

# TECNOLOGIA E ATTUALITÀ

L'INNOVAZIONE NELL'INDUSTRIA MICROELETTRONICA

di Paolo Cappelletti\*

*L'esperienza, nell'ambito della ricerca fisica, di un manager di una delle maggiori industrie internazionali di microelettronica può essere utilmente comunicata a insegnanti e studenti perché possano incontrare un mondo troppo spesso sconosciuto. L'autore, raccontando di sé e del proprio lavoro di ricercatore presenta possibilità di itinerari professionali di indubbio interesse.*

**L**a tecnologia del XX secolo che ha avuto il maggior impatto sulla nostra vita quotidiana è certamente l'elettronica a stato solido o, più precisamente, l'integrazione su silicio. I risultati dello sviluppo della microelettronica hanno modificato il nostro modo di comunicare, di lavorare e di divertirci; senza i circuiti integrati non avremmo *Internet*, i telefoni cellulari, i personal computer, i videogiochi, i riproduttori MP3 e quant'altro l'elettronica professionale e di consumo è stata in grado di realizzare negli ultimi trent'anni.

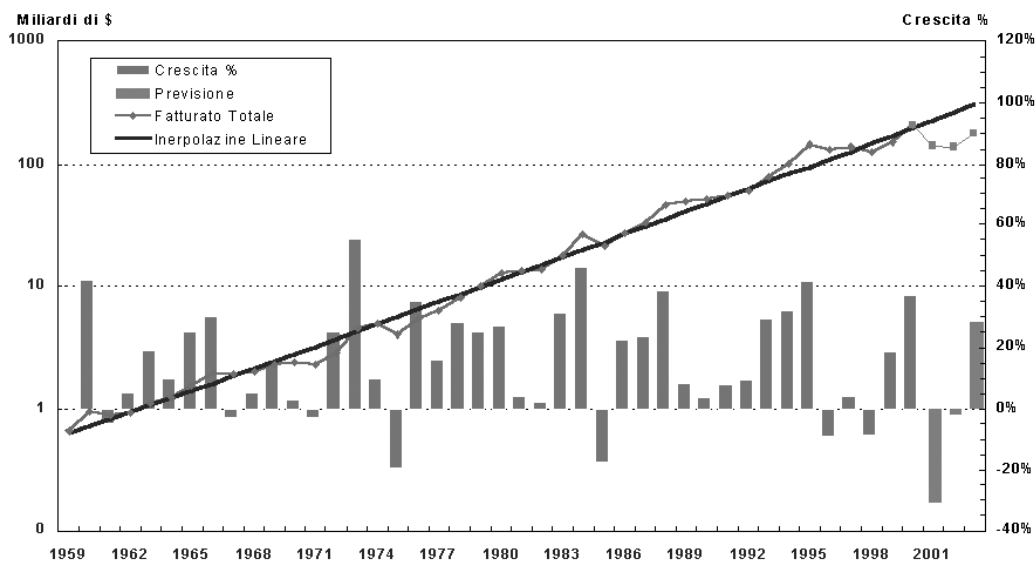
L'assegnazione, nel 1999, del premio Nobel per la Fisica a Jack Kilby ha costituito un ulteriore autorevole riconoscimento dell'importanza dei circuiti integrati.

Dagli inizi degli anni Sessanta, quando Kilby, alla *Texas Instruments*, e Robert Noyce, alla *Fairchild*, gettavano le basi di una nuova tecnologia, l'evoluzione dei circuiti integrati è proseguita a ritmo esponenziale fino ai giorni nostri.

Nel 1965, quando la nuova tecnologia era ancora agli albori, Gordon Moore, fondatore dell'*Intel* assieme a Noyce e ad Andy Grove, aveva predetto che il numero di transistori integrabili su uno stesso *chip* sarebbe raddoppiato ogni 18 mesi; questa previsione, nota nel settore come «legge di Moore», si è dimostrata vera fino a oggi, a dispetto di tutte le sentenze che ripetutamente ne avevano preannunciato la fine imminente, e ha semmai subito negli ultimi cinque anni un'accelerazione. Analogamente all'incremento del numero di componenti per *chip*, l'evoluzione della tecnologia d'integrazione ha consentito di ridurre esponenzialmente il consumo d'energia, il tempo necessario per ogni commutazione elementare e, non meno importante, il costo del singolo transistor.

\*Laureato in Fisica all'Università degli Studi di Milano nel 1978, dal 1979 lavora alla *STMicroelectronics*, nell'Unità Centrale di Ricerca e Sviluppo, dove dal 1998 dirige lo Sviluppo Processi per Memorie Non Volatili. Ha insegnato presso le Università degli Studi di Milano, di Padova e di Bologna. È autore di numerosi brevetti, articoli e memorie in congressi a livello internazionale. È coautore di un libro sulle memorie *flash* pubblicato nel 1999 da *Kluwer Academic Publishers*.

Tuttavia, se è noto ai più l'incredibile progresso tecnologico della microelettronica, non è altrettanto conosciuta la dimensione economica raggiunta dall'industria dei semiconduttori. Negli ultimi quarant'anni il mercato mondiale dei semiconduttori è cresciuto costantemente, a prescindere dal caratteristico andamento ciclico determinato dallo sbilanciamento ricorrente della domanda e dell'offerta, a un ritmo superiore al 15%, superando nel 2000 la soglia dei 200 miliardi di dollari, valore confrontabile con quello dell'industria automobilistica. È questa la caratteristica peculiare dell'industria microelettronica che mi interessa sottolineare: è un settore industriale che ha raggiunto dimensioni economiche estremamente rilevanti in cui però l'innovazione costituisce ancora il fattore competitivo determinante.



Evoluzione del mercato mondiale dei semiconduttori (fonte: WSST, ST); prescindendo dalla forte variabilità evidenziata dalle barre per oltre quarant'anni il mercato è cresciuto mediamente del 15% all'anno

L'investimento in ricerca e sviluppo rappresenta il 10-15% del fatturato e l'investimento necessario per rinnovare gli impianti produttivi è del 25-30% annuo; non esistono a mia conoscenza altri settori industriali di pari dimensioni che richiedano un impegno così pesante nell'innovazione.

## Pianificare l'innovazione

Se si vuole mantenere un progresso tecnologico come quello sperimentato dall'industria microelettronica, considerando anche le dimensioni di mercato raggiunte, il processo d'ino-

vazione non può essere affidato al caso. Per quanto l'affermazione possa sembrare contraddittoria rispetto allo stereotipo che l'invenzione sia il frutto imprevedibile della creatività individuale, bisogna pianificare l'innovazione.

Per smontare lo stereotipo occorre precisare che l'innovazione tecnologica procede principalmente in modo evolutivo o, più precisamente, in modo incrementale; ogni nuova generazione di una tecnologia riutilizza in buona parte elementi perfezionati della generazione precedente e introduce un numero limitato di elementi innovativi. Più rari, ma a impatto più dirompente, sono gli eventi rivoluzionari caratterizzati dalla comparsa di soluzioni radicalmente nuove che sconvolgono lo scenario competitivo. È chiaramente più facile pianificare l'innovazione di tipo incrementale; l'innovazione rivoluzionaria può essere solo stimolata, identificando i limiti delle tecnologie note e investendo sulla ricerca di soluzioni che consentano di superarli.

Molti sono gli attori che partecipano al processo innovativo dell'industria microelettronica. Un ruolo determinante è ovviamente svolto dai produttori di circuiti integrati ma altrettanto importante è il contributo dei fornitori di attrezzature e materiali e quello degli utilizzatori. Lo sviluppo delle tecnologie di base (la litografia, le tecniche di deposizione e attacco dei film sottili, l'impiantazione ionica, eccetera) e il miglioramento dei materiali è svolto prevalentemente dai fornitori dell'industria dei semiconduttori, seppure in stretta collaborazione con i produttori. Gli utilizzatori di circuiti integrati, che sono i produttori di sistemi elettronici, dettano all'industria dei semiconduttori gli obiettivi da raggiungere e forniscono le conoscenze di sistema che diventano tanto più importanti quanto più la tecnologia consente di integrare diverse funzioni su un singolo *chip*. Indispensabile è anche il contributo degli enti di ricerca, pubblici e privati, all'innovazione di tipo incrementale e soprattutto all'esplorazione di soluzioni radicalmente innovative.

Lo strumento tipicamente utilizzato per pianificare l'innovazione, che si rivela particolarmente utile quando al risultato concorrono diversi attori, è la *road-map* tecnologica.

La *road-map* traccia un percorso nel futuro fissando gli obiettivi tecnologici da raggiungere per ciascun anno. Questo strumento rappresenta il piano di lavoro per chi deve sviluppare la tecnologia e consente di allineare le attività concorrenti dei fornitori e degli enti che contribuiscono allo sviluppo; inoltre, dà visibilità agli utilizzatori della tecnologia per pianificare a loro volta lo sviluppo dei sistemi. Dalla *road-map* principale, che fissa gli obiettivi generali, si declinano quindi varie *road-map* particolari che definiscono per ciascuna delle attività rile-

vanti gli obiettivi particolari congruenti con quelli generali. L'industria microelettronica a livello mondiale ha costituito un gruppo permanente di lavoro con lo scopo di aggiornare continuamente la *road-map* tecnologica; questo gruppo, che produce annualmente la *International Technology Road-map of Semiconductor* (ITRS; [www.public.itrs.net](http://www.public.itrs.net)) è composto da esperti di provenienza industriale e accademica e, fa piacere rilevarlo, è coordinato da Paolo Gargini, un italiano giunto ai vertici della carriera tecnica all'*Intel*. L'IRTS è un corposo rapporto che disegna, a tratti progressivamente meno definiti, il futuro della microelettronica nei prossimi 15 anni, definendo obiettivi per tutti gli aspetti rilevanti, indicando, dove possibile, le soluzioni tecnologiche più probabili e evidenziando i problemi per i quali non sono ancora note le soluzioni.

Anno di introduzione	2001	2004	2007	2010	2013	2016
Nodo tecnologico (nm)	130	90	75	45	32	22
Tolleranza di allineamento litografico (nm @ $3\sigma$ )	45	31	23	18	13	9
Variazione delle dimensioni critiche (nm @ $3\sigma$ )	16	11	8	5.5	3.9	2.7
Spessore equivalente dell'ossido di gate (nm)	1.3 - 1.6	0.9 - 1.4	0.6 - 1.1	0.5 - 0.8	0.4 - 0.6	0.4 - 0.5
Lunghezza fisica dei transistori per microprocessori (nm)	65	37	25	18	13	9
Energia dissipata per commutazione (fJ/transistore)	0.35	0.10	0.032	0.015	0.007	0.002
Frequenza di clock dei microprocessori (Ghz)	1.7	4	6.7	11.5	19.3	28.7
Area della cella DRAM ( $\mu\text{m}^2$ )	0.13	0.049	0.024	0.012	0.0041	0.0020

Alcuni dei parametri più significativi della *road-map* tecnologica dei circuiti integrati (fonte: ITRS 2001)

L'attività di ricerca nel settore della microelettronica assorbe enormi risorse finanziarie. La ricerca incrementale è sostenuta prevalentemente dalle società del settore mentre la ricerca a medio e lungo termine beneficia anche di finanziamenti pubblici; negli USA un grande aiuto all'innovazione viene anche dalla larga disponibilità di capitale di rischio (*venture capital*). La Comunità Europea finanzia la ricerca nella microelettronica attraverso il programma *ESPRIT* ([www.cordis.lu](http://www.cordis.lu)) che sostiene progetti internazionali di collaborazione precompetitiva cui partecipano aziende, università e enti di ricerca. Inoltre, nell'ambito del programma *MEDEA* ([www.medea.org](http://www.medea.org)) si sviluppano progetti internazionali che ricevono finanziamento dai governi nazionali. Il governo italiano ha poi attivato

il programma *MADESS* ([www.madess.cnr.it](http://www.madess.cnr.it)), rivolto prevalentemente a università e laboratori CNR, per coordinare e finanziare l'attività di ricerca sulla microelettronica in Italia.

## Il fattore umano

Se la corretta pianificazione degli obiettivi e la coerente allocazione di risorse sono elementi fondamentali nella gestione della ricerca industriale, il fattore determinante per l'innovazione rimane comunque l'apporto creativo dell'individuo.

Le idee non vengono a comando ma si può certamente creare un contesto favorevole allo sviluppo dell'innovazione; questo è il compito più importante e più impegnativo per chi abbia la responsabilità di gestire un gruppo di ricerca e sviluppo.

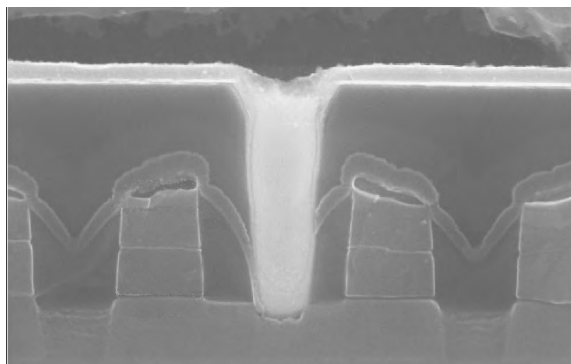
Poiché la concezione di un'idea è un processo eminentemente personale, la prima condizione per favorire l'innovazione è che le persone siano motivate a impegnare tenacemente le proprie risorse mentali, logiche e intuitive, alla soluzione dei problemi; nessun lavoro può essere svolto senza un apporto personale ma il lavoro di ricerca richiede un coinvolgimento particolare.

Non basta l'interesse dell'individuo per la materia e la sua voglia di contribuire alla soluzione dei problemi, occorre che il contesto in cui egli è inserito ne stimoli e ne sviluppi le potenzialità. Per esempio, attivare un processo di delega che sviluppi spazi d'iniziativa personale e creare un clima in cui sia possibile sbagliare e ammettere il proprio errore sono condizioni indispensabili per favorire lo sviluppo delle potenzialità individuali. Inoltre, l'attività di ricerca, specialmente in ambito industriale, si svolge prevalentemente in *team*; la competitività è un forte stimolo a dare il meglio di sé ma può diventare un fattore negativo se arriva a impedire la collaborazione tra le persone e la circolazione delle informazioni.

La gestione delle risorse umane è un aspetto determinante per il successo nella competizione industriale nei settori tecnologici avanzati, ma non è comunque la questione che oggi desta maggior preoccupazione; il problema più rilevante sta diventando la carenza di personale tecnico qualificato.

L'industria microelettronica, in particolare, è un incredibile concentrato di tecnologie, il cui impiego nei processi industriali è spinto al limite delle cono-

Fotografia al microscopio elettronico della sezione di una memoria *flash* realizzata in tecnologia da 150 nm; la cella di memoria occupa un'area di  $0,32 \mu\text{m}^2$



scienze scientifiche e tecniche. Tracciare il confine tra conoscenza scientifica e ricaduta tecnologica è veramente difficile; ne sia riprova il fatto che in questo settore la ricerca accademica più avanzata si svolge in stretta collaborazione con l'industria.

Per questo motivo l'impiego di ricercatori e di personale tecnico laureato (ingegneri, fisici, chimici, informatici, eccetera) nell'industria microelettronica è elevatissimo.

Le stime mostrano che, a livello mondiale, la risorsa più critica per mantenere le prospettive di sviluppo previste nei prossimi anni per l'industria microelettronica sarà la disponibilità di personale tecnico laureato.

L'Italia da questo punto di vista non fa eccezione. Se, finora, la presenza di un buon numero di università rispetto al numero di industrie tecnologicamente avanzate faceva della disponibilità di ottimi giovani laureati in materie scientifiche un vantaggio competitivo per l'insediamento in Italia di attività di ricerca industriale, l'impressionante calo di iscrizioni alle facoltà scientifiche degli ultimi anni fa sorgere serie preoccupazioni per il futuro.

## Una professione interessante

Esula dallo scopo di questo mio contributo analizzare le ragioni del calo d'interesse dei giovani per corsi di laurea come fisica, chimica, scienze dei materiali e ingegneria elettronica. Mi preme però ribadire che questo fenomeno non ha alcuna relazione con la domanda di laureati in materie scientifiche, che, come detto, è invece destinata ad aumentare, e dare testimonianza della possibilità di svolgere in Italia una carriera professionale di assoluto livello internazionale in un settore a tecnologia avanzata.

Lavoro nel settore della microelettronica da più di vent'anni, tutti spesi in ricerca e sviluppo, in una società con solide radici in Italia, che si posiziona ai vertici del settore a livello mondiale (tra le prime cinque per fatturato, nel 2001). Ho avuto anche la fortuna di fare parte di un gruppo, che ora dirigo, che ha sviluppato e che detiene una competenza di prim'ordine a livello mondiale in un settore tecnologico in forte sviluppo, d'interesse strategico per l'azienda. È entusiasmante lavorare in Italia in una società italiana, in un gruppo che sviluppa tecnologia avanzata in un settore industriale di primaria importanza, competendo alla pari con i grandi nomi dell'elettronica come *Intel*, *AMD* e *Toshiba*.

Ci occupiamo di memorie non-volatili e in particolare di

memorie *flash*, la famiglia di prodotti che ha avuto negli ultimi anni il tasso di crescita in assoluto più elevato nel mercato dei semiconduttori e che sta ormai raggiungendo livelli di fatturato paragonabili a quelli delle DRAM.

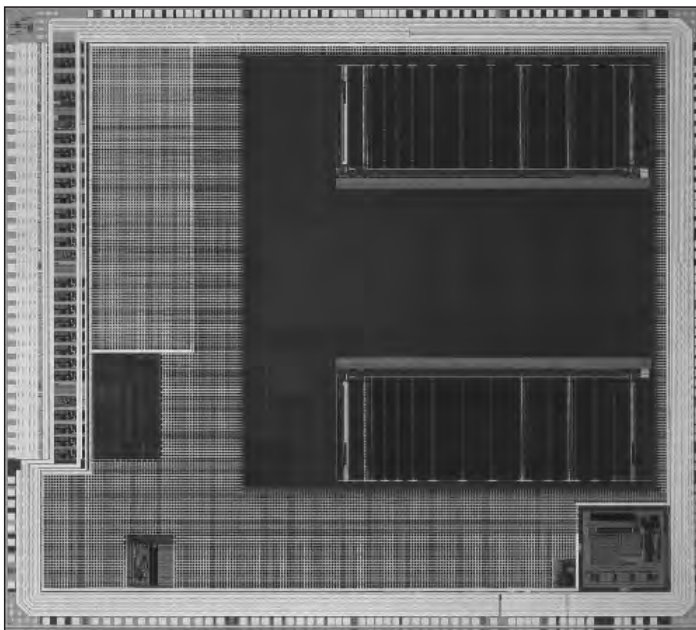
Le memorie *flash* utilizzano le più avanzate tecnologie d'integrazione: stiamo oggi sviluppando la generazione da 130 nm, con la quale realizzeremo entro l'anno memorie da 128 Mbit e 256 Mbit, e impostando la generazione successiva, da 90 nm. Nel mio gruppo, quasi interamente composto da laureati in materie scientifiche, c'è una netta prevalenza di laureati in fisica.

Quando mi capita di fare un colloquio d'assunzione a un neo-laureato o a una neo-laureata in fisica, per sgomberare il campo da equivoci, spesso dico: «Nell'industria non si fa la fisica, ma quello che ti offriamo è un lavoro da fisico». Quello che intendo dire è che lo scopo della ricerca in ambito industriale non è il «sapere» ma piuttosto il «saper fare» (quello che con un termine inglese ormai entrato nell'uso comune si chiama *know-how*); tuttavia, non si arriva a dominare i processi industriali in settori tecnologici avanzati senza un'approfondita comprensione dei fenomeni coinvolti. Le conoscenze e il metodo di affrontare i problemi che si acquisiscono con una solida formazione scientifica sono quindi indispensabili per avere successo in un lavoro dove alla difficoltà dei fenomeni da studiare si aggiunge la complessità dei sistemi con cui si tratta.

La presenza di fisici in azienda non è limitata solo al settore della ricerca ma è diffusa in tutti i settori; la *STMicroelectronics* occupa in Italia oltre 600 fisici, di cui circa 400 nelle sedi nell'area milanese e 200 nella sede di Catania.

Più che le nozioni specialistiche, ciò che si apprezza nei laureati in fisica è la capacità di porsi di fronte a problemi nuovi: la voglia di capire, la disponibilità a studiare, la capacità di cercare le fonti d'informazioni, la tenacia nello stare sul problema finché non si è risolto, la spiccata propensione all'attività

Microcontrollore a 32 bit con memoria *flash* incorporata da 6 Mbit realizzato in tecnologia da 180 nm con 5 livelli di interconnessione



sperimentale supportata dalla capacità di sintetizzare e ricomporre la complessità dei fenomeni in modelli teorici semplici, mantenendo però l'attenzione a cogliere l'evidenza del dato che falsifica il modello. In sintesi ciò che rende interessanti i laureati in fisica è la formazione mentale e il metodo di affronto dei problemi che hanno acquisito nel corso degli studi universitari.

## Conclusioni

L'innovazione tecnologica continua a essere il principale fattore propulsivo dell'industria microelettronica, nonostante questo settore abbia ormai raggiunto le dimensioni di un'industria matura, sperimentandone pienamente i tipici fenomeni di globalizzazione e consolidamento.



Memoria *flash* realizzata in tecnologia da 150 nm; il *chip* ha un'area inferiore a 0,5 cm<sup>2</sup> e contiene più di 70 milioni di transistori

La gestione del processo d'innovazione in un settore così complesso e competitivo richiede una particolare capacità di pianificazione e di coordinamento di attività che coinvolgono ingenti risorse umane e finanziarie in ambito industriale e in quello della ricerca pubblica.

La risorsa di gran lunga più preziosa e più scarsa è quella umana: la carenza di laureati in materie scientifiche e tecniche rischia di essere il fattore limitante lo sviluppo della microelettronica nei prossimi anni.

Questo settore industriale rappresenta quindi un interessante sbocco professionale per i giovani laureati in discipline scientifiche; in particolare, è uno dei pochi che possano offrire in Italia opportunità concrete d'impiego in un settore tecnologico d'avanguardia a livello mondiale.

v