

SPEKTROSKOPIJA AUGERJEVIH ELEKTRONOV V MIKROELEKTRONIKI

Uvodno predavanje SD-91, Portorož

A.Zalar

KLJUČNE BESEDE: Augerjeva elektronska spektroskopija, analize metode, raziskava materiala, eksperimentalni rezultati, mikroelektronski materiali, superprevodniška keramika, superprevodne tanke plasti, mikroelektronika

POVZETEK: Razvoj mikroelektronike in spektroskopije Augerjevih elektronov (AES) je šel vsaj v pogledu geometrijskih dimenzij v isto smer. Mikroelektronska vezja so se zmanjševala vse do submikronskih področij, prav tako pa debeline posameznih večslojnih struktur, ki so potrebne, na primer, za kontaktiranje vezij. Vse od prvih začetkov, okrog leta 1970 pa do danes, je bil tudi razvoj metode AES podrejen zahtevi po doseganju čim manjšega analiznega volumna. Lahko razumemo, da je metoda AES v mikroelektroniki nepogrešljiva prav zaradi njene dobre lateralne ločljivosti, ki danes dosega 30 do 50 nm in dobre globinske ločljivosti, reda velikosti nekaj 10 nm. Ocenjujemo, da metoda AES daje podatke o elementni sestavi v povprečju 3 do 5 atomskih plasti in v mnogih primerih tudi o kemijskem stanju elementov. Njena velika prednost pred drugimi metodami za analizo površin, kot sta npr. XPS in SIMS, je v njeni razmeroma enostavni obdelavi analiznih rezultatov, ki daje semikvantitativne podatke. Moderni vrstični Augerjevi mikroanalizatorji omogočajo tudi izdelavo slik, ki kažejo porazdelitev posameznih elementov na površini preiskovanega dela vzorca. Za preiskavo večplastnih mikroelektronskih struktur pa je še posebej primerna kombinacija metode AES in ionskega jedkanja vzorca, ki ga tako lahko preiskujemo po njegovi globini, takorekoč v zaporednih atomskih plasteh ali na večjih razdaljah. Uporabnost metode AES v mikroelektroniki je ilustrirana s primeri iz dolgoletne lastne in tuje analitske prakse na vzorcih SiO₂/Si, superprevodne keramike Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O, superprevodne tanke plasti Y-Ba-Cu-O in večslojne MBE strukture Al_xGa_{1-x}As.

AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY IN MICROELECTRONICS

Invited Paper, SD-91 Conference, Portorož

KEYWORDS: Auger electron microscopy, analysis methods, materials testing, experimental results, microelectronic materials, superconducting ceramics, superconducting thin films, microelectronics

ABSTRACT: Microelectronic devices became smaller and line widths and shallow junctions are today of submicrometer dimensions. Using Auger electron spectroscopy (AES) with a reduced diameter of the primary electron beam the analysing volume was reduced drastically too. The AES is indispensable in microelectronics especially due to its favorable lateral resolution being in the range of 30 to 50 nm and depth resolution, today in the range of few tenths of nanometres. The information depth is about 3 to 5 atom layers and in many cases by the AES also the information on chemical state of elements is available. The quantification of data, giving the semiquantitative results is easier by AES than by other surface analysis methods i.e. XPS and SIMS. By Auger mapping the modern scanning Auger microprobes enable the investigation of elements distribution on the surface of the sample. For depth profiling of multilayer structures the combination of AES and in-depth ion etching of the sample being investigated layer per layer is most often applied. The applicability of the AES in microelectronics is illustrated by our own investigations of SiO₂/Si sample, high-temperature superconductive materials of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O ceramics, and Y-Ba-Cu-O thin film, and MBE Al_xGa_{1-x}As multilayer structure investigated by others.

1. UVOD

Spektroskopija Augerjevih elektronov (Auger Electron Spectroscopy - AES) je danes uveljavljena metoda za elementno analizo površin trdnih snovi, ki jo v mikroelektroniki uporabljajo tako v temeljnih raziskavah kot v industrijskih laboratorijih. Ne smemo pa pozabiti, da je bila za to potrebna dolga raziskovalna in razvojna pot. Samo od odkritja Augerjevega elektrona (1) pa do prvih analiz s spektroskopijo Augerjevih elektronov, ki bazira na meritvi kinetične energije elektronov, je minilo več kot štirideset let (2,3).

Naslednji odločilni korak za to preiskovalno metodo je bil napravljen leta 1969, ko so za spektrometer elektro-

nov uvedli analizator s cilindričnim zrcalom (4) z veliko transmisijo za elektrone, ki je bil hitrejši, občutljivejši in z ugodnejšim razmerjem signala proti šumu, kot so ga imeli mrežni analizatorji LEED optike (Low Energy Electron Diffraction). Razvoj metode AES, ki praktično poteka še sedaj, njene fizikalno-kemijske osnove in njena široka uporabnost so opisane, razen v mnogoštevilnih člankih, tudi v večih kvalitetnih knjigah (5,6,7,8,9).

Širina linij med mikrovezji, kakor tudi prehodi do substratov, so se v zadnjih letih zmanjšali na red velikosti pod mikrometer. Miniaturizacija vezij je bil pogoj za povečanje njihove hitrosti in tudi za povečani izplen in prihranek materiala. Večslojne strukture, ki jih danes uporabljamo v mikroelektroniki so sestavljene iz treh ali več

posameznih plasti, ki imajo vlogo difuzijske bariere, adhezijske plasti ali omskega kontakta. Uvedeni so novi materiali, ki jih pred nekaj leti še ni bilo mogoče uporabljati: to so različne tanke plasti silicidov, nitridov ali superprevodnih plasti in substrati, ki so razen iz silicija lahko še na osnovi GaAs, AlGaAs, HgCdTe ali SiGe. Zaradi nanosa tanjših plasti in vezij manjših geometrijskih oblik, ki določajo električne lastnosti elementov, so postavljene posebne zahteve tako za nanos kot za kontrolo sestave kompozitnih materialov.

Z metodo AES je v kombinaciji z ionskim jedkanjem mogoče analizirati površino, notranje fazne meje in profil (po globini) tankih plasti. Moderni spektrometri Augerjevih elektronov imajo danes premer vzbujevalnega elektronskega curka celo pod 30 nm, kar omogoča analizo drobnih vključkov in posameznih mikropodročij na miniaturiziranem mikroelektronskem vezju. Rastrska spektroskopija Augerjevih elektronov (SAM) omogoča kvalitetne slike sestave površine vezij (10). S povezavo spektrometra z računalnikom dobimo analizne rezultate razmeroma hitro, kar je izjemnega pomena za veliko serijsko proizvodnjo. Iz tega razloga je metoda AES, kljub razmeroma visoki ceni aparatur, že pred leti našla pot v industrijske laboratorije, tako pri razvoju novih vezij kot za kontrolo mikroelektronskih tehnologij.

V tem delu je na primerih lastnih preiskav in dela v tujih laboratorijih, s katerimi sodelujemo, prikazana uporabnost metode AES za preiskavo mikroelektronskih materialov: strukture SiO₂/Si, superprevodne keramike Bi₂Pb_{0,5}Sr₂Ca_{2,5}Cu_{3,5}O_x, superprevodne tanke plasti YBa₂Cu₃O₇ in večslojne strukture Al_xGa_{1-x}As.

2. OSNOVE SPEKTROSKOPIJE AUGERJEVIH ELEKTRONOV

Analizna metoda AES temelji na meritvi kinetične energije Augerjevih elektronov, ki jih dobimo z obstreljevanjem trdne površine, tekočine ali plinskih molekul, največkrat z elektroni, lahko pa tudi z rentgenskimi žarki ali ioni. Augerjev elektron s kvantizirano energijo, karakteristično za posamezen element, je rezultat Augerjevega prehoda, v katerega so ob ionizaciji atoma vključeni trije elektroni iz notranjih obel, lahko pa tudi iz valenčnega pasu atoma. Kadar se nek element veže v kemijsko spojino z drugim elementom, ima to za posledico spremembo energije elektronov na nekaterih notranjih elektronskih oblah in v valenčnem pasu, kar je hkrati spremljano s spremembo gostote elektronskih stanj. To se odraža v spremembi energije Augerjevega elektrona in v spektrih Augerjevih elektronov tudi v spremembi oblike konice, kar izrabljamo za ugotavljanje kemijskih spojin. Z metodo AES prepoznamo lahko nekatere okside, karbide, sulfide in še nekatere druge spojine. Po dogovoru označujemo v spektrih konice Augerjevih elektronov posameznih elementov z energijami, pri katerih imajo konice svoj minimum. Debelina analizirane plasti je določena z izstopno globino Augerjevih elektronov, ki je za elektrone z energijo od 50 do 2400 eV v mejah 0,3

do 3 nm. Volumen analiziranega vzorca je proporcionalen izstopni globini elektronov in preseku vzbujevalnega elektronskega curka $V = \pi d^2 \lambda / 4$. Odvisno predvsem od premera elektronskega curka, znaša analizni volumen od 10⁻⁶ do 10⁻¹⁴ μm³. Meja detekcije leži pri okrog 0,1 at %, določamo pa lahko vse elemente, razen H in He, ki okrog svojega atomskega jedra nimata na razpolago zadostnega števila elektronov in energijskih nivojev, potrebnih za Augerjev prehod.

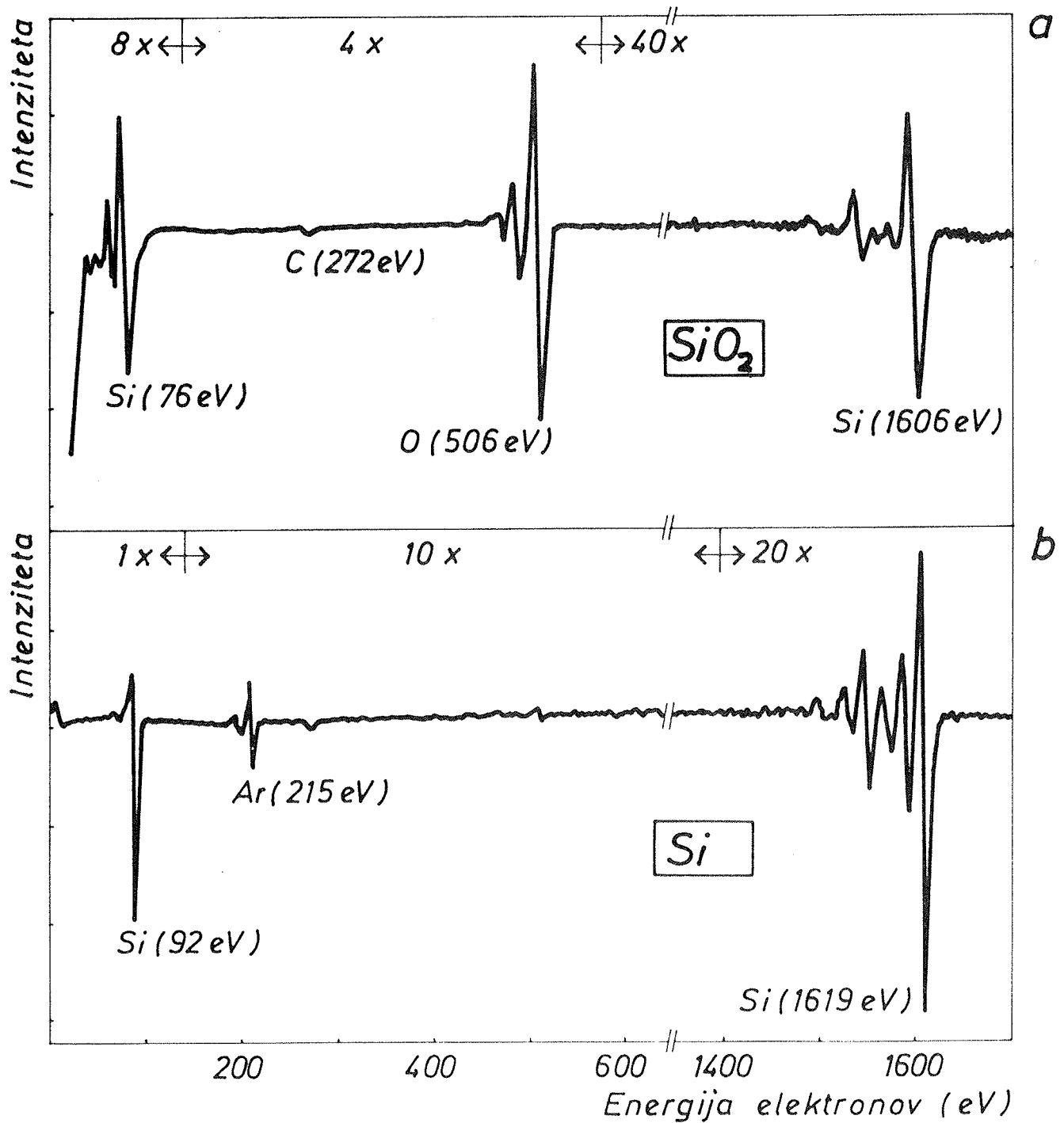
Za oceno elementne sestave vzorca se v praksi velikokrat zadovoljimo s kvalitativno analizo AES. Uveljavljena in pogosto uporabljena je primerjalna analiza "dobrih" in "slabih" vzorcev. Kadar pa želimo vedeti čim bolj natančne podatke o kemični sestavi preiskovanega vzorca, analizne podatke obdelamo po enem od znanih postopkov za kvantitativni izračun (11,12). Metoda s faktorji relativne občutljivosti elementov za Augerjev prehod je semikvantitativne narave (13). Bolj natančna, žal pa tudi bolj zamudna pa je metoda s primerjalnimi vzorci – standardi, ki temelji na primerjavi spektrov preiskovanih vzorcev s spektri standardov znane sestave (11). V zadnjem času se za kvantifikacijo AES rezultatov uvaja metoda, ki temelji na faktorski analizi (14, 15). Ta daje natančnejše podatke o prisotnosti elementov v posameznih komponentah, npr. o koncentraciji istega elementa v različnih oksidativnih stanjih, za kar pa je potrebna zahtevna računalniška obdelava podatkov (16).

Rastrski mikroanalizator Augerjevih elektronov omogoča slikanje površine in linijsko, točkovno ter profilno analizo (17, 18). V preiskavah z metodo AES najpogosteje uporabljamo točkovno analizo. Velikost analizirane površine vzorca je določena s premerom elektronskega curka, ali s površino, na kateri ta rastrira, rezultat analize pa je spekter Augerjevih elektronov (sl. 1).

Z rastriranjem vzbujevalnega elektronskega curka na preiskovani površini vzorca vzbudimo Augerjeve elektrone, ki omogočajo izdelavo slik. Svetlost zaslona katodne elektronke je modulirana s tokom Augerjevih elektronov izbranega elementa, katerega porazdelitev želimo ugotoviti na preiskovani površini. Na slikah prepoznamo prisotnost iskanega elementa iz svetlih področij, katerih intenzivnost je direktno povezana z njegovo koncentracijo in imamo možnost kvalitativne ocene sestave površine vzorca (sl. 2, 3).

Pri linijski analizi vodimo vzbujevalni elektronski curek prek površine vzorca vzdolž ravne črte. Elektronska puška na enem paru odklonskih plošč nima prevesne napetosti in je za zapis na zaslonu katodne elektronke v vertikalni smeri uporabljena modulacija s tokom Augerjevih elektronov tistega elementa, katerega koncentracijo vzdolž neke ravne linije iščemo (sl. 2f, g.).

Profilno analizo imenujemo postopek, s katerim v kombinaciji z AES, ali kako drugo metodo za analizo površin, in z ionskim jedkanjem vzorca, analiziramo vzorec v predelu od površine proti njegovi notranjosti (19, 20). Elektronska puška in ionska puška sta usmerjeni na isto



Sl. 1a,b: Spektra Augerjevih elektronov, dobljena s točkovno analizo na tanki plasti SiO₂ (a) in na substratu silicija (b).

mesto vzorca, tako da ozek vzbujevalni elektronski curek obstreljuje sredino ploskve, ki jo jedka mnogo širši curek ionov inertnega plina. Curek pozitivnih ionov, največkrat Ar⁺, s premerom okrog 2 mm, ki rastira na površini do 10 mmx10 mm, pri trku s površino vzorca odstranjuje vrhnje plasti atomov, ki jih hkrati analiziramo. Hitrost ionskega jedkanja je odvisna od energije in gostote ionskega toka in jo izbiramo največkrat v mejah od nekaj desetink nanometrov na minuto do 30 nm/min. Večje število zaporednih spektrov, dobljenih med profilno analizo, omogoča izdelavo profilnega diagrama, v

katerem je koncentracija elementov v tankih plasti podana v odvisnosti od časa ionskega jedkanja, oz. od globine (debeline) plasti (sl. 4, 6).

3. PRIMERI PREISKAV MATERIALOV ZA MIKROELEKTRONIKO

Vsi navedeni preiskovalni postopki so v tem delu ilustrirani s primeri preiskav materialov in komponent, ki jih uporabljamo v mikroelektroniki.

Tanka plast SiO se v mikroelektroniki uporablja kot pasivacijska plast, ki jo na površini silicijeve rezine formiramo s termično oksidacijo. Pred leti smo za potrebe Tovarne polprevodnikov, RIZ, Zagreb, preiskali vzorce SiO₂/Si, ki so bili skozi oksidno plast dopirani z borom. Sam postopek priprave vzorcev je podrobno opisan drugje (21), na tem mestu pa so prikazani rezultati analize z metodo AES, ki ilustrirajo postopke točkovne analize, linijsko analizo in slike sestave površine, napravljene z Augerjevimi elektroni.

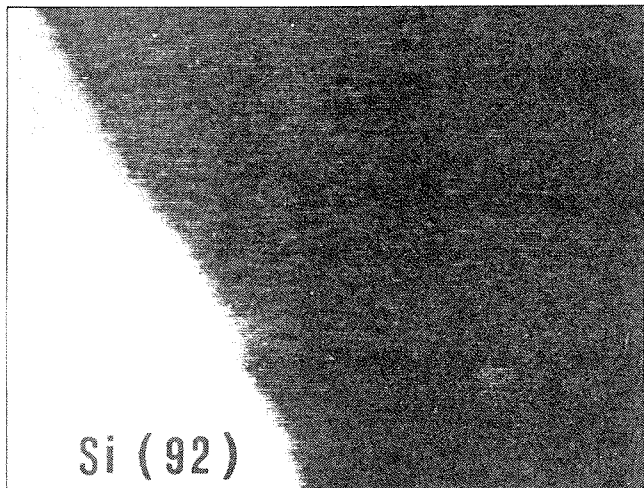
Na sliki 1a,b sta prikazana spektra Augerjevih elektronov, dobljena s točkovno analizo na površini tanke plasti SiO in na podlagi Si. Kateremu elementu pripada posamezna konica v spektrih Augerjevih elektronov, prepoznamo iz njene energijske lege in oblike, pri čemer si pomagamo s spektri standardov, ki so zbrani v priročnikih (13, 22). V spektru čistega silicija (sl. 1b) sta označeni dve najpomembnejši konici pri 92 eV in 1619 eV. Spekter na sl. 1a pa kaže spremembo energijske lege konic k 76 eV in pri višjeenergijski konici k 1606 eV, kar je posledica kemijske vezi silicija v SiO₂.

Vzorec SiO₂/Si, dopiran z borom, smo preiskali z AES profilno analizo (21). Med tem postopkom nastane na vzorcu jedkalna jamica (krater) s stenami, nagnjenimi za

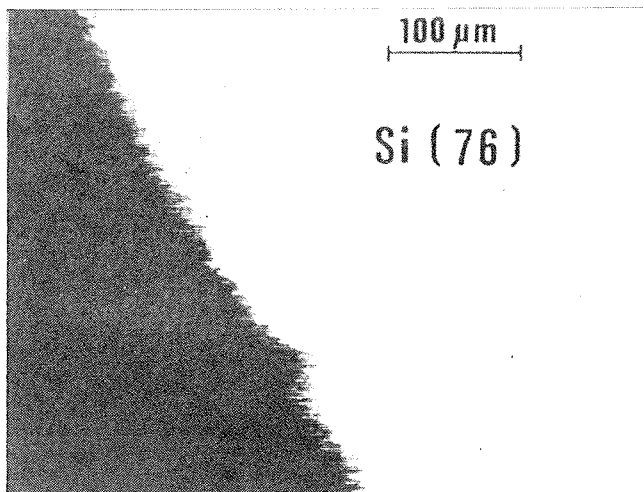
manj kot eno kotno stopinjo, kar je posledica večje gostote ionskega toka v sredini jedkanega področja kot na njegovem robu (23). Jedkalna jamica z nagnjenimi stenami nastane tako pri uporabi statičnega ionskega curka z Gausovo porazdelitvijo gostote ionskega toka kot pri rastiranju ionskega curka. Na stenah jamice lahko opazujemo in kontroliramo sestavo vzorca po njegovi globini, podobno kot v primeru vzorcev pripravljenih s poševnim brušenjem, kar poznamo že iz priprave metalografskih obrusov debelejših plasti (24).

Z AES profilno analizo smo ugotovili, da je B v tanki plasti SiO v obliki oksida, medtem, ko je na fazni meji SiO₂/Si v elementarni obliki (21). Ta ugotovitev je bila potrjena tudi s preiskavo stene jedkalne jamice vzorca s slikami in linijsko analizo, izdelanimi z Augerjevimi elektroni na fazni meji SiO₂/Si. Tudi pri izdelavi posnetkov na sl.2a, b, c, d, e, f, g smo izrabili energijski premik Augerjevih elektronov bora in silicija, ki imata v elementarni obliki vrednosti Si (92 eV) in B (179 eV) in kot oksida Si (76 eV) in B (168 eV). Slika 2a kaže porazdelitev Si: svetlejša področja na levi strani slike predstavljata substrat silicija. Slika 2b kaže porazdelitev Si vezanega v tanki plasti SiO₂, ki se hkrati ujema s sl. 2c, ki kaže porazdelitev kisika. Na slikah 2d in 2e je pokazana porazdelitev bora, ki je v SiO₂ plasti v eni od oksidnih oblik, HBO₂ ali B₂O₃, fazna meja SiO₂/Si pa je obogatenjena z elementarnim borom. Enako razlago nam da tudi linijska analiza teh elementov pri prehodu iz substrata Si, skozi fazno mejo, v oksidno plast (sl.2 f, g). Argon, ki ga najdemo vgrajenega več v siliciju je posledica ionskega jedkanja vzorca. Tovrstna preiskava vzorcev SiO₂/Si, dopiranih z B pri različnih pogojih (21) in vzporedne električne meritve, dajo tehnologu važne podatke za pravilno vodenje tehnološkega procesa, ki omogoča optimalne lastnosti mikroelektronskega elementa.

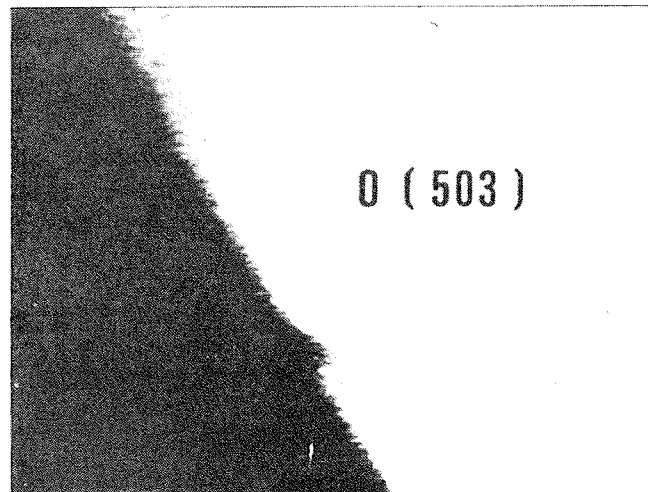
Slike 2a do 2g imajo razmeroma slabo lateralno ločljivost, saj je bil premer vzbujevalnega elektronskega curka razmeroma velik in je znašal okrog 40 μm. Novejše naprave z zožanim elektronskim curkom, celo pod 30 nm, so v tem pogledu veliko bolj uporabne za preiskavo majhnih faznih področij, posameznih kristalnih zrn in celo ozkih področij okrog mej kristalnih zrn. Na sl.3a,



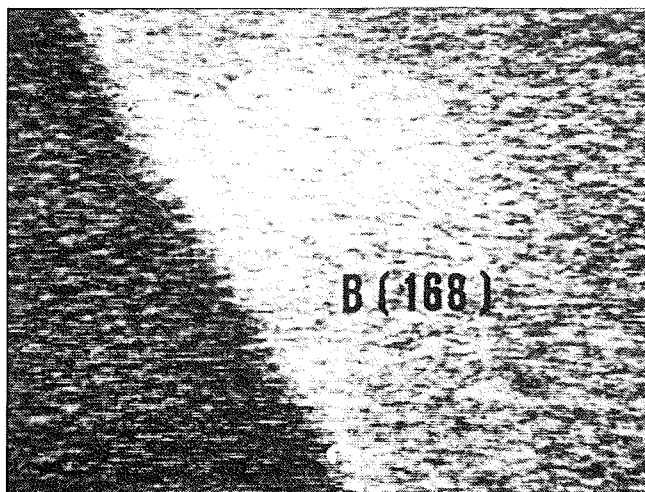
a



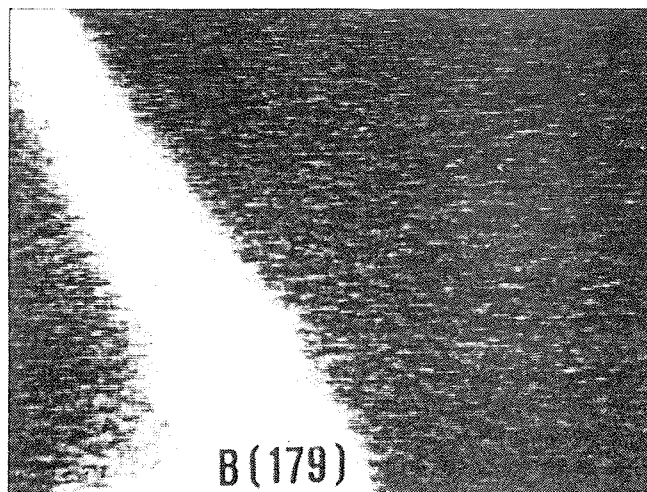
b



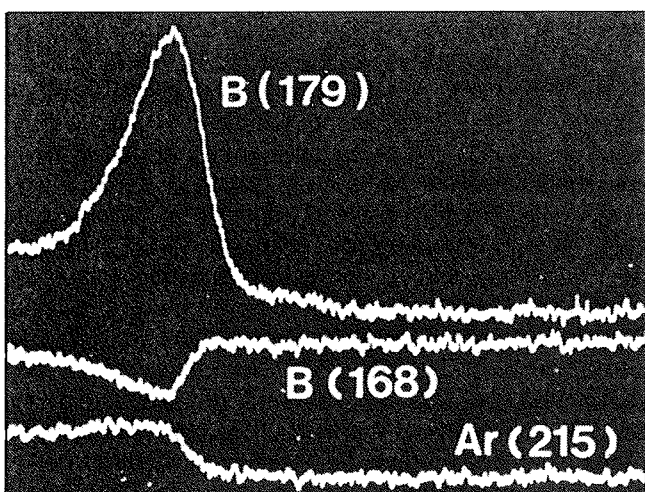
c



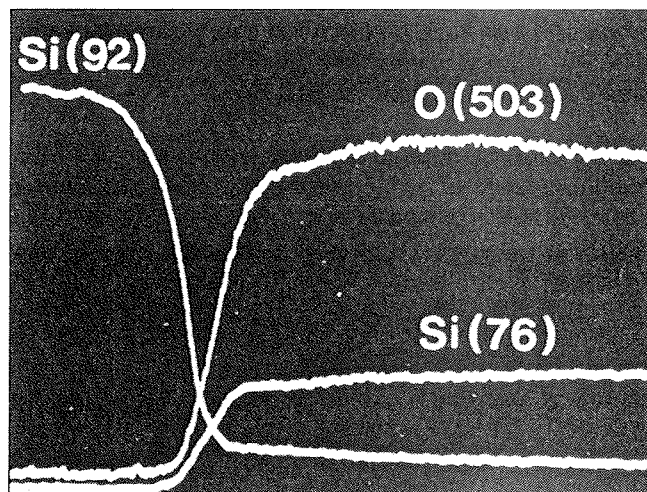
d



e



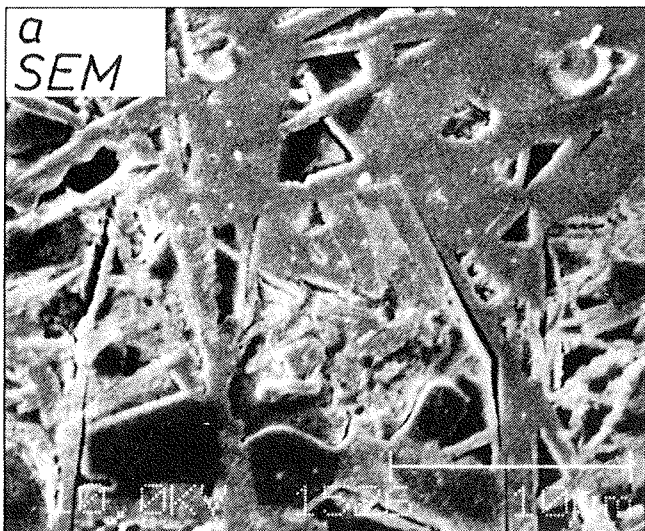
f



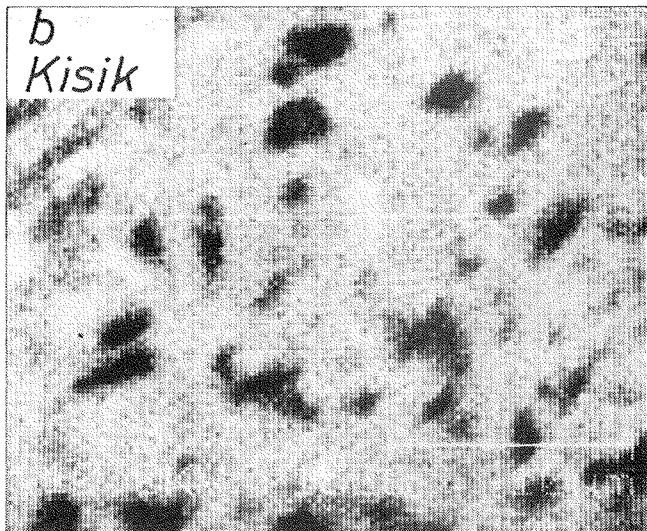
g

Sl. 2a,b,

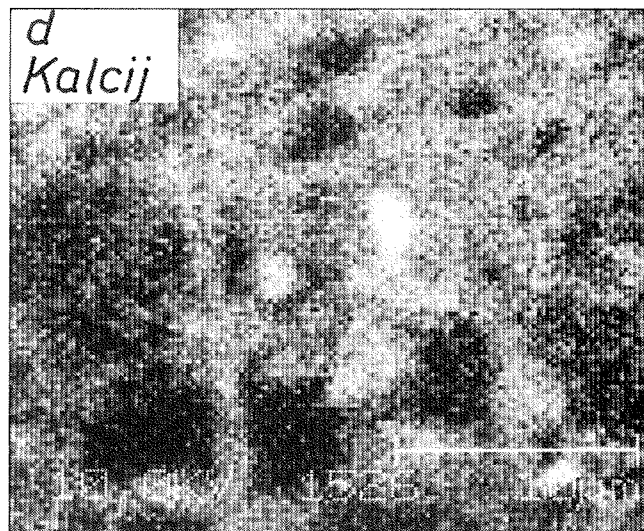
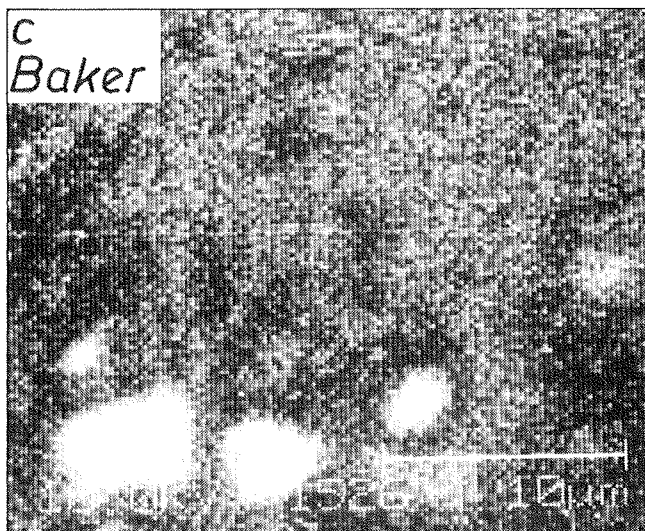
c,d,e,f,g.: Augerjeve slike (a do e) in linijska analiza (f,g) na fazni meji SiO_2/Si , ki kažejo porazdelitev elementov in različno kemijsko stanje Si in B (21).



a



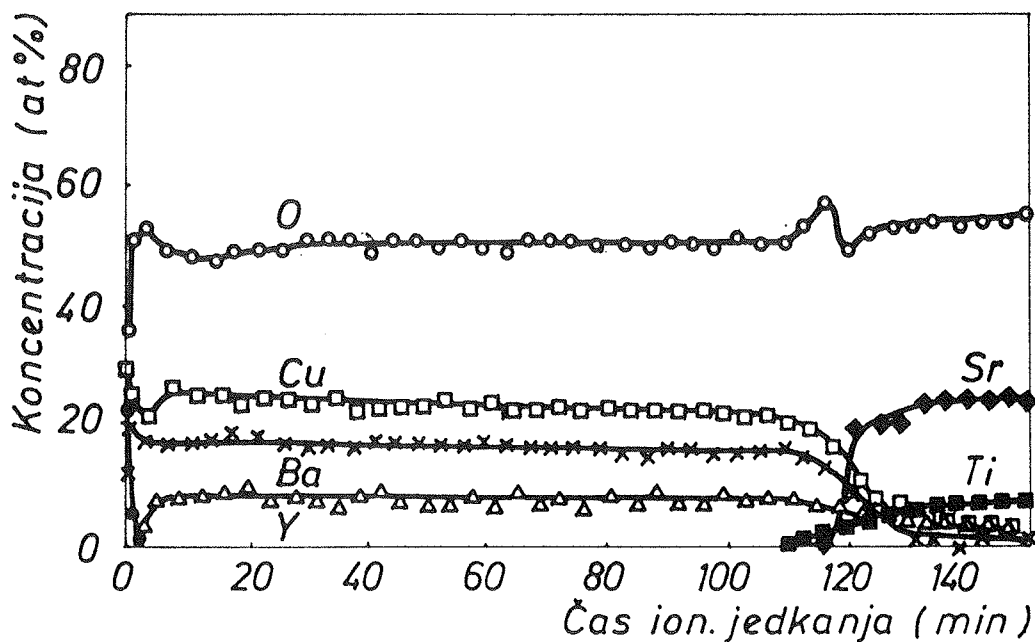
b



Sl. 3 a, b, c, d: Elektronsko-mikroskopska slika polirane površine superprevodnika Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O (a) in Augerjeve slike, ki kažejo porazdelitev O (512 eV) (b), Cu (917 eV) (c) in Ca (291 eV) (d), (25).

b, c, d je prikazan primer preiskave sestave superprevodne keramike $\text{Bi}_2\text{Pb}_{0,5}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2,5}\text{Cu}_{3,5}\text{O}_x$, z uporabo vzbujevalnega curka elektronov s premerom okrog $0,7\mu\text{m}$ (25). Slika 3a je elektronsko-mikroskopski posnetek površine polirane superprevodne keramike, izdelan v spektrometru Augerjevih elektronov. Dobro se vidijo posamezna keramična zrna in vmesni prostori, ki predstavljajo pore v tem materialu. Slike 3 b, c in d so izdelane z Augerjevimi elektroni O (512 eV) Cu (917 eV) in Ca (291 eV) in kažejo porazdelitev teh elementov, oz. nehomogenost sestave keramike. Prisotnost faz, ki odstopajo od stehiometrije superprevodnika, ki smo jih našli tudi v okolici mej keramičnih zrn (25), povzročajo znižanje kritične temperature T_c in omejujejo gostoto toka

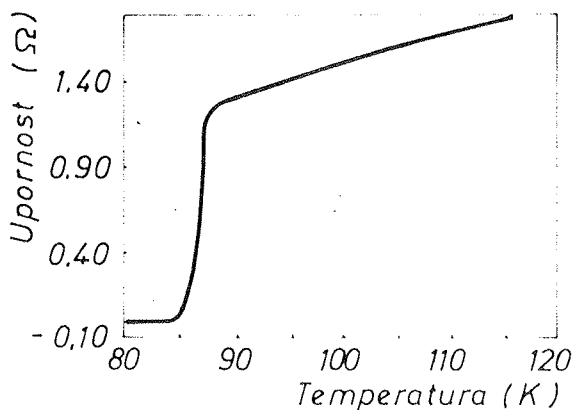
na $10\text{A}/\text{cm}^2$ (25, 26). Z raziskavami superprevodnih materialov z metodo AES smo ugotovili, da imajo najbolj homogeno sestavo napršene tanke superprevodne plasti (27), ki zato tudi dosegajo optimalne električne lastnosti, kar jim daje bodočnost in prednost pred drugimi superprevodnimi materiali. Kot primer AES profilne analize navajamo v tem delu profilni diagram superprevodne tanke plasti $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ na podlagi SrTiO_3 , z orientacijo osnovne ploskve (100). Iz profilnega diagrama na sl. 4 vidimo, da ima superprevodna plast, razen na površini in na meji s podlago, homogeno sestavo, ki je blizu stehiometriji $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. To se kaže tudi v njenih električnih lastnostih: plast ima ničelno upornost pri 85K, širina temperaturnega prehoda pa je okrog 3K (sl. 5).



Sl. 4: AES profilni diagram $0,5\mu\text{m}$ debele superprevodne tanke plasti $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ na podlagi SrTiO_3

Kot primer mejne zmogljivosti AES profilne analize prikazujemo profilni diagram večslojne strukture s kvantno jamo, $Al_xGa_{1-x}As$, izdelane s postopkom epitaksije z molekularnim curkom (MBE) sl. 6). Preiskava je bila napravljena v laboratoriju PERKIN-ELMER, Physical Electronics v ZDA (28), vendar s postopkom, ki je bil razvit v našem laboratoriju na IEVT in tudi patentiran (29,30). V profilni analizi je ključnega pomena dosežena globinska ločljivost, ki je odvisna od večih fizikalnih vplivov, povzročenih zaradi ionskega jedkanja vzorca (20). V splošnem se globinska ločljivost v profilnih diagramih, izdelanih s klasičnim postopkom, z njihovo glo-

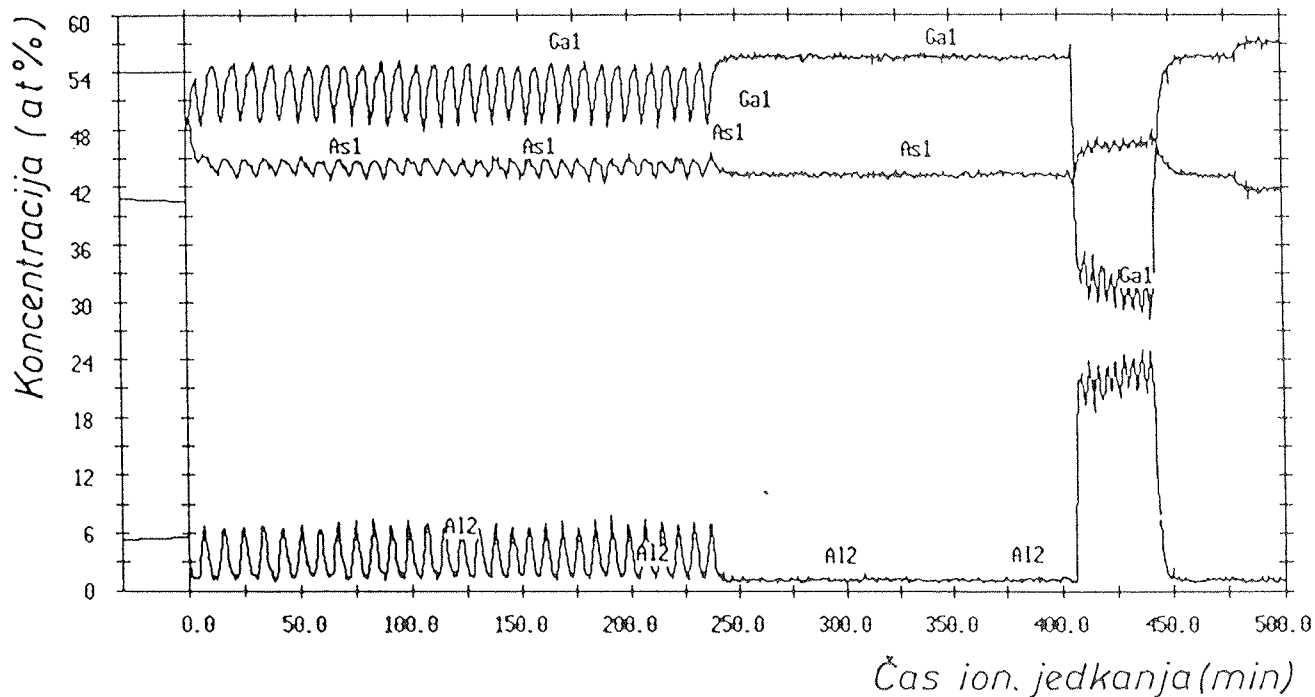
bino slabša. Posebnost profilnega diagrama na sl. 6 pa je, da je bil izdelan s profilno analizo med rotacijo vzorca v ravnini prečno na ionski curek. S tem se močno zmanjša ali celo prepreči mikrohrapavost, na površini vzorca, ki jo ionsko jedkanje povzroča na mirujočih vzorcih. V profilnem diagramu na sl. 6 prepoznamo 30 zaporednih parov tankih plasti GaAs, debeline 14,2 nm in $Al_xGa_{1-x}As$, debeline 6,1 nm, na 400 nm debelem GaAs, nato pa sledi še devet tanjših parov plasti GaAs, 4,0 nm/ $Al_xGa_{1-x}As$, 4,0 nm na podlagi GaAs. Še do nedavnega, zaradi slabe globinske ločljivosti, prepoznavanje tako tankih plasti, kot jih ima navedeni vzorec, na globini večji od nekaj sto nanometrov ni bilo mogoče. Dodati je še potrebno, da je kvantitativni izračun izdelan na osnovi faktorjev relativne občutljivosti elementov za Augerjev prehod, vzeti iz priročnika (13), zato se izračunana sestava na sl. 6 samo približuje stehiometrijski sestavi vzorca.



Sl. 5: Odvisnost upornosti superprevodne tanke plasti $YBa_2Cu_3O_7$ (prikazane na sl.4) od temperature.

4. ZAKLJUČEK

V delu so predstavljene osnove spektroskopije Augerjevih elektronov (AES), ki je danes napogrešljiva preiskovalna metoda na področju mikroelektronike, prav zaradi njene dobre lateralne in globinske ločljivosti, ki sta pogoj za preiskavo miniaturiziranih mikroelektronskih vezij v submikronskem področju. Na primeru nekaterih modernih mikroelektronskih materialov je prikazana uporabnost preiskovalnih postopkov, ki jih omogoča rastrska Augerjeva mikroanaliza in AES profilna analiza. Seveda je uporabnost metode AES v mikroelektroniki še veliko širša kot je navedeno v tem delu, saj je nepogrešljiva pri osnovnih raziskavah novih materialov, kakor tudi v industrijskih laboratorijih, pri vhodni kontroli materialov, pri



Sl. 6: Profilni diagram večslojne strukture $Al_xGa_{1-x}As$, izdelan z AES profilno analizo med vrtenjem vzorca (1 obr/min) (28,30).

preiskavi defektnih elementov, pri kontroli površin po posameznih tehnoloških operacijah kot so čiščenje in jedkanje, nadalje pri procesiranju, pasivaciji, spajkanju, bondiranju ali pa pri bolj zahtevnih postopkih, kot so kontrola učinkovitosti difuzijskih barier ali pa tvorba silicidov. Pri razvoju in izdelavi zahtevnih mikroelektronskih vezij zadnje generacije, ki so praviloma sestavljeni iz večslojnih struktur pa razen analize AES v vodilnih mikroelektronskih firmah uporabljajo še druge metode za preiskavo površin, kot sta spektroskopija fotoelektronov vzbujenih z rentgenskimi žarki (XPS = ESCA) in masna spektrometrija sekundarnih ionov (SIMS). Ne ene ne druge metode v Sloveniji nimamo, nad čemer naj bi se potencialni uporabniki, skupaj z odgovornimi iz Ministrstva za znanost in tehnologijo, resno zamislili.

ZAHVALA

Firmi Perkin-Elmer, Physical Electronics, Eden Prairie, Minnesota, se zahvaljujem, ker mi je dovolila uporabiti profilni diagram MBE- večslojne strukture $Al_xGa_{1-x}As$.

LITERATURA

1. P. Auger, J. Phys. Radium 6, 1925, 205.
2. L. A. Harris, J. Appl. Phys., 39, 1968, 1419.
3. R. E. Weber, W. T. Peria, J. Appl. Phys. 38, 1967, 4355.
4. P. W. Palmberg, G. K. Bohn, J. C. Tracy, Appl. Phys. Lett., 15, 1969, 254
5. P. F. Kane, G. B. Larabee (Eds.), Characterization of Solid Surfaces, Plenum Press, New York, 1974.
6. T. A. Carlson, Photoelectron and Auger Spectroscopy, Plenum Press, New York, 1975
7. A. W. Czanderna (Ed.), Methods of Surface Analysis Elsevier, New York, 1975.
8. D. Chattarji, The Theory of Auger Transitions, Academic Press, New York, 1976.
9. D. Briggs and M. P. Seah, Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy, Wiley, Chichester, 1st edition, 1983, 2nd edition, 1990
10. D. W. Harris, R. S. Nowicki, Applications of AES in Microelectronics, v referenci 9, druga izdaja, str.257.
11. A. Zalar, Elektrotehniški vestnik, 2-3, 1980, 61.
12. M. P. Seah, Quantification of AES and XPS, v referenci 9, druga izdaja, str.201.
13. L. E. Davis, N. C. MacDonald, P. W. Palmberg, G. E. Riach and R. E. Weber, Handbook of Auger Electron Spectroscopy, 2nd ed., Physical Electronics Industries Inc, Minnesota, 1976.
14. E. Weber, Einführung in die Faktorenanalyse, G. Fischer Verlag, Stuttgart, 1974.
15. S. W. Gaarenstroom, J. Vac. Sci. Technol. 16, 1979, 600.
16. S. Hofmann, J. Steffen, Surf. Interface Anal., 14, 1989, 59.
17. H. E. Bishop, Auger Electron Spectroscopy, v knjigi J.M.Walls (Ed.), Methods of Surface Analysis, Cambridge University Press, Cambridge, 1989, 87.
18. J. C. Riviere: Instrumentation, v referenci 9, druga izdaja, str.19.
19. H. Oechsner (Ed.), Thin Film and Depth Profile Analysis, Topics in Current Physics 37, Springer, Berlin, 1984.
20. S. Hofmann, Depth Profiling in AES and XPS, v referenci 9, druga izdaja, str.143.
21. S. Muštra, A. Zalar, B. Praček, Zbornik referatov XI. Jugoslovanskega posvetovanja o mikroelektroniki, urednika M. Gojo in P. Tepina, Zagreb, 1983, 411.
22. G. E. McGuire, Auger Electron Spectroscopy Reference Manual, Plenum Press, New York, 1979.
23. A. Zalar, S. Hofmann, Surf. Interface Anal., 2, 1980, 183.
24. A. Zalar, B. Praček, F. Korošič, Zbornik referatov, Simpozij o elektronskih sestavnih delih in materialih, SD 87, urednik M. Kosec, 1987, 91.
25. A. Zalar, E. W. Seibt, M. Hrovat, S. Bernik, Supercond. Sci. Technol. 3, 1990, 409.
26. E. W. Seibt, A. Zalar, Materials Letters, 7 No 7/8, 1988, 256.
27. E. W. Seibt, A. Zalar, Materials Letters, 11, 1991, 1.
28. PHI, SAM info., Appl. Note 8901, Perkin-Elmer, februar, 1989.
29. A. Zalar, Thin Solid Films, 124, 1985, 223.
30. A. Zalar, Thin Solid Films, 193/194, 1990, 258.

*Dr. A. Zalar, dipl. ing.
Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko,
Teslova 30,
61000 Ljubljana*