

# POGOJI ZA MODERNO MIKROELEKTRONSKO PROIZVODNJO

I. Šorli, R. Ročak, M. Maček, Z. Bele

**KLJUČNE BESEDE:** polprevodniki, silicij, polprevodniške tehnologije, MOS tehnologije, CMOS, integrirana vezja, nečistoče, vsebnost nečistoč, selectipur, MOS selectipur, čisti prostori, deionizirana voda, TOC, mikroelektronska proizvodnja, proizvodni pogoji, razvoj tehnologije

**IZVLEČEK:** Za uspešno moderno proizvodnjo mikroelektronskih komponent je potrebno zagotavljati kakovost okolja, infrastrukture, opreme, tehnoloških procesov in materialov. Neizprosni konkurenčni boj zahteva doseganje svetovnih cen in kakovosti, kar za mikroelektronsko proizvodnjo pomeni borbo za čim višje izplene, čim nižje stroške na enoto površine silicija ter striktno realizacijo koncepta celovitega zagotavljanja kakovosti.

## CONDITIONS FOR MODERN MICROELECTRONIC PRODUCTION

**KEY WORDS:** semiconductors, silicon, semiconductor technologies, MOS technologies, CMOS, integrated circuits, impurities, impurity content, Selectipur, MOS Selectipur, clean rooms, deionized water, TOC, microelectronic production, production conditions, technology development

**ABSTRACT:** A successful modern production of microelectronic components needs controlled environment, good infrastructure, state of the art equipment, materials and process technologies. Strong market competition requires world level prices and quality which for microelectronic producers means fight for as high yields as possible, as low cost per square millimeter of silicon as possible, and strict realization of total quality concept.

### 1.0 UVOD

Odkar je leta 1961 ameriška firma Fairchild izdelala prvo integrirano vezje, se je v polprevodniški industriji začelo obdobje strahovito hitrega razvoja, kakršnega zgodovina ne pomni. Mnogi danes polprevodniško industrijo že poimenujejo z mikroelektroniko, ki je sprva bil sinonim za proizvodnjo integriranih vezij, torej elektroniko na nivoju silicijevega čipa. Čeprav mikroelektronika daje materialno osnovo vsej moderni elektroniki, saj le-ta izdeluje končne produkte, ki nastopajo na tržišču, je sama vrednost prodaje mikroelektronskih komponent v svetu primerljiva obsegu prodaje izdelkov v posameznih panogah elektronske industrije<sup>1/</sup>.

Razvoj mikroelektronike karakterizirajo<sup>2/</sup>:

- stalno povečevanje števila elementov na vezju (število elementov se podvoji na 2 do 2.5 leta)
- zmanjševanje minimalnih geometrij elementov (10-15% na 2 leti)
- povečevanje površine čipa (0.36 mm<sup>2</sup> na 2 leti)
- povečevanje kompleksnosti tehnologije in struktur (2 nova kritična nivoja na 2 leti)
- povečevanje zanesljivosti mikroelektronskih vezij
- povečevanje velikosti silicijeve rezine, na kateri se izdeluje integrirana vezja
- povečevanje kompleksnosti in avtomatizacije montaže čipov v ohišja

V tabeli 1 je prikazana rast stopnje kompleksnosti integriranih vezij, izdelanih v MOS tehnologijah, kakor tudi njihove zanesljivosti.

Takšen razvoj je mikroelektronika lahko doživela le z ogromnim vlaganjem v razvoj ne samo novih tehnologij in struktur, temveč tudi v proizvodno okolje in samo proizvodnjo.

V tem članku želimo pokazati, kaj so gonilna sila in pogoji za danes uspešno mikroelektronsko proizvodnjo.

### 2.0 VISOKI IZPLENI, GLAVNA GONILNA SILA MODERNE MIKROELEKTRONSKE PROIZVODNJE

Neizprosni konkurenčni boj na področju mikroelektronike zahteva doseganje svetovnih cen. Mikroelektronska proizvodnja je zato pogojena z vse višjimi izpleni dobrih čipov na rezini. To je posebej pomembno ob vse bolj zapleteni tehnologiji (zmanjšane dimenzije elementov, povečanje števila vertikalnih plasti na čipu itn., glej UVOD) z ene strani, z druge strani pa vedno boljšim poznavanjem tehnologije, vse manjšimi razlikami v tehnoloških postopkih in iskanjem "second source" proizvodnje tudi na področju vezij po naročilu med različnimi proizvajalci.

Izplen vezij na rezini je močno odvisen od vrste vezja, oz. njegove funkcije, občutljivosti vezja na posamezne električne parametre, prilagojenosti vezja na dano teh-

TABELA 1.: Rast stopnje kompleksnosti integriranih vezij izdelanih v MOS tehnologijah

PARAMETRI TEHNOLOGIJE	1974	1977	1979	1982	1984	1990
število elementov na vezju (x 1000), od/do	6	20	50	150	400	6000
	20	90	200	500	1000	10000
površina vezja, mm <sup>2</sup>	18	25	33	49	52	79
minimalna dimenzija, μm	5.5	4.0	3.5	2.5	2.0	.7-1
dolžina kanala, μm	3.5	2.7	2.5	1.7	1.5	.5-8
debelina oksida	120	80	50	30	20	10
krmilne elektrode, nm	140	100	70	50	30	15
št. kritičnih nivojev	4	5	6	7	8	10
zakasnitev/invertor, ns	3	1.5	1	.75	.5	.15
tipičen premer Si rezin v proizvodnji, mm	50			100		150
<b>MERILLO ZANESLJIVOSTI</b>		<b>1972</b>	<b>1974</b>	<b>1977</b>	<b>1979</b>	<b>1982</b>
zgodnje odpovedi, % odpovedi po vtekanju, 48 ur/125st.C		0.5	0.2	0.1	0.05	0.05
pogostnost odpovedi, FIT		1000	500	200	100	70

nologijo, števila aktivnih elementov na površino (dimenzija vezja), predvsem pa od števila in velikosti defektov.

Vsi modeli za izračun izplena čipov na rezini kažejo, da izplen hitro pada z večanjem površine vezja in večanjem gostote defektov.

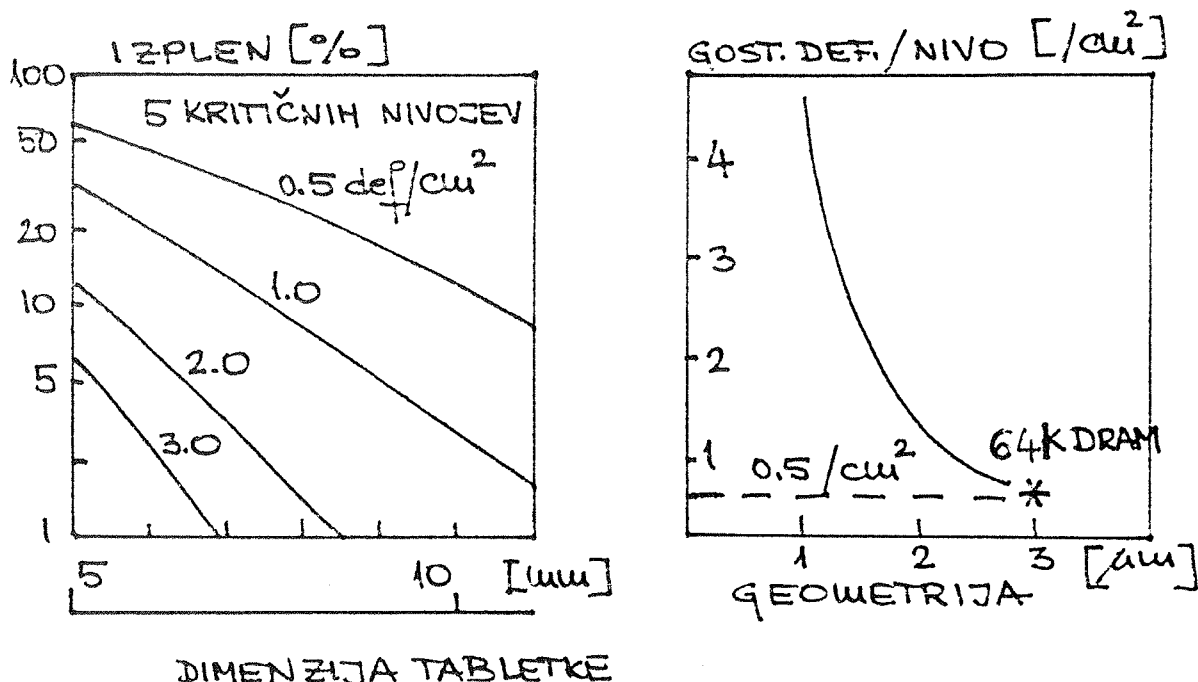
Na sliki 1 je prikazana odvisnost izplena Y, izračunana z Bose-Einsteinovim modelom, ki določa izplen v odvisnosti od števila kritičnih nivojev n, gostote defektov na nivo, D in površine vezja A, kot :

$$Y = 1 / (1 + D \cdot A)^n \tag{1}$$

V praksi dostikrat uporabljamo t.i. eksponencialni model za izračun predvidenega izplena na rezini. Le-ta podaja odvisnost končnega izplena, Y, od sestavljene (končne, efektivne) gostote defektov, D, in velikosti vezja, A. Velja:

$$Y = \exp(-\sqrt{D \cdot A}) \tag{2}$$

Tipična sestavljena gostota defektov v mikroelektronski industriji pri izdelavi CMOS integriranih vezij po naročilu, srednjih serij, z minimalno razežnostjo 5 μm in ob uporabi kontaktnih poravnalnikov, je leta 1982 bila okoli 6/cm<sup>2</sup>, tipična velikost tabletko pa 12 - 15 mm<sup>2</sup>. Izplen čipov na rezini se je gibal malo čez 40%.



Slika 1: Vpliv gostote defektov na izplen

Če bi prehod na izdelavo CMOS vezij po naročilu z minimalno razsežnostjo 3 μm bil narejen brez kakršne-koli kvalitetne spremembe v proizvodnji čipov, bi se sestavljena gostota defektov povečala, saj je vezje z manjšimi geometrijami bolj občutljivo na defekte in delce z manjšo dimenzijo, ki pa pri tehnologijah z minimalno razsežnostjo 5 μm niso še vplivali na izplen.

Privzemimo, da za gostoto defektov velja relacija :

$$D = D_0 \cdot (X_0 / X_s)^2 \quad (3)$$

kjer je  $D_0$  osnovna gostota defektov pri dani minimalni razsežnosti,  $X_0$  dana minimalna razsežnost na čipu in  $X_s$  nova zmanjšana minimalna razsežnost.

Če  $D_0 = 6/\text{cm}^2$ ,  $X_0 = 5 \mu\text{m}$  in  $X_s = 3 \mu\text{m}$ , sledi, da  $D_s = 16.6/\text{cm}^2$ . V tem primeru bi izplen dobrih čipov površine 12 - 15 mm<sup>2</sup> na rezini padel na približno 20%.

Poleg tega je kompleksnost vezij "3 μm" generacije večja od prejšnje, kar potegne za sabo tudi večjo površino čipa. Tipična velikost je okoli 25 - 50 mm<sup>2</sup>. Zlahka se da izračunati, da bi proizvodnja čipov "3 μm generacije" v tovarni za proizvodnjo čipov "5 μm generacije", leta 1982 bila katastrofalna z izplnom 13% ali manj.

Zato je prvi cilj ob prehodu iz starejše na novejšo generacijo tehnologije zmanjšati osnovno gostoto defektov pri vezjih z manjšo minimalno razsežnostjo in večjo površino z namenom obdržati osnovne izplene (40%). Taka usposobljenost proizvodnje čipov na rezini pa hkrati pomeni izdelavo "5 μm generacije" čipov z izpleni na rezini nad 70 %!

Takšen pristop je neodvisen od eventualno same tehnične omejitve uporabe nekaterih tehnoloških postopkov starejše generacije v modernejši proizvodnji.

V letu 1990 je standarden izplen čipov na rezini pri vodilnem evropskem proizvajalcu mikroelektronike bil 80 - 85 % za kompleksna in 90 - 95 % za enostavnejša vezja. Podatek velja ne glede na minimalne dimenzije elementov na čipu!

Mikroelektronski proizvajalec, ki želi biti tehnično in ekonomsko uspešen, mora nadzorovati in obvladovati čim več možnih izvorov kontaminacije in defektov. Le-ti so : proizvodno okolje, materiali, oprema in ljudje. Pri tem predpostavljamo, da so vezja in sam tehnološki proces že optimizirani.

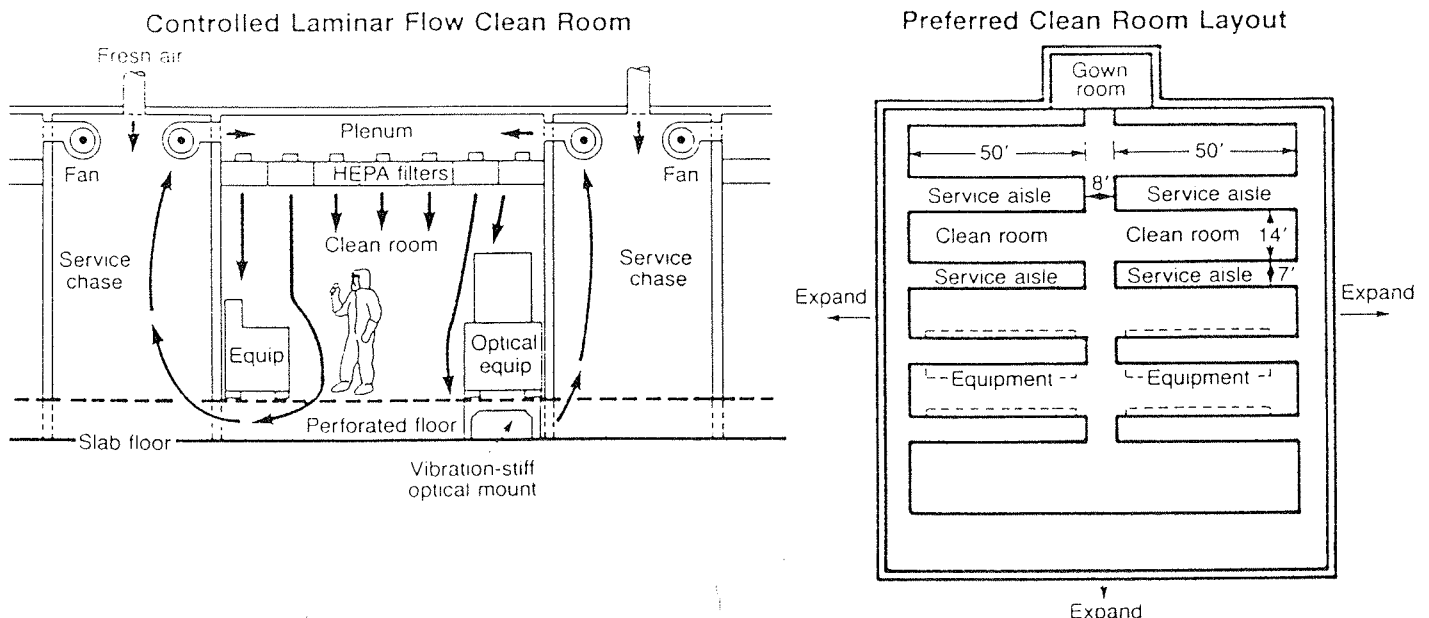
### 3.0 OBVLADOVANJE IZVOROV DEFEKTOV

#### 3.1 Čisti prostori<sup>/3/</sup>

Temeljni pogoj za moderno proizvodnjo mikroelektronike so čisti prostori. Prijemi načrtovanja čistega prostora so odvisni od vrste proizvoda, tehnološkega procesa, načina transporta rezin, stopnje splošne avtomatizacije proizvodnje, razporeditve procesne opreme ipd.

Za proizvodnjo ULSI čipov (vezja z ultra visoko stopnjo integracije) so tehnične zahteve za izvedbo čistih prostorov naslednje, slika 2:

- gostota delcev mora biti statistično 1 delec / 28 dm<sup>3</sup> (1 delec / ft<sup>3</sup>) ali manj za delce velikosti 0.2 μm ali več,
- strop naj bo 100% pokrit s HEPA filtri z učinkovitostjo 99.99% za delce z velikostjo 0.12 μm,
- vpihovanje zraka naj bo s hitrostjo 0.46 m/s (90 ft/min) ± 10 %,



Slika 2: Tipična konfiguracija čistih prostorov

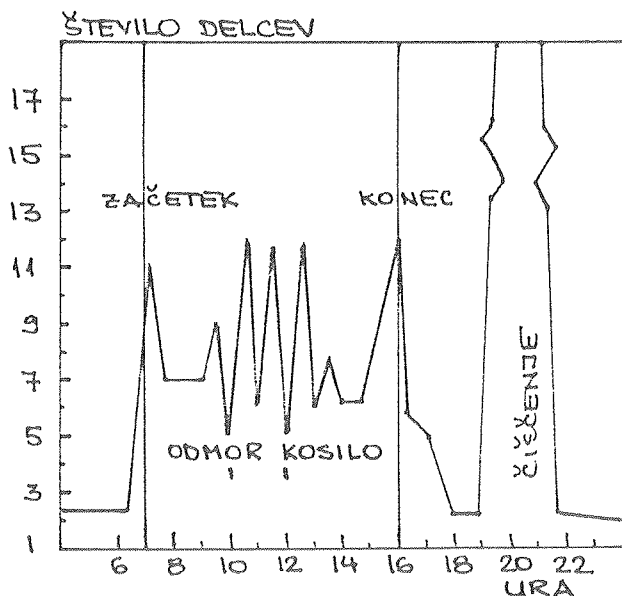
- čas potreben za povrnitev klase 1 po motnji (izvor delcev) mora biti krajši od 10s v prehodih in krajši od 6s na delovnih mestih,
- pod mora biti dvignjen (okoli 0.5 m) in vsaj s 25% površine perforirane, oz. odvod zraka mora biti omogočen od strani; v obeh primerih hitrost izstopnega zraka ne sme preseči 3.6 m/s (700 ft/min),
- temperatura :  $20 \pm 0.55$  st.C,
- relativna vlažnost :  $40 \pm 5$  %

Vsak modul s HEPA filtrom mora imeti možnost neodvisne nastavitve vpihovanja z namenom doseči pravilno aerodinamiko v prostoru. Laminarni pretok zraka nastavimo lokalno ob vsakem kosu opreme, s čimer optimiziramo odstranitev delcev v zraku in omogočimo učinkovito zračno zaveso.

Čisti prostor je razdeljen na servisni del in ultračisti del, ki sta med seboj ločena. V servisnem prostoru potekajo vsa vzdrževalna dela ter priprava in zamenjava materiala za proizvodnjo (kemikalije, plini, pomožni material). V ultračistem prostoru se nahajajo samo tisti deli naprav, ki jih poslužujejo operaterji. Prehod iz enega v drugi prostor je prepovedan.

Včasih zanemarjeno, toda zelo pomembno je ob čistih prostorih zgraditi prostorne pomožne prostore: več prehodnih garderob z naraščajočimi zahtevami po čistosti (vhodna garderoba - klasa 1000, prostor za preoblačenje - klasa 10, vhod v ultračiste prostore skozi zračne tuše ipd.), prostore za umivanje, omarice za osebne stvari, zrcala in podobno.

Izredno pomembno je ustrezno **izobraziti** vse ljudi, ki se gibljejo v čistih prostorih (operaterji, tehniki, inženirji, vzdrževalci, pomožno osebje ..) o namembnosti le-teh, pravilnem obnašanju v čistih prostorih, kakor tudi pravilni uporabi vse pomožne opreme, ki je zahtevana v čistih prostorih.



Slika 3: Stopnja kontaminacije v čistem prostoru med delavnikom

Čisti prostor je potrebno obravnavati kot dinamično kategorijo, saj se med delom pogoji v njem spreminjajo, slika 3.

Največji izvor delcev v čistem prostoru je človek, zato je glavna skrb procedur predpisanih v čistem prostoru namenjena prav zaščiti produkta od človeka.

Čistoča procesov in procesne opreme postaja vse bolj pomemben dejavnik, kajti njihov relativni delež pri ustvarjanju defektov raste glede na čiste prostore, ki se nenehno izboljšujejo. Prekladanja in prenašanja rezin vse manj opravljajo operaterji (razen tam, kjer je to nujno potrebno), ljudi nadomeščajo roboti in posebni transportni mehanizmi.

TABELA 2.: Vpliv ljudi na povečanje števila delcev v čistem prostoru

AKTIVNOST	faktor povečanja nad osnovnim nivojem, delci $0.2 < R < 2 \mu m$
<b>GIBANJE LJUDI</b>	
zbiranje ljudi na enem mestu	1.5 do 3
normalna hoja	1.2 do 2
mirno sedenje	1 do 1.2
roke v del. mestu z laminarnim pretokom	1.01
delovno mesto z laminarnim pretokom	1
<b>OBLAČILA ZA ČISTE PROSTORE</b>	
stopicanje brez obuval za čiste prostore	10 do 50
jemanje robčka iz žepa	3 do 10
drgnjenje rokava oblačila	1.5 do 3
stopicanje z obuvali na nogah	1.5 do 3
<b>OSEBJE</b>	
kihanje	5 do 20
sapa, 20 min po kajenju	2 do 5
drgnjenje kože na obrazu	1
sapa	1

### 3.2 Deionizirana voda

Ultračista deionizirana voda (DI voda) je eden izmed bistvenih dejavnikov potrebnih za uspešno mikroelektronsko proizvodnjo. Vsa mokra čiščenja in jedkanja rezin ter čiščenja mask se končajo z izpiranjem v vodi, oz. krtačenjem z vodno raztopino. Tipični tehnološki niz izdelave CMOS rezin zahteva nad 20 izpiranj v deionizirani vodi. Nekateri so celo izračunali, da za dokončanje enega čipa rabimo do 600 l deionizirane vode, pri čemer zadnji liter vode mora biti prav tako kakovosten kot prvi.

Kako pomembna je kakovost deionizirane vode pri končnem uporabniku lepo ilustrira primer dveh Hewlett Packard tovarn, v katerih je tekel enak tehnološki proces

za izdelavo SOS integriranih vezij (SOS - Silicon On Sapphire). V tisti, v kateri je kakovost DI vode bila neoporečna, je končni izplen bil 4 do 5 krat višji kot pri sosedih.

V zadnjih letih je mikroelektronska industrija vložila veliko truda in sredstev, da se je dokopala do določenih spoznanj o vplivu DI vode na kakovost tehnoloških procesov in, da je razvila ustrezne metode analize in kontrole njenih lastnosti.

Poleg novih materialov za distribucijska ocevja (namesto PVC sta vse bolj v uporabi PVDF - polyvinylidene in PFA - perfluoroalkoxy), vpeljevali ultrafiltracije kot zadnje stopnje pred uporabo (filtracija z 0.02 do 0.1  $\mu\text{m}$  filtri !!), se zahteva vse ostrejši nadzor in zmanjševanje vsebnosti delcev, bakterij, kremenca in TOC (vsota vseh sestavin, ki vsebujejo ogljik razen  $\text{CO}_2$  in karbonatov ter upoštevajoč bakterije in njihove produkte), tabela 3.<sup>15/</sup>

TABELA 3.: Specifikacije za ultračisto DI vodo

PARAMETER	enota	dosegljivo	sprejemljivo	alarm
ostanek	ppm	0.1	<0.3	>0.3
TOC	ppb	<20	<50	>100
delci, 1 $\mu\text{m}$	#/100 ml	<50	<100	>250
bakterije	#/100 ml	0	<6	>10
raztopljen $\text{SiO}_2$	ppb	<3	<5	>10
upornost	Mohmcm	18.3	17.9	17.5
KATIONI				
	ppb			
Al		0.2	2.0	5.0
$\text{NH}_4$		<0.3	0.3	0.5
Cr		0.02	0.1	0.5
Cu		0.02	0.1	0.5
Fe		0.02	0.1	0.2
Mn		0.05	0.5	1.0
K		0.1	0.3	1.0
Na		0.05	0.2	1.0
Zn		0.02	0.1	0.5
ANIONI				
	ppb			
Br		<0.1	0.1	0.3
Cl		0.05	0.2	0.8
$\text{NO}_2$		0.05	0.1	0.3
$\text{NO}_3$		<0.1	0.1	0.5
$\text{PO}_4$		<0.2	0.2	0.3
$\text{SO}_4$		0.05	0.3	1.0

Kot primer navajamo vpliv vsebnosti TOC v DI vodi na kakovost posameznih tehnoloških procesov v proizvodnji rezin.

PODROČJE	posledice visoke vsebnosti TOC v DI vodi
OKSIDACIJA	– neenakomerna rast oksidov
DIFUZIJA	– neenakomerno dopiranje – tvorba ogljikovih nukleacijskih centrov v siliciju – hidrofilna površina silicija – veliki premiki CV krivulje po napetostno temperaturni obremenitvi – luknjice v plasteh – nizke prebojne trdnosti dielektrikov – veliki tokovi puščanja pn spojev in oksidov
NANAŠANJE TANKIH FILMOV	– neenakomerno nanašanje filmov – slaba adhezija filmov – megličavost površine
FOTOLITOGRAFIJA	– slaba adhezija fotorezista – defekti na maskah – luknjice v fotorezistu

### 3.3 Čiste procesne kemikalije

Proizvodnja integriranih vezij na rezini je serija fotolitografskih, visoko in srednje temperaturnih in predvsem kemičnih postopkov in procesov. Zaradi slednjega je v nekaj zadnjih letih kakovosti kemikalij posvečena velika pozornost zlasti na strani dobavitelja. Včasih je veljala miselnost: ko je enkrat nova generacija kemikalij ustrezne čistosti na voljo, je zamenjava stare generacije z izboljšano enostavna. Izkušnje kažejo, da temu ni tako, saj proizvajalec lahko dobavi kemikalije optimalne kakovosti, katero uporabnik zelo hitro z nepravilnim ravnanjem pokvari.

Danes se večina uporabnikov zaveda, da morajo **vsa-kodnevno** nadzirati in vzdrževati kakovost kemikalij **na mestu uporabe**, v proizvodni liniji. Pri tem je potrebno predvsem razločevati kontrolo delcev od kontrole raztopljenih nečistoč v kemikaliji.

Splošni napotki in priporočila za uporabo kemikalij v moderni proizvodnji VLSI in ULSI integriranih vezij na rezini so naslednji :

- izboljššan nadzor nad pakiranjem in shranjevanjem kemikalij pri proizvajalcu in uporabniku (predvsem uporaba inertnih materialov za kontejnerje),
- direktna razdelitev kemikalij na mestu uporabe, če je možno in ekonomsko upravičeno,
- cena naj ne bo ovira za vpeljavo ultračistih kemikalij, ker se s povečanim izplenom porabljeni denar povrne,
- stalna filtracija in recirkulacija na mestu uporabe je nujna ne glede na vrsto in temperaturo kemikalije,

- potrebna sta dogovor in soglasje med proizvajalcem in uporabnikom glede tehnične /kakovostne specifikacije kemikalij in standardov za ustrezne merilne metode, s katerimi se bodo potrjevale dogovorjene številke,
- uporabniki bodo morali razviti metode za definicijo soodvisnosti (korelacijo) med kontaminacijo površine rezine in kakovostjo kemikalije, saj bodo le na ta način lahko za svoje proizvodne potrebe naročali kemikalije ustrezne kakovosti; uporabniki bi morali poznati direkten vpliv kemikalij, uporabljenih za različne procese v liniji na izplen; če je to neizvedljivo, potem je zelo težko opravičiti določene številke na razumen način.
- proizvajalci mokrih jedkalnih postaj morajo pri načrtovanju in gradnji jedkalnih sistemov upoštevati zgoraj našete zahteve; moderna jedkalna postaja naj vsebuje :
  - avtomatsko/robotizirano prekladanje rezin,
  - recirkulacijo in filtracijo kemikalij na mestu uporabe, temperatura do 150 st.C, filtri 0.1 µm ali boljši,
  - meritev vsebnost delcev na mestu uporabe, delci 0.5 µm ali manjši,
  - uporabljeni material za konstrukcijo naj zagotavlja petletno življensko dobo brez zamenjav,
  - postaja naj ima možnost recikliranja DI vode,
  - postaja naj ima centrifugo za čisto izpiranje in sušenje rezin.

Od tako zasnovane jedkalne postaje uporabniki poleg izboljšave izplena in kakovosti čipov pričakujejo še :

- zmanjšano porabo kemikalij,
- zmanjšan strošek kemikalij na vezje,
- zmanjšano obremenitev nevtralizacije, zmanjšano količino odpadnih kemikalij,
- zmanjšano količino kemikalij na mestu uporabe,
- izboljšan nivo varnosti.

Konkreten primer zgodovinskega kakovostnega razvoja kemikalij, ko iz leta v leto ožimo specifikacije za vsebnost suspendiranih delcev, raztopljenih težkih kovin in alkalnih nečistoč, je Merck s svojo serijo MOS Selectipur (za LSI integrirana vezja), VLSI Selectipur (za VLSI vezja) in MEGA Selectipur (za ULSI vezja) kemikalij za polprevodniško industrijo.

Na sliki 4. in iz tabele 4. je razviden faktor izboljšave za posamezne serije kemikalij glede vsebnosti delcev in nečistoč.

Glavno težišče dela proizvajalcev kemikalij v zadnjih letih je bilo:

- na razvoju merilnih postopkov za ugotavljanje vsebnosti delcev in nečistoč v kemikalijah,
- na izboljšavi klase čistosti in zmanjševanju nanosa delcev na površino silicija med potapljanjem rezin,
- na zmanjševanju vsebnosti kritičnih kovin (Cu, Fe, Ni, Cr) in alkalnih elementov (Na, K) v kemikalijah na

ppb nivo in zmanjševanju precipitacije kovin na površino silicija med potapljanjem,

- na iskanju ustreznih materialov za kontejnerje, ki bodo zmanjšali sekundarno kontaminacijo in zagotavljali kvaliteto kemikalij do mesta uporabe,
- na podaljševanju življenjske dobe kemikalij na mestu uporabe, zlasti pa zmanjševanju vsebnosti kovin med postopkom recirkulacije in filtracije.

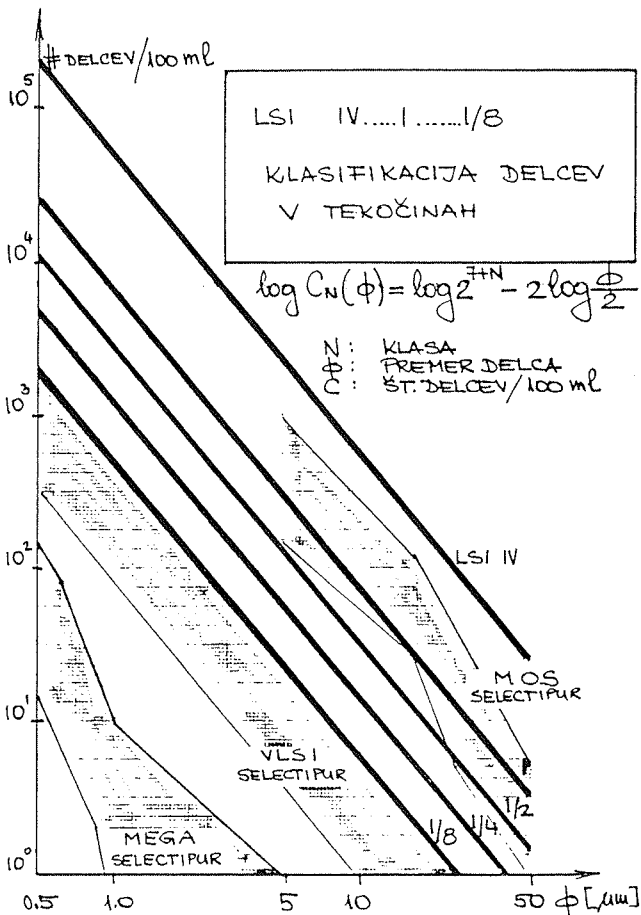
**TABELA 4. : Primerjava čistosti med MOS Selectipur, VLSI Selectipur in MEGA Selectipur fluorovodno kislino.**

H F 50 %, 1l = 1.15 kg, M E R C K				
PARAMETER	MOS	VLSI	MEGA	RAZ-MERJE
klasa	0	1	1/4	
koncentracija, %	49.5 ±1	50 ±0.5	50 ±0.2	
barva, max	10	10	10	
Cl, max ppm	5	5	0.2	5/5/2
SiF <sub>6</sub> , max ppm	50	50	50	
NO <sub>3</sub> , max ppm	5	10	10	1/2/2
PO <sub>4</sub> , max ppm	0.5	0.5	0.1	5/5/1
SO <sub>4</sub> , max ppm	1	1	0.5	2/2/1
SO <sub>3</sub> , max ppm	2	2	0.5	4/4/1
Al, max ppm	0.05	0.02	0.02	5/2/2
As & Sb, max ppm	0.03	0.02	0.01	3/2/1
Ba, max ppm	0.05	0.05	0.01	5/5/1
Be, max ppm	0.02	0.01	0.01	2/1/1
Bi, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Pb, max ppm	0.05	0.02	0.01	5/2/1
B, max ppm	0.05	0.02	0.01	5/2/1
Cd, max ppm	0.05	0.01	0.01	5/1/1
Ca, max ppm	1	0.5	0.1	10/5/1
Cr, max ppm	0.01	0.01	0.01	1/1/1
Co, max ppm	0.02	0.01	0.01	2/1/1
Fe, max ppm	0.5	0.1	0.1	5/1/1
Ga, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/1/1
Ge, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Au, max ppm	0.1	0.02	0.02	5/1/1
In, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/1/1
K, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Cu, max ppm	0.02	0.01	0.01	2/1/1
Li, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/2/1
Mg, max ppm	0.2	0.1	0.05	4/2/1
Mn, max ppm	0.05	0.02	0.02	5/2/2
Mo, max ppm	0.05	0.02	0.02	5/2/2

HF 50 %, 1l = 1.15 kg, M E R C K				
PARAMETER	MOS	VLSI	MEGA	RAZ-MERJE
Na, max ppm	0.2	0.1	0.05	4/2/1
Ni, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/2/1
Pt, max ppm	0.2	0.05	0.05	4/1/1
Ag, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/2/1
Sr, max ppm	0.1	0.02	0.02	5/1/1
Tl, max ppm	0.05	0.05	0.05	
Ti, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
V, max ppm	0.05	0.01	0.01	5/1/1
Zn, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Sn, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Zr, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
ostanek po zažigu, ppm	5	5	2	

### 3.4 Čisti procesni plini in plinske napeljave,<sup>16/, 17/</sup>

Podobni trendi kot pri uporabi ultračistih kemikalij v proizvodnji vezij na silicijevi rezini so se uveljavili tudi pri osveščanju uporabnika o pomembnosti uporabe ultra-



Slika 4: Klasifikacija vsebnosti delcev v tekočinah in primerjava kakovosti različnih kemikalij.

čistih procesnih plinov in plinskih napeljav. Zavedati se moramo, da ne glede na čistost plina, ki ga pošlje proizvajalec v cilindru ali shranjevalnem kontejnerju ali pa ga sami pridelamo v hiši, ohraniti njegovo čistost na mestu uporabe, pomeni preprečiti degradacijo kakovosti med izvorom plina in mestom uporabe.

Glavni namen plinske napeljave ni samo pripeljati plin do uporabnika, ampak tudi **zagotoviti** nenehno kakovost po prehodu skozi filtre in čistilce ter zaščititi plin pred vnosom **delcev, kemičnih nečistoč in vlage**.

Delce vnašajo in spuščajo v plinsko napeljavo čistilni sistemi, filtri, ventili in zvari. Kemične nečistoče vnašamo v materiale med izdelavo, ostanejo v ceveh po čiščenju in se odplinjajo v ocevju. Iz plinskega sistema najteže odstranimo vlago, ki poleg delcev povzroča največ preglavic v procesih.

Plinski sistemi sedanosti so izdelani tako, da skoraj povsem onemogočajo puščanje, odplinjevanje in generacijo delcev. To dosegamo z uporabo ustreznih materialov in s posebnimi prijemi pri sestavljanju plinskih sistemov.

Najbolj razširjen material za ULSI plinske napeljave je SS316L (Low - z nizko vsebnostjo ogljika), katerega notranje stene morajo biti elektrolitsko polirane. Le-to v primerjavi z mehanskim in kemičnim poliranjem daje bolj gladke površine, ki težko zajemajo delce in kemične nečistoče. Kljub temu je potrebna izjemna pazljivost pri čiščenju, shranjevanju, prenosu in montaži ocevja, s čimer preprečimo nadaljno kontaminacijo, ki lahko pozneje med uporabo sistema z odplinjevanjem preide v pline in procesne komore.

Elektrolitsko poliranje je potrebno izvesti po zvijanju, kajti zvijanje povzroča mikrorazpoke. Spojke uporabimo tam, kjer je to le nujno potrebno pa še takrat uporabimo posebne spojke za ULSI napeljavo, ki so tako izdelane, da minimizirajo generacijo delcev, odplinjevanje in mrtve kote. Najboljši način sestavljanja cevi je varjenje. Zvar mora z notranje strani biti gladek, brez razpok, luknjic ali drugih nepravilnosti, ki utegnejo zajemati delce in kontaminacijo. Varjenje izvajamo ob vpihovanju inertnega plina (Ar) skozi ocevje, s čimer izoliramo notranjost. Zvar mora biti odporen na korozijo, ker korozijski produkti spuščajo delce (pri nepravilno izvedenem zvaru prihaja do tvorbe kromovega karbida, ki korodira). Opisane zahteve dosežemo z varjenjem direktnih zvarov ("butting welding") in uporabo avtomatskih orbitalnih varilnih naprav.

Plinski kabineti so tudi del plinske napeljave, saj nadzirajo dobavo procesnih plinov, njihov pritisk in pretoke ter zapletene prepihalne cikle ob menjavi jeklenk. Ker je njihovo delovanje računalniško krmiljeno, zasledujejo še številne alarmne situacije, napovedujejo zamenjave cilindrov ter zagotavljajo zasilne izklope v primeru nevarnosti.

Večina kovinskih nečistoč, ki so prisotne v plinu, prihaja od delcev iz plinskega sistema (kontejner - cilindri - ocevje - spojke - zvari - filtri). Temu ustrezno je potrebno usmeriti napore za njihovo odstranjevanje.

Vsebnost kemičnih, oz. nečistoč v plinski fazi pa je prav tako pomembna, saj v določenih primerih omejuje uporabo plina za specifične namene. Za silan velja, da nivo zahtevane čistosti za bodoče aplikacije presega meje detekcije merilnih instrumentov. Če iz silana želimo nanesti EPI plast s specifično upornostjo v območju 10000 ohmcm, to pomeni, da koncentracija dopantov n tipa ne sme preseči meje 0.02 ppb!! Podobno kot za silan velja tudi za diklorsilan.

**TABELA 5. : Pregled nivoja plinskih primesi v različno čistih silanih za uporabo v polprevodniški industriji.**

KAKOVOST SILANA	POL- PREV.	NITRID	UHP	RAZ- MERJE
UPORNOST, ohmcm	300	1000	2500	3/10/25
NEČISTOČE, max ppm,				
O <sub>2</sub>	10	10	0.5	20/20/1
N <sub>2</sub>	40	40	1	40/40/1
Ar	500	40	0.5	1000/80/1
H <sub>2</sub> O	2	2	1	2/2/1
Kloridi	10	10	3	10/10/3
Ogljikovi hidrati				
THC (kot CH <sub>4</sub> )	40	10	1	40/10/1
CO/CO <sub>2</sub>	10	5	1	10/5/1

Čistoča hišnih in inertnih plinov je prav tako v nenehnem porastu. Velika večina proizvajalcev mikroelektronskih komponent bodisi sama proizvaja hišne pline (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>), bodisi uporablja shranjevalne kontejnerje za hišne in inertne pline (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, Ar). Da dosežemo visok nivo čistosti na mestu uporabe, uporabljamo dodatne sisteme za prečiščevanje in filtracijo tik pred vstopom plinov v procesne komore. Na ta način uspemo doseči nivo čistosti 99.99999%!

**TABELA 6.: Pregled vsebnosti primesi v hišnih plinih**

NEČISTOČE, ppm max	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	THC/CO /CO <sub>2</sub>
KAKOVOST PLINA					
LSI N <sub>2</sub>		5		5	
VLSI N <sub>2</sub>		0.1	0.1	0.1	0.1
UHP N <sub>2</sub>		0.01	0.01	0.01	0.01
LSI O <sub>2</sub>			5	5	
VLSI O <sub>2</sub>	0.5			0.1	0.3
UHP O <sub>2</sub>	0.05		0.01	0.01	0.03
LSI H <sub>2</sub>		5		5	
VLSI H <sub>2</sub>	0.1	0.1		0.5	0.1
UHP H <sub>2</sub>	0.01	0.01		0.05	0.01

### 3.5 Maske in njihov vpliv na kvaliteto integriranih vezij

V mikroelektronski industriji uporabljamo maske za prenos geometrijske informacije na rezine. Le v primeru direktnega zapisa maske niso potrebne, saj računalniško krmiljen elektronski snop slika geometrijske informacije direktno na fotorezist na rezini.

Od dveh možnih načinov preslikave informacije z maske na rezino, kontaktne in projekcijske, je slednja danes najbolj v rabi. Pri tovrstnem načinu osvetljevanja, maska in rezina nista v kontaktu in maska je zategadelj lahko dodatno zaščitena z opno. Obstojnost take maske je dolga, gostota defektov pa je praktično neodvisna od števila ekspozicij. V tabeli 7. je podan pregled materialov, ki so danes v rabi za izdelavo etalonskih in delovnih mask.

**TABELA 7.: Pregled materialov za izdelavo mask**

SESTAVA (%)	White soda lime	Soda lime	LE borosi- licate	Syn- thetic quartz
	1	2	3	4
SiO <sub>2</sub>	73	70	60	100
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			5	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1		15	
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15	8	1	
K <sub>2</sub> O	1	9	1	
RO	10	13	18	
Temperaturni koef. raztezka(ppm/st.C)	9.4	9.3	3.7	0.5

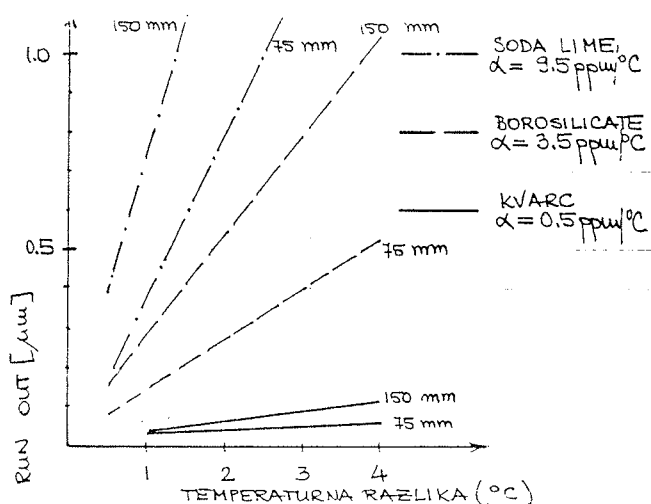
Za materiala 1 in 2 velja, da iz njiju izdelane plošče uporabljamo za preslikavo geometrij  $\geq 2 \mu\text{m}$ , plošče izdelane iz materiala 3 pa za preslikavo geometrij  $\geq 1.5 \mu\text{m}$ .

Plošče iz sintetičnega kvarca nedvomno prekašajo svoje predhodnice zaradi naslednjih prednosti<sup>4/</sup>:

a) večja kontrola napake poravnave (RUN OUT) zaradi nizkega temperaturnega koeficienta raztezka. RUN OUT napaka poravnave je merilo za naleganje maske na sliko na rezini, ki je bila preslikana s predhodno masko. Le-ta v končni fazi določa najmanjšo možno geometrijo, ki jo je mogoče preslikati s **celim setom mask** (10 do 15 nivojev). Glavni vzrok tozadevne napake poravnave je razlika v temperaturi med masko in rezino tik pred osvetlitvijo, kar povzroči različne diletacije in porušitev nastavitve nivojev, slika 5.

b) plošče so za razliko od ostalih prepustne v celotnem področju valovnih dolžin zanimivih za moderne fotolitografske postopke, od 200 nm naprej, slika 6.





Slika 5: Napaka poravnave v odvisnosti od dimenzije rezine, vrste stekla in temperaturne razlike med rezino in masko.

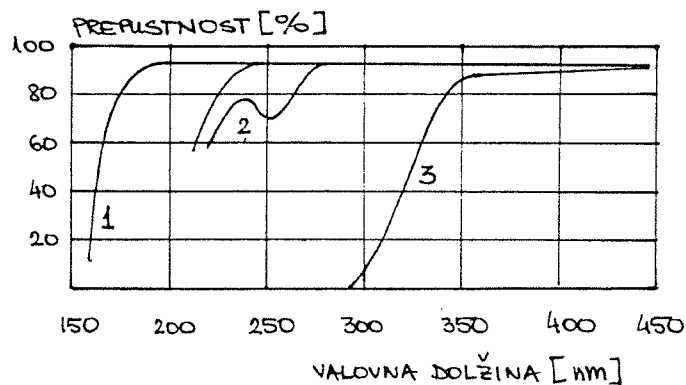
c) material vsebuje manjše število mehurčkov in vključkov, obdelava materiala je lažja, saj omogoča izdelavo skoraj idealne polirane površine brez defektov, ki bi se lahko preslikali na rezino.

d) material je kemično bolj stabilen, kar povečuje adhezijo kromove plasti in kar posredno omogoča večje število čistilnih ciklov preden pride do tvorbe luknjic in degradacije robov kromovih linij.

Ne le kakovost plošč, tudi kakovost kromove plasti (reflektivnost, gostota defektov, adhezija, uniformnost debeline) ter nanjo nanešenega fotorezista (uniformnost debeline, gostota defektov) vplivajo na končno kakovost maske za uporabnika. Danes lahko celo govorimo o izdelavi mask po naročilu, saj so proizvajalci plošč za fotomaske pripravljene optimizirati svoj proces za izdelavo ftoplošč po želji kupca (reflektivnost, tip fotorezista, kemija fotorezista itn...).

TABELA 8.: Vzpostavljeni razvoj rezin in vezij

LETO	STOPNJA INTEGR.	GEOMETRIJA NAČIN OSVETLJEV.	PREMER REZINE	DEBELINA REZINE	RAVNOST REZINE
/		μm	mm	μm	μm
1968	SSI	8 - 10 KONTAKTNA	50	250	15 - 20
1972	MSI	5 - 7 KONT./PROJ.	75	325	10 - 15
1977	LSI	3 - 5 KONT./PROJ.	75 100	325 525	6 - 10
1980	VLSI	2 - 3 KONT./PROJ.	100 125	525 625	4 - 6
1985	VLSI	1.5 - 2 KORAČNO	150	625 675	1.5 - 2 na 20 mm
1989	ULSI	1 - 1.5 KORAČNO	200	725 775	1 - 1.5 na 20 mm



- 1: SINTETIČNI KVARC
- 2: NARAVNI KVARC
- 3: KONVENCIONALNA STEKLA

Slika 6: Prepustnost različnih vrst stekla

### 3.6 Silicijeve rezine

Silicij je bil in bo v bodočnosti polprevodnik, katerega bo uporabljala ogromna večina proizvajalcev kot substrat za izdelavo čipov. V tabeli 8. je podan časovni pregled razvoja silicijevih rezin vzporedno z razvojem mikroelektronskih vezij. Jasno je viden trend k vse večjim rezinam in zaostretem določenih tehničnih specifikacij. Med te sodijo :

a) izboljšanje ravnosti rezin, saj uporaba koračnih poravnalnikov zahteva lokalno ravnost 1 - 1.5 μm na območju 10- 20 mm; le-ta mora biti vzdrževana na vsej uporabni površini rezine, pri čemer se zavedamo, da nanjo vplivajo vsi visokotemperaturni koraki med izdelavo čipov na rezini.

b) izboljšanje uniformnosti debeline rezine, oz. planparalelnosti, s čimer se izognemo dolgim časom nastavitve fokusa pri koračnih poravnalnikih.

c) razvoj novih metod za vhodno kontrolo rezin, o katerih se morata dogovoriti proizvajalec in uporabnik; gre za "uporabniške" metode, ki zajemajo meritve življenjskih časov, napetosti ravnih pasov in prebojne trdnosti MOS struktur; s pomočjo dobljenih rezultatov uporabnik lahko napove obnašanje rezin v svoji liniji, končne električne parametre vezij in celo pričakovani izplen čipov na rezini.

Za 200 mm rezine, ki bodo sicer zelo počasi prevzemale večinski delež uporabljanih rezin zlasti za velikoserijsko proizvodnjo standardnih in spominskih elementov v devetdesetih letih, je zelo pomembno pravilno nastaviti razmerje premer proti debelini, ki bo zagotavljalo dimenzijsko stabilnost rezin, kakor tudi vzdržljivost rezin za procesiranje na povišanih temperaturah in po nanašanju tankih plasti (temperaturni šoki, mehanske napetosti, zvijanje).

Za prehod na ULSI geometrije je življenskega pomena čistost čelne in hrbtne strani rezine. Delci na hrbtu pokvarijo ravnost rezine, če je rezina pritegnjena na vakuumsko mizico.

Znano je, da uporabniki nikakor ne morejo očistiti čelne strani rezine tako učinkovito, kot to znajo proizvajalci rezin. Tako je vse bolj v modi, da proizvajalci dobavijo že oksidirane rezine, na katerih oksid služi kot pasivacija (površina rezine je hidrofilna, neprodušna za kontaminacijo in elektrostatično ne privlači delcev).

Pri rasti kristala in izdelavi rezin je velika pozornost posvečena kontroli defektov, neželenih dopantov in kontaminacije :

- koncentracijo kovinskih nečistoč na površini rezine kontroliramo na nivoju ppb, v notranjosti rezine pa na manj kot 0.01 ppb,
- gostota kristalnih defektov v aktivnem delu silicijeve rezine ne sme preseči 5 def/cm<sup>2</sup>,
- minimizirane morajo biti mikrovariacije upornosti, ki vplivajo npr. na uniformnost pragovnih napetosti MOS tranzistorjev,
- prečna in navpična začetna koncentracija kisika morata biti kontrolirani v čim bolj ozkih mejah,
- pomembno je izvajati kontrolo koncentracije ogljika in s tem posredno tvorbo mikrodefektov v zvezi s kisikom.

Moderna specifikacija surove silicijeve rezine je podana po področjih, slika 7. :

a) zgornja epitaksijalna plast, potrebna zlasti za moderna CMOS vezja, mora biti čim bolj uniformna glede koncentracije dopantov in debeline, brez mehanskih napetosti in s čim manj kristalnih defektov

b) osiromašeno (denudirano) področje pod površino, kjer je koncentracija intersticijalnega kisika nekajkrat manjša kot v substratu; na ta način proizvajalci v svoje rezine vgradijo sposobnost getranja s pomočjo precipitacije kisika SAMO V SUBSTRATU in ne na površini, kjer se nahajajo aktivni elementi

c) substrat, ki mora biti učinkoviti geter za vse kovinske nečistoče, ki povzročajo degradacijo aktivnih elementov

d) hrbtna stran rezine, kamor proizvajalec vgradi določene vrste zunanjšega getranja z enakim namenom kot pri c); danes sta v rabi "soft damage", mehko mehansko poškodovana hrbtna stran in nanos polisilicija na hrbtno stran; slednja metoda je čistejša in deluje kot geter od prvega do zadnjega visokotemperaturnega koraka pri izdelavi čipov na rezini.

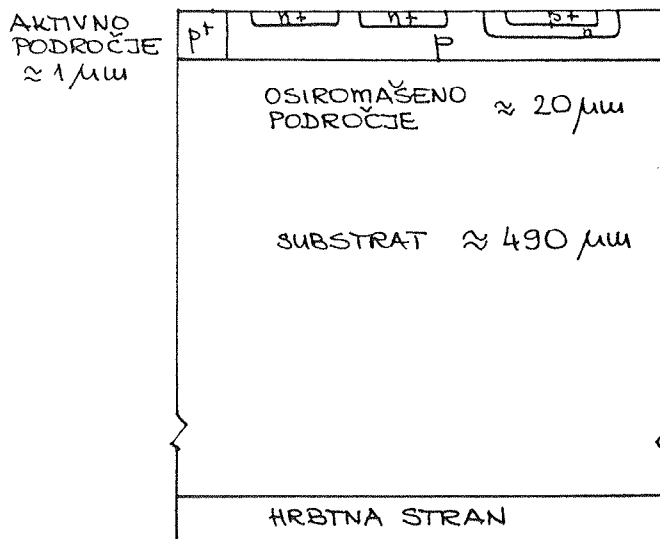
### 3.7 Oprema in vzdrževanje

Vzporedno z mikroelektronsko proizvodnjo se je razvijala tudi proizvodnja opreme za izdelavo čipov. Velika denarna vlaganja v razvoj in stalna posodobitev mikroelektronske opreme je bilo in je še vedno gonilo te specifične elektronsko-strojne industrije<sup>11</sup>.

Oprema se je razvijala predvsem v smeri zmanjševanja generacije defektov in avtomatizacije povezane v koncept CAM (Computer Aided Manufacturing). Za sodobno opremo ni dovolj, da zmore tehnično izvedbo določenega tehnološkega koraka, temveč mora pri tem generirati čim manj defektov na silicijevi rezini in biti sposobna povezave v tovarniški informacijski sistem.

Kompleksnost takih naprav kažejo cene posameznih strojev. Številka 1.000.000,00 US\$ ni več neobičajna. Ob takih stroških opremljanja proizvodnje, je povsem jasno, da morata biti izkoriščenost in pripravljenost za obratovanje, "up time", take opreme čim bližje stotim odstotkom.

S tako opremo več "ne delamo", ampak nadzorujemo njeno delovanje in skrbimo, da je čim bolj izkoriščena. Skupine za vzdrževanje opreme v modernem proizvodnem modulu (brez inženirske tehnološke podpore) predstavljajo tudi do 30 % tehničnega kadra. Ni daleč od resnice šala, da si je potrebno ob nabavi najmodernejšega japonskega stroja "kupiti" tudi še enega "Japončka", ki bo za stroj skrbel.



Slika 7: Razdelitev silicijeve rezine na področja

### 3.8 Ljudje

Iz predhodnih točk lahko naslutimo, da v mikroelektronski proizvodnji dela pretežno kvalificirani operaterski kader. V tovrstni proizvodnji vsekakor ni mogoče zaposliti delavcev, ki jih "poberemo s ceste". Avtorji tega prispevka so v preteklih desetih letih dela v jugoslovanski mikroelektronski proizvodnji zaposlovali kot operaterje predvsem kemijske laborante in tehnike, da bi nadoknadjili handicap zaradi zastarele opreme. Prav tako je zakon o združenem delu takrat omogočal skoraj enako "ceno" kvalificiranega laboranta in priučenega delavca. Danes pa je v moderni mikroelektronski tovarni prav zaradi kompleksnosti opreme in tehnoloških postopkov vodstvo prisiljeno izvajati enako zaposlovalno politiko.

Poleg osnovne strokovne kvalifikacije je potrebno redno izvajati specifični trening operaterjev. To pomeni, da izmenovodja ni samo kontrolor izvajanja opravil, ampak tudi pomočnik in učitelj.

Povsod je v veljavi koncept celovitega zagotavljanja kakovosti. Kakovost je parameter, ki se poleg rokov dobave (JUST IN TIME) postavlja kot temeljni cilj proizvodnje mikroelektronskih vezij.

### 4.0 VARNOSTNA PROBLEMATIKA

Znano je, da mikroelektronska proizvodnja uporablja veliko količino raznovrstnih kemikalij in plinov, ki predstavljajo potencialno nevarnost za ljudi, ki delajo v mikroelektroniki in za okolje. Imamo opravka z jedkimi tekočinami, topili, strupenimi plini, samovžignimi plini ter deli opreme, kjer temperatura doseže tudi do 1200 st.C.

Zaradi navedenega nekateri štejejo mikroelektroniko za ekološko bombo in grožnjo okolju in ljudem.

Dejstvo je, da ob gradnji mikroelektronike **moramo varnost vgraditi**, stalna skrb za varno in ekološko čisto delo pa je potrebna med obratovanjem.

Med sistemske varnostne rešitve štejemo ustrezno načrtovanje in izvedbo:

- centralnega skladišča za pline in kemikalije,
- priročnega skladišča za pline in kemikalije,
- kemično odpornega odsesovanja in nevtralizacije za odplake,
- požarne varnosti z ustreznimi javljalniki in gasilnimi napravami,
- centralnega sistema za detekcijo in nadzor strupenih plinov in ostalih parametrov okolja,
- tehnološke instalacije za dovod plinov in kemikalij do opreme ter instalacijo proizvodne opreme same

Med tekoče varnostne obratovalne ukrepe pa štejemo predvsem :

- zasledovanje varnostnih parametrov in ustrezno ukrepanje ob nevarnih situacijah,
- skrb za obratovanje vseh naprav v skladu z varnostnimi predpisi,

- nenehno izobraževanje ljudi, skrb za uporabo zaščitne varnostne opreme, skrb za varno delo v proizvodnji

Ob predpostavki, da je vsem naštetim pogojem za- doščeno, lahko govorimo o mikroelektroniki kot **čisti** industriji.

### 5.0 ZAKLJUČEK

Vse večja kompleksnost mikroelektronske proizvodnje in potrebno zagotavljanje kakovosti okolja, infrastrukture, opreme, tehnoloških procesov in materialov, kar smo poskusili opisati v tem članku, pogojujejo moderno proizvodnjo in razvoj. Razumljiv je trend k vse večji količinski proizvodnji z ene strani in vse večji "industrializaciji razvoja". Razvoj se je v svetu povsem preselil v tovarne, v "mikroelektronske laboratorije", oz. "razvojni laboratoriji" so majhne tovarne. Za primer naj navedemo, da SGS Thomsonov "razvojni laboratorij" v Milanu izdelava letno 36.000 rezin premera 100 mm, najnovejši "proizvodni laboratorij" pa 110.000 rezin premera 150 mm.

V Jugoslaviji smo opisani koncept in pogoje želeli realizirati v Iskri Mikroelektroniki. Projekt je predvideval investicijo cca 40 mio US\$ v prostore in opremo, s tehnologijo, ki je bazirala na lastnih izkušnjah. V predhodnih desetih letih nabrano znanje bi omogočilo povezavo z obstoječimi evropskimi proizvajalci mikroelektronike in elektronike, firma pa bi prerasla v na zahodni trg orientirano mešano delniško družbo..., vendar to je že druga zgodba.

### 6.0 LITERATURA

- /1/ R.Ročak : Stanje mikroelektronske proizvodnje v svetu in Jugoslaviji, MIKROELEKTRONIKA IN DRUŽBA, MIDEM 1989
- /2/ W.L.Morgan : From VLSI to ULSI, SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, May 1984
- /3/ W.L.Morgan, J.R.Burnett : Concept for World Class VLSI Manufacturing Plants, SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, June 1984
- /4/ P.Burgraff : Photomasks and Reticle Blanks, SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, December 1987
- /5/ R.Iscoff : The Challenge for Ultrapure Water, SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, February 1986
- /6/ J.M.Davidson, F.K.Kies : Sub-Micron Particle Analysis in VLSI Gase, Presented to Osaka Sanso Semiconductor Conference, June 28, 1985
- /7/ AIR PRODUCTS : Specialty Gases Catalogue

Iztok Šorli, dipl.ing  
Dr.Rudi Ročak, dipl.ing.  
mag.Marijan Maček, dipl.ing.  
Zlatko Bele, dipl.ing.  
MIKROIKS d.o.o.  
Titova 35  
61000 Ljubljana

Prispelo: 20.11.90

Sprejeto: 28.02.91