

FER Fakultet elektrotehnike i računarstva

Senzorske tehnologije

ak. god. 2021./2022.

Zavod za elektroničke sisteme i obradbu informacija

Tehnologija MEMS senzora

doc. dr. sc. Dinko Oletić
prof. dr. sc. Mario Cifrek
doc. dr. sc. Željka Lučev Vasić

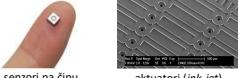
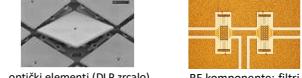
Sadržaj

- Materijali u izradi MEMS senzora
- Čista soba (*cleanroom*)
- Priprema podloge (*wafer*)
- Mikrostrukturiranje litografijom
- Tehnike depozicije tankih slojeva (*deposition*)
- Tehnike jetkanja materijala (*etching*)
- Mjerjenja, karakterizacija
- Primjeri tehnoških procesa - MEMS senzori ultrazvučnih emisija

Senzorske tehnologije

2

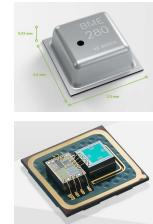
Uvod

- Mikroelektromehanički sustavi (*MEMS – microelectromechanical systems, microsystems*)
 

- Primjeri MEMS senzora
 

FER Senzorske tehnologije 3

Uvod

- Primjena poluvodičkih tehnologija, materijala i proizvodnih procesa u izradi senzora
 - Senzor na čipu – funkcionalni elementi mikro/nanometarskih dimenzija
 - Masovna proizvodnja, niska cijena
- Što donosi skaliranje?
 - Smjerenje dimenzija – praktičnost, integracija s mikroelektroničkim sklopovljem
 - Nabala reda – ista (makroskopske) svojstva materijala, ali različiti odnosi fizikalnih veličina (npr. masa, udaljenost → odnos gravitacije i elektrostatske sile)
 - Osjetljivost – ovisi o konkretnoj vrsti senzora (jednako, povećanje, smanjenje)
 - Pouzdanoć – ovisi o dizajnu, materijalima, načinu pakiranja
- Integracija senzora s mikroelektroničkim sklopovljem
 - Senzorska sučelja – analoga prilagoda, A/D pretvornja, digitalna obrada, komunikacija
 - Inteligentni senzori – umjeravanje, kompenzacija utjecajnih veličina, dijagnostika
 - Smjer → digitalna obrada signala, detekcija/klasifikacija na čipu
 - Kompatibilnost MEMS i CMOS procesa ograničena (materijali, sljed tehnoloških koraka)



Senzorske tehnologije

4

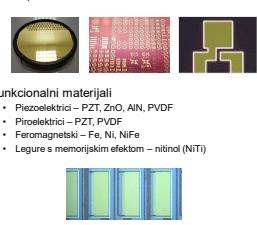
Primjer: MEMS senzori ultrazvučnih emisija

- Senzorski sustavi za analizu ultrazvučnih emisija (industrija, materijali, stanje strojeva, infrastrukture, znanost)
 - Veličina, odziv piezoelektričnih senzora (cm), potrošnja električnog sustava za A/D pretvorbu, obradu, pohranu (mW)
- MEMS izvedba polja pasivnih piezoelektričnih mikromehaničkih filtera
 - Minijaturnizacija (μm), smanjenje potrošnje električnog senzorskog sučelja (μW, "near-zero power") – osjetljivost?

FER Senzorske tehnologije 5

Materijali

- Podloge (substrati)
 - Kristalni – najčešće silicij, Si, SiC (visoke temperature)
 - Amorfni (stakla) – silikatno (Pyrex), kvarcno (slika, SiO₂)
 - Keramike – Al₂O₃, AlN, Si₃N₄
 - Polimeri – poliamid (PA), polikarbonat (PC), PMMA, PDMS
- Mehanički strukturni slojevi
 - Gradivni – polikristalni silicij (*poly-Si*)
 - Potporni (*sacrificial*), stop-maske – SiO₂, foto-polimeri
- Izolatori
 - Električki, pasivizacija – SiO₂, Si₃N₄
 - Difuzijske banjere – W, Ta
- Funkcionalni materijali
 - Metali – Al, Au, Pt, legure Al/Si, Cr/Au, Ni/Cr
 - Pričlanjanje na podlogu (*adhesive layer*) – Ti, Cr, Zr
 - Doprirani Si

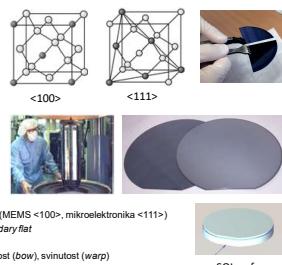


Senzorske tehnologije

6

Materijali – monokristalni silicij

- Mehanička svojstva**
 - Kubična kristalna rešetka → **anizotropija**
 - Elastični materijal: $<100> E = 1.3 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2, v = 0.28$
 - Krki materijal, pravilni lom uzduž kristalne rešetke
 - Dobra topilska vodljivost: $\lambda = 157 \text{ W/mK}, \alpha = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
- Električne značajke**
 - Promjena vodljivosti dopiranjem – veliki raspon, 10^6
 - p-tip (B), $\rho = 2 \cdot 10^{-1} - 1.5 \cdot 10^{-4} \Omega\text{cm}$
 - n-tip (P, As, Sb), $\rho = 50 - 3 \cdot 10^{-4} \Omega\text{cm}$
- Silicijski waferi**
 - Prozvodnja tehnikom Czochralski
 - Parametri: tip dopiranja (p/n) vodljivost (Ωcm), kristalna orijentacija (MEMS $<100>$, mikroelektronika $<111>$)
 - Standardizirane oznake orijentacije, dopiranja – *primary flat, secondary flat*
 - Standardni promjer za MEMS 2", 4", 6": debeline 300-800 μm
 - Geometrijske nepravilnosti – varjabilnost debline (TVT), zakrivljenost (bow), svinutost (warp)
 - Posebne izvedbe: dvostrani (SOI, silicon-on-insulator), ukopani (cavity-SOI, CSOI)...

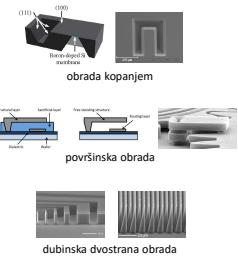


Senzorske tehnologije

7

Tehnološki postupci izrade MEMS senzora

- Pristupi izradi MEMS struktura:**
 - Obrada kopanjem (bulk micromachining)**
 - Anizotropno kemijsko jetkanje Si wafra
 - Geometrijski određena smjerom kristalne rešetke
 - Površinska obrada (surface micromachining)**
 - Depozicija i rezanje materijala na površini popornog SiO₂
 - Ograniklenje – dejstva strukture, materijal, mehanička svojstva
 - Dubinska dvostrana obrada (SOI-based micromachining)**
 - Proizvoljna geometrija – duboki, uski jaci, vertikalni zidovi
 - Kompliciranji proces, oprema – suho jetkanje u plazmi
- Izrada – slijedi uzastopnih koraka, svaki uključuje:**
 - Preparacija wafera (prethodni korak)
 - Mikrostrukturniranje litografijom
 - Tehnološki proces izrade
 - Aditivni – depozicija materijala
 - Subtraktivni – jetkanje materijala
- Razvoj MEMS senzora je iterativni, eksperimentalni postupak**
 - Pronaći optimalni skup parametara svakog tehnološkog procesa – "recept"

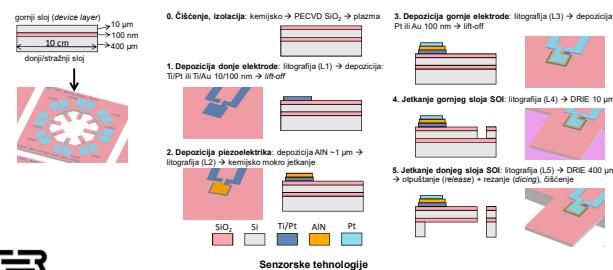


Senzorske tehnologije

8

Primjer: Koraci tehnološkog procesa, ultrazvučni rezonatori

- Podloga: dvostrani SOI wafer, promjer 4" (10 cm), <100> silicij, gornji sloj 10 μm



Senzorske tehnologije

9

Tehnologija čistih soba (cleanroom)

- Radni prostor za izradu MEMS senzora**
 - Smještaj opreme i instrumenata
 - Kontrolirani mikroklimatski uvjeti, sigurne avansirane kompjuterske tehnologije, 2. generacija
 - Ventilačna klimatizacija, razvod plinova, raspodjelni tekućina, skladištenje kemijskih agensija, zbrinjavanje i rekuperacija produkata (tekućine, plinovi), sigurnost, protupožarna zaštita...
 - Visoki troškovi pogona, održavanja

• Odjeća, procedure

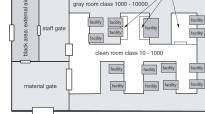
- Pristup, ulazak, rad, sigurnost



• Čistota zraka – ISO i FED klasifikacija

ISO	FED 209 D*		FED 209 E		0,1 μm	0,3 μm	0,5 μm
	10	100	1000	10000			
ISO 1	10	100	1000	10000	4	4	4
ISO 2	20	200	2000	20000	35	35	35
ISO 3	30	315	3150	31500	50	50	50
ISO 4	40	400	4000	40000	70	70	70
ISO 5	1000	10000	100000	1000000	3234	3234	3234
ISO 6	10000	100000	1000000	10000000	123400	123400	123400
ISO 7	100000	1000000	10000000	100000000	3234000	3234000	3234000

MEMS



Senzorske tehnologije

10

Vrste, namjene čistih soba

- Istraživačka – MEMS, elektronika, materijali, optika...**
 - Razvoj, prototipna proizvodnja, edukacija, laboruka
 - Samostalno rukovanje, slobodno kombiniranje procesa
 - Primer – C2N, Pariz, 2900 m², ISO 4 (class 10)
- Industrijska**
 - Masovna proizvodnja, visoka razina automatizacije
 - Strogo definirani procesi (npr. MEMSCAP PiezoMUMPs...)
 - TSMC, Samsung, Global Foundries, Infineon...



Senzorske tehnologije

11

Priprema podloge – čišćenje wafera

- Odstranjivanje kontaminanata**
 - Lebdeće čestice (prasišta, koga, metalne čestice, organski spojevi, slojevi oksida)
 - Izvori – prethodni koraci tehnološkog procesa, procesni medij (plinovi, tekućine, zrak, čovjek)
- Kemijski postupci čišćenja**
 - Organiske tvari (foto-polimerni, masli, vosak) – **aceton / izopropanol**: dušična kiselina HNO₃
 - Metali Cu, Ag, Ni, Co, Cd – NH₄OH/H₂O₂/H₂O, Au, Cr, Fe, Na – HCl/H₂O₂/H₂O
 - Oksidi, SiO₂ – fluorovodika kiselina HF
 - Isprijanje u **deioniziranoj vodi** – praćenje električne otpornosti kupuje
 - Susjedje s N₂ ili u centrifugama
- Čišćenje plazmom**
 - Vakuum, uvođenje plina (O₂, N₂), visoki napon → ionizacija plina
 - Skidanje ostataka foto-polimera (litografija, jetkanje)
 - Čišćenje metalnih elektroda, aktivacija površine, bolje prijenanje (depozicija, spajanje substrata – bonding, čišćenje – wire-bonding)



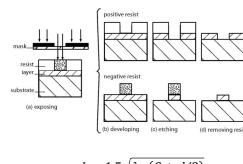
Senzorske tehnologije

12

Mikrostrukturiranje – litografija

- Prijenos 2D geometrijskog uzorka na polimer koji služi kao stop-maska za selektivnu obradu podloge
 - Suha i mokra jetkanja, dopiranje, depositu postupkom *lift-off*
 - Osmogućiti umnažanje dizajna, masovnu proizvodnju
- Naćini prijenosa uzorka na polimer
 - Fotolitografija – UV, rendgenske zrake (*UV photolithography*)
 - Nanosem Cesticama** – elektronska ili ionska zraka (*ion-beam or electron-beam lithography*)
 - Mehaničkim utiskivanjem (*nanoprint lithography*)
 - Preko litografske maske, krom na staklu
 - Bez maske (*mask-less lithography, direct-writing*)
- UV fotolitografija
 - Fotolitografija – živina lampa $\lambda = 436 \text{ nm}$, 365 nm ; LED; laser
 - Ogib svjetla na maski (debljina d, udaljenost maske G) → najmanja veličina uzorka (*feature-size, L*)

$$L = 1,5\sqrt{\lambda} \cdot (G + d/2)$$
 - Foto-osjetljivi polimeri (*photo-resist*)
 - Positiv** – osjetljivi dio depolimeriza, uzorak istovjetan maski, PMMA, DNQ, AZ5214...
 - Negativ** – osjetljivi dio polimeriza, uzorak komplementarni maski, SU8
 - Poravnavanje slojeva uzastopnih koraka procesa – optički uređaji, markeri na litografskim maskama i podlozi



Senzorske tehnologije

13

Mikrostrukturiranje – UV fotolitografija

Slijed koraka procesa UV fotolitografije

- Specifično se prilagođava namjeni, procesu obrade koji slijedi
- Izbor, debljina, priprema foto-polimera, parametri osjetljivljavanja, razvijanja



1. Nanošenje foto-polimera

- dišćenje aceton / izopropanol / N₂
- predpriprema (hot-plate), npr. 100 °C, 30 s
- nanošenje centrifugom, d ~ \sqrt{a} (spin-coating), npr. n = 4000 rpm, držat = 2000 rpm/s, t = 30 s

2. Termička priprema (softbake, prebake)

- stvarljivanje, uklanjanje otpala
- gnjata ploča (hot-plate) ili pecnicu profili (sljed temperature, trajanje)
- čekanje na polimer, namjenski

3. Poravnavanje i osvetljivanje (alignment, exposure)

- poravnavanje s prethodnim slojevima na podlozi (mask-aligner)
- postavljanje na UV stajolu sa maskama na foto-polimer na podlozi
- konačno vrijeme (s) ili doza (mJ)

4. Razvijanje i provjera (development, inspection)

- termička obrada (stopti valovi od osvetljivanja)
- razvijanje u obrazicima kemijskim jetkanjem
- postavljanje obrazica (hardbake) – bolje prianjanje, uklanjanje otpala
- inspekcija – vizualno, optički mikroskop

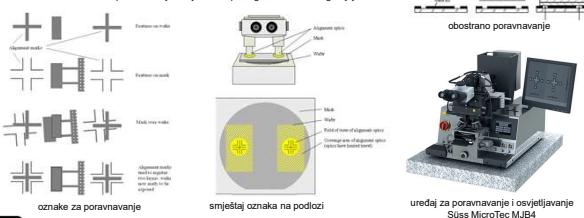
Senzorske tehnologije

14



Mikrostrukturiranje – poravnavanje uzastopnih slojeva

- Uredaj za optičko poravnavanje litografske maske s podlogom (*mask aligner*) i UV osvetljivanje (*exposure*)
 - Metode osjetljivanja – kontaktna, iz bliza (*proximity*), projekcijska
 - Sustav vizualnih oznaka, markera za poravnavanje na maski i podlozi (*alignment marks*)
 - Obostrova obrada → poravnavanje donje strane podloge s maskom na gornjoj strani



Senzorske tehnologije

15

Primjer: fotolitografske maske za ultrazvučne rezonatore – 1

Istovremena izrada velikog broja prototipova čipova na istoj podlozi (*waferu*)

- Isplivanje različitih geometrija rezonatora: gređa (pravokutna, trapez, trokut, most, membrana)



Varijacije broja, duljina, širina elemenata, dizajna okopka, elektroda, orijentacije piezoelektrika (d_{33}/d_{31})

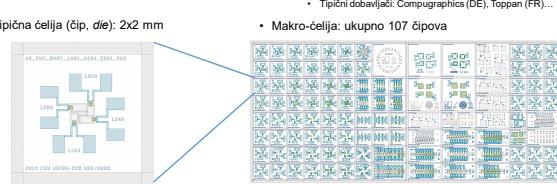


Senzorske tehnologije

16

Primjer: fotolitografske maske za ultrazvučne rezonatore – 2

- Hijerarhijski dizajn, 5 slojeva / maski:
 - L1 – donja metalna elektroda (negativ)
 - L2 – piezoelektrični film (pozitiv)
 - L3 – gornja metalna elektroda (negativ)
 - L4 – DRIE jetkanje gornje strane (negativ)
 - L5 – DRIE jetkanje donje strane (negativ)
- Tipična čelija (čip, die): 2x2 mm
- CAD alati za projektiranje
 - LASI, LayoutEditor, Klayout, MAGIC, Cadence
- Izrada maski
 - 5" maska, krom, očekivana točnost (*feature-size*) 1 μm
 - Specifikacije: pozitiv/negativ, zrcaljeno (gornji/donji sloj SOI)
 - Tipični dobavljači: Compugraphics (DE), Toppan (FR)...



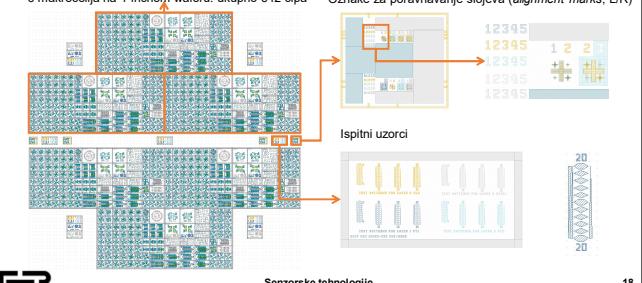
Senzorske tehnologije

17

Primjer: fotolitografske maske za ultrazvučne rezonatore – 3

6 makroćelija na 4-inčnom waferu: ukupno 642 čipa

Oznake za poravnavanje slojeva (alignment marks, L/R)



Senzorske tehnologije

18

Aditivni postupci: nanošenje tankih slojeva materijala

- Tipično od ~10 nm do oko 100 µm, materijali: silicij, metali, oksidi, nitridi, piezoelektrični

Depozicija iz tekuće faze (sputne):

- Centrifugiranje premasa (spin-coating, sol-gel)
- Elektro-kemijski (electro-chemical plating)
- Narastanje kristala (molecular beam epitaxy, MBE)

Depozicija iz plinovite faze (pare):

Kemijski (chemical vapor deposition, CVD)

- Termički (thermal oxidation, atmospheric pressure, APCVD)
 - Pri smanjenom tlaku (low pressure, LPCVD)
 - U plazmi (plasma enhanced, PECDV)

Fizičko (physical vapor deposition, PVD)

- Termičko naparivanje (evaporation, vapor deposition)
 - Ionsko bombardiranje (sputtering)
 - Laserska depozicija (pulsed laser deposition, PLD)

Značajke nanesenog tankog sloja:

- Kemijski sastav – kontaminanti, defekti kristalne rešetke
- Fizičke značajke – konformnost, hrapavost, prijanjenje, elastičnost, rezidualni stres

Technique	PVD Vapor deposition	Sputtering	APCVD	LPCVD	PECDV
Temperature	ca. 100 °C	>300 °C	400...1000 °C	400...1000 °C	200...400 °C
Process time	fast	slow	medium	fast	good
Contamination	low	high	high	low	good
Adhesion	poor	good	high	medium	good
Conformity	very bad	bad	bad	very good	very good

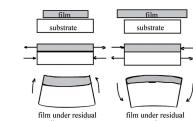
Senzorske tehnologije

19

Rezidualni stres tankih slojeva materijala

Mehanički stres u tankom sloju nakon depozicije (σ , GPa)

- Kod tankih slojeva (filmova) djeluje samo u lateralnom smjeru
- Promjena mehanička svojstva – smanjenje amplitude, pomak rezonantne frekvencije...
- Defekti, pukotine u nanesenom sloju
- Zakrivljenje površine

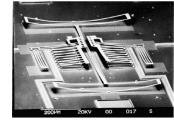


Vrste rezidualnog stresa

- Tlačni (compressive) – podloga ispušćena
- Vlačni (tensile) – podloga udubljena

Uzroci

- Razlike u gradi kristalinskih rešetki, gustoćama, koeficijentima elastičnosti, toplinskog širenja
- Kemijski sastav – kompatibilnih materijala
- Izbor tehnike depozicije
- Parametri procesa (npr. temperaturu ↔ trajanje)



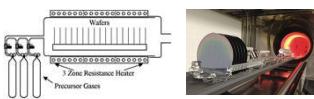
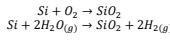
Senzorske tehnologije

20

Depozicija silicijevog dioksida, SiO_2

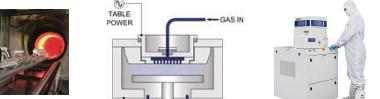
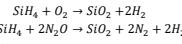
Termička oksidacija (thermal oxidation)

- Debeli konformni oksidni sloj visoke čistote, dobrih elektro-mekanickih svojstava, dobivena **izlaganjem materijala pod dugotrajnu vrućinu**
- Jednostavna oprema: pećica, 1000-1200°C
- Oksidira se u suhi, O_2 ili H_2O (ili HCl)
- Debljina ↔ trajanje (Desl-Grove model difuzije O_2 kroz SiO_2)
 - npr. mokra oksidacija $\text{Si} < 100 \text{ nm} / 1200^\circ\text{C} = 1 \text{ µm} / 85 \text{ min}$
 - Mokra oksidacija – veća brzina, manja gustoća, niži probjni napon (lošiji dielektrik), imobilizacija metalnih kontaminanata



Depozicija kemijskih para u plazmi (PECVD, plasma enhanced chemical vapor deposition)

- Niža temperatura, 200-400°C → manji rezidualni stres
- Depozicija na postojeće slojeve (potporni sloj, pasivizacija)
- Tanji slojevi, manja kvaliteta od termičkog oksida
- Kompliciranija oprema, vakuum, visoki napon, plinovi, plazma
- Plinovi – silan (SiH_4) i dušikov oksid (N_2O)
- Stični proces za depoziciju poli-silicija, silicij-nitrida – LPCVD



Senzorske tehnologije

21

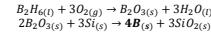
Dopiranje silicija

Promjena otpornosti Si podloge, stop-maska za kemijsko jetkanje

- Izvor nosioca n-tipa bor, B
- Izvor nosioca p-tipa fosfor, P

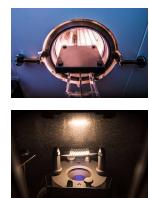
Difuzija dopanada u Si podlogu pri visokoj temperaturi

- 1) kemijska priprema → 2) termička difuzija u pećici
 - Prerađenje (trajanje, koncentracije, difuzijski profili) – Fickov model difuzije za čvrsta tijela
 - Jednostavnost, velika difuzijska dubina do 100 µm
 - Loša ponovljivost, postepena promjena koncentracije na pn-spoji
 - Izvor dopanada tekućine, visiši tlak par, B → boretan, B_2H_6 ; BF_3 , BBr_3 ; F → PH_3 , POCl_3



Implantacija iona

- Ubrzavanje iona dopanada u podlogu električnim poljem, razdjeljivanje različitih atomskih masa magnetskim poljem – visoka čistota
- Veći izbor kombinacija materijala dopanada i podloga – izrada ukapanog SiO_2 , SiC, izolatora ukapanih u metale (npr. AlN u Al)...
- Skokovita promjena koncentracije na pn-spoji, odlična ponovljivost
- Mala difuzijska dubina do 1 µm, komplikirana oprema, trajanje



Senzorske tehnologije

22

Naparivanje tankih slojeva (evaporacija)

Toplina → taljenje, isparavanje materijala (cruible) → taljenje na podlozi (wafer)

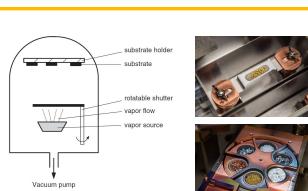
- Materijali – Al, Au, Ti, Cr, Pt, Mo, Ta, W...

Oprena

- Vakuum → smanjenje temperature taljila, kontaminacije
- Termičko grijanje (thermal evaporation) – grijanje električnom strujom (otpornički, induktivno)
- Grijanje elektronskim snopom (e-beam evaporation)
- Brzina depozicije – udaljenost, tlak, temperatura
- Mjerenje debljine sloja (završetak procesa): Δf kristalnog oscilatora

Značajke naparenih slojeva

- Mali termički stres (< 100°C), brzina procesa, jednostavnost
- Ograničen izbor materijala, loše prijanjenje, neuniformnost



Senzorske tehnologije

23

Primjer: depozicija metalnih elektroda naparivanjem – 1

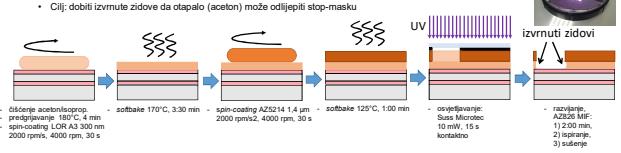
Depozicija lift-off postupkom

- Mikrostrukturiranje, razvijeni poli-pomer stop-maska
- Depozicija naparivanjem elektronskom zrakom
- Odvajanjem polimera mokrim, kemijskim jetkanjem



1. Litografsko strukturiranje stop-maske za lift-off postupak

- Cilj: dobiti izvrmute zidove da otapalo (aceton) može odlijeti stop-masku



Senzorske tehnologije

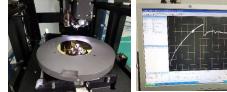
24

Primjer: depozicija metalnih elektroda naparivanjem – 2

2. a) Čišćenje plazmom O₂
• Neutral NE 100, trajanje 30 s
2. b) Evaporacija Ti/Au elektronskim snopom
• Plasys ME8800S: 1) Ti 10 nm → 2) Au 100 nm, 0,5 nm/s



2. c) Karakterizacija: profilometrija
• Dektek 8 Stylus Profiler

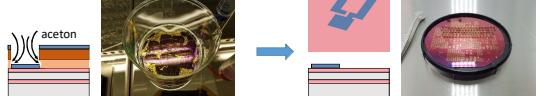


Senzorske tehnologije

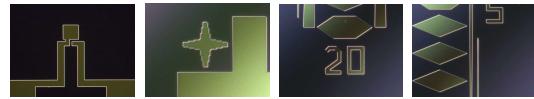
25

Primjer: depozicija metalnih elektroda naparivanjem – 3

3. a) kemijsko odvajanje - lift-off
• Aceton ~20 min, 3 kupke → ispiranje izopropanol



3. b) Karakterizacija: optička mikroskopija



Senzorske tehnologije

26



Depozicija ionskim bombardiranjem (sputtering)

- Ionizacija plina (Ar plazma) → ubrani ioni udaraju u metu (target) → izbijeni, ubrani atomi mete talože se na substrat

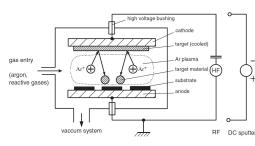
Velići izbor materijala, nekoliko metoda

- DC – vodljive mete: matali Al, Au, Pt, Ti, W...
- RF, ISM 13.56 MHz – izolatori, dielektrični (nemetalni)
- Reaktivno – oksidi (SiO₂, Al₂O₃, SnO₂), nitridi (Si₃N₄, AlN)...

Magnetron – varovalo magnetne polje povećava ionizaciju, ubrzava reakciju, smanjuje napon, poričuju energiju, većina uređaja

Značajke, u odnosu na naparivanje

- 10-100-vrednostne energije atoma mete → bolje prijanje, kolizijski → bolja konformnost, uniformnija površina
- Manja čistoća, defekti rešetke, ugradeni atomi plina
- Visoka temperatura – potreba hlađenje mete, rezidualni termički stres
- Komplikiranja opreme – visoki vakuum, plinovi, plazma, RF izvor, trošenje mete



Senzorske tehnologije

27



Primjer: Sputtering depozicija piezoelektrika, AlN

- DC magnetronsko reaktivno raspršivanje (DC magnetron reactive sputtering)

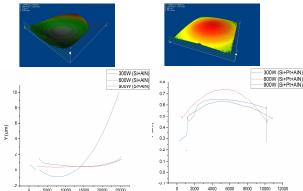
- Reaktivni plin: N₂/Ar = 1/1
- Mete: aluminij, čistoće 99,999%
- Udaljenost mete od substrata: 8 cm
- Snaga: 300 – 900 W
- Vakuum: 10⁻⁴ – 10⁻⁵ Pa
- Temperatura: 300 – 400°C
- Trajanje: 9 h za 500 nm AlN



Senzorske tehnologije

Karakterizacija tankih slojeva AlN

- Debljina – profilometrija
- Sastav – kvalitativno EDS (SEM), kvantitativno XRD
- Mehanička svojstva – interferometrija, mjerjenje zakrivljenosti → izračun Youngovog modula elastičnosti, (E), Poissonovog koeficijenta (ν), rezidualnog stresa (σ)



28

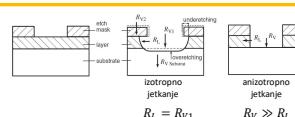
Subtraktivni postupci: jetkanje materijala

- Selektivnost jetkanja (S)
• Izbor agensa cija je brzina nagrizanja željenog sloja (R_{V1}) veća od brzine nagrizanja stop-maska (R_{V2}) ili podloge ($R_{Vsubstr}$)

$$S = R_{V1}/R_{V2}$$

$$R_{V1} \gg R_{V2}$$

$$R_{V1} \gg R_{Vsubstr}$$

R_LR_{V1}R_{Vsubstr}R_VR_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_LR_VR_{V1}R_{V2}R_{Vsubstr}R_L

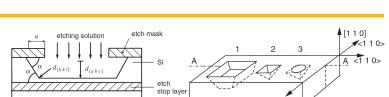
Senzorske tehnologije

29

Kemijsko jetkanje

- Namjene, tipični kemijski agensi

- Si – KOH, TMAH, EDP
- SiO₂ – HF, H_F / NH₄F (buffered-HF)
- Poli-Si – HNO₃ / HF / CH₃COOH
- Si₃N₄ – H₃PO₄ / H₂O



$$\alpha_{(111)} = 54,74^\circ$$

Kemijsko jetkanje Si podloga (bulk micromachining)

- Anizotropno (čvrsto stvaranje) – zanjedra prečizno orientiranje Si podloge, nemogućnost izveštva prečiznih oblika
- Moguće unaprijed modelirati efekte (kut α, trajanje → potkopavanje υ)
- Stop-maska SiO₂, Si₃N₄, Au, Cr



Senzorske tehnologije

30

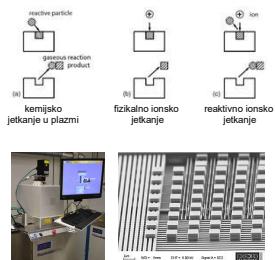
Jednostavna tehnologija (chemical bench)

- Konflikacija, sigurnost – odvojeni prostori za kiseline, lužine i otapala
- Ventilirani digestor, kupka za jetkanje, kupka za ispiranje deioniziranim vodom (mjerjenje električne vodljivosti), sušenje N₂
- Posjepavanje – elektrokemijsko, ultrazvučne vibracije, temperatura, para
- Odvodi za rekuperaciju ili zbrinjavanje (neutralizaciju) produkata



Suhu jetkanje

- Mehanizmi suhog jetkanja
 - Kemijsko jetkanje u plazmi (plasma etching) – selektivnost (S)
 - Fizičko jetkanje ionskim bombardiranjem u el. polju (ion etching)
 - anizotropija ($\lambda > 1$, strini vertikalni zidovi), loša selektivnost
 - Reaktivno ionsko jetkanje u plazmi (reactive ion etching, RIE) – selektivnost plazme i anizotropija ionskog bombardiranja
- Izvedbe reaktora za reaktivno ionsko jetkanje (RIE)
 - Kapacitativno spregnuta plazma (CCP-RIE)
 - Induktivno spregnuta plazma (ICP-RIE)
- Tipične primjene
 - Tanki slojevi Si, SiO_2 , Si_3N_4 , AlN, AlO, GaAs, GaN, foto-polimeri
 - Korisni plinovi – O_2 , SF_6 , CF_4 , CHF_3 , Ar
- Nedostaci
 - Komplikirana konstrukcija: plinovi, vakuuum, izvori napona, hlađenje
 - Rizik oštećenja uzorka UV radijacijom u plazmi
 - Sigurnost – skidatičnost toksičnih plinovih reaktanata, obrada i zadržavanje toksičnih produkata



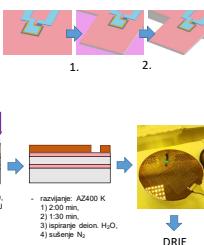
Senzorske tehnologije

31



Primjer: DRIE jetkanje geometrije užv. rezonatora – 1

- Obostrano dubinsko suho jetkanje, vertikalni zidovi (DRIE)
 - Predna strana: 10 μm
 - Stradnja strana: 400 μm
- a) Strukturiranje stop-maske UV fotolitografijom
 - SOI wafer, debeli foto-film (10 μm), potpuno okomiti zidovi



- čistjenje acetono-izopropanol
predgrijanje: 180°C, 4 min
spin-coating AZ4002
500 rpm, 2000 rpm @ 30 s
- predgrijanje: 180°C, 4 min
20 min 20-90°C + 40 min 90°C
refrigeracija 1 hr @ 20°C
- osvjetljenje: EVG620,
kontakno, dosta 325 mJ
- razvlačenje: AZ400 K
1) 2:00 min
2) 1:30 min
3) spranje decon, H_2O_2 ,
4) čuvanje: N_2
- DRIE



Senzorske tehnologije

33

Mjerenja

- Provjera uspješnosti/kvalitete pojedinačnih koraka
 - Pronalaženje, optimiranje parametara tehnološkog procesa (fotolitografija, depozicija, jetkanja)
- Karakterizacija izrađenog prototipa MEMS senzora

- Morfologija, površina
- Sastav materijala
- Mehanička svojstva
- Električka svojstva



Senzorske tehnologije

35



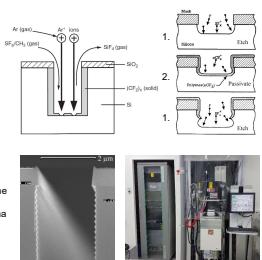
Duboko reaktivno ionsko jetkanje (DRIE, Boschov proces)

- Dubinsko jetkanje Si podloge RIE postupkom
 - Mala brzina, kosi zidovi → prikladno samo za tanke slojeve

- Duboko reaktivno ionsko jetkanje (deep reactive ion etching, DRIE, Boschov proces) – naizmjenično iteriranje:

1. Reaktivno ionsko jetkanje u plazmi (RIE) ionima Ar^+ , produkt SiF_4
2. Pasivizacija kemijskom depozicijom polimera (CF_3Cl), u plazmi (PECVD)

- Značajke u odnosu na RIE:
 - Veća brzina (RIE 50 nm/min, DRIE 500 nm/min), duboki kanali >100 μm , vertikalni zidovi $90 \pm 2^\circ$, veliki omjer dubine i širine (aspect-ratio) 30:1
 - Tekstura vertikalnih zidova (scalloping), kontrolira se frekvencijom izmjene komponente depozicije (1-10 Hz)
 - Komplikiranija oprema – veći broj plinova, hlađenje, vakuuum, izvori napona



Senzorske tehnologije

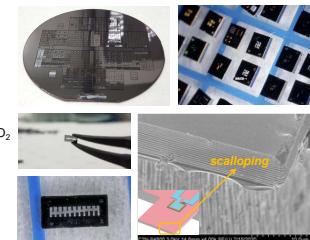
32

Primjer: Dubinsko suho jetkanje geometrije užv. rezonatora – 2

- b) Suhu jetkanje – (DRIE, Boschov proces)



- d) Karakterizacija – optički mikroskop, SEM



Senzorske tehnologije

34

Morfološka mjerenja (1D, 2D)

- Profilometrija (1D)

- Pravocrtno mjerjenje vertikalnog profila podloge (z-os)
 - Računalno upravljanje mehanička igla (stylus), regulirana sila priskice na podlogu
 - Kvadraturna provjera zadržljivosti podloge, debljine talice, dojeva nakon depozicije
 - Razlučivost – vertikalna 0,5 nm; horizontalna 1-10 μm
 - Sporsot, nije pogodno za mokre materijale



- Svjjetlosna mikroskopija (2D)

- Kvalitativna inspekcija površine
 - Provjera mikrostrukturna polimera, tijek/završetak kemijskog jetkanja
 - Brzo, nije potrebna priprema uzorka
 - Nije 3D, nema informacije o visini (z-os)
 - Horizontalna razlučivost ograničena ogibom svjetlosti (diffraction limit)



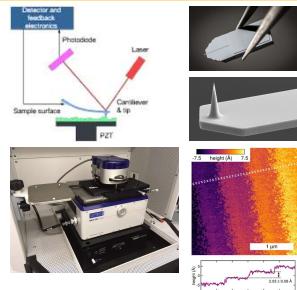
Senzorske tehnologije

36



Morfološka mjerena (3D) - mikroskop atomskih sila, AFM

- 3D vizualizacija površine u visokoj razlučivosti (atomic force microscope, AFM)
 - Minijaturizirani mehanički profilometar, vrh mikro-gredje skenira površinu (x-y)
 - Optočko očitanje pomaka vrha
- Značajke
 - Osfračna vertikalna razlučivost ~25 pm
 - Optičko detektovanje slike i vrpavosti
 - Dodata, mjeranje mehaničkih (modul elastičnosti), termičkih, elektromagnetskih (permittivnost, vodljivost) i elektromekaničkih svojstava (prezeličkivost)
 - Neki izvedbi mogu raditi kao skenirajući tunelirajući mikroskop (STM), vizualizacija kristalne rešetke metala
- Prednosti i nedostaci
 - Jednostavna konstrukcija, stolna izvedba, ne treba vakuum, visokonaponski izvor
 - Prizvoljna vrsta materijala
 - Ograničen raspon skeniranja po svim osima (x, y, z)

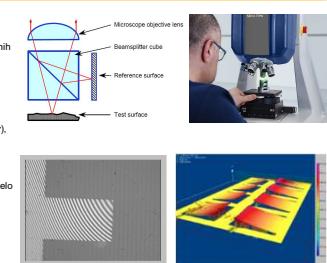


Senzorske tehnologije

37

Morfološka mjerena (3D) – optička interferometrija

- Optički sustav za 3D vizualizaciju površine uzorka
 - Interferometar (Michelson, Mirau)
 - 3D rekonstrukcija iz slijeda interferometrijskih slika snimljenih s pomacima u optičkom putu (vertikalno, <λ)
- Primjene
 - 3D mapiranje, mjerjenje udaljenosti, debeline slojeva
 - Mjerjenje hrapavosti površine (nakon jeklenje, depozicije)
 - Depozicije – mjerjenje zakrivljenosti površine → estimacija reziduelnog stresa σ, mehaničkih svojstava materijala (E, ν), koeficijenta topilinskog širenja α
- Izvedbe
 - 3D mapiranje, mjerjenje udaljenosti, debeline slojeva
 - Izvor svjetla monokromatski (valina duljina - proximost), bijelo
 - Različite metode rekonstrukcije 3D topologije
- Prednosti i nedostaci
 - Veliki raspon (1-10 μm) do manja razlučivost od AFM
 - vertikalno 1-10 nm, horizontalno 200-500 nm
 - 3D prikaz, cijena, jednostavnost, brzina, priprema uzorka
 - Osnjedljivost na vibracije i promjene temperature okoline

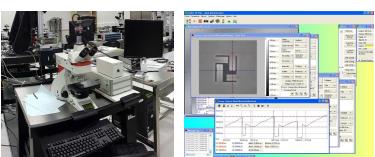


Senzorske tehnologije

38

Primjer: interferometrija uzv. rezonatora

- Interferometrijski postav Fogale Nanotech, prototip
 - Kohärentni monokromatski izvor svjetla – natrijeva lampa, A = 589 nm
 - Interferometar s Mirau-objektivom pokretanim po vertikalnoj osi (z)
 - Rekonstrukcija 3D topologije digitalnom obradom (2D-FFT) niza interferometrijskih slika istog uzorka dobivenih na različitim vertikalnim udaljenostima (uz različitu fazu)
 - Vertikalna (out-of-plane) ločljivost oko 10 nm, raspon ~ mm

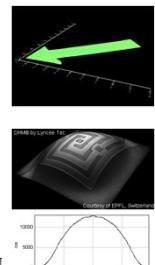


Senzorske tehnologije

39

Mehanički odziv (4D) – optička vibrometrija

- Optička vibrometrija: interferometrija uz mehaničku pobudu uzorka
 - Mjerjenje frekvencijskog odziva (pomak) u nizu interferometrijskih slika
 - mjeriti mehaničku pobudu – električni izvor signala sinkroniziran s interferometrijskim postavom pobudjuje aktuator, piezoelektrički (vibracije), grise (topilinsko širenje) ...
 - Rezonansna frekvencija, amplituda, širina pojasa, faktor dobrote
 - Stroboskopija – 3D vizualizacija kretanja uzorka u rezonanciji (modova)
- Izvedbe vibrometara
 - Skenirajući laserski, Dopplerov efekt (laser-Doppler vibrometry, LDV)
 - Digitalna holografika mikroskopija (digital holographic microscopy, DHM)

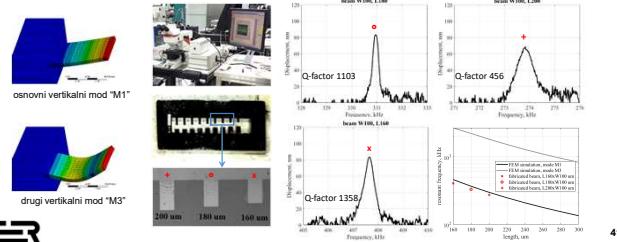


Senzorske tehnologije

40

Primjer: modovi i frekvencijski odziv uzv. rezonatora

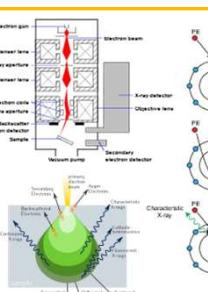
- Optička vibrometrija
 - Postav Fogale Nanotech, silicijski rezonatori zaliđeni na piezo-aktuator, pobudeni do amplitude 60-80 nm u rezonanciji
 - Pogreška rezonantne frekvencije u odnosu na FEM simulaciju 8-11%, Q-faktor 400-1400



41

Skenirajući elektronski mikroskop (SEM)

- Vizualizacija površine i kvalitativno mjerjenje sastava uzorka (scanning electron microscope, SEM)
 - Elektronski top (katod, vofram) ubrzava zraku
 - Primarnih elektrona (PE) prema uzmjerljenoj uzorku, nastaju:
 - Sekundarni elektroni (SE) – najčešći oblik obočenja površine
 - potrošljivo-raspširjeni elektroni (back-scattered electrons, BSE)
 - distribucija kemijskog sastavisa, kontrast – atomski broj
 - Rendgenske zrake – kemijski sastav uzorka, vrsta elementa (energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS)
 - 2D slika nastaje x-y skenirajućim elektronskim zrakom po površini
 - 3D sjenčanje – kut upada SE, izometrijski prikaz zakretanjem uzorka
- Značajke
 - Povećanje veće od svjetlosnog mikroskopa, do 3-10⁵, određuje ga površina skeniranja (x-y), elektroni ne podlježu granici ogiba svjetlosti
 - Horizontalna razlučivost 1-20 nm
 - Potreban vakuum, visoki napon (15-20 kV)
 - Uzorci prikladni za vakuum (čvrstoča), električki vodljivi – nevodljivi materijali se metaliziraju (stolni sputnici uredaji)



Senzorske tehnologije

42

Primjer: SEM mikroskop Hitachi S-3600N

- Skenirajući elektronski mikroskop (SEM), Hitachi S-3600N

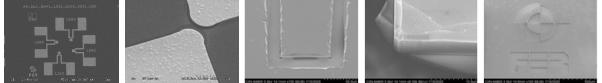


Senzorske tehnologije

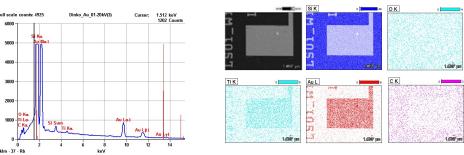
43

Primjer: SEM snimke površine i sastava užv. rezonatora

- Karakterizacija površine nakon depozicije elektroda, suhog jetkanja, kemijskog jetkanja zaostalog SiO₂ itd.



- EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy) – provjera sastava elektroda (Ti/Au)



Senzorske tehnologije

44

Električka svojstva

- Tipične mjerene veličine
 - Napon, struja
 - Frekvenčni odziv
 - Otpor, vodljivost
 - Dielektrinost, kapacitet
 - Impedancijska spektroskopija
 - S-parametri



Senzorske tehnologije

45