

MIKROELEKTRONSKI LABORATORIJ NA FAKULTETI ZA ELEKTROTEHNIKO IN RAČUNALNIŠTVO

Dr. Lojze Trontelj, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Tržaška c. 25, 61001 Ljubljana

Laboratory of microelectronics at the Faculty of electrotechnical engineering and computer sciences

Povzetek

V članku je opisanih nekaj novih dosežkov na področju mikroelektronike v svetovnem merilu. Predstavljen je Laboratorij za mikroelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo in nakazana je njegova vloga v slovenskem prostoru. Posebej je osvetljena vloga vakuumskih tehnologij v polprevodniškem procesu.

Abstract

New products and directions of future development in the field of microelectronics are highlighted. Laboratory of microelectronics in the Faculty of electrotechnical engineering and computer sciences is portrayed and its role in the Slovenian environment is discussed.

The utilization of vacuum technology in silicon wafer fabrication process is listed.

Področje mikroelektronike, kot eden izmed motorjev tehnološke revolucije, še vedno ne miruje. Nove ideje in z njimi povezane tehnološke spremembe znova in znova burkajo elektrotehniško srenjo. V letošnjem letu so veliki svetovni proizvajalci ponudili, poleg že utečene proizvodnje mikroelektronskih vezij, paleta mikroprocesorjev z arhitekturo zmanjšanih ukaznih naborov (RISC). Brez dvoma je tu na prvem mestu Intelovo vezje i860XP z 2,55 milijoni integriranih tranzistorjev in z 32 kbyti predpomnilnika ter s hitrostjo 100 Mflopov (s sto milijoni računskih operacij s plavajočo vejico v sekundi). Družino vezij ASIC (Application Specific Integrated Circuits) povečujejo pomnilniška vezja in logične mreže, ki jih po svojih željah lahko programirajo uporabniki. Tako zmanjšujejo čas do aplikacije povprečno za tri mesece in stroške, ki so povezani z izdelavo in s procesiranjem ene ali več fotomask.

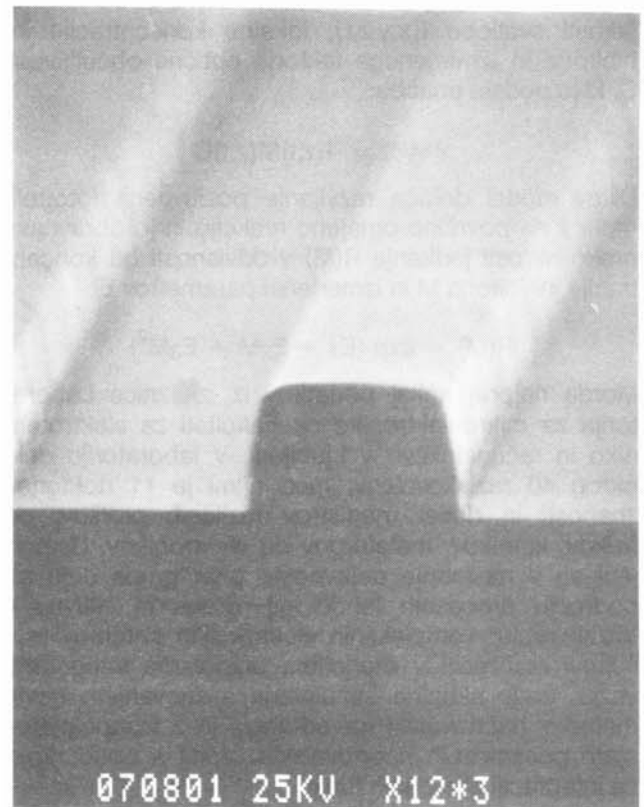
Nastopa obdobje čipov z izredno majhnimi dimenzijami gradnikov; pri teh čipih je zaradi pojava "vročih elektronov" zamenjano petvoltno napajanje s 3 volti.

Tipične napovedane 0.35 μm in 0.15 μm geometrije za vezja v masovni produkciji bodo še naprej zmanjševale cene čipov.

Razvoj v smeri proti nanoelektroniki se ne kaže le v kompaktnjših in kompleksnejših vezjih: v razvojnih laboratorijih preizkušajo tudi tipične realizacije na integrirani optiki, kombinirani z vezji na indijevem fosfidu za frekvence okrog 150 GHz. Na siliciju so v submikrometrskih tehnologijah izdelani unipolarni tranzistorji za centimetrsko frekvenčno področje. Izdelani so že bili kompletni mikrovalovni sprejemniki z integriranim antenskim sistemom na rezini. Več sto vatov moči pri 10 GHz obetajo oscilatorji, ki bodo integrirani na čipih

iz silicijevega karbida. Seveda ves ta napredek ni poceni. Podatek, da bo nova IBM-ova linija za masovno proizvodnjo 256 Mbitnega dinamičnega bralno pisalnega pomnilnika v geometriji 0.35 μm stala 750 milijonov dolarjev, dovolj zgovorno govori o tem. Dokončana naj bi bila v 1996. letu. Pri gradnji sodelujeta Motorola in Siemens.

Hitrost napredka mikroelektronskih tehnologij v glavnem diktirata dva postopka v fotolitografskem koraku: prvi je način osvetljevanja in razvijanja fotopolimera na rezini, drugi pa selektivno jedkanje posameznih plasti. Podrobnejši pogled na presek skozi strukturo na sliki 1 pokaže, da ta postopka usodno vplivata na geometrijo gotovih gradnikov integriranega vezja in s tem na lastnosti vezja.



Slika 1. Izgled 2 μm široke linije po jedkanju; posnetek smo naredili z vrstičnim elektronskim mikroskopom.

Za ilustracijo navedimo le prvi model:

Za izdelavo mikroelektronskih vezij je pomemben uspešen prenos na računalniku načrtanih submikronskih geometrij v fizično strukturo na rezini. V večini mikroelektronskih tovarn danes to preslikavo opravi koračni naravnalnik (stepper), s pomočjo katerega os-

vetlimo pozitivni fotopolimer. Ta proces optičnega prenosa omejujejo uklon in interferenčni pojavi v tankih plasteh na silicijevi rezini, zaradi katerih je lokalna osvetljenost fotopolimera neenakomerna in se med osvetljevanjem spreminja.

Odstopanja resnične strukture od načrtovane smejo biti le minimalna. To dosežemo s kontroliranim vodenjem procesa, ki je optimiziran s pomočjo procesnih meritev in računalniške simulacije. Fotopolimer, v katerem kot inhibitor razvijanja v alkalni vodni raztopini nastopa diazonaftokvinonski izomer, se ob reakciji, ki jo sproži ultravijolična svetloba, spremeni v molekulo s kislinsko skupino. Lokalna koncentracija inhibitorja, ki jo označujemo z $M(x,y,z,t)$, je ena pri neosvetljenem in nič pri povsem osvetljenem fotopolimeru. Takšen model (ki ga je predlagal Dill) določa absorpcijsko konstanto fotopolimera α , definirano kot

$$\alpha = A \cdot M(z,t) + B$$

kjer sta A na osvetlitev odvisen in B na osvetlitev neodvisen faktor.

Trenutna hitrost spreminjanja koncentracije na določenem mestu je po tem modelu odvisna od lokalne jakosti svetlobe $I(x,y,z,t)$, lokalne koncentracije inhibitorja in izmerjenega faktorja optične občutljivosti C , ki jo podaja enačba:

$$\delta M/\delta t = -I(z,t)M(z,t)C$$

Dillov model določa razvijanje pozitivnega fotopolimera z na površino omejeno reakcijo in jo obravnava preko hitrosti jedkanja $R(M)$ v odvisnosti od koncentracije inhibitorja M in izmerjenih parametrov E :

$$R(M) = \exp(E_1 + E_2M + E_3M^2)$$

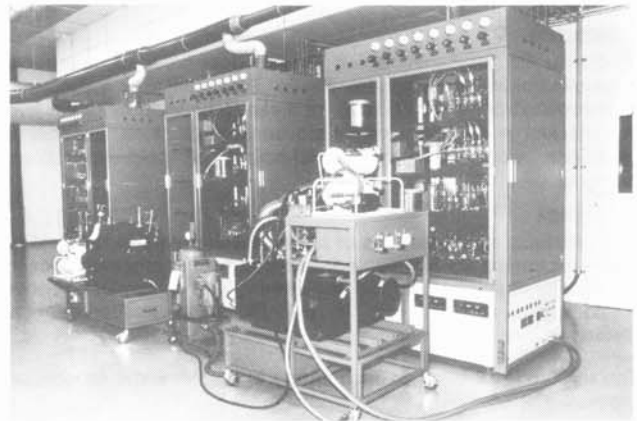
Morda najprej nekaj podatkov iz izkaznice Laboratorija za mikroelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. V laboratoriju dela okrog 40 raziskovalcev, med njimi je 11 doktorjev znanosti in devet magistrorov različnih profilov, od fizikov, kemikov, metalurgov do elektronikov. Usmerjeni so v naslednje dejavnosti: prva grupa dela na področju procesnih tehnologij; druga je aktivna v "dizajniranju" kompleksnih elektronskih sistemov in v njihovi realizaciji v monolitna unipolarna integrirana vezja; tretja skupina se ukvarja s snovanjem novih metod v načrtovalski metodologiji in z izpopolnjevanjem posameznih načrtovalskih orodij s poudarkom na integraciji analognih funkcij.

Med uspešno zaključene projekte v zadnjem obdobju sodijo vezja za telefonski aparat nove generacije, vezja za avtomobilsko elektroniko, vezja s "pametnimi" senzorji, knjižnica analognih celic, programska oprema za avtomatsko sintezo in geometrijo operacijskih ojačevalnikov in filtrov ter nekateri procesni koraki za submikronsko tehnologijo BICMOS.

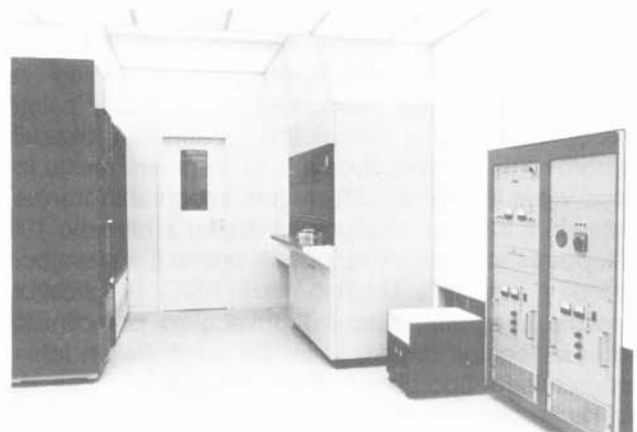
Skupina je v zadnjih letih objavila preko 200 prispevkov. Na novo zgrajeni laboratorij ima 400 m² čistega prostora razreda 10. Še dokaj moderna tehnološka

oprema omogoča izdelavo prototipnih serij unipolarnih integriranih vezij z najmanjšimi liki z dimenzijami pod enim mikrometrom. Načrtovalski del laboratorija je opremljen s petnajstimi delovnimi postajami. V laboratoriju je tudi vsa oprema za izdelavo, kontrolo in korekcijo optičnih fotomask in elektronska oprema za verifikacijo delovanja načrtanih in izdelanih vezij.

Na slikah 2, 3 in 4 vidimo dele tehnološkega in načrtovalskega laboratorija. Slika 5 prikazuje vezje za mobilni telefonski aparat.



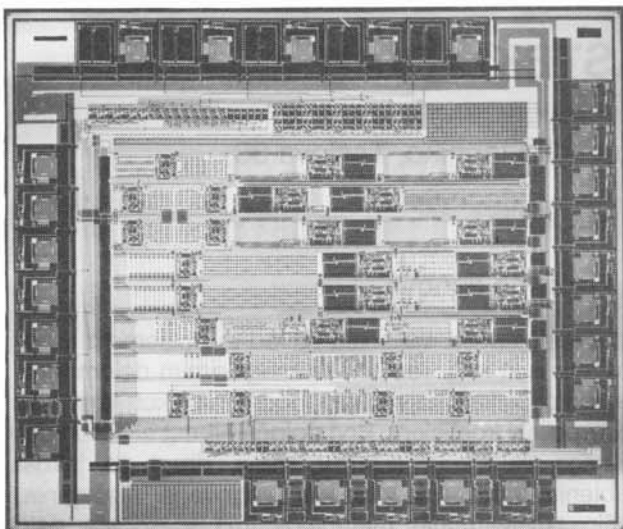
Slika 2. Sistem za depozicijo tankih plasti pri znižanem tlaku.



Slika 3. Naprševalnik (Varian 3180).



Slika 4. Pogled v načrtovalski laboratorij.



Slika 5. Vezje za mobilni telefonski aparat.

Laboratorij torej lahko avtonomno ponudi izdelana optimizirana integrirana vezja po specifičnih željah naročnika in to predvsem na področju kombiniranih analognih in digitalnih funkcij na enem čipu. Vezja so primerna za periferijo elektronskih sistemov v različnih segmentih uporabe.

Vendar tovrstna, četudi kompletna ponudba dejavnosti, še ni zadosten pogoj za obstoj relativno drage tehnološke instalacije.

Kakšna je pri tem burnem razvoju lahko vloga našega majhnega laboratorija, ki deluje na področju že preko 20 let?

V laboratoriju smo mnenja, da je naša vloga predvsem v šolanju študentov in razvojnih inženirjev v naši elektronski industriji z zapletenimi mikroelektronskimi koraki, ki so potrebni za nastanek integriranega vezja. Znanje o tem, kaj je možno in kaj ne, lahko nastaja le v skupnem delu s specialisti, ki pokrivajo celotno področje od simulacije vezja preko geometrijske zasnove fotomask in procesiranja do razvoja testne procedure za izdelano vezje. Le tako lahko vplivamo na nadomeščanje pri nas zelo udomačene "Lego" metode, ki s standardnimi vezji gradi elektronske sisteme. Banalno rečeno, tako degradiramo njihov razvoj le na načrtovanje tiskanega vezja in taka rešitev seveda ne more biti niti konkurenčna niti optimalna. Pripelje nujno do višje cene ob omejeni funkcionalnosti sistemov. Ne nazadnje je tudi zaščita industrijske lastnine tako

zgrajenega "Lego" sistema vprašljiva. Boj proti tovrstni mentaliteti je torej glavni vzrok našega trmastega vztrajanja na zahtevnem področju.

Za bralce Vakuumista bo morda zanimiva tudi informacija, kje vse v mikroelektronskem laboratoriju uporabljamo vakuumske tehnologije.

V mikroelektronskih tehnologijah uporabljamo vakuum na treh operacijskih nivojih: kot "delovni medij" pri upravljanju s silicijevimi rezinami (2 kPa), v napravah za nanašanje in jedkanje v plazmi (nizki vakuum med 2 in 0,2 kPa) ter v visokovakuumskih sistemih, kot so: ionski implanter, elektronski mikroskop, naprave za napajanje in naprševanje itd. (10^{-4} Pa).

V novem laboratoriju za mikroelektroniko na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo pripravljamo vakuum na prvem nivoju s centralno rotacijsko vakuumsko črpalko visoke zmogljivosti, ki celoten razvodni sistem (cca 100m dolžine, $\phi = 50$ mm) izčrpa do delovnega vakuuma v manj kot 60s in mora delovati neprekinjeno. Tako velika črpalna hitrost je potrebna, ker različne naprave, ki ta vakuum uporabljajo, navadno delujejo istočasno.

V napravah za nanašanje in jedkanje navadno zagotavljajo ustrezen delovni tlak večstopenjski mehanski črpalni sistemi, sestavljeni iz Rootsve črpalke s spremenljivo črpalno hitrostjo in navadne rotacijske predčrpalke. Ker so delovni plini pri teh procesih korozivni in/ali puščajo ablativne ostanke, so sistemi opremljeni s filtrirnimi napravami za stalno čiščenje olja in uporabljajo inertna sintetična halogenirana olja (na primer tipa Fomblin). V laboratoriju imamo takih črpalnih sistemov sedem in predstavljajo zahteven vzdrževalni problem.

Visokovakuumski sistemi v laboratoriju so sestavljeni iz standardnih difuzijskih in krio črpalk z dvostopenjskimi rotacijskimi predčrpalkami. Glede na to, da so nekatere naprave moderne konstrukcije, so njihove delovne komore neprestano pod visokim vakuumom, rezine pa vanje vstavljamo skozi predkomore z majhnimi prostorninami; to opazno zmanjšuje potrebne črpalne hitrosti in s tem tudi velikost črpalnih sistemov.

Ne nazadnje lahko omenimo tudi centralni vakuumski sesalni sistem za čiščenje prostorov, pri katerem so v čistih prostorih samo sesalni priključki, agregat pa je postavljen v strojnici.