

MIKROOBDELAVA SILICIJA (I. del)

Drago Resnik, Laboratorij za elektronske elemente, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

Micromachining of Silicon (Part I)

ABSTRACT

This paper presents an overview of techniques and fields involved in advanced micromachining of silicon. As the market demands new and sophisticated sensors and actuators in a various fields of nowadays life, the micromachining as a tool is in a constant progress, sometimes even ahead of manufacturers needs. As a supplement to microelectronics it is capable to offer new solutions in area of microelectromechanical systems.

POVZETEK

V članku je prikazan pregled raznih tehnik, ki se danes največ uporabljajo pri mikroobdelavi silicija. Tržišče dandanes zahteva vedno nove in dovršene senzorje in aktuatorje na različnih področjih našega življenja. Tako je tudi področje mikroobdelave neprestano v razvoju, neredko pa celo prehiteva potrebe trga. Kot dopolnilna veja mikroelektronike tvori skupaj z njo tudi novo vejo, imenovano mikroelektromehanski sistemi.

1 Uvod

Silicij je že več kot pol stoletja poznan kot tisti osnovni material z izrednimi električnimi lastnostmi, ki ga uporabljamo za izdelavo elektronskih elementov in v zadnjih desetletjih za mikroelektronska integrirana vezja, ki posegajo danes že globoko v submikronsko tehnologijo. Silicij pa se uveljavlja čedalje bolj tudi kot material z izrednimi mehanskimi lastnostmi, kot so odzivi na natezne, tlačne, strižne napetosti, elastičnost, toplotna prevodnost in odpornost proti utrujanju materiala. Te lastnosti omogočajo izdelavo širokega spektra tridimenzionalnih senzorskih in aktuatorskih struktur z orodji mikroobdelave silicija /1-6/.

Mikroobdelava silicija je način obdelave standardne silicijeve podlage v primerne elektromehanske strukture, ki bodo izkoriščale razne mehanske lastnosti silicija z uporabo standardnih planarnih mikroelektronskih postopkov in novih jedkalnih ter bondirnih tehnik, tudi globinsko v podlago. Na isti podlagi pa kljub temu še vedno želimo ohraniti električne lastnosti že izdelanih elektronskih sestavnih delov na površini. Dasiravno bo govor le o mikroobdelavi silicija, pa se izraz mikroobdelava uporablja tudi pri drugih materialih, kot so kremen, GaAs, InP, keramika itd.

1.1 Mikroobdelava kot funkcionalna dopolnitev mikroelektronike

Ker je silicij kot polprevodniški material zelo natančno raziskan in poznan, obstajajo seveda težnje, da se gradi na teh spoznanjih tudi dodatne strukture, ki izkoriščajo navedene mehanske lastnosti.

Postopki in tehnološke operacije za izdelavo elektronskih sestavnih delov in vezij na siliciju so že tako dovršene, da se mikroobdelava, kot dodaten proces za razširitev funkcionalnosti posameznih vezij, ponuja kar sama od sebe.

Dandanes razpolagamo z zelo visokokvalitetnim, brezdefektnim silicijevim monokristalom velikih dimenzij in

dostopne cene, kar je eden od prvih pogojev za 3D-mikrostrukture točnih dimenzij, zahtevnih oblik in električnih ter mehanskih lastnosti.

Orodja, kot so tehnike nanosa raznih prevodnih in izolacijskih plasti, mokro ter suho jedkanje silicija in drugih tankih plasti, natančni fotolitografski postopki, so na voljo v vsaki mikroelektronski industriji za takomenovano planarno tehnologijo (postopki omejeni na zgornjih 5-10 μm globine silicijeve rezine). Ista orodja in tehnike so uporabljene tudi kot pomoč za tridimenzionalno obdelavo silicija čez celo globino podlage za realizacijo mikroelektromehanskih struktur.

Dve osnovni lastnosti, ki omogočata mikroobdelavo silicija sta anizotropno vedenje različnih kristalnih ravnin silicija in pa selektivnost jedkanja glede na maskirne plasti. Za mikroobdelavo so posebej primerne silicijeve rezine orientacije (100) zaradi svojih anizotropnih lastnosti, saj se te ravnine jedkajo znatno hitreje od drugih. V sedemdesetih letih je bil dosežen viden napredek pri mikroobdelavi z izpopolnitvijo tehnik jedkanja s samoustavljanjem na močno dopiranih P^+ plasteh silicija, v osemdesetihletih pa so bile razvite še druge precizne elektrokemijske samoustavitvene tehnike, kar je omogočilo široko uporabo mikroobdelave. Poleg silicija orientacije (100) se za posebne vertikalne strukture uporablja tudi silicij z orientacijo (110).

1.2 Polja uporabe mikroobdelave

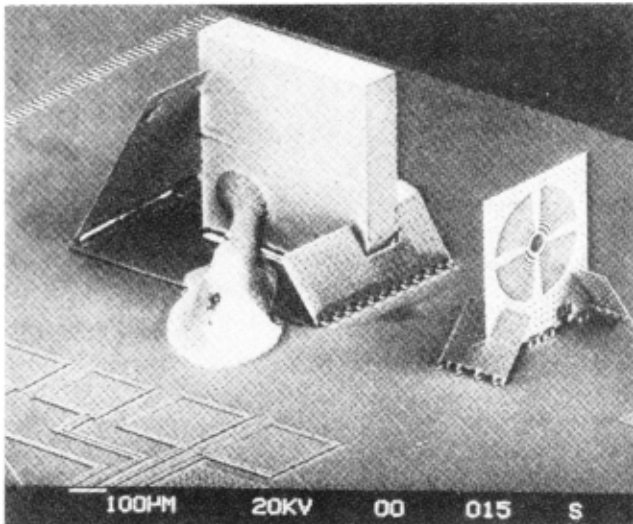
Potrebe po zaznavanju in merjenju fizikalnih veličin so sprožile raziskave in razvoj sensorike, ki naj bi bila podaljšana veja mikroelektronike. Precej časa je minilo, da so periferne enote ujele hitro se razvijajočo planarno tehnologijo izdelave visokointegriranih vezij. Ta razvoj je bil možen predvsem z napredkom mikroobdelave silicija. Pod pojmom periferne enote razumemo elemente, ki povezujejo realni svet okolja s krmilnim in procesnim delom vezja. To so:

- senzorji, ki pretvarjajo fizikalne in kemijske veličine v električni signal
- aktuatorji, ki pretvarjajo električni signal v mehansko gibanje

Elementi, ki so utirali pot sensoriki in omogočili preboj tudi mikroobdelavi, so bili nedvomno senzori pritiska in merilniki pospeška (akcelerometri). Dandanes najdemo mikroobdelavo silicija na vseh področjih življenja: od avtomobilov, mikrorobotike, biomedicine, vesoljskih programov, optike ter še kje /3/.

Vedno znova se pojavljajo zahteve po senzorijskih novih fizikalnih veličin raznih merilnih območij, točnosti, novih zahtevnih merilnih okolij, čedalje manjših dimenzij in večje zanesljivosti.

V zadnjih letih so se povečale težnje po izdelavi takomenovanih inteligentnih ("smart") senzorjev, kjer 3D mikroelektromehanske strukture realiziramo skupaj z integriranim vezjem na isti podlagi, vsaj tam, kjer to uporaba dopušča /6/.

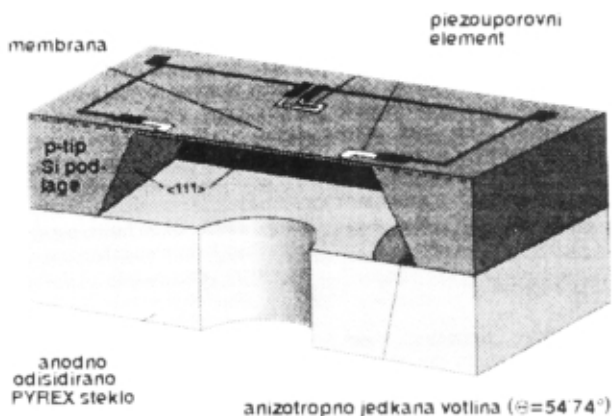


Slika 1. Posnetek SEM mikro-Fresnelove leče, izdelane z mikroobdelavo v povezavi z lasersko diodo. [3]

2 Globinska in površinska mikroobdelava silicija

- globinska mikroobdelava silicija po celi debelini podlage (bulk micromachining)

Pri tej tehnologiji, ki se tudi največ uporablja, potekajo obdelave za realizacijo strukture na obeh straneh rezine. Na sprednji strani se ponavadi izdelava plast, ki bo omogočila samoustavitev jedkanja ter tudi funkcionalne elektronske elemente (piezorezistorje, vezja, PZT aktuatorske plasti), na zadnji strani pa se izvaja preko fotolitografsko definiranih področij anizotropno jedkanje do končne strukture. Težava je v dolgih časih, ki so potrebni, da se izvrši jedkanje skozi celo strukturo do želene globine skupaj z zahtevo po zelo precizni dvostranski fotolitografiji, saj se morajo maskirni vzorci na sprednji strani točno ujemati z vzorci na zadnji strani rezine. Za večino struktur je to neizogibna tehnika, ki se tudi najbolj množično uporablja. Zaradi narave anizotropnega mokrega jedkanja (100) silicija, ki se jedka

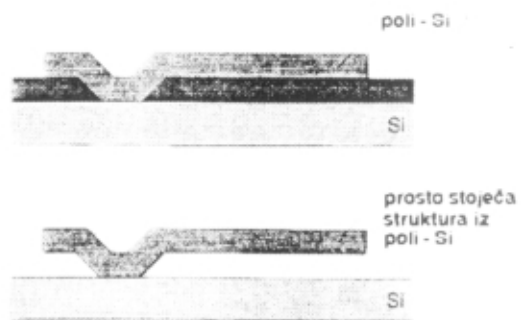


Slika 2 Značilen primer globinske mikroobdelave silicija je piezouporovni senzor tlaka, ki je bil in je še vlečni konj te nove tehnologije. Upogib membrane zaradi pritiska se zazna na difuzijskih piezouporih p^+ [2].

pod kotom $54,7^\circ$, so dimenzije tako izdelanih struktur precej večje, kot bi bile, če bi jih izdelali z površinsko mikroobdelavo. Vendar funkcionalnost in robustnost, ki je za potrebno nekatere uporabe, dosežemo le s to tehniko.

- površinska mikroobdelava (surface micromachining)

Ima nekatere prednosti pred globinsko mikroobdelavo, vsaj pri mikrostrukturah, ki to v osnovi dovoljujejo. Mehanska struktura tukaj ni narejena v globino podlage, pač pa izključno na površini s kombinacijo več tankih plasti, nanesenih s CVD postopki na silicijevo podlago. S fotolitografskimi postopki v kombinaciji s plazemskimi in mokrimi jedkanji sukcesivno definiramo obliko struktur posameznih plasti in nato z mokrim jedkanjem odstranimo žrtvovane plasti, tako da se začne mikrostruktura vesti kot prosto gibajoča.

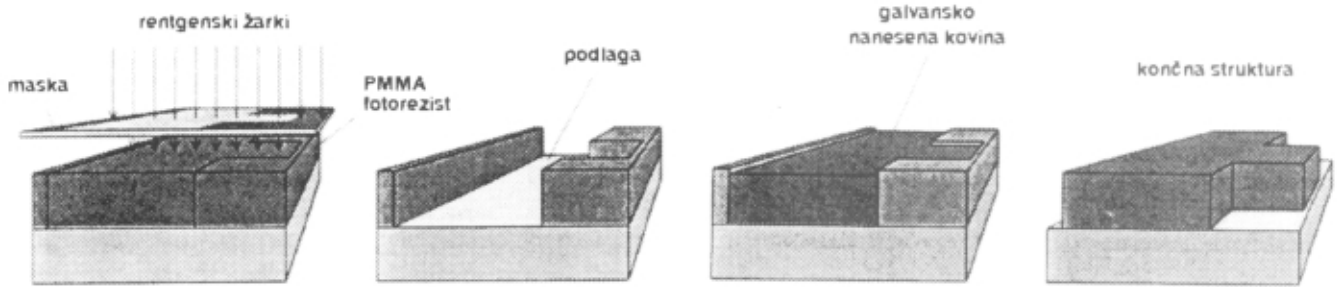


Slika 3 Osnovni princip površinske mikroobdelave je mehanska struktura enostransko vpetega peresa polisilicija. Po jedkanju žrtvovane plasti (SiO_2) nam ostane prosto stoječa vzmet [9].

Žrtvovane, vmesne plasti (sacrificial layers), so ponavadi boro- ali fosforosilikatna stekla; plasti, ki ostanejo in tvorijo končno strukturo, pa so ponavadi polikristalni silicij ali silicijev LPCVD nitrid. Slabe mehanske in električne lastnosti teh polikristalnih in amorfni plasti so se z novimi tehnologijami in spoznanji na področju tankih plasti izboljšale (n.pr. zmanjšane napetosti, ki so posledica nanašanja), da se metoda čedalje več uporablja. Tako izdelane 3D-strukture imajo omejitve v z smeri in so omejene z zmožnostmi tehnik nanašanja in jedkanja in lastnostmi tankih plasti, zato gredo največ do globine $5 \mu m$. S tehnikami bondiranja na drugo silicijevo podlago ali steklo ter tanjšanja pa se uporabnost razširi. Prednost površinske mikroobdelave silicija pred globinsko je tudi v tem, da uporabljamo le enostransko fotolitografijo, kar nenazadnje pomeni cenejšo opremo.

LIGA

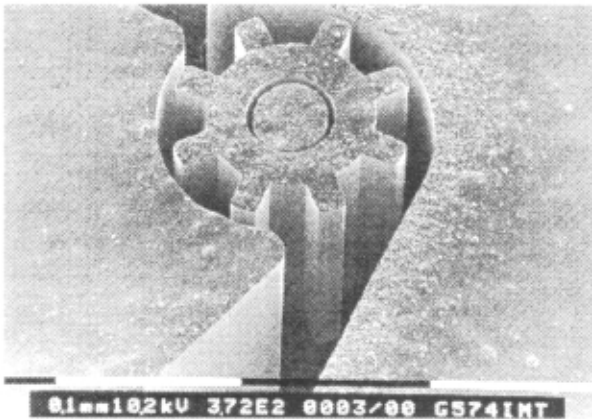
Za 3D-strukture z visokim razmerjem vertikalne dimenzije proti lateralnim je bil razvit postopek LIGA (Litographie-Galvanoformung-Abformung) [7]. V tem primeru mikroobdelave so mikrostrukture ponavadi kovinske ali pa plastični odlitki. Z x-žarkovno fotolitografijo se skozi ustrezno masko preslika neka planarna oblika mikrostrukture čez debelo plast fotopolimera PMMA (ta debelina fotopolimera je tudi končna debe-



Slika 4. Predstavitev osnovnih korakov postopka LIGA

lina mikrostrukture) na pomožno podlago s prevodno kovinsko plastjo. Sledi razvijanje PMMA, nato pa selektiven elektrokemijski nanos kovine (npr. Ni, Cu) v praznine, kjer smo odstranili osvetljen PMMA. Nato

odstranimo neosvetljen rezist. Ostane mikrostruktura, ki jo lahko uporabimo direktno, ko jo odstranimo s podlage ali kot matrico za nadaljnje brizganje komplementarnih struktur. S to tehniko se izdeluje mikro-konektorje, zobniške prenose za ure, mikroturbine itd.



Slika 5 Mikroturbina, izdelana iz niklja po postopku LIGA [7]. Premer rotorja je 130 μm , višina pa 150 μm . Maksimalna hitrost vrtenja je 150000 obratov na minuto, trajnost pa 10^8 vrtljajev. Mikroturbino lahko uporabimo kot merilnik pretoka.

Prednost postopka LIGA je, da lahko izdelamo mikrostrukture enakih ali večjih debelin kot pri masivni ("bulk") mikroobdelavi, ohranimo pa natančnost lateralnih dimenzij kot pri površinski mikroobdelavi. Temperaturne obdelave ne presegajo 200°C.

3. Struktura in lastnosti kristalne mreže silicija

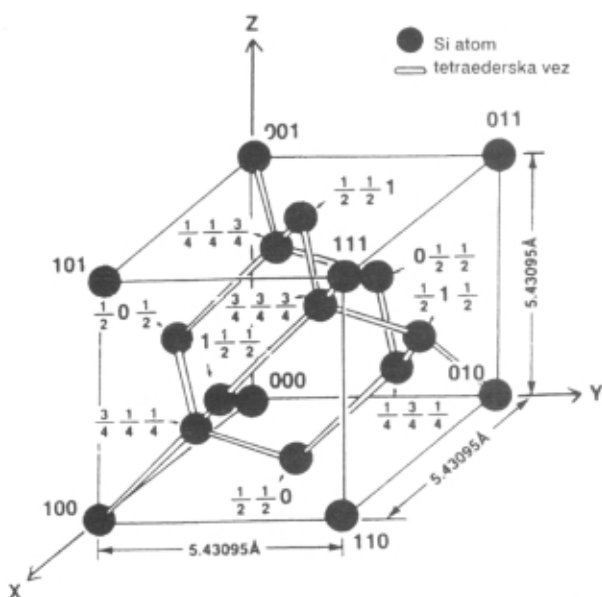
Kot smo omenili spada Si v družino kristalov s kubično mrežo in ima diamantno strukturo [8]. To pomeni, da ima dve ploskovno centrirani osnovni celici, ki imata izhodišče premaknjeno med seboj za $(1/4, 1/4, 1/4)$ (vogalni atom druge kocke leži na četrtini razdalje glavne diagonale prve kocke). To nam zelo dobro ponazarja sl. 6.

Pri obravnavi kristalnih mrež lahko definiramo atomske ravnine, kjer so atomi urejeni periodično. Ker ima vsaka od teh atomskih ravnin drugačno, sebi lastno postavitve atomov, se lahko zaradi tega razlikujejo tudi njene mehanske, fizikalne in električne lastnosti. Torej se različne atomske ravnine vedejo anizotropno. To pa je izredno pomembno za izdelavo različnih polprevodniških struktur, tako mikroelektronskih, kot tudi mikroelektromehanskih, izdelanih z mikroobdelavo.

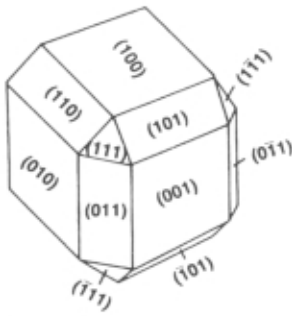
V kubičnem sistemu so ravnine, kot npr. (hkl) , (khl) , (hkl) in (lkh) , ekvivalentne med seboj in jih imenujemo ravnine forme, ter jih označujemo kot $\{hkl\}$. V kubičnem sistemu tudi vedno velja, da je smer (orientacija) $[hkl]$ vedno pravokotna na ravnino (hkl) .

Preprost način za predstavitev medsebojne lege posameznih ravnin pri siliciju prikazujemo na modelu na sl. 7, ki vsebuje skupino $\{100\}$, $\{110\}$ in $\{111\}$ ravnin.

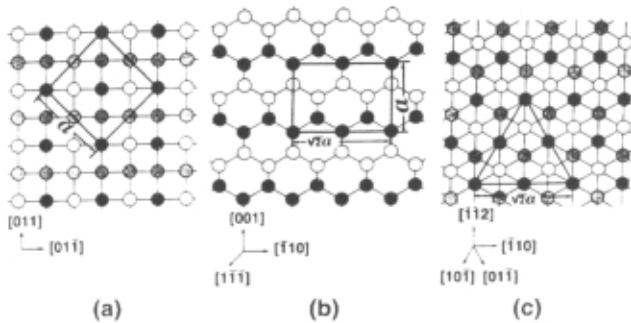
Mehanske, fizikalne, kemijske in električne lastnosti so funkcija kristalne orientacije, kar je postalo očitno že pri mikroelektronski tehnologiji izdelave elementov MOS, ki na podlagah neke orientacije ne dajejo zadovoljivih rezultatov. Te osnovne razlike lastnosti posameznih orientacij pripisujemo predvsem površinski razporeditvi atomov Si in razdaljam med posameznimi ravninami kristalne mreže. Na sl. 8 je grafično ponazorjena ta razlika med tremi najbolj pogosto uporabljanimi orientacijami Si v polprevodniški tehnologiji. Vidimo, kako



Slika 6. Struktura osnovne celice silicijevega kristala



Slika 7. 3D-model kubičnega sistema silicija, ki vključuje {100}, {110} in {111} ravnine



Slika 8. Planarna atomska postavitev pri treh osnovnih orientacijah silicija: (a) <100>, (b) <110>, (c) <111>

Tabela 1. Lastnosti silicija pri treh osnovnih orientacijah

Lastnosti	Orientacija		
	<100>	<110>	<111>
razdalja med atomi (nm)	0,543	0,384	0,313
Youngov modul (kN/mm ²)	130	170	190
površinska energija (J/m ²)	2,13	1,51	1,23
atomska gostota (10 ¹⁴ /cm ²)	6,78	9,59	15,66
gostota prostih vezi (10 ¹⁴ /cm ²)	6,78	9,59	11,76

so atomi planarno razporejeni, če gledamo kristal na površini. Različno senčenje atomov pa se nanaša na različne atomske plasti. Za vsako orientacijo so prikazane tudi ravnine osnovnih celic. Anizotropne lastnosti kristala se nanašajo predvsem na energijo nepopolno vezanih površinskih atomov (na število prostih vezi oziroma vezi na enoto površine kristala). To omogoča mikroobdelavo in delovanje silicijevih struktur.

4 Sklep

Preboj v svet senzorike in mikroelektromehanskih sistemov je dokončno izvršen in mikroobdelava kot suplementarna veja mikroelektronike ljudem reže danes že velik kos pogače na svetovnem trgu. Nove potrebe po specifičnih mikrostrukturah pa narekujejo tudi nove inovativne tehnološke postopke in rešitve na področju mikroobdelave. To pa nam omogočajo tako temeljna znanja kot tudi aplikativna.

V naslednji številki časopisa bomo podali razširjen pregled osnovnih orodij mikroobdelave, ki so danes v uporabi, mehanizmov, ki nas pripeljejo do začrtanih mikrostruktur, ter del rezultatov, ki sledijo iz dela v Laboratoriju za elektronske elemente na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.

8 Literatura

- /1/ Kurt E. Petersen, IEEE Proc., Vol. 70, No 5. May 1982.
- /2/ J. Bryzek, K. Petersen, W. Mc Culley, IEEE Spectrum, 20-31, May 1994.
- /3/ M. Pottenger, B. Eyre, E. Kruglick, G. Lin, Solid State Technology, 89-96, Sep. 1997, 89-96.
- /4/ J.B. Angell, S.C. Terry, P.W. Barth, Scientific American, April, 1983, 36-47.
- /5/ H.-J. Roelke, H.F. Schlaak, Siemens review-R&D Special-spring 1990.
- /6/ K.D. Wise, K. Najafi, Science, Vol. 254, Nov.(1991) 1334-1342.
- /7/ P. Bley, Interdisciplinary Science Reviews, Vol. 18, No. 3 (1993) 267-272.
- /8/ Fumio Shimura, Semiconductor silicon crystal technology, Academic Press, Inc., 1989.
- /9/ W. Lang, Materials Science and Engineering, Vol. R17, N1, str. 36, Sep. 1996.

Zahvala

Za pomoč in vzpodbudo pri nastajanju tega dela se zahvaljujem prof. dr. S. Amonu in drugim sodelavcem Laboratorija za elektronske elemente na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.



INŠTITUT ZA ELEKTRONIKO IN VAKUUMSKO TEHNIKO

Teslova ulica 30, POB 2959, 1001 LJUBLJANA, Slovenija

Tel.: (+386 61) 177 66 00 n.c., fax: (+386 61) 126 45 78

Elektronska pošta: IEVT.group@guest.arnes.si

Domača stran na Internetu: <http://www2.arnes.si/guest/lievt/index.htm>