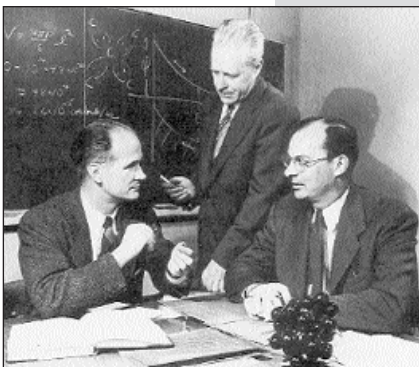


I semiconduttori

Le proprietà peculiari dei semiconduttori possono essere così sintetizzate: la resistività ha un coefficiente di temperatura negativo; la corrente è trasportata sia da portatori con carica negativa che positiva; la resistività può essere variata di ordini di grandezza mediante il drogaggio del semiconduttore con atomi di specie atomica opportuna; la resistività diminuisce a seguito di illuminazione con fotoni di energia opportuna. In un solido cristallino i livelli elettronici degli atomi danno origine a bande di stati permessi separate da bande proibite. Nei metalli la banda occupata a energia più alta è semipiena: gli elettroni possono quindi acquistare facilmente energia da un campo elettrico esterno e la loro resistività è bassa. Gli isolanti hanno la banda occupata a energia più alta (banda di valenza) completamente piena e la banda a energie immediatamente superiori (banda di conduzione) vuota: il materiale ha un'elevata resistenza. I semiconduttori a bassa temperatura hanno un comportamento analogo a quello degli isolanti: la loro resistenza è elevata. Il salto energetico (*energy gap*) tra banda di valenza e banda di conduzione è però basso (1.12 eV per il silicio): all'aumentare della temperatura quindi elettroni della banda di valenza possono essere eccitati termicamente e raggiungere la banda di conduzione. Il materiale diviene conduttore e la sua resistenza decresce al crescere della temperatura. A seguito dell'eccitazione termica si ha una banda di conduzione con elettroni liberi e una banda di valenza senza alcuni elettroni. Se viene applicata una differenza di potenziale, gli elettroni in banda di conduzione si muovono verso le regioni a più bassa energia, dando origine a un flusso di carica. Anche in banda di valenza gli elettroni si muovono verso le regioni a più bassa energia: essendo però la banda solo parzialmente occupata, il risultato netto è quello di far «risalire» gli stati non occupati da elettroni verso le regioni di alta energia. Quindi le proprietà elettriche dei semiconduttori sono descritte assumendo la presenza di due tipi di portatori: gli elettroni (negativi) in conduzione e le «lacune» («particelle» di carica positiva) in valenza. Inoltre, in un semiconduttore è possibile variare il numero di elettroni o di lacune introducendo opportune impurezze: la resistività quindi può essere variata anche con il drogaggio. La sostituzione di un atomo di silicio con un elemento pentavalente (fosforo,

arsenico, antimonio) provoca la comparsa di elettroni liberi (gli elettroni di valenza in più rispetto al silicio) in banda di conduzione e di cariche positive fisse (l'atomo drogante ionizzato). Invece, l'introduzione di atomi trivalenti (boro, alluminio) in posizione sostituzionale induce un eccesso di lacune in banda di valenza e una carica negativa fissa (l'atomo drogante ionizzato). La resistenza elettrica di un semiconduttore dipende anche dall'illuminazione: fotoni di energia superiore all'*energy gap* promuovono elettroni dalla valenza alla conduzione e inducono una diminuzione di resistività.



W. Shockley, W. Brattain e J. Bardeen nel 1947

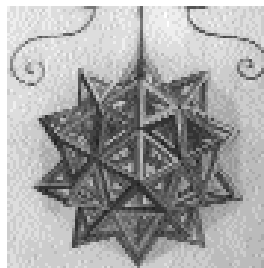
SEMICONDUTTORI E DISPOSITIVI DAL TRANSISTOR A INTERNET

di Mario Guzzi*

Le tappe più importanti della «rivoluzione racchiusa in un granello di silicio» che ha profondamente cambiato il volto della società contemporanea. Un affascinante itinerario che chiarisce i termini di un linguaggio tecnologico specifico ormai entrati a far parte del linguaggio comune.

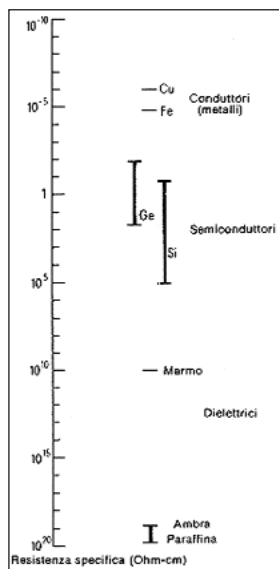
Negli ultimi due o tre decenni l'elettronica, e in particolare quella che si suole chiamare l'elettronica allo stato solido, quella cioè basata su dispositivi a semiconduttore, ha inciso sempre più profondamente sull'organizzazione del lavoro e sulla vita di tutti i giorni. All'origine di questa rivoluzione sta una classe di materiali: i semiconduttori. Fra questi il silicio, con le sue proprietà peculiari, ha reso possibile la realizzazione di circuiti integrati e memorie dalle dimensioni sempre più ridotte (da cui il termine microelettronica) e dalle potenzialità sempre più spinte. D'altra parte semiconduttori composti, quali quelli costituiti da elementi del III e del V gruppo della tavola periodica, di cui l'arseniuro di gallio (GaAs) è il prototipo, hanno permesso, grazie alla loro particolare struttura elettronica, la realizzazione del laser a semiconduttore, utilizzato per la trasmissione di informazioni per via ottica (da cui il termine optoelettronica) o per la lettura di compact disk, e di dispositivi per applicazioni a alta frequenza, utilizzati nel settore delle trasmissioni. La capacità di trasmettere, conservare e elaborare dati e informazioni, propria di questi sistemi, ha portato alla realizzazione e diffusione capillare di strumenti di calcolo (calcolatori, personal computer, portatili) e permesso di potenziare l'intervento e il controllo sui processi produttivi (robotizzazione), sulle strutture economiche (informatizzazione delle banche e dei mercati finanziari internazionali) e sull'organizzazione del lavoro e della società (posta elettronica, telefoni cellulari, diffusione dell'informazione via internet). Probabilmente poche altre scoperte hanno avuto effetti altrettanto innovatori: la macchina a vapore, l'elettricità, il motore a scoppio, le materie plastiche.

Ripercorrere sinteticamente le vicende che hanno portato alla nascita e allo sviluppo dell'elettronica a semiconduttore permette ora, a poco più di 50 anni dall'invenzione del transistor, di mettere in evidenza un aspetto importante. La «rivoluzione elettronica» che caratterizza questa nostra epoca è stata resa possibile sola-



*M. Guzzi è Ordinario di Fisica Generale presso il Corso di Laurea in Scienza dei Materiali dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca.

mente grazie a una continua interazione di progresso scientifico e sviluppo di tecnologie appropriate. A partire dal transistor, l'invenzione di ogni dispositivo è stata preceduta da studi di carattere fondamentale e ha costituito una spinta importante verso ulteriori ricerche. Ciò a sua volta ha determinato la possibilità di realizzare nuovi dispositivi e rendere quindi possibili nuove applicazioni. Scrive infatti nel 1976 W. Brattain, uno degli inventori del transistor: «Oggi il transistor non è più un dispositivo singolo. È una famiglia di dispositivi realizzati in un gran numero di modi differenti e presenti in pressoché tutti i circuiti elettrici. [...] Il transistor nacque perché la conoscenza di aspetti fisici fondamentali si era sviluppata a un livello tale che fu possibile interpretare fenomeni che erano già stati osservati da tempo. Nel caso di un dispositivo dalle così importanti conseguenze tecnologiche, è da notare che la scoperta derivò da un lavoro dedicato alla comprensione di fenomeni fisici fondamentali piuttosto che attraverso un procedere per tentativi nella produzione di un dispositivo utile.» I semiconduttori sono i materiali che hanno reso possibile questa rivoluzione. Senza l'approfondimento di conoscenze di base sulle loro proprietà e senza lo sviluppo di tecnologie adeguate per la loro preparazione, la rivoluzione elettronica non sarebbe stata possibile. Anche nello studio delle proprietà fondamentali dei semiconduttori conoscenza scientifica e sviluppo tecnologico vanno di pari passo: lo sviluppo della tecnologia permette di preparare materiali dalle proprietà così ben controllate da rendere possibile un approfondimento del loro studio altrimenti non possibile.



Suddivisione dei materiali in base alla conducibilità elettrica

La scoperta dei semiconduttori e le loro prime applicazioni

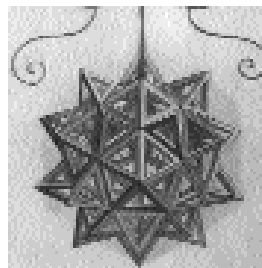
La parola «semiconduttore» fu introdotta nel 1782 da Alessandro Volta, a seguito dell'osservazione che un elettrometro si scarica con velocità diversa se uno dei suoi terminali viene toccato con materiali diversi: i metalli lo scaricano istantaneamente, gli isolanti non lo scaricano e i semiconduttori lo scaricano molto lentamente. È questa una prima evidenza del diverso valore della resistività di queste tre classi di materiali, documentata storicamente, ma non adeguatamente compresa. La prima osservazione significativa di un comportamento tipico dei semiconduttori, cioè differente da quello dei metalli, è dovuta a Faraday che nel 1833 nota che la conducibilità di alcuni materiali aumenta all'aumentare della temperatura. Un ulteriore passo avviene nel 1873, quando W. Smith osserva che la conducibilità del selenio aumenta quando viene illuminato.

Queste proprietà, anche se diffusamente studiate nella seconda metà del secolo scorso, non furono subito comprese; solo nella prima decade del Novecento comparvero le prime proposte di

interpretazione, anche se ancora non sistematiche né organiche.¹

¹ Nel 1907, Karl Baedeker conclude che la concentrazione degli elettroni (scoperti nel 1897 da J.J. Thomson) e il carattere metallico dello ioduro di rame aumentano con la temperatura. Nel 1930 Gudden dell'Università di Gottingen ipotizza che sostanze pure non possano essere semiconduttori e che quindi solamente la presenza di impurezze giustifichi il comportamento dei semiconduttori. Nel 1931 Alan Wilson dell'Università di Cambridge propone una teoria a bande dei solidi e descrive il comportamento dei semiconduttori nell'ambito di questa teoria; introduce il concetto di impurezze donori e accettori. Nello stesso anno Heisenberg introduce il concetto di lacuna come quasi-particella di carica positiva che descrive gli stati vuoti in una banda altrimenti piena.

Parallelamente allo studio delle proprietà fondamentali dei semiconduttori e allo sforzo per la loro interpretazione, si hanno le prime evidenze di proprietà di strutture basate su semiconduttori che poi si sarebbe rivelate di grande interesse applicativo. Nel 1874 Ferdinand Braun a Marburg in Germania mise in evidenza che il contatto tra un metallo e un semiconduttore (PbS) può essere rettificante, cioè la sua resistenza non obbedisce alla legge di Ohm, ma dipende da valore e segno della tensione applicata. Questa costituisce la prima osservazione di un effetto di rettificazione su una struttura a semiconduttore.² Le proprietà rettificanti di strutture basate su semiconduttori (contatto metallo-semiconduttore prima e giunzione p-n poi) costituiscono lo stimolo per lo studio e lo sviluppo di queste strutture, che si prevedeva potessero essere utilizzate per commutazione e per rivelare e amplificare segnali.³ L'interesse che si andava sviluppando per le proprietà e le applicazioni di materiali con caratteristiche elettriche peculiari non era però unanimemente condiviso. Infatti, nel 1931 Pauli in una lettera a Rudolf Peierls afferma che «uno non deve lavorare sui semiconduttori: sono un pasticcio; chi sa se addirittura i semiconduttori esistono». Questa affermazione è apparentemente strana se si pensa che è stata fatta da una persona (nel 1945 Pauli vincerà il Premio Nobel) che non può essere sospettata di non capire il «nuovo» nella ricerca fisica! Nel 1931 inoltre molte delle proprietà di questi materiali erano già abbastanza note. È però ben comprensibile se si considera che le caratteristiche dei semiconduttori, per esempio la resistività, mostrano una marcata dipendenza dalla purezza chimica e dalla qualità cristallografica del materiale. Questo punto però permette di mettere in evidenza uno degli aspetti caratteristici dei semiconduttori: dalla capacità di controllare il contenuto di impurezze (il drogaggio) e la regolarità della struttura cristallina scende la possibilità di avere materiale adeguato per uno studio approfondito e per lo sviluppo di applicazioni. Ecco allora che lo sviluppo della ricerca e di conseguenza anche delle applicazioni dei semiconduttori è strettamente dipendente dalla possibilità di controllo della qualità del



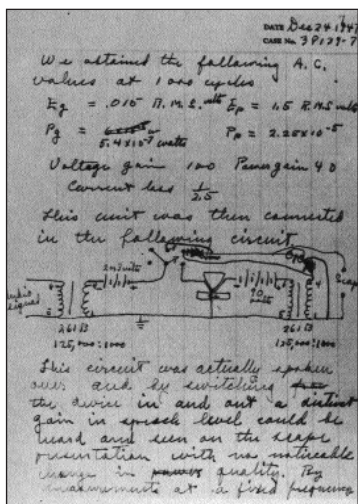
²Successivamente, tra il 1904 e il 1906, vengono scoperti i diodi e i triodi a valvole che solo molto tempo dopo verranno sostituiti da dispositivi a semiconduttore. Infatti le proprietà dei semiconduttori e quindi le caratteristiche dei dispositivi non erano sufficientemente stabili e riproducibili da permettere un impiego affidabile in sistemi di utilizzo pratico.

³La teoria della rettificazione della giunzione metallo-semiconduttore fu formulata alla fine del 1930 da Nevill F. Mott (Gran Bretagna), Alexander Sergeevich Davydov (Unione Sovietica) e Walter Schottky (Germania).

materiale, in particolare dallo sviluppo di metodi di preparazione e di tecniche di caratterizzazione. In quest'area della Fisica, come più in generale della Scienza dei Materiali, il procedere della conoscenza scientifica e dello sviluppo tecnologico sono intimamente legati. Questo è evidente già nel periodo che ha visto la nascita del transistor, dispositivo che è alla base della microelettronica. Il ruolo di stimolo dell'applicazione tecnologica e l'impegno del mondo industriale hanno giocato un ruolo determinante nel progredire della conoscenza scientifica.

I «dispositivi» che precedono il transistor

Abbiamo sopra accennato alla scoperta dell'effetto di rettificazione da parte di un sistema costituito da un contatto metallico su galena (PbS). Un tale sistema, collegato a un opportuno circuito elettrico, permise di rivelare onde radio provenienti da un trasmettitore: ciò è alla base del sistema noto come «radio a galena». Queste prime osservazioni però rimasero senza conseguenze o ricadute pratiche per lungo tempo; infatti la comparsa dei tubi elettronici (la messa a punto del triodo è del 1906 e segue di poco la scoperta delle onde radio da parte di Hertz nel 1889) mette a disposizione un sistema semplice e soprattutto affidabile per l'amplificazione di segnali elettrici (essenziale nel settore sempre più importante delle trasmissioni radio) e per la realizzazione di circuiti elettronici anche complessi. Le valvole termoioniche tennero il campo per oltre 50 anni.



Pagina del quaderno di laboratorio di Brattain con data 24 Dicembre 1947

La conclusione della seconda guerra mondiale permise di concentrare risorse finanziarie e intellettuali in direzioni differenti da quelle imposte dallo sforzo bellico. L'impegno per la soluzione di problemi pratici, nel caso particolare il miglioramento delle prestazioni di sistemi per la rivelazione, l'amplificazione e la trasmissione di segnali radio o telefonici, creò sinergie tra ricerca di base e sviluppo di tecnologie.

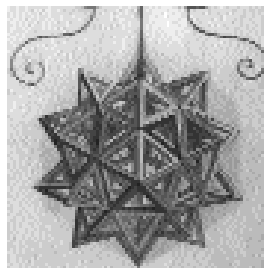
Valvole e relé elettromeccanici incominciarono ad apparire poco adeguati, dato l'elevato consumo di potenza richiesto dalle valvole e la scarsa adattabilità dei relé al funzionamento a frequenze elevate. La necessità di sistemi veloci, compatti e con consumi ridotti riporta alla luce le osservazioni di inizio secolo sulle proprietà rettificanti del sistema metallo-semiconduttore e dà il via a un'intensa attività di ricerca. Un ruolo importante hanno avuto i laboratori della Bell Telephone negli Stati Uniti, dove la ricerca di nuove soluzioni ai problemi citati diede origine a un grosso sforzo per la comprensione delle proprietà fisiche dei semiconduttori.

La scoperta del transistor

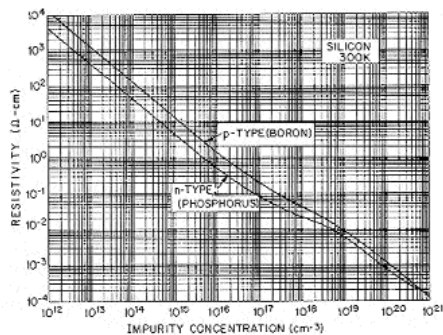
L'attività presso i laboratori della Bell prese avvio alla fine degli anni Trenta; l'attività iniziò dall'ossido di rame, le cui proprietà di rettificazione erano note. Nel frattempo però era iniziato lo studio delle proprietà di nuovi semiconduttori più robusti e affidabili, in particolare germanio e silicio. Semiconduttori elementari, costituiti cioè da un solo tipo di atomo, possono essere preparati e purificati in laboratorio molto meglio dei semiconduttori composti. Presso la Bell vennero prodotti dispositivi rettificanti basati su silicio. I primi risultati anche qui non furono però incoraggianti: la rettificazione era instabile, in alcuni casi era in un verso, in altri nel verso opposto e in altri ancora totalmente assente. Questi problemi indussero un grosso sforzo nel miglioramento del materiale, in particolare nella sua purificazione.

Nel corso della seconda guerra mondiale l'attenzione dei ricercatori si era spostata su problematiche più direttamente connesse con l'industria bellica. Malgrado questo, nel 1942 viene lanciato dall'Università di Purdue un progetto di ricerca sui semiconduttori con l'obiettivo di produrre e testare diodi a semiconduttore, mediante l'intensificazione della ricerca sui semiconduttori sia dal punto di vista del materiale che dei dispositivi. Viene scelto come materiale il germanio, perché precedenti studi ne dimostrano un'alta affidabilità. Questa ricerca era motivata dalle applicazioni di raddrizzatori a diodo come rivelatori per radar. I principali risultati furono lo studio delle proprietà fondamentali del germanio (banda proibita, drogaggio, mobilità, proprietà ottiche, eccetera), il brevetto di un raddrizzatore per tensioni inverse molto alte (>100V) e l'approfondimento delle proprietà dei contatti di superficie per la rettificazione. Il progetto termina nel 1946.

Alla fine della guerra riparte con nuovo impulso presso i laboratori Bell il progetto sui semiconduttori e viene nominato direttore del progetto William Shockley. Fanno parte del gruppo di ricerca John Bardeen e Walter Brattain. Nelle prime fasi del lavoro divenne evidente che, malgrado l'attività svolta prima e durante la guerra, si era ancora lontani da una reale comprensione della fisica dei semiconduttori e dei dispositivi. Una ragione di questa difficoltà era sicuramente che i materiali su cui si era lavorato sono solidi strutturalmente complicati. La natura semplice di silicio e germanio indusse a concentrare gli sforzi su di essi: in quanto semiconduttori elementari, il legame è covalente puro e ben conosciuto da un punto di vista quanto-meccanico. E Brattain in un suo articolo conclude: «Il nostro lavoro era perciò diretto verso una comprensione degli aspetti fondamentali del problema, anche se eravamo ben consapevoli dell'importanza di un amplificatore a semiconduttore, ammesso che fosse possibile realizzarlo.» Importante fu



John Bardeen (1902-1991)



Resistività del silicio in funzione della concentrazione di fosforo (drogante n) e boro (drogante p)

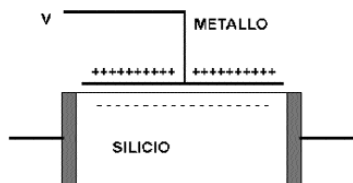
quindi l'attività di J.H. Scaff e H. C. Theurer, anch'essi appartenenti ai laboratori Bell, che riuscirono a produrre silicio di qualità controllata mediante un processo di fusione in vuoto; essi distinguevano il tipo di drogaggio dall'odore (se drogato n odora di fosforo), poiché la concentrazione delle impurezze era inferiore ai limiti di rivelazione dell'epoca; determinarono anche che gli elementi del III gruppo sono accettori e drogano p il materiale, mentre quelli del V gruppo sono donori e

drogano n. Realizzarono inoltre la prima giunzione p-n. In conclusione, un primo importante risultato dell'attività dei Laboratori Bell è la messa a punto di tecniche che permettono di preparare silicio e germanio di tipo n o di tipo p con resistività controllata. Questo evidenzia il fatto che il progresso nel campo dei semiconduttori e più in generale dei dispositivi a semiconduttore dipende in grande misura da una stretta cooperazione tra fisici, chimici e metallurgisti; infatti, come già detto, la possibilità di comprensione delle proprietà del materiale discende direttamente dalla capacità di controllo della produzione del materiale stesso.

Ripercorriamo ora sinteticamente la strada che portò il gruppo della Bell Telephone all'invenzione del transistor e alla realizzazione del primo dispositivo.

Brattain cercava di realizzare una struttura metallo-isolante-semiconduttore che consentisse l'amplificazione in modo efficace. L'idea era semplice: applicando una tensione positiva all'elettrodo metallico si sarebbe dovuto poter attrarre elettroni nel semiconduttore, prendendoli dal circuito esterno. La resistenza del semiconduttore sarebbe dovuta diminuire e la corrente elettrica quindi aumentare: si sarebbe così potuto ottenere l'amplificazione del segnale applicato all'elettrodo metallico. Il dispositivo non funzionò: gli elettroni erano effettivamente attratti nel germanio e addensati alla superficie, dove però restavano intrappolati a causa della scarsa qualità della superficie stessa, rovinata dal taglio e dalla lavorazione. L'idea però era assolutamente valida e oggi è alla base di una intera famiglia di dispositivi: i «transistor a effetto di campo».

La sperimentazione però continuava; un errore sperimentale portò alla scoperta dell'effetto di amplificazione cercato, anche se non mediante la struttura prevista. Nel corso della ripulitura del cristallo di germanio, venne asportato il sottile strato di isolante e il contatto metallico fu quindi realizzato direttamente sul semiconduttore; questo diede origine a un nuovo effetto che fu attentamente valutato e non semplicemente rigettato, in quanto dovuto a un errore. Vennero applicati al germanio due contatti metallici a punta molto vicini: l'intensità della corrente circolante tra una delle



Struttura del triodo a stato solido proposto da Shockley per verificare la possibilità di amplificazione di segnali elettrici con dispositivi a semiconduttore

due punte e un terzo contatto di massa aumentava se all'altra punta veniva applicata una tensione. Inoltre un segnale modulato inviato a una delle due punte compariva amplificato all'altra: si era così ottenuto l'effetto di amplificazione di segnali elettrici modulati a lungo cercato.

La scoperta dell'effetto sopra descritto e l'invenzione del relativo dispositivo valse a Bardeen, Brattain e Shockley il premio Nobel per la Fisica nel 1956.⁴

Il dispositivo così realizzato era fortemente instabile: il suo funzionamento dipendeva in modo critico dalle caratteristiche e dalla distanza delle due punte metalliche, nonché dalla qualità della superficie del germanio. Era cioè un dispositivo dal difficile utilizzo pratico. Pochi anni dopo la sua invenzione venne abbandonato grazie alla scoperta del «transistor bipolare a giunzione», un dispositivo basato interamente su semiconduttori e quindi più solido e affidabile. In questo caso, contrariamente a quanto avvenuto per il transistor a punte metalliche, l'idea precedette la realizzazione pratica.

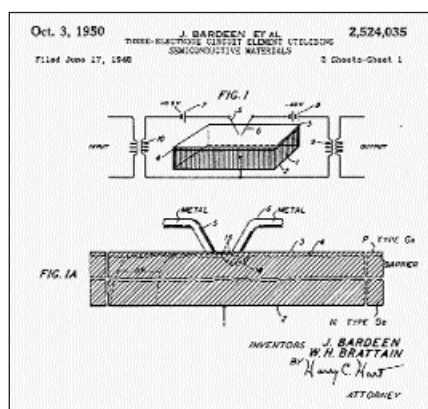
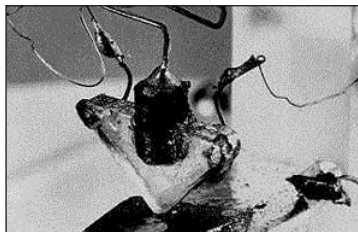
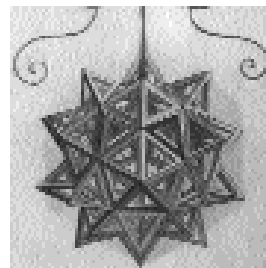


Foto del primo transistor e del brevetto di Bardeen e Brattain



⁴John Bardeen ricevette un secondo premio Nobel nel 1972, insieme a L.N. Cooper e J.R. Schrieffer, per la teoria della superconduttività. Bardeen è stata l'unica persona a aver vinto due premi Nobel per la Fisica.

Dal transistor all'integrazione su larga scala

Nella fase iniziale della storia dell'elettronica a semiconduttore si fece largo uso del germanio, materiale meglio noto e dalle proprietà allora più facilmente controllabili.

Il silicio (Si) è un semiconduttore duro e fragile. Il silicio elementare è solido, ha una temperatura di fusione di 1410°C e di ebollizione di 2477°C, appartiene al IV gruppo della tavola periodica degli elementi (numero atomico 14, peso atomico 28 e densità 2.33 g/cm³), è tetravalente e ha una struttura cristallina simile a quella del diamante. Il silicio, che in natura si trova sempre in forma di composto, costituisce il 28% della crosta terrestre e, dopo l'ossigeno, rappresenta l'elemento più abbondante del pianeta. Il silicio elementare è stato preparato e riconosciuto come elemento solo nel 1824. Con lo sviluppo e l'industrializzazione dell'elettronica a stato solido il silicio è diventato il materiale fondamentale per la realizzazione dei circuiti integrati e ha per questo assunto un'importanza economica di notevole rilievo. Infatti, grazie all'abbondanza di materia prima, alle sue particolari proprietà semiconduttrici, alle proprietà isolanti del suo ossido, nonché alla stabilità nel tempo e rispetto a trattamenti in temperatura, ha soppiantato materiali già affermati sul mercato, quali per esempio il germanio.

Il silicio però aveva dalla sua la straordinaria abbondanza in natura (è l'elemento più abbondante dopo l'ossigeno) e presenta due importanti vantaggi. Il maggior valore dell'*energy gap* fa sì che a temperatura ambiente il silicio puro sia praticamente isolante: la conduzione è quindi controllata dal drogaggio. Inoltre, il silicio si può ossidare facilmente ad alta temperatura in atmosfera di ossigeno e il suo ossido (SiO_2) è stabile, resistente e impermeabile a agenti esterni: ciò non vale per l'ossido di germanio che è solubile in acqua. Questo fatto si è rivelato importante nella tecnologia dei circuiti integrati. Infatti alla metà degli anni Cinquanta il germanio era ancora il materiale più utilizzato per dispositivi elettronici: il silicio compie il sorpasso verso la metà degli anni Sessanta con l'avvento della tecnologia planare, processo che sfrutta al massimo la presenza dell'ossido di silicio.

L'inizio e le prime fasi dell'evoluzione dei dispositivi elettronici, a partire dai dispositivi discreti (diodi e transistor) per giungere ai circuiti integrati su scala sempre più larga, sono stati vertiginosi.

Nel 1952, poco dopo la scoperta del transistor, è stato ipotizzato da ricercatori del Royal Radar Establishment in Gran Bretagna che un blocco di semiconduttore possa essere usato per formare tutti gli elementi di un circuito elettrico: questa è la prima intuizione della possibilità di realizzare circuiti integrati. Poco dopo, nel 1954 viene annunciato dalla Texas Instruments il primo transistor basato sul silicio e nello stesso anno, con la decisione di Shockley di lasciare i laboratori Bell e di fondare la Shockley Semiconductor Laboratory, nasce di fatto la Silicon Valley, una regione della California dove si concentrano le più dinamiche ditte di semiconduttori e calcolatori.

La tecnologia planare

Questa tecnologia sfrutta le proprietà dell'ossido di silicio di essere un ossido facilmente realizzabile, stabile e robusto. Esso può essere asportato con HF, acido da cui il silicio non è attaccato.

Un semplice esempio permette di dare una descrizione schematica della tecnologia planare. Una fetta di silicio n viene ossidata mediante riscaldamento in atmosfera di ossigeno.

Successivamente, mediante HF, viene aperta una finestra nell'ossido; prima sarà stata deposta su tutto l'ossido, con l'eccezione della zona in cui si vuole praticare la finestra, una vernice non attaccabile dall'acido. Un metallo, drogante p, viene depositato e quindi fatto diffondere; esso penetra solamente in corrispondenza della finestra, in quanto l'ossido protegge il silicio. Si realizza così nel silicio una zona drogata p, e quindi una giunzione p-n, in corrispondenza della finestra.

Variazioni e ripetizioni di processi tipo quello sopra descritto permettono di ottenere strutture complesse (transistor, circuiti di amplificazione, memorie) sulla fetta di silicio. La possibilità poi di realizzare sulla stessa fetta di silicio non solamente elementi «attivi», ma anche elementi «passivi» quali condensatori e resistenze ha portato alla realizzazione dei cosiddetti circuiti integrati: su un unico *chip* di silicio viene cioè realizzato un circuito completo, pronto quindi all'utilizzo.



Descrizione schematica della realizzazione di una giunzione con la tecnologia planare

Il salto di qualità, dovuto a un netto cambiamento di prospettiva nel progetto di dispositivi a semiconduttore si ha però alla fine degli anni Sessanta quando viene prodotto il primo circuito integrato. Questa realizzazione è ottenuta contemporaneamente nel 1959 da due importanti industrie di semiconduttori: la Texas Instruments, che realizzò il dispositivo su germanio, e la Fairchild Semiconductor, che invece utilizzò silicio. Negli stessi anni la proposta di utilizzare ossido di silicio come strato passivante e d'isolamento in strutture integrate segna l'affermazione definitiva del silicio e costituisce un passaggio importante nella storia della microelettronica.

Un nuovo importante passo nell'evoluzione dei circuiti integrati avviene negli stessi anni e consiste nell'introduzione della tecnologia MOS (Metallo-Ossido-Semiconduttore), resa possibile dalle già citate proprietà dell'ossido di silicio.

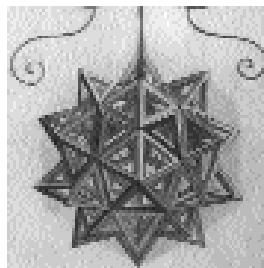
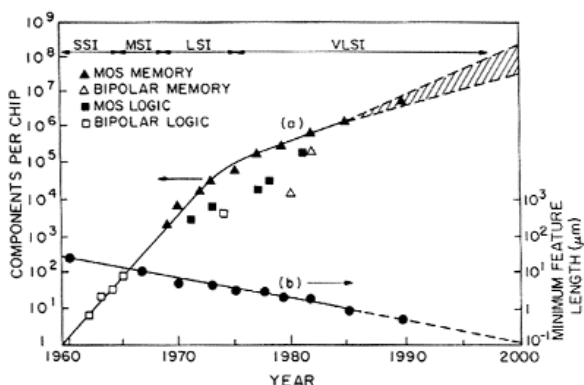
Nel 1967 fa la sua comparsa sul mercato un altro colosso della microelettronica, l'INTEL Corporation.

Il cammino della microelettronica è in continua accelerazione. Le innovazioni fondamentali per lo sviluppo dell'elettronica moderna sono frutto di incessanti ricerche e spinte innovative, alla base delle quali vi è l'applicazione di un semplice concetto: la digitalizzazione dei segnali. I Personal Computer permettono l'accesso a un numero notevole di servizi o, collegandosi a Internet, a una straordinaria fonte di informazioni.

Oltre che nei calcolatori, i *chip* di silicio trovano applicazione in innumerevoli settori che fanno parte della nostra vita quotidiana (automobili, elettrodomestici, sistemi di sicurezza) e nel controllo di grandi processi industriali. Il loro costo è talmente competitivo che vengono impiegati anche quando non si riesce a sfruttare più del 10% o 20% delle loro potenzialità!

Nel settore delle telecomunicazioni la tecnologia analogica, usata da buona parte degli attuali sistemi di trasmissione viene progressivamente sostituita, sotto la spinta del progresso della microelettronica, dalla tecnologia digitale. Il passaggio alla tecnologia completamente digitale sta portando a strumenti di comunicazione con maggiore funzionalità, minori dimensioni e consumi di energia inferiori: i telefoni portatili e gli altri dispositivi radio sono in sostanza calcolatori in miniatura dotati di alcuni circuiti elettronici per trasmettere e ricevere segnali radio.

Componenti per *chip* in un circuito integrato
La scala di sinistra (logaritmica) mette in evidenza
l'elemento esponenziale di tale numero
La scala di destra riporta
la corrispondente diminuzione (esponenziale)
delle dimensioni minime dei componenti il circuito



Il transistor, un triodo a semiconduttore

Traduzione di parte del breve articolo di J. Bardeen e W.H. Brattain pubblicato nel 1948 sul Volume 74 (p. 230) di The Physical Review, in cui viene descritto il principio di funzionamento del transistor.

Viene descritto un dispositivo elettronico a tre elementi basato su un principio scoperto recentemente che sfrutta un semiconduttore come elemento di base. Il dispositivo può essere utilizzato come amplificatore, oscillatore o per gli altri scopi per cui sono comunemente utilizzati i tubi a vuoto. Il dispositivo consiste di tre elettrodi posti su un blocco di germanio, come mostrato schematicamente in Figura 1. Due, chiamati emettitore e collettore, sono contatti rettificanti a punta e sono posti vicini (distanza compresa tra 0.005 e 0.025 cm) sulla superficie superiore. Il terzo è un contatto realizzato sulla base con area elevata e bassa resistenza.

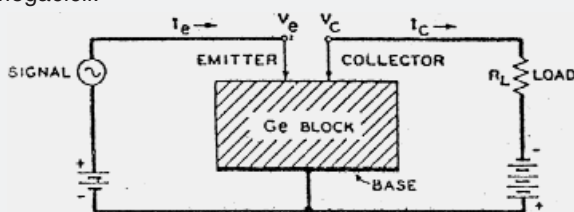
Il germanio [...] è di tipo n con resistività dell'ordine di 10 ohm cm. Negli studi originali, la superficie superiore era sottoposta a un'ossidazione anodica aggiuntiva [...]. L'ossido viene quindi asportato e non gioca un ruolo diretto. [...] Sono state usate sia punte di tungsteno che di bronzo fosforoso. La punta del collettore può essere formata elettricamente facendovi passare correnti inverse elevate.

Ogni punta, se collegata separatamente dall'altra all'elettrodo di base, ha una caratteristica simile a quella del rettificatore per alte tensioni. La natura della corrente diretta ha un'importanza critica per il funzionamento del dispositivo. Crediamo [...] che vi sia vicino alla superficie uno strato sottile con conducibilità di tipo p. Di conseguenza, la corrente diretta dalla punta al blocco di germanio è composta in grande misura da lacune, cioè da cariche che hanno natura opposta a quelle normalmente in eccesso nel volume del semiconduttore.

Quando i due contatti a punta sono posti vicini sulla superficie e ad essi sono applicati potenziali continui, vi è una mutua influenza che rende possibile utilizzare il dispositivo per amplificare segnali alternati. In figura è mostrato un circuito che permette di ottenere questo. L'emettitore è polarizzato con una debole tensione diretta che fa fluire una corrente di pochi milliampere nel materiale. Il collettore è polarizzato con una tensione inversa sufficientemente elevata da far sì che la corrente di collettore sia dello stesso ordine o maggiore della corrente di emettitore. Il segno della tensione di collettore è tale da attrarre le lacune che fluiscono dall'emettitore, cosicché una gran parte della corrente di emettitore fluisce e entra nel collettore. Il collettore ha un'elevata impedenza per il flusso di elettroni nel semiconduttore, mentre il flusso di lacune nella punta è poco ostacolato. Se ora la corrente di emettitore è fatta variare mediante un segnale in tensione, vi sarà una variazione corrispondente nella corrente di collettore. Si è trovato che il flusso di lacune dall'emettitore al collettore può alterare il normale flusso di corrente dalla base al collettore in modo tale che la variazione della corrente di collettore è maggiore della variazione della corrente di emettitore. Inoltre, il collettore, che opera in polarizzazione inversa, ha un'impedenza elevata [...]. Si ottiene un rapporto tra tensione di uscita e tensione di ingresso elevato, dello stesso ordine del rapporto tra impedenza in inversa e impedenza in diretta della punta. Vi è una corrispondente amplificazione della potenza del segnale d'ingresso.[...]

Utilizzando il circuito di figura si sono ottenuti guadagni di potenza di più di 20 db (20 db corrispondono ad un guadagno di potenza pari a 100). Dispositivi hanno funzionato come amplificatori fino a frequenze di 10 megacicli.

Desideriamo ringraziare W. Shockley per aver dato inizio e diretto il programma di ricerca che ha portato alla scoperta su cui è basata questa applicazione. Siamo anche grati a molti altri nostri colleghi di questi Laboratori per l'assistenza pratica e per gli utili suggerimenti.



INTERNET: autostrada informatica

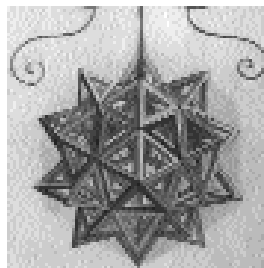
Internet è il nome dato a un insieme di reti di comunicazione tra computer. L'obiettivo fondamentale di una rete è di offrire un'interconnessione affidabile tra computer, minimizzando i costi e rendendo veloce il trasferimento dei dati. Internet è la più grande rete, ampiamente distribuita, su cui si affacciano laboratori di ricerca, università, servizi telematici, banche dati, aziende, strutture scientifiche, scuole di ogni grado, venditori, professionisti, studenti e persone comuni. La trasmissione delle informazioni sulla rete non conosce passaggi obbligati: ciò permette di evitare eventuali nodi nevralgici e avviare così a interruzioni nei collegamenti o a nodi inutilizzabili. Internet utilizza quindi l'integrazione di migliaia di sottoreti private, pubbliche e commerciali: da qui la definizione di «autostrada informatica».

Negli anni Sessanta un progetto militare finanziato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti diede vita alla realizzazione della rete ARPANet (1969) per scopi militari e scientifici. In poco tempo questo nucleo si espanse attraverso ulteriori progetti realizzati presso la Stanford University, la BBN e l'University College di Londra. Negli anni Settanta con la crescita di ARPANet si diede origine a decine di sottoreti, all'interconnessione tra reti e a una nuova serie di protocolli, destinati all'incremento dell'affidabilità nonché all'indirizzamento diretto delle risorse di rete.

Negli anni Ottanta Internet si rese accessibile ancor più agli enti governativi, alla ricerca e agli ambienti universitari per consentire il trasferimento di file e posta elettronica. Successivamente, si espanse notevolmente sino a costituire una rete mondiale unica, composta da un enorme numero di ramificazioni e da decine di migliaia di computer.

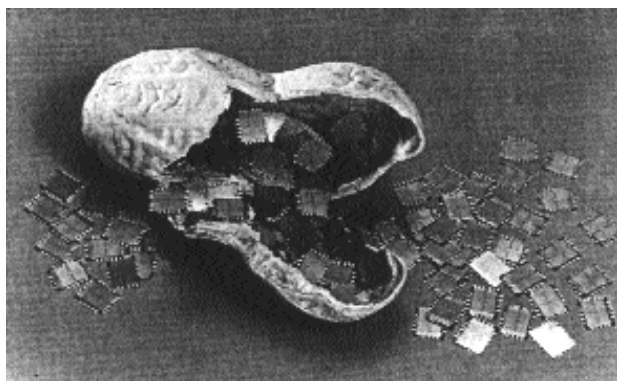
Per concludere questa sintetica presentazione dei principali passaggi che hanno portato alla nascita e allo sviluppo della moderna elettronica allo stato solido, prendo spunto da alcune considerazioni proposte da S.M. Sze, autore di uno dei più diffusi testi di fisica dei dispositivi a semiconduttore.

Sze riporta alcune affermazioni che mettono in evidenza come il campo dell'elettronica in generale, e dei dispositivi a semiconduttore in particolare, sia sempre stato in così rapida evoluzione che molti concetti usati oggi possono apparire obsoleti domani. Nel 1850 circa si è sicuramente detto «il telegrafo è l'ultimo traguardo nel campo della comunicazione veloce»; successivamente sono comparsi i circuiti di amplificazioni basati su valvole termoioniche e qualcuno nel 1920



circa avrà sicuramente affermato «con il tubo a vuoto si è raggiunto lo zenith della potenzialità nel campo delle telecomunicazioni». L'invenzione successiva del transistor ha portato a modificare questa convinzione e all'inizio degli anni Cinquanta pochi avrebbero dubitato che «i transistor sono il passo finale nella ricerca di validi mezzi di comunicazione veloce». Ecco però affermarsi la tecnologia planare e certamente nel 1960 circa si sarebbe potuto affermare che «i circuiti integrati sono la soluzione finale: non è possibile andare al di là di questo nuovo concetto rivoluzionario». Ma altri effetti sono successivamente stati scoperti e altre tecnologie sviluppate; nuove famiglie di dispositivi elettronici sono state prodotte e immesse sul mercato. Sicuramente quindi si potrebbe continuare nell'elencazione di «frasi celebri» sempre più rapidamente smentite dalla storia.

Tutto questo, come ho cercato di evidenziare, avviene grazie a una continua interazione costruttiva di ricerca di base, spinta all'innovazione e allo sviluppo tecnologico, come lo stesso Sze evidenzia nel primo capitolo del testo citato, quando afferma: «È perciò importante capire i processi fisici fondamentali e possedere una adeguata base di fisica e di matematica per assimilare e apprezzare un campo tanto dinamico e coglierne la sfida.»



Un guscio di nocciolina americana contiene 180 piccole memorie a circuito integrato di silicio che possono registrare 5.000 parole

**Ordinario di Fisica Generale
Università di Milano-Bicocca*

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Nello scrivere queste note ho preso spunto dal cd-rom *1947-1997 dal Transistor ad Internet*, curato da Lorenzo Pavesi del Dipartimento di Fisica dell'Università di Trento, da cui ho tratto anche alcune figure. Il cd-rom, particolarmente utile per approfondire gli argomenti trattati, è acquistabile presso la Segreteria del Dipartimento di Fisica dell'Università di Trento (tel. 0461 881504).

Altri testi di consultazione:

- A. Frova, *La rivoluzione elettronica*, Editori Riuniti, Roma 1981, un'introduzione alla fisica dei dispositivi con utili rimandi storici.
 M. Guzzi, *Introduzione allo studio di semiconduttori e dispositivi a semiconduttore*, C.U.S.L., Milano 1987.
 S.M. Sze, *Fisica dei dispositivi a semiconduttore*, Tamburini, Milano 1973.
 R.S. Muller e T.I. Kamins, *Dispositivi elettronici nei circuiti integrati*, Boringhieri, Torino 1982.