

# KARAKTERIZACIJA V VAKUUMU NAPARJENIH TANKIH PLASTI AL NA SI REZINE\*

B. Praček

Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, Ljubljana, Slovenija

**Ključne besede:** mikroelektronika, tehnologija polprevodniška, plasti tanke, rezine silicijeve, naparovanje vakuumsko, nanašanje aluminija, oksidacija termična, AES Auger spektroskopija elektronska, C-V metoda kapacitivno napetostna, interferometrija

**Povzetek:** Nanašanje tankih plasti aluminija na silicijeve rezine je pomemben del polprevodniške tehnologije. V članku so podani rezultati karakterizacije tankih plasti aluminija s spektroskopijo Augerjevih elektronov v kombinaciji s C-V metodo in interferometrijo. Prikazani rezultati so dobljeni s preiskavo šestih karakterističnih vzorcev. Tanka plast aluminija je bila nanešana na tri vzorce z elektronskim curkom, na preostale tri pa z indirektnim uporabnim ogrevanjem na volframski spirali. Na enem vzorcu iz obeh skupin je bila pred nanosom plasti aluminija, na silicijevih rezinah s termično oksidacijo izdelana samo tanka plast silicijevega dioksida. Na drugih dveh je pred nanašanjem Al plasti z difuzijo bora izdelan np spoj ter na preostalih dveh z difuzijo fosforja pn spoj. Debelina, kemična sestava in elektronske lastnosti tako naparjenih plasti aluminija se najbolj razlikujejo pri tistih plasteh, ki so nanesene na silicijev dioksid, zaradi redukcije tega z aluminijem. Prav tako smo ugotovili, da so Al plasti nanešene z elektronskim curkom veliko boljše v pogledu gibljivih in negibljivih nabitih delcev, katere vnašajo v silicijev dioksid.

## Characterization of Thin Al Films Deposited on Si Substrates\*\*

**Key words:** microelectronics, semiconductor technology, thin films, silicon wafers, vacuum evaporation, aluminium deposition, thermally grown silicon oxide, AES, Auger electron spectroscopy, capacitance-voltage method, interferometry

**Abstract:** For a long time vacuum evaporation of thin aluminium films has been a constitutive part of semiconductor technology. This article presents some results on characterization of these films by Auger electron spectroscopy, capacitance-voltage and interferometric methods. The results presented have been obtained by examining six characteristic samples. On three of them aluminium has been evaporated by electron beam technique; other three were coated with aluminium by evaporation from tungsten spiral. In each group of samples one of samples has been previously covered with thermally grown silicon oxide; the second two samples have been doped by boron and the third two by phosphorus. The thickness, chemical composition and electronic properties of these films are different; films deposited on the silicon dioxide show the most prominent differences because of the reduction of silicon dioxide by aluminium. Also, it has been confirmed that electron beam evaporated samples show better characteristics concerning the contents of fixed and mobile charges in the underlining silicon dioxide.

### 1. UVOD

Vakuumsko naparjene plasti aluminija so že dolgo nepogrešljivi sestavni del polprevodniške tehnologije. Dobro nanašanje in legiranje, dobra električna prevodnost, možnost fotolitografskega postopka in nizka cena so zelo zaželeni lastnosti v proizvodnji polprevodnikov. Aluminij se uporablja tako za vmesne plasti kot tudi za kontaktiranje. Uporabne lastnosti nanesenih plasti aluminija bodo odvisne od njihove končne kemične sestave in strukture. V članku podajamo rezultate karakterizacije tankih plasti aluminija, ki so nanesene v vakuumu z dvema različnima metodama: naparovanjem iz volframske špirale in nanašanjem s pomočjo elektronskega curka.

upornostjo 3-5 ohm cm. Plast aluminija je na vzorec št. 1 naparjena iz volframske spirale na vzorec št. 4 pa je nanesena z elektronskim curkom. Vzorca št. 2 in št. 5 sta izdelana na silicijevih rezinah p-tipa z upornostjo, ki je znašala 3-5 ohm cm, ki sta bili termično oksidirani do debeline silicijevega dioksida okoli 1  $\mu\text{m}$ . Z fotolitografskim postopkom sta bili najprej pri obeh v oksidni plasti izdelani odprtini, sledil je postopek dopiranja s fosforjem in nato nanašanje aluminija. Plast aluminija je na vzorec št. 2 naparjena iz volframske spirale na vzorec št. 5 pa nanešana z elektronskim curkom. Podlaga za vzorca št. 3 in št. 6 sta bili silicijevi rezini n-tipa s površino pripravljeno na enak način kot za vzorca št. 2 in št. 5, le da je po izdelavi odprtin v plasti silicijevega dioksida sledilo dopiranje z borom pred nanašanjem aluminija. Na vzo-

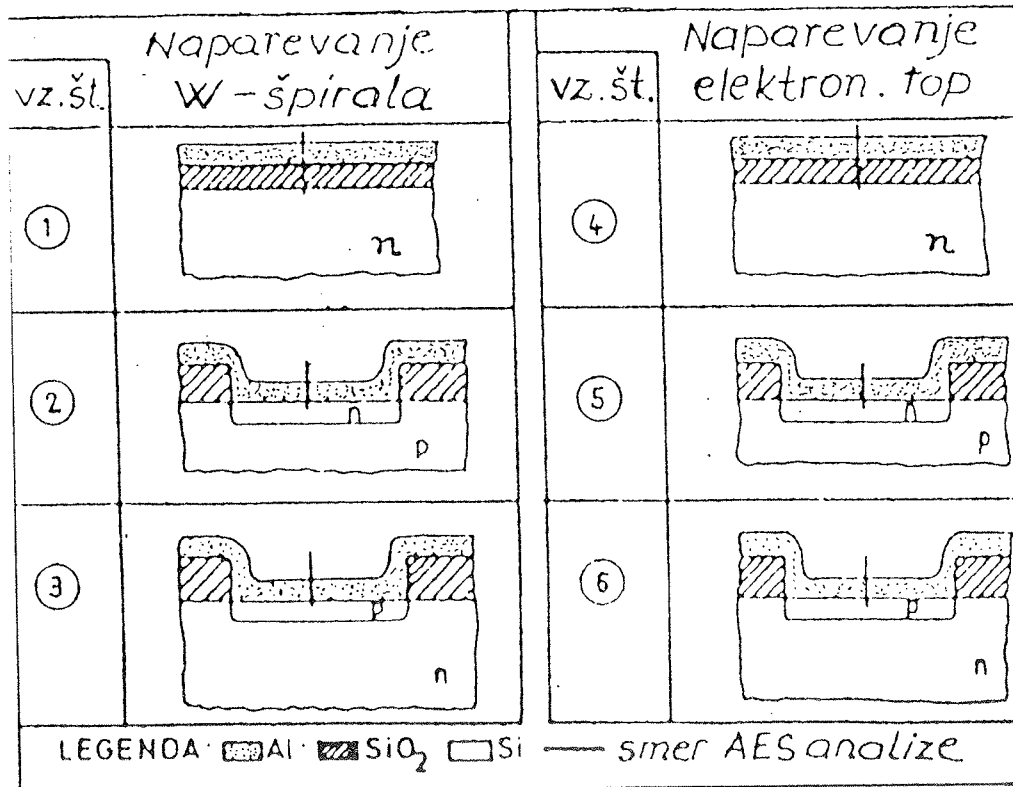
### 2. EKSPERIMENTALNO DELO

#### 2. 1. Izdelava vzorcev

Vsi vzorci so izdelani na podlagah iz silicijevih rezin z orientacijo  $\langle 111 \rangle$  in premera 2". Silicijevi podlagi sta bili za vzorca št. 1 in št. 4 termično oksidirani do debeline silicijevega dioksida okoli 0.4  $\mu\text{m}$  in sta bila n tip z

\* Prispevek je bil objavljen že v prejšnji številki Informacij MIDEM, 2(94), vendar ga ponovno objavljamo in se opravičujemo avtorju zaradi napak, ki so se prikradle med tiskom prejšnje številke.

\*\* This article has already been published in the last issue of Informacije MIDEM, 2(94). Due to some unfortunate mistakes which appeared in the text during printing, we are publishing it again with our apologies to the author.



Slika 1: Shematski prikaz prereza vzorcev

rec št.3 je plast aluminija naparjena iz volframske spirale, na vzorec št.6 pa je Al plast nanešena z elektronskim curkom. Shematski prikaz preseka na opisani način izdelanih vzorcev z označeno smerjo AES profilne analize kaže slika 1.

## 2. 2. Profilometrične meritve in optična karakterizacija

Meritve s profilometrom so pokazale, da je na vseh šestih vzorcih debelina nanešenih plasti aluminija dokaj enaka in da znaša okoli 0.4 μm. Prav tako so meritve pokazale, da sta debelini termično izdelanega silicijevega dioksida na podlagah vzorcev št.1 in št.4 pred nanašanjem aluminija, znašali okoli 0.38 μm. Preiskave z optičnim mikroskopom pri 500 kratni povečavi niso pokazale bistvenih razlik v izgledu in strukturi plasti.

## 2. 3. AES karakterizacija

Vzorci smo pritrdili na nosilec vzorcev z nagibom 60 kotnih stopinj in jih ugradili v spektrometer Augerjevih elektronov (Physical Electronics Ind. SAM 545 A). Za analizo smo uporabili statični curek primarnih elektronov energije 3 keV in tok elektronov 0.5 μA. Vzorci so jedkani z dvema sovpadajočima curkoma ionov argona z energijo 1 keV, ki sta rastrirala na površini 5mm x 5mm pri vpadnem kotu 47 kotnih stopinj. Hitrost jedkanja Cr/Ni standarda je bila okoli 3 nm/min. Podatki dobljeni iz spektrov Augerjevih elektronov, posneti med profilno analizo, so uporabljeni za izdelavo profilnih diagramov prikazanih na slikah 2 in 3. Na ordinati diagramov je nanesena koncentracija v relativnih enotah in na abscisi

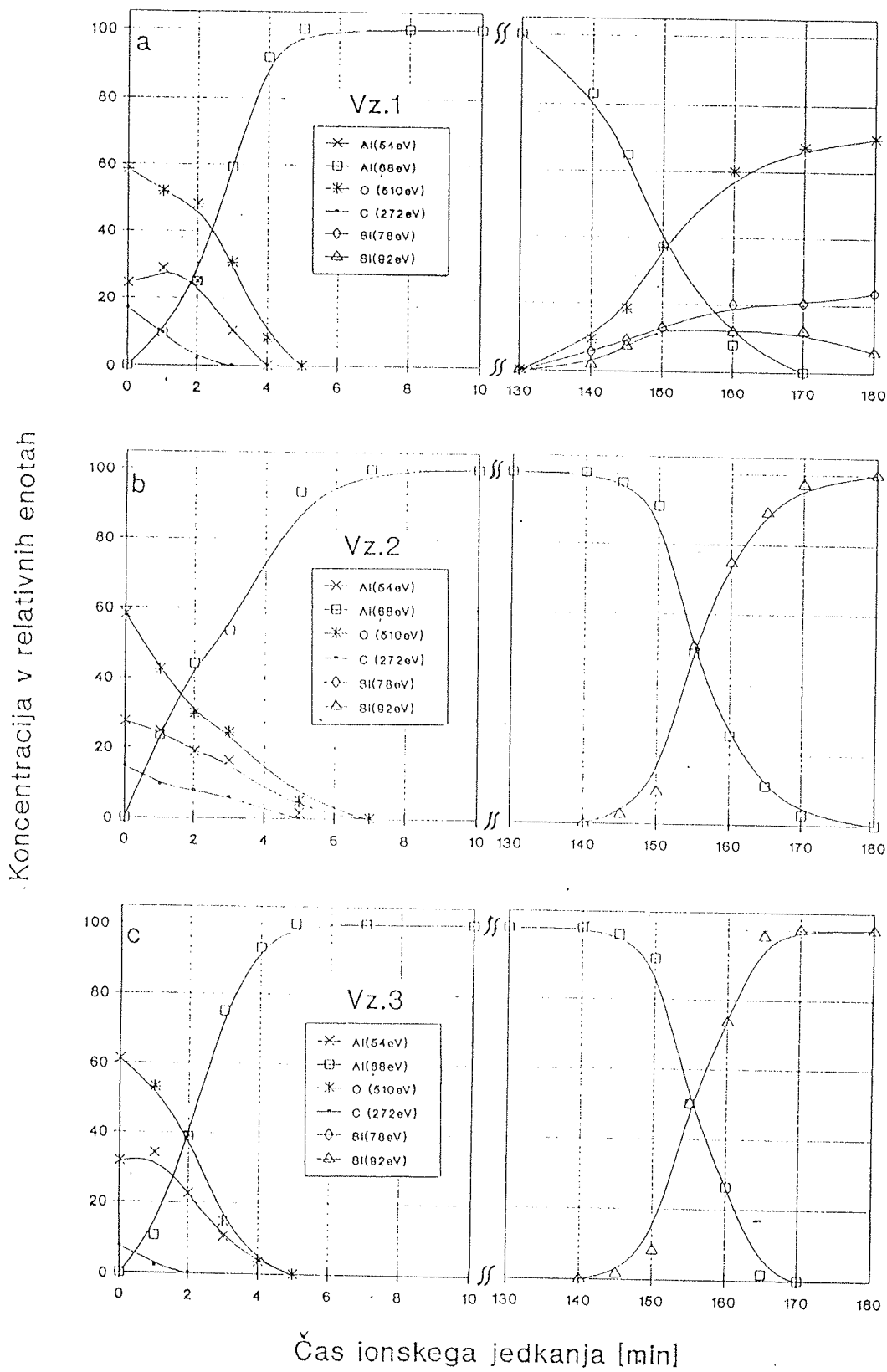
čas ionskega jedkanjav minutah. V legendi diagramov je za vse detektirane elemente označeno pri kateri energiji se v spektru Augerjevih elektronov nahaja njihov vrh.

## 3. REZULTATI IN DISKUSIJA

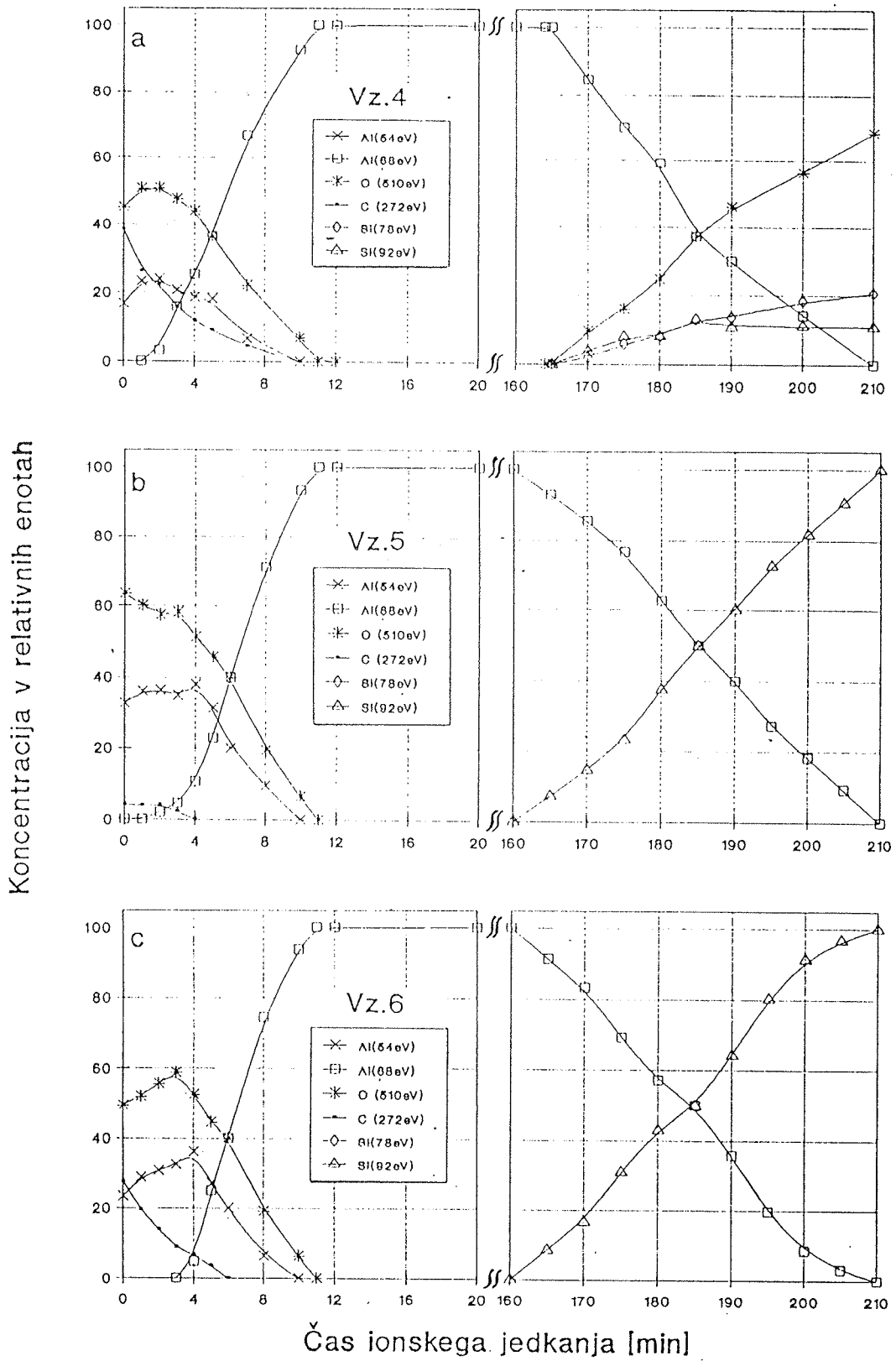
### 3.1 Rezultati AES profilne analize

Profilni diagram vzorca št.1 (slika 2a), prikazuje koncentracijski profil 0.4 μm debele plasti aluminija, ki je bila naparjena iz volframske spirale na 0.38 μm debelo plast silicijevega dioksida. Na površini Al plasti se nahaja tanka oksidna plast debela okoli 9 nm (okoli 3 min jedkanja). Augerjev vrh pri energiji 54 eV, ki pripada aluminiju vezanemu v Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ne zaznamo več že po štirih minutah jedkanja. Na površini in deloma tudi v tanki oksidni plasti najdemo kot kontaminacijo manjšo koncentracijo ogljika. Vse do 130-te minute jedkanja se nahaja plast čistega aluminija (Augerjev vrh pri energiji 68 eV), ko se že pojavijo vrhovi: Si(78eV), ki pripada siliciju vezanemu v SiO<sub>2</sub>, vrh Si(92eV) pripada elementarnemu siliciju in vrh kisika O(510eV). Fazno mejo med Al in SiO<sub>2</sub> dosežemo po 150-tih minutah jedkanja (debelina okoli 0.45 μm).

V profilnem diagramu vzorca št.2 (slika 2b), je prikazan koncentracijski profil 0.4 μm debele plasti aluminija, ki je bila naparjena iz volframske spirale na silicijevo rezino dopirano z fosforjem. Nastala oksidna plast na površini tega vzorca je približno enake debeline (okoli 9nm) kot na vzorcu št.1, le da je meja med Al oksidom in kovino manj izrazita. Krivulja vrha Al(54eV), ki pripada oksidir-



Slika 2: Profilni diagram vz.1(a), vz.2(b) in vz.3(c)



Slika 3: Profilni diagram vz.4(a), vz.5(b) in vz.6(c)

anemu aluminiju namreč počasneje pada s časom jedkanja in izgine šele po 7-mih minutah jedkanja. Enaka ugotovitev velja tudi za koncentracijo ogljika. Po 140-tih minutah ionskega jedkanja se pojavi vrh elementarnega Si(92eV). Fazno mejo med čisto plastjo Al in Si dosežemo po 155-tih minutah jedkanja (okoli 0.46  $\mu\text{m}$ ). Fosforja kot dopanda pa nismo zaznali zato, ker je njegova koncentracija pod mejo občutljivosti AES metode.

Profilni diagram vzorca št.3 (slika 2c), kaže profil 0.4  $\mu\text{m}$  debele plasti aluminija, ki je bila naparjena iz volframske spirale na silicijevo rezino dopirano z borom. Na površini vzorca št.3 je nastala oksidna plast aluminija, ki je po sestavi in izgledu meje med oksidom in kovino bolj podobna tisti na vzorcu št.1. Oksidna plast na vzorcu št.3 je tanjša (okoli 7nm) od plasti na vzorcih št.1 in 2 in vsebuje najnižjo koncentracijo ogljika. Čas ionskega jedkanja, ko zaznamo pojav elementarnega Si(92eV) in čas, ki je potreben, da dosežemo fazno mejo Al/Si pa je polnoma enak kot pri vzorcu št.2. Zaradi koncentracije, ki je pod mejo detekcije ne zaznavamo bora.

Profilni diagram vzorca št.4 (slika 3a), predstavlja profil 0.4  $\mu\text{m}$  debele plasti aluminija, ki je bila z elektronskim curkom nanešena na 0.38  $\mu\text{m}$  debelo plast silicijevega dioksida. Opazimo, da je na površini tega vzorca oksidna plast debela okoli 18 nm (6 min jedkanja). Na površini in tudi globlje vsebuje oksidna plast veliko koncentracijo ogljika. Po 165-tih minutah jedkanja zaznamo vrhove Si(78eV), Si(92eV) in O(510eV). Fazno mejo med Al in SiO<sub>2</sub> dosežemo po 185-tih minutah jedkanju (okoli 0.56  $\mu\text{m}$ ).

Profilni diagram vzorca št.5 (slika 3b), predstavlja profil 0.4  $\mu\text{m}$  debele plasti aluminija nanešene z elektronskim curkom na silicijevo rezino dopirano z fosforjem. Na površini vidimo približno enako debelo oksidno plast (okoli 18 nm) kot je tista na vzorcu št. 4. Koncentracija ogljika pa je na površini in v oksidni plasti tega vzorca najmanjša. Vrh elementarnega Si(92eV) se pojavi po 160-tih minutah jedkanja, fazno mejo med Al in Si pa dosežemo po 185-tih minutah jedkanja (okoli 0.54  $\mu\text{m}$ ).

Profilni diagram vzorca št.6 (slika 3c), kaže profil 0.4  $\mu\text{m}$  debele plasti aluminija, ki je bila z elektronskim curkom nanešena na silicijevo rezino dopirano z borom. Koncentracijski profil tega vzorca je zelo podoben profilom vzorcev št.4 in 5 (slika 3b in 3c) le da je koncentracija ogljika v približno enako debeli oksidni plasti nekoliko manjša kot pri vzorcu št.4

### 3. 2. CV karakterizacija

Vzorca št.1 in št.4 smo uporabili tudi za meritve količine gibljivih in negibljivih nabitih delcev s pomočjo TBS metode (1). Vzorec št.1 na katerega je bila 0.4  $\mu\text{m}$  debela plast aluminija naparjena iz volframske spirale na 0.38  $\mu\text{m}$  debelo plast SiO<sub>2</sub> je v oksidu vseboval  $Q = 3.41 \times 10E11$  q/cm<sup>2</sup> negibljivih in  $Q = 5.37 \times 10E11$  q/cm<sup>2</sup> gibljivih nabitih delcev. Vzorec št.4 na katerega je bila

0.4  $\mu\text{m}$  debela plast aluminija nanešena z elektronskim curkom na 0.38  $\mu\text{m}$  debelo plast SiO<sub>2</sub>, pa je v oksidu vseboval  $Q = 2.05 \times 10E11$  q/cm<sup>2</sup> negibljivih in  $Q = 1.83 \times 10E11$  q/cm<sup>2</sup> gibljivih nabitih delcev.

### 3. 3. Diskusija rezultatov

Znano je, da se na površini aluminija takoj po nanašanju v vakuumu, tvori tanka plast Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2). Proces oksidacije površine poteka v dveh fazah: prva je kemisorbcija kisika in na to kemična reakcija, ki tvori oksid. Vsi z AES metodo analizirani vzorci so imeli na površini nastalo tanko oksidno plast aluminija, kjer smo razen aluminija in kisika ugotovili različno vsebnost ogljika. Debelina tankih oksidnih plasti na površini aluminija, ki je bil naparevan iz volframske spirale je približno dvakrat tanjša od tistih na katere je aluminij nanašan z elektronskim curkom. Razlike so posledica večjih vzrokov: razlike v sestavi preostalih plinov pri nanašanju v vakuumu in razlike v energiji delcev, ki prihajajo na podlago (nekaj eV pri naparevanju iz W-spirale in nekaj deset eV pri nanašanju z elektronskim curkom) (3). Kot smo pričakovali so oksidne plasti na vzorcih št.1, 2 in 3, ki so bili istočasno v vakuumskem sistemu in naparevani iz W-spirale približno enake debeline (okoli 9 nm). Dvakrat debelejša (okoli 18 nm) so nastale oksidne plasti na vzorcih št.4, 5 in 6 ko je Al nanašan z elektronskim curkom. Debeline plasti Al so medsebojno enake na tistih vzorcih ko je nanašan na enako podlago in na enak način (vz. št.2 in št.3 ter vz. št.5 in št.6). Vrh elementarnega silicija Si(92eV), katerega zaznamo na fazni meji med Al in SiO<sub>2</sub> tako pri vzorcu št.1, kot pri vzorcu št.4 je posledica redukcije SiO<sub>2</sub> z aluminijem (4). Daljši časi jedkanja plasti Al, ki so na podlago nanešene s pomočjo elektronskega curka, v primerjavi s časi jedkanja plasti Al naparevanega iz volframske spirale lahko pojasnimo s tem, da imajo plasti nanašane z elektronskim curkom bolj kompaktno strukturo zaradi večje energije delcev ko prihajajo na podlago in se zato počasneje jedkajo (5). Pri vzorcih, kjer je plast Al nanašana z elektronskim curkom smo opazili, da je manj izrazita tudi fazna meja med Al in podlago. Plasti, ki jih nanašamo z elektronskim curkom imajo verjetno tudi zaradi tega boljšo adhezijo na podlago. Kot smo pričakovali, to so potrdile tudi CV meritve, je bolj primerno nanašanje Al z elektronskim curkom tudi zato, ker daje manjše količine nabitih delcev v silicijevem dioksidu pod plastjo Al.

### 4. ZAKLJUČEK

Rezultati preiskave šestih tipičnih vzorcev plasti aluminija nanosenih na različno obdelane podlage na silicijevih rezinah so pokazali, da med plastmi Al, ki so naparjene iz W-spirale in tistimi, ki so nanešene s pomočjo elektronskega curka obstojajo razlike v kemični sestavi površin in faznih mej Al/Si-rezina in tudi v elektronskih lastnostih. Na plasteh aluminija, ki so naparjene iz W-spirale so nastale tanjše in manj kontaminirane oksidne plasti. Postopek nanašanja iz W-spirale povzroča tudi večjo količino gibljivih in negibljivih nabitih delcev v SiO<sub>2</sub>

plasteh pod nanešenim aluminijem. Plasti Al, ki so nanešene z elektronskim curkom imajo bolj kompaktno strukturo kar kaže daljši čas ionskega jedkanja enako debelih plasti. Na površini Al z elektronskim curkom nanešenega Al nastajajo sicer debelejše oksidne plasti, nekoliko večja pa je tudi kontaminacija z ogljikom. V plasti SiO<sub>2</sub>, ki se nahaja pod plastjo Al pa se zato nahaja manjša količina gibljivih in negibljivih nabitih delcev.

## 5. LITERATURA

(1) D. M. Petković, Zbornik referatov simpozija o elektronskih sestavnih delih in materialih, Ljubljana (1980), p.247

(2) M. Bujor, L. A. Larson and H. Poppa, J. Vac. Sci. Technol., 20(3), (1982), P.392

(3) Y. E. Strausser and K. S. Majumder, J. Vac. Sci. Technol., 15(2), (1978), p.238

(4) D. Pramnik, A. N. Saxena, S. State Technology, Jan. 1983, p.127

(5) E. Zinner, J. Electrochem. Soc., May (1983), p.199C

*B. Praček, dipl.ing.*  
*IEVT*

*Teslova 30*

*Ljubljana*

*tel. + 386 61 123 13 41*

*fax. + 386 61 263 098*

*Prispelo (Arrived): 16.05.94*

*Sprejeto (Accepted): 10.06.94*