

HIBRIDNI INTEGRIRANI SKLOPOVI U TEHNICI DEBELOG FILMA - SNIMKA AKTUELNOG STANJA I TREND NA PODRUČJU MATERIJALA I DISKRETNIH KOMPONENATA

Greta Prajdić

KLJUČNE RIJEČI: hibridni integrirani sklopovi, tehnologija debelog filma, supstrati, paste, pasivne komponente, aktivne komponente, mikroelektronski materijali, trendovi razvoja

SAŽETAK: U članku su prikazani osnovni materijali - paste, supstrati - koji se koriste u tehnologiji debelog filma i navedeni potencijalni novi proizvodi. Uključen je pregled situacije na području diskretnih komponenata i istaknuti pravci razvoja tog područja.

THICK FILM HYBRID INTEGRATED CIRCUITS - CURRENT DEVELOPMENTS AND FUTURE TRENDS IN MATERIALS AND DISCRETE COMPONENTS DOMAIN

KEY WORDS: hybrid integrated circuits, thick film technology, substrates, pastes, passive components, active components, microelectronic materials, development trends

ABSTRACT: Basic thick film materials - substrates, pastes - are reviewed. Data regarding discrete components, passive and active, are included. Prospective changes are emphasised.

1. UVOD

Na razvoju tehnologije debelog filma (kratica TF, Thick Film) odražavali su se u proteklih pet desetljeća ne samo tehnički zahtjevi odnosno utjecaji s drugih područja znanosti i tehnike, nego i općedruštvena kretanja i situacije. Energetska kriza početkom sedamdesetih godina rezultirala je na primjer generacijom TF - pasta koje su dozvoljavale znatno nižu temperaturu sinteriranja ($\approx 600^\circ\text{C}$) od standardnih kompozicija ($800 - 1000^\circ\text{C}$). Kako su TF - paste velikim dijelom bazirane na plemenitim metalima (Ag, Au, Pt, Pd), visoka cijena i potresi na tržištu plemenitih metala poticali su nastojanja da se pronađu odgovarajući supstituenti. Tako je paleta proširena Cu - vodljivim sistemima. Najnoviji period u razvoju tehnologije debelog filma, kao i sva ostala područja ljudske djelatnosti, obilježen je prodorom računala. Iako CAD/CAM (Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing, projektiranje/procesiranje pomoću računala) može u velikoj mjeri poboljšati kvalitet i sniziti cijenu izrade sklopa, pomak u generacijskom smislu na području hibrida, smatra se, mogu izazvati samo novi fizikalno - kemijski momenti t.j. fenomeni vezani uz materijale i njihova svojstva.

Izvedbe hibridnih integriranih sklopova (kratica HIC, Hybrid Integrated Circuit), uz TF - elemente, svakako određuje i izbor diskretnih komponenata. Razvoj tehnologije površinske montaže (kratica SMT, Surface Mount Te-

chnology) u zadnjih nekoliko godina izazvao je velike promjene u toj domeni. Iako se u fokusu produkcije komponenata za površinsku montažu (kratica SMD, Surface Mount Device) nalazi proizvodnja sklopova na tiskanim pločama, ekspanzija SMD, uz neke druge aspekte, ima pozitivne posljedice za proizvođače HIC. Asortiman diskretnih komponenata koje se mogu koristiti u izradi hibridnih integriranih sklopova se povećava, a cijena SMD se s povećanjem potrošnje kontinuirano smanjuje. U SM - verziji pojavljuju se danas na tržištu već najrazličitiji proizvodi; od standardnih elemenata kao što su kondenzatori, otpornici, poluvodičke komponente do raznih tipova minijaturnih transformatora ili baterija na primjer. U članku su navedeni podaci koji u glavnim crtama oslikavaju kretanja na području aktivnih i pasivnih komponenata.

2. TREND NA PODRUČJU TF - MATERIJALA

2.1. Supstrati

Za izradu HIC u tehnologiji debelog filma i danas se kao supstrat najviše koristi tradicionalni materijal, 96 % Al_2O_3 . Za aplikacije kod kojih su termički zahtjevi izraženiji, koristi se BeO. Toplinska vodljivost BeO ($250 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) je za cijeli red veličine bolja od toplinske vodli-

vosti Al_2O_3 (21 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$). Nedostaci BeO su visoka cijena i velika toksičnost.

Trend na području hibridnih sklopova, karakteriziran zahtjevima za sve većom funkcionalnom gustoćom i sve većim brzinama rada, potencira termičke probleme u sistemu. Zato su već duže u fokusu interesa materijali, koji bi mogli popuniti distancu između Al_2O_3 i BeO u pogledu karakteristika i cijene ili proširiti paletu. Čini se, da tu ulogu mogu preuzeti dva materijala: AlN i SiC . Nisu toksični, imaju odlične mehaničke i električke osobine. Toplinska vodljivost SiC je kod sobne temperature tri puta, a AlN deset puta veća od Al_2O_3 . Teoretski bi maksimalna termička vodljivost AlN - supstrate mogla biti veća od 300 $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$. U svakom slučaju AlN je materijal, koji privlači najveću pažnju. Neki proizvođači pasta su se već orijentirali na izradu sistema kompatibilnih s AlN , pa se na tržištu mogu naći vodljive, dielektričke i, za sada samo niskoomske, otporničke kompozicije za AlN - supstrate.^{11, 12}

Na tržištu su se pred petnaestak godina bili pojavili supstrati na bazi emajl-čelika (EMS, Enamelled Metal-Steel Substrate/ PES, Porcelain Enamelled Steel Substrate). Trebali su predstavljati jeftiniju zamjenu za keramičke supstrate, a naglašavane su i njihove potencijalne termičke mogućnosti. Kako je cijena Al_2O_3 supstrata u međuvremenu postala mnogo niža, glavni je motiv otpao. Uz EMS se, osim toga, može koristiti samo ograničen broj kompozicija, jer dozvoljavaju temperature sinteriranja od maksimalno 620°C. Neki su proizvođači razvili paste za primjene na emajl-čelik supstratima, ali je evolucija na tom području izostala. Supstrati s metalnom jezgrom (MCS, Metal Core Substrate), međutim, zbog istih razloga - disipacije topline i cijene - i danas predstavljaju potencijalno optimalno rješenje na području hibrida snage. Četiri su osnovne strukture. Kao jezgra služi aluminij; dodaju se (a) oksidna anodna prevlaka, (b) emajl, (c) epoksidni sloj ili (d) poliimidni film.³

2.2. Paste

Paleta pasta za debeli film je u ovom času vrlo široka. Procjenjuje se, da 50 % od ukupne količine TF - proizvoda otpada na vodljive paste, 30 - 40 % na dielektričke, a 10 - 20 % na otporničke kompozicije.

2.2.1. Vodljive kompozicije

Tehnologija debelog filma se i danas temelji na Ag - i Au - sistemima, iako su razvijene vodljive Cu - paste kao alternacija (skupim) pastama na bazi plemenitih metala. Zbog zaštitne atmosfere, koju zahtjevaju u toku tehnološkog procesa, Cu - sistemi su skuplji od Ag - odnosno Ag/Pd - sistema. Na cijenu Cu - pasta utječe i činjenica, da se još uvijek proizvode u malim količinama. Bakar ima vrlo dobru električku vodljivost, pa se Cu - kompozicije koriste u višeslojnim strukturama umjesto Au. Ta

zamjena rezultira ekonomičnom cijenom produkta. U proteklom su razdoblju mnogo pažnje Cu - kompozicijama posvećivali japanski proizvođači (HIC), koriste ih i proizvođači HIC u USA, ali u Evropi Cu - sistemi jedva da imaju bilo kakovu primjenu.

Glavni trend na području TF - materijala odnosi se upravo na povećanje primjene Cu - sistema.^{14, 15}

2.2.2. Otporničke kompozicije

Razvoj otporničkih kompozicija se odvijao od Pd/Ag sistema, preko Ir/Pt do sistema na bazi rutenium oksida. Prvi je sistem, baziran na djelomičnoj oksidaciji paladija, bio izuzetno osjetljiv na variranje tehnološkog procesa. Drugi je tip materijala odbačen, jer su cijene iridija, koji je korišten umjesto Pd/Ag, kontinuirano rasle, pa je sistem izgubio na privlačnosti. Danas su otporničke paste bazirane na ruteniju odnosno njegovim spojevima. Strogo kontroliranim sastavom, velikom čistoćom sastojaka i nizom dodataka, uspješno se proizvode otporničke kompozicije, koje nisu pretjerano osjetljive na variranje procesa izrade otpornika. Na ovom području postoji kontinuirani trend u smislu poboljšavanja svojstava (stabilnost, TCR), ali uz primjene na Al_2O_3 ne očekuju se neki veći noviteti.

Otporničke kompozicije za AlN - supstrate pokrivaju u ovom času samo uski raspon vrijednosti (1 - 100 Ω/\square). Mogu se očekivati promjene u smislu povećanja područja.

2.2.3. Dielektričke kompozicije

Dielektričke kompozicije su bazirane na različitim kombinacijama stakla sa posebno određenim svojstvima. Razvoj na tom području je intezivan. U ovom času u TF - pastama se upotrebljava više od 1000 različitih vrsta stakla; veliki dio u dielektričkim kompozicijama. Nastoji se sagledati i zadovoljiti zahtjeve višeslojnih struktura, kojima nužno gravitira razvoj HIC, da bi se ostvarila što veća gustoća pakiranja. Uz klasične višeslojne strukture, realizirane sukcesivnim nanošenjem i sinteriranjem niza vodljivih i dielektričkih slojeva, sve se atraktivnijim čini t.zv. "Green Tape" sistem. Pojedini slojevi se izrađuju separatno na nesinteriranim supstratima i na kraju svi zajedno sinteriraju. Tako se mogu realizirati strukture do 40 slojeva. Postupak je ekonomičniji od izrade klasičnog višeslojnog sistema, jer se loši pojedinačni slojevi odmah eliminiraju. U ovom času još ne postoje velika iskustva u primjeni "Green Tape" sistema, ali ih eksperti za područje TF - materijala smatraju favoritima za naredni period. Višeslojne sisteme pokušava se ostvariti i kombinacijom različitih tehnika. Na pr. gusto pakirana Cu - vodljiva struktura (linije 50 μm) se realizira platanjem, a za izradu dielektričkih segmenata i otpornika koriste se postupci i materijali iz standardnog TF - programa. Takovim i sličnim postupcima pokušava se ostvariti što veća funkcionalna gustoća HIC

što je glavni trend na području izrade integriranih sklopova.^{16/, 17/}

2.3. Ostali materijali

Ekspanzija SMD intenzivirala je razvoj na području lemnih materijala. Aktivnosti su usmjerene na izradu kompozicija, koje će biti primjerene malim lemnim površinama i novim izvedbama IC, te PCB - supstratima. Nastoji se pronaći nove vrste topitelja, koji će se lako uklanjati ili uopće ne će biti potrebno čišćenje sklopa nakon lemljenja.

Proizvođači pasta za debeli film nastoje zadovoljiti i zahtjeve u pogledu rezolucije linija ($\geq 40 \mu\text{m}$), mijenjanjem reoloških svojstava materijala ili novim pristupom problemu. Tako su razvijeni TF - materijali, koji se mogu oblikovati fotopostupkom (PCM, Photoformed Ceramic Modules; PCS, Photoformed Ceramic Substrates).

PTF sistemi (Polymer Thick Film, sistemi koji kao vezivo sadrže polimerni materijal, a ne staklo poput klasičnih TF - kompozicija) također obećavaju mogućnost novih aplikacija u narednom periodu. Prisutan je i trend uvođenja PTF - pasta na bazi Cu. Takove kompozicije predviđene su za nanošenje na FR 4 materijal. Neki proizvođači pasta imaju razvijen kompletan alternativni sistem za klasične tiskane ploče.

Trend na području TF - materijala obuhvaća i izradu pasta za posebne namjene. Tu se ubrajaju hibridi snage i mikrovalni sklopovi. U grupu aplikativno specifičnih proizvoda ulaze i paste za senzore, sunčane ćelije, membranske tastature i sl.

3. TREND NA PODRUČJU AKTIVNIH KOMPONENATA

Ako se područje hibridnih integriranih sklopova uzme kao polazna točka, promjene koje se dešavaju u domeni poluvodičkih komponenata treba svesti u dvije kategorije. Prva obuhvaća trend vezan uz izvedbe (pakiranje) diskretnih komponenata. Druga se odnosi na primjenu nepakiranih IC. Na području izvedbe poluvodičkih komponenata u proteklom periodu, kroz gotovo dvije decenije, nije bilo značajnijih promjena. SO - izvedba (SO, Small Outline), koja datira iz 1970 godine, koristi se i danas. Za razliku od standardne DIP izvedbe (DIP, Dual-In-Line Package) poluvodičkih komponenata, SO-izvedba ima po prilici u pola manje dimenzije. SO izvedba je u početku podrazumijevala upotrebu polimernog materijala, ali u novije vrijeme je sve veći interes za identičnim pakiranjem uz primjenu keramičkog materijala. Inače u periodu od 1986 do 1995. godine se očekuje i registrira povećanje udjela polimernih kućišta u odnosu na keramička i metalna pakiranja IC. SOIC u pravilu uključuje DIL (Dual-In-Line) koncepciju izvoda. Izvodi mogu imati različite oblike - G (Gull Wing, oblik

krila galeba), J (J - Leaded Shape, izvod u obliku slova J). Maksimalan broj izvoda je 28.

Komponente s većim brojem izvoda (predviđene za površinsku montažu) dolaza na nosačima čipova (Chip Carriers). Nosači čipova mogu imati vanjske izvode ili su vodljivi segmenti preko kojih se ostvaruje spoj s podlogom dio kućišta. Mogu biti izrađeni od polimernog ili keramičkog materijala. U skladu s tim postoje varijante: LCCC (Leaded Ceramic Chip Carriers), LLCC (Leadless Chip Carriers), PLCC (Plastic Leaded Chip Carriers). PLCC u pravilu ima izvode u obliku slova J. Prema EIA optimalan je broj izvoda 18 - 124. Veći broj izvoda (44 - 300) dozvoljava t.zv. QFP (Quad Flat Pack) izvedba odnosno PQFP (Plastic Quad Flat Pack). Takovo pakiranje je tanje (2.5 - 3.0 mm) i u skladu s tim osjetljivije na termička naprežanja od PLCC (4.4 mm). Sofisticirane izvedbe kao što su MICROPACK, "flip chip", TAB i sl. omogućavaju izradu i asembliranje IC s još većim brojem izvoda (500).^{18/, 19/}

Različite izvedbe komponenata su praćene različitim mehaničkim, fizikalno - kemijskim i ekonomskim efektima. LLCC je na pr. 5 - 10 puta skuplji od PLCC. SOG (Small Outline G - pins) ima robustnu konstrukciju. J - izvodi zahtjevaju manju lemnu površinu od G - izvoda ali je kontrola lemnih spojeva kod takove konfiguracije teška. Fleksibilnost J - izvoda dozvoljava primjenu na različitim podlogama. LLCC zahtjeva veliku podudarnost podloge u pogledu koeficijenata termičke ekspanzije. Pojedine izvedbe su danas u literaturi već vrlo detaljno opisane i međusobno komparirane.^{10/, 11/, 12/, 13/}

Povećanje broja izvoda zahtjeva sve veće površine za asembliranje poluvodičkih komponenata. Iako minijature, SMD izvedbe IC poput LCC ili LLCC zahtjevaju na pr. za ugrađivanje više nego 10 puta veću površinu od aktivne površine silicija. Uz geometrijske, pojavljuju se problemi mehaničke i ekonomske prirode. Zato se povećava trend ugradnje nepakiranih čipova. Posebno je izražen na području ASIC-a (Application Specific Integrated Circuit).

4. TREND NA PODRUČJU PASIVNIH KOMPONENATA

Industriju pasivnih komponenata unatrag nekoliko godina karakteriziraju brze i temeljite promjene. Za ilustraciju situacije detaljnije je obrađen segment kondenzatora i otpornika.

4.1. Kondenzatori

Najizraženiji momenat u industriji kondenzatora predstavlja proliferacija SMD. Gotovo svi tipovi kondenzatora su sada bez vanjskih izvoda (leadless form). Ima mnogo proizvođača SM keramičkih i tantal kondenzatora, jer se čini da se oni najčešće koriste, ali se mogu dobiti i film kondenzatori u SM - izvedbi. Proizvođači elektrolitskih

kondenzatora također nastoje da ostvare SM - verziju i uključe se u novo tržište.^{14/, 15/, 16/}

Najveći stupanj ekspanzije postigli su višeslojni keramički kondenzatori (MLC, MLCC, Multilayer Ceramic Capacitor). Fizičke i električke karakterističke su im već standardizirane; kvalitetni čipovi se mogu dobiti od velikog broja proizvođača. Osnovni materijal za izradu keramičkih kondenzatora je BaTiO₂, ali posljednji radovi na tom području pokazuju da bi mu mogao konkurirati niobium oksid sa dva puta većom dielektričkom konstantom.

Ponuda promjenjivih čip kondenzatora (trimer kondenzatori) je također sve veća. Tehnološke inovacije su vezane uz pakiranje. Poboľjšanjem svojstava i osiguravanjem male visine čipa, ta vrsta proizvoda zauzima sve čvršće pozicije na tržištu.

Mnogi proizvođači izrađuju razne tipove kondenzatora prema specifičnim zahtjevima kupaca (application specific capacitors). Jedna od aplikativno specifičnih domena je mikrovalno područje. Za SM - kondenzatore je karakterističan pravokutni oblik. Najčešće su dimenzije 1206 (3.2 mm x 1.6 mm), slijedi 0805 (2.0 mm x 1.3 mm) i 1210 (3.1 mm x 2.5 mm). Na tržištu se već nalaze i EIA standardi 0630 (1.6 x 0.8 mm) i 0504 (1.2 x 1 mm) iako se te veličine još mnogo ne traže i većina SM - uređaja nije predviđena za takova minijaturna pakiranja. Uz tantal i keramičke čip kondenzatore standardizirani su otpornici s fiksnim i promjenjivim vrijednostima, te otporničke mreže. Za ostale pasivne komponente (induktiviteta na pr) standardizacija je u toku. Sve komponente s pravokutnom geometrijom koriste isti četveroznamenkasti kod.

4.2. Otpornici

Industrija čip otpornika se oporavlja od stagnacije, koju je u jednom periodu izazvala velika ponuda i imperativ niskih cijena lansiran od strane azijskih proizvođača. Kako otpornici predstavljaju glavni segment tržišta pasivnih komponenata, na njih se odnosi najveći napredak u pogledu kvalitete i izvedbe. U domeni hibridnih integriranih sklopova čip otpornici nemaju istu ulogu kao što je imaju u izradi PCB - sklopova, jer je osnovna orijentacija prema otpornicima koji se realiziraju tehnikom debelog (i tankog) filma i postaju integralni dio supstrata HIC. Među čip otpornicima, kao i kod svih ostalih električkih komponenata preferirana je SM - izvedba. Ostala poboljšanja se odnose na tolerance i svojstva vodljivih segmenata za lemljenje čipa (termination), te dimenzije.^{17/}

SM - otpornici mogu imati dvije konfiguracije. Jedna je već spomenuta, pravokutna. Od pravokutnih čip otpornika najčešće se koristi veličina 1206 (0.125 W). Drugu varijantu predstavljaju cilindrični MELF (MELF, Metal Electrode Face) otpornici. Standardizirani su i preferira-

ni na dalekom Istoku, ali potrošnja MELF otpornika se povećava i u drugim regijama.

Na tržištu se mogu naći i otporničke mreže (tanki, debeli film), predviđene za površinsku montažu. Izvedbe su različite. Većina proizvođača slijedi preporuke JEDEC-a (Joint Electronic Devices Engineering Council) za aktivne komponente. Proizvođači promjenjivih otpora uključili su se također u trend producirajući cijeli spektar ultratankih minijaturnih trimera u SM - izvedbi.

Kao i u industriji kondenzatora, neki se proizvodi izrađuju za specijalne namjene. Teže se probijaju na tržištu od standardnih varijanti, ali omogućavaju veću fleksibilnost u projektiranju sklopova. Primjer aplikativno specifičnog produkta predstavljaju otpornici velike snage, otpornici za područje visokih napona, termistori za zaštitu sklopova i sl.

4.3. Ostale komponente

U svim segmentima na području pasivnih komponenata, aktivnosti su usmjerene na realizaciju SMD. Neke su izvedbe uobičajene, ali se kontinuirano pojavljuju i različita nova rješenja. Zato je uz generiranje SMD aktuelan proces standardizacije. Kontinuirano se nastoji poboljšavati svojstva proizvoda.

5. ZAVRŠNE NAPOMENE

Sve promjene koje se dešavaju na području izrade (mikro)elektroničkih sklopova proizlaze iz kontinuiranog nastojanja da se povećaju kompleksnost i brzina rada. Poluvodički sklop, na primjer, u klasičnoj pravokutnoj DIP izvedbi ne može više zadovoljavati zahtjeve. Odnos dužine najmanje i najveće vodljive linije iznosi 1 : 8, što izaziva varijacije u prenosu signala. Prenos signala je ugrožen i zbog ukupne dužine vodljivih veza, jer povećavaju otpor i induktivitet u sistemu. Ti su negativni efekti različiti za različite izvode, što ima daljne negativne posljedice za rad sklopa. Modernim izvedbama IC s reduciranim geometrijama takovi se negativni efekti svode na minimum.

Minimalne dužine vodljivih veza neophodne su za ostvarivanje komunikacije između svih elemenata u sklopu, ne samo na relaciji poluvodički čip - vanjski svijet, iako je zbog sve većeg stupnja integracije funkcija na siliciju, taj momenat apostrofirani. Iz takovih potreba proizlazi imperativ višeslojnih struktura, SM - tehnike, novih izvedbi komponenata i, s pozicija TF - HIC, sve teži zahtjevi na materijale te proces izrade sklopa.

LITERATURA

1. H. Charles, E. Detmer, "High Reliability Thick Film Development Considerations For AIN Substrates," Proc. ISHM 1987, Minneapolis, Minnesota, Sept. 28 - 30, p.19.

2. H.G.Burkhardt, "Reactions and Thick Film Metallisation on AlN Substrates," Proc. ISHM - 89, Hamburg, Germany, May 24 - 26, (4.2).
3. J.C.Hubert, "Power Hybrid Circuits: The Future Prospects of New Material," 7th European Hybrid Microelectronics Conference, Hamburg, Germany, May 24 - 26, 1989, (6.4).
4. J.Muir, J.R.Williams, "Copper Metallization of Conventional & Alternate Ceramics", Hybrid Microtech 88, Jan. 19 - 20, 1988, London
5. "Dickschichtkupfer - Technologie für hybride Schaltungen bis 10 GHz", Design & Elektronik, 1 - 10. 1. 1988, S. 19.
6. A.L.Eustice, S.J.Horowitz, J.J.Stewart, A.R.Travis, H.T. Sawhill, "Electronic Packaging Using Low Temperature Co - fireable Ceramics," Hybrid Circuit Technology, June 1987, p.9. (Part 1), Jule 1987, p.15. (Part 2)
7. W.Pearse, "Low Temperature Co-Fired Multilayer Circuitry: The Technology and the Options," Proc. ISHM - 89, Hamburg, Germany, May 24 - 26, 1989, (5.7).
8. W.Maiwald, "MICROPACK - Third Generation SMDs", Siemens Comp. XXIII (1988), No.3, p.105.
9. G.L.Ginsberg, "Chip - On - Boards Profits from TAB and Flip - Chip Technology", Electronic Packaging and Production, Sept. 1985.
10. G.Stout, "A Brief Overview of Surface Mountable Components," Hybrid Circuit Technology, March 1989, p.13.
11. V.Biancomano, "Surface - Mounted Parts Make a Pass at Both Sides," Electronic Design, Jan. 7, 1988, p.33.
12. B.Geisberg, "IC - Gehäusebaumformen: heute und morgen," Elektronik 23/ 11.11.1988, S.64.
13. E.Freeman, "Cost, Device Speed, Size, and Reliability Determine the Best Package for an ASIC", EDN, April 30, 1987, p.77.
14. M.Grossman, "Ceramics Reign Supreme Within the Kingdom of Capacitors," Electronic Design, May 1987, p.63.
15. J.Sheraf, "Special Report: A Big Cast of SMD Passives Hits Center Stage," Electronics, Feb. 4, 1988.
16. "Product Focus - Passive Components," Electronic Engineering, August 1987, p.46.
17. T.Fleming, "Resistor Chips, Networks and Discrete Resistors," EDN, August 7, 1988.
18. H.Winard, "Surface Mounting Pushes New Designs in Chip Inductors," Electronic Design, March 13, 1989, p.41.
19. G.Prajdić, "Hibridni integrirani sklopovi po narudžbi" E - 5596, INDOK, ETI - Končar, 1990.

*Greta Prajdić, dipl.ing.
41000 Zagreb,
R. Končara 73*

Prispelo: 08.02.91 Sprejeto: 27.02.91