

MIKROELEKTRONIKA

U okviru tehničke opremljenosti savremenih armija, koja se povećava iz dana u dan, elektronski uređaji zauzimaju značajan deo. Osim kvantitativnog povećanja, pred konstruktore elektronskih uređaja postavljaju se i sve stroži zahtevi u pogledu tehničkih karakteristika koje takav uređaj treba da zadovolji, a to je povećanje brzine, tačnosti i pouzdanosti rada, kao i smanjenje njegove cene koštanja, potrošnje električne energije i dimenzija.

Cilj je ovog članka da se čitaoci upoznaju sa mikroelektronikom koja je znatno smanjila dimenzije i težinu elektronskih uređaja, što je i te kako važno sa vojnog stanovišta.

Međutim, smanjenje dimenzija elektronskih uređaja ne bi smelo istovremeno da dovede i do smanjenja njihovih dobrih karakteristika. Na sreću, mikroelektronika, tj. tzv. mikro-kola, osim svoje minijaturnosti imaju i tu dobru stranu što su pouzdanija, manje troše električnu energiju i jeftinija su od tzv. diskretnih kola.

Najpre, šta je to »diskretno-kolo«? Ako se pogleda televizor ili radio-prijemnik iznutra videće se mnoštvo otpornika, kondenzatora, kalemova i elektronskih cevi. Oni su na prvi pogled razmešteni haotično; međutim, taj razmeštaj ima svoj unutrašnji smisao. Ono što odmah pada u oči jeste da je svaki od ovih delova razdvojiv (diskretan) i da se, po potrebi, može zameniti. Ista je situacija i sa tranzistorima, koji su, u stvari, zamenili elektronske cevi, te i otpornici i kondenzatori mogu biti manjih dimenzija; inače, princip konstrukcije je isti kao i kod televizora ili radio-prijemnika.

Svaki elektronski uređaj može se, u funkcionalnom pogledu, razdvojiti na posebne delove — kola koja obavljaju određene operacije, na primer: pojačavanje signala, mešanje dva signala, detekcija itd. Kada su ova kola konstruisana na klasičan način — od »diskretnih« delova — nazivaju se diskretna-kola, za razliku od mikro-kola kod kojih su delovi tako povezani da se ne mogu vaditi i zamenjivati a da se pri tome ne ošteti čitavo kolo.

Ovom poslednjom rečenicom definisano je i samo mikro-kolo, s tim što treba još dodati da su mikro-kola mnogo manjih dimenzija od diskretnih-kola.

Ovde je potrebno objasniti i izraz »gustina pakovanja sastavnih delova« jer će se on kasnije češće spominjati. Gustina pakovanja sastavnih delova označava broj sastavnih delova (otpornika, kondenzatora, kalemova i tranzistora) koji se može smestiti u 1 cm³ elektronskog kola. Na taj način se sada ono ranije poređenje »mnogo manjih dimenzija« može brojno izraziti pomoću »gustine pakovanja«.

Kod diskretnog-kola gustina pakovanja iznosi 3 dela u cm³, a kod mikro-kola ona dostiže 3.000 delova u cm³.

Diskretno-kolo je već postiglo zasićenje u pogledu gustine pakovanja, dok mikro-kolo još nije iscrplo sve svoje mogućnosti. Teorijski je moguće

u 1 cm³ smestiti 300.000 delova kola. Međutim, u do sada realizovanim uređajima moglo se smestiti 3.000 delova/cm³. Dalje smanjenje uređaja za 100 puta moguće je ukoliko bi se izbacila kućišta, smanjile dimenzije potencijometra transformatora itd., a žičana veza između kola zamenila opto-elektronskom spregom, itd. što se danas već pokazuje kao moguće.

Šta znači povećanje gustine pakovanja neka posluži ovaj primer: računarska mašina pre pojave tranzistora, tj. konstruisana sa elektronskim cevima, zauzimala je čitavu sobu; isti računar konstruisan sa tranzistorima veličine je ormana i pisaćeg stola zajedno, a konstruisan sa mikro-kolima zauzima samo prostor pisaćeg stola. Osim ovog značajnog smanjenja zapremine, računari sa mikro-kolima su jeftiniji i pouzdaniji, tj. manje se kvare od diskretnih-kola sa tranzistorima, a da se i ne govori koliko su puta bolji od onih sa elektronskim cevima.

Šta je to mikroelektronika i čemu ona ima da zahvali za povećanje svoje pouzdanosti, gustine pakovanja i smanjene cene koštanja. Pod pojmom mikroelektronike podrazumevaju se u suštini tri vrste, odnosno načina konstrukcije kola: mikromoduli, funkcionalna elektronika i integralna-kola.

Potrebno je odmah napomenuti da će o mikromodulima i funkcionalnoj elektronicu biti vrlo malo govora, zapravo samo ono što je najneophodnije, pošto su mikromoduli već prevaziđeni a funkcionalna elektronika je još u povoju. Najviše reči biće o integralnim-kolima koja danas imaju najveću praktičnu vrednost.

MIKROMODULI

Kod diskretnog-kola otpornici se prave na keramičkoj cevčici, kondenzatori se dobijaju namotavanjem metalne i izolacione folije, tranzistori i diode se zatvaraju u posebnom kućištu. Svaki od ovih delova ima žične izvode za spajanje u kolo i svi su oni obično cilindričnog oblika, što otežava njihovo pakovanje. Kod njih je odnos između aktivne i ukupne zapremine vrlo veliki i iznosi oko 1 : 1.000, tj. svega se hiljaditi deo zapremine koristi za obavljanje same korisne operacije dok sve ostalo otpada na podlogu, izvode, kućište, itd.

Osnovna zamisao kod mikromodularne tehnike jeste da se svi delovi prave na istim keramičkim pločicama veličine obično 8 × 8 × 0,3 mm bez žičnih izvoda. Otpornici i kondenzatori se prave naparavanjem otporne, odnosno izolacione materije na pločicu. Tranzistori i diode se mogu montirati na pločici sa kućicom ili bez nje što zavisi o kojim tranzistorima i diodama se radi. Na pločici se montiraju i kalemovi. Električni kontakti svih ovih elemenata su izvedeni na ivici pločice. Kolo se može sklopiti slaganjem odgovarajućih pločica i njihovim povezivanjem žicama po obodu.

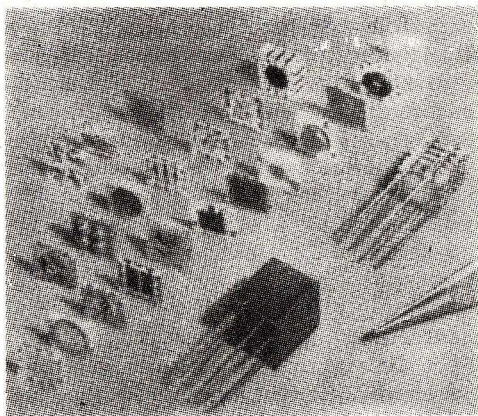
Na sl. 1 date su u nizu keramičke pločice, od kojih svaka nosi na sebi po jedan element kola. Osim toga, desno se vide i dva sklopljena kola, od kojih je donji već zaliven u smolu i time zaštićen od uticaja okoline.

Ovi delovi mikro-modula nisu mnogo manji od onih kod diskretnih-kola, ali sam njihov oblik je omogućio da se postigne 7—10 puta veća gustina pakovanja, tj. oko 20 sastavnih delova u cm³. Čvršća konstrukcija omogućava da ova kola mogu da izdrže i veće potrese i udarce (bez oštećenja), što je posebno značajno za vojne uređaje. Zalivanjem celog kola u

smolu omogućava se njegov rad i u vrlo teškim atmosferskim prilikama. Rad na mikromodulima počeo je 1958. godine, a već 1962. američka armija je imala nekoliko uređaja u mikromodularnoj izvedbi, na primer, radio-prijemnik sa 7 mikromodula, težine 400 gr, i radio-prijemnik sa 11 mikromodula, težine 22 gr zajedno sa baterijama.

Sa 1.650 mikromodula koji sadrže 25.625 sastavnih delova (tj. 15 delova u 1 mikromodulu prosečno) konstruisan je prenosni elektronski mozak čiju 1/3 zapremine zauzima samo elektronika, dok 2/3 izvor za napajanje.

I pored smanjenja dimenzija, nije došlo do masovne primene mikromodula kao što se to krajem pedesetih godina proricalo, jer su se u međuvremenu pojavila integralna-kola koja su mikromodule nadmašila u pogledu gustine pakovanja, pouzdanosti i cene. Sam rad na mikromodulima dao je ideju o dvodimenzionalnom-kolu iz koga se razvilo tankoslojno i hibridno-kolo, o kojima će biti reči u delu u integralnim-kolima.



Sl. 1

FUNKCIONALNA ELEKTRONIKA

Da bi se udovoljilo zahtevima sve preciznijeg rada uređaja, oni se moraju konstruisati od sve većeg broja visoko pouzdanih sastavnih delova. Iako savremena tehnologija proizvodi pouzdane sastavne delove, već sam njihov ogroman broj povećava verovatnoću otkazivanja rada čitavog uređaja. Uzmimo, na primer, televizor koji sadrži 20 elektronskih cevi, oko 200 otpornika i isto toliko kondenzatora. Ma koji deo da otkáže, pogoršavaju se ili slika ili ton, tj. dolazi do kvara čitavog televizora. Međutim, dok se na popravku televizora može čekati bez nekih većih posledica, dotle će ako otkáže nišanska elektronika kod mlaznjaka ili artiljerijski računar za vreme borbe posledice biti znatno teže. Verovatnoća da dođe do kvara rapidno se povećava sa povećavanjem broja sastavnih delova. Uređaji o kojima je reč sadrže po nekoliko desetina hiljada sastavnih delova te se može pretpostaviti da će takav uređaj vrlo kratko vreme raditi bez popravke, tj. nekoliko desetina časova, što i praksa potvrđuje.

U čovekovom nervnom sistemu nema elektronskih cevi, tranzistora, kondenzatora, itd., a mozak ipak obavlja vrlo složene operacije i, što je važno, ne kviri se tako često kao današnji elektronski mozгови.

Kada bi čovekov mozak bio napravljen od tranzistora, dioda, otpornika, itd. gustina pakovanja u njemu bila bi fantastična, oko 4,000.000 sastavnih delova u cm^3 , što je u principu nemoguće postići sa efektima koji se danas koriste u elektronskim kolima. Izgleda da mozak koristi druga-

čije efekte od onih u postojećim elektronskim uređajima, koji mu omogućavaju da u malom prostoru pouzdano obavlja složene operacije.

U poslednje vreme ljudi su pokušali da veštački stvore nešto što u prirodi postoji odavno i ta grana ljudske delatnosti naziva se *funkcionalna elektronika*. U funkcionalnom-kolu ne postoji ni tranzistor, ni otpornik ili neki drugi element, a kolo obavlja takvu operaciju kao da te elemente sadrži. Funkcionalno-kolo ne treba mešati sa integralnim-kolom u kome tranzistor i drugi elementi postoje, samo što su tako montirani da kolo čini nedeljivu celinu. Funkcionalno-kolo sačinjavaju jedan ili više takvih sastavnih delova koji zamenjuju rad desetine i desetine danas poznatih sastavnih delova. Ovako znatno smanjenje broja sastavnih delova i pruža funkcionalnom-kolu visoku pouzdanost.

Funkcionalna elektronika je još na početku svog razvoja, ali je već pokazala i prve uspehe. Desetak godina se već koristi ultrazvučna linija za zakazivanje električnih signala, koja sadrži svega tri sastavna dela: ultrazvučni generator,¹ kristal kvarca kao ultrazvučni vod² i ultrazvučni prijemnik. Ekvivalentno-kolo, sastavljeno od kondenzatora i kalemova, sadrži nekoliko stotina sastavnih delova.

Jedan od tipičnih funkcionalnih blokova koji je odavno našao primenu je piezoelektrični kvarcni kristal u ulozi oscilatornog-kola visokih kvaliteta. Skoro svaki radio-prijemnik u opremi armija, kao i oni u civilnoj upotrebi, sadrži ove kvarcne oscilatore. Kvarcni oscilator radi kao da sadrži induktivnost, kapacitet i otpornost, iako tih elemenata u stvari nema u kristalu.

Osim ovog, u praksi već ispitivanog bloka, razvijeni su i ultrazvučni pojačivači koji zamenjuju nekoliko desetina sastavnih delova klasičnog tipa.

Predviđa se da će funkcionalna elektronika doći do punog razvoja posle 1980. godine. Otuda je interesantnije razmotriti ono što nas očekuje u neposrednoj budućnosti, tj. integralna-kola.

INTEGRALNA-KOLA

Još pre drugog svetskog rata bilo je nekoliko pokušaja da se u zajedničko kućište smesti više sastavnih delova. Tako je poznat pokušaj da se u stakleni balon elektronske cevi, pored elektronskog sistema, smeste i otpornici. Međutim, ovo je otpalo kao nepraktično te se do ostvarenja ove zamisli moralo da čeka nekih dvadesetak godina, tako da su tek 1957. godine ponovo počeli ozbiljniji radovi na stvaranju kola u zajedničkom kućištu. Nije prošlo ni nekoliko godina posle toga, a već su načinjeni primerci integralnih-kola koji su položili i praktičan deo ispitata.

Prva integralna-kola bila su hibridnog tipa, tj. sastojala su se od keramičke pločice sa naparenim otpornicima i kondenzatorima kojima su pripojeni tranzistori zatvoreni u svoja posebna kućišta.

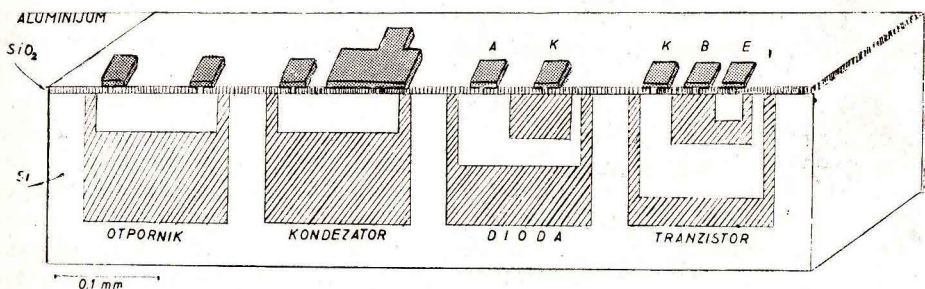
Ovo kolo je slično mikromodulu s tom razlikom što su ovde svi elementi na zajedničkoj podlozi.

¹ Ultrazvučni generator je izvor koji proizvodi ultrazvučne talase, a ultrazvučni prijemnik pretvara ultrazvučne talase u električni signal.

² Ultrazvučni vod je kristal ili neki drugi pogodan materijal kroz koji se puštaju ultrazvučni talasi sa što manjim slabljenjem.

Daleko značajnije smanjenje dimenzija postiže se izradom svih elemenata kola, tj. otpornika, kondenzatora i dioda, ne na keramičkoj pločici već u onom istom kristalu poluprovodnika u kome je ugrađen i tranzistor. Realizovanje ove zamisli omogućeno je razvojem tzv. »planarne«³ tehnike i s obzirom na njenu važnost opisaćemo je ukratko.

Pod planarnom tehnikom podrazumeva se niz tehnoloških operacija: oksidisanje monokristala silicijuma,⁴ fotolitografsko⁵ pravljenje otvora u oksidnoj zaštiti, difuzija primesa⁶ u silicijumu kroz napravljenu oksidnu masku, naparavanje aluminijuma kao kontaktnog materijala i pravljenje žičnih izvoda, sve ovo sa ciljem da se na određenim mestima u pločici silicijuma napravi tranzistor, dioda, otpornik ili kondenzator (vidi sl. 2).



Sl. 2

Samo integralno-kolo dobija se na taj način što se svi elementi jednog kola grupišu zajedno. Njihovo povezivanje u kolo vrši se na kraju jednim naparavanjem aluminijumske »šare«, koja zamenjuje desetak pa i dvadeset lemljenja žica kod diskretnog kola. Na sl. 3 prikazano je kolo sa 4 tranzistora i 6 otpornika.

Tranzistori su na kolu na desnoj strani (po dva skupa), a otpornici su na levoj strani pločice. Bele šare koje se vide u stvari su tanke trake aluminijuma koje povezuju međusobno tranzistore i otpornike. Crni krugovi na ivici kola označavaju mesta na kojima su napravljeni žični izvodi za uklapanje kola u uređaj.

Bilo bi suvišno u ovom članku govoriti detaljno o svakoj tehnološkoj operaciji ponaosob, već treba obratiti pažnju na sledeće činjenice.

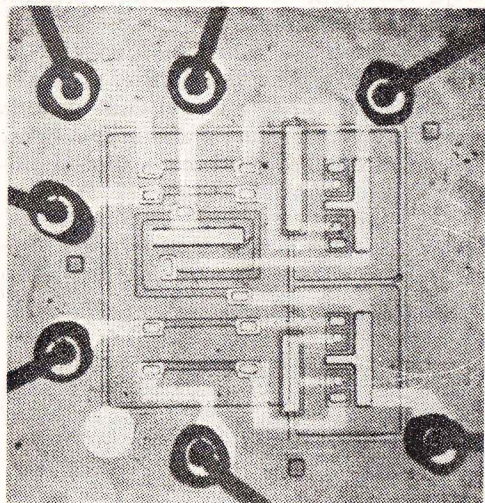
³ Naziv »planarna« potiče od toga što su svi izvodi napravljeni u jednoj ravni, u »planu«.

⁴ Oksidisanje silicijuma, njegovo rđanje, vrši se i na normalnoj temperaturi, ali da bi se ubrzala oksidacija i stvorio čvršći sloj oksida, silicijum se zagreva na 1.100°C u vlažnoj atmosferi. Stvoren oksid (SiO₂) je u stvari staklo koje je inertno prema hemikalijama. Jedino se rastvara u fluorovodoničnoj kiselini.

⁵ Fotolitografski postupak nagrizanja se sastoji u nanošenju fotoemulzije na onim površinama oksida koje se žele sačuvati, a nagrizanje oksida se vrši tamo gde nema fotoemulzije. Posle nagrizanja i pranja na silicijumu ostaje oksidni sloj sa otvorima te liči na masku.

⁶ Pod pojmom difuzije podrazumeva se sporo prodiranje stranih atoma primesa u čvrstom telu. Da bi se ubrzala difuzija čvrsto telo, u našem slučaju silicijum, se zagreva na oko 1.200°C u atmosferi atoma primesa i drži na toj temperaturi od nekoliko minuta do par časova, što zavisi od vrste primesa i željene dubine njenog prodiranja.

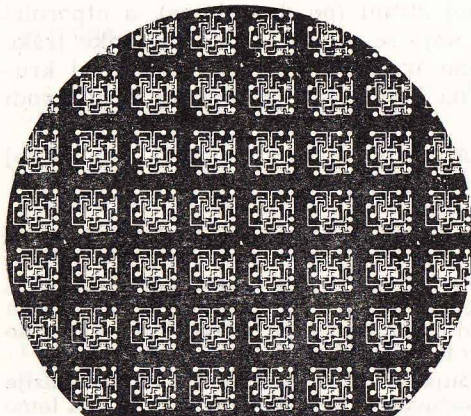
Sl. 3 nije data u razmeri te tranzistor i ostale sastavne delove treba zamisliti 25 puta manjim, tj. oni su jedva vidljivi golim okom, te se i celo kolo može razaznati tek pod mikroskopom. Ovo za razliku od kola televizi- zora, gde se svaki otpornik lepo vidi i može rukom opipati bez i- kakvih pomoćnih sprava.



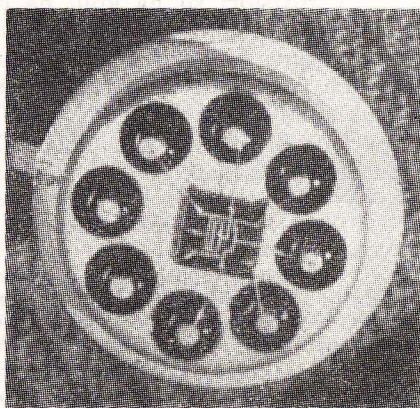
Sl. 3

Ova mikrominijatura tehnika, prema kojoj je i časovni- čarska, kao pojam preciznosti, vrlo gruba, zahteva osim mikro- skopa, bez kojih se ne može ni zamisliti rad, i vrlo precizne mi- kromanipulatore tačnosti reda mikrona; zatim, kvalitetne peći za difuziju (radi se na $1.300 \pm 1^{\circ}\text{C}$), precizne uređaje za zavari- vanje izvodnih žica i još neke do- datne (ne manje precizne i skupe) uređaje. Opremanje jedne razvoj- ne laboratorije za rad na planar- noj tehnici košta oko 100.000 do- lara, ali su zato proizvodi plana- rne tehnike kvalitetni i jeftini.

Na sl. 4 je prikazano poluprovodničko integralno-kolo koje je celo ugrađeno u parčetu kristala silicijuma veličine $2 \times 2 \times 0,1$ mm. Obično se istovremeno radi po 30—100 komada ovakvih kola na jednoj pločici sili- cijuma debljine 0,1 mm, prečnika oko 25 mm, pa kada se na kraju napare aluminijumske veze, pločica se iseca na posebna kola. Isečene pločice se leme u kućište, a veze im se zavaruju tankom debljinom 0,02 mm.



Sl. 4



Sl. 5

I pored velikog broja tehnoloških postupaka (oko 20) koji se moraju solidno obaviti, ova kola su, zahvaljujući tome da se sa jedne pločice do- bija čitava stotina odjednom, jeftina. Gotovo kolo pre sečenja pločice i

lemljenja u kućište košta oko 200 dinara, a potpuno završeno i ispitano oko 2.000 — 5.000 dinara; ovde se misli na kola za elektronske računare. Kola za radio-uređaje su skuplja. Ove cene su sada nešto veće od cena diskretnih-kola, ali kad se uzme u obzir da integralna-kola duže traju, onda im se cene izjednačuju.

Ne treba zaboraviti da je proizvodnja integralnih-kola tek na početku i da treba očekivati da će ubuduće i njihova cena pasti.

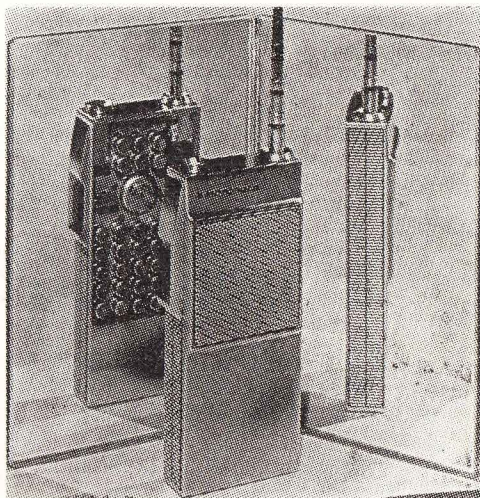
Do sada smo se uglavnom zadržali na poluprovodničkim integralnim-kolima koja su danas od najvećeg praktičnog značaja; međutim, postoje i tankoslojna integralna-kola kod kojih su i aktivni sastavni delovi (tranzistori i diode) i pasivni (otpornici, kondenzatori i kalemovi) u obliku vrlo tankog sloja, najčešće nanetog naporavanjem različitih materijala u vakuumu.

Zbog teškoća oko izrade tankoslojnih aktivnih sastavnih delova, potpuno tankoslojno-kolo nema značaja, ali zato kombinacijom poluprovodničkih aktivnih i tankoslojnih pasivnih sastavnih delova dobijaju se hibridna-kola, koja su za vojnu elektroniku od velikog značaja. Poznato je da je poluprovodnički otpornik nestabilan na promene temperature, a da je kondenzator malog kapaciteta i osetljiv na promene napona. Upotrebom tankoslojne tehnike kolo je manje zavisno od temperature i tu se mogu integrisati i takva kola koja traže visoke kapacitete, kao što su kola u radio-uređajima.

Tankoslojnim-kolima se predviđa budućnost jer zahtevaju manji broj tehnoloških postupaka. I kod njih treba imati u vidu da se i poluprovodnička integralna-kola oslanjaju na 15 godina intenzivnog razvoja poluprovodničkih tranzistora i dioda, dok je tankoslojna tehnika mlađa.

Uređaji sa integralnim-kolima su za sada uglavnom namenjeni vojnoj tehnici, te treba sačekati nekoliko godina dok dođe do njihove široke potrošnje, pošto je kod robe za široku potrošnju važnija cena od kvaliteta, tj. pouzdanosti rada.

U armiji SAD došlo je do delimičnog uvođenja mikro-kola u postojeće uređaje ili konstruisanja novih uređaja sa što je moguće više zastupljenim mikro-kolima. Prave se uređaji za potrebe veze, navigacije i računara. Najkrupniji program predstavlja izrada: elektronske računске mašine *Minuteman* sa integralnim-kolima; lansera sa elektronskim meraćem daljine, u kome će biti integralna-kola kako bi se dobio lakoprenosni daljinomer; fototelegrafske aparature tipa AN/GXC-5 za korišćenje u neposrednoj blizini fronta. Na sl. 6 vidi se minijturni radio-primopredajnik firme MOTOROLA namenjen za vojne potrebe, a izrađen pomoću integralnih-kola.



Sl. 6

U vremenu od 1959. do 1964. godine armija SAD je ubrzala razvoj integralnih-kola. Njihovim uvođenjem u naoružanje, pored znatne budžetske uštede, postiže se i smanjenje broja ljudi za održavanje elektronske opreme.

Iza obimnog rada na razvoju i proizvodnji integralnih-kola stoje danas mnogobrojne naučnoistraživačke organizacije i fabrike u svetu. Samo u SAD ima oko 60 većih firmi koje rade na proizvodnji pojedinih delova mikroelektronike. U Vel. Britaniji ih ima oko 30. Glavni izvori za finansiranje njihovog rada su nacionalni vojni budžeti i proizvođači računskih mašina.

Postoje slučajevi da se pojedine firme na Zapadu čak i zadužuju samo da ne bi bile potisnute — primorane da napuste proizvodnju u ovoj oblasti, gde mnogi vide budućnost čitave elektronike.

Do sada su u članku uglavnom spominjani rezultati rada američkih organizacija; međutim, to ne znači da socijalističke zemlje ne rade na ovome. U nekim od njih (SSSR-u, Čehoslovačkoj, Mađarskoj, DR Nemačkoj, Poljskoj) postoje instituti koji se orijentišu na razvoj i primenu mikroelektronike, te i rezultati svakako ne izostaju, samo što o tome ima malo objavljenih radova.

U našoj zemlji takođe postoje kadrovske i materijalne mogućnosti za razvoj mikroelektronike. U Beogradu, Ljubljani i Zagrebu postoje organizacije koje se bave razvojem poluprovodničkih sastavnih delova i koje su u fazi osvajanja planarne i tankoslojne tehnike koje omogućavaju i razvoj integralnih-kola.

Ljutica PEŠIĆ
dipl. inž.

LITERATURA:

- E. Koenjian: *Microelectronics*, McGraw-Hill Book Comp. 1963. god.;
- Warner R. and Fordemwalt, J.: *Integrated Circuits*, McGraw-Hill Book Comp. 1965. god.;
- Sumner Levine: *Principles of Solid-State Microelectronics*, Holt Rinehard and Winstva 1963. god.;
- *Custom Microcircuit Design Handbook*, firma Fairchild, USA, 1963. god.;
- *Motorola Monitor*, Vol. 2, No. 2, 1965. god.;
- *Proceedings of the IEEE*, decembar 1964. god.