

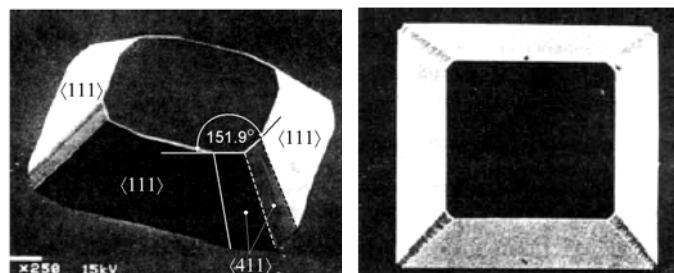
ASIMETRIČNA DIJAGONALNA KOMPENZACIJA KONVEKSNIH UGLOVA KOD SILICIJUMSKIH MIKROSTRUKTURA

Žarko Lazić, Milče Smiljanić

IHTM – Centar za mikroelektronske tehnologije i monokristale, Njegoševa 12, 11000 Beograd

Sadržaj – U radu je izvršen teorijski proračun, simulacija i eksperimentalna provera kompenzacione strukture za nagrizanje konveksnih uglova kod silicijumskih mikrostruktura. Kompenzaciona struktura je asimetrično dijagonalnog tipa bazirana na podgrizanju ravnima $\{100\}$. Ovaj tip kompenzacije konveksnih uglova je veoma pogodan kod nagrizanja uzanih struktura kod kojih "klasična" simetrična dijagonalna kompenzacija ne može da se primeni. Takođe, može da se primeni i kod struktura kod kojih se silicijum progriza da bi se struktura oslobodila, kao na primer kod nosača silicijumskih mikroredica.

ravni $\{411\}$ koje se brzo nagrizaju i koje međusobno zaklapaju ugao od 151.9° .



a)

b)

Sl. 1 a) delimično podgrižena struktura definisana kvadratnom maskom orijentisanom u pravcu $\langle 110 \rangle$ bez kompenzacije konveksnih uglova; b) ista struktura sa dijagonalnom kompenzijom (videti sl. 2a).

1. UVOD

Vlažno hemijsko anizotropno nagrizanje silicijuma u KOH je jedna od najznačajnijih tehnika u tehnologiji mikromašinstva. Uz pomoć ove tehnike mogu da se formiraju kvadratne ili pravougaone membrane, kao i razne komplikovane trodimenzionalne strukture. Ova tehnika se široko koristi za formiranje senzora, aktuatora i ostalih MEMS i MOEMS komponenata. Veliki problem za primenu ove tehnike kod (100) silicijuma je podgrizanje konveksnih uglova.

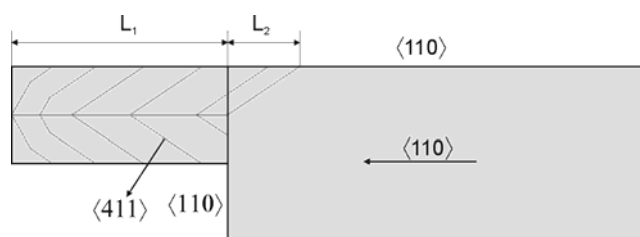
Problem podgrizanja konveksnih uglova može da se reši delimično ili potpuno, dodavanjem pogodno izabranih struktura na konveksnim uglovima maske za nagrizanje.

Kada se silicijumske strukture nagrizaju kroz otvore u oksidu koje sadrže samo konkavne uglove, izgled konačne strukture je precizno definisan kristalografskim ravnima u silicijumu koje se najsporije nagrizaju. Ovo je slučaj kada se napr. formira senzorska membrana pravougaonog oblika pri čemu su stranice pravougaone maske orijentisane u pravcu $\langle 110 \rangle$. Konačna struktura će biti definisana sa četiri ravni $\{111\}$ koje u odnosu na površinu silicijumske pločice orijentacije (100) stoje pod uglom od 54.74° (inverzna zarubljena piramida).

2. OSNOVNE KOMPENZACIONE STRUKTURE

Pauers i Sansen [1] su dodavali pravougaonik (sl. 2) ili trougao, dok su Bao et al. [2] koristili strukture u obliku slova L ili T. Ove metode kompenzacije imaju veliki nedostatak, jer zahtevaju veliki prostor oko strukture koja se kompenzuje i nisu pogodne za velike dubine nagrizanja.

Kada se nagriža struktura koja ima konveksne uglove (napr. zarubljena piramida), konačni izgled strukture je određen kristalografskim ravnima koje se najbrže nagrizaju. Front nagrizanja ovih ravni pojavljuje se na konveksnim (oštrim) uglovima na samom početku nagrizanja i napreduje vrlo brzo. Kao posledica ovoga, dolazi do zaobljavanja konveksnih uglova. Ako je napr. maska za nagrizanje pravougaonog oblika orijentisana u pravcu $\langle 110 \rangle$, ali sada ne kao otvor u oksidu, već kao ostrvo od oksida, konačna struktura će biti delimično ili potpuno podgrižena, u zavisnosti od vremena nagrizanja. Veliko podgrizanje čini ove strukture potpuno neupotrebljivim, naročito kod onih struktura koje moraju da budu strogo simetrične i čiji konveksni uglovi moraju da zaklapaju ugao od 90° (napr. akcelerometri). Na sl.1a prikazana je delimično podgrižena struktura (zarubljena piramida nagrizana sa kvadratnom maskom orijentisanom u pravcu $\langle 110 \rangle$) koja je ograničena sa četiri ravni $\{111\}$, sa приметnim zaobljavanjem konveksnih uglova. Ovo zaobljavanje je posledica pojavljivanja dve

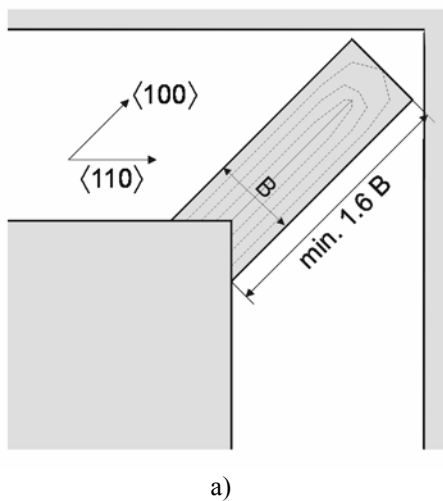


Sl.2) Kompenzaciona struktura sa pravougaonim elementom u pravcu $\langle 110 \rangle$;

Najjednostavnija kompenzaciona struktura ovog tipa prikazana je na sl.2. Na konveksni ugao na masci koja je usmerena u pravcu $\langle 110 \rangle$ dodat je pravougaonik, takođe usmeren u pravcu $\langle 110 \rangle$. Brzo-nagrizajuće ravni $\{411\}$ koje se pojavljuju na oba konveksna ugla kompenzacione strukture lateralno je podgrizaju. Front ovih ravni prikazan je isprekidanim linijama. Očigledno je da je konveksni ugao maske utoliko duže zaštićen od podgrizanja, ukoliko je pravougaonik duži. Takođe, sa sl.2 je očigledno da će po

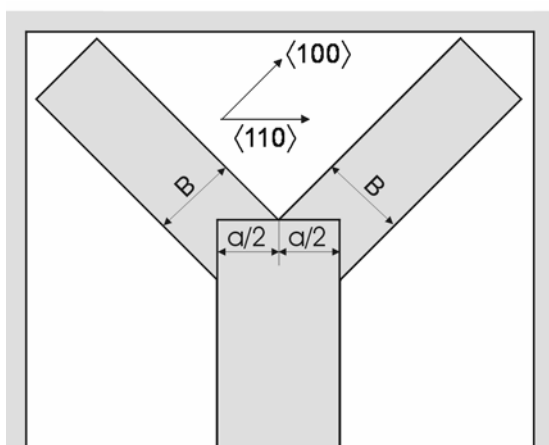
nestanku kompenzacione strukture konveksni ugao strukture ipak biti delimično podgrizen sa jedne strane.

Na sl.3 prikazan je dijagonalni tip kompenzacije: na konveksni ugao strukture dodata je kompenzaciona struktura u obliku pravougaonika, ali sada orijentisana u pravcu $\langle 100 \rangle$.



Sl. 3. Simetrična dijagonalna kompenzacija.

Ova kompenzaciona struktura se sa bočnih strana podgriza vertikalnim $\{100\}$ ravnima istom brzinom kojom se silicijum nagriza u dubinu (takođe ravan $\{100\}$). Zbog toga, širina B ove strukture mora da bude jednaka dvostrukoj dubini nagrivanja. Sa prednje strane kompenzacione strukture ponovo se pojavljuju ravni $\{411\}$. Front ovih ravni prikazan je isprekidanim linijama na sl.3. Dužina ove strukture mora da bude takva, da se izbegne podgrizanje konveksnih uglova ravnima $\{411\}$, pre nego što dođe do kompletnog podgrivanja vertikalnim ravnima $\{100\}$. Pokazano je [3] da za vodeni rastvor KOH odnos brzina nagrivanja ravni $\{411\}$ i $\{100\}$ praktično ne zavisi od temperature u opsegu od 60 do 100 °C, dok se sa povećanjem koncentracije KOH od 15% do 40% odnos ovih brzina nagrivanja smanjuje od 1.6 do 1.3, respektivno. Zbog toga za 33% rastvor KOH odnos između dužine i širine kompenzacione strukture mora da bude ≥ 1.6 , jer toliko iznosi odnos brzina nagrivanja ove dve ravni.



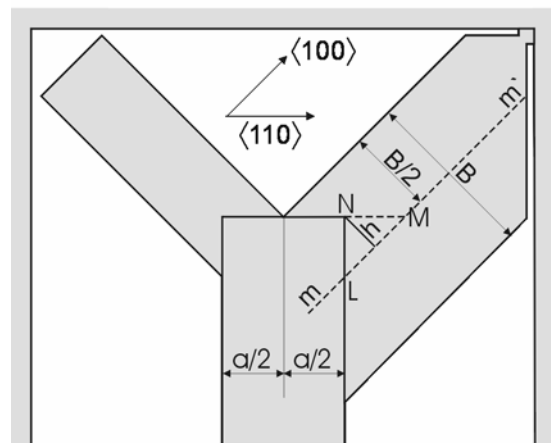
Sl. 4 Maksimalna širina kompenzacije B određena je širinom strukture a čiji se konveksni uglovi kompenzuju.

Uz pomoć ove strukture dobijaju se konveksni uglovi potpuno definisani ravnima $\{111\}$ od dna do vrha strukture. Primer jedne takve strukture prikazan je na sl.1b.

3. ANALIZA

U slučaju kada su dimenzije strukture koja se kompenzuje male i kada je dubina nagrivanja velika, ovaj tip kompenzacije ne može da se primeni. Na pr. takva jedna struktura je nosač mikrogredica koje služe kao osetljivi element u AFM (atomic force microscope). Na sl.4 prikazana je struktura gde je maksimalna širina B kompenzacione strukture jednaka $a\sqrt{2}/2$, gde je a širina strukture koja se kompenzuje. Očigledno je da ova kompenzacija može da se primeni samo za dubine nagrivanja $d=B/2$. Za veće dubine nagrivanja, po nestanku kompenzacione strukture doći će do podgrivanja konveksnih uglova.

Ovaj tip kompenzacije smo modifikovali na taj način, što smo strukturu proširili samo sa jedne strane i nazvali smo je *asimetrična dijagonalna kompenzacija* (sl.5). Pored toga, kompenzaciona struktura je vezana za spoljašnju ivicu strukture, da bi se što duže sprečilo pojavljivanje ravni $\{411\}$ [3].



Sl. 5 Asimetrična dijagonalna kompenzacija je primenjena samo na desni konveksni ugao.

Kao što se može videti sa sl.5, širina ove nove kompenzacije je B . Kompenzaciona struktura se podgriza sa bočnih strana vertikalnim ravnima $\{100\}$ i u momentu kada front ravni $\{100\}$ dostigne centralnu liniju mm' , od kompenzacione strukture ostaje samo trougao LMN koji je ograničen ravnima $\{100\}$ duž linije LM i $\{111\}$ duž linije MN . Dakle i dalje važi uslov da je širina kompenzacije jednaka dvostrukoj dubini nagrivanja, ali ne konačnoj dubini d nego nekoj dubini nagrivanja d' , tako da je $d' < d$. Ovaj trougao se sada podgriza preko ravni $\{100\}$ samo sa jedne strane, tako da se može uspostaviti relacija između B i ukupne dubine nagrivanja d :

$$d = \frac{B}{2} + h \quad (1)$$

gde je h visina trougla LMN sa sl.5. Ovaj izraz je aproksimativan, zato što se trougao LMN u tački M podgriza i preko ravni $\{411\}$, međutim kako je

$$MN = h\sqrt{2} \approx 1.41 \cdot h \quad (2)$$

tj. $MN/h < 1.6$ gde je 1.6 odnos brzina nagrizanja ravni $\{411\}$ i $\{100\}$. Odavde proizilazi da ova kompenzacija ne može da bude idealna, slično kompenzaciji sa sl.2, pa će zbog toga konveksni ugao biti neznatno podgrizen sa ravni $\{411\}$ što biti potvrđeno i eksperimentalno.

Prostim geometrijskim razmatranjem trougla LMN dobijamo da je:

$$h = \frac{B}{2} - \frac{a\sqrt{2}}{4} \quad (3)$$

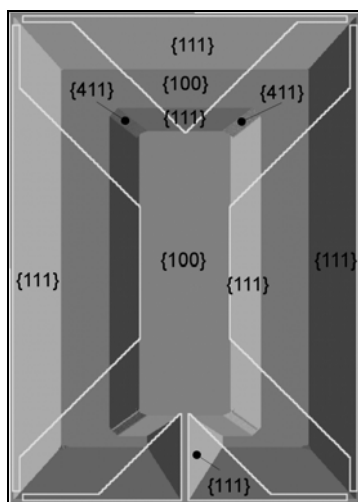
gde je a ukupna širina strukture koja se kompenzuje. Smenom (3) u (1) dobijamo konačnu vezu između B i d :

$$B = d + \frac{a\sqrt{2}}{4} \quad (4)$$

Ovaj izraz daje potrebnu širinu kompenzacije B za zadatu dubinu nagrizanja d .

4. SIMULACIJA

Simulaciju nagrizanja smo uradili uz pomoć shareware programa ACES beta2 (Anisotropic Crystalline Etching Simulation). U simulaciji je zanemarena brzina podgrizanja ravni $\{111\}$, što je za KOH opravana aproksimacija.



Sl. 6 Simulacija nosača mikrogredica u programu ACES beta2.

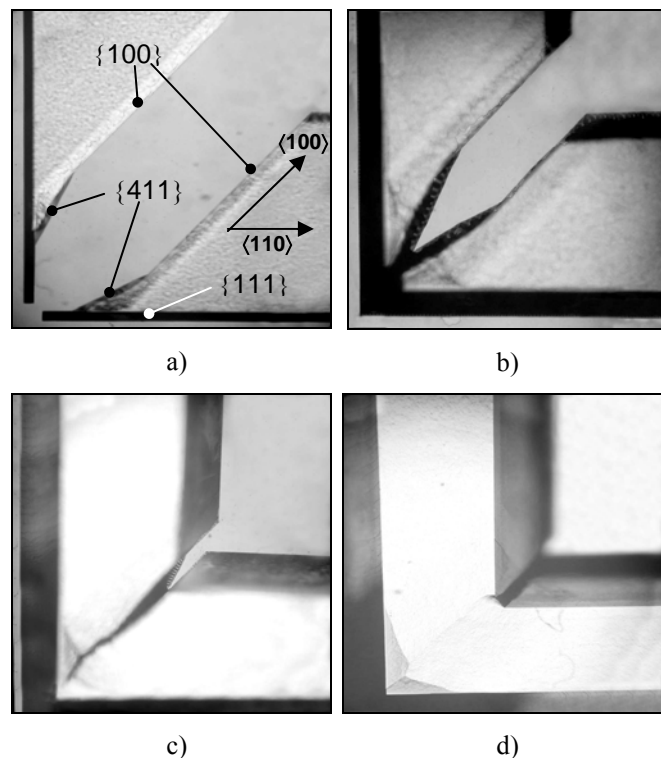
Na sl. 6 prikazani su rezultati simulacije nagrizanja nosača mikrogredica, koji ima četiri konveksna ugla koja su morala da se kompenzuju. Takođe su naznačene pojedine ravni. Ova komponenta se izrađuje na Si SOI pločicama čija je debljina oko $500\mu\text{m}$. Da bi se nosač mikrogredica oslobodio vrši se progrižanje Si po dubini pločice. Da bi se omogućilo dalje procesiranje, nosač mikrogredica ostaje vezan za Si pločicu

preko jedne konzole. Parametri strukture su $a=930\mu\text{m}$, $d=500\mu\text{m}$, tako da iz (4) sledi da je $B=828.8\mu\text{m}$. Na sl.6 belim linijama je naznačena originalna maska za nagrizanje. Sa slike se vidi da je i simulacija dala da su svi konveksni uglovi neznatno podgrizeni ravnima $\{411\}$.

5. EKSPERIMENT

Na sl.6 prikazan je jedan ugao nosača gredice sa asimetričnom dijagonalnom kompenzacionom strukturom posle nekoliko različitih dubina nagrizanja u KOH na temperaturi od $80\text{ }^\circ\text{C}$. Kao što se može videti, brzinu nagrizanja kompenzacione strukture skoro do kraja nagrizanja određuje brzina nagrizanja ravni $\{100\}$.

Na sl.6c prikazan je momenat neposredno pre nego što se spoje naspravne ravni $\{100\}$ i tada ostaje samo trougaona struktura. Upravo iz ovog razloga smo strukturu nazvali asimetričnom i momenat pojavljivanja ovog trougla, kao i njegovo potpuno nestajanje do kraja kompenzacije smo izveli analitički. Na sl.6d vidi se da je kompenzacija potpuna na dnu membrane, dok se na gornjoj površini još vidi (mutno) zaostatak od pomenute trougaone strukture.

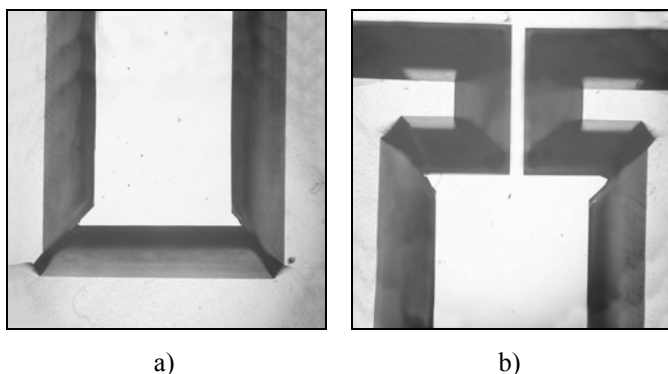


Sl. 6 Jedan ugao nosača gredice sa asimetričnom dijagonalnom kompenzacionom strukturom posle nekoliko različitih dubina nagrizanja u KOH na $80\text{ }^\circ\text{C}$: a) $100\mu\text{m}$; b) $300\mu\text{m}$; c) $400\mu\text{m}$; d) $470\mu\text{m}$.

Na sl.7 prikazane su prednja (a) i zadnja (b) strana nosača gredice. Na fotografijama je uočljiva asimetrija između naspravnih uglova nosača gredice, što je posledica nepreciznosti prilikom poravnavanja maske u odnosu na pravac $\langle 110 \rangle$.

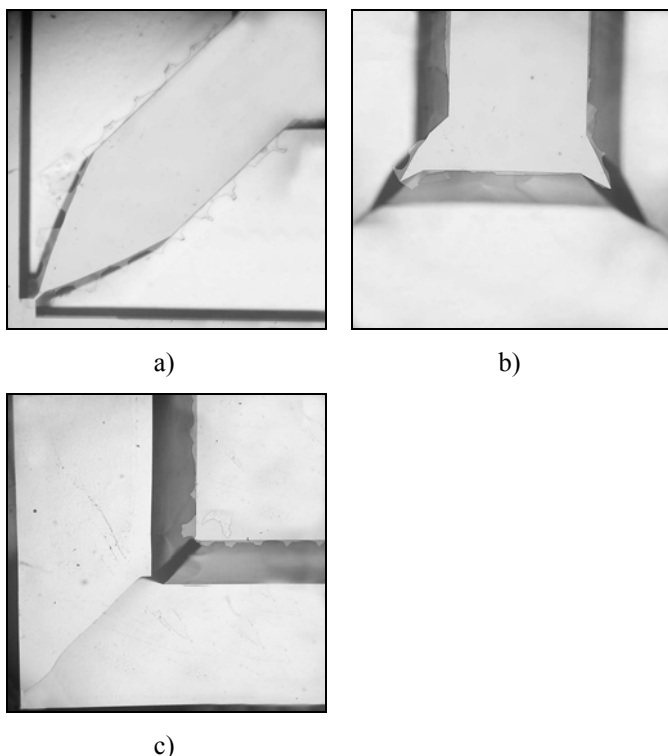
Zaostaci koji se vide neposredno uz donju površinu će nestati prilikom progrižanja i oslobađanja cele strukture. Fotografije su snimane na mikroskopu pri uvećanju $40\times$ pri kome je

dubinska oštrina vrlo mala, tako da je moguće uoštriti samo gornju ili samo donju površinu pločice (rastojanje između njih je oko $470\mu\text{m}$). Ovo se uočava na fotografijama na sl. 6. Zbog toga su fotografije na sl.7 snimljene tako da je prvo uoštrina gornja, a zatim donja strana pločice, da bi bile zajedno montirane.



Sl.7 a) izgled prednje strane nosača gredica; b) izgled zadnje strane nosača gredice sa konzolom kojim se ceo nosač sa gredicama fiksira za Si pločicu.

Eksperiment smo ponovili sa istom strukturom u TMAH-u. Analitički izraz za TMAH nismo izveli, jer je neophodno da se uključi i lateralno podgrizanje ravni $\{111\}$, koje je znatno veće nego kod KOH, kao i odnos brzina nagrizanja ravni $\{411\}$ i $\{100\}$ koji ima drugačije vrednosti nego za KOH.



Sl. 8 Nosača gredice sa asimetričnom dijagonalnom kompenzacionom strukturom posle nekoliko različitih dubina nagrizanja u TMAH: a) $100\mu\text{m}$; b) $300\mu\text{m}$; c) $400\mu\text{m}$.

Na sl. 8 prikazane su fotografije iste strukture nagrizane u 25% rastvoru TMAH-a na temperaturi od 80°C . Kao što se može primetiti, potpuna kompenzacija nastupa već pri dubini od oko $400\mu\text{m}$, dok se pri daljem nagrizanju (nije prikazano na slici), struktura potpuno podgriza i postaje neupotrebljiva za mikrogredice. Takođe, na ovoj slici je uočljivo znatno veće podgrizanje ravni $\{111\}$, što se vidi po zaostalom maskirajućem oksidu na gornjoj površini strukture. I na ovoj slici (b) se primećuje asimetrija levog i desnog čoška, kao posledica lošeg poravnavanja maske sa pravcem $\langle 110 \rangle$.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen novi tip kompenzacije konveksnih uglova za vlažno hemijsko anizotropno nagrizanje silicijumskih mikrostrukture. Izvršena je teorijska analiza predložene strukture, pri čemu smo došli do veze između potrebne širine kompenzacione strukture i dubine nagrizanja. Izvršena je simulacija nagrizanja, uzimajući u obzir sve parametre strukture i procesa nagrizanja u KOH. Rezultati teorijskog proračuna i simulacije su verifikovani eksperimentalno na primeru nagrizanja nosača mikrogredica nagrizanjem u KOH. Rezultati su pokazali dobro slaganje sa proračunom i simulacijom. Izvršen je i eksperiment sa nagrizanjem u TMAH, pri čemu se došlo do zaključka da je neophodno da se proračun koriguje, uzimajući u obzir podgrizanje ravni $\{111\}$, kao i odnos brzina nagrizanja ravni $\{411\}$ i $\{100\}$.

REFERENCE

- [1] B.Puers and W.Sansen, "Compensation structures for convex corner micromachining in (100) silicon", *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 1036-1042, 1990
- [2] M.Bao, Chr.Burrer, J.Esteve, J.Bausells and S.Marco, "Etching front control of $\langle 110 \rangle$ strips for corner compensation", *Sensors and Actuators*, A37-A38, pp. 727-732, 1993
- [3] H.L.Offereins, K.Kühl and H.Sandmaier, "Methods for the Fabrication of Convex Corners in Anisotropic Etching of (100) silicon in Aqueous KOH", *Sensors and Actuators*, A25-A27, pp.9-13, 1991

Abstract – Compensation structure for convex corner compensation is simulated, investigated theoretically and verified experimentally. Compensation structure is of asymmetrical diagonal type and is based on undercutting of $\{100\}$ planes. This type of compensation could be used advantageously for narrow silicon structures and/or for whole-through deep etched released structures such as silicon microcantilever support for AFM applications.

ASYMMETRICAL DIAGONAL CONVEX CORNER COMPENSATION FOR SILICON MICROSTRUCTURES

Žarko Lazić, Milče Smiljanić