

KOMPLEMENTARNA UNIPOLARNA TEHNOLOGIJA NA SILICIJU Z NAJMANJŠIMI RAZSEŽNOSTMI V MIKROMETRSKEM PODROČJU

L. Trontelj, J. Trontelj, S. Zorman

UVOD

Sodelavci Laboratorija za mikroelektroniko Fakultete za elektrotehniko, skupaj s strokovnjaki iz firme International Microelectronic Products, Inc. že več kot leto dni intenzivno delujejo na raziskavah in razvoju posameznih korakov v zahtevnem procesu CMOS, ki omogoča realizacijo analognih in digitalnih funkcij skupaj s pomnilniškimi elementi E²PROM. Končni cilj te dejavnosti naj bi bil utečen tehnološki proces z obširno knjižnico standardnih celic in z načrtovalskimi orodji za načrtovanje integriranih vezij za srenjo sistemskih inženirjev. Za tipičen operacijski ojačevalnik je v izbrani tehnologiji ciljni parameter produkta pasovne širine in ojačenja 300 MHz, komparator naj izvrši funkcijo v 6 nsec, sita SC naj delujejo v „uporabniškem“ frekvenčnem področju za radio televizijske naprave.

Digitalno analogni pretvorniki naj konverzijo opravijo s taktom 100 MHz. Ne nazadnje naj tehnologija omogoča realizacijo vezij za digitalno omrežje z dodanimi storitvami (ISDN).

Skratka, tipične aplikacije v sodobni elektroniki zahtevajo višjo hitrost in natančnost obdelave informacij, programabilnosti in izboljšano integracijsko gostoto v skladu z Moorovim pravilom, ki je v mikroelektroniki v veljavi že dve desetletji. Celična zasnova funkcijskih blokov omogoča strukturiran načrtovalski pristop.

DILEME V RAZVOJU TEHNOLOGIJE

Kvalitetna realizacija analognih vezij omogoča proces CMOS, ki zagotavlja med ostalim natančno izdelavo interpolisilicijevih kondenzatorjev, povsem izolirane bipolarne tranzistorje na vhodu vezja za zagotovitev čim nižjega šuma ter precizne tankoplastne upore. Po drugi plati zahteva „hitri“ digitalni proces visoko transkonduktanco integriranih tranzistorjev in kompaktnost. Zaželena je možnost doravnavanja in programiranja. Oba tipa elektronskih funkcij seveda težita za čim boljše imunostjo na degradacijo lastnosti integriranega tranzistorja, ki nastaja zaradi vročih elektronov v kratkem kanalu.

Izbira tipa otoka je odvisna od več med seboj nasprotujočih si kriterijev.

Realizacija z otokom p za tranzistor tipa n omogoča sicer trikratno transkonduktanco kot jo ima enak gradnik s kanalom p zaradi višje gibljivosti nosilcev. Seveda pa ima n kanalni gradnik večji „flickerjev“ šum v primerjavi z gradnikom tipa p. To „hibo“ lahko „popravimo“ z ustreznimi dimenzijami tranzistorja n, kot je to razvidno iz izraza za šumno napetost (Enačba 1):

$$\bar{V}_{eq}^2 = \left(\frac{K}{C_o W L} \quad \frac{1}{f} \right) \Delta f$$

Enačba 1: Šumna napetost

Uporabljeni simboli imajo standardno notifikacijo.

Aplikacije v biomedicinski nizkofrekvenčni elektroniki, kjer je nizek „flickerjev“ šum še posebej pomemben pa zahtevajo vhodno stopnjo na otoku n.

Pri višjih frekvencah je izbira tipa otoka manj pomembna.

Porast pragovne napetosti in s tem povezano zmanjšanje dinamičnega območja za gradnike v otokih, bogatejših s primesmi v primerjavi z onimi na „visokoohmskem“ substratu je lahko ovira za fleksibilnost v analognem načrtovanju.

Posebej prirejen postopek z otokom n dovoljuje izvedbo izoliranega vertikalnega bipolarnega tranzistorja npn. Kolektor tega tranzistorja leži v otoku, njegova baza pa je posebej difundirana. Taka izvedba ima seveda veliko prednosti pred konvencionalno lateralno.

E²PROM pomnilniki so danes zgrajeni s tehnologijo z otokom n. Če torej tehtamo prednosti in slabosti otoka n v primerjavi z otokom p, se odločimo za otok n, saj je z njim možno realizirati vse omenjene ciljne parametre.

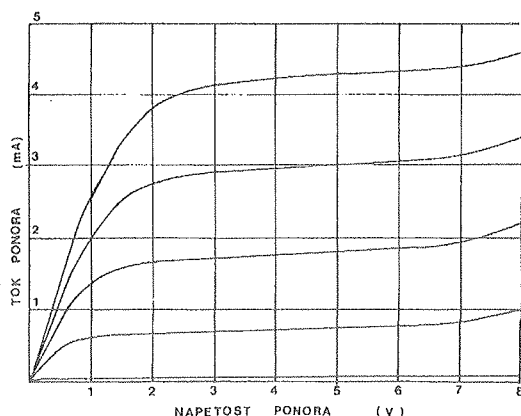
Digitalni del vezja z napajalno napetostjo 5V shaja z debelino oksida pod krmilno elektrodo v velikosti vsega 25 nm. Brez potrebnih ukrepov pa se bo tranzistorju s tako tankim dielektrikom pod krmilno elektrodo že po nekaj urah obratovanja zmanjšala transkonduktanca za približno 10 %. To

povzročijo vplivi vročih elektronov v kanalu. Substratni tok bo namreč pri napetosti 5,5V za tak gradnik presegel 5 % toka ponora. Električno polje v bližini spoja ponora je prevladujoči faktor, ki vpliva na degradacijo. Izraz za maksimalno električno polje $E_{\max}$ je z globino spoja ponora x_j , njegovo napetostjo nasičenja U_{dsat} in debelino izolatorja t_{ox} nad kanalom približno takle (Enačba 2):

$$E_{\max} = \frac{U_d - U_{dsat}}{\sqrt{3 t_{ox} x_j}}$$

Enačba 2: Maksimalno električno polje

To polje lahko zmanjšamo s strukturo LDD (nizkodopiran ponor) skupaj z oksidnimi ločniki. Taka rešitev dramatično poveča življenjsko dobo gradnika in tako zmanjša degradacijo zaradi vročih elektronov. Taka rešitev pa seveda vnese dodatno serijsko upornost ponora in izvora. Rezultirajoča karakteristika I-U kaže zmanjšan tok in transkonduktanco ter zmanjšanje uporabnega področja nasičenja (slika 1).



Slika 1: ID/VD karakteristika, $W/L = 20/1.2$

Posebno skrb zahteva povečana napajalna napetost (10V) za nekatere telekomunikacijske zahteve. V tem primeru je ob uporabi strukture LDD treba tudi povečati debelino tankega oksida na 40 nm. Za mešana analognodigitalna vezja je treba torej področje, kjer tranzistorji delujejo v režimu napetosti $U_{ds} > 8V$, načrtati s posebno topologijo (masko) za relativno povečanje debeline tankega oksida.

Zmanjšanje dimenzij in naštetih dodatki v topologiji gradnika so poseben izziv za vse fotolitografske postopke. Uspešnost preslikave zagotavlja metoda s koračnim poravnalnikom v razmerju 1:1. Jedkalni postopki so omejeni na suhe v plazmi.

Nekaj naših izkušenj je naštetih v naslednjem poglavju.

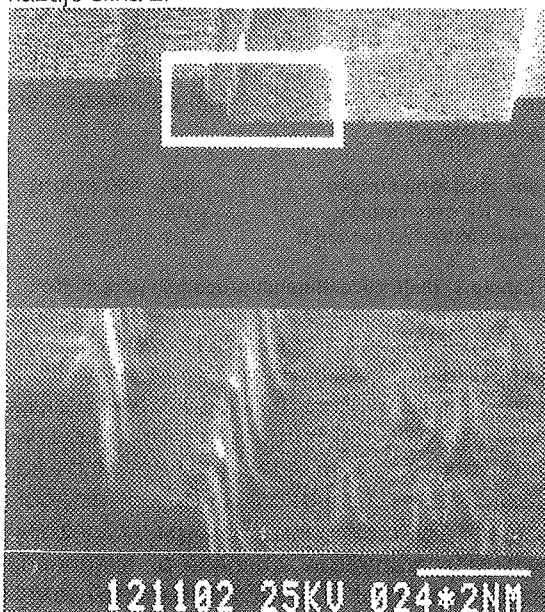
JEDKANJE

Za ilustracijo problematike, s katero se srečujemo pri plazma jedkanju, lahko dobro služi primer jedkanja polisilicija. Najprej navedimo nekatere nastavljive parametre, ki vplivajo na izid jedkanja:

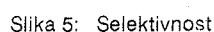
- * Tlak procesne komore
- * Izhodna moč RF generatorja
- * Medelektrodna razdalja
- * Sestava plinske mešanice
- * Masni pretoki posameznih plinov v plinski mešanici

Tudi trajanje jedkanja je lahko odločilno za kvaliteto jedkanja. To kontroliramo po metodi končne točke. Ta omogoča določitev trenutka, ko je jedkanje v glavnem končano ter s tem izključi poškodbo spodnje plasti.

Številni nastavljivi parametri omogočajo optimizacijo jedkalnih programov. Jedkanje lahko izvršimo v več korakih, z vsakim korakom pa lahko optimiramo določeno fazo. Presek rezine med jedkanjem tipično sestavljajo plasti različnih materialov. V primeru jedkanja polisilicija se pod njim nahaja plast silicijevega dioksida, na kateri je potrebno jedkanje ustaviti. Na vrhu polisilicija je fotorezistna maska, katere podobo želimo čimbolj verno prenesti na polisilicij. Za mnogo težav pri jedkanju poskrbi plast tankega samorodnega oksida med polisilicijem in fotorezistom. Le-ta deluje kot mikromaska in jo je treba pred jedkanjem polisti odstraniti. V primeru, da nam to ne uspe, je izgled jedkane površine lahko takšen kot ga prikazuje slika 2.



Slika 2: Posledica mikro maske



Na podlagi rezultatov je mogoče postaviti izkustveni model procesa. Enačba 3 predstavlja eno izmed možnih oblik takega modela za jedkalno hitrost polisilicija. Tabela 2 vsebuje numerične vrednosti koeficientov enačbe 3. Pri vsem tem se moramo zavedati, da model te vrste lahko dobro služi kot orientacija.

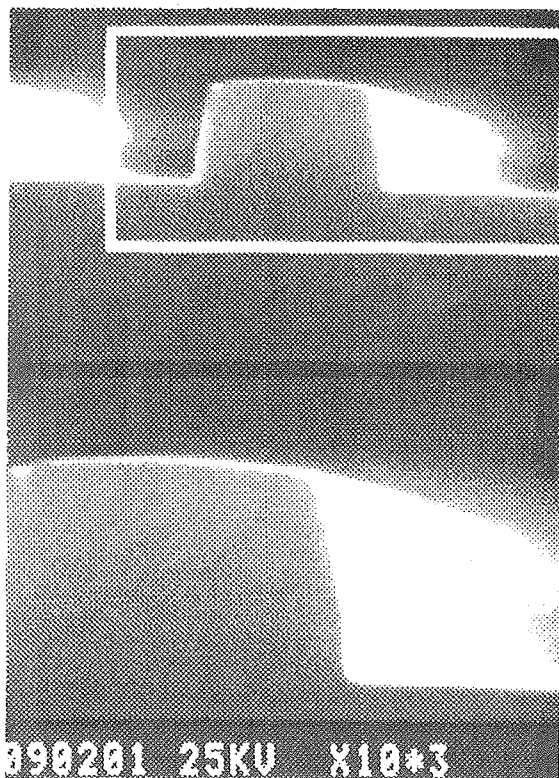
$$V_j = a_0 + a_1 p + a_2 P + a_3 g + a_4 pP + a_5 p g + a_6 P g + a_7 p^2 + a_8 p^2 + a_9 g^2$$

Enačba 3: V_j ... jedkalna hitrost

- a_x ... koeficient modela
- p ... tlak (mtorr)
- P ... moč (W)
- g ... razdalja med elektrodama (cm)

a_x	vrednost
a_0	6500.7
a_1	-3.864
a_2	12.38
a_3	-8122.1
a_4	-0.003
a_5	10.22
a_6	-15.32
a_7	-0.001
a_8	0.008
a_9	3421.6

Tabela 2: Numerične vrednosti koeficientov enačbe 3.



Slika 6: Profili poli linije

Slika 6 prikazuje tipični presek izjedkanih linij. Zgornji del linije, z rahlim naklonom bokov je po jedkanju preostali fotorezist. Spodnji odsekano strm del pa polisilicij. Visoka stopnja anizotropnosti jedkanja je očitna. Spodjedkavanja fotorezista ni opaziti.

Seveda tlak, moč in medelektrodna razdalja niso edini vplivni parametri. Opazili smo, da dodatek SF_5 v plinsko mešanico He in Cl_2 , močno spremeni jedkalno hitrost polisilicija in zmanjša selektivnost za silicijev dioksid. Kot se je izkazalo vpliva SF_5 tudi na zmanjšanje stopnje anizotropnosti jedkanja. Tabela 3 vsebuje rezultate meritev vpliva dodajanja SF_5 v He, Cl_2 plinsko mešanico. SF_5 smo dodajali tako, da smo pri stalnih masnih pretokih He in Cl_2 povečali masni pretok SF_5 od 0 do 20 sccm. Očiten je vpliv SF_5 na zmanjšanje poškodb fotopolimera.

SF_5 tok (sccm)	ERpoli (nm/min)	ERoks (nm/min)	ERres (nm/min)	Sp/o (°)	Sp/r (°)
0	349	17	149	20.5	2.3
5	1112	73	255	15.2	4.4
10	1061	76	273	14.0	3.9
15	1095	78	253	14.6	4.3
20	997	65	196	15.3	5.1

Tabela 3: Jedkalne hitrosti polisilicija, silicijevega dioksida, fotorezista in selektivnosti polisilicija proti oksidu in fotorezistu v odvisnosti od pretoka SF_5 .

Na hitrost jedkanja polisilicija vpliva tudi število vgrajenih primesi v plasti. Znano je, da tip n polisilicija jedkamo znatno hitreje od tipa p ali nedopiranega polisilicija.

Meritve jedkalnih hitrosti smo izvršili na dva načina.

Prva meritev jedkalne hitrosti je bila izvršena tako, da smo dano rezino jedkali 30 s ter pred jedkanjem in po jedkanju pomerili debelino polisilicija. Iz teh podatkov smo nato izračunali jedkalno hitrost:

V tabeli 4 so rezultati meritev jedkalne hitrosti po drugi metodi. To pot smo izmerili debelino polisilicija na vsaki od rezin le pred jedkanjem. Nato smo vse rezine jedkali dokler nismo odstranili vsega polisilicija z nemaskiranih mest. Med jedkanjem smo snemali izhodni signal senzorja za detekcijo končne točke jedkanja. Na podlagi tega podatka in podatka o začetnih debelinah polisilicija, je bilo mogoče izračunati jedkalno hitrost.

N	Pt	r	t	ER	plazma
04	423	16.1	26	976	
12	433	45.5	33	787	He
16	433	32.3	31	838	Cl ₂
22	460	/	62	445	SF ₅
23	460	/	62	445	
05	442	15.8	80	317	
13	433	39.1	90	289	He
15	433	39.2	90	289	Cl ₂
20	463	/	112	248	
21	460	/	112	247	
03	422	16.0	49	/	
10	435	46.5	67	/	o
14	437	47.2	67	/	b
24	460	/	96	/	e
25	458	/	96	/	

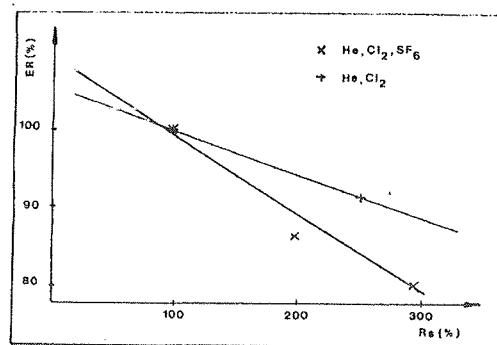
Tabela 4. Meritve jedkalne hitrosti polisilicija na podlagi znane začetne debeline in izmerjenega časa jedkanja.

Oznake v tabeli imajo naslednji pomen:

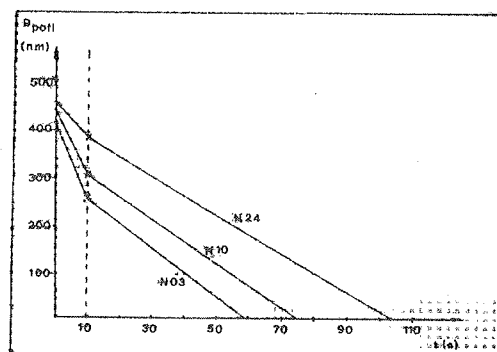
- * N ... Številka rezine
- * Pt ... Debelina polisilicija (nm)
- * r ... Plastna upornost polisilicija (ohm/ ())
- * t ... Čas jedkanja polisilicija (s)
- * ER ... Jedkalna hitrost (nm/min)
- * plazma ... Tip plazme

Rezultati naših meritev kažejo, da je jedkanje v He, Cl₂, SF₅ plazmi veliko bolj občutljivo na spremembe v plastni upornosti polisilicija, kot pa jedkanje v He, Cl₂ plazmi. To vidimo tudi na sliki 7. Rezultati na tej sliki so normirani tako, da so spremembe plastne upornosti podane relativno na maksimalno jedkalno hitrost in minimalno plastno upornost.

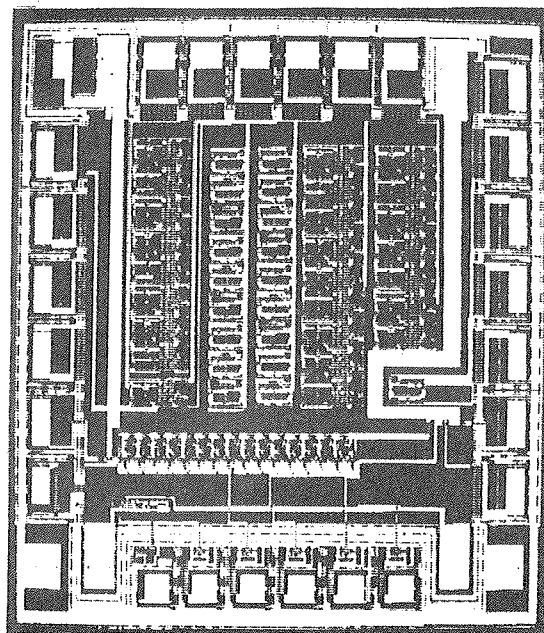
Ob upoštevanju rezultatov, dobljenih za jedkanje v He, Cl₂, oz. He, Cl₂, SF₅ plazmi, je bilo mogoče konstruirati potek jedkanja za kombiniran postopek jedkanja. Eno grupo rezin smo namreč za začetek 10 s jedkali v He, Cl₂, SF₅ plazmi, nato pa jedkanje nadaljevali v He, Cl₂ plazmi. Slika 8 je grafična konstrukcija poteka jedkanja za rezine N 03, N 10 in N 24 in predstavlja pričakovan potek jedkanja omenjenih rezin, ob upoštevanju začetnih debelin polisilicija ter ocenjenih jedkalnih hitrosti na osnovi znanih plastnih upornosti. V tabeli 4 so navedeni dejanski izmerjeni časi jedkanja. Ujemanje rezultatov iz tabele 4 in rezultatov dobljenih z grafično konstrukcijo je dobro. Ob predpostavki, da v naprej poznamo debelino polisilicija in njegovo plastno upornost, lahko zanesljivo ocenimo čas potreben za jedkanje dane rezine.



Slika 7 Sprememba jedkalne hitrosti polisilicija v odvisnosti od plastne upornosti



Slika 8 Grafična konstrukcija poteka jedkanja



Slika 9 Testna struktura

ZAKLJUČEK

Izbrani procesni koraki zagotavljajo štiri nivoje povezav, kar omogoča potrebno fleksibilnost za načrtovanje in realizacijo kombiniranih analogno digitalnih vezij.

Dosežene električne lastnosti posameznih funkcijskih blokov iz testne strukture (slika 9) potrjujejo pravilnost izbora tehnoloških korakov. Predikcija modelov gradnikov na podlagi študija njihove degradacije zaradi vpliva vročih elektronov v kanalu smo verificirali z meritvami. Lahko zaključimo, da bodo tehnološki koraki in razvite funkcionalne celice učinkovito orodje za snovalce elektronskih sistemov bodočnosti.

LITERATURA

1. J. Trontelj, L. Trontelj, S. Ožbolt
T. Pleteršek, V. Kunc, M. Khambaty,
C. M. Liu, M. Robinson:
1.2 micron, high speed, high density
CMOS analog library
Custom Integrated Circuits Conference
1988. Rochester, ZDA

Prof. dr. L. Trontelj, dipl. ing.
Prof. dr. J. Trontelj, dipl. ing.
Sašo Zorman, dipl. ing.
Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška 25, 61000 Ljubljana