

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Milče M. Smiljanić

**NOVE PRIMENE PROCESA
NAGRIZANJA SILICIJUMA U VODENOM
RASTVORU TMAH U IZRADI MEMS
SENZORA**

doktorska disertacija

Beograd, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Milče M. Smiljanić

**NEW APPLICATIONS OF SILICON WET
ETCHING USING TMAH WATER
SOLUTION FOR FABRICATION OF
MEMS SENSORS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

Mentori:

**dr Zoran Jakšić, naučni savetnik,
Univerzitet u Beogradu-Institut za Hemiju, Tehnologiju i Metalurgiju**

**dr Milan Tadić, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet**

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:

**dr Peđa Mihailović, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet**

**dr Vesna Jović, naučni savetnik,
Univerzitet u Beogradu-Institut za Hemiju, Tehnologiju i Metalurgiju**

**dr Slobodan Petričević, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu-Elektrotehnički fakultet**

Datum odbrane: _____

Zahvalnica

Ova disertacija je rađena u Institutu za Hemiju, Tehnologiju i Metalurgiju, Centar za Mikroelektronske tehnologije (IHTM-CMT) u sklopu projekta pod rukovodstvom Dr Dane Vasiljević-Radović: „Mikro, nano-sistemi i senzori za primenu u elektroprivredi, procesnoj industriji i zaštiti životne sredine–MiNaSiS”, TR 32008, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Autor se zahvaljuje Dr Katarini Radulović na simulacijama u softverskom paketu COMSOL Multiphysics, Dr Vesni Jović, Dr Milanu Matiću, Bogdanu Popoviću, dipl. inž, Dr Miliji Sarajliću, Dr Danijeli Randelović, Snežani Bjelić, Kristini Blagojević, Lidiji Novaković, Jožetu Živkoviću, Marku Starčeviću i Draganu Mitru, iz IHTM-CMT, na svakodnevnoj pomoći i velikoj podršci. Autor se zahvaljuje Dr Branislavu Rađenoviću i Dr Mariji Radmilović-Rađenović iz Instituta za Fiziku na simulacijama vlažnog hemijskog nagrizanja *level-set* metodom i Nikoli Vukoviću iz Laboratorije za skenirajuću elektronsku mikroskopiju Rudarsko-geološkog fakulteta.

Autor se posebno zahvaljuje Dr Zoranu Jakšiću na korisnim savetima i nesebičnoj pomoći u pisanju doktorske disertacije.

Ovaj rad posvećujem kolegi Žarku Laziću, kome se zahvaljujem na velikoj podršci u istraživanju i svakodnevnim razmenama naučnih, inženjerskih i životnih razmišljanja.

Na kraju, posebna posveta namenjena je mom razrednom starešini i profesoru geometrije u Matematičkoj gimnaziji Milanu Mitroviću, koji mi je usadio ljubav prema stereometriji, i mami Vladani, bez čijih umetničkih gena bi bilo nemoguće uraditi ovaj rad koji zahteva izuzetan osećaj za prostor :).

Naslov doktorske disertacije

NOVE PRIMENE PROCESA NAGRIZANJA SILICIJUMA U VODENOM RASTVORU TMAH U IZRADI MEMS SENZORA

Apstrakt

U ovom radu prikazani su razvoj i usavršavanje tehnološkog procesa vlažnog anizotropnog hemijskog nagrizanja silicijuma orijentacije (100) u vodenom rastvoru tetrametil-amonijum hidroksida (TMAH) koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C. Razvoj *maskless* tehnike nagrizanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH je odredio kristalografske ravni koje se pojavljuju tokom ove vrste nagrizanja. Preostale kristalografske ravni su određene dodatnim nagrizanjem silicijumskih struktura definisanih kvadratnim likovima sa stranicama projektovanim u različitim kristalografskim pravcima. Određene su brzine nagrizanja uočenih kristalografskih ravni merenjem odgovarajućih parametara. Na osnovu brzina nagrizanja i pojavljivanja i nestajanja uočenih kristalografskih ravni tokom nagrizanja objašnjen je mehanizam nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C. Mehanizam anizotropnog nagrizanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH definisao je ograničenja tehnološkog procesa. Razvijene su tehnike kompenzacije konveksnih i konkavnih uglova i tehnika *maskless* nagrizanja čiji je cilj prevazilaženje uočenih ograničenja. Prikazane su primene osvojenih tehnika nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH u izradi različitih trodimenzionalnih silicijumskih struktura, u izradi novih MEMS senzora i poboljšavanju postojećih senzorskih struktura.

Ključne reči

Silicijum, TMAH, vlažno hemijsko nagrivanje, kristalografske ravni, MEMS, senzor.

Naučna oblast

Mikroelektronske tehnologije i MEMS, senzori i aktuatori

Uža naučna oblast

Mikromašinstvo – vlažno anizotropno hemijsko nagrivanje silicijuma

UDK broj

621.3

Doctoral dissertation

NEW APPLICATIONS OF SILICON WET ETCHING USING TMAH WATER SOLUTION FOR FABRICATION OF MEMS SENSORS

Abstract

This dissertation presents the development and improvement of the technological process of wet anisotropic chemical etching in a 25 wt % TMAH water solution at a temperature of 80⁰C of a (100) silicon substrate. The development of a *maskless* etching technique in TMAH water solution has determined all the silicon crystallographic planes that appeared during this type of etching. The remaining crystallographic planes were determined by additional etching of silicon structures that had been defined by square islands with the sides designed along various crystallographic directions. The etch rates of all exposed planes have been calculated by measuring the time dependence of the appropriate parameters. Various silicon crystallographic planes have different etch rates and some planes disappear while others appear during etching. Based on these facts, a mechanism of wet silicon etching in 25 wt % TMAH water solution at a temperature of 80⁰C is explained. The mechanism of anisotropic etching in TMAH water solution has determined the limitations of this technological process. Convex corner compensation, concave corner compensation and *maskless* techniques were developed to overcome the observed limitations. As examples of the developed techniques in TMAH water solution, various 3D silicon structures, new and improved MEMS sensors structures have been fabricated.

Key words

Silicon, TMAH, wet chemical etching, crystallographic planes, MEMS, sensor.

Research area

Microelectronic technologies and MEMS, sensors and actuators

Micromachining – wet anisotropic chemical etching of silicon

Sadržaj

Sadržaj	1
1. Uvod	4
2. Silicijum	6
2.1 Uvod	6
2.2 Kristalografija silicijuma	6
2.3 Osobine silicijuma	10
2.4 Primene silicijuma	11
3. Mikromašinstvo	13
3.1 Uvod	13
3.2 Prenagrivanje i podgrivanje u mikromašinstvu	14
3.3 Vlažno hemijsko nagrivanje	16
3.3.1 Vodeni rastvor KOH	20
3.3.2 Vodeni rastvor TMAH	21
4. Nagrivanje silicijuma u vodenom rastvoru TMAH	23
4.1 Uvod	23
4.2 Osnovne silicijumske strukture određene ravnima $\{111\}$ i $\{100\}$	23
4.3 Mehanizam nagrivanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH	27
4.3.1 <i>Maskless</i> nagrivanje silicijumskih struktura sa kompenzacijom konveksnog ugla	28

4.3.2	Nagrivanje silicijumskih struktura određenih kvadratnim likovima stranica projektovanih u različitim kristalografskim pravcima	40
4.3.3	Brzine nagrivanja kristalografskih ravni	49
4.3.4	Mehanizam nagrivanja u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25% tež. na 80 ⁰ C	56
4.3.5	Podgrivanje konveksnih uglova	68
4.3.6	Podgrivanje konkavnih uglova	69
4.4	Tehnike nagrivanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH	70
4.4.1	Tehnika kompenzacije konveksnog ugla	71
4.4.2	Tehnika kompenzacije konkavnog ugla	83
4.4.3	<i>Maskless</i> tehnika sa kompenzacijom konveksnog ugla	92
5.	Trodimenzionalne silicijumske strukture i MEMS senzori	98
5.1	Uvod	98
5.2	Trodimenzionalne silicijumske strukture	98
5.2.1	Različite vrste jama u silicijumskim supstratima	99
5.2.2	Različite vrste silicijumskih meza struktura	100
5.2.3	Silicijumske strukture na više nivoa	104
5.3	Visokotemperaturni senzor za niske pritiske SOI SP-11	104
5.3.1	Izrada senzora SOI SP-11	106
5.3.2	Merna metoda	111
5.3.3	Karakterizacija i zaključci	112
5.4	Ojačanje dijafragme senzora pritiska	117
5.4.1	Izrada zaštite od preopterećenja ugrađene u senzorski čip primenom <i>maskless</i> tehnike u rastvoru TMAH	118
5.4.2	Merna metoda	121
5.4.3	Karakterizacija i zaključci	121

6. Zaključak	124
Literatura	128

1. Uvod

Procesi mikrofabrikacije odnosno tehnologije mikroelektromehaničkih sistema (MEMS) predstavljaju osnovu za izradu velikog broja mikrominijaturnih komponenti, uključujući različite tipove senzorskih čipova, mikroaktuatora i čitav niz pasivnih komponenti sa primenama od kontrole industrijskih procesa, RF tehnologija i telekomunikacija, automobilske industrije, računarske opreme itd. Ove tehnologije uključuju skupinu različitih procesa izrade komponenata sa karakterističnim dimenzijama veličine mikrometra i manjim i srodne su sa mikroelektronskim tehnologijama.

Među najosnovnije procese MEMS tehnologija spada mikromašinstvo odnosno mikroobrada. Tipično se ono radi korišćenjem planarnih mikroelektronskih tehnologija kojima se definiše geometrija strukture i upotrebom nagrivanja radi izrade 3D oblika mikrometarskih dimenzija. Dva osnovna postupka mikromašinstva su zapreminsko mikromašinstvo monokristalnog silicijuma (*bulk micromachining*) i površinsko mikromašinstvo (*surface micromachining*). U zapreminskom mikromašinstvu silicijuma koriste se različita sredstva za nagrivanje iz vodenog rastvora koja nagrivaju preferentno duž kristalografskih osa. Osnovna sredstva za anizotropno zapreminsko mikromašinstvo silicijuma su kalijum hidroksid (KOH), etilen-diamin-pirokatehol (EDP) i tetrametil-amonijum hidroksid (TMAH).

U ovoj disertaciji se polazi od poznatog, ali ne i dovoljno ispitanog, tehnološkog procesa vlažnog anizotropnog hemijskog nagrivanja silicijuma u vodenom rastvoru tetrametil-amonijum hidroksida (TMAH). U dosadašnjem razvoju tehnološkog procesa nagrivanja u vodenom rastvoru TMAH posebna pažnja je bila posvećena pojedinačnim pojavama i efektima nedovoljnim da se shvati opšti mehanizam nagrivanja. Iako se smatra da je nagrivanje u vodenom rastvoru TMAH poznat tehnološki proces, postoji puno nepoznatih parametara koji su neophodni u projektovanju i realizaciji različitih i uglavnom komplikovanih trodimenzionalnih silicijumskih senzorskih i aktuatorskih struktura.

Ovaj rad predstavlja razvoj i usavršavanje tehnološkog procesa vlažnog anizotropnog nagrivanja silicijuma orijentacije (100) u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 težinskih procenata na temperaturi od 80⁰C. U drugoj glavi će biti date osnovne kristalografske osobine silicijuma. Treća glava će se baviti osnovama mikromašinstva baziranog na vlažnom anizotropnom hemijskom nagrivanju i u njoj će biti dati poznati parametri tehnološkog procesa vlažnog nagrivanja u vodenom rastvoru TMAH. U četvrtoj glavi će biti opisan razvoj tzv. *maskless* tehnike vlažnog anizotropnog hemijskog nagrivanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH i biće određene kristalografske ravni koje se pojavljuju tokom ove vrste nagrivanja. Preostale kristalografske ravni će biti određene dodatnim nagrivanjem silicijumskih struktura definisanih kvadratnim likovima stranica projektovanih u različitim kristalografskim pravcima. Zatim će biti određene brzine nagrivanja uočenih kristalografskih ravni. Na osnovu brzina nagrivanja i pojavljivanja i nestajanja određenih kristalografskih ravni tokom nagrivanja objasniće se mehanizam nagrivanja u vodenom rastvoru TMAH. Mehanizam će objasniti nastanak svih trodimenzionalnih oblika silicijuma napravljenih nagrivanjem u eksperimentima u okviru izrade ove disertacije, kao i pojave i efekte opisane u radovima drugih autora. U četvrtoj glavi će se definisati i ograničenja ispitivanog tehnološkoga procesa koja nastaju kao posledica samog mehanizma nagrivanja. Na osnovu svakog definisanog ograničenja razvijaće se odgovarajuća tehnika nagrivanja kojom se može prevazići ograničenje. Razvijene tehnike tehnološkog procesa moraju biti polazne osnove u projektovanju trodimenzionalnih silicijumskih struktura i MEMS senzora. U petoj glavi će se pokazati primene osvojenih tehnika nagrivanja u vodenom rastvoru TMAH u izradi različitih trodimenzionalnih silicijumskih struktura, u izradi novih MEMS senzora i poboljšavanju postojećih senzorskih struktura.

Izloženi rezultati (SEM slike, mikrofotografije i šematski prikazi, izvedeni analitički izrazi, izračunate brzine nagrivanja i izračunati parametri osvojenih tehnika) predstavljaju samostalni rad autora, sem onih koji su dati uz reference ili su opšte poznati iz oblasti vlažnog hemijskog nagrivanja (Slika 2.1, Slika 2.2, Slike 3.1-3.2, Slika 3.5, Slike 4.1-4.3, Slike 4.39-4.40, izrazi (4.1), (4.2), (4.14), (4.16), (4.52) i (5.1))

2. Silicijum

2.1 Uvod

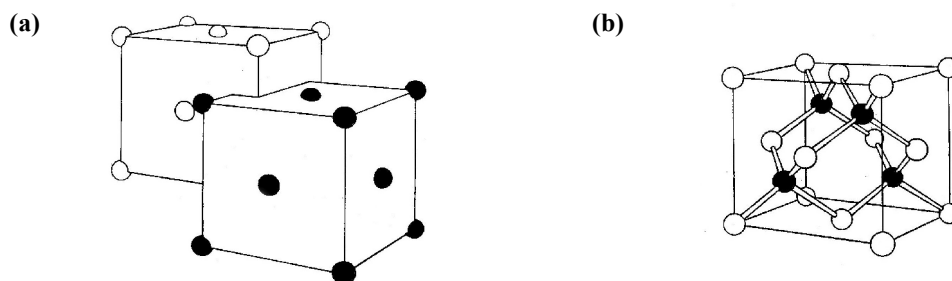
Hemijski element silicijum je veoma rasprostranjen u prirodi i nalazi se u obliku silicijum dioksida i silikata. On sačinjava četvtinu ukupne mase zemljine kore i drugi je element (posle kiseonika) po prisutnosti u njoj [1]. Silicijum pripada IV grupi Mendeljejevog periodnog sistema i njegova oznaka je Si. Atomski broj silicijuma je 14, atomska masa 28.086 a specifična težina 2.4 na 20⁰C. Silicijum se u čvrstom stanju, u zavisnosti od atomske uređenosti, može naći u jednom od tri moguća stanja: amorfnom, polikristalnom ili monokristalnom. Dobijanje silicijuma u obliku monokristala se može smatrati jeftinim tehnološkim procesom [2].

Monokristalni silicijum je osnovni materijal u izradi većine MEMS senzora. Ovo je posledica činjenice da je većina tehnoloških procesa korišćenih u proizvodnji silicijumskih senzora preuzeta iz uhodanih tehnologija izrade integrisanih kola. Zbog potreba razvoja i usavršavanja tehnologija izrade integrisanih kola osobine silicijuma su godinama intenzivno proučavane. Silicijum je poluprovodnik koji ima odlične električne i mehaničke osobine [1]. Razvijeni tehnološki procesi, osobine i uočeni efekti prouzrokovali su da silicijum postane materijal koji se najviše koristi u izradi različitih minijaturnih senzora i aktuatora.

2.2 Kristalografija silicijuma

Kristalna struktura Si je dijamantska struktura sa konstantom rešetke a od 0.543 nm. Ova vrsta strukture se sastoji od dve translatorno pomerene površinski centrirane kubne primitivne ćelije, gde se teme jedne ćelije nalazi unutar druge ćelije na četvtini njene glavne dijagonale, Slika 2.1a). Svaki atom silicijuma ima četiri susedna atoma sa kojima

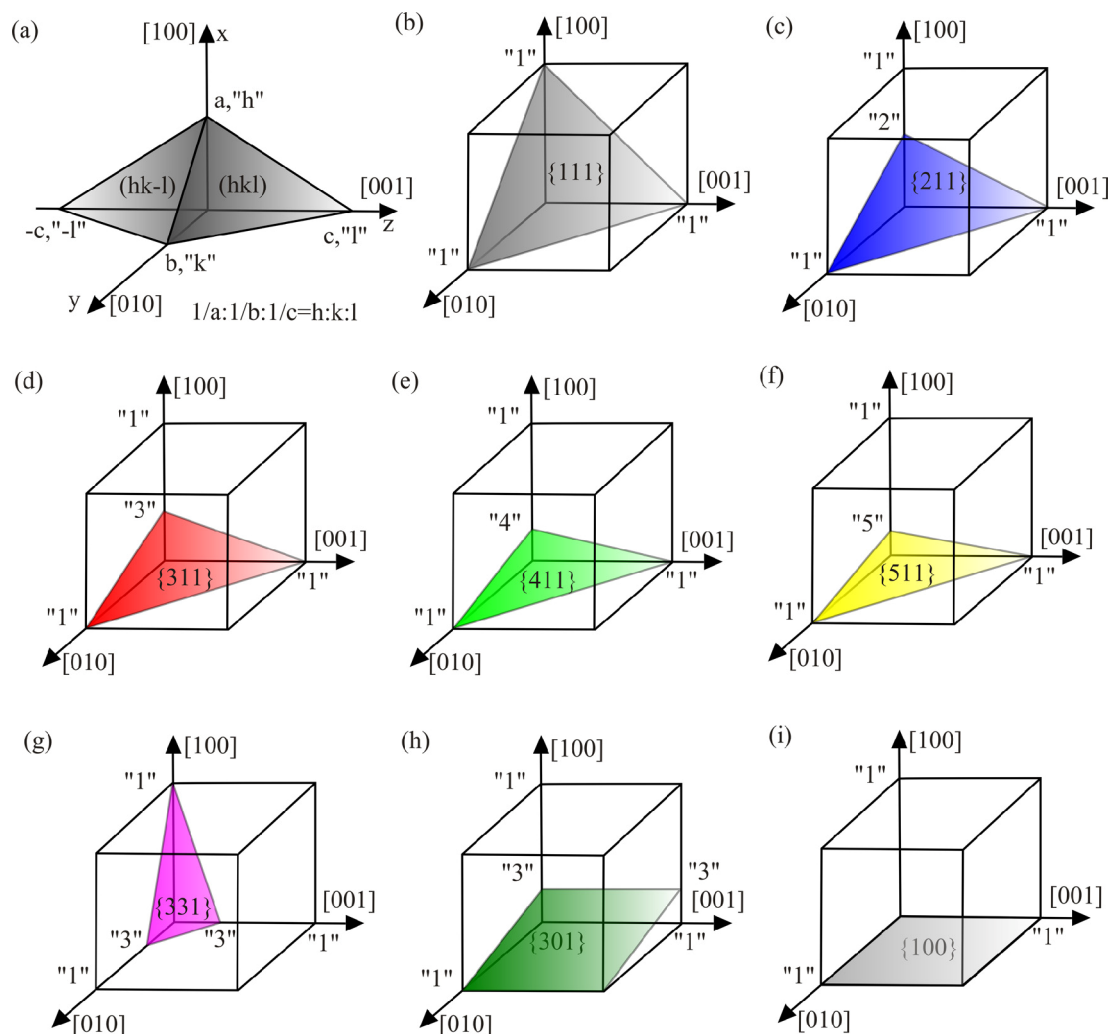
formira tetraedarsku kovalentnu vezu, Slika 2.1b). Ugao koji zaklapaju veze se može algebarski izračunati i iznosi $109^{\circ} 28'$. Svakoj primitivnoj ćeliji silicijuma pripada 8 atoma [3, 4].



Slika 2.1 – a) Dijamantska rešetka konstruisana od dve površinski centrirane kubne primitivne ćelije, slika preuzeta iz [3]. b) Atom Si formira sa susednim atomima samo četiri kovalentne veze (pune linije na slici), slika preuzeta iz [3].

U slučaju dijamantske kristalne strukture koristi se ortogonalni koordinatni sistem: glavne kristalografske ose su međusobno normalne i položaj atoma se opisuje vektorima u ortogonalnim pravcima x , y i z koji su proporcionalni konstanti rešetke a [1, 5]. Kristalografske ravni i kristalografski pravci se opisuju Milerovim (*Miller*) indeksima. Položaj i orijentacija kristalografskih ravni mogu se odrediti sa bilo koje tri tačke u toj ravni koje ne leže na istoj pravoj. Ako svaka od tri tačke leži na nekoj od kristalografskih osa, ravan je određena rastojanjima tačaka od koordinatnog početka izraženim preko konstante rešetke. Da bi se opisala pozicija kristalografskih ravni i pravaca uvode se Milerovi indeksi na sledeći način [1]:

1. Izraziti dužinu koje ravan odseca na osama preko konstanti rešetke, Slika 2.2a).
2. Uzeti recipročne vrednosti ovih brojeva i dovesti ih na tri najmanja cela broja koji ostaju u istoj proporciji.
3. Ovako dobijeni celi brojevi su Milerovi indeksi h , k i l .



Slika 2.2 – Različite kristalografske ravni. Brojevi pod navodnicima predstavljaju Millerove indekse. Ovu nestandardna notacija je uvedena da bi se kasnije lakše moglo objasniti pojavljivanje različitih kristalografskih ravni tokom tehnološkog procesa nagrizanja. a) ravni (hkl) i $(hk-l)$. a , b , c su vrednosti koje odseca ravan na kristalografskim osama. h , k , l su odgovarajući Millerovi indeksi. b) Ravan $\{111\}$. c) Ravan $\{211\}$. d) Ravan $\{311\}$. e) Ravan $\{411\}$. f) Ravan $\{511\}$. g) Ravan $\{331\}$. h) Ravan $\{301\}$. i) Ravan $\{100\}$.

Jedna kristalografska ravan određena Millerovim indeksima h , k i l se označava sa (hkl) . Ako ravan preseca osu na njenom negativnom delu, odgovarajući indeks je negativan i označava se sa znakom $-$ (npr. $(hk-l)$), Slika 2.2a). Ravni ekvivalentne po simetriji označavaju se pomoću Millerovih indeksa u vitičastoj zagradi $\{hkl\}$. Ekvivaletnost po simetriji znači da postoje geometrijske transformacije koje preslikavaju primitivnu ćeliju

samu u sebe što dovodi do poklapanja posmatranih ravni. U dijamantskoj kristalnoj strukturi pravac $[hkl]$ je uvek normalan na ravan (hkl) . Ekvivaletni pravci odgovaraju ekvivaletnim ravnima, i njihovu familiju označavamo sa $\langle hkl \rangle$.

Glavne kristalografske ose u silicijumu su u pravcima $[100]$, $[010]$ i $[001]$. Familija ravni normalna na ove pravce je $\{100\}$, Slika 2.2i). Familija $\{110\}$ je normalna na pravac $\langle 110 \rangle$, a familija $\{111\}$ na pravac $\langle 111 \rangle$, paralelan sa glavnom dijagonalom kocke, Slika 2.2b) [1, 2]. Familije ravni $\{100\}$, $\{110\}$ i $\{111\}$ predstavljaju tzv. glavne kristalografske ravni [6].

Različite kristalografske ravni imaju različite gustine atoma, različiti broj veza po atomu i različite vrste veza po atomu. Različite gustine atoma, broj i vrsta veza po atomu za svaku kristalografsku ravan predstavljaju razloge (ali ne i jedine) zašto postoje razlike u fizičkim i hemijskim osobinama među ravnima i zašto dolazi do selektivnog nagrivanja kristalografskih ravni [5-8].



Slika 2.3 – Primarno zaravnjenje na silicijumskoj pločici [9] .

U današnje vreme u proizvodnji silicijumskih senzora se kao podloga najčešće koriste silicijumske pločice (*wafers*) orijentacije $\langle 100 \rangle$, odnosno tzv. (100) pločice. (100) pločice imaju primarno zaravnjenje (*flat*) orijentacije $\langle 110 \rangle$ [3, 9], tj. ravno odsečeni deo pločice paralelan pravcu $\langle 110 \rangle$, Slika 2.3. Zaravnjenje služi za orijentaciju pri projektovanju mikroelektronskih i MEMS naprava i pri fotolitografskom postupku. Ovaj rad je posvećen izradi MEMS senzora i trodimenzionalnih silicijumskih struktura koji se

realizuju na pločicama orijentacije (100) tako da će se dalje u tekstu govoriti samo o fizičkim veličinama i tehnološkim procesima određenim za kristalografsku ravan (100).

2.3 Osobine silicijuma

Kristalna struktura silicijuma je jedan od razloga da on kao materijal ima odlične električne i mehaničke osobine [10]. Lokalna električna provodnost se može precizno kontrolisati procesom dopiranja, što predstavlja jedan od osnovnih procesa u proizvodnji integrisanih kola i poluprovodničkih senzorskih naprava. Mehanički, silicijum je gotovo idealno elastičan materijal [11], a njegove mehaničke osobine su anizotropne, tj. zavise od kristalografskih pravaca [2]. Monokristalni silicijum je tvrd i krt materijal koji se deformiše elastično dok ne dostigne zateznu čvrstoću. U momentu kad dostigne zateznu čvrstoću, on ne postaje plastičan kao metali, već se lomi. Histerezis i drift ne postoje kod monokristalnog silicijuma. Jungov (*Young*) modul monokristalnog silicijuma zavisi od pravca u kristalu i od orijentacije pločice. Njegova srednja vrednost je oko 160 GPa, što je blizu vrednosti Jungovog modula za čelik. Silicijum zadržava mehaničke osobine do temperature od 800⁰C [3]. Na višim temperaturama može doći do pojave plastične deformacije.

Tabela 2.1 – *Neke osobine silicijuma [1, 3, 10-11].*

Osobina silicijuma	Vrednost
Temperatura topljenja [⁰ C]	1415
Koeficijent toplotnog širenja [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	2.5
Gustina [g/cm^3]	2.3
Srednja vrednost Jungovog (<i>Young</i>) modula [GPa]	160
Zatezna čvrstoća [GPa]	6.9
Poasonov (<i>Poisson</i>) koeficijent	0.22
Toplotna provodnost na 25 ⁰ C [$\text{W}/\text{cm}^{\circ}\text{C}$]	1.57

Važno je pomenuti da silicijum ima dobru toplotnu provodnost [10] i mali koeficijent toplotnog širenja [3], Tabela 2.1. Ove dve osobine su veoma važne pri projektovanju silicijumskih senzora jer veoma utiču na temperaturne karakteristike senzora. Jedna od velikih prednosti silicijuma kao materijala je da ima stabilan oksid koji je električni izolator i koji se može lako tehnološki dobiti. Silicijum dioksid se koristi i kao maskirajući materijal u tehnološkom procesu vlažnog hemijskog nagrizanja.

2.4 Primene silicijuma

Zbog velike prisutnosti u zemljinoj kori, lakoće procesiranja (dobijanja polikristalnog i monokristalnog silicijuma) i dobrih osobina (elastičniji od čelika, odlične električne i mehaničke osobine), silicijum je našao veliku primenu [12]:

- a) u industriji proizvodnje čelika,
- b) u industriji aluminijuma,
- c) u hemijskoj industriji,
- d) u elektronskoj industriji i za proizvodnju MEMS senzora.

Najveća primena je u industriji aluminijuma i u proizvodnji čelika. Samo deset procenata od ukupne proizvodnje silicijuma se koristi u elektronskoj industriji [12]. Silicijum je najvažniji poluprovodnički materijal u mikroelektronici jer je na njemu bazirana većina postojećih poluprovodničkih naprava.

U izradi senzora silicijum nije samo strukturni (noseći) materijal već ima i pretvaračku funkciju [13]. Silicijum se koristi kao termoelektrični materijal. MEMS senzori na bazi Zebekovog (*Seebeck*) efekta imaju raznovrsnu primenu: senzori protoka, senzori vakuuma, termalni konvertori, IC detektori, senzori vrste gasa,... [13-17]. Silicijum se koristi i kao optički materijal. Solarne ćelije zasnivaju funkciju na fotonaponskom efektu u silicijumu [18], a fotodiode na fotoprovodnom efektu [19]. Većina silicijumskih mehaničkih senzora funkciju zasniva na piezootpornom efektu [2-3, 9-11, 13-14, 20-22]. Mehanički senzori koji rade na principu promene električne otpornosti usled mehaničkog naprezanja u silicijumu su senzor pritiska, senzor sile, senzor ubrzanja i hemijski senzori zasnovani na mikrogredicama. Mehaničkim sensorima se mogu smatrati i različite vrste

kapacitivnih i rezonantnih senzora i žiroskopi. Važno je pomenuti da su različite trodimenzionalne silicijumske strukture sastavni (ponekad i osnovni) deo mnogih mikroaktuatora.

3. Mikromašinstvo

3.1 Uvod

Većina tehnoloških procesa koji se koriste u proizvodnji silicijumskih senzora preuzeti su iz uhodanih tehnologija izrade integrisanih kola. Tehnološki procesi trodimenzionalne mikroobrade silicijuma (mikromašinstvo) ne pripadaju tehnologijama izrade integrisanih kola i postoji potreba za određivanjem i kontrolom parametara ovih procesa da bi se realizovale MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) strukture.

Mikromašinstvo se najčešće koristi da bi se formirali pokretni delovi u sklopu MEMS strukture, progrizali otvori na supstratima za električne međuveze između slojeva i realizovali duboki kanali i jame npr. za mikrorezervoare [14]. Za uspešno nagrizanje potrebna je selektivnost između materijala koji služi za maskiranje (maskirajući materijal) i materijala koji se nagriza. Selektivnost je osobina da sredstva za nagrizanje znatnije ili slabije reaguju sa nekim materijalom (nagrizaju materijal) u odnosu na reagovanje sa drugim materijalima. Pre svakog nagrizanja silicijuma nanosi se materijal koji služi za maskiranje (termički silicijum dioksid, silicijum nitrid, hrom, zlato, titanijum i dr. [1, 2]). Da bi se preneo lik sa maske nanosi se fotoosetljivi sloj (fotorezist), a potom se odstranjuje maskirajući materijal (sa dela koji se nagriza) da bi se dobio lik na površini silicijuma, Slika 3.1.

U zapreminskom (*bulk*) mikromašinstvu MEMS strukture se proizvode nagrizanjem velikih zapremina supstrata. U zapreminskom mikromašinstvu proces nagrizanja odstranjuje nepotrebni silicijum u otvoru maskirajućeg materijala i formira kompleksne trodimenzionalne oblike. Trodimenzionalni oblik, dobijen nagrizanjem, predstavlja neku vrstu projekcije dvodimenzionalnog, planarnog lika sa maske u treću dimenziju, koja je ovom slučaju debljina silicijuma i prostire se do dubine nagrizanja [7, 22]. Projektovanje željenog oblika u zapreminskom mikromašinstvu je najčešće veoma komplikovano i

zahteva puno eksperimentalnog iskustva kako se ponaša odgovarajuće sredstvo za nagrivanje [6].

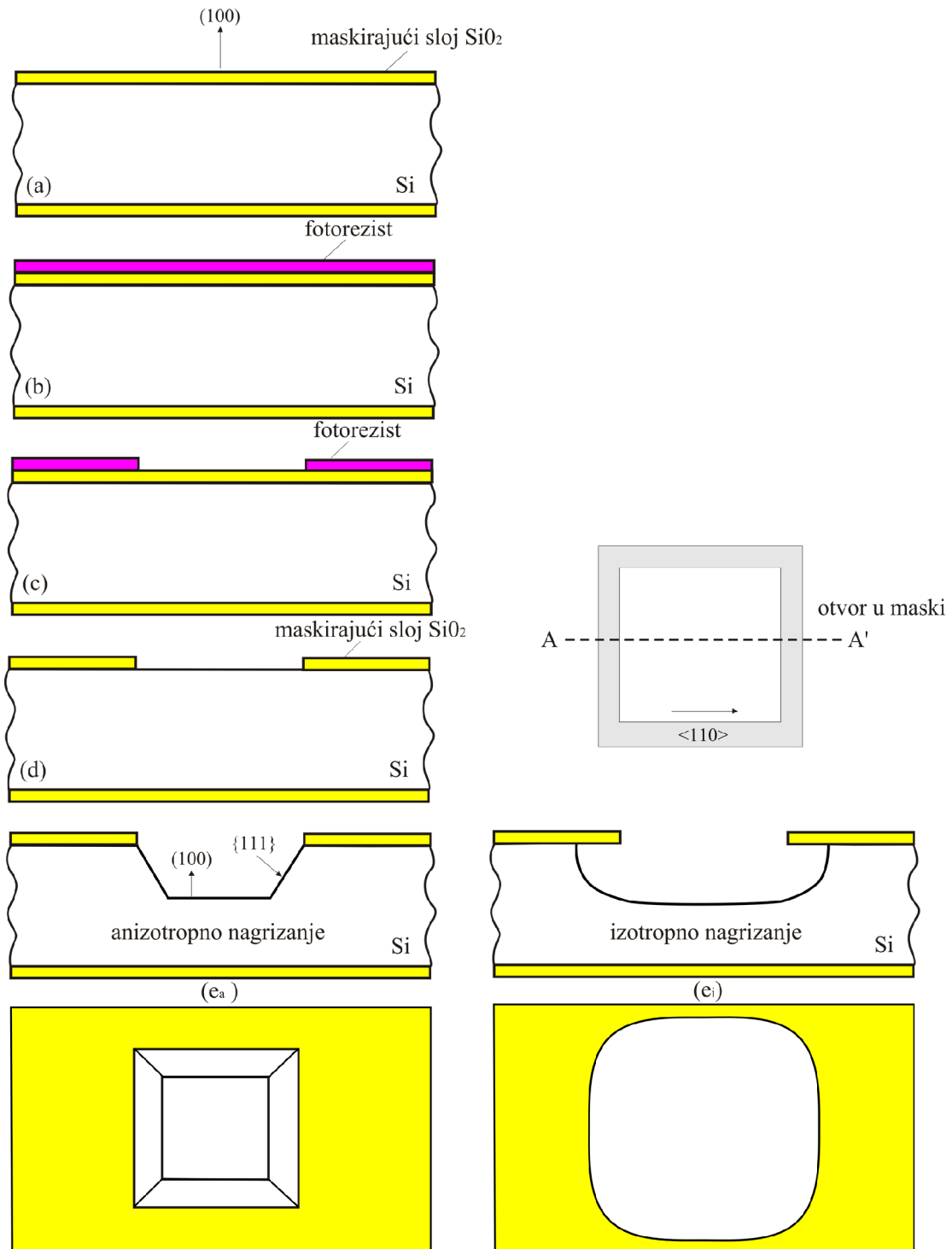
Za razliku od zapreminskog, u površinskom mikromašinstvu se nagriva žrtveni materijal nanet na supstrat, a ne sam supstrat. Nagrizana struktura je zbog toga vrlo tanka, praktično dvodimenzionalna. U ovoj disertaciji površinsko mikromašinstvo nećemo razmatrati.

3.2 Prenagrivanje i podgrivanje u mikromašinstvu

Pri projektovanju MEMS struktura mora se voditi računa o prenagrivanju i podgrivanju. Ako se ove dve pojave ne kontrolišu širina, dubina i oblik strukture mogu postati nedefinisani.

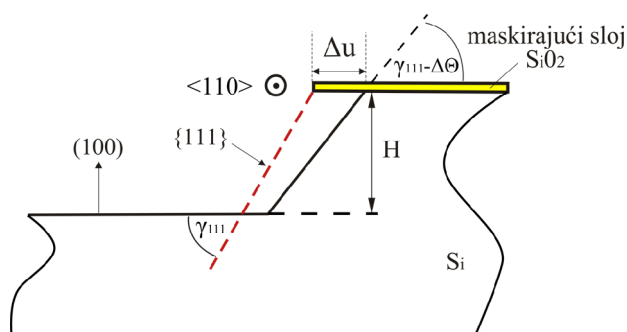
Kod prenagrivanja dubina nagrivanog strukture je veća od projektovane, odnosno dolazi do nagrivanja u većoj meri od optimalne. Prenagrivanje zavisi od vremena i brzina nagrivanja kristalografskih ravni. Za sprečavanje ove pojave koriste se mehanizmi koji ga kontrolišu i zaustavljaju. To su mehanizmi kontrole vremena nagrivanja, mehanizam nanošenja ili difuzije sloja jako dopiranog borom, mehanizam nanošenja tankih filmova i tehnika elektrohemijskog nagrivanja [1, 3, 6-8, 14, 22-24]. Kontrola vremena nagrivanja je najjednostavniji mehanizam kojim se kontroliše dubina nagrivanja. Ako su poznate brzine nagrivanja, nagrivanje pločica se zaustavlja vađenjem iz rastvora posle određenog vremena i na taj način se dobija tražena dubina strukture. Mana kontrole vremena nagrivanja je što se može primeniti samo na nagrivanje relativno dubokih struktura (više od 20 μm) [6, 7]. Ovaj mehanizam nije pouzdan, jer zavisi od debljine komercijalnih supstrata koja može varirati od pločice do pločice. Dodatna mana je što neka sredstva za nagrivanje posle dugotrajnog nagrivanja ostavljaju neuniformne površine strukture što utiče na kvalitet MEMS komponente.

Kod podgrivanja dolazi do nagrivanja supstrata i ispod maskirajućeg materijala, Slika 3.2, tako da je krajnji rezultat da dimenzije nagrivanog strukture ne odgovaraju projektovanim dimenzijama maske. Podgrivanje je kvantifikovano dimenzijom Δu koja je



Slika 3.1 – Šematski prikaz procesa: a) obostrane termičke oksidacije silicijuma. b) nanošenja fotorezista. c)-d) fotolitografskog postupka lika u obliku kvadratnog otvora. e_a) vlažnog anizotropnog hemijskog nagrizanja. e) vlažnog izotropnog hemijskog nagrizanja.

definisana u odnosu na dimenzije dvodimenzionog lika na površini, Slika 3.2, ali se ne odnosi samo na njega već se prenosi i na treću dimenziju [25]. Iako standardna fotolitografija omogućava veoma precizan i tačan prenos lika sa maske na maskirajući sloj, mora se voditi računa o poravnanju sa primarnim zaravnjenjem pločice (Odeljak 2.2). I neznatno odstupanje od pravca primarnog zaravnjenja može dovesti do neočekivanog podgrizanja, odnosno odstupanja u projektovanim dimenzijama, i formiranja neuniformnih površina MEMS struktura [1]. Iako podgrizanje u većini slučajeva predstavlja problem koji treba uračunati prilikom projektovanja senzorskih silicijumskih struktura, ova pojava se može i korisno upotrebiti u oslobađanju visećih pokretnih struktura kao što su npr. SiO₂ mikrogredice [23, 26], Slika 3.3. Struktura prikazana na Slici 3.3 oslobođena je od supstrata tako što je nagrizana sa obe strane vodenim rastvorom KOH.

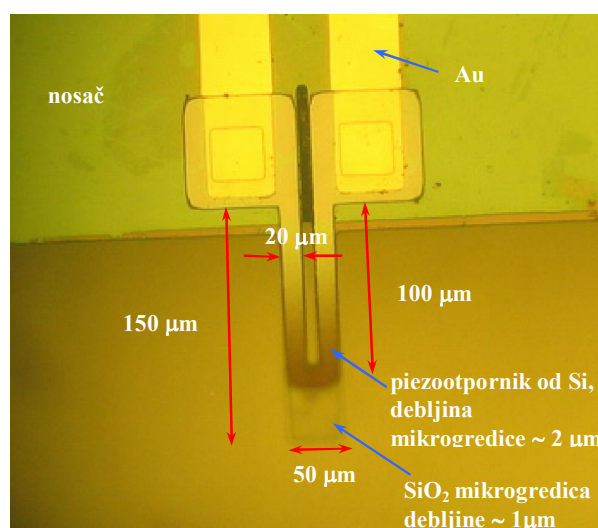


Slika 3.2 – Šematski prikaz podgrizanja (100) pločice ispod maskirajućeg materijala; na slici je poprečni presek usmeren u pravcu $\langle 110 \rangle$ [25]. Promena $\Delta\theta$ je ugaono odstupanje od ugla γ_{111} koga obrazuju ravni $\{111\}$ sa ravnima $\{100\}$ zbog male ali ipak konačne brzine nagrizanja ravni najsporijeg nagrizanja $\{111\}$.

3.3 Vlažno hemijsko nagrizanje

Postoje različiti načini hemijskih nagrizanja. Hemijsko nagrizanje može biti suvo (npr. *Dry Reactive Ion Etching*-DRIE) i vlažno (*wet chemical etching*). Vlažno hemijsko nagrizanje predstavlja hemijsko nagrizanje silicijuma u različitim vodenim rastvorima. Za razliku od drugih tehnoloških procesa uklanjanja većih zapremina silicijuma [1, 25], vlažno

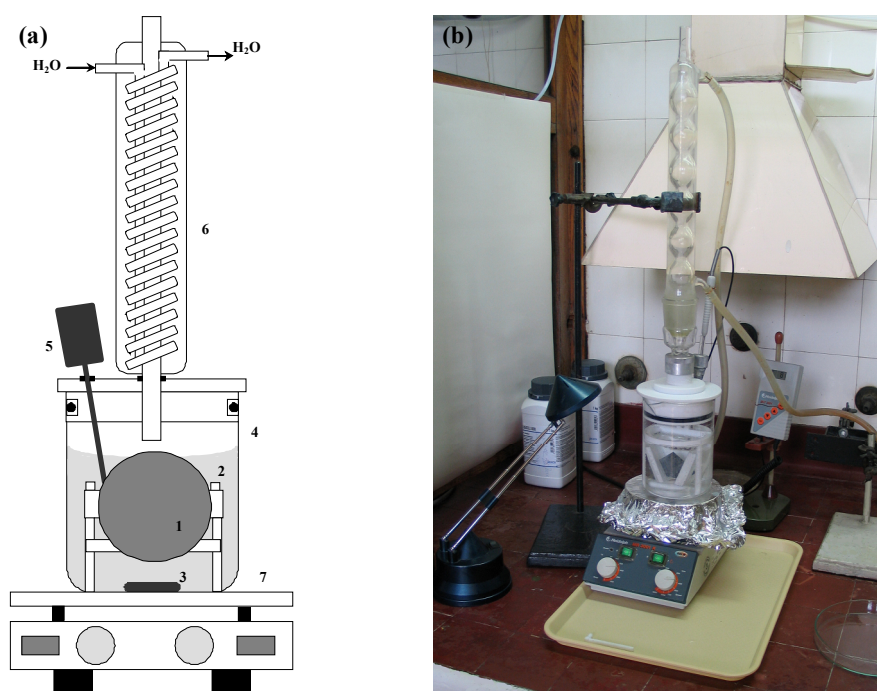
hemijsko nagrivanje je jeftin tehnološki proces koji ne zahteva komplikovanu aparaturu, Slika 3.4, i omogućava obradu velikog broja supstrata u isto vreme. Vlažno hemijsko nagrivanje je definisano sa tri koraka [1, 8, 23]: transport reaktanta do nagrivanog površine supstrata, reakcija između reaktanta i površine supstrata i odvođenje proizvoda nagrivanja sa površine supstrata. Ukoliko ne dođe do nagrivanja, takav problem može biti uzrokovan bilo kojim od tri navedena koraka. Prirodni oksid ili zaostaci i nečistoće prethodnih tehnoloških procesa mogu uticati na reakciju između reaktanta i površine supstrata. Ako postoji problem odvođenja proizvoda, oni se mogu ponovo naći na površini supstrata i sprečavati dalje nagrivanje. Mehurići vodonika koji se formiraju tokom nagrivanja mogu zaštititi površinu supstrata od daljeg nagrivanja i uticati na uniformnost nagrivanog površine [7]. Mešanje vodenog rastvora može pozitivno uticati na nagrivanje na više načina: ono može poboljšavati dovođenje reaktanta do površine supstrata i poboljšavati odvođenje proizvoda nagrivanja sa površine supstrata uključujući i mehuriće vodonika, kao i toplote koja nastaje usled hemijske reakcije. Važno je pomenuti uticaj procesa isparavanja tokom nagrivanja i procesa zasićenja rastvora nagrivanjem supstrata koji dovode do promene koncentracije vodenog rastvora sredstva za nagrivanje [1, 23].



Slika 3.3 – Mikrofotografija SOI mikroredice napravljena na mikroskopu Epival Interphako pri uvećanju od 50 puta izrađene u IHTM-CMT. Dvostranim vlažnim anizotropnim hemijskim nagrivanjem u vodenom rastvoru KOH oslobođene su SiO₂ mikroredice sa piezootpornicima od p⁺ silicijuma [26].

Vlažno hemijsko nagrizanje može biti izotropno ili anizotropno, Slika 3.1. Da li je vlažno hemijsko nagrizanje izotropno ili anizotropno zavisi od procesa transporta reaktanata i/ili proizvoda nagrizanja u rastvoru i kinetike reakcije koja se dešava na površini supstrata.

Ako je reakcija na površini supstrata brza, brzina nagrizanja je tada određena brzinom dovođenja reaktanata i odvođenja proizvoda nagrizanja. U ovom slučaju, atomi sa površina se uklanjaju veoma sličnim brzinama, pa kao rezultat, brzina nagrizanja supstrata ne zavisi od kristalografske orijentacije površine. Ova vrsta nagrizanja se naziva izotropnim [1] i karakterišu je zaobljeni profili i trodimenzionalni oblici nagrizanja, Slika 3.1.



Slika 3.4 – a) Šematski prikaz aparature za vlažno hemijsko nagrizanje: 1-silicijumska pločica u držaču od Teflona, 2-rastvor za nagrizanje, 3-elektromagnetna mešalica rastvora, 4-Pyrex[®] čaša za nagrizanje, 5-kontrolor temperature, 6-refluks kondenzator koji se hladi vodom iz vodovoda i time sprečava isparavanje, 7-grejna ploča [9, 25]. b) Fotografija aparature za vlažno hemijsko nagrizanje konstruisane i izrađene u IHTM-CMT [9].

Izotropno vlažno nagrivanje se manje upotrebljava od anizotropnog, jer je nagrivanje supstrata kontrolisano difuzijom i konvekcijom reaktanata i proizvoda, a takvi procesi su manje ponovljivi [7]. Izotropno vlažno nagrivanje silicijuma se najčešće vrši u mešavini fluorovodonične (HF), azotne (HNO_3) i sirćetne (CH_3COOH) kiseline. Brzina nagrivanja varira zavisno od odnosa koncentracija kiselina u mešavini. Mešanje rastvora može povećati brzinu nagrivanja i za red veličine. Dubinu nagrivanja silicijumske pločice, podgrivanje i uniformnost površine kod ove tehnike je teže kontrolisati. Prednost izotropnog nagrivanja je što formira oblike trodimenzionalne strukture, Slika 3.1. Problem kod mehaničkih struktura je što na mestu oštih ivica konkavnih uglova može doći do povećavanja koncentracije mehaničkog naprezanja, što negativno utiče na mehaničku izdržljivost senzora [27-31]. Takođe, oštri konveksni uglovi na silicijumskim strukturama u mikrofluidici predstavljaju mesta gde se lakše zahvataju i zadržavaju mehurići gasova.

Ukoliko postoji velika razlika u brzinama uklanjanja atoma na različitim kristalografskim površinama supstrata, nagrivanje je određeno kinetikom reakcije i naziva se anizotropnim. Anizotropno nagrivanje materijala znači da postoje pravci koji se brže nagrivaju, tj. da postoje kristalografske ravni koje se nagrivaju većom brzinom od ostalih. U slučaju vlažnog anizotropnog hemijskog nagrivanja silicijuma sredstvo za nagrivanje, osobine supstrata i njegova kristalografska orijentacija direktno utiču na trodimenzionalni oblik nagrivanog strukture. Trodimenzionalni oblik je definisan različitim kristalografskim ravnima koje se pojavljuju i nestaju tokom nagrivanja. Anizotropno nagrivanje je najčešći tehnološki proces u zapreminskom mikromašinstvu, jer omogućava bolju kontrolu dimenzija nagrivanog strukture od izotropnog nagrivanja [7, 22].

Sredstva za anizotropno nagrivanje silicijuma za koje postoje kvalitetni maskirajući slojevi su etilen-diamin-pirokatehol (EDP), kalijum hidroksid (KOH) i tetrametil-amonijum hidroksid (TMAH). Za razliku od izotropnog nagrivanja, kod anizotropnog je bolja kontrola dimenzija nagrivanog strukture i problem podgrivanja se može rešiti direktnim uračunavanjem ove pojave u projektovanju i kompenzacijom dodavanjem viška materijala (silicijuma) na mestima koja se brže nagrivaju (strukture za kompenzaciju). U odabiru sredstva za nagrivanje mora se voditi računa o jednostavnosti rukovanja, toksičnosti, brzinama nagrivanja kristalografskih ravni, uniformnosti površina koje se dobijaju na kraju

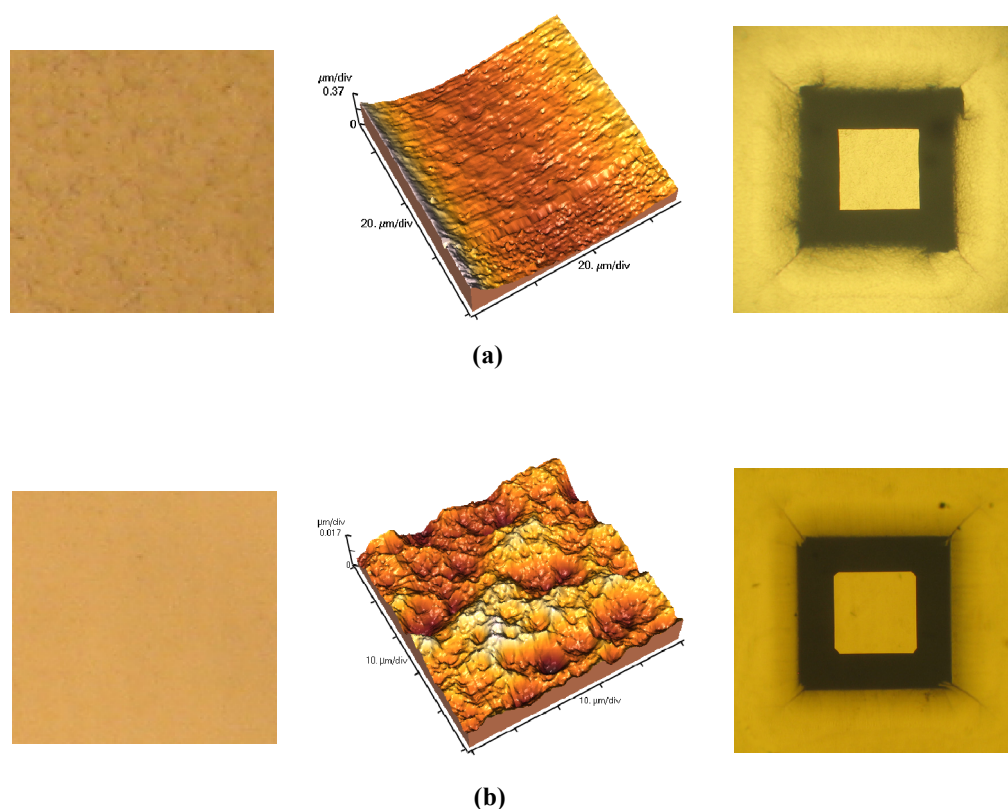
nagrivanja, kompatibilnosti sa tehnologijom integrisanih kola, načinima da se kontrolisano zaustavi nagrizanje, selektivnosti prema korišćenim materijalima u izradi strukture i o maskirajućim materijalima i njihovoj potrebnoj debljini [3]. EDP se sve manje koristi zbog svoje toksičnosti i kancerogenosti, kao i nekompatibilnosti sa tehnologijama izrade integrisanih kola. Umesto EDP u današnje vreme najviše se koriste vodeni rastvori KOH i TMAH.

3.3.1 Vodeni rastvor KOH

Vlažno anizotropno hemijsko nagrizanje silicijuma orijentacije (100) u vodenom rastvoru kalijum hidroksida (KOH) je jedan od najprisutnijih procesa u tehnologiji mikromašinstva i parametri ovog procesa su poznati. Vodeni rastvor KOH nagriza ravni {111} i do 100 puta sporije nego ravni {100}. Ova osobina KOH se standardno koristi za projektovanje trodimenzionalnih oblika ograničenih {111} ravnima koje se najsporije nagrizaju. Osobina hidroksida alkalnih metala je da se njihovo nagrizanje silicijuma zaustavlja ako je silicijum jako dopiran borom. Brzina nagrizanja silicijuma zavisi od temperature, koncentracije KOH i dodatih aditiva [1, 32-37], ali opada i za dva reda veličine kada je silicijum dopiran koncentracijama primesa bora većim od 10^{20} cm^{-3} [24]. Silicijum nitrid i zlato su odlični maskirajući materijali za nagrizanje u vodenom rastvoru KOH. Silicijum dioksid se nagriza brzinom koja, za razliku od brzine nagrizanja silicijuma nitrida, nije zanemarljiva i zavisi od koncentracije KOH i temperature vodenog rastvora. Samo veoma debeli silicijum dioksid se može koristiti kao maskirajući materijal za vremenski duža nagrizanja [3]. Posle višesatnog nagrizanja u vodenom rastvoru KOH ostaje površina silicijuma koja nije glatka, Slika 3.5a), što utiče na kvalitet MEMS strukture. Mana KOH je i što oštećuje površine od aluminijuma i što nije kompatibilan sa tehnologijom integrisanih kola, jer se tokom nagrizanja joni kalijuma ugrađuju u maskirajući oksid. Joni kalijuma u silicijum dioksidu direktno utiču na električne osobine i stabilnost karakteristika MEMS naprava.

3.3.2 Vodeni rastvor TMAH

Alternativa tehnološkom procesu nagrizanja silicijuma u vodenom rastvoru KOH je nagrizanje silicijuma u vodenom rastvoru $N(CH_3)_4OH$ – tetrametil-amonijum hidroksida (TMAH). Prilikom nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH ne dolazi do kontaminacije alkalnim jonima u maskirajućem sloju silicijum dioksida, što omogućava postprocesiranje silicijumskih supstrata. Postprocesiranje daje više slobode u redosledu tehnoloških procesa izrade, a samim tim i u projektovanju silicijumskih MEMS struktura.



Slika 3.5 – a) Površina silicijumske strukture nagrizane u vodenom rastvoru KOH koncentracije 30 tež. % na temperaturi od $80^{\circ}C$. Hrapavost je 56 nm (merena na AFM uređaju u IHTM-CMT, [38-39]). Levo: pogled odozgo, sredina: kvazi-3D prikaz leve slike, desno: mikrofotografija primera jedne silicijumske strukture formirane nagrizanjem u datom vodenom rastvoru KOH. b) Površina silicijumske strukture nagrizane u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od $80^{\circ}C$. Hrapavost je 8 nm (merena na AFM uređaju u IHTM-CMT, [38-39]). Levo: pogled odozgo, sredina: kvazi-3D prikaz leve slike, desno: primer iste silicijumske strukture kao na slici a) ali formirane nagrizanjem u vodenom rastvoru TMAH.

Vodeni rastvor TMAH ima slične osobine kao i KOH. U njemu se ravni {111} nagrizažu 30 do 50 puta sporije nego ravni {100}. Brzina nagrizažanja silicijuma zavisi od temperature i koncentracije TMAH, kao i od dodatih aditiva [1, 34-37, 40-46] koji utiču na neke osobine rastvora. Brzina nagrizažanja opada 40 puta u silicijumu jako dopiranom borom [11]. Silicijum dioksid, silicijum nitrid i zlato ostaju gotovo netaknuti u vodenom rastvoru TMAH i koriste se kao maskirajući materijali. Pre potapanja u TMAH potrebno je očistiti silicijum od prirodnog silicijum dioksida pomoću vodenog rastvora fluorovodonične kiseline, jer i sloj debljine od nekoliko nanometara dovoljan da zaštiti silicijum od nagrizažanja. TMAH takođe nagriza aluminijum, ali ako se rastvor zasiti dodatkom silicijuma drastično se smanjuje brzina nagrizažanja aluminijuma. TMAH je kompatibilan sa tehnologijom integrisanih kola i osnovni je deo razvijača većine fotorezista koji se koriste u fotolitografiji. Druga važna prednost TMAH u odnosu na KOH je dobijanje mnogo kvalitetnijih silicijumskih površina (u smislu manje hrapavosti, Slika 3.5b)) što utiče na kvalitet samih MEMS naprava.

Za razliku od nagrizažanja u vodenom rastvoru KOH, parametri nagrizažanja u vodenom rastvoru TMAH nisu dovoljno dobro poznati i postoji velika potreba za usavršavanjem ovog tipa tehnološkog procesa nagrizažanja. Cilj istraživanja u ovom radu je usavršavanje tehnološkog procesa vlažnog anizotropnog hemijskog nagrizažanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH, određivanje njegovih do sada neustanovljenih parametara i primena u izradi MEMS senzora.

4. Nagrizanje silicijuma u vodenom rastvoru TMAH

4.1 Uvod

Pri nagrizanju silicijumskih pločica orijentacije (100) u vodenom rastvoru TMAH dobijaju se strukture određene različitim kristalografskim ravnima. U literaturi [1-2, 8-9, 23, 34-37, 40-41, 43-44] proučavane su trodimenzionalne silicijumske strukture određene glavnim kristalografskim ravnima {111}, {100} i {110} prilikom nagrizanja u vodenim rastvorima TMAH različitih koncentracija i temperatura. Što se tiče drugih kristalografskih ravni [1-2, 8, 35-36, 42-46] najviše je proučavana kristalografska ravan {311}, međutim mehanizam njenog pojavljivanja pri nagrizanju nije dovoljno objašnjen. Cilj ovog rada je da se objasni mehanizam nagrizanja i eksperimentalno odrede brzine nagrizanja kristalografskih ravni koje će dati potrebne parametre za razvoj različitih tehnika nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80⁰C. Vodeni rastvor TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80⁰C je izabran jer ima najoptimalniji odnos između brzina nagrizanja glavnih kristalografskih ravni i kvaliteta površina koje se dobijaju na kraju nagrizanja [34, 40-41].

4.2 Osnovne silicijumske strukture određene ravnima {111} i {100}

Preseci ravni {111} i ravni pločice (100) su međusobno normalne prave paralelne familiji pravaca <110>. Projektovanjem pravougaonog ili kvadratnog otvora u maskirajućem sloju, stranica poravnatih sa primarnim zaravnjenjem <110>, Slika 4.1a), ravni {111}, koje se najsporije nagrizaju, postaju ograničavajuće strane jame na samom početku nagrizanja, Slika 4.1b),c). Ravni {111} zaklapaju ugao od 54,74⁰ sa ravnima

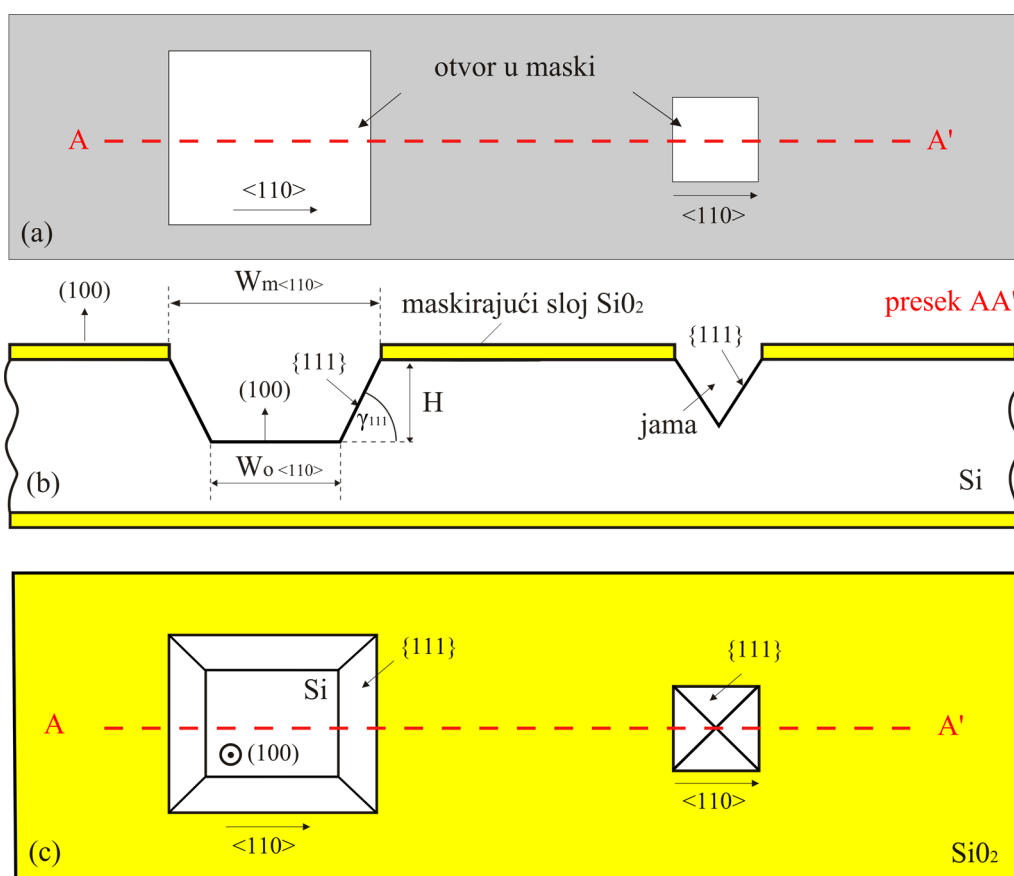
(100). Zavisno od dužine trajanja nagrizanja i oblika otvora maske, dobijaju se različiti trodimenzionalni oblici, Slika 4.1c).

Širina $W_{o<110>}$ pravougaone ili kvadratne jame zavisi od ukupne dubine nagrizanja H , otvora maske $W_{m<110>}$ i ugla γ_{111} koji zaklapaju $\{111\}$ strane jame sa ravni (100), Slika 4.1c) [3, 47]:

$$\gamma_{111} = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}}{2} = 54,74^\circ,$$

$$W_{o<110>} = W_{m<110>} - 2H \operatorname{ctg}(\gamma_{111}),$$

$$W_{o<110>} = W_{m<110>} - \sqrt{2}H.$$
(4.1)



Slika 4.1 – Šematski prikaz anizotropnog nagrizanja (100) pločice. a) Maska sa pravougaonim i kvadratnim otvorima u pravcu $\langle 110 \rangle$. Na maski bele površine predstavljaju površine silicijuma koje se nagrizaju, a žute – površine prekrivene maskirajućim materijalom. b) Poprečni presek anizotropnog nagrizanja (100) pločice, pri čemu je zanemareno podgrizanje usled male ali konačne brzine nagrizanja ravni najsporijeg nagrizanja $\{111\}$. c) Pogled odozgo na anizotropno nagrizanu pločicu orijentacije (100).

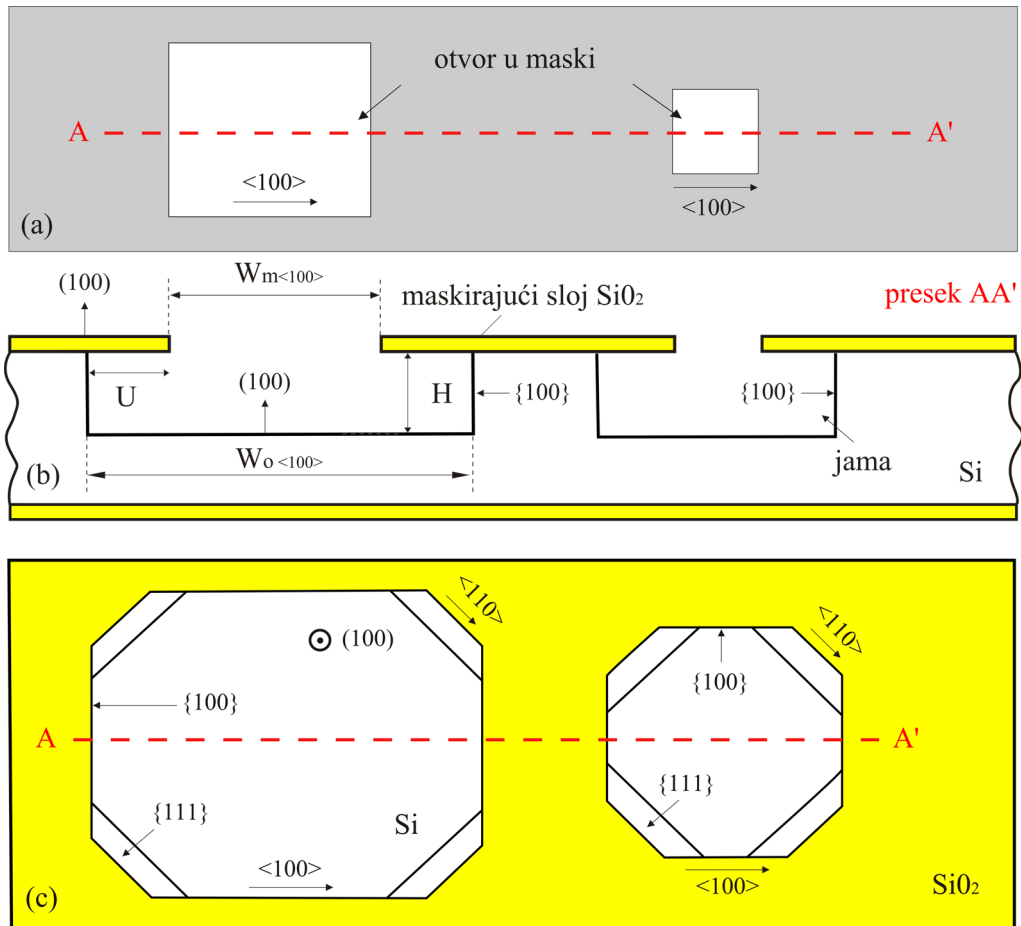
U trenutku kad jama dobije oblik pravilne inverzne piramide čije su strane ravni $\{111\}$, dubina nagrizanja je 0.7 puta veća od stranice kvadratnog otvora maske. Dalje nagrizanje će prouzrokovati podgrizanje ravni $\{111\}$, koje u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C nije zanemarljivo, ali neće promeniti oblik inverzne piramide.

Ako postoji potreba za vertikalnim stranama jame, u slučaju (100) pločice, stranice otvora se postavljaju u pravcu $\langle 100 \rangle$, Slika 4.2a). Preseci $\{100\}$ ravni sa (100) pločicom su pravci $\langle 100 \rangle$, koji zaklapaju ugao od 45° sa zaravnjenjem pločice u pravcu $\langle 110 \rangle$. Poravnanjem otvora u maskirajućem sloju sa pravcem $\langle 100 \rangle$, ravni $\{100\}$ postaju strane jame. U vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C ravni $\{110\}$ se nagrizaju brže od ravni $\{100\}$ [8, 34, 40, 45-46], tako da su odgovarajuće strane u pravcu $\langle 100 \rangle$ i dno jame iz familije $\{100\}$, Slika 4.2b),c), što će biti objašnjeno u Odeljku 4.3.4. Međutim, na samom početku nagrizanja na mestu konkavnih uglova razvijaju se ravni najsporijeg nagrizanja $\{111\}$ koje od početnog četvorougaoanog lika formiraju osmougaoan lik na površini (100) pločice, Slika 4.2, 4.3. Konkavni ugao lika od maskirajućeg sloja je onaj čiji kraci zaklapaju ugao veći od 180° i obrnuto, konveksni ugao je ugao lika čiji kraci zaklapaju ugao manji od 180° [22]. Kako su strane u pravcu $\langle 100 \rangle$ i dno iz iste familije $\{100\}$, kao posledica se pojavljuje lateralno podgrizanje, jer su brzine nagrizanja u vertikalnom i horizontalnom pravcu jednake. Posledica ovog efekta su jame poprečnog preseka pravougaoanog oblika u pravcu $\langle 100 \rangle$, Slika 4.2b), i trapeziodnog oblika u pravcu $\langle 110 \rangle$, Slika 4.1b), 4.3. Dimenzije završene jame poprečnog preseka pravougaoanog oblika mogu se dobiti iz sledećih izraza [3, 47]:

$$\begin{aligned}
 W_{o\langle 100 \rangle} &= W_{m\langle 100 \rangle} + 2Tr_l, \\
 H &= Tr_v, \\
 U &= Tr_l, \\
 r_l &= r_v = r_{100} \Rightarrow U = H \\
 W_{o\langle 100 \rangle} &= W_{m\langle 100 \rangle} + 2H,
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

gde su $W_{m\langle 100 \rangle}$ širina otvora maske u pravcu $\langle 100 \rangle$, $W_{o\langle 100 \rangle}$ širina jame u pravcu $\langle 100 \rangle$, T ukupno vreme nagrizanja, r_l brzina lateralnog nagrizanja, r_v brzina vertikalnog nagrizanja, H ukupna dubina nagrizanja i U lateralno podgrizanje u pravcu $\langle 100 \rangle$.

Posle dovoljno dugog vremena nagrizanja, nestaju ravni $\{100\}$ i ravni $\{111\}$ postaju strane jame, Slika 4.3. Dimenzije završene jame poprečnog preseka trapezoidnog oblika se dobijaju iz izraza (4.1).



Slika 4.2 – Šematski prikaz anizotropnog nagrizanja (100) pločice. a) Maska sa pravougaonim i kvadratnim otvorima u pravcu $\langle 100 \rangle$. b) Poprečni prikaz $\{100\}$ vertikalnih strana u (100) pločici i pojave lateralnog podgrizanja pri nagrizanju u vodenom rastvoru TMAH. c) Pogled odozgo anizotropnog nagrizanja (100) pločice.

Napomenimo na kraju još jedan detalj vezan za nagrizanje. Da bi se ostvarile definisane dimenzije trodimenzionalnih silicijumskih struktura potrebno je veoma precizno poravnati otvore u maskirajućem sloju sa određenim kristalografskim pravcima, zavisno od toga koje ravni želimo za strane jame. U suprotnom, nagrizanjem će se dobiti neželjeni oblici strukture.

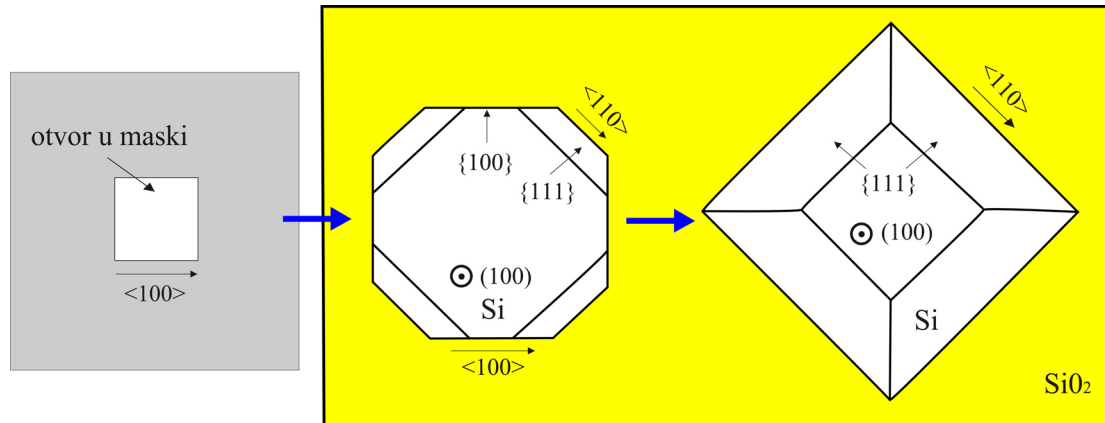
4.3 Mehanizam nagrizanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH

U literaturi se izraz *maskless* (na engleskom bukvalno "bez maske") koristi za označavanje dva različita tehnološka procesa vezana za MEMS i mikromašinstvo, što može uzrokovati terminološku zbrku. Jedan od njih je tzv. *maskless* fotolitografija, što je zapravo proces direktnog ispisivanja željenih likova u fotorezistu bez posredovanja fotolitografske maske – dakle, tu postoji maskirajući sloj, ali ne i maska [3]. U ovakve procese spadaju tehnike elektronskog snopa, direktno lasersko pisanje (*direct laser writing*) i slično. Druga tehnika je *maskless* nagrizanje, što zapravo označava vlažno anizotropno hemijsko nagrizanje u kome maska postoji, ali se delom uklanja u toku rada, tako da je proces nagrizanja dvostepen [8].

U daljem tekstu razmatra se *maskless* vlažno anizotropno hemijsko nagrizanje silicijuma [8, 35-36, 48-52] sa kompenzacijom konveksnog ugla [53] u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80⁰C. Ovaj proces biće korišćen da bi se definisale i karakterisale sve dominantne kristalografske ravni koje se pojavljuju tokom ove vrste nagrizanja. Preostale kristalografske ravni će biti određene dodatnim nagrizanjem silicijumskih struktura određenih kvadratnim likovima stranica orijentisanih u različitim kristalografskim pravcima. Eksperimentalno će se odrediti brzine nagrizanja uočenih kristalografskih ravni. Poznavanje ovih kristalografskih ravni i njihovih parametara nagrizanja od suštinskog je značaja za definisanje geometrije silicijumskih struktura rađenih zapreminskim mikromašinstvom i punu kontrolu njihovih parametara.

Na osnovu brzina nagrizanja i pojavljivanja i nestajanja dominantnih kristalografskih ravni tokom nagrizanja objasniće se mehanizam nagrizanja u datom vodenom rastvoru TMAH. Mehanizam anizotropnog nagrizanja silicijuma će dati objašnjenje pojave podgrizanja konveksnih i konkavnih uglova tokom nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH.

Pošto je čitav dalji tekst posvećen anizotropnom nagrizanju silicijuma u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80⁰C, od ove tačke nadalje se podaci o koncentraciji TMAH i temperaturi neće dalje navoditi, već će se sve do kraja podrazumevati iste vrednosti kao gore navedene.

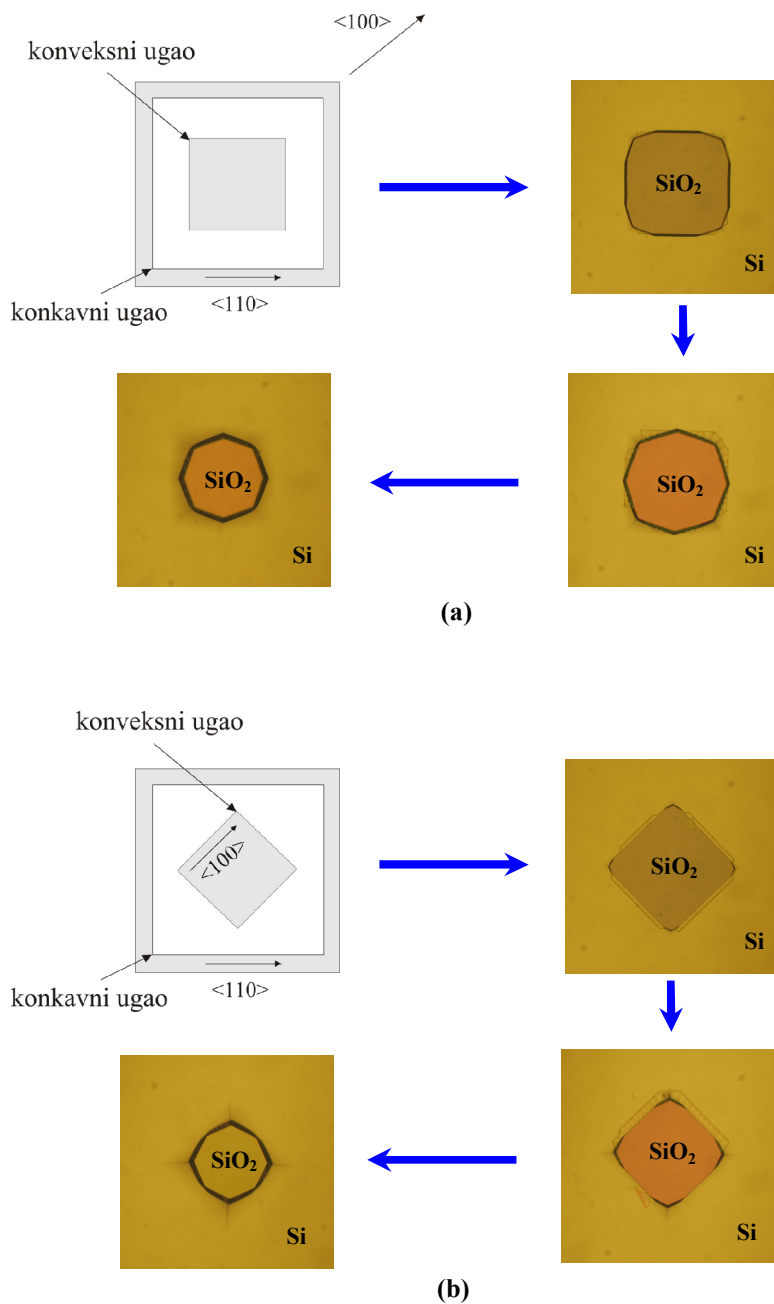


Slika 4.3 – Pogled odozgo na pločicu orijentacije (100) anizotropno nagrzanu u vodenom rastvoru TMAH. Maska sa kvadratnim otvorom u pravcu $\langle 100 \rangle$. Posle dovoljno dugog vremena nagrivanja, nestaju ravni {100} a ravni {111} postaju strane jame.

Da bi odredili sve potrebne parametre tehnološkog procesa nagrivanja (100) silicijuma u vodenom rastvoru TMAH u eksperimentu su korišćene dvostrano polirane pločice n-tipa specifične otpornosti 3-5 Ωcm . Na (100) silicijumskim pločicama formiran je silicijum dioksid procesom termičke oksidacije. Silicijum dioksid je nagrivan u fotolitografskom procesu da bi se u njemu definisali likovi preneti sa maske. Proces nagrivanja silicijuma se odvija u sudu napravljenom od Pyrex[®] stakla koji sadrži 0.8 dm³ vodenog rastvora TMAH firme Merck, Slika 3.4. Rastvor u staklenom sudu se zagreva na temperaturu od 80⁰C sa tačnošću od $\pm 0.5^0\text{C}$. Sud je zatvoren teflonskim poklopcem koji sadrži refluks kondenzator hlađen vodom iz vodovoda da bi se sprečilo isparavanje vodenog rastvora TMAH. Za vreme nagrivanja rastvor se meša elektromagnetnom mešalicom brzinom od 300 obrtaja u minuti.

4.3.1 Maskless nagrivanje silicijumskih struktura sa kompenzacijom konveksnog ugla

Kao što je već rečeno, za vreme vlažnog anizotropnog hemijskog nagrivanja različite kristalografske ravni imaju različite brzine nagrivanja. Zbog različitih brzina nagrivanja neke ravni će se pojavljivati tokom nagrivanja dok će druge nestajati. Kada se nagriva struktura koja ima konveksne uglove, kao u slučaju kada je maskirajući sloj u



Slika 4.4 – Mikrografije koje ilustruju vremenski razvoj podgrizanja konveksnog ugla: a) silicijumske strukture u slučaju kada je maskirajući sloj u obliku ostrva kvadratnog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 110 \rangle$. b) silicijumske strukture u slučaju kada je maskirajući sloj u obliku ostrva kvadratnog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 100 \rangle$.

obliku ostrva (tzv. meza struktura) kvadratnog ili pravougaonog oblika, čije su stranice na (100) silicijumskoj pločici orijentisane u pravcu $\langle 110 \rangle$ ili u pravcu $\langle 100 \rangle$, konačni izgled strukture je određen kristalografskim ravnima koje se najbrže nagrizaju,

Slika 4.4. Pod konveksnim uglom smatra se i prostorni ugao trodimenzionalne silicijumske strukture koga sačinjava presek dve kristalografske ravni i koji je manji od 180° . Pod konkavnim uglom smatra se i presek dve kristalografske ravni čiji je ugao veći od 180° . Podgrizanje konveksnih uglova sa vremenom nije zanemarljivo i dolazi do potpunog izobličenja željene trodimenzionalne silicijumske strukture, Slika 4.4. Svako odstupanje od pravilnih geometrijskih oblika silicijumske strukture utiče na ponovljivost tehnoloških procesa izrade MEMS naprave, a time i na njen kvalitet [9, 54]. Takođe, problem nepravilnih geometrijskih oblika otežava računarske simulacije potrebne pre svakog projektovanja MEMS struktura. Da bi se dobila željena struktura potrebno je eliminisati problem podgrizanja, odnosno pri projektovanju primeniti neku vrstu kompenzacije konveksnih uglova.

Različite tehnike kompenzacije konveksnih uglova za vodeni rastvor KOH i (100) silicijumske supstrate su dobro poznate [55-64]. Dve grupe autora su razvile tehnike kompenzacije konveksnog ugla za vodeni rastvor TMAH [40, 43]. Pokazano je [40, 64] da je najbolja vrsta kompenzacije konveksnog ugla dijagonalna. Kod dijagonalnog tipa kompenzacije projektuje se kompenzaciona struktura u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$ i dodaje na konveksni ugao, Slika 4.5b). Ovaj tip kompenzacije je najbolji jer za razliku od drugih tipova, njegovom primenom ni gornji deo (ispod maskirajućeg sloja) ni donji deo (na dnu nagrizane strukture) konveksnog ugla nije podgrižen.

Maskless tehnika anizotropnog nagrizanja monokristalnog silicijuma [8, 35-36, 48-53] je specijalan tehnološki proces zasnovan na vlažnom hemijskom nagrizanju (100) silicijuma u vodenom rastvoru TMAH. *Maskless* tehnika se može podeliti u dva dela. Prvi deo se naziva maskirano nagrizanje. Kao i kod standardnog nagrizanja, tehnološki proces počinje nanošenjem maskirajućeg materijala. Zatim se nanosi fotorezist na koga se prenosi lik sa maske i odstranjuje maskirajući materijal da bi se dobio lik na silicijumu, Slika 4.5a). Sledeći postupak je ponovno nanošenje maskirajućeg materijala. Drugi maskirajući materijal može biti različit od prvog, pri čemu je uslov da se ne odstranjuje istim sredstvom kao prvi materijal, ili može biti isti materijal, ali znatno drugačije debljine. Kao maskirajući materijali se koriste silicijum dioksid i silicijum nitrid. U ovom radu se kao prvi maskirajući materijal koristi silicijum dioksid veće debljine (oko $1\mu\text{m}$), a kao

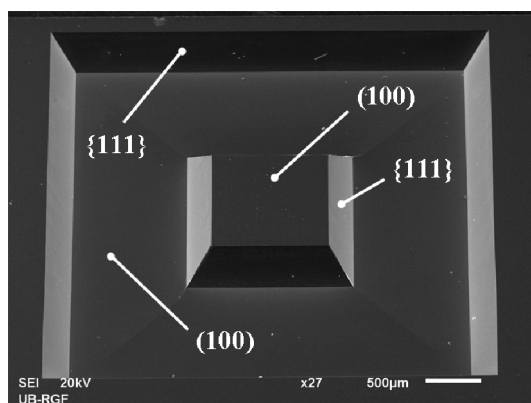
drugi tanji silicijum dioksid (oko $0.5 \mu\text{m}$), a odstranjivanje je vremenski određeno brzinom nagrizanja silicijum dioksida u rastvoru puferovane fluorovodonične kiseline ($0.08 \mu\text{m}/\text{min}$). Drugim fotolitografskim postupkom se nanosi fotorezist na koga se prenosi lik sa druge maske i odstranjuje drugi maskirajući materijal da bi se dobio lik na silicijumu, Slika 4.5b). Sledeći postupak je vlažno hemijsko nagrizanje tzv. maskirano nagrizanje. Glavni princip *maskless* tehnike je da se posle prvog dela nagrizanja do određene dubine h_1 , Slika 4.5c), skida drugi maskirajući materijal, Slika 4.5d) a zatim se nastavlja drugi deo nagrizanja do formiranja željene strukture, odnosno dubine h_2 , Slika 4.5f). Drugi deo nagrizanja se naziva *maskless* nagrizanje.

Maskless tehnika za vodeni rastvor KOH i (100) silicijumske supstrate je dobro poznata i detaljno opisana [8, 35-36, 48-50]. U [48] su dati svi potrebni analitički izrazi za različite koncentracije KOH koji se mogu primeniti na širok opseg dubina nagrizanja H . Pri *maskless* nagrizanju je prisutan problem podgrizanja konveksnih uglova trodimenzionalne silicijumske strukture. U [48, 65] je preporučeno da kompenzaciona struktura na konveksnom uglu u maskiranom delu nagrizanja treba da bude prekompenzovana da bi se ostvarila kompenzacija konveksnog ugla i po završetku *maskless* dela nagrizanja. Prekompenzovanost znači da po završetku maskiranog dela nagrizanja kompenzaciona struktura nije u potpunosti uklonjena sa konveksnog ugla. Analitički izrazi za prekompenzovanu strukturu nisu dati u ovim radovima.

Za razliku od anizotropnog nagrizanja sa KOH, *maskless* tehnika za vodeni rastvor TMAH i (100) silicijumske supstrate je opisivana u literaturi [8, 35-36] u znatno manjoj meri i sa mnogo manje detalja, tako da su mnogi parametri ostali nepoznati. Analitički izrazi za ovu tehniku nisu izvedeni niti dati. Autori [35-36] su izvršili eksperimente i izveli zaključke nagrizajući silicijum samo do dubine od $50 \mu\text{m}$. U [35] problem podgrizanja konveksnog ugla meza strukture je primećen za vreme *maskless* dela nagrizanja posle plitkog maskiranog nagrizanja bez kompenzacije na konveksnim ugovima. Autori preporučuju kompenzaciju konveksnih uglova tokom maskiranog nagrizanja, međutim nisu izvedeni niti dati analitički izrazi za odgovarajuću kompenzacionu strukturu. Dubine nagrizanja opisane u ovoj disertaciji su veće od $50 \mu\text{m}$. Višesatno nagrizanje u vodenom rastvoru TMAH je omogućilo da uočimo i analiziramo različite pojave karakteristične za *maskless* tehniku i da

utvrdimo različite kristalografske ravni koje drugi autori nisu uočili [35].

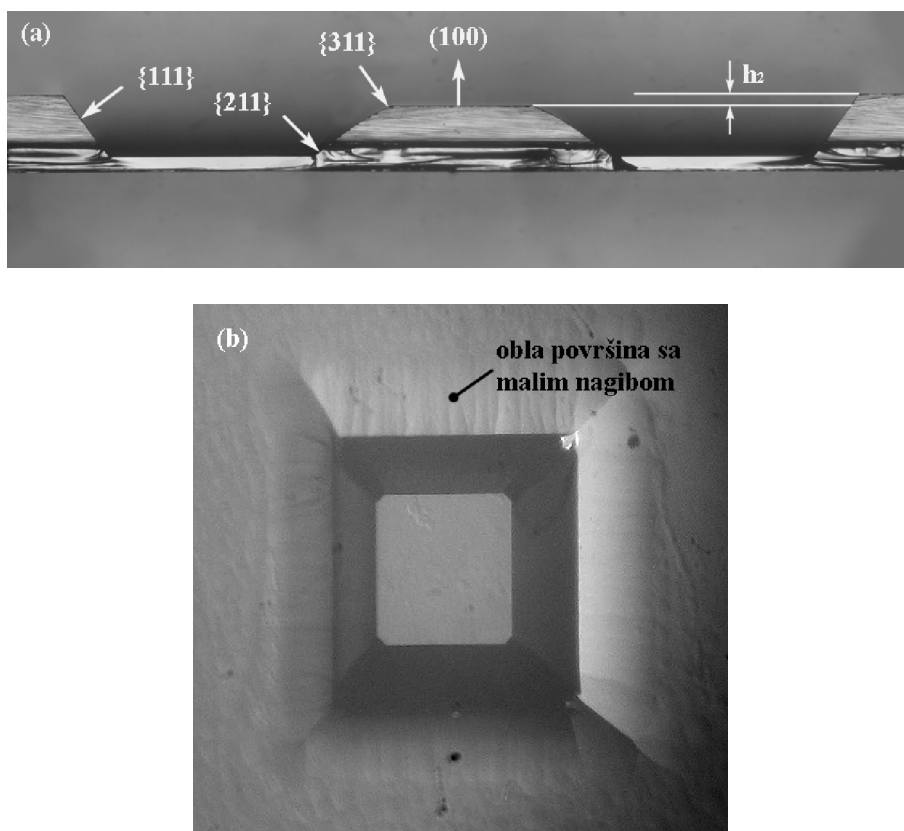
Prvim delom nagrizanja sa maskirajućim silicijum dioksidom do dubine h_1 , Slika 4.5c), realizuje se trodimenzionalna silicijumska struktura u obliku pravilne zarubljene piramide, Slika 4.6, tzv. bos (*boss*), Odeljak 5.3. Primenjena kompenzaciona struktura je u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$, Slika 4.5b). Dobijena pravilna zarubljena piramida je određena ravnima najsporijeg nagrizanja $\{111\}$ i ravnima (100) na vrhu i na dnu nagrizane strukture, Slika 4.5c), 4.6. Ukoliko tokom maskiranog nagrizanja nije korišćena kompenzaciona struktura, Slika 4.4a), na konveksnom uglu pojavice se još tri različite kristalografske ravni. Dve simetrične glatke površine brzog nagrizanja pojavljuju se na gornjem delu, a hrapava površina brzog nagrizanja pojavljuje se na donjem delu konveksnog ugla [8, 33, 44, 56, 58, 66-68]. Analizom sprovedenom u okviru istraživanja za ovu disertaciju [53] nađeno je da se dve simetrične glatke površine na gornjem delu konveksnog ugla sastoje od kristalografskih ravni iz familija $\{211\}$ i $\{311\}$ a da je hrapava površina na donjem delu konveksnog ugla bliska familiji $\{301\}$, što će biti objašnjeno u Odeljku 4.3.4.



Slika 4.6 – SEM slika trodimenzionalne silicijumske strukture u obliku pravilne zarubljene piramide, tzv. bosa (*boss*). Bos je formiran nagrizanjem lika u maskirajućem silicijum dioksidu u obliku kvadrata sa stranicama u pravcu $\langle 110 \rangle$ na koji je primenjena kompenzaciona struktura u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$. Pravilna zarubljena piramida je određena ravnima najsporijeg nagrizanja $\{111\}$ i (100) ravnima na vrhu i na dnu nagrizane strukture. Ram oko bosa je određen ravnima $\{111\}$.

Posle uklanjanja drugog maskirajućeg sloja SiO_2 , *maskless* nagrizanje počinje na već realizovanoj silicijumskoj strukturi na dva nivoa čija je razlika jednaka dubini h_1 ,

Slika 4.5d). Na osnovu poprečnog preseka bosa u pravcu $\langle 110 \rangle$, *maskless* nagrizanje se može podeliti na tri faze. U prvoj fazi *maskless* nagrizanja se pojavljuju dve površine na stranama zarubljene piramide, Slika 4.5e). Dno strane je i dalje određeno kristalografskim ravnima najsporijeg nagrizanja $\{111\}$. Konveksna ivica gornjeg dela strane, nastala tokom maskiranog dela nagrizanja, više nije zaštićena drugim maskirajućem slojem, Slika 4.5d), pa se na ovom konveksnom uglu pojavljuje obla i glatka površina, Slika 4.5e), 4.7a). Naša pretpostavka [53] je da se ova obla i glatka površina sastoji od kristalografskih ravni koje pripadaju familijama $\{311\}$ i $\{211\}$ [8, 35-36, 48] jer srednji uglovi koje obla i glatka površina zaklapa sa (100) ravni na vrhu i na dnu nagrizane strukture iznose redom 24.9° i 38.3° . Prelaz između ravni $\{311\}$



Slika 4.7 – Mikrofotografije: a) poprečnog preseka silicijumske strukture na tri nivoa u $\langle 110 \rangle$ pravcu [53]. Pojava oble i glatke površine koja se sastoji od kristalografskih ravni koje pripadaju familijama $\{311\}$ i $\{211\}$. b) ravni brzog nagrizanja $\{311\}$ i $\{211\}$ uzrokuju izrazito lateralno smanjenje bosa, ostavljajući iza sebe oble površine sa malim nagibom na dnu nagrizane strukture [53]. Nagrizana površina sa bosom je blago nagnuta.

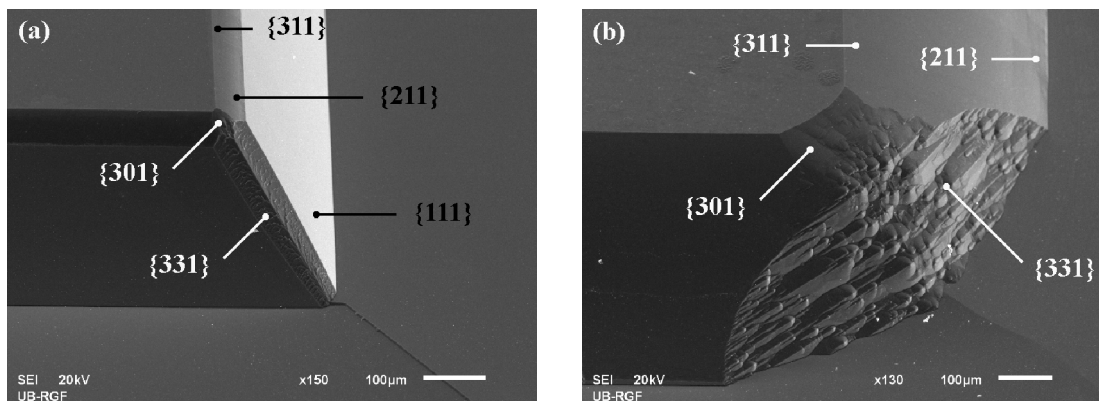
i $\{211\}$ je gladak. Takođe, utvrđeno je da srednji tetivni ugao γ_C ove oble površine iznosi 32.6° , Slika 4.5e), što se slaže sa rezultatima iz [8]. U [8] se pretpostavlja da se ova obla i glatka površina, čiji je ugao γ jednak 31.7° , nalazi negde između kristalografskih ravni iz familija $\{311\}$ i $\{211\}$.

Druga faza počinje kada $\{111\}$ ravni nestanu i ceo bos je definisan ravnima $\{311\}$ - $\{211\}$ i (100) , Slika 4.5f), 4.7a). U trećoj fazi, ravni brzog nagrizanja $\{311\}$ i $\{211\}$ uzrokuju izrazito lateralno smanjenje bosa, ostavljajući iza sebe oble površine sa malim nagibom na dnu nagrizane strukture, Slika 4.5g), 4.7b). Pojava oblih površina sa malim nagibom može uticati na raspodelu mehaničkih naprezanja u tankim silicijumskim strukturama kao što su dijafragme i mikrogredice [8-9, 49, 69-70]. Naša pretpostavka je da je poreklo ovih nepoželjnih površina slično poreklu zaostatka (grebena [9]) na dnu nagrizane strukture koji ostaje kada kompenzaciona struktura nestane na kraju nagrizanja [8-9, 61]. Ukoliko postoji zahtev da se izbegnu oble površine sa malim nagibom, potrebno je tačno odrediti trenutak kad nestaju ravni $\{111\}$ i prekinuti dalje nagrizanje. Sa druge strane, oble površine sa malim nagibom se mogu koristiti da smanje koncentraciju mehaničkog naprezanja koja može negativno uticati na izdržljivost senzora [27-31, 49, 69].

Ukoliko se tokom višesatnog maskiranog nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH ne koristi kompenzaciona struktura uočili smo da je nemoguće kompenzovati već podgrižen konveksni ugao tokom *maskless* nagrizanja, iako se pojavljuju ravni brzog nagrizanja $\{311\}$ i $\{211\}$. U ovoj disertaciji će se posmatrati dve kompenzacione strukture u obliku pravougona orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$, da bi se ostvarila kompletna kompenzacija konveksnog ugla na dnu nagrizane strukture na kraju *maskless* nagrizanja. U prvom slučaju, širina pravougona B_m je jednaka dvostrukoj vrednosti dubine maskiranog nagrizanja h_1 [53, 56, 58], Slika 4.5b). U drugom slučaju, širina pravougona B prekompenzovane strukture određena je sa:

$$B = 2H = 2(h_1 + h_2) \quad (4.3)$$

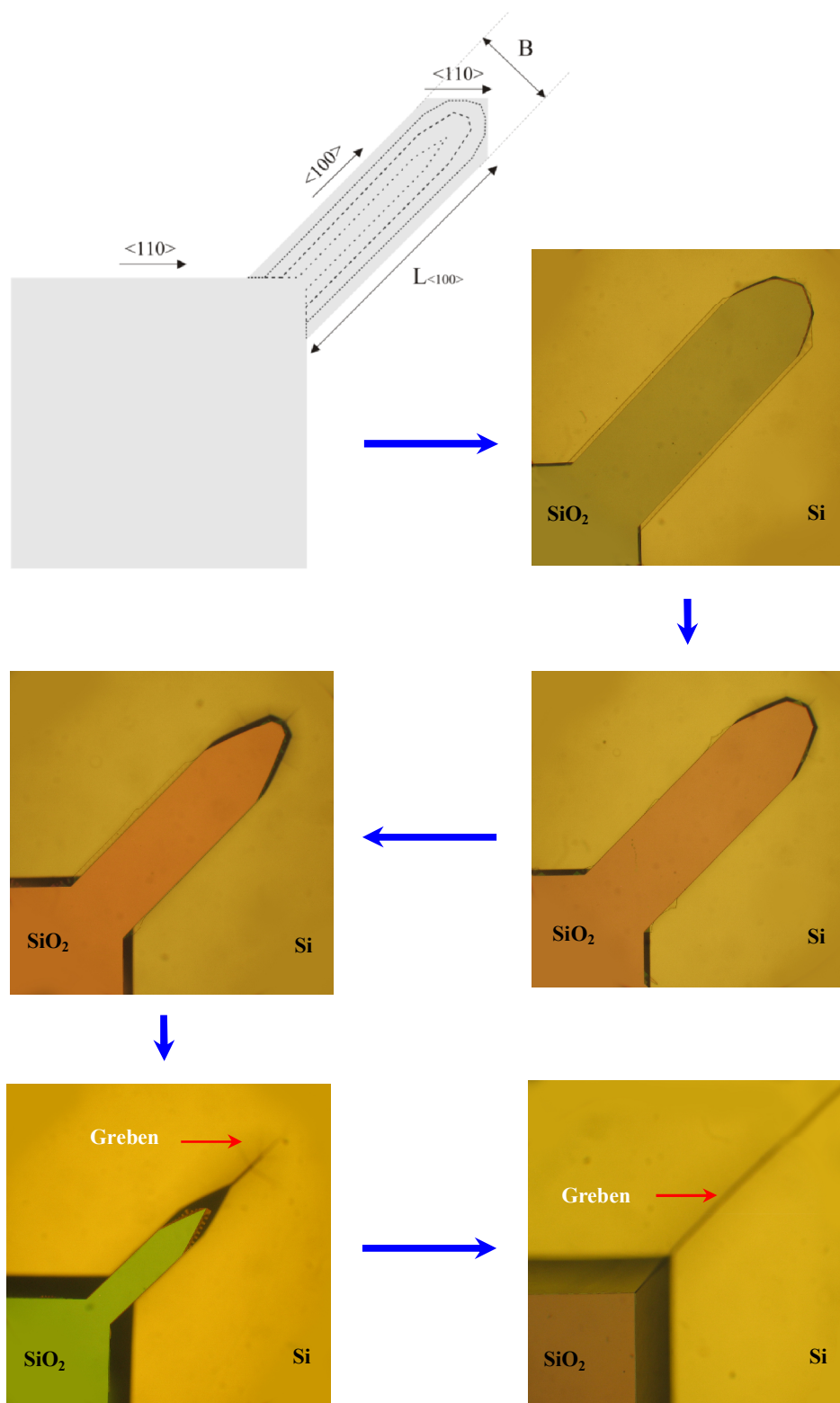
gde je H ukupna dubina nagrizanja, h_1 dubina maskiranog nagrizanja a h_2 dubina *maskless* nagrizanja.



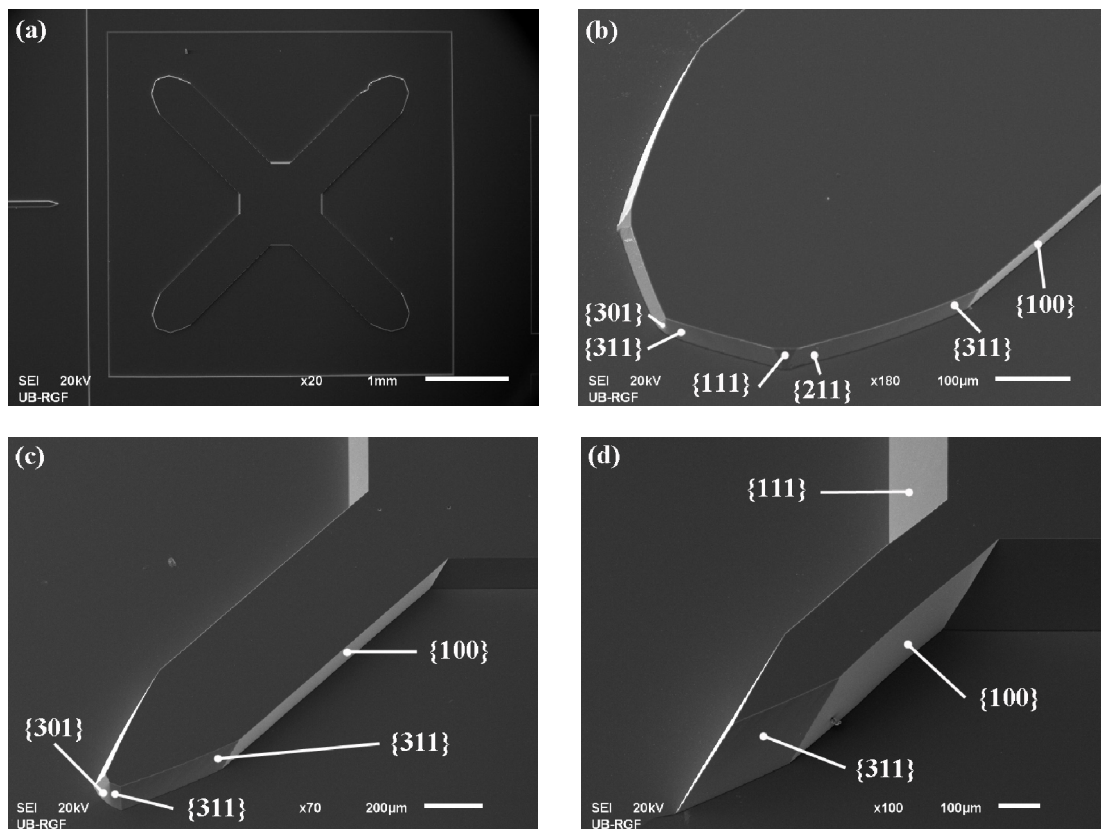
Slika 4.8 – SEM slike nagrizanih struktura za vreme maskless nagrizanja [53]. Dubina maskiranog nagrizanja je $258 \mu\text{m}$. Primenjena kompenzaciona struktura je računata za ovu dubinu nagrizanja. a) Dubina maskless nagrizanja je $7 \mu\text{m}$. b) Dubina maskless nagrizanja je $62 \mu\text{m}$. Ovo je momenat kada nestaju ravni $\{111\}$.

U prvom slučaju na kraju maskiranog nagrizanja nestaje kompenzaciona struktura i dobija se savršena zarubljena piramida čije su strane ravni iz familije $\{111\}$ i koja ima osnovicu u obliku kvadrata, Slika 4.6. U našem eksperimentu [53] za vreme *maskless* nagrizanja se pojavljuju dva tipa ravni brzog nagrizanja na konveksnom uglu između ravni iz familija $\{111\}$, Slika 4.8. Autori u [35] nisu prepoznali nijednu kristalografsku ravan na konveksnom uglu kao dominantnu. Naša pretpostavka je da ravan, koja se pojavljuje na gornjem delu konveksnog ugla, pripada familiji $\{301\}$, jer srednji ugao koja ona zaklapa sa (100) ravni bosa iznosi 20.2° . Ova pojava će biti objašnjena u Odeljku 4.3.4. Ove ravni nije moguće precizno odrediti zbog njihove veoma hrapave površine i nepravilnog oblika. Ravni koje se pojavljuju na donjem delu konveksnog ugla pripadaju familiji $\{331\}$ hrapavih ravni [44, 71]. Što je duže *maskless* nagrizanje, to je veće podgrizanje na donjem delu konveksnog ugla, Slika 4.8b).

U drugom slučaju kompenzaciona struktura u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$ nije nestala na kraju maskiranog nagrizanja. Kompenzaciona struktura je određena ravnima $\{100\}$ na stranama i na vrhu strukture i ravnima iz familija $\{311\}$ na slobodnom kraju pravougaonika, Slika 4.9-4.10. Pojava ravni iz familije $\{311\}$ na slobodnom kraju pravougaonika se objašnjava pojavom ravni iz familije $\{311\}$ u prvoj fazi *maskless* nagrizanja bosa [53]. U oba slučaja (tačka P na Slici 4.5b) i tačka R na Slici 4.5d)) postoji nezaštićena ivica konveksnog ugla na granici ravni $\{100\}$ i $\{111\}$ na početku nagrizanja. U isto vreme glatka površina $\{311\}$ - $\{211\}$ i hrapave $\{301\}$ podgrizaju konveksni ugao na slobodnom kraju pravougaonika kao u



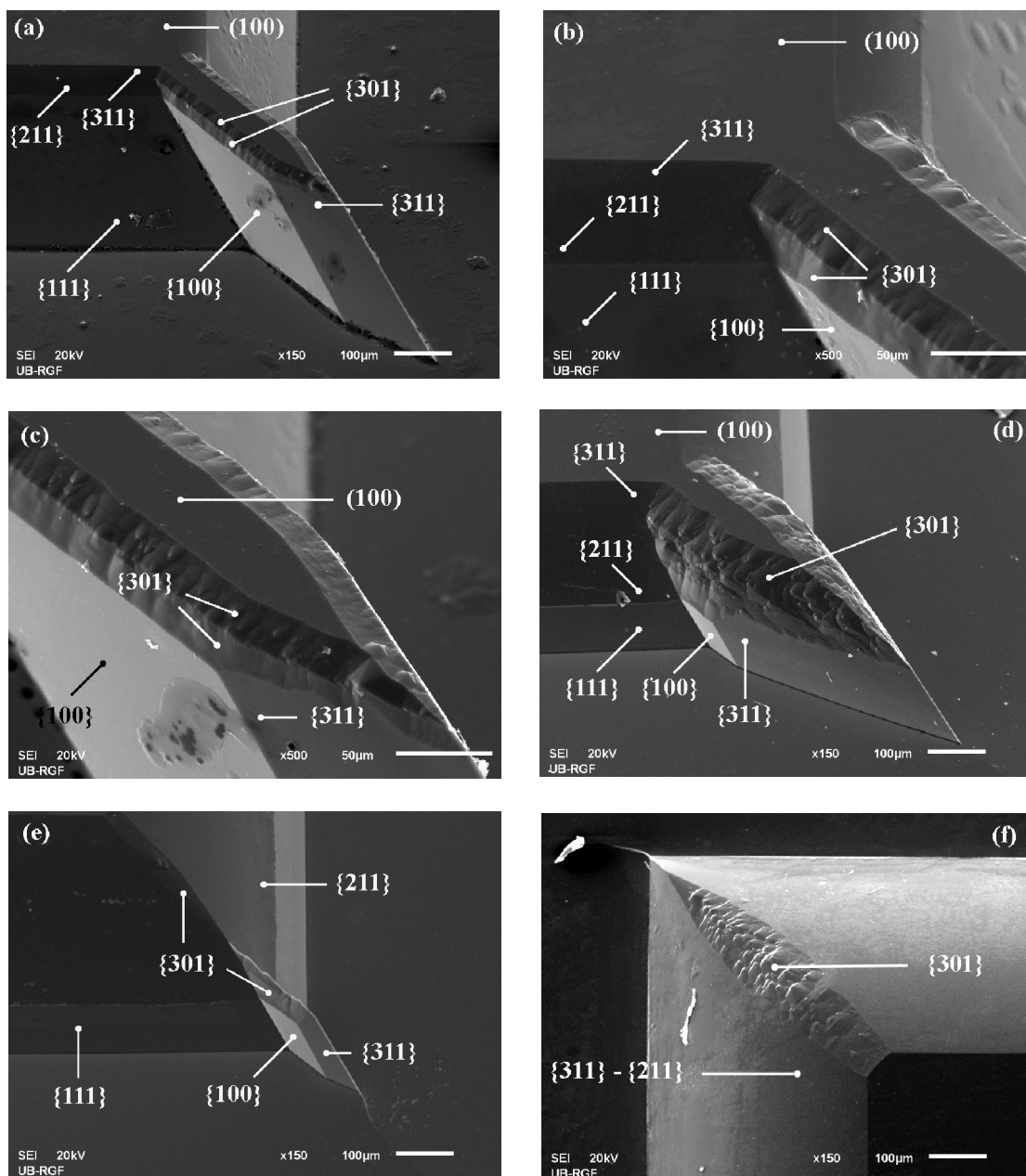
Slika 4.9 – Mikrofotografije koje ilustruju vremenski razvoj nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH pravougaone kompenzacione strukture u pravcu $\langle 100 \rangle$ koja se završava trouglom sa kracima duž $\langle 110 \rangle$ pravca. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata sa stranicama duž pravca $\langle 110 \rangle$.



Slika 4.10 – SEM slike nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH pravougaone kompenzacione strukture u pravcu $\langle 100 \rangle$ koja se završava trouglom sa kracima duž $\langle 110 \rangle$ pravca. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata sa stranicama duž pravca $\langle 110 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je $27 \mu\text{m}$. Primenjena kompenzaciona struktura je proračunata za ukupnu dubinu nagrizanja od $300 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike pod a). c) Dubina maskiranog nagrizanja je $100 \mu\text{m}$. d) Dubina maskiranog nagrizanja je $205 \mu\text{m}$. Na slobodnom kraju kompenzacione strukture ostaje dominantna samo jedna ravan iz familije $\{311\}$.

slučaju podgrizanja konveksnog ugla bosa bez primenjene kompenzacione strukture (tačka Q na Slici 4.5b)). Posle dovoljno dugog vremena ravni iz familije $\{311\}$, nastale na mestu tačke P na Slici 4.5b), postaju dominantne, Slika 4.9-4.10.

Posle uklanjanja drugog maskirajućeg sloja SiO_2 , gornje ivice konveksnog ugla u $\langle 100 \rangle$ pravcu na kompenzacionom pravouganiku nisu više zaštićene i za vreme *maskless* nagrizanja pojavljuju se simetrične hrapave kristalografske ravni, Slika 4.11a)-d). Naša pretpostavka je da ove ravni pripadaju familiji $\{301\}$ jer srednji uglovi koje one zaklapaju sa ravnima $\{100\}$ na kompenzacionoj strukturi iznose 18.7° i 70.9° [8, 53]. Na slobodnom kraju kompenzacionog pravougaonika gornja ivica konveksnog ugla na preseku ravni $\{311\}$ sa $\{100\}$ ravni ($\langle 310 \rangle$ pravac) nije više



Slika 4.11 – SEM slike nagrizane komenzacione strukture u obliku pravougaonika u $\langle 100 \rangle$ pravcu za vreme maskless nagrizanja. Dubina maskiranog nagrizanja je $258 \mu\text{m}$. Primenjena komenzaciona struktura je proračunata za ukupnu dubinu nagrizanja od $320 \mu\text{m}$, [53]. a) Dubina maskless nagrizanja je $7 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike a). Duž pravca $\langle 100 \rangle$ na komenzacionom pravougaoniku pojavljuju se ravni iz familije $\{301\}$. c) Drugi uvećani detalj sa slike a). Uočavaju se dve hrapave ravni na slobodnom kraju komenzacionog pravougaonika. d) Dubina maskiranog nagrizanja je $194 \mu\text{m}$. Primenjena komenzaciona struktura je proračunata za ukupnu dubinu nagrizanja od $360 \mu\text{m}$. Dubina maskless nagrizanja je $32 \mu\text{m}$. e) Posle određenog vremena maskless nagrizanja ravan (100) na vrhu pravougaone komenzacione strukture nestaje i ravni brzog nagrizanja $\{301\}$ postaju dominantne. f) Gornji deo konveksnog ugla na bosu je podgrižen u pravcu ravni $\{301\}$ na kraju maskless nagrizanja. Donji deo konveksnog ugla je potpuno kompenzovan.

zaštićena drugim maskirajućem slojem tako da se za vreme *maskless* nagrizanja pojavljuju dve hrapave ravni za koje takođe pretpostavljamo [53] da pripadaju familijama {331} i {301} (ili {311}), Slika 4.11c),d).

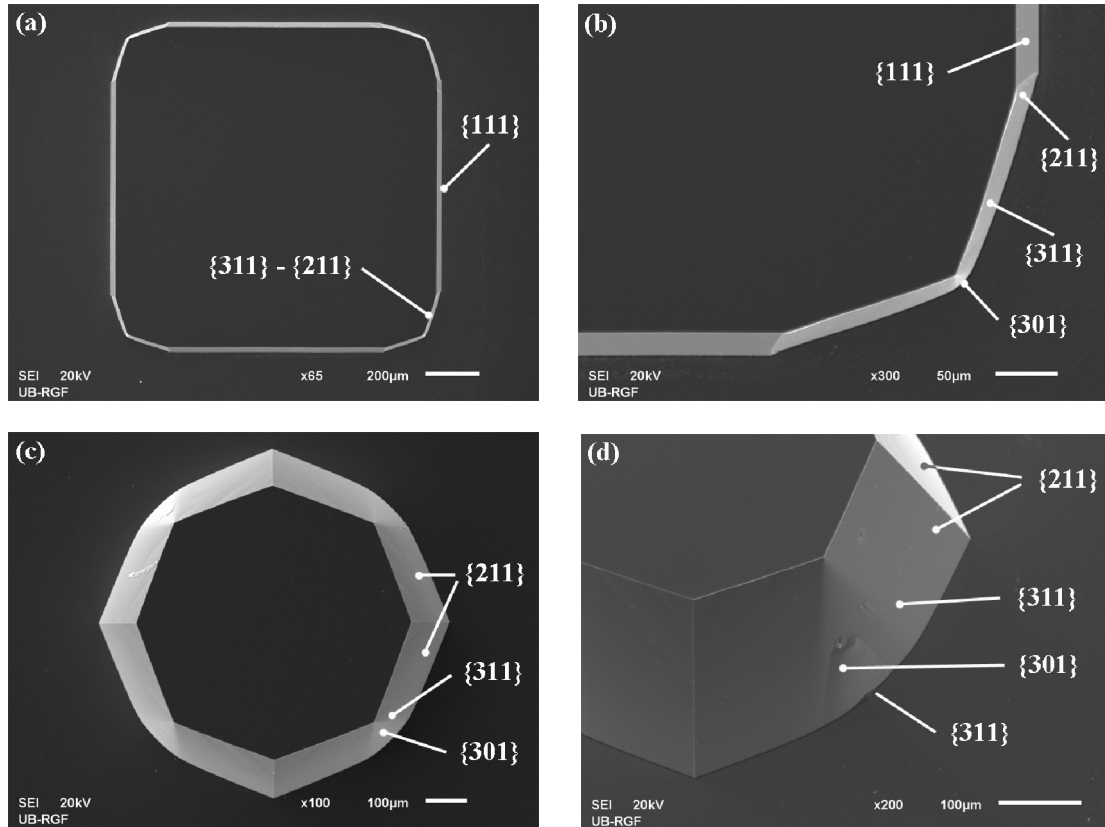
Na kraju *maskless* nagrizanja, u drugom slučaju kompenzacione strukture, gornji deo konveksnog ugla bosa je podgrizan ravnima koje pripadaju familiji {301}, Slika 4.11f), dok je donji deo u potpunosti kompenzovan. U prvom slučaju kompenzacione strukture ovo podgrizanje je još izraženije jer je konveksni ugao duže vreme bio izložen nagrizanju ravnima brzog nagrizanja {301}, Slika 4.8b).

4.3.2 Nagrizanje silicijumskih struktura određenih kvadratnim likovima stranica projektovanih u različitim kristalografskim pravcima

Maskless nagrizanjem silicijumskih struktura sa kompenzacijom konveksnog ugla smo odredili kristalografske ravni koje se pojavljuju tokom te vrste nagrizanja. Da bismo mogli da definišemo mehanizam nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH potrebno je odrediti i ostale dominantne kristalografske ravni koje se pojavljuju tokom nagrizanja. Dodatno nagrizanje silicijumskih struktura određenih kvadratnim likovima stranica projektovanih u različitim kristalografskim pravcima omogućava nam da uočimo nove ravni koje se ne pojavljuju tokom *maskless* nagrizanja. Kvadratni likovi su projektovani u kristalografskim pravcima $\langle 210 \rangle$, $\langle 310 \rangle$, $\langle 410 \rangle$ i $\langle 510 \rangle$ i predstavljaju kvadratna ostrva od silicijum dioksida (kao na Slici 4.4 ali u odgovarajućim pravcima) i kvadratne otvore u silicijum dioksidu.

Nagrizanjem kvadratnih ostrva od silicijum dioksida orijentisanih u različitim pravcima dobijaju se različiti trodimenzionalni oblici u silicijumu (tzv. meza strukture) određeni različitim kristalografskim ravnima. Kod nekih oblika konveksni uglovi su podgrizani hrapavim ravnima i sam oblik veoma brzo dobija nepravilan izgled, kod drugih oblika konveksni uglovi su pravilni i definisani glatkim ravnima. U slučaju kada su stranice kvadrata duž pravca $\langle 110 \rangle$ (što je najčešći slučaj u izradi senzorskih i aktuatorskih struktura), dolazi do velikog podgrizanja konveksnog ugla, Slika 4.4a), 4.12. Konveksni ugao je podgrizan ravnima iz familija {311}, {211} i {301}, Slika 4.12a),b). Kada ne bi postojao efekat podgrizanja konveksnih uglova,

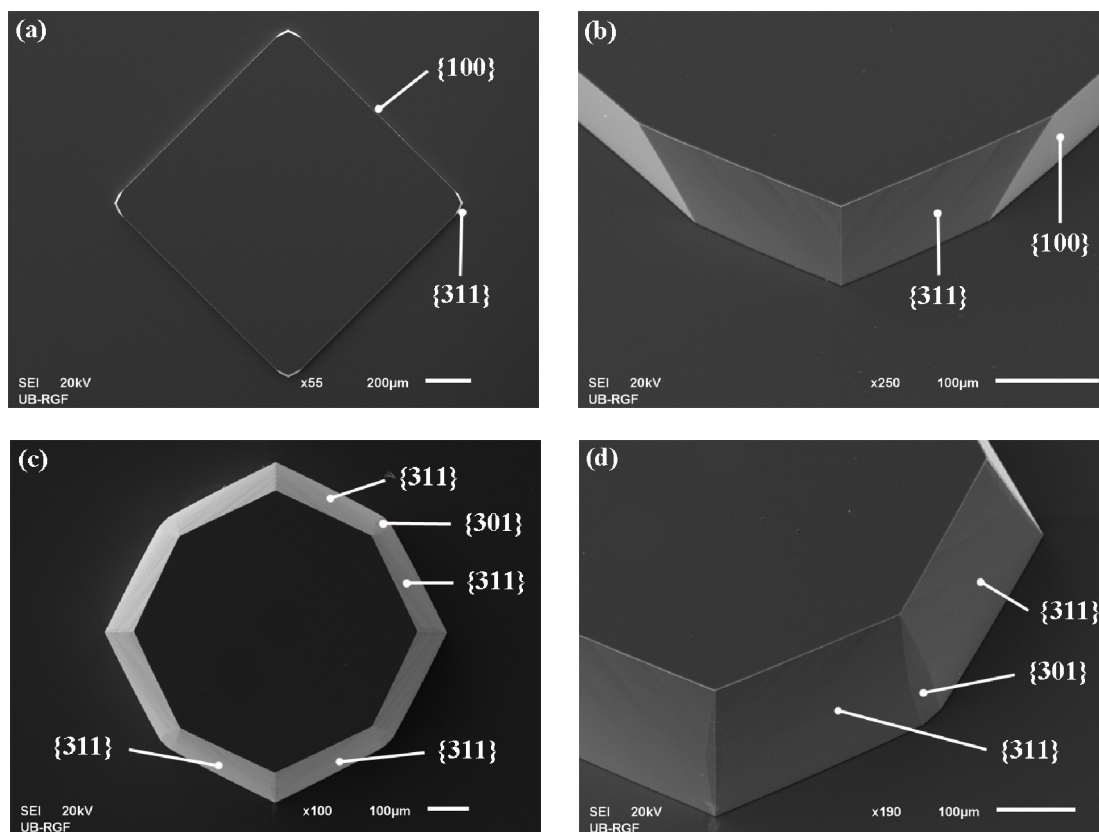
trodimenzionalni oblik silicijuma određen kvadratnom maskom stranica duž pravca $\langle 110 \rangle$ bi imao oblik pravilne zarubljenje piramide određene ravnima $\{111\}$, Slika 4.6. Posle dužeg vremenskog intervala, kristalografske ravni $\{111\}$ nestaju i brze ravni $\{211\}$ sa dva susedna konveksna ugla se spajaju, Slika 4.12c). Ovaj oblik se održava sve dok maska od silicijum dioksida u potpunosti ne nestane podgrizanjem brzih kristalografskih ravni $\{311\}$, $\{211\}$ i $\{301\}$, Slika 4.12d).



Slika 4.12 – SEM slike nagrizanja kvadratnog ostrva od silicijum dioksida čije su stranice duž pravca $\langle 110 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je $27 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike a). Podgrizanje konveksnog ugla je definisano brzim ravnima iz familija $\{311\}$, $\{211\}$ i $\{301\}$. c) Dubina maskiranog nagrizanja je $205 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini su već nestale kristalografske ravni $\{111\}$ a spojile se brze ravni $\{211\}$ sa dva susedna konveksna ugla. d) Dubina maskiranog nagrizanja je $257 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini se i dalje održava oblik sa slike c).

I u slučaju kada su stranice kvadrata duž pravca $\langle 100 \rangle$ dolazi do velikog podgrizanja konveksnog ugla, Slika 4.4b), 4.13. Podgrizanje konveksnog ugla je definisano samo kristalografskim ravnima iz familije $\{311\}$, Slika 4.13a),b). Kada ne bi postojao efekat podgrizanja konveksnih uglova, trodimenzionalni oblik silicijuma

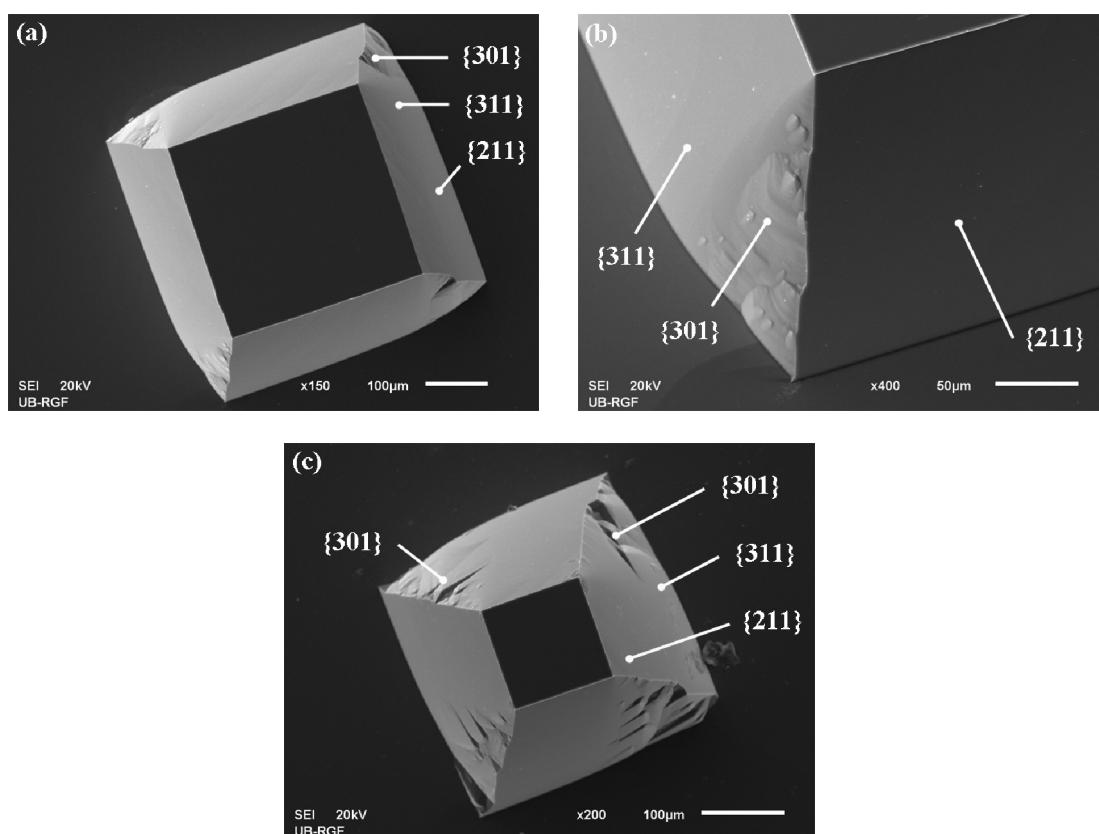
određen kvadratnom maskom sa stranicama duž pravca $\langle 100 \rangle$ bi imao oblik kvadra određenog ravnima $\{100\}$. Posle dužeg vremenskog intervala, kristalografske ravni $\{100\}$ nestaju i ravni iz familije $\{311\}$ sa dva susedna konveksna ugla se spajaju, Slika 4.13c). U trenutku njihovog spajanja pojavljuje se nova brza hrapava ravan koja pripada familiji $\{301\}$. Oblik sa Slike 4.13c,d) se održava sve dok maska od silicijum dioksida u potpunosti ne nestane podgizanjem brzih kristalografskih ravni $\{311\}$ i $\{301\}$.



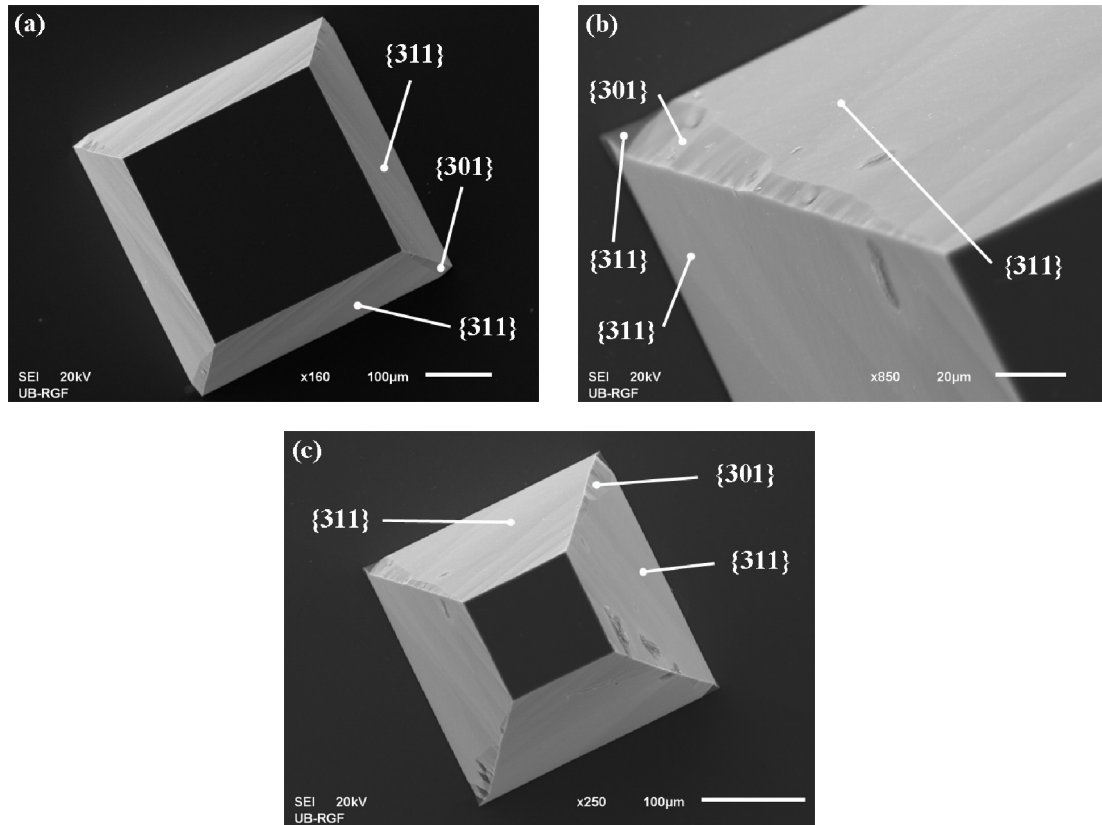
Slika 4.13 – SEM slike nagrizanja kvadratnog ostrva od silicijum dioksida stranica duž pravca $\langle 100 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je $27 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike a). Konveksan ugao je podgrizan brzim ravnima iz familija $\{311\}$. c) Dubina maskiranog nagrizanja je $205 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini su već nestale kristalografske ravni $\{100\}$ a spojile brze ravni $\{311\}$ sa dva susedna konveksna ugla. Na preseku ove dve brze ravni iz familije $\{311\}$ prisutna je ravan $\{301\}$. d) Dubina maskiranog nagrizanja je $257 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini se i dalje održava oblik sa slike c).

Trodimenzionalni oblici silicijuma u slučajevima kada su stranice kvadrata duž kristalografskih pravaca $\langle 210 \rangle$ i $\langle 310 \rangle$ su veoma slični, Slika 4.14, 4.15. Kada su stranice kvadrata duž kristalografskih pravaca $\langle 210 \rangle$, nagrizanjem se dobija oblik

zarubljenje piramide određen ravnima $\{211\}$, ali postoji podgrizanje konveksnog ugla, Slika 4.14a). Konveksni ugao je podgrizan u pravcu brzih ravni iz familija $\{311\}$ i $\{301\}$, Slika 4.14b). Ovo podgrizanje je manje agresivno nego kod kvadrata stranica u kristalografskim pravcima $\langle 110 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$ i oblik dobijen na početku nagrizanja se duže održava, Slika 4.14c). Razlog je što brzine nagrizanja ravni $\{311\}$, $\{211\}$ i $\{301\}$ imaju bliske vrednosti, Tabela 4.1. Kada su stranice kvadrata duž kristalografskih pravaca $\langle 310 \rangle$ nagrizanjem se dobija oblik zarubljenje piramide određen ravnima $\{311\}$, ali i kod njega postoji podgrizanje konveksnog ugla, Slika 4.15a). Podgrizanje konveksnog ugla određeno je brzim hrapavim ravnima iz familije $\{301\}$, Slika 4.15b). Slično kao i kod pravca $\langle 210 \rangle$, dobijeni oblik na početku nagrizanja se duže održava, Slika 4.15c).

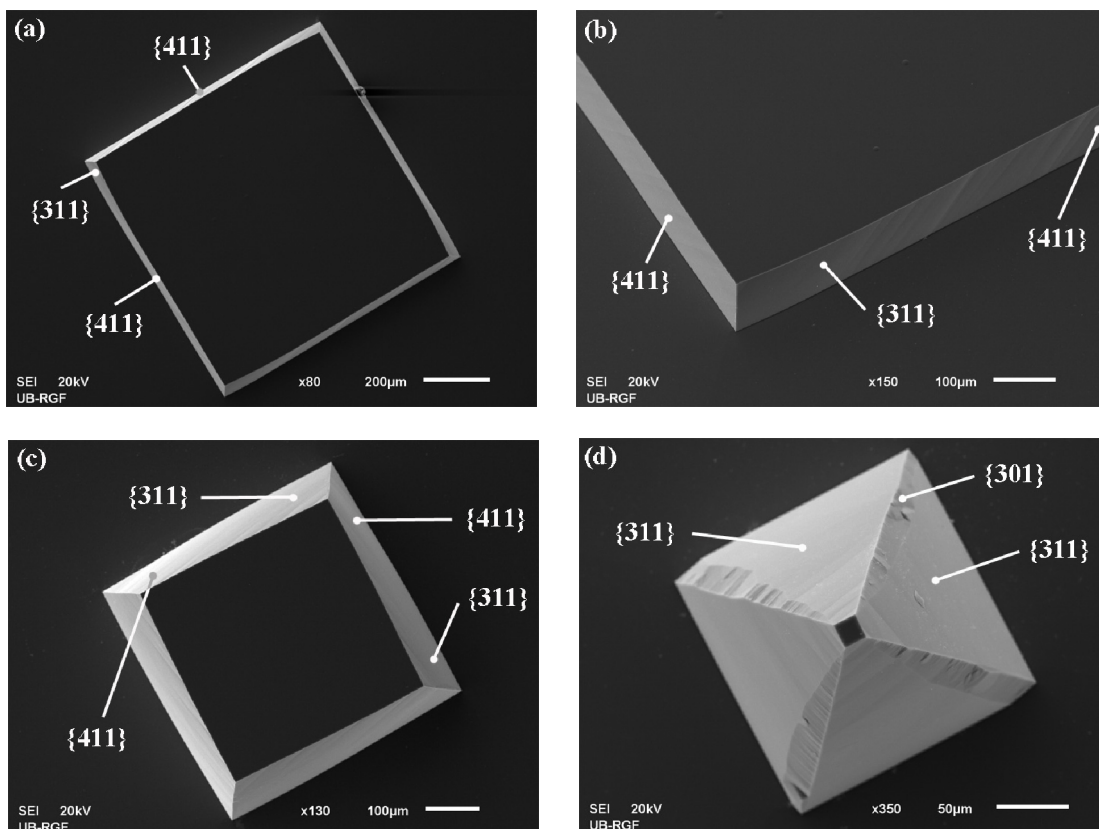


Slika 4.14 – SEM slike nagrizanja kvadratnog ostrva od silicijum dioksida čije su stranice duž pravca $\langle 210 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je 205 μ m. b) Uvećan detalj sa slike a). Podgrizanje konveksnog ugla određeno je brzim ravnima iz familija $\{311\}$ i $\{301\}$. c) Dubina maskiranog nagrizanja je 257 μ m. Na ovoj dubini se i dalje održava oblik sa slike a), ali se primećuje da su na vrhu dominantne ravni iz familije $\{211\}$ a na dnu iz familije $\{311\}$.



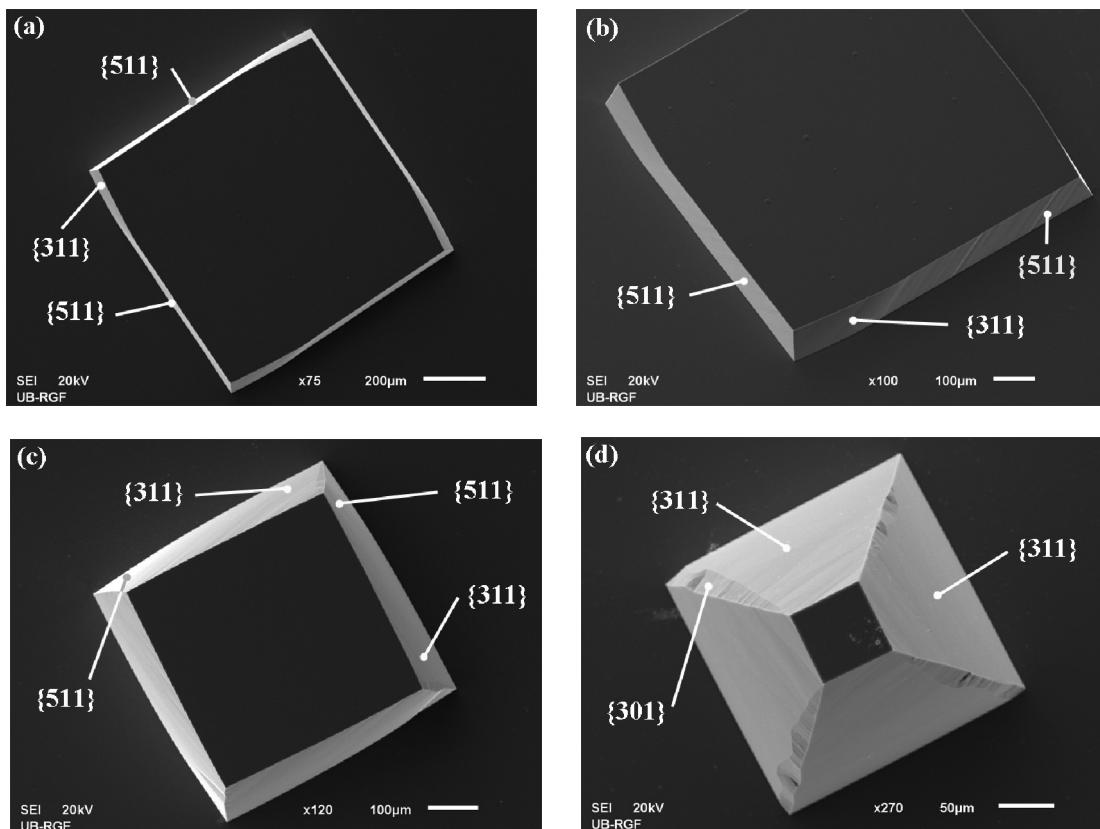
Slika 4.15 – SEM slike nagrizanja kvadratnog ostrva od silicijum dioksida stranica duž pravca $\langle 310 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je $205 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike a). Podgrizanje konveksnog ugla određeno je brzim ravnima iz familije $\{301\}$. c) Dubina maskiranog nagrizanja je $257 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini se i dalje održava oblik sa slike a).

Takođe, ustanovili smo da su i trodimenzionalni oblici silicijuma u slučajevima kada su stranice kvadrata duž kristalografskih pravaca $\langle 410 \rangle$ i $\langle 510 \rangle$ veoma slični, Slika 4.16, 4.17. Kada su stranice kvadrata duž kristalografskih pravaca $\langle 410 \rangle$, nagrizanjem se dobija oblik zarubljenje piramide određen ravnima $\{411\}$, ali ne postoji klasično podgrizanje konveksnog ugla, Slika 4.16a). Presek ravni $\{411\}$ i ravni (100) je duž pravca $\langle 410 \rangle$. Podgrizanje konveksnog ugla određeno je glatkim brzim ravnima iz familije $\{311\}$ i on ima oblik koji predstavlja presek ravni $\{311\}$ i $\{411\}$, Slika 4.16b). Posle dužeg nagrizanja trodimenzionalni oblik dobija formu pravilne zarubljenje piramide određene kristalografskim ravnima $\{311\}$, Slika 4.16d). U tom trenutku se na konveksnom uglu, koji sad predstavlja presek dve ravni iz familije $\{311\}$, pojavljuje hrapava ravan iz familije $\{301\}$, Slika 4.16d), kao u slučaju kada je maska kvadrat stranice u pravcu $\langle 310 \rangle$.

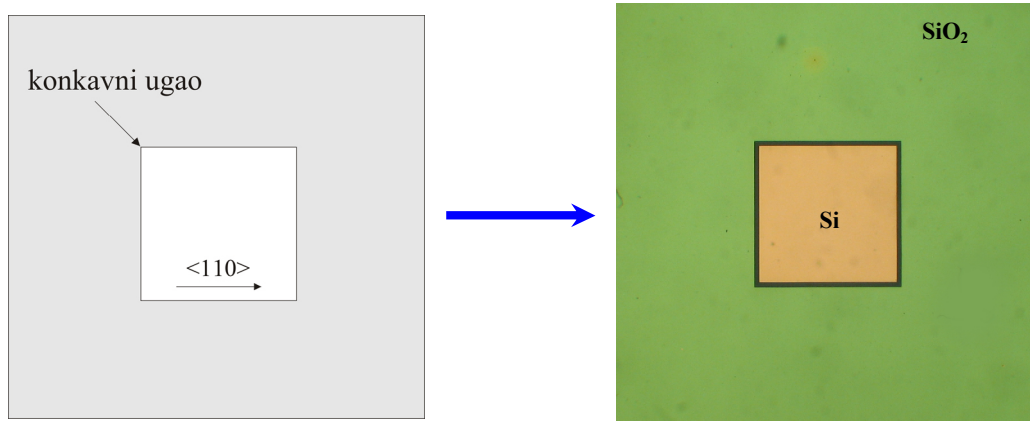


Slika 4.16 – SEM slike nagrizanja kvadratnog ostrva od silicijum dioksida čije su stranice duž pravca $\langle 410 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je $100 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike a). Podgrizanje konveksnog ugla određeno je brzim ravnima iz familija $\{311\}$. c) Dubina maskiranog nagrizanja je $205 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini se i dalje održava oblik sa slike a). d) Dubina maskiranog nagrizanja je $300 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini trodimenzionalna struktura dobija oblik pravilne zarubljene piramide određene kristalografskim ravnima $\{311\}$. Na konveksnom uglu, koji sad predstavlja presek dve ravni iz familije $\{311\}$, pojavljuje se hrapava ravan iz familije $\{301\}$.

Kada su stranice kvadrata duž kristalografskih pravaca $\langle 510 \rangle$, nagrizanjem se dobija oblik zarubljene piramide određen ravnima $\{511\}$. Presek ravni $\{511\}$ i ravni (100) je duž pravca $\langle 510 \rangle$. I u ovom slučaju ne postoji klasično podgrizanje konveksnog ugla, Slika 4.17a). Podgrizanje konveksnog ugla određeno je glatkim brzim ravnima iz familije $\{311\}$ i on ima oblik koji predstavlja presek ravni $\{311\}$ i $\{511\}$, Slika 4.17b). Kao i kod pravca $\langle 410 \rangle$, posle dužeg vremena nagrizanja trodimenzionalni oblik dobija formu pravilne zarubljene piramide određene kristalografskim ravnima $\{311\}$, Slika 4.17d). Na konveksnom uglu se pojavljuje hrapava ravan iz familije $\{301\}$, 4.17d).

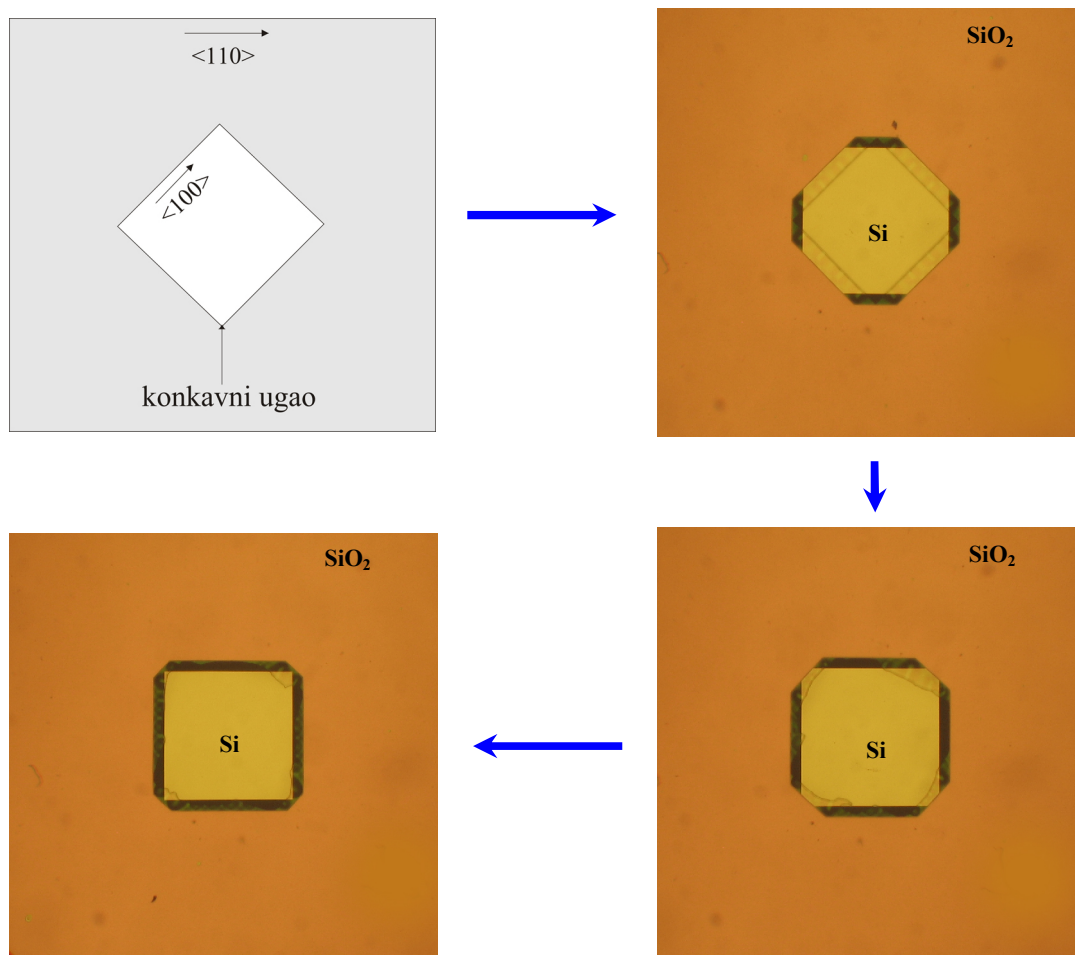


Slika 4.17 – SEM slike nagrivanja kvadratnog ostrva od silicijum dioksida čije su stranice duž pravca $\langle 510 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrivanja je $100 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike a). Podgrizanje konveksnog ugla je definisano brzim ravnima iz familija $\{311\}$. c) Dubina maskiranog nagrivanja je $205 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini se i dalje održava oblik sa slike a). d) Dubina maskiranog nagrivanja je $300 \mu\text{m}$. Na ovoj dubini trodimenzionalni oblik dobija oblik pravilne zarubljene piramide određene kristalografskim ravnima $\{311\}$. Na konveksnom uglu, koji sad predstavlja presek dve ravni iz familije $\{311\}$, pojavljuje se hrapava ravan iz familije $\{301\}$.



Slika 4.18 – Mikrofotografija nagrivanog kvadratnog otvora u silicijum dioksidu čije su stranice u pravcu $\langle 110 \rangle$. Nagrivanjem se dobijaju jame koje imaju oblik pravilne inverzne zarubljene piramide i čije su strane određene ravnima iz familije $\{111\}$.

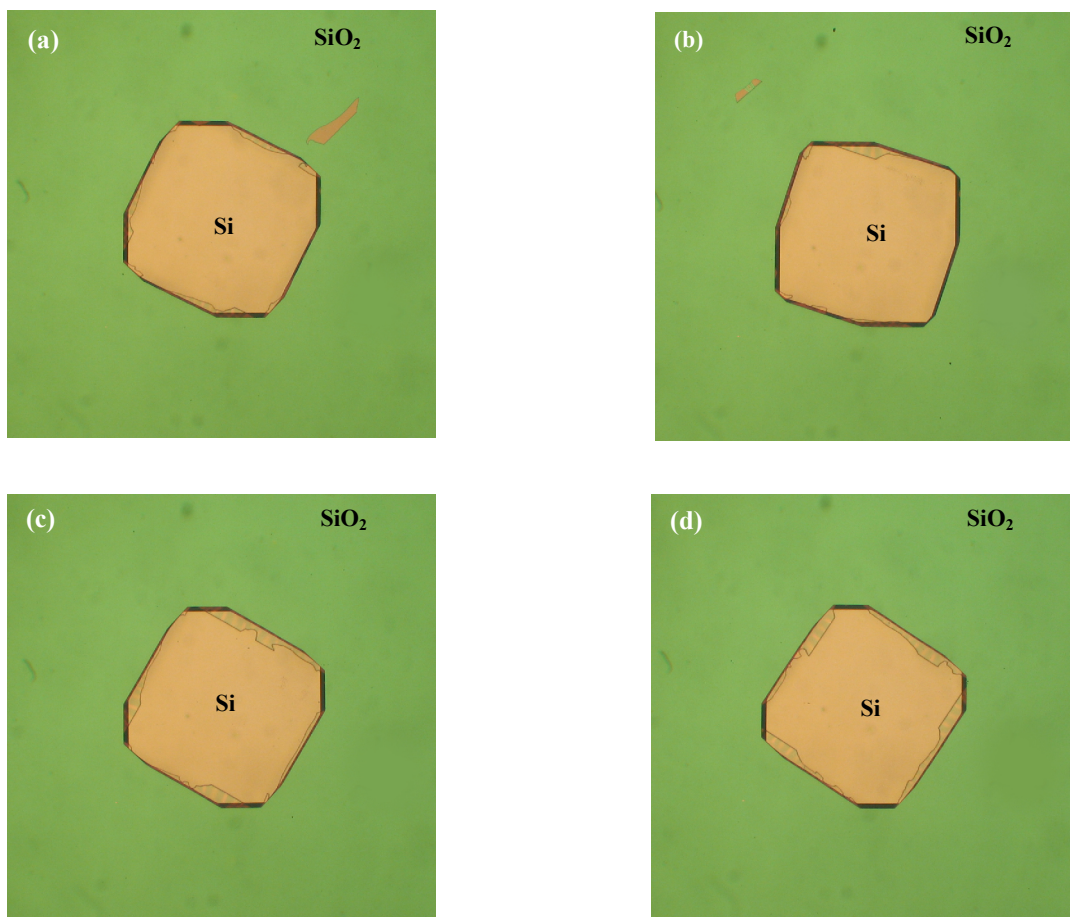
Nagrizanjem kvadratnih otvora u silicijum dioksidu u različitim pravcima dobijaju se različite trodimenzionalne jame u silicijumu određene različitim kristalografskim ravnima. Za sve jame je zajedničko da im dno predstavlja ravan (100) i da posle dovoljno dugog nagrizanja strane jame postaju ravni iz familije najsporijeg nagrizanja $\{111\}$, Slika 4.18-4.19. Nagrizanjem kvadratnih otvora u silicijum dioksidu



Slika 4.19 – Mikrografije koje ilustruju vremenski razvoj nagrizanja kvadratnog otvora u silicijum dioksidu čije su stranice u pravcu $\langle 100 \rangle$. Nagrizanjem se dobijaju jame koje na površini silicijuma imaju osmougaoni oblik i čije su strane određene ravnima iz familija $\{100\}$ i $\{111\}$. Vremenom kristalografske ravni $\{100\}$ nestaju, i oblik jame postaje pravilna inverzna zarubljena piramida određena ravnima iz familije $\{111\}$.

stranica u pravcu $\langle 110 \rangle$ dobijaju se jame u obliku pravilne inverzne zarubljene piramide i strana određenih ravnima iz familije $\{111\}$, Slika 4.18. Nagrizanjem kvadratnih otvora u silicijum dioksidu stranica u pravcu $\langle 100 \rangle$ dobijaju se jame koje na površini silicijuma imaju osmougaoni oblik i čije su strane određene ravnima iz familija

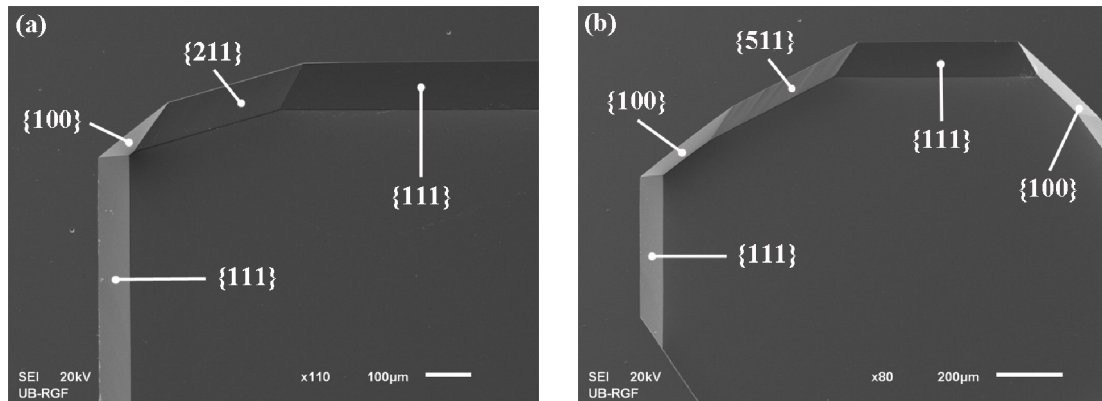
{100} i {111}, Slika 4.19. Vremenom kristalografske ravni {100} nestaju, i oblik jame postaje pravilna inverzna zarubljena piramida određena ravnima iz familije {111}, Slika 4.18.



Slika 4.20 – Mikrofotografije nagrizanih kvadratnih otvora u silicijum dioksidu čije su stranice u pravcu: a) $\langle 210 \rangle$. b) $\langle 310 \rangle$. c) $\langle 410 \rangle$. d) $\langle 510 \rangle$.

Nagrizanjem kvadratnih otvora u silicijum dioksidu čije su stranice u pravcu $\langle 210 \rangle$, $\langle 310 \rangle$, $\langle 410 \rangle$ i $\langle 510 \rangle$ dobijaju se jame koje na površini silicijuma imaju dvanaestougao oblik i čije su strane određene ravnima iz familija {100}, {111} i ravnima {211}, {311}, {411} i {511}, redom, Slika 4.20-4.21. Razlog pojave ovih kristalografskih ravni na konkavnom uglu će biti objašnjen u Odeljku 4.3.4. Vremenom brze kristalografske ravni {211}, {311}, {411} i {511} nestaju, i oblik jame postaje određen samo ravnima iz familija {100} i {111}, kao u slučaju nagrizanja kvadratnih otvora u silicijum dioksidu čije su stranice u pravcu $\langle 100 \rangle$, Slika 4.19. Daljim

nagrizanjem oblik jame postaje pravilna inverzna zarubljena piramida određena ravnima iz familije $\{111\}$.



Slika 4.21 – SEM slike jama formiranih nagrizanjem kvadratnih otvora čije su stranice u pravcu: a) $\langle 210 \rangle$. Jama je određena ravnima iz familija $\{100\}$, $\{111\}$ i $\{211\}$. b) $\langle 510 \rangle$. Jama je određena ravnima iz familija $\{100\}$, $\{111\}$ i $\{511\}$.

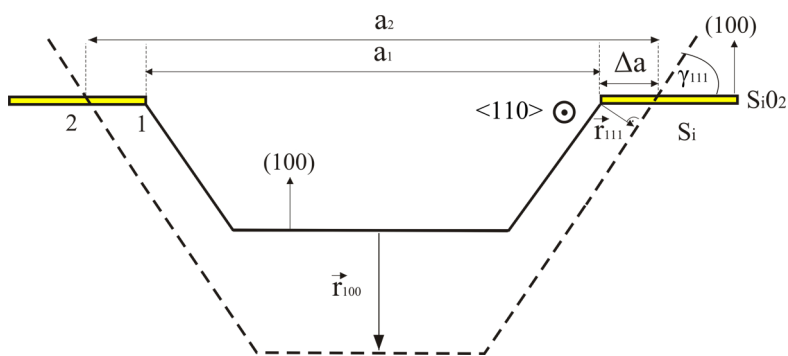
4.3.3 Brzine nagrizanja kristalografskih ravni

U Tabeli 4.1 su date brzine nagrizanja za sve kristalografske ravni razmatrane u prethodnim odeljcima. Brzinu nagrizanja ravni $\{100\}$ smo neposredno odredili merenjem promene dubine nagrizanja H sa vremenom. Ostale brzine nagrizanja smo odredili posredno merenjem promene odgovarajućih parametara nagrizanih kristalografskih ravni sa vremenom [53]. Pri određivanju brzina nagrizanja potrebno je voditi računa o pomeranju nagrizanih ravni $\{100\}$ na vrhu, na stranama i na dnu nagrizanih struktura [48], Slika 4.24.-4.26. Izuzeci su brzine nagrizanja ravni $\{111\}$, $\{211\}$, $\{311\}$, $\{411\}$ i $\{511\}$ koje se određuju merenjem parametara podgrizanja ispod maskirajućeg sloja SiO_2 , Slika 4.22-4.23, 4.27.

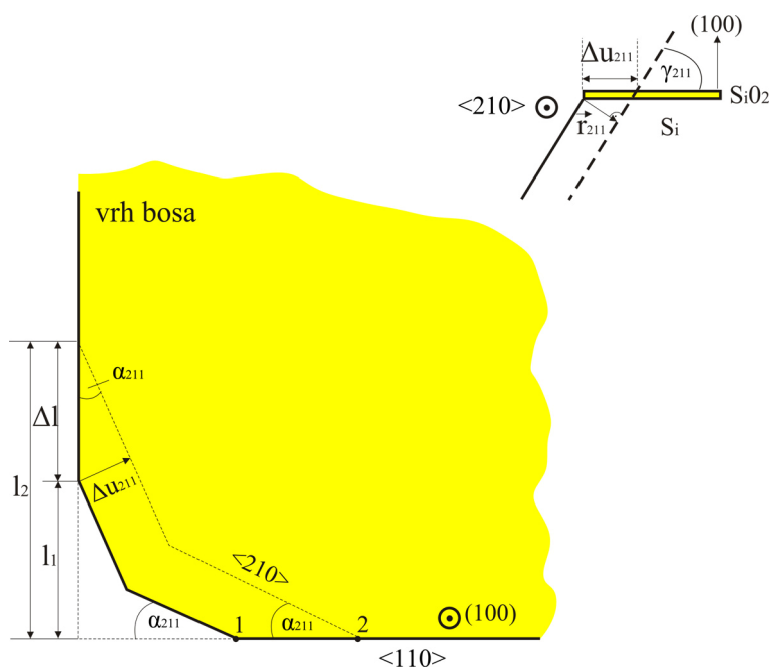
Na osnovu geometrije struktura izveli smo analitičke izraze za brzine nagrizanja ravni $\{111\}$, $\{211\}$, $\{331\}$, $\{311\}$, $\{301\}$, $\{411\}$ i $\{511\}$. Analitički izraz za ravan $\{111\}$, Slika 4.22, je:

$$r_{111} = \frac{\Delta a}{2\Delta t} \sin \gamma_{111}, \quad \Delta t = t_2 - t_1, \quad \Delta a = |a_2 - a_1| \quad (4.4)$$

gde su t_1 i t_2 vremena nagrizanja u trenucima 1 i 2, a_1 i a_2 stranice kvadratnog otvora u $\langle 110 \rangle$ pravcu u trenucima 1 i 2 a γ_{111} ugao koji ravan $\{111\}$ zaklapa sa ravni $\{100\}$.



Slika 4.22 – Promena stranice kvadratnog otvora a u $\langle 110 \rangle$ pravcu sa vremenom. Promena ovog parametra daje brzinu nagrizanja ravni $\{111\}$.



Slika 4.23 – Promena dužine podgrizanja l u $\langle 110 \rangle$ pravcu na gornjem delu konveksnog ugla nagrizanog bosa sa vremenom. Promena ovog parametra daje brzinu nagrizanja ravni $\{211\}$.

Analitički izraz za ravan $\{211\}$, Slika 4.23, je:

$$r_{211} = \frac{\Delta l \sin \alpha_{211}}{\Delta t} \sin \gamma_{211}, \quad \Delta t = t_2 - t_1, \quad \Delta l = |l_2 - l_1| \quad (4.5)$$

gde su t_1 i t_2 vremena nagrizanja u trenucima 1 i 2, l_1 i l_2 dužine podgrizanja u $\langle 110 \rangle$ pravcu u trenucima 1 i 2, α_{211} ugao koji pravac $\langle 210 \rangle$ zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$ na

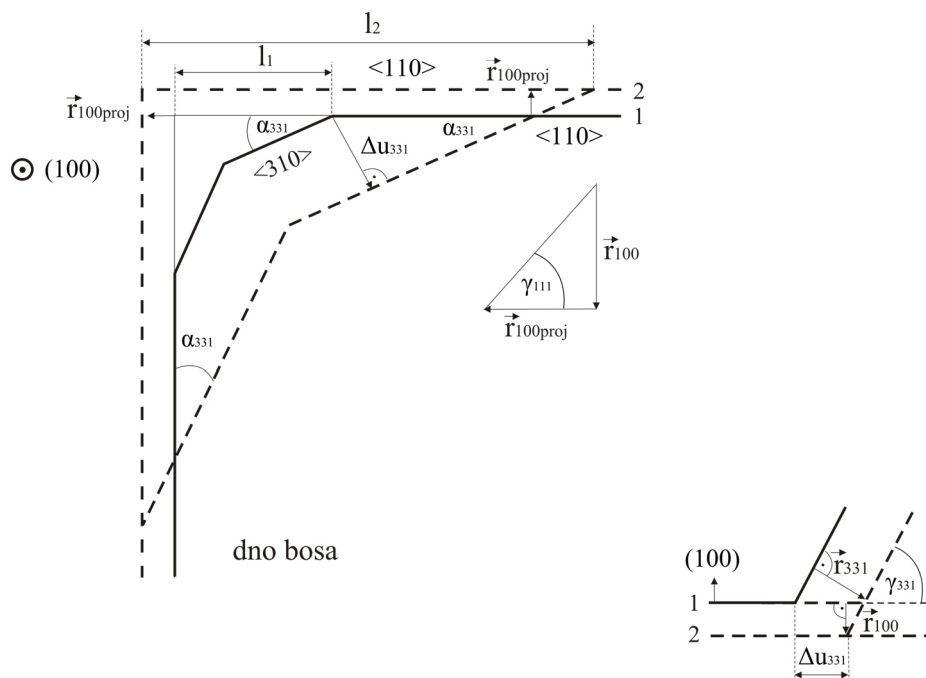
gornjem delu konveksnog ugla bosa, a γ_{211} ugao koji ravan $\{211\}$ zaklapa sa ravni (100).

Analički izraz za ravan $\{331\}$, Slika 4.24, izveli smo vodeći računa o nagrizanju ravni (100) na donjem delu podgrizanog konveksnog ugla bosa:

$$\Delta u_{331} = \frac{\Delta l}{\Delta t} \sin \alpha_{331} - \frac{r_{100}(\sin \alpha_{331} + \cos \alpha_{331})}{\operatorname{tg} \alpha_{111}}, \quad \Delta t = t_2 - t_1, \quad \Delta l = l_2 - l_1 \quad (4.6)$$

$$r_{331} = \Delta u_{331} \sin \gamma_{331} + r_{100} \cos \gamma_{331} \quad (4.7)$$

gde su t_1 i t_2 vremena nagrizanja u trenucima 1 i 2, l_1 i l_2 dužine podgrizanja u $\langle 110 \rangle$ pravcu u trenucima 1 i 2, r_{100} brzina nagrizanja ravni (100), α_{331} ugao koji pravac $\langle 310 \rangle$ zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$, a γ_{331} ugao koji ravan $\{331\}$ zaklapa sa ravni (100) na donjem delu konveksnog ugla.

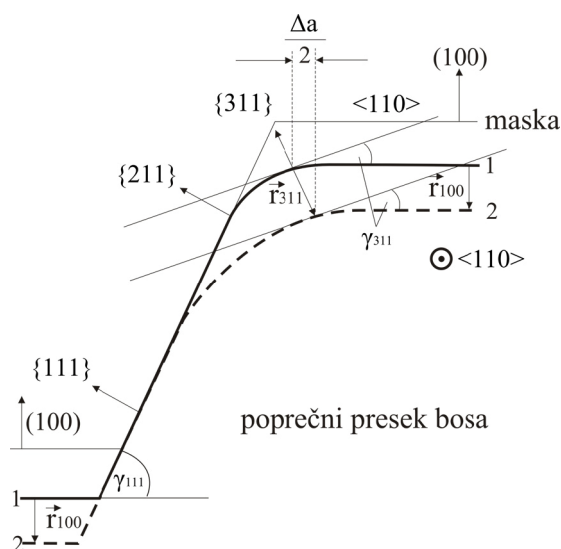


Slika 4.24 – Promena dužine podgrizanja l u $\langle 110 \rangle$ pravcu na donjem delu konveksnog ugla nagrizanog bosa sa vremenom. Promena ovog parametra daje brzinu nagrizanja ravni $\{331\}$.

Analitički izraz za ravan $\{311\}$, Slika 4.25, izveli smo vodeći računa o nagrizanju ravni (100) na vrhu bosa za vreme *maskless* nagrizanja:

$$r_{311} = \frac{\Delta a}{2\Delta t} \sin \gamma_{311} + r_{100} \cos \gamma_{311}, \quad \Delta t = t_2 - t_1, \quad \Delta a = |a_2 - a_1| \quad (4.8)$$

gde su t_1 i t_2 vremena nagrizanja u trenucima 1 i 2, a_1 i a_2 stranice bosa u $\langle 110 \rangle$ pravcu u trenucima 1 i 2, r_{100} brzina nagrizanja ravni (100) a γ_{311} ugao koji ravan $\{311\}$ zaklapa sa ravni (100) na vrhu nagrizanog bosa.

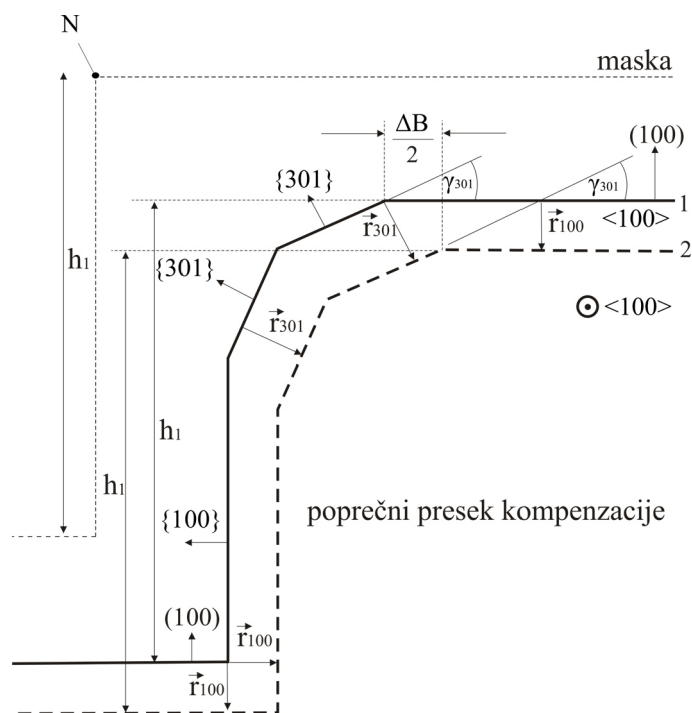


Slika 4.25 – Promena stranice nagrizanog bosa a u $\langle 110 \rangle$ pravcu sa vremenom tokom *maskless* nagrizanja. Promena ovog parametra daje brzinu nagrizanja ravni $\{311\}$.

Analitički izraz za ravan $\{301\}$, Slika 4.26, izveli smo vodeći računa o nagrizanju ravni (100) na vrhu kompenzacione strukture pravougaonog oblika u pravcu $\langle 100 \rangle$:

$$r_{301} = \frac{\Delta B}{2\Delta t} \sin \gamma_{301} + r_{100} \cos \gamma_{301}, \quad \Delta t = t_2 - t_1, \quad \Delta B = |B_2 - B_1| \quad (4.9)$$

gde su t_1 i t_2 vremena nagrizanja u trenucima 1 i 2, B_1 i B_2 širine kompenzacije pravougaonog oblika u $\langle 100 \rangle$ pravcu u trenucima 1 i 2, r_{100} brzina nagrizanja ravni (100), a γ_{301} ugao koji ravan $\{301\}$ zaklapa sa ravni (100) na vrhu kompenzacije pravougaonog oblika.



Slika 4.26 – Promena širine kompenzacione strukture pravougaonog oblika B u $\langle 100 \rangle$ pravcu sa vremenom tokom maskless nagrizanja. Promena ovog parametra daje brzinu nagrizanja ravni $\{301\}$.

Preostale brzine nagrizanja dominantnih ravni su određene merenjem promene stranice kvadratnog otvora ili ostrva sa vremenom. Analitički izraz za ravni $\{411\}$, Slika 4.27, je:

$$r_{411} = \frac{\Delta a}{2\Delta t} \sin \gamma_{411}, \Delta t = t_2 - t_1, \Delta a = |a_2 - a_1| \quad (4.10)$$

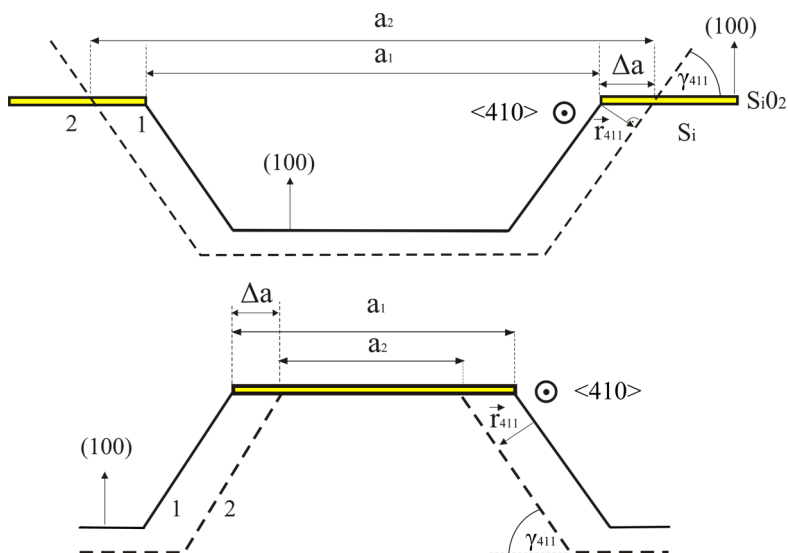
gde su t_1 i t_2 vremena nagrizanja u trenucima 1 i 2, a_1 i a_2 stranice kvadratnog otvora ili ostrva u $\langle 410 \rangle$ pravcu u trenucima 1 i 2 (merena su oba parametra) a γ_{411} ugao koji ravan $\{411\}$ zaklapa sa ravni (100) . Slično, analitički izraz za ravan $\{511\}$, Slika 4.27, je:

$$r_{511} = \frac{\Delta a}{2\Delta t} \sin \gamma_{511}, \Delta t = t_2 - t_1, \Delta a = |a_2 - a_1| \quad (4.11)$$

gde su t_1 i t_2 vremena nagrizanja u trenucima 1 i 2, a_1 i a_2 stranice kvadratnog otvora ili ostrva u $\langle 510 \rangle$ pravcu u trenucima 1 i 2, a γ_{511} ugao koji ravan $\{511\}$ zaklapa sa ravni

(100). Takođe, merenjem dužine stranice kvadratnog otvora ili ostrva sa vremenom duž pravaca $\langle 210 \rangle$ i $\langle 310 \rangle$ na isti način su dobijene vrednosti brzina nagrizanja veoma bliske vrednostima dobijenim iz (4.5) i (4.8).

Svi navedeni parametri nagrizanja i podgrizanja, uglovi i r_{100} brzina ravni (100) su dati u Tabeli 4.1. Podgrizanje ravni $\{111\}$ i ugaono odstupanje $\Delta\theta$ od ugla γ_{111} , Slika 3.2, su zanemareni u analitičkim izrazima (4.5)-(4.7) zbog malog uticaja na merenje parametara u opsegu realizovanih dubina nagrizanja da bi se dobile brzine nagrizanja. Sve brzine nagrizanja kristalografskih ravni su određene za najmanje tri različite ukupne dubine nagrizanja H . Dobijena brzina nagrizanja za ravan $\{311\}$ ima blisku vrednost brzini koja je dobijena u [8]. Odnos (l/H) podgrizanja ravni $\{211\}$ je veća (5.85) od odnosa podgrizanja konveksnog ugla u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 wt % TMAH na temperaturi 60°C (~ 5.25 za veće dubine nagrizanja), koji je dat u [41]. Brzine nagrizanja ravni $\{411\}$ i $\{511\}$ su bliske brzinama prijavljenim u [72]. Brzine nagrizanja ravni $\{411\}$ i $\{511\}$ iz [72] su dobijene posredno iz podataka datih na graficima.



Slika 4.27 – Promena stranice kvadratnog otvora, odnosno ostrva u $\langle 410 \rangle$ pravcu sa vremenom. Promena ovog parametra daje brzinu nagrizanja ravni $\{411\}$. Identični šematski prikaz se može primeniti i za ravni $\{511\}$, $\{211\}$ i $\{311\}$.

Tabela 4.1 – Kristalografske ravni, odgovarajući mereni parametri nagrizanja/podgrizanja, srednje vrednosti brzina nagrizanja r_{hkl} , srednje vrednosti ugla α_{hkl} između preseka ravni $\{hkl\}$ sa ravni (100) i $\langle 110 \rangle$ pravca, srednje vrednosti ugla γ_{hkl} preseka ravni $\{hkl\}$ i ravni (100) i odnos između brzina nagrizanja ravni $\{hkl\}$ i brzine nagrizanja ravni (100) [53].

Ravan $\{hkl\}$	Parametar nagrizanja (podgrizanja) / srednja merena vrednost [$\mu\text{m}/\text{min}$]	Brzina nagrizanja r_{hkl} [$\mu\text{m}/\text{min}$]	Mereni ugao α_{hkl} [$^\circ$]	Teorijski ugao α_{hkl} [$^\circ$] / pravac	Mereni ugao γ_{hkl} [$^\circ$]	Teorijski ugao γ_{hkl} [$^\circ$]	Odnos r_{hkl}/r_{100}
{100}	$\frac{\Delta H}{\Delta t} / 0.46$	0.46	-	-	0	0	1
{211}	$\frac{\Delta l}{\Delta t} \sin \alpha_{211} / 0.97$	0.87, 0.86 ⁺	20.9	18.4 / $\langle 210 \rangle$	38.3 ^{**} , 64.5 ^{***}	35.3, 65.9	1.89, 1.87 ⁺
{331}	$\frac{\Delta l}{\Delta t} \sin \alpha_{331} / 1.91$	1.38	26.1	26.6 / $\langle 310 \rangle$	46.4	46.5, 76.7	3
{311}	$\frac{\Delta a}{2\Delta t} / 1.21$	0.95, 0.93 ⁺	26.9 [*]	26.6 / $\langle 310 \rangle$	24.9 ^{**} , 71.9 [*]	25.2, 72.5	2.07, 2.02 ⁺
{301}	$\frac{\Delta B}{2\Delta t} / 2.21$	1.15	43.6	45.0 / $\langle 100 \rangle$	18.7, 71.9	18.4, 71.6	2.5
{411}	$\frac{\Delta a}{2\Delta t} / 0.85$	0.82	-	31 / $\langle 410 \rangle$	-, 75.9	19.5, 76.4	1.78
{511}	$\frac{\Delta a}{2\Delta t} / 0.74$	0.72	-	33.7 / $\langle 510 \rangle$	-, 77	15.8, 78.9	1.57
{111}	$\frac{\Delta a}{2\Delta t} / 0.03$	0.02	-	-	54.2	54.7	0.04

* na slobodnom kraju pravougaone kompenzacione strukture u $\langle 100 \rangle$ pravcu

** na strani bosa u $\langle 110 \rangle$ pravcu

*** na gornjem delu konveksnog ugla nagrizanog bosa

⁺ brzina nagrizanja dobijena merenjem promene dužine stranica kvadratnog ostrva i kvadratnog otvora sa vremenom

4.3.4 Mehanizam nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C

Na osnovu brzina nagrizanja i pojavljivanja i nestajanja dominantnih kristalografskih ravni tokom nagrizanja silicijumske pločice orijentacije (100) datih u prethodnim odeljcima izveli smo sledeće zaključke koji objašnjavaju mehanizam nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % TMAH na temperaturi od 80°C:

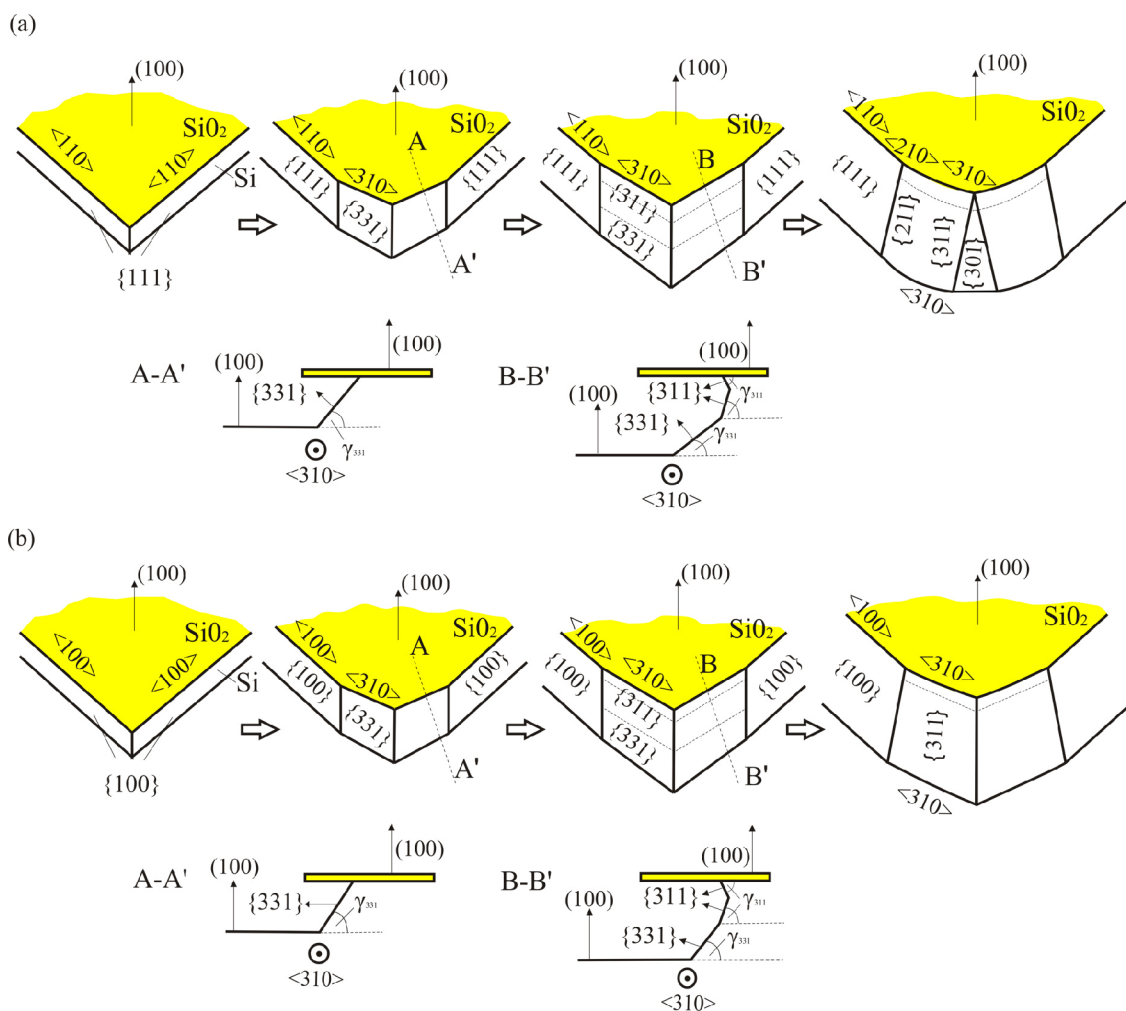
- 1) duž odgovarajućeg pravca ispod maskirajućeg sloja pojavljuju se najsporije ravni čiji je presek sa ravni (100) duž tog pravca,
- 2) najsporije ravni koje se pojavljuju duž odgovarajućeg pravca ispod maskirajućeg sloja na samom početku nagrizanja se pojavljuju u paru i zaklapaju konkavni prostorni ugao,
- 3) ako presek dva pravca, koje definišu susedne stranice lika od maskirajućeg sloja, predstavlja konkavni ugao, na tom preseku se javlja najsporija ravan {111}, čiji je presek sa ravni (100) duž pravca $\langle 110 \rangle$,
- 4) ako presek ravni u prostoru predstavlja konkavni ugao, duž pravca preseka u prostoru se na samom početku nagrizanja moraju razviti najsporije ravni, čiji je presek taj pravac i čiji je konkavni ugao preseka manji,
- 5) ako presek dva pravca, koje definišu susedne stranice lika od maskirajućeg sloja, predstavlja konveksni ugao, na tom preseku se na samom početku javljaju najbrže ravni {331}, čiji su preseci sa ravni (100) orijentisani duž pravaca $\langle 310 \rangle$,
- 6) ako presek ravni predstavlja konveksni ugao, duž pravca preseka u prostoru se razvijaju brže ravni čiji je presek taj pravac i čiji je konveksni ugao preseka veći, a čija je osobina da im je projekcija brzine na simetralu početnog konveksnog ugla, ili neki odgovarajući pravac, najveća od svih ravni koje sadrže taj pravac preseka.

Druga tačka je naša pretpostavka koju potvrđuju eksperimenti opisani u [44] i [46]. U oba ova rada autori su snimali poprečne preseke normalne na odgovarajuće pravce kod kojih su se nestajanjem brzih ravni duž tih pravaca pojavljivale spore ravni u paru, na

vrhu i na dnu strukture. Nažalost ograničenja SEM uređaja i IHTM-CMT mikroskopa su nam onemogućili da primetimo ovaj efekat. Pojava ovog efekta na pravcu $\langle 310 \rangle$ je dokazana pojavom odgovarajućih ravni pri *maskless* nagrizanju slobodnog kraja kompenzacije na konveksnom uglu, o čemu će biti reči kasnije u tekstu. Treća i peta tačka se objašnjavaju pomoću efekta koji nastaje usled fotolitografskog postupka. Standardnim fotolitografskim postupcima je nemoguće dobiti pravi ugao i može se smatrati da je on svom vrhu zaobljen (tačnije deo kruga) na nanometarskom nivou. Zbog njegove zaobljenosti smatramo da se na samom početku nagrizanja razvijaju najbrže ravni kod konveksnog ugla, odnosno najsporije ravni kod konkavnog ugla. Takođe, konveksne uglove koje zaklapaju kristalografske ravni u prostoru smatramo zaobljenim na atomskom nivou. Pravci preseka ravni, koje se pojavljuju na zaobljenim konveksnim i zaobljenim konkavnim uglovima, sa odgovarajućim ravnima (npr. kristalografska ravan (100)) predstavljaju tangente na delove kruga. Dalje u tekstu ćemo dati objašnjenje za svaki trodimenzionalni oblik koji smo eksperimentalno dobili u prethodnim odeljcima, pozivajući se na odgovarajuće tačke koje definišu mehanizam nagrizanja.

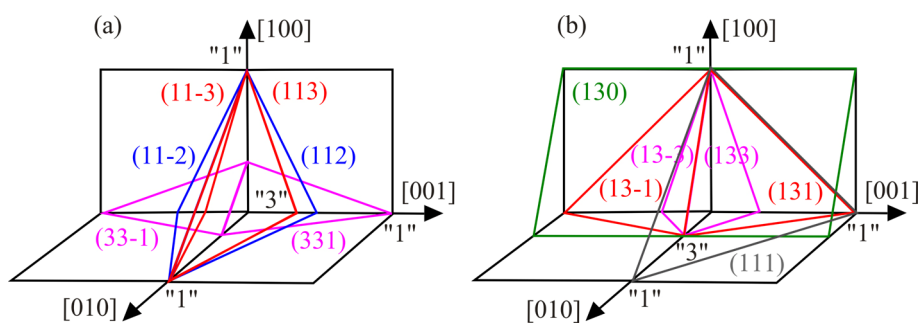
U slučaju kada nije primenjena kompenzaciona struktura na konveksni ugao čiji su kraci u maskirajućem sloju u $\langle 110 \rangle$ pravcu, na samom početku maskiranog nagrizanja duž pravca $\langle 110 \rangle$ pojavljuju se ravni $\{111\}$ koje se najsporije nagrizaju, Slika 4.28a). Prema tački 2) moguće je da se pojavljuju dve ravni $\{111\}$, od kojih je jedna dominantna – ona koja nije pod maskirajućim slojem i koja se vidi. Skoro istovremeno na zaobljenom konveksnom uglu koji zaklapaju dva pravca $\langle 110 \rangle$, pojavljuju se ravni sa najvećom brzinom nagrizanja. Ravni sa najvećom brzinom nagrizanja (Tabela 4.1) su hrapave ravni $\{331\}$ [53]. Presek ravni $\{331\}$ i ravni (100) orijentisan je duž pravca $\langle 310 \rangle$ u maskirajućem sloju, Slika 4.28a). Prema tački 1) duž pravca $\langle 310 \rangle$ se zatim pojavljuju ravni sa najmanjom brzinom nagrizanja duž tog pravca, [32-34, 53, 68]. Ravni $\{311\}$ imaju najmanju brzinu nagrizanja duž pravca $\langle 310 \rangle$, Tabela 4.1. Duž pravca $\langle 310 \rangle$ se u stvari, prema tački 2), pojavljuje par ravni iz familije $\{311\}$ koje zaklapaju konkavni ugao (npr. (131) i (-131)) [44]. Na preseku ravni $\{311\}$ i ravni $\{111\}$ koji se prostire duž pravca $\langle 110 \rangle$ pojaviće se ravni iz familije $\{211\}$ kao na stranama bosa za vreme *maskless* nagrizanja, Slika 4.8a), 4.11, 4.29b). Naši zaključci [53] potvrđuju zaključak iz [37] da nije samo jedna kristalografska ravan

odgovorna za podgrizanje konveksnog ugla koji zaklapaju ravni $\{111\}$ pod maskirajućim slojem, već front od dve različite kristalografske ravni iz familija $\{311\}$ i $\{211\}$. Vremenom će se usled nagrizanja dve ravni iz familije $\{211\}$ sastati sa dva susedna konveksna ugla i definisati konveksan ugao koji se dalje održava jer je u preseku dve najbrže ravni duž tog novonastalog pravca, Slika 4.12. Na samom početku nagrizanja ugao koji zaklapaju ravan (100) i ravni brzog nagrizanja iz familije $\{331\}$ na donjem delu podgrizanog konveksnog ugla je konkavan ugao. Posle određenog vremenskog perioda ravni $\{311\}$ - $\{211\}$ sporije u odnosu na brzinu nagrizanja ravni $\{331\}$, Tabela 4.1, će postati dominantne i ravni $\{331\}$ će nestati [44]. Ovaj efekat smo



Slika 4.28 – Šematski prikaz podgrizanja konveksnih uglova duž najčešće korišćenih pravaca u izradi senzorskih i aktuatorskih struktura. a) Konveksni ugao čije su stranice u maskirajućem sloju duž $\langle 110 \rangle$ pravca na samom početku nagrizanja. b) Konveksni ugao čije su stranice u maskirajućem sloju duž $\langle 100 \rangle$ pravca na samom početku nagrizanja.

uočili na slobodnom kraju kompenzacione strukture u obliku pravougaonika u $\langle 100 \rangle$ pravcu, Slika 4.10, 4.11a),d). Od tačke P do tačke Q na samom početku maskiranog nagrizanja, Slika 4.5b), posle dovoljno dugog vremenskog perioda pojaviće se površina definisana ravnima $\{311\}$ - $\{211\}$ i $\{211\}$ - $\{311\}$ - $\{301\}$ [53]. Pojava ravni $\{301\}$ će biti objašnjena kasnije u tekstu. Kako je ravan $\{311\}$ koja nastaje na mestu tačke P dominantna, Slika 4.5b), 4.9, 4.10, ona će vremenom preovladati i jedna strana slobodnog kraja kompenzacione strukture će biti definisana samo sa par ravni iz familije $\{311\}$, koje zaklapaju konkavan ugao, po tački 2). Presek dve dominantne ravni $\{311\}$, koje predstavljaju strane slobodnog kraja, orijentisan je duž pravca $\langle 110 \rangle$ (pravac "1"- "1"), Slika 4.29a). Na ovom pravcu se održavaju ove dve dominantne ravni $\{311\}$. Iako



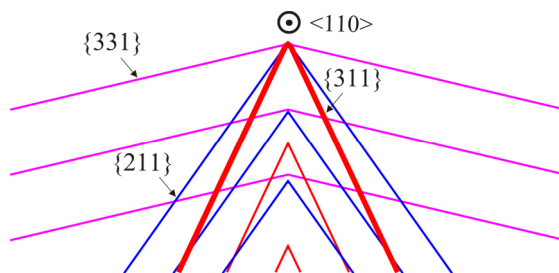
Slika 4.29 – Šematski prikaz dominantnih ravni koje se mogu pojaviti na preseku dve ravni iz familije $\{311\}$ duž pravaca: a) $\langle 110 \rangle$. b) $\langle 310 \rangle$.

ravni $\{331\}$ i $\{211\}$ zaklapaju veći konveksan ugao duž pravca $\langle 110 \rangle$, projekcije brzina nagrizanja ovih brzih ravni na pravac $\langle 110 \rangle$ koji je normalan na pravac preseka ravni $\{311\}$ i pripada simetrali početnog konveksnog ugla (koja je u stvari ravan (001)), Slika 4.29a), manje su od projekcije brzine nagrizanja ravni $\{311\}$, Slika 4.30 (tačka 6)). Projekcija brzina je data izrazom:

$$r_{mnn\ proj} = \frac{r_{mnn}}{\sin \gamma_{mnn}}, \quad (4.12)$$

gde je r_{mnn} brzina ravni $\{mnn\}$, a γ_{mnn} ugao koji ravan $\{mnn\}$ zaklapa sa ravni (001) koja je simetrala početnog konveksnog ugla. Projekcije brzina nagrizanja za ravni $\{211\}$, $\{331\}$, $\{311\}$, $\{411\}$ i $\{511\}$, dobijene primenom odgovarajućih parametara iz Tabele 4.1 u (4.12), redom su 1.4, 1.9, 2.26, 2.46 i 2.64 $\mu\text{m}/\text{min}$. Projekcije brzina

nagrizanja ravni $\{411\}$ i $\{511\}$ veće su od projekcije brzine nagrizanja ravni $\{311\}$, ali kako zaklapaju manje konveksne uglove, tj. ne predstavljaju tangente na početni zaobljeni konveksan ugao, ne utiču na održavanje ravni $\{311\}$.



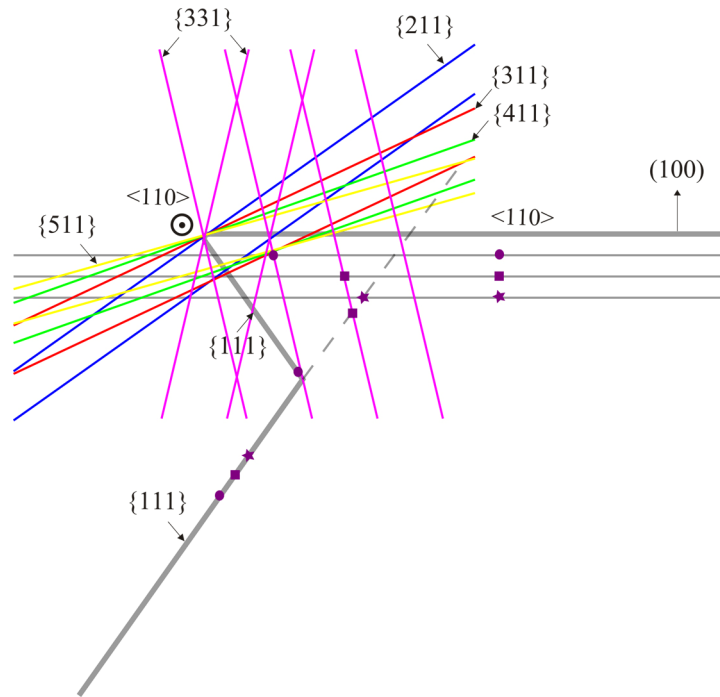
Slika 4.30 – Šematski prikaz dominantnih ravni koje se mogu pojaviti na preseku dve ravni iz familije $\{311\}$ u prostoru duž pravca $\langle 110 \rangle$. Početni presek ravni i zaobljeni konveksni ugao su označeni debelom crvenom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Ravni iz familija $\{411\}$ i $\{511\}$ zaklapaju manje konveksne uglove, tj. ne predstavljaju tangente na zaobljeni deo početnog konveksnog ugla i nisu prikazane na slici.

Na bosu, na preseku ravni (100) i ravni $\{111\}$ koji je duž pravca $\langle 110 \rangle$ pojavice se ravni iz familije $\{311\}$ i $\{211\}$ za vreme *maskless* nagrizanja, Slika 4.8a), 4.11. Na konveksnom uglu na preseku ravni (100) i “male” ravni $\{111\}$, koji je duž pravca $\langle 110 \rangle$, prema tački 6, moguće je da se pojavi samo par ravni $\{331\}$ koje zaklapaju ugao od 46.5° sa ravni (100) , Slika 4.31. Projekcija brzina ravni na pravac $\langle 110 \rangle$ koji je normalan na presek ravni (100) i ravni $\{111\}$, gde je zanemareno nagrizanje ravni $\{111\}$ ali ne i ravni (100) , data je izrazom:

$$r_{mnn\ proj} = \frac{r_{100}}{\sin \gamma_{mnn}} \left(\frac{r_{mnn}}{r_{100}} - \cos \gamma_{mnn} \right), \quad (4.13)$$

gde je r_{mnn} brzina ravni $\{mnn\}$, r_{100} brzina nagrizanja ravni (100) a γ_{mnn} ugao koji ravan $\{mnn\}$ zaklapa sa ravni (100) na vrhu bosa. Projekcije brzina nagrizanja ravni $\{211\}$, $\{331\}$, $\{311\}$, $\{411\}$ i $\{511\}$, dobijene primenom odgovarajućih parametara iz Tabele 4.1 u (4.13), redom su 0.82, 1.47, 1.27, 1.16 i 1.02 $\mu\text{m}/\text{min}$. Posle nestajanja “male” ravni, preostaje konveksni ugao na preseku ravni (100) i dominantne ravni $\{111\}$ orijentisanom duž pravca $\langle 110 \rangle$. Pravci $\langle 310 \rangle$ najbržih ravni $\{331\}$ ne predstavljaju više tangente na zaobljeni deo konveksnog ugla. Prema tački 6) i

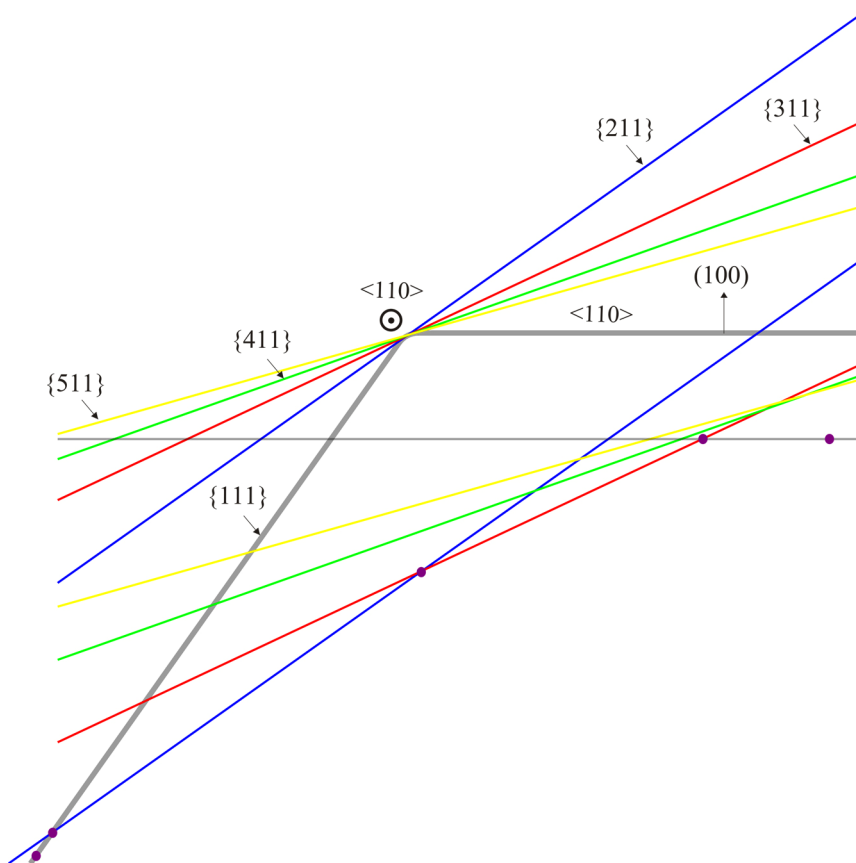
projekcijama brzina izračunatim uz pomoć (4.13), ovaj konveksni ugao može biti podgrizan samo iz pravaca ravni $\{311\}$ i $\{211\}$, Slika 4.32, čime je objašnjeno pojavljivanje ovih ravni na stranama bosa, Slika 4.8a), 4.11.



Slika 4.31 – Šematski prikaz dominantnih ravni koje se mogu pojaviti na preseku ravni (100) i “male” ravni $\{111\}$ u prostoru duž pravca $\langle 110 \rangle$ za vreme maskless nagrizanja. Početni presek ravni i zaobljeni konveksni ugao su označeni debelom sivom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Jedna ravan familije $\{331\}$ je dominantna ravan koja podgriza konveksni ugao duž pravca $\langle 110 \rangle$. Ljubičasti kružići, kvadratići i zvezdice (koji predstavljaju presek dominantnih ravni) označavaju nove oblike konveksnog ugla sukcesivno u vremenu.

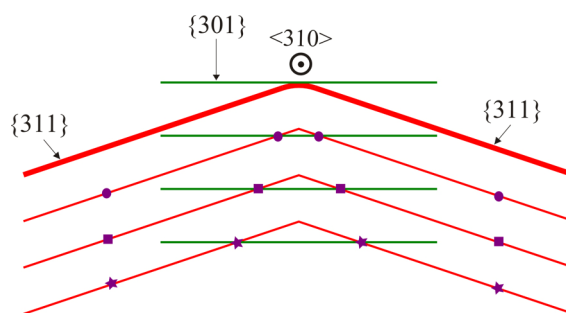
U slučaju kada nije primenjena kompenzaciona struktura za konveksni ugao čiji su kraci u maskirajućem sloju u pravcu $\langle 100 \rangle$, na samom početku maskiranog nagrizanja duž pravca $\langle 100 \rangle$ pojavljuju se ravni $\{100\}$ koje se najsporije nagrizaju, Slika 4.28b). Zatim, skoro istovremeno, na zaobljenom konveksnom uglu (zbog fotolitografskog postupka) koga zaklapaju dva $\langle 100 \rangle$ pravca, pojavljuju se ravni sa najvećom brzinom nagrizanja duž dva pravca $\langle 310 \rangle$. Ravni sa najvećom brzinom duž pravca $\langle 310 \rangle$ su hrapave ravni $\{331\}$, Tabela 4.1. Duž dva pravca $\langle 310 \rangle$ se odmah pojavljuju ravni $\{311\}$ koje imaju najmanju brzinu nagrizanja duž tih pravaca, slično

kao kod konveksnog ugla čiji su kraci u maskirajućem sloju u pravcu $\langle 110 \rangle$. Dve ravni iz familije $\{311\}$ definišu konveksni ugao koji se održava jer je u preseku dve najbrže ravni duž novonastalog pravca. Vremenom se ravni iz familije $\{311\}$ sa dva susedna konveksna ugla sastaju, Slika 4.13, nagrizajući ravan $\{100\}$, i njihov presek je duž pravca $\langle 310 \rangle$, (pravac “3”-“1”), Slika 4.29b). Duž ovog pravca se pojavljuje brza ravan $\{301\}$, Slika 4.33, jer najbrže ravni $\{331\}$ zaklapaju manji konveksan ugao, tj. ne predstavljaju tangente na zaobljeni deo konveksnog ugla. Na dnu nagrizane strukture se održavaju dve ravni $\{311\}$ sa dva susedna konveksna ugla, tačka 4), jer od početka nagrizanja zaklapaju manji konkavan ugao sa ravni (100) , Slika 4.12, 4.15. Ravan $\{301\}$ se razvija na identičan način na preseku dve ravni iz familije $\{311\}$ kod podgrizanja konveksnog ugla čiji su kraci u pravcu $\langle 110 \rangle$, Slika 4.28a).



Slika 4.32 – Šematski prikaz dominantnih ravni koje se mogu pojaviti na preseku ravni (100) i dominantne ravni $\{111\}$ duž pravca $\langle 110 \rangle$ za vreme maskless nagrizanja. Početni presek ravni i zaobljeni konveksni ugao su označeni debelom sivom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Ravni iz familija $\{311\}$ i $\{211\}$ podgrizavaju konveksni ugao. Ljubičasti kružići označavaju promenu oblika konveksnog ugla.

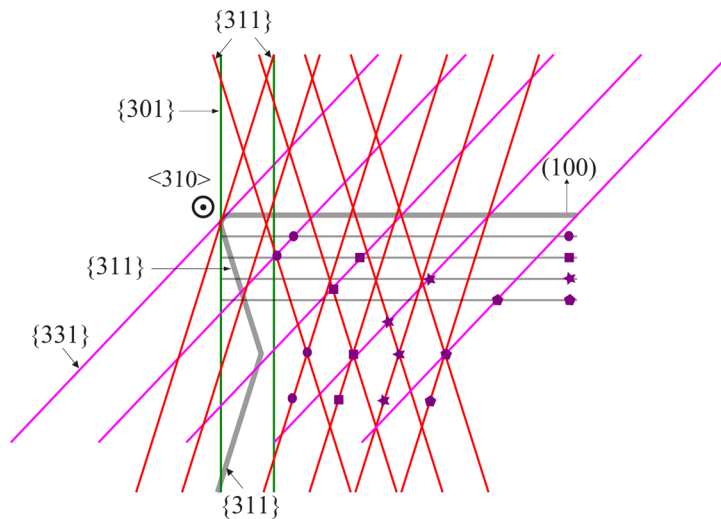
Na preseku ravni (100) i ravni {111} koji je orijentisan duž pravca $\langle 110 \rangle$, pojavljuju se ravni iz familije {311} za vreme *maskless* nagrizanja bosa, Slika 4.8a), 4.11, 4.32. Ove ravni postaju strane nove zarubljenje piramide koja predstavlja bos. Međutim, duž njihovog preseka orijentisanog u pravcu $\langle 310 \rangle$, pojavljuju se brze ravni {301}, isto kao kad se sastanu ravni iz familije {311} sa dva susedna konveksna ugla na kraju nagrizanja ravni {100}, Slika 4.13, 4.29b), 4.33. Ravni {301} se pojavljuju u trenutku kad nestane ravan {100} na vrhu pravougaone strukture za kompenzaciju konveksnog ugla u pravcu $\langle 100 \rangle$, Slika 4.8a), 4.11. U trenutku kad nestane kompenzaciona struktura, na dnu konveksnog ugla bosa pojavljuju se ravni {331} duž pravca $\langle 110 \rangle$ koji predstavlja presek dve ravni iz familije {111} i koje nisu više zaštićene, Slika 4.8. Kako se ravni {331} ne pojavljuju na početku nagrizanja i nisu ispod maskirajućeg sloja, niti postoji sporija ravan koja zaklapa manji konkavan ugao, tačka 4), sporije ravni duž pravca preseka sa ravni (100) na dnu nagrizane strukture (pravac $\langle 310 \rangle$) se ne pojavljuju, Slika 4.8b).



Slika 4.33 – Šematski prikaz dominantnih ravni koje se mogu pojaviti na preseku dve ravni iz familije {311} duž pravca $\langle 310 \rangle$. Početni presek ravni i zaobljeni konveksni ugao su označeni debelom crvenom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Ravni iz familija {331} zaklapaju manje konveksne uglove, tj. ne predstavljaju tangente na početni zaobljeni konveksni ugao i nisu prikazane na slici. Ljubičasti kružići, kvadratići i zvezdice označavaju nove oblike konveksnog ugla sukcesivno u vremenu.

Maskless nagrizanjem pravougaone kompenzacione strukture konveksnog ugla u pravcu $\langle 100 \rangle$, na konveksnom uglu koje zaklapaju dve ravni iz familije {100} duž pravca $\langle 100 \rangle$ pojavljuju se dve ravni iz familije {301}, Slika 4.26. Ravni iz familije {301} se najbrže nagrizaju duž pravca $\langle 100 \rangle$, brže od ravni {110} čija se brzina može naći u literaturi [34, 40, 45-46]. *Maskless* nagrizanjem slobodnog kraja kompenzacione

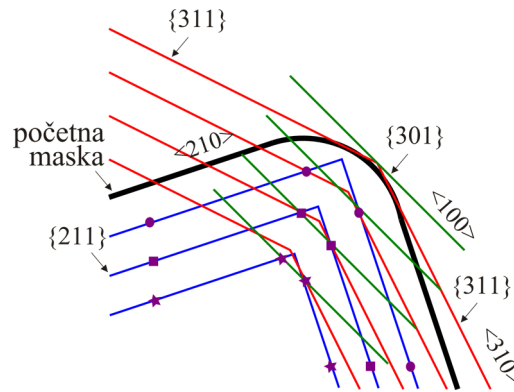
strukture konveksnog ugla, na konveksnom uglu koje zaklapaju ravan iz familije $\{311\}$ i ravan (100) duž pravca $\langle 310 \rangle$, pojavljuju se ravni iz familije $\{311\}$ i $\{331\}$, Slika 4.34. Vremenom ravan $\{311\}$ nestaje, a ravan $\{331\}$ postaje dominantna. Kako su sve brzine nagrizanja dobijene eksperimentalno i predstavljaju srednje vrednosti, malo smanjenje vrednosti brzine $\{301\}$ ravni dovodi do toga da se na Slici 4.34 duž pravca $\langle 310 \rangle$ pojavljuje ravan $\{301\}$ umesto $\{311\}$. Kako ova ravan vrlo brzo nestaje tokom *maskless* nagrizanja, Slika 4.11, nije moguće nijednom mernom metodom odrediti kojoj od ove dve familije ona pripada.



Slika 4.34 – Šematski prikaz dominantnih ravni koje se mogu pojaviti na preseku ravni (100) i “male” ravni $\{311\}$ duž pravca $\langle 310 \rangle$ za vreme *maskless* nagrizanja. Početni presek ravni i zaobljeni konveksni ugao su označeni debelom sivom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Ravni iz familije $\{331\}$ i $\{311\}$ podgrizavaju konveksni ugao na početku nagrizanja. Vremenom “mala” ravan $\{311\}$ nestaje, a ravan $\{331\}$ postaje dominantna i nagriža dominantnu ravan $\{311\}$. Ljubičasti kružići, kvadratići, zvezdice i kućice (koji predstavljaju presek dominantnih ravni) označavaju nove oblike konveksnog ugla sukcesivno u vremenu.

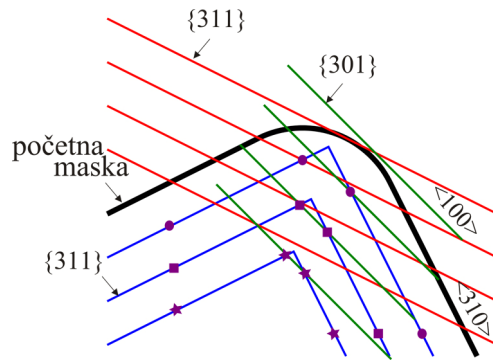
Da bi se objasnile kristalografske ravni dobijene nagrizanjem kvadratnih ostrva od silicijum dioksida dovoljno je posmatrati konveksne uglove koje zaklapaju pravci duž kojih su orijentisane stranice kvadrata. U slučaju konveksnog ugla čiji su kraci u maskirajućem sloju duž $\langle 210 \rangle$ pravca, Slika 4.35, na zaobljenom “pravom” uglu se pojavljuju najbrže ravni $\{331\}$ duž pravaca $\langle 310 \rangle$, koje se po tački 1) zamenjuju ravnima iz familije $\{311\}$. Na preseku ove dve ravni iz familije $\{311\}$ se pojavljuje brza ravan $\{301\}$, identično kao u slučaju kada je stranica kvadrata orijentisana duž pravca $\langle 100 \rangle$, odnosno kada se ravni $\{311\}$ sa dva susedna konveksna ugla sastanu

nagrizanjem ravni $\{100\}$, Slika 4.13, 4.29b), 4.33. Takođe, duž pravca $\langle 210 \rangle$ pojavljuju se najsporije ravni koje pripadaju familiji $\{211\}$. Kako ravni $\{311\}$ i $\{211\}$ imaju bliske vrednosti brzina, Tabela 4.1, vremenom se nagrizanjem gubi jedna ravan $\{311\}$, Slika 4.35. Na kraju ovog prelaznog dela nagrizanja konveksni ugao je sa jedne strane određen ravnima iz familije $\{211\}$ a sa druge strane redosledom ravni $\{301\}$ - $\{311\}$ - $\{211\}$, Slika 4.14.



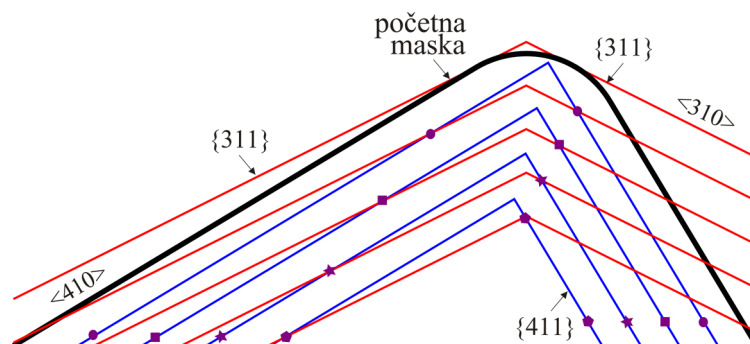
Slika 4.35 – Šematski prikaz konveksnog ugla čiji su kraci u maskirajućem sloju duž pravca $\langle 210 \rangle$. Početni oblik maske je označen debelom crnom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Ravni iz familije $\{311\}$ i $\{301\}$ podgrizaju konveksni ugao na početku nagrizanja. Na kraju prelaznog dela nagrizanja konveksni ugao je sa jedne strane određen ravnima iz familije $\{211\}$, a sa druge strane redosledom ravni $\{301\}$ - $\{311\}$ - $\{211\}$. Ljubičasti kružići, kvadratići i zvezdice (koji predstavljaju presek dominantnih ravni) označavaju nove oblike konveksnog ugla sukcesivno u vremenu.

U slučaju konveksnog ugla čiji su kraci u maskirajućem sloju duž $\langle 310 \rangle$ pravca, Slika 4.36, na zaobljenom “pravom” uglu se pojavljuje jedna najbrža ravan $\{331\}$ duž pravca $\langle 310 \rangle$, koji je tangenta na deo kruga. Skoro istovremeno, ravan $\{311\}$ zamenjuje ravan $\{331\}$. Isto se dešava i sa stranicama kvadrata orijentisanim duž pravca $\langle 310 \rangle$. Sa jedne strane imamo presek dve ravni iz familije $\{311\}$ koje se razvijaju na početku nagrizanja kao u slučaju kada su kraci konveksnog ugla duž $\langle 100 \rangle$ pravca, Slika 4.28b), a sa druge strane presek dve ravni iz familije $\{311\}$, (iz istog pomenutog slučaja) kao kada se sastanu dve ravni sa susednih uglova i na njihovom preseku se pojavi brza ravan iz familije $\{301\}$, Slika 4.13. Na kraju prelaznog dela nagrizanja konveksni ugao je sa jedne strane određen ravnima iz familije $\{311\}$, a sa druge strane redosledom ravni $\{301\}$ - $\{311\}$, Slika 4.15.



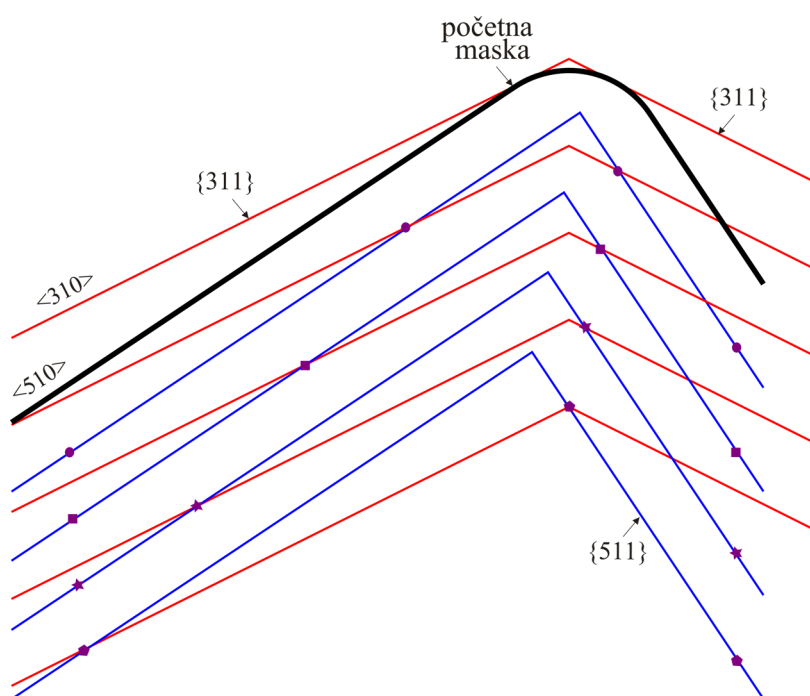
Slika 4.36 – Šematski prikaz konveksnog ugla čiji su kraci u maskirajućem sloju orijentisani duž pravca $\langle 310 \rangle$. Početni oblik maske je označen debelom crnom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Ravni iz familije $\{311\}$ i $\{301\}$ podgrizaju konveksni ugao na početku nagrizanja. Na kraju prelaznog dela nagrizanja konveksni ugao je sa jedne strane određen ravnima iz familije $\{311\}$, a sa druge strane redosledom ravni $\{301\}$ - $\{311\}$. Ljubičasti kružići, kvadratići i zvezdice (koji predstavljaju presek dominantnih ravni) označavaju nove oblike konveksnog ugla sukcesivno u vremenu.

Kao što je uočeno u Odeljku 4.3.2, podgrizanje konveksnih uglova kvadratnih ostrva čije su stranice duž $\langle 410 \rangle$ i $\langle 510 \rangle$ pravaca se ne može smatrati klasičnim podgrizanjem. U slučaju konveksnog ugla čiji su kraci u maskirajućem sloju duž $\langle 410 \rangle$ pravca, Slika 4.37, na zaobljenom “pravom” uglu se pojavljuju najbrže ravni $\{331\}$ duž dva pravca $\langle 310 \rangle$, koje se gotovo istovremeno zamenjuju ravnima iz familije $\{311\}$.



Slika 4.37 – Šematski prikaz konveksnog ugla čiji su kraci u maskirajućem sloju duž pravca $\langle 410 \rangle$. Početni oblik maske je označen debelom crnom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Ravni iz familije $\{311\}$ podgrizaju konveksni ugao na početku nagrizanja. Na kraju prelaznog dela nagrizanja konveksni ugao je sa jedne strane određen ravnima iz familije $\{411\}$, a sa druge strane redosledom ravni $\{311\}$ - $\{411\}$. Ljubičasti kružići, kvadratići, zvezdice i kućice (koji predstavljaju presek dominantnih ravni) označavaju nove oblike konveksnog ugla sukcesivno u vremenu.

Nagrizanjem se vremenom gubi ravan $\{311\}$ čiji pravac preseka sa ravni (100) zaklapa manji konveksan ugao sa pravcem definisanim presekom ravni $\{411\}$ sa ravni (100) , Slika 4.37. Na kraju prelaznog dela nagrizanja konveksni ugao je sa jedne strane određen redosledom ravni $\{311\}$ - $\{411\}$, a sa druge strane ravnima iz familije $\{411\}$, Slika 4.16. Isti zaključak se može izvesti i za podgrizanje konveksnih uglova kvadratnih ostrva čiji su kraci duž pravaca $\langle 510 \rangle$, Slika 4.38, samo što je na kraju prelaznog nagrizanja konveksni ugao sa jedne strane određen redosledom ravni $\{311\}$ - $\{511\}$, a sa druge strane ravnima iz familije $\{511\}$, Slika 4.17.



Slika 4.38 – Šematski prikaz konveksnog ugla čiji su kraci u maskirajućem sloju duž pravca $\langle 510 \rangle$. Početni oblik maske je označen debelom crnom linijom. Pomeraji frontova prikazanih ravni su realno nacrtani u skladu sa podacima iz Tabele 4.1. Ravni iz familije $\{311\}$ podgrizaju konveksni ugao na početku nagrizanja. Na kraju prelaznog dela nagrizanja konveksni ugao je sa jedne strane određen ravnima iz familije $\{511\}$, a sa druge strane redosledom ravni $\{311\}$ - $\{511\}$. Ljubičasti kružići, kvadratići, zvezdice i kućice (koji predstavljaju presek dominantnih ravni) označavaju nove oblike konveksnog ugla sukcesivno u vremenu.

Na konkavnom uglu kvadratnog otvora u silicijum dioksidu na samom početku nagrizanja se pojavljuje samo jedna ravan najsporijeg nagrizanja iz familije $\{111\}$. Jedan presek ove ravni sa ravnima koje se najsporije nagrizaju u slučaju kvadratnih otvora čije su stranice u pravcima $\langle 210 \rangle$, $\langle 310 \rangle$, $\langle 410 \rangle$ ili $\langle 510 \rangle$ (ravni su redom

{211}, {311}, {411} ili {511}) je duž pravca $\langle 110 \rangle$. Sa te prve strane ravni iz familije {111} nalazi se ravan koja se najsporije nagriza duž projektovanog pravca ispod maskirajućeg sloja i koja zaklapa najmanji konkavni ugao. Sa druge strane ravni iz familije {111} je ravan iz iste familije kao sa prve strane, ali koja zaklapa veći konkavni ugao sa ravni {111} ispod maskirajućeg sloja. Kako sa te strane ravni {111}, postoji ravan iz familije {100} manje brzine nagrivanja koja zaklapa manji konkavni ugao, ona će postati dominantna i nagrizaće se na račun ravni koja se najsporije nagriza duž projektovanog pravca ispod maskirajućeg sloja, Slika 4.20, 4.21.

4.3.5 Podgrizanje konveksnih uglova

Veliki problem u vlažnom anizotropnom hemijskom nagrivanju (100) silicijuma je podgrizanje konveksnih uglova [40-41, 43-44, 53, 55-64]. Najčešći slučaj u izradi senzorskih i aktuatorskih struktura je da se nagriza struktura čija je početna maska nagrivanja ostrvo silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika, čije su stranice orijentisane u pravcu $\langle 110 \rangle$ (od koje se očekuje oblik pravilne zarubljene piramide određene {111} i (100) ravnima u silicijumu, Slika 4.6). Konačni izgled strukture je određen kristalografskim ravnima koje se najbrže nagrizzaju, Slika 4.4a). Isti zaključak važi i za strukture čija je početna maska, takođe, ostrvo silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika, ali čije su stranice orijentisane u pravcu $\langle 100 \rangle$, Slika 4.4b). Za ovu strukturu se očekuje da ima oblik kvadra određenog ravnima iz familije {100}. Front nagrivanja ravni koje se najbrže nagrizzaju pojavljuje se na konveksnim uglovima na samom početku nagrivanja i napreduje vrlo brzo. Kao posledica ovoga, dolazi do zaobljavanja konveksnih uglova i konačna struktura će biti delimično ili potpuno podgrizena, u zavisnosti od vremena nagrivanja, Slika 4.4. 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° .

U [40, 43-44, 53] postoji slaganje oko identifikacije kristalografskih ravni koje se najbrže nagrizzaju u vodenom rastvoru TMAH, a koje su odgovorne za podgrizanje konveksnih struktura. Autori radova [40, 43-44] smatraju da su ravni {311} odgovorne za podgrizanje konveksnih uglova ispod ostrva silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika, čije su stranice orijentisane u pravcu $\langle 110 \rangle$, i svoj zaključak

potvrđuju uglom koji presek ove ravni sa ravni (100) zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$. Zaključak ove disertacije o tome koje su ravni odgovorne za podgrizanje konveksnih uglova delimično se slaže sa zaključcima iz [40, 43-44]. Pretpostavka ovog rada je da se front podgrizanja ne sastoji samo od jedne ravni $\{311\}$ već od kombinacije tri ravni $\{311\}$ - $\{211\}$ - $\{301\}$ (Odeljak 4.3.4). Neslaganje oko načina identifikacije kristalografskih ravni koje se pojavljuju je posledica toga što autori radova [40, 43-44] nisu razmatrali mehanizam nagrizanja.

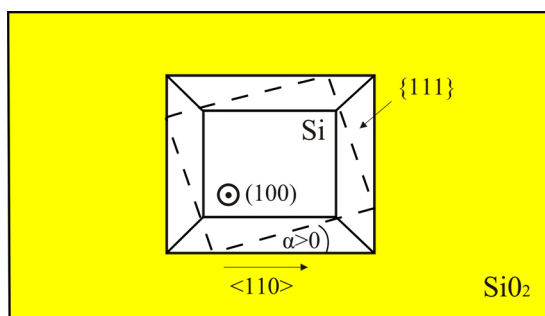
Što se tiče strukture čija je početna maska ostrvo silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika čije su stranice orijentisane u pravcu $\langle 100 \rangle$, u dostupnoj literaturi nije data kristalografska ravan odgovorna za podgrizanje konveksnog ugla. Zaključak ove disertacije je da su to ravni iz familije $\{311\}$ i taj zaključak je izveden u Odeljku 4.3.4 gde je objašnjen mehanizam nagrizanja kvadratnih ostrva sa stranicama u pravcu $\langle 100 \rangle$. Presek ovih ravni iz familije $\{311\}$ i ravni $\{100\}$, koja se razvija duž pravca $\langle 100 \rangle$, orijentisan je duž pravca $\langle 110 \rangle$, a sa ravni (100) pločice duž pravca $\langle 310 \rangle$.

4.3.6 Podgrizanje konkavnih uglova

Kada se silicijumske strukture nagrizaju kroz otvore u silicijum dioksidu koji imaju samo konkavne uglove, izgled konačne strukture je precizno definisan kristalografskim ravnima u silicijumu koje se najsporije nagrizaju, Slika 4.18-4.21. Posle dovoljno dugog vremena nagrizanja, najsporije ravni $\{111\}$ postaju strane jame. Jedan od najkarakterističnijih slučajeva nagrizanja strukture koja sadrži samo konkavne uglove je formiranje senzorske dijafragme pravougaonog ili kvadratnog oblika, pri čemu su stranice pravougaonog ili kvadratnog otvora u maskirajućem sloju orijentisane u pravcu $\langle 110 \rangle$. Konačna struktura će biti definisana sa četiri ravni $\{111\}$ (pravilne inverzne zarubljene piramide čije su osnove pravougaonici ili kvadrati), Slika 4.18.

Drugi karakterističan slučaj je kada se kroz otvor u maskirajućem sloju pravougaonog ili kvadratnog oblika, čije su stranice orijentisane u pravcu $\langle 100 \rangle$, formira senzorska ili aktuatoraska struktura koja ima strane normalne na ravan (100). Na konkavnim uglovima će se pojaviti neželjene ravni $\{111\}$ koje se najsporije nagrizaju [73], Slika 4.19. Na kraju nagrizanja dijafragma će imati osmougaoni oblik a na

stranama otvora će biti određena ravnima $\{111\}$ i $\{100\}$, Slika 4.19. Ravnii iz familije $\{111\}$ se nagrizaju na račun ravnii $\{100\}$ koje su na stranama silicijumske strukture i smanjuju njihove površine. Neke primene zahtevaju trodimenzionalne oblike sa stranama normalnim na površinu supstrata i potrebno je smanjiti izobličenja koja prouzrokuju ravnii $\{111\}$. Smanjivanje površine ravnii $\{111\}$ se može uraditi primenom konkavne kompenzacije. Pojava ravnii iz familije $\{111\}$ se ne može u potpunosti eliminisati.



Slika 4.39 – Šematski prikaz pravougaonog otvora na maski koji nije dobro poravnat sa primarnim zaravnjenjem $\langle 110 \rangle$ na (100) pločici (označen crticama). Otvor jame se povećava jer se nagrizanje vrši do četiri najbliže $\{111\}$ ravni.

Da bi se ostvarile projektovane dimenzije struktura potrebno je poravnati otvore na maskama sa određenim kristalografskim pravcima zavisno od toga koje ravnii želimo za strane jame. U suprotnom, nagrizanjem će se dobiti neželjene strukture. Kao posledica podgrizanja konkavnih uglova, ako maska nije dobro poravnata sa primarnim zaravnjenjem $\langle 110 \rangle$, otvor jame u silicijumskoj pločici (100) se povećava jer se vremenom nagrizanje vrši do četiri najbliže $\{111\}$ ravni [6-8, 32], Slika 4.39.

4.4 Tehnike nagrizanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH

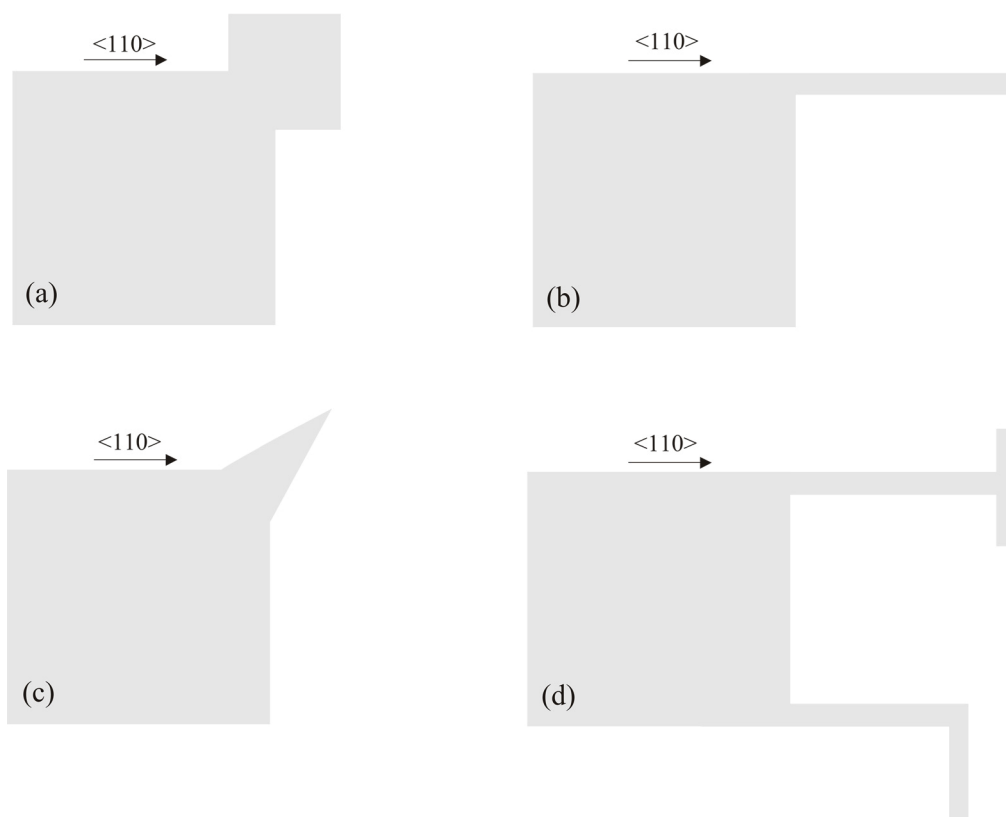
Da bi se realizovale željene trodimenzionalne silicijumske strukture i MEMS senzori neophodno je znati mogućnosti i parametre tehnološkog procesa nagrizanja. U prethodnim odeljcima smo odredili brzine nagrizanja kristalografskih ravnii, objasnili mehanizam nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH i predočili ograničenja tehnološkoga procesa – podgrizanje konveksnih i konkavnih uglova. U sledećim odeljcima biće date

tehnike nagrizanja kojim se mogu prevazići ograničenja tehnološkog procesa i koje moraju biti polazne osnove u projektovanju trodimenzionalnih silicijumskih struktura i MEMS senzora.

4.4.1 Tehnika kompenzacije konveksnog ugla

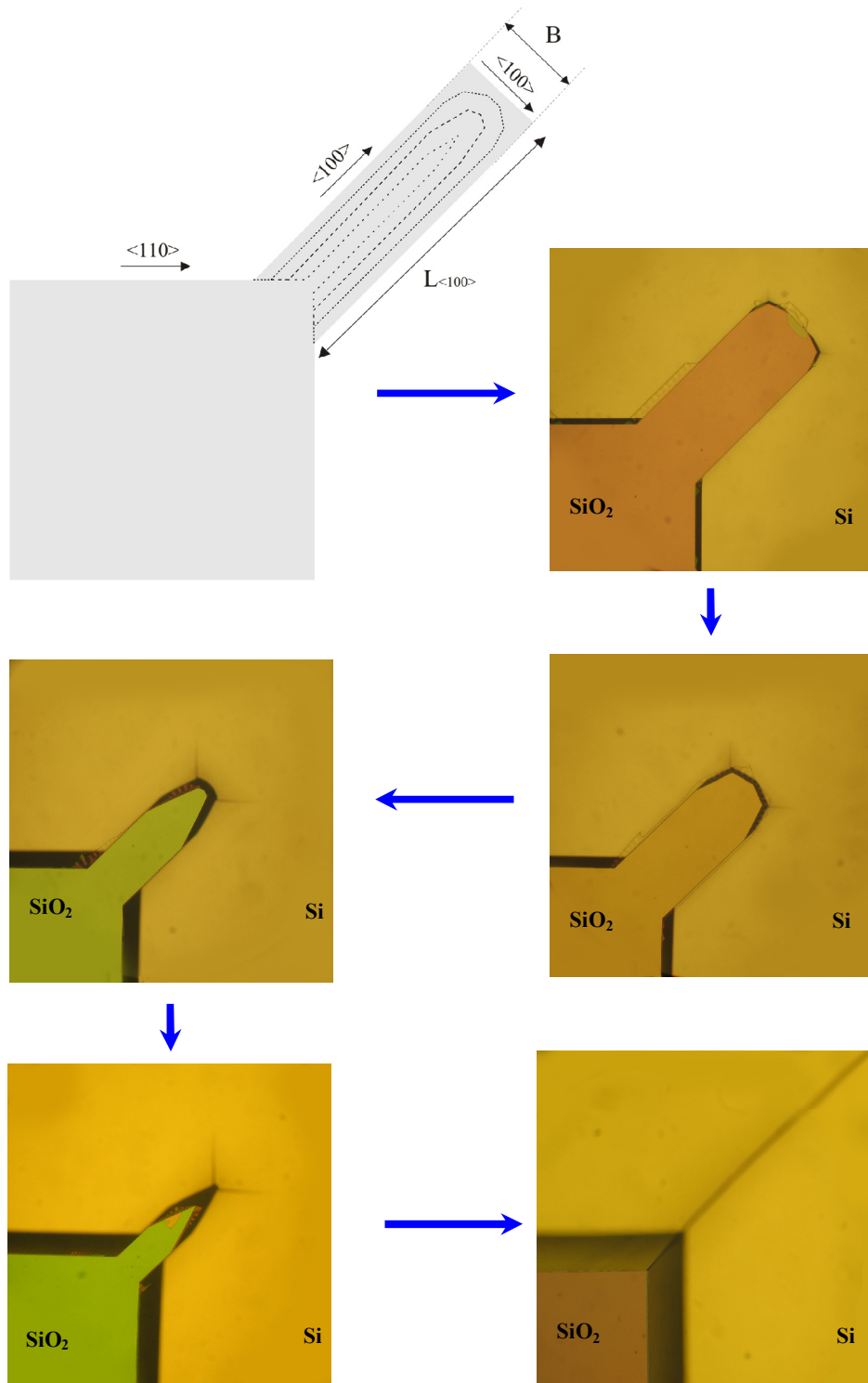
Problem podgrizanja konveksnih uglova može se rešiti delimično ili potpuno dodavanjem pogodno izabranih kompenzacionih struktura na konveksne uglove maske za nagrizanje. Ovde najpre razmatramo kompenzacione strukture kakve se primenjuju prilikom korišćenja vodenog rastvora KOH kao sredstva za anizotropno nagrizanje zbog toga što su one tehnološki mnogo poznatije i razrađene. Potom povlačimo paralele od koristi za dolaženje do optimalnih kompenzacionih struktura za vodeni rastvor TMAH.

Za slučaj kada je početna maska nagrizanja ostrvo silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 110 \rangle$, za vodeni rastvor KOH poznate su različite kompenzacione strukture [55-64]. Puers i Sansen (*Puers, Sansen*) [57] su dodavali kvadrat, Slika 4.40a), ili pravougaonik u pravcu $\langle 110 \rangle$, Slika 4.40b). Vu i Ko (*Wu, Ko*) trougao, Slika 4.40c), duž pravaca podgrizajućih kristalografskih ravni [55], dok je Bao et al. (*Bao*) [59] koristio strukture u obliku slova L ili T u pravcu $\langle 110 \rangle$, Slika 4.40d). Ove tehnike kompenzacije imaju velike nedostatke jer zahtevaju značajan prostor oko strukture koja se kompenzuje i nisu pogodne za velike dubine nagrizanja. Takođe, donji deo konveksnog ugla ostaje podgrizen na kraju nagrizanja. Najbolja vrsta kompenzacione strukture konveksnog ugla je dijagonalna kompenzacija [40, 56, 58, 64]. Dijagonalni tip kompenzacije predstavlja kompenzacionu strukturu u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$ i dodatog na konveksni ugao strukture, Slika 4.9-4.10, 4.41-4.42. Ovaj tip kompenzacije je najbolji jer, za razliku od drugih tipova, njegovom primenom ni gornji deo (ispod maskirajućeg sloja) niti donji deo (na dnu nagrizane strukture) konveksnog ugla nije podgrizan, Slika 4.6. Ostale kompenzacione strukture za vodeni rastvor KOH prikazane u literaturi [60-64] su manje ili više uspešne kombinacije navedenih osnovnih kompenzacionih struktura sa Slika 4.40, 4.43.



Slika 4.40 – Različite kompenzacione strukture [55, 57, 59]. a) Kvadrat čije su stranice u pravcu $\langle 110 \rangle$. b) Pravougaonik čije su stranice u pravcu $\langle 110 \rangle$. c) Trougao čiji su kraci u pravcu preseka podgrizajućih ravni sa (100) ravni. d) Kompenzacione strukture u obliku slova L ili T u pravcu $\langle 110 \rangle$.

Dijagonalna kompenzacija je razmatrana za vodeni rastvor TMAH koncentracije 25 tež. %, [40, 43, 64], a za ravni podgrizanja smatrane su ravni iz familije $\{311\}$. Ova kompenzaciona struktura se sa bočnih strana podgriza iz pravca vertikalnih $\{100\}$ ravni istom brzinom kojom se silicijum nagriza u dubinu (takođe ravan (100)). Zbog toga, širina B ove strukture mora da bude jednaka dvostrukoj dubini nagrizanja H , izraz (4.3). Postoje dve vrste ove kompenzacione strukture. Prva vrsta se završava trouglom sa kracima u pravcu $\langle 110 \rangle$, Slika 4.9-4.10. Druga predstavlja pravougaonik sa stranicama u pravcu $\langle 100 \rangle$, Slika 4.41-4.42. Na slobodnom kraju kompenzacione strukture, posle prelaznog nagrizanja, pojavljuje se front podgrizanja koji se sastoji od ravni iz familija $\{311\}$. Front ravni podgrizanja prikazan je isprekidanim linijama na Slikama 4.9, 4.41. Dužina ove strukture $L_{\langle 100 \rangle}$ mora da bude takva [40, 56, 58, 64], da se izbegne podgrizanje konveksnih uglova ravnima $\{311\}$, pre nego što dođe do kompletnog



Slika 4.41 – Mikrofotografije koje ilustruju vremenski razvoj nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH pravougaone kompenzacije čije su stranice u pravcu $\langle 100 \rangle$. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata sa stranicama duž pravca $\langle 110 \rangle$.

podgrizanja vertikalnim ravnima $\{100\}$. Na osnovu parametara sa Slike 4.43 (za obe vrste kompenzacije) i iz [40] se dobija izraz:

$$L_{\langle 100 \rangle} \frac{(\cos \alpha_{311} - \sin \alpha_{311})}{\sqrt{2}} + \sqrt{2} H \sin \alpha_{311} = \frac{r_{311}}{\sin \gamma_{311}} \frac{H}{r_{100}} \quad (4.14)$$

gde je $L_{\langle 100 \rangle}$ dužina pravougaone kompenzacione strukture, H ukupna dubina nagrizanja, r_{311} brzina nagrizanja ravni $\{311\}$, γ_{311} ugao koji ravan $\{311\}$ zaklapa sa ravni (100) , α_{311} ugao koji pravac $\langle 310 \rangle$ zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$ i r_{100} brzina nagrizanja ravni (100) . Zamenom odgovarajućih parametara iz Tabele 4.1 i iz (4.3) dobijamo izraz za odnos između dužine $L_{\langle 100 \rangle}$ i širine B kompenzacione strukture:

$$L_{\langle 100 \rangle} = 4.94H = 2.47B. \quad (4.15)$$

Ovaj odnos smo eksperimentalno potvrdili za tri različite ukupne dubine nagrizanja H . Projektovane su kompenzacione strukture različitih dužina u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$. Korak projektovanih dužina je bio 0.01B. Kompenzacioni pravougaonici imali su širinu B dva puta veću od ukupne dubine nagrizanja H . Eksperiment je pokazao da je najmanji odnos između dužine $L_{\langle 100 \rangle}$ i širine B jednak 2.45, što je veoma bliska vrednost izračunatom odnosu (4.15).

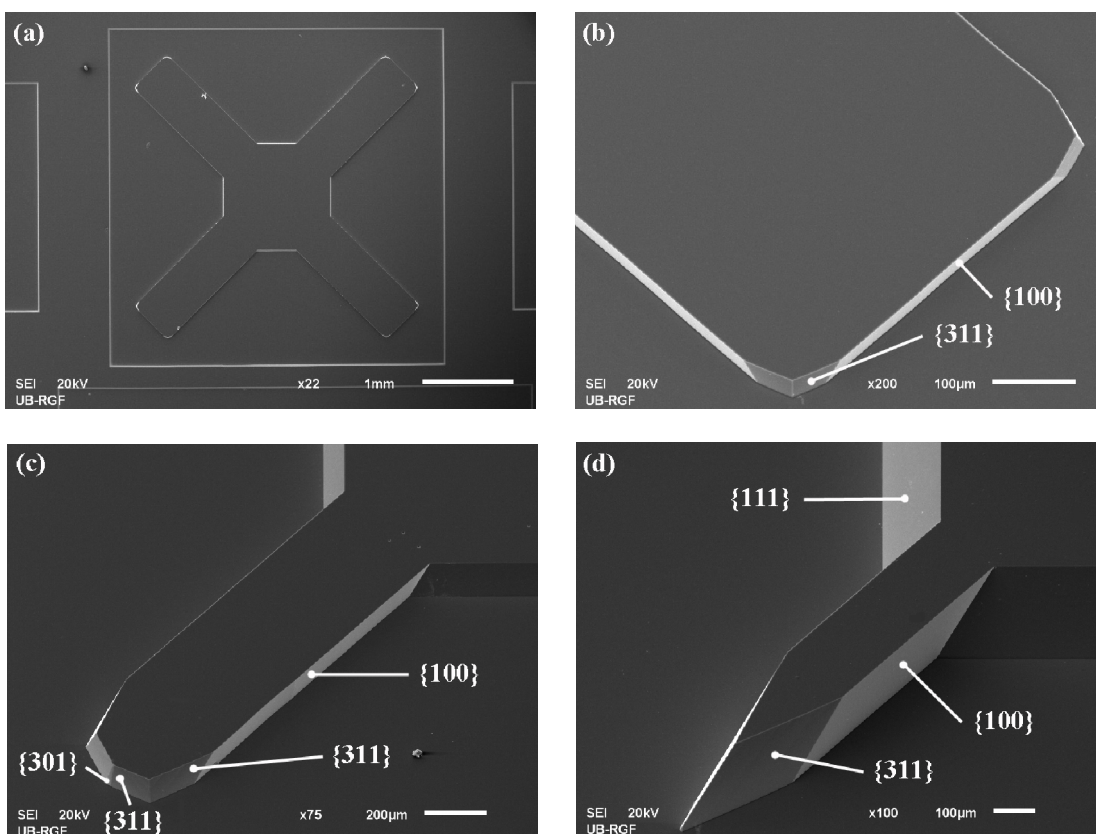
Uz pomoć pravougaone kompenzacione strukture koja zadovoljava izraz (4.15) na kraju nagrizanja dobijaju se konveksni uglovi potpuno definisani ravnima $\{111\}$ od dna do vrha strukture, Slika 4.6. Kao ilustracija navodi se i eksperimentalni rezultat za vodeni rastvor KOH koncentracije 30 tež % na 80 °C, koji se takođe koristi u IHTM-CMT za izradu MEMS senzora, za koga odnos između dužine i širine kompenzacione strukture mora da bude ≥ 1.6 . To znači da su za kompenzaciju konveksnih uglova u vodenom rastvoru TMAH potrebne duže kompenzacione strukture koje zauzimaju više prostora nego kompenzacione strukture za vodeni rastvor KOH.

Iako dijagonalna kompenzacije predstavlja najbolji tip kompenzacije i kod KOH i kod TMAH i kod njega postoje ograničenja u primeni. To se odnosi na dimenzije strukture u pravcu $\langle 110 \rangle$ koju treba zaštititi od podgrizanja. Dimenzije strukture definišu maksimalnu širinu B dijagonalne kompenzacije, što direktno utiče na

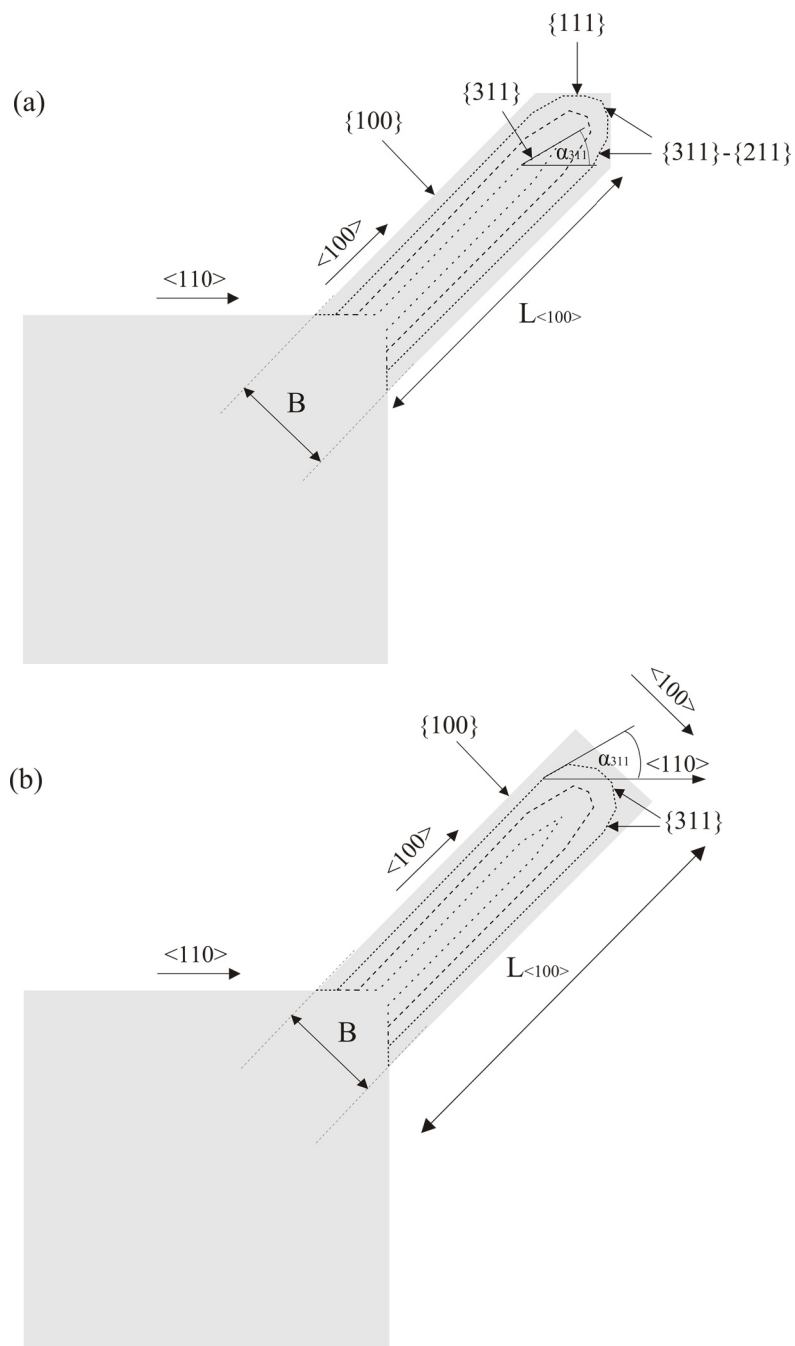
maksimalnu dubinu nagrizanja silicijuma. U slučaju kada ostrvo silicijum dioksida ima kvadratni ili pravougaoni oblik čija je stranica u pravcu $\langle 110 \rangle$, manja stranica a mora zadovoljavati sledeći uslov:

$$a \geq B\sqrt{2} = 2H\sqrt{2} \quad (4.16)$$

gde je B širina pravougaone kompenzacione strukture, a H ukupna dubina nagrizanja.



Slika 4.42 – SEM slike nagrizanja pravougaone kompenzacione strukture u pravcu $\langle 100 \rangle$ sa stranicama u pravcu $\langle 110 \rangle$ u vodenom rastvoru TMAH. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata sa stranicama duž pravca $\langle 110 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je $27 \mu\text{m}$. Primenjena kompenzaciona struktura je proračunata za ukupnu dubinu nagrizanja od $300 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike pod a). c) Dubina maskiranog nagrizanja je $100 \mu\text{m}$. d) Dubina maskiranog nagrizanja je $205 \mu\text{m}$. Na slobodnom kraju kompenzacione strukture je dominantna samo jedna ravan iz familije $\{311\}$.



Slika 4.43 – Šematski prikaz podgrizanja pravougaone kompenzacije u pravcu $\langle 100 \rangle$ koja se završava: a) trouglom sa kracima duž pravca $\langle 110 \rangle$, b) kvadratom u pravcu $\langle 100 \rangle$. Za oba slučaja prikazan je vremenski razvoj frontova ravni ispod maskirajućeg sloja iz čijih pravaca se podgrizaju konveksni uglovi kompenzacione strukture.

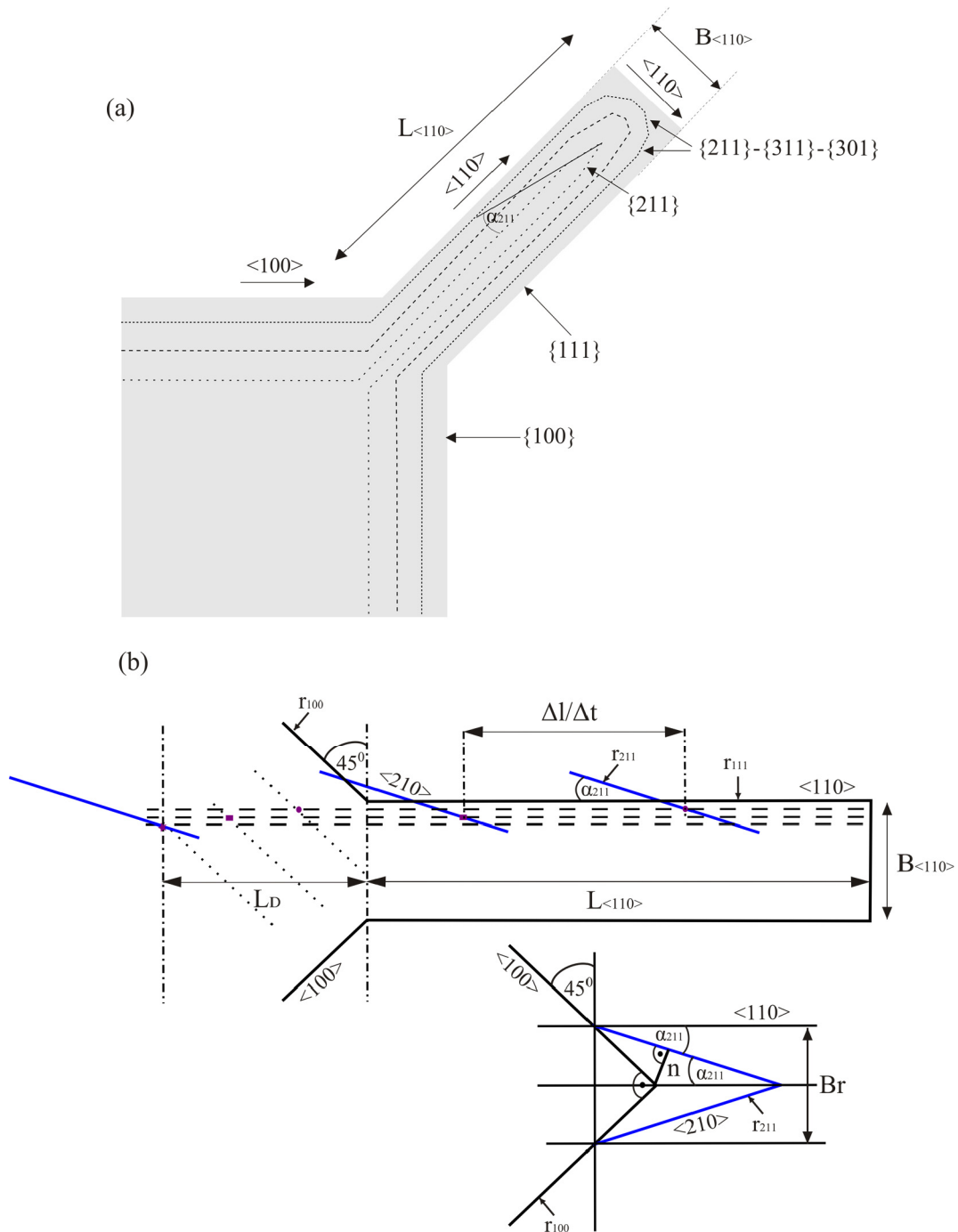
Izrazi (4.3), (4.15) i (4.16) u potpunosti definišu pravougaonu kompenzacionu strukturu konveksnog ugla u pravcu $\langle 100 \rangle$ u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % TMAH na temperaturi od 80°C . Ova kompenzaciona struktura se primenjuje samo u slučaju kada je početna maska nagrizanja ostrvo silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 110 \rangle$.

Ukoliko je potrebno nagrizati više od maksimalne dozvoljene dubine nagrizanja silicijuma neminovno će doći do podgrizanja konveksnih uglova. Sve navedene tehnike kompenzacije imaju nedostatak da posle nestanka kompenzacione strukture na dnu zaostaje nepoželjna struktura u obliku grebena [9], Slika 4.9. Greben koji ostaje posle dijagonalnog tipa kompenzacije predstavlja presek dve male oble površine. Njegova visina može biti i do $10\ \mu\text{m}$ i ona zavisi od dubine nagrizanja [8-9, 53, 61]. Visina grebena se smanjuje ukoliko se nastavi nagrizanje. Međutim, ukoliko se nastavi nagrizanje neminovno će doći do podgrizanja konveksnih uglova.

Za slučaj kada je početna maska nagrizanja ostrvo silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 100 \rangle$, u dostupnoj literaturi nije data nijedna vrste kompenzacione strukture. Naš zaključak je da i ovde najjednostavniju kompenzacionu strukturu predstavlja pravougaona struktura ali u pravcu $\langle 110 \rangle$, Slika 4.44-4.46. Ova kompenzaciona struktura se sa bočnih strana, pod maskirajućim slojem silicijum dioksida, podgriza ravnima najsporijeg nagrizanja $\{111\}$ istovremeno dok se silicijum nagrizava u dubinu brzinom nagrizanja ravni (100) . Zbog toga, širina pravougaone strukture $B_{\langle 110 \rangle}$ mora biti dva puta veća od dužine podgrizanja ravni $\{111\}$ u pravcu $\langle 110 \rangle$ za ukupno vreme nagrizanja T :

$$B_{\langle 110 \rangle} \geq 2 \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111}} T = 2 \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111}} \frac{H}{r_{100}} = 0.1H, \quad (4.17)$$

gde je $B_{\langle 110 \rangle}$ širina pravougaone kompenzacione strukture, H ukupna dubina nagrizanja, r_{111} brzina nagrizanja ravni $\{111\}$ i r_{100} brzina nagrizanja ravni (100) , pri čemu su sve vrednosti parametara date u Tabeli 4.1.



Slika 4.44 – Šematski prikaz podgrizanja pravougaone kompenzacione strukture u pravcu $\langle 110 \rangle$. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata sa stranicama duž pravca $\langle 100 \rangle$. a) Prikazan je razvoj frontova ravni koje podgrizavaju konveksne uglove kompenzacione strukture sa vremenom. b) Detaljniji prikaz frontova ravni koje se pojavljuju za vreme nagrizanja. Da bi se izračunao parametar $L_{\langle 110 \rangle}$ potrebno je posmatrati i nagrizanje ravni $\{100\}$ duž stranice kvadratnog lika na koga je primenjena kompenzacija.

U slučaju kada ostrvo silicijum dioksida ima pravougaoni oblik sa stranicama u pravcu $\langle 100 \rangle$, manja stranica a mora zadovoljavati odnos:

$$a \geq B_{\langle 110 \rangle} \sqrt{2} + 2H, \quad (4.18)$$

gde je $B_{\langle 110 \rangle}$ širina pravougaone kompenzacione strukture, a H ukupna dubina nagrizanja. Sa prednje strane kompenzacione strukture pojavljuje se front podgrizanja koji se sastoji od ravni iz familija $\{311\}$ - $\{301\}$ i $\{211\}$, Slika 4.12. Front ovih ravni prikazan je isprekidanim linijama na Slici 4.44. Vremenom ostaje samo dominantna ravan iz familije $\{211\}$, Slika 4.44-4.46, na slobodnom kraju kompenzacione strukture. Kad je u pitanju oblik kompenzacione strukture sa Slike 4.44, dužina strukture $L_{\langle 110 \rangle}$ se dobija iz sledećih odnosa, pri čemu nije zanemareno podgrizanje ravni $\{111\}$:

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \left(\frac{r_{211}}{\sin \gamma_{211} \sin \alpha_{211t}} - \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111} \operatorname{tg} \alpha_{211t}} \right), \quad (4.19)$$

$$L_D = \left(r_{100} \sqrt{2} - \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111}} \right) T, \quad (4.20)$$

$$L_D + L_{\langle 110 \rangle} = \frac{\Delta l}{\Delta t} T = \frac{\Delta l}{\Delta t} \frac{H}{r_{100}}, \quad (4.21)$$

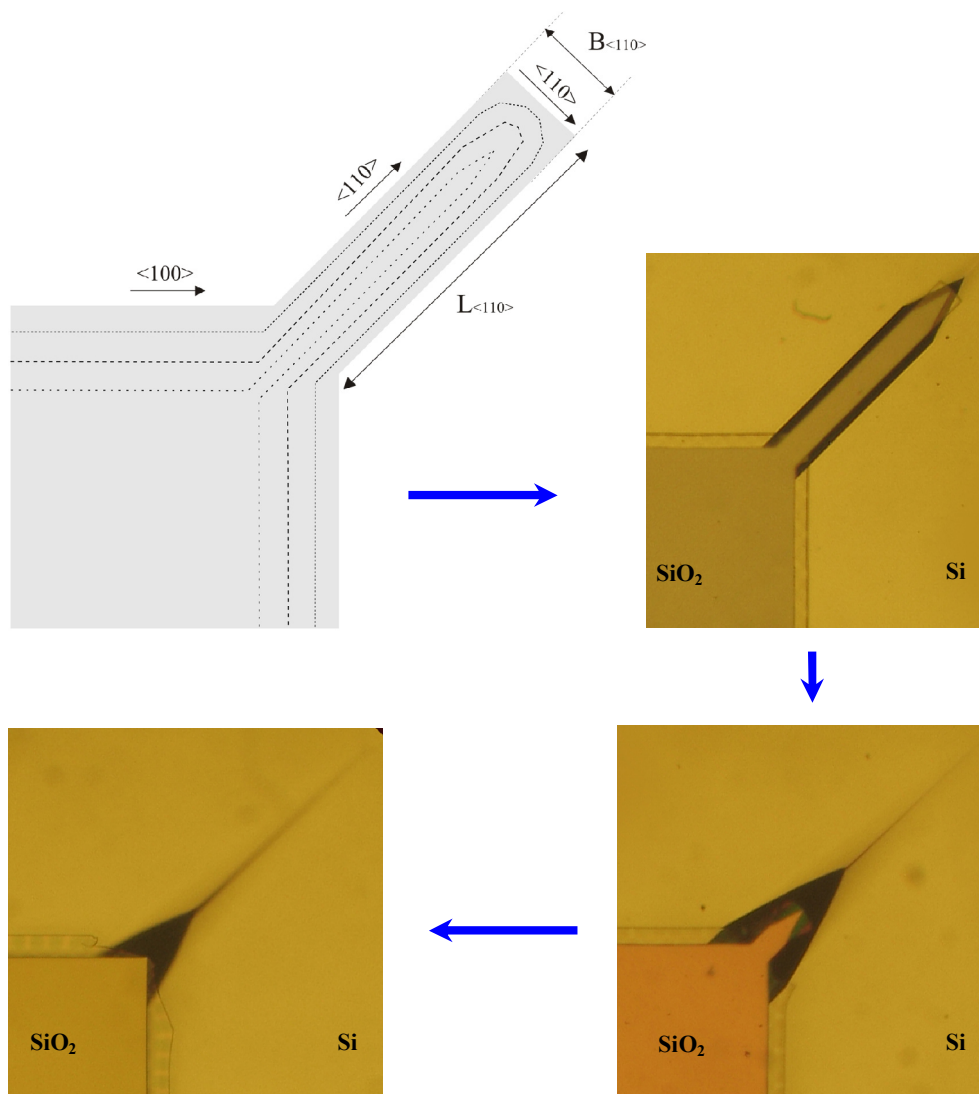
iz koga sledi:

$$L_{\langle 110 \rangle} = \left(\frac{r_{211}}{r_{100} \sin \gamma_{211} \sin \alpha_{211t}} - \frac{r_{111}}{r_{100} \sin \gamma_{111} \operatorname{tg} \alpha_{211t}} - \sqrt{2} + \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111} r_{100}} \right) H \quad (4.22)$$

$$L_{\langle 110 \rangle} = 5.05H \quad (4.23)$$

gde je H ukupna dubina nagrizanja, r_{111} brzina nagrizanja ravni $\{111\}$, γ_{111} ugao koji ravan $\{111\}$ zaklapa sa ravni (100) , r_{211} brzina nagrizanja ravni $\{211\}$, γ_{211} ugao koji

ravan $\{211\}$ zaklapa sa ravni (100) , α_{211t} teorijski ugao koji pravac $\langle 210 \rangle$ zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$, r_{100} brzina nagrizanja ravni (100) , pri čemu su sve vrednosti parametara date u Tabeli 4.1. Korišćen je teorijski ugao α_{211t} jer za ravan $\{211\}$ mereni ugao znatno odstupa od teorijske vrednosti, što nije slučaj sa drugim ravnima. Veća greška u merenju je posledica fronta podgrizanja koji se sastoji od ravni iz familija $\{311\}$ i $\{211\}$, Slika 4.12.



Slika 4.45 – Mikrofotografije koje ilustruju vremenski razvoj nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH koncentracije pravougaone kompenzacije u pravcu $\langle 110 \rangle$. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata sa stranicama duž pravca $\langle 100 \rangle$.

Odnos dužine strukture $L_{\langle 110 \rangle}$ i ukupne dubine nagrizanja H smo eksperimentalno potvrdili za tri različite ukupne dubine nagrizanja. U okviru eksperimenta projektovane su kompenzacione strukture različitih dužina u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 110 \rangle$. Korak projektovanih dužina je bio $0.1H$. Kompenzacioni pravougaonici imali su širinu $B_{\langle 110 \rangle}$ od $50 \mu\text{m}$ ili $100 \mu\text{m}$. Eksperiment je pokazao da najmanji odnos između dužine $L_{\langle 110 \rangle}$ i ukupne dubine nagrizanja H ima vrednost oko 5.20, što je veoma blisko vrednosti izračunatoj izrazom (4.23).

Međutim, od $L_{\langle 110 \rangle}$ iz izraza (4.22) se mora oduzeti još jedan član ΔL . Član ΔL efektivno predstavlja trougao ispod maskirajućeg sloja, čiji su kraci preseči ravni $\{211\}$ sa ravni (100), koji ostaje na konveksnom uglu kada se zadovolji uslov (4.23). Vrednost ΔL se izračunava na osnovu Slike 4.44b):

$$B_r = B_{\langle 110 \rangle} - 2 \frac{r_{111} H}{r_{100} \sin \gamma_{111}}, \quad (4.24)$$

$$n = \frac{B_r}{2} (\text{ctg} \alpha_{211} - 1) \sin \alpha_{211}, \quad (4.25)$$

$$t = \frac{n}{\frac{r_{211}}{\sin \gamma_{211}}} = \frac{B_{\langle 110 \rangle} - 2 \frac{r_{111} H}{r_{100} \sin \gamma_{111}}}{\frac{r_{211}}{\sin \gamma_{211}}} \left(\frac{\text{ctg} \alpha_{211} - 1}{2} \right) \sin \alpha_{211}, \quad (4.26)$$

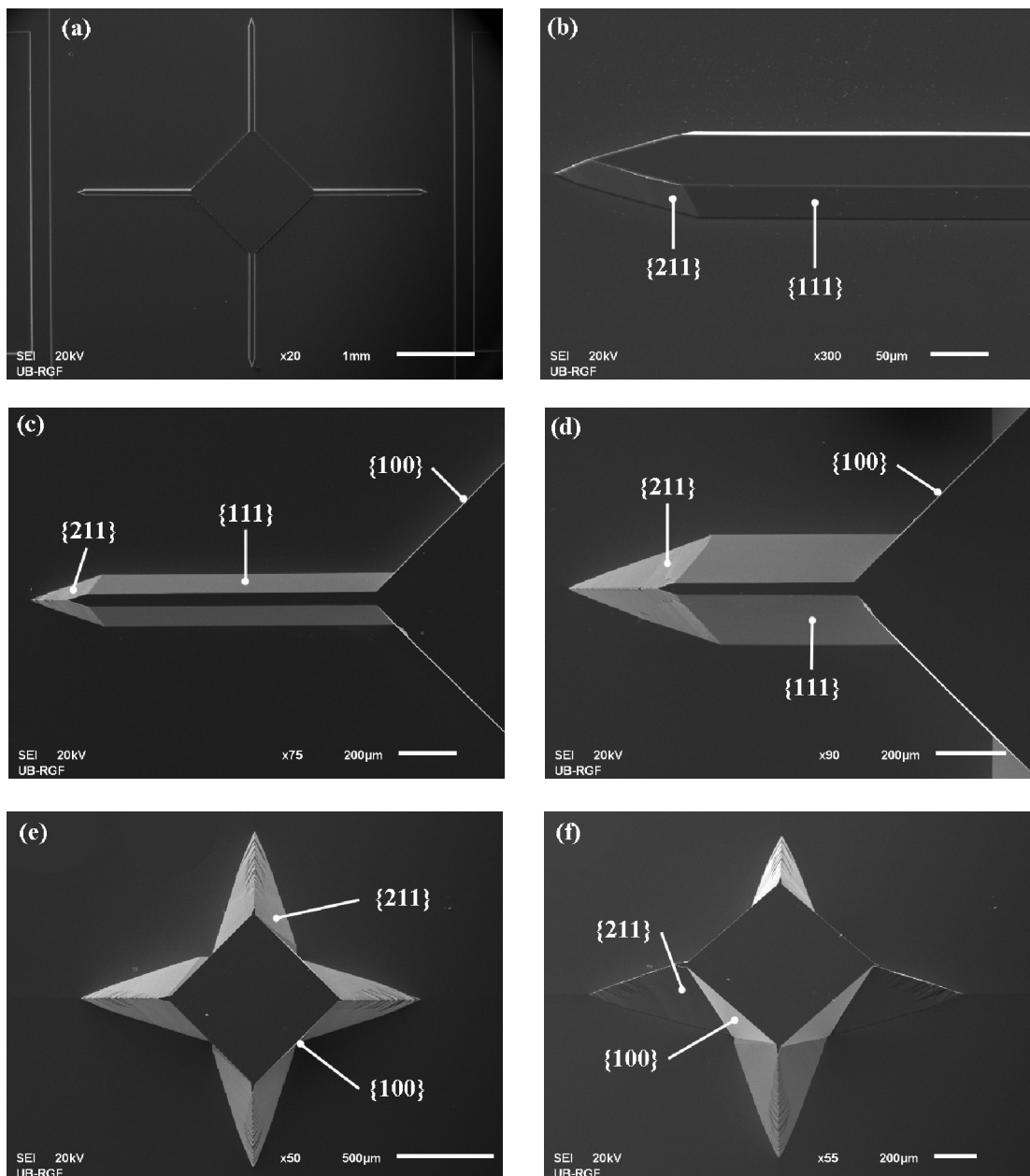
pa primenom izraza (4.19) dobijamo:

$$\Delta L = \frac{\Delta l}{\Delta t} t = \frac{1}{2} \left(B_{\langle 110 \rangle} - 2 \frac{r_{111} H}{r_{100} \sin \gamma_{111}} \right) (\text{ctg} \alpha_{211t} - 1) \left(1 - \frac{r_{111} \sin \gamma_{211} \cos \alpha_{211t}}{r_{211} \sin \gamma_{111}} \right) \quad (4.27)$$

tj.

$$\Delta L = 0.98(B_{\langle 110 \rangle} - 0.1H) \quad (4.28)$$

gde je $B_{\langle 110 \rangle}$ širina pravougaone kompenzacione strukture, H ukupna dubina nagrizanja, r_{211} brzina nagrizanja ravni $\{211\}$, γ_{211} ugao koji ravan $\{211\}$ zaklapa sa ravni (100), α_{211t} teorijski ugao koji pravac $\langle 210 \rangle$ zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$, r_{111} brzina



Slika 4.46 – SEM slike nagrizanja pravougaone kompenzacione strukture u pravcu $\langle 110 \rangle$ u vodenom rastvoru TMAH. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata sa stranicama duž pravca $\langle 100 \rangle$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je $27 \mu\text{m}$. Primenjena kompenzaciona struktura je proračunata za ukupnu dubinu nagrizanja od $300 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike pod a). Na slobodnom kraju kompenzacione strukture je dominantna ravan iz familije $\{211\}$. c) Dubina maskiranog nagrizanja je $100 \mu\text{m}$. d) Dubina maskiranog nagrizanja je $205 \mu\text{m}$. e) Dubina maskiranog nagrizanja je $300 \mu\text{m}$. Primećuje se zaostatak primenjene kompenzacione strukture koji je određen ravnima $\{211\}$ i koji nije zanemarljive veličine. Na preseku ravni iz familije $\{211\}$ se pojavljuju brze ravni koje nije moguće odrediti postojećim mernim metodama. f) Ista trodimenzionalna struktura sa slike a) ali blago nagnuta da bi se uočile ravni iz familije $\{100\}$.

nagrizanja ravni $\{111\}$, γ_{111} ugao koji ravan $\{111\}$ zaklapa sa ravni (100), r_{100} brzina nagrizanja ravni (100), pri čemu su sve vrednosti date u Tabeli 4.1. Dužina strukture $L_{\langle 110 \rangle}$, za koju u potpunosti nestaje kompenzacija konveksnog ugla, dobija se iz sledećeg izraza:

$$L_{\langle 110 \rangle} = 5.05H - 0.98(B_{\langle 110 \rangle} - 0.1H) = 5.15H - 0.98B_{\langle 110 \rangle} . \quad (4.29)$$

Izrazi (4.17), (4.18) i (4.29) definišu kompenzaciju konveksnog ugla u obliku pravougaonika u pravcu $\langle 110 \rangle$ u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % TMAH na temperaturi od 80°C . Ova kompenzaciona struktura se primenjuje samo u slučaju kada je početna maska nagrizanja ostrvo silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 100 \rangle$. Mana ove kompenzacione strukture je što se ne može primenjivati za velike dubine nagrizanja zbog velikog zaostajanja nenagrizanih delova kompenzacione strukture na dnu nagrizanog konveksnog ugla, Slika 4.46. Zaostajanje kompenzacione strukture je manje što je manja širina kompenzacione strukture $B_{\langle 110 \rangle}$, ali ona mora biti veća od vrednosti $0.1H$, ili će u suprotnom usled podgrizanja nestati ravni iz familije $\{111\}$ pre nego što se završi projektovano ukupno nagrizanje H .

4.4.2 Tehnika kompenzacije konkavnog ugla

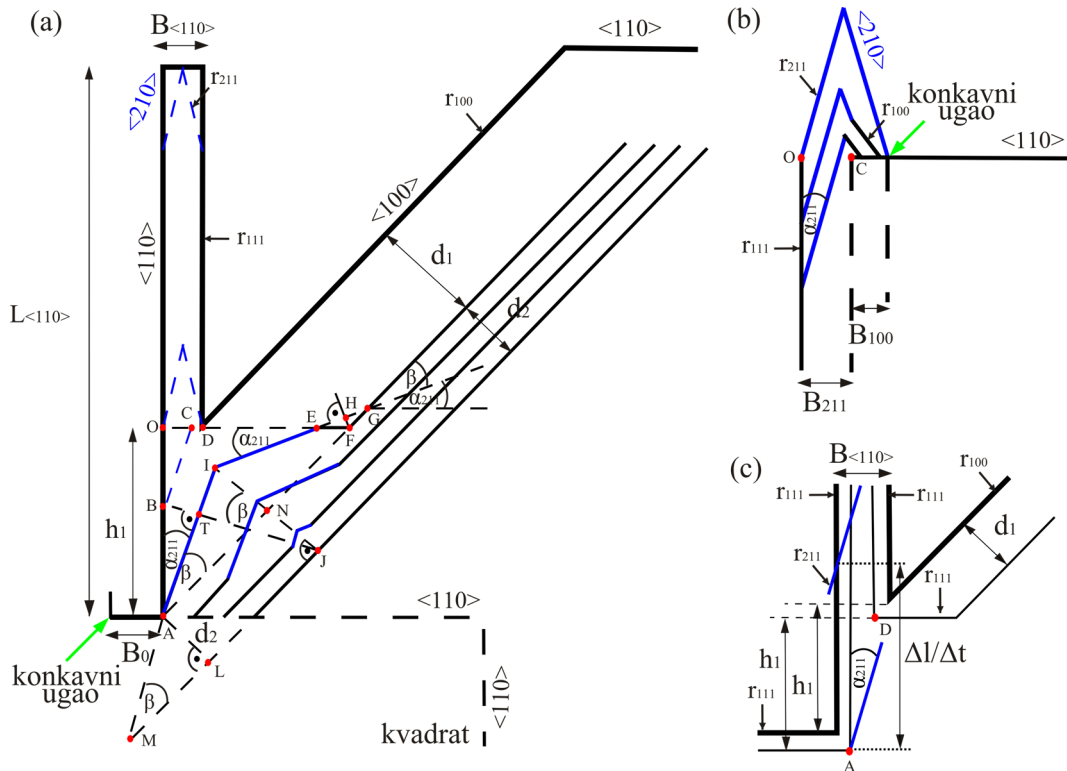
Za neke senzorske i aktuatorске strukture potrebno je napraviti trodimenzionalne silicijumske oblike sa stranama normalnim na površinu supstrata. U slučaju kada se kao supstrat koriste pločice orijentacije (100), normalne strane pripadaju ravnima iz familije $\{100\}$. Tokom podgrizanja konkavnih uglova u maskirajućem sloju potrebno je smanjiti površine ravni $\{111\}$, Slika 4.19, koje se šire na račun normalnih ravni $\{100\}$ i čija se pojava ne može u potpunosti eliminisati.

Površine ravni $\{111\}$, Slika 4.19, se mogu smanjiti kompenzacijom konkavnog ugla [73]. Ideja izložena u radu [73] je da se tokom nagrizanja odgovarajućom kompenzacionom strukturom odloži pojavljivanje ravni $\{111\}$ na konkavnom uglu u maskirajućem sloju. Ova kompenzaciona struktura se pokazala kao veoma komplikovana za projektovanje jer dati izrazi nisu jednostavni za proračun i pojavljuje

se mnogo parametara za čije je određivanje vrednosti potrebno veliko znanje o procesima vlažnog anizotropnog hemijskog nagrizanja.

Tokom rada na prethodnim eksperimentima i tehnikama nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH uočili smo da odgovarajuća kombinacija osnovnih kompenzacionih struktura konveksnih uglova može odložiti pojavljivanje ravni $\{111\}$, Slika 4.47-4.49. Kompenzaciona struktura u obliku pravougaonika u pravcu $\langle 110 \rangle$ ima zadatak da odloži povećavanje površine ravni $\{111\}$ do dubine prvog dela nagrizanja d_1 (konkavni ugao, tačka A), Slika 4.47a),c), 4.48, 4.49a)-d). Kompenzaciona struktura u obliku pravougaonika u pravcu $\langle 110 \rangle$ se podgriza ravnima $\{211\}$. Za to vreme se nagriza ravan $\{100\}$, normalna na (100) supstrat, na kompenzacionoj strukturi u obliku pravougaonika u pravcu $\langle 100 \rangle$, a pri tom se ravni iz familije $\{111\}$ (konkavni ugao, tačka A) još uvek ne pojavljuju. U slučaju kada se vrši konkavna kompenzacija na otvoru sa stranicama duž pravca $\langle 100 \rangle$, Slika 4.19, ne postoji kompenzacioni pravougaonik u pravcu $\langle 100 \rangle$, već se posmatraju ravni $\{100\}$ koje se razvijaju duž stranica u pravcu $\langle 100 \rangle$. U ovom odeljku posmatra se opšti slučaj konkavne kompenzacije, čija se neznatna modifikacija može primeniti na otvore u maskirajućem sloju sa stranicama duž pravca $\langle 100 \rangle$.

U trenutku kada se dostigne dubina d_1 , odnosno kada ravni $\{211\}$ stignu do otvora u maskirajućem sloju koji sadrži konkavni ugao (tačka A, Slika 4.47a)), na samom konkavnom uglu se pojavljuje ravan iz familije $\{100\}$, na isti način kao kod kvadratnog otvora sa stranicama duž pravca $\langle 210 \rangle$, Slika 4.21a), 4.49e). Dve ravni iz familije $\{100\}$, prva koja se nagriza na kompenzacionoj strukturi duž pravca $\langle 100 \rangle$ (ili na strani otvora duž pravca $\langle 100 \rangle$) i druga, koja se pojavljuje na konkavnom uglu (tačka A) moraju biti ista ravan, tj. nijedna ne sme prednjačiti ili kasniti u odnosu na drugu, Slika 4.47a), 4.49e),f). Pojavom ravni $\{100\}$ na konkavnom uglu, istovremeno počinje da se povećava površina ravni $\{111\}$, Slika 4.21a), i drugi deo nagrizanja se nastavlja do dubine d_2 da bi nestale ravni brzog nagrizanja $\{211\}$, $\{311\}$, $\{301\}$ i $\{331\}$, nastale usled podgrizanja kompenzacione strukture u obliku pravougaonika u pravcu $\langle 110 \rangle$ i pomeranja fronta ravni koja se nagriza na kompenzacionoj strukturi duž pravca $\langle 100 \rangle$ (ili na strani otvora duž pravca $\langle 100 \rangle$), Slika 4.47a), 4.48, 4.49d)-f).



Slika 4.47 – Šematski prikaz nagrizanja konkavne kompenzacije. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata čije su stranice duž pravca $\langle 110 \rangle$. a) Prikazan je vremenski razvoj frontova ravni iz čijeg pravca se na maskirajućem sloju podgrizaju konveksni i konkavni uglovi kompenzacione strukture. b) Detaljniji prikaz frontova ravni koje se pojavljuju na konkavnom uglu pri podgrizanju $\langle 110 \rangle$ kompenzacionog pravouganika ravnima iz familije $\{211\}$. c) Detaljniji prikaz podgrizanja pravca ravni iz familije $\{111\}$ do trenutka kad ravni podgrizanja $\{211\}$ stižu do konkavnog ugla koji se razvija na liku u obliku kvadrata (tačka A).

Kada ravan iz familije $\{211\}$ stigne do tačke B na Slici 4.47a), u tački C konveksnog ugla se razvijaju dve ravni iz familije $\{311\}$ i jedna ravan iz familije $\{301\}$, a zatim i ravan iz familije $\{211\}$ koja potom brzo podgriza po pravcu CF , pa mora važiti:

$$AB = CE = AO - OB = h_1 - OC \operatorname{ctg} \alpha_{211}, \quad (4.30)$$

gde se OC dobija, Slika 4.47b), iz izraza u kome se izračunava podgrizanje ravnima $\{211\}$ i $\{100\}$ do tačke C:

$$B_{\langle 110 \rangle} - 2 \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111} r_{100}} d_1 k = B_{211} + B_{100} = \left(\frac{r_{211}}{\sin \gamma_{211} \cos \alpha_{211}} + r_{100} \sqrt{2} \right) t, \quad (4.31)$$

i

$$k \approx \frac{L_{\langle 110 \rangle} - h_1}{L_{\langle 110 \rangle}}, \quad (4.32)$$

odnosno, kada uklonimo vreme t za koje ravan $\{211\}$ pređe iz tačke O u tačku C iz (4.31):

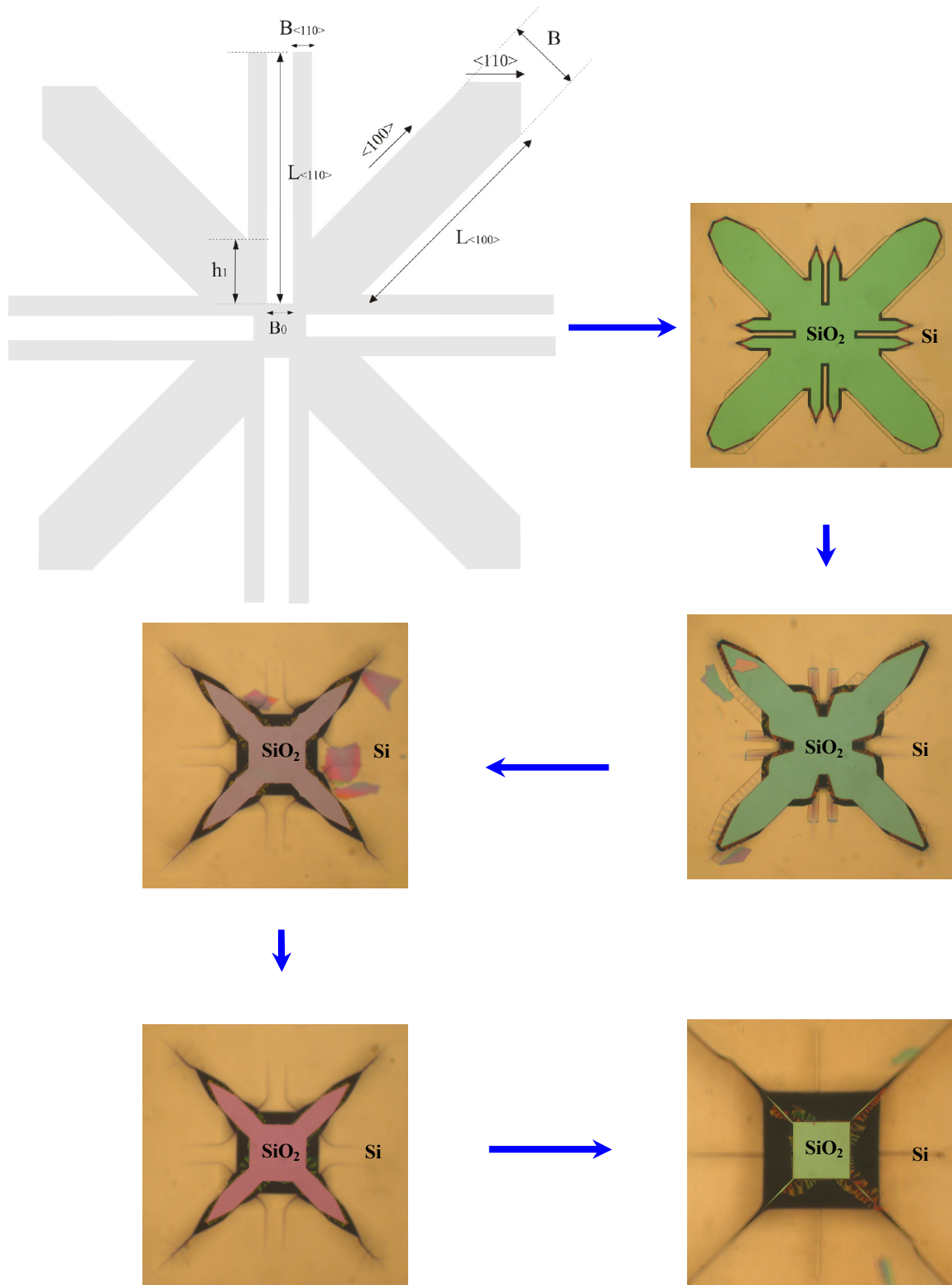
$$OC = \frac{B_{\langle 110 \rangle} - 2 \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111} r_{100}} d_1 k}{1 + q} \quad (4.33)$$

i

$$q = \frac{B_{100}}{B_{211}} = \frac{r_{100} \sqrt{2}}{r_{211} / \sin \gamma_{211} \cos \alpha_{211}} = 0.64, \quad (4.34)$$

gde je $B_{\langle 110 \rangle}$ širina pravougaone kompenzacione strukture, d_1 dubina prvog nagrizanja, r_{211} brzina nagrizanja ravni $\{211\}$, γ_{211} ugao koji ravan $\{211\}$ zaklapa sa ravni (100), α_{211} ugao koji pravac $\langle 210 \rangle$ zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$, r_{111} brzina nagrizanja ravni $\{111\}$, γ_{111} ugao koji ravan $\{111\}$ zaklapa sa ravni (100), r_{100} brzina nagrizanja ravni (100), pri čemu su sve vrednosti date u Tabeli 4.1. Kako se dve ravni iz familije $\{100\}$, prva koja se nagriža na kompenzacionoj strukturi duž pravca $\langle 100 \rangle$ (ili na strani otvora duž pravca $\langle 100 \rangle$) i druga koja se pojavljuje na konkavnom uglu (tačka A) moraju poklapati, mora važiti uslov, Slika 4.47c):

$$AO = OF = h_1 = B_{\langle 110 \rangle} - 2 \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111} r_{100}} d_1 + d_1 \sqrt{2}. \quad (4.35)$$



Slika 4.48 – Mikrografije koje ilustruju vremenski razvoj nagrizanja konkavne kompenzacije u vodenom rastvoru TMAH. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata čije su stranice duž pravca $\langle 110 \rangle$.

Trougao ΔAIG , Slika 4.47a), je jednakokrak pa važi:

$$\frac{AG}{2} = \left(\frac{AF + FG}{2} \right) = AN = NG = LJ = \frac{OA\sqrt{2} + FG}{2}, \quad (4.36)$$

gde je:

$$FG = EF \frac{\sin \alpha_{211}}{\sin \beta}, \beta = 45^\circ - \alpha_{211} \quad (4.37)$$

$$EF = OF - OC - CE = h_1 - OC - CE. \quad (4.38)$$

Ravan $\{211\}$ nestaje u tački J u trenutku t_2 pa važi:

$$TJ = MJ \sin \beta = \left(\frac{d_2}{\operatorname{tg} \beta} + \frac{OA\sqrt{2} + FG}{2} \right) \sin \beta = \frac{r_{211}}{\sin \gamma_{211}} t_2 = \frac{r_{211}}{\sin \gamma_{211}} \frac{d_2}{r_{100}}. \quad (4.39)$$

Iz izraza (4.30)-(4.39) dobija se odnos dubina prvog dela nagrizanja d_1 i drugog dela nagrizanja d_2 :

$$d_2 = \left(\begin{array}{l} d_1 \frac{\sin \beta - \frac{r_{111}}{r_{100}} \sqrt{2} \sin \beta - \frac{k}{1+q} \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111}} (\cos \alpha_{211} - \sin \alpha_{211})}{\frac{r_{211}}{r_{100}} \sin \gamma_{211} - \cos \beta} \\ + \frac{\frac{B_{\langle 110 \rangle}}{2} \left(\sqrt{2} \sin \beta + \frac{1}{1+q} (\cos \alpha_{211} - \sin \alpha_{211}) \right)}{\frac{r_{211}}{r_{100}} \sin \gamma_{211} - \cos \beta} \end{array} \right) \quad (4.40)$$

gde je $B_{\langle 110 \rangle}$ širina pravougaone kompenzacione strukture, r_{211} brzina nagrizanja ravni $\{211\}$, γ_{211} ugao koji ravan $\{211\}$ zaklapa sa ravni (100), α_{211} ugao koji pravac $\langle 210 \rangle$ zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$, r_{111} brzina nagrizanja ravni $\{111\}$, γ_{111} ugao koji ravan $\{111\}$ zaklapa sa ravni (100), r_{100} brzina nagrizanja ravni (100).

Kako je ukupna dubina nagrizanja H :

$$H = d_1 + d_2, \quad (4.41)$$

i koeficijent k (primenjen graničan slučaj (4.17)):

$$k \approx 1 - \frac{h_1}{L_{\langle 110 \rangle}} = 1 - \frac{B_{\langle 110 \rangle} - 2 \frac{r_{111}}{r_{100} \sin \gamma_{111}} d_1 + \sqrt{2} d_1}{6.3 d_1} = 1 - \frac{B_{\langle 110 \rangle} + 1.31 d_1}{6.3 d_1} \approx 0.80, \quad (4.42)$$

zamenom vrednosti iz Tabele 4.1 u izraze (4.40) i (4.35) dobijamo da su dubina prvog dela nagrizanja d_1 , dubina drugog dela nagrizanja d_2 i parametar h_1 jednaki:

$$d_1 = 0.75H - 0.3B_{\langle 110 \rangle}, \quad (4.43)$$

$$d_2 = 0.25H + 0.3B_{\langle 110 \rangle}, \quad (4.44)$$

$$h_1 = 1.31d_1 + B_{\langle 110 \rangle}. \quad (4.45)$$

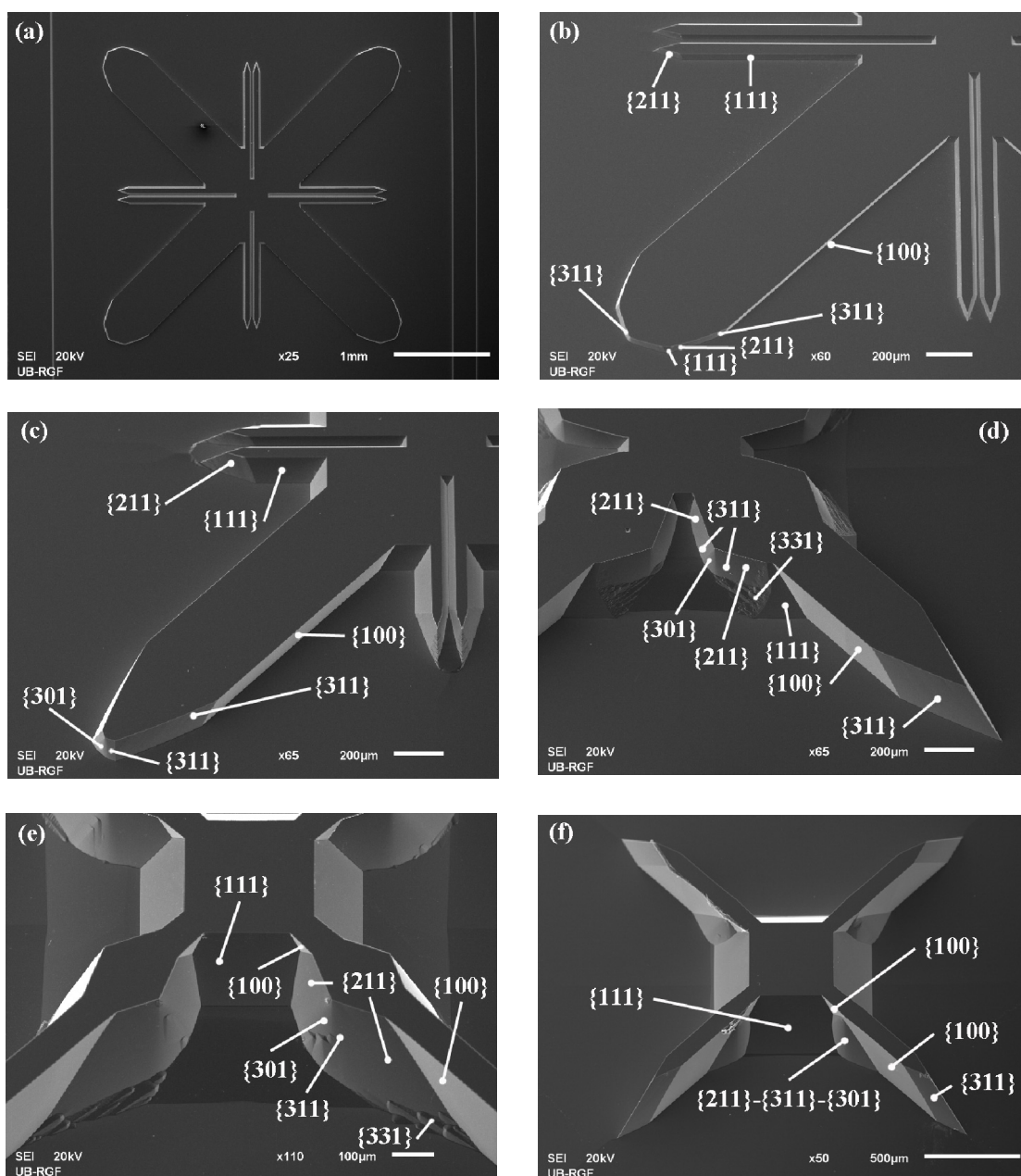
Parametar $L_{\langle 110 \rangle}$ je dobijen, Slika 4.47c) iz odnosa:

$$L_{\langle 110 \rangle} + \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111}} t_1 = \frac{\Delta l}{\Delta t} t_1 = \left(\frac{r_{211}}{\sin \gamma_{211} \sin \alpha_{211t}} - \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111} \operatorname{tg} \alpha_{211t}} \right) t_1 \quad (4.46)$$

tj.

$$L_{\langle 110 \rangle} = \left(\frac{r_{211}}{r_{100} \sin \gamma_{211} \sin \alpha_{211t}} - \frac{r_{111}}{r_{100} \sin \gamma_{111} \operatorname{tg} \alpha_{211t}} - \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111} r_{100}} \right) d_1 = 6.3 d_1 \quad (4.47)$$

gde je t_1 vreme prvog dela nagrizanja, d_1 dubina prvog dela nagrizanja, r_{211} brzina nagrizanja ravni $\{211\}$, γ_{211} ugao koji ravan $\{211\}$ zaklapa sa ravni (100), α_{211t} teorijski ugao koji pravac $\langle 210 \rangle$ zaklapa sa pravcem $\langle 110 \rangle$, r_{111} brzina nagrizanja ravni $\{111\}$, γ_{111} ugao koji ravan $\{111\}$ zaklapa sa ravni (100), r_{100} brzina nagrizanja ravni (100) i gde su sve vrednosti date u Tabeli 4.1.



Slika 4.49 – SEM slike nagrizanja konkavne kompenzacije u vodenom rastvoru TMAH. Kompenzaciona struktura je primenjena na lik u obliku kvadrata čije su stranice duž pravca $\langle 110 \rangle$. Primenjena kompenzaciona struktura je proračunata za ukupnu dubinu nagrizanja od $350 \mu\text{m}$. a) Dubina maskiranog nagrizanja je $27 \mu\text{m}$. b) Uvećan detalj sa slike pod a). c) Dubina maskiranog nagrizanja je $100 \mu\text{m}$. d) Dubina maskiranog nagrizanja je $205 \mu\text{m}$. e) Dubina maskiranog nagrizanja je $257 \mu\text{m}$. f) Dubina maskiranog nagrizanja je $300 \mu\text{m}$.

Odnos dužina strukture L i dubine prvog dela nagrizanja d_1 smo eksperimentalno potvrdili za tri različite ukupne dubine nagrizanja. U okviru tog eksperimenta projektovane su kompenzacione strukture različitih dužina u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 110 \rangle$. Korak projektovanih dužina je $0.1d_1$. Kompenzacioni pravougaonici imaju širinu B od $50 \mu\text{m}$. Eksperiment je pokazao da je najmanji odnos između dužine L i dubine prvog dela nagrizanja d_1 oko 6.6, što je blisko vrednosti izračunatoj izrazom (4.47).

U trenutku t_2 kada ravni $\{211\}$ - $\{311\}$ - $\{301\}$ stignu u tačku J koja pripada maskirajućem sloju, one i dalje postoje na stranama $\{100\}$ duž pravca $\langle 100 \rangle$, Slika 4.49f). Kako je ravan $\{301\}$ najbrža, Tabela 4.1, ona postaje dominantna u daljem nagrizanju. Da bi ove ravni nestale potrebno je produžiti nagrizanje za još dubinu d_3 , gde se mora voditi računa da se dalje nagrizaju i ravni $\{100\}$ na stranama kompenzacije i na dnu nagrizane strukture:

$$d_3 = r_{100}t_3 \approx r_{100} \frac{Hctg\gamma_{301}}{r_{301} / \sin \gamma_{301} - r_{100}} = 0.2H, \quad (4.48)$$

gde je t_3 vreme trećeg dela nagrizanja, d_3 dubina trećeg dela nagrizanja, H ukupna dubina nagrizanja do trenutka t_2 , r_{301} brzina nagrizanja ravni $\{301\}$, γ_{301} ugao koji ravan $\{301\}$ zaklapa sa ravni $\{100\}$, r_{100} brzina nagrizanja ravni $\{100\}$ i gde su sve vrednosti date u Tabeli 4.1. Ugao γ_{301} se koristi jer se na preseku dve ravni iz familije $\{311\}$ pojavljuje ravan $\{301\}$. Tada je širina B kompenzacione strukture u obliku pravougaonika u pravcu $\langle 100 \rangle$ data izrazom:

$$B = 2(H + d_3) = 2.4H, \quad (4.49)$$

gde d_3 dubina trećeg dela nagrizanja a H ukupna dubina nagrizanja do trenutka t_2 . Na kraju trećeg dela nagrizanja dobija se pravilna zarubljena piramida određena ravnima $\{100\}$ i $\{111\}$, Slika 4.6.

Izrazi (4.15), (4.17), (4.41), (4.43)-(4.45), (4.47) i (4.49) u potpunosti definišu kompenzaciju konkavnog ugla u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % TMAH na temperaturi od 80°C . Kompenzacija konkavnog ugla je smanjila površinu

ravni $\{111\}$ $\frac{2\sqrt{2}H}{2\sqrt{2}(d_2 + d_3)} = \frac{H}{0.45H + 0.3B_{\langle 110 \rangle}} \approx 2$ puta. Ukoliko nagrizanja nisu

duboka, ili su u pitanju velike strukture kod kojih se mogu zanemariti zaostale ravni $\{211\}$ - $\{311\}$ - $\{301\}$ na stranama $\{100\}$, Slika 4.49f), dodatno treće nagrizanje se može izostaviti i data kompenzacija konkavnog ugla može smanjiti površinu ravni $\{111\}$ i do 4 puta.

Pored toga što odlaže pojavljivanje ravni $\{111\}$ na konkavnom uglu u maskirajućem sloju, opisana tehnika ima i još jednu primenu, a to je smanjivanje minimalne dužine manje stranice strukture koja se kompenzuje. Zbog ove primene razvoj konkavne kompenzacije demonstriramo na slučaju kada ostrvo silicijum dioksida ima kvadratni ili pravougaoni oblik sa stranicom u pravcu $\langle 110 \rangle$, Slika 4.48-4.49. Manja stranica a pravougaonika (stranica kvadrata) morala je zadovoljavati uslov (4.16) da bi se mogla primeniti kompenzacija konveksnog ugla u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$. Ovaj uslov ograničava minimalnu vrednost stranice a . Tehnika konkavne kompenzacije, Slika 4.47a), pomera minimalnu vrednost na:

$$a \geq B_0 + 2\sqrt{2}(d_2 + d_3) = B_0 + 0.85B_{\langle 110 \rangle} + 1.27H, \quad (4.50)$$

gde je B_0 širina otvora koji sadrži konkavne uglove u maskirajućem sloju, Slika 4.47a), 4.48.

4.4.3 *Maskless* tehnika sa kompenzacijom konveksnog ugla

U prvom slučaju kompenzacione strukture u obliku pravougaonika koji je orijentisan u pravcu $\langle 100 \rangle$, Odeljak 4.3.1, nije moguće ostvariti potpunu kompenzaciju donjeg dela konveksnog ugla na dnu nagrizanje strukture na kraju *maskless* nagrizanja, Slika 4.8b). U drugom slučaju prekompenzovane strukture, Odeljak 4.3.1, potpuna kompenzacija donjeg ugla je moguća, Slika 4.11f), ali se moraju ispuniti određeni uslovi. Donji deo kompenzacionog pravougaonika u pravcu $\langle 100 \rangle$ ima isti oblik kao kompenzacioni pravougaonik u slučaju standardne maskirane kompenzacije (Odeljak 4.4.1) tj. kao da nije uklonjen drugi maskirajući silicijum dioksid, Slika 4.10, 4.11. Donji deo kompenzacije je određen ravnima $\{100\}$ na stranama i ravni $\{311\}$ na

slobodnom kraju, Slika 4.11a),d). Uočili smo [53] da posle trenutka kad nestanu ravni $\{111\}$ i strane bosa su određene ravnima $\{311\}$ - $\{211\}$ (druga faza *maskless* nagrizanja, Odeljak 4.3.1), vrlo brzo će nestati i ravni $\{100\}$ na stranama kompenzacionog pravougaonika. Ukoliko počne treća faza *maskless* nagrizanja, pojaviće se oble površine sa malim nagibom na stranama bosa, a iz smera hrapavih ravni $\{301\}$ duž pravca $\langle 100 \rangle$ biće napadnut donji deo konveksnog ugla na dnu nagrizane strukture. Podgrizanje donjeg dela konveksnog ugla može biti sprečeno ako se dubina *maskless* nagrizanja h_2 dostigne u trenutku kada ravni $\{111\}$ nestanu, Slika 4.5f). Eksperimentalno smo odredili da odnos između dubine maskiranog nagrizanja h_1 i dubine *maskless* nagrizanja h_2 mora da zadovoljava uslov:

$$h_2 = 0.24h_1, \quad (4.51)$$

da bi završetak *maskless* nagrizanja odgovarao trenutku kada ravni $\{111\}$ nestaju. Izraz koji opisuje izgled strane kompenzacionog pravougaonika u pravcu $\langle 100 \rangle$ za vreme *maskless* nagrizanja, Slika 4.11a),d), do trenutka kad ravni $\{100\}$ budu u potpunosti zamenjene hrapavim ravnima $\{301\}$ je dat sa [74]:

$$h_2 = \frac{\sin \gamma_{301}}{\frac{r_{301}}{r_{100}} - \cos \gamma_{301} - \sin \gamma_{301}} h_1 = 0.26h_1, \quad (4.52)$$

gde je γ_{301} ugao koji ravan $\{301\}$ zaklapa sa ravni (100) , r_{301} brzina nagrizanja ravni $\{301\}$ i r_{100} brzina nagrizanja ravni (100) i gde su sve vrednosti date u Tabeli 4.1. Razlika u izrazima (4.51) i (4.52) je dokaz uočene pojave da prvo nestaju ravni $\{111\}$ na stranama bosa, pa tek onda ravni $\{100\}$ na stranama kompenzacionog pravougaonika.

Dužina kompenzacione strukture $L_{maskless}$ mora da bude takva [40, 56, 58, 64] da se na kraju *maskless* nagrizanja izbegne podgrizanje konveksnih uglova ravnima $\{311\}$ (tačka P na Slici 4.5b)) pre nego što dođe do kompletnog podgrizanja vertikalnim ravnima $\{100\}$, kao i kod standardne maskirane kompenzacione strukture (Odeljak

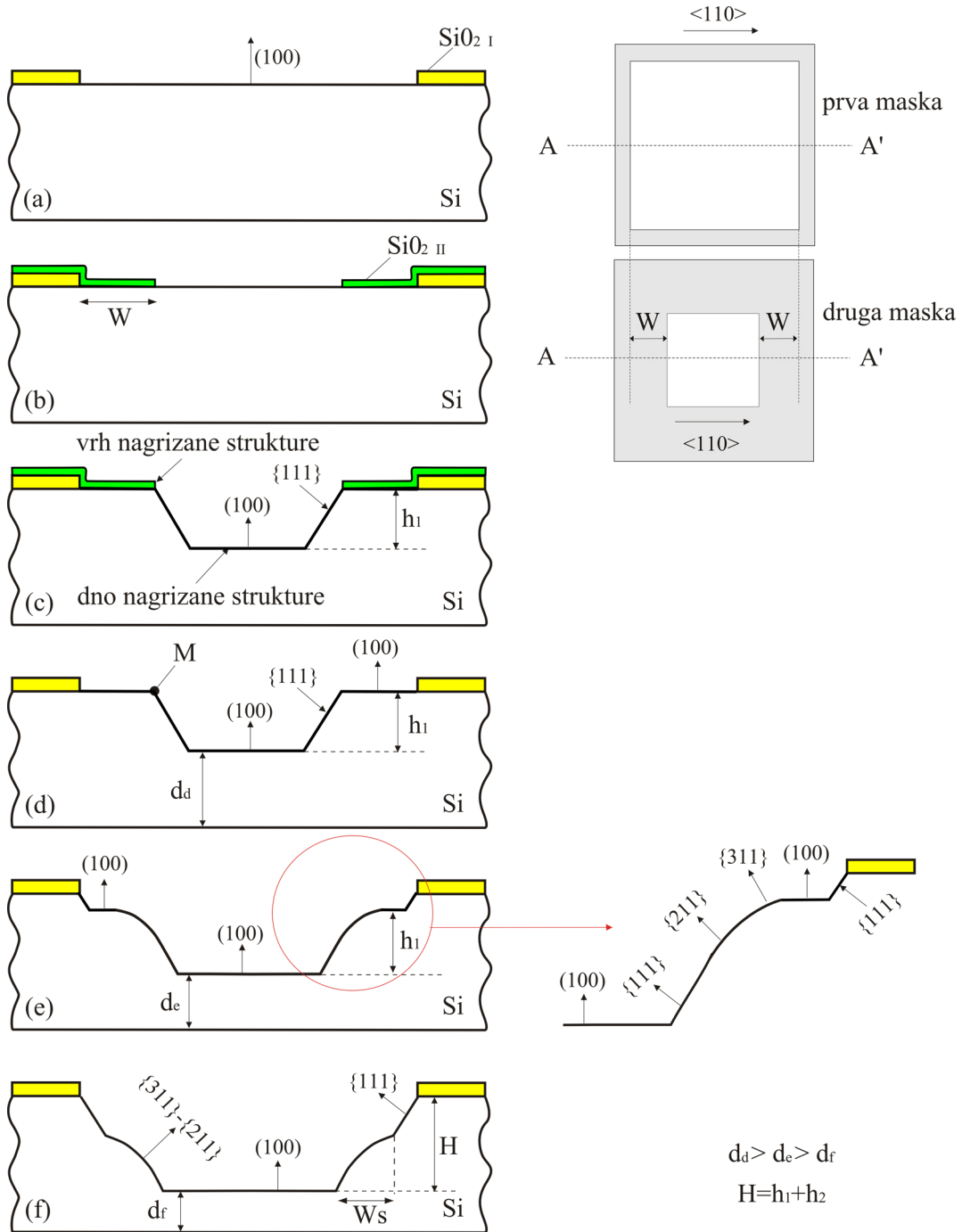
4.4.1). Odnos dužina strukture $L_{maskless}$ i ukupne dubine nagrizanja H je zato isti kao u izrazu (4.15):

$$L_{maskless} = 4.94H = 2.47B. \quad (4.53)$$

Odnos dužina $L_{maskless}$ i širine B kompenzacionog pravougaonika u pravcu $\langle 100 \rangle$ smo eksperimentalno potvrdili za tri različite ukupne dubine nagrizanja H . U okviru eksperimenta projektovane su kompenzacione strukture različitih dužina u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$. Ove kompenzacione strukture su definisane u drugom maskirajućem sloju silicijum dioksida. Korak projektovanih dužina je $0.01B$. Kompenzacioni pravougaonici imaju širinu B dva puta veću od ukupne dubine nagrizanja H . Posle maskiranog nagrizanja do dubine h_1 , vršeno je *maskless* nagrizanje do dubine h_2 , pri čemu je zadovoljen uslov (4.51). Eksperiment je pokazao da je najmanji odnos između dužine $L_{maskless}$ i širine B jednak sa 2.45, što je vrednost veoma bliska izračunatom odnosu (4.53).

Izrazi (4.3), (4.51) i (4.53) u potpunosti definišu *maskless* nagrizanje sa kompenzacijom konveksnog ugla u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C [53]. Ova tehnika se može primeniti samo na silicijumske strukture čije su početne maske nagrizanja ostrva silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 110 \rangle$. Naša preporuka je da se ova tehnika ne primenjuje na silicijumske strukture čije su početne maske nagrizanja ostrva silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 100 \rangle$. Razlog je pojava hrapavih ravni $\{301\}$ na nezaštićenim ivicama u pravcu $\langle 100 \rangle$ kvadra određenog ravnima $\{100\}$, Slika 4.11.

Maskless tehnika se može primeniti i za realizaciju silicijumske strukture u obliku dijafragme sa stepenikom [27, 75]. Prva maska ima otvore u obliku kvadrata čije su stranice sa stranicama u pravcu $\langle 110 \rangle$ i koje su veće od stranica (takođe u pravcu $\langle 110 \rangle$) otvora u obliku kvadrata na drugoj maski. Ovakvo projektovanje maski omogućava definisanje stepenika, Slika 4.50c). Razlika W između stranica projektovanih kvadrata određuje oblik i dimenziju stepenika na kraju *maskless* nagrizanja.

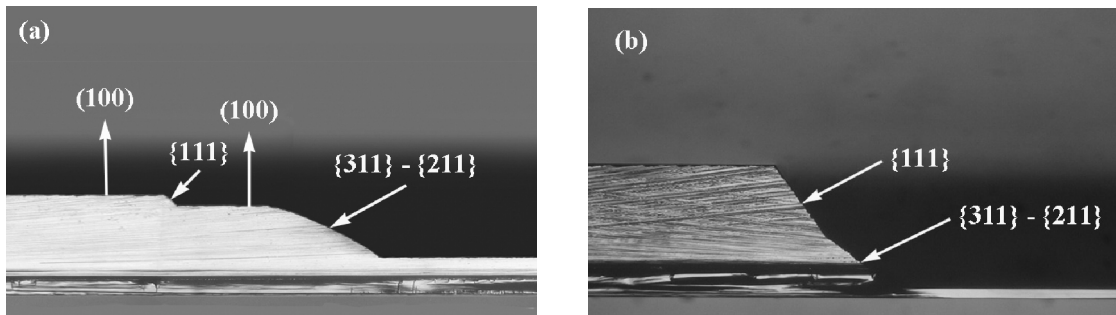


Slika 4.50 – Šematski prikaz maskless tehnike u vodenom rastvoru TMAH. a) Prvi fotolitografski postupak sa prvom maskom. b) Druga termička oksidacija za drugu masku. Drugi fotolitografski postupak sa drugu masku. c) Maskirani prvi deo nagrizanja. d) Glavni princip maskless tehnike je da se posle prvog dela nagrizanja do određene dubine h_1 , skida drugi maskirajući sloj SiO_2 . e) Drugi deo nagrizanja. Konveksan ugao koji je određen presekom ravni (100) i $\{111\}$ napadaju brze ravni koje se javljaju pri maskless nagrizanju. f) Trenutak kad nestane ravan $\{111\}$ i stepenik ostaje određen samo ravnima $\{311\}$ i $\{211\}$ mora biti trenutak završetka maskless nagrizanja.

Posle maskiranog nagrizanja do dubine h_1 , odstranjuje se drugi sloj termičkog silicijum dioksida, Slika 4.50d). Konveksan ugao određen presekom ravni (100) i {111} (tačka M) više nije zaštićen, Slika 4.50d), i njega nagrizaju ravni brzog nagrizanja iz familija {311} i {211}, koje se javljaju pri *maskless* nagrizanju. Trenutak kad nestane ravan {111} i stepenik ostaje određen samo ravnima {311} i {211} mora biti trenutak kada je završeno *maskless* nagrizanje, Slika 4.50f), 4.51. Da bi se to dogodilo potrebno je da bude ispunjen uslov (4.51). Granična vrednost širine stepenika W , da bi nestala ravan (100) (koja postoji na Slici 4.50e), 4.51a)) i da bi stepenik bio određen samo ravnima {311} i {211} na kraju *maskless* nagrizanja, Slika 4.50f) je:

$$W_g = \frac{\Delta a / 2\Delta t}{r_{100}} h_2 + \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111}} \frac{H}{r_{100}} = \frac{\Delta a / 2\Delta t}{r_{100}} \frac{0.24}{1.24} H + \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111}} \frac{H}{r_{100}} = 0.55H, \quad (4.54)$$

gde je $\Delta a / 2\Delta t$ eksperimentalno mereni parametar za ravan {311}, H ukupna dubina nagrizanja, γ_{111} ugao koji ravan {111} zaklapa sa ravni (100), r_{111} brzina nagrizanja ravni {111} i r_{100} brzina nagrizanja ravni (100), pri čemu su sve vrednosti parametara date u Tabeli 4.1.



Slika 4.51 – Mikrofotografije različitih oblika ojačanja formiranih *maskless* nagrizanjem. a) Oblik ojačanja predstavlja stepenik određen ravnima (100) i {311}-{211}. b) Oblik ojačanja kada je razlika W dosta manja od granične vrednost W_g . Ojačanje je određeno samo ravnima {311}-{211}.

Širina stepenika W_S na dnu nagrizane strukture na kraju *maskless* nagrizanja je data izrazom:

$$W_S = W - \frac{r_{111}}{\sin \gamma_{111}} \frac{H}{r_{100}} = W - 0.05H \quad (4.55)$$

gde je H ukupna dubina nagrizanja, γ_{111} ugao koji ravan $\{111\}$ zaklapa sa ravni (100) , r_{111} brzina nagrizanja ravni $\{111\}$ i r_{100} brzina nagrizanja ravni (100) i gde su sve vrednosti date u Tabeli 4.1. Razlika između projektovane i dobijene širine je posledica male ali konačne brzine nagrizanja ravni $\{111\}$, koja se ne može zanemariti, Tabela 4.1.

Izrazi (4.3), (4.54) i (4.55) u potpunosti definišu *maskless* nagrizanje silicijumskih struktura sa stepenikom u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % TMAH na temperaturi od 80°C [53]. Ona se može primeniti samo na silicijumske strukture čije su početne maske nagrizanja ostrva silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 110 \rangle$.

5. Trodimenzionalne silicijumske strukture i MEMS senzori

5.1 Uvod

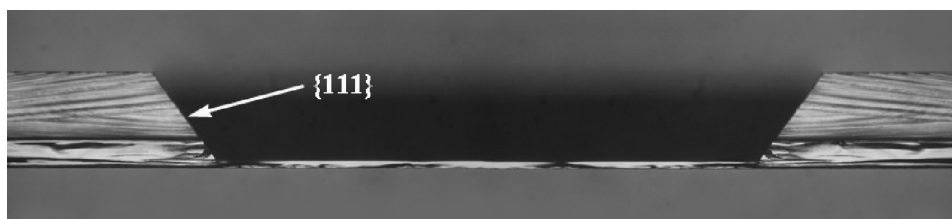
U Glavi 4 je objašnjen mehanizam anizotropnog nagrivanja silicijuma orijentacije (100) u vodenom rastvoru TMAH. Objasnjeni mehanizam je omogućio da se definišu parametri novih tehnika nagrivanja. Zadatak razvijenih tehnika nagrivanja je da se prevaziđu dosadašnja ograničenja tehnološkog procesa nagrivanja u vodenom rastvoru TMAH i omogući precizno kontrolisana, pouzdana i ponovljiva mikroizrada MEMS naprava. U ovoj glavi će se pokazati primene osvojenih tehnika nagrivanja u vodenom rastvoru TMAH u izradi različitih trodimenzionalnih silicijumskih struktura, u izradi novih i poboljšavanju postojećih MEMS senzora.

5.2 Trodimenzionalne silicijumske strukture

Anizotropnim nagrivanjem silicijumskih supstrata (100) orijentacije mogu se dobiti različiti trodimenzionalni oblici. Uračunavanjem promena koje nastaju usled podgrivanja u projektovane dimenzije lika i primene odgovarajućih kompenzacionih struktura na konveksne i konkavne uglove na način opisan u prethodnoj glavi mogu se kontrolisano dobijati ponovljive silicijumske strukture u obliku jama, dijafragmi, kanala, pravilnih zarubljenih piramida, kvadara i njihovih kombinacija. Svi ovi oblici, u nekim slučajevima noseći, u drugim funkcionalni (pretvarački), koriste se kao sastavni delovi senzorskih i aktuatorskih struktura u oblasti mikrofluidike, mehaničkih senzora, termoelektričnih senzora, hemijskih i bioloških senzora, [2-3, 9-11, 13-17, 20-22].

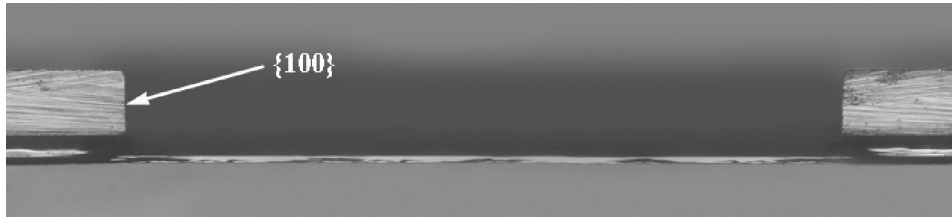
5.2.1 Različite vrste jama u silicijumskim supstratima

Jedna od najčešćih vrsta jama u mikromašinstvu nastaje formiranjem ravne dijafragme za piezootporni senzor pritiska, Slika 5.1. Početna maska za ovu vrstu jama je otvor pravougaonog ili kvadratnog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 110 \rangle$. Konačna geometrija jame će biti definisana sa četiri ravni $\{111\}$ (inverzna zarubljena piramida čije su osnove pravougaonici ili kvadrati), Slika 4.18, 5.1.



Slika 5.1 – Mikrofotografija poprečnog preseka u pravcu $\langle 110 \rangle$ (neojačane) dijafragme piezootpornog senzora pritiska.

Druga vrste jame nastaje kada se kroz otvor u maskirajućem sloju pravougaonog ili kvadratnog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 100 \rangle$, formira dijafragma. Na kraju nagrizanja dijafragma će imati osmougaoni oblik i jama će biti određena ravnima $\{111\}$ i $\{100\}$, Slika 4.19, 5.2. Ukoliko se nastavi nagrizanje u jednom trenutku će nestati ravni $\{100\}$ i dobiće se dijafragma definisama samo ravnima $\{111\}$, Slika 4.19. Primenom tehnike kompenzacije konkavnih uglova može se smanjiti izobličenje koje prouzrokuje ravan $\{111\}$. Dijafragma i dalje ima osmougaoni oblik, ali su za istu dubinu nagrizanja površine strana određene ravnima $\{111\}$ dva do četiri puta manje, Odeljak 4.4.2.



Slika 5.2 – Mikrofotografija poprečnog preseka u pravcu $\langle 100 \rangle$ osmougaone dijafragme nastale nagrivanjem kroz otvor u maskirajućem sloju pravougaonog ili kvadratnog oblika, stranica orijentisanih u pravcu $\langle 100 \rangle$.

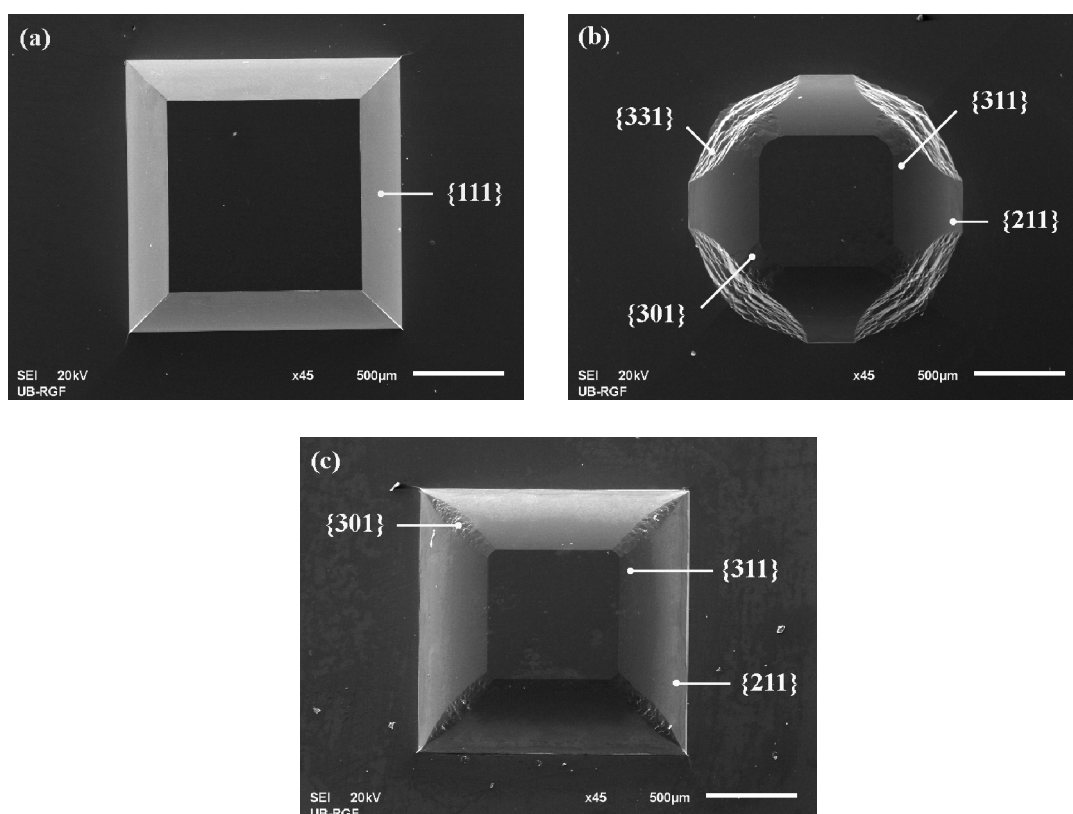
U zavisnosti od potreba i ukupne dubine nagrivanja moguće je realizovati i komplikovanije oblike jama kao kombinacije jama i meza struktura sa stranicama u različitim pravcima. Treba napomenuti da će dimenzije otvora kvadratnog ili pravougaonog nagrivanog oblika uvek biti veće od dimenzija lika jer će doći do lateralnog podgrivanja u pravcu ravni ispod maskirajućeg silicijum dioksida. To važi i za ravan $\{111\}$, koja ima malu ali konačnu i nezanemarljivu brzinu nagrivanja ravni, Tabela 4.1.

5.2.2 Različite vrste silicijumskih meza struktura

Kada se nagriza struktura koja ima konveksne uglove, kao u slučaju kada je maskirajući sloj u obliku ostrva (tzv. meza struktura) kvadratnog ili pravougaonog oblika na (100) silicijumskoj pločici, konačni izgled strukture je određen kristalografskim ravnima koje se najbrže nagrizzaju. Podgrivanje konveksnih uglova sa vremenom nije zanemarljivo i dolazi do potpunog izobličenja željene trodimenzionalne silicijumske strukture. U zavisnosti u kom pravcu su orijentisane stranice ostrva, potrebno je primeniti odgovarajuće kompenzacione strukture.

Tri vrste centriranog središnjeg ojačanja (bosa) dijafragme piezootpornog senzora niskih pritisaka mogu biti realizovane u vodenom rastvoru TMAH, Slika 5.3. Diјаfragma ima stranice poravnate sa primarnim zaravnjenjem u pravcu $\langle 110 \rangle$. Bos nastaje od ostrva maskirajućeg sloja čije su stranice orijentisane u u pravcu $\langle 110 \rangle$. Primenjene su dve vrste kompenzacione strukture u obliku pravougaonika orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$, Odeljak 4.3.1. Prva kompenzaciona struktura za drugi bos ima širinu pravouganika B_m jednaku

dvostrukoj vrednosti dubine maskiranog nagrizanja h_1 . Druga kompenzaciona struktura za prvi i treći bos ima širinu pravouganika B jednaku dvostrukoj vrednosti ukupne dubine



Slika 5.3 – SEM slike izrađenih središnjih ojačanja dijafragmi (bosova) u vodenom rastvoru TMAH [53]. a) Prvi bos, određen ravnima $\{111\}$. Ukupna dubina maskiranog nagrizanja je $320 \mu\text{m}$. b) Drugi bos, određen ravnima $\{311\}$ - $\{211\}$. Primećuje se izrazito podgrizanje donjeg dela konveksnog ugla na dnu nagrizane dijafragme. Dubina maskiranog nagrizanja h_1 je $258 \mu\text{m}$. Dubina maskless nagrizanja h_2 je $62 \mu\text{m}$. c) Treći bos koji je određen ravnima $\{311\}$ - $\{211\}$. Primećuje se da je donji deo konveksnog ugla na dnu nagrizane dijafragme potpuno kompenzovan. Dubina maskiranog nagrizanja h_1 je $258 \mu\text{m}$. Dubina maskless nagrizanja h_2 je $62 \mu\text{m}$.

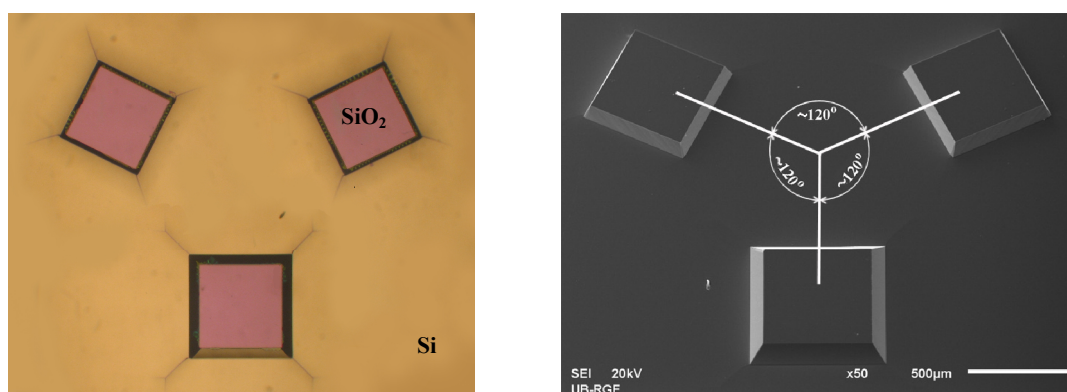
nagrizanja H . Dužine kompenzacionih struktura za sva tri bosa su 2.45 puta veće od njihovih širina. Prvi bos je izrađen standardnim nagrizanjem gde je primenjena druga kompenzaciona struktura na konveksnim uglovima. Prvi bos je pravilna zarubljena piramida određena ravnima $\{111\}$ i (100) , Slika 5.3a). Drugi bos je izrađen primenom

maskless tehnike sa kompenzacijom konveksnih uglova samo za vreme maskiranog nagrizanja do dubine h_1 i ima oblik veoma izobličene zarubljene piramide određen ravnima $\{311\}$ - $\{211\}$, $\{301\}$, $\{331\}$ i (100) , Slika 5.3b). Treći bos je izrađen primenom *maskless* tehnike, uz upotrebu druge kompenzacione strukture na konveksnim uglovima. Treći bos je zarubljena piramida koja ima kompenzovane donje delove konveksnih uglova i određena je ravnima $\{311\}$ - $\{211\}$, $\{301\}$ i (100) , Slika 5.3c). Izrada dijafragme sa centralnim središnjim ojačanjem u obliku drugog bosa nema smisla jer podgrizanje donjeg dela konveksnog ugla negativno utiče na pravilnu raspodelu mehaničkih naprezanja u dijafragmi senzora niskih pritisaka, što ima za posledicu povećanu nelinearnost senzora [9, 54]. Iako kod trećeg bosa postoji podgrizanje gornjeg dela konveksnog ugla, njegova izrada je ponovljiva ako su ispunjeni uslovi (4.3), (4.51) i (4.53). Prednost trećeg bosa je što niži od rama dijafragme, Slika 4.7a), za dubinu nastavljenog nagrizanja ($62 \mu\text{m}$), što nije slučaj kod prvog bosa koji je određen ravnima $\{111\}$. Ova osobina rešava veliki problem neželjenog elektrostatičkog spajanja bosa i Pyrex stakla pri (potrebnoj) anodnom bondovanju, koji postoji kod prvog bosa određenog $\{111\}$ ravnima. Druga prednost je smanjivanje dimenzija samog bosa. Manja masa bosa znači manju osetljivost senzora na ubrzanje i poboljšanje brzine odziva senzora [76-77].

Meza strukture mogu biti određene i ostrvima silicijum dioksida kvadratnog ili pravugaonog oblika sa stranicama u pravcima $\langle 510 \rangle$, $\langle 410 \rangle$, $\langle 310 \rangle$, $\langle 210 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$. Kao što je objašnjeno u Odeljcima 4.3.2 i 4.3.4, duž tih pravaca ispod maskirajućeg sloja silicijum dioksida će se na početku nagrizanja formirati kristalografske ravni koje se najsporije nagrizaju. Za pravce $\langle 510 \rangle$, $\langle 410 \rangle$, $\langle 310 \rangle$ i $\langle 210 \rangle$, to su ravni redom $\{511\}$, $\{411\}$, $\{311\}$ i $\{211\}$. Na kraju maskiranog nagrizanja dobiće se različite zarubljene piramide, Slika 4.12-4.17, zavisno od toga kako se podgrizaju konveksni uglovi. Dimenzije ostrva kvadratnog ili pravougaonog oblika će na kraju nagrizanja biti manje jer će doći do lateralnog podgrizanja brzim ravnima ispod maskirajućeg silicijum dioksida.

Poznavajući mehanizam nagrizanja možemo unapred odrediti kakav je oblik zarubljenje piramide moguće dobiti za određenu senzorsku ili aktuatorsku strukturu. Kao jedan primer sastavnog dela aktuatora dajemo tri bosa u obliku pravilnih zarubljenih piramida napravljenih nagrizanjem duž pravaca $\langle 310 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ i $\langle 310 \rangle$ i raspoređena

simetrično pod uglovima približno jednakim 120° , Slika 5.4. Ova tri bosa mogu predstavljati tri simetrične tačke oslonca na koje se može postaviti pokretni plato aktuatora. Dobijena struktura smatra se vrlo komplikovanom za izvođenje pomoću zapreminskog mikromašinstva, međutim precizno poznavanje procesa anizotropnog nagrizanja u rastvoru TMAH omogućilo je kvalitetnu izradu čitave strukture. Naročito treba obratiti pažnju na vrlo finu morfologiju sva tri bosa, što je posledica svojstava nagrizanja u TMAH i upravo predstavlja jedan od bitnih razloga što su ova istraživanja orijentisana na njegova svojstva.



Slika 5.4 – Fotografija i SEM slika dela aktuatora koji sadrži tri bosa u obliku pravilnih zarubljenih piramida napravljena nagrizanjem u vodenom rastvoru duž pravaca $\langle 310 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ i $\langle 310 \rangle$.

Meza strukture mogu biti i oblika kvadra strana određenih ravnina $\{100\}$ normalnih na površinu silicijumskog supstrata orijentacije (100) , Odeljak 4.4.1, Slika 4.46. Ovakve strukture su sastavni deo različitih senzora ubrzanja i mikrožiroskopa, [74]. Početna maska je ostrvo silicijum dioksida kvadratnog ili pravougaonog oblika stranica orijentisanih u pravcu $\langle 100 \rangle$. Potrebno je primeniti kompenzacionu strukturu u obliku pravougaonika u pravcu $\langle 110 \rangle$, jer se na konveksnim uglovima kvadra pojavljuju ravni iz familije $\{311\}$, Slika 4.13. Dimenzije ostrva kvadratnog ili pravougaonog nagrizanog oblika će biti manje jer će doći do lateralnog podgrizanja ravnina $\{100\}$ ispod maskirajućeg silicijum dioksida. Ova kompenzacija ima određena ograničenja. Ona se može primeniti samo za plitka nagrizanja i/ili ako su stranice kvadrata ostrva u

maskirajućem sloju mnogo veće od dubine nagrizanja, jer na donjem delu kompenzovanog ugla zaostaju ravni iz familije $\{211\}$ koje nisu zanemarljive, Slika 4.46e),f). Ako je potrebno napraviti strukturu oblika kvadra određenog ravnima iz familije $\{100\}$ koja je pokretna (npr. kod senzora ubrzanja), navedena kompenzacija se može iskoristiti zajedno sa obostranim nagrizanjem supstrata. U tom slučaju, pažljivim projektovanjem je moguće smanjiti ili čak eliminisati brze ravni $\{211\}$ jer će u jednom trenutku nagrizanja i one predstavljati slobodne (višeće) strukture u vodenom rastvoru TMAH.

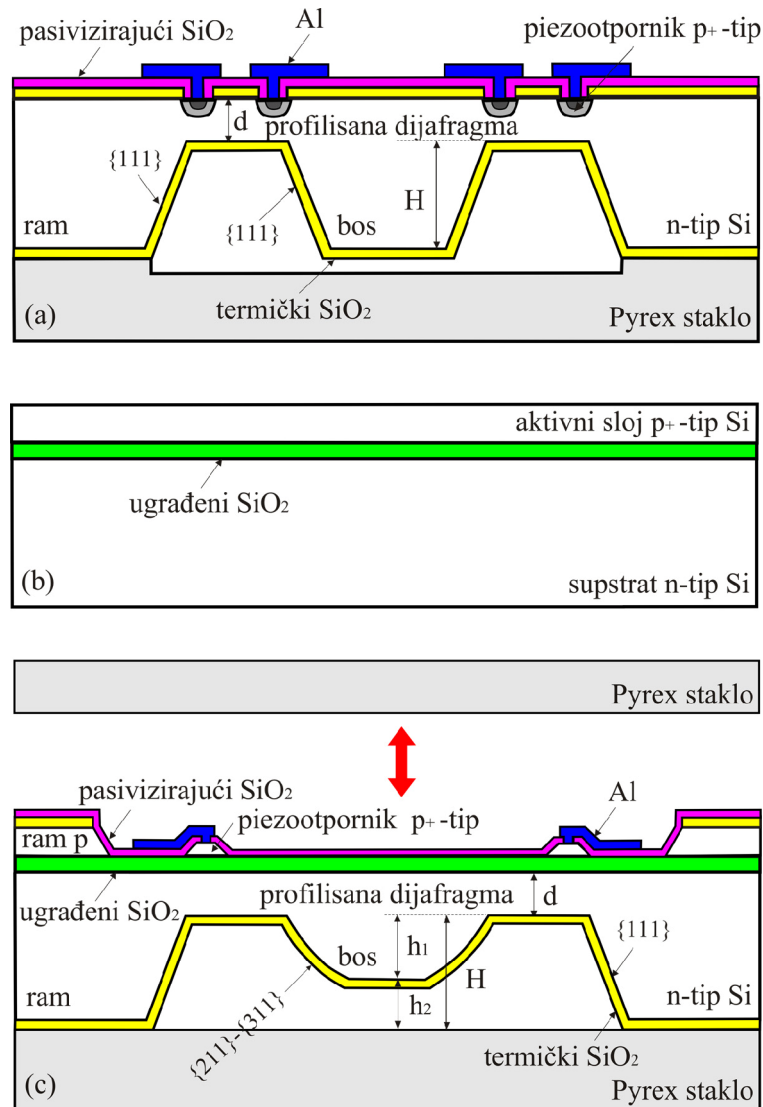
5.2.3 Silicijumske strukture na više nivoa

Kao što je detaljnije opisano u Odeljku 4.4.3, primenom *maskless* tehnike mogu se dobiti i silicijumske strukture na više nivoa, Slika 4.7a), 4.51a). Standardno maskirano anizotropno nagrizanje omogućava silicijumske strukture na više nivoa, ali samo ako se više puta vrši serija: nanošenje maskirajućeg materijala, fotolitografski postupak za definisanje lika, odstranjivanje maskirajućeg materijala. Međutim, nivoi koji se mogu dobiti vlažnim hemijskim nagrizanjem se mogu razlikovati samo za par mikrometra, jer nije poželjno standardnim fotolitografskim procesom nanositi fotorezist na neravnine veće od 10 μm . *Maskless* tehnika omogućava da se realizuju silicijumske strukture na tri nivoa koje se razlikuju za mnogo više od 10 μm , Slika 4.5f), 4.51a). U opštem slučaju ovakve strukture se mogu dobiti ako se zadovolji uslov (4.51) pri čemu likovi moraju imati stranice orijentisane isključivo u pravcu $\langle 110 \rangle$. U slučaju da likovi na maskama imaju konveksne uglove potrebno je da njihove kompenzacione strukture budu u obliku pravougona orijentisanog u pravcu $\langle 100 \rangle$ i da zadovoljavaju uslov (4.3) i (4.53).

5.3 Visokotemperaturni senzor za niže pritiske SOI SP-11

Standardni IHTM-CMT piezootporni senzori pritiska sadrže piezootpornike formirane procesom difuzije kao p-oblasti u substratu n-tipa, Slika 5.5a). Temperaturni

opseg rada ovih piezootpornih senzora je teorijski ograničen na temperature do 120°C zbog struje curenja p-n spoja. U IHTM-CMT je razvijana nova vrsta senzora pritiska za



Slika 5.5 – Šematski prikaz piezootpornih senzora za niže pritiske. a) Standardni IHTM-CMT piezootporni senzori pritiska sadrže piezootpornike formirane procesom difuzije kao p-oblasti u supstratu n-tipa. b) SOI pločica predstavlja višeslojnu strukturu koja se sastoji od Si supstrata, ugrađenog sloja SiO₂ i aktivnog tankog sloja Si. c) Visokotemperaturni SOI senzor pritiska se bazira na ideji da piezootpornici nisu više međusobno, kao i od supstrata, izolovani kontaktnim potencijalom p-n spoja, već dielektrikom silicijum dioksidom.

povišene temperature (do 300⁰C). Nova vrsta senzora je napravljena uz pomoć standardnih planarnih tehnologija i vlažnog anizotropnog hemijskog nagrivanja SOI (*Silicon-On-Insulator*) pločica, [78-79]. Ovaj visokotemperaturni senzor pritiska se zasnivao na ideji da piezootpornici nisu više međusobno, kao i od supstrata, izolovani kontaktnim potencijalom p-n spoja, već dielektrikom silicijum dioksidom, Slika 5.5c), [80-82]. Ova vrsta senzora pritiska je bila projektovana za više pritiske [78-79].

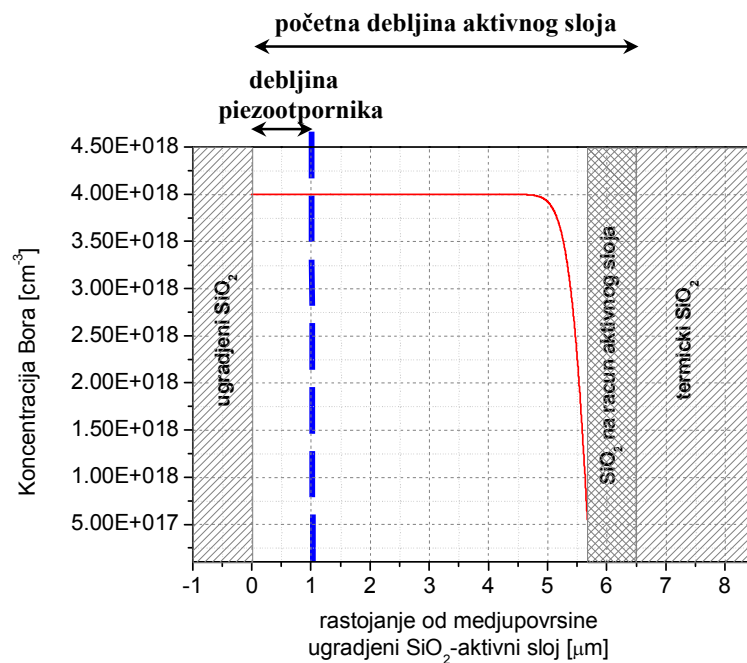
Kako postoji značajna potreba za merenjem niskih pritisaka fluida čija temperatura može biti vrlo visoka, u IHTM-CMT je započet razvoj novog tipa senzora SOI SP-11 [83-84]. Senzor SOI SP-11 je visokotemperaturni apsolutni senzor nižih pritiska, koji ima kvadratnu profilisanu dijafragmu u obliku centriranog središnjeg ojačanja – bosa, Slika 5.5c). Piezootpornici senzora SOI SP-11 su izolovani međusobno, kao i od supstrata, silicijum dioksidom. Kao i njegovi visokotemperaturni prethodnici, i ovaj senzor je napravljen od SOI pločica, ali je primenjena *maskless* tehnika zasnovana na vlažnom hemijskom nagrivanju u vodenom rastvoru TMAH. *Maskless* tehnika je primenjena da bi se dobila profilisana dijafragma sa središnjim bosom oblika pravilne zarubljene piramide i piezootpornici ponovljivih dimenzija. Ovakva dijafragma omogućava dobru linearnost odziva kod senzora niskih pritisaka.

5.3.1 Izrada senzora SOI SP-11

SOI pločica predstavlja višeslojnu strukturu koja se sastoji od Si supstrata, ugrađenog sloja SiO₂ i tankog aktivnog sloja Si, Slika 5.5b). U ovom radu u izradi visokotemperaturnih senzora za niže pritiske korišćene su komercijalne SOI pločice sa aktivnim slojem p-tipa (orijentacije (100) i specifične otpornosti 0.01-0.04 Ωcm) debljine ~6.5 μm, ugrađenim oksidom debljine ~1,5 μm i supstratom n-tipa (orijentacije (100) i specifične otpornosti 3-5 Ωcm) debljine ~470 μm. Od Si supstrata se nagrivanjem formira profilisana dijafragma, a od aktivnog sloja Si se formiraju piezootpornici.

Bilo je potrebno odrediti parametre tehnoloških procesa (temperature i vremena termičkih oksidacija) za površinsku koncentraciju piezootpornika od oko 3·10¹⁸ cm⁻³, koja

je potrebna da bi se ostvarila “unutrašnja” temperaturna kompenzacija osetljivosti, [85]. U tu svrhu izvršena je simulacija metodom konačnih elemenata procesa termičkih oksidacija i njenih uticaja na raspodelu bora u jako dopiranom aktivnom sloju SOI pločice, Slika 5.6, [86]. Tokom termičkih oksidacija koje se vrše na temperaturama preko 1000°C dolazi do osiromašenja aktivnog sloja SOI pločice i bor difunduje u sloj silicijum dioksida koji raste na račun silicijuma.



Slika 5.6 - Raspodela koncentracije bora u aktivnom sloju SOI pločice u zavisnosti od rastojanja aktivnog sloja od ugrađenog SiO_2 posle šest oksidacija [83]. Pri oksidaciji se osiromašuje jako dopiran aktivan sloj tako što bor difunduje u sloj silicijum dioksida. Početna površinska koncentracija aktivnog sloja komercijalne SOI pločice je oko $4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Posle simulacija radi određivanja potrebnih parametara, vršeni su sledeći tehnološki postupci na izradi senzora nižih pritiska na SOI pločici:

- I termička oksidacija ($0.16 \mu\text{m}$) da bi se definisali reperi za jednostrani i dvostrani fotolitografski postupak,
- fotolitografski postupak sa obe strane sa prvom maskom da bi se definisali reperi,

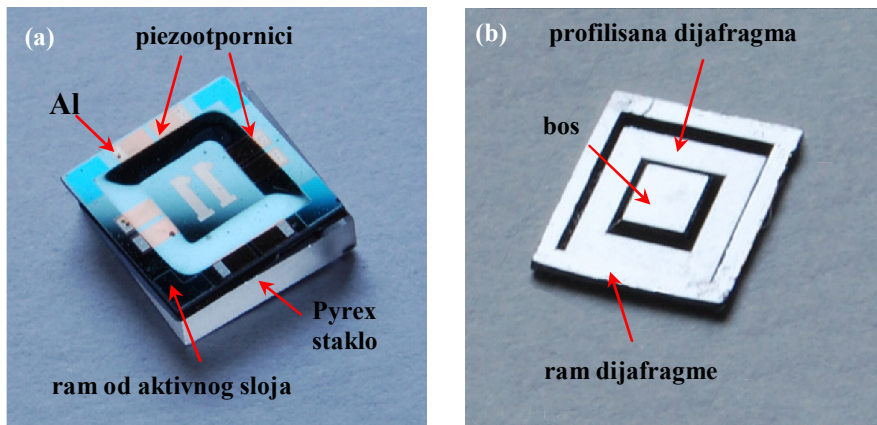
- nagrivanje Si supstrata i aktivnog sloja SOI pločice u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 60⁰C da bi se realizovali reperi,
- II termička oksidacija (1.05 μm) za drugu masku projektovanu za *maskless* nagrivanje supstrata SOI pločice,
- fotolitografski postupak za drugu masku projektovanu za *maskless* nagrivanje supstrata SOI pločice,
- III termička oksidacija (0.58 μm) za treću masku projektovanu za *maskless* nagrivanje supstrata SOI pločice,
- fotolitografski postupak za treću masku projektovanu za *maskless* nagrivanje supstrata SOI pločice,
- *maskless* nagrivanje supstrata SOI pločice u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80⁰C kojim se realizuje profilisana dijafragma debljine 35 μm sa bocom oblika pravilne zarubljene piramide,
- skidanje preostalog silicijum dioksida,
- IV termička oksidacija (0.55 μm) za četvrtu masku projektovanu za *maskless* nagrivanje aktivnog sloja SOI pločice,
- fotolitografski postupak za četvrtu masku projektovanu za *maskless* nagrivanje aktivnog sloja SOI pločice,
- V termička oksidacija (0.28 μm) za petu masku projektovanu za *maskless* nagrivanje aktivnog sloja SOI pločice,
- fotolitografski postupak za petu masku projektovanu za *maskless* nagrivanje aktivnog sloja SOI pločice,
- *maskless* nagrivanje aktivnog sloja SOI pločice u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 60⁰C kojim se realizuju piezootpornici i ram,
- VI kratka termička oksidacija (debljina oksida manja od 0.1 μm) za pasivizaciju piezootpornika i rama,
- fotolitografski postupak za šestu masku projektovanu za otvore za metalne kontakte,

- metalizacija (nanošenje tankog sloja aluminijuma) u uređaju za spaterovanje Perkin-Elmer 2400,
- fotopostupak za sedmu masku za definisanje metalnih kontakata,
- uklanjanje viška metalizacije,
- legiranje na 450 °C.

Glavni princip *maskless* tehnike (Odeljak 4.4.3) je da se, posle prvog dela nagrivanja do određene dubine h_1 , skida drugi maskirajući materijal (u ovom slučaju SiO_2 od 0.58 μm sa bosa profilisane dijafragme, odnosno SiO_2 od 0.28 μm sa piezootpornika), a zatim se nastavlja drugi deo nagrivanja do projektovane dubine h_2 , tj. do formiranja željene strukture. Pri tome je deo strukture i dalje zaštićen prvim maskirajućim materijalom, a to je u ovom slučaju preostali SiO_2 od II termičke oksidacije za ram dijafragme, odnosno SiO_2 od IV termičke oksidacije za ram od aktivnog sloja SOI pločice, Slika 4.5d)-f). Zaštićeni deo strukture je viši od nezaštićenog (sa kojeg je skinut drugi maskirajući materijal) za dubinu drugog dela nagrivanja h_2 . Visina nezaštićenog dela silicijumske strukture (bosa i piezootpornika) je jednaka dubini h_1 prvog dela nagrivanja.

Dubina prvog dela nagrivanja supstrata SOI pločice h_1 u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C je 337 μm , a drugog dela h_2 je 90 μm . Pri izradi profilisane membrane sa središnjim bosom koji je određen ravnima {311}-{211} primenjena je *maskless* tehnika sa kompenzacijom konveksnog ugla, Slika 5.3c). Dubina prvog dela nagrivanja aktivnog sloja SOI pločice u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 60°C je 1 μm , a drugog dela 4.55 μm . Nagrivanje jako dopiranog aktivnog sloja se vrši na 60°C, jer je tada brzina nagrivanja silicijuma gotovo 3.5 manja od brzine nagrivanja na 80°C i iznosi 0.13 $\mu\text{m}/\text{min}$. Ova manja brzina omogućava bolju kontrolu nagrivanja aktivnog sloja SOI pločice. Ram u aktivnom sloju je visine 5.55 μm (računa se od ugrađenog silicijum dioksida SOI pločice), a piezootpornici su visine, tj. debljine oko 1 μm , Slika 5.5c), 5.6. Sa Slike 5.6 se vidi da piezootpornici imaju početnu površinsku koncentraciju oko $4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, jer je posle šest oksidacija osiromašeni aktivan sloj prisutan na rastojanju od 4.8 μm od površine ugrađenog SiO_2 . Osiromašeni sloj je odstranjen prilikom realizacije piezootpornika nagrivanjem u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 60°C.

Visokotemperaturni senzor SOI SP-11 se tehnološki razlikuje od svojih prethodnika, [78-79] jer izbačen proces difuzije piezootpornika, a uvedena *maskless* tehnika koja omogućava realizaciju silicijumske strukture na dva nivoa. *Maskless* tehnika omogućava i da se odstrani osiromašeni sloj bora u aktivnom sloju nastao tokom termičkih oksidacija, Slika 5.6. Takođe, *maskless* tehnika omogućava buduću zaštitu dijafragme od preopterećenja sa strane aktivnog sloja [83-84], Slika 5.5c). Anodnim bondovanjem Pyrex[®] stakla za ram sa strane aktivnog sloja ostaje rastojanje između bosa i staklene podloge koje omogućava pomeranje dijafragme. Visina rama je proračunata tako da u slučaju preopterećenja sa donje strane senzora dijafragma legne na gornje Pyrex[®] staklo i ne dođe do pucanja dijafragme.



Slika 5.7 – Fotografije čipa senzora pritiska SOI SP-11. a) Gornja strana senzora gde se vide piezootpornici i delovi rama. Na kraju tehnološkog ciklusa je izvršeno anodno bondovanje u vakuumu čipa sa strane supstrata na Pyrex[®] staklo. b) Donja strana senzora, pre anodnog bondovanja, gde se vidi kvadratna profilisana dijafragma sa bosom oblika pravilne zarubljene piramide određene ravnima $\{311\}$ - $\{211\}$ i ram dijafragme određen ravnima $\{111\}$.

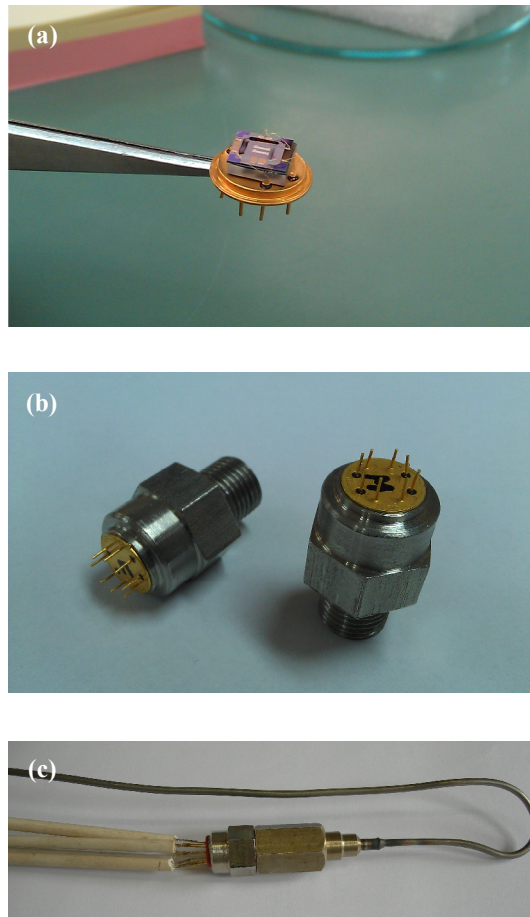
Posle završenih tehnoloških postupaka dobijen je čip čija je fotografija data na Slici 5.7. Na kraju tehnološkog ciklusa je izvršeno anodno bondovanje u vakuumu čipa sa strane supstrata na Pyrex[®] staklo. Dijafragma senzora je ugnuta (napregnuta) jer je sa njene donje strane vakuum, a sa gornje strane atmosferski pritisak, Slika 5.7a), 5.8a). Zahvaljujući tome što je realizovan uz pomoć *maskless* tehnike ovaj senzor poseduje

osobinu da mu je bos niži od rama za 90 μm . Ova osobina je rešila problem elektrostatičkog spajanja bosa i Pyrex[®] stakla pri anodnom bondovanju koji se javlja kod senzora kod kojih su ram i bos na istom nivou i gde je potrebno nagrizati Pyrex[®] staklo, Slika 5.5a), što je ranije u tekstu pomenuto.

5.3.2 Merna metoda

Prototip apsolutnog senzora dobijen je tako što je čip na staklenoj podlozi postavljen na tranzistorsko kućište tip TO-8 i povezan sa izvodnicama zlatnom žicom prečnika 25 μm , Slika 5.8a). Da bi se realizovao visokotemperaturni transdjuser podnožje je delimično zavareno za metalno kućište od čelika (Č.4574) na uređaju Slee Welder, Slika 5.8b). Zaptivanje je ostvareno tako što je zavareno mesto premazano Locitite 5398 silikonskim gelom za visoke temperature i pritiske do 20 bar-a. Na kućište je montirana metalna kapilara sa termički otpuštenom bakarnom zaptivkom u obliku prstena. Bakarne zaptivke su korišene zato što, za razliku od teflonskih, mogu izdržati visoke temperature. Na spoljne izvodnice TO-8 kućišta su zapunktovane žice od nikla, [78-79, 83]. Žice od nikla su stavljene u keramičku izolaciju, Slika 5.8c).

Formirana je nova merna metoda koja omogućava istovremenu primenu visoke temperature i pritiska direktno na senzor. Korišćena je peć Carbolite 2416 CG, koja ima temperaturnu regulaciju i tačnost od ± 1 $^{\circ}\text{C}$, Slika 5.9a) i davač pritiska Mensor sa tačnošću zadavanja pritiska od ± 1 mbar, Slika 5.9b). Na Mensor je povezana mehanička vakuum pumpa. Transdjuser je postavljen u peć Carbolite 2416 CG. Primenjene su temperature: 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 i 290 $^{\circ}\text{C}$. Preko kapilare su direktno na gornju stranu dijafragme senzora primenjeni pritisci od 50 i 250 mbar (sa korakom od 20 mbar) u odnosu na vakuum sa donje strane dijafragme. Vakuumska pumpa povezana u sistem za zadavanje pritiska nije u mogućnosti da održi stabilne vrednosti pritisaka ispod 50 mbar. Korišćen je izvor konstantne struje Keithley Programmable current source, a napon je meren sa Agilent Digital Multimeter 34410. Meren je izlazni napon mosta koji je napajan konstantnom strujom od 1 mA bez primenjene “spoljašnje” pasivne temperaturne kompenzacije.

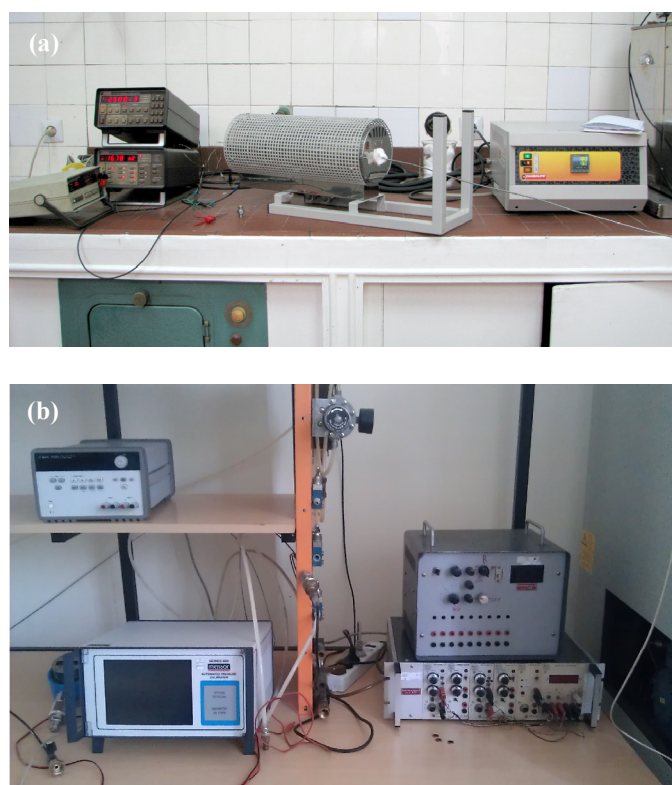


Slika 5.8 – Od čipa do transdjusera. a) Fotografija prototipa SOI SP-11 senzora dobijenog tako što je čip na staklenoj podlozi postavljen na TO-8 podnožje i povezan sa izvodnicama zlatnom žicom prečnika $25\ \mu\text{m}$. b) Fotografija podnožja delimično zavarenog za metalno kućište od čelika na uređaju Slee Welder. c) Fotografija visokotemperaturnog transdjusera na koga je montirana metalna kapilara. Na spoljne izvodnice TO-8 kućišta su zapunktovane žice od nikla. Žice od nikla su stavljene u keramičku izolaciju.

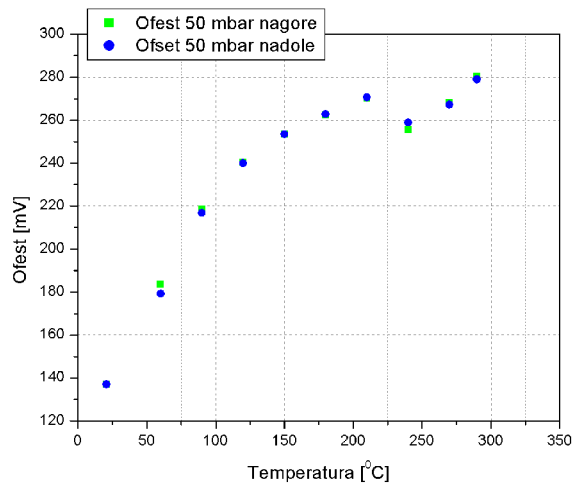
5.3.3 Karakterizacija i zaključci

Merene zavisnosti ofseta i napona pune skale za razne temperature su date na Slikama 5.10 i 5.11. Napon pune skale predstavlja razliku izlaznog napona na pritisku od 250 mbar i ofseta na datoj temperaturi. Ofset je u stvari izlazni signal senzora na pritisku od 50 mbar, jer nije moguće postignuti vakuum sa gornje strane dijafragme. Primenjeni

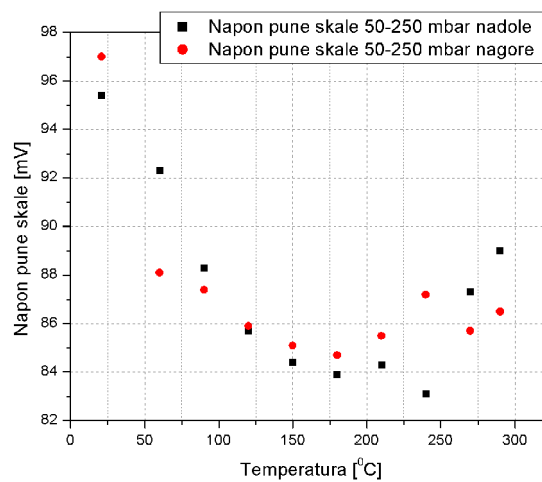
vakuum sa gornje strane bi postavio dijafragmu u nenapregnuti položaj i mereni izlazni napon bi bio realan ofset. Na svakoj temperaturi pritisak je meren podizanjem pritiska naviše sa 50 na 250 mbar i spuštanjem naniže sa 250 na 50 mbar. Histerezis je bio manji od 1 mV. Osetljivost se menja sa temperaturom i u opsegu je 0.42-0.49 mV/mbar. Senzor ispravno radi na temperaturama do 300⁰C. Ukoliko se primeni temperatura viša od 300⁰C senzor postaje nestabilan i ne može se više upotrebljavati. Linearnost čipova je do 0.4% od pune skale za svaku temperaturu.



Slika 5.9 – Fotografije merne metode. a) Korišćena je peć Carbolite 2416 CG sa temperaturnom regulacijom i kapilara od nerđajućeg čelika vezana za sistem koji reguliše pritisak gasa da bi se istovremeno zadala visoka temperatura i pritisak u opsegu od 50 do 250 mbar. b) Sistem Mensor za regulaciju pritiska gasa koji je povezan na mehaničku vakuum pumpu.



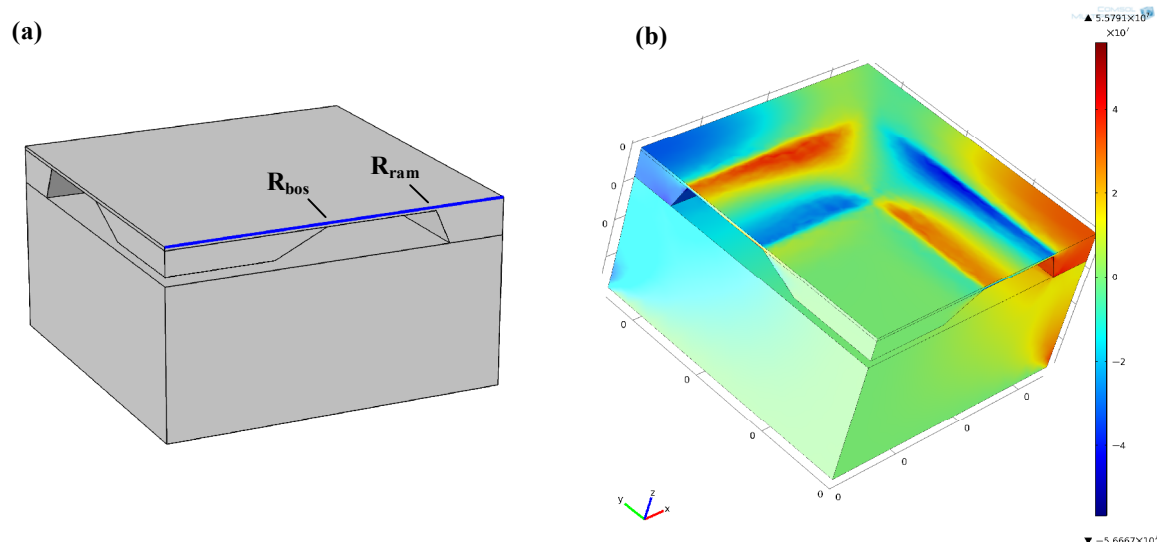
Slika 5.10 – Ofset transdjusera SOI SP-11 u zavisnosti od temperature.



Slika 5.11 – Napon pune skale transdjusera SOI SP-11 u zavisnosti od temperature za opseg od 200 mbara bez primenjene “spoljašnje” pasivne temperaturne kompenzacije.

Na Slikama 5.10 i 5.11 se primećuje prevoj ofseta i napona pune skale na temperaturama oko 240-270°C. Za razliku od njegovih prethodnih verzija za visoke temperature [78-79] kod SOI SP-11 ne postoji prelom napona pune skale na temperaturama od 180°C do 220 °C. Prethodne verzije senzora pritiska za visoke temperature su anodno bondovane na temperaturi od 350°C. Prelom se razlikuje kada se pritisak meri podizanjem

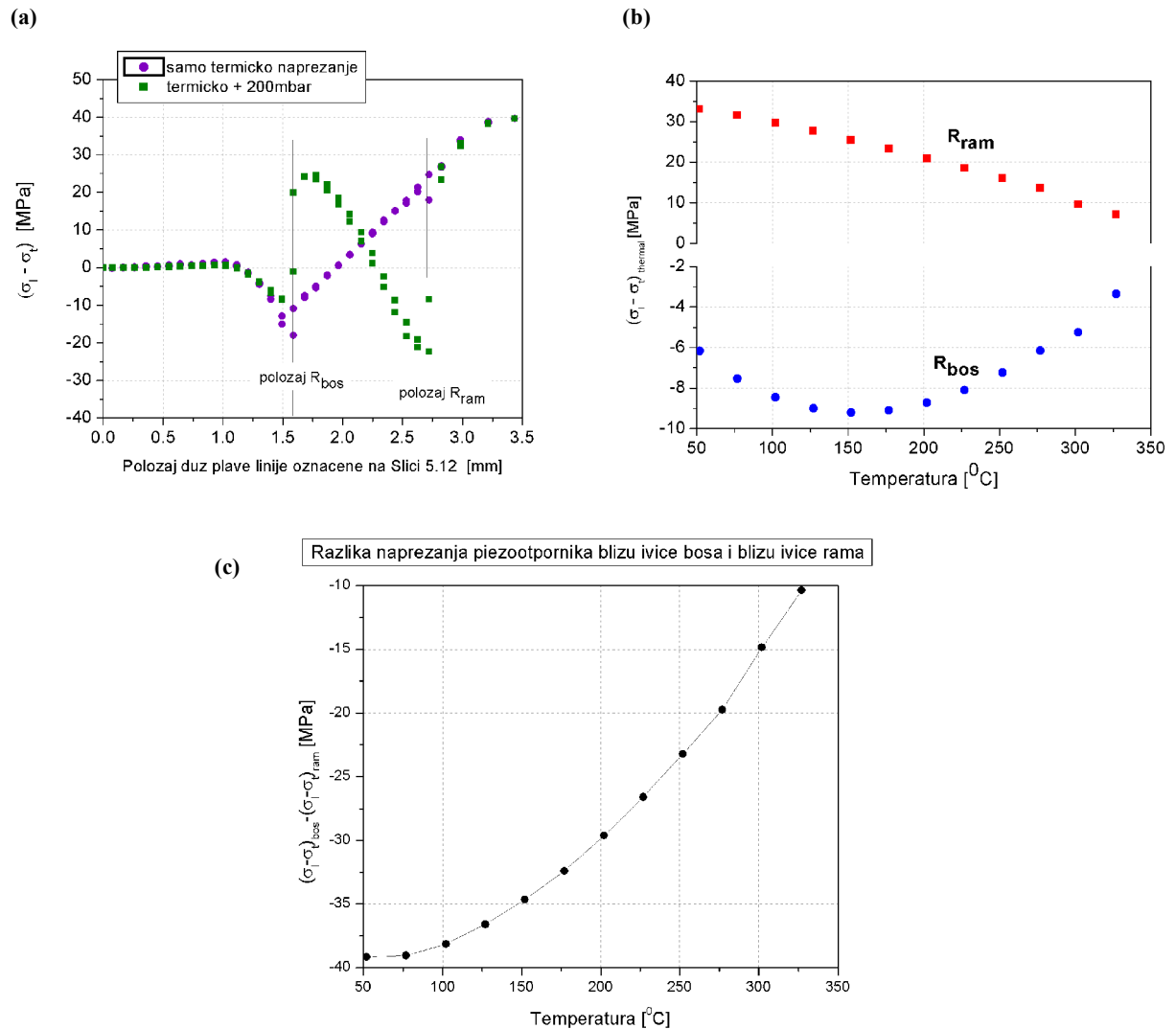
pritiska sa 50 na 250 mbar i spuštanjem sa 250 na 50 mbar. Naša pretpostavka je da je ovaj efekat posledica anodnog bondovanja i da nastaje usled različitih temperaturnih koeficijenata širenja Si i Pyrex[®] stakla, [83-84, 87]. Silicijumski čip SOI SP-11 i Pyrex[®] staklo se anodno bonduju na temperaturi od 380⁰C. Na ovoj temperaturi struktura Si-Pyrex[®] staklo je nenapregnuta, jer oba materijala imaju približno jednake temperaturne koeficijente širenja na temperaturama oko 380⁰C, [87]. Silicijum i Pyrex[®] staklo imaju različite temperaturne koeficijente širenja na nižim temperaturama. Različiti temperaturni koeficijenti širenja dovode do dodatnog termo-mehaničkog napreznja senzora i direktno utiču na ofset, odnosno napon pune skale.



Slika 5.12 – Simulacija u softverskom paketu COMSOL Multiphysics jedne četvrtine geometrije senzorskog čipa. a) Pravac duž sredine rama, dijafragme i središnjeg ojačanja-bosa (pravac $\langle 110 \rangle$) za koga se uzimaju rezultati simulacije. Dat je položaj piezootpornika blizu ivice bosa R_{bos} i položaj piezootpornika blizu ivice rama R_{ram} . b) Raspored napreznja za primenjen pritisak od 200 mbara i na temperaturi 227⁰C (referentna temperatura je 380⁰C) sa dodatnim termo-mehaničko napreznjem usled različitih temperaturnih koeficijenata širenja Si i Pyrex^R stakla.

Na Slikama 5.12 i 5.13 su dati rezultati simulacije u softverskom paketu COMSOL Multiphysics koji pokazuju uticaj dodatnog termo-mehaničkog napreznja u dijafragmi, [84]. Simulacija na Slici 5.13b) pokazuje da se sa porastom temperature napreznje Si-

Pyrex[®] smanjuje i da je uticaj dodatnog termo-mehaničkog napreznja različit za piezootpornike blizu ivice bosa i piezootpornike blizu ivice rama.



Slika 5.13 – Simulacija u softverskom paketu COMSOL Multiphysics. a) Raspored razlike napreznja u longitudinalnom i transverzalnom pravcu za primenjen pritisak od 200 mbara i na temperaturi 227⁰C (referentna temperatura je 380⁰C) sa dodatnim termo-mehaničkim napreznjem usled različitih temperaturnih koeficijenata širenja Si i Pyrex[®] stakla duž sredine rama, dijafragme i bosa. b) Razlika napreznja u longitudinalnom i transverzalnom pravcu na otpornicima kada nije primenjen pritisak (referentna temperatura je 380⁰C). c) Razlika napreznja piezootpornika blizu ivice bosa i piezootpornika blizu ivice rama sa slike b). Ofset senzora je srazmeran ovoj razlici.

Izlaz senzora napajanog konstantnom strujom I je dat izrazom [10]:

$$\Delta V = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R}{R_{bos}} - \frac{\Delta R}{R_{ram}} \right) I = I \frac{\pi_{44}}{4} \left((\sigma_l - \sigma_t)_{bos} - (\sigma_l - \sigma_t)_{ram} \right), \quad (5.1)$$

gde su date relativne promene otpornosti piezootpornika blizu ivice bosa R_{bos} i blizu ivice rama R_{ram} predstavljene preko piezokoefficienta π_{44} i razlike naprezanja u longitudinalnom pravcu σ_l i transverzalnom pravcu σ_t . Kada nije primenjen pritisak ofset ΔV bi trebalo da ima vrednost nula. Međutim, zbog dodatnog termo-mehaničkog naprezanja njegova vrednost je različita od nule i menja se sa temperaturom. Na Slici 5.13c) je data razlika naprezanja piezootpornika blizu ivice bosa i piezootpornika blizu ivice rama kad nije primenjen pritisak, pri čemu su korišćene vrednosti sa Slike 5.13b). Na temperaturama oko 270°C se primećuje mali prevoj, koji odgovara prevoju pri merenju ofseta senzora, Slika 5.10. Iz toga se može zaključiti da je to ranije pretpostavljeni uticaj različitih temperaturnih koeficijenata širenja silicijuma i Pyrex® stakla.

5.4 Ojačanje dijafragme senzora pritiska

Standardni IHTM-CMT silicijumski piezootporni senzori pritiska se ugrađuju na najkritičnijim mestima u industrijskim postrojenjima, termoelektranama, postrojenjima za transport gasa i nafte, itd. U svim ovim postrojenjima dolazi do mehaničkih oscilacija, udara, rezonantnih pojava koji ne mogu da se predvide, a mogu da dovedu do pucanja dijafragme i nepopravljivog oštećenja samog senzora pritiska. Zaštita dijafragme od pucanja moguća je spoljnim mehaničkim zaštitnim sistemom, ali takav uređaj zbog svojih fizičkih dimenzija, odnosno inercije svojih delova, ne može uvek da pruži potpunu zaštitu. Najoptimalnija zaštita za senzore pritiska je ona koja se radi unutar samog čipa primenom MEMS tehnologije.

U IHTM-CMT je razvijena zaštita od preopterećenja i pucanja kojom se ograničava ugib mikrometarski tanke dijafragme senzora. Izrađen je uložak, i sam mikrometarskih dimenzija, na koji se dijafragma osloni pre nego što se dostigne granica pucanja [88].

Uložak ne dozvoljava pomeranje dijafragme prilikom daljeg povećanja pritiska i time štiti dijafragmu od pucanja. Ova zaštita efikasno omogućava da dijafragma izdrži pritiske nekoliko stotina puta veće od vrednosti nominalnog pritiska za koji je projektovana. Jedina mana ovog rešenja je što se uložak izrađuje kao posebna komponenta i ugrađuje pod dijafragmu senzora tokom procesa anodnog bondovanja.

Druga vrsta zaštite, koja se radi integrisano na samom čipu senzora pritiska uz pomoć *maskless* tehnike, je tzv. ojačanje dijafragme senzora pritiska. Oštre ivice na prelazu kvadratne dijafragme u ram su mesta velikih mehaničkih naprezanja, Slika 5.1, i uzrokuju da pritisak na kome dijafragma puca ima nisku vrednost. Da bi se povećala vrednost pritiska pucanja izrađuje se profilisana dijafragma, tzv. dijafragma sa ojačanjem [28-31]. Profilisanje dijafragme može se ostvariti zadebljavanjem dijafragme na mestu oštih ivica [28-29], ili ublažavanjem konkavnog ugla preseka ravni (100) i {111}, zaobljavanjem vlažnim izotropnim hemijskim nagrivanjem [30] ili definisanjem novih ravni vlažnim anizotropnim hemijskim nagrivanjem, Slika 4.50f), koje zaklapaju veći konkavni ugao sa ravni (100) [27].

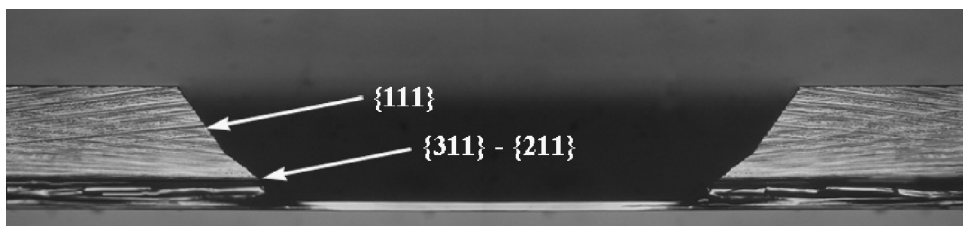
5.4.1 Izrada zaštite od preopterećenja ugrađene u senzorski čip primenom *maskless* tehnike u rastvoru TMAH

Ojačane i neojačane kvadratne dijafragme su izrađene *maskless* tehnikom u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C na pločicama jednostranog ili dvostranog poliranog monokristalnog silicijuma, n-tipa, orijentacije (100) i debljine 385 μm [27]. Korišćene su dve različite maske u dva fotolitografska postupka, Slika 4.50a),b). Ovakvo projektovanje maski omogućava definisanje stepenika širine W . Razlika W određuje oblik i dimenziju stepenika, odnosno ojačanja na kraju *maskless* nagrivanja.

Posle potrebnih simulacija radi određivanja parametara za tehnološke procese, vršeni su sledeći tehnološki postupci na izradi ojačane i neojačane dijafragme senzora pritiska na Si pločici:

- I termička oksidacija ($1.4 \mu\text{m}$) za prvu masku,
- I fotolitografski postupak sa prvom maskom, Slika 4.50a),
- II termička oksidacija ($0.6 \mu\text{m}$) za drugu masku,
- II fotolitografski postupak sa drugom maskom, Slika 4.50b),
- prvi deo nagrizanja Si pločice u vodenom rastvoru TMAH, Slika 4.50c),
- skidanje II sloja silicijum dioksida ($0.6 \mu\text{m}$) sa stepenika Slika 4.50d),
- *maskless* nagrizanje u vodenom rastvoru TMAH kojim se istovremeno na pločici realizuju i ojačana i neojačana dijafragma Slika 4.50f).

Kao što je rečeno u Odeljku 4.4.3, glavni princip *maskless* tehnike je da se posle prvog dela nagrizanja do određene dubine h_1 , skida drugi maskirajući materijal (u ovom slučaju II SiO_2 od $0.6 \mu\text{m}$ sa stepenika profilisane dijafragme), a zatim se nastavlja drugi deo nagrizanja do određene dubine h_2 tj. do formiranja željene strukture, pri čemu je deo strukture i dalje zaštićen prvim maskirajućim materijalom (u ovom slučaju I SiO_2 od $1.4 \mu\text{m}$ za ram dijafragme), Slika 4.50. Zaštićeni deo strukture na kraju nagrizanja je viši od nezaštićenog dela strukture (sa kojeg je skinut drugi maskirajući materijal) za dubinu h_3 koja zavisi od širine stepenika W . Visina zaštićenog dela strukture je jednaka zbiru dubine h_1 prvog dela nagrizanja i dubine h_2 drugog dela (*maskless*) nagrizanja u odnosu na dijafragmu.

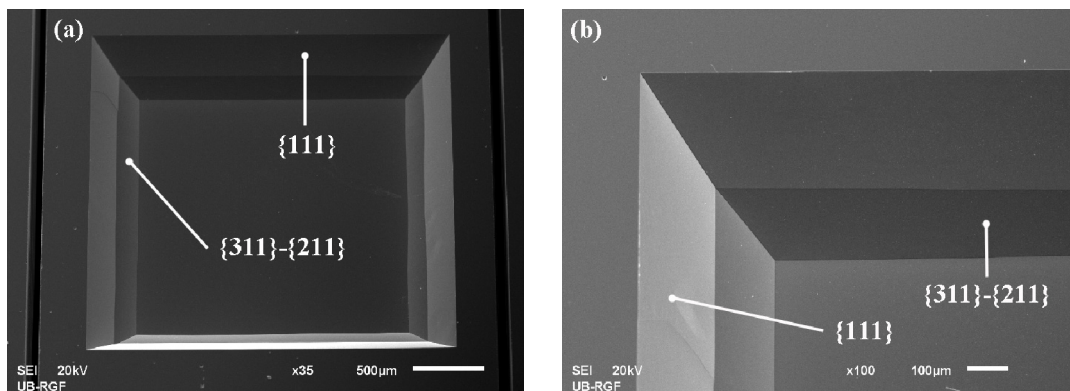


Slika 5.14 – Mikrofotografija ojačane dijafragme debljine $30 \mu\text{m}$. Trenutak kad nestane ravan $\{111\}$ i ojačanje je određeno samo ravnima $\{311\}$ i $\{211\}$ mora biti trenutak kada je završeno *maskless* nagrizanje.

Oblik ojačanja zavisi od širine stepenika. U trenutku kad se skine drugi termički oksid, konveksan ugao koji je određen presekom ravnima (100) i $\{111\}$ više nije zaštićen,

Slika 4.50d). Na preseku ravni $\{100\}$ i $\{111\}$ se razvijaju ravni $\{311\}$ i $\{211\}$, Slika 4.50e). Trenutak kad nestane ravan $\{111\}$ i stepenik je određen samo sa ravnima $\{311\}$ i $\{211\}$, mora biti trenutak kada je završeno *maskless* nagrizanje Slika 4.50f). Da bi se to dogodilo potrebno je da bude ispunjen uslov (4.51).

Dubina prvog dela nagrizanja h_1 Si pločice u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C je $286\ \mu\text{m}$, a drugog dela h_2 je $69\ \mu\text{m}$. Ostvarena je projektovana debljina dijafragme od $30\ \mu\text{m}$. Površina neojačane dijafragme je $2040\ \mu\text{m} \times 2040\ \mu\text{m}$. Granična vrednost razlike W_g da bi nestala ravan $\{100\}$, Slika 4.50e), 4.51a), i da bi ojačanje bilo određeno samo ravnima $\{311\}$ i $\{211\}$ je $195\ \mu\text{m}$ (izraz (4.54)). Za projektovane razlike W od $100\ \mu\text{m}$ i $50\ \mu\text{m}$ na drugoj maski, dobijene su redom širine ojačanja $90\ \mu\text{m}$ i $40\ \mu\text{m}$ [27]. Razlika između projektovane i dobijene širine je posledica male ali konačne brzine nagrizanja ravni $\{111\}$ koja se ne može zanemariti, izraz (4.55), Tabela 4.1. Visine ojačanja u odnosu na dijafragmu su $124\ \mu\text{m}$ i $51\ \mu\text{m}$ redom za širine ojačanja $90\ \mu\text{m}$ i $40\ \mu\text{m}$.

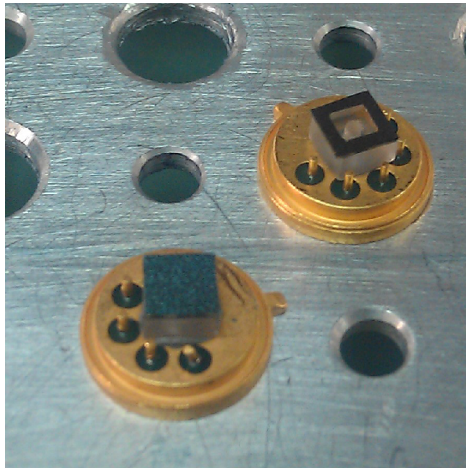


Slika 5.15 – SEM slike ojačane dijafragme debljine $30\ \mu\text{m}$. a) Ojačanje je određeno samo ravnima $\{311\}$ i $\{211\}$. b) Uvećan detalj sa slike a).

Posle završenih tehnoloških postupaka dobijeni su čipovi bez ojačanja, sa ojačanjem širine $90\ \mu\text{m}$ i sa ojačanjem širine $40\ \mu\text{m}$ čije su spoljne dimenzije $3200\ \mu\text{m} \times 3200\ \mu\text{m}$, Slika 5.1, 5.14-5.15. Na kraju tehnološkog ciklusa je izvršeno anodno bondovanje čipa za Pyrex[®] staklo sa otvorom, Slika 5.16.

5.4.2 Merna metoda

Uzorak silicijumske strukture za merenje se dobija tako što se čip na staklenoj podlozi lepi na tranzistorsko TO5 kućište sa otvorom za merenje relativnog pritiska, Slika 5.16. Pritisak je primenjen sa gornje strane silicijumske strukture i povećavan je do pucanja dijafragme. Pritisak je meren manometrom firme Keller sa opsegom merenja do 200 bar [27], Slika 5.17. Manometar očitava maksimalnu vrednost primenjenog pritiska koja predstavlja pritisak pucanja dijafragme. U trenutku pucanja dijafragme pritisak na manometru opada do vrednosti atmosferskog pritiska sa druge strane dijafragme.



Slika 5.16 - Čip silicijumske strukture je anodno bondovan na staklo i zalepljen na TO5 kućište sa otvorom. Na slici je probušena dijafragma na koju je primenjen pritisak pucanja i neoštećena dijafragma na koju je primenjen pritisak manji od pritiska pucanja [27].

5.4.3 Karakterizacija i zaključci

Nominalni radni opseg pritiska za neojačanu dijafragmu izabrane debljine 30 μm je 1 bar. Eksperiment je izvršen na više desetina uzoraka. Izmerene vrednosti pritiska pucanja za dijafragmu bez ojačanja, dijafragmu sa ojačanjem širine 90 μm i dijafragmu sa

ojačanjem širine 40 μm su redom 12 bar, 21 bar i 30 bar. Eksperiment [27] pokazuje da je ojačanje povećalo pritisak na kojem puca dijafragma 1.8 puta za dijafragmu sa ojačanjem širine 90 μm , odnosno 2.5 puta za dijafragmu sa ojačanjem širine 40 μm .

Više od polovine uzoraka svih tipova ima navedene vrednosti pritiska na kojima pucaju dijafragme. Rasipanje dobijenih vrednosti pritiska pucanja je verovatno posledica odstupanja maske od pravca $\langle 110 \rangle$ pri fotolitografskom postupku [30]. Svako odstupanje pri fotolitografskom postupku utiče na kvalitet ivica i strana i veličinu dijafragme. Drugi razlog za rasipanje je činjenica da su korišćene jednostrano i dvostrano polirane silicijumske pločice. Prema [30] nepoliranost tj. hrapavost gornje strane, kao i svaki drugi defekt u silicijumu, imaju veliki uticaj na izdržljivost tanke Si dijafragme na većim pritiscima. U našem radu sa dvostrano poliranim silicijumskim pločicama nismo dobili da je raspodela vrednosti dobijenih pritiska na kojima dijafragma puca uniformnija, kako se očekivalo.



Slika 5.17 - Merna metoda. Pritisak je meren manometrom firme Keller sa opsegom merenja do 200 bar [27].

Izmereno poboljšanje performansi senzora pritiska prilikom preopterećenja natpritiskom pokazuje da je u okviru izrade samog senzora primenom *maskless* tehnike

moгуće povećati vrednosti pritiska na kojima dolazi do pucanja dijafragme i do njenog nepopravljivog oštećenja. Ojačanje dijafragme je moguće primeniti i kod postojećih komercijalnih IHTM-CMT senzora pritiska SP-9 i SP-12 koji imaju ravnu dijafragmu.

6. Zaključak

Određeni su parametri od važnosti za vlažno anizotropno hemijsko nagrivanje monokristalnog silicijuma u vodenom rastvoru TMAH koji do sada i pored praktične važnosti tematike nisu bili publikovani u literaturi. Razvojem *maskless* tehnike vlažnog anizotropnog hemijskog nagrivanja silicijuma orijentacije (100) u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80°C ustanovljene su kristalografske ravni {211}, {331}, {311} i {301}. Preostale kristalografske ravni {411} i {511} su ustanovljene dodatnim nagrivanjem silicijumskih struktura određenih kvadratnim likovima stranica orijentisanih u različitim kristalografskim pravcima. Na osnovu geometrije silicijumskih struktura dobijenih nagrivanjem izveli smo analitičke izraze i odredili brzine nagrivanja za ravni {111}, {211}, {331}, {311}, {301}, {411} i {511}. Na osnovu eksperimentalno određenih brzina nagrivanja ravni i pojavljivanja i nestajanja određenih kristalografskih ravni tokom nagrivanja objašnjen je mehanizam nagrivanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH.

Predloženi mehanizam nagrivanja je objasnio nastanak svih trodimenzionalnih oblika u eksperimentima u okviru izrade ove disertacije, kao i pojave i efekte proučavane u radovima drugih autora. Mehanizam anizotropnog nagrivanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH iskorišćen je da bi se objasnila ograničenja tehnološkog procesa i omogućio je definisanje parametara novih tehnika nagrivanja, čiji je cilj prevazilaženje uočenih ograničenja. Objasnjena su ograničenja tehnološkog procesa koja nastaju usled podgrivanja ispod maskirajućeg sloja, podgrivanja konveksnih uglova i podgrivanja konkavnih uglova. Razvijene su tehnike kompenzacije konveksnih i konkavnih uglova i tehnika *maskless* nagrivanja. Dobijeni parametri nagrivanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH i osvojenih tehnika nagrivanja predstavljaju nove rezultate na svetskom nivou. Osvojene tehnike nagrivanja u vodenom rastvoru TMAH proverene su u izradi različitih

trodimenzionalnih silicijumskih struktura, novih MEMS senzora i poboljšavanju postojećih senzorskih struktura.

Primenom razvijenih tehnika kompenzacije konveksnih i konkavnih uglova i tehnike *maskless* nagrizanja izrađen je značajan broj različitih trodimenzionalnih silicijumskih struktura. Ove trodimenzionalne silicijumske strukture i njihove kombinacije se mogu iskoristiti u izradi različitih MEMS senzora i aktuatora u oblastima mikrofluidike, mehaničkih, termoelektričnih, hemijskih i bioloških senzora.

Korišćenjem SOI pločica i *maskless* tehnike zasnovane na vlažnom hemijskom nagrizanju u vodenom rastvoru TMAH uspešno je napravljen prototip apsolutnog visokotemperaturnog senzora za niže pritiske SOI SP-11. Kako p-n spoj ne postoji, izbegnuta je struja curenja, a opseg radnih temperatura je proširen tako da je gornja granica pomerena sa 120⁰C na 300⁰C. Ukoliko se primeni temperatura viša od 300⁰C, senzor postaje nestabilan. Prototip ima kvadratnu profilisanu dijafragmu u obliku centriranog središnjeg ojačanja – bosa oblika pravilne zarubljene piramide. Ovako profilisana dijafragma omogućava dobru linearnost odziva senzora tokom merenja nižih pritisaka do 250 mbar. Ovaj senzor, zato što je realizovan *maskless* tenikom, ima osobinu da mu je bos niži od rama, čime se rešava problem elektrostatičkog spajanja bosa i Pyrex[®] stakla pri anodnom bondovanju (koji postoji kada su ram i bos na istom nivou).

Primenom *maskless* tehnike zasnovane na vlažnom hemijskom nagrizanju u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na temperaturi od 80⁰C, na silicijumskim pločicama orijentacije (100) uspešno su napravljene dijafragme sa ojačanjem. Primenom pritiska na neojačane i ojačane dijafragme dobijene su vrednosti pritisaka na kojima dijafragme pucaju. Vrednosti pritisaka na kojima ojačane dijafragme pucaju su veće do 2.5 puta od pritiska pucanja neojačane dijafragme. Ovo poboljšanje pokazuje da je u okviru izrade samog senzora primenom *maskless* tehnike moguće povećati vrednosti pritiska na kojima dolazi do pucanja dijafragme i njenog nepopravljivog oštećenja i time poboljšati izdržljivost senzora na preopterećenja.

Objašnjeni mehanizam, osvojene tehnike anizotropnog nagrizanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH i njihova primena u dobijanju različitih trodimenzionalnih

silicijumskih struktura daju smernice za buduće projektovanje i tehnološku izradu novih MEMS senzora i aktuatora.

U okviru ove doktorske disertacije autorka je ostvarila sledeće rezultate:

- Objasnjeno je mehanizam nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na 80°C, koji do sada u literaturi nije bio niti određen niti objašnjen.
- Na osnovu sopstvenih eksperimentalnih rezultata izvedeni su analitički izrazi i određene su brzine nagrizanja kristalografskih ravni {100}, {311}, {211}, {301}, {331}, {111}, {411} i {511}.
- Određena su ograničenja tehnološkog procesa nagrizanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % na 80°C - podgrizanje ispod maskirajućeg sloja silicijum dioksida, podgrizanje konveksnog ugla i podgrizanje konkavnog ugla.
- Osvojene su tehnike kompenzacije konveksnih, konkavnih uglova i *maskless* nagrizanja koje su omogućile realizovanje različitih trodimenzionalnih silicijumskih struktura. Za svaku tehniku su izvedene analitičke formule potrebne za njenu primenu u projektovanju i realizaciji senzorskih i aktuatorskih struktura. Na osnovu analitičkih formula i parametara osvojenih tehnika eksperimentalno je izrađen niz silicijumskih struktura koje su potvrdile njihovo važenje.
- Primenom *maskless* tehnike nagrizanja izrađen je prototip novog apsolutnog visokotemperaturnog senzora za niže pritiske SOI SP-11 koji radi na temperaturama do 300°C. Razvijena je merna metoda i izvršena je karakterizacija prototipa senzora SOI SP-11.
- Primenom *maskless* tehnike nagrizanja uspešno su napravljene dijafragme sa ojačanjem koje predstavljaju poboljšanje postojeće senzorske strukture. Formirana je merna metoda i izvršena je karakterizacija poboljšanja senzorske strukture.

Tokom rada na doktorskoj disertaciji ukupno vreme nagrizanja svih pločica u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. % je bilo 630 h (u proseku 4 h dnevno). Potrošeno je 55 silicijumskih pločica prečnika 3'' (6 dvostrano poliranih i 49 jednostrano poliranih), 2 SOI pločice prečnika 4'' i 11 litara vodenog rastvora TMAH koncentracije 25 tež. %. Projektovano je tri seta maski za senzor SOI SP-11 čiji su likovi crtani laserom direktno na supstrat sa fotorezistom, 13 maski čiji su likovi izrađeni na emulzionim ili hromnim fotopločama i 11 maski čiji su likovi crtani laserom direktno na supstrat sa fotorezistom.

Pri izradi ove disertacije korišćeni su rezultati autora prikazani u radovima [53] (publikovan u vrhunskom međunarodnom časopisu), [51-52, 84] (saopštenja na međunarodnom skupu štampana u celini), [26-27, 54, 78-79, 83, 88] (saopštenja na nacionalnom skupu štampana u celini) i [9] (magistarski rad).

Literatura

- [1] V. Lindroos, M. Tilli, A. Lehto, T. Motooka, *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, William Andrew Applied Science Publishers, Elsevier, 2010.
- [2] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White, *MEMS mechanical sensors*, Artech House, Inc, 2004.
- [3] M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, 1997.
- [4] A. Anselm, *Introduction to semiconductor theory*, Mir Publishers, Moscow, 1981.
- [5] J. J. Allen, *Micro Electro Mechanical System Design*, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2005.
- [6] N. Simičić, *Manufacturing processes for micromechanical components*, Course, Beograd, 1995.
- [7] M. Elwenspoek, *Etching technology*, Course, Neuchatel, Switzerland, 1995.
- [8] J. Frühauf, *Shape and Functional Elements of the Bulk Silicon Microtechnique*, Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [9] **M. M. Smiljanić**, *Piezootporni senzori za visoke temperature i niže pritiske*, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu, 2009.
- [10] S. M. Sze, *Semiconductor sensors*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1994.
- [11] N. Maluf, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Artech House, Boston London, 2000.
- [12] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silicon/mcs-2011-simet.pdf>
- [13] Y.B. Gianchandani, O. Tabata, H. Zappe, *Comprehensive microsystems*, Elsevier, 2007.
- [14] J. G. Korvnik, O. Paul, *MEMS: a practical guide to design, analysis and applications*, William Andrew Publishing, Springer, 2006.

- [15] G. C. M. Meijer, A. W. Herwaarden, *Thermal Sensors*, Bristol, IOP Publishing 1994.
- [16] D. Randjelović, A. Petropoulos, G. Kaltsas, M. Stojanović, Ž. Lazić, Z. Djurić, M. Matić, “Multipurpose MEMS Thermal Sensor Based on Thermopiles”, *Sensors & Actuators A*, Vol. 141, pp. 404-413, 2008.
- [17] D. Randjelović, **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, M. Popović, “Poboljšanje performansi višenamenskog senzora sa termoparovima primenom sopstvene MEMS tehnologije za izradu SOI piezorezistivnih senzora pritiska”, *Zbornik radova 56. Konferencije ETRAN*, Zlatibor, 11-14. Jun, 2012, MO3.3-1-4.
- [18] M. A. Green, “The Path to 25% Silicon Solar Cell Efficiency: History of Silicon Cell Evolution”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* Vol. 17, pp. 183-189, 2009.
- [19] M. A. Smiljanić, Z. Djurić, D. Leković, Ž. Lazić, D. Jevtić, J. Matović, “Dark Current Analysis of Silicon PIN Photodiodes”, *Proc. XIV Yugoslav Conference on Microelectronics MIEL*, Beograd, Vol. II, pp. 579-586, 1986.
- [20] A. A. Barlian, W.T. Park, J. R. Mallon Jr, A. J. Rastegar, and B. L. Pruitt, “Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems”, *Proc IEEE Inst Electr Electron Eng.* Vol. 97(3), pp. 513–552, 2009.
- [21] M. Bao, *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*, Elsevier, 2005.
- [22] C. Liu, *Foundations of MEMS*, Pearson Prentice Hall, 2006.
- [23] S. Franssila, *Introduction to Microfabrication*, John Wiley&Sons, Ltd, 2004.
- [24] H. Seidel, L. Csepregi, A. Hauberger, H. Baumgartel, “Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions”, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 137, No. 11, 1990.
- [25] V. Jović, M. Popović, J. Lamovec, “Preciznost anizotropnog hemijskog nagrivanja”, *Zbornik radova 52. Konferencije ETRAN*, Palić, 8-12. Jun, 2008, MO2.2-1-4.
- [26] Ž. Lazić, **M. M. Smiljanić**, Z. Đurić, M. Popović, J. Matović, “SOI piezootporna SiO₂ mikrogredica-oslobađanje vlažnim hemijskim nagrivanjem”, *Zbornik radova 51. Konferencije ETRAN*, Herceg Novi - Igalo, 4 – 8. Jun, 2007, MO3.7.

- [27] **M. M. Smiljanić**, M. Matic, K. Radulović, Ž. Lazić, V. Jović, “Ojačanje dijafragme senzora pritiska nagrizanjem u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. %”, *Zbornik radova 56. Konferencije ETRAN*, Zlatibor, 11-14. Jun 2012, MO3.1-1-4.
- [28] S. Aravamudhan, S. Bhansali, “Reinforced piezoresistive pressure sensor for ocean depth measurements”, *Sensors and Actuators A*, Vol 142, pp. 111-117, 2008.
- [29] K. Schjolberg-Henriksen, D.T. Wang, H. Rogne, A. Ferber, A. Vogl, S. Moe, R. Bernstein, D. Lapadatu, K. Sandven, S. Brida, “High-resolution pressure sensor for photo acoustic gas detection”, *Sensors and Actuators A*, Vol 132, pp.207-213, 2006.
- [30] A.K. Henning, S. Patel, M. Selser, B.A. Cozad, “Factors affecting silicon membrane burst strength”, *Proceedings of SPIE*, Vol. 5343, pp. 145-153, 2004.
- [31] A. Gotz, F. Campabadal, C. Cane, “Improvement of pressure-sensor performance and process robustness through reinforcement of the membrane edges”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 67, pp. 138-141, 1998.
- [32] I. Zobel, “Silicon anisotropic etching in alkaline solution III: On the possibility of spatial structures forming in the course of Si (100) anisotropic etching in KOH and KOH+IPA solutions”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 84, pp. 116-125, 2000.
- [33] W. T. Chang Chien, C. O. Chang, Y. C. Lo, Z. W. Li, C. S. Chou, “On the Miller-indices determination of Si_{100} convex corner undercut planes”, *J. Micromech. Microeng.* Vol. 15, pp. 833-842, 2005.
- [34] I. Zobel, I. Barycka, K. Kotowska, M. Kramkowska, “Silicon anisotropic etching in alkaline solution IV: The effect of organic and inorganic agents on silicon anisotropic etching process”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 87, pp. 163-171, 2001.
- [35] D. Resnik, D. Vrtacnik, U. Aljancic, S. Amon, “Wet etching of silicon structures bounded by (311) sidewalls”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 51-52, pp. 555-566, 2000.

- [36] D. Resnik, D. Vrtacnik, S. Amon, "Morphological study of {311} crystal planes anisotropically etched in (100) silicon: role of etchants and etching parameters", *J. Micromech. Microeng.* 10, pp. 430-439, 2000.
- [37] H. K. Trieu, W. Mokwa, "A generalized model describing corner undercutting by the experimental analysis of TMAH/IPA", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 8, pp. 80-83, 1998.
- [38] D. Randelović, *Višenamenski mikroelektromehanički (MEMS) termalni senzori na bazi Zebekovog efekta*, Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2008.
- [39] V. Jović, D. Randelović, M. Popović, "Anizotropno nagrivanje monokristalnog Si u rastvorima TMAH-a sa dodatkom etanola: morfološke i kinetičke odlike", *Zbornik radova 49. Konferencije ETRAN*, Budva, 5-10. Jun 2005, Vol. 4, str. 181-184.
- [40] P. Pal, K. Sato, M. Shikida, M. A. Gosalvez, "Study of corner compensating structures and fabrication of various shape of MEMS structures in pure and surfactant added TMAH", *Sensors and Actuators A*, Vol. 154, pp.192-203, 2009.
- [41] P. Pal, K. Sato, M. A. Gosalvez, M. Shikida, "Study of rounded concave and sharp edge convex corners undercutting in CMOS compatible anisotropic etchants", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 17, pp. 2299-2307, 2007.
- [42] M. Shikida, K. Sato, K. Tokoro, D. Uchikawa, "Differences in anisotropic etching properties KOH and TMAH solutions", *Sensors and Actuators A*, Vol. 80, pp. 179-188, 2000.
- [43] R. Mukhiya, A. Bagolini, B. Margesin, M. Zen, S. Kal, "<100> bar corner compensation for CMOS compatible anisotropic TMAH etching", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 16, pp. 2458-2462, 2006.
- [44] A. Bagolini, A. Faes, M. Decarli, "Influence of etching potential on convex corner anisotropic etching in TMAH solution", *IEEE J. Microelectromech. Syst.* Vol. 19 No. 5, pp. 1254-1259, 2010.
- [45] K. Sato, M. Shikida, T. Yamashiro, K. Asami, Y. Iriye, M. Yamamoto, "Anisotropic etching rates of single-crystal silicon for TMAH water solution as a

- function of crystallographic orientation”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 73, pp. 131-137, 1999.
- [46] H. Yang, M. Bao, S. Shen, X. Li, D. Zhang, G. Wu, “A novel technique for measuring etch rate distribution of Si”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 79, pp. 136-140, 2000.
- [47] M. Gad el Hak, *MEMS: Design and Fabrication*, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2006.
- [48] X. Li, M. Bao, S. Shen, “Maskless etching of three-dimensional silicon structures in KOH”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 57, pp. 47-52, 1996.
- [49] A. Koide, K. Sato, S. Suzuki, M. Miki, “A multistep anisotropic etching process for producing 3-D silicon accelerometers”, *Technical Digest of the 11th Sensor Symposium* 23-26, 1992.
- [50] I. B. Kang, M. R. Haskard, N. D. Samaan, “A study of two-step silicon anisotropic etching for a polygon-shaped microstructure using KOH solution”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 62, pp. 646-651, 1997.
- [51] V. Jović, J. Lamovec, **M. M. Smiljanić**, M. Popović, “Micromachining by Maskless Wet Anisotropic Chemical Etching {hkl} Structures on {100} Oriented Silicon”, *Proc. 27th Internat. Conf. on Microelectronics MIEL*, Niš, Serbia, 16-19 May 2010.
- [52] V. Jović, **M. M. Smiljanić**, J. Lamovec, M. Popović, “Microfabrication of Maskless-Mask Wet Anisotropic Etching for Realization of Multilevel Structures in {100} Oriented Si”, *Proc. 28th Internat. Conf. on Microelectronics MIEL*, Niš, Serbia, 13-16 May 2012, pp. 139-142.
- [53] **M. M. Smiljanić**, V. Jović, Ž. Lazić, “Maskless convex corner compensation technique on a (100) silicon substrate in a 25 wt % TMAH water solution”, *J. Micromech. Microeng.* Vol. 22, No. 11, pp. 115011-115021, 2012.
- [54] **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, Z. Đurić, K. Radulović, “Dizajn i modelovanje modifikovanog senzora niskih pritisaka IHTM-CMTM SP-6”, *Zbornik radova 51. Konferencije ETRAN*, Herceg Novi - Igalo, 4 – 8. Jun, 2007, MO3.2.

- [55] X. P. Wu, W. H. Ko, "Compensating corner undercutting in anisotropic etching of (100) silicon", *Sensors and Actuators A*, Vol. 18, pp. 207-215, 1989.
- [56] G. K. Mayer, H. L. Offereins, H. Sandmaier, K. Kühl, "Fabrication of non-underetched convex corners in anisotropic etching of (100)-silicon in aqueous KOH with respect to novel micromechanic elements", *J. Electrochem. Soc.* Vol. 137, No. 12, pp. 3947-3951, 1990.
- [57] B. Puers, W. Sansen, "Compensation structures for convex corner micromachining in silicon", *Sensors and Actuators A*, Vol. 21-23, pp. 1036-1041, 1990.
- [58] H. L. Offereins, K. Kühl, H. Sandmaier, "Methods for the fabrication of convex corners in anisotropic etching of (100) silicon in aqueous KOH", *Sensors and Actuators A*, Vol. 25-27, pp. 9-13, 1991.
- [59] M. Bao, C. Burrer, J. Esteve, J. Bausells, S. Marco, "Etching front control of <110> strips for corner compensation", *Sensors and Actuators A*, Vol. 37-38, pp. 727-732, 1993.
- [60] Q. Zhang, L. Liu, Z. Li, "A new approach to convex corner compensation for anisotropic etching of (100) Si in KOH", *Sensors and Actuators A*, Vol. 56, pp. 251-254, 1996.
- [61] P. Enoksson, "New structures for corner compensation in anisotropic KOH etching", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 7, pp. 141-144, 1997.
- [62] P. Pal, S. Chandra, "A novel process for perfect convex corner realization in bulk micromachining", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 14, pp. 1416-1420, 2004.
- [63] W. Fan, D. Zhang, "A simple approach to convex corner compensation in anisotropic KOH etching on a (100) silicon wafer", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 16, pp. 1951-1957, 2006.
- [64] P. Pal, K. Sato, S. Chandra, "Fabrication techniques of convex corners in a (100)-silicon wafer using bulk micromachining: a review", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 17, pp. R111-R133, 2007.
- [65] X. Li, R. Lin, J. Miao, M. Bao, "Study on convex-corner undercutting formed by masked-maskless etching in aqueous KOH", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 10, pp. 309-313, 2000.

- [66] H. Schroder, E. Obermeier, "A new model for $\text{Si}_{\{100\}}$ convex corner undercutting in anisotropic KOH etching", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 10, pp. 163-170, 2000.
- [67] H. Schroder, E. Obeimeier, A. Horn, G. K. M. Wachutka, "Convex corner undercutting of $\{100\}$ silicon in anisotropic KOH etching: the new step-flow model of 3-D structuring and first simulation results", *IEEE J. Microelectromech. Syst.* Vol. 10 No. 1, pp. 88-97, 2001.
- [68] M. Shikida, K. Nanbara, T. Koizumi, H. Sasaki, M. Odagaki, K. Sato, M. Ando, S. Furuta, K. Asami, "A model explaining mask-corner undercut phenomena in anisotropic silicon etching: a saddle point in the etching-rate diagram", *Sensors and Actuators A*, Vol. 97-98, pp. 758-763, 2002.
- [69] K. Sato, K. Asami, G. Kobayashi, Y. Iriye, M. Shikida, "Development of an orientation-dependent anisotropic etching simulation system MICROCAD", *Electronics and Communication in Japan, Part 2*, Vol. 83, No. 4, pp. 13-22, 2000.
- [70] R. P. van Kampen, R. F. Wolffenbuttel, "Effects of $\langle 110 \rangle$ -oriented corner compensation structures on membrane quality and convex corner integrity in (100)-silicon using aqueous KOH", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 5, pp. 91-94, 1995.
- [71] K. E. Bean, "Anisotropic etching of silicon", *IEEE Trans. Electron Devices* Vol. Ed-25 No. 10, pp. 1185-1193, 1978.
- [72] L. M. Landsberger, S. Naseh, M. Kahrizi, M. Paranjape, "On Hillocks Generated During Anisotropic Etching of Si in TMAH", *IEEE J. Microelectromech. Syst.* Vol. 5 No. 2, pp. 106-116, 1996.
- [73] B. Nikpour, L. M. Landsberger, T. J. Hubbard, M. Kahrizi, A. Ifimie, "Concave corner compensation between vertical (010)-(001) planes anisotropically etched in Si (100)", *Sensors and Actuators A*, Vol. 66, pp. 299-307, 1998.
- [74] X. Li, H. Yang, M. Bao, S. Shen, W. Wang, " $\langle 100 \rangle$ composite beam structure formed by masked-maskless etch of silicon", *J. Micromech. Microeng.* Vol. 9, pp. 264-269, 1999.

- [75] M. Bao, X. Li, S. Shen, H. Chen, "A novel micromachining technology for multilevel structures of silicon", *Sensors and Actuators A*, Vol. 63, pp. 217-221, 1997.
- [76] P. K. Kinnell, J. King, M. Lester, R. Craddock, "A hollow stiffening structure for low-pressure sensors", *Sensors and Actuators A*, Vol. 160, pp. 35-41, 2010.
- [77] H. Yang, S. Shen, M. Bao, J. Ren, J. Shen, D Lu, "A pressure transducer with a single-sided multilevel structure by maskless etching technology", *Mechatronic* 8, pp. 585-593, 1998.
- [78] **M. M. Smiljanić**, Z. Đurić, Ž. Lazić, M. Popović, K. Radulović, "Piezootporni senzori pritiska na SOI pločicama namenjeni funkcionisanju na visokim temperaturama", *Zbornik radova 49. Konferencije ETRAN*, Budva, 5-10. Jun 2005, Vol. 4, str. 185-186.
- [79] **M. M. Smiljanić**, Z. Đurić, Ž. Lazić, B. Popović, "SOI piezootporni senzor pritiska za opseg radnih temperatura od 60⁰C do 300⁰C", *Zbornik radova 52. Konferencije ETRAN*, Palić, 8-12. Jun, 2008, MO2.6-1-4.
- [80] P.W. Bath, K.E. Petersen, "Mechanical sensor for high temperature environments", U.S. Patent, 4 904 978, 1990.
- [81] K. Peterson, J. Brown, T. Vermeulen, P. Barth, J. Mallon, JR, J. Bryzek, "Ultra-stable, High-temperature Pressure sensors Using Silicon Fusion Bonding", *Sensors and Actuators A*, Vol. 21-A23, pp. 96-101, 1990.
- [82] S. Guo, H. Eriksen, K. Childress, A. Fink, M. Hoffman, "High temperature smart-cut SOI pressure sensor", *Sensors and Actuators A*, Vol. 154, pp. 255-260, 2009.
- [83] **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, K. Radulović, V. Jović, B. Popović, "Visokotemperaturni piezootporni senzor za niske pritiske SOI SP-11", *Zbornik radova 55. Konferencije ETRAN*, Banja Vrućica, 6-9. Jun 2011, MO3.3-1-4.
- [84] **M. M. Smiljanić**, K. Radulović, Ž. Lazić, V. Jović, B. Popović, "SOI piezoresistive low pressure sensor for high temperature environments", *Proc. 5th Internat. Sci. Conf. on Defensive Technologies OTEH 2012*, Belgrade, Serbia. 18-19 September 2012, pp. 422-426.

- [85] В.И. Ваганов, *Интегральные тензопреобразователи*, Энергоатомиздат, Москва, 1983.
- [86] S. Margalit, A. Neugroschel, A. Bar-Levi, "Redistribution of Boron and Phosphorous in Silicon After Two Oxidation Steps Used in MOST Fabrication", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.ED-19, No.7, 1972.
- [87] C. D. Tudryn, *Characterization of anodic bonding*, Master Thesis, MIT, 2004.
- [88] Ž. Lazić, **M. M. Smiljanić**, M. Popović, "Projektovanje uloška za zaštitu dijafragme senzora pritiska od preopterećenja", *Zbornik radova 48. Konferencije ETRAN*, Čačak, 6-10. Jun 2004, Vol. 4, str. 168-171.

Biografija

Milče Smiljanić je rođena 14. 04. 1978. u Beogradu, gde je završila Osnovnu školu “Branko Radičević” sa prosečnom ocenom 5.0 (kao đak generacije) i Matematičku gimnaziju sa prosečnom ocenom 5.0. U osnovnoj i srednjoj školi je osvojila veći broj nagrada i pohvala na takmičenjima iz matematike i fizike od opštinskog do saveznog nivoa.

Diplomirala je 2003. na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu na odseku za Fizičku elektroniku, smer Optoelektronika i laserska tehnika, sa prosečnom ocenom 9.33. Godine 2002. je bila na studentskoj praksi u Image Processing Group na University College of London.

Od 2003. radi u Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Centar za mikroelektronske tehnologije (IHTM-CMT). Magistarske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu je upisala 2003. godine i položila sve ispite sa ocenom 10. Magistrirala je 2009. godine odbranivši rad “Piezootporni senzori za visoke temperature i niže pritiske”. Od 2010. radi u zvanju istraživača saradnika i zamenica je rukovodioca laboratorije za mikroelektronske i MEMS tehnologije u IHTM-CMT.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а МИЛЧЕ М. СМОЛАНИЋ

број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

НОВЕ ПРИМЕНЕ ПРОЦЕСА НАПРИЗАЊА СИМИЉИЈУМА У
ВОДЕНОМ РАСТВОРУ ТМАХ У ИЗРАДИ МЕМС СЕНЗОРА

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 16.09.2013.

Милче Милче

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора МИЛУЕ М. СМИЉАНИЋ

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада НОВЕ ПРИМЕНЕ ПРОЦЕСА НАПРИЗАЊА СИЛИЦИЈУМА
У ВОДЕНОМ РАСТВОРУ ТМАХ У ИЗРАДИ МЕМС СЕНЗОРА

Ментори ДР ЗОРАН ЈАКШИЋ, НАУЧНИ САВЕТНИК, ИХТМ
ДР МИЛАН ТАДИЋ, РЕДОВНИ ПРОФЕСОР, ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Потписани/а Миљана Милуе

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 16.09.2013.

Миљана Милуе

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НОВЕ ПРИМЕНЕ ПРОЦЕСА НАПРИЗАЊА СИЛИЦИЈУМА У
ВОДЕНОМ РАСТВОРУ ТМАХ У ИЗРАДИ МЕМС СЕНЗОРА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 16.09.2013.

Јелена Јефсе