

LA SIMULAZIONE NUMERICA NELLA PROGETTAZIONE DI CIRCUITI INTEGRATI

La progettazione di circuiti elettronici, sia digitali, sia analogici, è sempre più condotta con l'ausilio di simulatori numerici. Oggi, chiunque sia coinvolto nello sviluppo di circuiti elettronici necessita di un simulatore circuitale. Questo strumento ha rivoluzionato l'industria elettronica, consentendo lo sviluppo degli attuali circuiti integrati ad alta densità (circuiti *VLSI*, *Very-Large-Scale Integration*), che possono contenere anche più di un miliardo di transistori. In questo contributo vengono analizzate le problematiche, gli strumenti e i metodi di progetto impiegati nello sviluppo dei moderni circuiti integrati, con particolare riguardo alla simulazione circuitale.

1. INTRODUZIONE

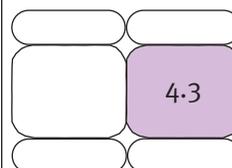
La progettazione di un circuito elettronico si sviluppa, essenzialmente, in tre diverse fasi. Il circuito viene innanzitutto concepito a livello di idea. In questa fase il progettista, sfruttando creatività ed esperienza, ottiene una prima definizione del sistema elettronico che, mediante modelli mentali di alto livello, risulta suddiviso in blocchi logico-comportamentali elementari opportunamente interconnessi tra loro al fine di svolgere le funzioni desiderate. A questa fase creativa iniziale seguono la definizione delle specifiche di progetto e una prima sintesi del circuito, che si basa su modelli reali, seppure estremamente semplificati, dei diversi elementi circuitali (quali transistori, amplificatori, resistori, condensatori, induttori e generatori di segnale) necessari alla sua realizzazione. In questa fase viene definita la topologia del sistema e viene progettata la rete elettrica del circuito elettronico. Nella terza fase, il circuito progettato viene analizzato al fine di verificarne la corretta funzionalità. In funzione dei risultati

ottenuti, il circuito viene opportunamente modificato al fine di ottimizzarne le prestazioni. Questo processo di analisi e sintesi viene ripetuto fino a quando non risultano soddisfatte tutte le specifiche di progetto. Il risultato finale sarà la definizione di tutti i componenti (incluse le loro dimensioni) e le interconnessioni del circuito, che consentirà la successiva fase di produzione.

La fase di analisi di un circuito elettronico è un processo che può risultare estremamente complesso e costoso, se il circuito stesso è complesso. Da questa fase dipendono la qualità del prodotto finale e, quindi, il successo del progetto. L'analisi può essere svolta in due diversi modi: realizzando e valutando sperimentalmente un prototipo su scheda elettronica (*breadboard*) oppure sviluppando un modello numerico in grado di riprodurre ed emulare, in modo sufficientemente accurato, il circuito reale e impiegandolo per simulare il circuito. La scelta fra i due diversi approcci dipende essenzialmente dal tempo richiesto e dal costo complessivo dell'operazione di analisi,



Alessandro Cabrini
Guido Torelli



nonché dalla confidenza sui risultati ottenibili. L'analisi che prevede la realizzazione di un prototipo è conveniente solo nel caso in cui si debbano progettare semplici circuiti a componenti discreti. Nel caso dello sviluppo di un circuito integrato, infatti, la realizzazione di un *breadboard* può risultare eccessivamente onerosa (si pensi al caso di un circuito contenente centinaia di milioni di transistori) e, soprattutto, non consente di emulare adeguatamente il comportamento del circuito reale, a causa dell'intrinseca differenza tra le prestazioni dei transistori integrati e di quelli discreti e tra i componenti parassiti presenti nelle due realizzazioni (questo vale in particolar modo per i transistori MOS, a causa della loro limitata capacità di erogare corrente di uscita). La simulazione numerica è pertanto la scelta unanimemente adottata per la progettazione di circuiti integrati. Una volta dimostrata, tramite simulazione numerica, la funzionalità del circuito progettato, questo sarà integrato mediante il processo di fabbricazione e subirà il vero e proprio collaudo elettrico. È evidente come, per seguire questo approccio, sia necessario assicurare la massima corrispondenza fra modello e realtà. L'accuratezza della simulazione numerica deve garantire la massima confidenza nei risultati al fine di rendere attendibile l'analisi svolta, in modo da limitare il numero di prototipi integrati intermedi (l'obiettivo è anzi ottenere silicio funzionante al primo tentativo) e, quindi, il *time-to-market* e i costi complessivi del progetto.

Dall'idea iniziale al progetto finale, il numero delle variabili in gioco e, quindi, la complessità dei modelli utilizzati nelle diverse fasi progettuali crescono esponenzialmente. Consideriamo per esempio un semplice resistore. Per il progettista, un resistore è un elemento che, concettualmente, mette in relazione lineare, tramite il suo valore di resistenza, la corrente che lo attraversa con la tensione che si sviluppa ai suoi capi. Non importa come il resistore verrà realizzato. Quello che il progettista utilizza è, al primo ordine, il valore nominale della sua resistenza (oltre alla legge di Ohm). Tuttavia, un resistore reale, realizzato per esempio in un circuito integrato in tecnologia CMOS, è molto più complesso. Per descrivere adeguatamente il componente reale, il simulatore circuitale utilizza un modello in

cui il valore di resistenza è solo uno dei tanti parametri. La resistenza di un resistore integrato può variare al variare della corrente da cui è attraversato, come pure può cambiare al variare della tensione che lo polarizza rispetto ad altri elementi del circuito (per esempio il substrato del circuito integrato) e al variare della temperatura. Il resistore può presentare correnti di perdita verso il substrato del circuito integrato. Possono osservarsi comportamenti diversi in funzione del materiale (silicio policristallino, silicio drogato ecc.) con cui il resistore è realizzato. Un resistore integrato presenta inoltre capacità parassite delle quali talvolta è necessario tenere conto. Questo ragionamento si può facilmente estendere agli altri componenti passivi e, a maggior ragione, ai componenti attivi (transistori).

In questo contributo, vengono analizzate le problematiche legate alla simulazione numerica dei circuiti integrati, con particolare riguardo alla simulazione circuitale, che rappresenta la tecnica di simulazione più accurata e attualmente più diffusa per l'analisi dei circuiti elettronici. Nel paragrafo 2 viene introdotto il simulatore circuitale certamente più accettato e utilizzato al mondo: SPICE. Nel paragrafo 3 sono evidenziate le differenti esigenze legate alla simulazione di circuiti analogici e a quella di circuiti digitali, e vengono passati in rassegna i diversi tipi di simulatore per questi ultimi. Il paragrafo 4, infine, prende in esame, con maggiore dettaglio, gli aspetti della simulazione circuitale di circuiti analogici.

2. IL SIMULATORE CIRCUITALE SPICE

I simulatori circuitali furono sviluppati a partire dai primi anni '70. Da allora, la diffusione dei simulatori circuitali è avanzata di pari passo con l'evoluzione delle tecnologie di integrazione. I primi circuiti integrati contavano al massimo qualche centinaio di transistori. Oggi, grazie alla continua riduzione delle dimensioni fisiche dei dispositivi MOSFET, la densità di integrazione è cresciuta fino a superare il miliardo di dispositivi in una singola piastrina di silicio, come previsto dalla legge di Moore [1] (enunciata negli anni '60 e seguita fino ai nostri giorni con sorprendente precisione), secondo la quale il numero di componenti in-

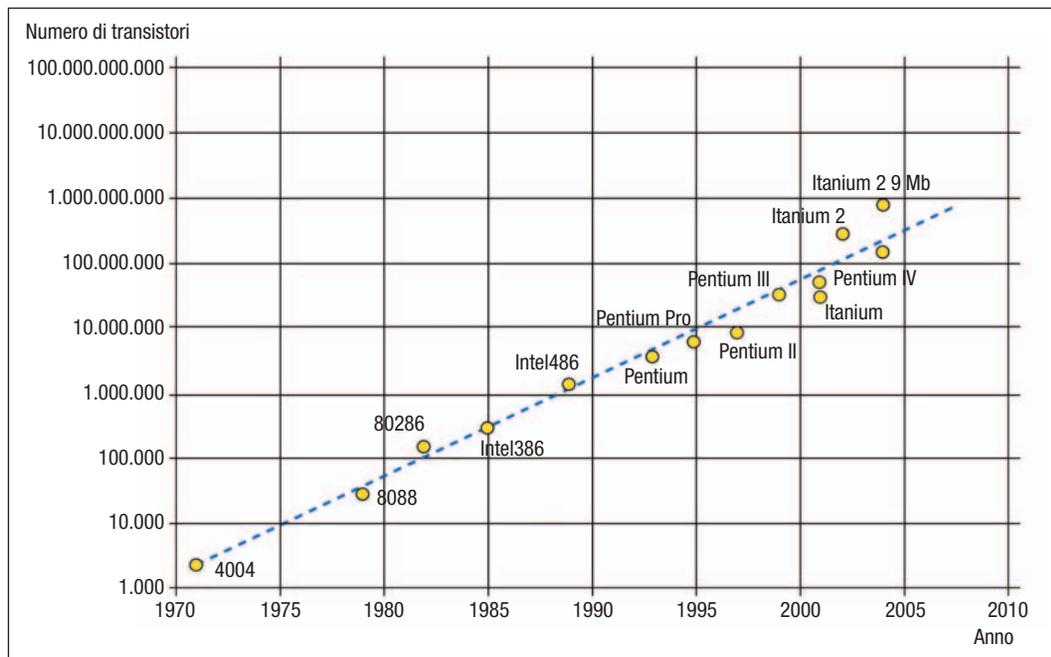


FIGURA 1
 Legge di Moore per i microprocessori (raddoppio della densità di integrazione circa ogni due anni)

tegrabili in una singola piastrina di silicio cresce in modo esponenziale con il passare del tempo (Figura 1). Progettare un circuito elettronico con un miliardo di transistori sarebbe impossibile senza l'ausilio di un simulatore circuitale. Analogamente, simulare in un tempo ragionevole un circuito composto da un miliardo di transistori o, almeno, i blocchi circuitali ritenuti critici in esso contenuti sarebbe impossibile senza disporre di dispositivi integrati in grado di garantire ai computer potenze di calcolo estremamente elevate. L'uso combinato di simulatori circuitali sempre più potenti e tecnologie di integrazione sempre più spinte ha consentito lo sviluppo dirompente dell'elettronica moderna e dei settori a questa legati, primi tra tutti quelli dell'informatica e delle telecomunicazioni.

Sviluppato attorno al 1970 nei laboratori di ricerca dell'Università di Berkeley (California, U.S.A.) dal gruppo del Prof. Donald Pederson, SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) fu il primo simulatore circuitale accettato estesamente nel mondo. Come lascia intendere il nome, l'interesse specifico di questo strumento era rivolto alla simulazione di circuiti integrati. La prima versione del simulatore (SPICE1) venne presentata durante una conferenza nel 1973 [2]. SPICE1 era scritto nel linguaggio di programmazione Fortran, e la descrizione del comportamento elettrico del

circuito si basava sull'analisi nodale, *node-voltage analysis*. La descrizione del circuito include i componenti elettrici (sia passivi, sia attivi) e i nodi (punti ai quali sono connessi almeno due componenti); a ogni nodo è associata una tensione, mentre a ogni ramo (un ramo rappresenta il collegamento tra due nodi) è associata una corrente. Ogni componente elettrico è rappresentato mediante un opportuno modello matematico, che descrive la relazione tra le tensioni presenti ai suoi terminali e le correnti che entrano in questi. In tal modo, sostanzialmente, il circuito risulta descritto utilizzando una matrice di ammettenza, che mette in relazione la corrente che scorre in ciascun ramo del circuito con le tensioni ai capi dei vari rami. La soluzione del sistema di equazioni (tipicamente non lineari) che descrive il circuito si basa su tecniche iterative (di tipo Newton-Raphson [3]): viene prima stimato un valore iniziale delle variabili elettriche (per esempio, nel caso di un'analisi di transitorio temporale, questo coinciderà con il valore assunto dalle variabili nell'intervallo temporale precedente a quello considerato), dopo di che il valore delle variabili viene variato in modo iterativo, fino a che non si raggiunge un livello considerato corretto, secondo un criterio prestabilito di errore massimo ammesso (quanto minore è questo errore, tanto migliore sarà l'accuratezza dei risultati, ma tanto maggiore sarà il tempo richie-

sto per completare la simulazione). Per quanto riguarda la variabile tempo, nelle analisi di transitorio temporale SPICE1 (come le successive versioni di SPICE) discretizza l'asse dei tempi in passi (*time step*) discreti (un passo più piccolo darà luogo a un'accuratezza migliore dei risultati e a un tempo di simulazione superiore).

Il tipo di analisi impiegato (cioè l'analisi nodale) rappresentava uno dei maggiori limiti di SPICE1 (componenti circuitali quali per esempio gli induttori e alcuni tipi generatori controllati introducono singolarità nella matrice), limiti che vennero risolti con la successiva versione del simulatore (SPICE2) introducendo la cosiddetta analisi nodale modificata (*modified nodal analysis*) [4]. SPICE1 utilizzava la *fixed step analysis* (simulazione a passo costante), mediante la quale l'intervallo temporale di simulazione viene suddiviso in una successione di istanti temporali equispaziati e lo stato del circuito viene risolto per ognuno degli istanti di questa successione. In SPICE2 venne inoltre introdotta la simulazione a passo variabile (*variable-step analysis*), nella quale il passo temporale di simulazione viene variato in funzione dell'effettiva attività del circuito (più precisamente, il passo viene reso più elevato quando le grandezze elettriche nel circuito risultano meno variabili), ottenendo una maggior velocità complessiva di simulazione. Nel 1989 venne introdotto SPICE3, scritto in linguaggio C, il quale presenta l'aggiunta di funzionalità per la visualizzazione di grafici e forma d'onda.

Il simulatore SPICE rappresenta, di fatto, la base dei diversi simulatori circuitali sviluppati negli anni e oggi in uso nell'industria elettronica. A partire da questo simulatore, molte aziende hanno sviluppato strumenti di progettazione commerciali, ottimizzandone le prestazioni. I simulatori commerciali oggi maggiormente diffusi e utilizzati includono infatti HSPICE (inizialmente commercializzato da Meta Software e oggi di proprietà di Synopsis) o PSPICE (di Cadence Design Systems). I modelli dei componenti utilizzati da un simulatore circuitale giocano ovviamente un ruolo fondamentale nell'accuratezza e nella robustezza dei risultati ottenuti. Normalmente, un'elevata accuratezza richiede lo sviluppo di modelli complessi, i quali possono portare a tempi di simulazione assai elevati e, in casi estremi, dare luogo

a problemi di convergenza. Occorre quindi un'adeguata scelta di compromesso tra accuratezza e complessità dei modelli (questo vale soprattutto per i modelli dei transistori). I modelli sviluppati vanno poi validati e calibrati mediante confronto con il comportamento sperimentale dei componenti. Nel corso degli anni sono stati sviluppati, anche da parte dei produttori di circuiti integrati, diversi modelli del transistor MOS, e sono stati proposti diversi livelli (*level*), orientati a garantire diverse prestazioni in termini di accuratezza e tempo di esecuzione. Il modello attualmente adottato come standard anche industriale, pure esso sviluppato presso l'Università di Berkeley, prende il nome di BSIM (*Berkeley Short-Channel IGFET Model*) [5].

3. CIRCUITI ANALOGICI E CIRCUITI DIGITALI: MONDI DIVERSI, ESIGENZE DIVERSE

Il simulatore SPICE nasce e si sviluppa come strumento per l'analisi di tipo analogico di circuiti elettrici nel dominio tempo-continuo. Amplificatori per audio, filtri, riferimenti di tensione o sensori di varia natura sono solo alcuni dei più noti blocchi elettronici analogici. La simulazione numerica di questi circuiti è concettualmente una simulazione di tipo tempo-continuo (anche se in realtà non può essere realizzata che in passi temporali discreti, come sopra evidenziato) con elevato grado di accuratezza "analogica". Il progetto di un circuito elettronico per la generazione di un riferimento di tensione stabile in temperatura, per esempio, richiede una simulazione che sia in grado di determinare con grande accuratezza il valore analogico della tensione di uscita del circuito al variare della temperatura e/o della tensione di alimentazione. Parametri fondamentali per un circuito analogico sono soesso il rapporto segnale/rumore, la linearità e la risposta in frequenza (per approfondimenti si veda il riquadro 1 a p. 36).

Lo sviluppo dei moderni sistemi elettronici digitali, quali per esempio i microprocessori o i sistemi di memorizzazione, ha determinato lo sviluppo di un diverso tipo di simulatori. I sistemi digitali, infatti, trattano il segnale non più come una grandezza continua di tipo tempo-continuo, bensì come un'informazione co-

dificata tramite bit (o *binary digit*, da cui il termine digitale) con evoluzione essenzialmente di tipo tempo discreto. Simulare un sistema digitale con un simulatore per circuiti analogici, quale SPICE, è un inutile spreco di risorse. Solitamente, infatti, di un circuito digitale si vuole verificare il corretto funzionamento logico, nonché la correttezza delle temporizzazioni e del sincronismo tra i diversi segnali. Non si richiede insomma, se non in casi specifici quali applicazioni ad altissima velocità, un'elevata accuratezza nella determinazione dell'evoluzione temporale delle tensioni ai nodi interni del circuito. Importanti nei circuiti digitali sono le transizioni dei segnali da un livello logico all'altro. In assenza di commutazioni, tutte le tensioni ai nodi interni del circuito sono stabili nel tempo. Una simulazione analogica di tipo tempo-continuo di un (intero) sistema digitale risulterebbe, ovviamente, estremamente costosa in termini di potenza di calcolo e i risultati ottenuti sarebbero caratterizzati da un'accuratezza non necessaria. Diverso è il caso in cui si voglia determinare nel dettaglio, per esempio, l'evoluzione temporale della tensione di uscita di una porta logica (quale un invertitore), come è richiesto durante lo sviluppo di celle elementari che verranno poi impiegate per realizzare un sistema digitale. In questo caso, la porta digitale deve essere considerata dal punto di vista analogico, e l'utilizzo di un simulatore circuitale quale SPICE risulta pienamente adeguato.

Un sistema elettronico digitale può essere modellizzato e descritto secondo quattro livelli di astrazione (Figura 2), cioè un primo livello di astrazione, tramite il quale si definisce la funzione che il sistema deve svolgere (indipendentemente dalla sua struttura fisica), un livello architetturale (o RTL, *Register Transfer Level*), nel quale il sistema è descritto come interconnessione di componenti di elaborazione standard (quali registri, sommatore e moltiplicatori), un livello di descrizione logico, nel quale ogni componente architetturale viene descritto tramite un'opportuna rete logica e, infine, il livello circuitale vero e proprio, nel quale ogni singola rete logica viene realizzata e simulata con uno specifico schema circuitale a livello transistor. A ognuno di questi diversi livelli di astrazione corrisponde uno specifico ambiente di simulazione numerica.

Da un progetto finanziato dal Dipartimento della Difesa americano, nel 1987 nacque il VHDL (*VHSIC Hardware Description Language*, [6] dove l'acronimo VHSIC indica *Very High Speed Integrated Circuit*), che è un linguaggio ad alto livello per la descrizione e la progettazione di sistemi digitali elettronici. Tramite VHDL è possibile descrivere il sistema sia a livello comportamentale, cioè mediante le relazioni tra le variabili di ingresso e le variabili di uscita, sia a livello strutturale, cioè mediante i moduli funzionali da cui esso è costituito e le relative interconnessioni (le stesse tipologie di descrizione sono possibili pure per i vari moduli); la descrizione del sistema permette di determinarne la risposta in funzione dei segnali presenti in ingresso. Un altro linguaggio ad alto livello per la progettazione di circuiti digitali è Verilog (di Synopsys). Una volta terminata con successo la fase di analisi, questi programmi consentono di realizzare la sintesi del circuito integrato in modo automatico, mediante l'impiego di celle digitali (completamente caratterizzate) disponibili in libreria.

Parametri critici per la progettazione e la conseguente simulazione digitale sono i tempi di ritardo, i tempi di commutazione e i tempi di propagazione dei segnali attraverso le diverse porte logiche. Un circuito digitale è completamente descritto una volta che siano noti la funzione logica che esso implementa e i tempi di elaborazione richiesti (i quali dipendono dalla

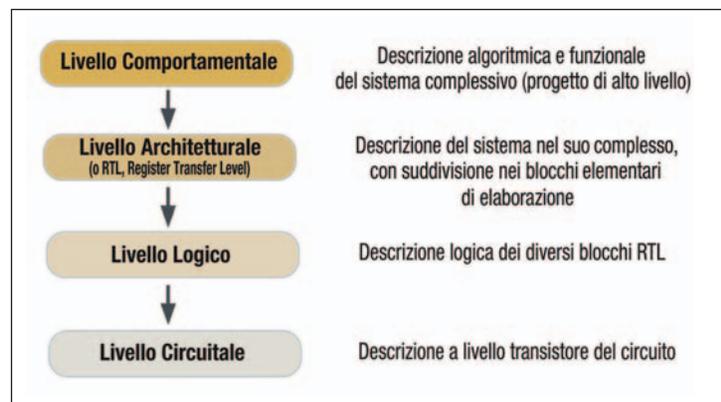


FIGURA 2

Livelli di astrazione nella descrizione di circuiti digitali. A questi livelli viene in genere aggiunto il livello fisico, che riguarda il layout, cioè il disegno delle figure che daranno origine alle maschere per la fabbricazione del circuito: questo livello specifica quindi come è costituito fisicamente il circuito. Il livello fisico, peraltro, non ha interesse specifico in questa sede

realizzazione fisica della porta logica). Sono pertanto stati sviluppati simulatori che descrivono e analizzano i circuiti digitali nel dominio del tempo. Esistono peraltro diversi livelli di dettaglio nella descrizione e, quindi, nell'analisi (che si riflettono, naturalmente, in diverse prestazioni in termini di accuratezza da una parte e di complessità computazionale dall'altra). Sono disponibili simulatori logici, per i quali gli elementi di base sono le porte logiche (queste non vengono descritte in base alla loro realizzazione circuitale, ma hanno associati i tempi di ritardo, che tipicamente dipendono dal carico capacitivo di uscita), e simulatori a livello interruttore (*switch-level*), che descrivono le singole porte logiche in base alla loro realizzazione circuitale e simulano ciascun transistor come un interruttore che risulterà spento (resistenza infinita) o acceso (resistenza pari alla resistenza serie media del corrispondente transistor nelle condizioni operative di accensione) in funzione dell'evoluzione dei segnali. I simulatori di tipo *switch-level* tengono conto delle capacità presenti ai nodi, in modo da fornire una stima sufficientemente accurata dei tempi di commutazione.

A livello ancora più basso possono essere classificati i simulatori temporali (*timing simulator*), il cui obiettivo fondamentale è valutare parametri temporali di una rete logica (tempi di propagazione, di salita e di discesa). Questi simulatori descrivono un circuito digitale attraverso la sua realizzazione fisica a livello transistor, ma impiegano per i componenti modelli assai semplificati (pur tenendo conto di numerosi effetti non ideali), in modo da permettere la simulazione anche di un circuito assai complesso i tempi ragionevoli. Il loro impiego può risultare particolarmente utile per la simulazione globale di un intero circuito nella fase finale della progettazione (per un approfondimento si consideri l'esempio relativo a una memoria digitale riportato nel riquadro 2 a p. 37).

4. LA SIMULAZIONE DI CIRCUITI ANALOGICI

A differenza di quanto accade nella simulazione dei circuiti digitali per i quali, fondamentalmente, vengono effettuate simulazioni aventi come obiettivo la verifica funzionale del circuito e la corretta temporizzazione delle diverse

parti del circuito stesso, l'analisi di un circuito analogico si articola in quattro diverse fasi, alle quali corrispondono quattro distinte tipologie di simulazione. La prima fase è l'analisi in continua (DC). In questo caso, il circuito è simulato in condizioni statiche, in assenza cioè di segnali tempo varianti. Obiettivo della simulazione in DC è quello di valutare il punto operativo (*Operating Point*, OP) del circuito, ovvero analizzare le condizioni di polarizzazione dei diversi componenti. Infatti, per ognuno dei diversi componenti (in particolare per i dispositivi attivi quali i transistori), è necessario analizzare accuratamente la regione di funzionamento. Un transistor MOS può operare in saturazione, in triodo, in debole inversione o in interdizione. In ognuna di queste regioni, il comportamento del transistor e, quindi, le sue caratteristiche elettriche di piccolo segnale sono differenti che nelle altre. In un circuito elettronico analogico, la polarizzazione e, quindi, la regione di funzionamento dei transistori devono essere quelle previste dal progettista. Un transistor progettato per uno stadio di guadagno, per esempio, può introdurre non linearità pesanti quando passa da una regione di funzionamento a un'altra: tipicamente, questo deve essere evitato. Lo strumento per verificare quanto sia robusto il progetto di un circuito dal punto di vista della polarizzazione è appunto l'analisi tramite simulazioni in DC.

Conclusa l'analisi in DC, il comportamento del circuito deve essere analizzato nei domini della frequenza e del tempo. A tal fine sono effettuate simulazioni in AC e simulazioni in transitorio. Nella simulazione in AC, viene analizzato il comportamento del circuito a piccolo segnale. In questo caso si analizza la risposta in frequenza del circuito nell'intorno dello stato di polarizzazione in DC. La caratteristica elettrica dei diversi componenti viene linearizzata nell'intorno del punto operativo del circuito e il circuito viene simulato valutando la risposta a uno stimolo sinusoidale con ampiezza unitaria e frequenza variabile in un intervallo predefinito. La simulazione in AC è fondamentale per analizzare la stabilità in frequenza di un circuito, per valutare il guadagno in continua e la banda passante di un amplificatore e per determinare la risposta in frequenza di un filtro. Il risultato di una simulazione in AC è solitamente il diagramma di Bode, tramite il quale è pos-

sibile valutare la posizione e il peso dei poli e degli zeri nella funzione di trasferimento di un circuito. Dato che è un'analisi di piccolo segnale, la simulazione in AC non è di per sé sufficiente per valutare in modo esaustivo la risposta del circuito a un generico stimolo esterno. I limiti dell'analisi in AC vengono superati effettuando un'analisi in transitorio. Con la simulazione in transitorio, il progettista valuta la risposta nel dominio del tempo del circuito progettato. In una simulazione in transitorio, lo stato di polarizzazione dei dispositivi varia nel tempo come avviene in un circuito reale e, quindi, possono essere analizzate le non linearità e le distorsioni introdotte nella risposta. Nell'analisi in transitorio, il progettista valuta la risposta a diversi stimoli di ingresso quali, ad esempio, gradini e rampe di tensione o corrente, e stima i tempi di recupero dello stato di polarizzazione per effetto di stimoli impulsivi (quali per esempio quelli causati da *sharing* capacitivi dovuti alla connessione, al nodo di uscita, di un condensatore inizialmente scarico). Oltre ai tipi di analisi indicati, il simulatore circuitale offre ulteriori possibilità, quali l'analisi di rumore e l'analisi di distorsione armonica (quest'ultima viene eseguita sul risultato di un'analisi in transitorio, al fine di tenere conto degli effetti non lineari dei componenti).

Le analisi in DC, in AC e in transitorio sono, quindi, necessarie per valutare il comportamento del circuito in modo esaustivo. Tuttavia, esse non sono sufficienti. Prima che il circuito progettato possa essere approvato per la successiva fase di layout, durante la quale esso viene tradotto dalla sua vista a livello schema alla vista fisica che verrà poi realizzata su silicio tramite il processo di integrazione (Figura 3), occorre completare le analisi considerando anche le variazioni di processo. A causa dell'accuratezza finita del processo di integrazione, infatti, tutti i parametri elettrici dei dispositivi sono ottenuti con una certa tolleranza (che varia a seconda del parametro considerato, ma si può stimare essere nell'ordine del 10%). Il circuito deve quindi essere analizzato considerando anche le dispersioni dei parametri di processo. Fra questi, i più critici sono la tensione di soglia e il fattore di transconduttanza dei transistori MOS, la resistività dei diversi materiali (silicio monocristallino drogato, silicio policristallino, metallizzazioni), le capacità per

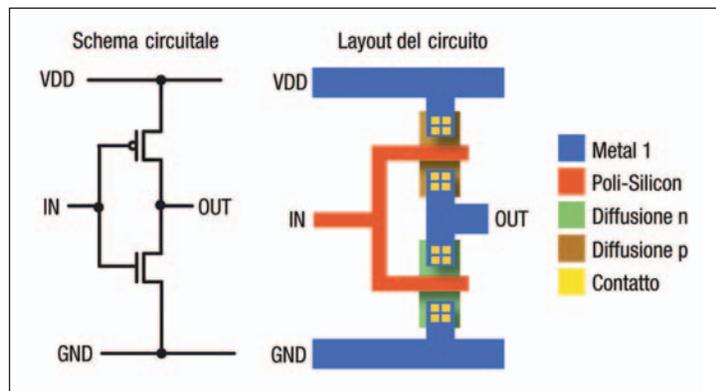


FIGURA 3

Vista a livello schema (sinistra) e vista layout (destra) di un invertitore CMOS

unità di superficie, le dimensioni geometriche dei componenti. Durante la fase di sviluppo del progetto, questa analisi viene in genere condotta imponendo ai diversi parametri i valori estremi delle tolleranze che la linea di produzione è in grado di garantire (analisi dei *corner* di processo). I simulatori circuitali rendono inoltre disponibile la cosiddetta simulazione di Monte Carlo, [7] che viene in genere eseguita nella fase conclusiva della progettazione di uno specifico blocco circuitale. Nella simulazione di Monte Carlo, il circuito progettato viene simulato (in DC, AC e/o transitorio, a seconda delle esigenze) un numero N di volte. In ognuna di queste N simulazioni, i parametri dei componenti vengono scelti in modo non correlato (quindi casuale) seguendo la distribuzione di probabilità propria, per ciascun parametro, del processo di integrazione considerato. La simulazione di Monte Carlo emula quindi un insieme casuale di realizzazioni possibili del circuito sotto analisi, dove per ciascuna realizzazione la probabilità di essere presa in esame risulta pari alla probabilità che essa si verifichi durante la fase di produzione. Su ciascuno dei campioni casuali così determinati, la simulazione esegue la valutazione delle grandezze di interesse (quali per esempio il guadagno in continua o la frequenza di taglio di un amplificatore, o il tempo di ritardo di un invertitore), permettendo in tal modo di avere una stima delle distribuzioni dei valori di tali grandezze cui il circuito progettato darà luogo in fase di produzione e, quindi, una stima della resa di produzione (fattore di fondamentale importanza a livello industriale).

Come mostrato nella figura 4, una volta ulti-

mata l'analisi circuitale, basata sullo schema elettrico, il flusso di progetto di un circuito integrato prosegue con la fase di *layout*. Come accennato in precedenza, durante questa fase vengono definite le figure geometriche che dovranno essere ottenute sui diversi strati di materiale (metalli, ossido di silicio, diffusione di tipo n e di tipo p, silicio policristallino) per realizzare i componenti e le interconnessioni che costituiranno, nel loro complesso, il circuito integrato voluto dal progettista; queste figure geometriche saranno utilizzate per la generazione delle maschere del processo di integrazione. Senza entrare nei dettagli operativi della fase di *layout*, in questa sede è opportuno puntualizzare che la realizzazione fisica di un circuito ha un impatto che può essere non trascurabile sulle prestazioni di questo, a causa della presenza inevitabile di elementi parassiti (quali le resistenze delle linee di interconnessione o gli accoppiamenti capacitivi fra elementi fisicamente adiacenti). A causa degli elementi parassiti introdotti, le prestazioni del circuito precedentemente simulate potrebbero risultare degradate. Una volta ultimato il *layout*, quindi, un buon progetto di un circuito integrato prevede l'uso di strumenti per l'estrazione degli elementi parassiti. Si rende a questo punto necessaria un'ulteriore fase di simulazione finale volta a verificare che, anche tenendo conto degli effetti degli elementi parassiti, il circuito risulti sempre in specifica di progetto, consentendo quindi il passaggio alla fase finale di produzione.

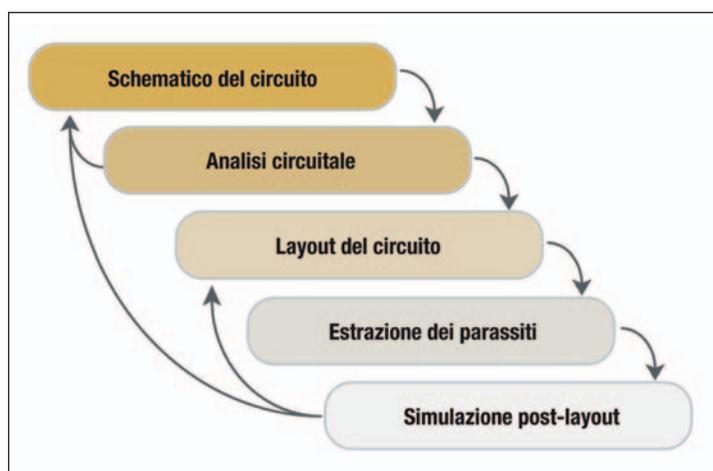


FIGURA 4

Flusso di progettazione di un circuito integrato

5. CONCLUSIONI

I moderni circuiti integrati sono sistemi realizzati con milioni (e talvolta anche miliardi) di transistori. Progettare un circuito elettronico di tale complessità sarebbe impossibile senza l'ausilio della simulazione numerica, mediante la quale le prestazioni di un sistema vengono stimate e affinate durante la fase di sviluppo. La simulazione può essere eseguita a diversi livelli di complessità, in modo da ottimizzare da una parte i tempi di calcolo e, dall'altra, l'accuratezza dei risultati. L'uso combinato di simulatori sempre più potenti e tecnologie di integrazione sempre più spinte ha consentito lo sviluppo dirompente dell'elettronica moderna e dei settori a questa legati, primi tra tutti quelli dell'informatica e delle telecomunicazioni. Questo lavoro ha analizzato le problematiche relative alle tecniche di simulazione, con specifico riguardo alla simulazione circuitale, che costituisce la tecnica più accurata per l'analisi dei circuiti integrati. Sviluppati a partire dai primi anni '70, i simulatori circuitali hanno subito un'evoluzione costante. Dal primo prototipo SPICE, si è giunti oggi a sistemi di simulazione in grado di affiancare il progettista durante tutto il percorso di sviluppo del circuito integrato. Dalla concezione dell'idea fino al rilascio del progetto finale per la fase di integrazione e realizzazione del dispositivo, il simulatore rappresenta uno strumento indispensabile, senza il quale la realizzazione dei moderni sistemi elettronici non sarebbe praticabile.

Acronimi

CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
IGFET	<i>Insulated-Gate Field Effect Transistor</i>
MOS	<i>Metal-Oxide-Semiconductor</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor</i>

Bibliografia

- [1] Moore G.E.: Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, Vol. 38, n. 8, April 1965.
- [2] Nagel L.W., Pederson D.O.: *SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)*. EECS Department, University of California, Berkeley, Tech. Rep. No. UCB/ERL ERL-M382, Apr. 1973.

- [3] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T.: "Newton-Raphson Method Using Derivatives" and "Newton-Raphson Methods for Nonlinear Systems of Equations". §9.4 and 9.6 in Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing, 2nd ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1992, p. 355-362, p. 372-375.
- [4] Nagel L.W.: *SPICE2, a Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits*. EECS Department, University of California, Berkeley, Tech. Rep. n. UCB/ERL-M520, 1975.
- [5] Liu W., Jin X., Chen J., Jeng M-C., Liu Z., Cheng Y., Chen K., Chan M., Hui K., Huang J., Tu R., Ko P.K., Chenming Hu: *BSIM 3v3.2 MOSFET Model Users' Manual*. EECS Department, University of California, Berkeley, Technical Report n. UCB/ERL M98/51, 1998.
- [6] AA. VV.: IEEE Standard VHDL Language Reference Manual. *IEEE Std*, 1988, p. 1076-1987.
- [7] Metropolis N., Ulam S.: The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association (American Statistical Association)*, Vol. 44, n. 247, 1949, p. 335-341.

ALESSANDRO CABRINI si è laureato (con lode) in Ingegneria Elettronica nel 2000 presso l'Università di Pavia dove, successivamente, ha conseguito il Dottorato di ricerca in Elettronica ed Informatica con un lavoro su memorie non volatili di tipo flash multilivello. Dal 2004 svolge attività di ricerca presso il Dipartimento di Elettronica dell'Università di Pavia occupandosi di progettazione e caratterizzazione di memorie non volatili a cambiamento di fase basate su materiali calcogenuri. Fra le sue principali attività di ricerca risulta inoltre la progettazione di circuiti analogici per la conversione di tensioni DC-DC ad alta efficienza energetica basati su topologie a *charge pump* e *buck-boost*.

E-mail: alessandro.cabrini@unipv.it

GUIDO TORELLI, nato a Roma nel 1949, si è laureato (con lode) in Ingegneria Elettronica nel 1973 presso l'Università di Pavia dove, dopo la laurea, ha goduto di una borsa di studio annuale. Nel 1974, entrò in SGS-ATES (ora parte di STMicroelectronics), dove ha lavorato come progettista di circuiti integrati MOS, raggiungendo la qualifica di Dirigente (1987). Nel 1987 entrò nel Dipartimento di Elettronica dell'Università di Pavia, dove è attualmente Professore Ordinario. I suoi interessi di ricerca sono nell'area della progettazione, analisi e caratterizzazione di circuiti integrati MOS (attualmente l'enfasi è sulle memorie non volatili e sui circuiti misti analogico-digitali CMOS). Ha ricevuto (con colleghi) il Premio Ambrose Fleming della IEE (sessione 1994-95). È Senior Member della IEEE.

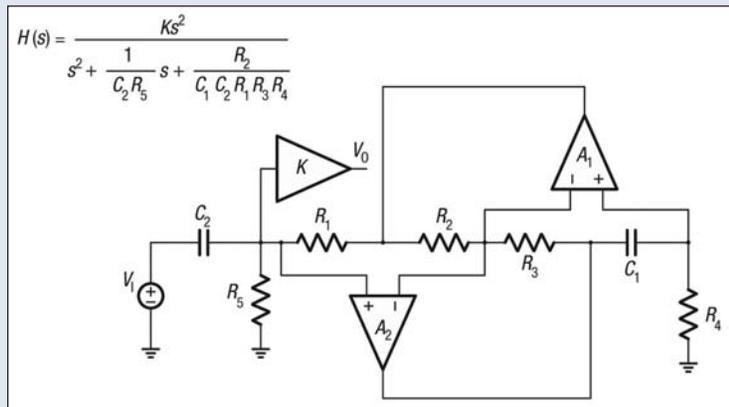
E-mail: guido.torelli@unipv.it

Riquadro 1 - Simulazione di un filtro elettronico

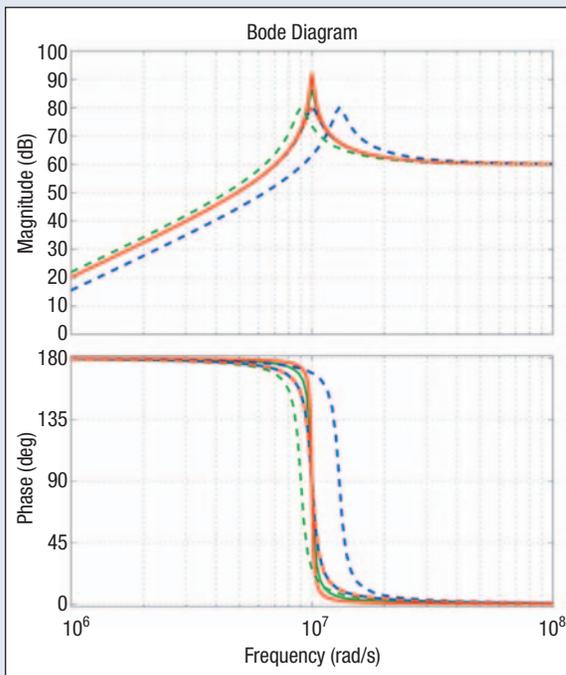
Un filtro elettronico è un circuito che introduce un'attenuazione e/o un'amplificazione selettiva per ciascuna delle frequenze del segnale applicato al suo terminale di ingresso. Esistono filtri di tipo passa basso (che attenuano le componenti ad alta frequenza del segnale), filtri passa alto (che, viceversa, attenuano le componenti a bassa frequenza del segnale), filtri passa banda (che attenuano le componenti del segnale al di fuori di un prefissato intervallo, o banda, di frequenze), filtri notch (che eliminano una determinata banda di frequenza, molto stretta, del segnale in ingresso) ecc.. Un filtro si caratterizza per la sua risposta in frequenza, che fornisce l'amplificazione del filtro in funzione della frequenza. Quando si progetta un filtro elettronico, la sua risposta in frequenza viene analizzata accuratamente mediante simulazione in AC. A questo proposito, è molto importante valutare la sensibilità della risposta in frequenza del filtro alle variazioni dei parametri dei componenti che lo costituiscono. Consideriamo, per esempio, il circuito della figura A, tramite il quale si realizza un filtro attivo passa alto del secondo ordine (cioè con due poli). La risposta in frequenza del circuito è data da:

$$H(s) = \frac{Ks^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

In particolare, i parametri K (guadagno a centro banda), ω_0 (frequenza caratteristica) e Q (fattore



A - Schema circuitale di un filtro attivo del secondo ordine (V_1 = segnale di ingresso; V_0 = segnale di uscita)

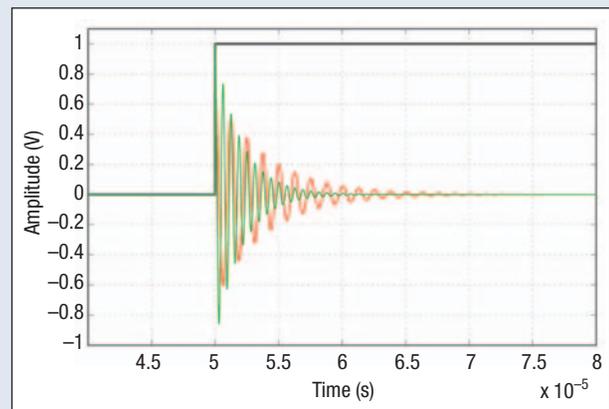


B - Risposta in frequenza del filtro di figura A per diversi valori dei componenti (e, quindi, di K , ω_0 e Q); la risposta è stata ottenuta mediante simulazione parametrica in AC

lizzare, per esempio, i transienti di funzionamento, la risposta del filtro al gradino, come quella mostrata nella figura C, che è essenziale, assieme a simulazioni in AC, ai fini della valutazione della sua stabilità in frequenza, e le prestazioni di distorsione armonica, che vengono valutate mediante la trasformata di Fourier della risposta temporale a uno stimolo sinusoidale) e, ove occorra, simulazioni particolari mirate a obiettivi specifici.

di merito) dipendono dall'accuratezza dei valori dei condensatori e dei resistori impiegati, oltre che dalle caratteristiche degli amplificatori operazionali utilizzati. Mediante simulazioni parametriche (che consistono nell'esecuzione di successive simulazioni, eseguite variando il valore di determinati componenti entro un dato intervallo con un passo prefissato) su resistori e condensatori, si ottengono i risultati riportati nella figura B: da questi è possibile stimare quali sono gli elementi maggiormente critici per la risposta in frequenza del sistema. Ciò consente di effettuare la scelta migliore tra le tipologie disponibili dei componenti, o di cambiare la topologia del filtro in modo che le specifiche richieste vengano rispettate anche in presenza delle inevitabili tolleranze di produzione. Un'analisi di Monte Carlo sulla topologia definitiva potrà fornire dati interessanti in tal senso.

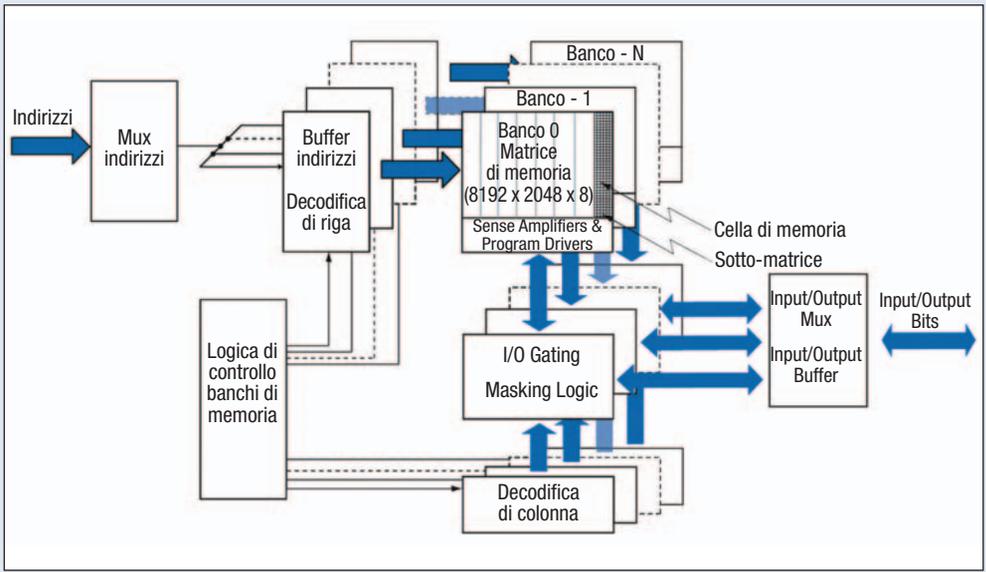
Naturalmente, una buona progettazione di un filtro come quello mostrato prevede pure simulazioni in DC (per analizzare le condizioni di polarizzazione dei componenti), simulazioni in transitorio (per ana-



C - Risposta al gradino del filtro di figura A, ottenuta mediante simulazione in transitorio, per due differenti combinazioni di (K , ω_0 e Q). Traccia nera: gradino di tensione applicato all'ingresso; tracce rossa e verde: uscita del filtro nei due diversi casi

Riquadro 2 - Simulazione di una memoria digitale

Una moderna memoria digitale include centinaia di milioni - nei casi più avanzati, miliardi - di transistori. La simulazione di sistema elettronico di tale complessità ha determinato lo sviluppo di sistemi di simulazione dedicati. In questo ambito troviamo la cosiddetta *hierarchical simulation* (simulazione gerarchica). Una caratteristica comune a tutti i sistemi di memoria è infatti la possibilità di suddividere il sistema stesso in un insieme gerarchico di blocchi elementari a complessità crescente via via che si sale dal basso verso l'alto (Figura A). Il più elementare di questi blocchi è la cella di memoria, mentre quello al livello più alto è il sistema completo. Durante il normale funzionamento di un dispositivo di memoria, solo una piccola parte dei transistori è effettivamente attiva in un certo istante di tempo. Infatti, le celle non indirizzate per una lettura o una programmazione (che solitamente rappresentano la grande maggioranza del sistema) sono inattive. Per questo, la simulazione del loro comportamento è, di fatto, non essenziale. I simulatori gerarchici sfruttano appunto questa caratteristica. In particolare, quando viene dato in ingresso uno stimolo, in una prima fase della simulazione tutte le celle di memoria sono rimosse dal sistema e lo stimolo applicato viene utilizzato per determinare le *bit-line* e le *word-line* che saranno attivate dallo stimolo stesso. In seguito, vengono inserite per la simulazione le celle ritenute necessarie (in quanto connesse o prossime alle *word-line* e alle *bit-line* attivate dallo stimolo applicato). La procedura prende il nome di *hierarchical array reduction*, e consente una notevole riduzione dei tempi di simulazione. Altri miglioramenti nei tempi di simulazione sono poi ottenuti sfruttando le tecniche note come *hierarchical storage* e *isomorphic matching*. Tramite la prima, elementi fondamentali (cella di memoria, flip-flop, porte logiche) che sono ripetuti più volte nel circuito, sono riconosciuti e memorizzati come singola istanza di un medesimo "modello" e vengono inseriti "on the fly" (al volo) nella simulazione solo quando ritenuti necessari. Tramite l'*isomorphic matching*, viceversa, vengono eliminati dalla simulazione cicli identici dedicati a blocchi uguali che lavorano nelle stesse condizioni operative. L'*isomorphic matching* elimina la ripetizione di simulazioni identiche, con evidenti vantaggi in termini di tempo complessivo di simulazione.



A - Schema a blocchi di un dispositivo di memoria digitale