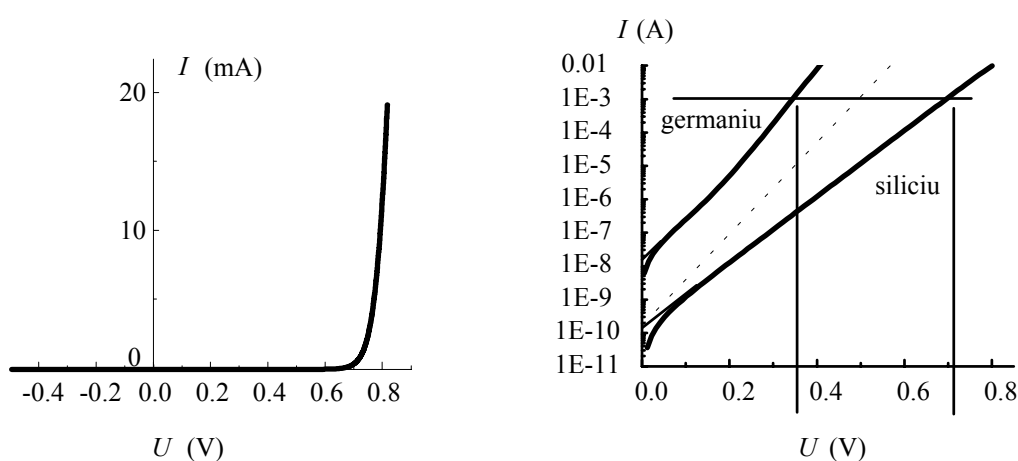


## CAPITOLUL

# 3

## Diode semiconductoare



- A. Caracteristica statică 60
- B. Date de catalog 65
- C. Metoda dreptei de sarcină 66
- D. Circuitul echivalent pentru variații mici 68
- E. Verificarea experimentală a unei dependențe exponențiale 70
- Probleme rezolvate 74, probleme propuse 77
- Lucrare experimentală 78

## A. Caracteristica statică

Circuitele electrice sunt, într-o anumită măsură, similare celor bazate pe circulația fluidelor (pneumatice sau hidraulice). O funcție esențială în aceste circuite este permiterea curgerii fluidului numai într-un anumit sens; ea este realizată cu dispozitive numite **supape**. De unde știți supapele sensul în care fluidul are tendința să circule pentru a decide să-l lase sau nu să treacă? Simplu, fluidul curge de la presiune mare la presiune mică iar supapele sesizează tocmai această diferență de presiune, deoarece ea este proporțională cu forța netă exercitată de fluid asupra supapei. Dacă forța are sensul corect și **dacă mărimea ei depășește o anumită valoare de prag**, supapa se deschide și fluidul poate să treacă.

În circuitele electronice, aceeași funcție este îndeplinită de către diode. Așa cum se vede în Fig. 3.1,

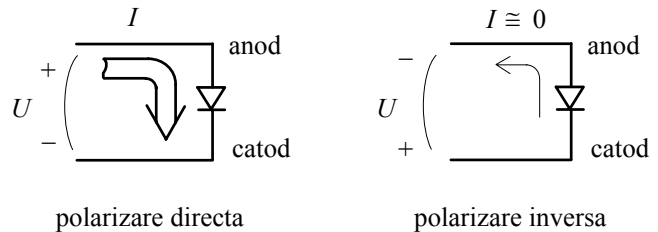


Fig. 3.1. Dioda semiconductoră: polarizare directă și inversă.

dioda este un dispozitiv de circuit cu două borne (un **dipol**) care conduce, practic, numai într-un sens: de la **anod** la **catod**.

Simbolul utilizat pentru ea este cel din figura anterioară; sensul săgeții arată sensul în care dioda conduce.

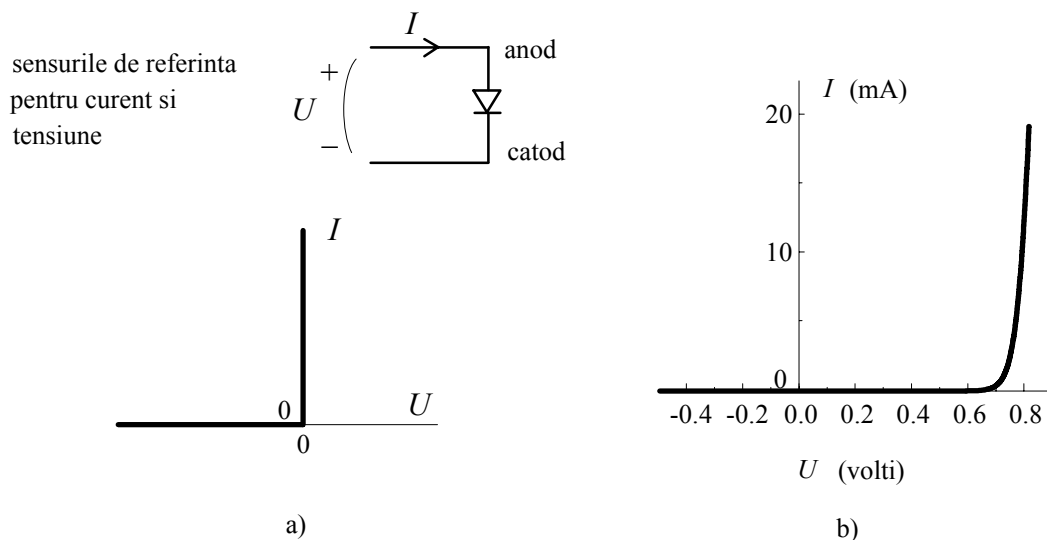


Fig. 3.2. Caracteristica statică a unei diode ideale (a) și a unei diode semiconductoră cu siliciu (b).

Comportarea dispozitivelor electronice la curent continuu și la frecvențe mici este descrisă de caracteristica lor statică. Pentru o diodă **ideală**, aceasta ar trebui să arate ca în Fig. 3.2 a) : la polarizare inversă (potențialul anodului mai coborât decât cel al catodului) curentul este nul pentru că la atingerea tensiunii zero dioda să se deschidă și să se comporte ca un scurtcircuit. Este clar dioda **nu se comportă ca un rezistor**, fiind un element nesimetric și neliniar.

Primele diode au fost realizate ca **tuburi electronice** dar astăzi se utilizează aproape exclusiv **diodele semiconductoră**, realizate din **germaniu** sau **siliciu**. Caracteristica statică curent-tensiune a unei diode semiconductoră cu siliciu arată ca în Fig. 3.2. b).

Să privim mai întâi regiunea de **polarizare directă** (forward în limba engleză), unde potențialul anodului este mai ridicat decât cel al catodului. Dioda ideală se comportă ca un scurtcircuit și nu există cădere de tensiune pe diodă, deși curentul poate avea orice valoare. Spre deosebire de aceasta, prin dioda semiconductoare trece un curent semnificativ numai dacă tensiunea depășește o anumită valoare, numită **tensiune de deschidere**. Astfel, pentru diodele cu germaniu tensiunea de deschidere este de 0.2-0.3 V iar pentru cele cu siliciu tensiunea de deschidere este de 0.6-0.7 V. După deschidere, curentul crește foarte rapid cu tensiunea; dacă încercăm să mărim cu mai mult de câteva zecimi de volt tensiunea pe diodă, curentul ajunge la valori atât de mari încât dioda este distrusă.

**Există un punct special pe caracteristică ce permite definirea precisă a tensiunii de deschidere ?**

La polarizare directă, caracteristica diodei semiconductoare este foarte bine descrisă de relația

$$I = I_S \left( e^{\frac{U}{mV_T}} - 1 \right); \quad (3.1)$$

unde mărimea  $V_T = k_B T / e$  este tensiunea termică, egală cu 25 mV la temperatura camerei, iar  $I_S$  este numit curent invers de saturație și are valori de ordinul  $10^{-11} \text{ A}$  -  $10^{-6} \text{ A}$ , după tipul materialului și destinația diodei. Parametrul  $m$ , numit **factor de idealitate** sau **coeficient de emisie**, depinde de locul din structura diodei unde are loc o anumită fază a mecanismului intern de transport al curentului; coeficientul de emisie  $m$  are valoarea 1 pentru diodele cu germaniu, în timp ce pentru diodele cu siliciu are o valoare apropiată de 2, care poate diferi însă după mărimea curentului prin diodă.

Să considerăm, deocamdată, o diodă cu germaniu și să urmărim în Fig. 3.3 evoluția curentului raportat la valoarea celui de saturație,  $I/I_S$ . În desenul a) avem reprezentată variația sa în jurul tensiunii nule; se observă că intensitatea este nulă la tensiune nulă, caracteristica statică a diodei trecând exact prin origine).

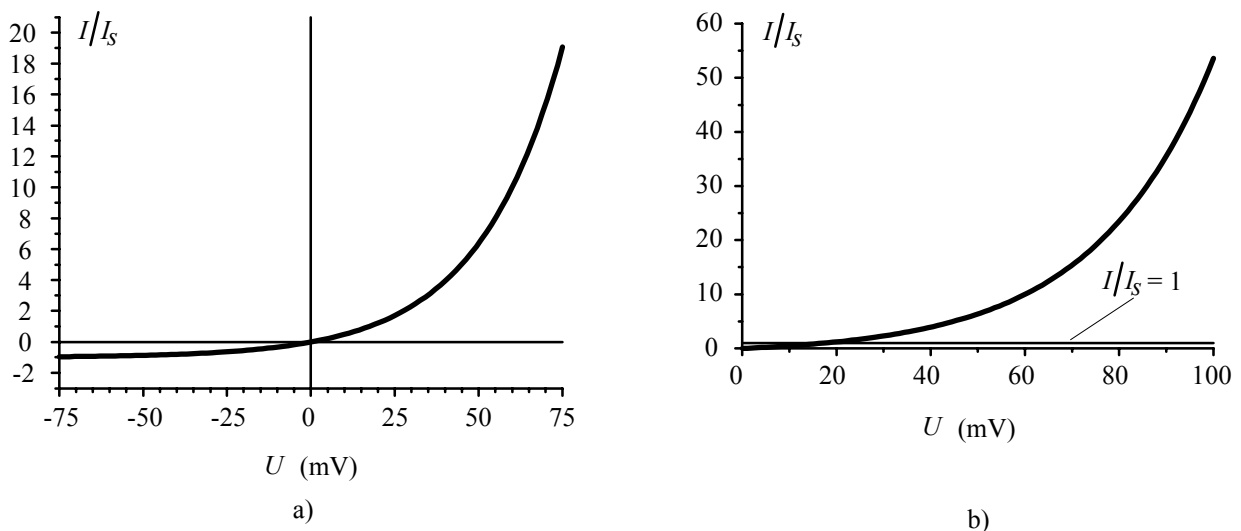
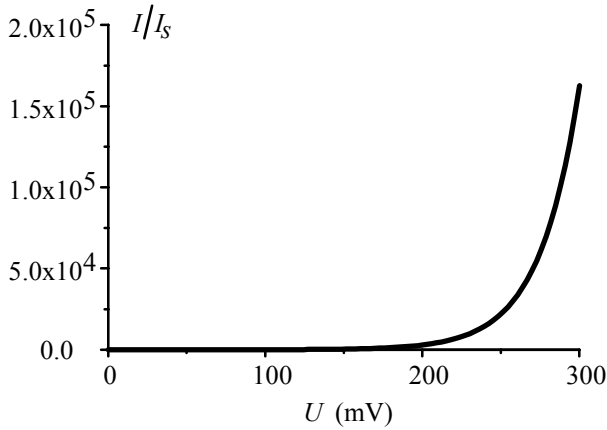


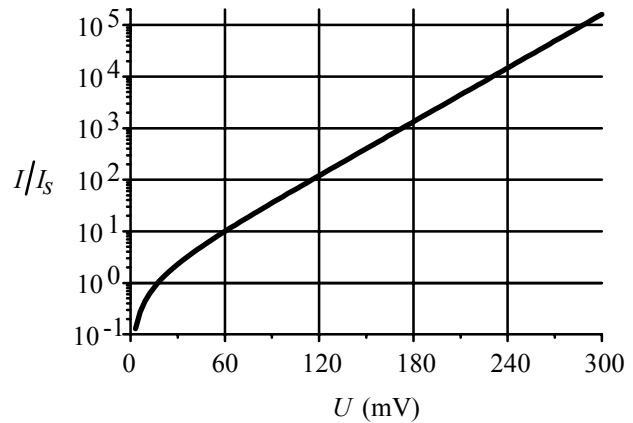
Fig. 3.3 a) și b). Evoluția raportului  $I/I_S$  la dioda cu germaniu; pe desenul b) a fost figurată cu linie subțire și dependența  $I/I_S = 1$

Este acest lucru obligatoriu ? Să privim sensurile de referință pentru curent și tensiune, așa cum au fost ele alese : curentul intră în diodă pe la borna de potențial ridicat. Aceasta înseamnă că dacă valorile tensiunii sunt fie ambele pozitive (cadrantul I al graficului caracteristicii), fie ambele negative (cadrantul III), dioda

funcționează ca un consumator de energie. Din contra, în cadranele II și IV dispozitivul ar trebui să fie un generator de energie electrică.



c)



d)

Fig. 3.3 c) și d).. Evoluția raportului  $I/I_s$  în conducție directă, la o diodă cu germaniu.

Deoarece dioda semiconductoră este un consumator de energie, caracteristica să treacă din cadranul III în cadranul I, evitînd cadranele II și IV. Acest lucru nu se poate face decît prin origine

Al doilea aspect pe care îl observăm este că intensitatea are comportări diferite la polarități diferite ale tensiunii. La polarizare inversă (tensiuni negative) curentul variază lent și pe la - 75 mV ajunge practic la valoarea de saturație  $I = -I_s$ . Pentru polarizare directă, exponențiala crește rapid și curentul crește și el puternic cu tensiunea. Desenele b) și c) explorează caracteristica în conducție directă pe o scară din ce în ce mai mare de tensiuni. Se observă că, privind la scara 300 mV=0.3 V, exponențiala face, pur și simplu, explozie, raportul  $I/I_s$  ajungînd peste 150 000; **pe la aceste valori ale curentului este utilizată dioda în conducție directă**. La scara la care suntem obligați acum să privim lucrurile, raportul  $I/I_s$  are valori semnificative începînd de pe la 200 mV=0.2V, ca și cum ar exista o tensiune de prag. De fapt, nu există nici un punct special pe caracteristică, așa cum se poate constata și în desenul c) al figurii, unde am reprezentat raportul  $I/I_s$  în scară logaritmică.

**Deși nu există un punct special de deschidere pe caracteristică, tensiunea de deschidere are semnificație clară**

Un anumit tip de diodă este proiectat să funcționeze garantat pînă la o valoare maximă  $I_{FD\max}$  a curentului. Dioda din Fig. 3.4 a) este una destinată să lucreze la curenți de cîteva zecimi de amper, cele din desenele b) și c) au un curent maxim de 1 A și, respectiv, 6 A, pe cînd "monstrul" din desenul d) poate suporta curenți de 50 A. Spunem că dioda este deschisă cînd intensitatea este semnificativă la scara lui  $I_{FD\max}$  (este undeva pe la  $I_{FD\max}$ ). De ce există, atunci, o tensiune tipică pentru germaniu ? În primul rînd, pentru că o modificare de 1000 de ori a curentului la care măsurăm tensiunea nu înseamnă decît o variație de

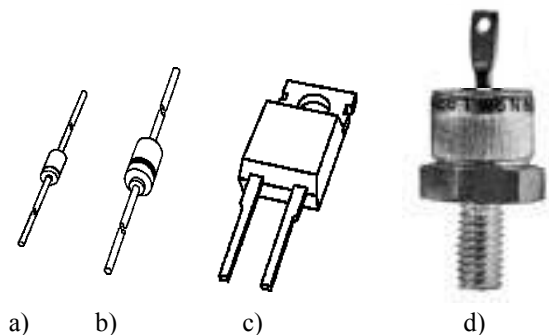


Fig. 3.4. Diode semiconductoră.

0.18 V a tensiunii. Iar în al doilea rând, diodele de curenți mari au aria mai mare, ceea ce, așa cum se poate constata în Fig. 3.5 a), conduce la mărirea corespunzătoare a curentului de saturație. Pe figură sunt desenate caracteristicile statice pentru dioda 1N4148 de 10mA și dioda 1N1183 cu un curent maxim de 35 A. Considerînd deschiderea la  $I_{FD\max}/100$ , tensiunea pe diode este aproape aceeași, deoarece raportul  $I/I_s$  are aproape aceeași valoare.

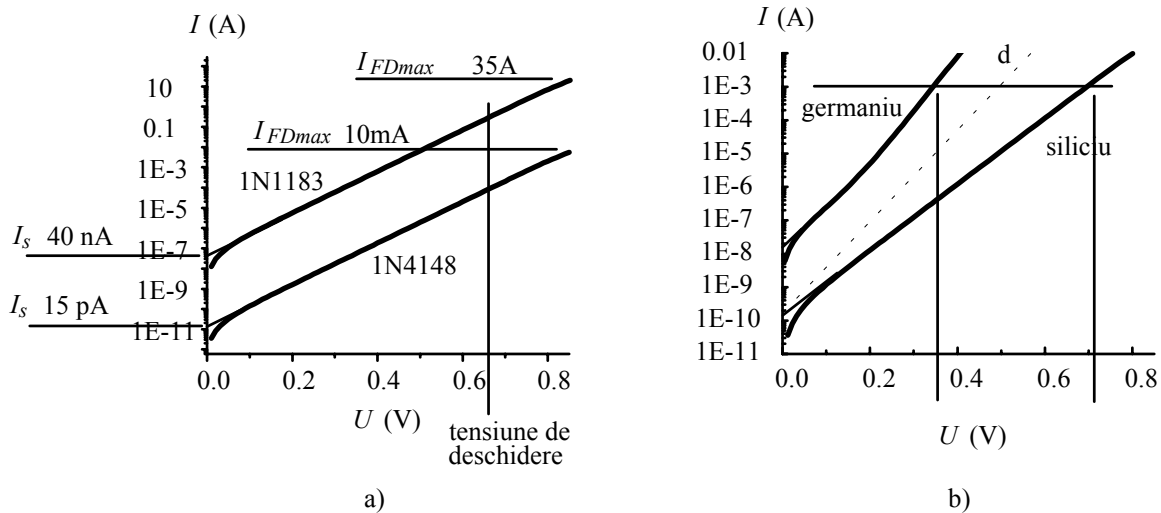


Fig. 3.5. Diodele destinate să lucreze la curenți mari au și curentul de saturație mai mare, astfel că tensiunea de deschidere este practic aceeași (a); explicația diferenței de tensiune de deschidere între diodele cu germaniu și cele cu siliciu (b).

Să privim acum mai atent caracteristica de conducție directă reprezentată în scară semilogaritmică în Fig. 3.3 d). Observăm că, la tensiuni mai mari de 100 mV, caracteristica în scară logaritmică este dreaptă, adică dependența curentului poate fi aproximată cu una exponențială; cum la germaniu coeficientul de emisie  $m$  este unitar,

$$I \cong I_s e^{\frac{U}{V_T}} \quad (3.2)$$

Extrapolarea acestei dependențe aproximative la  $U = 0$  în scară semilogaritmică permite determinarea comodă a curentului de saturație.

Cum baza logaritmulor naturali  $e = 2.7182$  nu este un număr prea confortabil pentru experimentatori, se obișnuiește să se dea variația de tensiune pentru care curentul crește de 10 ori nu de  $e$  ori, ci de 10 ori; din figură rezultă că

la o diodă cu germaniu, valoarea curentului se multiplică cu zece la fiecare creștere cu 60 mV a tensiunii.

Deoarece la siliciu valoarea coeficientului de emisie este aproape egală cu 2, în scară semilogaritmică intensitatea curentului crește cu tensiunea de două ori mai lent decât la germaniu; astfel

la o diodă cu siliciu, valoarea curentului se multiplică cu zece la fiecare creștere cu aproximativ 120 mV a tensiunii.

### E. Verificarea experimentală a unei dependențe exponențiale

Am văzut că, în conducție directă, caracteristica statică  $I = f(V)$  a unei diode semiconductoare este descrisă conform relației (3.2) de

$$I = I_S e^{\frac{V}{mV_T}} \quad (3.13)$$

Vom încerca să verificăm experimental acest lucru; numai că într-un grafic desenat în coordonate liniare (prescurtare "lin-lin" în literatura științifică) aceasta este o operație dificilă, datorită variației puternic neliniare a funcției exponențiale. O soluție mai simplă va apărea dacă vom logaritma relația precedentă. Atenție însă, **nu puteți aplica operația de logaritmare decât numerelor adimensionale**, altfel veți ajunge la întrebarea fundamentală: **în ce unități se măsoară  $\log I$** ? Avem două posibilități, fie împărțim relația la  $I_S$ , fie la o altă valoare de curent, să zicem 1 mA. Vom avea dreptul să scriem

$$y = \log(I/1 \text{ mA}) = \log(I_S/1 \text{ mA}) + \frac{V}{mV_T} \frac{1}{\ln(10)} = A + BV \quad (3.14)$$

unde  $A$  și  $B$  sunt constante. Am obținut o relație de gradul întâi, care va avea drept grafic o **linie dreaptă**, ca în Fig. 3.12. a). Panta graficului este legată direct de  $\frac{1}{mV_T}$  iar punctul de la  $V = 0$  (obținut prin extrapolarea graficului) furnizează valoarea curentului de saturație.

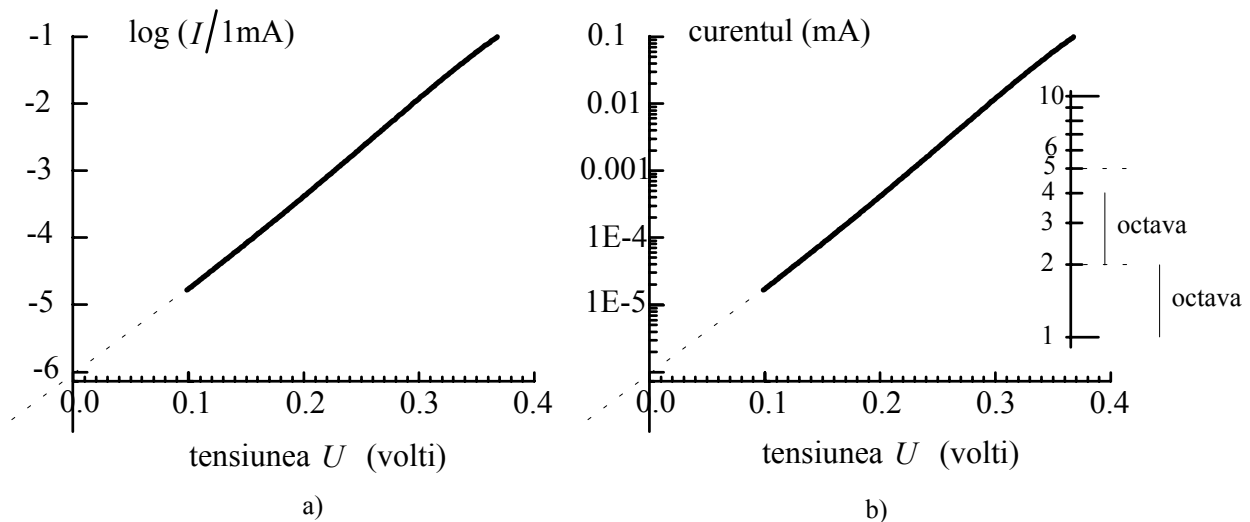


Fig. 3.12. Caracteristica diodei, în coordonate liniară pentru tensiune și logaritmică pentru curent.

Acesta este un procedeu absolut corect dar prezintă, în special pentru experimentatori, un inconvenient major: dacă alegem un punct oarecare de pe grafic, având coordonata  $y$ , și dorim să aflăm valoarea curentului va trebui să efectuăm operația matematică  $10^y \cdot 1 \text{ mA}$ ; or **rolul esențial al unui grafic este să permită citirea comodă și rapidă a informației**. Din acest motiv, gradarea axei  $y$  (liniute ajutătoare și

etichete) **nu se face cu valorile logaritmului ci direct cu valorile mărimii reprezentate**, ca în desenul b) al figurii. Evident, **ele nu vor fi echidistante, dar vor prezenta niște proprietăți esențiale pentru o reprezentare logaritmică**. Dacă pe o axă liniară o deplasare  $\Delta y$  este proporțională cu variația  $I_{final} - I_{init}$  a mărimii reprezentate, pe o scară logaritmică ea este proporțională cu raportul de multiplicare a mărimii reprezentate,  $I_{final}/I_{init}$ . Astfel, distanțele pe scara logaritmică se măsoară în **decade** (corespunzătoare multiplicării cu zece) sau **octave** (corespunzătoare multiplicării cu doi).

În desenul b) aveți desenată, în detaliu, o decadă. Se poate observa că diviziunile 1, 2, 5 și 10 sunt aproximativ echidistante. Această observație vă permite să vă construiți rapid și fără efort o scară logaritmică aproximativă; din același motiv, dacă doriți să aveți puncte experimentale echidistante pe axa y, va trebui să faceți măsurătorile în această secvență de valori.

Cum extragem, însă, informațiile din acest grafic ? Revenind la relația (3.14), pe o decadă de curent mărimea  $y = \log(I/1 \text{ mA})$  crește cu o unitate și, deci, tensiunea variază cu  $1 \cdot 10 \cdot mV_T = 2.30 \cdot mV_T$

$$\Delta U_{(10)} = 2.30 \cdot mV_T \Rightarrow I \rightarrow 10 \cdot I. \quad (3.15)$$

Pentru o dublare a curentului, variația de tensiune necesară este  $10 \cdot 2 \cdot 10 \cdot mV_T = 0.69 \cdot mV_T$

$$\Delta U_{(2)} = 0.69 \cdot mV_T \Rightarrow I \rightarrow 2 \cdot I. \quad (3.16)$$

După determinarea din graficul experimental a oricăreia dintre tensiunile  $\Delta V_{(10)}$  sau  $\Delta V_{(2)}$ , putem utiliza una din relațiile (3.15) sau (3.16) pentru calcularea produsului  $mV_T$ . Cît despre curentul de saturație  $I_S$ , el poate fi citit acum direct pe grafic, după extrapolare.

## Probleme rezolvate

**Problema 1.** Sursa de tensiune  $V_g$  produce o evoluție a potențialului nodului A ca în Fig. 3.13.

Determinați evoluția în timp a curentului prin diodă, aceasta fiind una redresoare cu siliciu, avînd tensiunea de străpungere inversă mult mai mare decît 10 V. Aflați, de asemenea, cum evoluează potențialul nodului B (ieșirea circuitului). Propuneți o aplicație pentru acest circuit.

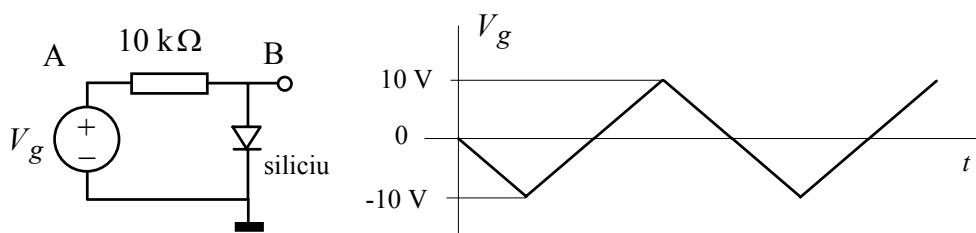


Fig. 3.13.

### Rezolvare

Analizăm mai întâi situația cînd potențialul punctului A este pozitiv; în acest caz dioda va fi polarizată direct. Atîta timp, însă, cît tensiunea pe diodă nu va depăși tensiunea de deschidere (0.6 V pentru că dioda este din siliciu), curentul va fi practic nul. În consecință, căderea de tensiune  $U_R$  pe rezistor ( $I \cdot 10 \text{ k}\Omega$ ) va fi și ea nulă și deci

$$U_R = V_g - V_B = 0 \Rightarrow V_B = V_g.$$

Relația anterioară este valabilă cîtă vreme  $V_g < 0.6 \text{ V}$ :

$$0 \leq V_g(t) < 0.6 \text{ V} \Rightarrow I = 0 \text{ și } V_B(t) = V_g(t)$$

La depășirea de către  $V_g$  a tensiunii de deschidere, dioda începe să se deschidă; deși curentul crește, tensiunea pe diodă rămîne practic constantă. Putem, astfel, calcula valoarea instantanee a curentului

$$0.6 \text{ V} \leq V_g(t) \Rightarrow I = \frac{V_g(t) - 0.6 \text{ V}}{R} \text{ și } V_B(t) = \text{constant} 0.6 \text{ V}.$$

Valoarea maximă a curentului este atinsă cînd  $V_g = 10 \text{ V}$  și este de 0.94 mA. În Fig. 3.14 a), evoluția potențialului  $V_g$  a fost reprezentată cu linie punctată, pe cînd evoluția potențialului  $V_B$  (tensiunea pe diodă) este trasată cu linie groasă. Trebuie remarcat că distanța între aceste curbe este chiar tensiunea pe rezistență,  $U_R = V_g - V_B$ , proporțională în orice moment cu intensitatea curentului, reprezentată și ea în desenul b).

Pentru cazul în care potențialul punctului A este negativ, situație este simplă, dioda fiind invers polarizată. Curentul prin diodă este practic nul și nodurile A și B au același potențial; avem

$$V_g(t) < 0 \Rightarrow I = 0 \text{ și } V_B(t) = V_g(t).$$



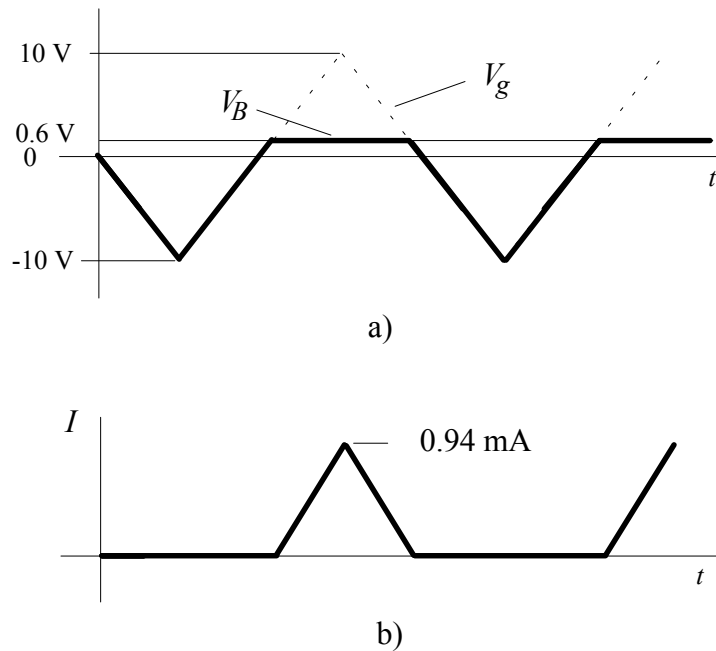


Fig. 3.14.

În concluzie, deși tensiunea generatorului evoluează între  $+10\text{ V}$  și  $-10\text{ V}$ , tensiunea pe diodă evoluează numai între  $-10\text{ V}$  și  $+0.6\text{ V}$  (tensiunea de deschidere în conducție directă). Circuitul acționează ca un **limitator de tensiune (clipper** în limba engleză), "retezînd" orice vîrf care depășește  $0.6\text{ V}$ . Astfel, circuitul poate fi utilizat pentru **protecția** unor dispozitive împotriva unor tensiuni pozitive prea mari. Valoarea rezistenței trebuie aleasă suficient de mare astfel încît intensitatea curentului prin diodă să nu devină periculoasă pentru diodă. Absența rezistenței (o valoare  $R = 0$ ) conduce la distrugerea diodei sau la părăsirea de către sursa a regimului liniar (intrarea în regimul de protecție prin depășirea curentului maxim). Dezavantajul circuitului este că pragul la care se face limitarea nu poate fi stabilit de proiectant, fiind egal cu tensiunea de deschidere a diodei.

### Problema 2.

a) Să reluăm problema precedentă, pentru circuitul modificat din Fig. 3.15 a).

### Rezolvare

De data aceasta, pentru ca dioda să se deschidă, potențialul anodului trebuie să treacă de  $V_{REF} + 0.6\text{ V} = 2.6\text{ V}$ . Circuitul va limita valorile pozitive ale tensiunii la valoarea  $2.6\text{ V}$ , curentul maxim fiind de  $0.74\text{ mA}$ . Putem, astfel, produce limitarea la orice valoare dorim, prin alegerea tensiunii  $V_{REF}$ .

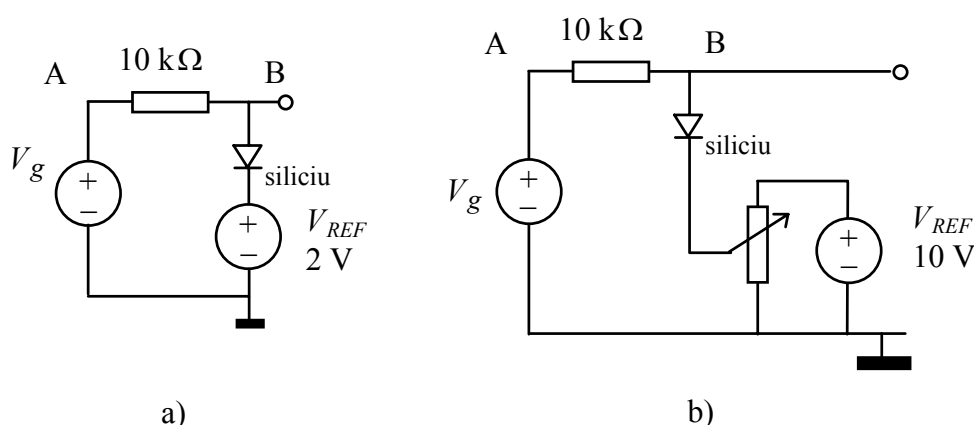


Fig. 3.15.

b) Circuitul din Fig. 3.15 b) permite ajustarea continuă a nivelului la care se face limitarea, prin intermediul unui potențiometru. Acesta este echivalent cu un divizor rezistiv, la care se modifică raportul rezistențelor, suma lor rămânând constantă.

-între ce limite poate fi modificat nivelul la care se face limitarea ?

- ce valoare trebuie să aibă rezistența potențiometrului (între bornele sale extreme), pentru ca circuitul să funcționeze corect ?

### Rezolvare

-În pozițiile extreme, catodul diodei este ținut fie la zero fie la 10 V; nivelul de limitare va putea fi reglat, deci, între 0.6 V și 10.6 V.

-Pentru ca circuitul să funcționeze corect este necesar ca potențialul catodului să fie menținut constant, chiar cu dioda în conducție. Astfel, rezistența echivalentă a divizorului trebuie să fie mult mai mică decât rezistența de 10 kΩ care limitează curentul prin diodă. Dacă nu suntem foarte pretențioși, un potențiometru cu rezistența de 1 kΩ este o alegere bună; în cel mai defavorabil caz, când cursorul este la jumătate, rezistența văzută de catodul diodei va fi aceea a două rezistențe de 500 Ω legate în paralel, adică 250 Ω, de 40 de ori mai mică decât rezistența de limitare de 10 kΩ.

## Probleme propuse

**P 3.1.** Calculați valoarea curentului prin circuitul din Fig. 3.16, dacă dioda este

- a) cu siliciu
- b) cu germaniu.

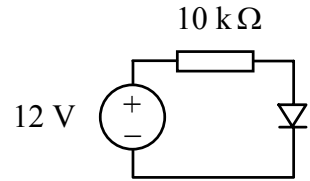


Fig. 3.16.

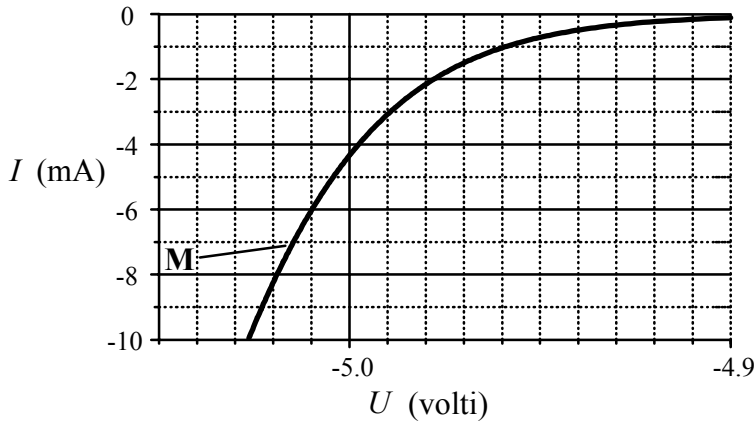


Fig. 3.17.

**P 3.2.** Sursa de tensiune din problema precedentă suferă o variație  $\Delta E = 1V$ . Considerînd o diodă cu siliciu, desenați circuitul echivalent pentru variații și calculați cu cît se modifică intensitatea curentului și tensiunea pe diodă (va trebui să calculați, mai întîi, rezistența dinamică a diodei, la curentul determinat anterior).

**P 3.3.** Caracteristica unei diode, în zona de străpunngere inversă, este cea din Fig. 3.17. Calculați, din grafic, rezistența dinamică în jurul punctului M.

**P 3.4.** În circuitul de limitare din Fig. 3.18., au fost montate **antiparalel**, două diode cu siliciu. Evoluția tensiunii generatorului se face între -10 V și 10V, cu o formă de undă identică cu cea de la problema rezolvată. Deduceți, din nou, evoluțiile potențialului punctului B și a curentului.

**P 3.5.** Proiectați un limitator care să taie vîrfurile mai mici de 3 V și vîrfurile mai mari de 7 V; utilizați o sursă de alimentare de +12 V, o rezistență de limitare a curentului de 1 kΩ, două diode cu siliciu și două divizoare rezistive.

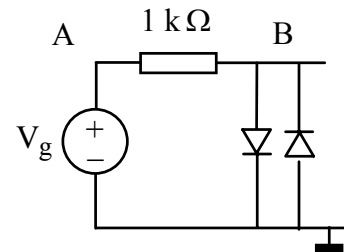


Fig. 3.18.

**P 3.6.** Dioda luminescentă (LED) din Fig. 3.19 are tensiunea de deschidere în jur de 2 V și dorim să fie operată la un curent de aproximativ 10 mA (+ sau - 10%). Calculați valoarea rezistenței. Cu cît se modifică intensitatea curentului dacă ne-am înșelat cu 0.5 V asupra tensiunii de deschidere ?

**P 3.7.** Utilizînd același circuit, trebuie să alimentăm o diodă laser. Ea are tensiunea de deschidere de aproximativ 2 V iar curentul de prag (de la care apare efectul laser) este de 50 mA. Curentul maxim la care funcționarea este sigură este de 100 mA. Alegeți o valoare adecvată pentru rezistență. Calculați apoi :

- puterea produsă de sursă
- puterea pierdută pe rezistență
- puterea absorbită de dioda laser

La curentu de 100 mA dioda laser emite o radiație luminoasă cu puterea de 5 mW. Estimați randamentul total (putere laser/putere consumată) și randamentul diodei laser (putere laser/putere diodă).

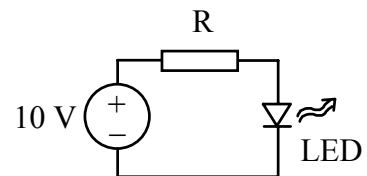
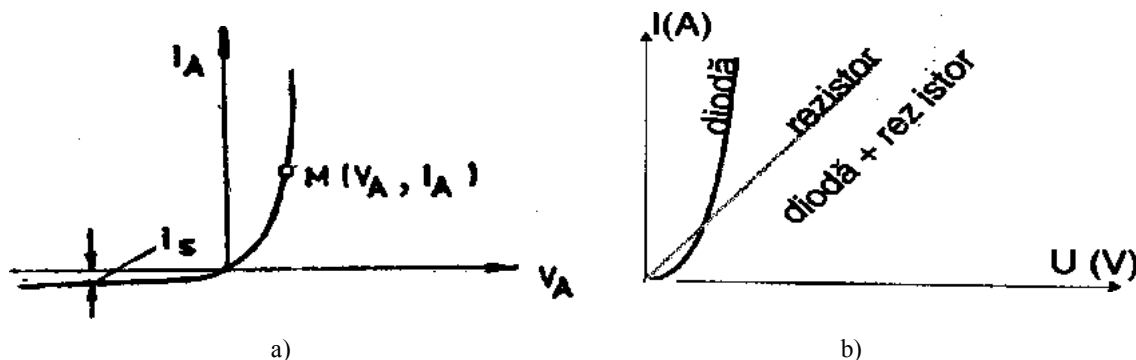


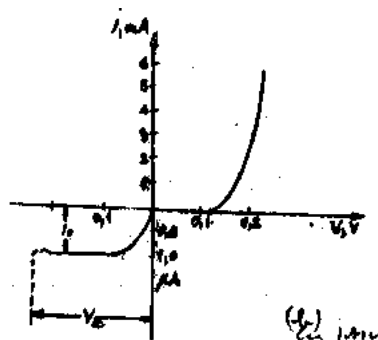
Fig. 3.19.

În cele mai multe cărți de electronică puteți întâlni graficul caracteristicii statice a diodei semiconductoare avînd forma<sup>1</sup> din desenul a) al figurii alăturate. Pe axe nu sunt trecute nici un fel de valori iar textul care îl însoțește este o înșiruire de formule fără valori numerice. Deși seamănă cu Fig. 3.3 a), graficul este incorect pentru că nu sunt specificate scările de valori la care este făcută reprezentarea.



Alți autori<sup>2</sup> sunt mai generoși, comunicîndu-ne că tensiunea se măsoară în volți și curentul în amperi (desenul b al figurii). Despre valorile numerice ale axelor respective elevii sunt liberi să creadă orice. Rezultatul inevitabil al acestui tip de literatură didactică este acela că elevii sau studenții rămîn cu informația că intensitatea curentului în conducție directă este mai mare **doar de cîteva ori** decît aceea a curentului invers.

O altă soluție în reprezentarea caracteristicii diodei este utilizarea de scale diferite pentru cadranele I și III al graficului<sup>3</sup>. Deși corectă și utilizată frecvent **între profesioniști** (care știu bine ordinele de mărime ale tensiunii și curentului), această soluție are dezavantajul că linia graficului prezintă un punct de frîngere în origine, proprietate pe care dependența reală nu o are (vezi Fig. 3.3 a) și b)). În plus, forma graficului este reținută automat de începători dar nu și faptul că scalele sunt complet diferite.



Ne putem explica evitarea cu îndrîjire a desenării corecte în coordonate liniare și completarea sa cu reprezentări de detaliu numai prin procesul greoi de realizare a graficelor utilizat înaintea apariției calculatoarelor personale. Dar noi bănuim că mulți autori nu au văzut niciodată o curbă reală pe caracterograf. Care exista cu mult înaintea PC-urilor.

<sup>1</sup>Z. Schhlett, I. Hoffman, A. Câmpeanu, "Semiconductoare și aplicații", Ed. Facla, Timișoara, 1981.

<sup>2</sup>\*\*\*, "Fizică", Manual pentru clasa a X-a, Ed. Teora Educațional, București, 2000.

<sup>3</sup>\*\*\*, "Dispozitive și circuite electronice - partea I", Universitatea din București, 1985