

M81-Novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na međunarodnom nivou

Autori: Branislav Radjenović, Milče M. Smiljanić, Marija Radmilović-Radjenović

Softver za simulaciju nagrivanja silicijuma LSPro

Ključne reči: level set metoda, silicijum, vlažno anizotropno hemijsko nagrivanje, TMAH, MEMS

Naručilac: NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Realizator: NU Institut za fiziku, NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Rukovodilac projekta: /

Godina izrade: 2014-2020.

Godina primene/primena od strane : 2020./ NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Naučna oblast: Tehničko-tehnološke nauke

Naučna disciplina: Elektronika, telekomunikacije i informacione tehnologije

Problem koji se rešava tehničkim rešenjem

U proizvodnji silicijumskih senzora koriste se tehnološki procesi koji se preuzeti su iz razvijenih tehnologija izrade integriranih kola. Tehnološki procesi trodimenzionalne mikroobrade silicijuma (mikromašinstvo) ne pripadaju tehnologijama izrade integriranih kola i postoji potreba za određivanjem i kontrolom parametara ovih procesa da bi se realizovale MEMS (Micro Electro Mechanical System) strukture [1-2]. MEMS strukture su sastavni delovi različitih vrsta senzora, aktuatora ili silicijumskih platformi i mogu predstavljati pokretne delove, različite vrste otvora za električne međuveze između slojeva, kao i mikrokanale i rezervoare (npr. u mikrofluidici).

U zapreminskom (bulk) mikromašinstvu MEMS strukture se proizvode nagrivanjem velikih zapremina supstrata. Najjeftiniji tehnološki procesi zapreminskog mikromašinstva silicijuma predstavljaju hemijska nagrivanja u različitim vodenim rastvorima jer se koriste jednostavne aparature i hemijska sredstva. Za razliku od izotropnog nagrivanja, kod hemijskih rastvora za anizotropno nagrivanje je bolja kontrola dimenzija nagrivanog strukture. Sredstva za anizotropno nagrivanje silicijuma za koje postoje kvalitetni maskirajući slojevi su etilen-diamin-pirokatehol (EDP), kalijum hidroksid (KOH) i tetrametilamonijum hidroksid (TMAH). U Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju-Centar za mikroelektronske tehnologije (IHTM-CMT) se koristi vodeni rastvor TMAH [1-17] jer prilikom nagrivanja ne dolazi do kontaminacije alkalnim jonima u maskirajućem sloju silicijum dioksida, što omogućava postprocesiranje silicijumskih supstrata.

U zapreminskom mikromašinstvu procesom vlažnog hemijskog nagrivanja odstranjuje se nepotrebn silicijum u otvoru maskirajućeg materijala i formiraju se kompleksni trodimenzionalni oblici. Dobijeni trodimenzionalni oblici predstavljaju neku vrstu projekcije dvodimenzionalnog, planarnog lika sa maske u treću dimenziju, koja je ovom slučaju debljina silicijumske pločice i prostiru se do dubine nagrivanja. Za vreme anizotropnog vlažnog hemijskog nagrivanja silicijuma u vodenom rastvoru TMAH

koncentracije 25 tež. % TMAH na temperaturi od 80 °C različite kristalografske ravni se nagrizzaju različitim brzinama. Zbog različitih brzina nagrizzanja neke ravni će se pojavljivati tokom nagrizzanja dok će druge nestajati [1-17]. Tokom nagrizzanja javlja se problem podgrizzanja konveksnih uglova i pojave određenih kristalografski ravni koje deformišu trodimenzionalne silicijumske strukture. Problem podgrizzanja se može rešiti direktnim uračunavanjem ove pojave u projektovanju i kompenzacijom dodavanjem viška materijala na mestima koja se brže nagrizzaju (strukture za kompenzaciju). Projektovanje željenog oblika u zapreminskom mikromašinstvu je najčešće veoma komplikovano i zahteva puno eksperimentalnog rada da bi se predvidelo kako se ponaša odgovarajuće sredstvo za nagrizzanje. Eksperimentalni rad zahteva potrošnju silicijumskih pločica i sredstva za nagrizzanje, kao i primenu procesa termičke oksidacije i hemijskih pranja u pripremi za eksperiment. Razvoj softvera za simulaciju nagrizzanja silicijuma u anizotropnom vodenom rastvoru smanjuje troškove razvoja i proizvodnje u IHTM-CMT jer se pre izrade silicijumske strukture mogu simulirati različite maske i izabrati onaj dizajn koji je najbolji.

Stanje rešenosti u svetu

Postoji veći broj komercijalnih i javno dostupnih (*open source*) programskih paketa za trodimenzionalno modelovanje vremenske evolucije površinske topografije pri procesu nagrizzanja i depozicije tokom fabrikacije mikro i nanoelektronskih elemenata. Kada su u pitanju *open source* paketi obično su teorijski koncepti i implementirane numeričke metode, kao i sam kod, dostupni korisnicima. U slučaju komercijalnih simulatora, najčešće je dostupno znatno manje detalja o implementiranoj metodologiji, ili ih nema uopšte. Ovde ćemo navesti one najvažnije:

-Victory Process [18] je komercijalni TCAD 1D, 2D i 3D simulator opšte namene koji distribuira *Silvaco*. Za nas je najvažniji modul paketa za trodimenzionalnu simulaciju procesa nagrizzanja i depozicije zasnovanom na različitim fizičkim modelima. Širok skup modela za nagrizzanje i depoziciju je implementiran u paketu, ali modele mogu da definišu i sami korisnici. Za evoluciju površine diskretizacija se vrši korišćenjem hijerarhijskih skupova funkcija nivoa (eng. hierarchical level set method).

-Sentaurus Topography 3D [19] je komercijalni simulator evolucije profila koji distribuira *Synopsis*. Omogućava trodimenzionalnu simulaciju procesa nagrizzanja i depozicije. Bazira se na konceptu modela koji definišu sami korisnici (slično *Victory Process*), ali omogućava i redefinisane modela za procese nagrizzanja i depozicije. Reprezentacija površine koja se koristi za evoluciju je takođe bazirana na metodi skupova funkcija nivoa (eng. level set method).

-SEmulator3D [20] je komercijalna platforma za trodimenzionalno modelovanje procesa koji distribuira *Coventor*. Koristi nespecificiranu sopstvenu metodologiju za praćenje evolucije površina. Slično gore pomenutim simulatorima, omogućava redefinisane modela za procese nagrizzanja i depozicije.

-ViennaTS [21] je topografski simulator *open source* tipa razvijen na Institutu za Mikroelektroniku, Tehničkog univerziteta u Beču (*Institute for Microelectronics, TU Wien*). Podržani su dvo- i trodimenzionalni modeli. Implementacija skupa funkcija nivoa je bazirana na metodi retkih polja korišćenjem HRLE metode (eng. hierarchical run-length encoded data structure) za redukciju memorijskih zahteva. Implementiran je skup unapređenih fizičkih modela za nagrizzanje i depoziciju. Modeli koje kreira sam korisnik se moraju rekompajlirati. Deo koji prati evoluciju površine i transport čestica je paralelizovan korišćenjem OpenMP metode.

1. Uvod

U ovom tehničkom rešenju je prikazan razvoj softvera za simulaciju nagrizanja silicijumskih struktura. Simulacija značajno smanjuje troškove razvoja i izrade različitih senzora, aktuatora i platformi čiji je sastavni deo silicijum obrađen zapreminskim hemijskim mikromašinstvom. Prvi deo je posvećen razvoju samog softvera. Drugi deo predstavlja korisnički interfejs. U ovom delu je dato uputstvo za korišćenje programa **LSPro**. U trećem delu su prikazani rezultati testiranja. Uporedo su date SEM mikrofotografije nagrizane silicijumske strukture u vodenom rastvoru TMAH i odgovarajući profili nagrizane strukture dobijeni simulacijom.

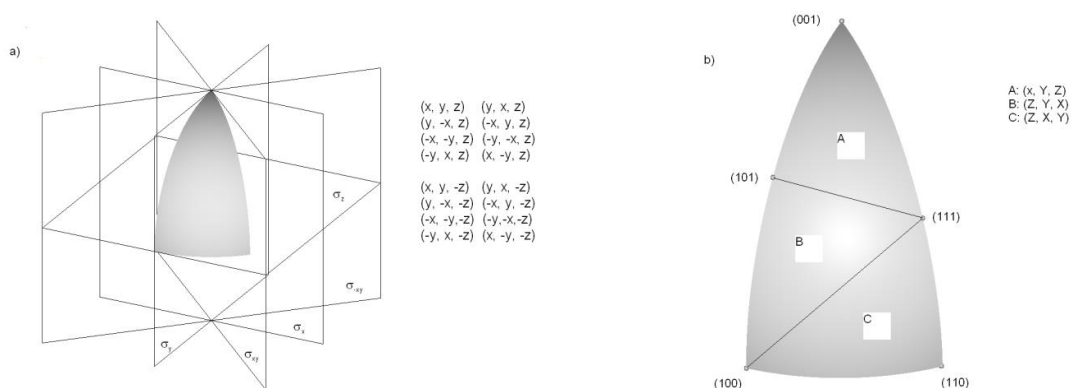
2. Razvoj softvera

Za simulaciju procesa nagrizanje (eng. etching), postoje dva tipa simulatora [22]. Prvoj kategoriji pripadaju simulatori u kojima se proces nagrizanja opisuje na atomskom nivou, obično uključujući i morfologiju nagrizane površine. Drugi tip simulatora se bavi evolucijom profila tokom procesa nagrizanja, imajući u vidu inženjerske primene, i često kombinuje nagrizanje sa ostalim MEMS proizvodnim tehnikama. Takozvani atomistički simulatori, koji pripadaju prvoj grupi, se baziraju na kombinaciji metode ćelijskih automata (eng. Cellular Automata) i Monte Karlo (eng. Monte Carlo) tehnike [23]. Kod ovih metoda, silicijumska podloga se predstavlja preko velikog broja ćelija koje se nalaze u čvorovima kristalnih rešetki. Tokom procesa nagrizanja, stanje svake ćelije ponaosob, bilo da biva otklonjena ili ostaje u rešetki, je određeno jačinom hemijskih veza kao i povezanošću sa susednim ćelijama u rešetki.

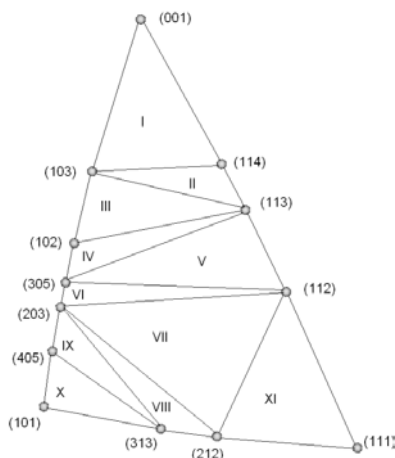
Najčešći tip simulatora koji koriste inženjeri predstavljaju takozvani geometrijski simulatori [24] kod kojih se profil površine koja se nagriza prikazuje preko skupa ravni koje propagiraju duž svojih normalnih pravaca sa brzinama koje se dobijaju iz eksperimenata. Ovakvi simulatori zahtevaju poznavanje kompletnog dijagrama brzina nagrizanja koje mogu biti dobijene eksperimentalno, ili pomoću nekog od računarskih metoda. Pošto se iz eksperimenata može dobiti samo konačan skup brzina nagrizanja, posebno je teško pratiti evoluciju zakrivljenih nekristalografskih površina. Uopšteno, kontinualni geometrijski modeli nagrizanih površina su neophodni da bi se njena evolucija integrisala sa procesima, kao što su hemijske reakcije, depozicija, difuzija, viskozni protok itd. koji su takođe opisani sistemima parcijalnih diferencijalnih jednačina.

Metod skupova funkcija nivoa (eng. level set method) za praćenje evolucije površina [25] pripada geometrijskom tipu i specijalno je dizajniran za profile kod kojih se mogu razviti oštre ivice, promene u topologiji, ili promene brzine za više redova veličine. Ovaj metod je baziran na Hamiltonijan-Jakobijevom (eng. Hamilton–Jacobi) tipu jednačina za funkcije nivoa koristeći tehnike razvijene za hiperboličke parcijalne diferencijalne jednačine. On je nezavisan od bilo kakvih implicitnih pretpostavki o prirodi procesa koji dovodi do evolucije površine i cela fizika i hemija su sadržane samo u jednom parametru-normalnoj komponenti brzine površine (eng. surface velocity). Simulator anizotropnog nagrizanja **LSPro**, koji smo razvili, baziran je na metodu retkih polja (eng. sparse field method) za rešavanje jednačina funkcija nivoa. Sam metod retkih polja, koga je razvio Whitaker [26], u širokoj je upotrebi za obradu slika. Naš primarni cilj je bio da razvijemo tačan, stabilan i efikasan kod za praćenje evolucije trodimenzionalnih (3D) nagrizanih profila, uključujući raznovrsne fizičke procese kao što su anizotropija i brzina propagacije, a koji se može efikasno koristiti i na desktop računaru.

Svi tehnički detalji koji su korišćeni za razvoj našeg modela za proces nagrizanja se mogu naći u referenci [27]. Ovde ćemo prikazati neke od njegovih najvažnijih karakteristika. Da bi se simulirala evolucija 3D profila tokom procesa nagrizanja, esencijalno je poznavanje tačnih brzina nagrizanja u svim pravcima. Međutim, iako su brzine nagrizanja poznate samo za ograničen broj pravaca, one se mogu iskoristiti za određivanje brzine u bilo kom pravcu pomoću interpolacije. Problem interpolacije brzina nagrizanja je ekvivalentan interpolaciji po sferi u 3D. Mi smo koristili model brzina nagrizanja koji je razvio Hubbard [24] u kome se pretpostavlja da su x , y i z ose usklađene redom sa pravcima $[100]$, $[010]$ i $[001]$. Tačkasta grupa (eng. point group) simetrije $m\bar{3}m$ (podgrupa $Fd\bar{3}m$ prostorne grupe) silicijuma sadrži 48 elemenata. Zato nije lako sastaviti ugaonu oblast koristeći tri glavna pravca sa kojom se, pomoću operacija simetrije, može prekriti ceo prostor. Za početak se koristi samo 16 od 48 elemenata simetrije. Kao rezultat toga, dobijamo samo 1/16-tinu od punog ugaonog raspona ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$; $0 \leq \phi \leq 45^\circ$), ili ireducibilni klin definisan ravnima ($0 \leq N_x$; $0 \leq N_y \leq N_x$; $0 \leq N_z$), kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Oblast interpolacije brzine nagrizanja: a) Ugaona oblast definisana ravnima ($0 \leq N_x$; $0 \leq N_y \leq N_x$; $0 \leq N_z$). b) Ireducibilni trouglovi (1/48-ti deo punog ugaonog raspona). Zakrivljeni trougao A je korišćen kao oblast interpolacije.



Slika 2. Trinaesto-parametarska interpolacija podoblasti A sa Slike 1b.

Drugi korak podrazumeva podelu ugaonog dela na tri ekvivalentna (zakrivljena) trougla kao što je prikazano na Slici 1b. Ovi trouglovi su povezani operacijama inverzne rotacije sa trostrukom inverznom rotacijom duž (111) pravca. Gornji trougao, definisan (001) , (101) i (111) pravcima, je oblast gde bi trebalo da se interpolira brzina nagrizanja. To je 1/48-ti deo punog ugaonog raspona i za svaki

proizvoljni pravac postoji ekvivalentna tačka koja se može odrediti koristeći navedene operacije simetrije $m3m$ grupe.

Sad ćemo navesti izraz dobijen korišćenjem brzine nagrizanja u trinaest pravaca za silicijum, koje je moguće naći u literaturi. U tom slučaju, oblast interpolacije je podeljena na 11 podoblasti, kao što je prikazano na Slici 2. Prelazeći na sferne koordinate:

$$N_x = \sin \theta \cos \phi; \quad N_y = \sin \theta \sin \phi; \quad N_z = \cos \theta, \quad (1)$$

dobija se izraz za ugaonu zavisnot brzine nagrizanja:

$$R(N) = \begin{cases} \left[R_{100}(N_z - 3N_x - N_y) + 3R_{310}(N_x - N_y) + 4R_{411}N_y \right] / N_z; & N \in I \\ \left[3R_{310}(N_x - N_y) + 3R_{311}(3N_x + N_y - N_z) + 4R_{411}(N_z - 3N_x) \right] / N_z; & N \in II \\ \left[3R_{310}(N_z - 2N_x - N_y) + 2R_{210}(3N_x - N_z) + 3R_{311}N_y \right] / N_z; & N \in III \\ \left[2R_{210}(3N_z - 5N_x - 4N_y) + 5R_{530}(2N_x - N_y - N_z) + 3R_{311}N_y \right] / N_z; & N \in IV \\ \left[5R_{530}(N_x - N_y) / 3 + 2R_{211}(5N_x + 4N_y - 3N_z) / 3 + R_{311}(3N_z - 5N_x - N_y) \right] / N_z; & N \in V \\ \left[5R_{530}(2N_z - 3N_x - N_y) + 3R_{320}(5N_x + N_y - 3N_z) + 2R_{211}N_y \right] / N_z; & N \in VI \\ \left[R_{320}(N_z - 2N_y) + 2R_{221}(3N_x + N_y - 2N_z) + 2R_{211}(2N_z + 2N_y - 3N_x) / 3 \right] / N_z; & N \in VII \\ \left[3R_{320}(N_z - N_x) + 3R_{331}(3N_x - 2N_y - 2N_z) + 2R_{221}(2N_z - 3N_x + 3N_y) \right] / N_z; & N \in VIII \\ \left[3R_{320}(4N_z - 5N_x + 3N_y) / 2 + 5R_{540}(3N_x - 3N_y - 2N_z) / 2 + 3R_{331}N_y \right] / N_z; & N \in IX \\ \left[5R_{540}(N_z - N_x) + R_{110}(5N_x - 3N_y - 4N_z) + 3R_{331}N_y \right] / N_z; & N \in X \\ \left[2R_{211}(N_z - N_x) + 2R_{221}(N_x - N_y) + R_{111}(2N_y - N_z) \right] / N_z; & N \in XI \end{cases} \quad (2)$$

Metod skupova funkcija nivoa, koji su uveli Osher i Sethian [25], je veoma moćna tehnika za analiziranje i proračun kretanja frontova u različitim okolnostima. Skupovi funkcija nivoa se koriste u obradi slika, kompjuterskoj vizuelizaciji, kompjuterskoj dinamici fluida, nauci o materijalima i mnogim drugim oblastima. Detaljno izlaganje teorijskih i numeričkih aspekata metoda i njihova primena na različite oblasti mogu se naći u mnogim knjigama [28-29] i skorašnjim preglednim radovima [30-31]. Osnovna ideja koja se nalazi iza metoda skupova funkcija nivoa je predstavljanje razmatrane površine, u datom trenutku vremena t , kao funkcija nultog nivoa $\varphi(t, \mathbf{x})$. Početna površina je data kao $\{\mathbf{x} \mid \varphi(0, \mathbf{x}) = 0\}$. Evolucija površine u toku vremena je prouzrokovana fluksevima čestica koje stižu do površine tokom procesa nagrizanja. Normalna komponenta brzine tačke na površini se označava sa $R(t, \mathbf{x})$, i naziva se funkcijom brzine. Za tačke na površini ova funkcija je određena fizičkim i hemijskim procesima. Funkcija brzine zavisi od vremena i prostornih promenljivih i pretpostavljamo da je definisana na celom simulacionom domenu. Za vreme $t > 0$, funkcija $\varphi(t, \mathbf{x})$, se definiše preko skupa tačaka $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \varphi(t, \mathbf{x}) = 0\}$, što dovodi do jednačine skupa funkcija nivoa (eng. level set equation):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + R(t, \mathbf{x}) |\nabla \varphi| = 0, \quad (3)$$

gde je $\varphi(t, \mathbf{x})$ nepoznata funkcija, a $\varphi(0, \mathbf{x}) = 0$ određuje početnu površinu. Ova jednačina povezuje promenu u toku vremena sa gradijentom preko funkcije brzine. U numeričkoj implementaciji, funkcija nivoa je predstavljena svojim vrednostima u čvorovima mreže i trenutna površina mora biti izvučena iz te mreže. Kao prvi korak, definiše se pogodna početna funkcija. Prirodni izbor za inicijalizaciju je označena funkcija rastojanja za datu površine. Kao što je već rečeno, vrednosti funkcije brzine su određene na osnovu fizičkog modela.

Jednačina (3) se može napisati u Hamilton-Jakobijevoj formi:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + H(\nabla \varphi(t, \mathbf{x})) = 0, \quad (4)$$

gde je Hamiltonijan $H = R(t, \mathbf{x})|\nabla \varphi(t, \mathbf{x})|$. Takav Hamiltonijan je konveksan (u $\mathfrak{R}^n$) pa važi:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial \phi_{x_i} \partial \phi_{x_j}} \geq 0, \quad (5)$$

gde je ϕ_{x_i} parcijalni izvod $\varphi(t, \mathbf{x})$ po x_i . Ako brzina površine $R(t, \mathbf{x})$ ne zavisi od funkcija nivoa $\varphi(t, \mathbf{x})$, ovaj uslov je obično zadovoljen. U tom slučaju, to je problem tipa slobodnih graničnih površina. Tada se prostorni izvodi funkcije φ mogu aproksimirati koristeći Enkvist-Ošerovu (Engquist-Osher) šemu konačnih razlika *upwind* tipa, ili ENO (višeg reda suštinski neoscilatorna) ili WENO (ponderisana suštinski neoscilatorna) šeme diskretizacije, koje zahtevaju razmatranje vrednosti funkcija u svim tačkama mreže. Rezultujuće semi-diskretne jednačine se mogu rešiti korišćenjem eksplicitnog Ojlerovog metoda (Euler method), ili preciznije korišćenjem TVD (eng. total-variation diminishing) Runge-Kuta (Runge-Kutta) procedure vremenske integracije (videti reference [28] i [29] za detalje).

Postoji nekoliko pristupa za rešavanje jednačina funkcija nivoa kod kojih je porast tačnosti praćen opadanjem računarskih performansi. Svi ti pristupi su bazirani na korišćenju neke vrste adaptivnih šema. Najvažniji je metod funkcija nivoa uskog pojasa (eng. narrow band level set method), najčešće korišćen kod alata za modelovanje procesa nagrizanja, kao i u metodu retkih polja [26], implementiranom u ITK biblioteci [32]. Metod retkih polja koristi aproksimaciju za funkciju rastojanja što omogućava da se, u svakom vremenskom koraku, preračuna okruženje nulte funkcije nivoa. Proračun se ažurira na opsegu mrežnih tačaka koji je širok samo jednu tačku. Širina okoline je takva da se izvodi, u sledećem vremenskom koraku, mogu izračunati. Ovaj pristup ima nekoliko prednosti. Algoritam vrši tačan broj proračuna neophodnih da se izračuna sledeći položaj površine nulte funkcije nivoa. Broj tačaka koji se izračunava je toliko mali da je izvodljivo pratiti ih sve, tako da se u svakoj iteraciji razmatraju samo one tačke čije vrednosti kontrolišu površinu nulte funkcije nivoa. Kao rezultat, broj proračuna raste sa veličinom površine, a ne sa ukupnim brojem tačaka mreže.

Nekonveksni Hamiltonijani su karakteristični za simulaciju procesa anizotropnog nagrizanja i depozicije. Šema konačnih razlika *upwind* tipa se ne može koristiti u slučaju nekonveksnih Hamiltonijana. Najjednostavnija šema koja se može koristiti u tim slučajevima je Laks-Fridrihsova (Lax-Friedrichs), koja se zasniva na aproksimaciji centralne razlike numeričkih flukseva i održava monotonost funkcije preko linearnog disipacionog člana drugog reda (eng. a second-order linear dissipation term) [33]:

$$\begin{aligned} \varphi_{ijk}^{n+1} = & \varphi_{ijk}^n - \Delta t \left[H \left(\frac{D_{ijk}^{-x} + D_{ijk}^{+x}}{2}, \frac{D_{ijk}^{-y} + D_{ijk}^{+y}}{2}, \frac{D_{ijk}^{-z} + D_{ijk}^{+z}}{2} \right) \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \alpha_x (D_{ijk}^{+x} - D_{ijk}^{-x}) - \frac{1}{2} \alpha_y (D_{ijk}^{+y} - D_{ijk}^{-y}) - \frac{1}{2} \alpha_z (D_{ijk}^{+z} - D_{ijk}^{-z}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

gde $D_{ijk}^{+x(y,z)}$ i $D_{ijk}^{-x(y,z)}$ predstavljaju razlike:

$$\begin{aligned}
D_{ijk}^{+x} &= \frac{\varphi_{i+1,j,k}^n - \varphi_{i,j,k}^n}{\Delta x}, & D_{ijk}^{-x} &= \frac{\varphi_{i,j,k}^n - \varphi_{i-1,j,k}^n}{\Delta x} \\
D_{ijk}^{+y} &= \frac{\varphi_{i,j+1,k}^n - \varphi_{i,j,k}^n}{\Delta y}, & D_{ijk}^{-y} &= \frac{\varphi_{i,j,k}^n - \varphi_{i,j-1,k}^n}{\Delta y}, \\
D_{ijk}^{+z} &= \frac{\varphi_{i,j,k}^n - \varphi_{i,j,k+1}^n}{\Delta z}, & D_{ijk}^{-z} &= \frac{\varphi_{i,j,k}^n - \varphi_{i,j,k-1}^n}{\Delta z}
\end{aligned} \tag{7}$$

a koeficijenti $\alpha_x (\alpha_y, \alpha_z)$ su povezani sa parcijalnim izvodima Hamiltonijana po prvom (drugom, trećem) argumentu:

$$\alpha_x = \max \left| \frac{\partial H}{\partial \varphi_x} \right|, \quad \alpha_y = \max \left| \frac{\partial H}{\partial \varphi_y} \right|, \quad \alpha_z = \max \left| \frac{\partial H}{\partial \varphi_z} \right|. \tag{8}$$

Generalno, ovi koeficijenti se ne moraju egzaktno izračunati. Njihove procenjene vrednosti će dovesti do nerealističnog “zaglađivanja” oštih ivica kod implicitnih površina. Sa druge strane, premalo “zaglađivanje” površine obično dovodi do numeričke nestabilnosti u proračunima. U referenci [34] je pokazano da je moguće koristiti Laks-Fridrihsovu šemu u sprezi sa metodom retkih polja čime se mogu očuvati oštine i ivice površine optimizujući količinu zaglađivanja.

Suštinski je da se brzine nagrizanja izraze preko članova funkcija nivoa da bi se dobila jednačina u Hamiltonijan-Jakobijevoj formi. Da bi smo postigli taj cilj, polazimo od činjenice da je jedinični vektor normale na nultu funkciju nivoa dat kao $N = \nabla \varphi / |\nabla \varphi|$, i da su uglovi θ i ϕ povezani sa funkcijom nivoa preko izraza $\sin \theta = \sqrt{1 - \varphi_z^2 / |\nabla \varphi|^2}$ i $\tan \phi = \varphi_y / |\nabla \varphi|$. Na taj način brzina R se može izraziti preko geometrijskih svojstava same funkcije nivoa. Ova procedura je korišćena za izvođenje relacija kada se za interpolaciju koristi trinaest eksperimentalnih vrednosti brzina nagrizanja (jedanaest podoblasti, Slika 2). Naime, koristeći trinaesto-parametarsku formulu (2) dobija se sledeći Hamiltonijan:

$$H(\nabla \varphi) = \begin{cases} |\nabla \varphi| [3(R_{310} - R_{100})\varphi_x + (4R_{411} - R_{100} - 3R_{310})\varphi_y + R_{100}\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in I \\ |\nabla \varphi| [3(R_{310} + 3R_{311} - 4R_{411})\varphi_x + 3(R_{311} - R_{310})\varphi_y + (4R_{411} - 3R_{311})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in II \\ |\nabla \varphi| [6(R_{210} - R_{310})\varphi_x + 3(R_{311} - R_{310})\varphi_y + (3R_{310} - 2R_{210})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in III \\ |\nabla \varphi| [10(R_{530} - R_{210})\varphi_x + (3R_{311} - 8R_{210} - 5R_{530})\varphi_y + (6R_{210} - 5R_{530})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in IV \\ |\nabla \varphi| [5(R_{530} / 3 + 2R_{211} / 3 - R_{311})\varphi_x + (8R_{211} / 3 - 5R_{530} / 3 - R_{311})\varphi_y + (3R_{311} - 2R_{211})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in V \\ |\nabla \varphi| [5(3R_{530} + 2R_{320})\varphi_x + (3R_{320} + 2R_{211} - 5R_{530})\varphi_y + 5(2R_{530} - 3R_{320})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in VI \\ |\nabla \varphi| [2(3R_{221} - R_{211})\varphi_x + 2(R_{221} + 2R_{211} / 3 - R_{320})\varphi_y + (R_{320} - 4R_{221} + 4R_{211} / 3)\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in VII \\ |\nabla \varphi| [3(3R_{331} - R_{320} - 2R_{221})\varphi_x + 6(R_{221} - R_{331})\varphi_y + (3R_{320} - 6R_{331} + 4R_{221})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in VIII \\ |\nabla \varphi| [15(R_{540} - R_{320})\varphi_x / 2 + 3(3R_{320} / 2 - 5R_{540} / 2 + R_{331})\varphi_y + (6R_{320} - 5R_{540})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in IX \\ |\nabla \varphi| [5(R_{110} - R_{540})\varphi_x + 3(R_{331} - R_{110})\varphi_y + (5R_{540} - 4R_{110})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in X \\ |\nabla \varphi| [2(R_{221} - R_{211})\varphi_x + 2(R_{111} - R_{221})\varphi_y + (2R_{211} - R_{111})\varphi_z] / \varphi_z; & \nabla \varphi \in XI \end{cases} \tag{9}$$

Neophodni prvi izvodi se mogu dobiti direktno iz izraza (8), ali su odgovarajući izrazi toliko rogovatni da ovde ne mogu da se napišu u celini. Drugi izvodi Hamiltonijana koji se javljaju u (9) su takođe neophodni za proveru uslova njihove konveksnosti. Brzine nagrizanja (i odgovarajući Hamiltonijani) su nekonveksne funkcije. To znači da je pogodno da se implementira već pomenuta procedura [35-36] da bi se numerički rešio problem sa početnim vrednostima (4).

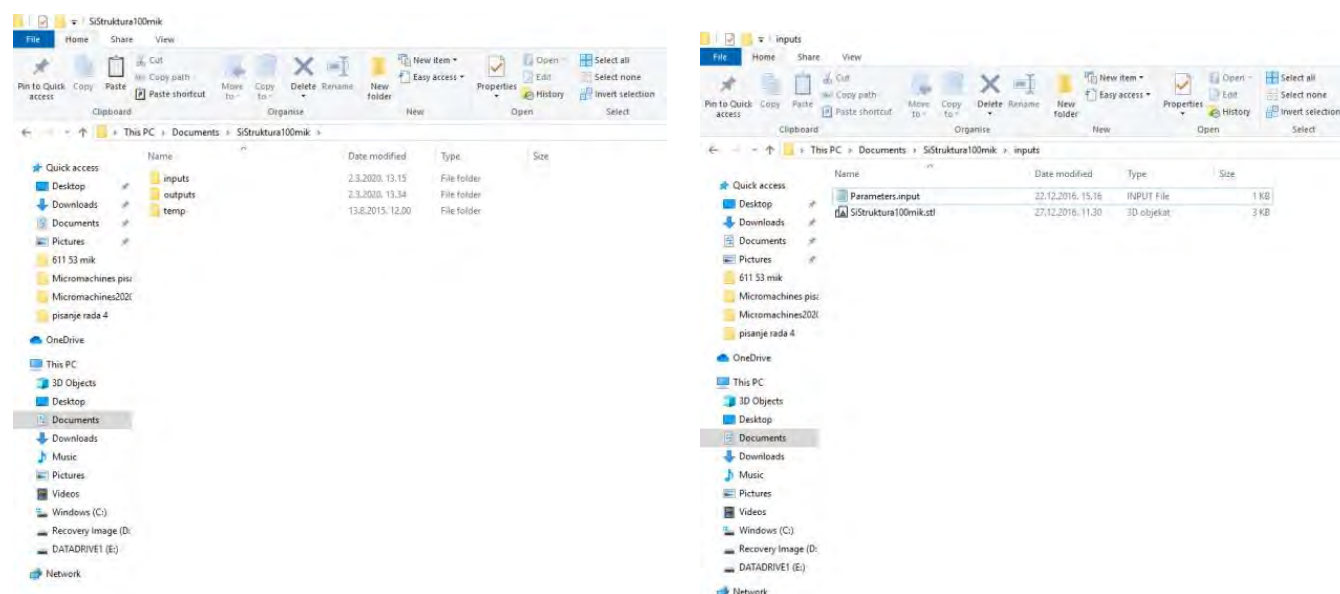
Softverski paket **LSPro**, u kome je implementirana opisana metodologija modelovanja procesa nagrizanja, razvijen je u programskom jeziku C++. Za razvoj grafičkog korisničkog interfejsa korišćena je biblioteka FLTK [37], a za potrebe vizualizacije 3D objekata biblioteka VTK [38]. Paket je moguće kompajlirati na Windows i Linux sistemima korišćenjem Microsoft i GNU kompajlera. Treba imati u vidu da su memorijski zahtevi ovakvih proračuna relativno veliki, i da je na sistemima na kojima se oni izvršavaju potrebno instalirati minimalno 8GB memorije.

3. Korisnički interfejs

U ovom delu biće prikazan korisnički interfejs i data uputstvo za korišćenje programa **LSPro**. Prvi deo se odnosi na projektovanje dvodimenzionalne planarne maske za nagrizanje silicijumske strukture. U ovom delu će biti data i priprema fajla za simulator. Drugi deo predstavlja objašnjenje kako se u programu **LSPro** podešavaju parametri potrebni da se simulacija uspešno izvrši.

3.1 Projektovanje maski za nagrizanje

Projektovanje dvodimenzionalne planarne maske se vrši u programskom paketu AUTOCAD ili odgovarajućoj zameni otvorenog koda. Projektovanje se vrši u **.dwg** fajlu tako što se bira opcija **Metric**. Jedinica mere u projektovanju odgovara 1 mikrometru. Uglovi koji se koriste se definišu na dve decimale. Oblici koji predstavljaju masku moraju biti definisani kao zatvorene konture. Projektovanje se vrši u I kvadrantu, odnosno x i y vrednosti temena konture moraju imati pozitivne vrednosti. Posle završenog projektovanja, primenjuje se naredba **Extrude** (20 jedinica po z osi) pri čemu se od dvodimenzionalnog lika dobija trodimenzionalni oblik čije su nove stranice duž pozitivnog dela z ose i iznose 20 jedinica. Ukoliko se dvodimenzionalna maska sastojala iz više zatvorenih kontura, potrebno je izvršiti uniju dobijenih novih 3D oblika koristeći funkciju **Union**. Na kraju se naredbom **Export** dobija **.stl** fajl koji predstavlja projektovani 3D oblik. Slova i brojevi naziva **.stl** fajla moraju biti spojena i nije dozvoljeno korišćenje znakova -, _ , ; , . , slova srpske latinice i space-a.



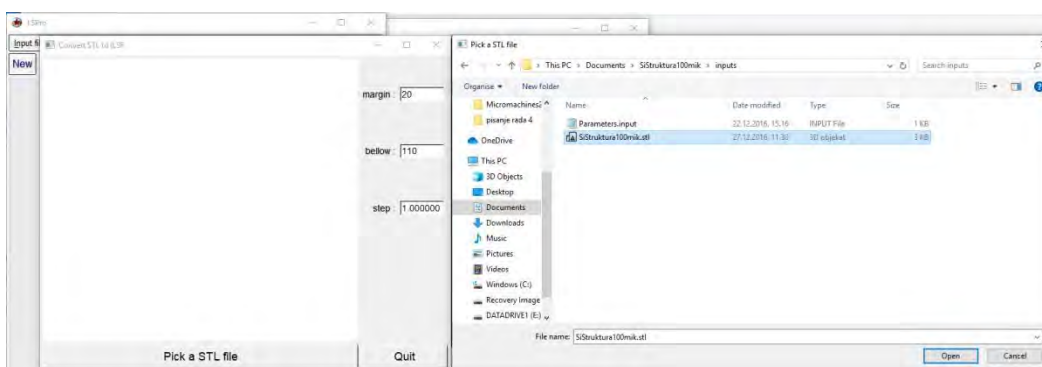
Slika 3. Folderi inputs, outputs i temp.

3.2 Aktiviranje projekta nagrizanja

Pre početka simulacije potrebno je za svaki projekat otvoriti poseban folder. Naziv foldera ne sme imati znakove -, _ , ; , . , slova srpske latinice i space, slova i brojevi naziva moraju biti spojena. Folder se sastoji od tri foldera: **inputs**, **outputs** i **temp**, Slika 3. U folderu input se nalaze **Parameters.Input** (zadati parametri simulacije) i **.stl** fajl projektovane maske. Pretvaranjem **.stl** fajl u **.vtk**, koje će biti objašnjeno u odeljku 3.3 u folder **inputs** se automatski upisuje i napravljeni **.vtk**. U folder **outputs** se automatski upisuju **.stl** fajlovi koji su dobijeni simulacijom. Otvaranje novog foldera se vrši kopiranjem prethodnog projekta, menjanjem naziva i brisanjem svih fajlova sem **Parameters.Input**.



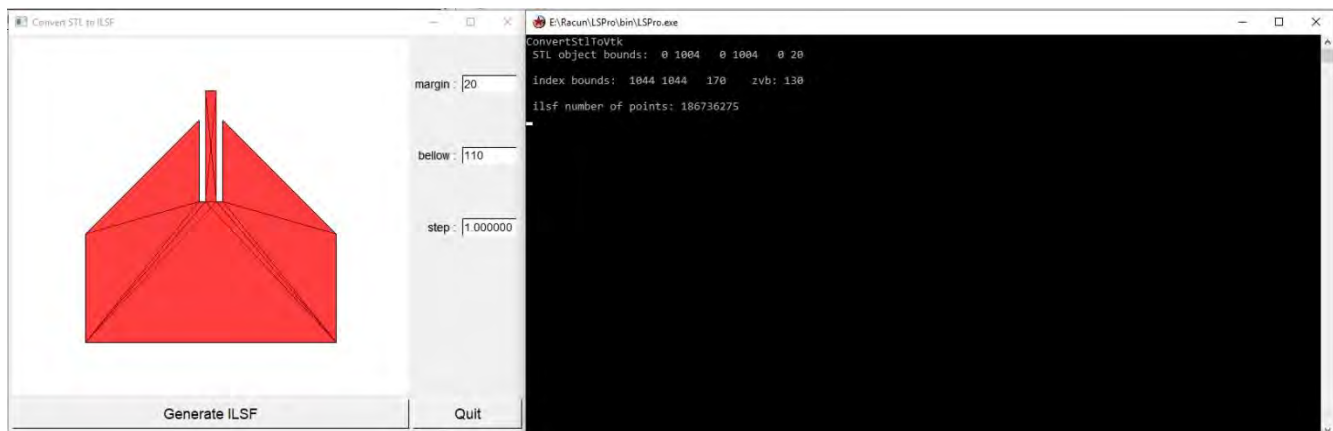
Slika 4. Opcija .stl fajl u .vtk fajl u Tools.



Slika 5. Prozor za izbor .stl fajla, zadavanje margine profila nagrizanja i dubine nagrizanja.

3.2 Pretvaranje .stl fajla u .vtk

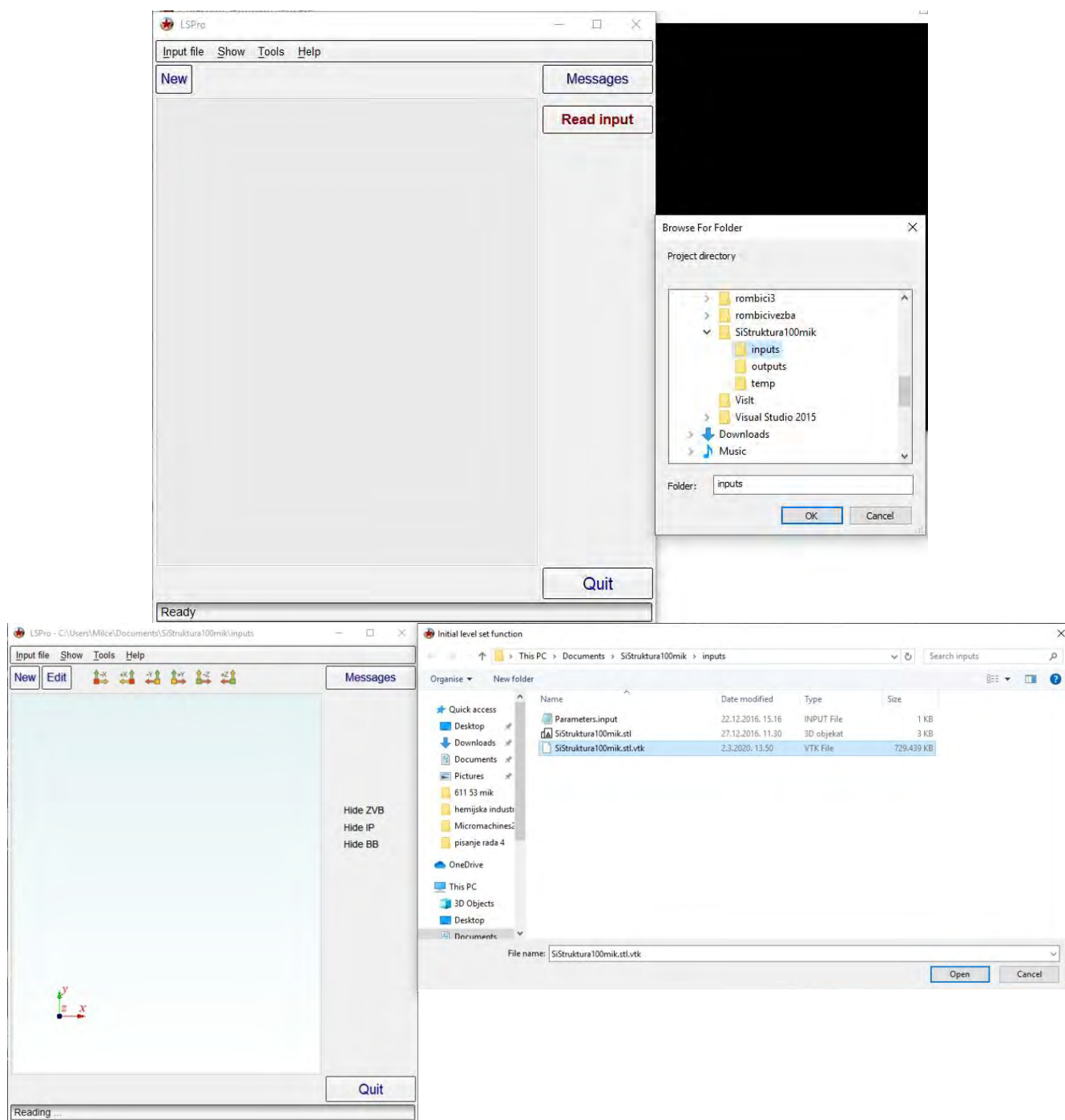
Pretvaranje .stl fajla u .vtk počine aktiviranjem programa **LSPPro**, u opciji Tools, Slika 4. Otvara se prozor, Slika 5, gde se postavljaju **margin** po x,y i z osi 3D profila koji će se dobiti simulacijom nagrivanja (vrednost **20** u ovom slučaju) i definiše dubina nagrivanja **bellow** (vrednost **110** u ovom slučaju). Margine se postavljaju u i pozitivnom i u negativnom smeru ose tako da su posmatrane vrednosti uvećane za 40 u ovom slučaju. Funkcijom **Pick a .stl** fajl se preuzima fajl koji ubačen u folder **inputs**. Posle završenog pretvaranja, pored dobijenog .vtk fajla u **inputs** istog naziva kao .stl fajl, definisani su parametri za simulaciju koji se moraju ubaciti u program, Slika 6. U prvom redu su projektovane granične vrednosti po x, y i z osi iz .stl fajla. U drugom redu su vrednosti po x i y osi dvodimenzionalne planarne maske uvećane za dvostruku vrednost margine, i zbir dubine nagrivanja **bellow**, dvostruke **margin** i **Extrude** parametra, odeljak 3.1, po z osi. Poseban parametar u ovom redu je zvb (zero velocity bound- iznad toga je brzina nagrivanja nula) koji predstavlja zbir dubine nagrivanja **bellow** i **margin** parametra. U poslednjem redu je broj tačaka simulacije u prostoru.



Slika 6. Završeno pretvaranje .stl fajla u .vtk fajl. Definisani parametri za simulaciju projektovane maske.

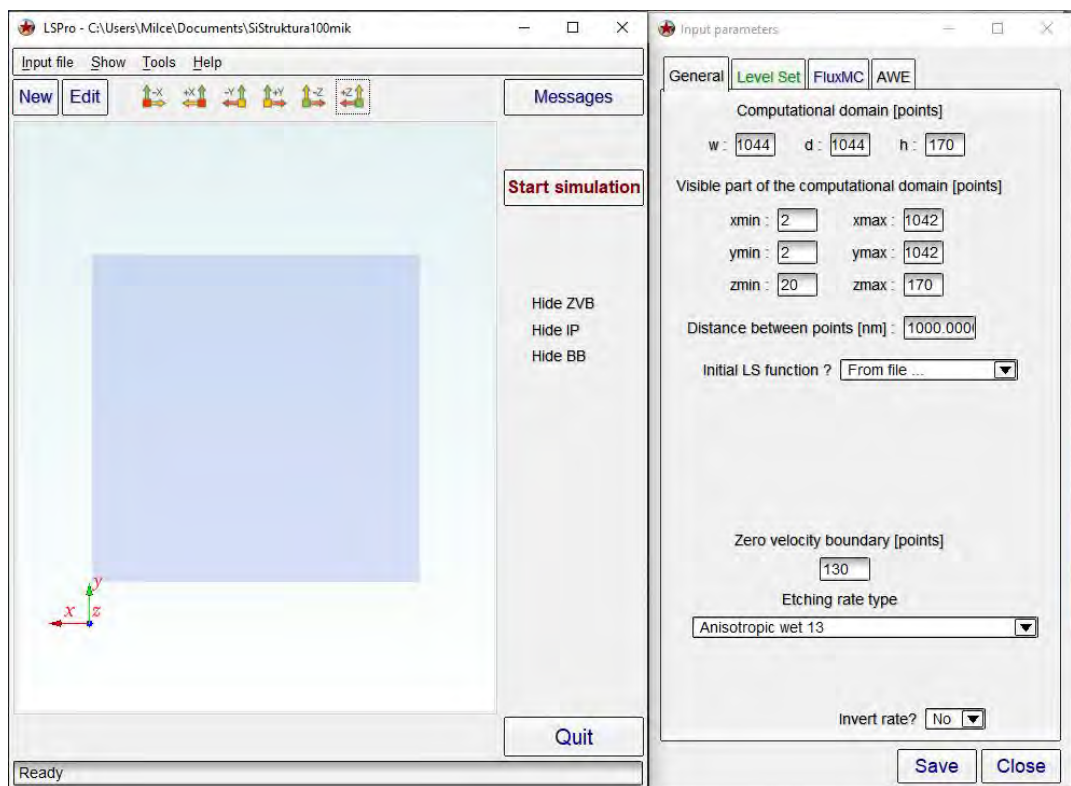
3.4 Definisanje parametara simulacije

Posle dobijanja .vtk fajla potrebno je definisati parametre simulacije. Učitavanje .vtk fajla se vrši naredbom **Read input**, Slika 7. Otvara se prozor kojim se omogućava pristup folderu **inputs**, odnosno .vtk fajlu. Posle učitavanja, potrebno je definisati parametre simulacije. Naredba **Edit**, Slika 8, omogućava pristup prozoru koji ima opcije **General**, **Level Set**, **FluxMC** i **AWE**. U opciji **General** se definiše domen simulacije i koriste se parametri dobijeni tokom pretvaranje .stl fajla u .vtk. Veličine **w**, **d** i **h** predstavljaju vrednosti uvećane za dvostruku vrednost margine po x i y osi početne dvodimenzionalne planarne maske, i zbir dubine nagrivanja **bellow**, dvostruke **margin** i **Extrude** parametra (u prikazanom slučaju **1044**, **1044** i **170**, Slika 6). Veličine **xmin**, **xmax**, **ymin**, **ymax**, **zmin** i **zmax** se definišu iz veličina **w**, **d** i **h**, odnosno projektovanih graničnih vrednosti, margine i dubine nagrivanja. Domeni se skraćuju po x, y i z da se ne bi videla cela zatvorena površina već samo profil koji nas interesuje. Takođe, postavlja se i veličina Zero velocity bound (u prikazanom slučaju **130**, Slika 6).

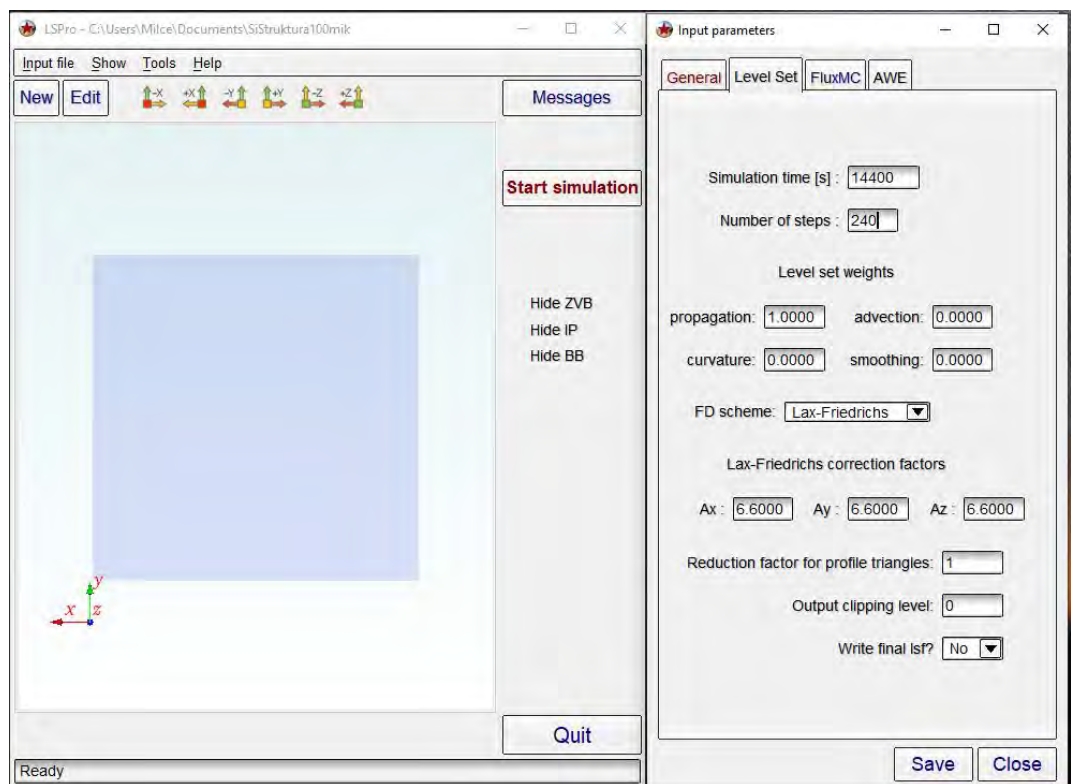


Slika 7. Učitavanje .vtk fajla.

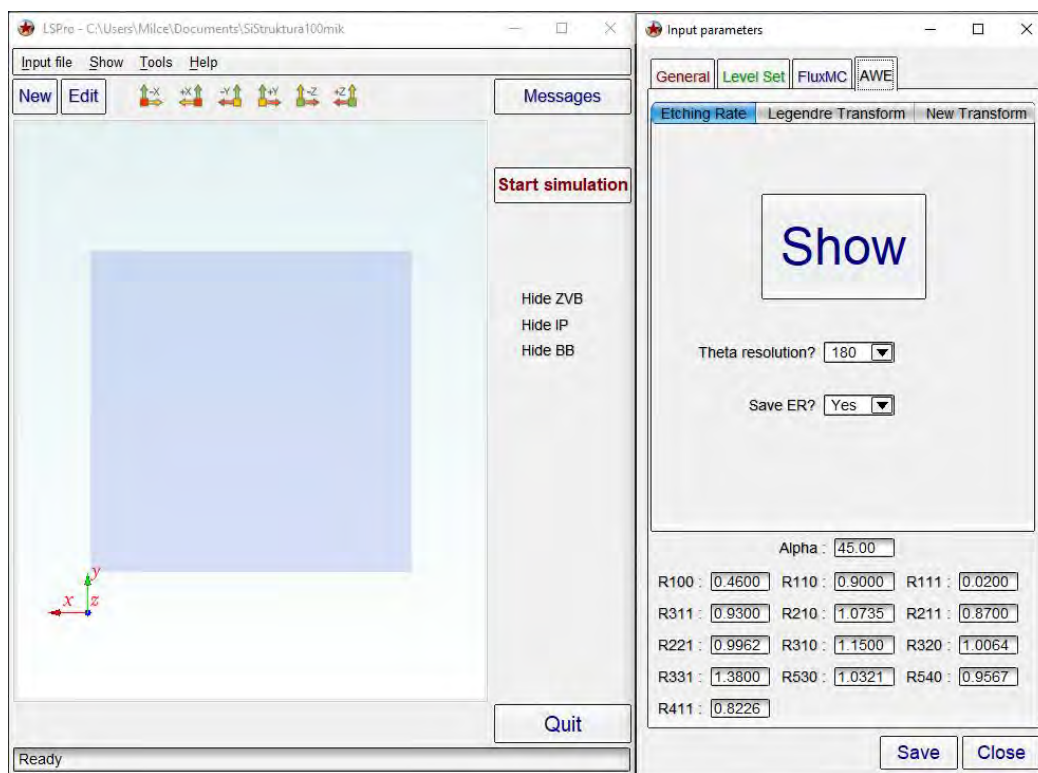
U opciji **Level Set**, Slika 9, se definiše vreme nagrizanje silicijumske strukture, odnosno vreme simulacije. **Simulation time** (vreme simulacije, odnosno nagrizanja, u ovom slučaju **14400s** koje odgovara dubini nagrizanja $110,4 \mu\text{m}$) se definiše u sekundama. **Number of steps** (u ovom slučaju **240**), predstavlja broj trodimenzionalnih profila nagrizanja koji se dobijaju u obliku .stl fajla i upisuju se u **outputs**. U opciji **AWE** su postavljene brzine anizotropnog nagrizanja, Slika 10. Potrebno je odrediti 13 brzina nagrizanja. U slučaju nagrizanja u vodenom rastvoru 25% TMAH na 80°C eksperimentalno smo odredili 6 brzina nagrizanja. Preostale brzine nagrizanja su određene interpolacijom, što je objašnjeno u poglavlju 2. Ostali parametri koji su prisutni u predstavljenim opcijama se ne trebaju menjati jer su definisani prema rezultatima eksperimenta.



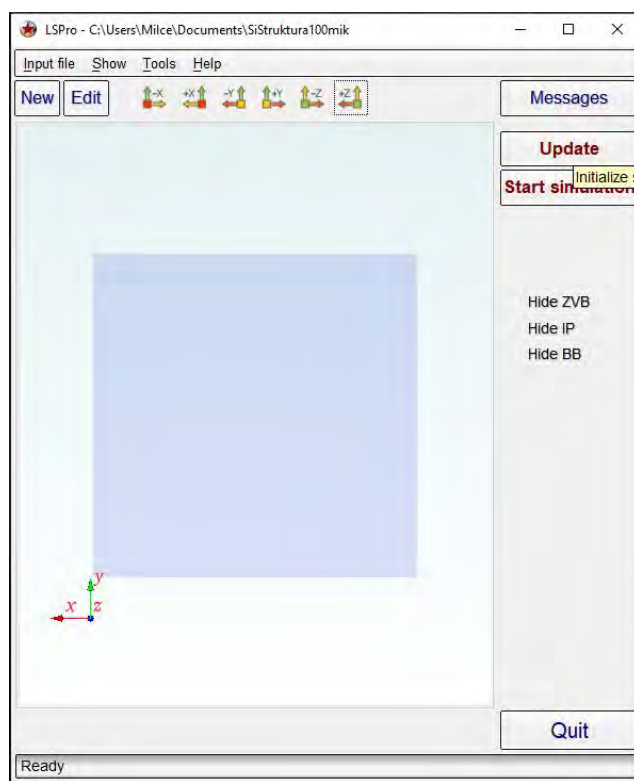
Slika 8. Definisiranje parametara domena simulacije.



Slika 9. Definisiranje vremena i broja profila simulacije.

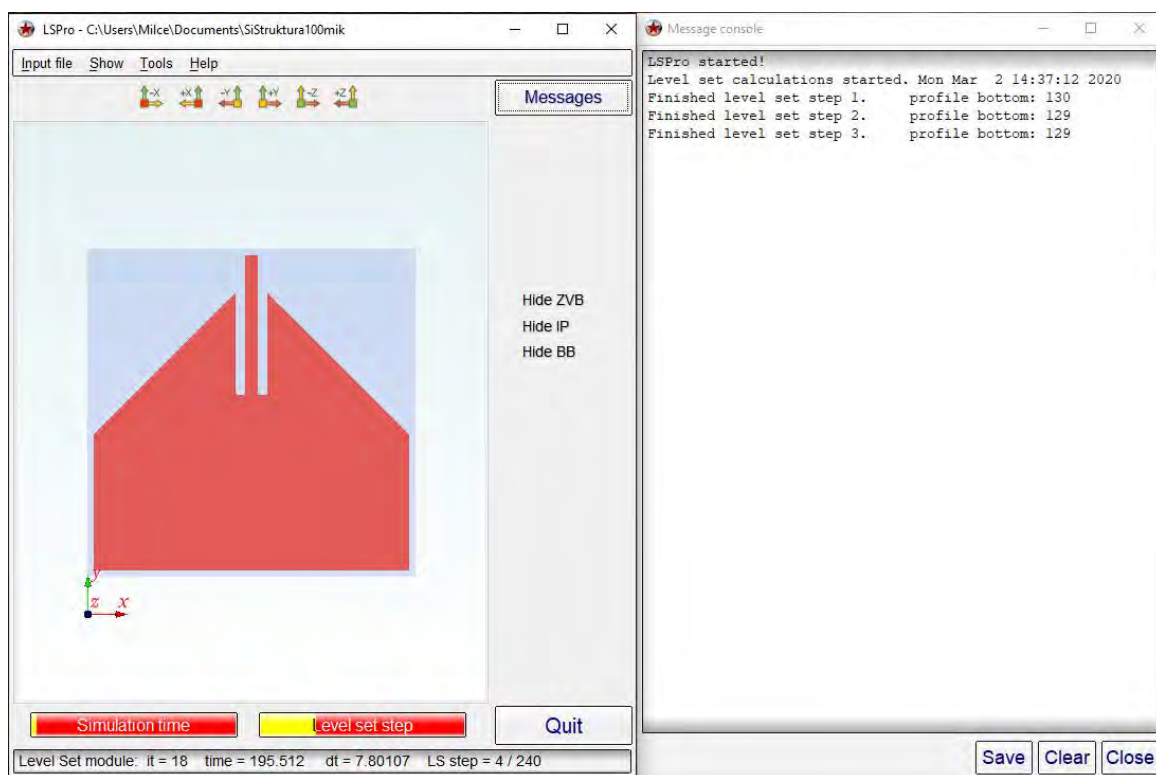


Slika 10. Definisanje brzina anizotropnog nagrivanja.

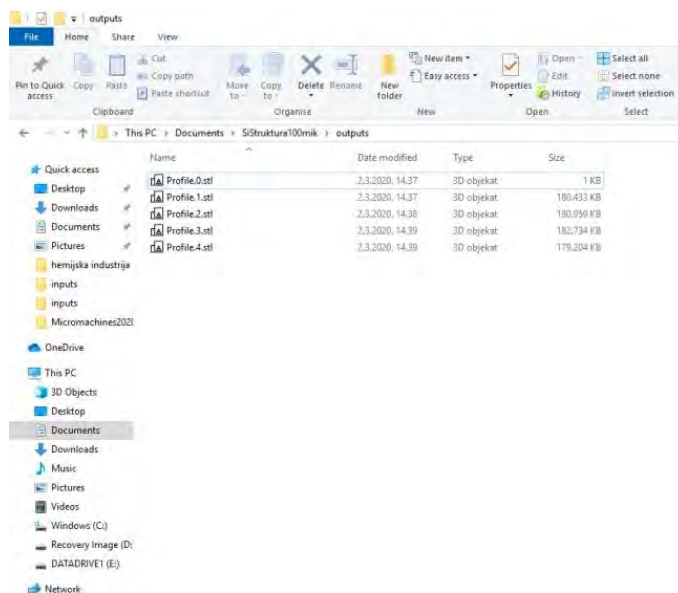


Slika 11. Učitavanje .vtk fajla ukoliko su promenjeni parametri simulacije.

Kada se promene potrebni parametri, potrebno je uraditi **Save**. Pošto su parametri promenjeni, naredbom **Update**, Slika 11, se automatski upisuju novi parametri u **Parameters.Input**. **Update** zahteva da se ponovo upiše **.vtk** fajl, Slika 7.



Slika 12. Simulacija nagrizanja.



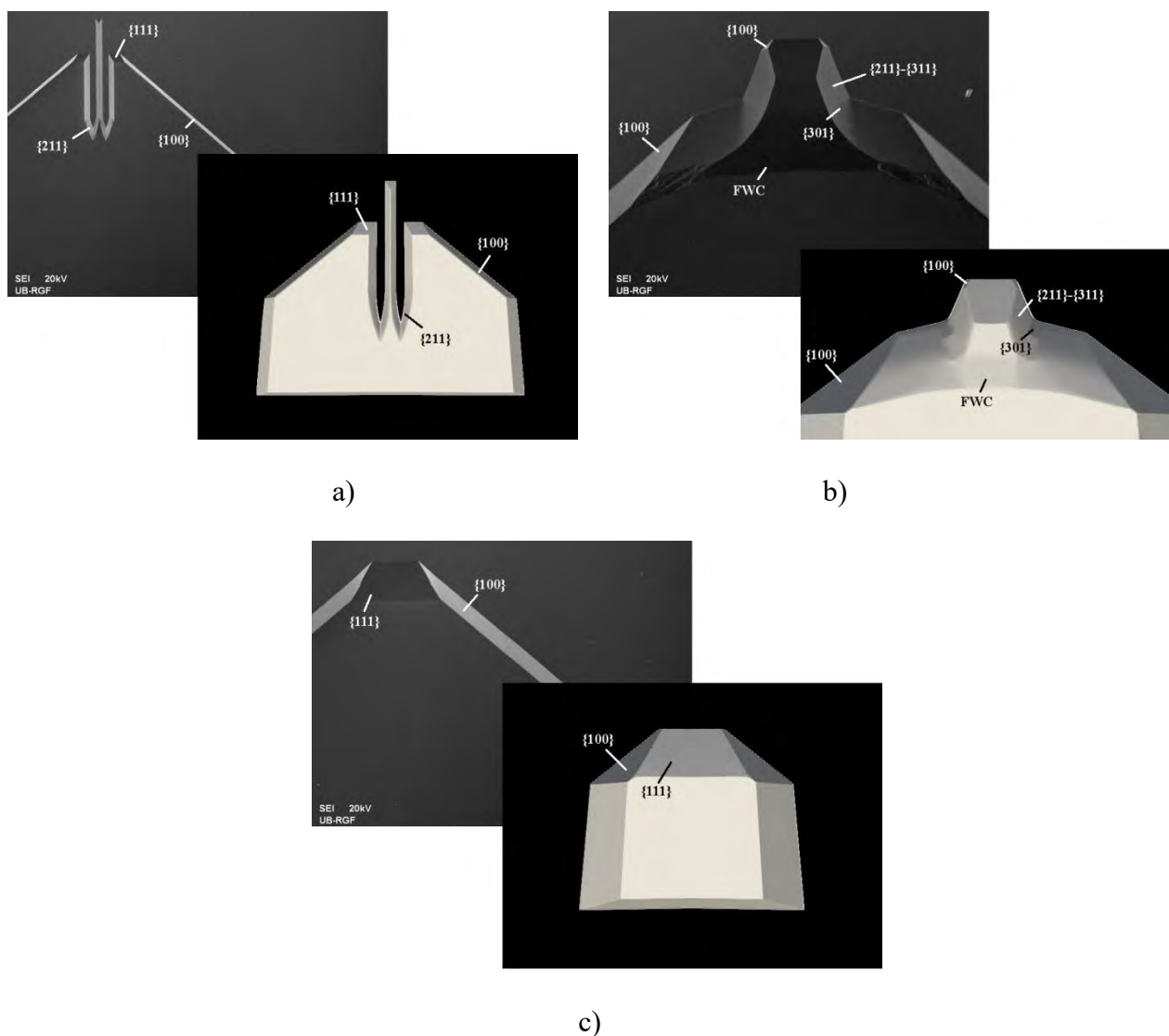
Slika 13. Upisivanje profila nagrizanja u outputs.

3.5 Simulacija

Simulacija počinje naredbom **Start simulation**, Slika 11. Naredba **Messages** otvara prozor, Slika 12, u kome se može pratiti upisivanje profila nagrizanja, odnosno **.stl** fajlova u **outputs**, Slika 13. Broj LS steps je definisan sa **Number of steps**. Na Slici 12 se vizuelno može pratiti razvoj profila nagrizanja sa vremenom. Simulacija se u bilo kom trenutku može prekinuti naredbom **Quit**.

4. Testiranje

Testiranja su vršena u IHTM-CMT tokom višegodišnjeg razvoja softvera **LSPro**. Definisani su parametri simulacija na osnovu eksperimentalnih rezultata [14-17]. Na Slici 14 je prikazano nagrizanje jednog dela trodimenzionalne silicijumske strukture u vodenom rastvoru 25% TMAH na 80 °C.



Slika 14. Testiranje softvera LSPro nagrizanjem silicijumske strukture za tri dubine nagrizanja: a) 21 μm, b) 76 μm, c) 110 μm. SEM mikrofotografije i simulirani profili su nagnuti za 30°.

Posmatrane su tri različite dubine nagrivanja: 21, 76 i 110 μm . Za sve tri dubine nagrivanja su date SEM mikrofotografije dela silicijumske strukture i odgovarajući simulirani profili nagrivanja. Profili nagrivanja su dobijeni uz pomoć Paraview softvera [39] učitavanjem odgovarajućih .stl fajlova. Analizom su definisane kristalografske ravni koje se pojavljuju tokom nagrivanja i simulacije. Uočava se dobra saglasnost između eksperimenata i profila dobijenih simulacijama. Ostala testiranja se mogu pronaći u publikovanim radovima M21, M22 i M33 kategorije autora ovog tehničkog rešenja [14-17].

Napomena: Softver za simulaciju nagrivanja silicijuma LSPro se može dobiti na zahtev. Zahtev se može poslati na mejl adrese: bradjeno@ipb.ac.rs (Branislav Rađenović)

marija@ipb.ac.rs (Marija Radmilović Rađenović)

smilce@nanosys.ihtm.bg.ac.rs (Milče M. Smiljanić)

Reference

- [1] V. Lindroos, M. Tilli, A. Lehto, T. Motooka, "Wet Etching of Silicon" in *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, William Andrew, Elsevier, 2010
- [2] J. Frühauf, *Shape and Functional Elements of the Bulk Silicon Microtechnique*, Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [3] M. Shikida, K. Sato, K. Tokoro, D. Uchikawa, "Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions", *Sensors and Actuators A* vol. 80 no. 2, pp. 179-188, Mar. 2000.
- [4] K. Sato, M. Shikida, T. Yamashiro, K. Asaumi, 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 no. 1-2, pp. 131-137, Mar. 1999.
- [5] 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, May 2000.
- [6] 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.* vol. 10 no.3 pp. 430-439, Apr. 2000.
- [7] 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 no. 2 pp.136-140, Feb. 2000.
- [8] 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, Jul. 1996. DOI: 10.1109/84.506198
- [9] I. Zubel, 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 no. 3 pp. 163-171, Jan. 2001.
- [10] M.M. Smiljanić, V. Jović, Ž. Lazić, "Maskless convex corner compensation technique on a (1 0 0) silicon substrate in a 25 wt. % TMAH water solution", *J. Micromech. Microeng.* vol. 22 no.11 pp. 115011, Sep. 2012.
- [11] 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 no. 11 pp. 2458-2462, Oct. 2006. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/16/11/029>
- [12] 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, Oct. 2010. P. Pal, K. Sato, M. Shikida, M.A. Gosálvez, "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 no.2 pp. 192-203, Sep. 2009.
- [13] 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 no. 10 R111-R133, Sep. 2007.
- [14] M.M. Smiljanic, B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, Ž. Lazić, V. Jović, "Simulation and experimental study of maskless convex corner compensation in TMAH water solution", *J. Micromech. Microeng.* vol. 24, no. 11 pp. 115003, Oct. 2014.
- [15] M.M. Smiljanić, Ž. Lazić, B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, V. Jović, "Evolution of Si Crystallographic Planes-Etching of Square and Circle Patterns in 25 wt % TMAH", *Micromachines*, 10(2), 102, Jan. 2019.
- [16] M.M. Smiljanić, Ž. Lazić, V. Jović, B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, "Etching of Uncompensated Convex Corners with Sides along <110> and <100> in 25 wt% TMAH at 80 °C", *Micromachines*, 11(3), 253, Feb. 2020.
- [17] M. M. Smiljanić, Ž. Lazić, B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, V. Jović, M. Rašljčić, K. Cvetanović, A. Filipović, "Etched Parallelogram Patterns with Sides Along <100> and <110> Directions in 25 wt % TMAH", *Proc. 6th Conf. IcETRAN*, Srebno jezero, June 3– 6, 2019.
- [18] Silvaco, *Victory Process - 3D Process Simulator*, http://www.silvaco.com/products/tcad/process_simulation/victory_process/victory_process.html
- [19] Synopsis, *Sentaurus Topography*, <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/process-simulation/> sentaurus-

topography.html

- [20] Coventor, *SEmulator3D*, <http://www.coventor.com/semiconductor-solutions/semulator3d/>
- [21] Otmar Ertl, Lado Filipovic, Paul Manstetten, Xaver Klemenschits, and Josef Weinbub, *ViennaTS - The Vienna Topography Simulator*, <https://github.com/viennats/viennats-dev>
- [22] M. Elwenspoek, H.V. Jansen, *Silicon Micromachining*, Cambridge University Press, UK, 2004.
- [23] M.A. Gosálvez, K. Sato, A.S. Foster, R.M. Nieminen, H. Tanaka, "An atomistic introduction to anisotropic etching", *J. Micromech. Microeng.*, 17, S1-S26, 2007.
- [24] T.J. Hubbard, *MEMS Design - Geometry of silicon micromachining*, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 1994.
- [25] S. Osher, J.A. Sethian, "Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations", *J. Comp. Phys.* 79, 12-49, 1988.
- [26] R. Whitaker, "A Level-Set Approach to 3D Reconstruction From Range Data", *Int. J. Comp. Vision*, 29, 203-231, 1998.
- [27] B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, M. Mitrić, "Level set approach to anisotropic wet etching of silicon", *Sensors* 10, 4950-67, 2010.
- [28] J. Sethian, *Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Fluid Mechanics, Computer Vision and Materials Sciences*, Cambridge University Press, UK, 1998.
- [29] S. Osher, R. Fedkiw, *Level Set Method and Dynamic Implicit Surfaces*, Springer-Verlag, New York, NY, 2002.
- [30] R. Tsai, S. Osher, "Level Set Methods and Their Applications in Image", *Science.Comm. Math. Sci.*, 1, 623-656, 2003.
- [31] R. Fedkiw, G. Sapiro, C. Shu, "Shock capturing, level sets, and PDE based methods in computer vision and image processing: a review of Osher's contributions", *J. Comput. Phys.* 185, 309-341, 2003.
- [32] NLM Insight Segmentation and Registration Toolkit, <http://www.itk.org>
- [33] J.A. Sethian, "Evolution, Implementation, and Application of Level Set and Fast Marching Methods for Advancing Fronts", *J. Comp. Phys.* 169, 503-555, 2001.
- [34] B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, M. Mitrić, "Non-convex Hamiltonians in 3D level set simulations of the wet etching of silicon", *Appl. Phys. Lett.* 89, 213102 (1-2), 2006.
- [35] B. Radjenović, J.K. Lee, M. Radmilović-Radjenović, "Sparse field level set method for non-convex Hamiltonians in 3D plasma etching profile simulations", *Computer Physics Communications* 174, 127-132, 2006.
- [36] B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, "3D simulations of the profile evolution during anisotropic wet etching of silicon", *Thin Solid Films*, 517, 4233-4237, 2009.
- [37] FLTK Fast Light Toolkit, <http://www.fltk.org>
- [38] VTK The Visualization Toolkit, <http://www.vtk.org>
- [39] Paraview, <http://www.paraview.org/>

Tehnička dokumentacija

Radovi kategorije M20 kao dokaz umesto ugovora o prodaji, prema PRAVILNIKU O POSTUPKU, NAČINU VREDNOVANJA I KVANTITATIVNOM ISKAZIVANJU NAUČNOISTRAŽIVAČKIH REZULTATA ISTRAŽIVAČA ("Sl. glasnik RS", br. 24/2016, 21/2017 i 38/2017):

-M.M. Smiljanić, B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, Ž. Lazić, V. Jović, "Simulation and experimental study of maskless convex corner compensation in TMAH water solution", *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 24, No. 11, 2014, <https://doi.org/10.1088/0960-1317/24/11/115003>

ISSN: 0960-1317

IF: 1.790 (2012) (M21)

-M.M. Smiljanić, Ž. Lazić, B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, V. Jović, "Evolution of Si Crystallographic Planes-Etching of Square and Circle Patterns in 25 wt % TMAH", *Micromachines*, 10(2), 102, Jan. 2019. <https://doi.org/10.3390/mi10020102>

ISSN: 2072-666X

IF: 2.426 (2018) (M22)

-M.M. Smiljanić, Ž. Lazić, V. Jović, B. Radjenović, M. Radmilović-Radjenović, "Etching of Uncompensated Convex Corners with Sides along $\langle 110 \rangle$ and $\langle 100 \rangle$ in 25 wt% TMAH at 80 °C", *Micromachines*, 11(3), 253, Feb. 2020. <https://doi.org/10.3390/mi11030253>

ISSN: 2072-666X

IF: 2.426 (2018) (M22)

Tehnička rešenja:

Milče M. Smiljanić

M81

1. Z. Đurić, **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, M. Matić, J. Matović, „Visokotemperaturni SOI SP-9 piezootporni senzor pritiska“, novi proizvod ili tehnologija uvedeni u proizvodnju, TR-6151 MNTR, korisnik IHTM, 2007
2. Ž. Lazić, M. Popović, M. Matić, Z. Đurić, K. Radulović, M. Sarajlić, **M. M. Smiljanić**, D. Vasiljević-Radović, „Minijaturni Piezootporni Senzor Pritiska SP12“, novi proizvod, TR 32008, korisnici Elektroprivreda Srbije, Železnice Srbije, 2011
3. Ž. Lazić, **M. M. Smiljanić**, Z. Đinović, M. Rašljić, K. Radulović, K. Cvetanović-Zobenica, D. Vasiljević-Radović, "Aktuator na bazi promene zapremine parafina PCA-2 (Phase-Change Actuator) ", TR-32008 MPN, 2017
4. Ž. Lazić, **M. M. Smiljanić**, Z. Đinović, M. Rašljić, K. Cvetanović-Zobenica, D. Vasiljević-Radović, "Opto-fluidna platforma za praćenje ćelija raka", TR-32008 MPNTR, 2018.

M83

1. Ž. Lazić, J. Matović, **M. M. Smiljanić**, M. Sarajlić, "Tehnološki postupak oslobađanja SiO₂ mikrogredica iz rastvora", novi tehnološki postupak, TR-6151 MNTR, korisnik IHTM, 2007
2. M. M. Smiljanić, Ž. Lazić, "Formiranje MEMS struktura sa više nivoa uz pomoć maskless nagrizanja", novi tehnološki postupak, TR-6151 MNTR, korisnik IHTM, 2007
3. V. Jović, J. Lamovec, D. Tanasković, **M. M. Smiljanić**, M. Vorkapić, B. Popović, M. Popović, Ž. Lazić, „Realizacija dubokih otvora u monokristalnom Si sa ciljem inkapsulacije mikro-elektro-mehaničkih (MEM) komponenti“, novi tehnološki postupak, TR-11025 MNTR Beograd, korisnik IHTM, 2010
4. **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, V. Jović, K. Radulović, B. Vukelić, B. Popović, D. Vasiljević-Radović, „Primena tehnike *maskless* nagrizanja u vodenom rastvoru TMAH u realizaciji SOI SP-11 i usavršavanju SP-9 i SP-12 senzora pritiska“, novi tehnološki postupak, TR-32008 MPN, 2012
5. V. Jović, J. Lamovec, I. Mladenović, **M. M. Smiljanić**, D. Todorović, Ž. Lazić, B. Popović, B. Vukelić, „Realizacija silicijumskih mikrogredica za fotoakustična merenja“, novi tehnološki postupak, TR-32008 MPN, 2012
6. Ž. Lazić, **M. M. Smiljanić**, M. Rašljić, I. Mladenović, K. Radulović, M. Sarajlić, D. Vasiljević-Radović, „Vlažno hemijsko nagrizanje Pyrex stakla sa maskirajućim slojem Cr/Au“, novi tehnološki postupak, TR-32008 MPN, 2013
7. **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, V. Jović, M. Rašljić, K. Cvetanović, D. Vasiljević-Radović, „Kompenzacija konveksnog ugla u vodenom rastvoru TMAH koncentracije 25 tež. %“, novi tehnološki postupak, TR-32008 MPN, 2014
8. V. Jović, Z. Đjinović, F. Radovanović, M. Starčević, J. Lamovec **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, B. Popović, M. Vorkapić, „ Realizacija PDMS (PoliDiMetilSiloksanskih) membrana nad definisanim otvorima u Si {100} orijentacije postupcima zapreminskog mikromašinstva“, novi tehnološki postupak, TR-32008 MPN, 2014

M84

1. **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, Z. Đurić, M. Matić, J. Matović, „Modifikovani SP-6 senzor niskog pritiska sa bosom koji je određen {311} ravnima“, bitno poboljšani postojeći proizvod, TR-6151 MNTR Beograd, korisnik IHTM, 2007

2. Z. Đurić, V. Jović, M. Popović, Ž. Lazić, K. Radulović, **M. M. Smiljanić**, „Zaštita Si pločica u procesima vlažnog nagrizanja pri izradi mikroelektromehaničkih komponenata i sistema (MEMS)“, poboljšana postojeća tehnologija, TR-11027 MNTR Beograd, korisnik IHTM, 2009
3. Ž. Lazić, Z. Đurić, M. Popović, **M. M. Smiljanić**, „Postupak dvostrane fotolitografije za izradu MEMS-NEMS struktura“, bitno poboljšan tehnološki postupak, TR-11027 MNTR Beograd, korisnik IHTM, 2009
4. M. Matić, V. Jović, B. Popović, M. Vorkapić, **M. M. Smiljanić**, J. Lamovec, D. Tanasković, M. Popović, Ž. Lazić, „Montaža MEM piezorezistivnih senzora relativnog pritiska korišćenjem niskotopivog stakla („glass frit“)“, bitno poboljšan tehnološki postupak, TR-11025 MNTR Beograd, korisnik IHTM, 2010
5. Ž. Lazić, **M. M. Smiljanić**, M. Popović, Z. Đurić, „Poboljšanje tehnološkog procesa fotolitografije uvođenjem hromnih fotolitografskih maski i pozitivnog fotorezista“, bitno poboljšana postojeća tehnologija, TR-11027 MNTR Beograd, korisnik IHTM, 2010

M85

1. Z. Đurić, Ž. Lazić, **M. M. Smiljanić**, I. Jokić, D. Vasiljević-Radović, D. Randelović, K. Radulović, „Zlatne AFM-gredice U- i V-oblika za merenje magnetske sile, magnetskog polja i intenziteta struje u provodnicima“, laboratorijski prototip, TR-6151 MNTR, korisnik IHTM, 2007
2. Z. Đurić, I. Jokić, D. Vasiljević-Radović, D. Randelović, **M. M. Smiljanić**, „Metoda karakterizacije konstante krutosti provodne mikrogredice merenjem ugiba gredice pod dejstvom magnetske sile u polju stalnog magnet“, nova metoda, TR-6151 MNTR, korisnik IHTM, 2007
3. Ž. Lazić, **M. M. Smiljanić**, M. Popović, „Piezootporna bimaterijalna mikrogredica na SOI“, laboratorijski prototip, TR-6151 MNTR, korisnik IHTM, 2007
4. Z. Đurić, I. Jokić, D. Vasiljević-Radović, D. Randelović, **M. M. Smiljanić**, M. Frantlović, „Metoda za merenje malih elektromagnetskih sila pomoću AFM-a u statičkom i dinamičkom režimu rada“, nova metoda, TR-6151 MNTR, korisnik IHTM, 2007
5. **M. M. Smiljanić**, Z. Đurić, Ž. Lazić, B. Popović, M. Popović, „Transdjuser pritiska gasova za visoke temperature“, laboratorijski prototip, TR-6101 MNTR, korisnik IHTM, 2007
6. Z. Đurić, I. Jokić, **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, D. Randelović, D. Vasiljević-Radović, K. Radulović, M. Frantlović, „Mikrogredice od zlata za detekciju i merenje malih koncentracija žive u gasovitoj sredini“, laboratorijski prototip, TR-11027 MNTR Beograd, korisnik IHTM, 2008
7. M. Rašljčić, I. Gadjanski, **M. M. Smiljanić**, N. Z. Janković, Ž. Lazić, K. Cvetanović-Zobenica, „Izrada mikrokanala uz pomoć 3D štampe i PDMS“, TR-32008 MPN, 2017
8. M. Rašljčić, **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, K. Cvetanović-Zobenica, A. Filipović, M. Sarajlić, D. Vasiljević-Radović, „Dvostrano vlažno hemijsko nagrizanje Pyrex stakla“, TR-32008 MPNTR, 2018.
9. P. Poljak, M. Frantlović, **M. M. Smiljanić**, Ž. Lazić, I. Jokić, D. Randelović, O. Jakšić, D. Tanasković, D. Vasiljević-Radović, „Aparatura za automatsku karakterizaciju silicijumskih piezootpornih MEMS senzora pritiska“, TR-32008 MPNTR, 2018.

M81-Novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na međunarodnom nivou

Autori: Branislav Radjenović, Milče M. Smiljanić, Marija Radmilović-Radjenović

Softver za nagrivanje silicijuma LSPro

Ključne reči: level set metoda, silicijum, vlažno anizotropno hemijsko nagrivanje, TMAH, MEMS

Naručilac: NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Realizator: NU Institut za fiziku, NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Rukovodilac projekta:

Godina izrade: 2014-2020.

Godina primene/primena od strane: 2020./NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Naučna oblast: Tehničko-tehnološke nauke

Naučnadisciplina: Elektronika, telekomunikacije i informacione tehnologije

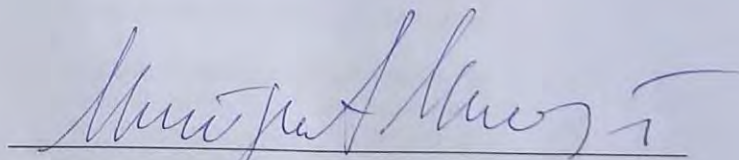
Mišljenje

Vlažno hemijsko nagrivanje silicijuma u vodenom rastvoru 25% TMAH je tehnološki proces koji se koristi za izradu različitih trodimenzionalnih struktura od silicijuma. U ovom tehničkom rešenju je razvijen i uspešno implementiran softver LSPro za nagrivanje silicijuma. Date su najvažnije karakteristike softvera. Izvršeno je testiranje softvera tako što su analizirani profili nagrivanja dobijeni simulacijom i odgovarajuće silicijumske strukture dobijene nagrivanjem. Uočena je dobra saglasnost između simulacije i eksperimenta.

U skladu sa gore iznetim činjenicama, tehničko rešenje ispunjava uslove da bude priznato kao novo tehničko rešenje M 81 u skladu sa Pravilnikom o postupku, načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača, Сл. гл. РС бр.24/2016, 21/2017 i 38/2017).

16. Mart 2020,

U Beogradu,



Dr Miodrag Mitrić, naučni savetnik

Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu

M81-Novo tehničko rešenje (metoda) primenjeno na međunarodnom nivou

Autori: Branislav Radjenović, Milče M. Smiljanić, Marija Radmilović-Radjenović

Softver za nagrivanje silicijuma LSPro

Ključne reči: level set metoda, silicijum, vlažno anizotropno hemijsko nagrivanje, TMAH, MEMS

Naručilac: NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Realizator: NU Institut za fiziku, NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Rukovodilac projekta: /

Godina izrade: 2014-2020.

Godina primene/primena od strane : 2020/ NU IHTM-Centar za mikroelektronske tehnologije

Naučna oblast: Tehničko-tehnološke nauke

Naučna disciplina: Elektronika, telekomunikacije i informacione tehnologije

Mišljenje

Proizvodnja trodimenzionalnog oblika od silicijuma tehnikama zapreminskog mikromašinstva je često veoma komplikovana. Glavna metoda za fabrikaciju trodimenzionalnih struktura je vlažno anizotropno hemijsko nagrivanje. Ukoliko se pre projektovanja ne izvrši simulacija procesa nagrivanja, dobijena morfologija fabrikovane strukture obično nije zadovoljavajuća. Da bi se dobio željeni profil, neophodno je izraditi veliki broj struktura ponavljanjem eksperimenata za različite oblike maskirajućih slojeva i za različite vrednosti procesnih parametara, što je zahtevan, mukotrpan, dugotrajan i skup proces. Korišćenje softvera za simulaciju procesa nagrivanja silicijuma pri projektovanju smanjuje troškove razvoja i proizvodnje. U cilju projektovanja maske za nagrivanje vrši se simulacija nagrivenog profila za veliki broj dvodimenzionalnih maskirajućih slojeva. Rezultati simulacija koji najbliže odgovaraju željenoj morfologiji strukture određuju optimalni dizajn maske za proizvodnju. U ovom tehničkom rešenju je dat razvoj programskog paketa za vlažno anizotropno hemijsko nagrivanje silicijuma LSPro. Za praćenje evolucije profila korišćen je metod skupa funkcija nivoa. Parametri softvera su kalibrisani na osnovu mnogobrojnih eksperimentalnih rezultata. Softver je detaljno opisan i izvršeno je testiranje. Rezultati testova su pokazali da postoji veoma dobro poklapanje između profila nagrivanja dobijenih simulacijom sa profilima odgovarajućih silicijumskih struktura koje su eksperimentalno realizovane. Opis tehničkog rešenja je prikazan u časopisu kategorije M21.

U skladu sa gore iznetim činjenicama, tehničko rešenje ispunjava uslove da bude priznato kao novo tehničko rešenje kategorije M81 u skladu sa Pravilnikom o postupku, načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača, „Sl. glasnik RS” br. 24/2016, 21/2017 i 38/2017.

U Beogradu,

Mart 2020.



dr Vladimir Arsoski, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Министарство просвете, науке и технолошког развоја
Матични научни одбор за електронику, телекомуникације
и информационе технологије
ТР096/31.07.2020

Институт за хемију, технологију и металургију
Универзитет у Београду

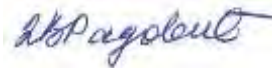
Поштовани,

На основу захтева за верификацију техничког решења под насловом „Софтвер за симулацију нагризања силицијума LSPro“, чији су аутори Бранислав Рађеновић, Милче Смиљанић и Марија Радмиловић, чланови Матичног научног одбора за електронику, телекомуникације и информационе технологије су на својој седници одржаној 31. јула 2020. године, разматрали исти и донели одлуку да су у складу са условима које предвиђа *Правилник о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача* („Службени гласник РС“, број 24/2016, 21/2017 и 38/2017):

„ИСПУЊЕНИ СВИ ПРОПИСАНИ УСЛОВИ ЗА ДОДЕЛУ КАТЕГОРИЈЕ

М81 „Ново техничко решење (метода) примењено на међународном нивоу“.

С поштовањем,



др Дана Васиљевић-Радовић

председник Матичног научног одбора за
електронику, телекомуникације и
информационе технологије