AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE 2025

MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI



Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

1974-2024

AGRA

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

Fondata nel 1974, Airi è un punto di riferimento per la ricerca industriale in Italia. Associazione senza scopo di lucro, sostiene ricerca, innovazione, sviluppo tecnologico e trasferimento di conoscenze, promuovendo un'innovazione che integra valore economico, ambientale e sociale.

Riunisce una rete di soci – industrie, PMI, enti di ricerca pubblici, università, organismi di ricerca e società di consulenza – favorendo lo scambio di esperienze e buone pratiche nella ricerca industriale.

Grazie alla sua rappresentatività, AIRI è un interlocutore autorevole per gli orientamenti tecnologici nelle politiche della ricerca, per l'adeguata gestione e attuazione del sostegno pubblico, e più in generale per la diffusione della cultura.

www.airi.it

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE

UNA PUBBLICAZIONE DEL GRUPPO DI LAVORO AIRI

MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI

PARTE 1: PROFILO DI SETTORE
PARTE 2: SCENARI TECNOLOGICI

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI edizione Settore: Microelettronica e Semiconduttori

ISBN 978-88-98935-63-5
copyright © 2025 Airi
Associazione Italiana per la Ricerca Industriale
viale Aventino, 102 00153 Roma tel +39 068848831 e-mail info@airi.it www.airi.it

finito di stampare
nel mese di gennaio 2025
Realizzazione editoriale
Airi
progetto grafico
Goodlab srl

Edizioni:
Agra Editrice srl, Roma (www.agraeditrice.it)

Disponibile in versione online su
www.airi.it

Attribuzione-Non Commerciale-Non Opere Derivate 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

indice - profili di settore

PREFAZIONE 9

INTRODUZIONE 10

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO 15

IL SETTORE DELLA MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI 17

IMPATTI SOCIO ECONOMICI E SOSTENIBILITÀ 25

RICERCA E SVILUPPO 41

INDIRIZZI E TEMI STRATEGICI A MEDIO/LUNGO TERMINE 49

SCENARI FUTURI E MEGATRENDS 57

SCENARI TECNOLOGICI 65

APPENDICE: LA STORIA DEI SEMICONDUTTORI

Come sono fatti i semiconduttori e quali sono i loro elementi costruttivi e distintivi? 67

GLOSSARIO 78

RIFERIMENTI 81

indice - scenari tecnologici

SETTORE - MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI 85

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO 87

1 - TECNOLOGIE BCD, INTEGRAZIONE DI FUNZIONI ANALOGICHE, DIGITALI E SMART POWER 89

2 - MEMS - MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS 101

3 - NUOVI MATERIALI: TECNOLOGIA GAN - NITRURO DI GALLIO 117

4 - NUOVI MATERIALI: TECNOLOGIA SIC - CARBURO DI SILICIO 131

5 - VIP POWER - VERTICAL INTELLIGENT POWER 149

6 - SISTEMI DI PACKAGING DEI CHIP: PACKAGE 3D 163

7 - SISTEMI DI PACKAGING DEI CHIP: TECNOLOGIE DI MANIFATTURA ADDITIVA E SOTTRATTIVA 179

8 - SISTEMI HARDWARE DI EDGE COMPUTING PER L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE 195

9 - PILOT LINE "FROM LAB TO FAB" PER SVILUPPI DI SENSORI E DISPOSITIVI 223

10 - TECNOLOGIE DI PRODUZIONE DI SUBSTRATI DI SILICIO 300 MM TIPO N PER L'ELETTRONICA DI POTENZA 231

GLOSSARIO 236

RIFERIMENTI 239

Prefazione

Da oltre 25 anni, Airi coinvolge manager e ricercatori provenienti da alcune delle principali imprese, centri di ricerca e università Italiane per discutere su quali siano le tecnologie ad alto impatto socioeconomico destinate a trasformare il sistema paese.

Giunto alla XI edizione, il lavoro Airi "Le Innovazioni del Prossimo Futuro" è uno studio di *technology assessment* e *foresight* unico a livello nazionale: un quadro aggiornato degli scenari tecnologici che contribuiranno, nel breve-medio periodo e in maniera trasversale e abilitante, all'innovazione nei principali settori produttivi nazionali.
Dieci settori e 130 scenari tecnologici che fotografano la ricerca industriale italiana, che da sempre ha una significativa vocazione all'esportazione della propria tecnologia nel mondo.
Il presente volume mono grafico è dedicato al settore della Microelettronica e Semiconduttori, ad aprile 2025 sarà pubblicato il volume complessivo

La tecnologia è oggi un fattore determinante per la competitività del sistema paese. L'impegno continuo in Ricerca e Innovazione aiuta le imprese ad adattarsi alle rapide dinamiche del contesto socioeconomico.
Lo studio si propone come una guida per i *decision-maker* di istituzioni, industrie, investitori per anticipare e comprendere quale sarà il nostro futuro tecnologico e gli impatti più significativi attesi su tutta la nostra società.
Molte le tecnologie ad alto impatto identificate nel tempo dalla analisi Airi. Si ricordano ad esempio Internet of Things e Intelligenza Artificiale, già presenti nella edizione 2012 e poi diventate sempre più significative in termini di applicazioni e impatti nelle successive analisi (2016, 2020) e con un ruolo determinante in diversi dei settori della presente edizione.

Le scelte di oggi determineranno la posizione del sistema paese nelle diverse catene del valore globali per i prossimi anni (leader o follower). L'obiettivo è stimolare una riflessione puntuale sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico. Per un futuro tecnologico significativo è necessario lavorare insieme - istituzioni, imprese e ricerca pubblica – per comprendere e condividere gli asset e le risorse su cui investire.

In conclusione, vorrei fare un sentito ringraziamento ai coordinatori di settore, ai numerosi esperti, ai soci e non soci, ed allo staff Airi, che hanno messo a disposizione il loro tempo e le loro competenze. Senza di loro, la loro apertura e le loro intuizioni non sarebbe stato possibile realizzare questo studio.

Andrea Bairati, Presidente Airi

Introduzione

Il Rapporto «Le Innovazioni del prossimo futuro», giunto all'undicesima edizione, riporta a cadenza regolare dal 1995 le previsioni tecnologiche che Airi elabora grazie al contributo delle imprese, degli enti di ricerca, delle istituzioni finanziare associati, in collaborazione con qualificati partner pubblici e privati. È uno studio di *technology assessment* e di f*oresight* che svolge un'analisi di tecnologie e famiglie di tecnologie ad alto impatto socioeconomico su dieci settori produttivi di rilievo per l'economia nazionale. L'analisi di tipo verticale (per settore) viene poi integrata da una valutazione complessiva (orizzontale) delle sinergie, convergenze e trasversalità delle tecnologie selezionate lungo tutti i settori produttivi.

Come nella precedente edizione, pur mantenendo la tradizionale impostazione per settori produttivi, abbiamo diviso il rapporto in due parti: nella prima analizziamo la posizione della ricerca industriale italiana rispetto alla competitività globale e la relazione tra sviluppo tecnologico e sostenibilità; nella seconda illustriamo le azioni e gli investimenti che il nostro sistema industriale sta definendo, anche in collaborazione con gli attori più significativi della ricerca pubblica.

I settori che analizziamo in questa edizione sono dieci: Ambiente e transizione circolare, Costruzioni, Chimica e Materiali, Energia, Farmaceutica, Meccatronica, Microelettronica e semiconduttori, Tecnologie Digitali, Trasporti e Mobilita, Spazio.

Per ogni settore, sono riportati il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sui quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche e intellettuali nel breve-medio periodo.

La definizione di tecnologie prioritarie

Le tecnologie prioritarie sono definite come tecnologie ad alto impatto socioeconomico per il tessuto imprenditoriale e l'economia nazionale. Sono tecnologie abilitanti e sistemiche su catene del valore legate a uno o più settori produttivi, caratterizzate da un rilevante impatto rispetto a una o più delle seguenti dimensioni:

industriale (investimenti, capacità abilitante), politico ed economico (es. competitività, lavoro, politiche di investimento), sostenibilità etico, sociale e ambientale, implicazioni legali (es. necessità o capacità di rispondere a sfide e driver normativi).

I criteri di selezione

Abbiamo individuato oltre 130 tecnologie su dieci settori produttivi analizzati , quasi sempre presentate e raggruppate in scenari tecnologici che fungono da famiglia di riferimento o cluster, attraverso i seguenti criteri:

- Impatto politico ed economico
- Impatto industriale
- Innovatività e time to market
- Impatto etico, legale, sociale e ambientale

Il nostro obiettivo è stato di identificare tecnologie e famiglie di tecnologie con un carattere abilitante per una o più catene del valore e sistemi dell'innovazione. L'orizzonte applicativo o di lancio della ricerca che mette a punto la tecnologia è nel breve medio termine (indicativamente 1 -3 anni, anche a seconda delle caratteristiche del settore), pur non trascurando eventuali tecnologie dirompenti con un ciclo di sviluppo più lungo.

Le tecnologie individuate nelle precedenti edizioni sono state utilizzate come uno dei riferimenti iniziali dello studio, riconoscendo il valore che hanno i dati storici nella validità e affidabilità degli studi *foresight* (la presenza di un ambito tecnologico nel corso di più edizioni dello studio, nelle sue diverse declinazioni e livelli di sviluppo, ne conferma l'importanza).

A chi è rivolto lo studio?

La pubblicazione è rivolta a direttori e manager della ricerca pubblici e privati, ricercatori, istituzioni, investitori, *opinion leader*. Il nostro obiettivo è fornire una guida per le strategie e gli investimenti privati e pubblici in ricerca e innovazione e stimolare una riflessione sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico.

La metodologia

Lo studio è realizzato mediante l'impegno diretto di esperti della rete Airi, soci e non soci, che nel loro insieme hanno competenze approfondite e riconosciute in relazione

sia ai settori produttivi sia alle diverse tecnologie trattate.

Le attività iniziano con la scelta dei coordinatori dello studio, indicativamente due per settore, nominati in accordo con il Consiglio Direttivo di Airi. Viene costituito quindi il Board dei coordinatori settoriali, che rappresenta il primo nucleo del Gruppo di Lavoro (GdL) Tecnologie Prioritarie. Il coordinamento del GdL è a cura di Airi.

Prima fase: Gruppo di Lavoro e selezione delle tecnologie

Il Gruppo di Lavoro, composto inizialmente dai coordinatori, svolge una prima analisi delle tecnologie da trattare. Vengono considerate diverse fonti, quali piani strategici di sviluppo a livello industriale e politiche per la ricerca e innovazione europee e nazionali. Come dato storico si utilizza il catalogo delle tecnologie trattate nell'edizione precedente (2020). Il coinvolgimento della compagine associativa permette di raccogliere suggerimenti per definire il nuovo catalogo delle tecnologie e gli esperti da coinvolgere.

Vengono riviste le definizioni, la struttura, i modelli da utilizzare per lo svolgimento dello studio.

I risultati della prima fase sono un primo catalogo di tecnologie suddivise per settore, un elenco di esperti collegati a tali tecnologie e settori, delle linee guida condivise per la preparazione dello studio.

Seconda fase: Elaborazione dei profili di settore e degli scenari tecnologici.

I lavori vengono svolti principalmente a livello settoriale. Sulla base del catalogo di tecnologie selezionate nella prima fase, coordinatori ed esperti di ciascun settore si incontrano ed elaborano una versione sintetica degli scenari tecnologici. Il Board dei coordinatori supervisiona regolarmente il programma di attività e fornisce eventuali suggerimenti sulle scelte prese a livello settoriale. Il processo è iterativo, durante l'analisi è possibile rivedere, eliminare o aggiungere tecnologie ed includere, ove necessario, altri esperti.

Il risultato della seconda fase è una prima versione del profilo di settore e degli scenari tecnologici.

Terza fase: Revisione ed integrazione

Il GdL svolge un'attività di revisione complessiva dal punto di vista sia tecnico-scientifico sia editoriale. L'obiettivo è di arricchire ed integrare i singoli scenari e

valutare sovrapposizioni e sinergie tra i diversi settori. Si cerca inoltre, per quanto possibile data la diversità dei temi affrontati e le diverse esigenze settoriali in termini di granularità e di tempi, di dare uniformità al lavoro nel suo complesso.
Il profilo di settore e gli scenari tecnologici vengono rivisti e finalizzati. Il risultato sono le bozze finali del lavoro. Viene infine svolta una revisione editoriale dei singoli capitoli e preparato l'impaginato finale.
Il processo sopra riportato è indicativo e alcune fasi del lavoro sono svolte in parallelo. I lavori di preparazione dell'intero volume, comprensivo dei dieci settori produttivi, si svolgono in un periodo di circa due anni.
Questa edizione dello studio Airi ha coinvolto oltre 180 esperti, tra coordinatori e membri dei gruppi di lavoro settoriali, che sono riportati nelle prime pagine dei capitoli relativi a ciascuno dei diversi settori.
Per la presente edizione, si è scelto di pubblicare in anteprima alcuni dei settori nella forma di volume monografico.

Le limitazioni dello studio

Il lavoro è il risultato delle competenze e della visione di Airi e degli esperti coinvolti nello studio, che determina la tipologia e ampiezza degli ambiti trattati, tra cui in particolare la scelta dei settori e degli scenari tecnologici.
A titolo di esempio, in questa edizione non viene trattato in maniera approfondita il settore agroalimentare (se non come ricaduta di alcune tecnologie settoriali), che invece è di evidente rilievo per l'economia nazionale.
L'approfondimento dei temi trattati è limitato dalla necessità di contenere sia la lunghezza sia l'impegno richiesti dallo studio, anche considerata la partecipazione a carattere volontario di tutti gli esperti coinvolti.
Sono utilizzati dati provenienti da un numero selezionato e limitato di fonti bibliografiche, sia pubbliche sia provenienti da dati interni delle aziende e centri di ricerca coinvolti, che coprono l'intero spettro dei settori selezionati ma che non si possono considerare esaustive.
I contenuti e le opinioni espresse sui possibili scenari di sviluppo tecnologico per il sistema paese rimangono un esercizio di analisi, deduzione e previsione, come tale soggetto a variabilità ed imprecisioni.

I contenuti

Lo studio analizza una parte rilevante del portafoglio tecnologico del sistema paese. Per ogni settore, viene riportato il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sulle quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche ed intellettuali nel breve-medio periodo.

È prevista la pubblicazione delle analisi dei dieci settori sia in forma integrale in due volumi (volume 1, profilo di settore; volume 2, scenari tecnologici), sia in pubblicazioni monografiche (per settore).

Il presente volume rappresenta la pubblicazione settorialedello studio relativa al settore Microelettronica e Semiconduttori

MICROELETTRONICA e SEMICONDUTTORI

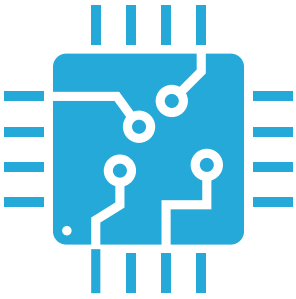
MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

STMICROELECTRONICS	**Donato Di Donato**
POLITECNICO MILANO	**Alberto Corigliano**

ESPERTI

STMICROELECTRONICS	**Mario Scurati**



SETTORE

MICROELETTRONICA e SEMICONDUTTORI

PROFILO DI SETTORE

IL SETTORE MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI

L'impatto economico dell'industria dei semiconduttori è così elevato che in molte regioni del mondo incide anche sul Prodotto Interno Lordo (PIL) nazionale, diventando di conseguenza un asset di importanza strategica per le nazioni che non solo possiedono le fabbriche in grado di produrli, ma, anche e soprattutto, per quelle che detengono il know-how necessario per progettare le nuove soluzioni in modo competitivo, sia dal lato economico che da quello prestazionale.
Questo settore, nonostante l'età, gode ancora di grande fermento ed è in una continua evoluzione tecnologica che difficilmente trova confronti in altri settori industriali. Pochi altri settori hanno un simile livello di investimenti finanziari e R&D.

Si trova una conferma nella legge di Moore, formulata circa 60 anni fa, che ipotizzava un raddoppio del numero di transistor nei microprocessori ogni due anni. Pochi anni fa molti pensavano che la legge di Moore avesse ormai raggiunto il suo limite fisico, oltre il quale non era possibile andare; ma costoro ragionavano partendo da topologie costruttive 2D, mentre oggi sappiamo che la soluzione planare può essere ulteriormente migliorata grazie alle nuove soluzioni 3D, che sfruttano la terza dimensione e che prolungheranno ancora la validità di questa legge.
Dal 1971, anno del primo microprocessore, si è vista una continua rincorsa tra maggiore miniaturizzazione e maggiore capacità di elaborazione dati, che fu prevista già nel 1965 da Gordon Moore cofondatore della Intel. Relazione empirica diventata poi famosa in tutto il modo come "legge di Moore" (Figura 1), basata sull'ipotesi di allora, poi confermata nel corso degli anni, dice che il numero di transistori nei microprocessori sarebbe raddoppiato ogni 24 mesi circa.

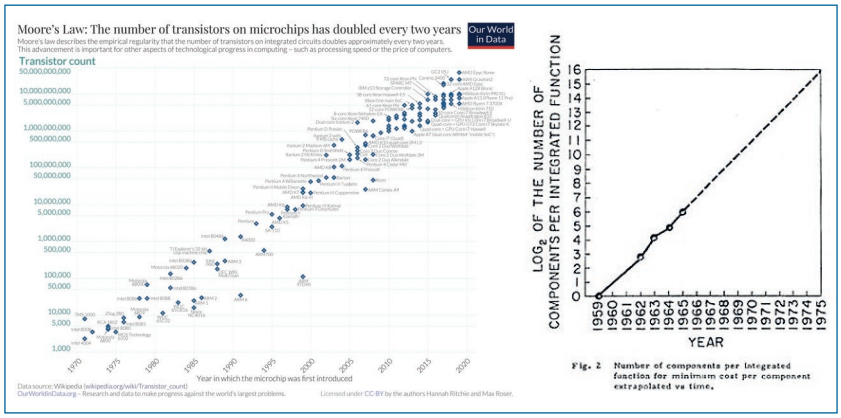


Figura 1: Legge di Moore

Oltre a Intel (USA), che detiene tutt'ora e da diversi anni il dominio assoluto nella produzione dei microprocessori (e presumibilmente continuerà a mantenerlo anche nei prossimi anni), vi sono altri competitor di rilievo in questo settore: AMD Inc. (USA), ARM Holdings plc. (UK), NVIDIA Corporation (USA), Qualcomm, Inc. (USA), e Samsung Electronics Co. Ltd. (Corea). Un altro mercato che ha beneficiato della miniaturizzazione dei processi produttivi quali la litografia è quello delle memorie. Caratterizzato da bassi costi e bassissimi margini, consente l'accesso solo a quelle aziende in grado di sfruttare l'economia di scala propria di elevati volumi produttivi, quali: Samsung (Corea), SK Hynix (Corea), Micron (USA), Elpida (Giappone), Toshiba (Giappone) e Powerchip (Taiwan).

ALCUNI TREND DI SVILUPPO DELLA MICROELETTRONICA

La competizione negli ultimi anni è incentrata sulla ricerca di nuove soluzioni tecnologiche che sfruttino la terza dimensione; quindi, un cambio topologico progettuale e radicale rispetto alle classiche soluzioni planari. Ne è un esempio il FinFET, cioè Fin (pinna) Field Effect Transistor, di Intel, nato dall'esigenza di superare le problematiche insorte con miniaturizzazioni inferiori ai 10nm. Infatti, con queste litografie si instaurano fenomeni (come l'elevata corrente di leakage gate source) tali da peggiorare le caratteristiche complessive del transistor. Grazie al FinFET la validità della legge di Moore molto probabilmente proseguirà.
L'innovazione del FinFET consiste nel trasformare il canale source-drain da planare a tridimensionale (Figura 2), creando una pinna (fin) verticale.

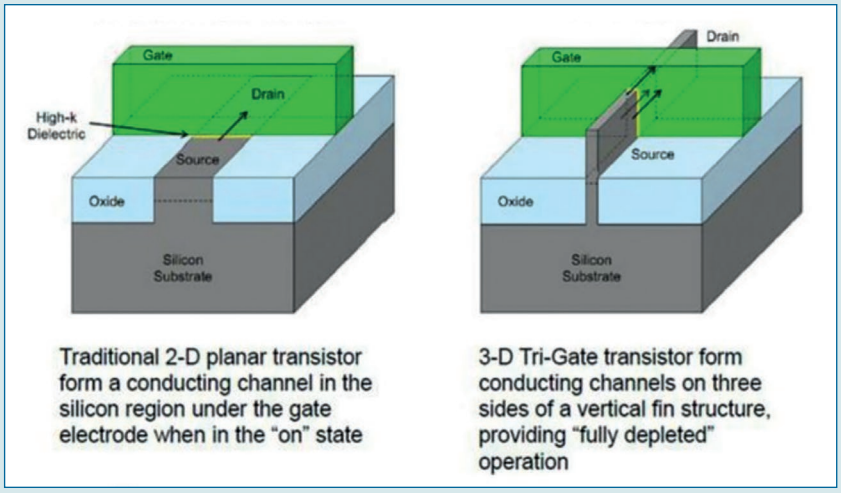


Figura 2: 2D vs 3D transistor (Fonte: Quora)

Questo cambio di topologia favorisce la miniaturizzazione; inoltre, la gate risulta avvolta attorno al canale, e ciò introduce diversi vantaggi, come il miglioramento della corrente di pilotaggio e la riduzione degli effetti di dispersione, che si possono riassumere in:

1. Trans-conduttanza maggiore (corrente in uscita per tensione in ingresso);

2. Minore capacità di ingresso apparente per lo stesso guadagno;
3. Minore area di wafer per transistor per ottenere un guadagno elevato, poiché l'altezza dell'aletta può essere aumentata per ottenere un guadagno elevato;
4. Struttura completamente depleted, che consente migliori condizioni di on/off.
Ulteriore evoluzione 3D è la GAAFET (Gate-All-Around Transistors), rappresentata in Figura 3, e suddivisa inNanosheet, Forksheet e CFET, che amplificano ulteriormente i vantaggi di cui sopra.

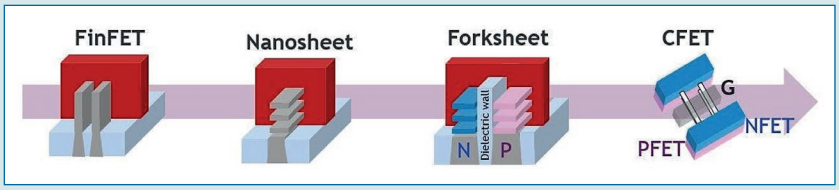


Figura 3: Dal FinFET al nanosheet, al forksheet e infine al CFET (Fonte: Imec)

Ma, il mercato dei semiconduttori non è solo composto da microprocessori e memorie, la cui evoluzione da sempre consiste nella riduzione delle litografie di produzione (More Moore), ma anche da una grande famiglia di prodotti il cui punto di forza si basa sulla diversificazione delle funzioni in grado di soddisfare, e chiamata "More than Moore" . Questi prodotti e le relative tecnologie sono progettati con l'obiettivo di interpretare i segnali provenienti da altri dispositivi, come ad esempio microprocessori e sensori esterni (di pressione, accelerazione, temperatura, etc.), e pilotare, con un adeguato livello di potenza, gli attuatori a valle. Funzioni diverse richiedono componenti tecnologicamente diversi, integrati in forma monolitica in un solo chip: ne è un esempio la tecnologia ibrida BCD.

LA TECNOLOGIA BCD

BCD è l'acronimo di Bipolare (per svolgere funzioni analogiche di precisione), **C**MOS (per operazioni logiche) e **D**MOS (per pilotare potenza in uscita). È anche chiamata **Smart Power** a sottolineare l'integrazione monolitica di "intelligenza" e "potenza" capace di svolgere funzioni analogiche ed operazioni logiche di precisione (B) usando CMOS (tecnologia utilizzata per la progettazione di circuiti integrati) pilotando potenza in uscita con DMOS (particolari tipi di transistor). In Fig. 4 sono rappresentate le possibili applicazioni ed evoluzioni.

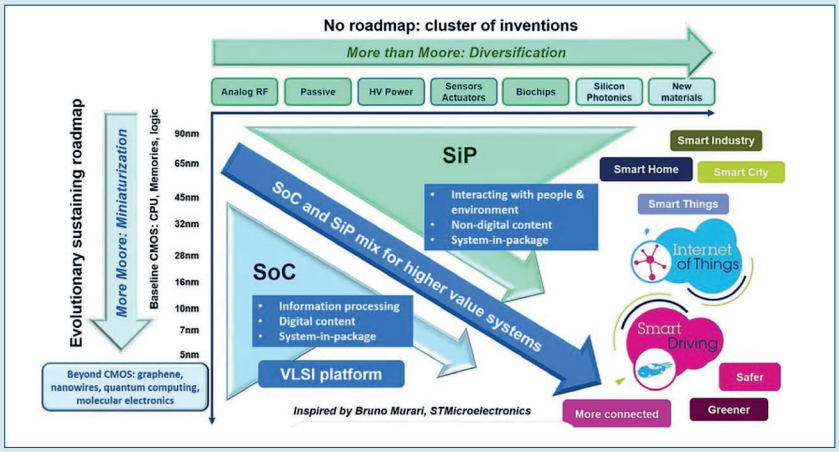


Figura 4: Legge di Moor vs More than Moore

Su queste diverse tecnologie, cioè, elevata capacità computazionale o integrazione di un certo livello di potenza, si sviluppa la scelta del progettista di sistemi elettronici tra una soluzione completamente monolitica integrata, quindi System On Chip (SoC), oppure una soluzione diversificata con più ASIC inglobati in un solo package, quindi System In Package (SiP) (Figura 5). La valutazione tra costi e benefici delle due diverse soluzioni guida la scelta tra una soluzione SoC oppure SiP.

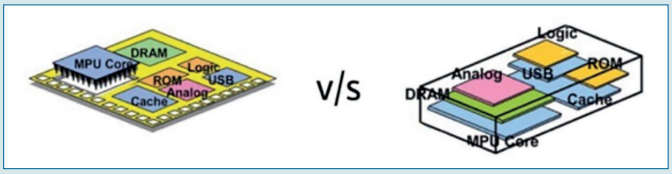


Figura 5: SoC vs SiP

Ulteriori approfondimenti sono riportati nello scenario dedicato al tema BCD.

IMPATTI SOCIOECONOMICI E SOSTENIBILITÀ

MERCATO GENERALE DEI SEMICONDUTTORI

Il mercato dei semiconduttori storicamente è sempre stato caratterizzato da una forte ciclicità, influenzata da fattori diversi fra di loro, che spaziano dalle fisiologiche oscillazioni di domanda e offerta, al surplus di materiale in stock, al boom di alcune applicazioni, a politiche macroeconomiche dei singoli paesi, pandemie, disordini geopolitici, fino ad arrivare ai conflitti regionali, che provocano inevitabilmente un fallout negativo sul mercato di tutte le tipologie di semiconduttori.

Dall'esame della Figura 6 che riporta il mercato dei semiconduttori sia in valore sia per numero di unità si possono notare alcune fasi negative:

- **1997 – 2000:** bolla speculativa delle Dot-com (definizione che deriva dalle aziende produttrici di servizi attraverso internet) associata all'andamento del NASDAQ che è cresciuto del 582% (l'indice NASDAQ è passato da 751,49 a 5.132,52 da gennaio 1995 a marzo 2000) e poi è sceso del 75% (da marzo 2000 a ottobre 2002), annullando la maggior parte dei guadagni dall'inizio della bolla.

- **2007 – 2013:** la grande recessione prodotta da una crisi economica mondiale, scoppiata negli Stati Uniti d'America in seguito alla crisi dei mutui subprime e del mercato immobiliare.

- **2019-2020:** recessione dovuta alla pandemia da COVID19 e unita ad altri fattori, tra cui l'aumento dell'inflazione e i disordini geopolitici. Questi hanno contribuito all'incertezza macroeconomica, alla diminuzione della spesa dei consumatori e alle fluttuazioni della domanda di semiconduttori (ad es. quelli associati all'elettronica di consumo, il cui consumo è diminuito al diminuire della spesa delle famiglie).

Se da una parte il mercato dei semiconduttori è per propria natura ciclico, dall'altra si nota come integrando il trend nel lungo periodo la crescita del mercato sia costante.

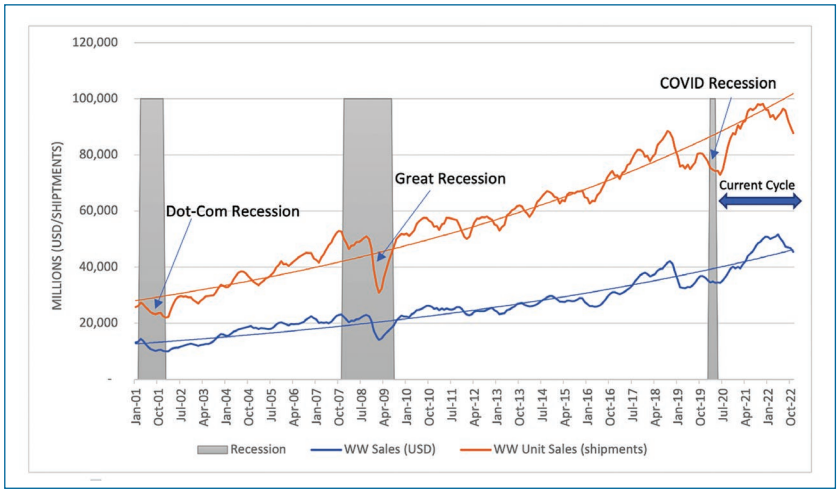


Figura 6: Cicli dei semiconduttori (Fonte: SIA - Semiconductor Industry Association)

Le vendite annuali sono passate da 139 miliardi di dollari nel 2001 a circa 574 miliardi di dollari nel 2022, con un aumento di circa il 313% e un aumento delle vendite unitarie del 290%. Inoltre, si prevede che la domanda di capacità produttiva di semiconduttori crescerà del 56% entro il 2030[1].

l World Semiconductor Trade Statistics (WSTS), ovvero la più importante organizzazione del settore che raccoglie i dati del commercio mondiale dei semiconduttori, ha aggiornato le sue previsioni economiche dopo aver osservato nel 2023 una contrazione dell'8,2% rispetto al 2022, raggiungendo un valore di mercato di circa 527 miliardi di dollari, a cui seguirà una ripresa significativa nel 2024 stimata del 17,3%.
Geograficamente, l'Europa si è distinta come l'unica regione con una crescita del 5.9% nel 2023. Al contrario, si è registrata una contrazione nelle altre aree: le

[1] *Studio del 2020 condotto da SIA e dal Boston Consulting Group*

Americhe hanno visto una riduzione del 4,8%, l'Asia-Pacifico del 12,4% e il Giappone del 2,9%. In proiezione, sulla finestra temporale '23-'26 l'Asia-Pacifico e le Americhe mostrano una controtendenza di incremento a doppia cifra (Figura 7).

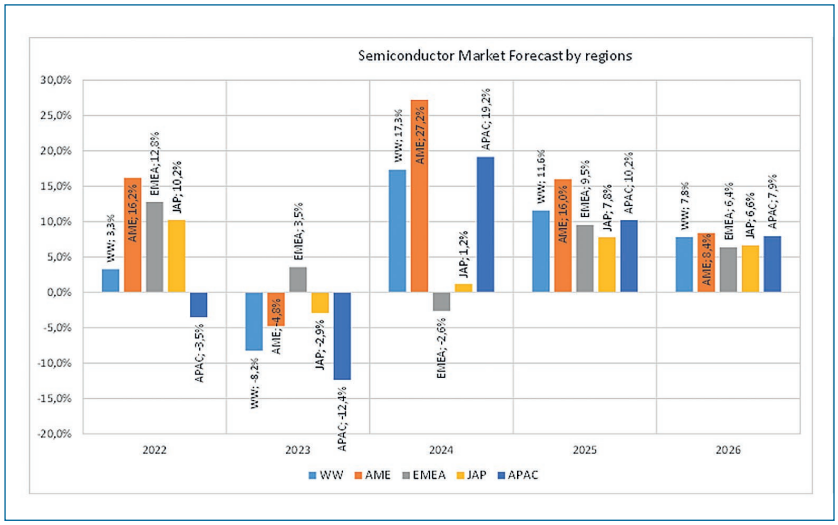


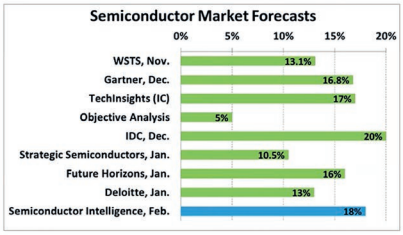
Figura 7: Previsione '23-'26 del commercio mondiale dei semiconduttori (Fonte: WSTS2023 Fall Forecast Update)

Come si può notare, tutte le previsioni dei vari analisti, evidenziate nella Figura 8.b, si collocano nell'ambito delle medesime aspettative a doppia cifra. Anche se dalla Figura 8.a si vede come le primarie aziende del mercato abbiano un orientamento distribuito non entusiasmante sui resoconti degli utili del primo trimestre, questo non dovrebbe preoccupare; in alcuni di questi cicli ci può essere una sorta di pausa, ma ciò non significa che non sarà possibile mantenere lo slancio per il resto dell'anno.

Top Semiconductor Companies' Revenue
Change versus prior quarter in local currency

	Company	US$B 4Q23	Reported 4Q23	Guidance 1Q24	Comments on 1Q 2024
1	Nvidia	20.0	10.4%	n/a	4Q23 is guidance
2	Samsung SC	16.4	31.9%	n/a	growth in PC/mobile
3	Intel	15.4	8.8%	-17.6%	excess inventory
4	Broadcom	9.3	-0.3%	n/a	4Q23 is guidance
5	SK Hynix	8.6	24.7%	n/a	growth in PC/mobile
6	Qualcomm (IC)	8.4	14.2%	-6.2%	down due to seasonality
7	AMD	6.2	6.3%	-12.5%	down except data center
8	Micron	4.7	17.9%	12.1%	DRAM & NAND growth strong
9	STMicro	4.3	-3.4%	-15.9%	industrial inventory excess
10	TI	4.1	-10.0%	-11.7%	weakness in industrial
11	MediaTek	4.0	17.7%	-3.0%	mobile down
12	Infineon	3.7	-10.2%	-2.8%	industrial inventory excess
13	NXP	3.4	-0.3%	-8.7%	seasonality & inventory
14	Analog Devices	2.5	-8.0%	n/a	4Q23 is guidance
15	Renesas	2.5	-4.6%	-4.7%	industrial inventory excess
	Total of above		11%		
	Memory Cos. (US$)		33%		Samsung, Hynix, & Micron
	Non-Memory Cos.		4%	-11%	

Source Semiconductor Intelligence



Source Semiconductor Intelligence

Figura 8 a e b: Prime aziende di semiconduttori

Quindi, rimanendo sulla curva mostrata nella Figura 9, si vede che il trend potrà raggiungere un trilione di dollari entro il 2033.

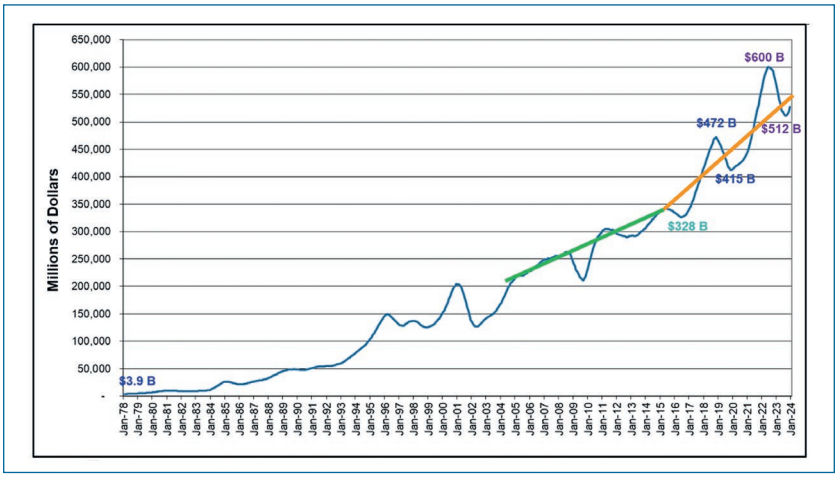


Figura 9: Trend di lungo periodo, ossia 1 trilione di dollari nel 2033

Queste tendenze confermano come i microchip rimangano il prodotto fondamentale non solo per i mercati più consolidati, come automotive e industrial consumer, ma anche e soprattutto per i nuovi, come ad esempio AI, IoT e 6G. Tale previsione richiederà che le aziende del settore investano ulteriormente in ricerca, progettazione e produzione.

L'obiettivo dell'UE è di raddoppiare la sua quota di mercato nel settore dei semiconduttori, passando quindi da un indicativo 10% di oggi al 20% entro il 2030. Obiettivi e intenti ambiziosi che richiedono una revisione dell'attuale capacità di progettazione e produzione di semiconduttori.
L'espansione della capacità produttiva attraverso la costruzione di nuovi impianti è inevitabile, e la questione principale è dove questi impianti verranno costruiti. Ad esempio, tra il 2020 e 2023 sono stati erogati diversi investimenti nella costruzione di FAB (Figura 10): 80 FABs solo negli USA, e molti altri in diverse aree geografiche.

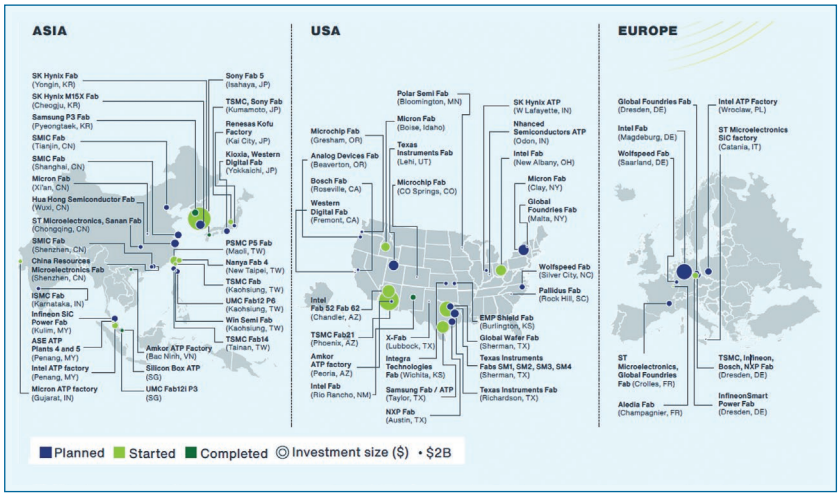


Figura 10: Principali nuovi investimenti in FAB e ATP annunciati globalmente dal 2020 (Fonte: BCG & SIA Emerging resilience in the semiconductor supply chain may 2024)

La capacità produttiva italiana è estesamente derscritta nell'articolo "L'Italia dei chip, una panoramica dell'industria italiana dei semiconduttori" in cui vengono analizzate le capacità produttive dei vari semiconduttori e le future prospettive.

FOCUS: LE INIZIATIVE ST IN ITALIA

STMicroelectronics sta costruendo un nuovo impianto a Catania, che si occuperà di tutta la filiera per la produzione in volume di substrati epitassiali in carburo di silicio SiC da 200mm. Il carburo di silicio è un materiale composto, utilizzato per fabbricare wafer che fungono da base per specifici microchip che richiedono maggiore efficienza. Con alcune operazioni iniziate nel dicembre 2023, si prevede il suo completamento nel 2026. L'investimento di 730 milioni di euro in cinque anni beneficerà di un supporto finanziario fino a 292,5 milioni di euro attraverso il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza italiano.

Una volta completato, creerà oltre 700 nuovi posti di lavoro diretti. L'impianto di produzione integrerà tutte le fasi di lavorazione del carburo di silicio, dalla creazione della polvere di SiC fino alla produzione dei wafer. Successivamente, questi wafer subiranno un trattamento epitassiale che ne migliorerà le prestazioni tecniche, trasformandoli in epiwafer in carburo di silicio. I piani di sviluppo e produzione dell'impianto mirano a garantire la priorità agli ordini dell'UE in situazioni di scarsità di semiconduttori, e a sostenere il consolidamento dell'ecosistema dei semiconduttori in Europa.

È stato annunciato che Catania ospiterà il primo impianto al mondo completamente integrato per la produzione di carburo di silicio in linea con gli obiettivi dell'UE di rafforzare la sicurezza dell'approvvigionamento e la sovranità digitale nel settore dei semiconduttori. La fabbrica da 200mm sarà specializzata nella produzione di chip in SiC per dispositivi e moduli di potenza, con attività che includeranno anche test e packaging. L'aiuto prenderà la forma di una sovvenzione diretta di circa 2 miliardi di euro a sostegno dell'investimento totale pluriennale dell'impresa pari a 5 miliardi di euro.



Figura 11: 2M€ur dell'Italia per Stm di Catania

Con il Silicon Carbide Campus di Catania (Figura 11), STMicroelectronics intende avere la completa integrazione verticale della catena manda del carburo di silicio, dalla ricerca e sviluppo alla produzione, dal substrato al modulo. Il progetto si fonda su tecnologie avanzate che sono state e continueranno ad essere sviluppate attraverso progetti di comune interesse europeo (IPCEI) nel campo della microelettronica, progetti che hanno ricevuto l'approvazione della Commissione Europea nel dicembre 2018 e nel giugno 2023. Inoltre, il 4 marzo 2024, STMicroelectronics ha inoltrato una richiesta per il riconoscimento del Catania Campus come impianto di produzione integrato conformemente alle disposizioni dell'European Chips Act, una procedura che procede autonomamente rispetto alla valutazione degli aiuti di Stato. L'obbiettivo è quello di avviare la produzione nel 2026 e il ramp-up alla piena capacità entro il 2033, con una produzione a regime fino a 15mila wafer a settimana ed un incremento occupazionale dell'ordine del migliaio di unità (2000 circa), tra profili specializzati e laureati.

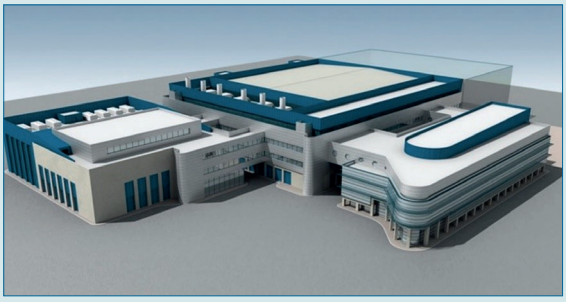


Figura 12: FAB da 300mm ad Agrate Brianza

In questo quadro sta assumendo un'importanza di rilievo europeo anche la recente costruzione della nuova linea pilota a 300mm di STMicroelectronics ad Agrate Brianza, in Italia (Figura 12), essa si aggiunge agli impianti già esistenti ad Agrate per wfs da 200mm (8") e quello di Catania per la produzione di tecnologie SiC. Questa nuova fabbrica rappresenta il più grande investimento produttivo high-tech in Italia, con un investimento di oltre 2 miliardi di euro, la ricaduta occupazionale ha avuto un impatto positivo richiedendo circa 700 nuove persone tra ingegneri di processo, ricercatori, tecnici di produzione e impianti, operatori di produzione.

Nel caso di ST vi è una forte spinta alla ricerca di competenze mediante la collaborazione con oltre 45 Università italiane e con diverse altre istituzioni scolastiche e non. Ad esempio con la Fondazione ITS Lombardia-Meccatronica che forma tecnici all'avanguardia in grado di operare sui sistemi meccatronici avanzati.
STMicroelectronics ha siglato un accordo con il Politecnico di Milano per creare un centro di ricerca congiunto (Research Center on sensor systems with advanced materials - Steam) su microsistemi e materiali avanzati ed è attivo un accordo quadro con l'Università di Catania, nel settore dell'elettronica di potenza e dei materiali innovativi. Altri esempi di collaborazione sono il laboratorio ARCES- ST, nato già nel 2001 con l'Università di Bologna, e l'accordo sulla sensoristica con la Scuola Sant'Anna di Pisa.

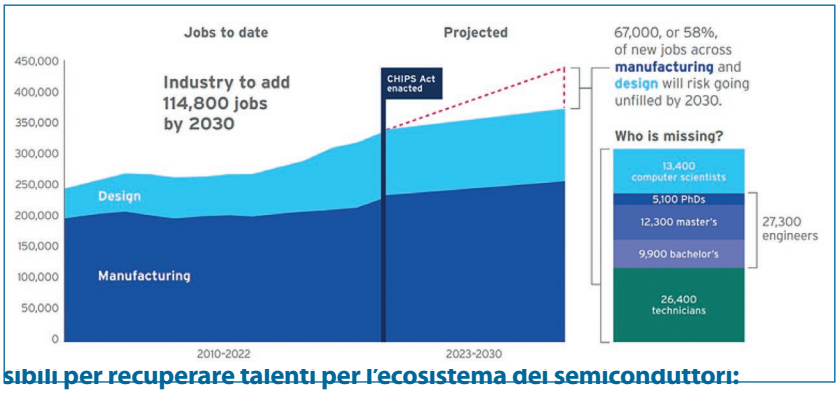
RICADUTE OCCUPAZIONALI

Nell'ambito occupazionale, non possiamo considerare solo le prospettive di occupazione diretta, derivanti dalle singole iniziative di investimenti nei semiconduttori, bensì anche quelle indirette derivanti da una strategia più ampia del comparto semiconduttori.
Nello scenario internazionale dal 2008 in poi, per diversi fattori geopolitici, catastrofi ambientali, carenze di materie prime, etc., si è generato un picco di domanda di semiconduttori, indotta anche dall'evoluzione dei comportamenti dei consumatori durante la pandemia COVID-19.
A questo si aggiunge la vulnerabilità legata alla concentrazione geografica, con una catena di approvvigionamento sbilanciata su specifiche aree geografiche che mette a serio rischio la catena di approvvigionamento globale dei chip.
Le aspettative di crescita a 1 trilione di dollari confermano il bisogno di capacità produttiva, ma il rischio è quello di passare da una carenza di materiali a una

carenza di talenti se non vengono prese adeguate azioni. Gli sforzi, quindi, nel ricostruire poli domestici della filiera dei semiconduttori (Figura 10) e l'impiego di investimenti pubblici e privati (Figura 19) rischiano di trasformarsi in uno spreco di risorse, se non coadiuvati da un adeguato piano di sviluppo di conoscenze STEM. La scarsità di competenze e talenti complica l'attuazione di programmi in grado di soddisfare il fabbisogno del ciclo produttivo dell'intero ecosistema dei semiconduttori: *Integrated Device Manufacturing* (IDM)[2], *IP Designers, Fabless, Foundries (TSMC) ed Equipment Manufacturers.*
Nessun singolo Paese ha la forza lavoro necessaria per supportare l'autosufficienza dei semiconduttori a livello domestico, poiché ogni Paese fa parte di una rete interconnessa di talenti altamente specializzati e contesi.

Ad esempio, le previsioni riportate nello studio "CHIPPING AWAY" – SIA del 2023 indicano che entro il 2030 l'industria dei semiconduttori statunitense, spinta anche dal Chips Act, vedrà una crescita del 33% nella forza lavoro, raggiungendo circa 460.000 posti di lavoro (Figura 13). Tuttavia, si stima che circa 67.000 (pari al 58% dei nuovi posti di lavoro previsti e all'80% di quelli tecnici) potrebbero rimanere vacanti a causa della carenza di laureati qualificati. La mancanza di personale qualificato non riguarda solo l'industria dei semiconduttori ma anche gli altri settori tecnologici cruciali. Sempre negli USA, si stima la creazione di 3,85 milioni di nuovi posti di lavoro tecnici entro il 2030, di cui 1,4 milioni a rischio di non essere coperti. Le dimensioni del fenomeno si riflettono anche sulle altre aree geografiche, inclusa l'Italia, per cui la carenza di talenti rappresenta una sfida significativa sia per l'industria dei semiconduttori che per l'economia nel suo complesso, e colmare questo gap è essenziale per il successo e l'innovazione futura sollecitata dai vari programmi di investimento.

[2] *Vedasi STMicroelectronics, Intel, Samsung, Micron Technology, Texas Instrument*



sibili per recuperare talenti per l'ecosistema dei semiconduttori:

Figura 13: Forza lavoro storica e gap stimato (2023-2030) nel settore dei semiconduttori (Fonte: SIA)

• **Automazione.** In tutta la catena del valore dei semiconduttori, le aziende hanno con l'automazione ancora del margine non del tutto sfruttato per liberare risorse da collocare su attività a maggior valore aggiunto. In un contesto di crescenti costi e competizione per l'acquisizione di talenti, l'automazione può aiutare a ridurre la pressione sulla ricerca di ingegneri qualificati nonché sostenere l'innovazione, come richiesto dalla Legge di Moore e/o da "More than Moore". In questo modo, ad esempio, si potrebbero concentrare le risorse su ruoli di data science e analytics e quindi a maggior valore aggiunto. Vedasi ad esempio nuovi FAB ad alta automazione che da un lato richiede meno risorse, ma dall'altro risorse con più alte competenze.

• **Riqualificazione.** È vista come uno strumento fondamentale per affrontare la mancanza di talenti in vari settori, tra i quali quello dei semiconduttori, che investono in formazione e sviluppo delle competenze di chi è già assunto, a colmare la difficoltà di nuove assunzioni (in ambiti quali data science, programmazione, applicazioni di IA, etc.). Ad esempio, la riqualificazione si declina attraverso la mobilità interna, oppure attraverso la formazione promossa tramite diverse piattaforme interne ed esterne, per creare opportunità di sviluppo di carriera, ma anche di contaminazione del sapere. Tuttavia, permangono fattori strutturali che limitano questo processo: ad esempio, i profili ad alta specializzazione già presen-

ti difficilmente possono essere riqualificati e ricollocati in altri settori con maggior bisogno; inoltre, la ricollocazione potrebbe generare anche fuga di risorse. La riqualificazione su scala richiede tempi lunghi che il settore dei semiconduttori non può avere.

• Coltivare **un bacino per attrarre e trattenere talenti**. Le aziende del settore dei semiconduttori devono personalizzare le loro strategie di acquisizione dei talenti in base alla loro posizione nella catena del valore, al tipo di talenti che cercano e alla concorrenza che devono fronteggiare (rappresentata, ad esempio, dagli hyperscaler del software, i principali cloud service providers globali, che attraggono gli stessi professionisti). L'impiego di risorse nello sviluppo software è diventato nel corso degli anni sempre più critico, in quanto il prodotto oggi non è costituito solo da silicio ma anche da software.
È bene precisare che questi talenti qualificati richiedono strategie di reclutamento differenti rispetto a quelli meno qualificati nel settore dei materiali o della produzione back-end, dove gli IDM possono reclutare lavoratori tra laureati in materie tecniche e attraverso la formazione professionale.

Le aziende dei semiconduttori investono da tempo su queste azioni poiché ritengono che le persone rappresentino un investimento strategico.

In termini di occupabilità, le opportunità sono a favore non soltanto dei laureati. Ovviamente le opportunità formative e gli sbocchi professionali sono diversi, con percorsi più professionalizzanti per i non laureati, impiegabili per esempio nel manufacturing tecnologico, e percorsi piu ampi per i laureati, impiegabili sia nella ricerca e sviluppo sia nel manufacturing.
Il successo di un'azienda di semiconduttori è legato alla capacità di identificare, attrarre, trattenere e motivare personale qualificato in un mercato del lavoro competitivo. È fondamentale anche assicurare una transizione fluida nella successione aziendale. La sfida include mantenere una cultura lavorativa diversificata e inclusiva per essere percepiti come un datore di lavoro attraente rispetto altri

brand (vedasi automotive, hyperscale, etc;). Nonostante l'impegno nel reclutamento e nella formazione, esiste tuttavia il rischio di non riuscire a mantenere o sostituire personale chiave, il che potrebbe avere degli impatti negativi sulla crescita futura dell'azienda.

FOCUS: IL CASO ST

In Italia ed Europea ST è una delle realtà significative riguardo all'occupazione nel settore dei semiconduttori. In Italia è presente con 13 siti con più di 12.500 mila dipendenti, di cui più di 3.400 ricercatori. La Società ha assunto 1.600 laureati e diplomati fra il 2022 e il 2023 ed è in continua ricerca di talenti.

La provincia di Monza-Brianza e l'Etna Valley sono parte della Silicon Europe, in quanto due dei maggiori poli dell'industria dei semiconduttori italiana (Figura 14) insieme ad Avezzano, in provincia dell'Aquila, dove opera l'importante fonderia LFoundry (il cui azionista di maggioranza è la cinese Wuxi Xichanweixin Semiconductor). Secondo un'analisi di Cassa Depositi e Prestiti (CDP), complessivamente il settore in Italia conta 1900 imprese che danno lavoro a 36mila addetti, e le 17 imprese con produzione sopra i 50 milioni di euro annui valgono oltre il 50% del mercato nazionale.

In termini occupazionali riveste un ruolo positivo l'ultimo accordo siglato dal Ministero delle Imprese e del Made in Italy e Silicon Box, startup di Singapore nata 3 anni fa. All'inizio del 2024 ha annunciato un investimento di 3.2 miliardi di euro in Italia per la produzione di chiplet, ovvero una tecnologia che vede collegati tra loro più chip per costruire un sistema più complesso, anziché realizzare un singo-

lo chip con un singolo processo di produzione: chip realizzati con processi diversi possono combinarsi per formare un unico chiplet. Il nuovo stabilimento per la produzione di chiplet, previsto nel Nord Italia, potrà generare 1600 nuovi posti di lavoro tra la costruzione della fabbrica e a regime nel più ampio ecosistema di conduzione. L'investimento di Silicon Box risponde alla strategia del Chips Act dell'UE e nella strategia italiana per la crescita del settore della microelettronica. Silicon Box introduce una tecnologia utile e finora mancante per rafforzare la catena del valore, nello specifico nell'advanced back-end.

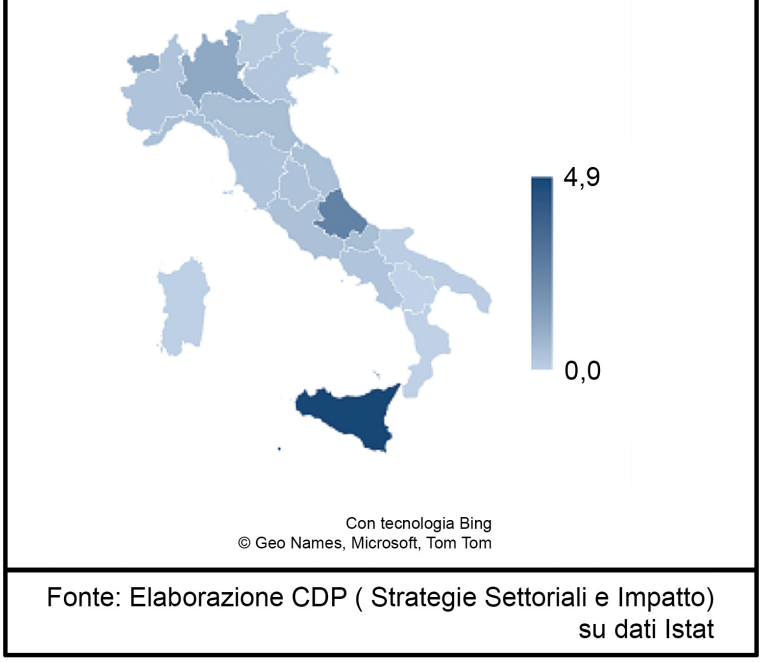


Figura 14: Specializzazione regionale nella produzione di microchip, 2019 (occupazione del settore microelettronica su totale occupati del manifatturiero per regione, %) (Fonte: CDP3)

SOSTENIBILITÀ E SFIDE SOCIALI

Un altro pilastro per lo sviluppo del settore della microelettronica, in particolare in Europa, è la protezione ambientale. La maggior parte delle grandi aziende dei semiconduttori redigono annualmente codici di condotta e sviluppano sistemi di monitoraggio ponendosi importanti obiettivi specifici e quantitativi in termini di sostenibilità ambientale e sociale.

Riportiamo di seguito l'esempio di alcuni degli obiettivi della "Carta della Sostenibilità" (Sustainability Charter) di ST, dato l'impatto sul contesto nazionale, tra cui alcuni molto ambiziosi e con scadenze in anticipo rispetto ad altre aziende del settore. Per citare alcuni dei Sustainability goals (SG) utilizzati dall'azienda[4]:

- 2027 data entro la quale raggiungere la carbon neutrality (SG9), a differenza di altre aziende del settore che si sono poste come scadenza il 2030 o anche il 2035 (su Scope 1 e 2 e parzialmente su Scope 3). La tabella di marcia comprende due obiettivi specifici: il rispetto dello scenario di 1,5°C definito alla COP21 di Parigi entro il 2025, che implica una riduzione del 50% delle emissioni dirette e indirette di gas serra rispetto al 2018 e l'approvvigionamento del 100% di energia rinnovabile entro il 2027. Il piano d'azione (Figura 15) ridurrà:

I. le emissioni dirette di gas a effetto serra (ambito 1), principalmente attraverso gli investimenti in apparecchiature per bruciare i gas che rimangono dopo la produzione;

II. il consumo energetico complessivo (ambito 2);

III. le emissioni derivanti dal trasporto dei prodotti, dai viaggi di lavoro e dal pendolarismo dei dipendenti (parte dell'ambito 3);

IV. le emissioni rimanenti attraverso l'identificazione e l'implementazione dei programmi più credibili e rilevanti per minimizzare e cattura il carbonio

[4] *Si veda per dettagli: https://sustainabilityreports.st.com/sr24/_assets/downloads/ata-ambitions-and- goals-st-sr24.pdf*

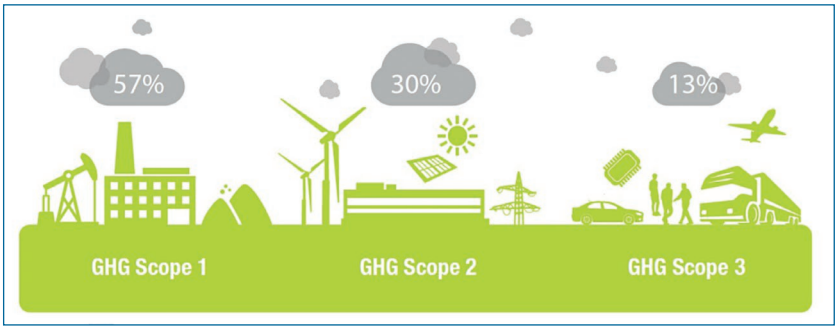


Figura 15: I 3 differenti GHG creati da un'azienda (Fonte: ST)

- 2016 – 2025 arco temporale durante il quale si vuole ridurre del 20% il consumo acqua (SG13) per wfs con riciclo al 50% (SG14).
- Generare almeno il 20% dei ricavi da nuove linee di prodotto entro il 2025 (SG1) e il 33% dei ricavi da prodotti più sostenibili entro il 2027 (SG2).

Gli ambiti di intervento riguardano:

- **Tecnologie responsabili:** Sviluppo di soluzioni per una vita più sicura, ecologica e intelligente.

- **Persone:** Priorità alla salute, sicurezza e benessere, diritti umani ed empowerment delle comunità.

- **Ambiente:** Riduzione delle emissioni e del consumo energetico, gestione delle risorse idriche e dei rifiuti.

- **Profitto:** Gestione dei rischi e incremento del valore per gli stakeholder.

L'azienda è riconosciuta in vari indici di sostenibilità, come Dow Jones Sustainability Index World e Europe, FTSE4Good, Solactive Global e Europe CSR index, etc.

e ha ottenuto valutazioni elevate da CDP, MSCI e da ISS ESG corporate rating. È membro della Responsible Business Alliance (RBA) e firmataria del Patto Globale delle Nazioni Unite dal 2000, contribuendo a 11 dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite (SDG)[5].

L'obiettivo è rafforzare la trasparenza delle informazioni sociali e ambientali, con particolare attenzione ai rischi legati al cambiamento climatico ed agli altri aspetti di sostenibilità. Di seguito a titolo di esempio sono riportati i passaggi principali che ST sta intraprendendo per allinearsi alle richieste normative:

- *Revisione delle pratiche di rendicontazione*, per garantire che le informazioni sulla sostenibilità siano complete, affidabili e in linea con i nuovi standard richiesti dalla CSRD.
- *Implementazione di audit esterni*, per assicurare la veridicità e l'accuratezza dei dati riportati nel report di sostenibilità
- *Confronto con le metriche di divulgazione dei concorrenti*, per ridurre o evitare disallineamenti.

[5] *Per approfondimenti il rapporto di sostenibilità di ST è disponibile al link https://sustainabilityreports.st.com/sr24/*

RICERCA E SVILUPPO

Nel dicembre 2023 è stato pubblicato l'EU Industrial R&D Investment Scoreboard 2023, uno strumento che traccia e analizza le tendenze degli investimenti in Ricerca e Sviluppo (R&S) delle industrie europee. Questo report è particolarmente rilevante per valutare il progresso verso l'obiettivo dell'Unione Europea di investire il 3% del suo PIL in R&S, un traguardo considerato cruciale per la competitività a lungo termine dell'Unione, ma che nel 2021 ha mancato. Infatti l'UE avrebbe dovuto investire ulteriori 106 miliardi di euro per l'obbiettivo del 3% , una cifra pari al programma settennale di R&S dell'UE Horizon Europe.

Il documento fotografa anche lo stato dell'arte del settore dei semiconduttori, mostrando le tendenze strutturali della R&S nell'arco degli ultimi 10 e 20 anni e il valore strategico della R&S durante eventi critici come la crisi finanziaria mondiale e la pandemia di COVID-19.

I semiconduttori hanno mostrato la loro centralità strategica per la filiera di molti prodotti. A causa della carenza di semiconduttori durante la pandemia di COVID-19, le aziende dei semiconduttori hanno guadagnato molta attenzione politica in tutte le aree geografiche, ed in particolare negli Stati Uniti, in Europa, ed in Cina. Attualmente tutte le regioni/paesi mirano a rafforzare la loro posizione nel settore dei semiconduttori. In questo contesto il consolidamento e rafforzamento delle proprie capacità di R&S è diventato un fattore strategico ed elemento di forte competitività.

Nel 2022, secondo i dati del Quadro di valutazione (Figura 16) del settore Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (ICT), comprendente aziende che producono hardware per computer, apparecchiature elettroniche ed elettriche, semiconduttori e apparecchiature per telecomunicazioni, gli Stati Uniti sono in testa con il 62,2% degli investimenti in R&S, che ammontano a 84,1 miliardi di euro per il settore dei semiconduttori. Tra le aziende statunitensi spiccano Intel, all'8° posto mondiale con 16,4 miliardi di euro investiti in R&S, Nvidia al 26° posto con 6,9 miliardi di euro, e Advanced Micro Devices al 44° posto con 4,7 miliardi di euro.

La regione del Resto del Mondo (RoW), che include Taiwan e la Corea del Sud, copre il 25,5% delle aziende e il 19,1% degli investimenti in R&S. Le aziende di spicco in quest'area sono Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), al 42° posto mondiale con 4,9 miliardi di euro in R&S, e SK Hynix in Corea del Sud, al 54° posto con 3,3 miliardi di euro.

La Cina, nonostante abbia una maggiore percentuale di aziende (14,4%), mostra un investimento in R&S relativamente basso, con solo il 3,5% del totale, pari a 2,8 miliardi di euro. La principale azienda cinese nel quadro di valutazione è TCL Zhonghuan Renewable Energy Technology Co, che si posiziona al 508° posto mondiale con investimenti in R&S di 348 milioni di euro.

L'Unione Europea si posiziona al terzo posto per investimenti in R&S con il 12,1% e l'11% delle aziende. Le principali società europee nel settore sono ASML Holding e NXP Semiconductors, entrambe olandesi, rispettivamente al 64° posto mondiale con 3,1 miliardi di euro in R&S e al 111° posto con 2,0 miliardi di euro, seguite dalla tedesca Infineon Technologies al 113° posto con 1,9 miliardi di euro.

ST si colloca per investimenti in R&S al 32° posto in Europa e al 150° posto a livello mondiale (statistiche afferenti l'anno 2022[6], Figura 17) se confrontato nel comparto Technology Hardware & Equipment.

		Computer hardware	Electronic & electric equipment	Semiconductors	Telecommunication equipment	Total
EU	Firms	3	26	10	3	42
	Share	6.7%	9.8%	10.1%	4.8%	8.9%
	R&D	1 158	11 841	9 891	9 006	31 988
	Share	2.6%	12.4%	11.7%	14.5%	11.2%
US	Firms	12	48	37	20	117
	Share	26.7%	18.2%	37.4%	32.3%	24.9%
	R&D	34 733	13 725	50 824	21 628	120 911
	Share	79.6%	12.5%	62.6%	34.5%	42.3%
China	Firms	11	105	18	27	161
	Share	24.4%	39.8%	18.2%	43.5%	34.3%
	R&D	3 673	23 307	2 862	30 004	59 847
	Share	8.3%	23.5%	3.5%	47.9%	20.9%
Japan	Firms	0	35	10	2	47
	Share	0.0%	13.3%	10.1%	3.2%	10.0%
	R&D	0.0	18 021	2 562	258.9	20 843
	Share	0.0%	18.9%	3.7%	0.4%	7.3%
RoW	Firms	19	50	24	10	103
	Share	42.2%	18.9%	24.2%	16.1%	21.9%
	R&D	4 145	30 828	15 616	1 400	51 990
	Share	9.4%	32.6%	18.3%	2.6%	18.2%
Total	Firms	45	264	99	62	470
	Share	9.6%	56.2%	21.1%	13.2%	19%
	R&D	43 648	95 344	84 092	62 251	285 337
	Share	15.3%	33.5%	29.4%	21.8%	100%

Figura 16: Produttori di ICT nel 2022: imprese e R&S nelle diverse regioni, classificazione ICB4 - Nota: R&S espressi in milioni di € (Fonte: Tabella 14 del 2023 EU Industrial R&D Investment Scoreboard, European Commission, JRC/DG R&I)

[6] *https://iri.jrc.ec.europa.eu/data*

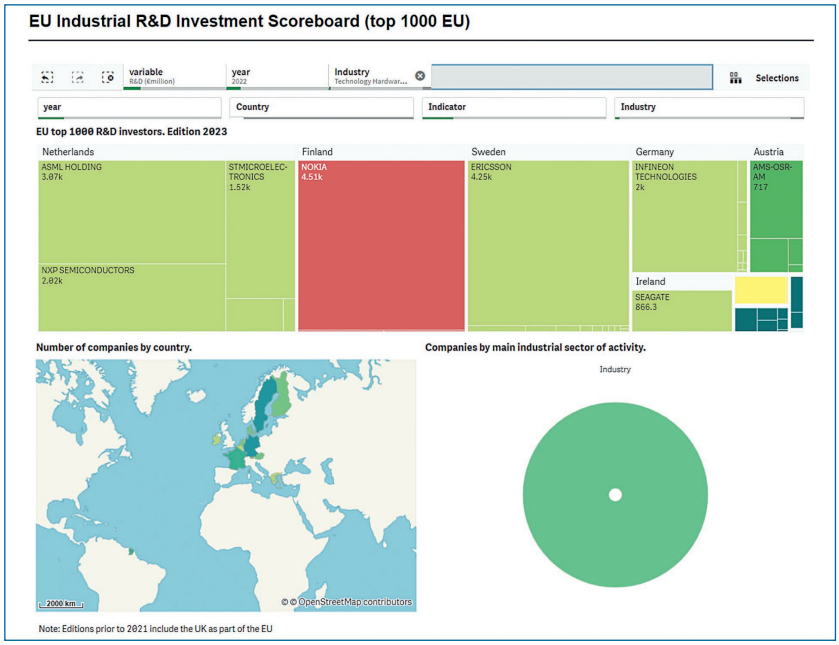


Figura 17: Segmento industriale Technology Hardware & Equipment (Fonte: https://iri.jrc.ec.europa.eu/data)

Le aziende dell'UE si distinguono sul lato sostenibilità, in particolare nello sviluppo delle tecnologie pulite e nel rispetto dei criteri ESG (Environmental, Social and Governance) collocando l'UE in una posizione di forza a tutela dell'ambiente.

L'elevata intensità di R&S e di crescita annuale delle industrie delle ICT e della salute ha cambiato le strategie dei produttori e dei servizi ITC, i cui attori principali operano negli Stati Uniti (per le ITC e salute) e in Cina (per solo ITC) rappresentando una sfida continua per l'UE a eguagliare gli Stati Uniti negli investimenti globali in R&S e tenendo al contempo il passo con i recenti progressi della Cina.

L'Europa, tuttavia, detiene una posizione di leadership nel settore dei macchinari per la fabbricazione di semiconduttori, grazie all'azienda olandese ASML che è l'unica azienda in grado di produrre macchinari per la litografia a radiazione ul-

travioletta estrema (EUV), essenziali per la produzione di microchip avanzati con nodi tecnologici di 7 nm, 5 nm e 3 nm. Questa capacità rende ASML un partner strategico per l'UE e gli USA nella loro competizione con la Cina.
Gli investimenti in R&S industriali sono integrati da finanziamenti dell'UE anche se il divario con il resto delle principali aree concorrenti è dovuto principalmente a un divario negli investimenti privati.
Programmi come Horizon Europe (compreso il Consiglio europeo per l'innovazione), i Programmi Regionali e di Coesione, lo strumento di Ripresa e Resilienza, nonché ***InvestEU*** e il Fondo per l'Innovazione e a livello politico, la legge Net Zero Industry Act e il Critical ***Raw Materials Act*** mirano a mobilitare gli investimenti per ridurre le dipendenze e rafforzare la posizione dell'UE nella dinamica catene del valore globale.
Per rafforzare ulteriormente la sua posizione, l'UE si è data degli obiettivi tramite, ad esempio, l'***European Chips Act***, che stanzia oltre 43 miliardi di euro: risorse destinate al primo pilastro, ovvero alla ricerca, alla progettazione, al design di chips e alle linee pilota per favorire il trasferimento dalla R&S all'industrializzazione.

La EU Industrial Strategy, la ***New European Innovation*** Agenda (compresi i distretti dell'innovazione regionali) e la ***European Economic Security Strategy*** rafforzano la promozione dell'innovazione in collaborazione con i nostri partner internazionali.

L'industria dei semiconduttori globale deve impegnarsi nell'innovazione di materiali, architetture e metodologie produttive per preservare il tasso di miglioramento delle prestazioni e dei costi degli ultimi decenni. È necessario investire massicciamente nella ricerca di base precompetitiva e collaborativa. Ad esempio, al ridursi del nodo tecnologico, i costi aumentano (Figura 18) ponendo sfide sempre più alte al compiersi delle Legge di Moore. Per continuare a fare progressi, è necessario un approccio ingegneristico che integri l'innovazione a tutti i livelli e che superi l'attuale specializzazione verticale delle aziende di semiconduttori favorendo quindi la collaborazione nell'ecosistema di R&S per superare le sempre più crescenti complessità.

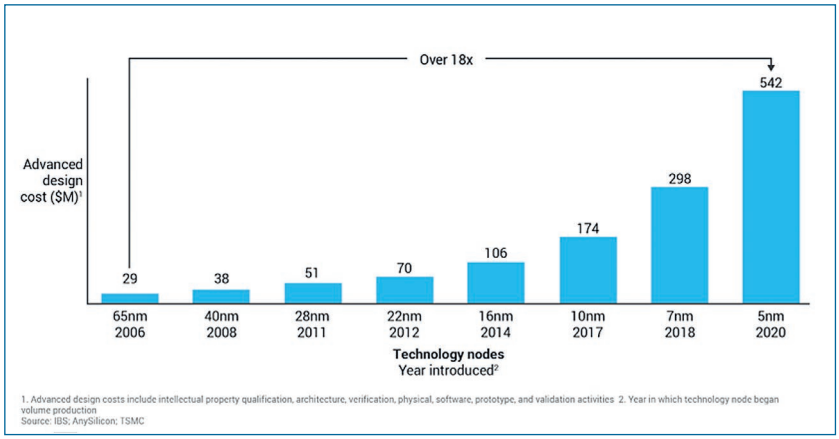


Figura 18: I costi di progettazione aumentano con ogni nuovo nodo tecnologico (Fonte: SIA)

L'Italia vanta una elevata capacità di ricerca, sviluppo tecnologico e produzione nel settore dei semiconduttori, inclusa la produzione di macchinari quali clean room e impianti di testing, grazie alla presenza di diversi importanti centri di ricerca e aziende con posizioni di mercato importanti quali ST, LFoundry, Micron Technology, MEMC, Technoprobe, Lpe, OPTOI, SPEA, Osai, Meridionali Impianti, Applied Materials Italia srl, etc.

Un punto di forza per il paese è la ricerca nel campo della microelettronica, spesso frutto della sinergia tra il mondo accademico e quello industriale. Le università italiane sono un fulcro importante per l'istruzione avanzata nel settore, grazie ai loro programmi di laurea e dottorato di elevata qualità. La specializzazione vede attenzionati settori come quello automobilistico, degli strumenti di precisione e dei prodotti elettronici per i consumatori. Nonostante ciò, l'Italia risente di una mancanza di aziende che producono semiconduttori con tecnologie di punta, e c'è un bisogno di espansione nell'area del design e ingegnerizzazione di semiconduttori. Per sfruttare appieno le opportunità offerte dalla legislazione europea

sui chip, l'Italia dovrebbe concentrarsi sull'incremento della qualità dell'istruzione e sul rafforzamento della propria catena di valore nel campo della microelettronica, valorizzando i centri di eccellenza già presenti.
Un punto debole significativo del contesto italiano, rispetto ad altri paesi europei, è la carenza di grandi centri di ricerca applicata e la mancanza di impianti capaci di produrre semiconduttori di ultima generazione. Questi limiti costituiscono barriere significative per il progresso del settore nel paese.
A tal fine sono stati approvati il Fondo Nazionale per la Microelettronica, da 3,3 miliardi di euro, e il Decreto Energia n.17 del 2022, con 4,15 miliardi di euro, che costituiscono gli strumenti principali del Chips Act (Chips Joint Undertaking) per sostenere, tra gli altri, i progetti di ricerca delle imprese o sviluppati nell'ambito di un partenariato europeo.
Con la Fondazione Chips-IT, ovvero la Fondazione per il design dei circuiti integrati a semiconduttore, introdotta dalla legge di bilancio del 2023, l'Italia mira a potenziare le proprie competenze nel campo del design dei chip, stimolando la creazione di un distretto di imprese specializzate nel design di circuiti integrati, aperto alla partecipazione di aziende internazionali. Sfruttando le significative potenzialità del Paese nella progettazione e nel design, la Fondazione favorirà la creazione di una "fabless valley" sul territorio nazionale, accrescendo l'attrattività della filiera dei semiconduttori e supportando l'ampliamento dell'offerta formativa del settore e per accrescerne le competenze.

FOCUS: IL CASO ST

Per comprendere il contesto e le esigenze in termini di R&S a livello nazionale si riportano per riferimento alcuni dati caratteristici di un grande player industriale come ST.
Nell'azienda un significativo 18% del personale è impegnato in attività di R&S, e nel 2023 l'investimento in questo settore è stato pari al 12,2% dei ricavi netti, con un importo totale di 2,1 miliardi di dollari per il 2023 e 1.9 miliardi di dollari e 1.7 miliardi di dollari rispettivamente nel 2022 e 2021.

La strategia di R&S tecnologica di ST si basa sullo sviluppo di tecnologie differenziate, che consentono un'offerta ampia in termini di nuovi prodotti e abilitano nuove applicazioni:
Il portafoglio tecnologico è composto da sistemi di fabbricazione di tecnologie chip, includenti CMOS avanzati, FD-SOI, RF-SOI, rilevamento ottico, memorie non volatili embedded, mixed- signal, analog, MEMS, Smart Power, processi SiC e GaN. Questo è ben integrato nel portafoglio di tecnologie del packaging come BGA ad alto numero di pin, packaging a livello di wafer, packaging per sensori altamente integrati e prodotti di potenza con package leadframe. La R&S tecnologica è integrata sia per la produzione di front-end che di back-end per garantire un flusso di informazioni tra organizzazioni di R&S e produzione. Collaborazioni trasversali ai gruppi di prodotti aumentano e favoriscono il processo di contaminazione delle competenze. Per CMOS con nodi tecnologici pari o inferiori ai 18 nm, ci si appoggia a fonderie esterne e non si prevede di produrre né di sviluppare internamente. L'azienda ha centri avanzati di R&S e di innovazione che offrono un vantaggio nell'introdurre rapidamente prodotti nuovi. Inoltre, ha stabilito una cultura di partnership e negli anni ha creato una rete di collaborazioni strategiche con clienti chiave, fornitori, concorrenti, università di spicco e istituti di ricerca in tutto il mondo. Partecipa anche a specifici programmi di R&D definiti dall'UE, singoli paesi e autorità locali (principalmente in Francia e Italia). Grazie alla continua R&S, ad oggi ST possiede circa 20,000 tra brevetti e procedure di ottenimento in corso; 690 nel solo 2023 di cui 37% italiani.

INDIRIZZI E TEMI STRATEGICI A MEDIO/LUNGO TERMINE

Il quadro geopolitico attuale è segnato da notevoli incertezze a causa di fattori come le tensioni commerciali tra Cina e USA, con impatti a livello mondiale, in particolare nel settore dei semiconduttori, dove prodotti ad alta tecnologia diventano obiettivi di sanzioni. Gli Stati Uniti hanno imposto limitazioni alle vendite di prodotti con know-how americano a imprese cinesi. In aggiunta, l'aggravarsi delle tensioni tra Cina e Taiwan minaccia di restringere ancora di più i commerci internazionali, specialmente per i semiconduttori.

L'invasione dell'Ucraina da parte della Russia ha avuto un impatto devastante sulla produzione di gas rari come neon, elio e NF_3, indispensabili nella produzione di semiconduttori. Prima del conflitto, l'Ucraina contribuiva circa per il 50% alla produzione mondiale di neon e la guerra ha distrutto alcune fonti di produzione e messo a rischio i piani di espansione per questi gas.

Questi fattori creano un'atmosfera di incertezza che potrebbe riflettersi negativamente sull'economia globale e sulla catena di approvvigionamento dei semiconduttori, un settore vitale per il progresso di molte tecnologie attuali. Da qui il riassetto produttivo della filiera dei semiconduttori con investimenti tesi a creare autosufficienza e resilienza nelle varie aree geografiche (Figura 19). Tra i tanti, citiamo i programmi:

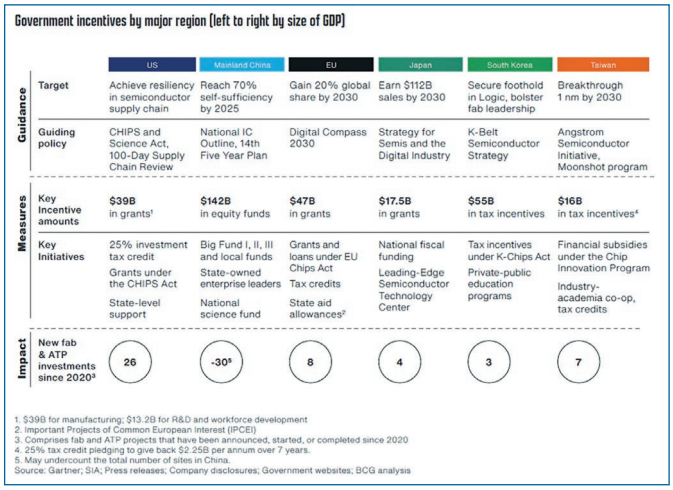
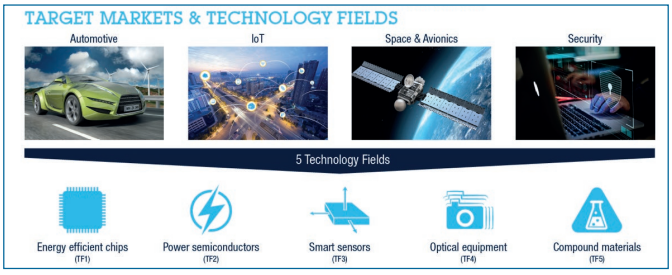


Figura 19: Sforzo per l'autosufficienza per aree geografiche (Fonte: SIA)

IPCEI (MPORTANT PROJECT OF COMMON EUROPEAN INTEREST) 1 & 2

Come precedentemente menzionato, si è assistito all'attuazione di iniziative governative volte a potenziare l'autosufficienza delle catene di approvvigionamento in diverse regioni. Tra queste, spiccano i programmi di sostegno nazionali di paesi come Italia, Francia, Germania e Inghilterra, ai quali si è poi unita l'Austria nel settore dei semiconduttori con l'iniziativa "Connecting Europe's microelectronic industry to foster digitisation in Europe", conosciuta anche come IPCEI Microelettronica del 2018 fino al 2024. I finanziamenti provengono dagli stessi paesi partecipanti, non dall'Unione europea.

IPCEI ME: Important Project of Common European Interest on Microelectronics



Ulteriori informazioni disponibili al sito https://ipcei-me.eu/

Gli aiuti autorizzati a livello comunitario nel 2018 ammontano a 1,75 miliardi di euro complessivi, a cui si aggiungono 146,5 milioni di euro autorizzati dopo l'ingresso dell'Austria (dati MIMIT).

L'IPCEI sulla microelettronica promuove la ricerca, lo sviluppo e l'innovazione in cinque ambiti tecnologici: chip a basso consumo energetico, semiconduttori di potenza, sensori intelligenti, attrezzature ottiche avanzate e materiali compositi. L'obiettivo principale è quello di sviluppare tecnologie e componenti microelettroniche all'avanguardia, pronte per essere integrate nelle industrie.

La Commissione europea l'8 giugno 2023, ha approvato il secondo IPCEI sulla microelettronica, denominato "IPCEI ME/CT" e noto anche come IPCEI Microelettronica 2, notificato da quattordici paesi europei per il lancio di progetti di comune interesse sempre nel settore della microelettronica e delle tecnologie di comunicazione.

IPCEI MICROELETTRONICA: QUALCHE DETTAGLIO IN PIÙ

Nel 2023 è stato lanciato questo nuovo progetto paneuropeo, che è stato avviato per promuovere la ricerca e l'innovazione e dare il via alla prima industrializzazione della microelettronica. Coinvolge partner italiani oltre ad altre circa 65 aziende in 16 Paesi europei. Nel complesso, gli aiuti a livello EU ammontano a 8,1 miliardi di euro complessivi, e potranno essere accordati dagli Stati membri in favore delle imprese partecipanti alla realizzazione dell'IPCEI ME/CT (Microelettronica 2) per lo svolgimento delle attività di ricerca, sviluppo e innovazione fino al 2032.

IPCEI ME/CT: Important Project of Common European Interest on Microelectronics and Communication Technologies



Ulteriori informazioni disponibili al sito https://ipcei-me-ct.eu/

Come riportato dal MIMIT, l'IPCEI ME/CT rappresenta un'integrazione e un'estensione del primo IPCEI e sostiene attività di ricerca, sviluppo e innovazione, già comprese nella prima applicazione industriale, e mira ad accelerare la trasformazione green e digitale nei seguenti modi:

1. creando soluzioni innovative di microelettronica e comunicazione e
2. sviluppando sistemi elettronici e metodi di produzione efficienti sotto il profilo energetico e a basso consumo di risorse.

Nell'ambito di questo IPCEI, le imprese, tra cui PMI e start-up, avvieranno 68 progetti di ricerca. Il programma prevede di stimolare il progresso tecnologico in settori chiave come le comunicazioni (5G e 6G), la guida autonoma, l'intelligenza artificiale e l'informatica quantistica, oltre a sostenere la transizione ecologica in ambiti legati alla produzione e all'uso dell'energia. Si stima che i primi prodotti innovativi saranno disponibili sul mercato entro il 2025, con il completamento del progetto previsto per il 2032. L'iniziativa dovrebbe generare circa 8.700 posti di lavoro diretti, oltre a numerosi impieghi indiretti.

EUROPEAN CHIPS ACT

A febbraio 2022 la Commissione ha rinforzato la posizione Europea adottando lo European Chips Act, un insieme di atti orientati a rendere l'Europa più autonoma in materia di semiconduttori e a portare la quota di mercato dell'UE dall'attuale 10% al 20% della produzione mondiale di semiconduttori entro il 2030 (Figura 20). Si tratta di una serie di misure con le quali si intendono mobilitare oltre 43 miliardi di euro di investimenti pubblici e privati. La normativa si identifica con il Regolamento UE 1781 rilasciato il 13 settembre 2023.

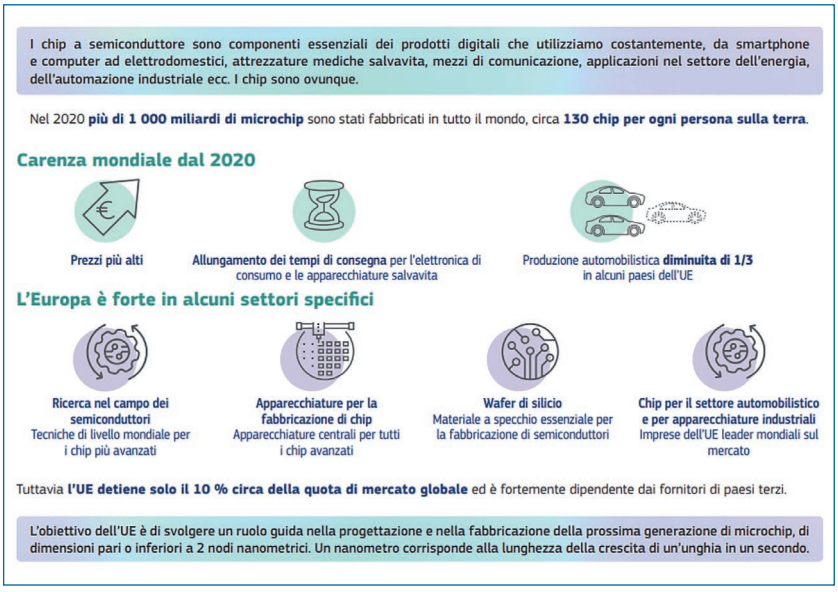


Figura 20: Panorama europeo e globale dei chip (Fonte: European Chips Act: Factsheet)

Lo European Chips Act è composto da: una Comunicazione che delinea cinque obiettivi: 1) rafforzare la ricerca sui semiconduttori; 2) definire linee guida per la

creazione di prototipi; 3) stabilire certificazioni per garantire efficienza energetica, qualità e sicurezza; 4) promuovere la creazione di competenze; 5) creare una rete di centri di competenza.
Per raggiungere gli obbietti elencati il Regolamento identifica 3 pilastri:

- **Iniziativa "Chip per l'Europa":** per mettere a fattor comune lo sviluppo di capacità tecnologiche su larga scala e l'innovazione già avviate e sostenute nell'ambito dei programmi Horizon Europe e Digital Europe oltre che dal partenariato del settore privato ovvero il "Chips Joint Undertaking (Chip JU), evoluzione del KDT JU (Key Digital Technologies Joint Undertaking).
- **Sicurezza dell'approvvigionamento e resilienza:** investimenti pubblici e privati negli impianti di fabbricazione del tipo "first-of-a-kind" che garantirà la sicurezza dell'approvvigionamento e la resilienza. Con "first-of-a-kind" si intende impianti nuovi o miglioramenti di fabbriche di semiconduttori con innovazioni non ancora presenti nell'UE. Questi possono richiedere lo status di "impianto di produzione integrato" (IPF), che si riferisce a fabbriche di semiconduttori verticalmente integrate che si occupano di vari aspetti della produzione e progettazione di semiconduttori, o di "fonderia dell'UE aperta" (OEF), ovvero impianti che riservano una parte della loro produzione basate sui design di altre aziende, in particolare fabless.
- **Monitoraggio e risposta alle crisi:** un meccanismo di coordinamento tra gli Stati membri e la Commissione per rafforzare la collaborazione in materia di monitoraggio e risposta alle crisi.

Oggi l'Europa con la nuova proposta di Regolamento mira ad ampliare l'intervento dell'UE nel settore, promuovendo non solo la ricerca e lo sviluppo (sostenuta con aiuti di Stato, IPCEI, etc.), ma anche l'espansione delle capacità produttive. In particolare, la Commissione Europea pone enfasi sulla produzione di microchip di ultima generazione, segnalando un interesse crescente nell'incrementare la produzione all'interno dell'Unione.

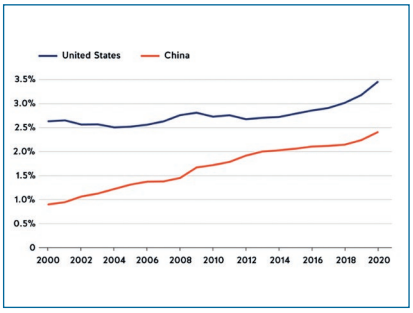


Figura 21: Spesa interna lorda per R&S in rapporto al PIL totale, 2000-2020

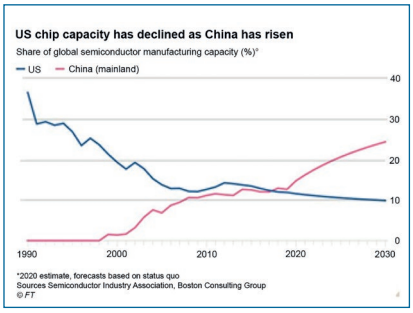


Figura 22: Evoluzione nel tempo della capacità produttiva

U.S.A. CHIP ACT

La brillante crescita del mercato a livello mondiale dei semiconduttori, dalla loro nascita ad oggi, è stata possibile sostanzialmente grazie a scelte aziendali che hanno sostenuto economicamente la ricerca e lo sviluppo, con crescenti investimenti in rapporto al PIL nazionale.

La Figura 21 mostra come la politica della Cina abbia costantemente aumentato la percentuale di spesa in R&D in rapporto al loro PIL, mentre la Figura 22 confronta l'evoluzione nel tempo delle capacità produttiva nazionale di chip di Cina e America.

Dalla Figura 22 si nota che attorno agli anni 2000 si è assistito ad un incrocio delle due curve, le cui cause possono essere diverse, ma una di queste possono essere i ridotti investimenti in R&D, che hanno causato a partire dagli anni 2000 uno spostamento della capacità produttiva di semiconduttori a favore delle regioni asiatiche e a sfavore di quelle occidentali; infatti, la capacità di produzione di semiconduttori negli Stati Uniti è scesa dal 37% nel 1990 al 12% di oggi, e preceduta da una crescita di investimenti in R&D sostanzialmente piatta.

Per ovviare a questo svantaggio, il Governo americano ha varato all'inizio del 2020, il provvedimento "CHIPS and Science Act", una legge storica volta a rafforzare la capacità manufatturiera dei semiconduttori, circuiti integrati, e soprattutto alla ricerca di innovativi processi tecnologici americana. Il Chip Act (dove CHIPS sta per Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors), consiste in un investimento nel settore dei semiconduttori di circa 280 miliardi di dollari, con importanti ricadute occupazionali sul territorio, con la creazione entro il 2030 di circa 300.000 di nuovi posti di lavoro altamente specializzati.

Made In China

Il Governo cinese nel 2014 si è imposto una strategia economica innovativa, volta a modificare il modello produttivo cercando di passare da industria di soli prodotti low cost e bassa tecnologia a industria high tech, privilegiando produzioni con materie prime estratte in Cina e ponendo come obiettivo il passaggio dal 40% al 70% di prodotti che usano materie prime estratte in Cina. Nel 2019, la Cina ha rivisto al rialzo l'obiettivo, fissandolo all'80% entro il 2030, come parte della sua strategia industriale MIC 2025 (Made in China 2025) con finanziamenti statali stimati nell'ordine delle centinaia di miliardi di dollari, prestiti a basso interesse, e agevolazioni fiscali, inclusi 2,7 miliardi di dollari per l'Advanced Manufacturing Fund e 19 miliardi di dollari per il National Integrated Circuit Fund. In paragone, il fondo dell'Unione Europea, che la Germania ha stanziato per Industrie 4.0, ammonta a soli 200 milioni di euro.

PARADIGMI FUTURI: I MEGATRENDS

L'evoluzione dei complessi mutamenti sociali, che si prevede avverranno da qui al 2050 nel mondo, è sintetizzata nell'analisi redatta da Roland Berger, giugno 2023[7] (Figura 23), società di consulenza strategica. Il report illustra quelli che saranno le principali tendenze socioeconomiche che plasmeranno il mondo, cioè i megatrend.
Nonostante gli ultimi anni abbiano portato ad avvenimenti e cambiamenti prima impensabili, modificando usi e abitudini consolidate da molto tempo, si prevede che i sistemi elettronici rimarranno sempre strumenti di uso quotidiano in grado di incidere in modo significativo e trasversale in tutti i 6 megatrend.



Figura 23: Megatrends (Fonte: Roland Berger)

Aumento della popolazione

A partire dal 1975 la popolazione mondiale cresce di un altro miliardo di persone ogni 12 anni; a fine 2022 abbiamo raggiunto gli 8 miliardi, e le ultime proiezioni delle Nazioni Unite prevedono che la popolazione mondiale dovrebbe crescere

[7] *Trend Compendium 2050: Six megatrends will shape the next decades, 2023, Roland Berger*

fino a circa 10 miliardi nel 2080, per poi stabilizzarsi su quel livello fino al 2100 (Figura 24).

Questa stabilizzazione è dovuta alla riduzione del tasso di natalità, da imputare alla diminuzione dei tassi di fertilità in tutto il mondo negli ultimi decenni; ad esempio, dal 2019 il tasso di crescita della popolazione mondiale è sceso al di sotto dell'1%. Come si vede dalla Figura 25, nel 1950 le donne partorivano in media circa 5 volte, mentre nel 2021 questa cifra è scesa a 2,3. Ciò è dovuto al percorso di emancipazione, a migliori opportunità sociali ed economiche, e a una migliore capacità di realizzare i propri obiettivi personali e professionali.

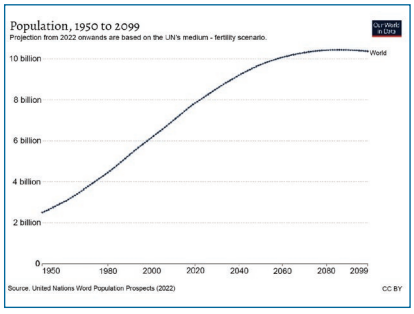


Figura 24: Aumento stimato (2022) della popolazione mondiale

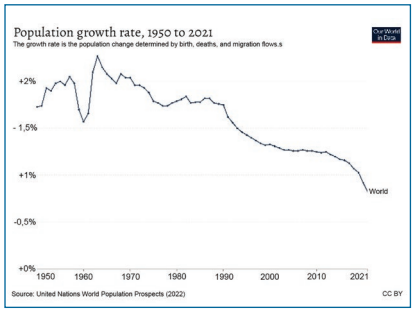


Figura 25: Tasso di crescita della popolazione

Parallelamente, si prevede che la quota della popolazione mondiale di età pari o superiore a 65 anni aumenterà dal 10% nel 2022 al 16% nel 2050, un trend in crescita soprattutto nei paesi sviluppati. E con l'invecchiamento della popolazione emergono le problematiche connesse alla salute.

I semiconduttori possono giocare un ruolo fondamentale in questo ambito; ad esempio, consentono di passare da un'assistenza locale negli ospedali a una decentralizzata (Figura 26), grazie alla creazione di nuovi sistemi diagnostici portatili sufficientemente precisi ed economici, tra i quali i più comuni sono il controllo della glicemia, ritmo cardiaco, pH, pressione arteriosa, etc., con positivi riflessi in termini di:

- diffusione capillare dei sistemi diagnostici;
- monitoraggio di 24 ore al giorno dei parametri sotto esame;
- riduzione dei costi sociali associati.

In definitiva, un miglioramento delle condizioni di vita e un'assistenza sanitaria personalizzata.

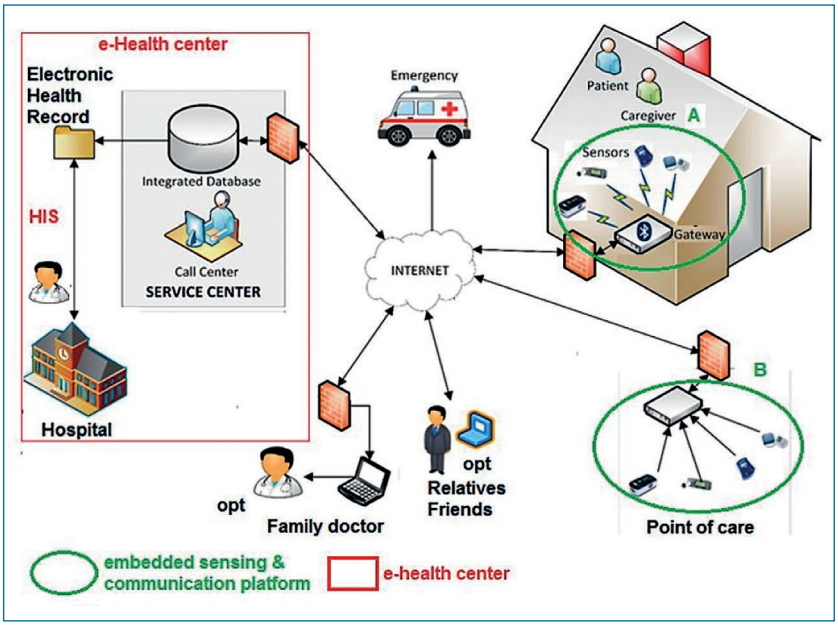


Figura 26: Decentralizzazione dell'assistenza sanitaria (Fonte: Saponara et all, Electronics 5(3), 47, 2016)

Un altro tangibile miglioramento si prevede nella diagnostica per immagini, confrontando le ecografie realizzate da strumenti 2D rispetto a quelli 3D (Figura 27) e reso possibile grazie a nuovi impulsatori ultrasound, (che usano tecnologia BCD). Non ultimo, la nascita dei visori 3D a realtà aumentata e del metaverso, cioè una rete di mondi virtuali condivisa contemporaneamente da più soggetti che si trovano in luoghi fisici distanti tra loro, trova applicazione in diversi ambiti clinici, come la formazione di medici chirurghi, la simulazione preventiva degli interven-

ti, la pianificazione della migliore strategia chirurgica, e infine anche operazioni chirurgiche a distanza.

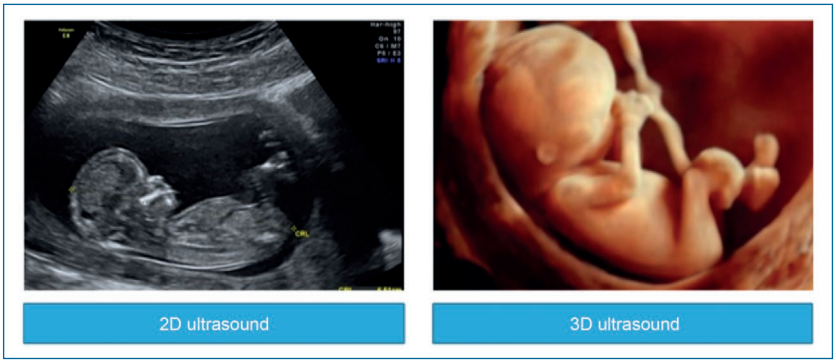


Figura 27: Immagini ultrasound 2D vs 3D

L'aumento della popolazione mondiale (grazie ai trend positivi dei paesi asiatici: india etc.) ha però come controparte un aumento generalizzato e disomogeneo dell'inquinamento; almeno sul fronte dei consumi energetici e delle relative emissioni, l'utilizzo di sistemi elettronici ad alta efficienza ne consente una riduzione. Ad esempio, per le sole applicazioni di home appliances (Figura 28) si vede come grazie a un'alta efficienza sia possibile risparmiare circa il 27% di energia da qui al 2030.

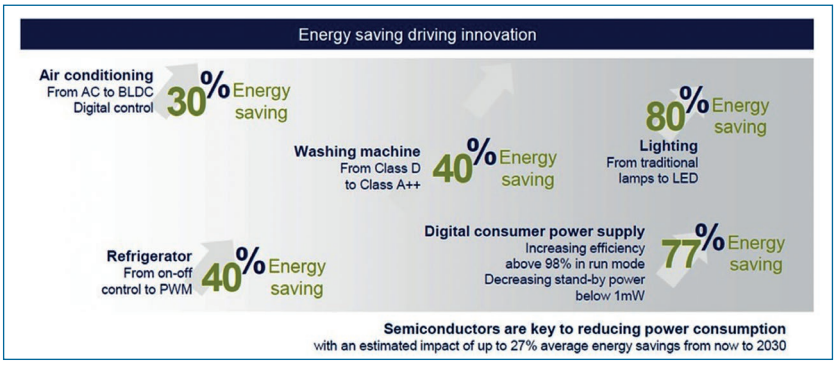


Figura 28: Risparmio energetico per le applicazioni di home appliances

Le applicazioni industriali e di consumo

La Figura 29, ripresa dal report Yole 2024 sull'industria dei semiconduttori, propone la prospettiva di contesto in cui i semiconduttori potranno fornire un apporto determinante: Lo scenario evidente dalla figura trova rispondenze con le analisi e i risultati dello studio Technology Trends Outlook 2023 di McKinsey, in cui l'IA Generativa fa il suo ingresso a fianco di altre 14 categorie tecnologiche che potranno guidare la crescita futura, ovvero: IA applicata, IA generativa, Web3, Sviluppo software di ultima-generazione, Trust architectures e identità digitale, Connettività avanzata, Tecnologie per la realtà immersiva, Cloud e edge computing, Tecnologie quantistiche, Il futuro della mobilità, Il futuro della bioingegneria, Il futuro delle tecnologie spaziali, Elettricità e fonti rinnovabili, Tecnologie per il clima oltre elettrico e rinnovabili, Industrializzazione del machine learning. in ognuna di queste i semiconduttori e la microelettronica in generale saranno essenziali e determinanti abilitanti.

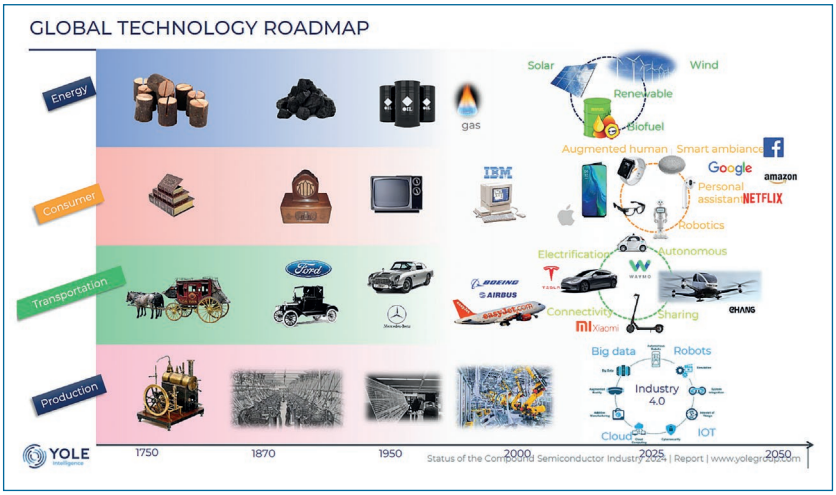


Figura 29: Global technology roadmap (Fonte: Yole 2024)

Alcune categorie già introdotte e descritte in altre sezioni vengono riprese nella Figura 30 del report in base allo stato di ogni tendenza, abbinando un punteggio per l'innovazione (basato su brevetti e ricerche) e l'interesse (basato su notizie e ricerche sul web). Inoltre, si evidenziato gli investimenti in tecnologie rilevanti e si valuta il loro livello di adozione da parte delle organizzazioni.

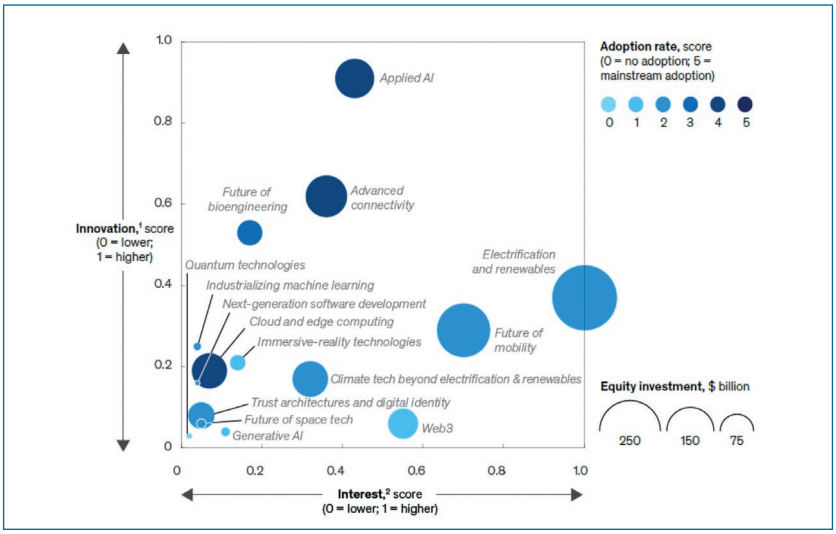


Figura 30: Innovazione, interesse, investimenti e adozione, per tendenza tecnologica, 2022 (Fonte: McKinsey)

Note: *Alla figura 30 I punteggi dell'innovazione e dell'interesse per i 15 trend sono relativi l'uno all'altro. Tutti i trend mostrano alti livelli di innovazione e interesse rispetto ad altri temi e stanno anche attirando investimenti significativi.*

1 Il punteggio dell'innovazione combina i punteggi 0-1 per i brevetti e la ricerca, che sono relativi alle tendenze studiate. Il punteggio dei brevetti si basa su una misura dei depositi di brevetti, quello della ricerca su una misura delle pubblicazioni di ricerca.

2 Il punteggio di interesse combina i punteggi 0-1 per le notizie e le ricerche, che sono relativi alle tendenze studiate. Il punteggio delle notizie si basa su una misura delle pubblicazioni di notizie, mentre il punteggio delle ricerche si basa su una misura delle query dei motori di ricerca.

Un esempio classico del ruolo della microelettronica è la sua applicazione nel settore dei trasporti ed in particolare delle auto a partire dagli anni 60. Trend simili sono in corso per tutti i mezzi di trasporto che stanno perseguendo simili traiettorie di elettrificazione, automazione e gestione ottimizzata dei sistemi ed impianti. Simili trend sono in corso anche per le altre applicazioni industriali citate nella figura 31. In tutti questi casi il numero di sensori, processori, memorie, sistemi di potenza e altri componenti microelettronici è minore per dimensione del mercato globale dell'automotive (per esempio mercato annuo automotive da milioni di vetture mentre quello navale e aeronautico è dell'ordine delle migliaia) o per prestazioni richieste (potenze da gestire da qualche centinaio di kW nelle auto che arrivano a molti MW nel caso di treni, navi ed aerei) ovvero intrinseche esigenze operative, ambientali e di sicurezza che al momento non consentono ancora una estesa introduzione di sistemi digitali in situazioni potenzialmente critiche o pericolose

FOCUS: IL CASO AUTOMOTIVE

Il settore automotive ha beneficiato dell'uso dei semiconduttori nei sistemi elettronici, migliorando non solo il comfort di guida o la connettività, ma anche in particolare la sicurezza, sia attiva che passiva, l'efficienza di combustione del motore e l'elettrificazione.

In funzione del compito da svolgere, in un'auto sono presenti prodotti semiconduttori sviluppati con diverse tecnologie; nello specifico, dove occorre potenza sono presenti i BCD, tipicamente per l'azionamento motore (ad es. cristalli, serrature) ma anche per il segnale dell'infotainment (in-car entertainment), o per il RF del 5G o 6G, mentre il carburo di silicio c'è per il Battery Management System (BMS).

Si stima che il numero di semiconduttori vari dagli attuali circa 3000 per un'auto di medio segmento a circa 8.000 per un'auto di gamma superiore (Figura 31).

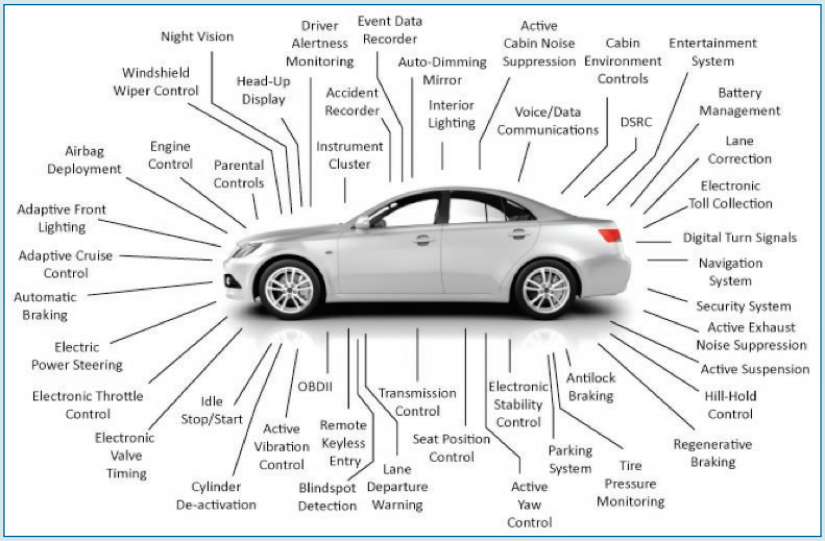


Figura 31: Sistemi elettronici in un'auto (Fonte: Clemson University Vehicular Technology Lab)

Considerando il costante aumento del numero di sistemi elettronici in un'auto e del relativo costo nel corso degli anni, si prevede che nel 2030 circa il 50% del costo di un'auto sarà dedicata ai sistemi elettronici (Figura 32).

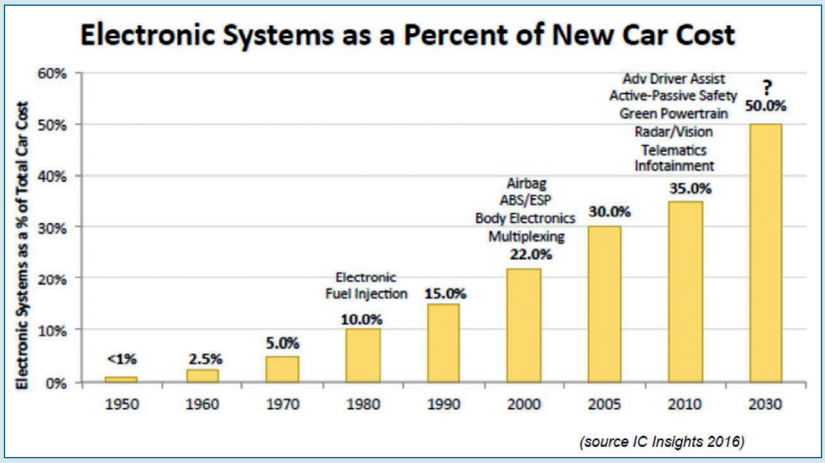


Figura 32: Impatto dei sistemi elettronici sul costo di un'auto (Fonte: IC Insight 2016)

SCENARI TECNOLOGICI

Gli scenari tecnologici per la microelettronica e semiconduttori coprono un vasto assortimento di componenti microelettronici, nonché sottosistemi e sistemi. Questo perché il percorso della microelettronica segue una traiettoria evolutiva che, oltre a proseguire lungo la direzione conosciuta come "more Moore", esplora sempre più il percorso denominato "More than Moore".
Pertanto, i prodotti a semiconduttori hanno come scopo quello di indirizzare soluzioni applicative quali ad esempio: l'audio; la connettività cablata e wireless; l'intelligenza artificiale per l'automotive – consumer – industriale; la Human machine interface (HMI, touch, gestuale, voice control); soluzioni per l'illuminazione industriale e automotive; il controllo motore industriale e automotive; il Power & Energy management industriale e automotive; soluzioni per la sicurezza automotive; la protezione industriale; la sensoristica (monitoring, elettrico, ambientale, image sensing, motion detection).
Tra i tanti scenari tecnologici che abilitano le soluzioni applicative, il presente studio si sofferma su:

Smart Power e tecnologie BCD per soluzioni più ecologiche Combinare le tecnologie di alimentazione con l'intelligenza incorporata è una sfida che prosegue da oltre venti anni, con l'obiettivo di sviluppare soluzioni di gestione dell'alimentazione e dell'energia più efficienti e compatte mediante dispositivi quali ad esempio: BCD, STi^{2}GaN, VIPower, STi^{2}Fuse

MEMS – Micro Electro-Mechanical Systems

I MEMS e MEMS ScanAR stanno diventando sempre più pervasivi, trasformando il modo in cui il mondo digitale e analogico interagiscono.

Nuovi materiali: Tecnologia GaN - Nitruro di Gallio

Il Nitruro di Gallio (GaN) offre vantaggi prestazionali tipici del Carburo di Silicio (SiC). La sua tecnologia avanzata sta emergendo sul mercato, promettendo miniaturizzazione e affidabilità per applicazioni esigenti come convertitori per data center e azionamenti industriali.

Nuovi materiali: Tecnologia SiC - Carburo di Silicio

Il Carburo di Silicio (SiC) promette elevata efficienza operativa e migliori prestazioni in applicazioni come veicoli elettrici e inverter solari. La recente disponibilità di substrati di alta qualità ha ridotto i costi, facilitando l'adozione su larga scala.

VIP Power - Vertical Intelligent Power

VIPower™ è una tecnologia che combina MOSFET verticali con sensori integrati per controllo, protezione e diagnostica in applicazioni automobilistiche, migliorando l'efficienza e sostituendo soluzioni elettromeccaniche. Ottimizza l'efficienza energetica e la gestione termica, rendendola ideale per sistemi di illuminazione, motori DC e serrature.

Sistemi di packaging dei chip: Package 3D e tecnologie di manifattura additiva e sottrattiva.

La roadmap tecnologica dei package si sviluppa insieme agli ASICs, nonché in funzione di applicazioni quali Realtà Aumentata, MEMS, SiP, SoC. Esse richiedono di considerare diversi fattori, quali le intrinseche differenze applicative o la disponibilità e integrazione di nuovi materiali.

Sistemi hardware di edge computing per l'Intelligenza Artificiale

L'Edge AI è un cambiamento di paradigma per l'IA con vantaggi rispetto all'IA nel cloud. E' importante proseguire gli investimenti in ricerca e sviluppo per implementare edge IA su microcontrollori, microprocessori e sensori intelligenti.

Pilot line "from lab to fab" per sviluppi di sensori e dispositivi

Sviluppo di clean room pubbliche in grado di realizzare dispositivi micro-nano elettronici completi, sensori, memorie e qualificare processori in Europa per prototipazione e validazione sul mercato.

Tecnologie di produzione di substrati di Silicio 300mm tipo N per l'elettronica di potenza

Processi di crescita del monocristallo per la definizione delle caratteristiche di drogaggio, resistività e contenuto di ossigeno del wafer al fine di sviluppare e produrre: substrati drogati arsenico e fosforo a bassa resistività per l'ottimizzazione delle performance di dispositivi a basso e medio voltaggio; substrati 300mm ad alta resistività cresciuti con metodologia Czochralski a basso ossigeno.

All'interno delle diverse schede viene inoltre affrontato il tema delle Tecnologie Digital e mixed-signal per nuove applicazioni Signal/Analog & RF. I progressi nelle tecnologie digitali e a mixed-signal consentono di realizzare sistemi più piccoli senza compromettere le prestazioni. Per soddisfare i requisiti di potenza e integrazione l'obiettivo è innovare le tecnologie RF, analogiche e digitali mediante: FD-SOI, PCM, RF-SOI, BiCMOS, eSTM, Space ASIC.

APPENDICE: LA STORIA DEI SEMICONDUTTORI E DI ST

Quello che oggi appare evidente e scontato non lo era affatto negli anni '50 del secolo scorso, quando i semiconduttori rappresentavano un grande punto di domanda per le nuove applicazioni e per il ritorno industriale, che questo sconosciuto mercato poteva offrire; a quei tempi, solo alcuni imprenditori ebbero la visione per coglierne la valenza ed entrare in questo nuovo settore nascente; altri furono ancora più intraprendenti, modificando radicalmente la strategia di produzione delle loro aziende, scelta che poi nel corso degli anni si è rivelata vincente.
Una storia affascinante che si può approfondire con il libro "Silicon Europe - La grande avventura della microelettronica e di un'azienda italofrancese che fa girare il mondo"[8] scritto dal giornalista e scrittore Marco Bardazzi. Questo libro esplora l'importanza dei semiconduttori e dei chip nella nostra vita quotidiana, evidenziando come questi componenti siano fondamentali per il funzionamento di una vasta gamma di dispositivi, la cui innovazione non proviene esclusivamente da fabbriche asiatiche o laboratori statunitensi. Infatti pochi sanno che in Europa, e in particolare tra Italia e Francia, esiste da decenni una vera e propria "Silicon Europe". Questa area di eccellenza industriale e tecnologica ha il suo cuore in un'azienda leader mondiale dei chip: STMicroelectronics.
Qui sotto alcuni esempi significativi:

- **Intel (Integrated Electronics Corporation)** negli anni '60 produceva solo memorie, poi quando l'italiano Federico Faggin realizzò il primo microprocessore monolitico in silicio, chiamato 4004 (Figura 33), modificò la propria strategia produttiva introducendo anche i microprocessori; ora Intel è storicamente la #1 nella top 10 dei produttori di semiconduttori.

- **Samsung** è la #2; nata in Corea nel 1938, commercializzava solo prodotti alimentari, ma poi nella seconda metà degli anni '60 cambiò radicalmente strategia

[8] *Silicon Europe, Marco Bardazzi, 2022 ISBN 9788817163842*

rivolgendo la propria capacità produttiva al campo dell'elettronica.

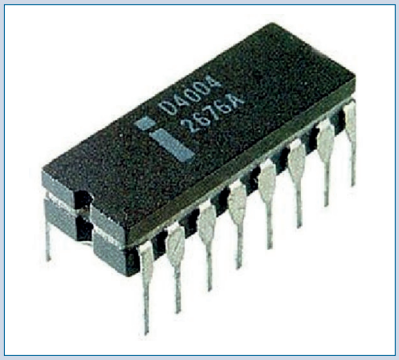


Figura 33: Microprocessore Intel 4004

• **Texas Instruments (T.I.),** nata nel 1931 come Geophysical Service Incorporated, società attiva nel settore delle ricerche petrolifere, nel 1951 si rivolse alla produzione di semiconduttori; ora T.I. si colloca tra i top 10 produttori di semiconduttori al mondo.

• **STMicroelectronics (ST)** è nata nel 1957 grazie alla visione di Adriano Olivetti e Virgilio Floriani, che insieme fondarono quella che ai tempi si chiamava SGS (Società Generale Semiconduttori) per avviare la progettazione e produzione completamente italiana di diodi e semiconduttori, staccandosi quindi completamente dalla dipendenza dalle grandi aziende americane. Quella che 67 anni fa era una industria neonata italiana, oggi è ancora presente e ben radicata in Italia, con più di 12.500 dipendenti, e a livello mondiale con circa 51.000 impiegati e un fatturato nel 2023 di oltre 17B$.

Gli investimenti nella tecnologia dei semiconduttori non sono solo importanti dal punto di vista del ritorno economico immediato, ma anche per le ricadute in termini occupazionali sul territorio locale, come si può capire dalla regola empirica del "3x3":

• sono necessari 3 mesi per progettare un sistema elettronico, 3 anni per produrre un nuovo circuito integrato ASIC (Application Specific Integrated Circuit) e 3 lustri per creare una nuova tecnologia.

La stessa regola si può analogamente applicare al tempo di vita dei dispositivi elettronici; infatti, un sistema elettronico alle volte dura per un tempo davvero breve, quanto una moda, mentre una tecnologia, una volta progettata ed entrata in produzione, rimane sul territorio ben oltre i tre lustri; ne è un esempio la piattaforma tecnologica BCD[9] (Figura 34), tutta italiana. Nata grazie al suo padre

[9] *Bipolare, CMOS e DMOS. Si veda oltre per maggiori dettagli*

fondatore Bruno Murari negli anni '80 in SGS a Cornaredo, in provincia di Milano, è oggi, dopo più di 40 anni, ancora in produzione, con un fatturato in costante crescita che le consente di mantenere lo status di asset insostituibile, non solo per ST, ma per tutta l'industria elettronica italiana ed europea.



Figura 34: Il primo BCD prodotto, L6202 (Fonte: ST)

Per avere una rappresentazione quantitativa del volume di prodotti BCD basti pensare che dalla loro nascita nel 1985 ad oggi ST ha progettato già dieci generazioni tecnologiche, e prodotto e venduto più di 40 miliardi di ASICs con tecnologia BCD, dedicati a una diversificata gamma di mercati che comprende automotive, industrial, consumer, healthcare, apparecchi diagnostici, smartphone, etc.

Come sono fatti i semiconduttori e quali sono i loro elementi costruttivi e distintivi?

La produzione di chip si può esemplificare in 3 passaggi: il design (legato all'R&S e ad alte competenze), la produzione (che include formazione wafer, processi di back-end, front-end e richiedente alti investimenti – vedasi i FAB[10]) e infine l'assemblaggio (ossia testing e packaging, ad alta intensità di manodopera e bassi margini di profitto).

La base dei semiconduttori fonda le sue radici in un elemento naturale, economico e facilmente reperibile in natura: il silicio, che è il secondo elemento più

[10] *FAB" è l'abbreviazione di "fabrication plant" ovvero "impianto di produzione" o "fabbrica di semiconduttori".*

abbondante sulla crosta terrestre (27.7% in peso dopo l'ossigeno) ed è presente, oltre che nella sabbia, in una grande varietà di sali che si trovano nel terreno e nelle rocce. La sua facile reperibilità, associata alla sua economicità, ha consentito lo sviluppo, da circa settanta anni a questa parte, di una delle più avanzate industrie tecnologiche della storia.
Il silicio è rappresentato nella tabella periodica degli elementi di Mendeleev (Figura 35) col simbolo "Si" e ha numero atomico 14, con 14 protoni ed elettroni, e gli elettroni sono distribuiti su tre orbitali, con i 4 del terzo orbitale che lasciano locazioni libere. La capacità del silicio di funzionare come conduttore o isolante dipende dal drogaggio (inserendo nelle quattro posizioni libere del 3° orbitale del silicio altrettanti elettroni provenienti da atomi di altri elementi).

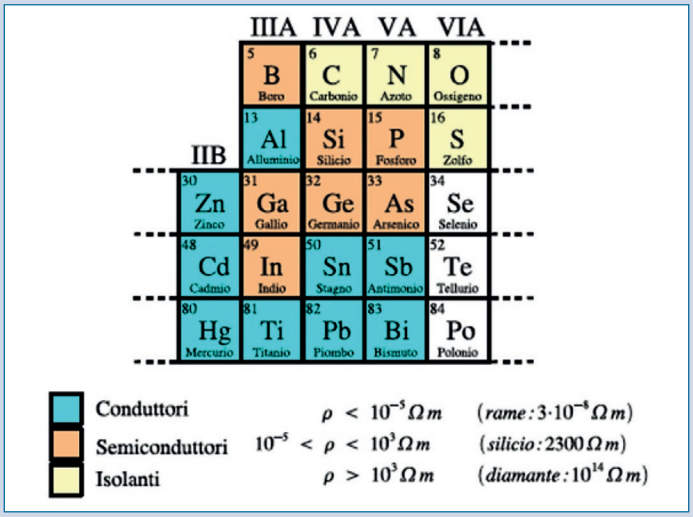


Figura 35: Estratto dalla tabella di Mendeleev

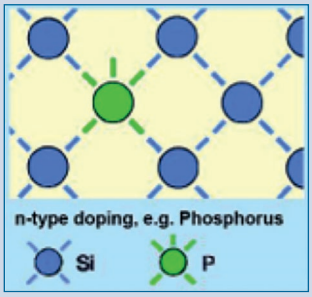


Figura 36: Silicio drogato con fosforo

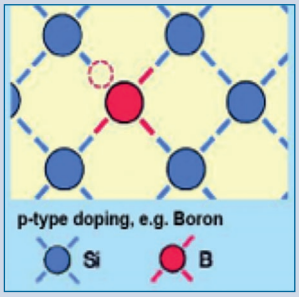


Figura 37: Silicio drogato con boro

Ad esempio, drogando il silicio con:
- fosforo (P) (Figura 36) con 5 elettroni esterni si ottiene un elettrone libero che aumenta la conducibilità del silicio.
- boro (B) (Figura 37) con 3 elettroni esterni, all'opposto, si crea una lacuna, riducendo la conducibilità del silicio.

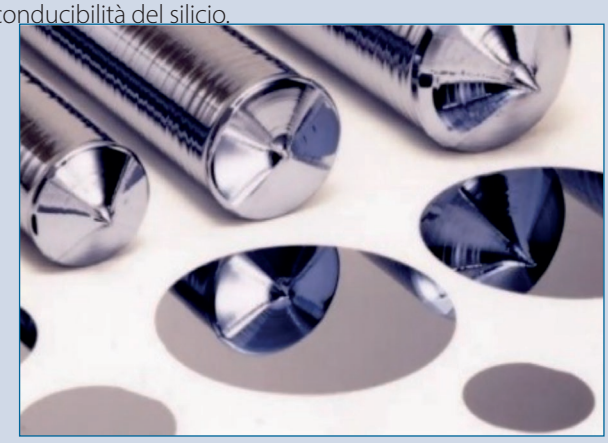


Figura 38: Wafer di puro silicio

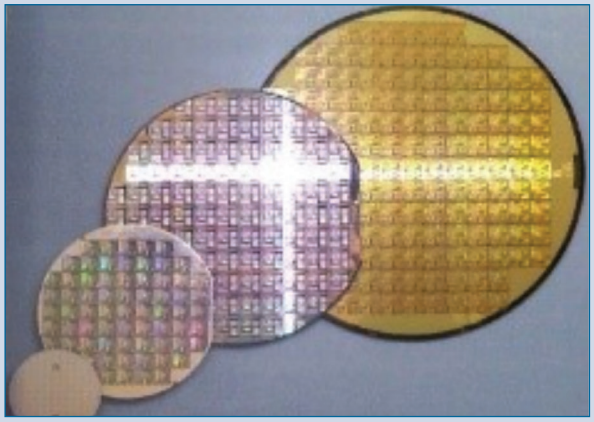


Figura 39: ASIC su diversi diametri di wafers

In sintesi, tanto maggiore sarà la quantità di P o B aggiunta, tanto maggiore o minore risulterà rispettivamente la conducibilità del silicio.
La produzione industriale dei semiconduttori inizia con la fabbricazione dei wafer di silicio puro tramite il processo di Czochralski, sviluppato negli anni '50.
Il lingotto (Figura 38) di silicio monocristallino lungo circa 2 metri e di estrema purezza viene tagliato (Figura 39) in singole fette (dette wafer) sulle quali vengono cresciuti, tramite numerose metodologie chimiche e fisiche, i singoli circuiti integrati; ne consegue che maggiore sarà il diametro del lingotto di silicio, maggiore sarà il diametro dei wafer e maggiore sarà il numero di chip integrati sulla singola fetta. Questa economia di scala nel corso degli anni è stata largamente utilizzata, passando da un diametro dei lingotti di ~50mm alle attuali produzioni con diametri di 200mm (8"), 300mm (12") e 450mm (18").

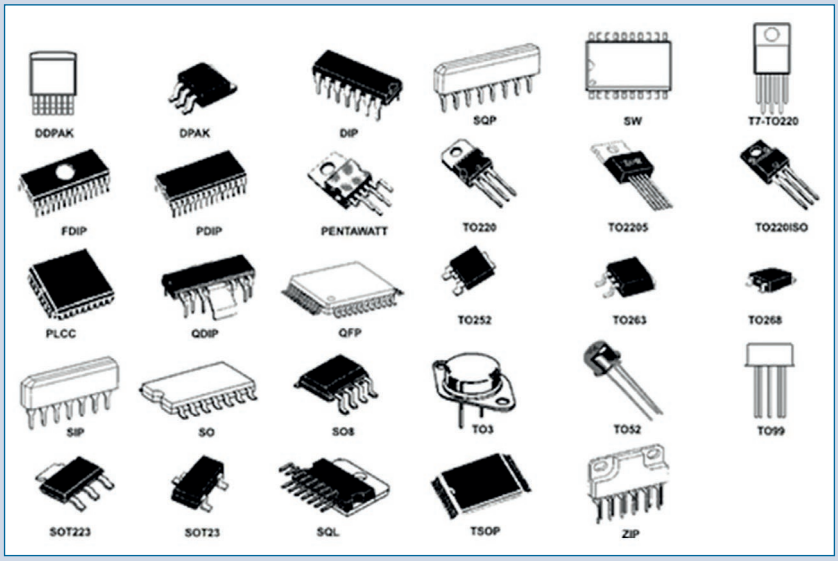


Figura 40: Diverse tipologie di package

Il passaggio da 8" (200mm) a 12" (300mm) rappresenta un x2.25 come numero di chip (a parità di area) presenti su un wafer, e una riduzione di circa il 40% del costo unitario per chip; il rovescio della medaglia consiste negli investimenti dell'ordine di miliardi di dollari necessari per la costruzione di fabbriche di produzione di massa; ciò implica che i prodotti finali debbano essere competitivi, sia per costi che per prestazioni, e quindi necessitano di accurate strategie di mercato che garantiscano il riempimento della fabbriche nel tempo e il ritorno economico dell'investimento.

Quanto sopra è necessario per "diffondere", cioè produrre il prodotto semiconduttore desiderato, che però non è ancora pronto per essere messo in vendita, poiché il chip in silicio drogato risulta molto fragile (come il vetro), quindi occorre

proteggerlo in contenitori (package) di resina dal caratteristico colore nero, le cui funzioni, oltre alla protezione, consistono nel portare all'esterno le diverse connessioni elettriche, e allo stesso tempo garantire al chip al suo interno ermeticità, buona dissipazione termica e robustezza. Come si può vedere dalla Figura 40, la forma e le dimensioni dei package sono molto diverse fra di loro dovendo rispondere alle specifiche di diverse applicazioni.

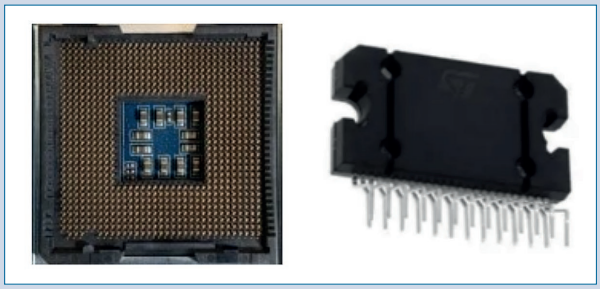


Figura 41: Package microprocessore e di potenza

A titolo esemplificativo, nella Figura 41 si confronta il package di un microprocessore con quello di un dispositivo di potenza: si nota subito la differenza in termini di numero di connessioni (pin) necessarie al microprocessore per dialogare con gli apparati a valle, rispetto alle soluzioni del package di potenza, che implementano soluzioni progettuali volte a ridurre la resistenza termica per sostenere l'elevata dissipazione del calore generato durante il funzionamento del dispositivo.
La nascita del mercato dei semiconduttori si può collocare nel 1947, grazie a tre ricercatori dei laboratori Bell Labs, Walter Brattain, John Bardeen e William Shockley, che realizzarono in forma macroscopica il primo transistor (Figura 42), chiamato così in riferimento al processo di trasferimento di cariche elettriche che si instaura nella sua struttura: il nome è composto da trans(fer) e (re)sistor. Grazie a questa realizzazione, nel 1956 i tre ricercatori furono insigniti del premio Nobel per la Fisica.



Figura 42: Copia del primo transistor

Dalla nascita del primo transistor ad oggi si è avuta una serie di scoperte e innovazioni incredibili che hanno portato non solo ad una continua miniaturizzazione dei semiconduttori, ma anche a un contemporaneo aumento delle prestazioni, portando quel primo transistor del 1947 ad arrivare alla macchina complessa racchiusa nei personal computer di oggi, strumento di uso quotidiano.

Il primo computer, chiamato ai tempi ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), nacque per scopi bellici; non disponeva dei transistor bensì di valvole termoioniche (~17.000), occupava una superficie di 180 metri quadrati, pesava 30 tonnellate e aveva una potenza installata di 150 kilowatt. ENIAC fu poi vantaggiosamente sostituito dalla tecnologia a semiconduttori, sostituzione fondamentale per ottenere un passaggio del peso da tonnellate a kilogrammi e una crescita

iperbolica delle funzioni integrate.
Anche l'Italia è stata protagonista nel settore dei computer. Infatti, Adriano Olivetti il 12 aprile 1959 presentò alla Fiera di Milano il primo calcolatore elettronico, chiamato ELEA 9003, progettato e costruito completamente in Italia sotto la guida dell'ingegner Mario Tchou (figlio dall'ambasciatore cinese in Italia); ELEA 9003 conteneva 300.000 transistor di fabbricazione totalmente italiana provenienti dalla neonata Società Generale Semiconduttori (SGS) con base ad Agrate Brianza, poi diventata STMicroelectronics. ELEA 9003 disponeva di una potenza di calcolo di circa 10.000 istruzioni al secondo, ai tempi anche superiore a quella dei concorrenti. Purtroppo, la concomitanza di alcuni eventi sfortunati, come la prematura scomparsa sia di Mario Tchou che di Adriano Olivetti subito dopo la presentazione di ELEA 9003, determinò un cambio di strategia aziendale, favorendo la produzione di macchine da scrivere a scapito dei semiconduttori, causando la fuoriuscita dell'Italia dal mercato dei computer e perdendo così l'opportunità di rimanere attori in un mercato miliardario, che dopo 67 anni è ancora presente.

Nel frattempo, la corsa alla miniaturizzazione del singolo transistor e dei successivi ASIC non si è fermata, anzi è proseguita incessante, passando dalle dimensioni iniziali di centimetri del primo transistor a valori attuali inferiori a 5 nanometri ($5 \cdot 10^{-9}$ m), che corrisponde ad un rapporto di miniaturizzazione di 1:10.000.000.

Per dare una rappresentazione più tangibile di cosa questo significhi, è sufficiente rispondere alla domanda quanti transistor (Figura 43) si possono oggi integrare sulla capocchia di uno spillo? 100 milioni.

LEGGE DI MOORE IN PRATICA Numero di transistor incorporati in un chip	
1971	**2.308**
1974	**6.098**
1982	**135.773**
1986	**273.842**
1990	**1.207.901**
1994	**3.105.900**
1998	**15.261.378**
2002	**221.000.000**
2006	**583.000.000**
2010	**806.000.000**
2014	**5.700.000.000**
2018	**21.100.000.000**
2022	**80.200.000.000**
2023	**114.000.000.000**

Figura 43: Legge di Moore in pratica (fonte: OWID)

Se i transistor, nelle loro diverse forme tecnologiche costruttive, sono i mattoni della microelettronica, i microprocessori rappresentano l'unità operativa di elaborazione dati di tutti i computer, in grado di leggere informazioni provenienti da altre unità digitali esterne ed effettuare in modo autonomo operazioni aritmetiche e logiche costituenti il programma esecutivo di tutte le funzioni necessarie a pilotare il funzionamento di qualsiasi sistema applicativo.

glossario profilo di settore

ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASSP	Application-specific standard product
ATP	Assembly, Test, and Packaging
BCD	Bipolar, CMOS and DMOS process technology
BGA	Build Grid Array
Bi-CMOS	Bipolar and CMOS process technology
CAD	Computer Aided Design
CAGR	Compound Average Growth Rate
CMOS	Complementary metal-on silicon oxide semiconductor
cMUT	Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer
CO_2	Biossido di carbonio (anidride carbonica)
DMOS	Diffused metal-on silicon oxide semiconductor
DRAM	Dynamic random access memory
DRIE	Deep Reactive Ion Etching
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme, the voluntary European
FDM	Fused Deposition Modeling
FD-SOI	Fully depleted silicon-on-insulator
FID	First Industrial Deployment
FinFET	Field Effect Transistor a "pinna"
GaN	Gallium Nitride
GST	Germanio (Ge), Antimonio (Sb) e Tellurio (Te)
IA	Intelligenza Artifiiale
IC	Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
IDM	Integrated Device Manufacturing
IP	Intellectual Property
IPCEI	Important Project for Common European Interest
IR	Infra-Red

glossario profilo di settore

ISO	International Organization for Standardization
LBS	Laser Beam Scanning
LGA	Land Grid Array
LIDAR	Light Detection and Ranging
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MCU	Microcontroller Unit (MCUs have internal flash memory and are intended to operate with a minimum amount of external support ICs. They commonly are a self-contained, system-on-chip (SoC) designs.)
MOSFET	Metal-On Silicon Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPU	Microprocessor Unit
NFC	Near Field Communication
NIR	Near Infra Red
nm	Nanometro (miliardesimo di metro)
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCM	Phase Change Memory
PFC	Perfluorinated Compounds
pMUT	Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer
RF	Radio Frequency
RF-SOI	Radio Frequency Silicon-On-Insulator
ROM	Read Only Memory
SGS	Società Generale Semiconduttori
SIA	Semiconductor Industry Association
SiC	Silicon Carbide
SiP	System In Package
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
SoC	System On Chip
STi²GaN	Intelligent integrated gallium nitride
STi²Fuse	Electronic harness protection

glossario profilo di settore

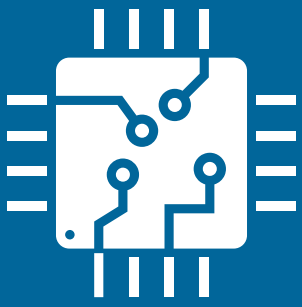
SWIR	Small Wavelenght Infra-Red
TAM	Total Available Market
T-MOS	Thermal Metal Oxide Semiconductor
ViP	Vertical Intelligent Power
VIPower	Vertically integrated power
VOC	Volatile Organic Compounds
WSTS	World Semiconductor Trade Statistics
µm	Micrometro (milionesimo di metro)

riferimenti profilo di settore

- Antonio Varas, et all. - "Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era", BCG SIA
- Link to: STMicroelectronics NV - 2023 Annual Report (Form 20-F)
- Aiuti di Stato: approvata una misura dell'Italia di 292,5 milioni di € nell'ambito del dispositivo per la ripresa e la resilienza per sostenere STMicroelectronics nella costruzione di uno stabilimento all'interno della catena del valore dei semiconduttori https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/ip_22_5970
- Link to: A Review of the 2023 Semiconductor Market and a Look to 2024 - Semiconductor Industry Association (semiconductors.org)
- Link to: IEEE Awards ST for its BCD Technology - EE Times Europe
- Link to: Crisi dei semiconduttori: cosa succede? Analisi e previsioni | CDP
- Link to: Semiconduttori e chip, l'industria mondiale che impatta la geopolitica | Il Sole 24 Ore
- Link to: https://www.imec-int.com/en/articles/entering-nanosheet-transistor-era-0
- ITRS 2.0 2015 Edition, Section 5: More Moore; ITRS 2.0 2015 Edition - IEEE Electronics Packaging Society
- M. Graef, "More Than Moore White Paper," 2021 IEEE International Roadmap for Devices and Systems Outbriefs, Santa Clara, CA, USA, 2021, pp. 1-47, doi: 10.1109/IRDS54852.2021.00013.
- Market Intelligence source: www.yolegroup.com
- Link to: Despite Short-Term Cyclical Downturn, Global Semiconductor Market's Long-Term Outlook is Strong - Semiconductor Industry Association (semiconductors.org)
- Link to: The Semiconductor Market Will Recover in 2024 With an Annual Growth Rate of 20%, Says IDC
- The World Semiconductor Trade Statistics (WSTS) has recently published its latest forecast for the semiconductor market, generated in November 2023. Link to: WSTS_nr-2023_11.pdf
- WSTS Forecast 03/2024 Update based on: WSTS Semiconductor Market Forecast Fall 2023
- Aiuti di Stato: approvata una misura dell'Italia di 292,5 milioni di € nell'ambito del dispositivo per la ripresa e la resilienza per sostenere STMicroelectronics nella costruzione di uno stabilimento all'interno della catena del valore dei semiconduttori, link to: Aiuti di Stato (europa.eu)
- L'INDUSTRIA GLOBALE DEI SEMICONDUTTORI E IL RUOLO DELL'ITALIA N°3 dicembre 2023, Maria Rita Pierleoni note Tematiche x pag dettaglio - MEF Dipartimento del Tesoro
- Link to: Addressing the Talent Gap | Accenture

riferimenti profilo di settore

- Link to: STMicroelectronics Italia certificata Top Employer Italia 2024 - ST News
- Link to: Urso annuncia un maxi investimento da 3,2 miliardi di Silicon Box in Italia (mimit.gov.it)
- Link to: STMicroelectronics Sustainability report 2024
- Link to: STMicroelectronics Sustainability report 2024 - Sustainability charter
- 2023 Statutory Annual Report including IFRS Financial Statements Link to : https://investors.st.com/static-files/205fee1b-9d01-487d-be4f-6d7efbf6d77b
- Link to: RESEARCH AND INNOVATION - The 2023 EU Industrial R&D Investment Scoreboard (europa.eu)
- EU Industrial R&D Investment Scoreboard (World 2500) – Link to: Data | IRI (europa.eu)
- Link to: IPCEI Microelettronica 1 (mimit.gov.it)
- Link to: IPCEI Microelettronica 2 (ME/CT) (mimit.gov.it)
- Link to: Regolamento sui chip - Commissione europea (europa.eu)
- Link to: Legge europea sui chip: Sicurezza dell'approvvigionamento e resilienza | Plasmare il futuro digitale dell'Europa
- Link to: Legge europea sui chip: Monitoraggio e risposta alle crisi | Plasmare il futuro digitale dell'Europa
- American-Semiconductor-Research-Report-FINAL1.pdf (semiconductors.org)
- European Chips Act: Factsheet link to: IT: Legge Europea Sui Semiconduttori (.pdf)
- Link to: News detail · Chips Ju (europa.eu)
- Fariselli, Patrizia (a cura di) (2020) La Cina nel mercato globale. Bologna: Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Lingue, Letterature e Culture Moderne, p. 428. ISBN 9788854970229, DOI 10.6092/unibo/amsacta/6431 Il volume è disponibile alla seguente URL http://amsacta.unibo.it/6431/
- Trend Compendium 2050: Six megatrends will shape the next decades, Link to: Roland Berger Trend Compendium 2050 | Roland Berger
- Status of the Compound Semiconductor Industry 2024 by Yole Intelligence — JAN 2024 link to: Yole Group - Follow the latest trend news in the Semiconductor Industry
- Link to: McKinsey Technology Trends Outlook 2023 | McKinsey
- Silicon Europe, Marco Bardazzi, 2022 ISBN 9788817163842
- Link to https://www.elettronicaemercati.it/litalia-dei-chip-una-panoramica-dellindustria-italiana-dei-semiconduttori/



SETTORE

MICROELETTRONICA e SEMICONDUTTORI

SCENARI TECNOLOGICI

indice - scenari tecnologici

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO 87

1 - TECNOLOGIE BCD, INTEGRAZIONE DI FUNZIONI ANALOGICHE, DIGITALI E SMART POWER 89

2 - MEMS - MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS 101

3 - NUOVI MATERIALI: TECNOLOGIA GAN - NITRURO DI GALLIO 117

4 - NUOVI MATERIALI: TECNOLOGIA SIC - CARBURO DI SILICIO 131

5 - VIP POWER - VERTICAL INTELLIGENT POWER 149

6 - SISTEMI DI PACKAGING DEI CHIP: PACKAGE 3D 163

7 - SISTEMI DI PACKAGING DEI CHIP: TECNOLOGIE DI MANIFATTURA ADDITIVA E SOTTRATTIVA 179

8 - SISTEMI HARDWARE DI EDGE COMPUTING PER L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE 195

9 - PILOT LINE "FROM LAB TO FAB" PER SVILUPPI DI SENSORI E DISPOSITIVI 223

10 - TECNOLOGIE DI PRODUZIONE DI SUBSTRATI DI SILICIO 300 MM TIPO N PER L'ELETTRONICA DI POTENZA 231

GLOSSARIO 236

RIFERIMENTI 239

MICROELETTRONICA e SEMICONDUTTORI

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

STMICROELECTRONICS	**Donato Di Donato**
POLITECNICO MILANO	**Alberto Corigliano**

ESPERTI

STMICROELECTRONICS	**Bruno Murari, Lisa Trollo Mirko Guarnera, Laura Castoldi, Luigi Innacolo, Nicolò Cascone, Mario Scurati, Marco Del Sarto, Amedeo Maierna**
MEMC ELECTRONIC MATERIALS	**Luca Moiraghi, Michael Raffeiner**
FONDAZIONE BRUNO KESSLER	**Lorenza Ferrario**

TECNOLOGIE BCD, INTEGRAZIONE DI FUNZIONI ANALOGICHE, DIGITALI E SMART POWER

Se i microprocessori sono dispositivi fondamentali per la gestione e generazione dei comandi necessari al funzionamento di qualsiasi applicazione, fondamentali sono anche i componenti che interpretano questi comandi e li trasformano in segnali dotati dei necessari requisiti di tensione e corrente atti a pilotare il carico finale ad essi associato. Tecnologie che ben rispondono a queste esigenze sono le piattaforme miste BCD.

BCD è un acronimo composto dalle parole Bipolari – CMOS – DMOS, e rappresenta una tecnologia mista che integra queste tre diverse tipologie di componenti in un singolo chip; più specificatamente, i Bipolari svolgono precise funzioni analogiche, CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) effettua operazioni logiche di digital processing, e DMOS (Double Diffused Metal Oxide Semiconductor) serve per la potenza e l'alta tensione. I BCD sono quindi in grado di pilotare carichi esterni, come si può vedere in una sezione trasversale nella Figura 1: BCD schematic cross section Figura 1 e in una vista dall'alto nella Figura 2.

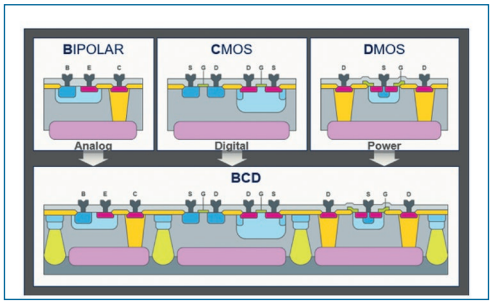


Figura 1: BCD schematic cross section

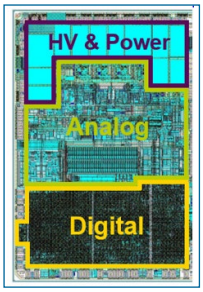


Figura 2: BCD product top view

Motivazioni per lo sviluppo

Lo stato dell'arte della piattaforma tecnologica BCD in Italia oggi utilizza litografie di 90 nm su wafer in produzione a 300mm nell'impianto produttivo di recente costruzione di Agrate Brianza.
Nel corso degli anni, le tecnologie BCD si sono costantemente migliorate fornendo soluzioni sempre più miniaturizzate insieme a un aumento della potenza disponibile, in funzione delle diverse esigenze applicative.
Una combinazione tecnologica che porta con sé numerosi vantaggi: maggiore affidabilità, ridotta interferenza elettromagnetica e minor superficie del chip.
È grazie a questa modularità tecnologica che i prodotti in BCD sono idonei per soddisfare le specifiche di diversi comparti di mercato con condizioni operative di lavoro molto diverse, come automotive, industrial, healthcare, consumer e peripherals.
La differenziazione di specifiche della tecnologia BCD è stata una chiave di volta per il successo di questi componenti, perché ha consentito non solo di espandere il portafoglio prodotto in diversi settori, ma anche di assorbire le fluttuazioni dei diversi segmenti di mercato, a volte molto veloci, come quello del settore dei computer, altre volte più lente, come nell'automotive.
Grazie a questa differenziazione, i prodotti BCD si collocano nella famiglia dei prodotti "More than Moore", in cui il progresso tecnologico rappresentato (Figura 3) dipende dalla diversificazione e non solo dal nodo tecnologico, com'è invece nel caso delle tecnologie digitali "More Moore".

Ridurre le dimensioni dei chip e magari aumentarne anche la potenza è una sfida di non poco conto, anche perché la continua miniaturizzazione porta con sé problematiche nuove. Nel caso dei BCD, queste problematiche hanno trovato una risposta efficace in una tecnologica proprietaria di ST, il FD-SOI (Fully Depleted Silicon-On-Insulator) (Figura 4): i Transistor vengono realizzati con un processo

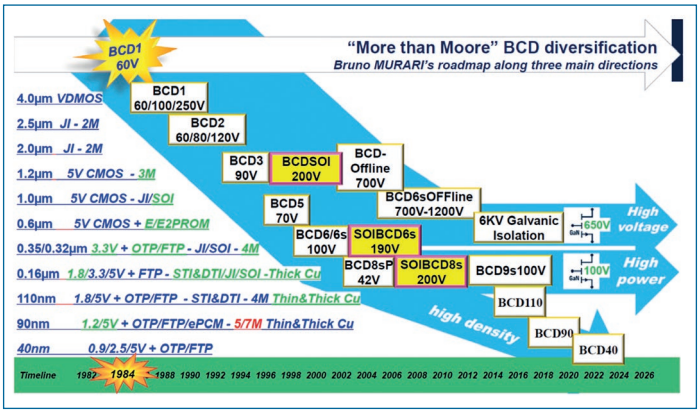


Figura 3: More than Moore" BCD diversification, Bruno MURARI's roadmap along three main directions (Fonte: STMicroelectronics)

1/10

planare su un substrato di silicio ultrasottile appoggiato su un isolante (Silicon-On-Insulator) che permette di sviluppare un'architettura a transistor completamente esaurita (Fully Depleted), in quanto non c'è bisogno di drogare il canale.

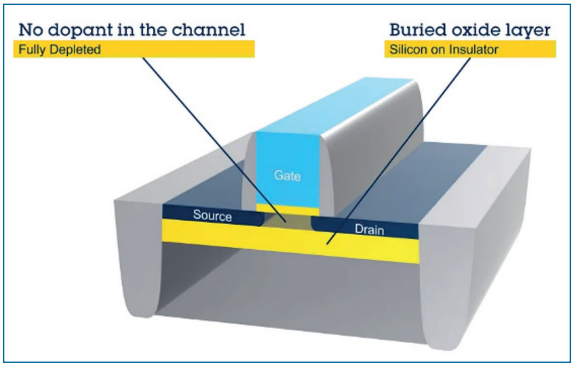


Figura 4: FD-SOI

Questo ha permesso la realizzazione di dispositivi con migliori caratteristiche elettrostatiche (minor capacità parassite, minori leakage currents) e di ridurre le

geometrie dei transistor rispetto alla tecnologia tradizionale. Ne risulta quindi una miglior performance di dispositivi innovativi nel settore automotive, dell'internet delle cose (IoT), delle applicazioni a ultrasuoni e del sempre più sfidante settore dello spazio (infatti FD-SOI esibisce un'elevata immunità al latch-up e bit flip causati dalle radiazioni).

Le famiglie di BCD (Figura 5) si possono suddividere in Alta Tensione (6kV), FD-SOI e Advanced BCD (che vedono una costante riduzione delle dimensioni litografiche):

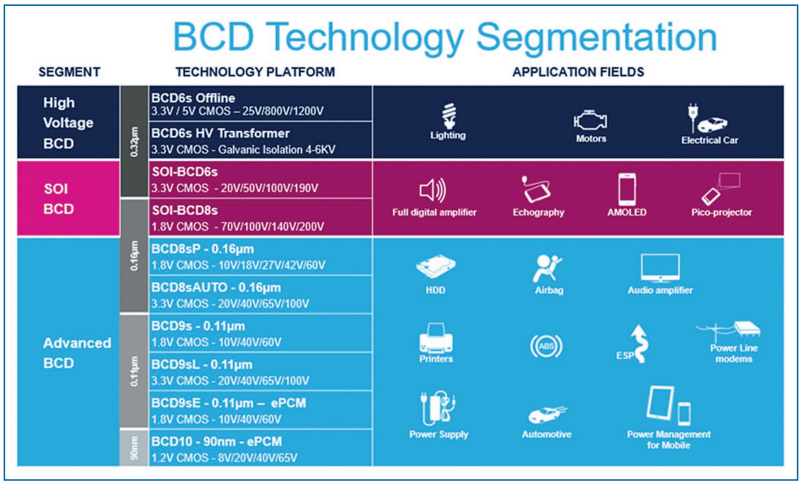


Figura 5: BCD process families and applications field

- Alta Tensione (800V – isolamento galvanico fino a 6kV) tipicamente utilizzate in applicazioni industriali, illuminazione e automobili elettriche;
- Substrato SOI (20V – 200V) per soddisfare i requisiti di applicazioni particolari, quali ad esempio l'ecografia a ultrasuoni o i pico-proiettori;
- Avanzati (8V – 100V) usati in una grande varietà di applicazioni nel campo automotive e consumer;
- High Voltage CMOS (<40V) per realizzare interfacce sensori e prodotti analogici avanzati.

Recentemente, ai vari blocchi costituenti i BCD sopra descritti si sono aggiunte le memorie a cambiamento di fase denominate PCM (Phase Change Memory), facilitando la transizione dal controllo analogico al controllo digitale per migliorare le applicazioni di conversione di potenza e di controllo del motore.
Le memorie PCM risolvono anche le sfide dell'integrazione di memorie non volatili (eNVM - embedded Non-Volatile Memory) in processi di CMOS, nonché per l'accesso in tempo reale a eNVM di MCUs (ad esempio integrate nella famiglia di MCU Stellar, discusse nel profilo di settore del presente studio).
Il meccanismo fondamentale per la PCM è stato inventato negli anni '60 da Stanford Robert Ovshinsky, la licenza per i brevetti risultanti da quell'approccio pionieristico è detenuta da ST.
Il principio di funzionamento delle PCM si basa sulle proprietà di alcuni composti ternari (noti come calcogenuri, composti da germanio, antimonio, e tellurio - GST) di cambiare fase da cristallina ad amorfa, e viceversa, in modo reversibile e controllato per mezzo di una corrente che, riscaldando in modo opportuno il GST, induce il cambiamento di fase (Figura 6). Le due differenti fasi hanno la caratteristica di avere una bassa resistenza elettrica per la fase cristallina (1 logico) e un'elevata resistenza elettrica per quella amorfa (0 logico), condizione base per la realizzazione di una memoria logica.

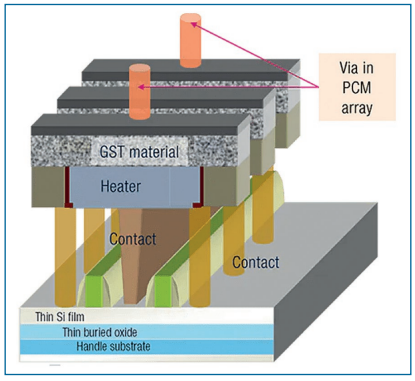


Figura 6: Sezione trasversale di una cella ePCM integrate nella tecnologia a FD-SOI in cui si vede lo "heater" che fa commutare tra stato cristallino ed amorfo

Il vantaggio delle memorie PCM è la possibilità di riscrivere il contenuto digitale molte volte, contrariamente ad altre memorie tipo ROM (Read Only Memory) e quindi introducendo per l'utilizzatore finale la possibilità di modificare il contenuto della PCM senza dover cambiare il dispositivo o staccarlo dalla board applicativa.
L'Italia, per mantenere una posizione strategica nel settore dell'integrazione di potenza verso gli altri concorrenti (Texas Instrument e Freescale negli USA, Infineon e NXP in Europa, Renesas e Toshiba in Giappone, TSMC a Taiwan), deve continuare ad avanzare costantemente nella tecnologia e nei prodotti per consolidare l'attuale posizione e soddisfare nuove richieste di mercato.
Un esempio è l'evoluzione tecnologica per cui dagli attuali 40nm delle memorie eNVM di ST si passerà a un processo avanzato basato sulla tecnologia FD-SOI a 18 nm (Figura 7) con ePCM (embedded PCM), sviluppato congiuntamente da ST e Samsung Foundry per supportare dispositivi di elaborazione embedded di nuova generazione, con i notevoli miglioramenti che questa tecnologia comporta:

- Miglioramento di oltre il 50% del rapporto prestazioni/potenza;
- Aumento di 2,5 volte della densità della memoria NVM (Non-Volatile Memory), con possibilità di realizzare memorie on-chip di maggiori dimensioni;
- Densità digitale tre volte superiore per l'integrazione di periferiche digitali, come acceleratori grafici, sistemi di Intelligenza Artificiale (IA), funzionalità di sicurezza e protezione all'avanguardia;
- Miglioramento di 3 dB nei valori di rumore, per prestazioni RF superiori nei microcontrollori wireless.



Figura 7: 18nm FD-SOI a 18nm con ePCM

L'impatto è a vantaggio anche degli MCU, in quanto permetterà agli sviluppatori di realizzare una nuova classe di microcontrollori wireless ad alte prestazioni e bassa potenza che integrerà il core ARM® Cortex®-M più avanzato. Inoltre,

l'ampiezza di memoria integrabile (eNVM) supporterà le crescenti esigenze di elaborazione dell'Edge AI e degli aggiornamenti firmware via etere OTA (vedasi capitolo specifico su AI), e permetterà di implementare funzionalità di sicurezza avanzate. Questa tecnologia consentirà anche di fare progressi nell'efficienza energetica dei dispositivi a potenza ultra-bassa.
I BCD hanno un ruolo tecnologico strategico per supportare brillantemente i mercati più esigenti, inclusi quelli automobilistico, aerospaziale e alcuni segmenti del mercato industriale.

Stato dell'arte

Il nome e la tecnologia BCD furono introdotti da ST a metà degli anni '80, in anticipo di qualche anno sulla concorrenza. Ciò ha permesso di realizzare e consolidare un primato nel campo (Figura 8), tuttora presente con la generazione di molte piattaforme evolutesi in litografia, capacità di sostenere tensione e varietà di componenti integrati.



Figura 8: Milestones: Multiple Silicon Technologies on a Chip, 1985. La targa rappresenta la prestigiosa milestone del IEEE (una sorta di Nobel per le invenzioni scientifiche), che testimonia il valore della ricerca e dell'innovazione che ha condotto negli anni Ottanta all'invenzione del BCD. Un riconoscimento assegnato solo alle innovazioni che generano un impatto significativo, orgoglio della ricerca italiana e dell'allora SGS (oggi STMicroelectronics).

Si stima che l'80% di tutte le innovazioni nell'industria automobilistica oggi siano abilitate direttamente o indirettamente dall'elettronica. Con la funzionalità dei veicoli che migliora a ogni nuovo modello, ciò significa un aumento continuo del contenuto di semiconduttori per auto.
I prodotti Smart Driving di ST e le soluzioni automobilistiche rendono la guida più sicura, più ecologica e più connessa attraverso la combinazione di diverse tecnologie implementate per un'ampia gamma di applicazioni automobilistiche, dal Powertrain per ICE (Internal Combustion Engine), agli chassis e sicurezza, dalle carrozzeria e comfort alle telematica e infotainment, spianando la strada verso la nuova era dell'elettrificazione delle auto, con Sistemi Avanzati di Assistenza alla Guida (ADAS) che si basano, ad esempio, su tecnologie FD-SOI su nodo tecnologico da 28 nm (si veda scenario di settore) .
Non solo l'automotive, ma tutto il settore industriale sta subendo una significativa trasformazione nota come "Next Automation Age", caratterizzata da una spinta verso maggiore sicurezza, intelligenza ed efficienza. Questo cambiamento è supportato dai progressi nelle tecnologie dei semiconduttori composti, quali SiC e GaN, che offrono densità di potenza ed efficienza superiori rispetto al silicio tradizionale.
La nuova era dell'automazione integra tecnologie quali sensori, connettività, calcolo avanzato e attuatori intelligenti, portando alla proliferazione di sistemi cibernetico-fisici. Ciò include l'integrazione di Machine Learning (ML) e IA, avanzando oltre l'IoT convenzionale verso il cosiddetto Next Automation Age (legato al paradigma dell'Industria 4.0/5.0). Ciò include il passaggio dalla manutenzione preventiva a quella predittiva, e l'uso crescente di robot e cobot.
Nel campo medicale si registra una tendenza verso il monitoraggio personalizzato e la possibilità di accedere ai servizi medici a distanza; ciò si combina con la trasformazione delle città in Smart Cities o con l'Agrifood-tech, in cui l'uso di sensori intelligenti e nodi IoT è in costante aumento per migliorare la gestione delle risorse e la logistica, inclusi l'uso di veicoli autonomi e droni.
Nella Figura 9 si vede la distribuzione della domanda di BCD rispetto al mercato finale nel periodo 2020-2026. L'industria elettronica gioca un ruolo cruciale nel

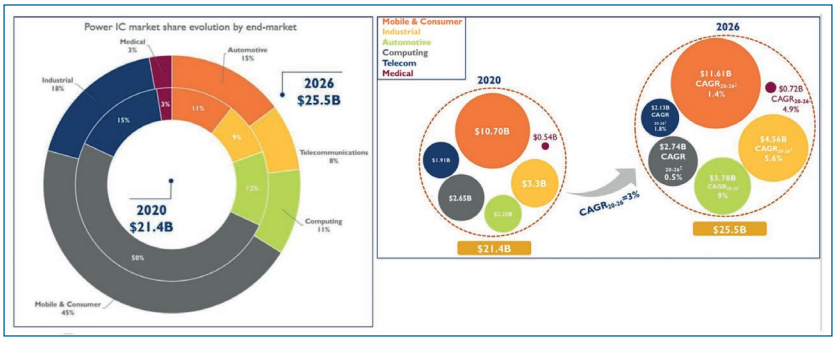


Figura 9: Il mercato automotive e industriale sono quelli a più rapida crescita per i BCD (Fonte Yole SystemPlus 2023)

raggiungere gli obbiettivi europei di sostenibilità, a partire dalla riduzione del consumo energetico ad opera di tecnologie quali BCD e Smart Power (ovvero con NVM). Basti pensare, come riportato dallo studio "CLIMATE CHANGE 2023" dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), che nel 2019 circa il 79% delle emissioni globali di gas serra proveniva complessivamente dai settori dell'energia, dell'industria, dei trasporti e dell'edilizia, e il 22% dal settore agricolo e forestale (AFOLU - Agriculture, Forestry and Other Land Use). I Power IC possono aiutare a ridurre questi consumi. La strada è lunga, poiché i miglioramenti energetici sono ancora inferiori agli aumenti delle emissioni dovuti all'incremento delle attività globali in industria, fornitura di energia, trasporti, agricoltura ed edilizia.

In Figura 10 si vede il mercato degli IC di potenza, in cui il contributo tecnologico dei BCD è fondamentale poiché consentono di realizzare funzioni logiche, analogiche e di potenza sullo stesso chip per convertire, controllare, monitorare o distribuire l'energia.

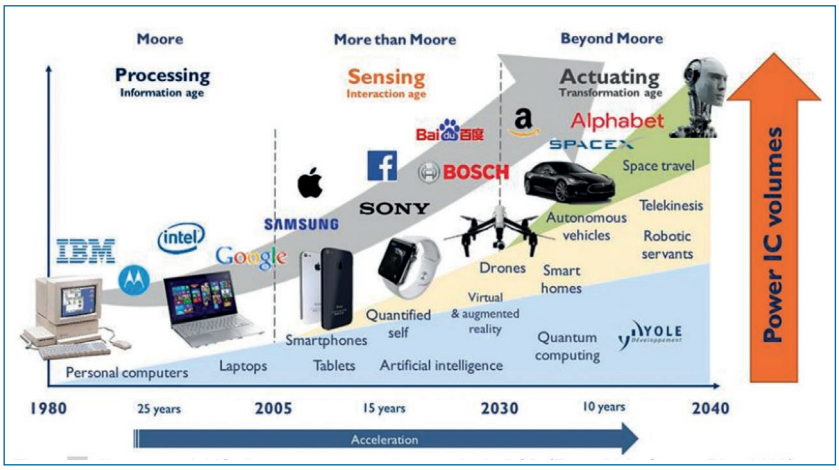


Figura 10: Il mercato dei IC di potenza legato alla tecnologia BCD (Fonte Yole SystemPlus 2023)

L'Italia gioca un ruolo rilevante con una solida attività di sviluppo di nuove tecnologie, come le NVM a cambiamento di fase, quali le PCM, che hanno visto la commercializzazione del primo dispositivo prodotto per la prima volta in Italia e la cui richiesta sul mercato è in continua espansione, come si rileva dalla Figura 11 sull'analisi di mercato "Emerging Non-Volatile Memory 2024" di Yole Group.

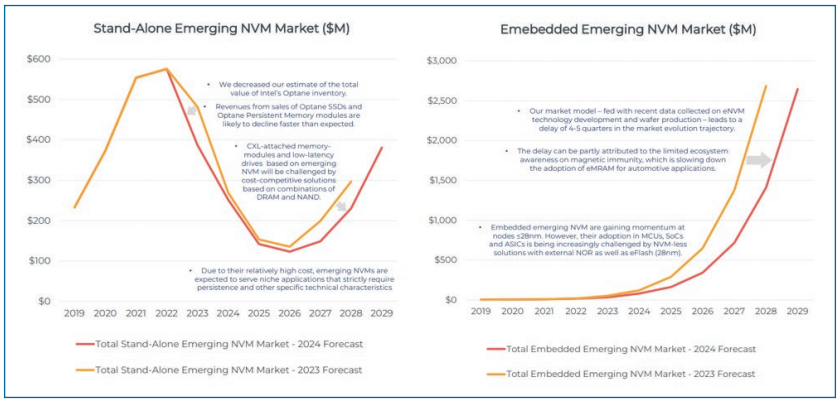


Figura 11: Confronto 2024 VS. 2023 e confronto tra stand-alone NVM (vedasi PCM) vs eNVM (vedasi ePCM) (Fonte: Yole)

Risorse economiche necessarie

Aumentare la capacità produttiva e concentrare R&D in questo ambito richiede significativi investimenti, alcuni dei quali già in corso, come l'investimento di 2 miliardi di dollari per costruire uno stabilimento destinato a produrre – e sarebbe la prima volta per il nostro mercato – wafer in silicio da 300 millimetri ad Agrate Brianza, per spingersi verso la produzione con nodi di processo della categoria 40÷65 nm e che a regime sarà in grado di produrre 8.000 wafer alla settimana per chip di potenza nonché analogici, *a segnale misto e RF*.

In termini tecnologici, **a livello europeo**, un investimento totale di circa 180 milioni di euro che per il tramite del progetto R3-POWERUP ha visto l'impegno di un consorzio di attori europei impegnati nello sviluppare una nuova generazione di impianti pilota per la tecnologia Smart Power su wafer da 300mm, per permettere all'industria europea di semiconduttori di diventare un punto di riferimento mondiale per soluzioni innovative e competitive in risposta a sfide sociali critiche, come il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni di CO_2. La strategia del progetto si basa su diversi punti chiave, tra cui la linea pilota che permetterà la realizzazione di processi Smart Power sub-100nm, partendo dal processo BCD10 a 90nm, sfruttando le apparecchiature avanzate disponibili solo per wafer da 300mm.

MEMS - MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS

Se i BCD abilitano lo *Smart Power*, con i MEMS entriamo nel campo degli *Smart Things*, ovvero un mondo fatto di sensori e attuatori. Sono questi i dispositivi che misurano l'accelerazione (lineare e angolare), la pressione, la temperatura, l'umidità, le onde sonore, etc. È grazie a questi dispositivi (Figura 12) IMU (Inertial Measurement Unit) che ad esempio i nostri cellulari girano le immagini sul nostro schermo e contano i passi, o permettono all'airbag delle nostre automobili di azionarsi da solo a seguito di un incidente (Figura 13).

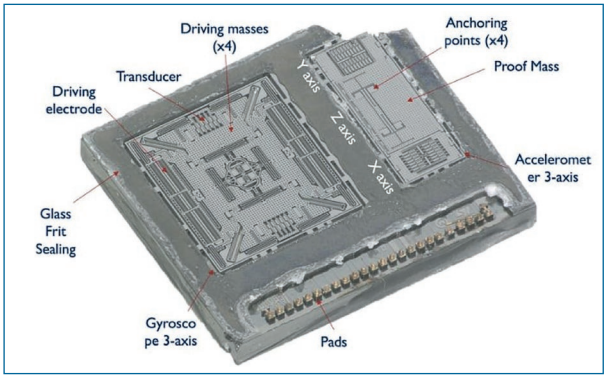


Figura 12: ST MEMS die opening optical view
(Fonte: Mobile Inertial Sensors Comparison 2021, System Plus Consulting)

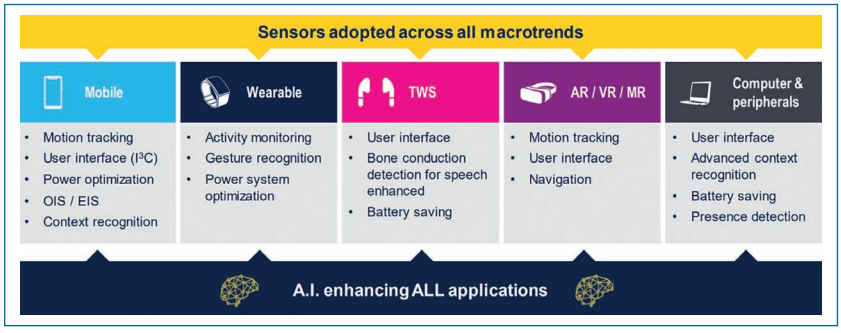


Figura 13: ST MEMS die opening optical view
(Fonte: Mobile Inertial Sensors Comparison 2021, System Plus Consulting)

I MEMS sono strutturalmente e tecnologicamente diversi dalle altre tecnologie quali BCD, SiC o GaN, poiché si basano su un componente micromeccanico composto da una membrana flottante, spessa pochi millesimi di millimetro e ancorata con molle di silicio alla parte fissa del dispositivo. La membrana realizzata sfrutta una proprietà intrinseca del silicio, l'elasticità.
Quando la membrana è sottoposta a un fenomeno fisico esterno (Figura 14) che può essere un'accelerazione, una velocità angolare, pressione, umidità, etc., si deforma e modifica alcuni parametri elettrici, come ad esempio la capacità, che opportunamente misurata e interpretata da circuiti associati rende possibile la trasduzione del segnale fisico esterno in un segnale elettrico.

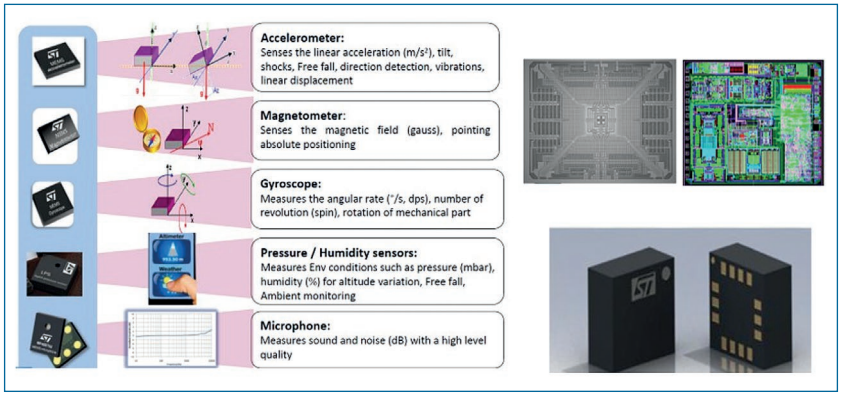


Figura 14: MEMS different sensing types enabled by Micron-Sized Transducer realized through a specific process called Micro-Machining, by Advanced Analog Chip with embedded smart functionalities and by dedicated package and calibration features.

Gli attuatori e sensori MEMS comprendono:

- Attuatori termici e piezoelettrici per la stampa 2D e 3D nelle applicazioni del mercato consumer, applicazioni commerciali e industriali;
- Attuatori piezoelettrici per applicazioni come l'autofocus delle fotocamere degli smartphone e altoparlanti MEMS;

• Attuatori piezoelettrici, elettrostatici ed elettromagnetici per le applicazioni emergenti di VR/AR, come la nostra tecnologia MEMS ScanAR, le telecamere di profondità a bassissimo consumo e i sistemi LIDAR per la guida intelligente assistita;
• Micromirror MEMS, micro-specchi tipicamente utilizzati nei sistemi di scansione a fascio laser (LBS - Laser Beam Scanning) per proiettare immagini visibili o modelli a infrarossi (Figura 15). La deflessione del fascio viene generalmente eseguita utilizzando una combinazione di due specchi che ruotano su assi perpendicolari;



Figura 15: Accuvein av500 vein visualization; (b) North's smart glasses; Intel's 2nd generation L515 LiDAR camera; ST's LaSAR alliance of technology developers, supplier and manufacturers Aco-system

• Accelerometri per il controllo elettronico della stabilità e attivazione dell'airbag, l'antimanomissione di scatole di misurazione remota, calcolo di inclinazione di un oggetto, per attivare l'airbag quando avviene un impatto violento e incidente, etc.;
• Unità di misura inerziale o IMU (una combinazione di accelerometro MEMS e giroscopio MEMS) per misurare imbardata, beccheggio e rollio per la guida autonoma, la navigazione nei tunnel o in città, la misura di tutte le velocità angolari dell'oggetto in cui è montato;
• Magnetometro per determinare la rotta nella navigazione;
• Sensore di pressione per il monitoraggio della pressione degli pneumatici, per la geolocalizzazione all'interno dei palazzi (Figura 16), per il monitoraggio della pressione dei tubi, del flusso d'aria della presa d'aria, etc.;

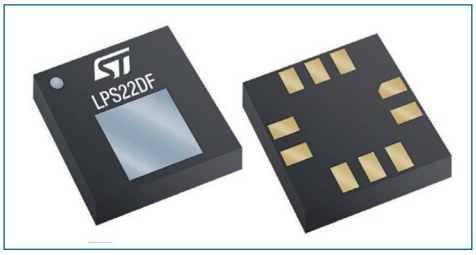


Figura 16: LPS22DF pressure sensors are opening the door to new use cases (Fonte: STMicroelectronics)

- Sensore carburante quale indicatore del livello carburante;
- Microfono MEMS per la comunicazione e la cancellazione del rumore;
- Sensore di temperatura per il controllo automatico della climatizzazione e il monitoraggio della temperatura del motore.

A livello nazionale, STMicroelectronics ha venduto oltre 23 miliardi di unità negli ultimi 20 anni ed è tra i primi 4 top player nel mercato dei MEMS con una continuata crescita anche nel periodo 2022 su 2021, come mostrato in Figura 17.

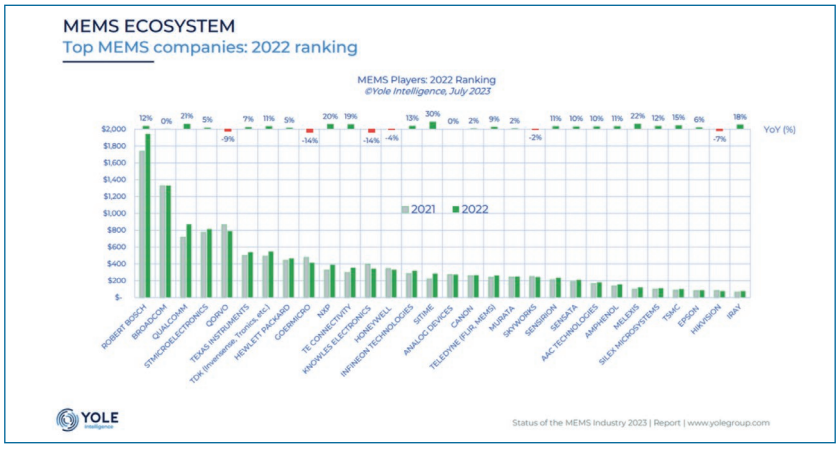


Figura 17: Top MEMS producers (Fonte: Yole Intelligence 2023)

Motivazione per lo sviluppo

Anche la tecnologia dei MEMS, grazie a una differenziazione di prodotto, gode di una continuità di crescita. Come si vede nelle proiezioni di Yole (Figura 18), si prevede complessivamente un CAGR 2022-2028 del 5%, passando da circa 14.5B$ a 20B$.

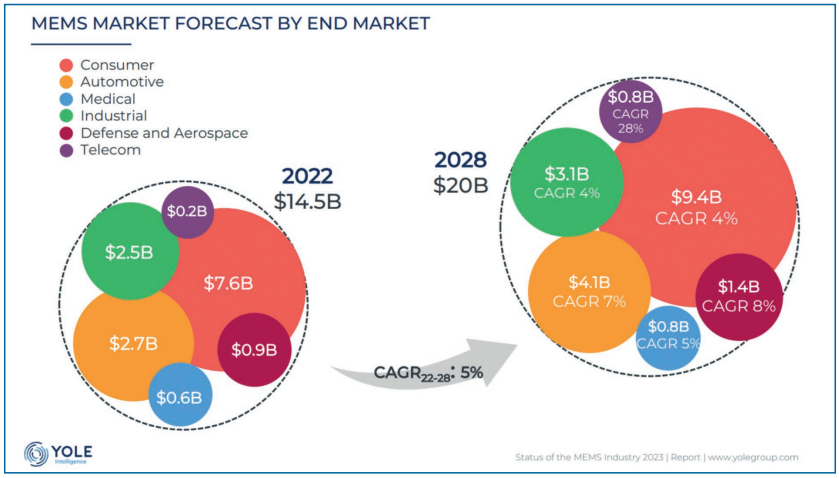


Figura 18: MEMS CAGR outlook (Fonte: Yole Intelligence 2023)

I settori che ne beneficeranno maggiormente sono consumer, automotive, industriale e medicale. Invece, in termini di dispositivi, lo spaccato di crescita dettagliato in Figura 19 stima per i prossimi anni un incremento significativo per gli RF MEMS.

La richiesta di miniaturizzazione associata all'aumento di potenze richieste per lo stesso ASIC ha introdotto problematiche di affidabilità che in parte si risolvono con soluzioni ingegneristiche, come l'aumento dell'efficienza del prodotto, ma che trovano un nuovo impulso nello sviluppo di nuove tecnologie: ad esempio l'arseniuro di gallio (GaN) e il carburo di silicio (SiC), le cui intrinseche e migliori proprietà rispetto a quelle del silicio permettono una più semplice gestione delle problematiche associate ad applicazioni di potenza.

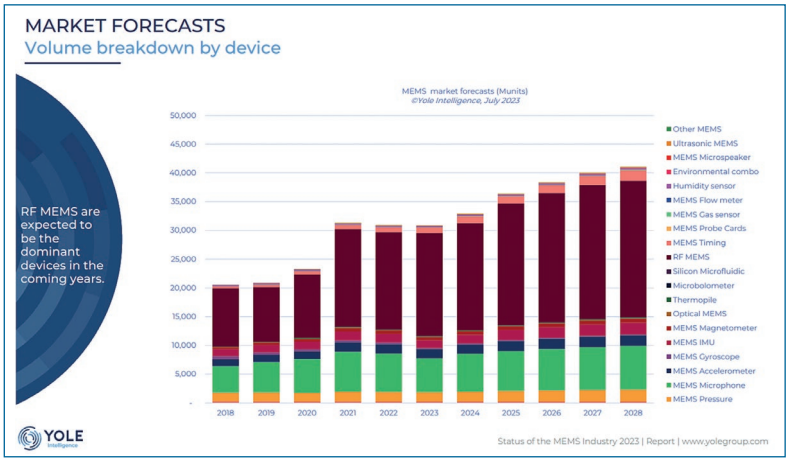


Figura 19: Volume breakdown by device (Fonte: Yole Intelligence 2023)

I dispositivi MEMS, che rappresentano un avanzamento delle tecnologie "More than Moore", presentano sfide nell'integrazione e nell'aggiunta di nuove funzionalità. La produzione di MEMS differisce da quella di altri tipi di circuiti integrati, come quelli logici, di memoria o analogici, poiché spesso richiede processi di fabbricazione personalizzati per il prodotto specifico. Questo può portare a costi di sviluppo più alti e tempi di realizzazione più lunghi, ma offre anche la possibilità di creare prodotti distintivi e difficilmente replicabili. Sebbene la produzione di MEMS sia diventata più matura, con tecnologie come il DRIE, l'incisione sacrificale e l'unione di wafer multipli, i livelli di rendimento non sono ancora paragonabili a quelli di altri circuiti integrati. Negli ultimi dieci anni l'industria ha puntato alla riduzione dei costi, al miglioramento dei rendimenti e all'integrazione avanzata, mentre l'evoluzione dei MEMS è stata più graduale. Cambiamenti significativi nella produzione potranno avvenire solo con l'evoluzione delle tecnologie di lavorazione, come l'integrazione dei sensori con le unità logiche o l'uso di *stepper* e tecniche di litografia senza maschera per incrementare i rendimenti.

L'industria non modificherà processi e attrezzature a meno che non sia strettamente necessario. Tecnologie di incollaggio affermate e vantaggiose dal punto di vista economico, quali l'incollaggio con adesivi, il glass frit bonding (tecnica di unione di wafer con uno strato intermedio di vetro) e l'incollaggio anodico, continueranno probabilmente ad essere utilizzate. Spesso, il lancio di un nuovo prodotto MEMS implica lo sviluppo di un processo produttivo su misura e l'adozione di attrezzature specializzate: la standardizzazione dei processi, come avviene per le tecnologie CMOS e SOI, non è stata ancora realizzata nel campo dei MEMS. Gli addetti ai lavori stanno ancora esplorando cosa possa significare la standardizzazione in questo settore, e non è detto che verrà mai completamente conseguita. Tra le nuove tendenze emergenti per i dispositivi MEMS si annoverano una maggiore precisione, ripetibilità e affidabilità, il consumo ultraridotto di energia, l'uso crescente di materiali piezoelettrici a film sottile come AIN (Aluminium nitride - per MEMS RF, microfoni, etc.) e PZT (Piombo-Zirconato di Titanio – MEMS per Stampanti Inkjet, micro-mirrors, lenti autofocus, etc.), l'intelligenza integrata per una migliore qualità dei dati dei sensori, e l'integrazione eterogenea con approcci SiP per combinare più componenti in un unico package.

Stato dell'arte

Nel settore dei MEMS e dei sensori, le aziende produttrici si trovano spesso di fronte alla sfida di individuare un partner adatto per l'industrializzazione che possa supportare efficacemente la ricerca nelle sue fasi iniziali e contribuire a far progredire e trasferire concetti innovativi verso la produzione di massa. La scelta di un partner non idoneo può portare a ritardi significativi e a un incremento dei costi di sviluppo, soprattutto quando il progetto deve essere trasferito tra diverse strutture specializzate nelle varie fasi di sviluppo.

Yole, che monitora il mercato dei MEMS da due decenni, ha osservato una crescita costante, come descritto nella Figura 20. Nel 2024, si prevede che il mercato dei MEMS superi abbondantemente il volume dei 30 miliardi di unità. Questa crescita

testimonia l'importanza di stabilire processi di sviluppo efficienti per mantenere il passo con la domanda.

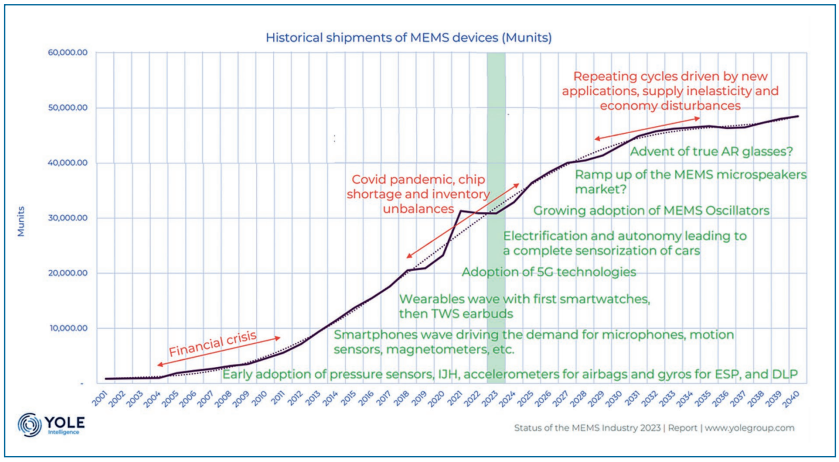


Figura 20: MEMS Industry History (Fonte: Yole Intelligence 2023)

Il processo di sviluppo di nuovi MEMS richiede tempo per raggiungere una commercializzazione su larga scala. Sebbene questi tempi si siano ridotti grazie all'esperienza accumulata, il successo commerciale non è immediato.
L'attenzione attuale è rivolta principalmente alle applicazioni consumer di massa. Nonostante i vantaggi tecnologici dei MEMS, la riduzione dei costi rimane una sfida significativa, in particolare quando si compete con soluzioni esistenti come altoparlanti MEMS o stabilizzazione ottica dell'immagine (OIS) MEMS.
L'industria dei MEMS mostra un cambiamento significativo nel corso del tempo (Figura 21):

- In passato, lo sviluppo e la prototipazione di nuovi MEMS erano processi lunghi, ma una volta sviluppati, i dispositivi potevano avere successo in mercati a volume basso e medio, pur avendo prezzi elevati grazie al loro valore aggiunto. Con il tempo, questi componenti maturavano e diventavano adatti per applicazioni mobili, come i sensori di pressione e umidità.

• Nel presente, il mercato mobile è diventato il target principale a causa del suo alto volume e della crescita dinamica, attirando l'interesse degli investitori. La prototipazione è diventata più rapida, ma il processo per aumentare la produzione e raggiungere volumi elevati è lungo e complesso. Una volta che un prodotto è accettato nel mercato, la domanda per volumi elevati è immediata, ma soddisfare questa domanda richiede un'ottimizzazione industriale approfondita per garantire buone rese e alta affidabilità, elementi essenziali per la produzione su larga scala.

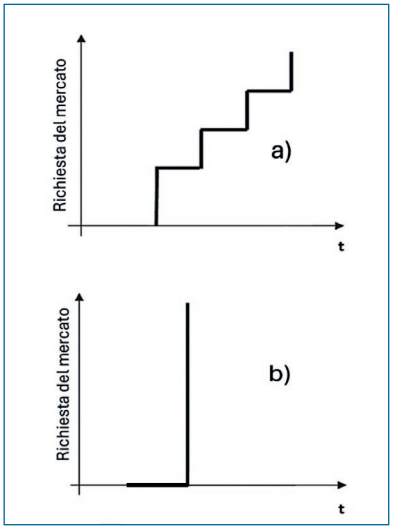


Figura 21: Curva di commercializzazione: a) a scala nel passato; b) a gradino nel presente

I nuovi MEMS sfruttano il know-how acquisito negli sviluppi passati per ridurre il tempo tra R&D e il lancio del prodotto (Figura 22), ma la riduzione dei costi e l'incremento commerciale a volumi elevati ha ancora una finestra temporale che non può essere compressa come evidenziato e mostrato dal grafico dello studio Yole.

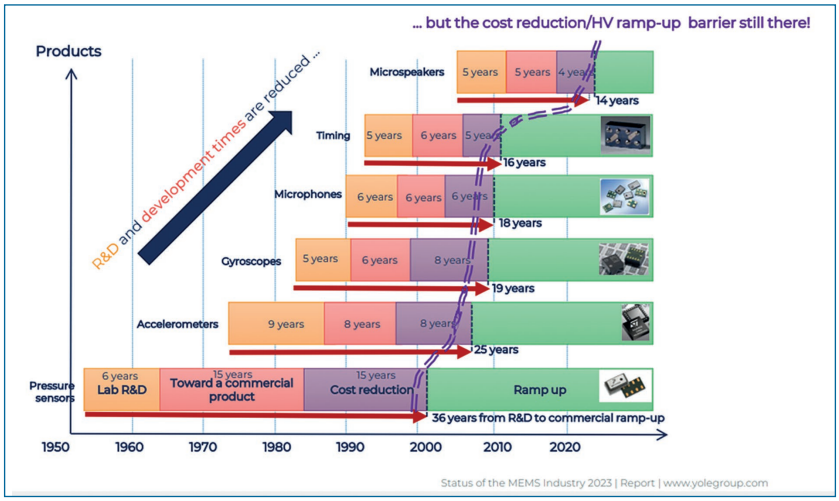


Figura 22: New MEMS Development Times (Fonte: Yole Intelligence 2023

In Italia, STMicroelectronics è leader di settore nelle tecnologie MEMS e da decenni ha dimostrato una forte competenza nello sviluppo di sensori e attuatori. Vengono industrializzati un'ampia gamma di sensori MEMS basati su diverse tecnologie, tra cui dispositivi per il movimento (accelerometri, giroscopi, sensori magnetici), sensori per l'ambiente (pressione, umidità e temperatura), microfoni. Si tratta di un portafoglio completo di sensori, da soluzioni discrete a quelle completamente integrate, fusione di sensori ad alte prestazioni per migliorare l'accuratezza dei sistemi di sensori multi-assi al fine di consentire applicazioni molto esigenti, come la navigazione al chiuso e i servizi di localizzazione, stabilizzazione ottica delle immagini e prodotti di alta qualità. L'ultima gamma di sensori intelligenti comprende la capacità di apprendimento del contesto (context awareness) e di elaborazione locale (Edge AI) integrata nel sensore.

Sono oltre 400 i brevetti legati ai MEMS pubblicati da ST, con un evidente vantaggio competitivo che ha un valore strategico a livello nazionale. In Italia sono presenti un sito produttivo di front-end (il secondo è a Singapore), oltre al gruppo globale di R&D MEMS .

In questo scenario sono state affrontate le problematiche legate allo sviluppo dei MEMS, evidenziando in particolare le difficoltà causate dai numerosi passaggi di consegna (Figura 23) che lo sviluppo di un MEMS deve attraversare nel suo cammino dall'idea iniziale alla produzione su larga scala. Ogni fase del processo, dalla ricerca alla produzione pilota fino alla produzione di massa, può introdurre ritardi, curve di apprendimento e potenziali errori.

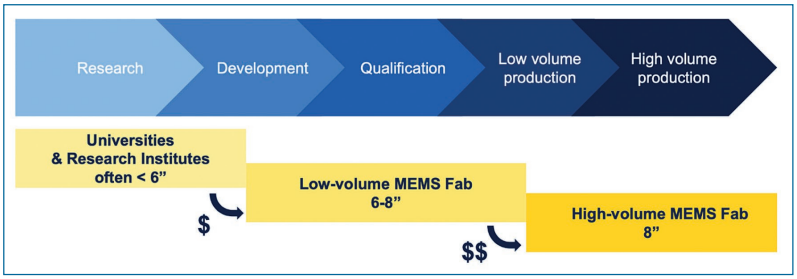


Figura 23: Typical MEMS Development Cycle (Fonte: STMicroelectronics)

Per superare queste sfide, ST ha collaborato con l'Institute of Microelectronics (IME) per creare a Singapore un impianto di sviluppo MEMS di tipo unico, che concentra tutte le fasi dello sviluppo dei prodotti MEMS in un'unica località. Questo approccio integrato consente a ST di offrire competenze all'avanguardia e di beneficiare di un ecosistema globale, collegato con gli stabilimenti italiani, favorendo così un più rapido sviluppo dei prodotti (Figura 24).



Figura 24: Rapid Product Development (Fonte: STMicroelectronics)

L'innovativo "Lab-in-Fab", ossia un laboratorio integrato all'interno dell'impianto produttivo, rappresenta un approccio sfidante che mira a ridurre i tempi di sviluppo e ottimizzare il processo di industrializzazione. La strategia è illustrata nella Figura 25, che sottolinea i vantaggi di un modello di coinvolgimento più diretto e di una tempistica di sviluppo accelerata.

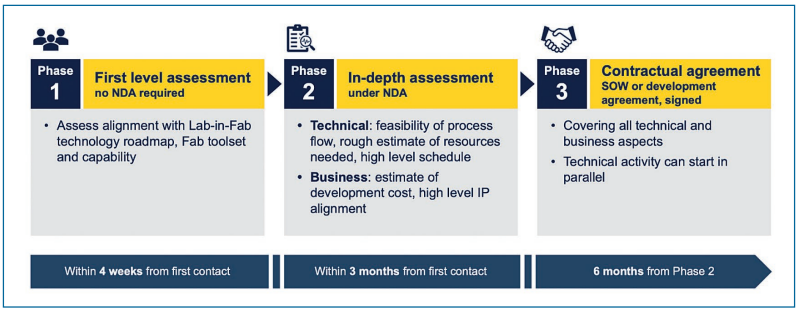


Figura 25: Lab in Fab Engagement Model (Fonte: STMicroelectronics)

L'integrazione degli algoritmi di IA nei sensori MEMS sta rivoluzionando il nostro modo di interagire con l'ambiente circostante. Grazie all'Edge AI, i sensori attuali sono in grado di raccogliere, processare e trasmettere dati rilevanti in tempo reale. Questo passaggio permette una nuova generazione di sensori intelligenti, aperti e accurati, per aiutare gli sviluppatori a sfruttarne le potenzialità migliorando allo stesso tempo l'efficienza del sistema. In particolare è possibile ridurre il volume di dati da trasferire e alleggerire il carico di trasferimento dati sulla rete, favorendo un minor consumo energetico e quindi una soluzione più sostenibile. Un ecosistema aperto favorisce l'innovazione e lo sviluppo del prodotto attraverso la condivisione dei dati. Sensori accurati forniscono informazioni dettagliate agli utenti finali grazie a complessi algoritmi di sviluppo.

Per assicurarsi che gli sviluppatori trovino la soluzione più adatta in termini di potenza di calcolo e flessibilità di programmazione, sono disponibili diverse tecnologie per l'elaborazione del dato nel sensore (Figura 26):

- sensori con un nucleo di apprendimento incorporato con alberi decisionali (MLC);
- sensori con un'unità di elaborazione del sensore intelligente (ISPU).

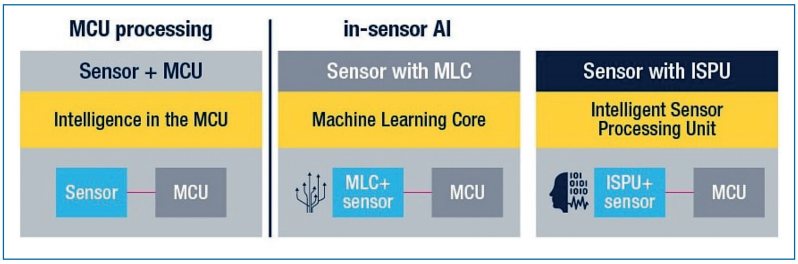


Figura 26: LMCU processing vs In-sensor AI processing (Fonte: STMicroelectronics)

L'MLC è una tecnologia nel sensore che può essere programmata per attivare un'azione quando viene rilevato un evento specifico attraverso l'apprendimento basato su alberi decisionali. Con un MLC integrato nel sensore, è possibile identificare movimenti specifici e segnalare l'evento a un processore con la massima efficienza energetica del sistema. Il valore aggiunto include:

- Soluzione a bassissimo consumo energetico;
- Maggiore precisione e migliore rilevazione del contesto;
- Riduzione del carico sul processore principale, migliorando l'efficienza del sistema.

La terza generazione di sensori MEMS con MLC integra una tecnologia avanzata di core in grado di offrire funzionalità intuitive e consapevoli del contesto per le più recenti applicazioni a batteria.

L'ISPU è un vero processore di segnale digitale integrato (DSP), ottimizzato rispetto a un MCU generico, e può essere utilizzato per eseguire algoritmi di IA complessi. Il suo vantaggio è che, essendo integrato, ottimizza al massimo la potenza di calcolo richiesta. Il valore aggiunto include:

- Consumo energetico estremamente basso a livello di sistema, grazie al trasferimento dati ottimizzato;
- Elevata capacità di elaborazione con core programmabile abilitato all'intelligenza artificiale (ML e NN);
- Facilmente programmabile con il linguaggio C o con modelli AI commerciali e open source.

Per facilitare l'adozione di queste tecnologie di IA nei sensori, è stato sviluppato un ambiente software versatile (Figura 27) – MEMS Studio – per programmare ed implementare soluzioni AI coadiuvando lo sviluppatore nell'uso dei sensori MEMS intelligenti con MLC e ISPU.

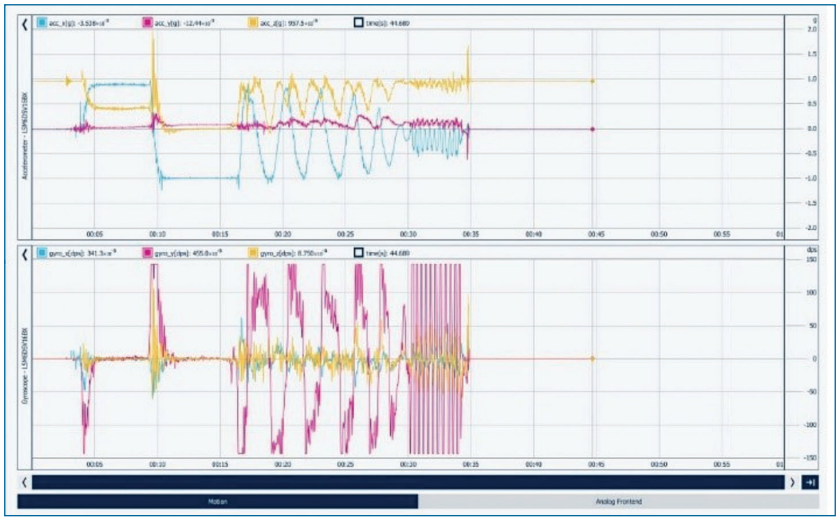


Figura 27: MEMS Studio application (Fonte: STMicroelectronics)

Risorse economiche necessarie

Per quantificare gli investimenti necessari per lo sviluppo di applicazioni MEMS specifiche, si riporta a titolo di esempio l'investimento compiuto per la realizzazione di una linea pilota per lo sviluppo di prototipi di applicazioni MEMS.

Lo sviluppo di un Plant produttivo ha ovviamente costi molto maggiori, come discusso in altre sezioni di questo studio.

Nel 2021, STMicroelectronics, in collaborazione con il Politecnico di Milano, ha potenziato il centro PoliFab, specializzato in micro e nanotecnologie, con l'obiettivo di avanzare la ricerca sui MEMS e in ambiti quali il controllo di movimento e l'elettronica di potenza. L'investimento ha incluso l'aggiunta di una *clean* room avanzata e l'introduzione di una nuova linea pilota da 200mm, che si affianca alla già esistente da 150mm, per lo sviluppo di tecnologie MEMS. Questo ampliamento, sostenuto da attrezzature all'avanguardia, non solo rafforza la leadership dell'azienda nel settore dei MEMS e del suo gruppo di R&D MEMS globale, ma trasforma anche il Politecnico di Milano in un polo di attrazione per ricercatori e studenti, contribuendo a farne uno dei principali centri di ricerca in Italia. L'espansione di PoliFab mira a creare un hub di innovazione di caratura internazionale per l'innovazione e il trasferimento tecnologico nel settore dei semiconduttori, promuovendo la collaborazione tra il mondo accademico e quello industriale.
In questo contesto, l'attenzione si rivolge anche alle tecnologie che favoriscono la transizione energetica, in particolare attraverso lo sviluppo di dispositivi e materiali che mirano a ridurre i consumi energetici.
Tra i progetti di ricerca emergenti, due in particolare sono stati avviati nell'ambito del JRP STEAM (centro di ricerca congiunto sui materiali avanzati per sensori), in accordo con STMicroelectronics, focalizzati sui MEMS per convertire l'energia meccanica generata da **micro-movimenti** e vibrazioni in energia elettrica (*energy harvesting*) e per lo stoccaggio di quest'energia in "micro-batterie", destinate all'alimentazione di dispositivi vari. Questi progetti integrano l'innovazione nel settore dei MEMS con le necessità di un futuro energetico più sostenibile.

L'investimento è nell'ordine di decine di milioni di euro, a cui il Politecnico di Milano ha aggiunto un investimento ulteriore di qualche milione di euro.

NUOVI MATERIALI: TECNOLOGIA GaN - NITRURO DI GALLIO

L'industria dell'elettronica di potenza sta affrontando sfide significative, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza e la potenza dei dispositivi, riducendone al contempo costi e dimensioni. La chiave per superare questi ostacoli risiede nell'adozione di semiconduttori a banda proibita ampia (WBG - Wide BandGap), come il nitruro di gallio (GaN) e il carburo di silicio (SiC), i quali offrono prestazioni superiori rispetto ai tradizionali dispositivi a base di silicio, ormai prossimi ai loro limiti teorici, specialmente in relazione all'aumento delle frequenze di commutazione.
I dispositivi GaN, già in produzione da anni, hanno un potenziale che non è ancora stato completamente sfruttato, con la possibilità di migliorare la tecnologia di ulteriori due ordini di grandezza. Questi dispositivi trovano applicazione in una varietà di settori, dai carica batterie veloci per telefoni cellulari agli azionamenti per motori di biciclette elettriche, fino ai sistemi LIDAR per auto e robot, con previsioni di vendita in costante aumento (Figura 32).
Il GaN, grazie alla sua elevata tensione di breakdown, alla mobilità degli elettroni e alla capacità di operare a temperature e tensioni elevate, è ideale per applicazioni come gli amplificatori di potenza.

Parallelamente, il progresso verso un mondo dotato di risorse energetiche adeguate dipende dall'uso di tali materiali innovativi. I convertitori elettronici di potenza, fondamentali per la gestione dell'energia negli edifici, sono responsabili di notevoli perdite energetiche durante il processo di conversione, con oltre il 60% dell'energia utilizzata per la produzione di elettricità che si disperde in trasformazioni inefficaci.
I semiconduttori sono cruciali nello sviluppo di tecnologie fondamentali in vari campi, dall'elettronica alle comunicazioni, e l'efficienza dei convertitori di potenza è strettamente legata alla scelta dei dispositivi a semiconduttore e alla loro frequenza di commutazione. I materiali semiconduttori WBG, operando ad alta frequenza, possono ridurre le perdite di commutazione e aumentare la densità di potenza dei convertitori. Di conseguenza, le innovazioni nell'elettronica di potenza sono essenziali per minimizzare le perdite durante i processi di conversione dell'energia.
I dispositivi WBG non solo possono ridurre le dimensioni dei componenti e i costi

a livello di sistema o del componente stesso, ma possono anche migliorare le prestazioni e l'affidabilità.
Il band gap, parametro fisico che definisce l'energia necessaria per gli elettroni per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione, è fondamentale per determinare le proprietà elettriche e ottiche di un semiconduttore e rappresenta il cuore delle prestazioni superiori dei semiconduttori WBG. Nella Figura 28 si evidenziano le applicazioni tipo dei GaN.

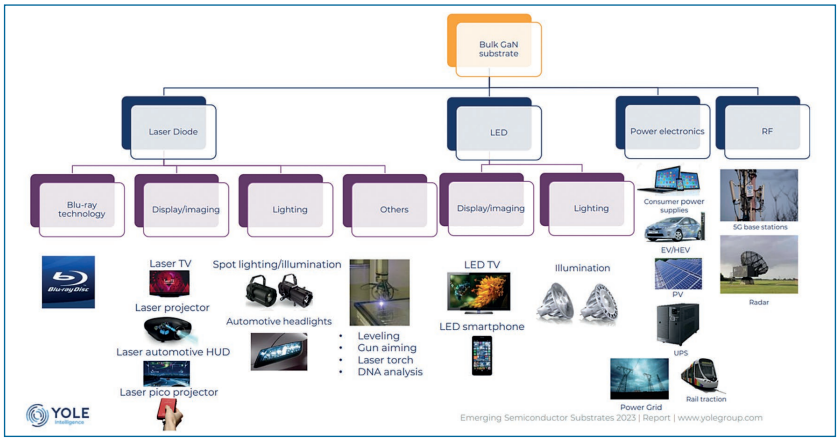


Figura 28: GaN applications (Fonte: Emerging Semiconductor Substrates 2023 Report by Yole Intelligence)

Motivazioni per lo sviluppo

I semiconduttori sono materiali chiave nell'industria elettronica, utilizzati per costruire dispositivi come diodi, transistor e circuiti integrati. La loro capacità di condurre elettricità è determinata dalla larghezza della banda proibita, ovvero l'intervallo di energie che gli elettroni non possono possedere. Nel silicio, che è il materiale semiconduttore più comune, la banda proibita si situa tra 1 e 1,5 elettronvolt (eV). Tuttavia, esistono semiconduttori con bande proibite più ampie, noti appunto come semiconduttori a banda larga (WBG), che hanno bande proibite comprese tra 2 e 4 eV. Tra i semiconduttori WBG, il nitruro di gallio (GaN)

e il carburo di silicio (SiC) sono particolarmente notevoli. Il GaN ha una banda proibita di 3,2 eV, mentre il SiC raggiunge i 3,4 eV. Questi valori sono circa il triplo di quello del silicio, il che significa che questi materiali possono gestire tensioni e frequenze molto più elevate.

Nonostante entrambi siano semiconduttori WBG, GaN e SiC presentano differenze significative. Una di queste differenze è la velocità con cui gli elettroni possono muoversi attraverso il materiale, un parametro noto come mobilità elettronica. Nel GaN, la mobilità elettronica è del 30% superiore rispetto al silicio, raggiungendo i 2.000 cm^2/Vs. Questo lo rende particolarmente adatto per applicazioni che richiedono alte prestazioni e frequenze elevate, come i dispositivi RF che operano nell'intervallo dei gigahertz.

Infatti, questo è un mercato strategico, come si evince dal Report Yole sul Mercato RF GaN 2023 in cui si riporta un mercato di 1.3 miliardi di dollari nel 2022, e la proiezione è di 2.7 miliardi di dollari entro il 2028, con un tasso annuo di crescita composto (CAGR) del 12% nel periodo di analisi 2022-2028.

La crescita (Figura 29) sarà guidata principalmente dal comparto telecomunicazioni e dalle applicazioni RF per la difesa, oltre a un ulteriore slancio a carico delle applicazioni satcom, ovvero applicazioni satellitari Low Earth Orbit (LEO) e Geosynchronous Earth Orbit (GEO) per internet, etc.

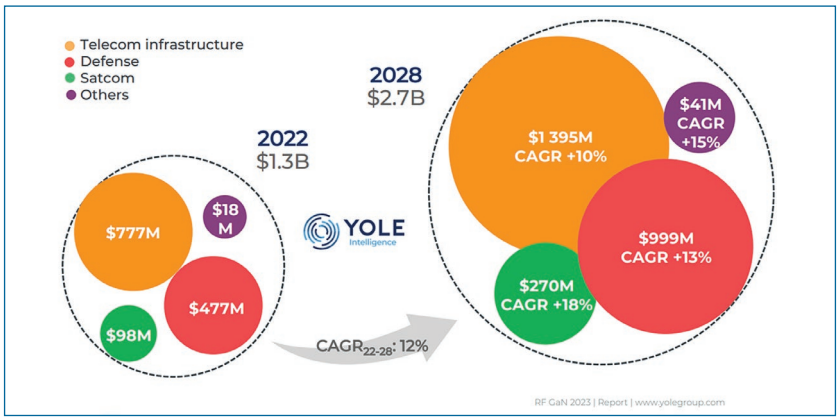


Figura 29: PACAKGED RF GAN DEVICES FORECAST: 2022-2028, Split by application
(Fonte: RF GaN 2023 Report by Yole Intelligence)

Al contrario, il SiC ha una mobilità elettronica di 650 cm^2/Vs, ma eccelle in conduttività termica e prestazioni a bassa frequenza, rendendolo ideale per applicazioni ad alta potenza come i veicoli elettrici, i data center, la trazione ferroviaria, le turbine eoliche, la distribuzione elettrica. Queste applicazioni beneficiano della capacità del SiC di gestire tensioni più elevate e di dissipare meglio il calore.
Per meglio comprendere i potenziali benefici in termini di prestazioni, si riportano nella Figura 30 le principali proprietà del Si rispetto al SiC (polimorfo 4H) e al GaN.

	Si	SiC-4H	GaN
Bandgap (eV)	1.1	3.2	3.4
Electron mobility μ_n ($cm^2/V\ s$)	1450	900	2000
Breakdown Electric Field E_{br} (MV/cm)	0.3	3	3.5
Saturation electron drift velocity V_S (10^7 cm/sec)	1	2.2	2.5
Thermal conductivity ⊖ (W/cm K)	1.5	3.8	1.3

Figura 30: Proprietà fisiche dei semiconduttori WBG confrontati con il Silicio (Fonte: STMicroelectronics)

Ad esempio, nel grafico di Figura 31 si vede la distribuzione dell'applicazione dei dispositivi WBG nell'ambito dei veicoli elettrici, in cui la diversificazione vede il SiC in concorrenza con il Si in un intervallo di potenza superiore, ma inferiore di frequenza, mentre il GaN compete con il Si in un intervallo di potenza inferiore, ma con frequenza di commutazione alta frequenza.

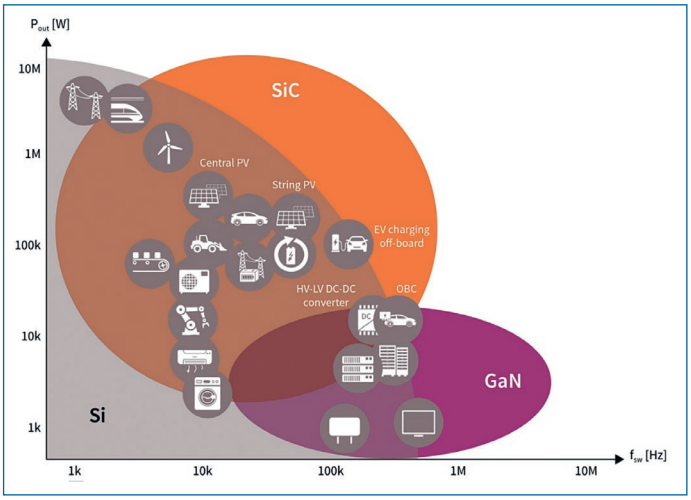


Figura 31: Power-frequency plane of Si, SiC, and GaN for different application (Fonte: https://doi.org/10.3390/en15239172)

I vantaggi dei dispositivi GaN non solo migliorano le prestazioni dei sistemi elettronici, ma promuovono anche la sostenibilità attraverso l'uso più efficiente delle risorse e la riduzione dei rifiuti. Nonostante il costo iniziale più elevato rispetto ai dispositivi basati su silicio, i benefici a lungo termine in fatto di risparmio energetico e riduzione dell'impatto ambientale rendono i dispositivi GaN una scelta vantaggiosa per un futuro più sostenibile, grazie a:

- Efficienza energetica migliorata: I dispositivi GaN consumano meno energia rispetto a quelli in silicio, poiché hanno una bassa resistenza termica che genera minori perdite di conduzione e commutazione. Questo si traduce in un minore spreco energetico e in costi energetici ridotti;

- Dimensioni ridotte: I transistor GaN possono essere fino a 10 volte più piccoli dei dispositivi in silicio, il che significa che richiedono meno materiali e spazio, favorendo la sostenibilità attraverso la riduzione dell'impronta di materiali utilizzati;

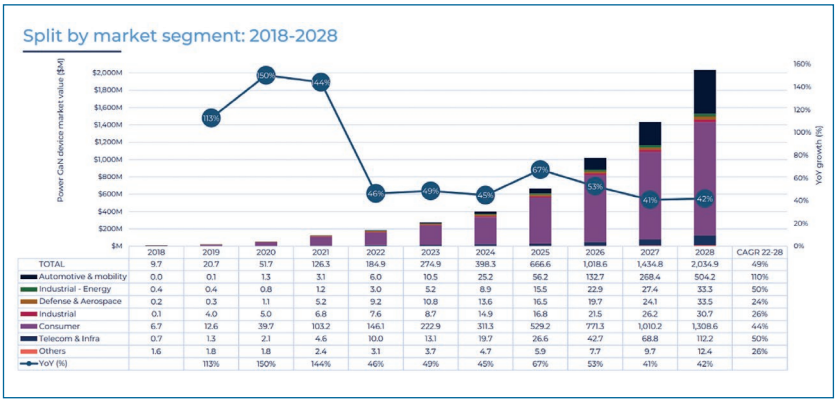
- Alta densità di potenza: La capacità di operare a frequenze di commutazione e temperature più elevate rispetto al silicio consente di ridurre le dimensioni dei sistemi di raffreddamento o di eliminarli del tutto, contribuendo a un sistema più compatto e leggero;

- Componenti passivi più piccoli: Le elevate frequenze di commutazione dei dispositivi GaN permettono l'uso di induttori e condensatori di dimensioni ridotte, minimizzando il volume e il peso del sistema e riducendo i costi complessivi;

- Prestazioni di commutazione rapide: I dispositivi GaN offrono prestazioni di commutazione più rapide, che possono migliorare l'efficienza complessiva dei circuiti di potenza;

- Integrazione monolitica: La possibilità di integrare diversi componenti ad alta tensione in un unico chip GaN riduce la complessità del sistema e i costi di produzione, semplificando la catena di approvvigionamento e la gestione dei componenti.

Infatti, questi vantaggi mostrano come tra il 2019 e il 2021 il mercato del GaN (Figura 32) per applicazioni di potenza ha registrato una crescita notevole, grazie all'adozione su larga scala nei dispositivi di alimentazione per i consumatori, cui è seguito un rallentamento del tasso di crescita nel 2022, a causa delle ripetute chiusure legate all'epidemia da COVID-19 e alla situazione economica globale. Si prevede tuttavia una ripresa per tutto il 2024, con una crescita più sostenuta nel 2025 favorita dall'aumento dell'uso nelle applicazioni automobilistiche e nei datacom. Il report Yole del mercato Power GaN 2023 riporta un mercato di 187.9 milioni di dollari nel 2022, e la proiezione è di 2.04 miliardi di dollari entro il 2028, con un tasso annuo di crescita composto (CAGR) del 49% nel periodo di analisi 2022-2028.



	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	CAGR 22-28
TOTAL	9.7	20.7	51.7	126.3	184.9	274.9	398.3	666.6	1,018.6	1,434.8	2,034.9	49%
Automotive & mobility	0.0	0.1	1.3	3.1	6.0	10.5	25.2	56.2	132.7	268.4	504.2	110%
Industrial - Energy	0.4	0.4	0.8	1.2	3.0	5.2	8.9	15.5	22.9	27.4	33.3	50%
Defense & Aerospace	0.2	0.3	1.1	5.2	9.2	10.8	13.6	16.5	19.7	24.1	33.5	24%
Industrial	0.1	4.0	5.0	6.8	7.6	8.7	14.9	16.8	21.5	26.2	30.7	26%
Consumer	6.7	12.6	39.7	103.2	146.1	222.9	311.3	529.2	771.3	1,010.2	1,308.6	44%
Telecom & Infra	0.7	1.3	2.1	4.6	10.0	13.1	19.7	26.6	42.7	68.8	112.2	50%
Others	1.6	1.8	1.8	2.4	3.1	3.7	4.7	5.9	7.7	9.7	12.4	26%
YoY (%)		113%	150%	144%	46%	49%	45%	67%	53%	41%	42%	

Figura 32: Power GaN devices in $M: Market Forecast, split by market segment 2018-2028 (Fonte: Power GaN 2023 Report by Yole Intelligence)

Stato dell'arte

I GaN derivano dalla tecnologia degli RF HEMT (High Electron-Mobility Transistors), che differisce dai FET di potenza al silicio. STMicroelectronics è un importante fornitore di soluzioni di potenza, introducendo nella sua gamma di prodotti WBG come il SiC e il GaN. L'implementazione su larga scala di questi nuovi semiconduttori composti è vista anche come un modo per affrontare le preoccupazioni ambientali che stanno diventando sempre più prominenti nel discorso pubblico e nelle politiche energetiche governative.

Dispositivi quali MOSFET SiC e GaN HEMT hanno ruoli complementari in diverse applicazioni.

I veicoli elettrici stanno beneficiando di un uso su larga scala di entrambe le tecnologie, con i MOSFET SiC particolarmente adatti per inverter di trazione, convertitori DC-DC e caricabatterie di bordo (OBC - On-Board Chargers), operando con tensioni nell'intervallo di 650V a 1600V. I GaN HEMT operano da 100V a 650V e potrebbero diventare una soluzione vantaggiosa anche per convertitori DC-DC e caricabatterie di bordo a man a mano che la tecnologia matura e diventa

economicamente più conveniente, grazie alle loro capacità di funzionamento a elevate frequenze.
Le prestazioni superiori dei GaN HEMT consentono ai progettisti di ottenere efficienze di conversione più elevate (Figura 33) e fattori di forma più piccoli, spingendo la densità di potenza verso nuovi e impegnativi obiettivi.

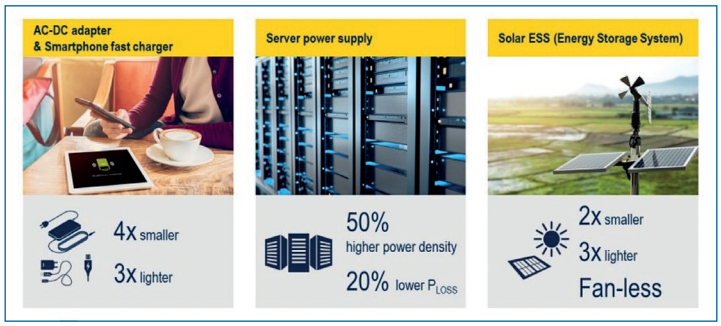


Figura 33: High power - Mini size (Fonte: STMicroelectronics)

Gli HEMT GaN si stanno facendo strada in un ampio spettro di applicazioni, inclusi OBC, ricarica wireless, point-of-loads (POL), micro-inverter fotovoltaici, alimentatori switching, etc. Essi sfruttano le loro prestazioni superiori in termini di bassa resistenza in conduzione, basse capacità e alte frequenze operative, coprendo un intervallo di tensione da 100V a 650V/900V.
Non solo le topologie tradizionali beneficiano delle proprietà degli GaN HEMT, ma questi dispositivi facilitano anche la realizzazione di nuove tipologie di circuito.
Ad esempio, i circuiti PFC a totem-pole possono raggiungere efficienze fino al 99%, offrendo alta efficienza e maggiore densità di potenza. Le topologie PFC senza ponte beneficiano di ridotte perdite in conduzione grazie al minor numero di dispositivi attivi a semiconduttori e al minor rumore elettromagnetico (EMI - Electromagnetic Interference). Pertanto, anche se i dispositivi GaN possono essere più costosi rispetto alle alternative al silicio (MOSFET o IGBT), i vantaggi che apportano fanno pendere la bilancia a loro favore.

Un'altra applicazione di alto volume che beneficia dell'uso del GaN è il convertitore (Figura 34) Active Clamp Flyback (ACF) che si trovata negli adattatori da viaggio per PC e nei caricabatterie da USB. In questa topologia, il diodo standard di un circuito flyback convenzionale è sostituito da un interruttore secondario, che, insieme alle basse perdite di commutazione e al riutilizzo dell'energia di dispersione del trasformatore, consente il funzionamento ad alte frequenze, riducendo significativamente le dimensioni e il peso degli adattatori.

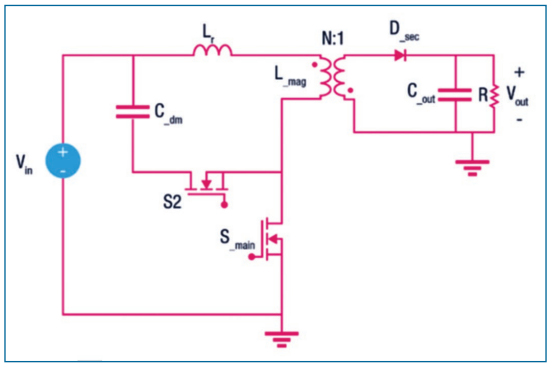


Figura 34: GaN in ACF topology for chargers

Per quanto riguarda i dispositivi GaN, il sito di riferimento per Integrated GaN Power ICs si trova ad Agrate (Italia) e a Tours (Francia), dove è già in funzione una linea da 200 mm che raggiungerà la produzione in volumi entro il 2023, mentre a Catania è stata installata una linea RF-GaN da 150 mm attualmente in fase di qualifica.

Lo sviluppo tecnologico vede nel 2023 l'ampliamento della famiglia di prodotti MasterGaN (SiP integrante gate driver e 2 E-mode GaN transistors in configurazione half-bridge converter) e della nuova famiglia ViperGaN, integranti Si Driver e HEMT GaN Power transistors in un unico package.

Non solo potenza più sostenibile ed efficiente, ma anche intelligente con soluzio-

ni integrate mediante la famiglia STi²GaN (Figura 35) che semplifica la progettazione e offre maggiore flessibilità e prestazioni ai progettisti. Le soluzioni STi²GaN integrano transistor di potenza GaN con driver, protezioni e logica in package innovativi senza fili di collegamento per fornire un'elevata robustezza e affidabilità.

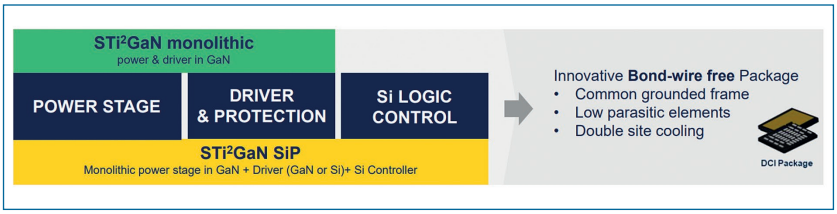


Figura 35: STi²GaN: Intelligent & Integrated GaN in Monolithic or SiP configuration (Fonte: STMicroelectronics)

Nuovi concetti di packaging integrati (2SPAK e PowerFLAT) sono parte integrante dello sviluppo della tecnologia GaN, poiché aiutano a gestire le eccezionalmente alte frequenze di commutazione con packages che presentano un'induttanza parassita interna molto bassa.

Inoltre, lo sviluppo tecnologico arriva anche da partnership come quella dal 2020 con TSMC, la più grande foundry di semiconduttori al mondo, per accelerare lo sviluppo tecnologico GaN e l'offerta di dispositivi GaN, sia discreti che integrati. Grazie a questa collaborazione, i prodotti innovativi e strategici di ST basati sul GaN sono fabbricati utilizzando tecnologia di processo GaN all'avanguardia di TSMC. Questa partnership si affianca agli sforzi di ST nel sito di Tours, in Francia, e con il CEA-Leti per lo sviluppo di dispositivi di potenza GaN.

L'adozione della tecnologia GaN è stata accelerata ulteriormente con l'acquisizione a marzo del 2020 di quote di maggioranza della Exagan, un innovatore francese con un'esperienza unica nella crescita epitassiale GaN-on-Silicon e uno dei pochi ad abilitare la produzione di massa di dispositivi di potenza GaN su wafer da 8 pollici (200 mm). Questo è stato un significativo investimento da parte di ST, una visione a lungo termine nei semiconduttori di potenza composti che ha permesso di introdurre nel proprio portafoglio dispositivi GaN depletion-mode

(D-mode) ed enhancement-mode (E-mode).
I transistor (HEMT) in D-mode sono in configurazione "normalmente accesa", ovvero hanno un canale naturalmente conduttore che non richiede l'applicazione di una tensione al gate. La modalità D rappresenta la forma naturale dei dispositivi basati su GaN e spesso integra un MOSFET al silicio a bassa tensione in una configurazione Cascode. D'altra parte, i dispositivi "normalmente spenti", ovvero E-mode (Figura 36), hanno un canale P-GaN che richiede una tensione al gate per essere conduttivo. Infatti, la serie MASTERGAN è l'unico System-In-Package nell'industria con due transistor GaN in modalità E.

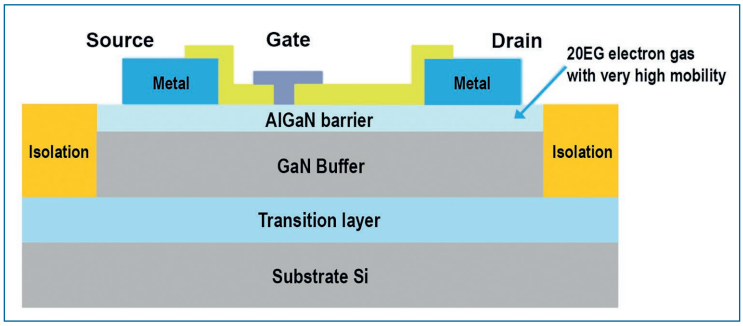


Figura 36: AlGaN/GaN HEMT structure (Fonte: STMicroelectronics)

Grazie alla loro tecnologia, al processo epitassiale, e all'esperienza di Exagan, ST sta inserendo questa tecnologia nelle sue attuali fabbriche senza investimenti straordinari in attrezzature uniche. Gli impianti possono così godere di rendimenti maggiori e avviare la produzione più rapidamente. L'industria può quindi aspettarsi soluzioni più efficienti dal punto di vista dei costi e catene di fornitura più affidabili.
In ogni caso, malgrado una diffidenza iniziale e un'inerzia del mercato alla riprogettazione del PCB, entrambi le configurazioni sono sempre più presenti nelle applicazioni consumer, industriali, di telecomunicazione e automotive.

A parte ST, ci sono diverse realtà anche multinazionali che, oltre alle attività commerciali e di marketing, hanno significative attività di ricerca; vedasi ad esempio la tecnologia GaN di EPC per applicazioni inerenti l'**azionamento dei motori.**
Varie sono inoltre le iniziative a livello europeo e nazionale che vedono ST e in genere l'Italia impegnata nella ricerca attiva, come ad esempio:

- Il progetto EleGaNT, finanziato dall'UE (~2.5M€), si propone di dimostrare un livello più elevato di integrazione tra GaN e circuiti integrati. Il progetto intende favorire progettazioni migliori di circuiti e dispositivi passivi GaN integrati e di schede di conversione del punto di carico;
- Il progetto YESvGaN, finanziato dall'UE (~30M€), sta sviluppando un'innovativa tecnologia WBG che utilizza transistor su substrati GaN-on-Si, che unirà migliorate prestazioni a costi ridotti e vede il sito di ST Tours parte attiva del consorzio;
- Il progetto GaN4AP, finanziato dall'UE (~15.3M€), mira a migliorare le competenze europee nella tecnologia dei dispositivi basati su GaN, coprendo uno spettro che va dai materiali allo sviluppo di sistemi all'interno di un unico istituto. Questo progetto supporterà l'industria europea nel miglioramento della produzione di dispositivi di potenza GaN-on-Si e nello sviluppo di dispositivi con nuove architetture, promuovendo al contempo la formazione nel campo dell'elettronica di potenza per mantenere una globale competitività. Questo progetto è stato finanziato dall'Electronic Component Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU). Questa comune impresa riceve il sostegno del programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea e di Italia, Germania, Francia, Polonia, Repubblica Ceca e Paesi Bassi. Ha l'ambizione di posizionare l'elettronica basata sul nitruro di gallio come la tecnologia di riferimento per i dispositivi attivi impiegati nei sistemi di conversione di potenza. Il consorzio, ad esempio, ha tra gli obbiettivi anche quello di sviluppare nuove soluzioni intelligenti e integrate di GaN (si veda STi^{2}GaN) nella configurazione SiP o Monolitiche, che permettono la generazione di convertitori di potenza per la mobilità elettrica. I progetti si concentrano sulla scalabilità delle soluzioni per convertitori Buck Boost bidirezionali da 48V a 12V, per applicazioni convenzionali e ADAS (Figura 37).

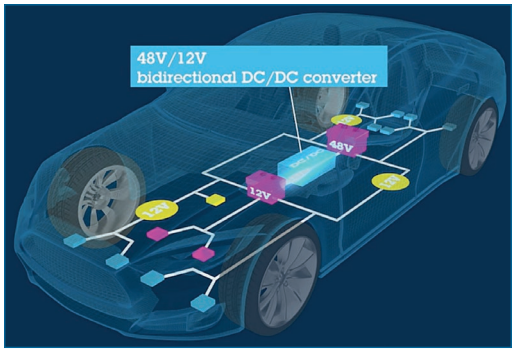


Figura 37: STi²GaN for MHEV (mild hybrid electrified vehicle) with centralized architecture

Il consorzio GaN4AP riunisce tutti gli attori della catena del valore, partendo dai produttori di dispositivi GaN, quali STMicroelectronics, ai system integrators, fino agli utenti finali nel settore automobilistico, TIER 1 e TIER 2. Il gruppo, inoltre, è completato da istituti accademici di spicco:

- Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nanosistemi S.C.A.R.L. (DTSMNS), che coordina il progetto
- Università di Catania (UNICT)
- Università di Messina (UNIME)
- Università di Parma (UNIPA)
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)
- Consorzio Nazionale Interuniversitario per la Nanoelettronica (IUNET)

Risorse economiche necessarie

Investire nella tecnologia GaN rappresenta una sfida simile a quella affrontata dall'industria dei semiconduttori con il silicio negli ultimi quarant'anni. Per giustificare ulteriori investimenti in una nuova tecnologia, i produttori devono vedere risultati concreti, e il GaN promette di essere un catalizzatore per futuri sviluppi e innovazioni nel settore dei semiconduttori. Le attese di crescita sono significative e, come mostrato dagli esempi citati sopra, lo sono anche gli investimenti, che a livello globale, secondo una stima Yole nel report "Power GaN 2023", si attestano a circa 4 miliardi di dollari.

NUOVI MATERIALI: TECNOLOGIA SIC - CARBURO DI SILICIO

Rispetto al silicio, il carburo di silicio (SiC, Figura 38) è entrato in produzione di massa in tempi relativamente recenti, e il primo dispositivo semiconduttore SiC commerciale è arrivato nel 2001 sotto forma di un diodo Schottky da parte di Infineon Technologies.
Il SiC, grazie alla sua estrema durezza, inizialmente ha trovato applicazione anche in campi diversi da quello dei semiconduttori, come ad esempio i giubbotti antiproiettile, le pale per le turbine, e recentemente (2015) come nuova lega resistente adatta per l'aeronautica e l'aerospazio; sempre grazie alla sua resistenza alle altissime temperature ha trovato applicazione anche nei supporti per forni e freni a dischi per auto.

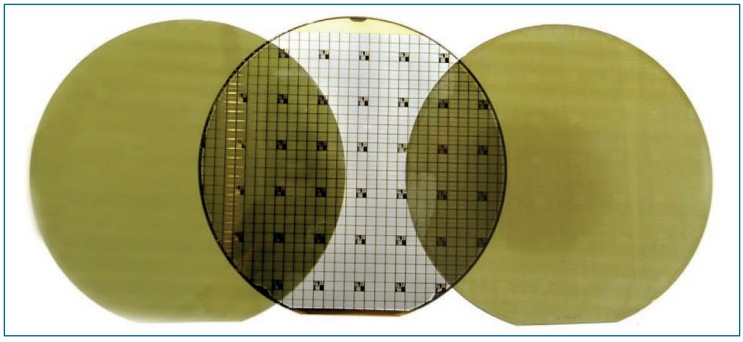


Figura 38: 25 Anni di Carburo di Silicio in ST e la nuova area tecnologica (Fonte: STMicroelectronics)

Il SiC è un materiale composto del gruppo IV con un bandgap di circa 3.3 eV, che mostra una resistenza alla rottura elettrica circa 15 volte superiore e una conducibilità termica 3 volte maggiore rispetto al Si.
Grazie alle sue eccellenti proprietà fisiche, il SiC è attualmente il materiale che sta rivoluzionando il campo dell'elettronica di potenza, consentendo lo sviluppo di dispositivi più efficienti per l'automotive, la gestione dell'energia e le applicazioni industriali.
Il SiC nella sua forma pura è un isolante elettrico, e diventa semiconduttore solo

tramite l'aggiunta (drogaggio) di altri elementi: azoto o fosforo permettono di avere un semiconduttore di tipo "n" (quindi conduttore); berillio, boro, alluminio o gallio portano a un tipo "p" (quindi isolante).

Una differenza intrinseca e fondamentale tra Si e SiC è il band gap o banda proibita, cioè l'intervallo di energia interdetto agli elettroni, caratteristico di ogni materiale e differente tra isolanti, semiconduttori e metalli.
Il bandgap (Figura 39) rappresenta la quantità di energia necessaria a un elettrone per saltare dalla banda di valenza (cioè gli elettroni di un atomo che sono presenti nel guscio atomico più esterno) alla banda di conduzione (cioè la banda che consente la conduzione elettrica).
Il bandgap è misurato in eV (elettronvolt, un'unità di energia pari a circa 1.602×10−19 J). Il bandgap del SiC = 3,26 eV, corrispondente a circa tre volte quello del silicio (Si = 1,12 eV).

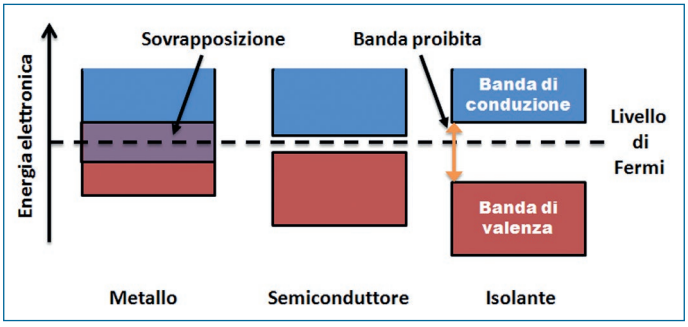


Figura 39: bandgap

Le sue proprietà intrinseche (Figura 40) sono attraenti per applicazioni ad alta potenza e ad alta temperatura. I vantaggi del SiC sono:

- Alta conducibilità termica grazie alla bassa resistenza termica, circa dieci volte migliore di quella del silicio (SiC=1490 W/m-K, Si=150 W/m-K), garantendo quindi una più efficace distribuzione del calore e consentendo di ridurre o eliminare le

ventole e i dissipatori di calore;

- Maggiore affidabilità;
- Die di piccole dimensioni (con la stessa tensione di rottura), fino a 100 volte più piccolo rispetto alla sua controparte tecnologica realizzata in silicio;
- Alta frequenza e temperatura di esercizio (operativo fino a 200°C di giunzione);
- Bassa dilatazione termica ed eccellente resistenza agli shock termici;
- Bassa potenza e perdite di commutazione;
- Alta efficienza energetica;
- Tensione di breakdown da 600V a qualche migliaio di volt, circa 10 volte superiore a quella del silicio;
- Consente concentrazioni di drogaggio più elevate rispetto al silicio, con la possibilità di ridurre lo spessore del dispositivo generando una minore resistenza (fino a 1/300 di quella del silicio);
- La capacità di gestire campi elettrici più elevati ad alte tensioni.

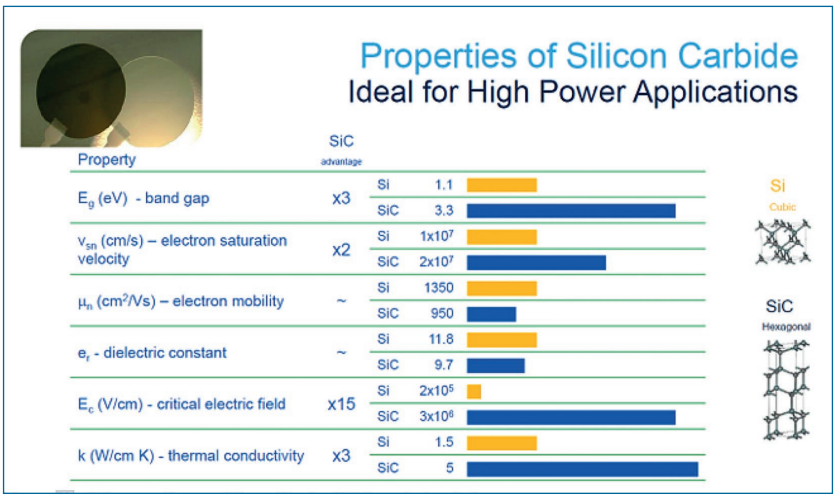


Figura 40: SiC properties vs. Silicon (Fonte: STMicroelectronics)

Motivazioni di sviluppo

Il mercato dei dispositivi a carburo di silicio è dominato dalle applicazioni automotive (Figura 41), che hanno rappresentato il 77% del mercato Power SiC nel 2023. La forte tendenza verso l'elettrificazione nel settore automotive (xEV - Electric Vehicle/Hybrid Electric Vehicle) è un motore chiave di questa predominanza.

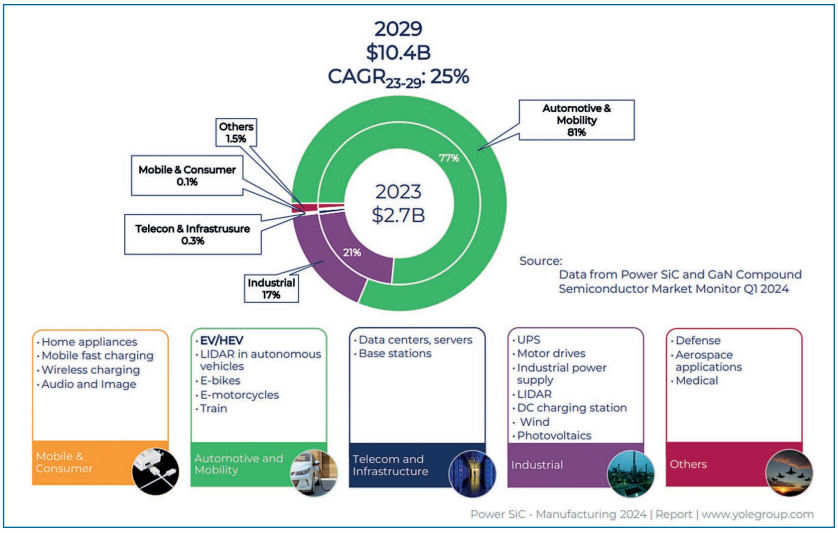


Figura 41: Power SiC Device Market ($M) split by application (Fonte: Power SiC 2023, Report Yole International)

Si prevede quindi che il mercato dei dispositivi SiC di potenza crescerà fino a quasi 10.4 miliardi di dollari, sostenuto dalla continua penetrazione nel settore automobilistico e nelle applicazioni industriali. Il mercato è destinato a raggiungere questa cifra entro il 2029, con un tasso di crescita annuale composto (CAGR) del 25% dal 2023 al 2029. Il settore mobilità, sia automotive che a trazione ferroviaria, si prevede che aumenterà ulteriormente la sua quota, raggiungendo l'81% del mercato totale dei dispositivi SiC nel 2029. Le applicazioni industriali, inclusi i settori delle infrastrutture di ricarica, del fotovoltaico e dei sistemi di accumulo ener-

getico, rappresentano anch'esse un mercato in espansione per il SiC di potenza.

I principali produttori di dispositivi SiC sono Wolfspeed, Infineon Technologies, STMicroelectronics, Rohm e Onsemi, anche se a lungo termine (Figura 42) ci si aspetta che il SiC veda l'ingresso massiccio di operatori a tutti i livelli per incrementare il volume e superare le barriere di costo. L'inverter sarà la principale applicazione del SiC, e il cambiamento nella tensione della batteria continuerà a guidare la spinta del SiC.

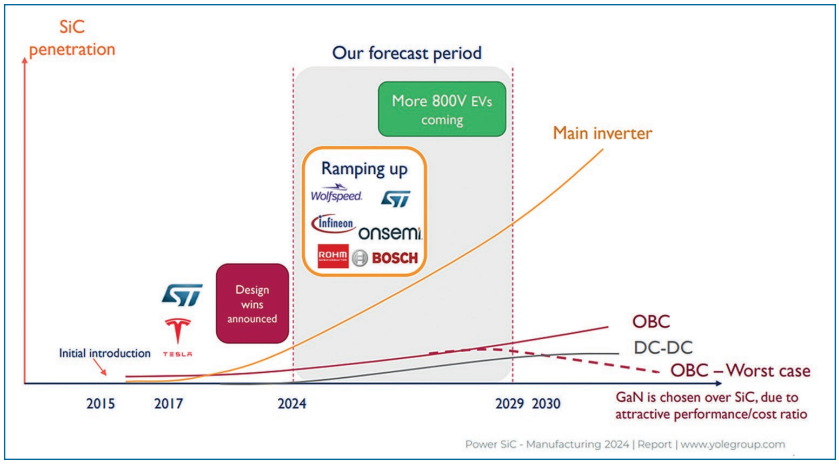


Figura 42: xEV market for SiC overlook 2030 (Fonte: Power SiC Manufacturing 2024 Report; Yole)

Nel panorama del mercato dei dispositivi SiC, STMicroelectronics si distingue per la sua posizione di leadership. Nel 2022, l'azienda ha conseguito un fatturato di 700 milioni di dollari, con un incremento del 56% rispetto all'anno precedente, dimostrando così la solidità e la crescita costante nel settore.
Il mercato dei dispositivi SiC ha mostrato segnali di maturità nel 2022, con i primi cinque produttori che hanno raggiunto ciascuno un fatturato di circa 200 milioni di dollari. Bosch, entrato nel mercato nel dicembre 2021, ha iniziato a fornire in volume a partire dal 2022, concentrando la propria attenzione sulle applicazioni

automotive. Sanan IC ha visto un incremento del proprio fatturato, espandendo le linee di produzione.
STMicroelectronics ha una ventennale esperienza: ha introdotto i suoi primi diodi SiC nel 2004 e i MOSFET SiC nel 2009, avviando la produzione di massa nel 2014. Questo percorso ha portato l'azienda a posizionarsi al vertice della classifica mondiale dei produttori di SiC (Figura 43).

Rank	Company	2021	2022	% change 2021-2022
1	STMicroelectronics	$450M	$700M	56%
2	Infineon	$242M	$360M	49%
3	Wolfspeed	$165M	$299M	81%
4	onsemi	$78M	$277M	253%
5	ROHM	$85M	$149M	75%
6	Bosch	$2M	$77M	4567%
7	x-fab	$34M	$56M	66%
8	Sanan IC	$13M	$38M	200%
9	Episil	$14M	$37M	171%
10	Mitsubishi Electric	$28M	$31M	10%
11	Navitas (GeneSiC)	$17M	$25M	51%
12	Fuji electric	$18M	$19M	10%
13	Semikron - Danfoss	$9M	$15M	68%
14	Toshiba	$12M	$14M	10%
15	Qorvo (UnitedSiC)	$7M	$8M	10%
	others	$38M	$50M	30%

Figura 43: Revenue estimates of SiC power device manufacturers (
Fonte: Yole Power SiC 2023 Report)

La gamma di prodotti per l'alimentazione a media e alta tensione, basati sulla tecnologia SiC, è tra le più ampie del mercato e trova applicazione in settori diversificati quali i veicoli elettrici, gli inverter solari, i sistemi di accumulo di energia, i dispositivi di azionamento per motori industriali, gli alimentatori e l'aerospazio.

Diodo SiC

La tecnologia dei diodi SiC è una soluzione promettente per aumentare l'efficienza della conversione di potenza. Rispetto ai diodi tradizionali a base di silicio, i diodi SiC hanno perdite di potenza inferiori e velocità di commutazione più elevate, consentendo una conversione energetica più efficiente. Questa tecnologia ha il potenziale per rivoluzionare l'industria dell'elettronica di potenza e contribuire a un futuro più sostenibile (Figura 44).

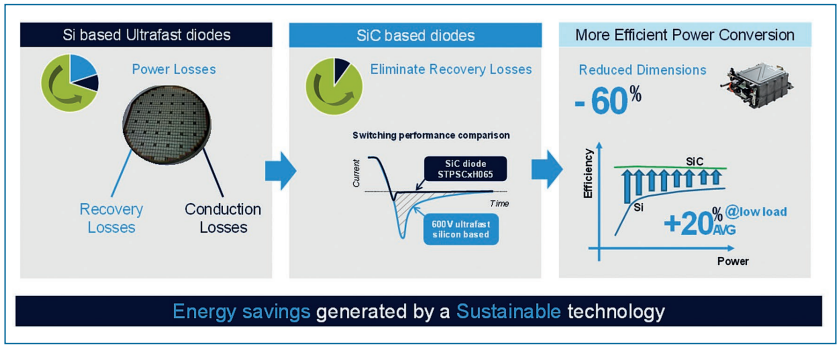


Figura 44: Energy efficient concept in SiC diodes (Fonte: STMicroelectronics)

La tecnologia dei diodi SiC è stata la prima ad essere sviluppata in ST e oggi (2024) vanta decine di prodotti in classi di tensione che vanno da 650V a 1200V - come diodi singoli e doppi - e presentano caratteristiche di recupero inverso imbattibili e una migliore tensione diretta. Il diodo SiC SilverGen (G5) è posizionato sul mercato come uno dei migliori della sua categoria, dimostrando elevate densità di corrente e bassa perdita. Questa tecnologia ha il potenziale per rivoluzionare l'industria dell'elettronica di potenza e contribuire a un futuro più sostenibile, con la sua capacità di aumentare l'efficienza della conversione di potenza e ridurre le perdite energetiche. Man mano che la tecnologia dei diodi SiC continua ad evolversi, possiamo aspettarci ulteriori progressi e applicazioni in una vasta gamma di settori (Figura 45).

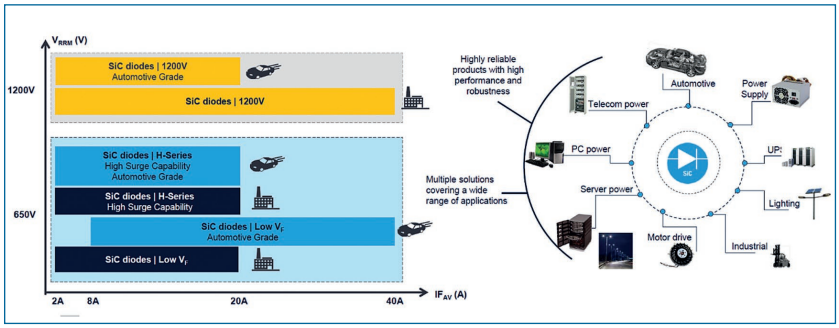


Figura 45: SiC diode product range - Extended product range covering a host of applications (Fonte: STMicroelectronics)

MOSFETs

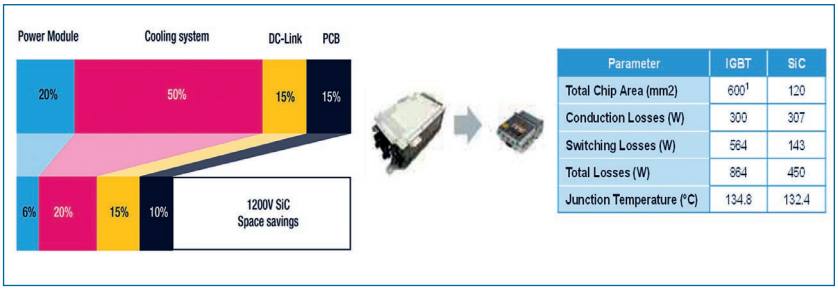
I MOSFET in carburo di silicio rappresentano una scelta tecnologica avanzata che offre notevoli benefici (Figura 46) rispetto ai tradizionali MOSFET basati sul silicio. Come si può osservare in tutte le condizioni di carico, le perdite totali sono in media 3 volte inferiori per il MOSFET SiC, risultando in un'efficienza di conversione più elevata. È inoltre degno di nota che le topologie sia per il convertitore DC-DC che per l'OBC derivano da applicazioni industriali; quindi, la tecnologia SiC si rivolge a entrambi i settori (automotive e industriale) fornendo gli stessi benefici.

Load [W]	P_{TOT} [W]		Efficiency [%]	
	Si MOSFET	SiC MOSFET*	Si MOSFET	SiC MOSFET
150	2.86	0.63	87.63	91.01
230	3.09	0.71	88.58	91.53
400	3.714	0.89	88.79	91.73
600	4.49	1.19	88.63	90.40
1000	6	1.84	85.73	86.48

Table 4: Table summarizing comparison between SiC and Si MOSFETs

Figura 46: Confronto tra SiC e Si MOSFETs (Fonte: STMicroelectronics)

Il loro impiego è particolarmente vantaggioso in quanto sono in grado di operare ad alte temperature, aspetto fondamentale per le applicazioni ad alta potenza dove si richiede un'elevata efficienza e affidabilità. Inoltre, i MOSFET SiC si caratterizzano per avere una resistenza di conduzione RDS(on) bassa e quindi minori perdite di commutazione, il che si traduce in velocità di commutazione più rapide e un minor consumo energetico, portando a un'efficienza energetica superiore e a una riduzione dei costi operativi.
Queste caratteristiche rendono i MOSFET SiC particolarmente attraenti per l'uso in sistemi di energia rinnovabile (inverter solari e turbine eoliche), automazione industriale e per gli inverter di trazione. L'adozione del SiC in questi sistemi permette di ottenere una maggiore potenza in un volume più piccolo, favorendo la creazione di inverter più compatti e robusti, contribuendo a un abbassamento del costo totale del sistema (Figura 47).



Parameter	IGBT	SiC
Total Chip Area (mm2)	600[1]	120
Conduction Losses (W)	300	307
Switching Losses (W)	564	143
Total Losses (W)	864	450
Junction Temperature (°C)	134.8	132.4

Figura 47: The move to SiC from IGBT can deliver higher efficiency and power density for a lower system cost. (Note 1: combined transistor and diode area) (Fonte: STMicroelectronics)

I primi sforzi per adattare la tecnologia SiC ai rigorosi requisiti automobilistici, mediante test estensivi, si sono rivelati un successo per ST, permettendo all'azienda di fornire MOSFET SiC planari in grandi quantità all'industria delle auto elettriche per l'inverter principale, il convertitore DC-DC e l'OBC (Figura 48). Inoltre, i MOSFET SiC STPOWER si prestano bene per le stazioni di ricarica delle auto elettriche, ovvero la parte strategica dell'infrastruttura EV.

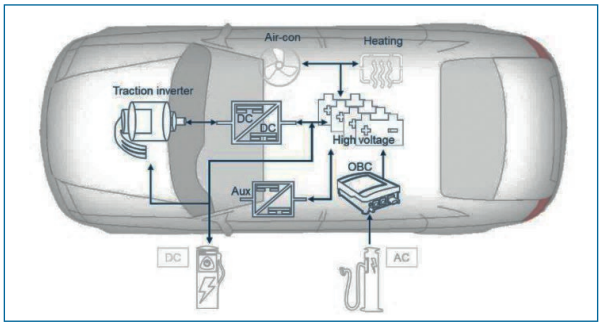


Figura 48: High-voltage power MOSFET for automotive

L'impiego del carburo di silicio nell'Automotive non solo sta aiutando a penetrare in altre aree applicative nel dominio industriale, ma sta anche indirizzando i progettisti a progettare future generazioni per applicazioni afferenti lo spazio e l'avionica.

Nella Figura 49 si vede la distribuzione dei MOSFET SiC in una vasta gamma di applicazioni in funzione delle potenze in gioco.
I MOSFET SiC e i GaN HEMT sono largamente complementari, poiché ognuno di essi indirizza applicazioni diverse. I veicoli elettrici stanno beneficiando dell'adozione su larga scala di entrambi, con:

- I MOSFET SiC e la loro capacità di operare a tensioni tra 650V e 1600V, essendo ideali per inverter di trazione, convertitori DC-DC e caricabatterie di bordo (OBC);
- Il GaN, operando a tensioni da 650V fino a 100V, potrebbe alla fine essere anche una tecnologia preziosa per queste ultime due applicazioni - grazie alle sue superiori frequenze operative - man mano che diventa più maturo ed economicamente vantaggioso.

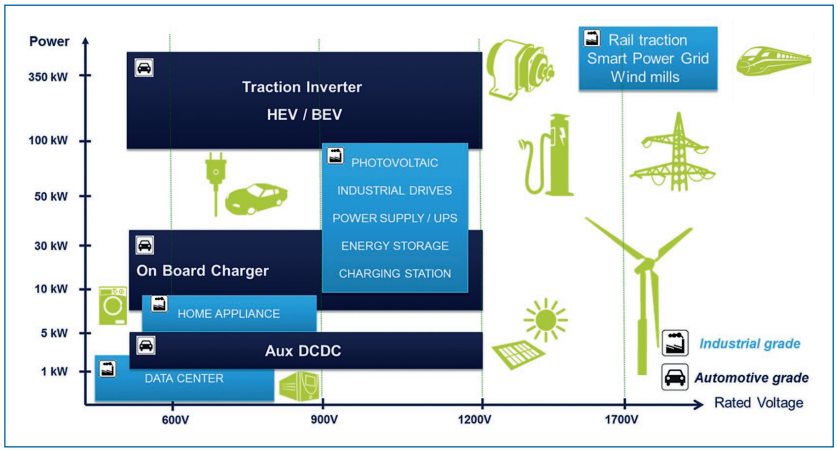


Figura 49: SIC MOSFET market applications (Fonte: STMicroelectronics)

I MOSFET SiC condivide la stessa struttura verticale del suo omologo in silicio, con l'ossido di gate quale blocco tecnologico strategico. Nel silicio, le strutture planari dei MOSFET e degli IGBT sono state da tempo sostituite da varianti più performanti di tipo trench e superjunction, anche se ci sono voluti anni perché i progettisti si adattassero a queste nuove tecnologie.
La seconda generazione planare dei MOSFET SiC viene prodotta in grandi volumi e risulta ancora fortemente vantaggiosa, per questo l'integrazione di processi trench rimane uno sviluppo tecnologico più di medio e lungo termine.

Le prossime iterazioni (Figura 50) del MOSFET SiC (terza generazione, etc.) mostrano prestazioni migliorate, in particolare per quanto riguarda R(on) e la stabilità del dispositivo, e questo sempre su tecnologia planare.
Ciò è stato ottenuto attraverso l'implementazione di un migliorato strato epi, riduzione del JFET, ottimizzazione della struttura laterale, riduzione della lunghezza di contatto e riduzione complessiva delle dimensioni del pitch. In tutte le generazioni, la struttura del canale è stata progettata in modo coerente seguendo

un'ottimizzazione dedicata che è stata ottenuta attraverso estensive attività di ricerca e sviluppo.
Passando dalla Gen2 alle nuove generazioni è possibile ottenere circa il 50% in meno di R(on), o alternativamente ottenere una riduzione simile delle dimensioni del die, e allo stesso tempo ridurre tensione di soglia gate-source VTH del MOSFET da un Vgs di 20V a 15V per la Gen3.

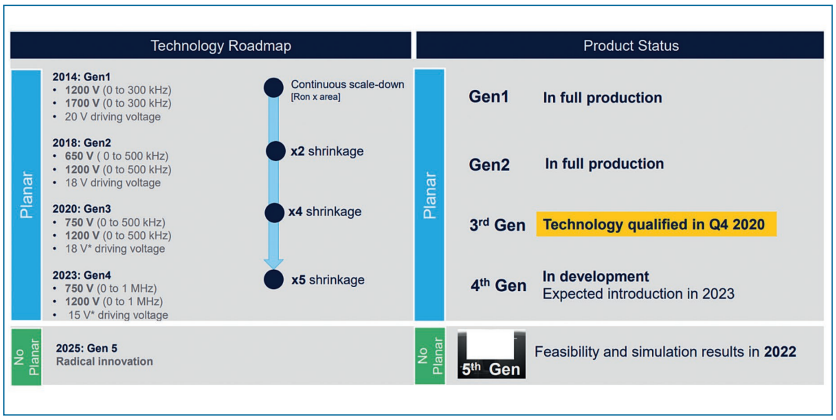


Figura 50: SiC MOSFET Technology Roadmap (Fonte: STMicroelectronics)

Allo stato attuale, invece la tecnologia Trench per il SiC è ancora nella roadmap di ST come un impegno a lungo termine; questo perché ci sono alcuni ostacoli e problemi da risolvere prima che la nuova tecnologia Trench sia resa abbastanza robusta da essere impiegata in sicurezza. In ogni caso, le potenzialità della tecnologia planare non sono state ancora sfruttate fino in fondo.
Gli sviluppi di cui sopra hanno consentito l'ulteriore espansione di questo dispositivo anche per il mercato delle applicazioni industriali. In Figura 51 vediamo la distribuzione delle varie tecnologie e il rispettivo focus tecnologico

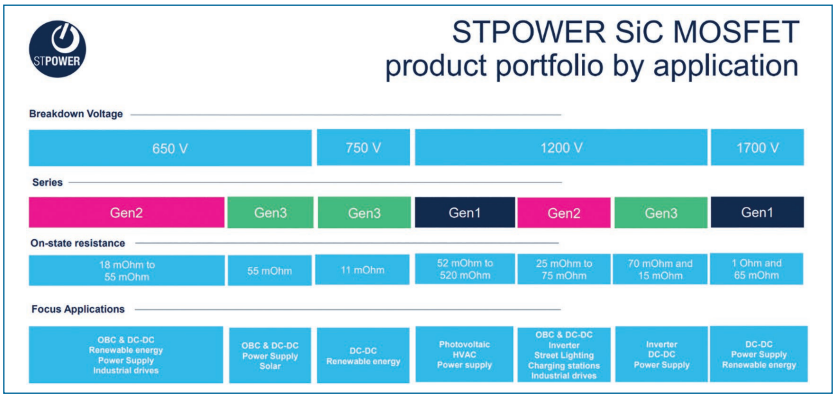


Figura 51: SIC MOSFET technology by application (Fonte: STMicroelectronics)

Stato dell'arte

Nel corso dell'estate del 1996 un gruppo di ricerca e sviluppo di STMicroelectronics a Catania ha intrapreso un progetto rivoluzionario in collaborazione con il CNR e l'Università di Catania, focalizzato sul SiC, a suo tempo un materiale promettente per l'industria elettronica. Nonostante le numerose sfide incontrate, la loro dedizione ha portato alla realizzazione del primo diodo Schottky in SiC nel maggio 2002, segnando un momento storico. Questo successo ha aperto la strada allo sviluppo di MOSFET in SiC nel 2009, contribuendo a definire il futuro dell'elettronica di potenza. L'impegno costante e l'innovazione hanno trasformato Catania in un punto di riferimento mondiale per la tecnologia SiC, culminato con la costruzione di un avanzato impianto di produzione per substrati di SiC da 8 pollici (Figura 52).

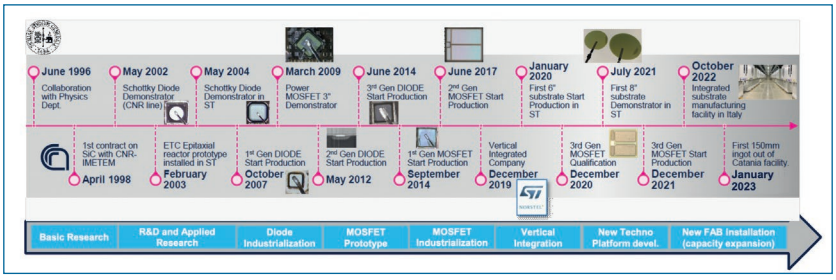


Figura 52: La storia del SiC in STMicroelectronics (Fonte: STMicroelectronics)

Subito dopo la produzione dei primi prototipi, ST ha iniziato ad attirare l'attenzione di aziende leader e partner da tutto il mondo interessati a questa nuova tecnologia rivoluzionaria. Catania si è trasformato in un hub di eccellenza tecnologica dove ricercatori, ingegneri e imprenditori collaborano strettamente, spingendo oltre i limiti del SiC e lavorando in sinergia con enti come il CNR-IMM e le università locali (Figura 53).
Fino al 2023, l'impegno congiunto in questo ecosistema ha portato alla creazione di oltre 110 brevetti e circa 650 rapporti tecnici, sottolineando l'importanza della condivisione di conoscenze ed esperienze attraverso la partecipazione a conferenze ed eventi globali. Questa dedizione collettiva ha portato ad una posizione di leadership nel mercato del SiC, con una quota dominante del 60%.



Figura 53: The ST-SIC ecosystem (Fonte: STMicroelectronics)

La storia del SiC a Catania è emblematica del fatto che l'innovazione non sia solo una questione di sviluppi tecnologici, ma anche di fattore umano e dell'ambiente collaborativo in cui si opera. È una dimostrazione potente di come il lavoro di squadra e la collaborazione possano generare risultati straordinari e apportare cambiamenti significativi nel mondo. STMicroelectronics ha annunciato a fine maggio 2024 un progetto pionieristico che segnerà un nuovo capitolo nella produzione di dispositivi elettronici e di Catania. Con un investimento di 5 miliardi di euro, di cui 2 miliardi sostenuti dallo Stato italiano nell'ambito dell'EU Chips Act, la città vedrà sorgere il primo impianto (Figura 54) al mondo completamente integrato per il SiC da 8 pollici (200 mm), in grado di soddisfare la sempre più crescente domanda e consolidare la posizione di leadership dell'azienda nella tecnologia SiC per i decenni a venire.



Figura 54: Progetto di impianto di lavorazione per fette da 200mm in SiC a Catania (Fonte: STMicroelectronics)

Il "Silicon Carbide Campus" di Catania diventerà parte essenziale dell'ecosistema globale SiC di ST, un luogo dove ricerca e sviluppo, produzione di substrati, fabbricazione di fette da 200 mm e assemblaggio di moduli convergono in un unico sito di eccellenza. Questa integrazione verticale permetterà di offrire soluzioni all'avanguardia per l'elettrificazione e una maggiore efficienza energetica, contribuendo in modo significativo agli obiettivi di decarbonizzazione.

La produzione è prevista per il 2026, con l'obiettivo di raggiungere la piena capacità produttiva entro il 2033, arrivando a produrre fino a 15.000 wafer a settimana. Questa iniziativa non solo rafforza il ruolo di Catania come centro di competenza globale per la tecnologia SiC, ma anche come un luogo di crescita e innovazione, grazie alla collaborazione con l'Università di Catania e il CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche).

Attualmente, ST produce i suoi prodotti in SiC più importanti in grandi volumi su due linee di fette da 150 millimetri a Catania e Ang Mo Kio (Singapore). Un terzo polo è rappresentato da una joint venture con Sanan Optoelectronics, con un impianto da 200 millimetri attualmente in costruzione a Chongqing (Cina) dedicato a ST per servire il mercato cinese. Gli impianti di produzione sono supportati da attività di assemblaggio e test in grandi volumi, qualificate per il settore

automotive, svolte a Bouskoura (Marocco) e Shenzhen (Cina). Le attività di R&S e industrializzazione dei substrati in SiC sono condotte a Norrköping (Svezia) e a Catania, dove l'impianto di produzione di substrati in SiC di ST sta ampliando la produzione e dove ha sede la maggior parte del personale di Ricerca e Sviluppo e di progettazione di prodotti in SiC di ST.

Risorse economiche necessarie

Il SiC è competitivo dal punto di vista dei costi e delle prestazioni. Si riconosce essere un abilitatore della trasformazione della mobilità elettrica e della transizione energetica, motivo per cui molte aziende nel comparto dei semiconduttori stanno investendo in capacità produttive e quindi in fabbriche da 8 pollici (Figura 55), con circa 20 miliardi di dollari di investimenti a livello globale. Inoltre, durante gli ultimi anni si è registrato un considerevole numero di fusioni e acquisizioni sia negli Stati Uniti che in Europa, tutte evidentemente guidata da aziende leader del settore.



Figura 55: Special focus of 8" SiC - part of the $20B global investment
(Fonte: Yole, Power SiC 2023 Report)

In Europa, le operazioni di fusione e acquisizione nel settore del carburo di silicio (SiC) e del nitruro di gallio (GaN) hanno visto come protagonisti STMicroelectronics e Infineon. Queste mosse strategiche hanno permesso alle due aziende di consolidare la loro leadership nel mercato dei dispositivi di potenza SiC.
ST ha acquisito Norstel AB nel 2019 ed Exagan nel 2020, investendo in capacità di produzione di wafer SiC e competenze nella progettazione di dispositivi di alimentazione GaN. Infineon ha seguito una strategia simile, acquisendo Siltectra nel 2018 per espandere la sua presenza nel mercato GaN oltre che SiC.
In Italia, STMicroelectronics sta realizzando un impianto a Catania con un investimento di 5 miliardi di euro per la produzione integrata di SiC che si aggiungono ai 730 milioni di euro per la costruzione di un impianto di produzione di substrati in SiC. Questi investimenti sono diretti a rafforzare la posizione di ST nel mercato SiC e dell'Europa in senso più generico.

VIP POWER - VERTICAL INTELLIGENT POWER

VIPower™ (Vertical Intelligent Power) è una tecnologia sviluppata da ST e in produzione dal 1991: fornisce controllo, protezione e diagnostica per applicazioni auto di media/alta potenza, grazie alla combinazione di dispositivi (Figura 56) MOS Power a doppia diffusione verticale con i propri sensori di temperatura e corrente e componenti CMOS e HV, oltre che una riduzione del 35% della resistenza R(on) rispetto alle precedenti strutture DMOS (alimentazione TrenchFET).

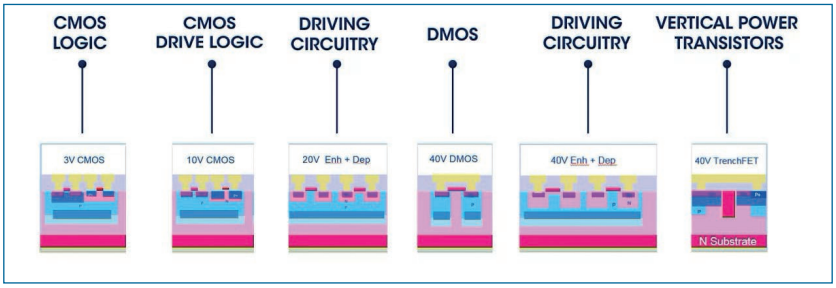


Figura 56: Combined technology for Intelligent Power solutions (Fonte: STMicroelectronics)

Nei dispositivi VIPower, il substrato rappresenta il terminale comune (drain) dei MOSFET di potenza, tipicamente usati come interruttori tra la batteria e il carico (Figura 57).

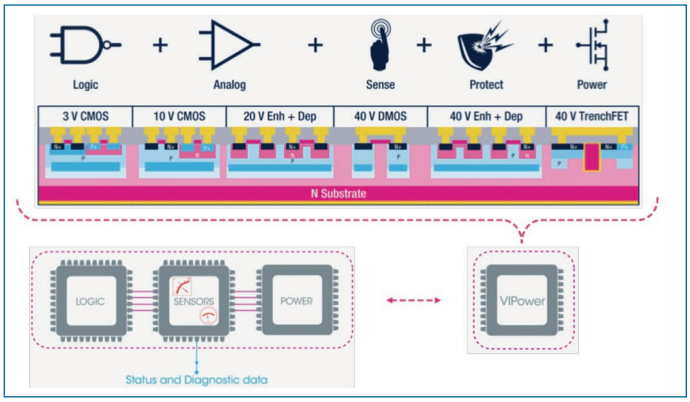


Figura 57: VIPower with common substrate (Fonte: STMicroelectronics)

Questo rende la tecnologia VIPower la scelta perfetta per il controllo dell'illuminazione esterna e interna di automobili, di motori CC per la regolazione dei sedili, di serrature delle portiere e alzacristalli, di riscaldatori resistivi e di qualsiasi tipo di carico di potenza che richieda controllo e rilevamento oltre che potenza. I prodotti VIPower sostituiscono le soluzioni elettromeccaniche richiedendo una potenza inferiore, un numero di chip inferiore e soluzioni con un numero di pin inferiore, elemento chiave per il passaggio ai veicoli elettrici (Figura 58).

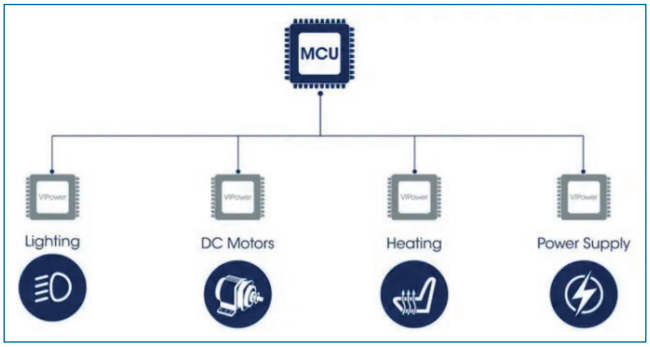


Figura 58: VIPower application (Fonte: STMicroelectronics)

Motivazioni per lo sviluppo

Si stima che l'80% di tutte le innovazioni nell'industria automobilistica oggi siano direttamente o indirettamente abilitate dall'elettronica. Con la funzionalità dei veicoli che migliora con ogni nuovo modello, ciò significa un aumento continuo del contenuto di semiconduttori per auto.

Nel campo dell'elettronica di carrozzeria, l'auto moderna incorpora numerosi sistemi elettronici interconnessi che vanno dai controlli dell'abitacolo e della zona porta ai sistemi HVAC, dai controlli dei sedili ai sistemi di tergicristalli e di illuminazione (Figura 59). Con l'aumento dell'uso dell'elettronica nei veicoli, cresce anche la necessità di migliorare l'affidabilità e le capacità diagnostiche. ST affronta questa sfida con lo sviluppo del "smart junction box", un centro di

commutazione e potenza intelligente che integra varie funzioni e caratteristiche, da quelle dell'illuminazione a quelle dei tergicristalli, attraverso un'architettura completa che include moduli hardware e software aggiornabili. Grazie alla sua tecnologia VIPower e alla profonda conoscenza applicativa, ST si posiziona come leader nell'elettronica dell'illuminazione automobilistica, fornendo soluzioni che vanno dai tradizionali bulbi incandescenti ai più moderni sistemi a LED o HID ai più moderni sistemi a LED o HID.

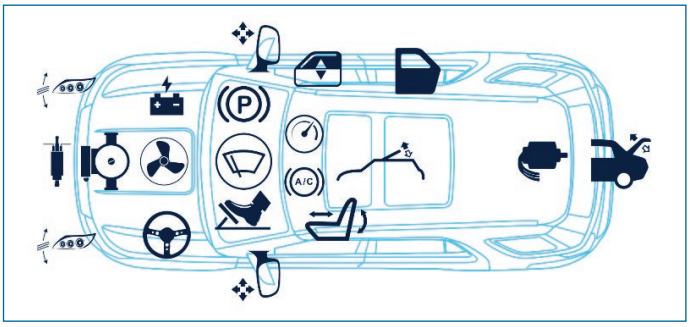


Figura 59: Key functions and solutions for Motor Control (Fonte: STMicroelectronics)

Il portafoglio di soluzioni per l'automotive, progettato per supportare l'elettrificazione e la digitalizzazione dei veicoli, affronta tutte le principali aree applicative: dal gruppo trasmissione (powertrain) al tealio (chassis), dalla sicurezza alla protezione, dai sistemi ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems) all'elettronica di carrozzeria, fino alla telematica, all'Infotainment e alla connettività. Queste soluzioni sono la risposta diretta all'evoluzione verso veicoli elettricamente più sofisticati e affidabili.

In questo l'unità di controllo elettronico (electronic control unit o ECU) svolge un ruolo fondamentale nei veicoli moderni, fornendo una vasta gamma di funzioni: affidabilità, comfort, sicurezza e non solo. L'ECU è responsabile del controllo di vari aspetti del veicolo, come il motore, la trasmissione, il sistema frenante, nonché i sistemi di intrattenimento e comunicazione, e rispondente alle normative o agli standard internazionali automotive.

Questo richiede considerazioni di progettazione specializzate e soluzioni per soddisfare le ulteriori richieste poste dal sistema di alimentazione tradizionale a 12V, per garantire numerose opzioni di connettività insieme alla capacità di supportare più telecamere e sensori anche in condizioni difficili. Questo migliora la sicurezza e il comfort degli occupanti del veicolo e aumenta anche la durabilità e la longevità complessiva del sistema.
I severi transitori ad alta energia di un alternatore e il rumore a basso livello del sistema di accensione sono esempi di pericoli dinamici per le alimentazioni automobilistiche. Una di queste condizioni estreme è l'avviamento a freddo, che si verifica quando la batteria tenta di alimentare il motorino di avviamento del motore e la sua tensione scende a una frazione del livello normale, tipicamente sotto i 3V, a causa dell'elevato assorbimento di corrente. La tecnologia start-stop rende il controllo delle operazioni di avviamento a freddo ancora più difficile a causa del gran numero di eventi, e le basse temperature peggiorano il problema riducendo ulteriormente la tensione della batteria. Un'altra sfida che i moduli elettronici automobilistici devono affrontare è la necessità di essere il più efficienti possibile per minimizzare il consumo di energia e prolungare la vita della batteria del veicolo.
Tutto ciò richiede soluzioni intelligenti per circuiti di gestione dell'energia specializzati e protezioni che aiutino a mitigare gli effetti di questi pericoli garantendo al contempo funzionalità, prestazioni e robustezza di alto livello.

L'adozione crescente di veicoli ibridi ed elettrici sta guidando la necessità di driver per lato alto (HSD, High-Side Drivers) in grado di gestire efficacemente il flusso di energia tra la batteria, il motore elettrico e altri componenti, garantendo un funzionamento sicuro e affidabile.
Progettati per fornire protezione da sovracorrente, sovratensione e protezione termica nelle centraline automobilistiche, i driver high-side controllano il flusso di corrente in un circuito high-side dove il carico (ad esempio un motore o una luce) è collegato tra la tensione di alimentazione positiva ed il driver. Comunemente impiegati nelle applicazioni automobilistiche in cui il carico deve essere

controllato da remoto o non è facilmente accessibile, gli interruttori intelligenti di potenza basati su MOSFET possono rilevare una vasta gamma di guasti e disturbi elettrici, interrompendo rapidamente il flusso di corrente per evitare danni alle unità elettroniche di controllo. Oltre alle funzioni di protezione, gli interruttori di potenza intelligenti offrono anche funzionalità di diagnostica e monitoraggio. Ad esempio, possono monitorare la temperatura del modulo elettronico e regolare il flusso di corrente per evitare il surriscaldamento. Questi dispositivi intelligenti possono anche fornire un feedback al sistema di controllo del veicolo, consentendo una gestione più efficiente ed efficace dell'impianto elettrico.

La configurazione high-side è preferita in molte applicazioni automobilistiche per il miglior controllo del carico. In particolare, è vantaggiosa per due motivi principali:

- Protegge dal funzionamento continuo in caso di cortocircuito a terra, che potrebbe danneggiare il carico;
- Evita la corrosione elettrochimica che può verificarsi nelle batterie al piombo da 12V a causa di condizioni ambientali difficili come alte temperature, umidità e atmosfera salina.

L'HSD è collegato tra il carico e la sorgente di alimentazione positiva, come illustrato nella Figura 60.

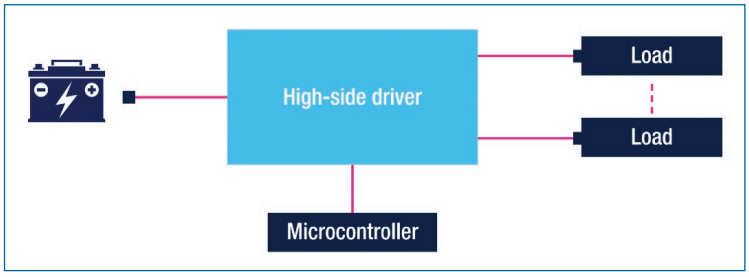


Figura 60: Simplified block diagram for HSD connection (Fonte: STMicroelectronics)

Questa configurazione garantisce che i componenti elettrici siano al minimo potenziale quando non sono alimentati, prevenendo la corrosione elettrochimica per la maggior parte della vita dell'auto.
Gli HSD integrano un'interfaccia periferica seriale (SPI) o un'interfaccia parallela standard con canali singoli, doppi e quadrupli, facilitando la scalabilità dei progetti dei circuiti. Gli HSD M0-9 includono anche circuiti di controllo digitali e/o analogici che possono pilotare un transistor di potenza verticale nello stesso chip, semplificando la progettazione e riducendo le dimensioni e i costi complessivi dei sistemi. Questi interruttori intelligenti gestiscono correnti e tensioni elevate fino a circa 40V e sono dotati di protezione integrata contro sovracorrenti e sovratensioni.
Offrono inoltre un arresto termico e una diagnostica sofisticata per garantire funzionalità, prestazioni, robustezza e durata ottimali (Figura 61).

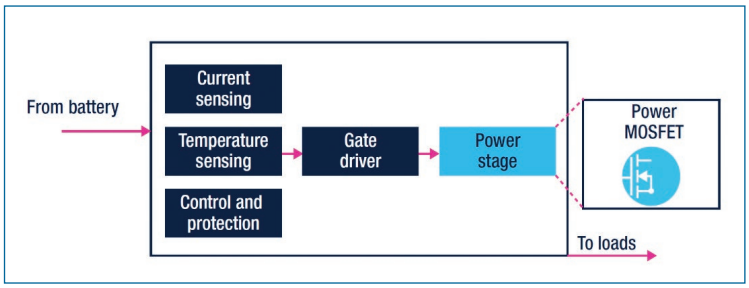


Figura 61: Simplified block diagram of VIPower M0-9 smart HSD series

Nel complesso, i driver intelligenti svolgono un ruolo fondamentale nel fornire un'alimentazione stabile e affidabile a un'ampia gamma di carichi automobilistici, compresi quelli resistivi, induttivi e capacitivi. Sono in grado di gestire improvvisi picchi di corrente ed eventi transitori energetici che si verificano quando la corrente di carico viene interrotta, mantenendo le prestazioni ottimali dei cablaggi e proteggendo i convertitori CC-CC locali.

Stato dell'arte

Lo sviluppo tecnologico del VIPower vede coinvolti per la ricerca e sviluppo e il front-end i siti di Catania e Singapore e per il back-end i siti Bouskoura, Shenzhen, Muar, Calamba (Figura 62)

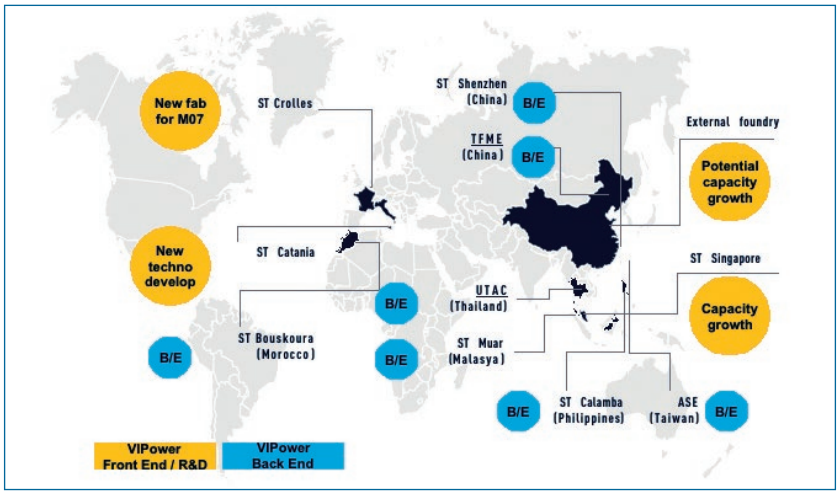


Figura 62: VIPower Fronte End, Back End and R&D (Fonte: STMicroelectronics)

Secondo Tech Insights, il TAM del VIPower, per i domini applicativi "body and convenience", "Chassis & Safety", "Electro Mobility" e "Zonal", vale circa 3,6M$ nel 2028 e 3,9M$ nel 2030.

Il mercato principale quindi è sicuramente l'automotive, con segmenti di applicazione dominanti che includono l'illuminazione esterna, il comfort della carrozzeria, il riscaldamento e la regolazione dei sedili, il controllo dei motori DC come la serratura della porta e il bagagliaio elettrico, e la gestione dell'energia nel veicolo (Figura 63).

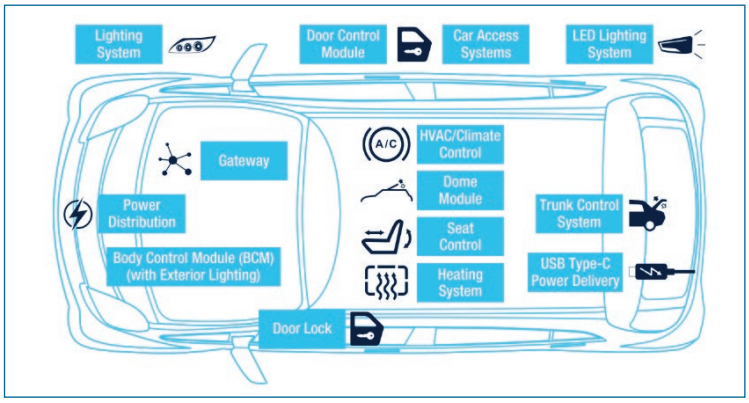


Figura 63: ST's key products and solutions for Body and Convenience applications (Fonte: STMicroelectronics)

Intelligent High-Side Drivers

Lo stato dell'arte nei driver ad alta tensione per l'automotive ha visto notevoli progressi nel corso degli anni. Nel settembre 2021, è stato stabilito un nuovo punto di riferimento con il lancio dei driver a monte (high-side) ST VN9D30Q100F e VN9D5D20FN, che semplificano l'hardware e il software per progettare l'unità di controllo elettronico (electronic control unit o ECU) ed aumentare l'affidabilità del sistema. Questi dispositivi sfruttato la tecnologia VIPower M0-9 di ultima generazione per integrare un efficiente Vertical Trench MOSFET da 40V con logica digitale a 3.3V e circuiti analogici ad alta precisione in un compatto package QFN da 6mm x 6mm, con un significativo 40% di riduzione dell'area dei driver IC comparabili e già presenti sul mercato (Figura 64). Fornendo un driver complesso che opera indipendentemente dall'applicazione, si semplifica lo sviluppo del software e si facilita la conformità AUTOSAR.

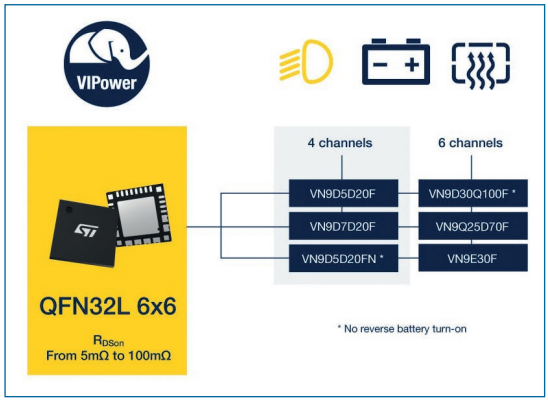


Figura 64: VIPower M0-9, a new generation of automotive intelligent switches (Fonte: STMicroelectronics)

L'ampliamento continua con l'introduzione di driver high-side per l'automotive a singolo, doppio e quattro canali. Questi driver indirizzano una vasta gamma di applicazioni in tutto il veicolo. Si sono distinti per la loro corrente di standby molto bassa, che ha ridotto significativamente il consumo della batteria quando i veicoli non sono in funzione. Prodotto utilizzando la tecnologia proprietaria VIPower M0-9, questi driver gestiscono alte correnti con efficienza, insieme a robuste caratteristiche di protezione e una gestione flessibile del reset per le risposte ai guasti.
In pratica, i dispositivi M0-9 hanno la capacità fondamentale di ripristinare automaticamente la piena funzionalità una volta eliminata la condizione di guasto. Ciò significa che il dispositivo può riprendersi da una condizione di guasto senza intervento esterno, riducendo i tempi di fermo e migliorando l'affidabilità del sistema.
A giugno 2024, l'azienda ha iniziato la produzione del VNF9Q20F, un driver automatico intelligente per l'automotive che si distingue per l'integrazione del MOSFET VIPower M0-9 avanzato di ST con la tecnologia proprietaria STi2Fuse, fornendo una soluzione integrata monolitica che ha migliorato la stabilità della tensione della rete di bordo e la sicurezza funzionale.

Il successo della tecnologia VIPower può essere misurato dal fatto che in media vengono ordinati 40 dispositivi VIPower ogni secondo. La maggior parte dei dispositivi viene impiegata in applicazioni per la carrozzeria delle automobili in sostituzione di una serie di soluzioni elettromeccaniche (relays, etc.) e fornendo soluzioni più affidabili (Figura 65) con minor potenza, minor numero di chip e minor numero di pin.

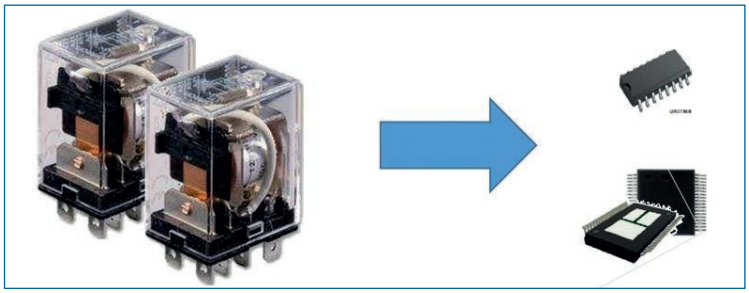


Figura 65: Relays performance will lead to low reliability vs Solid State Switches (10x switching times) (Fonte: STMicroelectronics)

Intelligent Low-Side Drivers

Vi è una vasta gamma di interruttori low-side smart automotive a 3 e 5 pin (OMNIFET) basati sulla tecnologia VIPower. Questa tecnologia proprietaria consente l'integrazione di circuiti di controllo e protezione digitali e analogici che pilotano un MOSFET di potenza verticale, tutto su un unico chip.

Gli interruttori low-side, con le loro funzionalità integrate, sono interruttori di potenza che possono gestire alte correnti in modo sicuro e in conformità agli standard automotive. Richiedono solo un ingresso logico TTL semplice (o un ingresso logico CMOS per uno switch 5-pin). Questi dispositivi sono compatibili pin-to-pin con i MOSFET di potenza, funzionano da -40 a +150°C, garantiscono il controllo di carichi induttivi o resistivi (Figura 66) in tempo reale e sono protetti contro il surriscaldamento, proteggendo così l'intera scheda.

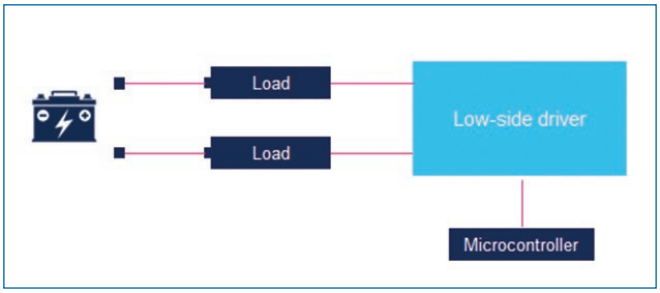


Figura 66: Simplified block diagram for LSD connection (Fonte: STMicroelectronics)

Gli ultimi dispositivi a 5-pin offrono anche funzionalità diagnostiche. Sono dispositivi versatili in grado di affrontare molte applicazioni per la carrozzeria delle automobili (Figura 67).



Figura 67: VIPower LSD Target application (Fonte: STMicroelectronics)

La terza generazione di driver intelligenti denominata OMNIFET III (Figura 68), sviluppata con la tecnologia VIPower M0-5, ha ulteriormente migliorato la robustezza, aumentato le funzionalità e la densità del package. La complessità di un moderno driver low-side (LSD) è ancora relativamente bassa rispetto a molti altri circuiti integrati logici. Tuttavia, la combinazione di funzioni logiche digitali con strutture di potenza analogiche alimentate dalla batteria dell'auto non stabilizzata su un'ampia gamma di temperature è una sfida per un tale dispositivo.

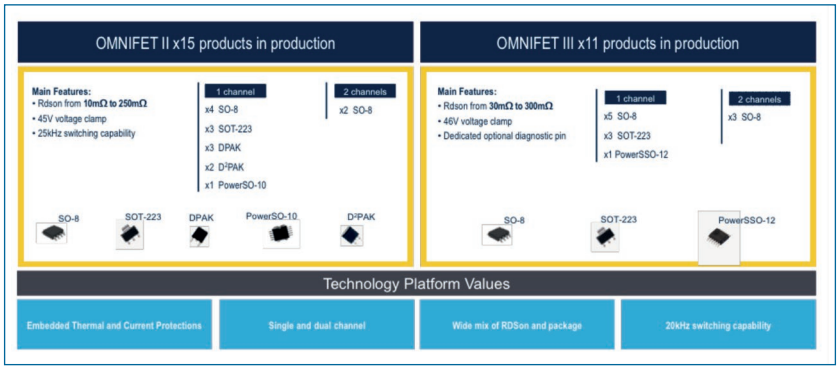


Figura 68: VIPower Low Side Driver Target Product Portfolio (Fonte: STMicroelectronics)

Configurable Low/High Side Switches

Lo sviluppo prevede un ampliamento del portafoglio di dispositivi configurabili low-/high-side prodotti con architettura ST BCD, conformi alla norma ISO26262 per la sicurezza funzionale dei dispositivi elettrici e/o elettronici nei sistemi automobilistici.

Questi interruttori low-side e high-side configurabili dispongono di funzioni di protezione e diagnostica, sono controllati tramite l'interfaccia seriale SPI e sono utilizzati per pilotare piccoli carichi automobilistici, spesso in combinazione con altri prodotti automotive. Le tipiche possibili applicazioni sono raffigurate nella Figura 69.

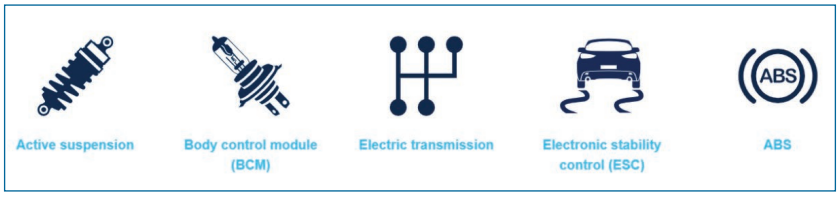


Figura 69: Low/High Side Switches main applications (Fonte: STMicroelectronics)

Nel complesso, la progressione di questi sviluppi riflette una chiara traiettoria verso soluzioni più integrate, efficienti e intelligenti per la gestione dell'energia

automobilistica. E come nel caso delle altre tecnologie, anche in questo caso il sw e i tool a corredo della tecnologia VIPower al silicio sono strategici per supportare gli ingegneri nello sviluppo delle loro applicazioni (Figura 70):



Figura 70: Development support tool for VIPower (Fonte: STMicroelectronics)

- Easyboards: scheda di valutazione per IC automotive in grado di semplificare la valutazione da parte degli sviluppatori senza impegnare risorse e tempo per progettare un circuito personalizzato. Le Easyboard sono board di valutazione semplici ed economiche che collegano un prodotto VIPower a un carico;
- TwisterSIM: è un simulatore elettro-termico unico che abbrevia il ciclo di progettazione abilitando valutazioni ingegneristiche complesse e facilita l'individuazione dei driver HSD adatti in base a: carico, condizioni di guasto, analisi del comportamento diagnostico, prestazioni termiche dinamiche, etc.;
- VIPower-FINDER: un sistema user-friendly con cui definire facilmente il dispositivo che si adatta meglio alla propria applicazione utilizzando un motore di ricerca Smart o parametrico.

Risorse economiche necessarie

Gli investimenti si concentrano principalmente nell'incrementare le performance, nonché nella ricerca di soluzioni circuitali innovative con investimenti che si possono inglobare all'interno dei costi complessivi afferenti alla R&S.

SISTEMI DI PACKAGING DEI CHIP: PACKAGE 3D

La produzione di un circuito integrato può essere suddivisa in due fasi:

- La fabbricazione dei wafer, nota come front end, comporta tecnologie di processo estremamente sofisticate per produrre chip in silicio o materiale composito;
- L'assemblaggio e il test, noti come back end, coinvolgono processi di packaging e test dei die altamente precisi e automatizzati.

I prodotti a semiconduttori in genere sono il risultato dell'uso di diverse e fondamentali tecnologie di processo per semiconduttori, e frutto di decenni di investimenti e di sviluppo. Ogni processo è meticolosamente progettato e ottimizzato per rispondere alle esigenze specifiche delle applicazioni dei clienti.

L'innovazione nel packaging è una parte essenziale dell'industria dei semiconduttori. La combinazione unica di competenze nello sviluppo della tecnologia di processo, nel design dei prodotti, nel packaging e nella produzione consente di offrire al mercato soluzioni abilitanti la vasta gamma di applicazioni indirizzate. L'innovazione è continua, con l'obiettivo di creare chip più piccoli e altamente integrati che aumentano le prestazioni e migliorano l'affidabilità, offrendo al contempo soluzioni più convenienti sul mercato. Le attività di R&S nel packaging interne a ST permettono di ottimizzare la tecnologia di packaging per adattarsi ai requisiti di processo e design del prodotto. Inoltre, sono fondamentali le interazioni tecniche tra il design del prodotto, la produzione front-end e back-end per valutare congiuntamente nuove tecnologie di processo o caratteristiche e materiali di packaging (Figura 71)

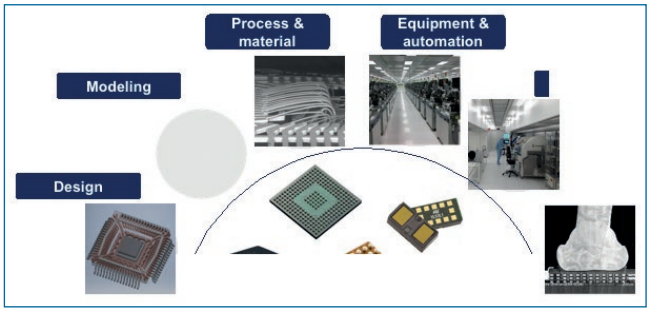


Figura 71: Packaging R&D e focus per garantire affidabilità e qualità (Fonte: STMicroelectronics))

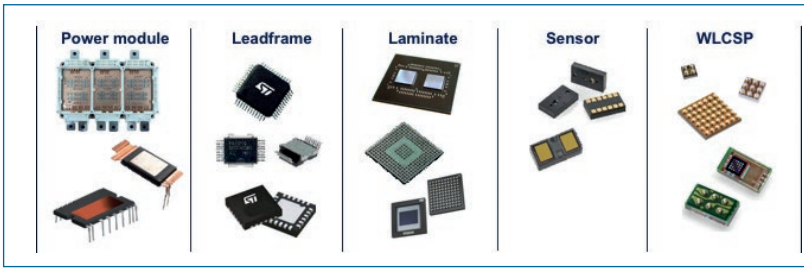


Figura 72: ST packaging and R&D (Fonte: STMicroelectronics)

Alcune delle aree in cui si sta innovando nel packaging (Figura 72) includono:

- System-in-Package (SiP) per la potenza, che integra più die in un unico package per soluzioni di potenza intelligente basate su GaN, BCD e ViPower;

- Moduli di potenza in SiC per l'elettrificazione dell'auto utilizzando design, materiali e processi innovativi per massimizzare la densità di potenza;

- Packaging di potenza per componenti discreti (singoli) con substrato in rame a connessione diretta sul lato superiore del package, per migliorare l'accoppiamento termico con i dissipatori di calore;

- Packaging per ambienti estremi, come quelli incontrati nelle applicazioni automobilistiche e industriali;

- Isolamento galvanico incorporato nel packaging del chip, per applicazioni di automazione industriale;

- Packaging ad alta affidabilità e basso costo con elevato numero di pin per microcontrollori automotive (MCU);

- Wafer Level Chip Scale Packaging (WLCSP) per dispositivi con elevati vincoli dimensionali, come smartphone e dispositivi indossabili;

• Miniaturizzazione avanzata dei packaging che integrano sensori, come i nostri dispositivi Time-of-Flight e MEMS;

• Integrazione di antenna-in-package per dispositivi RF a onde millimetriche (5G e 60 GHz);

• Packaging 3D che coinvolge l'impilamento di più die (stacked dies, Figura 73) uno sopra l'altro e il loro collegamento elettrico tramite Through-Silicon Vias (TSV) o altri inter-connettori avanzati;

• Packaging resistenti alle radiazioni per applicazioni aerospaziali.

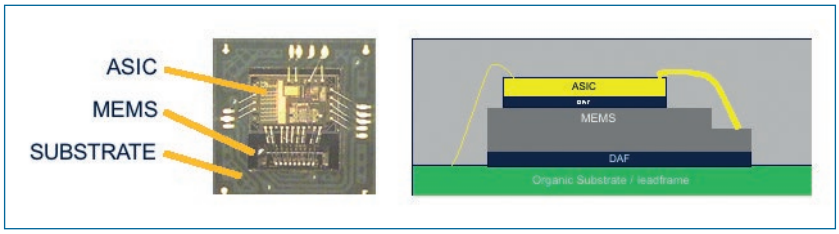


Figura 73: Stacked solution in a motion MEMS (Fonte: STMicroelectronics)

La maggior parte degli ASICs utilizza package che sono facilmente riconoscibili dall'esterno grazie al loro involucro di resina nera, che li ingloba garantendo una protezione sufficientemente robusta, impermeabile e in grado di portare all'esterno le connessioni elettriche dell'ASIC in modo ermetico.
Recentemente, però, sono apparse nuove applicazioni come la Realtà Aumentata (AR), di cui un esempio implementativo in Figura 74, la Realtà Virtuale (VR) e i sistemi di visione Automotive per la guida autonoma che usano specchi MEMS, che di conseguenza devono offrire al loro interno uno spazio sufficientemente grande per consentire ai MEMS i necessari movimenti spaziali; di conseguenza, servono soluzioni strutturalmente diverse dalle precedenti, che hanno richiesto uno sforzo progettuale per introdurre nuovi materiali e processi di fabbricazione.

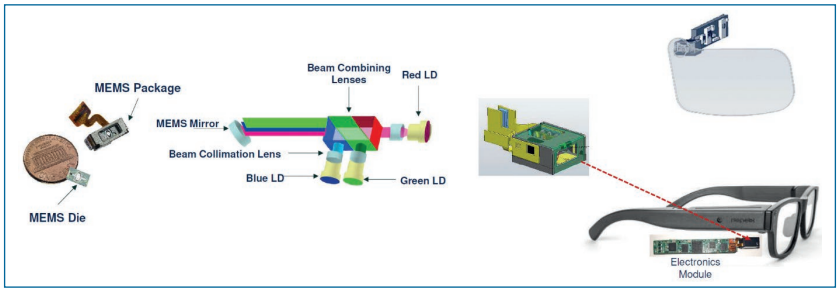


Figura 74: Laser Beam Scanning (LBS) – AR Principles of Operation (Fonte: STMicroelectronics)

La roadmap tecnologica dei package (Figura 75) si sviluppa quindi tenendo conto di diversi fattori, quali intrinseche differenze applicative (asse y), disponibilità e integrazione di nuovi materiali (asse x) come materiali di supporto ceramici, soluzioni flessibili e non ultime, soluzioni a favore di SiP piuttosto che SoC.

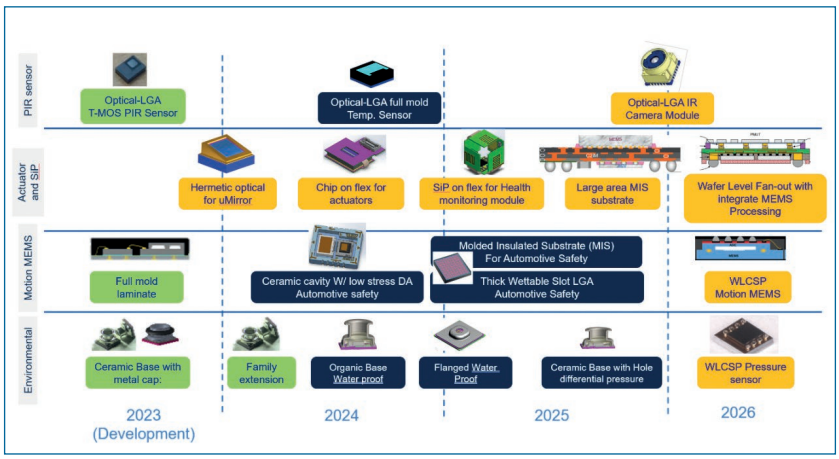


Figura 75: MEMS Pressure sensor in ceramic (a), 3D-Model for waterproof-package (b) (Fonte: STMicroelectronics)

Motivazioni per lo sviluppo

Il package di un chip è parte dello sviluppo tecnologico dei semiconduttori.
In origine, l'attributo principale dei circuiti integrati era "semplicemente" incapsulare e proteggere un chip, fornendo funzioni meccaniche, elettriche e termiche. Con il rapido ritmo di innovazione dei sistemi elettronici e delle loro applicazioni nella vita quotidiana, la tecnologia del packaging è diventata ora un fattore chiave per portare sul mercato le migliori soluzioni a semiconduttore in termini di miniaturizzazione, densità di potenza, integrità del segnale elettrico, dissipazione del calore e, non ultimo, costi. La continua spinta alla miniaturizzata dei prodotti consumer (smartphone, dispositivi indossabili, IoT) e più recentemente la forte elettrificazione e sviluppo di dispositivi alimentati a batteria, stanno spingendo la tecnologia del packaging dei chip a concentrarsi in un unico dispositivo di più elementi (si vedano MEMS e ASICs), che a sua volta ha condotto allo sviluppo di System in Package (SiP), ovvero dell'Integrazione Eterogenea (HI - Heterogenous Integration).

L'Heterogenous Integration (HI) consente anche di "espandere" la legge di Moore e di "connettersi" all'avanzamento delle tecnologie "More than Moore" risolvendo le problematiche dell'integrazione dei nuovi sistemi avanzati.
L'HI rappresenta un cambiamento di paradigma rispetto all'approccio tradizionale del System-on-Chip (SoC), offrendo un'alternativa che può migliorare la funzionalità, aumentare le prestazioni e ridurre i tempi di sviluppo.
L'integrazione eterogenea è la combinazione di diversi tipi di componenti prodotti separatamente, in un assemblaggio di livello superiore come un SiP. L'obiettivo è migliorare la funzionalità, le prestazioni, ridurre i tempi di ciclo e ottimizzare i costi.
Questo processo integra diversi chip, *chiplet* (circuito integrato elementare progettato per essere combinato con altri chiplet in un unico pacakge) e componenti di chip in un unico package. Diversamente da un chip monolitico (Figura 76), come un SoC, dove tutti i blocchi funzionali sono costruiti su un singolo die e nello stesso nodo di processo, l'integrazione eterogenea combina chip diversi

(anche con diversi nodi di processo e con differenti funzioni) su un substrato e/o impilati l'uno sull'altro con diversi schemi di interconnessione.

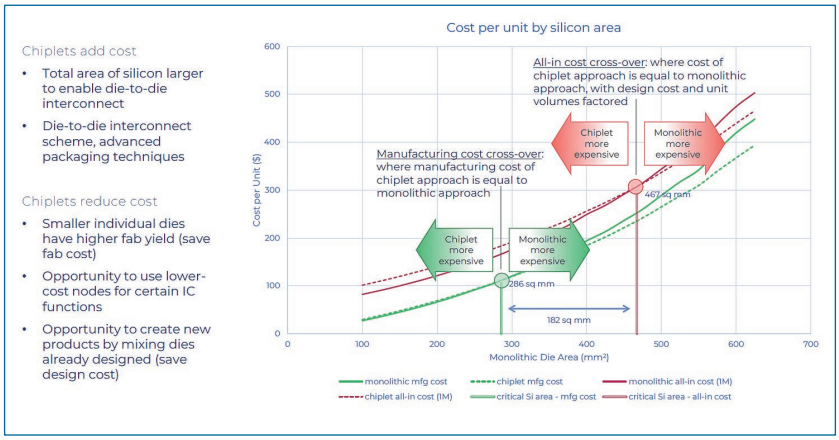


Figura 76: Economics of chiplets (Fonte: Status of the Processor Industry 2023 Report)

Con il termine di Heterogenous Integration si identificano diversi tipi di packaging avanzato (Figura 77), inclusi:

- Moduli multi-chip (MCM);
- System-in-Package (SiP);
- Configurazioni 2.5D;
- Fan-outs;
- 3D-IC.

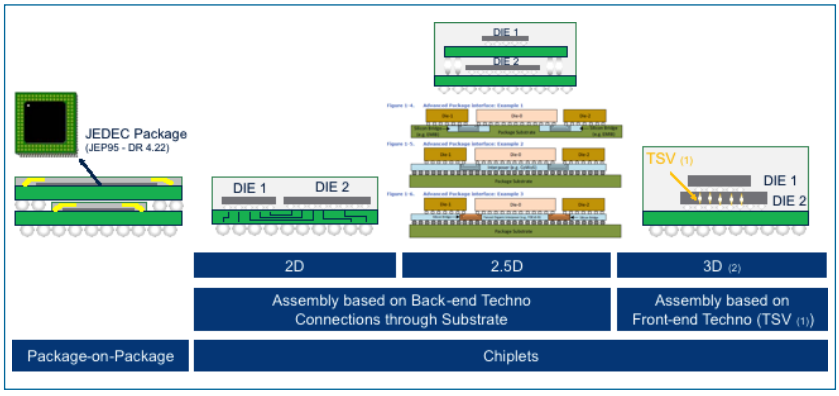


Figura 77: Topologie 2D, 2.5D, 3D

Le aziende praticano tipi di integrazione eterogenea su MCM e SiP da anni, prima che il termine fosse coniato. Quando i progettisti di chip hanno iniziato a disaggregare i loro chip (scomponendo i chip monolitici in funzioni su chiplet separati), il termine è diventato comune nell'ambito del packaging.
L'integrazione eterogenea consente un numero quasi illimitato di funzionalità in un singolo packaging. Tuttavia, introduce sfide a livello di sistema in uno spazio ridotto, con varie interazioni possibili:

- Invecchiamento non uniforme;
- Deformazione (warpage);
- Differenti stress meccanici.

Gli strumenti di simulazione multi-fisici per le interazioni (termiche, etc.) aiuteranno i gruppi di progettazione nel superare le associate problematiche. L'integrazione eterogenea richiederà la standardizzazione dei modelli di chiplet e dell'IP di connettività die-to-die, oltre a processi di sviluppo di co-design pacakging - die.

L'integrazione eterogenea è già una realtà, con molti strumenti in grado di supportare un'integrazione flessibile e si basa su:

1. SiP per l'integrazione di alto livello;
2. SiP per l'ultra-miniaturizzazione nell'elettronica indossabile;
3. Progetti modulari basati sui blocchi chiplet in alternativa ai complessi SoC.

Inoltre, l'innovazione collaborativa e la cooperazione sono essenziali per avere successo nell'area dell'HI.
La valutazione di tutte queste variabili, che si influenzano a vicenda, connessa alla disponibilità di bassi prezzi, sia dei MEMS che ASICs, fanno sì che la scelta e la progettazione dei loro relativi package debba necessariamente seguire due strade di valutazione parallele, quindi:

- Top-Down, pilotato dalle applicazioni, come ad esempio i sensori di rilevamento ottico e guida ottica, o sensori inerziali più robusti per il settore automotive, o ancora nodi IoT per l'ambiente industriale;
- Bottom-Up, guidata dalla tecnologia, dove il basso costo abbinato alla disponibilità tecnologica di una "integrazione eterogenea" e la disponibilità di Fan-Out adeguati porteranno alla progettazione e all'adozione di package dedicati.

Non ultime, le stampanti 3D, in una prospettiva di medio-lungo termine (5 a 10 anni), potranno contribuire alla progettazione e produzione di package che utilizzano soluzioni strutturali oggi non usate, come ad esempio l'eliminazione del wire bonding a favore di deposizioni di metal verticali, con immediate ricadute positive in termini di riduzione di cross talk e noise.
Il limite attuale di tutte le stampanti 3D in ambito package per semiconduttori è il loro basso throughput, attualmente incompatibile con produzioni di massa nell'ordine dei milioni di pezzi l'anno, come i settori consumer, industrial o automotive.
Una possibile mitigazione di questo limite consiste nella disponibilità di stampanti 3D multi-ugello, in modo tale da parallelizzare la deposizione di materiale e quindi aumentare la loro produttività.

Stato dell'arte

Il packaging è parte integrante delle attività di sviluppo dei MEMS, come dettagliato anche nella sezione dedicata ai MEMS. Proteggere e incapsulare un chip non è più sufficiente, in quanto ora il package deve consentire al dispositivo di percepire l'ambiente che lo circonda.
La terza dimensione diventa per i sensori MEMS (Figura 78) significativa per le funzionalità aggiuntive:

- 2D packaging: I segnali elettrici si distribuiscono (FAN OUT) dal circuito integrato (IC) ai pin di input/output (IO) del package;
- 3D packaging: I segnali elettrici vengono trasferiti verticalmente da un IC all'altro e si distribuiscono (FAN OUT) dal circuito integrato (IC) ai pin di input/output (IO) del package;
- Sensor packaging: nei package di sensori MEMS, la terza dimensione è deputata al trasferimento di segnali fisici o stimoli dal mondo esterno all'elemento sensore.

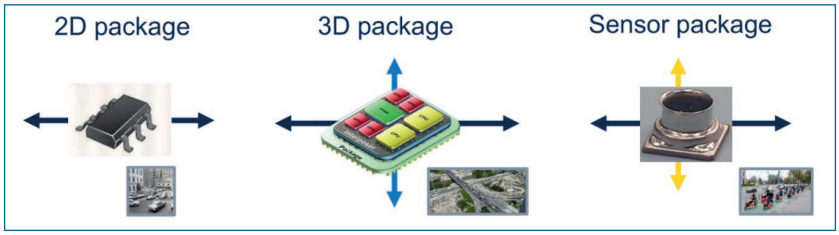


Figura 78: In sensor packages the third dimension is the transfer of physical signal (Fonte: STMicroelectronics)

Mentre nei packages 2D e 3D la terza dimensione riguarda principalmente la gestione e la distribuzione dei segnali elettrici all'interno del package, in quello dei sensori essa rappresenta il processo in cui segnali fisici (come pressione, temperatura, luce, etc.) vengono convertiti in segnali elettrici all'interno del sensore. Questo "percorso di rilevamento" è un processo di conversione e trasferimento fondamentale per il funzionamento del sensore. Vediamo di seguito qualche esempio della complessità di questi nuovi e diversi packages.

Package ermetici

Alcune applicazioni ottiche, come i sistemi LIDAR (Light Detection And Ranging) e LBS (Laser Beam Sensor), usano specchi MEMS che si muovono nella direzione "z" e interagiscono con l'ambiente esterno. Le due condizioni, ambiente esterno insieme al movimento in asse "z", guidano obbligatoriamente la progettazione di un package che, rispettando sempre i requisiti di protezione da temperatura, umidità ed ermeticità, consenta i movimenti spaziali propri delle soluzioni MEMS. Nella Figura 79 è riportato il concept design di un package che risponde a queste esigenze; come si può notare, ha una forma e materiali molto diversi dai soliti package di resina nera già mostrati precedentemente. In particolare, include una finestra ottica (1), un cappuccio metallico (2), die MEMS micro-specchio (3), apertura della finestra perforata (4), preform di saldatura (5), wire bonding (6) e un circuito a base di ceramica (7).

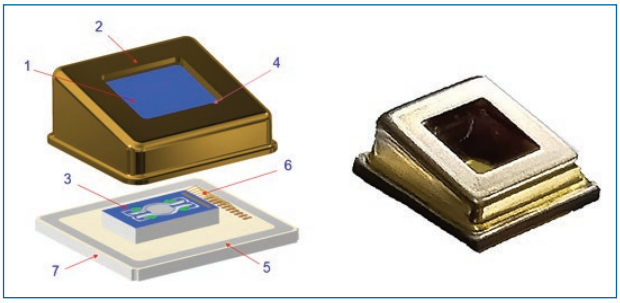


Figura 79: F3D-model (a) and proto photograph (b) of package structure in vacuum or N2 atmosphere (Fonte: STMicroelectronics)

Per questa categoria di contenitori ermetici, il relativo scenario di mercato previsto è molto promettente già a partire dal 2024, con un volume di circa 10-15Munits/Y nei 3 anni successivi nelle applicazioni scanner 2D, proiettori LASER e LIDAR con coinvolgimento di micro-specchi MEMS dinamici, per un valore complessivo nell'ordine dei 530M$.
La costruzione di una linea di sviluppo completa, comprendente le attrezzature necessarie all'assemblaggio di package ermetici, la costruzione del cappuccio e relativo saldatura della finestra ottica, richiede investimenti da 1,8M$.

Package polimerico per sensori termici a infrarossi

Ogni oggetto emette radiazioni infrarosse (IR) a seconda della sua temperatura, e i rilevatori IR sono oggi utilizzati per una vasta gamma di funzioni, tra cui il rilevamento del movimento, la misurazione della temperatura senza contatto, il conteggio delle persone, il rilevamento di incendi e gas in ambienti chiusi e all'aperto.
La caratteristica macroscopica identificativa dei package per rilevamento di raggi infrarossi (IR) è la finestra che consente il passaggio di lunghezze d'onda IR verso il sottostante sensore T-MOS.
Un package per sensore IR contiene componenti diversi (Figura 43), quali il transistor T-MOS (Thermal MOS), un ASIC dedicato per ricevere e interpretare correttamente le informazioni che arrivano dal T-MOS, e le connessioni elettriche. Questi

componenti sono montati su un supporto e chiusi in un package dotato di un filtro specifico per la lunghezza d'onda IR: ad esempio, per rivelare la presenza umana occorre progettare un filtro nell'intervallo di lunghezze d'onda di 5-13µm. Una corretta selezione e progettazione di ogni componente determina la sensibilità finale del prodotto, elemento distintivo per i sensori IR. La Figura 80 mostra gli elementi principali del package che oltre all'ASIC contiene il sensore IR T-MOS. Questo tipo di package denominato LGA (Land Grid Array), con finestra per il filtro ottico IR, ha un mercato in espansione dal 2024 poiché coinvolgerà molti diversi segmenti applicativi, come consumer, industriali, e medicali (contactless T-sensing), con un TAM previsto intorno ai 100Munits, corrispondente a un valore di circa 800M$ per Microbolometri e Termopile.
L'investimento necessario per i prossimi cinque anni può essere valutato in circa 1M$ consistente nell'acquisto delle apparecchiature necessarie all'assemblaggio e testing del sensore IR.

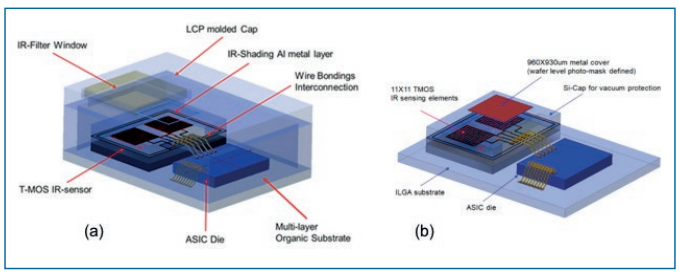


Figura 80: LGA Assembly of T-MOS sensor (a) and MEMS+ASIC interconnection details (b) (Fonte: STMicroelectronics)

Package ceramico per sensori di pressione impermeabili e di elevata precisione

I package per sensori di pressione ambientale si differenziano dai classici package per una piccola apertura (Figura 81) posta sulla loro parte superiore, che permette al trasduttore interno di ricevere e rilevare la pressione o variazione di pressione che avviene nell'ambiente esterno. Questa specifica necessità introduce una serie di accorgimenti costruttivi che garantiscono al package un'ottima stabilità di funzionamento durante l'intera vita del dispositivo sia per valori di temperatura bassi che alti, anche in presenza di umidità o vibrazioni.



Figura 81: ST pressure package (Fonte: STMicroelectronics)

La Figura 82 mostra il progetto, la modellazione 3D e il rendering della struttura del package in ceramica, caratterizzata da strutture meccaniche verticali del canale per il sensore sul tappo metallico.
La miniaturizzazione dei sensori di pressione è iniziata circa 30 anni fa nei settori dei sistemi di elettronica indossabile, automotive, medicale e aerospaziale.
Le previsioni di volume per i prossimi 3 anni prospettano una crescita fino a 1.77B$, con volumi di produzione vicini a 1.48Bunits, mentre l'ammontare degli investimenti porterà a superare il 2.0 B$ per la sola STMicroelectronics nei prossimi anni.

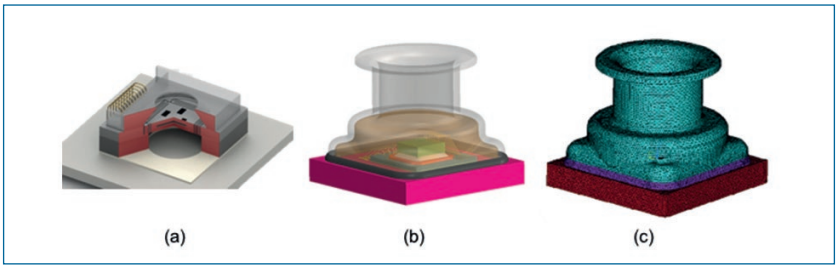


Figura 82: MEMS Pressure sensor in ceramic (a), 3D-Model for waterproof-package (b), 3D Finite Element Model of the package (c) (Fonte: STMicroelectronics)

Trasduttori a ultrasuoni MEMS piezoelettrici

I trasduttori per rilevare ultrasuoni basano il loro principio di funzionamento su di una membrana MEMS la cui deformazione spaziale viene convertita o in una variazione capacitiva CMUT (Capacitive Micro Ultrasonic Transducer) o in una variazione piezoelettrica PMUT (Piezo Micro Ultrasonic Transducer).

Per questa specifica applicazione il package deve prevedere una cavità sopra la quale la membrana MEMS può muoversi in asse "z" in funzione delle onde ultrasonore in arrivo, ma anche i pilastri che sorreggono la membrana e le connessioni elettriche (micro bumps) devono essere selezionati e progettati in funzione delle vibrazioni cui l'intero sistema MEMS + ASIC + package è sottoposto (Figura 83)

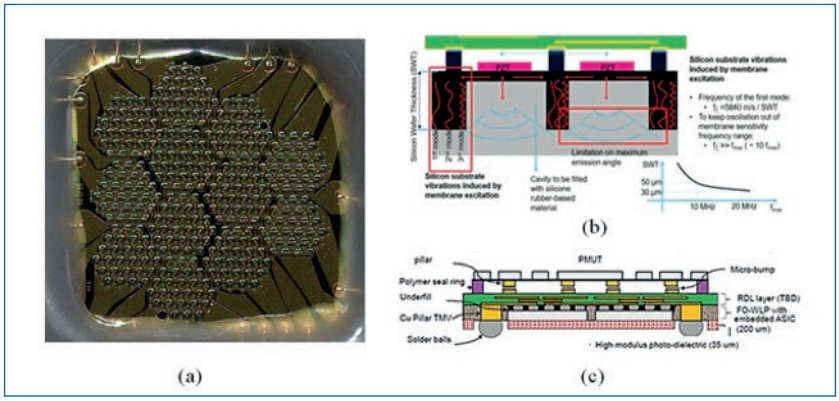
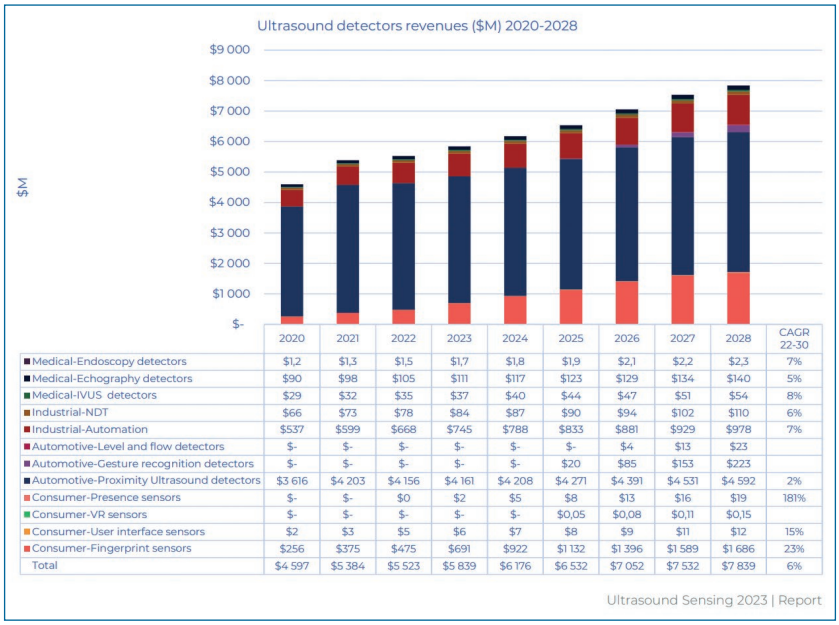


Figura 83: (a) PMUT assembly and wire-bonding interconnections, (b) Schematic of the ultrasound absorption effect due to silicon thickness, (c) concept section of PMUT assembly on FOWLP (Fonte: STMicroelectronics)

Applicazione tipica dei PMUT sono apparecchi ecografici, biometria delle impronte digitali o il mercato consumer in generale, così come l'ecografia point-of-care nel settore medicale, che prevede una crescita del +80% nell'arco temporale 2023-2026.

Nel Report *Yole Ultrasound Sensing 2023* si prevede (Figura 84) una significativa crescita dei moduli di rilevamento a ultrasuoni nei settori automobilistico, consumer medico e industriale, con valori di mercato pari a circa 8 miliardi di dollari

nel 2028; la loro crescita sarà dovuta anche ad applicazioni emergenti, come ad esempio i controlli gestuali automobilistici.



	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	CAGR 22-30
Medical-Endoscopy detectors	$1,2	$1,3	$1,5	$1,7	$1,8	$1,9	$2,1	$2,2	$2,3	7%
Medical-Echography detectors	$90	$98	$105	$111	$117	$123	$129	$134	$140	5%
Medical-IVUS detectors	$29	$32	$35	$37	$40	$44	$47	$51	$54	8%
Industrial-NDT	$66	$73	$78	$84	$87	$90	$94	$102	$110	6%
Industrial-Automation	$537	$599	$668	$745	$788	$833	$881	$929	$978	7%
Automotive-Level and flow detectors	$-	$-	$-	$-	$-	$-	$4	$13	$23	
Automotive-Gesture recognition detectors	$-	$-	$-	$-	$-	$20	$85	$153	$223	
Automotive-Proximity Ultrasound detectors	$3 616	$4 203	$4 156	$4 161	$4 208	$4 271	$4 391	$4 531	$4 592	2%
Consumer-Presence sensors	$-	$-	$0	$2	$5	$8	$13	$16	$19	181%
Consumer-VR sensors	$-	$-	$-	$-	$-	$0,05	$0,08	$0,11	$0,15	
Consumer-User interface sensors	$2	$3	$5	$6	$7	$8	$9	$11	$12	15%
Consumer-Fingerprint sensors	$256	$375	$475	$691	$922	$1 132	$1 396	$1 589	$1 686	23%
Total	$4 597	$5 384	$5 523	$5 839	$6 176	$6 532	$7 052	$7 532	$7 839	6%

Figura 84: Ultrasound Market Forecast by module/detector type (Revenue $M)
(Fonte: Yole Ultrasound Sensing 2023 Report)

Risorse economiche necessarie

Considerando le tecnologie di cui prima, il valore totale dell'investimento per i prossimi anni per la costruzione di una linea di sviluppo completa e l'acquisto delle attrezzature per l'assemblaggio di diversi tipi di package per sensori è nell'ordine dei 5 miliardi di dollari

SISTEMI DI PACKAGING DEI CHIP: TECNOLOGIE DI MANIFATTURA ADDITIVA E SOTTRATTIVA

Tutte le tecnologie sopra descritte sono costruite secondo una strategia planare, cioè tutti i componenti che andranno poi a costituire un circuito integrato (transistor, diodi, condensatori, connessioni I/O, memorie, etc.) vengono realizzati con deposizioni successive di diversi elementi su un piano bi/dimensionale (2D) per uno spessore attivo totale di circa 10µm–15µm, contro uno spessore di circa 500µm del substrato di supporto per i dispositivi di potenza ad alta tensione e di qualche micrometro per i dispositivi VLSI (Very large scale integration) che operano a tensioni molto basse.
Si deduce quindi che la parte attiva di un processo di potenza occupa circa il 6% del substrato complessivo nel caso di tecnologie di potenza ad alta tensione, mentre il restante 94% è usato solo come supporto meccanico. Quando si tratta di processi VLSI lo spessore attivo è dell'ordine di 1µm su uno spessore di 500µm di substrato (e per alcuni particolari esigenze di miniaturizzazione) ridotto di spessore scartando il silicio in eccesso.
L'esigenza di aumento di potenza, miniaturizzazione e riduzione dei costi porta a non pensare più la progettazione tecnologica su piani bidimensionali, bensì in 3D (il FinFET ne è un esempio), sviluppando lungo l'asse "z" strutture verticali superiori ai 15µm nelle classiche soluzioni tecnologiche.

Motivazione per lo sviluppo

L'evoluzione delle tecnologie da 2D a 3D nei semiconduttori è guidata dalla crescente domanda di dispositivi più piccoli, potenti e a basso consumo energetico. Il processo produttivo potrebbe trarre vantaggio dai processi 3D, come la Manifattura Additiva (AM – Additive Manufacturing), per sostituire, ad esempio, le tecniche di rimozione dei materiali che utilizzano composti di fluoruro nei processi di incisione (etching). Un approccio a lungo termine potrebbe prevedere la sostituzione di alcuni di questi processi non critici con fasi di produzione additiva. Questa transizione richiederà notevoli sforzi di R&S per creare metodi di deposizione altamente selettivi e/o molecole auto-assemblate capaci di impedire la deposizione di metalli e dielettrici in punti specifici.

Nello sviluppo di sistemi intelligenti e prodotti innovativi a semiconduttore, l'integrazione eterogenea sta diventando sempre più cruciale a tutti i livelli, dal SoC al System-in-Package (SiP) fino a moduli e sistemi più grandi. Questo capitolo, insieme al precedente, sottolinea l'importanza delle tecnologie SiP dal loro specifico punto di vista. Vengono considerate tecnologie alternative come la produzione additiva, materiali complementari a livello funzionale e strutturale, e approcci eterogenei per l'assemblaggio, l'integrazione e il packaging avanzato. L'integrazione eterogenea è intesa nel senso più ampio, comprendendo qualsiasi unità, dai singoli die ai dispositivi MEMS, dai componenti passivi ai package assemblati, che vengono integrati in componenti, moduli o sistemi complessi. Gli sviluppi in questo campo includono anche soluzioni di elettronica flessibile e fotonica.
La manifattura additiva può fornire soluzioni strutturali e funzionali per integrare sistemi che non sono fattibili con i metodi tradizionali. La AM permetterà una produzione a zero difetti a partire dal primo lotto. Sebbene la AM migliori anche la flessibilità produttiva, bisogna superare i limiti della scalabilità economica di questi metodi di produzione.
La Figura 85 illustra un approccio duale verso l'evoluzione tecnologica: da un lato, il tradizionale avanzamento della miniaturizzazione secondo la "legge di Moore" e "More than Moore"; dall'altro, la diversificazione e l'innovazione attraverso tecnologie additive ed eterogenee.

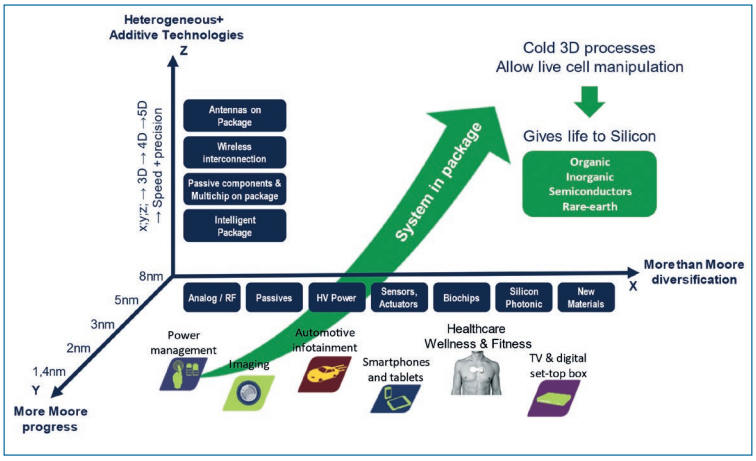


Figura 85: Technology Competitive Advantage, by Bruno MURARI (Fonte: STMicroelectronics)

Le tecnologie additive 3D, rispetto ai processi planari tradizionali, offrono notevoli vantaggi in termini di flessibilità e personalizzazione, pur presentando alcune limitazioni come la lentezza produttiva e la minore precisione nella produzione di massa. Tuttavia, queste limitazioni possono essere superate attraverso, ad esempio, due filoni di ricerca principali:

Parallelismo e velocità di produzione:

- Nel caso di stampa 3D, incrementare il numero di ugelli utilizzati simultaneamente per aumentare la velocità di produzione;
- Utilizzare sistemi di deposizione parallela per realizzare una maggiore quantità di prodotti in tempi più rapidi.

Precisione e nuove fonti di luce:

- Migliorare la precisione passando da tecnologie che utilizzano luce visibile a quelle che utilizzano luce UV e infrarossa;
- Utilizzare macchine a due fotoni con lunghezze d'onda inferiori, come 660 nanometri o 640nm, per ottenere voxel (volumetric pixel) di dimensioni estremamente ridotte e precise.

Le tecnologie additive permettono la deposizione di una vasta gamma di materiali, inclusi semiconduttori, metalli, isolanti, ossidi e terre rare. Questi materiali vengono spesso trasformati in polveri e miscelati con polimeri, che possono essere aggregati e fusi con precisione. Un esempio è la fusione della polvere di rame a circa 1100 °C, mantenendo il substrato freddo. Questo metodo permette la crescita epitassiale goccia a goccia su cristallini, come il silicio, ottenendo orientamenti cristallini senza il bisogno di riscaldare il substrato sottostante. I processi a freddo offrono numerosi vantaggi, tra cui:

- Riduzione del consumo energetico: Le tecnologie additive consumano significativamente meno energia rispetto ai processi planari tradizionali. I forni tradizionali utilizzati nei processi planari, che richiedono di rimanere accesi tutto l'anno, possono essere sostituiti, ad esempio, da laser ad alta precisione che consumano meno energia;
- Nuove applicazioni: medicina personalizzata (trattamenti su misura per i

pazienti), farmaceutica (produzione di vaccini, farmaci, etc.) e applicazioni nel campo biologico che sono rese possibili grazie ai processi a freddo che non danneggiano i materiali sensibili (materiale organico, cellule, etc.).
L'integrazione di tecnologie additive ed eterogenee rappresenta un'importante direzione di sviluppo per l'industria elettronica e permettono di superare i limiti dei metodi tradizionali, offrendo nuove opportunità per la personalizzazione, l'efficienza energetica e l'innovazione in vari settori. Il concetto di "cold manufacturing" (produzione a freddo) è centrale in questa evoluzione, aprendo nuove strade per applicazioni avanzate e sostenibili.
Le tecnologie additive e sottrattive permettono la creazione di architetture tridimensionali che possono migliorare significativamente le prestazioni dei semiconduttori e dei processi di front-end e back-end.

Stato dell'arte

In Italia e in Europa, la ricerca e lo sviluppo nel campo dei semiconduttori 3D stanno facendo progressi significativi. Diverse università e istituti di ricerca collaborano con industrie per sviluppare tecnologie innovative. Ad esempio, il Politecnico di Milano e l'Istituto Italiano di Tecnologia sono attivamente coinvolti in progetti di ricerca avanzata. A livello europeo, programmi come Horizon 2020 finanziano numerosi progetti di ricerca e sviluppo per la produzione di semiconduttori 3D, con aziende leader che giocano un ruolo chiave.
Le tecnologie 3D si possono classificare in due grandi famiglie:

- processi tecnologici sottrattivi;
- processi tecnologici additivi.

Processi sottrattivi

I processi sottrattivi si avvalgono di processi elettrochimici che scavano il silicio (ma anche altri materiali come plastiche o polimeri) creando strutture verticali con diametro e profondità molto diverse fra di loro; questo processo è anche conosciuto col nome di silicio poroso, che consente di effettuare scavi con profondità da poche decine di nanometri fino 500µm e con un aspect ratio

(rapporto tra diametro e profondità) maggiore o uguale a 1:100, con strutture tipiche dei MEMS (Figura 86) oppure a spugna (Figura 87), con dimensioni anche cinque ordini di grandezza diverse fra di loro; infatti, si possono avere sullo stesso componente fori con diametro di pochi nanometri (milionesimi di millimetro) e profondità di centinaia di micron (millesimi di millimetro) aumentando lo sviluppo superficiale fino a un x1000, rispetto ad una soluzione planare.
Nonostante l'apparente fragilità della struttura forata ottenuta, la robustezza è notevole, garantendo, anche con un rapporto vuoto – pieno = 80%, di crescere uno strato epitassiale superiore. Il risultato è l'integrazione di una struttura micromeccanica con un ASICs.

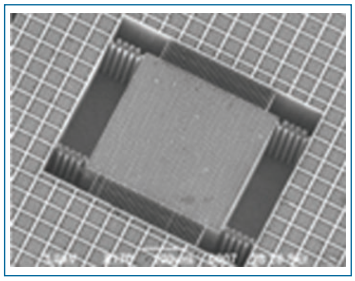


Figura 86: MEMS 3D view

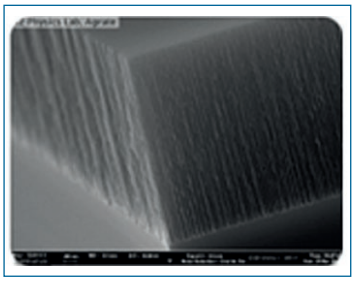


Figura 87: Porous silicon 3D view

Il silicio poroso non è l'unico processo 3D: ad esempio, nel campo dei semiconduttori il DRIE (Deep Reactive Ion Etching) effettua scavi di profondità nettamente inferiori ai 100µm, con però lo svantaggio di richiedere l'uso di *equipment* molto costosi.
Grazie a questa enorme flessibilità dimensionale il silicio poroso può interagire con diversi tipi di fenomeni fisici, che spaziano dai filtri ottici, condensatori, batterie di nuova generazione ed applicazioni biomedicali.
Se associamo queste peculiarità alla sua economicità, alla possibilità di essere usato con gli *equipment* normalmente usati nelle industrie di semiconduttori, si vede che il silicio poroso è interessante per lo sviluppo di applicazioni 3D, come

riportato negli esempi qui di seguito:

Condensatore 3D C=1µF/mm2 V=15V

1µF/mm2 significa disporre di un condensatore con un valore di capacità circa 100 volte superiore a quella dei condensatori planari normalmente usati dai progettisti di circuiti integrati; questa soluzione 3D utilizza scavi con profondità >100µm ed è stata realizzata nel programma finanziato europeo R2POWER300 (ECSEL JU Project) grazie alla collaborazione tra ST, Università di Pisa e Picosun (start up finlandese). Il vantaggio di poter disporre di condensatori con questa elevata capacità specifica aiuta notevolmente il progettista di ASICs per il filtraggio di segnali spuri.

Nelle figure qui sotto si può vedere la sequenza realizzativa:

- Specifiche del progetto (Figura 88 a) consistenti in fori del diametro di 2µm e profondità 200µm;
- Microsezione (Figura 88 b) che ben evidenzia l'ottima verticalità dello scavo, oltre che l'uniformità di deposizione ALD (Atomic Layer Deposition) di uno stack di metallo, ossido, metallo per integrare un condensatore;
- Confronto di misure (Figura 88 c) effettuate su campioni a due dimensioni e tre dimensioni con due dielettrici diversi (allumina Al2O3 e alluminato di afnio HfAlOx), dove si evidenzia il risultato di maggiore capacità per unità di area nella soluzione 3D con HfAlOx pari a 1µF/mm2.

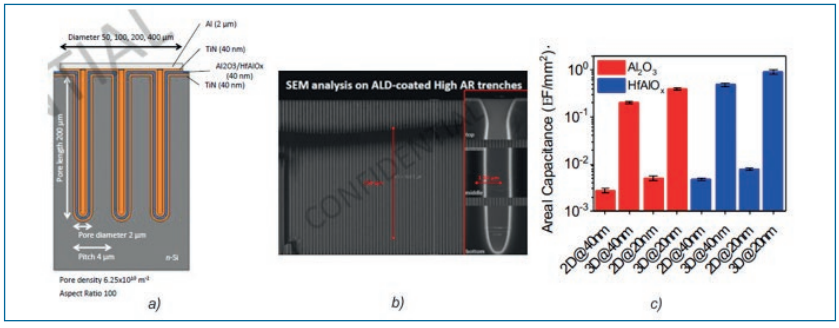


Figura 88: a) Design; b) Cross section; c) Electrical characterization

Batterie 3D

Il rapido sviluppo dell'elettronica di consumo portatile ha promosso la necessità di avere batterie leggere, ecocompatibili, e più sicure delle classiche batterie agli ioni di litio che usano un elettrolita liquido (quindi prono al problema dell'infiammabilità) e che sono realizzate mediante avvolgimento di tre componenti laminari (anodo, separatore e catodo, Figura 89), quindi sostanzialmente ancora con un approccio planare (la cui densità di energia varia da 50Wh/Kg a 250Wh/Kg).

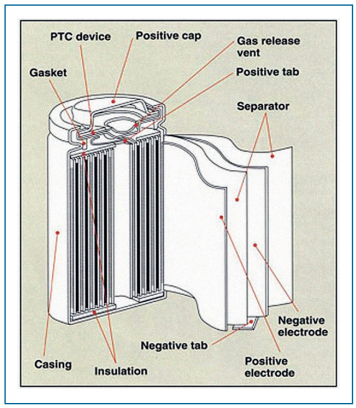


Figura 89: Rappresentazione schematica di una batteria stilo agli ioni di litio 18650 (Fonte: https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells)

Per incontrare le nuove necessità energetiche sono allo studio batterie di nuova generazione 3D che passano da una soluzione planare a una tridimensionale effettuando scavi nel silicio usando il processo del silicio poroso (Figura 90 a), come realizzato ad esempio da XNRGI, start up USA[1] che utilizza wafer a 12" (Figura 90) processati per realizzare batterie con una densità di energia di 680Wh/kg, circa 3 volte superiore alle attuali batterie agli ioni di litio: col processo tecnologico del silicio poroso è possibile realizzare milioni di fori che producono uno sviluppo superficiale 50 volte rispetto a quello planare. L'utilizzo di equipment tipici usati nel settore dei semiconduttori consente di ottenere economia di scala considerevoli; XNRGI prevede un costo finale di batterie 3D in silicio poroso <85$/kWh, che le rende competitive rispetto alle classiche batterie agli ioni di litio.

[1] https://xnrgi.com

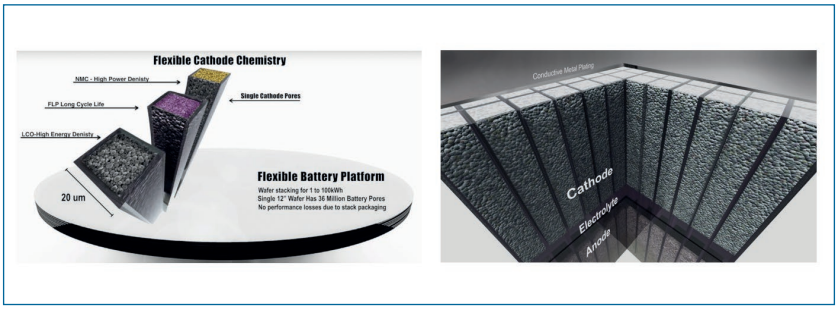


Figura 90: a) Porous silicon wafer; b) 3D battery structure (Fonte XNRGI)

Super condensatori

Analogamente alle batterie, da qualche anno sono presenti nel mercato i super capacitori (supercap) in forme ridotte e a stato solido, progettati anche con tecnologie 3D, con la peculiare caratteristica di rilasciare elevati picchi di energia in tempi molto rapidi, al contrario delle batterie che rilasciano energia in modo lento e graduale (Figura 91) e che si collocano tra le soluzioni convenzionali di batterie e condensatori.

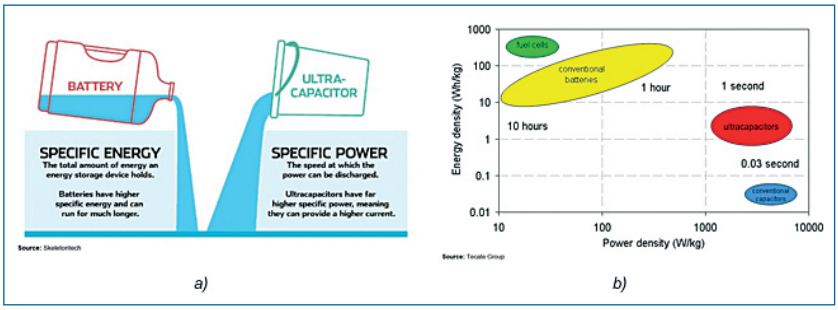


Figura 91: a) Energy difference battery vs capacitor; b) Supercap chart

Il loro utilizzo si estende a un ampio mercato applicativo che copre healthcare, robotica, automotive, droni, e-bike, nautica e aerospaziale, in cui la densità di energia richiesta è di 1Wh/Kg – 10 Wh/Kg. Essi portano notevoli vantaggi alle batterie in termini di affidabilità e durata di vita, oltre che un miglioramento delle

performance dell'applicazione.
Inoltre, il mercato dei supercap (Figura 92) è molto promettente; infatti, si stima che crescerà da 2,3 miliardi di dollari nel 2020, a 8,5 miliardi di dollari entro il 2026, con un CAGR relativo del 24,9%.

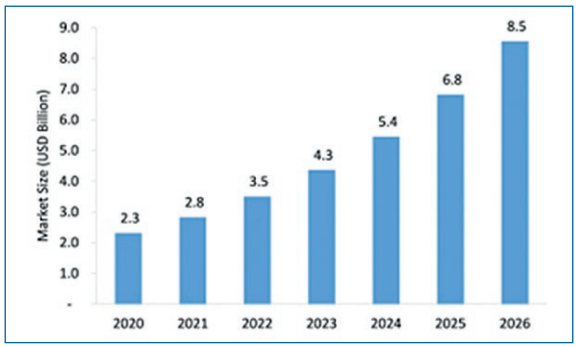


Figura 92: Supercap market outlook (Fonte: Market Insight)

Sensore di pressione

Bosch ha in produzione un sensore di pressione (Figura 93) la cui membrana sospesa è stata ottenuta passando attraverso una fase di scavo realizzata tramite il silicio poroso, mentre la successiva chiusura dei fori è stata ottenuta per migrazione del silicio via forno ad alta temperatura. Da notare come questa struttura sia integrata con una crescita epitassiale senza danneggiare la membrana sospesa.

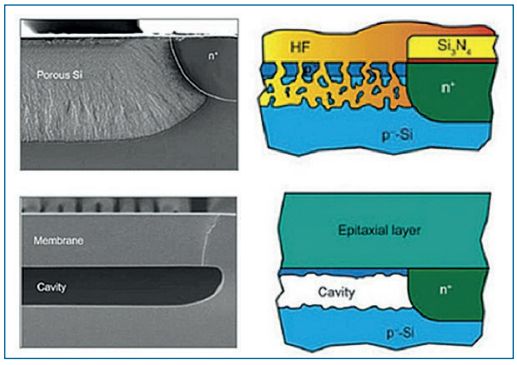


Figura 93: Bosch pressure sensor cross section

Silicon drugs carrier

Gli attuali farmaci antitumorali hanno un'efficacia limitata perché solo una piccola frazione della dose somministrata riesce a superare le naturali barriere biologiche del corpo umano e raggiungere l'organo malato, mentre la maggior parte viene dispersa provocando pesanti effetti collaterali.

L'innovazione della start-up USA BrYet[2] consiste nell'avere progettato e poi sviluppato particelle discoidali di silicio, chiamati iNPGs (injectable Nano Particle Generators), da usarsi come carrier di questi stessi tipi di farmaci. Nella pubblicazione "An injectable nanoparticle generator enhances delivery of cancer therapeutics" viene descritto come questi iNPGs, preventivamente caricati con il farmaco, grazie alla loro precisa dimensione si accumulino solo nell'organo bersaglio, dopodiché vengano metabolizzati dal corpo umano e trasformati in acido ortosilicico, biocompatibile, consentendo così il rilascio di tutto il farmaco solo localmente.

Nella Figura 94 sotto si può notare una rappresentazione degli iNPGs di silicio forati tramite il processo del silicio poroso (a sinistra) e i singoli canali caricati col farmaco (a destra).

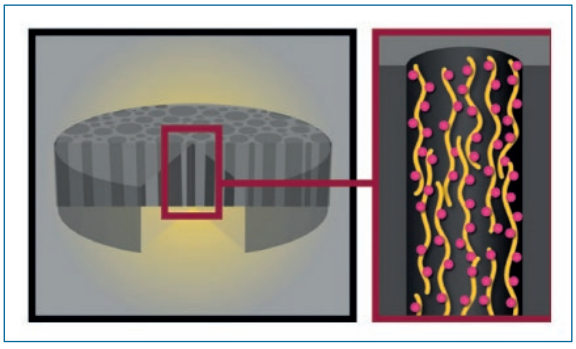


Figura 94: iNPG cross section source BrYet

InfraRed (IR) filter

Il campo degli infrarossi offre diverse possibilità di utilizzo: dai filtri ottici 3D presenti in diverse applicazioni ottiche all'automotive (Figura 95 a) per rilevare se il manto stradale sia asciutto, bagnato o ghiacciato grazie ai filtri NIR (Near Infra

[2] https://bryetpharma.com/

Red) e SWIR (Small Wavelenght Infra Red), realizzati con strutture 3D (Figura 95 b). Altri settori applicativi di NIR e SWIR sono alimentare, arte e industria, rispettivamente per rilevare lo stato di deterioramento dei prodotti, le contraffazioni e la corretta qualità di determinati prodotti.

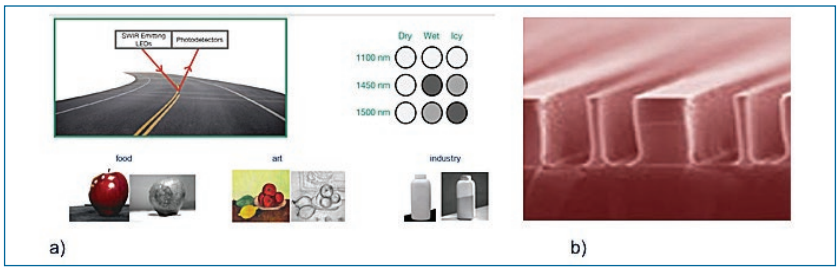


Figura 95: a) SWIR application, b) reticle cross section (Fonte: Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia USA)

Filtri per CO_2

Alcune molecole, come quella dell'acqua (H_2O o H^2O_3), il monossido di carbonio (CO) e l'anidride carbonica (CO_2), hanno la specifica caratteristica di essere assorbite da bande ristrette di IR (Figura 96). Quindi disponendo di filtri idonei è possibile costruire precisi rilevatori di gas inquinanti, trovando applicazioni in molti settori industriali.

Ad esempio, la CO_2 è assorbita alla lunghezza d'onda di 4.2µm in una banda molto stretta, come si può vedere dalla Figura 96.

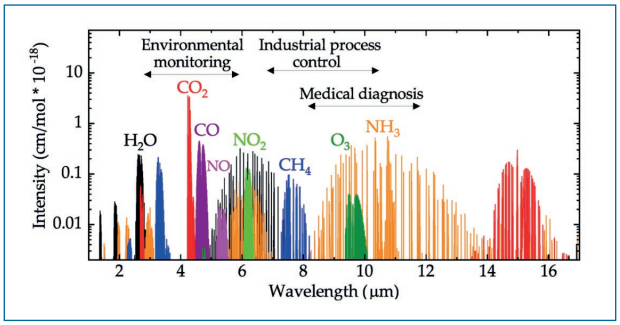


Figura 96: IR spectrum and molecule absortion

Grazie a questa particolare caratteristica, Infineon ha realizzato sensori di CO_2 per rilevare la qualità dell'aria nell'abitacolo di un'auto tramite filtri progettati per rilevare solo determinate lunghezze d'onda (Figura 97)

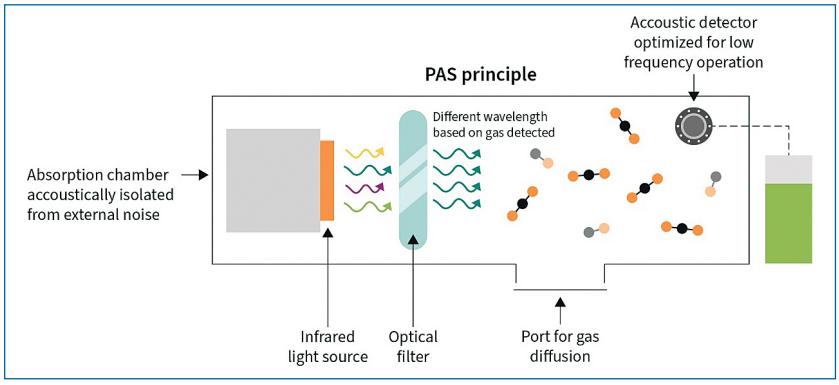


Figura 97: CO2 sensor block diagram (Fonte: Infineon)

Inoltre, il silicio è trasparente alle lunghezza d'onda SWIR, quindi un opportuno tuning dei filtri, (Figura 98, che rappresenta la trasmittanza attraverso il silicio dopo i 1500nm) consente di ispezionare dei difetti presenti durante il processo di fabbricazione di un ASIC, che possono essere in corto circuito o a circuito aperto, oppure la presenza di impurità metalliche nel substrato, o anche il mascheramento disallineato durante il processo di fotolitografia.

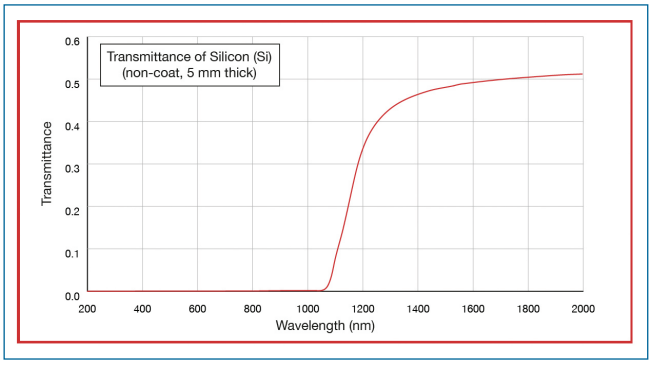


Figura 98: Transmittance of silicon

Processi additivi

Contrariamente ai processi sottrattivi, quelli additivi realizzano la terza dimensione tramite una deposizione di materiale resa possibile grazie a stampanti 3D, in grado di riprodurre oggetti tridimensionali progettati via CAD secondo un processo seriale di deposizioni di strati successivi di diversi tipi di materiale, e le cui dimensioni possono variare da pochi micron fino a centimetri. Negli ultimi anni sono nate diverse tipologie di stampanti 3D, che sfruttano metodi diversi:
Fused Deposition Modeling (FDM): Un ugello riscaldato scioglie un filamento termoplastico che può essere deposto sia in direzione orizzontale che verticale. Tra i materiali che si possono deporre vi sono polimeri Carbonio, Vetro o Kevlar;
Stereolitografia (SLA): Le stampanti 3D SLA usano resine termoindurenti e reattivi alla luce, che quando vengono esposte a una luce con determinata lunghezza d'onda polimerizzano in strutture solide rigide o anche flessibili;
Sinterizzazione laser selettiva (SLS - Selective Laser Sintering): Impiega un raggio Laser per sinterizzare delle particelle di polvere a base polimerica, che in caso di utilizzo di polveri metalliche assume l'acronimo di SLM (Selective Laser Melting).

In Italia ci sono diverse università attive nel settore delle stampanti 3D come, ad esempio, l'Università di Pisa o la Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa, dotata di laboratori finalizzati allo sviluppo di campioni di prodotti tramite stampanti 3D per diversi campi di studio[3].

Medicina rigenerativa

Bio3DPrinting, società italiana appartenente a SolidWorld GROUP, si occupa di riprodurre parti di organi umani o tessuti biologici partendo da una rappresentazione CAD 3D, oppure partendo direttamente da cellule prelevate dal paziente stesso e utilizzate per ricreare tessuti biologici danneggiati tramite processi di microestrusione, elettrofilatura, ma soprattutto esenti dai problemi di rigetto.

Lo stesso tipo di approccio si può applicare nel campo della farmaceutica per sviluppare e testare con processi economici nuovi farmaci o cosmetici prima di

[3] https://crosslab.dii.unipi.it/team

essere immessi in commercio, rendendoli più sicuri per l'uomo.

Smorzatore di vibrazioni polimerico per applicazioni MEMS

La stampa a getto d'inchiostro (IJP) può essere una possibile soluzione alternativa di manifattura additiva rispetto a tecniche tradizionali come la litografia. Nel lavoro "Inkjet printing of a polymeric vibration damper for MEMS application adopting a step-reticulation process" si esplora l'uso dell'IJP nella produzione di strati polimerici per smorzamento delle vibrazioni su dispositivi MEMS soggetti a vibrazioni indesiderate. I polimeri sono materiali ideali per queste applicazioni, e viene proposto un processo alternativo (Figura 99) per migliorare la verticalità delle pareti stampate. La stampa è stata applicata su MEMS patternati ed è stato dimostrare che l'IJP può essere un'alternativa economica alle tecniche di patterning tradizionali, soprattutto in applicazioni senza vincoli di risoluzione stringenti.

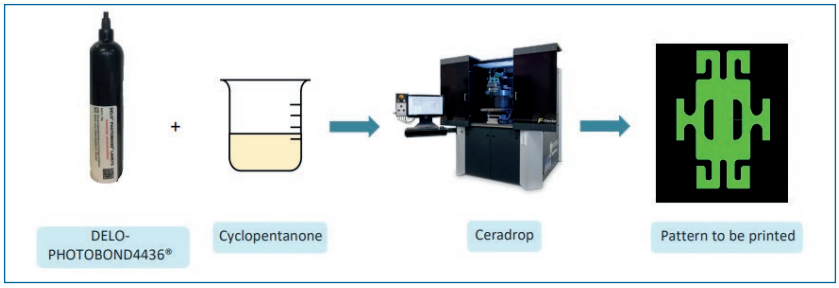


Figura 99: IJP Methodology (Fonte: Politecnico Milano & STMicroelectronics)

Risorse economiche necessarie

Lo sviluppo e l'implementazione delle tecnologie additive e sottrattive nel settore dei semiconduttori richiedono investimenti significativi: il solo progetto R2POWER300 ha richiesto un investimento di circa 8 milioni EUR. Le risorse economiche necessarie comprendono finanziamenti per la ricerca e sviluppo, l'acquisto di attrezzature avanzate e la formazione di personale specializzato. In Italia e in Europa sono essenziali politiche di sostegno governativo, investimenti da parte di aziende private e collaborazioni internazionali per mantenere la competitività nel mercato globale dei semiconduttori.

SISTEMI HARDWARE DI EDGE COMPUTING PER L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

L'Intelligenza Artificiale (IA) è un settore in continua evoluzione, con il potere di trasformare il nostro approccio ai problemi complessi. Il suo punto di forza risiede nell'abilità di processare ingenti volumi di dati, un aspetto cruciale in un'era caratterizzata dalla produzione di dati a velocità crescente. L'espansione di sensori e dispositivi per la raccolta di dati ha fatto esplodere la quantità di informazioni analizzabili, generando una richiesta in aumento per soluzioni basate su IA capaci di interpretare questi dati e ricavare conoscenze altrimenti ardue o impossibili da acquisire con metodi convenzionali. Con l'avanzamento tecnologico, l'IA si sta diffondendo in numerosi ambiti e applicazioni. La Figura 100 mostra come l'IA superi l'uomo in termini di capacità di analisi, analogamente a come la potenza meccanica ha aiutato la società. Se la potenza meccanica, basata su vapore, elettricità, petrolio e altre fonti, si è evoluta in due secoli, l'evoluzione dell'intelligenza delle macchine si prevede acceleri in soli 20 anni.

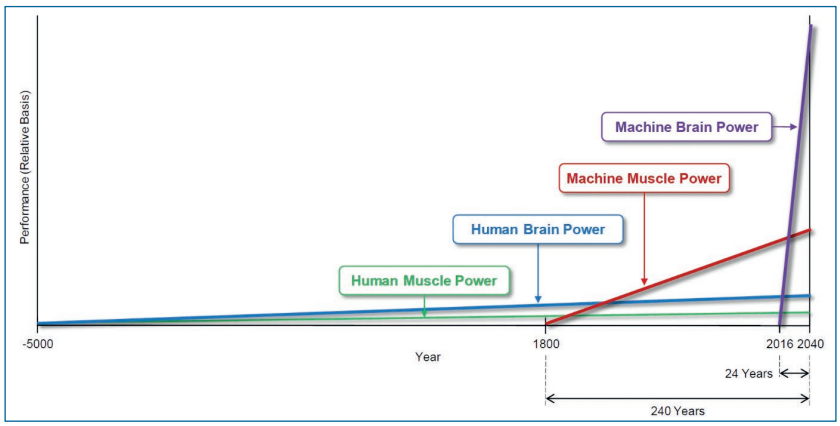


Figura 100: Man versus Machine Power (Fonte IBS Vol.29 No.1 Jan 2020)

Da un sistema di intelligenza centralizzato a uno distribuito

L'IA è capace di gestire enormi volumi di dati; tuttavia, per decisioni immediate e con minima latenza è necessario che l'elaborazione avvenga in prossimità della

fonte dei dati. L'IA distribuita conduce all'implementazione di dispositivi di Edge AI, o Edge Computing, nei quali algoritmi e modelli di IA sono impiegati direttamente sui dispositivi di rete per processare e analizzare i dati in loco. Questi sistemi di Edge AI sono concepiti per effettuare l'elaborazione dati in situ, evitando così l'invio delle informazioni a un server centrale. Il risultato è un'elaborazione dati in tempo reale con bassa latenza. Inoltre, la limitazione del trasferimento dati non solo aumenta l'accuratezza, ma migliora anche la privacy e la sicurezza.
L'Edge AI offre un ampio spettro di applicazioni pratiche, che spaziano dalla manutenzione industriale ai sistemi di controllo, dall'Internet delle Cose (IoT) ai veicoli autonomi. Ad esempio:

- **Manutenzione Industriale:** i dispositivi di Edge AI possono monitorare in tempo reale condizioni e performance di macchinari e impianti industriali, rilevando anomalie o potenziali guasti prima che si verifichino, permettendo così interventi preventivi (Figura 101);
- **Sistemi di Controllo:** l'Edge AI può ottimizzare le prestazioni e l'efficienza attraverso analisi immediate e decisioni autonome, senza il bisogno di comunicare con un server centrale;
- **Internet delle Cose:** nei dispositivi IoT, l'Edge AI elabora e analizza i dati raccolti dai sensori in tempo reale, favorendo lo sviluppo di città intelligenti, edifici smart, abitazioni connesse e automazione industriale, con una risposta immediata agli input sensoriali. L'IA consentirà di analizzare i dati a livello di ragionamento cognitivo per prendere decisioni all'edge (intelligenza artificiale integrata), trasformando gli IoT nell'Intelligenza Artificiale degli IoT (AIoT).

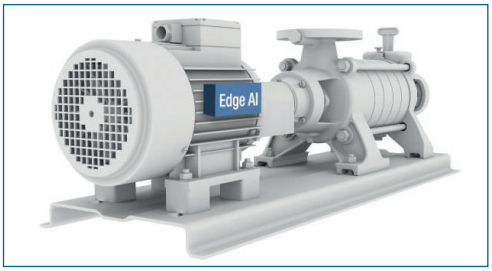


Figura101: Manutenzione predittiva, prestazioni aumentate, qualifica dei fallimenti e anomalie, etc.

Un approccio distribuito all'IA, che coinvolge sensori, microcontrollori, gateway e server cloud, offre vantaggi rispetto a un sistema centralizzato basato sul cloud (Figura 102). Tra questi, citiamo:

- **Bassa latenza e riduzione della larghezza di banda**: gli algoritmi di IA in esecuzione sui sensori e microcontrollori in oggetti smart consente di elaborare i dati in loco evitando la necessità di doverli trasmetter a un server cloud per l'elaborazione. Ciò comporta tempi di risposta rapidi e riduzione della latenza, aspetti critici per il controllo industriale e la guida autonoma;
- **Aumento della privacy e della sicurezza:** poiché i dati non vengono trasmessi su Internet, ma elaborati localmente, questo consente di tutelare aspetti critici del controllo industriale e della guida autonoma;
- **Scalabilità:** distribuendo gli algoritmi di IA tra più dispositivi, ci consente di scalare facilmente il sistema per gestire quantità crescenti di dati e compiti più complessi;
- **Adattabilità:** l'IA distribuita (locale) può reagire prontamente ai cambiamenti dell'ambiente circostante, offrendo risposte tempestive;
- **Approccio ecologico:** l'elaborazione locale ridurrà l'allarmante impatto ambientale e incrementale dei data center dedicati all'IA, con benefici in termini di consumo di risorse energetiche, idriche e riduzione dell'impronta di CO_2.

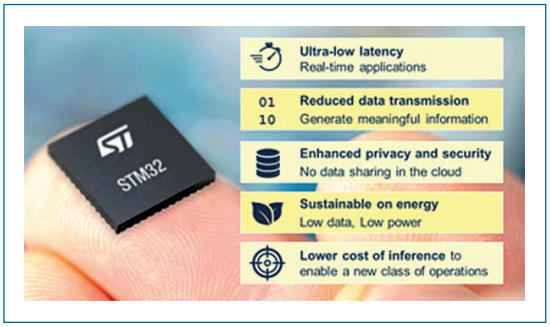


Figura102: Dettaglio dei 5 benefici dell'Edge AI integrata in MCU

La sfida di spostare l'IA nel dominio degli oggetti può essere affrontata attraverso l'uso di tecnologie a ultra-basso consumo, architetture innovative e acceleratori hardware. Questi possono aumentare le capacità di elaborazione di microprocessori (MPU), microcontrollori (MCU) e sensori. L'IA nei microcontrollori e nei sensori con un consumo di potenza inferiore a 1mW è anche conosciuta come TinyML.
A tal proposito, è cruciale dotarsi di tecnologie capaci di:

Apprendimento automatico su sensori avanzati come:

- 1. Inertial Measurement Units (IMU), macchine a stati finiti (FSM - Finite State Machine) e funzioni digitali avanzate: strumenti che dotano di IA dispositivi come quelli automotive a batteria, applicazioni IoT industriali (IIoT) e dispositivi elettronici di consumo quali giochi, tecnologia indossabile, elettrodomestici, etc., offrendo precisione, alte prestazioni e basso consumo energetico;
- 2. Le IMU che integrano un Intelligent Sensor Processing Unit (ISPU), una tecnologica proprietaria di ST: potenziano le capacità di apprendimento automatico e la flessibilità della soluzione grazie al suo nucleo di elaborazione a basso consumo energetico.

L'apprendimento automatico e l'esecuzione di inferenze di reti neurali artificiali sui microcontrollori STM32 a uso generale possono essere realizzati utilizzando specifici strumenti software:

- 1. NanoEdge AI Studio (Figura 103): uno strumento che automatizza l'implementazione di algoritmi di apprendimento automatico sui microcontrollori STM32, ottimizzando l'uso della memoria e riducendo i tempi di elaborazione, e si rivolge a utenti con differenti livelli di competenza nella programmazione IA;

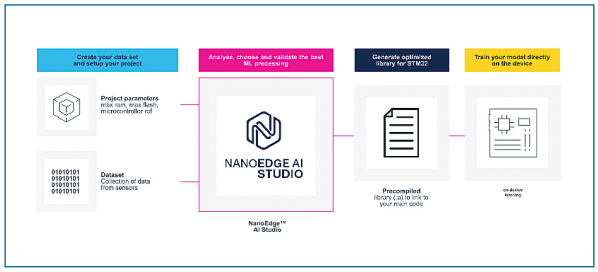


Figura103: From idea to datalogging, in a matter of minutes configure the best AI library for your embedded project

• 2. STM32Cube.AI (Figura 104): uno strumento di ottimizzazione che genererà codice C ottimizzato dalle reti neurali artificiali. È particolarmente efficace per applicazioni di visione artificiale e può essere impiegato in una vasta gamma di scenari.

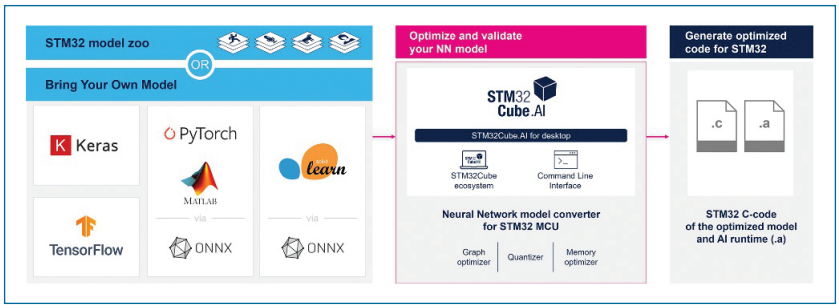


Figura104: STM32Cube.AI allows you to optimize and deploy trained Neural Network models from the most popular AI frameworks on any STM32 microcontroller

8/10

Nell'ambito automotive troviamo la famiglia di MCU Stellar a 32-bit (Figura 105), progettata per supportare le case automobilistiche e i Tier1 nella transizione verso quello che è il nuovo paradigma del Software-Defined Vehicles (SDVs). In sostanza, le automobili possono essere trasformate in dispositivi simili a smartphone o computer attraverso il concetto degli SDV: le componenti elettriche verrebbero controllate da un unico sistema operativo, continuamente aggiornabile per introdurre nuove funzionalità, proprio come accade con computer e smartphone.



Figura105: MCU Stellar a 32-bit

Un cambio radicale di non facile implementazione facilitato e abilitato tramite IA e specifici microcontrollori automotive. La serie Stellar (Figura 106) include:

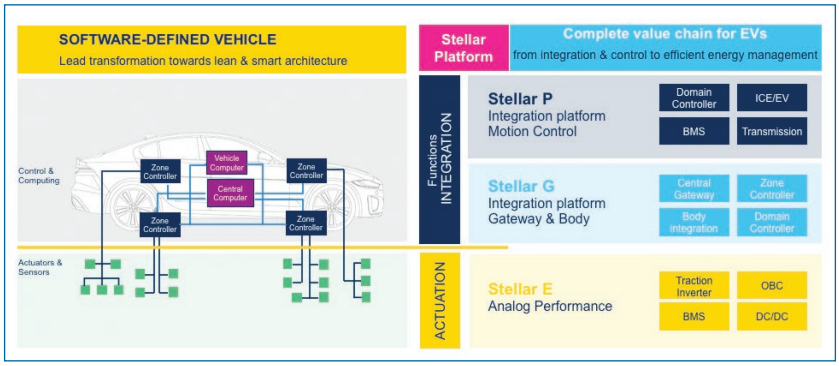


Figura106: Stellar family - A unified computing platform

- **Stellar E MCU Series:** particolarmente adatti per l'elettrificazione dei veicoli (Figura 107), questi MCU permettono un controllo digitale avanzato e analogico ad alte prestazioni per tecnologie di potenza a banda larga, come SiC/GaN, e convertitori DC-DC. Questi MCU offrono prestazioni sicure e in tempo reale, con elevata capacità (ASIL - Automotive Safety Integrity Level), servizi crittografici di sicurezza (HSM - Hardware Security Module) e capacità di riprogrammazione a distanza Over-The-Air (OTA) ad alta efficienza, ottimizzando le continue prestazioni e funzionalità del veicolo per mezzo di aggiornamenti post-vendita;

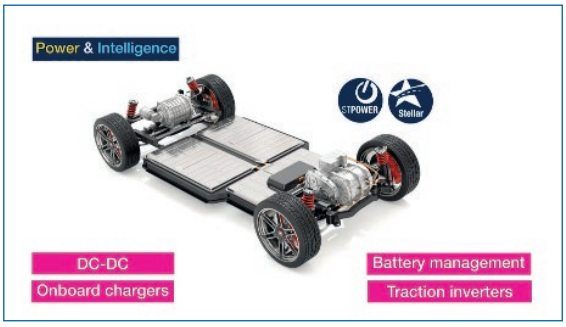


Figura107: Stellar E microcontrollers

- **Stellar G MCU Series:** questi microcontrollori agiscono come un data hub centralizzato e sicuro per la gestione dei dati e da aggregatore in tempo reale delle funzioni dell'abitacolo, principalmente per le architetture zonali. Consente gli aggiornamenti software OTA, modalità a basso consumo e instradamento dei dati con una vasta gamma di protocolli di comunicazione già integrati;
- **Stellar P MCU Series:** la nuova serie di MCU automotive (attesa nel corso del 2024) offrirà capacità avanzate di elaborazione e integrazione di diverse funzionalità (Figura 108). La serie Stellar P risponde alle ultimissime tendenze sulla propulsione elettrica e delle architetture a zone per ottimizzare le prestazioni in tempo reale e la gestione dell'energia.

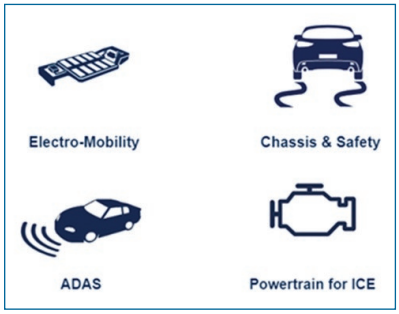


Figura108: Stellar P function integration

In questo contesto automotive, si facilita l'integrazione dell'IA con il plug-in StellarStudioAI (Figura 109), ovvero dell'ambiente di sviluppo StellarStudio, che supporta la serie di MCU Stellar E Series di elettrificazione specifici per l'automotive.



Figura109: Development flow (Fonte: STMicroelectronics)

L'obiettivo primario è quello di potenziare le architetture di reti neurali, fornendo una piattaforma senza soluzione di continuità per la generazione, l'esecuzione e la convalida di modelli di reti neurali pre-addestrati su MCU automotive.
La funzionalità principale di *StellarStudioAI* consiste nella capacità di generare automaticamente reti neurali pre-addestrate e di convertirle in efficienti librerie "Ansi C". Queste librerie possono essere facilmente compilate, installate ed eseguite sui MCU della serie Stellar E. L'importazione di reti neurali pre-addestrate è resa comoda dall'integrazione di framework di deep learning ampiamente utilizzati, come Keras, TensorFlow lite e ONNX.
Per gli sviluppatori embedded, questo plug-in offre la flessibilità di importare la libreria generata in progetti *application-specific* più complessi, grazie a un limitato numero di API pubbliche.

La Strategia per l'IA si concentra su diversi aspetti:

- 1. Per potenziare le prestazioni delle soluzioni di IA sui processori e sensori, si può ricorrere a hardware dedicato che facilita le operazioni computazionali e di memoria. Un'unità di elaborazione neurale configurabile e a basso consumo energetico contribuisce a ridurre i tempi di inferenza e a minimizzare i requisiti di memoria e consumo energetico. Ulteriori miglioramenti sono possibili attraverso innovative architetture AI-SoC che incorporano la computazione in memoria (In-Memory Computing).
Parallelamente, lo sviluppo di un framework MLOps (Machine Learning Operations) modulare e interoperabile, che offra un'interfaccia grafica intuitiva e flessibile, permetterebbe agli utenti di importare e distribuire soluzioni di Machine Learning su piattaforme ST: dai sensori di movimento o di immagine MEMS a MCU di uso generale o automobilistico, fino ai MPUs, con o senza supporto di accelerazione hardware.
- 2. Introdurre funzionalità innovative nel dominio dell'IA, quali reti neurali profondamente quantizzate (DQNN - Deeply Quantized Neural Network) che bilanciano accuratezza, requisiti di memoria e velocità di esecuzione, nonché l'apprendimento diretto *on-device* e oltre.

• 3. Contribuire al progresso dell'IA nei sistemi embedded, in particolare nel settore del TinyML. ST può condividere le proprie ricerche, innovazioni e idee con la comunità scientifica globale, partecipando a conferenze, pubblicando articoli e collaborando in progetti di ricerca.

Motivazioni per lo sviluppo

L'IA è utilizzata oggi in una gamma sempre più ampia di applicazioni. Incide sui servizi che utilizziamo così come sui dispositivi e le macchine con cui interagiamo ogni giorno. Mentre gran parte della IA si basa sul cloud computing, utilizzando potenti data center remoti che elaborano i dati raccolti dai dispositivi locali, l'Edge Computing per la IA implementa algoritmi e modelli di IA direttamente sui dispositivi distribuiti come i dispositivi IoT, i sistemi industriali e automobilistici. Questo approccio consente l'elaborazione e l'analisi dei dati in tempo reale direttamente alla fonte. Questo permette di costruire dispositivi intelligenti autonomi, capaci di decidere e agire rapidamente in modo adattivo senza passare per il cloud.
Distribuire l'IA sul dispositivo (Figura 110) offre diversi vantaggi rispetto all'approccio cloud.

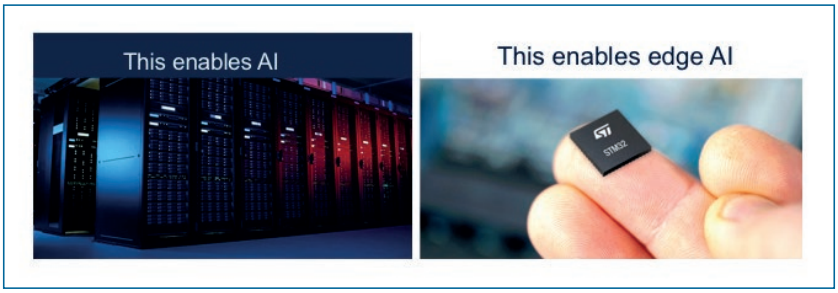


Figura110: Cloud AI vs Edge AI

Fornisce velocità e bassissima latenza, un'inferiore trasmissione di dati e sicurezza. Riduce significativamente il consumo energetico grazie ad algoritmi di inferenza con consumi di milliwatt, o addirittura microwatt nei dispositivi Edge contro i watt nel cloud, oltre a preserva la privacy del dato.

L'Edge AI offre un gamma di nuove opportunità per i produttori di dispositivi e fornitori di servizi in diversi mercati, permettendo lo sviluppo di nuove applicazioni a costi significativamente inferiori rispetto alle soluzioni basate interamente sul cloud.

Mentre l'IA centralizzata esiste da molto tempo, è sempre più evidente che l'Edge AI stia diventando centrale in molte delle odierne aree tematiche.

Il continuum dell'elaborazione distribuita (edge) comprende una gamma di dispositivi che facilitano il monitoraggio e la gestione di beni industriali fisici. Questo include (come proposto dalla comunità AIoT):

- Micro-edge: Dispositivi che si trovano in stretta prossimità dei beni fisici, responsabili della rilevazione, elaborazione e comunicazione dei dati. Questi sono implementati usando microcontrollori costruiti con ARM Cortex M0, M0+, M3, M4, M7X, ASICs e RISC V.
- Deep-edge: Gateway, PLCs, elementi SCADA e controllori intelligenti che elaborano dati a un livello più profondo, spesso con maggiore potenza di calcolo e capacità di archiviazione. Il deep-edge si implementa con processori e microcontrollori performanti quali Intel i-series, Atom, ARM Cortex M7+, etc., includendo CPUs, GPUs, TPUs, FPGAs ed ASICs.
- Meta-edge: Dispositivi di calcolo on-premise che servono scopi multipli e possono gestire quantità elevate di dati ed elaborazioni complesse. Questo è implementato con unità di calcolo embedded ad alte prestazioni, sistemi di visione artificiale periferici e server periferici (ad esempio CPU ad alte prestazioni, GPU, FPGA, etc.).

Questa classificazione è strettamente correlata alla distanza tra l'origine dati e l'elaborazione degli stessi, con un impatto sulla latenza complessiva.

Ogni livello del continuum di elaborazione, dal dispositivo edge fino al cloud, ha un ruolo fondamentale nell'assicurare che i dati siano raccolti, processati e trasmessi efficacemente, facilitando così decisioni immediate e il controllo sulle operazioni industriali.

Infatti, si nota un effetto su tutti i mercati e in tutti i prodotti, e la discussione si è spostata dal "clamore" dell'uso dell'IA in un prodotto al "valore reale" nell'incorpo-

rare l'IA nei prodotti, e ciò segna un grande cambiamento. Questo comporta una svolta molto interessante nella rivoluzione dell'IA. La maggior parte del mercato pensa ancora che l'IA sia alimentata da Data Center molto grandi e nel Cloud, mentre assistiamo all'emergere di un tipo di IA molto diverso, direttamente ai margini, sui dispositivi e alimentata da diversi chip-set. Questo è il terreno di gioco del STM32 e dei sensori MEMS intelligenti, un ruolo chiave nel rendere l'Edge AI una realtà.

Nel mondo di domani, miliardi di piccoli nodi con capacità autonome abiliteranno casi d'uso e modelli di business che una volta erano inimmaginabili. La crescita esponenziale nei casi d'uso di Tiny Edge AI è sbalorditiva (Figura 111), e tutto ciò grazie ai 20-30 miliardi di microcontrollori e milioni di sensori spediti ogni anno in prodotti industriali, automobilistici, di elettronica di consumo e infrastrutture. L'onda anomala sta arrivando, e sta arrivando più velocemente di quanto pensiamo, e l'impronta IA sarà più grande di quella che potessimo immaginare qualche anno fa.

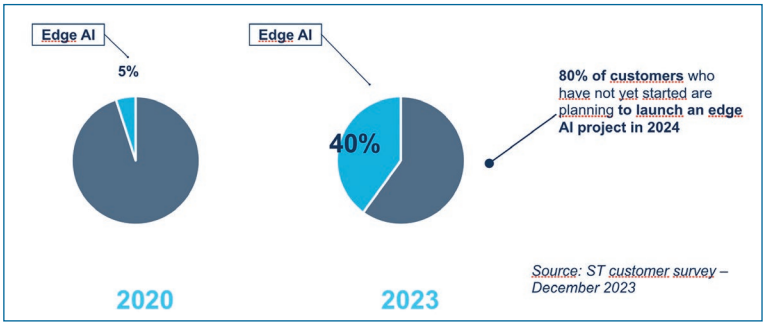


Figura111: Edge AI adoption is rapidly accelerating (Fonte: STMicroelectronics)

L'Edge AI risponde anche ai forti bisogni di sviluppare tecnologia sostenibile visto dalla prospettiva dei diversi pilastri della sostenibilità (sociale, economico, ambientale e non solo). L'IA sostenibile (o sostenibilità dell'IA) richiede di stimolare il cambiamento in tutto il ciclo di vita delle tecnologie e delle applicazioni dell'IA verso un'integrità ecologica più efficiente nonché economica.

La ricerca e lo sviluppo nell'Edge AI industriale incorporano due elementi essenziali:

- Edge AI Sostenibile: ottimizzazione del consumo di risorse nel processo di elaborazione, riduzione del consumo di risorse per i modelli di IA, minore necessità di potenza di calcolo, utilizzo di tecniche di modellazione più accurate che diminuiscano la necessità di modelli ad alta risoluzione, etc.

Ad esempio, il riconoscimento vocale richiedeva modelli da 100 GB nel cloud, mentre ora usa modelli da meno di mezzo gigabyte che possono essere eseguiti su dispositivi locali come gli smartphone.

- Edge AI per la Sostenibilità: l'uso finalizzato al raggiungimento di obiettivi di sostenibilità in diverse applicazioni e settori industriali.

La concettuale adozione dell'edge computing e dell'intelligenza artificiale distribuita sposterà le funzioni di controllo e automazione da sistemi centralizzati a dispositivi AIoT distribuiti, riducendo il consumo energetico per la trasmissione dati e risparmiando risorse nei sistemi industriali, migliorando l'efficienza nell'uso delle risorse naturali e la sostenibilità del settore industriale.

I requisiti dell'Edge AI Sostenibile richiedono lo sviluppo di nuovi moduli hardware integrati, piattaforme e architetture di acceleratori, quali System On Module (SoM), System On Chip (SoC), System In Package (SiP), neuromorfico, etc.

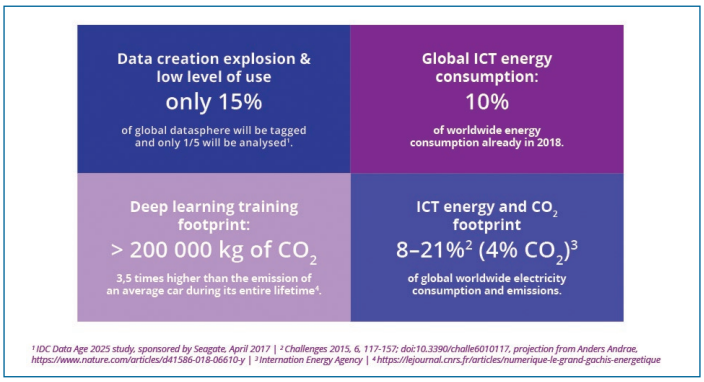


Figura 112: Impatto ambientale, sfide ed evoluzione attese (Fonte ECS-SRIA)

La Figura 112 mostra un estratto delle sfide e del previsto andamento di mercato dell'Edge Computing e dell'Edge AI.

EU AI ACT

Il 21 maggio 2024 il Consiglio europeo ha dato il suo assenso definitivo al nuovo Regolamento sull'Intelligenza Artificiale (AI Act), che era stato già approvato dal Parlamento europeo il 13 marzo 2024. Il regolamento mira a stabilire un quadro giuridico uniforme per lo sviluppo e l'uso di sistemi di IA nell'UE, in linea con i valori europei e garantendo la protezione di salute, sicurezza e diritti fondamentali.
Il regolamento sarà applicato due anni dopo la sua entrata in vigore, con alcune eccezioni per disposizioni specifiche. Un aspetto fondamentale del regolamento è la garanzia della libera circolazione transfrontaliera di beni e servizi basati sull'IA all'interno degli Stati membri, evitando così restrizioni allo sviluppo, alla commercializzazione e all'uso di tali sistemi, salvo quanto espressamente previsto dal regolamento stesso.
Per affrontare i rischi associati all'uso dell'IA, il regolamento classifica i sistemi di IA in categorie basate sul livello di rischio. I sistemi che presentano un rischio limitato sono soggetti a obblighi di trasparenza minimali, mentre quelli ad alto rischio devono soddisfare una serie di requisiti rigorosi prima di poter accedere al mercato dell'UE. Inoltre, il regolamento impone il divieto di sistemi di IA ritenuti inaccettabili a causa del loro elevato rischio, come quelli che si basano sulla manipolazione comportamentale, il punteggio sociale, la polizia predittiva basata sulla profilazione e i sistemi che utilizzano dati biometrici per discriminare le persone in base a categorie come razza, religione o orientamento sessuale.
In conclusione, il Regolamento sull'IA si pone come un elemento chiave della politica dell'UE per un mercato unico in cui l'IA sia utilizzata in modo responsabile e conforme ai diritti fondamentali, promuovendo al contempo l'Europa come centro di innovazione nel settore.

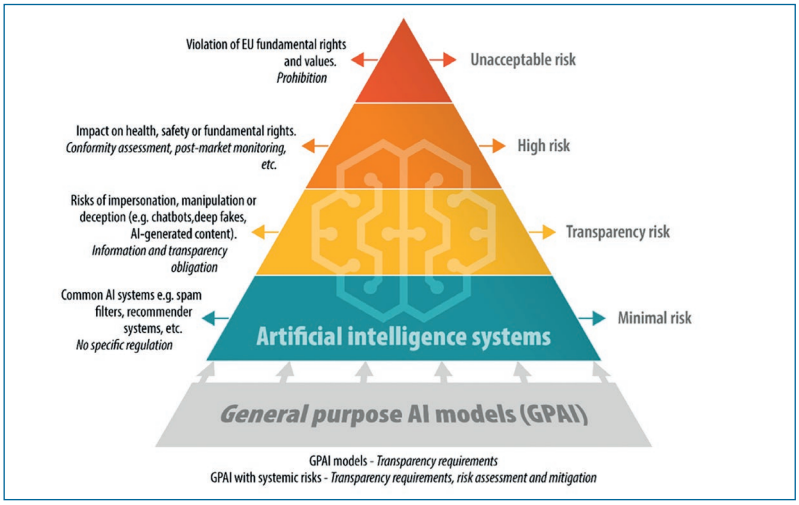


Figura 113: EU AI act risk-based approach (Fonte: Commissione Europea)

Stato dell'arte

Al pari di altri paesi, in Italia si sta affrontando il tema dell'IA su più fronti. L'Italia gioca un ruolo di primaria importanza a livello internazionale con una forte specializzata nello sviluppo di prodotti integranti IA (embedded), quali sensori, IoT, automazione, etc., combinando sul prodotto finale elementi propri del design e del Made in Italy.

L'embedded AI è un tratto distintivo del know-how italiano che propone un modello di sviluppo in contrapposizione al modello tradizionale di elaborazione nel cloud; si tratta dell'intelligenza distribuita di dispositivi IoT o embedded che richiedono l'edge computing di cui sopra.

È oramai acclarato che rispetto ad altre tecnologie l'IA richiama in modo forte l'attenzione sui principi etici a cui vincolare la tecnologia coadiuvata da IA, oltre che sulla competitività del tessuto industriale di un paese. Per questo numerose sono le iniziative a livello di organi governativi (come la "Strategia italiana per l'Intelligenza Artificiale" del MiSE[5] e simili) e sviluppatori di IA che cercano di indirizzarne

[5] *https://www.mimit.gov.it/images/stories/documenti/Proposte_per_una_Strategia_italiana_AI.pdf*

lo sviluppo soprattutto verso il tema della conformità etica.
L'IA combina una varietà di tecnologie interconnesse che consentono di affrontare sfide elaborate e risolvere problemi specifici. Questo richiede analisi e competenze trasversali, che alla tradizionale informatica e matematica affiancano la psicologia, la filosofia, le neuroscienze e la linguistica.
Secondo lo studio dell'Osservatorio AI del Politecnico di Milano, al 2019 l'89% delle imprese italiane segnalava la mancanza di competenza all'interno dell'azienda quale barriera principale all'adozione. Questa percentuale, nello studio del 2024, scende al 77%, confermando quindi una certa difficoltà ad adottare l'IA malgrado l'avvento della Generative AI (vedasi ChatGPT, etc.). In temini di sviluppo, "il 61% delle grandi imprese ha all'attivo, almeno a livello di sperimentazione, un progetto di Intelligenza Artificiale, mentre si scende al 18% tra le piccole e medie imprese (+3 punti percentuali rispetto al 2022)".

ST lavora nell'ambito dell'IA da quasi 10 anni (Figura 114) con la visione che l'embedded AI diventasse pervasiva e che fosse necessario fornire un portafoglio prodotti completo.

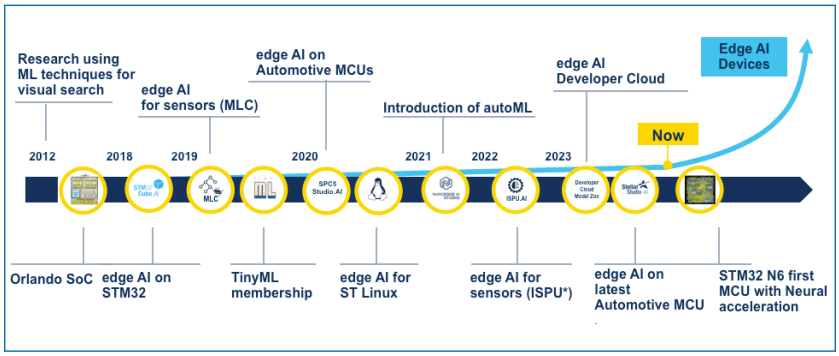


Figura114: Più di un decennio di sviluppi e rilasci HW e SW abilitanti Edge AI

Questo include soluzioni con acceleratori hardware, ma anche e soprattutto strumenti software per poter ottimizzare ed eseguire modelli computazionali

su microcontrollori e microprocessori. Quindi non solo silicio, ma sempre di più la combinazione di entrambi i fattori tecnologici di Semiconduttori e Software.

- Nel **2019** è stato rilasciato la prima versione del STM32Cube.AI, da allora diventato lo strumento più popolare per ottimizzare i modelli di IA per microcontrollori. Esso sarà fondamentale nel prossimo futuro, con l'arrivo di microcontrollori STM32 dotati di unità di elaborazione di reti neurali (NPU) dedicate. Sempre nello stesso anno è uscito uno strumento per programmare alberi decisionali nei sensori intelligenti, Unico-GUI, con l'intenzione di offrire un approccio facilitato all'utente in questo cambio di paradigma sul sensore che diventa in grado di collezionare, elaborare e prendere delle decisioni.
- Nel **2021** è stata acquisita Cartesiam, un'azienda fondata nel 2016, con la sua soluzione NanoEdge AI Studio, al fine di offrire una soluzione TinyML facile da implementare per affrontare applicazioni industriali come la manutenzione predittiva.
- Nel **2024** è stato lanciato uno strumento per implementare reti neurali ottimizzate nei sensori con ISPU, il tutto integrato nel MEMS Studio, dove è possibile avere anche l'esperienza degli alberi decisionali per sensori con MLC.

Ad esempio, ci si è focalizzati sullo sviluppo del ST Edge AI Developer Cloud (STEDGEAI-DC, Figura 115), rilasciato all'inizio del 2024; esso è il punto d'ingresso per gli sviluppatori di IA che vogliono incorporare Neural Networks su STM32, Stellar e sensori con ISPU. STEDGEAI-DC è stato progettato per valutare, convertire, ottimizzare e distribuire modelli di reti neurali addestrate provenienti da qualsiasi framework di IA del mercato, in modo che possano essere adattati e ottimizzati per l'applicazione dell'utente. Progettare carichi di lavoro di ML per MCU e sensori è un compito complesso a causa di vincoli specifici, come il fabbisogno di memoria e la potenza di elaborazione. In questo caso lo strumento fornisce agli utenti la capacità di valutare e regolare i loro algoritmi secondo necessità per raggiungere le prestazioni richieste.

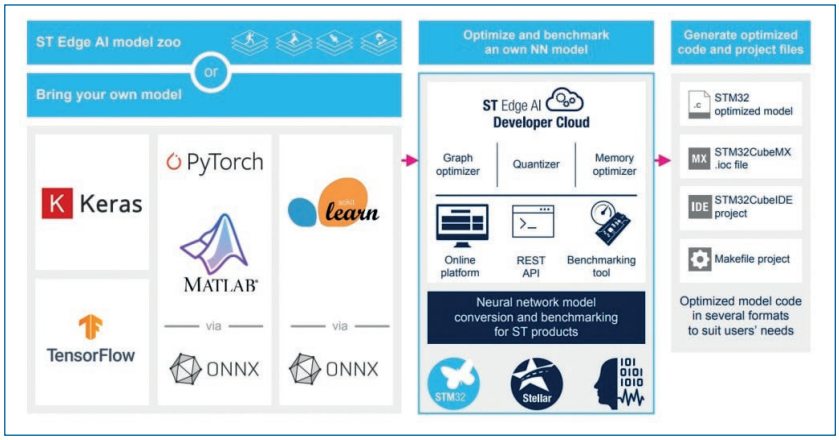


Figura115: STEDGEAI-DC is a free-of-charge online platform and services (Fonte: STMicroelectronics)

Nello specifico ST Edge AI Developer Cloud è un'applicazione web che offre i servizi direttamente sul web. ST ha integrato Developer Cloud con due caratteristiche salienti:

- Un ventaglio di modelli provenienti da framework IA open source;
- Modelli ST ottimizzati per gli MCU STM32, Stellar e sensori con ISPU.

Ciò per ispirare nuovi progetti e sperimentare nuove soluzioni nel settore industriale, automotive/mobilità, consumer e comunicazione. L'obbiettivo è quello di accorciare ulteriormente il ciclo di sviluppo con una offerta di Live Board (schede) che consenta di testare a costo nullo i modelli sugli STM32, Stellar e sensori con ISPU di propria scelta.

In contrapposizione ai bisogni di sviluppi sofisticati, esiste anche la soluzione *NanoEdgeAI* Studio, una piattaforma locale che facilita l'accesso all'Edge AI e accelera lo sviluppo di nuove soluzioni integrate, alleggerendo il lavoro degli sviluppatori embedded che potrebbero non avere competenze in Data Science o difettare di grandi set di dati ben documentati. Tramite *NanoEdge AI Studio* l'utente viene guidato in un percorso in cui può creare, pulire, ottimizzare i set di dati e poi ese-

guire automaticamente il benchmark di centinaia di migliaia di combinazioni di modelli di ML, iperparametri e blocchi di pre-elaborazione per trovare la combinazione che ottimizzerà l'accuratezza e l'uso di RAM e Flash.
NanoEdge offre il Rilevamento di Anomalie con apprendimento sul dispositivo, ma anche librerie di classificazione e regressione per combinare e costruire la migliore soluzione di manutenzione predittiva. L'apprendimento sul dispositivo rimane una capacità unica in cui il modello è ottimizzato per la macchina e quindi estremamente accurato. Questo approccio riduce i tempi di sviluppo degli algoritmi a poche settimane, rispetto ai mesi che sarebbero necessari per alcuni esperti di IA utilizzando metodi tradizionali.

Un esempio applicativo potrebbe essere quello della precisa misura del peso del cestello di una lavatrice (Figura 116). Per i produttori di lavatrici questo risulta importante per adattare i programmi di lavaggio alla quantità di vestiti caricati, regolando finemente la quantità d'acqua e il tempo di lavaggio con un impatto diretto sulla quantità di acqua ed elettricità impegnata. Una configurazione già sperimentata vede un primo algoritmo di apprendimento automatico, partendo da un sensore virtuale che stima il peso degli indumenti da lavare in base alla misura della corrente del motore. Un altro algoritmo di apprendimento automatico raccoglie i dati da un sensore inerziale a 6 assi per evitare le collisioni del cestello, calcolando se quest'ultimo possa entrare a contatto con il rivestimento esterno della lavatrice. In base agli input degli algoritmi, un programma aziona il motore utilizzando esattamente la corrente necessaria e regola i consumi di acqua e detersivo per ridurre energia e acqua tra il 15% e il 40% nel ciclo di lavaggio. Entrambi gli algoritmi sono stati sviluppati con *NanoEdge AI Studio* e vengono eseguiti su un microcontrollore STM32G0 insieme a un sensore inerziale a 6 assi di ST.



Figura116: AI helps to save energy

Con l'esplodere dello smart-working, accentuatosi con la pandemia COVID-19, avere un portatile che si adatti al contesto in cui opera è diventato cruciale. In questo contesto, un'altra applicazione è quella di modelli di IA applicati al monitoraggio di un PC che identificano le attività degli utenti analizzando i loro movimenti e quelli del dispositivo. Considerando i vari scenari d'uso e il posizionamento del laptop su superfici diverse o il suo trasporto (Figura 117), si è giunti alla creazione di un modello di IA specifico, basato su alberi decisionali, integrato in un sensore inerziale intelligente a 6 assi, LSM6DSOX. Il sensore a sua volta ha un'efficienza energetica ragguardevole, esegue un algoritmo nell'Edge AI con 34µA, permettendo ai computer di reagire ai cambiamenti e preservare la batteria per operazioni più importanti. Con questo sensore, gli sviluppatori HP sono stati in grado di creare una nuova linea di laptop consapevoli del contesto.

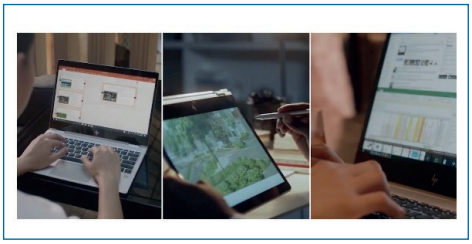


Figura117: Focus di modelli IA su svariati casi e luoghi d'uso dei laptop

Nell'ambito automotive, l'Edge AI trova applicazione nel migliorare la sicurezza, l'efficienza e l'esperienza di guida complessiva (Figura 118), utilizzando l'ambiente di sviluppo SPC5Studio.AI per convertire, analizzare e distribuire modelli di reti neurali automobilistiche su microcontrollori ST SPC58.



Figura 118: ST's key functions and solutions enabled by AI

Elaborando in tempo reale i dati provenienti dai sensori, le soluzioni di IA periferiche automotive forniscono funzionalità di assistenza alla guida e gli ultimi servizi riguardanti lo stato del veicolo per:

- Sistemi avanzati di assistenza alla guida (ADAS - Advanced Driver Assistance Systems), che possano rilevare oggetti sulla strada, come pedoni, veicoli e ostacoli, e avvisare i conducenti di potenziali pericoli;
- Sistemi di monitoraggio nell'abitacolo ADAS che possano avvertire i conducenti se mostrano segni di stanchezza o distrazione, riducendo il rischio di incidenti;
- Migliorare l'efficienza di guida e abilitare la manutenzione predittiva. Monitorare le prestazioni dei componenti del veicolo può aiutare a ridurre i tempi di inattività e migliorare l'affidabilità complessiva dell'auto;
- Proteggere le funzioni critiche dell'auto. Man mano che le auto diventano più connesse, la complessità dei flussi di dati aumenta, rendendole più vulnerabili agli attacchi informatici. In questo caso, l'Edge AI può fornire analisi in tempo reale e rilevare anomalie preservando funzioni critiche e potenziando la cybersecurity.

Quanto descritto è solo uno spunto di riflessione sui numerosi benefici dell'Edge AI, a cui si contrappone un'evidente difficoltà per le aziende che intendono sviluppare questi nuovi servizi, poiché l'implementazione dell'IA sui dispositivi richiede spesso competenze trasversali. Per questo le diverse soluzioni implementative sono integrate in un pacchetto, ovvero *ST Edge AI Suite* (Figura 119) che dovrebbe aiuta a superare queste barriere, incontrando le esigenze e i requisiti dei diversi profili, dai data scientist agli sviluppatori di software embedded, fino agli ingegneri di sistemi hardware.



Figura 119: ST Edge AI Suite

Indipendentemente dal fatto che l'Edge AI sia definita dal punto di vista hardware o software, una co-progettazione hardware-software è fondamentale per incorporare l'IA nei dispositivi.
In questo modo ST permette di fruire di risorse e conoscenze con una logica comunitaria condivisa e aperta. La Suite, quindi, integra gli ambienti di sviluppo di cui sopra e un più ampio e completo ecosistema di hardware di ST (MCU e MPU general-purpose e specifici per l'automotive, ISPU) insieme a strumenti software, supportati da partnership (come Nvidia e AWS) con fornitori di servizi cloud e toolchain di IA.

Questo per quanto attiene gli strumenti abilitanti l'IA sui MCUs e sensori intelligenti di ST. Sul lato hardware l'impegno di ST per la leadership nell'IA integrata

continua attraverso il prossimo rilascio di GP MCUs con acceleratori IA e sensori intelligenti con DSP personalizzati e programmabili dall'utente, in linea con le aspettative del mercato, che chiede soluzioni economicamente vantaggiose per il dispiegamento distribuito di prodotti abilitati dall'Edge AI.
In prospettiva, gli acceleratori efficienti dal punto di vista energetico permetteranno di indirizzare segmenti di mercato, attualmente non possibili con MCU di uso generale. La proposta di valore dell'IA dal cloud all'edge, grazie a tecnologia al silicio nativa IA, permette di estendere la legge di Moore e accelera l'adozione dell'elaborazione periferica. Come illustrato nella Figura 120, questo è possibile grazie all'avanzamento tecnologico dei semiconduttori che sfruttano gli ulteriori effetti di scala del "More Moore" e del "More than Moore".

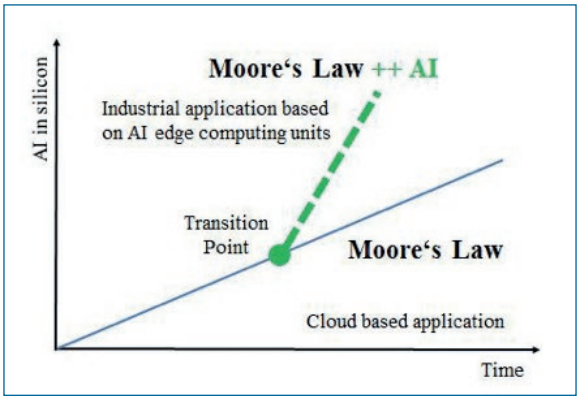


Figura 120: Silicon-born AI effect on Moore's Law beyond the current silicon technology developments

Risorse economiche necessarie

Impatto economico dell'AI

Il rapporto "Artificial Intelligence (AI) - Global Strategic Business Report" di settembre 2024 ha stimato un mercato globale di 87,4 miliardi di dollari nel 2023, e la proiezione è di 459,3 miliardi di dollari entro il 2030, con un tasso annuo di crescita composto (CAGR) del 26,8% nel periodo di analisi 2023-2030 (Figura 121).

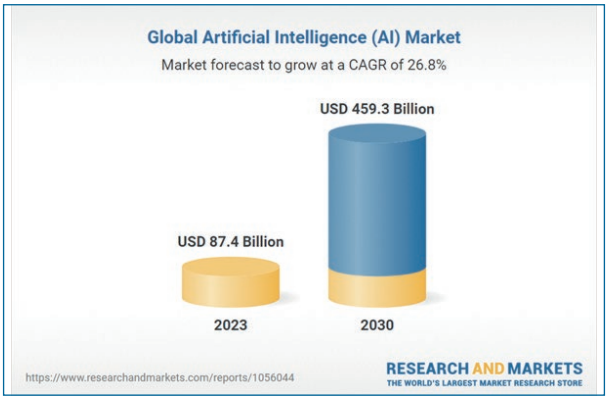


Figura 121: AI Market forecast (Fonte: Research and Markets)

Si prevede che il software AI, uno dei segmenti analizzati nel rapporto, registrerà un CAGR del 26,5% e raggiungerà i 188,2 miliardi di dollari alla fine del periodo di analisi. **La crescita nel segmento dell'hardware AI è stimata in un CAGR del 22,9% per il periodo analizzato.**

Il mercato dello smart manufacturing è segmentato in IIoT, Cloud Computing e Storage, Robotica e Automazione, Cybersecurity Industriale, Manifattura Additiva, Realtà Aumentata (AR), Realtà Virtuale (VR), Gemello Digitale, IA e tecnologia basata su Blockchain. Si prevede una crescita significativa del segmento IIoT, che rappresenterà la quota maggiore del mercato dello Smart Manufacturing.

La crescita del mercato dell'IA industriale è dovuta alla riduzione dei costi dei sensori IoT, al miglioramento dell'efficacia delle attrezzature (OEE - Overall Equipment Effectiveness) tramite IIoT e alle iniziative governative a favore della digitalizzazione.

Guardando al mercato dell'IA in generale (non quindi nello specifico di hardware IA, che tuttavia viene evidentemente trainato dallo sviluppo dell'intero mercato), in termini di investimenti, Stati Uniti e Cina gareggiano per il predominio nel settore IA, superando di gran lunga lo sforzo in atto in altri paesi. La Cina intende

raggiungere la leadership mondiale in IA entro il 2030 con una serie di piani strategici.
Uno di questi è il "Made in China 2025", incentrato sullo sviluppo del settore manufatturiero, cui seguono ulteriori piani strategici per la digitalizzazione e l'innovazione. Non da meno ma in modo alternativo si esplica l'approccio degli Stati Uniti, in cui l'azione è guidata da iniziative private stimolate da un supporto governativo per tutelare l'occupazione e la leadership sul settore con vari incentivi e programmi tesi a combattere la discriminazione e favorire l'equità e la sicurezza dei sistemi di IA, in linea con le azioni in corso in Europa.
Attraverso i programmi Horizon Europe e Digital Europe, la Commissione Europea prevede invece di investire 1 miliardo di euro all'anno nell'IA, con misure per finanziare e supportare idee e soluzioni innovative. Ciò consentirà di creare una relazione forte tra la comunità europea di ricerca nell'IA e gli innovatori, in particolare le start-up e le PMI, sia nelle fasi iniziali che nella fase di espansione. L'obiettivo è mobilitare ulteriori investimenti del settore privato e degli Stati membri al fine di raggiungere un volume di investimenti annuo di 20 miliardi di euro nel corso di questo decennio. Il Piano di Riprese e Resilienza, il più grande pacchetto di incentivi mai finanziato dal bilancio dell'UE, mette a disposizione del digitale 134 miliardi di EUR e consente all'Europa di amplificare le proprie ambizioni di diventare un leader mondiale nello sviluppo di un'IA affidabili e all'avanguardia.

Nello specifico, in Italia il mercato dell'IA vede una forte crescita. Secondo lo Studio dell'Osservatorio AI del Politecnico di Milano, nel 2023 il mercato italiano dell'IA (Figura 122) è stimato in 760 milioni di euro, con una crescita che segna un +52%, in accelerazione rispetto al +32% registrato nel 2022. La gran parte degli investimenti riguarda soluzioni di analisi e interpretazione testi per ricerca semantica, di classificazione, sintesi e spiegazione di documenti o agenti conversazionali tradizionali, mentre i progetti di Generative AI pesano solo per il 5% (38 milioni di euro). Il 90% del mercato dell'IA è guidato dalle grandi imprese ed il resto tra PMI e Pubblica Amministrazione.

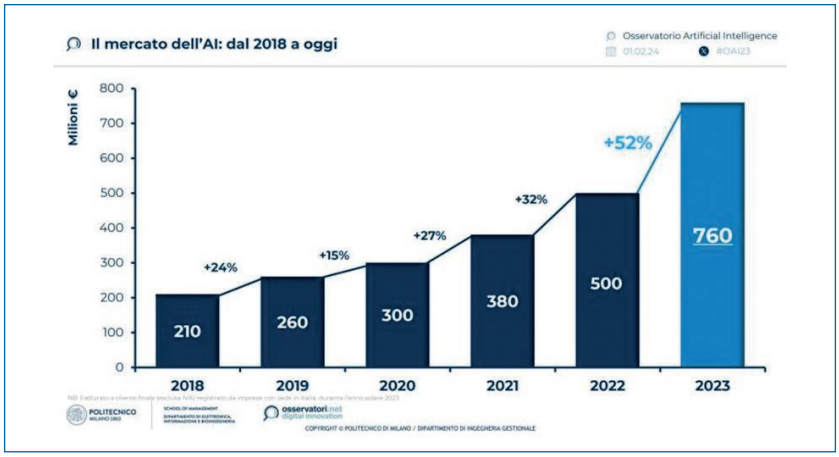


Figura 122: il mercato AI in Italia dal 2018 al 2023 (Fonte: Osservatorio Artificial Intelligence)

Le opportunità sull'ecosistema italiano dell'IA richiedono la collaborazione di tre componenti (Figura 123): Ricerca e Trasferimento tecnologico (Università, Technology Cluster, Competence Center, Digital Innovation Hubs, etc.), Produzione (industria del software, dei semiconduttori per lo sviluppo di componenti IoT, automotive, etc.), e Adozione (Pubblica Amministrazione e Industria).
Nel 2024 il Governo italiano ha annunciato un investimento sull'IA fino a 1 miliardo di euro, con il supporto di investimenti di privati. In esso ci sono 500 milioni per IA e cybersecurity, e la medesima quota per algoritmi e applicazioni in diverse aree tematiche strategiche dell'IA: spazio, infrastrutture e trasporti, tecnologie ambientali ed energia pulita, industria, salute e scienze della vita, agroalimentare.

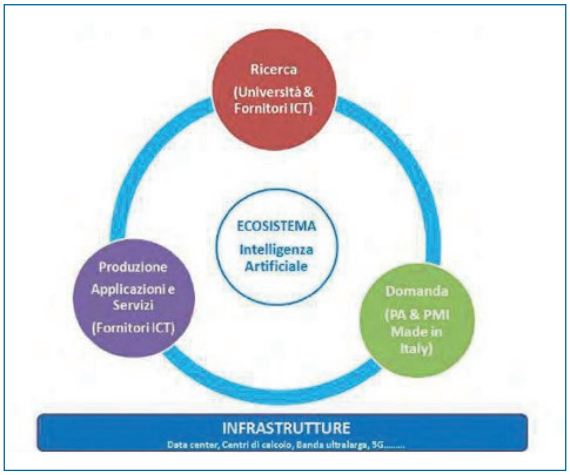


Figura 123: I tre componenti dell'ecosistema dell'IA italiana

Inoltre, il 2024 vede il termine del "Programma Strategico nazionale per l'Intelligenza artificiale" 2022-2024 iniziato a fine 2021. Era un piano ambizioso, che integrava obiettivi volti al mondo della formazione, dell'Università e delle imprese, e che non era ancora influenzato dai recenti sviluppi accelerati dalla Generative AI, una delle tecnologie a più alto impatto rispetto alle varie rivoluzioni industriali e tecnologiche. Il 2023 è l'anno in cui si è compresa la portata reale del cambiamento indotto e il mercato ne testimonia l'entusiasmo.
Nella prospettiva globale, l'impatto dell'IA viene stimato come sempre più significativo, ancor più con la diffusione delle nuove metodologie di Generative AI. Secondo McKinsey (Figura 124), il surplus di valore di mercato mondiale per il 2030 dell'IA è stimato tra i 17.1 e 25.6 trilioni di dollari. Di questi, la Generative AI crea un surplus compreso tra i 6.1 e i 7.9 trilioni di dollari, grazie all'aumento complessivo di produttività sia tramite nuovi casi d'uso sia tramite l'aumento di produttività in attività già svolte dai lavoratori.

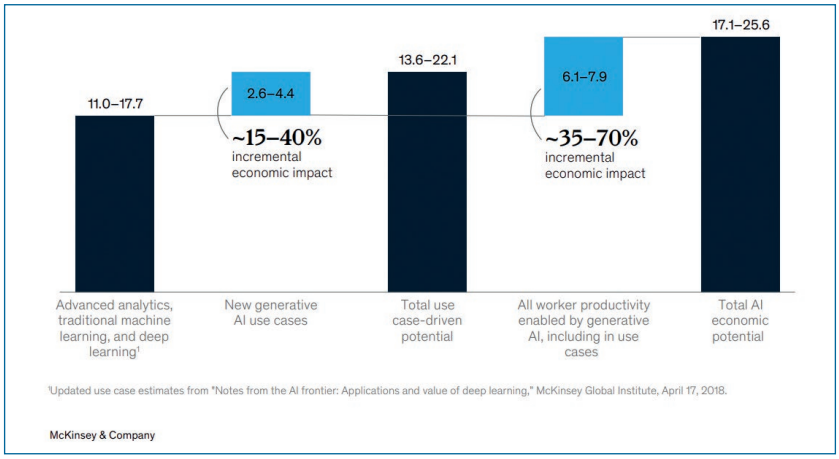


Figura 124: AI's potential impact on the global economy, $ trillion
(Fonte: "The economic potential of generative AI,
The next productivity frontier" – McKinsey&Company, Giugno 2023

Per portare l'Italia, e più in generale l'Europa, a essere un polo di riferimento del sistema economico-finanziario globale, è indispensabile accelerare gli investimenti in IA, sostenere le realtà coinvolte nello sviluppo della tecnologia IA con progetti di respiro europeo (ad esempio AI4DI[6], Andante[7], etc.) e finanziamenti, così come stanno già facendo Usa, Cina, Asia, India e Paesi Arabi con la loro immensa ricchezza.

[6] https://ai4di.eu/
[7] https://www.andante-ai.eu/

PILOT LINE "FROM LAB TO FAB" PER SVILUPPI DI SENSORI E DISPOSITIVI

La fabbricazione di sensori avviene in laboratori detti cleanroom, ambienti dove temperatura, umidità e pressione sono mantenuti in intervalli controllati per non interferire coi processi di lavorazione, e dove un sistema di filtraggio continuo dell'aria limita la presenza di particelle di sporco (anche di dimensioni inferiori al millesimo di millimetro) che, se depositate sulla superficie delle fette di semiconduttore, possono compromettere la qualità dei dispositivi.
Il termine pilot line si focalizza in questo contesto su cleanroom pubbliche in grado di sviluppare dispositivi micro-nano elettronici completi per permettere una validazione di mercato, curandone il design in linea con le necessità dell'utilizzatore finale, lo sviluppo, l'ingegnerizzazione e il controllo di qualità.

Motivazione per lo sviluppo

In analogia alle "sorelle maggiori", cioè le silicon foundry, le pilot line in oggetto nascono come supporto trasversale a molte tecnologie tra quelle abilitanti nell'ambito delle nanotecnologie, per diverse aree applicative e mercati. A testimonianza dell'impatto di queste realtà, si segnala che in Italia sviluppano i propri dispositivi presso le pilot almeno un centinaio tra SME, startup, LME e altre realtà quali ASI, INFN, ESA e CERN.
Oggi, le pilot line permettono di supportare la ricerca nelle micro e nanotecnologie e lo sviluppo di applicazioni quali nuovi sensori più performanti, meno energivori e più sicuri, contribuendo direttamente e in modo importante alle direttive green e digital in settori chiave quali telecomunicazioni, salute e sicurezza. Da questo discende un ruolo strategico delle pilot line come infrastrutture essenziali per sviluppare tecnologie di frontiera e mettere in pratica le strategie di ricerca e innovazione, oltre al recupero di competitività degli Stati Europei e dell'Europa nel suo complesso.

Un riferimento fondamentale è il Chips Act, attivato nel 2022, che tra le azioni che sta mettendo in campo annovera progetti Chips JU nella forma di Pilot Line. Queste sono intese come infrastrutture europee di ricerca formate da più enti di

ricerca e università, che hanno il compito di traghettare le tecnologie a livello pre-competitivo in settori di frontiera e mettere a disposizione di altri enti di ricerca, imprese e SMEs l'infrastruttura, i servizi e i dimostratori. Sono già state attivate diverse call, su temi quali: F*ully Depleted Silicon on Insulator, towards 7nm, Leading-edge nodes below 2nm, Heterogeneous system integration and assembly, Wide Band Gap semiconductors, Quantum technologies.* Molte delle realtà citate in questa scheda sono state coinvolte nella preparazione dei progetti per le Pilot Line.

Stato dell'arte

Gli scenari tecnologici dettagliati nei paragrafi precedenti sono caratterizzate da due elementi cruciali: costi e tempi. Sviluppare sensori e dispositivi micro-nanoelettronici richiede laboratori molto sofisticati, le *cleanroom,* che hanno costi di costruzione ma soprattutto di gestione elevati rispetto a molti altri contesti produttivi. Inoltre, la messa a punto di nuovi design e nuovi dispositivi richiede spesso mesi, se non anni, per arrivare a processi stabili, ripetibili, pronti per produzioni prototipali e di massa. In questo contesto risulta senz'altro evidente quanto possa essere difficile l'avvio di produzioni di nuovi dispositivi per la tipologia di aziende più diffuse in Italia, le PMI.

Ad oggi, le grosse aziende, quali le IDM (in Italia ST), dispongono di proprie linee di produzione e si focalizzano su propri dispositivi, disponendo inoltre di importanti aree di R&S interne. Le Foundry (tra queste citiamo LFoundry, in Italia) offrono la possibilità di sviluppare produzioni per i propri clienti, per quanto a costi di setup elevati che si giustificano se sono previste reali produzioni di massa. È possibile immaginare un modello diverso, che consenta di gestire piccoli numeri ma al contempo garantisca il raggiungimento di livelli di maturità (TRLs - Technology Readiness Levels) intermedi e alti, e fornisca un numero di dispositivi sufficiente a coprire mercati di nicchia, o a validare nuovi mercati?
Molti e di eccellente levatura sono i laboratori di ricerca italiani in grado di progettare e arrivare a prototipi, o parti di prototipi. Le aziende possono, con finanziamenti diretti o tramite progetti finanziati, appoggiarsi a questi laboratori per

valutare idee e arrivare anche allo sviluppo di cosiddetti "Proof of Concept" (PoC). Un PoC viene inteso come un sistema prototipale che permette di validare un progetto o un'idea di soluzione innovativa, e ne dimostra la fattibilità. Ad esempio, lo sviluppo di un sensore fortemente focalizzato su specifiche frequenze di risonanza o lunghezze d'onda per determinare una sensibilità specifica.
In prima battuta quello che si vuole dimostrare è la fattibilità dell'oggetto, la capacità di inserirlo in un sistema che possa funzionare nello spazio applicativo prescelto. Questo è spesso il primo passo per immaginare poi il passaggio verso l'ulteriore sviluppo del prototipo, la correzione di punti deboli, l'individuazione di un processo industrializzabile e ottimizzato rispetto a specifiche applicazioni, robusto e a resa controllata.
Incoraggiare le PMI verso investimenti in questo settore richiede di mettere a disposizione altri anelli della catena del valore che permettano di passare dai PoC alle produzioni.

Uno di questi anelli è senz'altro costituito da *cleanroom* che siano in grado di sviluppare tecnologie, sensori e dispositivi completi, e che possano farlo anche su piccoli numeri, in quanto non vincolate a una specifica tecnologia e alla necessità di minimizzare i costi e massimizzare gli utili. *Cleanroom* che abbiano la flessibilità necessaria per supportare soggetti, e quindi tecnologie e dispositivi, molto diversi tra loro. E che possano investire in modo continuativo per avere tecnologie allo "stato dell'arte" e quindi mantenere posizioni di eccellenza per garantire la qualità della ricerca, il supporto all'innovazione e un luogo qualificato per formare nuove leve di ricercatrici e ricercatori, che potranno diventare risorse preziose anche in ambito industriale.
È questo tipo di realtà che descriviamo come pilot line: strutture di ricerca pubbliche dotate di *cleanroom* all'avanguardia e di laboratori utili a fornire in piccole serie sistemi, stabilizzati rispetto ai PoC e già impostati su processi di fabbricazione a qualità controllata, ripetibili e adatti ad una successiva industrializzazione.

Le tecnologie presenti nelle pilot, necessarie per sviluppare dispositivi di micro e nanoelettronica per applicazione in diversi contesti industriali, includono patter-

ning/litografia, deposizione di film sottili, rimozioni, trattamenti termici, impiantazione ionica in cleanroom in classe almeno ISO5.
In Italia, tra i principali istituti di ricerca pubblici che dispongono di tali tecnologie possiamo citare la Micro Nano Facility (MNF) della Fondazione Bruno Kessler e i laboratori del CNR IMM di Bologna, entrambi operativi dagli anni Novanta, veri pionieri della sensoristica in ambito pubblico in Italia e con un importante sistema di collaborazioni e relazioni con aziende e agenzie europee per lo sviluppo di serie prototipali. Più recenti altre cleanroom che fanno parte del consorzio It-Fab, del quale anche MNF e CNR-IMM rientrano: PoliFAB del Politecnico Milano, Nanotec Lecce e PiQuet INRIM. Sono tutte realtà che mantengono alto il livello di ricerca di base pur dedicando importanti risorse alla ricerca applicata e all'innovazione.
Questa formula è necessaria per garantire un posizionamento di alto livello nel medio e lungo periodo, con capacità di offrire competenze e tecnologie sempre realmente innovative.
Pur nella loro trasversalità, le realtà citate hanno caratteristiche tecnologiche diverse, che vanno dal tipo di linea, che può essere MEMS, CMOS-like, o ancora specializzata nella deposizione e crescita di materiali sui substrati. Citiamo, a titolo di esempio, la specializzazione di FBK-MNF nel settore della sensoristica per radiazioni e imaging; CNR-IMM Bologna e PoliFAB per MEMS e sviluppo materiali; INRIM nel settore delle quantum technologies, con attenzione a sistemi di metrologia; CNR Nanotec Lecce con competenze in nanostrutture. Da citare sicuramente anche CNR-IMM Catania per sviluppi in carburo di silicio, laddove i centri precedenti si focalizzano prevalentemente sul silicio. Altra differenza tecnica tra i vari centri è la dimensione dei substrati lavorati, che varia dai 4 agli 8 pollici. Questo elemento ha rilevanza laddove si voglia pianificare un back end presso foundry o altre pilot, per l'integrazione in altri dispositivi, il packaging, la produzione in grande scala.

L'accesso alle pilot line per utenti esterni, e nello specifico per aziende, può avvenire in più modalità. La più classica è collegata all'attivazione di collaborazioni di ricerca tra azienda e pilot line, tipica in fasi di R&S.

Considerando le richieste di avvio di attività di produzione, molti degli istituti citati hanno definito negli anni procedure di accesso e sistemi di tariffe dedicati, per essere in grado di gestire in modo uniforme e compatibile con i propri regolamenti e il proprio impianto amministrativo attività che si discostano dai progetti di ricerca classici. Ritroviamo in alcuni casi convenzioni per avere diritto di accesso alle pilot line e tariffe di utilizzo, spesso basate sul tempo di occupazione di macchine e spazi. In parallelo, per produzioni che sono eseguite direttamente dalla pilot per il committente sono previste tariffe basate su occupazione delle macchine e in alcuni casi quote di consumabili, tempo dello staff impiegato e quote di utenze (luce, gas, acqua), queste ultime spesso componente impegnativa delle spese di gestione dei laboratori.

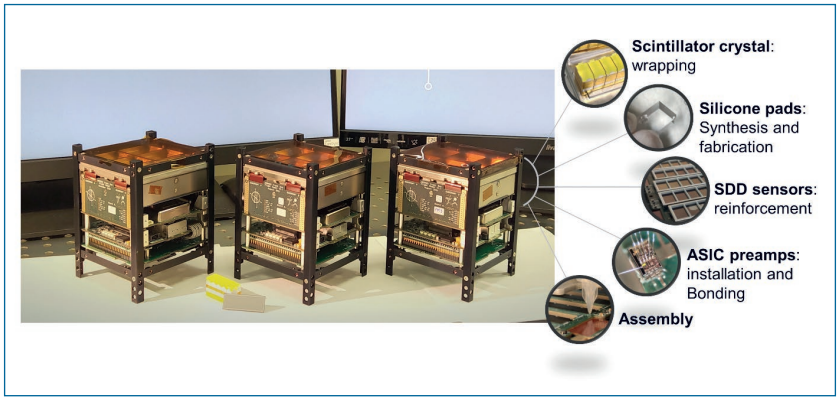


Figura 125: Esempio di ingegnerizzazione ad alto Technology Readiness Level (TRL) di componenti di ricerca presso cleanroom pubblica

La Figura 125 è un esempio di ingegnerizzazione ad alto TRL di componenti di ricerca presso cleanroom pubblica. Hermes CubeSAT - HERMES Pathfinder P/L lanciati con il satellite SpIRIT il 16 gennaio 2024 e in IDLE operative mode. Componenti CubeSat progettati, fabbricati e assemblati presso Fondazione Bruno Kessler. Il sistema è valutato a TRL9.

Alcuni esempi di sensori sviluppati in clean room pubbliche per piccole produzioni sono riportati in figura 126 e 127.

Radiation Sensors Technology	Field of app.	Status	Main commitments
Diodes & Phototransistors	Industrial	Production	SME
Diodes & Phototransistors	Space	TRL 6	SME
Silicon Photomultiplier	HEP & Space Medical Automotive	Up to TRL9 (prod included)	INFN Intern. Large Co.
Pixel & Microstrip	HEP & Space	Up to TRL9 (prod included)	CERN, INFN Intern. Large Co PSI
Silicon 3D	HEP	TRL 9	CERN, INFN
LGAD	HEP & Space Medical	TRL up to 7	CERN PSI
Silicon drift detector	HEP/Syncrothron Space Material Analysis	Up to TRL9 (prod included)	INFN/Elettra INAF Intern. Large Co.s

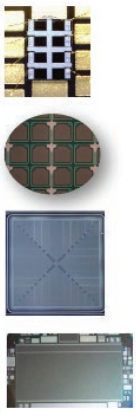


Figura 126: Esempi di sensori richiesti in piccole produzioni e relativo TRL fabbricati in una delle cleanroom pubbliche italiane (FBK)

MEMS Technology	Field of app.	Status	Main commitments
Flow sensors	Industrial space	Production	SME Leonardo
Gas Sensors	Environmental	TRL 6	SME Intern. Large Co.s Regional Ambient protection agencies
RF Platform	Industrial Space	Up to TRL7	Under discussion
Customized services	Various		Research institutions

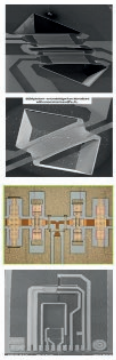


Figura 127: Esempi di sensori in piccole produzioni e relativo TRL fabbricati in una delle cleanroom pubbliche italiane (FBK)

In Europa troviamo realtà quali VTT, CEA-LETI, IMEC. Sono istituti di natura pubblica, a volte fortemente connessi al mondo industriale, come VTT, creati proprio per attivare il trasferimento tecnologico dalla ricerca verso il mercato. Offrono il supporto di ricerca e sviluppo necessario per aziende che ritengono più flessibile, a volte più sostenibile, e sicuramente più efficacie questa soluzione al solo sviluppo *in house*. Queste collaborazioni hanno definito un contesto virtuoso che favorisce da un lato la sostenibilità di strutture indubbiamente costose e che dall'altro stimola un aggiornamento costante degli investimenti, a garanzia del mantenimento di un livello di tecnologia "leading edge". Sono infrastrutture fortemente e direttamente sostenute dai rispettivi Stati con politiche di investimento stabili. Ciò che ha consentito anche il raggiungimento di dimensioni maggiori rispetto a istituti e pilot italiani, e quindi anche la capacità di occupare diverse aree tecnologiche e la presenza stabile nei luoghi di indirizzamento delle strategie di investimento a livello europeo.

Risorse economiche necessarie

Considerando pilot con superfici di cleanroom tra i 1000 e i 10000mq, si stimano costi annui nell'ordine tra 1 e 5 milioni di euro per ogni pilot line. Questo budget indicativo include: personale; materie prime quali wafer, gas, chimici e altri consumabili specifici; servizi di manutenzione; spese di funzionamento quali energia elettrica, acqua, metano. In molti casi tra quelli citati parte delle risorse richieste viene coperta da progetti e da commesse industriali. Tuttavia, il contesto rende necessario garantire investimenti costanti per rinnovare le tecnologie e il mantenimento in perfetto funzionamento delle apparecchiature. Le strutture come quelle descritte possono potenzialmente sviluppare serie prototipali che possono raggiungere, come ordine di grandezza, le centinaia di migliaia di dispositivi all'anno, numeri che ovviamente dipendono fortemente da fattori quali la dimensione delle fette, il design del dispositivo e la sua complessità. Questi numeri, pur importanti, sono sicuramente ordini di grandezza inferiori a quanto viene prodotto nelle foundry industriali, ma sottolineano la concretezza del supporto che può derivare dalle pilot a realtà che vogliano testare nuovi prodotti e mercati.

Quanto descritto evidenzia l'importanza strategica di realtà pubbliche che proprio per la loro missione, per il loro essere lontane da necessità di guadagno, ma in grado di dialogare con le imprese, sono altresì grado di accompagnare le idee più innovative da un livello di ricerca a dimostratori in numero sufficiente a validare il mercato. L'avvio di pilot, o il loro rafforzamento su tecnologie specifiche, può beneficiare di programmi dedicati, quali appunto i grandi finanziamenti Europei o Ministeriali. Tuttavia, la sostenibilità di lungo periodo va assicurata tramite risorse pubbliche stabili, politiche che prevedano fondi sistematici e non solo occasionali, associati ovviamente a valutazione di efficacia e monitoraggi.

TECNOLOGIE DI PRODUZIONE DI SUBSTRATI DI SILICIO 300MM TIPO N PER L'ELETTRONICA DI POTENZA

La produzione delle fette di silicio iper-pure è alla base della maggior parte dei dispositivi elettronici oggi realizzati, e le caratteristiche di tali substrati sono di fondamentale importanza per il corretto funzionamento del dispositivo stesso.
In questa scheda, ci focalizziamo su una specifica parte del processo di produzione dei wafer: la crescita del monocristallo che, tagliato e lavorato, verrà infine spedito ai clienti sotto forma di fetta. La crescita del monocristallo è determinante per le caratteristiche di drogaggio, resistività e contenuto di ossigeno del wafer, a loro volta specificate dai produttori di chip sulla base delle caratteristiche del dispositivo a cui sono destinate.

Ci occuperemo, in particolare, delle richieste dei produttori di elettronica di potenza, che si stanno dirigendo in due direzioni preferenziali:

- Da un lato verso l'ottimizzazione delle performance di dispositivi a basso e medio voltaggio, utilizzando substrati drogati arsenico (As) e fosforo (P) con resistività sempre più basse;
- Dall'altro verso la riduzione dei costi di produzione di IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) e diodi, spostando la produzione dall'utilizzo di substrati 200mm ad alta resistività cresciuti con metodo Floating Zone (FZ) a substrati 300mm ad alta resistività cresciuti con metodologia Czochralski (CZ) a basso ossigeno (< 2.5 E17 at/cm3), con costi intrinsecamente più bassi.

Per soddisfare queste richieste sempre più sfidanti, il classico processo CZ (Czochralski) ha delle limitazioni di resa e produttività che si rispecchiano in un costo troppo elevato di produzione e performances insufficienti.
In questa scheda trattiamo quindi lo sviluppo di tecnologie innovative di produzione CCz (Continuous Czochralski) mostrato in Figura128 per la realizzazione di substrati a 300mm per l'elettronica di potenza, quale tecnologia alternativa, ad alta efficienza e minor costo, rispetto alle tradizionali metodologie CZ e Floating Zone (FZ).

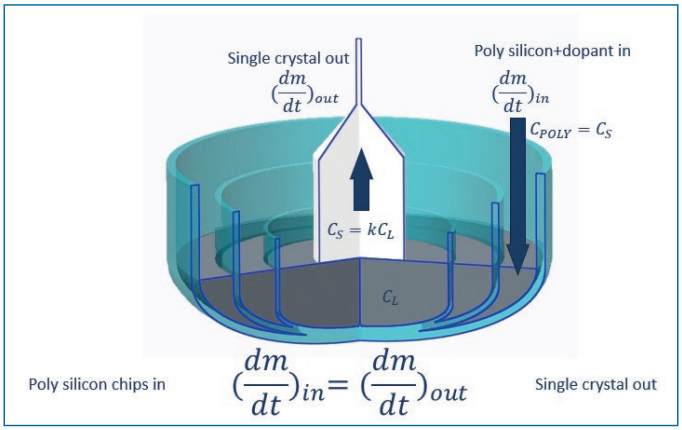


Figura 128: Schema di sistema di crescita CCz (Continuous Czochralski)

Substrati fortemente drogati con As o P a bassa resistività sono utilizzati per produrre dispositivi Power-MOSFET, le cui applicazioni consistono nelle seguenti: switch a basso/medio voltaggio per alimentatori di potenza, convertitori DC/DC, controllori di motori a basso voltaggio, elettronica per l'automotive.
I requisiti del substrato sono principalmente legati alle caratteristiche del cristallo; infatti, si richiede una resistività molto bassa (<1,8 mOhm*cm per l'arsenico, <1 mOhm*cm per il fosforo) per minimizzare la resistenza al passaggio di corrente (RDSon), e un più severo controllo di resistività assiale e radiale (< 10%) per ridurre la variabilità delle caratteristiche elettriche dei transistor realizzati sulla fetta. In caso di strato epitassiale depositato dal fornitore di silicio, è necessaria uniformità sia di spessore e di resistività.
Substrati drogati con fosforo ad alta resistività e basso ossigeno trovano invece sbocco nei dispositivi Trench-Field Stop IGBT, con applicazioni in switch ad alto voltaggio, convertitori DC-AC, motori industriali, inverter. I requisiti di cristallo in questo caso sono: alta resistività di tipo n (nel range 50 – 200 Ohm*cm) per sopportare alte tensioni di rottura; stretto range di resistività (+/-10%) per controllare la variazione di on-resistance; basso contenuto di ossigeno per evitare derive di

resistività dovute ai donori termici; basso livello di carbonio per minimizzare il possibile impatto dei cicli termici del cliente sulla resistività del substrato; bassa densità di agglomerati di vacanze (COP) per massimizzare l'integrità dell'ossido di gate.

Motivazioni per lo sviluppo

I dispositivi di potenza svolgono un ruolo cruciale nell'ambito dei semiconduttori poiché permettono la conversione, il controllo e la gestione efficiente dell'energia elettrica in una vasta gamma di applicazioni, contribuendo così alla modernizzazione e all'efficienza dei sistemi elettrici.
Sono applicati nell'industria, nelle energie rinnovabili e nell'automotive, dove l'elettrificazione sta diventando sempre più importante sia a bordo macchina che a livello infrastrutturale per la rete di ricarica.

Gli indicatori di impatto per questi dispositivi sono i consumi elettrici del dispositivo e i costi di realizzazione. Proprio sul costo del dispositivo impatta molto il costo del substrato, che l'utilizzo di tecnologie CCz permette di ridurre.
Nel processo CZ standard la resistività diminuisce durante la crescita del cristallo (dalla testa alla coda), per via della segregazione del drogante; pertanto, il prodotto a bassa resistività può essere allocato solo nella porzione terminale del cristallo. Questo comporta difficoltà di programmazione e allocazione dei segmenti di silicio che vengono prodotti, nel senso che la porzione iniziale del cristallo deve poter essere assegnata ad altri prodotti destinati a dispositivi con requisiti meno stringenti.
L'innovativa tecnologia CCz (Continuous Czochralski) permette, attraverso l'introduzione in continuo di silicio e drogante man mano che il cristallo cresce, di ottenere un cristallo con resistività costante, compensando l'effetto della segregazione e arrivando a resistività molto basse, difficili da raggiungere con il processo CZ standard. Il processo CCz, a parità di massa di materia prima utilizzata, permette di produrre molto più materiale nel range di resistività voluto rispetto al CZ, e quindi

di semplificare la programmazione e l'allocazione dei segmenti di silicio prodotti, e di conseguenza di ottimizzare la produzione risparmiando sull'energia e sui materiali. La tecnologia CCz permette inoltre di crescere più cristalli nello stesso batch rispetto alla tecnologia CZ; pertanto, a parità di quantità di silicio prodotto si riduce il costo dei materiali e dei componenti utilizzati per la crescita.

Per quanto riguarda i prodotti ad alta resistività e basso ossigeno, questi sono normalmente prodotti con la tecnica FZ, che è molto costosa ed è limitata al diametro 200mm. Riuscire a produrre silicio con queste caratteristiche usando invece la tecnica CZ permette di risparmiare notevolmente sul costo del substrato, e di realizzare substrati di diametro maggiore (300mm) attualmente non disponibili con FZ.
Le difficoltà nel produrre questi substrati con tecnica CZ sono di diversa natura. Per ottenere bassissimi livelli di ossigeno occorre applicare campi magnetici elevati, e questo comporta un maggior consumo energetico; inoltre, per garantire la purezza necessaria si rende indispensabile la ricerca di materiali di consumo e componenti di qualità superiore, e quindi costi più elevati. La sfida tecnologica sarà quindi ottimizzare i costi migliorando l'efficienza energetica e la resa del processo.
In Europa sono presenti molti leader nella produzione di dispositivi di potenza (ad esempio Infineon e Bosch) a loro volta integrati con i produttori finali. A completamento della filiera, la possibilità di produrre e fornire i substrati di silicio necessari a livello europeo rappresenterebbe un vantaggio competitivo per l'economia dell'Unione Europea e per la sostenibilità della filiera stessa.

Stato dell'arte

A livello mondiale, il mercato dei produttori di silicio per l'elettronica è dominato dalle due società più grandi, entrambe giapponesi, con un market share maggiore del 55%. Il terzo produttore al mondo è MEMC-Global Wafer, primo in Europa per market share e unico in Italia. L'azienda ha tre stabilimenti in Europa, di cui

due in Italia.
La tecnologia di produzione CCz è tradizionalmente utilizzata per il silicio destinato al fotovoltaico, che ha delle caratteristiche meno sfidanti rispetto al silicio per l'elettronica. MEMC – GlobalWafers ha ottimizzato le apparecchiature e i processi CCz per migliorare le proprietà del prodotto e renderlo adeguato al mercato dell'elettronica, specializzandosi in prodotti fortemente drogati As e P di diametro 200 mm e 300 mm. Questi prodotti sono realizzati anche da altre aziende all'estero utilizzando la tecnica CZ standard. L'azienda è l'unica al mondo a detenere il know-how ed utilizzare questa tecnologia per produrre silicio per l'elettronica.
Per quanto riguarda i substrati ad alta resistività e basso ossigeno, sono attualmente presenti sul mercato prodotti FZ di diametro 200 mm, mentre sono assenti prodotti con queste caratteristiche per il diametro 300 mm. Lo sviluppo e la messa sul mercato di tale tecnologia da parte di MEMC potranno portare ad un ulteriore vantaggio competitivo per l'Italia e l'Europa.

Risorse economiche necessarie

Per la realizzazione della filiera completa italiana, compresa la prototipazione, la realizzazione dell'impianto e la messa in opera di una linea completa dalla crescita del cristallo fino alla produzione del wafer a 300mm, sono richiesti 380 milioni di euro in un arco temporale indicativo di 3 anni.

glossario scenari tecnologici

AI	Artificial Intelligence
AIoT	Artificial Intelligence of IoT
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
ASSP	Application-specific standard product
ATP	Assembly, Test, and Packaging
BCD	Bipolar, CMOS and DMOS process technology
BGA	Build Grid Array
Bi-CMOS	Bipolar and CMOS process technology
CAD	Computer Aided Design
CAGR	Compound Average Growth Rate
CMOS	Complementary metal-on silicon oxide semiconductor
cMUT	Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer
CO2	Biossido di carbonio (anidride carbonica)
DMOS	Diffused metal-on silicon oxide semiconductor
DQNN	Deeply Quantized Neural Network
DRAM	Dynamic random access memory
DRIE	Deep Reactive Ion Etching
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme, the voluntary European
FDM	Fused Deposition Modeling
FD-SOI	Fully depleted silicon-on-insulator
FID	First Industrial Deployment
FinFET	Field Effect Transistor a "pinna"
FSM	Finite State Machine
GaN	Gallium Nitride
GST	Germanio (Ge), Antimonio (Sb) e Tellurio (Te)
HID	High intensity discharge

glossario scenari tecnologici

HSM	Hardware Security Module
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IC	Integrated Circuit
IIoT	Industrial IoT
IoT	Internet of Things
IMU	Inertial Measurement Units
IP	Intellectual Property
IPCEI	Important Project for Common European Interest
IR	Infra-Red
ISO	International Organization for Standardization
ISPU	Intelligent Sensor Processing Unit
LBS	Laser Beam Scanning
LED	Light Emitting Diodes
LGA	Land Grid Array
LIDAR	Light Detection and Ranging
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System
MLC	Machine Learning Core
MCU	Microcontroller Unit (MCUs have internal flash memory and are intended to operate with a minimum amount of external support ICs. They commonly are a self-contained, system-on-chip (SoC) designs.)
MLOps	Machine Learning Operations
MOSFET	Metal-On Silicon Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPU	Microprocessor Unit
NFC	Near Field Communication
NIR	Near Infra Red
nm	Nanometro (miliardesimo di metro)
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OEM	Original Equipment Manufacturer
OTA	Over-The-Air
PCM	Phase Change Memory
PFC	Perfluorinated Compounds

glossario scenari tecnologici

pMUT	Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer
RF	Radio Frequency
RF-SOI	Radio Frequency Silicon-On-Insulator
ROM	Read Only Memory
SDV	Software-Defined Vehicles
SGS	Società Generale Semiconduttori
SIA	Semiconductor Industry Association
SiC	Silicon Carbide
SiP	System In Package
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
SoC	System On Chip
STi^{2}GaN	Intelligent integrated gallium nitride
STi^{2}Fuse	Electronic harness protection
SWIR	Small Wavelenght Infra-Red
TAM	Total Available Market
T-MOS	Thermal Metal Oxide Semiconductor
ViP	Vertical Intelligent Power
VIPower	Vertically integrated power
VOC	Volatile Organic Compounds
WSTS	World Semiconductor Trade Statistics
µm	Micrometro (milionesimo di metro)

riferimenti scenari tecnologici

Riferimenti: TECNOLOGIE BCD, INTEGRAZIONE DI FUNZIONI ANALOGICHE, DIGITALI E SMART POWER

- https://ethw.org/Milestones:Multiple_Technologies_on_a_Chip,_1985
- https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/BCD.html
- D. Arrigo, C. Adragna, V. Marano, R. Pozzi, F. Pulicelli and F. Pulvirenti, "The Next "Automation Age": How Semiconductor Technologies Are Changing Industrial Systems and Applications,"ESSCIRC 2022- IEEE 48th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC), Milan, Italy, 2022, pp. 17-24, doi: 10.1109/ESSCIRC55480.2022.9911230.
- https://www.osservatori.net/it/ricerche/comunicati-stampa/intelligenza-artificiale-italia
- ITRS (2014) More than Moore White Paper [online]. c2014, Version 2.3 [cit. 2016-06-05]. http://www.itrs2.net/uploads/4/9/7/7/49775221/irc-itrs-mtm-v2_3.pdf
- https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/FD-SOI.html
- https://www.st.com/en/applications/industrial.html#text_and_title-1
- https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/PCM.html
- https://www.st.com/resource/en/brochure/st12081_brautomotive1018_lr.pdf
- Le innovazioni del prossimo futuro. Vol. 1: Scenari di settore,10^ edizione, Agra Editore, Roma, 2020; ISBN-10: 8898935293
- https://newsroom.st.com/media-center/press-item.html/c3244.html
- https://www.st.com/en/applications/automotive.html
- Yole Report - Understand Innovation to drive your progress - SystemPlus 2023
- CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report Summary for Policymakers; https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- MARKET AND TECHNOLOGY TRENDS - Emerging Non-Volatile Memory 2024, by Yole Intelligence, APR 2024
- 300mm Pilot Line for Smart Power and Power Discretes | R3-PowerUP | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission (europa.eu)

Riferimenti: MEMS - MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS

- Mobile Inertial Sensors Comparison 2021, System Plus Consulting, 2021 - Status of the MEMS Industry 2021, Yole Développement, 2021 link to source
- Boni, Nicolò & Carminati, Roberto & Mendicino, Gianluca & Merli, Massimiliano. (2021). Quasi-static PZT actuated MEMS mirror with 4x3mm2 reflective area and high robustness. 6. 10.1117/12.2576526. link
- https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/mems-scanar.html
- Multiple MEMS mirrors synchronization techniques, modeling, and applications; G. Amor, E. Roth, D. Sharon, N. Gorelik, S. Kinstlich, S. Nagola; SPIE.Photonics West, SPIE OPTO, March 2021; link

riferimenti scenari tecnologici

- https://www.st.com/en/mems-and-sensors/accelerometers.html
- Inertial Measurement Units (IMU) - iNEMO inertial sensors and modules - STMicroelectronics
- LPS22DF, ST's first pressure sensor to receive the NextNav Certification thanks to unique capabilities
- MEMS Pressure Sensors - STMicroelectronics
- Status of the MEMS Industry 2023 Market and Technology Report; Yole Intelligence 2023
- https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/mems-scanar.html
- Link to: STMicroelectronics NV - 2023 Annual Report (Form 20-F)
- A Webinar with Silicon Catalyst, ST Microelectronics and an Exciting MEMS Development Contest - SemiWiki
- https://www.st.com/content/st_com/en/ecosystems/MEMS-Sensors-Ecosystem-for-Machine-Learning.html
- https://newsroom.st.com/media-center/press-item.html/p4460.html
- https://www.st.com/content/st_com/en/st-edge-ai-suite.html
- https://www.italiameccatronica.it/stmicroelectronics-e-politecnico-di-milano-insieme-per-un-centro-di-ricerca-sui-materiali-destinati-ai-sensori/
- https://newsroom.st.com/media-center/press-item.html/c3009.html

Riferimenti: NUOVI MATERIALI: TECNOLOGIA GAN - NITRURO DI GALLIO

- https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/GaN.html
- Solutions for Smarter Mobility Automotive Applications Overview by STMicroelectronics link: en.ST12081_brautomotive1018_lr.pdf
- Kumar, A.; Moradpour, M.; Losito, M.; Franke, W.-T.; Ramasamy, S.; Baccoli, R.; Gatto, G. Wide Band Gap Devices and Their Application in Power Electronics. Energies 2022, 15, 9172. https://doi.org/10.3390/en15239172
- Power GaN 2023 Market and Technology Report, Market and Technology Trends; Yole Intelligence 2023
- Emerging Semiconductor Substrates 2023 Market and Technology Trends, Yole Intelligence 2023
- RF GaN 2023 Market and Technology Trends; Yole Intelligence 2023
- White paper : How the unique properties of wide bandgap materials improve application performance by Filippo Di Giovanni, STMicroelectronics; link to paper
- https://www.st.com/en/power-management/integrated-smart-gans.html
- ST and Exagan, The New Chapter in the Gallium Nitride Story, https://blog.st.com/powergan/
- Eccezionale 2022 per l'industria italiana dei semiconduttori | Elettronica & Mercati (elettronicaemercati.it)
- STMicroelectronics NV - 2023 Annual Report (Form 20-F)
- GaN Power Transistor Comparison 2023 Technology, Process and Cost Comparison, Yole SystemPlus 2023
- https://www.st.com/en/power-management/integrated-smart-gans.html

riferimenti scenari tecnologici

- https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/sti2gan.html
- STMicroelectronics and TSMC Collaborate to Accelerate Market Adoption of Gallium Nitride-Based Products - ST News
- ST and Exagan, The New Chapter in the Gallium Nitride Story, link: https://blog.st.com/powergan/
- https://newsroom.st.com/media-center/press-item.html/c2946.html
- HOME | gan4ap project (gan4ap-project.org)
- GaN for Advanced Power Applications | GaN4AP | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission (europa.eu)
- GaN Transistor Integrated Circuits | EleGaNT | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission (europa.eu)
- Vertical GaN on Silicon: Wide Band Gap Power at Silicon Cost | YESvGaN | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission (europa.eu)
- Power GaN 2023 Market and Technology Report, Yole Intelligence 2023

Riferimenti: NUOVI MATERIALI: TECNOLOGIA SIC - CARBURO DI SILICIO

- 25 Years of Silicon Carbide at ST and the New Era Ahead
- Silicon carbide (SiC) - STMicroelectronics
- Silicon Carbide: Go Beyond Silicon (st.com)
- 25th Anniversary of SiC, a Timeline (st.com)
- Yole Group - Follow the latest trend news in the Semiconductor Industry
- EV Traction Inverter Design Challenges - PDF Whitepaper - STMicroelectronics
- Whitepaper | Benefits of using ST's wide bandgap technology - STMicroelectronics
- ST's power discrete solutions improve performance and density performance and density
- SiC power modules for your electric vehicle designs (st.com)
- Whitepaper | Benefits of using ST's wide bandgap technology - STMicroelectronics
- PE3-2_Lay_Lv_ST_SIC_Mosfet_Diode_product_and_application_Industrial_summit_Version2_EN.pdf
- STPOWER Gen3 SiC MOSFETs IDEAL FOR EV - Efficient technology silicon carbide in EV
- STMicroelectronics to build the world's first fully integrated silicon carbide facility in Italy - ST News
- Stm rilancia sull'Italia: cantieri aperti per 10 miliardi, Il Sole 24 Ore Martedì 25 Giugno 2024– N.174
- Urso e Vestager a Catania per il nuovo impianto STMicroelectronics, 5 miliardi di investimento (mimit.gov.it)

Riferimenti: VIP POWER - VERTICAL INTELLIGENT POWER

- VIPower - STMicroelectronics
- VIPower M0-9Standard family
- Automotive - STMicroelectronics

riferimenti scenari tecnologici

- STMicroelectronics NV - 2023 Annual Report (Form 20-F)
- Whitepaper: How smart power switches improve vehicle safety and performance - STMicroelectronics
- Body Electronics, Lighting & Convenience - STMicroelectronics
- Solutions for Smarter Mobility Automotive Applications Overview
- STMicroelectronics Launches Highly Integrated Intelligent High-Side Drivers for Automotive Applications - ST News
- STMicroelectronics reveals scalable, feature-rich automotive high-side drivers leveraging advanced power technology - ST News
- STMicroelectronics reveals intelligent automotive circuit breaker featured for flexibility and functional safety - ST News
- High Side Switches with SPI and Asymmetrical Outputs - STMicroelectronics
- High and Low Side Drivers / Switches - STMicroelectronics
- Low Side Switches and Drivers - STMicroelectronics
- Application note - AN4798 - VIPower OMNIFET III hardware design guide (st.com)
- DC Motors trends in automotive body electronics-EDOM Technology - Your Best Solutions Partner

Riferimenti: SISTEMI DI PACKAGING DEI CHIP: PACKAGE 3D

- ST process and packaging technologies - STMicroelectronics Sustainability report 2024
- Tutorials | IEEE SENSORS 2023 (ieee-sensorsconference.org), Heterogeneous Integration: Sensors Point of View Marco Del Sarto October 29, 2023;
- Laser Beam Scanning (LBS) for Near-to-Eye Displays: A Preview (st.com)
- Yole Group - Follow the latest trend news in the Semiconductor Industry 2023
- N. Manca, M. Del Sarto, A. Gritti, R. Duca and V. Mangion, "Package Design for Multiphysics MEMS Sensor," 2019 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 183-188, doi: 10.1109/ITHERM.2019.8757310.
- Yole Group - Follow the latest trend news in the Semiconductor Industry 2023
- J. J. Marek, 'Trends and Challenges in Modern MEMS Sensor Packages'.
- K. Pun, C.N. Chan, S.L. Ng, KK Wong, "MEMS Gyro Sensor using Flexible Substrate for Package Size Reduction", IECPT 2015.
- J. Barrett, M. Reynolds, "Package Size Reduction & Solder Joint Reliability for High Density Semiconductor Packaging", IEEE 2007.
- M. Ooida, Y. Koshio, M. Ikemizu, 'Small, Lightweight and Thin Package', ECTC 2007.
- R. Duca, M. O. Ghidoni 'A Comprehensive Methodology for Design for Package Miniaturization'.
- R. Duca, Jing En Luan, Phone Maw Hla, Kim-Yong Goh 'A Comprehensive Study on BGA Block Warpage and Prediction Methodology.
- https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic

riferimenti scenari tecnologici

- M. Li, J. Song, Q.A. Huang, F.X Chen, J.Y. Tang, "The thermomechanical coupling effect in multi-layered microelectronic packaging structures", In: 2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings. IEEE, 2006. p. 2135-2137.
- M. Lishchynska, C. O'Mahony, O. Slattery, O. Wittler, H. Walter, "Evaluation of Packaging Effect on MEMS Performance: Simulation and Experimental Study", IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2007, 30.4: 629-635
- Stefano Facchinetti, Luca Guerinoni, Luca Giuseppe Falorni, Andrea Donadel, Carlo Valzasina, "Development of a complete model to evaluate the Zero Rate Level drift over temperature in MEMS Coriolis Vibrating Gyroscopes".
- Atsushi Oouchi, "Plastic Molded Package Technology for MEMS Sensor".
- B. Vigna, "Sensor Integration: Feynman or Moore", 2019, IMAPS Device Packaging Conference.
- A. Maierna, M. Del Sarto, N. Manca, G. Bruno, M. E. Castagna, A. La Malfa, A. Gritti, Electronic Packaging For Infrared T-MOS Sensor With Filtered Optical Window, EMPC 2019.
- T. Blank, I. Brouk, Sharon Bar-Lev, G. Amar, E. Meimon, S. Bousher, M. Meltsin, M. Vaiana, A. Maierna, M. E. Castagna, G. Bruno, and Yael Nemirovsky, Non-Imaging Digital CMOS-SOI-MEMS Uncooled Passive Infra-Red Sensing System, IEEE Sensor Journal 312020, 2020.
- N. Boni, R. Carminati, G. Mendicino and M. Merli, "Quasi-static PZT actuated MEMS mirror with 4x3mm2 reflective area and high robustness," in Proc. SPIE 11697, MOEMS and Miniaturized Systems XX, 1169708, 2021.
- M. Del Sarto, L. Maggi, A. Maierna, M. Shaw, R. Carminati, G. Mendicino, D. Rotta, M. Chiesa, A. Serrano, A. Bogoni, "MEMS Mirror in Hermetic Package for Enhanced Performances", IMAPS Europe, 2023.

Riferimenti: SISTEMI DI PACKAGING DEI CHIP: TECNOLOGIE DI MANIFATTURA ADDITIVA E SOTTRATTIVA

- https://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/multipas/
- Anitha, Kuttiappan & Chenchula, Santenna & Surendran, Vijayaraj & Shvetank, Bhatt & Ravula, Parameswar & Milan, Rhythm & Chikatipalli, Radhika & Vijayaraj, Surendran & Bhatt, Shvetank & Author, Corresponding. (2024). Advancing Cancer Theranostics through Biomimetics: A Comprehensive Review. Heliyon. 10.1016/j.heliyon.2024.e27692.
- Prisca Viviani, Maria Teresa Caporaso, Martina Scolari, Ilaria Gelmi, Laura Castoldi, Luca Magagnin, Inkjet printing of a polymeric vibration damper for MEMS application adopting a step-reticulation process, Journal of Manufacturing Processes, Volume 120, 2024, Pages 966-974, ISSN 1526-6125, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.04.079.
- Ink-jet printing of polymeric dampers for MEMS applications "Ink-jet printing of polymeric dampers for MEMS applications", P. Viviani, R. Bernasconi, L. Magagnin Dip. Chimica, Materiali e Ing. Chimica G. Natta – Politecnico di Milano
- AENEAS - Association for RD&I in Electronic Components & Systems : Aeneas (aeneas-office.org), "ECS Strategic Research and Innovation Agenda 2023"
- Welcome to R2POWER300 Homepage — R2POWER300

riferimenti scenari tecnologici

- Preparing R2 extension to 300mm for BCD Smart Power | R2POWER300 | Project | News & Multimedia | H2020 | CORDIS | European Commission (europa.eu)
- Aerosol Jet Printing of a Benzocyclobutene-Based Ink as Adhesive Material for Wafer Bonding Application. Advanced Materials Interfaces. Filippo Iervolino, Angelica Baldini, Ilaria Gelmi, Laura Castoldi, Raffaella Suriano, Marinella Levi.2023/2
- Inkjet printing of a polymeric vibration damper for MEMS application adopting a step-reticulation process 2024/6/30. Prisca Viviani, Maria Teresa Caporaso, Martina Scolari, Ilaria Gelmi, Laura Castoldi, Luca Magagnin. Journal of Manufacturing Processes
- Inkjet Printing of Low-k Polymer Adhesives for Electronic Applications, 2021/6/10 American Chemical Society Filippo Iervolino, Raffaella Suriano, Martina Scolari, Ilaria Gelmi, Laura Castoldi and Marinella Levi.

Riferimenti: SISTEMI HARDWARE DI EDGE COMPUTING PER L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

- IBS, Global Semiconductor Industry Service Report - Semiconductor market analysis Vol. 29 No.1 January 2020
- ECS-SRIA 2023 https://ecssria.eu/ECS-SRIA%202023.pdf
- https://stm32ai.st.com/nanoedge-ai/
- https://newsroom.st.com/media-center/press-item.html/p4477.html
- Stellar E automotive MCUs boost electrification applications - STMicroelectronics
- https://www.st.com/en/automotive-microcontrollers/stellar-actuation-mcus.html
- https://www.st.com/en/automotive-microcontrollers/stellar-g-gateway-and-body.html
- https://www.st.com/en/automotive-microcontrollers/stellar-p-motion-control.html
- https://www.st.com/content/dam/OLM%20Email%20Marketing/2023/asia_pac/events/2023-st-tw-techday/sm01_st-automotive-solution-empower-the-transition-to-e-mobility.pdf
- https://content.st.com/st-taiwan-tech-day-EN.html
- https://www.st.com/en/development-tools/stellarstudioai.html
- https://www.st.com/resource/en/product_presentation/presentation-edge-ai-stellar-mcu-automotive.pdf
- https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/artificial-intelligence-at-the-edge.html
- Ovidiu Vermesan, SINTEF, Norway, Mario Diaz Nava, STMicroelectronics, France - Intelligent Edge-Embedded Technologies for Digitising Industry; doi: https://doi.org/10.13052/rp-9788770226103
- Opportunities for Heterogenous Computing: General & Generative AI at the Edge; 08 Feb 2024 – ABI Research, Code: AN-5471
- Artificial intelligence (AI) act: Council gives final green light to the first worldwide rules on AI; https://europa.eu/!3Gf3QN
- Artificial intelligence act, https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)698792
- Artificial Intelligence - Questions and Answers, 12 December 2023 Brussels https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_21_1683

riferimenti scenari tecnologici

- https://www.mimit.gov.it/index.php/it/notizie-stampa/intelligenza-artificiale-online-la-strategia
- https://www.osservatori.net/it/ricerche/comunicati-stampa/intelligenza-artificiale-italia
- https://newsroom.st.com/media-center/press-item.html/c3218.html
- https://www.st.com/content/st_com/en/about/customer-success-stories/how-hp-is-leading-the-way.html
- Artificial Intelligence (AI) - Global Strategic Business Report (researchandmarkets.com) ID: 1056044
- https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-approach-artificial-intelligence
- Intelligenza artificiale e strategie: i tre grandi vizi che l'Italia non perde - ilSole24ORE
- Contributo dell'Osservatorio Artificial Intelligence all'Indagine Conoscitiva sull'intelligenza artificiale: opportunità e rischi per il sistema produttivo italiano
- "The economic potential of generative AI, The next productivity frontier" – McKinsey&Company, Giugno 2023
- https://www.st.com/en/development-tools/stedgeai-dc.html

SOCI AIRI >

SOCI SOSTENITORI

BRACCO
CNR - CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
MAPEI
PIRELLI

ORGANIZZAZIONI DI IMPRESE

FARMINDUSTRIA
FEDERCHIMICA
UNIONCAMERE

ISTITUTI FINANZIARI

INTESA SANPAOLO

ENTI PUBBLICI DI RICERCA E UNIVERSITÀ

AREA SCIENCE PARK
CENTRO NAST
CSGI
ENEA
INAIL
POLITECNICO DI TORINO - CHILAB
SCUOLA NORMALE SUPERIORE DI PISA
UNIVERSITÀ DI PISA

INDUSTRIE E CENTRI DI RICERCA

BAIC AGRO ITALIA
BIOTECNOMED
BYRON'S HOLDING
BRACCO IMAGING
BREMBO
CAMOZZI AUTOMATION
CENTRO RICERCHE FIAT
CEREAL DOCKS
CERTIMAC
CONSORZIO ITALBIOTEC
CRSLAGHI
CETMA
CIRA
COLOROBBIA CONSULTING
COMSOL
DIASORIN
DOMPÉ
ECOR INTERNATIONAL
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE
E.M.A
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI
FINCANTIERI
FONDAZIONE CAVALIERI OTTOLENGHI
FONDAZIONE BRUNO KESSLER
FONDAZIONE PIEMONTE INNOVA
GEWISS
GIUSTO FARAVELLI
INNOVHUB STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSTRIA
IVECO
LFOUNDRY
MECCANO
MEMC ELECTRONIC MATERIALS - GLOBALWAFERS COMPANY

**Situazione soci aggiornata a dicembre 2024*

MENARINI SILICON BIOSYSTEMS
METTLER TOLEDO
PIRELLI TYRE
PROGEST
SAES GETTERS
SAIPEM
SMILAB
SPEA
STMICROELECTRONICS
TECNOALIMENTI SOCIETA CONSORTILE PER AZIONI
THALES ALENIA SPACE ITALIA
TODARO INDUSTRY
TXT E-TECH

START UP INNOVATIVE

AIENG
ARCHA SRL
ASSING
COSBERG
ECOR INTERNATIONAL
ENERTECH SOLUTION
EPSILON
IUVO
JONIX
KLASTER
MARITIME TECHNOLOGY CLUSTER FVG
NATIVE TO WEAR
NEXT TECHNOLOGY TECNOTESSILE SRL
NICHE SRL
NVNOVA
PLASTICA ALFA
SULTAN
TECHNETIC ITALIA

SOCIETÀ DI CONSULENZA

AYMING ITALIA
BUGNION
FI GROUP ITALIA
FINSERVICE
LUNATI & MAZZONI
SERVICE GROUP R&D
STUDIO PROMOZIONI
STUDIO TRIBUTARIO E SOCIETARIO DELOITTE
TINEXTA INNOVATION HUB


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
TECNOLOGIE DIGITALI


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
MECCATRONICA


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
FARMACEUTICA


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
ENERGIA E DECARBONIZZAZIONE


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
AMBIENTE ED ECONOMIA CIRCOLARE


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
COSTRUZIONI


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
TRASPORTI E MOBILITÀ


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
CHIMICA E MATERIALI


AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI EDIZIONE 2025
SPAZIO

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
MICROELETTRONICA E SEMICONDUTTORI

Da oltre 25 anni lo studio Le Innovazioni del Prossimo Futuro di Airi offre una guida autorevole per comprendere e anticipare l'evoluzione tecnologica e i suoi impatti su imprese e società.

Quest'undicesima edizione, frutto della collaborazione tra manager e ricercatori di imprese, centri di ricerca e università italiane, fornisce un quadro aggiornato di 130 tecnologie ad alto impatto socioeconomico, che contribuiranno nel breve-medio periodo all'innovazione di dieci dei principali settori produttivi nazionali.

Il volume dedicato al settore Microelettronica e Semiconduttori, coordinato da STMicroelectronics e dal Politecnico di Milano, con il contributo di MEMC Electronic Materials e Fondazione Bruno Kessler, presenta 10 scenari tecnologici chiave – BCD & Smart Power, MEMS, Nitruro di Gallio e Carburo di Silicio, Vertical Intelligent Power, Packaging avanzato, Edge computing per l'intelligenza artificiale, wafer manufacturing e pilot line – fornendo dati di mercato, stato dell'arte, investimenti necessari e impatti socioeconomici attesi.

Il volume evidenza come la microelettronica costituisca una leva strategica per aumentare competitività, sostenibilità e resilienza industriale. Contribuisce inoltre a rafforzare la sovranità digitale italiana ed europea, guidando la transizione verso un futuro tecnologico più innovativo e inclusivo.

Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
50 1974-2024

www.airi.it

"La collaborazione con l'ecosistema degli attori della Microelettronica e Semiconduttori italiani ha portato a questo studio, che consente di individuare gli scenari tecnologici che potranno agire da motore economico del tessuto industriale italiano. L'obiettivo de Le Innovazioni del Prossimo Futuro è accrescere la cultura della ricerca nelle imprese, università e scuole e accompagnare i nostri soci nel creare sinergie pubblico-private."

Andrea Bairati, Presidente Airi

"Innovazione è la capacità di trasformare le scoperte provenienti dalla ricerca in valore concreto per il mercato e la società nel suo complesso. La trasformazione in valore coinvolge trasversalmente un ecosistema industriale complesso e multidisciplinare. Il report Airi offre una visione chiara e condivisa delle tecnologie fondamentali per la microelettronica, un settore essenziale per l'innovazione trasversale e la crescita sostenibile del sistema Paese."

Alessandro Cremonesi, Chief Innovation Officer STMicroelectronics

"Non solo dispositivi, ma anche materiali avanzati: i wafer di silicio sono le fondamenta dell'intera industria dei semiconduttori, la base su cui si realizza l'architettura di tutti i dispositivi elettronici, dai più semplici a quelli più tecnologicamente sofisticati e complessi."

Marco Sciamanna, Presidente MEMC SpA (GlobalWafers)

"In un panorama tecnologico complesso, dinamico e altamente competitivo, università e istituti di ricerca svolgono un ruolo chiave nel delicato passaggio dalla ricerca di base all'innovazione, collaborando con le industrie. Nella microelettronica servono solide competenze teoriche, laboratori all'avanguardia e cleanroom dove concretizzare il concetto "from lab to fab", come avviene in FBK."

Lorenza Ferrario, responsabile Micro-Nano Facility FBK

Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

GlobalWafers
MEMC Electronic Materials S.p.A.

FONDAZIONE BRUNO KESSLER

Volume scaricabile gratuitamente dal sito www.airi.it

Isbn 978-88-98935-63-5