

Capitolul 9. Structuri de dispozitive semiconductoare discrete

Sunt prezentate diferite structuri de dispozitive, dintre care unele sunt de dată recentă și care funcționează fie pe bază de joncțiuni, fie pe bază de heterojoncțiuni. Tranzistoarele cu nitrit de galiu, sunt asemenea prezentate, punându-se în evidență performanțele remarcabile ale acestora.

9.1. Diode

Diodele semiconductoare se pot realiza în tehnologie planară, joncțiunea fiind realizată prin difuzarea sau implantarea impurităților în placheta semiconductoare tăiată după un plan cristalografic prestabilit. În fig. 9.1a este reprezentată o diodă semiconductoare cu structura planară epitaxială utilizată pentru redresarea tensiunii alternative, pentru stabilizarea unei tensiuni variabile, pentru detecție sau comutație. Stratul dopat suplimentar „n+” micșorează rezistența în sens direct a diodei – datorită numărului suplimentar de purtători de sarcină. Diodele varicap se pot realiza atât în tehnologia planară cât și prin aliere. Pentru ca variația capacității de barieră să fie pronunțată, atunci când tensiunea inversă, aplicată diodei se modifică, este necesar ca profilul de impurități al joncțiunii să fie abrupt. Un profil hiperabrupt se obține prin aliere (fig. 9.1b). Diodele varicap sunt utilizate în circuite acordate, sau pentru mixare și modulație în frecvență.

Diodele Schottky, cu joncțiuni de tip metal – semiconductor (fig. 9.1c), funcționează cu un singur tip de purtători majoritari de sarcină – electroni. Pentru mărirea tensiunilor de străpungere inversă stratul din bioxid de siliciu se metalizează parțial, sau se realizează un inel de gardă dintr-un semiconductor de tip „p”. Metalizarea anodului diodei este realizată din mai multe straturi, fiecare strat având o funcție bine precizată. Primul metal depus pe stratul epitaxial de tip „n” este crom sau molibden – care conferă proprietăți de contact optime. Al doilea strat este din nichel, care corespunde din punct de vedere al interacțiunilor cu aliajele utilizate pentru atașarea terminalului și reprezintă un ecran prin care se evită contaminarea contactului cu compuși ai aliajului folosit pentru atașarea terminalului. Al treilea strat este din argint, care protejează stratul de nichel împotriva oxidării. Diodele Schottky funcționează la frecvențe ridicate și sunt utilizate în circuite detectoare, modulatori sau convertori din domeniul microundelor.

Diodele PIN se caracterizează prin existența unui strat semiconductor intrinsec între două straturi extrinseci de tip opus (fig. 9.1d). Regiunea intrinsecă, cu rezistivitate ridicată, este fie un strat semiconductor „p” (denumit π), fie un strat „n” (denumit μ), iar joncțiunea PIN este fie p^+pn sau $p\pi n$, fie pnn^+ sau $p\mu n$. Procedul de obținere al unei joncțiuni PIN în tehnologia planară, constă în creșterea unui strat epitaxial pe un suport monocristalin, cu puritate mai ridicată decât a suportului și care constituie stratul intrinsec. În etapa următoare se depune epitaxial un strat în care purtătorii de sarcină sunt de tip opus. Diodele PIN au tensiuni de blocare mai ridicate, iar aplicațiile lor sunt în domeniul microundelor.

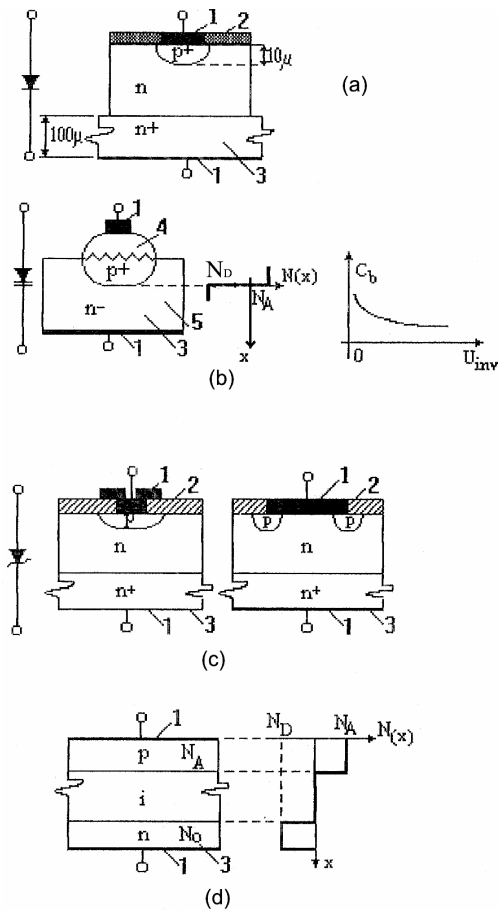


Fig. 9.1 Structuri de diode semiconductoare : planar – epitaxială (a), aliată – varicap (b), Schottky (c), PIN (d). 1 – metalizări; 2 – bioxid de siliciu; 3 – siliciu; 4 – indiu; 5 – germaniu.

9.2. Tranzistoare bipolare

Tranzistoarele bipolare sunt dispozitive semiconductoare cu două joncțiuni și pot fi realizate în tehnologie planară sau prin aliere. În fig. 9.2 sunt reprezentate diferite structuri de tranzistoare bipolare.

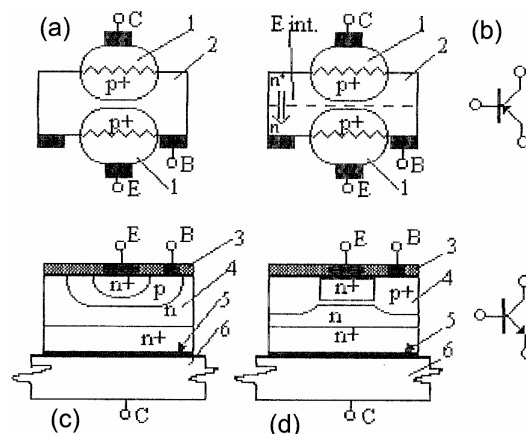


Fig. 9.2 Structuri de tranzistoare bipolare : aliat (a); difuzat – aliat (b); planar – epitaxial (c); dublu implantat (d). 1 – indiu; 2 – germaniu; 3 – bioxid de siliciu; 4 – siliciu; 5 – aliaj aur – nichel; 6 – ambaza.

Tranzistoarele cu germaniu, se pot realiza prin alierea pastilelor din indiu cu placheta din germaniu (fig. 9.2.a). Dacă se realizează un gradient de concentrație a purtătorilor majoritari – electroni – determinând apariția unui câmp electric de drift, timpul de tranzit al purtătorilor minoritari în bază se micșorează și determină mărirea frecvenței limită superioară de funcționare a tranzistorului (fig. 9.2.b).

Tranzistoarele cu siliciu se realizează în tehnologie planară, joncțiunile semiconductoare fiind realizate prin difuzie (fig. 9.2c), sau implantare ionică (fig.9.2d). Prin implantare ionică, grosimea bazei se poate reduce și astfel frecvența limită superioară de funcționare, se mărește. Baza este mai slab dopată decât emitorul pentru ca purtătorii majoritari din emitor să contribuie în măsură mai mare la formarea curentului din emitor. Pentru mărirea performanțelor, se utilizează difuzii sau implantări duble, se creează straturi îngropate sau insule de ecranare sub contactul de bază, se decupează regiunile laterale ale joncțiunilor semiconductoare, sau se utilizează materiale semiconductoare compuse, cu mobilități ridicate ale purtătorilor de sarcină. Formele constructive ale tranzistoarelor bipolare cât și materialele semiconductoare utilizate sunt variate, iar tehnologiile de realizare sunt adaptate pentru realizarea unor dispozitive performante.

9.3 Tranzistoarele unijonctiune

În tranzistoarele unijonctiune, prin intermediul unei joncțiuni semiconductoare se comandă curentul prin dispozitiv. În fig. 9.3 sunt reprezentate tranzistoarele unijonctiune realizate prin aliere sau prin difuziune.

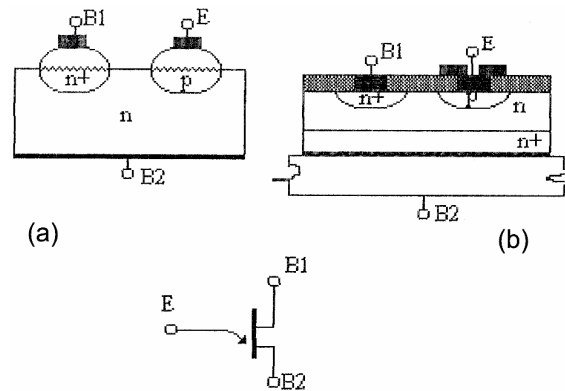


Fig. 9.3 Structura aliată (a) și difuzată (b) de tranzistor unijonctiune de tip „n”.

Tranzistoarele unijonctiune se utilizează în circuite generatoare de impulsuri pentru comanda sincronizată pe fază a tiristoarelor, pentru generatoarele de tensiune liniar variabilă, etc.

9.4 Tranzistoarele unipolare

Tranzistoarele unipolare cu grila joncțiune pot fi considerate tranzistoare de volum, întrucât conducția electrică între sursă și drenă se efectuează într-un canal a cărui secțiune se modifică prin tensiunea aplicată grilei. În fig. 9.4a, este reprezentat un astfel de tranzistor, a cărui formă constructivă este circulară sau închisă, sursa înconjurând grila, iar drenă este localizată centrat. Structura poate fi realizată prin difuziune, sau implantare ionică. Prin implantare ionică,

cantitatea de impurități poate fi mai exact controlată și se asigură un grad ridicat de uniformitate pe suprafața plachetei, precum și o delimitare mai strictă a zonelor impurificate. Printr-o difuzie dublă, se realizează un canal mai îngust decât printr-o difuzie simplă și prin aceasta, se obțin performanțe superioare.

În fig. 9.4b, este reprezentat un tranzistor unipolar cu grila joncțiune de tip Schottky, conducția electrică efectuându-se într-un strat implantat cu sulf. Metalizarea sursei și drenei, este efectuată cu aliaj din aur și germaniu, pentru realizarea joncțiunilor Schottky.

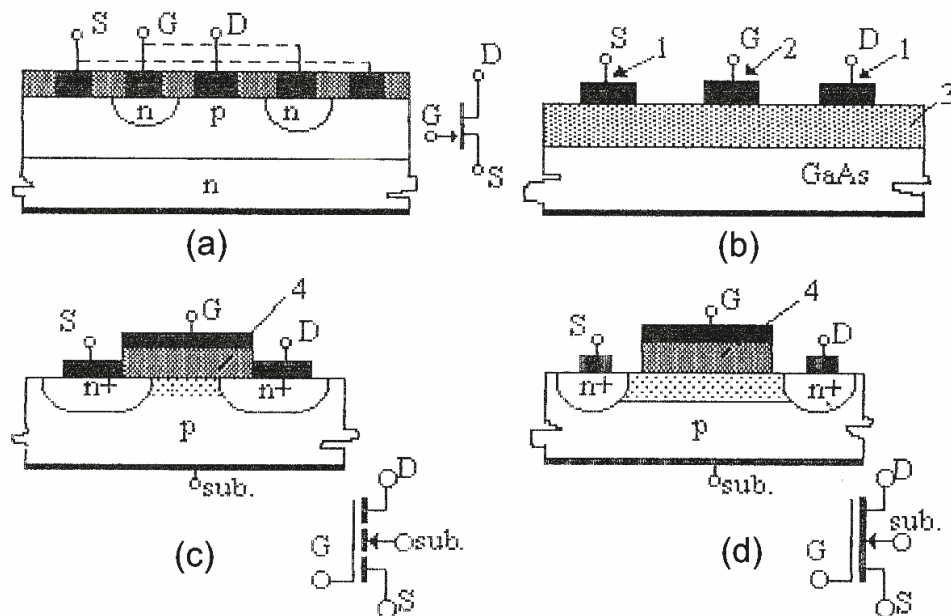


Fig. 9.4 Structuri de tranzistoare cu efect de câmp, realizate în tehnologie planară:
 (a) – cu grila joncțiune și canal „n”; (b) – Schottky cu grila joncțiune;
 (b) – cu grilă izolată și canal „n” indus; (d) – cu grilă izolată și canal „n” inițial. 1 – aliaj aur-germaniu; 2 – aluminiu; 3 – strat implantat cu sulf; 4 – strat izolator.

Tranzistoarele unipolare cu grilă izolată, pot fi considerate tranzistoare de suprafață, întrucât conducția electrică are loc într-un canal sau strat de inversie extrem de subțire. Dacă stratul izolator pe care este depusă grila, este din bioxid de siliciu, tranzistorul este de tip MOS (metal – oxid - semiconductor), sau de tip MIS (metal – izolator - semiconductor), dacă se utilizează un alt material izolator. În structura reprezentată în fig. 9.4c, grila acoperă o parte din regiunile sursei și drenei, pentru realizarea canalului între sursă și drenă. Capacitatea între drenă și grilă este astfel în mod nedorit, crescută. Acest dezavantaj, este înlăturat în structura cu canal inițial din fig. 9.4d, dar prin tranzistor va circula un curent apreciabil chiar și atunci când tensiunea dintre grilă și sursă este nulă, spre deosebire de tranzistorul unipolar cu canal indus. Structurile cu grilă izolată, funcționează în regim de îmbogățire a canalului, în timp ce structurile cu grilă joncțiune funcționează prin sărăcirea regiunilor de sarcină spațială. Datorită impedanțelor de intrare foarte ridicate, pe grila structurilor MOS sau MIS se pot acumula sarcini electrice, care pot determina deteriorarea tranzistorului prin străpungere. Pentru protejarea grilei, acesta se conectează constructiv la substrat, prin intermediul unei diode Zener. De asemenea sursa poate fi conectată constructiv la substrat.

Structurile prezentate ale tranzistoarelor unipolare sunt structuri orizontale, întrucât conducția electrică are loc pe direcții paralele cu suprafețele dispozitivului. Pentru tranzistoarele MOS de putere se utilizează structuri verticale de tip celular. O astfel de structură cu canal dublu implantat este reprezentată în fig. 9.5.

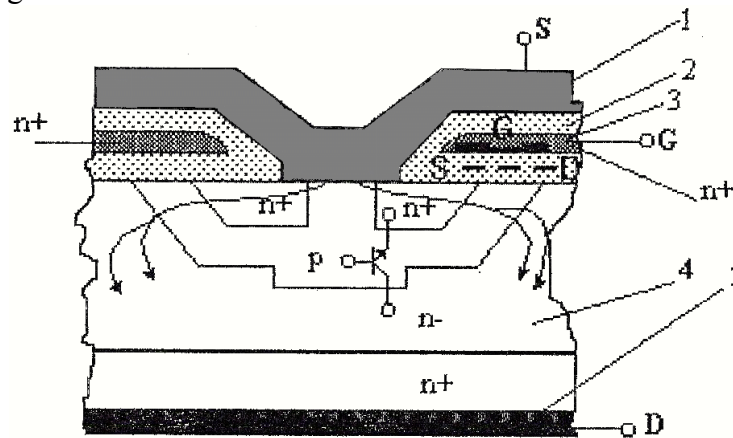


Fig. 9.5 Structura de tip celular a unui tranzistor unipolar de putere cu canal „n”:
1 – metalizări; 2 – bioxid de siliciu; 3 – siliciu policristalin; 4 – strat epitaxial.

Grila este realizată din siliciu policristalin și este îngropată într-un strat izolator din bioxid de siliciu. Prin metalizarea sursei cu aluminiu, se realizează un scurt circuit între regiunile „p” și „n⁺”, conectându-se astfel baza la emitorul tranzistorului bipolar parazit, pentru a preveni comutarea tranzistorului în regim dinamic, iar joncțiunea parazită baza – colector este polarizată invers. Un număr de câteva mii de astfel de celule sunt conectate în paralel. Construcția verticală asigură o utilizare optimă a suprafeței plachetei, o bună disipare de putere și tensiuni de străpungere ridicate. Implantarea dublă, cu o lungime a canalului extrem de redusă, asigură viteze foarte mari de creștere a curentului.

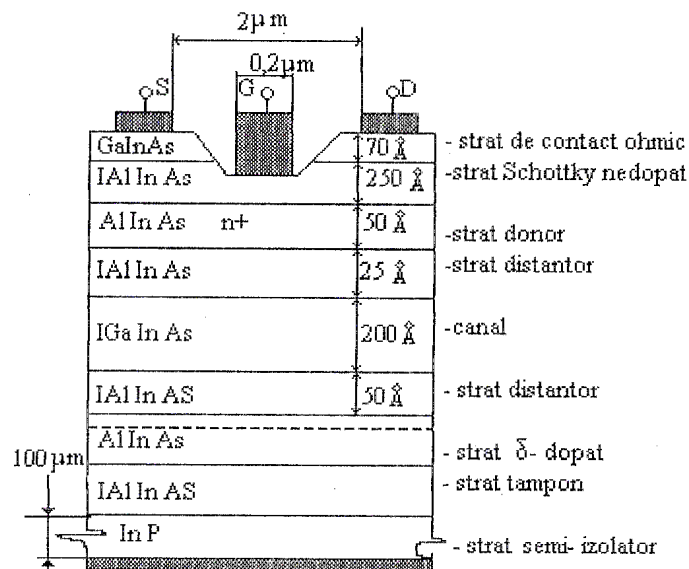


Fig. 9.6 Structura dublu dopată a unui tranzistor HEMT de putere.

Heterostrucura unui tranzistor unipolar de putere cu Al In As – Ga In As, cu înaltă mobilitate a electronilor, este reprezentată în fig. 9.6.

Tranzistorul HEMT este realizat pe o structură dublu dopată, pentru mărirea densității superficiale a electronilor în canal. Secțiunea grilei este de forma literei „T”, cu amprenta de $0,2\mu m$ și lungimea de $800\mu m$, iar înălțimea tranzistorului, este de $100\mu m$. Mobilitatea gazului electronic bidimensional din canal, depășește valoarea: $\mu_n = 10000 cm^2 / Vs$, fiind cu un ordin de mărime mai mare decât mobilitatea electronilor din dispozitivele semiconductoare prezentate anterior. Mobilitățile mari ale gazului electronic din canal, se obțin prin controlul riguros al interfețelor canalului cu straturile vecine. Frecvența limită superioară de funcționare a tranzistoarelor HEMT depășește valoarea de $100GHz$. Cu astfel de tranzistoare se pot realiza circuite amplificatoare, sau oscilatoare în banda de frecvență W.

În fig. 9.7 sunt reprezentate structurile unor tranzistoare cu efect de câmp cu siliciu și nitrit de galiu.

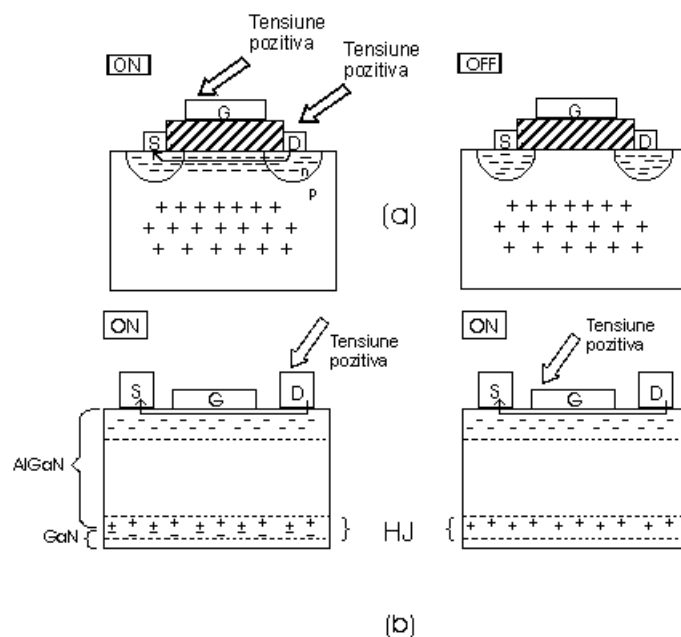


Fig. 9.7 Tranzistoare cu efect de câmp cu siliciu (a) și nitrit de galiu (b) în stări de conducție (ON) și de blocare (OFF).

Într-un tranzistor cu efect de câmp, semnalul de tensiune aplicat pe grilă comandă fluxul de sarcini electrice între sursă și drenă. Modificările mici ale tensiunii pe grilă sunt astfel amplificate, determinând modificări mult mai mari ale curentului, într-un circuit exterior conectat între sursă și drenă. În tranzistoarele cu efect de câmp realizate cu nitrit de galiu și nitrit de aluminiu și galiu, există în mod natural regiuni puternic polarizate cu sarcini electrice în stratul de nitrit de aluminiu și galiu de sub sursă, grilă și drenă. Într-un tranzistor cu efect de câmp cu siliciu, purtătorii de sarcină trebuie atrași printr-o tensiune pozitivă aplicată grilei, iar în absența acestei tensiuni, tranzistorul este blocat – în stare normală. În tranzistorul cu efect de câmp cu nitrit de galiu, la limita dintre stratul din nitrit de aluminiu și galiu, crescut peste stratul de nitrit de galiu, apare o heterojuncțiune HJ. Stratul de sarcini pozitive de la marginea de jos a nitritului de aluminiu și galiu, determină apariția unui strat complementar, format din electroni mobili, în stratul de nitrit de galiu. Electronii mobili din stratul complementar formează gazul electronic bidimensional (2DEG), care

există în mod natural. O tensiune negativă aplicată grilei, interferează cu acest strat, oprind curgerea curentului.

Dacă starea normală a tranzistorului cu efect de câmp cu siliciu, este blocată (OFF), în absența unei tensiuni pozitive aplicată grilei, starea normală a tranzistorului cu efect de câmp cu nitrit de galiu, este starea de conducție (ON), cu condiția ca să fie aplicată o tensiune între drenă și sursă.

Din punct de vedere constructiv, grila trebuie să aibă o geometrie lungă, (pentru puteri mari) și îngustă, (pentru frecvențe mari). Pentru grile înguste, timpul de tranzit al electronilor este micșorat, iar lungimea grilei este limitată de degradarea semnalului dintr-o latură la alta a grilei. Pentru frecvențe de 10 GHz, s-au realizat tranzistoare cu efect de câmp cu nitrit de galiu cu densități de putere pe unitatea de lungime a grilei, de 10 W/mm, valoare care este atinsă doar de un număr redus de tranzistoare cu galiu arsen, care nu depășesc, în general, valoarea de 1 W/mm la 10GHz, în timp ce tranzistoarele ordinare cu siliciu amplifică eficient semnalul electric până la frecvențe de 2 ÷ 3 GHz.

9.5 Dispozitive multijoncțiune

În figura 9.8 sunt reprezentate câteva dispozitive semiconductoare multijoncțiune.

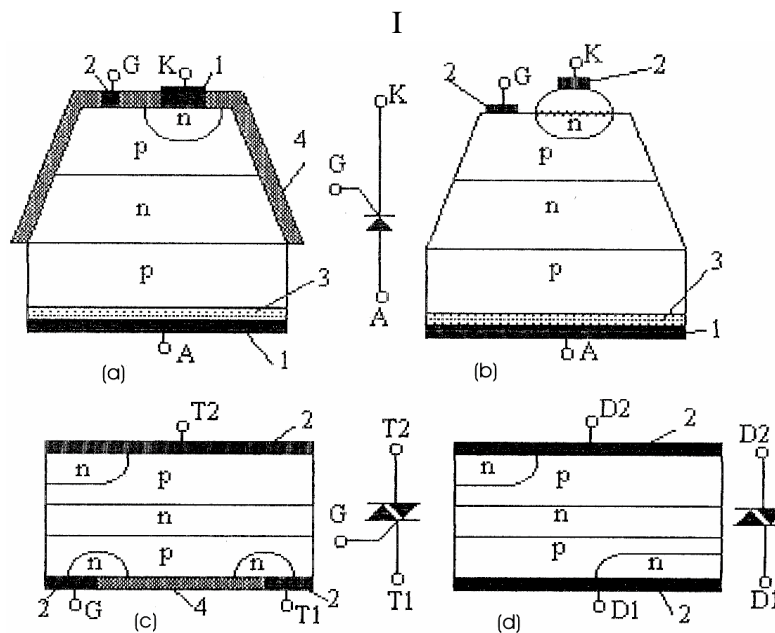


Fig. 9.8 Structuri de dispozitive semiconductoare multijoncțiune: tiristor dublu difuzat (a) și aliat difuzat (b); triac (c) și diac (d)
 1 – disc din molibden; 2 – metalizări; 3 – aliaj aur-nichel;
 4 – bioxid de siliciu.

Caracteristicile tensiune – curent ale dispozitivelor semiconductoare multijoncțiune, prezintă porțiuni cu panta (sau rezistența) negativă, permițând astfel comutarea din starea locală în starea conductoare, prin injectarea unui curent în electrodul poartă (fig. 9.8a,b). Tranziția din stare conductoare în stare blocată, se efectuează prin inversarea tensiunii aplicate între anod și catod. Curenții prin tiristor, au valori mult mai ridicate decât curenții prin poartă, iar tensiunea inversă între catod și anod este de asemenea ridicată. Tiristoarele cu blocare pe poartă (GTO), prezintă și posibilitatea tranziției din starea conductoare în starea blocată, prin aplicarea unei tensiuni corespunzătoare pe

poartă. Pentru blocarea tiristoarelor cu blocare asistată pe poartă (GATT), se inversează mai întâi tensiunea anod – catod, iar apoi se aplică semnal pe poartă. În tiristoare, puterea este disipată pe joncțiunea corespunzătoare anodului, iar anodul este în contact electric și termic cu ambaza sau carcasa metalică, care se montează pe un radiator. Triacul și diacul se pot considera ca fiind formate din două tiristoare, respectiv diode, conectate prin construcție în opoziție (fig. 9.7c,d).

Dispozitivele semiconductoare multijoncțiune sunt utilizate frecvent pentru controlul și comanda curenților alternativi industriali, dar nu au aplicații și în circuitele electronice de puteri reduse.

9.6 Dispozitive optoelectronice

În fig 9.9 sunt reprezentate câteva structuri uzuale de dispozitive semiconductoare optoelectronice.

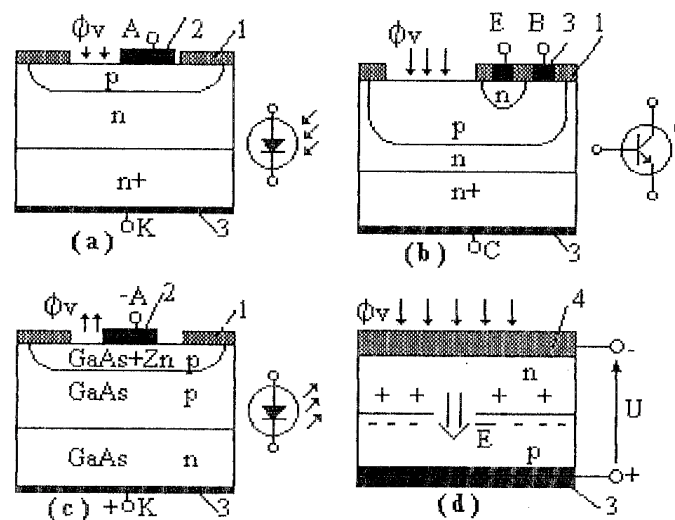


Fig. 9.9 Structuri de dispozitive semiconductoare optoelectronice: fotodiada difuzantă (a); fototranzistor (b); dioda emisivă (c) și celula fotoelectrică (d). 1 – bioxid de siliciu; 2 – electrod din aur; 3 – metalizări; 4 – electrod transparent.

Dispozitivele semiconductoare optoelectronice realizează conversia fluxului luminos incident Φ_v , în curent sau tensiune electrică, prin efect fotoelectric intern, sau funcționează pe baza procesului de emisie a radiației luminoase atunci când se aplică materialului semiconductor un câmp electric, sau este parcurs de un curent electric. Din prima categorie fac parte fotodiodele, fototranzistorii și celulele fotoelectrice. Pentru realizarea conversiei, este necesar să se aplice fotodiodelor sau fototranzistoarelor, o tensiune electrică, în timp ce în celula fotoelectrică conversia se face direct. Fluxul incident Φ_v , generează perechi electron – gol, care se deplasează spre electrozi datorită existenței câmpului intern E , din zona de sarcină spațială a joncțiunii. Tensiunea care apare la electrozii fotocelulei, este rezultatul acumulărilor de sarcini electrice pe electrozi și este în raport direct cu iluminarea suprafeței expuse fluxului luminos. Pentru obținerea unui randament ridicat al conversiei într-un domeniu larg de lungimi de undă, celulele fotoelectrice se realizează din mai multe joncțiuni suprapuse. Joncțiunea colector – bază a fototranzistoarelor, se polarizează invers,

la fel ca și la diodele emisivive, jonctiunea emitor – bază fiind polarizată direct sau nepolarizată. Electronii generați prin efect fotoelectric, se deplasează spre colector, iar golurile se deplasează spre bază și încarcă baza cu sarcină electrică pozitivă, polarizând direct baza, ceea ce determină injecția electronilor din emitor în bază. Curentul de injecție la emitor, durează atât timp cât golurile generate din bază se recombina sau difuzează prin jonctiunea emitor-bază.

Un senzor corespunzător unui pixel, pentru cele trei culori considerate fundamentale în sistemele de prelucrare digitală a imaginii și de televiziune, este reprezentat în fig. 9.10.

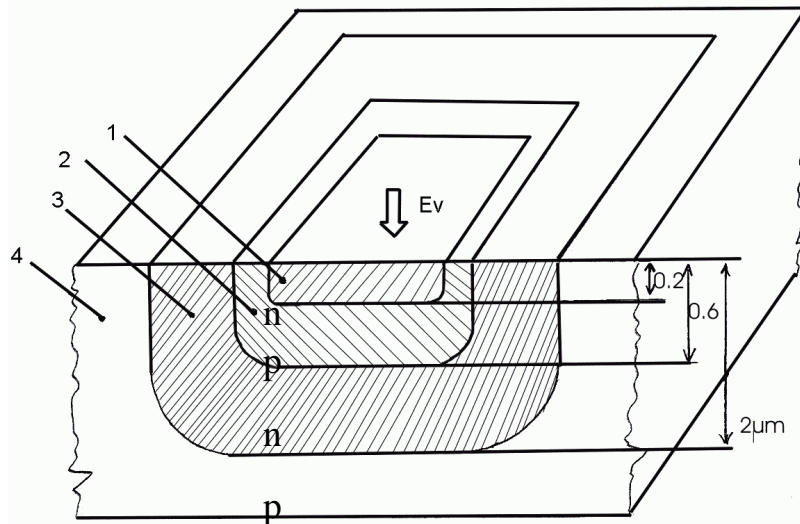


Fig. 9.10 Senzor difuzat pentru cele trei culori fundamentale:
 1 – drenă de tip „n” slab dopată; 2 – strat de tip „p”,
 colector în spectrul albastru; 3 – strat de tip „n”, colector în
 spectrul verde; 4 – substrat de tip „p”, colector în spectrul roșu.

Senzorul este format din trei straturi cu absorbție a radiațiilor în spectrele: albastru, verde și roșu. Radiațiile cu frecvență și energii mai ridicate din spectrul albastru, sunt absorbite de primul strat, în timp ce radiațiile din spectrul verde sau roșu – cu frecvențe și energii mai reduse trec prin primul strat colector, pentru că energiile acestor radiații sunt insuficiente pentru a produce tranziția electronilor din banda de valență în banda de conducție, prin escaladarea benzii interzise. Analog se produce absorbția radiațiilor din spectrul verde în stratul colector plasat sub primul strat colector, iar în substrat sunt absorbite radiațiile din spectrul roșu, care au frecvențele și energiile cele mai scăzute din spectrul vizibil și care traversează primele două straturi. Acest tip de senzor îmbunătățește sensibil rezoluția și contrastul imaginilor captate.

Structura diodei fotoemisivive din fig. 9.9c, este alcătuită dintr-un substrat semiconductor opac și un strat optic activ, dopat cu zinc situat la suprafața de emisie. În domeniul infraroșu se utilizează GaAs, în roșu – galben GaAsP, în roșu – GaPZn, în verde – galben GaPN, iar în albastru ZnSe. Nitritul de galiu se utilizează pentru emisia în toate culorile spectrului, inclusiv pentru lumina albă.

Procesele care au loc într-o diodă fotoemisivă și o diodă LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), nu diferă în mod esențial. Dioda fotoemisivă poate fi considerată o diodă LASER de calitate inferioară, iar dioda LASER poate fi considerată drept o diodă emisivă de foarte bună calitate. În general, un LASER este format din trei elemente importante: un mediu activ, o

sursă de pompaj și o cavitate rezonantă (fig. 9.11a). Sursa de pompaj pentru un mediu semiconductor, poate fi o sursă optică (pompaj optic), un fascicul de electroni sau un curent printr-o joncțiune p – n. Cavitatea rezonantă nu este neapărat necesară. Rolul cavității constă în scurtarea LASER-ului din punct de vedere constructiv și în stabilirea profilului modului electromagnetic.

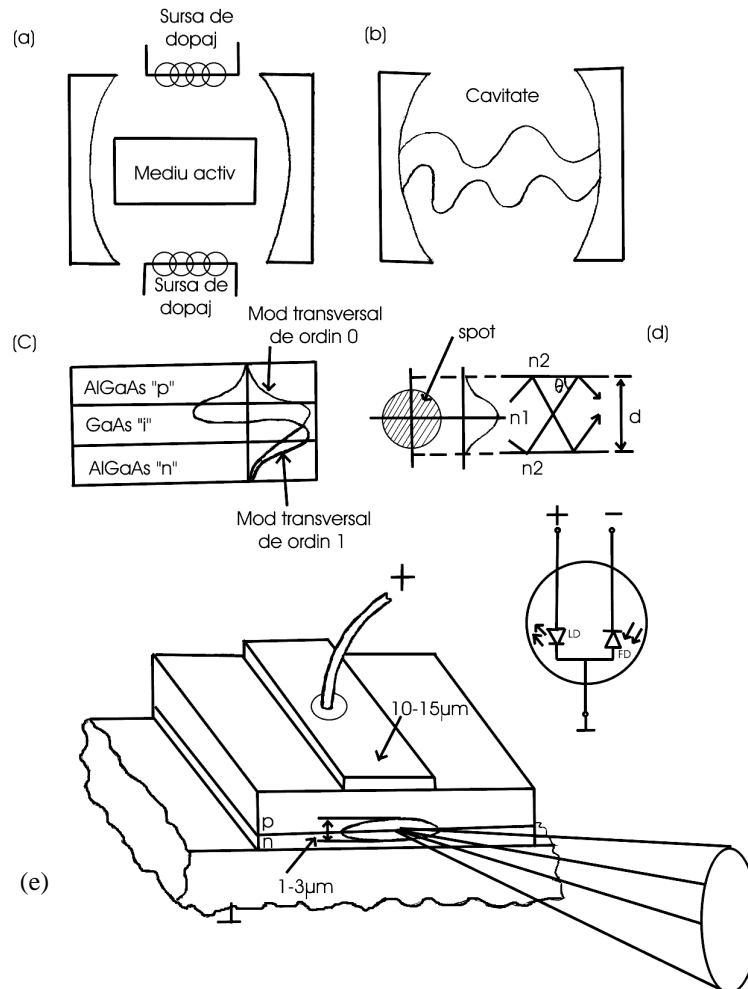


Fig 9.11 Reprezentarea simplificată a unui LASER (a), a cavității rezonante (b), a heterojoncțiunii duble cu distribuția câmpului optic (c), a modului electromagnetic transversal de ordinul zero (d) și a diodei LASER cu emisia în lungul joncțiunii (e).

În cavitatea rezonantă, undele electromagnetice se reîntorc în punctul de plecare după două reflexii pe cele două suprafețe ale cavității. Datorită surselor de pompaj și mediului activ în care se propagă, câștigul este mai mare sau egal cu pierderile, iar undele electromagnetice ajung în punctele de plecare cel puțin cu aceeași intensitate cu care au plecat. Câștigul din joncțiunea semiconductoră puternic dopată, este foarte mare și este generat prin inversie de populație între benzile de conducție și de valență ale semiconductorului. Coerența se obține prin amplificarea acelor unde, care formează unde staționare în cavitate. Lungimea cavității trebuie să fie egală cu un număr întreg de jumătăți de lungimi de undă, pentru a obține unde staționare în cavitate. Multiplii întregi ai jumătăților de lungimi de undă, se numesc modurile longitudinale ale cavității. Desigur că există o infinitate de lungimi de undă, care satisfac condiția ca lungimea cavității să fie un multiplu întreg al jumătății de lungime de undă, dar numai un număr

finit de unde formează unde staționare în cavități, iar acest număr (1000 – 2000), depinde de cavitățile LASER-ului. Aceste lungimi de undă sunt centrate simetric pe lungimea de undă a radiației cu amplificarea maximă în cavități.

Spotul de ieșire al fasciculului LASER, este denumit modul electromagnetic transversal (TEM). În majoritatea LASER-elor, modul transversal este de ordinul zero și este un spot de formă rotundă și cu un profil Gaussian al câmpului optic în secțiune transversală (fig. 9.11d). Spotul de ieșire al unei diode LASER cu emisie a radiației în lungul joncțiunii, nu este rotund ci tinde să devină eliptic, iar divergența tinde să devină largă (fig. 9.11e).

Radiația electromagnetică se propagă într-o diodă LASER într-un mod puțin diferit în comparație cu dioda fotoemisivă. Într-o diodă fotoemisivă, care se polarizează invers, fotonii emiși pot fi modelați ca entități independente, care se propagă în structură la fel ca și niște raze. În dioda LASER, care se polarizează direct, fotonii se modelează ca niște entități colective, care traversează structura într-o manieră confinată (ghidată și focalizată) de-a lungul joncțiunii p-n, parcursă de curent. În fig. 9.11c este reprezentată o heterojoncțiune dublă și undele staționare cu un singur maxim (modul 0) și cu două maxime (modul 1), ale câmpului optic din cavitățile rezonante. Straturile care formează cavitățile, au indici de refracție diferiți, favorizând astfel reflexia undelor electromagnetice. În fig. 9.11d este reprezentat modul în care este reflectată și ghidată (confinată) radiația electromagnetică, în lungul joncțiunii, atunci când unghiul de incidență θ , este mai mic decât un unghi limită, care este o funcție de indici de refracție n_1 și n_2 ai straturilor semiconductoare și pentru care reflexia este totală. Unda electromagnetică poate fi descrisă ca o undă plană, care se propagă în direcția ghidului, cu care face unghiurile: $\pm\theta$, suferind reflexii totale la marginile ghidului și formează unde staționare în direcție perpendiculară pe axa ghidului. Prin modificarea mărimilor θ și d se pot obține mai multe moduri transversale. Densitatea curentului de prag de la care începe emisia stimulată a radiației, pentru heterojoncțiunea de galiu – arsen din fig. 9.11c, are valoarea de ordinul a 500 A/cm^2 , fiind mult mai scăzută decât pentru heterojoncțiunea simplă (7000 A/cm^2) sau pentru joncțiunea p-n (40000 A/cm^2) de galiu – arsen.

Suprafața emergentă a diodei LASER din fig. 9.11e, transmite 95% din radiația incidentă, iar suprafața opusă transmite 5% din radiația incidentă spre o fotodiodă conectată în circuitul de reglaj și stabilizare a curentului prin dioda LASER. Reflexia diferită a celor două suprafețe laterale opuse ale joncțiunii poate fi obținută cu inserții prin clivare.

Funcționarea diodei semiconductoare LASER, reprezentată în fig. 9.12, se bazează pe reflexia Bragg în cristale. Pachetul de straturi reflectorizante este format din perechi Bragg de straturi cu grosimi, compoziții și indici de refracție diferiți. Oglinda Bragg este un reflector distribuit. În apropierea lungimii de undă Bragg, cuplajul între unda directă și cea reflectată, este foarte puternic. Emisia mono-mod este liniar polarizată, direcția de polarizare diferind de la un exemplar la altul, iar divergența fasciculului emis, este redusă. Prin implantare cu protoni se reduce dispersia curentului care stimulează emisia LASER, întrucât rezistivitatea semiconductorului în zona implantată, este crescută. Lungimea de undă a emisiei LASER, este $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, în spectrul infraroșu.

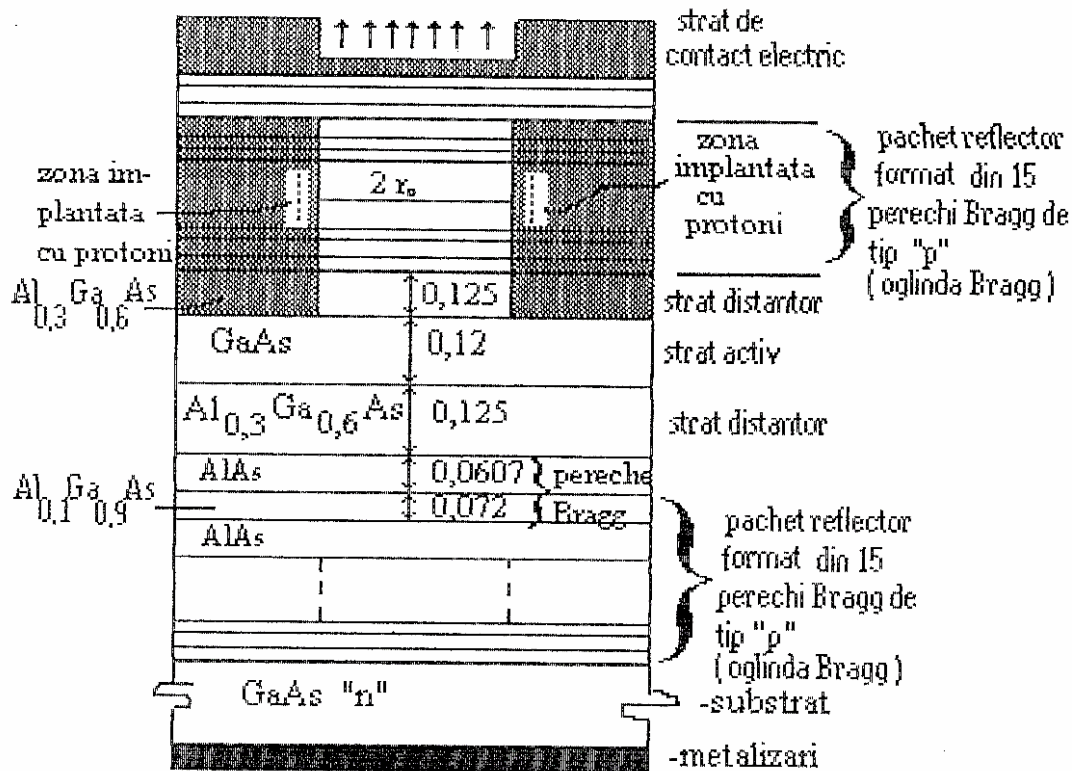


Fig. 9.12 Structura unei diode LASER cu cavitate verticală și emisie de suprafață. Grosimile straturilor sunt în μm .

Diodele LASER cu emisie re suprafață, prezintă avantajul obținerii unui fascicul emis cu secțiune circulară, iar diametrul spotului se poate modifica constructiv, modificându-se în același raport, puterea consumată.

9.7. Limitări in utilizarea dispozitivelor semiconductoare

9.7.1 Limitări de tensiune [Căt]

Străpungerea electrică a unei joncțiuni semiconductoare polarizate invers este de trei tipuri: străpungere prin tunelare, în avalanșă și prin patrundere.

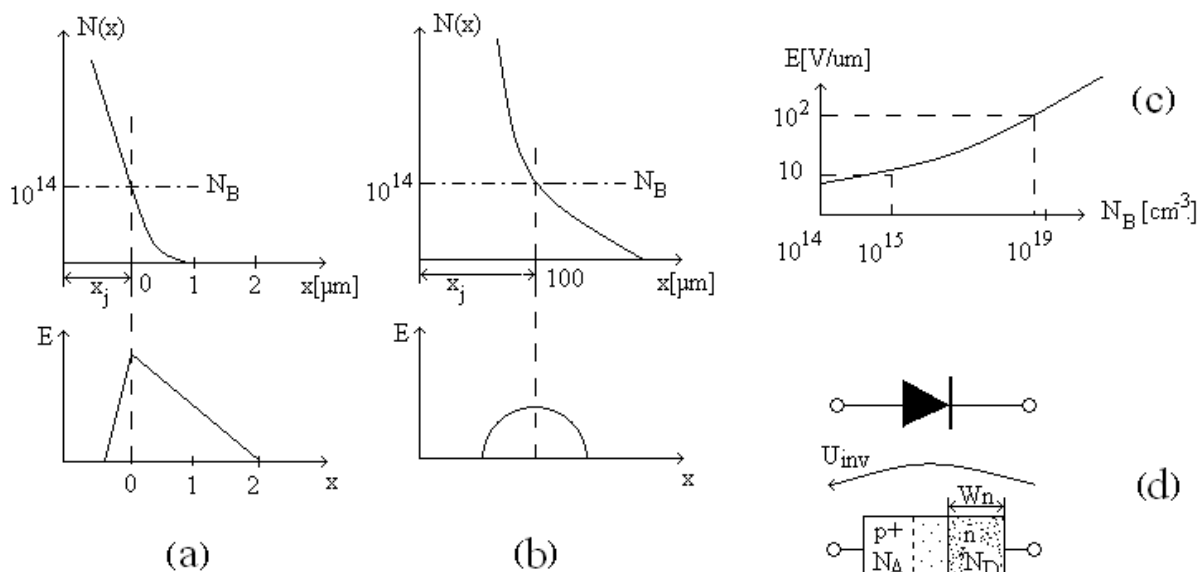


Fig.9.13. Concentrațiile de impurități și câmpurile electrice asociate, pentru joncțiuni abrupte (a) și gradate (b); dependența câmpului de străpungere inversă a joncțiunii, de concentrațiile de impurități ale substratului de siliciu dopat uniform (c). Străpungerea prin patrundere a unei joncțiuni (d).

Străpungerea prin tunelare, sau Zener corespunde tranziției electronilor din banda de valență în banda de conducție, în prezența unui câmp electric exterior intens, ce depășește o valoare critică: $E_{cr} \cong 100 \text{ V}/\mu\text{m}$. Acest tip de străpungere apare în joncțiuni cu dopări puternice: $N_S = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, profil abrupt și zone de tranziție ale joncțiunii foarte înguste ($0,01 \mu\text{m}$) (fig. 9.13a). Pentru concentrații superficiale de impurități N_S cu mult superioare și de tip opus impurităților din placheta semiconductoră dopată uniform cu impurități cu concentrație N_B , lățimea w a zonei de tranziție sau de sarcină spațială, se determină în funcție de tensiunea inversă U_{inv} , aplicată joncțiunii cu relația.

$$w = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{e N_B}} \cdot U_{inv} , \quad (9.1)$$

unde: e , este sarcina electronului, iar tensiunea de străpungere are expresia:

$$U_{str} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2e N_B} \cdot E_{cr}^2 = K_a \cdot E_{cr}^2 , \quad (9.2)$$

Cu creșterea numărului de impurități N_B , coeficientul K_a corespunzător joncțiunii cu profil abrupt, se micșorează și, de asemenea, scade și tensiunea de străpungere. Străpungerea în avalanșă corespunde procesului de ionizare și apare în joncțiuni slab dopate, cu profil gradat de impurități (fig. 9.13b). În prezența unui câmp electric exterior, perechile electron-gol generate termic, obțin între două ciocniri succesive, energii suficient de ridicate, pentru a provoca ruperea unei legături covalente, generând o nouă pereche electron-gol. Câmpul critic pentru străpungerea în avalanșă, corespunzător unor dopări reduse, este $E_{cr} \cong 10 \text{ V}/\mu\text{m}$ și depinde de materialul semiconductor. Lățimea zonei de tranziție a joncțiunii sau de sarcină spațială, este:

$$w = \sqrt{\frac{12\varepsilon_0\varepsilon_r U_{ing}}{e\nabla N(x)}} \quad , \quad (9.3)$$

iar tensiunea de străpungere are expresia:

$$U_{strap} = \sqrt{\frac{32\varepsilon_0\varepsilon_r M_{cr}^3}{9e\nabla N(x)}} K_g E_{cr}^{1.5} \quad , \quad (9.4)$$

Cu cât gradientul de concentrație $\nabla N(x)$ este mai redus, cu atât este mai redus coeficientul k_g corespunzător joncțiunii cu profil gradat și, de asemenea, tensiunea de străpungere este mai redusă. O joncțiune cu o modificare mai redusă a concentrației de impurități în zona de tranziție a joncțiunii, are - pentru același câmp critic - o tensiune de străpungere inversă mai ridicată. Pentru dopări medii, apar ambele tipuri de străpungere (fig. 9.13c).

Suprafețele curbate ale joncțiunilor difuzate favorizează străpungerea, datorită gradului crescut de neuniformitate al câmpului electric. Prin decupare laterală (fig. 9.13a) sau metalizarea stratului de oxid (fig. 9.13b) se elimină acest inconvenient. Reducerea câmpului sau mărirea tensiunii de străpungere, se poate realiza și prin introducerea unui inel de gardă conectat la un potențial convenabil (fig. 9.13c). Acest procedeu, se utilizează frecvent la structuri de tip metal - semiconductor sau Schottky. Străpungerea prin pătrundere (fig. 9.13b), apare în joncțiuni cu lățime w_n , exagerat de redusă. Cu creșterea tensiunii inverse, zona hașurată de sarcina spațială, va ajunge să se extindă pe toată lungimea w_n și să atingă contactul metalic, înainte ca intensitatea câmpului electric - în regiunea spațială să ajungă la o valoare critică. (fig. 9.13d) În momentul atingerii contactului metalic, curentul invers prin joncțiune va crește brusc. Proiectarea dispozitivului semiconductor se efectuează astfel, încât străpungerea prin avalanșă să apară înaintea străpungerii prin pătrundere, obiectiv care se poate realiza prin dopare slabă și grosimi ale structurii suficient de mari.

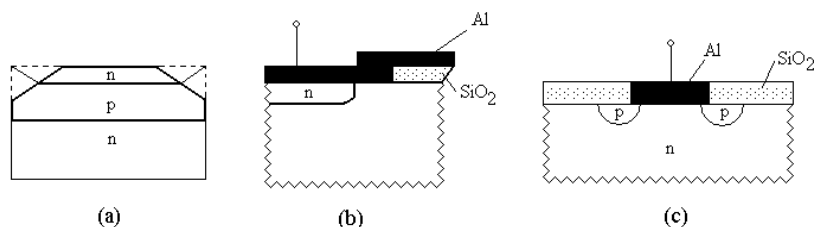


Fig. 9.14 Procedee constructive de micșorare a tensiunii de străpungere inversă a joncțiunii semiconductoare, prin decupare laterală (a), metalizarea stratului de bioxid de siliciu (b) și introducerea unui inel de gardă (c)

La structurile unipolare de tip MOS, datorită rezistenței foarte mari de intrare, pe grila se pot acumula sarcini electrice, care pot conduce la deteriorarea dispozitivului prin străpungere. Protejarea dispozitivului se efectuează prin conectarea în paralel a unei diode Zener, a cărei tensiune de deschidere este superioară tensiunii aplicate dispozitivului la funcționare normală.

9.7.2 Limitari de current

Pentru o joncțiune semiconductoare polarizată direct, la injecții mari de current, se constată o comportare rezistivă determinată de rezistența zonelor neutre ale joncțiunii.

În figura 9.15 sunt reprezentate două structuri de transistor, în care apare efectul de limitare a curentului prin "aglomerare", la periferia emitorului.

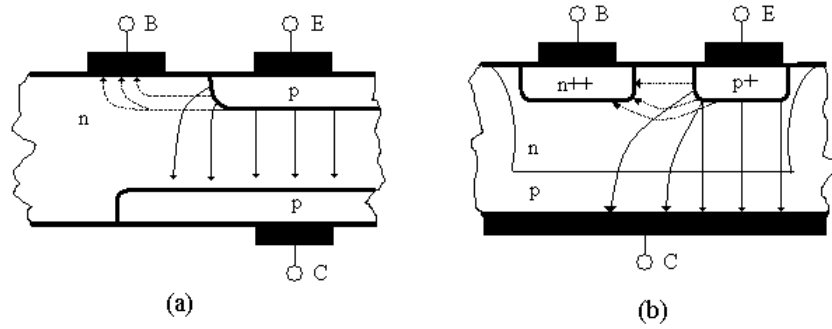


Fig. 9.15 Efectul de „aglomerare” a curentului pentru o structură aliată (a) și difuzată (b) de tranzistor cu concentrații de impurități: $n, p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $p^+ = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; $n^{++} = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$.

Curentul bazei circulă pe o direcție perpendiculară pe direcția curentului de colector. Tensiunea emitor-bază corespunzătoare periferiei emitorului, este inferioară tensiunii emitor-bază corespunzătoare zonei centrale a emitorului. În consecință apare efectul de aglomerare a curentului la periferia emitorului. Pentru evitarea acestui inconvenient, regiunea emitorului se realizează constructiv astfel încât pentru o suprafață a emitorului – precizată prin dimensiunile dispozitivului, suprafața laterală a joncțiunii emitor-bază să fie cât mai ridicată. Acest obiectiv poate fi atins de exemplu printr-o geometrie de tip stelat, sau interdigital a tranzistorului.

9.7.3. Limitări termice [Căt]

Temperatura maximă de funcționare a unui dispozitiv semiconductor cu siliciu este cuprinsă între $150^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$. Pentru evitarea depășirii temperaturii maxime admise, dispozitivul semiconductor se realizează constructiv – atunci când este cazul, astfel încât să permită atașarea unui radiator, care să preia căldura de la dispozitivul semiconductor și să o transmită prin convecție, sau radiație spre mediul ambiant. Rezistența termică între joncțiune și mediul ambiant exterior, are expresia:

$$R_{T_{ja}} = \frac{\Phi_j - \Phi_{amb}}{P_d}, \quad (9.5)$$

unde: Φ_j și Φ_{amb} , sunt temperaturile joncțiunii și mediului ambiant, iar P_d este puterea disipată pe joncțiune. Această rezistență termică - de valoare ridicată, se poate micșora prin atașarea unui radiator. În aceasta situație, schema echivalentă a transmisiei de energie termică, este reprezentată în figura 9.16

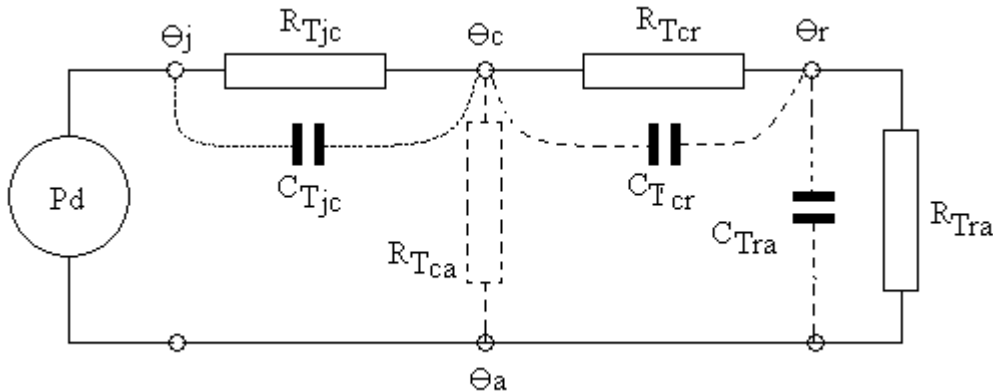


Fig. 9.16 Modelul electric al transferului de energie termica de la joncțiune spre mediul ambiant.

Dispozitivul semiconductor se realizează constructiv astfel încât temperatura capsulei Φ_C , să fie cât mai apropiată de temperatura joncțiunii, sau rezistența termică între joncțiune și capsulă $R_{T_{jc}}$, să fie cât mai redusă. În cazul tranzistoarelor, puterea se disipă cu preponderență pe joncțiunea bază-colector, iar colectorul este în contact direct cu capsula tranzistorului. Rezistența între capsulă și radiator $R_{T_{cr}}$, se micșorează prin realizarea unui contact între capsulă și radiator pe o suprafață extinsă, care să permită transferul de energie termică. Se introduce vaselină siliconică între radiator și capsulă, pentru eliminarea interstițiilor izolate de aer. Pentru reducerea rezistenței între radiator și mediul ambiant $R_{T_{ra}}$, radiatorul se execută din aluminiu profilat, astfel încât suprafața efectivă expusă mediului să fie crescută, favorizând schimbul de căldură cu mediul ambiant, prin convecție, iar eloxarea în culoare neagră a aluminiului, favorizează transmisia energiei termice prin radiație.

Puterea disipată pe joncțiune variază în timp și din acest motiv, în schema echivalentă a transmisiei de energie termică, se introduc capacitățile termice între joncțiune și capsulă $C_{T_{jc}}$, capsulă și radiator $C_{T_{cr}}$, radiator și mediul ambiant $C_{T_{ra}}$: $C_{T_{jc}} < C_{T_{cr}} < C_{T_{ra}}$. Constanta de timp $R_T C_T$, crește din zona activă a joncțiunii spre radiator, cu câteva ordine de mărime. Prin realizarea unor capacități termice mai mari în zona activă a structurii, impulsurile de putere cu care poate fi încărcat dispozitivul se măresc sensibil, dar cresc și dimensiunile dispozitivului.

9.7.4. Limitări de frecvență [Căt]

Limitele superioare ale intervalului de frecvență în care poate fi utilizat dispozitivul semiconductor, sunt determinate de structura acestuia și de prezența inevitabilă a capacităților și inductivităților parazite. Frecvența superioară se poate mări în principal, prin micșorarea capacității joncțiunii semiconductoare C_j .

La polarizare directă a joncțiunii semiconductoare, se manifestă cu preponderență capacitatea de difuzie C_d . Transferul de sarcină electrică, prin intermediul purtătorilor de sarcină majoritari, are loc concomitent cu apariția unor sarcini electrice distribuite spațial pe cele două fețe ale joncțiunii, formate din purtători de sarcină minoritari în exces, și care se asociază prezenței capacități de difuzie:

$$C_d = C_{d_0} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right), \quad (9.6)$$

unde: C_{d_0} , este capacitatea de difuzie în absența unei tensiuni U , aplicate joncțiunii, iar $U_T = kT/e$ este tensiunea termică. Capacitatea de difuzie are valori cuprinse între zeci de pF până la zeci de μ F. Pentru polarizare inversă ($U < 0$), capacitatea de barieră scade exponențial cu tensiunea aplicată (fig. 9.7.5a).

Capacitatea de difuzie se poate exprima în funcție de timpul de viață τ , al purtătorilor minoritari în exces:

$$C_d = g_d \tau, \quad (9.7)$$

unde $g = \frac{di}{du}$ este conductanța diferențială.

Capacitatea de difuzie se micșorează prin reducerea timpului de viață a purtătorilor minoritari de sarcină. În acest sens, se utilizează ca material semiconductor arseniura de galiu GaAs, sau se creează în structura dispozitivului dislocații, care au ca efect nedorit micșorarea tensiunii de străpungere a joncțiunii (vezi anexa 5.1). Limitele care apar datorită capacității de difuzie pot fi evidențiate prin utilizarea structurilor metal-semiconductor sau Schottky, în care curentul electric este constituit exclusiv din purtători de sarcină majoritari.

Capacitatea de bariera devine importantă la polarizarea inversă a joncțiunii semiconductoare și depinde de înălțimea barierei de potențial U_b cât și de tensiunea inversă aplicată joncțiunii. O relație aproximativă este:

$$C_b = C_{b_0} \sqrt{\frac{U_b}{U_b - U}} \quad (9.8)$$

unde: C_{b_0} este capacitatea de bariera în absența unei tensiuni U , aplicate joncțiunii. La polarizare directă, bariera de potențial se micșorează dar nu dispăre în totalitate, ceea ce ar fi echivalent cu dispariția joncțiunii semiconductoare. Prin urmare, tensiunea aplicată diodei polarizate direct nu poate depăși valoarea corespunzătoare barierei de potențial. Tensiunea inversă este limitată superior doar de apariția străpungerii joncțiunii. Cu creșterea tensiunii inverse, capacitatea de bariera se micșorează.

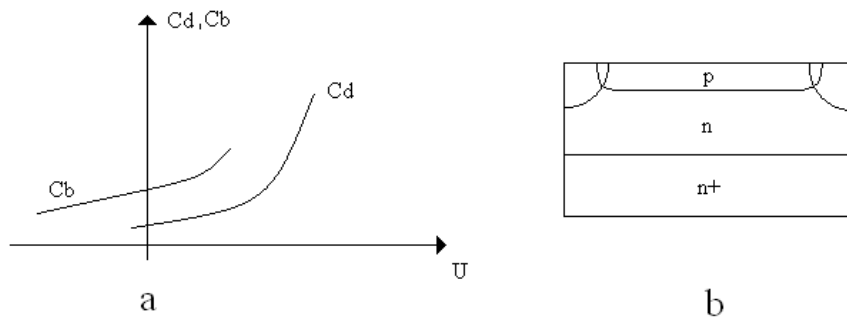


Fig. 9.17 Dependența capacităților de difuzie și bariere de tensiune aplicată (a) și structura cu capacitate de bariera redusă (b)

Legea de variație a capacității de bariera în funcție de tensiunea inversă aplicată, este determinată de profilul concentrației de impurități din vecinătatea joncțiunii.

Capacitatea de bariera maximă este de ordinul zecilor de pF (fig. 9.17a). Capacitatea de bariera se poate exprima în funcție de suprafața joncțiunii S și lățimea efectivă w , a zonei de sarcină spațială:

$$C_b = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{w} \quad (9.9)$$

Conform relației (9.7.9), capacitatea de bariera se poate micșora prin utilizarea materialelor semiconductoare cu permitivitate scăzută, sau cu suprafața redusă a joncțiunii. În figura 9.7.5b este reprezentată o astfel de structură de tip “platou înalt”, în care rezistența serie în sens direct a diodei semiconductoare s-a micșorat printr-o dopare suplimentară de tip n^+ .

Frecvența limită superioară de funcționare a unui tranzistor, este determinată de timpul de tranzit al purtătorilor minoritari în bază, precum și de

valoarea rezistenței distribuite a bazei tranzistorului. Timpul de tranzit poate fi descris prin relația:

$$t_{tr} \cong \frac{w_B}{2D_B}, \quad (9.10)$$

unde: w_B , este lățimea efectivă a bazei, iar D_B este constanta de difuzie a purtătorilor minoritari prin bază. Timpul de tranzit se micșorează prin reducerea grosimii bazei, evitând însă posibilitatea străpungerii prin pătrundere. Prin utilizarea arseniurii de Ga, în care electronii au mobilitate ridicată, timpul de tranzit se micșorează datorită reducerii constantei de difuzie. De asemenea, timpul de tranzit se poate reduce prin utilizarea unei structuri „drift”, care se realizează printr-o dublă difuzie a bazei, astfel încât concentrația de impurități nu mai este uniformă și determină apariția unui câmp electric intern, sau imprimat. Câmpul intern favorizează difuzia purtătorilor minoritari prin bază și reduce timpul de tranzit cu un ordin de mărime.

9.8. Întrebări

1. Descrieți structurile și proprietățile diodelor: planar epitaxială, shottky și varicap;
2. Descrieți structurile tranzistoarelor: planar epitaxialdifuzat și dublu implantat și precizați diferențele care apar în funcționarea acestora.
3. Descrieți structura unui senzor pentru cele trei culori fundamentale și analizați modul de operare al acestuia;
4. Descrieți structurile fotodiodei difuzate și ale diodei fotoemisive.
5. Descrieți structura unui fototranzistor planar epitaxial, cu comentariul asociat.
6. Descrieți structura și performanțele unui tranzistor cu efect de câmp, de putere și cu structură hexagonală;
7. Descrieți structura și procesele care au loc într-un tranzistor HEMT;
8. Descrieți modalitatea de realizare a emisiei stimulate într-o diodă laser;
9. Descrieți structura și procesele care au loc într-o diodă laser cu cavitate longitudinală;
10. Descrieți structura și procesele care au loc într-o diodă laser cu cavitate transversală și emisie de suprafață:

9.9. Anexa

Etapele tehnologice de realizare a unui tranzistor bipolar cu performanțe medii

Studiul plachetelor cu tranzistoare de tip “npn”, în diferite faze tehnologice se efectuează cu un microscop, iar plachetele corespunzătoare principalelor etape tehnologice în ordinea de fabricație, sunt:

1. Material inițial: Substrat N^{**} ; $\rho = 0,007 - 0,015 \Omega\text{cm}$; grosime: 350 - 380 μm ; proveniență Wacker.

2. Epitaxie: Crescut strat epitaxial: $2,6 \Omega\text{cm}$ cu $12 \mu\text{m}$ în proces cu încălzire inductivă prin radiofrecvență; sursă siliciu: SiCl_4 ; temperatură $\cong 1200^\circ\text{C}$; mediu: hidrogen; dopant: fosfină.

3. Oxidare inițială: temperatura: 1150°C ; oxidare umedă utilizând vapori obținuți prin arderea directă a hidrogenului în oxigen (oxidare pyrogenică).

4. Plachetă cu ferestrele de bază deschise. Fotogravură (incluzând și plachetele nr.8, 12, 14). Se realizează folosind măști de sticlă; lac fotosensibil: fotorezist AZ1350 H cu developantul corespunzător; Aliniere - expunere prin proiecție; UV - 200 W; raport proiecție 1:1, atac chimic: oxid în soluție: NH_4F și HF standard; Îndepărtare fotorezist în plasmă de oxigen.

5. Predifuzie bor: 950°C ; sursă: nitrură de bor; mediu: oxigen și azot.

6. Deglazurare: proces pentru înmuiere sticlă de bor; se efectuează termic ($\cong 700^\circ\text{C}$), în vapori și oxigen.

7. Difuzie bor: 1200°C ; cu oxidare; joncțiune $X_B = 2,67 \mu\text{m}$ ($U/I = 30$); concentrație la suprafață: $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Gauss.

8. Plachetă cu ferestrele de emitor deschise.

9. Predifuzie fosfor: 1000°C ; mediu: azot și oxigen; sursă: POCl_3 , la temperatura camerei.

10. Difuzie fosfor: 1050°C ; cu oxidare în vapori; joncțiune: $W_B = 1,07 \mu\text{m}$; $X_E = 2,00 \mu\text{m}$ (măsurare interferometrică); Concentrație: 10^{21} cm^{-3} Gauss.

11. Tratament termic; îndepărtare sticlă de fosfor: 900°C ; mediu: azot cu oxigen.

12. Plachetă cu ferestrele de contacte deschise.

13. Depunere aluminiu; grosime: 10000 \AA ; măsurare cu cristal cuarț în timpul procesului; procedeu depunere: evaporare cu fascicol de electroni - deflecat la 270° ; energie maximă: 10 kW; aluminiu, 99,999% puritate.

14. Plachetă după masca de interconexiuni.

15. Sinterizare: 550°C ; gaz - formare.

16. Lepuire (subțiere) mecanică cu alumină: $12 - 15 \mu\text{m}$ pentru grosime sub $250 \mu\text{m}$, necesară în procesul de trasare.

17. Depunere aur: aur 99,999 %; contact colector; prin evaporare termică în vid.

18. Aliere aur: 400°C ; mediu: azot.