

REAKTIVNO IONSKO JEDKANJE (RIE) SILICIJA NA OSNOVI SF₆/O₂-KEMIJE

Danilo Vrtačnik^{1,2}, Drago Resnik^{1,2}, Matej Možek^{1,2}, Borut Pečar¹, Tine Dolžan¹, Slavko Amon^{1,2}

ZNANSTVENI ČLANEK

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

²CO NAMASTE, Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Opisan je sistem reaktivnega ionskega jedkanja silicija in mehanizem usmerjenega jedkanja s SF₆/O₂-kemijsko. Raziskana je odvisnost osnovnih lastnosti jedkanja od ključnih procesnih parametrov ter prikazana implementacija jedkanja pri izdelavi silicijevih mikrostruktur.

Ključne besede: MEMS, RIE, hitrost jedkanja, profil jedkanja, selektivnost jedkanja

RIE etching of silicon based on SF₆/O₂ chemistry

Abstract

The system for reactive ion etching and mechanism of directional etching with SF₆/O₂ chemistry are described. Investigation of basic process parameters was investigated and results of etching were implemented into fabrication of silicon microstructures.

Keywords: MEMS, RIE, etch rate, etch profile, selectivity of etching

1 UVOD

Pri izdelavi naprednih mikrostruktur, kot so npr. mikroelektromehanski in mikrooptoelektromehanski sistemi (angl. MEMS, MEOMS), je natančna kontrola mikroobdelave silicija in kompatibilnost jedkanja silicija s polprevodniškimi mikrotehnologijami ena od osnovnih zahtev. Reaktivno ionsko jedkanje (angl. *Reactive Ion Etching*, RIE) daje v primerjavi z mokrimi anizotropnimi jedkanji mnogo več možnosti realizacije različnih mikrostruktur, predvsem zaradi boljše kontrole profila jedkanja, večje anizotropije in neodvisnosti jedkanja od kristalografske orientacije. Zato jedkanje silicija po RIE-postopku postaja eno od osnovnih orodij za mikroobdelavo silicija.

Osnovni problem pri usmerjenem jedkanju silicija po RIE-postopku je v iskanju ravnovesja med istočasnim ščitjenjem (pasivacijo) stranskih sten pred jedkanjem in jedkanjem dna mikrostruktur. Ko znamo tak postopek ustrezno kontrolirati, je mogoče izdelovati mikrostrukture z odlično kontrolo profila jedkanja.

2 OSNOVNA ZGRADBA RIE-SISTEMA

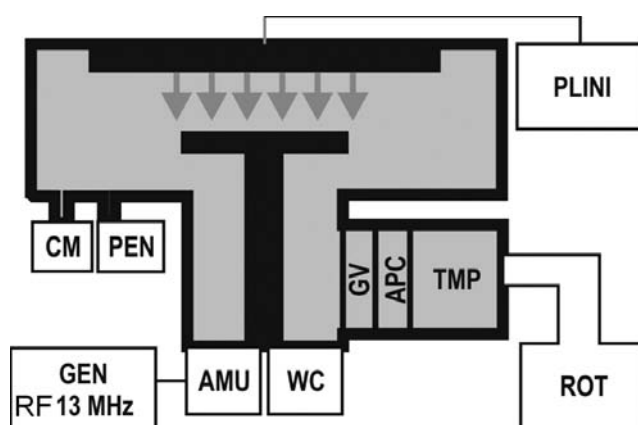
Schema uporabljenega RIE-sistema za suho jedkanje silicija je prikazano na **sliki 1**. V osnovi je to standardni sistem, ki se uporablja v mikroelektroniki za usmerjeno jedkanje tankih izolacijskih plasti, kot sta npr. silicijev oksid in silicijev nitrid. V našem

primeru smo sistem Plasmalab μ P 80 proizvajalca Oxford Instruments, Plasma Technology, prilagodili tudi za usmerjeno jedkanje silicija.

Sistem sestavlja aluminijasta vakuumsko komora, gornja elektroda, ki je na ozemljitvenem potencialu in ki hkrati zagotavlja homogen dovod plinov v komoro, ter električno izolirana spodnja elektroda premera 240 mm, ki je priključena na RF-generator in ki se hkrati tudi rabi kot nosilec podlag. Medelektrodna razdalja je 50 mm. RF-generator frekvence 13,56 MHz in moči 300 W je kapacitivno povezan s plazmo. Tlak in pretoki plinov v komori so kontrolirani z avtomatsko kontrolo tlaka (angl. *Automatic Pressure Control*, APC) ter z masnimi merilniki pretoka (angl. *Mass Flow Controller*, MFC). Dobro odvajanje toplote od vzorca in nosilca vzorca na vodno hlajeno elektrodo na podlagi se zagotavlja s tankim premazom visokovakuumske masti.

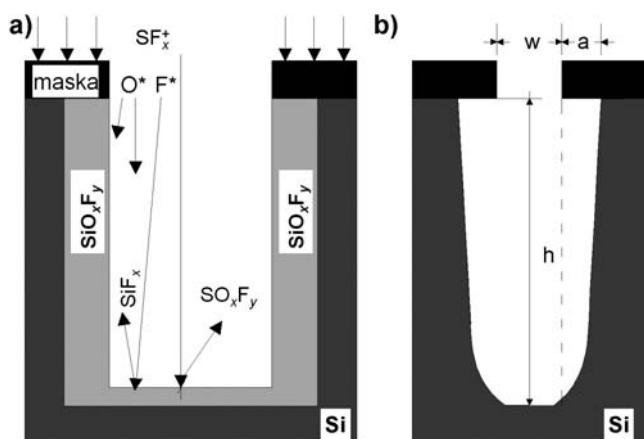
3 OSNOVE REAKTIVNEGA IONSKEGA JEDKANJA (RIE) SILICIJA S SF₆/O₂-KEMIJO PRI SOBNI TEMPERATURI

Najpogosteje uporabljena kemija za suho jedkanje silicija temelji na fluorovi plazmi. V prvi vrsti je to zato, ker so ti plini nestrupeni in ker se jedka silicij z visoko hitrostjo. Shematski prikaz mehanizma usmer-



Slika 1: Shema RIE-sistema:

- gornja elektroda z distribucijo plinov
- elektroda na podlagi z RF-generatorjem (GEN) in avtomatsko prilagoditveno enoto (AMU)
- vodno hlajena elektroda (WC)
- turbo (TMP) z dvostopenjsko rotacijsko črpalko (ROT)
- zaporni ventil (GV) in avtomatska kontrola tlaka (APC)
- merilniki tlaka (CM) in (PEN)



Slika 2: Shematski prikaz mehanizma usmerjenega jedkanja z RIE in SF₆/O₂-kemijo: a) idealni usmerjeni profil in b) realni profil s prikazanim lateralnim spodjedkavanjem a in pozitivnim nagibom stranskih sten profila globine h ter širine odprtine w .

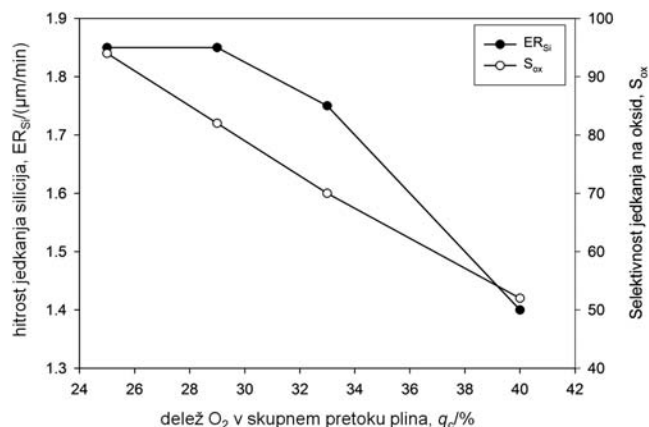
jenega jedkanja silicija z RIE in SF₆/O₂-kemijo je prikazan na **sliki 2**.

V plazmi molekule plina SF₆ razpadejo, proizvedejo fluorove radikale (F*) in ti kemijsko jedkajo silicij. Produkt jedkanja je plin SiF_x, najpogostejše sestave SiF₄. Prav tako kisikove molekule v plazmi razpadejo v kisikove radikale (O*), ki pasivirajo silicijevo površino s silicijevimi oksifluoridi (SiO_xF_y). Plin SF₆ je tudi izvir ionov SF_x⁺, ki odstranjujejo pasivacijsko plast z dna strukture preko formiranja hlapljivih produktov SO_xF_y. Takšno jedkanje je poznano iz literature pod imenom »ion-inhibitor« ali »desorption-controlled« RIE-jedkanje [1].

4 REZULTATI JEDKANJA

Osnovni procesni parametri jedkanja so: tlak, skupni pretok in razmerje plinov ter RF-moč. Poleg procesnih parametrov je rezultat jedkanja odvisen tudi od izpostavljenosti površine, ki se jedka (silicijevega bremena, angl. *loading*) in geometrijskega razmerja med višino in širino struktur (angl. *Aspect Ratio*, AR). Na **sliki 2b** je to razmerje h/w .

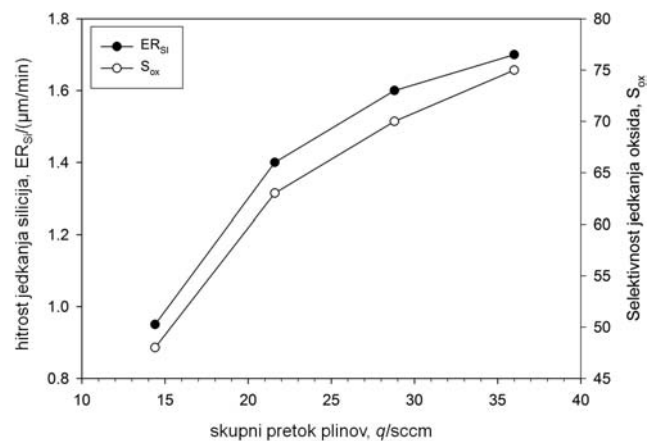
Prvi korak pri iskanju ustreznih procesnih parametrov jedkanja, ki dajejo usmerjen profil oziroma profil z vertikalnimi stenami, določimo s tako imenovano metodo črnega silicija (angl. *Black Silicon Method* – BSM), ki jo je razvil H. Jansen s sodelavci [2]. Metoda temelji na ugotovitvi, da se črni silicij pojavi takrat, ko je anizotropija jedkanja največja. Profil je tedaj vertikalni, površina dna strukture pa je tedaj hrapava, ker vsebuje mikrometrski ostanke nejedkanega silicija v obliki trave (angl. *grass*). Gladko površino dobimo, če pomaknemo jedkanje v režim, kjer so stene struktur rahlo obrnjene navznoter, to je v smeri negativnega konusa (angl. *negative tapering*).



Slika 3: Hitrost jedkanja silicija in selektivnost jedkanja oksidne maske v odvisnosti od deleža O₂ v skupnem pretoku plina

ing). Teoretično je anizotropni režim mogoče doseči za skoraj poljubno ustrezno kombinacijo tlaka in RF-moči ter drugih procesnih parametrov.

Na profil jedkanja je mogoče vplivati tudi z dodajanjem oziroma odvzemanjem silicijevega bremena. S tem vplivamo na pravilno razmerje med gostoto nevtralnih delcev in ionov, ki sodelujejo pri jedkanju. V osnovi je vpliv procesnih parametrov na lastnosti usmerjenega jedkanja naslednji: večji pretok plina povzroča, da je profil bolj izotropen, medtem ko večje silicijevo breme povzroča, da je profil bolj pozitivno konusen (angl. *positive tapered*). Pomembno je tudi plinsko razmerje med plinoma SF₆ in O₂, ker preveliko ali premajhno razmerje dela profil bolj izotropen oziroma bolj pozitivno konusen (to je nagnjenega v smeri navzven). Podobno se na obliko profila odzivata tudi RF-moč in tlak, ki soodvisno vplivata na energijsko porazdelitev ionov ter gostoto nevtralnih delcev in ionov v plazmi. Nepravilna izbira le-teh povzroča poleg omenjenega še stranske efekte na obliko profila, kot so ukrivljenost (angl. *bowing*) in zasekanost (angl. *trenching*).



Slika 4: Hitrost jedkanja silicija in selektivnost jedkanja oksidne maske v odvisnosti od skupnega pretoka plina

Nanos plasti SiO_xF_y v glavnem določa vsebnost kisika v plinu SF_6 in temperatura podlage. Eksperimenti so pokazali, da je zmes od 22 % do 28 % kisika v celotni zmesi plina tista, ki zagotavlja ustrezno pasivacijo stranskih sten, hkrati pa omogoča ustrezno odstranitev pasivacije z dna silicija [3].

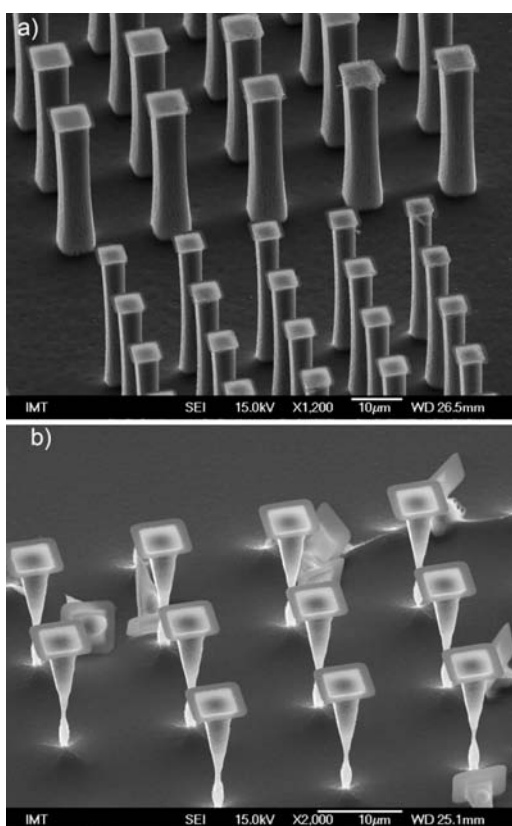
Slika 3 prikazuje hitrost jedkanja silicija ER_{Si} in selektivnost jedkanja oksidne maske S_{ox} v odvisnosti od deleža O_2 v skupnem pretoku plina za naslednje parametre jedkanja: sobna temperatura, RF-moč 150 W, skupni pretok plina pri standardnih razmerah $36 \text{ cm}^3/\text{min}$ (tj. 36 sccm), tlak 0,16 mbar in silicijevo breme 80 cm^2 . Vidimo, da hitrost jedkanja silicija naglo upada, če koncentracija O_2 narašča preko vrednosti 30 %. Takrat debelejša pasivacijska plast začne zavirati dostop nevtralnemu delcem do silicijevih površinskih vezi.

Na **sliki 4** je prikazana odvisnost hitrosti jedkanja silicija in selektivnost jedkanja oksidne maske od skupnega pretoka plina za enake parametre jedkanja, kot so bili uporabljeni na **sliki 3**, in za razmerje pretokov plinov $\Phi(\text{SF}_6/\text{O}_2) = 3$, to je 25 % O_2 v skupnem pretoku. Hitrost jedkanja narašča s količino dovedenega plina, kar je razumljivo, saj večja količina plina generira bogatejšo plazmo z več delci, ki sodelujejo

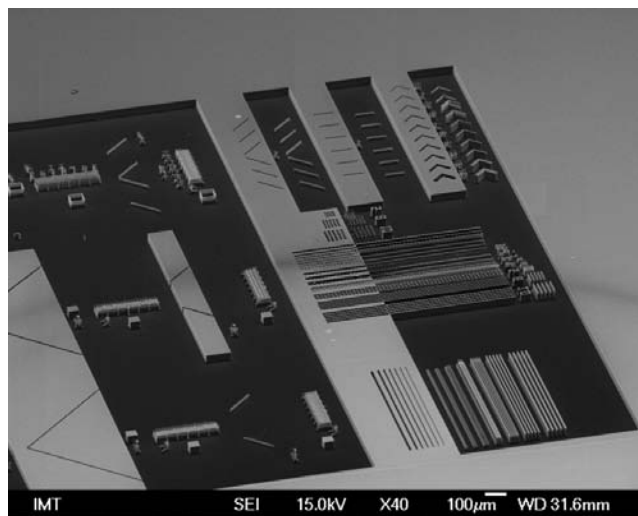
pri jedkanju. Naraščanje ER_{Si} s pretokom plina ni linearno, ker se pri konstantnem tlaku in pri večjem pretoku generira relativno manj delcev. To je posledica nižje ionizacijske proste poti elektronov.

Selektivnost jedkanja oksidne maske je definirana z razmerjem med hitrostjo jedkanja silicija in hitrostjo jedkanja oksida. Čim večja je ta, manj maskirnega oksida porabimo za to, da izjedkamo enako globino silicija. S **slik 3** in **4** je razvidno, da je selektivnost odvisna tako od deleža O_2 v skupnem pretoku kakor tudi od velikosti skupnega pretoka plina in je v prvi vrsti funkcija hitrosti jedkanja silicija: čim večja je hitrost, tem večja je selektivnost. Vzrok je v dejstvu, da se hitrost jedkanja oksida s fluorovimi radikali znatno poveča, če so prisotni še ioni (angl. *ion-assisted etching*). Energija in gostota ionov sta v veliki meri funkciji RF-moči in tlaka, zato je pri konstantni RF-moči in tlaku hitrost jedkanja oksida bolj ali manj konstantna.

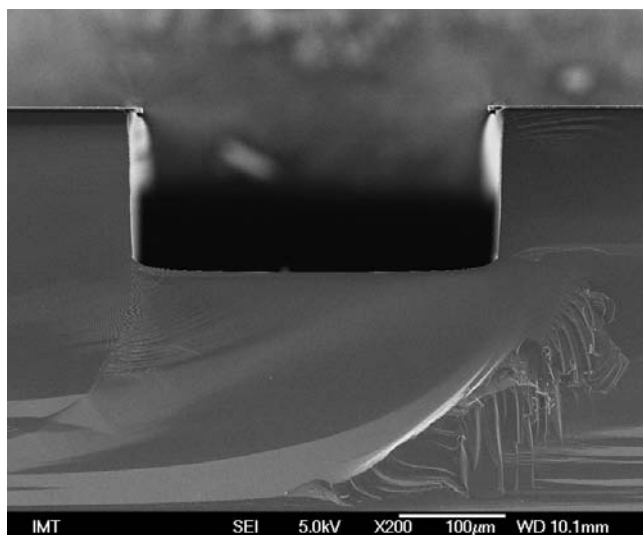
Sliki 5a in **5b** prikazujeta rezultat jedkanja stebričkov, maskiranih z oksidno masko dimenzij $6,5 \mu\text{m} \times 6,5 \mu\text{m}$. V prvem primeru je bil uporabljen optimalen set procesnih parametrov (RF-moč = 145 W, tlak 0,13 mbar, skupni pretok plinov 36 sccm , razmerje plinov $\Phi(\text{SF}_6/\text{O}_2) 2,5$ in silicijevo breme 40 cm^2 . Primer jedkanja, prikazanega na **sliki 5b**, se razlikuje od primera na **sliki 5a** v tem, da ni bilo uporabljenega dodatnega silicijevega bremena, RF-moč pa dvignjena iz 145 W na 180 W. Razvidno je, da manjše breme povzroča večje lateralno spodjedkavanje struktur in da večja energija ionov pri relativno visokem tlaku omogoča, da imajo razpršeni ioni v plazmi, ki bombardirajo silicijevo površino pod različnimi koti, zadostno energijo, da odstranjujejo pasivacijsko plast iz sten stebričkov.



Slika 5: Polje silicijevih stebričkov pod 600 nm debelo oksidno masko: a) skoraj vertikalni profil z rahlim lateralnim spodjedkavanjem silicija pod oksidno masko in profilom, ki kaže rahel efekt ukrivljenosti profila in b) močno spodjedkana struktura z močnim negativnim konusom



Slika 6: Jedkanje preizkusnih silicijevih mikrostruktur lateralnih dimenzij med $3 \mu\text{m}$ in nekaj $100 \mu\text{m}$ ter z višine okrog $20 \mu\text{m}$



Slika 7: Realizacija mikrokanala v prerezu strukture, širine 300 μm in višine 145 μm

Na **sliki 6** je prikazan primer optimiziranega jedkanja preizkusnih silicijevih mikrostruktur, kot so polni in votli stebrički ter okrogle in pravokotne votline. Mikrostrukture so izdelane na silicijevi ploščici premera 100 mm, s 40-odstotnim silicijevim bremenom. Hitrost jedkanja je v tem primeru 1,8 $\mu\text{m}/\text{min}$, selektivnost jedkanja silicija glede na oksidno masko je 70 ter lateralno spodjedkavanje 4-odstotno. Zavedati se moramo, da zaradi kompleksnosti procesa jedkanja vsaka nova oblika zahteva individualno optimizacijo [4, 5].

Slika 7 prikazuje primer 300 μm širokega in 145 μm visokega silicijevega mikrokanala v prerezu. Za masko je bil uporabljen fotorezist debeline 8 μm . V tem primeru je imela silicijeva bremenska ploščina samo 2,75 cm^2 , zato je bila hitrost jedkanja silicija 1,8 $\mu\text{m}/\text{min}$ dosežena pri znižanih vrednostih parametrov jedkanja: pri pretoku plina SF_6 15 sccm, tlaku 0,13 mbar in RF-moči 135 W [6].

5 SKLEP

Raziskan in razvit je bil postopek suhega jedkanja silicija v standardnem RIE-sistemu za suho jedkanje tankih izolacijskih plasti s SF_6/O_2 -kemijo pri sobni temperaturi. Proces jedkanja je bil uporabljen pri razvoju različnih MEMS aplikacij, kot so izdelava mikrofluidnih kanalov za mikroprocesorje goriva, mikročrpalke, mikrokonice, itd. Glavna pomanjkljivost omenjenega načina pred namenski suhimi jedkalniki za globoko jedkanje silicija (ang. *Deep Reactive Ion Etching* – DRIE) je v omejeni hitrosti jedkanja, prevelikem spodjedkavanju (tipično 5–10 % glede na globino jedkanja), nizki selektivnosti in predvsem omejeni možnosti jedkanja struktur z velikim razmerjem med višino in širino struktur (AR). To razmerje je tipično omejeno na $\text{AR} = 4\text{--}6$, nasprotno od DRIE-jedkalnikov, kjer je mogoče doseči AR tudi večje od 20. Prav tako pri DRIE ni lateralnega spodjedkavanja, doseči pa je mogoče znatno večje hitrosti (tipično 5–10 $\mu\text{m}/\text{min}$) in večje selektivnosti jedkanja na oksidno masko (100–200).

ZAHVALA

Raziskavo je sofinanciralo Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije.

6 LITERATURA

- [1] M. Elwenspoek and H. Jansen, *Silicon Micromachining*, Cambridge University Press, Cambridge CB2 1RP, 1998.
- [2] H. Jansen, H., M. De Boer, R., Legtenberg, M., Elwenspoek, J. *Micromech. Microeng.*, 5 (1995), 115–120
- [3] D. Vrtačnik, D. Resnik, U. Aljančič, M. Možek, S. Amon, *Microelectronics, MEMS, and Nanotechnology*, 11–14. 12. 2005, Brisbane, Avstralija, 11-14 December 2005. *Proceedings of SPIE on CD-ROM*, 2005, vol. 6037, 603720
- [4] K. P. Müller, K. Roithner, H.-J. Timme, *Microelectron. Eng.*, 27 (1995), 457–462
- [5] C. J. Mogab, *J. Electrochem. Soc.*, 124 (1977), 1262–1268
- [6] D. Vrtačnik, D. Resnik, U. Aljančič, M. Možek, S. Penič, S. Amon, 44th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials and the Workshop on Advanced Plasma Technologies, 17.–19. 9. 2008, Fiesca, *Proceedings*, 2008, str. 93–98