

OSNOVE ELEKTRONSKE NANOLITOGRAFIJE

Marko Uplaznik, Dragan Mihailović

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Elektronska nanolitografija omogoča izdelavo vezij velikosti do 50 nm. Njihova oblika je lahko poljubna, zato je postopek primeren tako za oblikovanje vezij v eksperimentalne namene kot tudi za visokotehnološko industrijo. Potencialna uporaba je mogoča na področju informacijske tehnologije, v medicinski diagnostiki in senzoriki.

Basics of Electron Nanolithography

ABSTRACT

The electron nanolithography enables us to produce circuits of the size down to 50 nm. Their shape is totally arbitrary, that is why this procedure can be used for designing different devices for the experimental use and also in the high technology. The main potential use is possible in the information technology, in medicine diagnostics and in the development of new sensors.

1 UVOD

Litografija¹ je precej star postopek tiskanja na papir in v osnovi obsega pisanje na posebej pripravljeno tiskarsko ploščo. Nanjo nanese tiskarsko črnilo, ki se je prime le na popisanih mestih, ne pa tudi drugje. Tako so dobili na papirju odtisnjen tiskarski vzorec, ploščo pa so lahko večkrat uporabili. V splošnem je ideja litografskih postopkov v tem, da na neki način ločimo med popisanimi in nepopisanimi deli. Podlaga, pisalo in ločitveni postopek so posebnosti posamezne vrste litografije in so prilagojeni končenemu cilju oziroma izdelku.

Modernejša izvedba tega postopka je zelo razširjena *fotolitografija*, ki jo uporabljajo pri izdelavi mikrovezij. Pisalo je v tem primeru svetloba, podlaga je rezina izbranega materiala, prevlečena s *fotorezistom* (shema a na sliki 1), tj. posebno snovjo, ki spremeni kemijsko strukturo ob osvetlitvi. S kemijskim postopkom *razvijanja* (shema b na sliki 1) odstranijo osvetljeni del fotorezista in tam izpostavijo rezino. Ločitveni postopek je napršitev kovine, saj nekaj snovi pade direktno na rezino, torej tam, kjer so prej pisali, preostali del pa na neosvetljeni del fotorezista. Ko z zadnjim kemijskim postopkom *dvigovanja* odstranijo ves fotorezist z rezine, ostane na njej le kovina, ki je v neposrednem stiku z njo, saj preostali del odstranijo skupaj s fotorezistom (shema c na sliki 1).

Valovna dolžina svetlobe, s katero osvetlimo fotorezist, neposredno vpliva na ločljivost in s tem na velikost najmanjših struktur. Z njenim krajšanjem se pojavijo težave, saj preprosto nimamo na voljo

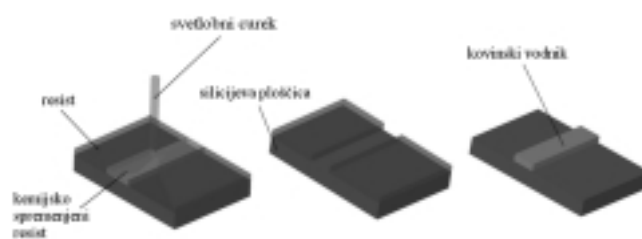
uspešnih optičnih elementov. Tako se zdi, da je odločitev izbire curka elektronov namesto svetlobe zelo primerna. Ne le da je njihova valovna dolžina neprimerno krajša od valovne dolžine svetlobe, tudi optika je dosegljiva in ne pomeni nepremostljivih težav. Najmanjše velikosti struktur so nekaj nanometrov, zato dodamo predpono *nano-*, postopek pa imenujemo *elektronska nanolitografija*. Seveda je treba predvsem kemijski postopek prilagoditi elektronom, zato namesto fotorezista uporabljamo elektronski resist *e-resist*. Drugi koraki procesa so enaki kot pri fotolitografiji in so natančneje opisani v naslednjih poglavjih:

1. pisanje
2. razvijanje
3. nanašanje kovine
4. dvigovanje

2 E-RESIST

E-resisti⁽³⁾ so polimeri, pri katerih se ob osvetljevanju z elektroni trgajo vezi med monomeri. Nastali radikali se ponovno povezujejo, vendar neurejeno in naključno, zato se po re-polimerizaciji povežejo v mreže ali pa ostanejo ločeni. Ob primerni izbiri monomerov je moč dobiti snovi, ki so različno topne v nekaterih topilih glede na njihovo polimerno, monomerno ali mrežno strukturo. Glede na povezovanje radikalov monomerov po osvetlitvi razlikujemo dva tipa resistov: *pozitivne* in *negativne*. Pri prvih raztopimo osvetljeni del in na koncu dobimo strukture na njih, pri drugih pa naprotno: osvetljeni deli ostanejo, kovino pa nanese povsod drugod, saj odstranimo neosvetljene dele. Izbira ni le stvar okusa, pač pa pripomore predvsem k časovni zahtevnosti in navsezadnje tudi h kakovosti izdelave.

Ker je bila naša naloga izdelati majhne vodnike, smo se odločili za pozitivni e-resist, saj je bila površina celotnega vezja precej majhna v primerjavi z



Slika 1: Shema korakov fotolitografije: pisanje (a), razvijanje (b) in kovinski vodnik po dvigovanju (c)

¹ litografija; grškega izvora: *lythos* – kamen, *graphein* – pisati

velikostjo čipa. Poleg tega so bile bistvo vezja ozke strukture, ki jih najuspešneje izdelamo s pozitivnimi resisti. Ker s tovrstno litografijo nismo imeli izkušenj, smo izbrali splošno uporaben pozitiven e-resist, ki je bil dober tako za prvo spoznavanje s postopki kot tudi za dopolnitev znanja. Na predlog proizvajalca (All-resist GmbH, Nemčija) smo izbrali organski pozitiven e-resist *metilmetakrilat* (slika 2) oz. polimerno pasto *PoliMetilMetAkrilat* ali krajše PMMA (slika 3).

Spojina ima vse lastnosti, ki smo jih potrebovali pri delu:

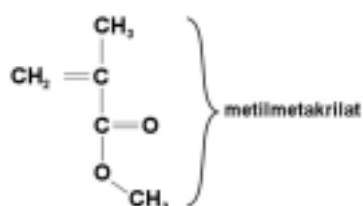
- ob osvetlitvi z elektroni polimeri razpadejo na radikale monomera (slika 3)
- radikali monomerov se močno zamrežijo
- v *metil-izobutil-ketonu* je mrežna struktura zelo dobro topna, polimeri pa precej slabše
- oba strukturna tipa sta dobro topna v *1-metil-2-pirolidonu*

Za izdelavo vezij je bilo treba osvojiti večšine dela z e-resistom. To je bilo še posebej težavno, saj smo obenem preizkušali pisalnik in kemijske postopke, uspeh pa je bil odvisen od obeh. Posebej poudarimo debelino e-resista, saj je bil ta parameter osnova vsem drugim, zato smo se morali še posebej potruditi.

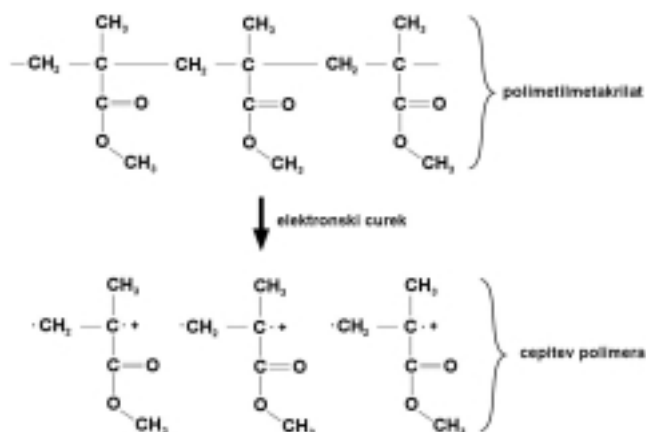
3 NANAŠANJE E-RESISTA

Na prvi pogled enostavna naloga se je izkazala za precej zahtevno, saj je proizvajalec priporočal nanašanje raztopine e-resista v *klorbenzenu* z vrtečim se nanašalnikom tankih nanosov. Pri prvih poskusih smo se zato zatekli h kolegom, ki so imeli vse potrebne aparature in dovolj izkušenj, kasneje pa smo spoznali, da smo morali biti sposobni nanašanja e-resista tudi sami, saj je bilo sodelovanje časovno preveč potratno. Tako smo izdelali svoj nanašalnik tankih nanosov, ki je bil dejansko predelava ločevalne centrifuge.

Naprava je bila v osnovi navpično postavljen motor z mizico na vrhu njegove gredi (shema na sliki 4). Na ploščico, ki smo jo pritrdili na mizico, smo kapnili nekaj kapljic raztopine resista in vključili motor. Centrifugalna sila je nato razvlekla kapljevino po celotni površini in presežek potisnila čez rob. Na ploščici je tako ostal tanek in precej enakomeren sloj e-resista. Da je bil postopek uspešen in ponovljiv, je naprava morala ustrezati nekaterim zahtevam:



Slika 2: Kemijska struktura monomera PMMA

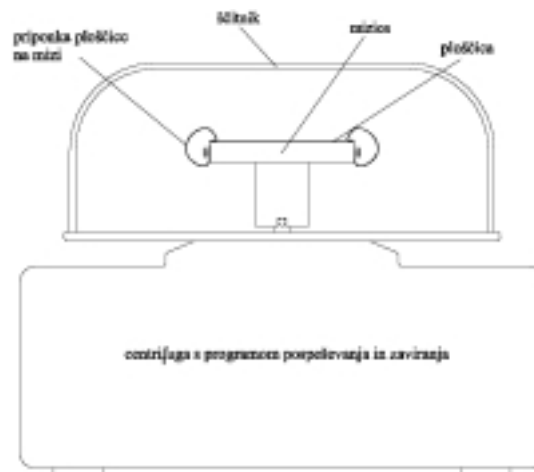


Slika 3: Depolimerizacija polimera PMMA

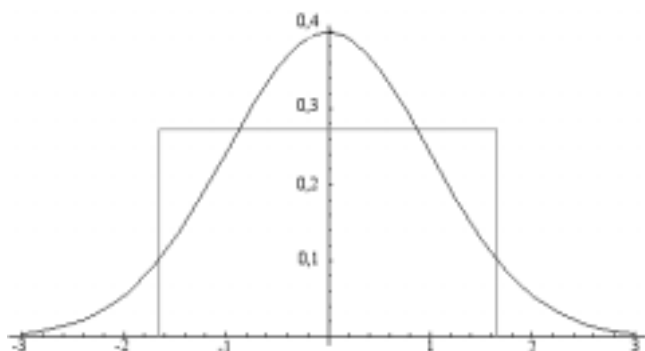
- dovolj zmogljiv motor (2000 r/min – 6000 r/min)
- motor je moral imeti primeren program počasnega pospeševanja in zaviranja
- ozračje okoli mizice je moralo biti izolirano od okolice, da smo preprečili nastajanje turbulentnih tokov in obenem ulovili odvečni e-resist s ploščice.

Primerno zmogljivost in program vrtenja je imela centrifuga že vgrajeno. Tretjo zahtevo smo izpolnili z dodatnim plastičnim pokrovom, ki je poleg naštetega zagotavljal še varnostno zaščito.

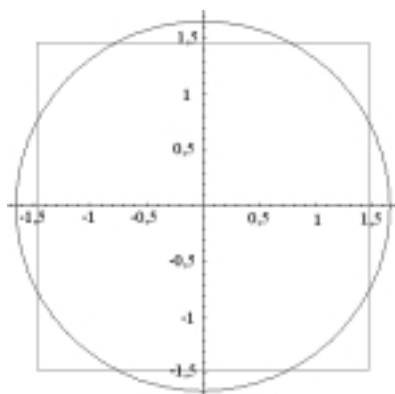
Debeline nanosov pri različnih frekvencah vrtenja in za različne koncentracije e-resista nam je sporočil že proizvajalec. Ti podatki so nam bili zgolj za oceno, saj smo morali vse postopke prilagoditi našim nanosom, ki pa so bili kljub vsemu blizu predvidenim. Izbrali smo frekvenco 4000 min^{-1} za nanašanje 5-odstotne raztopine e-resista, kar je pomenilo debelino okoli 500 nm. Po nanašanju je bilo treba ploščico sušiti nekaj minut pri $60 \text{ }^\circ\text{C}$, da je izhlapelo topilo, in nato še eno uro pri temperaturi $150 \text{ }^\circ\text{C} - 160 \text{ }^\circ\text{C}$, da se je e-resist strdil. Tako pripravljena ploščica je bila primerna za elektronsko pisanje.



Slika 4: Shema nanašalnika tankih nanosov



Slika 5: Gaussovo porazdelitev nadomestimo s konstantno

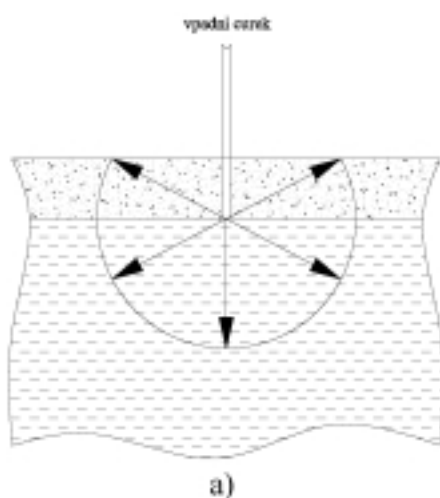


Slika 6: Krožno obliko nadomestimo s kvadratom

4 ELEKTRONSKO PISANJE

Osnovni parameter pri elektronskem pisanju je *ekspozicijska doza* D ¹, ki pove stopnjo kemijske spremembe e-resista oz. kar število elektronov na osvetljeno površino:

$$D = \frac{It}{S} \quad (1)$$



Slika 7: Shema povratnega sipanja (a) in posnetek razširjenih majhnih kontaktov (b); s črnimi črtami so označene meje risalnih površin oziroma vezja, ki smo ga želeli narisati

pri čemer je I vpadni tok, t čas osvetlitve in S osvetljena ploščina. Pri natančnejši obravnavi je treba izraz prilagoditi načinu osvetlitve: lahko osvetimo celotno površino zaslona in dozo uravnavamo s časom osvetlitve (podobno kot pri fotografiji) ali pa s premikanjem manjšega curka "prehodimo" celotno površino. V našem primeru gre seveda za drugi način, pri katerem s hitrostjo curka uravnavamo stopnjo osvetlitve. Da bi izraz veljal tudi tokrat, je treba privzeti enakomerno porazdelitev gostote elektronov z enako energijo namesto Gaussove porazdelitve obeh količin. Velikost vpadne površine omejimo s področjem, kamor pade 90 % vseh elektronov v curku, njeno krožno obliko pa nadomestimo s kvadratom, da lahko pokrijemo celotno površino. Shematski prikaz je na slikah 5 in 6.

Stranica kvadrata je tako:

$$s = 1,65\sqrt{\pi} \sigma_G \quad (2)$$

kjer sta numerična faktorja posledica privzetkov o obliki curka, σ_G pa Gaussov polmer curka. Količina S v izrazu (1) je preprosto s^2 , čas pa lahko zapišemo kot s/v , kjer je v hitrost pisanja, kot jo posredno nastavimo v programski opremi. Da je izraz pravilen, jo moramo deliti še s povečavo M . Tako dobimo končni izraz:

$$D = K \frac{IM}{sv} \quad (3)$$

kjer so v konstanti K združeni vsi numerični faktorji približkov in pretvorbe programske hitrosti v dejansko.

5 BLIŽINSKI EFEKT

Pomemben stranski efekt pri pisanju je *bližinski efekt* (angleško: proximity effect)¹. Pri vpadu elektronov je treba namreč upoštevati povratno sipanje, ki

osvetljuje resist od spodaj. Posledica tega je učinkovita razširitev osvetljenega kanala in zmanjšanje ločljivosti. V idealnem primeru si lahko zamislimo, da elektroni, ki se niso neelastično sipali na molekulah polimera, v ravnem snopu predrejo plast e-resista in v nespremenjeni smeri nadaljujejo pot skozi ploščico.

V resnici se elektroni ravno tako sipajo elastično že znotraj plasti, v ploščici pa se lahko sipajo tudi nazaj ter zopet vstopijo v plast e-resista, stran od mesta osvetlitve curka (slika 7a). Efekt nas moti pri majhnih strukturah ali pa v primeru struktur, ki so blizu skupaj v primerjavi z debelino e-resista (slika 7b).

Kjub temu pa lahko efekt obrnemo v svojo korist. Povratno sipani elektroni osvetljujejo e-resist od spodaj, stran od vpadnega curka, in če je njihova gostota zadostna, lahko, enako kot elektroni v vpadnem curku, kemijsko spremenijo polimerno pasto. Meja dosega zadostne osvetlitve je odvisna od jakosti povratnega sipanja, ta pa je sorazmerna s tokom vpadnega curka. Tako imamo možnost uravnavanja širine pisala, ki se za majhne tokove približuje širini vpadnega curka.

Pri izdelavi vezja smo lahko ubirali različne strategije pisanja glede na velikost posameznih delov: za najdrobnejše smo izbrali najtanjšo pisalo, torej pri zelo nizkih tokovih (≈ 50 pA), za večje površine pa smo izbrali najširše pisalo pri zelo visokih tokovi (≈ 60 nA). Seveda je bila ostrina in natančnost robov velikih struktur močno zmanjšana, vendar to ni bila težava, saj so bile tovrstne strukture namenjene povezavi z makrosvetom in njihova natančna izdelava ni bila kjučnega pomena. Različne strategije so zmanjšale čas izdelave na vsega 10 % prvotnega; za eno vezje smo potrebovali okoli 4 min, prej pa celo 40 min golega pisanja.

Efekt lahko upoštevamo v izrazu definicije ekspozicijske doze (3) tako, da namesto širine curka v parameter s vstavimo širino pisala. S tem definiramo namesto konstantne širine vpadnega curka *efektivno širino* curka, ki pove dejansko širino pisalne poteze, kakor jo narekuje povratno sipanje bližinskega efekta.

Takšna definicija ima še svojo praktično uporabno plat, saj lahko parameter s razumemo kot razmik med črtami pisanja, ki ga nastavimo v programski opremi.

6 MEJNA EKSPOZICIJSKA DOZA

Bolj kot absolutna ekspozicijska doza je pri pisanju pomembna *mejna ekspozicijska doza*¹. To je doza, pri kateri osvetlimo e-resist ravno še dovolj, da ga uspešno odtopimo. Določitev tega parametra je eksperimentalna in subjektivna, saj je lahko edino merilo visoka ostrina robov in uspešna odtopitev resista. Za drobne strukture je dobro poznanje mejnih vrednosti zelo pomembno, saj pri vsaki prekoračitvi nehote širimo širino pisanja, kot smo spoznali v prejšnjem razdelku.

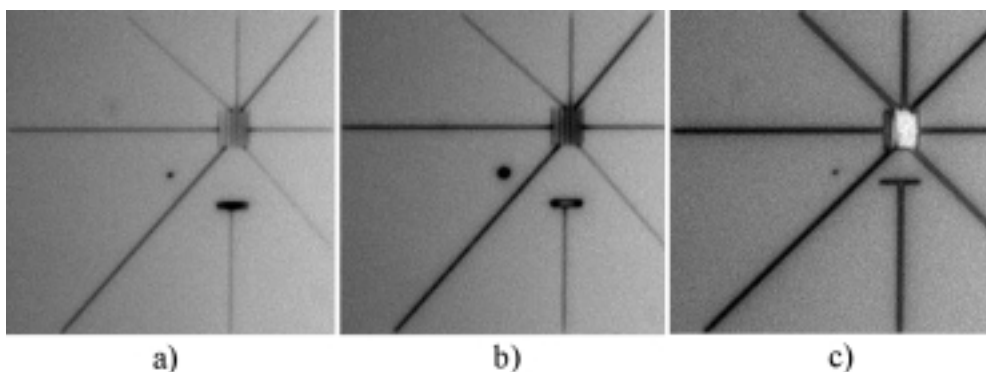
Pri našem delu nismo želeli tvegati neuspeha, zato smo pisali z dvakratno mejno dozo, za velike strukture pa tudi s štirikratno. Globlja analiza tega pomembnega parametra ni bila preveč smiselna, saj pri nanašanju tankih nanosov nismo dosegli odličnega uspeha, ti pa neposredno vplivajo na mejno dozo, tako da smo pojmovali mejne parametre zgolj kot informacijo in kot vodilo.

7 RAZVIJANJE

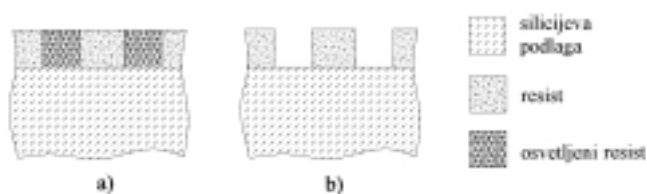
Pri tem koraku izdelave smo odtopili osvetljene dele e-resista⁴. Po navodilih proizvajalca resista smo kot razvijalec uporabili raztopino *metil-izobutilketona*, krajše MIBK, in izopropanola v razmerju 1 : 3.

Rezino smo potapljali v razvijalcu, ki je odtopil kemijsko spremenjene dele polimerne paste do ploščice (slika 9), nato pa smo s čistim izopropanolom sprali razvijalec s ploščice, da smo ustavili raztapljanje.

Najpomembnejši parameter je bil čas razvijanja. Nastavili smo ga na 3 min, kar je bilo dvakrat več od priporočenega časa. To smo storili zato, ker pri predvidenem času minute in pol nismo uspešno razvili



Slika 8: Posnetki preizkušanja doze na vezju velikosti $50\ \mu\text{m}$ s kontakti, širokimi $1\ \mu\text{m}$; na sliki a) je doza prenizka, saj vidimo, da kanali niso ostri. Na sliki b) je doza previsoka, saj so kanali zlit skupaj. Na sliki c) je doza ravno prava, saj so kanali dobro vidni in ločeni med seboj



Slika 9: Shema prereza ploščice, prekrivane z resistom pred in po razvijanju (a) in po njem (b), ko smo odtopili popisane dele resista

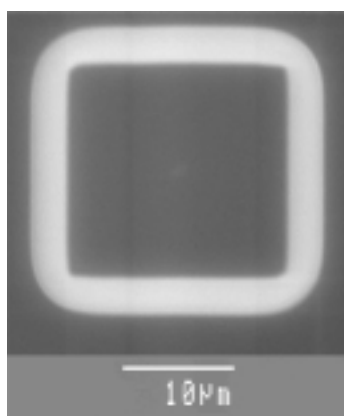
oziroma odtopili osvetljenega e-resista, to pa je pomenilo neuspeh. Razlog za to je bila debelina sloja oziroma boljše nanašanje tankih nanosov, ki ni bilo izpopolnjeno. Daljšanje časov razvijanja je pomenilo neznatno širjenje struktur in zmanjševanje ostrine robov, to pa v našem primeru izdelave vezij ni imelo dramatičnih posledic. Podobno kot pri nastavitvi mejne ekspozicijske doze smo tudi v tem primeru ravnali tako iz previdnosti, saj nismo hoteli tvegati in po nepotrebnem izgubljati vezij.

V prejšnjem razdelku smo ekspozicijsko dozo omejili navzdol, pri razvijanju pa smo ugotovili, da z osvetljevanjem vendarle ne gre pretiravati. Zares visoke doze namreč spremenijo kemijsko sestavo monomerov polimerne paste e-resista, takšne spojine pa niso več topne v razvijalcu. Po razvijanju preosvetljenega območja vidimo le obrobo okoli strukture zaradi bližinskega efekta, notranjost pa ostane neraztopljena, kot je to prikazano na sliki 10.

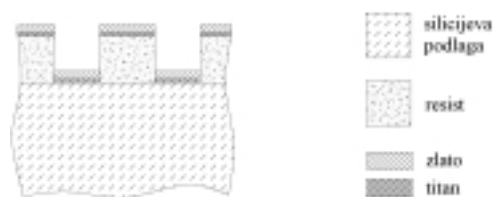
Dodajmo še, da bi bilo nujno raziskati parametre razvijanja veliko bolj podrobno, če bi bile ciljne strukture manjše, saj bi sicer šibki vplivi v tem primeru postali zelo močni.

8 NANAŠANJE KOVINE

Naše vezje je bilo meritveno, zato smo izbrali zlato, saj ima zelo dobre fizikalne lastnosti. Kovino so nam napršili kolegi z Odseka za tanke plasti in



Slika 10: Slika območja, kjer je bila doza veliko previsoka. Risalna površina je kvadrat znotraj svetlega pasu, ki je posledica bližinskega efekta



Slika 11: Shema prereza ploščice, prekrivane s titanom in z zlato, po razvijanju

površine (Institut "Jožef Stefan"), saj so imeli poleg ustreznih naprav tudi bogate izkušnje, tako da je bil postopek zelo zanesljiv.

Na sliki 11 je prikazan prerez nanosa kovine po razvijanju. Nekaj kovine pade neposredno na ploščico, to je na mestih, kjer razvijalec odtopi v procesu pisanja osvetljene dele resista, preostli del pa na resist v okolici kanalov. Tudi pri tem postopku smo naleteli na težave, saj so bila vezja iz zlata zelo občutljiva za mehanske vplive, saj se zlato zelo slabo oprime ploščice, zato smo pod zlato nanесли še tanek sloj titana (slika 11). Takšna vezja so bila neprimerno bolj obstojna, vendar je bilo treba z njimi previdno ravnati.

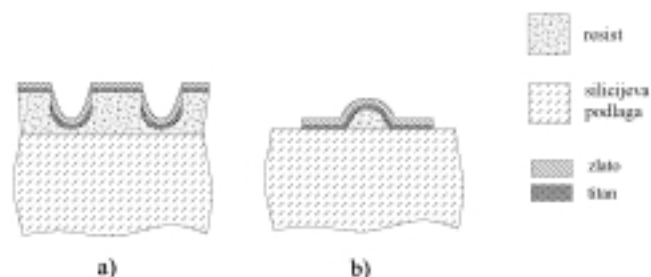
9 DVIGOVANJE

To je bil zadnji korak izdelave vezja in bi ga lahko šteli skupaj z nanašanjem kovine v en proces, saj sta močno povezana.

Pri tem postopku odstranimo oziroma dvignemo (angleško: lift-off) kovino, ki je na resistu, tako da ostanejo le strukture znotraj kanalov, neposredno na ploščici. To storimo tako, da ploščico potopimo v 1-metil-2-pirolidon, topilo resista v monomerni, polimerni ali mrežni obliki. Sloj polimera se raztopi,



Slika 12: Shema prereza ploščice po dvigovanju; na površini ostane tanek vodnik iz plasti titana in zlata



Slika 13: Shema glavnih napak pri izdelavi. Zaradi slabo odtopljenega resista se kovinski prevleki v kanalu in na resistu stakneta, lahko pa kovina sploh nima stika s podlago (a); predolgo razvijanje ali premočna osvetlitev znižata debelino resista med kanaloma, zato se kovinske prevleke staknejo (b).

kovina na njem pa ostane brez podlage in jo lahko odstranimo z rahlim curkom topila ali pa v ultrazvoku (slika 12).

Vendar kljub enostavnosti uspeh ni zagotovljen. Vežja so lahko po izdelavi popolnoma neuporabna in v kratkem stiku (slika 13). Razlogi so lahko različni:

- slabo raztopljen e-resist
- stik med kovino na resistu in v kanalih zaradi manj ostrih robov in napak pri naprševanju
- stik med kovino na resistu in v kanalu zaradi prevelike debeline kovine
- grobo odstranjevanje s curkom ali ultrazvokom odtrga tudi kovino v kanalih

Težave smo omilili s protiukrepi:

- rezino smo pustili v topilu vsaj od 24 h do 72 h
- zelo tanek nanos kovine: 10 nm titana in 20 nm zlata
- izpiranje z rahlimi curki tekočine in izogibanje ultrazvočnim kopelim.

Ni treba posebej poudarjati, da so razmere kritične še posebej pri drobnih strukturah z majhnimi oddaljenostmi (300 nm) med seboj, saj so tam vse težave še bolj izrazite.

Po uspešnem procesu smo rezino očistili z izopropanolom in jo posušili z dušikom. Tako pripravljena ploščica je bila pripravljena na meritve.

10 ČISTOČA

Posebej poudarimo še vpliv čistoče na naše delo. Navidez zelo postranska skrb zelo močno vpliva na uspešnost izdelave struktur. Nečistoče v kemikalijah, zraku ali na orodjih velikokrat zaidejo na silicijeve rezine in motijo pri korakih izdelave, njihov vpliv pa se skozi procese le še stopnjuje. Morda najpomembnejša je motnja pri nanašanju e-resista, kjer se ob zrnih oblikujejo debelejši nanosi, ki vplivajo na neenakomerni pas sloja vse do roba ploščice. Pisanje je brez varnostnih ukrepov skoraj obsojeno na propad, še posebej, če želimo izdelovati majhne strukture.

Nečistoče lahko motijo tudi pri pisanju v primeru, če nehote pišemo čeznje, saj se lahko zgodi, da se kasneje nanese kovina z njih odlušči, to pa pomeni neuspeh. Končno lahko nečistoče vplivajo neposredno na meritve, če imamo smolo in zaidejo na območje kontaktov, tako da je ves poprejšnji trud zopet zaman.

Za čistočo smo skrbeli tako, da smo rezine nosili v škatlicah, izogibali smo se nepotrebni izpostavljanju zraku, ob ravnanju z njimi smo uporabljali pincete in rokavice iz lateksa za enkratno uporabo, pred nanašanjem resista pa smo jih očistili v acetonu, jih sprali z izopropanolom in nazadnje posušili z

dušikom. Če smo sumili, da so bile ploščice še posebej onesnažene ali mastne, smo jih najprej očistili z alkalnim čistilom, ki smo ga sprali z vročo vodo, nato pa še z deionizirano vodo, preden smo jih dali v aceton in izopropanol.

Takšni ukrepi so bili zares osnovni in so le omilili omenjene težave, zato smo izdelali več vezij naenkrat, da smo lahko dopustili določen odstotek neuspeha.

11 SKLEP

Opisani postopek elektronske nanolitografije je splošno uporaben pri izdelavi majhnih vezij in struktur. Realno so meje najmanjših struktur našega prototipa med 50 nm in 100 nm, pri razmikih do 50 nm in ostrino robov pod 10 nm. Ker smo morali posamezne korake in aparature razviti in izdelati po osnovnih navodilih praktično od začetka, so bile karakteristike struktur slabše od navedenih:

- najmanjše velikosti struktur so bile 1 μm pri razmiku 1 μm
- ostrina robov med 50 nm in 100 nm
- debelina kovinskih nanosov 30 nm
- napake zaradi nečistoč.

Poleg napak procesa k slabšim rezultatom prispevajo tudi parametri izdelave, ki smo jih nastavili tako, da so bili uspehi izdelave dovolj zanesljivi. Predvsem bi bilo treba preučiti mejno ekspozicijsko dozo in nanašanje resista. Tanjši nanosi bi se bolje obnesli, še boljše rezultate pa bi dobili z nanašanjem več plasti različnih resistov, saj bi tako omilili razširjevanje zaradi bližinskega efekta, ki v največji meri vpliva na velikost najmanjših struktur. Kljub temu smo lahko zadovoljni z uspešnostjo izdelave, saj lahko ob nadaljnjem delu pričakujemo mnogo boljše karakteristike in se tudi približamo navedenim realnim mejam.

Vsa meritvena vezja smo izdelali z enkratnim nanosom plasti e-resista debeline 500 nm, kar je bilo dovolj dobro za izdelavo naših razmeroma velikih vezij.

LITERATURA

- ¹W. Daumann, InP-Kurzkanal-Heterostruktur-Feldeffekttransistoren mit elektronen-strahldefinierten Gate-Kontakten, doktorska disertacija, Duisburg, 2000
- ²M. Uplaznik, Meritev vzdolžne električne prevodnosti Mo₆S₄I₄ nanožičk z uporabo elektronske nanolitografije, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, 2003
- ³L. A. W. Robinson, Self-aligned electrodes for suspended carbon nanotube structures, *Microelectronic Engineering*, 67(2003), 615-622
- ⁴Katalog: Allresist : Photo- und E-beam Resists, 2002