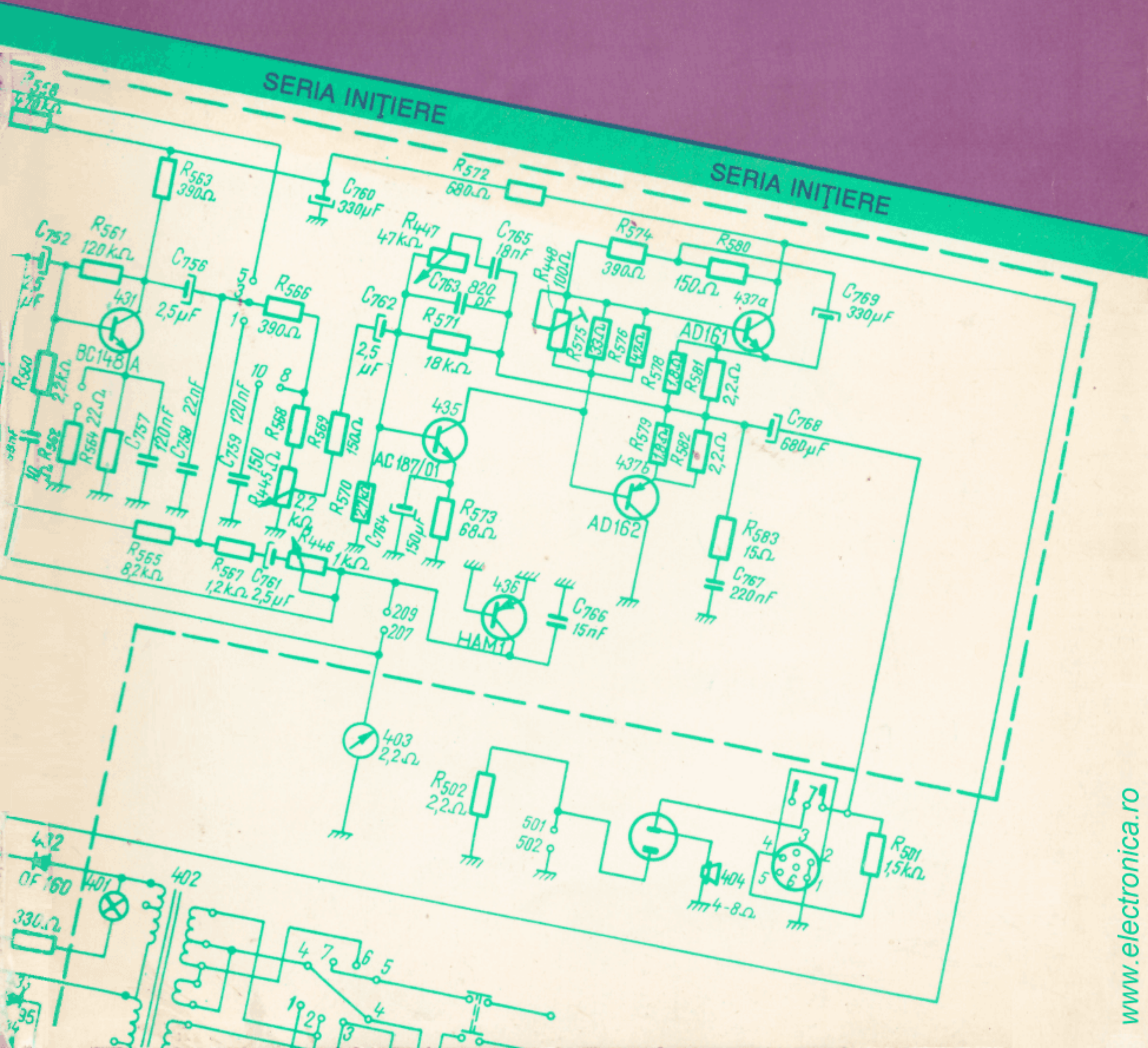


E. SOFRON
C. MIROIU
H.N. TEODORESCU

A B C

Electronica în imagini Componente active

www.electronica.ro



ABC... ELECTRONICA ÎN IMAGINI

www.electronica.ro

**BIBLIOTECA DE
Automatică-Informatică-Electronică-Management
SERIA INIȚIERE**

INIȚIERE ÎN COBOL
STELIAN NICULESCU
INIȚIERE ÎN FORTRAN
I.V. DUMITRESCU ș.a.
INIȚIERE ÎN TELEPRELUCRAREA DATELOR
I. CREȚU
INIȚIERE ÎN ESTETICA PRODUSELOR (Ciclul ABC-uri)
E. AISBERG
ABC DE RADIO ȘI TELEVIZIUNE
Traducere din limba franceză
J. D. WARNIER, B. MI FLANAGAN
INSTRUIRE ÎN PROGRAMARE
Traducere din limba franceză
I. H. BERNHARD, B. KNUPPERTZ
INIȚIERE ÎN TIRISTOARE
Traducere din limba germană
W. DEPPEERT, K. STOLL
INIȚIERE ÎN PNEUMOAUTOMATICĂ
Traducere din limba germană
E. VASILIU
INIȚIERE ÎN RADIOELECTRONICA CUANTICĂ
V. POPESCU
INSTRUIREA PROGRAMATĂ ÎN CALCULATOARE NUMERICE
ȘT. BÎRLEA
INIȚIERE ÎN CIBERNETICA SISTEMELOR INDUSTRIALE
A. CARABULEA
INIȚIERE ÎN INGINERIA SISTEMELOR INDUSTRIALE
I. PAPADACHE
AUTOMATIZĂRI INDUSTRIALE, INIȚIERE, APLICAȚII
ȘT. NICULESCU
FORTRAN. INIȚIERE ÎN PROGRAMARE STRUCTURATĂ
J. FORRESTER
PRINCIPIILE SISTEMELOR. TEORIE ȘI AUTOINSTRUIRE
PROGRAMATĂ
Traducere din limba engleză — S.U.A.
P. DRANSFIELD, D. F. HABER
INSTRUIRE PROGRAMATĂ ÎN METODA LOCULUI RĂDĂCINILOR
R. BÂRSAN
DISPOZITIVE ȘI CIRCUITE INTEGRATE CU TRANSFER DE
SARCINĂ
D. RODDY
INIȚIERE ÎN MICROELECTRONICĂ
Traducere din lb. engleză
CI. NICULESCU, M. IOSIF
INIȚIERE ÎN COMUNICAȚIILE PRIN FIBRE OPTICE
CSABAI DANIEL
TEHNICA SONORIZĂRII (traducere din lb. maghiară)
GH. MITROFAN, G. PFLANZER
INIȚIERE ÎN TELEVIZIUNEA ÎN CULORI
RADU NEGOESCU
INIȚIERE ÎN ELECTRONICA BIOMEDICALĂ
RADU NEGOESCU
INSTRUMENTAȚIA ELECTRONICĂ BIOMEDICALĂ
N. DRĂGULĂNESCU ș.a.
ABC... ELECTRONICA ÎN IMAGINI: COMPONENTE PASIVE

www.electronica.ro

dr. ing. Emil Sofron

dr. ing. Constantin Miroiu

dr. ing. Horia Teodorescu

ABC...

ELECTRONICA ÎN IMAGINI

COMPONENTE ACTIVE

www.electronica.ro



Editura Tehnică

București, 1993

Copyright © 1993, Editura Tehnică
Toate drepturile asupra acestei ediții sînt
rezervate editurii

Adresa: Editura Tehnică
Piața Presei Libere, 1
33 București, România
cod 79738

Prezentul volum continuă ciclul de lucrări **ELECTRONICA IN IMAGINI**. Prima apariție, în 1989, s-a intitulat „Componente pasive”. De această dată autorii prezintă o altă clasă de dispozitive electronice, cuprinzînd diodele, tranzistoarele etc. E vorba de componentele active, omniprezente, și ele, în circuitele și aparatele electronice de toate felurile.

Vor urma lucrări avînd ca subiect circuitele electronice fundamentale, circuitele integrate, echipamente de radio și televiziune ș.a.m.d.

Volumele se adresează tuturor celor care doresc să-și sistematizeze cunoștințele de specialitate, ca și celor care își propun să se inițieze și să se formeze în domeniile menționate mai sus.

www.electronica.ro

Redactor: ing. **Bogdan Zotta**
Tehnoredactor: **Mihai Vlaiciu**
Coperta: **Simona Dumitrescu**

Bun de tipar: 19.11.1993
Coli tipar: 10
C.Z. 621.382

ISBN 973-31-0556-2

CUPRINS

1. MATERIALE SEMICONDUCTOARE DE BAZĂ	7
1.1. Structuri cristaline simple și modalități de preparare	7
1.2. Atomi de germaniu și siliciu	11
1.3. Purtători liberi : electroni și goluri. Generarea și recombinația lor	12
1.4. Atomi donori și acceptori pentru doparea materialelor semiconductoare de bază	14
2. JONȚIUNEA PN. DIODE SEMICONDUCTOARE	21
2.1. Procese și fenomene fizice de bază	21
2.2. Caracteristicile curent-tensiune în diferite situații de lucru	24
2.3. Modalități de realizare tehnologică	30
2.4. Diode semiconductoare	33
3. TRANZISTOARE	35
3.1. Tranzistoare bipolare	35
3.1.1. Definiție și caracterizare generală	35
3.1.2. Caracteristicile statice	38
3.1.3. Tranzistorul bipolar în regim de comutație	39
3.1.4. Tranzistorul bipolar în regim de curent alternativ, la frecvențe înalte	41
3.1.5. Aspecte tehnologice	42
3.1.6. Tipuri de tranzistoare bipolare	47
3.2. Tranzistoare unipolare	48
3.2.1. Tranzistoare unipolare cu joncțiune pe poartă (TEC-J)	49
3.2.2. Tranzistoare unipolare cu poarta izolată (TEC-MIS sau TEC-MOS)	52
3.3. Elemente comparative privitoare la tranzistoarele bipolare și unipolare	54
3.4. Tranzistoare unijoncțiune	54
4. DISPOZITIVE MULTIJONȚIUNE	57
4.1. Definiție și caracterizare generală	57
4.2. Tiristorul	57
4.3. Triacul	59
	<i>www.electronica.ro</i>
5. DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE	60
5.1. Introducere	60
5.2. Mărimi radiometrice și fotometrice	61
5.3. Dispozitive optoelectronice active	66
5.3.1. Efecte de excitație însoțite de emisie de radiație electromagnetică	66
5.3.2. Laserii	71
5.3.3. Diode electroluminescente	75
5.3.4. Dispozitive fotoemitive cu plasmă	77
5.3.5. Dispozitive fotoemitive fluorescente	78

5.3.6. Dispozitive cu efect electroluminescent intrinsec	79
5.4. Dispozitive fotodetectoare	79
5.4.1. Clasificare	79
5.4.2. Parametrii principali	80
5.4.3. Efecte fotoelectrice	80
5.4.4. Detectori bazați pe efectul fotoelectric extern	82
5.4.5. Detectori bazați pe efectul fotoelectric intern	84
5.4.6. Detectori piroelectrici	92
5.5. Modulatoare de lumină	94
5.6. Dispozitive pasive de semnalizare optică și afișaj	96
5.6.1. Principii generale	96
5.6.2. Dispozitive cu cristale lichide	96
5.6.3. Dispozitive electroforetice	99
5.7. Dispozitivele optoelectronice în aplicații	100
5.7.1. Afișajele și comanda lor	100
5.7.2. Panouri solare	103
5.7.3. Optocuploare	103
5.8. Aplicații	105
ANEXE	107
BIBLIOGRAFIE	

www.electronica.ro

Materiale semiconductoare de bază

1.1. STRUCTURI CRISTALINE SIMPLE ȘI MODALITĂȚI DE PREPARARE

www.electronica.ro

Pînă în ultima perioadă a evului mediu, cuvîntul „cristal“ s-a referit numai la cuarț, dar ulterior acest cuvînt a căpătat un înțeles mai general. Regularitatea rețelelor cristaline pentru anumite materiale din natură, respectiv pentru cele crescute în condiții de laborator — observată încă din secolul al XVII-lea — a condus la ideea că există atomi și chiar grupe de atomi ce se repetă în mod regulat, pe anumite direcții și realizează un aranjament periodic tridimensional. O anumită structură cristalină se definește cu ajutorul unei baze, adică a unui grup caracteristic de atomi și a unei rețele specifice pe care se repetă baza respectivă în spațiu. Fiecare bază de atomi se atașează identic în fiecare nod al unei rețele cristaline, rezultînd materiale monocristaline și/sau policristaline cu anumite compoziții, orientări și aranjamente atomice specifice.

În figura 1.1 se prezintă un model de structură monocristalină și un altul de structură policristalină. Pe cale experimentală, cea mai simplă structură policristalină se poate obține suflînd un curent constant de aer prin orificiul unui ac de cusut, ținut deasupra unui vas cu soluție de săpun. Se formează un număr mare de arii cu bule de săpun; bulele din fiecare arie se aranjează în mod regulat, dar orientarea lor în oricare două arii vecine diferă. La marginea suprafeței apare, însă, o deformare vizibilă a stării de ordine în aranjamentul de bule. Pe această cale, descrisă anterior, se poate simula comod o structură *policristalină* pentru germaniu și siliciu în formă brută. Într-un astfel de model, bulele de săpun reprezintă atomii sau chiar ariile unor microcristale.

Cercetările efectuate pe cristale reale au scos la iveală defecte specifice sau rețele false, care prezintă goluri și atomi interstițiali ce intervin suplimentar în generarea și/sau recombinația purtătorilor mobili de sarcină. Asemenea defecte ale rețelelor cristaline influențează nefavorabil comportamentul unei joncțiuni semiconductoare și chiar a unor dispozitive mai complexe care se realizează din astfel de materiale. Pentru industria de componente active, de exemplu cele bazate pe semiconductoare, se impune ca structurile cristaline folosite să nu conțină defecte, adică să se prezinte sub formă de monocristale. Astfel, pentru eliminarea defectelor, germaniul și siliciul în forma lor brută necesită operații avansate de purificare și rafinare.

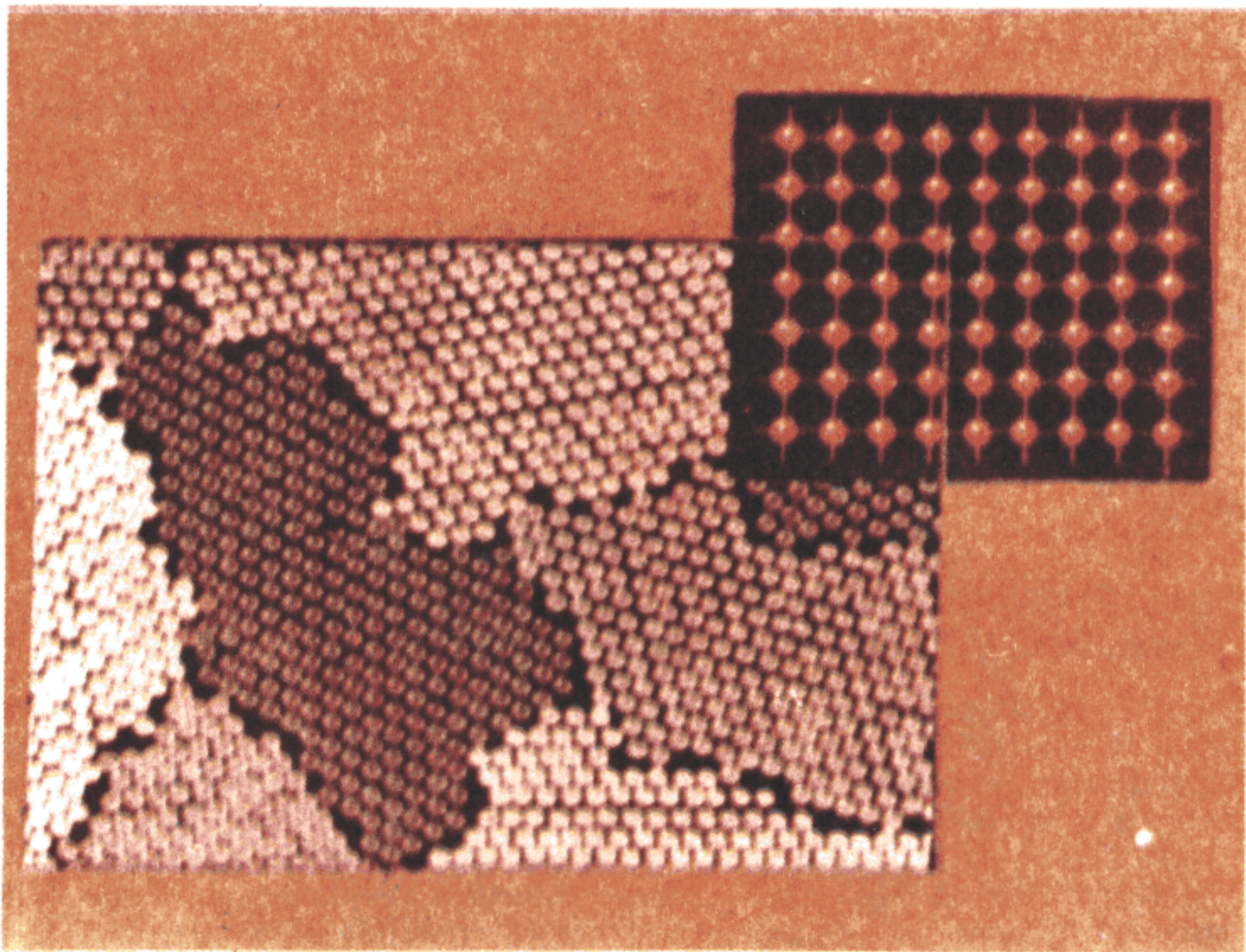


Fig. 1.1. Model de structură cristalină și policristalină.

De exemplu, germaniu brut se poate obține la temperaturi înalte prin reducerea bioxidului de germaniu (GeO_2), în formă de pulbere. Prin acest procedeu se obțin vergele de germaniu policristalin și cu un număr mare de impurități. Cu rezultate mult mai bune se folosește principiul *purificării zonare*, așa cum se arată în figura 1.2 a, b și c, care se aplică materialelor semiconductoare după ce, în prealabil, au fost purificate chimic. În purificarea zonală se folosește proprietatea că, în fază solidă și lichidă, concentrația unei impurități este diferită ($C_S \neq C_L$).

O vergea (B) de germaniu brut, care conține inițial o concentrație de impurități C_i , se plasează într-un creuzet și se deplasează spre stînga, într-un tub de cuarț (A), prin care circulă gaz inert (figura 1.2 a). O spirală îngustă (E) dispusă pe tubul A, este alimentată în curent alternativ de înaltă frecvență și răcită prin interior cu apă pompată de la robinet. Curenții induși în bara de germaniu produc topirea locală a materialului semiconductor (D). Prin deplasarea spre stînga a creuzetului, zona topită avansează de la stînga la dreapta și adună impuritățile de-a lungul vergelei sau a lingoului de germaniu spre capătul acestuia, care se taie și se îndepărtează. De regulă, se trec mai multe zone topite prin același lingou, pentru a se obține un grad mai mare de purificare. Procesul de purificare constă în faptul că concentrația de impurități în fază solidă (C_S), la stînga planului (α) este mai mică decît concentrația de impurități în fază lichidă (C_L), delimitată între planele (α) și (β) (figura 1.2 b). În zona topită apare un gradient de concentrație pentru C_L , care face ca impuritățile să curgă spre dreapta prin

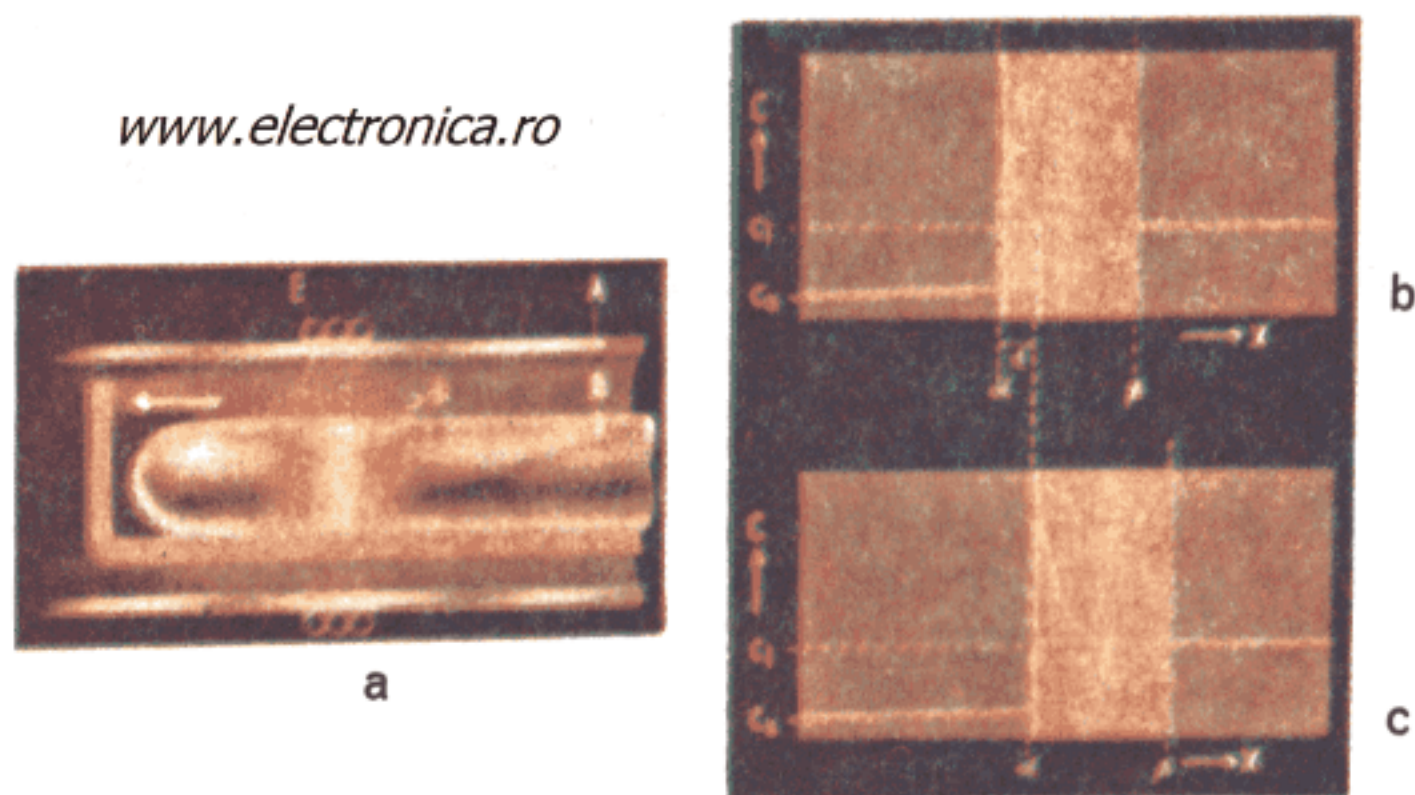


Fig. 1.2. Principiul purificării zonare pentru obținerea germaniului pur.

difuzie (figura 1.2 c). Dacă zona de lichid se deplasează pe o distanță d , o cantitate suplimentară de impurități (fig. 1.2 b) se absoarbe de către zona topită (figura 1.2 c). Pe această cale se pot realiza purități de circa 1 atom străin la 10^{16} atomi de germaniu.

Prin procesul de purificare zonală, lingoul de germaniu se obține destul de pur din punct de vedere chimic, dar structura sa rămâne încă policristalină. Pentru a se obține o structură de *monocristal*, se folosește o procedură similară, adică lingoul de germaniu (B) se plasează din nou într-un creuzet (D), ca în figura 1.3, având la capătul din dreapta o probă de germaniu monocristalin (E), care se folosește ca „sămînță“. Totul se plasează într-un tub de cuarț (A), având în dreapta o spirală alimentată în curent de înaltă frecvență (G). Pe această cale, în lingoul de germaniu se generează curenți de inducție, care topesc local materialul semiconductor, începînd de la proba de monocristal spre lingou policristalin, a cărui structură fizică se modifică treptat și se transformă în monocristal, calitate conferită de sămînța folosită. Simultan cu procesul de creștere a unui monocristal, se poate realiza și doparea controlată cu impurități — de tip N sau donoare, respectiv de tip P sau acceptoare. Din figura 1.3 se observă că materialul de dopare

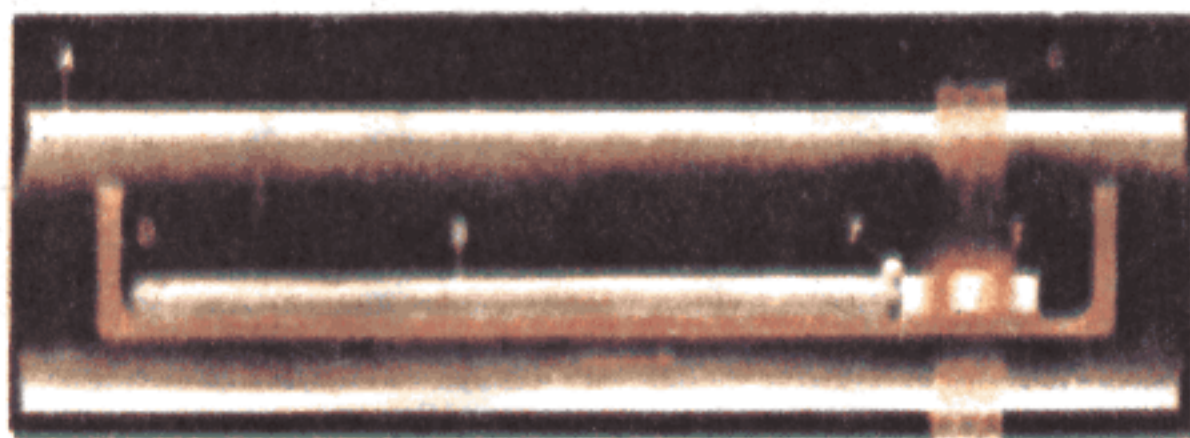


Fig. 1.3. Metodă de creștere și dopare controlată a cristalelor.

(*F*) este plasat la interfața dintre cele două materiale semiconductoare — unul monocristalin și celălalt policristalin. Deși cantitatea de impurități care rămâne în lingou, după topire și solidificare, este foarte mică comparativ cu cantitatea adăugată, totuși, aceasta se menține constantă de la un capăt la altul al lingoului. Un astfel de procedeu se recomandă pentru obținerea germaniului de tip N, folosind ca element de impurificare stibiu sau antimoniu (*F* — figura 1.3).

În ceea ce privește purificarea zonală a siliciului, operația este mult mai dificilă. Rafinarea propriu-zisă se realizează prin procedeul *zonei flotante* (figura 1.4 a), adică o zonă de siliciu topită se află suspendată între două zone solide de siliciu aparținând lingoului *B*. Acesta este așezat în tubul de cuarț *A*, cu atmosferă de gaz inert, pe care se află spirala *G* alimentată în curent de înaltă frecvență. Lingoul este tras lent în sus și rotit continuu, pentru a se preveni solidificarea pe părțile sale laterale.

După operația de purificare chimică, urmează rafinarea fizică și doparea controlată cu impurități (fig. 1.4 b). Lingoul de siliciu *B* este din nou suspendat într-un tub de cuarț *A*, prin care circulă gaz inert, peste o probă monocristalină *E* așezată pe un suport *D*. Prin deplasarea în jos a tubului de cuarț, zona topită de spirala *G*, prin curenți de înaltă frecvență, parcurge tot lingoul și acesta se transformă treptat în monocristal de siliciu. La interfața dintre lingoul *B* și proba *E* se află o cantitate de impuritate *F* în stare solidă, care se va topi simultan cu siliciul și se va îngloba în structura sa prin solidificare. Impurificarea se poate realiza și cu materiale în fază de vapori.

Pentru realizarea de componente active, germaniul și siliciul trebuie să prezinte un grad înalt de puritate chimică. De exemplu, la 10^{22} atomi de semiconductor/cm³ nu este permis să se afle mai mult de 10^{14} atomi străini. Pe lângă cerințele de puritate fizică avansată, materialele semiconductoare trebuie să prezinte structuri monocristaline, iar numărul de defecte să fie cât mai redus posibil. Toți acești factori determină întreaga gamă de proprietăți pentru componentele active cu semiconductoare, adică cu germaniu și siliciu.

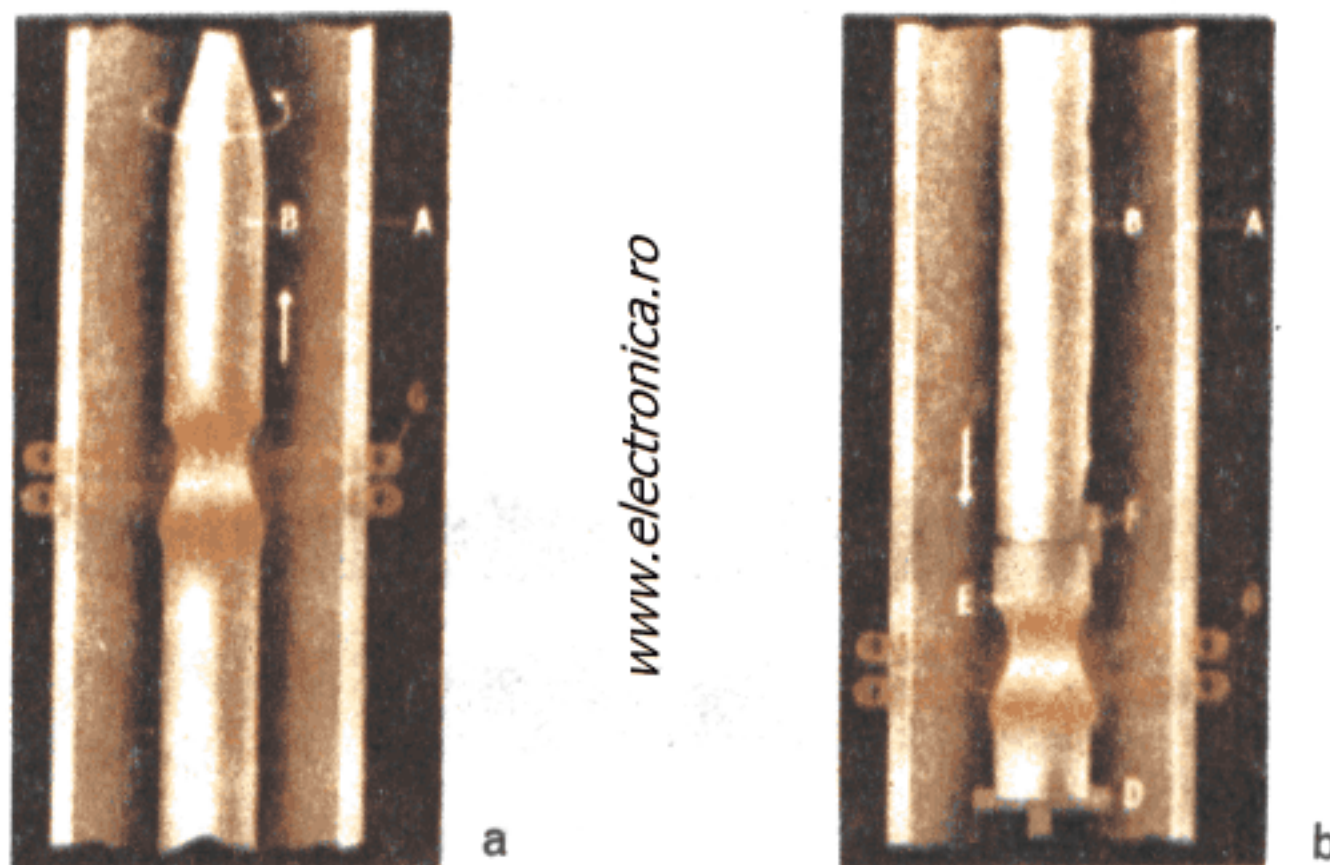


Fig. 1.4. Principiul purificării zonare (a) și a dopării controlate (b) pentru siliciu.

1.2. ATOMII DE GERMANIU ȘI SILICIU

Atomii de germaniu și siliciu prezintă câte puțini electroni pe stratul de valență (figura 1.5 a) și au tendința să se înconjoare cu câte patru electroni suplimentari. În rețelele lor cristaline, atomii de germaniu și siliciu se distribuie la distanțe regulate. Fiecare dintre acești atomi se pot imagina ca fiind plasați în centrul unor cuburi imaginare, în care patru din cele opt noduri sînt ocupate cu atomii cei mai apropiați de atomul central (fig. 1.5 b). Deoarece un electron de valență al atomului central nu se mișcă numai în jurul său, orbita sa include și câte unul din atomii vecini. În mod similar, atomul vecin împarte un electron de valență cu atomul central, adică în jurul său se află $4 \times 2 = 8$ electroni. Legătura între doi atomi este covalentă, fiind asigurată de cei doi electroni de valență pe care îi au în comun.

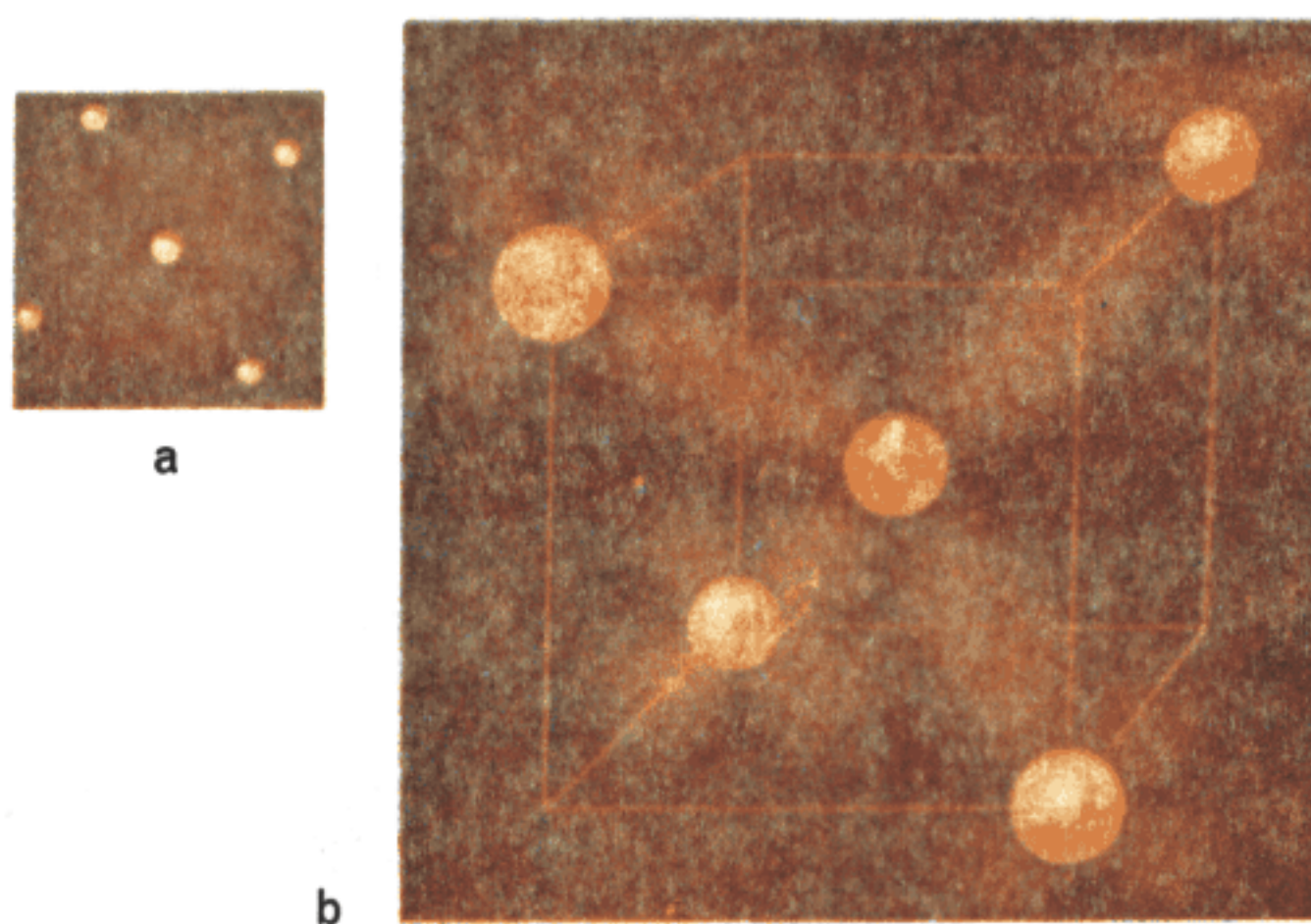


Fig. 1.5. Atomii de germaniu și siliciu: *a)* nucleul și învelișul electronic; *b)* aranjamentul spațial al atomilor și legăturile covalente pentru fiecare pereche de atomi.

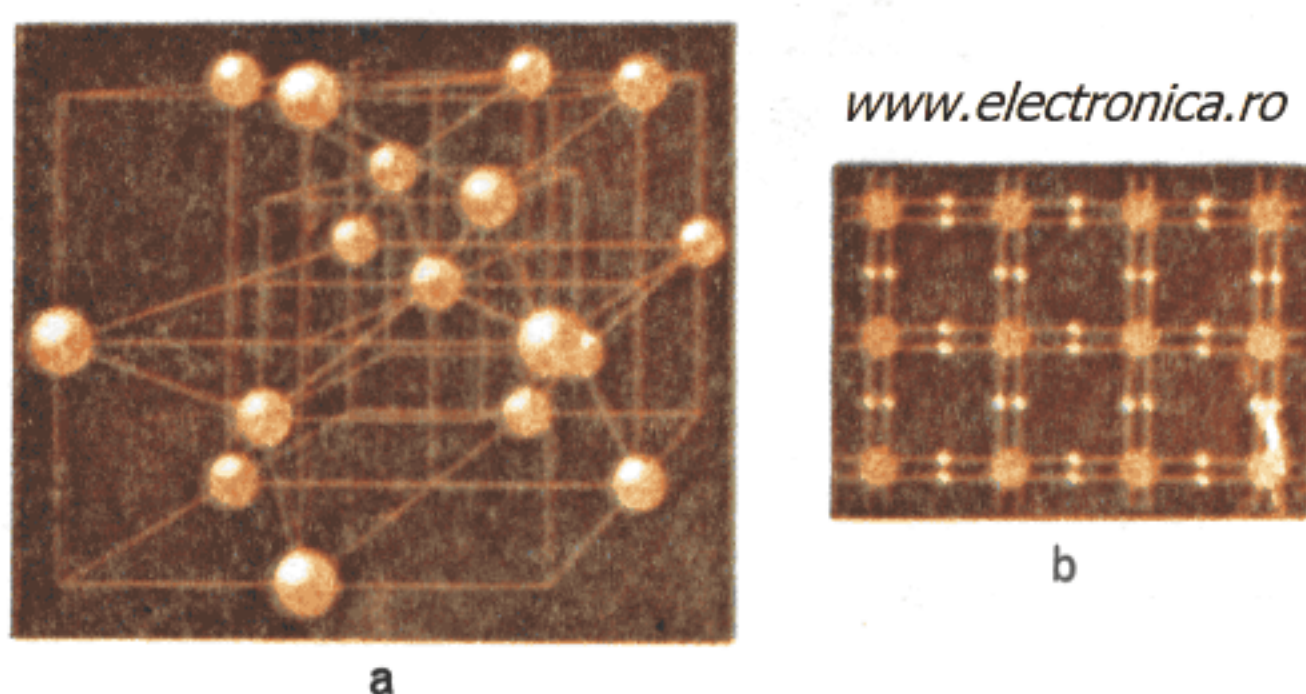


Fig. 1.6. *a)* Rețeaua cristalografică pentru diamant (carbon) și *b)* un aranjament plan al atomilor de germaniu sau de siliciu și legăturile covalente pentru fiecare pereche de atomi.

Dacă ne referim și la structura de diamant (fig. 1.6 a), fiecare atom de carbon poate fi privit ca fiind simultan în centrul și în colțul unui cub. De exemplu, atomul din centrul cubului albastru este și în colțul sistemului de cuburi roșii. Comparativ cu rețeaua cristalografică la diamant, în figura 1.6 b, se prezintă aranjamentul plan al atomilor dintr-un cristal de germaniu. Fiecare atom are câte patru atomi în vecinătate, între fiecare pereche de atomi stabilindu-se legături *covalente*.

1.3. PURTĂTORI LIBERI: ELECTRONI ȘI GOLURI. GENERAREA ȘI RECOMBINAREA LOR

www.electronica.ro

În cristalele semiconductoare există o stare naturală de agitație termică, care se amplifică o dată cu creșterea temperaturii. În aceste condiții, din când în când, o parte din electronii de valență scapă din legăturile tipice și se deplasează prin cristal ca *electroni liberi* (fig. 1.7. a), dar în aceste legături covalente rămân spații libere numite *goluri*, care se deplasează și ele pe anumite direcții (fig. 1.7 b), adică are loc un proces de generare. Când golul capturează un electron liber, se reface o legătură covalentă, având loc un proces de *recombinare* (figura 1.7 c). Generarea și recombinarea purtătorilor de sarcină sînt procese care se realizează continuu (figura 1.7 d). În același timp există și purtători de sarcină care se generează, dar și alți purtători de sarcină care dispar prin recombinare. Electronii și golurile care se obțin prin fenomenul de generare termică, în absența cîmpului electric, se deplasează în diferite direcții și suferă ciocniri cu atomii rețelei cristaline (figura 1.8 a).

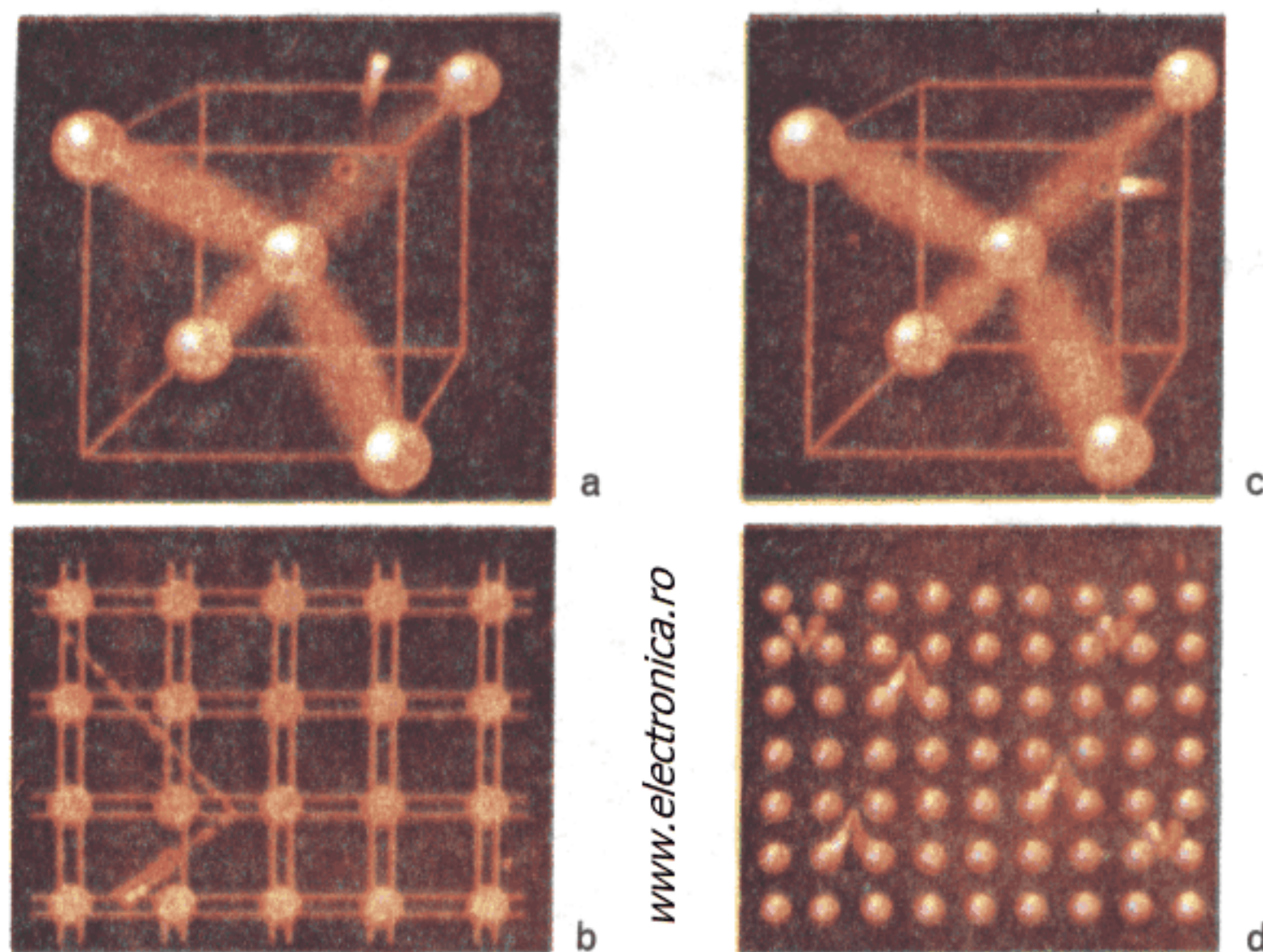
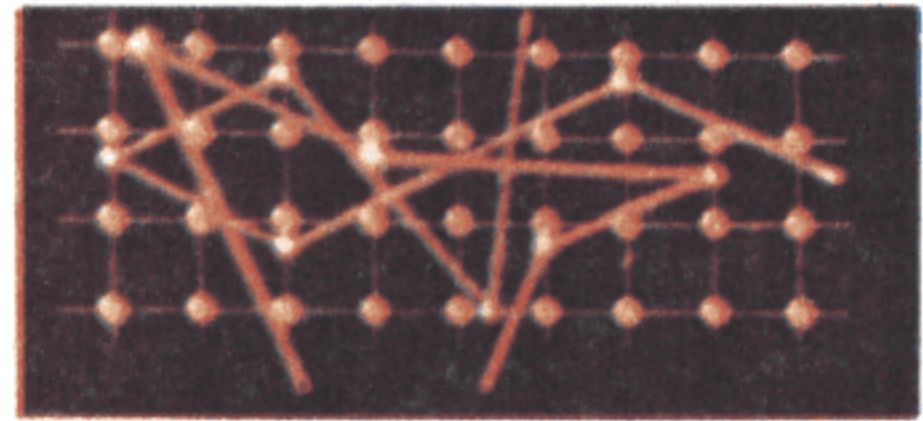
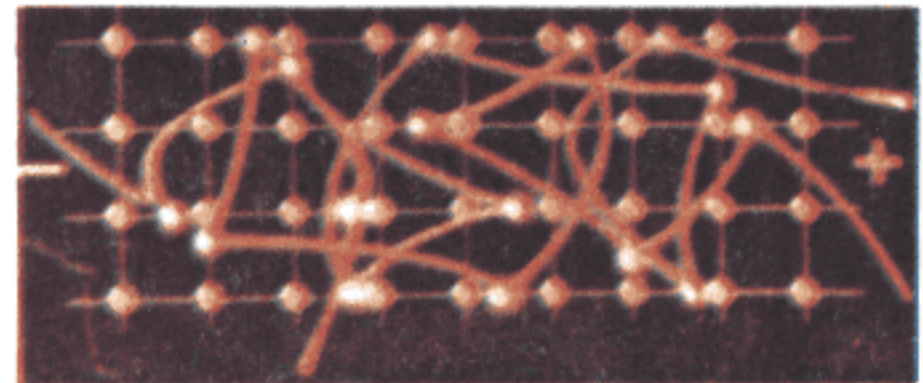


Fig. 1.7. a) Generarea unei perechi electron-gol într-un cristal semiconductor; b) model plan, în care se evidențiază direcțiile de deplasare pentru electron și gol; c) recombinare electron-gol în același cristal semiconductor; d) rețea cristalografică plană, în care se evidențiază simultan procese de generare și de recombinare a purtătorilor de sarcină (electroni și goluri).

În prezența cîmpului electric (fig. 1.8 b) electronii și golurile suferă o accelerare, iar traseul lor între două ciocniri se curbează. Datorită ciocnirilor, curentul se limitează și se reglează la o anumită valoare, care depinde doar de intensitatea cîmpului electric aplicat. Deși electronii și golurile se deplasează în direcții opuse sub influența unui cîmp electric, totuși, curenții asociați acestor purtători se adună din punct de vedere electric.



a

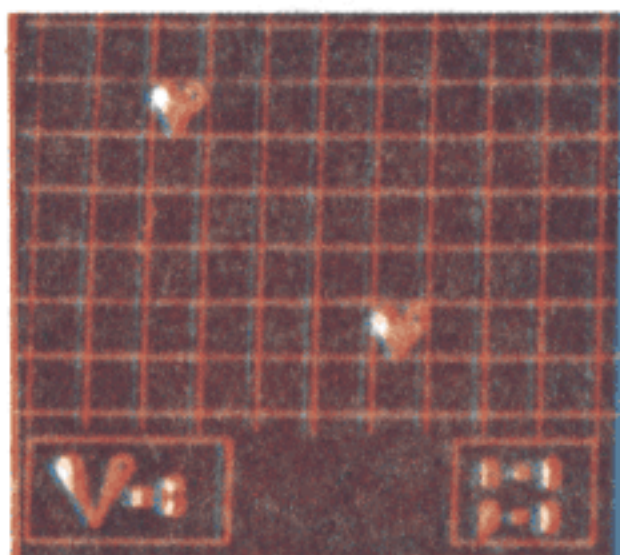


b

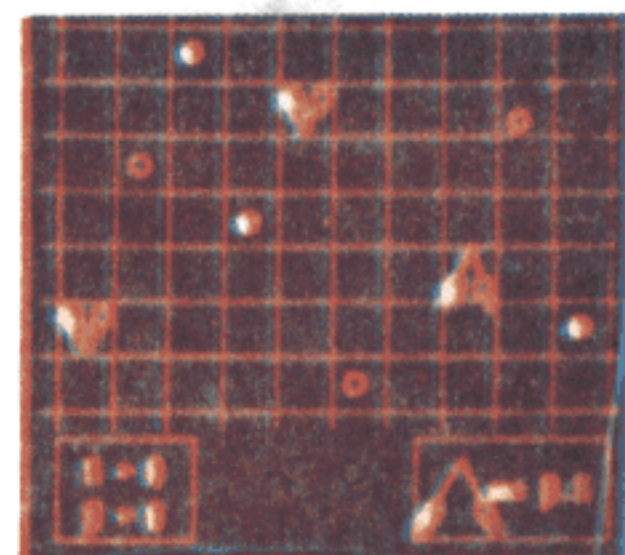
Fig. 1.8. Mișcarea electronilor și golurilor într-o rețea cristalină plană: a) în absența cîmpului electric; b) în prezența cîmpului electric.

www.electronica.ro

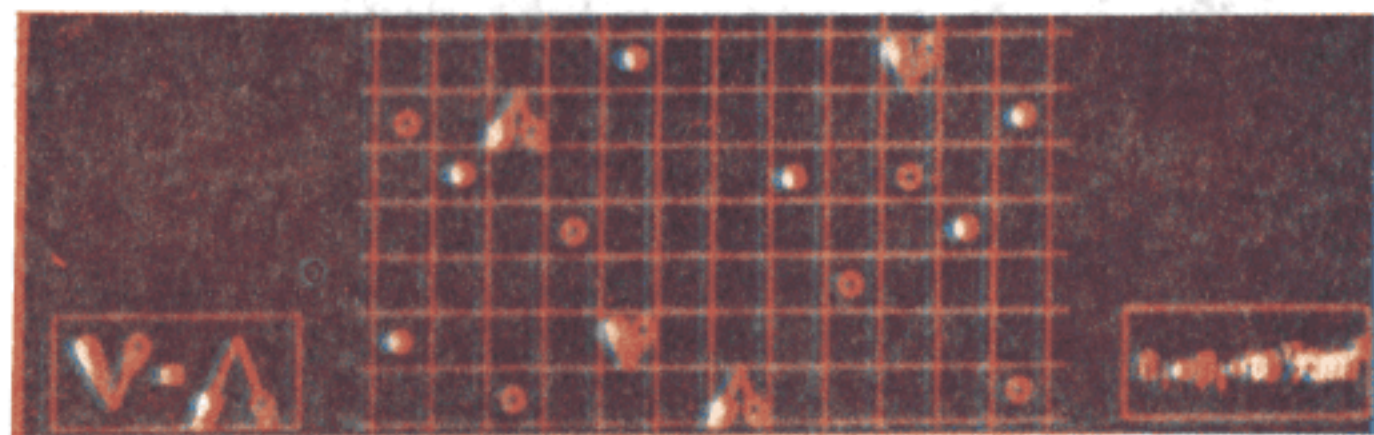
Într-o stare de echilibru, rata de generare a perechilor de tip electron-gol trebuie să fie compensată de recombinarea lor cu aceeași rată. Să presupunem că generarea de purtători liberi (perechi de electroni și goluri) începe la un anumit moment și că în fiecare secundă se generează un număr dat de perechi electroni-goluri (figura 1.9 a). Dacă concentrațiile de electroni (n) și goluri (p) cresc, numărul de recombinări pe secundă va crește proporțional cu np , deoarece șansa lor de întâlnire sau de recombinare crește (figura 1.9 b).



a



b



c

Fig. 1.9. Electroni și goluri în semiconductoare pure: a) generarea de perechi electron-gol; b) electronii și golurile din rețeaua cristalină se pot recombină în orice moment; c) starea de echilibru se realizează numai în cazul în care ratele de generare și de recombinare sînt egale.

Starea de echilibru se obține când concentrațiile de electroni (n) și de goluri (p) au crescut la asemenea valori, încît numărul de recombinări pe secundă este egal cu numărul de generări pe secundă (figura 1.9 c).

La temperatura camerei se stabilește o stare de echilibru, deoarece un număr relativ mic de legături covalente eliberează cite un electron. Aceste concentrații de purtători, în materialele semiconductoare pure, se numesc concentrații intrinseci (figura 1.10 a și b). Cînd electronii și golurile apar și dispar în perechi, concentrațiile intrinseci de electroni (n_i) și de goluri (p_i) sînt egale. De exemplu, pentru Ge pur, $n_i = p_i = 10^{13}/\text{cm}^3$, iar la Si pur $n_i = p_i = 10^{10}/\text{cm}^3$, la temperatura camerei (290°K). O astfel de condiție corespunde și echilibrului de ioni OH^- și H^+ din apa pură.

Pe măsură ce temperatura ambianță crește, agitația termică se amplifică și electronii de valență scapă mai ușor din legăturile covalente. Astfel, concentrațiile de electroni și goluri cresc pînă cînd rata de generare și rata de recombinare se egalează, obținîndu-se din nou o stare de echilibru (figura 1.10 c). Rezultă că rezistivitatea electrică specifică la un semiconductor *decrește* cînd temperatura crește, adică prezintă un coeficient negativ de temperatură, spre deosebire de metale, care au coeficienți pozitivi de temperatură.

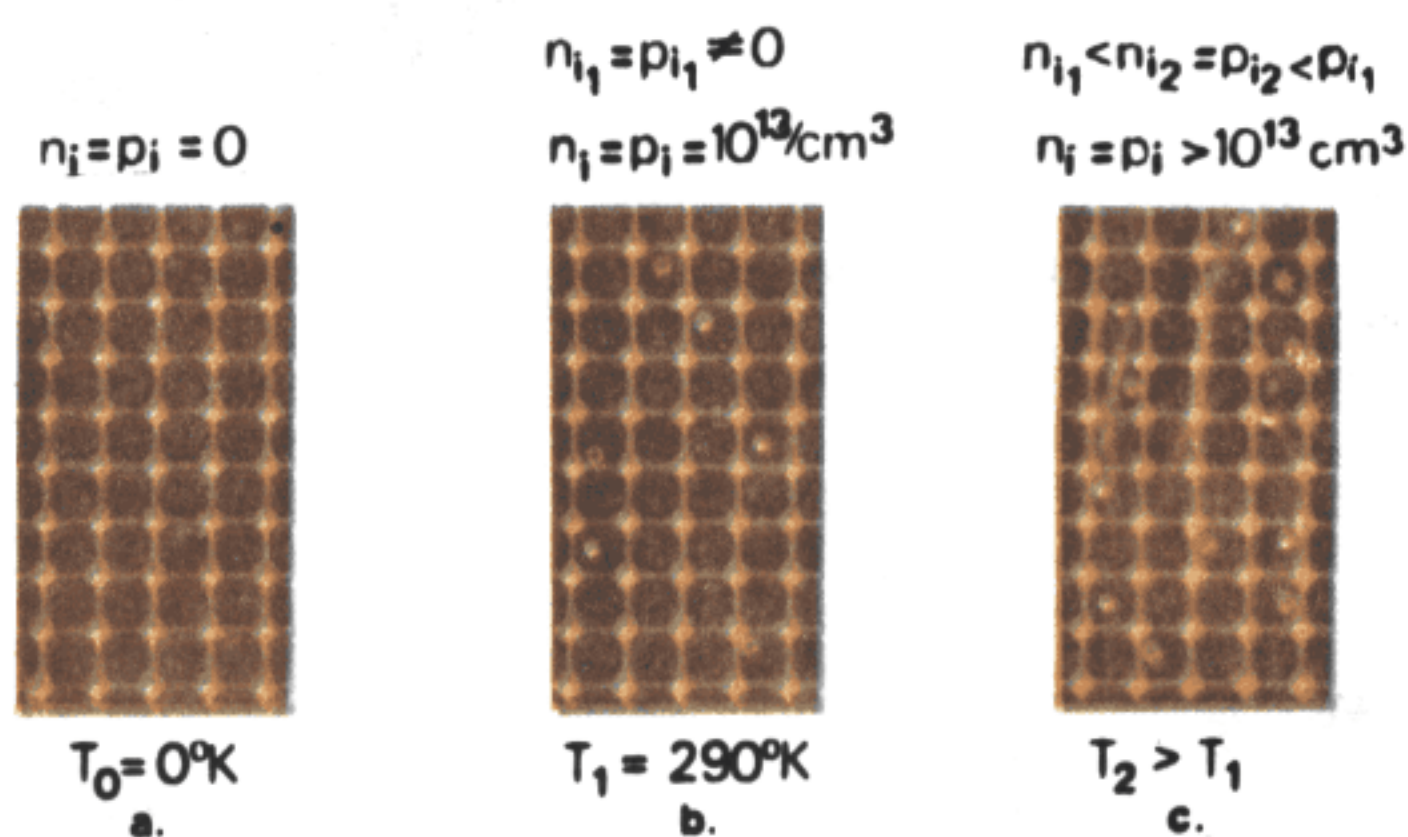


Fig. 1.10. Evoluția cu temperatura a concentrațiilor de purtători în semiconductoare pure: a) la temperatura $T_0 = 0^\circ\text{K}$; b) la temperatura $T_1 = 290^\circ\text{K}$; c) la temperatura $T_2 > T_1$.

www.electronica.ro

1.4. ATOMI DONORI ȘI ACCEPTORI PENTRU DOPAREA MATERIALELOR SEMICONDUCTOARE DE BAZĂ

Atomii *donori* și *acceptori* reprezintă impurități introduse în mod accidental sau voit în semiconductoare, și care sînt capabile să genereze purtători liberi. Dacă în locul unui atom de germaniu sau de siliciu pătrunde un atom de impuritate pentavalentă (stibiu, arsen, fosfor), patru electroni se fixează în legăturile interatomice ale rețelei cristaline și al cincilea electron rămîne slab legat de atomul său. Datorită agitației termice, la temperatura camerei, electronul suplimentar părăsește atomul din care a provenit

și capătă o mișcare liberă în interiorul cristalului semiconductor (figura 1.11 a și b).

Dacă electronul rămâne în vecinătatea imediată a atomului său, partea respectivă de cristal rămâne neutră din punct de vedere electric (fig. 1.11 c). Dacă se compară forța de legătură de la un atom donor cu cea de la un atom de hidrogen, rezultă că atomul de hidrogen nu este ionizat la temperatura camerei, de către mișcarea de agitație termică. La atomul de hidrogen energia de ionizare este 13,5 eV, adică de circa o mie de ori mai mare decât energia de legătură dintre electronul și ionul donor (circa 0,01 eV).

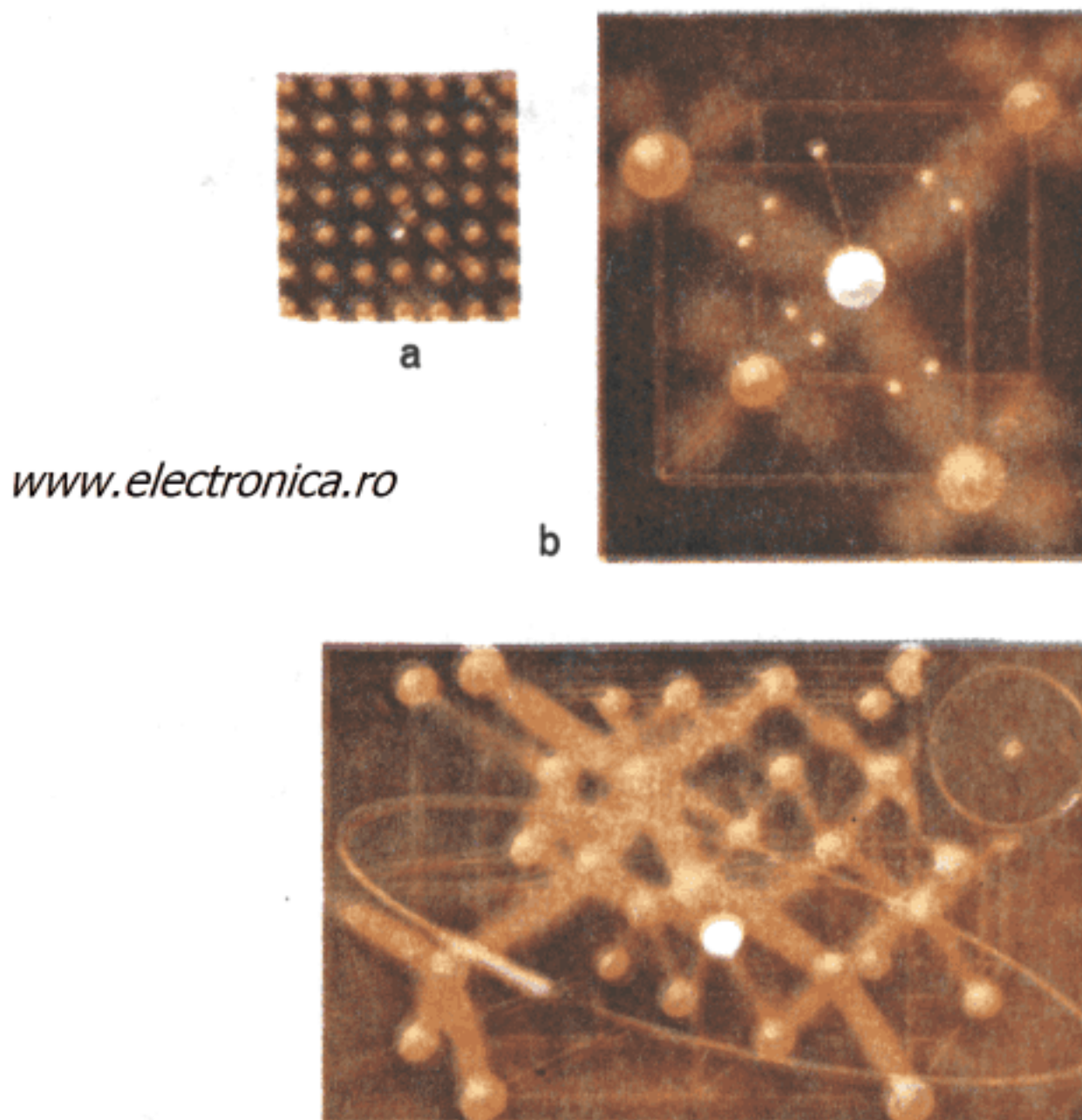


Fig. 1.11. Comportarea unui atom donor într-o structură semiconductoare de bază: a) configurație plană; b) configurație spațială simplă; c) configurație spațială mai complexă, în care electronul donor nu părăsește orbita sa, comparativ cu cazul atomului de hidrogen (în colțul din dreapta sus).

În figura 1.12 se prezintă comparativ trei situații distincte pentru rețeaua cristalină a unui semiconductor de bază:

a) în rețeaua semiconductorului pur există câteva perechi de electroni — goluri;

b) în aceeași rețea semiconductoare, s-a efectuat o dopare controlată de un atom donor la 10^6 atomi de bază (Ge sau Si), obținându-se un număr mai mare de electroni liberi;

c) pentru o concentrație de 10^{16} donori/cm³ se produc circa 10^{16} electroni/cm³.

La echilibrul termic, produsul $n_0 p_0 = C(T)$ reprezintă o constantă.

Prin doparea cu atomi donori, apare un fenomen caracteristic de polarizare, așa cum se arată în figura 1.13.

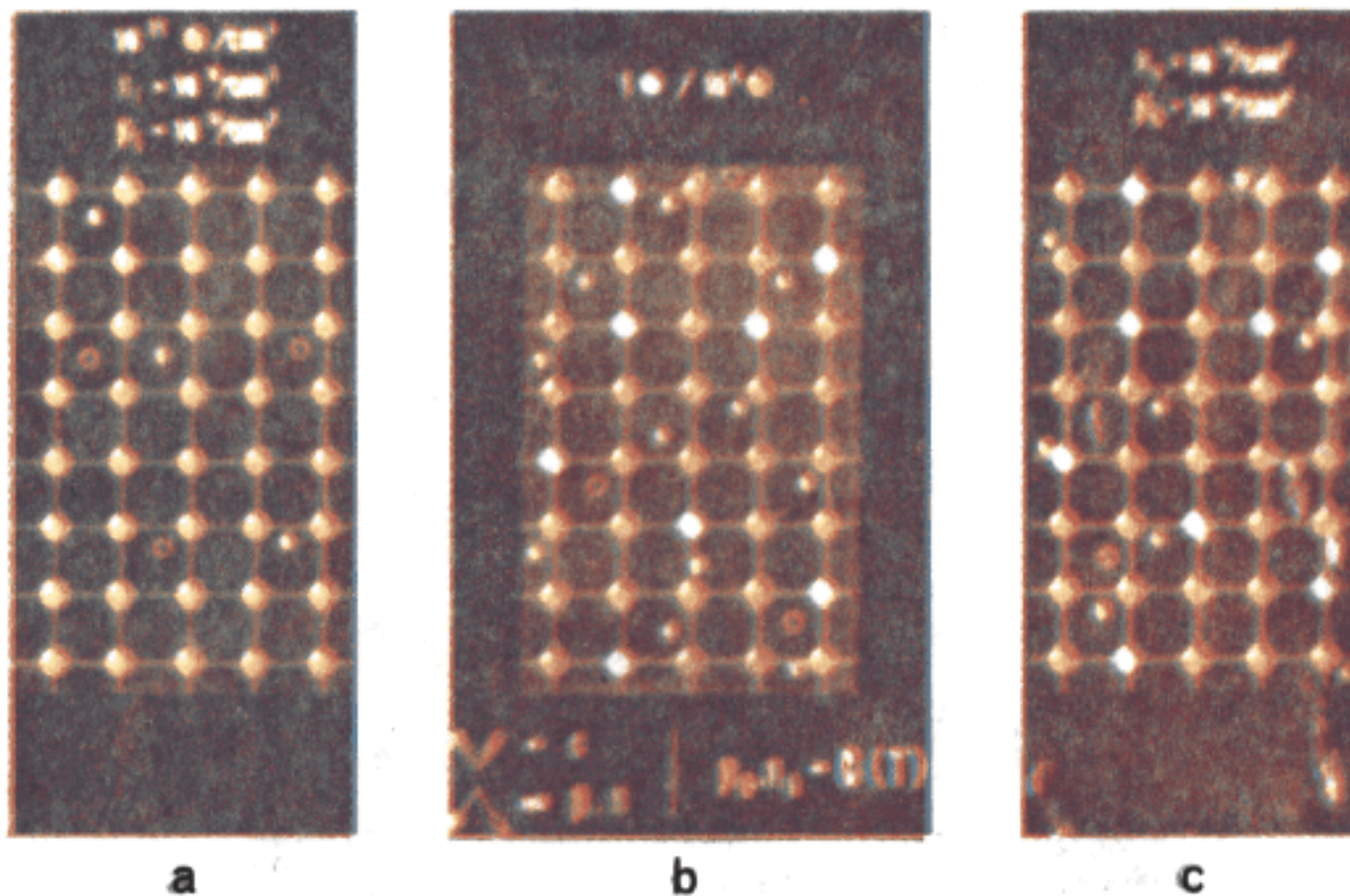


Fig. 1.12. Situații comparative în cazul unui semiconductor dopat cu impurități donoare: a) cazul unui semiconductor intrinsec; b) cazul unui semiconductor extrinsec cu o dopare de 1 atom donor la 10^6 atomi de bază; c) starea de echilibru, la care $p_0 n_0 = C(T)$.

Presupunind un aranjament plan al atomilor de germaniu sau de siliciu (fig. 1.13. a), la care se scot în evidență și învelișurile lor electronice (fig. 1.13 b), se observă că un ion donor respinge nucleele de bază cu sarcini pozitive ale atomilor de bază și atrage spre interior învelișul lor elec-

www.electronica.ro

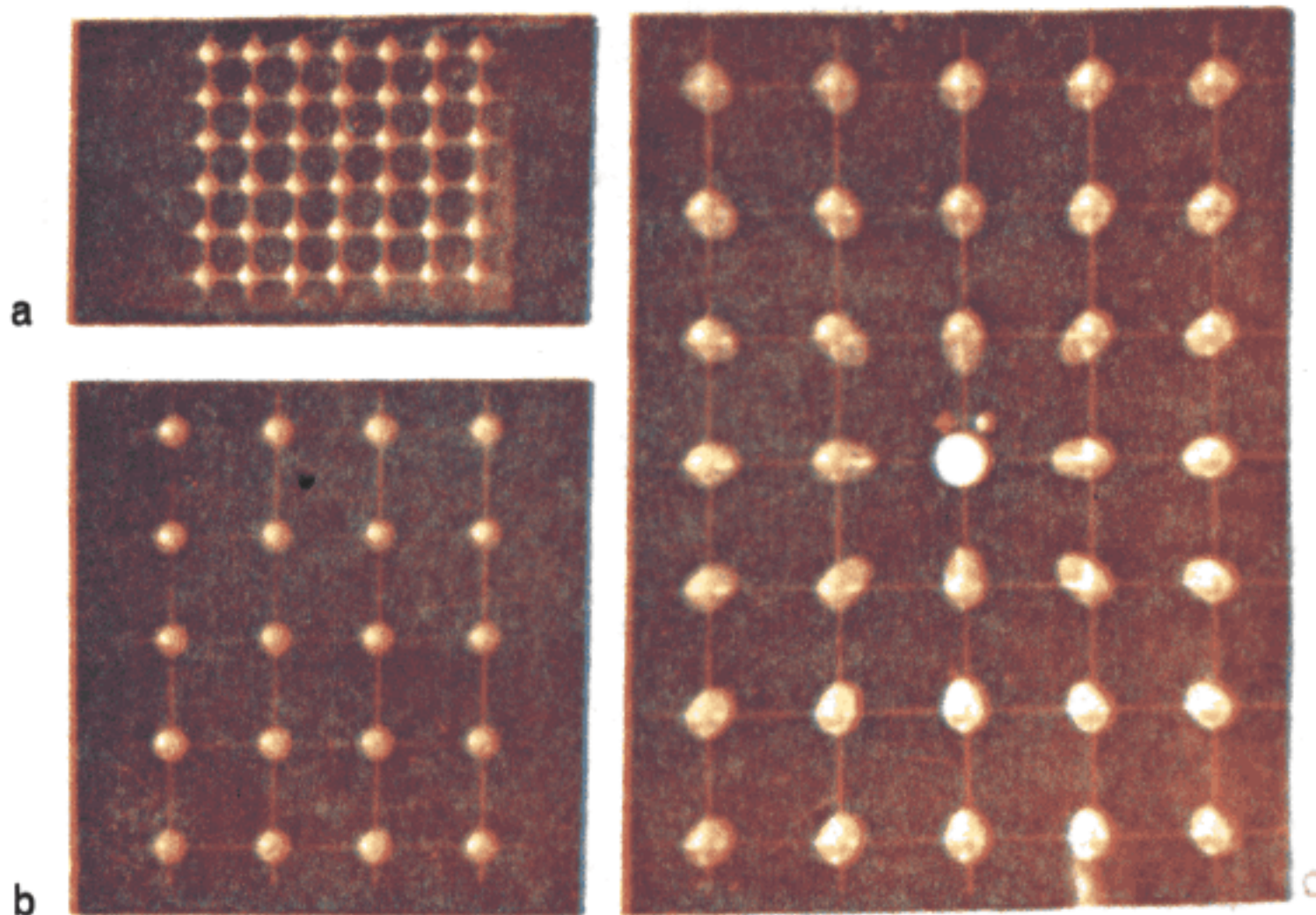


Fig. 1.13. Efectul de polarizare indus prin doparea cu atomi donori: a) aranjamentul atomic fără explicitarea învelișului electronic; b) aranjamentul atomic de bază, cu explicitarea învelișului electronic; c) polarizarea electrică a regiunii din jurul atomului donor.

tronic (fig. 1.13 c). Deoarece sarcinile pozitive și negative ale atomilor de bază nu mai coincid, ei devin dipoli și regiunea din jurul atomului donor a devenit polarizată.

Din cauza polarizării locale a semiconductorului (figura 1.14), energia de legătură a atomilor donori se reduce la valori extrem de mici și vibrația termică la temperatura camerei este suficientă pentru a produce ionizarea acestora.

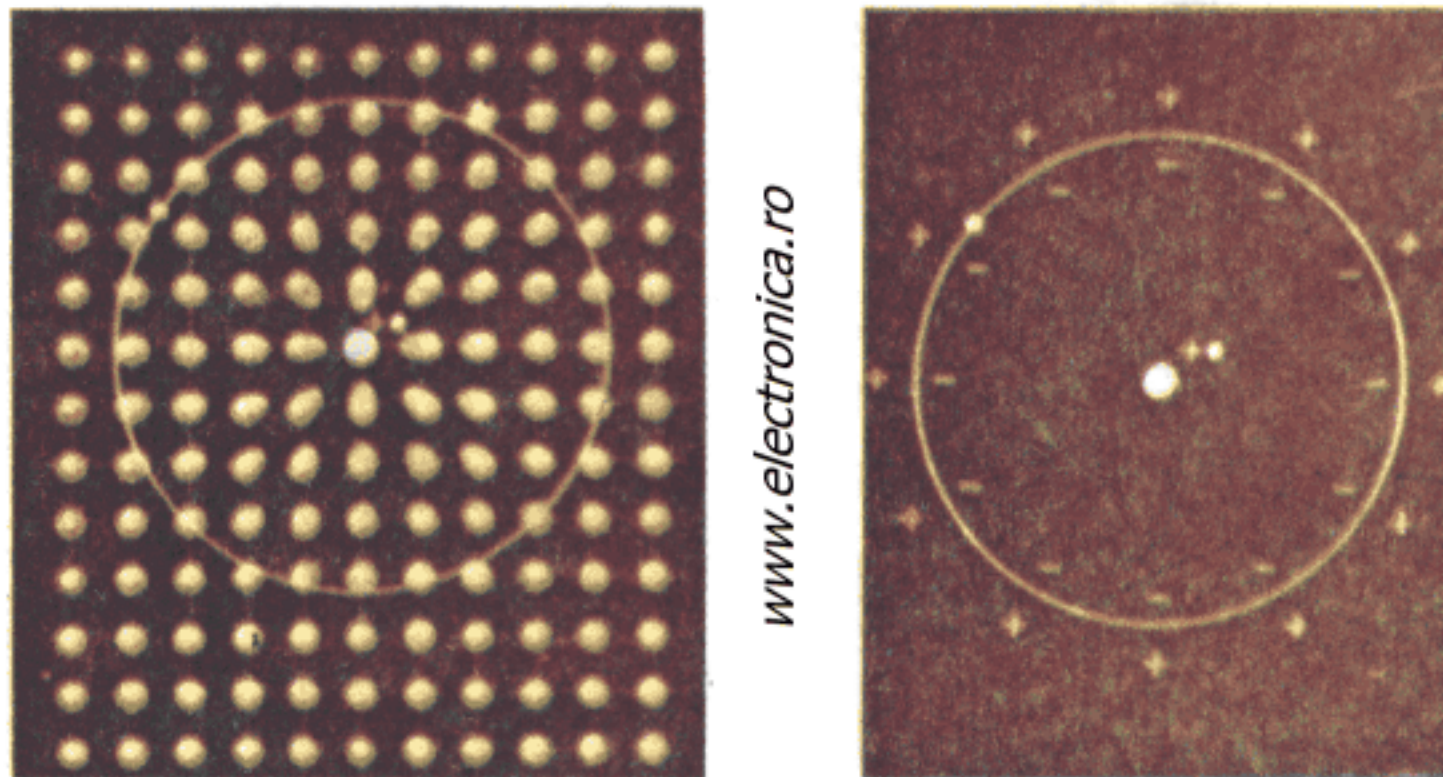


Fig. 1.14. Comportarea regiunilor polarizate din vecinătatea atomilor donori:
 a) delimitarea printr-un cerc imaginar a zonei de acțiune pentru atomul donor;
 b) distribuția sarcinilor negative și pozitive în jurul atomului donor.

Dacă în locul unui atom de germaniu sau de siliciu pătrunde un atom de impuritate trivalentă (aluminiu, indiu, bor ș.a.), se completează numai trei din cele patru legături covalente, la una dintre ele lipsind un electron.

Dacă la temperatura camerei atomul acceptor reușește să-și completeze cele patru legături covalente, acesta devine ion cu sarcină negativă, așa cum se arată în figura 1.15 a, respectiv în figura 1.15 b. Energia slabă de legătura între gol și atomul receptor se datorează polarizării induse de ionul respectiv. La temperaturi joase, golul respectiv este legat de nucleu și se deplasează pe o orbită mare în jurul acestuia (figura 1.15 c).

În figura 1.16 a, b și c se prezintă trei situații comparative privind doparea cu impurități la un semiconductor de germaniu. Față de semiconductorul intrinsec, având $n_i = p_i$, la semiconductoarele extrinseci de tip n sau p, cu concentrațiile de electroni (n_0) și goluri (p_0) — la echilibru termic, se obțin purtători majoritari și minoritari. De exemplu, la un semiconductor de tip, N, electronii sînt purtători majoritari și golurile sînt purtători minoritari ($p_0 \gg n_0$) iar la un semiconductor de tip P, golurile sînt purtători majoritari și electronii sînt purtători minoritari ($n_0 \gg p_0$). În oricare semiconductor influența impurităților donoare se poate neutraliza prin dopare cu impurități acceptoare și invers. Prin neutralizarea reciprocă a celor două tipuri de impurități, se ajunge la un semiconductor intrinsec.

La temperatura camerei se generează purtători liberi în semiconductoarele cu impurități, donoare și acceptoare, ca urmare a fenomenului de polarizare. De exemplu: în figura 1.17 a se observă că, un ion negativ (de tip

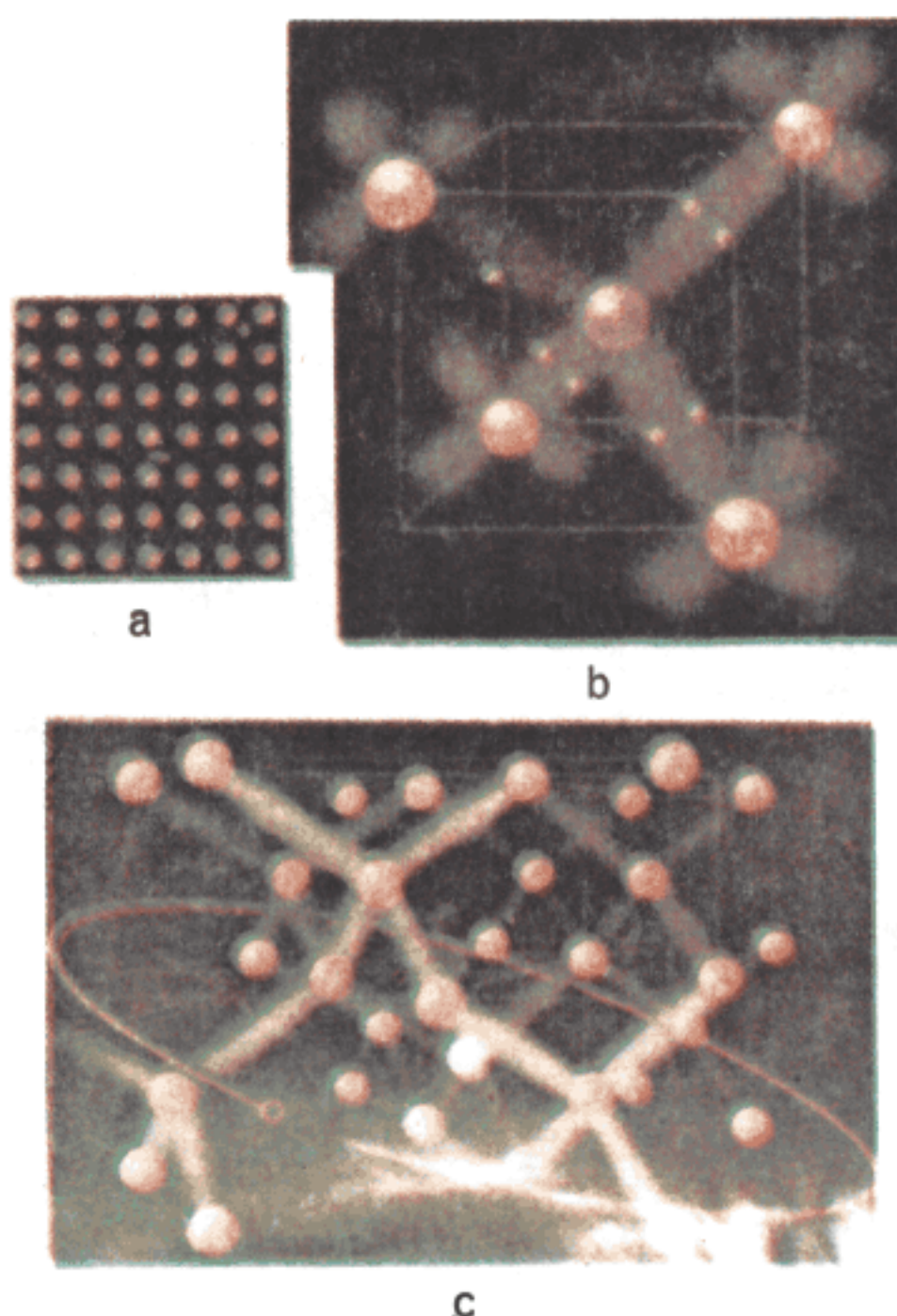


Fig. 1.15. Comportarea unui atom acceptor într-o structură semiconductoră de bază: *a)* configurație plană; *b)* configurație spațială simplă; *c)* configurație spațială mai complexă, în care golul acceptor nu părăsește orbita sa.

www.electronica.ro

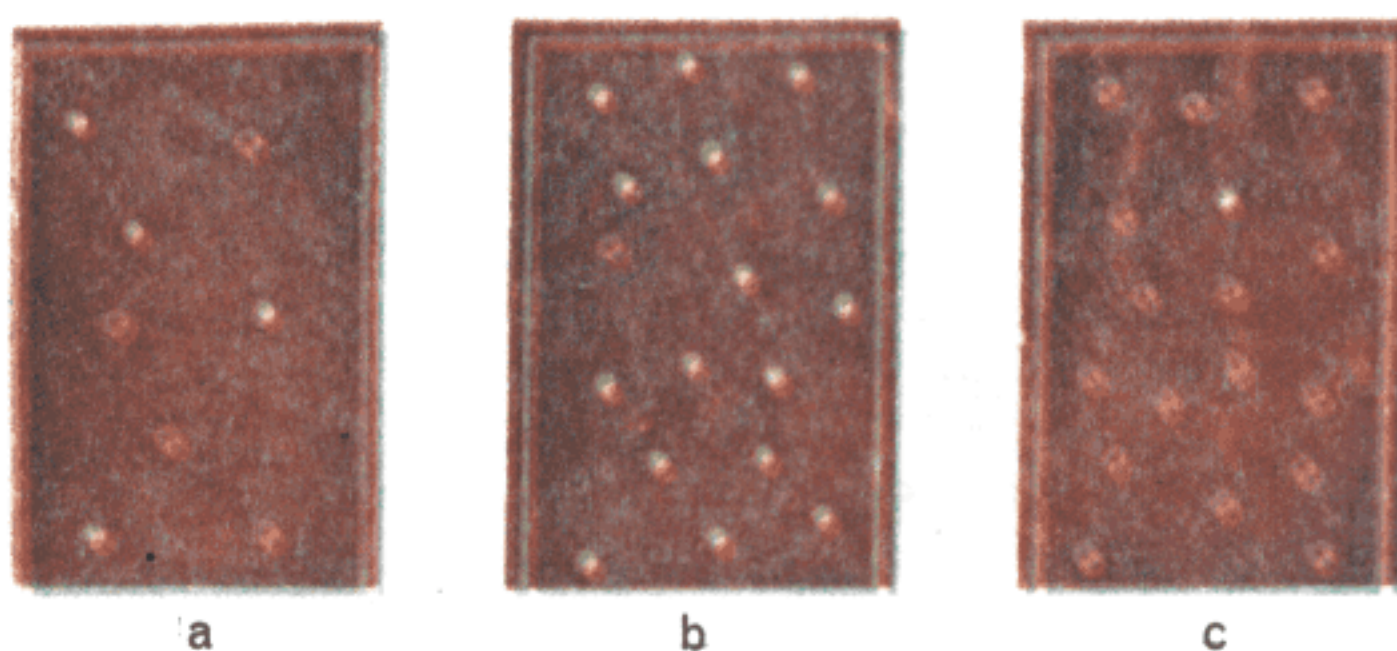


Fig. 1.16. Situații comparative privind doparea cu impurități la un semiconductor de germaniu: *a)* cazul pentru germaniu intrinsec ($n_i = p_i = 10^{13}/\text{cm}^3$); *b)* cazul pentru germaniu de tip N, cu goluri mai puține ($n_0 = 10^{16}/\text{cm}^3$ și $p_0 = 10^{10}/\text{cm}^3$); *c)* cazul pentru germaniu de tip P, cu electroni mai puțini ($p_0 = 10^{16}/\text{cm}^3$ și $n_0 = 10^{10}/\text{cm}^3$).

acceptor) exercită o respingere a norilor de electroni asociați atomilor gazdă din vecinătatea sa. Prin astfel de deplasări, atomii semiconductorului de bază capătă structură de dipoli electrici. Sarcinile negative se deplasează spre exterior, iar cele pozitive sînt atrase spre interior (figura 1.17 *b*). Deoarece forța electrică dintre ionul acceptor și golul de pe orbita unei sfere

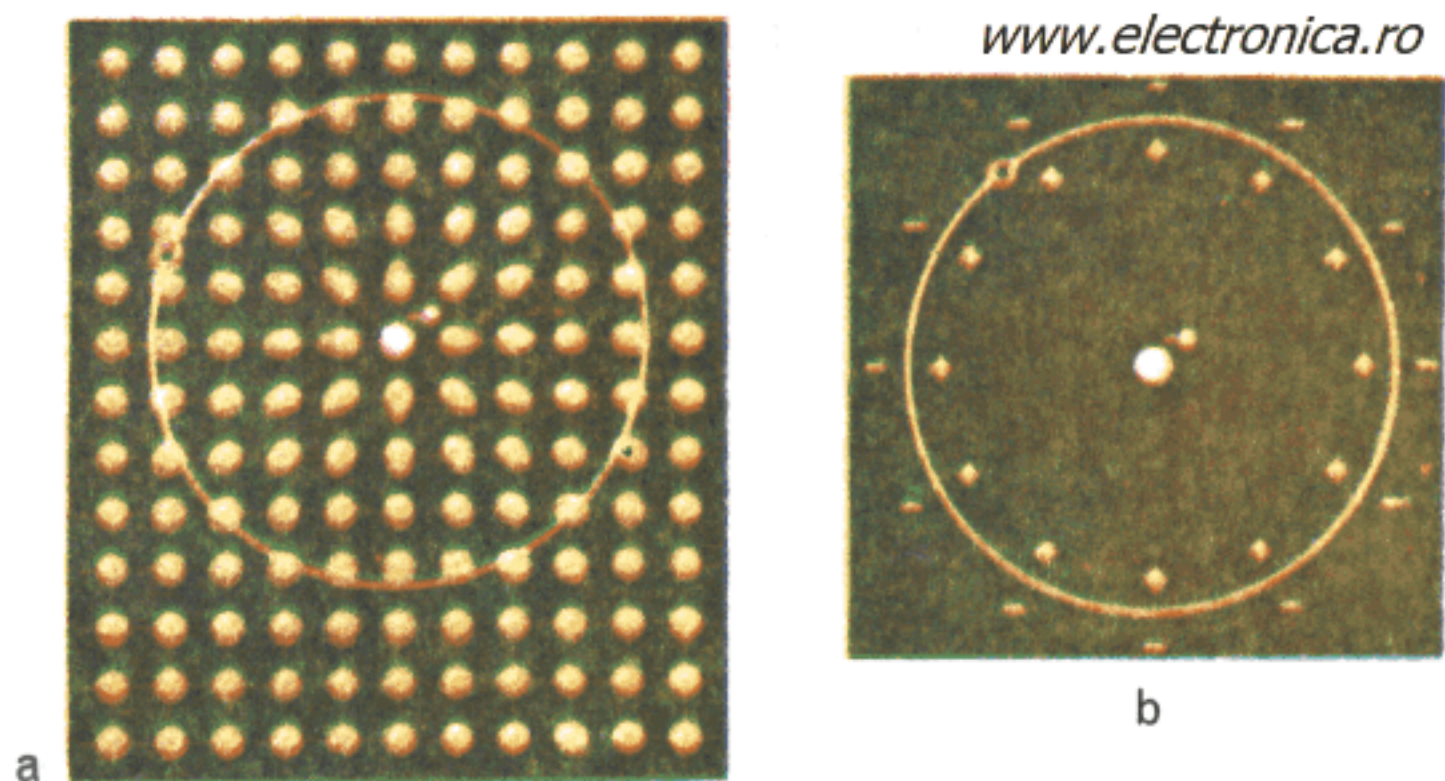


Fig. 1.17. Comportarea regiunilor polarizate din vecinătatea atomilor acceptori:
a) delimitarea printr-un cerc imaginar a zonei de acțiune pentru atomul acceptor;
b) distribuția sarcinilor pozitive și negative în jurul atomului acceptor.

imaginare (figura 1.17 *a*) este redusă sensibil, ca urmare a prezenței sarcinilor pozitive ce rezultă prin procesul de polarizare, golul respectiv nu mai este legat de atomul acceptor și devine liber, chiar la temperatura camerei.

În prezența unui câmp electric extern (figura 1.18), prin semiconductoarele de tip N și P circulă un curent de purtători majoritari (electroni — figura 1.18 *a*, — respectiv goluri — figura 1.18 *b*), iar printr-un semiconductor intrinsec (figura 1.18 *c* și *d*), curentul de electroni este egal cu curentul de goluri.

Dacă în volumul semiconductorului există ambele tipuri de purtători (electroni și goluri), în conductoarele metalice de legătură nu circulă *decît electroni*.

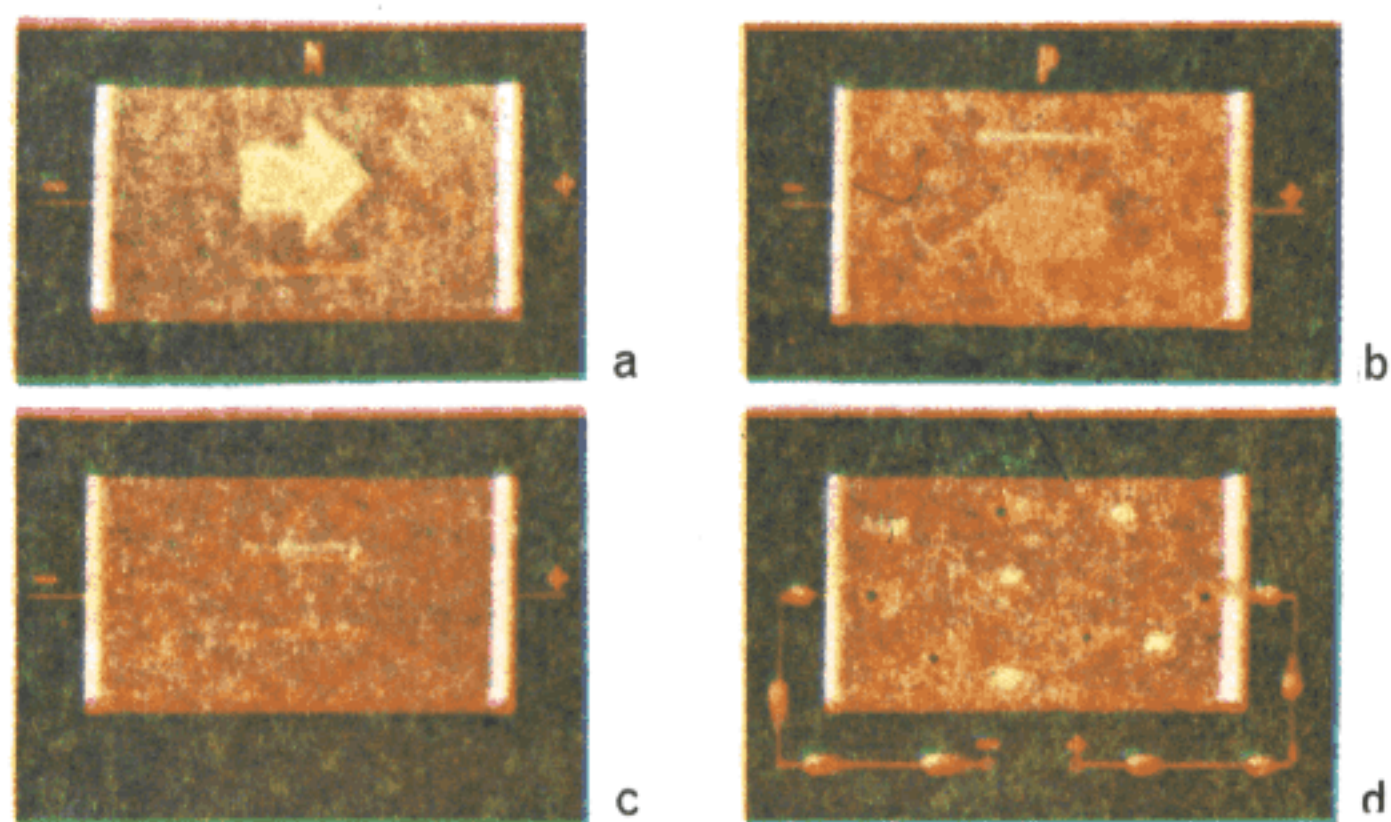


Fig. 1.18. Conducția electrică în semiconductoare polarizate din exterior:
a) conducție prin electroni majoritari și goluri minoritare la un semiconductor de tip N; *b)* conducție prin goluri majoritare și electroni minoritari la un semiconductor de tip P; *c)* conducția prin goluri și electroni în proporție egală la un semiconductor intrinsec; *d)* circulația purtătorilor prin semiconductor și prin conductoarele de acces.

În Anexa 1 se prezintă principalele caracteristici tehnice ale unor materiale semiconductoare utilizate pentru realizarea de dispozitive electronice și optoelectronice. Pentru fiecare tip de material se specifică grupa din sistemul periodic, temperatura de topire, densitatea, constanta dielectrică, înălțimea barierei de potențial sau ecartul benzii interzise ce separă banda de valență de banda de conducție, mobilitatea electronilor și a golurilor pentru anumite tipuri de materiale.

Joncțiunea PN.

Diode semiconductoare

www.electronica.ro

2.1. PROCESE ȘI FENOMENE FIZICE DE BAZĂ

Considerând joncțiunea PN sau *pn* ca o structură fizică de bază, care intră în componența unei game variate de dispozitive electronice, aceasta se obține într-un monocristal de semiconductor cu două regiuni *P* și *N* vecine, despărțite între ele printr-o joncțiune metalurgică (figura 2.1 *a*). În regiunea *P* se află numai impurități acceptoare, iar în zona *N* se află numai impurități donoare, ambele tipuri de impurități fiind ionizate la temperatura camerei. Dacă cele două regiuni ar fi independente, concentrațiile de goluri (*p*) și electroni (*n*) ar fi constante (figura 2.1 *b*). În realitate, concentrațiile de goluri și electroni se modifică sensibil în regiunea joncțiunii metalurgice (figura 2.1 *c* și *d*), în care se constată o scădere puternică a concentrațiilor de purtători majoritari, ca urmare a *difuziei* purtătorilor mobili de sarcină. Un astfel de proces începe chiar cu purtătorii din zona joncțiunii metalurgice, în care apare un exces de sarcină electrică negativă la stînga, respectiv un exces de sarcină electrică pozitivă la dreapta joncțiunii propriu-zise, ca urmare a prezenței ionilor acceptori și donori, care nu mai sînt neutralizați de purtătorii mobili de sarcină. Un astfel de aranjament spațial al sarcinilor electrice opuse și egale se numește strat electric dublu, la exteriorul căruia (în zonele *P* și *N*) sarcinile pozitive și negative se neutralizează reciproc (figura 2.1 *e*). Acest strat electric dublu este numit, adeseori, barieră de potențial cu nivelul V_0 al potențialului de contact, deoarece cîmpul electric intern din această zonă nu permite difuzia purtătorilor mobili de sarcină prin joncțiunea PN. Dacă zonele *P* și *N* se conectează direct printr-un conductor (figura 2.1 *f*), în circuitul respectiv nu curge curent. Se observă, însă, că mai apar și alte zone cu potențiale de contact. Suma algebrică a tuturor potențialelor de contact, pe circuitul închis menționat, trebuie să fie nulă. Apare astfel un *cîmp electric intern* care transportă electronii și golurile în sens invers curenților de difuzie. La echilibrul termic, suma curenților de difuzie și de cîmp trebuie să fie nulă. O astfel de stare este ilustrată în figura 2.2. În ambele regiuni *P* și *N* (figura 2.2 *a*) concentrațiile de goluri și electroni (figura 2.2 *b*), respectiv potențialul *V* (figura 2.2 *c*), sînt constante și, deci, nu există cîmp electric. Prin urmare, regiunile *P* și *N* se comportă identic ca și cum ar fi două semiconductoare separate. Referitor la regiunea de trecere sau de barieră (figura 2.2 *d*), densitatea de sarcină are valori negative în regiunea *P* și valori pozitive în regiunea *N*. Starea de echilibru în cele două regiuni (*N* și *P*), inclusiv în

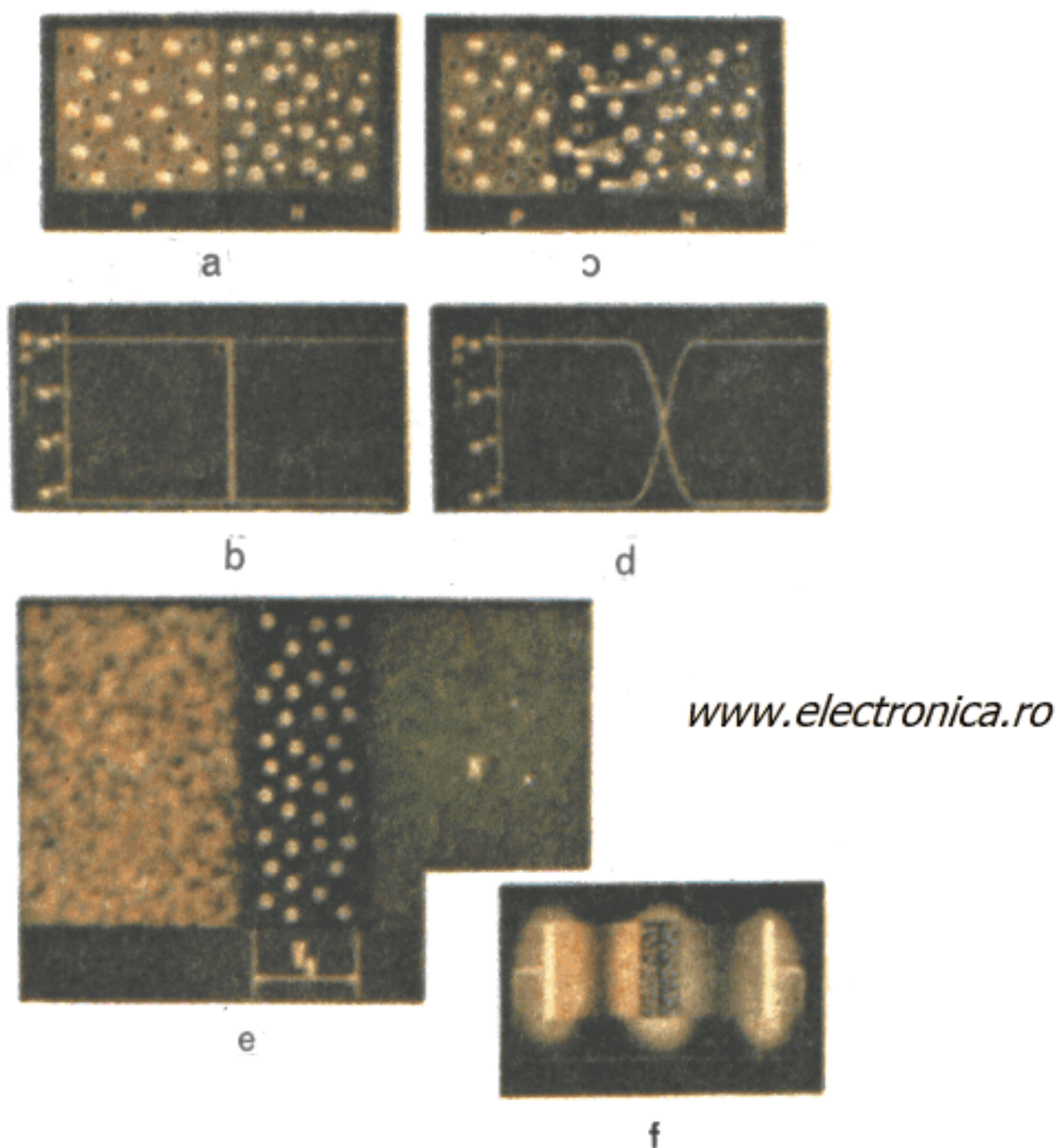


Fig. 2.1. Joncțiunea PN: a) regiunile P și N separate printr-o joncțiune metalurgică; b) concentrațiile de goluri și electroni aferente celor două regiuni; c) evidențierea procesului de difuzie a purtătorilor de sarcină în vecinătatea joncțiunii metalurgice; d) concentrațiile de goluri și electroni cu modificările care apar în regiunea de trecere sau de barieră; e) bariera de contact la joncțiunea PN; f) circuitul închis al unei joncțiuni PN cu bariere de contact.

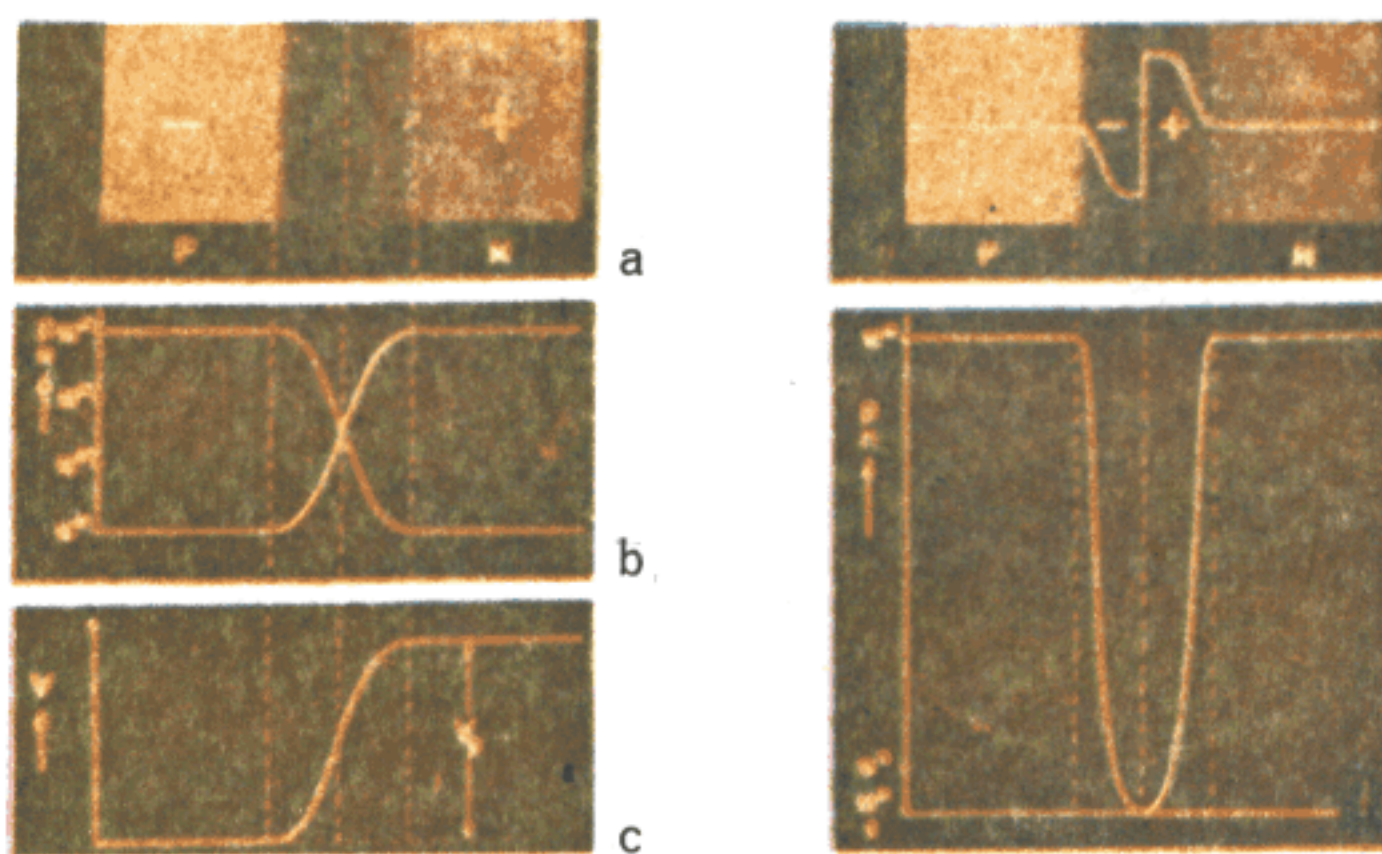
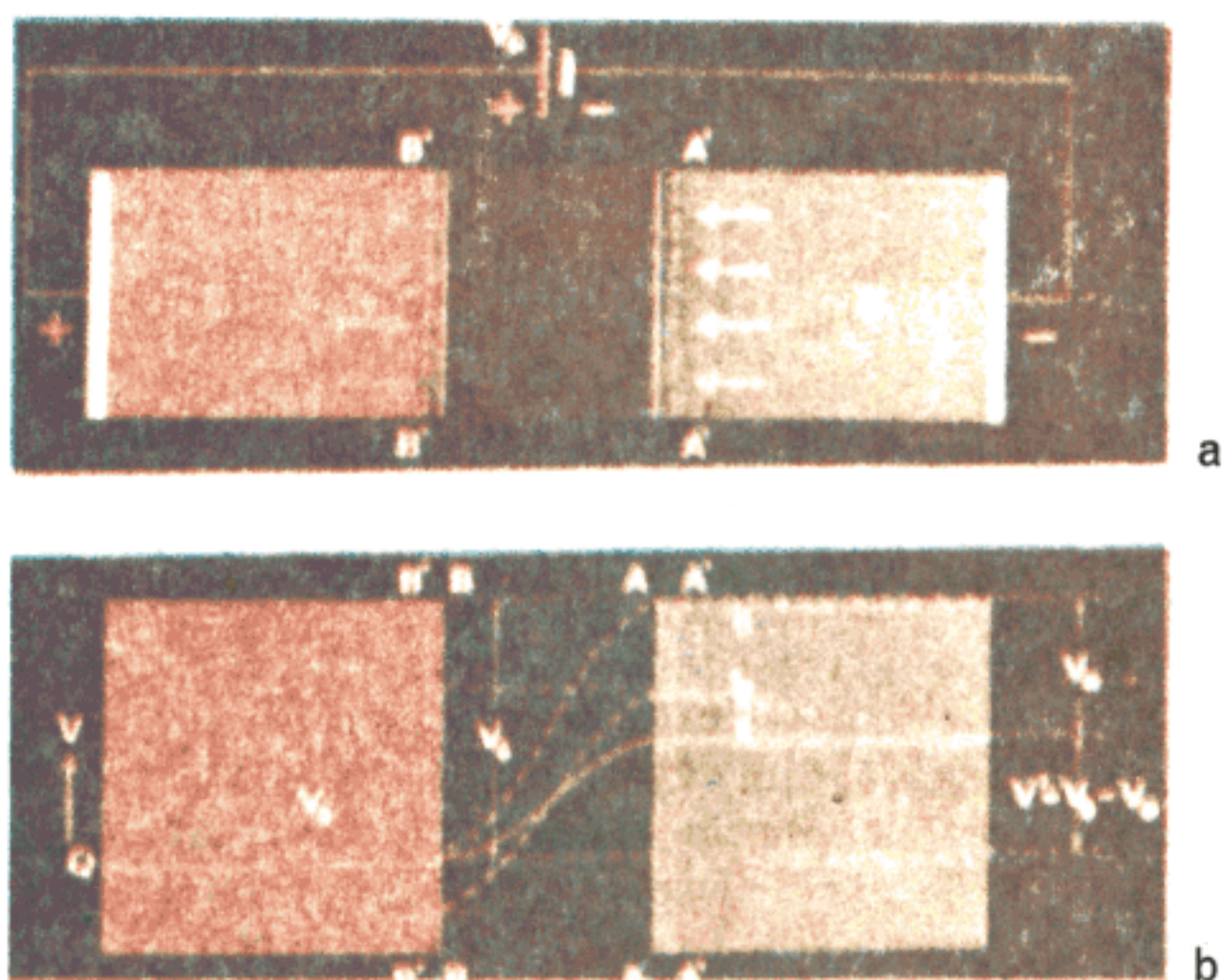


Fig. 2.2. Joncțiunea PN la echilibru termic: a) situația în regiunile neutre P și N; b) concentrațiile de goluri și electroni; c) potențialul de contact; d) distribuția densității de sarcină în regiunea de trecere; e) concentrațiile de goluri și electroni în structura prezentată.



www.electronica.ro

Fig. 2.3. Joncțiunea PN polarizată direct: *a*) structura fizică cu planurile de referință $A'A'$ și $B'B'$, care delimitează regiunea de trecere; *b*) curba de variație a potențialului intern de contact ($V = V_0 - V_e$).

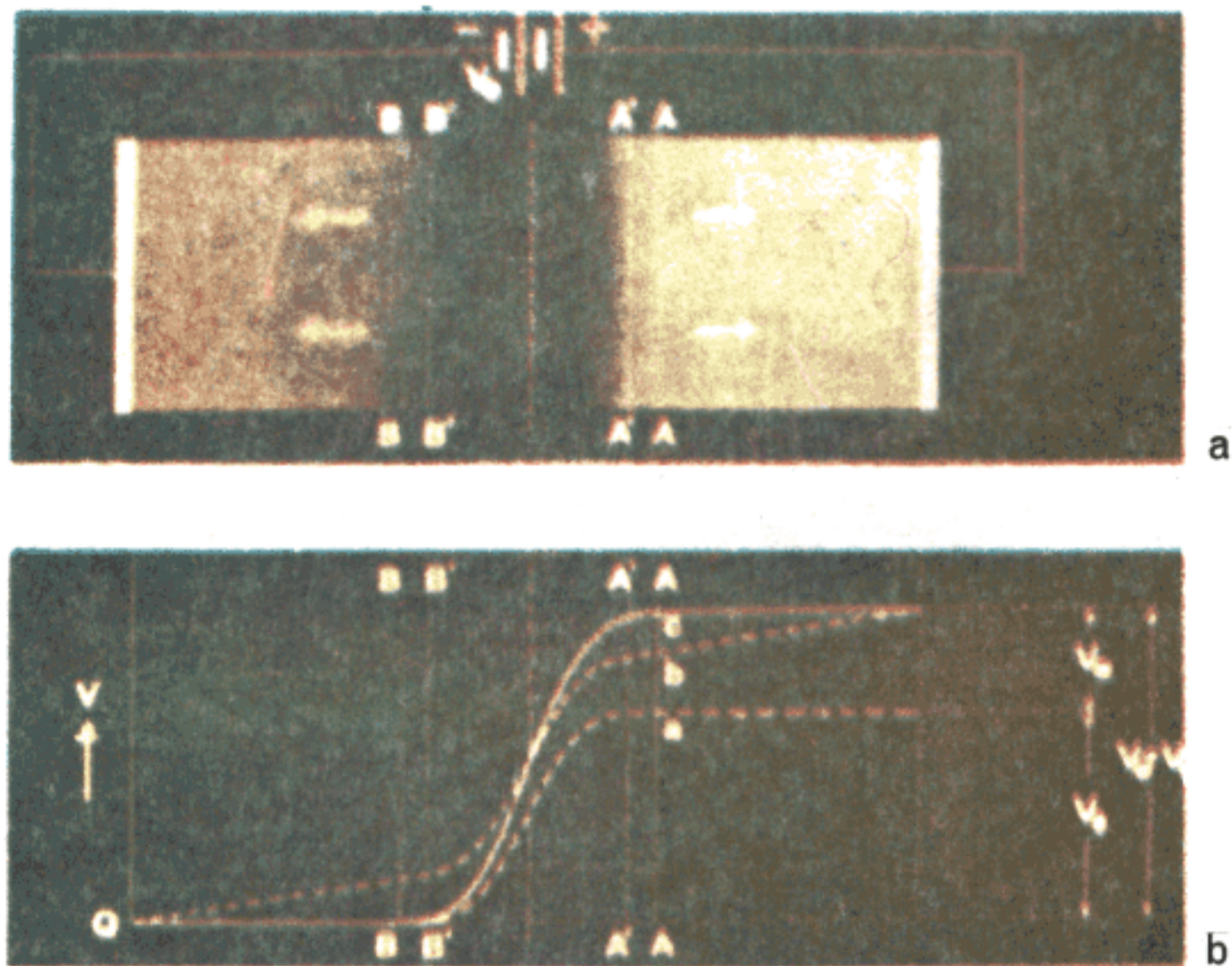


Fig. 2.4. Joncțiunea PN polarizată invers: *a*) structura fizică cu planurile de referință AA , $A'A'$, BB și $B'B'$, care delimitează regiunea de trecere în absența și prezența tensiunii electrice de polarizare; *b*) curba de variație a potențialului intern de contact ($V' = V_0 + V_e$).

regiunea de trecere, se exprimă prin produsul $np=C(T)$ la o temperatură T dată (figura 2.2 e).

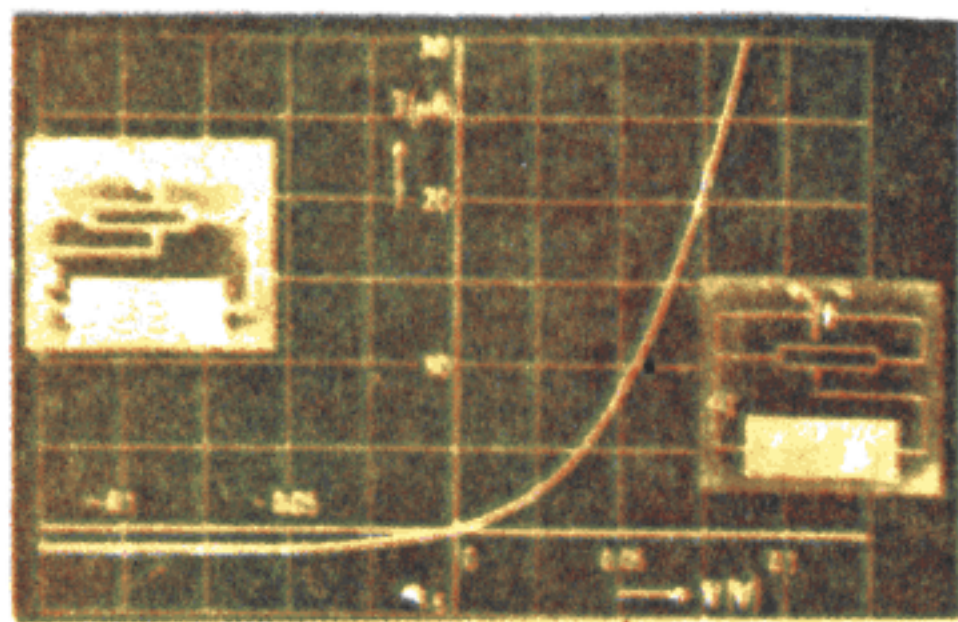
Prin polarizarea directă a unei joncțiuni PN (figura 2.3 a), adică cu $+$ pe regiunea P și cu $-$ pe regiunea N, diferența internă de potențial (V_0) se micșorează cu valoarea tensiunii de polarizare (figura 2.3 b), iar regiunea de trecere se îngustează de la $A'B'$ la AB .

Electronii din zona N se deplasează spre stînga și golurile din zona P spre dreapta, adică spre joncțiunea PN, care nu se opune conducției electrice pentru acest mod de polarizare în curent continuu (în sens direct).

În cazul polarizării inverse a joncțiunii PN (fig. 2.4 a), regiunea N se conectează la borna (+), iar regiunea P la borna (-) a bateriei. Deoarece cîmpul electric extern are același sens cu cîmpul electric intern, se produce o frînare puternică a deplasării purtătorilor majoritari, iar bariera de potențial crește cu tensiunea aplicată din exterior ($V'=V_0+V_e$) așa cum se arată în figura 2.4 b. Prin golirea de purtători mobili de sarcină, regiunea de trecere se mărește (de la $A'B'$ la AB) și se opune conducției electrice pentru acest mod de polarizare în curent continuu (în sens invers).

2.2. CARACTERISTICILE CURENT-TENSIUNE ÎN DIFERITE SITUAȚII DE LUCRU

Considerîndu-se o joncțiune PN plasată într-un circuit electric, în care se află o sursă de tensiune continuă, comportarea acesteia este diferită în cele două cazuri de polarizare (directă și inversă), așa cum rezultă și din *caracteristicile curent-tensiune* (figura 2.5). În cazul polarizării directe, conducția electrică este asigurată de purtătorii majoritari care trec mult mai ușor prin-



www.electronica.ro

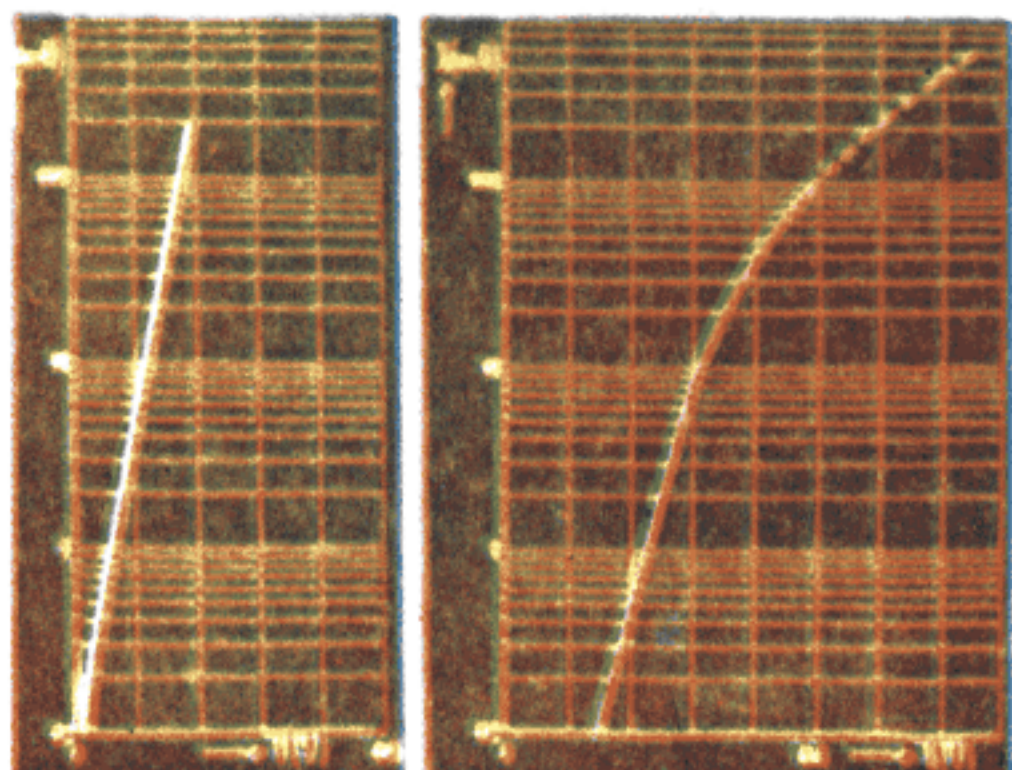


Fig. 2.5. Modalități de prezentare a caracteristicii $I=f(V)$ pentru o joncțiune PN: a) caracteristica $I=f(V)$ pentru conducția în sens direct și în sens invers, la scară liniară; b) caracteristica $I=f(V)$ teoretică pentru conducția în sens direct, la scară semilogaritmică; c) caracteristica $I=f(V)$ experimentală pentru conducția în sens direct, la scară semilogaritmică.

tr-o barieră de potențial îngustată sensibil. Nivelul de curent crește cu tensiunea aplicată din exterior. Pentru situația de polarizare inversă curentul prin jonctiunea PN nu depinde în principiu de tensiunea aplicată, fiind numit și *curent de saturație*. Acest curent este determinat de purtătorii minoritari de sarcină și are o valoare extrem de mică. Din forma exponențială a caracteristicii $I=f(V)$.

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right)$$

rezultă că jonctiunea PN se comportă nelinier din punct de vedere electric.

Alura caracteristicii $I=f(V)$ din figura 2.5 c pune în evidență și efectul rezistențelor serie asociate zonelor de tip P și N, care practic nu sînt neglijabile. Pe aceste rezistențe (R_1 și R_2) se înregistrează următoarele căderi de tensiune (figura 2.6 a și b):

$$\begin{aligned} V_1 &= R_1 I \\ V_2 &= R_2 I \end{aligned}$$

www.electronica.ro

O tensiune V la bornele unei jonctiuni PN se distribuie pe cele două zone neutre (V_1 pe zona P și V_2 pe zona N) și pe regiunea de trecere (V_3), în așa fel încît avem $V = V_1 + V_2 + V_3$, toate regiunile fiind parcurse de același curent I .

Tensiunea parțială $V_1 + V_2$ variază liniar funcție de curentul I (figura 2.6 b — curba b) iar dependența $I(V_3)$ este de tip exponențial (figura 2.6 curba a). Caracteristica reală a jonctiunii PN (curba c) se obține prin însumarea pe orizontală a tensiunilor reprezentate de curbele a și b, la o valoare constantă a curentului I (adică I_1, I_2, \dots) și a temperaturii de lucru. La creșterea temperaturii ambiante se înregistrează o deplasare controlată, spre stînga, a ca-

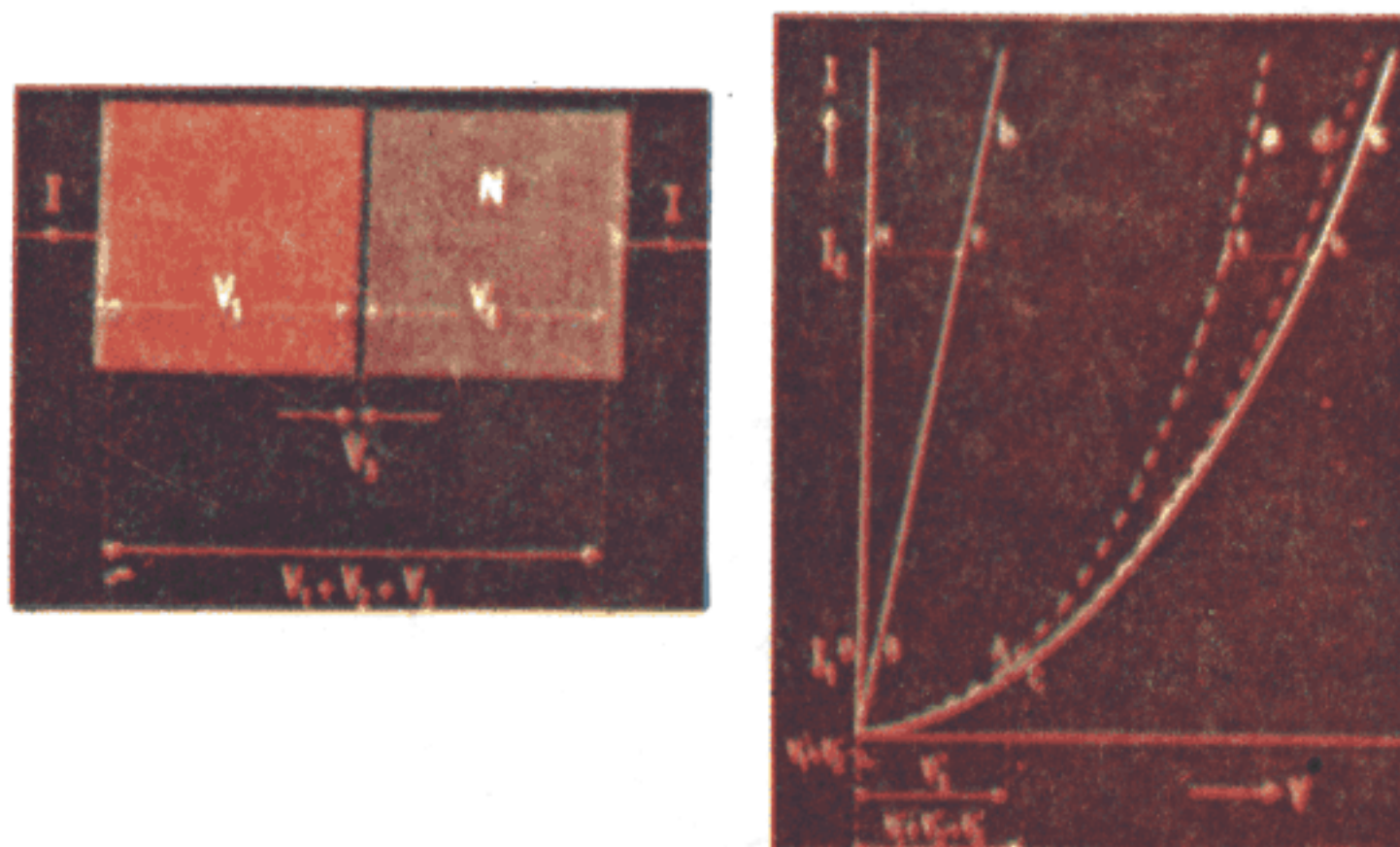


Fig. 2.6. a) Jonctiunea PN polarizată în conducție directă și b) caracteristica $I=f(V)$ experimentală obținută prin sumarea de tensiuni la două valori diferite ale curentului (I_1 și I_2): curba a reprezintă variația exponențială $I=f(V_3)$; curba b indică o dependență liniară $V_1 + V_2 = (R_1 + R_2)I$; curba c este caracteristica reală a unei jonctiuni PN la o temperatură dată; curba d arată caracteristica $I=f(V)$ a aceleiași jonctiuni PN, dar la o temperatură mai ridicată.

racteristicii $I=f(V)$ — curba d . Așadar, la o tensiune de lucru dată, curentul prin jonctiunea PN este mai mare pe curba d față de cel înregistrat pe curba c (curbă obținută la o temperatură mai mică). Astfel de caracteristici, ridicate experimental la două temperaturi de lucru, se prezintă în figura 2.7 a, b, c pentru trei tipuri de jonctiuni PN cu germaniu.

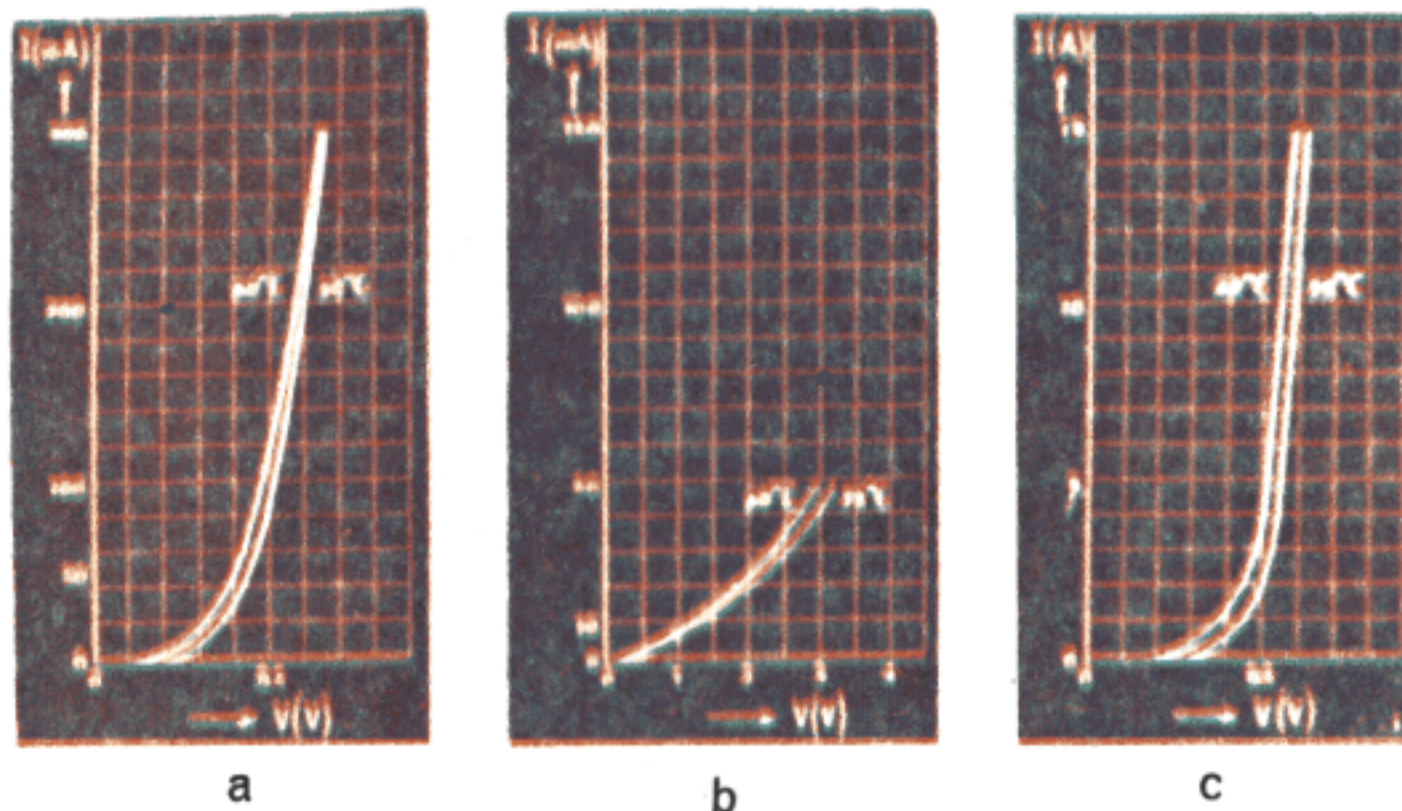


Fig. 2.7. Caracteristicile $I=f(V)$ în conducție directă, la două temperaturi de lucru (25°C și 60°C), pentru trei tipuri de jonctiuni cu germaniu: a) jonctiune PN utilizată la detecția tensiunilor de înaltă frecvență; b) jonctiune PN utilizată în comutație; c) jonctiune PN utilizată în aplicații la puteri mari și frecvențe joase.

Regimul termic al unei jonctiuni PN are o importanță deosebită deoarece la un volum mic de semiconductor se disipă o cantitate redusă de căldură. Prin urmare, este posibil să apară o încălzire excesivă a jonctiunii respective, care conduce și la creșterea curentului în condițiile menținerii aceleiași tensiuni de lucru. În cazul unor jonctiuni cu germaniu (Ge) și siliciu (Si) polari-

www.electronica.ro

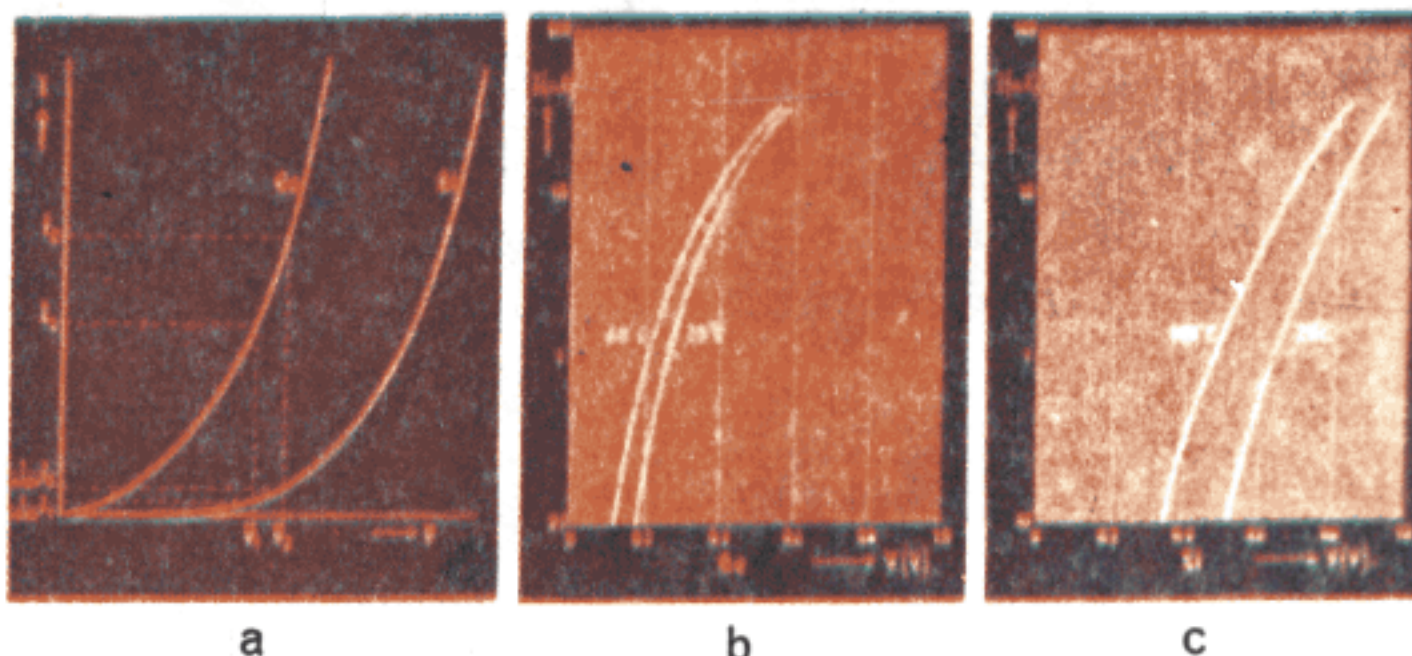


Fig. 2.8. Caracteristici $I=f(V)$ comparative pentru jonctiuni PN din germaniu și siliciu polarizate direct: a) caracteristici $I=f(V)$ la scară liniară pentru ambele tipuri de jonctiuni; b) caracteristici $I=f(V)$ la scară semilogaritmică pentru o jonctiune din germaniu la două temperaturi de lucru (25°C și 60°C); c) caracteristici $I=f(V)$ la scară semilogaritmică pentru o jonctiune de siliciu la două temperaturi de lucru (25°C și 100°C).

zate în conducție directă, ale căror caracteristici $I=f(V)$ sînt prezentate comparativ în figura 2.8 a, efectul temperaturii de lucru este înfățișat în figura 2.8 b. pentru o joncțiune cu germaniu (Ge), la temperaturile de 25°C și 60°C, respectiv în figura 2.8 c pentru o joncțiune cu siliciu (Si) la temperaturile de 25°C și 100°C (în 2.8 b și 2.8 c se folosește o scară semilogaritmică). Temperatura maximă de lucru pentru joncțiunile realizate din germaniu este de cca. 75°C, iar pentru joncțiunile realizate din siliciu este de circa 150°C.

În conducție inversă, datorită fenomenului de pierderi prin scurgeri de curent (figura 2.9 a), la o joncțiune PN nu se obține o saturare strictă a curentului de purtători minoritari. Acest curent crește o dată cu mărirea tensiunii de lucru, așa cum se observă și în figura 2.9 b pentru o joncțiune din germaniu (la 25°C și la 60°C), respectiv în figura 2.9 c pentru o joncțiune din siliciu (la 25°C și 100°C). Analizîndu-se comparativ caracteristicile prezentate, în conducție inversă, se observă că în aceleași condiții de lucru curentul printr-o joncțiune din siliciu este mult mai mic decît curentul printr-o joncțiune din germaniu (aproape cu trei ordine de mărime).

Așa cum rezultă din imaginile prezentate, asupra caracteristicilor statice ale joncțiunilor PN se manifestă o serie de factori perturbatori, care conduc la efecte nedorite asupra formei și stabilității acestora. De exemplu, variația temperaturii de lucru induce modificări ale caracteristicilor statice atît în conducție directă cît și în conducție inversă.

Este posibil să apară și o serie de accidente prin *ambalare termică*. O astfel de comportare fizică este înfățișată în figura 2.10. Se observă că, pentru un domeniu larg al temperaturii ambiante, caracteristica $I=f(V)$ a unei joncțiuni PN în conducție inversă înregistrează o întoarcere spre valori mari ale curentului prin structura fizică. În planul caracteristicilor statice, la diferite temperaturi de lucru, se înfățișează și curbele de putere constantă pentru aceleași temperaturi de lucru. Prin punctele de intersecție ale acestor curbe (hiperbole de disipație) cu caracteristicile $I=f(V)$ corespondente se

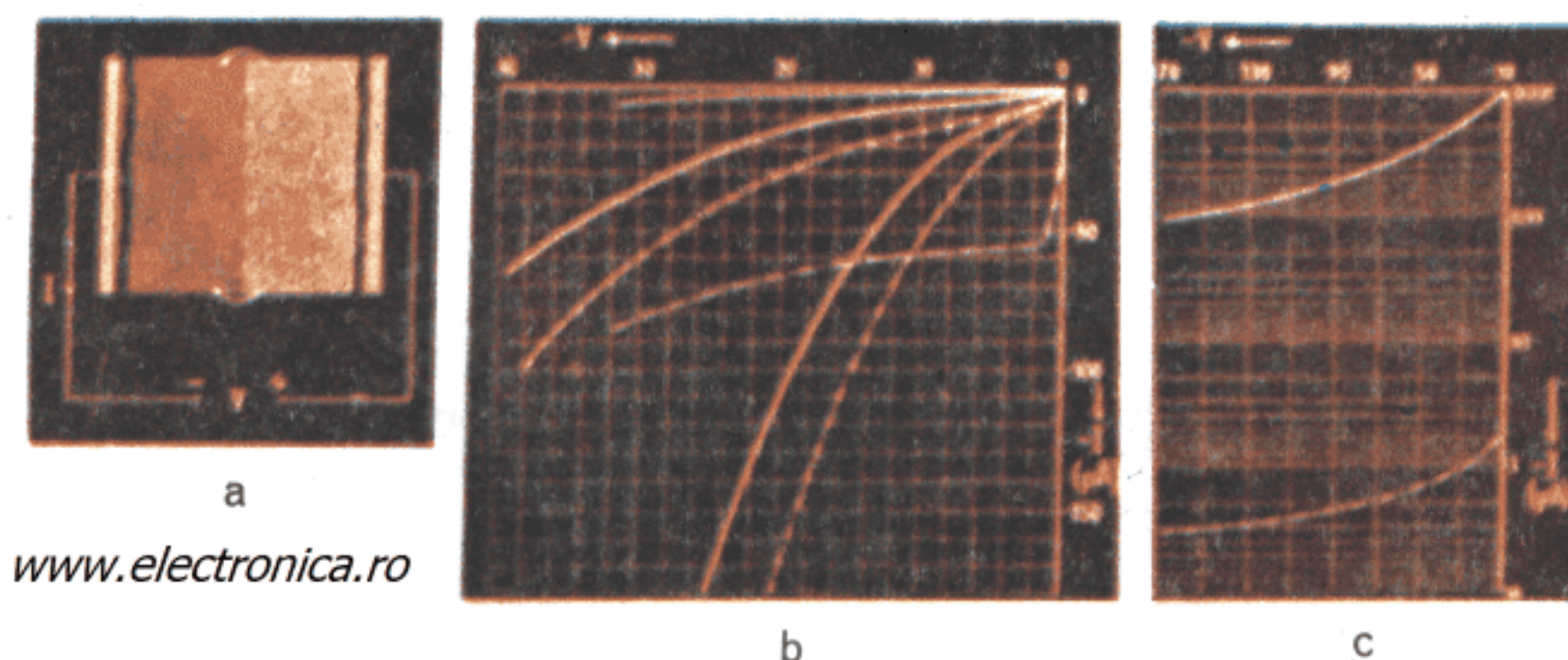


Fig. 2.9. a) Structură fizică de joncțiune PN polarizată invers cu imperfecțiuni ale rețelei cristaline la suprafața semiconductorului utilizat; b) caracteristicile $I=f(V)$ în conducție inversă pentru o joncțiune din germaniu (25°C și 60°C), la două temperaturi de lucru; c) caracteristicile $I=f(V)$ în conducție inversă pentru o joncțiune din siliciu la două temperaturi de lucru (25°C și 100°C).

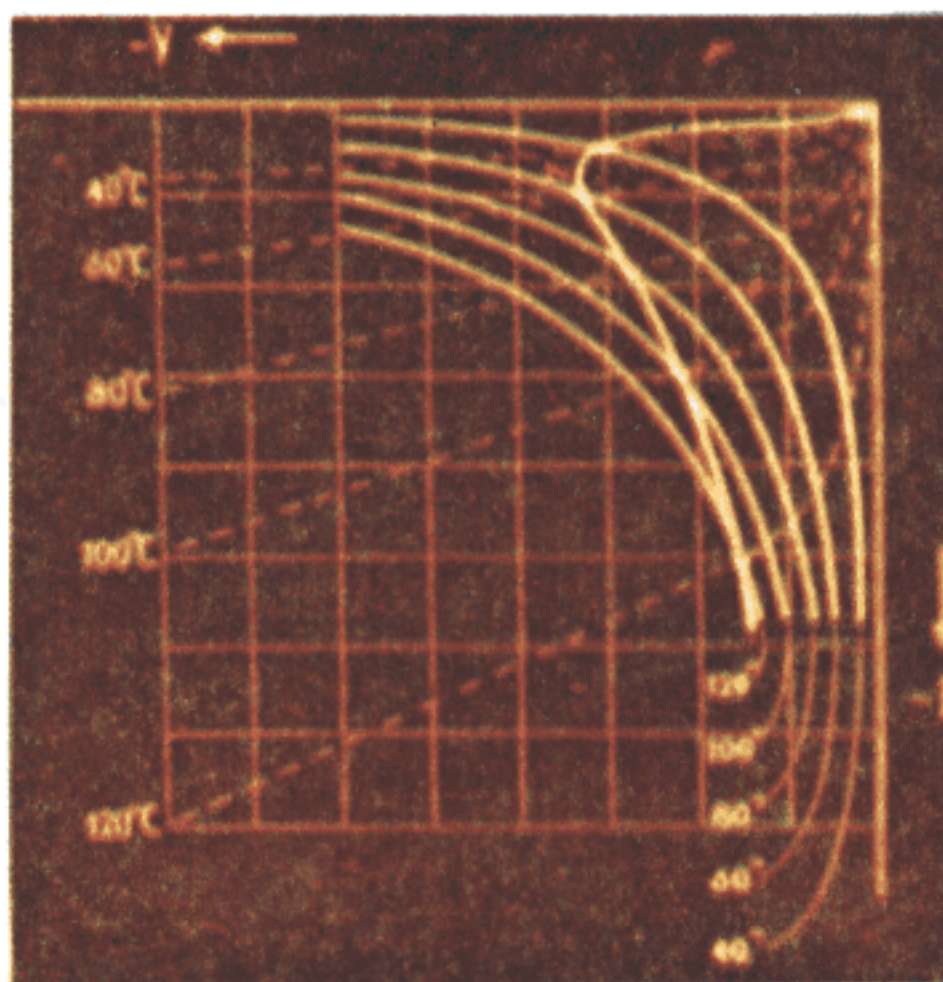


Fig. 2.10. Evidențierea efectului de ambalare termică în planul caracteristicii $I=f(V)$ la o joncțiune PN polarizată invers.

trasează caracteristica tipică de ambalare termică. Din alura unei astfel de caracteristici se observă o creștere lentă a curentului o dată cu mărirea tensiunii de lucru pînă la o valoare limită, numită *tensiune de străpungere*. Peste această valoare de tensiune se obține o creștere rapidă a curentului, în timp ce tensiunea pe joncțiune scade, adică se ajunge într-o regiune cu rezistență negativă, extrem de instabilă. Dacă durata de lucru în această regiune depășește o valoare critică, joncțiunea PN se distruge pe cale termică fără nici o posibilitate de recuperare. Pentru protecția joncțiunii PN se recomandă introducerea unei rezistențe serie în circuitul de polarizare, pentru a limita nivelul de curent în regiunea stabilă cu rezistență pozitivă, iar temperatura maximă de lucru nu trebuie să fie depășită.

De asemenea, o joncțiune PN se poate exploata și la tensiuni mai înalte, dar numai pe intervale scurte de timp, în care temperatura nu depășește valoarea critică de ambalare.

Totodată, *suprafața* oricărui semiconductor prezintă imperfecțiuni ale structurii cristaline și chiar impurități suplimentare ce sînt extrem de active din punct de vedere electric. Cum la nici un fel de joncțiune nu se poate evita suprafața activă a semiconductorului, rezultă modificări de distribuție a purtătorilor minoritari și deci a curenților de difuzie din zona respectivă. Așadar, pentru un grad scăzut de prelucrare a suprafeței semiconductoarelor, caracteristicile statice ale joncțiunilor PN polarizate invers sînt influențate sensibil de scurgerile superficiale de curent și de curentul de generare-recombinare la suprafață, care conduc la instabilități temporale și la creșterea curentului invers cu tensiunea aplicată.

La nivele mari de injecție, pentru o joncțiune PN polarizată direct, se pune în evidență și o *rezistență serie a regiunilor neutre*, care modifică forma exponențială a caracteristicii $I=f(V)$. Valoarea acestei rezistențe nu este constantă, fiind influențată direct la nivelul curentului de polarizare.

La tensiuni inverse mai înalte se produc și efecte electrice de *străpungere a joncțiunii PN*, dintre care menționăm:

- străpungerea prin *multiplicare în avalanșă* a purtătorilor de sarcină;
- străpungerea prin *efect Zener*.

Dacă tensiunile inverse de lucru au valori mai mari decât un anumit prag, câmpul electric din regiunea de trecere a joncțiunii PN transferă purtătorilor de sarcină o energie suplimentară, care permite formarea de noi perechi electroni-goluri prin ciocnirea lor cu atomii rețelei cristaline. Acest proces de multiplicare capătă prin repetare, un caracter de avalanșă și duce la creșterea rapidă a curentului (figura 2.11). Mărimea tensiunii de străpungere depinde de geometria joncțiunii PN, de gradul dopării cu impurități a zonelor P și N, de tehnologia de realizare ș.a.

De exemplu, pentru dopări mai consistente cu impurități există condiții favorabile ca străpungerea joncțiunii PN să aibă loc prin efecte Zener și nu prin multiplicare în avalanșă. Efectul Zener apare, de regulă, la joncțiunile cu tensiuni inverse mici de polarizare (figura 2.12). Regiunea de lucru se află în vecinătatea tensiunii de străpungere și oferă o comportare stabilă. Efectul Zener are loc la câmpuri electrice suficient de intense pentru a rupe legăturile covalente în cristal, din regiunea de trecere a joncțiunii PN. Curentul invers prin joncțiune crește rapid și poate fi limitat doar cu o rezistență serie în circuitul de polarizare. Dispozitivele bazate pe acest efect poartă numele de *diode Zener* sau *diode stabilizatoare de tensiune*.

Străpungerea unei joncțiuni PN este influențată pe de o parte de suprafața semiconductorului și, pe de altă parte, de temperatura de lucru. În cazul unor imperfecțiuni structurale la suprafața oricărei joncțiuni PN, tensiunea de străpungere prezintă instabilități temporale. Referitor la influența temperaturii se pot face următoarele afirmații:

- în cazul multiplicării prin avalanșă, tensiunea de străpungere *crește* cu mărirea temperaturii în regiunea joncțiunii PN;
- în cazul efectului Zener, tensiunea de străpungere *scade* cu creșterea temperaturii în regiunea joncțiunii PN.

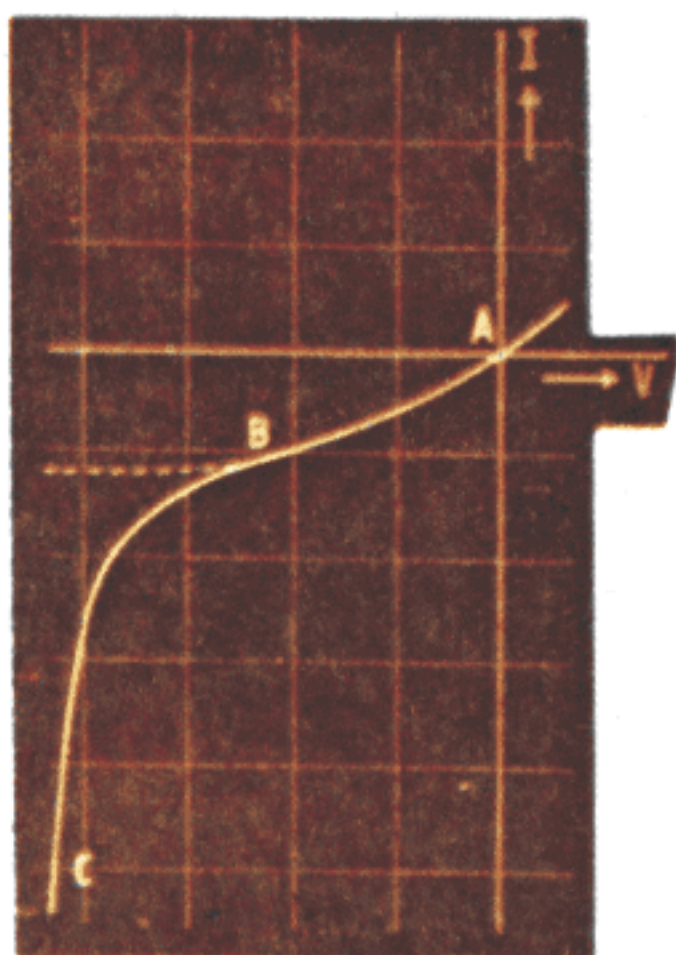


Fig. 2.11. Evidențierea efectului de străpungere prin multiplicare în avalanșă la o joncțiune PN polarizată invers.

www.electronica.ro

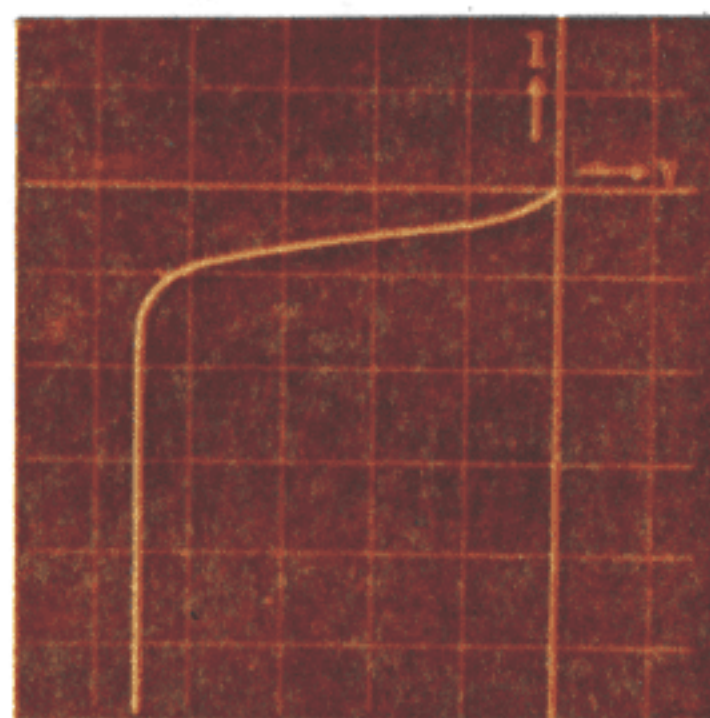


Fig. 2.12. Evidențierea efectului de străpungere prin efect Zener la o joncțiune PN polarizată invers.

Este util de precizat că temperatura (T_j) în regiunea joncțiunii PN este mai mare decât temperatura ambiantă (T_a), datorită puterii disipate (P_D), conform relației

$$T_j = T_a + R_{thj-a} P_D,$$

în care R_{thj-a} este rezistența termică a semiconductorului sau a materialelor care se află între joncțiune și mediul ambiant.

Efectul tunel apare în joncțiunile PN cu concentrații mari de impurități în ambele zone neutre, și care au o lățime mică a regiunilor de trecere. Prin modul de realizare a acestor joncțiuni și de polarizare electrică, electronii din banda de conducție a semiconductorului de tip N trec direct în banda de valență a semiconductorului de tip P, prin efect tunel. Este util de precizat că purtătorii de sarcină care tranzitează prin efect tunel, dintr-o parte în alta, nu sînt implicați în procese de recombinare. Forma caracteristicii statice pentru astfel de joncțiuni este înfățișată în figura 2.13 a pentru conducție inversă și în figura 2.13 b pentru conducție directă. În zona cu efect tunel, caracteristica $I=f(V)$ prezintă rezistență negativă (pe traseul A, B și C). Cu ajutorul unor astfel de joncțiuni se realizează *diode tunel* avînd viteză mare de comutație.

www.electronica.ro

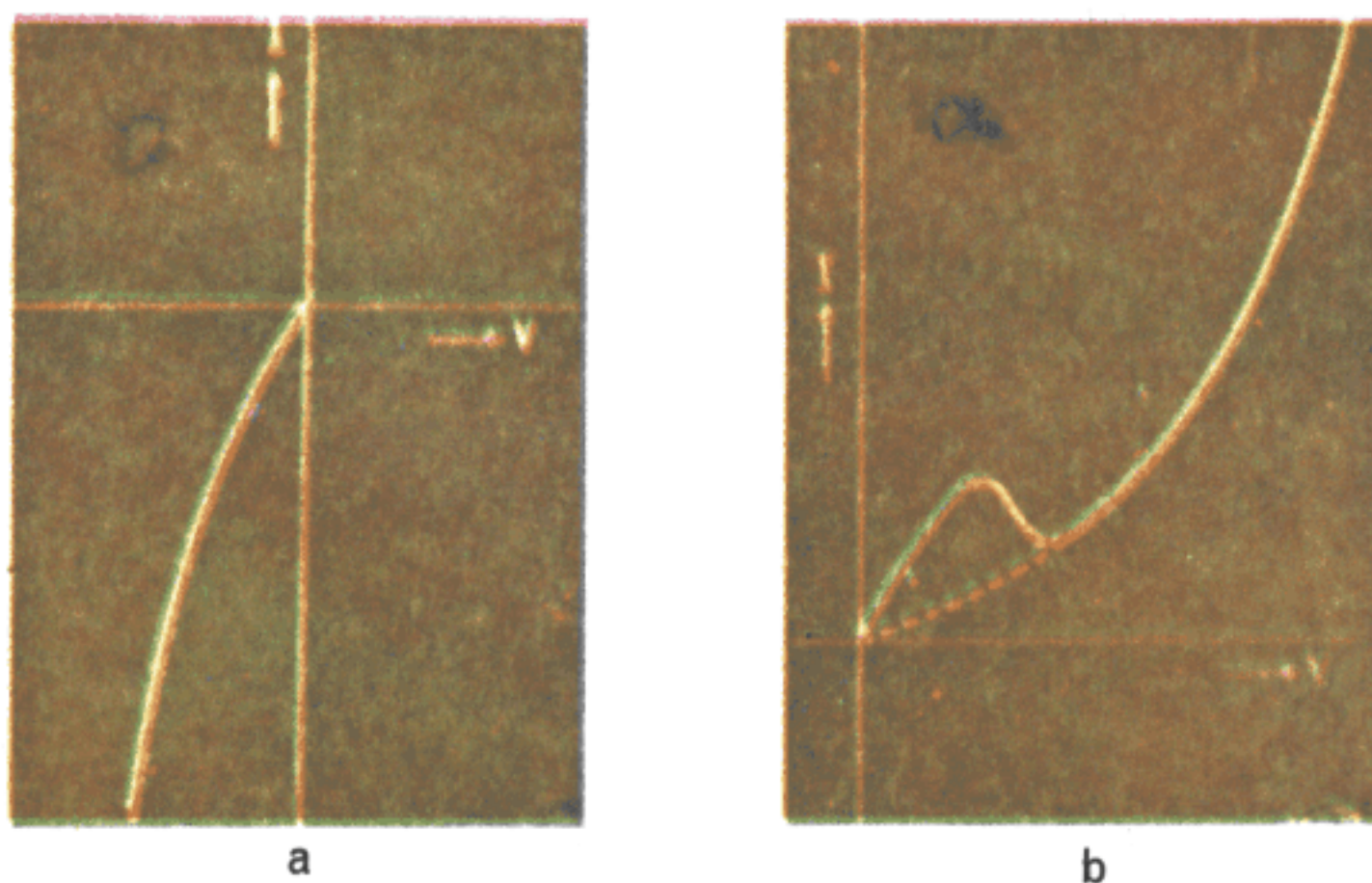


Fig. 2.13. Evidențierea efectului tunel: a) la o joncțiune îngustă polarizată invers; b) la o joncțiune îngustă polarizată direct.

2.3. MODALITĂȚI DE REALIZARE TEHNOLOGICĂ

Formarea joncțiunilor PN reprezintă cea mai importantă operație în fabricarea unor structuri de dispozitive semiconductoare (diode, tranzistoare ș.a.); ea se realizează prin diferite metode de lucru: aliere, difuzie, implantare ionică etc.

În cazul *alierii* (figura 2.14 a și b), se așează pe o plăcuță de germaniu sau de siliciu de tip N (b) o bilă de metal (a), care reprezintă impuritatea acceptoare (In sau Al). Prin încălzirea acestui ansamblu, într-o casetă de

grafit, se realizează topirea metalului și pătrunderea sa în semiconductorul de bază, formînd prin răcire o zonă P. Deoarece semiconductorul dopat cu impuritatea metalică se solidifică în același sistem cristalin cu cel al plăcuței inițiale, joncțiunea PN obținută rămîne tot monocristalină.

Pentru formarea de joncțiuni cu performanțe superioare, în cristale, de germaniu și de siliciu, se folosește metoda difuziei (fig. 2.14 c). Utilizîndu-se ca material acceptor un strat de bor (f) ce se aplică peste o pastilă de siliciu de tip N (g), pe măsură ce temperatura crește borul difuzează în cristalul semiconductor și se obține o joncțiune PN. La același rezultat se ajunge dacă se plasează cristalul semiconductor într-o atmosferă cu vapori de bor la temperatură înaltă, care determină difuzia borului în materialul semiconductor.

Pentru ca operația să decurgă cît mai rapid, difuzia propriu-zisă are loc la temperaturi apropiate de cea la care se topește semiconductorul. La realizarea unei joncțiuni PN prin difuzie, se pleacă de la un semiconductor de tip N sau P, deci care este deja dopat cu impurități donoare sau acceptoare. Într-un astfel de semiconductor se difuzează atomi ai unei impurități de tip opus. La distanța la care concentrația impurităților difuzate devine egală cu cea a impurităților din semiconductorul inițial se definește *joncțiunea metalurgică PN*.

Prin mărirea temperaturii de lucru sau a timpului de difuzie, joncțiunea PN se formează la o adîncime mai mare. Prin modificarea controlată a condițiilor de difuzie se pot obține joncțiuni PN cu diferite tensiuni de străpungere, de formă plană și fără defecte structurale. La structuri mai complexe de dispozitive, cu două sau mai multe joncțiuni, se utilizează *metoda dublei difuzii*. Impuritățile care urmează să fie difuzate se pot afla sub diferite forme: în strat subțire depus pe semiconductor; bucăți introduse în tubul de difuzie; vapori antrenați de un gaz purtător ș.a. Difuzia propriu-zisă se realizează pe mai multe căi, dintre care menționăm: difuzia din strat topit; difuzia în vid; difuzia în incintă deschisă și în atmosferă de gaz inert.

Pe baza tehnologiilor prezentate anterior se realizează diode aliate, diode difuzate și cu contact punctiform. În cazul *diodelor cu contact punctiform* (figura 2.15 a, b, c și d), o plăcuță semiconductoare A se sudează pe un conductor de cupru (B), care se acoperă cu un cilindru de sticlă C (figura 2.15 a). A doua componentă a diodei este o sîrmă de tungsten îndoită D (figura 2.15 b) care se presează cu vîrfurile ascuțite spre plăcuța de semiconductor și cu celălalt capăt este sudată la un alt terminal de cupru pe care se află o mărgea de sticlă E. Cu ajutorul acestor mărgele de sticlă se închide ermetic structura diodei cu un contact punctiform (fig. 2.15 c). Sudura sîrmei de tungsten pe plăcuța semiconductoare se realizează prin trecerea unui curent alternativ, cu anumită intensitate, prin structura fizică obținută (figura 2.15 d). În acest mod, atomii de tungsten din zona presată pe semiconductor migrează în cristalul de tip N

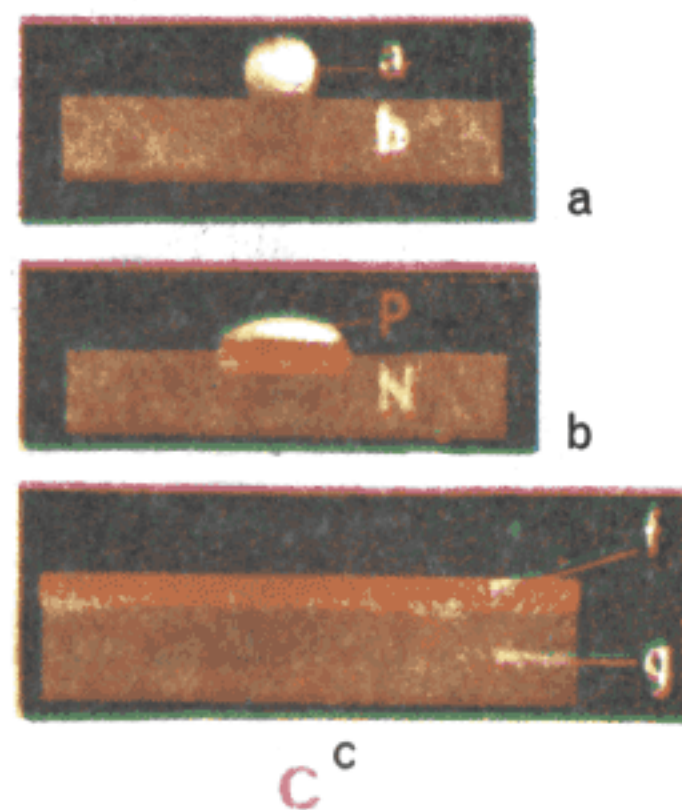


Fig. 2.14. a) Plasarea unei bile de metal trivalent pe un suport semiconductor tip N în vederea realizării unei joncțiuni PN aliate; b) joncțiune PN obținută prin aliere; c) joncțiune PN obținută prin difuzie.

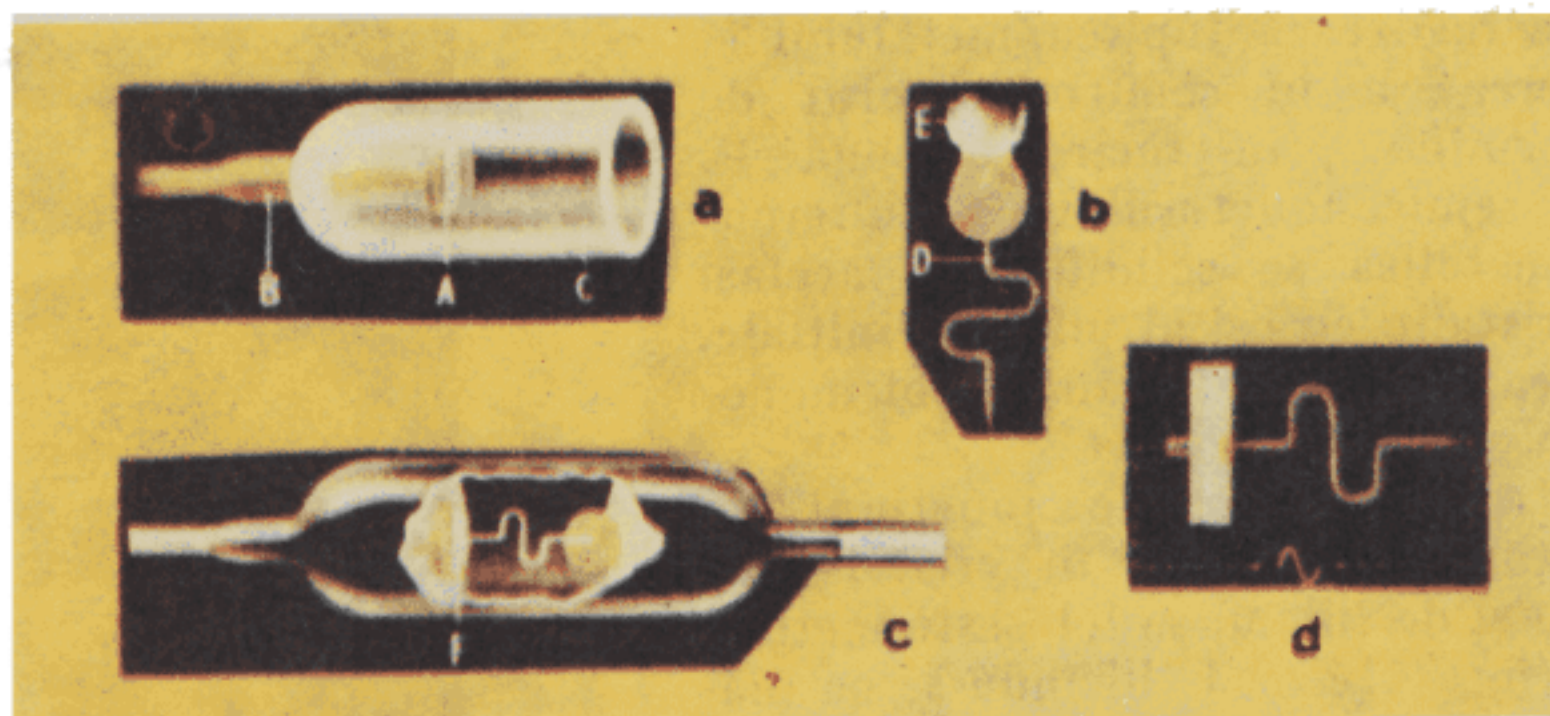


Fig. 2.15. a) Partea cu plăcuța semiconductoră a unei diode cu contact punctiform; b) partea cu firul de tungsten îndoit și ascuțit pentru o diodă cu contact punctiform; c) structura încapsulată de diodă cu contact punctiform; d) formarea microjoncțiunii PN la o diodă cu contact punctiform, prin aplicarea directă a tensiunii alternative.

și realizează o regiune de tip P la suprafața acestuia, adică o microjoncțiune PN. Pentru aplicații speciale, sîrma de tungsten se poate înlocui cu fir de aur. Învelișul transparent al acestor diode se poate acoperi cu lac negru, deoarece pot interveni și fenomene nedorite din cauza luminii ambiante.

La *diodele difuzate*, pentru asigurarea unui transfer mai bun de căldură se recomandă folosirea unei construcții mai robuste pentru încapsularea joncțiunilor PN (figura 2.16 a, b). Joncțiunea PN se plasează pe o bază de metal, iar al doilea electrod de contact este sudat la o sîrmă ce trece printr-o casetă metalică cu manta de etanșare din sticlă (figura 2.16 a). Structura complet încapsulată a unei diode difuzate cu siliciu este înfățișată în figura 2.16 b (există, însă, și alte tipuri de capsulă).

Pentru lucrul cu astfel de dispozitive sînt extrem de importante condițiile limită impuse de către firmele constructoare, atît cu privire la parametrii electrici cît și asupra temperaturii ambiante.

În paralel cu tehnicile folosite pentru elaborarea structurilor difuzate, s-a făcut apel și la tehnologia bazată pe *implantarea ionică*, prin care se realizează o impurificare controlată și selectivă a diferitelor structuri semiconductoră. Pe această cale se pot obține nivele reduse de dopare, însă sub un

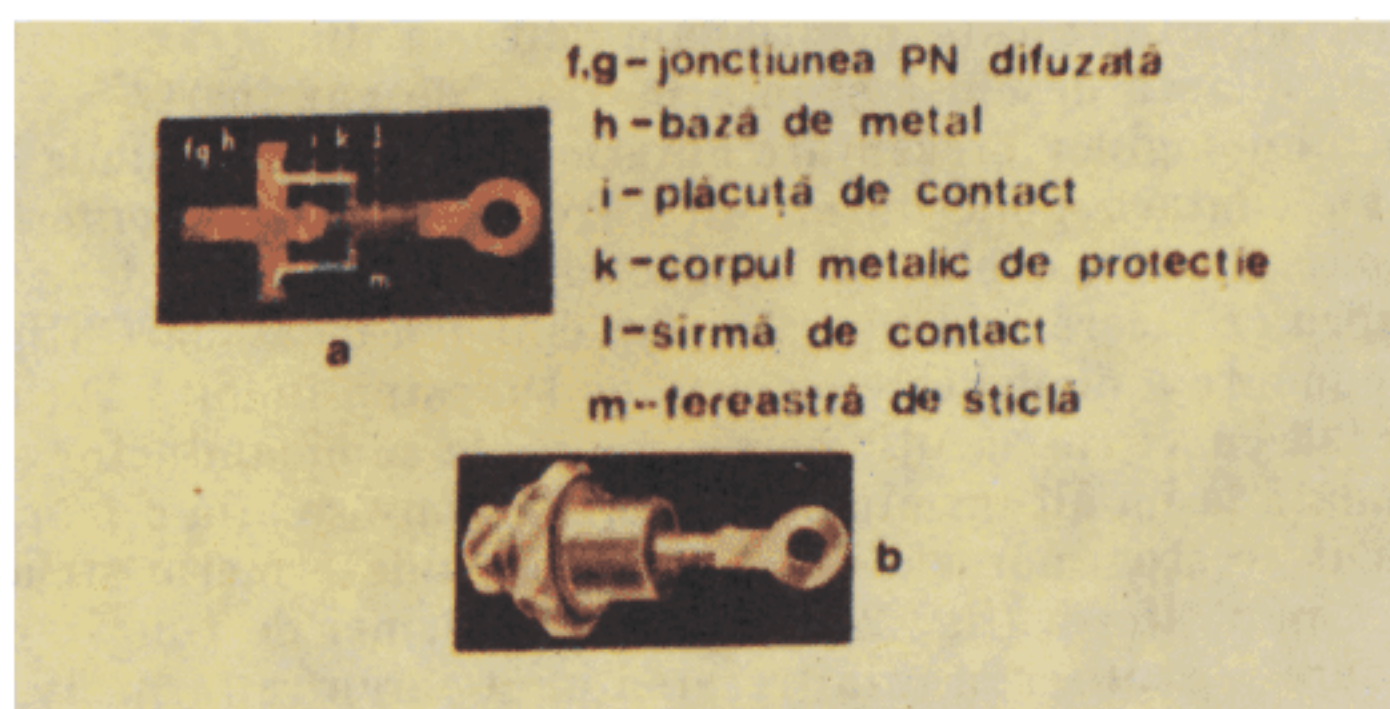


Fig. 2.16. a) Secțiune printr-o diodă difuzată; b) vedere pentru o diodă difuzată și încapsulată.

control riguros privind cantitatea și poziția ionilor de impuritate în diferite tipuri de semiconductoare.

Cu ajutorul joncțiunilor semiconductoare se realizează o gamă variată de structuri electronice, începînd cu diode și tranzistoare și terminînd cu dispozitivele multijoncțiune. Imediat după realizarea tehnologică propriuzisă, dispozitivele semiconductoare se *marchează* în clar sau codificat pentru identificarea și recunoașterea lor de către utilizatori, așa cum se arată în anexa 2.

www.electronica.ro

2.4. DIODE SEMICONDUCTOARE

În practică se realizează o gamă variată de diode semiconductoare, pentru diferite aplicații, ele deosebindu-se prin anumite particularități fizice și tehnologice ale joncțiunilor PN ce le conțin, care le conferă și o anumită specificitate de utilizare.

Pentru clasificarea diodelor semiconductoare se adoptă o serie de criterii dintre care menționăm:

- modul de realizare tehnologică;
- nivelul parametrilor de semnal (tensiune, curent, putere și frecvență de lucru);
- modul de funcționare și utilizare/

De exemplu, în baza modului de funcționare sau de lucru, respectiv de utilizare, menționăm următoarele tipuri de diode semiconductoare:

- diode redresoare (anexa 3.1);
- diode stabilizatoare de tensiune (diode Zener — anexa 3.2);
- diode pentru semnale de mică putere (anexa 3.3);
- diode cu capacitate variabilă (diode varicap — anexa 3.4);
- diode cu avalanșă controlată (anexa 3.5 A);
- diode picoamperice (anexa 3.5 B);
- diode pentru compensare termică (anexa 3.5 C);
- diode în configurații modulare (anexa 3.5 D);
- diode pentru uz didactic (anexa 3.5 E).

Pe lângă dispozitivele prezentate în anexele 3.1—3.5, se mai utilizează: diode cu contact punctiform pentru detecție, multiplicare și schimbare de frecvență; diode PIN pentru comutatoare și modulatori de microunde, diode de comutație; diode cu acumulare de sarcină pentru multiplicare de frecvență și generare de impulsuri; diode Schottky, care au înlocuit treptat diodele cu contact punctiform; diode tunel pentru realizarea de amplificatoare, oscilatoare și circuite de comutație; diode cu conducție inversă pentru lucru la semnale mici.

Parametrii caracteristici pentru fiecare dintre tipurile de diode menționate se referă la diferite valori ale tensiunii directe și inverse de lucru în regim static și de excitație în regim dinamic, ale curentului direct și invers de lucru în regim static și de excitație în regim dinamic, respectiv la timpii de comutație, la coeficienții de temperatură pentru tensiunile directe/inverse de lucru, la puterea disipată și chiar la rezistențele diferențiale în diferite zone de lucru. În aplicațiile diodelor semiconductoare trebuie avut în vedere, mai ales, să nu se depășească valorile maxime (de vîrf) ale următorilor parametri caracteristici:

- tensiunea maximă inversă de lucru, respectiv tensiunea de străpungere;
- curentul maxim direct de lucru;

- puterea disipată maximă;
- frecvența maximă de lucru.

Pentru anumite diode semiconductoare se folosește ca parametru caracteristic și *rezistența termică*, definită ca raportul dintre diferența de temperatură ce apare pe calea joncțiune-mediu ambiant și puterea evacuată. În aplicații care necesită utilizarea diodelor de putere se recomandă folosirea de radiatoare speciale, care facilitează micșorarea rezistenței termice a diodei cu radiator asociat.

3.1. TRANZISTOARE BIPOLARE

3.1.1. DEFINIRE ȘI CARACTERIZARE GENERALĂ

Prin *tranzistor bipolar* se înțelege un dispozitiv semiconductor cu două joncțiuni pe calea de conducție, în funcționarea căruia intervin ambele tipuri de purtători — electroni și goluri. Există o mare varietate de tranzistoare, care diferă prin modul de lucru, construcție, parametrii fizici și caracteristicile de bază. În anul 1948, J. Bardeen și W. Brattain au realizat primul tranzistor bipolar cu contacte punctiforme, iar în anul 1949 W. Shockley a propus structura fizică și teoria corespunzătoare pentru tranzistorul bipolar cu joncțiuni plane.

Tranzistoarele bipolare se realizează în cristale semiconductoare și constau din două joncțiuni pn (sau PN) învecinate. Structurile fizice se pot realiza în configurații de tip pnp și npn, așa cum rezultă și din figura 3.1. În ordinea prezentată, cele trei regiuni ale structurilor înfățișate au următoarele denu-

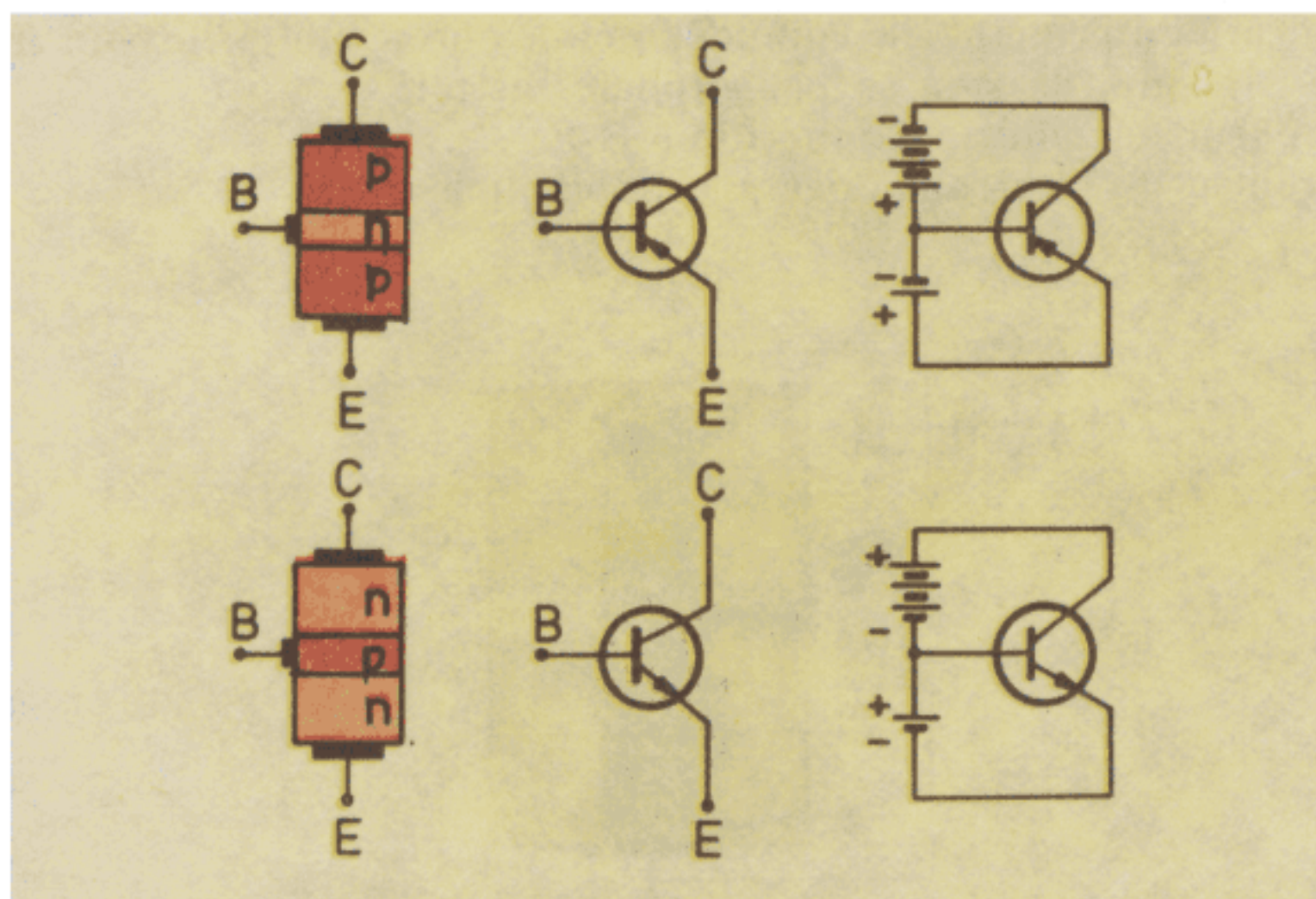


Fig. 3.1. Structura fizică, reprezentarea simbolică și modalități de polarizare pentru cele două tipuri de tranzistoare bipolare (pnp și npn).

miri: regiunea din mijloc se numește *bază* (B) iar regiunile exterioare — de jos și de sus — se numesc *emitor* (E), respectiv *colector* (C).

Cele două joncțiuni sînt apropiate una de alta, obținîndu-se astfel o lărgime mică a bazei (B). În aceeași figură (figura 3.1), alături de structurile fizice sînt prezentate simbolurile tranzistoarelor bipolare și modalitățile de polarizare ale acestora de la două surse de alimentare în c.c.

Deoarece un tranzistor bipolar apare format din două joncțiuni conectate în opoziție, este necesar ca între acestea să existe un cuplaj care să permită trecerea purtătorilor de sarcină de la o joncțiune la alta, adică să aibă loc *efectul de tranzistor*. Pentru ca efectul de tranzistor să fie mai pronunțat, lărgimea bazei trebuie să fie suficient de mică.

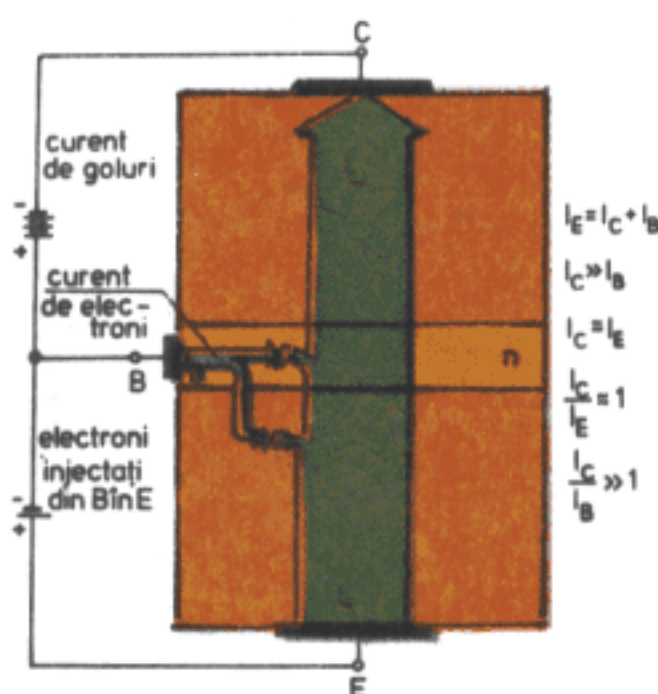
Pentru polarizarea în curent continuu a celor două structuri de tranzistoare bipolare (pnp și npn), sursele de alimentare se plasează astfel încît joncțiunile E-B (emitor-bază) să fie polarizate direct și joncțiunile C-B (colector-bază) să fie polarizate invers. Din figura 3.2 se observă că curentul prin joncțiunea E-B — polarizată direct — a unui tranzistor pnp se obține ca urmare a contribuției purtătorilor *majoritari* de sarcină, adică a golurilor injectate de emitor în bază. Numai o parte din goluri se recombina cu electronii din bază, în timp ce marea lor majoritate ajung în zona colectorului, datorită cîmpului electric din regiunea de trecere a joncțiunii colector-bază.

În cazul în care se renunță la polarizarea celor două joncțiuni, tranzistorul este străbătut de purtători de sarcină în ambele sensuri, iar contribuția lor la curentul total se compensează, adică curentul net prin fiecare joncțiune se anulează.

Referitor la efectul de tranzistor, în condițiile în care pe joncțiunea emitor-bază se aplică o tensiune directă de polarizare și lărgimea bazei este mare, curentul obținut se va închide în principal prin terminalul bazei. Dacă lărgimea bazei se micșorează sensibil, o fracțiune mult mai mare din curentul de emitor se va închide prin terminalul colectorului. Prin intermediul purtătorilor de sarcină injectați din emitor în bază, se obține și cuplarea fenomenelor electrice din cele două joncțiuni, adică efectul de tranzistor.

În legătură cu principalele componente ale curentului printr-un tranzistor bipolar, de tip pnp, acestea se pot explicita astfel:

- curentul de goluri al joncțiunii B-E;
- curentul de electroni injectați din B în E;



www.electronica.ro

Fig. 3.2. Principalele componente de curent în tranzistorul bipolar (pnp).

- curentul de electroni din bază (B);
- curentul de goluri al joncțiunii C-B.

Desigur, însă, că nu toate golurile injectate de emitor în bază se regăsesc la colector. O parte din aceste goluri se recombina cu electronii din bază și rezultă *curentul de bază*. Fără a se neglija circulația electronilor prin cele două joncțiuni, în funcționarea tranzistorului bipolar de tip pnp are o mare importanță circulația golurilor prin bază, ca purtători minoritari de sarcină, în sensul că un număr cât mai mare de purtători generați la emitor trebuie să ajungă la colector.

Luându-se în considerare și modul de polarizare electrică a tranzistorului din figura 3.2, se observă că joncțiunea E-B este polarizată direct și cîmpul electric total din regiunea sa de trecere este sensibil micșorat, deoarece cîmpul electric aplicat din exterior are sens contrar cîmpului intern al joncțiunii propriu-zise, iar joncțiunea C-B este polarizată invers, adică din exterior se aplică un cîmp electric de același sens cu cîmpul său intern. În aceste condiții de polarizare electrică a celor două joncțiuni, curentul de electroni majoritari al joncțiunii E-B circulă dinspre bază spre emitor, iar curentul de electroni minoritari al joncțiunii C-B circulă dinspre colector spre bază. Cele două componente ale curentului de electroni au valori scăzute, deoarece zona bazei are o rezistivitate mare, iar zona collectorului are o concentrație mică de electroni minoritari.

În cazul tranzistoarelor bipolare, de tip pnp sau npn, mecanismul de *amplificare* a semnalelor electrice se explică comod dacă avem în vedere circulația purtătorilor minoritari de sarcină prin baza acestor tranzistoare. Alături de desenul propriu-zis (figura 3.2), se prezintă și relațiile cantitative între curenți prin cele trei terminale (emitor, colector și bază). *Curentul de emitor* se estimează în funcție de tensiunea sursei de polarizare din circuitul joncțiunii E-B, care prezintă o rezistență neglijabilă în polarizare directă. Ca urmare a difuziei golurilor prin bază, valoarea *curentului de colector* se apropie practic de cea a curentului de emitor ($I_C \approx I_E$). Sursa de polarizare din circuitul joncțiunii C-B asigură circulația curentului de colector, ea avînd o tensiune mult mai mare decît cea din circuitul joncțiunii E-B.

Prin cuplajul fizic între cele două joncțiuni, care asigură transferul direct spre colector al purtătorilor de sarcină injectați de către emitor, tranzistorul bipolar se comportă ca un amplificator de putere. O astfel de comportare se datorează faptului că variația de putere din circuitul de colector este mult mai mare decît variația corespunzătoare a puterii din circuitul de emitor, deoarece tensiunea de polarizare inversă a joncțiunii colector-bază este mai mare decît tensiunea de polarizare directă a joncțiunii emitor-bază, iar nivelurile curenților de colector și de emitor, respectiv al variației acestora, rămîn foarte apropiate între ele.

În cazul unui circuit în care tranzistorul se conectează *cu baza comună* (conexiune BC), curentul de colector și cel de emitor ascultă de relația:

$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$, unde α reprezintă *coeficientul caracteristic de amplificare în curent* pentru această conexiune (valoarea sa fiind foarte puțin subunitară) și I_{CBO} — *curentul rezidual* la joncțiunea C-B. Dacă avem în vedere că $I_B = I_E - I_C = (1 - \alpha)I_E$, în cazul unui tranzistor în *conexiune emitor-comun* (EC), curentul de colector și cel de bază ascultă de relația $I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO}$,

în care $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ reprezintă *coeficientul caracteristic de amplificare în curent*

pentru o astfel de conexiune (valoarea sa fiind mult mai mare decît unitatea) iar $(\beta + 1)I_{CBO}$ este curentul de colector în cazul în care baza este în gol.

În construcția tehnologică a tranzistoarelor bipolare, se are în vedere să se obțină un coeficient α cât mai aproape de unitate, respectiv un coeficient β cât mai mare (de obicei de ordinul sutelor). Curenții prin cele trei terminale respectă următoarea relație de conservare: $I_E = I_B + I_C$.

3.1.2. CARACTERISTICILE STATICE

www.electronica.ro

Se vor prezenta caracteristicile *statice* (adică de curent continuu) ale unui tranzistor bipolar (de tip pnp) în conexiunea *emitor comun* (EC), sub forma unei familii de curbe.

Circuitul electric folosit în acest scop este înfățișat în figura 3.3 a. Cu potențiometrele R_1 și R_2 se ajustează convenabil tensiunile de polarizare ale joncțiunilor E-B și C-B. Curenții de bază și de colector sînt măsurați cu ajutorul instrumentelor A_1 și A_2 , iar tensiunile bază-emitor și colector-emitor se măsoară cu ajutorul voltmetrelor V_1 și V_2 .

Dacă se ia în considerare familia caracteristicilor de ieșire ale unui tranzistor bipolar, în conexiunea EC, aceasta exprimă dependența dintre curentul de colector și tensiunea colector-emitor, avînd ca parametru curentul de bază. Pentru ridicarea experimentală a acestei familii de caracteristici se procedează astfel: din R_1 se reglează un anumit curent de bază, ce trebuie să păstreze o valoare constantă, din R_2 se reglează valorile necesare pentru tensiunea colector-emitor, la care se obțin anumite valori pentru curentul de colector, așa cum se observă și în figura 3.3. În această figură, familia de caracteristici de ieșire (fig. 3.3 b) conține 5 curbe tipice, obținute pentru valori diferite ale curentului de bază, iar pentru intrare se înfățișează o singură caracteristică a curentului de bază funcție de tensiunea bază-emitor (fig. 3.3 c), în condițiile în care tensiunea colector-emitor se menține constantă.

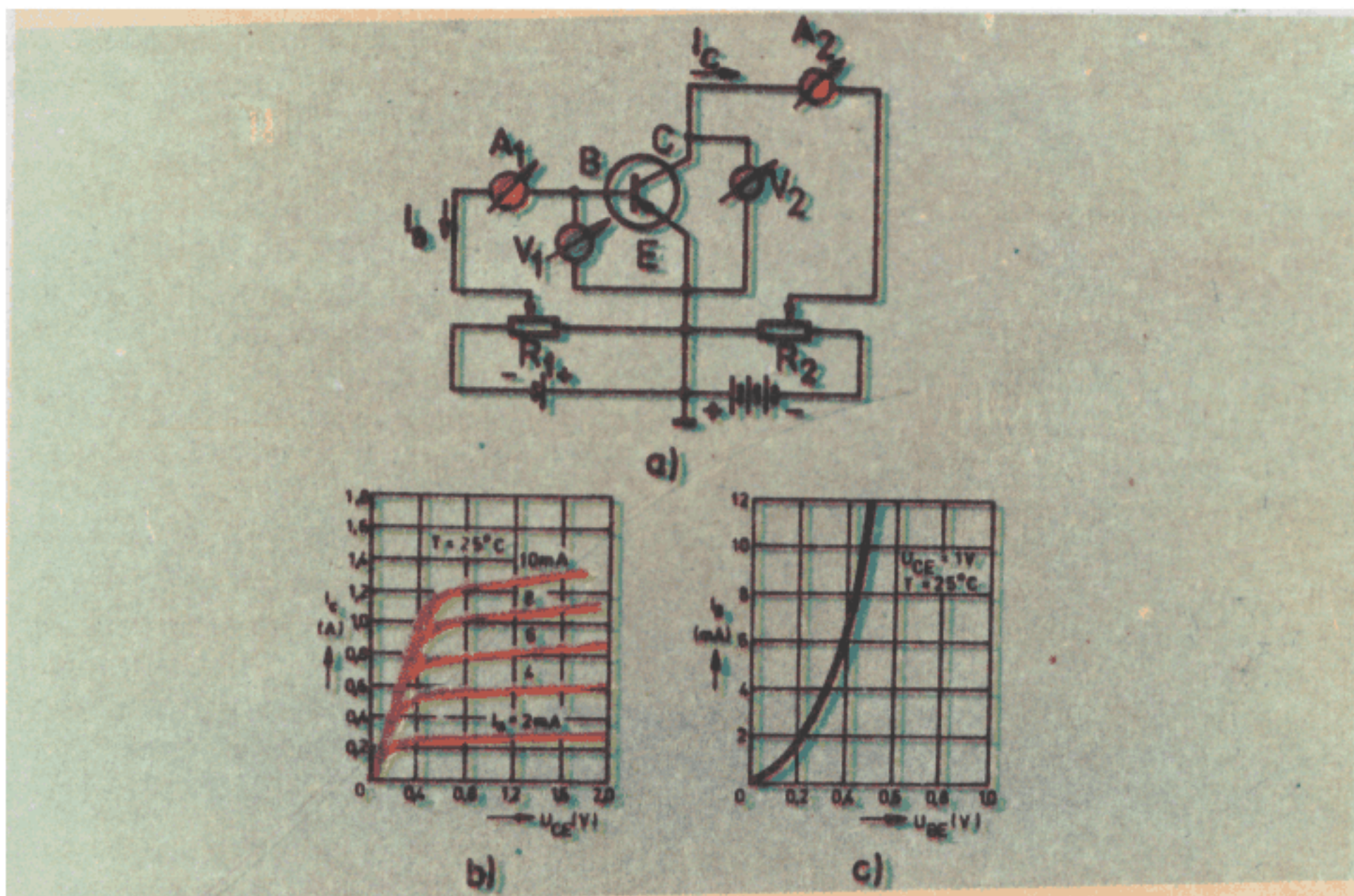


Fig. 3.3. a) circuit pentru ridicarea caracteristicilor statice ale tranzistorului bipolar (pnp) în conexiunea EC; b) caracteristici de ieșire curent-tensiune; c) caracteristica de intrare curent-tensiune.

Din caracteristicile prezentate, rezultă că valoarea curentului de colector se micșorează sensibil dacă tensiunea colector-emitor se reduce corespunzător, pînă se ajunge în *regimul de saturație*, în care ambele joncțiuni sînt polarizate direct, sau prin reducerea curentului de bază pînă se ajunge în *regimul de blocare*, în care ambele joncțiuni sînt polarizate invers.

În regim de saturație, emitorul și colectorul injectează simultan goluri în bază, iar în regim de blocare prin joncțiunile E-B și C-B circulă doar curenții reziduali ai acestor joncțiuni.

În planul caracteristicilor statice de ieșire, regiunea de saturație se află în vecinătatea axei curentului de colector, iar regiunea de blocare se situează între curba corespunzătoare lui $I_B=0$ și axa tensiunii colector-emitor.

Zona cuprinsă între regiunea de saturație și cea de blocare este cunoscută sub numele de *regiunea activă normală* și corespunde funcționării tranzistorului bipolar cu joncțiunea E-B polarizată direct și cu joncțiunea C-B polarizată invers.

Caracteristicile statice ale tranzistoarelor bipolare sînt influențate puternic de temperatură, deoarece curentul rezidual de colector variază exponențial cu temperatura de lucru, iar tensiunea pe joncțiunea emitor-bază scade liniar cu temperatura ambiantă.

În funcționarea unui tranzistor bipolar intervin și o serie de limitări referitoare la valorile maxime pentru tensiunile și curenții de lucru, pînă la care nu se produc efecte ireversibile. În cataloagele pentru dispozitive semiconductoare se specifică următoarele valori maxime pentru tensiune, curent, putere și temperatura de lucru:

- tensiunea maximă colector-emitor, pentru conexiunea E-C;
- tensiunea maximă colector-bază, pentru conexiunea B-C;
- curentul maxim de colector;
- puterea disipată maximă pe joncțiunea colector — bază;
- temperatura maximă de lucru.

Depășirea tensiunilor maxime, pe joncțiunile polarizate invers, conduce la apariția fenomenului de multiplicare în avalanșă a purtătorilor de sarcină adică la o creștere bruscă a curentului prin joncțiunea respectivă.

Temperatura de lucru a joncțiunii C-B, în care se disipă o putere mai mare decît în cazul joncțiunii E-B, depinde atît de pierderile de putere cît și de modul cum se evacuează căldura înmagazinată.

Cu ajutorul valorilor maxime pentru curentul de colector, tensiunea colector-emitor și puterea disipată, se definește domeniul permis de lucru al tranzistorului bipolar.

www.electronica.ro

3.1.3. TRANZISTORUL BIPOLAR ÎN REGIM DE COMUTAȚIE

Din caracteristicile sale statice, se observă că tranzistorul bipolar poate să lucreze și ca un *întrerupător comandat*, așa cum se arată în figura 3.4 a și b, deci ca un element cu două stări distincte:

— *starea de blocare* (sau de neconducție) a dispozitivului, căruia îi corespunde o rezistență suficient de mare, stare în care ambele joncțiuni sînt polarizate *invers*;

— *starea de conducție* a dispozitivului, căreia îi corespunde o rezistență suficient de mică, stare în care ambele joncțiuni sînt polarizate *direct*.

Trecerea tranzistorului de la o stare la alta se realizează cu o viteză suficient de mare. Circuitul comutator din figura 3.4 a se află inițial în stare de

blocare, adică cu ambele joncțiuni polarizate invers de la cele două surse de alimentare în curent continuu.

Cu ajutorul generatorului de impulsuri se realizează comanda tranzistorului-comutator din starea de blocare în starea de conducție și invers. La un impuls pozitiv de curent, aplicat în baza unui tranzistor pnp, joncțiunea emitor-bază începe să se polarizeze direct, adică emitorul injectează goluri în bază și curentul de colector crește treptat spre o valoare maximă, pe intervalul de timp $t_{cd} = t_i + t_c$ în care se realizează *comutarea directă* (t_i — timp de întârziere și t_c — timp de creștere).

Cît timp se menține impulsul de comandă la intrare, tranzistorul rămîne în starea de conducție.

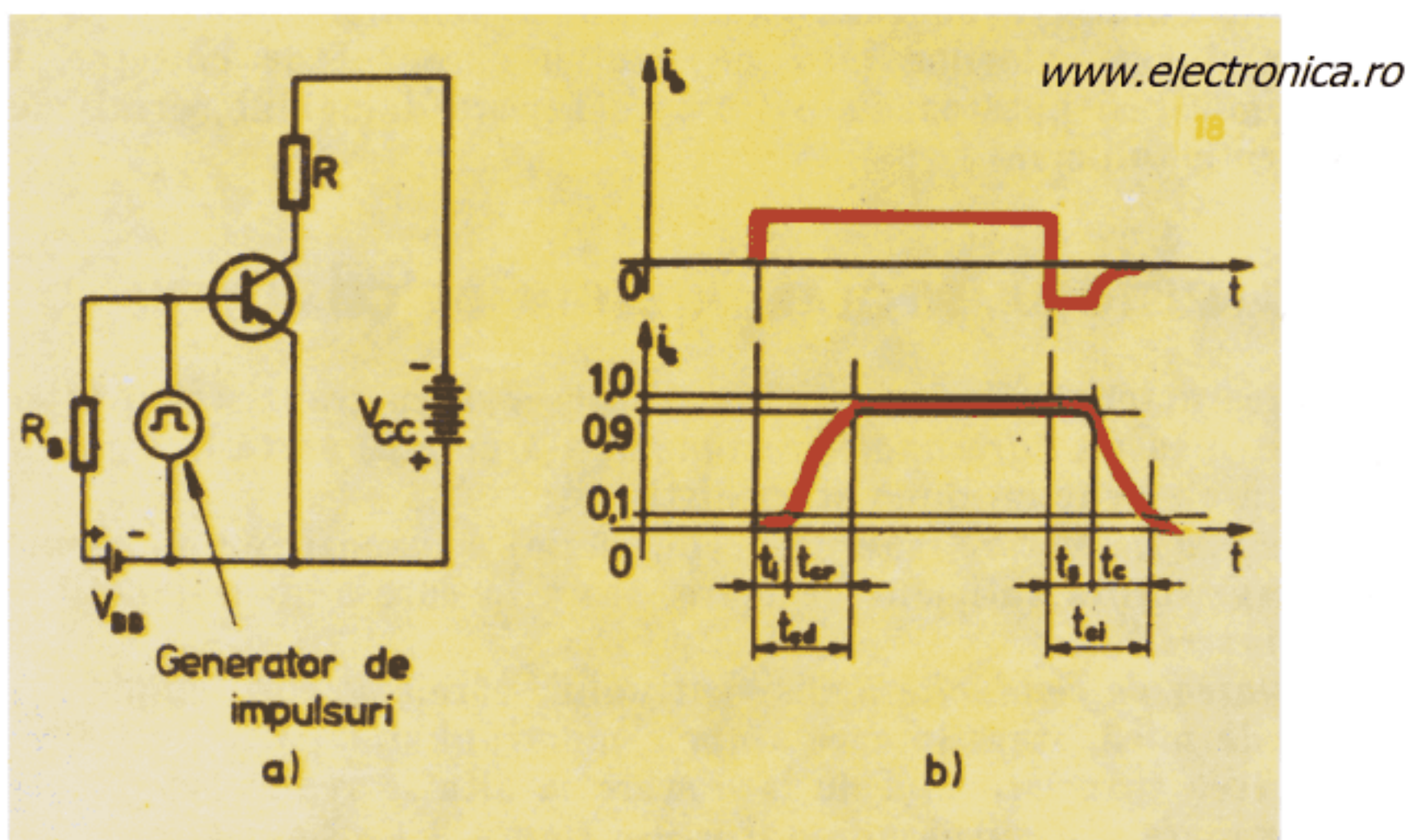
Cînd curentul de comandă (în bază) se întrerupe brusc, curentul de colector continuă totuși să-și păstreze aceeași valoare un timp, deoarece în bază se află o cantitate mare de purtători minoritari de sarcină, proveniți prin injecția din zona de emitor și zona de colector, purtători care se evacuează de către curentul de bază (avînd sens contrar). Pe toată durata de evacuare a sarcinii stocate (t_s) joncțiunea C-B este polarizată direct. După acest interval de timp, joncțiunea C-B se polarizează invers, iar curentul de bază și cel de colector scad la valorile corespunzătoare stării de blocare, pe un interval t_f . În procesul *comutării inverse* avem $t_{ci} = t_s + t_f$, așa cum rezultă și din figura 3.4. b.

Mărimea t_{cd} , numită timp de comutație directă a tranzistorului bipolar, este timpul cuprins între momentul aplicării impulsului de comandă și momentul în care curentul de colector atinge 90% din valoarea sa maximă.

În mod similar, mărimea t_{ci} este timpul de comutație inversă a tranzistorului bipolar, adică timpul dintre momentul anulării curentului de bază și momentul în care curentul de colector ajunge la 10% din valoarea corespunzătoare stării sale de conducție.

În majoritatea aplicațiilor se cere ca tranzistoarele pentru comutație să aibă valori mici pentru timpii t_{cd} și t_{ci} , dar în special pentru timpul t_{ci}

Fig. 3.4. Tranzistorul bipolar în regim de comutație: a) circuitul electric cu rol de comutator; b) forme de undă și definiția timpilor de comutație.



($t_{ei} \gg t_{ed}$). Se poate realiza o scădere convenabilă a acestor timpi fie folosind elemente de circuit suplimentare, fie prin tehnologia de realizare a acestor tranzistoare.

3.1.4. TRANZISTORUL BIPOLAR IN REGIM DE CURENT ALTERNATIV, LA FRECVENȚE ÎNALTE

Pentru cazul particular al regimului de lucru în curent alternativ, la frecvențe înalte, fenomenele din tranzistorul bipolar sînt asemănătoare cu cele descrise pentru regimul de lucru în comutație. Pe baza celor prezentate în paragraful precedent se poate deduce ușor că trecerea tranzistorului bipolar dintr-o stare în alta (de exemplu din conducție în blocare și invers) se realizează pe o durată finită, în care purtătorii de sarcină își pot modifica distribuția lor spațială în raport cu excitația electrică primită la intrare. În mod similar, pentru tranzistorul bipolar la înaltă frecvență, semnalul de ieșire urmărește semnalul de intrare prin intermediul variației corespunzătoare a distribuției purtătorilor de sarcină, pînă la o anumită frecvență limită de la care încetează acest proces de urmărire.

În scopul delimitării corecte a frecvențelor limită de lucru pentru tranzistoarele bipolare, trebuie să plecăm de la comportarea fiecărei joncțiuni semiconductoră în curent alternativ, în legătură cu care se explicitează efectele *reactive* caracteristice. De exemplu, la joncțiunea de intrare (E-B) — polarizată direct — intervine o capacitate „de difuzie“, iar la joncțiunea de ieșire (C-B) — polarizată invers — se va ține seama de o capacitate „de barieră“ asociată regiunii de trecere a joncțiunii colector-bază. Capacitatea de difuzie la joncțiunea emitor-bază este rezultatul acumulării în bază a purtătorilor minoritari de sarcină. În paralel cu capacitățile menționate se află și elemente *rezistive*, ale căror valori corespund stării de polarizare a celor două joncțiuni:

— la joncțiunea E-B, polarizată direct, rezistența asociată are o valoare mică;

— la joncțiunea C-B, polarizată invers, rezistența asociată are o valoare mult mai mare față de cazul precedent. Tot un efect rezistiv apare și în regiunea bazei, efect asociat circulației curentului de bază.

În curent continuu (c.c.) prin bază tranzitează „spre colector, purtătorii de sarcină injectați de emitor, obținîndu-se un curent de colector amplificat de α_0 ori față de emitor, în conexiunea BC, respectiv de β_0 ori față de curentul de bază, în conexiunea EC. Între α_0 și β_0 se stabilește următoarea relație

$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}$$

În conexiunea EC, tranzitarea purtătorilor de sarcină spre colector se realizează într-un timp finit (t_t),

$$t_t = t_e + t_b + t_c,$$

www.electronica.ro

unde t_e = timpul de încărcare a capacității de difuzie la joncțiunea E-B, t_b = timpul de tranzit prin bază, iar t_c = timpul de încărcare a capacității de barieră la joncțiunea C-B.

Dacă un semnal de curent alternativ (c.a.), aplicat la intrare, are o perioadă comparabilă cu timpul de tranzit t_t , purtătorii de sarcină nu mai pot urmări variațiile prea rapide ale semnalului de intrare și se reduce sensibil factorul de amplificare în curent. De exemplu, factorul β de amplificare în

curent (pentru conexiunea EC) devine unitar la *frecvența de tăiere* $f_T = \frac{1}{2\pi t_t} =$

$= f_\alpha = \beta_0 f_\beta$, unde: f_α este *frecvența limită de lucru* a tranzistorului bipolar în conexiunea BC (la care coeficientul α scade la 0,707 din valoarea corespunzătoare regimului de lucru în curent continuu); f_β este *frecvența limită de lucru* a tranzistorului bipolar în conexiunea EC (la care coeficientul β scade la 0,707 din valoarea corespunzătoare regimului de lucru în curent continuu).

Notă:

α_0 și β_0 reprezintă coeficienții de amplificare în c.c.; α și β reprezintă coeficienții de amplificare în c.a.

www.electronica.ro

3.1.5. ASPECTE TEHNOLOGICE

La fabricarea tranzistoarelor bipolare se folosesc metode și tehnologii diferite, în funcție de materialele cu care se operează și de aplicațiile lor specifice. În continuare se vor prezenta unele particularități privind tehnologia de realizare a tranzistoarelor bipolare.

Metoda alierii este asemănătoare cu cea folosită la obținerea diodelor semiconductoare bazate pe germaniu. În procesul tehnologic propriu-zis se pleacă de la o plachetă de Ge tip n; pe fiecare față a plachetei semiconductoare (cu rol de bază) se fixează câte o pastilă de In. Prin operații succesive de încălzire și răcire, sub pastilele de In se obțin zone tip p de semiconductor recristalizat, cu rol de emitor și colector. Pastila de In pentru colector are dimensiuni mai mari decât pastila folosită pentru emitor. Prin aliere se obțin tranzistoare bipolare cu frecvențe limită reduse, cu tensiuni de saturație mici, de asemenea cu tensiuni maxime de lucru reduse. Mărirea frecvenței de lucru se poate realiza prin micșorarea grosimii de bază și a volumului pentru regiunea activă a tranzistorului bipolar, folosind tehnica microalierii. Pe această cale se realizează și tranzistoare *drift*, care permit accelerarea tranzitării prin bază a purtătorilor mobili de sarcină, cu ajutorul unui câmp electric propriu în zona bazei. Acest câmp se induce cu ajutorul impurităților distribuite neuniform în bază, adică cu concentrație mai mare spre emitor și mai mică spre colector.

Metoda difuziei este folosită pe scară largă pentru realizarea tehnologică a tranzistoarelor *planare* și *planar-epitaxiale*.

În figurile 3.5—3.11 se prezintă principalele etape de lucru, plecând de la o plachetă simplă de Si tip n (fig. 3.5 a), ce se oxidează într-o primă etapă (fig. 3.5 b) și a cărei parte superioară se acoperă cu *fotorezist* (fig. 3.5 c), care este un material fotosensibil ce se expune la lumină în prezența unei măști fotografice; urmează dezvoltarea fotorezistului și corodarea oxidului (fig. 3.5 d) în vederea obținerii ferestrei pentru difuzie (fig. 3.6 a). Este vorba de prima fereastră, care delimitează baza și prin care, după îndepărtarea fotorezistului rămas, difuzează impurități de bor sau alte impurități de tip p (fig. 3.6 b). Paralel cu operația de difuzie a bazei, se reface și stratul protector de oxid de la suprafață (fig. 3.6 c), peste care se depune din nou un strat de fotorezist (fig. 3.6 d). Printr-o operație similară de dezvoltare și corodare se îndepărtează stratul corespunzător de oxid (fig. 3.7 a, b) și ulterior pelicula suplimentară de fotorezist (fig. 3.7 c), adică se deschide fe-

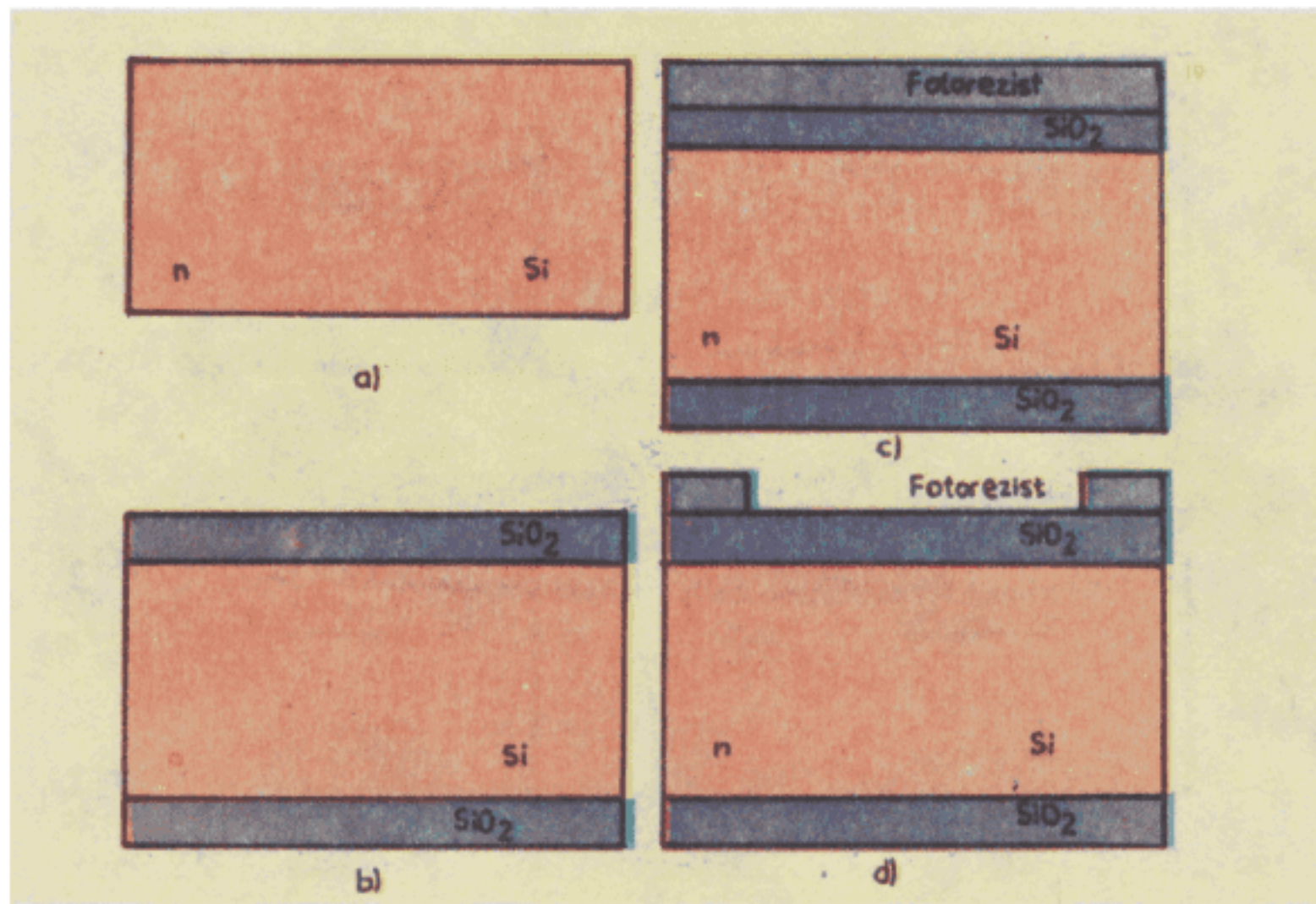


Fig. 3.5. Etape tehnologice de realizare a tranzistoarelor bipolare planare și planar-epitaxiale – primele 4 faze: a) pregătirea plachetei de Si tip n, b) creșterea de SiO₂ pe plachetă; c) acoperirea cu fotorezist peste SiO₂; d) dezvoltarea fotorezistului în vederea realizării ferestrei pentru prima difuzie.

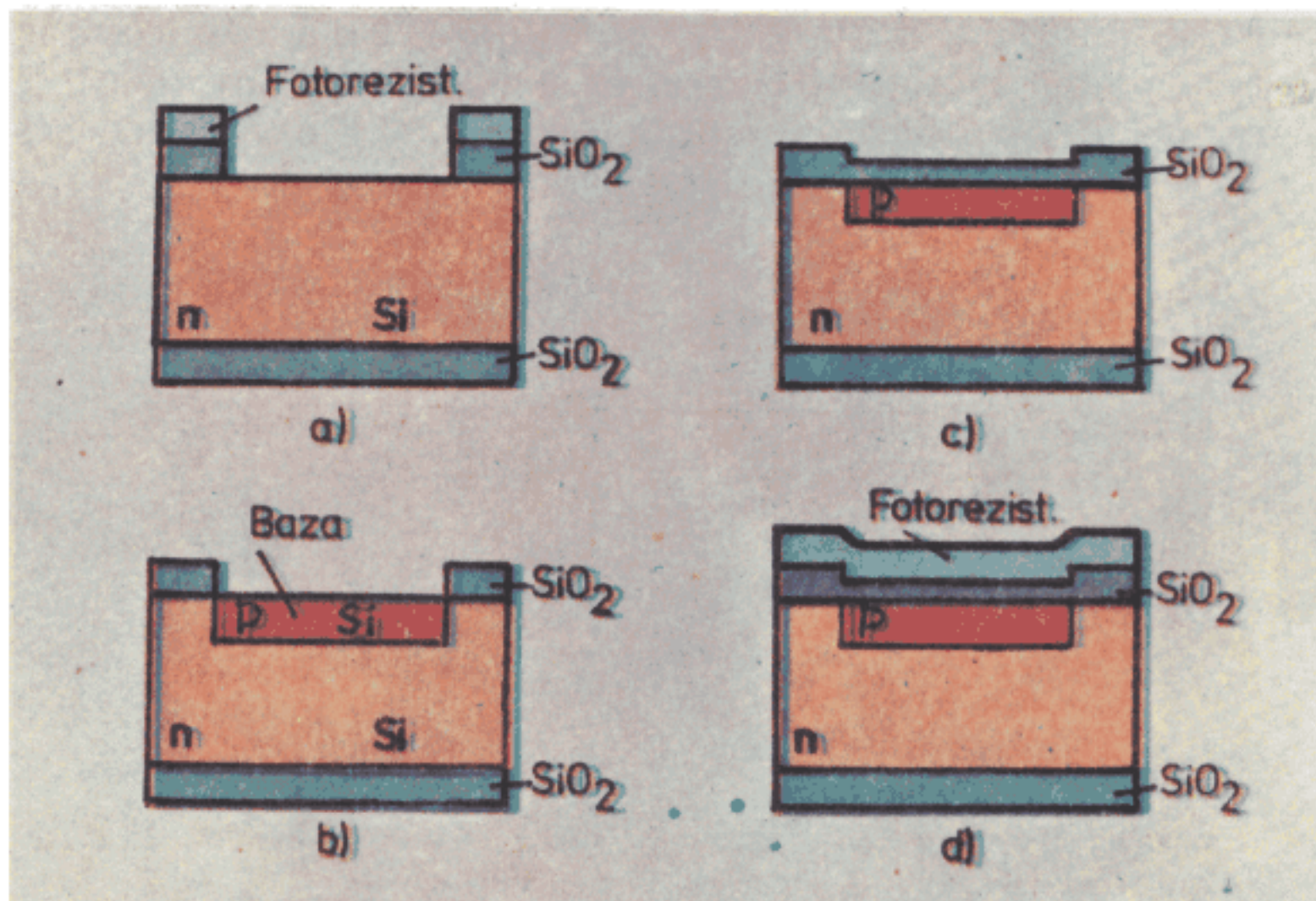


Fig. 3.6. Etape tehnologice de realizare a tranzistoarelor bipolare planare și planar-epitaxiale – următoarele 4 faze: a) realizarea primei ferestre pentru difuzia bazei; b) difuzia bazei; c) refacerea stratului de SiO₂; d) acoperirea cu un nou strat de fotorezist.

reasta pentru difuzia emitorului, care se realizează utilizând impurități de fosfor sau alte tipuri de impurități de tip n (fig. 3.7 d). Pe durata procesului de difuzie a emitorului se refacă și stratul superficial de oxid, cu rol de protecție.

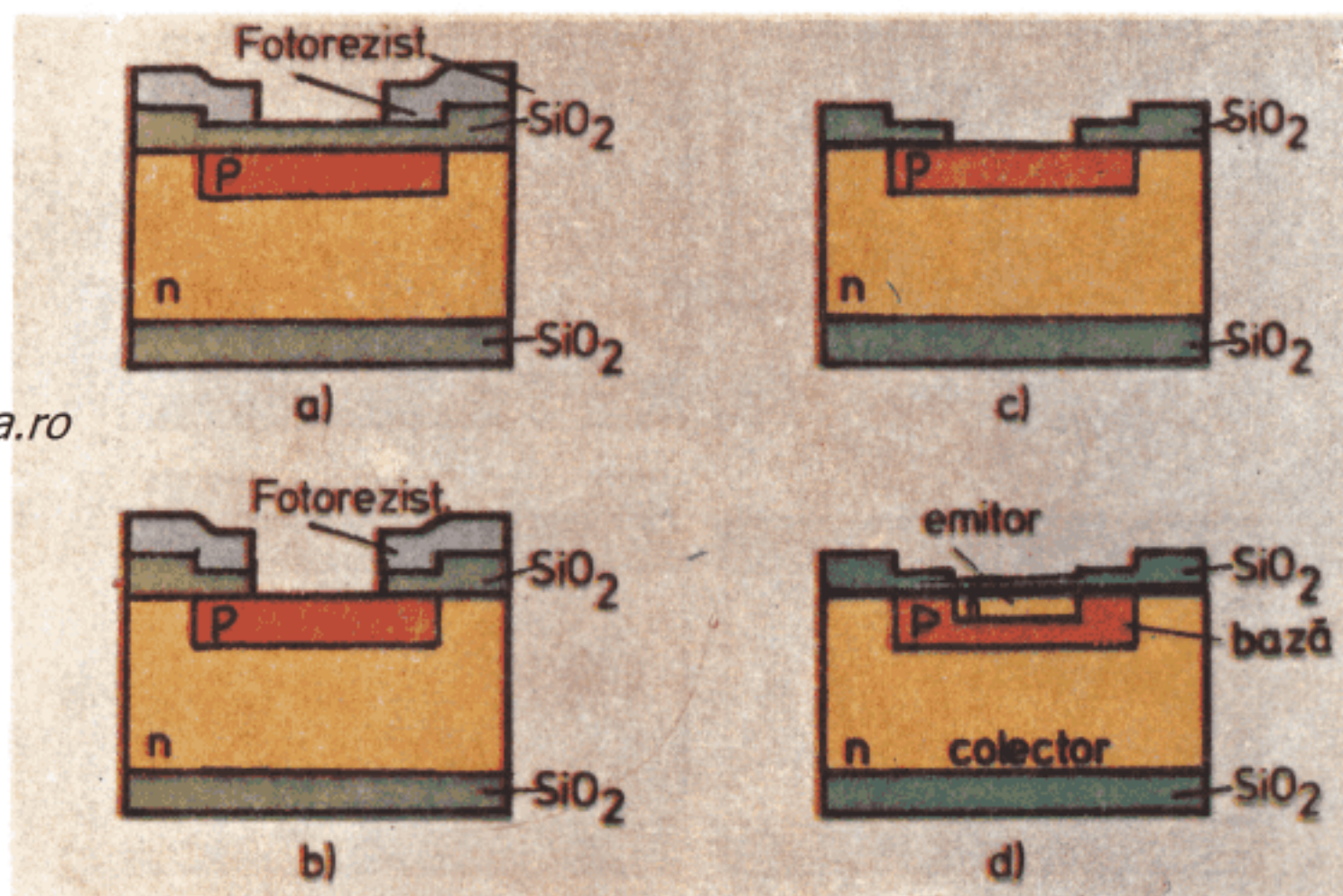


Fig. 3.7. Etape tehnologice de realizare a tranzistoarelor bipolare planare și planar-epitaxiale – următoarele 4 faze: a) dezvoltarea fotorezistului în vederea realizării ferestrei pentru a doua difuzie (de emitor); b) realizarea ferestrei pentru difuzia emitorului; c) eliminarea urmelor de fotorezist; d) difuzia emitorului (de tip n), urmată de refacerea stratului protector de SiO_2 .

În vederea aplicării contactelor pe fiecare zonă semiconductoră, se reiau operațiile pregătitoare anterioare, de acoperire cu fotorezist (fig. 3.8 a) și dezvoltare în regiunea bazei și emitorului (fig. 3.8 b), pentru deschiderea,

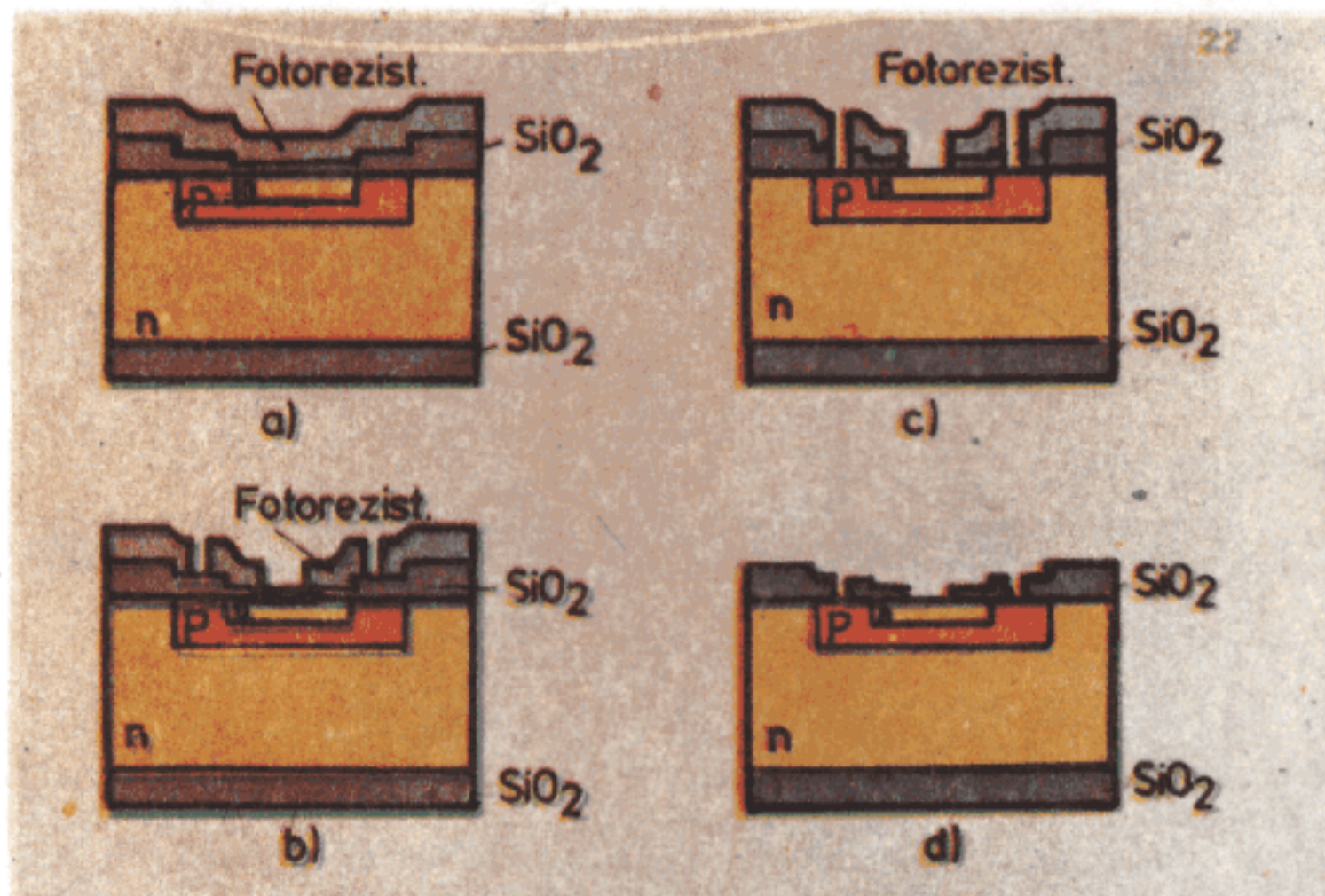


Fig. 3.8. Etape tehnologice de realizare a tranzistoarelor bipolare planare și planar-epitaxiale – următoarele faze: a) o nouă fază de acoperire cu fotorezist; b) dezvoltarea fotorezistului în vederea realizării ferestrelor pentru metalizări; c) realizarea ferestrelor pentru metalizările de bază și emitor; d) eliminarea urmelor de fotorezist.

prin corodare, a ferestrelor de contactare (fig. 3.8 c); urmează îndepărtarea stratului de fotorezist (fig. 3.8 d).

În figura 3.9 se înfățișează structura fizică a tranzistorului bipolar, cu metalizările realizate pentru contacte (fig. 3.9 a) și acoperirea acestora cu

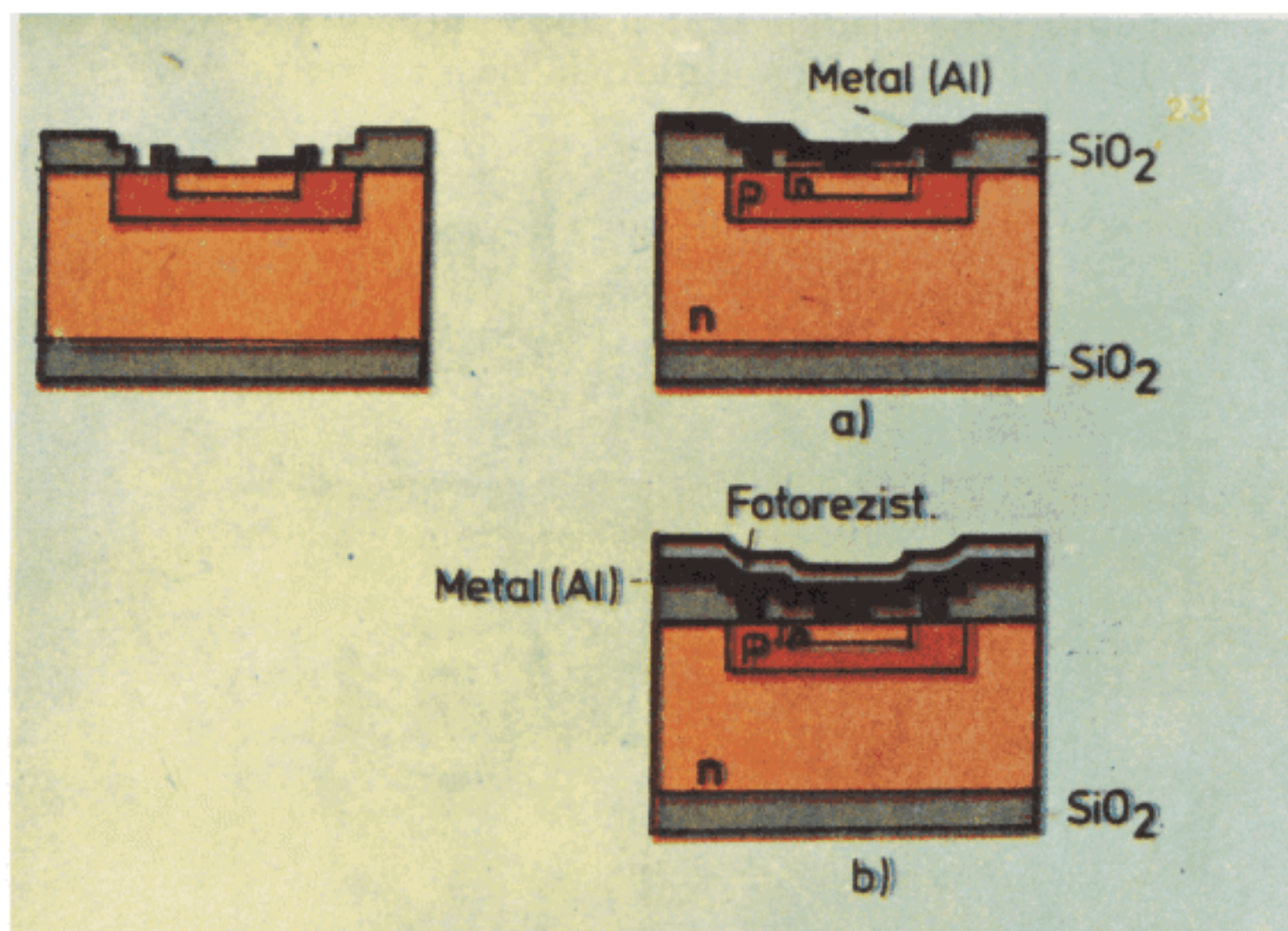


Fig. 3.9. Etape tehnologice de realizare a tranzistoarelor bipolare, planare și planar-epitaxiale — următoarele două faze, avînd ca referință ultima fază anterioară (fig. 3.8 d): a) realizarea metalizării propriu-zise; b) acoperirea cu fotorezist a metalizării efectuate.

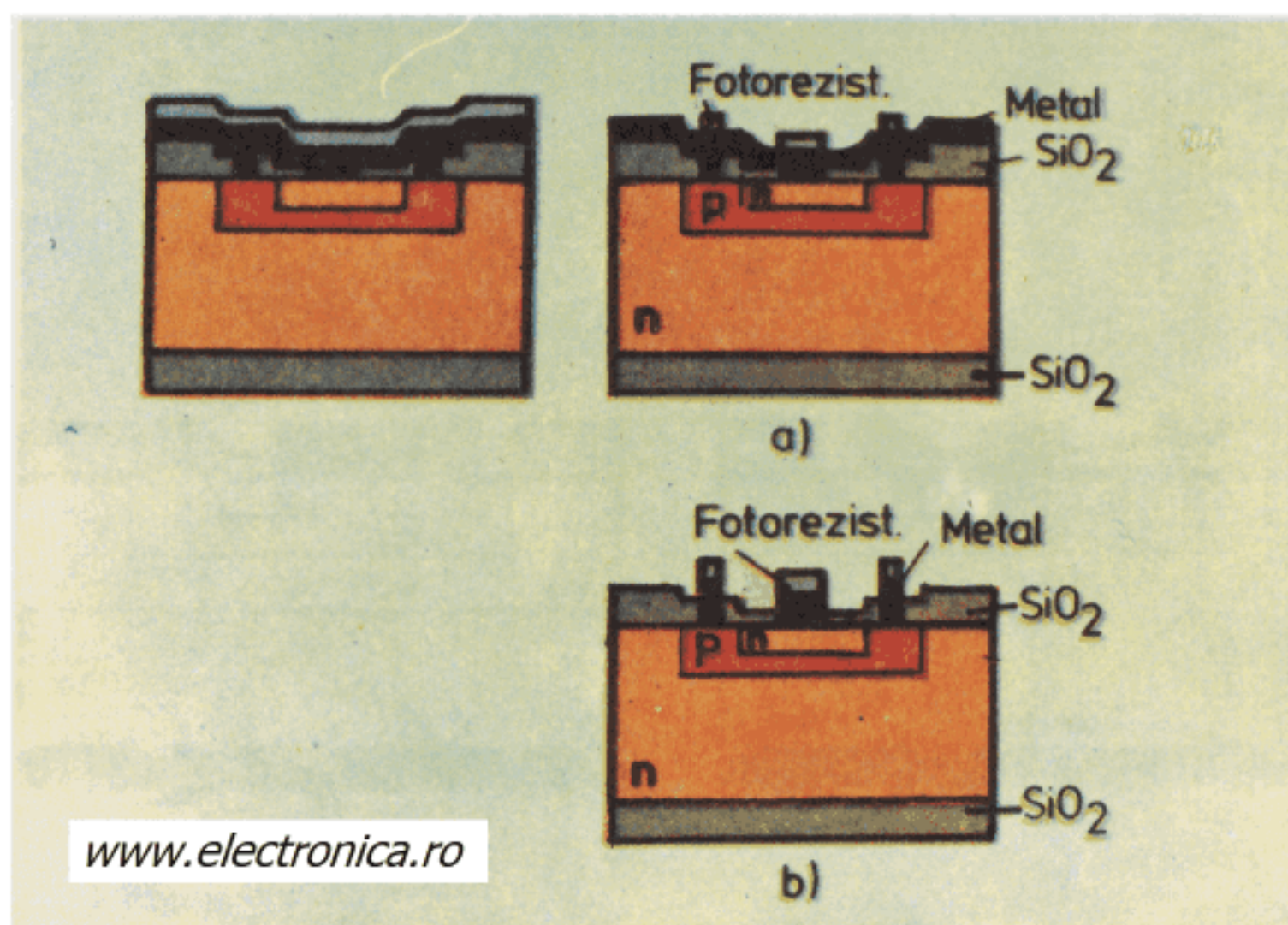


Fig. 3.10. Etape tehnologice de realizare a tranzistoarelor bipolare, planare și planar-epitaxiale — următoarele două faze, avînd ca referință ultima fază anterioară (fig. 3.9 b): a) dezvoltarea fotorezistului în vederea realizării zonelor de contact; b) corodarea metalului din afara zonelor de contacte.

fotorezist (fig. 3.9 b). În scopul delimitării contactelor de bază și de emitor, se decupează selectiv metalizarea suplimentară din vecinătatea lor (fig. 3.10 a și b).

Operațiile tehnologice continuă cu îndepărtarea totală a fotorezistului (fig. 3.11 a) și oxidului de pe fața opusă a plachetei de Si (fig. 3.11 b).

Structurile complete ale unor tranzistoare bipolare difuzate sînt prezentate în figura 3.12 a și b (a — configurație de tranzistor *planar* și b — con-

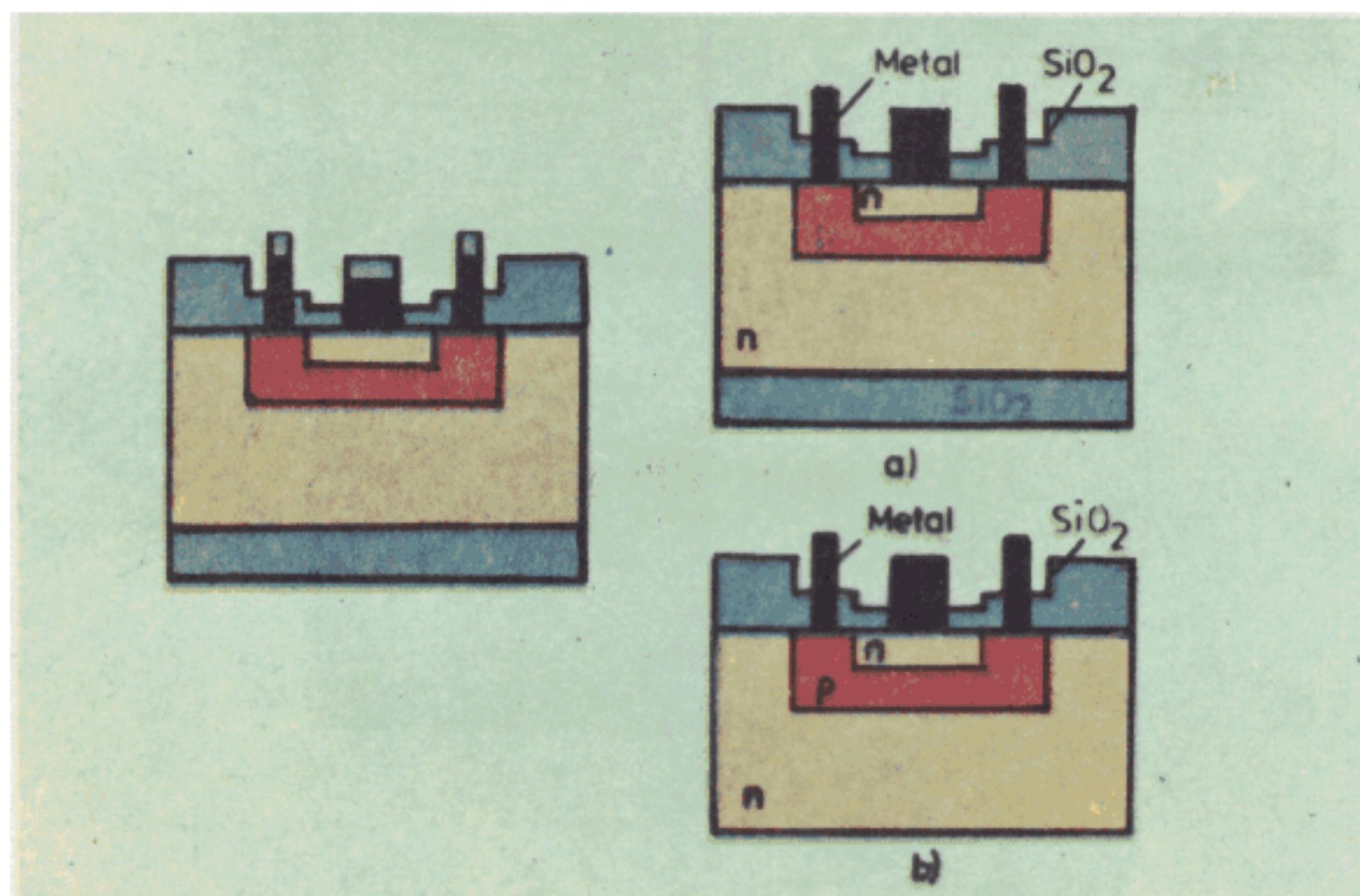


Fig. 3.11. Etape tehnologice de realizare a tranzistoarelor bipolare, planare și planar-epitaxiale — următoarele două faze, avînd ca referință ultima fază anterioară (fig. 3.10 b); a) eliminarea urmelor de fotorezist; b) eliminarea stratului de SiO_2 de pe fața opusă a plachetei de Si.

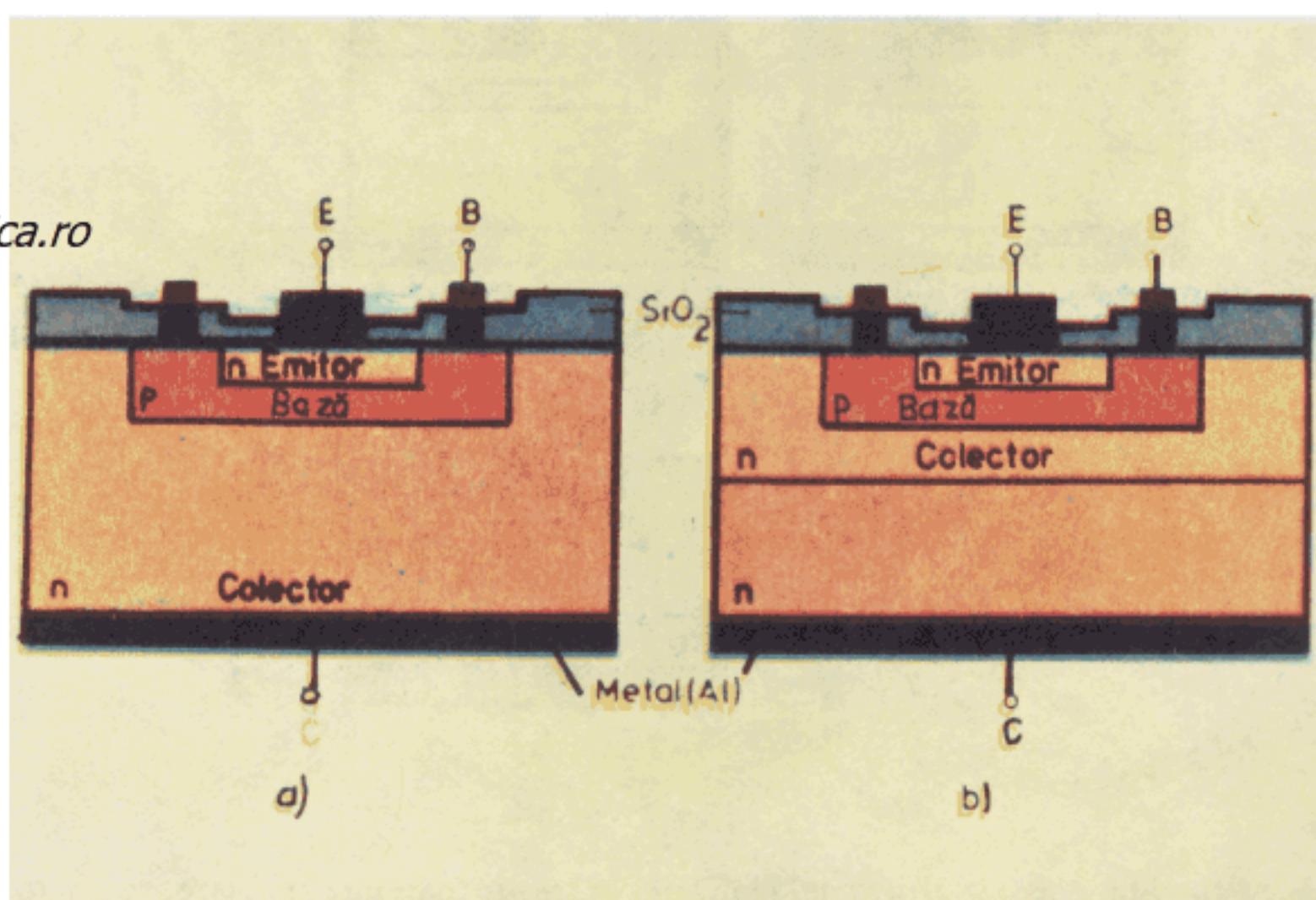


Fig. 3.12. Structuri complete de tranzistoare bipolare: a) tranzistor planar; b) tranzistor planar-epitaxial.

figurație de tranzistor *planar-epitaxial*). Metoda difuziei permite obținerea unei joncțiuni de calitate la tranzistoarele bipolare, cu arii relativ extinse, ceea ce explică realizarea comodă a unei mari varietăți de tranzistoare planare, pentru frecvențe și puteri de lucru situate într-o gamă mai largă de valori.

Prin compararea structurilor de tranzistoare din figura 3.12 (a și b), se observă că tranzistorul planar-epitaxial conține două regiuni tip n pentru colector — o regiune cu rezistivitate mică (situată la bază) și o altă regiune cu rezistivitate mare, crescută „epitaxial“ peste prima regiune și care se află situată în vecinătatea bazei. Pe această cale se obțin structuri de tranzistoare bipolare cu tensiuni mici de saturație, curenți de colector relativ mari, puteri maxime de ordinul sutelor de wați, frecvențe maxime de lucru de ordinul gigaherților și timpi de comutație de ordinul zecimilor și unităților de nano secunde (ns).

În final, structurile de tranzistoare sînt încapsulate, după următoarea procedură (v. fig. 3.13): se poziționează structurile pe un suport; se efectuează lipirea prin intermediul unui strat de aur; se lipesc firele de conexiune de aur, pentru a face legătura între structură și terminale; se montează capacul și se sudează prin contact, pe suport.

www.electronica.ro

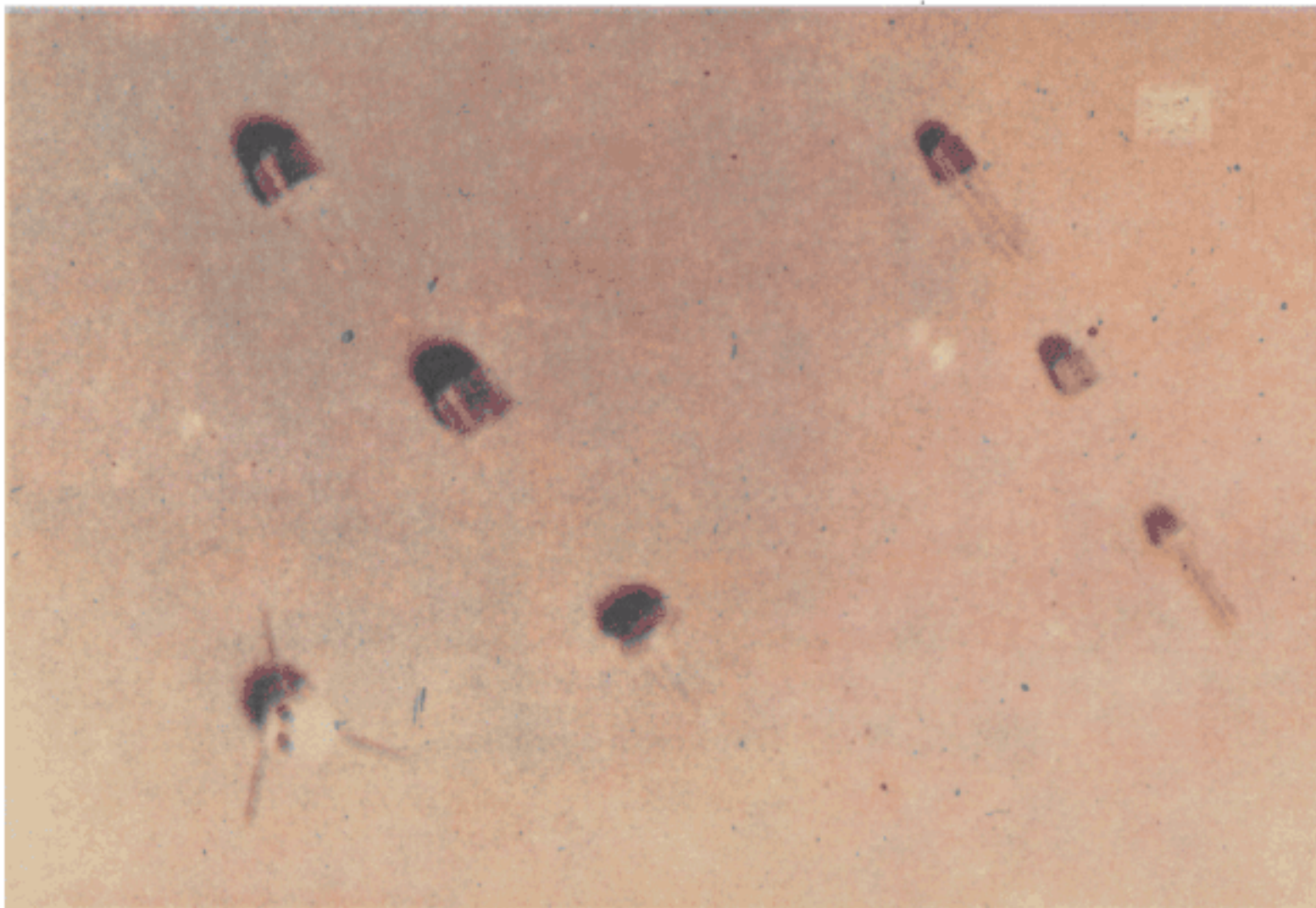


Fig. 3.13. Încapsularea tranzistoarelor bipolare.

3.1.6. TIPURI DE TRANZISTOARE BIPOLARE

Pentru fiecare domeniu de utilizare, tranzistoarele bipolare se proiectează și se realizează în funcție de cerințele concrete ale aplicațiilor solicitate. Principalele tipuri de tranzistoare bipolare se deosebesc între ele prin particularitățile tehnologice, funcționale și fizice ale acestora (anexa 4). În cazul în care se mențin aceleași criterii de clasificare a tranzistoarelor bipolare ca la diodele semiconductoare, menționăm următoarele tipuri de dispozitive active:

— tranzistoare cu Ge, tip PNP și NPN, de joasă frecvență și mică putere;

- tranzistoare cu Ge, tip PNP, de joasă frecvență și medie putere;
- tranzistoare cu Ge, tip PNP, de joasă frecvență și putere;
- tranzistoare cu Ge, tip PNP, de înaltă frecvență și mică putere;
- tranzistoare cu Si, tip NPN și PNP, de joasă frecvență și mică putere;
- tranzistoare cu Si, tip NPN și PNP, de joasă frecvență și medie putere;
- tranzistoare cu Si, tip NPN, de joasă frecvență și de putere;
- tranzistoare cu Si, tip PNP și NPN, de înaltă frecvență și mică putere;
- tranzistoare cu Si, tip NPN și PNP, de înaltă frecvență și medie putere;
- tranzistoare cu Si, tip NPN, de înaltă frecvență și de putere;
- tranzistoare cu Si, tip PNP și NPN, de comutație;
- tranzistoare cu Si, pentru uz didactic.

În figura 3.14 se prezintă unele tipuri de tranzistoare bipolare.

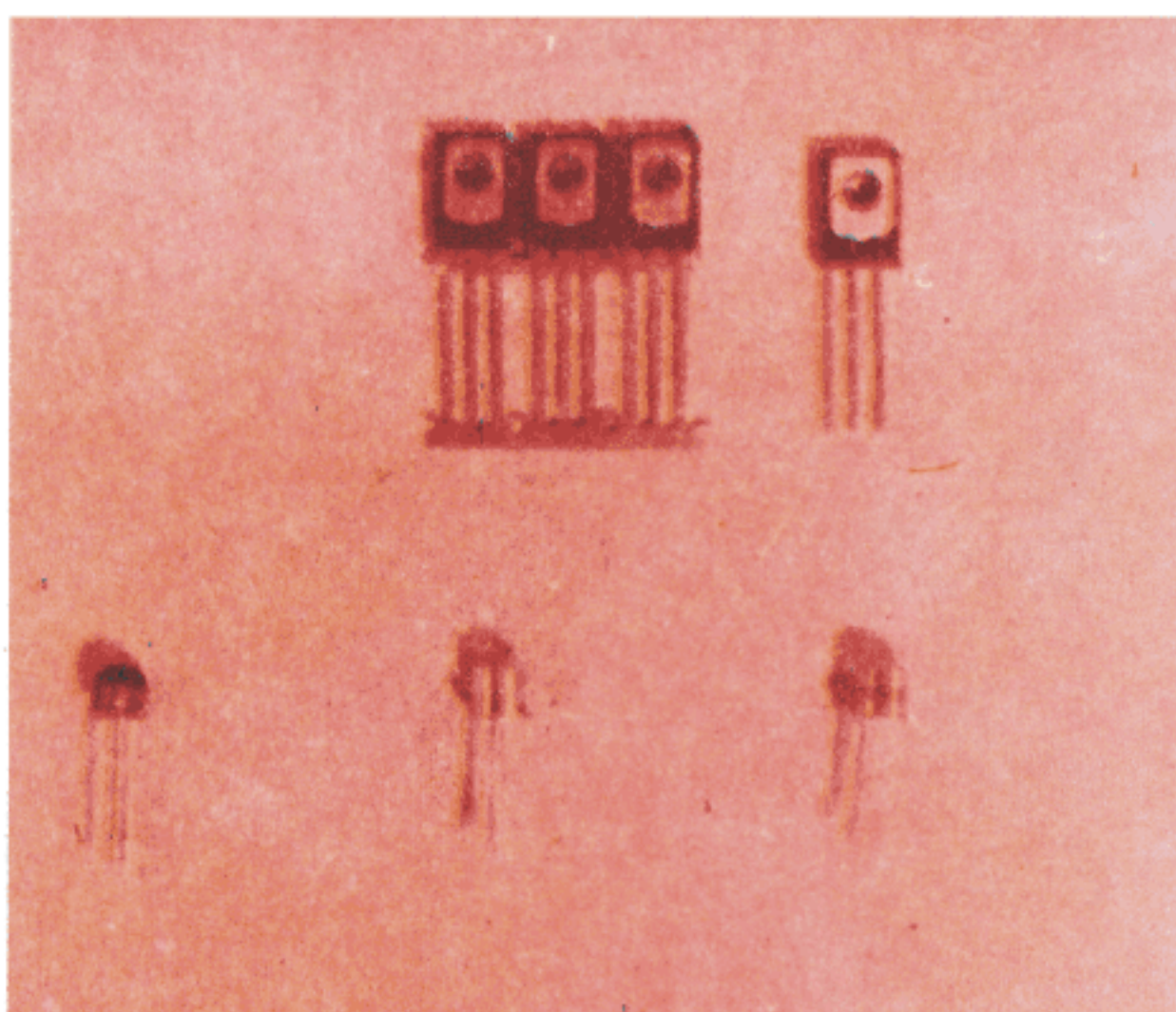


Fig. 3.14. Tranzistoare bipolare.

www.electronica.ro

3.2. TRANZISTOARE UNIPOLARE

Din categoria dispozitivelor semiconductoare unipolare fac parte și tranzistoarele *unipolare*, sau *cu efect de câmp* (TEC), la care conducția electrică este asigurată de un singur tip de purtători — electroni sau goluri — și care sînt caracterizate de o impedanță de intrare foarte mare. Curentul pe calea de conducție (numită *canal*) este controlat printr-un câmp electric transversal ce modulează conductanța acesteia. Canalul de conducție poate să fie de tip p sau n, după cum se asigură trecerea golurilor sau trecerea electronilor, avînd la capetele sale contacte ohmice de *sursă* (S) — la care se generează purtători de sarcină — și de *drenă* (D) — prin care se extrage (sau se „drenează”) curentul de lucru.

În figura 3.15 se prezintă structura generală a unui tranzistor unipolar, alcătuită din următoarele zone sau părți:

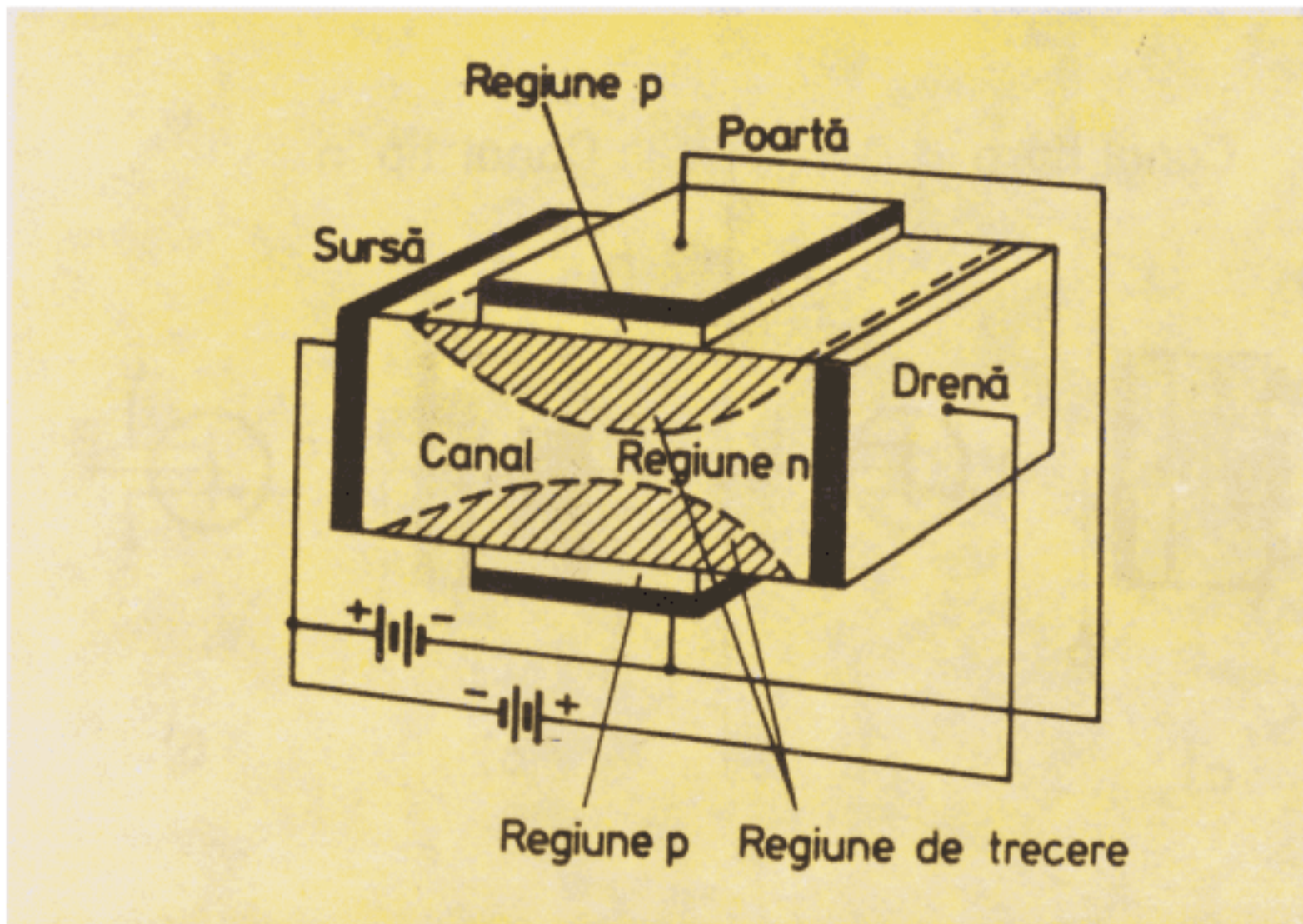


Fig. 3.15. Structura fizică pentru un tranzistor unipolar de tip TEC-J cu canal n, cu evidențierea canalului de conducție.

— o zonă semiconductoră de tip n, mărginită lateral de cei doi electrozi (S și D), în care se formează canalul de conducție;

— două zone semiconductoră de tip p, ambele jonționind cu zona de tip n, în partea inferioară (prevăzută cu electrod pentru substrat) și în partea superioară (prevăzută cu electrod pentru poartă — G). Dacă între drenă și sursă se aplică o tensiune de polarizare (cu + pe D), prin canalul de tip n se înregistrează un curent de electroni, a cărui valoare se reglează prin tensiunea aplicată pe poartă (cu — pe G) în raport cu substratul.

Plecând de la modul în care se obține canalul de conducție, se deosebesc următoarele tipuri de tranzistoare unipolare (anexa 5):

— tranzistoare cu jonțiune pe poartă (TEC-J), având canalul de conducție situat în volumul semiconductorului și jonțiunea respectivă polarizată invers în regim normal de funcționare;

— tranzistoare cu poartă izolată (TEC-MIS), utilizând structuri de tip *metal-izolator-semiconductor*, cu canalul de conducție situat la suprafața semiconductorului, la care izolatorul între poartă și canal se realizează dintr-un strat de oxid (SiO_2); dispozitivului TEC-MIS i se poate asocia, de aceea, denumirea de TEC-MOS.

3.2.1. TRANZISTOARE UNIPOLARE CU JONȚIUNE PE POARTĂ (TEC-J)

În tratarea acestei clase de dispozitive semiconductoră se vor prezenta unele aspecte esențiale de ordin fizic și tehnologic, care ne ajută să înțelegem mai bine funcționarea tranzistoarelor unipolare, cu canalul de conducție în volumul semiconductorului.

Prima structură de TEC-J din fig. 3.16 are canal de tip p (a) și simbolul prezentat alăturat (b); a doua structură de TEC-J din aceeași figură are canal de tip n (a) și simbolul de circuit corespunzător plasat lângă aceasta (b).

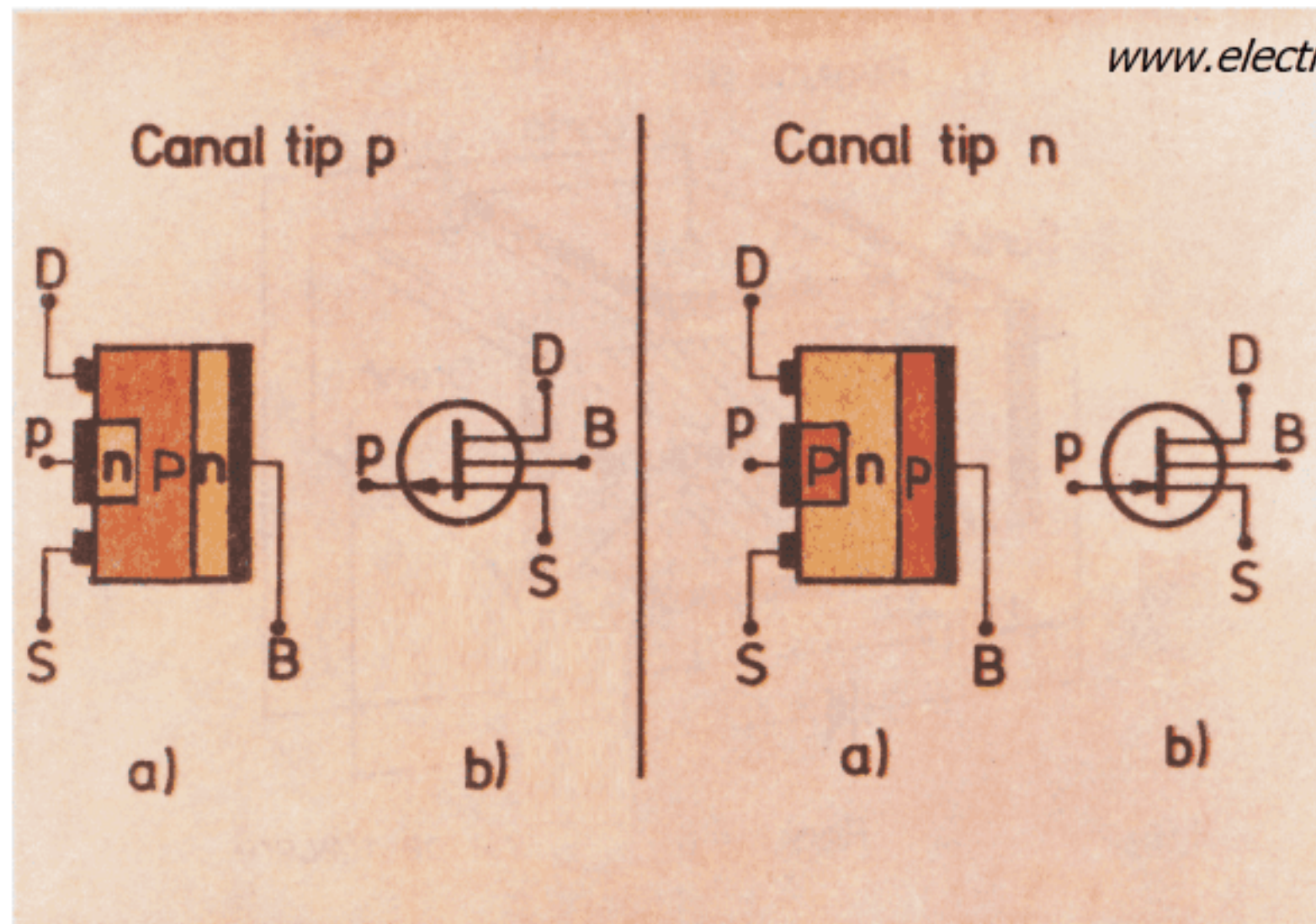


Fig. 3.16. Structuri fizice (a) și simbolurile (b) pentru tranzistoare unipolare de tip TEC-J (canal p — în stânga și canal n — în dreapta).

La ambele structuri fizice se disting patru terminale de acces în circuit:

- P sau G — poarta, pe care se aplică o tensiune de polarizare inversă a joncțiunii pn din această zonă;
- B — terminalul de substrat (*background*), care se leagă fie la sursă, fie la poartă sau la alt potențial fix dictat de modul în care trebuie să lucreze un anumit dispozitiv într-o aplicație dată;
- S (sursa) și D (drena) — terminalele de contact la capetele canalului de conducție (de tip p sau n).

În figura 3.17 se prezintă structurile fizice pentru TEC-J cu canal p (figura 3.17 a) și pentru TEC-J cu canal n (figura 3.17 b), în scopul de a sugera dependențele fizice $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$ pentru fiecare dintre acestea (figura 3.17 c). Cele două porți G_1 și G_2 sînt conectate intern și în exterior este accesibil un singur terminal ($G \equiv G_1 \equiv G_2$). Dacă sursa S se consideră terminal de referință iar pe terminalele G și D se aplică tensiuni electrice de polarizare în curent continuu, așa cum se sugerează în figura 3.17 a și b (adică cu polaritatea corespunzătoare pentru fiecare tip de canal), lățimea canalului între drenă (D) și sursă (S) se modifică din poziția inițială (figurată) pînă la obturarea lui completă (poziția finală, nefigurată). Deoarece tranzistoarele TEC-J (cu canal p sau n) operează cu joncțiunea poartă-canal blocată, curentul de poartă se consideră nul și deci curentul de drenă este egal cu curentul prin terminalul de sursă (S).

Tensiunea v_{GS} la care canalul drenă-sursă se obturează are valoarea (de prag) V_p . Pentru o tensiune $v_{GS} = V_p$ conductivitatea canalului devine nulă și rezistența drenă-sursă apare infinit de mare.

Din caracteristicile statice, $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$, înfățișate în figura 3.17 c — cu $i_D > 0$ pentru TEC-J cu canal n și cu $i_D < 0$ pentru TEC-J cu canal p — se observă două regiuni de lucru, despărțite printr-o linie punctată:

— în regiunea I, situată lingă axa de curent (i_D), comportarea tranzistorului unipolar este de tip ohmic — adică de rezistor controlat prin tensiune;

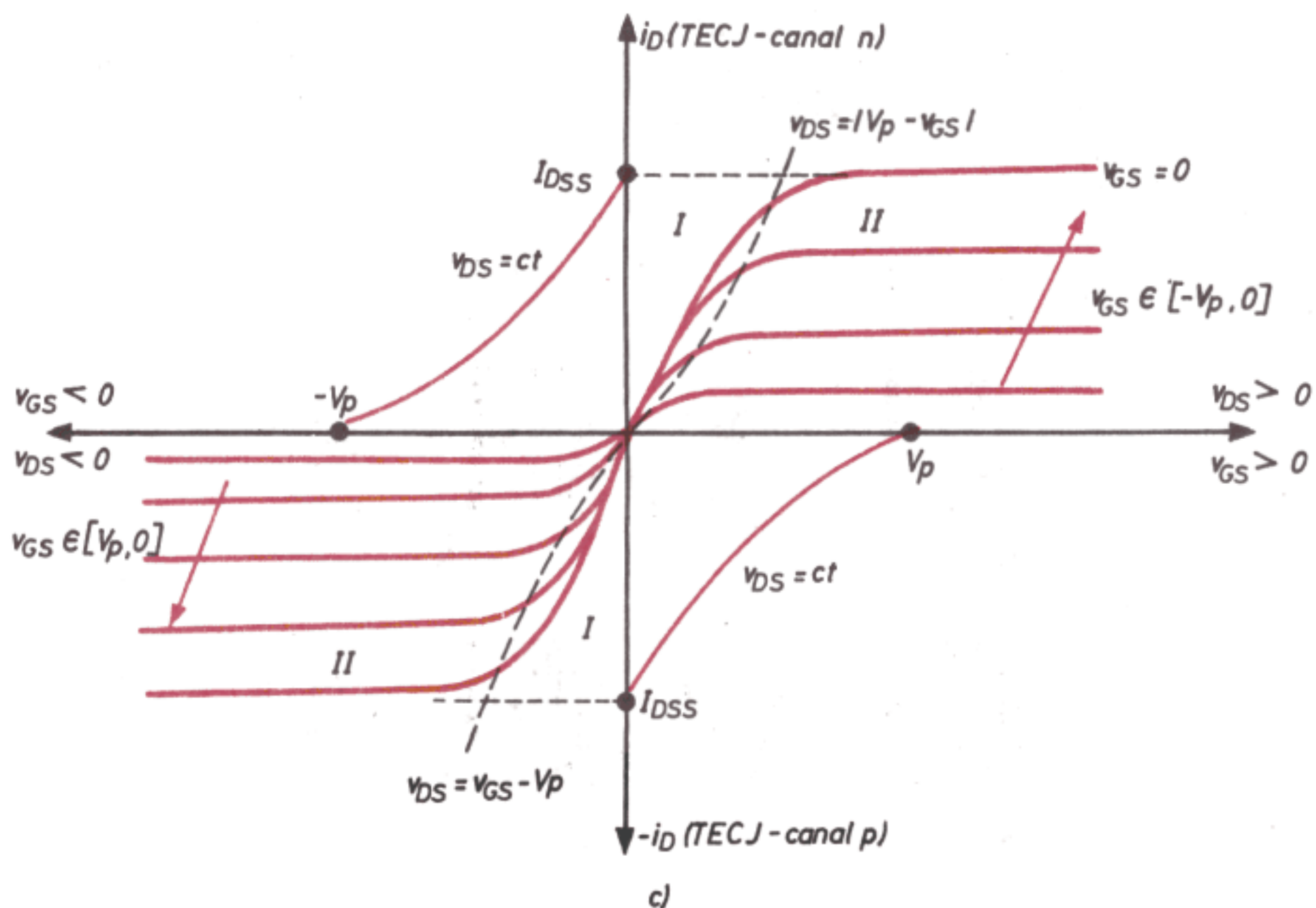
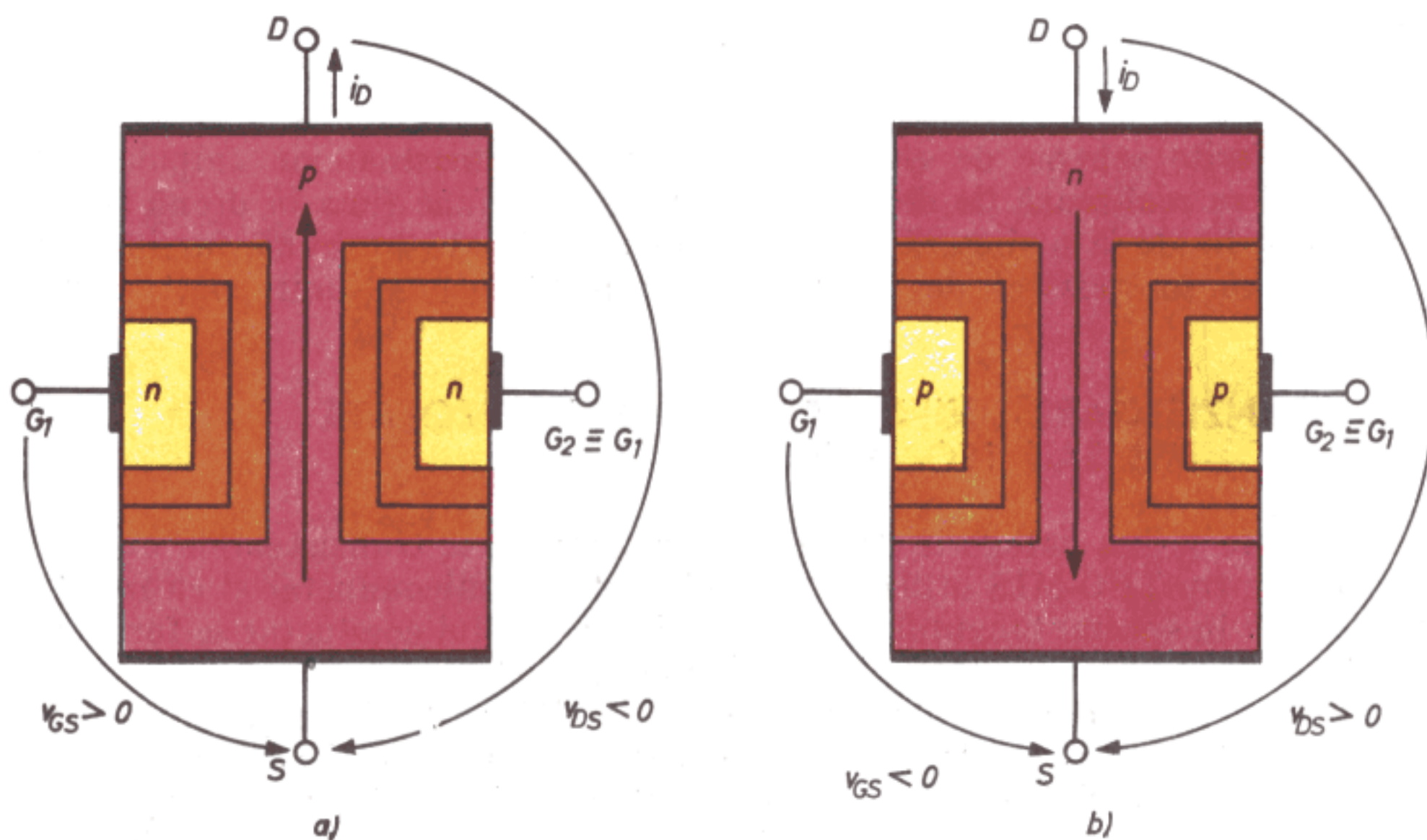


Fig. 3.17. Caracterizare în c.c. a tranzistoarelor unipolare de tip TEC-J: a) structura fizică cu tensiuni de polarizare în c.c. pentru TEC-J, canal p; b) structura fizică cu tensiuni de polarizare în c.c. pentru TEC-J, canal n; c) caracteristicile de transfer curent-tensiune, și de ieșire, pentru cele două tipuri de tranzistoare unipolare TEC-J: canal n – sus ($i > 0$) și canal p – jos ($i < 0$).

— în regiunea *II*, curentul de drenă se saturează și depinde de v_{GS} după o lege pătratică,

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_p} \right)^2$$

În diferite scheme de circuite, polarizarea tranzistoarelor unipolare de tip TEC-J se realizează fie de la două surse de tensiune (una în drenă și alta în poartă), fie de la o singură sursă de tensiune plasată în drenă, iar în sursă se introduce un rezistor de polarizare automată a joncțiunii poartă-canal.

3.2.2. TRANZISTOARE UNIPOLARE CU POARTĂ IZOLATĂ (TEC—MIS SAU TEC—MOS)

Față de prima categorie de dispozitive unipolare, tranzistoarele cu efect de câmp de tip TEC-MIS utilizează ca substrat un semiconductor și ca izolator se folosește în special bioxidul de siliciu (SiO_2); canalul conductor se formează la suprafața semiconductorului, în vecinătatea stratului izolator de SiO_2 . Prin utilizarea de oxid ca strat izolator, TEC-MIS este denumit TEC-MOS.

În funcție de modul de formare a canalului conductor, TEC-MOS se realizează cu canal *inițial* (adică canalul conductor sursă-drenă există și în absența tensiunii externe de polarizare a porții) și cu canal *indus* (adică canalul conductor sursă-drenă nu se formează decât în prezența tensiunii externe de polarizare a porții), tipul acestora fiind în ambele cazuri p sau n, așa cum se arată în figura 3.18 a (stînga, respectiv dreapta).

Funcționarea tranzistoarelor unipolare de tip TEC-MOS se bazează pe fenomenul de inducție electrostatică. Cea mai simplă structură de tranzistor cu efect de câmp apare în varianta metal-oxid-semiconductor (MOS), asemă-

www.electronica.ro

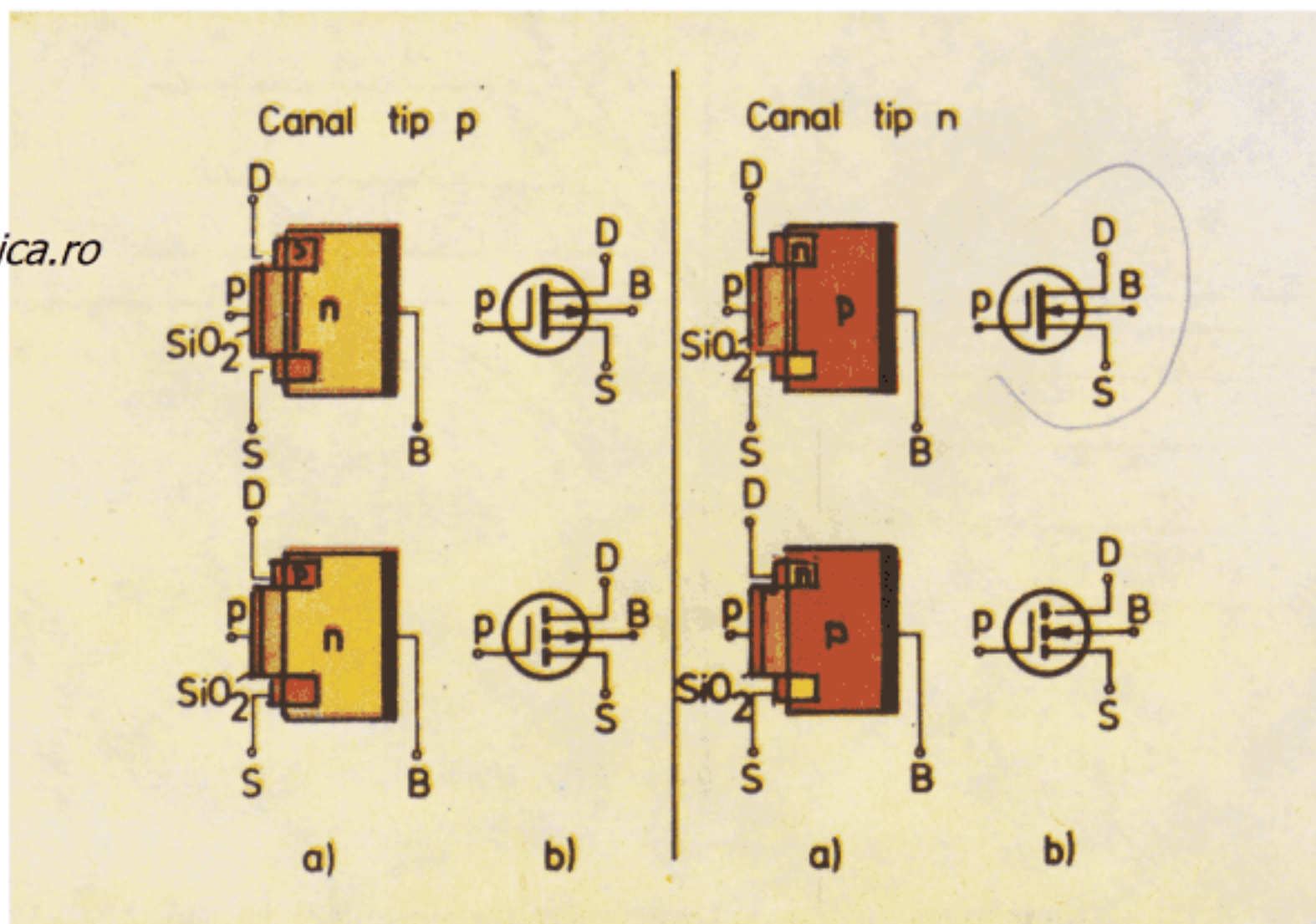


Fig. 3.18. Structuri fizice (a) și simbolurile (b) pentru tranzistoare unipolare de tip TEC-MOS: canal inițial (sus) și canal indus (jos) de tip p — în stînga, canal inițial (sus) și canal indus (jos) de tip n — în dreapta.

nătoare cu un condensator plan; dar cu o comportare diferită de cea a unui condensator obișnuit.

Modul de lucru al unui tranzistor de tip MOS se poate explica pe fiecare din structurile fizice prezentate în figura 3.18 (avînd alăturat și simbolurile standard de reprezentare) care se numesc astfel:

- tranzistor MOS cu canal inițial de tip p (fig. 3.18 a — structură fizică și b — simbol, în stînga sus);
- tranzistor MOS cu canal indus de tip p (fig. 3.18 a — structură fizică și b — simbol, în stînga jos);
- tranzistor MOS cu canal inițial de tip n (figura 3.18 a — structura fizică și b — simbol, în dreapta sus);
- tranzistor MOS cu canal indus de tip n (fig. 3.18 a — structură fizică și b — simbol, în dreapta jos).

La o structură MOS avînd ca substrat un semiconductor de tip p sau n și lateral două contacte ohmice, pentru sursă și drenă, prin aplicarea unei tensiuni electrice se modifică conductibilitatea superficială a semiconductorului.

Structurile de TEC-MOS cu canal inițial operează în regim de *sărăcire*, iar cele cu canal indus lucrează în regim de *îmbogățire*. În primul caz, tranzistorul poate să funcționeze și în regim de *îmbogățire*. Din punct de vedere practic acest lucru se traduce prin aceea că tensiunea de polarizare pe poartă poate să fie atît pozitivă cît și negativă. De la un tip de canal la altul, tensiunile de polarizare ale tranzistorului MOS se inversează ca polaritate. Forma caracteristicilor statice, $i_D = f(v_{GS}, v_{DS})$, este asemănătoare cu cea indicată pentru caracteristicile statice ale tranzistoarelor unipolare de tip TEC-J.

Tranzistoarele de tip TEC-MOS în regim de *sărăcire* sînt utilizate pe scară mai redusă decît cele care operează în regim de *îmbogățire*, deoarece ele asigură o conducție importantă chiar atunci cînd tensiunea pe poartă este nulă; în schimb, la tranzistoarele MOS care operează în regim de *îmbogățire*, pentru tensiuni nule de poartă-sursă curentul de drenă este zero.

În structurile fizice ale tranzistoarelor unipolare de tip TEC-MOS, regiunea substrat-canal constituie o joncțiune pn polarizată invers, care nu injectează purtători de sarcină în canalul de conducție și nici nu colectează alți purtători de sarcină.

Din punct de vedere tehnologic, tranzistoarele unipolare de tip TEC-MOS se realizează mai ușor și mai simplu decît tranzistoarele bipolare. Poarta fiind izolată de canal printr-un strat dielectric (izolator), aceste tipuri de tranzistoare prezintă o impedanță de intrare foarte mare (cînd semnalul se aplică pe poartă), cu valori situate între 10^{14} și 10^{16} Ω . Pe baza tehnologiilor actuale se realizează tranzistoare MOS care operează în regim de *îmbogățire*, cu V_p de ordinul volților, cu $V_{DS\ max}$ de ordinul zecilor de volți, cu i_D de ordinul miliamperilor și cu frecvențe maxime de ordinul zecilor și sutelor de MHz.

Din aceeași categorie cu tranzistoarele unipolare de tip TEC-MOS fac parte și *tranzistoarele cu straturi subțiri*, adică tranzistoare realizate prin depunerea unor straturi subțiri semiconductoare pe un izolator cu rol de substrat, fără nici un fel de joncțiune pn. Astfel de tranzistoare pot opera atît în regim de *îmbogățire*, cît și în regim de *sărăcire*, funcție de rezistența stratului semiconductor:

- cînd rezistența semiconductorului este mică, curentul poate avea valori mari și tranzistorul operează în regim de *sărăcire*;

— cînd rezistența semiconductorului este mare, curentul are valori mici chiar la o tensiune nulă de poartă și tranzistorul operează în regim de îmbogățire.

Ca materiale semiconductoare se recomandă cele compuse, de tipul CdS și CdSe.

www.electronica.ro

3.3. ELEMENTE COMPARATIVE PRIVITOARE LA TRANZISTOARELE BIPOLARE ȘI UNIPOLARE

Tranzistoarele bipolare și cele unipolare se deosebesc esențial între ele, atît din punct de vedere tehnologic, cît și din punct de vedere funcțional.

La tranzistoarele unipolare, joncțiunile pn care intervin au rolul de a delimita canalul de conducție și se polarizează invers — adică se mențin blocate în regim normal de funcționare. Astfel de joncțiuni dispar total la tranzistoarele unipolare cu straturi subțiri.

Ca și în cazul tranzistoarelor bipolare (pnp și npn), ambele tipuri tehnologice de tranzistoare unipolare se pot realiza în forme complementare (cu canale de tip p și/sau n).

Privitor la TEC-J, modul de lucru normal este în regim de sărăcire, în timp ce un TEC-MOS poate să opereze fie în modul de sărăcire, fie prin sărăcire și îmbogățire.

În funcționare, tranzistoarele TEC-J sînt mult mai stabile decît tranzistoarele TEC-MOS.

Din punct de vedere tehnologic, tipul TEC-MOS se realizează mai comod și mai simplu decît TEC-J și decît tranzistoarele bipolare, fiind extrem de solicitat pentru aplicații în comutație.

3.4. TRANZISTOARE UNIJONCȚIUNE

Din punct de vedere structural, tranzistoarele unijoncțiune (fig. 3.19) sînt formate dintr-o pastilă semiconductoare, de obicei de tip n, cu două contacte ohmice la capete (adică bazele B_1 și B_2) și cu o joncțiune pn (la jumătatea distanței dintre cele două baze) pe care se plasează electrodul de comandă sau de control (fig. 3.19 b), denumit emitor (E). O astfel de structură este clasică. În practică se mai întîlnesc structuri programabile și complementare. De exemplu tranzistorul unijoncțiune de tip programabil, cu structură de tip pnpn, realizează tot funcția specifică a tranzistoarelor unijoncțiune convenționale. Calitatea de programabil o atribuie acestui tip de tranzistor multijoncțiune faptul că parametrii săi se pot regla în funcție de cerințele beneficiarului. Deosebirea între cele două tipuri de tranzistoare unijoncțiune constă în modul de obținere a *rezistenței negative* (fig. 3.19 c) pe caracteristica $i_E = f(U_E)$:

— pentru structura clasică, rezistența negativă se obține prin scăderea controlată a conductivității electrice între capetele B_1 și B_2 ale bazei semiconductoră;

— pentru structura fizică de tip „multijoncțiune“ (pnpn), rezistența negativă se obține prin intrarea în conducție electrică a dispozitivului propriu-zis, fenomen condiționat de potențialul pe regiunea centrală de tip n.

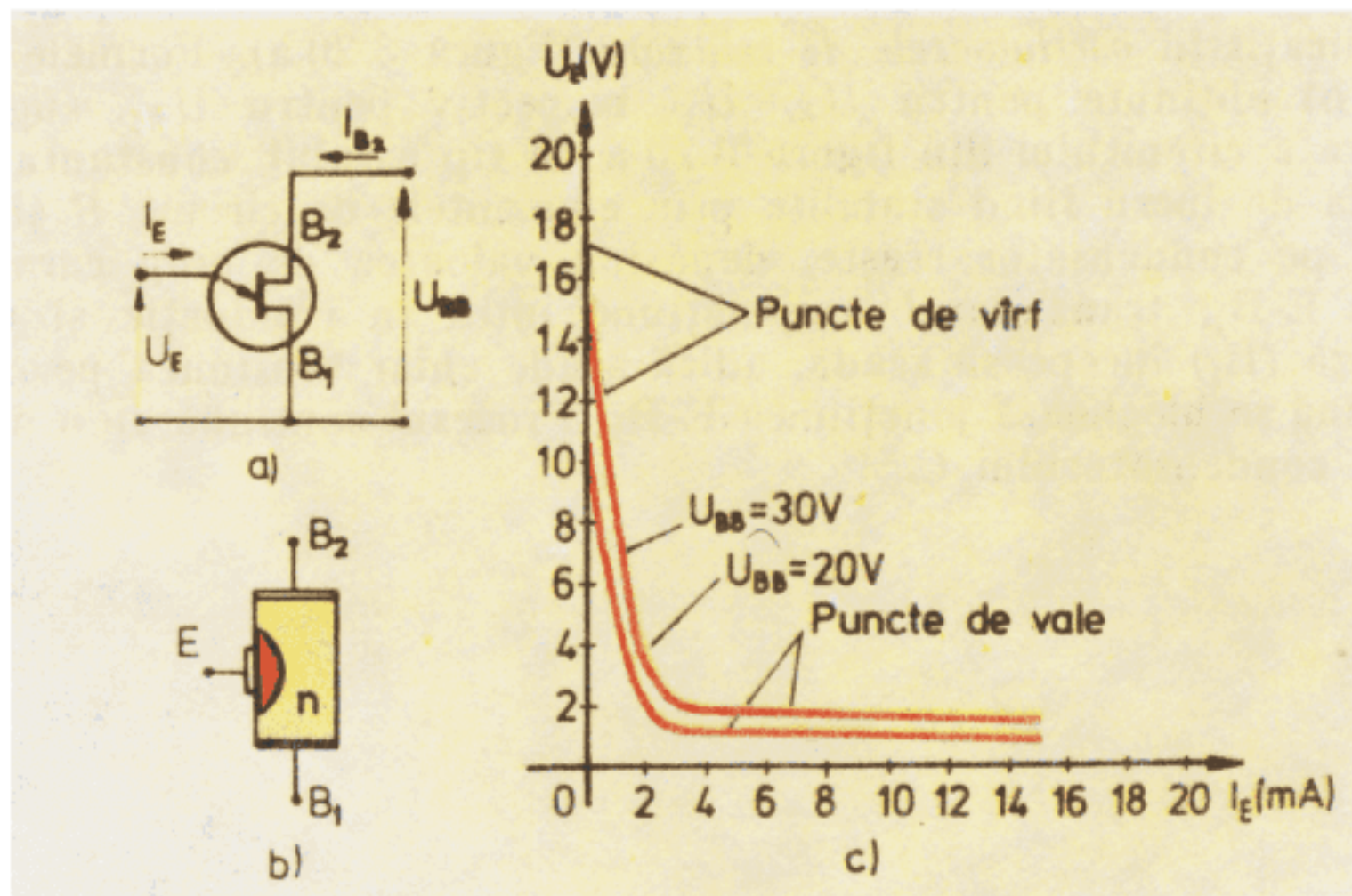


Fig. 3.19. a) Tranzistorul unijonțiune (TUJ); b) structura fizică pentru TUJ; c) caracteristici de intrare curent-tensiune.

Deși tranzistorul unijonțiune de tip programabil se aseamănă cu o diodă comandată și chiar cu un tiristor, simbolul lor diferă, întrucît comanda se face pe anod și nu pe catod (ca la tiristor).

Revenind la tranzistorul unijonțiune standard, funcționarea acestuia (figura 3.19 b) are loc astfel: emitorul injectează în semiconductor goluri, care sînt captate de baza B_1 , atrăgînd electronii din regiunea E- B_2 și, deci, provocînd o scădere a rezistenței semiconductorului în zona E- B_1 . O astfel de comportare conduce la creșterea curentului I_E și scăderea simultană a tensiunii U_E (între emitor și baza B_1).

www.electronica.ro

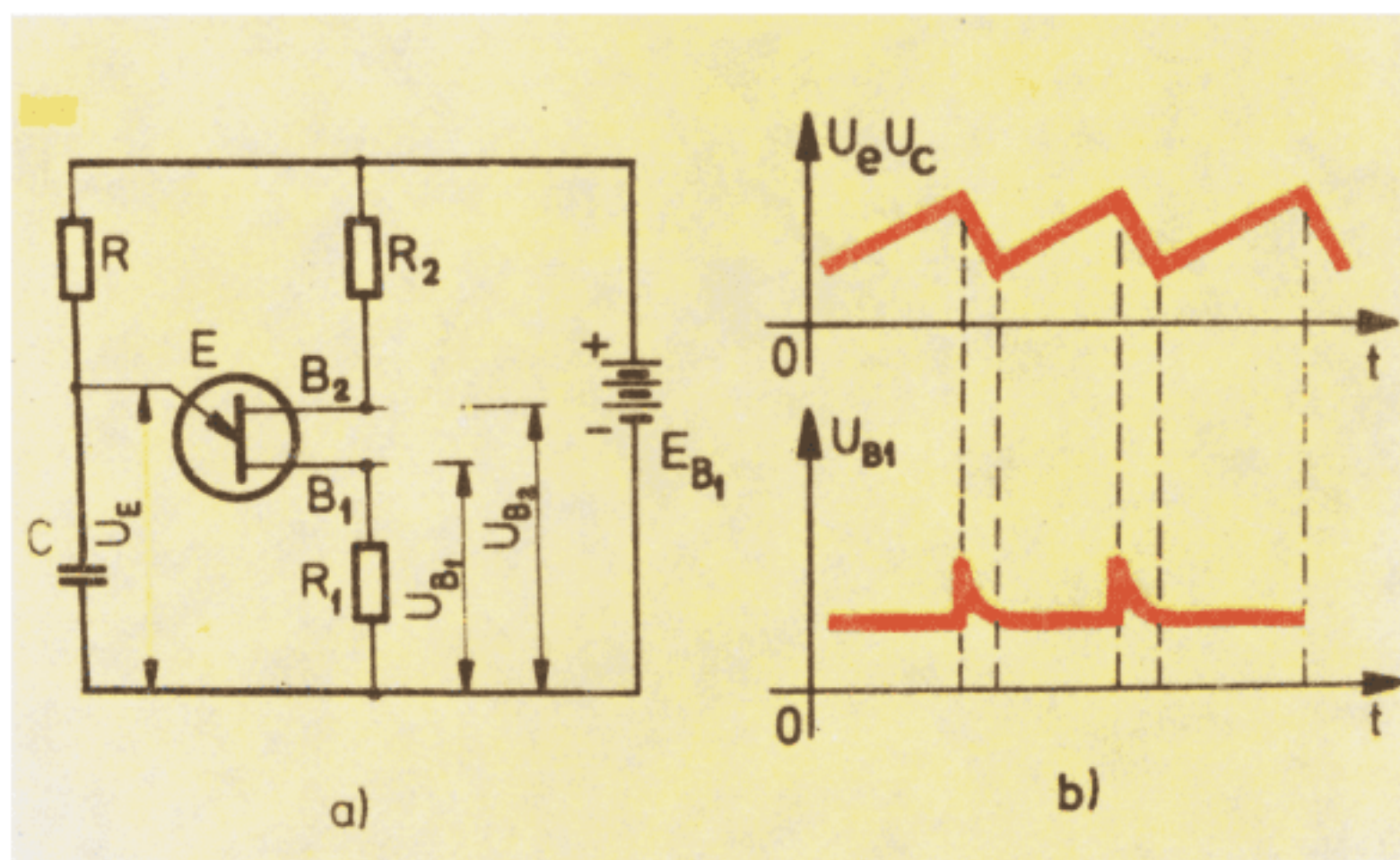


Fig. 3.20. a) Structură de oscilator de relaxare cu TUJ; b) formele de undă obținute pe condensator și pe baza B_1 .

Prin forma caracteristicii $I_E=f(U_E)$, tranzistoarele unijonțiune își găsesc aplicații în *oscilatoarele de relaxare* (figura 3.20 a). Formele de undă (fig. 3.20 b) obținute pentru $U_E=U_C$, respectiv pentru U_{B_1} , sugerează o funcționare a circuitului din figura 3.20 a de tip astabil, constanta de timp și perioada de lucru fiind stabilite prin elementele de circuit R și C . Când tensiunea pe condensator crește, depășind valoarea de prag caracteristică jonțiunii E- B_1 , tranzistorul unijonțiune intră în conducție și tensiunea emitor-bază (B_1) începe să scadă, adică scade chiar tensiunea pe condensatorul C pînă se blochează jonțiunea E- B_1 . Procesul continuă cu o nouă reîncărcare a condensatorului C .

www.electronica.ro

Dispozitive multijoncțiune

4.1. DEFINIRE ȘI CARACTERIZARE GENERALĂ

Dispozitive multijoncțiune (v. anexa 7) sînt structuri fizice cu mai mult de două joncțiuni PN pe calea de conducție, care prezintă rezistență *negativă* în planul caracteristicilor statice curenți-tensiune. Din această categorie de dispozitive fac parte următoarele structuri fizice: *dinistorul* sau dioda pnpn, *tiristorul* cu un electrod sau doi electrozi de comandă, *diacul*, *triacul* și *tranzistorul unijoncțiune programabil* (prezentat în paragraful 3.4).

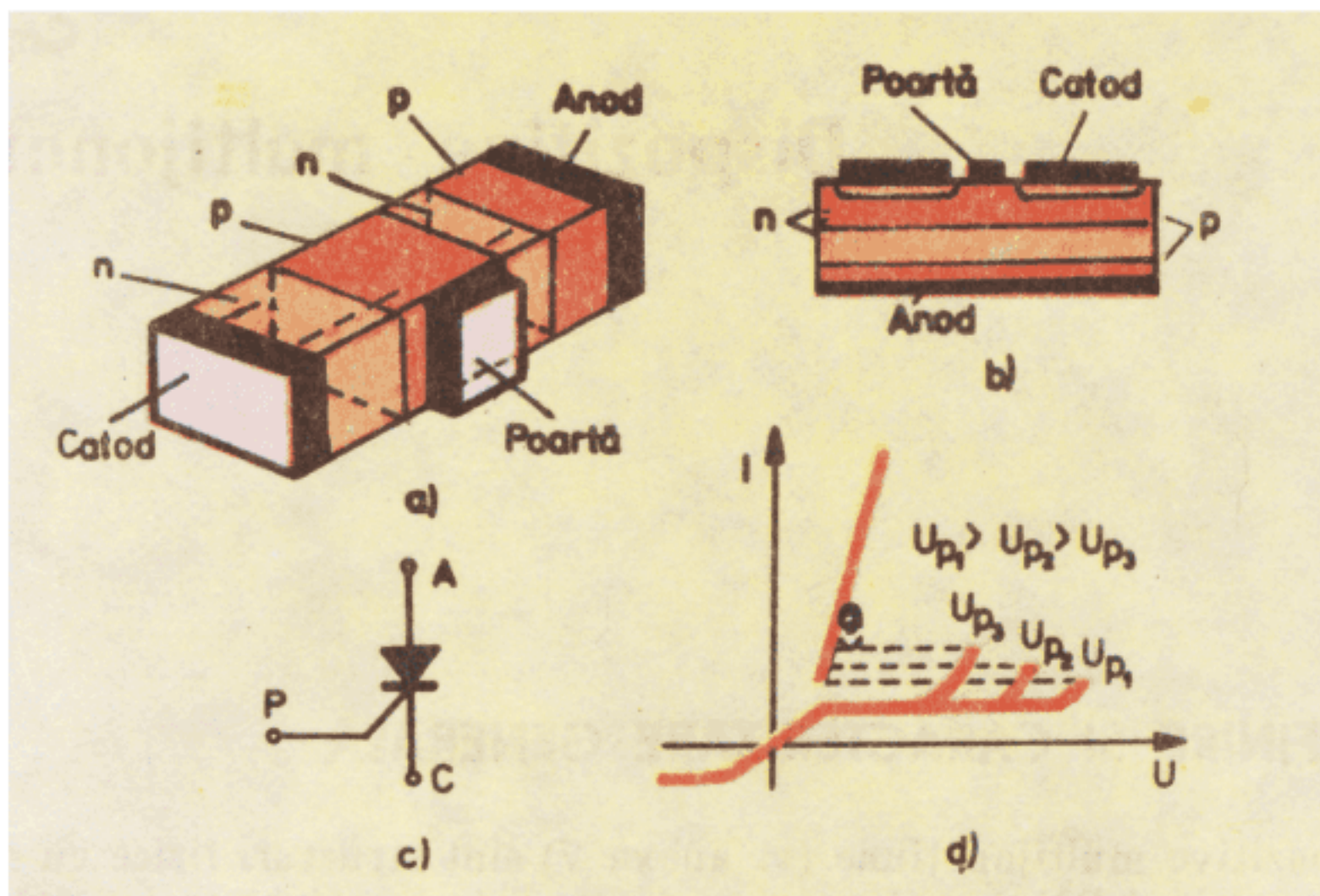
4.2. TIRISTORUL

www.electronica.ro

În figura 4.1 se prezintă structura fizică a unui tiristor, cu poarta lângă catod (fig. 4.1 a), avînd la capete metalizările pentru contactele de anod și catod. O secțiune printr-o astfel de structură fizică apare în figura 4.1 b; contactele de *poartă* (P) și *catod* (C) sînt scoase pe o față a structurii fizice și contactul de *anod* (A) se află pe fața inferioară a structurii respective. Simbolul pentru un astfel de tiristor apare în figura 4.1 c, iar caracteristicile sale statice sînt prezentate în figura 4.1 d la diferite tensiuni aplicate pe poartă.

Fenomenele care au loc în tiristoare se explică comod asimilînd structura lor fizică cu cea a două tranzistoare bipolare complementare, avînd o joncțiune comună cu rol de joncțiune *colectoare*, celelalte două joncțiuni laterale fiind numite joncțiuni *emitoare*. Prin polarizarea directă a joncțiunilor emitoare se obțin rezistențe mici, comparativ cu joncțiunea colectoare care prezintă o rezistență foarte mare, fiind polarizată invers. Prin creșterea tensiunii pe tiristor, se mărește tensiunea pe joncțiunea colectoare și de la o anumită valoare de prag se constată o creștere bruscă a curentului și, evident, o scădere a tensiunii pe dispozitivul analizat. O astfel de comportare apare și în caracteristicile statice prezentate în figura 4.1 d. Curentul în starea de conducție, prin tiristor, se limitează cu elemente de circuit exterioare (plasate în anodul sau catodul tiristorului). Creșterea nelimitată a curentului prin tiristor se datorează fenomenului de multiplicare prin avalanșă a purtătorilor de sarcină în joncțiunea colectoare (polarizată invers)

Trecerea tiristorului din starea de *blocare* în starea de *conducție* se realizează la o anumită tensiune, numită „de prag“, între anod și catod, a cărei valoare depinde și de nivelul tensiunii de comandă ce se aplică între poartă și catod. După intrarea în conducție a tiristorului, tensiunea de comandă



www.electronica.ro

Fig. 4.1. a) Structură fizică de tiristor; b) secțiunea printr-o structură fizică de tiristor; c) simbolul utilizat pentru tiristor; d) caracteristicile de ieșire, curent-tensiune.

poartă-catod nu mai are nici o influență. Rolul impulsului de comandă, pe poarta tiristorului, constă doar în *amorsarea* fenomenului de generare în avalanșă a purtătorilor de sarcină; controlul curentului prin tiristor se va realiza doar din exterior.

Prin urmare, dacă pe tiristor nu se aplică nici o tensiune, tiristorul este blocat. Această stare se obține în condițiile în care tensiunea anod-catod se menține sub valoarea de prag. Dacă pe poartă se aplică un impuls pozitiv

www.electronica.ro

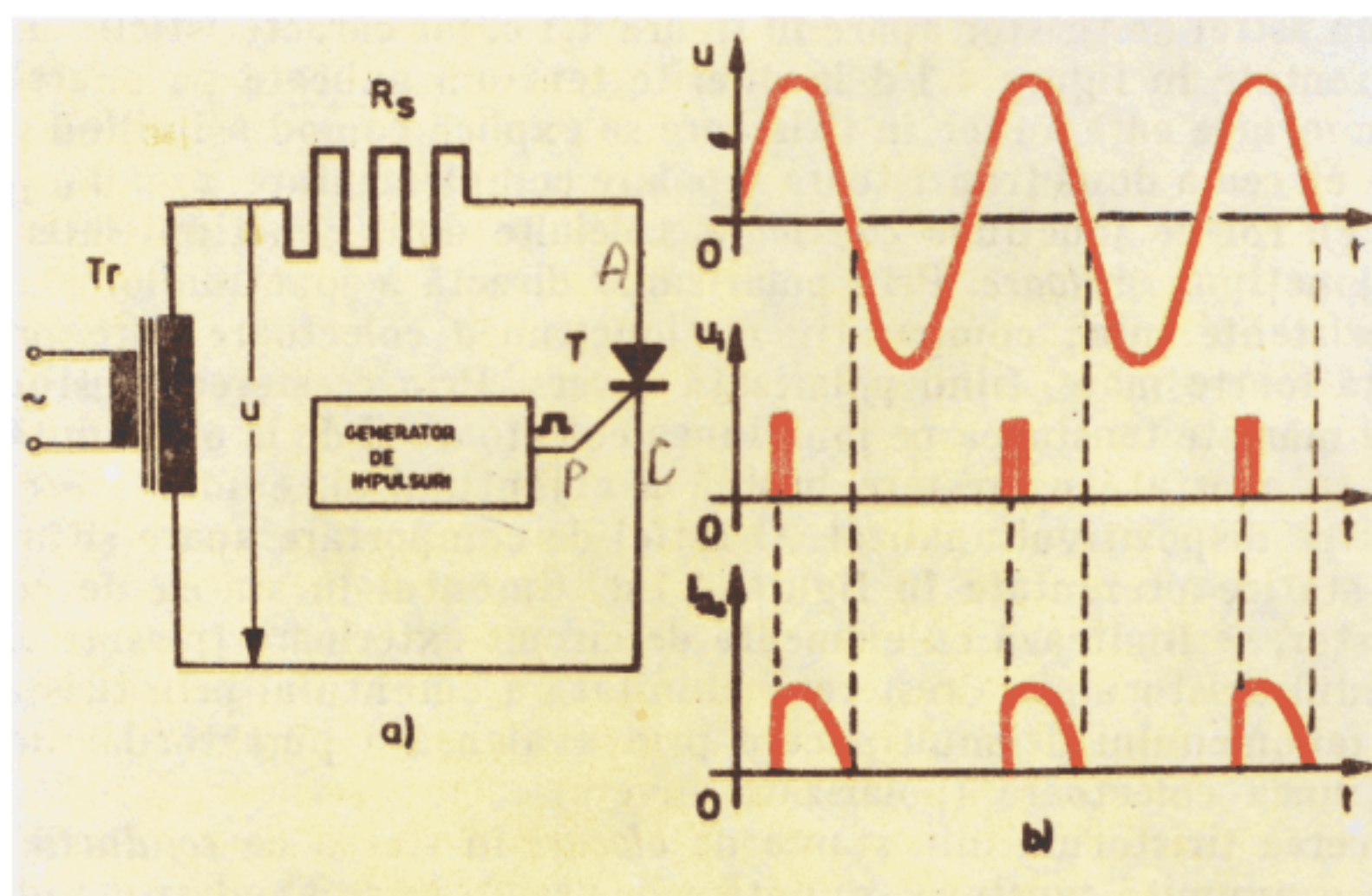


Fig. 4.2. a) Schema electrică a unui circuit de redresor comandat cu tiristor; b) formele de undă în diferite puncte de lucru.

de tensiune (printr-o injecție de curent suplimentară), tiristorul trece din starea de blocare în stare de conducție. Comutarea în sens invers a unui tiristor se realizează prin scăderea bruscă sau inversarea tensiunii anod-catod.

Din punct de vedere aplicativ, tiristoarele își găsesc multiple utilizări în redresarea comandată a curentului alternativ (figura 4.2). Schema de redresor comandat cu tiristor (fig. 4.2 c) se aseamănă cu cea a unui redresor monoalternanță cu diodă semiconductoare. Cât timp pe poarta tiristorului nu se aplică impulsuri de comandă, calea de conducție spre sarcină este blocată și prin sarcină nu circulă curent electric. Dacă pe poartă apar impulsuri pozitive de comandă, pe durata semialternanțelor pozitive din anod-catod, tiristorul se comportă ca un comutator închis, așa cum se arată și în figura 4.2 b. O importanță deosebită o are și momentul în care se aplică impulsul pozitiv pe poarta tiristorului, în raport cu evoluția semialternanțelor pozitive. Fără o sincronizare corespunzătoare între cele două semnale, se va prinde doar câte o fracțiune din semialternanțele pozitive și numai de la momentul în care apare impulsul de comandă pe electrodul de poartă, sub acțiunea căruia tiristorul trece în starea de conducție.

Dacă la tiristor se adaugă și un al doilea electrod de comandă, situat lângă anod, se mărește considerabil și aria sa de aplicare, în domeniul circuitelor de comutație.

Dispozitivul pnpn fără nici un electrod de comandă se numește dinistor. Caracteristica curent-tensiune a dinistorului este identică cu caracteristica similară a tiristorului, în absența tensiunii de comandă aplicată pe poartă.

Câteva exemple de tiristoare se găsesc în anexa 7.

4.3. TRIACUL

www.electronica.ro

Dacă tiristorul a fost echivalent, din punct de vedere structural, cu două tranzistoare complementare, având joncțiunile colectoare comune, triacul trebuie echivalat cu două tiristoare în paralel — conectate în opoziție —, și cu un singur electrod de comandă. Acest mod de conectare a celor două tiristoare — în paralel și în opoziție — permite să se asigure conducția electrică în ambele sensuri, după caracteristici curent-tensiune tipice unui tiristor. Prin simetria acestui tip de dispozitiv, comanda se poate realiza cu orice fel de polaritate a impulsurilor aplicate pe poartă.

În aplicații, circuitul pentru comanda puterii de curent alternativ este aproape identic cu cel prezentat în figura 4.2 a, numai că în locul tiristorului se plasează un triac. Acest tip de dispozitiv intră în conducție numai în prezența unui impuls de comandă aplicat pe poartă. Puterea în sarcină se reglează prin modificarea controlată a momentului aplicării impulsului de comandă în raport cu momentul trecerii prin zero a tensiunii de alimentare (în oricare din cele două sensuri posibile).

Un alt dispozitiv din aceeași clasă cu triacul este și diacul; structural este aproape identic cu triacul, numai că lipsește electrodul de comandă. Din punct de vedere funcțional, diacul are tot o conducție bidirecțională, limitată strict doar de tensiunea de prag (pozitivă, respectiv negativă), începând de la care diacul trece din starea de blocare în starea de conducție.

În anexa 7 se găsesc exemple de diacuri și triacuri produse în țară, la IPRS — Băneasa.

Dispozitive optoelectronice

www.electronica.ro

5.1. INTRODUCERE

Optoelectronica este o ramură a electronicii. Ea are ca obiect dispozitivele traductoare de mărimi optice (radiație electromagnetică) în mărimi electrice (curent, tensiune), dispozitivele de conversie a mărimilor electrice în mărimi optice, dispozitivele (comandate electric) de prelucrare a mărimilor electrice, precum și circuitele de utilizare a acestor traductoare.

Radiația electromagnetică este convențional clasificată după lungimea de undă, λ , sau după frecvența $f = \frac{c}{\lambda}$ conform tabelului 5.1.

Tabelul 5.1

Clasificarea radiațiilor electromagnetice

Gama	Lungimi de undă	Frecvențe
unde radio	mai mari de 0,1 mm	mai mici de $3 \cdot 10^{12}$ Hz
radiație infraroșie (IR)	780 nm ÷ 0,1 mm	$3 \cdot 10^{12}$ ÷ cca $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz
radiație vizibilă (luminoasă)	380 nm ÷ 780 nm	cca $3,8 \cdot 10^{14}$ ÷ cca $7,8 \cdot 10^{14}$ Hz
radiație ultravioletă (UV)	10 nm ÷ 380 nm	$7,8 \cdot 10^{14}$ ÷ $3 \cdot 10^{16}$ Hz
radiație Röntgen (X)	0,1 nm ÷ cca 10 nm	$3 \cdot 10^{16}$ ÷ $3 \cdot 10^{18}$ Hz
radiație gamma (γ)	0,1 pm ÷ cca 0,1 nm	$3 \cdot 10^{18}$ ÷ $3 \cdot 10^{21}$ Hz

Radiația γ și radiațiile cu frecvențe mai mari, numite uneori *raze cosmice*, fac parte din clasa radiațiilor nucleare.

În general dispozitivele optoelectronice lucrează numai cu radiații IR, vizibilă și UV, dar multe dintre ele, sau alte dispozitive de construcție similară, pot fi folosite și în gama radiației X sau chiar γ .

Dispozitivele destinate exclusiv gamei de radiații vizibile sînt numite și *dispozitive fotoelectrice*. De reținut însă că unele dispozitive, realizate la început pentru a lucra în gama radiației luminoase și dezvoltate apoi pentru a funcționa și în alte game, și-au păstrat denumirea inițială. De exemplu, există *fotodiode* capabile să opereze cu radiații IR, UV, X sau γ . Aceste denumiri nu trebuie să genereze confuzii.

5.2. MĂRIMI RADIOMETRICE ȘI FOTOMETRICE

Radiometria, ca disciplină, are ca obiect caracterizarea, pe bază de măsurători, a radiației electromagnetice în general, în timp ce *fotometria* se ocupă doar de studiul radiației vizibile, în corelație cu modul de percepere de către om a luminii. Caracterizarea radiației se face pe baza unor parametri (mărimi radio/fotometrice) definiți ca mai jos și a unor scări convenționale (unități de măsură corespunzătoare). Mărimile radiometrice se măsoară în toată gama de frecvență a radiației electromagnetice, cu traductoare cu răspuns identic la toate frecvențele, în timp ce mărimile fotometrice se măsoară cu traductoare care modelează răspunsul ochiului uman normal. Deoarece mărimile radiometrice și cele fotometrice sînt similare, diferențierea dintre ele se face prin adjectivele „*radiant*” și „*luminos*”.

Distribuția spectrală a radiației (luminii) reprezintă repartitia energiei radiației, W , după lungimile de undă. Se notează $W(\lambda)$ sau W_λ și se obține prin împărțirea energiei dintr-o gamă cît mai îngustă de lungimi de undă la lărgimea benzii respective:

$$W_\lambda = (\text{energia în banda } \lambda_1 \dots \lambda_2) / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

sau

$$W_\lambda = dW/d\lambda.$$

Mai sus, în locul lungimilor de undă se pot folosi frecvențele corespunzătoare, obținîndu-se $W(f)$.

În mod similar, pentru orice mărime radiometrică se poate defini distribuția spectrală a mărimii respective.

În particular, *răspunsul spectral* (*sensibilitatea spectrală*) al unui traductor se definește ca valoarea (mărimea) răspunsului la diverse lungimi de undă (frecvențe). În general, se utilizează *răspunsul spectral relativ*, obținut prin împărțirea răspunsului spectral absolut, definit ca mai sus, la valoarea sa maximă.

Răspunsul spectral al ochiului uman normal (standard), pe timp de zi, este cel prezentat în fig. 5.1 a. Ochiul uman se adaptează și la condițiile de întuneric, sensibilitatea spectrală pe timp de noapte (vedere „scotopică”) fiind diferită de cea pe timp de zi (vedere „fotopică”). Fotometria se bazează pe măsurarea radiației cu traductoare cu răspuns spectral identic cu cel al ochiului pe timp de zi.

Fluxul radiant, respectiv *luminos* se definesc ca energia radiantă (luminoasă) raportată la unitatea de timp:

$$\Phi = dW/dt$$

www.electronica.ro

Unitățile de măsură sînt, respectiv, *watt-ul* [W] pentru fluxul radiant și *lumenul* [lm] pentru fluxul luminos. Funcție de dispozitivul optoelectronic, care poate fi emițător, receptor sau transmiteor de radiație (respectiv de lumină), se vorbește despre energie și flux emise, reflectate sau transmise.

În cazul fotometriei, este esențial faptul că energii fizic egale, dar de lungimi de undă diferite, nu produc senzații vizuale egale, deci nu sînt egale, ca valoare subiectivă, pentru ochi. Scara de măsură fizică, avînd ca etalon joule-ul, nu este aceeași cu scara de măsură subiectivă. Energia luminoasă, adică energia radiației vizibile, așa cum este percepută subiectiv, va avea deci altă unitate de măsură. Din acest motiv și fluxul luminos se exprimă în unitatea

fotometrică specifică lumen, diferită de watt. În mod similar, unitățile de măsură ale tuturor mărimilor fotometrice diferă de cele ale mărimilor radiometrice corespunzătoare. Pentru a distinge simbolurile mărimilor radiometrice de ale celor fotometrice similare, primele se notează cu indicele „r”, iar celelalte cu indicele „v” (de la „vizibil”), de exemplu: W_r și W_v , sau Φ_r și Φ_v etc.

În cazul dispozitivelor care receptează lumină, respectiv radiație, este de interes ce valoare de flux cade pe unitatea de arie a suprafeței lor, iluminându-le (iradiindu-le). Această mărime, definită prin raportul dintre fluxul incident la suprafață și aria respectivă A (fig. 5.1 b) se numește *incidență luminoasă*, sau *iluminanță*, sau *iluminare* în cazul fluxului luminos, respectiv *incidență radiantă* sau *iradianță* în cazul fluxului radiant. Aceste mărimi se notează E_v și respectiv E_r . În cazul unui flux constant pe toată suprafața, $E_r = \Phi_r/A$, respectiv $E_v = \Phi_v/A$, iar în cazul unor fluxuri variabile $E_r = d\Phi_r/dA$, respectiv $E_v = d\Phi_v/dA$. Pentru incidența radiantă, mărimea de măsură este *watt pe metru pătrat* W/m^2 , iar pentru iluminare mărimea specifică de măsură este *luxul* notat lx.

Pentru dispozitivele emise este de interes valoarea fluxului generat într-un unghi solid (spațial) Ω , deci după o anumită direcție. Unitatea de unghi solid este *steradianul*, notat sr. Mărimea care reprezintă fluxul într-un unghi solid unitar se numește *intensitate radiantă*, respectiv *intensitate lumi-*

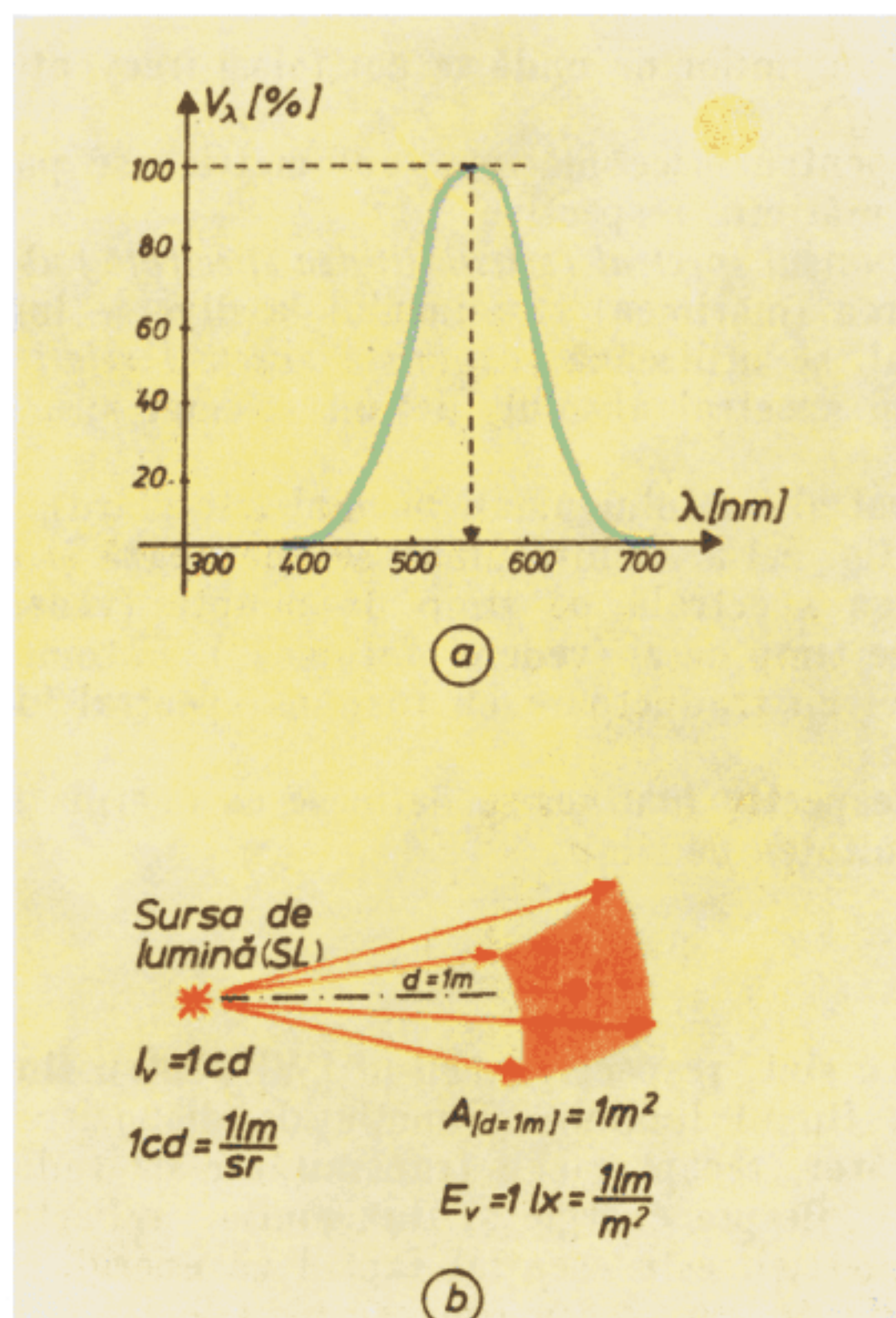


Fig. 5.1. Sensibilitatea spectrală a ochiului uman: a) curba de vizibilitate; b) reprezentarea dependenței $I_v - E_v$ în scopul definirii incidenței radiante sau luminoase și a intensității radiante sau luminoase.

noasă și se notează I_r , respectiv I_v . Dacă fluxul este constant în unghiul solid considerat, intensitatea este obținută prin raportul $I = \Phi/\Omega$, iar dacă fluxul este variabil, $I = d\Phi/d\Omega$. Intensitatea radiantă se măsoară în watt pe steradian: $[I_r] = W/sr$. Unitatea de măsură a intensității luminoase este *candela*, prescurtat *cd*. Candela este unitate fundamentală de măsură în Sistemul Internațional. Între candela și lumen, relația de legătură este: $cd = lm/sr$.

Pentru dispozitivele emise, surse de radiație sau lumină, se definește o mărime duală incidenței, anume *excitanța*, numită uneori și *emitanță*. Aceasta se definește ca fluxul generat de unitatea de arie a sursei și se notează uzual cu M . Valoarea excitanței se obține raportând fluxul emis la unitatea de arie a traductorului. În cazul unui flux uniform, excitanța se obține prin $M = \Phi/A$, iar în cazul unui flux generat neuniform de suprafața sursei, $M = d\Phi/dA$. Unitățile de măsură sînt $[M_r] = W/m^2$, respectiv $[M_v] = lm/m^2$ (aceleași ca pentru incidanță).

Deoarece în cazul surselor de suprafață mare intensitatea nu caracterizează suficient de complet sursa, se introduce mărimea *steranță*, notată L . Aceasta se obține prin combinarea definiției intensității cu cea a emitanței: steranța se definește ca intensitatea generată de unitatea de arie a sursei (a cărei suprafață se consideră normală la direcția de propagare a radiației): $L = I/A$. Mărimea radiometrică respectivă este *steranța radiantă*, sau *radianta*, măsurată în $[L_r] = W/sr \cdot m^2$. Mărimea fotometrică este *steranța luminoasă*, sau *luminanța* (sau strălucirea), cu unitatea $[L_v] = cd/m^2$ numită uneori și *nit*, cu prescurtarea *nt*.

Principalele mărimi radiometrice și fotometrice sînt sistematizate în fig. 5.2.

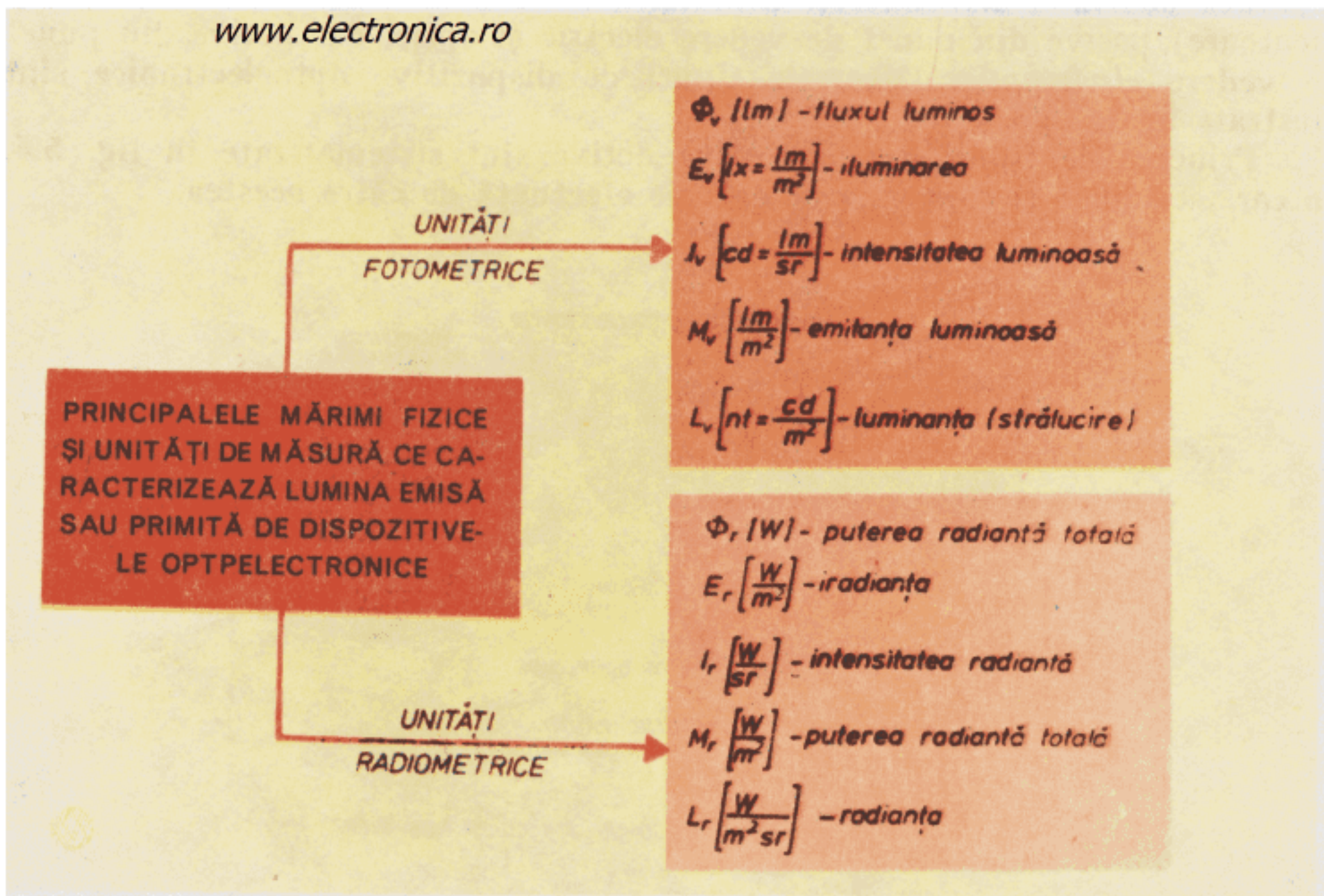


Fig. 5.2. Principalele mărimi radiometrice și fotometrice.

Sursele uzuale de radiație sau lumină au forme care se apropie de cea sferică, plană sau cilindrică. Pentru a ușura calculele mărimilor fotometrice sau radiometrice pentru aceste surse, în tabelul 5.2 se prezintă principalele lor caracteristici.

Tabelul 5.2

Exemple de configurații pentru surse de lumină și caracteristicile geometrice ale acestora	Sursă sferică de rază R	Sursă plană lungime L lățime l	Sursă cilindrică (filiformă) de înălțime l și diametru D
Aria sursei de lumină (A_s)	$4\pi R^2$	Ll	Dl
Unghiul solid în care radiază (Ω)	4π	2π	π^2
Distanța minimă de la care sursa se poate considera punctiformă (d)	$20R$	$10\sqrt{L^2 + l^2}$	$10\sqrt{D^2 + l^2}$
Aria suprafeței iluminate la distanța d	$4\pi d^2$	$2\pi d^2$	$\pi^2 d^2$

Sursele de lumină sau radiație se numesc (din punct de vedere optic) și *dispozitive active*. Dispozitivele care receptează lumina sau radiația mai sînt numite și *detectoare* sau *dispozitive fotosensibile*. Din punct de vedere optic ele fac parte din clasa *dispozitivelor pasive*, dar *electric* sînt tot active. O clasă separată cuprinde dispozitivele *modulatoare* (valve de lumină, afișaje și indicatoare), pasive din punct de vedere electric și optic, dar active din punct de vedere *electrooptic*. Diversele tipuri de dispozitive optoelectronice sînt ilustrate în fig. 5.3.

Principalele tipuri de dispozitive active sînt sistematizate în fig. 5.4, în care se indică și conversia de energie efectuată de către acestea.

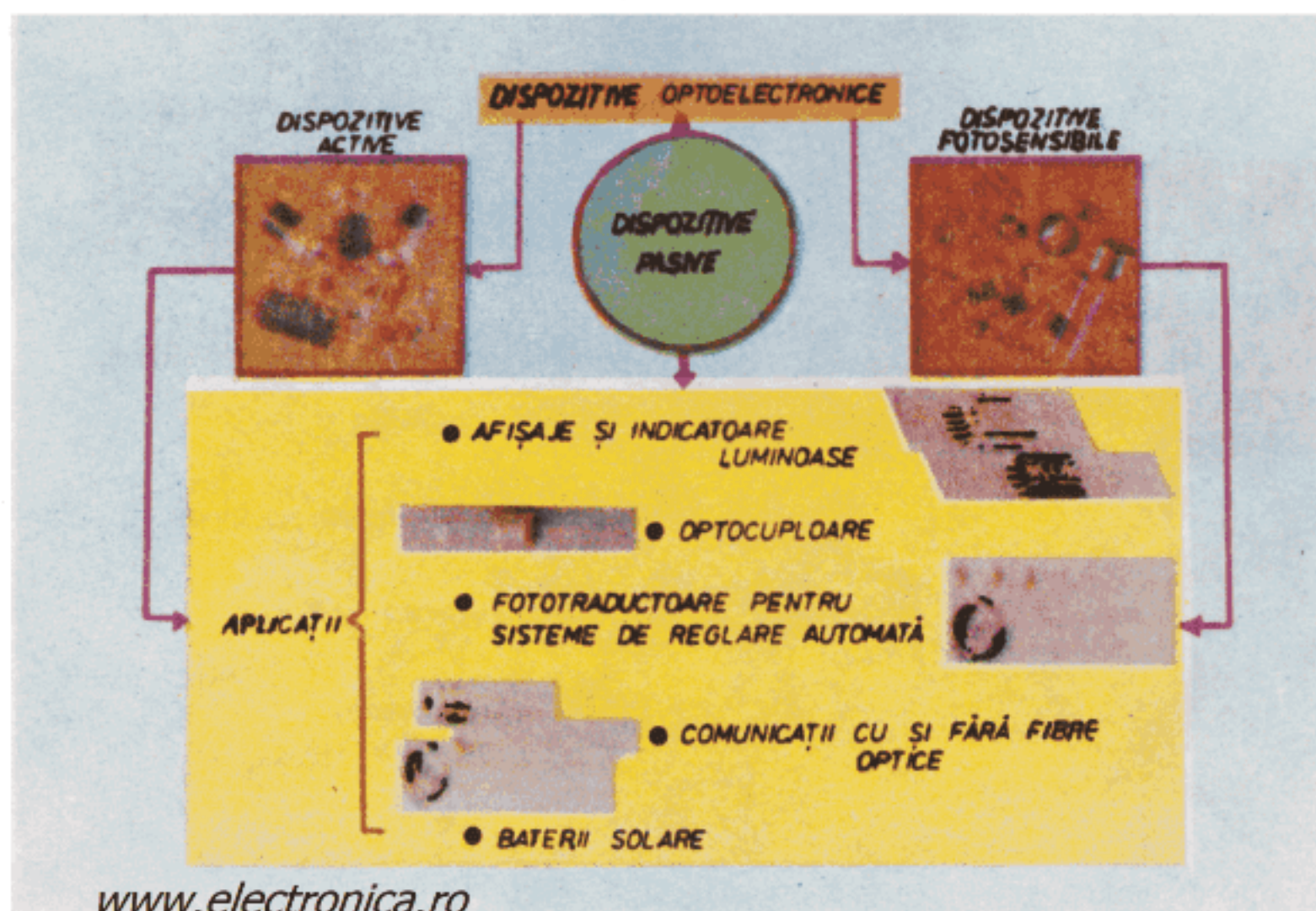


Fig. 5.3. Tipurile de dispozitive optoelectronice și principalele lor aplicații.

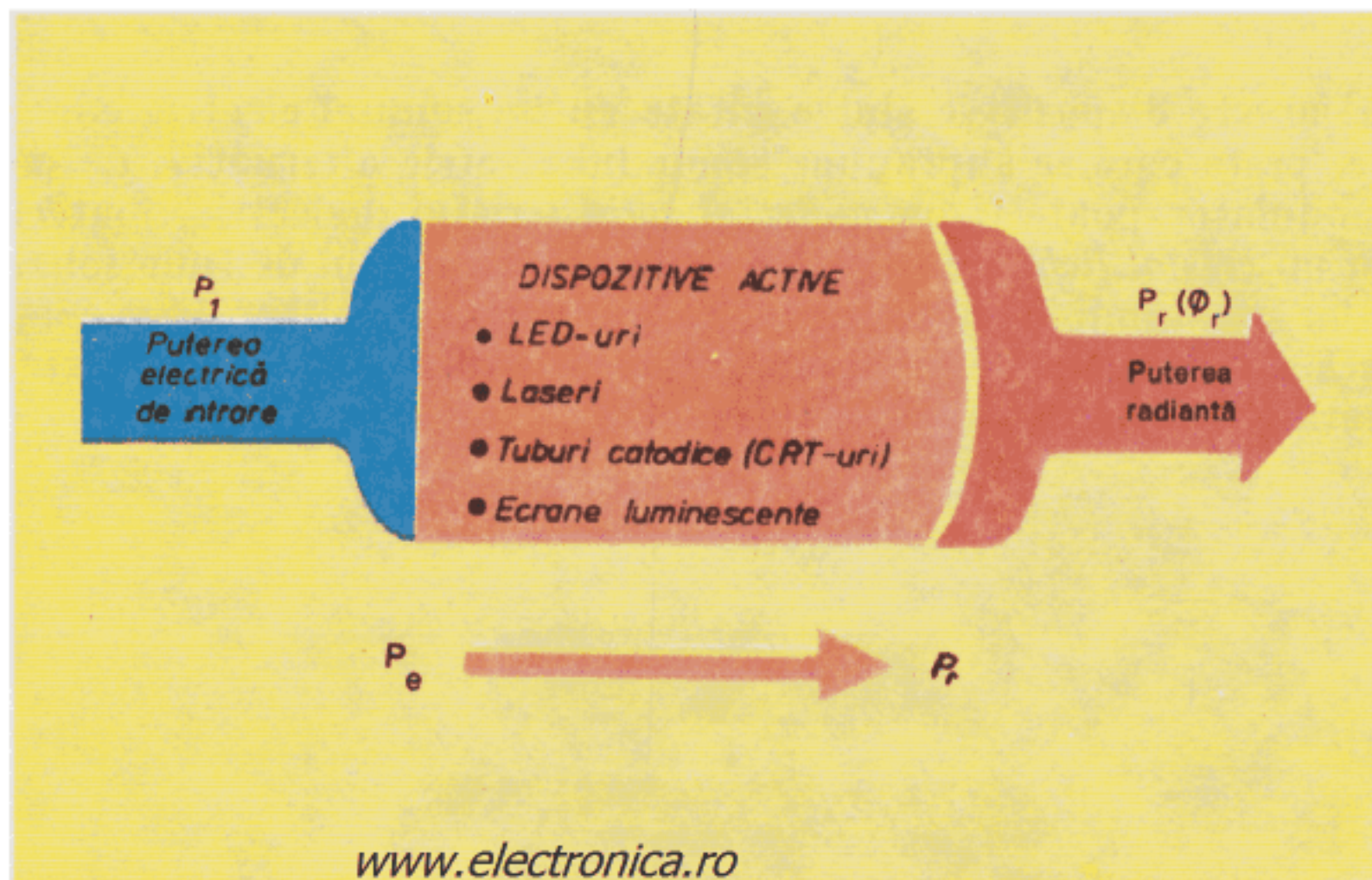


Fig. 5.4. Dispozitivele optoelectronice „active“ și sensul conversiei energetice realizate de acestea.

În mod similar, în fig. 5.5 se sistematizează tipurile uzuale de dispozitive optoelectronice fotosensibile.

Rolul principal al dispozitivelor optoelectronice modulatoroare nu este de a face o conversie de energie, ci de a modifica în mod controlat fluxul luminos transmis sau cel reflectat. Controlul se face printr-un semnal electric variabil purtător de informație. În final, aceste dispozitive convertesc informația electrică în informație optică. Din motive de optimizare a eficienței,

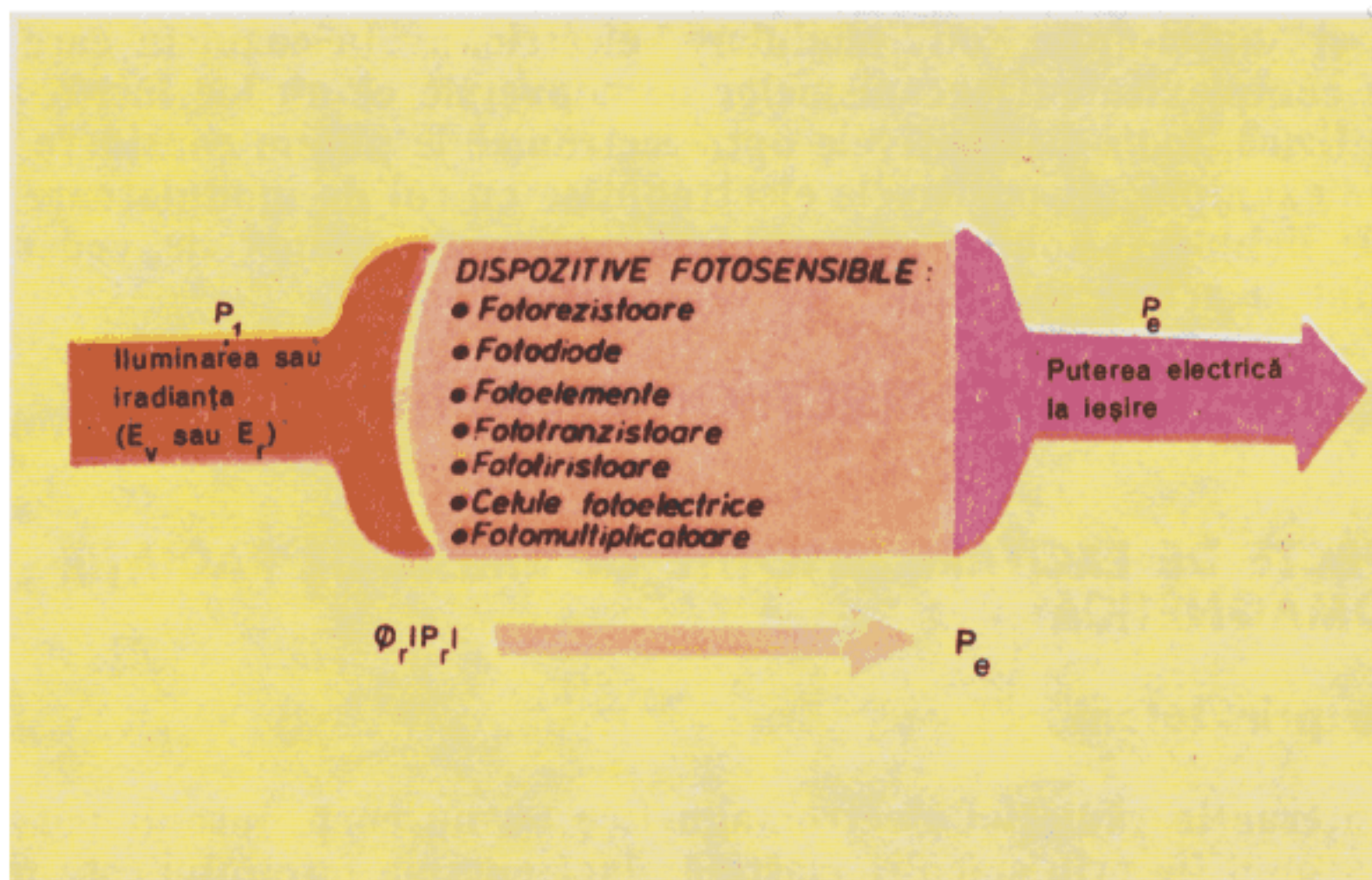


Fig. 5.5. Dispozitivele optoelectronice „pasive“ și transformarea energetică efectuată.

în general aceste dispozitive sînt excitate cu un semnal electric continuu, de polarizare, peste care se suprapune semnalul electric alternativ, de modulare. Mediul modulator poate fi un *material solid* (cristal dielectric, material magnetic) sau un *cristal lichid*. În fig. 5.6 se schițează modul de funcționare a modulatorilor de lumină cu controlul fluxului transmis.

Există și alte tipuri de modatoare, la care informația optică este purtată de alți parametri decît valoarea fluxului.

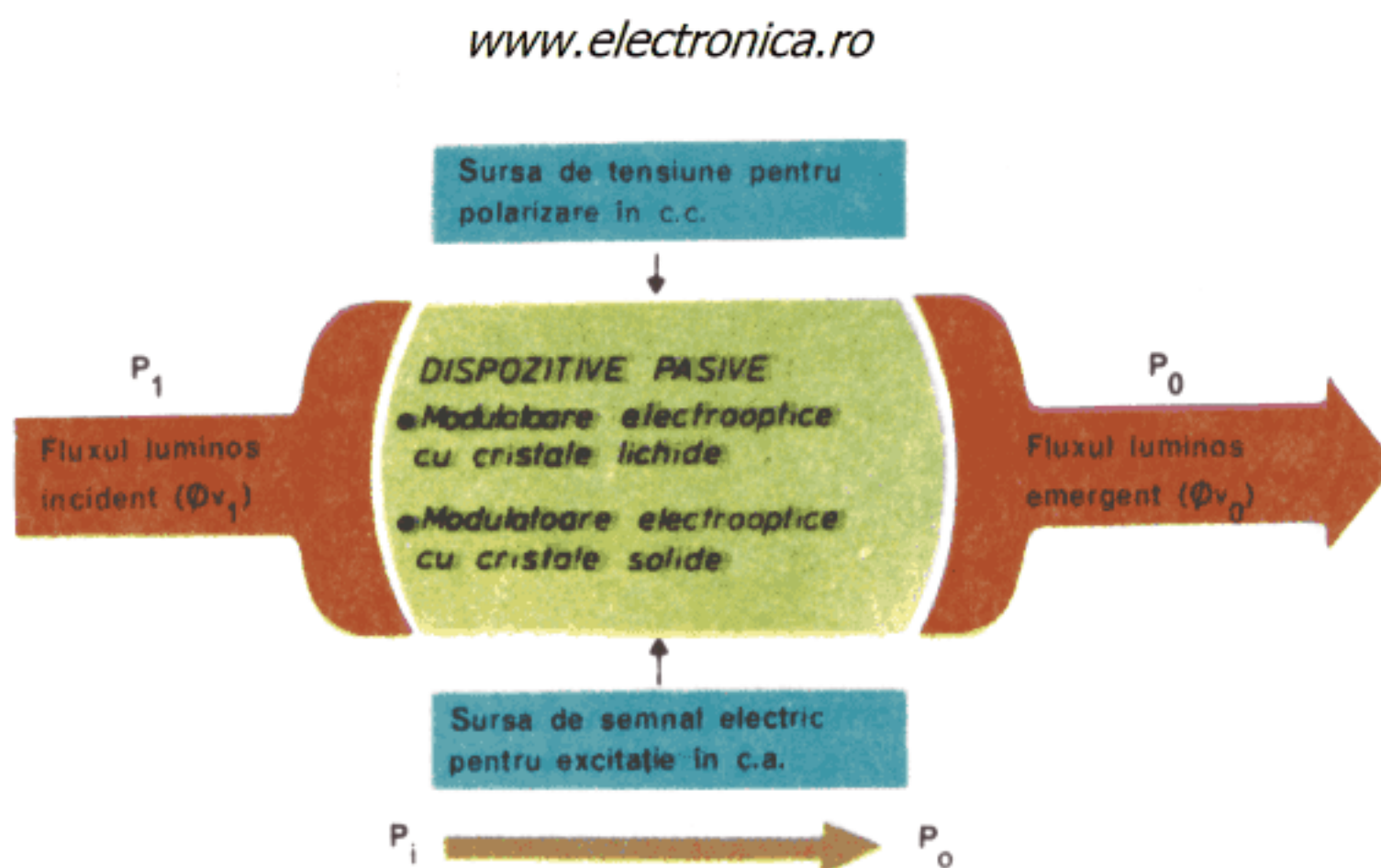


Fig. 5.6. Modulatorii de lumină cu controlul valorii fluxului transmis.

Notă: Clasificarea dispozitivelor optoelectronice în *active* și *pasive* este pur convențională și se impune cînd se iau în considerare anumite aspecte particulare ale mecanismelor de conversie specificate (electric-optic, optic-electric și optic-optic cu modulare electrică). În cazul în care se ține seama de complexitatea mecanismelor de conversie ce au loc într-o anumită structură fizică, *toate* dispozitivele optoelectronice le putem considera ca fiind active. De exemplu, dispozitivele electrooptice cu rol de modatoare (bazate pe cristale lichide și solide) se consideră pasive din punct de vedere optic, dar ele sînt și active din punct de vedere electrooptic.

5.3. DISPOZITIVE OPTOELECTRONICE ACTIVE

5.3.1. EFECTE DE EXCITARE ÎNSOȚITE DE EMISIE DE RADIAȚIE ELECTROMAGNETICĂ

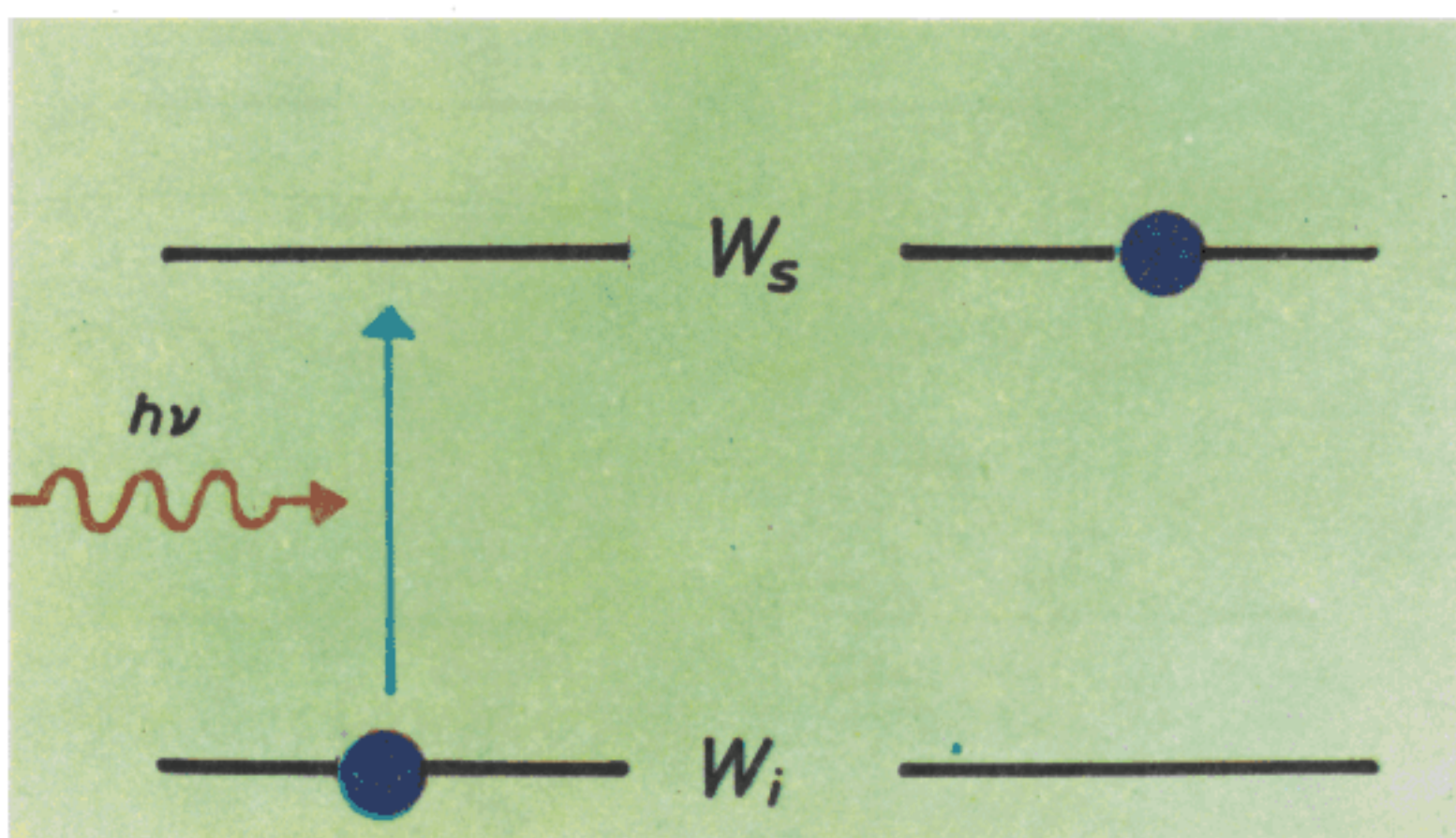
Excitarea prin fotoni

La interacția radiației electromagnetice cu un corp, fotonii pot interacționa cu atomii fie prin ciocnire elastică, dacă energia fotonului este mai mică decît energia minimă de excitare a atomului, fie prin absorbția fotonului în corp și excitarea acestuia. Procesul de excitare a corpului se poate desfășura în mai multe feluri. Energia fotonului se poate transfera unui atom, unei mo-

lecole sau chiar întregii rețele cristaline (pentru ultimul caz, vezi fenomenul de scintilație în paragraful privind detectorii de radiație X și γ). Excitarea atomilor sau moleculelor poate fi însoțită de trecerea unui electron de pe un nivel energetic inferior W_i pe un nivel superior W_s , ca în figura 5.7. Dacă energia fotonului incident este suficient de mare, atomul va fi ionizat prin eliberarea unui electron. Acesta este fenomenul de *fotoionizare*, care conduce la *fotoconducție*; explicarea sa este dată în paragrafele despre fotodetectori.

Absorbția fotonului se poate produce și prin alte mecanisme, de exemplu cu generarea unui foton de energie mai mică (efect de luminescență), însoțită de generarea unui fonon (adică vibrație a rețelei cristaline), ca în figura 5.8.

În cazul excitării atomului, acesta poate reveni în starea dezexcitată în mai multe moduri. Revenirea poate avea loc de la sine, către același nivel



www.electronica.ro

Fig. 5.7. Excitarea optică a unui atom sau a unei molecule, cu trecerea electronului de pe nivelul inferior de energie W_i pe nivelul superior W_s ($W_s > W_i$).

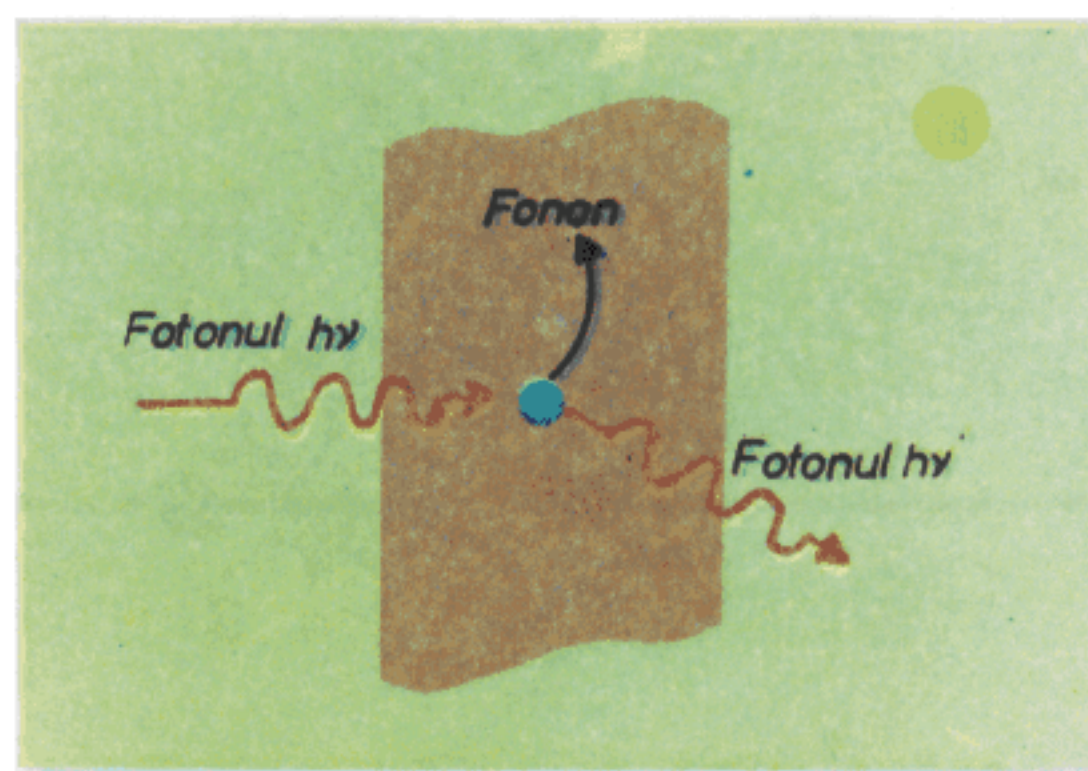


Fig. 5.8. Modelul absorbției fotonului însoțită de fenomenul de fotoluminescență.

de energie, după un timp de ordinul $10^{-7} - 10^{-8}$ s, caz în care se numește *emisie spontană* de tip *fluorescență de rezonanță* (fig. 5.9). Evident, frecvența fotonului generat este egală cu energia celui absorbit la excitație: $h\nu = W_s - W_i$. Un ansamblu de atomi sau molecule excitate în aceeași stare W_s , care revin spontan în starea neexcitată W_i , la momente diferite, aleatoare, de timp, se comportă ca o sursă de lumină monocromatică dar necoerentă. Lipsa de coerență se manifestă chiar și atunci când excitarea atomilor s-a produs sincron (simultan), deoarece dezexcitarea este un fenomen cuantic aleator. Probabi-

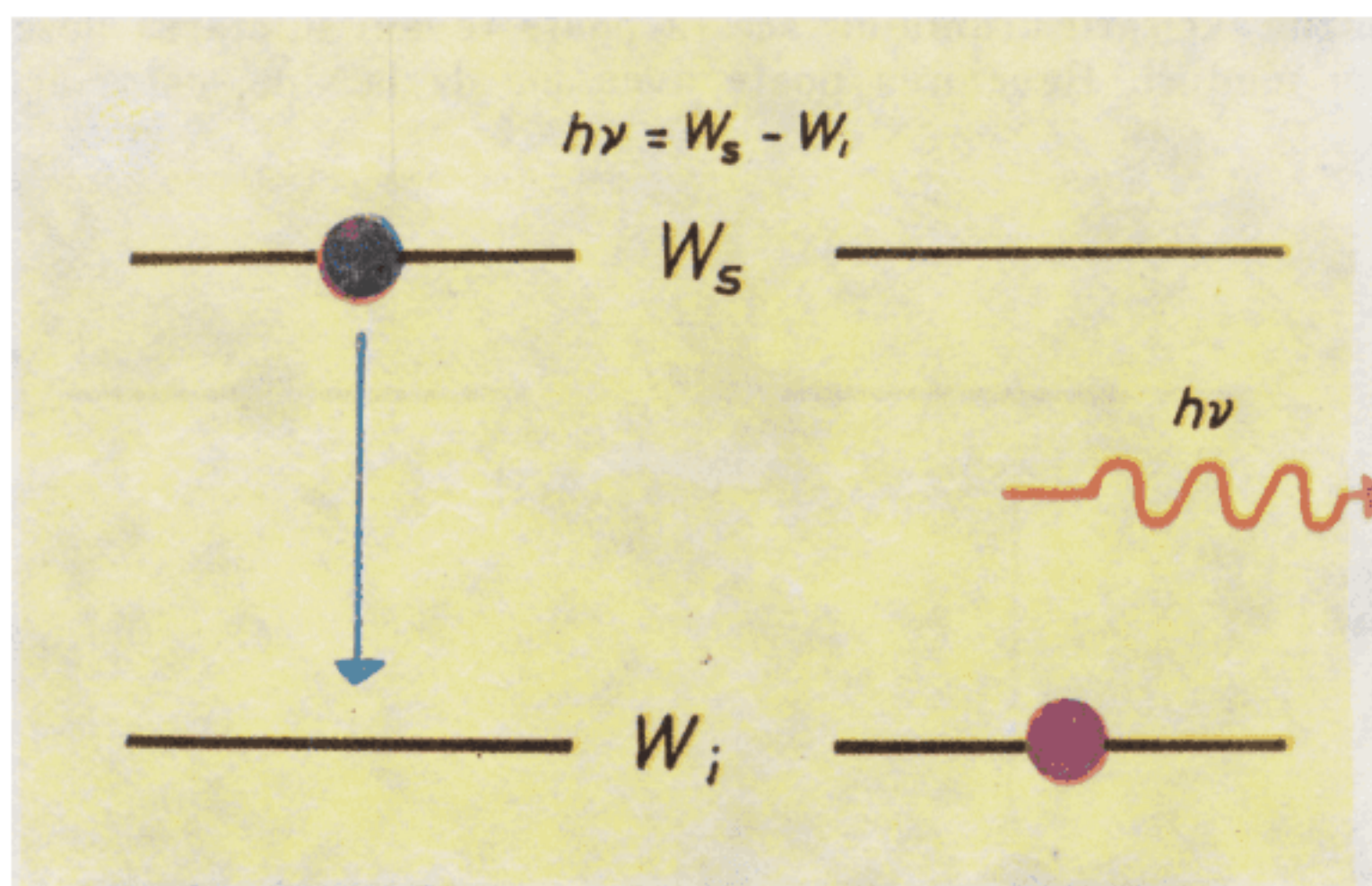


Fig. 5.9. Modelul emisie spontane de lumină, de tip fluorescență de rezonanță.

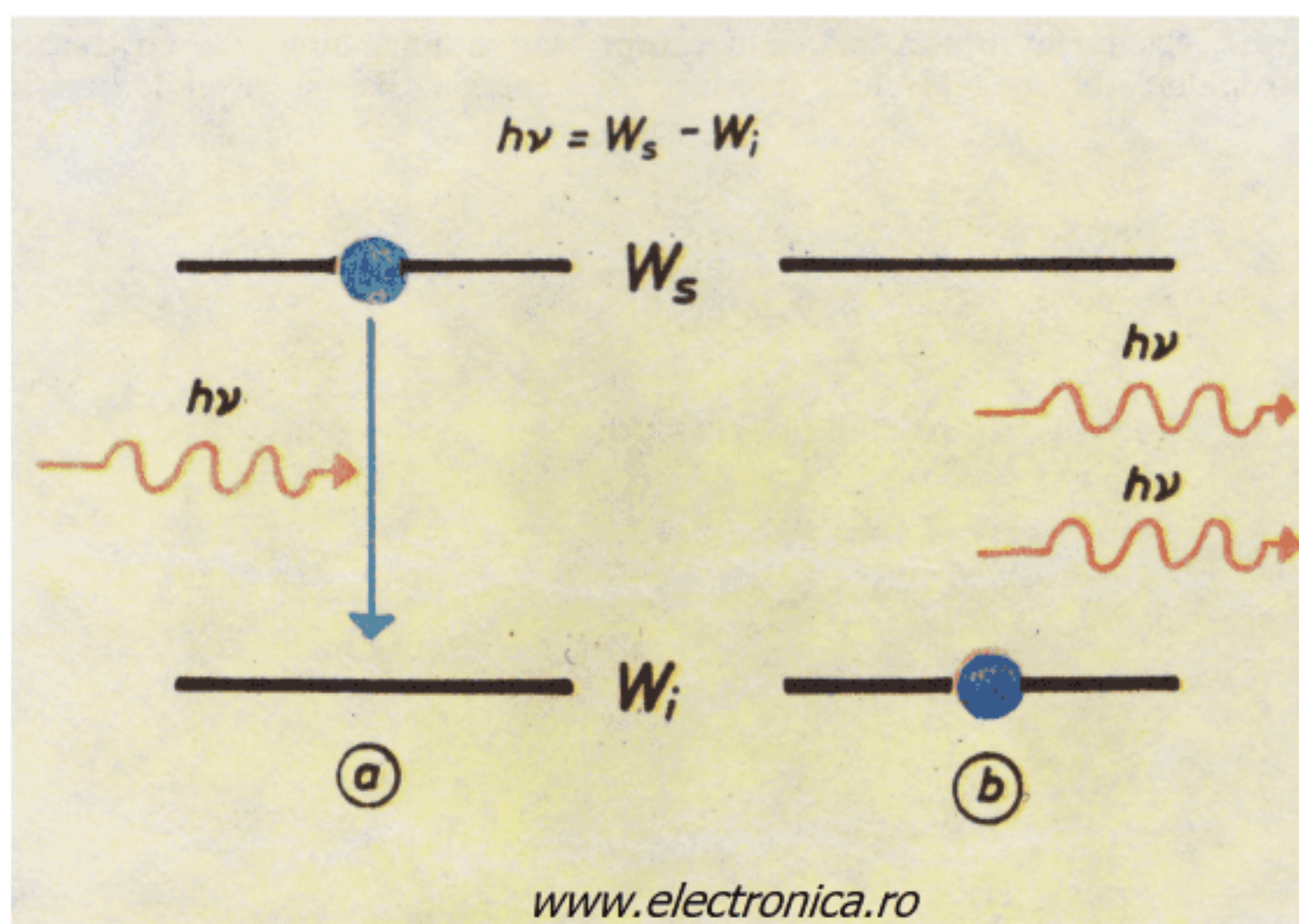


Fig. 5.10. Modelul emisie stimulate de lumină, cu participarea a două nivele de energie.

litatea de revenire la momentul t , raportat la originea timpului $t_0=0$, este proporțională cu $\exp(-t/\tau)$, unde τ este constantă de timp a procesului, numită și timp mediu de viață în starea excitată. Uzual $\tau=10^{-7} \div 10^{-8}$ s, valoare amintită mai sus. Timpul mediu de viață depinde de natura atomilor și de nivelele de excitare și revenire. Există însă și stări, numite *nestabile*, în care atomul poate rămâne excitat un timp mult mai îndelungat.

Revenirea atomului de la starea excitată la cea neexcitată poate să se facă mai rapid, sub influența unei acțiuni externe, de exemplu cea a unui foton de aceeași energie cu cel care a produs excitarea ($h\nu=W_s-W_i$). În acest mod are loc o *emisie stimulată* prin care, la iradierea cu un foton de energie $h\nu$, se obțin din corpul excitat doi fotoni identici, $h\nu$ (fig. 5.10).

Revenirea atomilor excitați pe nivelul inițial se poate produce și în mai multe faze, dacă electronii pot să treacă pe (unul sau mai multe) nivele intermediare, W_{in} , ca în fig. 5.11. În acest caz, energia fotonilor absorbiți va fi mai mare decât cea a fotonilor emiși ($h\nu_1=W_s-W_{in}$, respectiv $h\nu_2=W_{in}-W_i$). Dacă emisia este spontană, fenomenul se numește *fluorescență* (nerezonantă). Fluorescența are aplicații în unele dispozitive electrooptice de afișaj, de tipul tubului cu descărcare în plasmă, la care emisia primară este de lungimi mici de undă, transformarea în lumină vizibilă avînd loc prin fluorescență. Revenirea atomului pe un nivel intermediar poate avea loc și stimulat, fenomenul avînd aplicații în realizarea laserilor.

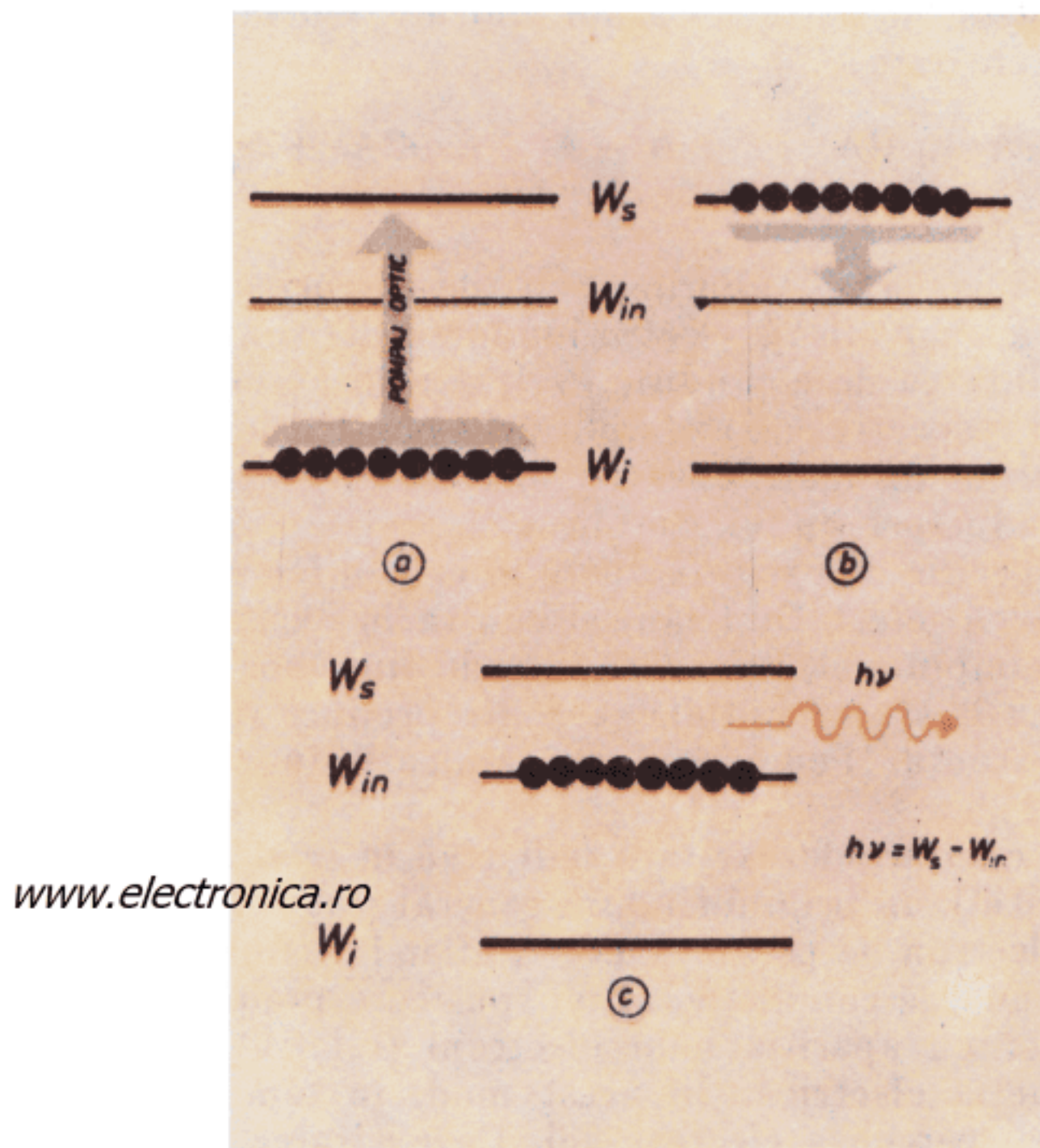
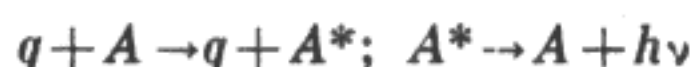


Fig. 5.11. Modelul emisiei stimulate, cu participarea a trei nivele de energie.

Alte mecanisme de excitare

Fenomenele de excitare a atomilor se pot produce și în alte moduri decât sub influența radiației.

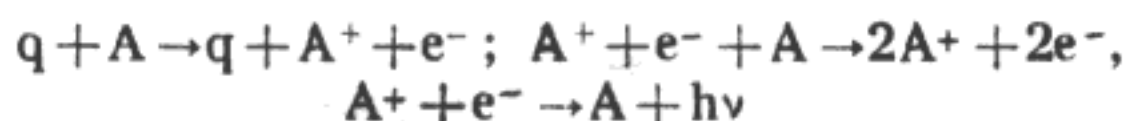
Un prim caz îl constituie excitarea, fără ionizare, a atomilor prin ciocnire cu alte particule, de exemplu cu electroni, conform schemei:



www.electronica.ro

unde q reprezintă sarcina electrică a particulei (electronul); A — atomul neexcitat, A^* — atomul excitat iar $h\nu$ — energia fotonului eliberat.

O altă modalitate de excitare a atomilor o constituie ionizarea, caz în care un electron este complet smuls din atom, prin ciocnire cu altă particulă. Pentru a produce ionizarea, particula incidentă trebuie să aibă o energie cinetică ridicată, ceea ce se obține de obicei, pentru particulele încărcate electric, prin accelerare în câmp. Procesul de ionizare în câmp este un proces multiplicativ, de tip avalanșă: sub influența câmpului electric extern, sarcinile libere aflate în material sînt accelerate; dacă intensitatea câmpului este suficient de mare, energia cinetică dobîndită va fi suficientă pentru a produce, prin ciocnire, ionizarea atomilor; sarcinile astfel create vor fi la rîndul lor accelerate, producînd prin ciocniri noi ionizări și așa mai departe. Emisia de radiație se produce la recombinarea sarcinilor produse prin ionizare, de exemplu la captura unui electron de către un atom ionizat. Schema întregului proces de excitare-dezexcitare este:



Acest proces stă la baza tuburilor cu descărcări în gaze, a afișajelor cu astfel de tuburi, a unor afișaje electro-luminescente și a unor laseri cu gaz.

Există și posibilitatea de a produce excitarea în absența unui câmp electric aplicat corpului respectiv, de exemplu prin bombardarea materialului cu un fascicul de electroni de mare energie. Metoda este aplicată la realizarea unor laseri semiconductori cu emisie în UV.

Un mecanism specific de excitare apare în cadrul fenomenului de electro-luminescență intrinsecă (efect Destriau) și constă în excitarea directă a atomilor sub acțiunea câmpului electric, fără intermediul unor procese de ciocnire cu sarcini. Revenirea la starea inițială se poate produce radiativ, caz în care apare electroluminescența. Fenomenul are aplicații în realizarea afișajelor electro-optice.

Fenomenele de excitare-dezexcitare radiativă în *semiconductori* comportă o serie de particularități. În primul rînd, în general sînt de interes numai excițăările care duc un electron de pe un nivel W_v aflat în banda de valență pe un nivel W_c aflat în banda de conducție, altfel spus care produc ionizarea atomilor de semiconductor cu apariția unor electroni (relativ) liberi, capabili să contribuie la conducția electrică. În acest mod, în semiconductor apare o pereche de purtători, perechea electron-gol. Dezexcitarea, însoțită de emisia de lumină, se va produce prin recombinarea (radiativă) a purtătorilor din semiconductor, producînd revenirea electronului din banda de conducție în banda de valență, direct sau prin intermediul unui nivel de energie acceptor (W_a), ca în figura 5.12.

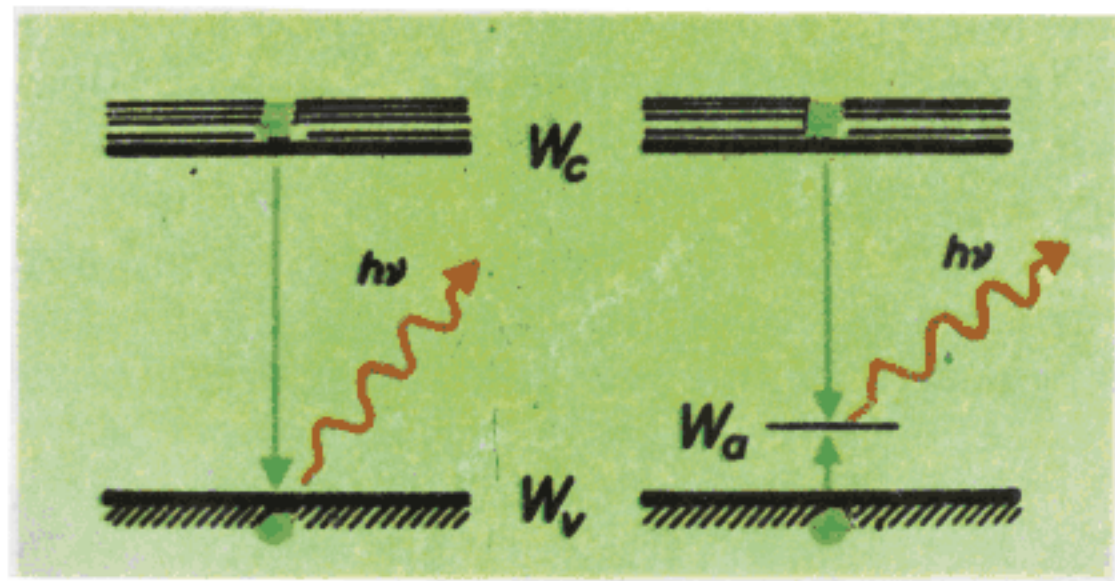


Fig. 5.12. Modelul recombinării radiative a purtătorilor mobili de sarcină în semiconductori.

O a doua particularitate o constituie modul în care se realizează excitarea. În dispozitivele care și-au găsit o largă aplicabilitate, anume diodele electroluminescente (notate DEL, sau LED) și laserii semiconductori (LS), excitarea se obține prin injecția de purtători minoritari într-o joncțiune pn, la aplicarea unei tensiuni electrice directe pe joncțiune. Procesele de excitare-dezexcitare în acest caz vor fi explicate în paragrafele următoare.

5.3.2. LASERII

Fenomenul laser

Laserii sînt dispozitive care generează o radiație monocromatică și coerentă printr-un fenomen de emisie stimulată, numit *fenomen laser* sau *fenomen de amplificare a luminii*. Pentru a înțelege funcționarea unui laser să revedem mai în amănunt procesul de emisie stimulată. Atunci cînd un flux incident de fotoni cade pe un corp, el va găsi în mod natural o parte dintre atomi excitați, pe cale termică, deci avînd un electron pe nivele superioare de energie (W_s). Majoritatea electronilor se vor afla însă pe nivelul energetic inferior (W_t). Probabilitatea de interacțiune a unui foton cu un atom neexcitat va fi deci mai mare decît cu un atom excitat și prin urmare cei mai mulți fotoni vor fi absorbiți de atomii neexcitați. Numai fotonii care vor interacționa cu atomi excitați — o proporție redusă din cei incidenti — vor genera o emisie stimulată. Emisia stimulată va genera deci un flux mai mic de lumină decît cel incident: se poate spune că fluxul de lumină este atenuat de către corp.

Dacă dorim ca prin emisie stimulată să obținem un flux mai mare, decît cel incident, va trebui să creem artificial o excitare a corpului astfel încît numărul de atomi în starea excitată să fie *mai mare* decît cel al atomilor neexcitați. Această situație se numește *inversiune de populație*: populația atomilor excitați, în mod invers situației normale, este mai numeroasă. Inversiunea de populație se poate realiza practic prin mai multe procedee, de exemplu cu un flux de lumină, caz în care metoda se numește *pompaj optic*. Dacă, după realizarea inversiunii de populație, corpul interacționează cu un flux de fotoni, prin emisie stimulată fluxul generat va fi mai mare decît cel incident, ceea ce echivalează cu o amplificare a fluxului. Acesta este efectul laser. Fluxul de lumină generat prin efect laser are două proprietăți remarcabile: el este *monocromatic*, adică toți fotonii au aceeași frecvență și, de asemenea,

el este *coerent*, adică toți fotonii au aceeași fază, generarea lor fiind simultană. Această ultimă proprietate este specifică dezexcitării stimulate. În afara celor două proprietăți amintite, emisia laser se caracterizează prin posibilitatea generării unor fluxuri foarte mari — posibilitate asigurată de eliberarea energiei de excitare sincron de către un mare număr de atomi. De asemenea, fluxul de lumină emis poate fi obținut într-un unghi solid foarte îngust, având deci o direcționalitate precisă și o intensitate imposibil de obținut cu sursele clasice de lumină.

Pentru obținerea unui flux emergent mare de lumină este nevoie de un flux incident de stimulare a emisiei de valoare, de asemenea, mare. Deoarece un asemenea flux este dificil de obținut, se recurge la un artificiu prin care se produce, chiar prin efect laser, un flux de excitare suficient de intens. În acest scop materialul excitat se închide între două oglinzi plan paralele, realizându-se o *cavitate optică* (fig. 5.13). Inițial, prin emisie stimulată de un flux incident redus se generează un flux amplificat. Acesta va fi reflectat de oglindă și va acționa la rândul său ca flux stimulant, fiind amplificat pînă la reflexia de a doua oglindă, revenind în corp ca flux de stimulare și așa mai departe. Una din oglinzi se realizează semitransparentă, astfel încît, atunci cînd fluxul luminos atinge o anumită intensitate, el să străbată oglinda semitransparentă, devenind flux emis.

www.electronica.ro

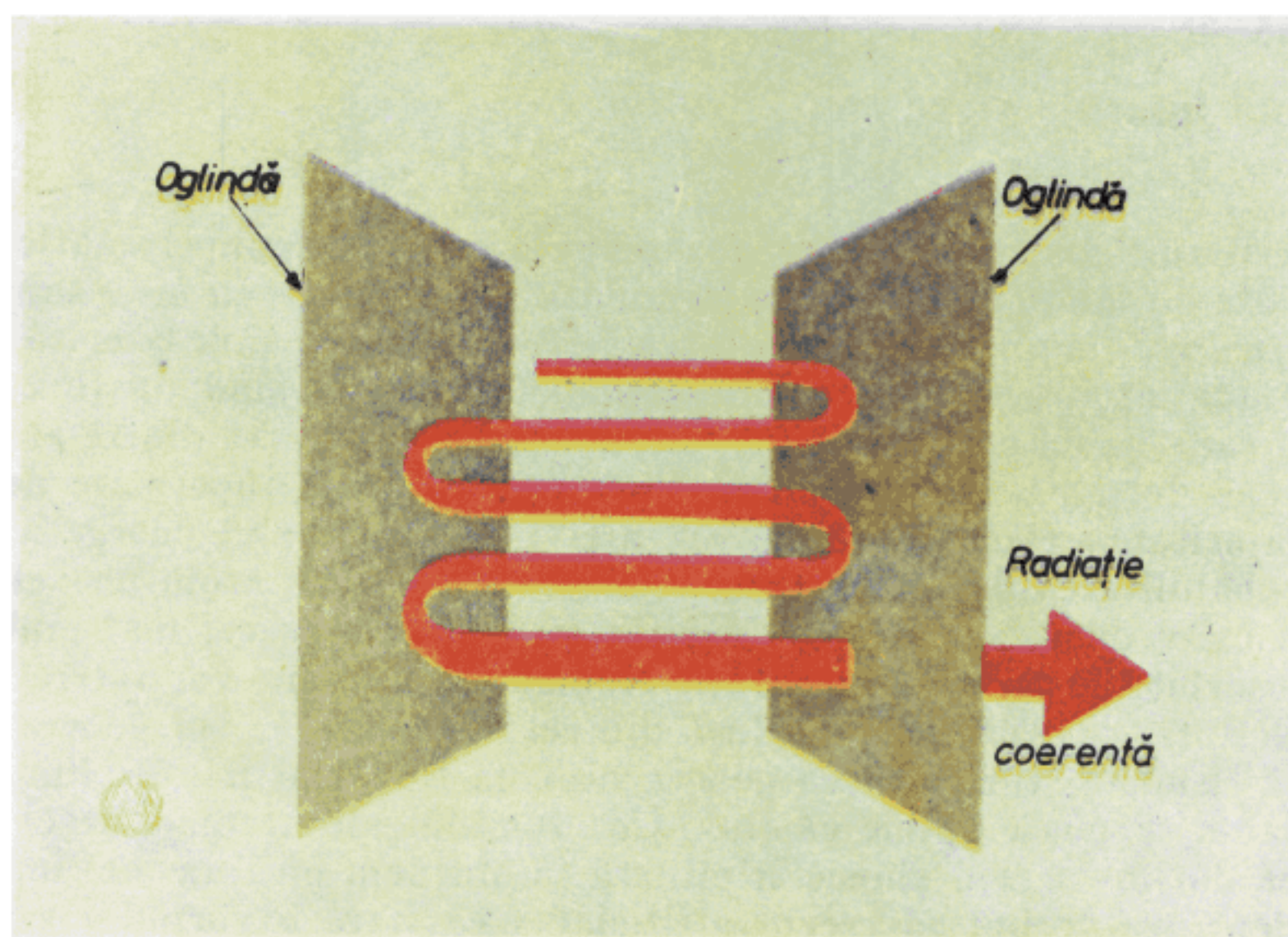


Fig. 5.13. Structura cavității optice rezonate cu oglinzi plan paralele.

Laserul cu rubin

Modul de lucru descris mai sus, în care inversiunea de populație se face prin pompaj optic, iar nivelul W_2 se află în banda interzisă, este specific laserilor cu mediu activ dielectric, de tipul laserilor cu rubin. În figura 5.14 se prezintă schematic structura laserului cu rubin și modul său de lucru; pompajul optic se realizează cu o lampă cu descărcare în xenon, spiralată și în-

chisă într-o cavitate reflectorizantă pentru creșterea randamentului de excitare. Rubinul este un monocristal de oxid de aluminiu (Al_2O_3) impurificat cu crom trivalent ($0,05\% \text{Cr}^{+3}$). Atomii de Cr sînt excitați, dezexcitarea făcîndu-se în trei moduri. Poate avea loc o tranziție spontană, neradiativă, pe un nivel intermediar W_{in} , o tranziție spontană, radiativă, de pe nivelul W_s pe nivelul W_i , precum și tranziția din starea nestabilă W_{in} pe nivelul W_i . Dacă s-a realizat inversiunea de populație între nivelele W_i și W_{in} , primii fotoni generați prin dezexcitarea $W_{in} \rightarrow W_i$ vor stimula emisia altor fotoni, producîndu-se o dezexcitare în lanț, de tipul efectului laser.

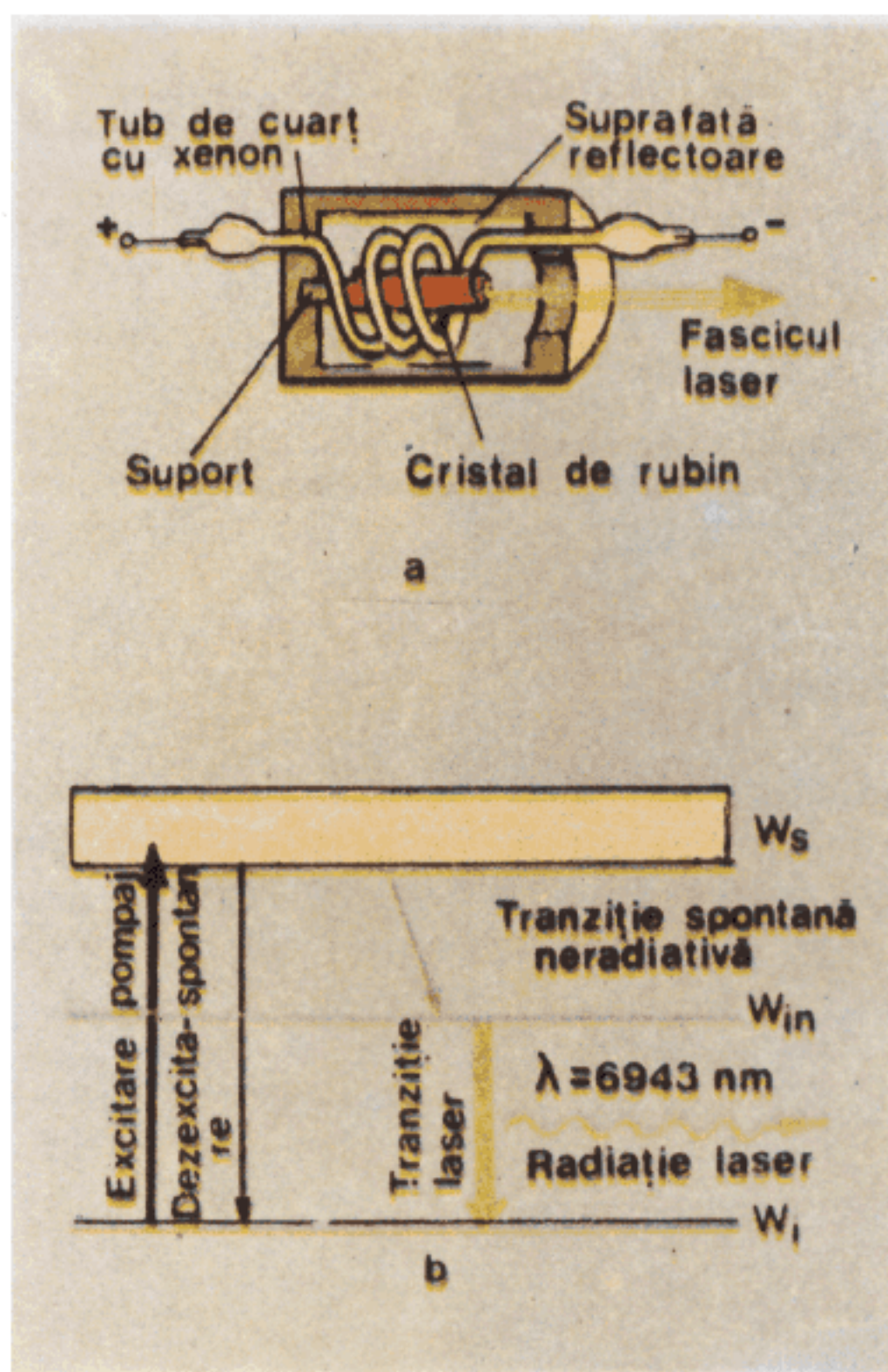


Fig. 5.14. Structura de principiu a laserului cu rubin: a) alcătuirea fizică; b) modul de lucru (excitarea-dezexcitarea).

www.electronica.ro

Laserii cu gaz

Laserii de acest tip folosesc drept mediu de emisie un gaz, uzual bioxidul de carbon (CO_2), în amestec cu heliu și azot. Proporția tipică $\text{He}:\text{N}_2:\text{CO}_2$ este 70:25:5. Excitarea moleculelor de CO_2 (inversiunea de populație) se face în cîmp electric continuu sau alternativ de radiofrecvență.

Structura unui laser cu CO_2 este ilustrată, pentru două moduri la excitație, în figura 5.15. Pompa de circulație a gazului și instalația de răcire sînt necesare deoarece aceste lasere sînt de puteri mari (sute de $\text{W} \div 10 \text{ kW}$), căldura disipată prin pierderi fiind ridicată.

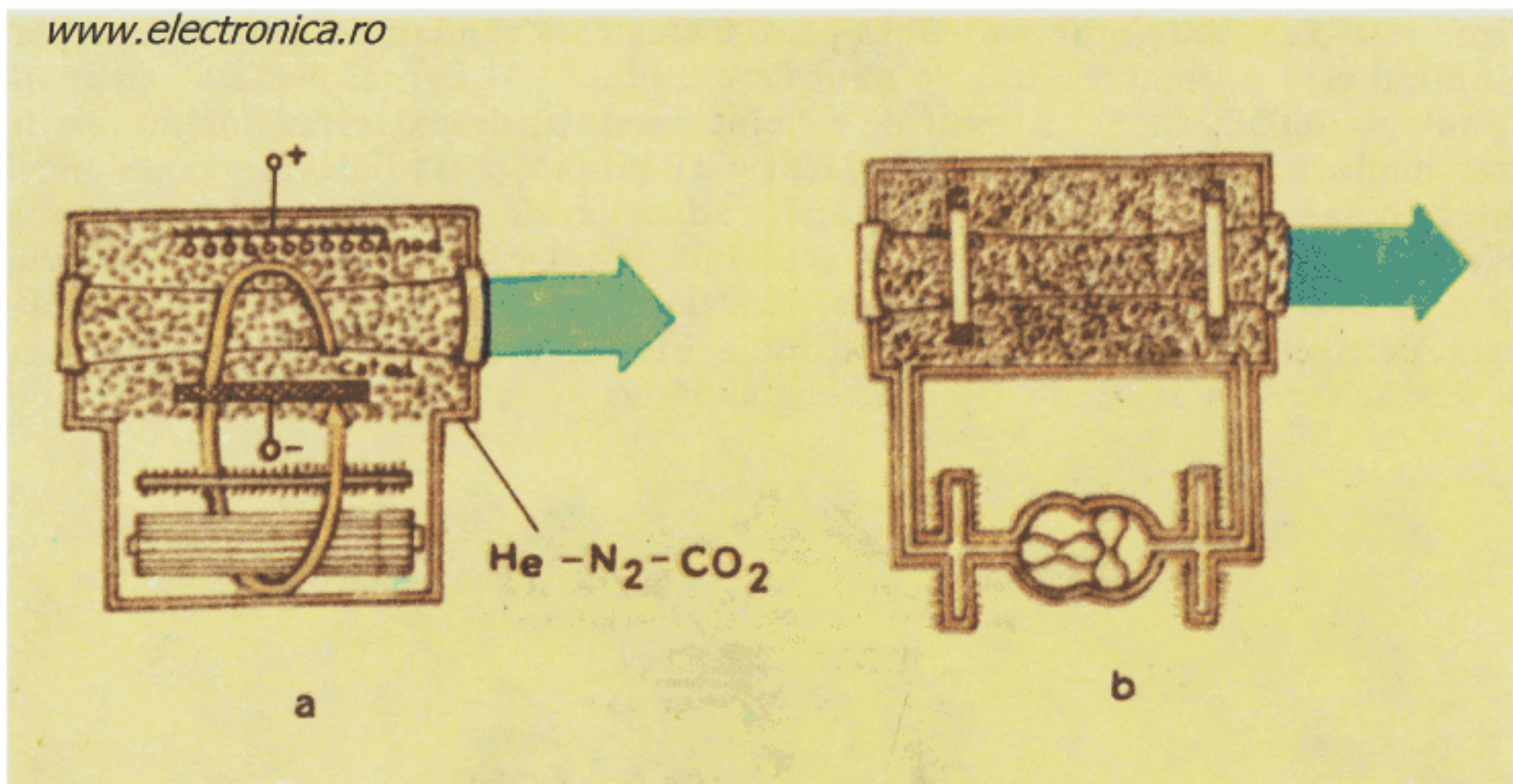


Fig. 5.15. Structura de principiu a laserului cu CO₂ pentru două moduri de excitație: a) în câmp electric transversal, b) în câmp electric longitudinal.

Laserii cu semiconductori

Laserii semiconductori se realizează uzual sub forma unor joncțiuni PN cu configurație plană, avînd suprafețele laterale perpendiculare pe zona joncțiunii, ca în figura 5.16 a, în care I_{FP} este curenții de prag (vezi mai jos). Suprafețele laterale sînt bine șlefuite, avînd rol de oglinzi delimitatoare ale cavității optice.

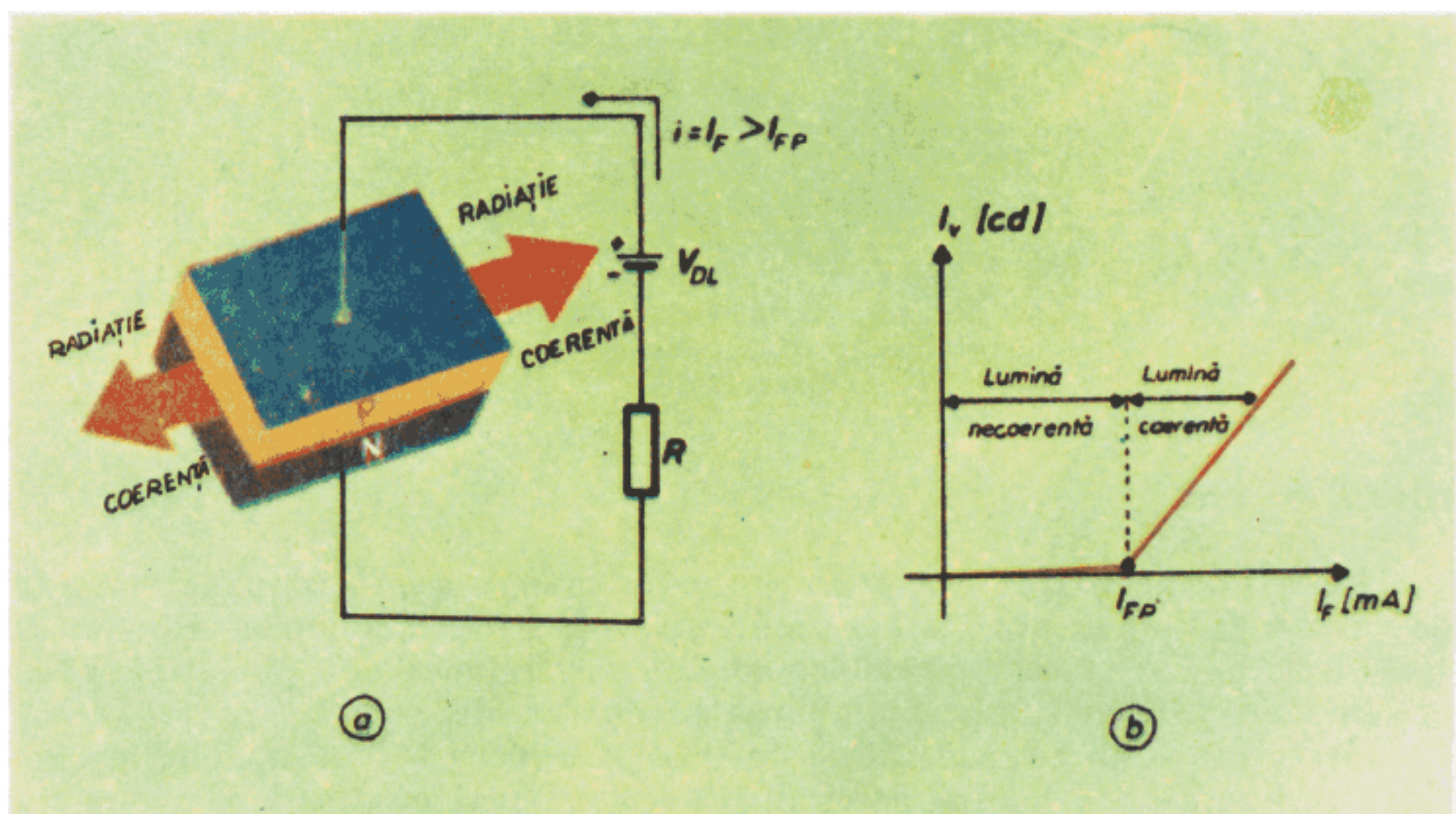


Fig. 5.16. a) Configurația unei diode laser cu geometrie plană; b) caracteristica $I_v - I_F$.

Metoda de excitare constă în injecția de curent prin joncțiune, la aplicarea unui câmp electric în sens *direct* (sensul de deschidere a diodei). În acest fel, purtătorii trec din banda de valență în banda de conducție, formându-se în jurul joncțiunii o regiune în care concentrația purtătorilor este mare. Dacă se aplică un câmp electric suficient, se formează condițiile pentru realizarea inversiunii de populație în această zonă a semiconductorului și apariției efectului laser prin recombinarea radiativă a purtătorilor. Pentru realizarea inversiunii de populație este deci necesară trecerea unui curent ridicat prin joncțiune, un timp scurt. În caz contrar, nu se realizează inversiunea de populație, iar emisia nu va fi coerentă (laser), după cum se ilustrează în figura 5.16 b.

Avantajul diodelor laser, față de alte tipuri de lasere, constă în dimensiunile lor reduse, în faptul că se realizează direct conversia din energie electrică în energie optică și în posibilitatea comenzii directe în curent.

Diodele laser se realizează pe bază de arseniură de galiu (GaAs) și a compusului derivat GaAlAs. Structura fizică efectivă este mai complicată decât cea a unei diode semiconductoare obișnuite, pentru o bună funcționare fiind necesară realizarea unei distribuții inițiale convenabile a purtătorilor ca și realizarea unui ghid de undă (lumină), echivalent cavității optice, în zona joncțiunii. Din aceste motive se utilizează fie joncțiuni tip p^+pn , fie heterojoncțiuni, adică joncțiuni realizate prin contactul a două semiconductoare diferite. Frecvente sînt diodele laser cu dublă heterojoncțiune, notate DH, formate din patru straturi de semiconductor, de tipul p-AlGaAs, n-GaAs, n-AlGaAs, n-GaAs, sau similare.

Diodele laser actuale generează radiații electromagnetice în domeniul IR, puterile fiind de ordinul 10–100 nW, curentul de prag, la care apare efectul laser fiind de ordinul 0,1–1 A.

5.3.3. DIODE ELECTROLUMINESCENTE

www.electronica.ro

Dioda electroluminescentă, pe scurt DEL, sau LED, este o diodă semiconductoare la care excitarea se produce prin injecție de curent, similar ca la dioda laser, dar fără realizarea inversiunii de populație. Lipsa necesității realizării inversiunii de populație simplifică în mare măsură cerințele de realizare privind structura și dopajul diodei. În cazul LED-urilor sînt posibile și alte tipuri de recombinări radiative decât recombinarea directă bandă de conducție-bandă de valență, ca în cazul laserilor semiconductori. Sînt frecvente LED-urile în care recombinarea se produce tot bandă-bandă, dar indirect, prin intervenția a trei particule: electronul, golul și un *fonon* (particulă care cuantizează vibrația rețelei), sau un *exciton* (particulă care cuantizează o excitare, produsă de exemplu prin deformarea rețelei). Astfel de recombinări sînt favorizate de introducerea în material a unor impurități. Prin recombinare indirectă este posibil să se producă radiație și de alte lungimi de undă decât cea specifică materialului de bază, adică diferenței de energie $W_c - W_v = \hbar\nu$. Se realizează astfel LED-uri cu emisie în IR, specifică recombinării directe, sau cu emisii de lumină roșie, portocalie, galbenă sau chiar albastră. În figura 5.17 se prezintă structura tipică, simbolul și principalele caracteristici ale unui LED. Materialele din care se realizează LED-urile și principalele performanțe obținute sînt sintetizate în tabelul 5.3.

Pentru a obține un randament cît mai bun, LED-urile se realizează pe plachete de GaAs cu substrat reflectorizant, de exemplu substrat de GaP, cu indice de refracție diferit de cel al GaAs, astfel încît coeficientul de reflexie

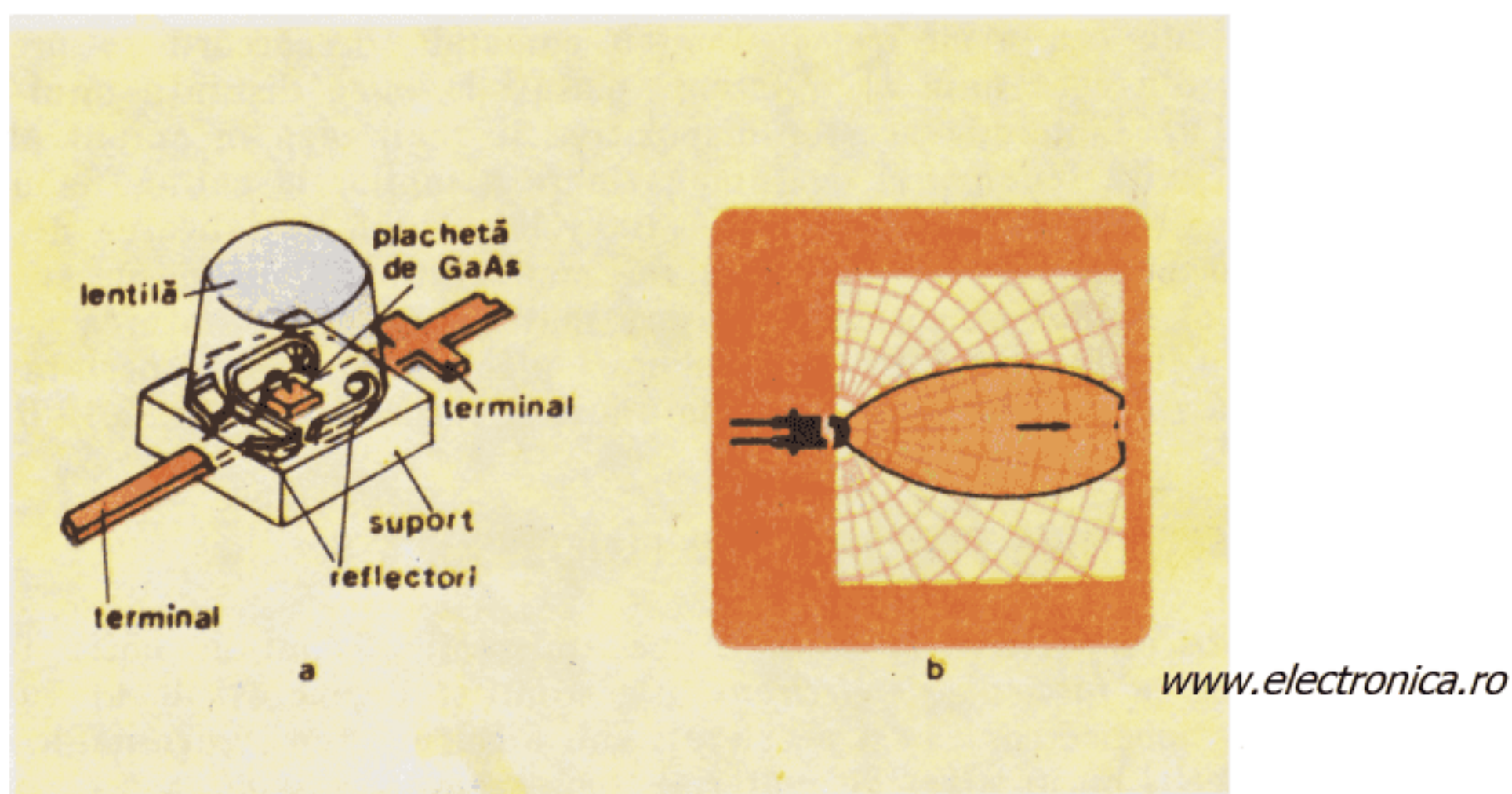


Fig. 5.18. a) Capsula utilizată pentru LED-uri și b) efectul său asupra unghiului de observare.

5.3.4. DISPOZITIVE FOTOEMISIVE CU PLASMĂ

Dispozitivele fotoemise cu plasmă se bazează pe emisia de lumină în cadrul fenomenului de *descărcare electrică în gaze*, deci pe fenomenul de excitație (ionizare) prin ciocnirea atomilor cu ioni sau electroni accelerați în câmp electric. Din această categorie fac parte și dispozitivele cunoscute sub denumirea de „tuburi NIXIE”.

În principiu, un dispozitiv fotoemisiv cu plasmă constă dintr-o incintă plată de sticlă, în care se introduce un gaz inert (de exemplu He, Ne, Ar, Kr, Xe) sau un amestec de gaze (uzual Ne 90% cu N₂, CO, N₂O etc.), la

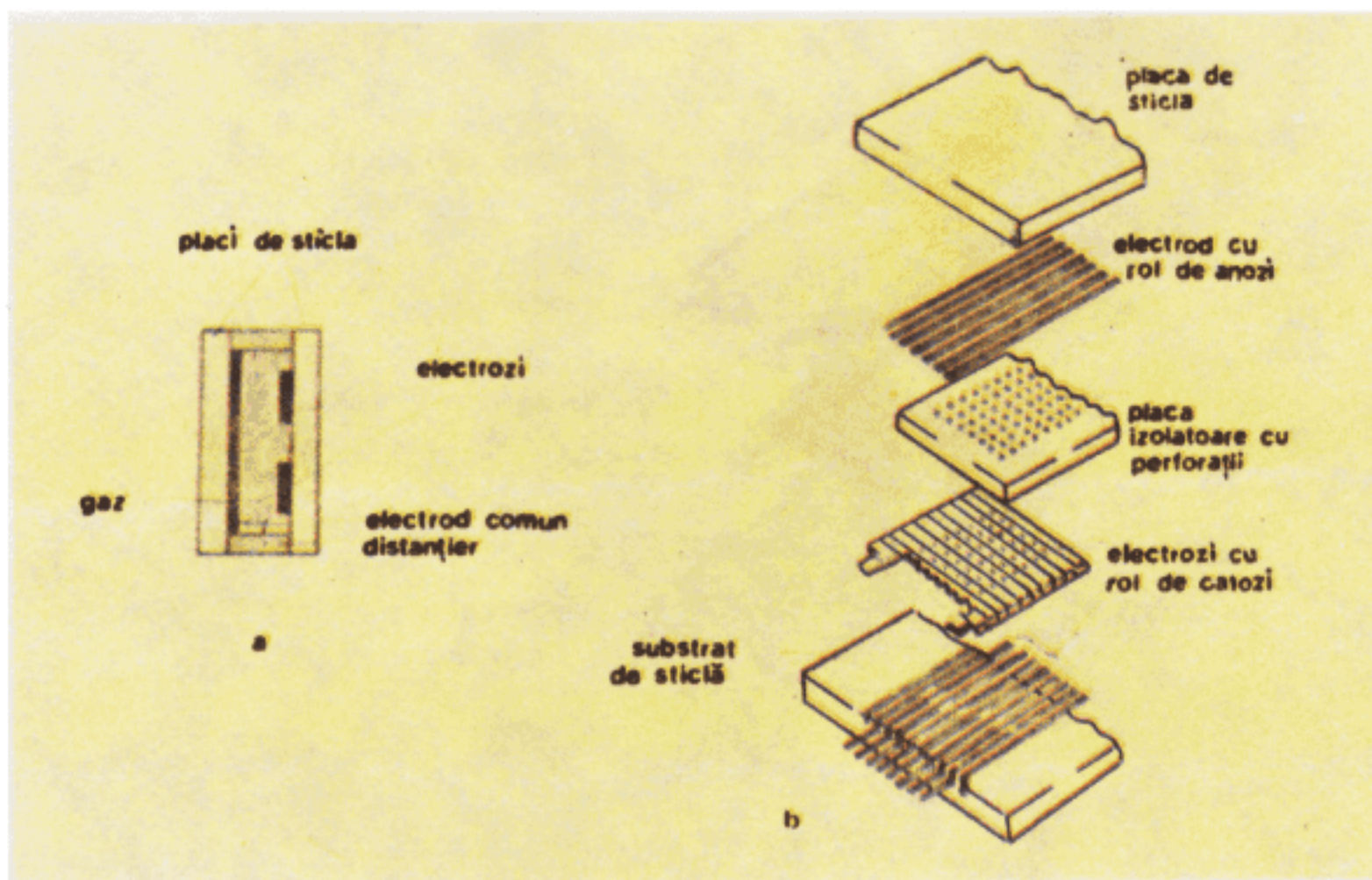


Fig. 5.19. a) Structura unui dispozitiv fotoemisiv cu plasmă; b) exemplu de afișaj fotoemisiv cu plasmă de tip material.

presiune sub cea atmosferică. Pentru comanda descărcării se prevăd doi electrozi, din care unul transparent, plasați la mică distanță unul de altul (fig. 5.19 a). Comanda acestor dispozitive se realizează în curent alternativ pentru a evita fenomenul de înmagazinare a ionilor la catod. Se utilizează frecvențe de comandă de ordinul a 100 KHz. După inițializarea descărcării, aceasta se poate menține la o tensiune mai redusă („tensiune de susținere“).

Se pot realiza structuri de afișare matriceală, prin limitarea zonelor de descărcare luminescentă cu ajutorul unei plăci izolatoare cu perforații și folosind matrici de electrozi cu rol de anodi și catodi, ca în fig. 5.19 b.

5.3.5. DISPOZITIVE FOTOEMISIVE FLUORESCENTE

Aceste dispozitive se bazează pe emisia de fotoni de către materiale bombardate cu fascicule de electroni. Electronii sînt generați de un catod cald (emisie termoelectronică) și accelerați sub influența tensiunii anodice. Anozii sînt acoperiți cu un strat de material fluorescent (*luminofor*), a cărui natură determină culoarea luminii emise (uzual verde). Dispozitivele sînt în general prevăzute și cu o grilă, cu dublu rol: de accelerare suplimentară a electronilor, pe durata cît dispozitivul este activat și de întrerupere a fasciculului de electroni la dezactivare. Întreaga structură se închide într-o incintă din sticlă, vidată (fig. 5.20 a).

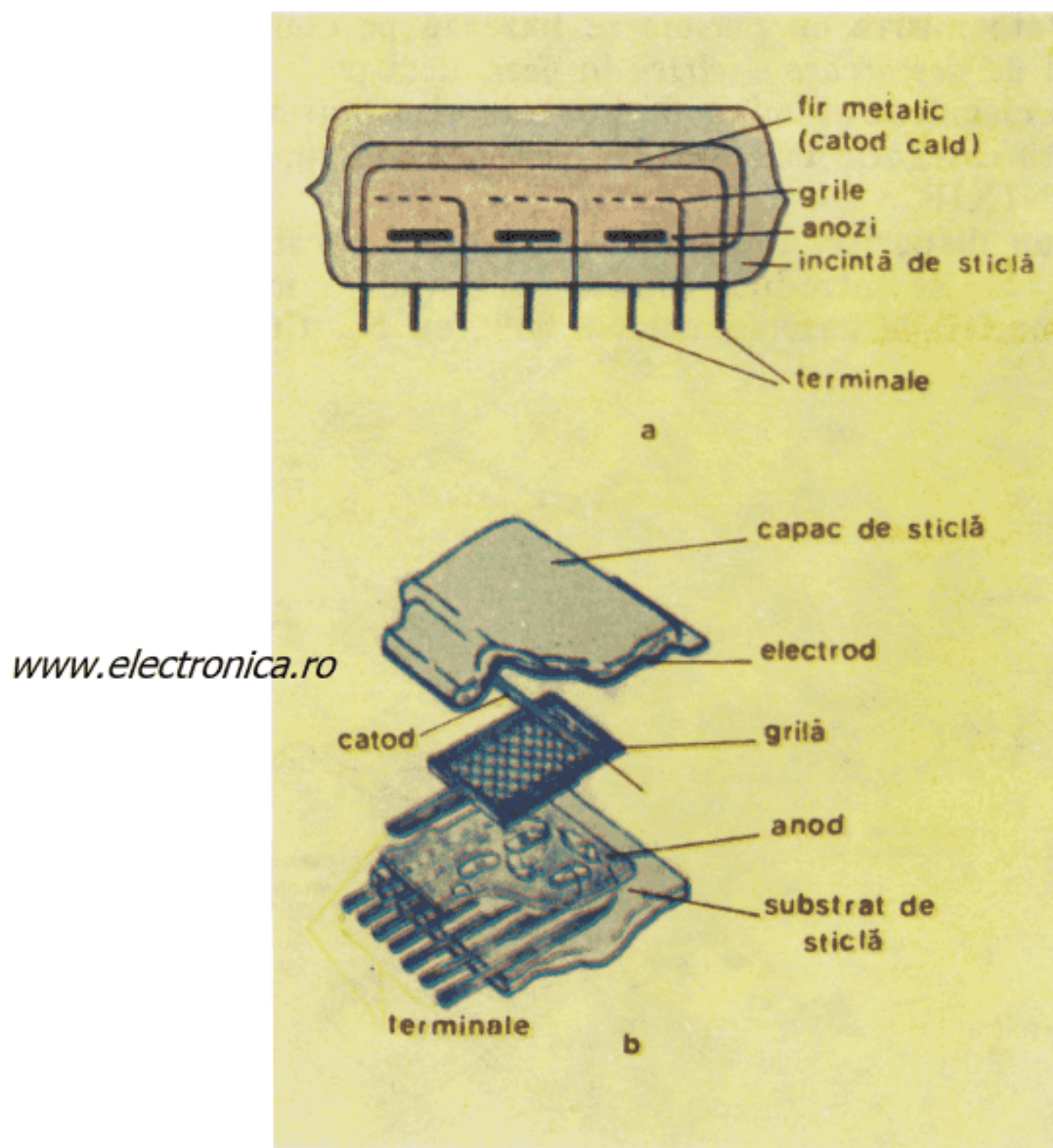


Fig. 5.20. a) Structura unui dispozitiv fotoemisiv fluorescent de tip afișaj; b) realizare practică.

Deoarece în dispozitivele de afișaj de tip fluorescent în vid se utilizează un singur catod pentru mai mulți anodi (fig. 5.20 b), pentru stingerea rapidă a descărcării, tensiunea anodică sau cea de grilă trebuie inversată (polarizare inversă), pentru blocarea fluxului de electroni.

5.3.6. DISPOZITIVE CU EFECT ELECTROLUMINESCENT INTRINSEC

Aceste dispozitive sînt bazate pe ionizarea directă, *sub influența unui cîmp electric*, a unor impurități activatoare din materialul semiconductor de bază. Ca materiale se folosesc, de exemplu, pulbere de sulfură de zinc (ZnS), impurificată cu Mn, Cu, Cl etc., înglobată într-un material dielectric pentru a reduce curentul de pierderi.

Configurația acestor dispozitive este deosebit de simplă, constînd din două plăci-suport de sticlă, prevăzute cu metalizări (din care una transparentă) pe fețele interioare, între plăci fiind închis un strat subțire din material optic activ. Eficiența de emisie este ridicată, iar spectrul luminii emise este larg, adaptat vederii umane.

5.4. DISPOZITIVE FOTODETECTOARE

www.electronica.ro

5.4.1. CLASIFICARE

Dispozitivele fotodectoare se impart în două clase: detectorii numiți fotonici sau cuantici și detectori termici.

În *fotodectorii cuantici*, radiația (lumina) interacționează direct cu electronii materialului, producînd o modificare a echilibrului purtătorilor. Ca urmare, apare o modificare a conductibilității electrice sau un cîmp electric intern. Interacțiunea foton-electron fiind instantanee, timpul de răspuns al acestor detectori este rapid, fiind limitat de efecte parazite, precum fenomenele de recombinare la revenirea în starea inițială, capacități parazite ale dispozitivului etc. Deoarece interacția electron-foton este selectivă, deci dependentă de lungimea de undă a fotonului, fotodectorii cuantici au o caracteristică spectrală de răspuns cu un maxim destul de accentuat. Lungimile de undă la care răspunsul este maxim depind puternic de materialul folosit pentru realizarea fotodectorului. Principalele tipuri de fotodectori cuantici sînt: fotodioda cu vid, fotomultiplicatorul, fotorezistența, fotodioda semiconductoare și dispozitivele derivate din aceasta din urmă (fotoelementul sau celula fotovoltaică, fototranzistorul bipolar, fototiristorul) și fotocondensatorul MOS cu dispozitivele derivate (dispozitivele cu cuplaj prin sarcină).

Fotodectorii termici se bazează pe absorbția și transformarea în căldură a radiației incidente și pe măsurarea unui parametru electric al dispozitivului (rezistență, tensiune la borne), care se modifică sub influența temperaturii. Fotodectorii termici uzuali sînt termocuplul și detectorul piezoelectric. Datorită inerției termice relativ mari, timpul de răspuns al fotodectorilor termici este ridicat, ceea ce limitează aplicațiile lor.

5.4.2. PARAMETRII PRINCIPALI

Parametrii caracteristici ai fotodetectorilor sînt definiți mai jos. În general, toți acești parametri sînt funcții de lungimea de undă a radiației incidente, depind de temperatura de lucru și diferă pentru dispozitivele din aceeași clasă în funcție de materialul din care sînt realizate și de tehnologia de fabricație.

Suprafața activă (sensibilă) reprezintă aria suprafeței prin care se recepționează radiația (lumina).

Sensibilitatea sau *responsivitatea* se definește ca raportul dintre valoarea eficace a semnalului de ieșire V și fluxul radiant incident Φ ,

$$S = V/\Phi$$

Sensibilitatea spectrală, S_λ , reprezintă funcția sensibilitate în raport cu lungimea de undă, atunci cînd S_λ se măsoară în flux incident monocromatic, de lungime de undă variabilă.

Constanta de timp de creștere reprezintă timpul în care răspunsul traductorului atinge $(1 - 1/e) \approx 63\%$ din valoarea finală a răspunsului, de la aplicarea bruscă a unui cîmp de iradiere. În mod dual se definește *constantă de timp de revenire*.

Senzitivitatea reprezintă valoarea minimă a fluxului radiant incident care produce un semnal măsurabil la ieșire.

Senzitivitatea fotodetectorilor este limitată de apariția la bornele lor a unui semnal variabil aleator, de zgomot, independent de fluxul radiant incident. Valoarea minimă a fluxului incident detectabil este cea care produce la ieșire un semnal egal cu semnalul de zgomot, motiv pentru care această valoare se numește *putere echivalentă de zgomot* (notată NEP).

Gama de liniaritate este dată de domeniul valorilor fluxului incident pentru care se obține un răspuns proporțional cu fluxul. Limita de jos a gamei liniare este dată de senzitivitate, iar limita maximă de fenomenele de saturație.

Curentul de întuneric este curentul care trece prin dispozitiv, la un flux radiant incident nul, în anumite condiții de măsură privind polarizarea electrică și temperatură de lucru.

www.electronica.ro

5.4.3. EFECTE FOTOELECTRICE

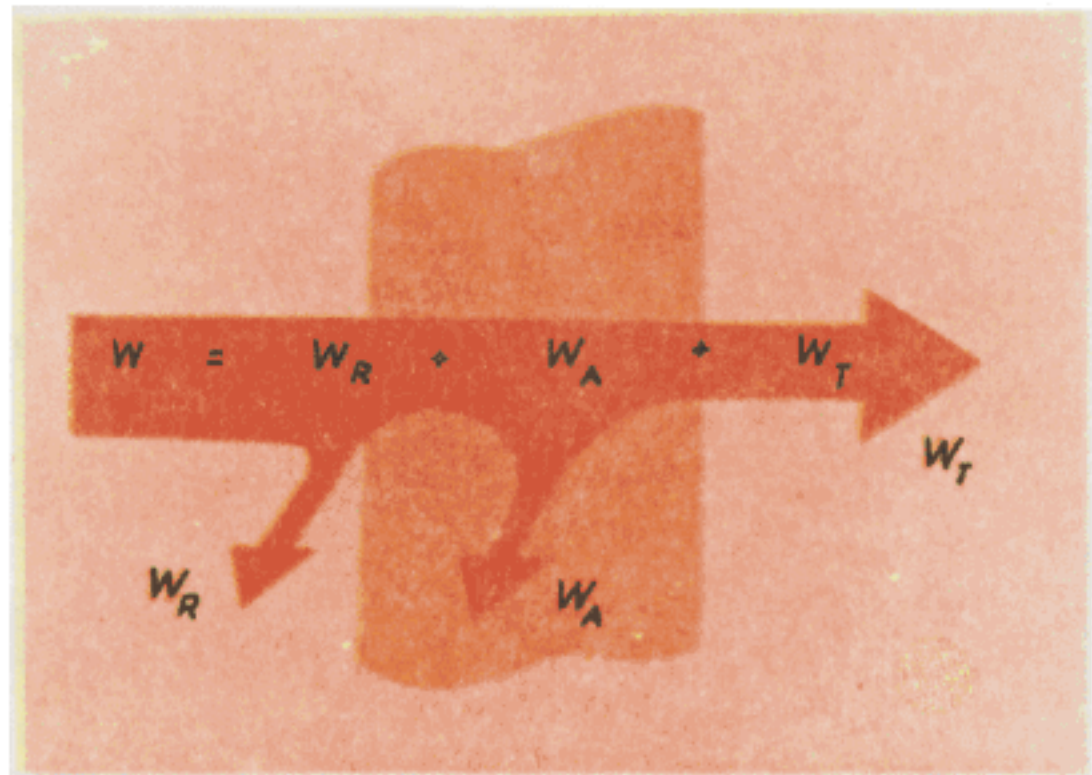
La interacția radiației electromagnetice cu un corp solid, o parte a fluxului incident se reflectă, o parte se absoarbe și eventual, la materialele transparente, o parte se transmite (fig. 5.21).

Fluxul absorbit poate contribui la încălzirea corpului sau poate genera fenomenele fotoelectrice care stau la baza detectoarelor cuantice. Există două efecte fotoelectrice, numite respectiv intern și extern.

Efectul fotoelectric *extern* constă în generarea de către material, sub acțiunea radiației, a unor electroni liberi, care se deplasează în afara corpului. Extragerea electronilor din material necesită efectuarea unui *lucru mecanic de extragere*, W_0 , a cărui valoare depinde de natura materialului. Radiația incidentă trebuie să aibă o frecvență minimă dată de relația:

$$h\nu_{min} = W_0$$

Fig. 5.21. Modelul general al interacției radiției electromagnetice cu un corp solid (W_i – energia incidentă, W_R – energia reflectată, W_T – energia transmisă, W_A – energia absorbită).



Pentru frecvențe mai mari, surplusul de energie al fotonilor se transformă în energie cinetică, W_c , a electronilor (fig. 5.22) și în energia fononilor generați simultan, W_f :

$$h\nu = W_0 + W_c + W_f \approx W_0 + W_c$$

Pentru ca electronii să nu revină pe suprafața care i-a emis, aceasta se polarizează negativ, constituind astfel un *fotocatod*.

Randamentul de extragere a electronilor este puternic dependent de frecvența radiției incidente. Pentru o frecvență ceva mai mare decât ν_{min} , randamentul crește, dar pentru frecvențe mult mai mari, $\nu \gg \nu_{min}$, randamentul începe să scadă. În fig. 5.23 se prezintă sensibilitatea S a unor fotocatozi, în raport cu λ .

Efectul fotoelectric *intern* constă în generarea, sub influența radiției electromagnetice, de purtători liberi (electroni în metale, perechi electroni-goluri în semiconductoare), alături de producerea de fononi (fig. 5.24).

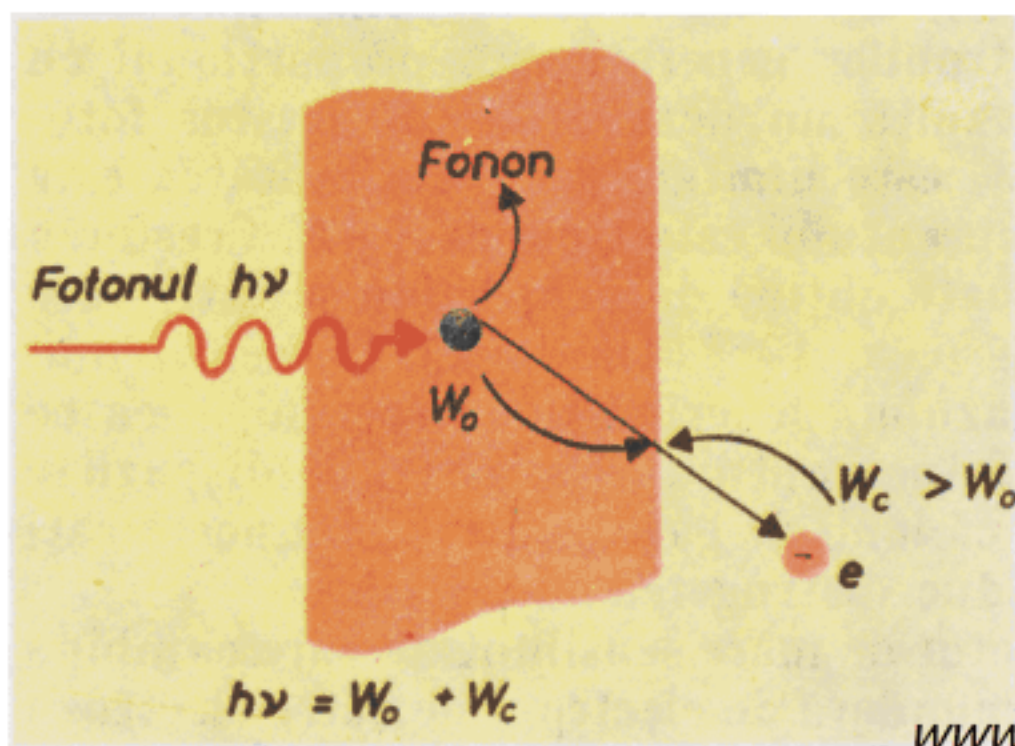


Fig. 5.22. Modelul simplificat al efectului fotoelectric extern (ejecția de electroni).

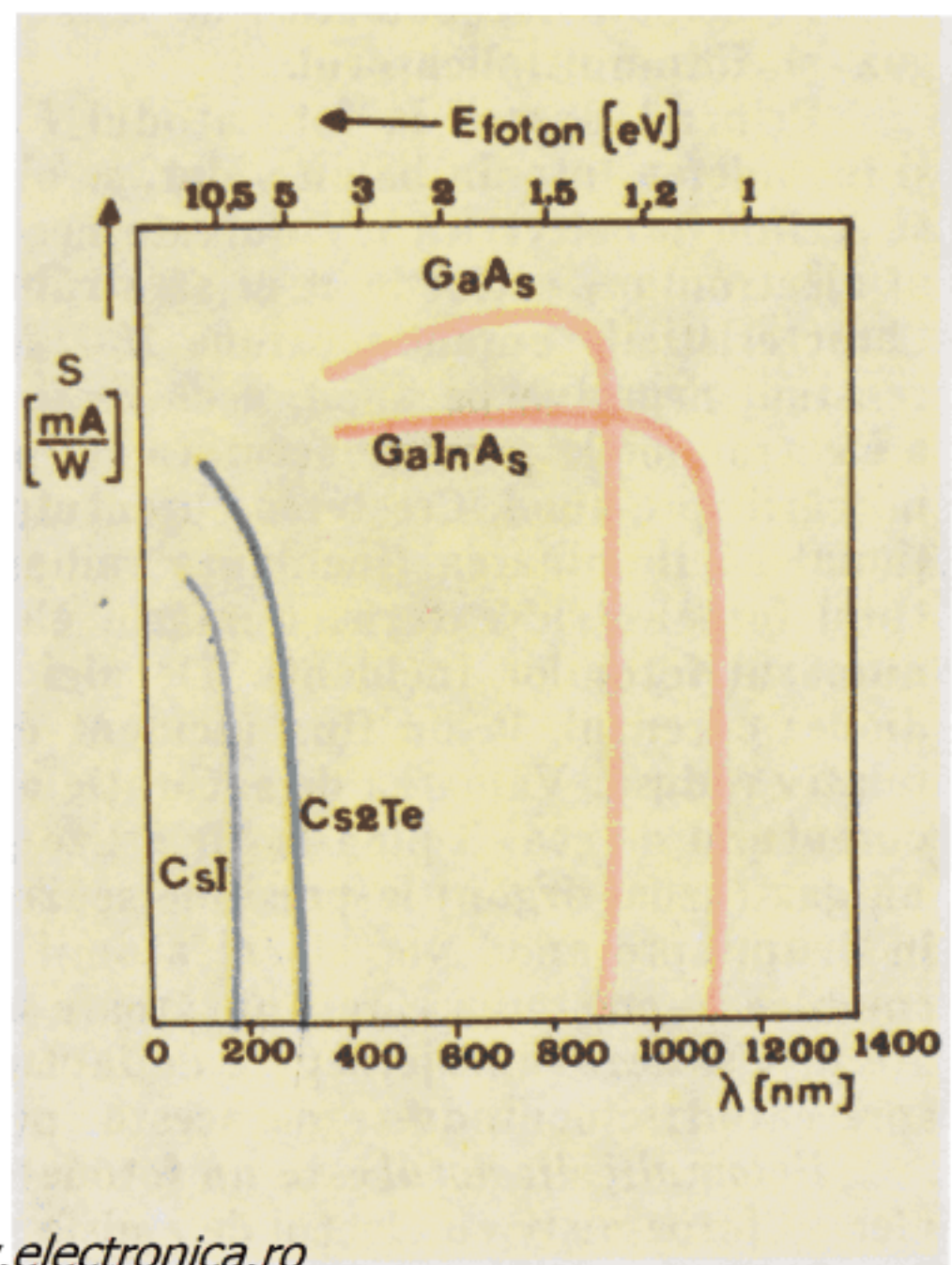


Fig. 5.23. Sensibilitatea spectrală a unor fotocatozi uzuali.

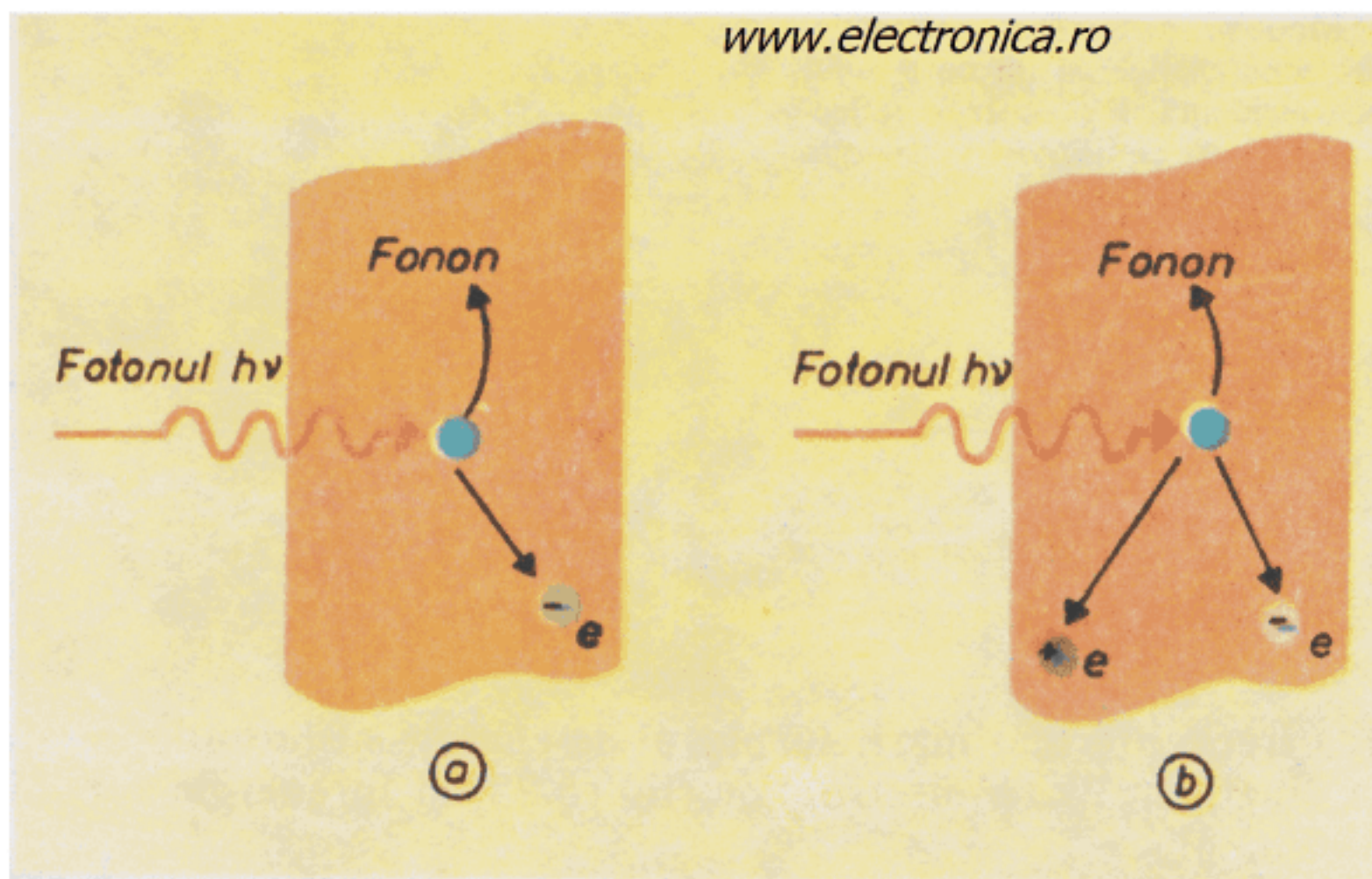


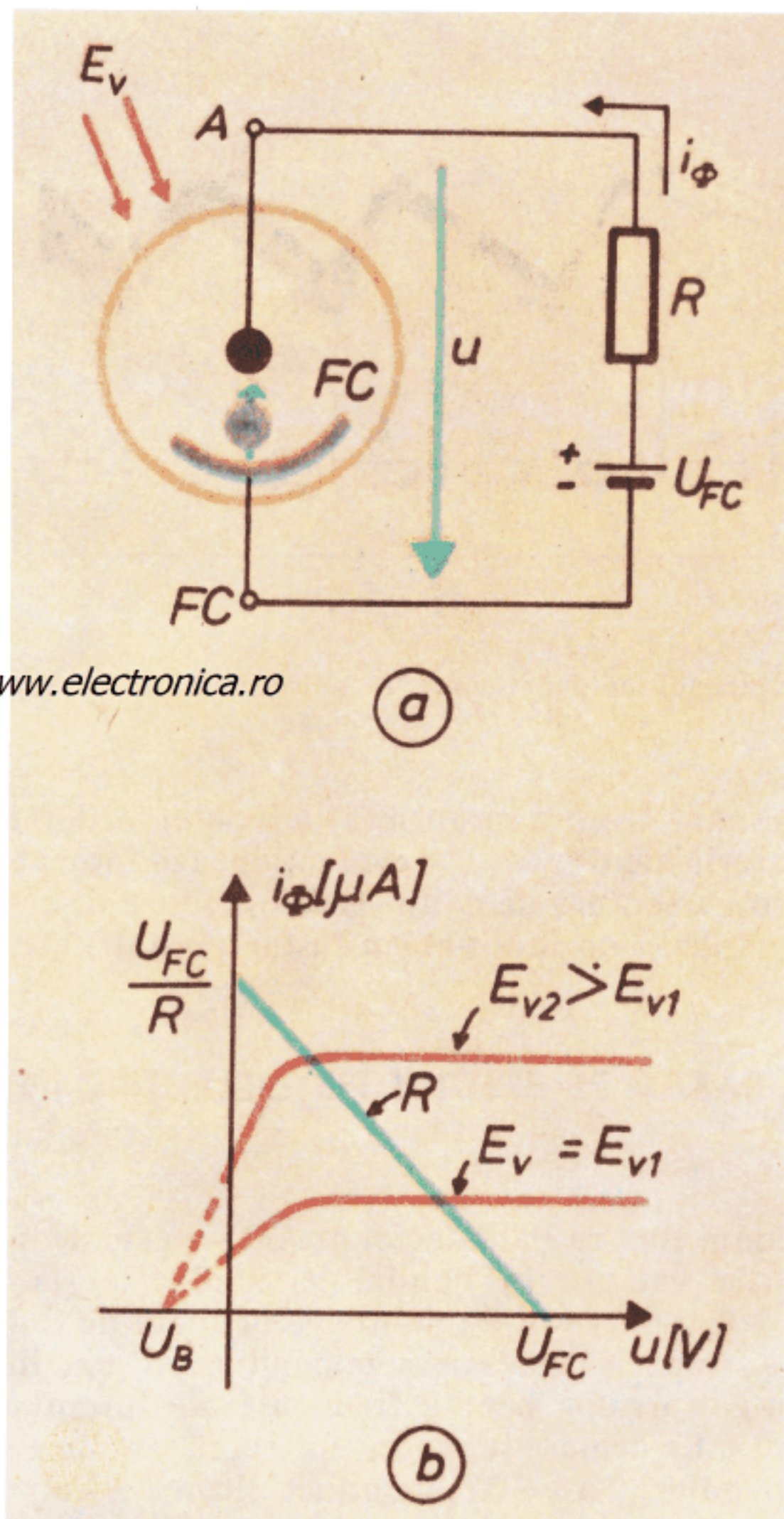
Fig. 5.24. Modelul simplificat al efectului fotoelectric intern: a) în metale, generare de electroni liberi și fotoni; b) în semiconductoare, generare de perechi electron-gol și fononi.

5.4.4. DETECTORI BAZAȚI PE EFECTUL FOTOELECTRIC EXTERN

Principalii fotodetectori de acest tip sînt fotodiada cu vid, fotodiada cu gaz și fotomultiplicatorul.

Prin adăugarea la fotocatodul FC a unui anod colector de electroni A și închiderea într-un balon vidat, se obține *fotodiada cu vid* (fig. 5.25), numită și „celulă fotoelectrică“. Vidul este necesar pentru a crește drumul liber mediu al electronilor, astfel încît ei să străbată fără ciocniri distanța pînă la anod. Caracteristicile curen-tensiune $u-i_\phi$ evidențiază un curent nenul chiar la tensiuni negative pe anod, ceea ce se explică prin faptul că energia cinetică a electronilor le permite acestora să învingă potențialul electric care se opune mișcării spre anod. Creșterea curentului, la o aceeași tensiune anodică, proporțional cu iluminarea (incidența radiantă), E_v , rezultă direct din legile efectului fotoelectric extern: numărul electronilor generați este proporțional cu numărul fotonilor incidenți. De aici rezultă un dezavantaj al acestor fotodiode: curentul, la un flux incident dat, este limitat, deci sensibilitatea este relativ redusă. Valoarea de saturație a curentului este tipic de $1 \mu A$. Creșterea curentului de cca. 3 pînă la 10 ori se poate obține dacă în balon se introduce un gaz (uzual argon) la presiune scăzută (cca 10^{-3} atmosfere). Fotoelectronii în drum spre anod vor ciocni atomii gazului, generînd noi electroni, ceea ce conduce la creșterea corespunzătoare a fotocurentului. Un astfel de dispozitiv are însă și dezavantaje, legate de faptul că ionii de gaz, pozitivi, sînt accelerați spre catod; ciocnindu-se de acesta, produc distrugerea lui în timp.

Fotomultiplicatorul este un fotodetector de mare sensibilitate care combină efectul fotoemisiv cu efectul de emisie secundară de electroni de către electrozii bombardați cu electroni primari. În acest fel, pentru fiecare foton care eliberează din fotocatod un electron, se generează, prin ciocniri repetate cu electrozi secundari numiți *dinode*, un număr considerabil de electroni liberi.



www.electronica.ro

Fig. 5.25. a) Configurația și b) caracteristicile electrice ale fotodiodei cu vid.

Pentru ca multiplicarea de electroni să aibă loc, dinodele (notate D_1, D_2, \dots) trebuie polarizate corespunzător, fiecare la o tensiune mai mare decât electrodul precedent. Aceste tensiuni se obțin de la o singură sursă, cu rezistențe înseriate (fig. 5.26). Amplificarea unui fotomultiplicator se definește ca raportul dintre numărul de electroni care ajung la anod și numărul fotonilor incidenți pe fotocatod. Pentru un dispozitiv cu 10 dinode se obține o amplificare de ordinul $10^5 \div 10^6$, funcție de tensiunea de polarizare. Creșterea peste anumite limite a tensiunii duce la creșterea zgomotului propriu. Uzual, tensiunea dintre dinode este de cca. $80 \div 150$ V, iar tensiunea anodică cca. $800 \div 1500$ V pentru un tub cu 10 dinode. Fotomultiplicatorii au răspuns spectral relativ constant din IR până în UV. Constanta de timp este de ordinul $10 - 100$ ns. Curenții anodici sînt de ordinul $0,1 - 100 \mu\text{A}$.

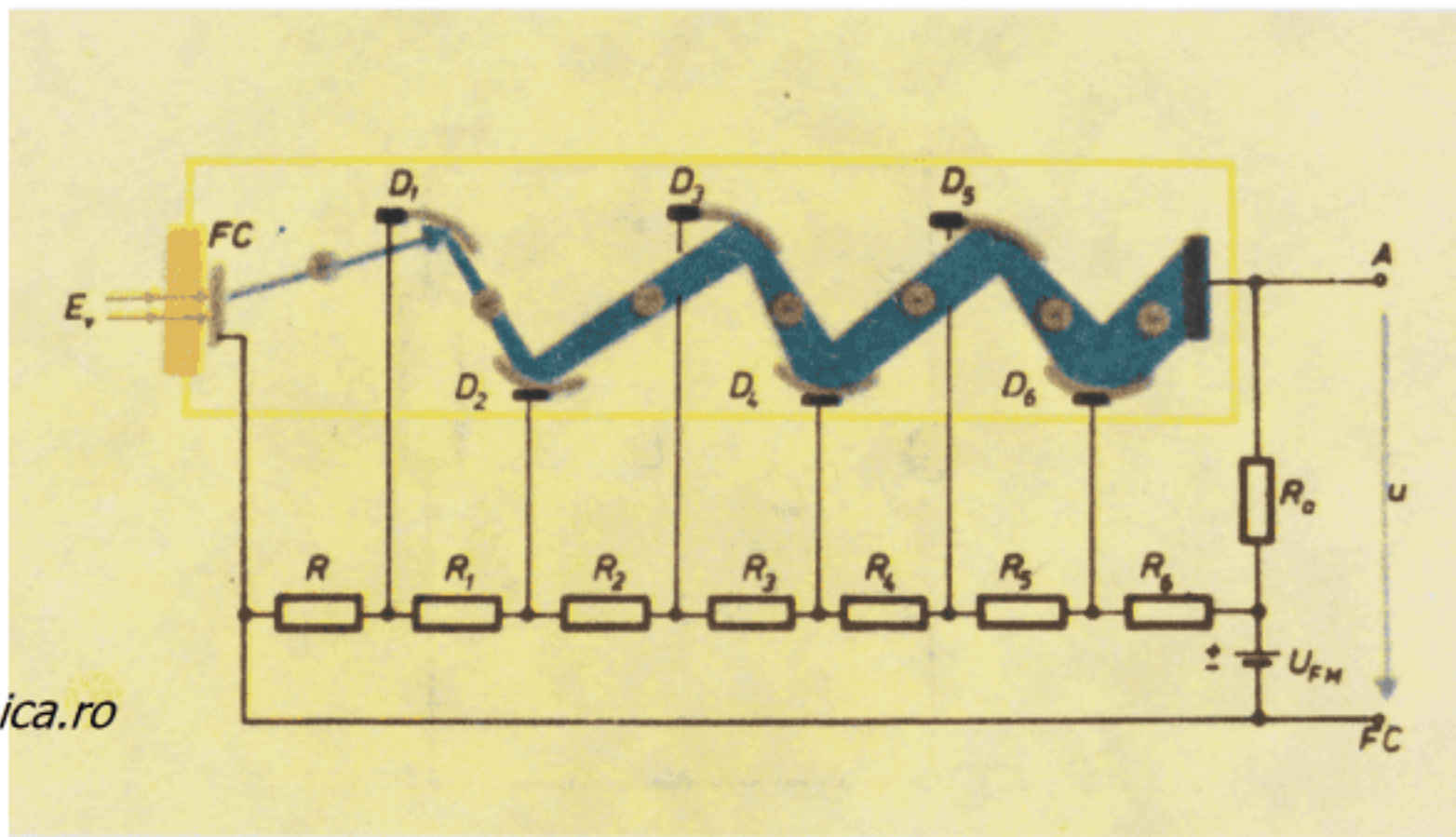


Fig. 5.26. Principiul de funcționare și polarizarea fotomultiplicatorului

Un rol determinant asupra proprietăților detectorilor cu efect fotoelectric extern îl au materialele din care se confecționează fotocatozii. Se utilizează frecvent în acest scop arseniura de galiu (GaAs), iodura de cesiu (CsI), telurura de cesiu (CsTe), complecși de indiu-arsen-fosfor (InAsP) etc.

5.4.5. DETECTORI BAZAȚI PE EFECTUL FOTOELECTRIC INTERN

Fotorezistența

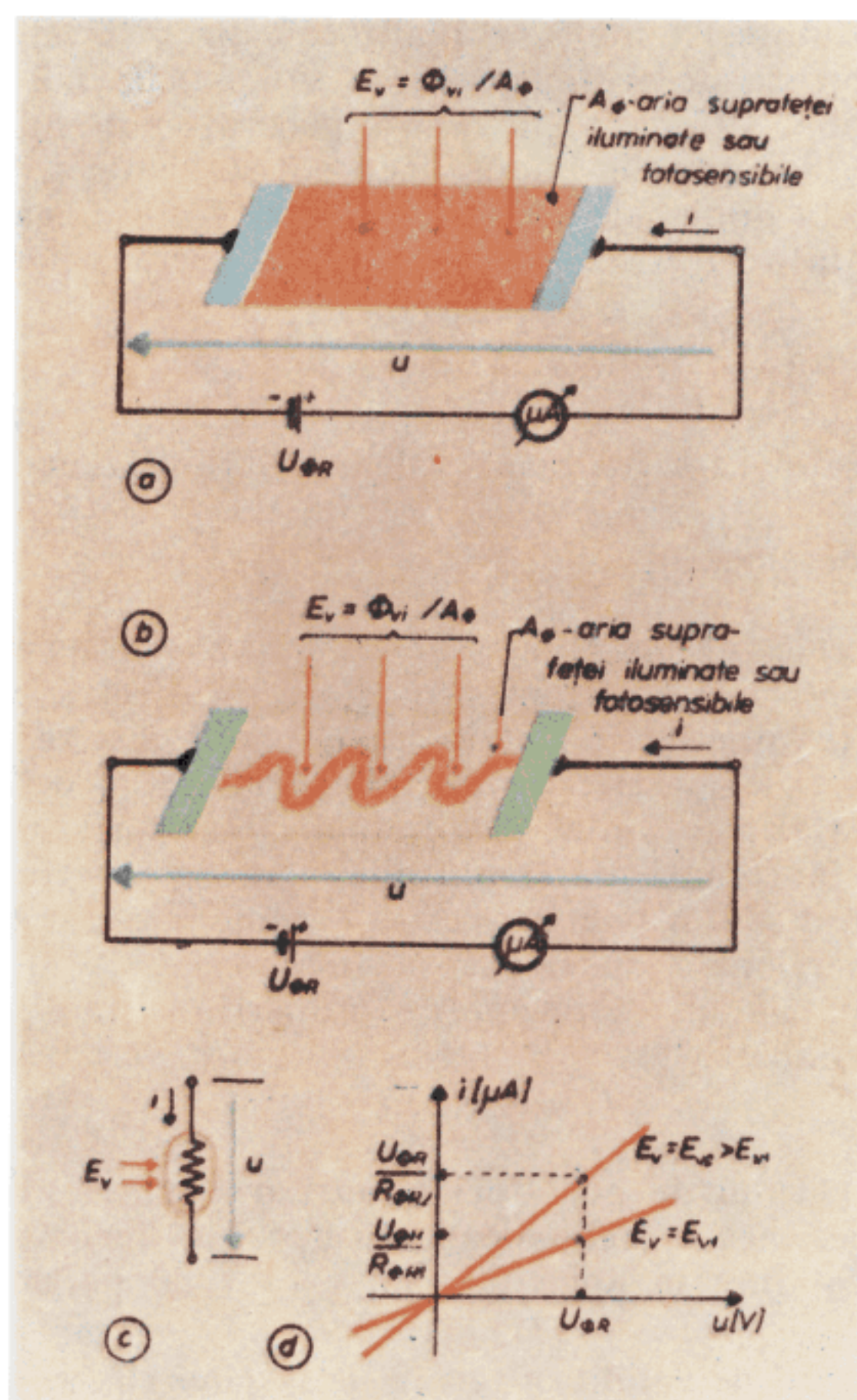
Sub influența unui flux radiant incident, într-un semiconductor se produc salturi din banda de valență în banda de conducție (la semiconductoare intrinseci, în lipsa defectelor) sau de pe nivele ocupate de impurități în banda interzisă (ionizarea impurităților în semiconductori extrinseci). Generarea de perechi electron-gol are loc pentru frecvențe ale fotonilor mai mari decât anumite valori limită. Ca urmare se produc un număr suplimentar de purtători, Δn electroni și Δp goluri, $\Delta n = \Delta p$, conductivitatea electrică devenind:

$$\sigma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p]$$

unde $n_0 = p_0$ reprezintă numărul perechilor electron-gol existente în lipsa iluminării, iar μ_n, μ_p reprezintă mobilitățile purtătorilor respectivi. Notînd cu σ_0 conductibilitatea în absența iluminării, $\sigma_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p)$, obținem: $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$, $\Delta\sigma = e(\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p \cdot \mu_p)$, termenul $\Delta\sigma$ fiind datorat iluminării. Aplicînd semiconductorului o tensiune u , ca în fig. 5.27 a, curentul prin semiconductor va avea în lipsa iluminării o valoare („de întuneric“) $i_0 = k\sigma_0 u$, k fiind o constantă de proporționalitate, iar în prezența iluminării valoarea

$$i = i_0 + k\Delta\sigma u$$

Termenul $k\Delta\sigma u = i - i_0$ reprezintă curentul „de iluminare“. Pentru fluxuri radiante incidente cu frecvențe mai mari decât valorile limită, dintr-un domeniu, Δ_ν , curentul de iluminare va fi proporțional cu valoarea fluxului. Un corp semiconductor poate fi deci folosit ca o rezistență comandată în lumină (fotorezis-



www.electronica.ro

Fig. 5.27. a, b) Configurații de fotorezistențe; c) simbolul folosit; d) caracteristicile tensiune-curent la o fotorezistență.

tență, FR). În fig. 5.27 b se prezintă o variantă constructivă uzuală de FR, iar în fig. 5.27 c simbolul FR. Caracteristicile $u-i$ ale FR sînt cele ale unei rezistențe uzuale, cu pante diferite funcție de iluminare (fig. 5.27 d).

Materialele din care se realizează uzual FR sînt: sulfura de plumb (PbS) pentru domeniul vizibil și IR, sulfura de cadmiu (CdS) sensibilă din vizibil pînă în domeniul undelor x și γ , amestecurile CdS—CdSe cu proprietăți diferite funcție de concentrația seleniurii de cadmiu (CdSe), arseniura de indiu (InAs), seleniul (Se) impurificat cu telurii (Te); în particular, pentru domeniul IR se folosesc compușii plumb-seleniu (PbSe), plumb-teluriu (PbTe) și indiu-stibiu (InSb). În general, pentru domeniul IR, în care energia fotonilor este mică, se preferă utilizarea unor semiconductori extrinseci, cu nivelele acceptoare sau donoare apropiate de banda de conducție, de tipul Ge sau Si dopat cu Au, Sb, Hg, Cu, Cd sau Zn.

Dezavantajele principale ale fotorezistoarelor sînt: dependență puternică (exponențială) de temperatură (specifică oricărui rezistor semiconductor), timpi mari de răspuns și revenire, stabilitate redusă.

Constructiv, fotorezistențele se realizează cu o lățime a zonei active, delimitată de electrozi, de ordinul a 1 mm. Această formă constructivă este adaptată convenabil, deoarece purtătorii generați sub influența iluminării contribuie efectiv la conducție numai dacă pot străbate, pe durata lor medie de viață, τ , distanța dintre electrozi. Dacă U este tensiunea aplicată pe electrozi, d distanța dintre electrozi și μ mobilitatea purtătorilor, viteza lor va fi:

$$v = \mu U/d$$

Distanța dintre electrozi trebuie să fie astfel încît

$$d \approx \mu \tau U$$

sau: $\mu U \tau \approx d^2$, relația care limitează valoarea lățimii zonei active.

Fotodioda și fotoelementul

Într-o diodă a cărei joncțiune este iluminată, se generează în zona de sarcină spațială goluri și electroni prin efect fotoelectric intern. Purtătorii majoritari generați fotoelectric sînt în număr mult mai redus decît cei existenți în structura fizică, astfel încît contribuția lor la determinarea valorii barierei de potențial va rămîne neglijabilă. Purtătorii minoritari generați fotoelectric vor fi antrenați de cîmpul din regiunea joncțiunii, producînd un curent invers prin diodă. Valoarea acestui curent, măsuraț la scurtcircuitarea diodei, este proporțională cu incidența luminoasă E_v , și aria joncțiunilor A_Φ , la care se adaugă un coeficient de proporționalitate S_Φ care exprimă eficiența detectorului:

$$I_L = S_\Phi A_\Phi E_v$$

Datorită curentului de purtători minoritari, pentru înălțimea barierei de potențial scade, ceea ce echivalează cu apariția unei polarizări U în sens direct. Aceasta conduce la apariția unui curent de purtători majoritari

$$I_M = I_s \exp(eU/kT),$$

unde I_s este curentul de echilibru termic, e sarcina electronului, k constanta lui Boltzman iar T temperatura absolută.

Curentul total prin joncțiune, obținut prin sumarea curentului de purtători minoritari și a celui de purtători majoritari, va fi:

$$I_\Phi = -(I_L + I_s) + I_M$$

deci

$$I_\Phi = I_s [\exp(eU/kT) - 1] - I_L$$

Deoarece s-a presupus că U este tensiunea care apare pe diodă în lipsa oricărei influențe externe (fără iluminare), condiție care se satisface dacă fotodioda este lăsată în circuit deschis, ($U = U_{CD}$), curentul de mai sus trebuie să nu fie nul. Se obține astfel, din ecuația de mai sus, impunînd $I_\Phi = 0$:

$$U = U_{CD} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_s} \right)$$

Relațiile de mai sus rămîn valabile și dacă U se înlocuiește cu valoarea unei tensiuni aplicate din exteriorul diodei. Se observă că dacă tensiunea U pe diodă este nulă ($U=0$), se regăsește expresia curentului de scurtcircuit, $I_\Phi = -I_L$.

Rezumînd, se poate spune că particularitățile de funcționare ale unei fotodiode sînt următoarele:

— în scurtcircuit apare un curent invers, a cărui valoare este proporțională cu incidența luminoasă;

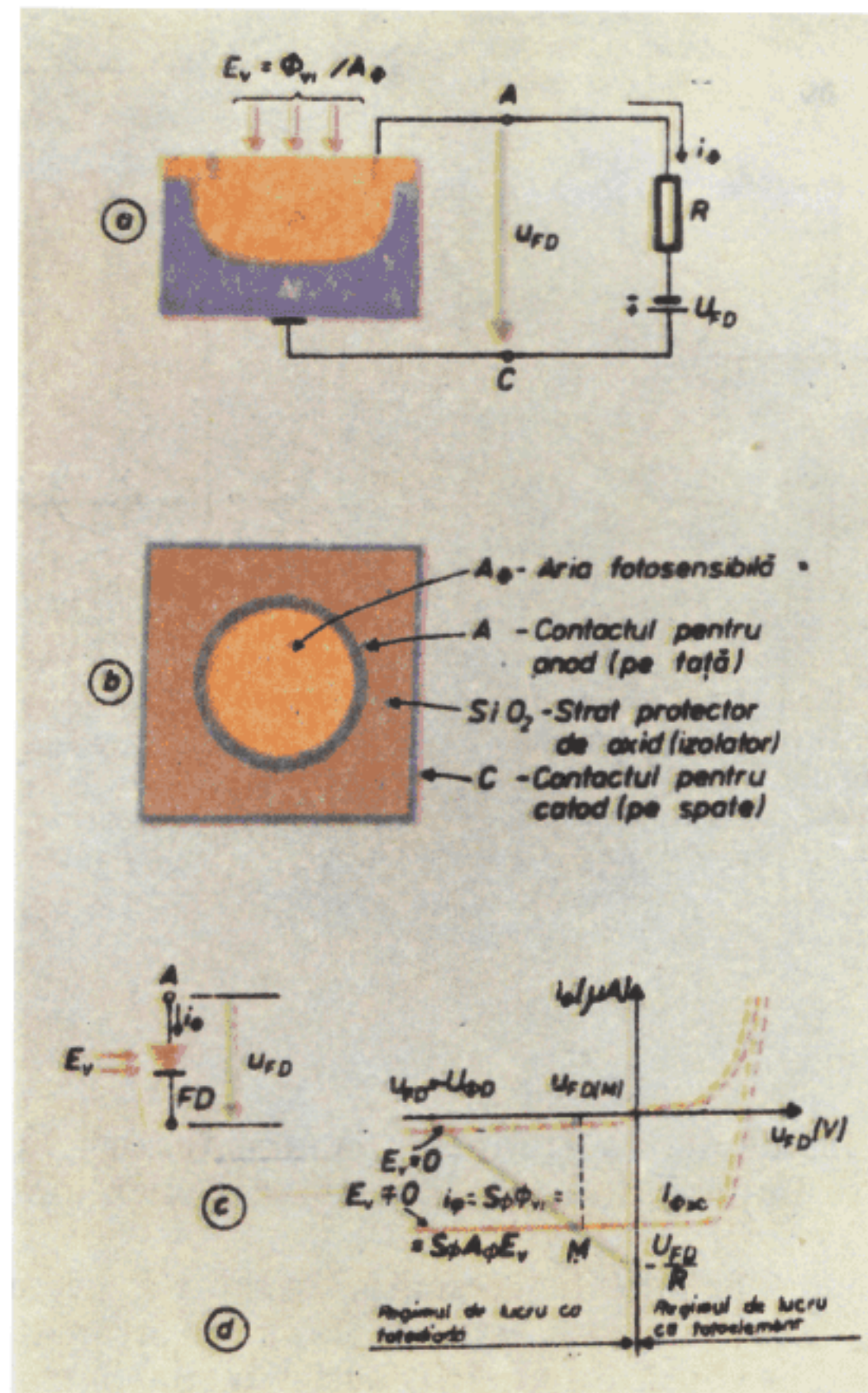
— la polarizare inversă, curentul invers este dat, în principiu, de purtătorii (minoritari) generați optic ($I_s \ll I_L$), valoarea curentului fiind practic independentă de tensiune și proporțională cu logaritmul incidenței luminoase:

$$U_{CD} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_s} \right) \approx \frac{kT}{e} \ln \frac{I_L}{I_s} = \frac{kT}{e} \ln \left(E_v \frac{S \Phi A \Phi}{I_s} \right).$$

În polarizare inversă, dispozitivul lucrează în regim de *fotoiodă*, iar în lipsa polarizării — în regim de *fotoelement*.

În fig. 5.28 a se ilustrează schematic, în secțiune, structura unei fotodiode, iar în fig. 5.28 b, se indică o vedere de sus a dispozitivului. Figura 5.28 c, reprezintă simbolul fotodiodei, iar în fig. 5.28 d, sînt reprezentate comparativ caracteristicile fotodiodei la $E_v = 0$ (diodă normală) și la $E_v \neq 0$.

Figura 5.29 ilustrează structura și utilizarea unei fotodiode, cu arie mare a regiunii active, în regim de fotoelement, iar în fig. 5.30 se prezintă caracteristicile $U_\Phi(E_v)$ și $I_\Phi(E_v)$, pentru două valori ale rezistenței de sarcină R_L .



www.electronica.ro

Fig. 5.28. a) Structura unei fotodiode (în secțiune) și modul de conectare în circuit; b) configurația unei fotodiode (vedere a suprafeței active); c) simbolul fotodiodei; d) caracteristicile electrice.

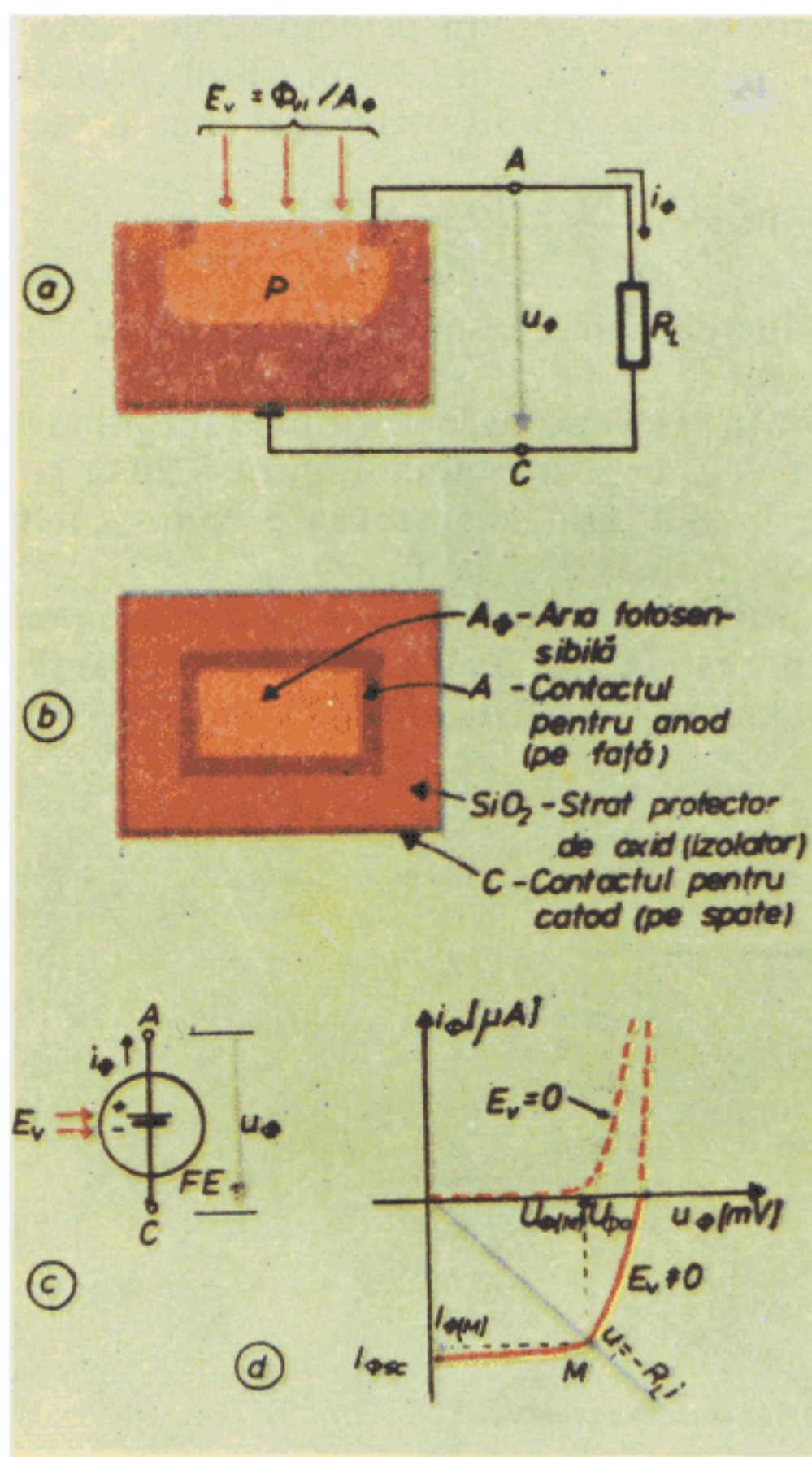


Fig. 5.29. a) Structura unui fotoelement și modul de conectare în circuit; b) vedere a suprafeței active; c) simbolul fotoelementului sau al celulei fotovoltaice; d) caracteristica $i-u$ tipică, cu E_v ca parametru ($E_v \equiv 0$ și $E_v \neq 0$)

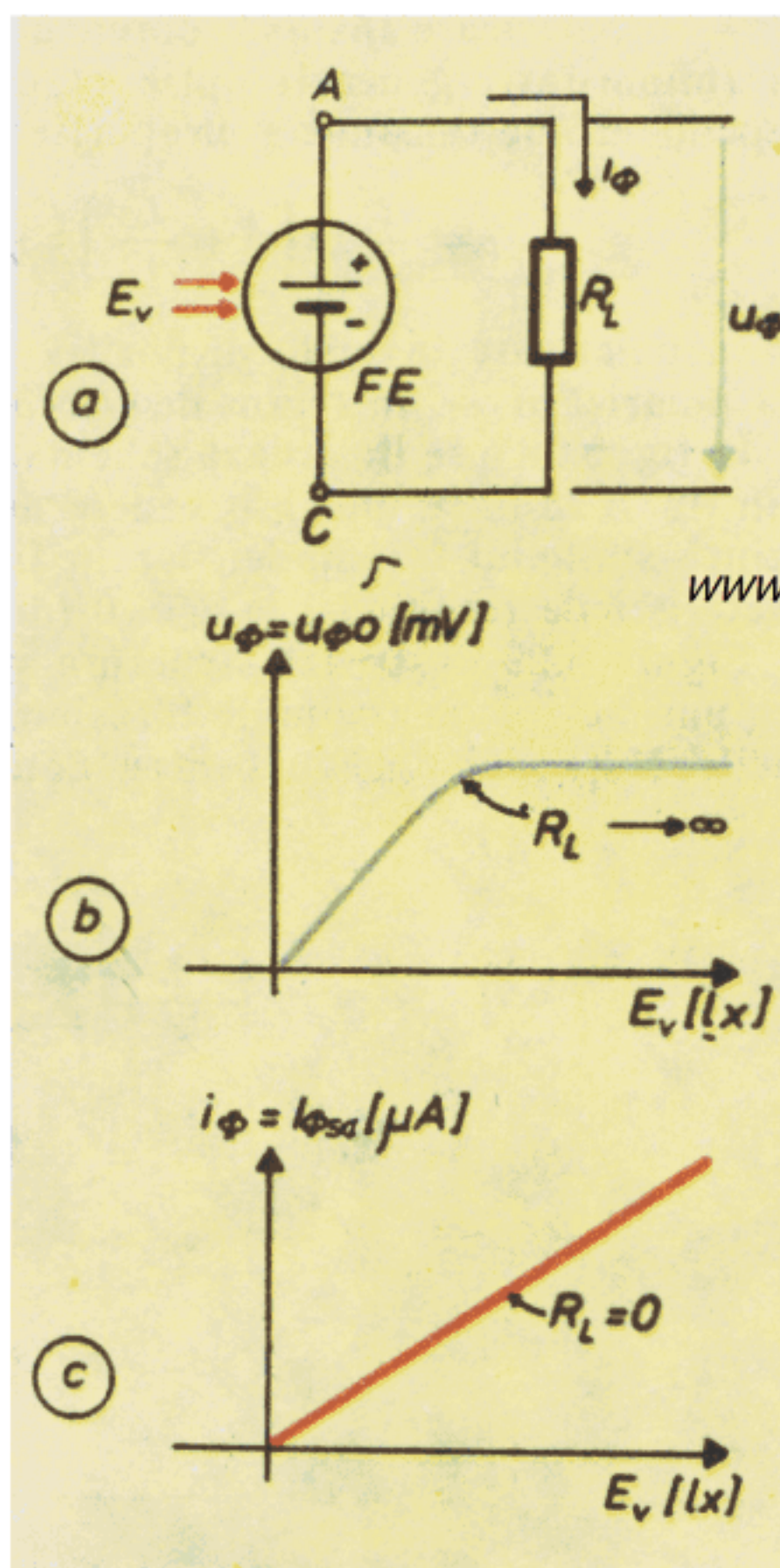


Fig. 5.30. Principalele caracteristici electrooptice ale unui fotoelement; a) modul de conectare a sarcinii; b) caracteristica $U_\Phi - E_v$ fără sarcină; c) caracteristica $I_\Phi - E_v$ în scurtcircuit.

Fototranzistorul

Sensibilitatea fotodiodei ca traductor pentru fluxuri luminoase este relativ scăzută, ceea ce impune, în cazul unor fluxuri mici, amplificarea semnalului de ieșire.

Un dispozitiv cu sensibilitate crescută, bazat tot pe o fotodiodă, este **fototranzistorul** (fig. 5.31). Acesta este de fapt un tranzistor cu regiunea joncțiunii bază-emitor expusă iluminării, astfel încât controlul potențialului bazei să fie realizat prin incidența luminoasă E_v . Prin urmare, la un fototranzistor terminalul (conexiunea) bazei poate lipsi, sau poate fi prevăzut în scopul asigurării unui control suplimentar al curentului de colector. Caracteristicile electrice ale fototranzistorului sînt similare celor de tranzistor (fig. 5.31 d), cu deosebirea că parametrul caracteristicilor este E_v în locul tensiunii U_{BE} .

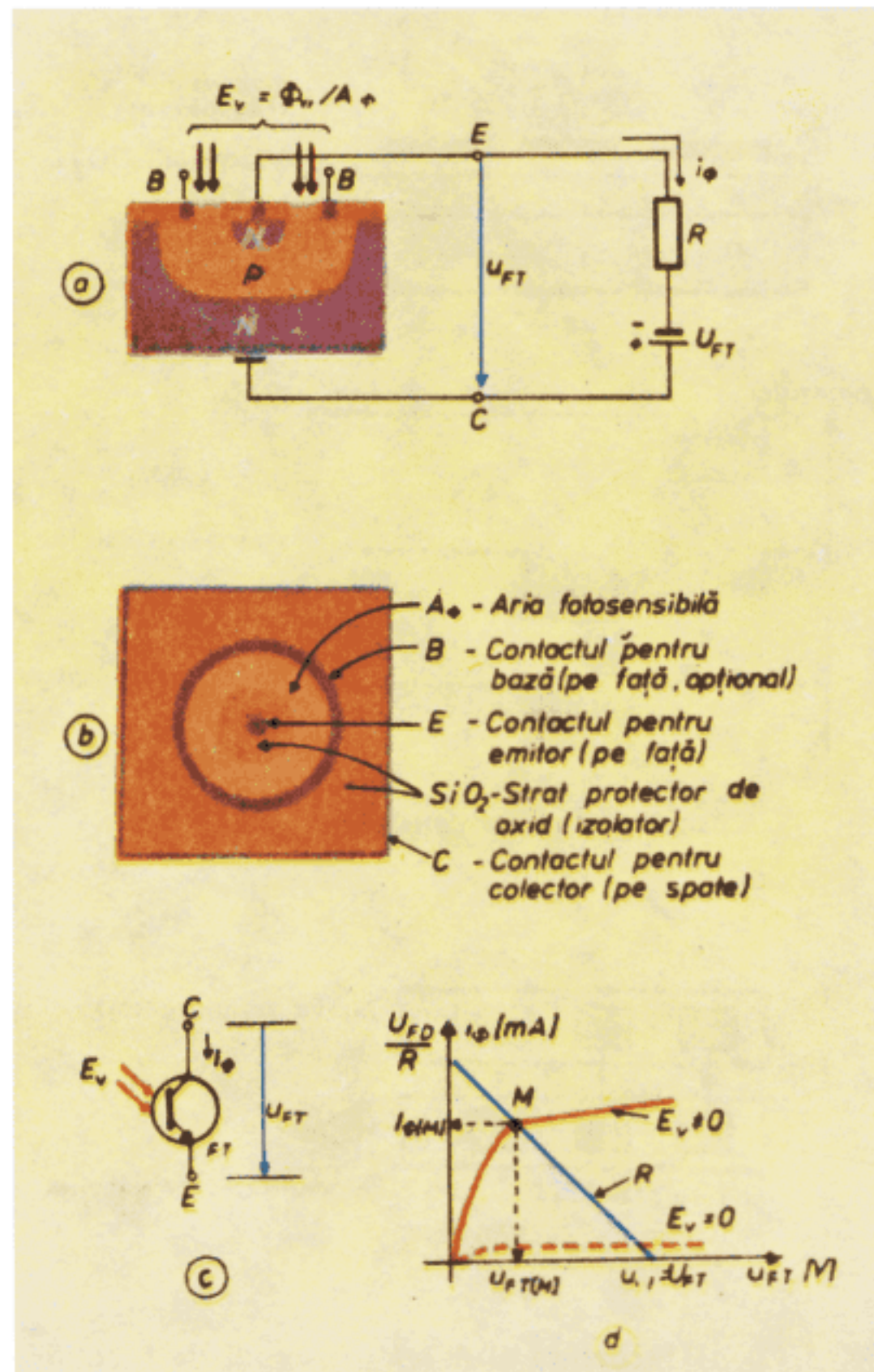


Fig. 5.31. a) Structura (în secțiune) a unui fototranzistor (FT); b) vedere de sus; c) simbol; d) caracteristici i - u tipice, cu E_v parametru ($E_v=0$ și $E_v \neq 0$).

www.electronica.ro

Detectori cu cuplaj prin sarcină

Detectorii cu cuplaj prin sarcină, numiți și detectori CCD, sînt constituiți din șiruri de condensatoare MOS realizate în aceeași structură semiconductoră și cuplate electric între ele astfel încît transferul sarcinii să se poată face secvențial de la unul la altul. Sarcina este generată în structura pn de sub condensatorii MOS constituiți din electrozi, stratul izolator de SiO_2 și semiconductor (fig. 5.32). Fiecare element CCD, constituit din cîte un detector transparent și regiunea de sub el, formează un element fotosensibil care transformă valoarea incidenței radiante (luminoase) într-o valoare proporțională de sarcină. Avantajul structurii este că citirea valorii de sarcină se poate face secvențial, la un capăt al șirului de traductori, fără să se utilizeze alte circuite de citire.

Pentru citire se procedează la *transferul* sarcinii, de exemplu de la stînga la dreapta, ca în fig. 5.32 b, prin aplicarea unei tensiuni $V_2 < V_1$. Operația se repetă pînă cînd sarcina ajunge la ultima celulă, de unde este preluată de un amplificator de sarcină și transformată într-un semnal de tensiune. Structura

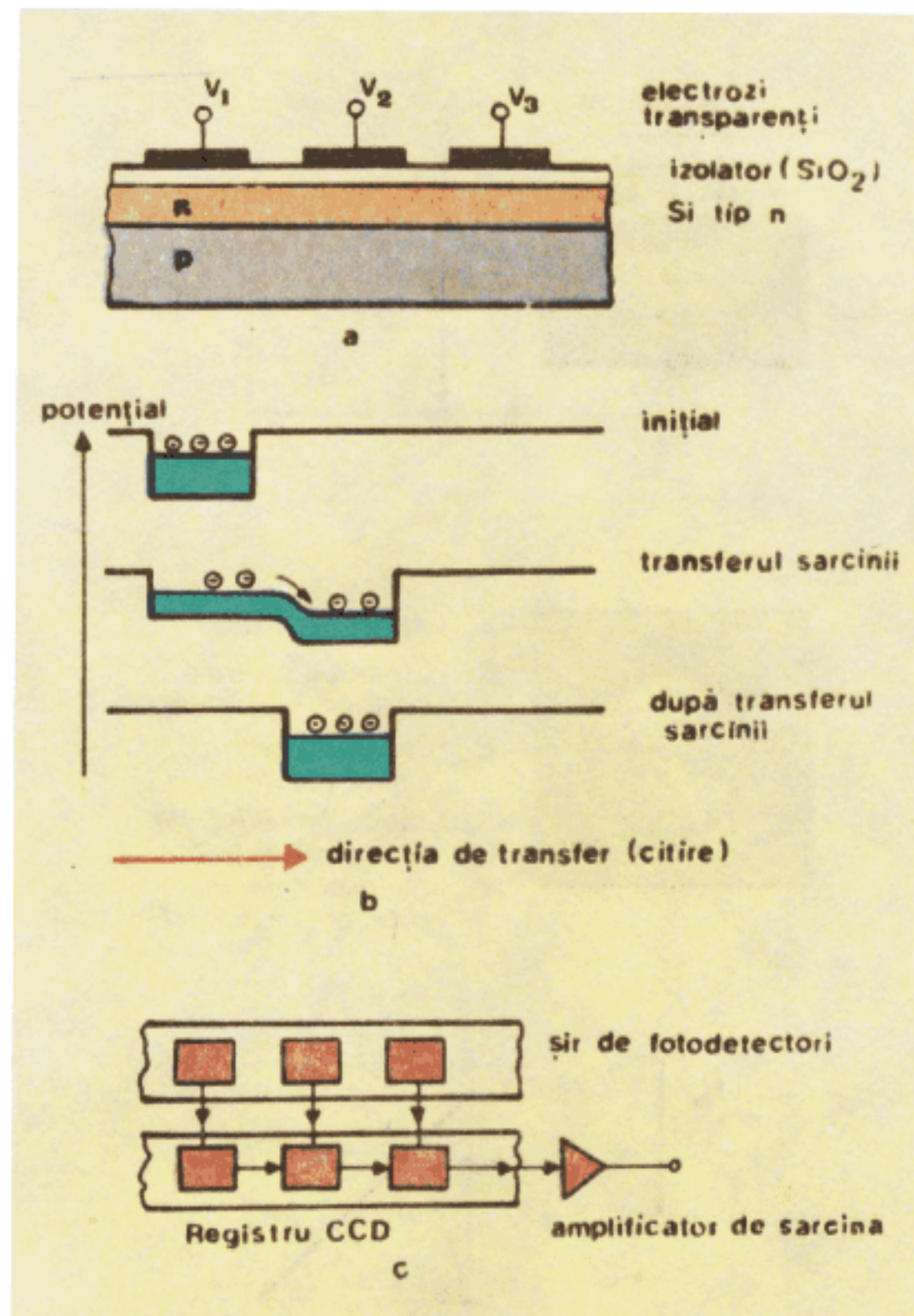


Fig. 5.32. a) Structura și b, c) principiul de funcționare a unei rețele de fototraductori cu cuplaj prin sarcină (CCD).

prezentată se comportă deci similar cu un șir de electroni generați optic (fotoelectroni) și un registru de deplasare (de sarcină).

Dezavantajul structurii este că în timpul transferului de sarcină, electronii continuă să fie impresionati optic, modificând astfel valorile de sarcină transferate. Această deficiență poate fi eliminată fie dacă se utilizează un obturator care să oprească iluminarea pe timpul transferului, fie dacă se utilizează un dispozitiv similar, cu rol doar de registru de deplasare, în care sarcina din șirul de traductori să fie transferată în bloc (*in paralel*) la anumite momente de timp.

Detectoare pentru radiații X și γ

Detectoarele radiometrice pentru domeniile X și γ se pot realiza după două principii de lucru: cu conversie intermediară a radiației nucleare (X sau γ) în lumină și cu dispozitiv sensibil la lumină, sau cu conversie directă a radiației incidente într-un parametru electric (rezistență, tensiune, curent).

Detectorii cu conversie intermediară se constituie ca un ansamblu format dintr-un *scintilator* (detector cu scintilație), bazat pe un material care prezintă efect de luminiscentă la excitarea cu raze X sau γ (efect de scintilație) și un detector uzual sensibil în vizibil sau UV (fig. 5.33).

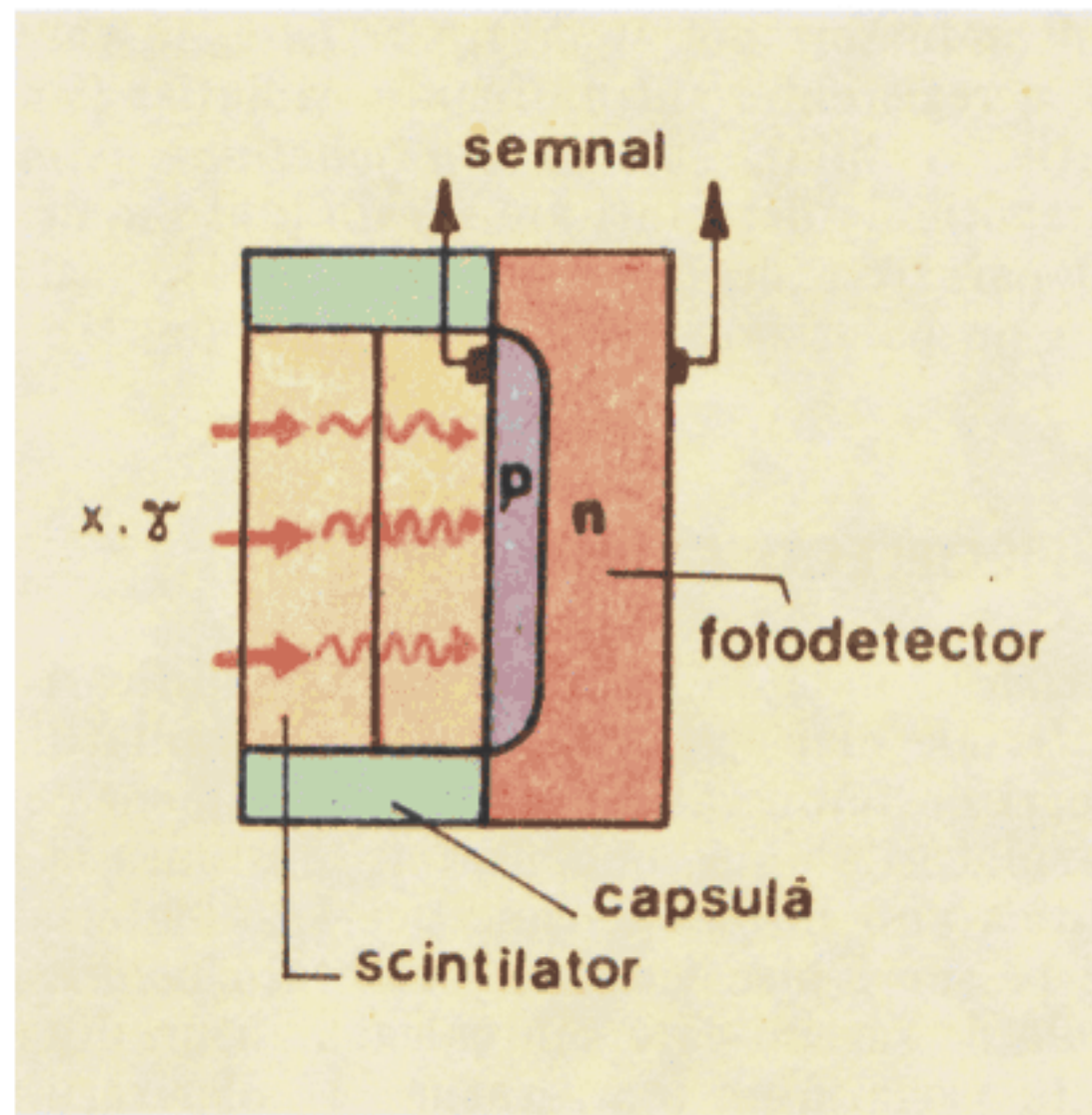


Fig. 5.33. Structura unui detector X sau γ cu scintilator.

Fenomenul de *scintilație* apare într-o gamă largă de materiale, atât anorganice cât și organice, lichide sau solide. În materialele organice scintilația este o proprietate moleculară, radiația incidentă producând excitarea directă a moleculelor, în timp ce în materialele anorganice este o proprietate de rețea. Materiale organice care prezintă scintilație sînt, de exemplu, antracenu, diversele soluții lichide și unele soluții solide în materiale plastice. Scintilația în materialele anorganice se manifestă în cristale pure, de exemplu halogenuri alcaline sau de mangan pure, în cristale activate cu impurități, de exemplu în halogenuri alcaline activate cu metale grele de tipul Pb, In, Tl, sau în sulfura de zinc sau de cadmiu activată cu Mn, Cu, Ag, sau în cristale autoactivate, cu exces de ioni de un tip (de exemplu ZnS cu exces de S).

Parametrii principali ai unui scintilator sînt *eficacitatea de scintilație* (definită prin raportul dintre energia emisă și energia disipată în scintilator), *coeficientul de absorbție* (definit prin raportul dintre fluxul energetic disipat și fluxul energetic incident), *spectrul de emisie de scintilație* și *timpii de răspuns*. Atît eficacitatea cât și coeficientul de absorbție sînt funcții spectrale, depinzînd de lungimea de undă a fluxului incident. Timpii de răspuns sînt de ordinul $10 \text{ ns} \div 1 \mu\text{s}$.

Cel mai utilizat scintilator în domeniile X și γ este cel pe bază de iodură de sodiu activată cu taliu: NaI(Tl), cu eficacitate mare de scintilație, absorbție mare la radiația γ și timp de răspuns de cca $1,5 \mu\text{s}$.

Ca fotodetector se poate utiliza orice tip de detector cu sensibilitate mare.

Detectorii cu conversie directă sînt de tip semiconductor, asemănători celor pentru radiație vizibilă, IR și UV. Funcționarea lor se bazează pe generarea perechilor electron-gol în semiconductorul supus radiației și pe apariția unui curent de ionizare controlat de radiație, în cîmp electric exterior. Avantajul acestor detectori este sensibilitatea mare: de exemplu, pentru radiația γ , fiecare foton produce prin conversie directă de cca. 100 de ori mai multe perechi electron-gol decît numărul de fotoni optici pe care i-ar produce într-un scintilator.

Detectorii semiconductori pot fi *de tip rezistiv*, la care efectul măsurat este cel de variație a rezistenței sub influența radiației (similar fotorezistențelor pentru radiație vizibilă), sau *de tip joncțiune* (similari fotodiodelor uzuale). A doua categorie de detectori are sensibilitate mult mai mare. Pentru a micșora curentul parazit („de întuneric“) și a crește astfel sensibilitatea, se folosesc joncțiuni pn polarizate invers, sau joncțiuni tip pin.

5.4.6. DETECTORI PIROELECTRICI

Efectul piroelectric constă în apariția unei modificări a distribuției de sarcini în unele materiale dielectrice, sub influența radiațiilor infraroșii (IR), deci a unei modificări de temperatură. Dacă un asemenea material dielectric se introduce între armăturile unui condensator, tensiunea la bornele condensatorului se va modifica sub influența radiației IR. Materialele care prezintă acest efect, numite pe scurt piroelectrice, prezintă o *polarizare* spontană, deci o distribuție naturală de sarcini care echivalează cu un dipol electric. Efectul piroelectric constă în variația cu temperatura a polarizării spontane. Notînd cu DP variația polarizării spontane, ecuația efectului piroelectric se scrie liniar

$$DP = p\Delta T$$

unde p este un coeficient de proporționalitate, numit coeficient piroelectric, iar ΔT este variația de temperatură.

Efectul piroelectric apare numai în materiale anizotrope (în general, cristale), după o direcție preferențială, numită axa polară a cristalului. Coeficientul piroelectric depinde în general, de temperatură și prin urmare sensibilitatea detectorilor piroelectrice va fi maximă la o anumită temperatură optimă de funcționare.

Proprietatea de piroelectricitate dispare dacă materialul este încălzit peste o anumită temperatură, numită temperatură Curie (T_c).

Dintre materialele piroelectrice, mai importante sînt: turmalina, tantalatul de litiu (LiTaO_3 , cu temperatura Curie $T_c = 610^\circ\text{K}$, cel mai folosit în detectori IR), sulfatul de litiu ($\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), triglicinsulfatul (prescurtat TGS cu $T_c = 49^\circ$) etc.

Un *detector piroelectric* constă dintr-un condensator sensibil la radiații IR, realizat dintr-o plăcuță de material piroelectric cu metalizări în strat subțire. Deoarece traductorul propriu-zis este de natură capacitivă, cu impedanță mare de ieșire, greu de adaptat direct în aplicațiile curente, se utilizează de obicei un tranzistor FET, inclus în aceeași capsulă cu traductorul, avînd funcția de *convertor de impedanță*. Pentru a elimina influența polarizării spontane, care creează o tensiune electrică fixă, independentă de semnal, uneori se utilizează doi condensatori piroelectrice identici, în paralel sau în serie, incluși în aceeași capsulă, astfel încît tensiunile constante generate să se anuleze (fig. 5.34). Sensibilitatea la temperatură a piroelectricilor este mare, un detector tipic (bandă de turmalină de 1 mm grosime) generînd o tensiune de cca $100 \mu\text{V}$ la o modificare a temperaturii de 1°C . În raport cu puterea absorbită, sensibilitatea detectorilor uzuali este de cca $1 \div 5 \text{ V/mW}$.

Un aspect particular al utilizării detectorilor piroelectrice este datorat faptului că tensiunea la bornele condensatorului este dependentă de temperatură, deci de *energia* radiantă, nu de fluxul radiant incident. Pentru a putea

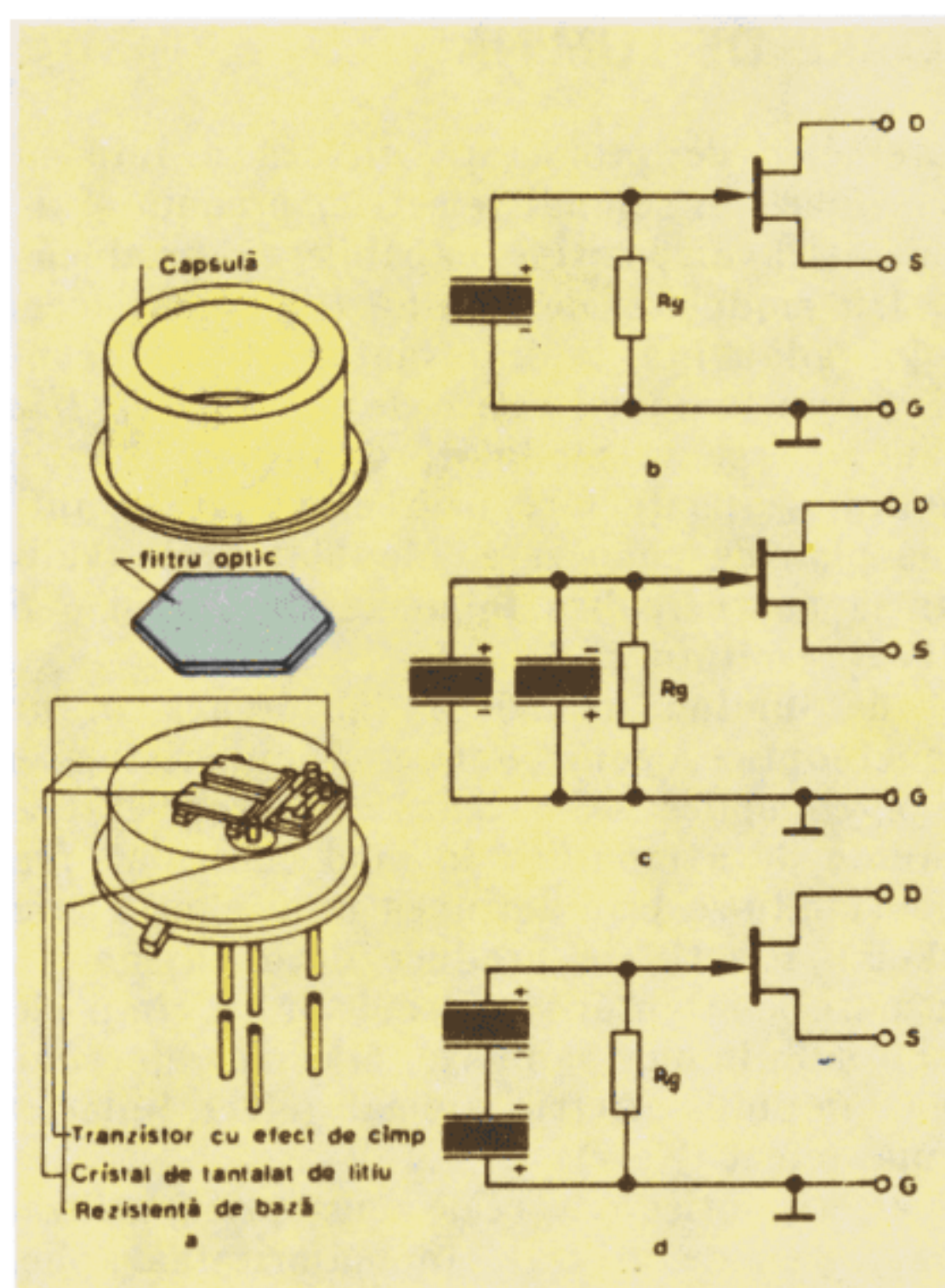


Fig. 5.34. a) Configurația tipică a fotodetectorului piroelectric cu tranzistor adaptor de impedanță încorporat; b) schema electrică; c) detector piroelectric dublu, cu compensare prin punere în paralel; d) detector dublu, compensat prin inseriere.

măsura fluxul, este necesar ca acesta să fie întrerupt periodic printr-un obturator mecanic sau de altă natură. Frecvența de obturare se alege (tipic) între 0,1 și 10 Hz, sensibilitatea traductorului scăzând cu frecvența de lucru, scăderea fiind importantă la frecvențe de peste 10–100 Hz.

Sensibilitatea spectrală a detectorilor piroelectrici este dată în principal de *fereastra optică* a dispozitivului. Aceasta are rol de filtru optic (IR) și se realizează din materiale transparente în IR (de exemplu, din germaniu, fluorură de calciu, bromură de potasiu). Gamele uzuale de lungime de undă în care traductorii piroelectrici au sensibilitate spectrală practic constantă se încadrează între $6 \mu\text{m}$ și $15 \mu\text{m}$ (gama IR neabsorbită de atmosferă), dar există traductori piroelectrici sensibili de la IR îndepărtat la UV. Nivelul minim de energie măsurabil este (tipic) de ordinul 10^{-9}W .

Aplicațiile specifice ale detectorilor piroelectrici se referă la măsurarea surselor de radiații IR, de exemplu lasere IR, la analiza IR a diverselor medii de transmisie, la detectoarele și alarmele de incendiu etc. Se realizează și *tuburi videocaptoare* pentru camere de luat vederi de tip TV (televiziune în infraroșu), bazate pe materiale piroelectrice. Tubul videocaptor cel mai uzual de acest tip este vidiconul piroelectric.

5.5. MODULATOARE DE LUMINĂ

Realizarea sistemelor de prelucrare directă a informației optice, fără transformare intermediară în semnal electric, precum și a sistemelor de comunicații optice, necesită dispozitive capabile să producă modularea fasciculului de lumină. Un modulator de lumină (fig. 5.35), recepționează un flux radiant incident Φ_i , adăugînd la informația inițială conținută de acesta informația purtată de un semnal electric de modulare, U_m . Ca rezultat se obține fluxul radiant emergent, modulat, Φ_m .

Modularea luminii se poate face prin modulare de intensitate, de fază, de frecvență sau de plan de polarizare. Modulatoarele realizează o modulare externă sursei, dar se poate realiza în unele situații și o modulare internă, chiar în dispozitivul emițător.

Modulatoarele de lumină uzuale se încadrează în următoarele clase: electrooptice, magnetooptice, acustooptice și cu cristale lichide.

Modulatoarele electrooptice se bazează pe proprietatea unor materiale dielectrice transparente de a modifica în mod controlat *faza* undelor luminoase, controlul efectuîndu-se prin acțiunea unui câmp electric exterior (efect Kerr și efect Pockels). Efectul se produce datorită modificării anizotropiei materialului, ca urmare a orientării moleculelor în câmp electric și se manifestă atât în solide cît și în lichide sau gaze. Mărimea efectului poate fi proporțională cu valoarea câmpului electric aplicat (efect liniar, tip Pockels), sau cu pătratul acestuia (efect Kerr).

Modulatoarele electrooptice (ca și cele acustooptice) utilizate ca atare produc o modulație de fază, greu de utilizat. În majoritatea aplicațiilor se preferă modulația de *amplitudine* a fasciculului luminos. Transformarea modulației de fază în modulație de amplitudine se realizează prin separarea fasciculului luminos inițial în două fascicule, dintre care unul este trecut prin modulatorul electrooptic, și prin interferarea lor ulterioară.

www.electronica.ro

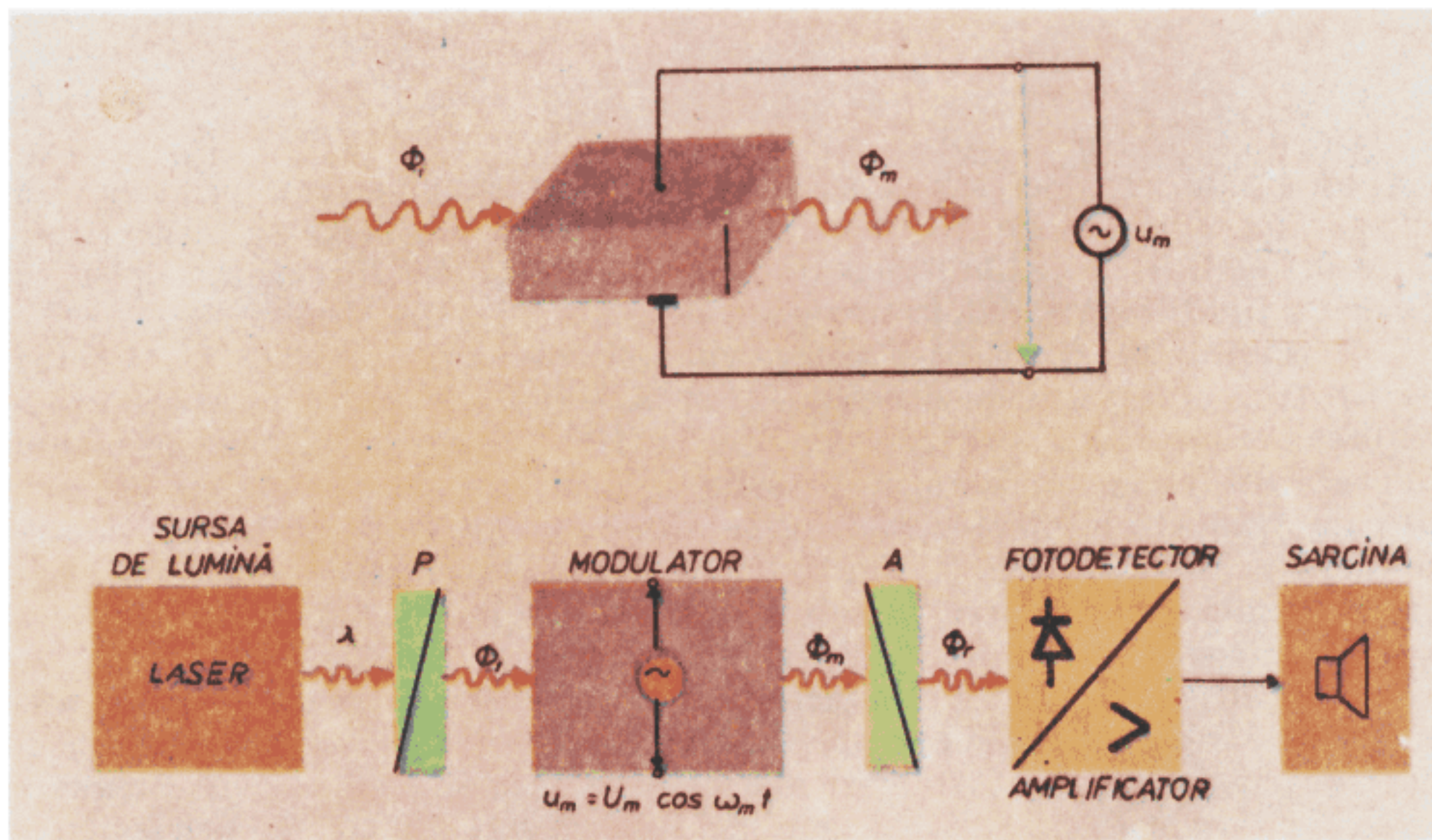
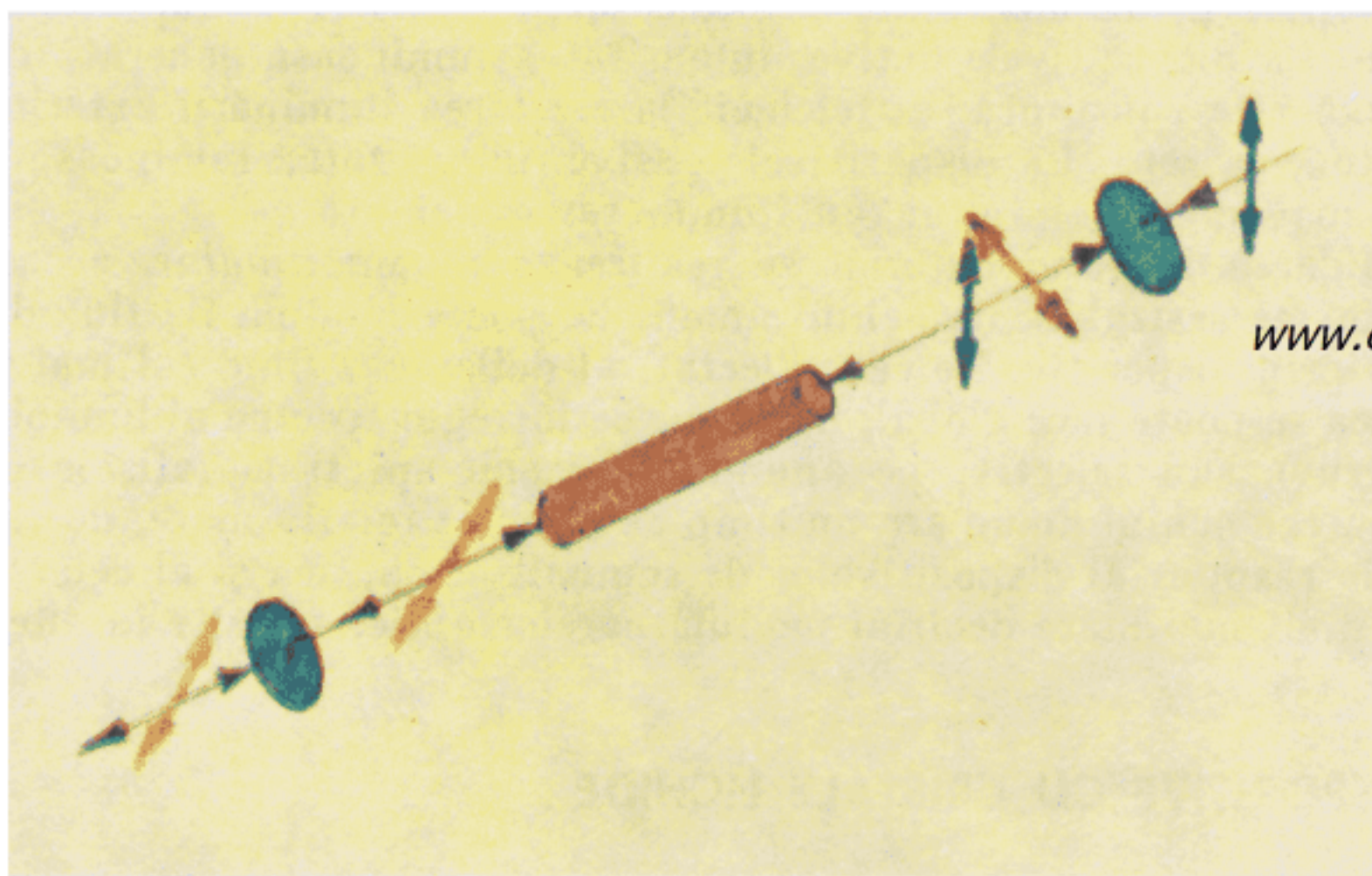


Fig. 5.35. Modelul simplificat al modulatorului de lumină.

Materialele uzuale pentru realizarea modulatorilor electrooptice sînt complecșii KH_2PO_4 (notat KDP) și $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (notat ADP) niobatul și tantalatul de litiu (LiNbO_3 , LiTaO_3), GaAs, ZnS, ZnSe, CdS, CdSe, CdTe, CuCl etc.

Modulatorile magnetooptice se bazează pe efectul Faraday, care constă în rotirea, controlată prin cîmp magnetic, a *planului de polarizare* a luminii la trecerea prin unele materiale transparente aflate în cîmp magnetic. Efectul este liniar, unghiul ψ de rotire a planului de polarizare fiind proporțional cu intensitatea H a cîmpului magnetic aplicat și cu lungimea l a drumului parcurs de raza de lumină prin corp: $\psi = KlH$, unde K e o constantă de material. În fig. 5.36 se prezintă schematic un modulator magneto optic cu efect Faraday longitudinal (direcția de propagare a luminii este aceeași cu cea a cîmpului magnetic aplicat). Pentru variantele constructive realizate în tehnologia straturilor subțiri și utilizabile în sistemele optoelectronice integrate, ca materiale active se utilizează compuși pe bază de oxizi de fier și galiu în amestec cu pămînturi rare (lantaniu, ytriu, gadoliniu ș.a.), cristalizați sub formă de granați (de exemplu granatul de ytriu și fier, $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, notat prescurtat YIG).



www.electronica.ro

Fig. 5.36. Modulator magneto optic cu efect Faraday longitudinal.

Modulatorile acustooptice funcționează prin efectul de modificare a *indicii de refracție* a luminii într-un material supus unor tensiuni mecanice. Pentru ca producerea deformărilor mecanice să poată fi controlată electric, se utilizează materiale piezoelectrice transparente de tipul niobatului sau tantalatului de litiu (LiNbO_3 , LiTaO_3), germanatului de bismut ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ notat prescurtat BGO) și compușilor săi derivați prin substituția Ge (de exemplu $\text{Bi}_{12}\text{GaO}_{20}$) etc. Efectul aplicării unei tensiuni electrice la bornele unui modulator acustooptic este deflecția sau difracția fasciculului de lumină.

Modulatorile cu cristale lichide se bazează pe dispozitivele uzuale cu cristale lichide (v. 5.6.2). În funcție de efectul care ia naștere în stratul de cristal lichid, modulatorul va funcționa pe principiul electro-optic de rotire a *planului de polarizare* a luminii, sau prin *difuzie controlată* a luminii (difuzie dinamică).

5.6. DISPOZITIVE PASIVE DE SEMNALIZARE OPTICĂ ȘI DE AFIȘAJ

www.electronica.ro

5.6.1. PRINCIPII GENERALE

Dispozitivele „pasive“ de semnalizare optică și afișaj *nu emit* lumină ci modulează doar un flux de lumină generat în exteriorul lor, de obicei fluxul incident provenit din mediu. Din acest motiv, *nu pot fi utilizate în absența unei iluminări exterioare* (pe întuneric). Acest dezavantaj este însă compensat de consumul energetic scăzut în raport cu dispozitivele optice active, la care emisia de lumină trebuie să aibă o intensitate mai mare decât intensitatea fluxului ambiant și pentru care randamentul energetic al emisiei luminoase este scăzut (cca 10%). Un alt avantaj al dispozitivelor pasive de semnalizare optică și afișare este că ele își păstrează contrastul practic independent de lumina ambiantă, deoarece ele modulează chiar fluxul ambiant incident, în timp ce contrastul dispozitivelor active scade cu iluminarea ambiantă. Într-adevăr, contrastul este dat de diferența dintre intensitatea luminoasă generată de suprafața dispozitivului și intensitatea generată de suprafețele înconjurătoare. La dispozitivele active, intensitatea luminoasă generată de suprafața activă este constantă, astfel încât la creșterea iluminării exterioare contrastul tinde la zero. La dispozitivele pasive, intensitatea luminoasă generată de dispozitiv crește simultan cu iluminarea ambiantă.

Modularea fluxului exterior se realizează în *amplitudine*, aceasta fiind singura formă sesizabilă de ochiul uman. Se poate modula fie fluxul luminos transmis prin dispozitiv, fie cel reflectat, al doilea caz fiind cel mai frecvent. Modularea se poate face global, uniform, pe întregul spectru al luminii (afișaje „alb-negru“), sau selectiv, pe anumite domenii spectrale (afișaje colorate).

Deoarece ochiul uman are un timp de răspuns relativ mare, de cca 40 ms, timpul de răspuns al dispozitivelor de semnalizare optică și al celor de afișaj poate fi mult mai mare decât al modulatorilor optice folosiți în alte scopuri.

5.6.2. DISPOZITIVE CU CRISTALE LICHIDE

Cristalele lichide sînt materiale care au proprietăți comune atât lichidelor cît și solidelor cristaline. Ca și lichidele obișnuite, ele au proprietăți de curgere, datorate unei coeziuni scăzute între molecule, dar datorită unui grad ridicat de ordonare spațială în dispunerea moleculelor, asemănătoare celei din cristalele solide, curgerea se produce diferit după direcții diferite. Structura internă ordonată a cristalelor lichide este datorată formei moleculelor din care sînt compuse. Un lichid uzual este în general format din molecule a căror formă poate fi considerată sferică și care prin urmare nu manifestă o preferință de ordonare după o anumită direcție. Moleculele cristalelor lichide au uzual o formă *alungită*, de bastonaș, ceea ce le conferă o preferință de ordonare, și anume în așa fel încît să aibă axele paralele. Există trei moduri posibile de aranjament ordonat al moleculelor de formă alungită. Cristalele lichide la care centrele de greutate ale moleculelor sînt dispuse aleator, se numesc *nematice*, dacă centrele de greutate sînt dispuse ordonat, cristalul lichid este numit *smectic*; cristalele lichide care au moleculele dispuse paralel în fiecare strat molecular, iar de la strat la strat axa moleculelor suferă o rotație cu

unghi constant, moleculele aranjându-se astfel după o elice, se numesc *co-lesterice*.

Datorită dispunerii ordonate a moleculelor alungite în cristalele lichide, acestea prezintă o puternică anizotropie, adică toate proprietățile lor măsurate după direcția axelor moleculare diferă de proprietățile măsurate după o direcție perpendiculară pe această axă.

Cristalele lichide se utilizează în dispozitive a căror configurație de bază este prezentată în fig. 5.37. Aceste dispozitive sînt constituite din două plăci de sticlă cu electrozi transparenti pe fețele dinspre interior, care delimitează stratul de cristal lichid; în cazul unor dispozitive de afișare, ele mai au un *analizor* și un *polarizor* de lumină, plasate la exteriorul structurii. Electrozii transparenti se realizează tipic prin depunerea unui strat subțire (sub $1\ \mu\text{m}$) de bioxid de staniu (SnO_2). Moleculele de cristal lichid trebuie să fie aranjate cu axele fie perpendicular, fie paralel față de plăcile de sticlă. Grosimea stratului de cristal lichid este de ordinul $10\ \mu\text{m}$.

Utilizarea cristalelor lichide în dispozitive de afișare și de modulare a luminii se bazează pe modificarea proprietăților optice ale acestor materiale sub acțiunea unui cîmp electric. Există mai multe efecte electro-optice în cristalele lichide.

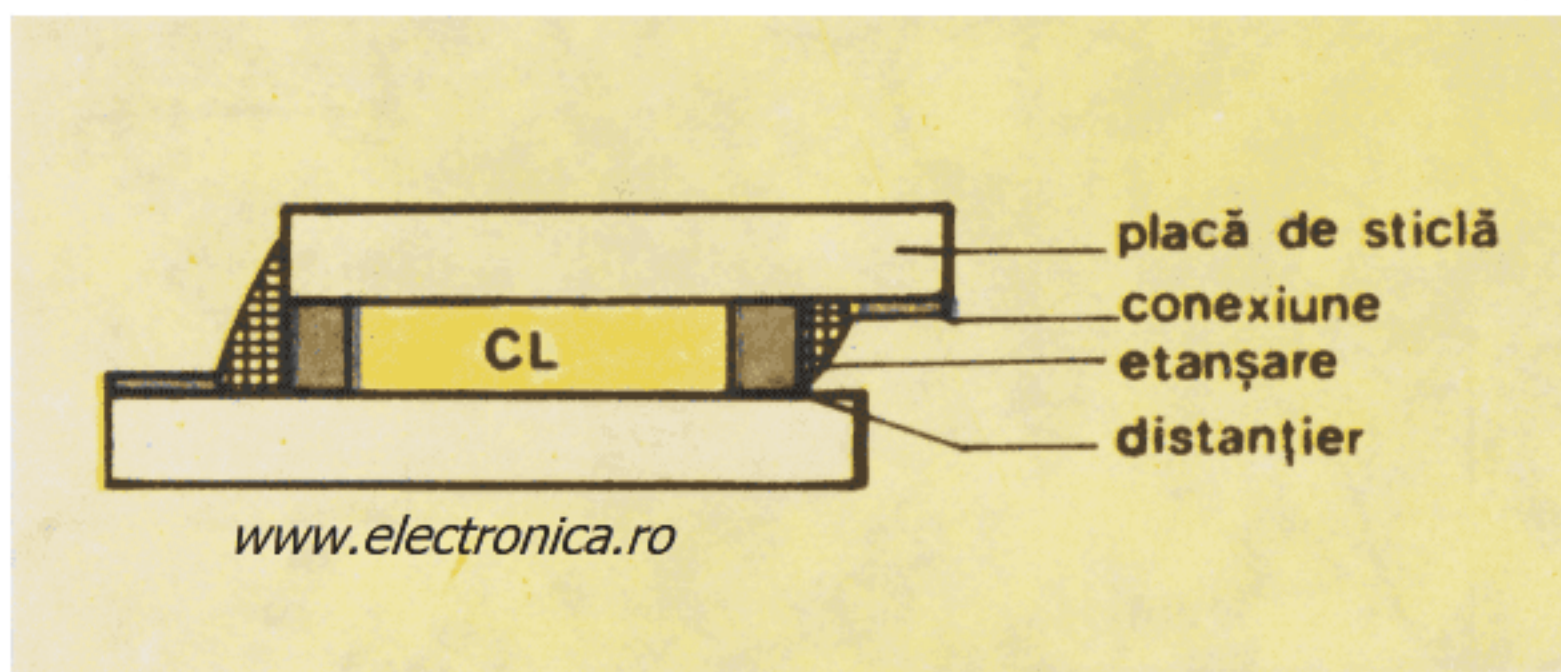


Fig. 5.37. Configurația unui dispozitiv cu cristal lichid.

Efectul de *difuzie dinamică* a luminii apare în nematice și constă în scăderea transmitanței optice (opacizarea) la trecerea unui curent prin dispozitiv, datorită distrugerii temporare a aranjamentului molecular. Prin urmare crește turbulența, respectiv împrăștierea luminii (fig. 5.38 a, b). Caracteristica de contrast, definită prin variația transmitanței optice (Φ_{v0}/Φ_{vt}) funcție de tensiunea aplicată, este ilustrată în fig. 5.38 c (Φ_{v0} și Φ_{vt} sînt fluxurile luminoase la ieșire, respectiv la intrare). Se constată o modificare rapidă a contrastului (C_{DDL}) în jurul tensiunii U_{PCL} , numită *tensiune de prag*. Acest parametru al dispozitivului cu cristal lichid este important în aplicații, deoarece toate afișajele aparatelor și instrumentelor portabile (de exemplu ceasuri electronice, calculatoare de buzunar) trebuie alimentate de la baterii cu tensiuni mici. Dispozitivele care lucrează pe baza efectului de difuzie dinamică a luminii prezintă dezavantajele unui contrast relativ scăzut, a tensiunilor de prag mari, de peste $10\ \text{V}$ și a consumului de putere relativ mare.

Cele mai utilizate dispozitive cu cristal lichid se bazează pe *efectul de cîmp* în straturi de cristal nematic torsionat (fig. 5.39). La trecerea printr-un nematic torsionat, lumina suferă o modificare a polarizării (fig. 5.40 a). Dacă din lumina naturală se selectează cu ajutorul unui polarizor optic numai lumina cu o anumită polarizare, pentru ca dispozitivul cu cristal lichid să

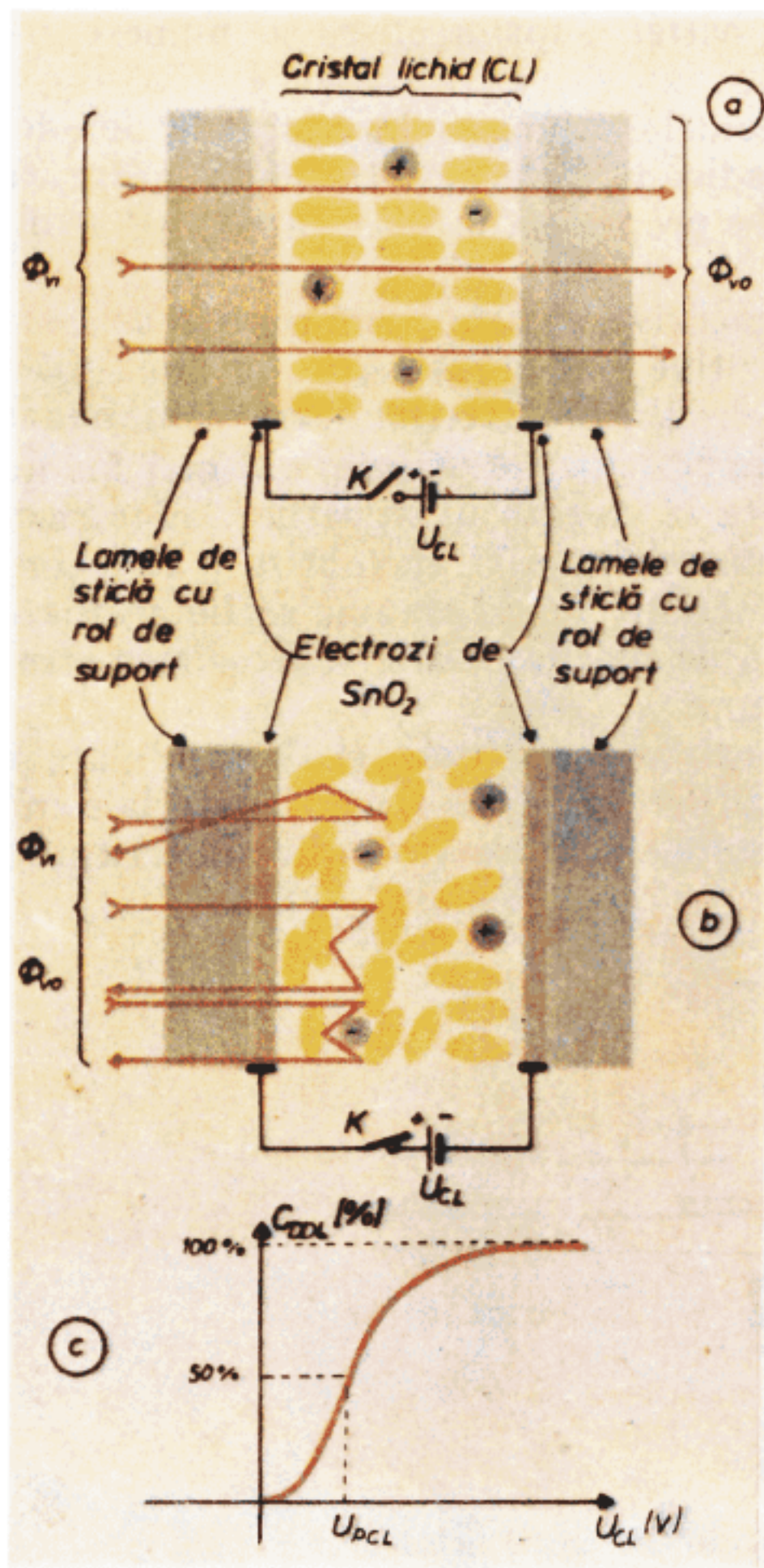


Fig. 5.38. Dispozitiv cu cristal lichid, cu efect de difuzie dinamică a luminii; a) în lipsa polarizării; b) la apariția efectului; c) caracteristica de contrast.

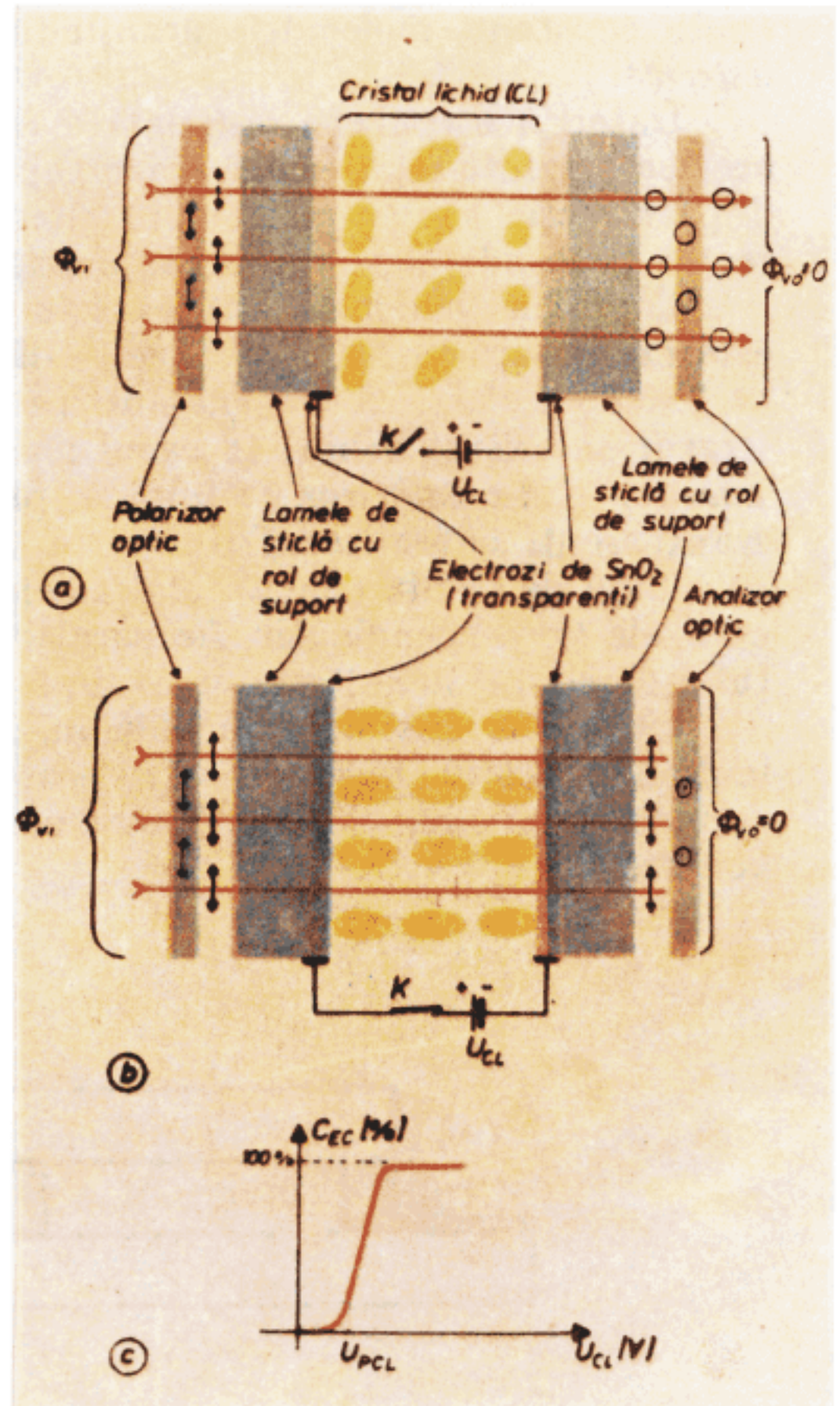


Fig. 5.39. Principiul de funcționare (a, b) și caracteristica de contrast la LCD cu efect de câmp (C).

www.electronica.ro

fie transparent în condiții normale este necesar ca al doilea polarizor (analizorul) să fie rotit la 90° față de primul. La aplicarea unui câmp electric exterior, de valoare suficientă, orientarea moleculelor nematicului se modifică, devenind uniformă (strat netorsionat, starea „ON“, ca în fig. 5.40, b). Lumina nu își mai modifică polarizarea la trecerea prin nematic și nu poate trece de analizor. Ea va fi absorbită în dispozitiv, care devine opac.

Caracteristica de contrast la aceste dispozitive este mult mai abruptă decât la cele cu difuzie a luminii (fig. 5.39 c) iar contrastul (C_{EC}) este mai bun. Tensiunile de prag sînt de ordinul $2 \div 5$ V, compatibile cu cele furnizate de bateriile miniatură, iar consumul de putere este neglijabil. Timpii de răspuns (opacizare, respectiv revenire la starea inițială) ai dispozitivelor cu nematic torsionat sînt de asemenea mai reduși decât al celor cu difuzie dinamică a luminii. Uzual, pentru a crește durata de viață și a micșora timpii de răspuns, dispozitivele cu cristal lichid se alimentează în curent alternativ sau în curent continuu în impulsuri.

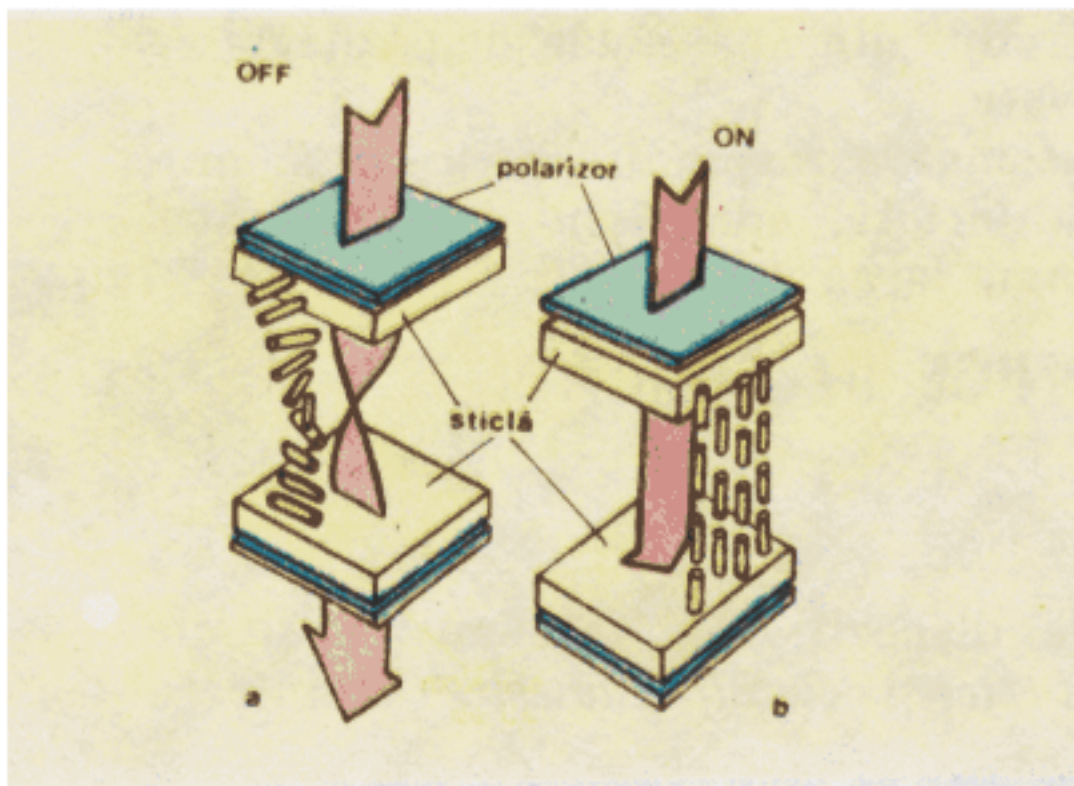


Fig. 5.40. Principiul de funcționare al unui LCD cu nematic: cristal torsionat (a) și nertorsionat (b).

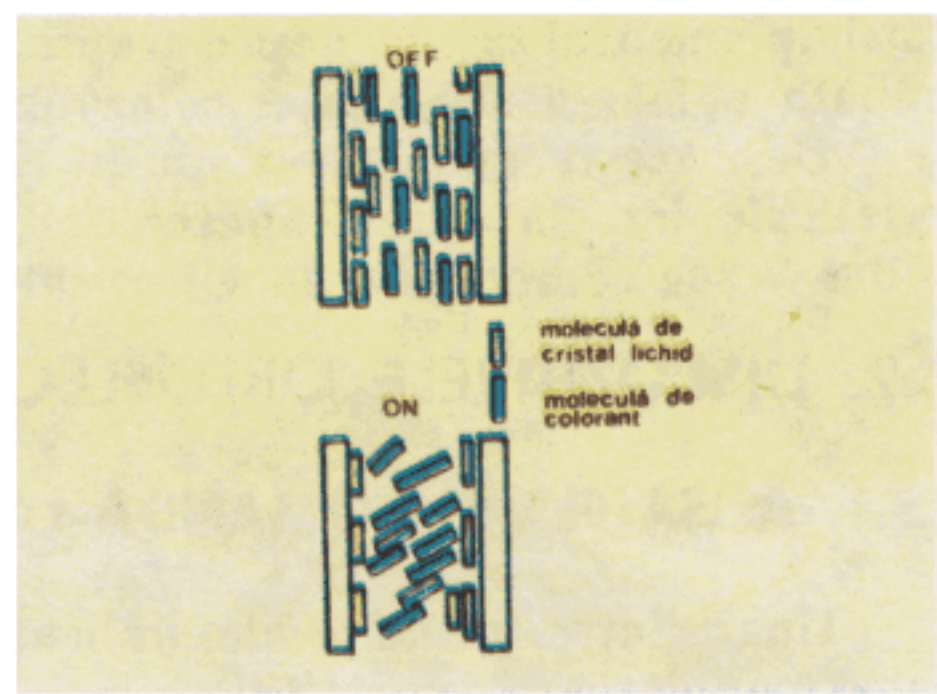


Fig. 5.41. Principiul de funcționare a unui LCD cu colorant și efect de câmp.

Pentru îmbunătățirea contrastului sau pentru afișarea în culori, se poate folosi un cristal lichid în care se introduce un colorant cu molecule alungite de dimensiuni mari. La aplicarea tensiunii, moleculele de cristal lichid forțează și moleculele de colorant să își modifice direcția (fig. 5.41), ceea ce face ca dispozitivul să își modifice culoarea transmisă.

www.electronica.ro

5.6.3. DISPOZITIVE ELECTROFORETICE

Aceste dispozitive realizează o modulare a fluxului luminos incident, provenit din mediul ambiant, pe baza unui efect de modificare a distribuției spectrale a coeficientului de reflexie sau de absorbție a luminii. Acest efect se produce prin mișcarea dirijată de câmpul electric, a unor particule de colorant aflate în suspensie coloidală. Deoarece mișcarea sub influența câmpului electric a unor particule electrizate aflate în suspensie coloidală și separarea lor din suspensie către electrozii cu polaritate corespunzătoare se numește *efect electroforetic*, dispozitivele care lucrează pe acest principiu poartă numele de dispozitive (de afișaj) electroforetice.

Construcția unui dispozitiv electroforetic este asemănătoare celei a dispozitivelor cu cristal lichid. Structura constă din două plăci suport, transparente și prevăzute în interior cu electrozi. Unul dintre electrozi este transparent. Între plăci se află o suspensie coloidală conținând particule de pigment cu dimensiuni sub $1 \mu\text{m}$ într-un mediu cu densitate egală cu a pigmentului (pentru a compensa forțele gravitaționale și a preveni depunerea particulelor). Mediul este colorat, în general, cu o substanță solubilă, de culoare complementară celei a solventului, astfel încât să se obțină contrast maxim. Pentru ca fenomenul de electroforeză să poată avea loc, particulele de pigment trebuie să aibă sarcini electrice, ceea ce se poate realiza prin reacția pigmentului cu un agent chimic specific (tipic, un polimer).

În lipsa oricărui câmp electric, culorile pigmentului și ale colorantului solvat se compensează, dispozitivul apărând incolor. La aplicarea unui câmp electric cu polaritatea „+” pe electrodul transparent, particulele de pigment (uzual încărcate negativ) se vor acumula spre acest electrod, iar observatorul va vedea dispozitivul colorat în culoarea pigmentului. La inversarea polari-

tății, pigmentul se va deplasa spre electrodul din spate, iar dispozitivul va căpăta culoarea substanței colorante solvate.

Deși aceste dispozitive nu au căpătat încă o răspîndire prea largă, proprietățile lor, în special puterea mică absorbită, contrastul bun și costul redus le fac competitive în viitor într-o gamă largă de aplicații.

5.7. DISPOZITIVELOR OPTOELECTRONICE ÎN APLICAȚII

5.7.1. AFIȘAJELE ȘI COMANDA LOR

Una dintre principalele aplicații ale dispozitivelor fotoemise și ale celor modulate o constituie *afișajele numerice* și cele *alfanumerice* (de numere și de litere).

Funcție de dispozitivele utilizate în realizarea afișajelor, acestea se pot clasifica în conformitate cu tabelul 5.4.

Clasificarea afișajelor optoelectronice

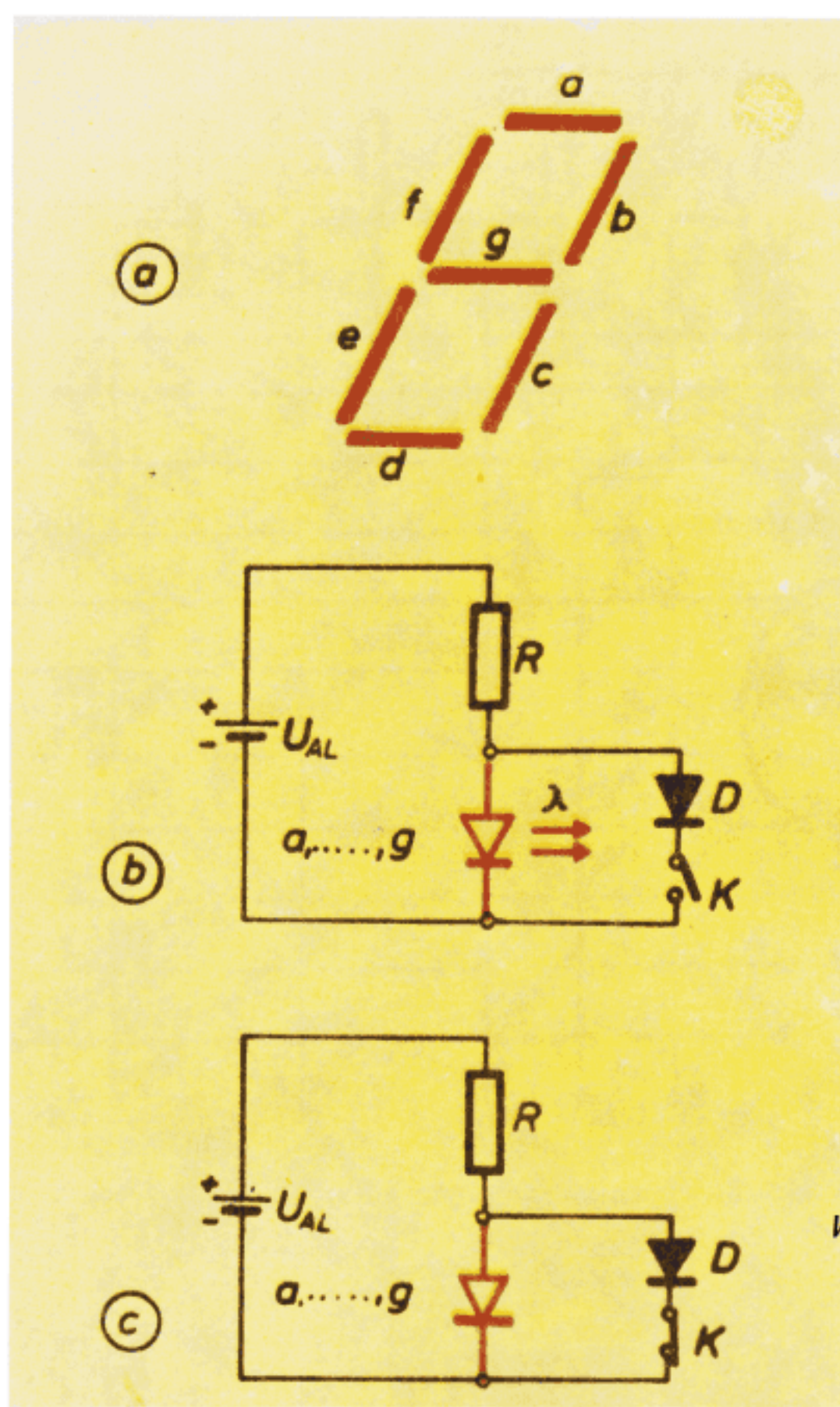
Tabelul 5.4.

Tip	Clasa	Observații
Active	electroluminiscente	diverse culori, tensiuni de alimentare reduse, monocrome
	cu plasmă fluorescente cu incandescență	monocrome, consum mare
Pasive	cu cristal lichid	diverse culori sau monocrome, puteri consumate neglijabile
	electroforetice	în curs de dezvoltare, tensiuni de alimentare sau puteri consumate mari

www.electronica.ro

Pentru realizarea afișajelor capabile să afișeze oricare cifră între zero și nouă (numite afișaje *de 1 digit*), se utilizează cel mai frecvent o configurație formată din 7 dispozitive elementare, de forma unor segmente, dispuse ca în fig. 5.42 a. Dispozitivele elementare (segmentele) pot fi LED-uri independente înglobate într-o masă din material plastic, de susținere, dispozitive cu cristal lichid, cu plasmă etc. În ultimele două cazuri, se realizează toate segmentele în cadrul aceluiași dispozitiv, folosind un electrod comun, al doilea electrod al fiecărui segment fiind chiar de forma segmentului, cu acces separat.

În cazul în care segmentele sînt realizate cu LED-uri, ele se activează în c.c.; cu o tensiune directă de polarizare de valoare mai mare decît tensiunea caracteristică de prag. În exemplul de circuit de comandă a unui segment, ilustrat în fig. 5.42 b, la deschiderea comutatorului *K* segmentul va genera lumină. Prin închiderea comutatorului *K*, LED-ul se stinge deoarece dioda *D* se polarizează direct la o tensiune mai coborîtă decît cea necesară deschiderii LED-ului (fig. 5.42 c).



www.electronica.ro

Fig. 5.42. a) Configurația standard a afișajului cu 7 segmente; b, c) modul de activare a unui segment la afișajul cu LED-uri.

Pentru formarea cifrelor de la 0 la 9 este necesar să se selecteze activarea segmentelor corespunzătoare, de exemplu segmentele a, b, c, d, e, f pentru cifra 0, b și c pentru cifra 1, a, b, g, e și d pentru cifra 2 ș.a. (vezi fig. 5.43). Pentru ca activarea selectivă să se poată face de la un comutator decadic avînd cîte un singur contact pentru fiecare cifră, este necesară utilizarea unui decodificator. În fig. 5.43 se ilustrează modul de realizare a unui asemenea decodificator pe bază de diode. În figură, comutatorul selectează cifra 4, comandînd aprinderea segmentelor b, c, f, g . Acestea sînt singurele pentru care LED-urile corespunzătoare nu sînt scurtcircuitate de diode, puse prin comutator la masă.

Cîteva aparate care folosesc uzual afișajele optoelectronice digitale sînt ilustrate prin schema lor bloc în fig. 5.44: numărătorul electronic, ceasul electronic și frecvențmetrul digital.

Pentru afișarea caracterelor alfanumerice, se folosesc matrici de dispozitive fotoemisive punctiforme, cum sînt cele ilustrate în fig. 5.45, cuprinzînd cîte 5 coloane a cîte 7 fotogeneratori, sau 9 coloane a cîte 11 fotogeneratori etc. Pentru a simplifica utilizarea lor, uneori dispozitivul de afișaj cuprinde și circuite de decodificare.

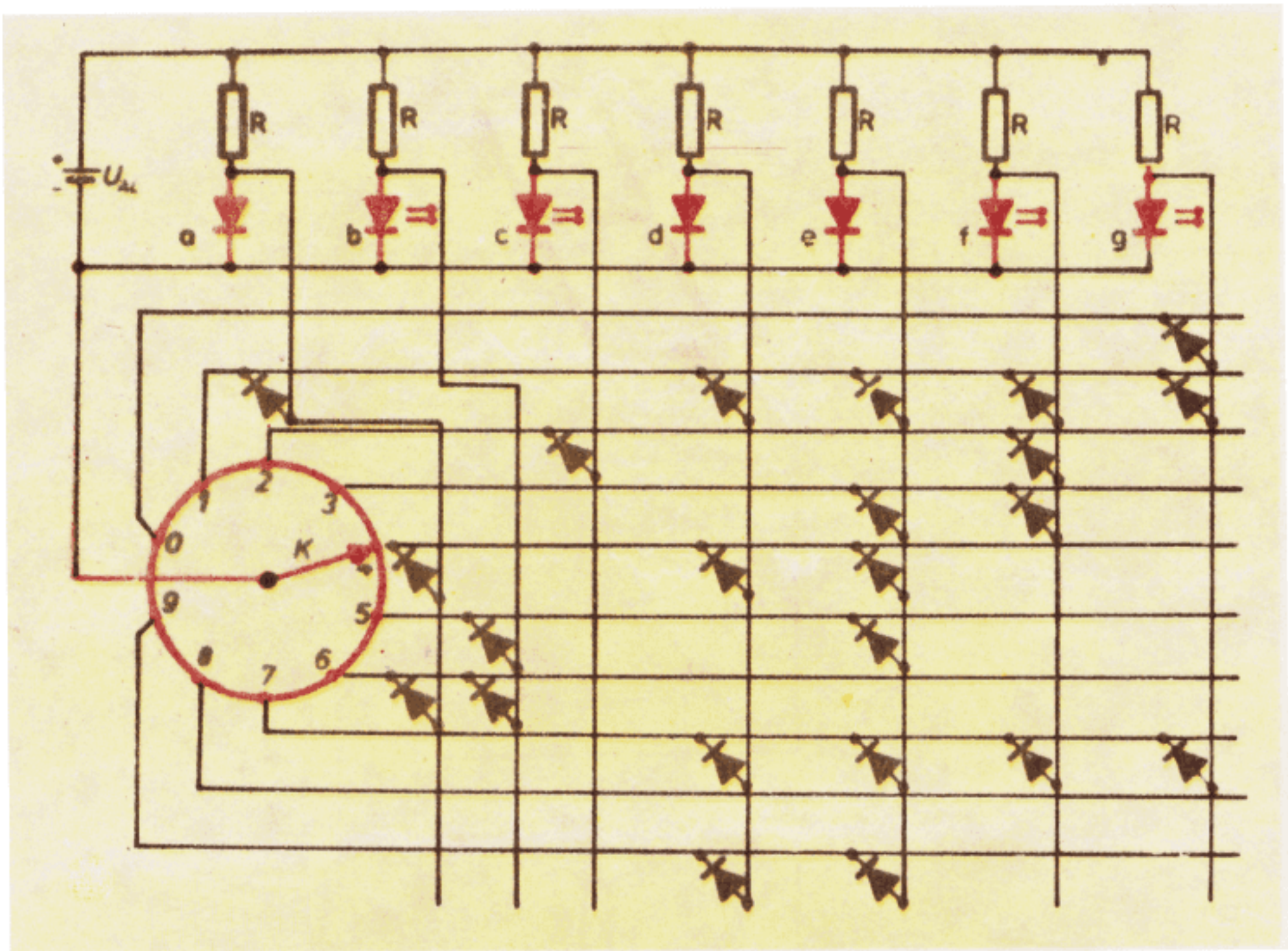


Fig. 5.43. Circuit decodificator pentru comanda unui afișaj cu 7 segmente, cu LED-uri.

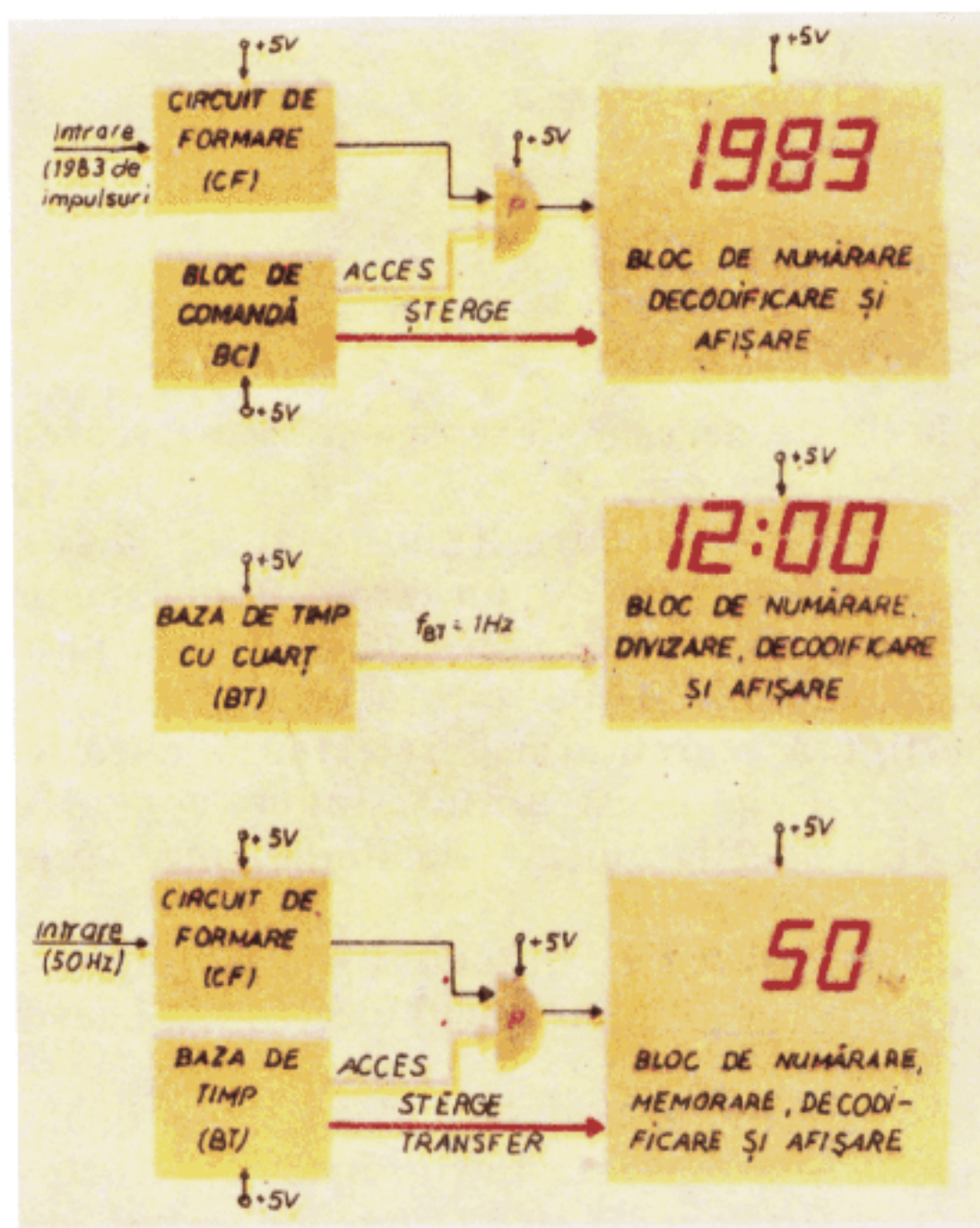


Fig. 5.44. Exemple de aplicații ale dispozitivelor de afișaj.

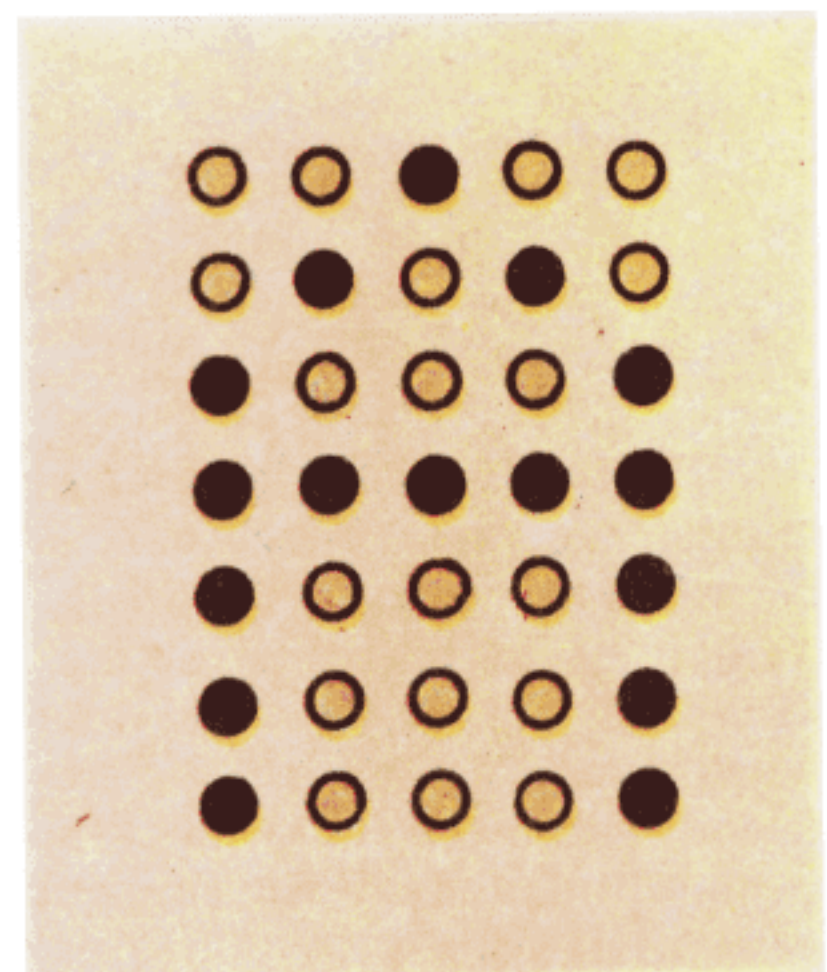


Fig. 5.45. Configurația afișajului matriceal.

www.electronica.ro

5.7.2. PANOURI SOLARE

Generarea de energie electrică pe baza luminii solare, prin efect fotovoltaic, se face în instalații a căror schemă de principiu este ilustrată în fig. 5.46 d. *Regulatorul* este destinat menținerii tensiunii generate între anumite limite, atâta timp cât iluminarea panoului solar nu scade sub o anumită valoare. Pentru a putea alimenta consumatorii (*sarcina*) și pe timpul cât iluminarea este insuficientă sau absentă (pe timp noros, noaptea), se utilizează o baterie de *acumulatori* (tampon).

În general, cerințele sarcinii (curent și tensiune de alimentare) depășesc posibilitățile unui singur element fotovoltaic. Pentru a satisface cerințele de tensiune, se conectează mai multe fotoelemente în serie, ca în fig. 5.46 a; satisfacerea cerințelor de curent mare se obține prin conectarea în paralel a unui număr suficient de mare de fotoelemente, ca în fig. 5.46 b. Panourile solare sînt uzual realizate prin conectarea în paralel a mai multor grupe de fotoelemente înseriate (fig. 5.46 c).

www.electronica.ro

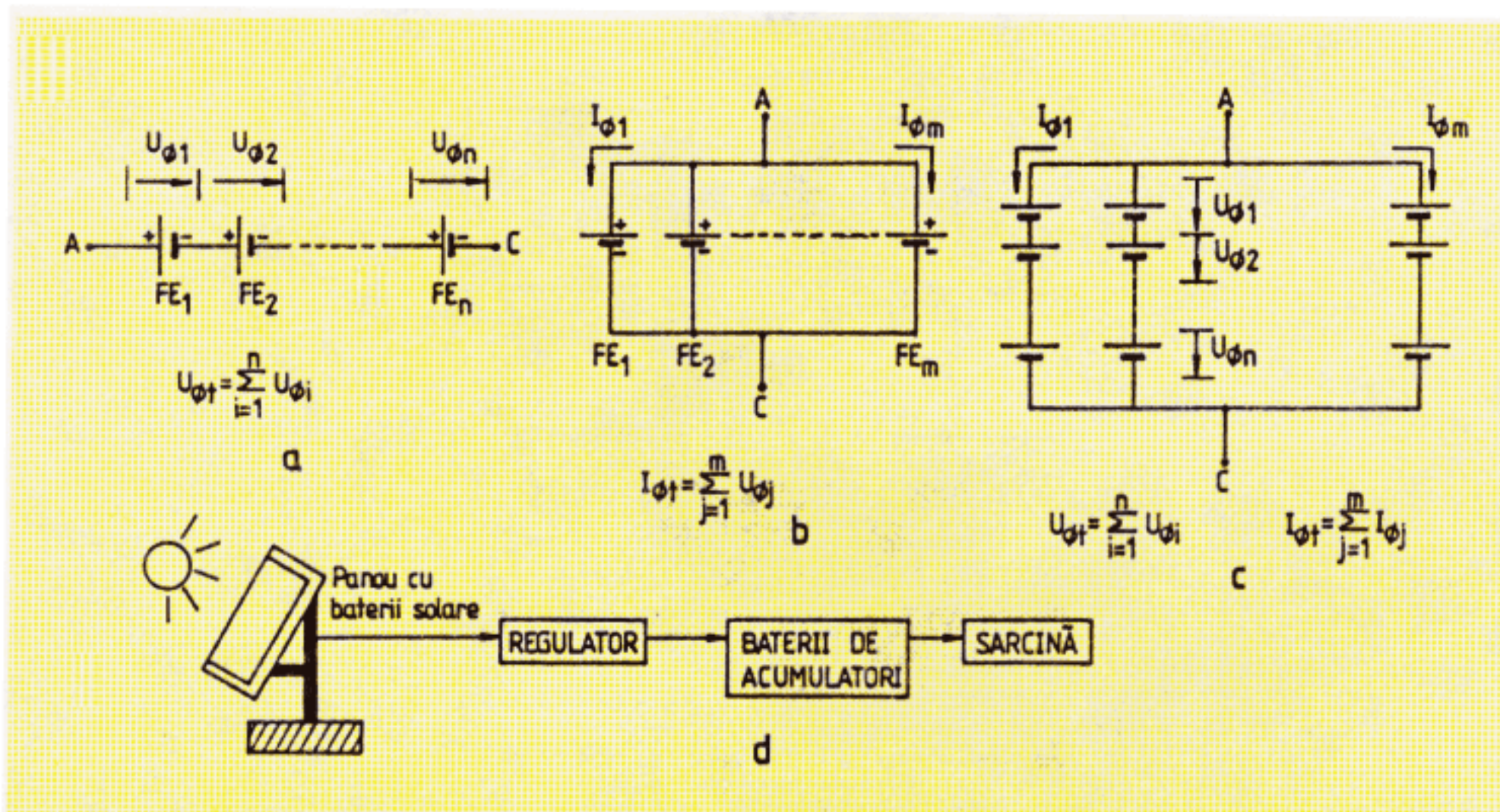


Fig. 5.46. a. b. c) Modalități de conectare a fotoelementelor; d) schema unei instalații solare de alimentare electrică.

5.7.3. OPTOCUPLOARE

Necesitatea transmiterii de comenzi sau informații prin semnale electrice, dar *fără conexiune electrică directă* între receptor și emițător, apare în multe domenii (energetic, industrial, biomedical ș.a.). Această cerință se poate îndeplini întrerupînd calea electrică și folosind un cuplaj optic cu următoarea transformare a purtătorului de informație:

Semnal electric \xrightarrow{LED} semnal optic \xrightarrow{Fd} semnal electric, unde Fd semnifică un fotodetector (FD, FR, FE, FT).

Un ansamblu format prin cuplarea unui LED cu un Fd , izolate optic de exterior prin închiderea într-un corp opac, se numește *fotocuplor*, sau *optocuplor*. Uneori, optocuploarele includ și circuite de îmbunătățire a semnalului de ieșire (amplificare, refacerea impulsului dreptunghiular etc.).

În general, fotodetectorul este un dispozitiv realizat pe bază de siliciu. Pentru creșterea randamentului energetic de transfer al semnalului electric este necesar ca fotoemitorul să genereze radiație cu un spectru adaptat sensibilității spectrale a fotodetectorului, deci cu un maxim de energie în regiunea de lungime de undă în care detectorul prezintă un maxim de sensibilitate. Pentru a satisface această cerință, LED-ul se realizează din arseniură de galiu (GaAs), cu emisie maximă în infraroșul apropiat (IRA), la cca 850 nm (fig. 5.47 a).

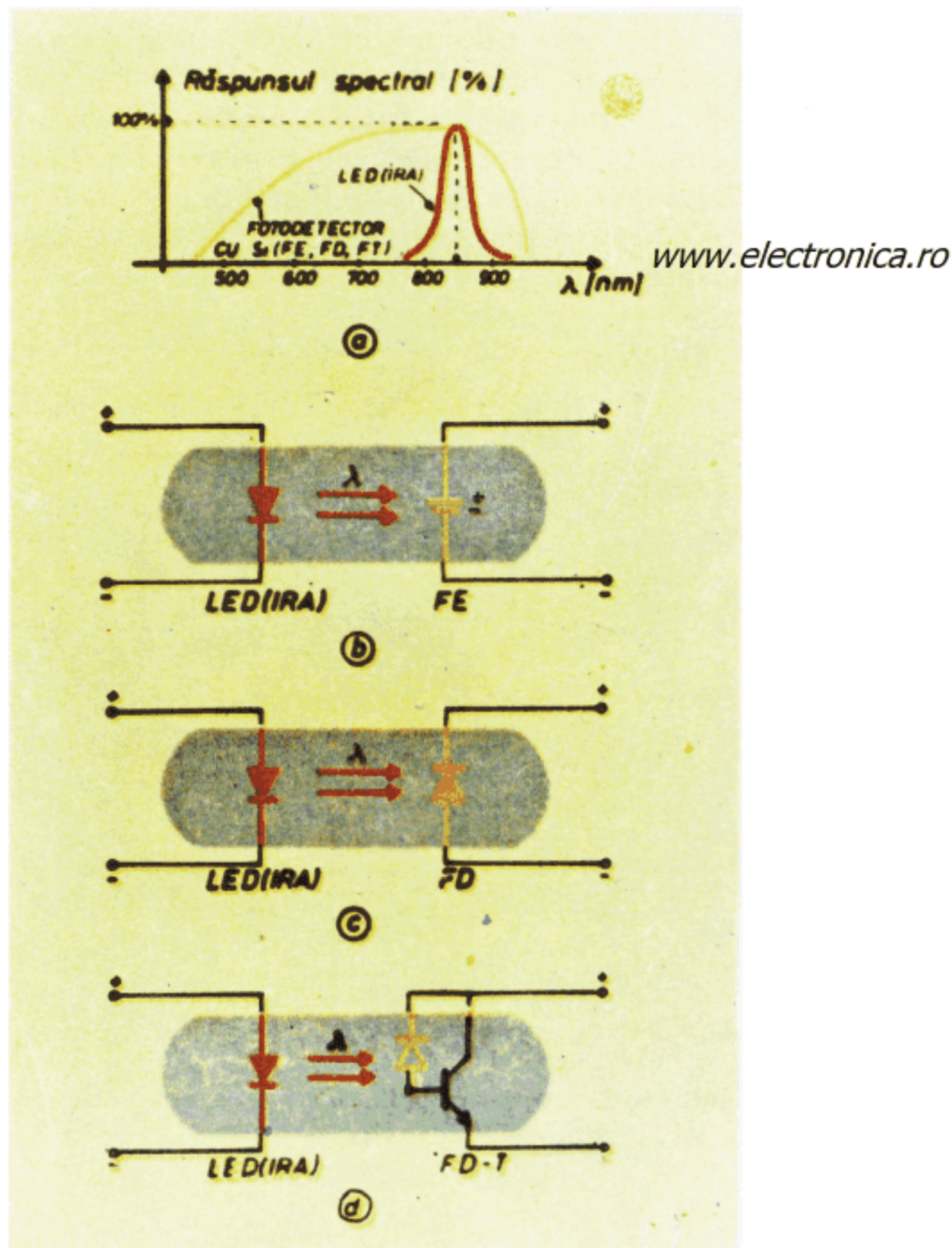


Fig. 5.47. a) Adaptarea sensibilității spectrale a LED-ului și a fotodiodei și diferite configurații de optocuplare; b) cu fotoelement; c) cu fotodiodă; d) cu fotodiodă și tranzistor.

Funcție de tipul fotodetectorului, configurația optocuplorului va fi una dintre cele prezentate în figurile 5.47—49. Cea mai folosită este configurația cu *fototranzistori*, (fig. 5.48 a), având sensibilitate mare, deci randament de transfer bun. Configurația cu *fotodiodă* (fig. 5.47 c) este folosită datorită timpului mic de răspuns, esențial în sistemele cu viteză mare de transmitere a informației. Configurația din fig. 5.48 b cu *pereche Darlington* (fototranzistor

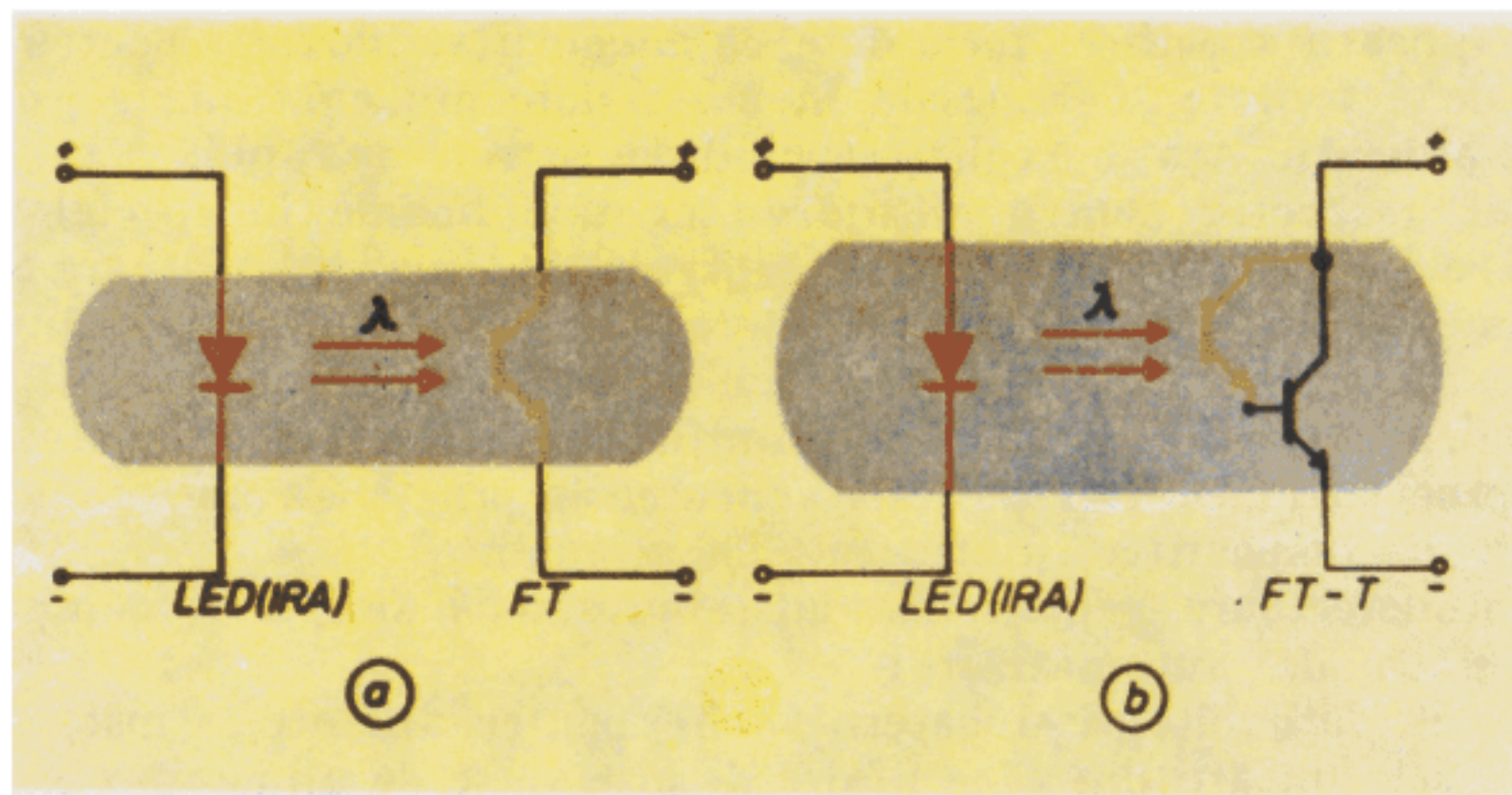


Fig. 5.48. a) Optocuplor cu fototranzistor și b) cu fototranzistor în configurație Darlington.

urmat de un tranzistor de amplificare), prezintă o sensibilitate ridicată, dar un timp de răspuns mare. Sînt uneori utilizate și montaje de amplificare cu două tranzistoare (fig. 5.49).

Principalele tipuri de dispozitive optoelectronice produse în țară sînt prezentate în anexa 8.

www.electronica.ro

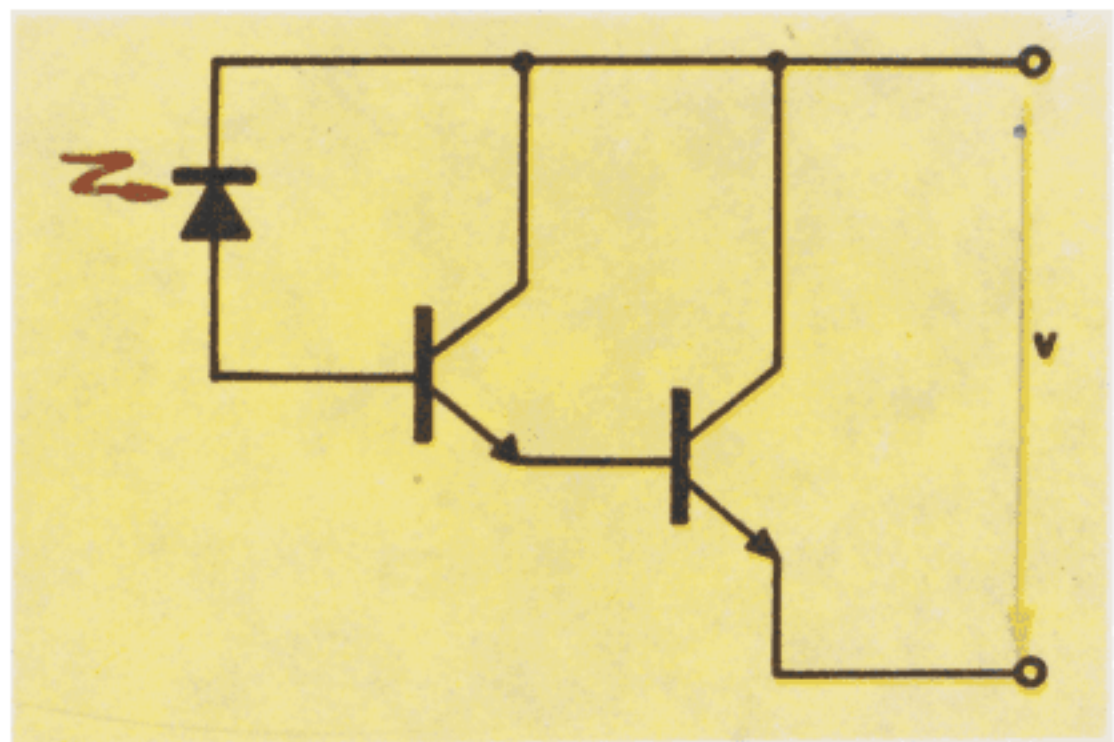


Fig. 5.49. Schemă cu fotodiodă și pereche Darlington de tranzistoare.

5.8. APLICAȚII

Așa cum rezultă din paragrafele anterioare, în funcționarea dispozitivelor optoelectronice trebuie ca radiația electromagnetică să aibă rol fie de excitație la intrare (cazul fotodetectorilor de diferite tipuri și al bateriilor solare), fie de răspuns la ieșire (cazul LED-urilor, al laserilor cu injecție, al dispozitivelor cu plasmă), fie cu rol de excitație și de răspuns (cazul modulatorilor electrooptice), fie cu rol de semnal pentru transfer între două procese de conversie (cazul optocuploarelor).

Multe dintre aplicațiile dispozitivelor optoelectronice sînt folosite pe scară largă în industrie, în cercetare și învățămînt, la aparatura electrică și electronică de uz casnic, la multe dintre instalațiile aferente mijloacelor de transport în comun sau unor săli și localuri publice. De asemenea, mai există

și unele aplicații specifice, formulate ca invenții și inovații pentru diferite domenii de activitate. Cercetările în acest domeniu continuă și, deci, vor apare noi aplicații. Așa se explică răspîndirea extrem de rapidă pentru afișaje în general, respectiv pentru afișaje cu cristale lichide în special. Acestea din urmă se folosesc tot mai mult la ceasuri electronice și calculatoare numerice de buzunar, avînd un consum de putere neglijabil comparativ cu afișajele bazate pe LED-uri (care nu pot fi înlocuite pentru anumite aplicații).

După ritmul accelerat în care se continuă cercetările în domeniul dispozitivelor optoelectronice, este posibilă aplicarea în practică a unei game extrem de variate de dispozitive, dintre care menționăm:

— fotodetectoare pentru instalații industriale simple și complexe, cu diferite grade de automatizare;

— celule fotovoltaice și baterii solare pentru aparate și instalații electronice de comunicații din zone lipsite de alte surse de alimentare cu energie electrică;

— afișaje cu lumină proprie (bazate pe LED-uri și plasmă), cu lumină transmisă sau reflectată (bazate pe cristale lichide), în diferite structuri de lucru și tipodimensiuni, pentru: ecrane și panouri de afișare numerică, alfanumerică și grafică a informației, proiectoare cu rol de convertoare de imagini, respectiv ca valve de lumină în automatizări industriale.

Există preocupări susținute privind realizarea de memorii și filtre optice pentru noile generații de calculatoare numerice.

Numărul aplicațiilor specifice, în care se solicită dispozitivele menționate, crește continuu, iar lista acestora rămîne permanent deschisă noutăților din domeniul optoelectronicii.

Anexa 1

Materiale semiconductoare (principalele caracteristici tehnice)

Materialul	Grupa din sistemul periodic	Temperatura de topire [°C]	Densitatea [g/cm ³]	Constanta dielectrică	Înălțimea barierei de potențial eU _g [eV]	Mobilitatea	
						electronilor μ_n [cm ² /Vs]	golurilor μ_p [cm ² /Vs]
(la temperatura camerei)							
Ge	IV	937	5,32	16,3	0,66	3640	3040
Si		1417	2,33	11,7	1,107	1400	380
SiC		2830	3,22	—	2,8	4690	—
Se	VI	217	4,79	—	1,8	2	17
Te		450	6,21	—	0,32	2200	1000
BN	III—V	3000	2,25	—	4,6	—	—
BP		> 2000	2,97	11,6	6,0	—	300
AlP		> 1500	2,38	11,6	3,0	3500	—
AlAs		> 1600	3,79	—	2,46	1200	200
AlSb		1050	4,26	10,1	1,6	900	400
GaP		1465	4,13	8,5	2,25	300	150
GaAs		1237	5,32	11,1	1,47	8600	250
GaSb		712	5,60	14,0	0,68	5000	1000
InP		1070	4,78	10,7	1,27	5300	650
InAs		942	5,66	11,7	0,36	33000	450
InSb		525	5,77	15,7	0,17	80000	700
ZnS		II—VI	1850	4,09	5,13	3,58	120
ZnSe	1515		5,26	8,4	2,67	530	16
ZnTe	1238		5,70	≈ 9	2,26	530	900
CdS	1750		4,84	5,38	2,59	340	18
CdSe	1350		5,74	—	1,7	600	—
CdTe	1098		5,86	≈ 11	1,50	700	65
HgSe	800		8,26	5,8	0,6	18500	—
HgTe	670		8,20	—	0,025	22000	160
PbS	IV—VI	1077	7,50	—	0,37	600	200
PbSe		1062	8,15	—	0,26	1400	1400
PbTe		904	8,16	—	0,29	6000	4000

Anexa 2

Marcarea și codificarea dispozitivelor semiconductoare discrete

Generalități

Orice dispozitiv semiconductor discret — diodă, tranzistor, tiristor, etc. — are marcat pe capsula sa:

1) codul alfanumeric reprezentând tipul dispozitivului (ce exprimă — direct și/sau prin intermediul unui număr de identificare în catalog — caracteristicile funcționale de bază);

2) simbolul (alfanumeric sau grafic) caracteristic producătorului (facultativ);

3) data fabricației (facultativ) — în general codificată printr-un grup de 3 sau 4 cifre;

4) numărul lotului/seriei de fabricație (facultativ).

În plus, în cazul diodelor (și, uneori, și al tranzistoarelor) de mică putere se marchează cu un punct sau inel colorat¹⁾ unul dintre electrozi, cel „de referință” — de ex. catodul sau colectorul — făcând astfel posibilă identificarea tuturor celorlalți electrozi. În cazul diodelor de medie/mare putere, simbolul diodei marcat pe capsulă indică polaritatea electrozilor.

Din punct de vedere al specificității dispozitivelor semiconductoare realizate de un anumit producător, acestea se pot clasifica în:

a) produse „standard” — în fabricație curentă, de mare serie, la mai mulți producători și prezentând posibilitatea înlocuirii reciproce, eventual pe baza unor tabele de echivalență;

b) produse „de casă” (specifice producătorului respectiv sau destinate exclusiv anumitor utilizatori) — realizate sporadic sau ocazional, în serii mici sau mijlocii.

În prezent nu există norme internaționale general aplicabile care să reglementeze unitar codificarea tipului dispozitivelor semiconductoare. Fiecare producător utilizează — mai ales în cazul produselor „de casă” — codul său specific, prezentat în cataloagele proprii (a căror consultare devine de altfel indispensabilă atunci când se dorește cunoașterea caracteristicilor detaliate complete).

www.electronica.ro

Necesitatea facilitării interschimbabilității produselor „standard” a impus însă aplicarea și cunoașterea câtorva sisteme de codificare, relativ unitare, mai larg răspândite.

¹⁾ În cazul unor tranzistoare mai vechi această culoare poate indica și ea, uneori, (conform „codului culorilor”) valoarea amplificării în curent a tranzistorului iar în cazul unor diode, inelul colorat indică catodul.

Sistemul european PRO ELECTRON¹⁾

● Ex.: B C 107 — A

Materialul de bază	Funcția de bază	Numărul de serie	Indicații diverse
1	2	3	4
<p>A = material cu energie de activare între (0,6...1) eV — de ex. Ge (0,67 eV)</p> <p>B = idem, între (1,0...1,3) eV — de ex. Si (1,1 eV)</p> <p>C = idem, peste 1,3 eV — de ex. Ga As (1,4 eV)</p> <p>D = idem sub 0,6 eV — de ex. In Sb (0,33 eV)</p> <p>R = material cu structură complexă — de ex. în generatoarele Hall sau celulele fotoelectrice (dispozitive fără joncțiune)</p>	<p>A — diodă, de semnal, mică putere²⁾</p> <p>B — diodă cu capacitate variabilă („varicap“)</p> <p>C — tranzistor de J.F. de mică putere</p> <p>D — tranzistor de J.F. de putere</p> <p>E — diodă tunel</p> <p>F — tranzistor de I.F., de mică putere</p> <p>G — diverse componente (complexe sau deosebite)</p> <p>H — dispozitiv semiconductor sensibil la cmp magnetic</p> <p>K — generator Hall (în circuit magnetic deschis)</p> <p>L — tranzistor de I.F., de putere</p> <p>M — generator Hall (în circuit magnetic închis)</p> <p>N — optocuplor</p> <p>P — detector de radiații</p> <p>Q — generator de radiații</p> <p>R — dispozitiv de comandă, în comutație, de mică putere (de ex.: tiristor)</p> <p>S — tranzistor de comutație, de mică putere</p>	<p>trei cifre (100... 999)</p> <p>— pentru componentele de uz curent</p> <p><i>o literă</i> (X, Y, Z, etc.)³⁾ și două cifre (10...99)</p> <p>— pentru componentele de uz profesional</p> <p>C</p>	<p><i>o literă</i> (fără semnificație codificată) indicând variante constructive.</p> <p>Excepție: R („reverse“)</p> <p>— polaritate inversă</p> <hr/> <p>PENTRU DIODE ZENER</p> <p>— <i>o literă</i> — toleranța tensiunii Zener (A — 1%; B — 2%; C — 5%; D — 10%; E — 15%) și</p> <p>— <i>două cifre</i> (separate prin litera V înlocuind virgula zecimală) — tensiunea Zener medie (în volți)</p> <hr/> <p>PENTRU DIODE REDRESOARE ȘI TIRISTOARE</p> <p>— <i>două-trei cifre</i> — tensiunea inversă repetitivă, de vîrf (eventual, în stare blocată) — în volți</p> <p>— <i>litera R</i> (facultativ — polaritate inversă (tensiuni raportate la anod)</p>

¹⁾ Componentele acestui sistem sînt înregistrate la „Association Internationale PRO ELECTRON“ (10, Avenue Hamoir, Bruxelles 18, Belgia).

www.electronica.ro

²⁾ Un dispozitiv semiconductor este considerat de „mică putere“ pentru $R_{thj-amb} > 15^{\circ}\text{C}/\text{W}$ și de „putere“ pentru $R_{thj-amb} \leq 15^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

³⁾ Această literă nu are o semnificație codificată

(continuare)

1	2	3	4
	T — dispozitiv de comandă, în comutație, de putere (de ex. tiristor, fototiristor) U — tranzistor de comutație, de putere X — diodă multiplicatoare sau varactor Y — diodă redresoare de putere Z — diodă Zener		<i>www.electronica.ro</i>

În cazul diodelor, codul PRO ELECTRON poate fi înscris atât în clar cât și într-un cod al culorilor, prin patru benzi colorate, două mai largi (1 și 2) și două mai înguste (3 și 4) — citite în această ordine — și având semnificațiile următoare:

1 — maron = AA; roșu = BA.

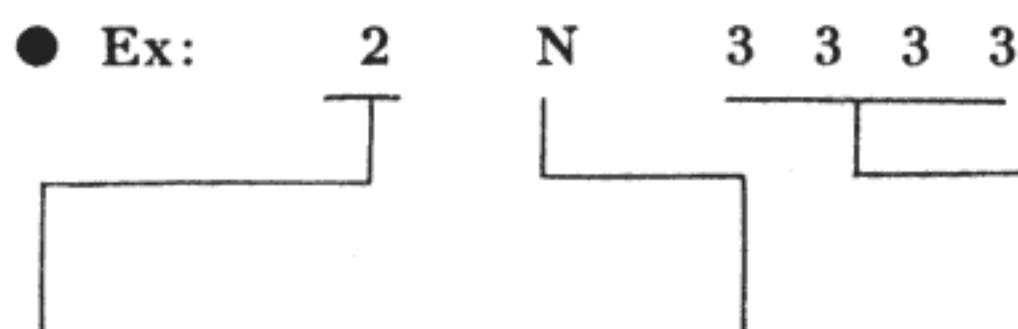
2 — portocaliu = S; galben = T; verde = V; albastru = W; negru = X; gri = Y; alb = Z.

3, 4 — negru = 0; maron = 1; roșu = 2; portocaliu = 3; galben = 4; verde = 5; albastru = 6; violet = 7; gri = 8; alb = 9 (conform codului culorilor aplicat la componentele pasive).

Exemple: roșu — albastru — albastru — roșu = BAW 62

roșu — negru — maron — portocaliu = BAX 13

Sistemul american JEDEC¹⁾



Structura	Natura	Numărul de identificare
1 — dispozitiv cu 2 electrozi (diodă)	N — dispozitiv semiconductor	01...9999
2 — dispozitiv cu 3 electrozi (tranzistor, tiristor etc.)		
3 — dispozitiv cu 4 electrozi (MOSTEC etc.)		
4 — dispozitiv optoelectronic		

¹⁾ Componentele acestui sistem sînt înregistrate la „Electronic Industries Association“ (2001 I Street, N.W.; Washington — D.C., S.U.A.)

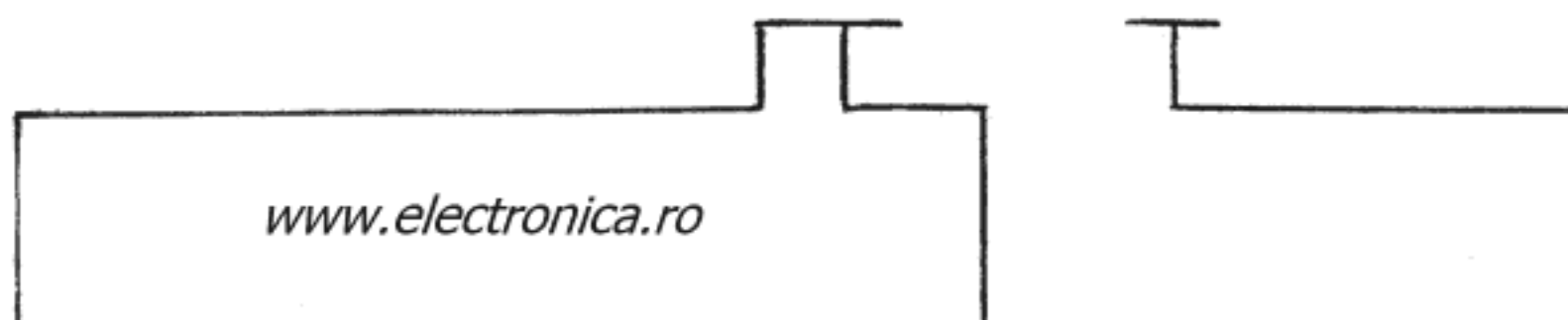
În cazul diodelor, numărul de identificare al codului JEDEC poate fi înscris atât în clar cât și într-un cod al culorilor prin patru benzi colorate (citite începînd cu cea mai lată) ce au semnificațiile conforme codului culorilor aplicat la componentele pasive (4 cifre).

Exemple: galben — maron — galben — gri = 1 N 4148

galben — violet — roșu — gri = 1 N 4728.

Sistemul european vechi

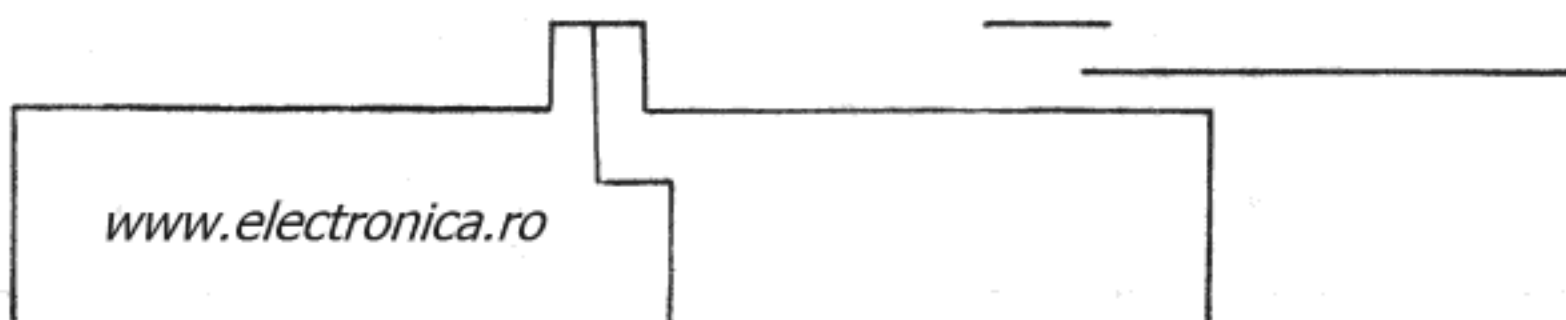
● Ex.: OAZ 200



Natura	Funcția	Numărul de identificare
O – dispozitiv semiconductor	A – diodă redresoare AP – fotodiodă AZ – diodă Zener C – tranzistor CP – fototranzistor RP – celulă fotoelectrică	001...999

Sistemul japonez JIS¹⁾

● Ex.: 2SA 106



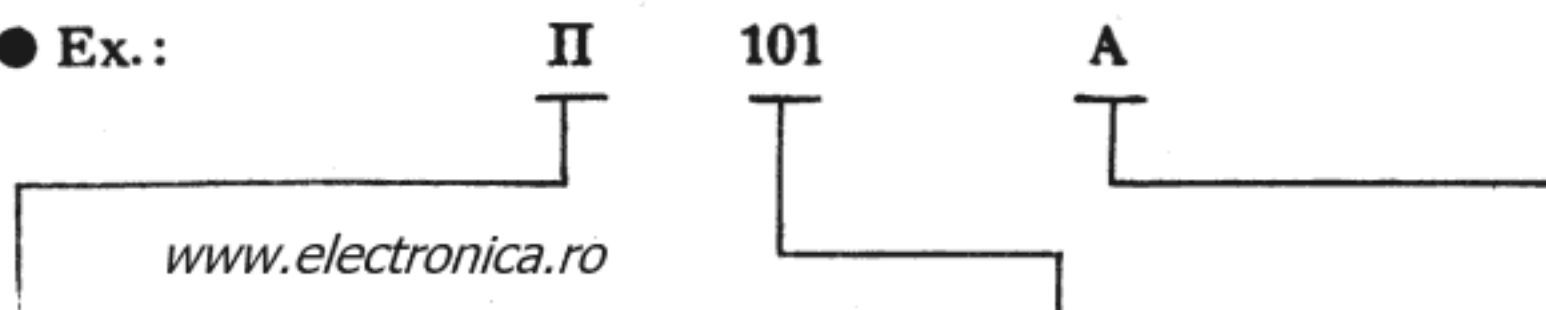
Structura	Natura	Funcția	Numărul de identificare
1 – dispozitiv cu 2 electrozi (diodă) 2 – dispozitiv cu 3 electrozi (tranzistor, tiristor etc.) 3 – dispozitiv cu 4 electrozi (MOSTEC etc.) 4 – dispozitiv optoelectronic	S – dispozitiv semiconductor	PENTRU TRANZISTOARE A – pnp, IF B – pnp, JF C – npn, IF D – npn, JF H – TUJ J – TEC, canal p K – TEC, canal n	01...9999

¹⁾ JIS = Japanese Industrial Standards

Sistemele sovietice

A. Varianta I (până în 1964)

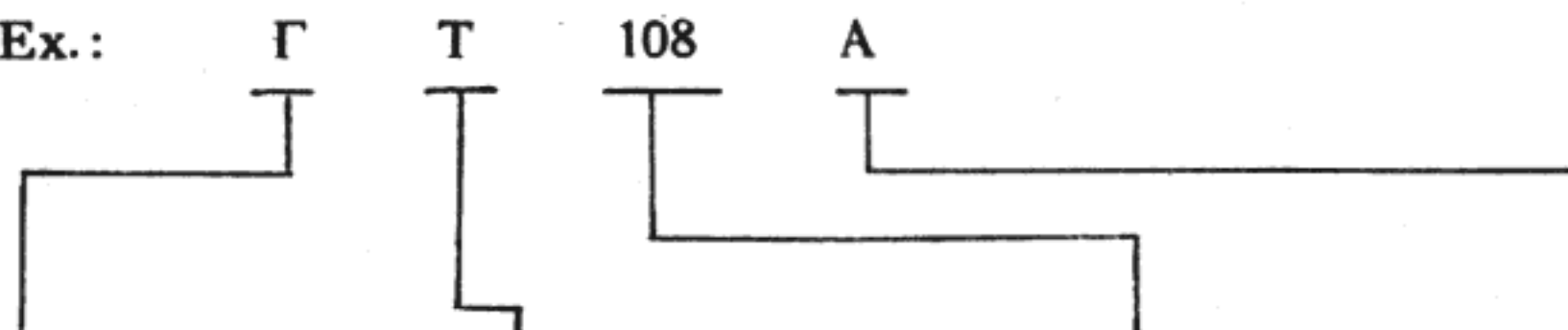
● Ex.:



Funcția	Tipul/utilizarea	Varianta constructivă
	DIODE	
Д = diodă П = tranzistor	1 – 100 = cu contact punctiform, cu Ge 101 – 200 = cu contact punctiform, cu Si 201 – 300 = planară, cu Si 301 – 400 = planară, cu Ge 401 – 500 = de amestec (IF) 501 – 600 = multiplicatoare 601 – 700 = detectoare 701 – 749 = parametrică, cu Ge 750 – 800 = parametrică, cu Si 801 – 900 = stabilizatoare de tensiune 901 – 950 = varicap 951 – 1000 = tunel 1001 – 1100 = bloc cu diode redresoare	A ... Я
	TRANZISTOARE	
	1 – 100 = cu Ge, de mică putere, JF 101 – 200 = cu Si, de mică putere, JF 201 – 300 = cu Ge, de (mare) putere, JF 301 – 400 = cu Si, de (mare) putere, JF 401 – 500 = cu Ge, de mică putere, IF 501 – 600 = cu Si, de mică putere, IF 601 – 700 = cu Ge, de (mare) putere, IF 701 – 800 = cu Si, de (mare) putere, IF	

B. Varianta II (între 1964–1973, conf. GOST 10862.64)

● Ex.:



Materialul	Tipul	Funcția/utilizarea	Varianta constructivă
1	2	3	4
Г (sau 1) = Ge К (sau 2) = Si А (sau 3) = GaAs (și similare)	Д = diodă (redresoare, de uz general etc.) Т = tranzistor В = diodă varicap	DIODE 101 – 399 = redresoare 401 – 499 = de uz general 501 – 599 = de impulsuri 601 – 999 = varicap	A...Я

1	2	3	4																														
	<p>A = diodă de înaltă frecvență Φ = dispozitiv opto-electronic H = tiristor-diodă Y = tiristor-triodă H = diodă tunel C = diodă stabilizatoare de tensiune U = bloc de diode redresoare</p> <p style="text-align: center;"><i>www.electronica.ro</i></p>	<p>DIODE DE ÎNALTĂ FRECVENȚĂ</p> <p>101 – 199 = de amestec 201 – 299 = detectoare 301 – 399 = modulatori 401 – 499 = parametrică 501 – 599 = de comutație 601 – 699 = multiplicatoare</p> <p>FOTODIODE (101–199) FOTOTRANZISTOARE (201–299) TIRISTOARE (DIODA sau TRIODA)</p> <p>101 – 199 = de mică putere 201 – 299 = de putere medie 301 – 399 = de (mare) putere</p> <p>DIODE TUNEL</p> <p>101 – 199 = amplificatoare 201 – 299 = oscilatoare 301 – 399 = de comutație 401 – 499 = de conversie</p> <p>DIODE STABILIZATOARE (ZENER)</p> <table border="1" data-bbox="871 1507 1564 1938"> <thead> <tr> <th></th> <th>U_z [V]</th> <th>P_d [W]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>101–199</td> <td>0,1–9,9</td> <td>≤ 0,3</td> </tr> <tr> <td>210–299</td> <td>10–99</td> <td>≤ 0,3</td> </tr> <tr> <td>301–399</td> <td>100–199</td> <td>≤ 0,3</td> </tr> <tr> <td>401–499</td> <td>0,1–9,9</td> <td>0,3–5</td> </tr> <tr> <td>510–599</td> <td>10–99</td> <td>0,3–5</td> </tr> <tr> <td>601–699</td> <td>100–199</td> <td>0,3–5</td> </tr> <tr> <td>701–799</td> <td>0,1–9,9</td> <td>≥ 5</td> </tr> <tr> <td>810–899</td> <td>10–99</td> <td>≥ 5</td> </tr> <tr> <td>901–999</td> <td>100–199</td> <td>≥ 5</td> </tr> </tbody> </table> <p>BLOCURI CU DIODE REDRESOARE</p> <p>101–199 = în coloană ($I_0 \leq 0,3$ A) 201–299 = în coloană ($I_0 > 0,3$ A) 301–399 = în punte ($I_0 < 0,3$ A) 401–499 = în punte ($I_0 = 0,3–10$ A) 501–599 = în punte ($I_0 > 10$ A)</p> <p>TRANZISTOARE</p> <p>101–199 = de mică putere, JF 201–299 = mică putere, MF 301–399 = mică putere, JF 401–499 = medie putere, JF 501–599 = medie putere, MF 601–699 = medie putere, IF 701–799 = (mare) putere, JF 801–899 = (mare) putere, MF 901–999 = (mare) putere, IF</p>		U_z [V]	P_d [W]	101–199	0,1–9,9	≤ 0,3	210–299	10–99	≤ 0,3	301–399	100–199	≤ 0,3	401–499	0,1–9,9	0,3–5	510–599	10–99	0,3–5	601–699	100–199	0,3–5	701–799	0,1–9,9	≥ 5	810–899	10–99	≥ 5	901–999	100–199	≥ 5	
	U_z [V]	P_d [W]																															
101–199	0,1–9,9	≤ 0,3																															
210–299	10–99	≤ 0,3																															
301–399	100–199	≤ 0,3																															
401–499	0,1–9,9	0,3–5																															
510–599	10–99	0,3–5																															
601–699	100–199	0,3–5																															
701–799	0,1–9,9	≥ 5																															
810–899	10–99	≥ 5																															
901–999	100–199	≥ 5																															

C. Varianta III (după 1973, conf. GOST 10862-72)

● Ex.: K Д 305 Б

Materialul	Tipul	Funcția/utilizarea	Varianta constructivă												
1	2	3	4												
<p>Γ (sau 1)= Ge (sau compuși ai săi)</p> <p>K (sau 2)= Si (sau compuși ai săi)</p> <p>A (sau 3)= compuși ai Ga</p>	<p>T = tranzistor bipolar</p> <p>Π = tranzistor cu efect de clmp TEC)</p> <p>Д = diodă (uz general)</p> <p>Ц = bloc cu diode redresoare</p> <p>A = diodă de IF</p> <p>B = diodă varicap</p> <p>И = diodă tunel</p> <p>H = tiristor-diodă</p> <p>У = tiristor-triodă</p> <p>A = diodă electroluminescentă</p> <p>Г = generator de zgomot</p> <p>Ъ = diodă Gunn</p> <p>K = stabilizator de curent</p> <p>C = stabilizator de tensiune</p>	<p>TRANZISTOARE (BIPOLARE și TEC)</p> <p>101–199 = mică putere, JF</p> <p>201–299 = mică putere, MF</p> <p>301–399 = mică putere, IF</p> <p>401–499 = medie putere, JF</p> <p>501–599 = medie putere, MF</p> <p>601–699 = medie putere, IF</p> <p>701–799 = (mare) putere, JF</p> <p>801–899 = (mare) putere, MF</p> <p>901–999 = (mare) putere, IF</p> <p>DIODE</p> <p>101–199 = redresoare ($I_0 \leq 0,3$ A)</p> <p>201–299 = redresoare ($I_0 = 0,3–10$ A)</p> <p>401–499 = de uz general ($f < 1$ GHz)</p> <p>DIODE DE IMPULSURI</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>$t_{creștere}$ [ns]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>501–599</td> <td>> 150</td> </tr> <tr> <td>601–699</td> <td>30–150</td> </tr> <tr> <td>701–799</td> <td>5–30</td> </tr> <tr> <td>801–899</td> <td>1–5</td> </tr> <tr> <td>901–999</td> <td>< 1</td> </tr> </tbody> </table>		$t_{creștere}$ [ns]	501–599	> 150	601–699	30–150	701–799	5–30	801–899	1–5	901–999	< 1	A...
			$t_{creștere}$ [ns]												
501–599	> 150														
601–699	30–150														
701–799	5–30														
801–899	1–5														
901–999	< 1														
		<p>BLOCURI CU DIODE REDRESOARE</p> <p>101–109 = în coloană ($I_0 < 0,3$ A)</p> <p>201–299 = în coloană ($I_0 = 0,3...10$ A)</p> <p>301–399 = în punte ($I_0 < 0,3$ A)</p> <p>401–499 = în punte ($I_0 = 0,3...10$ A)</p> <p>DIODE DE IF</p> <p>101–199 = de amestec</p> <p>201–299 = detectoare</p> <p>401–499 = parametrice</p> <p>501–599 = de reglaj</p>													

www.electronica.ro

1	2	3	4																														
		<p>601 – 699 = multiplicatoare 701 – 799 = oscilatoare</p> <p>DIODE VARICAP</p> <p>101 – 199 = de acord 201 – 229 = multiplicatoare</p> <p>DIODE TUNEL</p> <p>101 – 199 = amplificatoare 201 – 299 = oscilatoare 301 – 399 = de comutație 401 – 499 = de conversie</p> <p>TIRISTOARE-DIODĂ</p> <p>101 – 199 = ($I_0 < 0,3 \text{ A}$) 201 – 299 = ($I_0 = 0,3 - 10 \text{ A}$)</p> <p>TIRISTOARE-TRIODĂ</p> <p>101 – 199 = convenționale ($I_0 < 0,3 \text{ A}$) 201 – 299 = convenționale ($I_0 = 0,3 \dots 10 \text{ A}$) 301 – 399 = bioperaționale ($I_0 < 0,3 \text{ A}$) 401 – 499 = bioperaționale ($I_0 = 0,3 \dots 10 \text{ A}$) 501 – 599 = triacuri ($I_0 < 0,3 \text{ A}$) 601 – 699 = triacuri ($I_0 = 0,3 \dots 10 \text{ A}$)</p> <p>DIODE ELECTROLUMINESCENTE</p> <p>101 – 199 = în infraroșu 301 – 499 = în vizibil</p> <p>DIODE STABILIZATOARE DE TENSIUNE (ZENER)</p> <table border="1" data-bbox="926 2199 1633 2700"> <thead> <tr> <th></th> <th>U_z [V]</th> <th>P_d [W]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>101 – 199</td> <td>< 10</td> <td>< 0,3</td> </tr> <tr> <td>210 – 299</td> <td>10 – 99</td> <td>< 0,3</td> </tr> <tr> <td>301 – 399</td> <td>100 – 199</td> <td>< 0,3</td> </tr> <tr> <td>401 – 499</td> <td>< 10</td> <td>0,3 – 5</td> </tr> <tr> <td>510 – 599</td> <td>10 – 99</td> <td>0,3 – 5</td> </tr> <tr> <td>601 – 699</td> <td>100 – 199</td> <td>0,3 – 5</td> </tr> <tr> <td>701 – 799</td> <td>< 10</td> <td>> 5</td> </tr> <tr> <td>810 – 899</td> <td>10 – 99</td> <td>> 5</td> </tr> <tr> <td>901 – 999</td> <td>100 – 199</td> <td>> 5</td> </tr> </tbody> </table>		U_z [V]	P_d [W]	101 – 199	< 10	< 0,3	210 – 299	10 – 99	< 0,3	301 – 399	100 – 199	< 0,3	401 – 499	< 10	0,3 – 5	510 – 599	10 – 99	0,3 – 5	601 – 699	100 – 199	0,3 – 5	701 – 799	< 10	> 5	810 – 899	10 – 99	> 5	901 – 999	100 – 199	> 5	
	U_z [V]	P_d [W]																															
101 – 199	< 10	< 0,3																															
210 – 299	10 – 99	< 0,3																															
301 – 399	100 – 199	< 0,3																															
401 – 499	< 10	0,3 – 5																															
510 – 599	10 – 99	0,3 – 5																															
601 – 699	100 – 199	0,3 – 5																															
701 – 799	< 10	> 5																															
810 – 899	10 – 99	> 5																															
901 – 999	100 – 199	> 5																															

Sistemul românesc (codul intern CCSIT-CE)

● Ex.:

RO B

740

www.electronica.ro

Cod specific producătorului	Funcția	Numărul de identificare
RO (Romania)	<p>A – tranzistor cu Ge, de mică putere¹⁾</p> <p>B – circuit integrat bipolar</p> <p>C – tiristor</p> <p>D – diodă de semnal mic</p> <p>F – ansamblu de diode redresoare</p> <p>H – circuit integrat hibrid</p> <p>L – dispozitiv optoelectronic</p> <p>M – circuit integrat MOS</p> <p>P – tranzistor cu Si, de putere</p> <p>R – diodă redresoare</p> <p>S – tranzistor cu Si, de mică putere²⁾</p> <p>V – diodă tunel, varactor, varicap sau pentru microunde</p> <p>X – dispozitiv experimental (pentru cercetare)</p> <p>Z – diodă Zener</p>	01...9999

¹⁾ putere disipată <2,5 W

²⁾ bipolare, unijonțiune sau cu efect de câmp

Анеха 3

Diode semiconductoare

1. Diode redresoare

www.electronica.ro

A. Tipuri

- diodă redresoare [rectifier (diode)/diode redresseuse/Gleichrichter-diode/выпрямительный диод]
- bloc redresor în puncte (bridge rectifier assembly/redresseur en pont/Gleichrichter-Brückenschaltung/выпрямительный мост)
- coloană (cu diode) redresoare (rectifier stack/colonnnette/Gleichrichter-säule (-block)/столб; столбик)

B. Parametri caracteristici

a) *Tensiune (continuă) directă* (continuous forward voltage/tension (continue) directe/Durchlass (gleich)spannung/прямое (постоянное) напряжение) V_F [V].

b) *Tensiune directă de vîrf* (peak forward voltage/tension directe de crête/Spitzen-Durchlassspannung/наибольшее прямое напряжение) V_{FM} [V]

c) *Tensiune directă medie* (average forward voltage/tension directe moyenne/mittlere Durchlassspannung/среднее прямое напряжение) $V_{F(AV)}$ [V]

d) *Tensiune (continuă) inversă* [(continuous) reverse voltage/tension (continue) inverse/Sperrspannung/обратное (постоянное) напряжение] V_R [V]

e) *Tensiune inversă de vîrf, de lucru* (working peak reverse voltage/tension inverse de crête en fonctionnement/Lauf-Spitzen-Sperrspannung/работающее обратное напряжение) V_{RWM} [V]

f) *Tensiune inversă de vîrf repetitivă* (repetitive peak reverse voltage/tension inverse repetitive de crête/periodische Spitzen-Sperrspannung/периодическое наибольшее обратное напряжение) V_{RRM} [V]

g) *Tensiune inversă de vîrf, accidentală*, (non repetitive peak reverse voltage/tension inverse non-repetitive de crête/nicht-periodische Spitzen-Sperrspannung/случайное наибольшее обратное сопротивление) V_{RSM} [V]

h) *Tensiune de străungere* (breakdown voltage/tension de claquage (inverse)/Durchbruchspannung/пробивное напряжение; напряжение пробоя) V_{BR} (V)

i) *Tensiune de prag* (threshold voltage/tension de seuil/Grenzspannung/пороговое напряжение) V_{TO} [V]

j) *Curent (continuu) direct* [(continuous) forward current/courant (continu) direct/Durchlass (gleich) strom/прямой (постоянный) ток] I_F [A]

k) *Curent direct de vîrf repetitiv* (repetitive peak forward current/courant direct repetitif de crête/periodische Spitzen-Durchlassstrom/периодический наибольший прямой ток) I_{FRM} [A]

l) *Curent direct de suprasarcină admisibil* (allowed overload forward current/courant direct de surcharge admissible/zulässiger Stoss-Durchlassstrom/допустимый прямой ток перегрузки) $I_{F(OV)}$ [A]

m) *Curent direct de vîrf de suprasarcină accidentală* (non-repetitive surge peak forward current/courant direct non-repetitif de surcharge/nicht periodischer Stoss-Durchlassstrom/прямой ток случайной перегрузки) I_{FSM} [A]

n) *Curent mediu redresat* (average rectified (forward) current/courant redressé moyen/mittlerer Richtstrom/средний выпрямленный ток) I_0 [A]

o) Curent (continuu) invers [(continuous) reverse (leakage), current/courant (continu) invers (de fuite)/Sper (gleich) strom; negativer Leckstrom/обратный (постоянный) ток] I_R [A]

p) Curent invers mediu (average reverse current /courant invers moyen/mittlerer Sperrstrom/средний обратный ток) $I_{R(AV)}$ [A]

q) Rezistență aparentă (apparent resistance/résistance apparente/Scheinwiderstand/кажущееся сопротивление) r_T [Ω]

r) Integrala de curent (curent integral/intégrale du courant/Stromintegral/интеграл тока) $\max \int i^2 dt (I^2 t)$ [$A^2 s$]

Codificarea unor diode redresoare cu siliciu de medie/mare putere, produse de IPRS — Băneasa
(conf. NTR. 19036-80)

Ex.	D	400	N	200	T
Funcția	Curentul direct mediu I_{FAB} [A]	Tip/polaritate		Tensiune inversă de vîrf repetitivă V_{RRM} [V]	Tip constructiv capsulă
D-diodă	(la T_{amb} . specificat)	N — normale R — cu polaritate inversă (anod la ambază) F — rapide A — cu avalanșă controlată		200 400 600 ... 2600 2800 3000	A — fir-fir B — șurub-tresă E — bază plată-tresă T — disc

Exemple de diode redresoare produse în România (producător: I.P.R.S. — Băneasa)

www.electronica.ro

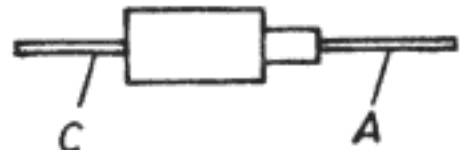
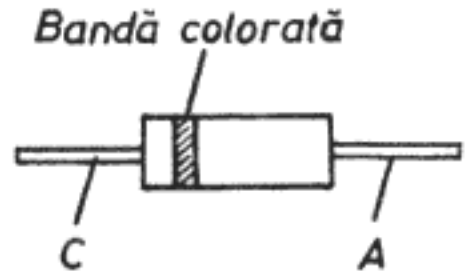
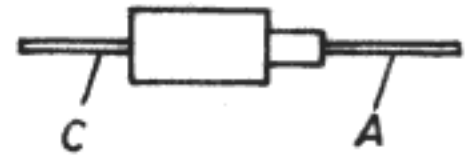
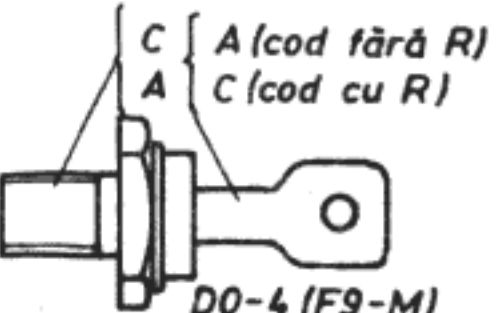
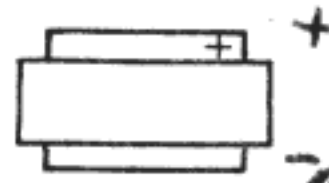
Diode cu germaniu

Cod	V_{RRM} [V]	I_{FM} [A]	V_F [V]	I_0 [A]	Capsula
EFR 135	100	15	0,7	0,8	
EFR 135 A	100	15	0,7	4	
EFR OB	30	15	0,7	0,8	

Diode cu seleniu (de înaltă tensiune)

Cod	I_F [mA]	V_R [kV]	V_{RSM} [kV]	T_{amb} [°C]	Capsulă
TV 13	0,200	13	15,6	50	
TV 18	0,200	18	21,6	50	

Diode cu siliciu

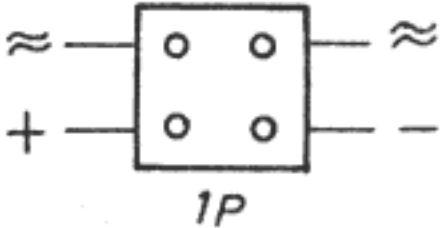
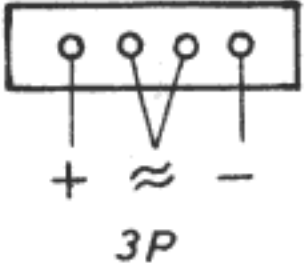
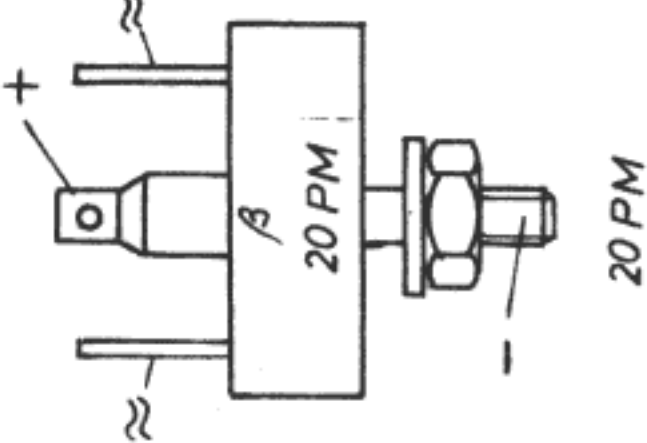
Cod	I_{FRMSM} [A]		I_{FAVM} [A]		V_{RRM} ($= V_B$) [V]	I_{FRM} [A]	I_{FSM} (10ms) [A]	V_F [V]		I_R [mA]		i^2t [A ² s]	Capsulă
	la T_{amb} [°C]	la T_{amb} [°C]	la T_{amb} [°C]	la T_{amb} [°C]				la I_F [A]	la T_{amb} [°C]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
F 057	1	95	0,75	25	50	4	30	1	0,75	0,05	100	4,5	
F 407	1	95	0,75	25	800	4	30	1	0,75	0,05	100	4,5	<i>DO-13 (F-61)</i>
1N 4001	1,15	75	1	75	50	10	30	1,1	1	0,05	100	4,5	<i>Bandă colorată</i> 
F 102	3	25	2	25	100	6,5	70	1,2	2	1	150	24,5	<i>F-126</i> 
6 Si 05(R)	6.8	125	6	125	50	20	160	1,2	20	3	125	—	
RAG 115	20	(100)	15	(100)	100	60	250	1,4	60	3	150	—	

AUTO

RAG

Auto

EXEMPLE DE PUNȚI REDRESOARE MONOFAZATE ȘI TRIFAZATE

Cod	$V_{RM}(V_{RRM})$ [V]	V_{RSM} [V]	I_a [A]	I_{FRM} [A]	I_{FSM} [A]	i^2t [A ² s]	V_d [V]	$V_{ef}(V_a)$ [V]	Capsulă
MONOFAZATE									
1 PM 05	50	100	1,2	4	30	4,5	30	35	
1 PM 8	800	900	1,2	4	30	4,5	480	560	
3 PM 05	50	100	3,2	6,5	70	24	30	35	
3 PM 8	800	900	3,2	6,5	70	24	480	560	
20 PM 03	30	50	20	30	250	313	18	20	
20 PM 8AC	800	—	20	—	180	—	—	—	
TRIFAZATE									
4 PT 2	200	300	4	—	—	—	—	—	4 PT2

GHID DE SELECȚIE
A DIODELOR REDRESĂRE CU SILICIU
 (produse de IPRS Băneasa)

Curent direct limita mediu $I_{F(AV)}$ [A]	Tensiune inversă de vîrf repetitivă V_{RRM} [kV]																
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3		
0,75	<u>F057 ... F407</u>																
1	<u>1N4001 ... 1N4007</u>																
					<u>F4AC ... F10AC</u>												
					<u>D1A4 ... D1A12</u>												
												<u>D1N13/16</u>					
2	<u>F102 ... F112</u>																
					<u>F42AC ... F102AC</u>												
6	<u>6Si 0,5(R) ...</u>						<u>6Si 15(R)</u>										
	<u>6Si1P ... 6Si5P</u>																
10	<u>D10N05 ...</u>										<u>D10N16</u>						
					<u>D10A4 ... D10A10</u>												
16	<u>D16N05 ...</u>										<u>D16N16</u>						
					<u>D16A4 ...</u>						<u>D16A14</u>						
20	<u>RA032052 RA120/220/420</u>																
25	<u>RA125/225</u>		<u>D25A4</u>								<u>D25A16</u>						
	<u>D25N05</u>										<u>D25N16</u>						
32	<u>D32N05</u>										<u>D32N16</u>						
40	<u>D40N05</u>										<u>D40N16</u>						
	<u>K1040</u>										<u>K1140</u>						
50	<u>D50N05</u>										<u>D50N16</u>						
60	<u>KS1060</u>										<u>KS1160</u>						
90					<u>KU 290</u>						<u>KU 1490</u>						
200			<u>TU 21</u>				<u>TU 28</u>				<u>TU 29</u>						
300			<u>TU 31</u>				<u>TU 35</u>										
325	<u>D325N200B</u>										<u>D325N2000B</u>						
350												<u>TU38/39</u>					
355	<u>D355N200B</u>										<u>D355N2000B</u>						
360	<u>D358N200T/800T</u>																
400	<u>D400N200E</u>										<u>D400N2000E</u>						
410	<u>D408N200T/800T</u>																
450	<u>D450N200E</u>										<u>D450N2000E</u>						
500												<u>D500N1400T... D500N3000T</u>					
630												<u>D630N1400T... D630N3000T</u>					
800												<u>D800N1400T... D800N2800T</u>					
1000												<u>D1000N1400T... D1000N2800T</u>					
1300	<u>D1300N200T</u>										<u>D1300N2000T</u>						
1600	<u>D1600N200T</u>										<u>D1600N2000T</u>						

2. Diode stabilizatoare de tensiune (ZENER)

A. Tipuri

— diodă (Zener) stabilizatoare de tensiune (voltage regulator diode; avalanche (Zener) diode; Z-Diode/diode régulatrice (stabilisatrice) de tension; diode Zener/Stabilisatordiode; Z-Diode/диод Зенера, лавинный диод, диод регулировки напряжения, (диод) стабилитрон)

— diodă Zener de referință (voltage reference diode/diode de référence/Referenzdiode/опорный диод)

B. Parametri caracteristici¹⁾

a) *Tensiune nominală de stabilizare* (la I_Z dat) [avalanche (Zener) voltage/tension stabilisée (regulée, Zener)/stabilisierte; Referenz-: Zener-Nennspannung стабилизированное номинальное напряжение) V_{ZT} [V]

b) *Curent de control al tensiunii de stabilizare* ([test (Zener) current/courant de mesure (Zener)/Test-; Prüf-; Mess-; Zener-Strom/ток контроля стабилизированного напряжения) I_{ZT} [A]

c) *Rezistență diferențială în regiunea de stabilizare* [differential (Zener) resistance/résistance (Zener) différentielle/dynamischer Z-Widerstand/дифференциальное сопротивление в области стабилизаций) r_{ZT} [Ω]

d) *Coeficient de temperatură al tensiunii de stabilizare* (breakdown temperature coefficient/coefficient de temperature de la tension stabilisée (regulée)/Temperaturkoeffizient der Zener-Nennspannung/температурный коэффициент стабилизированного напряжения) α_{VZ} [%/°C] [mV/°K]

Codificarea unor diode ZENER

(cu puteri disipate ≥ 1 W)
 produse de IPRS — Băneasa
 (conf. NTR 19036-80)

www.electronica.ro

Ex.: 10 DZ 180

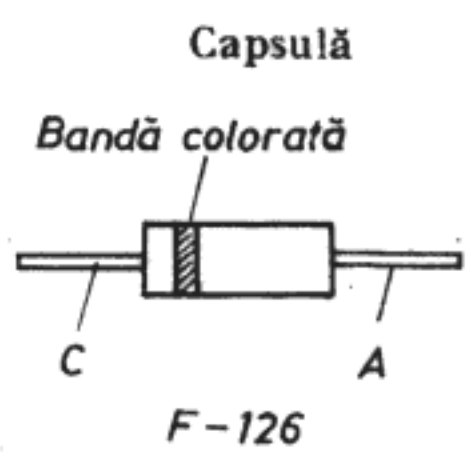
Putere disipată P_R [W]	Funcție	Tensiunea de stabilizare nominală V_{ZT} [V]
1 4 10 20	DZ — diode zener	(valori normalizate)

¹⁾ În plus față de (o parte din) parametrii prezentați la „diodele redresoare“.

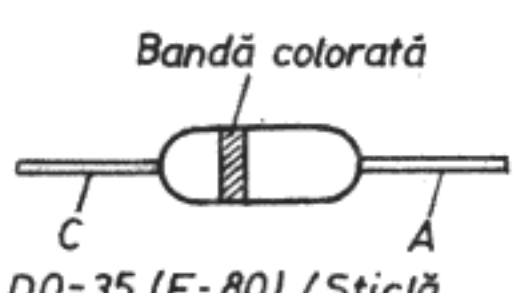
Exemple de diode ZENER produse în România
(producător I.P.R.S. — Băneasa)

● **DIODE CU SILICIU DE REFERINȚĂ**

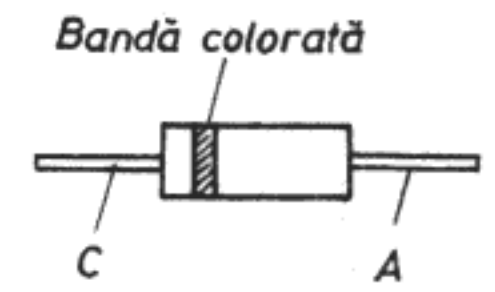
Cod	Valori limită absolute			Caracteristici electrice							
	I_{FM} [mA]	R_{inj-a} [°C/W]	$I_R[\mu A]$ (la $V_R = 10V$)	$I_F = 0,1$ mA		$I_F = 1$ mA		$I_F = 10$ mA		$I_F = 100$ mA	
				V_{ET} [V]	r_{dM} [Ω]	V_{ET} [V]	r_{dM} [Ω]	V_{ET} [V]	r_{dM} [Ω]	V_{ET} [V]	r_{dM} [Ω]
DRD 1	250	100	10	0,4...0,5	680	0,52...0,63	65	0,65...0,74	6,7	0,75...0,85	0,7
DRD 2	250	100	10	0,8...1,0	1300	1,05...1,25	135	1,25...1,5	13	1,5...1,75	2
DRD 3	250	100	10	1,22...1,42	2250	1,62...1,83	205	1,98...2,18	21	2,3...2,6	3,5
DRD 4	250	100	10	1,5...1,9	3100	2,07...2,37	275	2,6...2,8	27	3...3,3	4,5



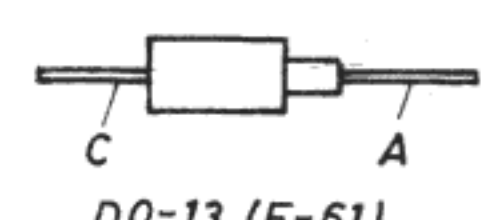
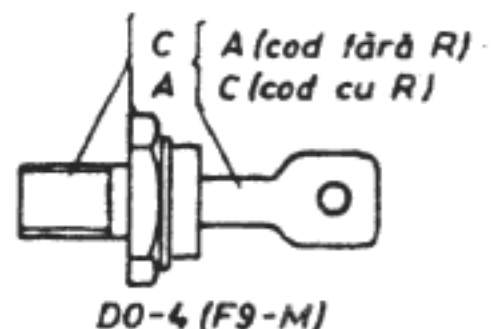
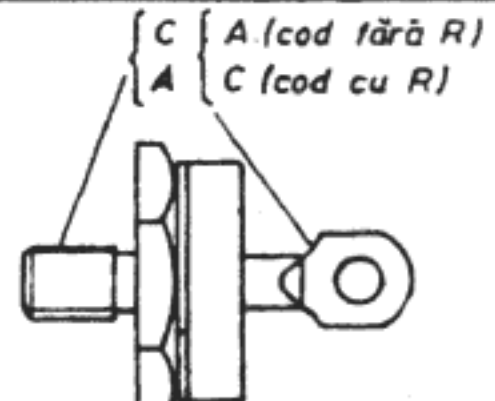
● DIODE ZENER DE 0,4 W

Cod	V_{ZT} [V]			r_z [Ω] (la I_{ZT} 5mA)	α_{VZT} [$10^{-4}/^{\circ}\text{C}$] (la I_{ZT} 5mA)	Capsulă
	min	nom	max			
1	2	3	4	5	6	
DZ 2V7	2,5	2,7	2,9	<83	-9...+4	 <p>Bandă colorată DO-35 (F-80) / Sticlă</p>
DZ 3	2,8	3	3,2	<95	-9...-3	
DZ 3V3	3,1	3,3	3,5	<95	-8...-3	
DZ 10	9,4	10	10,6	<15	0...+9	
DZ 11	10,4	11	11,6	<20	0...+9	
DZ 47	44	47	50	<100	+10...+12	
DZ 51	48	51	54	<100	+10...+12	

● DIODE ZENER DE 1 W

Cod	V_{ZT} [V]			I_{ZT} [mA]	r_{ZM} [Ω]	α_{VZ} [$10^{-4}/^{\circ}\text{C}$]	I_{ZM} [mA]	Capsulă
	min	nom	max					
PL 3V3Z	3,1	3,3	3,5	100	10	-6	285	 <p>Bandă colorată F-126</p>
PL 3V6Z	3,4	3,6	3,8	100	10	-5,5	260	
PL 180 Z	168	180	191	100	10	9,5	5,2	
PL 200 Z	188	200	212	100	10	10,00	5,0	

● DIODE ZENER DE 1 W (1 N...), 4W (4 DZ...), 20 W (20 DZ...)

Cod	V_{ZT} [V]			I_{ZT} [mA]	r_{ZM} [Ω]	$\alpha_{r z}$ [$10^{-4}/^{\circ}\text{C}$]	I_{ZM} [mA]	Capsulă
	min	nom	max					
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1N3016B	6,4	6,8	7,2	37	3,5	2...6	140	 <p>DO-13 (F-61)</p>
1N3017B	7	7,5	7,9	34	4	3...7	130	
1N3050B	168	180	191	1,4	1200	10...11	5,2	
1N3051B	188	200	212	1,2	1500	10...11	4,7	
4DZ10	9	10	11	250	2,4	5,5	350	 <p>DO-4 (F9-M) (cu P în cod - T0 220)</p>
4DZ12	10,5	12	13,5	210	3,2	6,5	300	
4DZ150	130	150	165	17	190	9,5	25	
4DZ180	140	180	205	14	260	9,5	20	
20DZ150	130	150	165	33	150	9,6	125	 <p>DO-5 (F-10M)</p>
20DZ180	160	180	205	28	280	9,8	100	

3. Diode pentru semnale de mică putere

A. Tipuri

- diodă cu contact punctiform (point contact diode: whisker diode/diode á contact ponctuel/Spitzen (kontakt) diode/точечно-контактный (точечный) диод)
- diodă (aliată) produsă prin aliere (alloyed diode/whiskerless diode/diode (á jonction) alliée/Legierungsdiode/сплавной (вилавной) диод)
- diodă (difuzată) produsă prin difuzie (diffused diode/diode (á jonction) diffusée/Diffusiondiode; diffundierte Diode/дифузионный диод)
- diodă cu Ge (germanium diode/diode au germanium/Germaniumdiode/германиевый диод)
- diodă cu Si (silicon diode/diode au silicium/Siliziumdiode/кремниевый диод)
- diodă detectoare (detector diode/diode detectrice/Detektordiode детекторный диод)
- diodă de comutație (switching diode/diode de commutation (commutatrice)/Schaltdiode/коммутационный (коммутирующий) диод)
- diodă de uz general (general purpose diode/diode universelle/(Allzweck-) Universaldiode/универсальный диод).

www.electronica.ro

B. Parametri caracteristici

a) *Tensiune (continuă) directă* [(continuous) forward voltage/tension continue) directe/Durchlass(gleich)spannung/прямое (постоянное) напряжение)
 $V_F[V]$

b) *Tensiune directă medie* (average forward voltage/tension directe moyenne/Mitteldurchlassspannung/среднее прямое напряжение)

$$V_{F(AV)} [V]$$

c) *Tensiune (continuă) inversă* [(continuous) reverse voltage/tension (continue) inverse/Sperr(gleich)spannung/обратное (постоянное) напряжение)

$$V_{RM}[V]$$

d) *Tensiune inversă de vîrf* (peak reverse voltage/tension inverse de crête/Spitzen-Sperrspannung/наибольшее обратное напряжение)

$$V_R[V]$$

e) *Tensiune inversă de suprasarcină accidentală* (non-repetitive surge peak reverse voltage/tension inverse non-repetitive de surcharge/nicht-periodische Stoss-Sperrspannung/обратное напряжение случайной перегрузки)

$$V_{RSM}[V]$$

f) *Tensiune de străungere* (breakdown voltage/tension de claquage (inverse/Durchbruchspannung/пробивное напряжение; напряжение пробоя)

$$V_{(BR)}[V]$$

g) *Curent (continuu) direct* (continuous) forward current/courant (continu) direct/Durchlass(gleich)strom/прямой (постоянный) ток)

$$I_F[A]$$

h) *Curent direct de vîrf* (peak forward current/courant direct de crête/Spitzen-Durchlassstrom/наибольший прямой ток)

$$I_{FM}[A]$$

i) *Curent direct de suprasarcină accidentală* (non-repetitive surge peak forward current/courant direct non-repetitif de surcharge/nichtperiodischer Stoss-Durchlassstrom/прямой ток случайной перегрузки)

$$I_{FSM}[A]$$

j) *Curent mediu redresat* (average rectified (forward) current/courant redressé moyen/mittlere Richtstrom/средний выпрямленный ток)

www.electronica.ro

$$I_0[A]$$

k) *Curent (continuu) invers* [(continuous) reverse (leakage) current/courant (continu) invers (de fuite)/Sperr (gleich)strom; negativer Leckstrom/обратный (постоянный) ток)

$$I_R[A]$$

l) *Curent invers de vîrf* (peak reverse current/courant invers de crete/Spitzen-Sperrstrom/наибольший обратный ток)

$$I_{RM}[A]$$

m) *Putere de suprasarcină accidentală* (non-repetitive surge peak power dissipation/puissance dissipée non-repetitive de crête/nichtperiodische Stoss-Verlustleistung/рассеиваемая мощность случайной перегрузки)

$$P_{SM}[W]$$

n) *Timp de recuperare direct* (forward recovery time/temps de recouvrement direct/Durchlassverzögerungszeit/время установления прямого сопротивления (напряжения)

$$t_{fr}[s]$$


o) *Timp de recuperare invers* (reverse recovery time/temps de recouvrement invers/Sperrverzögerungszeit; Sperrholungszeit/время восстановления обратного сопротивления (тока)

$$t_{rr}[s]$$

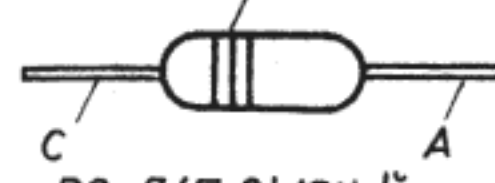
**Exemple de diode pentru semnale de mică putere
produse în România** (producător: I.P.R.S. — BĂNEASA)

www.electronica.ro

● **DIODE CU GERMANIU, DE SEMNAL ȘI COMUTAȚIE**

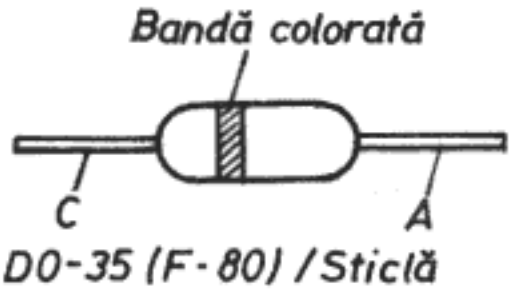
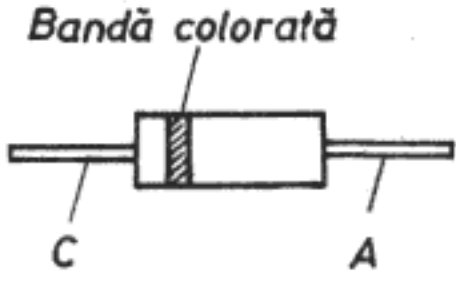
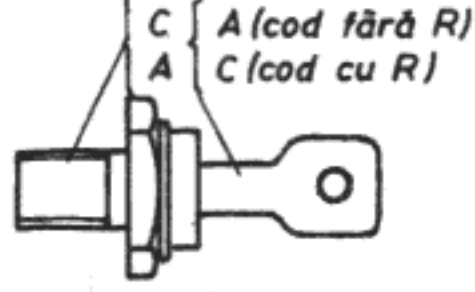
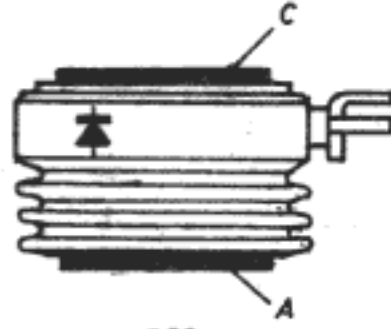
Cod	V_{RM} [V]	I_{FAV} [mA]	V_F [V]	I_F [mA]	t_{rr} [ns]	Capsulă
AA 112	25	20	1	5	—	<p>1...3 inele colorate</p>  <p>DO-7(F-2)/Sticlă</p> <p>Inelele au culorile următoare (citite de la C spre A):</p> <p>AA-112: alb-roșu AA-114: portocaliu AB-117: negru-portocaliu AA-118: negru-portocaliu AA-131: verde-portocaliu EFD-103: roșu-albastru-galben EFD-105: verde-roșu EFD-106: cenușiu-roșu EFD-107: alb-galben EFD-108: portocaliu-galben EFD-109: portocaliu-galben-negru EFD-110: portocaliu-albastru EFD-115: cenușiu 1N 54 A: negru-verde-galben 1N 541: verde-galben-cafeniu 1N 542: verde-galben-roșu</p>
AA 114 (EFD 104)	25	20	1	5	—	
AA 117	100	20	1,9	5	—	
AA 118	100	20	1,5	5	—	
AA 131 (EFD112)	40	20	1	5	—	
EFD 103	30	20	1	5	—	
EFD 105	30	20	1	5	160	
EFD 106	25	20	1	5	—	
EFD 107 (AA 130)	15	20	1	5	—	
EFD 108	100	20	1	5	—	
EFD 109	100	20	1	5	—	
EFD 110	35	20	1	5	—	
EFD 115	45	20	1	5	—	
1N 54A	80	20	1	5	—	
1N 541 (AA 119)	45	20	1	5	—	
1N 542	45	20	1	5	—	

● **DIODE CU GERMANIU, DE UZ GENERAL***

Cod	V_{RM} [V]	V_R [V]	I_F [mA]	I_{FSM} [mA]	V_{FM} [V]		I_{RM} [μA]		Capsulă
					la I_F [mA]	la V_R [V]	la V_R [V]	la V_R [V]	
1N 34A	75	60	50	500	1	5	30	10	<p>1...3 inele colorate</p>  <p>DO-7(F-2)/Sticlă</p>
1N 38A	120	100	50	500	1	3	5	3	
1N 127A	125	100	50	500	1	3	300	50	
1N 198	100	80	50	500	1	4	10	10	
AA 113	65	60	50	500	1,6	10	120	30	
AA 116	35	30	50	500	1,5	10	140	10	
AA 138	25	15	50	500	1,5	10	50	10	
OA 90	30	20	50	500	1,5	10	135	10	
OA 91	115	90	50	500	1,9	10	1	10	
OA 92	20	15	50	500	1	3	115	15	
OA 95	115	90	50	500	1,5	10	7	10	

*) Aceste diode nu se fabrică în mod curent la IPRS—Băneasa, ci doar la cererea beneficiarului.

● DIODE CU SILICIU DE COMUTAȚIE (rapide și ultrarapide)

Cod	V_{RRM} [V]	t_{rr} [ns]	I_{FAVM} [mA] (la 25°C)	I_{FSM} [A] (la 25°C)	i^2 [[A ² g] (la 25°C)	R_{thj-cM} [°C/W]	Capsulă	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1N 4154	35	4	150	2	—	350	 <p>Bandă colorată C A DO-35 (F-80) / Sticlă</p>	
1N 4454	50	4	150	2	—	350		
BAY 93	20	15	75	—	—	350		
BA 243/ 244	20	20	100	6	—	350		
BA 21W	70	50	400	6	—	300		
BA 12X	90	50	400	—	—	300		
BA 170... 172	20...50	250	160	—	—	410		
BA 157... ...159	400... ...1000	300	0,4 (100)	12 (150)	0,8 (150)	75		 <p>Bandă colorată C A F-126</p>
BAX 157	400	400	0,4 (100)	12 (150)	0,8 (150)	62		
DRR 104 ...114	100... ...1000	1000	0,4 (100)	12 (150)	0,8 (150)	75		
D10 F05 (R)... ...10(R)	50... ...1000	600	10(115)	150 (150)	110 (150)	2,4	 <p>C A (cod fără R) A C (cod cu R) DO-4 (F9-M) (cu P în cod - T0 220)</p>	
D16 F05 (R)... ...10(R)	50... ...1000	600	16(100)	180 (150)	160 (150)	1,9		
D400S 1200... ...2600	1200... ...2600	6000	400 (100)	6320 (150)	200000	0,06	 <p>C A T30</p>	
D400S 1200... ...2600	1200... ...2600	6000	495 (100)	8300 (150)	344500 (150)	0,06		

● ALTE DIODE DE COMUTAȚIE
(produse de CCSIT-CE)

Cod	V_{RRM} [V]	I_F	V_F/I_F	I_R/V_R	C [pF]	t_{rrmax}	Mar- care	Capsulă
		[mA]	[V]/[mA]	[μA]/[V]		[ns]		
BAW 56	70	100	1,1/50	2,5/70	2	6	A1	SOT-23
BAV 70	170	100	1,1/50	5/70	1,5	6	A4	
BAV 99	70	100	1,1/50	2,5/70	1,5	6	A7	
BAT 18	35	100	1,2/100	1/20	1	—	A2	

4. Diode cu capacitate variabilă (varicap)

A. Tipuri

— diodă varicap (variable) capacitance diode; tuner diode/diode tuner à capacité variable/Kapazitätsdiode; Diode mit veränderlicher Kapazität; Abstimm-; Nachstimm-diode/варикап; диод с управляемой ёмкостью)
— diodă varactor (charge storage varactor; depletion layer varactor; microwave tuning varactor/Speichervaraktordiode; Sperrschichtvaraktordiode; Varaktor(diode)/варакторный (параметрический диод)

B. Parametrii caracteristici (STAS 7128/7-78)

a) *Capacitate parazită (paralelă)* (parallel capacitance/capacité parallèle/Parallelkapazität/паразитная ёмкость) C_p [F]

b) *Inductanță serie echivalentă* (series (equivalent) inductance/inductance (équivalente) série (Äquivalent-) Längsinduktivität/последовательная эквивалентная индуктивность) L_s [H]

c) *Capacitatea joncțiunii* (junction capacitance/capacité de la jonction/Sperrschichtkapazität/ёмкость перехода) C_1 [F]

d) *Conductanță intrinsecă a diodei* (intrinsic conductance/conductance intrinsèque/Äquivalent-Leitfähigkeit/проводимость диода, крутизна характеристики диода) g_1 [Ω^{-1}]

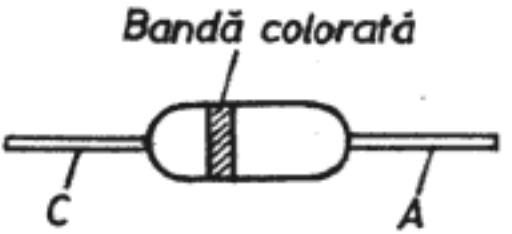
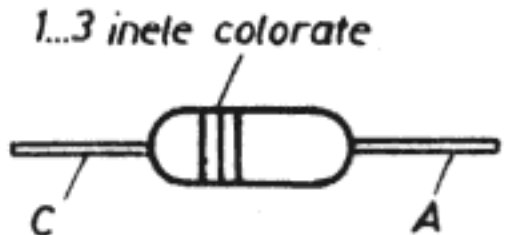
e) *Rezistență serie echivalentă* (series (equivalent) résistance/résistance (équivalente) série/(Äquivalente-) Serienwiderstand/последовательное (эквивалентное) сопротивление) r_s [Ω]

f) *Capacitate la borne* (diode capacitance/capacité de la diode/Diodenkapazität/ёмкость между выводами диода) C_{tot} [F]

www.electronica.ro

g) *Capacitate la tensiune de polarizare zero* (diode capacitance at $V_R=0$ /capacité de la diode pour $V_R=0$ /Diodenkapazität bei $V_R=0$ /ёмкость между выводами диода при нулевом смещении) C_0 [F]

DIODE VARICAP PRODUSE ÎN ROMÂNIA
(producător: IPRS—Băneasa)

Cod	Valori limită absolute				Caracteristici electrice					Capsulă	
	V_{RM} [V]	T_J [°C]	C_{tot} [pF]		C_{tot} [pF]		$C_{tot}(V_{R2})/$ $C_{tot}(V_{R1})$	I_{RM} (μA)			
			la V_{R1} [V]	la V_{R2} [V]	la V_{R1} [V]	la V_{R2} [V]					
BB 121 A	30	150	2,0...2,35	25	11	3	4,5...6	0,05	28	 <p align="center">Bandă colorată</p> <p align="center">DO-35 (F-80) / Sticlă</p>	
BB 121 B	30	150	2,25...2,65	25	12	3	4,5...6	0,05	28		
BB 122	30	150	2,1...2,8	25	13	3	4,5...6	0,05	28		
BB 125 A	30	150	2...2,35	25	11	3	4...6	0,05	28		
BB 125 B	30	150	2,25...2,65	25	13	3	4...6	0,05	28		
BB 125 C	30	150	2,5...3,2	25	13	3	4...6	0,05	28		
BB 126	30	150	2...3	25	12	3	4...6	0,05	28		
BB 139	30	150	4,3...6	25	26...32	3	5...6,5	0,05	28		
BB 221	30	150	1,8...2,2	25	11	3	5...6	0,05	28		
BB 222	30	150	1,8...2,6	25	11	3	4,3...6	0,05	28		
$\beta 310^1$	—	150	—	9	16...28	4	1,6...2,25	1	12		
$\beta 410^1$	—	150	—	9	7,5...11,5	4	—	5	12		
BA 110	30	150	6,8	10	10	2	0,5...1,2	50	10		 <p align="center">1...3 inele colorate</p> <p align="center">DO-7 (F-2) / Sticlă</p>
BA 111	20	150	34,7	10	55	2	0,5...1,2	100	10		
BA 112	20	150	63	10	100	2	0,5...1,2	200	10		
BA 124	30	150	20	25	66	2	0,98...1,03	15	10		

¹⁾ Scos din fabricație.

5. Alte diode semiconductoare produse în România

(producător: I.P.R.S. — BĂNEASA)

A. Diode redresoare cu avalanșă controlată

Cod	V_{RRM} [V]	I_{FAVM} [A] (la T [°C])	I_{FSM} [A] (la T [°C])	i^2t [A ³ s] (la T [°C])	V_{RA}^* [V]	P_{RSM} [kw]	Capsulă
BA21 W BA12 X	70 90	0,4 0,4	6 6	— —	— —	— —	DO 35 DO 35
D1A4...12	400... ...1200	1(75)	30(150)	4,5(150)	450... ...2000	5...0,5	F 126
F4AC... ...10 AC	400... ...1000	1(75)	10(175)	1,1(175)	450... ...1700	5...1	DO 13
D10A4(R) ...10(R)	400... ...1000	10(125)	150(150)	110(160)	450... ...1700	30...6	DO 4
D16A4(R)... ...14(R)	400... ...1400	16(125)	180(150)	160(175)	450... ...2400	40...4	DO 4
D25A4(R)... ...14(R)	400... ...1400	25(125)	300(160)	450(160)	450... ...2400	60...7	DO 5

*) Tensiune de avalanșă

B. Diode picoamperice

www.electronica.ro

Cod	V_{RRM} [V]	I_{RM} [pA] (la $V_R=5$ V)	I_{RMR} [pA] (la $V_R=5$ V)	C_t [pF]	t_{rr} [ns]	R_{thj-a} [°C/W]	Capsulă
DP 450 DP 451	35 35	5 10	10 25	1,5 1,5	350 350	500 500	DO 35 DO 35

C. Diode pentru compensare termică

Cod	I_{FM} [mA]	V_F [V]	K_T [mV/°C]	R_{thj-a} [°C/W]	Capsulă
DC 2 DC 4	50 50	0,65...0,85 ($I_F=5$ mA) 0,65...0,85 ($I_F=5$ mA)	2 1,8	500 420	TO 18/1 TO 92A

D. Module dublă-diodă

Cod	V_{RRM} [V]	I_{FAVM} [A] (la T [°C])	I_{FSM} [kA]	i^2t [kA ² s]	R_{thj-c} pe diodă [°C/W]	Capsulă
MDD 100 N MDD 125 N	400...1600 400...1600	100(100) 125(100)	2 2	20 28,8	0,365 0,32	K-25 K-25

E. Diode cu siliciu pentru uz didactic*

(producător: IPRS—Băneasa)

Cod	Marcaj pe capsulă	Valori limită absolute					Caracteristici electrice					Familia de dispozitive din care provine
		V_R [V]	I_{ZM} [mA]	I_F [mA]	P_{tot} [mw]	T_{jMax} [°C]	V_{RR} [V]	I_R [μA]	$\frac{C_{VR2}}{C_{VR1}}$	V_{ZT} [V]	I_{ZT} [mA]	
DVD 51	verde	25	—	—	—	150	25	100	3,5	—	—	BB 139
DVD 52	galben	25	—	—	—	150	25	100	3,5	—	—	BB 125/126
Z2 V7...51	(indiferent)	2,7...51 (V_{ZT})	$\frac{P_{tot}}{V_{ZT}}$	—	350	175	—	—	—	V_{ZT}	5	DZ2 V7...56
DGD 51	portocaliu	20	—	100	—	150	20	100	—	—	10	BA 243/244 1N 4148

* Aceste componente provin din producția situată în afara normelor tehnice de ramură (NTR) și se obțin prin sortare. Valorile indicate în tabel sînt valori minime garantate. Toate diodele sînt disponibile în capsula (DO 35 din sticlă) avînd marcat catodul cu un inel negru.

Tranzistoare bipolare

Caracteristici tehnice

www.electronica.ro

A. Tipuri

— tranzistor cu germaniu; cu siliciu (germanium; silicon transistor/transistor à germanium; à silicium/Germanium-; Siliziumtransistor;/германиевый; кремниевый транзистор)

— tranzistor de joasă, medie, înaltă frecvență (low-; medium-; high frequency transistor/transistor à basse; moyenne: haute fréquence/Nieder-; Mittel-; Hochfrequenz-Transistor/транзистор низкой; средней; высокой частоты)

— tranzistor de mică; medie; (mare) putere (low-; medium-; (high) power transistor/transistor de faible; moyenne; (grande) puissance/Kleinsignal-Leistungstransistor/транзистор малой; средней; большой мощности)

B. Parametrii caracteristici

a) *Tensiuni continue* (în condiții specificate) între electrozi (emitor, bază, colector).

(collector-emitter; base-collector, base-emitter DC, voltages/tensions continues collecteur-émetteur; base-collecteur, base-émetteur/Kollektor-Emitter-; Basis-Kollektor-; Basis-Emitter-Gleichstromspannungen/ постоянные напряжения между коллектором и эмиттером; базой и коллектором; базей и эмиттером)

$V_{CE}(V_{EC})$ [V]	= tensiune colector — emitor — colector)
$V_{BC}(V_{CB})$ [V]	= tensiune bază-colector (colector-bază)
$V_{BE}(V_{EB})$ [V]	= tensiune bază-emitor (emitor-bază)
V_{CBO} [V]	= tensiune colector-bază, pentru $I_E=0$ și I_C specificat
V_{EBO} [V]	= tensiune emitor-bază, pentru $I_C=0$ și I_E specificat
V_{CEO} [V]	= tensiune colector-emitor, pentru $I_B=0$ și I_C specificat
V_{CER} [V]	= tensiune colector-emitor, pentru $R_{BE}=R$ și I_C specificat
V_{CEX} [V]	= tensiune colector-emitor, pentru $V_{BE}=V_{BEX}$ (joncțiunea emitor-bază polarizată invers), pentru I_C specificat
V_{CES} [V]	= tensiune colector-emitor, pentru $V_{BE}=0$ și I_C specificat
$V_{(BR)CBO}$ [V]	= tensiune de străpungere (circuit deschis) colector-bază pentru I_C specificat și $I_E=0$
$V_{(BR)EBO}$ [V]	= tensiune de străpungere (circuit deschis) emitor-bază pentru $I_C=0$ și I_E specificat
$V_{(BR)CER}$ [V]	= tensiune de străpungere (circuit deschis) colector-emitor pentru $I_{BE}=0$ și I_C specificat
$V_{(BR)CEX}$ [V]	= tensiune de străpungere (circuit deschis) colector-emitor, pentru $R_{BE}=R$ și I_C specificat
$V_{(BR)CEX}$ [V]	= tensiune de străpungere (circuit deschis) colector-emitor, pentru $V_{BE}=V_{BEX}$ (joncțiunea emitor-bază polarizată invers) și I_C specificat
$V_{(BR)CES}$ [V]	= tensiune de străpungere (scurt-circuit) colector-emitor pentru $V_E=0$ și I_C specificat
V_{CESat} [V]	= tensiune de saturație colector-emitor pentru I_E și I_C specificați
V_{BESat} [V]	= tensiune de saturație bază-emitor, pentru I_E și I_C specificați

b) *Curenți continui* (de bază, colector sau emitor), (base, collector, emitter DC, currents/courants continus (de repos) de base, collecteur, émetteur/Basis-, Kollektor-, Emitter- Gleichströme/постоянные токи базы; коллектора; эмиттера)

$$I_B[A], I_C[A] \text{ sau } I_E[A]$$

c) *Curenți reziduali*

(cutoff currents/courants residuels/Restströme/обратные токи)

$I_{CRO}[A]$ = curent rezidual de colector, pentru $I_E=0$ și V_{CB} specificată

$I_{CEO}[A]$ = curent rezidual de colector, pentru $I_C=0$ și V_{CE} specificată

$I_{EBO}[A]$ = curent rezidual de emitor, pentru $I_C=0$ și V_{EB} , specificată

$I_{CEB}[A]$ = curent rezidual de colector, pentru $R_{BE}=R_X$ și V_{CE} specificată

$I_{CES}[A]$ = curent rezidual de colector, pentru $V_{BE}=0$ și V_{CE} specificată

$I_{CEX}[A]$ = curent rezidual de colector, pentru $V_{BE}=V_{BEX}$ și V_{CE} specificată

$I_{BEX}[A]$ = curent rezidual de bază, pentru $V_{BE}=V_{BEX}$ și V_{CE} specificată

d) *Putere disipată în colector* (la o temperatură ambiantă) (power dissipation at collector/puissance dissipée au collecteur /Kollektor-Dissipations-(Verlust-)leistung/мощность, рассеивания на коллекторе)

$$P_C[W]$$

e) *Putere totală disipată* (continuă sau medie, a tuturor electrozilor, la o temperatură specificată), (total power dissipation/puissance dissipée totale/Gesamt-Dissipations-(Verlust-)leistung/полная мощность рассеивания)

$$P_{tot}[W]$$

f) *Parametrii de frecvență* (frequency parameters/paramètres de fréquence/Frequenzparameter/частоты параметры)

f_{21e}^h (sau f_{fe}^h) [Hz] = frecvența de tăiere în montaj emitor comun

f_{21b}^h (sau f_{fb}^h) [Hz] = frecvența de tăiere în montaj bază comună

f_{21c}^h (sau f_{fc}^h) [Hz] = frecvența de tăiere în montaj colector comun

f_r [Hz] = frecvența de tranziție

f_{max} [Hz] = frecvența maximă de oscilație

g) *Parametrii de comutație* (switching parameters (times)/paramètres (temps) de commutation/Schaltparameter(-zeiten)/параметры(время) коммутаций)

t_p [s] = durata impulsului

$t_{a(on)}(t_a)$ [s] = timpul de întârziere al creșterii

t_r [s] = timpul de creștere

$t_{a(off)}(t_s)$ [s] = timpul de întârziere al descreșterii (timpul de stocare)

t_f [s] = timpul de descreștere

t_{on} [s] = $t_{a(on)} + t_r$ = timpul de comutație directă (timpul total de stabilire)

t_{off} [s] = $t_{a(off)} + t_f$ = timpul de comutație inversă (timpul total de descreștere)

h) *Parametrii de zgomot* (noise parameters/paramètres de bruit/Rauschparameter/параметры шума)

F (sau B_n) [-] = factor de zgomot

I_n [A] = curent de zgomot

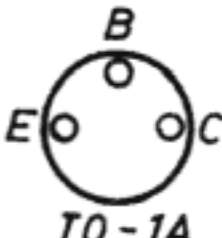
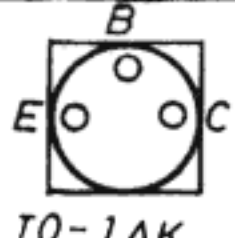
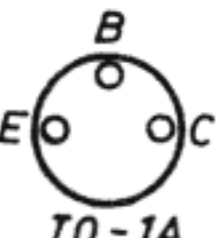
V_n [V] = tensiune de zgomot

P_n [W] = putere de zgomot

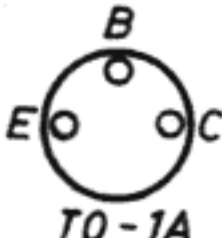
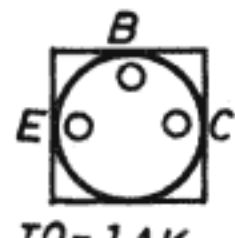

R_n [Hz] = lărgimea benzii zgomotului efectiv

Exemple de tranzistoare bipolare produse în România (producători: IPRS — Băneasa și CCSIT—CE*)

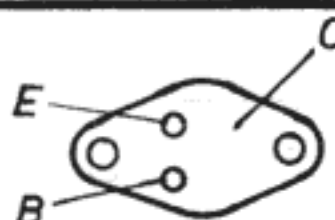
1. Tranzistoare cu germaniu, PNP, de joasă frecvență, mică putere

Cod	Valori limită					Caracteristici electrice			Capsulă
	$-V_{CB0}$ [V]	$-V_{CEc}$ [V]	$-V_{EB0}$ [V]	$-I_C$ [mA]	P_{tot} [mW]	β_o [-]	I_{a-I_C} [mA]	f_T [MHZ]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AC 180	32	16	10	1500	300	35...400	600	2,5	 TO-1A
AC 184	32	20	10	500	270	35...400	300	2,5	
AC 188	25	15	10	1000	300	100...500	300	2,5	
AC 188K	25	15	10	1000	750	100...500	300	2,5	 TO-1AK
EFT 302(D)	12	—	6	250	250	35...56	100	1,6	 TO-1A
EFT 303(D)	12	—	6	250	250	55...180	100	2,0	
EFT 311	18	20	9	250	200	17...45	100	1,3	

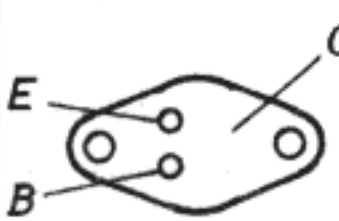
2. Tranzistoare cu germaniu, NPN, de joasă frecvență, mică putere

Cod	Valori limită					Caracteristici electrice			Capsulă
	V_{CB0} [V]	V_{CE0} [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{tot} [mW]	β_o [-]	I_{aI_C} [mA]	f_T [MHZ]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AC 181	32	20	10	1000	300	35...400	600	4,5	www.electronica.ro  TO-1A
AC 185	32	20	10	500	250	35...400	300	4,5	
AC 187	25	15	10	1000	300	100...500	300	4,5	
AC 187K	25	15	10	1000	750	100...500	300	4,5	 TO-1AK
EFT 373	12	20	9	300	250	55...155	100	3,5	 TO-1A
EFT 377	32	16	10	600	250	50...250	100	1	

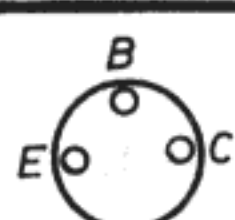
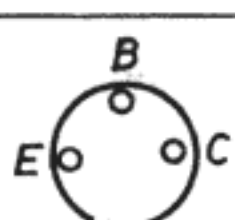
3. Tranzistoare cu germaniu, PNP, de joasă frecvență, medle putere

Cod	Valori limită absolute				Caracteristici electrice				Capsulă
	$-V_{CE0}$ [V]	$-V_{CE0}$ [V]	$-I_C$ [A]	P_{tot} [W]	$-V_{CEsat}$ [V]	la $-I_C$ [A]	f_T [MHz]	R_{thj-a} [°C/W]	
AD 152	45	23	1,5	6	0,5	1,5	0,9	8	 TO-66
AD 155	25	15	1,5	6	0,5	1,5	0,8	8	

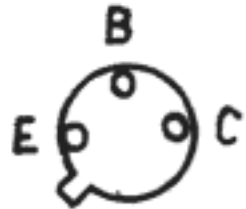

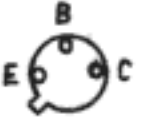
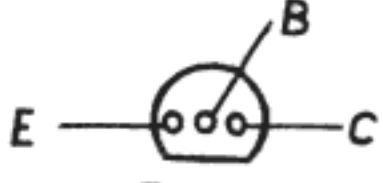
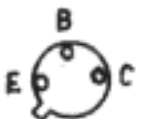
4. Tranzistoare cu germaniu, PNP, de joasă frecvență, de putere

Cod	Valori limită absolute				Caracteristici electrice				Capsulă
	$-V_{CB0}$ [V]	$-V_{CE0}$ [V]	$-I_C$ [A]	P_{tot} [W]	$-V_{CEsat}$ [V]	la $-I_C$ [A]	f_T [MHz]	R_{thj-a} [°C/W]	
AD 130	32	30	3	30	0,4	3	0,25	1,5	www.electronica.ro  TO-3
AD 149	50	30	3	30	0,4	3	0,3	1,5	
ASZ 15	100	60	10	45	0,4	10	0,2	1,5	
ASZ 16	60	32	10	45	0,4	10	0,25	1,5	
AUY 31	60	35	6	45	0,4	6	0,2	1,5	
AUY 32	80	60	6	45	0,4	6	0,2	1,5	
EFT 212	30	—	3	30	—	—	0,2	1,5	
EFT 213	40	30	3	30	0,4	2	0,2	2	

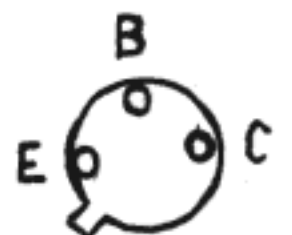
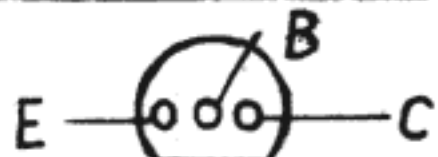
5. Tranzistoare cu germaniu, PNP, de înaltă frecvență, mică putere

Cod	Valori limită absolute				Caracteristici electrice			Capsulă
	$-V_{CE0}(V_{CB0})$ [V]	$-V_{EB0}$ [V]	$-I_C$ [mA]	P_{tot} [mW]	β [—]	la $-I_C$ [mA]	f_T [MHz]	
EFT 306	15	9	100	150	15...70	1	2,5	 TO-1A
EFT 307	15	9	100	150	25...120	1	2,7	
EFT 308	15	9	100	150	40...160	1	10,5	
2N 404	(25)	12	100	150	30...100	12	12	 TO-5
2N 404A	(40)	25	150	150	30...100	12	12	

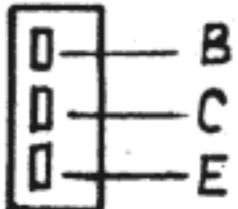

6. Tranzistoare cu siliciu, NPN, de joasă frecvență, mică putere

Cod	Valori limită absolute					Caracteristici electrice							Capsulă	
	V_{CE0} [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{tot} [mW]	T_j [°C]	V_{CEsat} [V]		$\beta_o[-]$	f_T [MHz] la		F [dB]			
						la I_C [mA]	la V_{CE} [V]		la $I_C = 10$ mA	la f [kHz]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
BC 107	45	6	100	300	175	0,6	100	125...500	2	5	300	10	1	 TO-18
BC 108	20	6	100	300	175	0,6	100	125...900	2	5	300	10	1	
BC 109	20	6	100	300	175	0,6	100	240...900	2	5	300	4	0,03...15	
BC 170	20	5	100	300	150	0,4	30	35...800	1	1	250	10	1	 TO-92
BC 171	45	6	100	300	150	0,6	100	125...900	2	5	250	10	1	
BC 172	25	5	100	300	150	0,6	100	125...900	2	5	350	10	1	
BC 173	25	5	100	300	150	0,6	100	240...900	2	5	250	4	0,03...15	
BC 174	64	5	100	300	150	0,6	100	125...500	2	5	250	10	1	
BC 190	64	6	100	300	175	0,6	100	125...500	2	5	300	10	1	 TO-18
BC 237	45	6	100	300	150	0,6	100	125...500	-2	5	300	10	1	 TO-92
BC 238	25	5	100	300	150	0,6	100	125...900	2	5	300	10	1	
BCY 58	32	7	200	1000	200	0,7	100	120...630	2	5	125	6	1	 TO-18
2N 929	45	5	200	300	175	1	10	40...120	0,01	5	30	4	0,01...15	

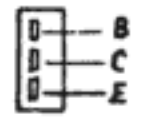
7. Tranzistoare cu siliciu, PNP, de joasă frecvență, mică putere

Cod	Valori limită absolute					Caracteristici electrice								Capsulă
	$-V_{CE0}$ [V]	$-V_{EB0}$ [V]	$-I_C$ [mA]	P_{tot} [mW]	T_j [°C]	$-V_{CE sat}$ [V]	$\beta[-]$		f_T [MHz] — (la $I_C = 10$ mA)	F [dB]				
							la $-I_C$ [mA]	la $-V_{CE}$ [V]		la f [MHz]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
BC 177	45	5	100	300	175	0,95	100	75...260	2	5	130	10	1	 TO-18
BC 178	25	5	100	300	175	0,95	100	75...800	2	5	130	10	1	
BC 179	20	5	100	300	175	0,95	100	125...800	2	5	130	4	0,03...15	
BC 250	20	4	100	300	150	0,3	10	35...600	1	1	250	10	1	 TO-92
BC 251	45	4	100	300	150	0,3	10	125...900	2	5	250	10	1	

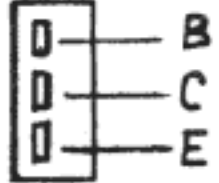
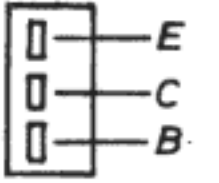
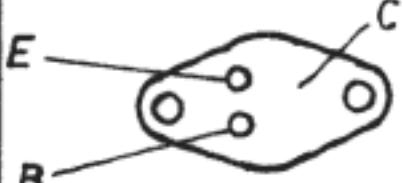
8. Tranzistoare cu siliciu, NPN, de joasă frecvență, medie putere

Cod	Valori limită absolute					Caracteristici electrice ($T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$)								Capsulă
	V_{CE0} [V] (V_{CB0} [V])	V_{EB0} [V]	I_C [A]	P_{tot} [W]	T_j [$^{\circ}\text{C}$]	$V_{CE\ sat}$ [V] la I_C [mA]	f_T [MHz] la I_C [mA]	I_{CB0} [nA] la V_{CB} [V]	β_0 [-] la I_C [mA]					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
BD.135	45	5	1	12,5	125	0,6	500	50	50	100	30	40...250	150	 TO-126  TO-39
BD 137	60	5	1	12,5	125	0,6	500	50	50	100	30	40...160	150	
2N 1711	75	7	0,8	1,7	200	1,5	150	70	—	10	60	100...300	150	
BSX 45	40	7	1	5	200	0,7	1000	50	50	—	—	40...250	100	
BSX 46	60	7	1	5	200	0,7	1000	50	50	—	—	40...250	100	
BSX 47	80	7	1	5	200	0,7	1000	50	50	—	—	40...250	100	
ROS 03A*	20	6	0,5	3	175	0,4	100	250	10	—	—	20...100	150	

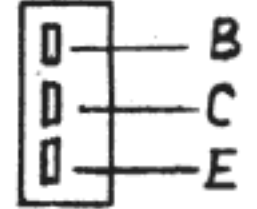
9. Tranzistoare cu siliciu, PNP, de joasă frecvență, medie putere

Cod	Valori limită absolute					Caracteristici electrice								Capsulă
	$-V_{CE0}$ [V]	$-V_{EB0}$ [V]	$-I_C$ [A]	P_{tot} [W]	T_j [$^{\circ}\text{C}$]	$-V_{CE\ sat}$ [V] la $-I_C$ [mA]	f_T [MHz] la $-I_C$ [mA]	$-I_{CB0}$ [nA] la $-V_{CB}$ [V]	β_0 [-] la $-I_C$ [mA]					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
BD 136	45	5	1	12,5	150	0,6	500	50	50	100	30	33...300	150	 TO-126
BD 136	60	5	1	12,5	150	0,6	500	50	50	100	30	40...160	150	

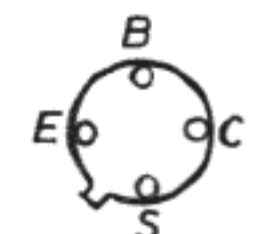
10. Tranzistoare cu siliciu, NPN, de joasă frecvență, de putere

Cod	Valori limită absolute						Caracteristici electrice					Capsulă
	V_{CE0} (V_{CB0}) [V]	V_{EB0} [V]	I_C [A]	P_{tot} [W]	T_j [°C]	R_{thj-c} [°C/W]	$V_{CE\ sat}$ [V]		β_0 [-]		f_T [MHz]	
							la I_C [A]	la I_C [A]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BD 233	45	5	2	25	150	5	0,6	1	40...375	0,15	3	 TO-126
BD 235	60	5	2	25	150	5	0,6	1	40...375	0,15	3	
2N 5293	(80)	7	4	36	150	3,5	2	4	30...120	0,5	0,8	 TO-220 AB
2N 5294	(80)	7	4	36	150	3,5	2	4	30...120	0,5	0,8	
BD 142	45	7	15	117	200	1,5	1,1	4	12...160	4	0,8	 TO-3
BD 181	55	7	15	117	200	1,5	1	4	20...70	4	0,8	
BDX 67	60	2,5	20	150	200	1,17	2	10	1500	16	0,8	
BDY 29	75	7	30	220	200	0,8	1,2	15	15...60	15	0,8	
BUX 10A	125	7	25	150	200	1,17	1,2	20	20...60	10	8	


11. Tranzistoare cu siliciu, PNP, de înaltă frecvență, mică putere

Cod	Valori limită absolute						Caracteristici electrice					Capsulă
	V_{CE0} [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{tot} [W]	T_j [°C]	R_{thj-c} [°C/W]	$V_{CE\ sat}$ [V]		β_0 [-]		f_T [MHz]	
							la I_C [A]	la I_C [mA]	la I_C [mA]	la I_C [mA]		
BD 234	-45	-5	-2	25	150	5	-0,6	-1	40...375	-0,15	3	 TO-126
BD 236	-60	-5	-2	25	150	5	-0,6	-1	40...375	-0,15	3	

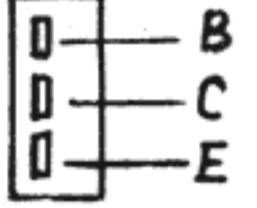
12. Tranzistoare cu siliciu, NPN, de înaltă frecvență, mică putere

Cod	Valori limită absolute						Caracteristici electrice						Capsulă
	V_{CB0} [V]	V_{CE0} [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{tot} [mW]	T_j [°C]	β_0 [-]		I_{CB0} [nA]		C_{12e} [pF]	f_T [MHz]	
							la I_C [mA]	la I_C [mA]	la V_{CB} [V]	la V_{CB} [V]			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
BF 115	50	30	5	30	165	175	40...165	1	100	10	0,8	150	 TO-72
BF 167	40	30	4	25	130	175	≥ 25	4	100	20	0,15	350	
BF 173	40	25	4	25	200	175	≥ 40	7	100	20	0,3	550	

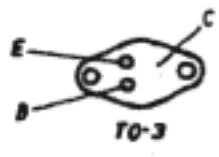
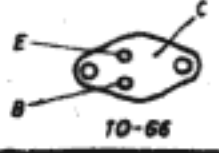
13. Tranzistoare cu siliciu, NPN, de înaltă frecvență, medie putere

Cod	Valori limită absolute						Caracteristici electrice						Capsulă
	V_{CB0} [V]	V_{CE0} (V_{CER}) [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{tot} [mW]	T_j °C	β_0 [-]		I_{CB0} [nA]		C_{12e} [pF]	f_T [MHz]	
							la I_C [mA]	la V_{CB} [V]	la V_{CB} [V]	la V_{CB} [V]			
BF 177	—	100	5	50	1400	175	20	15	—	—	1,8	120	 TO-39
BF 178	—	(160)	5	50	1400	175	20	15	—	—	1,8	120	

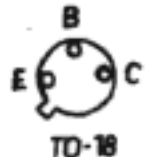
14. Tranzistoare cu siliciu, PNP, de înaltă frecvență, medie putere

Cod	Valori limită absolute						Caracteristici electrice						Capsulă
	V_{CB0} [V]	V_{CE0} [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{tot} [mW]	T_j [°C]	β_0 [-]		I_{CB0} [nA]		C_{12} [pF]	f_T [MHz]	
							la I_C [mA]	la V_{CB} [V]	la V_{CB} [V]	la V_{CB} [V]			
BF 470	-250	-250	-5	-30	2000	150	≥ 50	-25	-10	-200	1,8	60	 TO-126
BF 472	-300	-300	-5	-30	2000	150	≥ 40	-25	-10	-200	1,8	60	


15. Tranzistoare cu siliciu, NPN, de înaltă frecvență, de putere

Cod	Valori limită absolute							Caracteristici electrice						Capsulă		
	V_{CEs} [V]	V_{CE0} [V]	V_{EB0} V_{CB0} [V]	T_j [°C]	I_{CM} [A]	P_{tot} [W]	R_{thj-c} [°C/W]	$V_{CE\ sat}$ [V]		β_0 [-]		f_T [MHz]			C_{CB} [pF] (la $f = 1$ MHz)	
								la I_C [mA]	la I_C [mA]	la V_{CE} [V]	la I_C [mA]					
BU 204	1300	600	—	115	3	10	2,5	—	—	—	—	7,5	100	80		
BU205(A)	1500	700	—	115	3	10	2,5	(5)	(2000)	—	—	7,5	100	80		
BUR 606	430	200	6	175	7	60	2,5	1	5000	—	—	10	500	—		
BUR 607	330	200	6	175	7	60	2,5	1	5000	—	—	10	500	—		

16. Tranzistoare cu siliciu, PNP, de comutație

Cod	Valori limită absolute						Caracteristici electrice						Capsulă		
	V_{CB0} [V]	V_{CE0} [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{tot} [mW]	T_j [°C]	$V_{CE\ sat}$ [V]		β_0 [-]		f_T [MHz]	t_{on} [ns]		t_{off} [ns]	
							—	la I_C [mA]	la $-I_C$ [mA]	la V_{CE} [V]					
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
BSW 19	-35	-30	-5	-200	300	175	0,3	-50	40...300	-10	-1	150	150	800	
BSW 21	-25	-25	-5	-200	300	175	0,5	-50	75...225	-2	-4,5	150	—	—	

17. Tranzistoare cu siliciu, NPN, de comutație

Cod	Valori limită absolute						Caracteristici electrice						Capsulă		
	V_{CB0} [V]	V_{CE0} [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{tot} [mW]	T_j [°C]	$V_{CE\ sat}$ [V]		β_0 [-]		f_T [MHz]	t_{on} [ns]		t_{off} [ns]	
							—	la I_C [mA]	la I_C [mA]	la V_{CE} [V]					
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
BSV 89	—	10	5	—	300	200	0,2	10	40...120	10	1	400	12	18	
BSV 90	—	13,5	5	—	300	200	0,2	10	40...120	10	1	400	12	18	

18. Tranzistoare cu siliciu pentru uz didactic*

Cod	Tip	Valori limită absolute				Caracteristici electrice						Capsulă (conexiuni)	Familia de dispozitive din care provine	
		V_{CB0} [V]	V_{EB0} [V]	I_C [mA]	P_{101} [W]	I_{CE0} [μ A]	la		β [-]	la				f_T [MHz]
							V_{CE} [V]	I_C [mA]		V_{CE} [V]	I_C [mA]			

● TRANZISTOARE DE JOASĂ FRECVENȚĂ

SNC1	NPN	20	4,5	100	0,25	10	10	40	2	5	—	T092 (EBC)	BC 170—174 BC 337—338
SPC1	PNP	20	4,5	100	0,25	10	10	40	2	5	—	T092 (EBC)	BC 250—256 BC 327—328

● TRANZISTOARE DE ÎNALTĂ FRECVENȚĂ/TENSIUNE ȘI DE COMUTAȚIE

SNF1	NPN	150	4,5	50	8	100	50	20	30	10	—	T0126 (BCE)	BF 457—459
SNF2	NPN	150	4,5	50	3	100	50	20	30	10	—	T039 (EBC)	BF 257—259

* Aceste componente provin din producția situată în afara normelor tehnice de ramură (NTR) și se obțin prin sortare. Valorile indicate în tabel reprezintă valori minime garantate.

Anexa 5

Tranzistoare cu efect de câmp (TEC)

Caracteristici tehnice

A. Tipuri

— TEC cu joncțiune (TEC-J) (junction-gate field-effect transistor; JUGFET; junction FET; JFET/JFET; transistor à effet de champ à jonction; TECJ/Bipolar-Feldefekttransistor; Bipolar-FET/ полевой транзистор с „pn” — переходом)

— TEC cu poartă (grilă) izolată (TEC-MOS)¹ (insulated-gate FET; IGFET; metal-oxide-semiconductor FET; MOSFET/transistor à effet de champ à électrode de commande isolée, TEC—MOS MOSFET/MOS Feldefekttransistor, MOS-FET/полевой транзистор с изолированным затвором; МОП полевой транзистор)

— TEC-MOS în regim de sărăcire²) (depletion mode MOSFET/TEC-MOS à appauvrissement (a déplétion)/MOS-FET vom Verarmungstyp/МОП полевой транзистор обедненного типа)

— TEC-MOS în regim de îmbogățire²) (enhancement mode MOSFET/TEC-MOS à enrichissement/MOS-FET vom Anreicherungstyp/МОП полевой транзистор обогащенного типа)

În afară de TEC-J și TEC-MOS („clasice”, binecunoscute) mai sînt și tipurile: MESFET (=TEC cu poartă realizată prin contact „metal-semiconductor”) și VMOS (=TEC-MOS cu canal vertical).

B. Parametri caracteristicii

a) *Tensiuni continue (în condiții specificate)* (DC voltages/tensions continues/Gleichstromspannungen/постоянные напряжения) între electrozi:

— sursă (source/source/Source/исток)

— poartă (grilă) (gate/grille, gate/Gate/затвор)

— drenă (drain/drain/Drain/сток)

— substrat (substrate; bulk/substrat; bulk; corps/Untergrund; Bulk/подложка)

V_{DS} [V] = tensiune drenă—sursă

V_{GS} [V] = tensiune grilă—sursă

V_{GD} [V] = tensiune grilă—drenă

www.electronica.ro

V_{SE} (V_{SU}) [V] = tensiune sursă—substrat

V_{DE} (V_{DU}) [V] = tensiune drenă—substrat

V_{GS} (V_{GU}) [V] = tensiune grilă—substrat

$V_{GS}(OFF)$ [V] = tensiune de blocare grilă-sursă

¹ TEC-ul cu poartă izolată este cunoscut mai mult în varianta MOS (cu metaloxid-semiconductor). TEC-MOS constituie unicul reprezentant al familiei TEC-MIS (=TEC cu metal-izolator-semiconductor).

² Reprezintă regimuri de lucru ale tipului TEC-MOS.

$V_{GST} (V_{(GSTH)} \text{ sau } V_{GS(TO)}) [V]$ = tensiune de prag, grilă-sursă
 $V_{(BR)GSS} [V]$ = tensiune de străpungere grilă-sursă, pentru drenă scurt circuitată la sursă

b) Curenți continui (în condiții specificate) de electrozi (DC currents/courants continus/Gleichströme/постоянные токи)

$I_D, I_S, I_C [A]$ = curent de drenă, sursă sau grilă
 $I_B (I_O) [A]$ = curent de substrat
 $I_{DSX} [A]$ = curent de drenă în condiții grilă—sursă specificate
 $I_{DSR} [A]$ = curent de drenă, pentru o rezistență exterioară grilă-sursă specificată
 $I_{DSS} [A]$ = curent de drenă, pentru grilă scurtcircuitată la sursă ($V_{GS}=0$)
 $I_{SDX} [A]$ = curent de sursă, în condiții grilă—drenă specificate
 $I_{SDS} [A]$ = curent de sursă, pentru grilă scurtcircuitată la drenă ($V_{GD}=0$)
 $I_{GF} [A]$ = curent direct de grilă
 $I_{GDO} [A]$ = curent rezidual de grilă, cu sursă în circuit deschis
 $I_{GSO} [A]$ = curent rezidual de grilă, cu drenă în circuit deschis
 $I_{GSS} [A]$ = curent rezidual (sau de fugă) al grilei, cu drenă scurtcircuitată la sursă
 $I_{GSX} [A]$ = curent de fugă al grilei în condiții de circuit drenă-sursă specificate.

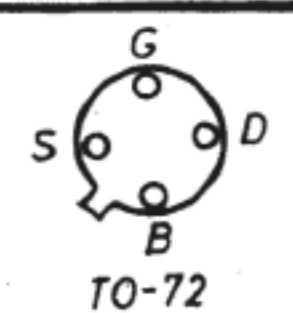
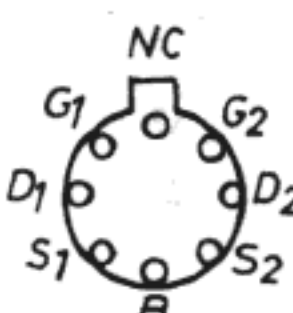
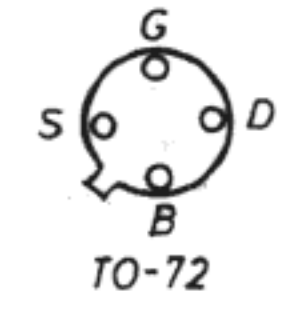
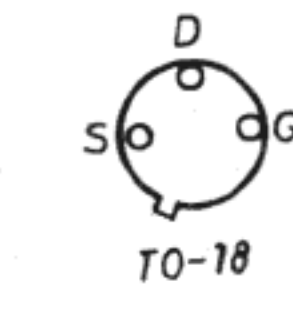
c) Putere disipară drenă sursă (în c.c.) (drain-source power dissipation/ puissance dissipée drain-source/Drain-Source-Verlustleistung/ рассеиваемая мощность сток — источник)

$P_{DS} [W]$

d) Rezistențe (între electrozi, în condiții specificate) (internal resistances/résistances internes/Innenwiderstände/Внутренние сопротивления)

$r_{DS}(r_{ds}) [\Omega]$ = rezistență drenă—sursă
 $r_{GS}(r_{gs}) [\Omega]$ = rezistență grilă—sursă
 $r_{GD}(r_{gd}) [\Omega]$ = rezistență grilă—drenă
 $r_{GSS}(r_{gss}) [\Omega]$ = rezistență grilă—sursă pentru $V_{DS}(v_{ds})=0$
 $r_{DSS(ON)} (r_{ds(ON)} \text{ sau } r_{DS(ON)}) [\Omega]$ = rezistență drenă-sursă în stare de conducție
 $r_{DS(OFF)} (r_{ds(OFF)} \text{ sau } r_{DS(OFF)}) [\Omega]$ = rezistență drenă-sursă în stare de blocare

Exemple de tranzistoare cu efect de cimp produse in România (producători IPRS—Băneasa și CCSIT—CE)*

Cod	Tipul	Valori limită absolute					Caracteristici electrice					Capsulă
		V_{DS} [V]	V_{GS} [V]	V_{GB} [V]	I_D [mA]	P_d [mW]	$V_{GST(V_{GSoff})}$ [V]	I_{DSS} [mA]	I_{GSS} [nA]	$r_{DS(ON)}$ [Ω]	δ_m [mA/V]	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ROS 01* ROS 02* ROS 04*	TEC-MOS											
	canal p	-30	-40	-30...+0,3	30	200	-3...-6	0,01	0,05	330	5	 TO-72
	canal n	+30	+40	-30...+40	30	200	2...10	1...3	0,01	500	5	
canal p	-25	-	-	30	200	-3...-6	0,01	-	350	1		
												 TO-99
ROS 104* BFW 10* BFW 11*	TEC-J											
	canal p	-25	+25	-25...+0,3	30	200	3,5	1	0,1	250	4	 TO-72
	canal n	-	-30	-	-	-	-8	8...20	-0,1	-	3,2	
canal n	-	-30	-	-	-	-6	1...10	-0,1	-	3,2		
												 TO-18

*) Componentele CCSIT-CE sînt notate cu asterisc la cod

www.electronica.ro

Anexa 6

Tranzistoare unijonțiune

Caracteristici tehnice

A. Tipuri

— T.U.J. — convențional (UJT = unijunction transistor; double base diode/UJT; transistor unijonction (conventionnel)/(konventioneller) Unijunctiontransistor/однопереходный транзистор, двухбазовой диод)

— T.U.J. — programabil (= TUJP) (PUT = programmable unijunction transistor/transistor unijonction programmable/programmierbarer Unijunctiontransistor/программирующий однопереходный транзистор)

— T.U.J. complementar (= TUJC) (complementary unijunction transistor/transistor unijonction complementaire/komplementäre Unijunctiontransistor/дополнительный однопереходный транзистор)

B. Parametri caracteristici

a) Tensiuni (voltages/tensions/Spannungen/напряжения)

V_F [V]	= tensiune continuă directă	
V_{OB1} [V]	= tensiune de impuls de vîrf	
V_{EB1sat} [V]	= tensiune de saturație a emitorului	
V_{EB1} [V]	= tensiune emitor-bază 1	
V_{BB} [V]	= tensiune continuă de alimentare a bazelor	
V_V [V]	= tensiune de vale	
V_P [V]	= tensiune de vîrf	<i>www.electronica.ro</i>
V_{B2B1} [V]	= tensiune interbază	

b) Curenți (currents/courants/Ströme/токи)

Exemple de tranzistoare unijonțiune produse în

Cod	Valori limită absolute				
	P_{tot} [mW]	I_E [mA]	$I_E^{1)}$ [A]	V_{EB1} [V]	V_{B2B1} [V]
1	2	3	4	5	6
ROS 11*	450	70	2	30	35
ROS 11A*	450	70	2	30	35
ROS 11B*	450	70	2	30	35
ROS 11C*	450	70	2	30	35

* Componentele CCSIT-CE sînt notate cu asterisc

¹⁾ Curent de emitor în impuls (= I_{EMS} — curent

$I_{B1}(I_{B2})$ [A]	= curenți continuu de bază-1 (bază-2)
I_E [A]	= curenți continuu de emitor
I_V [A]	= curenți de vale
I_P [A]	= curenți de vîrf
I_{EBO} [A]	= curenți rezidual de emitor

c) *Rezistență interbază* (interbase resistance/résistance interbase/Basis-Basis-Widerstand/сопротивления между базой 1 и базой 2)

$$R_{B2B1} [\Omega]$$

d) *Coeficient de variație a rezistenței interbază cu temperatura* (temperature coefficient of interbase resistance/coefficient de temperatura de la résistance interbase/Temperatur-Koeffizient des Basis-Basis Widerstandes/температурный коэффициент сопротивления между базой 1 и базой 2)

$$K_B [^\circ/\text{C}]$$

e) *Frecvență maximă de oscilație* (maximum frequency of oscillation/frequence maximale d'oscillation/höchste Schwingungsfrequenz/максимальная частота генераций)

$$f_{max} [\text{Hz}]$$

f) *Putere totală* (total disipation/puissance dissipée totale/gesamte Verlustleistung/максимальная рассеиваемая мощность)

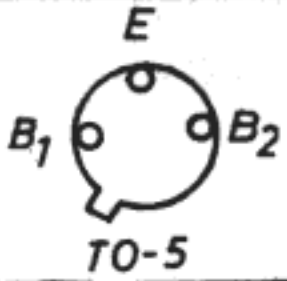
$$P_{tot} [\text{W}]$$

g) *Raport intrinsec* (intrinsic stand-off ratio/rapport intrinseque/Verhältniss der Basisspannungen/внутренний коэффициент однопереходного транзистора)

$$\eta [-] = \frac{V_P - V_F}{V_{B2B1}}$$

www.electronica.ro

România (producători IPRS—Băneasa și CCSIT—CE*)

Caracteristici electrice								Capsulă
η		R_{B2B1} (k Ω)		I_{EBO} [μ A]	I_P [μ A]	I_V [mA]	$V_{EB1 sat}$ [V]	
min	max	min	max	max	max	min	min	
7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,6	0,8	2,5	10	12	25	1	5	
0,6	0,8	2,5	10	12	12	1	5	
0,6	0,8	2,5	10	0,2	6	8	5	
0,6	0,8	2,5	10	0,02	2	8	5	

la cod.
le emitor maxim de suprasarcină).

Anexa 7

Tiristoare, diacuri, triacuri

Caracteristici tehnice

www.electronica.ro

A. Tipuri

— diodă pnpn (= tiristor-diodă cu blocare în sens invers; dinistor) (p-n-p-n diode; Schockley diode; four-layer diode/diode pnpn/PNPN-Vierschichtdiode; Thyristordiode/кремниевый динистор, диодный тиристор)

— tiristor convențional (= tiristor-triodă cu blocare în sens invers; redresor de siliciu controlat) (SCR; silicon controlled rectifier; thyristor/thyristor; SCR/Thyristor; Thyrode; Kathodenseitig steuerbare rückwärtssperrende Thyristor (triode)/кремниевый тринистор, незапираемый триодный тиристор)

— diac (= tiristor-diodă cu conducție bidirecțională; diodă bidirecțională) (diac, diode alternating current/diac/Diac/симметричный диодный тиристор)

— triac (= tiristor-triodă cu conducție bidirecțională, tiristor bidirecțional) (triac; triode alternating current; triode AC switch; bidirectional triode switch/triac/Triac; Zweirichtungs-Thyristor-(triode); bidirektionale Thyristor/незапираемый симметричный триодный тиристор)

— tiristor bioperațional (= tiristor cu blocare pe poartă) (GTO; gate turn — off thyristor/thyristor à extinction par la gachette; thyristor blocable: GTO/abschaltbare Thyristor (triode); GTO/запираемый триодный тиристор)

— contactor unilateral cu siliciu (= tiristor — triodă cu conducție unidirecțională) (SUS; silicon unilateral switch/dispositif de declenchement unilateral au silicium; SUS/Silizium-Unilateralschalter; SUS/кремниевый односторонний контактор)

— contactor bilateral cu siliciu (= tiristor — triodă cu conducție bidirecțională) (SBS; silicon bilateral switch/dispositif de declenchement bilateral au silicium; SBS/Silizium-Bilateralschalter; SBS/кремниевый двухсторонний контактор)

— tiristor-tetrodă (= contactor cu siliciu controlat) (SCS; silicon controlled switch; thyristor tetrode/dispositif de declenchement contrôlé, au silicium; SCS/rückwärtssperrende Thyristor-tetrode; SCS; PNP- Thyristor-Tetrode/тетродный тиристор)

B. Parametri caracteristici

a) *Tensiuni anod-catod (în condiții specificate)* (anode to cathode voltages/tensions anode-cathode/Anode-Katode Spannungen/напряжения между анодом и катодом)

V_D [V] = tensiune continuă în stare blocată

V_{DM} [V] = tensiune de vîrf în stare blocată

V_{DWM} [V] = tensiune de vîrf de lucru, în stare blocată

V_{DRM} [V] = tensiune de vîrf în stare blocată, repetitivă

V_{DSM} [V]	= tensiune de vîrf accidentală în stare blocată
$V_{(BO)}$ [V]	= tensiune continuă de revenire
V_T [V]	= tensiune continuă în stare de conducție
$V_{T(TO)}$ [V]	= tensiune de prag în stare de conducție
V_R [V]	= tensiune inversă continuă
V_{RWM} [V]	= tensiune inversă de vîrf de lucru
V_{RRM} [V]	= tensiune inversă de vîrf, repetitivă
V_{RSM} [V]	= tensiune inversă de vîrf, accidentală
$V_{(BR)}$ [V]	= tensiune inversă de străpungere

b) *Curenți anod-catod (în condiții specificate)* (anode to cathode currents/courants anode — cathode/Anode — Kathode Ströme/токи анода (катода))

I_D [A]	= curent continuu direct în stare blocată
$I_{(BO)}$ [A]	= curent continuu direct de revenire
I_H [A]	= curent continuu direct de menținere
I_T [A]	= curent continuu direct în stare de menținere
$I_{(OV)}$ [A]	= curent de suprasarcină previzibil în stare de conducție
I_{TRM} [A]	= curent de vîrf repetitiv în stare de conducție
I_{TSM} [A]	= curent de suprasarcină accidentală în stare de conducție
I_R [A]	= curent continuu invers în stare blocată
I_{RRM} [A]	= curent invers de vîrf repetitiv

c) *Tensiuni de comandă (de grilă/poartă)* (gate trigger voltages/tensions de gachette/Tor-Zündspannungen/напряжения на управляющем электроде)

V_{FG} [V]	= tensiune continuă directă de comandă
V_{FGM} [V]	= tensiune directă de vîrf de comandă
V_{RG} [V]	= tensiune inversă continuă de comandă
V_{RGM} [V]	= tensiune inversă de vîrf de comandă
V_{GT} [V]	= tensiune continuă de comandă de amorsare
V_{GD} [V]	= tensiune continuă de comandă de neamorsare
V_{GQ} [V]	= tensiune continuă de comandă de dezamorsare prin grilă/poartă

d) *Curenți de comandă (de grilă/poartă)* (gate trigger currents/courants de gachette/Tor-Zündströme/токи управляющего электрода)

I_{FG} [A]	= curent continuu direct de comandă
I_{FGM} [A]	= curent direct de vîrf de comandă
I_{RG} [A]	= curent invers-continuu de comandă
I_{GT} [A]	= curent continuu de comandă de amorsare
I_{GD} [A]	= curent continuu de comandă de neamorsare
I_{GQ} [A]	= curent continuu de comandă de dezamorsare prin grilă

e) *Timpi de amorsare/dezamorsare prin comandă pe grilă/poartă* (gate controlled turn-on/turn-off times/temps d'amorçage/desamorçage pour la commande par gachette/ /Zünd-/Löschungs-Zeiten bei Torsteuerung/время включения (выключения) управляющим электродом)

t_{gb} [s] = timp de amorsare
 t_{gg} [s] = timp de dezamorsare

f) *Timp de întârziere/creștere prin comandă pe grilă/poartă* (gate controlled delay/rise times/ / temps de retard/montée pour la commande par gachette/ Zündverzugs-/Anstiegs-Zeiten bei Torsteuerung/время выключения коммутацией цепи)

t_a [s] = timp de întârziere
 t_r [s] = timp de creștere

g) *Timp de dezamorsare prin comutarea circuitului* (circuit commutated turn-off time/temps de desamorçage contrôlé par le circuit/Freiwerdezeit/ время задержки (повышения) управляющим электродом)

t_g [s]

www.electronica.ro

h) *Viteză critică de creștere a curentului în stare de conducție* (critical rate of on-state current rise/vitesse critique de croissance du courant a l'état passant/kritische Stromsteilheit/критическая скорость увеличения прямого тока)

$$\frac{di}{dt} \left[\frac{A}{\mu s} \right]$$

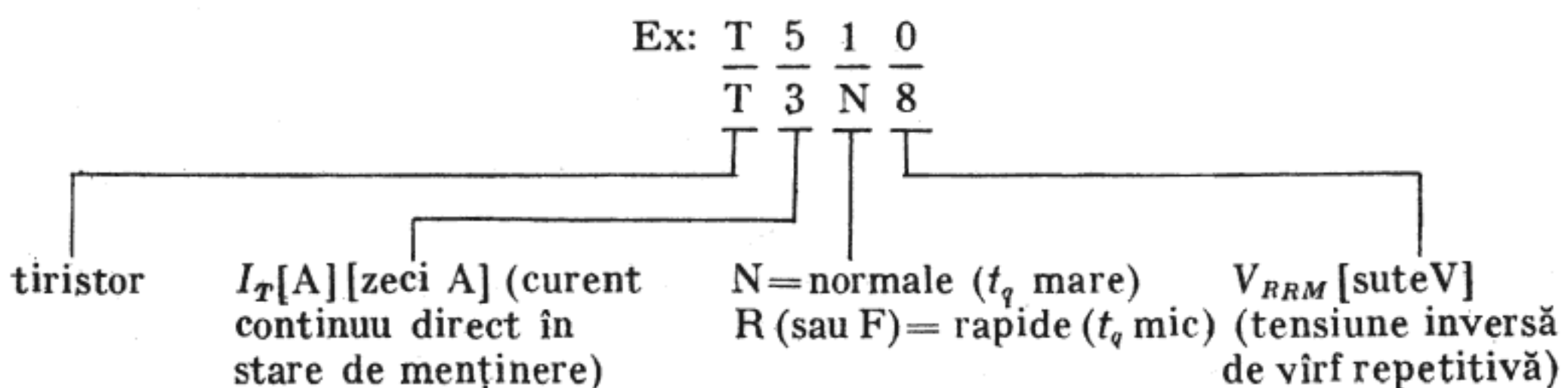
i) *Viteză critică de creștere a tensiunii în stare de blocare* (critical rate of off-state voltage rise/vitesse critique de croissance de la tension a l'état bloqué/kritische Spannungssteilheit/критическая скорость увеличения запираемого напряжения)

$$\frac{dv}{dt} \left[\frac{V}{\mu s} \right]$$

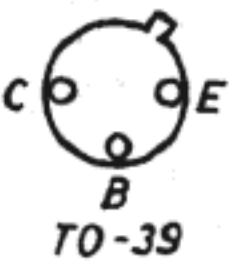
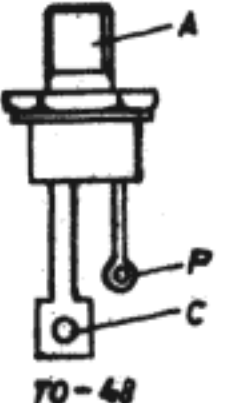

Exemple de tiristoare produse în România

(producător: IPRS-Băneasa)

- Codificare specifică IPRS-Băneasa



● Caracteristici

Cod	Valori limită absolute ¹⁾				Caracteristici electrice							Capsulă
	V_{RRM} ($=V_{DRM}$) [V] (la T_c [°C])	I_{TAVM} [A] (la T_d [°C])	I_{TRM} [A] (la T_d [°C])	I_{TSM} ²⁾ [A]	P_{GM} [W]	V_{GT} [V]	I_{GT} [mA]	t_{on} [μs]	t_p [μs]	$\frac{dV}{dt}$ [$\frac{V}{\mu s}$] (la T_d [°C])	$\frac{di}{dt}$ [$\frac{A}{\mu s}$]	
T1N-05... ...T1N-8	50; 100; 200; 400; 600; 800 (125°C)	1 (100°C)	9 (100°C)	15	0,5	2	10	1,5	N=20	50 (125°C)	10	 TO-39
T10N-05... ...T10N-8 T10R-05... ...T10R-8	50; 100; 200; 300 400; 500; 600; 700 800 (125°C)	10 (85°C)	90 (85°C)	150	2	3	N=50 R=100	5	N=200 R=20	50 (125°C)	50	 TO-48
T51...T59 T510, T511; T512 ³⁾	100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 100; 1100; 1200; (125°C)	50 (85°C)	160 (85°C)	800	—	1,2	100	2,5	100	20...1000 (125°C)	50	 TO-49

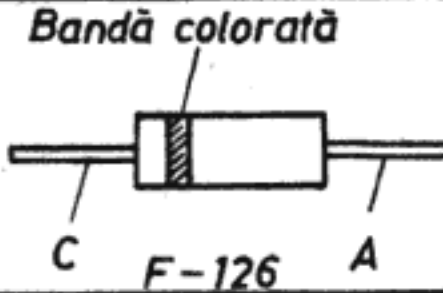
¹⁾ la temperatura capsulei T_c

²⁾ pentru o durată de 10 ms

³⁾ Codul de mai sus este completat (in cazul acestor categorii de tiristoare) de o ultimă literă indicind valoarea a dv/dt : A=20 V/μs; R=50 V/μs; C=100 V/μs; D=200 V/μs; E=300 V/μs; F=400 V/μs; G=500 V/μs; H=600 V/μs; I=700 V/μs; J=800 V/μs; K=1000 V/μs

Diacuri produse în România¹⁾

(producător: I.P.R.S. — Băneasa)

Cod	Tensiune de întoarcere V_{BO} [V]		Curent de întoarcere maxim ²⁾ I_{BOM} [μ A]	Tensiune de salt minimă (la $I_s = 10$ mA) V_s [V]	Capsulă
	maximă	minimă			
DC 32	28	36	300	5	 <p>Bandă colorată</p> <p>C F-126 A</p>
DC 32A	28	36	50	5	
DC 38	34	42	300	5	
DC 38A	34	42	50	5	

¹⁾ Toate diacurile au curentul de vîrf maxim $I_{TRM} = 1,5$ A și puterea disipată maximă $P_{DM} = 0,3$ W

²⁾ Rezistența negativă a diacului apare la I_{DO} și dispare la curenți de (2...5) A

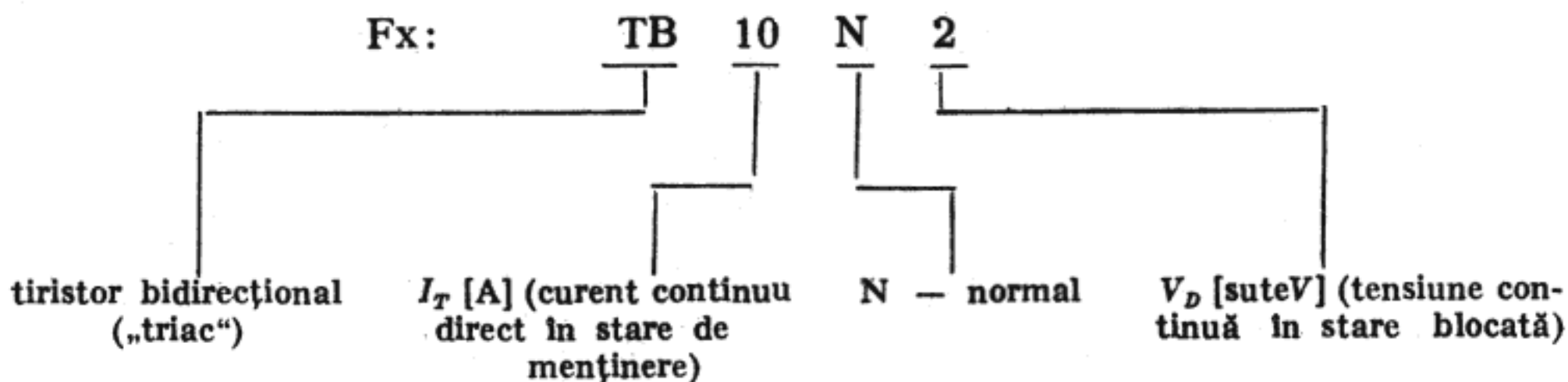
DC 44	40	48	300	7	F-126
DC 44A	40	48	50	7	
DC 50	46	54	300	7	
DC 50A	46	54	50	7	

Triacuri produse în România

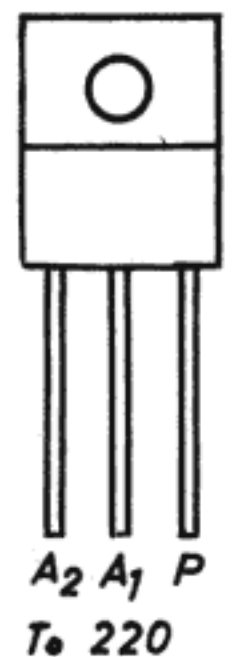
(producător: IPRS-Băneasa)

www.electronica.ro

- Codificare specifică IPRS Băneasa:



- Caracteristici

Cod	I_T [A]	V_D [V]	V_R [V]	I_{GT} [mA]	V_{GT} [V]	V_{TM}	dv/dt	Capsula
TB6N2	6	200	200	100	3	2,3 V (la $I_T =$ $= 8,5$ A)	20 V/ μ s normale 5 V/ μ s în co- mutație	 <p>A₂ A₁ P</p> <p>T_c 220</p>
TB6N3	6	300	300	100	3			
TB6N4	6	400	400	100	3			
TB6N5	6	500	500	100	3			
TB6N6	6	600	600	100	3			
TB10N2	10	200	200	100	3			
TB10N3	10	300	300	100	3			
TB10N4	10	400	400	100	3			
TB10N5	10	500	500	100	3			
TB10N6	10	500	600	100	3			

Anexa 8

Dispozitive optoelectronice produse în România

● Componente produse de CCSIT-CE

www.electronica.ro

Cod	Funcție	Capsulă
A. DETECTOARE DE LUMINĂ (FOTODETECTOARE)		
ROL 011	Celulă fotovoltaică	T0-5 PLASTIC
ROL 11	Celulă fotovoltaică	T0-5/SL 10 002
ROL 12	Celulă fotovoltaică	T0-5/SL 10 002
ROL 14	Celulă fotovoltaică	—
ROL 15	Dispozitiv pentru supra- vegherea firelor textile	P4 — PLASTIC
ROL 16	Fotodetector sensibil în albastru	PLASTIC
ROL 17	Celulă fotovoltaică	—
ROL 021	Fotodiodă	T0-18
ROL 21	Fotodiodă	T0-18/SL 10 008
ROL 22	Fotodiodă	T0-18/SL 10 005
ROL 25	Fotodiodă PIN	T0-18/SL 10 005
ROL 26	Fotodiodă PIN	T0-5/SL 10 002
ROL 27	Fotodiodă cu avalanșă	T0-18/SL 10 005
ROL 28	Fotodiodă cu avalanșă	T0-18/SL 10 005
ROL 121	Fotodiodă PIN	T0-5/SL 10 002
ROL 123	Fotodiodă PIN	T0-5/SL 10 002
ROL 125	Fotodiodă PIN	—
ROL 127	Fotodiodă cu avalanșă	T0-18/SL 10 005
ROL 031	Fototranzistor	T0-18 PLASTIC
ROL 31	Fototranzistor	T0-18/SL 10 008
ROL 32	Fototranzistor	T0-18/SL 10 005
ROL 33 (A, B, C)	Fototranzistor	T0-18/SL 10 005
ROL 033 (A, B)	Fototranzistor	T0-18 — PLASTIC
ROL 34 (A, B)	Fototranzistor	T0-18/SL 10 005
ROL 034 (A, B)	Fototranzistor	T0-18 — PLASTIC
ROL 035	Fototranzistor	T0-18
ROL 36	Fototranzistor	T0-18/SL 10 005
ROL 036	Fototranzistor	PLASTIC
ROL 37 (A, B)	Fototiristor	T0-5 FT/SL 10 007
ROL 41	Celulă solară	P-3
ROL 44	Celulă solară	—
ROL 45	Baterie de celule solare	PLASTIC
ROL 48	Baterie de celule solare	STICLĂ
ROL 46/47	Celulă fotovoltaică	—
ROL 49	Baterie de celule fotovoltaice	P-2
ROL 50	Baterie de celule fotovoltaice	—

ROL 66/67	Comutator optoelectronic	—
ROL 110	Fototrigger	T099 — SL 10 007
ROL 210	Fotodetector QUADRANT fotovoltaic	Q 1
ROL 212	Fotodetector QUADRANT fotoconductiv	Q 2

B. DISPOZITIVE ELECTROLUMINISCENTE

www.electronica.ro

ROL 02 ROL 03 (A) ROL 003	Diodă electroluminiscentă (LED) roșu LED roșu LED roșu	T0-18 PLASTIC T-1 3/4 T-1
ROL 05 ROL 005	LED portocaliu LED portocaliu	T-1 3/4 T-1
ROL 07 ROL 007	LED galben LED galben	T-1 3/4 T-1
ROL 09 ROL 009	LED verde LED verde	T-1 3/4 T-1
ROL 01 RV ROL 01 RG	LED LED	T0-18 T0-18
ROL 05 S ROL 03 E ROL 07 E ROL 04 A(B) ROL 101 ROL 102	LED LED LED LED LED LED	PLASTIC PLASTIC PLASTIC PLASTIC PLASTIC PLASTIC
ROL 91 ROL 091 ROL 0091	LED — în infraroșu LED — în infraroșu LED — în infraroșu	T0-18/SL 10 004 PLASTIC PLASTIC
ROL 77 ROL 78 ROL 81	Element de afișare pentru 1 digit (cu 7 segmente și punct zecimal) — roșu Element de afișare pentru semn roșu Element de afișare multi- digit (cu 9 cifre și punct zecimal mobil) — roșu	PLASTIC PLASTIC PLASTIC

C. OPTOCUPLOARE

ROL 61 (—, A, B, C, D, E) ROL 62/63/64	Optocuplor (LED+foto- tranzistor) Optocuplor cu viteză și factor de transfer ridicat	Mini DIP/PLASTIC Mini DIP/PLASTIC
--	---	--------------------------------------

● Componente produse de IPRS—BĂNEASA

Cod	Funcție	Capsulă
DF 1/DF 2/DF 3 CS-01-C2 (CS-02-C2) CS-01-C3 (CS-02-C3) CS-01-C2/4 (CS-02-C2/4) CS-01-C2/6 (CS-02-C2/6) CS-01-C3/6 (CS-02-C3/6) CS-01-C3/12 (CS-02-C3/12)	Fotodiodă (cu Ge) Celule solare Celule solare Celule solare Celule solare Celule solare Celule solare	T0-5 (F-46)
		www.electronica.ro

B I B L I O G R A F I E

1. M. Drăgănescu, *Procese electronice în dispozitive semiconductoare de curent*, Ed. Academiei, București, 1962.
2. * * * *Physical principles of electronics — The crystal diode: I — Basic principles, II — A More Advanced Treatment, III — Practical Considerations*, Educational products and systems, Philips, 1970.
3. E. Vasiliu, *Inițiere în dispozitivele semiconductoare*, Ed. Tehnică, București, 1970.
4. P. Cutler, *Solid-state device theory with illustrative problems*, McGraw-Hill Book Company, 1972.
5. D. D. Sandu, *Dispozitive și circuite electronice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1975.
6. E. Sofron, *Dispozitive optoelectronice — set de diapozitive*, Studioul „Animafilm“ București 1983.
7. I. Ristea, *Tranzistoare — set de diapozitive*, Studioul „Animafilm“ București, 1985.
8. E. Sofron, V. Croitoru, C. Miroiu, H. Teodorescu, P. Svasta ș.a., *Electronica — îndrumar de laborator*, I. P. București, 1988.
9. * * * *Flight Electronics limited*, 7th Edition, 1988/9.
10. N. Drăgulănescu, *Agenda radioelectronistului*, ed. a II-a, Ed. Tehnică, București, 1989.
11. * * * *Cataloage de componente semiconductoare*, IPRS—Băneasa, ICCE — Băneasa Microelectronica București.

A,B,C,... ELECTRONICS THROUGH IMAGES, vol. 2

ACTIVE DEVICES

This volume continues the introductory approach of electronics initiated in the first book of the series—*PASSIVE DEVICES*. This time the authors deal with semiconductor active components such as diodes, transistors, integrated circuits, LEDs, etc. They describe the structure, the manufacturing and the use of these devices, all in a colour “environment” built by a lot of diagrams and photographs. With little theory but many colourful images, this book is a very useful and readable introduction aimed to a wide public of students and amateurs. The series will continue with volumes dealing with fundamental electronic circuits, radio and TV equipment, satellite receivers, etc.

www.electronica.ro

