

CAPITOLUL 2

TRADUCTOARE DE RADIAȚII OPTICE

2.1 Structura generală a unui traductor optoelectronic

Diferența între un traductor electronic și un traductor optoelectronic este la senzor, care în acest caz este optoelectronic. Schema bloc a unui senzor optoelectronic este prezentată în fig. 2.1.

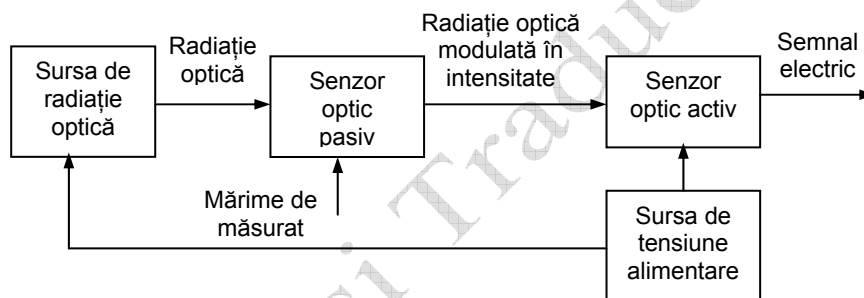


Fig. 2.1

Sursa de radiație optică poate fi de orice tip: coerentă sau necoerentă, de bandă largă sau de bandă îngustă și putere optică mare sau mică, în funcție de mediul de propagare ales, de distanța până la senzorul optic pasiv, tipul senzorului optic pasiv, tipul mărimii de măsurat și aplicație. Mărimea de măsurat determină variația unuia din parametrii unde de radiație optică în senzorul optic pasiv: intensitate, fază, polarizare, lungime de undă sau frecvență de modulație.

Senzorul optic activ (denumit și detector optic sau fotodetector) convertește variația intensității unde de radiație optică de la ieșirea senzorului optic pasiv în variația unui semnal electric: tensiune, curent, sarcină sau rezistență.

În fig. 2.2 este reprezentată schema bloc a senzorului optoelectronic cu variația polarizării radiației optice.

În acest caz, sursa de radiație optică trebuie să fie monocromatică și să permită o definiție corectă a stării de polarizare. Blocul polarizor este un element optic care permite obținerea unei polarizări bine definite. Conține un polarizor și mai multe lame ce permit un defazaj fix sau continuu variabil între două polarizări

ortogonale. Senzorul optic pasiv este un mediu a cărui birefrință depinde de mărimea de măsurat. Conversia se face prin efect elasto-optic, electro-optic sau magneto-optic.

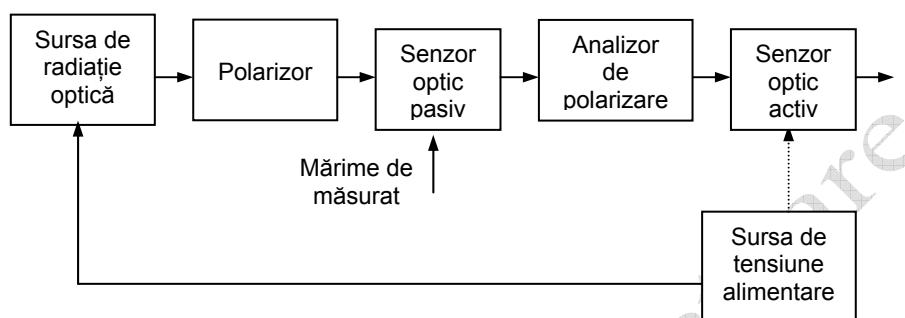


Fig. 2.2

Blocul analizor de polarizare permite analiza stării de polarizare a unei de radiație optică de la ieșirea modulatorului optic și se complică dacă se măsoară toți parametrii care descriu starea de polarizare. În cele mai multe cazuri, este suficientă măsurarea unuia sau a doi parametri cu ajutorul unor elemente fixe, ceilalți parametri fiind cunoscuți. Acest lucru este posibil dacă se cunoaște evoluția birefrinței sensorului optic pasiv în funcție de variația mărimii de măsurat. Analizorul de polarizare transformă variația polarizării în variații de intensitate.

Rolul sensorului optic pasiv este acela al unui modulator optic, însă transformă și variația parametrului modulat în variație de intensitate optică.

2.2 Surse de radiații optice

2.2.1 Surse de radiații optice necoerente

Principalele surse de radiații optice necoerente sunt sursele cu incandescență, lămpile cu descărcare și diodele electroluminiscente (LED).

a) Sursele cu incandescență sunt lămpile cu halogen iod sau brom și filament de tungsten, care produc radiație optică stabilă, strălucitoare, în domeniul vizibil și infraroșu. Radiația optică se emite datorită excitării termice a atomilor sau moleculelor sursei. Spectrul radiației este continuu și aproximează un corp negru. Distribuția spectrală și fluxul total radiat depind de temperatură, suprafața de incidență și emisivitate.

Sursele cu incandescență produc o temperatură de aproximativ 3000 K iar emisivitatea este de 0,4 în domeniul vizibil. În aceste lămpi, halogenul înlătură tungstenul depus în interiorul balonului de cuarț și îl reîntoarce la filamentul cald, lăsând interiorul balonului lămpii curat și crescând durata de viață. Acest proces poartă numele de *ciclu halogen*. Energia radiată are un maxim pentru lungimea de undă de aproximativ 1 μm .

Avantaje: energie radiată mare, spectru de emisie întins, cost scăzut.

Dezavantaje: fragilitate mare, durată scurtă de viață (4000 ore), radiație puțină în domeniul vizibil, inerție termică mare, absența directivității.

b) Lămpile cu descărcare sunt de două tipuri:

- cu descărcare în gaz la presiune scăzută și
- cu descărcare în gaz la presiune mare.

În lămpile cu descărcare în gaz la presiune scăzută, datorită ionizării atomilor sau moleculelor gazului în urma descărcării bruște a unui condensator apare un curent electric. Electronii din atomii de gaz devin excitați la nivele energetice superioare și cad pe nivele inferioare emițând radiație optică, sub forma unor linii spectrale înguste, fixe, cu radiație mică.

Lămpile cu arc cu densitate mare de curent, cu descărcare în gaz cu presiune mare sunt sursele convenționale de radiație optică cu strălucirea cea mai mare. Atomii sau moleculele de gaz sunt puternic excitați. Rezultatul este obținerea plasmei în tot volumul interior. Plasma fierbinte emite ca o sursă incandescentă, în timp ce atomii ionizați emit linii lățite. Distribuția spectrală a radiației este o combinație de spectru continuu și spectru de linii. Cele mai uzuale surse de acest tip sunt lămpile cu arc scurt cu xenon sau vapori de mercur. Se pot folosi și alte gaze ca argon, kripton, neon, deuteriu, hidrogen, vapori de sodiu, vapori de zirconiu sau amestecuri de gaze. Carcasa se realizează din material transparent, de obicei safir, datorită proprietăților de transfer de căldură foarte bune. Dezavantajul safirului este prelucrarea dificilă. Forma optică este cilindrică, specifică aplicației, cu doi electrozi la extremități. Pentru a extinde gama spectrală a radiației emise se folosesc ferestre de fluorură de magneziu, spectrul radiației ajungând de la 110 nm la IR apropiat.

Lămpile cu arc cu descărcare în gaz cu presiune mare se folosesc în undă continuă sau în impulsuri de putere mare, curenții fiind 1... 700 A. cu impulsuri de 1 .. 10 ms.

Aplicațiile lor sunt: ca surse de pompare pentru laserele optice cu cristale solide și în aplicații industriale, de măsurare, comerciale, etc.

c) Diode electroluminescente

Caracteristicile diodelor electroluminescente

Radiația optică emisă de o diodă electroluminescentă (LED) nu este riguros monocromatică. Lățimea tipică de emisie este de aproximativ 40 nm (măsurată la jumătatea înălțimii vârfului de radiație spectrală). La creșterea temperaturii,

spectrul se translează spre lungimi de undă mai mari deoarece lățimea benzii energetice interzise W_g variază cu temperatura.

Diodele electroluminescente cele mai eficiente se bazează pe structuri cu heterojonctiune dublă: cu emisie de suprafață și cu emisie laterală. Dioda cu emisie laterală are caracteristică de radiație cu directivitate mai bună decât dioda cu emisie de suprafață, astfel eficiența de cuplare la fibra optică este mai bună.

Schema echivalentă electrică a unei diode electroluminescente este în fig. 2.3.

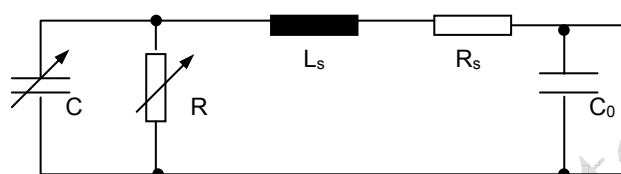


Fig. 2.3

Elementele neliniare R și C reprezintă jonctiunea și variază cu tensiunea de polarizare directă. Elementele L_s , R_s și C_0 depind de conexiunile la capsulă și la porțiunile semiconductoare din afara jonctiunii. Dacă $R_s \ll R$, caracteristica statică a diodei electroluminescente seamănă cu a diodei semiconductoare obișnuite. Capacitatea C are valoarea de aproximativ 1 nF pentru un curent direct de 100 mA.

Modulația puterii radiației optice emise de un LED se face acționând asupra curentului direct, într-o bandă de frecvență de 0 Hz...200 MHz.

Avantajele LED-urilor sunt următoarele: consum electric mediu, liniaritate bună între puterea radiată și curentul direct, bandă de trecere mare, rezistență bună la șocuri și vibrații, fiabilitate foarte bună, cuplare ușoară la fibra optică, compatibilitate cu circuitele de comandă logice.

Dezavantajele principale ale LED-urilor sunt puterea optică scăzută (< 100 mW) și dependența de temperatură a puterii optice emise.

Diode electroluminescente cu heterostructură dublă

LED-urile cu heterostructură dublă pentru puteri optice mari (>100 mW) au o configurație apropiată de a unei diode laser, cu strat activ și o față reflectoare, amplificarea radiației făcându-se în urma unei singure treceri prin dispozitiv. Aceste LED-uri se mai numesc și *diode superluminescente* (SLED).

Structura tipică a unei SLED verde este reprezentată în fig 2.4.

ZnSe este transparent pentru radiația verde a stratului activ ZnTeSe, astfel puterea optică radiată fiind mai mare. La trecerea unui curent direct de 10 mA, se obțin 1,3 mW putere optică, cu lungimea de undă la vârful radiației spectrale de 512 nm.

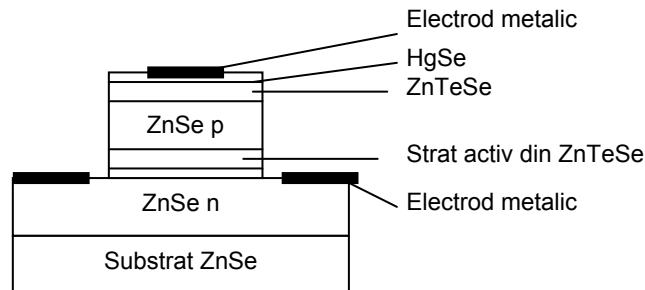


Fig. 2.4

Materialele folosite nu trebuie să aibă calități foarte bune, de exemplu LED-urile pe bază de azot conțin $10^9 \dots 10^{11}$ dislocații/cm² în timp ce diodele laser se realizează din materiale cu mai puțin de 10^6 dislocații/cm².

Dislocațiile sunt defecte liniare create de perturbații în periodicitatea rețelei cristaline. Densitatea dislocațiilor influențează direct fiabilitatea dispozitivului. S-au obținut deja cristale XnSe cu densitatea de 10^3 dislocații/cm², existând certitudinea obținerii unor dispozitive cu performanțe superioare.

LED-uri cu cavitate rezonantă (RCLED)

Structura tipică a unui RCLED este dată în fig. 2.5.

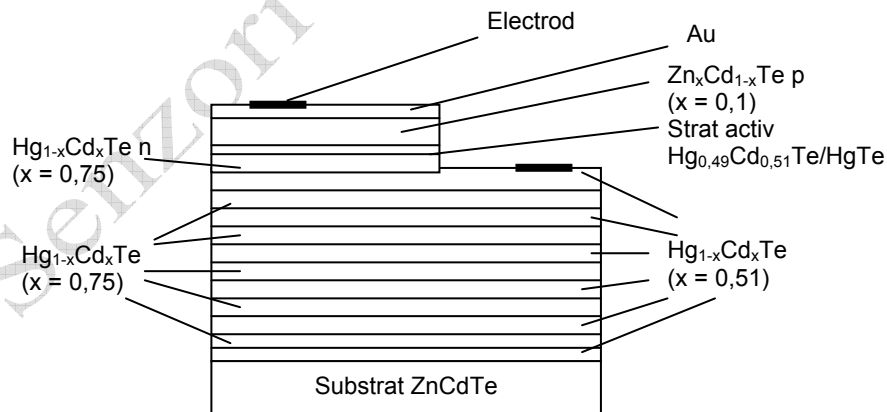


Fig. 2.5

Există LED-uri cu cavitate rezonantă pentru lungimi de undă de 3...5 μm . LED-urile cu cavitate rezonantă (RCLED) sunt mai eficiente decât cele simple deoarece folosesc tehnologii similare cu ale diodelor laser cu cavitate verticală și emisie de suprafață (VCSEL). RCLED sunt mai ușor de realizat decât VCSEL, necesitând un număr mic de perioade Bragg. Reflectoarele Bragg se fac din aliaje HgCdTe, deoarece au un contrast mare al indicelui de refracție, de până la 20% pentru $\lambda = 1 \dots 10 \mu\text{m}$.

RCLED se obțin prin creștere epitaxială moleculară pe substrat ZnCdTe. Oglinda de jos este un reflector Bragg distribuit. Cavitatea în $\lambda/2$ este realizată din același material, având un rezervor de 50 nm din pseudoaliaj. Ultimele trei perioade ale oglinzii de jos și primii 100 nm ai cavității sunt dopați cu In n. La capătul cavității există un strat de 100 nm de ZnCdTe tip p dopat cu N. Oglinda de sus este realizată dintr-un strat de Au. Reflectorul Bragg cu perioada de 10,5 are reflectivitatea maximă de 86 % măsurată la $\lambda = 3,2 \mu\text{m}$.

Când dispozitivul este polarizat direct, emisia radiației se face la lungimea de undă de rezonanță a cavității de 3,19 μm . Lățimea liniei de emisie depinde doar de lățimea cavității rezonante. Astfel, s-a îmbunătățit directivitatea, obținându-se un unghi sub 50° la jumătatea înălțimii vârfului de radiație optică și eficiență cuantică externă de $(0,2 \dots 1,7) \cdot 10^{-3}$.

LED-uri din polimer cu radiație optică polarizată

Constau dintr-un strat de politiofen întins între doi electrozi subțiri, pe un substrat de sticlă. Macromoleculele din polimer sunt orientate aleatoriu și radiația emisă este nepolarizată. Lanțurile însă pot fi întinse și aliniat prin întindere mecanică. Tranzițiile dipolilor sunt orientate de-a lungul direcției dominante a lanțurilor iar electroluminiscența este paralelă cu această orientare. Emisia unui strat întins va fi astfel polarizată.

Raportul dintre radiația optică emisă perpendicular pe direcția de orientare și radiația emisă paralel este de 2,4 ... 3,1, în funcție de material. Materialul folosit este polinom tip PTOPT. Radiația optică emisă este în gama roșu-portocaliu pentru un curent direct de 3 mA.

Eficiența cuantică este aproximativ 0,01 % la tensiunea directă de 2 V și $< 0,1$ % la 4 V.

2.2.2 Surse de radiații optice coerente

Sursele de radiații optice coerente sunt denumite uzual *surse laser* și au următoarele proprietăți:

- Monocromaticitate mare, echivalentă cu o lățime spectrală îngustă și o mare coerență temporală;

- divergență mică,
- dimensiune mică a fascicolului,
- coerență spațială mare sau focalizare limitată de difracție;
- putere mare: în undă continuă (mW ... MW), impulsuri (GW ... EW);
- gamă mare de acord, existând surse laser pentru aproape tot spectrul optic;
- impulsuri laser cu lățimi foarte înguste.

2.2.2.1 Diode laser

a. Diode laser cu cavitate optică rezonantă Fabry - Perot

Sunt realizate cu structura de tip heterojoncțiune dublă. Stratul activ este încadrat între două straturi cu benzi interzise mai mari (pentru captivitate electrică) și indici de refracție mai mici (pentru captivitate optică). Crește astfel eficiența, putându-se obține funcționarea în undă continuă. Structura este crescută pe GaAs multistrat dopat.

Factorii care determină eficiența emisiei radiației laser sunt banda interzisă, indicele de refracție, constanta rețelei cristaline, structura dispozitivului și calitatea materialelor.

Lungimea de undă a radiației laser depinde de grosimea benzii interzise a stratului activ. GaAs pur are energia benzii interzise de 1,35 eV la temperatura camerei, corespunzând unei lungimi de undă de 905 nm. Adăugând Al în structura GaAs, crește energia benzii interzise, mutând emisia laser spre lungimi de undă mai mici. Pentru concentrații variabile de Al, în structura GaAlAs se obțin emisii până 620nm. Schimbarea structurii nivelelor energetice reduce eficiența emisiei laser la lungimi de undă mai mici, limitând durata de viață. Lungimile de coerență ale diodelor laser multimod sunt de câțiva mm.

Constructiv, diodele laser nu diferă de diodele LED decât prin calitatea materialelor și contactele metalice necesare pentru asigurarea densităților ridicate a purtătorilor de sarcină injectați. Cel mai adesea aceste contacte sunt sub formă de bandă cu lățimea de câțiva micrometri, situată deasupra zonei active, diodele laser având denumirea de diode laser cu geometrie de bandă.

Diodele laser cu heterojoncțiune dublă cu geometrie de bandă, se realizează în două variante:

- cu ghidare prin câștig și
- cu ghidare prin indicii de refracție.

În cazul **diodei laser cu heterojoncțiune dublă cu geometrie de bandă, cu ghidare prin câștig**, lățimea benzii determină lățimea zonei active, doar regiunea de sub bandă, unde captivitatea curentului este suficientă, prezintă câștig optic. Radiația laser emisă este ghidată transversal. Există diverse variante de structuri cu

ghidaj prin câștig, realizate în sisteme GaAs-GaAlAs și InP-GaInAsP: cu localizarea curentului prin izolanți, cu localizarea curentului cu diode Schottky, etc.

Diodele laser cu heterojuncțiune dublă, cu geometrie de bandă, cu ghidare prin indicii de refracție folosesc o structură de ghid de undă pentru a forța optic radiația în regiunea îngustă a stratului activ. S-au dezvoltat mai multe heterostructuri de acest tip: îngropată, îngropată crescătoare, îngropată plană bicanal, cu ghid de undă crestat, cu substrat plan canelat, etc

Aceste diode au eficiență și coerență foarte bună și fascicul de radiație laser emis mai îngust, dar au puteri mai mici decât diodele laser cu ghidare prin câștig.

Suprafețe de diode laser

Pentru obținerea unor puteri optice emise mari (> 100 mW), diodele laser se împerechează formând suprafețe de diode laser, conectate în serie și în paralel.

Se pot obține suprafețe de diode laser cu ghidare prin câștig cu faza blocată la care separarea între benzile active este doar $10\ \mu\text{m}$. Apropierea între benzi facilitează cuplarea optică, sincronizarea sau blocarea fazelor fasciculelor de radiație optică învecinate, simplificând sistemul optic. S-a putut obține blocarea fazei în suprafețele cu ghidare prin indice de refracție cât și în suprafețe ghidate invers (*anti-guided*). La suprafețele *anti-guided* indicii de refracție al benzii active este mai mic decât al materialului înconjurător, permițând astfel interferența optică. Dacă separarea între benzi este egală cu un număr impar de jumătăți de lungimi de undă, radiația optică devine cuplată rezonant. Aceste suprafețe cu ghid de undă rezonant permit obținerea unor nivele de putere de $0,5$ W în undă continuă și $2,1$ W în impulsuri.

Suprafețele cu diode laser cu puterea cea mai mare sunt barele monolitice cu zone de benzi active de 1 cm, aranjate în linie. Puterea este de 100 W în undă continuă.

Structuri de diode laser cu rezervor cuantic

Dezvoltarea tehnicilor de fabricație avansate ale semiconductoarelor, ca epitaxia cu fascicul molecular și depunerea metalică în faza de vapori chimici organici, a permis obținerea unor structuri foarte subțiri (prin depunere metalică în fază de vapori s-au crescut straturi cu grosimi de câțiva atomi).

Dacă grosimea stratului activ într-o heterostructură dublă ajunge sub 50 nm, mișcarea electronilor și golurilor este limitată. Se schimbă astfel energia globală și momentul purtătorilor de sarcină în material, modificând proprietățile optice. Ca efect, banda de conducție și banda de valență se divid în subbenzi discrete, cu distribuția energetică dependentă de grosimea materialului, deci se poate modifica lungimea de undă a radiației laser emise variind grosimea stratului activ. O altă consecință este schimbarea probabilității tranziției între o subbandă de conducție și o subbandă de valență, rezultând inversiunea de populație.

Diode laser cu o singură heterostructură dublă cu un strat activ cu grosime sub 50 nm este denumită rezervor cuantic unic (SQW – *single quantum well*). Diodele laser SQW au câștiguri ridicate și curenți de prag mult mai mici decât dispozitivele convenționale, iar radiația optică este mai coerentă.

Pentru amplificări mai mari, straturile cu heterostructură cu un singur rezervor cuantic pot fi stivuite, obținându-se astfel structura de rezervor cuantic multiplu: MQW. Diodele laser MQW au performanțe superioare, combinând captivitatea foarte strânsă a purtătorilor, dată de structura SQW și captivitatea optică superioară a straturilor multiple.

La fel ca structurile cu heterostructură dublă, structurile cu rezervor cuantic pot fi realizate în ambele variante, cu ghidare prin câștig sau cu ghidare prin indice de refracție. Realizările în domeniul structurilor cu rezervor cuantic includ structuri cu fire cuantice, puncte cuantice și cascadă cuantică. Diodele laser cu structură tip cascadă cuantică folosesc tranzițiile electronice între subbenzi ale benzii de conducție pentru a crea radiație optică în domeniile spectrale de la infraroșu mijlociu până la infraroșu îndepărtat. Avantajele diodelor laser cu structuri cu rezervor cuantic sunt curentul mic de prag, sensibilitate scăzută cu temperatura, comportare dinamică excelentă, puteri optice de câțiva mW în undă continuă.

b) Diode laser cu alte cavități rezonante

În afară de cavitatea optică clasică Fabry - Perot s-au realizat și cavități optice pentru cuplarea radiației optice de la ieșirea diodelor laser, pentru aplicații care necesită fascicul cu înaltă coerență și bandă de frecvență îngustă. Aceste cavități optice pot fi folosite în structuri specifice de diode laser sau pot fi adăugate la structurile existente Fabry - Perot. Cea mai simplă modalitate este o rețea de difracție cu oglindă externă posterioară.

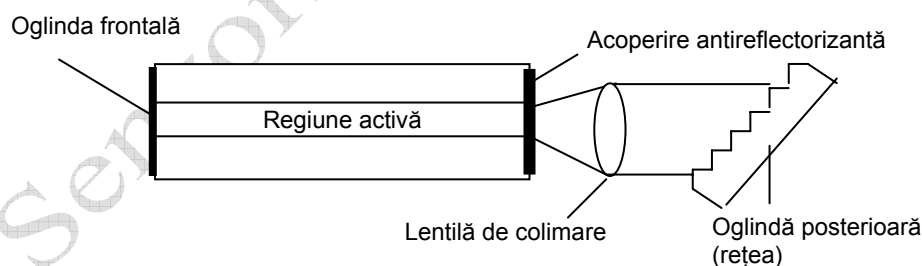


Fig. 2.6

Două alte variante de cavități de diode laser mai importante care folosesc rețele de difracție sunt cavitatea cu reacție distribuită (DFB), fig. 2.7 și cavitatea cu reflexie distribuită Bragg (DBR), fig 2.8.

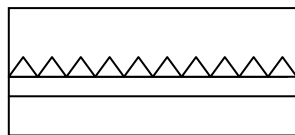


Fig. 2.7

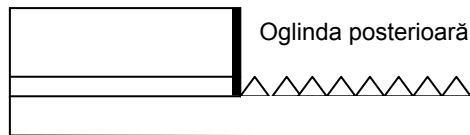


Fig. 2.8

La dioda laser cu cavitate distribuită, o rețea de difracție plasată pe suprafața stratului activ realizează reacția cu reflexie înapoi (difracțată) doar pentru o anumită lungime de undă. La toate celelalte lungimi de undă se produc pierderi mai mari în cavitate, neatingându-se pragul de emisie laser.

Dioda laser cu reflexie distribuită Bragg, fig. 2.8, are rețeaua poziționată în prelungirea stratului activ și necesită un strat cu ghidare prin indice de refracție pentru a face legătura optică la regiunea de câștig a cavității optice.

Diode laser cu emisie prin suprafață

Toate structurile de diode laser descrise până acum emit radiația optică lateral. Există însă și o altă clasă de diode laser, la care emisia se face prin suprafață. Pentru acestea, cavitatea optică are două variante:

- cavitate optică plană (PCSEL – *planar cavity surface emitting laser*) și
- cavitate optică verticală (VCSEL – *vertical cavity surface emitting laser*).

Ambele variante formează suprafețe bidimensionale de diode laser.

Dioda laser cu emisie de suprafață cu cavitate optică plană constă dintr-o diodă laser cu emisie laterală și două structuri optice (frontală și posterioară) care redirecționează fascicolul laser în sus, perpendicular pe suprafața structurii. Fascicolul emis are formă eliptică.

Dioda laser cu emisie de suprafață cu cavitate optică verticală este realizată pe straturi de GaAs. Regiunea activă și oglinzile superioară și inferioară sunt realizate sub formă de straturi depuse succesiv, stivuite vertical. La punerea sub tensiune, fascicolul emis este circular, facilitând cuplarea cu eficiență mare la fibre optice. Deoarece depunerile pentru contactele p și n sunt pe aceeași față a substratului, VCSEL pot fi testate în timpul fabricației, înainte de a fi tăiate.

2.2.2.2 Lasere cu stare solidă

Laserele cu stare solidă au mediul laser alcătuit din dopanți (ioni de pământuri rare sau metale de tranziție) care emit radiație laser, implantați în matrici

transparente din materiale solide izolatoare, cristaline sau sticlă, denumite gazdă. Inversiunea de populație se obține prin pompare cu lămpi cu descărcare sau cu diode laser.

În materialele laserelor solide, atomii responsabili de generarea radiației laser sunt mai întâi excitați la nivelele energetice superioare prin absorbția fotonilor: felul în care acești atomi se relaxează din stările excitate determină calitatea și cantitatea radiației laser emise.

Laserele cu stare solidă au putere radiată mare, dând la ieșire impulsuri laser foarte scurte sau radiații cu lungimea de undă acordabilă în domeniul vizibil și infraroșu apropiat.

Există mai multe tipuri de lasere cu stare solidă:

- lasere solide cu neodimiu, la care mediul activ este neodimiu triplu ionizat ca material dopant, într-o matrice cristalină sau sticlă. Este foarte versatil, putându-se dubla, tripla sau cvadrupla lungimea de undă prin generarea de armonici. Dă la ieșire impulsuri scurte prin comutarea factorului de calitate sau blocarea modului.

- lasere solide cu rubin, realizate din bastonașe de rubin crescute pe safir dopat cu crom. Emite raze laser în impulsuri de ordinul ms, dar necesită răcire.

- lasere solide vibronice acordabile. Lungimea de undă acordabilă se obține la funcționarea pe tranziții vibronice în care mediul activ schimbă și stările electronice și cele de vibrații. Pot funcționa în unda continuă sau în impulsuri. Laserul vibronic cu alexandrit are benzile de absorbție vizibile în regiunile spectrale albastru și roșu. Ca surse, folosește pompe cu xenon sau diode laser cu emisie roșie.

- lasere solide cu holmiu, tului sau erbiu;

- lasere solide cu fibre optice.

Lasere solide și amplificatoare cu fibre optice

Amplificatoarele cu fibre optice amplifică direct semnalul optic, eliminând conversia inițială în semnal electric, amplificarea electronică și apoi reconversia în semnal optic. Procesul este ilustrat în fig. 2.9.

Laserul cu fibră optică este realizat dintr-o fibră optică unimod, tipic din sticlă siliconică dopată cu un ion ce emite radiație laser cu lungimea de undă dorită, λ_1 . Această fibră optică primește printr-un capăt radiația optică de nivel scăzut cu lungimea de undă λ_1 și radiația optică puternică cu lungimea de undă λ_2 care excită ionul din fibră la nivelul laser superior. Trecerea semnalului de nivel scăzut λ_1 prin fibra optică stimulează emisia unei radiații optice cu lungimea de undă λ_1 de către ionii excitați. Radiația optică cu lungimea de undă de 1,3 μm este amplificată folosind neodimiu ca ion dopant iar radiația optică de 1,54 μm este amplificată folosind ioni de erbiu. Ca surse se folosesc diode laser. La capete sunt necesare

filtre și izolatoare optice pentru a înlătura la ieșire radiația optică de excitare și a elimina zgomotul.

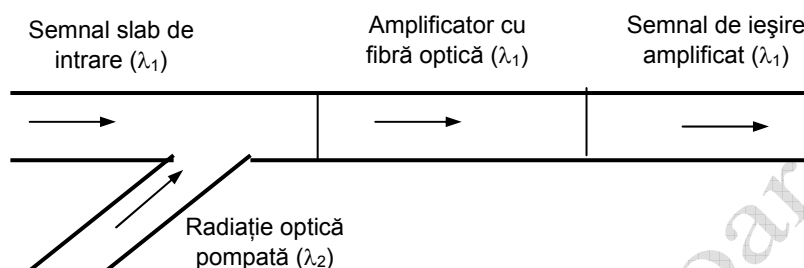


Fig. 2.9

Fibrele optice dopate cu pământuri rare și plasate într-o cavitate rezonantă se pot folosi la obținerea de surse laser. Câștigul lor mare permite tolerarea pierderilor semnificative ale cavității. Capătul lustruit al unei fibre optice, cu reflectivitate doar 4% se poate folosi drept cuplor de ieșire. Se utilizează lasere liniare cu fibre optice, dar cel mai mult se folosesc cavitățile inelare sau în forma de opt, deoarece pot genera impulsuri scurte.

2.2.2.3 Lasere cu gaz

Laserele cu gaz au lungimile lor de undă centrale de emisie în regiunea vizibilă. Mediul laser este un gaz format din atomi neutri (gaze rare), ioni (Hg), molecule (CO_2) sau vapori metalici. Inversiunea de populație se obține prin descărcare electrică în gaz, unde de radiofrecvență, fotoni, etc.

Randamentul laserelor cu gaz este slab, de câteva procente.

Există următoarele categorii de lasere cu gaz:

- **Lasere cu He – Ne**, folosite pentru puteri mici, în undă continuă. Mediul activ este un amestec de gaze rare He-Ne închis într-o incintă de sticlă la presiunea de 1 mbar, prevăzută cu un anod și un catod la capete. Au performanțe remarcabile, fiind folosite fără filtrare. Durata de viață este de ordinul anilor.

- **Lasere cu ion de gaz nobile** (Ar, Kr, Ne, Xe). Laserul cu Ar are linii de emisie în regiunea albastru – verde și linii mai slabe în regiunea UV. Laserele cu Kr au ieșiri cu puteri mai mici, dar produc o gamă largă de lungimi de undă în UV, vizibil și infraroșu apropiat: Amestecurile gazoase de Ar și Kr produc un laser multigaz care emite pe liniile spectrale ale ambelor gaze. Singurul laser cu funcționare în impulsuri este Xe, care emite pe linii între 488 nm și 540 nm. Laserele cu neon și xenon sunt puțin folosite.

- **Lasere cu He – Cd** au linii în spectrul vizibil și UV și sunt folosite în undă continuă.

- **Laserele cu gaz molecular** sunt variate, cu lungimi de undă în domeniul infraroșu în gama $5 \mu\text{m} \dots 1 \text{mm}$, cele mai reprezentative fiind laserele cu dioxid de carbon (CO_2), cu oxid de carbon (CO), oxid de azot (N_2O), metanol (CH_3OH), alcooli, alte amestecuri simple de carbon, etc.

- **Lasere chimice**, denumite astfel datorită reacțiilor care produc energia de activare, cauza tranzițiilor în gaze, finalizate cu emisia radiației optice. Mediile laser folosite sunt: iod, acid fluorhidric, acid clorhidric, fluorură de deuteriu, acid bromhidric, monoxid de carbon, dioxid de carbon, etc. Laserele chimice folosesc în general substanțe toxice, care se înlătură în final cu ajutorul unei pompe de vid și au puteri de ordinul MW, funcționând în undă continuă.

- **Laserele cu vapori de metal** (Cu sau Au) funcționează numai în impulsuri, cu durate de maxim zeci ns și frecvențe de repetiție sub zeci de kHz. Alte lasere cu vapori de metal sunt cele cu vapori de Ba, Pb, Mn sau Ca.

- **Lasere cu azot (N_2)**. Mediul laser este azotul gazos, pur. Au câștig optic foarte mare. Funcționează în mediu superradiant, fără cavitate cu oglinzi, dar energia impulsurilor de ieșire poate fi dublată dacă se folosește o oglidă posterioară cu reflexivitate totală și o oglidă frontală cu reflexivitate 4%. Laserele cu azot au coerență scăzută, fasciculele de ieșire fiind ovale sau dreptunghiulare.

2.2.2.4 Lasere cu lichid

Laserele reprezentative cu lichid sunt *laserele dye*, al căror mediu activ este o substanță lichidă, colorată, organică, fluorescentă, dizolvată într-un solvent lichid, la temperatura camerei. Pomparea se face cu lămpi cu descărcare sau laser extern. Lungimea de undă de ieșire poate fi variată de la UV apropiat până la IR apropiat.

Laserele dye funcționează în undă continuă, într-o lățime de bandă spectrală foarte îngustă și produc impulsuri foarte scurte, cu durate sub 1 ps.

Au o construcție complexă, care necesită elemente optice complicate iar obținerea lungimilor de undă în tot spectrul vizibil impune schimbarea mediului activ. Au eficiență și coerență mare.

2.2.2.5 Metode de creștere a performanțelor laserelor

1. Modificarea lungimii de undă a laserelor, realizată prin generarea armonicilor laser sau folosirea unor oscilatoare parametrice optice.

Generarea armonicilor se bazează pe interacțiunile neliniare între radiația optică și materie (uzual un cristal neliniar), care pot genera armonici de frecvență

egală cu un multiplu al frecvenței unde de radiație optică. În majoritatea aplicațiilor se produc doar armonica a doua, a treia și a patra.

Oscilatoarele parametrice optice sunt de două tipuri: simplu rezonante sau dublu rezonante. Răspunsul neliniar al cristalelor oscilatoarelor parametrice optice convertește radiația laser de pompă în două frecvențe noi, de semnal și întârziată. Reglarea temperaturii cristalului, a lungimii de undă a laserului de pompă sau a unghiului între axa oscilatorului și axa cristalului, permite acordul fin la ieșire.

2. Obținerea impulsurilor laser scurte, în următoarele moduri:

- comutarea factorului de calitate al cavității laser;
- bascularea cavității laser;
- blocarea modului de oscilație laser;
- folosirea unor materiale optice neliniare.

3. Îngustarea lățimii liniei laser prin:

- folosirea etalonului Fabry – Perot (etalonul este o placă transparentă cu două suprafețe reflectorizante care formează un rezonator scurt, ce poate fi introdus în interiorul cavității laser.). Se pot obține astfel lățimi de bandă de minim 500kHz;

- folosirea unor rețele cu una sau mai multe prisme. Acestea se cuplează în afara cavității laser. Sunt robuste, compacte, ușor de aliniat, cu eficiență mare de conversie și nivele scăzute ale emisiei spontane.

2.2.2.6 Surse de alimentare pentru lasere

Nu există un singur model de sursă de alimentare optimizată pentru toate tipurile de lasere.

Pentru lasere solide pompate de la lămpi cu descărcare se folosesc surse în comutație de mare viteză, comandate de la un computer (de exemplu, cu încărcarea unui condensator). Unele lasere folosesc surse de alimentare convenționale, de tensiune continuă (de exemplu, un transformator, redresor și filtru). Pentru creșterea flexibilității surselor de alimentare se folosesc dispozitive electronice noi ca tranzistoare bipolare cu poartă izolată și circuite integrate specifice aplicației

Aplicațiile cu diode laser folosesc surse de curent specifice (drivere) și circuite electronice pentru controlul temperaturii (controlere) pentru a menține constantă intensitatea și lungimea de undă de lucru a diodei laser. Se folosesc și surse de tensiune continuă cu limitare de curent. Diodele laser cu lățime îngustă a liniei necesită surse de curent cu zgomot scăzut. Suprafețele de diode laser de putere mare necesită nivele ridicate pentru curenți și tensiuni. Diodele laser în undă continuă au nevoie de curent continuu în timp ce diodele laser în impulsuri sau modulate au nevoie de furnizarea la timp a energiei, astfel încât să se obțină impulsul optic dorit. O sursă de curent pentru diode laser trebuie să aibă zgomot

scăzut și stabilitate mare. Fluctuațiile curenților de alimentare produc zgomot de ieșire și influențează lățimea liniei.

Sursele de curent pentru diode laser funcționează în două moduri de lucru:

- curent constant sau
- putere optică de ieșire constantă.

În modul curent constant, controlul nivelului curentului de alimentare este realizat printr-o buclă de reacție. Pentru performanțe optime, se realizează și controlul temperaturii diodei laser.

Modul de lucru cu putere optică de ieșire constantă este util când este necesară intensitate optică stabilă, dar controlul temperaturii este fie scăzut, fie greu de realizat. Pentru a controla curentul de alimentare și a compensa fluctuațiile mici de temperatură, fotodiada de monitorizare este conectată într-o buclă de reacție.

Dezavantajul metodei este variația lungimii de undă cu temperatura.

Există și aplicații ale diodelor laser care folosesc dependența lungimii de undă de ieșire de curentul de alimentare. În aceste cazuri, curentul de alimentare al laserelor este sub forma unor rampe repetate: pentru aceasta se folosește un generator de rampe inclus în sursa de alimentare a diodelor laser sau un modulator analog extern cu bandă de frecvență de câteva sute de kHz.

Se recomandă utilizarea diodelor laser la temperaturi cât mai scăzute și cât mai stabile, funcție de aplicație. Pentru diode laser de putere scăzută se pot folosi radiatoare simple pasive. Suprafețele de diode laser de putere necesită uzual răcire cu apă. Dacă aplicația necesită un grad mare de stabilitate a temperaturii, se folosesc circuite de control cu elemente de răcire Peltier.

2.3 Senzori optici pasivi (SOP)

În funcție de mărimea care variază, se întâlnesc mai multe tipuri de senzori optici pasivi (SOP):

- cu variația intensității radiației optice,
- cu variația fazei radiației optice,
- cu variația polarizării,
- cu variația lungimii de undă spectrală,
- cu variația frecvenței de modulație, etc.

2.3.1 Senzori optici pasivi cu variația intensității radiației optice

Sunt cel mai simplu de realizat, deoarece nu impun exigențe particulare nici sursei de radiație și nici senzorilor optici activi. Au fiabilitate mare și preț scăzut. Mărimea detectată de senzorii optici activi este intensitatea undei după trecerea

printr-un mediu atenuator sau dispersiv. Se realizează într-o mare diversitate, prin transmisia sau prin reflexia undei.

Pot măsura: turații (prin întreruperea totală a fascicolului de radiație optică), deplasări, poziții relative și vibrații (prin poziționarea față în față a fibrelor optice), forțe și presiuni (prin variația pierderilor optice în funcție de raza de curbură a unei fibre optice), coduri de bare prin reflexie, densități ale substanțelor (prin absorbție sau difuzie), temperaturi prin fluorescență, etc.

Radiația optică trebuie să aibă o bună directivitate, dimensiuni mici ale fascicolului și intensitate suficientă pentru a fi detectată ușor. Aceste cerințe sunt asigurate prin folosirea unui laser, a unei surse necoerente (de exemplu LED) și a unei fibre optice unimod pentru directivitate.

2.3.2 Senzorii optici pasivi cu variația fazei radiației optice

Sunt mai complicați și au o sensibilitate foarte mare. Necesită compensarea mărimilor care interferează. Cel mai întâlnit senzor de acest tip este *interferometrul*. Mărimile de măsurat acționează asupra unui element optic aflat în unul din brațele interferometrului și are ca efect variația fazei undei de radiație la trecerea prin elementul optic.

Faza radiației optice are două părți: o parte care depinde de timp și este denumită *fază temporală* și o parte care depinde de poziție și este denumită *fază spațială*. Ambele se măsoară față de o fază (defazaj) de referință.

a. Senzorii optici activi cu variația fazei temporale pot fi de două feluri:

- cu modificarea frecvenței,
- cu modificarea timpului.

Singurul efect cunoscut care poate modifica continuu frecvența undei monocromatice este efectul Doppler. Pentru a obține o variație de fază temporală semnificativă, trebuie ca raportul $v_r/c \gg 1$, unde v_r este viteza relativă a sursei. Variația fazei temporale poate fi mărită prin creșterea timpului de propagare.

Un exemplu de **senzor cu variația fazei temporale prin modificarea timpului** este *giometrul cu fibre optice*, folosit pentru măsurarea vitezei unghiulare și a sensului de rotație (fig. 2.10).

Constructiv, este format dintr-un interferometru Sagnac cu două fascicole de radiație optică, obținute prin divizarea undei monocromatice cu un despicător de fascicole. Cele două fascicole sunt trecute simultan prin cele două extremități ale fibrei optice și apoi recombinate la ieșire. Când interferometrul este în repaus, drumurile optice ale celor două unde a și b sunt egale și au valoarea $2\pi R$, unde R este raza buclei de fibră optică. Dacă interferometrul se rotește cu viteza Ω în sens trigonometric, drumul optic al undei a (care are sens trigonometric) este alungit iar

cel al undei b (cu sens invers trigonometric) este scurtat, rezultând un defazaj temporal:

$$\Delta\Phi = \omega \cdot \Delta t = 4\pi R^2 \omega \cdot N \cdot \Omega / c^2$$

Defazajul este proporțional cu viteza de rotație Ω a interferometrului. Pentru creșterea sensibilității se poate crește drumul optic folosind mai multe spire N , de fibră optică. La revenirea în despicătorul de fascicol, cele două unde interferă producând franje de interferență. Aplicația tipică este în domeniul navigației.

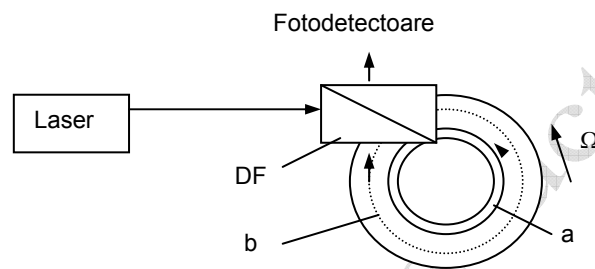


Fig. 2.10

b. Senzorii optici pasivi cu modificarea fazei spațiale sunt de tip interferometric, cei mai cunoscuți fiind *interferometrul Michelson* (fig. 2.11) și *interferometrul Mach – Zehnder* (fig. 2.12).

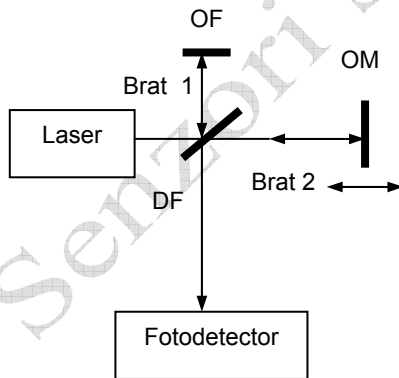


Fig. 2.11

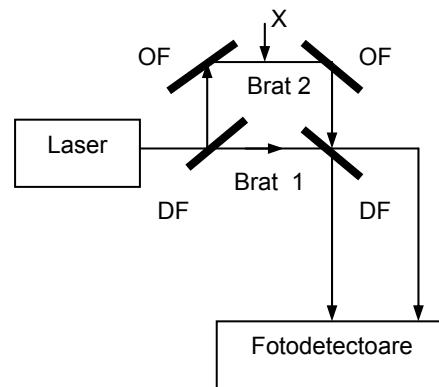


Fig. 2.12

Senzorii interferometrici transformă variația fazei radiației optice în variație de intensitate (flux optic sau putere optică) la intrarea fotodectoarelor.

Unda monocromatică provenită de la sursa coerentă este divizată în două fascicule care urmează parcurșuri diferite înainte de a se recombina. Brașul I, denumit *braș de referință*, este ferit de perturbații. Celălalt braș, denumit *braș de măsurare*, este supus mărimii de intrare X și produce modificarea fazei spațiale a undei de radiație optică prin brașul 2. Notațiile folosite în cele două figuri sunt următoarele: DF - divizor de fascicol, OF - oglindă fixă, OM - oglindă mobilă.

Sensibilitatea interferometrului, notată cu $\Phi(x)/\Delta x$, depinde de lungimea brașului de măsurare (denumit și braș de captură) și de indicele său de refracție, ceilalți parametri fiind fixați.

Condițiile necesare bunei funcționări a unui senzor interferometric sunt următoarele:

- rigiditate mecanică a sistemului, pentru a evita variațiile brașului de referință;
- izolare termică și mecanică (antivibratorie);
- sursă optică de radiație coerentă spațial și temporal pentru buna evidențiere a franjelor de interferență;
- distribuție egală a câmpurilor de polarizare pentru cele două brașe;
- lungime mare a brașului de măsurare.

Pentru obținerea unor performanțe ridicate se recomandă folosirea fibrelor optice unimod.

2.3.3 Senzori optici pasivi cu variația polarizării radiației optice

Acești senzori conțin un element birefringent asupra căruia acționează mărimea de măsurat. Pentru determinarea stării de polarizare trebuie calculați mai mulți parametri și aplicați unui analizor de polarizare.

Starea de polarizare a unei unde plane de radiație optică se determină matematic, pornind de la vectorii: intensitate câmp electric \overline{E} , intensitate câmp magnetic \overline{H} și deplasare electrică \overline{D} .

2.3.3.1 Plăci polarizatoare

Pentru analiza stării de polarizare a radiației optice, se plasează în calea fascicolului diferite tipuri de filtre polarizatoare. Dacă radiația optică este incidentă la interfața dintre două medii cu indici de refracție diferiți, atunci radiația reflectată

și radiația transmisă își schimbă starea de polarizare față de starea de polarizare a radiației optice incidente.

Interacțiunea radiației optice cu atomii sau moleculele unui material optic depinde de lungimea de undă. Consecințele acestei dependențe sunt interacțiunile rezonante legate de dispersia materialelor și *birefringența*, adică schimbarea indicelui de refracție cu polarizarea radiației optice. Aranjarea ordonată a atomilor în anumite cristale are ca efect diferite frecvențe de rezonanță pentru orientări diferite ale vectorului electric față de axele cristaline.

Birefringența poate fi folosită și la schimbarea stării de polarizare a radiației optice. Componentele optice care realizează acest lucru sunt denumite *plăci de undă birefringente* (sau plăci de undă) sau plăci cu întârziere.

Tăind un cristal după axele cristaline, se obține indicele minim de refracție pentru polarizarea vectorului electric al undei plane. Se spune că unda este polarizată de-a lungul axei rapide atât timp cât viteza de fază este maximă. O undă plană polarizată cu planul rotit cu 90° se propagă cu indice de refracție maxim și viteză de fază minimă. În acest caz, unda este polarizată de-a lungul axei lente. Diferența între numerele de lungimi de undă dintre cele două unde va determina raportul celor doi indici de refracție n_r / n . Diferența între aceste două deplasări de fază este denumită *întârziere*.

Dacă se schimbă frecvența optică, întârzierea se va schimba la o viteză mai mare decât ar fi pentru o placă întârziată doar cu o treime de undă, placa fiind denumită **placă treime de undă de ordin multiplu**.

Placa jumătate de undă se folosește la rotirea planului de polarizare al radiației optice plane, de exemplu, din polarizare verticală în polarizare orizontală.

Plăcile sfert de undă se folosesc pentru a obține radiație optică polarizată circular din radiație optică polarizată plan și invers. Pentru aceasta, placa sfert de undă trebuie orientată astfel ca unda incidentă plană să fie la 45° față de axa rapidă (sau lentă). Plăcile sfert de undă se folosesc și ca izolator optic, pentru evitarea reflexiilor nedorite.

Placa undă întregă se folosește la ștergerea polarizării, la oglinzi metalice. Plăcile de undă se realizează din cristale birefringente (mica sau cuarțul).

Polarizorul liniar sau plan are proprietatea de a transmite radiația optică al cărei vector de câmp este paralel cu direcția de transmisie a polarizorului. Polarizorul liniar este o rețea de fire conductoare, echidistante, paralele, cu spațiere foarte mică între ele (unda incidentă pentru care câmpul oscilează paralel cu firele este absorbită, toate celelalte unde fiind transmise).

Radiația optică emisă de surse de radiație optică obișnuite este nepolarizată deoarece direcția instantanee a polarizării variază rapid și aleator în timp între 0 și 2π . Radiația nepolarizată are intensitatea neafectată când este transmisă printr-o placă de undă și devine polarizată liniar când este transmisă printr-un polarizor liniar: intensitatea ei nu depinde de direcția de transmisie a polarizorului.

2.3.3.2 Birefrința

Cristalele optice ale căror proprietăți variază cu orientarea radiației optice care le traversează sunt anizotrope. În acest caz, vectorii câmp electric \vec{E} și deplasare electrică \vec{D} nu mai sunt coliniari, chiar dacă modulele lor rămân proporționale. Anizotropia își are originea fie în structura materialului, fie în existența unei direcții privilegiate rezultate în urma aplicării unui câmp exterior. Într-un mediu anizotrop, direcția de propagare a undei nu coincide cu direcția razelor de propagare a energiei. Propagarea în medii anizotrope poate fi interpretată ca propagarea a două unde polarizate liniar în plane ortogonale și având fiecare un indice de refracție diferit.

În interiorul mediilor uniaxă, unda incidentă se divide în două unde:

- o undă ordinară care se propagă cu indicele n_0 , același cu al razei ordinare corespunzătoare și
- o undă extraordinară, având un indice de refracție variabil cu direcția de incidență, indice diferit de al razei extraordinare corespunzătoare.

Fenomenul de propagare cu doi indici de refracție poartă numele de *birefrință liniară* sau *dublă refracție*.

Unda incidentă polarizată eliptic se divide în două unde polarizate liniar care se propagă cu viteze diferite. Dacă după trecerea prin mediul liniar birefringent razele sunt apropiate, ele se suprapun parțial. Zona de suprapunere rămâne polarizată eliptic iar părțile distincte își mențin polarizările liniar ortogonale.

Propagarea în ghidurile de undă optice de formă cilindrică este dictată de o singură constantă de propagare dublu degenerată, adică două unde polarizate ortogonal alese arbitrar pentru a descompune unda care traversează ghidul optic își conservă pe toată lungimea propagării defazajul lor inițial. În acest caz, comportarea fiecărei polarizări este dictată de constante de propagare diferite.

2.3.3.3 Efecte care acționează asupra polarizării radiației optice

În urma aplicării unor câmpuri exterioare care modifică anizotropia mediului traversat, distribuția câmpurilor electromagnetice se schimbă local, ceea ce modifică interacțiunea lor cu unda de radiație optică. Variațiile locale sunt însă slabe față de câmpurile create de legăturile atomice. Macroscopic, aceasta se exprimă printr-o dependență a permitivității relative ϵ_0 în funcție de câmpul exterior aplicat.

a. Efectul elasto-optic

Se datorează câmpului de tensiuni interne determinate de forțe mecanice de joasă frecvență. Variația indicilor de refracție este proporțională cu deformațiile.

b. Efectul acusto - optic

Câmpul electric aplicat modifică tensiunile interne cu frecvențe ridicate (kHz...zeci kHz) induse prin efect piezoelectric. Spre deosebire de efectul elasto-optic care este datorat deformațiilor statice și de foarte joasă frecvență, efectul acusto-optic introduce deformații cu frecvențe ridicate.

c. Efectul Pockels

Un câmp electric static induce birefringență liniară în anumite medii. Se induce o polarizare care determină mediul să devină anizotrop.

d. Efectul Kerr

Apare pe lângă efectul Pockels și este un efect electro-optic de ordinul doi în puteri ale câmpului electric E . Cristalele care au un centru de simetrie au doar efect Kerr, fără efect Pockels. Cel mai pronunțat efect Kerr este întâlnit la nitrobenzen.

e. Activitate optică

Anumite medii pot roti planul de polarizare al unde plane incidente, unghiul de rotație θ fiind proporțional cu lungimea mediului traversat.

O undă polarizată dreapta sau stânga își conservă polarizarea la trecerea printr-un mediu optic activ. Activitatea optică este un fenomen de birefringență circulară prin care unda incidentă se separă în două unde polarizate circular, cu indicii n_d respectiv n_s . La ieșirea din mediu, undele se recombina și refac unda polarizată liniar, al cărei azimut depinde de variația fazei relative a celor două propagări polarizate circular. După cum diferența $n_d - n_s$ este pozitivă sau negativă, rotația va avea loc în sens trigonometric sau în sensul acelor de ceas.

f. Efectul Faraday

Dacă o undă polarizată liniar traversează un câmp magnetic de inducție B , planul de polarizare al unde se rotește cu un unghi proporțional cu valoarea inducției, după direcția de propagare Oz și proporțional cu lungimea L a mediului traversat:

Efectul Faraday este nerez reciproc: două treceri în sens invers în același mediu care prezintă efect Faraday conduc la o rotație de 2θ ; nu același lucru se întâmplă în cazul activității optice, unde rotația finală este nulă.

g. Efectul Voigt

Este un efect magneto-optic de ordin unu care induce birefringență liniară.

h. Efectul Cotton - Mouton

Este un efect magneto-optic de ordin doi care apare pe lângă efectul Kerr și induce birefringență liniară.

2.3.4 Senzori pasivi cu fibre optice

2.3.4.1 Introducere

După locul interacțiunii dintre mărimea de măsurat și radiația optică, senzorii pasivi cu fibre optice (SOP) sunt de trei tipuri:

- intrinseci, la care acțiunea de modulare se petrece în interiorul fibrei optice. Exemple: senzorii bazați pe microîndoiri, care schimbă condițiile de reflexie internă totală a radiației optice.

- extrinseci, la care acțiunea de modulare se petrece în exteriorul fibrei optice. Exemple: senzorii bazați pe reflexia radiației optice înapoi în fibră, după ce a fost modulată de mărimea de măsurat..

- bazați pe câmp slab, de suprafață (evanescent), la care acțiunea de modulare se face direct pe suprafața exterioară, dezvelită, a miezului. Exemple: unii senzori chimici.

Senzorii optici pasivi cu fibre optice se bazează în general pe variația intensității sau fazei radiației optice. Sunt realizați din fibre optice unimod sau multimod.

Senzorii cu modulația fazei necesită fibre optice unimod sau chiar unimod cu menținerea polarizării. Pentru senzorii extrinseci cu variația intensității, un rol important îl are capacitatea de putere, definită ca posibilitatea fibrelor optice de a transmite puterea optică. Pentru aceste aplicații se recomandă fibrele optice cu miezuri cu diametru și aperturi numerice mari.

Senzorii cu fibre optice cu variația intensității au dezavantajul suprapunerii peste semnalul util a perturbațiilor determinate de variația intensității radiației optice a sursei, eficiența de cuplare a fibrei optice, îndoiri, etc.

O clasă de senzori pasivi cu fibre optice o constituie senzorii înglobați în structuri pentru determinarea eforturilor, temperaturilor, deformațiilor, formelor, forțelor, vibrațiilor, agenților chimici sau a deteriorărilor.

Senzorii cu fibre optice au gamă dinamică mare, pot fi montați pe suprafața structurilor noi sau existente folosind adezivi convenționali și pot fi incluși în materialele compozite în timpul fabricației. Mai mult, senzorii cu fibre optice pot fi realizați cu sensibilitate optimă la un parametru sau să exploateze diferite proprietăți ale radiației optice, în scopul modulării simultane a mai multor parametri, folosind același senzor.

Senzorii cu fibre optice cu variația fazei sunt de mai multe tipuri:

- interferometru Mach-Zehnder cu fibre optice,
- senzori cu faza codată, bazați pe interferența dintre radiațiile optice reflectate de suprafețe apropiate. De exemplu, senzorii etalon liniari, care folosesc două lungimi de FO unimod lipite prin topire de un microtub scurt din siliciu, de 0,1 mm, al cărui diametru este identic cu al fibrei.

- senzori cu rețea Bragg în fibra optică – au rețeaua realizată în fibrele optice. Măsurarea efortului se face prin injectarea unei radiații optice de la o sursă de bandă largă (diodă superluminiscentă, LED cu emisie laterală sau sursă superfluorescentă) în fibră și detectarea lungimii de undă de vârf a radiației reflectate.

Senzorii etalon liniari se aseamănă cu interferometrul Fabry - Perot extrinsec în care cele două fibre sunt introduse într-un tub cu diametru mai mare.

O clasă specială o constituie **senzorii cu fibre optice pentru radiație optică infraroșie**.

Materialele folosite pentru realizarea lor sunt: safirul, fluoruri și sticle calcogenide cu o gamă variată de ferestre spectrale de transmisie.

Senzorii cu fibre optice pentru IR pot fi multiplexați de-a lungul unei fibre optice pentru a obține măsurători discrete, distribuite. Senzorii cu variația intensității pot fi multiplexați necoerent (cu divizare spațială, cu divizare în timp, cu divizare în frecvență sau cu divizarea lungimii de undă), iar senzorii interferometrici pot fi multiplexați prin mai multe tehnici: cu purtătoare cu generarea impulsului, interferetrie diferențială cu împerecherea căilor, multiplexare coerentă, cu divizare în timp sau în frecvență.

Una din tehnicile cele mai folosite este multiplexarea necoerentă cu divizare în timp, tehnica fiind denumită *reflectometrie optică* în domeniul timp (OTDR). În reflectometrul optic în domeniul timp se măsoară diferența de timp între impulsul laser emis în fibră și impulsul laser reflectat și împrăștiat înapoi (de către defect). Instrumentul se folosește la testarea fibrelor optice.

2.3.4.2 Senzori pasivi cu fibre optice cu variația intensității

a. Senzori pasivi hibridi cu capetele fibrelor optice față în față

Un astfel de senzor, de vibrații sau de închidere, constă din două fibre optice apropiate față în față. Radiația optică este transmisă prin una din fibrele optice iar la ieșire radiația optică este expandată într-un con al cărui unghi depinde de diferența dintre indicele de refracție al miezului și învelișului FO. Cantitatea de radiație optică capturată de a doua FO depinde de unghiul de acceptanță și de distanța dintre fibre.

O variantă a acestui senzor folosește cele două fibre optice în aceeași parte iar în fața lor o oglindă flexibilă care răspunde la un efect extern (presiunea sau deplasarea). Aranjând două fibre optice în linie, se obține un senzor prin translație, ca în fig. 2 13. Un senzor rotativ de poziție conține o placă codată cu zone cu reflectanță variabilă, plasată astfel încât fiecare poziție are un cod unic. Pentru a determina prezența sau absența unei zone reflectorizante, se folosește un anumit număr de fibre optice.

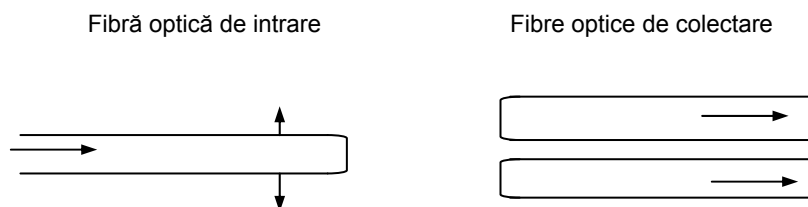


Fig. 2.13

b. Senzori de poziție cu multiplexare cu divizarea lungimii de undă

Sursa de radiație optică folosită este de bandă largă, de exemplu o diodă LED și se utilizează o singură fibră optică care transportă fascicolul până la un multiplexor cu divizarea lungimii de undă (WDM), fig. 2.14.

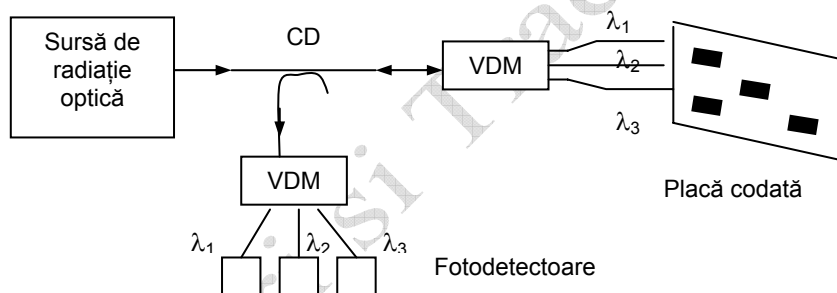


Fig. 2.14

Multiplexorul divide fascicolul de radiație optică și-l trimite la o placă codată pentru determinarea poziției liniare. Semnalele reflectate sunt apoi recombinate și separate de al doilea multiplexor cu divizarea lungimii de undă, astfel încât fiecare semnal de la fibra optică de interogare este citit de un fotodetector separat (CD este un cuplor direcțional cu fibră optică).

c. Senzori de poziție cu FO cu multiplexare și divizare în timp

Utilizează o sursă de radiație optică în impulsuri, care sunt divizate în mai multe fibre optice de interogare, fig. 2.15. Fibrele optice sunt aranjate astfel încât au întârzieri care separă semnalul reflectat de la placa codată cu un timp mai mare decât durata impulsului. Când semnalele reflectate se recombina la detector,

rezultatul este o secvență codată de impulsuri de semnal care corespund cu poziția plăcii codate.

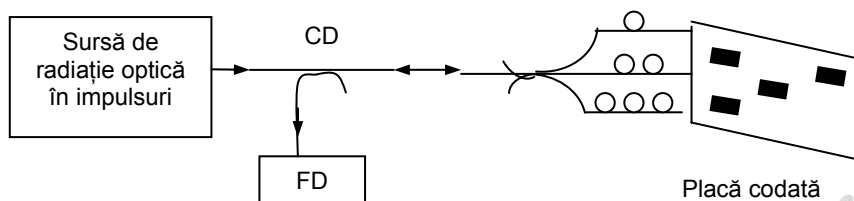


Fig. 2.15

d. Senzori cu fibre optice bazați pe reflexie internă totală

Radiația optică se propagă prin miezul FO și ajunge la capătul tăiat la un anumit unghi critic al FO, fig. 2.16. Dacă mediul în care se plasează capătul FO tăiat oblic are indicele de refracție mic, toată radiația optică este reflectată când ajunge la oglindă și se întoarce în fibra optică. Dacă însă indicele de refracție al mediului se apropie de acela al materialului miezului fibrei optice, o parte din radiația optică se propagă în afara fibrei, rezultând modulația de intensitate.

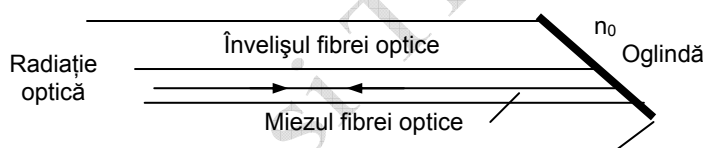


Fig. 2.16

Acest tip de senzor este folosit la măsurarea cu acuratețe scăzută (10 %) a variațiilor presiunii sau indicelui de refracție într-un lichid sau gel.

Pentru măsurarea nivelului de lichid, ca suprafață oglindă se folosește o prismă reflectorizantă. Atunci când nivelul de lichid ajunge la prisma reflectorizantă, radiația optică se scurge în lichid atenuând semnalul reflectat.

e. Senzori cu fibre optice bazați pe câmp slab de suprafață

Transferul puterii optice între două miezuri de FO fără înveliș și apropiate se folosește pentru a obține senzori cu FO bazați pe câmp slab de suprafață.

Pentru FO unimod, această distanță este 10... 20 μm și există pierderi considerabile de radiație în înveliș și în jurul miezului. Dacă în apropiere se plasează un al doilea miez de fibră optică, câmpul slab de suprafață se va cupla în miezul fibrei optice alăturate. Cuplajul depinde de mai mulți parametri: lungimea

de undă a radiației optice, indicele de refracție relativ al mediului în care sunt miezurile, distanța dintre senzori și lungimea de interacțiune. Acest tip de senzor cu FO se folosește pentru măsurarea lungimii de undă, filtrare spectrală, măsurarea indicelui de refracție și a efectelor mediului înconjurător asupra miezurilor (temperatură, presiune, efort).

f. Senzori bazați pe microîndoirea periodică a fibrei optice

Microîndoirea FO este folosită la realizarea de senzori pentru măsurarea vibrațiilor, presiunii, forțelor și a altor efecte din mediul înconjurător. Un astfel de traductor conține o sursă de radiație optică, o porțiune de fibră poziționată într-un senzor cu microîndoiri pentru modularea în intensitate a radiației optice în funcție de un efect din mediu și un fotodetector.

Senzorul cu microîndoiri poate fi implementat și folosind cabluri speciale cu fibre optice sau FO optimizate să fie sensibile la pierderi prin microîndoire.

g. Senzori cu fibre optice bazați pe rețele de difracție

Un fascicol de radiație optică este colimat de o lentilă și trece printr-un sistem de două rețele de difracție, una fixă și una mobilă, fig. 2.17.

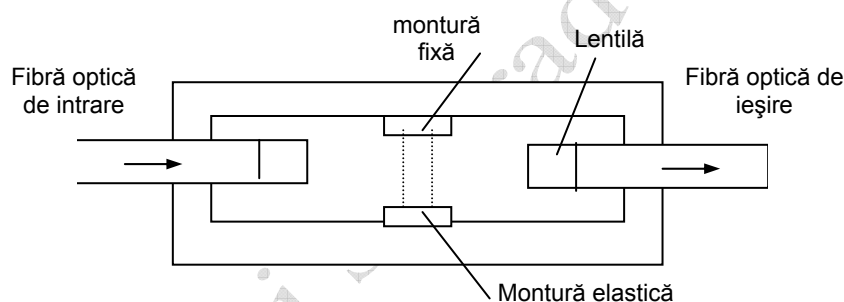


Fig. 2.17

Dezavantaj: mișcarea relativă a rețelilor de difracție are ca efect o caracteristică sinusoidală a sensibilității relative. Pentru sensibilitate optimă, poziția inițială a rețelilor trebuie să fie jumătate deschisă, jumătate închisă. Pentru creșterea sensibilității se folosesc rețele cu spațieri mai fine care însă, limitează gama dinamică.

Pentru a mări sensibilitatea fără limitarea gamei dinamice se folosesc rețele multiple decalate cu 90° .

În cazul rețelilor duble ieșirile sunt în cuadratură. Când una din ieșiri este la sensibilitate optimă cealaltă este la sensibilitate minimă și invers. Folosind ambele ieșiri pentru urmărire, se pot scana mai multe linii ale rețelei, crescând astfel gama dinamică și evitând scăderea la zero a semnalului la pozițiile de sensibilitate minimă și uniformizând sensibilitatea.

Senzorii pasivi cu fibre optice bazați pe modularea intensității au limitări impuse de pierderile variabile din sistem care nu sunt legate de mărimea ce trebuie măsurată. Sursele de erori sunt pierderile variabile datorate conectoarelor, divizoarelor, îndoirilor și nealinierea surselor de radiație optică și a fotodectoarelor. Pentru a elimina aceste probleme se folosesc două lungimi de undă, una fiind pentru calibrare prin evitarea regiunii de detecție. O concepție alternativă este utilizarea unor senzori pasivi cu fibre optice rezistenți la erori induse de variații de intensitate

2.3.4.3 Senzori spectrali cu fibre optice

Senzorii spectrali cu fibre optice se bazează pe modulația lungimii de undă a radiației optice de către mărimea de măsurat.

În această categorie se încadrează senzorii bazați pe radiația corpului negru, cu absorbție, cu fluorescență și cu rețele de difracție etalon și dispersive.

a. Senzori spectrali cu fibre optice bazați pe corp negru

Structura unui astfel de senzor este dată în fig. 2.18.

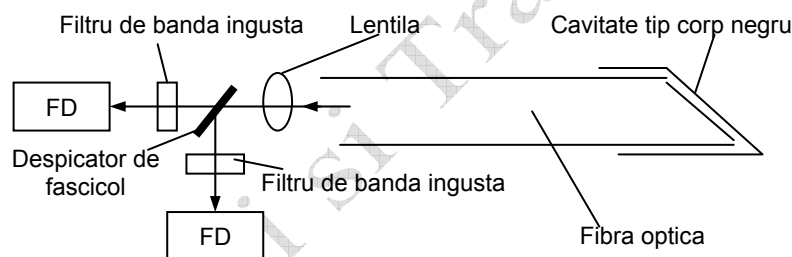


Fig. 2.18

O cavitate de tip corp negru este plasată la capătul unei fibre optice. Când temperatura cavității crește, ea începe să se comporte ca o sursă de radiație optică, permițând măsurarea temperaturilor peste 300°C. Se folosesc două fotodectoare (FD) împreună cu filtre de bandă îngustă pentru a determina profilul curbei corpului negru și astfel temperatura. Senzorul este folosit la măsurarea temperaturilor mari, cu acuratețe de câteva grade Celsius. În prezența câmpurilor de radiofrecvență acuratețea scade sub 200°C.

b. Senzori spectrali cu fibre optice bazați pe absorbție

Folosesc un senzor din GaAs, o sursă de radiație optică de bandă largă și fibre optice de intrare și ieșire. Profilul de absorbție depinde de temperatură și presiune (fig. 2.19).

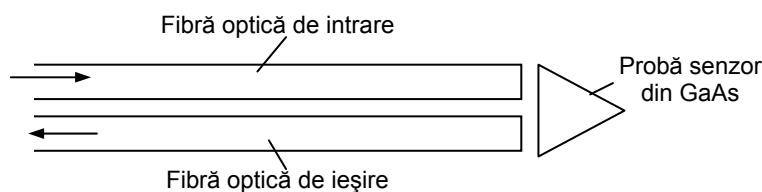


Fig. 2.19

c. Senzori spectrali cu fibre optice bazați pe fluorescență

Sunt folosiți pentru aplicații medicale, chimice și pentru măsurarea parametrilor fizici ca temperatura, vâscozitatea și umiditatea.

Configurațiile cele mai folosite sunt cu materialul fluorescent la capăt și multipunct, fig. 2.20.

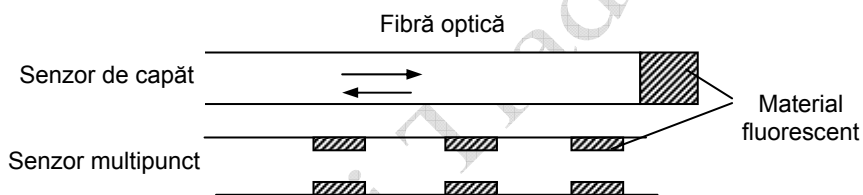


Fig. 2.20

Se bazează pe dependența de timpul de stingere a impulsului de radiație optică emis de materialul fluorescent, excitat cu impulsuri de radiație optică.

2.4 Senzori optici activi (SOA)

2.4.1 Clasificarea senzorilor optici activi

Senzorii optici activi, denumiți și *fotodetectoare*, transformă variația intensității radiației optice (fluxului sau puterii optice) modificate de mărimea de măsurat în senzorii optici pasivi, într-o variație a unei mărimi sau parametru electric (tensiune, curent, sarcină, rezistență sau capacitate).

După modul în care se face absorbția radiației optice și transformarea ei în alte forme de energie, senzorii optici activi se împart în două grupe:

- **electronici (sau cuantici)**, în care absorbția radiației optice determină excitarea electronilor pe nivele energetice superioare și

- **termici**, în care absorbția radiației optice este însoțită de creșterea temperaturii sistemului rețea cristalină - electroni.

a. Fotodectoarele electronice sunt selective deoarece răspund numai la acei fotoni a căror energie minimă depășește energia de prag determinată de lățimea benzii interzise a semiconductorului. La baza funcționării fotodectoarelor electronice stă efectul fotoelectric.

Dacă în urma absorbției, radiația optică determină ieșirea electronilor din solid și formarea unui flux de electroni între catod și anod, atunci apare *efectul fotoelectric extern*. Excitarea internă a rețelei cristaline sub acțiunea radiației optice absorbite ce determină trecerea electronilor din stările legate în stările libere poartă denumirea de *efect fotoelectric intern*. O formă a efectului fotoelectric intern este apariția purtătorilor de sarcină și creșterea conductivității electrice. O altă formă a efectului fotoelectric intern în semiconductoare cu neomogenități (contact metal-semiconductor, joncțiune p-n), este separarea purtătorilor de sarcină în câmpurile interne și apariția unei tensiuni fotoelectromotoare (*efect fotovoltaic*).

b. Fotodectoarele termice nu sunt selective deoarece energia absorbită este transformată în energie termică. Ele utilizează acele proprietăți ale solidelor ce se modifică la creșterea temperaturii în urma absorbției radiației optice. De aceea, fotodectoarele termice au viteză de răspuns mult mai mică decât fotodectoarele electronice.

Fiecare din cele două tipuri de fotodectoare se clasifică în **parametrice** (sau **modulatoare**) și **energetice (generatoare)**, după cum radiația optică are ca efect modificarea unui parametru electric (rezistență, capacitate) sau generarea unei tensiuni, curent sau sarcini electrice.

2.4.2 Fotodectoare electronice

2.4.2.1 Fotodiode

a. Fotodiode p-n (planare)

Fotodiodele cele mai răspândite sunt cele din siliciu, realizate dintr-un singur substrat cristalin din Si pur, similar celor folosite la circuite integrate. Puritatea Si este direct legată de rezistivitatea sa. Valorile tipice pentru rezistivitatea Si sunt $10 \Omega\text{cm} \dots 10 \text{k}\Omega\text{cm}$.

O secțiune transversală printr-o fotodiodă plană din Si este dată în fig. 2.21.

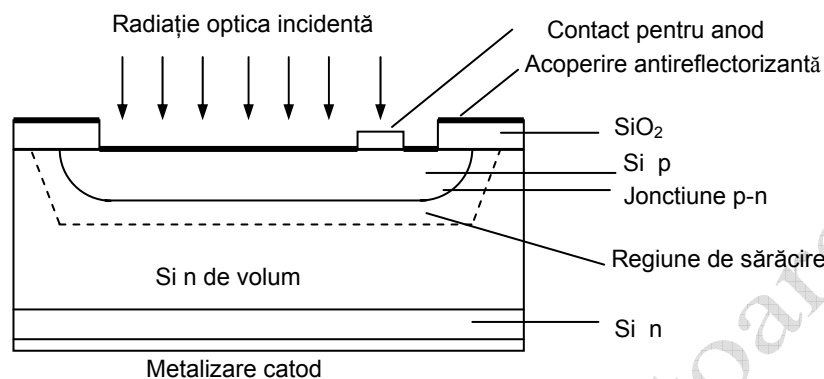


Fig. 2.21

Prin difuzia termică sau implantarea ionică a unui material dopant (de obicei bor) în Si tip n, se formează stratul subțire tip p de la suprafața frontală. Pe suprafața frontală se aplică un contact mic de metal iar suprafața posterioară este complet metalizată. Se formează astfel o jonctiune p-n care diferă de cele de la diode prin faptul că stratul p este foarte subțire, în funcție de gama de lungimi de undă selectate. Adâncimea regiunii de sărăcire poate varia prin modificarea tensiunii inverse aplicate pe jonctiune.

Capacitatea electrică a jonctiunii p-n depinde de grosimea regiunii de sărăcire, rezistivitatea siliciului și mărimea suprafeței active. Crescând tensiunea de polarizare inversă, crește adâncimea regiunii de sărăcire și se micșorează capacitatea până se atinge sărăcirea completă.

Când radiația optică este absorbită în regiunea activă, se formează perechi electron - gol care sunt separate, electronii trecând în regiunea n, iar golurile în regiunea p. Rezultă astfel un curent foarte puțin afectat de temperatură, variind cu mai puțin de 0,2 %/°C pentru spectrul vizibil.

La aplicarea unei polarizări inverse, în lipsa iluminării, prin fotodiodă va trece un curent mic, denumit curent de întuneric.

Parametrii fotodiodelor p – n sunt următorii:

- *Responsivitatea* este o măsură a sensibilității fotodiodei și este definită ca raportul dintre fotocurentul de ieșire și puterea radiantă incidentă. În fig 2.22 se dă responsivitatea spectrală a unei fotodiode de siliciu.

- *Eficiența cuantică* se exprimă în procente și este capabilitatea fotodiodei de a converti energia radiației optice în energie electrică.

- *Puterea echivalentă de zgomot* este puterea optică incidentă minimă necesară unei fotodiode pentru a genera un fotocurent egal cu curentul de zgomot total al

fotodiodei și se definește ca raportul între curentul de zgomot și responsivitate. Puterea echivalentă de zgomot depinde de lățimea benzii de frecvență a sistemului de măsurare.

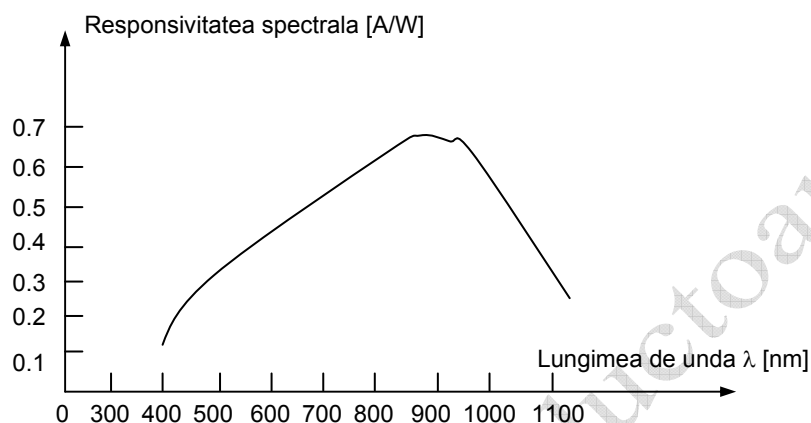


Fig. 2.22

Zgomotul generat de o fotodiodă cu Si polarizată invers este o combinație de zgomot de alice, datorat curentului de întuneric de scurgere, și zgomot Johnson, datorat rezistenței interne paralelă a dispozitivului și temperaturii. Zgomotul de alice este componenta dominantă a curentului de zgomot a unei fotodiode polarizate invers cu tensiune mare. Dacă dispozitivele sunt folosite în mod fotovoltaic (cu polarizare zero), zgomotul Johnson este predominant, iar curentul de întuneric se apropie de zero. Când se lucrează fără polarizare, se reduce curentul de zgomot, deci și puterea de zgomot.

- *Timpul de creștere* reprezintă măsura vitezei de răspuns a fotodiodei la un impuls dreptunghiular de radiație optică și este timpul necesar pentru fotodiodă să-și crească nivelul de ieșire de la 10 % la 90 % din nivelul final de ieșire.

Timpul de colectare al sarcinii depinde de tensiune și are două componente: una rapidă, care este timpul de tranzit al purtătorilor de sarcină prin regiunea de sărăcire, sub influența unui câmp electric și una lentă, timpul de difuzie.

O clasă specială de fotodiode sunt cele pentru domeniul infraroșu.

b. Fotodiode PIN

Fotodiodele PIN au o regiune cu Si intrinsec între regiunile p și n. Pe o plachetă de Si intrinsec cu rezistivitate mare se difuzează un strat epitaxial tip n cu grosimea de 30 ... 40 μm. Pe cealaltă față a plachetei se difuzează un strat subțire, de 2 ... 5 μm, de conducție mare, tip p. Urmează apoi depunerea unor straturi antireflectorizante de SiO și a contactelor ohmice.

Fotodiodele PIN se realizează cu iluminare frontală sau cu iluminare laterală. Datorită sensibilității la radiația optică incidentă și a vitezei mari de răspuns, ele înlocuiesc des fotodiodele cu joncțiune p-n.

Pentru polarizări inverse, câmpul electric din regiunea intrinsecă accelerează purtătorii de sarcină liberi spre regiunile puternic dopate. Începând cu tensiuni mici de polarizare inversă, toți purtătorii de sarcină generați de radiația optică incidentă ajung în regiunile puternic dopate într-un interval de timp mai scurt decât timpul de viață. Pentru Si, timpul de răspuns este ≈ 0.5 ns și randamentul cuantic este mare ($\eta = 0.6$).

c. Fotodiode Schottky

Curbarea benzilor energetice ale unui semiconductor în vecinătatea contactului cu un metal dă naștere unei bariere de potențial numită barieră Schottky. Dispozitivul obținut este fotodiode Schottky, cu un principiu de funcționare asemănător cu al fotodiodei p-n

Spre deosebire de fotodiodele cu joncțiune p-n, fotodiodele Schottky se pot utiliza și ca fotodectoare pentru regiunea UV a spectrului radiației optice. În domeniul UV, coeficientul de absorbție al materialelor semiconductoare este foarte mare ($\alpha = 10^8 \text{ cm}^{-1}$), astfel că adâncimea efectivă de absorbție a radiației incidente este $d_\lambda = 1/\alpha = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ sau chiar mai mică. Pentru realizarea fotodiodelor Schottky eficiente în detecția radiației optice cu lungimi de undă mici, se alege grosimea stratului de metal și a stratului antireflectorizant astfel încât radiația optică incidentă să fie absorbită în regiunea de la suprafața semiconductorului. Fotodiodele Schottky din Au-Si au timpi de răspuns de ordin 0,1 ns și randament mare ($\eta = 70\%$).

d. Fotodiode cu avalanșă

Fotodiodele cu avalanșă (APD) detectează nivele foarte scăzute de radiație optică datorită câștigului intern. Structura fotodiodei cu avalanșă din Si are o regiune de absorbție și o regiune de multiplicare, existând trei variante:

- cu muchie teșită (*bevelled-edge*),
- epitaxială și
- întinsă.

La fotodiodele cu avalanșă cu muchia teșită, se aplică o tensiune de polarizare de 1500 V și 2400 V, cu plusul la catod (determinată de câștig), care crează un câmp electric puternic în joncțiunea sărăcită de purtători. La creșterea câmpului electric, regiunea de sărăcire (denumită și de sarcină spațială) se extinde. Când fotonii ating regiunea p, ei sunt convertiți în perechi electron-gol. Electronii sunt trași în regiunea de sărăcire unde sunt accelerați, atingând viteza de saturație. Lângă joncțiune, acești electroni primari au destulă energie pentru a ioniza perechi secundare electron-gol, când se lovesc de atomii de Si. Electronii secundari sunt accelerați și repetă procesul în avalanșă până când toți sunt colectați la cealaltă

margină a regiunii de sărăcire. În acest fel se amplifică semnalul. Debitul intern de purtători produce un curent electric în circuitul extern.

Structura unei fotodiode cu avalanșă cu muchie teșită este dată în fig. 2.23.

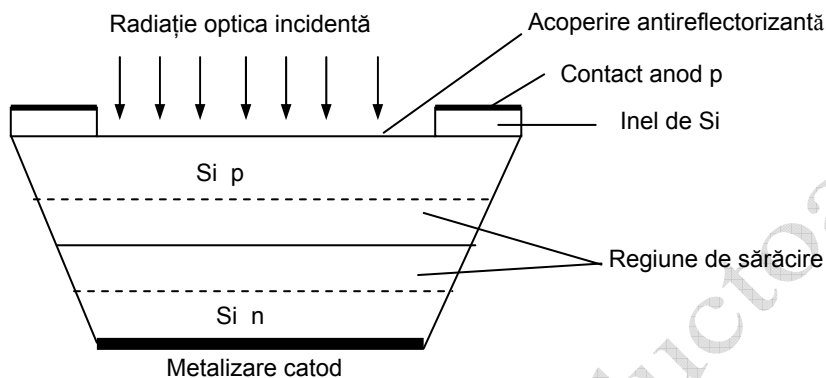


Fig. 2.23

Dispozitivul are o tensiune de străpungere peste care detecția liniară este dificilă datorită zgomotului mare generat de avalanșă. Odată atinsă străpungerea, tensiunea trebuie micșorată pentru a reseta fotodiodea cu avalanșă. Acesta este modul de lucru Geiger, unde câștigul este mare, dar neliniar.

Eficiența cuantică (randamentul) este probabilitatea conversiei fotoelectrice a unui foton incident și este funcție de lungimea de undă. Peste 1100 nm, fotonii nu au destulă energie pentru a trece electronii de valență peste banda interzisă în banda de conducție. Sub 1100 nm fotonii sunt absorbiți la diferite adâncimi medii în fotodiodea cu avalanșă, funcție de coeficientul de absorbție. Curba eficienței cuantice în funcție de lungimea de undă este un clopot.

Alegând convenabil grosimea stratului antireflectorizant, se optimizează funcționarea în domeniul vizibil sau infraroșu apropiat, obținându-se eficiență cuantică de 70... 80% între 500 nm și 800 nm.

Câștigul intern este funcție de lungimea de undă și tensiunea aplicată. De exemplu, pentru $\lambda = 670$ nm, dependența câștigului de tensiunea aplicată este dată în fig. 2.24.

Fotocurentul de ieșire din fotodiodea cu avalanșă cu câștigul M este:

$$I = M \cdot I_0 + I_D$$

unde I_0 = fotocurentul primar fără amplificare, iar I_D = curentul total de întineric.

Deoarece curentul de întuneric circulă paralel cu cel de semnal, el limitează semnalul minim amplificat de fotodioda cu avalanșă.

Curentul de întuneric total are două componente: o componentă de suprafață și una de volum. Curentul de întuneric de volum este amplificat cu același câștig ca și curentul de semnal. La câștiguri mici predomină curentul de suprafață, în timp ce la câștiguri mari predomină curentul de volum.

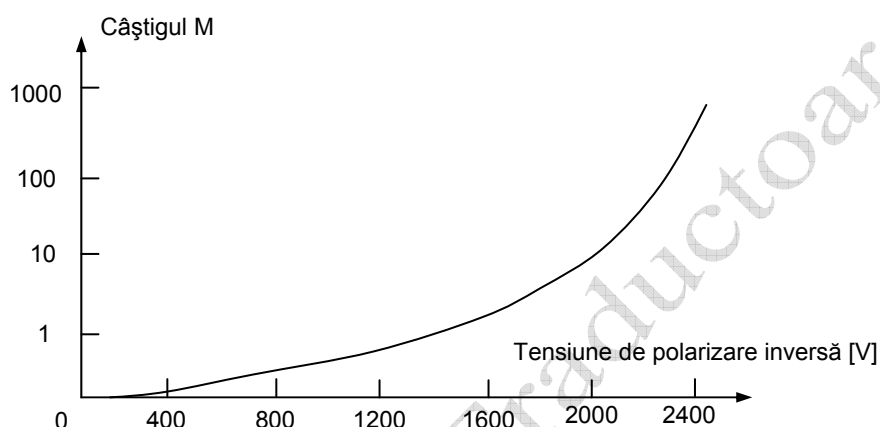


Fig. 2.24

Sursele principale de zgomot în fotodioda cu avalanșă sunt:

- zgomotul de alicie, independent de frecvență, ce provine din fotocurentul primar;
- zgomotul efectiv de întuneric;
- zgomotul în exces, care măsoară variațiile câștigului fotocurentului și curentului de zgomot introdus în timpul multiplicării;
- zgomotul electronic al circuitului de conversie curent - tensiune de la ieșirea fotodiodei cu avalanșă.

Puterea echivalentă de zgomot se definește ca puterea optică incidentă la fotodioda cu avalanșă pentru care raportul semnal / zgomot este egal cu 1.

În aplicațiile unde se analizează amplitudinea unor secvențe scurte de impulsuri, zgomotul nu mai este caracterizat în domeniul frecvență ci în domeniul timp.

$$\text{Frecvența de taiere este: } f_i = \frac{2,2}{2\pi \cdot t_r}$$

unde t_r este timpul de creștere al impulsului de la ieșirea fotodiodei cu avalanșă.

Fotodiodele cu avalanșă au curenți de ieșire liniari într-o gamă dinamică mare a amplitudinii impulsurilor de intrare. Impulsurile de radiație optică incidente care generează sarcină de peste $1 \mu\text{C}$ sau nivelele continue de radiație care generează peste 1 W putere optică, produc neliniarități datorită încălzirii rețelei cristaline. Stabilitatea câștigului se obține prin compensarea fluctuațiilor de temperatură cu ajutorul tensiunii de alimentare. În limitele a 10°C față de temperatura camerei, tensiunea de alimentare poate varia cu aproximativ $\pm 1,8 \text{ V}$ la o variație cu 1°C .

e. Fotodiada cu avalanșă și vacuum

Conține un fotocatod și o fotodiodă cu avalanșă într-un tub cu vid (fig 2.25) și se folosește la detecția fotonilor singulari și a nivelelor foarte mici de radiație optică, la temperatura camerei.

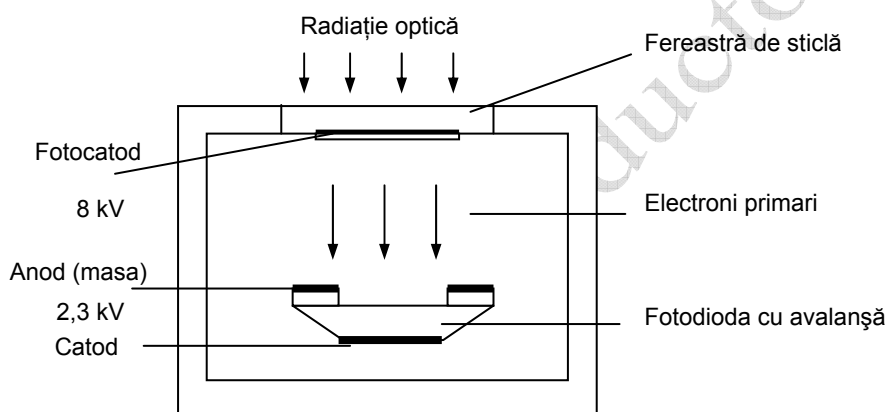


Fig. 2.25

Configurația are câștig de maxim 10^6 prin intermediul unui proces în două etape. Fotonii incidenti generează fotoelectroni la fotocatod, care este menținut la o tensiune negativă mare față de suprafața frontală a fotodiodei cu avalanșă (tipic 8kV). Energia electronilor emiși crește de aproximativ 2000 ori prin accelerare în câmp electric. Când electronii lovesc fotodiada cu avalanșă, ei eliberează noi electroni în Si. Acest proces este denumit *conductivitate indusă prin bombardare cu electroni*. Spre deosebire de fotonul vizibil, a cărui energie este suficientă pentru a produce o pereche primară electron-gol, electronii fierbinți au energii de 2000 ori mai mari decât energia benzii interzise a Si ($3,6 \text{ eV}$). Corespunzător, avalanșa de electroni secundari rezultantă începe cu mai mult de 2000 electroni în loc de unul singur. Fotodiada cu avalanșă are un câștig tipic de 500.

Fotodiodele cu avalanșă și vacuum (VAPD) au fotocatodul din materiale bialcaline, multialcaline sau GaAs, permițând optimizarea răspunsului de la UV apropiat până la IR apropiat. Diametrul tipic este 18 mm.

Sursele de zgomot din semnal sunt:

- zgomotul fonic de alicie (din semnalul optic),
- curentul de zgomot de întuneric,
- zgomotul datorat fluctuațiilor câștigului.

Contribuția majoră la zgomotul de întuneric este curentul de întuneric de volum al fotodiodei cu avalanșă. Zgomotul poate fi redus prin răcirea VAPD la 0°C. Gama dinamică este 10^7 , folosindu-se la numărarea fotonilor singuri și la detectarea semnalelor mari.

Câmpul magnetic perturbator paralel cu câmpul electric al VAPD nu are nici un efect asupra câștigului. La schimbarea triunghiului între câmpul magnetic și câmpul electric, fotoelectronii din vid sunt deplasați cu o valoare care depinde de mărimea câmpului magnetic și de distanța între fotocatod și fotodioda cu avalanșă.

Pentru polarizarea inversă a APD se recomandă surse stabilizate în comutație, cu tensiunea de ieșire reglabilă în gama 0 V...+2600 V, riplu mai mic de 0,005 % vârf la vârf și carcasa legată la pământ, pentru protecție.

Preamplificatoarele folosite sunt identice pentru APD și VAPD. Deoarece fotodioda cu avalanșă este o sursă de curent, preamplificatoarele folosite sunt convertoare curent-tensiune (pentru liniaritate bună sau gamă dinamică mare) sau convertoare sarcină-tensiune (pentru rezoluție bună).

Alegerea schemei particulare a preamplificatorului depinde de durata pachetului de impulsuri, frecvența, intensitatea și gama dinamică. Legătura cu fotodioda cu avalanșă se face în curent alternativ sau în curent continuu.

f. Fotodiode cu intensificare

Într-o fotodiodă cu intensificare (IPD) radiația optică incidentă pătrunde printr-o fereastră semitransparentă de sticlă din carcasa cu vid. Structura fotodiodei cu intensificare este prezentată în fig. 2.26.

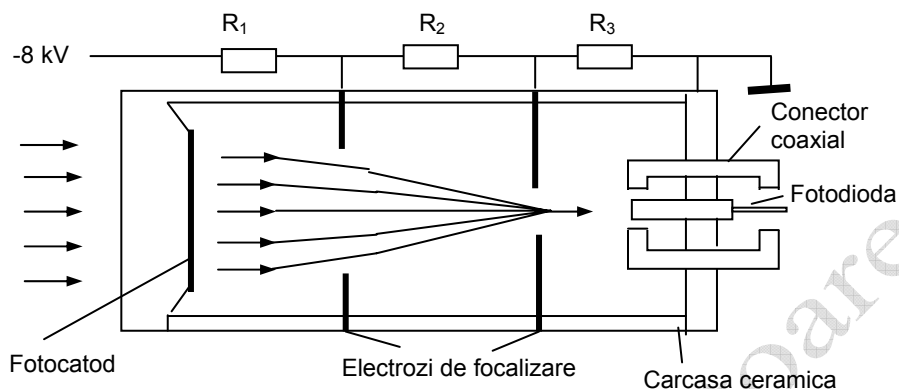


Fig. 2.26

Suprafața interioară a ferestrei frontale din sticlă este acoperită cu un catod din material fotosensibil (GaAs, GaAsP sau InGaAs-InP).

Fotoelectronii generați de catod sunt accelerați cu o tensiune de 8 kV și focalizați pe suprafața mică a unei fotodiode PIN sau Schottky, aflată de asemenea în interiorul carcasei vacuumate. Fiecare electron accelerat generează câteva mii de electroni în joncțiunea p-n, rezultând astfel câștigul tipic al fotodiodei cu intensificare de 1000.

Fotocatozii standard au lungimea de undă de tăiere sub 1100 nm. Fotocatozii cu electroni transferați au lungime de undă de tăiere mai mare și polarizează fotocatozii InGaAs-InP pentru a adăuga energie electronilor liberi fotogenerați. Polarizarea aplicată transferă electronii în una din văile stratului de emisie InP. Electronii sunt apoi emiși prin stratul cu barieră Schottky, ce a fost folosit pentru aplicarea polarizării, și scapă în vacuum.

Un dezavantaj al fotodiodei cu intensificare este necesitatea tensiunii mari. Există însă variante de ansambluri integrate împreună cu multiplicatoare de tensiune care se alimentează la 12 V.

g. Fotodiode duale

Fotodetecția duală sau diferențială este recunoscută ca fiind mai sensibilă decât fotodetecția simplă, deoarece elimină zgomotul de mod comun.

În schema de bază a unui fotoreceptor dual, fotocurentul de la intrarea amplificatorului este egal cu fotocurentul primei fotodiode minus fotocurentul celei de-a doua, fig. 2.27.

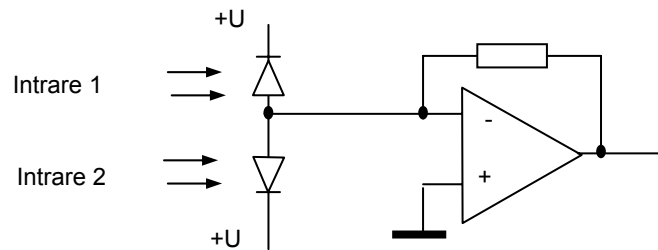


Fig. 2.27

Când cele două intrări optice au puteri identice și responsivități împerecheate, spre amplificator nu trece nici un fotocurent continuu. Dacă răspunsurile în frecvență ale fotodiodelor sunt împerecheate, se elimină fluctuațiile de intensitate de mod comun ale radiației optice (aceeași amplitudine și fază). Această situație este valabilă când cele două intrări provin de la același laser și au întârzieri egale în timp. Dacă întârzierile sunt diferite, ieșirea va fi proporțională cu $\sin(\omega t_d/2)$, unde t_d este diferența de timp de întârziere iar ω este pulsația de modulație.

Există fotodiode duale într-o singură capsulă și chiar patru fotodiode în aceeași capsulă, pentru realizarea fotodectoarelor în cuadratură. Tipic, fotodiodele de pe aceeași capsulă au catodii legați în comun.

h. Fotodiode sensibile la poziție

O fotodiodă sensibilă la poziție (PSD - *Position Sensitive Detector*) este o fotodiodă cu siliciu cu rezistență uniformă. PSD liniară are doi anodi și un catod, fig. 2.28.

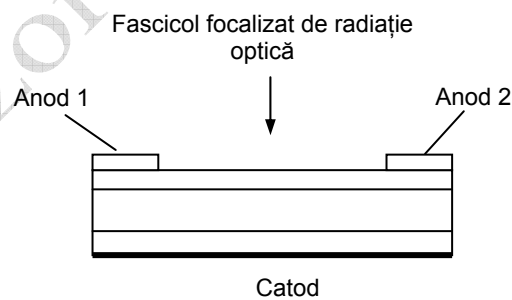


Fig.2.28

Când un fascicol focalizat de radiație optică ajunge la suprafața activă a fotodiodei sensibile la poziție, la fiecare din cei doi anodi se generează câte un

fotocurent invers proporțional cu distanța dintre centrul fascicolului și anod. O PSD cu lungimea, de exemplu 24 mm are o rezoluție de $\pm 30 \mu\text{m}$ și un timp de răspuns de 50 ms. PSD se folosesc la măsurarea rapidă a poziției capurilor unităților de disc magneto-optice, sursa de radiație optică fiind un LED.

Există și fotodelectoare sensibile la poziție pe două axe, cu patru anodi și un catod, în aceeași capsulă. De asemenea, există circuite hibride cu fotodiode sensibile la poziție pe o axă sau două axe, împreună cu amplificatoare operaționale, ieșirea fiind sub forma semnalelor sumă și diferență de tensiuni, în exterior fiind necesară doar adăugarea unui circuit de împărțire de precizie pentru obținerea informațiilor de poziție.

i. Fotodiode cu filtru optic

Filtrul optic se obține prin depunerea mai multor straturi pe fața inferioară a unei fotodiode p-n, aceasta fiind fața expusă la radiația optică incidentă. Nu mai este necesară utilizarea unui filtru integral sau separat, filtrul fiind realizat chiar în structura fotodiodei, prin modificarea grosimii și a structurii stratului n și a multistraturilor realizate prin evaporare.

Se obțin astfel filtre trece bandă în regiunea 340... 1080 nm, cu o transmisie în bandă $> 80 \%$ și rejecție în afara benzii de 99,9 %. Scade astfel dimensiunea și crește raportul semnal / zgomot, putându-se folosi în prezența radiației optice puternice de fond. Configurația se utilizează la fotodetecția bidirecțională sau fotodetecția simultană a două semnale diferite, unul cu partea superioară și celălalt, filtrat, cu partea inferioară.

2.4.2.2 Fotodetectoare hibride sau integrate

Fotodetectoarele hibride sau integrate conțin o fotodiodă legată împreună cu un amplificator operațional în schemă de convertor curent-tensiune. Avantajele fotodetectoarelor hibride față de soluția cu fotodiode discrete și schemă cu amplificator operațional sunt următoarele:

- construcția compactă și rigidă,
- zgomot scăzut, datorită firelor scurte de legătură și substratului cu suprafață mai mică,
- capacitatea parazită mică la intrarea preamplificatorului.

Amplificatoarele operaționale folosite la intrare sunt cu tranzistoare cu efect de câmp cu Si, iar pentru creșterea benzii și sensibilității și scăderea zgomotului se folosesc amplificatoare operaționale cu TEC cu GaAs.

Circuitul hibrid este acoperit și sudat într-o capsulă metalică izolată de circuit și ecranată față de sursele exterioare de tensiuni de zgomot. Capacul ansamblului are o fereastră de sticlă, lentilă, filtru și montură cu fibră optică.

Fotodetectoare hibride se mai folosesc și pentru structuri cu diodă laser sau diodă electroluminescentă în același ansamblu.

2.4.2.3 Fototranzistoare

Datorită expunerii la radiație optică, în joncțiunea colector-bază a fototranzistoarelor bipolare apare un curent care este amplificat de tranzistor. Pentru amplificare mai mare, emitorul fototranzistorului se leagă în baza unui tranzistor, formând un etaj Darlington și denumit fotodarlington. Amplificarea fotodarlingtoanelor este $> 10^5$, însă răspunsul este mai lent ca la fotodiode.

Tipuri de fototranzistoare: cu barieră Schottky, unijoncțiune, unipolare, bipolare din Si sau cu heterojoncțiuni. Cele mai folosite sunt fototranzistoarele bipolare, TECMOS și TECj din Si.

Fototranzistoarele bipolare din Si cu baza polarizată au două intrări: una optică și una electrică. Intrarea electrică este utilizată pentru fixarea punctului static de funcționare în regiunea liniară a caracteristicii.

Domeniul de sensibilitate spectrală al fototranzistoarelor bipolare din Si este același cu al fotodiodelor de Si, adică 400 ... 1100 nm, cu un maxim la ~ 850 nm.

Fototranzistoarele bipolare din Si cu baza în aer au aceleași caracteristici curent-tensiune pentru diferite nivele ale fluxului optic incident. Curentul de întuneric la fototranzistoarele din Si este de ordinul 50 nA și depinde neliniar de nivelul fluxului optic. La intensități mai mari ale radiației optice incidente, factorul de amplificare trece printr-un maxim și apoi scade rapid.

În domeniul liniar al dependenței fotocurentului de nivelul de iradiere optică, sensibilitatea fototranzistoarelor bipolare din Si este de ordinul 10 ... 15 mA/klx.

2.4.2.4 Fotorezistoare

Numite și fotoconductoare, fotorezistoarele au un strat semiconductor omogen cu grosimea 50...100 μ m din CdS, PbS, PbSe sau amestecuri de CdS și CdSe depuse între doi electrozi. Radiația optică incidentă determină scăderea neliniară a rezistenței de la valori mari (10^6 ... $10^9 \Omega$) în lipsa radiației optice, până la valori de zeci de ohmi la nivele mari de iradiere optică.

Fotorezistoarele se polarizează cu tensiune alternativă sau continuă cu orice polaritate ($< \text{sute volți}$) și în urma iradierii la putere optică de μ W...mW apare un curent. Variația rezistenței electrice este determinată de efectul fotoelectric intern. Când un foton incident trece un electron din banda de valență în banda de conducție peste banda interzisă, crește conductivitatea semiconductorului.

Dezavantajele fotorezistoarelor sunt răspunsul neliniar, timp mare de răspuns (zeci - sute ms) și memoria de termen lung.

Caracteristicile curent - tensiune ale fotorezistoarelor sunt simetrice față de originea axelor de coordonate, rezistența nedepinzând de polaritatea tensiunii. Variația fotocurentului în funcție de nivelul de iradiere optică este logaritmică.

2.4.2.5 Tuburi fotomultiplicatoare

Tuburile fotomultiplicatoare sunt tuburi cu vacuum, formate dintr-o carcasă din sticlă, ceramică sau metal, un fotocatod din material fotoemisiv, electrozi cu emisie secundară (dinozi) și un electrod colector, anodul. Structura unui tub fotomultiplicator este prezentată în fig. 2.29.

Un foton care trece prin fereastra tubului fotomultiplicator (PMT) este absorbit de fotocatod dacă energia sa depășește energia de legătură a materialului fotocatodului. Conform efectului fotoelectric extern, se eliberează un electron care, dacă are energie suficientă scapă în vidul tubului și este accelerat spre primul dinod de diferența de potențial dintre fotocatod și primul dinod. În urma coliziunii, energia electronului primar produce un număr de electroni secundari. Aceștia, la rândul lor, sunt accelerați spre al doilea dinod, unde se formează alți electroni. Procesul se repetă până când anodul colectează un nor de electroni (peste un milion de electroni), rezultând un curent de semnal la ieșire.

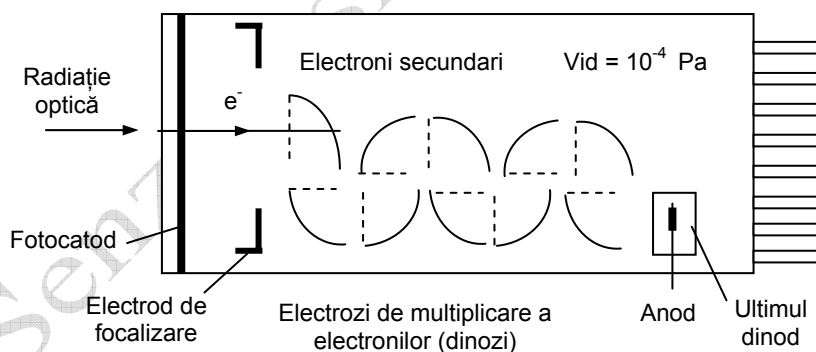


Fig. 2.29

Tipic se folosesc două configurații de fotocatozi:

- opac (sau prin reflexie), folosit la PMT laterale și
- semitransparent (sau prin transmisie), folosit la tuburile fotomultiplicatoare frontale.

Fotocatozii opaci au sensibilitate mai bună în domeniul UV și IR, în timp ce fotocatozii semitransparenți au sensibilitate mai bună în regiunile albastru și verde ale spectrului vizibil.

Numărul și configurația dinozilor determină amplificarea, viteza, liniaritatea și uniformitatea răspunsului.

Există șapte tipuri de tuburi fotomultiplicatoare: circular, cutie cu grilă (fig. 2.29), cu focalizare liniară, venețian, cu rețea fină, placă microcanal și canal. Plăcile microcanal se folosesc pentru intensificarea semnalului, datorită dimensiunilor mici, rigidității, vitezei, liniarității și imunității la câmpuri magnetice. O placă microcanal conține milioane de tuburi capilare paralele. Amplificarea se realizează prin ciocnirea electronilor de pereții interiori, din materiale semiconductoare, ai tuburilor capilare.

Pentru aplicații de preluare de semnale la nivel de element de imagine (pixel), fără interferență între pixeli, se folosesc tuburi fotomultiplicatoare multicanal, denumite și PMT multianod sau PMT sensibile la poziție, cu 64 de canale sau cu de 96 canale. PMT multicanal sunt realizate cu 10 etaje și asigură o amplificare de 10^6 (ca în PMT convenționale) la o tensiune de alimentare de 1000 ... 1200 V. Diferența de câștig între cele 96 PMT este de 3:1. Curentul de întuneric anodic este tipic 5 nA și de ordinul 100 pA/pixel. Interferența între canale este doar 35 % la un pixel față de toți ceilalți opt vecini. În versiunea cu 64 canale interferența scade la 12 %.

Tuburile fotomultiplicatoare singulare (convenționale), pentru un singur foton incident, produc sute mV pe o sarcină de 50 Ω . În aplicații de numărare a fotonilor, de exemplu pentru creșterea sensibilității, tuburile trebuie răcite pentru scăderea zgomotului. Produsul amplificare bandă este 10^{16} iar timpul mediu de bună funcționare 10000 ... 100000 ore.

Dezavantajele PMT sunt următoarele:

- posibilitatea defectării la nivele mari de iradiere optică, datorită saturației date de norul de electroni de la anod,
- fragilitate mecanică și dimensiuni mari,
- perturbare în câmp magnetic,
- existența impulsurilor ecou,
- tensiune mare de alimentare și
- rețea rezistivă de divizare a tensiunii.

2.4.3 Fotodetectoare termice

Fotodetectoarele termice (senzorii optici activi termici) detectează radiația optică răspunzând la creșterea temperaturii în urma absorbției energiei radiației optice în material.

Pentru a arăta diferența de funcționare între senzorii optici activi termici și cei electronici (cuantici), se trasează răspunsul lor spectral (fig. 2.30). Răspunsul spectral măsoară responsivitatea unui fotodetector la diferite lungimi de undă.

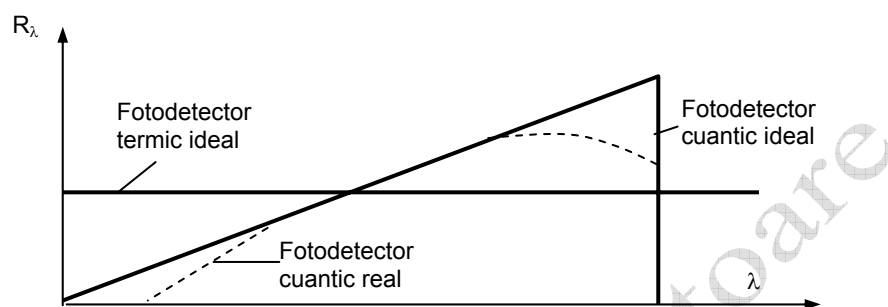


Fig. 2.30

Fotodetectoarele termice au răspunsul spectral plat pentru o gamă foarte mare de lungimi de undă. Fotodetectoarele cuantice au o responsivitate care crește cu lungimea de undă până la un punct de tăiere caracteristic, unde responsivitatea scade spre zero. Acest lucru se datorează faptului că energia fotonilor este invers proporțională cu lungimea de undă și responsivitatea măsoară ieșirea electrică a unui fotodetector la o putere optică dată. Responsivitatea crește astfel cu lungimea de undă pentru că ieșirea unui fotodetector cuantic este proporțională cu numărul de fotoni incidenti.

Tipuri de fotodetectoare termice: termopilele, fotodetectoarele piroelectrice, bolometrele, celulele Golay, etc.

2.4.3.1 Termopile

O termopilă este formată din mai multe termocupluri legate în serie pentru a crește sensibilitatea cu temperatura.

Termocuplul a fost descoperit în anul 1821 de J. Seebeck care a observat că, dacă extremitățile a două fire din metale diferite sunt legate împreună pentru a forma o buclă, prin buclă va trece un curent electric când o joncțiune este menținută la o temperatură diferită de cealaltă. Tensiunea care determină curentul electric generat de termocuplu este direct proporțională cu diferența de temperatură dintre cele două joncțiuni, constanta de proporționalitate fiind denumită coeficient Seebeck.

O schemă simplă de fotodeteție cu termocuplu este dată în fig. 2 31.

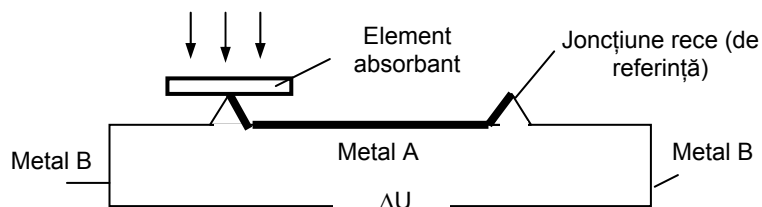


Fig. 2.31

În cazul termopilelor, joncțiunile calde (de măsurare) sunt concentrate pe o suprafață comună de absorbție, subțire, iar joncțiunile reci sunt fixate pe un radiator comun cu masă termică mare.

Cea mai folosită tehnologie de realizare a termopilelor este microprelucrarea siliciului prin procedee fotolitografice. Construcția unei termopile începe cu un substrat de Si din care se înlătură partea de jos din mijloc, rămânând o membrană groasă de 1 μm din $\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$ de conductivitate termică scăzută. Pe membrană se depun conductoare subțiri din două materiale termoelectrice diferite. Conductoarele au joncțiunile calde în centrul membranei, iar joncțiunile reci pe partea superioară a substratului de Si. Stratul absorbant de radiație optică acoperă joncțiunile calde. Cipul senzor se montează cu un contact termic într-o capsulă metalică închisă ermetic cu un filtru integral pentru radiație infraroșie. Numărul maxim de elemente termoelectrice legate în serie este 40.

Senzorii termoelectrice necesită sensibilitate mare și zgomot redus. Senzorul ideal trebuie să aibă coeficient termoelectric mare, conductivitate termică scăzută și rezistivitate de volum scăzută. Materialele termoelectrice folosite sunt bismut și antimoniu dopate cu seleniu sau telurii, materiale semiconductoare (Si cristalin sau policristalin). Rezistivitatea și puterea termoelectrică se pot modifica prin schimbarea concentrației dopanților. Avantajul de bază al Si este compatibilitatea cu procesele CMOS, fiabilitate, stabilitate termică. Produsele realizate în această tehnologie includ termopile cu polisiliciu dopat n și aluminiu.

Senzorul se montează în capsulă cu un termistor pentru măsurarea temperaturii ambiante de referință.

Sensibilitatea unei termopile este dată de raportul între tensiunea de ieșire și puterea optică incidentă:

$$S = \frac{U}{\Phi} \quad [\text{V/W}]$$

unde U este valoarea efectivă a tensiunii de ieșire și Φ este valoarea efectivă a fluxului radiației optice. Sensibilitatea depinde de transmisia filtrului optic, de absorbția suprafeței receptoare a senzorului și de proprietățile termice ale ansamblului senzor capsulat. Cu filtru optic, sensibilitatea este de 5 ... 100 V/W.

Constanta de timp este durata răspunsului semnalului după o variație a puterii radiației optice incidente, măsurată când semnalul a atins 63 % din valoarea sa finală. Tipic, valoarea este 10 ... 100 ms.

Răspunsul în frecvență al unei termopile depinde de constanta de timp. Termopilele din Si microprelucrat au benzi de frecvență de la 0 ... 5Hz până la 0 Hz ... 10Hz.

Radiația incidentă afectează adesea nu numai suprafața senzorului ci și capsula sa; dacă și capsula se încălzește, semnalul de ieșire va fi afectat. Acuratețea cea mai bună de detecție se obține când radiația optică incidentă este focalizată pe suprafața senzorului.

Un alt factor care afectează acuratețea măsurătorii este temperatura ambiantă. Pentru minimizarea acestui efect se folosesc tehnici electronice de compensare a temperaturii. Termopilele au coeficienți de sensibilitate cu temperatura de 0,01 .. 0,5 %/ K.

2.4.3.2 Fotodectoare piroelectrice

Fotodectoarele piroelectrice folosesc un element absorbant feroelectric care are moment de dipol electric intern permanent, adică dipolii atomici ai substanței au o direcție preferențială de polarizare, chiar în absența unui câmp electric aplicat. La creșterea temperaturii, vibrațiile rețelei cristaline a materialului feroelectric reduc polarizarea materialului până la dispariția sa, la punctul Curie. La orice temperatură fixă sub punctul Curie, polarizarea internă a materialelor feroelectrice nu se manifestă extern pentru că este neutralizată de purtătorii de sarcină liberi din material sau din afara lui, care migrează la suprafețe. Dacă temperatura variază, variația corespunzătoare de polarizare generează o variație măsurabilă a sarcinii electrice la suprafață.

Pentru a obține o tensiune electrică utilizabilă, se folosesc preamplificatoare de tensiune sau convertoare curent-tensiune.

Amplitudinea semnalului depinde direct de suprafața elementului absorbant, de coeficientul piroelectric (dP/dT) și de rezistența de sarcină. Factorii termodinamici ca emisivitatea, capacitatea calorică și conductivitatea termică afectează responsivitatea la fel ca la celelalte fotodectoare termice.

Absorbanții feroelectrice sunt realizați din:

- materiale dielectrice fără simetrie centrală (sulfat de triglicina (TGS), TGS deuterat, niobat de stronțiu și bariu și tantalat de litiu);

- materialele dielectrice ceramice;
- straturi subțiri din materiale elastice.

Structura fotodectoarelor piroelectrice este dată în fig. 2.32.

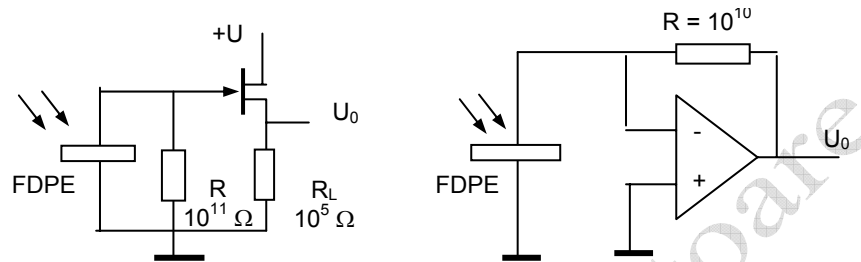


Fig. 2.32

Avantajele fotodectoarelor piroelectrice (FDPE) sunt următoarele:

- gamă mare a temperaturii ambiante, fără răcire sau termostatare;
- cost scăzut;
- gama frecvențelor de modulație a radiației optice 1 ... 60 Hz;
- se pot realiza preamplificatoare simple cu amplificatoare operaționale;
- nu au cerințe speciale pentru sursa de alimentare.

Dezavantajele fotodectoarelor piroelectrice:

- răspund numai la variații ale nivelului radiației optice;
- răspunsul în frecvență nu este plat la un dispozitiv standard, ducând la dificultăți de interpretare a semnalului la ieșire;
- raportul semnal / zgomot este mai mic decât la alte fotodectoare;
- toate dispozitivele piroelectrice sunt piezoelectrice și deci au un răspuns parazit la vibrații;
- sunt afectate de variațiile temperaturii ambiante și de mișcările de aer;
- raportul semnal / zgomot scade la creșterea frecvenței de modulație;
- frecvența maximă este de ordinul kHz.

Din punct de vedere termic, fotodetectorul piroelectric se conectează într-o structură care se comportă ca un radiator: La frecvențe de modulație foarte mari structura nu are nici un efect deoarece căldura absorbită nu are timp să părăsească fotodetectorul. La frecvențe de modulație scăzute, semnalul de ieșire scade spre zero deoarece căldura generată de radiația optică incidentă este preluată de radiator în loc să crească temperatura fotodetectorului. Domeniul lungimilor de undă este 0,1 ... 100 μm .

Analiza responsivității în tensiune (folosind schema din fig. 2.32.a) duce la o dependență de frecvență ca în fig. 2.33.

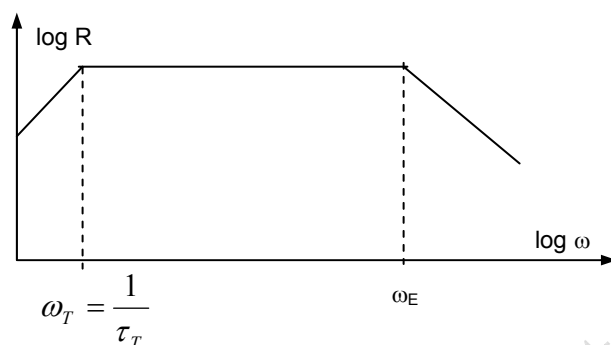


Fig. 2.33

Constanta de timp termică t_i este raportul între căldura care poate fi menținută de fotodetector și viteza la care ea poate fi eliminată în exterior:

$$t_i = \frac{H}{G_T}, \text{ unde } H \text{ este capacitatea calorică iar } G_T \text{ este conductanța termică.}$$

$$\text{Frecvența de tăiere electrică este: } \omega_E = \frac{1}{RC},$$

unde R este rezistența în circuitul de grilă al TECj iar C este capacitatea fotodetectorului piroelectric.

2.4.3.3 Bolometre

Bolometrele folosesc variația rezistenței electrice a materialelor expuse la radiația optică. Primul bolometru realizat în 1880 de către Langley folosea un element absorbant din platină înnegrită, legat în punte Wheatstone. Rezistența electrică a bolometrului crește când platina absoarbe energia radiației optice.

Tipurile moderne de bolometre au două elemente absorbante împerecheate, montate în brațe opuse ale punții. Unul din elementele absorbante nu este expus la radiația optică incidentă, el realizând compensarea cu variațiile temperaturii ambiante. Se folosesc diverse materiale absorbante, chiar și termistoare (oxizi de nichel, mangan și cobalt cu capacitate calorică mică și coeficient de temperatură mai mare decât metalele pure ca platina sau nichelul). Coeficientul de temperatură al metalelor este aproximativ 0,005/ °C la temperatura camerei, coeficientul de

temperatură al termistoarelor este aproximativ $-0,06/^\circ\text{C}$, mai bun cu mai mult de un ordin de mărime decât al metalelor. Coeficientul de temperatură negativ al termistoarelor este la fel ca la semiconductoare. Ca elemente absorbante se folosesc semiconductoare intrinseci și extrinseci (Ge, Si, triseleniură de arseniu).

Funcționarea criogenică a bolometrelor mărește coeficientul de temperatură, micșorează capacitatea calorică, elimină sursele de zgomot dependente de temperatură (zgomotul Johnson), cresc rezistența electrică și fac posibilă realizarea bolometrelor superconductoare. Aceste bolometre funcționează la temperatura de tranziție a superconductoarelor, unde rezistența variază radical cu temperatura, rezultând sensibilități foarte mari.

Dezavantajul bolometrelor este că temperatura lor ambiantă trebuie să fie precis controlată pentru a evita variațiile ridicate nedorite ale rezistenței.

2.4.4 Suprafețe de fotodectoare

Suprafețele de fotodectoare realizate pe același substrat au mai multe avantaje față de fotodectoarele singulare: rezoluție spațială, preluarea rapidă a semnalelor pentru multiplexare, sensibilitate foarte mare și semnalele pot fi integrate pentru a obține timpi mari de expunere.

Sunt două tipuri de astfel de suprafețe, și anume:

a. Suprafețe de fotodectoare electronice

- suprafețe de fotodiode (fotodiode p-n polarizate invers din Si, fotodiode p-n nepolarizate din Ge sau fotodiode Schottky din PtSi);

- suprafețe de fotorezistoare, realizate din Si extrinsec;

- suprafețe cu transfer de sarcină electrică (suprafețe de condensatoare MOS și amplificatoare de sarcină MOS). Transferul de sarcină reprezintă transferul unei sarcini electrice mobile stocată într-un element semiconductor, spre un element de stocare similar aflat în vecinătate, prin manipularea externă a valorii unor potențiale. Sarcina electrică se transferă în două moduri: prin cuplaj sau prin injecție.

- suprafețe CMOS, compatibile cu tensiunile TTL.

b. Suprafețe de fotodectoare termice

Fotodectoarele termice sunt folosite în domeniul infraroșu, la temperatura camerei, deoarece performanțele variază puțin cu temperatura.

Sunt sensibile pentru radiația optică din gama $8 \dots 14 \text{ nm}$, unde transmisia atmosferică este mai mare.

Dintre fotodectoarele termice, pentru realizarea suprafețelor se folosesc bolometrele și fotodectoarele piroelectrice. Avantajele acestora față de suprafețele de fotodectoare cuantice constau în simplitate, funcționare fără răcire,

rezultând astfel preț scăzut. O cameră de luat vederi cu suprafețe de bolometre poate fi folosită în aplicații de larg consum.

Senzori si Traductoare