

Progetto di sistemi VLSI assistito da calcolatore

G. De Micheli - Centro di Studio per l'Ingegneria dei Sistemi per l'Elaborazione delle Informazioni - C.N.R.

Sulla base delle esperienze del primo corso italiano di progetto di circuiti VLSI, in questo lavoro si presenta un approccio alla progettazione elettronica di tipo custom e si delinea la struttura di una stazione di progetto per circuiti e sistemi integrati a larghissima scala.

Introduzione

I recenti progressi nella capacità tecnologica di integrare su di un singolo chip un alto numero di dispositivi hanno provocato una rivoluzione nel metodo di progettare. Un chip può ora ospitare un complesso sistema elettronico e rende vantaggioso dal punto di vista tecnico, affidabilistico ed economico realizzare un sistema come chip VLSI, piuttosto che come insieme di piastre contenenti componenti standard MSI ed SSI.

Il salto di qualità interessa tutte le ditte impegnate nella progettazione di sistemi elettronici e soprattutto quelle italiane che soffrono di ritardi di aggiornamento tecnologico rispetto alle concorrenti statunitensi.

Negli Stati Uniti già da parecchi anni il VLSI è diventato un'esigenza primaria per un grande numero di case produttrici e di pari passo si sono formati centri qualificati per l'insegnamento delle nuove tecniche di progettazione. Le principali università americane (Università di California e Berkeley, Caltech, Massachusset Institute of Technology, Stanford, Carnegie Mellon University) offrono annualmente un corso "graduate" (riservato cioè a già laureati) nel campo della progettazione VLSI. Questi corsi sono caratterizzati dalla possibilità di acquisire "hands on experience" nella progettazione. Ciò significa mettere l'allievo nella possibilità di realizzare un progetto di un sistema VLSI, come sarà esemplificato più avanti.

Per questo motivo queste università hanno creato una o più stazioni di progetto complete di tutto l'hardware ed il software necessario per la progettazione di un circuito VLSI. In questo ambiente di progettazione chi segue il corso può arrivare a definire le geometrie delle maschere per la fabbricazione del chip. E' compito poi delle università far realizzare, in casa o all'estero, tramite opportuni accordi, il circuito e restituirlo al neoprogettista per il collaudo.

Diverse compagnie private statunitensi fanno ora concorrenza alle università in questo tipo di didattica: il loro successo è dovuto alla crescente richiesta sul mercato del lavoro di progettisti di circuiti VLSI.

In quest'ottica è stato organizzato a febbraio presso la Scuola Superiore Guglielmo Reiss Romoli il primo corso italiano di progettazione VLSI. Ciò ha richiesto una concentrazione di competenze e di strumenti hardware e software che hanno permesso l'esecuzione di progetti di sistemi VLSI fino alla completa descrizione delle maschere.

Nel seguito saranno descritte le tematiche toccate durante il corso e le scelte effettuate per la costituzione di due diverse stazioni di progetto.

Il problema VLSI

La realizzazione di circuiti integrati a larga scala ha coinvolto un notevole numero di aree di mercato. La spinta verso la microminiaturizzazione dei sistemi, principalmente venuta dai produttori di sistemi di calcolo, si è ora estesa a parecchi altri settori industriali ugualmente interessati all'integrazione su larga scala. Le case costruttrici di sistemi di telecomunicazioni hanno ad esempio grande interesse ad integrare sistemi sempre più complessi per l'elaborazione dei segnali; le case automobilistiche consumano già adesso un grosso volume di circuiti per il controllo e la guida dei veicoli; grande attenzione è rivolta all'uso di tecniche di sintesi ed analisi della voce umana ed al loro impiego nell'interazione uomo-macchina. Tutti i settori infine che fanno riferimento a tecnologie avanzate, dalla sperimentazione scientifica ed universitaria alla costruzione di sistemi di difesa, hanno necessità e conseguente interesse all'affermazione della tecnologia di progetto VLSI.

Anche in Italia in questi ultimi anni è cresciuta l'esigenza di dispositivi a grandissima scala da parte dell'industria.

Tradizionalmente i costruttori di sistemi italiani commissionano i circuiti integrati alle case di semiconduttori. Il che significa che la casa responsabile del progetto consegna uno schema elettrico o logico alla casa costruttrice, lasciando a quest'ultima il compito di passare dal circuito al prodotto finito.

Questo approccio ha notevoli svantaggi sia da un punto di vista pratico che economico.

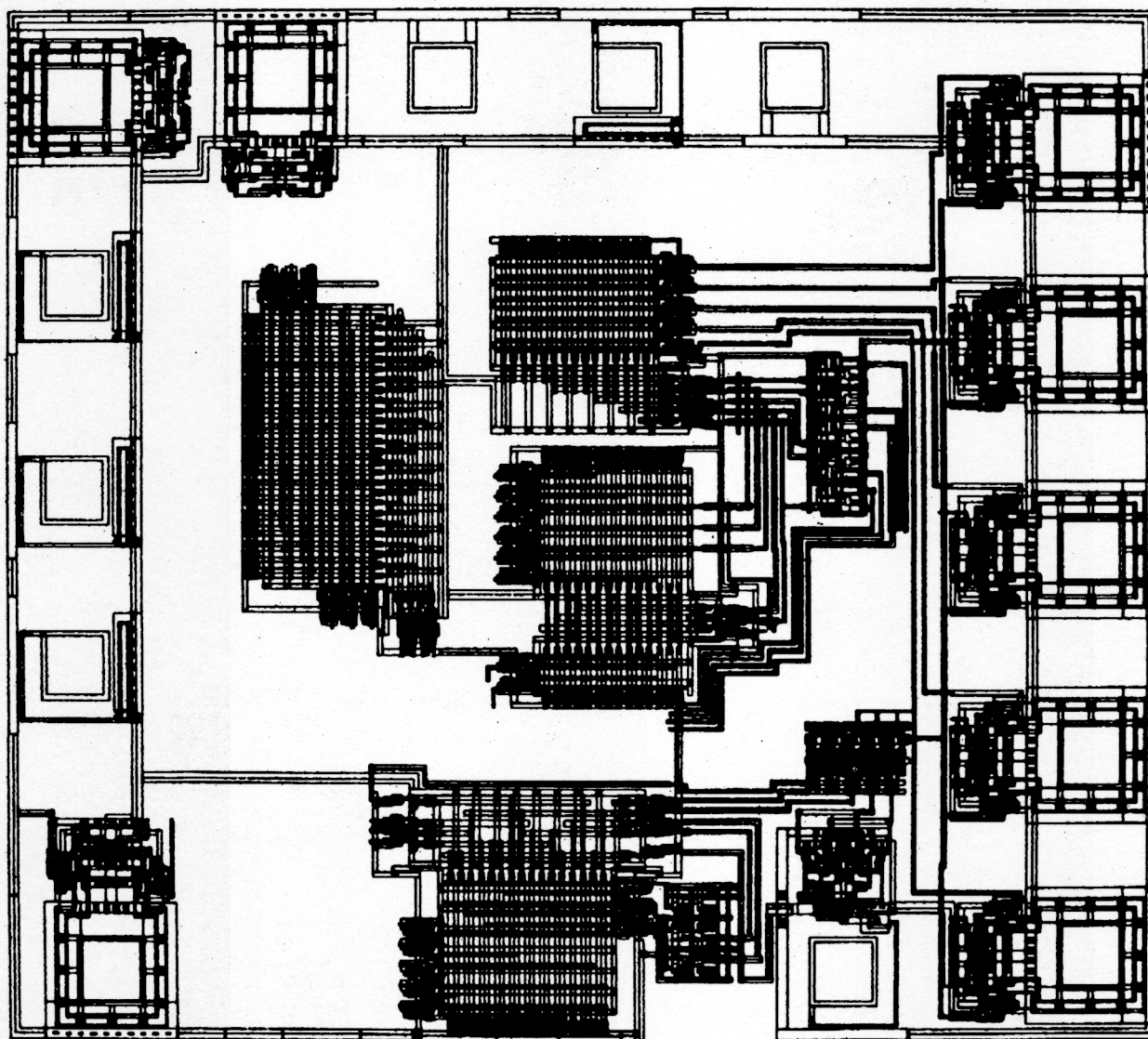
In primo luogo si richiede un ulteriore sforzo di progettazione alla casa manifatturiera, che può non conoscere tutti i dettagli e le finalità del progetto. Questo aumenta tempi e costi di realizzazione con la possibilità sempre presente che una cattiva comunicazione tra le due case porti come conseguenza ad un prodotto mediocre o comunque non ottimo. In secondo luogo la casa progettista può avere interesse a non far conoscere i dettagli implementativi elettrici del progetto per questioni di brevetti o know-how.

Una soluzione ideale al problema si avrebbe se ogni casa di progettazione potesse fabbricare in sede i propri circuiti integrati. Questo comporterebbe però un ingente impiego di capitali e personale.

La soluzione razionale al problema è che ciascuna casa di progettazione esegua completamente il ciclo di progetto di un circuito integrato fino alla definizione delle maschere, e trasmetta poi questa informazione (codificata su nastro magnetico) alla ditta costruttrice.

Parecchie aziende statunitensi si sono ormai orientate ver-

Fig. 4 - Layout finale



Programma di progettazione automatica della stazione di progetto VAX-UNIX installata per il corso "Introduzione alla progettazione VLSI"

SPICE2G	Simulazione circuitale
SPLICE1A3	Simulazione logica
KARL	Simulazione RTL
EQNTOTT	Sintesi implicante logici
PRESTO	Minimizzazione logica
PLEASURE	Compattazione topologica di PLA
BLAM	Compattazione topologica di PLA
PLAID	Sintesi layout PLA
KIC	Editor grafico a colori
KICTOCIF	Interprete
CIFTOKIC	Interprete

so questo tipo di divisione delle risorse di progettazione che comporta la trasformazione delle case di semiconduttori in "silicon foundries", cioè fonderie di silicio sul "calco" dato dalle case di progettazione.

Metodologia di progettazione VLSI

Esistono varie metodologie di progettazione di circuiti e sistemi VLSI: "fully custom", "gate arrays", "polycells", ecc. La scelta di un tipo o dell'altro è motivata dai volumi di produzione, dal tempo richiesto per avere il prodotto finito e dal tipo di circuito.

Un metodo di progettazione ormai divenuto celebre è quello descritto nel testo di Carver Mead e Lynn Conway intitolato "Introduction to VLSI Systems" [1]. Il libro presenta un tipo di progettazione custom semplificata in tecnologia NMOS, basata soprattutto sull'utilizzo di strutture regolari e ripetute. I circuiti progettati secondo tale metodologia, se non sono ottimizzati dal punto di vista elettrico, possono in compenso essere eseguiti in minor tempo e con maggiore facilità grazie all'intrinseca semplicità del metodo di progettazione. Questo approccio si rivela quindi particolarmente adatto alle aziende che commissionano all'esterno la realizzazione dei propri chip ed alle università.

Per apprezzare quali sono i problemi affrontati nella progettazione di circuiti e sistemi VLSI, è opportuno percorrere il cammino di sviluppo di un progetto attraverso le varie fasi. Tale sviluppo è sovente definito di tipo "top-down" o progetto gerarchico.

Il processo di progettazione comincia con la definizione delle specifiche funzionali del sistema in esame.

A tale fase segue quella detta di "chip planning", cioè di ripartizione della superficie del chip in aree dedicate a blocchi funzionali. A questo punto è possibile dare una descrizione di tipo algoritmico del funzionamento del sistema a livello di trasferimento di informazione tra registri. Il funzionamento del sistema può essere simulato e verificato a questo livello con appositi programmi come ad esempio il programma KARL [2].

Segue la cosiddetta progettazione logica, cioè la definizione delle porte logiche impiegate nel circuito. A questo livello è possibile effettuare una verifica della correttezza logica del circuito — ad esempio con il simulatore logico SPLICE [3] — che tenga conto della temporizzazione del circuito e dei ritardi di trasmissione attraverso ciascuna porta.

Con il programma SPICE2 [4], ad esempio, ciascun blocco o porta logica sono progettati a livello di schema elettrico simulato per verificare l'esattezza delle grandezze elettriche nelle varie condizioni di funzionamento.

Ciascun blocco viene poi rappresentato mediante un diagramma a stick, per apprezzare l'importanza della collocazione topologica dei vari dispositivi.

Segue il layout di ciascuna cellula, prima su carta e poi, mediante un editor grafico, su un terminale grafico a colori (stazione CALMA, programma KIC).

E' possibile in alternativa fare uso di una "biblioteca di cellule", cioè fare ricorso a moduli già progettati ed usati in precedenti progetti.

Le cellule vengono poi piazzate e ripetute fino alla sintesi dei blocchi funzionali, successivamente disposti a seconda del "chip plan" e collegati tra loro ed ai "pads" di comunicazione con il mondo esterno.

L'informazione relativa alle geometrie delle maschere è automaticamente memorizzata ed aggiornata in un'apposita base di dati: potrà essere poi trasferita tramite supporto magnetico o rete di calcolatori a chi deve produrre le maschere per guidare un fotoripetitore ottico od una macchina per la litografia a fascio di elettroni.

Le geometrie delle maschere possono essere disegnate con vari colori per un controllo visivo, oppure verificate automaticamente con appositi programmi.

Nella progettazione dei blocchi digitali si fa sovente riferimento alla progettazione strutturata. Una qualsiasi funzione logica può essere realizzata mediante PLA (matrice logica programmabile). Il progettista ha a disposizione un intero package di programmi per la sintesi di PLA.

Il punto di partenza può essere quello delle equazioni booleane che descrivono la funzione. Queste vengono trasformate automaticamente, attraverso vari passaggi, in un layout delle maschere della PLA che realizza la funzione desiderata. Tale PLA può essere ottimizzata dal punto di vista logico e compattata dal punto di vista topologico (folding).

Funzioni logiche sequenziali possono essere realizzate mediante macchine a stati finiti. Si dà notevole importanza a questo tipo di progettazione in quanto una macchina a stati si compone di una PLA e di un insieme di registri.

La progettazione può perciò essere quasi completamente automatizzata ed il layout finale mostrare notevole regolarità.

Infine il progetto di un sistema VLSI può prevedere degli ingressi (uscite) di tipo analogico. E' opportuno quindi definire i blocchi analogici costituenti di sistemi analogico-digitali. Questi devono essere realizzati con una tecnologia compatibile con i blocchi digitali ed in particolare essere realizzati in tecnologia NMOS (in futuro CMOS). I blocchi analogici fondamentali sono i "sample and hold", gli amplificatori operazionali ed i comparatori. Con questi si realizzano i convertitori digitali-analogici ed analogico-digitali ed i filtri a capacità commutata. Ciò è sufficiente per l'elaborazione di segnali analogici ed il loro interfacciamento all'unità logica.

La stazione di progetto ed il sistema CAD

Per effettuare il progetto di un circuito VLSI, il progettista si avvale di una stazione di progetto, cioè di un insieme di strumenti hardware ed un sistema software di programmi CAD.

In linea ideale ciascun appartenente ad un gruppo di proget-

to deve poter lavorare indipendentemente su una parte del circuito ed interagire facilmente coi colleghi per scambiarsi informazioni. Pertanto ogni progettista lavora sulla propria stazione di progetto, interagente con le altre mediante una rete di comunicazione [5].

Ciascuna stazione di progetto è costituita da un minicalcolatore con una propria memoria di massa (disco) che colloquia con l'utente mediante un terminale alfanumerico ed un terminale grafico a colori. Le diverse stazioni di progetto sono poi collegate ad un potente calcolatore numerico, ad un certo numero di stampanti e tracciatori (a colori) e ad un sistema di memorie di massa che possa contenere le librerie di dati e di programmi utili per il progetto.

Per il corso di progettazione VLSI presso l'istituto Reiss Romoli sono state utilizzate due stazioni di progetto, profondamente differenti per capacità e finalità. La prima faceva capo ad un minicalcolatore DEC VAX 11/780, connesso ad un terminale grafico a colori AED 512 e ad un certo numero di terminali alfanumerici; la seconda era una stazione Calma GDS II, connessa ad un plotter Calcomp 960, ad un video grafico a colori ed a uno alfanumerico. La prima stazione di progetto costituisce un tipico prototipo sperimentale di una stazione di tipo universitario, la seconda un sistema più potente adatto per la progettazione industriale.

Per la prima stazione di progetto (VAX) è stato scelto il sistema operativo UNIX*, perché questo rappresenta il veicolo di sviluppo più usato negli USA per i programmi di progettazione automatica. L'uso della stazione di progetto VAX-UNIX riguarda le simulazioni, la sintesi automatica di moduli quali le PLA ed il layout delle maschere dei circuiti mediante il terminale grafico a colori. Questa stazione permette di passare attraverso tutte le fasi di progetto di tipo "top-down" e di una verifica di tipo "bottom-up". Inoltre è possibile creare un'interfaccia ad alto livello tra l'utente ed i programmi di progettazione automatica (cadshell).

Tramite la "cadshell" un comando viene interpretato come una sequenza di chiamata di programmi che libera il progettista dalla cura dei dettagli implementativi e dell'interfacciamento dei singoli programmi CAD.

Tramite il sistema operativo UNIX è inoltre possibile accedere ai programmi sorgenti (di CAD e di sistema) e quindi creare una stazione di progetto su misura per l'utente.

Per queste caratteristiche la stazione di progetto VAX-UNIX si configura bene come strumento di ricerca nell'ambito universitario poiché permette sia il progetto di un circuito integrato di ricerca che lo studio di metodologie e di programmi per il progetto stesso.

La seconda stazione è dedicata soltanto alla parte finale del progetto, e cioè alla sintesi delle maschere. L'editor grafico della stazione Calma GDS II permette una veloce introduzione delle geometrie delle maschere e la loro elaborazione. Inoltre è possibile effettuare una verifica delle eventuali violazioni delle regole di layout durante il disegno delle maschere (ad esempio larghezza e spaziatura minima dei rettangoli).

La stazione Calma GDS II permette inoltre il "fracturing", cioè la decomposizione delle figure geometriche in rettangoli, e la generazione automatica dei file di comando dei fotoripetitori ottici. Il software della stazione Calma è ampiamente collaudato (ma non modificabile dall'utente) e quindi una stazione di questo tipo va bene come "stazione a valle" in una linea di progettazione industriale. Ovviamente deve essere completata da un'altra stazione o da un supporto

software (per ora non sul mercato) che intervenga nelle altre fasi di progetto come la simulazione, la sintesi dei circuiti logici e la generazione dei moduli funzionali.

Conclusioni

L'avvento dei circuiti VLSI impone un rinnovamento dei metodi di progettazione elettronica. Per affrontare la complessità dei circuiti si richiede una progettazione gerarchica, strutturata a vari livelli. La costituzione di un'efficiente stazione di progetto risulta essere un presupposto fondamentale per avviare la progettazione di circuiti VLSI.

Bibliografia

- [1] Carver Mead, Lynn Conway "Introduction to VLSI Systems", Addison Wesley 1980
- [2] P. Liell, E. Shaaf "Karl2 Language Reference Manual", Interner Bericht, Universität Kaiserslautern
- [3] A.R. Newton "Techniques for the Simulation of Large Scale Integrated Circuits", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. CAS 26 N° 9, Sept. 79, pp. 741-744
- [4] W. Nagel "SPICE2 A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits", University of California, Berkeley, ERL Memo M520, 1975
- [5] A.R. Newton, D.O. Pederson, A.L. Sangiovanni-Vincentelli, C.H. Sequin "Design Aids for VLSI: the Berkeley Perspective", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. CAS 28, pp. 666-680, Jul 80