

TANKI SLOJEVI ALUMINIJEVA ANODNOG OKSIDA ZA PRIMJENU U DIODAMA S UČINKOM KVANTNOG TUNELIRANJA

Samostalni seminar iz istraživanja u fizici

Ana Marija Bićanić*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

Mentor: doc. dr. sc. Vedran Đerek

Grupa za opto-bioelektroniku

Laboratorij za atomsku optičku spektroskopiju

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,

Bijenička 32, Zagreb

(Dated: 22. siječnja 2023.)

SAŽETAK

U ovom seminarskom radu razrađena je procedura izrade tankih slojeva aluminijeva oksida procesom potenciostatske anodizacije. Pri tome su isprobana tri eksperimentalna postava kako bi se ispitala najbolja konfiguracija za što reproducibilnije rezultate te se odredila ovisnost debljine dobivenih slojeva o naponu anodizacije, koji je jedan od glavnih parametara procesa. Aluminijev anodni oksid je iskorišten pri izradi tzv. MIM diode, čiji se princip rada temelji na kvantnom tuneliranju nosioca naboja. Za dobivenu diodu su provjerene njezine strujno-naponske karakteristike.

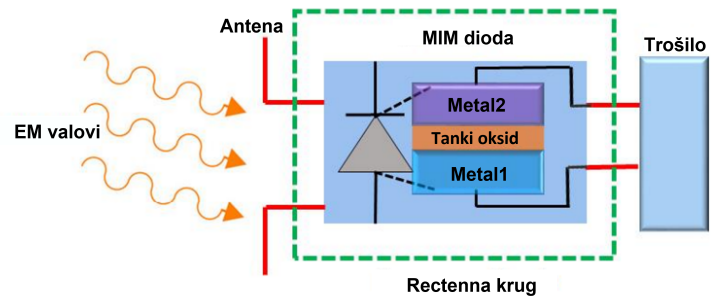
I. UVOD

Metal-izolator-metal (MIM) diode vrlo su važno područje interesa pri izradi i istraživanju svojstava solarnih ćelija. Zbog svog kratkog vremena odgovora i širokog frekventijskog pojasa, dobar su izbor ispravilačkog elementa pri izradi tzv. optičkih *rectenna* (rectifier + antenna), elektroničkog elementa koji apsorbira elektromagnetsko zračenje u anteni, konvertira ga u visokofrekventni AC signal, te prosljeđuje diodi koja ga ispravila u DC izlaz, kako bi se na taj način dobila električna energija¹⁻⁴. Strujni krug koji sadrži rectennu prikazan je na slici 1.

Takoder, MIM diode se zbog brzog mehanizma transporta elektrona kvantnim tuneliranjem te sposobnosti rada na tetraherz frekvencijama koriste i kao detektori kod bežičnih prijemnika, za infracrvenu detekciju te bežični prijenos energije^{3,4}.

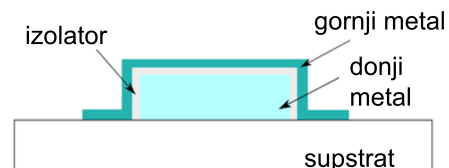
Kvantno tuneliranje

U MIM diodi, prikazanoj na slici 2, prevladavajući transportni mehanizam elektrona jest kvantno tuneliranje. Budući da se između dva sloja metala nalazi tanki sloj izolatora, primjenom napona na jedan od metala, elektroni će iz jednog sloja metala tunelirati kroz klasično zabranjeno područje izolatora u nepopunjena stanja drugog metala¹.



Slika 1. Shematski prikaz električnog kruga sa rectennom (antena + dioda) te trošilom. Preuzeto i prilagođeno iz 5.

Energetski dijagram MIM diode prikazan je na slici 3. Na njemu su označeni Fermijevi nivoi oba metala te primijenjeni prednapon. Da bi se tuneliranje dogodilo, sloj izolatora koji predstavlja barijeru treba biti dovoljno tanak (< 10 nm), kako bi vjerojatnost tuneliranja $T(E)$ bila konačna¹. Uz to, potrebna je egzistencija popunjenih energetske stanja na strani s koje elektroni tuneliraju (*Metal 2* na slici 3) te nepopunjenih energetske stanja na drugoj strani (*Metal 1* na slici 3)⁶.



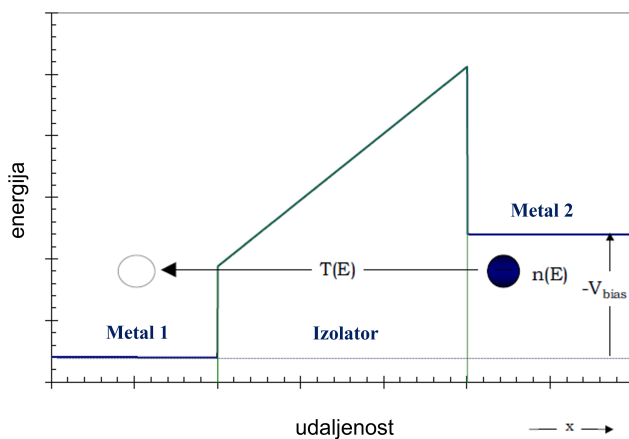
Slika 2. Shematski prikaz MIM diode.

* abicanic.phy@pmf.hr

Vjerojatnost tuneliranja opisana je širinom i visinom barijere. Širina barijere je definirana debljinom i brojem slojeva izolatora, dok visinu lijeve i desne strane barijere određuju izlazni radovi metala te elektronski afinitet izolatora⁴. Koeficijent transmisije dobiven je modificiranim Schrödingerovom jednačinom te je dan izrazom:

$$T(E) = e^{-2d\sqrt{\frac{2m(V-E)}{\hbar^2}}}, \quad (1)$$

gdje je d debljina izolatorskog sloja, m masa elektrona, V visina barijere, a E energija elektrona. Vidljivo je da se visoki transmisijski koeficijent može dobiti tankim slojem izolatora i malom visinom barijere⁷.



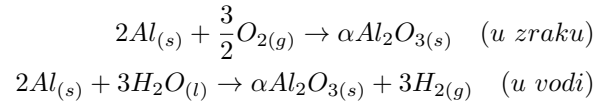
Slika 3. Primjer energetskog dijagrama MIM diode. Koncentracija elektrona $n(E)$ u metalu 2 ima vjerojatnost tuneliranja $T(E)$ u metal 1. *Preuzeto i prilagođeno iz 1.*

Fabrikacija dioda

MIM diode se fabriciraju na način da se svaki sloj diode može nanijeti drugačijom depozicijskom tehnikom. Neke od mogućih tehnika nanošenja metala na podlogu su termalna ili E-beam evaporacija, sputtering, fotolitografija te lift-off tehnike⁶. Neki od metala koji se mogu koristiti pri izradi dioda su titanij, aluminij, krom, nikal, niobij, zlato, platina, gadolinij i sl.^{1,4,6,7} Kod izbora materijala za diode potrebno je voditi računa da odabrani metali imaju dovoljno veliku razliku izlaznih radova, budući da oni definiraju karakteristike diode kao što su asimetrija i nelinearnost⁶.

Za prvi sloj metala pogodni su tzv. *valve* metali (aluminij, titanij, niobij, krom), koji formiraju tanki (\sim nekoliko nm) površinski sloj metalnog oksida u kontaktu sa zrakom ili vodom - tzv. *native oxide*. Za aluminij se stvaranje native oksida odvija prema kemijskim jed-

nadžbama⁸:



Native oksid je izolator koji može služiti kao drugi sloj u MIM diodi. Osim izlaganja uzorka metala zraku ili čistom kisiku kako bi se izgradio native oksid, neke od tehnika kojima se također može dobiti sloj metalnog oksida su plazma oksidacija, anodizacija, evaporacija te depozicija atomskih slojeva^{1,3}.

U ovom radu za izradu MIM diode su korišteni aluminij (Al) kao prvi sloj metala, aluminijev oksid (Al_2O_3 , aloks) kao izolator te eutektik indija i galija (EGaIn) kao drugi sloj metala. Eutektik je smjesa ili slitina dviju ili više tvari kojoj je talište (eutektička točka) niže od tališta pojedinih sastojaka i od bilo koje druge smjese ili slitine koja se sastoji od istih sastojaka²⁴. Za depoziciju aluminija na supstrat (Si/SiO_2) korištena je tehnika termalne evaporacije, dok se sloj aluminijevog oksida dobio procesom anodizacije. Mjerenja debljine svih slojeva uzorka napravljeni su tehnikom spektroskopske elipsometrije. Opis primijenjenih eksperimentalnih tehnika nalazi se u poglavlju II.

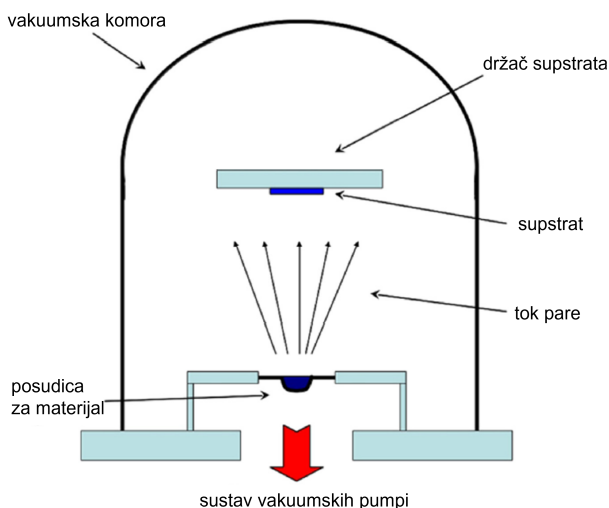
Osim fabricacije same MIM diode, cilj ovog seminara je uspostava procedure izrade tankih slojeva aluminijevog oksida, koja bi otvorila mogućnost izrade i drugih elektroničkih elemenata (tranzistora, kapacitora) koji su pogodni za razvoj biokompatibilnih elektroničkih implantata zbog poželjnih svojstava (primjerice fleksibilnosti) u odnosu na dosad korištene materijale.

II. EKSPERIMENTALNE TEHNIKE

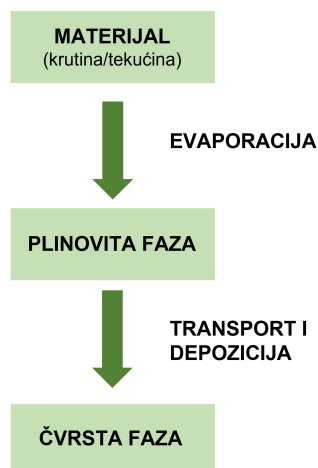
Termalna evaporacija

Termalna evaporacija jedna je od tehnika fizikalne depozicije parom (*physical vapor deposition*, PVD), kojom se u vakuumu mogu nanijeti vrlo tanki filmovi materijala na željeni supstrat. Termalna evaporacija je primjenjiva na supstrate od različitih materijala, primjerice polimera, metala i stakla, dok je skup materijala koji se mogu deponirati evaporacijom vrlo širok te uključuje većinu čvrstih materijala, oksida, karbida te sulfida⁹.

Postav za termalnu evaporaciju (slika 4) sastoji se od vakuumske komore, držača za supstrat, posudice (tzv. lađice) ili zavojnice unutar kojih se postavlja materijal koji se evaporira te sustava vakuumskih pumpi^{9,10}.



Slika 4. Shema postava za termalnu evaporaciju. *Preuzeto i prilagođeno iz 11.*



Slika 5. Etape tehnike fizikalne depozicije parom.

Kao i kod svake tehnike fizikalne depozicije parom, materijal koji želimo nanijeti na supstrat sublimira ili isparava u vakuumu zbog toga što je zagrijan na visoku temperaturu. Kako bi se materijal zagrijao do temperature koja uzrokuje prijelaz u plinovitu fazu, kroz lađicu/zavojnicu se pušta visoka DC struja koja uzrokuje Jouleovo zagrijavanje¹⁰. Atomi ili molekule materijala putuju do vrha komore gdje se nalazi supstrat te na njemu ponovno prelaze iz plinovite u čvrstu fazu¹¹. Dijagram koji prikazuje dijelove opisanog procesa nalazi se na slici 5. Budući da je srednji slobodni put atoma materijala obrnutno proporcionalan tlaku unutar komore te utječe na kinetičku energiju atoma koji udaraju u supstrat⁹, potrebno je voditi računa da je tlak dovoljno nizak, kako bi se izbjegle interakcije atoma materijala s preostalim plinom u komori. Kako bi se pare materijala

nesmetano mogle pravocrtno propagirati kroz komoru do supstrata na vrhu nje, srednji slobodni put atoma mora biti veći od dimenzija komore (barem 10 puta)¹².

Visina vakuuma u komori za vrijeme evaporacije ovisi o kriterijima koje mora zadovoljavati dobiveni uzorak. Ukoliko dobiveni sloj evaporiranog materijala mora biti bez nečistoća, potrebno je koristiti vakuumski sustav koji je sposoban proizvesti ultravisoki vakuum (UHV, $\sim 10^{-9}$ mbar). Međutim, ako svojstva dobivenog sloja nisu osjetljiva na nečistoće iz vodene pare, dovoljna je visina vakuuma od 10^{-4} mbar⁹.

Anodizacija

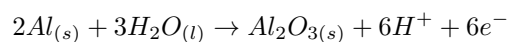
Anodizacija ili anodna oksidacija ili elektrooksidacija je kemijski proces u kojem uzorak na kojem želimo formirati sloj anodnog oksida ima ulogu anode te se uranja u elektrolit zajedno s katodom¹. Za vrijeme anodizacije primjenjuje se konstantan napon ili struja između katode i anode kako bi se kemijskim reakcijama oksidacije i redukcije u kombinaciji sa difuzijom iona zbog električnog polja formirao oksidni sloj na površini anode, odnosno željenog uzorka¹⁴. Ukoliko se radi o potenciostatskoj anodizaciji, za vrijeme anodizacije se primjenjuje konstantan napon, dok se kod galvanostatske anodizacije zadaje konstantna gustoća struje^{15,16}.

Strukturalna i kemijska svojstva dobivenog anodnog oksida ovisi o parametrima procesa, kao što su potencijal anode, kemijski sastav i pH elektrolita, temperatura, vrijeme anodizacije te gustoća struje^{14,17}. Općenito, formirani oksidni sloj na metalu ima dobra adhezijska svojstva¹⁴, visoku mehaničku¹⁰ i kemijsku stabilnost¹⁵ te veliku otpornost na koroziju¹³.

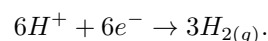
Anodizacija je vrlo važan proces u industriji kod pasivizacije nekih lakih metala, posebice aluminija, zbog činjenice da se anodni oksid može koristiti kao završni pasivan sloj u zaštiti od korozije i abrazije^{15,18}. Također, kemijski stabilan i netoksičan pasivan sloj vrlo je važan faktor u biokompatibilnosti elektroničkih medicinskih implantata u *in vivo* uvjetima te se zbog toga anodizacija često primjenjuje i u biomedicinskim znanostima^{13,19}.

Kod anodizacije aluminija, istovremeno se odvijaju 2 kemijske reakcije⁸:

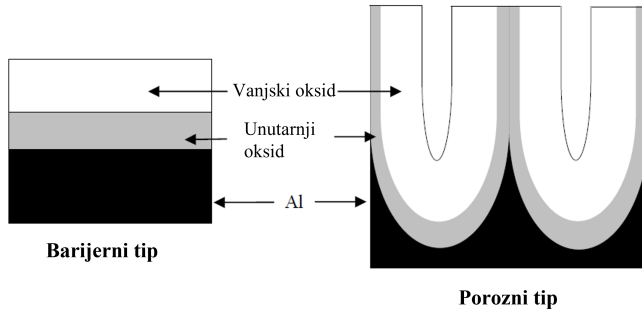
- na anodi:



- na katodi:



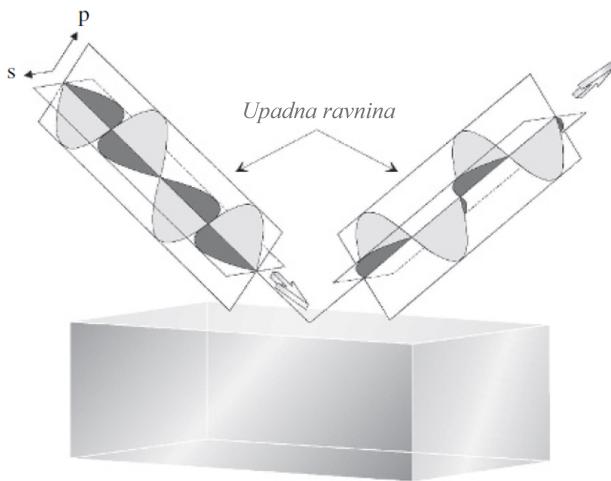
Debljina formiranog aluminijskog anodnog oksida najviše ovisi o naponu anodizacije^{10,18}, dok poroznost sloja određuje korištenje elektrolita tako da se barijerni tip anodnog oksida dobiva korištenjem elektrolita za koji vrijedi $5 < \text{pH} < 7$, dok se porozni anodni oksid dobiva za $\text{pH} < 5$ ⁸. Razlika između barijernog i poroznog filma prikazana je na slici 6.



Slika 6. Barijerni i porozni tip aluminijskog oksida. *Preuzeto i prilagođeno iz 8.*

Spektroskopska elipsometrija

Elipsometrija je optička mjerna tehnika koja karakterizira refleksiju (ili transmisiju) svjetlosti na uzorku. Koristi se kod mjerenja optičkih konstanti (npr. indeksa loma n) te debljine tankih slojeva uzorka. Glavna značajka elipsometrije je mjerenje promjene polarizacije svjetlosti zbog refleksije (ili transmisije) svjetlosti na uzorku. Ime je dobila po činjenici da polarizacija svjetlosti često postaje eliptična nakon refleksije.



Slika 7. Refleksija p- i s-polariziranih valova svjetlosti. *Preuzeto i prilagođeno iz 20.*

Elipsometrija mjeri omjer amplituda tzv. p- i s-polariziranih valova Ψ te njihovu faznu razliku Δ . P-polarizacija odgovara slučaju kada upadni val ima polarizaciju paralelnu s upadnom ravninom, dok je kod s-polarizacije upadni val okomite polarizacije u odnosu na upadnu ravninu (prikazano na slici 7). Kod spektroskopske elipsometrije se (Ψ, Δ) spektar mjeri mijenjanjem valne duljine svjetlosti u ultraljubičastom/vidljivom/infracrvenom dijelu spektra.

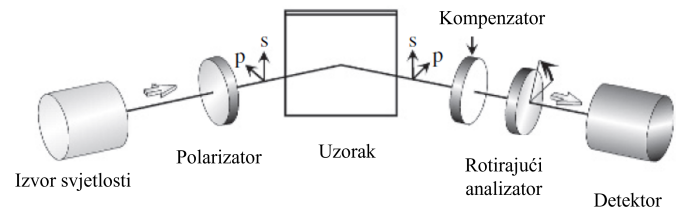
Za vrijeme mjerenja, p- i s-polarizirani valovi su usmjereni prema uzorku pod određenim kutom te se optičke konstante uzorka i debljina tankih filmova mjere iz promjene polarizacijskog stanja svjetlosti nakon refleksije/transmisije, budući da p- i s-polarizirani valovi pokazuju različite promjene u amplitudi i fazi. Izmjerene vrijednosti (Ψ, Δ) su definirane preko omjera koeficijentata refleksije za p- i s-polarizacije:

$$\rho \equiv \tan \Psi \exp(i\Delta) \equiv \frac{r_p}{r_s}. \quad (2)$$

Ako se postupak temelji na mjerenju transmisije svjetlosti, ρ iz jednadžbe (2) odgovara omjeru koeficijentata transmisije.

Vrijednosti željenih optičkih konstanti se računaju iz poznatih relacija koje ih povezuju sa izmjerenim veličinama Ψ i Δ . Da bi se do njih došlo, potrebno je konstruirati optički model koji reprezentira uzorak koji mjerimo te napraviti prilagodbu na izmjerene (Ψ, Δ) spektar.

Osim izvora monokromatske svjetlosti i detektora, elipsometar sadrži i neke od sljedećih optičkih elemenata: polarizatora koji linearno polarizira svjetlost iz izvora te analizatora koji određuje stanje polarizacije, retardera (kompenzatora) koji pretvara linearnu polarizaciju u kružnu i obrnuto ili generira razliku u fazi između okomitih komponenti električnog polja, i depolarizatora koji polariziranu svjetlost pretvara u nepolariziranu²⁰. Primjer elipsometra s navedenim komponentama nalazi se na slici 8.



Slika 8. Shematski prikaz elipsometra sa rotirajućim analizatorom i kompenzatorom. *Preuzeto i prilagođeno iz 20.*

III. REZULTATI

Priprema uzorka

Prije evaporacije aluminijskih pločica supstrata Si/SiO₂ očišćene su u ultrazvučnoj kadici koristeći redom aceton, isopropanol, Hellmanex otopinu te deioniziranu (DI) vodu. Aluminij je evaporiran na supstrat termalnom evaporacijom u vakuumu od $3 \cdot 10^{-6}$ mbar te je njegova debljina iznosila 115 nm. Slika 9 prikazuje pločice supstrata postavljene na držač supstrata iz vakuumske komore prije i poslije evaporacije.



Slika 9. Pločice Si/SiO₂ supstrata prije (lijevo) i poslije evaporacije aluminijske.

Anodizacija aluminijske

Sloj aluminijske okside dobivao se procesom potenciostatske anodizacije na sobnoj temperaturi. U svrhu potenciostatske se koristio Keithley 2450 SourceMeter, a korišteni elektrolit je limunska kiselina/citratni pufer (limunska kiselina i natrijev citrat u DI vodi s pH vrijednošću 6.0)¹⁰. Odabirom elektrolita s blago kiselim pH vrijednošću dobiva se barijerni tip anodnog oksida. Korištene su 3 različite konfiguracije elektroda te su za sve konfiguracije provedene anodizacije u dvije etape:

- provjera reproducibilnosti procesa
- određivanje ovisnosti debljine Al₂O₃ filma o naponu anodizacije.

Nakon anodizacije, debljina dobivenog sloja na svakom uzorku izmjerena je elipsometrom.

Anodizacija s referentnom elektrodom od Ag/AgCl žice

Kod prve konfiguracije, elektroda od platine imala je ulogu katode, a konstantan napon je postavljen između uzorka (anode) i referentne elektrode (RE) koju je sačinjavala Ag/AgCl žica savijena u obliku zavojnice.

Korišteni mjerni postav prikazan je na slici 10, dok je shematski prikaz postava za anodizaciju s referentnom elektrodom prikazan na slici 12 desno. Reproducibilnost se provjerila anodizacijom 5 uzoraka u jednakim uvjetima (naponom anodizacije od +5V i trajanju od 2h) te dobivena srednja vrijednost debljine aloks sloja iznosi:

$$d = (11 \pm 1) \text{ nm}.$$

Razlog velike nepouzdanosti srednje vrijednosti debljine, a time i relativno loše reproducibilnosti leži u nestabilnosti Ag/AgCl žice za vrijeme anodizacije.



Slika 10. Eksperimentalni postav za provođenje procesa anodizacije.

Ovisnost između debljine aloks filma i napona odredila se provođenjem anodizacije na različitim naponima i mjerenjem debljine. Dobivena ovisnost je linearna:

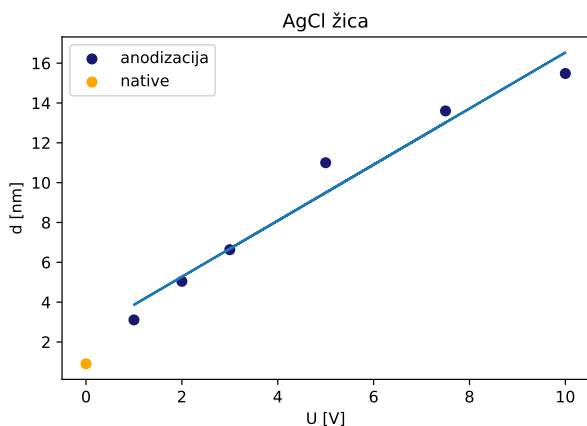
$$d = \text{const.} \cdot U + d_0 \quad (3)$$

uz:

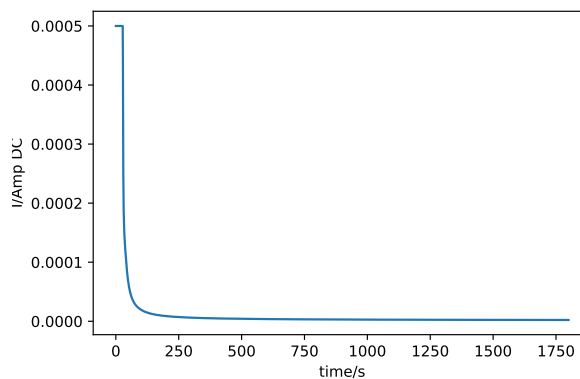
$$d_0 = (2.5 \pm 0.8) \text{ nm}$$

$$\text{const.} = (1.4 \pm 0.1) \text{ nm/V}.$$

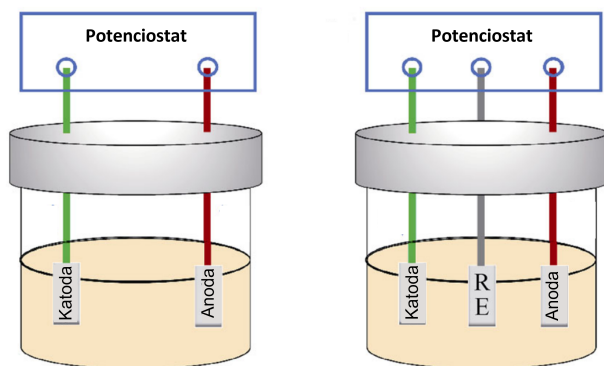
Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s pravcem dobivenim linearnom regresijom nalazi se na slici 11.



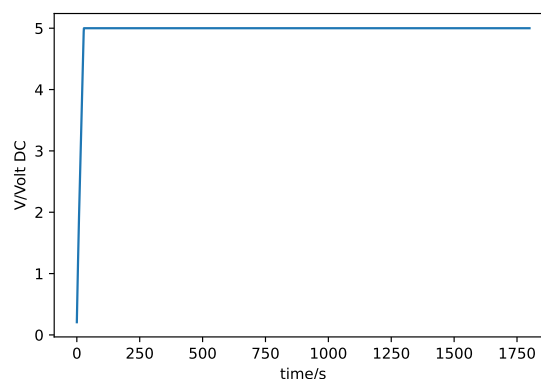
Slika 11. Ovisnost debljine anodnog oksida o naponu anodizacije za postav koji sadrži žicu od AgCl kao referentnu elektrodu. Na grafu je označena i debljina native sloja oksida.



Slika 13. Vremenska ovisnost struje tijekom anodizacije.



Slika 12. Shematski prikaz postava za anodizaciju bez referentne elektrode (lijevo) i sa referentnom elektrodom (desno). Preuzeto i prilagođeno iz 23.

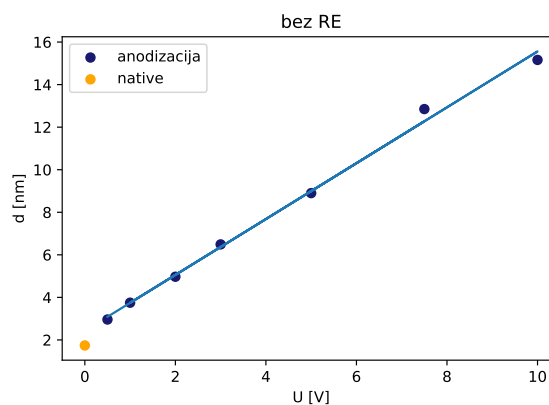


Slika 14. Ovisnost napona anodizacije o vremenu.

Anodizacija bez referentne elektrode

Druga konfiguracija postava je koristila elektrodu od platine kao katodu i uzorak kao anodu, a napon anodizacije se postavljao između katode i anode. Shematski prikaz postava bez referentne elektrode nalazi se na slici 12 lijevo. Reproducibilnost se ponovno provjeravala anodiziranjem 5 uzoraka u jednakim uvjetima (naponom anodizacije od +5V i trajanju od 30 min). Trajanje anodizacije je smanjeno zbog zaključka da već nakon 30 min struja anodizacije značajno padne, što je vidljivo na slici 13. Radi potpunosti, na slici 14 je prikazana i vremenska ovisnost napona anodizacije istog uzorka. Srednja vrijednost debljine Al_2O_3 sloja za anodizaciju bez RE u jednakim uvjetima iznosi:

$$d = (8.9 \pm 0.1) \text{ nm.}$$



Slika 15. Ovisnost debljine anodnog oksida o naponu anodizacije za postav bez referentne elektrode. Drugom bojom je označena debljina native sloja oksida.

Mjerenjem ovisnosti debljine alosko sloja o naponu ano-

dizacije te korištenjem linearne regresije dobivene su konstante iz jednadžbe (3) koje iznose:

$$d_0 = (2.4 \pm 0.2) \text{ nm}$$

$$\text{const.} = (1.31 \pm 0.04) \text{ nm/V.}$$

Graf koji prikazuje izmjerene vrijednosti, kao i debljinu native sloja prikazuje slika 15.

Anodizacija s AgCl staklenom referentnom elektrodom

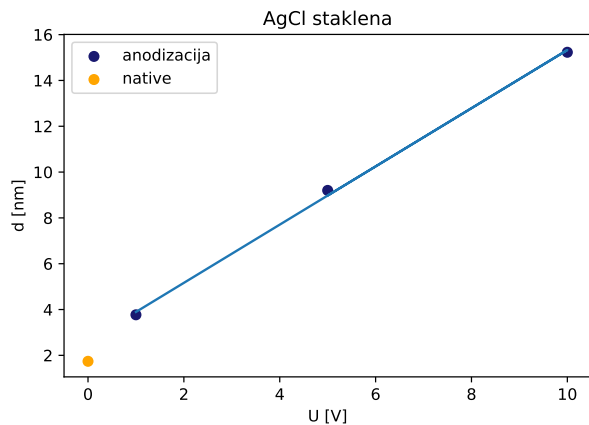
Za treću konfiguraciju elektroda u postavu za anodizaciju, osim katode od platine i uzorka kao anode, koristila se Ag/AgCl referentna elektroda unutar staklene cijevi. Za provjeru reproducibilnosti su anodizirana 3 uzorka u jednakim uvjetima (napon anodizacije od +5V i trajanje od 30 min) te je izračunata srednja vrijednost debljine sloja anodnog oksida:

$$d = (9.2 \pm 0.2) \text{ nm.}$$

Ovisnost debljine o naponu (slika 16) prema relaciji (3) daje:

$$d_0 = (2.6 \pm 0.3) \text{ nm}$$

$$\text{const.} = (1.27 \pm 0.04) \text{ nm/V.}$$



Slika 16. Ovisnost debljine anodnog oksida o naponu anodizacije za postav sa AgCl staklenom referentnom elektrodom. Debljina native sloja oksida označena je narančasto.

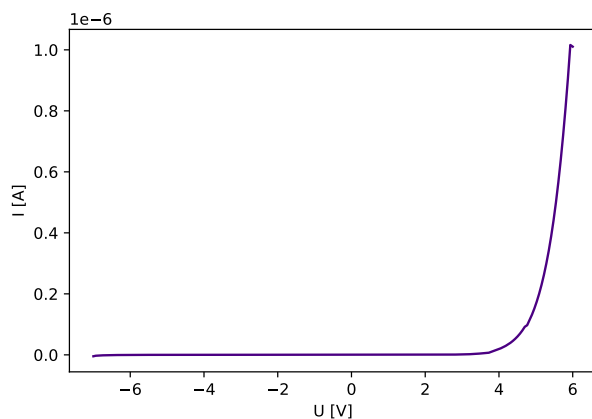
Mjerenja diode

Kako bi se izmjerile strujno-naponske karakteristike dobivene diode, prvo je potrebno nadodati drugi sloj metala nakon izolatora. Za to se koristio eutektik indija i galija (EGaIn) koji je na sobnoj temperaturi u tekućem stanju. U kontaktu sa kisikom, na površini EGaIn se

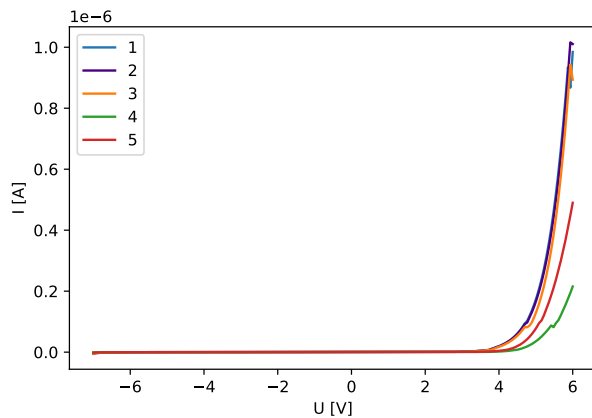
formira sloj galijeva oksida, zbog čega EGaIn ima ne-njutnovska svojstva pa je od takvog materijala moguće formirati mikrokapljice²¹ (slika 17).



Slika 17. Formacija mikrokapljica koristeći EGaIn. Preuzeto iz 22.



Slika 18. Strujno-naponske karakteristike uzorka.



Slika 19. Rezultati uzastopnog mjerenja strujno-naponskih karakteristika uzorka.

Kapljica indij-galij eutektika formirana je na uzorku anodiziranom na +5V tako da je bila u direktnom kontaktu sa slojem aluminijeva oksida te je u nju bila uroñjena tanka vodljiva proba, dok je druga proba bila u kontaktu sa aluminijem. Slika 18 prikazuje strujno-naponske karakteristike mjerenog uzorka koje odgovaraju ponašanju diode, dok slika 19 prikazuje rezultate uzastopnog mjerenja I-V karakteristike istog uzorka.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izveden proces izrade tzv. MIM diode na način da je prvi sloj metala aluminija deponiran na supstrat tehnikom termalne evaporacije, izolator aluminijev oksid je formiran kemijskim procesom potenciostatske anodizacije, a za drugi sloj metala je korišten eutektik indija i galija u formi kapljice koji je bio u direktnom kontaktu s Al/Al₂O₃ uzorkom. Pri izradi ove diode naglasak je bio na anodizaciji aluminija, kako bi se istražila ovisnost debljine formiranog aloksa filma o naponu anodizacije te provjerilo koliko je takav proces reproducibilan izvodeći nekoliko anodizacija u jednakim uvjetima. Korištene su tri konfiguracije elektroda pri anodizaciji: prva konfiguracija se sastojala od katode od

platine, uzorka kao anode te referentne elektrode u obliku spiralne Ag/AgCl žice. Velika nepouzdanost srednje vrijednosti debljine aloksa d za uzorke anodizirane pod istim naponom i relativno veliko odstupanje izmjerenih vrijednosti od pravca linearne regresije kod mjerenja ovisnosti d o naponu U pokazuju da takav postav ne daje dovoljno reproducibilne uzorke. Takvi rezultati pripisuju se nedovoljno stabilnoj Ag/AgCl elektrodi. Slijedeći postav koji se koristio je sadržavao samo elektrodu od platine u ulozi katode i uzorak kao anodu. Dobiveni rezultati srednje vrijednosti debljine d te malo odstupanje izmjerenih točaka od pravca dobivenog linearnom prilagodbom pokazuju da je takav postav optimalan za anodizaciju. Treća konfiguracija je imala katodu i anodu kao prethodne konfiguracije te referentnu elektrodu u formi Ag/AgCl žice unutar staklene cijevi. Takva referentna elektroda pokazuje puno bolje rezultate od prethodne odabrane te se pokazuje kao bolji odabir ukoliko se anodizacija želi provoditi koristeći referentnu elektrodu. Nakon izrade MIM diode, provjerene su njezine strujno-naponske karakteristike koje uistinu odgovaraju karakteristikama diode. Istraživanje ovisnosti strujno-naponskih karakteristika dobivenih dioda o naponu anodizacije ostavljeno je za buduća mjerenja.

-
- ¹ Eliasson, B.J. (2001). Metal-Insulator-Metal Diodes For Solar Energy Conversion, University of Colorado
 - ² Moddel, G., Grover, S. (Eds.). (2013). *Rectenna Solar Cells* (2013th ed.). Springer.
 - ³ Bhatt, K., Kumar, S., Tripathi, C.C. (2019). Highly sensitive Al/Al₂O₃/Ag MIM diode for energy harvesting applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, **111**, 152925.
 - ⁴ Mistry, K., Yavuz, M. and Musselman, K.P. (2017). Simulated electron affinity tuning in metal-insulator-metal (MIM) diodes. *Journal of Applied Physics*, **121**(18), 184504.
 - ⁵ Khan, A.A. et al. (2017). Metal-insulator-metal diodes with sub-nanometre surface roughness for energy-harvesting applications. *Microelectronic Engineering*, **181**, 34–42.
 - ⁶ Krishnan, S. (2004). Design, Fabrication and Characterization of Thin-Film M-I-M Diodes for Rectenna Array, University of South Florida
 - ⁷ Shin, J.H. (2013). Metal-Insulator-Metal Diodes for High Frequency Applications, DGIST
 - ⁸ Choi, J. (2003). Fabrication of monodomain porous alumina using nanoimprint lithography and its applications, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
 - ⁹ Koskinen, J. (2014). Cathodic-arc and thermal-evaporation deposition. *Comprehensive Materials Processing*, 3–55.
 - ¹⁰ Mardare, A. I., Kaltenbrunner, M., Sariciftci, N. S., Bauer, S., Hassel, A. W. (2012). Ultra-thin anodic alumina capacitor films for Plastic Electronics. *Physica Status Solidi (a)*, **209**(5), 813–818.
 - ¹¹ Bashir, A., Awan, T. I., Tehseen, A., Tahir, M. B., Ijaz, M. (2020). Interfaces and surfaces. *Chemistry of Nanomaterials*, 51-87.
 - ¹² Sree Harsha, K. (2006). Evaporation. *Principles of Vapor Deposition of Thin Films*, 11-143.
 - ¹³ Li, Z., Aik Khor, K. (2019). Preparation and properties of coatings and thin films on metal implants. *Encyclopedia of Biomedical Engineering*, 203–212.
 - ¹⁴ Chu, P., Wu, G. (2015). Surface design of biodegradable magnesium alloys for biomedical applications. *Surface Modification of Magnesium and its Alloys for Biomedical Applications*, 89-119.
 - ¹⁵ Song, G., Shi, Z. (2011). Anodization and corrosion of magnesium (Mg) alloys. *Corrosion of Magnesium Alloys*, 565-614.
 - ¹⁶ Yao, C., Lu, J., Webster, T. (2011). Titanium and cobalt–chromium alloys for hips and knees. *Biomaterials for Artificial Organs*, 34-55.
 - ¹⁷ Souza, J., Bins-Ely, L., Sordi, M., Magini, R., Aparicio, C., Shokuhfar, T., Cooper, L. (2018). Nanostructured surfaces of cranio-maxillofacial and dental implants. *Nanostructured Biomaterials for Cranio-Maxillofacial and Oral Applications*, 13-40.
 - ¹⁸ Masuda, H., Yanagishita, T., Kondo, T. (2018). Fabrication of anodic porous alumina. *Encyclopedia of Interfacial Chemistry*, 226–235.
 - ¹⁹ Sunija, A. J. (2018). Biomaterials and biotechnological schemes utilizing TiO₂ nanotube arrays—a review. *Fundamental Biomaterials: Metals*, 175–195.
 - ²⁰ Fujiwara, H. (2007). *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications*. Wiley-Blackwell.

- ²¹ Soh, E. J., Astier, H. P., Daniel, D., Isaiah Chua, J. Q., Miserez, A., Jia, Z., . . . Nijhuis, C. A. (2022). AFM manipulation of Egain microdroplets to generate controlled, on-demand contacts on molecular self-assembled monolayers. *ACS Nano*, **16**(9), 14370–14378.
- ²² Chiechi, R. C., Weiss, E. A., Dickey, M. D., Whitesides, G. M. (2008). Eutectic gallium–indium (egain): A Moldable Liquid Metal for electrical characterization of self-assembled monolayers. *Angewandte Chemie International Edition*, **47**(1), 142–144.
- ²³ Li, X.-Y., Qu, J.-K., Yin, H.-Y. (2020). Electrolytic alloy-type anodes for metal-ion batteries. *Rare Metals*, **40**(2), 329–352.
- ²⁴ <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=18671>