

Akustičkooptički modulator svjetlosti. Ako se u prozirnem piezoelektričnom kristalu širi val ultrazvuka, u kristalu nastaju promjene indeksa refrakcije zbog kompresije i dilatacije. Kristal se može smatrati nizom paralelnih ravnina jednakih indeksa refrakcije, razmaknutih za valnu duljinu λ_s ultrazvuka. Na tim ravninama dolazi do refleksija ako su na pojedinim ravninama reflektirani valovi međusobno u fazi, što se zbiva ako zadovoljavaju Braggovu relaciju kad je $m = 1$,

$$\lambda = 2d \sin \vartheta = 2\lambda_s \sin \vartheta, \quad (199)$$

gdje je kut ϑ komplementaran kutu upadanja φ . U prikladnim uvjetima gotovo čitav upadni fluks može biti otklonjen. Bitno je da reflektirani snop ima frekvenciju koja se malo razlikuje od frekvencije upadnog snopa. Tome je uzrok pomicanje ravnina refleksije, komponentom brzine $v_s \sin \vartheta$, u smjeru širenja upadne svjetlosti i u protivnom smjeru, što uzrokuje Dopplerov efekt. Promjena frekvencije jednaka je frekvenciji ultrazvuka. Akustičkooptički deflektori upotrebljavaju se za frekvenzijsku modulaciju svjetlosti i za precizno otklanjanje snopa.

NELINEARNA OPTIKA

U klasičnoj optici smatra se da je dielektrična polarizacija \vec{P} , jednaka induciranom dipolnom momentu po jedinici volumena dielektrika, proporcionalna uzbudnom električnom polju \vec{E} , pa je

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}, \quad (200)$$

gdje je α električna polarizabilnost, svojstvo dielektrika. U većini slučajeva α ima konstantnu vrijednost. Električni dipoli osciliraju s frekvencijom uzbudnog električnog polja elektromagnetskog vala, ali ne nužno s istom fazom. Klasična elektrodinamika pokazuje da svaki oscilirajući dipol zrači elektromagnetski val kojemu je frekvencija jednaka frekvenciji oscilacije dipola. Sredstvo zrači val frekvencije upadnog vala tako dugo dok vrijedi proporcionalnost (200). To je, npr., omogućilo izvesti Fresnelove jednadžbe, koje daju zakone refleksije, refrakcije i polarizacije svjetlosti u međudjelovanju s dielektrikom. Ako električno polje postane veoma jako, kao što to može biti pri upotrebi intenzivnog laserskog zračenja (v. *Laser*, TE 7, str. 465), relacija (200) više ne vrijedi. Tada se αE može smatrati prvim članom reda

$$\vec{P} = \alpha_1 \vec{E}^2 + \alpha_2 \vec{E}^3 + \alpha_3 \vec{E}^4 + \dots, \quad (201)$$

gdje su $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ nelinearne polarizabilnosti.

Nastajanje druge harmonijske frekvencije. Ako se pretpostavi da je upadno polje harmonično

$$\vec{E} = E_0 \sin \omega t, \quad (202)$$

primjenom trigonometrijskih identiteta može se (201) pisati u obliku

$$\begin{aligned} \vec{P} = & \alpha_1 \vec{E}_0 \sin \omega t + \left(\frac{\alpha_2}{2}\right) \vec{E}_0^2 - \left(\frac{\alpha_2}{2}\right) \vec{E}_0^2 \cos 2\omega t - \\ & - \left(\frac{\alpha_3}{4}\right) \vec{E}_0^3 \sin 3\omega t, \dots \end{aligned} \quad (203)$$

Od naročito je interesa član koji sadrži 2ω , jer predočuje dipolne momente koji osciliraju dvostrukom frekvencijom upadnog zračenja. Takve oscilacije generiraju elektromagnetske valove frekvencija 2ω , tj. drugu harmonijsku frekvenciju upadnog zračenja. A. E. Hill, C. W. Peters i G. Weinreich (1961) dobili su pomoću impulsnog rubinskog lasera snage jednog impulsa 3 kW i valne duljine $\sim 694,3$ nm, iako s veoma malom efikasnošću od 10^{-8} , zračenje druge harmonijske frekvencije valne duljine $\sim 347,15$ nm. Danas se upotrebom snažnijih lasera (u infracrvenom području) i s prikladnijim supstancijama (KH_2PO_4) postižu druge harmonijske frekvencije s efikasnošću od 10^{-1} .

Parametarska pojačala. Nelinearna električna polarizacija $\alpha_2 \vec{E}^2$ iz (201) može se smatrati rezultatom uzbuđenja električnim poljima $E_1 \sin \omega_1 t$ i $E_2 \sin \omega_2 t$. Ako se kvadrat te sume razvije

u red, pojavljuju se članovi $2\omega_1$ i $2\omega_2$, te član $2\vec{E}_1 \vec{E}_2 \alpha_2 \cdot \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t$, koji se može pisati u obliku

$$E_1 E_2 \alpha_2 [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t]. \quad (204)$$

To znači da oscilirajuća, nelinearna, inducirana električna polarizacija, a time i emitirana svjetlost, sadrži frekvencije $\omega_1 + \omega_2$ i $\omega_1 - \omega_2$. Proces kojim se ti valovi dobivaju je parametarsko pojačanje (C. C. Wang i G. W. Racete, 1965). Da bi se postigao jaki fluks zračenja iz parametarskog pojačala, ono se može staviti u optičku rezonantnu šupljinu. Mod lasera koji pumpa parametarsko pojačalo usklađen je s rezonatorom. Zrcala rezonatora imaju velike reflektancije za ω_1 i ω_2 . Ako je pumpanje pomoću lasera dovoljno, parametarsko pojačalo, npr. monokristal ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), oscilira slično kao laser, i to s frekvencijama ω_1 i ω_2 (parametarska oscilacija). Parametarski oscilator može biti podešen, npr., orijentiranjem u prostoru ili promjenom temperature kristala, što uzrokuje male promjene frekvencije zračenja (J. A. Giordmaine i R. C. Miller, 1966; S. A. Ahmanov, A. I. Kovrigin, A. S. Piskaraltas, V. V. Fadjev i R. V. Holihov, 1966).

LIT.: P. Fleury, J. P. Mathieu, Lumière. Eyrolles, Paris 1961. — M. Cagnet, M. Françon, J. C. Thrierr, Atlas optischer Erscheinungen. Springer-Verlag, Berlin 1962. — R. W. Ditchburn, Light. Blackie and Son, London 1963. — M. Paić, Fizička mjerenja I. Školska knjiga, Zagreb 1963. — The Feynman Lectures on Physics II. Addison Wesley, Reading, Massachusetts 1966. — G. W. Stroke, An Introduction to Coherent Optics and Holography. Academic Press, New York 1966. — M. Paić, Fizička mjerenja II. Školska knjiga, Zagreb 1967. — R. W. Pohl, Optik und Atomphysik. Springer-Verlag, Berlin 1967. — Berkeley Cours de Physique III, Ondes. Armand Colin, Paris 1968. — O. S. Heavens, Optical Properties of Thin Solid Films. Dover INC, New York 1968. — G. Kortün, Reflexionsspektroskopie. Springer-Verlag 1969. — A. F. Harvey, Coherent Light. Wiley-Interscience, London 1970. — B. T. Graveley, Applied Optics, 12, 2537, 1973. — E. Menzel, W. Mirandé, I. Weingärtner, Fourier — Optik und Holographie. Springer-Verlag, Wien 1973. — E. Hecht, Optics, Schaum's Outline Series. McGraw-Hill, New York 1975. — F. A. Jenkins, H. E. White, Fundamentals of Optics. McGraw-Hill-Kogakusha Ltd., Tokyo 1976. — M. Young, Optics und Lasers. Springer-Verlag, Berlin 1977. — M. Paić, Osnove fizike IV, Svjetlost. Liber, Zagreb 1984.

M. Paić

OPTOELEKTRONIKA, posebno područje elektronike u kojemu se primjenjuju pojave međudjelovanja svjetlosti (i bliskog infracrvenog i ultraljubičastog zračenja) i tvari. Sve su te pojave kvantne prirode, pa se u tom području isprepleću optika, kvantna fizika i elektronika.

Fotoelektrični efekt zapažen je još u prošlom stoljeću, pa su usporedo s drugim električnim elementima konstruirani fotootpornik, fotočelija, fotoelement, katodna cijev, ikonoskop i dr. (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 641; v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, TE 4, str. 466). Znatniji razvoj optoelektronike počeo je primjenom poluvodičkih materijala oko 1960. godine i konstruiranjem prvih svjetlećih dioda (v. *Poluvodiči*). To su bili izvori svjetla načinjeni od binarnog III-V spoja GaP i ternarne krute otopine $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$, te binarnog III-V spoja GaAs koji emitira zračenje u infracrvenom području valne duljine $\sim 0,9 \mu\text{m}$ (H. C. Casey i F. A. Trumbore, 1970). Prvi GaAs poluvodički laser na niskoj temperaturi proradio je 1962. godine (R. N. Hall, M. I. Nathan, 1962). Kako se radilo o PN-spoju jednog poluvodiča, laseri su nazvani jedno-spojnim. Ubrzo su konstruirani poboljšani poluvodički laseri s heterospojevima (spojevi između dva poluvodiča s različitim energetskim procijepima i indeksima loma), koji su radili s mnogo slabijim strujama. Ubrzo se pojavio $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ jednostruki heterostrukturalni laser sniženog praga (I. Hayashi, H. Kressel, H. Nelson, 1969), te konačno takav laser dvostrukie heterostrukture, koji je radio kontinuirano na sobnoj temperaturi (I. Hayashi, 1970; Zh. Aferov, 1971). Praktički razvoj visokoemisivnih poluvodičkih svjetlećih dioda injekcijskih lasera bio je omogućen ostvarenjem kontinuiranog rada na sobnoj temperaturi.

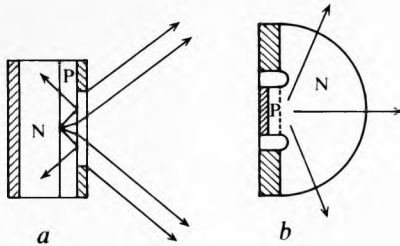
Razvoj fotodetektora počeo je još ranije, pojavom fotoemisivnog detektora i fotomultiplikatora, a kasnije fotodiode i fotootpornika. Tzv. PIN-dioda i lavinska fotodioda važna su dostignuća u tehnici fotodetektora.

OPTOELEKTRONIČKI IZVORI ZRAČENJA

Poluvodički laser. Prikladnim dotiranjem u poluvodičima mogu se manjinski nosioci injektirati kroz PN-prijelaze, te se tada induciranim prijelazima rekombiniraju s većinskim nosiocima i proizvode stimulirano zračenje. Pri tom elektroni prelaze iz stanja na rubu vodljivog pojasa u stanje na rubu valentnog pojasa, te nastaje foton takve frekvencije koja odgo-

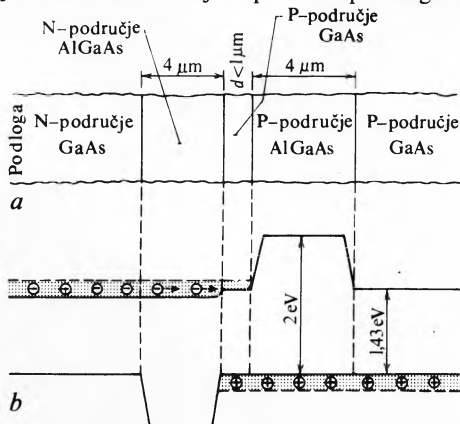
vara razlici energija. Preduvjet za takvu stimuliranu emisiju pretežno su zračeći prijelazi, kakvi se događaju samo u određenim, tzv. direktnim poluvodičima (v. *Laser*, TE 7, str. 478).

Svjetleća dioda (luminescentna dioda, LED prema engl. Light Emitting Diode). Pri prolazu električne struje kroz takvu diodu nastaje samo spontana rekombinacija. Zato je svjetlo nekoherentno i ima spektralnu raspodjelu šire ili uže emisijske linije takve zračeće rekombinacije. Za luminescenciju je potrebno da su elektroni i šupljine koncentriranije nego što je to u ravnotežnom stanju. Za pobudu tog stanja služi opet injektiranje nosilaca kroz PN-prijelaz u smjeru toka. Analogno jednostavnom poluvodičkom laseru postoji jednostavna svjetleća dioda (sl. 1a). Sastoji se od jednog PN-prijelaza u direktnom poluvodiču. Područja su dotirana, i to područje N više, da bi se injektiranjem elektrona iz područja N u područje P postigao visok stupanj djelotvornosti emisije. Injektirani elektroni samo dijelom sudjeluju u zračućim rekombinacijama. Ostatak se gubi u rekombinacijama bez zračenja. Koeficijent rekombinacije (omjer zračeće i nezračeće rekombinacije) mora za svjetleće diode biti što veći.



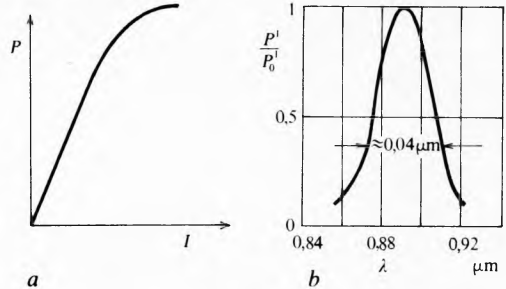
Sl. 1. Shematski prikaz presjeka svjetleće diode sa PN-prijelazom. a) jednostavna dioda, b) dioda s polukuglom za povećanje stupnja izračavanja

Spontana emisija zračeće rekombinacije u području P neposredno na prijelazu u svim je smjerovima prostora. Iskorišćuje se samo dio zračenja u području P, koje je osim toga oslabljeno apsorpcijom, a već prema upadnom kutu na površini još i djelomično ili potpuno reflektirano. Kako bi se smanjili rekombinacijski i optički gubici, načinjene su i snažnije diode s heteroprijelazima, ili dapače s dvostrukim heterostrukturama. U dvostrukoj heterodiodi pri naponu u propusnom smjeru postoje energetska pojasa kao u dvostrukom heterolaseru. Elektroni su injektirani iz N-područja GaAs kroz N-područje AlGaAs u stvarnu zonu rekombinacije, P-područje GaAs. Potencijalni prag prema P-području AlGaAs zadržava elektrone u sloju P-područja GaAs, gdje se stvara visoka koncentracija elektrona s pripadnom jakom rekombinacijom (sl. 2). Od rekombinacijskog zračenja iskorišćuje se samo dio koji ide u sloj N-područja AlGaAs, gdje nije apsorbiran zbog širokog procijepa u pojasu tog sloja, što ga čini prozirnim za rekombinacijsko zračenje. Dio se tog zračenja kroz prozore u vanjskom sloju N-područja GaAs izvodi izvan kristala. I u ovim strukturama koje zrače poprečno na prijelaze gubici su refleksije prema slobodnom prostoru još veliki. Dodavanjem prozirne polukugle istog in-



Sl. 2. Dvostruka heterostruktura (GaAs i GaAlAs). a) shematski prikaz presjeka, b) energetska pojasa

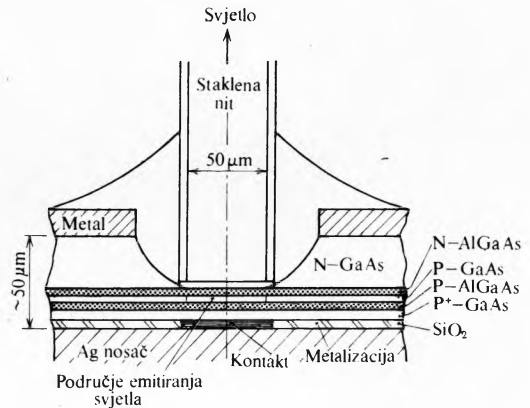
deksa loma ($n = 3,6$) moguće je izdvojiti više svjetla (sl. 1b). Svjetlosni tok diode raste približno linearno sa strujom injektiranja (sl. 3a). Spektralna raspodjela zračenja GaAs svjetleće diode ima približni oblik Gaussove krivulje sa $1/e$ -širinom od $\Delta\lambda = 0,02 \dots 0,04 \mu\text{m}$ (sl. 3b).



Sl. 3. Karakteristike svjetleće diode. a) snaga zračenja diode prema struji injektiranja s termičkim zasićenjem, b) spektralna raspodjela zračenja svjetleće diode

Svjetleće diode izrađuju se u dvije izvedbe: s površinskim emiterom i rubnim emiterom.

Dioda s površinskim emiterom ima malu površinu PN-spoja, pa će se toplina brzo širiti i bit će apsorbirana u velikom toplinskom spremištu. Zato dioda može biti pobuđivana velikim strujama a da se ne pregrije. Površina spoja je promjera $15 \dots 100 \mu\text{m}$, a kristal kroz koji svjetlost izlazi vrlo je tanak ($10 \dots 15 \mu\text{m}$), što smanjuje apsorpciju i omogućuje približavanje početka svjetlovoda emitirajućoj površini. Gustoća pobudne struje može iznositi nekoliko kiloampera do nekoliko desetaka kiloampera po četvornom centimetru. U složenijoj strukturi može se dobiti povećana djelotvornost, a time i veća svjetlosnost (luminancija), ali uz lošije odvođenje topline (sl. 4). Zračenje ima približno Lambertovu raspodjelu, tj. približno je jednoliko u svim smjerovima s maksimumom zračenja okomito na spoj, te s opadanjem po kosinusovu zakonu kod odstupanja od tog smjera. Zračenje iznosi $150 \dots 300 \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ za emiter promjera $15 \mu\text{m}$ kad je dvostruka heterostruktura.

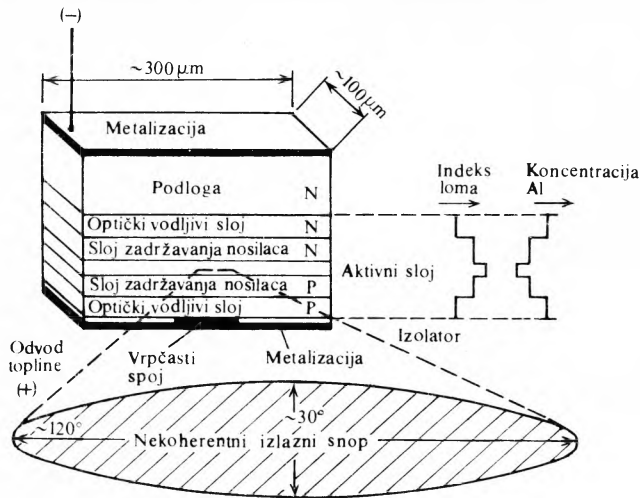


Sl. 4. Dvostruka heterostruktura (AlGaAs) je svjetleća dioda male površine, a velike svjetljivosti, pa se izravno spaja na svjetlovod

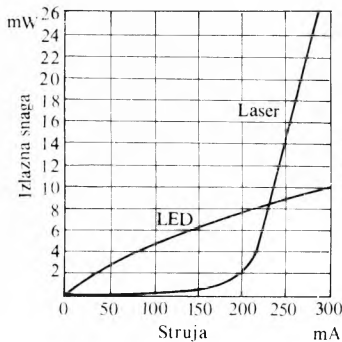
Dioda s rubnim emiterom zrači uglavnom u relativno usmjerenom snopu, te se može lakše spajati na svjetlovod. Opadanje je kuta emisije u ravnini okomitoj na spoj, a uzrokovano je valovodnim efektom heterostrukture. Iako je apsorpcija u aktivnom sloju velika, ona je u okolnim valovodnim slojevima koji sadrže aluminij malena, pa se većina svjetla prenosi do krajnjih ploha i emitira u snopu određenom parametrima valovoda. Reflektor na jednoj krajnjoj površini i antirefleksijska prevlaka na drugoj omogućuju zračenje većine svjetla na jednoj krajnjoj površini. Emitirani snop je Lambertova tipa, širine pola snage od 120° u ravnini spoja gdje nema valovodnog efekta. U ravnini okomitoj na spoj on je širine $25^\circ \dots 35^\circ$ uz točno dimenzioniranje valovoda. Kanaliziranjem svjetla valovodom postiže se visoko efektivno zračenje na graničnoj plohi, koje iznosi $\sim 1000 \dots 1500 \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ iz emitirajuće

površine $(2 \cdot 4) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$. To je često za red veličine veće nego iz površinskog emitera (sl. 5).

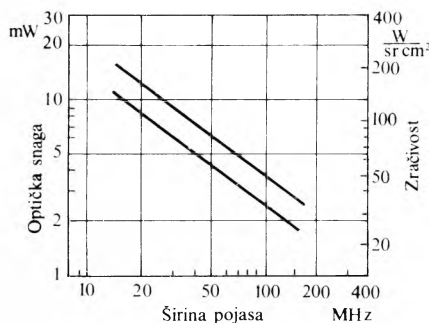
Ovisnost izlazne snage o pobudnoj struji gotovo je linearna (sl. 6). U površinskim emiterima dvostruke heterostrukture opada izlazna snaga sa širinom pojasa modulacije (sl. 7). Brzina modulacije u svjetlećim diodama može se povećati povećanjem pobudne snage uz smanjenu djelotvornost. Za diodu predviđenu za širinu pojasa 40 MHz mogu se povećanjem pobudne snage za $\sim 6 \text{ dB}$ po oktavi postići brzine modulacije 250 Mbit/s.



Sl. 5. Raspored slojeva svjetleće diode s heterostrukturom i s rubnim emiterom svjetla



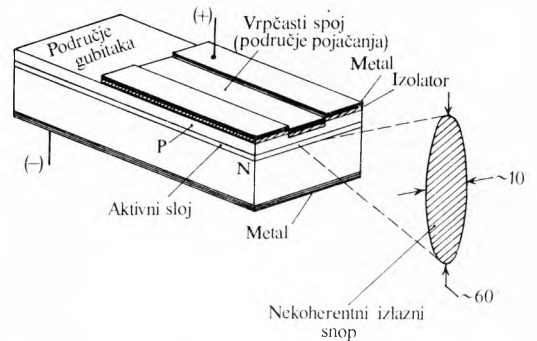
Sl. 6. Ovisnost izlazne snage svjetleće diode s jednostrukim spojem (promjer površine 0,4 mm) i lasera s dvostrukom heterostrukturom ($\eta = 30\%$)



Sl. 7. Prosječna izlazna snaga svjetleće diode prema širini pojasa modulacije

Superluminescentna dioda (SLD) jest treći oblik svjetleće diode. Ima povećanu snagu, veće usmjerenje izlaznog snopa i smanjenu spektralnu širinu pojasa. To je produžena verzija rubnog emitera vrpčastog oblika (sl. 8). Po konstrukciji slična je laseru s PN-spojem oblika dugačke pravokutne vrpce. Jedan kraj vrpce načinjen je s optičkim gubicima za sprečavanje refleksije i potiskivanje laserskog efekta, dok je izlaz na suprotnom kraju. U radu se struja injektiranja povećava sve do stimulirane emisije (prvi korak do laserskog efekta). Dobiva se pojačanje, ali zbog visokih gubitaka na jednom kraju vrpce ne postoji povratna veza i ne nastaju oscilacije. Zato

u strujnom području stimulirane emisije nastaje pojačanje i izlaz brzo raste sa strujom zbog pojačanja u jednom prolazu. Istodobno se spektralna širina izlaznog zračenja smanjuje na manje od 10^{-8} m . U impulsnom radu postigla se vršna izlazna snaga 60 mW na valnoj duljini $\sim 0,87 \mu\text{m}$, uz širinu pojasa $6 \cdot 8 \text{ nm}$. U kontinuiranom radu postignuta je vršna izlazna snaga 25 mW.



Sl. 8. Slojevi superluminescentne diode

Mana je ovih dioda u tome što je za postizanje usporedive snage s laserom potrebna oko tri puta veća gustoća struje. Zato je apsolutna struja velika zbog velike duljine a time i površine. U perspektivi verzija za kontinuirani rad obećava veliku izlaznu snagu, uzak snop i malu spektralnu širinu, a bez ograničenja praga.

Primjena svjetlećih dioda. U području valnih duljina $0,8 \dots 0,9 \mu\text{m}$ i $1,1 \dots 1,6 \mu\text{m}$ svjetleće diode najjednostavniji su poluvodički izvori svjetlosti. Primjenjuju se u optičkim komunikacijama uz optičke svjetlovođe kao prijenosne linije. Imaju prihvatljivu snagu, dug vijek i prikladnu optičku širinu pojasa, uz direktnu modulaciju. Ograničenja su više diktirana karakteristikom disperzije svjetlovođa nego njegovim gubicima. Vlastita spektralna širina i mogućnosti modulacije omogućuju primjenu tih dioda u području $0,8 \dots 0,9 \mu\text{m}$ kao izvora niske repeticije (do nekoliko desetaka Mbit/s) uz relativno duge prijenosne linije (nekoliko kilometara). Ista dioda omogućuje prijenos nekoliko stotina megabita u sekundi na daljinu nekoliko stotina metara. Svjetleće diode za veće valne duljine mogu se upotrebljavati uz veće brzine i udaljenosti. Umnožak širine pojasa modulacije i duljine optičkog valovođa u području $1,2 \dots 1,4 \mu\text{m}$ može biti veći od 500 Mbit/km/s (npr. uz 50 Mbit/s moguća je udaljenost veća od 10 km).

OPTOELEKTRONIČKI DETEKTORI ZRAČENJA

Optoelektronički detektori, tzv. fotodetektor, pretvaraju optičko zračenje u električne veličine. U komunikacijskom sustavu oni demoduliraju optički signal, tj. pretvaraju optičke promjene u električne promjene, te su općenito samo komponente prijemnika. U fotodetektorima primjenjuje se direktni fotoelektrični efekt, pri kojem upadno svjetlo proizvodi nosioce naboja, i termički efekti pri kojima zagrijavanje apsorpcijom svjetla indirektno uzrokuje električne efekte. Termički su detektori, međutim, spori prema promjenama svjetla (male su širine pojasa), pa mogu demodulirati samo niskofrekvencijske pojaseve signala. Zato su za optičke komunikacije malo važni. Od direktnih optoelektroničkih efekata razlikuju se vanjski i unutrašnji fotoefekt. Kod vanjskog fotoefekta radi se o fotoemisiji, tj. svjetlosnim zračenjem uzrokovanom emisiji elektrona iz fotokatoda u vakuumskim cijevima. Unutrašnji fotoefekt predstavlja proizvodnju pokretnih nosilaca naboja pomoću svjetla u poluvodičima, čime se povećava gustoća nosilaca, a time i vodljivost (fotootpornici). Kod unutrašnjeg fotoefekta u području poluvodičkih PN-prijelaza rastavljaju se proizvedeni nosioci naboja na difuzijske i dielektrične struje i daju fotostruju (fotodiode).

Definicije osnovnih veličina. Karakteristike optoelektroničkih elemenata opisuju se posebnim veličinama.

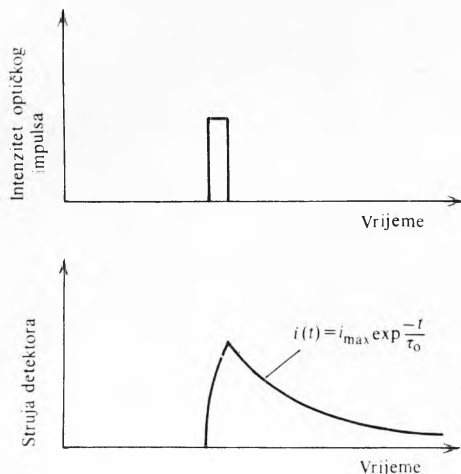
Kvantna djelotvornost η omjer je prosječnog broja emitiranih ili proizvedenih elektrona po detektoru i prosječnog broja upadnih fotona.

Odziv (zvan i osjetljivost) omjer je prosječne struje detektora i prosječne ulazne snage zračenja, a izražava se u amperima po vatu. Nekad se ti podaci daju u fotometrijskoj jedinici amper po lumenu. Takve podatke treba korigirati s obzirom na spektralnu osjetljivost oka.

Spektralni odziv je promjena odziva detektora, mjenog kvantnom djelotvornošću ili odzivom, kao funkcija optičke valne duljine.

Frekvencijski odziv je modulaćijska frekvencija gdje je vršna izlazna struja jednaka polovici svoje maksimalne vrijednosti. Naime, upadom sinusno moduliranog svjetla na detektor amplituda izlazne struje detektora obično opada s porastom modulaćijske frekvencije.

Impulzni odziv karakteriziran je vremenskom konstantom τ_0 opadanja izlaza prema nuli kad je svjetlosni impuls na ulazu detektora (sl. 9).



Sl. 9. Pobudni svjetlosni impuls i strujni odziv foto-detektora

Struja tame I_D je struja detektora kad je on zaklonjen od optičkog zračenja.

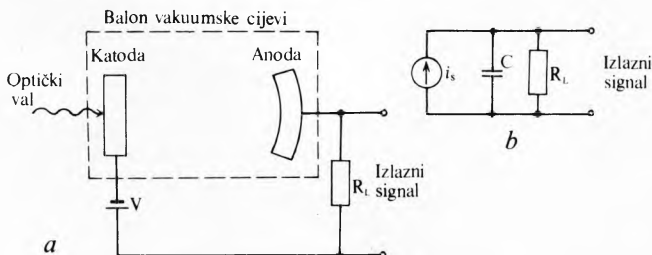
Ekvivalentna snaga šuma P_{ne} je efektivna vrijednost sinusno moduliranog optičkog zračenja za koje je efektivna vrijednost signala jednaka efektivnoj vrijednosti napona šuma detektora. Za to je potrebno poznavanje modulaćijske frekvencije, širine pojasa detektora, temperature detektora i njegove površine. Tipična referentna širina pojasa jest 1 Hz pri modulaćijskoj frekvenciji 400 Hz.

Detektivnost D je recipročna vrijednost ekvivalentne snage šuma, tj. $D \equiv 1/P_{ne}$.

D -zvjezdica, D^* , jest detektivnost pomnožena kvadratnim korijenom iz umnoška ploštine detektora A_D i njegove širine pojasa Δf , tj. $D^*(\lambda, f) \equiv D \sqrt{A_D \Delta f}$. Pri tom je potrebno znati modulaćijsku frekvenciju i temperaturu detektora.

Osnovna karakteristika fotodetektora za potrebe komunikacija je kvantna djelotvornost. Pri odabiranju detektora za optičke komunikacije poželjan je onaj s najvećom kvantnom djelotvornošću (za rad ograničen pozadinskim zračenjem) ili s najvećim D^* , tj. s najmanjim P_{ne} (za rad ograničen unutrašnjim šumom detektora).

Detektori s fotoemisijom. Na vanjskom fotoelektričnom efektu osniva se nekoliko detektora. To su vakuumske cijevi s foto-



Sl. 10. Fotoemisivni detektor: a građa, b nadomjesni spoj

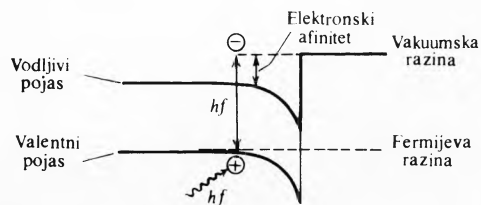
katodom iz koje izlaze svjetlom pobuđeni elektroni. Pomoću vanjskog naponskog izvora anoda je dovedena na pozitivni potencijal, te privlači i hvata elektrone. Na vanjskom opteretnom otporu nastaje napon razmjernan fotostruji (sl. 10). Fotokatoda mora imati dovoljnu kvantnu izdašnost u željenom spektralnom području, a osjetljivost joj ne smije biti previše ovisna o struji tame. Fotokatoda se izrađuje kao reflektivna, koja emitira elektrone na istu stranu s koje upada svjetlo, ili kao transparentna koja emitira elektrone u produžetku svjetlosnog snopa (tada je u obliku tankog prozirnog filma nanesena na prozirnoj podlozi direktno na stakleni balon vakuumske cijevi). Svi važni fotoemisivni materijali jesu poluvodiči tipa P, kojima energetski pojasi prema površini veoma opadaju (sl. 11). Tim opadanjem smanjen je afinitet elektrona (razlika potencijala ruba vodljivog pojasa u unutrašnjosti poluvodiča i gornjeg ruba potencijalne barijere). Da bi elektroni iz valentnog pojasa bili pobuđeni na emisiju, fotoni moraju imati energiju jednaku ili veću od zbroja energetskog procijepa i elektronskog afiniteta. Dakle, maksimalna energija emitiranog elektrona jest

$$\xi_e = hf - W, \quad (1)$$

gdje je h Planckova konstanta, f frekvencija upadnog svjetla, a W izlazni rad elektrona iz tvari. Samo fotoni iznad frekvencije praga imaju energije veće od izlaznog rada i mogu postati slobodni elektroni. Za fotoemisivne materijale kvantna djelotvornost je mjera gubitaka zbog sudara i početne fotonske energije pobuđenih elektrona. Ona će određivati trenutnu struju signala

$$i_s = \frac{\eta e}{hf} \overline{C_M(t)}, \quad (2)$$

gdje je e naboj elektrona, a $\overline{C_M(t)}$ trenutni intenzitet moduliranog nosioca.



Sl. 11. Energetski pojasi fotoemisivne poluvodičke površine

Struja tame koja teče bez vanjske fotouzbuđene uzrokovana je uglavnom termičkom emisijom, polja i strujom odvoda detektora. Dva zadnja uzroka mogu se eliminirati pravilnom konstrukcijom. Struja tame mijenja se prema Richardsonovu zakonu

$$I_D = 1,2 \cdot 10^6 A_k T^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (3)$$

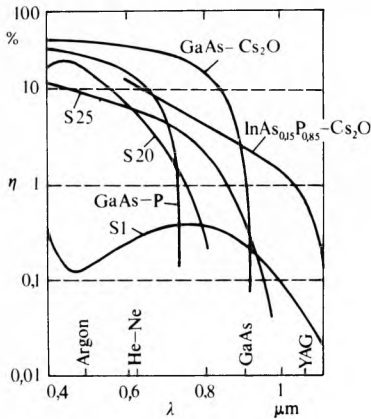
gdje je A_k površina katode, T njena temperatura, W izlazni rad, a k Boltzmannova konstanta. Struja tame pomiče radnu točku na pozitivnu vrijednost i uvodi sačmen šum struje tame. Ona je, međutim, vrlo malena, jer u veoma dotiranom poluvodiču P postoji malo elektrona u vodljivom pojasu. Ako je još i elektronski afinitet pozitivan, ovi termički elektroni ne mogu svladati potencijalnu barijeru. Čak i u fotokatodama sa zanemarljivim, dapače i negativnim elektronskim afinitetom ostaje struja tame malena zbog malo termičkih elektrona.

Elektroni pobuđeni iznad elektronskog afiniteta mogu napustiti poluvodič ako su dovoljno blizu površine. Čak i s određene udaljenosti od površine elektroni mogu izaći ako nisu izgubili previše energije rasipanjem na rešetki. Kako je u ovim poluvodičima linearni koeficijent apsorpcije $10^7 \dots 10^8 \text{ m}^{-1}$, bit će u filmovima debelim $0,1 \mu\text{m}$ apsorbirano više od 60% upadnog svjetla i pobuđeni elektroni mogu još doseći površinu.

Za smanjenje elektronskog afiniteta uobičajene fotokatode imaju samo jednoatomni sloj cezija ili cizij-monoksida. Tako

se u galij-arsenidu sa cezijem snižuje elektronski afinitet na negativne vrijednosti i postiže kvantna djelotvornost veća od 50%. I ostali poluvodiči III i V skupine sa cezijem ili cezij-monoksidom prikladni su za fotokatode, ali su kvantne djelotvornosti općenito mnogo niže. One su mnogo niže, osobito na većim valnim duljinama zbog frekvencije praga (sl. 12).

Zbog male kvantne djelotvornosti jednostavni detektori s fotoemisijom (tzv. fotoćelije) prikladni su samo za primanje razmjerno jakog svjetla. Male fotostruje slabih svjetlosnih signala gube se u šumu opteretnog otpora ili sljedećih elektroničkih pojačala. Proces fotoemisije je ekstremno brz, ograničenje predstavlja vrijeme proleta fotoelektrona od katode do anode, što se još može smanjiti višim anodnim naponima. Tako je uz širokopojasne visokofrekvencijske sklopove omogućena demodulacija do frekvencije 10 GHz.



Sl. 12. Kvantna djelotvornost nekih fotokatoda prema valnoj duljini

Vakuumske fotodiode imaju umjerenu osjetljivost od $\sim 0,025$ A/W i primjenjuju se od ultraljubičastog do bližeg infracrvenog spektralnog područja. Za kvantitativna mjerenja moraju raditi u području između vršne i prosječne struje, moraju biti oklopljene protiv elektromagnetskih i elektrostatskih polja i napajane točnim naponima iz dobro reguliranih izvora. Zbog nejednolike osjetljivosti fotokatode potrebno je da velik dio njene površine bude osvjetljen. Granična je snaga većine vakuumskih fotoćelija ~ 1 W (tabl. 1).

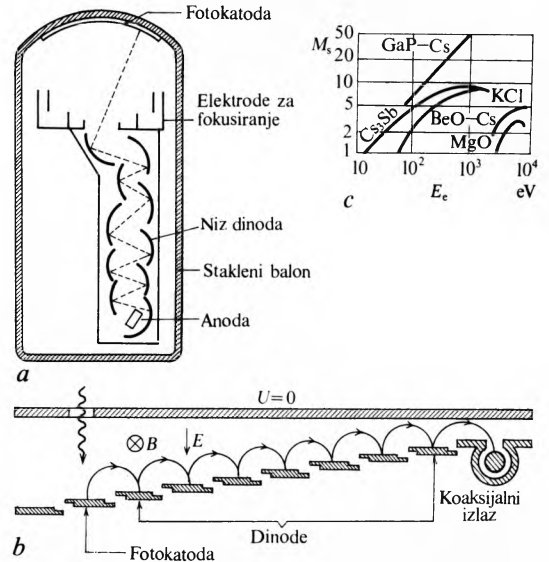
Tablica 1
OSJETLJIVE FOTOKATODE

Materijal	Valna duljina najveće djelotvornosti		Energetski pricijep eV	Elektronski afinitet eV	Gustoća struje tame A/cm ²
	η %	λ μm			
GaAs-Cs	35	0,4	1,4	-0,55	10^{-16}
InAs _{0,15} P _{0,85} -Cs ₂ O	2	0,9			
Ag-O-Cs	0,8	...	1,1	-0,25	10^{-11}
Cs ₃ Sb	1,8	1,06			10^{-14}
Na ₂ KSb-Cs	0,5	0,8	1,6	0,45	10^{-15}
NaKSb-Cs	30	0,5	1,0	0,55	10^{-13}
	15	0,4			
	0,5	0,9			

Fotomultiplikatori. Da bi se povećala osjetljivost fotoćelije, u vakuumski balon ugrađuju se elektrode, tzv. *dinode*, naponski stupnjevane tako da fotoni udaraju na prvu elektrodu i iz nje izbijaju sekundarne elektrone. Te elektrone privuče druga elektroda i oni iz nje isto tako izbijaju sekundarne elektrone. U nizu takvih dinoda umnaža se primarna elektronska struja (sl. 13a). Elektrode za fokusiranje usmjeravaju fotoelektrone na prvu dinodu.

Upadni primarni elektroni pobuđuju u dinodama elektrone tako intenzivno da oni svladavaju potencijalnu barijeru na površini, te mogu napustiti dinodu. Obično su dinode reflektivne, tako da sekundarni elektroni izlaze na istu stranu na koju

primarni upadaju. Ima i prozirnih dinoda u obliku filma debljine samo $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ m. Omjer broja sekundarnih i primarnih elektrona na jednoj dinodi, tzv. jedinično umnažanje M_s , raste sa kinetičkom energijom, doseže maksimum i zatim opada. Opadanje je uzrokovano prebrzim primarnim elektronima koji prodiru preduboko u reflektivne dinode, ili pak imaju premalo sudara u prozirnim dinodama. S reflektivnim dinodama od Cs₃Sb i od BeO-Cs postiže se uz napone 100...300 V umnažanje 4...6 puta po dinodi (sl. 13c). Novije poluvodičke dinode od GaP-Cs daju uz 500...1000 V umnažanje čak 30...50 puta.



Sl. 13. Fotomultiplikator: a s nasuprotnim dinodama, b s dinodama u jednoj ravni i ukrštenim električnim i magnetskim poljem, c ovisnost umnažanja M_s sekundarnih elektrona o energiji E_c primarnih elektrona

Dinode ne smiju biti opterećene prevelikim strujama jer inače dolazi do umora i njihovo se umnažanje trajno smanjuje. Da bi se izbjegao taj efekt, izlazne se struje ograničuju na nekoliko miliampera. Ukupno strujno pojačanje fotomultiplikatora sa n stupnjeva iznosi

$$M = M_s^n \quad (4)$$

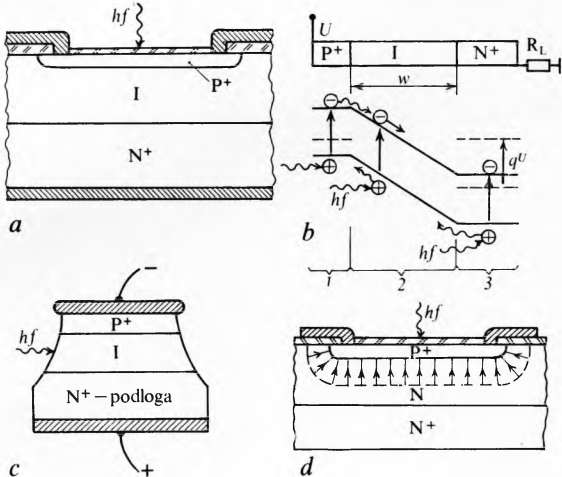
Uz 9...14 stupnjeva postižu se strujna pojačanja $10^4 \dots 10^7$ puta. Mnogo dinoda uzrokuje, međutim, pri moduliranom svjetlu kašnjenje pripadne modulacije izlazne struje s obzirom na modulaciju svjetla, a osim toga dolazi do gušenja modulacije s obzirom na modulacijsku frekvenciju. Kašnjenje nastaje zbog proleta elektrona nizom dinoda i najčešće ne smeta. Frekvencijski ovisno gušenje je veći problem, a nastaje rasipanjem izlaznih sekundarnih elektrona po brzini zbog nejednako dugih prevaljenih putova i zbog nejednakih upadnih kutova na dinode. Takvo rasipanje vremena proleta može se smanjiti smanjenjem razmaka dinoda i višim naponima. Uobičajeni fotomultiplikatori sa 9...14 dinoda imaju vremena proleta elektrona $10 \dots 100$ ns koja se rasipaju $1 \dots 20$ ns. Zato je moguća demodulacija samo do frekvencije 100 MHz.

Prednost fotomultiplikacije prema elektronskom pojačanju je u izbjegavanju termičkog šuma nastalog na otpornicima pojačala. U fotomultiplikatorima fotostruja je pojačana prije dolaska na otpornik gdje daje napon signala.

Fotomultiplikator s ukrštenim električnim i magnetskim poljem. Oblikom i rasporedom dinoda te homogenim poljima moguće je znatno smanjiti rasipanje vremena proleta i povećati širinu pojasa demodulacije. Smanjenjem napona dinoda prema zajedničkoj protuelektrodi i istodobnim smanjenjem razmaka do nje stvara se homogeno električno polje (sl. 13b). U poprečnom smjeru postoji homogeno magnetsko polje. Svi fotoelektroni i sekundarni elektroni s malom brzinom izlaza putuju u tim ukrštenim poljima po identičnim cikloidama i imaju

ista vremena proleta između stupnjeva. Rasipanje vremena proleta nastaje samo još zbog različitih izlaznih brzina. Takvi fotomultiplikatori s ukrštenim poljima imaju strujno pojačanje veće od 10^5 puta i mogu demodulirati do frekvencije 6 GHz.

Fotodiode. U poluvodičkim fotodiodama primjenjuje se unutrašnji fotoefekt. Obično su izrađene kao tzv. PIN-diode (tip P, izolator I, tip N), npr. od silicija. Na dobro vodljivoj podlozi od kristala tipa N jest slabo vodljivi sloj N (ili čak samo vlastito vodljivo područje) u koji je udifundirano dobro vodljivo područje P⁺. To je područje tanko, na rubu ima kontakt, te omogućuje prodor svjetla po mogućnosti bez refleksije (sl. 14a). U normalnom radu fotodiode je vanjskim



Sl. 14. PIN-fotodiode, a planarna izvedba, b energetski pojasevi uz zaporni napon, c slojna (mesa) fotodiode s bočnim upadom svjetla, d P⁺N-fotodiode

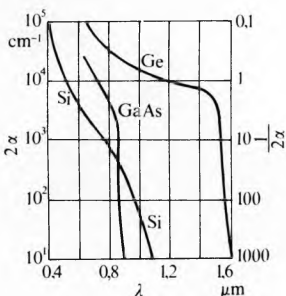
naponskim izvorom nepropusno polarizirana. Prema apsorbiranom svjetlu i dubini prodiranja fotoni proizvode u svim trima područjima (P⁺, I i N⁺) parove nosilaca naboja. Elektroni i šupljine nastali u području I brzo se kreću u jakom električnom polju, i to elektroni prema području N⁺, a šupljine prema području P⁺ (sl. 14b). Putovanjem jednog nosioca naboja s elementarnim nabojem *e* brzinom *v* kroz područje I pobudit će se u vanjskom krugu kroz otpornik R_L struja

$$i = \frac{ev}{w}, \tag{5}$$

gdje je *w* širina područja I. Upadom svjetla snage *P* sa *P*(*hf*) fotona u jedinici vremena, teći će ukupna struja prosječne vrijednosti

$$I = \frac{\eta e P}{hf}. \tag{6}$$

Svjetlosni se val u poluvodiču eksponencijalno prigušuje, pri čemu svaki apsorbirani foton proizvode par nosilaca. Koeficijent prigušenja α eksponencijalno opadajuće amplitude svjetlosnog vala različit je za pojedine poluvodiče, a veoma ovisi i o valnoj duljini (sl. 15). Intenzitet svjetla opada eksponencijalno sa 2α , pa je dubina prodiranja $1/(2\alpha)$. Zbog uskog energetskog procijepa germanijske fotodiode rade do valne duljine



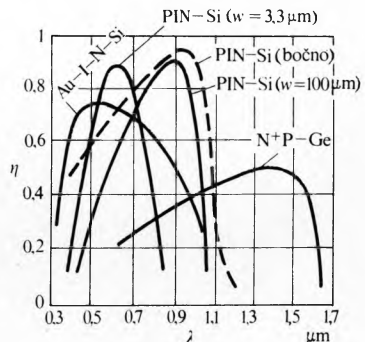
Sl. 15. Optička apsorpcija i dubina prodiranja prema valnoj duljini za tri tehnološki osnovna poluvodička materijala

1,6 μm , silicijske fotodiode do 1,1 μm , a galij-arsenidne fotodiode do 0,9 μm . Danas se za valne duljine do 1 μm pretežno upotrebljavaju silicijske fotodiode. Za silicij kao indirektni poluvodič povoljno je što koeficijent prigušenja ispod apsorpcijskog ruba postepeno raste s fotonskom energijom, pa je moguće optimalno projektiranje za određene valne duljine i vremena odziva.

Za veću kvantnu djelotvornost moraju područje I te susjedna difuzijska područja P⁺ odnosno N⁺ biti toliko široka da apsorbiraju mnogo svjetla. Time, međutim, fotodiode sporije reagira na brze promjene intenziteta svjetla, jer se nosioci naboja sporo kreću kroz ta područja. Za širokopoljansku demodulaciju ili prijem kratkih impulsa morala bi širina područja I biti što manja. Potrebno je dakle kompromisno rješenje. Poboljšana svojstva u tom pogledu ima PIN-fotodiode s bočnim upadom svjetlosnog vala u relativno usko područje I. Put svjetla u području I toliko je dug koliko je fotodiode široka, pa je kvantna djelotvornost velika. Područje I mora ipak biti toliko široko da se u njega može fokusirati svjetlosna zraka, te da se zraka uzduž područja I ne širi (sl. 14c). Zato je ova izvedba prikladna za Gaussov svjetlosni snop ili za spajanje s jednomodnim optičkim valovodom.

Varijantu PIN-fotodiode predstavlja P⁺N-fotodiode. Građena je poput PIN-diode u planarnoj izvedbi, samo što umjesto područja I ima usko (nekoliko mikrometara) i slabo dotirano područje N (sl. 14d). Na P⁺N-prijelazu stvara se u njoj zaporni sloj koji suglasno narinutom zapornom naponu seže u područje N, što bliže NN⁺-prijelazu. Kroz tanko područje P⁺ prodire svjetlo, biva u zapornom sloju apsorbirano, te proizvode nosioce naboja. Kako je takav zaporni sloj debeo samo nekoliko mikrometara, poluvodič mora veoma apsorbirati svjetlo. Zato je koeficijent apsorpcije $5 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1}$. Zbog toga su silicijske P⁺N-fotodiode osobito prikladne za valne duljine svjetla 0,45 \dots 0,6 μm , a germanijske za 0,95 \dots 1,5 μm .

Kvantna djelotvornost brzih fotodiode može s antirefleksivnim slojem doseći 90% (sl. 16, tabl. 2).



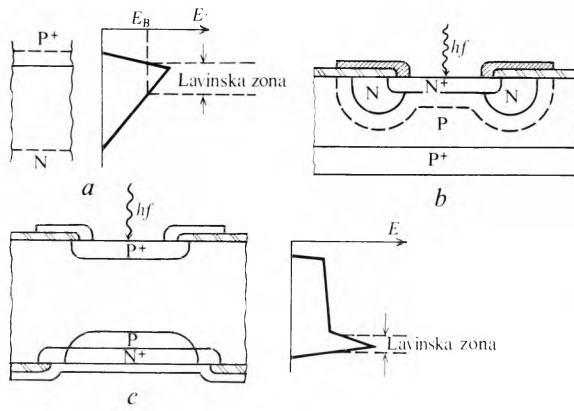
Sl. 16. Kvantna djelotvornost brzih fotodiode prema valnoj duljini

Tablica 2
BRZE FOTODIODE

Dioda	Valne duljine μm	Najveća kvantna djelotvornost %	Vrijeme odziva (uz opterećenje 50 Ω) ns	Kapacitet pF	Struja tame A	Svjetloosjetljiva površina mm ²
Si-PIN	0,5 \dots 0,7	≥ 90	0,1	1	10^{-9}	0,002
Si-PIN	0,4 \dots 1,1	90	3	3	$5 \cdot 10^{-8}$	2
Au-Si-1N	0,38 \dots 0,8	75	5	4	10^{-10}	0,2
Si-PN*	0,4 \dots 1,1	90	0,5	1,8	10^{-8}	
GeN ⁺ P	0,6 \dots 1,65	50	0,12	0,8	$2 \cdot 10^{-8}$	0,002

* Bočno osvjetljena

Lavinske fotodiode. Povećanjem zapornog napona na jednostavnoj PN-fotiodi di (sl. 17a) približava se šiljak trokutno raspodijeljenog električnog polja u zapornom sloju probnoj jakosti polja *E_B*. Fotoni stvoreni elektroni i šupljine proizvode ionizacijom sudarima nove parove nosilaca naboja. To umnažanje nosilaca naboja zbiva se u zapornom području



Sl. 17. Lavinska fotodiode. *a* detalj raspodjele polja u zapornom sloju s lavinskim područjem na P⁺N-prijelazu, *b* fotodiode sa N zaštitnim prstenom, *c* profil i raspodjela polja P⁺πN⁺-fotodiode

samo blizu šiljka električnog polja (u području pokraj PN-prijelaza), gdje nosioci naboja na svom putu u kristalnoj rešetki dobiju od električnog polja kinetičku energiju procijepa. Kako novo nastali nosioci naboja pridonose ionizaciji sudarima, prvobitno slaba fotostruja bit će lavinski umnožena. Time se osjetljivost fotodiode povisuje. Lavina se razvija postepeno, jer svaki nosilac naboja putuje kristalnom rešetkom u prosjeku kroz vrijeme τ' (vrijeme bez sudara) prije nego sudarom proizvede novi par nosilaca naboja. Vrlo kratki svjetlosni impuls konstantnog intenziteta uzrokovat će eksponencijalni porast lavinske struje s vremenskom konstantom tzv. lavinskog odziva

$$\tau_L = M_0 \tau', \quad (7)$$

gdje je M_0 faktor umnažanja ili faktor pojačanja za vrlo slabu fotostruju. Sinusna kolebanja fotostruje neće biti prenesena s punim faktorom pojačanja u vanjsku struju, već će zbog tromosti obrazovanja lavine oslabiti i kasniti. Iz toga slijedi granična frekvencija pojačanja izmjenične struje $\omega = 1/\tau_L$. Njom je određen umnožak faktora strujnog pojačanja M_0 i širine pojasa B lavinskog procesa

$$M_0 B = \frac{1}{2\pi\tau'}. \quad (8)$$

Planarna izvedba N⁺P-lavinske fotodiode sadrži zaštitni prsten u obliku dublje udifundiranog područja N na rubu N⁺P-prijelaza protiv lokalnih proboja, čime je smanjena na tom mjestu inače velika jakost polja (sl. 17b).

Postoji izvedba fotodiode sa tzv. N⁺PπP⁺-profilom. U slabu dotiranom području π polje je gotovo konstantno, a uz PN⁺-prijelaz raste u uski šiljak, gdje se zbiva lavinsko umnažanje. Kako ovdje područje N⁺ bočno prelazi preko područja P, to PN⁺-prijelaz ne dodiruje površinu, pa i jakost polja na njegovu rubu neće biti prevelika (sl. 17c).

Omjer signala i šuma, frekvencijski odziv i stabilnost lavinske fotodiode bolji su nego kod fotomultiplikatorske cijevi. Fotodiode je malih dimenzija, male snage, velike pouzdanosti i robusnosti pri jačem osvjetljavanju. Mane su joj šum i

manje pojačanje od fotomultiplikatora. Razlikuju se u električnim svojstvima (tabl. 3).

Tablica 3
LAVINSKE FOTODIODE

Dioda	Valna duljina μm	Probojni napon V	Najveće strujno pojačanje	Umnožak pojačanja i širine pojasa GHz	Svjetloosjetljiva površina mm ²	Kapacitet pF	Struja tame A
SiN ⁺ P	0,4...0,8	23	10 ⁴	100	0,002	0,8	5 · 10 ⁻¹¹
SiN ⁺ PπP ⁺	0,6...1,1	200	200	30	0,2	2	10 ⁻⁷
SiPN*	0,6...1,1	210	200	100		1	10 ⁻⁸
GeN ⁺ P	0,8...1,65	16	200	60	0,002	0,8	10 ⁻⁸

* Bočno osvjetljena

Fotootpornici. Otpor nekog poluvodiča ovisi o gustoći pokretnih nosilaca naboja. ApSORPCIJA svjetla povisuje tu gustoću i time smanjuje otpor. Uz stalan napon na poluvodiču struja će rasti s manjim otporom. Kolebanja svjetla bit će pretvorena u kolebanja struje. Fotoni mogu pobudom elektrona iz valentnog pojasa u vodljivi pojas proizvesti parove elektron-šupljina, a za to moraju imati barem energiju

$$hf = W_g, \quad (9)$$

gdje je W_g energetski razmak pojasa (energetski procijep). Ta unutrašnja fotovodljivost nastaje, dakle, samo zbog svjetla valnih duljina kraćih od

$$\lambda = \frac{hc}{W_g}. \quad (10)$$

Fotoni mogu, međutim, proizvesti elektrone i šupljine ioniziranjem donora odnosno akceptora kad poluvodički materijal nije čist, već sadrži primjese, dislokacije i defekte strukture. U tim tzv. vanjskim fotovodljivim materijalima postoje dodatne energetske razine unutar energetskog procijepa. Tu je dugovalna granica složenija zbog dodatnih energetskih razina u energetskom procijepu. Do njih će mnogi nosioci naboja biti termički dovedeni, pa tada djeluju na efekt vanjske fotovodljivosti. Zato se fotootpornici za zračenje velikih valnih duljina nekada moraju hladiti na nisku temperaturu.

Pojačanje fotovodlene struje prema fotostruji iznosi prema (7)

$$M = \frac{\tau}{\tau_t}, \quad (11)$$

gdje je τ vrijeme rekombinacije (prosječno vrijeme života elektrona u vodljivom pojasu), a τ_t vrijeme proleta nosioca kroz cijeli fotootpornik. Za veliko strujno pojačanje moralo bi trajanje života nosilaca biti što veće, a vrijeme proleta τ_t što kraće. Tako je kratkim fotootpornicima od poluvodiča dugog trajanja života nosilaca moguće postići velika strujna pojačanja, i više od 10⁵ puta. To vrijedi za vremenski stalno i sporo kolebljivo svjetlo. Brze promjene svjetla neće dati odmah primjerene promjene fotovodljive struje, nego će struja poprimiti određenu vrijednost tek nakon trajanja života τ nosilaca naboja.

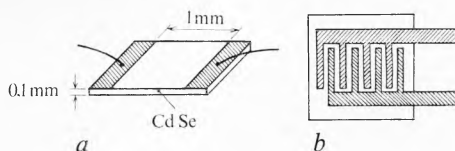
Tablica 4
FOTOOTPORNICI

Materijal	Radna temperatura K	Spektralno područje (iznad 50% najveće osjetljivosti) μm	Kvantna djelotvornost	Vrijeme odziva s	Otpor tame Ω	Moć praćenja cmHz ^{1/2} /W	Primjedba
PbS	295	0,9...2,8		10 ⁻⁴	10 ⁶	10 ¹¹	Unutrašnji fotovodiči
PbSe	295	0,5...4,2		2 · 10 ⁻⁶	2 · 10 ⁶	2 · 10 ¹⁰	
InSb	295	3,6...7,3	0,5...0,8	10 ⁻⁸	20	3 · 10 ⁸	
InSb	77	3,0...5,6	0,5...0,8	10 ⁻⁵	10 ⁴	10 ¹¹	
Ge: Au	77	3,0...9,0	0,2...0,3	3 · 10 ⁻⁸	4 · 10 ⁵	10 ¹⁰	Vanjski fotovodiči
Ge: Hg	27	6,0...14,0	0,6	10 ⁻⁷	10 ⁵	5 · 10 ¹⁰	
Ge: Cu	4,2	12,0...27,0	0,2...0,6	2 · 10 ⁻⁹	2 · 10 ⁴	4 · 10 ¹⁰	

Za sinusno promjenljiv svjetlosni signal opada zato faktor pojačanja s frekvencijom, pa umnožak strujnog pojačanja i širine pojasa ovisi samo o vremenu proleta i iznosi prema (8)

$$M_0 B = \frac{1}{2\pi\tau_t} \quad (12)$$

Uz brzinu nosilaca naboja u zasićenju od 10^5 m/s i duljinu fotootpornika (duljina puta nosilaca) veću od $10 \mu\text{m}$ taj je umnožak $M_0 B < 1$ GHz. Fotootpornici imaju, dakle, veliku osjetljivost samo za relativno niskofrekvencijska kolebanja svjetla. Za odziv na višim frekvencijama kolebanja svjetla moraju imati kratka vremena proleta, dakle moraju biti ekstremno kratki, a narinuti napon visok. Debljina fotootpornika mora biti takva da upadno svjetlo djelotvorno apsorbira i postigne veliku kvantnu djelotvornost. Unutrašnji fotovodiči općenito veoma apsorbiraju (linearni koeficijent apsorpcije $2\alpha \approx 10^5 \dots 10^8 \text{ m}^{-1}$), pa mogu biti vrlo tanki. Vanjski fotovodiči imaju slabiju apsorpciju ($2\alpha \approx 10^2 \dots 10^3 \text{ m}^{-1}$), pa moraju biti deblji. Fotootpornici se izrađuju s jednostavnim, paralelnim elektrodama, odnosno s interdigitalnim elektrodama, između kojih nastaju vrlo kratki i široki strujni putovi za veliku osjetljivost (sl. 18).



Sl. 18. Fotootpornici: a sa dvije paralelne elektrode, b s interdigitalnim elektrodama

Unutrašnji fotovodiči imaju i pri sobnoj temperaturi dovoljnu osjetljivost, iako se dubokim hlađenjem višestruko povećava moć praćenja (brzina odziva npr. za InSb uz 77 K čak 300 puta). Time, međutim, isto tako raste vrijeme odziva. Vanjski fotovodiči imaju samo kod dubokog hlađenja dovoljnu moć praćenja (tabl. 4).

LIT.: Joint Conference on Lasers and Opto-electronics. 25.—28. 3. 1969, IERE, London. — W. K. Pratt, Laser Communication Systems. J. Wiley, New York 1969. — Laser 75, Optoelectronics, Munich 24/27, June 1975. Conference Proceedings, IPC Science and Technology Press, Guildford. — H. G. Unger, Optische Nachrichtentechnik. Elitera, Berlin 1976. — S. E. Miller, A. G. Chynoweth, Optical Fiber Telecommunications. Academic Press, New York 1979. — G. Winstel, C. Weyrich, Optoelektronik I. Springer-Verlag, Berlin 1980.

B. Kviz

ORGANIZACIJA PROIZVODNJE, znanstveno područje u oblasti tehnike koje se bavi istraživanjem, projektiranjem i usavršavanjem proizvodnog sustava (statički dio proizvodnje), te istraživanjem, projektiranjem, usavršavanjem, pripremanjem, koordiniranjem i praćenjem odvijanja tehnološkog i proizvodnog procesa (dinamički dio proizvodnje) da bi se uz optimalne troškove dobio proizvod u utvrđenom roku i u traženoj količini i kvaliteti. Pri tom se uzimaju u obzir čovjek i njegove mogućnosti, raspoloživi materijal i sredstva rada, te njihovo uzajamno djelovanje. Rješavajući tehničke probleme, organizacija proizvodnje dio je šire interdisciplinarne znanstvene oblasti koja obuhvaća i ekonomske i sociološke probleme, a naziva se *organizacija rada*.

Potreba za organiziranim načinom rada postojala je već u starih naroda. Da bi se radovi izvodili organizirano, babilonski kralj Hamurabi (—1729— —1686) uveo je planiranje rada i kontrolu proizvodnje, proračunavanje potrebnog broja radnika i radnih dana, te opis rada i zapisivanje podataka o potrebnom vremenu. Atenski vojskovođa i povjesničar Ksenofont (—430— —354) zastupa specijalizaciju u radu i podjelu rada na operacije. Leonardo da Vinci (1452—1519) utvrđuje vrijeme po zahvatima za prebacivanje zemlje lopatom, određuje predah u radu i piše o različitoj brzini rada radnika. Francuski inženjer J. R. Perronet (1708—1794) prvi u industriji snima vrijeme i raščlanjuje proces proizvodnje igala na 18 operacija. Francuski maršal i vojni inženjer S. Vauban (1633—1707) određuje potrebno vrijeme za radove,

te raspored rada i odmora u toku ljetnog i zimskog razdoblja. Engleski matematičar Ch. Babbage (1792—1871) analizira proces (1832), snima vrijeme kronometrom, postavlja principe istraživanja i razvoja, proučava smještaj tvornice s obzirom na sirovinu. Sve su to bili pojedinačni radovi, a potreba za znanstvenim pristupom i sustavnim rješavanjem problema organizacije proizvodnje javlja se u doba širenja industrijske proizvodnje. Prvi je to uočio strojarski inženjer F. W. Taylor (1856—1915) koji je svojim djelima *Shop management* i *The principles of scientific management* postavio osnovne principe u organiziranju proizvodnje, koji osiguravaju djelotvorniju proizvodnju. Taylor zastupa funkcionalni oblik organizacijske strukture. I dok je Taylor stavljao u težište svojih radova studij vremena, dotle F. B. Gilbreth (1868—1924) stavlja u prvi plan studij pokreta čovjeka koji obavlja neki posao. Uspješna suradnja njegove supruge L. M. Gilbreth (1878—1972), koja je bila psiholog, dovodi do toga da se u studij pokreta uključuju psihofiziologija rada. Američki inženjer H. L. Gantt (1861—1919) proučava elemente rada i sustav stimulacije, a razvio je 1901. grafičku metodu planiranja i praćenja proizvodnje (gantogrami). Američki inženjer Ch. Bedaux (1887—1944) razvio je novi sustav određivanja vremena rada u kojemu uzima u obzir i predah u radu. Rad tih pionira na području organizacije proizvodnje (u Americi nazvano *Industrial engineering*, za razliku od naziva *Management*) poticalo je i mnogo pomoglo Udruženje američkih strojarskih inženjera (American Society of Mechanical Engineers, ASME) koje je 1912. god. promoviralo *industrial engineering* kao znanstveno područje.

Francuski rudarski inženjer H. Fayol (1841—1925) u svom djelu *Administration industrielle et générale* izlaže svoju filozofiju i pristup organiziranju, ali ne samo proizvodnje već i cjelokupnog poslovanja u industriji, zastupajući linijski oblik organizacijske strukture.

Organizacija proizvodnje počela se intenzivnije razvijati na znanstvenim temeljima u metaloprerađivačkoj industriji, i to od inženjera koji su se, radi uspješnijeg obavljanja rada, morali baviti problemima neposredne proizvodnje. Razvijajući principe i metode prema kojima se proizvodnja može dobro organizirati, oni su postavili temelje i za djelotvorno organiziranje cjelokupnog poslovanja poduzeća, a time su omogućili da se razvije znanstveno područje organizacije rada.

I za našu je zemlju karakteristično da su inženjeri započeli i razvili područje organizacije proizvodnje i organizacije rada: P. Jušić, F. Podbrežnik, M. Pilar, D. Domainko, A. Đurašević, i poslije njih mnogi drugi.

Za vrijeme drugoga svjetskog rata u Engleskoj se, radi djelotvornijeg rješavanja ratnih problema, razvilo područje nazvano *Operativno istraživanje*, u kojemu se traži optimalno rješenje problema primjenjujući matematičko-statističke metode i teoriju vjerojatnosti. Karakteristika je operativnog istraživanja znanstveni pristup istraživanju i traženju optimuma, uzimajući u obzir sve utjecajne čimbenike i njihovu međusobnu zavisnost. Tako se nastoji izraditi model cjelovitog problema koji treba omogućiti da se odredi optimum ovisan o cilju koji se želi postići.

U operativnom je istraživanju pristup rješavanju problema drugačiji od klasičnog, tj. uočava se postojanje više čimbenika koji utječu na rješavanje problema kao i njihovo međusobno djelovanje (interakcija), uočava se djelovanje slučajaja, stvara se ekipa raznorodnih stručnjaka te se uvodi pojam optimalnoga i suboptimalnoga.

Metode operativnog istraživanja brzo su se prenijele u SAD gdje su se odmah poslije rata počele primjenjivati za rješavanje problema u organizaciji industrijske proizvodnje. Te su se metode (linearno programiranje, teorija repova, teorija igara, tehnike mrežnog planiranja i druge) vrlo brzo razvijale zahvaljujući i razvoju elektroničkih računskih strojeva, pa su se počele vrlo uspješno primjenjivati i u drugim područjima.

Kao što je operativno istraživanje pomoglo da se problemi u organiziranju proizvodnje bolje i djelotvornije rješavaju, tako su i psihofiziologija rada, studij međuljudskih odnosa te u posljednje vrijeme ergonomija i biomehanika mnogo pridonijeli da se problemi organizacije rada ne promatraju samo tehnički, već i psihofiziološki i sociološki. Shvaćeno je da je proizvodnja sustav u kojemu zajednički djeluju čovjek, sredstva i radna okolina, pa je zato bitno da se njihovi međusobni odnosi tako usklade da je osigurana humanizacija rada.

Prema poslovima, zadacima i cilju organizacija proizvodnje obuhvaća projektiranje proizvodnog sustava, projektiranje tehnološkog i proizvodnog procesa, studij rada, planiranje i praćenje proizvodnje, kontrolu kvalitete, rukovanje materijalom i održavanje. Svaka je od tih disciplina u industrijskoj proizvodnji u principu poseban odjel ili stručna služba.

PROJEKTIRANJE PROIZVODNOG SUSTAVA

Zadatak je projektiranja proizvodnog sustava istraživati, projektirati, pratiti i usavršavati proizvodni sustav, nastojeći uvijek postići optimalni rezultat.

Svaka je proizvodnja složeni sustav u kojemu se odvijaju tehnološki i proizvodni procesi. Da bi se ti procesi mogli u proizvodnom sustavu tako odvijati da se rezultat proizvodnje dobije uz optimalne uvjete, potrebno je postaviti takvu organizacijsku strukturu (statički dio u organizaciji proizvodnje) koja će omogućiti neometano odvijanje procesa, pratiti njeno djelovanje i djelotvornost te je usavršavati. To zahtijeva jednoznačno određivanje svih utjecajnih faktora koji sudjeluju u proizvodnji, pridržavajući se svih prihvaćenih organizacijskih principa, jer *organizirati znači povezivati sve podsustave u jedan skladni sustav*. Pri tom se uvažavaju sljedeće polazne i temeljne postavke: