

INFORMACIJE

Strokovno društvo za mikroelektroniko
elektronske sestavne dele in materiale

MIDEM

1•1991

Časopis za mikroelektroniko, elektronske sestavne dele in materiale

Časopis za mikroelektroniku, elektronske sestavne dijelove i materijale

Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials

INFORMACIJE MIDEM, LETNIK 21, ŠT. 1(57), LJUBLJANA, MAREC 1991



SURFACE MOUNTING TECHNOLOGY

INFORMACIJE MIDEM	LETNIK 21, ŠT. 1(57), LJUBLJANA,	MAREC 1991
INFORMACIJE MIDEM	GODINA 21, BR. 1(57), LJUBLJANA,	MART 1991
INFORMACIJE MIDEM	VOLUME 21, NO. 1(57), LJUBLJANA,	MARCH 1991

Izdaja trimesečno (marec, junij, september, december) Strokovno društvo za mikroelektroniko, elektronske sestavne dele in materiale.

Izdaja tromesečno (mart, jun, septembar, decembar) Stručno društvo za mikroelektroniku, elektronske sestavne dijelove i materiale.

Published quarterly (march, june, september, december) by Society for Microelectronics, Electronic Components and Materials - MIDEM.

Glavni in odgovorni urednik
Glavni i odgovorni urednik
Editor in Chief

Iztok Šorli, dipl. ing.
MIKROIKS, Ljubljana

Tehnični urednik
Tehnički urednik
Executive Editor

Janko Colnar

Uredniški odbor
Redakcioni odbor
Editorial Board

mag. Rudi Babič, dipl. ing. Tehniška fakulteta Maribor
Dr. Rudi Ročak, dipl. ing., MIKROIKS, Ljubljana
mag. Milan Slokan, dipl. ing., MIDEM, Ljubljana
Zlatko Bele, dipl. ing., MIKROIKS, Ljubljana
Miroslav Turina, dipl. ing., Rade Končar, Zagreb
Jože Jekovec, dipl. ing., Iskra ZORIN, Ljubljana

Časopisni svet
Izdavački svet
Publishing Council

Prof. dr. Leo Budin, dipl. ing., Elektrotehniški fakultet, Zagreb
Prof. dr. Dimitrije Čajkovski, dipl. ing., PMF, Sarajevo
Prof. dr. Georgij Dimirovski, dipl. ing., Elektrotehniški fakultet, Skopje
Prof. dr. Jože Furlan, dipl. ing. - Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana
Franc Jan, dipl. ing. - Iskra-HIPOT, Šentjernej
Prof. dr. Drago Kolar, dipl. ing. - Institut Jožef Stefan, Ljubljana
Ratko Krčmar, dipl. ing., Rudi Čajavec, Banja Luka
Prof. dr. Ninoslav Stojadinović, dipl. ing. - Elektronski fakultet, Niš
Prof. dr. Dimitrije Tjapkin, dipl. ing. - Elektrotehniški fakultet, Beograd

Naslov uredništva
Adresa redakcije
Headquarters

Uredništvo Informacije MIDEM
Elektrotehniška zveza Slovenije
Titova 50, 61000 Ljubljana
telefon (061) 316-886

Letna naročnina za delovne organizacije znaša 960,00 din, za zasebne naročnike 480,00 din, cena posamezne številke 120,00 din. Člani in sponzorji MIDEM prejema Informacije MIDEM brezplačno.

Godišnja predplata za radne organizacije iznosi 960,00 din, za privatne naročnike 480,00 din, cijena pojedinog broja je 120,00 din. Članovi i sponzori MIDEM primaju Informacije MIDEM besplatno.

Annual Subscription Rate is US\$ 40 for companies and US\$ 20 for individuals, separate issue is US\$ 6. MIDEM members and Society sponsors receive Informacije MIDEM for free.

Znanstveni svet za tehnične vede I je podal pozitivno mnenje o časopisu kot znanstveno strokovni reviji za mikroelektroniko, elektronske sestavne dele in materiale. Izdajo revije sofinancirajo Republiški sekretariat za raziskovalno dejavnost in tehnologijo in sponzorji društva.

Znanstveno-strokovne prispevke objavljene v Informacijah MIDEM zajemamo v domačo bazo podatkov

- ISKRA SAIDC-el, kakor tudi v tujo bazo podatkov

- INSPEC.

Po mnenju Republiškega sekretariata za informiranje št. 23-91 z dne 6. 3. 1991 je publikacija oproščena plačila davka od prometa proizvodov.

Mišljenjem Republičkega sekretariata za informiranje br. 23-91 od 6. 3. 1991 publikacija je oslobojena plačanja poreza na promet.

Oblikovanje besedila in tisk
Oblikovanje stavka i štampa
Printed by

BIRO M, Ljubljana

Naklada
Tiraž
Circulation

1000 izvodov
1000 primjeraka
1000 issues

R.Ročak: In memoriam Ratku Krčmaru	2	R.Ročak: In memoriam Ratko Krčmar
ZNANSTVENO STROKOVNI PRISPEVKI		PROFESSIONAL SCIENTIFIC PAPERS
Branko Livada: Elektrofizične karakteristike indijum antimonida: Upotreba za projektovanje detektora na temperaturi tečnog azota	3	Branko Livada: Indium Antimonide Electrophysical Characteristics: Use for Liquid Nitrogen Temperature IR Detector Design
I. Šorli, R. Ročak, M. Maček, Z. Bele: Pogoji za moderno mikroelektronsko proizvodnjo	11	I. Šorli, R. Ročak, M. Maček, Z. Bele: Conditions for Modern Microelectronic Production
Greta Prajdž: Hibridni integrirani sklopovi u tehnici debelog filma - snimka aktuelnog stanja i trend na području materijala i diskretnih komponenata	22	Greta Prajdž: Thick Film Hybrid Integrated Circuits - Current Developments and Future Trends in Materials and Discrete Components Domain
S. Gruden, M. Leban, B. Zajc: Generiranje sheme iz tekstovnega opisa logičnega vezja s programom SCHEMGEN	27	S. Gruden, M. Leban, B. Zajc: Scheme Generation from Textual Description of the Logical Circuit with the Program SCHEMGEN
R. Cajhen, J. Nastran, M. Seliger, A. Zupanc: Regulacija sinusne izhodne napetosti feroresonančnega transformatorja, I.del	34	R. Cajhen, J. Nastran, M. Seliger, A. Zupanc: Sinus Output Voltage Regulation of Ferroresonant Transformer, part I.
J. Pogorelc, M. Cigrovski, B. Premzel: Mikroračunalniško krmiljenje stroja za brizganje plastičnih mas	42	J. Pogorelc, M. Cigrovski, B. Premzel: Microcomputer Controller for an Injection Molding Machine
PRIKAZI DOGODKOV, DEJAVNOSTI ČLANOV MIDEM IN DRUGIH INSTITUCIJ		REPRESENT OF EVENTS, ACTIVITIES OF MIDEM MEMBERS AND OTHER INSTITUTIONS
France Mlakar: Delo Mednarodne elektrotehnične komisije (IEC) na področju zanesljivosti	46	France Mlakar: Work of International Electrotechnical Committee (IEC) on Reliability
Karakterizacija površin in tankih filmov z modernimi elipsometri firme PLASMOS	47	Characterization of Surfaces and Thin Films by State of the Art PLASMOS Ellipsometers
Iztok Šorli: Seznam recenzentov znanstveno strokovnih člankov objavljenih v Informacijah MIDEM	57	Iztok Šorli: List of Reviewers of Scientific and Professional Papers Published in Informacije MIDEM
KONFERENCE, POSVETOVANJA, SEMINARJI, POROČILA		CONFERENCES, COLLOQUYMS, SEMINARS, REPORTS
M. Hrovat: Konferenca MICROTECH 91, Birmingham, 29. - 30. januar 1991	58	M. Hrovat: Conference MICROTECH 91, Birmingham, January 29 - 30 1991
XIX. Jugoslovansko posvetovanje o mikroelektroniki - program	61	19 th Yugoslav Conference on Microelectronics - program
PREDSTAVLJAMO DO Z NASLOVNICE		REPRESENT OF COMPANY FROM FRONT PAGE
MIPOT S.p.A.	65	MIPOT S.p.A.
ČLANI MIDEM	65	MIDEM MEMBERS
VESTI, OBVESTILA	66	NEWS, INFORMATION
KOLENDAR PRIREDITEV	67	CALENDAR OF EVENTS
JUGOSLOVANSKI TERMINOLOŠKI STANDARDI	69	YUGOSLAV TERMINOLOGICAL STANDARDS
Slika na naslovnici: MIPOT - Tehnologija površinske montaže		Front page: MIPOT - Surface Mounting Technology

IN MEMORIAM RATKU KRČMARU

*Svaki rastanak je tužan i bolan. Čak i rastanak pred kakav put dovodi koju suzu u oko voljene osobe. Posebno težak pak je rastanak sa voljenom osobom koja je otišla zauvijek. Takav je i naš rastanak sa podpredsjednikom našega društva, sa stručnim drugom, sa čovjekom koji je uvijek bio spreman nesebično pomoći bilo kojem čovjeku iz svoje okoline, sa čovjekom kojeg smo svi zbog njegove staloženosti, promišljenosti, stručnosti, drugarstva, poštovali i voljeli, sa **Ratkom Krčmarom**.*

Nakon teške i opake bolesti otpratili smo ga, u velikom broju, na njegov posljednji put, na pravoslavnom Banjalučkom groblju na njegov 51. rođendan.

Rođen u selu Hotkovici kod Glamoča 5.1.1940. morao je kao dijete preživjeti strahote rata i ubrzo stasati uz tvrdi rad, kojeg je za vrijeme čitavog života od svega najviše cijenio. U Beogradu je završio studij tehničke fizike na elektrotehničkom fakultetu. 1968. godine dolazi u Banja Luku i zapošljava se u "Rudi Čajevecu", gdje je proživio i sav svoj radni vijek. Poslije pet godina rada u Fabrici elektronskih prijemnika i uređaja, 1973 godine prelazi u Profesionalnu elektroniku na tada novi program hibridne mikroelektronike. Formiranjem Fabrike mikroelektronike 1978. godine Ratko biva postavljen za njezinog prvog direktora. Na toj dužnosti ostaje šest godina, zatim prelazi u programski razvoj SOURa. Prije nego što ga je napala opaka bolest Ratko je predao svoju doktorsku disertaciju, koju je trebao braniti na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu, sa naslovom "Teorija sukoba modela".

Pored svog stručnog rada Ratko je ogromno doprinjeo stvaranju "radne kulture" u svom poduzeću, iz kojeg se je i pored specifične potrebe zatvorenosti, uvijek pojavljivalo sa svojim stručnjacima, širokih pogleda i obrazovanja, na jugoslavenskim i svjetskim skupovima stručnjaka. Aktivno je surađivao u područjima školovanja i naučnog rada na nivou Banja Luke, Bosne i Hercegovine, Jugoslavije. Pored svojih menedžerskih zaduženja bio je nosilac i suradnik u više naučnih projekata.

Vjerojatno nema člana društva MIDEM, koji Ratka nije poznavao, budući da je Ratko bio u svim proteklim godinama među najaktivnijim članovima. Nije "markirao" nijedne naše aktivnosti, nije mu bilo teško "skočiti" na sjednicu organa društva u Ljubljani i u najtežim vremenskim uvjetima, ni u maksimumu svojih obaveza. A tih je bilo više nego što smo i najbolji njegovi prijatelji znali. Naime Ratko je bio prije svega skroman, nikada se nije razbacivao sa svojom osobnošću. Nikome nije nametao svoju volju, sve je pokušao razumjeti. To je vrijedilo za njegov život u struci, za politička i nacionalna uvjerenja. Ratko je prije svega uvijek bio drug.

Zbog toga danas za njim tuguje puno dobrih i pametnih ljudi od Kranja do Devđelije, kojima tužnoga petoga januara ove godine nije bilo teško doći u velikom broju u Banja Luku, da s poštovanjem iskažu zadnju počast jednom velikom Jugoslavenu u najboljem smislu takve pripadnosti i uvjerenja.

*Za sve članove društva MIDEM
Rudi Ročak*



ELEKTROFIZIČKE KARAKTERISTIKE INDIJUM ANTIMONIDA: Upotreba za projektovanje detektora na temperaturi tečnog azota

Livada G. Branko

KLJUČNE REČI: poluprovodnici, poluprovodnički materijali, indijum antimonid, elektrofizičke karakteristike, parametri, koeficijent apsorpcije, koeficijent refleksije, sopstvena koncentracija, difuziona konstanta, fotodetektor, infracrveni detektor, InSb detektor, hladeni detektor

KRAKATK SADRŽAJ: Analiziraju se elektrofizičke karakteristike i parametri indijum antimonida na temperaturi tečnog azota. Formiran je model parametara koji se mogu koristiti u analizi i projektovanju InSb hladenih detektora. Model uključuje: koeficijent apsorpcije, koeficijent refleksije, sopstvenu koncentraciju, pokretljivost, vreme života manjinskih nosilaca, difuzionu konstantu i difuzionu dužinu. Pri formulisanju modela korišćeni su rezultati teorijskih i eksperimentalnih istraživanja uz primenu odgovarajućih postupaka ekstrapolacije i korekcije. Sumirane su vrednosti parametara n-InSb u opsegu koncentracija $1 \cdot 10^{13}$ do $2 \cdot 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ i p-InSb u opsegu koncentracija $1 \cdot 10^{13}$ do $6 \cdot 10^{16} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$

INDIUM ANTIMONIDE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS: Use for liquid nitrogen temperature infrared detector design.

KEY WORDS: semiconductors, semiconductor materials, indium antimonide, electrophysical characteristics, parameters, absorption coefficient, reflection coefficient, intrinsic concentration, diffusion constant, photodetectors, infrared detectors, InSb detectors, cooled detectors

ABSTRACT: Indium antimonide liquid nitrogen temperature electrophysical characteristics and parameters are analyzed. A model for the parameters which can be used in the analysis and design of the InSb cooled detectors, is set. This model includes: absorption coefficient, reflection coefficient, intrinsic concentration, mobility, minority carriers lifetime, diffusion constant and diffusion length. The results of the theoretical and experimental investigations commonly with the suitable methods for corrections and extrapolation are used in the model formulation. The parameters numerical values for n-type InSb ($n = 1 \cdot 10^{13}$ to $2 \cdot 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$) and p-type InSb ($p = 1 \cdot 10^{13}$ to $6 \cdot 10^{16} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$) are summarized.

1 UVOD

Indijum antimonid (InSb) se široko koristi za izradu infracrvenih detektora osetljivih u spektralnom opsegu 3 - 5 μm pri čemu se proizvode različiti tipovi fotodetektora (fotootporni, fotonaponski, fotoelektromagnetni). InSb detektori imaju široke primene u industriji (merenje temperature, termovizija) i u vojnim uređajima i sistemima (senzori u sistemima vođenih i samonavedenih raketa, senzori u sistemima inteligentne municije, senzori u sistemima za izviđanje, osmatranje i praćenje).

Iako je InSb dobro poznat i izučen materijal¹⁻⁴ u literaturi postoje samo oskudni podaci o elektrofizičkim parametrima koji se mogu koristiti u postupku analize i projektovanja infracrvenih detektora koji rade na temperaturi tečnog azota (77 K). U ovom radu je izvršena analiza dostupnih rezultata teorijskih i eksperimentalnih istraživanja elektrofizičkih osobina InSb sa aspekta primene ovih rezultata za analizu i simuliranje hladenih detektora. Korišćenjem pogodnih postupaka aproksimacije i ekstrapolacije formulisan je model za elektrofizičke parametre InSb koji se odnosi na tehnološki idealno proizveden polazni materijal bez strukturnih i drugih defekata. Razmatraju se sledeće karakteristike InSb na temperaturi tečnog azota: koeficijent apsorpcije, koeficijent refleksije, sopstvena koncentracija, pokretljivost elektrona i šupljina, brzina površinske rekombinacije, vreme života, difuziona konstanta i difuziona dužina.

2 ELEKTROFIZIČKE KARAKTERISTIKE InSb

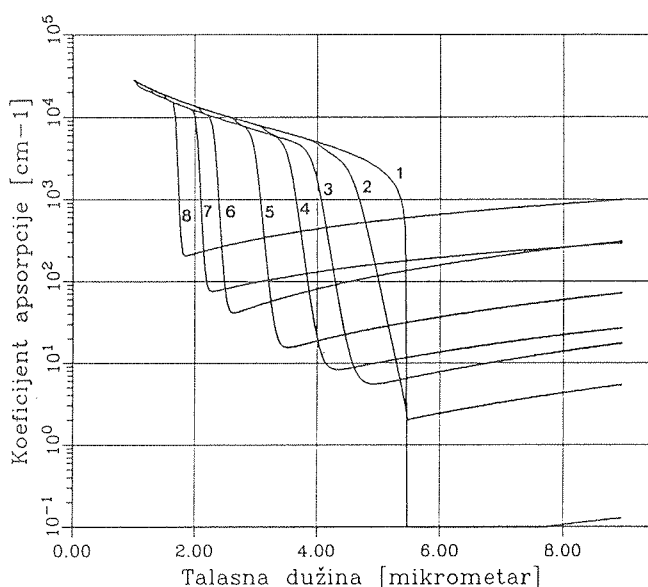
Elektrofizički parametri materijala bitno utiču na kvantnu efikasnost i karakteristike fotodetektora. Kako vrednosti elektrofizičkih parametara zavise od radne temperature, koncentracije i tipa primesa to analiza njihovog uticaja na parametre fotodetektora kombinovana sa zavisnošću koeficijenta apsorpcije od koncentracije i temperature može dati kompletniju sliku o ponašanju fotodetektora dobijenih na materijalima različitog nivoa kvaliteta pri različitim radnim temperaturama.

Zbog tehnoloških ograničenja primene sistema za hlađenje i karakteristika InSb najčešće se koristi radna temperatura $T_r = 77\text{K}$ (temperatura ključanja tečnog azota). Zbog toga su u ovom radu analizirane vrednosti elektrofizičkih parametara InSb na temperaturi tečnog azota i formiran je model elektrofizičkih parametara InSb koji je primenljiv za projektovanje i analizu parametara i funkcionisanja infracrvenih detektora.

Zavisnost elektro fizičkih parametara od koncentracije koja se koristi u modelu dobijena je uz korišćenje eksperimentalnih i teorijskih rezultata i odgovarajućih postupaka aproksimacije i ekstrapolacije. Pri tome su korišćeni rezultati publikovani u otvorenoj literaturi kao i rezultati izračunavanja opisanih u ovom radu.

2.1 Koeficijent apsorpcije

Koeficijent apsorpcije bitno utiče na kvantnu efikasnost i spektralne karakteristike fotodetektora. U literaturi postoji malo podataka za zavisnost koeficijenta apsorpcije InSb od koncentracije. Zavisnost koeficijenta apsorpcije InSb od koncentracije i talasne dužine zračenja je prikazana na slici 1. i dobijena je izračunavanjima u modelu⁹ koji uključuje koeficijent apsorpcije za međuzonske prelaze i koeficijent apsorpcije na slobodnim elektronima. Za izračunavanja koeficijenta apsorpcije za međuzonske prelaze korišćen je model Andersona⁷ i rezultati Kejnovog kp zonalnog modela^{5,6} InSb. Za izračunavanje koeficijenta apsorpcije na slobodnim elektronima korišćen je semiempirijski pristup. Rezultati izračunavanja su verifikovani poređenjem sa postojećim eksperimentalnim rezultatima^{8,9} pri čemu je pokazano odlično slaganje teorije i eksperimenta.



Slika 1: Izračunate vrednosti koeficijenta apsorpcije^{8,9} za InSb na 77 K: (p-tip: 1 - nezavisno od koncentracije; n-tip: 1 - $n = 1 \cdot 10^{16}$; 2 - $n = 1 \cdot 10^{17}$; 3 - $n = 4 \cdot 10^{17}$; 4 - $n = 8 \cdot 10^{17}$; 5 - $n = 2 \cdot 10^{18}$; 6 - $n = 6 \cdot 10^{18}$; 7 - $n = 1 \cdot 10^{19}$; 8 - $n = 2 \cdot 10^{19}$;

2.2 Koeficijent refleksije

Koeficijenti refleksije sa razdvojnih površina strukture (vazduh materijal - R1; i sa razdvojnih površina unutar strukture detektora - R2) zavise od koncentracije slobodnih elektrona i šupljina preko koeficijenta apsorpcije. Koeficijent refleksije na razdvojnoj površini vazduh - poluprovodnik je:

$$R1 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (1)$$

Realni deo (n) i imaginarni deo (k) indeksa prelamanja vezani su sa dielektričnom konstantom preko disperzionih relacija:

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2a)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (2b)$$

odnosno:

$$n = \frac{\sqrt{\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}}{\sqrt{2}} \quad (3a)$$

$$k = \frac{\epsilon_2}{2n} \quad (3b)$$

gde su ϵ_1 i ϵ_2 realni i imaginarni deo kompleksne dielektrične konstante a n i k realni i imaginarni deo indeksa prelamanja. Za analizu uticaja indeksa prelamanja na koeficijent refleksije može se uzeti $n = \sqrt{\epsilon_\infty}$. Imaginarni deo indeksa prelamanja vezan je sa koeficijentom apsorpcije preko relacije:

$$\alpha = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (4)$$

Za talasnu dužinu $\lambda = 5 \mu m$ i koeficijent apsorpcije $\alpha = 1 \cdot 10^4 cm^{-1}$ je $k=0.39$ što je mnogo manje od $n = \sqrt{\epsilon_\infty}$ što znači da se uticaj apsorpcije može zanemariti. Pri visokom nivou dopiranja n sloja u okviru strukture detektora optičke osobine sloja se menjaju, zbog zavisnosti koeficijenta apsorpcije od koncentracije, pa bi se ukupan koeficijent apsorpcije sa strukture trebao računati po formulama za tanak apsorbujući sloj na neprozirnoj podlozi¹⁰⁻¹². Međutim rezultati merenja koeficijenta refleksije^{13,14} za $\lambda < 5 \mu m$ pokazuju minimalne razlike koje potvrđuju opravdanost uvođenja sledeće aproksimacije: koeficijent refleksije R1 se računa korišćenjem izraza:

$$R1 = \frac{(\sqrt{\epsilon_\infty} - 1)^2}{(\sqrt{\epsilon_\infty} + 1)^2} \quad (5)$$

pri čemu je $\epsilon_\infty = 15.68$, a $R2 = 0$.

Ovako izračunate vrednosti koeficijenta refleksije mogu se koristiti pri proračunima karakteristika fotodetektora kod kojih nije nanosen antirefleksioni sloj na upadnoj površini. U slučaju da postoji antirefleksioni sloj umesto R1 uzima se izmerena ili proračunska vrednost koeficijenta refleksije. Uticaj refleksije sa zadnje površine detektora, kod najvećeg broja struktura detektora, je zanemarljiv ili se uzima vrednost karakteristična za konkretnu strukturu.

2.3 Sopstvena koncentracija

Sopstvena koncentracija je važan parametar koji se koristi u modelu i njemu se posvećuje značajna pažnja u literaturi. Međutim, za InSb na temperaturi tečnog azota postoji malo podataka o vrednosti n_i iako se javlja više izraza koji se mogu koristiti za izračunavanja^{1,2,25} ali koji nisu potpuno primenljivi za temperaturu tečnog azota:

$$n_i = (N_c \cdot N_v) \cdot \exp\left(-\frac{E_G(0)}{2 \cdot k_B \cdot T}\right) \quad (6a)$$

$$n_i = 2 \cdot \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \cdot (m_p^* \cdot m_n^*)^{3/4} \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{2k_B T}\right) \quad (6b)$$

odnosno približni numerički izrazi za izračunavanje n_i :

$$n_i = 4.9 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{m_n^* \cdot m_p^*}{m_0^2} \right)^{3/4} \cdot T^{3/2} \cdot \exp \left(- \frac{0.125}{k_B T} \right) [cm^{-3}] \quad (7a)$$

$$n_i = 2.2 \cdot 10^{14} \cdot T^{3/2} \cdot \exp \left(- \frac{0.125}{k_B T} \right) [cm^{-3}] \quad (7b)$$

koji važe u temperaturnom opsegu 180-300 K i

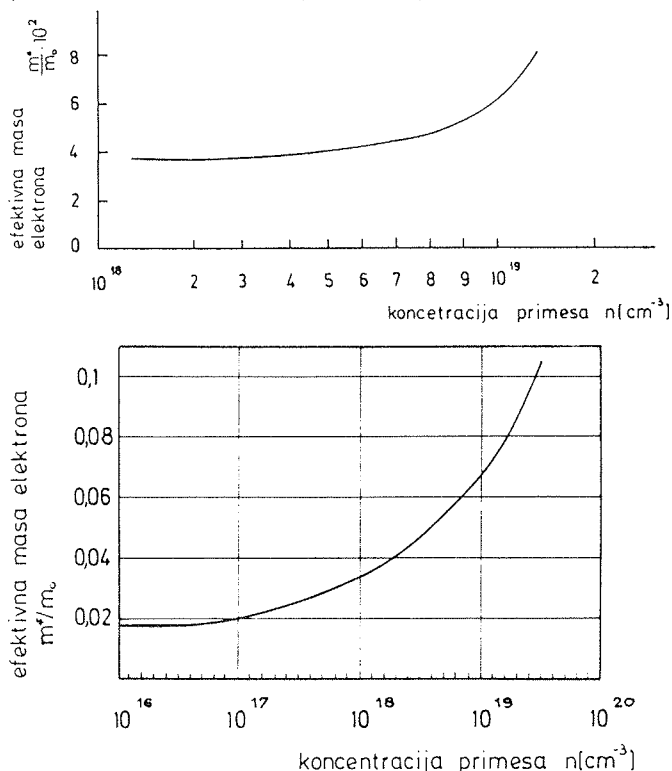
$$n_i = 6 \cdot 10^{14} \cdot T^{3/2} \cdot \exp \left(- \frac{\Delta E(T)}{k_B T} \right) [cm^{-3}] \quad (7c)$$

pri čemu je $\Delta E(T) = 0.27 - 3 \cdot 10^{-4} \cdot T$ (eV) i $k_B T$ izraženo u eV. Primenom numeričkih izraza (7) dobijaju se vrednosti $n_i = 2-4 \cdot 10^9 cm^{-3}$. Primenom izraza (6b) koji važi za poluprovodnike sa parabolničnim zonama pri čemu su uzete vrednosti za efektivne mase koje su dostupne u literaturi dobija se vrednost $n_{i0} = 1.3 \cdot 10^9 cm^{-3}$, što je u ovom radu usvojeno za vrednost sopstvene koncentracije u nedegenerisanom InSb.

Za degenerisani InSb n tipa efektivna masa elektrona zavisi od koncentracije pa i efektivna gustina stanja zavisi od koncentracije. Zavisnost n_i od koncentracije se može izraziti kroz efektivno smanjenje energetskog procepa²⁶ δE_G tako da je:

$$n_B = n_0^2 \cdot \exp \left(\frac{\delta E_G(n)}{k_B T} \right) \quad (8)$$

Zavisnost m^*/m_0 od koncentracije elektrona prikazana na slici 2 pokazuje da je $\delta E_{G \max} \approx 2 \cdot k_B \cdot T$ zbog čega se pri modelovanju fotoodziva najčešće može zanemariti uticaj koncentracije na n_i , jer n_i najviše utiče pri proračunu širine oblasti prostornog naelektrisanja u n



Slika 2: Zavisnost efektivne mase elektrona od koncentracije²³ u InSb n tipa na 77 K

sloju strukture. Pri visokoj koncentraciji u n oblasti osiromašena oblast na n strani minimalno utiče na fotodziv u strukturi koja se analizira.

Zavisnost sopstvene koncentracije od koncentracije slobodnih elektrona korišćena je za korekciju Ožeevog vremena života nosilaca naelektrisanja u materijalu n tipa tako da se u izrazima za Ožeevo rasejanje uzima efektivna vrednost sopstvene koncentracije.

2.4 Pokretljivost elektrona i šupljina

Kretanje nosilaca naelektrisanja kroz poluprovodnike bilo zbog procesa difuzije bilo zbog uticaja ugrađenog ili spoljašnjeg električnog polja ograničeno je procesima interakcije elektrona sa kristalnom rešetkom (akustički i optički fononi); primesama (jonizovanim i neutralnim) ugrađenim u rešetku i defektima rešetke. Pri tome je najznačajniji uticaj procesa rasejanja koji zavise od vrste, koncentracije i energetskih karakteristika centara rasejanja. Procesi rasejanja (rekombinacije) bitno utiču na pokretljivost μ (vreme života τ) nosilaca naelektrisanja koji su osnovni makroskopski parametri koji opisuju transportne procese u poluprovodniku.

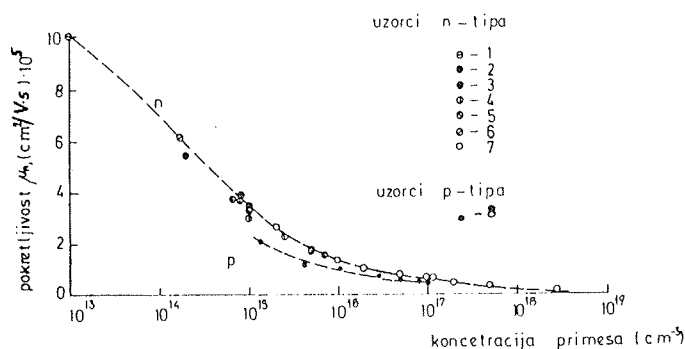
Modelovanje procesa rasejanja i njihovog ukupnog doprinosa pokretljivosti je težak zadatak zbog teškoća identifikacije centara rasejanja (koncentracija, uticaj) i određivanje dominantnih procesa rasejanja i njihovog modelovanja. U ovom radu, je zbog toga, usvojen pristup po kome se koriste eksperimentalni rezultati objavljeni u otvorenoj literaturi^{1,2,15,18} za formulisanje zavisnosti pokretljivosti manjinskih nosilaca od koncentracije primesa.

Tipični dijagrami zavisnosti pokretljivosti od koncentracije za InSb n i p tipa na 77K dati su na sl. 3 i sl. 4.

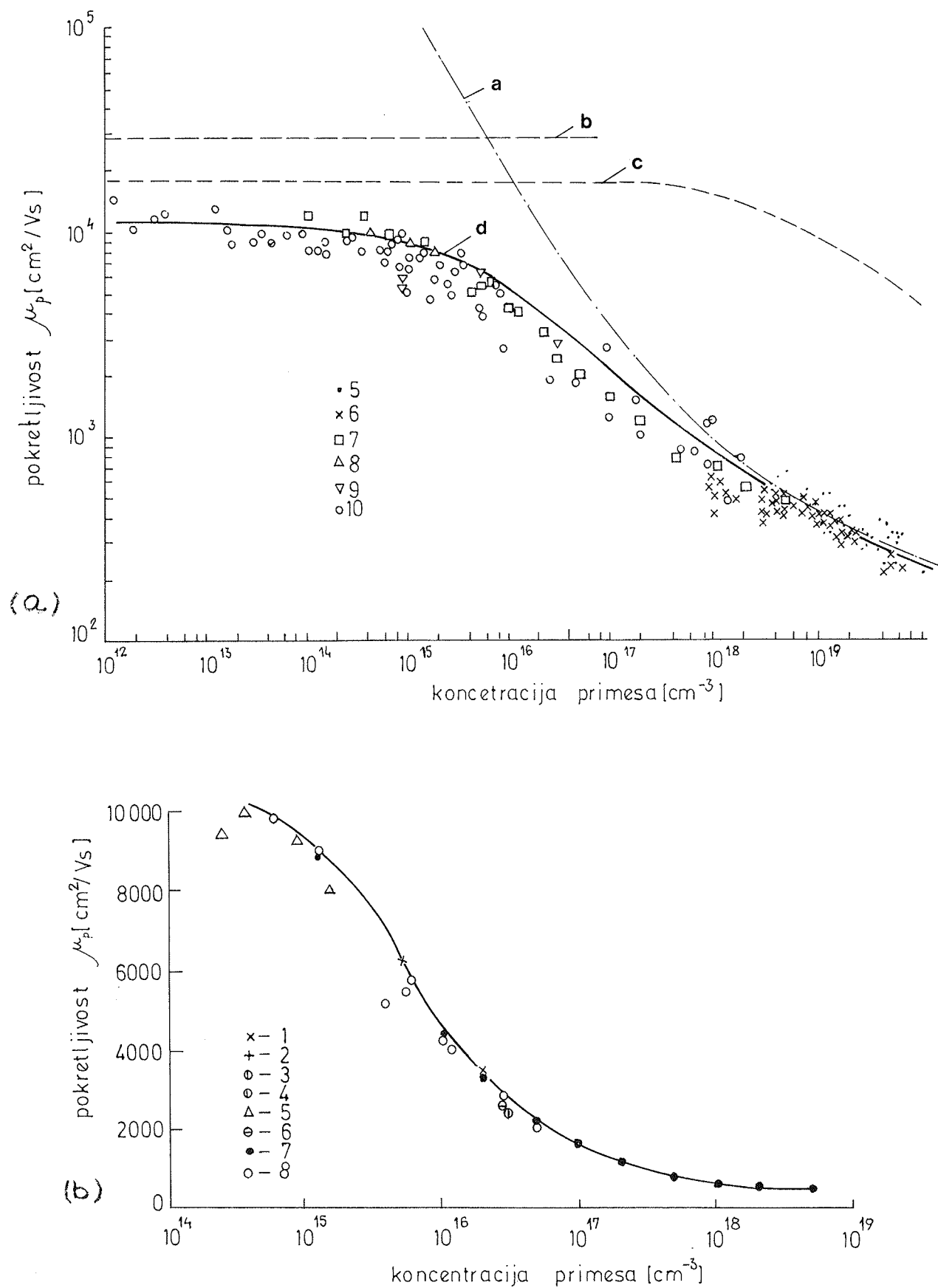
Pokretljivost manjinskih i većinskih nosilaca naelektrisanja na temperaturama $T > 200K$ vezane su relacijom²:

$$b = \frac{\mu_{pn}}{\mu_{nn}} \approx \frac{\mu_{pp}}{\mu_{np}} \approx 6.7 \cdot \sqrt{T} \quad (9)$$

što za temperaturu tečnog azota iznosi 59. Za InSb pri temperaturi 77 K je taj odnos¹ manji od 50.



Slika 3: Zavisnost pokretljivosti elektrona² od koncentracije u InSb p i n tipa



Slika 4: Zavisnost pokretljivosti šupljina od koncentracije u p-InSb na 77 K
 (a) rezultati proračuna i merenja (teorijske vrednosti pri rasejanju na: a - jonima; b - optičkim fononima; c - akustičkim fononima; d - ukupno)
 (b) merene vrednosti^{1,5}

Korišćenjem eksperimentalnih vrednosti dobijena je zavisnost pokretljivosti manjinskih nosilaca od koncentracije prikazana u Tabelama 1 i 2 pri čemu je odnos pokretljivosti elektrona i šupljina oko 60. Ovako formulirana zavisnost pokretljivosti od koncentracije odnosi se na idealan polazni materijal i korisna je za upotrebu pri analizi uticaja koncentracije na parametre fotodetektora. Kako pokretljivost za odgovarajuću koncentraciju zavisi i od vrste primesa i stepena kompenzacije to realne vrednosti mogu biti i do 30% niže u InSb zadovoljavajućeg kvaliteta izrade materijala.

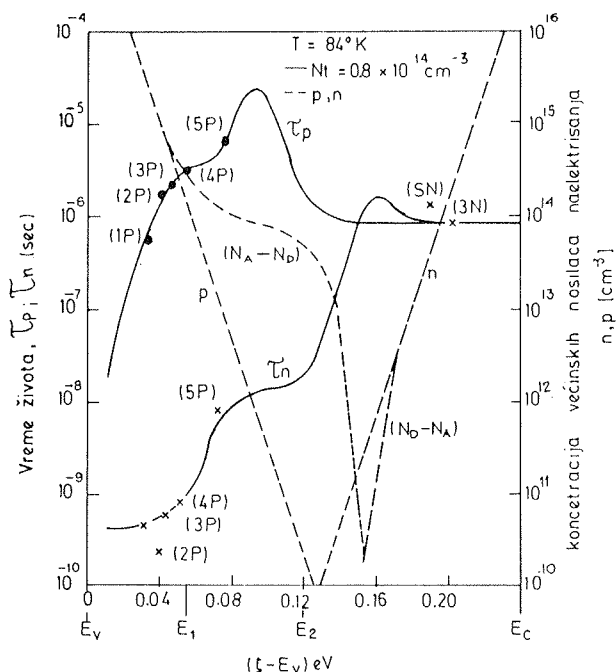
2.5 Vreme života elektrona i šupljina

Zavisnost vremena života elektrona i šupljina od koncentracije i temperature je od izuzetne važnosti za modelovanje odziva (kvantne efikasnosti) fotodetektora a time i za projektovanje fotodiode pošto utiče na fotosignal (preko L_{pn} , L_{np}), vremensku konstantu odziva i šum fotodiode a time i na detektivnost. Vreme života nosilaca zavisi od dominantnog procesa rekombinacije.

Analiza vremenskih konstanti odziva za fotoprovodni efekat ($\tau_{PC} = f(\tau_n, \tau_p, b)$) i fotoelektromagnetni efekat ($\tau_{PEM} \approx \tau_n$) pokazuje da za niže vrednosti koncentracije primesa $n, p < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ dominira uticaj Šokli-Ridovih rekombinacionih procesa^{1,2,15}, i tada se za određivanje vremena života nosilaca naelektrisanja može koristiti dijagram sa sl. 5.

Za visoko dopirani InSb n-tipa dominantan je proces Ože rekombinacije. Na osnovu teorijskih analiza^{16,20-24} je:

$$\tau_{pp} \approx \tau_{pn} \approx \tau_{A1} \approx \frac{2\tau_{A1}^i}{1 + \left(\frac{n}{n_i}\right)^2} \approx \frac{2\tau_{A1}^i}{\left(\frac{n}{n_i}\right)^2} \approx \frac{2\tau_{A1}^{Nc}}{\left(\frac{n}{N_C}\right)^2} \quad (10)$$



Slika 5: Zavisnost vremena života nosilaca naelektrisanja u InSb (77 K) pri rasejanju na Šokli-Ridovim centrima rasejanja

pri čemu je:

$$\tau_{A1}^i = 3.8 \cdot 10^{-18} \cdot \epsilon_{\infty}^2 \cdot \left(\frac{m_0}{m_n^*}\right) \cdot \left(1 + \frac{m_n^*}{m_p^*}\right)^{1/2} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{m_n^*}{m_p^*}\right) \cdot \left(\frac{E_G}{k_B T}\right)^{3/2} \cdot (F_1 F_2)^2 \cdot \exp \left(\frac{\left(1 + 2 \cdot \frac{m_n^*}{m_p^*}\right) \cdot \frac{E_G}{k_B T}}{\left(1 + \frac{m_n^*}{m_p^*}\right)} \right) \quad (11)$$

Zamenom numeričkih vrednosti dobije se:

$$\tau_{A1}^i = 6.5 \cdot 10^6 \text{ s} \quad \tau_{A1} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

$$\text{za } n = N_C = 7.43 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}.$$

Za visoko dopirani InSb p tipa je:

$$\tau_{np} \approx \tau_{A7} \approx \frac{2\tau_{A7}^i}{1 + \left(\frac{p}{n_i}\right)^2} \approx \frac{2\tau_{A7}^i}{\left(\frac{p}{n_i}\right)^2} \quad (12)$$

pri čemu je:

$$\frac{\tau_{A7}^i}{\tau_{A1}^i} = 6 \cdot \frac{\left(1 - \frac{5E_G}{k_B T}\right)}{\left(1 - \frac{3E_G}{2k_B T}\right)} \quad (13)$$

Za InSb na 77 K odnos izražen jednačinom (13) ima vrednost 20. Za jako dopirani InSb p tipa postoje i eksperimentalne vrednosti¹⁷ koje su u ovom radu i korišćene.

Korišćenjem izraza (10) i (11); uz uračunavanje korekcije za zavisnost n_i od koncentracije dobijene su vrednosti za vreme života manjinskih nosilaca naelektrisanja u InSb n tipa koje su sumirane u Tabeli 1.

Korišćenjem eksperimentalnih vrednosti i vrednosti za vreme života sa dijagrama na sl. 5, dobijene su vrednosti za vreme života manjinskih nosilaca u InSb p tipa koje su sumirane u Tabeli 2.

Za InSb p tipa sa koncentracijama višim od vrednosti datih u Tabeli 2 vreme života je ograničeno Ožeovom rekombinacijom i tada se mogu primenjivati izrazi (12) i (13) pri čemu se ne vrši korekcija vrednosti sopstvene koncentracije pošto je efektivna masa šupljina velika i slabo zavisi od koncentracije.

Pri izračunavanjima koristi se relacija:

$$\frac{1}{\tau_{uk}} = \frac{1}{\tau_{S-R}} + \frac{1}{\tau_A} \quad (14)$$

koja daje efektivno vreme života nosilaca naelektrisanja i objedinjuje uticaj dominantnih procesa rasejanja.

2.6 Brzina površinske rekombinacije

Brzina površinske rekombinacije najviše zavisi od načina obrade površine poluprovodnika i karakteristika izvedenih kontakata. Kod mehanički poliranih površina je $S = 10^4 - 10^6 \text{ cm/s}$, a kod elektrohemijski poliranih

Tabela 1: Zavisnost transportnih parametara n InSb od koncentracije na temperaturi 77 K

rb	n	$\frac{n}{N_c}$	$\frac{n_{ie}}{n_0}$	Pokretljivost		K_μ	D_{pn}	Vreme života, s		L_{pn}	S_0 pri t
				$cm^2 / V s$				$\tau_{pn}^{S-R} = 8 \cdot 10^{-7} s$			
				μ_{nn}	μ_{pn}			τ_{A1}	τ_{pn}		
	cm^{-3}						$\frac{cm^2}{s}$			μm	$10 \mu m$
N1	$1 \cdot 10^{13}$	0.00135	1.	$9.5 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^4$	1.	100.	0.21	$8.0 \cdot 10^{-7}$	89.	$1.0 \cdot 10^5$
N2	$2 \cdot 10^{13}$	0.00269	1.	$9 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^4$	1.	93.	0.055	$8.0 \cdot 10^{-7}$	86.	$9.2 \cdot 10^4$
N3	$4 \cdot 10^{13}$	0.00538	1.	$8.5 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^4$	1.	87.	0.014	$8.0 \cdot 10^{-7}$	83.	$8.7 \cdot 10^4$
N4	$6 \cdot 10^{13}$	0.00808	1.	$8.0 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^4$	1.	83.	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	80.	$8.0 \cdot 10^4$
N5	$8 \cdot 10^{13}$	0.0108	1.	$7.5 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^4$	1.	74.	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	76.	$7.4 \cdot 10^4$
N6	$1 \cdot 10^{14}$	0.0134	1.	$7.0 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^4$	1.	67.	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	73.	$6.7 \cdot 10^4$
N7	$2 \cdot 10^{14}$	0.0269	1.	$6.5 \cdot 10^5$	$9.0 \cdot 10^3$	1.	60.	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	69.	$6.0 \cdot 10^4$
N8	$4 \cdot 10^{14}$	0.0538	1.	$6.0 \cdot 10^5$	$8.5 \cdot 10^3$	1.	57.	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	67.	$5.7 \cdot 10^4$
N9	$6 \cdot 10^{14}$	0.0807	1.	$5.5 \cdot 10^5$	$8.0 \cdot 10^3$	1.	54.	$6.0 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	65.	$5.4 \cdot 10^4$
N10	$8 \cdot 10^{14}$	0.0108	1.	$5.0 \cdot 10^5$	$7.5 \cdot 10^3$	1.	50.	$3.4 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	63.	$5.0 \cdot 10^4$
N11	$1 \cdot 10^{15}$	0.134	1.	$4.0 \cdot 10^5$	$7.0 \cdot 10^3$	1.	47.	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$8.0 \cdot 10^{-7}$	61.	$4.7 \cdot 10^4$
N12	$2 \cdot 10^{15}$	0.269	1.	$3.5 \cdot 10^5$	$6.0 \cdot 10^3$	1.	40.	$5.5 \cdot 10^{-6}$	$7.0 \cdot 10^{-7}$	53.	$4.0 \cdot 10^4$
N13	$4 \cdot 10^{15}$	0.538	1.	$3.0 \cdot 10^5$	$5.5 \cdot 10^3$	1.	37.	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$5.0 \cdot 10^{-7}$	43.	$3.7 \cdot 10^4$
N14	$6 \cdot 10^{15}$	0.808	1.	$2.5 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^3$	1.	33.	$6.0 \cdot 10^{-7}$	$3.4 \cdot 10^{-7}$	33.	$3.4 \cdot 10^4$
N15	$8 \cdot 10^{15}$	1.08	1.	$2.0 \cdot 10^5$	$4.5 \cdot 10^3$	1.	30.	$3.4 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	26.	$3.1 \cdot 10^4$
N16	$1 \cdot 10^{16}$	1.35	1.	$1.8 \cdot 10^5$	$4.0 \cdot 10^3$	1.	27.	$2.1 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$	21.	$2.9 \cdot 10^4$
N17	$2 \cdot 10^{16}$	2.69	1.	$1.5 \cdot 10^5$	$3.0 \cdot 10^3$	1.	20.	$5.5 \cdot 10^{-8}$	$5.1 \cdot 10^{-8}$	10.5	$2.6 \cdot 10^4$
N18	$4 \cdot 10^{16}$	5.38	1.	$1.0 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^3$	1.	13.5	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$	4.34	$4.2 \cdot 10^4$
N19	$6 \cdot 10^{16}$	8.08	1.	$9.5 \cdot 10^4$	$1.7 \cdot 10^3$	1.5 !	17.	$6.0 \cdot 10^{-9}$	$6.0 \cdot 10^{-9}$	3.2	$5.3 \cdot 10^4$
N20	$8 \cdot 10^{16}$	10.8	1.	$9.0 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^3$	2.1 !	22.5	$3.3 \cdot 10^{-9}$	$3.3 \cdot 10^{-9}$	2.75	$8.0 \cdot 10^4$
N21	$1 \cdot 10^{17}$	13.5	1.	$8.0 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^3$	6.0 !	28.	$2.1 \cdot 10^{-9}$	$2.1 \cdot 10^{-9}$	2.45	$1.1 \cdot 10^5$
N22	$2 \cdot 10^{17}$	26.9	1.07	$6.5 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^3$	9.0 !	36.	$6.2 \cdot 10^{-10} *$	$6.2 \cdot 10^{-10}$	1.44	$2.4 \cdot 10^5$
N23	$4 \cdot 10^{17}$	53.8	1.14	$4.7 \cdot 10^4$	$8.0 \cdot 10^2$	14. #	42.	$1.8 \cdot 10^{-11} *$	$1.8 \cdot 10^{-11}$	0.85	$4.9 \cdot 10^5$
N24	$6 \cdot 10^{17}$	80.8	1.21	$4.1 \cdot 10^4$	$7.0 \cdot 10^2$	14.0 #	65.	$9.0 \cdot 10^{-11} *$	$9.0 \cdot 10^{-11}$	0.74	$8.7 \cdot 10^5$
N25	$8 \cdot 10^{17}$	108.	1.28	$3.8 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^2$	25. #	100.	$5.6 \cdot 10^{-11} *$	$5.6 \cdot 10^{-11}$	0.72	$1.4 \cdot 10^6$
N26	$1 \cdot 10^{18}$	135.	1.35	$3.5 \cdot 10^4$	$6.0 \cdot 10^2$	31.5 #	125.	$4.0 \cdot 10^{-11} *$	$4.0 \cdot 10^{-11}$	0.7	$1.8 \cdot 10^6$
N27	$2 \cdot 10^{18}$	268.	1.55	$3.2 \cdot 10^4$	$5.5 \cdot 10^2$	96.2 #	355.	$1.3 \cdot 10^{-11} *$	$1.3 \cdot 10^{-11}$	0.67	$5.3 \cdot 10^6$
N28	$4 \cdot 10^{18}$	538.	1.75	$2.6 \cdot 10^4$	$4.5 \cdot 10^2$	191. #	576.	$4.2 \cdot 10^{-12} *$	$4.2 \cdot 10^{-12}$	0.49	$1.2 \cdot 10^7$
N29	$6 \cdot 10^{18}$	808.	1.95	$2.3 \cdot 10^4$	$4.1 \cdot 10^2$	286. #	767.	$2.4 \cdot 10^{-12} *$	$2.4 \cdot 10^{-12}$	0.40	$1.9 \cdot 10^7$
N30	$8 \cdot 10^{18}$	1076.	2.15	$2.2 \cdot 10^4$	$4.0 \cdot 10^2$	381. #	1023.	$1.6 \cdot 10^{-12} *$	$1.6 \cdot 10^{-12}$	0.39	$2.6 \cdot 10^7$
N31	$1 \cdot 10^{19}$	1345.	2.39	$2.0 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^2$	476. #	1190	$1.2 \cdot 10^{-12} *$	$1.2 \cdot 10^{-12}$	0.38	$3.1 \cdot 10^7$
N32	$2 \cdot 10^{19}$	2691.	2.80	$1.8 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^2$	952. #	1920	$4.4 \cdot 10^{-13} *$	$4.4 \cdot 10^{-13}$	0.28	$6.8 \cdot 10^7$
! Zawadski ²⁵ # prema jednačini (18) ²⁴ * korigovano sa $\left(\frac{n_{ie}}{n_0}\right)^2$											

Tabela 2 Zavisnost transportnih parametara p InSb od koncentracije na temperaturi 77 K

rb	p cm ⁻³	Pokretljivost cm ² / V s		D _{np} $\frac{cm^2}{s}$	Vreme života τ _{np} , s	L _{np} μm
		μ _{pp}	μ _{np}			
P1	1.10 ¹³	1.00 10 ⁴	5.0 10 ⁵	3350	4.0 10 ⁻⁹	36.60
P2	2.10 ¹³	1.00 10 ⁴	4.8 10 ⁵	3220	2.0 10 ⁻⁹	25.40
P3	4.10 ¹³	1.00 10 ⁴	4.6 10 ⁵	3080	1.0 10 ⁻⁹	17.50
P4	6.10 ¹³	1.00 10 ⁴	4.4 10 ⁵	2950	8.0 10 ⁻¹⁰	15.40
P5	8.10 ¹³	1.00 10 ⁴	4.2 10 ⁵	2850	6.0 10 ⁻¹⁰	13.00
P6	1.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	4.0 10 ⁵	2680	4.0 10 ⁻¹⁰	10.35
P7	2.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	3.6 10 ⁵	2410	3.8 10 ⁻¹⁰	9.56
P8	4.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	3.3 10 ⁵	2200	3.3 10 ⁻¹⁰	8.12
P9	6.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	3.0 10 ⁵	2000	3.0 10 ⁻¹⁰	7.21
P10	8.10 ¹⁴	1.00 10 ⁴	2.5 10 ⁵	1670	2.6 10 ⁻¹⁰	6.50
P11	1.10 ¹⁵	0.95 10 ⁴	2.0 10 ⁵	1340	2.3 10 ⁻¹⁰	5.50
P12	2.10 ¹⁵	0.90 10 ⁴	1.8 10 ⁵	1200	2.0 10 ⁻¹⁰	4.90
P13	4.10 ¹⁵	0.80 10 ⁴	1.6 10 ⁵	1070	1.6 10 ⁻¹⁰	4.14
P14	6.10 ¹⁵	0.70 10 ⁴	1.4 10 ⁵	940	1.3 10 ⁻¹⁰	3.50
P15	8.10 ¹⁵	0.60 10 ⁴	1.2 10 ⁵	800	1.0 10 ⁻¹⁰	2.80
P16	1.10 ¹⁶	0.50 10 ⁴	1.0 10 ⁵	670	8.0 10 ⁻¹¹	2.30
P17	2.10 ¹⁶	0.40 10 ⁴	0.8 10 ⁵	540	6.5 10 ⁻¹¹	1.80
P18	4.10 ¹⁶	0.30 10 ⁴	0.6 10 ⁵	400	5.0 10 ⁻¹¹	1.40
P19	6.10 ¹⁶	0.20 10 ⁴	0.5 10 ⁵	335	3.0 10 ⁻¹¹	1.02

površina je vrednost brzine površinske rekombinacije znatno niža i iznosi $S = 10^2 - 10^4$ cm/s^{1,2}. U slučaju idealnog omskog kontakta na površini brzina površinske rekombinacije ima beskonačnu vrednost.

Pri izračunavanjima uticaja brzine površinske rekombinacije mogu se koristiti vrednosti brzine površinske rekombinacije u opsegu ($10^2 < S < 10^7$) pri analizi uticaja površinske rekombinacije na parametre fotoodziva. Uticaj površinske rekombinacije na n strani je naročito izražen ako je $S_{pn} > S_0$ pri čemu je:

$$S_0 = \frac{D_{pn}}{L_{pn}} \cdot \text{cth} \left(\frac{t}{L_{pn}} \right)$$

Vrednosti za S_0 pri debljini n oblasti $t = 10 \mu m$ sumirane su u Tabeli 1 za InSb od n tipa.

2.7 Difuziona konstanta i difuziona dužina

Difuziona konstanta za nedegenerisane poluprovodnike zavisi od pokretljivosti i određuje se primenom Anštajnovе relacije koja za Maksvel - Bolcmanovu energetsku raspodelu nosilaca naelektrisanja ima oblik:

$$D_{pn} = \frac{k_B T}{q} \cdot \mu_{pn} = D_{pn}^{M-B} \quad (16a)$$

$$D_{np} = \frac{k_B T}{q} \cdot \mu_{np} = D_{np}^{M-B} \quad (16b)$$

Za degenerisane poluprovodnike n tipa (Fermi-Dirakova energetska raspodela nosilaca naelektrisanja) primenjuje se generalizovana Anštajnova relacija²⁴:

$$D_{pn}^{F-D} = \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \mu_{pn} \cdot K_\mu = D_{pn}^{M-B} \cdot K_\mu \quad (17)$$

gde je K_μ faktor proporcionalnosti koji zavisi od koncentracije (redukovanoг Fermijevog nivoa η) prema približnoj jednačini²⁴:

$$K_\mu = \frac{F_{1/2}(\eta)}{F_{-1/2}(\eta)} \approx 1 + 0.35355 \cdot \left(\frac{n}{N_c} \right) - 4.95 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{n}{N_c} \right)^2 + 1.484 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{n}{N_c} \right)^3 - 4.43 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{n}{N_c} \right)^4 + \dots \quad (18)$$

koja se primenjuje za poluprovodnike sa paraboličnim zonama. Za poluprovodnike sa neparaboličnim zonama koeficijenti u jednačini (18) imaju nešto drugačije vred-

nosti. Za InSb koji nema parabolične zone izračunate su vrednosti²⁵ za $n < 6 \cdot 10^{17}$ koje se ne razlikuju bitno od vrednosti koje se dobiju primenom izraza (18) pri čemu su uzeta u obzir samo prva dva člana.

Izračunate vrednosti za K_{μ} koje su korišćene u ovom radu dobijene su kombinacijom rezultata detaljnog proračuna i primenom izraza (18) i sumirane su u Tabeli 1.

Difuzione dužine manjinskih nosilaca određuju se primenom izraza:

$$L_{pn} = \sqrt{D_{pn} \cdot \tau_{pn}} \quad (19a)$$

$$L_{np} = \sqrt{D_{np} \cdot \tau_{np}} \quad (19b)$$

Vrednosti za difuzionu konstantu i difuzionu dužinu koje su odabrane za modelovanje sumirane su u Tabeli 1 za n tip materijala i Tabeli 2 za p tip materijala.

3. ZAKLJUČAK

Sistem parametara InSb na temperaturi tečnog azota prikazan u ovom radu dobijen je na osnovu poznatih teorijskih i eksperimentalnih rezultata. Međutim, dostupni rezultati ne pokrivaju ceo opseg koncentracija od interesa za projektovanje i analizu InSb detektora pa je primenom odgovarajućih aproksimacija, analogija i korekcija izvršena ekstrapolacija i za vrednosti koncentracija za koje ne postoje objavljeni rezultati. Time je omogućeno da se formira celovit sistem parametara koji je primenljiv za analizu i projektovanje InSb detektora različitih tipova i strukture. Ovako formulisani sistem parametara je korišćen pri analizi InSb fotodioda n⁺-p tipa⁹ pri čemu se rezultati modelovanja vrlo dobro slažu sa eksperimentalnim rezultatima.

Pri korišćenju razmatranog modela elektrofizičkih parametara InSb treba voditi računa da je on formulisani za idealno proizveden monokristalni InSb i da daje vrednosti parametara koje se dobro slažu sa publikovanim rezultatima za najbolje uzorke kristala InSb. Upotrebom ovog modela parametara pri modelovanju InSb detektora mogu se dobiti maksimalne vrednosti parametara detektora koje se u analiziranoj strukturi mogu realizovati, i analizirati uticaj promene koncentracije nosilaca naelektrisanja u pojedinim elementima strukture, što zajedno daje dobru osnovu za optimizaciju parametara odabrane strukture detektora.

4 LITERATURA

- 1) Hilsom C., Rose-Innes A. C.: "Semiconducting III-V compounds", (1961), Pergamon Press, Oxford;
- 2) Madelung O.: "Physics of III-V compounds", (1964), John Wiley & Sons, New York;
- 3) Hogarth C. A.: "Materials used in semiconductor devices", (1964), Interscience Publishers, New York;
- 4) Baranskii P. I., Klochov V. P., Potykievich I. V.: "Poluprovodnikova elektronika. Spravotchnik", (1975), Naukova Dumka, Kiev;
- 5) Kane E. O.: "Band Structure of Indium Antimonide", (1957), Phys. Chem. Solids, vol. 1, 249-261;

- 6) Kane E. O.: "The kp method", (1966), Semiconductors and Semimetals (ed. Willardson R. K., Beer C. A.), vol. 1, Academic Press, New York;
- 7) Anderson W. W.: "Absorption Constant of Pb1-xSnxTe and Hg1-xCdxTe Alloys", (1980), Infrared Physics, vol. 20, 363-372;
- 8) Livada B., Đurić Z.: "Koeficijent apsorpcije za jako dopirani InSb", (1983), Zbornik radova sa XXVII Jugoslovenske konferencije ETAN-a, Struga, 6-10. juna 1983, V331-V337;
- 9) Livada B.: "Uticaj Mos-Burštajnovog efekta na neke parametre InSb n⁺-p fotodioda", (1990), magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu;
- 10) Livada B.: "Teorijski osnovi analize interakcije IC zračenja sa jako dopiranim poluprovodnicima" (neobjavljeno);
- 11) Bilenko D. I. i sar.: "Opredelenie parametrov rezko neodnorodnyh poluprovodnikovoyh struktur po infrakrasnym spektram otzraheniya sveta", (1971), Fizika Tekhnika Poluprovodnikov, vol. 5, No7, 1423-1427;
- 12) Gopal V.: "Analysis of IR Plasma Reflectivity Spectra: Surface Characterization", (1981), Infrared Physics, vol. 21, 159-165;
- 13) Livada B.: "Određivanje nekih parametara jako dopiranih poluprovodnika iz spektralne zavisnosti koeficijenta refleksije", Naučno tehnički pregled, (1984) vol. XXXI, No7, 32-38;
- 14) Livada B., Jović V.: "Ispitivanje epitaksijalnih slojeva InSb korišćenjem metode određivanja plazma minimuma refleksivnosti", (1987), Zbornik radova sa XXXI Jugoslovenske konferencije ETAN-a, Bled, 1-5 juna 1987. god.;
- 15) Kruse P. W.: "Indium Antimonide Photoconductive and Photoelectromagnetic Detectors", (1970), Semiconductors and Semimetals (ed. Willardson R. K., Beer C. A.), vol. 5, Academic Press, New York;
- 16) Striha M. B.: "Ozshe rekombinacija dyrok cherez glubokye donory v InSb n-tipa", (1984), Fizika Tekhnika Poluprovodnikov, vol. 18, No3, 441-444;
- 17) Bartoli F., i sar.: "Auger-Limited Carrier Lifetimes in HgCdTe at High Excess Carrier Concentrations", (1974), Journal of Applied Physics, vol. 45, No5, 2150-2154;
- 18) Volkov A. S., Galavanov V. V.: "Rekombinacionnye processy u p-InSb", (1967), Fizika Tekhnika Poluprovodnikov, vol. 1, No2, 163-171;
- 19) Galavanov V. V.: "O mehanizme rasejanija dyrok v InSb", (1970), Fizika Tekhnika Poluprovodnikov, vol. 4, No5, 853-859;
- 20) Pines M. Y.: "Surface Effects in n-Type InSb Photoconductors", (1979), Infrared Physics, vol. 19, 559-561;
- 21) Rogalski A., Orman Z.: "Band to Band Recombination in InAs1-xSbx", (1985), Infrared Physics, vol. 25, No3, 551-560;
- 22) Pines M. Y.: "Recombination Processes in Intrinsic Semiconductors Using Ionization Capture Cross Section in Indium Antimonide and Mercury Cadmium Telluride", (1980), Infrared Physics, vol. 20, 73-91;
- 23) Pines M. Y.: "Characteristics of n-Type InSb", (1979), Infrared Physics, vol. 19, 563-569;
- 24) Kroemer H.: "The Einstein Relation for Degenerate Carrier Concentration", (1978), IEEE Trans. El. Dev., vol. ED-25, 850;
- 25) Zawadzki W.: "Electron Transport Phenomena in Small-Gap Semiconductors", (1974), Advances in Physics, vol. 23, 435-522;
- 26) Marshak A. H., i sar.: "Rigid Band Analysis of Heavily Doped Semiconductor Devices", (1981), IEEE Trans. El. Dev., vol. ED-28, 293-298;

Livada (Gojko) Branko
dipl. inž. magistar elektrotehnike
Vojnotehnički institut KoV
11000 Beograd Katanićeva 15

Prispelo: 25.01.91

Sprejeto: 06.03.91

POGOJI ZA MODERNO MIKROELEKTRONSKO PROIZVODNJO

I. Šorli, R. Ročak, M. Maček, Z. Bele

KLJUČNE BESEDE: polprevodniki, silicij, polprevodniške tehnologije, MOS tehnologije, CMOS, integrirana vezja, nečistoče, vsebnost nečistoč, selectipur, MOS selectipur, čisti prostori, deionizirana voda, TOC, mikroelektronska proizvodnja, proizvodni pogoji, razvoj tehnologije

IZVLEČEK: Za uspešno moderno proizvodnjo mikroelektronskih komponent je potrebno zagotavljati kakovost okolja, infrastrukture, opreme, tehnoloških procesov in materialov. Neizprosni konkurenčni boj zahteva doseganje svetovnih cen in kakovosti, kar za mikroelektronsko proizvodnjo pomeni borbo za čim višje izple, čim nižje stroške na enoto površine silicija ter striktno realizacijo koncepta celovitega zagotavljanja kakovosti.

CONDITIONS FOR MODERN MICROELECTRONIC PRODUCTION

KEY WORDS: semiconductors, silicon, semiconductor technologies, MOS technologies, CMOS, integrated circuits, impurities, impurity content, Selectipur, MOS Selectipur, clean rooms, deionized water, TOC, microelectronic production, production conditions, technology development

ABSTRACT: A successful modern production of microelectronic components needs controlled environment, good infrastructure, state of the art equipment, materials and process technologies. Strong market competition requires world level prices and quality which for microelectronic producers means fight for as high yields as possible, as low cost per square millimeter of silicon as possible, and strict realization of total quality concept.

1.0 UVOD

Odkar je leta 1961 ameriška firma Fairchild izdelala prvo integrirano vezje, se je v polprevodniški industriji začelo obdobje strahovito hitrega razvoja, kakršnega zgodovina ne pomni. Mnogi danes polprevodniško industrijo že poimenujejo z mikroelektroniko, ki je sprva bil sinonim za proizvodnjo integriranih vezij, torej elektroniko na nivoju silicijevega čipa. Čeprav mikroelektronika daje materialno osnovo vsej moderni elektroniki, saj le-ta izdeluje končne produkte, ki nastopajo na tržišču, je sama vrednost prodaje mikroelektronskih komponent v svetu primerljiva obsegu prodaje izdelkov v posameznih panogah elektronske industrije^{1/}.

Razvoj mikroelektronike karakterizirajo^{2/}:

- stalno povečevanje števila elementov na vezju (število elementov se podvoji na 2 do 2.5 leta)
- zmanjševanje minimalnih geometrij elementov (10-15% na 2 leti)
- povečevanje površine čipa (0.36 mm^2 na 2 leti)
- povečevanje kompleksnosti tehnologije in struktur (2 nova kritična nivoja na 2 leti)
- povečevanje zanesljivosti mikroelektronskih vezij
- povečevanje velikosti silicijeve rezine, na kateri se izdeluje integrirana vezja
- povečevanje kompleksnosti in avtomatizacije montaže čipov v ohišja

V tabeli 1 je prikazana rast stopnje kompleksnosti integriranih vezij, izdelanih v MOS tehnologijah, kakor tudi njihove zanesljivosti.

Takšen razvoj je mikroelektronika lahko doživela le z ogromnim vlaganjem v razvoj ne samo novih tehnologij in struktur, temveč tudi v proizvodno okolje in samo proizvodnjo.

V tem članku želimo pokazati, kaj so gonilna sila in pogoji za danes uspešno mikroelektronsko proizvodnjo.

2.0 VISOKI IZPLENI, GLAVNA GONILNA SILA MODERNE MIKROELEKTRONSKE PROIZVODNJE

Neizprosni konkurenčni boj na področju mikroelektronike zahteva doseganje svetovnih cen. Mikroelektronska proizvodnja je zato pogojena z vse višjimi izpleni dobrih čipov na rezini. To je posebej pomembno ob vse bolj zapleteni tehnologiji (zmanjšane dimenzije elementov, povečanje števila vertikalnih plasti na čipu itn., glej UVOD) z ene strani, z druge strani pa vedno boljšim poznavanjem tehnologije, vse manjšimi razlikami v tehnoloških postopkih in iskanjem "second source" proizvodnje tudi na področju vezij po naročilu med različnimi proizvajalci.

Izplen vezij na rezini je močno odvisen od vrste vezja, oz. njegove funkcije, občutljivosti vezja na posamezne električne parametre, prilagojenosti vezja na dano teh-

TABELA 1.: Rast stopnje kompleksnosti integriranih vezij izdelanih v MOS tehnologijah

PARAMETRI TEHNOLOGIJE	1974	1977	1979	1982	1984	1990
število elementov na vezju (x 1000), od/do	6	20	50	150	400	6000
površina vezja, mm ²	20	90	200	500	1000	10000
minimalna dimenzija, μm	18	25	33	49	52	79
dolžina kanala, μm	5.5	4.0	3.5	2.5	2.0	.7-1
debelina oksida	3.5	2.7	2.5	1.7	1.5	.5-8
debelina oksida	120	80	50	30	20	10
krmilne elektrode, nm	140	100	70	50	30	15
št. kritičnih nivojev	4	5	6	7	8	10
zakasnitev/invertor, ns	3	1.5	1	.75	.5	.15
tipičen premer Si rezin v proizvodnji, mm	50			100		150
MERIL ZANESLJIVOSTI		1972	1974	1977	1979	1982
zgodnje odpovedi, % odpovedi po vtekanju, 48 ur/125st.C		0.5	0.2	0.1	0.05	0.05
pogostnost odpovedi, FIT		1000	500	200	100	70

nologijo, števila aktivnih elementov na površino (dimenzija vezja), predvsem pa od števila in velikosti defektov.

Vsi modeli za izračun izplena čipov na rezini kažejo, da izplen hitro pada z večanjem površine vezja in večanjem gostote defektov.

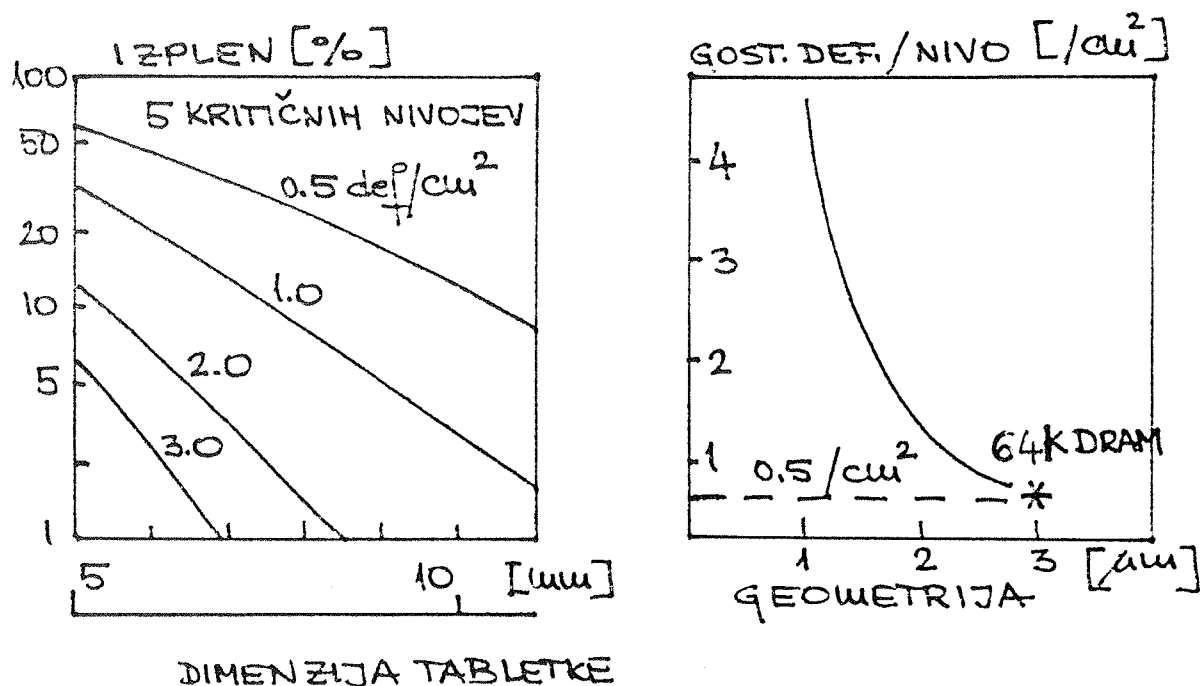
Na sliki 1 je prikazana odvisnost izplena Y, izračunana z Bose-Einsteinovim modelom, ki določa izplen v odvisnosti od števila kritičnih nivojev n, gostote defektov na nivo, D in površine vezja A, kot :

$$Y = 1 / (1 + D \cdot A)^n \quad (1)$$

V praksi dostikrat uporabljamo t.i. eksponencialni model za izračun predvidenega izplena na rezini. Le-ta podaja odvisnost končnega izplena, Y, od sestavljene (končne, efektivne) gostote defektov, D, in velikosti vezja, A. Velja:

$$Y = \exp(-\sqrt{D \cdot A}) \quad (2)$$

Tipična sestavljena gostota defektov v mikroelektronski industriji pri izdelavi CMOS integriranih vezij po naročilu, srednjih serij, z minimalno razežnostjo 5 μm in ob uporabi kontaktnih poravnalnikov, je leta 1982 bila okoli 6/cm², tipična velikost tablete pa 12 - 15 mm². Izplen čipov na rezini se je gibal malo čez 40%.



Slika 1: Vpliv gostote defektov na izplen

Če bi prehod na izdelavo CMOS vezij po naročilu z minimalno razsežnostjo 3 μm bil narejen brez kakršne-koli kvalitetne spremembe v proizvodnji čipov, bi se sestavljena gostota defektov povečala, saj je vezje z manjšimi geometrijami bolj občutljivo na defekte in delce z manjšo dimenzijo, ki pa pri tehnologijah z minimalno razsežnostjo 5 μm niso še vplivali na izplen.

Privzemimo, da za gostoto defektov velja relacija :

$$D = D_0 \cdot (X_0/X_s)^2 \quad (3)$$

kjer je D_0 osnovna gostota defektov pri dani minimalni razsežnosti, X_0 dana minimalna razsežnost na čipu in X_s nova zmanjšana minimalna razsežnost.

Če $D_0 = 6/\text{cm}^2$, $X_0 = 5 \mu\text{m}$ in $X_s = 3 \mu\text{m}$, sledi, da $D_s = 16.6/\text{cm}^2$. V tem primeru bi izplen dobrih čipov površine 12 - 15 mm^2 na rezini padel na približno 20%.

Poleg tega je kompleksnost vezij "3 μm " generacije večja od prejšnje, kar potegne za sabo tudi večjo površino čipa. Tipična velikost je okoli 25 - 50 mm^2 . Zlahka se da izračunati, da bi proizvodnja čipov "3 μm generacije" v tovarni za proizvodnjo čipov "5 μm generacije", leta 1982 bila katastrofalna z izplenom 13% ali manj.

Zato je prvi cilj ob prehodu iz starejše na novejšo generacijo tehnologije zmanjšati osnovno gostoto defektov pri vezjih z manjšo minimalno razsežnostjo in večjo površino z namenom obdržati osnovne izplene (40%). Taka usposobljenost proizvodnje čipov na rezini pa hkrati pomeni izdelavo "5 μm generacije" čipov z izpleni na rezini nad 70 %!

Takšen pristop je neodvisen od eventualno same tehnične omejitve uporabe nekaterih tehnoloških postopkov starejše generacije v modernejši proizvodnji.

V letu 1990 je standarden izplen čipov na rezini pri vodilnem evropskem proizvajalcu mikroelektronike bil 80 - 85 % za kompleksna in 90 - 95 % za enostavnejša vezja. Podatek velja ne glede na minimalne dimenzije elementov na čipu!

Mikroelektronski proizvajalec, ki želi biti tehnično in ekonomsko uspešen, mora nadzorovati in obvladovati čim več možnih virov kontaminacije in defektov. Le-ti so : proizvodno okolje, materiali, oprema in ljudje. Pri tem predpostavljamo, da so vezja in sam tehnološki proces že optimizirani.

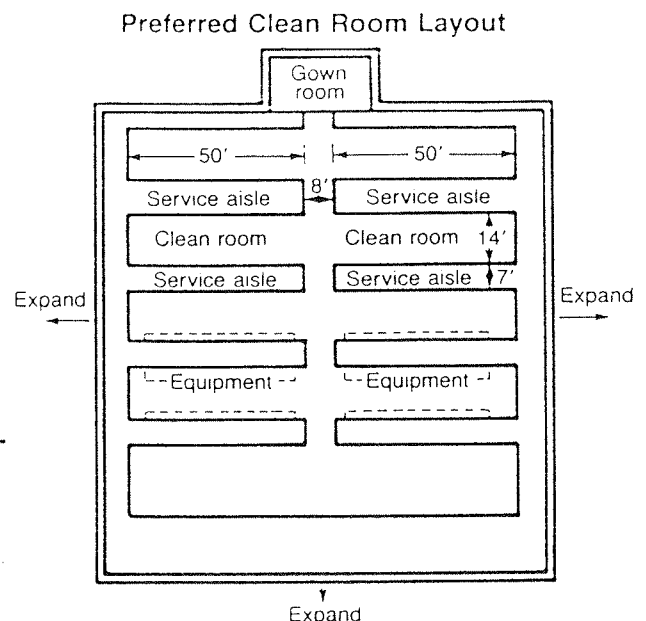
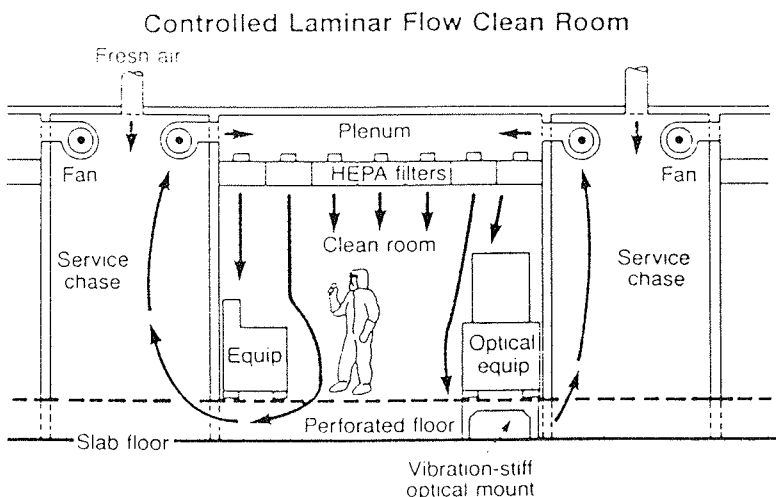
3.0 OBVLADOVANJE IZVOROV DEFEKTOV

3.1 Čisti prostori^{/3/}

Temeljni pogoj za moderno proizvodnjo mikroelektronike so čisti prostori. Prijemi načrtovanja čistega prostora so odvisni od vrste proizvoda, tehnološkega procesa, načina transporta rezin, stopnje splošne avtomatizacije proizvodnje, razporeditve procesne opreme ipd.

Za proizvodnjo ULSI čipov (vezja z ultra visoko stopnjo integracije) so tehnične zahteve za izvedbo čistih prostorov naslednje, slika 2:

- gostota delcev mora biti statistično 1 delec / 28 dm^3 (1 delec / ft^3) ali manj za delce velikosti 0.2 μm ali več,
- strop naj bo 100% pokrit s HEPA filtri z učinkovitostjo 99.99% za delce z velikostjo 0.12 μm ,
- vpihovanje zraka naj bo s hitrostjo 0.46 m/s (90 ft/min) $\pm 10 \%$,



Slika 2: Tipična konfiguracija čistih prostorov

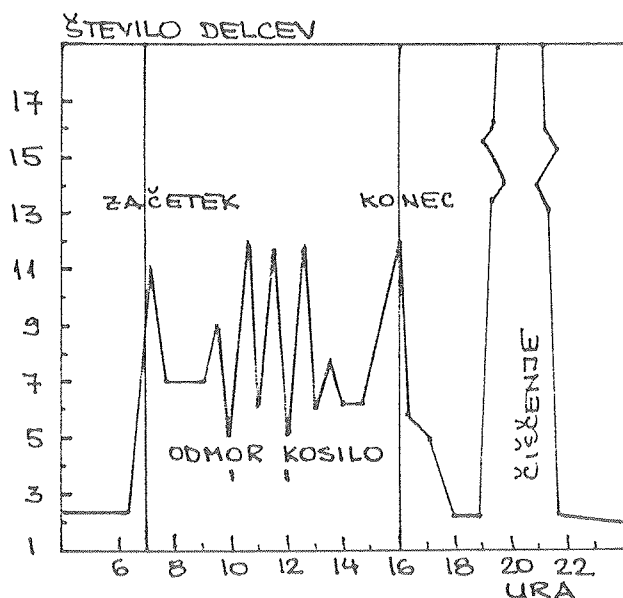
- čas potreben za povrnitev klase 1 po motnji (izvor delcev) mora biti krajši od 10s v prehodih in krajši od 6s na delovnih mestih,
- pod mora biti dvignjen (okoli 0.5 m) in vsaj s 25% površine perforirane, oz. odvod zraka mora biti omogočen od strani; v obeh primerih hitrost izstopnega zraka ne sme preseči 3.6 m/s (700 ft/min),
- temperatura : 20 ± 0.55 st.C,
- relativna vlažnost : 40 ± 5 %

Vsak modul s HEPA filtrom mora imeti možnost neodvisne nastavitve vpihovanja z namenom doseči pravilno aerodinamiko v prostoru. Laminarni pretok zraka nastavimo lokalno ob vsakem kosu opreme, s čimer optimiziramo odstranitev delcev v zraku in omogočimo učinkovito zračno zaveso.

Čisti prostor je razdeljen na servisni del in ultračisti del, ki sta med seboj ločena. V servisnem prostoru potekajo vsa vzdrževalna dela ter priprava in zamenjava materiala za proizvodnjo (kemikalije, plini, pomožni material). V ultračistem prostoru se nahajajo samo tisti deli naprav, ki jih poslužujejo operaterji. Prehod iz enega v drugi prostor je prepovedan.

Včasih zanemarljivo, toda zelo pomembno je ob čistih prostorih zgraditi prostorne pomožne prostore: več prehodnih garderob z naraščajočimi zahtevami po čistosti (vhodna garderoba - klasa 1000, prostor za preoblačenje - klasa 10, vhod v ultračiste prostore skozi zračne tuše ipd.), prostore za umivanje, omarice za osebne stvari, zrcala in podobno.

Izredno pomembno je ustrezno **izobraziti** vse ljudi, ki se gibljejo v čistih prostorih (operaterji, tehniki, inženirji, vzdrževalci, pomožno osebje ..) o namembnosti le-teh, pravilnem obnašanju v čistih prostorih, kakor tudi pravilni uporabi vse pomožne opreme, ki je zahtevana v čistih prostorih.



Slika 3: Stopnja kontaminacije v čistem prostoru med delavnikom

Čisti prostor je potrebno obravnavati kot dinamično kategorijo, saj se med delom pogoji v njem spreminjajo, slika 3.

Največji izvor delcev v čistem prostoru je človek, zato je glavna skrb procedur predpisanih v čistem prostoru namenjena prav zaščiti produkta od človeka.

Čistoča procesov in procesne opreme postaja vse bolj pomemben dejavnik, kajti njihov relativni delež pri ustvarjanju defektov raste glede na čiste prostore, ki se nenehno izboljšujejo. Prekladanja in prenašanja rezin vse manj opravljajo operaterji (razen tam, kjer je to nujno potrebno), ljudi nadomeščajo roboti in posebni transportni mehanizmi.

TABELA 2.: Vpliv ljudi na povečanje števila delcev v čistem prostoru

AKTIVNOST	faktor povečanja nad osnovnim nivojem, delci $0.2 < R < 2 \mu m$
GIBANJE LJUDI	
zbiranje ljudi na enem mestu	1.5 do 3
normalna hoja	1.2 do 2
mirno sedenje	1 do 1.2
roke v del. mestu z laminarnim pretokom	1.01
delovno mesto z laminarnim pretokom	1
OBLAČILA ZA ČISTE PROSTORE	
stopicanje brez obuval za čiste prostore	10 do 50
jemanje robčka iz žepa	3 do 10
drgnjenje rokava oblačila	1.5 do 3
stopicanje z obuvali na nogah	1.5 do 3
OSEBJE	
kihanje	5 do 20
sapa, 20 min po kajenju	2 do 5
drgnjenje kože na obrazu	1
sapa	1

3.2 Deionizirana voda

Ultračista deionizirana voda (DI voda) je eden izmed bistvenih dejavnikov potrebnih za uspešno mikroelektronsko proizvodnjo. Vsa mokra čiščenja in jedkanja rezin ter čiščenja mask se končajo z izpiranjem v vodi, oz. krtačenjem z vodno raztopino. Tipični tehnološki niz izdelave CMOS rezin zahteva nad 20 izpiranj v deionizirani vodi. Nekateri so celo izračunali, da za dokončanje enega čipa rabimo do 600 l deionizirane vode, pri čemer zadnji liter vode mora biti prav tako kakovosten kot prvi.

Kako pomembna je kakovost deionizirane vode pri končnem uporabniku lepo ilustrira primer dveh Hewlett Packard tovarn, v katerih je tekel enak tehnološki proces

za izdelavo SOS integriranih vezij (SOS - Silicon On Sapphire). V tisti, v kateri je kakovost DI vode bila neoporečna, je končni izplen bil 4 do 5 krat višji kot pri sosedih.

V zadnjih letih je mikroelektronska industrija vložila veliko truda in sredstev, da se je dokopala do določenih spoznanj o vplivu DI vode na kakovost tehnoloških procesov in, da je razvila ustrezne metode analize in kontrole njenih lastnosti.

Poleg novih materialov za distribucijska ocevja (namesto PVC sta vse bolj v uporabi PVDF - polyvinylidene in PFA - perfluoroalkoxy), vpeljevali ultrafiltracije kot zadnje stopnje pred uporabo (filtracija z 0.02 do 0.1 μm filtri !!), se zahteva vse ostrejši nadzor in zmanjševanje vsebnosti delcev, bakterij, kremenca in TOC (vsota vseh sestavin, ki vsebujejo ogljik razen CO_2 in karbonatov ter upoštevajoč bakterije in njihove produkte), tabela 3.^{5/}

TABELA 3.: Specifikacije za ultračisto DI vodo

PARAMETER	enota	dosegljivo	sprejemljivo	alarm
ostanek	ppm	0.1	<0.3	>0.3
TOC	ppb	<20	<50	>100
delci, 1 μm	#/100 ml	<50	<100	>250
bakterije	#/100 ml	0	<6	>10
raztopljen SiO_2	ppb	<3	<5	>10
upornost	Mohmcm	18.3	17.9	17.5
KATIONI				
	ppb			
Al		0.2	2.0	5.0
NH_4		<0.3	0.3	0.5
Cr		0.02	0.1	0.5
Cu		0.02	0.1	0.5
Fe		0.02	0.1	0.2
Mn		0.05	0.5	1.0
K		0.1	0.3	1.0
Na		0.05	0.2	1.0
Zn		0.02	0.1	0.5
ANIONI				
	ppb			
Br		<0.1	0.1	0.3
Cl		0.05	0.2	0.8
NO_2		0.05	0.1	0.3
NO_3		<0.1	0.1	0.5
PO_4		<0.2	0.2	0.3
SO_4		0.05	0.3	1.0

Kot primer navajamo vpliv vsebnosti TOC v DI vodi na kakovost posameznih tehnoloških procesov v proizvodnji rezin.

PODROČJE

posledice visoke vsebnosti TOC v DI vodi

OKSIDACIJA	– neenakomerna rast oksidov
DIFUZIJA	– neenakomerno dopiranje – tvorba ogljikovih nukleacijskih centrov v siliciju – hidrofilna površina silicija – veliki premiki CV krivulje po napetostno temperaturni obremenitvi – luknjice v plasteh
NANAŠANJE TANKIH FILMOV	– nizke prebojne trdnosti dielektrikov – veliki tokovi puščanja pn spojev in oksidov – neenakomerno nanašanje filmov – slaba adhezija filmov – megličavost površine
FOTOLITOGRAFIJA	– slaba adhezija fotorezista – defekti na maskah – luknjice v fotorezistu

3.3 Čiste procesne kemikalije

Proizvodnja integriranih vezij na rezini je serija fotolitografskih, visoko in srednje temperaturnih in predvsem kemičnih postopkov in procesov. Zaradi slednjega je v nekaj zadnjih letih kakovosti kemikalij posvečena velika pozornost zlasti na strani dobavitelja. Včasih je veljala miselnost: ko je enkrat nova generacija kemikalij ustrezne čistosti na voljo, je zamenjava stare generacije z izboljšano enostavna. Izkušnje kažejo, da temu ni tako, saj proizvajalec lahko dobavi kemikalije optimalne kakovosti, katero uporabnik zelo hitro z nepravilnim ravnanjem pokvari.

Danes se večina uporabnikov zaveda, da morajo **vsa-kodnevno** nadzirati in vzdrževati kakovost kemikalij **na mestu uporabe**, v proizvodni liniji. Pri tem je potrebno predvsem razločevati kontrolo delcev od kontrole raztopljenih nečistoč v kemikaliji.

Splošni napotki in priporočila za uporabo kemikalij v moderni proizvodnji VLSI in ULSI integriranih vezij na rezini so naslednji :

- izboljššan nadzor nad pakiranjem in shranjevanjem kemikalij pri proizvajalcu in uporabniku (predvsem uporaba inertnih materialov za kontejnerje),
- direktna razdelitev kemikalij na mestu uporabe, če je možno in ekonomsko upravičeno,
- cena naj ne bo ovira za vpeljavo ultračistih kemikalij, ker se s povečanim izplnom porabljeni denar povrne,
- stalna filtracija in recirkulacija na mestu uporabe je nujna ne glede na vrsto in temperaturo kemikalije,

- potrebna sta dogovor in soglasje med proizvajalcem in uporabnikom glede tehnične /kakovostne specifikacije kemikalij in standardov za ustrezne merilne metode, s katerimi se bodo potrjevale dogovorjene številke,
- uporabniki bodo morali razviti metode za definicijo soodvisnosti (korelacijo) med kontaminacijo površine rezine in kakovostjo kemikalije, saj bodo le na ta način lahko za svoje proizvodne potrebe naročali kemikalije ustrezne kakovosti; uporabniki bi morali poznati direkten vpliv kemikalij, uporabljenih za različne procese v liniji na izplen; če je to neizvedljivo, potem je zelo težko opravičiti določene številke na razumen način.
- proizvajalci mokrih jedkalnih postaj morajo pri načrtovanju in gradnji jedkalnih sistemov upoštevati zgoraj našete zahteve; moderna jedkalna postaja naj vsebuje :
 - ☐ avtomatsko/robotizirano prekladanje rezin,
 - ☐ recirkulacijo in filtracijo kemikalij na mestu uporabe, temperatura do 150 st.C, filtri 0.1 μm ali boljši,
 - ☐ meritev vsebnost delcev na mestu uporabe, delci 0.5 μm ali manjši,
 - ☐ uporabljeni material za konstrukcijo naj zagotavlja petletno življensko dobo brez zamenjav,
 - ☐ postaja naj ima možnost recikliranja DI vode,
 - ☐ postaja naj ima centrifugo za čisto izpiranje in sušenje rezin.

Od tako zasnovane jedkalne postaje uporabniki poleg izboljšave izplena in kakovosti čipov pričakujejo še :

- zmanjšano porabo kemikalij,
- zmanjšan strošek kemikalij na vezje,
- zmanjšano obremenitev nevtralizacije, zmanjšano količino odpadnih kemikalij,
- zmanjšano količino kemikalij na mestu uporabe,
- izboljšan nivo varnosti.

Konkreten primer zgodovinskega kakovostnega razvoja kemikalij, ko iz leta v leto ožimo specifikacije za vsebnost suspendiranih delcev, raztopljenih težkih kovin in alkalnih nečistoč, je Merck s svojo serijo MOS Selectipur (za LSI integrirana vezja), VLSI Selectipur (za VLSI vezja) in MEGA Selectipur (za ULSI vezja) kemikalij za polprevodniško industrijo.

Na sliki 4. in iz tabele 4. je razviden faktor izboljšave za posamezne serije kemikalij glede vsebnosti delcev in nečistoč.

Glavno težišče dela proizvajalcev kemikalij v zadnjih letih je bilo:

- na razvoju merilnih postopkov za ugotavljanje vsebnosti delcev in nečistoč v kemikalijah,
- na izboljšavi klase čistosti in zmanjševanju nanosa delcev na površino silicija med potapljanjem rezin,
- na zmanjševanju vsebnosti kritičnih kovin (Cu, Fe, Ni, Cr) in alkalnih elementov (Na, K) v kemikalijah na

ppb nivo in zmanjševanju precipitacije kovin na površino silicija med potapljanjem,

- na iskanju ustreznih materialov za kontejnerje, ki bodo zmanjšali sekundarno kontaminacijo in zagotavljali kvaliteto kemikalij do mesta uporabe,
- na podaljševanju življenjske dobe kemikalij na mestu uporabe, zlasti pa zmanjševanju vsebnosti kovin med postopkom recirkulacije in filtracije.

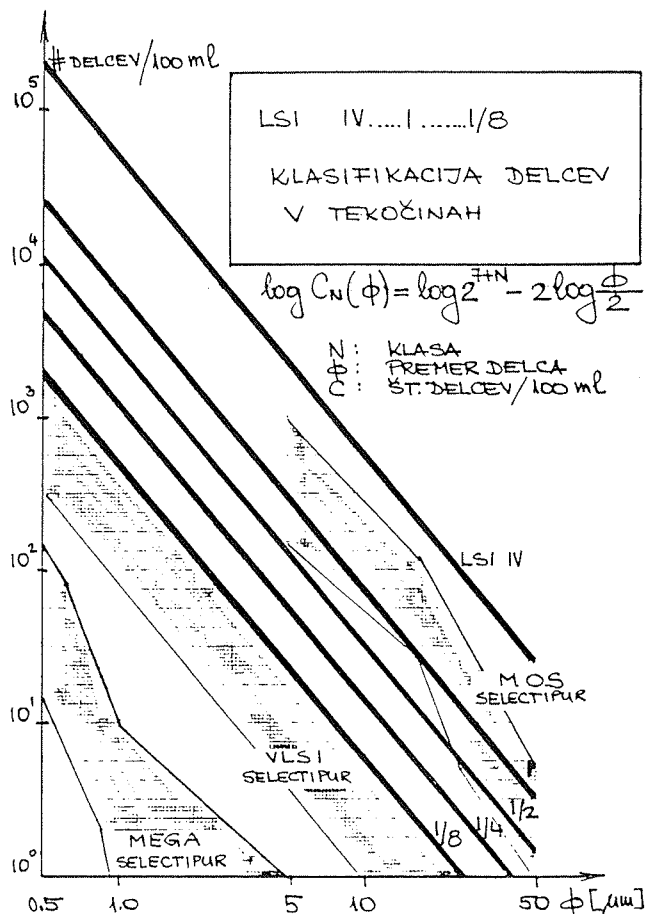
TABELA 4. : Primerjava čistosti med MOS Selectipur, VLSI Selectipur in MEGA Selectipur fluorovodno kislino.

H F 50 %, 1l = 1.15 kg, M E R C K				
PARAMETER	MOS	VLSI	MEGA	RAZ-MERJE
klasa	0	1	1/4	
koncentracija, %	49.5 $\pm$ 1	50 $\pm$ 0.5	50 $\pm$ 0.2	
barva, max	10	10	10	
Cl, max ppm	5	5	0.2	5/5/2
SiF ₆ , max ppm	50	50	50	
NO ₃ , max ppm	5	10	10	1/2/2
PO ₄ , max ppm	0.5	0.5	0.1	5/5/1
SO ₄ , max ppm	1	1	0.5	2/2/1
SO ₃ , max ppm	2	2	0.5	4/4/1
Al, max ppm	0.05	0.02	0.02	5/2/2
As & Sb, max ppm	0.03	0.02	0.01	3/2/1
Ba, max ppm	0.05	0.05	0.01	5/5/1
Be, max ppm	0.02	0.01	0.01	2/1/1
Bi, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Pb, max ppm	0.05	0.02	0.01	5/2/1
B, max ppm	0.05	0.02	0.01	5/2/1
Cd, max ppm	0.05	0.01	0.01	5/1/1
Ca, max ppm	1	0.5	0.1	10/5/1
Cr, max ppm	0.01	0.01	0.01	1/1/1
Co, max ppm	0.02	0.01	0.01	2/1/1
Fe, max ppm	0.5	0.1	0.1	5/1/1
Ga, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/1/1
Ge, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Au, max ppm	0.1	0.02	0.02	5/1/1
In, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/1/1
K, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Cu, max ppm	0.02	0.01	0.01	2/1/1
Li, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/2/1
Mg, max ppm	0.2	0.1	0.05	4/2/1
Mn, max ppm	0.05	0.02	0.02	5/2/2
Mo, max ppm	0.05	0.02	0.02	5/2/2

HF 50 %, 1l = 1.15 kg, MERCK				
PARAMETER	MOS	VLSI	MEGA	RAZ-MERJE
Na, max ppm	0.2	0.1	0.05	4/2/1
Ni, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/2/1
Pt, max ppm	0.2	0.05	0.05	4/1/1
Ag, max ppm	0.02	0.02	0.01	2/2/1
Sr, max ppm	0.1	0.02	0.02	5/1/1
Tl, max ppm	0.05	0.05	0.05	
Ti, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
V, max ppm	0.05	0.01	0.01	5/1/1
Zn, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Sn, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
Zr, max ppm	0.1	0.05	0.05	2/1/1
ostanek po zažigu, ppm	5	5	2	

3.4 Čisti procesni plini in plinske napeljave,^{/6/, /7/}

Podobni trendi kot pri uporabi ultračistih kemikalij v proizvodnji vezij na silicijevi rezini so se uveljavili tudi pri osveščanju uporabnika o pomembnosti uporabe ultra-



Slika 4: Klasifikacija vsebnosti delcev v tekočinah in primerjava kakovosti različnih kemikalij.

čistih procesnih plinov in plinskih napeljav. Zavedati se moramo, da ne glede na čistost plina, ki ga pošlje proizvajalec v cilindru ali shranjevalnem kontejnerju ali pa ga sami pridelamo v hiši, ohraniti njegovo čistost na mestu uporabe, pomeni preprečiti degradacijo kakovosti med izvorom plina in mestom uporabe.

Glavni namen plinske napeljave ni samo pripeljati plin do uporabnika, ampak tudi **zagotoviti** nenehno kakovost po prehodu skozi filtre in čistilce ter zaščititi plin pred vnosom **delcev, kemičnih nečistoč in vlage**.

Delce vnašajo in spuščajo v plinsko napeljavo čistilni sistemi, filtri, ventili in zvari. Kemične nečistoče vnašamo v materiale med izdelavo, ostanejo v ceveh po čiščenju in se odplinajo v ocevju. Iz plinskega sistema najtežje odstranimo vlago, ki poleg delcev povzroča največ preglavic v procesih.

Plinski sistemi sedanosti so izdelani tako, da skoraj povsem onemogočajo puščanje, odplinjevanje in generacijo delcev. To dosegamo z uporabo ustreznih materialov in s posebnimi prijemi pri sestavljanju plinskih sistemov.

Najbolj razširjen material za ULSI plinske napeljave je SS316L (Low - z nizko vsebnostjo ogljika), katerega notranje stene morajo biti elektrolitsko polirane. Le-to v primerjavi z mehanskim in kemičnim poliranjem daje bolj gladke površine, ki težko zajemajo delce in kemične nečistoče. Kljub temu je potrebna izjemna pazljivost pri čiščenju, shranjevanju, prenosu in montaži ocevja, s čimer preprečimo nadaljno kontaminacijo, ki lahko pozneje med uporabo sistema z odplinjevanjem preide v pline in procesne komore.

Elektrolitsko poliranje je potrebno izvesti po zvijanju, kajti zvijanje povzroča mikrorazpoke. Spojke uporabimo tam, kjer je to le nujno potrebno pa še takrat uporabimo posebne spojke za ULSI napeljavo, ki so tako izdelane, da minimizirajo generacijo delcev, odplinjevanje in mrtve kote. Najboljši način sestavljanja cevi je varjenje. Zvar mora z notranje strani biti gladek, brez razpok, luknjic ali drugih nepravilnosti, ki utegnejo zajemati delce in kontaminacijo. Varjenje izvajamo ob vpihovanju inertnega plina (Ar) skozi ocevje, s čimer izoliramo notranjost. Zvar mora biti odporen na korozijo, ker korzijski produkti spuščajo delce (pri nepravilno izvedenem zvaru prihaja do tvorbe kromovega karbida, ki korodira). Opisane zahteve dosežemo z varjenjem direktnih zvarov ("butting welding") in uporabo avtomatskih orbitalnih varilnih naprav.

Plinski kabineti so tudi del plinske napeljave, saj nadzirajo dobavo procesnih plinov, njihov pritisk in pretoke ter zapletene prepisovalne cikle ob menjavi jeklenk. Ker je njihovo delovanje računalniško krmiljeno, zasledujejo še številne alarmne situacije, napovedujejo zamenjave cilindrov ter zagotavljajo zasilne izklope v primeru nevarnosti.

Večina kovinskih nečistoč, ki so prisotne v plinu, prihaja od delcev iz plinskega sistema (kontejner - cilindri - ocevje - spojke - zvari - filtri). Temu ustrezno je potrebno usmeriti napore za njihovo odstranjevanje.

Vsebnost kemičnih, oz. nečistoč v plinski fazi pa je prav tako pomembna, saj v določenih primerih omejuje uporabo plina za specifične namene. Za silan velja, da nivo zahtevane čistosti za bodoče aplikacije presega meje detekcije merilnih instrumentov. Če iz silana želimo nanesti EPI plast s specifično upornostjo v območju 10000 ohmcm, to pomeni, da koncentracija dopantov n tipa ne sme preseči meje 0.02 ppb!! Podobno kot za silan velja tudi za diklorsilan.

TABELA 5. : Pregled nivoja plinskih primesi v različno čistih silanih za uporabo v polprevodniški industriji.

KAKOVOST SILANA	POL- PREV.	NITRID	UHP	RAZ- MERJE
UPORNOST, ohmcm	300	1000	2500	3/10/25
NEČISTOČE, max ppm,				
O ₂	10	10	0.5	20/20/1
N ₂	40	40	1	40/40/1
Ar	500	40	0.5	1000/80/1
H ₂ O	2	2	1	2/2/1
Kloridi	10	10	3	10/10/3
Ogljikovi hidrati				
THC (kot CH ₄)	40	10	1	40/10/1
CO/CO ₂	10	5	1	10/5/1

Čistoča hišnih in inertnih plinov je prav tako v nenehnem porastu. Velika večina proizvajalcev mikroelektronskih komponent bodisi sama proizvaja hišne pline (N₂, O₂, H₂), bodisi uporablja shranjevalne kontejnerje za hišne in inertne pline (N₂, O₂, H₂, Ar). Da dosežemo visok nivo čistosti na mestu uporabe, uporabljamo dodatne sisteme za prečiščevanje in filtracijo tik pred vstopom plinov v procesne komore. Na ta način uspemo doseči nivo čistosti 99.99999%!

TABELA 6.: Pregled vsebnosti primesi v hišnih plinih

NEČISTOČE, ppm max	N ₂	O ₂	H ₂	H ₂ O	THC/CO /CO ₂
KAKOVOST PLINA					
LSI N ₂		5		5	
VLSI N ₂		0.1	0.1	0.1	0.1
UHP N ₂		0.01	0.01	0.01	0.01
LSI O ₂			5	5	
VLSI O ₂	0.5			0.1	0.3
UHP O ₂	0.05		0.01	0.01	0.03
LSI H ₂		5		5	
VLSI H ₂	0.1	0.1		0.5	0.1
UHP H ₂	0.01	0.01		0.05	0.01

3.5 Maske in njihov vpliv na kvaliteto integriranih vezij

V mikroelektronski industriji uporabljamo maske za prenos geometrijske informacije na rezine. Le v primeru direktnega zapisa maske niso potrebne, saj računalniško krmiljen elektronski snop slika geometrijske informacije direktno na fotorezist na rezini.

Od dveh možnih načinov preslikave informacije z maske na rezino, kontaktne in projekcijske, je slednja danes najbolj v rabi. Pri tovrstnem načinu osvetljevanja, maska in rezina nista v kontaktu in maska je zategadelj lahko dodatno zaščitena z opno. Obstojnost take maske je dolga, gostota defektov pa je praktično neodvisna od števila ekspozicij. V tabeli 7. je podan pregled materialov, ki so danes v rabi za izdelavo etalonskih in delovnih mask.

TABELA 7.: Pregled materialov za izdelavo mask

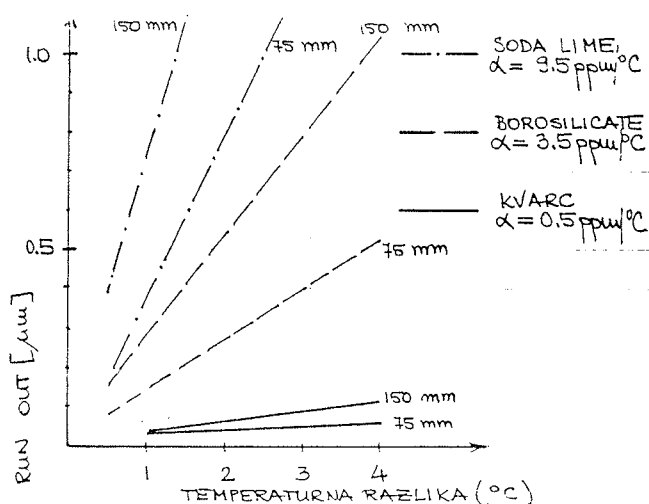
SESTAVA (%)	White soda lime	Soda lime	LE borosi- licate	Syn- thetic quartz
	1	2	3	4
SiO ₂	73	70	60	100
B ₂ O ₃			5	
Al ₂ O ₃	1		15	
Na ₂ O ₃	15	8	1	
K ₂ O	1	9	1	
RO	10	13	18	
Temperaturni koef. raztezka(ppm/st.C)	9.4	9.3	3.7	0.5

Za materiala 1 in 2 velja, da iz njiju izdelane plošče uporabljamo za preslikavo geometrij $\geq 2 \mu\text{m}$, plošče izdelane iz materiala 3 pa za preslikavo geometrij $\geq 1.5 \mu\text{m}$.

Plošče iz sintetičnega kvarca nedvomno prekašajo svoje predhodnice zaradi naslednjih prednosti^{4/}:

a) večja kontrola napake poravnave (RUN OUT) zaradi nizkega temperaturnega koeficienta raztezka. RUN OUT napaka poravnave je merilo za naleganje maske na sliko na rezini, ki je bila preslikana s predhodno masko. Le-ta v končni fazi določa najmanjšo možno geometrijo, ki jo je mogoče preslikati s **celim setom mask** (10 do 15 nivojev). Glavni vzrok tozadevne napake poravnave je razlika v temperaturi med masko in rezino tik pred osvetlitvijo, kar povzroči različne diletacije in porušitev nastavitve nivojev, slika 5.

b) plošče so za razliko od ostalih prepustne v celotnem področju valovnih dolžin zanimivih za moderne fotolitografske postopke, od 200 nm naprej, slika 6.



Slika 5: Napaka poravnave v odvisnosti od dimenzije rezine, vrste stekla in temperaturne razlike med rezino in masko.

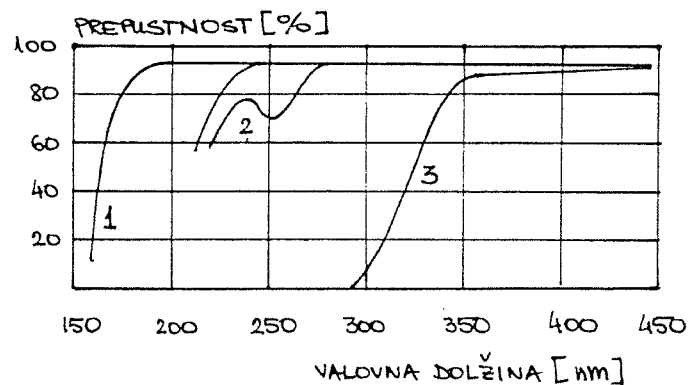
c) material vsebuje manjše število mehurčkov in vključkov, obdelava materiala je lažja, saj omogoča izdelavo skoraj idealne polirane površine brez defektov, ki bi se lahko preslikali na rezino.

d) material je kemično bolj stabilen, kar povečuje adhezijo kromove plasti in kar posredno omogoča večje število čistilnih ciklov preden pride do tvorbe luknjic in degradacije robov kromovih linij.

Ne le kakovost plošč, tudi kakovost kromove plasti (reflektivnost, gostota defektov, adhezija, uniformnost debeline) ter nanjo nanešenega fotorezista (uniformnost debeline, gostota defektov) vplivajo na končno kakovost maske za uporabnika. Danes lahko celo govorimo o izdelavi mask po naročilu, saj so proizvajalci plošč za fotomaske pripravljene optimizirati svoj proces za izdelavo fotoplošč po želji kupca (reflektivnost, tip fotorezista, kemija fotorezista itn...).

TABELA 8.: Vzporedni razvoj rezin in vezij

LETO	STOPNJA INTEGR.	GEOMETRIJA NAČIN OSVETLJEV.	PREMER REZINE	DEBELINA REZINE	RAVNOST REZINE
/		μm	mm	μm	μm
1968	SSI	8 - 10 KONTAKTNA	50	250	15 - 20
1972	MSI	5 - 7 KONT./PROJ.	75	325	10 - 15
1977	LSI	3 - 5 KONT./PROJ.	75 100	325 525	6 - 10
1980	VLSI	2 - 3 KONT./PROJ.	100 125	525 625	4 - 6
1985	VLSI	1.5 - 2 KORAČNO	150	625 675	1.5 - 2 na 20 mm
1989	ULSI	1 - 1.5 KORAČNO	200	725 775	1 - 1.5 na 20 mm



- 1: SINTETIČNI KVARC
2: NARAVNI KVARC
3: KONVENCIONALNA STEKLA

Slika 6: Prepustnost različnih vrst stekla

3.6 Silicijeve rezine

Silicij je bil in bo v bodočnosti polprevodnik, katerega bo uporabljala ogromna večina proizvajalcev kot substrat za izdelavo čipov. V tabeli 8. je podan časovni pregled razvoja silicijevih rezin vzporedno z razvojem mikroelektronskih vezij. Jasno je viden trend k vse večjim rezinam in zaostrovanju določenih tehničnih specifikacij. Med te sodijo :

a) izboljšanje ravnosti rezin, saj uporaba koračnih poravnalnikov zahteva lokalno ravnost 1 - 1.5 μm na območju 10- 20 mm; le-ta mora biti vzdrževana na vsej uporabni površini rezine, pri čemer se zavedamo, da nanjo vplivajo vsi visokotemperaturni koraki med izdelavo čipov na rezini.

b) izboljšanje uniformnosti debeline rezine, oz. planparalelnosti, s čimer se izognemo dolгим časom nastavitve fokusa pri koračnih poravnalnikih.

c) razvoj novih metod za vhodno kontrolo rezin, o katerih se morata dogovoriti proizvajalec in uporabnik; gre za "uporabniške" metode, ki zajemajo meritve življenjskih časov, napetosti ravnih pasov in prebojne trdnosti MOS struktur; s pomočjo dobljenih rezultatov uporabnik lahko napove obnašanje rezin v svoji liniji, končne električne parametre vezij in celo pričakovani izplen čipov na rezini.

Za 200 mm rezine, ki bodo sicer zelo počasi prevzemale večinski delež uporabljanih rezin zlasti za velikoserijsko proizvodnjo standardnih in spominskih elementov v devetdesetih letih, je zelo pomembno pravilno nastaviti razmerje premer proti debelini, ki bo zagotavljalo dimenzijsko stabilnost rezin, kakor tudi vzdržljivost rezin za procesiranje na povišanih temperaturah in po nanašanju tankih plasti (temperaturni šoki, mehanske napetosti, zvijanje).

Za prehod na ULSI geometrije je življenjskega pomena čistost čelne in hrbtne strani rezine. Delci na hrbtu pokvarijo ravnost rezine, če je rezina pritegnjena na vakuumsko mizico.

Znano je, da uporabniki nikakor ne morejo očistiti čelne strani rezine tako učinkovito, kot to znajo proizvajalci rezin. Tako je vse bolj v modi, da proizvajalci dobavijo že oksidirane rezine, na katerih oksid služi kot pasivacija (površina rezine je hidrofilna, neprodušna za kontaminacijo in elektrostatično ne privlači delcev).

Pri rasti kristala in izdelavi rezin je velika pozornost posvečena kontroli defektov, neželenih dopantov in kontaminacije :

- koncentracijo kovinskih nečistoč na površini rezine kontroliramo na nivoju ppb, v notranjosti rezine pa na manj kot 0.01 ppb,
- gostota kristalnih defektov v aktivnem delu silicijeve rezine ne sme preseči 5 def/cm^2 ,
- minimizirane morajo biti mikrovariacije upornosti, ki vplivajo npr. na uniformnost pragovnih napetosti MOS tranzistorjev,
- prečna in navpična začetna koncentracija kisika morata biti kontrolirani v čim bolj ozkih mejah,
- pomembno je izvajati kontrolo koncentracije ogljika in s tem posredno tvorbo mikrodefektov v zvezi s kisikom.

Moderna specifikacija surove silicijeve rezine je podana po področjih, slika 7. :

a) zgornja epitaksijalna plast, potrebna zlasti za moderna CMOS vezja, mora biti čim bolj uniformna glede koncentracije dopantov in debeline, brez mehanskih napetosti in s čim manj kristalnih defektov

b) osiromašeno (denudirano) področje pod površino, kjer je koncentracija intersticijskega kisika nekajkrat manjša kot v substratu; na ta način proizvajalci v svoje rezine vgradijo sposobnost getranja s pomočjo precipitacije kisika SAMO V SUBSTRATU in ne na površini, kjer se nahajajo aktivni elementi

c) substrat, ki mora biti učinkoviti geter za vse kovinske nečistoče, ki povzročajo degradacijo aktivnih elementov

d) hrbtna stran rezine, kamor proizvajalec vgradi določene vrste zunanjega getranja z enakim namenom kot pri c); danes sta v rabi "soft damage", mehko mehansko poškodovana hrbtna stran in nanos polisilicija na hrbtno stran; slednja metoda je čistejša in deluje kot geter od prvega do zadnjega visokotemperaturnega koraka pri izdelavi čipov na rezini.

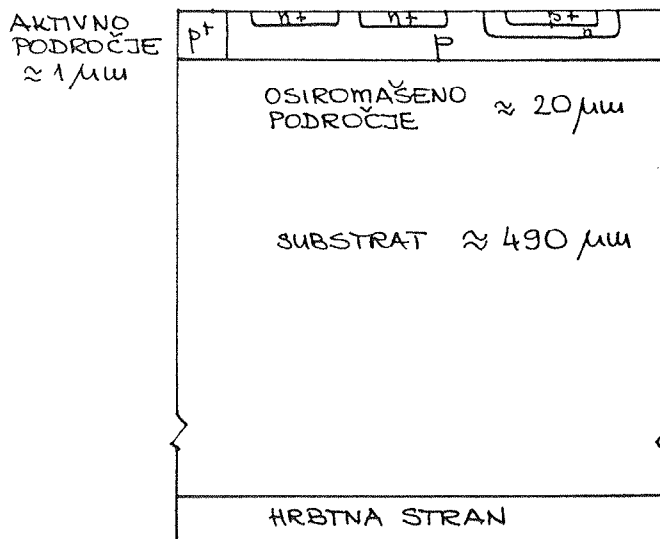
3.7 Oprema in vzdrževanje

Vzporedno z mikroelektronsko proizvodnjo se je razvijala tudi proizvodnja opreme za izdelavo čipov. Velika denarna vlaganja v razvoj in stalna posodobitev mikroelektronske opreme je bilo in je še vedno gonilo te specifične elektronsko-strojne industrije^{1/}.

Oprema se je razvijala predvsem v smeri zmanjševanja generacije defektov in avtomatizacije povezane v koncept CAM (Computer Aided Manufacturing). Za sodobno opremo ni dovolj, da zmore tehnično izvedbo določenega tehnološkega koraka, temveč mora pri tem generirati čim manj defektov na silicijevi rezini in biti sposobna povezave v tovarniški informacijski sistem.

Kompleksnost takih naprav kažejo cene posameznih strojev. Številka 1.000.000,00 US\$ ni več neobičajna. Ob takih stroških opremljanja proizvodnje, je povsem jasno, da morata biti izkoriščenost in pripravljenost za obratovanje, "up time", take opreme čim bližje stotim odstotkom.

S tako opremo več "ne delamo", ampak nadzorujemo njeno delovanje in skrbimo, da je čim bolj izkoriščena. Skupine za vzdrževanje opreme v modernem proizvodnem modulu (brez inženirske tehnološke podpore) predstavljajo tudi do 30 % tehničnega kadra. Ni daleč od resnice šala, da si je potrebno ob nabavi najmodernejšega japonskega stroja "kupiti" tudi še enega "Japončka", ki bo za stroj skrbel.



Slika 7: Razdelitev silicijeve rezine na področja

3.8 Ljudje

Iz predhodnih točk lahko naslutimo, da v mikroelektronski proizvodnji dela pretežno kvalificirani operaterski kader. V tovrstni proizvodnji vsekakor ni mogoče zaposliti delavcev, ki jih "poberemo s ceste". Avtorji tega prispevka so v preteklih desetih letih dela v jugoslovanski mikroelektronski proizvodnji zaposlovali kot operaterje predvsem kemijske laborante in tehnike, da bi nadoknadili handicap zaradi zastarele opreme. Prav tako je zakon o združenem delu takrat omogočal skoraj enako "ceno" kvalificiranega laboranta in priučenega delavca. Danes pa je v moderni mikroelektronski tovarni prav zaradi kompleksnosti opreme in tehnoloških postopkov vodstvo prisiljeno izvajati enako zaposlovalno politiko.

Poleg osnovne strokovne kvalifikacije je potrebno redno izvajati specifični trening operaterjev. To pomeni, da izmenovodja ni samo kontrolor izvajanja opravil, ampak tudi pomočnik in učitelj.

Povsod je v veljavi koncept celovitega zagotavljanja kakovosti. Kakovost je parameter, ki se poleg rokov dobave (JUST IN TIME) postavlja kot temeljni cilj proizvodnje mikroelektronskih vezij.

4.0 VARNOSTNA PROBLEMATIKA

Znano je, da mikroelektronska proizvodnja uporablja veliko količino raznovrstnih kemikalij in plinov, ki predstavljajo potencialno nevarnost za ljudi, ki delajo v mikroelektroniki in za okolje. Imamo opravka z jedrkimi tekočinami, topili, strupenimi plini, samovžigimi plini ter deli opreme, kjer temperatura doseže tudi do 1200 st.C.

Zaradi navedenega nekateri štejejo mikroelektroniko za ekološko bombo in grožnjo okolju in ljudem.

Dejstvo je, da ob gradnji mikroelektronike **moramo varnost vgraditi**, stalna skrb za varno in ekološko čisto delo pa je potrebna med obratovanjem.

Med sistemske varnostne rešitve štejemo ustrezno načrtovanje in izvedbo:

- centralnega skladišča za pline in kemikalije,
- priročnega skladišča za pline in kemikalije,
- kemično odpornega odsesovanja in nevtralizacije za odplake,
- požarne varnosti z ustreznimi javljalniki in gasilnimi napravami,
- centralnega sistema za detekcijo in nadzor strupenih plinov in ostalih parametrov okolja,
- tehnološke instalacije za dovod plinov in kemikalij do opreme ter instalacijo proizvodne opreme same

Med tekoče varnostne obratovalne ukrepe pa štejemo predvsem :

- zasledovanje varnostnih parametrov in ustrezno ukrepanje ob nevarnih situacijah,
- skrb za obratovanje vseh naprav v skladu z varnostnimi predpisi,

- nenehno izobraževanje ljudi, skrb za uporabo zaščitne varnostne opreme, skrb za varno delo v proizvodnji

Ob predpostavki, da je vsem naštetim pogojem zadoščeno, lahko govorimo o mikroelektroniki kot **čisti** industriji.

5.0 ZAKLJUČEK

Vse večja kompleksnost mikroelektronske proizvodnje in potrebno zagotavljanje kakovosti okolja, infrastrukture, opreme, tehnoloških procesov in materialov, kar smo poskusili opisati v tem članku, pogojujejo moderno proizvodnjo in razvoj. Razumljiv je trend k vse večji količinski proizvodnji z ene strani in vse večji "industrializaciji razvoja". Razvoj se je v svetu povsem preselil v tovarne, v "mikroelektronske laboratorije", oz. "razvojni laboratoriji" so majhne tovarne. Za primer naj navedemo, da SGS Thomsonov "razvojni laboratorij" v Milanu izdelava letno 36.000 rezin premera 100 mm, najnovejši "proizvodni laboratorij" pa 110.000 rezin premera 150 mm.

V Jugoslaviji smo opisani koncept in pogoje želeli realizirati v Iskri Mikroelektroniki. Projekt je predvideval investicijo cca 40 mio US\$ v prostore in opremo, s tehnologijo, ki je bazirala na lastnih izkušnjah. V predhodnih desetih letih nabrano znanje bi omogočilo povezavo z obstoječimi evropskimi proizvajalci mikroelektronike in elektronike, firma pa bi prerasla v na zahodni trg orientirano mešano delniško družbo..., vendar to je že druga zgodba.

6.0 LITERATURA

- /1/ R. Ročak : Stanje mikroelektronske proizvodnje v svetu in Jugoslaviji, MIKROELEKTRONIKA IN DRUŽBA, MIDEM 1989
- /2/ W.L.Morgan : From VLSI to ULSI, SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, May 1984
- /3/ W.L.Morgan, J.R.Burnett : Concept for World Class VLSI Manufacturing Plants, SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, June 1984
- /4/ P.Burgraff : Photomasks and Reticle Blanks, SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, December 1987
- /5/ R.Iscoff : The Challenge for Ultrapure Water, SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL, February 1986
- /6/ J.M.Davidson, F.K.Kies : Sub-Micron Particle Analysis in VLSI Gase, Presented to Osaka Sanso Semiconductor Conference, June 28, 1985
- /7/ AIR PRODUCTS : Specialty Gases Catalogue

Iztok Šorli, dipl.ing.
Dr.Rudi Ročak, dipl.ing.
mag.Marijan Maček, dipl.ing.
Zlatko Bele, dipl.ing.
MIKROIKS d.o.o.
Titova 35
61000 Ljubljana

Prispelo: 20.11.90

Sprejeto: 28.02.91

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 računal. 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 W/m²C). 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 - supstrata mogla biti veća od 300 W/m²C. 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.^{/1/, /2/}

Na tržištu su se pred petnaestak godina bili pojavili supstrati na bazi email-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 email-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) email, (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 zahtijevaju 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.^{/4/, /5/}

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/□). 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.^{/6/, /7/}

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. Nastoje 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) dolaze 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 naprezanja 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).^{/8/, /9/}

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 zahtijevaju manju lemnu površinu od G - izvoda ali je kontrola lemnih spojeva kod takove konfiguracije teška. Fleksibilnost J - izvoda dozvoljava primjenu na različitim podlogama. LLCC zahtijeva 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 zahtijeva sve veće površine za asembliranje poluvodičkih komponenata. Iako minijature, SMD izvedbe IC poput LCC ili LLCC zahtijevaju 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. Poboľšanjem 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 minijturna 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 komponentata, 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 komponentata 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 minijturnih 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 komponentata, 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 apostrofiran. Iz takovih potreba proizlazi imperativ višeslojnih struktura, SM - tehnike, novih izvedbi komponentata 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.Sheref, "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

GENERIRANJE SCHEME IZ TEKSTOVNEGA OPISA LOGIČNEGA VEZJA S PROGRAMOM SCHEMGEN

S. Gruden, M. Leban, B. Zajc

KLJUČNE BESEDE: računalniško načrtovanje vezij, integrirana vezja, logična vezja, generiranje shem, SCHEMGEN, računalniški program

POVZETEK: Opisali bomo program, ki na osnovi tekstovnega opisa logičnega vezja generira shemo, ki si jo lahko ogledamo na zaslonu ali pa shranimo za nadaljnjo obdelavo. Opisali bomo postopke za razmeščanje simbolov celic in njihovo medsebojno povezovanje.

SCHEME GENERATION FROM TEXTUAL DESCRIPTION OF THE LOGICAL CIRCUIT WITH THE PROGRAM SCHEMGEN

KEY WORDS: computer aided circuits design, integrated circuits, logic circuits, scheme generation, SCHEMGEN, computer program

ABSTRACT: A program for scheme generation from textual description of the logical circuit is described. The resulting scheme can be viewed immediately or saved for further use. Algorithms for placement and routing of cell symbols are shown.

1. UVOD

Eden od korakov računalniškega načrtovanja integriranih vezij je vnos opisa vezja v računalnik. Opis vezja lahko vnesemo grafično tako, da na zaslon narišemo shemo vezja, ali tekstovno tako, da opišemo vse celice vezja in njihove medsebojne povezave. V drugem primeru imamo shemo vezja narisano samo na papirju ali pa še to ne. Tudi če dobimo tekstovni opis vezja kot rezultat dela katerega drugega programa (programi za minimizacijo logičnih vezij, programi za generiranje vezja iz matematičnega opisa vezja itd.), sheme nimamo nikjer narisane. Le-to pa velikokrat potrebujemo zaradi nepreglednosti tekstovnega opisa vezja. Ročno risanje sheme je posebno za velika vezja zamudno opravilo, pri katerem lahko naredimo veliko napak. Naslednji prispevek opisuje program in postopke za avtomatsko generiranje sheme iz tekstovnega opisa vezja. Program deluje za logična vezja, ki so sestavljena iz standardnih celic. Opisi teh celic morajo biti v knjižnici, ki jo program prebere na začetku. Program rabi podatke o velikosti in obliki celic ter podatke o vrsti in pozicijah priključkov celic. Priključki se lahko nahajajo na vseh štirih robovih celic. Datoteka z opisom vezja, ki naj ga program nariše, mora vsebovati vrstico, v kateri je ime vezja in imena vozlišč, ki so vhodi in izhodi celotnega vezja. Vsaka celica, ki se nahaja v vezju pa mora imeti svojo vrstico, v kateri je opisan tip celice in vozlišča, kamor so njeni priključki vezani. Program loči tri vrste celic: vhodne, izhodne in aktivne celice vezja. Vhodne celice je zunanj (vhodni) priključek vezja, izhodne celice pa je vezan v vezje. Podobno je izhod izhodne celice zunanj (izhodni) priključek, vhod izhodne celice pa je vezan v vezje. Aktivne celice imajo vse svoje vhode (vsi

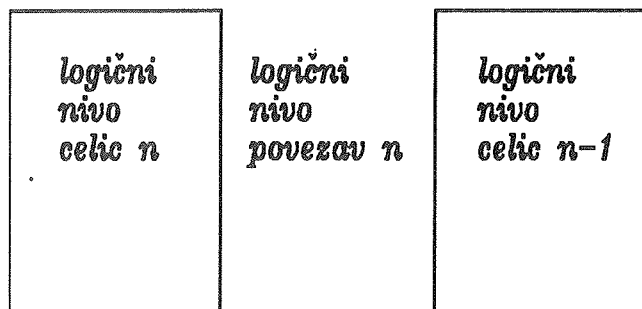
vhodi morajo namreč biti definirani) in nekatere ali vse svoje izhode vezane v vezje. Izhodi celic med sabo ne smejo biti povezani. Program vse vhodne celice postavi skrajno levo, vse izhodne celice pa skrajno desno na shemi. Aktivne celice vezja porazdeli po nivojih. Povezave, ki povezujejo celice na dveh sosednjih nivojih, postavi v vmesni prostor med tema dvema nivojema, povezave, ki povezujejo celice na bolj oddaljenih nivojih, pa postavi nad ali pod vse celice.

2. OPIS DELOVANJA PROGRAMA

Program SCHEMGEN je sestavljen iz treh večjih delov. Prvi del prebere vhodno datoteko (opis vezja in knjižnico elementov). Drugi del programa generira shemo, tretji del pa je namenjen obdelavi dobljenih rezultatov (prikaz sheme na zaslon in tvorjenje izhodne datoteke s podatki o shemi). Glavni del programa SCHEMGEN je drugi del. Ta del sestavljajo podprogrami za določanje nivojev, funkcije za razmestitev celic, funkcije za povezovanje celic med sabo in funkcije za namestitev spojišč na mesta, kjer je to potrebno.

2.1 DOLOČANJE NIVOJEV CELIC

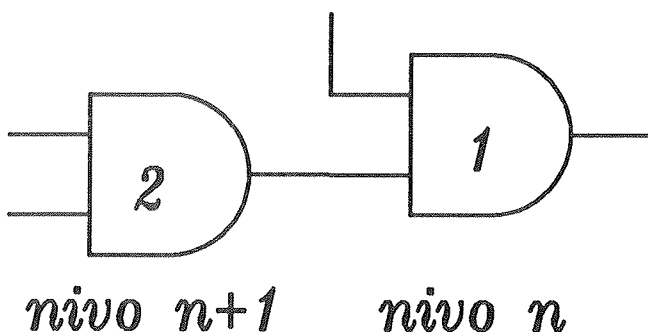
Preden celice vezja dejansko razmestimo na določene koordinate, je potrebno določiti nivoje, na katerih se posamezne celice nahajajo. Nivo celic v bistvu pove, kako daleč od izhoda (oz. v katerem stolpcu glede na izhod) se določena celica nahaja. Skrajni levi nivo celic ima številko 0, nivoji pa naraščajo od desne proti levi.



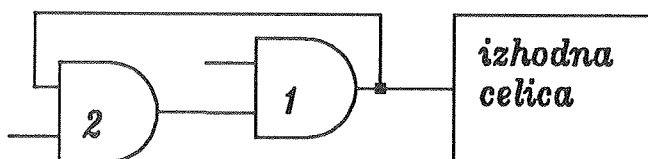
Slika 1: Ponazoritev definicije nivojev celic in nivojev povezav

Nivo povezav s številko n pa pomeni tisti vmesni prostor (kjer se nahajajo povezave), ki se nahaja med nivojema celic $n-1$ in n (slika 1).

V programu SCHEMGEN so torej nivoji celic definirani tako, da so vse izhodne celice postavljene na nivo 0. Celica, ki je bolj oddaljena od izhoda, je na višjem nivoju. Pravilo za določanje nivojev je v grobem tako: Imejmo dve celici. Če vhod prve celice, ki se nahaja na nivoju n , krmili druga celica, potem lahko to drugo celico postavimo na nivo $n+1$ (slika 2). Za vezja brez povratnih vezav so nivoji celic enolično definirani, medtem ko za vezja s povratnimi vezjavami nivoje lahko določimo na več različnih načinov. Tak primer je prikazan na sliki 3. Izhodna celica je na nivoju 0. Po pravilu za določanje nivojev postavimo celico št. 1 na nivo 1 in celico št. 2 na nivo 2. Vhod celice št. 2 pa krmili celica št. 1, ki bi jo zato lahko postavili tudi na nivo 3.



Slika 2: Določanje logičnih nivojev

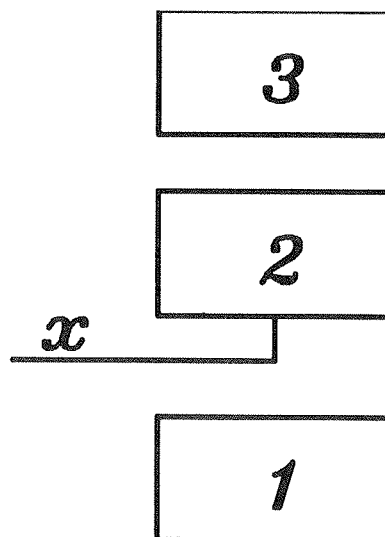


Slika 3: Primer določanja nivojev za vezje s povratnimi povezavami

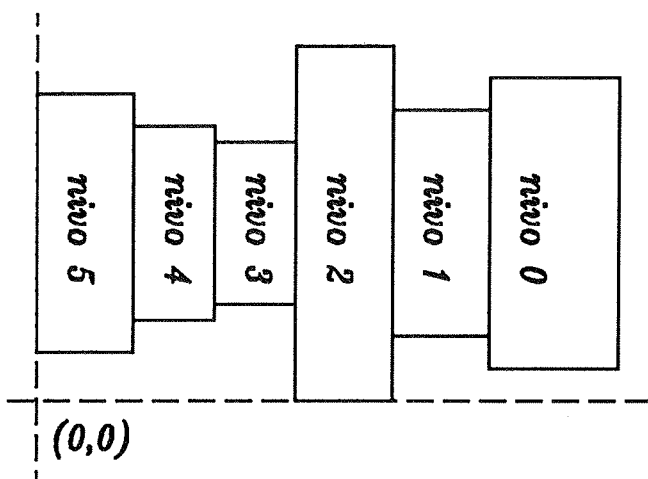
Da lahko sploh določimo nivoje celic, moramo najprej za vsako vozlišče ugotoviti, katera celica ga krmili. Nivoje nato poiščemo na sledeči način. Začnemo z eno od izhodnih celic, ki jo postavimo na nivo 0. Za en vhod te celice poiščemo krmilno celico in jo postavimo na nivo 1. Nato zopet za en vhod nove celice poiščemo krmilno celico ter jo postavimo na naslednji višji nivo celic. Postopek ponavljamo, dokler ne pridemo do ene od vhodnih celic ali do celice, ki ima nivo že določen. Pri tem smo za vsako celico izkoriščali le po en vhod. Isti postopek rekurzivno ponovimo tudi za ostale vhode celic ter za vse izhodne celice. Problem, da je isto celico mogoče postaviti na različne nivoje, rešimo tako, da celico pač pustimo na tistem nivoju, kamor smo jo prvič postavili. Zatem poiščemo najvišji nivo celic, ki je pri tem nastopil, vsem vhodnim celicam celotnega vezja pa priredimo še za ena višji nivo. Vse vhodne celice se bodo torej nahajale na najvišjem nivoju (skrajno levo na shemi), vse izhodne celice pa na nivoju 0 (skrajno desno na shemi).

2.2 OPIS RAZMEŠČANJA CELIC

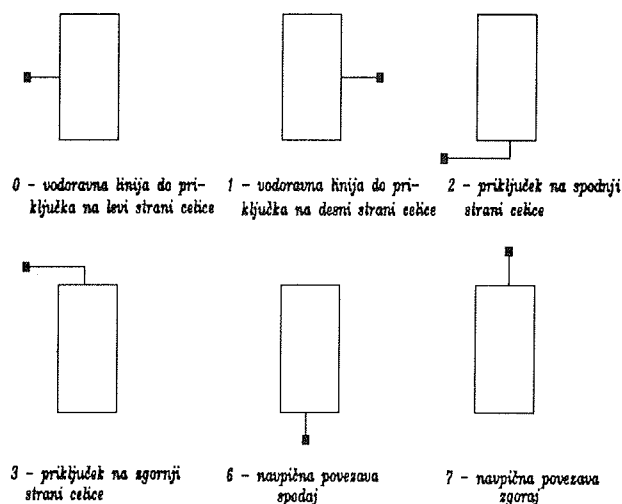
Ko je določeno, katerim nivojem bodo celice pripadale, je potrebno izračunati še dejanske koordinate, na katerih se bodo celice v shemi nahajale. Celice na skrajnem levem nivoju postavimo na določeno začetno x koordinato. Nivoje postavljamo po vrsti od leve proti desni. Na vsakem nivoju poiščemo najširšo celico, naslednji nivo pa postavimo na desni rob te celice. Nivoje torej postavimo enega poleg drugega, saj zaenkrat še ne vemo, koliko prostora za povezave bomo rabili med celicami. Na posameznih nivojih celice postavimo eno nad drugo. Če ima celica priključke na zgornji ali spodnji strani, je potrebno celice razmakniti za toliko, da naredimo prostor za povezave, ki bodo priključene na te priključke (slika 4, povezava x). Nato celice še uredimo tako, kot so urejene na sliki 5. Nivo z največjo skupno višino postavimo torej na y koordinato izhodišča, vse ostale nivoje pa simetrično glede na linijo, ki teče skozi sredino tega najvišjega nivoja.



Slika 4: Primer, ko ima celica priključek na spodnji strani



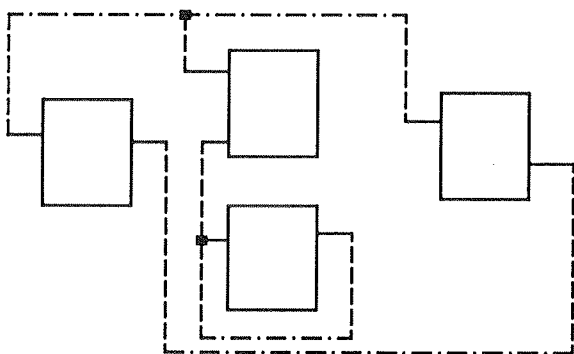
Slika 5: Končna razporeditev celic vezja



Slika 7: Možne oblike horizontalnih povezav

2.3 POVEZAVE MED CELICAMI

V programu so za povezovanje uporabljene tri vrste povezav. Prva vrsta so povezave, ki povezujejo skupaj priključke na različnih nivojih povezav (linije šrafirane z - - - - na sliki 6). Te povezave v celoti tečejo nad ali pod celicami, nikoli pa med celicami določenega nivoja celic. V nadaljnjem tekstu se te povezave na kratko imenujejo vodoravne povezave. Druga vrsta povezav so povezave, ki med sabo povezujejo priključke na istem nivoju povezav, poleg tega pa povezujejo te priključke še z ustreznimi vodoravnimi povezavami (linije šrafirane z --- na sliki 6). Te povezave se v nadaljnjem tekstu imenujejo vertikalne povezave.



Slika 6: Prikaz vseh treh vrst povezav vezja

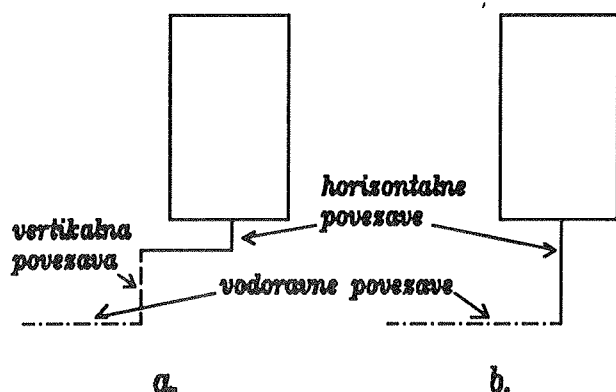
Tretja vrsta povezav pa povezuje priključke celic z ustreznimi vertikalnimi povezavami (linije šrafirane s polno črto na sliki 6). Te povezave se v nadaljnjem tekstu na kratko imenujejo horizontalne povezave, čeprav to niso vedno le vodoravne črte. Možne oblike horizontalnih povezav so prikazane na sliki 7. Poleg tega pa se izkaže, da je potrebno včasih vodoravne dele teh povezav še dodatno nalomiti, da ne pride do prekrivanja z drugimi povezavami.

Vsakemu vozlišču lahko pripada največ ena vodoravna povezava, zato podatke o teh povezavah hranimo kar med podatki o vozliščih. Podatki, ki jih rabimo so: začetni in končni nivo povezav, med katerima povezava teče, odmika na obeh nivojih, kjer se vodoravna povezava točno konča in še višina, na kateri se povezava nahaja. Lahko se zgodi, da vodoravna povezava za določeno vozlišče ni potrebna, ker so vsi priključki med sabo povezani na enem in istem nivoju povezav. Podatki o vertikalnih povezavah so: y koordinata spodnjega in zgornjega roba vertikalne povezave, nivo povezav, na katerem se povezava nahaja, odmik od izhodišča nivoja in vozlišče, ki mu povezava pripada. Podatki o horizontalnih povezavah pa so: nivo povezav, na katerem se povezava nahaja, koordinate začetka in konca horizontalne povezave, vrsta horizontalne povezave (slika 7) in vozlišče, ki mu pripada povezava.

2.4 POVEZOVANJE CELIC

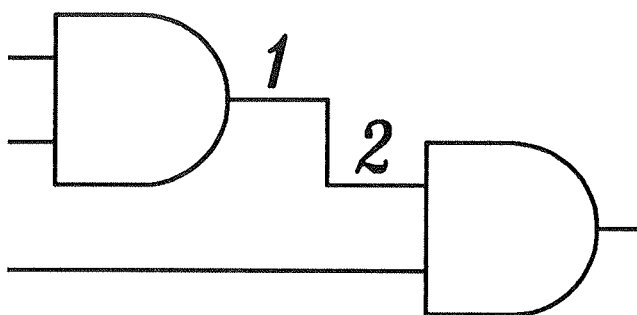
Najprej v grobem izračunamo koordinate vseh vrst povezav vezja. Vhodi in izhodi celotnega vezja ne potrebuje nobenih povezav, zato jih ni potrebno obdelati. Za ostale priključke pa je treba povezave izračunati. Najprej za horizontalno povezavo določimo njeno vrsto (glej sliko 7). Zaenkrat se vpiše le to, na kateri strani celice se horizontalna povezava nahaja (primeri 0, 1, 2 in 3). Vsaki horizontalni povezavi določimo nivo, kjer se nahaja, x koordinato začetka, višino, na kateri se nahaja, in vozlišče, kateremu pripada povezava. Označimo še, da to zaenkrat ni lomljena povezava. Horizontalno povezavo, ki se nahaja nad, oz. pod celico (slika 7, tip povezave 2 in 3) postavimo en razdelek nižje ali višje glede na priključek celice. Na vodoravne povezave so običajno priključene ustrezne vertikalne povezave. Če pa ima npr. neka celica priključek spodaj in se hkrati nahaja čisto na dnu nivoja celic, vodoravna povezava pa tudi teče pod celico, bi bilo škoda, da bi bila povezava dvakrat nalomljena (slika 8.a). Zato rajši potegnemo povezavo kar navpično do vodoravne povezave (slika

8.b). Vse povedano velja tudi, če se priključek nahaja na vrhu celice, celica na vrhu nivoja celic in vodoravna povezava nad celico. Ker še ne vemo, ali se bo ustrezna vodoravna povezava res nahajala na ustrezni strani celice, si zaenkrat samo zapomnimo ustrezno x koordinato priključka. Začetke in konce vseh vodoravnih povezav določimo tako, da bodo le-te dosegle vse priključke, ki jih morajo povezati. Nato obdelamo še vertikalne povezave. Te povezave določimo tako, da segajo od najnižjega do najvišjega priključka na danem nivoju povezav za ustrezno vozlišče.



Slika 8: Horizontalna povezava, ki teče navpično do ustrezne vodoravne povezave

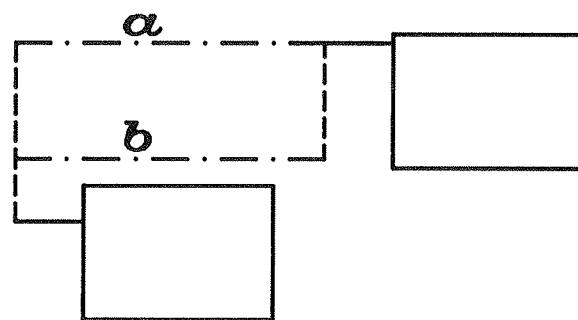
Vertikalne povezave zatem razporedimo po vmesnih prostorih med nivoji celic. Preštejemo, koliko priključkov z leve in koliko z desne povezujejo vertikalne povezave danega nivoja povezav. Povezave razporedimo tako, da tiste z najmanjšo razliko med številom priključkov na levi in desni (lahko je negativna) postavimo najbolj desno, ostale pa z naraščanjem razlike postavljamo proti levi. S tem dosežemo, da so povezave z velikim številom priključkov na eni strani bolj pomaknjene na to stran (skupna dolžina povezav je tako manjša). Nato vse nivoje celic (ki so bili do sedaj skupaj) pomaknemo proti desni za toliko, kolikor je vrinjenih vertikalnih povezav na pripadajočem nivoju povezav.



Slika 9: Primer, ko vodoravna povezava ni potrebna

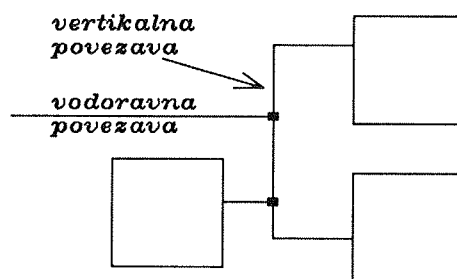
Velikokrat se zgodi, da povezave med različnimi nivoji sploh niso potrebne (povezava med priključkoma 1 in 2 na sliki 9), ker so vsi priključki povezani med sabo na istem nivoju s pomočjo vertikalnih in horizontalnih povezav. Take povezave zato izločimo. Nato za vse nivoje celic, prek katerih gre vodoravna povezava, izračunamo na zgornji strani najnižji in na spodnji strani najvišji

položaj, kamor bi vodoravno povezavo lahko postavili, ne da bi prišlo do prehajanja prek celic. Upoštevati moramo še dve stvari: če je na isti višini že postavljena neka druga vodoravna povezava, potem nove povezave na tem mestu ne moremo postaviti. Lahko pa se zgodi, da preglednost sploh ne bi trpela, tudi če bi povezavo oddaljili od celic. S tem bi namreč pustili prostor za povezave, za katere je bolj smiselno, da so celicam čim bližje. Povezavo lahko oddaljimo kljub temu, da imamo prostor zanj, če se skupna dolžina vertikalnih povezav, ki so vezane na vodoravno povezavo, pri oddaljevanju ne poveča (primer na sliki 10). Vodoravno povezavo poskusimo postaviti nad in pod celicami. Povezavo višamo (na zgornji strani), oz. nižamo (spodaj), dokler je to potrebno zaradi morebitnega prekrivanja, oz. dokler to smemo zaradi tega, ker se skupna dolžina vertikalnih povezav ne večja. Nato še pogledamo, na kateri strani bi bila vsota dolžin novo nastalih vertikalnih povezav manjša in vodoravno povezavo postavimo na to stran.



Slika 10: Skupna dolžina vertikalnih povezav (---) je neodvisna od tega, ali vodoravno povezavo (- - - -) postavimo na mesto a ali b

Ko imamo vodoravno povezavo postavljeno na znano višino, do nje podaljšamo pripadajoče vertikalne povezave. Podaljšamo spodnji ali zgornji rob vertikalne povezave, ali pa celo nobenega (primer na sliki 11).

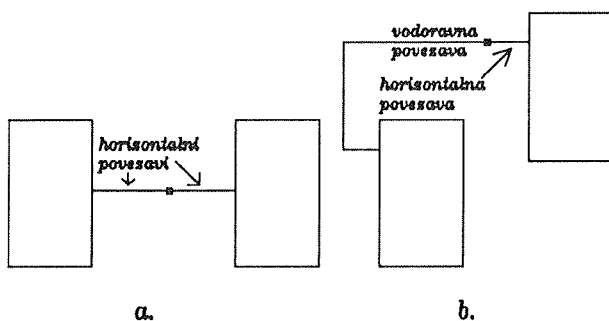


Slika 11: Podaljševanje vertikalne povezave do vodoravne ni potrebno

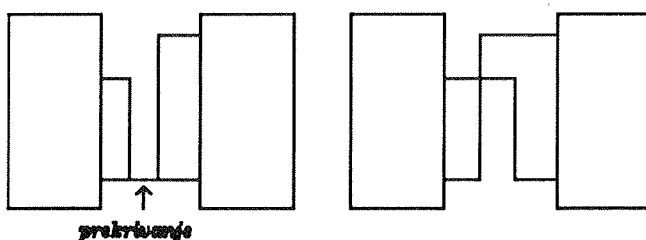
Nato se natančno izračunajo vse horizontalne povezave. Pri tem se lahko zgodi, da nekatere vertikalne povezave ne bodo več potrebne. Preverimo, če lahko horizontalno povezavo potegnemo kar navpično navzdol (tip povezave 6, glej sliko 7) ali navpično navzgor (tip povezave 7, glej sliko 7). To lahko storimo, če gre za spodnjo celico, ki ima ustrezni priključek spodaj, pripadajoča vodoravna povezava pa teče pod celicami, oz.

če gre za zgornjo celico na nivoju, ki ima priključek zgoraj, medtem ko vodoravna povezava teče nad celicami. V teh dveh primerih pripadajoče vertikalne povezave ne rabimo. Če pa je horizontalna povezava ena od običajnih (tip povezave 0, 1, 2 ali 3, glej sliko 7), ji določimo x koordinato konca tam, kjer se nahaja pripadajoča vertikalna povezava. Ker imamo določene x koordinate vseh vertikalnih in horizontalnih povezav, lahko izračunamo, kje točno se vodoravne povezave končajo. Nato pregledamo, če obstajajo vodoravne povezave z dolžino 0 in jih izločimo, vertikalno povezavo za ustrezno vozlišče na istem nivoju povezav (če obstaja) pa nazaj skrajšamo. Pobrišemo tudi vse tiste vertikalne povezave, ki imajo dolžino 0. Take povezave ne vodijo niti do drugega priključka na istem nivoju, niti do ustrezne vodoravne povezave (to se lahko zgodi, če npr. izhod neke celice ni prav nikamor vezan). Do vertikalne povezave z dolžino 0 pa lahko pride tudi, če se horizontalni povezavi dveh sosednjih celic nahajata na isti višini (slika 12.a). Tudi v tem primeru je vertikalna povezava nepotrebna. V primerih, ko brišemo vertikalno povezavo, moramo včasih pobrisati tudi horizontalno povezavo, ki pelje do določenega priključka. V ta namen preštejemo, koliko priključkov vseh celic je sploh vezanih na ustrezno vozlišče. Če je tak priključek le eden, potem lahko horizontalno povezavo pobrišemo, če pa je teh priključkov več pa morajo med sabo biti nekako povezani, zato horizontalnih povezav ne smemo izbrisati (dva primera, ko vertikalna povezava ni potrebna, horizontalna pa je, sta na sliki 12).

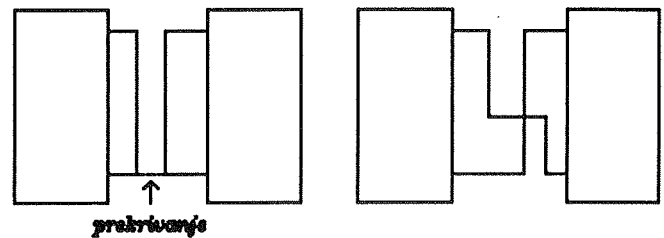
Program do tu že skoraj pravilno poveže med seboj vse celice. V dokaj pogostih situacijah pa lahko še vedno pride do neželenega prekrivanja povezav (glej sliko 13.a). V tej konkretni situaciji bi se lahko prekrivanju izognili že tako, da bi enostavno zamenjali med sabo obe vertikalni povezavi (dobili bi situacijo na sliki 13.b). Obstajajo pa tudi primeri, ko problem tudi na ta način ni rešljiv (glej sliko 14.a). V tem primeru moramo eno od povezav na mestu, kjer se prekrivata, tako zlomiti, da se



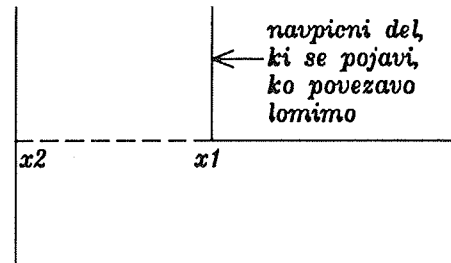
Slika 12: Primeri, ko vertikalna povezava ni potrebna



Slika 13: Neželeno prekrivanje povezav, ki ga je možno preprosto odpraviti

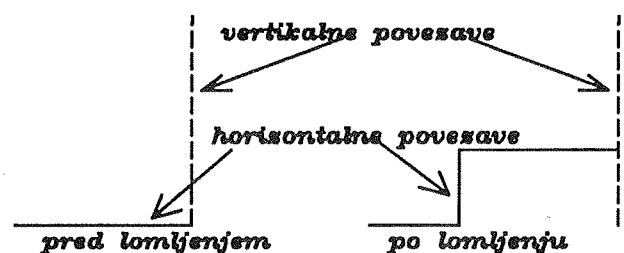


Slika 14: Neželeno prekrivanje povezav, ki ga je možno odpraviti le z lomljenjem povezav



Slika 15: Ponazoritev razmer, ko nalomimo horizontalno povezavo

izognemo prekrivanju (slika 14.b). V programu najprej ugotovimo, če se horizontalne povezave prekrivajo s kako drugo povezavo. Če prekrivanje obstaja, povezavo nalomimo. Pri tem pa se pojavi kos navpične črte (slika 15). Če bi horizontalno povezavo nalomili na katerikoli x koordinati, bi se lahko ta kos prekrival s katero od obstoječih vertikalnih povezav. Da se temu izognemo, razširimo razmik med nivojema celic za en razdelek. S tem pridobimo potrebno prosto mesto za ta kos navpične črte. Vse nivoje celic, ki se nahajajo desno od te povezave, moramo premakniti za eno mesto v desno. Če je horizontalna povezava, ki jo hočemo nalomiti, vezana na celico na desni strani, bomo prostor za kos navpične črte naredili na skrajni desni strani nivoja povezav (tipi povezav 0, 2 in 3, glej sliko 7), sicer pa na skrajni levi (tip povezave 1, glej sliko 7). Nato vzamemo vodoravni del linije, ki se začne na x koordinati, kjer smo naredili prostor za navpični kos črte (X1 na sliki 15) in konča na x koordinati pripadajoče vertikalne povezave (X2 na sliki 15). Temu vodoravnemu delu linije nato tako dolgo višamo y koordinato, dokler prekrivanja z drugimi povezavami ni več in zato ta vodoravni del lahko pustimo na tem mestu. Zaključki popravljenih horizontalnih povezav se sedaj ne nahajajo več na isti višini kot prej. Če je bila taka horizontalna povezava prej vezana na enega od robov pripadajoče vertikalne povezave, ta vertikalna povezava sedaj ni več pravilno zaključena (primer na sliki 16). Zato pregledamo pripadajočo vodoravno pove-



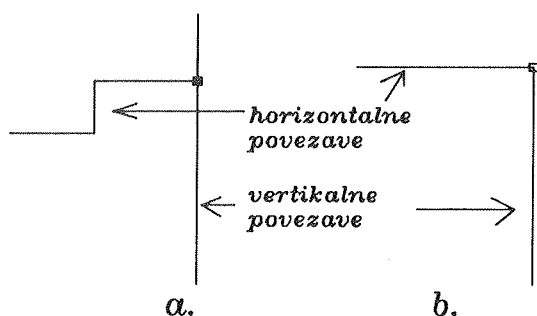
Slika 16: Nepravilna zaključitev vertikalne povezave po lomljenju horizontalne povezave

zavo in vse horizontalne povezave, ki so vezane nanjo ter na novo določimo spodnji in zgornji rob povezave.

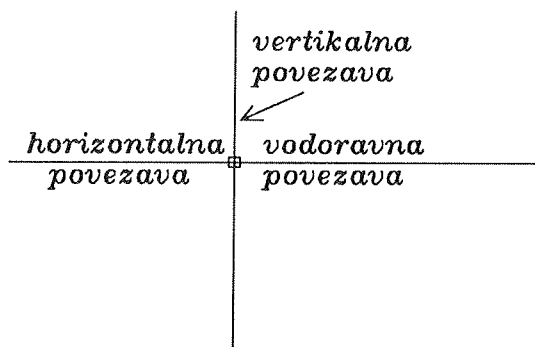
2.5 NAMESTITEV SPOJIŠČ NA POVEZAVE

Na koncu generiranja sheme vezja moramo še postaviti spojišča na tista mesta, kjer je to potrebno. To pa je tam, kjer se v eni točki stika tri ali več linij, ki so med sabo električno povezane. Podatki o spojiščih so pridruženi podatkom o vertikalnih in horizontalnih povezavah. Za vertikalne povezave se spojišče nahaja na stičišču z vodoravno povezavo. Za horizontalne povezave pa se spojišče nahaja na stičišču z ustrezno vertikalno povezavo (oz. vodoravno povezavo za tip povezave 6 ali 7, glej sliko 7).

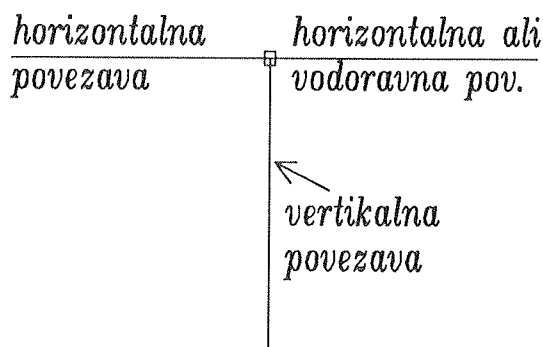
Najprej se določijo spojišča za horizontalne povezave. Za tipe horizontalnih povezav 0, 1, 2 in 3 (glej sliko 7)



Slika 17: Postavitev spojišč za horizontalne povezave

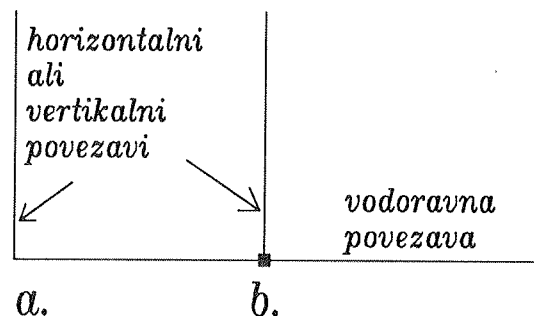


Slika 18: Poseben primer, ko spojišča ne priredimo horizontalni povezavi



Slika 19: Primer, ko je na konec vertikalne povezave poleg horizontalne priključena še ena povezava

poiščemo y koordinato, kjer se horizontalna povezava končuje (tu bo pozneje mogoče spojišče). Spojišče postavimo v primeru, ko se horizontalna povezava dotika ustrezne vertikalne povezave nekje v sredini (slika 17.a). Če se horizontalna povezava dotika vertikalne na robu, spojišča ni treba postaviti (slika 17.b). Obstaja možnost, da se na isti višini, kjer se nahaja horizontalna povezava, priključi še vodoravna povezava (slika 18). V tem primeru bi morali spojišče tudi narisati, vendar pustimo, da se bo le-to narisalo, ko se bodo obdelovale vertikalne povezave. Na konec vertikalne povezave, kamor je priključena horizontalna povezava, je lahko priključena še katera druga povezava (slika 19). Če je to vodoravna povezava, moramo spojišče narisati, ker se le-to ne bo narisalo, ko bomo obdelovali vertikalne povezave. V primeru, da je to horizontalna povezava pa spojišče narišemo le, če le-to še ni narisano na drugi horizontalni povezavi (spojišče torej dobi tista povezava, ki pride prva na vrsto). Za horizontalne povezave, ki so direktno priključene na vodoravno povezavo (tip 6 in 7, slika 7), narišemo spojišče le, če se horizontalna povezava dotika vodoravne nekje v sredini (slika 20.b), na robovih pa spojišča ne postavimo (slika 20.a).

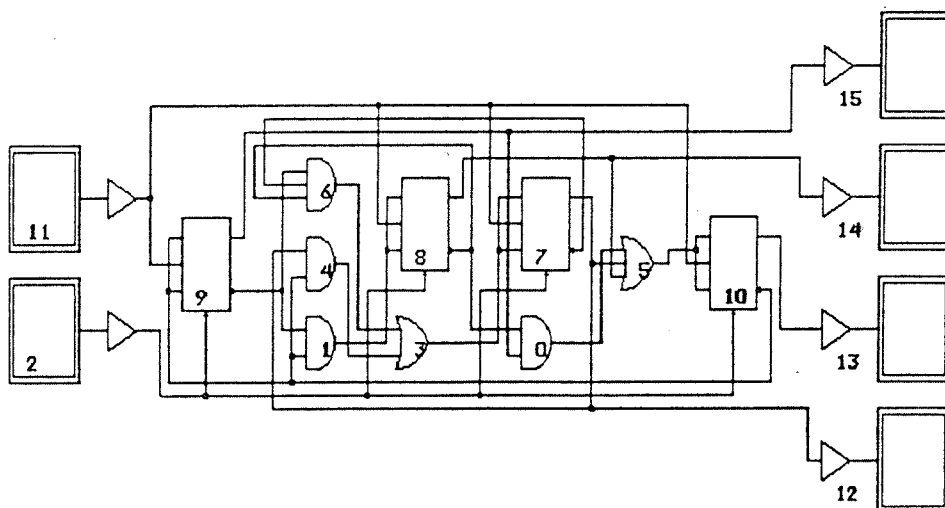


Slika 20: Določitev spojišč za vertikalne povezave

Nato določimo še spojišča za vse vertikalne povezave. Spojišča postavimo ravno tako, kot za horizontalne povezave, ki so direktno priključene na vodoravne (slika 20), spojišče postavimo, če se vertikalna povezava dotika ustrezne vodoravne nekje v sredini.

3.ZAKLJUČEK

Na sliki 22 je izrisan primer sheme vezja, ki jo generira program SCHEMGEN. To vezje predstavlja števniki po modulu 9. V datoteki opisa vezja (slika 21) se nahaja vrstica MODULE, v kateri so opisani vsi izhodi in vhodi celotnega vezja ter ime vezja. Med vrsticama BEGIN in END pa se nahajajo opisi celic vezja: vozlišča, kamor so vhodi in izhodi celic priključeni in tipi celic. Številke ob celicah na sliki pomenijo zaporedno št. celice v vhodni datoteki (le-te tečejo od 0 naprej). Program je posebno uporaben za kombinacijska vezja. Problem pa nastane pri vezjih, ki imajo povratne povezave, ker razporeditev celic vezja ni več enolično določena. Razporeditev celic je močno odvisna od vrstnega reda opisov celic v vhodni datoteki. Primer je ravno vezje na sliki 22. Ker je to



Slika 22: Shema vezja, ki jo je program generiral (opis na sliki 21)

```
MODULE QA QB QC QD .STEVNIK9 RES CLK;
BEGIN 16 .AA025 4 5;
9 .AA025 6 8;
RES1 .IB01C5 RES;
22 .OR025 21 10;
10 .AA025 1 8;
15 .OR035 16 1 3;
21 .AA035 6 2 4;
1 2 .JK115 22 22 CLK1 RES1;
3 4 .JK115 9 9 CLK1 RES1;
5 6 .JK115 8 8 CLK1 RES1;
7 8 .JK115 15 15 CLK1 RES1;
CLK1 .IB01C5 CLK;
QD .OB03C5 1;
QA .OB03C5 7;
QC .OB03C5 3;
QB .OB03C5 5;
END;
```

Slika 21: Tekstovni opis vezja na sliki 22

števniki, bi bilo idealno, če bi bili flip-flopi na shemi postavljeni tako, kot si sledijo biti po svoji pomembnosti. Vidimo, da to ne velja. Ne obstaja splošen postopek, po katerem bi lahko računalnik vedno našel tako razporeditev celic, kot si jo želimo mi. Razporeditev je namreč močno odvisna tudi od funkcije vezja. Ta problem bi bilo možno rešiti tako, da bi v programu omogočili, da nekatere celice vezja razmestimo ročno.

LITERATURA:

/1/ Yehuda Shiran: A Deterministic Approach to Netlist Display, COMP EURO 89, Proceedings of the 3rd Annual European Computer Conference, Hamburg, May 8-12, 1989, str. 5-13 do 5-34.

Stanislav Gruden, dipl. ing.
Marijan Leban, dipl. ing.
prof. dr. Baldomir Zajc, dipl. ing.
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo
Tržaška 25, 61000 Ljubljana

Prispelo: 08.02.91 Sprejeto: 01.03.91

REGULACIJA SINUSNE IZHODNE NAPETOSTI FERORESONANČNEGA TRANSFORMATORJA (I. del)

Rafael Cajhen, Andrej Zupanc, Janko Nastran, Matija Seliger

KLJUČNE BESEDE: ferroresonančni transformatorji, regulacija napetosti, izhodna napetost, sinusna napetost, regulacijska vezja, izračun, električne karakteristike, eksperimentalni rezultati

POVZETEK: V članku je opisana originalna rešitev regulacije sinusne izhodne napetosti ferroresonančnega transformatorja, kar je novost na tem področju.

SINUS OUTPUT VOLTAGE REGULATION OF FERRORESONANT TRANSFORMER (part I)

KEYWORDS: ferroresonant transformers, voltage regulation, output voltage, sinusoidal voltage, control circuits, design, electrical characteristics, experimental results

ABSTRACT: Paper deals with regulation of sinusoidal output voltage of ferroresonant transformer. An original solution is given.

1. UVOD

Klasični ferroresonančni transformator - stabilizator FRT - ima veliko zelo dobrih električnih lastnosti. V prvi vrsti zelo dobro stabilizira izhodno napetost, dobro zmanjšuje električne motnje, ki se pojavljajo v omrežju zaradi preklopnih pojavov in atmosferskih motenj, je robusten in njegovo obratovanje je zelo zanesljivo.

Določene pomankljivosti pa se pokažejo v primeru, ko se zahteva zelo veliko stabilnost izhodne napetosti pri nekoliko večji spremembi frekvence napajalnega izvora (npr. lokalni agregati), večje spremembe vhodne napetosti in pri obremenitvah s kompleksnimi bremenmi. Pri kapacitivni obremenitvi je izhodna napetost večja od nazivne izhodne napetosti in obratno pri induktivni obremenitvi pa je izhodna napetost manjša od nazivne. Tudi faktor moči je zelo dober le pri nazivni vhodni napetosti. Pri večji spremembi vhodne napetosti pa se faktor moči bistveno poslabša, posebno pri relativno majhnih obremenitvah ferroresonančnega transformatorja.

V praksi se je pokazala potreba po ferroresonančnem transformatorju, katerega izhodna napetost bi bila nastavljiva in stabilna ter praktično neodvisna od relativno velike spremembe frekvence napajalnega izvora, relativno velike spremembe vhodne napetosti in sekundarnega bremena. Pri tem pa mora imeti izhodna napetost sinusno obliko z minimalnim nelinearnim popačenjem.

2. PREGLED STANJA V SVETU

Iz razpoložljivega gradiva tujih člankov smo videli, da so se mnogi avtorji ukvarjali z regulacijo izhodne napetosti

feroresonančnega transformatorja. Pri tem so bile dosežene regulacije izhodne napetosti v relativno širokih mejah, vendar so bila nelinearna popačenja izhodne napetosti tako velika, da so bili ti sistemi uporabni le za usmerniške namene. Pri tem pa so bili doseženi nekateri zelo dobri rezultati glede električnih izkoristkov, faktorja moči itd. Ti sistemi pa niso bili uporabni za napajanje porabnikov, ki zahtevajo sinusno izhodno napetost z minimalnim popačenjem.

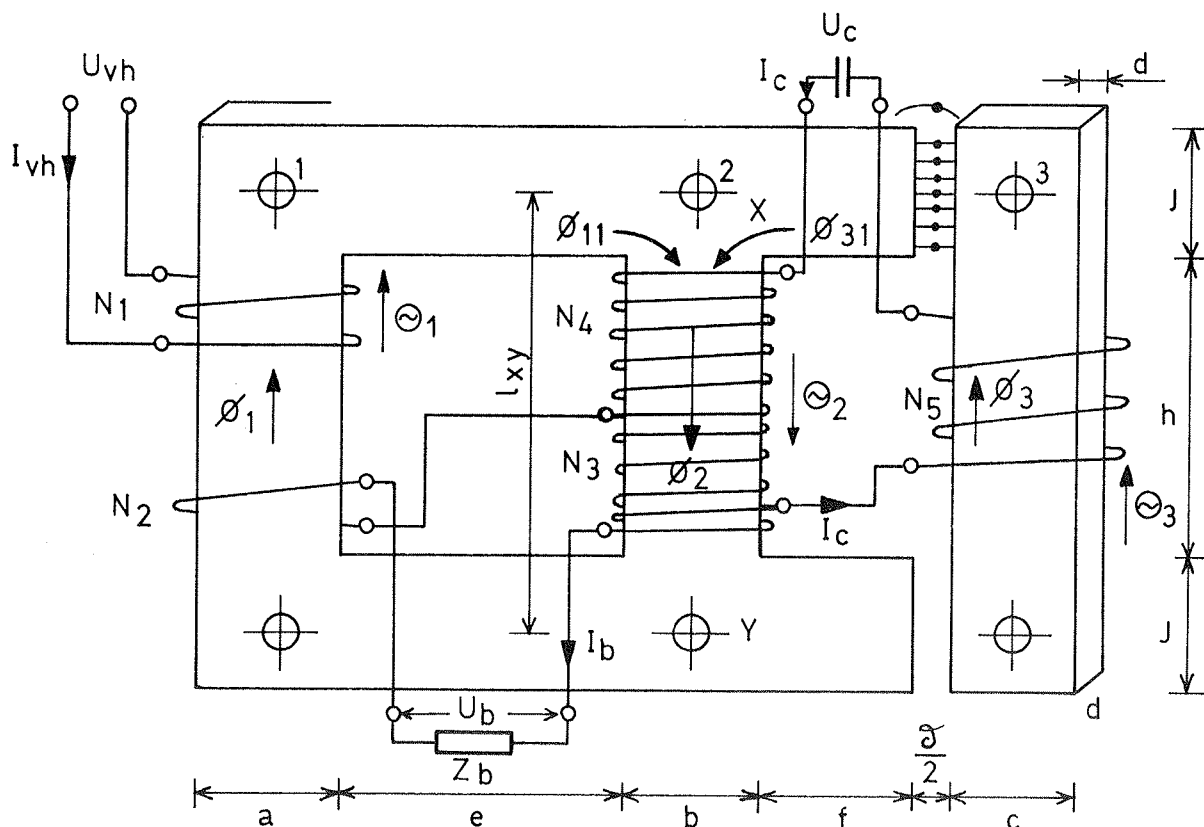
3. KLASIČNI ENOFAZNI FERORESONANČNI TRANSFORMATOR

Osnovnih principov klasičnih ferroresonančnih transformatorjev je veliko. Eden od starejših sistemov je sestavljen iz transformatorja, ki obratuje v nasičenju in ima v seriji z napajalno napetostjo lienarno dušilko s pomožnimi korekcijskimi ovoji.

Paralelno izhodu nasičenega transformatorja sta vgrajena filtra za 3. in 5. harmonsko napetost. Skupna kapacitivnost obeh filterskih kondenzatorjev pa tvori z navitjem nasičenega transformatorja filter za osnovno frekvenco napajalne napetosti.

Nadaljni razvoj ferroresonančnih transformatorjev pa je šel v smeri enotne magnetne izvedbe. Tako je ta sistem izdelan iz tristebernega transformatorja z različnim presekom magnetnih stebrov in pripadajoče zračne reže.

Princip takega sistema vidimo na sliki 1. Na prvem stebri je navito primarno navitje N_1 in korekcijsko navitje



Slika 1: Osnovni princip enofaznega FRT

N_2 . Na srednjem stebru sta naviti sekundarni navitji N_3 in N_4 . Ta steber obratuje v nasičenju. Navitje na tretjem stebru N_5 ima vlogo filterskega navitja. V seriji z navitji N_3 , N_4 in N_5 je priključen kondenzator C , ki tvori z drugim stebrom resonanco za osnovno frekvenco. Prav tako pa učinkuje ta kondenzator kot filter za tretjo harmonsko napetost skupaj z navitjem N_5 .

Sekundarna izhodna napetost U_{izh} se inducira v navitju N_3 . Ta je običajno za cca 10 % večja od nazivne izhodne napetosti, ker je navitje N_3 vezano v seriji s korekcijskim navitjem N_2 , ki je vezano v protifazi.

Osnovni parametri za dimenzioniranje feroresonančnega transformatorja so: vhodna napetost U_{vh} , izhodna napetost U_{izh} , izhodna moč in frekvenca napajalnega izvora. Pri samem dimenzioniranju pa je osnova moč resonančnega kroga. Tako mora biti nazivna moč kondenzatorja, ki je enaka moči resonančnega navitja, približno 2,5 do 4-krat večja od nazivne izhodne moči transformatorja. S tem se doseže dobro stabilizacijo izhodne napetosti in dovolj majhno nelinearno popačenje izhodne napetosti. Ker je moč resonančnega kroga relativno velika bi morala biti kapacitivnost kondenzatorja velika, če naj bi bil ta priključen neposredno na navitje N_4 . Če pa priključimo v serijo z navitjem N_4 še navitje N_3 , se napetost na drugem stebru zelo poveča, s tem pa se hkrati bistveno zmanjša potrebna kapacitiv-

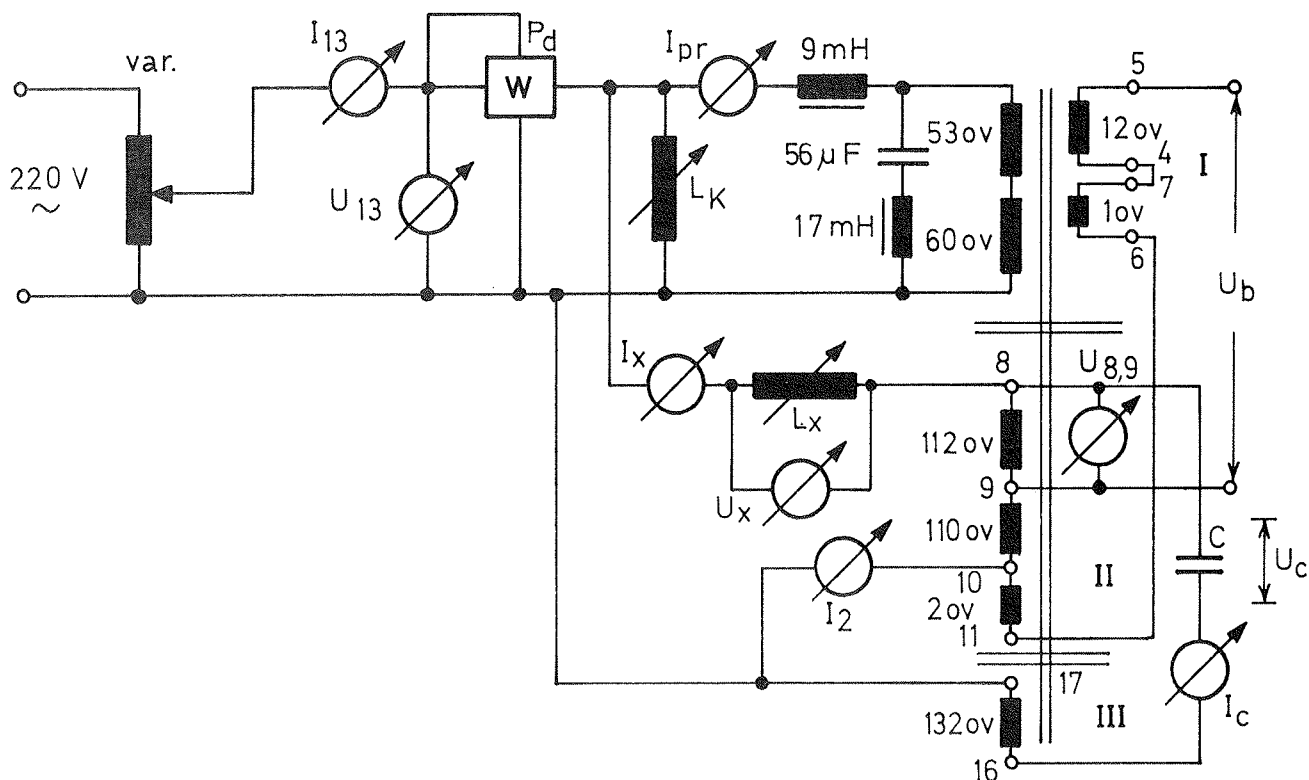
nost kondenzatorja. Ta se manjša s kvadratom porasta sekundarne napetosti.

Navitje N_2 na primarnem stebru služi za popraviljanje izhodne napetosti zaradi spreminjanja vhodne napetosti in bremena, ki bi v obratnem primeru vplivala nekoliko na stabilnost izhodne napetosti.

4. PRINCIP REGULACIJE IZHODNE NAPETOSTI

Na osnovi študija in eksperimentalnih predpoizkusov se je porodila zamisel, da je mogoče spreminjati velikost izhodne napetosti le s spreminjanjem gostote magnetnega polja v resonančnem stebru, ki normalno obratuje v nasičenju. To pa je mogoče doseči s pomočjo pomožne izmenične sinusne napetosti, ki vpliva neposredno na magnetno gostoto resonančnega stebra feroresonančnega transformatorja.

V prvem primeru je bila uporabljena omrežna napetost 220 V. Med navitje resonančnega stebra in omrežno napetostjo je bila priključena dušilka L_x . Velikost dušilke L_x je vplivala na magnetno gostoto resonančnega stebra. Pri tem je iz resonančnega navitja tekel v omrežje kapacitivni tok. Pri relativno majhnih vrednostih induktivnosti dušilke je bil tok skozi dušilko približno enak vsoti toka skozi kondenzator in toka skozi resonančno navitje.



Slika 2: Princip regulacijskega vezja

Pri relativno velikih induktivnostih pa je bil tok kondenzatorja približno enak toku skozi dušilko L_x in toku skozi resonančno navitje N_3 in N_4 . Pri neki določeni induktivnosti dušilke L_x pa je bil tok dušilke približno enak kondenzatorskemu toku. Tok skozi resonančno navitje pa je bil minimalen. Iz tega sledi, da je pri majhnih vrednostih induktivnosti L_x imela glavni vpliv na magnetno gostoto resonančnega kroga pomožna, omrežna napetost. Pri večjih induktivnostih pa je imela bistveni vpliv napetost resonančnega navitja. Izhodna napetost se je v obeh primerih spreminjala v relativno širokih mejah (glej tabelo I). Pri majhnih vrednostih induktivnosti dušilke L_x ni bilo resonančnega efekta, pri večjih vrednostih pa je ostala resonanca feroresonančnega transformatorja.

5. DIMENZIONIRANJE ELEMENTOV PRI KRMILJENJU IZHODNE NAPETOSTI U_b

Osnova za izračun krmilnih pogojev je magnetilna B , H karakteristika klasičnega feroresonančnega transformatorja in to karakteristika II. stebra z resonančnim navitjem.

Pri tem nastane vprašanje, kako je mogoče že vnaprej določiti velikost krmilnega toka I_x , oz. velikost krmilne dušilke L_x . V idealiziranih pogojih veljajo naslednje zakonitosti. Pri dimenzioniranju izhajamo iz kondenzatorske napetosti U_c . Želena napetost na resonančnem

navitju U_{cx} je enaka napajalni napetosti na krmilni dušilki L_x , ki ga povzroča krmilni tok I_x

$$U_{cx} = U_{13} + U_x = U_{13} + I_x \cdot \omega \cdot L_x$$

Napetost U_{cx} je enaka omrežni napetosti U_{13} takrat, kadar je induktivnost krmilne dušilke enaka nič ($L_x = 0$.)

Ko izberemo želeno napetost na resonančnem krogu U_{cx} (ta je v našem primeru $U_{cx} \approx 2 \cdot U_{8,9}$, oz. približno dvakrat večja od izhodne napetosti $2 \cdot (U_b + 20 \text{ V})$), izračunamo iz osnovne enačbe ustrezno gostoto B .

$$B = \frac{U_{cx} \cdot \sqrt{2}}{A_{II} \cdot N_c \cdot \omega} \quad (T) \quad (1)$$

Iz magnetilne B, H karakteristike odčitamo za izračunano magnetno gostoto B pripadajočo magnetno poljsko jakost H . S tem pa lahko določimo odgovarjajočo krmilno poljsko jakost H_x . Ta je podana z razliko med maksimalno poljsko jakostjo H_{sat} (pri $B = 2,15 \text{ T}$) in odčitano poljsko jakostjo H_0 .

$$H_x = H_{sat} - H_0 \quad (A/m) \quad (2)$$

To je tista vrednost magnetne poljske jakosti, ki jo mora ustvariti tok I_x pomožnega navitja v resonančnem stebru.

Magnetna poljska jakost H_{sat} je določena z nasičenjem magnetne gostote B . Iz poljske jakosti H_x in dolžine

magnetne poti I_{Fe} ter število ovojjev resonančnega navitja N_0 izračunamo krmilni tok I_x .

$$I_x = \frac{H_x \cdot I_{Fe}}{N_c} \quad (A)$$

(maksimalni tok I_x sledi iz $H_x = 5000 \text{ A/m}$, $I_{sat} \approx 19 \text{ A}$).

Iz napetosti U_{cx} lahko izračunamo velikost kapacitivnega toka.

$$I_c = U_{cx} \cdot \omega \cdot C$$

Prav tako lahko izračunamo tudi razliko med kapacitivnim in krmilnim tokom I_x .

$$dI = I_x - I_c$$

Iz razlike tokov dI lahko sedaj izračunamo navidezno impedanco, kot bi jo imel v tem primeru navidezni odvisno kapacitivni tok. Navidezni kapacitivni tok predstavlja pravzaprav razliko med dejanskim tokom in merjenim tokom. To pot je potrebno izbrati zato, ker imamo v seriji z napajalno omrežno napetostjo induktivnost, ki pa delno kompenzira navidezni kapacitivni tok. Kapacitivnost tega navideznega kondenzatorja določi navidezno kapacitivno impedenco Z_c .

$$Z_c = \frac{U_{cx}}{dI}$$

Prav tako lahko izračunamo impedenco krmilne dušilke Z_L .

$$Z_L = \omega \cdot L_x$$

Tako je skupna impedanca:

$$Z = Z_c - Z_L$$

Padec napetosti na krmilni dušilki L_x je določen iz razlike med želeno resonančno napetostjo U_{cx} in napajalno napetostjo iz omrežja U_{13} .

$$U_x = U_{cx} - U_{13}$$

Tabela I.

	U_{13}	I_{13}	P_d	U_b	U_c	I_c	U_x	I_x	I_{pr}	I_z	$U_{8,9}$
	V	A	W	V	V	A	V	A	A	V	V
a	215	4	160	92	230	6,5	0	12,5	8	6,0	107
b	215	9	180	136	350	10	93	14	5,5	3,4	155
c	215	10,7	200	170	440	12,8	160	13,5	3,3	1,5	190
d	215	7,5	240	204	540	16	220	8,5	1,5	7	223
e	215	4,5	300	92	230	6,5		13			107

U_{13} vhodna napetost
 I_{13} vhodni tok
 P_d vatne izgube praznega teka
 U_b izhodna napetost
 U_c kondenzatorska napetost
 I_c tok kondenzatorja

Iz napetosti U_x in impedanca "Z" lahko izračunamo razliko navideznega toka I_a .

$$I_a = \frac{U_x}{Z}$$

Če sedaj odštejemo od krmilnega toka I_x (to je tok, ki je bil določen iz magnetilne karakteristike) izračunani "kompenzirani" navidezni tok I_a , dobimo realno vrednost krmilnega toka I_x' , ki ga resnično izmerimo in je manjši od izračunanega krmilnega toka I_x iz B,H karakteristike.

$$I_x' = I_x - I_a$$

Pri tem ima lahko impedanca "Z" tudi negativno vrednost, to je v primeru, ko je impedanca Z_L večja od Z_c . To pa se realno dogaja takrat, kadar se velikost dušilke zelo poveča, oz. takrat, ko se želena napetost U_{cx} zelo približuje maksimalni vrednosti.

V primeru da je $L_x = 0$ pa je realni krmilni tok enak razliki med maksimalnim krmilnim tokom in kapacitivnim tokom.

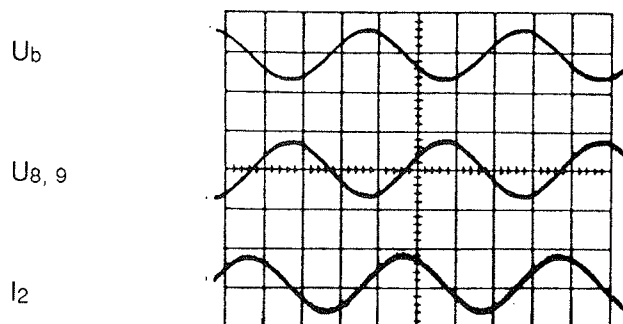
$$I_{sat} - I_c = I_x'$$

V tabeli I so podane izmerjene vrednosti tokov in napetosti na eksperimentalnem ferroresonančnem transformatorju moči 3 kVA. Podane vrednosti so izmerjene za različne vrednosti induktivnosti linearnih dušilk L_x . Pri a) je induktivnost $L_x = 0$, pri b) je $L_x = 23 \text{ mH}$, pri c) je $L_x = 45 \text{ mH}$, pri d) je $L_x = 84,5 \text{ mH}$ ter pri e) je $L_x = 0$ in breme pri toku $I_b = 2 \text{ A}$.

Iz tabele lahko vidimo, da se z velikostjo induktivnosti od 0 do 84,5 mH spreminja izhodna napetost od 92 do 240V. Ohmske izgube transformatorja v praznem teku so relativno majhne, saj znašajo od cca 5 do 8 % pri nazivni moči transformatorja 3 kVA.

Obliko tokov in napetosti pa lahko vidimo na osciloskopskih slikah za obremenjeni in neobremenjeni ferroresonančni transformator. Iz diagramov se lepo vidi, da ima izhodna napetost U_b lepo sinusno obliko ne glede ali je

U_x padec napetosti na dušilki L_x
 I_x tok dušilke L_x
 I_{pr} primarni tok transformatorja
 I_z tok resonančnega navitja
 $U_{8,9}$ delna napetost resonančnega navitja



sl. 3a

$L_x = 0$

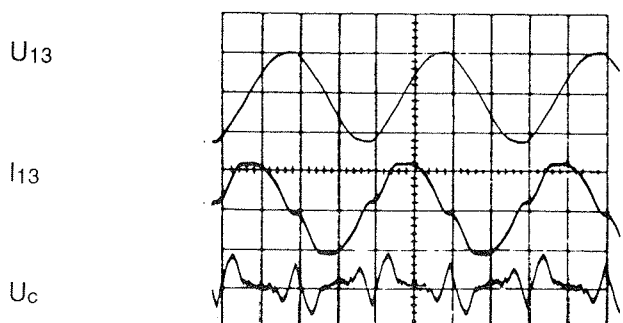
Merilo:

$U_b = 200V/d$

$U_{8,9} = 200V/d$

$I_2 = 10A/d$

$t = 5ms/d$



sl. 3b

$L_x = 0$

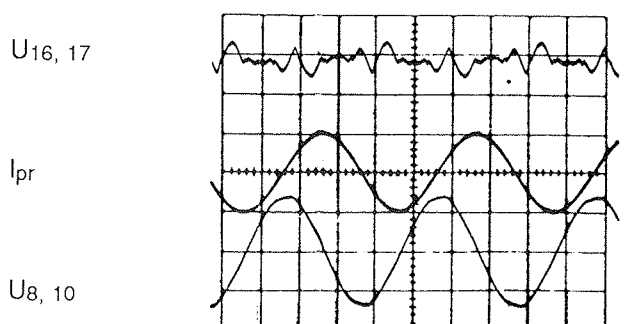
Merilo:

$U_{13} = 200V/d$

$I_{13} = 4A/d$

$U_c = 200V/d$

$t = 5ms/d$



sl. 3c

$L_x = 0$

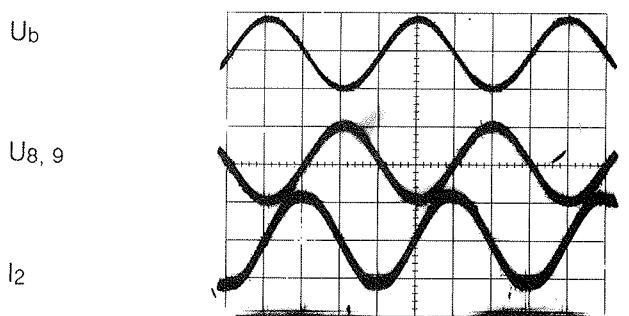
Merilo:

$U_{16,17} = 20V/d$

$I_{pr} = 10A/d$

$U_{8,10} = 200V/d$

$t = 5ms/d$



sl. 4a

$L_x = 23mH$

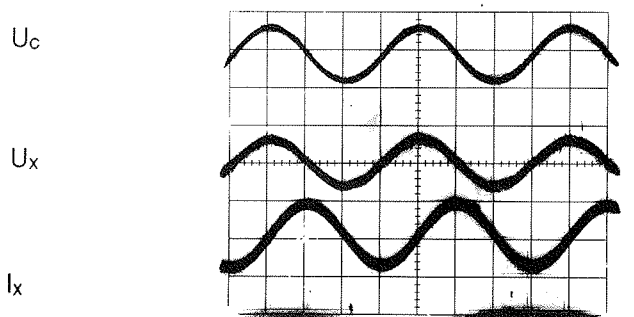
Merilo:

$U_b = 200V/d$

$U_{8,9} = 200V/d$

$I_2 = 4A/d$

$t = 5ms/d$



sl. 4b

$L_x = 23mH$

Merilo:

$U_c = 500V/d$

$U_x = 200V/d$

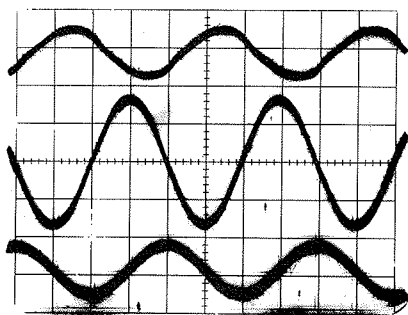
$I_x = 20A/d$

$t = 5ms/d$

$U_{16, 17}$

$U_{8, 10}$

I_{pr}



sl. 4c

$L_x = 23\text{mH}$

Merilo:

$U_{16, 17} = 200\text{V/d}$

$U_{8, 10} = 200\text{V/d}$

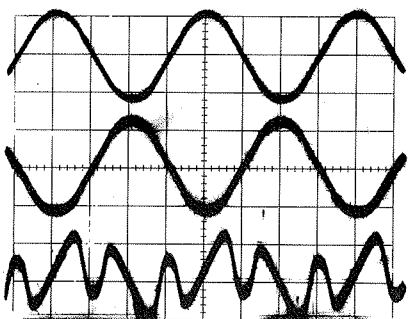
$I_{pr} = 10\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_b

$U_{8, 9}$

I_2



sl. 5a

$L_x = 45\text{mH}$

Merilo:

$U_b = 200\text{V/d}$

$U_{8, 9} = 200\text{V/d}$

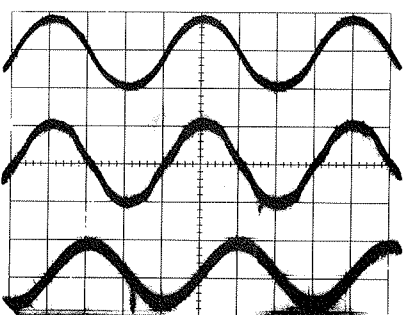
$I_2 = 2\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_c

U_x

I_x



sl. 5b

$L_x = 45\text{mH}$

Merilo:

$U_c = 500\text{V/d}$

$U_x = 200\text{V/d}$

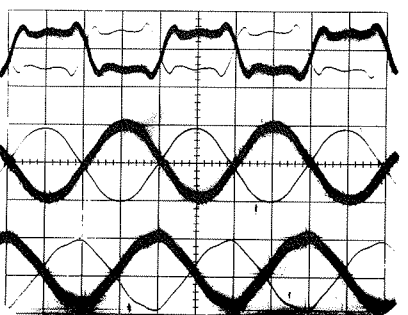
$I_x = 20\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

$U_{16, 17}$

$U_{8, 10}$

I_{pr}



sl. 5c

$L_x = 45\text{mH}$

Merilo:

$U_{16, 17} = 100\text{V/d}$

$U_{8, 10} = 500\text{V/d}$

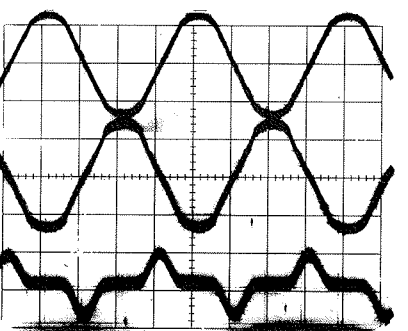
$I_{pr} = 4\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_b

$U_{8, 9}$

I_2



sl. 6a

$L_x = 84,5\text{mH}$

Merilo:

$U_b = 200\text{V/d}$

$U_{8, 9} = 200\text{V/d}$

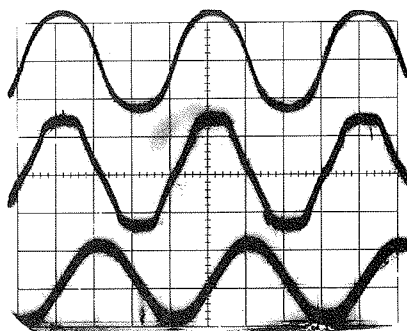
$I_2 = 20\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_c

U_x

I_x



sl. 6b

$L_x = 84,5\text{mH}$

Merilo:

$U_c = 500\text{V/d}$

$U_x = 200\text{V/d}$

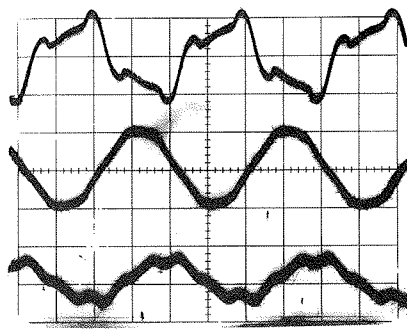
$I_x = 10\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

$U_{16, 17}$

$U_{8, 10}$

I_{pr}



sl. 6c

$L_x = 84,5\text{mH}$

Merilo:

$U_{16, 17} = 200\text{V/d}$

$U_{8, 10} = 500\text{V/d}$

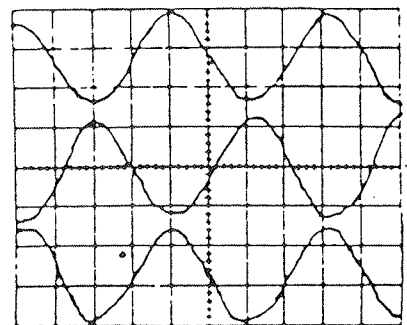
$I_{pr} = 4\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_b

$U_{8, 9}$

I_b



sl. 7a

$L_x = 0$

breme

Merilo:

$U_b = 100\text{V/d}$

$U_{8, 9} = 100\text{V/d}$

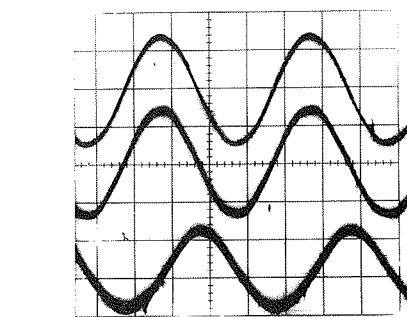
$I_b = 2\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

U_c

U_{13}

I_2



sl. 7b

$L_x = 0$

breme

Merilo:

$U_c = 200\text{V/d}$

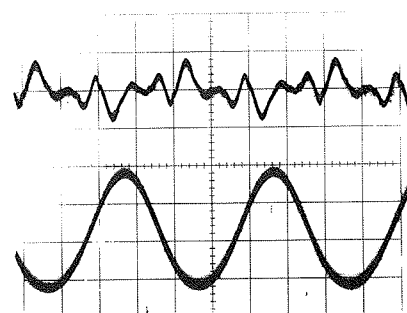
$U_{13} = 200\text{V/d}$

$I_2 = 4\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

$U_{16, 17}$

I_{pr}



sl. 7c

$L_x = 0$

breme

Merilo:

$U_{16, 17} = 20\text{V/d}$

$I_{pr} = 4\text{A/d}$

$t = 5\text{ms/d}$

sistem v resonanci ali pa ne in to pri vseh vrednostih induktivnosti L_x .

6. PRAKTIČNI REZULTATI NA EKSPERIMENTALNEM MODELU

Na eksperimentalnem modelu FRT 3 kVA, $U_{vh} = 220$ V, 50 Hz, so bili primerjani rezultati izračunanih in merjenih vrednosti. Dobljeni rezultati potrjujejo pravilnost postavljenih teoretičnih predpostavk. Minimalna odstopanja izmerjenih in izračunanih vrednosti pripisujemo napakam merilnih postopkov zaradi nelinearnih veličin.

7. OSCILOSKOPSKI POSNETKI TOKOV IN NAPETOSTI

V nadaljnjem so podane osciloskopske slike za različne vrednosti krmilnih dušilk L_x . Na slikah 3a, 3b in 3c so podani diagrami za krmilno induktivnost $L_x = 0$. Na slikah 4a, 4b in 4c so diagrami za $L_x = 23$ mH. Na slikah 5a, 5b in 5c so diagrami za $L_x = 45$ mH. Na slikah 6a, 6b in 6c so diagrami za $L_x = 84,5$ mH. Na slikah 7a, 7b in 7c so diagrami za vrednosti $L_x = 0$ pri obremenjenem feroresonančnem transformatorju.

Iz diagramov se lepo vidi, da je izhodna napetost U_b lepe sinusne oblike (ne glede ali smo v resonanci ali ne) pri vseh vrednostih L_x (prazni tek ali obremenitev). Tok I_{13} prehiteva pri vseh vrednostih L_x napetost U_{13} .

Fazni premik, ki nastopi med I_c in I_{pr} narašča z večanjem krmilne induktivnosti L_x . Tok I_x je v nasprotni fazi z I_{pr} in je to najbolj izrazito, ko je L_x enak nič. Z večanjem krmilne induktivnosti L_x se ta efekt manjša, ker se spreminja faza primarja I_{pr} .

V prvem primeru ima I_{pr} induktivni karakter, ki se pa z večanjem L_x manjša. Iz tega sledi, da sta I_{13} in I_{pr} premaknjena (I_{13} prehiteva tok I_{pr}), kar velja za $L_x = 0$. Ko L_x narašča se kot manjša in sta v ekstremu v fazi.

Za tabelo I velja za vse primere, da tok I_x teče v nihajni krog in je kapacitivnega karakterja, prehiteva vhodno napetost U_{13} . Skupni tok I_{13} je v vseh teh primerih tudi kapacitivnega karakterja, I_{pr} pa induktivnega karakterja.

Naredili smo preizkus, da smo izklopili primarno navitje in serijski filter za tretjo harmonsko komponento (tok I_x

je bil kapacitiven, če je bil priključen resonančni kondenzator). Pri izključitvi tega kondenzatorja pa je tekel relativno majhen tok, ampak induktivnega karakterija (tok je tekel v navitje sekundarja -II. steber). Iz tega sledi, da pri normalnem delovanju inducira primarna napetost dodaten (navidezni) tok I_a , ki pa je znatno večji od prej določenega I_2 (tok navitja II. stebra).

Primer meritve, kjer je $L_x = 84,5$ mH, je I_x še vedno relativno velik (8,5 A), medtem ko je vpliv I_{pr} relativno majhen (1,5 A). V tem primeru je tok I_{pr} za pokrivanje ohmskih izgub FRT.

Opisani sistem v bistvu zadošča osnovnim zahtevam glede možne regulacije izhodne sinusne napetosti z minimalnim nelinearnim popačenjem. Kljub temu pa ima ta sistem dve pomanjkljivosti. Izhodna napetost je v tem primeru potencialno povezana z vhodno omrežno napetostjo. Druga pomanjkljivost pa je ta, da je potrebno jalovo moč kompenzirati na primarni strani feroresonančnega transformatorja z ustrezno dušilko. Induktivnost (kompenzirana) za vse primere ni konstantna, temveč bi jo bilo potrebno prilagajati različnim delovnim pogojem.

Zaradi teh pomankljivosti je bil nadaljni študij usmerjen v njihovo odpravljanje. Težišče dela je bilo med drugim predvsem na možni avtomatski kompenzaciji reaktivnih moči v samem transformatorju. Opis te rešitve, ki podaja zelo dobre rezultate bo podan v naslednjem članku.

prof. dr. Rafael Cajhen, dipl. ing.
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo,
Tržaška 25, Ljubljana

dr. Andrej Zupanc, dipl. ing.
IMP
Titova 37, Ljubljana

doc. dr. Janko Nastran, dipl. ing.,
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo,
Tržaška 25, Ljubljana

prof. dr. Matija Seliger, dipl. ing.
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo,
Tržaška 25, Ljubljana

Prispelo: 21.02.91 Sprejeto: 28.03.91

MIKRORAČUNALNIŠKO KRMILJE STROJA ZA BRIZGANJE PLASTIČNIH MAS

Janez Pogorelc, Matjaž Cigrovski, Branko Premzel

KLJUČNE BESEDE: računalniško vodenje sistemov, mikroračunalniška krmilja, digitalna regulacija, CNC krmilja, regulacija temperature, operacijski sistem v realnem času, OS-9/68000, mikroračunalnik MC 68010, mikroračunalniški sistem ISKRA-CNC, brizganje plastičnih mas, industrija obutve

POVZETEK: V članku je opisano mikroračunalniško krmilje za obdelovalne stroje plastičnih mas, ki so namenjeni izdelavi dvobarvne plastične obutve. Najprej so obravnavane osnovne karakteristike stroja, značilne za tehnološki postopek. Nato sledi opis aparturne in programske opreme krmilnega sistema, ki omogoča realizacijo časovno zahtevnih funkcij upravljanja obdelovalnega stroja.

MICROCOMPUTER CONTROLLER FOR AN INJECTION MOULDING MACHINE

KEY WORDS: computer control systems, microcomputer controllers, digital control, CNC control, temperature control, real time operating system, OS-9/68000, microcomputer MC 68010, microcomputer system ISKRA-CNC, injection moulding machines, shoe industry

ABSTRACT: This paper describes the microcomputer controller for the injection moulding machine intended for production of two-colour footwear. In the beginning, the paper gives the basic characteristics of the machine in relation to production technology. Next comes the description of the microcomputer controller hardware and software which performs many complex real time functions.

1. UVOD

Hiter razvoj mikroelektronskih komponent je omogočil gradnjo mikroračunalniških sistemov, ki omogočajo reševanje vedno kompleksnejših nalog. Mikroračunalniki nastopajo v vlogi podsklopa neke naprave z namenom, da ji izboljšajo lastnosti ali pa ji dajo povsem nove lastnosti, ki jih sicer ne bi bilo možno doseči. V preteklosti so to vlogo opravljali predvsem 8-bitni mikroračunalniki s programsko opremo, kodirano pretežno v zbirnem jeziku. Sodobni 16 in 32-bitni mikroračunalniški sistemi (družine Motorola 680xx ali Intel 80xxx) imajo veliko večjo procesno moč, aparturna in programska oprema pa je poenotena, oz. dostopna pri množici svetovnih proizvajalcev. Poleg aparturne opreme (sistemi z vodili VME, MULTIBUS II) pa se je v zadnjih letih standardizirala tudi sistemska programska oprema za aplikacije v realnem času. Znani komercialni operacijski sistemi so VERSADOS, PDOS, OS-9/68000, VRTX in pSOS.^(1, 4, 5)

V naši ustanovi smo se za potrebe pedagoškega in raziskovalnega procesa odločili za operacijski sistem OS-9/68000, ki smo ga kot razvojno orodje instalirali na mikroračunalniški sistem Motorola VME/10. Ustreznost operacijskega sistema OS-9/68000 smo testirali na kompleksni industrijski aplikaciji mikroračunalniškega krmilnika stroja za brizganje plastičnih mas (za izdelavo dvobarvne gumijaste obutve).

Stroj za brizganje plastičnih mas je po svojih značilnostih tako industrijska naprava (obdelava logičnih vhodov in izhodov, vodenje proporcionalnih hidravličnih cilindrov), kot tudi procesna naprava (nadzoruje temperature plastične mase v štirih conah v cilindru, prikazuje stanja procesa na zaslonu monitorja, ima možnost vplivanja na izvajanje programa z vnosom ukazov prek tipkovnice, ipd.).

Priredili smo sistemsko programsko opremo mikroračunalniškega krmilnika, razvili aplikativne programe in vse skupaj integrirali na 16-bitni modularni aparturni opremi z VME vodilom.

2. UPORABA OPERACIJSKEGA SISTEMA V REALNEM ČASU

Pri uporabi operacijskega sistema OS-9/68000 kot programirnega okolja smo ugotovili nekatere dobre lastnosti kot so: mikroračunalnik z MC68010 in dovolj masovnega ter hitrega pomnilnika podpira delo 4 do 6 uporabnikov sočasno; enostavna uporabnost zaradi podobnosti z UNIX; s knjižnicami dobro podprta C-jezik in zbirni jezik; dobra orodja za preizkušnje programov v nadzor in uporabniškem načinu delovanja (simbolični "debugger"). Nekatere izmed navedenih lastnosti in tudi način dodeljevanje procesorjevega časa posameznim procesom ter hiter odziv na zunanje dogodke (prekinitve) omogočajo uporabnost OS-9/68000 tudi v aplikacijah realnega časa.

Tako smo s pomočjo omenjenega operacijskega sistema v "industrijski verziji" pristopili k realizaciji mikroračunalniškega krmilnika stroja za brizganje plastičnih mas (ARBD-12). Stroj je prototipni produkt Kombinata Belišče - Tovarna strojev, medtem ko je bil za aparaturno opremo izbran 16-bitni mikroračunalnik ISKRA-CNC.

Stroj je sestavljen iz dveh, med seboj neodvisnih hidravlično krmiljenih enot za doziranje in brizganje plastičnih mas in iz vrtljive mize (karusel), kjer je nameščenih 12 kalupov (orodij). Vsaka izmed enot (cilinder) za brizganje, oz. doziranje je razdeljena na 4 cone, kjer je potrebno regulirati temperaturo mase. V obeh cilindrih sta vstavljena polžna vijaka, katerih hitrost pomika in položaj krmilijo proporcionalne dvostopenjske črpalke. V šobi vsake enote je še grelec za krmiljenje temperature mase ob izstopu. Pogonski mehanizem stroja obsega elektromotorje za pogon obeh enot za brizganje, pogon vrtljive mize, pogon za transporterje granulata obeh enot in črpalko za centralno mazanje.

Tehnološki postopek zahteva regulacijo temperature plastike v posameznih conah cilindra v področju 50°C do 450°C z odstopkom $\pm 2^\circ\text{C}$ od želene vrednosti ter natančno meritev položaja polžnih vijakov obeh enot (odstopki $\pm 0,1$ mm). Skupno je potrebno krmiliti 14 proporcionalnih ventilov glede na čas ali na položaj, pri čemer se ob določenih pogojih nastavljajo konstantne vrednosti, v določenih pogojih pa se te vrednosti spreminjajo po krivuljah, katere podajajo tehnologi tabelarično. Razen tega lahko tehnologi na interaktiven način (s pomočjo menijev) vpisujejo razne strojne in tehnološke parametre (dostopnost je odvisna od položaja

ključa in preklopnika), oz. lahko izbirajo različne zaslonske izpise o stanju procesa.

Krmilje stroja obsega še množico binarnih logičnih signalov (galvansko ločenih), ki predstavljajo stanja stikal, raznih komand, kontaktov, dvopoložajnih merilnikov, relejev, kontaktorjev, svetlobnih indikatorjev, itd...

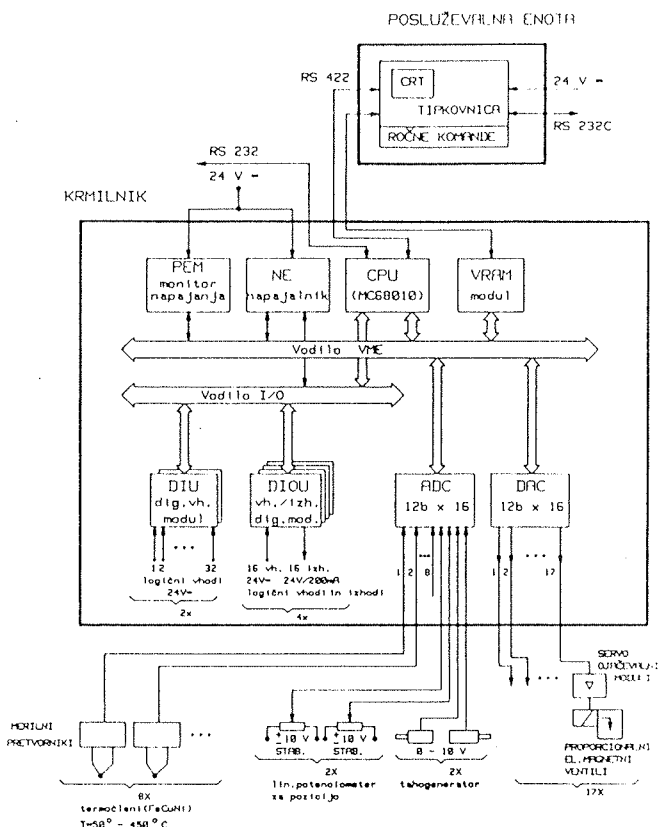
2.1. Aparaturna oprema krmilnega sistema

Aparaturna oprema krmilnega sistema stroja za brizganje plastičnih mas obsega mikroračunalniški sistem ISKRA-CNC, ki je zgrajen na osnovi vodila VME in perifernega vodila Motorola "I/O channel". Na sliki 1 je podana blokovna shema mikroračunalnika vključno z merilnimi pretvorniki in aktuatorji.

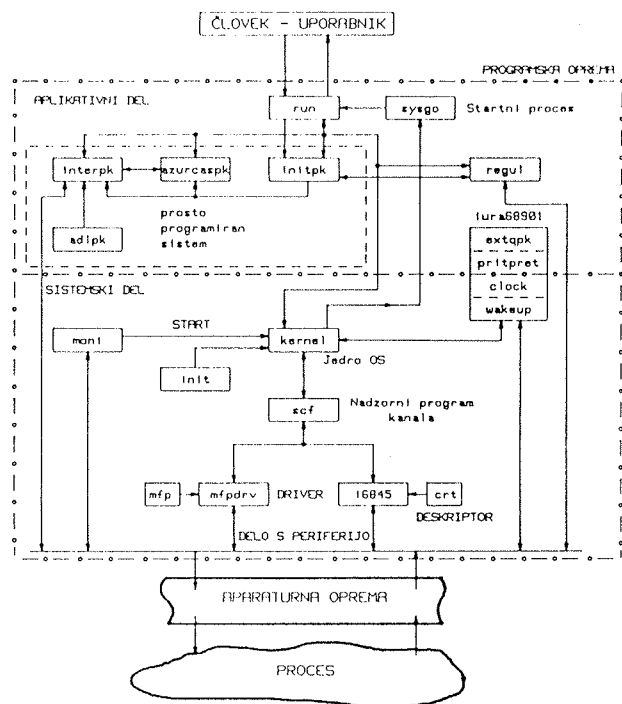
Meritev temperatur poteka s pomočjo termočlenov in merilnih pretvornikov ISKRAMERK, ki generirajo proporcionalni napetostni nivo med 0V in 10V, kar peljemo na analogne vhode (ADC). Meritev položaja polžnega vijaka poteka s pomočjo dveh preciznih linearnih potencio metrov, ki generirata proporcionalni napetostni nivo v območju -10 V do +10 V, kar peljemo na preostala analogna vhoda (ADC).

Krmiljenje proporcionalnih elektromagnetnih ventilov poteka prek analognih izhodov (DAC), ki generirajo napetostni signal za krmiljenje servo-ojačevalnih modulov.

Mikroračunalniški sistem je v celoti proizvod ISKRE Avtomatike z izjemo 12-bitnih A/D in D/A modulov, ki sta nabavljena na zahodnem tržišču od proizvajalcev Motorola in Burr-Brown.



Slika 1: Blokovna shema mikroračunalniškega krmilja



Slika 2: Nivojska zgradba programske opreme

2.2. Programska oprema krmilnega sistema

Na sliki 2 je prikazana nivojska zgradba programske opreme krmilnika stroja za brizganje plastičnih mas.

Sistemski del programske opreme predstavlja skupaj z aparaturno opremo mikroračunalnika virtualni računalnik. Število modulov v tem delu je minimalno potrebno za funkcioniranje aplikacije. Na kratko opišimo te module:

- "moni" je monitorski program, ki vzpostavi operacijski sistem;
- "kernel" je jedro operacijskega sistema, ki upravlja sredstva računalnika in razvršča procese;
- "init" je sistemski podatkovni modul s podatki za konfiguracijo operacijskega sistema;
- "scf" je nadzorni program serijskih kanalov;
- "i6845" je driverski program, ki podpira komunikacijo prek konzole sistema (video izhodni vmesnik za monitor in posebno tipkovnico, priključeno prek serijskega kanala);
- "crt" je deskriptorski modul s konfiguracijskimi podatki za inicializacijo konzole;
- "mfpdrv" je driverski program serijskega kanala RS232 s komunikacijskim vmesnikom MK 68901 - MFP;
- "mfp" je deskriptorski modul s konfiguracijskimi podatki za inicializacijo serijskega komunikacijskega kanala RS232;
- "iura 68901" - sistemski modul (driver) ure realnega časa, ki ima pridružena še aplikativna podprograma "extqpk" in "pritpret".

Aplikativni del programske opreme je sestavljen iz modulov, ki tečejo v uporabniškem načinu delovanja 68010. Prosto programirani sistem (programirani logični krmilnik) je sestavljen iz treh programskih modulov: "initpk" (inicializacija podatkovne strukture, "interpck" (interpreter logičnih ukazov), "azurcaspk" (ažuriranje časovnikov) ter iz podatkovnega modula s tabelo ukazov aplikativnega programa prosto programiranega sistema. Proces "interpck" in "azurcaspk" se izvajata periodično na vsakih 100 ms.

- "regul" je proces za digitalno regulacijo 8 temperatur. Uporabljen je algoritem dvopoložajnega regulatorja s povratno zanko, ki ima podobne odzive kot PID regulator.⁽²⁾ Kot aktuatorji za vklopjanje grelcev so uporabljeni elektronski releji (SSR).
- "run" je proces, ki omogoča interaktivno komunikacijo človek-stroj prek sistemske konzole. Med vsemi procesi ima najnižjo prioriteto, saj ima tudi majhne časovne zahteve. Uporabnik ima možnost spremljanja odvijanja procesa in možnost spreminjanja tehnoloških ali strojnih parametrov glede na položaj ključa.

Glede na tehnološke zahteve pozicionirne enote polžnega vijaka (hitrost pomika 80 mm/s, ponovljivost 0,1 mm) se mora programska naloga za krmiljenje pritiskov in

pretokov "pritpret" izvajati periodično vsakih 2,5 ms. Ker je časovni korak operacijskega sistema 10 ms, smo omenjeni podprogram priključili k driverskemu programu za uro realnega časa ("iura 68901").

Večina programov je bila zaradi časovne kritičnosti kodirana v zbirnem jeziku za mikroprocesor MC 68010 z izjemo procesa "run", ki je bil kodiran v C-jeziku. Slednji je tudi daleč najboljše in najkompleksnejši program.

Poudariti velja, da je kodiranje tehnološkega dela programa (nadzor logičnih binarnih vhodov, krmiljenje binarnih izhodov, časovnikov in števnikov) povsem ločeno od ostale programske opreme in da se v ta namen uporablja PLC programski jezik (v mnemonični obliki). Tako lahko dele programov, ki so vezani na specifično aplikacijo stroja načrtuje tehnolog, ki problematiko najboljše pozna. Vnašanje PLC programov poteka na osebni računalniku PC/AT ali pa na mikroračunalniškem razvojnem sistemu.

3. ZAKLJUČEK

Procesna moč današnjih 16 in 32-bitnih komercialnih mikroprocesorjev je tako velika, da lahko v mnogih aplikacijah realnega časa uporabimo komercialni operacijski sistem, ne da bi to bistveno vplivalo na zakasnitev odzivov na zunanje dogodke. Prednosti so predvsem v tem, da imajo ti operacijski sistemi orodja za razvoj in preizkušanje programov ter da podpirajo delo z datotekami na diskovnih enotah, tračnih enotah in podpirajo lokalne računalniške mreže.

Operacijski sistem skupaj z aparaturno opremo mikroračunalnika predstavlja virtualni računalnik. Razvijalec ima tako vrsto prednosti pri načrtovanju in testiranju programske opreme, saj mu ni potrebno posebej sestavljati programov za vzbujanje procesov v določenih časovnih presledkih in za izpise ter vpise prek standardne vhodno/izhodne enote. Pomembna prednost je tudi, da je programska oprema modularna in je zato možno vsako programsko nalogo (proces) do določene mere že preizkusiti na razvojnem sistemu.

Stroj za izdelavo dvobarvne plastične obutve, ki deluje na principu vrtljive mize z 12 kalupi in dveh enot za brizganje, je s stališča upravljivosti zelo zahtevna naprava, saj je potrebno obdelovati množico raznovrstnih informacij in hkrati skrbeti za ustrezen dialog s tehnologom. Te naloge uspešno opravlja procesni mikroračunalnik s 16-bitnim mikroprocesorjem 68010 in modularno programsko opremo, ki teče pod operacijskim sistemom OS-9/68000.

Celotna programska oprema (sistemski moduli OS-9/68000, aplikativni moduli, PLC program) je bila v končni fazi naložena v EPROM integrirana vezja in obsega približno 180 k zlogov. Tako predstavlja mikroračunalniško krmilje elektronski sestav, ki je sestavni del stroja za brizganje plastičnih mas.

Projekt izdelave prototipa mikroračunalniškega krmilja stroja za brizganje plastičnih mas je naročil kombinat Belišče - Tovarna strojev v Iskri Avtomatiki, le-ta pa je zasnovno programske opreme in realizacijo določenih programov naročila na Tehniški fakulteti, VTO ERI.

Prvi prototip stroja skupaj z opisanim krmiljem je Tovarna strojev iz Belišča predala naročniku Jugoplastiki iz Splita v letu 1987. Stroj je bil namenjen za izdelavo dvobarvne plastične obutve (gumijasti škornji). Po razpoložljivih informacijah stroj še vedno uspešno deluje, medtem pa je Iskra Avtomatika opremila še tri stroje s podobnimi krmilji in sicer za izdelavo gumijastih plavuti in škornjev.

Pri realizaciji projekta so iz Iskre Avtomatike sodelovali:

dr. Anton Čížman, dipl.ing.,
Srečo Klančar, dipl.ing.,
Tomaž Pelko, dipl.ing.,
Igor Jamšek, dipl.ing. in
Gregor Topole, dipl.ing..

4. LITERATURA

- (1) P. D. Lawrence, K. Mauch: Real - Time Microcomputer System Design, Mc Graw-Hill, 1987
- (2) J. Pogorelc, B. Premzel, K. Jezernik: Mikroprocesorski dvopoložajni regulator, MIPRO, Opatija 1987
- (3) Microware: OS-9/68000 Operating System Technical Manual, 1987
- (4) B. Premzel: Operacijski sistemi za delo v realnem času za družino MC680xx 16/32 bitnih mikroprocesorjev, Informatica 87, Nova Gorica
- (5) K. Jezernik in soavtorji: Mikroračunalniške regulacije realnega časa, poročilo o delu za URP Sistemi avtomatike in obdelava podatkov, Tehniška fakulteta VTO ERI, Maribor 1988
- (6) VME bus - Systeme in Echtzeit - Applikationen, Elektronik 1986/20, str. 34-38

mag. Janez Pogorelc, dipl.ing.
mag. Matjaž Cigrovski, dipl.ing.
mag. Branko Premzel, dipl.ing.
Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta,
VTO Elektrotehnika, računalništvo in informatika
Smetanova 17, 62000 Maribor

Prispelo: 12.02.91

Sprejeto: 27.03.91

PRIKAZI DOGODKOV, DEJAVNOSTI ČLANOV MIDEM IN DRUGIH INSTITUCIJ

DELO MEDNARODNE ELEKTROTEHNIŠKE KOMISIJE (IEC) NA PODROČJU ZANESLJIVOSTI

V okviru Mednarodne elektrotehniške komisije je za obravnavo zanesljivosti in sorodnih problemov ter za izdelavo ustreznih mednarodnih standardov zadolžen tehniški komite TC 56: Zanesljivost in vzdrževalnost, ki je doslej izdelal 13 standardov:

- IEC 271: List of basic terms, definitions and related mathematics for reliability
- IEC 300: Reliability and maintainability management
- IEC 319: Presentation of reliability data on electronic components (or parts)
- IEC 362: Guide for the collection of reliability, availability, and maintainability data from performance of electronic items
- IEC 409: Guide for the inclusion of reliability clauses into specifications for components (or parts) for electronic equipment
- IEC 410: Sampling plans and procedures for inspection by attributes
- IEC 419: Guide for inclusion of lot-by-lot and periodic inspection procedures in specification for electronic components (or parts)
- IEC 605: Equipment reliability testing:
Part 1: General requirements
Part 2: Guidance for the design of test cycles
Part 3: Preferred test conditions
Part 4: Procedures for determining point estimates and confidence limits for equipment reliability determination tests
Part 5: Compliance test plans for success ratio
Part 6: Test for the validity of a constant failure rate assumption
Part 7: Compliance test plans for failure rate and mean time between failures assuming constant failure rate
- IEC 706: Guide on maintainability of equipment:
Part 1: Introduction, requirements and maintainability programme
Part 2: Maintainability studies during the design phase
Part 3: Verification and collection
- IEC 812: Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMA)
- IEC 863: Presentation of reliability, maintainability and availability predictions

IEC 1014: Programmes for reliability growth

IEC 1025: Analysis techniques for system reliability
- Fault tree analysis (FTA)

V okviru večjezičnega Mednarodnega elektrotehniškega slovarja, ki ga pripravlja tehniški komite TC 1: Terminologija v sodelovanju s specializiranimi tehniškimi komiteji, v konkretnem primeru s TC 56 pa je bilo obdelano poglavje 191 in izšlo kot standard:

IEC 50(191) International Electrotechnical Vocabulary - Chapter 191:
Dependability and quality of service.

Obseg teh standardov presega 800 strani, v pripravi pa je vrsta novih standardov, ki bodo obravnavali predvsem naslednje:

- preskušanje zanesljivosti izdelkov,
- vzdrževanje in načrtovanje logistike vzdrževanja,
- tehnike analize zanesljivosti sistemov,
- modeli rasti zanesljivosti in metode ocenjevanja,
- diagnostično preskušanje,
- uporaba tehnik Markova,
- preskušanje z vidika razpoložljivosti,
- vodenje zanesljivosti in vzdrževalnosti programske opreme,
- metode preskušanja programske opreme,
- večanje zanesljivosti programske opreme,
- mehanizmi odpovedi programske opreme,
- človeški vidiki zanesljivosti,
- napovedovanje zanesljivosti elektronskih komponent,
- zahteve in smernice za analizo tehnoloških tveganj.

Čeprav je bila temeljna naloga tega komiteja reševanje zadevne problematike električnih in zlasti elektronskih naprav in njihovih delov, se je zlasti v zadnjih letih pokazalo, da so izdani standardi neposredno ali posredno uporabni tudi za druge izdelke, ki so sicer predmet tehniških komitejev Mednarodne organizacije za standardizacijo (ISO). Hkrati pa je postalo delo tehniških komitejev ISO/TC 176: Zagotavljanje kakovosti in ISO/TC 69: Uporaba statističnih metod pomembno tudi na elektrotehniškem področju, kjer je treba opozoriti na standarde serije ISO 9000, ki obravnavajo zagotavljanje kakovosti. Zato sta akcijski komite IEC in tehniški upravni odbor ISO lani sklenila, da se formira mešana koordinacijska skupina za kakovost, zanesljivost in statistiko

Projekt izdelave prototipa mikroračunalniškega krmilja stroja za brizganje plastičnih mas je naročil kombinat Belišče - Tovarna strojev v Iskri Avtomatiki, le-ta pa je zasnovano programske opreme in realizacijo določenih programov naročila na Tehniški fakulteti, VTO ERI.

Prvi prototip stroja skupaj z opisanim krmiljem je Tovarna strojev iz Belišča predala naročniku Jugoplastiki iz Splita v letu 1987. Stroj je bil namenjen za izdelavo dvobarvne plastične obutve (gumijasti škornji). Po razpoložljivih informacijah stroj še vedno uspešno deluje, medtem pa je Iskra Avtomatika opremila še tri stroje s podobnimi krmilji in sicer za izdelavo gumijastih plavuti in škornjev.

Pri realizaciji projekta so iz Iskre Avtomatike sodelovali:

dr. Anton Čižman, dipl.ing.,
Srečo Klančar, dipl.ing.,
Tomaž Pelko, dipl.ing.,
Igor Jamšek, dipl.ing. in
Gregor Topole, dipl.ing..

4. LITERATURA

- (1) P. D. Lawrence, K. Mauch: Real - Time Microcomputer System Design, Mc Graw-Hill, 1987
- (2) J. Pogorelc, B. Premzel, K. Jezernik: Mikroprocesorski dvopoložajni regulator, MIPRO, Opatija 1987
- (3) Microware: OS-9/68000 Operating System Technical Manual, 1987
- (4) B. Premzel: Operacijski sistemi za delo v realnem času za družino MC680xx 16/32 bitnih mikroprocesorjev, Informatica 87, Nova Gorica
- (5) K. Jezernik in soavtorji: Mikroračunalniške regulacije realnega časa, poročilo o delu za URP Sistemi avtomatike in obdelava podatkov, Tehniška fakulteta VTO ERI, Maribor 1988
- (6) VME bus - Systeme in Echtzeit - Applikationen, Elektronik 1986/20, str. 34-38

mag. Janez Pogorelc, dipl.ing.
mag. Matjaž Cigrovski, dipl.ing.
mag. Branko Premzel, dipl.ing.
Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta,
VTO Elektrotehnika, računalništvo in informatika
Smetanova 17, 62000 Maribor

Prispelo: 12.02.91

Sprejeto: 27.03.91

PRIKAZI DOGODKOV, DEJAVNOSTI ČLANOV MIDEM IN DRUGIH INSTITUCIJ

DELO MEDNARODNE ELEKTROTEHNIŠKE KOMISIJE (IEC) NA PODROČJU ZANESLJIVOSTI

V okviru Mednarodne elektrotehniške komisije je za obravnavo zanesljivosti in sorodnih problemov ter za izdelavo ustreznih mednarodnih standardov zadolžen tehniški komite TC 56: Zanesljivost in vzdrževalnost, ki je doslej izdelal 13 standardov:

- IEC 271: List of basic terms, definitions and related mathematics for reliability
- IEC 300: Reliability and maintainability management
- IEC 319: Presentation of reliability data on electronic components (or parts)
- IEC 362: Guide for the collection of reliability, availability, and maintainability data from performance of electronic items
- IEC 409: Guide for the inclusion of reliability clauses into specifications for components (or parts) for electronic equipment
- IEC 410: Sampling plans and procedures for inspection by attributes
- IEC 419: Guide for inclusion of lot-by-lot and periodic inspection procedures in specification for electronic components (or parts)
- IEC 605: Equipment reliability testing:
Part 1: General requirements
Part 2: Guidance for the design of test cycles
Part 3: Preferred test conditions
Part 4: Procedures for determining point estimates and confidence limits for equipment reliability determination tests
Part 5: Compliance test plans for success ratio
Part 6: Test for the validity of a constant failure rate assumption
Part 7: Compliance test plans for failure rate and mean time between failures assuming constant failure rate
- IEC 706: Guide on maintainability of equipment:
Part 1: Introduction, requirements and maintainability programme
Part 2: Maintainability studies during the design phase
Part 3: Verification and collection
- IEC 812: Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMA)
- IEC 863: Presentation of reliability, maintainability and availability predictions

IEC 1014: Programmes for reliability growth

IEC 1025: Analysis techniques for system reliability - Fault tree analysis (FTA)

V okviru večjezičnega Mednarodnega elektrotehniškega slovarja, ki ga pripravlja tehniški komite TC 1: Terminologija v sodelovanju s specializiranimi tehniškimi komiteji, v konkretnem primeru s TC 56 pa je bilo obdelano poglavje 191 in izšlo kot standard:

IEC 50(191) International Electrotechnical Vocabulary - Chapter 191: Dependability and quality of service.

Obseg teh standardov presega 800 strani, v pripravi pa je vrsta novih standardov, ki bodo obravnavali predvsem naslednje:

- preskušanje zanesljivosti izdelkov,
- vzdrževanje in načrtovanje logistike vzdrževanja,
- tehnike analize zanesljivosti sistemov,
- modeli rasti zanesljivosti in metode ocenjevanja,
- diagnostično preskušanje,
- uporaba tehnik Markova,
- preskušanje z vidika razpoložljivosti,
- vodenje zanesljivosti in vzdrževalnosti programske opreme,
- metode preskušanja programske opreme,
- večanje zanesljivosti programske opreme,
- mehanizmi odpovedi programske opreme,
- človeški vidiki zanesljivosti,
- napovedovanje zanesljivosti elektronskih komponent,
- zahteve in smernice za analizo tehnoloških tveganj.

Čeprav je bila temeljna naloga tega komiteja reševanje zadevne problematike električnih in zlasti elektronskih naprav in njihovih delov, se je zlasti v zadnjih letih pokazalo, da so izdani standardi neposredno ali posredno uporabni tudi za druge izdelke, ki so sicer predmet tehniških komitejev Mednarodne organizacije za standardizacijo (ISO). Hkrati pa je postalo delo tehniških komitejev ISO/TC 176: Zagotavljanje kakovosti in ISO/TC 69: Uporaba statističnih metod pomembno tudi na elektrotehniškem področju, kjer je treba opozoriti na standarde serije ISO 9000, ki obravnavajo zagotavljanje kakovosti. Zato sta akcijski komite IEC in tehniški upravni odbor ISO lani sklenila, da se formira mešana koordinacijska skupina za kakovost, zanesljivost in statistiko

(QDS), ki jo sestavljajo predsedniki in sekretarji vseh treh komitejev. Ta je dobila naslednje naloge:

- določiti predmete, ki so bistveni za standardizacijo s področja kakovosti in zanesljivosti,
- pregledati programe dela IEC/TC 56, ISO/TC 176 in ISO/TC 69 in tako ugotoviti morebitna prekrivanja v programu, oz. morebitne spregledane naloge,
- po potrebi predlagati spremembe delovnih programov omenjenih komitejev.

Naposled je treba še omeniti, da so v angleščini uvedli izraz dependability kot skupni izraz za reliability, maintainability in maintenance support, kar bomo morali upoštevati tudi pri naši terminologiji s tega področja.

*prof. France Mlakar, dipl. ing.
podpredsednik IEC
Streliška 5
61000 Ljubljana*

CHARACTERIZATION OF SURFACES AND THIN FILMS BY STATE OF THE ART PLASMOS ELLIPSOMETERS

GENERAL

Ellipsometry is an optical characterization technique that is used to analyze and measure elliptically polarized light. By analyzing the light, reflected from different optical media, surface optical constants, thin film optical constants, thickness and composition can be determined.

An ellipsometer consists of a set of optical polarizing devices through which the light propagates. A typical set of an ellipsometer arrangement is shown in figure 1. A collimated monochromatic light passes through a rotatable polarizer (P) and compensator (C) onto the surface (S) of the sample. The modified state of the polarization, after the interaction with the sample, is analyzed by a rotatable analyzer (A) which then is detected with the light detector (D). From the angular settings of polarizer, analyzer and the compensator, it is possible to calculate the values of the optical system which are represented by the ellipsometric angles Ψ and Δ of the optical reflectance. Figure 2. shows the angles Ψ and Δ in cartesian coordinates of an air-film silicon wafer system at an incidence angle of 70 degrees for a wavelength of 632.8 nm. The parameter is the film refractive index. Application of Snell's law and Fresnel's equations relates Ψ and Δ to thickness and refractive index of both the film and substrate.

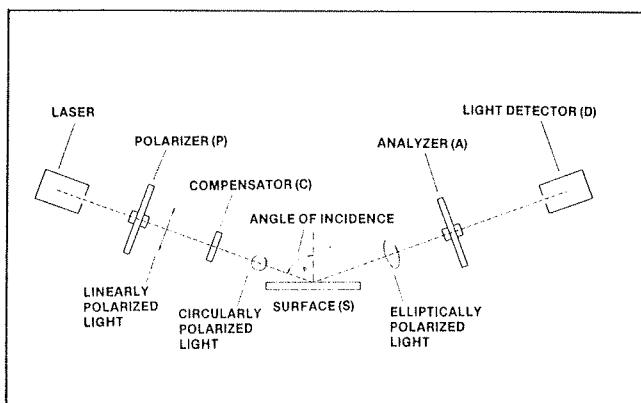


Figure 1: Typical ellipsometer arrangement

APPLICATIONS OF ELLIPSOMETRY

Ellipsometry is quite versatile and has the following applications in R&D or industry:

1. Solid state device technology:

- ☐ gate and field oxides
- ☐ interlayer dielectrics
- ☐ dielectric or semi-insulating layers for passivation

2. Solar energy technology:

- ☐ absorbing layers like amorphous silicon or PbS
- ☐ interference layers

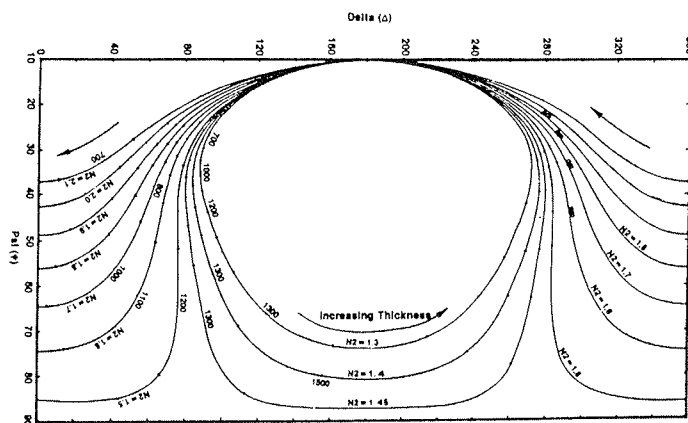


Figure 2: Ψ and Δ of an air-film silicon wafer system at 70 deg. incidence angle and 632.8 nm wavelength

3. Optics:

- ☐ antireflection coatings
- ☐ absorbing layers

4. CD technology:

- ☐ thin film integrity verification

5. Tribology:

- ☐ hard coatings
- ☐ implanted or nitrided layers

6. Electrochemistry:

- ☐ absorption or anodic oxidation

Within the above mentioned areas of interest, it is possible to determine optical constants of thick materials, liquids, or gases, as well as refractive indices and thicknesses of thin films on substrates or self-supporting foils.

Single layers, multiple layers, transparent, and absorbing films also can be evaluated, as long as the differences in refractive indices are sufficient and films have thicknesses within penetration depth of the light source.

Surface roughness too can be characterized by changes of apparent refractive index. By evaluating the absorption coefficient of implanted material, implantation doses can be measured, as well.

Advantages of ellipsometry comparing to other competitive measurement techniques are as follows:

- high accuracy of thickness (± 0.1 nm, monolayers)
- high accuracy of refractive index (± 0.001)
- very fast (1 sec/meas. with PLASMOS)
- nondestructive (no special sample preparation)
- coupled with state of the art computer technology, allows modern data management and display of results

INSTRUMENTATION CONCEPTS

Ellipsometry can be used in the laboratory environment for research and development purposes, but it is finding increased application in process control for production of thin films in wafer fabrication. For these significantly varied applications, a range of ellipsometers has been developed. For R&D work, manual ellipsometers (where the instrument must be manually operated) are widely used, and semiautomatic or fully automatic instruments are used for wafer fab production applications. These ellipsometers are usually based on motorized mechanics with measurement times between 1 and 60 seconds. Fully automatic instruments are usually equipped with xy stages, so that it is possible to produce area scans across the substrates (semiautomatic systems operate automatically, but typically have a manual sample stage).

In many film deposition or etching processes, in-situ monitoring of the grown or etched film is desirable. Due to advantages in accuracy and ease of adaptability, in-situ ellipsometers are increasingly used for either endpoint detection or in-situ thickness monitoring.

PRINCIPLES OF ELLIPSOMETRIC CONFIGURATION

Most ellipsometer configurations consist of light source, polarizer, compensator, surface, analyzer and detector (PCSA arrangement). However arrangements without the compensator or PSA arrangements are common.

Early systems use the principle of nulling (extinction by adjusting polarizer and analyzer or compensator). Manual and automatic systems are available.

More advanced systems usually use the photometric set up which can be static or dynamic. The RAE arrangement (Rotating Analyzer Ellipsometer) has found the widest applications for the latter principle. With RAE, the dynamic intensity of the detector signal is recorded as a function of the analyzer angle. This curve is then usually Fourier transformed, and PSI and DELTA can be calculated via a complex iteration process.

A performance comparison between the most common set ups (nulling ellipsometry and RAE ellipsometers) is shown in table 1.

Table 1: Comparison of Nulling and RAE Ellipsometers

Rotating Analyzer (RAE)	Nulling Set Up
very short analysis time (<1 s)	measurement time 20-40 s
complicated mathematics and software necessary	only simple software needed
only one rotating element	two rotating elements
complicated electronics (linearity)	simple electronics
alignment critical	alignment easier

LIGHT SOURCES

Before the laser age, mercury spectral sources were widely used in ellipsometry. With the availability of HeNe lasers with high power densities at wavelengths at 632.8 nm, many disadvantages of the Hg source disappeared, e.g. lifetime, dark environment, and collimation of light. Most industrial ellipsometers now use these HeNe lasers, but because of the increased availability of laser diodes at wavelengths between 790 nm and 1.5 μ m, laser diodes are replacing the gas lasers. Also, increased wavelengths offer distinct advantages concerning penetrating depth of many materials and magnitude of periodic thicknesses.

The accuracy of thickness determination of very thin films can be enhanced by using increased wavelengths as can be seen in table 2.

Table 2: Wavelength Versus Resolution for Ellipsometry

n	λ	633 nm	1000 nm
1.5		270.6 nm	427.7 nm
2.0		179.2 nm	283.2 nm
2.5		136.6 nm	215.8 nm

The comparatively small change in wavelength of 633 nm to 790 nm increases the thickness period from 271 nm to 388 nm at a refractive index of 1.5.

Despite this fact, increased thickness period can also be obtained at increased incidence angles (70 - 85 degrees).

For spectroscopic applications, halogen or xenon light sources are frequently used depending on desired wavelength regions.

MEASUREMENT SPOT SIZES

Mercury sources and spectroscopic sources need collimation optics, therefore the beam diameter can be altered to a certain extent. Lasers produce well collimated beams with diameters usually around 1 mm (HeNe) or between 2 and 4 mm (laser diodes). Due to these collimated and high power density beams, it is possible either to use pinhole diaphragms for beam diameter variations or microspot optics. Thus, with beam expanders and well corrected optics, spot sizes as small as 10 μm have been achieved. This allows measurements of film properties within integrated circuits.

ALIGNMENT OF ELLIPSOMETERS

In principle, alignment of ellipsometer system is easy and straightforward but for accurate results, especially for films near the period (depending on the refractive index), alignment is critical.

For these cases, precise alignment is essential in the case for incidence angle, azimuth of polarizers and compensator. To align the sample to be measured correctly to the ellipsometric plane of incidence, an autocollimating telescope is usually needed. Imperfections of optical elements must also be accounted for in critical applications. Thickness and refractive index calibrations can be accomplished by using calibration standards with known parameters.

ERRORS IN ELLIPSOMETRY

Although an ellipsometer arrangement can be nearly perfectly aligned with respect to incidence angle, polarizer azimuth and retarder alignment, in practice, certain errors occur in measurements. Among other error sources, the most important error sources are birefringence and depolarization of polarizers, multiple internal reflections in optical components, or window imperfections. By choosing high quality optical components, most of these errors can be reduced to negligible magnitudes.

USEFUL ELLIPSOMETRIC DATA

The primary measurement results PSI and DELTA, and hence, the derived results - refractive index and film thickness depend on different quantities like the angle of incidence, wavelength etc. and are influenced by certain film properties like surface roughness etc.

Influence of the angle of incidence

For transparent media PSI and DELTA show the known curves if plotted versus the angle of incidence.

In figure 3. it is shown that at Brewster angle PSI and DELTA become zero, so, the emerging light is absolutely

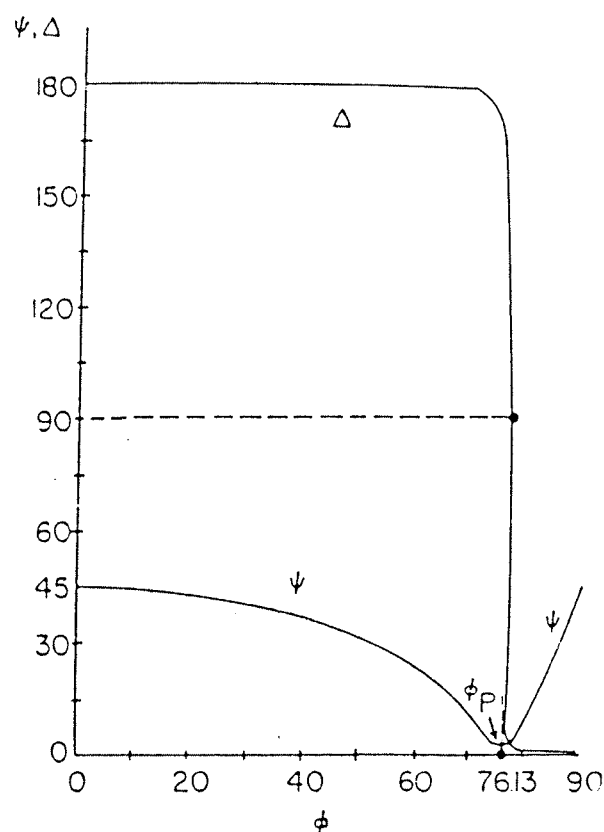


Figure 3: The ellipsometric angles PSI and DELTA as functions of the angle of incidence (degrees) for reflection at an air/glass interface, $\lambda = 546.1$ nm, $n = 1.5$

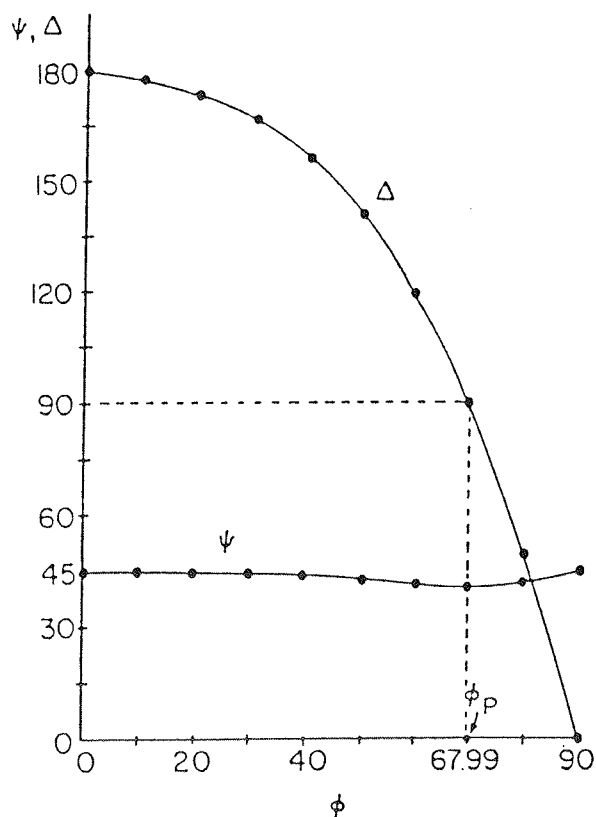


Figure 4: The ellipsometric angles PSI and DELTA as functions of the angle of incidence (degrees) for reflection at an air/gold interface, $\lambda = 546.1 \text{ nm}$, $n = 4.05 - i0.028$

linearly polarized and no evaluation is possible at this point.

With increasing absorption of the substrate material, the edges of the curves become more and more smooth as it is seen in figure 4. where PSI and DELTA are displayed for air - gold interface.

Influence of surface roughness

As shown in figure 5., the refractive index decreases with increasing surface roughness. So, one of the most important premises for accurate ellipsometric measurements is the perfect flatness of the samples.

Sensitivities of reflection coefficient, PSI and DELTA

According to the theory, the reflection sensitivity factors for the ellipsometric quantities R (reflection coefficient), PSI and DELTA can be defined. If these sensitivity factors are plotted against the angle of incidence, it becomes evident that for all quantities, the sensitivities show a maximum at the Brewster angle. So, as a rough

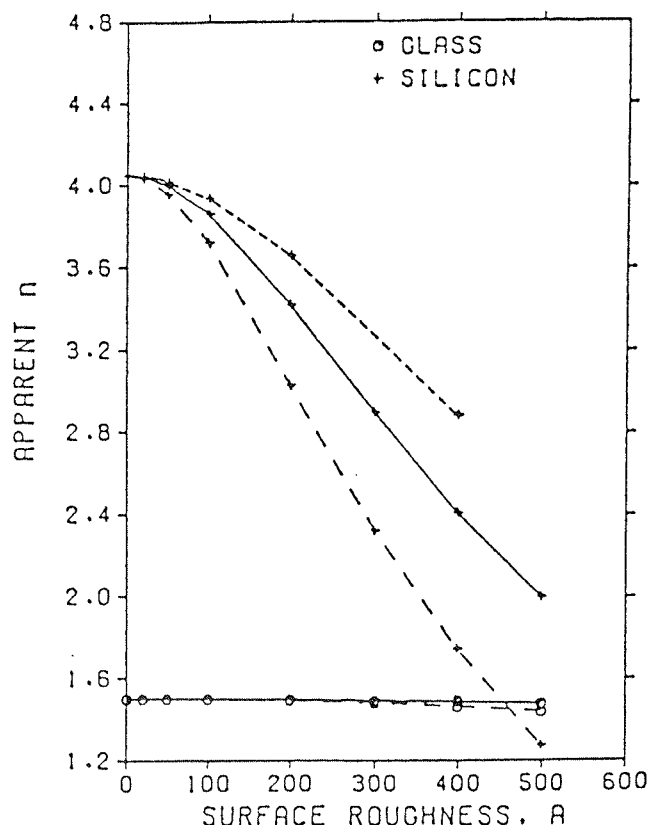


Figure 5: Real part of the apparent complex refractive index ($n - ik$) of a perfectly smooth substrate that is equivalent to rough glass and silicon surfaces. The surface roughness, which ranges from 0 - 50 nm is assumed to have three topologies: (1) triangular ridge (-----), (2) square ridge (-.-.-.-), and (3) pyramid (-.-.-) models.

rule, the angle of incidence should always be set close to the Brewster angle.

Tables of optical constants

Selection of tables with the optical constants of different materials for different wavelengths is given.

Especially the absorption factor k is of great interest because it determines the maximum thickness that can be measured of a film of that particular material.

The higher the k, the smaller the maximum thickness to be measured.

Using a longer wavelength reduces the absorption of many materials as can be seen in the tables.

The wavelength of 632.8 nm is produced by a HeNe laser, all other wavelengths are produced by laser diodes.

Table 3: Optical Constants

	632.8 nm		790 nm		850 nm		1300 nm	
MATERIAL	n	k	n	k	n	k	n	k
OPTICAL CONSTANTS OF DIELECTRICS								
SiO ₂	1.457	0.000						
Si ₃ N ₄	2.000	0.000						
Pos.resist	1.640	0.000						
Al ₂ O ₃	1.750	0.000						
C	2.400	0.000	2.400	0.000			7.000	0.000
SiO	1.900	0.005	1.900	0.001			1.870	
TiO ₂	2.600		2.800				2.500	
LiF	1.390	0.000	1.390	0.000			1.380	0.000
NaCl	1.540		1.530	0.000			1.530	
OPTICAL CONSTANTS OF METALS								
Ni(bulk)	2.00	3.700					3.10	6.00
to	2.10	4.00						
Niob(bulk)	2.50	2.50						
Al	1.39	1.5					1.25	13.0
to	1.51	7.00						
Au	0.17	3.10					0.42	8.50
	(0.37)	(2.80)						
Fe	3.05	3.10						
W	3.65	2.90					3.15	4.40
Ti	1.66	3.4						
OPTICAL CONSTANTS OF SEMICONDUCTORS								
c-si	3.85	0.020	3.70	0.007			3.50	0.000
to	3.88	0.018						
a-Si	3.00	0.040	3.90	0.170			3.50	0.020
to	6.00	0.500						
Ge	5.00	1.800	4.70	0.300			4.30	0.074
to	5.50	0.700						
Poly Si	4.05	0.050						
GaAs	3.85	0.200	3.68	0.087			3.41	0.00
InP	3.53	0.300	3.46	0.200			3.20	
CdTe	2.90	0.200		0.160			2.77	
OPTICAL CONSTANTS OF LIQUIDS								
Water	1.33	0.00						
Cedar oil	1.52	0.00						

Periods of thickness

The periodicity of PSI and DELTA is the reason for the fact that each pair of values stands for an infinite number of thickness values that are determined by adding a constant "thickness periods" to the initially calculated thicknesses. These "thickness periods" depend as well on the wavelengths, the refractive index of the film, as on the angle of incidence.

Table 4.: the thickness periods for a fixed wavelength of $\lambda = 632.8$ nm at different refractive indices vs. the angle of incidence. The periods increase with increasing angle of incidence and with decreasing refractive index.

n	50 deg.	60 deg.	70 deg.
nm			
1.3	3012	3263	3522
1.4	2700	2876	3049
1.5	2453	2583	2706
1.6	2252	2352	2443
1.7	2084	2163	2233
1.8	1942	2005	2061
1.9	1819	1871	1915
2.0	1712	1755	1792
2.1	1618	1654	1685
2.2	1534	1565	1591
2.5	1329	1349	1366
3.0	1090	1102	1111
3.5	926	933	938
4.0	806	810	814
4.5	714	717	719
5.0	640	643	644
5.5	581	583	584
6.0	532	533	534

Tables of maximum thicknesses

The maximum thickness to be measured with thin films depends on different parameters and can therefore only be quoted very roughly. The values in the tables shown below are calculated with the absorption formula:

$$I = I_0 \cdot \exp(4n \cdot 2d / (2 \cdot \cos \theta))$$

where d is the film thickness and the length l of the way the light passes through the film has been replaced by

$$2d = l \cdot \cos \theta$$

or determined empirically for $0.01 > k > 0$ and may, therefore, differ considerably from those measured in other places.

PLASMOS SD ELLIPSOMETER SERIES

As can be seen from figure 6., the SD type layer thickness measurement systems consist of the following main components:

- system frame with adjustable feet (mandatory only for SD 2000, optional for all other systems)
- optical measurement unit (ellipsometer optics)
- sample stage
- slide in control unit for optical measurement unit and sample table (only SD 2000)
- flowbox

The system frame is manufactured from clean room compatible square stainless steel girders with inlaid perforated stainless steel sheet metal.

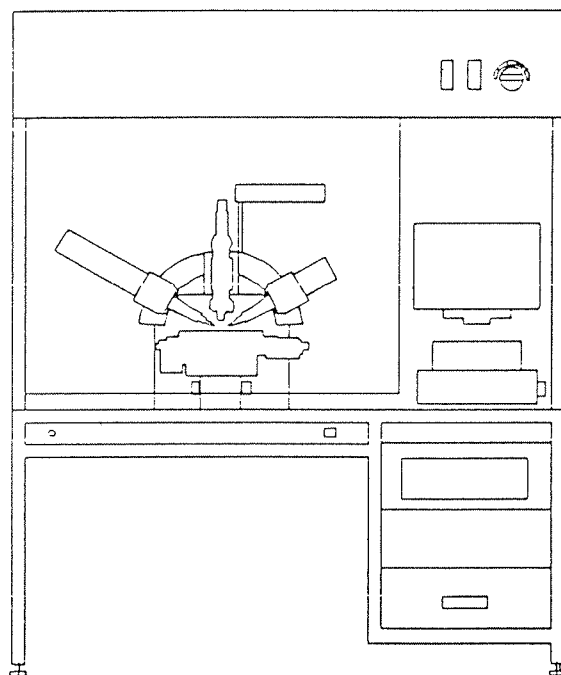


Figure 6: The assembly of the SD2000 ellipsometer

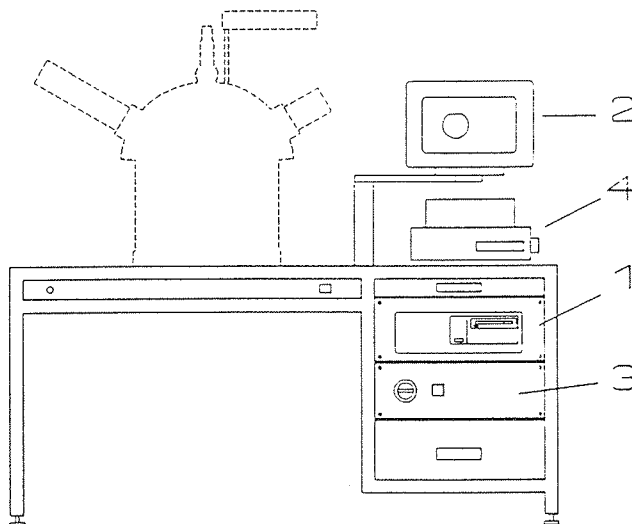


Figure 7: SD stainless steel frame and its elements

Table 5.: Maximum Thickness

	632.8 nm		790 nm		850 nm		1300 nm	
MATERIAL	k	dmax	k	dmax			k	dmax
DIELECTRICS (in um)								
SiO ₂	0.001	6					0.001	30
Si ₃ N ₄	0.000	30					0.001	30
SiO	0.005	1	0.001	8				
METALS (in nm)								
Ni(bulk)	3.70						6.00	27
to	4.00	20						
Al	1.50	53					13.00	12
to	7.00	11						
Au	3.10	25					8.50	19
	(2.80)	28						
W	2.90	27					4.4	37
SEMICONDUCTORS (in nm)								
c-Si	0.02	3950	0.007	14000			0.000	30000
to	0.018	4400						
Ge	1.80	44	0.300	330			7.40	2200
to	0.70	110						
PolySi	0.05	1600						
GaAs	0.2	400	0.087	1130			0.00	30000
InP	0.30	260	0.200	490				
CdTe	0.20	400	3.100	32				

This frame contains:

- the control computer - (1)
- the monitor - (2)
- the slide in control unit for the x-y sample stage, (3), including power supply and function switches
- the printer - (4)

The basic element of the optical unit is an ellipsometer system. It consists of the following main components:

- basic frame with integrated power supply and electronics
- light source unit with integrated laser(s), polarizer, lambda/4 compensator and microspot optical piece
- analyzer unit with image optics, rotating analyzer and photodetector
- autocollimator/microscope
- LCD display of reflected laser light intensity
- microspot optics

The mechanical suspension of light source and receiver makes it possible to tilt the incident and reflected angle continuously between 35 deg. and 73 deg. (90 deg. for calibration) to the sample normal.

THE SD SOFTWARE

The SD ellipsometer software is a user friendly, menu driven package for use with the SD2xxx series of ellipsometers. The standard software comprises of a single point/single layer measurement and display module.

The following physical parameters may be entered:

- | | |
|--------------------------|--------------|
| Measurement mode | – PSI, DELTA |
| | – substrate |
| | – Nfix |
| | – Nfloat |
| Incidence angle of laser | |
| Laser to be used | – 632.8 nm |
| | – 790.0 nm |
| | – 1300 nm |

- Refractive index of medium (n)
- Refractive index of substrate (n + k)
- Refractive index of film (n + k)
- Thickness of film

The single point measurement module allows entry of the following parameters:

- ☐ wafer name
- ☐ number of repeat measurements on same point
- max 99
- ☐ value distribution - bar graph

The following modules can be added to the system:

- multilayer
 - ☐ the number of layers that can be measured is increased from 1 to maximum of 5 layers. Parameters for all underlying layers must be known and entered to determine the top layer results.
- five/nine point measurement
 - ☐ a variety of measurements can be undertaken with this measurement module. The measurement field can have the following forms: five +, five x, nine +, nine x, nine 0, twenty five. The center point of the field can be entered as well as the size of the field. The points can then be measured and displayed in the block form, similar to the field type.
- multiple point measurement
 - ☐ this module allows a pattern of measurement points to be freely defined, up to a maximum of 100 points. The points may be positioned anywhere on the wafer. The pattern can then be moved around, enlarged or reduced. Each defined point is measured with a resulting list and statistics over all points.
- multiple angle measurement with thickness optimization
 - ☐ in a situation where the absolute thickness of a film is not known, the multiple angle measurement module may be used. By making three measurements at various angles of incidence, the absolute thickness can be determined. The first measurement may be either in Nfix or Nfloat mode while second and third measurements are in Nfix mode. The refractive index calculated from the first measurement will be used for the following two measurements. From these measurements a table is created, from which the absolute thickness is determined.
- multiple wavelength measurement with thickness optimization
 - ☐ in a situation where the absolute thickness of the film is not known, the multiple wavelength measurement module may be used. By making measurements with different wavelengths at the same angle of incidence, the absolute thickness can be determined
- profile measurement
 - ☐ this module allows for a profile view of a wafer. A maximum of 400 points can be measured in a straight line. The results are displayed as a line graph. Measured points can be deleted, for points that may distort the graph. Statistics of all measured points can also be displayed.
- raster scan measurement - topography
 - ☐ a scan can be performed of a wafer up to a maximum of 55 x 55 points. The result is displayed as a colour topography of 15 different colours. As with the profile measurement, points can be deleted. Statistics can also be displayed of all measured points.
- raster scan measurement - 3D
 - ☐ this module is identical to the RASTER SCAN MEASUREMENT - TOPOGRAPHY module except that the result is displayed as 3D graphic.
- raster scan measurement - isometric
 - ☐ this module is identical to the RASTER SCAN MEASUREMENT - TOPOGRAPHY module except that the result is displayed as a color isometric graphic of 15 different colours (e.g. all points of equal value).
- data management
 - ☐ all measurements may be saved using the data management module. The measurement is saved as an ASCII file for later viewing, or further calculations with other external programs.
- recalculate
 - ☐ recalculate is a valuable tool for use in research and development, as well as in production. All measurements can be recalculated using the PSI and DELTA values with new physical parameters. The following parameters may be changed: measurement mode, number of layers, angle of incidence, wavelength, medium, substrate n and k, film n, k and t. This allows for fast display of results, without having to repeat the entire measurement. It becomes very useful, especially with raster scan, or if the sample is no longer available and it has been saved, using data management.
- program management
 - ☐ program management is a very useful tool to increase the productivity of the SD software. It allows all physical parameters and measurement details to be predefined and stored as a program file on the hard disk. When making a measurement, this program can be run, automatically setting the physical parameters and measurement details. This is very useful if you are using different wafer sizes, or different substrates and films, since you do not need to change all the parameters all the time. Additionally, if there are parameters that vary for a program, such as the thickness, this can be defined and you will be requested to enter these values before the measurement is started (a default value can be given). The measurement can be automatically saved to disk if required as well as printed.
- production mode
 - ☐ in a production environment, operators will be required to measure wafers. It is not advisable to allow them access to the whole software, since this could lead them to changing parameters, and

problems can result. For this reason, operators only have access to a list of measurement programs which have been defined by the engineer. Access to the rest of the software is via a password which can be changed by the engineer. The operator can enter any requested parameters and the computer does the rest. The wafer is measured, the measurement saved and printed, and the results displayed.

- SECS interface
 - ☐ all SD2xxx series ellipsometers can be connected to a host computer, which can be used to initiate all operations. The SECS I and II standard is used for communicating over an RS232 interface.
- simulation
 - ☐ at times it is required to be able to vary parameters, to see how this effect will influence the results. The simulation module will allow for entry of parameters and PSI-DELTA curves will result. PSI-DELTA values may be entered and the thickness calculated and vice versa.
- measurement addition/subtraction
 - ☐ when making a scan measurement, n, k and t can vary. When making a multilayer scan, it will be possible to include the values from a previous measurement for the underlying values n, k and t, in the new calculations of the upper film.
- printer drivers
 - ☐ printer drivers are available for the HP Paintjet Color printer, NEC P6+ printer and F+O Thermo-printer.

MULTIPLE WAVELENGTH ELLIPSOMETRY

The reasons to use multiple wavelength ellipsometry are the following:

- determination of absolute thickness because of increasing period
- IR measurement of films that are absorbing in the visible range
- spectroscopic ellipsometry

The three wavelength ellipsometer setup is shown in the figure 8.

Typical wavelengths used are:

- ☐ 546 nm: earlier Hg bulb systems
- ☐ 632.8 nm: standard
- ☐ 790 nm: little absorption for most semiconductors
- ☐ 1300 nm: no absorption for most semiconductors

IN SITU ELLIPSOMETRY

For real time measuring of refractive index and thickness of growing layers, for optimization of deposition process or for investigation of the gradient of refractive index within the layer, SD 2200 in situ ellipsometer can be used.

This instrument includes, figure 9.:

- high precision optical ellipsometer heads of the PLASMOS SD series automatic ellipsometers,
- an AT compatible PC for system control and evaluation,
- control unit including LCD display of polarizer and analyzer angles, PSI and DELTA, the actual quadrant and reflected intensity
- complete software operated via menus and dialogue screens using the window technique,
- autocollimation system for reading of angle of incidence as an option,
- x-y feed unit for aligning the detector head,
- flanges for mounting the heads to any process chamber,
- operation manual and calibration standards

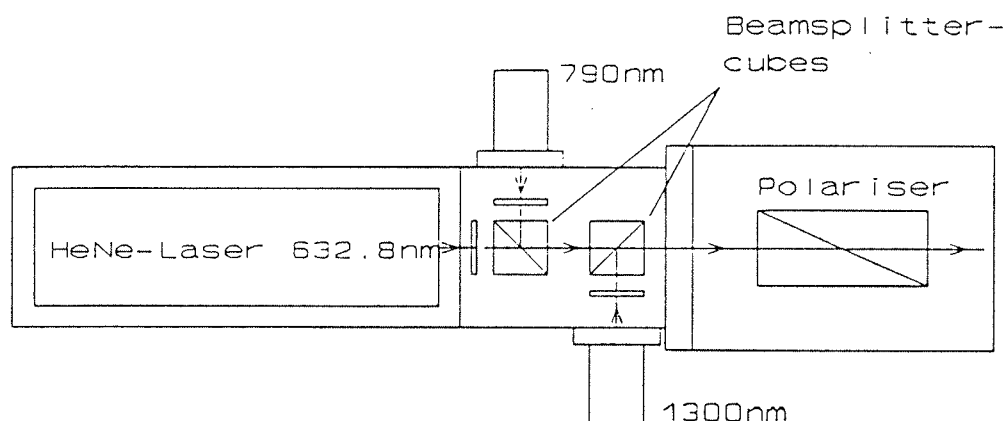


Figure 8: The three wavelength ellipsometer setup

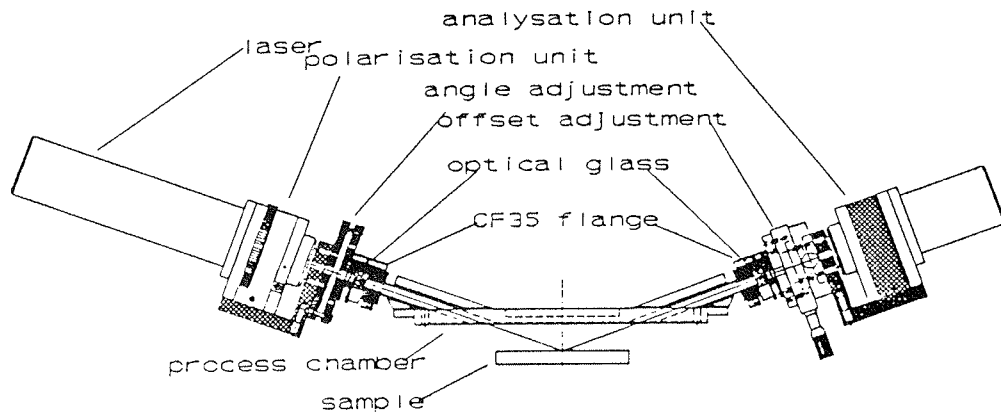


Figure 9: The assembly of the SD 2200

SD 2300 AUTOMATIC ELLIPSOMETER WITH XY STAGE

Main Features:

Fast - measurement time below 1 second per point

Easy Operation - automatic measurement controlled by IBM compatible PC, software fully menu driven

Large Samples - precise xy table 150/200 mm max travel, 200 mm diameter maximum wafer capability

Flexible Setup - continuously adjustable angle of incidence, clean room compatible

Laser Source - 632.8 nm wavelength, spotsize 0.5 mm standard or microspot with 10 μ m

Multiple Wavelengths - 632.8 nm, 790 nm and 1.3 μ m available

SPECIFICATIONS:

- measurement time below 1 second per point
- continuously adjustable angle of incidence from 35 deg. to 73/90 deg., accuracy vernier 0.025 deg.
- LCD digital readout of angles P and A
- LCD bar graph of intensity with automatic gain
- film thickness range 1 - 6000 nm
- accuracy 0.3 nm (80 nm of SiO₂ on Si)
- xy tiltable stage with 150 mm travel (200 mm optional)
- max. sample size 150 mm (200 mm optional)
- sample thickness range 0 - 30 mm (height adjustment)
- HeNe laser with 0.8 mW at 632.8 nm (790 nm and 1.3 μ m optional)
- spot size 0.5 mm or microspot size 10 μ m (optional)

- precise autocollimator with crosshairs for wafer adjustment,
- microscop retrofit (optional)
- software for IBM compatible PC (fixed/floating retractive index, single and multiple layers, absorbing layers, substrate)
- thermal and matrix printer listings (optional)
- manual and calibration standards included
- dimensions: 55 x 90 x 65 cm (d x w x h)
- weight: 60 kg
- warranty: 1 year

SD 2000 AUTOMATIC ELLIPSOMETER WITH SCANNING XY STAGE

Main Features:

Fast - measurement time below 1 second per point

Easy Operation - automatic measurement controlled by IBM compatible PC, software fully menu driven

Large Samples - precise motorized xy table 150/200 mm max travel, 200 mm diameter maximum wafer capability

Analysis Modes - rasterscanning mode, single, multiple point or profile mode, continuously adjustable angle of incidence

Laser Source - 632.8 nm wavelength, spotsize 0.5 mm standard or microspot with 10 μ m

Multiple Wavelengths - 632.8 nm, 790 nm and 1.3 μ m available

Graphics Display - high resolution computer color graphics display

Documentation - HP paintjet color printer or color matrix printer

SPECIFICATIONS:

- measurement time below 1 second per point
- continuously adjustable angle of incidence from 35 deg. to 73/90 deg., accuracy vernier 0.025 deg.
- LCD digital readout of angles P and A
- LCD bar graph of intensity with automatic gain
- film thickness range 1 - 6000 nm
- accuracy 0.3 nm (80 nm of SiO₂ on Si)
- xy tiltable stage with 150 mm travel (200 mm optional)
- max. sample size 150 mm (200 mm optional)
- sample thickness range 0 - 30 mm (height adjustment)
- HeNe laser with 0.8 mW at 632.8 nm (790 nm and 1.3 μ m optional)

- spotsize 0.5 mm or microspot size 10 μ m (optional)
- precise autocollimator with crosshairs for wafer adjustment, microscop retrofit (optional)
- software for IBM compatible PC (fixed/floating refractive index, single and multiple layers, absorbing layers, substrate)
- graphics: topography, isometric contour lines, 3D graphics, 2D profiles, documentation printed using color matrix printer or paintjet printer, thermal printer
- manual and calibration standards included
- dimensions: 55 x 90 x 65 cm (d x w x h)
- weight: 75 kg
- warranty: 1 year

PLASMOS line of ellipsometers is distributed in Europe by John P. Kummer AG, Zug, Switzerland. In Yugoslavia, contact MIKROIKS d.o.o., Titova 35, Ljubljana, Mr. Iztok Šorli, tel. (0)61- 312-898 fax. (0)61 - 302-658

SEZNAM RECENZENTOV ZNANSTVENO STROKOVNIH ČLANKOV OBJAVLJENIH V Informacijah MIDEM

Na željo nekaterih bralcev Informacij MIDEM objavljamo seznam recenzentov znanstveno strokovnih člankov v časopisu.

1. Mag. Babič Rudi, dipl.ing., Tehniška fakulteta, Maribor
2. Bele Zlatko, dipl.ing., Mikroiks d.o.o., Ljubljana
3. Prof. Dr. Biljanović Petar, dipl.ing., Elektrotehniški fakultet, Zagreb
4. Prof. Dr. Furlan Jože, dipl.ing., Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana
5. Mr. Gojo Miroslav, dipl.ing., Grafički fakultet, Zagreb
6. Prof. Dr. Hribernik Božo, dipl.ing., Tehniška fakulteta, Maribor
7. Dr. Hrovat Marko, dipl.ing., Institut Jožef Stefan, Ljubljana
8. Franc Jan, dipl.ing., Institut Jožef Stefan, Ljubljana
9. Prof. Dr. Kolar Drago, dipl.ing., Institut Jožef Stefan, Ljubljana
10. Dr. Lavrenčič Borut, dipl.ing., Institut Jožef Stefan, Ljubljana
11. Mag. Maček Marijan, dipl.ing., Mikroiks d.o.o., Ljubljana
12. Mr. Pantović Vladimir, dipl.ing., EI - IRI, Zemun Polje
13. Prof. Dr. Pejovnik Stane, dipl.ing., Institut Boris Kidrič, Ljubljana
14. Dr. Pešić Ljutica, dipl.ing., Institut Mihajlo Pupin, Beograd
15. Mag. Ročak Dubravka, dipl.ing., Institut Jožef Stefan, Ljubljana
16. Dr. Ročak Rudi, dipl.ing., Mikroiks d.o.o., Ljubljana
17. Dr. Rožaj Alenka Brvar, dipl.ing., Iskra CEO, Ljubljana
18. Prof. Dr. Runovc Franc, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Ljubljana
19. Mag. Slokan Milan, dipl.ing., Ljubljana
20. Prof. Dr. Stojadinović Ninoslav, dipl.ing., Elektronski fakultet, Niš
21. Šorli Iztok, dipl.ing., Mikroiks d.o.o., Ljubljana
22. Dr. Švedek Tomislav, dipl.ing., Zagreb
23. Prof. Dr. Tjapkin Dimitrije, dipl.ing., Elektrotehniški fakultet, Beograd
24. Prof. Dr. Trontelj Janez, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana
25. Prof. Dr. Trontelj Lojze, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana
26. Turina Miroslav, dipl.ing., Zagreb

*Glavni in odgovorni urednik
Informacije MIDEM
Iztok Šorli, dipl.ing.*

KONFERENCE, POSVETOVANJA, SEMINARJI, POROČILA

KONFERENCA MICROTECH-91, BIRMINGHAM, 29.-30. JANUAR 1991

Konferenco o hibridni mikroelektroniki MicroTech prireja v Angliji vsako leto konec januarja ali začetek februarja angleška sekcija ISHM (International Society for Hybrid Microelectronics).

Letošnja konferenca MicroTech-91 je bila 29. in 30. januarja 1991 v hotelu Metropole v Birminghamu. Hkrati s konferenco je bila tudi razstava opreme, materialov in komponent za hibridno mikroelektroniko.

Vodilne teme konference so bile povezave, nove tehnologije za hibridna vezja in materiali za močnostna vezja. Povezave (interconnections) so v uvodu definirali kot električne povezave med komponentami, ne na samih silicijevih tabletkah (chipih). Ker bo kmalu izšel zbornik referatov, bom v poročilu na kratko opisal vsebino nekaterih zanimivejših predavanj.

S. Wadsworth (System and sub-assembly optimization through hybrids) je govoril o optimizaciji novih izdelkov z izbiro ustreznih tehnologij in komponent. Razvoj "gate array" silicijeve tabletki za neko konkretno vezje (električni mešalec) stane okrog 6000 GBP, hibridnega vezja za isti namen pa 1000 GBP, zato je za manjše serije hibrid primernejši. Do 40 % cene vezja so cena inkapsulacije in povezav, zato je pomembna optimizacija pri načrtovanju. Omenil je "krizo srednjih let", to je, da se napaka v načrtovanju, ki nastane zaradi prevelikega entuziazma načrtovalcev, ki načrtujejo na mejah možnosti tehnologije, odkrije šele, ko je vezje v proizvodnji. Precejkrat je tudi ceneje, če se namesto komplicirane silicijeve tabletki, ki je "špica" tehnologije, upo-

rabi več že obstoječih monolitnih vezij, ki se jih poveže na hibridu.

J. Atkinson (Thick film fabricated techniques for chemical and physical sensors) je govoril o senzorjih, izdelanih z debeloplastno tehnologijo. V uvodu je opisal "pametne" (smart) senzore. Tehnologija senzorjev, predvsem izdelanih na siliciju, gre namreč v smer, ko so na istem vezju senzorski element in elektronika tako, da senzor daje digitalen namesto analognega signala.

Avtor in sodelavci so razvili senzor tlaka - debeloplastni upori na substratu iz emajliranega jekla. Prednost debeloplastnih uporov je temperaturna stabilnost odvisnosti upornosti od deformacije (faktor upogiba - gauge factor). Polprevodni upori na siliciju so sicer bolj občutljivi, vendar je odziv zelo odvisen od temperature.

Razvijajo "chemical array sensors" - senzore za različne pline. Različne organo-metalne spojine so različno občutljive na različne pline, na primer alkohole, benzenove pare, CO, razna organska topila itd. Na substratu so natiskane zlate elektrode, prekrte z organo-metalnimi spojinami. V odvisnosti od vrste in koncentracije plinov se spreminja upornost senzorskih plasti. Občutljivost posameznih spojin je odvisna tudi od temperature. To izkoriščajo tako, da ali na enem koncu substrata natiskajo grelec, ki ustvari temperaturni gradient vzdolž substrata, ali pa da individualno grejejo vsak element. Senzorje izpostavijo različnim kombinacijam plinov. Rezultate - meritve upornosti - odčitava računalnik, ki se s tem uči prepoznavati različne pline.

Tabela I: Karakteristike tehnologij za povezavo

Parameter	Bondiranje z žičko		TAB	Flip-chip
Material	Al	Au	Cu	Pb-Sn
T tališča (°C)	660	1064	1084	310
Geometrija	25 µm premer		25x100 µm trak	125 µm premer 100 µm višina
Tipična blazinica	170 µm		200 µm	250 µm
Minimalna blazinica	120 µm		80 µm	65 µm
Jakost vezi (g)	6	10	50	30
Toplotna upornost (K/mW na bond)	80	50	8	0,5
Število povezav (silicijeva tabletki 8x8 mm ²)				
Tipična blazinica	184		160	1024
Minimalna blazinica	266		400	15150

N. Stockham (Fine pitch microbonding techniques) je govoril o tehnikah povezav, ki jih rabijo, oz. bodo rabila zelo gosta vezja. Problem, če temu lahko tako rečemo, je, da se gostota elementov na silicijevih tabletkah in s tem število povezav na ven večja hitreje, kot se manjšajo dimenzije povezav na tiskanih ali hibridnih vezjih. V tabeli I so podani nekateri parametri "standardnih" tehnik povezav, to je bondiranje, avtomatska montaža na traku (TAB - tape automated bonding) in flip-chip.

Vidimo, da flip-chip tehnike omogočajo večjo gostoto povezav kot ostale "klasične" tehnike. Zato se sicer že 25 let stara tehnologija flip-chip, ki je doslej niso veliko uporabljali, spet "prebija" v uporabo. Velikost "bunkic", ki je sedaj nad 100 μm , želijo pomanjšati do premera 40 μm ali celo manj, pri tem se pa seveda pojavijo problemi pri točni namestitvi na vezje. Kot alternativa k klasičnim "bunkicam" je bila omenjena izdelava kontaktov tako, da se na silicijevo tabletko na kontaktne blazinice kroglično bondira Au/Pd žička, ki se jo odreže takoj na vrhu kroglice. Te "bunkice" se lahko povežejo s substratom, oz. vezjem tako, da so narejene tako na podlagi kot na silicijevi tabletki. Oboje se poveže s tanko plastjo organskega (neprevodnega) materiala, ki se pri polimerizaciji skrči in fizično pritisne oba kontakta drug k drugemu.

Pri bondiranju z žičko razvijajo tehnike bondiranja z žičkami manjših premerov, do 7 μm , pri tem pa se pojavljajo problemi mehanske trdnosti, oz. "premočnih" obstoječih bondirnih naprav. Drugi pristop je bondiranje s trakom namesto z žičko. Ker se žička pri bondiranju deformira, rabi precej večjo bondirno blazinico kot trak (25 μm žička čez 100 μm blazinico, trak iste širine pa samo 25-30 μm). Razvijajo tudi bondiranje z bakrenimi žičkami, pokritimi s polimerno izolacijo. Take žičke se lahko križajo, kar spet omogoči večjo gostoto povezav. TAB tehnologije imajo sedaj širino priključka 50 μm , razvijajo pa dimenzije 14-18 μm .

Uveljavlja se tudi bondiranje z laserjem. Pri tem morajo biti kontakti in blazinice v fizičnem stiku. V nekaterih verzijah laserskega bondiranja so kontakti pritisnjeni na blazinice s stekleno ploščico, skozi katero bliska laserki žarek. Seveda se pri velikih tabletkah z veliko izvodi spet pojavi problem hkratne pravilne orientacije vseh kontaktov. V nekaterih aplikacijah se je kombinacija ultrazvoka in laserskega bondiranja - na vsako posamezno povezavo "posveti" laserski žarek, medtem ko jo kapilara bonderja pritiska in vibrira ob bondirni blazinici - izkazala kot najmanj občutljivo na okside ali nečistoče.

N. Priestley (**MIMAC - an advanced hybrid technology for high frequency components**) je govoril o tehnologiji izdelave visokofrekvenčnih tankoplastnih vezij za mikrovalovno in milimetrsko področje. Vse pasivne komponente so integrirane na substratu. Na Al_2O_3 ali monokristalni feritni substrat napršijo tanko plast zlata, ki jo galvansko odebelijo do 5 μm . Upore izdelajo tako, da se zlate linije selektivno izjedkajo do debeline 1 μm ali manj. Kondenzatorji so narejeni iz napršenega silicijevega nitrida. Posebnost te tehnologije so "zračni mostovi" (air bridge), zlati trakci, ki visijo v zraku. Te naredijo

tako, da prek kupčka polimera napršijo in galvansko odebelijo zlato linijo, nato pa odtopijo polimer. Ta način izdelave vodi k nižji ceni, večji zanesljivosti in boljši ponovljivosti vezij.

M. Wright (**Packaging considerations for power hybrids**) je govoril o materialih za močnostna vezja. Prednost močnostnih hibridov so majhne dimenzije. So kompaktni in zanesljivi. S primerno izbiro materialov in designa vezja ter ohišja se lahko doseže toplotna impedanca pod 1 K/W. Močnostne silicijeve tabletko generirajo do 40 W moči, debeloplastni upori pa do 155 mW/mm². Materiali za substrate in ohišja morajo imeti nizko toplotno upornost in razteznostni koeficient čim bližji temperaturnemu razteznostnemu koeficientu silicija. V tabeli II so podane toplotne upornosti in razteznostni koeficienti nekaterih materialov.

Tabela II

Material	Toplotna prevodnost (W/mK)	Razt. koeficient ($\times 10^{-6}$)
Si	120	3,4
Al_2O_3	20	7
BeO	200	8
AlN	100-150	4,5
SiC	270	3,7
Al	240	25
Cu (brez kisika)	400	18
Mo	135	3,5
jeklo	75	14

Za močnostna vezja so se večinoma uporabljali BeO substrati, vendar je prah berilijevega oksida strupen. Primeren material je AlN. Zanj zaenkrat še ni kompatibilnih debeloplastnih uporovnih materialov, vendar jih več proizvajalcev past razvija. Substrate na osnovi silicijevega karbida šele razvijajo. Material ima visoko toplotno prevodnost in razteznostni koeficient zelo blizu silicijevega, vendar pa ima visoko dielektričnost (okrog 40).

Močnostne silicijeve tabletko se pritrjuje na substrat s spajkanjem ali eutektičnim bondiranjem. Za večje komponente je spajkanje ustrežnejše, ker spajka nekoliko ublaži razlike v razteznostnih koeficientih. "Navadne" komponente se prispajkajo ali pritrdijo s polimernim lepilom. Prevodne linije morajo imeti čim nižjo upornost, zato so široke in večkrat odebeljene s platiranjem (tenkoplastne) ali spajkanjem (debeloplastne). Za bondiranje se uporabljajo debele Al žičke. Aluminij je boljši kot zlato, ker se na stiku med Al metalizacijo na silicijevih tabletkah in žičko ne tvorijo krhke intermetalne spojine.

V razpravi je bilo v zvezi s strupenostjo berilijevega oksida omenjeno, da je strupen samo prah, ne pa sintrana keramika. V nekaj deset letih, kar BeO uporabljajo v elektroniki, ni bilo pri uporabnikih niti enega primera berilioze.

Tabela III

Obdobje	1975-1980	1980-1985	1985-1990	1990-1995
Integracija	MSI	LSI	VLSI	ULSI
Minimalne dimenzije	4 μm	2 μm	1,25 μm	0,5 μm
Število vrat	10-100	1k-4k	10k-50k	100k-200k
Takt ure	1 MHz	10 MHz	25 MHz	100 MHz
Vhod/izhod	14-40	48-120	84-200	148-200
Moč	0,2-0,4 W	0,5-1 W	1-2 W	2-4 W

O karakteristikah aluminijevega nitrida je govorila tudi E. Logan (**Aluminium nitride for microelectronic applications**). AlN je zelo dober material za močnostne hibride. Temperaturni razteznostni koeficient je blizu silicijevemu, toplotna prevodnost pa pet do sedemkrat višja kot pri Al_2O_3 . Teoretična toplotna prevodnost monokristala je 340 W/mK, pri sintrani keramiki pa je zaradi mej med zrnji in vključkov kisika 100 do 150 W/mK. Trenutno je cena AlN substratov 20 do 30 krat višja kot Al_2O_3 , upajo pa, da bo padla na samo 2 do 3 krat višjo.

Zaradi visoke toplote prevodnosti se AlN substrati težje režejo z laserjem kot Al_2O_3 . Po rezanju z laserjem ostaja zaradi razpadanja AlN v zarezi kovinski aluminij, zato nekateri proizvajalci substratov po laserskem rezanju operejo substrate v razredčeni kislini. Za izdelavo tankih plasti Ni/Cr-Au ni dober, ker je jakost bondov prenizka. Precej boljši material je Ti/Pt-Au. Tudi običajni debeloplastni materiali, razviti za Al_2O_3 , navadno niso kompatibilni z AlN. Eden izmed razlogov je, da Bi_2O_3 , ki je v pastah (kot fluks za izboljšanje adhezije pri prevodnikih, oz. $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$ v uporih) reagira z AlN. Pri tem se sprošča dušik, kar povzroča mehurčke ali luščenje žganih plasti. Omenjena je bila tudi možnost, da pri doravnavanju debeloplastnih uporov z laserjem ostaja zaradi razpada AlN v rezu tanka plast kovinskega aluminija, kar bi lahko poslabšalo stabilnost uporov.

Precej delajo tudi na razvoju nosilcev tabletk na osnovi AlN, vendar zaenkrat še ni rešen problem hkratnega žganja AlN keramike in prevodnih linij.

A. D. Trigg (**Design and materials choices for multi-chip modules**) je govoril o multichip moduli, ki jih je definirjal kot hibridna vezja zelo velike gostote, v katerih so gole silicijeve tabletk. Minimalne dimenzije povezav na silicijevih tabletkah se manjšajo, gostota elementov (vrat) narašča in s tem narašča tudi število povezav (vhod/izhod) med silicijevo tabletko in "zunanjim svetom". Dimenzije so bile 4 μm ali več za MSI tabletk, 2 μm ali večje za LSI in 1 μm ali večje za VLSI. Pri novi ULSI (Ultra Large Scale) bodo dimenzije podmikronske, 0,5 do 0,8 μm . To je povezano z naraščanjem gostote vrat in številom vrat na silicijevi tabletki ter z naraščanjem takta ure. Na drugo strani pa to pomeni naraščanje števila vhodov/izhodov in večje moči, ki se sproščajo na silicijevih tabletkah. Trendi so prikazani v tabeli III.

Multichip moduli (MCD) imajo precej prednosti pred konvencionalno inkapsuliranimi silicijevimi tabletkami z velikim številom vhodov/izhodov (single chip modules), predvsem v primerih, ko primanjkuje prostora v vezju in, če je takt ure "hiter". V grobem lahko MCD razdelimo na tri tipe v odvisnosti uporabljene tehnologije:

MCM-L	Večplastna tiskana vezja visoke gostote
MCM-C	"Keramični" hibridi visoke gostote
MCM-D	Moduli, ki imajo nanešene večplastne kovinske povezave, ločene s polimernim ali tankoplastnim dielektrikom.

MCM-L moduli so zahtevna večplastna tiskana vezja z linijami minimalne širine, to je 25 μm . Keramični MCM-C moduli so večplastni keramični substrati, v kateri je tudi do 30 ali 40 nivojev prevodnika. V obeh primerih se tehnologija izrablja do skrajnih možnosti. "Pravi" multichip moduli so MCM-D, ki omogočajo največje gostote povezav. Trenutno jih razvijajo ali uporabljajo v več kot 50 firmah.

Kot substrat se največ uporablja Al_2O_3 ali silicij. Silicij dobro prevaja toploto, njegov temperaturni razteznostni koeficient pa je seveda isti kot razteznostni koeficient silicijevih tabletk. V tem primeru se del elektronike izdelava lahko že na substratu. Steklo kot material za substrat preiskujejo. Steklo kot podlaga bo uporabljano predvsem za zaslone s tekočimi kristali (chip on glass). Kot dielektrik se uporabljajo ali organski polimeri ali pa napršen SiO_2 . Polimeren dielektrik so poliimidi, ki so precej dragi, okrog 1 GBP za gram. SiO_2 je sorazmerno poceni, vendar je napršena plast tanka. Predavatelj je povedal, da se ameriška vojska trenutno nagiba k SiO_2 , ker ne zaupa organskim dielektrikom. Povezave so narejene z aluminijem ali bakrom. Baker ima nižjo upornost, vendar ga je pri uporabi polimernih dielektrikov potrebno navadno prekriti z zaščitno plastjo neke druge kovine. Za povezavo silicijevih tabletk se uporablja bondiranje z žičko, avtomatsko bondiranje na traku ali pa flip-chip. Ker je izdelava multichip modulov zahtevna in so zato dragi, se nanje pritrjuje samo testirane silicijeve tabletk. Te so seveda dražje. Kot primer je bilo navedeno, da vtekavanje (burn-in) lahko podraži TAB komponento tudi do 0,5 GBP.

dr. Marko Hrovat, dipl. ing.
Institut Jožef Stefan,
Jamova 39, 61000 Ljubljana

19th YUGOSLAV CONFERENCE ON MICROELECTRONICS - XIX. JUGOSLOVANSKO POSVETOVANJE O MIKROELEKTRONIKI - XIX. JUGOSLOVENSKA KONFERENCIJA O MIKROELEKTRONICI - Program

ORGANIZER

MIDEM-Professional Society for Microelectronics,
Electronic Components and Materials,
Ljubljana, Yugoslavia

LOCAL ORGANIZER

Institute MIHAILO PUPIN, Beograd
Ei-Research and Dev. Inst., Beograd
Inst. of Microel. Techn. and Single Crystal, Beograd
Electrotechnical Faculty, Beograd

Program committee chairman

Ljiljana Pešić, dipl.ing.
PUPIN Institute
Volgina 15, 11040 Beograd
Yugoslavia

Organizing committee chairman

Vladimir Pantović
Ei-Research and Dev. Inst.
Batajnički put 23, 11080 Zemun
Yugoslavia

ADDRESS FOR GENERAL INFORMATION

MIDEM-MIEL
Titova 50
61000 Ljubljana
Yugoslavia
Phone: + 38 61 316 886

The 19th annual Yugoslav conference on microelectronics continues at 25-year tradition as a forum for the presentation of the latest advances in this field. Since 1983 MIEL conferences have become international with distinguished guest speakers from all over the world. Conference will be held in Belgrade on May 15.- 17. 1991, sponsored by Research council of Serbia, MIDEM, Electrotechnical Faculty of Belgrad, PUPIN Institute, Ei - IRI, Inst. of Microelectronics and Single Crystal, Inst. of Microwaves of Belgrade.

ORIGINAL PAPERS IN THE FOLLOWING AREAS ARE SOLICITED:

- Hybrid circuits; processing, design and application
- Sensors on the base of microelectronics technologies
- Optoelectronic devices
- Microwave circuits
- Monolithic integrated circuits

- Discrete semiconductor devices
- Physics of thick and thin films and semiconductors
- Quartz crystal devices and sensors

INVITED PAPERS

Organizing committee has invited the following distinguished speakers to present introductory review papers before sessions:

1. Maria Prudenziati and Bruno Morten,
University of Modena, Italy
STATE OF THE ART OF THICK FILM
SENSORS
2. F.S. Shoucair,
Brown University, Providence, U.S.A.
HIGH TEMPERATURE EFFECTS IN MOS
DEVICES
3. Jozef Piotrowski,
VIGO Ltd., Poland
RECENT ADVANCES IN IR DETECTOR
TECHNOLOGY
4. Dragan Podlesnik,
Columbia University U.S.A.
MICROMACHINING IN SENSOR
TECHNOLOGY
5. Micheal Conrad,
Molecular Electronics, Wayne State University,
U.S.A.
RETROSPECTIVE CONTEMPORARY AND
FUTURE ACHIEVEMENTS

ACCEPTED PAPERS

1. Ivan Stantchev,
Bulgaria
MULTIVIBRATORS WITH OPTOISOLATORS
WITH REACTIVE ELEMENTS
2. D. Bollmann,
Germany
IN-SITU MEASUREMENT OF PLANARIZATION
OF WAFER TOPOGRAPHY
3. Movalem, J. A. S. Dias,
Brasil
AN ALL DIFFUSED JUNCTION TERMINATION
EXTENSION PROCESS FOR HIGH VOLTAGE
DEVICES
4. Fernandes, J. A. S. Dias,
Brasil

- IMPLEMENTATION OF AN INTEGRATED GAS FLOW SENSOR USING A BIPOLAR SEMI-CUSTOM ANALOG ARRAY
5. Yianis Karafyllidis,
Greece
THE INCOMPLETE DEPLETION APPROXIMATION IN SEMICONDUCTOR HETEROJUNCTIONS
6. B. Mitrović,
Yugoslavia
THE SELF-CONSISTENT ANALYSES OF A GaAs/Al_xGa_{1-x}As QUANTUM WELL IN PARALLEL MAGNETIC FIELD
7. V. Milanović,
Yugoslavia
THE ELECTRONIC STRUCTURE OF SEMICONDUCTOR EFFECTIVE-MASS QUANTUM WELL
8. D. Indin,
Yugoslavia
FAST AND HIGH ACCURACY METHOD FOR ENERGIES AND WAVEFUNCTIONS DETERMINATION IN THE SEMICONDUCTOR QUANTUM WELL
9. Pantelić Goran,
Yugoslavia
RELIABILITY EVALUATION OF THE HYBRID CIRCUITS
10. Benda V.,
Czechoslovakia
SIMPLE METHOD OF CHECKING HOMOGENEITY OF GTO-THYRISTORS
11. Janez Trontelj,
Yugoslavia
FRONT END CAD TOOL FOR ASIC DESIGN
12. Björn Sjöling,
Germany
THE MATERIAL SCIENCE OF A NON WARP; HERMETIC, NONE BATTERY EFFECT, CRYSTALLIZING DIELECTRIC FOR SIMPLIFICATION OF MULTILAYER HYBRID CIRCUITRY CONSTRUCTION
13. Andrej Vodopivec,
Yugoslavia
USE OF MONTE CARLO METHOD FOR OPTIMIZATION IN ANALOG ASIC SYNTHESIS
14. V. Kunc,
Yugoslavia
INTEGRATED EXTENDED FUNCTION TELEPHONE SET ASIC
15. J. Trontelj,
Yugoslavia
IMPLEMENTED LOW NOISE HIGH RESOLUTION D/A CONVERTER
16. Stanislav Ožbolt,
Yugoslavia
COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF NMOS AND PMOS TRANSISTORS FOR HIGH-GAIN ANALOG STAGES
17. J. Trontelj,
Yugoslavia
LOW NOISE AMPLIFIER IN CMOS TECHNOLOGY
18. Gerhard Wachutka,
Switzerland
THE THERMODYNAMIC MODEL: THE MISSING LINK BETWEEN MICROSCOPIC TRANSPORT THEORY AND ADVANCED DEVICE
19. Jose Caverio,
Spain
MIGRATION ANALYSIS OF SILVER BASED INKS FOR HYBRID CIRCUITS
20. Marija Hribšek,
Yugoslavia
DESIGN OF BIDIRECTIONAL SAW BANDPASS FILTERS WITH MULTISTRIP COUPLERS
21. Miloš Živanov,
Yugoslavia
ANALYSIS OF HALL MOBILITY IN THE ULTRA HEAVY DOPED n-Si
22. Florin Balasa,
Romania
MODULE PLACEMENT APPROACH IN VLSI DESIGN
23. Salvador Hidalgo,
Spain
WAVED GATE LAYOUT FOR LDMOS TRANSISTORS
24. Saša Sokolić,
Yugoslavia
ANALYSIS OF HEAVILY DOPED SEMICONDUCTOR
25. D. Sterle,
Yugoslavia
EFFICIENT ALGORITHM FOR STATE SPACE ANALYSIS OF SWITCHED CAPACITOR CIRCUITS
26. Luis Fonseca,
Spain
DYNAMIC STORAGE TIME MEASUREMENT ON THIN RTO AND O₂ - DILUTED OXIDES
27. F. Martin,
Spain
EFFECT OF TEMPERATURE ON CHARGE TRANSPORT AND STORAGE IN THE NITRIDE OF MNOS DEVICES
28. L. Trontelj,
Yugoslavia
ULTRA LOW INTEGRATOR INPUT CURRENT FOR INTEGRATED PIKOAMPERE METER
29. Ivan Skubic,
Yugoslavia
DOS EVALUATION IN THIN FILM N⁺-I-N⁺

- A-Si:H STRUCTURES USING SCLC TECHNIQUE
30. Drago Resnik,
Yugoslavia
SILICON PHOTODIODE PROCESSING IMPROVEMENTS
 31. V. Kunc,
Yugoslavia
OVER VOLTAGE PROTECTION FOR AUTOMOTIVE ASICs
 32. Vojko Ambrožič,
Yugoslavia
TRANSIENT RESPONSES OF CHARGE CARRIERS IN AMORPHOUS SILICON
 33. Elvis Basanež,
Yugoslavia
SMALL SIGNAL TRANSIENT RESPONSE OF CHARGE-CARRIERS IN a-Si
 34. Jaroslav Slunečko,
Yugoslavia
THICK FILM MATERIALS FOR HUMIDITY SENSORS
 35. Marko Hrovat,
Yugoslavia
INTERACTIONS BETWEEN CONDUCTORS AND THICK FILM SUPERCONDUCTORS
 36. Benedict Popescu,
Romania
ELECTRICAL PROPERTIES OF Ni-Cr RESISTIVE THIN
 37. Iolanda Placencia,
Spain
CHARACTERIZATION OF BREAKDOWN FAILURES IN MOS CAPACITORS
 38. Dejan Križaj,
Yugoslavia
BREAKDOWN SIMULATION WITH MULTIGRAD METHOD
 39. Dušanka Stojanović,
Yugoslavia
NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROTHERMAL HOT-CARRIER TRANSPORT MODEL OF Si PIN DIODES
 40. D. Gvozdić,
Yugoslavia
ANALYSIS OF ELECTRON PROFILES IN THE PIN PHOTODIODE OF TWO-VALLEY SEMICONDUCTORS IN THE CASE OF THE DIRAC EXCITATION
 41. Dragan Petković,
Yugoslavia
RELIABILITY ASPECT OF POLYSILICON RESISTORS WITH SWITCHING I-V CHARACTERISTICS
 42. G. F. Romanova,
Poland
MASS-SPECTROSCOPY OBSERVATIONS OF
 - RADIATION EFFECTS IN FLUORINATED GATE OXIDES
 43. Marijan Maček,
Yugoslavia
INTRINSIC GETTERING IN CMOS PROCESS
 44. D. Ročak,
Yugoslavia
ELECTRONIC CIRCUITS REALIZED IN THICK FILM AND SURFACE MOUNT TECHNOLOGY-COMPARISON
 45. D. M. Todorović,
Yugoslavia
APPLICATION OF PHOTO-THERMAL METHOD IN MICROELECTRONICS
 46. Aleksandar Petrovski,
Yugoslavia
USING MICROCODED ROM IN SELF-TESTING RAMS
 47. Zoran Stamenković,
Yugoslavia
COMPARISON OF DEFECT SIZE DISTRIBUTIONS FOR YIELD MODELING
 48. Antonio Strollo,
Italy
TWO-DIMENSIONAL MODELING OF CURRENT GAIN IN DOWNSCALED BIPOLAR TRANSISTORS
 49. A. Stanojević,
Yugoslavia
ANALYZING AND MODELING OF SHORT-CHANNEL GaAs MESFET's NONSTATIONARY ELECTRON DYNAMICS
 50. M. Iorgulescu,
Romania
YIELD PARAMETER MONITORING BY WAFER MAP ANALYSIS
 51. Stamenov Vasil,
Yugoslavia
A THICK-FILM PRESSURE SENSOR-NEW RESULTS
 52. C. Cané,
Spain
FABRICATION OF pH ISFET's BASED IN MICROELECTRONICS TECHNOLOGY
 53. C. Cané,
Spain
THICK FILM HYBRID COILS
 54. M. Luković,
Yugoslavia
MULTILAYER PRINTED VARISTORS
 55. R. Ramović,
Yugoslavia
THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GEOMETRICAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS IN THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF NOISE IN SHORT-CHANNEL GaAs MESFET

56. M. Marković,
Yugoslavia
OPTICAL PROPERTIES OF HIGHLY
REFLECTING ALUMINIUM FILMS IN WIDE
SPECTRAL RANGE
57. Ž. Mrčarica,
Yugoslavia
SOME CONSIDERATIONS OF
SHORT-CHANNEL MOS MODEL SELECTION
FOR AN ANALOG CIRCUIT SIMULATING
PROGRAM
58. U. Kamšek,
Yugoslavia
SOME APPLICATIONS OF (E) PLD IC IN
BASE-BAND MODEM REALIZATION
59. M. Lugović,
Yugoslavia
THE CERAMIC SUBSTRAT PARAMETERS
INFLUENCE ON THE OVERALL THERMAL
DISTRIBUTION OF THE HYBRID INTEGRATED
CIRCUITS
60. V. Jović,
Yugoslavia
EPITAXIAL GROWTH OF $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ FROM
Te-RICH SOLUTIONS IN A SEMI-CLOSED,
TWO-ZONE SYSTEM
61. Z. Đinović,
Yugoslavia
THE INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE
ANNEALING ON THE COMPOSITION PROFILE
CHANGE OF THE $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ EPITAXIAL
LAYERS
62. B. LIVADA,
Yugoslavia
THE INFLUENCE OF EPITAXIAL LAYER AND
SUBSTRATE MATERIAL PARAMETERS ON
PROPERTIES OF $\text{InSb } n^+-n$ PHOTODIODES
63. Ž. Lazić,
Yugoslavia
THE INFLUENCE OF VARIOUS PHYSICAL
PARAMETERS ON GAIN-VOLTAGE
DEPENDENCES OF RAPD
64. Z. ĐURIĆ,
Yugoslavia
THE INFLUENCE OF THE MOSS-BURSTEIN
EFFECT ON RADIATIVE RECOMBINATION
RATE OF NARROW-BAND
SEMICONDUCTORS
65. M. Conrad,
U.S.A.
BIOMOLECULAR INFORMATION
PROCESSING AND MOLECULAR
ELECTRONICS
66. F. Hong,
U.S.A.
PROPERTIES OF BACTERIORHODOPSIN
AND MOLECULAR OPTOELECTRONIC
DEVICES
67. F. Kermendi,
Yugoslavia
BIOCOMPUTING BASED ON NONLINEAR
PHENOMENA
68. D. Raković,
Yugoslavia
BIOCOMPUTING BASED ON BIOPHYSICAL
MODEL OF CON SCIOUSNESS
69. K. K. Likharen,
USSR
SINGLE ELECTRONIC PHYSICS AND
MOLECULAR DEVICES
70. D. Koruga,
Yugoslavia
STM AND MOLECULAR ELECTRONICS
71. G. Bizo,
Hungary
ONE ELECTRON STATES IN 3-D CRYSTAL
LATTICES AND MOLECULAR ELECTRONICS
72. V. Litovski,
Yugoslavia
BASIS OF NEUROCHIP DESIGN
73. J. Matović,
Yugoslavia
NON LINEAR SIMULATION OF PRESURE
SENSOR
74. D. Kunovac,
Yugoslavia
LIQUID PHASE EPITAXY AS A METHOD FOR
PREPARATION OF $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$
PHOTODETECTOR STRUCTURES
75. Jozef Piotrowski
Poland
RECENT ADVANCES IN IR DETECTOR
TECHNOLOGY
76. V. I. Ryzhii,
USSR
ON THE THEORY OF CONDUCTANCE OF A
NARROW CHANNEL IN TWO- DIMENSIONAL
ELECTRON GAS AT HIGH BIAS
77. M. Lazić,
Yugoslavia
ANALYSIS OF THE FEEDBACK OF THE
MODULAR CONVERTERS OF HIGH POWER
DENSITY
78. R. Antović,
Yugoslavia
CHARACTERIZATION OF GOLD PASTES IN
HIGH FREQUENCY MICROCIRCUITS
PROCESSES BY SCREEN PRINTING AND
PHOTOLITHOGRAPHIC
79. Pešić Ljutica,
Yugoslavia
EXPLANATION OF THICK FILM RESISTORS
CHANGES AT HIGH TEMPERATURE AGING

PREDSTAVLJAMO DO Z NASLOVNICE

MIPOT

Background

The Italian Company MIPOT was founded in 1973 and began by manufacturing thin film variable resistors.

Thin film technology enabled MIPOT to widen its range of products and include fixed components such as resistive networks.

In 1976 the first plant was completed in CORMONS (Gorizia) giving MIPOT the possibility of expanding into the production of thin-film hybrid microcircuits.

Thick-film technology oriented to custom designed hybrid microcircuits and resistive networks was introduced in 1980.

From its very beginnings MIPOT has set out to improve and expand the scope of its technology in order to ensure an extensive range from which to select the optimum approach to a wide variety of applications.

This has enabled MIPOT to fulfil the increasingly demanding requests from both its industrial and professional customers.

However, the ever changing world of hybrid microcircuits has created a demand for solutions to meet the requirements of military, aerospace and medical customers for smaller, more complex and reliable hybrid circuits.

1982 saw the introduction of chip and wire bonding assembly for hi-rel circuits.

In 1985 MIPOT stopped manufacturing trimmers and concentrated investments on consolidating hybrid circuits and starting work on Surface Mounting Technology on Printed Circuit Boards.

New computer aided design (CAD) facilities were installed both for hybrid circuits and SMTs.

The application of chip and wire bonding was also extended to PCBs (chip-on-board).

1989 was the year MIPOT reached important goals in development and manufacturing of medium power (30 - 60 W) hybrid circuits for high-professional applications.

In the same year construction of new plants started. This investment will enable MIPOT to increase production capacity both on hybrid circuits and SMTs and allow new R&D activities.

TECHNOLOGICAL FEATURES

MIPOT avails itself of a wide range of different technologies which enable the Company to offer optimum cost/performance ratio. Thin film technology makes use of vacuum deposited resistive (NiCr, Ta₂N), conductive (Cu, Au, Al) and dielectric materials on various types of substrates (glass, alumina, oxidized Si wafers, polyimide, BeO).

A combination of processes including photolithography, selective etching and plating leads to the creation of thin film substrates with high stable resistors and very tight resolution which offers extremely high density packaging.

Thick film substrate technology is based on conventional screen printing and firing of resistive and dielectric inks.

Laser trimming for precision adjustments of both thick and thin film resistors is the next step in substrate manufacturing. Active and passive components are then mounted by different means, principally:

- epoxy or eutectic attachment of naked active chips and their connection to the pads by bonding Al or Au wires.
- reflow vapor phase IR soldering.
- IR, wave soldering for SMT on PCB.

Where necessary on hybrid circuits, functional laser trimming permits control of individual electrical parameters by means of resistors adjustments after components have been assembled.

A full range of encapsulation techniques is available from conformal coating to hermetic sealing.

Functional and in-circuit electrical testing are performed alone or together with screening processes agreed between the customer and MIPOT.

MIPOT is pending EN290001 European Standard.

MIPOT SpA.
Via Corona 5
34071 Cormons (GO)
Italia
tel. (0481) 630200
fax. (0481) 62387

ČLANI MIDEM

Novi člani

- ☐ Jekovec Jože 683
- ☐ Milanovič Miro 685

- ☐ Vižintin Jože 686
- ☐ Zajc Baldomir 684

VESTI, OBVESTILA

Nastavlja se propadanje elektroničke industrije u Zagrebu

VIJEST PRVA

Vrlo ugledna znanstvenoistraživačka institucija "Elektrotehnički institut-Rade Končar", koji je nekoliko zadnjih mjeseci poslovao kao d.o.o. unutar holding poduzeća Končar, više ne postoji. Institut je 20. 12. 1990. godine pao pod stečaj. Svi zaposleni, njih više od 700, od čega 500 diplomiranih inženjera, među kojima je bilo pedesetak doktora znanosti našlo se na ulici. Svi su dobili radne knjižice i poslani su na zavod za zapošljavanje.

Do stečaja nije došlo iznenada. O njemu se govorilo i ranije. U oktobru prošle godine radnici instituta su štrajkali izražavajući tako svoj protest prema lošem stanju u institutu i cijeloj firmi. Posljedica toga štrajka, kojemu su se pridružili i radnici nekih Končarevih tvornica, bila je smjenjivanje rukovodstava instituta, većine tvornica i cijeloga poduzeća. Kratkotrajna nada, da će novo rukovodstvo Končara uvidjeti značenje instituta za daljnji opstanak firme, pokazala se nerealnom i institut je likvidiran. Opomene i upozorenja da likvidacija instituta vodi u likvidaciju cijele firme nisu u upravi shvaćena ozbiljno, ili su možda baš shvaćena, tko zna?

VIJEST DRUGA

Poduzeće "Rade Končar - Elektronika i informatika" s više od tisuću zaposlenih radnika nalazi se u stečaju. Nije poznato da li će tvornica ikada uskrsnuti i u kakvom obliku.

VIJEST TREĆA

Poduzeće "Rade Končar - Trgovina" nalazi se u stečaju. Poduzeće je između ostaloga obavljalo skoro sav Končarev vanjskotrgovinski promet koji je iznosio nekoliko stotina miliona dolara godišnje.

VIJEST ČETVRTA

U poduzeću RIZ u Zagrebu nakon što je već ranije pod stečaj pala tvornica poluvodiča stečaj je u međuvremenu zahvatio nekadašnji RIZ-ov institut IETA, tvornicu elektroničkih elemenata i tvornicu televizora u Slunju.

Daljnje vijesti iz Zagreba objaviti ćemo u slijedećem broju časopisa.

VIJESTI IZ INOZEMSTVA

NOVI FET

Gene Cavanaugh inženjer iz firme "Valid Logic Systems" patentirao je novi poluvodički element nazvan quantum FET (QFET). Novi element će deseterostruko premašiti brzinu rada svih dosada poznatih konvencionalnih poluvodičkih elemenata, a potrebna snaga i površina smanjiti će se za isti red veličine. Za proizvodnju novih elemenata potrebno je primijeniti novi proizvodni postupak RTP "rapid thermal processing". Za pretpostaviti je da će se novi elementi početi serijski proizvoditi za 3 do 5 godina. Cavanaugh pregovara s TI, IBM-om i INTEL-om o licenčnom aranžmanu.

NOVI FERITNI MATERIJALI

Kompanija "Siemens Matsushita Components (S+M)" nudi feritne materijale T35 i T38. Materijal T38 ima početnu permeabilnost veću od 10000 i namijenjen je za rad na frekvencijama do 100 kHz. Drugi materijal ima nešto nižu permeabilnost, ali radi na frekvencijama do 400 kHz. Novi materijal T37 moći će nadomjestiti obadva već spomenuta materijala.

ZELENI POLUVODIČKI LASER

Stručnjacima u "Philips Research Laboratories" u Eindhovenu uspjelo je razviti poluvodički laser, koji emitira svjetlost valne dužine od 555×10^{-9} m. Kažu da je to prvi poluvodički laser, koji emitira zeleno. Laser kontinuirano emitira snagu od 3 mW pri struji od 7.5 mA. Element emitira zeleno svjetlo samo ako je ohlađen na temperaturu tekućeg dušika, a to govori da mu je primjena ograničena samo na specijalne naučne potrebe.

ZAŠTITA DMOSFET ELEMENATA

Motorolina "Discrete & Materials Technologies Group" razvila je integrirani sklop za zaštitu snažnih MOSFET elemenata i IGBT tranzistora, koji može isključiti element u vremenu od 15 ns. Sklop je izveden u obliku troizvodnog elementa, koji ima ulazni, izlazni i priključak za uzemljenje, a spaja se na izlazni priključak pobudnog stupnja, upravljačku elektrodu i uvod FET-a. Za pobudni impuls integrirani sklop izgleda kao serijska dioda iza koje, između upravljačke elektrode i uvoda, slijedi 10.4 V zaštitna zener dioda. Gledajući prema natrag upravljačka elektroda FET-a vidi zaštitnu zener diodu i jedan

SCR elemenat. Za vrijeme dok pobudni impulsi dolaze na upravljačku elektrodu SCR je u "off" stanju. Kada pobuda prestane SCR brzo provede prazneći kapacitet upravljačka elektroda-uvod i FET postaje "off". Sklop, koji ima oznaku MDC1000 isporučuje se u TO-92, SOT-23 i SOT-223 kućištima. Cijena je između 0.35 i 0.70 \$/kom. za količine od 1000 kom.

NOVI SKLOP U SOIC KUĆIŠTU

Firma "Internatironal Rectifier" dala je prije dvije godine na tržište integrirani sklop IR2110 u DIP. Sklop je namjenjen za pobudu MOSFET i IGBT tranzistora u mosnim spojevima izvora za napajanje i sklopova za upravljanje elektromotorima. Sada se taj sklop isporučuje u SOIC kućištu. Osnovne karakteristike sklopa su ; napon 500 V, nezavisna pobuda dva kanala s plivajućim gornjim izlazom i donjim izlazom kojemu je uzemljenje referenca. Sklop prekida na frekvencijama višim od 500 kHz u vremenu manjem od 20 ns u opterećenje od 500 pF. Pod oznakom IR2110S sklop košta 5.36 \$ po komadu u količinama od 1000 komada.

NOVI AKUMULATORI

Thoshiba Corp. iz Tokija i Sanyo Electric Co iz Osake proizvode novi tip (nikal/metal- hibrid) akumulatora. Novi akumulator ima dvostruko veći kapacitet, za isti volumen, od Ni/Cd akumulatora. Novi akumulatori će se moći koristiti i u postojećim uređajima, jer su im karakteristike nabijanja i izbijanja slične Ni/Cd akumulatoru. Za početak je i cijena novih akumulatora približno dvostruka u odnosu na Ni/Cd.

PRECIZNA OPERACIONA POJAČALA

Kao zamjenu za popularne standardne modele operacionih pojačala kompanija Burr-Brown dala je na tržište operaciono pojačalo OPA177. Pojačalo ima maksimalni ofset 10 μ V, 0.1 μ V/ $^{\circ}$ C maksimalni drift i 130 db minimalno pojačanje otvorene petlje. Ulazna struja namještanja je 1.5 nA, a tipična struja mirovanja je 1.5 mA. Isporučuje se u 8 izvodnom keramičkom ili plastičnom kućištu, a također i u SO-8 kućištu.

Pripremio:
Miroslav Turina, dipl. ing.

KOLENDAR PRIREDITEV 1991

MAJ

- 5. - 11. III. Evropska konferenca o rasti kristalov, Budimpešta
- 7. - 10. JUROB91, razstava fleksibilne avtomatizacije in robotizacije, Ljubljana (info. GR tel. 311-022)
- 14. - 16. SENSOR 91, Nürnberg (info. ACS Organisation, Von Münchhausen str. 29, D-3050, Wunstorf 2)
- 15. - 17. MIEL91, 19. jugoslovanska konferenca o mikroelektroniki, Beograd (info. MIDEM tel. 061/316-886)
- 19. - 24. MIPRO'91, Opatija (info. M. Filiferović, tel. 051/211-051)
- 22. - 24. MELECON 91, Ljubljana, (info. IEEE Ljubljana, FER)
- 29. - 31. 8th European Hybrid Microelectronics Conference, Rotterdam, (info. Eurocongres, Koningslaan 52, NL 1075 AE Amsterdam)

JUNIJ

- 3. - 7. XXXV. KONFERENCA ETAN, Ohrid
- 5.-7. TECHNOVA INTERNATIONAL, znanstveno, strokovni sejem za visoko tehnologijo in inovacije
- 11. - 14. LASER 91 München (info. OZEHA Zagreb, tel. 041/421-322)

SEPTEMBER

- 9. - 12. ECOSS 12, 12. evropska konferenca o znanosti površin, Stockholm - Uppsala (info. ECOSS12 c/o CONGREX BOX 5619, S-11486, Stockholm)

- 18. - 20. SD91, Simpozij o elektronskih sestavnih delih in materialih, Portorož, (info. MIDEM Ljubljana, 319-170)
- 22. - 25. V. konferenca o senzorjih in njih uporabi, Edinburgh
- 23. - 25. EVC-3, 3. evropska vakuumaska konferenca, Dunaj (info. W. Husinsky, Inst. f. Allgemeine Phys., TU Wien)

OKTOBER

- 7. - 10. SODOBNA ELEKTRONIKA, mednarodna razstava, Ljubljana
- 8. - 9. YUTEL91, 25. Jugoslovanski simpozij o telekomunikacijah, Ljubljana (info EZS)
- 8. - 9. ISEMEC91, 27. Seminar o merilno-procesni tehniki, Ljubljana (info EZS)
- 10. - 11. VAES91, 7. Simpozij o vodenju in avtomatizaciji elektroenergetskih sistemov, Ljubljana (info. EZS)
- 10. - 11. EP91, 13. Jugoslovanski simpozij o elektroniki v prometu, Ljubljana (info. EZS)
- 14. - 18. ECASIA-91 4. evropska konferenca o uporabi metod za analizo površin in faznih mej, Budimpešta (Info. L. Kover, MTA ATOMKI, H-4001 Debrecen, p.f.51)
- 21. - 25. SYSTEMS 91 Muenchen (info. OZEHA Zagreb, tel. 041-421322)
- 22. - 26. INFORMATIKA/INTERBIRO, mednarodni sejem informatike, telekomunikacij in pisarniške opreme, Zagreb

NOVEMBER

- 12. - 16. PRODUCTRONICA 91 München (info. OZEHA Zagreb, tel. 041/ 421-322)

NAVODILA AVTORJEM

Informacije MIDEM je znanstveno-strokovno-društvena publikacija Strokovnega društva za mikroelektroniko, elektronske sestavne dele in materiale-MIDEM. Časopis objavlja prispevke domačih in tujih avtorjev, še posebej članov MIDEM, s področja mikroelektronike, elektronskih sestavnih delov in materialov, ki so lahko:

izvirni znanstveni članki, predhodna sporočila, pregledni članki, razprave z znanstvenih in strokovnih posvetovanj in strokovni članki.

Članki bodo recenzirani.

Časopis objavlja tudi novice iz stroke, vesti iz delovnih organizacij, inštitutov in fakultet, obvestila o akcijah društva MIDEM in njegovih članov ter druge relevantne prispevke.

Strokovni prispevki morajo biti pripravljeni na naslednji način

- 1. Naslov dela, imena in priimki avtorjev brez titula.
- 2. Ključne besede in povzetek (največ 250 besed).
- 3. Naslov dela v angleščini.
- 4. Ključne besede v angleščini (Keywords) in povzetek v angleščini (Abstract).
- 5. Uvod, glavni del, zaključek, zahvale, dodatki in literatura.
- 6. Imena in priimki avtorjev, titule in naslovi delovnih organizacij, v katerih so zaposleni.

Ostala splošna navodila

1. Članki morajo biti tipkani na listih A4 formata v vrsticah dolžine 16 cm. Rob na levi strani mora biti širok 3.5-4 cm.

2. V članku je potrebno uporabljati SI sistem enot oz. v oklepaju navesti alternativne enote.

3. Risbe je potrebno izdelati s tušem na pavs ali belem papirju. Širina risb naj bo do 7.5 oz. 15 cm. Vsaka risba, tabela ali fotografija naj ima številko in podnapis, ki označuje njeno vsebino. Risb, tabel in fotografij ni potrebno lepiti med tekst, ampak jih je potrebno ločeno priložiti članku. V tekstu je potrebno označiti mesto, kjer jih je potrebno vstaviti.

4. Delo je lahko napisano in bo objavljeno v kateremkoli jugoslovanskem jeziku v latinici in v angleščini.

Uredniški odbor ne bo sprejel strokovnih člankov, ki ne bodo poslani v treh izvodih.

Avtorji, ki pripravljajo besedilo v urejevalnikih besedil, lahko pošljejo zapis datoteke na disketi (360 ali 1,2) v formatih ASCII, wordstar (3.4, 4.0), wordperfect, word, ker bo besedilo oblikovano v programu Ventura 2.0. Grafične datoteke so lahko v formatu HPL, SLD (AutoCAD), PCX ali IMG/GEM.

Avtorji so v celoti odgovorni za vsebino objavljenega sestavka. Rokopisov ne vračamo.

Rokopise pošljite na naslov

Uredništvo Informacije MIDEM
Elektrotehniška zveza Slovenije
Titova 50, 61000 Ljubljana

UPUTE AUTORIMA

Informacije MIDEM je znanstveno-stručno-društvena publikacija Stručnog društva za mikroelektroniku, elektronske sestavne dijelove i materijale - MIDEM. Časopis objavljuje priloge domaćih i stranih autora, naročito članova MIDEM, s područja mikroelektronike, elektronskih sastavnih dijelova i materijala koji mogu biti:

izvirni znanstveni članci, predhodna priopćenja, pregledni članci, izlaganja sa znanstvenih i stručnih skupova i stručni članci.

Članci će biti recenzirani.

Časopis također objavljuje novosti iz struke, obavijesti iz radnih organizacija, instituta i fakulteta, obavijesti o akcijama društva MIDEM i njegovih članova i druge relevantne obavijesti.

Stručni članci moraju biti pripremljeni kako slijedi

- 1. Naslov članka, imena i prezimena autora bez titula.
- 2. Ključne riječi i sažetak (najviše 250 riječi).
- 3. Naslov članka na engleskom jeziku.
- 4. Ključne riječi na engleskom jeziku (3 Key Words) i sažetak na engleskom jeziku (Abstract).
- 5. Uvod, glavni dio, zaključni dio, zahvale, dodaci i literatura.
- 6. Imena i prezimena autora, titule i naslovi institucija u kojima su zaposleni.

Ostale opšte upute

1. Prilozi moraju biti strojno pisani na listovima A4 formata u redovima dužine 16 cm. Na lijevoj strani teksta treba biti rub širok 3.5 do 4 cm.

2. U prilogu treba upotrebljavati SI sistem jedinica od. u zagradi navesti alternativne jedinice.

3. Crteže treba izraditi tušem na pausu ili bijelom papiru. Širina crteža neka bude do 7.5 odnosno 15 cm. Svaki crtež, tablica ili fotografija treba imati broj i naziv koji označuje njen sadržaj. Crteže, tabele i fotografije nije potrebno lijepiti u tekst, već ih priložiti odvojeno, a u tekstu samo naznačiti mjesto gdje dolaze.

4. Rad može biti pisan i biti će objavljen na bilo kojem od jugoslavenskih jezika u latinici i na engleskom jeziku.

Autori mogu poslati radove na disketama (360 ili 1,2) u formatima tekst procesora ASCII, wordstar (3.4 i 4.0), word, wordperfect pošto će biti tekst dalje obrađen u Venturi 2.0. Grafičke datoteke mogu biti u formatu HPL, SLD (AutoCAD), PCX ili IMG/GEM.

Urednički odbor će odbiti sve radove koji neće biti poslani u tri primjerka.

Za sadržaj članaka autori odgovaraju u potpunosti. Rukopisi se na vraćaju.

Rukopise šalјite na adresu:

Uredništvo Informacije MIDEM
Elektrotehnička zveza Slovenije
Titova 50, 61000 Ljubljana

INFORMATION FOR CONTRIBUTORS

Informacije MIDEM is professional-scientific-social publication of Yugoslav Society for Microelectronics, Electronic Components and Materials. In the Journal contributions of domestic and foreign authors, especially members of MIDEM, are published covering field of microelectronics, electronic components and materials. These contributions may be:

original scientific papers, preliminary communications, reviews, conference papers and professional papers.

All manuscripts are subject to reviews.

Scientific news, news from the companies, institutes and universities, reports on actions of MIDEM Society and its members as well as other relevant contributions are also welcome.

Each contribution should include the following specific components:

- 1. Title of the paper and authors' names.
- 2. Key Words and Abstract (not more than 250 words).
- 3. Introduction, main text, conclusion, acknowledgements, appendix and references.
- 4. Authors' names, titles and complete company or institution address.

General information

1. Papers should be typed on page format A4 in lines up to 16 cm long. Space on left side of the text should be at least 3.5 to 4 cm long.

2. Authors should use SI units and provide alternative units in parentheses wherever necessary.

3. Illustrations should be in black on white or tracing paper. Their width should be up to 7.5 or 15 cm. Each illustration, table or photograph should be numbered and with legend added. Illustrations, tables and photographs are not to be placed into the text but added separately. However, their position in the text should be clearly marked.

4. Contributions may be written and will be published in any Yugoslav language and in english.

Authors may send their files on formatted diskettes (360 or 1,2) in ASCII, wordstar (3.4 or 4.0), word, wordperfect as text will be formatted in Ventura 2.0. Graphics may be in HPL, SLD (AutoCAD), PVX or IMG/GEM formats.

Papers will not be accepted unless three copies are received.

Authors are fully responsible for the content of the paper. Manuscripts are not returned.

Contributions are to be sent to the address:

Uredništvo Informacije MIDEM
Elektrotehniška zveza Slovenije
Titova 50, 61000 Ljubljana,
Yugoslavia

JUGOSLOVANSKI TERMINOLOŠKI STANDARDI

1	2	3	4
4.3.4	• širina snopa između tačaka polusnage • kut zračenja snopa između točaka polovične snage • агол на зрачењето меѓу точките на полумаќност • sevalni kot med točkama polovične moči	• emission beam angle between half-power points	Kót z vrhom na optični osi emitorja, v katerem izhodna sevalna moč ni manjša kot polovica največje izhodne moči.
4.3.5	• Izlazni/ulazni ugao • izlazni/ulazni kut • излезен/влезен агол • izstopni/vstopni kot	• exit/entrance angle	Kót med izstopnim/vstopnim vektorjem sevanja in osjo vlakna ali snopa vlaken.
4.3.6	• pobudni ugao • uzbudni kut • инјекционен агол, возбужден агол • vnašalni kot	• launch angle	Kót med vektorjem vpadnega sevanja in osjo optičnega vzbujalnika (vnašalnika).
4.3.7	• meridijanska ravan • meridijanska ravnina • меридијанска рамнина • meridianska ravnina	• meridian plane	Katerakoli ravnina, ki gre skozi optično os.
4.3.8	• meridijanski zrak • meridijanska zraka • меридијански зрак • meridianski žarek	• meridian ray	Žarek v meridianski ravnini.
4.3.9	• kosi zrak; nemeridijanski zrak • kosa zraka • немеридијански зрак • poševni žarek	• skew ray	Žarek, ki ni v meridianski ravnini. Pri ravnem vlaknu potuje poševni žarek po vijakasti poti vzdolž vlakna, ne da bi sekal os vlakna.

JUGOSLOVANSKI TERMINOLOŠKI STANDARDI

1	2	3	4
4.3.10	• paraksijalni zraci • paraksijalne zrake • параксијални зраци • obosni žarki	• paraxial rays	Žarki, ki so približno vzporedni z optično osjo.
4.3.11	• optička osa • optička os • оптичка оска • optična os	• optical axis	Simetrijska os optičnega sistema.
4.3.12	• optički kanal • optički kanal • оптички канал • optični kanal	• optical channel	Optično sredstvo za prenos signalov.
4.3.13	• profil indeksa prelamanja • profil indeksa loma • профил на индексот на прекршување • profil lomnega količnika	• refractive index profile	Porazdelitev lomnega količnika vzdolž premera v povprečnem prerezu vlakna.
4.3.14	• največja promena indeksa prelamanja • največja promjena indeksa loma • најголема варијација на индексот на прекршување • največja sprememba lomnega količnika	• maximum index variation	Razlika med največjo vrednostjo lomnega količnika v strženu in vrednostjo lomnega količnika v optični lupini.
4.3.15	• profil indeksa prelamanja vlakna sa skokovitom promenom • profil sa skokovitim promjenom indeksa loma • профил со скоковита промена на индексот на прекршување • nezvezni profil lomnega količnika	• step index profile	Izraz, ki opisuje naglo spremembo lomnega količnika pri prehodu med dvema homogenima elementoma vlakna z nevezano spremembo lomnega količnika. Na primer: $n(r) = n_1 \quad r \leq a$ $n(r) = n_2 \quad r > a$ $n_1 > n_2$

JUGOSLOVANSKI TERMINOLOŠKI STANDARDI

1	2	3	4
4.3.16	- profil indeksa prelamanja sa kontinualnom promenom - profil s kontinuiranom promjenom indeksa loma - профил со постепена промена на индексот на прекршување - zvezni profil lomnega količnika	graded index profil:	Zvezna sprememba lomnega količnika vzdolž premera vlakna. Eden izmed načinov izražanja je naslednji: $n^2(r) = \begin{cases} n_1^2 - (n_1^2 - n_2^2) \cdot \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha, & r \leq a \\ n_2^2, & r \geq a \end{cases}$ kjer je: a — premer stržena, n_2 — lomni količnik lupine, n_1 — lomni količnik stržena, α — koeficient, ki je odvisen od valovne dolžine, za katero je vlakno projektirano, in od optičnih parametrov snovi, iz katerih je vlakno izdelano (lomni količnik in disperzija snovi).
4.3.17	- parabolični profil - parabolični profil - параболичен профил - parabolni profil (lomnega količnika)	parabolic profile	Vlakno, pri katerem se lomni količnik spreminja po obrazcu: $n(r) = n_1 \cdot \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^{1/2}$ kjer je: r — polmer, računat od osi vlakna, Δ, a — konstanti, n_1 — lomni količnik za $r = 0$.
4.3.18	- dužina optičkog puta - dužina optičkog puta - должина на оптичката патека - dolžina optične poti	optical path length	Zmnožek elementa poti in lomnega količnika n. Ča je n odvisen samo od položaja na poti, je: dolžina optične poti — $n \cdot ds$, kjer je: ds — element poti.

JUGOSLOVANSKI TERMINOLOŠKI STANDARDI

4.4 Numerična odprtina

1	2	3	4
4.4.1	• numerička apertura • numerical aperture • нумеричка апертура — класична • numerical aperture	• numerical aperture — classical	Sprejemni kot optičnega sistema v meridianski ravnini, definiranih z obrazcem: $NA = n \cdot \sin \theta$ kjer je: - NA — numerična odprtina, θ — kot med optično osjo vlakna in meridianskim žarkom, — lomni količnik sredstva, v katerem se meri kot.
4.4.2	• numerical aperture vlakna • numerical aperture of fibre • нумеричка апертура на оптичното влакно • numerical aperture of fibre	• fibre numerical aperture	Za optična vlakna se numerična odprtina določa z lomnima količnikoma stržena in lupine: $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ kjer sta n_1 in n_2 lomna količnika stržena oz. lupine vlakna pri vlaknu z nezvezno spremembo lomnega količnika. Pri vlaknih z zvezno spremembo lomnega količnika je n_1 največja vrednost lomnega količnika v strženu in n_2 najmanjša vrednost v lupini. Opomba: Obrazec je pomemben za razumevanje prenosa z optičnimi vlaknom, vendar se v praksi uporabljajo druge definicije, ki upoštevajo še druge pojave pri prenosu (diferenčno slabljenje rodov, izgube zaradi mikro upogibanja itd.).