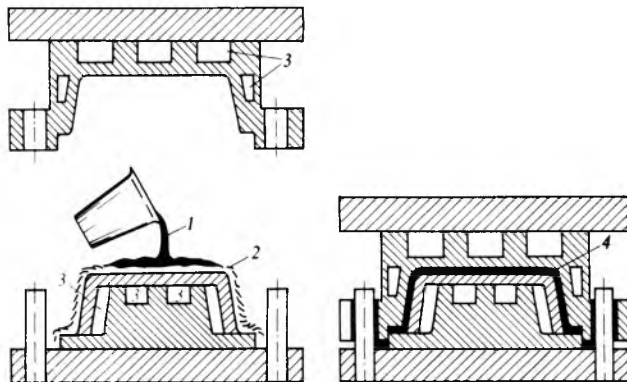


u kalupe. Smola se umrežuje u zatvorenom kalupu povišenjem temperature i stvara se čvrsti ojačani otpresak.

Predimpregnirana mješavina u obliku *tijesta* priprema se u gnjetilici od smole i kratkosječenog staklenog vlakna. Od tijesta se prvo ekstrudiranjem dobiva pripremak (užad, trupci), koji se prerađuje izravnim, posrednim ili injekcijskim prešanjem.

Mokro prešanje. U oblikovani kalup ulaže se vlaknati materijal, koji je od staklenog pletiva ili tkanine već izrezan na potrebnu veličinu i oblik. Može se raditi i tako da se od staklenih vlakana duljine 2...5 cm prvo načini pripremak (suhi predoblik) željene debljine cijedenjem na situ koje je približno savijeno na oblik kasnijeg proizvoda, a zatim se takav pripremak ulaže u kalup.



Sl. 37. Mokro prešanje ojačane poliesterske smole. 1 smola, 2 suhi predoblik od vlaknatog materijala, 3 kanali za zagrijavanje kalupa, 4 ojačani otpresak

Na vlaknati materijal u kalupu lijeva se zatim smola sa svim potrebnim dodacima (sl. 37). Prilikom zatvaranja kalupa istjeruje se zrak i smola se jednoliko širi i natapa vlaknato ojačanje. Za hladno prešanje (temperatura 20...60 °C) u smolu se dodaje umrežavalo i ubrzavalo, pa umrežavanje započinje ubrzo po zatvaranju kalupa. Smola za toplo prešanje ne sadrži ubrzavalo, već se umrežavanje postiže povišenjem temperature kalupa na 80...120 °C uz tlak 0,5...5 MPa.

LIT.: R. V. Milby, *Plastics Technology*. McGraw-Hill, New York 1973. — H. Käufer, *Arbeiten mit Kunststoffen*. Springer Verlag, Berlin: Band 1, 1978; Band 2, 1981. — G. Menges, *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Carl Hanser Verlag, München 1979. — G. Menges, *Werkstoffkunde der Kunststoffe*. Carl Hanser Verlag, München 1979. — Z. Tadmor, C. G. Gogos, *Principles of Polymer Processing*. John Wiley and Sons, New York 1979.

1. Čatić

POLUVODIČI, materijali kojima su električna svojstva različita od električnih svojstava metala i izolatora. Posebnost je poluvodiča povećanje njihove električne provodnosti (specifične vodljivosti) porastom temperature u širokom temperaturnom području. U vodičima kao što su metali (osim kod nekih slitina) ona se smanjuje porastom temperature sve do tališta.

Naziv *poluvodiči* potječe od toga što se vrijednost električne provodnosti prvih poznatih poluvodiča pri sobnoj temperaturi nalazi između te vrijednosti vodiča i izolatora (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, TE 4, str. 472). Međutim, vodiči i poluvodiči se razlikuju prema porijeklu slobodnih nosilaca elektriciteta, a ne po vrijednosti električne provodnosti. I jedni i drugi mogu biti bolje vodljivi ili slabije vodljivi (tako da se s obzirom na primjenu mogu smatrati gotovo izolatorima).

Kristalni poluvodiči su osnova suvremenih elektroničkih elemenata (dioda, tranzistora i mnogih drugih) i integriranih elektroničkih sklopova koji su 1960-ih godina gotovo potpuno potisnuli iz upotrebe elektronske cijevi. Zato se suvremena elektronika često naziva i poluvodičkom elektronikom.

Još je 1874. njemački fizičar F. Braun zapazio da se kristali metalnih sulfida i oksida u strujnom krugu ponašaju kao električni ventili. U to doba to nije imalo nikakvu praktičnu primjenu, pa je to otkriće ostalo nezapaženo.

Pioniri radio-tehnike u svojim su prvim pokusima kao detektor (demodulator) upotrebljavali mnogo manje osjetljive ventile: koherer ili fritter (E. Branley 1890), magnetski detektor (G. Marconi 1901/2), termički detektor ili bolometer (B. W. Feddersen), te elektrolitički detektor (G. Ferrie i W. Schlämlich 1902/3).

Godine 1904. britanski inženjer J. A. Fleming konstruirao je na temelju Edisonovih opažanja elektronsku cijev diodu. Dioda je pouzdan detektor za profesionalnu upotrebu, ali vrlo skup u izradbi i upotrebi.

Kristalni detektor na temelju Braunova otkrića počeli su upotrebljavati tek 1906. i to neovisno američki general Dunwoody i njemačka tvrtka Telefunken. Zbog jednostavnosti i vrlo dobrih električnih svojstava kristalni se detektor počeo odmah mnogo upotrebljavati. Sastojao se od grumenčica prikladnog kristala (karborund, galenit, pirit, cinkit i mnogi drugi) na koji je bio prislonjen metalni šiljak ili drugi kristal. Istraženi su mnogi parovi kristal—metal koji su pokazivali ventilsko djelovanje. Nastale su također i mnoge teorije (termoelektrična, elektrolitička, elektrostatika) kojima se pokušalo tumačiti ventilsko djelovanje.

No, uz sva dobra svojstva kristalni je detektor imao, posebno za profesionalnu upotrebu, i velik nedostatak. Ventilsko je djelovanje, osim u paru kristal—metal, ovisno i o mjestu na kojemu metalni šiljak dodiruje kristal, pa i o sili kojom pritišće. Položaj šiljka je mehanički nestabilan i lako se potresanjem poremeti.

Izumom elektronske cijevi triode (Lee de Forest, 1906/7), koja osim što je detektor može i pojačavati, kristalni detektor tokom prvoga svjetskog rata izlazi iz profesionalne upotrebe. S razvojem radio-difuzije 1920-ih godina kristalni se detektor počinje ponovno na veliko upotrebljavati u najjednostavnijim radio-prijemnicima, ali uskoro su ga zamijenile sve jeftinije i bolje elektronske cijevi: trioda, tetroda, pentoda i dr., na kojima se razvila elektronika u većini svojih primjena.

Još je samo poneko eksperimentirao s kristalnim detektorom. Tako je ruski inženjer O. V. Losev 1919/23 pomoću prednapona načinio oscilator sa cinkinom. U tzv. *kristalinskom prijamniku* na pragu osciliranja takav je kristalni detektor vrlo osjetljiv, a pri osciliranju može primati nemoduliranu telegrafiju. Cinkinisti kristalni detektor je prethodnik mnogo kasnije konstruirane tunelne diode.

Godine 1928. J. Lillienfeld izradio je pomoću bakar-sulfida element koji je prethodnik današnjem MOSFET-u (v. *Impulsna i digitalna tehnika*, TE 6, str. 436), a 1935. O. Heil je pomoću različitih poluvodiča izradio element koji je prethodnik današnjem FET-u (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, TE 4, str. 483). C. Zener (1935) istražuje posebna svojstva poluvodiča na kojima se osniva današnja Zenerova dioda. Oko 1935. razvijeni su i električni ventili s bakrenim ili selenskim oksidom, s nazivima Westector (SAD) i Sirutor (Njemačka).

Tek je razvoj radara prelaskom na sve više frekvencije, na kojima zbog parazitnih kapaciteta i induktiviteta elektronska cijev više ne može raditi, ponovno potaknuo istraživanja kristalnih dioda. Tako su oko 1938. konstruirani stabilni kristalni detektori pomoću germanijskog kristala. Takav je element načinjen zatajivanjem metalnog šiljka na pločicu germanijskog kristala i nazvan je *kristalnom diodom*.

Poslije drugoga svjetskog rata u Bell Telephone Laboratories grupa fizičara pod vodstvom W. Shockleya istraživala je svojstva poluvodičkih kristala. J. Bardeen i W. Brattain zapazili su 1947/48. na germanijskom kristalu, spojem pomoću prislonjenih šiljaka u dva strujna kruga, pojačavačko djelovanje. Taj su element prema engl. *transfer resistor* nazivali *tranzistorom*. Bio je to revolucionaran pronalazak, na kojemu se osniva suvremena elektronika.

W. Shockley je 1950. razvio slični tranzistor sastavljen od triju slojeva poluvodičkog kristala, i tek se takav tranzistor mogao serijski proizvoditi za komercijalnu upotrebu.

Godine 1956. su za izum tranzistora W. Shockley, J. Bardeen i W. Brattain dobili Nobelovu nagradu.

Na temelju tih otkrića razvila se poluvodička tehnologija kojom se proizvode brojni poluvodički elektronički elementi: tranzistor s efektom polja ili FET (Shockley, 1952; S. Tszner, 1958), tunelna dioda (L. Esaki, 1958), sunčana ćelija (D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson, 1954), svijetleća dioda ili LED (J. W. Allen i P. E. Gibbons, 1960; N. Holonyah, 1962), poluvodički laser (R. N. Hall i dr., 1962) i mnogi drugi koji su gotovo potpuno potisnuli iz upotrebe elektronske cijevi.

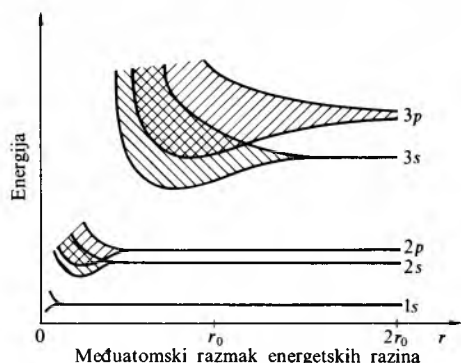
Konačan oblik današnji elektronički uređaji dobivaju izumom integriranih sklopova (G. W. A. Dummer, 1952; J. S. Kilby, 1959) i mikroprocссора (1974).

Z. Jakobović

Atomska struktura poluvodiča. Poluvodički materijali jesu prirodni elementi, prirodni kemijski spojevi ili umjetno načinjeni spojevi. Atom takva materijala vezan je s drugim atomom istog ili drugog elementa preko elektrona. Dok je u mnogim kemijskim spojevima (npr. natrij-klorid, NaCl) ta veza ostvarena predajom elektrona od jednog atoma i prihvaćanjem elektrona od drugog atoma, u elementima u sredini periodnog sustava elemenata nema tendencije ni predaje, ni prihvaćanja elektrona pojedinih atoma. U tim elementima atomi se međusobno povezuju stvaranjem zajedničkih elektronskih parova, u kemiji poznato kao kovalentna veza (v. *Kemija*, TE 7, str. 14). U takvoj atomskoj vezi nema slobodnih elektrona ni iona koji bi mogli pridonijeti vođenju električne struje.

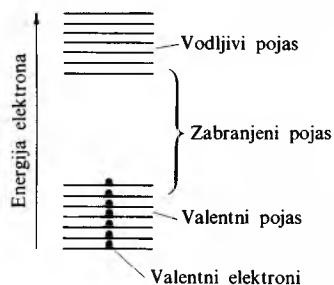
U pojedinom atomu elektroni imaju određenu energiju s obzirom na jezgru atoma (nalaze se na određenim energetske razinama). U jednoj energetskoj razini mogu se nalaziti samo dva elektrona, ali različitih spinova (Paulijev princip). Ako se atomi međusobno toliko približe da čine tekućinu ili čvrsto

tijelo, energije se elektrona na vanjskim razinama prekrivaju, pa je prema Paulijevu principu potrebno da se energetske razine pomaknu i cijepaju. Tako nastane mnogo diskretnih energetskih razina koje su vrlo blizu jedna drugoj, pa se može smatrati da čine kontinuirani pojas (zonu). Na sl. 1 shematski je prikazan model stvaranja energetskih pojasa. Dijagram je nacrtan za metalni natrij, kojemu je elektronska struktura $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. Energetske razine su prikazane u ovisnosti o



Sl. 1. Ovisnost energetskih razina o međuatomskom razmaku

međuatomskom razmaku, koji za metalni natrij iznosi r_0 . Za $r \rightarrow \infty$ energetske razine su oštro odijeljene, dok se za $r < r_0$ šire u pojase. Broj i širina tih, za elektrone dopuštenih, elektronskih pojasa ovisi o materijalu (sl. 2). Zadnji pojas popunjen elektronima naziva se valentnim pojasom i od sljedećeg pojasa, koji može biti djelomično ili potpuno zaposjednut elektronima i naziva se vodljivim pojasom, dijeli ga zabranjeni energetski



Sl. 2. Energetski pojasi u atomima čvrstih materijala

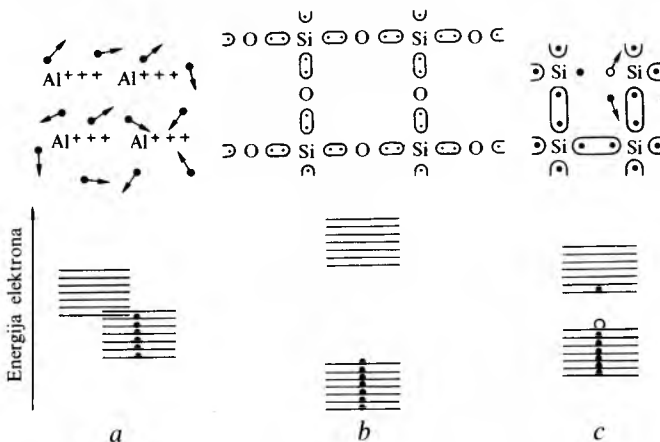
pojas (tabl. 1). O elektronskoj strukturi ovisi da li će materijal biti izolator, poluvodič ili vodič. Širina zabranjenog pojasa u poluvodičima iznosi nekoliko elektronvolta, u izolatorima nekoliko desetaka elektronvolta, a u metalima se valentni i vodljivi pojas prekrivaju i nema zabranjenog pojasa.

Tablica 1
KEMIJSKI ELEMENTI POLUVODIČI
I NJIHOVI Približni ZABRANJENI
ENERGETSKI POJASI

Kemijski element	Zabranjeni energetski pojas eV
Bor	1,1
Ugljik	5,2
Silicij	1,1
Germanij	0,75
Kositar	0,08
Fosfor	1,5
Arsen	12
Antimon	0,12
Sumpor	2,5
Selen	17
Telur	0,36
Jod	1,25

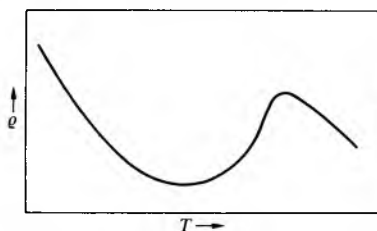
U vodičima metalnog tipa (sl. 3a) energetski se pojasi prekrivaju, pa uz vrlo malo povećanje energije atoma elektroni

prelaze u vodljivi pojas, tvoreći tako mnogo lakopokretljivih elektrona. U izolatorima (sl. 3b) energetski su pojasi razdvojeni, a kako su atomi međusobno čvrsto vezani, u vodljivom pojasu nema elektrona, pa je električna vodljivost gotovo nemoguća. U poluvodičima (sl. 3c) pojasi su manje razdvojeni, pa povećanje energije atoma povišenjem temperature omogućuje elektronima prijelaz u vodljivi pojas, a u valentnom pojasu ostaju ispraznjena mjesta, tzv. šupljine. Broj slobodnih elektrona, a s time i električna provodnost raste s temperaturom.



Sl. 3. Raspored atoma (gore) i energetskih razina (dolje) u metalima (a), izolatorima (b) i poluvodičima (c)

Elektroni se u poluvodiču prema takvoj energetske sliki mogu premještati samo preko slobodnih energetskih stanja, tj. u vodljivom pojasu. U valentnom pojasu sva su energetska stanja popunjena, pa se elektroni ne mogu premještati, odnosno nema vođenja električne struje. Takvo stanje je idealno i može se zamisliti na temperaturi apsolutne nule. Na višim temperaturama, zbog statističke raspodjele elektrona s obzirom na energiju, postoji vjerojatnost da se neki elektroni nalaze i u vodljivom pojasu poluvodiča. Vjerojatnost prijelaza elektrona iz valentnoga u vodljivi pojas ovisi o temperaturi i širini zabranjenog pojasa poluvodiča. Što je zabranjeni energetski pojas veći, s porastom temperature poluvodič počinje voditi pri višoj temperaturi i slabije vodi električnu struju. Međutim, svakom se poluvodiču, neovisno o širini zabranjenog energetskog pojasa, s porastom temperature povećava električna provodnost, odnosno smanjuje otpornost. Postoje temperaturna područja u kojima ta konstatacija ne vrijedi (sl. 4).



Sl. 4. Ovisnost električne otpornosti ρ , odnosno provodnosti γ , poluvodiča N-tipa o temperaturi T

S prijelazom elektrona iz valentnog u vodljivi pojas ostaje u valentnom pojasu slobodna energetska razina preko koje se elektroni pod utjecajem električnog polja mogu gibati. Slobodna energetska razina pomiče se u suprotnom smjeru, prikazuje se kao pozitivni naboj, a naziva se šuplinom. Poluvodiči u kojima se elektroni i šupljine stvaraju u paru zovu se *intrinzični poluvodiči* (lat. *intrinsecus* unutrašnji). Poluvodiči su intrinzični samo ako je materijal posve čist. Poluvodički materijali u kojima osim atoma poluvodiča ima i atoma drugih elemenata, primjesa, zovu se *ekstrinzični* (lat. *extrinsecus* vanjski) ili *primjesni poluvodiči*. Utjecaj primjesa na svojstva poluvodičkog materijala ovisi o vrsti i koncentraciji primjese. Tako npr. jedan primjesni atom dodan na 10^5 atoma silicija povećava električnu provodnost silicija ~ 1000 puta.

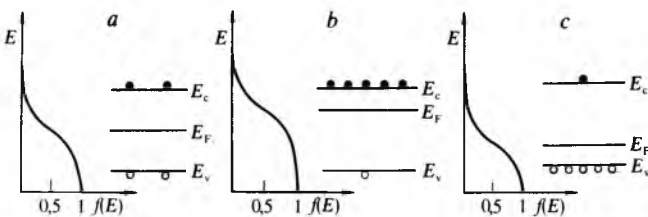
Primjese uvode nove energetske razine u zabranjeni pojas. Te primjesne razine veoma utječu na provodnost poluvodiča. Primjese su donorske i akceptorske. *Donorske primjese* na određenju se temperaturi ioniziraju prelaskom elektrona s donorske razine u vodljivi pojas. *Akceptorske primjese* prihvaćaju elektrone iz valentnog pojasa i time stvaraju šupljine u valentnom pojasu. Osim slobodnih nosilaca naboja nastalih ionizacijom primjese, u svakom poluvodiču postoje slobodni nosioci naboja nastali prijelazom elektrona iz valentnog pojasa u vodljivi. U poluvodiču s primjesama postoje, dakle, elektroni i šupljine kao slobodni nosioci naboja, te ionizirane primjese (negativni akseptori i pozitivni donori) kao vezani nosioci naboja. Oni električni naboji kojih ima više nazivaju se *većinskim nosiocima*, a oni kojih ima manje *manjinskim*. Ako su većinski nosioci naboja elektroni, poluvodič je *N-tipa*, ako su šupljine, poluvodič je *P-tipa*. U poluvodičima s mnogo primjesa energetske razine tih primjesa mogu postati pojasi i preklopiti se s vodljivim pojasom. Takvi poluvodiči jesu *degenerirani poluvodiči* i njihova svojstva su vrlo slična svojstvima metala.

Primjese, osim donorskih i akceptorskih razina, mogu stvarati energetske razine koje djeluju kao zamke i rekombinacijski centri. *Zamke* zadržavaju slobodne nosioce naboja za određeno vrijeme i time utječu na vodljivost. Na *rekombinacijskim centrima* elektroni i šupljine međusobno se poništavaju (rekombiniraju).

Koncentracija nosilaca naboja u poluvodiču. Vjerojatnost f da je energetska razina W zauzeta elektronom opisana je Fermi-Diracovom funkcijom raspodjele (sl. 5)

$$f = \left[1 + \exp\left(\frac{W - W_f}{kT}\right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta, T temperatura, a W_f Fermijeva energetska razina (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, TE 4,



Sl. 5. Fermi-Diracova raspodjela energije u intrinzičnom poluvodiču (a), N-tipu (b) i P-tipu poluvodiča (c)

str. 472). Fermijeva razina je određena raspodjelom energetskih razina W , ukupnog broja primjesa N i temperaturom. Za poluvodič N-tipa iznosi

$$W_f = W_g - kT \ln \frac{2(2\pi m_e^* kT)^{3/2}}{h^3 N_d}, \quad (2a)$$

a koncentracija je nosilaca naboja (elektrona)

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{W_f - W_g}{kT}\right), \quad (3a)$$

gdje je m_e^* efektivna masa elektrona, tj. matematički ekvivalent mase u jednadžbi gibanja, uzimajući u obzir kristalografsku strukturu materijala, W_g je širina zabranjenog energetskog pojasa, a N_d je ukupni broj donorskih primjesa. Za poluvodič P-tipa Fermijeva su razina i koncentracija nosilaca naboja (šupljina)

$$W_f = kT \ln \frac{2(2\pi m_h^* kT)^{3/2}}{h^3 N_a}, \quad (2b)$$

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{W_f - W_g}{kT}\right), \quad (3b)$$

gdje je N_a ukupni broj akceptorskih primjesa, a m_h^* efektivna masa šupljina. Za čiste intrinzične poluvodiče vrijedi

$$W_f = \frac{W_g}{2} + kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right)^{3/2}, \quad (4)$$

gdje je W_g širina zabranjenog energetskog pojasa. Budući da je

$$np = 4 \left(\frac{2\pi k}{h^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} T^3 \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right), \quad (5a)$$

a u čistom poluvodiču $n = p$ (svaki elektron koji prijeđe u vodljivi pojas ostavlja šuplinu u valentnom pojasu), slijedi

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{2\pi k}{h^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} T^{3/2} \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right). \quad (5b)$$

Najopćenitije vrijedi da je umnožak koncentracije nosilaca naboja zbog primjesa jednak kvadratu nosilaca naboja nastalih termičkim pobuđenjem:

$$np = n_i^2. \quad (6)$$

Pokretljivost nosilaca naboja. U električnom polju nosioci naboja imaju komponentu gibanja s određenom brzinom u smjeru djelovanja električnog polja (engl. drift). Ta je komponenta brzine v proporcionalna jakosti električnog polja E , a faktor proporcionalnosti naziva se pokretljivost μ :

$$\mu = \frac{v}{E}. \quad (7)$$

Pokretljivost nosilaca naboja ovisi o materijalu, koncentraciji primjesa, temperaturi i redovno je različita za elektrone i šupljine u istom materijalu pod istim uvjetima.

Za jaka električna polja ($E \approx 10^4$ V/cm) relacija (7) više ne vrijedi jer komponente brzine u smjeru polja teže konstantnim vrijednostima.

Vrijeme života nosilaca naboja. Većina elektroničkih poluvodičkih elemenata radi u uvjetima neravnoteže u poluvodiču, tj. u uvjetima gdje je produkt broja nosilaca naboja pn različit od ravnotežne vrijednosti n_i^2 . Ako je $np > n_i^2$, govori se o ubrizgavanju nosilaca naboja, a ako je $np < n_i^2$, govori se o vađenju nosilaca naboja. Ubrizgavanje je nosilaca naboja slabo izraženo ako postoji višak (ili manjak) nosilaca naboja s obzirom na ravnotežno stanje, označen sa $\Delta n = \Delta p$, i ako je broj nosilaca u ravnotežnom stanju mnogo manji od koncentracije primjesa N u poluvodiču. Za $\Delta n = \Delta p \gg N$ pojave su u poluvodiču vrlo složene, a ubrizgavanje je nosilaca naboja veoma izraženo. Poluvodič se vraća u ravnotežno stanje rekombinacijom manjinskih nosilaca s većinskim ili stvaranjem para elektron-šupljina. Ako se pretpostavi da je brzina rekombinacije v_r proporcionalna višku manjinskih nosilaca naboja Δn ili Δp (tj. elektrona u P-tipu ili šupljina u N-tipu poluvodiča), tada je

$$v_r = \frac{\Delta n}{\tau_n}, \quad v_r = \frac{\Delta p}{\tau_p}. \quad (8)$$

Konstanta proporcionalnosti τ_n ili τ_p naziva se vremenom života manjinskih nosilaca naboja. Ako se elektron u vodljivom elektronskom pojasu i šupljina iz valentnog pojasa direktno rekombiniraju, to je rekombinacijski proces pojas-pojas. U takvu rekombinacijskom procesu elektron mora izgubiti dio energije (vrijednost energetskog procijepa) i ta energija može zračiti iz poluvodiča u obliku svjetla ili topline.

Osim direktne rekombinacije, elektron i šupljina mogu se rekombinirati preko energetskih stanja unutar zabranjenog pojasa (stvaraju ih primjese ili nepravilnosti kristalne rešetke), tzv. rekombinacijskih centara. Tih centara ima puno, pogotovo na površini poluvodiča. Često se nazivaju *površinskim stanjima* i važna su svojstva elektroničkih poluvodičkih elemenata.

Električna provodnost. Provodnost poluvodiča σ općenito je dana relacijom:

$$\sigma = e\mu_e n + e\mu_h p, \quad (9)$$

gdje je e naboj elektrona, μ_e i μ_h pokretljivost elektrona, odnosno šupljina, n koncentracija elektrona, a p koncentracija šupljina. Driftna je gustoća struje j :

$$j = \sigma E, \quad (10)$$

gdje je E jakost električnog polja.

U poluvodiču mogu postojati gradijenti koncentracije nosilaca naboja, pa tada čestice difundiraju od mjesta više koncentracije prema mjestu niže koncentracije. Gustoća je difuzijske struje j za elektrone

$$j = e D_n \frac{dn}{dx}, \quad (11a)$$

a za šupljine

$$j = e D_p \frac{dp}{dx}, \quad (11b)$$

gdje su D_n i D_p difuzijske konstante naznačenih čestica, a $\frac{dn}{dx}$ i $\frac{dp}{dx}$ gradijenti koncentracije elektrona ili šupljina.

Pokretljivost μ i difuzijska konstanta D međusobno su povezane Einsteinovom relacijom:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}, \quad (12)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta, a T temperatura.

Termoelektrične pojave u poluvodičima slične su takvim pojavama u metalima. *Seebeckov efekt* je pojava termoelektromotorne sile na krajevima poluvodiča koji su na različitim temperaturama. Smjer je sile za N-tip obrnut od smjera za P-tip. Napon na krajevima poluvodiča ΔU proporcionalan je temperaturnoj razlici ΔT

$$\Delta U = \alpha \Delta T, \quad (13)$$

gdje je α koeficijent termoelektromotorne sile. Taj je efekt poznat i u metalima, ali je u poluvodičima općenito izrazito velik ($\alpha = 100 \dots 1000 \mu\text{V/K}$). U N-tipu poluvodiča većinski nosioci (elektroni) zbog jačeg termičkog gibanja putuju s toplog kraja na hladni kraj. Na toplom kraju nastaje manjak elektrona ili šupljina, a na hladnome višak. Tako između oba kraja nastaje razlika potencijala. To je ujedno bio i jedan od dokaza da u poluvodiču postoje dvije vrste nosilaca naboja. Taj se efekt primjenjuje za eksperimentalno određivanje tipa poluvodiča.

Peltierov efekt je inverzan Seebeckovu efektu. Ako dva vodiča ili poluvodiča čine krug kojim prolazi električna struja I , osim pojave Jouleove topline, na spojevima se oslobađa ili apsorbira toplina Q koja iznosi

$$Q = \Pi I \tau, \quad (14)$$

gdje je Π Peltierov koeficijent, a τ vrijeme. Ako se spoj na kojemu se oslobađa toplina drži na konstantnoj temperaturi, drugi će se spoj hladiti sve dok količina topline dovedena iz okoliša i količina topline dovedena kroz vodiče kruga ne postanu jednake apsorbiranoj Peltierovoj toplini. To je osnova za termoelektrično hlađenje. Peltierov koeficijent Π , koeficijent termoelektromotorne sile α i temperatura spoja T povezani su relacijom

$$\Pi = \alpha T. \quad (15)$$

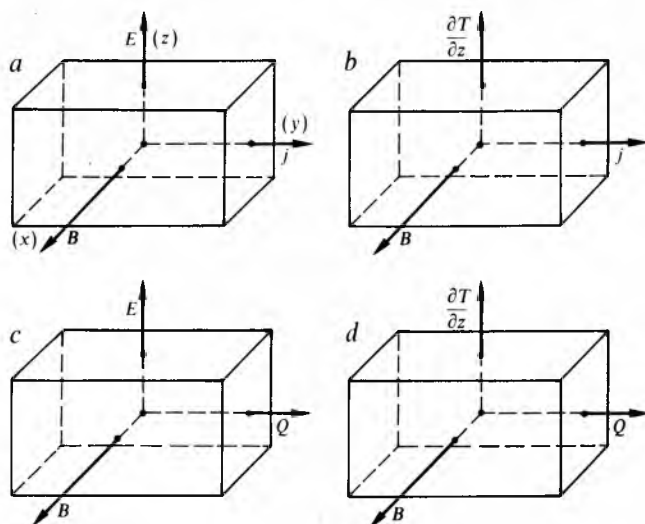
Seebeckov i Peltierov efekt su pretvorbe toplinske energije u električnu, i obratno.

Elektromagnetske i termomagnetske pojave. *Halloff efekt* je zapažen u metalima, ali je mnogo izrazitiji u poluvodičima. Ako je poluvodič u električnom polju te zbog toga teče struja gustoće j , a okomito na smjer tog polja je magnetsko polje, javlja se transversalno na oba smjera novo električno polje (sl. 6a) kojemu je jakost

$$E = R_H j B, \quad (16)$$

gdje je R_H Hallova konstanta, j gustoća struje, a B magnetska indukcija. Pod utjecajem obaju polja gibat će se većinski nosioci (elektroni u N-tipu i šupljine u P-tipu) prema graničnim ploham poluvodiča i nagomilavati se na njima. Električno

polje nastalo zbog razlike potencijala na graničnim ploham djelovat će na ostale nosioce naboja nekom silom koja je suprotna sili zbog djelovanja magnetskog polja (Lorentzova sila).



Sl. 6. Shematski prikaz elektromagnetskih i termomagnetskih pojava. a Hallov efekt, b Ettingshausenov efekt, c Nernstov efekt, d Righi-Leducov efekt

Efekt se primjenjuje u fizici i tehnologiji poluvodiča kao metoda određivanja fizikalnih svojstava poluvodiča, a u tehnici kao metoda za mjerenje magnetske indukcije.

Ettingshausenov efekt je pojava transversalnoga temperaturnog gradijenta kada je poluvodič u električnom i magnetskom polju, koji iznosi

$$\frac{\partial T}{\partial z} = P j B, \quad (17)$$

gdje je P Ettingshausenov koeficijent (sl. 6b).

Nernstov efekt je pojava da se uz magnetsko polje koje je okomito na smjer y temperaturnog gradijenta (koji uzrokuje tok topline Q) transversalno javlja termoelektrična sila

$$E = N B \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (18)$$

gdje je N Nernstov koeficijent (sl. 6c).

Righi-Leducov efekt je pojava da se uz Nernstov efekt javlja i transversalni temperaturni gradijent

$$\frac{\partial T}{\partial z} = S B \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (19)$$

gdje je S Righi-Leducov koeficijent, B magnetska indukcija, a $\frac{\partial T}{\partial y}$ temperaturni gradijent (sl. 6d).

Fotoelektrične pojave. *Fotovodljivost* je pojava električne vodljivosti poluvodiča pod utjecajem svjetlosti (općenito elektromagnetskog zračenja). Međudjelovanjem fotona i kristalne rešetke povećava se broj slobodnih nosilaca naboja s obzirom na termičku ravnotežnu koncentraciju. To je princip rada fototopnika.

Fotonaponski (fotovoltaični) efekt je pojava električnog napona na krajevima poluvodiča (PN-prijelaza) zbog apsorpcije svjetlosti u poluvodiču. Elektroni i šupljine koje se stvaraju zbog apsorpcije svjetlosti mogu se razdvojiti unutrašnjim električnim potencijalom koji postoji u osiromašenom sloju PN-prijelaza. Time se smanjuje unutrašnji potencijal, pa se ta razlika potencijala s obzirom na vrijednost pri termičkoj ravnoteži pojavljuje kao fotonapon, koji može kroz vanjski električni krug uzrokovati tok električne struje. Znači, moguća je pretvorba svjetlosne energije u električnu (fotokonverzija). To je fizikalna osnova rada sunčanih ćelija.

Elektroluminiscencija je pojava pretvorbe električne energije u svjetlosnu. U nekim poluvodičima ta je pretvorba vrlo uspješna i fizikalna je osnova rada svijetlećih dioda.

Piezoelektrične pojave. Piezoelektrični efekt je pojava stvaranja električnog naboja na površini kristala koji je elastično deformiran zbog vanjske sile (v. *Kristalografija*, TE 7, str. 379). Pojave te električne polarizacije upotrebljavaju se u senzorima tlaka.

TIPOVI I SPOJEVI POLUVODIČA

Poluvodički materijali sa svojim jedinstvenim električnim svojstvima upotrebljavaju se rijetko kao čisti poluvodiči. Njihova primjena je u obliku P-tipa ili N-tipa, odnosno u kombinaciji PN-spoja ili diode, PNP-spoja ili tranzistora ili u kombinaciji još više slojeva. Primjena u mikroelektronici proširila se i na spojeve različitih materijala, na heterospojeve. Danas je nemoguće nabrojiti sve poluvodičke materijale i njihove kombinacije; od elementarnih poluvodiča (poluvodič je čisti kemijski element) u monokristalnom (v. *Kristalizacija*, TE 7, str. 355), polikristalnom ili amorfnom obliku, preko poluvodičkih materijala koji su anorganski ili organski spojevi.

Elementarni i složeni poluvodiči. Ako se spomenu samo po- vijesno važni ili danas najvažniji poluvodiči, mora se nabranje početi selenom kao materijalom za prve ispravljače iz grupe poluvodičkih kemijskih elemenata, te bakar(I)-oksidom (Cu_2O) za ispravljače i fotoćelije iz grupe poluvodičkih kemijskih spojeva.

Poluvodički spojevi su spojevi dvaju ili više elemenata. Osim već navedenog bakar(I)-oksida, poluvodička svojstva pokazuju i neki drugi oksidi metala, npr. titan-dioksid (TiO_2). Posebno je potrebno spomenuti intermetalne spojeve dvaju elemenata koji su u periodnom sustavu elemenata simetrično s lijeve i desne strane IV skupine. To su tzv. III—V, II—VI ili slično nazvani spojevi. Od svih tih spojeva danas je za industriju najvažniji *galij-arsenid* (GaAs), jer služi, osim za diskretne diode i tranzistore, također za proizvodnju integriranih sklopova. Posebna su grupa poluvodiča pseudobinarni spojevi (ternarni), kao npr. galij-arsenid—galij-fosfid (GaAs—GaP), često označeni sa $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$, ili galij-arsenid—aluminij-arsenid (GaAs—AlAs , $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$), te sve ostale moguće kombinacije. Također su važni spojevi npr. galij-arsenid—indij-fosfid (GaAs—InP , $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$) zvani i kvaternami spojevi ($x = 0 \cdots 1$, $y = 0 \cdots 1$). Oni su sve važniji u izradbi poluvodičkih lasera (v. *Laseri*, *Poluvodički laseri*, TE 7, str. 478). Navedeni poluvodički spojevi samo su ilustracija bezbrojnih kombinacija koje imaju veću ili manju tehnološku primjenljivost. Potrebno je navesti još antimonide (indij-antimonid, InSb), selenide (kadmij-selenid, CdSe), sulfide (olovo-sulfid, PbS), teluride (kadmij-telurid, CdTe), jodide (srebro-jodid, AgI), nitride (aluminij-nitrid, AlN), karbide (silicij-karbid, SiC) kao materijale od kojih se danas izrađuju različiti optički ili termički detektori. Postoje i organski poluvodiči, kakav je npr. naftalen ili antracen.

Tablica 2
NEKA SVOJSTVA TEHNOLOŠKI VAŽNIH POLUVODIČA
($t = 27^\circ\text{C}$)

Svojstvo	Germanij (Ge)	Silicij (Si)	Galij-arsenid (GaAs)	Silicij-dioksid (SiO_2)
Atomni broj	32	14		
Relativna atomna ili molekularna masa	72,60	28,08	144,63	60,08
Atomna ili molekularna gustoća, cm^{-3}	$4,42 \cdot 10^{22}$	$5,0 \cdot 10^{22}$	$2,21 \cdot 10^{22}$	$2,3 \cdot 10^{22}$
Kristalna struktura	dijamant	dijamant	cink, miješani	SiO_4 , tetraedar veza: 50% kovalentna 50% ionska
Broj atoma u jediničnoj rešetki	8	8	8	
Konstanta rešetke, nm	0,566	0,543	0,565	
Gustoća, g cm^{-3}	5,32	2,33	5,32	2,27
Energijski procijep, eV ($T = 300\text{ K}$)	0,67	1,11	1,40	8
Efektivna gustoća stanja, cm^{-3}				
vodljivi pojas	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	
valentni pojas	$6,0 \cdot 10^{18}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	
Intrinzična koncentracija nosilaca, cm^{-3}	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	$9 \cdot 10^6$	
Intrinzična pokretljivost, $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$				(Izolator, $\rho = 10^{16} \Omega \text{cm}$ pri $T = 300\text{ K}$)
elektroni	3900	1350	8600	
šupljine	1900	480	250	
Relativna dielektričnost	16,3	11,7	12	3,9
Talište, $^\circ\text{C}$	937	1415	1238	1700
Specifični toplinski kapacitet, $\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$				
	0,31	0,7	0,35	1,0
Toplinska provodnost, $\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,6	1,5	0,81	0,014
Temperaturna difuznost, $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	0,36	0,9	0,44	0,006
Linearni koeficijent toplinskog rastezanja, K^{-1}	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$

Od kemijskih elemenata tehnološki su za proizvodnju elek- troničkih elemenata najvažniji poluvodički materijali germanij i silicij (tabl. 2). *Germanij* danas više iz povijesnih razloga, jer je pomoću njega 1948. konstruiran tranzistor (v. *Elektronika*, TE 4, str. 471). Danas je njegova primjena ograničena samo na nekoliko specijalnih elektoničkih elemenata, ali je proizvodnja elektoničkih elemenata pedesetih godina našeg stoljeća bila uglavnom na osnovi germanija. *Silicij* je trenutno za industrijske svrhe najvažniji poluvodički materijal. Osim povoljnih polu- vodičkih svojstava, on je svojim oksidom (silicij-dioksid, SiO_2) omogućio tehnolozima sjedinjenje nekoliko poluvodičkih ele- menata u samo jedan integrirani elektonički sklop (v. *Elektro- nika*, TE 4, str. 485), što je bila nova prekretnica u poluvodičkoj elektronici.

Poluvodički monokristali najčešći su oblik u kojemu se po- luvodički materijal upotrebljava. Kako je većina poluvodiča umjetnog porijekla, razvijeno je niz različitih postupaka dobi- vanja monokristala. Jednako kao i primjese, na svojstva polu- vodiča utječu i kristalografski defekti: točkasti defekti (npr. vakancije), linijski defekti (npr. dislokacije), plošni defekti (npr. defekti slaganja). Zbog toga se u proizvodnji poluvodičkih monokristala teži za što većom čistoćom i što boljom kristal- nom jednoličnošću materijala. Primjese se dodaju samo kontro- lirano da bi se dobio materijal određenog tipa i određene električne provodnosti. Najvažniji postupci rasta kristala iz ta- ljevine za dobivanje velikih i homogenih monokristala jesu Bridgemanov postupak, postupak Czochralskoga i postupak lebdeće zone (v. *Kristalizacija*, TE 7, str. 361).

Epitaksija. Postupcima za rast kristala dobivaju se monokristali u obliku štapa, koji se za upotrebu reže u tanke pločice, tzv. *vafere* (engl. *wafer*, oblatna). Takve pločice upotrebljavaju se kao klica za rast kristala *epitaksijalnim postupkom* (v. *Kristalografija*, TE 7, str. 358). Rast kristala istog materijala kao što je klica zove se *homoepitaksija*, a klica se tada zove *supstrat*. Moguće je da na nekom supstratu naraste i neki drugi materijal, uz uvjet da taj materijal kristalizira u istom tipu kristalne rešetke i da se parametri rešetke međusobno bitno ne razlikuju. Takav se rast naziva *heteroepitaksija*.

Prednost je epitaksije prema ostalim postupcima u jednostavnosti kojom je moguće mijenjati koncentraciju u epitaksijalno naraslom sloju. Moguće je formirati PN-prijelaze u rastu kristala između supstrata i epitaksijalnog sloja, te u samom epitaksijalnom sloju. Često su supstrati visoke električne provodnosti, a epitaksijalni sloj može biti slabo vodljiv.

Za dobivanje epitaksijalnog silicija upotrebljava se epitaksija iz plinovite faze. Kemijskom reakcijom nekog plinovitog silicijskog spoja na površini se supstrata izlučuje silicij i tako raste epitaksijalni sloj. Brzina rasta ovisi o silicijskom spoju koji se upotrebljava (obično silicij-tetraklorid, SiCl_4 ; triklorsilan, SiHCl_3 ; diklorsilan, SiH_2Cl_2 , ili silan, SiH_4), o koncentraciji spoja, temperaturi reakcije i uređaju gdje se epitaksija događa. U heteroepitaksiji, pogotovo u dobivanju poluvodičkih spojeva, osim epitaksije iz plinovite faze, primjenjuje se epitaksija iz tekuće faze i epitaksija s molekularnim snopom.

Pri epitaksiji iz tekuće faze supstrat se dovede u kontakt s tekućinom u kojoj je određen materijal otopljen, npr. galij-arsenid u galiju. Dok je tekućina u kontaktu sa supstratom, smanjuje se temperatura sustava, tako da otopina postane prezasićena otopljenim materijalom, koji se izlučuje na supstratu kao epitaksijalni monokristalni sloj. Tim tehnološkim postupkom može se dobiti redom niz slojeva različitih po tipu vodljivosti i po kemijskom sastavu. Brzine rasta u poluvodičima III—V i srodnicima iznose $100 \cdots 1000 \text{ nm/min}$. Prvi poluvodički laseri s kontinuiranom emisijom svjetlosti na sobnoj temperaturi od aluminij-galij-arsenida bili su napravljeni tim tehnološkim postupkom rasta kristala.

Epitaksija s molekularnim snopom danas je najnoviji laboratorijski postupak dobivanja monokristala koji omogućuje izvanredno dobru kontrolu kvalitete kristala, sastava materijala i debljine epitaksijalnog sloja. Radi se zapravo o naporu na naparivanju molekula na supstrat u uređaju s visokim vakuumom od 10^{-8} Pa , a tipične brzine rasta su približno $5 \cdots 50 \text{ nm/min}$.

POLUVODIČKA TEHNOLOGIJA

Poluvodička tehnologija je naziv za skup tehnoloških postupaka kojima je svrha realizacija poluvodičkog elementa. Postoji čitav niz poluvodičkih elemenata (diode, tranzistori, tiristori, integrirani sklopovi itd.) na različitim poluvodičkim materijalima (germanij, silicij, galij-arsenid itd.).

Razvoj poluvodičke tehnologije počeo je s germanijem. Razdoblje germanijske tehnologije trajalo je od 1948. do 1960. Planarna tehnologija primijenjena na siliciju, zbog svojih prednosti, od 1960. potiskuje germanijsku tehnologiju te je silicijska tehnologija danas najrazvijenija. Galij-arsenidna tehnologija posebno se veoma razvija od 1979. godine.

Silicijska poluvodička tehnologija. Poluvodički postupci izradbe ovise o vrsti poluvodičkog elementa, odnosno specifičnosti tog elementa je posljedica tehnoloških postupaka njegove realizacije. Ipak, mogu se opisati neki najvažniji općeniti tehnološki postupci: rast monokristala, priprema i obradba silicija, oksidacija, stvaranje PN-prijelaza, mikrolitografija, metalizacija, zaštita od vanjskih utjecaja, kemijski postupci, provjere tehnoloških postupaka te ugrađivanje u kućište. Svi se ti tehnološki postupci izvode na tankoj silicijskoj pločici (*vafetu*), promjera $50 \cdots 200 \text{ mm}$. Na toj silicijskoj pločici izrađuje se mnogo pojedinačnih elemenata, kojima je površina od stotinjak četvornih mikrometara (diskretni elementi male snage), $0,5 \cdots 1 \text{ cm}^2$ (integrirani sklopovi), do samo jednog elementa na cijeloj pločici (tiristori, sunčane ćelije). Kad su ispitane karakteristike pojedinih elemenata na silicijskoj pločici, pločica se razreže tako da je svaki element samostalan. Takav poluvodički elektronički

element ili sklop, bez obzira na funkciju i karakteristike, formiran na samo jednoj kristalnoj pločici, dok još nije ugrađen u kućište (inkapsuliran) zove se *čip* (engl. *chip*, kriška, odlomak). Čip ugrađen u svoje kućište pogodan je za rukovanje i ugrađivanje u uređaje. Kad je zatvoren u kućište, naziva se elektronički poluvodički element (iako može biti i vrlo složen integrirani sklop), ponovno se karakterizira i, s obzirom na parametre karakterizacije, dobiva specifičnu oznaku (ime) na kućištu.

Rast silicijskog monokristala. Osnovni materijal, polikristalni silicij poluvodičke čistoće, s manje primjese od jednog dijela na milijun (1 ppm), dobiva se od trgovačkog ferosilicija. Pomoću klorovodika silicij se prevede u triklorsilan (SiHCl_3), koji se frakcijskom destilacijom očisti. Reakcijom triklorsilana s vodikom, na visokoj temperaturi ($\sim 1200^\circ \text{C}$), dobiva se čisti polikristalni silicij u obliku granulata ili u obliku polikristaličnih štapova, tzv. *ingota*, promjera $20 \cdots 200 \text{ mm}$ i dugih $0,5 \cdots 1 \text{ m}$. Kao granulat služi za dobivanje monokristala postupkom Czochralskoga, a u obliku štapa pogodan je za dobivanje postupkom lebdeće zone. Za epitaksiju kao supstrat služi silicijska monokristalna pločica dobivena jednim od prethodnih dvaju postupaka, a novi silicij taloži se kemijskom reakcijom triklorsilana s vodikom. Uz triklorsilan u upotrebi su također drugi plinovi, prije svega silicij-tetraklorid i silan (SiH_4).

Postupkom Czochralskoga (v. *Kristalizacija*, TE 7, str. 361) raste monokristal iz silicijske taline kojoj je dodan bor (P-tip) ili fosfor, antimon ili arsen (N-tip) do potrebne koncentracije. Klica (mali komadić monokristala u kojemu započinje monokristalni rast) namoči se djelomično u rastaljeni silicij pod takvim uvjetima da je temperatura na granici taline i klice neznatno niža od tališta silicija. Klica se polagano rotira i izvlači iz taline. Zbog površinske napetosti za sobom povlači talinu koja polagano kristalizira u monokristal iste kristalografske orijentacije koju ima klica. Uobičajene orijentacije kristala jesu $\langle 111 \rangle$, $\langle 100 \rangle$ (v. *Kristalografija*, TE 7, str. 374), a rjeđe $\langle 110 \rangle$ i $\langle 511 \rangle$. Tipične su brzine rasta $10^{-4} \cdots 10^{-2} \text{ cm/s}$.

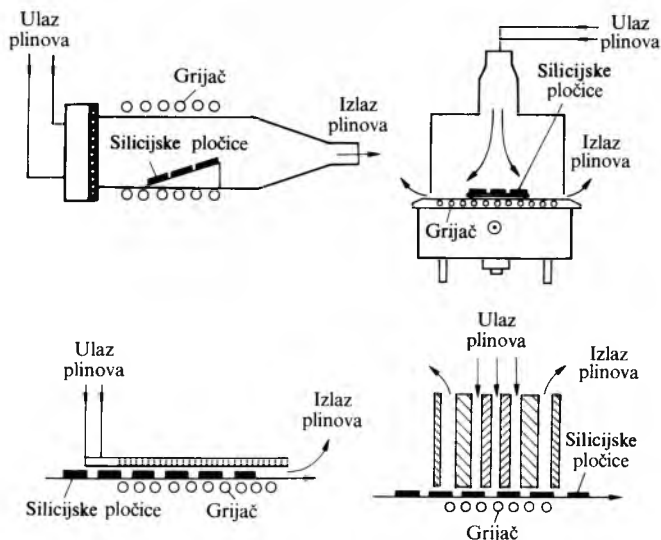
Zbog reakcije između taline i kreme posude koncentracija je kisika u siliciju koji je dobiven tim postupkom nekoliko milijuntinki, pa je maksimalna otpornost $\sim 80 \Omega \text{ cm}$. Kristalografska je struktura vrlo dobra, a broj je uraštenih dislokacija $n_{\text{urašteno}} < 100 \text{ cm}^{-2}$. Ingoti ili njegovi dijelovi kristala dobiveni postupkom Czochralskoga često su klice u rastu postupkom lebdeće zone.

Postupkom lebdeće zone (v. *Kristalizacija*, TE 7, str. 362) nastaju silicijski monokristali gotovo bez ikakvih neželjenih primjesa, pa se mogu dobiti kristali s najvećom otpornošću. Polikristalni štap rastali se lokalno u jednom dijelu tako da rastaljena zona lebdi između dva polikristalna dijela zbog djelovanja površinske napetosti. Pomakom grijača pomiče se i rastaljena zona s jednog kraja polikristalnog štapa na drugi. Uz rast monokristala od klice dalje postoji i zonsko čišćenje, a zbog rasta u vakuumu isparuju se primjese. Kao primjesa je prethodno uveden bor (P-tip) ili fosfor (N-tip). Često se neutronske ozračivanjem gotova monokristalnog ingota visoke otpornosti postiže nuklearnom transformacijom silicijevih atoma u fosforne jednolika raspodjela primjesnih fosforovih atoma u siliciju. Uobičajene kristalografske orijentacije jesu $\langle 111 \rangle$ i $\langle 100 \rangle$.

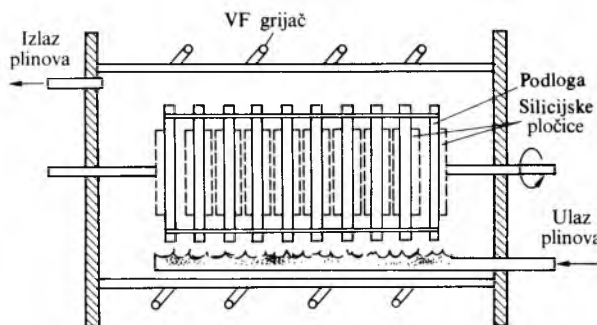
Epitaksija. Epitaksijalni rast kristala taloženjem silicija kemijskom reakcijom iz parne faze na monokristalni supstrat (silicijsku pločicu dobivenu postupkom Czochralskoga ili postupkom lebdeće zone), obično male otpornosti ($\sim 10^{-3} \Omega \text{ cm}$), služi za dobivanje monokristalnih pločica s određenim dodatkom primjesa određene debljine naraslog sloja. Budući da je kontrola primjesnog dodatka relativno jednostavna, na supstrat može narasti i više slojeva primjesa različitih po količini i po tipu.

Epitaksijski reaktori. Uređaji u kojima se događa epitaksija nazivaju se reaktori. Shematski je prikazano nekoliko osnovnih tipova reaktora (sl. 7). S obzirom na smještaj pločica, odnosno tok plina, reaktori su horizontalni ili vertikalni. Naziv vertikalni reaktor primjenjuje se i na tip reaktora prema sl. 8, gdje se pojam vertikalni odnosi na položaj podloge (susceptora) na kojoj su smješteni supstrati. Podloga (sa supstratima) smještena je u kremenju cijevi (ili poklopcu) i zagrijava se visokofrek-

ventnom induktivnom metodom. U posljednje vrijeme kao izvor topline upotrebljavaju se izvori infracrvenog zračenja.

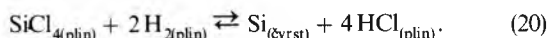


Sl. 7. Neki tipovi horizontalnih epitaksijalnih reaktora

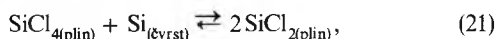


Sl. 8. Vertikalni epitaksijalni reaktor

Za epitaksiju monokristala potrebne su temperature supstrata više od 1000 °C (obično 1200–1250 °C), a kremene su stijenke posude reaktora hladne da se ne bi na njima nataložio silicij. Rast silicijskog monokristala iz silicij-tetraklorida u atmosferi vodika opisan je kemijskom reakcijom:



Iz te se reakcije vidi da je moguće klorovodikom odstraniti (odjetkati) silicij. Moguća je i reakcija



kojom se jetka silicij i u reaktoru bez klorovodika. S povećanjem koncentracije silicij-tetraklorida brzina monokristala na određenoj temperaturi raste, ali se ubrzo (uz molarni omjer ~0,1) rast monokristala preokreće u jetkanje. Zbog toga su brzine rasta epitaksijalnih monokristala ograničene na nekoliko mikrometara u minuti. Brzina rasta veoma ovisi o konstrukciji epitaksijalnog reaktora. Brzina rasta v epitaksijalnog monokristala može biti uvjetovana reakcijom plina na površini ili difuzijom plinskih čestica prema površini:

$$v = \frac{k_s h_g}{k_s + h_g} \cdot \frac{C_T y}{N_1} \quad (22)$$

gdje su k_s i h_g konstante za kemijsku površinsku reakciju, odnosno plinski transport mase, C_T je ukupni broj molekula po obujmu plina, N_1 je broj ugrađenih silicijevih atoma po obujmu epitaksijalnog sloja, a y molarni udio reagirajućih čestica.

Ovisnost je brzine rasta epitaksijalnog silicijskog monokristala o temperaturi pri nižim temperaturama približno:

$$v = \exp\left(-\frac{1,9}{kT}\right), \quad (23)$$

gdje je k Boltzmannova konstanta, a T temperatura. Pri temperaturama višim od 1200 °C brzina rasta praktično više ne ovisi o temperaturi.

Najčešće se pomoću plinova fosfina (PH_3) i diborana (B_2H_6) uvode donori (npr. fosfor) i akceptori (npr. bor). Koncentracijom tih plinova kontrolira se koncentracija primjese u epitaksijalnom siliciju. Gornja je granica otpornosti epitaksijalnog silicija za N-tip ~150 Ωcm, za P-tip ~80 Ωcm, a uvjetovana je mogućnošću onečišćenja iz supstrata i plinskih vodova. Moguće su debljine epitaksijalnih slojeva i do nekoliko stotina mikrometara.

Kristalografska orijentacija supstrata mora biti takva da je smjer rasta <111> nekoliko stupnjeva otklonjen od kristalografskog smjera supstrata. U protivnom epitaksijalni sloj nepravilno stepeničasto raste.

Budući da se epitaksija odvija na visokoj temperaturi, primjese iz supstrata difundiraju u epitaksijalni sloj. To može smetati vrlo tankim epitaksijalnim slojevima. Zato je potrebno da se rast odvija na što nižoj temperaturi, što je moguće primjenom silana (rast na ~1000 °C). Laboratorijski se eksperimentira i s rastom kristala u plazmi. Današnji su epitaksijalni reaktori posve industrijskih dimenzija, s mogućnošću istodobnog rasta monokristalnih slojeva na nekoliko desetaka silicijskih pločica s vrlo ponovljivim rezultatima s obzirom na debljinu i otpornost sloja. Ukupne površine rasta u jednom punjenju veće su od 1 m².

Priprema silicijskih pločica. Monokristalni štap silicija reže se na pločice debljine 250–650 μm, već prema promjeru, posebnim pilama u obliku koluta. Reže se unutrašnjim obodom koluta, koji je presvučen dijamantnim kristalićima. Takvim se rezanjem u kristalografsku strukturu pločice uvodi najmanje defekata. Ipak, na površini odrezanih pločica ostaju mehanička oštećenja od piljenja, pa ih treba ukloniti brušenjem i poliranjem pločice. Pomoću grubog abrazivnog sredstva (obično aluminij-oksida, Al_2O_3 , sa zrcima promjera ~10 μm) odbrusi se dio pločice, a zatim se površina pločice na polirnoj tkanini ispolira do visokog optičkog sjaja. Obično je to poliranje kemijsko-mehaničko. Zrcalno glatka površina prijeke je potrebna da bi se dobili poluvodički elementi traženih svojstava. Jednolikost je debljina pločice unutar 5 μm, a posebnim kemijskim pranjem s površine silicijske pločice uklone se sve nečistoće, makroskopske i mikroskopske. Silicijske su pločice danas pravilnoga kružnog oblika s tolerancijom promjera ±0,1 mm i s jednim ravnim bridom. Taj se ravni brid, još dok je monokristal u obliku šipke, oblikuje tako da predstavlja jedan, točno određen kristalografski smjer. Točnost tog brida tehnološki je važna za pravilan raspored čipova po pločici s obzirom na kasnije lomljenje silicijske pločice u pojedine čipove.

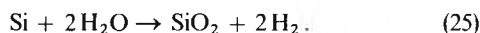
Oksidacija silicija. Velika primjena silicija za izradbu elektroničkih elemenata prije svega je posljedica svojstava silicij-dioksida. Danas je gotovo teško reći da li je proteklih godina bilo više istraživačkih radova o svojstvima silicija ili njegova oksida. Svakako bez tih kvaliteta silicij-dioksida ni sam silicij ne bi bio toliko važan. Silicij-dioksid se upotrebljava kao odlična maska u selektivnom difundiranju primjese u silicij, što je omogućilo izradbu monolitnih integriranih sklopova, zatim zaštićuje površinu silicija od korozivnog djelovanja okoliša i služi kao aktivni dio u poluvodičkim elementima na osnovi struktura MOS (metal—oksid—poluvodič). Već na sobnoj temperaturi površina se silicija oksidira zbog prisutnosti atmosferskog kisika



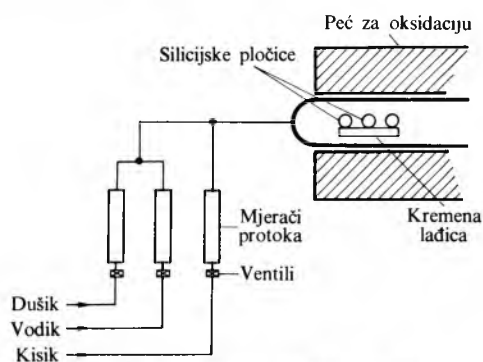
Debljina je tog oksida ~2 nm i tehnološki nije važna. Osim vrlo tankih oksidnih slojeva (5–10 nm, za novije memorijske sklopove), upotrebljavaju se slojevi silicij-dioksida debljine $10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ nm. Za dobivanje takvih slojeva upotrebljava se termička oksidacija silicija na temperaturi 700–1250 °C.

Silicijske pločice stave se u kremenju cijev peći za oksidaciju koja je shematski prikazana na sl. 9. Pri tom se upotrebljavaju

posebni kremeni nosači (kremene ladice, sl. 10), tako da je moguće istodobno oksidirati nekoliko stotina pločica. U cijev se dovodi suhi kisik ili vodena para. Uz prisutnost pare moguća je sljedeća reakcija:



Znači da na račun silicija na međuplohi Si—SiO₂ raste oksidni sloj. Oksidirajuće čestice difundiraju kroz već nastali sloj silicij-dioksida i na međuplohi reagiraju sa silicijem. Zbog toga je na početku oksidacije brzina rasta oksida veća, ali se s trajanjem oksidacije (sve većom debljinom oksida) smanjuje. S povišenjem temperature brzina oksidacije raste. Oksidacija u vodenoj pari brža je od oksidacije suhim kisikom.



Sl. 9. Shema uređaja za oksidaciju silicija



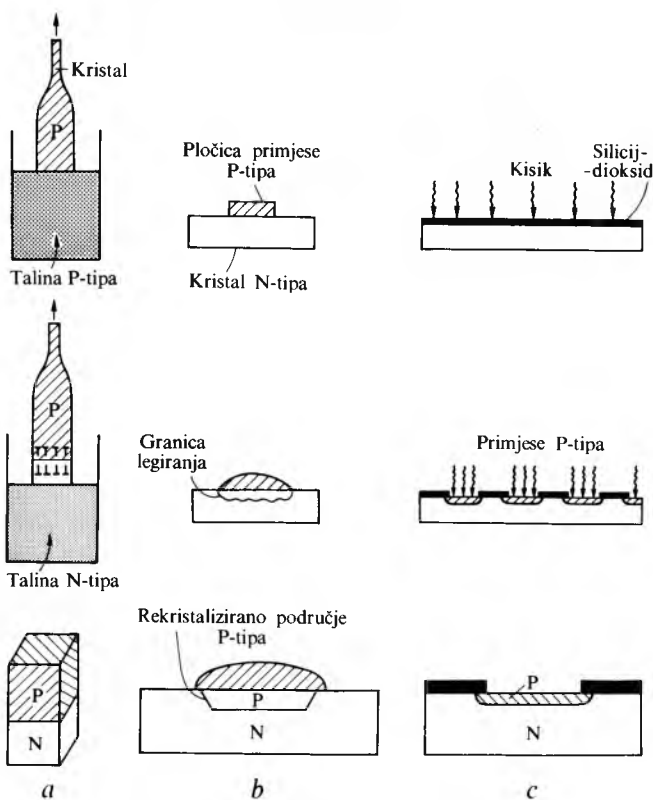
Sl. 10. Kremene ladice za smještaj silicijskih pločica u peći za oksidaciju

Oksidacija silicijske pločice nije u tehnološkoj izradbi tranzistora ili integriranih sklopova samo postupak na početku izradbe, nego se praktički svaki difuzijski proces završava u oksidacijskoj atmosferi, rezultirajući zaštitom površine. Za vrijeme oksidacija koje slijede difuzije moguća je i redifuzija (preraspodjela) primjesa već uvedenih u silicij. Zbog toga se teži oksidacijama na što nižoj temperaturi i u što kraćim vremenima. To se danas postiže tehnološkim postupkom termičke oksidacije pri povišenom ili sniženom tlaku, ili oksidacijama podržanim plazmom. Osim termičkom oksidacijom, silicij se može oksidirati i elektrolitički.

Silicij-dioksid se može na silicijsku pločicu nanijeti kompaktno i konformno također taloženjem. Postoje tehnološki postupci kemijskog taloženja, napaivanja u vakuumu i napaivanja.

Stvaranje PN-prijelaza. Poluvodiči samo jednog tipa, P ili N, vrlo se rijetko primjenjuju u mikroelektronici. Mnogo interesantnije su strukture s jednim ili više PN-prijelaza (PN-spojeva). Zbog specifičnih svojstava PN-prijelaza (v. *Elektronika*, TE 4, str. 473) bilo je moguće razviti čitav niz poluvodičkih elektroničkih elemenata. Oni su u početku zamijenili elektronske cijevi, da bi kroz sljedećih tridesetak godina nastajali sasvim novi elementi, s novim mogućnostima primjene.

Dodavanje akceptorskih i donorskih primjesa za vrijeme rasta monokristala bio je jedan od prvih tehnoloških postupaka za stvaranje PN-prijelaza. Monokristal jednog tipa vodljivosti rastao je do određenog trenutka kada se promijenila primjesa, pa je dalje rastao monokristal suprotnog tipa vodljivosti (sl. 11 a). Taj je postupak važan samo povijesno jer nikad nije bio primijenjen industrijski.



Sl. 11. Stvaranje PN-prijelaza u poluvodičkom kristalu postupkom rasta kristala (a), postupkom legiranja (b) i postupkom difuzije primjesa (c)

Legiranje je bilo sljedeći tehnološki postupak u razvoju stvaranja PN-prijelaza. Princip je u tome da se na pločicu, npr. N-tipa vodljivosti, stavi komadić akceptorskog materijala. Sve se zajedno zagrije do njihove temperature legiranja i akceptorski atomi ulaze u osnovni poluvodič do određene dubine. Nakon hlađenja rekristalizirani legirani sloj je P-tipa, a ostali dio je N-tipa; nastao je PN-prijelaz (sl. 11 b). Tim je postupkom dobiven prvi tranzistor (v. *Elektronika*, TE 4, str. 471), a primjenjivao se i za proizvodnju germanijskih dioda i tranzistora.

Difuzija

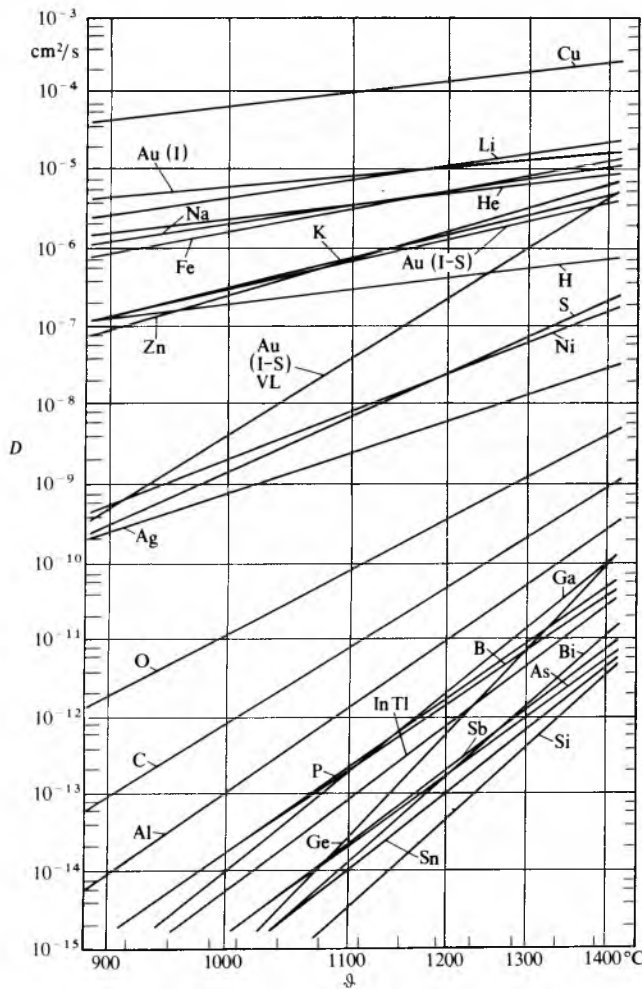
Najvažniji tehnološki postupak za stvaranje PN-prijelaza, koji se i danas najšire primjenjuje, jest difuzija primjesa u poluvodič. Difuzija je primijenjena za unošenje primjesa u osnovni kristal još 1952. (W. G. Pfann). Površina poluvodičke pločice izloži se utjecaju primjesa u atmosferi visoke koncentracije obrnutog tipa vodljivosti od poluvodičke pločice. Primjesni atomi ulaze u strukturu pločice difuzijom koja se može dosta precizno definirati i upravljati. Brzina je difuzije na sobnoj tempera-

turi malena, pa se radi na povišenim temperaturama (npr. za silicij pri 800...1250 °C). Difuzijom primjesa u poluvodič na povišenoj temperaturi raspoređuju se primjesni atomi od površine poluvodiča do određene dubine u poluvodičkoj pločici. Primjese mijenjaju u tom području tip vodljivosti poluvodiča. Dubina prodiranja naziva se dubinom difuzije ili dubinom PN-prijelaza. Difuzija ovisi o temperaturi, trajanju difuzije i površinskoj koncentraciji primjesa (sl. 11 c).

Difuzija se može aproksimativno opisati Fickovim zakonom (iz 1855. god.), prema kojemu je difuzijski tok primjese (brzina prijenosa atoma po površini) za jednodimenzijski model

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (26)$$

gdje je D koeficijent difuzije koji ovisi o prirodi atoma i temperaturi, a često i o koncentraciji primjesa c , $\frac{\partial c}{\partial x}$ je gradijent koncentracije.



Sl. 12. Ovisnost koeficijenta difuzije D o temperaturi za različite elemente

Koeficijent difuzije ovisi o temperaturi prema zakonu

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right), \quad (27)$$

gdje je W_a aktivacijska energija, k Boltzmannova konstanta, a T temperatura. Eksperimentalni koeficijenti difuzije najvažnijih primjesa u siliciju prikazani su na sl. 12. U jednodimenzijskom modelu gibanje primjese u poluvodič prikazano je transportnom jednačinom:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (28)$$

Ako se pretpostavi da koeficijent difuzije ne ovisi o koncentraciji, dobiva se uvrštenjem (26) u (28) difuzijska jednačina

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (29)$$

Istom jednačinom opisan je i prijenos topline tako da je D zamijenjen toplinskim koeficijentom a .

Ako je za trajanja difuzije površinska koncentracija primjese konstantna, rješenje je jednačbe (29)

$$c(x, t) = c_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (30)$$

gdje je c_s površinska koncentracija primjese, a $2\sqrt{Dt}$ naziva se difuzijskom duljinom. Ukupni je broj primjesnih atoma na 1 cm²

$$Q(t) = \int_0^\infty c(x, t) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt} c_s. \quad (31)$$

Gradijent je koncentracije primjesa

$$\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x,t} = -\frac{c_s}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \approx -\frac{x}{2Dt} c(x, t). \quad (32)$$

Ako atomi primjese difundiraju u poluvodič nakon što su u njega uvedeni pomoću izvora koji daje konstantnu površinsku koncentraciju (30) tako da se tok primjesa iz vanjskog izvora zaustavi, dakle da difundira dalje samo ona količina koja je u poluvodiču (31), uz uvjet da je $\sqrt{Dt}$ druge difuzije puno veći od $\sqrt{Dt}$ prve, rješenje (29) jest

$$c(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right). \quad (33)$$

Budući da je ukupna količina primjesa Q konstantna, površinska koncentracija primjesa s vremenom mora opadati, pa je

$$c_s(t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}. \quad (34)$$

Gradijent je koncentracije primjesa

$$\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x,t} = -\frac{x}{2Dt} c(x, t). \quad (35)$$

Dubina je PN-prijelaza u poluvodiču ona dubina na kojoj je koncentracija difuzijom uvedenih primjesa $c(x_j, t)$ jednaka koncentraciji prethodno uvedenih primjesa obrnutog tipa c_B

$$c(x_j, t) = c_B, \quad (36)$$

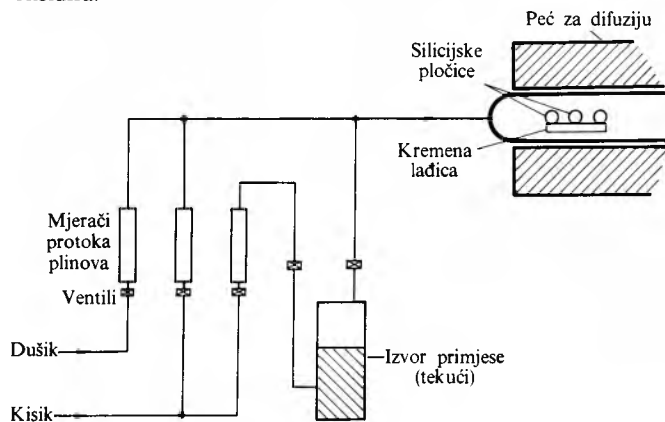
gdje je x_j dubina PN-prijelaza.

Za formiranje jednog PN-prijelaza, kako je u diodama, potrebna je u principu samo jedna difuzija, za tranzistor dvije, a za integrirane sklopove više njih. No, već u praktičnoj realizaciji dioda potrebno je više difuzijskih procesa.

Difuzijske peći. Difuzija primjesa u silicij ostvaruje se u difuzijskim pećima. Na sl. 13 naznačeni su glavni dijelovi takve peći. Na duljini od nekoliko decimetara (6...10 dm) temperatura je jednolika ($\Delta T \approx \pm 0,5$ K) i vremenski konstantna u istim granicama. Tipične su temperature za difuziju 800...1250 °C, za veoma duboke PN-prijelaze i 1300 °C. Da bi se spriječio nekontrolirani utjecaj okoliša na silicij za vrijeme difuzije, kroz zaštitnu kremenu cijev protječe čisti dušik. Silicijske pločice slože se u kremenu ladu i pomoću kremenog štapa stave u središte visokotemperaturne zone peći. Na suprotnoj strani kremenice cijevi od ušća gdje ulazi kremena ladica sa silicijskim pločicama uvodi se u difuzijsku cijev primjesa. Difuzije su za različite primjese u principu iste, ali se parametri difuzije određuju prema primjesi i poluvodičkom elementu koji se želi dobiti. Za ilustraciju odabran je primjer dodavanja fosfora siliciju.

Na ulazu u cijev nalazi se bočica s tekućim fosfor-oksikloridom (POCl₃) na sobnoj temperaturi. Kroz tu bočicu protječe

čisti dušik koji u difuzijsku cijev nosi pare fosfor-oksiklorida. U cijevi se na visokoj temperaturi fosforni spoj raspada i na površini silicija nastaje čvrsta otopina granične koncentracije koja ovisi o temperaturi. Trajanje je depozicije fosfora relativno kratko (10...20 min) na temperaturi 800...1100 °C, tako da su dubine prodiranja fosfora u silicij manje od 0,2 μm, dok je površinska koncentracija fosfora određena temperaturom depozicije. U praktičnoj izvedbi osim dušika difuzijskom cijevi protječe i čisti kisik, tako da se površina silicijske pločice lagano oksidira.



Sl. 13. Shema uređaja za difuziju primjesa u silicij

Difuzija fosfora i drugih primjesa. Konačna određena dubina PN-prijelaza (s određenom površinskom koncentracijom) postiže se difuzijom fosfora. Prije toga se sa silicijskih pločica, nakon depozicije, odjetka oksidni sloj bogat fosforom (fosforno staklo), pločice se slože u novu kremenu lađicu koja se stavi u difuzijsku cijev na određenoj temperaturi. Vrijeme difuzije određuje i dubinu PN-prijelaza.

Fosfor nije jedina primjesa, a opisana metoda nije jedina moguća metoda uvođenja fosfora u silicij. Difuzija primjese u silicij gotovo je uvijek dvojaka: najprije depozicija, a zatim difuzija.

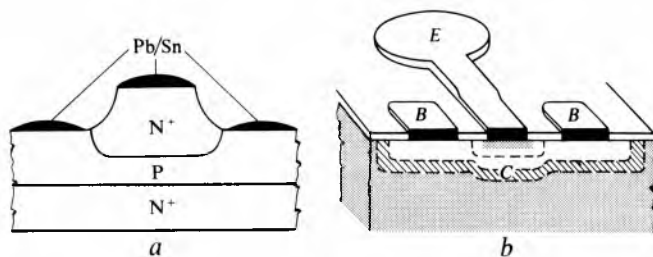
Difuzija je većinom slična opisanoj, a depozicija se razlikuje prema vrsti primjese i njenu agregatnom stanju: tekući su izvori primjesa npr. fosfor-oksiklorid, bor-tribromid (BBr₃), bor-triklorid (BCl₃), arsen-triklorid (AsCl₃), dok su u čvrstom stanju poznati bor-trioksid (B₂O₃), arsen-trioksid (As₂O₃), antimon-trioksid (Sb₂O₃), fosfor-pentaoksid (P₂O₅), a u plinskom stanju diboran (B₂H₆), fosfin (PH₃), arsin (AsH₃).

Posebno je potrebno navesti i difuziju iz stakla silicij-dioksida s ugrađenim primjesama. Na silicijsku se pločicu kemijski nataloži silicij-dioksid s fosforom, arsenom, borom ili kojom drugom primjesom, na relativno niskoj temperaturi (~400 °C). Na toj temperaturi primjesa gotovo ne uđe u silicij. Zatim se pločice zagriju na temperaturu difuzije, na kojoj primjese iz silicijeva dioksida prelaze u silicij i difundiraju do željene dubine. Površinska koncentracija može se osim temperaturom upravljati i koncentracijom primjesa u silicij-dioksidu, što daje dodatni faktor slobode u projektiranju PN-prijelaza.

Mesa-postupak. Difuzija primjesa u silicijsku pločicu može biti po čitavoj silicijskoj pločici. Tada je PN-prijelaz po čitavoj pločici, a pojedini se čip konstruira kemijskim jetkanjem. Zbog sličnosti izgleda s planinama Colorada u SAD takav je čip dobio naziv *mesa* (španj. *mesa*, stol). U čipu s mesa-strukturom PN-prijelaz je ravan (sl. 14a). Kad je više PN-prijelaza (transistor), oni izlaze na površinu čipa sa strane.

Planarni postupak. U tehnološkom postupku izradbe silicijskih poluvodičkih elemenata planarnom difuzijom difuzija je primjese ograničena samo na dijelove silicijske pločice koji nisu prekriveni oksidom. Drugi dijelovi pločice zaštićeni su silicij-dioksidom u kojemu je brzina difuzije primjesa manja nego u siliciju. Uz dovoljno debeo oksid na dijelovima pločice primjese ne mogu doprijeti do silicija, dok na dijelovima bez oksida difundiraju do potrebnih dubina. Tako PN-prijelaz izlazi na onu površinu silicijske pločice s koje je difundirao i zaštićen

je od atmosfere zaštitnim oksidom. Svi PN-prijelazi koji se tako formiraju imaju izlaz na istoj površini, pa se nazivaju planarnima. Oni nisu ravni, nego u presjeku izgledaju kao na sl. 14b.

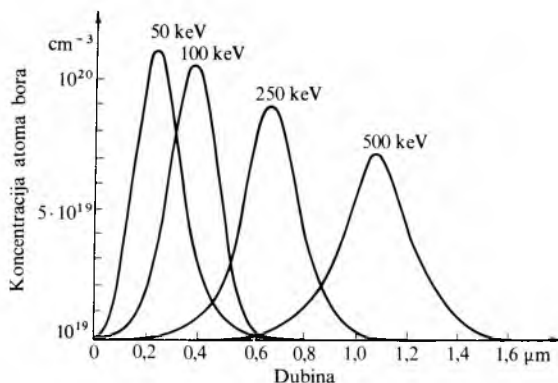


Sl. 14. Presjek kroz slojeve mesa-transistora (a) i planarnog tranzistora (b)

Planarnom difuzijom mogu se izrađivati ekonomični i pouzdani poluvodički elementi, diode, tranzistori, tiristori te složeni integrirani sklopovi. Planarna je tehnologija ograničena u upotrebi vrlo plitkih PN-prijelaza i u elementima s vrlo malim dimenzijama PN-prijelaza. Različiti efekti nepravilnosti difuzije (utjecaj jedne vrste primjesa na difuziju druge, utjecaj kristalnih defekata na difuziju) otežavaju precizno upravljanje svojstvima difundiranih slojeva. Zbog izotropnosti difuzije primjesa dimenzije su PN-prijelaza prevelike i unatoč izvanredno finoj mikrolitografiji. Za vrlo plitke PN-prijelaze i vrlo male dimenzije umjesto difuzije upotrebljava se ionska implantacija.

Ionska implantacija

Ionska implantacija je ugrađivanje primjesnih atoma u poluvodič bombardiranjem poluvodiča primjesnim ionima. Električno polje ubrzava ione na putu do površine poluvodiča ubrzavajući naponom od 50...500 kV. Kad uđu u poluvodič, ioni se sudaraju s atomima kristalne rešetke i pri tom izgube svoju energiju; na kraju se zaustave na određenoj dubini u poluvodičkom kristalu. Domet je implantiranih iona različit s obzirom na statističke uvjete implantacije i ovisi o vrsti i energiji iona te o vrsti poluvodiča i kristalografskom smjeru. Koncentracija implantiranih primjesa ovisi o ukupnoj količini iona, tj. o implantiranoj dozi, koja je određena vremenom implantacije i gustoćom struje ionskog snopa. Profil i koncentracije implantiranog bora u silicij za različite energije prikazani su na sl. 15. Za razliku od profila primjesa uvedenih u silicij termičkom difuzijom, gdje je maksimalna koncentracija uglavnom na površini, pri ionskoj implantaciji maksimum koncentracije primjese nalazi se na nekoj dubini, već prema upadnoj energiji iona.



Sl. 15. Koncentracija borovih atoma po dubini, implantiranih u silicij s različitim ulaznim energijama

Raspodjela implantiranih primjesa $n(x)$ može se aproksimirati Gaussovom raspodjelom

$$n(x) = n(R_p) \exp \frac{-(x - R_p)^2}{2 \Delta R_p^2}, \quad (37)$$

gdje je $n(R_p)$ maksimalna koncentracija iona na udaljenosti

R_p od površine, R_p projekcija ionskog dosega, a ΔR_p omjer broja atoma primjese i silicija. Integral $\int_0^\infty n(x)dx$ naziva se implantirana doza ϕ , pa za $n(R_p)$ slijedi

$$n(R_p) = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \approx \frac{0,4 \phi}{\Delta R_p} \quad (38)$$

Tablica 3
KONCENTRACIJA PRIMJESA U SILICIJU
($t = 1200^\circ\text{C}$)

Primjesa	Maksimalna koncentracija primjese $n(R_p)$ cm^{-3}	Omjer broja atoma primjese i silicija ΔR_p
As	$1,7 \cdot 10^{21}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$
Au	$7,0 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
B	$5,0 \cdot 10^{20}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
O	$7,0 \cdot 10^{17}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
P	$1,5 \cdot 10^{21}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
Sb	$5,5 \cdot 10^{19}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$

U tabl. 3 vide se podaci o R_p i ΔR_p za važnije primjese u siliciju. Točniji račun vodi Pearsonovoj IV. raspodjeli, koja se osniva na rješenju diferencijalne jednačbe

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{(x' - a)h(x)}{b_2 x'^2 + b_1 x' - b_0}, \quad (39)$$

gdje je h normalizirana funkcija raspodjele, $h(x)$ zadovoljava uvjet $\int_{-\infty}^{\infty} h(x)dx = 1$, a x' je definiran kao $x' \equiv x - R_p$. Četiri konstante a , b_0 , b_1 i b_2 definirane su sa četiri parametra ionske implantacije

$$\mu_1 = R_p = \int_{-x}^{+x} x h(x) dx, \quad (40a)$$

$$\mu_2 = \Delta R_p = \int_{-x}^{+x} (x - R_p)^2 h(x) dx, \quad (40b)$$

$$\gamma_1 = \frac{\int_{-x}^{+x} (x - R_p)^3 h(x) dx}{\Delta R_p^3}, \quad (40c)$$

$$\beta = \frac{\int_{-x}^{+x} (x - R_p)^4 h(x) dx}{\Delta R_p^4}, \quad (40d)$$

tako da vrijedi

$$a = -\frac{\gamma_1 \mu_2 (\beta + 3)}{A}, \quad (41a)$$

$$b_0 = -\frac{\mu_2^2 (4\beta - 3\gamma_1^2)}{A}, \quad (41b)$$

$$b_1 = a, \quad (41c)$$

$$b_2 = -\frac{(2\beta - 3\gamma_1^2 - 6)}{A}, \quad (41d)$$

gdje je

$$A = 10\beta - 12\gamma_1^2 - 18. \quad (41e)$$

Rješenje

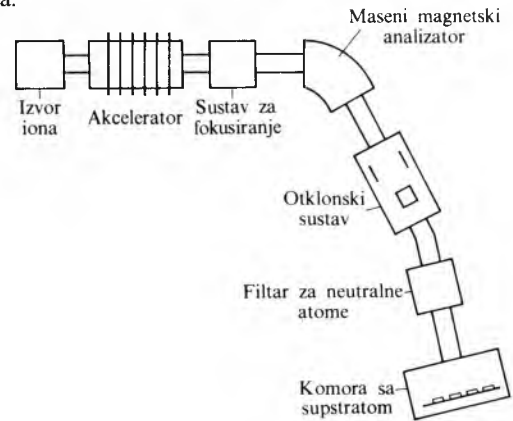
$$\ln \frac{n(x)}{n_0} = \frac{1}{2b_2} \ln(b_2 x'^2 + b_1 x' + b_0) - \frac{b_1}{b_2} + 2a - \frac{2b_2 x' + b_1}{(4b_2 b_0 - b_1^2)^{1/2}} \arctan \frac{2b_2 x' + b_1}{(4b_2 b_0 - b_1^2)^{1/2}} \quad (42)$$

Tablica 4
SVOJSTVA PRIMJESA U SILICIJU

Element	Tip kristala	Relativna atomna masa	Koeficijent odvajanja	Specifični broj atoma g^{-1}
Al	P	26,97	0,0020	$2,23 \cdot 10^{22}$
As	N	74,91	0,3	$8,03 \cdot 10^{21}$
Au		197,20	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,05 \cdot 10^{21}$
B	P	10,82	0,80	$5,55 \cdot 10^{22}$
Bi	N	209,00	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,88 \cdot 10^{21}$
Cu	N, P	63,57	$4 \cdot 10^{-4}$	$9,47 \cdot 10^{21}$
Fe	N	55,84	$8 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{22}$
Ga	P	69,22	0,0080	$8,69 \cdot 10^{21}$
In	P	114,76	$4 \cdot 10^{-4}$	$5,25 \cdot 10^{21}$
Li	N	6,94	0,01	$8,69 \cdot 10^{22}$
P	N	30,98	0,35	$1,94 \cdot 10^{22}$
Sb	N	121,76	0,023	$4,94 \cdot 10^{21}$
Ti	P	204,39		$2,68 \cdot 10^{21}$
Zn	P	65,38	$\sim 1 \cdot 10^{-5}$	$9,22 \cdot 10^{21}$

izvršno se slaže s eksperimentalnim podacima. U tabl. 4 vide se vrijednosti za parametre najvažnijih primjesa u siliciju.

Uređaji za ionsku implantaciju slični su spektrometru masa (sl. 16). Ione iz ionskog izvora ubrzava i fokusira elektrostatički elektronski sustav. Maseni analizator iz snopa isključuje sve ostale nepoželjne ione. Otklonski sustav otklanja ionski snop tako da je moguća istodobna implantacija u više silicijskih pločica.



Sl. 16. Blok-shema ionskog implantera

U sudaru iona s kristalom prilikom ionske implantacije oštećuje se kristalna rešetka, što djeluje nepovoljno na svojstva poluvodičkih elemenata. Zbog toga je potrebno silicijske pločice na povišenoj temperaturi $600 \cdots 800^\circ\text{C}$ napustiti, tj. omogućiti kristalnoj rešetki oporavak. Takvo napuštanje u mnogim slučajevima eliminira prednosti ionske implantacije s obzirom na termičku difuziju. U posljednje vrijeme upotrebljava se lasersko napuštanje. Pomoću jakog lasera dio se silicijskog kristala nakon implantacije rastali i ponovno rekristalizira. Kristal je slobodan od defekata, a profili implantacije zbog izvanredno kratkog vremena procesa napuštanja ostanu nepromijenjeni.

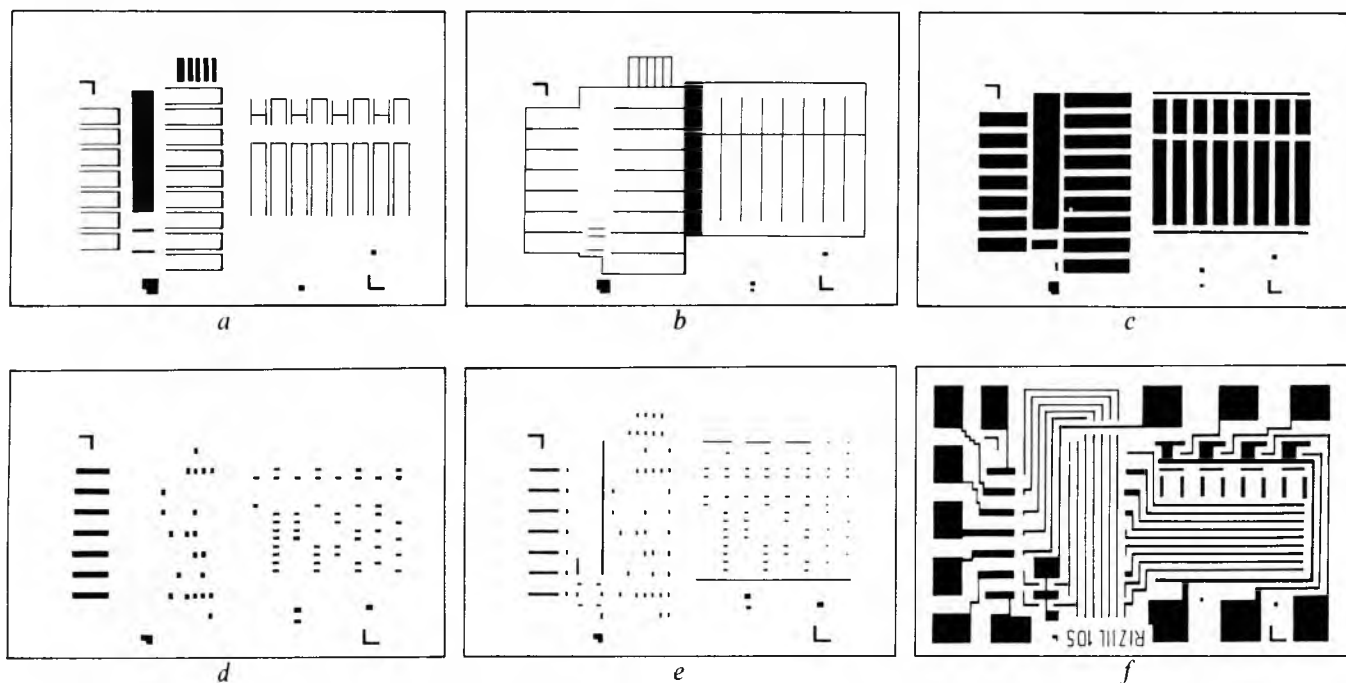
U modernim snažnim tranzistorima i tiristorima stvaraju se PN-prijelazi velikih površina za vrijeme rasta monokristala, ali ne iz taline, nego za vrijeme epitaksijalnog rasta. Ako se epitaksijalnom monokristalu najprije doda fosfor (npr. dodatkom fosfina za vrijeme rasta), promjenom primjese (npr. borom iz diborana dodanog u plin) mogu se dobiti dva epitaksijalna sloja, jedan N-tipa i drugi P-tipa. PN-prijelaz je po čitavoj silicijskoj pločici. Moguće je i više slojeva, pa se takva tehnologija zove *multiepitaksijalna*.

Mikrolitografija

Planarna tehnologija poluvodičkih elemenata s lokalnim stvaranjem PN-prijelaza omogućena je tehnološkim postupkom nazvanim mikrolitografija. Tim se postupkom na oksidiranoj silicijskoj pločici kemijski odjetka silicij-dioksid na određenim mjestima. Na oksidiranu silicijsku pločicu nanese se tanki sloj

(0,3...1,5 μm) tzv. fotoosjetljive emulzije, općenitije materijala osjetljivog na određena zračenja (svjetlost, elektrone, rendgensko zračenje). Fotoosjetljivi se sloj ozrači lokalno ultraljubičastim zračenjem primjenom maske (fotolitografska ploča s tamnim i prozirnim mjestima) (sl. 17), ili rendgenskim, laserskim ili elek-

tronskim zračenjem. Svim tim zračenjima upravlja računalni program. Industrijski se danas najviše upotrebljava ultraljubičasto zračenje živinih cijevi, a postupak se naziva fotolitografija (sl. 18). Za izvanredno složene integrirane sklopove upotrebljava se i elektronska litografija, a u laboratorijskim razmjerima rend-



Sl. 17. Primjeri maski za fotolitografski postupak izradbe linearnih integriranih sklopova. a maska za P⁺-sloj, b maska za N⁻-sloj, c maska za bazu, d maska za emitter, e maska za otvore za metalne kontakte, f maska za metalne staze



Sl. 18. Shema toka fotolitografskog postupka

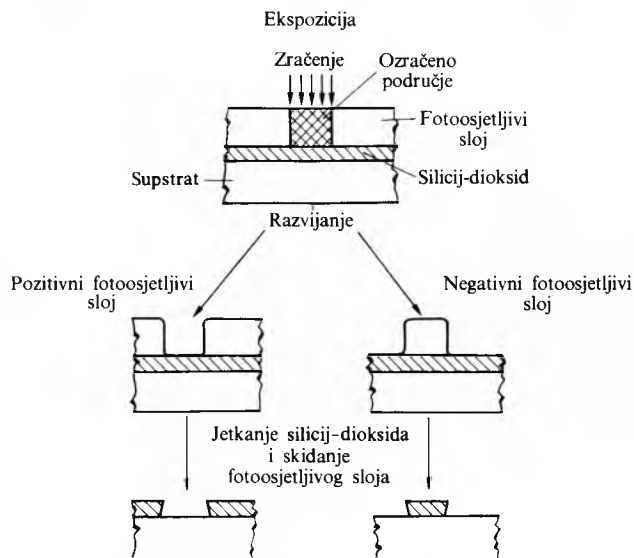
genska i laserska litografija. Ozračeni fotoosjetljivi sloj mijenja svoja svojstva topljivosti u određenim otapalima (razvijajući), bilo da postane otporan, bilo da postane topljiv, pa se na određenim mjestima odstranjuje. Kako to odstranjivanje često mora biti na istim mjestima silicijske pločice na kojima već postoji prethodna lokalna difuzija primjese, silicijska se pločica mora poravnati s maskom, tj. prethodna topografska slika na silicijskoj pločici mora se dovesti u određeni položaj prema novoj topografiji koja će se preslikati s maske na silicijsku pločicu. Tolerancije su tog poravnavanja reda mikrometra. Takvo je poravnavanje omogućeno posebnim složenim optičkim i finomehaničkim uređajima. Nakon poravnavanja maske i silicijske pločice, osvjetljavanje fotosloja i razvijanja, pločice se zagrijava u temperaturu $\sim 130^\circ\text{C}$ da bi fotosloj bolje prijanjao uz površinu pločice. U kemijskom jetkalu koje nagrizu silicij-dioksid nezaštićeni se oksid odstrani. Izgaranjem fotosloja u kisikovoj plazmi ili određenim kemijskim postupkom on se potpuno ukloni s pločice. Nakon posebnog kemijskog čišćenja silicijska pločica je spremna za sljedeći tehnološki postupak.

U realizaciji integriranih sklopova opisani mikrolitografski postupak primjenjuje se više (7 do 15) puta, pa nastale konture na silicijskoj pločici dobiju izvanredno složen izgled.

Izradba fotomaski. Starijim se postupkom željena topografija poluvodičkog elementa nacrtala u povećanom mjerilu (npr. 1000 puta), izrezala u tamnom papiru te fotografski reducirala najprije u omjeru 10:1 i zatim 1:1, a nakon toga reproducirala korak po korak po čitavoj fotomaski. U novijem se računalnom dizajnu (engl. *Computer Aided Design*, CAD) topografski podaci unesu na magnetsku vrpцу. U posebnom uređaju za stvaranje slike iz tih podataka nastaje slika u omjeru 10:1, a u redukcijskoj se kameri preko optičkog sustava reducira na realne dimenzije i reproducira po čitavoj fotoploči. Budući da je postupak pravljenja fotomaske vrlo složen pa zato i skup, a fotomaska se pri poravnavanju vrlo lako može oštetiti (svaki se defekt na maski preslika kao defekt i na silicijsku pločicu), na opisani način napravljena maska (osnovna ili master-mask) služi samo za reprodukciju kopija. Takve se kopije ili radne maske naprave iz osnovne maske pomoću kontaktnog kopi-

ranja. Materijal od kojeg su maske napravljene jest vrlo ravno staklo jednolike debljine, na kojemu je fotoosjetljiva emulzija. Između stakla i fotoosjetljive emulzije može biti i tanki sloj kroma ili nekog metalnog oksida. Nakon osvjjetljenja emulzije metalni se sloj može odjetkati selektivno, pa se tako dobiju uz *emulzijske fotomaske* i *metalne fotomaske*, koje su otpornije na različita oštećenja.

Fotorezisti su organski spojevi koji se utjecajem ultraljubičastog zračenja polimeriziraju ili razgrađuju. Postoje dva tipa fotorezista: negativni i pozitivni. Negativni se rezisti na mjestima koja su eksponirana polimeriziraju i slabo su topljivi u razvijaju. Pozitivni se rezisti, naprotiv, na eksponiranim područjima razgrađuju i otapaju u razvijaju (sl. 19). Osnovne komponente negativnih fotorezista jesu polimer, fotoinicijator i otapalo. Upotrebljavaju se u obliku viskozne tekućine koja se nanese na silicijsku pločicu bilo štrcanjem, bilo u obliku kapljice koja se centrifugiranjem raširi po čitavoj pločici. Ultraljubičastim zračenjem aktivirani fotoinicijator uzrokuje raspad azida tipa N_3-X-N_3 (X je aromatska grupa) u rezistu. Nastali imidogeni radikal $N-X-N$: kratkog vremena života reagira s vezom C-H polimera (derivat polizoprena), stvarajući unakrsno povezivanje u netopljiv visokopolimerni spoj mrežaste strukture.



Sl. 19. Nastajanje otvora u zaštitnom sloju s pozitivnim i negativnim fotoosjetljivim slojem

Za pozitivne fotoreziste upotrebljava se fotokemijska konverzija ortodiazoketona u karboksilnu kiselinu topljivu u alkoholnom razvijaju.

Izbor rezista u tehnološkoj realizaciji poluvodičkih čipova ovisi o topografiji poluvodičkog elementa. Za elektronsku litografiju postoje specijalni rezisti na osnovi vinilnih, akrilnih i metakrilnih polimera.

Uređaji za poravnavanje topografije razlikuju se s obzirom na položaj fotomaske prema silicijskoj pločici prilikom osvjetljivanja. U kontaktnim uređajima maska prijanja na pločicu. Postiže se razlučivanje manje od $2\ \mu\text{m}$, ali su česta oštećenja fotomaski. U nekontaktnim uređajima maska i pločica su za vrijeme ekspozicije razmaknute za nekoliko mikrometara. Oštećenja su maske smanjena, ali je i razlučivanje manje. U projekcijskim se uređajima slika maske optičkim sustavom projicira na pločicu.

U elektronskoj litografiji maska više nije potrebna. Elektronski snop prelazi (skanira) po silicijskoj pločici, a računalo upravlja direktno njegovim pomacima. Moguća su razlučivanja manja od $1\ \mu\text{m}$. Slično je zamišljena i rendgenska litografija, koja tek čeka industrijsku primjenu.

Metalni slojevi

Metalni slojevi za kontakte služe pri povezivanju čipa s kućištem ili za međusobno povezivanje pojedinih dijelova inte-

griranog sklopa. Sloj metala može biti s jedne ili s obje strane silicijske pločice. Na stražnjoj strani pločice (na onoj na kojoj obično nema nikakve topografske strukture) metal služi za stvaranje kontakta jedne zajedničke elektrode čitavog čipa, odnosno u tranzistoru je to kolektorski kontakt. Uobičajeni metal je zlato (zbog kompatibilnosti sa zlatom na podnožju kućišta), iako to ne mora biti uvijek tako. Izbor je materijala kod različitih proizvođača različit, a ovisi također o karakteristikama određenoga poluvodičkog elementa. Takav metalni sloj (često slojevi različitih materijala, npr. zlato—krom—nikal ili zlato—olovo—kositar) spaja poluvodički silicijski čip s kućištem električki, termički i mehanički. Zato taj metalni sloj ne smije promijeniti tip vodljivosti silicijske pločice, mora biti niske električne i termičke otpornosti, mora dobro prijanjati na silicij, mora se dobro legirati na kućište i mora kompenzirati razlike u koeficijentima termičkog širenja silicija i kućišta.

Tranzistori za male snage NPN-tipa ugrađuju se u kućište s pozlaćenim podnožjem. Na stražnju stranu pločice napari se zlato s približno 1% fosfora, koji je dodan zlatu da bi se spriječila kompenzacija silicija N-tipa (zlato u siliciju N-tipa djeluje kao akceptor). Taj se metalni sloj ulegira u silicij na temperaturi $\sim 450^\circ\text{C}$, tako da je njegovo prijanjanje na silicij dobro i zadnja strana je pripremljena za postavljanje u kućište.

Tranzistori za velike snage NPN-tipa relativno su velikih dimenzija, pa opisana metalizacija nije primjerena. Moguće su sljedeće modifikacije: u naporivaču se na silicijsku pločicu napari najprije tanki sloj zlata s primjesom fosfora, arsena ili antimona. Na taj se metalni sloj u tom istom postupku naparivanja nanese sloj kroma, zatim sloj nikla i vrlo tanak sloj zlata. Pomoću tankog listića legure olovo-kositar, tzv. preforme, čip se može montirati na *nikleno* podnožje kućišta. Sloj olovo-kositar služi kao jastučić pri termičkim promjenama i sprečava pucanje čipa zbog različitih koeficijenata termičkih rastezanja.

Često se na zadnju stranu silicijske pločice ne nanosi metalni sloj prije postavljanja čipa u kućište (PNP-tranzistor, integrirani sklopovi). Tek se pri postavljanju između čipa i podnožja stavlja listić preforme ili kapljica vodljive paste.

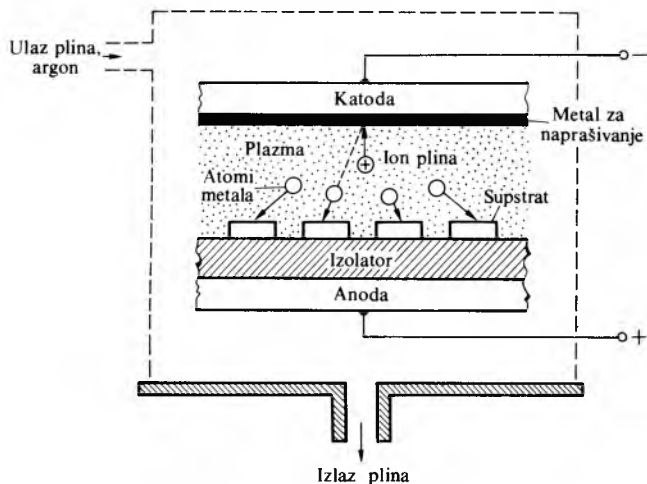
Na prednjoj strani silicijske pločice (na kojoj je topografija tranzistora, integriranog sklopa) metalizacija je mnogo složenija. Ne toliko u izboru materijala koliko u postupku. Najprije treba u silicij-dioksidu napraviti otvore mikrolitografijom. Zatim se metalizira čitava pločica i mikrolitografijom se, slično kao pri otvaranju oksida, odstrani metalni sloj sa svih dijelova pločice gdje nije poželjan. Rezultat toga je metal na kontaktnom otvoru, metalne staze kao vodovi i metalne plohe (često iznad silicij-dioksida) za spajanje s kućištem. Izbor metala treba zadovoljiti ove uvjete: da nanese sloj ima mali otpor, da se mogu napraviti uske linije, da između metala i poluvodiča postoji mali kontaktni otpor, da prijanja dobro na silicij-dioksid, te da je kompatibilan s načinom spajanja čipa na kućište. Najviše se upotrebljava u tu svrhu čisti aluminij ili aluminjska legura sa 1% silicija, te legure aluminij-silicij-bakar. Za izradbu vrlo pouzdanih poluvodičkih elemenata postala je standardna i metalizacija sa tri sloja: titanom, platinom i zlatom.

U početku tehnološkog razvoja tranzistora za metalizaciju se često upotrebljavao postupak kemijskog ili galvanskog nanošenja metala na poluvodič, dok je danas najraširenija metoda naparivanja metala u vakuumu i metoda naprašivanja.

Naparivanje u vakuumu tehnološki je postupak prijenosa čestica metala s rastaljenog izvora na silicijsku pločicu u posebnim uređajima, tzv. naporivačima. To su vakuumske uređaji koji u vakuumskoj komori imaju izvor metala, grijače metala, učvršćivače silicijskih pločica (tzv. planetarij), te mjerne uređaje. Vakuum mora biti tolik da je srednji slobodni put čestice koja se naparuje veći od udaljenosti pločice od izvora. U praktičnim izvedbama to su tlakovi $\sim 10^{-4}$ Pa. U tehnološkom postupku naparivanja metala na silicij metal se isparuje zagrijavanjem elektronskim snopom. Iz užarene katode elektroni se ubrzavaju u električnom polju, pod naponom $6\text{--}10\text{ kV}$, i usmjeravaju na materijal za isparivanje koji se nalazi u hladnoj ladici. Isparivanje metala je lokalno, pa se postiže najveća

čistoća naparivanja jer nema isparivanja ladice, kao pri starijoj metodi kojom se spiralnim grijачem zagrijavala ladica s metalom.

Za naparivanje legura upotrebljava se postupak trenutnog isparivanja. Naime, legure kojima je tlak para pojedinih komponenta različit opisanim se metodama zagrijavanja raspadaju ili im se komponente na različitim temperaturama isparuju, pa najprije ispari jedna komponenta, zatim druga itd. To se može spriječiti tako da se male količine legure dovedu na zagrijanu ladicu, koja je na višoj temperaturi od temperatura isparivanja pojedinih komponenta legure. Tada razlika tlaka njihovih para više ne utječe, pa se na silicijsku pločicu mogu napariti i homogeni slojevi legure.



Sl. 20. Shema uređaja za naprašivanje metala

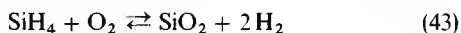
Naprašivanje (engl. sputtering) je tehnološki postupak kojim se metal naprašuje ionskim bombardiranjem. Skicu mogućeg uređaja i princip naprašivanja prikazuje sl. 20. Silicijske pločice stave se na anodu, a katoda je izvor metala. U tzv. magnetskim katodama neposredno je ispred katode magnetsko polje. Pod utjecajem tog polja elektroni se iz nastale plazme otklone i tako ne dolaze do poluvodiča, a naprašeni se materijal iskorištava bolje nego pri naparivanju. Brzine naprašivanja sloja su $\sim 1\text{--}4 \mu\text{m/min}$.

Ostali postupci

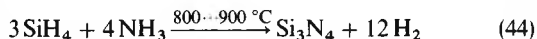
Zaštitni slojevi. Osim stavljanja u kućište (metalno, keramično, plastično), poluvodičke elemente treba zaštititi i od atmosferskog utjecaja. Ta se zaštita obično sastoji od izolacijskog sloja koji se stavlja na već metaliziranu silicijsku pločicu, pa se u njemu naprave otvori samo za kontakte za spajanje na kućište.

Slojevi koji se industrijski upotrebljavaju jesu silicij-dioksid bez primjesa, ili s primjesama fosfora ili bora, te silicij-nitrid (Si_3N_4). Često se upotrebljavaju i organski spojevi, npr. poliimid i perilen. Takav sloj sprečava prodiranje vlage do metalnog sloja i nepoželjnih iona, posebno natrija i kalija, na međuplohu silicija i silicij-dioksida.

Tehnološki su postupci dobivanja silicij-dioksida na relativno niskoj temperaturi ($300\text{--}500^\circ\text{C}$) različiti. Najvažnije je kemijsko nanošenje iz pare raspadom silana u atmosferi kisika. Kemijskom reakcijom



uz potrebnu čistoću omogućuje se dobivanje kompaktnog silicij-dioksida s dobrim prijanjanjem na silicijsku pločicu. Ako se pri kemijskom nanošenju silicij-dioksida u reaktor dovodi i plinoviti diboran ili fosfin, nastaje silicij-dioksid s ugrađenim primjesama, borom ili fosforom, koji je posebno pogodan za sprečavanje štetnog gibanja natrijevih iona. Silicij-nitrid često se stavlja na silicijsku pločicu i prije metalizacije. Primjenjuju se također reakcije:



Silicij-nitrid posebno je pogodan kao barijera za vlagu. Upotrebljava se često u kombinaciji s kemijski nanesenim silicij-dioksidom.

Silicij-dioksid i nitrid mogu se nanositi na silicijske pločice i na nižim temperaturama ako su reakcije potpomognute stvaranjem plazme.

Organski materijali nanose se na silicijske pločice iz otopina (poliimid), ili kemijskim reakcijama u vakuumu (perilen). Njihova je primjena mnogo rjeđa od primjene silicij-dioksida i nitrida.

Kemijski postupci. Iako je relativno jednostavno, izuzetno je važno u izradbi poluvodičkih elemenata čišćenje osnovnog materijala (silicija). Prije svakog termičkog procesa sa silicijskih pločica treba odstraniti nečistoće organskog porijekla odmašćivanjem u organskim otapalima (benzen, toluen, ksilen, triklor-etilen, metanol, freon i sl.) i nečistoće anorganskog porijekla (metalni ioni, oksidi, soli) u koncentriranim kiselinama i oksidirajućim agensima. Pranje u kiselinama obavlja se nekoliko puta uzastopno, a kombinacija i koncentracija kemikalija variraju od proizvođača do proizvođača. Industrijski je dosta uobičajeno pranje u razrijeđenoj otopini amonijaka i vodik-peroksida, klorovodične kiseline i vodik-peroksida, te sumporne kiseline i vodik-peroksida.

Posljednje je u svakom pranju ispiranje u ekstremno čistoj deioniziranoj vodi. Čistoća vode izražava se električnom otpornošću i treba biti $15\text{--}20 \text{ M}\Omega\text{cm}$. Voda kojoj je otpornost $20 \text{ M}\Omega\text{cm}$ ima kvalitetu kao voda koja je 50 puta redestilirana u kremennoj aparaturi.

Osim iona, iz vode treba sterilizacijom ukloniti mikroorganizme (obično ultraljubičastim zračenjem), a filtracijom sitne mehaničke čestice (manje od $0,3 \mu\text{m}$).

Jetkanje silicij-dioksida jest kontrolirano otapanje silicij-dioksida, a obavlja se prije svake difuzije i metalizacije. Silicij-dioksid se otapa do silicija na mjestima koja su određena slikom maske na površini.

Jetkalo mora biti selektivno (nagrizi samo silicij-dioksid, a ne silicij), mora osigurati stvaranje otvora malih dimenzija s oštrim rubovima i mora biti anizotropno. Osnovni je spoj otopine za jetkanje fluorovodična kiselina. Reakcija otapanja



u koncentriranoj fluorovodičnoj kiselini vrlo je burna i mjehurići plina koji se razvijaju oštećuju zaštitni sloj, pa jetkanje više nije kontrolirano. Za jetkanje se upotrebljava puferna vodena otopina fluorovodične kiseline i amonij-fluorida. Variranjem sastava utječe se na brzinu jetkanja.

Osim u vodenim otopinama, jetkati se može u plinskoj plazmi (ionizirani plin). Najčešće se upotrebljava plin ugljik-tetrafluorid. Takvo jetkanje je anizotropno.

Jetkanje silicija. U nekim tehnološkim postupcima izradbe poluvodičkih elemenata potrebno je jetkati silicij, npr. mesa-strukture ili strukture V-MOS, prije metalizacije stražnje strane silicijske pločice, te pri ispitivanju kvalitete monokristala. Jetkala za silicij su različitog sastava, uglavnom smjesa koncentrirane dušične, fluorovodične i octene kiseline.

Za otkrivanje kristalografskih defekata (dislokacije, greške u slaganju) jetkala su selektivna. Brzina je jetkanja za svaki kristalografski smjer i defekte različita. Primjer je jetkala za otkrivanje kristalografskih defekata otopina krom-oksida i fluorovodične kiseline u deioniziranoj vodi ($\text{CrO}_3 + \text{HF} + \text{H}_2\text{O}$).

Jetkanje metalnih slojeva ovisi o metalu koji je upotrijebljen. Jetkalo mora biti selektivno s obzirom na silicij-dioksid. Aluminij se jetka u otopini dušične i fosforne kiseline.

Ugrađivanje poluvodičkog čipa u kućište. Poluvodički čip ugrađuje se u kućište da bi se poluvodičkim elementom spretnije rukovalo, da bi se zaštitio od vanjskih utjecaja i radi poboljšanja termičke disipacije. Kućišta za poluvodičke elemente različitih su oblika i od različitih materijala s obzirom na tip

poluvodičkog elementa i način primjene. Kućište je i termički ponor ako se poluvodički element upotrebom zagrijava.

SVAKO se kućište sastoji od podnožja na koje se poluvodički element učvrsti (obično legiranjem) i izvoda koji služe kao električni kontakti. Pojedini dijelovi poluvodičkog čipa i izvodi spajaju se tankim žičicama. To su obično aluminijske ili zlatne žičice promjera 25–400 μm . Postoje i drugi načini spajanja: legiranjem metalnih kuglica na kontaktima pri upotrebi u hibridnim sklopovima (engl. solder bump, beam lead) i lemljenjem kontakata u obliku opruga ili šiljaka u diodama ili u elementima za velike snage. Žičice se spajaju s metalnim kontaktima na čipu i na unutrašnjem dijelu izvoda pomoću ultrazvuka ili termokompresije.

Čip spojen na podnožje i izvode kućišta izolira se od okoliša metalnim kapicama, poklopcima, a često i zalijevanjem poliuretanskom ili silikonskom smolom. Nakon završnog razvrstavanja na poluvodički element otiskuju se oznake, pa tako on dobiva konačni izgled.

Kontrola tehnoloških postupaka. Možda nijedan proizvodni tehnološki postupak nije podvrgnut tolikim kontrolama kao u poluvodičkoj tehnologiji. Tome je uzrok složenost proizvodnje zbog mnogo kritičnih parametara u postupku koji utječu na svojstva poluvodičkih elemenata. Samo nekoliko nekontrolirano prisutnih atoma na milijune silicijevih atoma ili udaljenosti od desetinke mikrometra mogu pokvariti poluvodički element. Bez strogih i najsloženijih kontrola proizvodnje mnogi poluvodički elementi (npr. složeni poluvodički elektronički sklopovi) nisu praktično upotrebljivi. Jednom uvedene metode kontrole kao sastavni dio proizvodnje poluvodičkih elemenata omogućile su dobivanje danas možda najpouzdanijih industrijskih tvorevina. Vrijeme trajanja poluvodičkih elemenata mnogo nadmašuje vrijeme proteklo od izuma poluvodičkih elemenata do danas. Metodama ubrzanog starenja predviđaju se vremena rada poluvodičkih elemenata i više od 100 godina.

Gotovo sve moderne mjerne metode, fizikalne i kemijske, upotrebljavaju se u poluvodičkoj industriji. Optički i elektronski mikroskopi, spektrometri svih vrsta i najsloženiji elektronički mjerni uređaji, uključivši računala, sastavni su dio opreme tvornica poluvodičkih elemenata. Osim električnih svojstava (parametara i funkcionalnosti), u toku proizvodnje provjerava se čistoća oksida, debljina oksida i ostalih slojeva na siliciju, dubine difuzije, električni otpor difundiranih slojeva i profili raspodjele primjesa.

Tehnologija dioda i sličnih elemenata

Tehnologija dioda ovisi o njihovom tipu i karakteristikama (v. *Elektronika*, TE 4, str. 476). *Zenerove i probojne diode*, kojima je osnovna karakteristika stabilni reverzni proboj, obično se izrađuju tehnologijom difuzije PN-prijelaza. Tehnologija *signalnih dioda*, osim uobičajenog formiranja PN-prijelaza, sadrži i dodavanje primjesa koje djeluju kao rekombinacijski centri (zlato, platina). *Tunelne (Esakijeve) diode* nastaju ako su koncentracije primjesa na PN-prijelazima relativno visoke. *Varikap (varactor)* je dioda kojoj se kapacitet PN-prijelaza mijenja s naponom. U početnom materijalu s niskom koncentracijom primjesa N-tipa napravi se PN-prijelaz s visokom koncentracijom primjesa P-tipa. Taj sloj mora biti tanak da bi otporni gubici visokofrekventne struje u diodi bili maleni. Zbog toga je prvi tehnološki korak epitaksijalni rast silicija, a dalja je tehnološka izvedba vrlo slična izvedbi epitaksijalnoga planarnog tranzistora, ali samo s jednim PN-prijelazom.

Varistor je dioda s promjenljivim otporom ovisnim o naponu. Izrađuje se kao Schottkyjev barijerni prijelaz. Najraniji tip takve diode bila je točkasta kontaktna dioda, npr. šiljak od volframa pritisnut na polikristalni silicij. Iako stara tehnologija, ona se još uvijek upotrebljava. Novija je tehnologija deponiranje tankoga metalnog sloja na monokristalni poluvodič, obično silicij, ali i galij-arsenid. Uobičajeni su metali aluminij, platina ili metalni silicidi, npr. platina-silicid (PtSi), paladij-silicid (Pd_2Si).

Svijetleće diode i laseri. Elektroluminescencijom PN-prijelaz (dioda) može emitirati određenu svjetlost. U poluvodiču, opće-

nito, protjecanje električne struje dovodi koncentraciju elektrona i šupljina u neravnotežno stanje. Višak se elektrona i šupljina rekombinira. Rekombinacija može biti radijativna, tj. oslobođena je energija u obliku fotona kojemu je valna duljina λ određena energetsom strukturom materijala:

$$\lambda = \frac{k}{W_g}, \quad (47)$$

gdje je W_g širina energetskog pojasa, a $k = 19,88 \cdot 10^{-26} \text{ Jm}$. Za W_g izraženo u elektronvoltima i $k = 1,24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}$ valna duljina je u mikrometrima.

Diode koje emitiraju nekoherentnu svjetlost nazivaju se svijetlećim diodama (engl. *light-emitting diode*, LED). Ako je emitirana svjetlost koherentna, diode se nazivaju *laserskim diodama* (v. *Laser*, TE 7, str. 480).

Dok su poznate poluvodičke svijetleće diode koje emitiraju svjetlost različitih boja (primjena u signalnim svjetlima i alfa-numeričkim pokazivačima), ili infracrveno zračenje (primjena u telekomunikacijama), poluvodički laseri dobiveni su samo onim materijalima koji emitiraju svjetlost u infracrvenom području, a njihova je primjena prije svega u telekomunikacijama pomoću staklenih vlakana. Šarenilo materijala koji se upotrebljavaju vrlo je veliko. Industrijski je ipak danas najbolje ispitani ternarni spoj aluminij-galij-arsenid na podlozi galij-arsenida.

Variranjem količine aluminija mogu se dobiti diode koje emitiraju svjetlost valne duljine 0,75–0,9 μm . Za izradbu signalnih svijetlećih dioda danas se upotrebljava galij-arsen-fosfid (GaAs_xP_y).

Tehnologija poluvodičkih lasera pogodnih za optičku telekomunikaciju zahtijeva heterostrukturu kristala. To su monokristali različitih materijala, narasli jedan na drugom, s usklađenim konstantama kristalne rešetke. To se postiže metodom tekuće epitaksije.

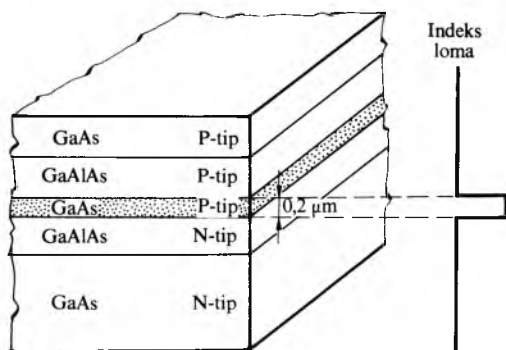
Tekuća epitaksija je rast monokristala na podlozi koja je u kontaktu s talinom. Na primjer podloga je galij-aluminij-arsenid, taljen u galiju. Hlađenjem taline dolazi do precipitacije galij-aluminij-arsenida na podlogu i do monokristalnog rasta. Tom metodom rasta kristala dobiveni su različiti heterospojevi s izvrsnim uklapanjem kristalografske strukture jednog materijala (podloge) s drugim materijalom (ili materijalima ako se radi o višeslojnom rastu).

Izgled reaktora za višeslojnu heteroepitaksiju prikazan je na sl. 21. U krenenoj cijevi napunjenoj vodikom i na visokoj temperaturi nalazi se grafitna ladica koja je sastavljena od osnove, klizača i nosača taline (male posudice u jednom komadu). Na kliznom je dijelu ladice stavljen podloga, npr. galij-arsenidni monokristal, koja se dovodi ispod pojedine posudice s talinama.



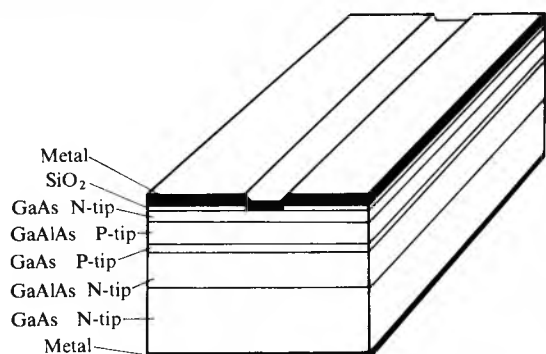
Sl.21. Reaktor za višeslojnu heteroepitaksiju

Temperatura peći u kojoj je krena cijev s ladicom kontrolirano se smanjuje tako da dolazi do precipitacije materijala iz one posudice pod kojom je podloga (supstrat). Pomicanjem podloge pod sljedeće posudice i snižavanjem temperature moguće je heteroepitaksijalni rast takvih struktura kao što je prikazano na sl. 22, a to je tipična struktura pločice za proizvodnju današnjih lasera za optičke komunikacije. Dimenzije pločica su $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ do $1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$.



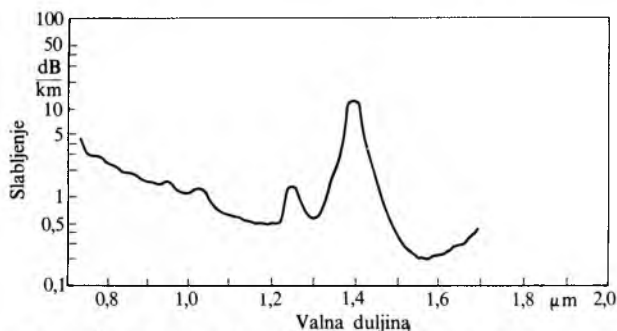
Sl. 22. Presjek heterostrukture tipične za izradbu poluvodičkih lasera za optičke komunikacije

Na sl. 23 prikazana je struktura lasera s dvojnomo heterostrukturom i vrpčastim geometrijskim oblikom postignutim silicij-dioksidom. To nije jedina struktura s kojom se eksperimentira. Na sl. 24 vide se neki interesantni spojevi i valne duljine koje emitiraju načinjeni laseri.



Sl. 23. Presjek dvostruke heterostrukture

AlGaAsSb/GaSb		InGaAsSb/GaSb
AlGaAs/GaAs	GaInAsP/InP	InGaAsSb/InAs

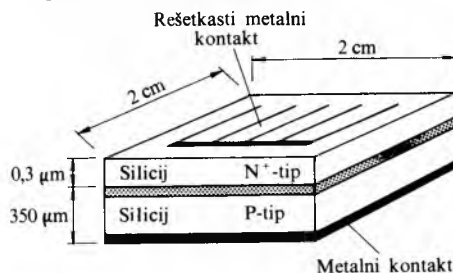


Sl. 24. Valne duljine što ih emitiraju neki poluvodički spojevi u laserima

Danas se industrijski proizvode samo aluminij-galij-arsenidni laseri s dvojnomo heterostrukturom, a tipični prinosi su posljednjih nekoliko godina povećani od 1% na 30% dobrih lasera po jednoj pločici izrađenoj tekućom epitaksijom. Područje istraživanja vrlo je dinamično, pa se mogu u sljedećim godinama očekivati novi proizvodi i novi materijali, možda više nego u bilo kojem drugom dijelu poluvodičke tehnologije.

Sunčane ćelije. Direktna pretvorba sunčane svjetlosti u električnu energiju moguća je pomoću tzv. sunčane ćelije. To je poluvodički element s određenom djelotvornošću pretvorbe sunčane energije u električnu. U svemirskoj tehnici monokristalne silicijske sunčane ćelije dominiraju već više od desetljeća, ali se primjenjuju i na Zemlji. Silicijske su sunčane ćelije za sada i jedine koje se industrijski proizvode.

U sunčanoj ćeliji pretvorba svjetlosti u električnu energiju osniva se na fotonaponskom efektu. Elektroni i šupljine koje se generiraju pri apsorpciji svjetlosti mogu se razdvojiti unutrašnjim električnim potencijalom koji postoji u osiromašenom sloju PN-prijelaza sunčane ćelije. To uzrokuje smanjenje unutrašnjeg potencijala, a razlika s obzirom na vrijednosti pri termičkoj ravnoteži pojavljuje se kao fotonapon koji može kroz vanjski električni krug uzrokovati tok električne struje. Osnovna struktura tipične sunčane ćelije prikazana je na sl. 25.



Sl. 25. Presjek osnovne strukture sunčane ćelije

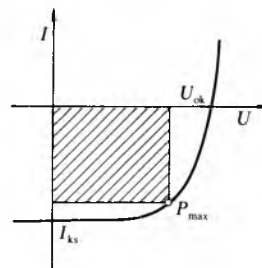
U P-tipu silicija s prednje strane napravljen je plitki PN-prijelaz. Električni kontakti dobiveni su napaivanjem metala. Stražnja je strana posve metalizirana, dok je na prednjoj strani rešetkasta struktura da bi se smanjio slojni otpor difundiranog sloja. Često je na ćeliji i antireflektirajući sloj koji daje ćeliji plavu boju.

Na sl. 26 prikazana je strujno-naponska karakteristika osvijetljene sunčane ćelije. I_{ks} je struja kratkog spoja, koja je jednaka struji generiranoj svjetlošću, U_{ok} je napon otvorenog kruga, a P_{max} je maksimalna realna snaga ćelije. Omjer realne i idealne snage naziva se faktorom kvalitete sunčane ćelije:

$$F_k = \frac{P_{max}}{U_{ok} \cdot I_{ks}}, \quad (48)$$

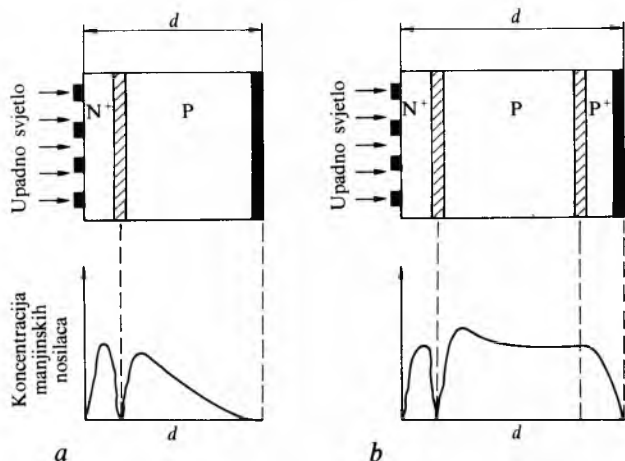
a ovisi o proizvodnoj tehnologiji ćelije.

Tehnološki se silicijske sunčane ćelije s visokom djelotvornošću energetske konverzije izrađuju od materijala koji je dobiven rastom pomoću metode lebdeće zone. Velika djelotvornost sunčane ćelije posebno je važna u svemirskoj primjeni, gdje npr. jedan teleskopski satelit na svome sunčanom generatoru od 52 m^2 ima više od 50000 ćelija.



Sl. 26. Strujno-naponska karakteristika sunčane ćelije

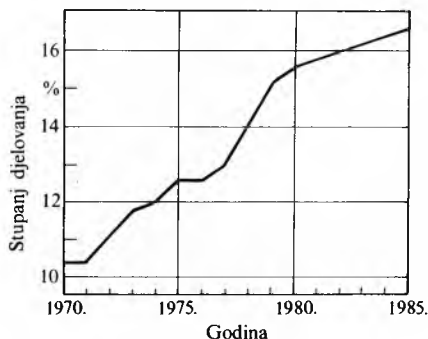
Struktura izvedbe sunčane ćelije s većom djelotvornošću prikazana je na sl. 27. U takvu je ćeliju ugrađeno još jedno električno polje na stražnjoj strani silicijske pločice pomoću difuzije koja stvara P-tip s većom koncentracijom šupljina (P^+). Tada se vanjski nosioci na stražnjoj strani reflektiraju, a ne rekombiniraju, kao u prvom primjeru. To omogućuje veću djelotvornost ćelije s manjom njenom ukupnom debljinom.



Sl. 27. Presjek sunčanih ćelija i raspored koncentracije manjinskih nosilaca. a s jednostavnom NP-strukturom i b s dodatnim P⁺-slojem

Porast djelotvornosti silicijskih sunčanih ćelija s razvojem tehnologije u posljednjih deset godina prikazan je na sl. 28.

Da bi se smanjila cijena izradbe sunčane ćelije s obzirom na izlaznu električnu energiju, osim monokristalnog silicija, upotrebljava se i materijal koji je polikristalan ili amorfan.



Sl. 28. Stupanj djelovanja silicijskih sunčanih ćelija s razvojem tehnologije

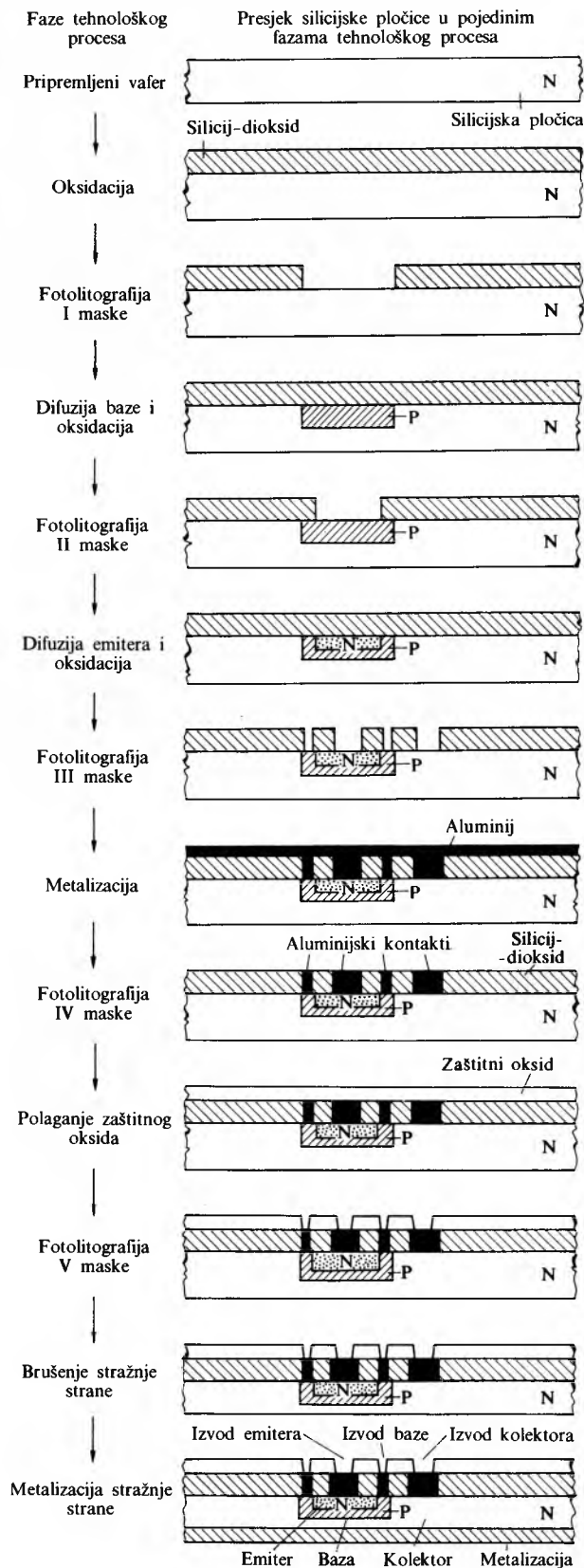
Osim silicija eksperimentira se i s drugim materijalima, kao npr. s galij-arsenidom, kadmij-sulfidom. Za ćelije s visokom djelotvornošću predlaže se upotreba heterostruktura (više slojeva s različitim sastavom materijala), ali za sada postoje teškoće u tehnološkoj realizaciji.

Osjetila i pretvornici pretvaraju neelektrične veličine u električni signal koji se dalje procesira u izlazni signal kompatibilan s mikroprocesorom ili bilo kojim drugim elektroničkim sklopom (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 683). Pretvorba signala u poluvodičkom pretvorniku osniva se na pretvorbi energije, pa se tako pretvaraju: mehanički signali (tlak, protok, razina), termički signali (temperatura), magnetski signali (gustoća magnetskog toka, jakost magnetskog toka, jakost magnetskog polja), elektrokemijski signali (kiselost, vlažnost), zatim svjetlost, ionizantna zračenja itd.

Većina današnjih poluvodičkih pretvornika načinjena je na siliciju planarnom tehnologijom. Razlog tome su mnoge pogodne pojave na siliciju (termootpornost, piezootpornost, magnetootpornost, fotonaponski efekt, galvanomagnetski efekt, Peltierov efekt itd.), dobra mehanička svojstva, zanemarljiva mehanička histeriza, kemijska stabilnost i relativna robustnost pretvornika. Osim silicija, upotrebljavaju se metali i metalni oksidi u tankim slojevima, polimeri, poluvodički spojevi, optička vlakna i sl. Poluvodički pretvornici veoma se mnogo upotrebljavaju, od specifičnih instrumenata za proučavanje svemira, istraživanja bioloških sustava (uključujući mjerenja u ljudskom tijelu), automatizacije kemijskih procesa i sl. do elektroničkog upravljanja automobilskeg motora, rashladnih uređaja, strojeva za pranje i za sušenje rublja itd.

Tehnologija bipolarnih tranzistora

Redoslijed primjene općih tehnoloških postupaka u proizvodnji tranzistora ovisi o potrebnim električnim karakteristikama i tipu tranzistora (v. *Elektronika*, TE 4, str. 478). Razni proizvođači poluvodičkih elemenata nude nekoliko desetaka tisuća različitih tipova diskretnih tranzistora za mnoštvo različi-

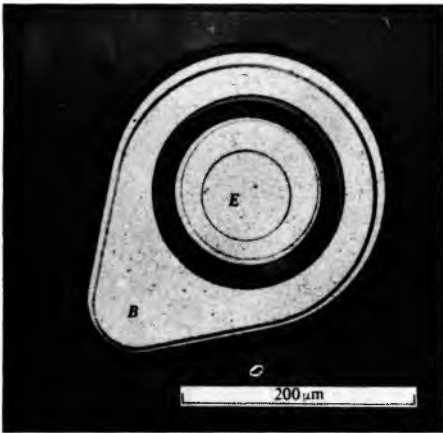


Sl. 29. Shematski prikaz izradbe planarnog tranzistora

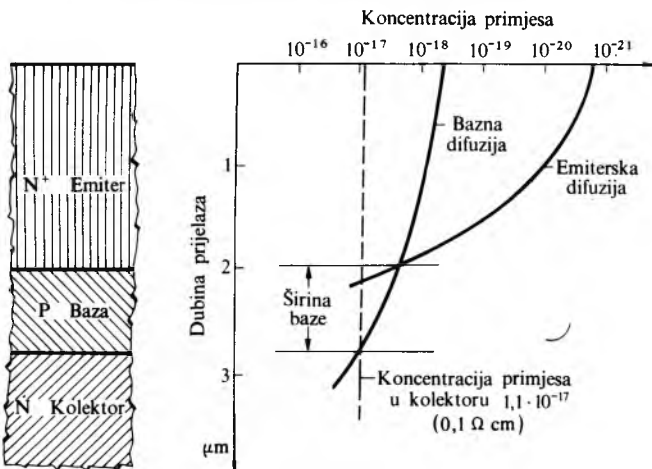
tih primjena. S obzirom na primjenu najvažniji su tranzistori za male signale, tranzistori za visoke frekvencije i tranzistori za velike snage, a za njih su tehnologije najrazličitije, pa se mogu navesti samo najvažnije ili povijesno interesantne.

Tehnologija planarnih tranzistora. Primjer izradbe NPN-tranzistora prikazan je na sl. 29. Početni materijal je silicij niske otpornosti ($\sim 0,01 \Omega \text{ cm}$) N-tipa, na kojemu je epitaksijalno naparen sloj silicija takve otpornosti i debljine kakvi su potrebni za tražene električne karakteristike (obično od $0,5 \dots 60 \Omega \text{ cm}$ i $2 \dots 40 \mu\text{m}$).

Termičkom oksidacijom narasli silicij-dioksid debljine $\sim 1 \mu\text{m}$ služi kao zaštitni sloj za planarnu difuziju akceptorskih primjesa u silicij na mjestima otvora u oksidu napravljenima prvim litografskim postupkom. Difuzija baze obično završava u oksidirajućoj atmosferi, pa se drugom litografijom u naraslom oksidu naprave otvori za difuziju donorskih primjesa koje će formirati emitere. Nakon te tzv. emitorske difuzije trećom se litografijom načine otvori u oksidu za emitorske i bazne kontakte. Preko čitave pločice napari se sloj aluminija, a četvrtom se litografijom odstrani aluminij s mjesta na kojima nije potreban. Za zaštitu čipa preko čitave se pločice nataloži silicij-dioksid s primjesom fosfora. Sljedećom litografijom otvori se u tom zaštitnom sloju područje kontakta za spajanje na podnožja kućišta. Silicijska se pločica nakon toga odbriše sa zadnje strane. Na tu se stranu napari metalni sloj (zlatu ili niz različitih metala). Tako završena pločica ima na sebi niz čipova. Tipična geometrijska izvedba baze i emitera u takvim tranzistorima prikazana je na sl. 30.



Sl. 30. Primjer geometrijskog oblika baze i emitera na tranzistorskom čipu u planarnoj tehnologiji (kontakt kolektora je na stražnjoj strani)



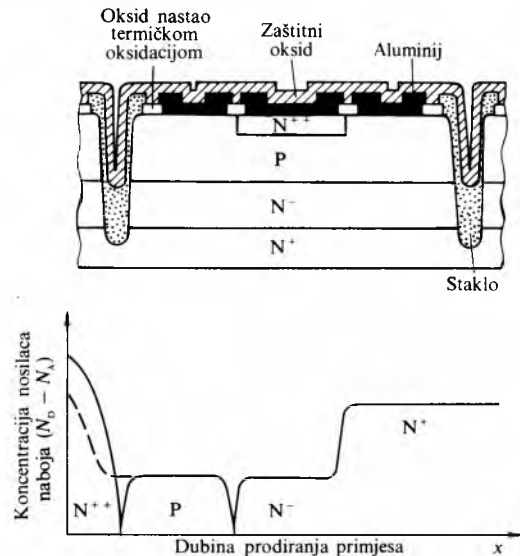
Sl. 31. Profil koncentracije primjesa u planarnom tranzistoru

Na sl. 31 prikazana je shematski vertikalna struktura takvih tranzistora i profil koncentracije nosilaca naboja.

Tehnologija tranzistora s epitaksijalnom bazom. Tranzistori za velike snage često imaju strukturu u kojoj je baza sloj

epitaksijalnog silicija umjesto difundiranog sloja. Na supstrat N-tipa epitaksijalno naraste najprije sloj N-tipa visoke otpornosti, a na njega u istom procesu sloj P-tipa također relativno visoke otpornosti. Umjesto difuzije za bazu difundira se tzv. bazni kontakt, tj. difundiraju se akceptori, što omogućuje bolji kontakt aluminija s bazom.

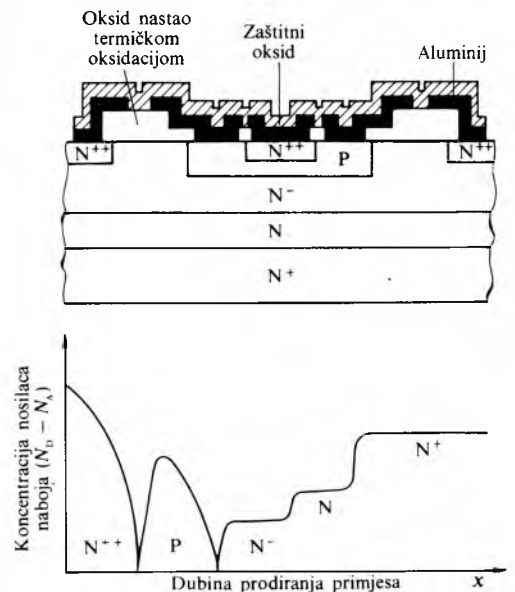
Bazno-kolektorski PN-prijelaz nije planaran, nego ravan i nastaje mesa-jetkanjem. Taj se jetkani dio često zaštićuje silicij-oksikom. Konačna vertikalna struktura s profilom primjesa shematski je prikazana na sl. 32.



Sl. 32. Presjek planarnog tranzistora s epitaksijalnom bazom i pripadni profil vodljivosti (N_D i N_A su koncentracije naboja koje potječu od donora i akceptora)

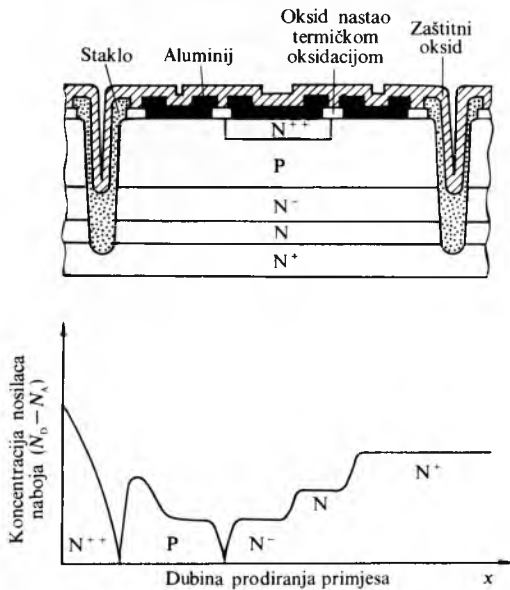
Multiepitaksijalna tehnologija. Multiepitaksijalna planarna tehnologija sjedinjuje prednosti planarne tehnologije i epitaksijalne, tako da se kolektorski sloj tranzistora sastoji od više slojeva N-tipa različite koncentracije, a difuzija baze je planarna. Struktura takva tranzistora prikazana je na sl. 33.

Multiepitaksijalna mesa-tehnologija slična je tehnologiji s epitaksijalnom bazom, ali ima slično kao multiepitaksijalna planarna više kolektorskih slojeva, a u epitaksijalnu bazu difundira se još i planarni dio baze koji služi za bazni kontakt i sprečava širenje osiromašenog sloja pri reverznoj polarizaciji bazno-kolektorskog PN-prijelaza do emitera. Taj pri-



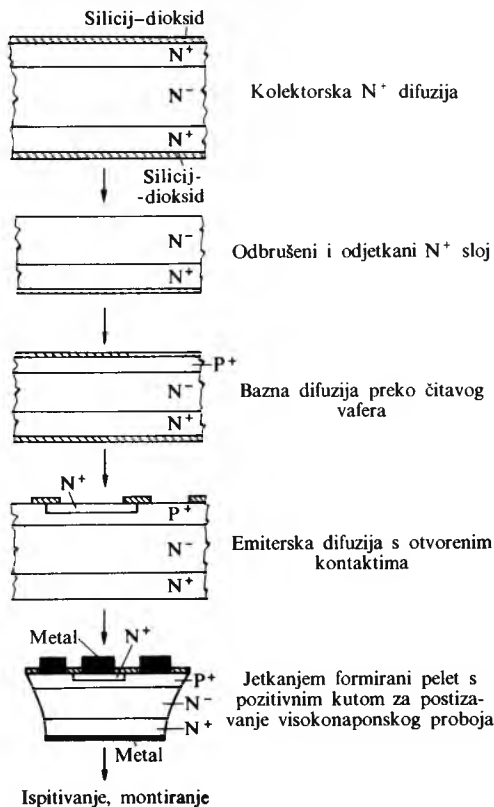
Sl. 33. Presjek tranzistora izrađenog multiepitaksijalnom planarnom tehnologijom i pripadni profil vodljivosti

jelaz nastaje mesa-jetkanjem. Skica vertikalne strukture i profila dotiranja vidi se na sl. 34. Ta se tehnologija primjenjuje u proizvodnji visokonaponskih robustnih tranzistora.



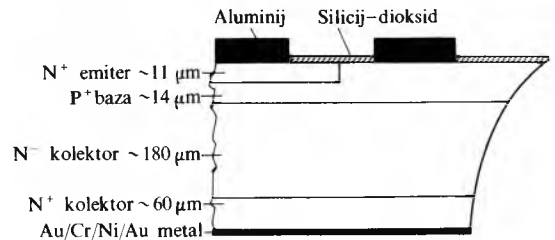
Sl. 34. Presjek tranzistora izrađenog multiepitaksijalnom mesa-tehnologijom

Tehnologija trojne difuzije upotrebljava se za izradbu tranzistora s visokim mogućim reverznim naponima. U silicijsku pločicu N-tipa velike otpornosti ($80 \dots 100 \Omega \text{cm}$) difundira se donor s obje strane do dubine od $\sim 80 \mu\text{m}$. S jedne se strane pločica izbrusi i polira jetkanjem. Na poliranu stranu deponiraju se akceptori i difundiraju po čitavoj silicijskoj pločici. Difuzija emitera slijedi kao u planarnoj tehnologiji. Čipovi se, za razliku od mesa-tehnologije, formiraju sa stražnje strane pločice. Tako nastaje čip koji na površini prijelaza baza—kolektor ima karakterističan krovni nagib. Takvim se jetkanjem



Sl. 35. Shematski prikaz izradbe tranzistora postupkom trojne difuzije

snizuju površinska električna polja pri reverznoj polarizaciji prijelaza, pa je moguća realizacija i tranzistora s više od 3000 V reverzne polarizacije. Slična tehnologija primjenjuje se i za visokonaponske tiristore. Shema je glavnih koraka procesa prikazana na sl. 35, a vertikalna struktura na sl. 36.



Sl. 36. Presjek visokonaponskog snažnog tranzistora izrađen postupkom trojne difuzije

Homotaksijalna tehnologija danas je već zastarjela, a primjenjivala se u ranoj fazi proizvodnje tranzistora. Početna je pločica u NPN-tranzistoru P-tipa relativno visoke otpornosti ($5 \dots 10 \Omega \text{cm}$). S obje se njene strane po čitavoj pločici (znači bez zaštitnog silicij-dioksida) deponiraju i difundiraju donori. Dubina difuzije kontrolira se tako da ostane nedifundirani dio pločice toliko debeo koliko je potrebno za dobivanje određenoga probojnog napona i pojačanja tranzistora. Naime, jedna se strana smatra emitorskom difuzijom, a druga kolektorskom. Prijelazi PN formiraju se mesa-jetkanjem. Skica i struktura tih prijelaza prikazani su na sl. 14a.

Tehnologija unipolarnih tranzistora

MOS tranzistori. Prema principu rada MOS tranzistori (engl. Metal Oxide Semiconductor) razvrstavaju se u dvije skupine: tranzistori s osiromašenim kanalom i tranzistori s induciranim kanalom. Primjer tehnološke izvedbe P-kanalnog MOS tranzistora prikazan je na sl. 37.

Početni materijal je silicijska pločica N-tipa niske koncentracije primjesa. Termičkom oksidacijom na njoj naraste sloj silicij-dioksida debljine $\sim 1 \mu\text{m}$. U oksidnom se sloju prvom maskom i litografskim postupkom izrade otvori za difuziju uvoda S (engl. source) i odvoda D (engl. drain). Uz depoziciju i difuziju akceptora na otvorima u oksidirajućoj atmosferi izraste ponovno tanki oksidni sloj. Drugom maskom i litografijom odstrani se oksidni sloj u području upravljačke elektrode tzv. zasuna G (engl. gate), a termičkom oksidacijom naraste ponovno tanki oksid koji će odvajati upravljačku elektrodu od kanala MOS tranzistora. Debljina je tog sloja $\sim 0,1 \mu\text{m}$ ili tanja. Trećom litografijom otvore se kontakti za metalizaciju u području elektroda uvoda i odvoda. Slijedi metalizacija čitave površine tankim slojem aluminija. Litografskim se postupkom odstrani aluminij s nepotrebnih mjesta pomoću četvrte maske.

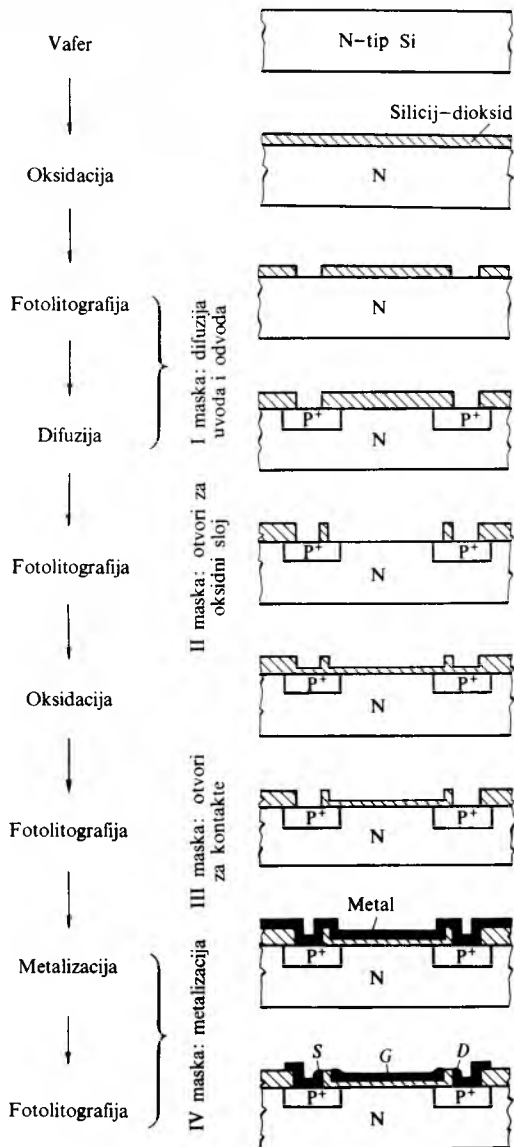
Gornja površina i presjek tipičnog MOS tranzistora prikazani su na sl. 38. Duljina i širina kanala parametri su kojima projektant može utjecati na svojstva MOS tranzistora.

Slična je tehnologija i N-kanalnih MOS tranzistora. Podloga je materijal P-tipa.

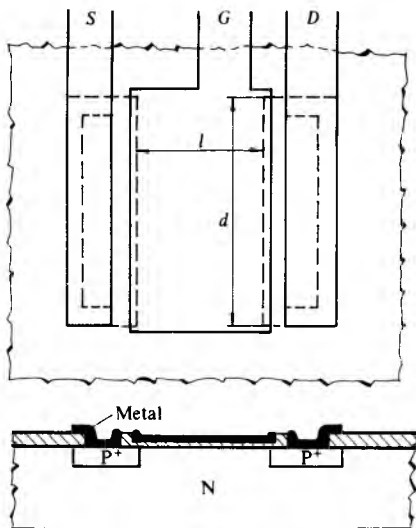
Osim silicij-dioksida ispod upravljačke elektrode upotrebljava se i silicij-nitrid, pa su poznati tranzistori s nazivom MNOS (engl. Metal-Nitride-Oxide Semiconductor). Ako je umjesto aluminija za upravljačku elektrodu upotrijebljen polikristalni silicij, to su tzv. Si-gate MOS tranzistori ili poly-gate tranzistori. Izradba takvih tranzistora prikazana je shematski na sl. 39. Posebno je potrebno spomenuti i MOS tranzistore na safirnoj podlozi strukture SOS (engl. Silicon on Sapphire) odnosno u posljednje vrijeme strukture SIS (engl. Silicon Insulator-Silicon).

Opisani MOS tranzistori primijenjeni su prije svega u integriranim sklopovima. Kao samostalni pojavljuju se kao tranzistori snage. To su vertikalne VMOS tranzistorske strukture kakve prikazuje skica na sl. 40. Naziv dolazi od jetkanja silicijske pločice u obliku slova V. Kao kanal služi inducirani N-kanal na površini P-tipa silicija koji je načinjen slično kao

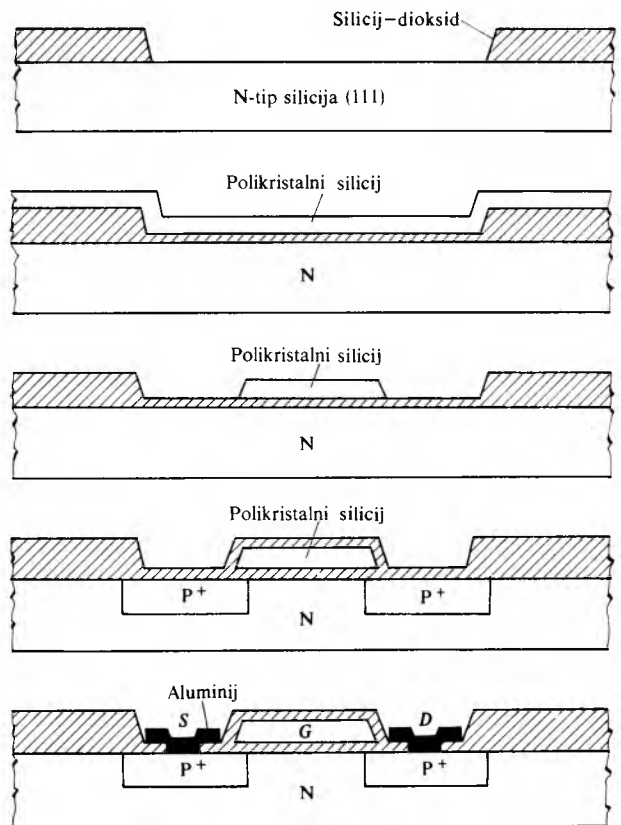
difuzija baze bipolarnog tranzistora. Oksid je ispod metalne upravljačke elektrode, a odvod je na suprotnoj strani silicijske pločice (na supstratu).



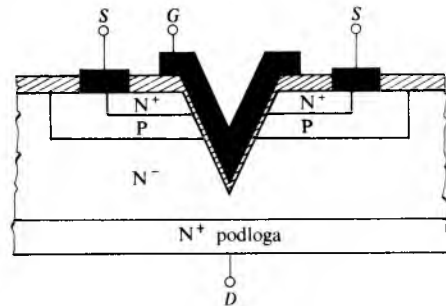
Sl. 37. Shematski prikaz izradbe MOS tranzistora



Sl. 38. Gornja površina i presjek MOS tranzistora s P-kanalom



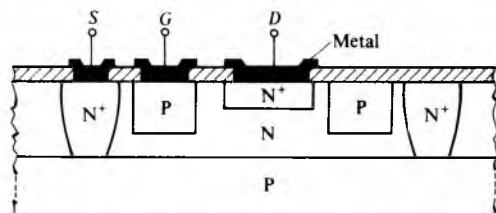
Sl. 39. Shematski prikaz izradbe SI-gate MOS tranzistora



Sl. 40. Presjek VMOS tranzistora

Spojni tranzistori s efektom polja. Zamisao o realizaciji tog tranzistora i njegov naziv JFET (engl. Junction Field Effect Transistor) dao je Shockley 1952. Osnovna ideja je u tome da se reverznom polarizacijom PN-barijere definira vodljivi kanal kroz koji teče struja od ulazne elektrode prema odvodnoj elektrodi. Moguća je izvedba kanala N-tipa, gdje struju čine elektroni, ili pak kanala P-tipa, gdje struju kroz kanal čine šupljine. U nizu slučajeva povoljniji je N-kanalni JFET zbog veće pokretljivosti elektrona.

N-kanalni JFET (sl. 41a) može se realizirati na monokristalnoj silicijskoj pločici P-tipa otpornosti $1 \dots 4 \Omega \text{ cm}$. Na njoj se formira epitaksijalni sloj debljine $\sim 3 \mu\text{m}$ niske površinske koncentracije atoma ($10^{15} \dots 10^{16} \text{ cm}^{-2}$). Isti se sloj može formirati neselektivnom difuzijom primjesa N-tipa. Dubokom difuzijom primjesa P-tipa formiraju se otoci N-tipa u koje se nakon



Sl. 41. Spojni unipolarni tranzistor s N-kanalom

toga difundira upravljačka elektroda, a o njenoj dubini ovisi širina vodljivog kanala. Relativni omjer koncentracije primjesa u sloju upravljačke elektrode i u kanalu veći je od 10^3 , tako da se reverzno polarizirana PN-barijera pretežno širi u područje kanala i time omogućuje vrlo preciznu regulaciju toka struje kroz kanal. Time se i probojni napon između ulazne i upravljačke elektrode održava na potrebnoj razini, obično višoj od 25 V.

P-kanalni JFET (sl. 41 b) obično se realizira selektivnom difuzijom P-primjesa (površinske koncentracije atoma $10^{15} \dots 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) u početnu monokristalnu silicijsku pločicu N-tipa otpornosti nekoliko omcentimetara. Omjer koncentracije primjesa u sloju upravljačke elektrode i u kanalu jednak je tom omjeru u N-kanalnom JFET-u, i to iz istih razloga.

INTEGRIRANI SKLOPOVI

Integrirani sklop (IC, prema engl. *Integrated Circuit*) jest skup elektroničkih elemenata u zajedničkom supstratu ili na njemu, koji su međusobno električno povezani u elektronički sklop. Na osnovi tih elemenata razvila se nova poluvodička industrija nazvana *mikroelektronikom*. U početku razvoja integriranih sklopova osnovni cilj, koji su diktirale vojna i svemirska primjena, bio je minijaturizacija i smanjenje mase elektroničkih sustava. Kako se povećavala mogućnost integracije s razvojem planarne silicijske tehnologije, glavni uzrok intenzivnom razvoju integriranih sklopova postala je njihova niska cijena s obzirom na sklopove s pojedinačnim elementima.

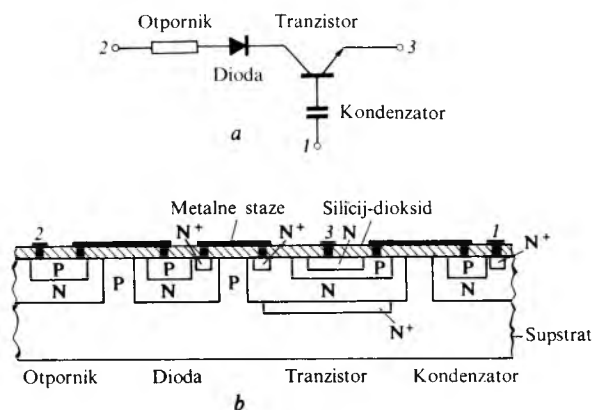
Prvi integrirani sklop zamislio je i izveo na germaniju Jack S. Kilby 1958. godine u SAD. Sklop je bio relativno jednostavan, sastojao se od tranzistora, kondenzatora i triju otpornika. Taj sklop nije bio pogodan za industrijsku proizvodnju zbog nekih tehničkih nedostataka koji se nisu mogli jednostavno ukloniti. S otkrićem planarnog tranzistora (J. Hoerni i R. Noyce 1959, SAD) nastale su realne osnove za razvoj integriranih sklopova. Već 1961. projektiran je integrirani sklop na siliciju, a 1962. počinje u SAD masovna proizvodnja (tvrtke Fairchild i Texas Instruments), koja se naglo razvija po obujmu proizvodnje i složenosti sklopova.

Silicij nije jedini poluvodički materijal za integrirane sklopove. Galij-arsenid (GaAs) istiskuje silicij iz upotrebe iz više razloga: veći zabranjeni pojas (1,35 eV), šest puta veća pokretljivost elektrona, odnosno brži odzivi električnog signala, manja pogonska snaga, manja osjetljivost na zračenje. Za sada su integrirani sklopovi od galij-arsenida skuplji od silicijskih, ali se predviđa da će se integrirani sklopovi od galij-arsenida uskoro primjenjivati prije svega u satelitskim komunikacijskim uređajima, vojnim uređajima i računalima.

Tehnologija integriranih sklopova. Prema tehnološkom postupku izradbe integrirani sklopovi mogu biti monolitni i hibridni, a prema primjeni digitalni (logički) i linearni (analogni).

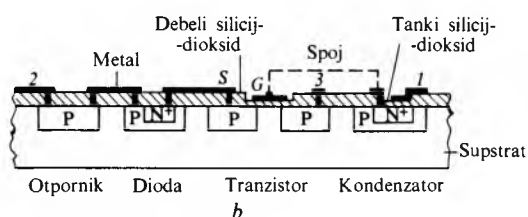
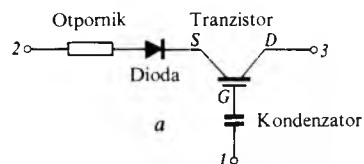
U monolitnim integriranim sklopovima svi su elektronički elementi: otpornici, kondenzatori, diode, tranzistori, tiristori itd. u istoj pločici poluvodičkog supstrata ili na njoj.

Hibridni integrirani sklopovi sastavljeni su od diskretnih elektroničkih elemenata ili nekoliko monolitnih integriranih sklopova međusobno povezanih vodljivim stazama na zajedničkom pasivnom supstratu (staklo, keramika).



Sl. 42. Bipolarni integrirani sklop s diodnom izolacijom u supstratu između pojedinih elemenata. a shema sklopa, b presjek integriranog sklopa

Monolitni integrirani sklopovi. Tehnološki proces izradbe monolitnih integriranih sklopova sastoji se od približno 35 osnovnih postupaka. Ekonomičnost i pouzdanost integriranih sklopova osniva se na izradbi mnoštva istih sklopova na jednoj silicijskoj pločici i mogućnosti procesiranja stotinjak pločica zajedno. Za različite tipove sklopova mijenja se samo konfiguracija rasporeda i povezivanja elemenata, a tehnološki proces je isti. Monolitni integrirani sklopovi mogu biti *bipolarni* ili *unipolarni*, dakle kao i tranzistori. Razlika je u tome da li u mehanizmu vodljivosti sudjeluju elektroni i šupljine (bipolarni), ili samo elektroni, ili samo šupljine (unipolarni). Na sl. 42 i 43 prikazan je isti elektronički sklop načinjen kao bipolarni i kao unipolarni integrirani sklop.



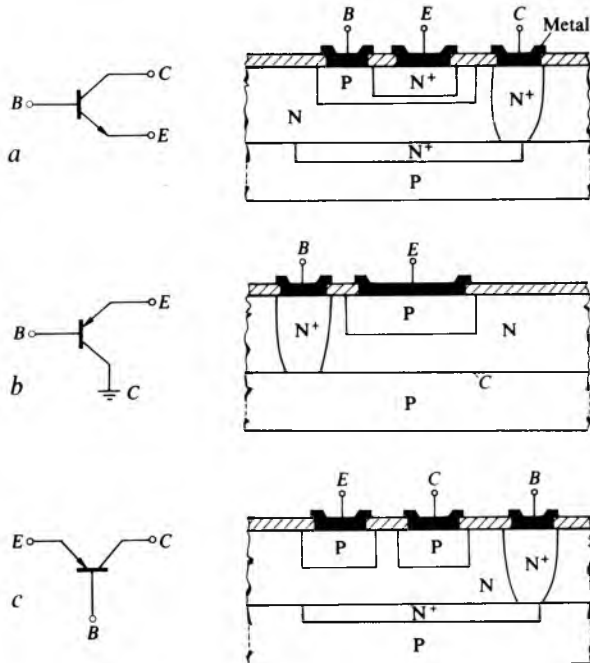
Sl. 43. Unipolarni integrirani sklop. a shema sklopa, b presjek integriranog sklopa (naznačeni spoj između zasuna i kondenzatora nije u ravni presjeka, nego gornjom površinom sklopa obilazi izvod 3)

Bipolarni integrirani sklopovi. Osnovni je element bipolarnih integriranih sklopova bipolarni tranzistor. Usporedo s njim nastaju i drugi u tom sklopu potrebni aktivni i pasivni elektronički elementi, kao što su diode, unipolarni tranzistori (FET), tiristori, pa sve do otpornika i kondenzatora.

Bipolarni tranzistori u integriranim sklopovima mogu biti vertikalni NPN ili PNP i lateralni PNP-tip (sl. 44).

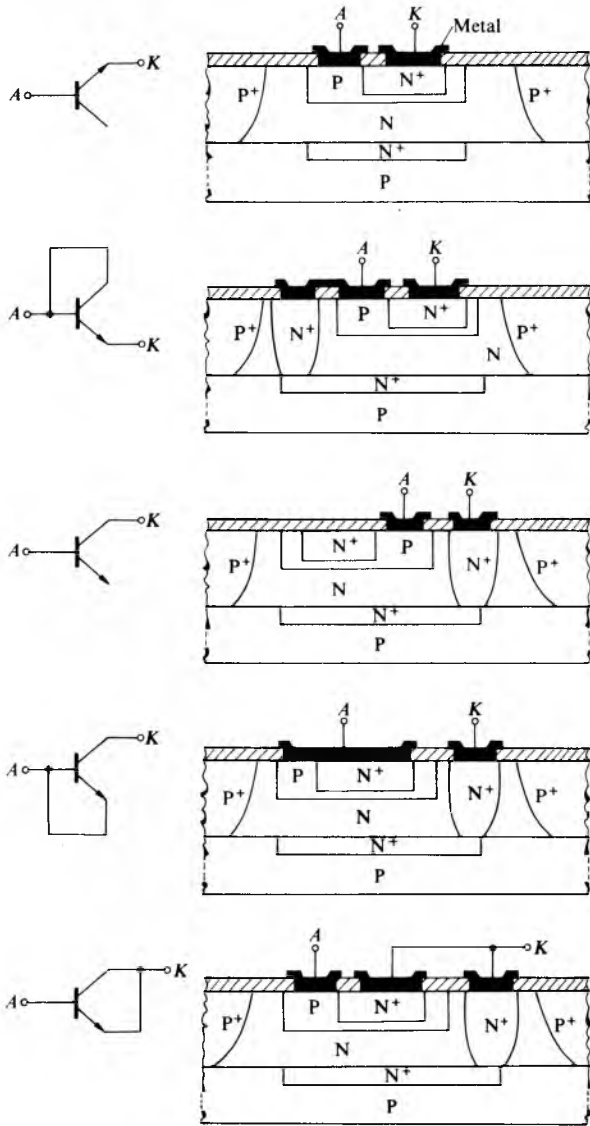
Spojini unipolarni tranzistor obično se upotrebljava s N-kanalom.

Diode se mogu izrađivati u više vrsta, zbog nekoliko poluvodičkih slojeva P i N s različitim primjesama. Diode u inte-



Sl. 44. Strukture vertikalnih bipolarnih tranzistora. a vertikalni NPN-transistor, b vertikalni PNP-transistor s uzemljenim kolektorom, c vertikalni PNP-transistor

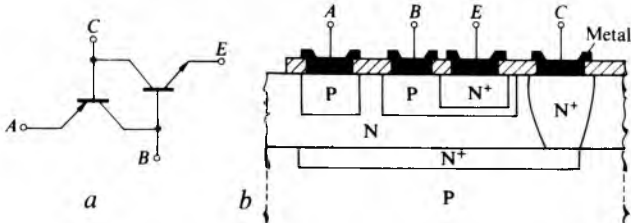
griranim sklopovima zapravo su uvijek tranzistorske strukture, s otvorenim ili kratko spojenim elektrodama neupotrijebljenog dijela tranzistora (sl. 45). U istom integriranom sklopu mogu se načiniti diode različite po kapacitetima, probojnim naponima i parazitnim kapacitetima.



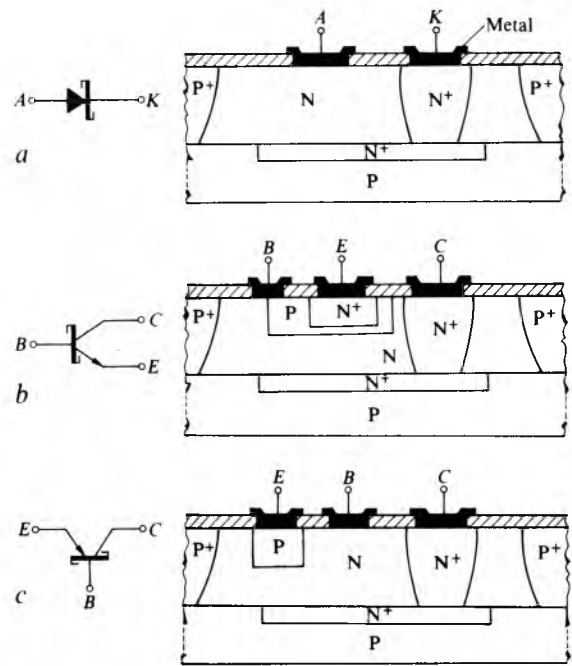
Sl. 45. Mogući spojevi bipolarnih tranzistora koji služe kao diode (A anoda, K katoda). a s otvorenim kolektorom, b s kratko spojenom bazom i kolektorom, c s otvorenim emiterom, d s kratko spojenim emiterom i kolektorom

Tiristori se također mogu izgraditi kao element integriranog sklopa (sl. 46).

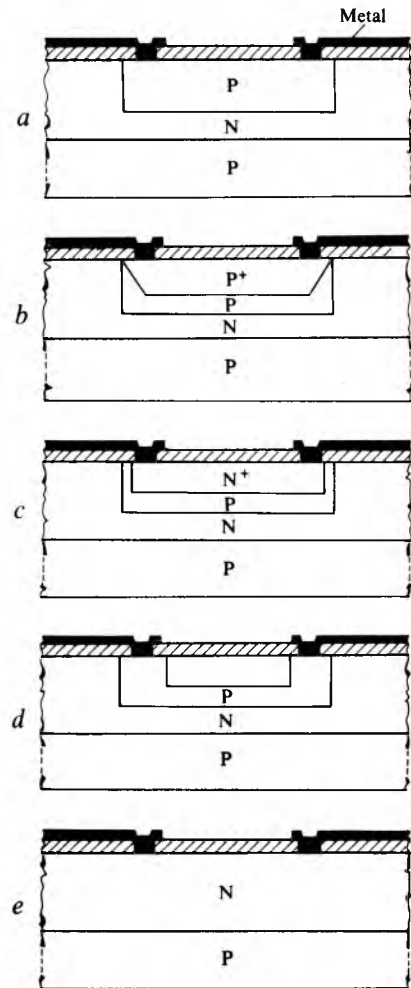
Elementi sa Schottkyjevim barijernim spojem (SB), i to diode, vertikalni NPN-tranzistor i lateralni PNP-tranzistor, izrađuju se na temelju ispravljačkog kontakta nekih metala i poluvodiča. Takav je kontakt moguć između aluminija i epitaksijalnog silicijskog sloja. Jednim SB spojem nastaje jedna SB dioda. Ako se SB sloj doda bipolarnom vertikalnom NPN-tranzistoru,



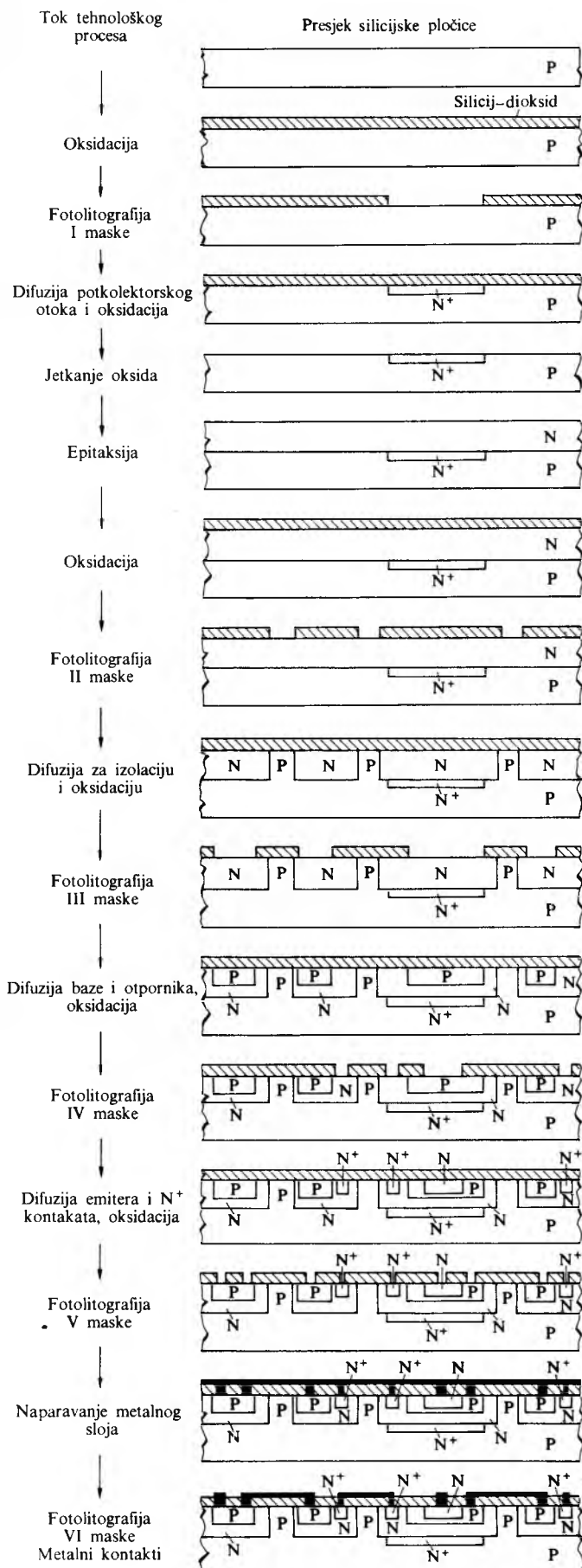
Sl. 46. Izvedba tiristora u integriranim sklopovima. a shema, b presjek tiristora



Sl. 47. Izvedbe elemenata sa Schottkyjevom barijerom i njihovi simboli. a SB dioda, b SB NPN-tranzistor, c SB PNP-tranzistor



Sl. 48. Upotreba pojedinih dijelova PN-kombinacija za otpornike u integriranim sklopovima. Pojedini P-slojevi nastaju pri difuziji: a baze, b baze i baznog kontakta, c emitera, d baze (stanjuje se pri difuziji emitera), e N-sloj nastaje epitaksijom



Sl. 49. Shematski prikaz izradbe bipolarnog integriranog sklopa

nastaje vertikalni SB NPN-tranzistor. Dodatkom SB sloja lateralnom PNP-tranzistoru nastaje lateralni SB PNP-tranzistor (sl. 47).

Otpornici u integriranim sklopovima nastaju formiranjem slojeva određene debljine, koncentracije primjese i geometrijskih oblika, a za otpornike se upotrebljavaju i dijelovi tranzistora: bazni sloj, kolektorski sloj, emiserski sloj i stanjeni bazni sloj (engl. pinch) (sl. 48).

Kondenzatori u integriranim sklopovima nastaju primjenom kapaciteta PN-prijelaza u tranzistorima, npr. PN-prijelaz baza—kolektor, emiter—baza, ili kolektor—supstrat (tabl. 5). Druga mogućnost za formiranje kondenzatora su strukture metal—izolator—poluvodič, npr. aluminijski—silicij—oksid—silicij. Površinski kapacitet ovisi o debljini oksida, pa je tipična vrijednost 30...300 pF/mm².

Tablica 5
OVISNOST KAPACITETA PN-SPOJA
O PREDNAPONU

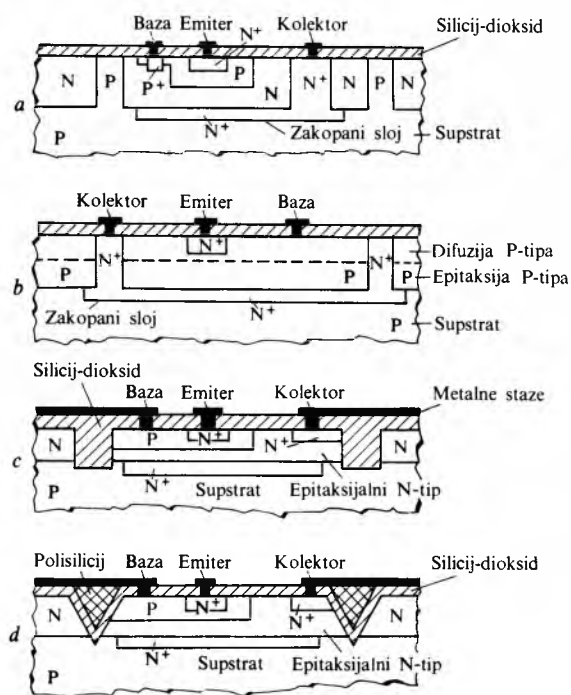
PN-spoj	Prednapon V	Površinski kapacitet pF/mm ²
Emiter-baza	0	1400
	-2	1000
	-5	650
Kolektor-baza	0	320
	-5	140
	-10	100
Kolektor-supstrat	0	250
	-5	80
	-10	50

Unipolarni integrirani sklopovi. Redoslijed općih tehnoloških postupaka u izradbi MOS integriranih sklopova određuje njegov osnovni element MOS tranzistor. Aktivni elementi su MOS tranzistori s induciranim kanalom, jer su im ulazni i izlazni naponi istog polariteta. To omogućuje istosmjernu serijsko spajanje tranzistora u digitalnim i integriranim sklopovima. Takvi integrirani sklopovi nemaju drugih elemenata, izuzev međusobno vezanih MOS tranzistora koji služe kao aktivni i pasivni elementi. Razlikuju se sklopovi samo sa N-kanalnim MOS tranzistorima, samo sa P-kanalnim MOS tranzistorima i s oba tipa kanala, tzv. komplementarni MOS tranzistori, skraćeno CMOS.

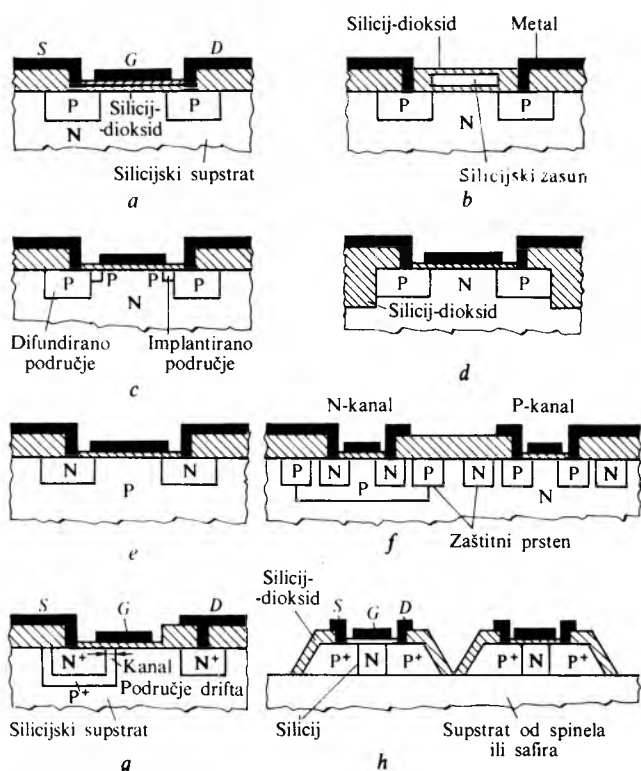
Izrada monolitnih integriranih sklopova. Tehnološki se proces za bipolarnu i unipolarnu sklopove u principu ne razlikuje. Tipični redoslijed tehnološkog procesa za bipolarnu integriranu sklopove s presjekom strukture elementa prikazan je na sl. 49.

Prva difuzija primjese u tipičnom bipolarnom integriranom sklopu je N⁺ difuzija tzv. zakopanog sloja (engl. buried layer). Zatim epitaksijom na supstrat naraste sloj N-tipa. Debljina i vodljivost epitaksijalnog sloja definira se prema električnim karakteristikama integriranog sklopa. Kroz epitaksijalni sloj difuzijom primjese P-tipa naprave se područja koja su spojena na prvobitni supstrat, unutar kojih daljim difuzijama nastaju individualni elementi međusobno izolirani područjima P-tipa. Ako je supstrat na najnegativnijem potencijalu u sklopu, tada su svi elementi električno međusobno odvojeni reverzno polariziranim PN-prijelazom. Ta vrsta izolacije naziva se *diodnom izolacijom* (sl. 50a). Postoje i druge mogućnosti izolacije koje se sve češće primjenjuju u novim sklopovima. To su npr. izolacija kolektorskom difuzijom (sl. 50b), izoplanarna izolacija (sl. 50c), poliplanarna izolacija (sl. 50d) itd.

Razvijene su različite modifikacije unipolarnih sklopova, od kojih su najpoznatije prikazane na sl. 51. Najperspektivnija MOS tehnologija danas je tehnologija CMOS. Prednost je CMOS sklopova prema ostalim poznatim MOS strukturama u tome što je nizak ulazni napon i mala potrošnja snage. Redoslijed tehnoloških postupaka s presjekom strukture elektroničkih elemenata prikazan je na sl. 52. Početni je materijal epitaksijalna pločica N-tipa. Nakon termičke oksidacije i depozicije silicij-nitrida (Si₃N₄) implantira se fosfor u područja gdje treba nastati N-kanal. Silicij-nitrid služi kao maska pri implantaciji (sl. 52a). Slijedi selektivna oksidacija, odjetka se silicij-nitrid na



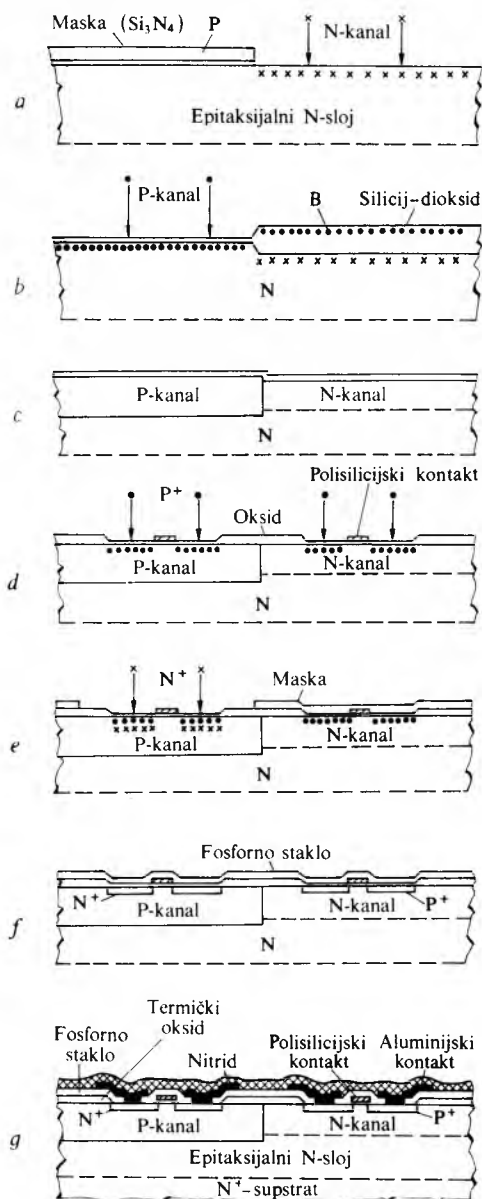
Sl. 50. Izvedba izolacije u bipolarnim sklopovima. *a* diodna izolacija, *b* izolacija kolektorskom difuzijom, *c* izoplanarna izolacija, *d* polioplanarna izolacija



Sl. 51. Izvedba unipolarnih integriranih sklopova različitim postupcima. *a* postupak NMOS, *b* postupak sa silicijskim zasunom (engl. Silicon Gate), *c* postupak ionskog implantiranja, *d* izoplanarni postupak, *e* postupak NMOS, *f* postupak CMOS, *g* postupak DMOS, *h* postupak SOI

mjestima za P-kanal i implantira se bor. Zatim se odjetkaju svi oksidi i termičkim postupkom difundiraju implantirane primjese do određene dubine. Slijedi formiranje N-kanalnih i P-kanalnih FET-ova u pojedinim područjima. Najprije se termičkim postupkom izrade oksidi koji izoliraju zasun od kanala, zatim se deponira polisilicij koji služi kao elektroda za zasun

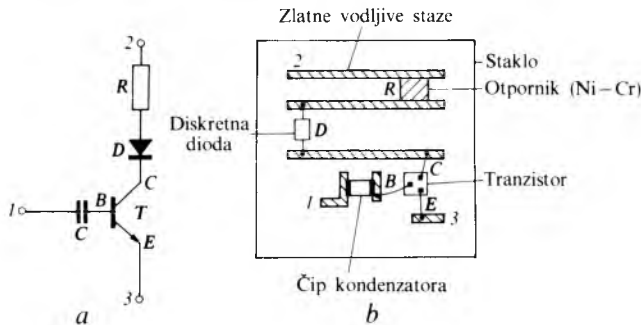
te se implantira bor u područje uvida i odvoda (sl. 52b). Slijedi selektivna implantacija fosfora za N-kanalne uvode i odvode da bi se poništio utjecaj implantiranog bora na tim mjestima (sl. 52c). Nakon depozicije fosfornog stakla i izradbe otvora za kontakte slijedi metalizacija i definiranje kontakata. Završni sloj je silicij-nitrid (sl. 52g).



Sl. 52. Shematski prikaz izradbe unipolarnog integriranog sklopa postupkom CMOS. *a* implantacija fosfornih iona za stvaranje N-kanala, *b* implantacija borovih iona za stvaranje P-kanala, *c* dvokanalna struktura, *d* neselektivna implantacija P⁺-primjese, zaštita oksidnim slojem i stvaranje metalnih kontakata, *e* selektivna implantacija N⁺-primjese za uvid i odvod upotrebom maske od fotorezista, *f* nanošenje zaštitnog sloja fosfornog stakla, *g* presjek gotove dvokanalne CMOS strukture

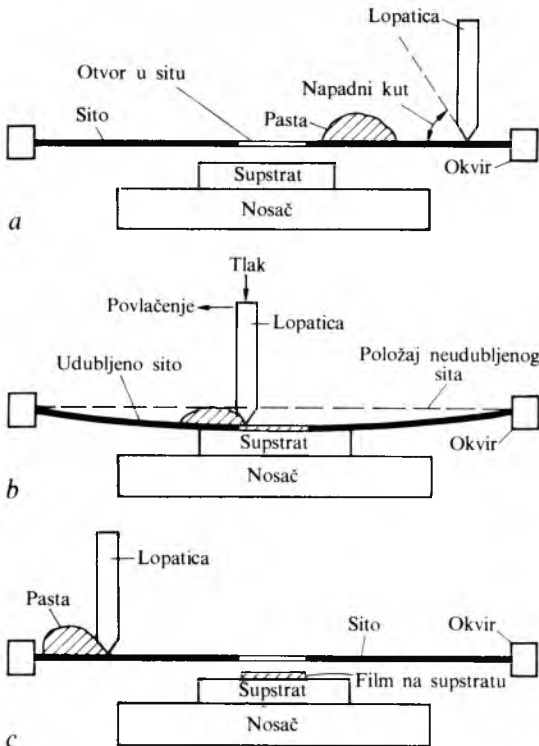
Hibridni integrirani sklopovi. Za izradbu hibridnih integriranih sklopova primjenjuju se danas dvije tehnologije: tehnologija *tankog filma* i tehnologija *debelog filma*. Sklopovi na tankom filmu imaju bolje električne karakteristike, ali je postupak skuplji. Tipični hibridni integrirani sklop na tankom filmu prikazan je na sl. 53. U tom je sklopu dioda diskretni element, tranzistor je u obliku čipa, kondenzator u obliku minijaturnog bloka, a otpornik je sloj na staklenom ili keramičkom supstratu. Elektronički elementi međusobno su spojeni vodljivim stazama. Materijal za vodljive staze mora imati malen djelatni otpor, mora dobro prijanjati na podlogu i biti kemijski

stabilan. Da bi se zadovoljili svi uvjeti, često se metalne staze sastoje od dva ili više slojeva. Npr. zlato ima dobra električna i kemijska svojstva, ali ne prijanja dobro na podlogu, pa se ispod zlata nanese tanak sloj nikal-kromne legure (80% Ni, 20% Cr) koja ima izvrsnu adheziju na staklene supstrate, a preko toga se sloja stavlja zlato. Aluminij se također upotrebljava za vodljive staze, ali ima veći otpor od zlata i može reagirati sa zlatnom žicom za spajanje elementa. Kondenzator se, kao i otpornik, može ugraditi kao sloj dielektrika i metala u supstratu. Dielektrik je tantal-oksidi ili aluminij-oksidi, koji se dobije oksidacijom nanosenog sloja aluminija ili tantala. Vodljivi film nanosi se općenito jednim od poznatih postupaka: napanjanjem metala u vakuumu ili naprašivanjem. Kontura sloja postiže se fotolitografijom.



Sl. 53. Hibridni integrirani sklop. a shema sklopa, b izvedba sklopa tehnologijom tankog filma

Hibridni integrirani sklopovi u tehnologiji debelog filma razlikuju se od tankoga po materijalu i načinu izradbe, a konfiguracija im je vrlo slična. Materijal je za vodljive staze i pasivne elemente u obliku pasta, kojih ima relativno mnogo na tržištu. Svaki proizvođač ima svoju recepturu, ali se u osnovi svaka pasta sastoji od metalnog i staklenog pudera u organskom otapalu. Pasta se nanosi na supstrat, uglavnom aluminij-oksidi ili berilij-oksidi, sitotiskom preko najlonskih ili čeličnih mrežica (sl. 54). Potrebno je nekoliko minuta da se pasta spoji sa supstratom. Zatim se suši da se ukloni hlapljiva komponenta i peče u zonskim pećima na temperaturi $\sim 1000^\circ\text{C}$. Pri

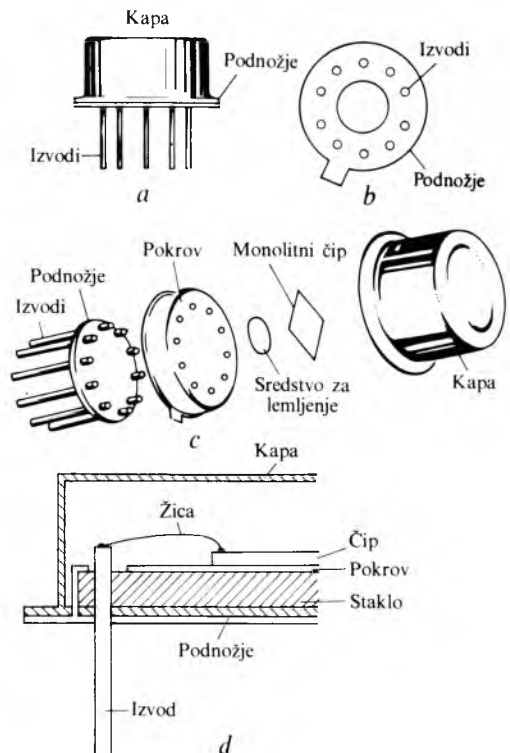


Sl. 54. Redoslijed tiskanja tankog filma. a početak prelaženja, b prelaženje, c kraj prelaženja

tom se organska veziva karboniziraju i oksidiraju, a staklena se komponenta paste rastali i fiksira metalne čestice na supstrat.

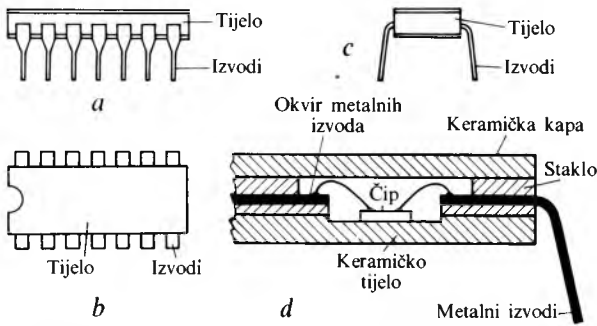
Reproducibilnost je tiskanja otpornika $\sim 30\%$. To je preveliko odstupanje, pa se otpornici, kad je već pločica gotova, dotjeruju na pravu vrijednost. Radi se tako da se dio otpornika uništi mehanički mlazom abraziva ili laserom (v. *Elektronika*, TE 4, str. 487).

Spajanje i ugrađivanje integriranih sklopova u kućište. U završnoj fazi izradbe trgovačkog integriranog sklopa metalne staze na čipu spajaju se na izvođe kućišta, a čip se sa stražnje strane učvrsti na kućište i sve se zajedno zaštititi metalnom ili plastičnom kapicom. Osim standardnih postupaka preuzetih od diskretnih komponenata (svaki je izvod pojedinačno spojen) razvili su se i stalno se razvijaju novi specifični tehnološki postupci ugrađivanja integriranih sklopova u kućište. Najpoznatiji su spajanje pomoću metalne kuglice, vodljive vrpce ili metalne preforme. Za prvi postupak kontakti su načinjeni na licu čipa u obliku kuglica od lako taljive legure kositra i olova. Kuglice se direktno legiraju na kućište. Za drugi postupak kontakti su u obliku metalnih vrpce koje se spajaju na kućište. U trećem spomenutom tehnološkom postupku upotrebljava se u kolut namotana metalna vrpca koja se sastoji od segmenata. Svaki segment ima mjesto na koje se spoji stražnja strana čipa, te izvođe u obliku vrpce na koje se žicama spoje izvođa na metalnim stazama čipa. Čip se zaštititi plastikom, a segment po segment se odreže. Metalne vrpce služe za vanjski priključak. Primjenom bilo koje od tih ili nekih sličnih metoda čip je učvršćen i spojen na podlogu. On je još zaštićen s gornje strane metalnim ili plastičnim pokrovom. Kućište je hermetičko (metalno) ili nehermetičko (plastično), a po konfiguraciji: metalno tranzistorsko kućište s više izvođa standardizirane oznake TO (sl. 55), plastično kućište sa dva reda izvođa, tzv. dvoredno kućište (engl. dual in line package, sl. 56) ili plastično plosnato kućište (engl. flat package, sl. 57). Za plastično kućište princip je u tome da se integriranim sklopu spojenom na supstrat napravi kućište lijevanjem ili prešanjem plastičnog materijala. To su najčešće epoksidne fenolne ili silikonske umjetne mase. Plastično je kućište jeftino, pogodno za industrijsku proizvodnju, ali zbog užeg radnog temperaturnog intervala ($0\cdots 70^\circ\text{C}$), određene propusnosti za vlagu i zbog iona koji nepovoljno djeluju na električne karakteristike sklopa primjena je ograničena na sklopove za široku potrošnju. Nedostaci plastičnog

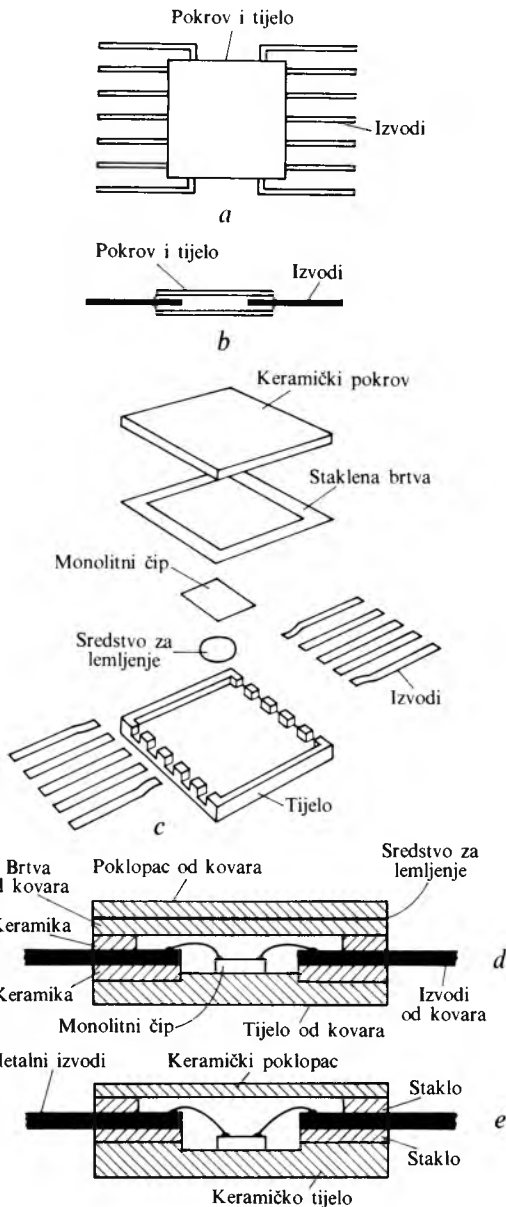


Sl. 55. Metalno kućište TO-5 za smještaj integriranog sklopa

kućišta mogu se djelomično otkloniti pasivizacijom čipa. Za hermetično kućište upotrebljavaju se tri tipa materijala: metal, keramika i staklo.



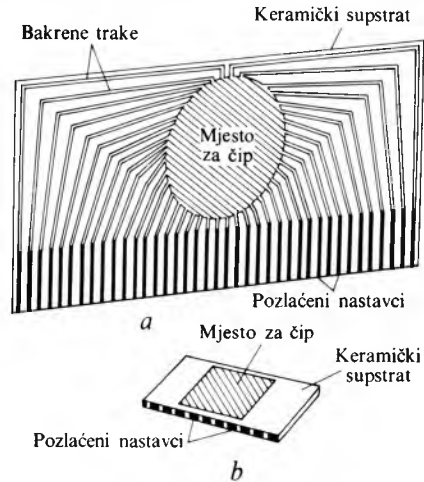
Sl. 56. Plastično kućište sa dva reda izvoda za smještaj integriranog sklopa. Pogled sa strane (a), odozgo (b) i s boka (c), te povećani presjek (d)



Sl. 57. Plastično plosnato kućište za smještaj integriranog sklopa različitih izvedaba (kovar, slitina nikla, kobalta i željeza)

Metalno kućište je potpuno hermetička zaštita s temperaturnim radnim intervalom od $-55 \dots 125^\circ\text{C}$. Ta kućišta za integrirane sklopove razlikuju se uglavnom po broju izvoda. Najčešća su s oznakama TO-3, TO-5, TO-8, TO-99 i TO-100. Broj izvoda

varira od 8 do 14. Zbog mnoštva različitih komercijalnih tipova kućišta za integrirane sklopove navode se samo oni najčešći i standardizirani. Za integrirane sklopove visokog stupnja integracije (LSI, prema engl. *Large Scale Integration*) razvijena su specifična kućišta. LSI čip je relativno velik s mnogo izvoda (do 40 i više). U dvorednom kućištu razmak je između centara izvoda 0,25 cm, pa bi za četrdesetak izvoda kućište bilo prilično veliko. Vrlo je teško umetnuti sklop u tiskanu ploču ili koju drugu priključnicu da bi svi izvodi došli na svoje mjesto i da bi ostali čitavi. Ta ograničenja riješena su uglavnom na dva načina: kućište s podignutim rubom (engl. *edge mounted package*, sl. 58 a) i kućište bez izvoda (engl. *leadless package*,

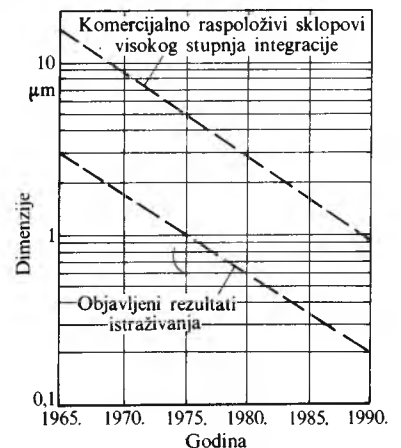


Sl. 58. Kućište integriranog sklopa: a s podignutim rubom na kojemu su izvodi naneseni samo s jedne strane keramičkog supstrata i b bez izvoda

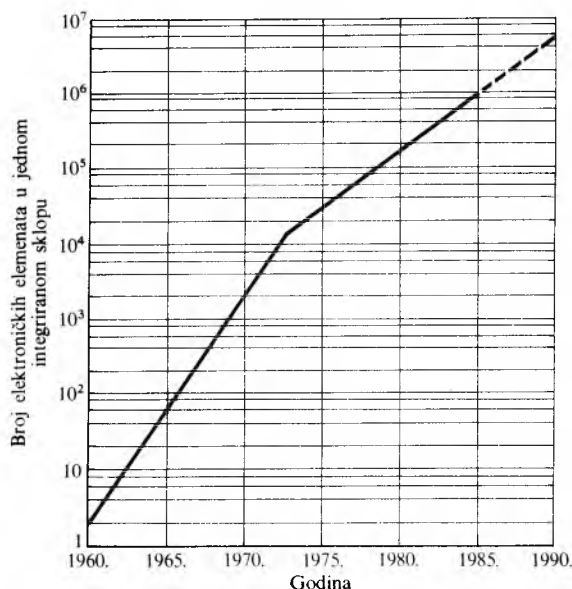
sl. 58 b). U prvoj izvedbi kućište je slično minijaturnoj tiskanoj ploči. Čip je posebno inkapsuliran i spojen s izvodima u obliku vrpce debelog filma na keramičkom supstratu. Na kraju vrpce su zlatni nastavci koji se umetaju u konektor. Operacija spajanja u konektor traje vrlo kratko, ali se pri višekratnom umetanju i vađenju nastavci deformiraju. Ako se sklop spaja u nekoliko konektora, keramičko se tijelo savija, što također može prekinuti spojeve. Ugrađivanje je sklopa u to kućište relativno skupo. S kućištem bez izvoda riješeni su problemi pouzdanosti spajanja. Čip je smješten u sredini supstrata i spojen na tiskane vrpce koje završavaju kuglicama sa strane ili na donjoj strani kućišta. U primjeni se kućište stavi u drugo kućište koje ima vodljive jastučiće (engl. *pad*) blizu kućišnih kuglica. Kad se drugo kućište zatvori, kuglice dođu u kontakt s jastučićima. Sve zajedno priključi se u vanjski krug. To je kućište jeftinije, ne oštećuju se izvodi, a zamjena je jednostavna.

Utjecaj poluvodičke tehnologije na dalji razvoj elektronike

Razvoj poluvodičke tehnologije, prije svega mikrolitografije i ionske implantacije, omogućuje izradbu sve manjih osnovnih



Sl. 59. Smanjivanje dimenzija integriranih sklopova tokom godina



Sl. 60. Razvoj stupnja složenosti integriranih sklopova

tranzistorskih struktura, a time i mogućnost sve više elektroničkih funkcija u jednom čipu. Na sl. 59 prikazano je kako su se smanjivale kritične dimenzije na čipovima u laboratorijima i svjetskoj proizvodnji. Vidi se da su se te dimenzije u 20 godina smanjile desetak puta. Na sl. 60 prikazano je koliko se umnožilo osnovnih elektroničkih funkcija u jednom čipu. Posljedica toga su čipovi koji čine cjelovit složeni elektronički sklop, npr. mikrokompjutor, mikroprocesor i sl. Kako su šezdesetih i sedamdesetih godina našeg stoljeća u elektroničkim sklopovima nestajali diskretni elementi: tranzistori, diode i kondenzatori, tako će krajem stoljeća nestajati i jednostavni integrirani sklopovi opće namjene. Prevladavat će usko specijalizirani integrirani sklopovi visokog stupnja integracije, tzv. *čipovi po narudžbi*. Konstruktori pojedinih elektroničkih sklopova svoje će ideje ugraditi direktno u taj sićušni komadić silicija, koji će biti sve važniji u daljem tehnološkom razvoju.

V. Radić R. Ročak

LIT.: A. van der Ziel, *Physical Electronics*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs 1958. — M. Varičak, *Poluprovodnici i njihova primena u nauci i tehnici*. Zavod za izdavanje udžbenika SRS, Beograd 1964. — W. R. Runyan, *Silicon Semiconductor Technology*. McGraw-Hill, New York 1965. — R. K. Willardson, A. C. Beer (Eds.), *Semiconductor and Semimetals*, Vol. 1. Physics of III-V Compounds. Academic Press Inc., New York 1966. — A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. John Wiley and Sons Inc., New York 1967. — S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. Interscience, New York 1969. — Ch. A. Harper (Ed.), *Handbook of Materials and Processes for Electronics*. McGraw-Hill Inc., New York 1970. — *Silicon Device Processing*. NBS Special Publication 337, Washington 1970. — P. W. Morrison, *Environmental Control in Electronic Manufacturing*. Van Nostrand Reinhold Company, New York 1973. — J. Furlan, *Integrirana vezja*. Fakulteta za elektrotehniku, Ljubljana 1975. — B. Juzbašić, *Elektronički elementi*. Školska knjiga, Zagreb 1975. — H. G. Schneider, W. Ruth, *Advances in Epitaxy and Endotaxy*. Akadémiai Kiadó, Budapest 1976. — B. A. Glaser, G. D. Subak-Sharpe, *Integrated Circuit Engineering (Design, Fabrication and Application)*. Addison-Wesley Publishing, Reading 1977. — F. F. Mazda, *Integrated Circuits (Technology and Application)*. Cambridge University Press, London 1978. — A. J. Diefenderfer, *Principles of Electronic Instrumentation*. W. B. Saunders Company, Philadelphia 1979. — A. G. Milnes, *Semiconductor Devices and Integrated Electronics*. Van Nostrand Reinhold Company, New York 1980. — C. Hilsom, *Device Physics*. North Holland Publishing Company, Amsterdam 1981. — P. Biljanović, *Mikroelektronika*. Školska knjiga, Zagreb 1983. — S. M. Sze, *VLSI Technology*. McGraw-Hill, Tokyo 1983.

Z. Jakobović V. Radić R. Ročak

POLJOPRIVREDNE MAŠINE (POLJOPRIVREDNI STROJEVI) služe u poljoprivrednoj proizvodnji za pripremu i obradu zemljišta, za sejanje i sadenje useva, za različite radove oko useva za vreme rasta, te za žetvu i sabiranje letine. Poljoprivredne mašine mogu biti ručne, mogu

ih vući životinje, a najčešće su ili samohodne ili ih vuku traktori. Postoji više vrsta poljoprivrednih mašina, koje se mogu svrstati u sledeće grupe: poljoprivredni traktori, plugovi, mašine za posebnu obradu zemljišta, mašine za dopunsku obradu zemljišta, mašine za setvu, mašine za utovar i rasipanje đubriva, mašine za žetvu trave i žitarica, mašine za ubiranje okopavina i povrtarskih kultura i mašine za zaštitu bilja.

Glavne etape razvoja mehanizovane poljoprivredne proizvodnje obeležene su najpre upotrebom životinjskog rada, a zatim zamenom životinja mašinama. Skoro sve do kraja XVIII veka poljoprivredna se proizvodnja malo razlikovala od proizvodnje u drevnom Egiptu, Grčkoj i Rimskom Carstvu. Tek početkom XIX veka počinje razvoj različitih vrsta poljoprivrednih mašina koje se osnivaju na životinjskoj vući. Tada počinje razvoj savremenih plugova, kultivatora, drljača, sejalica i mašina za ubiranje letine. Početkom XX veka konstruisane su širokozahvatne mašine, vuklo ih je više konja ili volova, koje su u drugoj dekadi toga veka zamenili traktori sa motorima s unutrašnjim sagorevanjem. Pokušaji upotrebe traktora sa parnim mašinama nisu našli širu primenu zbog njihove velike težine. Izuzetak je upotreba parnih traktora za vuču balansnih plugova u SAD tokom osvajanja prerija. Takvi su se traktori i u nas upotrebljavali i nakon drugoga svetskog rata. U drugoj polovini ovog veka traktori su skoro potpuno zamenili životinjsku vuču.

Industrijska proizvodnja poljoprivrednih mašina počela je u XIX veku u Velikoj Britaniji, koja je dosta dugo bila njihov glavni proizvođač. Uskoro se razvila ta proizvodnja u SAD zbog nedostatka radne snage i visoke cene ljudskog rada. Krajem XIX veka razvija se proizvodnja poljoprivrednih mašina u Francuskoj, Švedskoj, Austro-Ugarskoj i Nemačkoj. U carskoj Rusiji proizvodnja poljoprivrednih mašina je započela početkom XX veka, a naglo se razvila u SSSR-u tokom prvog petogodišnjeg plana početkom tridesetih godina ovog veka. U zapadnim zemljama ostvaren je vrlo brz razvoj do početka ekonomske krize (1929). Taj je razvoj usporen za vreme te krize, da bi se naglo ubrzao nakon završetka drugog svetskog rata.

Plugovi. Plug je bio poznat u drevnom Egiptu, Babilonu i Kini. Crteži pluga stari ~4000 godina pronađeni su na stenama u severnoj Italiji i južnoj Švedskoj. Takođe na grčkim i rimskim vazama stariim ~3000 godina nalaze se prikazi plugova. U tresetistima u Poljskoj pronađeni su isto toliko stari ostaci drvenih plugova.

Najpre su se upotrebljavali drveni plugovi, koji su imali sve elemente savremenih standardnih plugova. Sredinom prvog milenijuma p.n.e. pojavili su se gvozdeni plugovi. Oni su bili vrlo primitivni, pa su se mogli upotrebiti samo za oranje mekog zemljišta. Tvrdi i kameniti zemljišta obrađivala su se i dalje ralom. U prvo vreme ljudi su vukli plug, a u početku konjske vuče plugovi su se sprežali za konjski rep. Takva je vuča bila uobičajena u Irskoj, ali je zabranjena tek 1634. donošenjem zakona protiv surovosti. Razvoj poljoprivrede zavisio je od usavršavanja pluga. Zbog toga je pored univerzalnog pluga razvijen niz specijalnih plugova. Tako je Th. Jefferson (1745—1826), predsednik SAD, objavio (1788) matematički postupak za konstrukciju pluga. D. Webster (1782—1852) izradio je širokozahvatni plug što ga je vuklo 10—12 volova. Osvajanje zapadnih delova SAD tražilo je nove konstrukcije plugova, pa je J. Deere oko 1830. razvio novu vrstu gvođenog pluga, što je doprinelo kultivisanju prirejskih prostranstava.

Drljače. Za pripremu zemljišta nakon oranja najpre su se upotrebljavale grane drveća. Sredinom XIX veka pojavile su se drljače sa drvenim okvirom i zupcima. Uskoro su u Norveškoj izradene prve drljače sa čeličnim okvirom i zupcima, te rotacione drljače. Diskosne drljače konstruisane su oko 1860.

Sejalice. Poznato je da su se sejalice upotrebljavale u Kini još oko 1800. Na Apeninskom poluostrvu bilo je dvorednih sejalica već oko 1600. godine. Prve sejalice s istovremenim unošenjem đubriva patentirane su 1848. Čitav vek posle razvijene su sejalice koje su sa semenom unosile u zemljište i veštačko đubrivo. Sejalice za okopavine pojavile su se oko 1828, a dvoredne sejalice oko 1860. Traktorske dvoredne i troredne sejalice razvijene su oko 1930, a tek posle njih specijalne sejalice za okopavine. Savremene su sejalice u stvari kombinacija mašina za pripremu postelice s mulčem (malč; engl. *mulch* prekrivač od slame, gnoja i sl. za zaštitu biljaka) na površini, za polaganje semena u posteljicu i za istovremeno ulaganje veštačkog đubriva. Sredinom XX veka konstruisane su šestoredne i osmoredne sejalice, pa i sejalice sa još više redova koje uz seme unose u zemljište veštačko đubrivo, insekticide i herbicide.

Kultivatori sa konjskom vučom počeli su se upotrebljavati 1818. godine, dok su se višeredni kultivatori sa motornim pogonom pojavili za prvoga svetskog rata.

Mašine za žetvu žitarica i trave. Srp, malo zakrivljeno ručno oruđe, upotrebljavano je za žetvu žitarica već pre 5000 godina. Veće ručno oruđe, kosa, razvilo se iz srpa. Oba ta oruđa i danas se upotrebljavaju u mnogim delovima sveta za žetvu žitarica i trave.

Plinije Stariji (~70. god.) navodi da se u Galiji za žetvu upotrebljavaju kolica na dva točka sa češljem na prednjoj i ručkom za guranje na stražnjoj strani. To je prvi pisani trag o mašinama za žetvu, odnosno o uređaju za sakupljanje klasja. Dugo nakon toga nema tragova o pokušajima mehanizovanja žetve. Tek krajem XVII veka pokušava se gradnja žetvenih mašina koje su u početku bile samo poboljšane galske mašine. Oko 1809. primenjen je uređaj za sečenje koji deluje poput makaza, a 1822. prvi put je u žetvenu mašinu ugrađeno motovilo koje je priklanjalo žitnu stabljiku uređaju za sečenje. Pokošeno se žito ručno uklanjalo grabljama. Okretanje voznog točka služi kao pogon motovila i uređaja za sečenje.

Mašina sa grabljama koje rotiraju i prebacuju pokošeno žito sa platforme na strniku pojavila se 1828. Ona je omogućila da se, i pored promenljive količine pokosnog žita, uvek vežu snopovi približno jednake debljine. Prva mašina za košenje i formiranje snopova (1858) imala je platformu na kojoj je nekoliko radnika vezivalo žito u snopove. Daljim poboljšanjima mehanizovano je formiranje i vezivanje snopova. Godine 1858. pronađen je uređaj za vezivanje snopova kanapom, a desetak godina posle izrađena je prva snopovezačica.