

# SISTEM ZA SUHO JEDKANJE SILICIJA S KSENONOVIM DIFLUORIDOM

Erik K. Juvan, Matej Možek, Borut Pečar, Drago Resnik, Danilo Vrtačnik

ZNANSTVENI ČLANEK

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

## POVZETEK

Predstavljeni so zasnova, razvoj, izdelava, uporaba in karakterizacija sistema za suho izotropno jedkanje silicija s ksenonovim difluoridom. Cilj je bil narediti prilagodljivo, majhno in premično jedkalno napravo, sestavljeno iz krmilne elektronike in vakuumskega sistema. Na izdelanem sistemu so bila uspešno izvedena preizkusna jedkanja na silicijevih podlagah za določitev jedkalnih parametrov, kot so hitrost in globina jedkanja v odvisnosti od učinkovite izpostavljene površine silicija ter od časa jedkanja, selektivnost glede na maskirno plast SiO<sub>2</sub> in usmerjenost jedkanja.

**Ključne besede:** suho jedkanje silicija, ksenonov difluorid, izotropno jedkanje, vakuumski sistem

## System for dry etching of silicon by xenon difluoride

### ABSTRACT

Design and implementation of silicon dry etching system with xenon difluoride is presented. The goal was to build a portable, self-sufficient and flexible dry etching system using xenon difluoride as the etchant gas. The system comprises control electronics and a vacuum system. A detailed testing and verification of the realized vacuum system and electronics with associated software was performed. Finally, etching of silicon samples was done to determine the typical etching parameters such as silicon etch rate as a function of exposed silicon area and etch time, etching selectivity to silicon dioxide mask and degree of process isotropy.

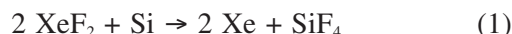
**Keywords:** silicon dry etching, xenon difluoride, isotropic etching, vacuum system

## 1 UVOD

Pri razvoju in izdelavi eno- ali večstransko vpetih, prosto gibajočih se mikroelektromehanskih (MEMS) struktur, kot so mikroročice, glavniške strukture za resonatorje, mostički, membrane, ki so največkrat izdelane s postopki globinske mikroobdelave (suho ali mokro jedkanje silicija), je potreben na koncu še sprostitveni jedkalni proces za ločitev silicijeve strukture od podlage. Princip jedkanja je prikazan na **sliki 1**. V

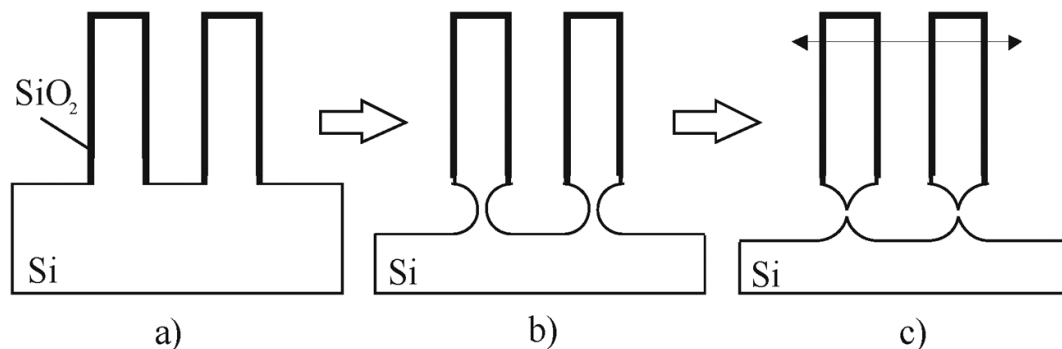
tem procesnem koraku je treba predvsem paziti, da ne poškodujemo predhodno izdelane občutljive mehanske mikrostrukture. Uporaba ksenonovega difluorida (XeF<sub>2</sub>) pomeni izboljššan način za sprostitveno suho izotropno jedkanje z veliko prednostmi pred drugimi silicijevimi jedkali [1, 2].

Prednosti uporabe ksenonovega difluorida so: visoka hitrost jedkanja, skoraj 100-odstotna izotropija, visoka selektivnost – hitrost jedkanja silicija proti maskirnim materialom, kot so silicijev dioksid (SiO<sub>2</sub>), silicijev nitrid (SiN), aluminij ali fotorezist [3]. Izredno pomembno dejstvo je tudi, da v primerjavi z mokrimi jedkali pri jedkanju s XeF<sub>2</sub> ni težav z zadrževanjem jedkala v ozkih režah med podlago in strukturo zaradi odsotnosti površinske napetosti, ker imamo jedkalo v plinastem stanju in ne v tekočem. Uravnotežena kemijska enačba reakcije silicija (Si) in XeF<sub>2</sub> je:



Reakcija jedkanja silicija je eksotermne narave s potencialnimi neželenimi stranskimi produkti: SiF, SiF<sub>2</sub>, SiF<sub>3</sub>, in Si<sub>2</sub>F<sub>6</sub> [4]. Parni tlak XeF<sub>2</sub> pri sobni temperaturi je približno 6 mbar [5]. Ob stiku XeF<sub>2</sub> z vodno paro se tvori fluorovodikova kislina (HF), ki v procesu jedkanja močno znižuje selektivnost. Za izvedbo ponovljivega, kontroliranega ter varnega procesa jedkanja je nujno potreben tako računalniško voden krmilni sistem z mikrokontrolerjem, ki omogoča natančno časovno kontrolo in zapisovanje korakov [6], kot tudi zagotovitev ustreznega vakuuma v jedkalni komori in povezovalnih ceveh [7]. To so bile glavne smernice pri razvoju novega sistema.

V predstavljenem delu smo načrtali in realizirali sistem za suho jedkanje silicija z uporabo ksenonovega difluorida kot jedkalnega plina. Dobljeni rezultati preizkusnih jedkanj silicijevih vzorcev so bili povsem



**Slika 1:** Primer sproščanja silicijevih mikrostruktur s suhim jedkanjem s XeF<sub>2</sub>: a) anizotropno globinsko jedkanje (DRIE proces) in nanos maskirne plasti SiO<sub>2</sub>, b) izotropno jedkanje s XeF<sub>2</sub>, c) končna sproščena struktura

v skladu s pričakovanimi in so potrdili ustreznost zasnovanega načina.

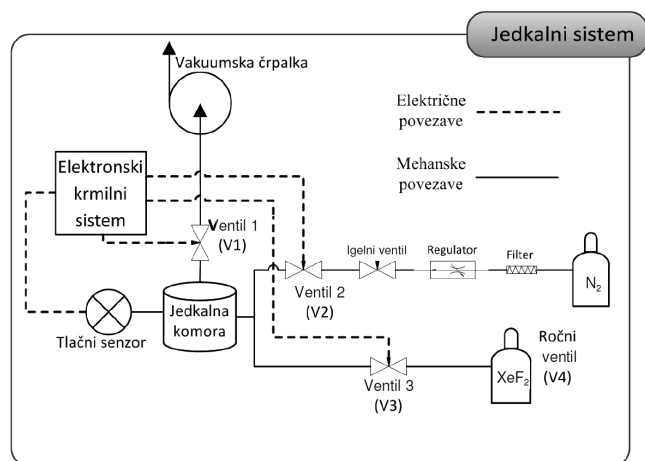
## 2 ZASNOVA JEDKALNEGA SISTEMA

Jedkalni sistem s ksenonovim difluoridom je bil zasnovan na osnovi dveh podsklopov, in sicer mehanskega in električnega, in je shematsko prikazan na **sliki 2**.

Mehanski del sestavlja jedkalna komora in niz standardnih vakuumskih gradnikov, kot so: trije električno krmiljeni visokovakuumski ventili, tlačni senzor (kapacitivni manometer), dvostopenjska rotacijska vakuumška črpalka, aluminijasta tlačna posoda s  $\text{XeF}_2$ , vakuumška komora, zunanji priključek za dovod dušika za preprihanje komore in plinskih povezav, regulatorja, igelnega ventila, filtra in ogrodja sistema ter povezovalnih cevi iz nerjavnega jekla.

Električni del (krmilni sistem) sestavljajo ločeni moduli: napajalno vezje, glavna krmilna plošča, vezje za uporabniški vmesnik in krmilnik perifernih enot (ventilov in tlačnega sensorja).

Predstavljena zasnova ima nekatere omejitve, ki jih je treba upoštevati. Bistvena omejitev je, da tak sistem ne zagotavlja visoke ponovljivosti procesa, ker je količina plina v jedkalni komori odvisna od količine plina  $\text{XeF}_2$  v tlačni posodi in povezovalnih cevi, ki pa se med tem, ko plin porabljamo, spreminja, s tem pa se spreminjajo tudi tlačne razmere v komori. Za boljšo ponovljivost jedkalnega procesa lahko v sistem uvedemo dodatno ekspanzijsko komoro. Ta omogoča, da v jedkalno komoro vedno vnesemo natančno in ponovljivo količino plina  $\text{XeF}_2$  [5]. Izdelan sistem v tej fazi ne vključuje dodatne ekspanzijske posode, ima pa predvidene vse elemente za omenjeno nadgradnjo.

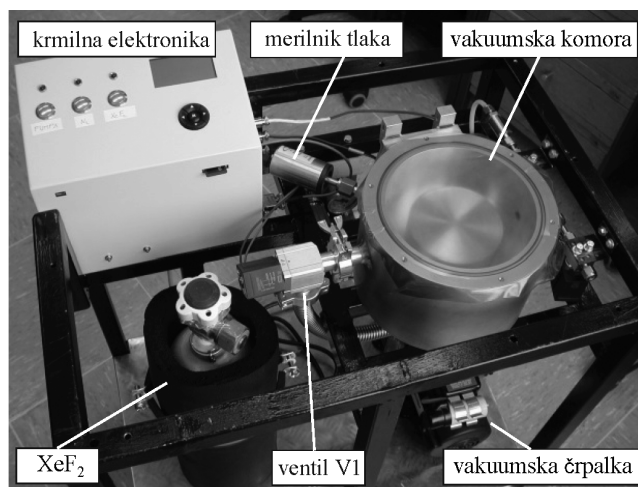


**Slika 2:** Bločni diagram zasnovanega sistema

## 3 KONSTRUKCIJSKA IZVEDBA SISTEMA

Konstruktivna izvedba jedkalnega sistema brez ekspanzijske komore ter namestitve posameznih komponent je prikazana na **sliki 3**. Jedkalna komora je narejena iz strojno obdelanega bloka aluminija z delovno prostornino  $1,19 \text{ dm}^3$  in krožno delovno površino  $95 \text{ cm}^2$ . Jedkalna komora omogoča jedkanje silicijevih podlag maksimalnega premera  $100 \text{ mm}$ .

Za doseg zahtevanega vakuuma in črpanja reaktantov je uporabljena dvostopenjska vakuumška črpalka Edwards E2M-1.5 z največjim pretokom  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$  in maksimalnim doseženim absolutnim tlakom  $5 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$ . Senzor tlaka je Baratron 750B11TCD2GG z 1-odstotno natančnostjo, z najvišjim merjenim tlakom  $13 \text{ mbar}$  in najnižjo zanesljivo merilno tlačno vrednostjo  $7 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ . Med jedkalno komoro in vakuumško črpalko je vgrajen vakuumški ventil (V1) XLS-16, SMC Inc. Ventil (V3) XSA2-32S je nameščen med tlačno posodo  $\text{XeF}_2$  in jedkalno komoro. V sistemu je še linija elementov, ki skrbijo za filtracijo in tlačno regulacijo dušika, ki ga uporabnik v sistem pripelje od zunaj. Ti elementi so: mehanski filter, regulator, igelni ventil in vakuumški ventil (V2), XSA1-12S, ki je zadnji v liniji in povezan z jedkalno komoro.

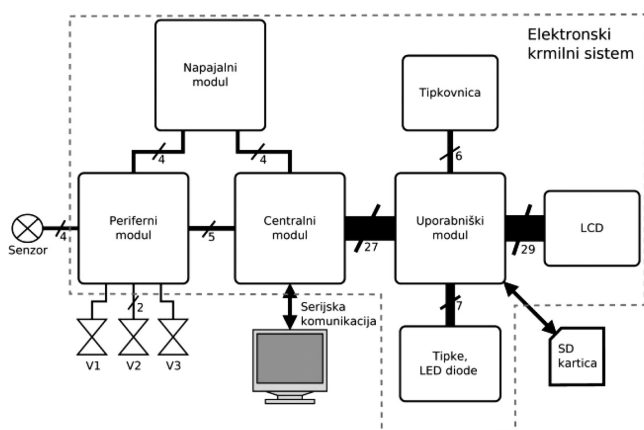


**Slika 3:** Jedkalni sistem

## 4 ELEKTRONSKI KRMILNI SISTEM

Elektronski krmilni sistem skrbi za pregled, varnost, nastavitve in zapisovanje parametrov ter avtomatizacijo jedkalnega procesa. Načrtovan in izdelan je modularno kot skupek medsebojno povezanih modulov, ki so: napajalni, periferni, uporabniški in centralni. Moduli in njihove povezave so prikazane na **sliki 4**.

Za napajalni modul je bil izdelan stikalni napajalnik, ki proizvede dva napetostna nivoja:  $5 \text{ V}$  in  $24 \text{ V}$  enosmerne napetosti. Potrebni  $7 \text{ V}$  enosmerne nape-



Slika 4: Bločni diagram krmilne elektronike

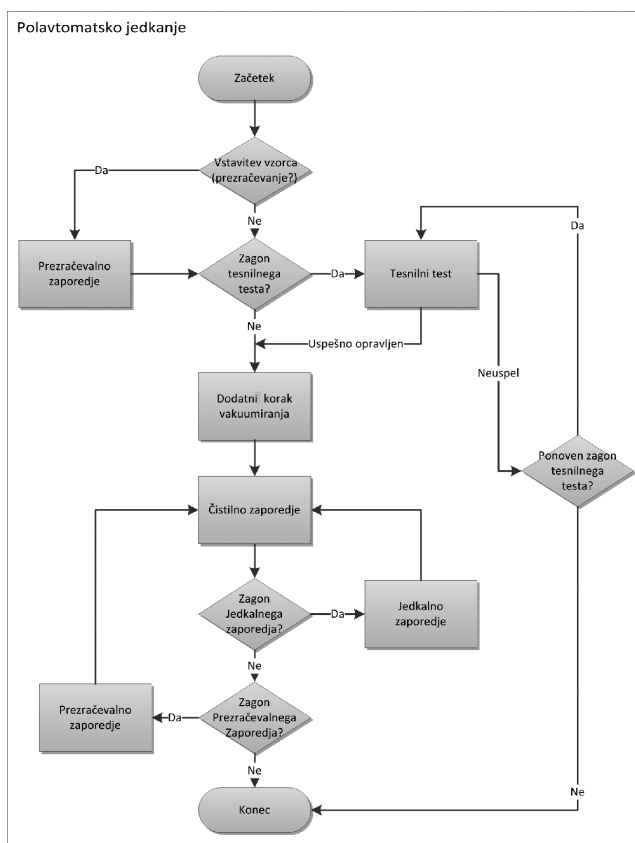
tosti za napajanje ventilov je generiranih iz 24 V s stikalnim regulatorjem navzdol (angl. *step down*). Periferni modul vsebuje gonilne tranzistorje za krmiljenje ventilov in napetostni delilnik za znižanje izhodne napetosti tlačnega sensorja. Prožilni signali za ventile so pripeljani iz centralnega modula. Elementi uporabniškega modula so: smerna tipkovnica, LCD-zaslon in tri namenske tipke za ročno krmiljenje ventilov. Poleg tega vsebuje modul še priključek za SD-kartico za možnost zapisovanja in shranjevanja podatkov. Podatki se shranjujejo v tekstovne datoteke, ki jih lahko kasneje obdelamo na osebni računalniku.

Središče krmilne elektronike je centralni modul, ki skrbi za komunikacijo in krmiljenje drugih modulov in njihovih perifernih enot. Osnova centralnega modula je razvojna plošča STM32VLDISCOVERY z mikrokrmilnikom STM32F100RB, ki je zasnovan okoli procesnega jedra ARM Cortex-M3. Poleg tega je na vezju še pretvornik UMFT230XA (USB ↔ UART), ki omogoča komunikacijo z osebnim računalnikom preko standardnega USB-vhoda.

## 5 NAČINI DELOVANJA SISTEMA

Uporaba sistema poteka na dva načina: ročno ali polavtomatsko. Pri ročni uporabi poteka krmiljenje ventilov s pritiskom na krmilne tipke. Ročni način je namenjen predvsem preizkušanju sistema. Za uporabo sistema za jedkanje je primeren predvsem polavtomatski način.

Postopek jedkanja s ksenonovim difluoridom v polavtomatskem načinu je fiksni proces, sestavljen iz štirih funkcijsko ločenih zaporedij (ciklov, korakov): preizkus puščanja vakuumskega sistema, čistilni cikel, jedkalni cikel in prezračevalni cikel (slika 5). Čeprav je potek zaporedij vnaprej določen, je spremenljivost procesa v nastavitvah programskih parametrov: število ciklov jedkanja, čas trajanja cikla, število čistjenj ko-



Slika 5: Potek polavtomatskega načina jedkanja

more, najvišji dovoljeni tlak v komori pred začetkom jedkanja itd.

**Preizkus puščanja** vakuumskega sistema je postopek za preverjanje kakovosti tesnjenja vakuumskega sistema. Za jedkanje silicijevih struktur s  $\text{XeF}_2$  je pogoj, da je puščanje manjše od  $3 \cdot 10^{-5}$  mbar L/s za dan volumen (pribl. 1,5 L).

V **čistilnem ciklu** očistimo komoro in povezovalne cevi stranskih produktov jedkanja ( $2 \text{ Xe}$  in  $\text{SiF}_4$ ) s preplakovanjem komore z dušikom v zanki, v kateri se izmenjujeta procesa evakuiranja in dovajanja dušika.

V **jedkalnem ciklu** prazno komoro evakuiramo in nato dovajamo jedkalni plin skozi vakuumski ventil V3 iz jeklenke  $\text{XeF}_2$ . Hitrost, stopnja in trajanje jedkanja je določeno s programskimi parametri.

**Prezračevalni cikel** z dovajanjem dušika v komoro izenači notranji tlak z zunanjim in omogoči dvig pokrova za vstavitve ali odstranitev vzorca iz komore.

Celoten postopek jedkanja je torej sestavljen iz naslednjega zaporedja posameznih korakov:

- vklop sistema in segrevanje vakuumske črpalke in tlačnega sensorja na delovno temperaturo,
- sestava nove programske sekvence oziroma izbira obstoječega jedkalnega programa,
- vstavitve vzorca v jedkalno komoro,
- preizkus puščanja vakuumskega sistema,

- čistilni cikel,
- jedkalni cikel,
- prezračevalni cikel,
- odstranitev vzorca iz komore.

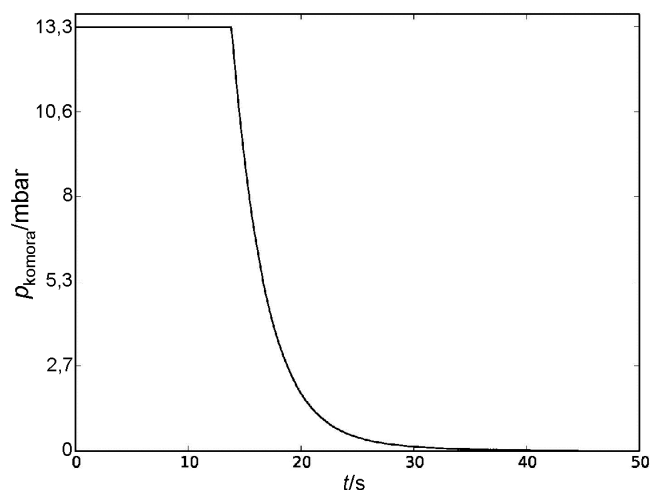
## 6 PREIZKUŠANJE VAKUUMSKEGA SISTEMA

**Slika 6** prikazuje potek evakuiranja prazne komore, ki je v tem primeru trajalo 56 s. V tem času se je v komori znižal tlak od atmosferskega do  $7 \cdot 10^{-3}$  mbar. Signal sensorja je prvih 13 s vpet v zgornjem območju tlačnega sensorja (nad 13 mbar), zato časovni potek ni zajet. Prikazan je samo eksponencialni potek padca tlaka med evakuiranjem komore v kazalnem območju  $10^{-3}$ –10 mbar.

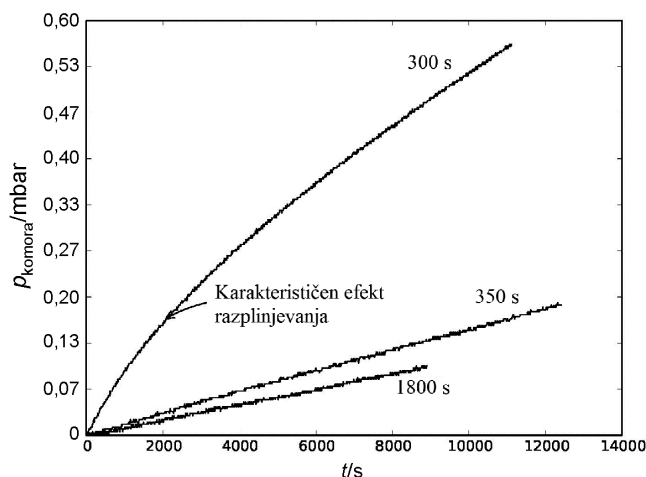
Preizkus na tesnost vakuumskega sistema je prikazan na **sliki 7**. Opravljeni so bili trije preizkusi evakuiranja in ugotavljanja naraščanja tlaka v komori.

Pri prvem preizkusu smo neočiščen sistem evakuirali 5 min (300 s) do tlaka  $7 \cdot 10^{-3}$  mbar. Po zaprtju ventila V1 je tlak v komori narasel na 0,55 mbar v 180 min (10.800 s). Velikost naraščanja pretoka plina zaradi netesnosti sistema in razplinjevanja v komori je bila  $7,6 \cdot 10^{-5}$  mbar L/s. Začetni eksponenten potek krivulje na **sliki 7**, tj. hitro naraščanje tlaka je posledica učinka razplinjevanja (angl. *outgassing*) ali navideznega puščanja (angl. *virtual leak*) in ne samo slabega tesnjenja sistema, kar potrjujeta naslednja dva preizkusa.

Pri drugem preizkusu je bil sistem najprej temeljito očiščen z 2-propanolom, posušen in nato evakuiran v 350 s na  $7 \cdot 10^{-3}$  mbar. Po zaprtju ventila V1 je tlak v komori narasel po 180 min (10.800 s) na 0,17 mbar. Velikost puščanja in razplinjevanja je bila  $2,3 \cdot 10^{-5}$  mbar L/s. Sistem je bil pod nadzorom še dodatnih 20 h in v tem času je tlak dosegel vrednost 1,2 mbar, preračunamo puščanje pa je bilo  $2,4 \cdot 10^{-5}$  mbar L/s.



**Slika 6:** Potek tlaka v komori med evakuiranjem

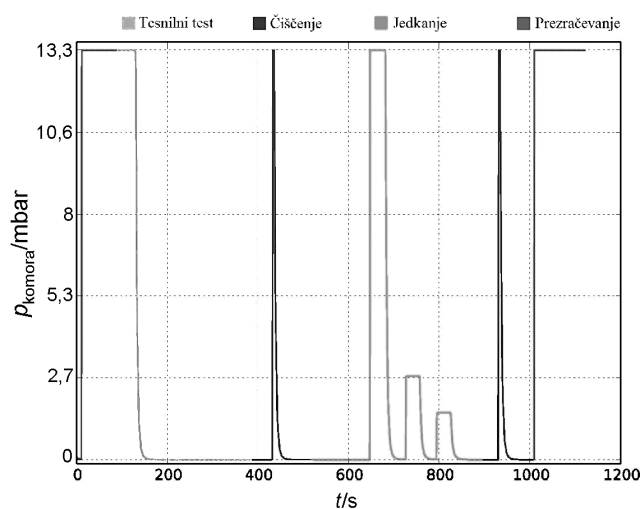


**Slika 7:** Tri meritve puščanja vakuumskega sistema po evakuiranju komore 300 s, 350 s in 1800 s

Pri tretjem preizkusu (**sliki 7**) je evakuiranje komore potekalo 30 min (1800 s) od začetnega tlaka 1,2 mbar na končno vrednost pod  $7 \cdot 10^{-3}$  mbar. Po zaprtju ventila V1 je tlak v komori narasel v 150 min (9000 s) na 0,1 mbar. Pretok plina zaradi puščanja in razplinjevanja je bil v tem primeru  $1,7 \cdot 10^{-5}$  mbar L/s.

Tretji preizkus prikazuje realno sliko tesnjenja sistema, saj je z dolgim časom evakuiranja in temeljitim čiščenjem notranjih površin vpliv navideznega puščanja ali razplinjevanja zelo majhen in zato sprejemljiv za naš namen dela.

Za ugotavljanje pravilnega delovanja sistema je bilo treba pred priključitvijo  $\text{XeF}_2$  narediti še dodatne preizkuse brez procesnih plinov. Na ventil jedkalnega plina je bil pripeljan zunanji zrak preko tlačnega regulatorja. To je omogočilo varno simulacijo jedkalnega postopka in preizkušanja stabilnosti polavtomatskega načina. Potek tlaka v komori med opisanim preizkusom je prikazan na **sliki 8**. Razvidno je prezračevalno



**Slika 8:** Spremljanje tlaka v komori med simulacijo zaporedja korakov procesa

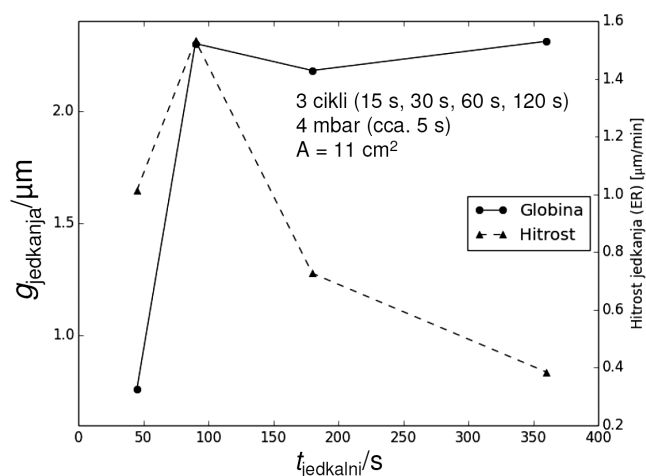
zaporedje na začetku in koncu, preizkus na vakuumsko tesnost, dva čistilna cikla in tri jedkalne cikle po 30 s.

## 7 REZULTATI JEDKANJA

Z izdelanim sistemom so bila opravljena jedkanja na enostransko mehansko poliranih vzorcih monokristalnih silicijevih podlag premera 75 mm. Vzorci silicija so bili pokriti z maskirno plastjo  $\text{SiO}_2$ , ki je definirala področja, kjer je bil silicij izpostavljen jedkalnemu procesu. Namen je bil eksperimentalno ovrednotiti nabor naslednjih jedkalnih parametrov: hitrost in globina jedkanja v odvisnosti od efektivne izpostavljene površine in časa jedkanja, hitrost jedkanja oksida, selektivnost, usmerjenost, najvišji dosežen tlak  $\text{XeF}_2$  v jedkalni komori in hitrost napolnitve komore s  $\text{XeF}_2$ .

Z eksperimentalnim delom je bila ugotovljen čas, potreben za stabilizacijo tlaka  $\text{XeF}_2$  v komori. Stabiliziran tlak je bil 5,1 mbar in je bil dosežen po približno 20 s od odprtja ventila V3 v komoro. Ta podatek je pomemben za določitev minimalnega časa trajanja jedkalnega cikla. Kajti krajši časi zmanjšujejo jedkalno hitrost (ker dovedemo manj plina), medtem ko daljši časi povzročajo tlake v komori, ki so večji od tistega v  $\text{XeF}_2$ -jeklenki (kar sledi iz kemijske enačbe 1). To pa ni željeno, ker lahko pride do kontaminacije jeklenke z jedkalnimi produkti.

Hitrost jedkanja  $\text{SiO}_2$  maskirne plasti  $ER_{\text{ox}}$  je bila ugotovljena z meritvami debeline  $\text{SiO}_2$  z elipsometrom SpecEl-2000VIS po vsakem ciklu jedkanja. Debelina oksida ( $\text{SiO}_2$ ) se je po 60 s jedkanja zmanjšala za 10,4 nm. Hitrost jedkanja oksida je tako  $ER_{\text{ox}} = 10,4 \text{ nm/min}$ . Hitrost jedkanja silicija  $ER_{\text{si}}$  je bila določena po 60 s jedkanja izpostavljene silicijeve rezine. Sprememba debeline silicija je bila 1,06  $\mu\text{m}$ , kar ustreza hitrosti jedkanja  $ER_{\text{si}} = 1,06 \mu\text{m/min}$ .



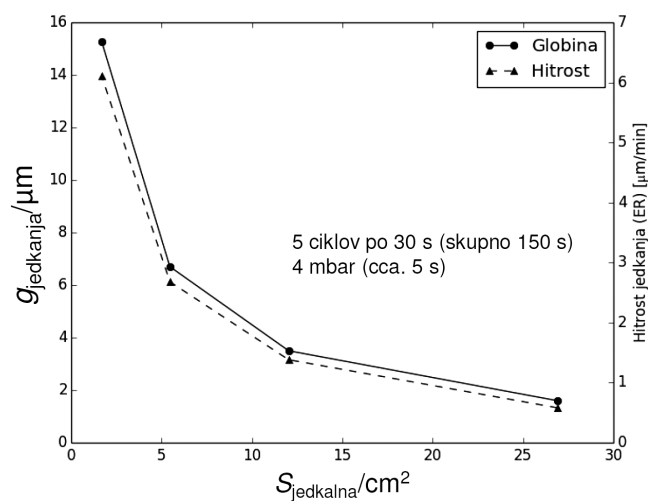
Slika 9: Globina in hitrost jedkanja v odvisnosti od časa trajanja jedkalnih ciklov

Selektivnost jedkalnega procesa  $S$ , ki je podana kot razmerje  $S = ER_{\text{si}} / ER_{\text{ox}}$ , je tako za dani primer 102.

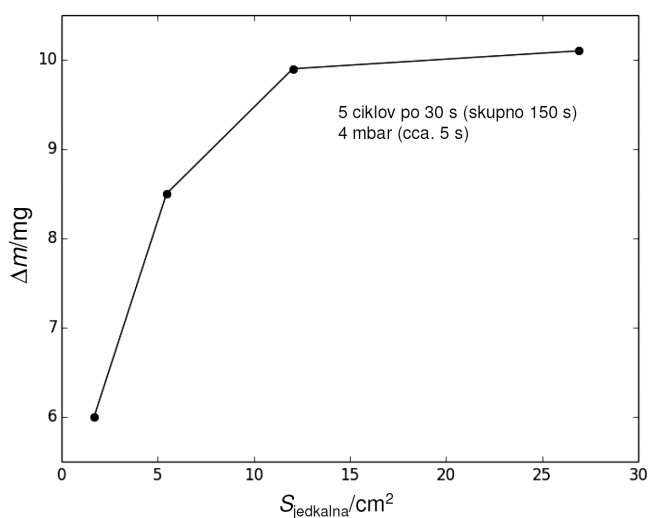
Za določitev hitrosti jedkanja v odvisnosti od trajanja jedkalnega cikla so bili jedkani štirje vzorci enakih površin ( $11 \text{ cm}^2$ ) pri začetnem tlaku  $\text{XeF}_2$  v komori 4 mbar. Na **sliki 9** je prikazana globina in hitrost jedkanja v odvisnosti od časa trajanja jedkalnega cikla. Vsi vzorci so bili jedkani s tremi zaporednimi jedkalnimi cikli. Za vsak posamezen vzorec smo povečali dolžino trajanja posamičnih ciklov, in sicer je bil jedkan prvi vzorec  $3 \times 15 \text{ s}$ , drugi  $3 \times 30 \text{ s}$ , tretji  $3 \times 60 \text{ s}$  in četrti  $3 \times 120 \text{ s}$ .

Ugotovljeno je bilo, da je globina jedkanja konstantna, če je čas jedkalnega cikla daljši od 30 s (**slika 9**). Slednje pomeni, da se v tem času porabi praktično ves jedkalni plin, ki je bil spuščen v komoro. S porabo reakcijskega plina pa posledično upade tudi hitrost jedkanja, kot je prikazano s črtkasto črto na **sliki 9**. Globina jedkanja je bila izračunana iz meritve spremembe mase vzorca pri predpostavki, da je jedkanje po površini vzorca uniformno. Masa vzorcev med jedkanjem je bila merjena s tehtnico Kern ABJ z ločljivostjo 0,1 mg.

Za ugotovitev hitrosti jedkanja v odvisnosti od efektivne jedkalne površine so bili jedkani štirje vzorci različnih površin ( $26,8 \text{ cm}^2$ ,  $12,03 \text{ cm}^2$ ,  $5,46 \text{ cm}^2$ ,  $1,69 \text{ cm}^2$ ) pri začetnem tlaku 4 mbar in skupnim jedkalnim časom 150 s (5 ciklov po 30 s). Kot je razvidno s **slike 10**, jedkalna hitrost  $ER_{\text{si}}$  z manjšanjem jedkalne površine strmo narašča, s tem pa posledično tudi globina jedkanja v dani časovni enoti. Iz tega lahko sklepamo, da bi bil pri danih parametrih jedkanj za površine manjše od  $10 \text{ cm}^2$  potreben manjši vnos jedkalnega plina na začetku ( $< 4 \text{ mbar}$ ), ali pa daljši čas jedkanja, saj se v 150 s na površini ne uspe porabiti za reakcijo ves vnos plina  $\text{XeF}_2$ . **Slika 11** prikazuje spremembo mase silicijevega vzorca v odvisnosti od jedkalne površine.



Slika 10: Globina in hitrost jedkanja v odvisnosti od velikosti izpostavljene površine silicija



Slika 11: Sprememba mase odjedkanega silicija v odvisnosti od izpostavljenosti površine silicija

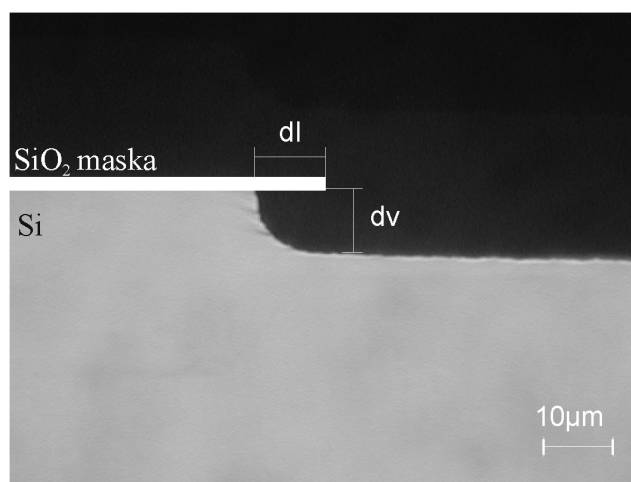
Ugotovljeno je bilo tudi, da je pri povečani hitrosti jedkanja površina silicijevega vzorca vse bolj groba (hrapava), kar je po vsej verjetnosti posledica burnejše kemijske reakcije na majhni izpostavljeni površini in močnejšega segrevanja silicijeve podlage.

Izotropija jedkalnega procesa je definirana kot kvocient hitrosti lateralnega jedkanja silicija pod masko (spodjedkavanje) in vertikalnega jedkanja zunaj področja maske, kar lahko ponazorimo z geometrijo ( $dl/dv$ ), kot je to prikazano na **sliki 12**. Rezultat pokaže, da dobimo praktično 100-odstotno izotropijo. Pri navadnih plazemskih jedkanjih je izotropija tipično med 50 % in 80 %, kar je s stališča sproščanja struktur neželjeno.

Za določitev usmerjenosti je bil jedkan vzorec z izdelanimi strukturami z masko termično raščene oksida debeline 60 nm. V tem primeru je bila efektivna jedkalna površina vzorca  $4,4 \text{ cm}^2$ . Vzorec je bil jedkan s petimi cikli dolžine 30 s in začetnim tlakom jedkalnega plina 4 mbar. Na **sliki 12** je prikazana mikrofotografija prereza vzorca pod optičnim mikroskopom. Globina jedkanja vzorca ( $dv$ ) je bila  $9,68 \mu\text{m}$ , lateralno spodjedkavanje ( $dl$ ) pa  $9,5 \mu\text{m}$ . Izotropija jedkanja je tako 98-odstotna, kar potrjuje odlično izotropnost procesa.

## 8 SKLEP

Predstavljeno je bilo načrtovanje, izdelava, uporaba in karakterizacija sistema za suho jedkanje s ksenonovim difluoridom. Načrtovanje in izdelava sistema po meri je bila cenejša od nakupa sedanjih rešitev na trgu. Razvoj sistema je obsegel izdelavo krmilne elektronike, načrtovanje ohišja za elektroniko in izdelavo ogrodja za integracijo sestavnih elementov.



Slika 12: Profil izotropno jedkanega vzorca silicija v prerezu

Po končanem razvoju in izdelavi jedkalnika je sledila karakterizacija sistema s preizkusnimi jedkanji. Opravljeni so bili štiri smiselno ločeni preizkusi na skupno 12 vzorcih. Namen karakterizacijskega jedkanja je bil spoznati praktično delovanje sistema in določitev jedkalnih parametrov, kot so: hitrost in globina jedkanja v odvisnosti od efektivne površine in časa jedkanja, selektivnost ter usmerjenost procesa, čas polnitve komore z jedkalnim plinom ter smiselna dolžina jedkanja v odvisnosti od izpostavljenosti silicijeve površine. Določen je bil smiseln čas polnitve komore 5 s (tlak 4 mbar), optimalni časi trajanja ciklov tipične površine jedkanj sproščenih struktur med  $5 \text{ cm}^2$  in  $40 \text{ cm}^2$ , ki so med 40 s oziroma 5 s. Izmerjena selektivnost jedkanja silicija na oksidno masko je bila nižja (102) od pričakovane (500), kar je verjetno posledica povečanega nastanka stranskih produktov. Jedkalni sistem laboratoriju LMSE omogoča dodaten proces pri razvoju novih MEMS-struktur.

## 9 LITERATURA

- [1] D. Vrtačnik, D. Resnik, U. Aljančič, M. Možek, B. Pečar, S. Amon, *47<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics, Devices and Materials and the Workshop on Organic Semiconductors, Technologies and Devices*, 28.–30. september 2011, Ajdovščina, Slovenija, str. 141–146
- [2] M. Tramšek; B. Žemva, *Acta Chim. Slov.*, 53 (2006), 105–116
- [3] I. W. T. Chan, K. B. Brown, R. P. W. Lawson, A. M. Robinson, Y. Ma, D. Strembecke, *Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 9.–12. maj 1999, Edmonton, Kanada, str. 1637–1642
- [4] P. B. Chu, J. T. Chen, R. Yeht, G. Lin, J. C. P. H. Elrett, A. Warneket, K. S. J. Pister, *1997 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators*, 16.–19. junij 1997, Chicago, ZDA, str. 665–668
- [5] F. Schreiner, G. N. McDonald, C. L. Chernick, *The Journal of Physical Chemistry*, 72 (1968) 4, 1162–1166
- [6] T. Risaku, M. Kazuyuki, E. Masayoshi, *Sensors and Actuators A: Physical*, 66 (1998), 1–3, 268–272
- [7] J. D. Brazzle, M. R. Dokmeci, C. H. Mastrangelo, *17<sup>th</sup> IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 25.–29. januar 2004, Maastricht, Nizozemska, str. 737–740