

Curs 2

PARAMETRII STATICI DE COMUTARE A DIODELOR SEMICONDUCTOARE

4.1.1. Comportarea unei joncțiuni pn la echilibru termic

Purtătorii mobili de sarcină dintr-un semiconductor se află într-o continuă mișcare, ce constituie o manifestare a energiei termice

aleatoare a atomilor și electronilor cuprinși într-un semiconductor. Mișcarea unui singur gol (sarcină electrică pozitivă), sau electron (sarcină electrică negativă) este o mișcare dezordonată, la echilibru termic; de exemplu purtătorul de sarcină pozitivă are ciocniri frecvente cu atomii semiconductorului, ceea ce determină modificarea sensului de mișcare a purtătorului de sarcină pozitivă. În mod statistic numărul de ciocniri ale sarcinilor electrice (goluri, electroni) dintr-un semiconductor la temperatura camerei este de aproximativ 10^{10} - 10^{12} ciocniri pe secundă, pentru o viteză de deplasare a sarcinilor electrice de $3 \cdot 10^7$ cm/sec. Datorită acestor mișcări dezordonate a purtătorilor de sarcină în condiții de echilibru nu se va produce nici un curent electric prin semiconductor.

Echilibrul se poate deteriora în două moduri:

- prin aplicarea unei energii din exterior;
- Prin neuniformizarea distribuțiilor de purtători de sarcini în semiconductor, numit proces de difuziune.

Să vedem situația la echilibru termic în cazul unei joncțiuni pn. În regiunea de tip p concentrația de goluri depășește concentrația de electroni, iar în regiunea de tip n concentrația de electroni depășește concentrația de goluri (figura 4.1.a) ca urmare a acestei concentrații, în apropierea planului joncțiunii golurile tind să difuzeze din regiunea de tip p în regiunea de tip n, în timp ce electronii tind să difuzeze în sens invers.

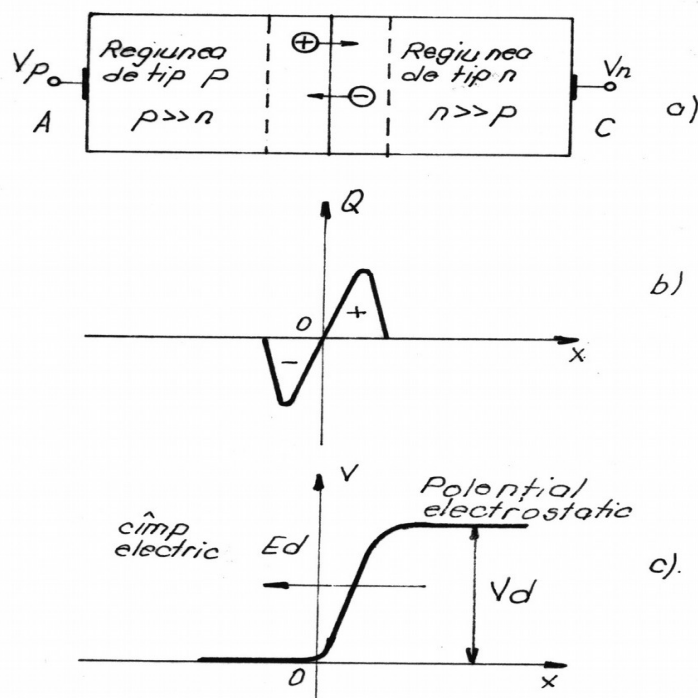


Figura 4.1

Prin acest proces de difuzie în apropierea planului joncțiunii se produce următorul fenomen: prin deplasarea golurilor din regiunea de tip p și infuzia cu electroni, în imediata vecinătate a joncțiunii din regiunea de tip p are loc o încărcare cu sarcină negativă, respectiv în imediata vecinătate a joncțiunii de tip n se încarcă cu sarcină pozitivă. Existența unor sarcini electrice din planul joncțiunii, diferită de sarcina electrică a celor două tipuri de semiconductoare, care este nulă, determină un câmp electric de difuzie (E_d).

Câmpul electric de difuzie (E_d) este asociat la rândul său unei diferențe de potențial, numit potențial de difuzie sau barieră de potențial lângă planul joncțiunii (figura 4.1.c). Câmpul electric asociat barierei de potențial este orientat dinspre regiunea de tip n spre regiunea de tip p; astfel el se opune tendinței de difuzie atât a electronilor cât și a golurilor.

Așa cum s-a arătat acest câmp electric provine din dezechilibrul de sarcină cauzat de difuzia purtătorilor din planul joncțiunii. Acest fenomen încetează în momentul când se ajunge la un echilibru, adică câmpul electric este suficient de mare să se opună deplasărilor sarcinilor electrice. Așadar difuzia de purtători prin joncțiune, dinspre partea în care sunt majoritari, este un proces ce se autolimează.

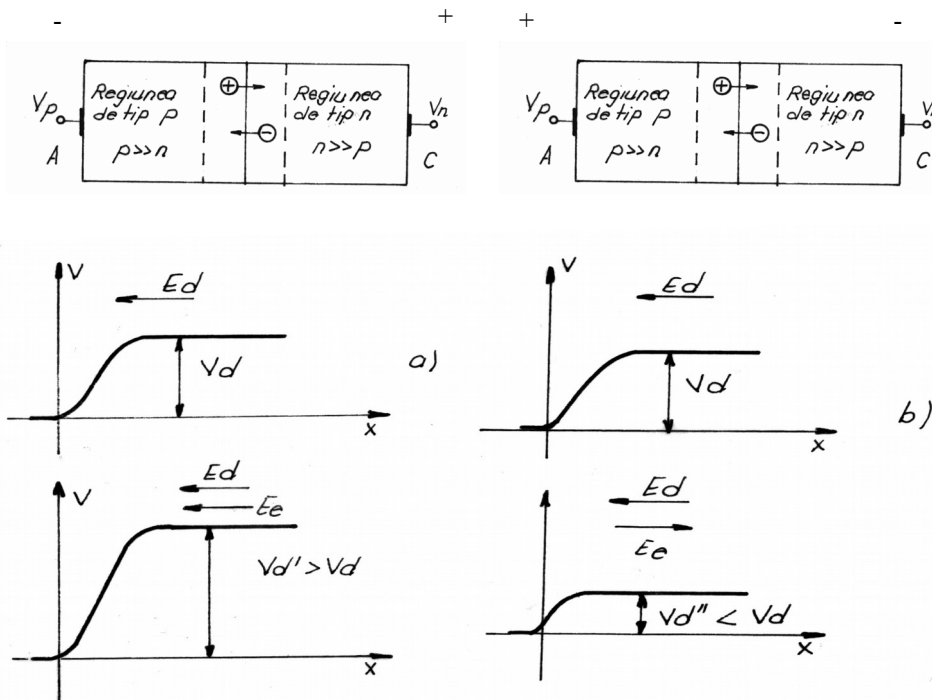


Figura 4.2

Să examinăm acum cazul când se aplică o tensiune între terminalele joncțiunii.

Considerăm întâi o polaritate a tensiunii aplicate ce face regiunea de tip n mai pozitivă decât regiunea de tip p ($V_n > V_p$), adică câmpul electric exterior E_e are același sens cu câmpul electric de difuzie, ceea ce va determina mărirea barierei de potențial (figura 4.2.a). O tensiune ce conduce la creșterea barierei de potențial este numită tensiune de polaritate inversă. Joncțiunea conduce slab în sens invers, în primul rând pentru că golurile din regiunea de tip p și electronii din regiunea de tip n, unde sunt purtători majoritari, nu sunt capabili să depășească bariera de potențial de valoare mai mare și, în al doilea rând, pentru că sunt foarte puțini purtători minoritari disponibili în cele două regiuni pentru a se mișca în sens invers, “în josul” barierei de potențial. De aceea curentul rezultat va fi

foarte mic prin joncțiunea pn și se datorează purtătorilor minoritari. Curentul rezultat este un curent de valoare mică. Numărul de purtători de sarcină minoritare este limitat. Din acest motiv curentul poartă denumirea de curent de saturație(limitat) invers(dinspre regiunea de tip n spre regiunea de tip p) și se notează cu I_0 .

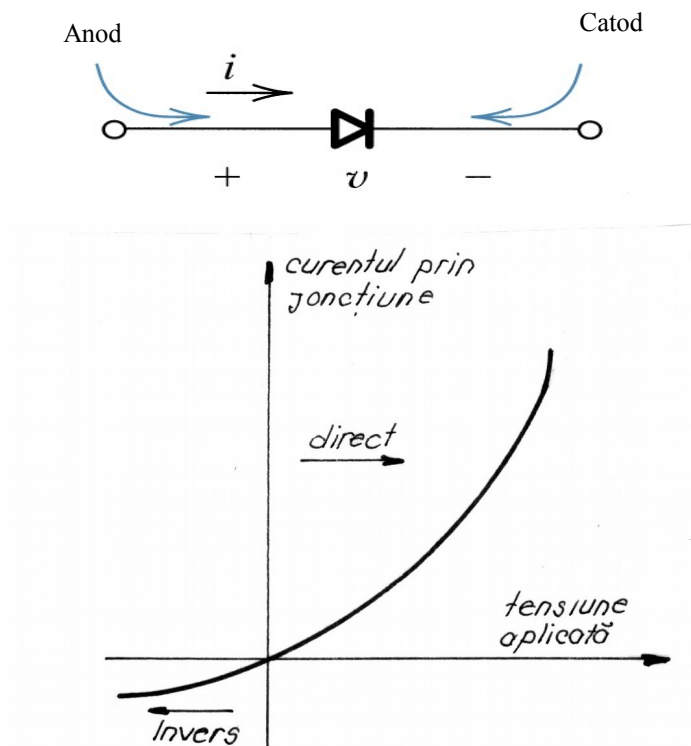


Figura 4. 3

O tensiune externă de polaritate opusă celei descrise mai sus se numește tensiune directă. ($V_p > V_n$). Câmpul electric asociat tensiunii externe va determina un câmp electric total mai mic decât câmpul electric de difuzie de la echilibru termic, ceea ce va duce la micșorarea înălțimii barierei de potențial a joncțiunii. Bariera de potențial V_d și câmpul electric rezultat nu mai sunt suficiente ca mărime pentru a se opune procesului de difuzie, ceea ce permite curgerea purtătorilor de sarcină dinspre regiunea unde sunt în majoritate spre regiunea unde sunt în minoritate. Din această cauză prin joncțiunea pn va circula un curent relativ mare format de purtători majoritari (figura 4.2b). acest curent poartă denumirea de curent direct prin diodă și se notează cu I_D . Curentul direct este dependent de câmpul electric exterior, deci de diferența de potențial între cele două borne.

Asimetria comportării electrice, distribuțiile interne de purtători și circulațiile asociate lor stau la baza celor mai multe dintre proprietățile diodelor cu joncțiune, proprietăți care le fac utile în circuitele electronice.

Curentul electric prin joncțiunea pn se obține aplicând o tensiune la bornele A(anod)borna pozitivă și C (catod) borna negativă ale diodei semiconductoare.

Fie notația: $V_D = V_p - V_n$

Dacă:

- a) $V_p > V_n$ – curentul electric este mare (I_D) și este datorat purtătorilor majoritari. În acest caz joncțiunea este polarizată direct
- b) $V_p < V_n$ – curentul electric este neglijabil (I_0) și este datorat purtătorilor minoritari. În acest caz joncțiunea este polarizată invers.

Pe baza celor discutate mai sus reiese clar că pentru o joncțiune pn caracteristica curent-tensiune trebuie să aibă o formă generală arătată în figura 4.3. Creșterea rapidă a curentului cu tensiunea în regiunea directă rezultă din existența numărului mare de purtători majoritari capabili să treacă peste bariera de potențial micșorată. Curentul mic invers, aproape constant este dat de numărul limitat de purtători minoritari disponibili pentru a curge în josul barierei de potențial mărite, care blochează curgerea purtătorilor majoritari.

4.1.2. Parametrii statici

Pentru o joncțiune pn ideală relația curent-tensiune este exprimată de relația:

$$I = I_0 (e^{U/\eta U_T} - 1) \quad (4.1)$$

unde I_0 poartă numele de curent de saturație invers al diodei, U este căderea de tensiune la bornele diodei, U_T este tensiunea termică, iar η este un coeficient de recombinare a golurilor.

Relația (4.1) este adesea întâlnită sub numele de ecuația idealizată a diodei cu joncțiune pn. Ea este o relație fundamentală pentru comportarea tuturor dispozitivelor semiconductoare cu joncțiune ce poate fi aplicată și altor structuri de diode dacă forma coeficientului I_0 este modificat corespunzător.

În relația (4.1) dioda se polarizează direct dacă $U > 0$, adică zona p are un potențial mai ridicat decât zona n; valorile pozitive ale curentului indică sensul de circulație de la p la n. Dacă $U < 0$; adică zona n are un potențial mai ridicat decât zona p, $I \approx -I_0$, când U devine mai mic decât ηU_T .

Caracteristica curent-tensiune reprezentată în figura 4.3, arată că o joncțiune pn reprezintă un dispozitiv electronic neliniar. Comportarea joncțiunii în regimul de curent continuu poate fi caracterizată prin raportul dintre căderea de tensiunea pe diodă și curentul care o străbate. Acest

raport se numește rezistență în curent continuu: $R_{c.c.} = \frac{U}{I}$. Rezistența $R_{c.c.}$ a diodei depinde de punctul de funcționare. Această comportare a joncțiunii este datorită neliniarității caracteristicii curent-tensiune.

Existența unei surse de tensiune alternativă la bornele diodei determină ca alături de rezistența de curent continuu să mai apară și o rezistență în curent alternativ.

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (4.4)$$

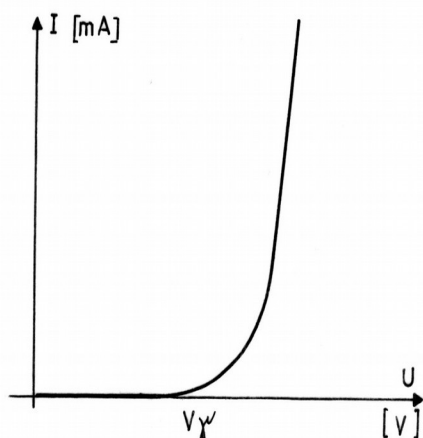
care se mai numește rezistență diferențială sau dinamică.

Referitor la caracteristica curent-tensiune ce reprezintă forma grafică a ecuației (4.1) se poate constata că dacă $e^{U/\eta U_T} \gg 1$ atunci curentul prin diodă crește exponențial cu căderea de tensiune de la bornele diodei.

$$U = I_0 e^{U/\eta U_T} \quad (4.5)$$

Acest rezultat se exprimă ca o scădere a barierei de potențial ceea ce permite o difuzi mai mare prin joncțiune. Există diode (dioda de comutație) la care creșterea curentului direct cu scăderea de tensiune se prezintă ca în figura 4.4.

Se poate constata că există o tensiune, numită tensiune de prag, V_γ pentru care curentul crește semnificativ cu creșterea de tensiune pe diodă, dacă $U > V_\gamma$ sau crește nesemnificativ dacă $U < V_\gamma$. Aceste diode se comportă ca un comutator ideal (figura 4.5). Din punct de vedere se poate considera că pentru o tensiune de comandă (V_γ) dioda se închide, este în conducție, ceea ce face ca rezistența ei să fie zero iar curentul să tindă spre infinit. Pentru o tensiune mai mică decât tensiunea de comandă (prag, V_γ) comutatorul este deschis ($R = \infty$ și $I = 0$).



din

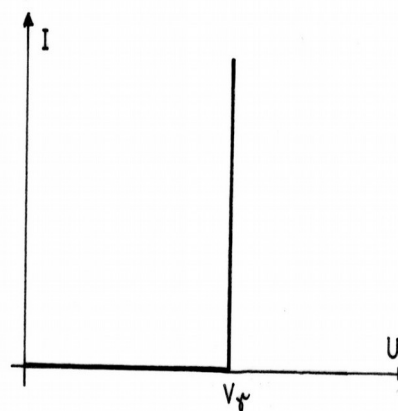


Figura 4.4

Figura 4.5

Caracteristica figura 4.5 poartă denumirea de caracteristică liniarizată a diodelor de comutație, utilizate cel mai frecvent în

circuitele logice integrate. Caracteristica liniarizată este o caracteristică aproximativă, în realitate toate diodele semiconductoare prezintă o caracteristică neliniară. Și anume creșterea curentului direct prin diodă cu scăderea de tensiune la borna diodei este exponențială, adică la modificări mici ale căderii de tensiune se obțin creșteri mari ale curentului prin diodă.

Ca rezumat, parametri statici de comutare al diodelor semiconductoare se definesc pe baza caracteristicii volt- amper ce caracterizează fiecare diodă în parte. Caracteristica volt-amper se obține din foia de catalog corespunzătoare diodei. Valori tipice pentru acești parametri vor fi dați mai jos:

Tabelul 4.1

Tipul de diodă (materialul semiconductor)	Curentul rezidual de saturație I_o (nA)	Tensiunea de prag: V_γ (V)	Rezistența de trecere la conducție (rezistența directă: R_D) (Ω)	Rezistența de trecere la blocare (rezistența inversă: R_i) ($M\Omega$)
siliciu	1-2	0,65	15-30	1-100
germaniu	1000-2000	0,3	20-40	0,1-10
Shottky	0,5-1	0.4	10-20	50-100

În principiu o diodă poate fi echivalentă în conducție sub forma unei rezistențe directe R_D în serie cu tensiunea de prag, iar în regim blocat sub forma rezistenței inverse (figura 4.6)

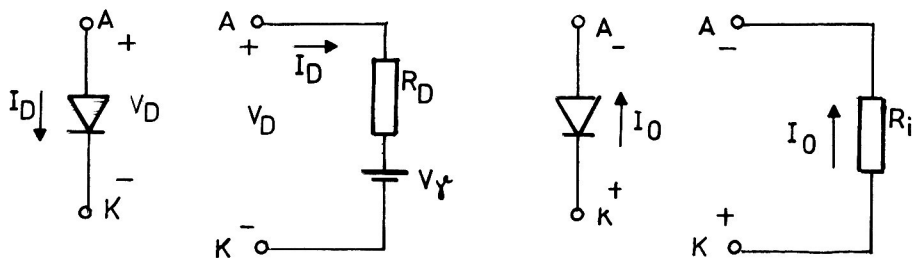


Figura 4.6

O joncțiune de tip pn se comportă nu numai ca o rezistență, dar și ca o capacitate

variabilă a cărei valoare depinde de tensiunea de polarizare. După cum s-a arătat în regiunea de trecere a unei joncțiuni pn apar două sarcini electrice egale și de semn contrar, de o parte și de alta a suprafeței de separație a celor două regiuni. Dar două sarcini electrice egale și de semne contrare se acumulează și pe armăturile metalice ale unui condensator plan. Se poate deci echivala o joncțiune pn și cu un condensator plan. Capacitatea determinată de regiunea de trecere se numește capacitatea barieră.

În multe cazuri caracteristica volt-ampere a unei diode este aproximată cu două drepte (figura 4.9), astfel:

a) pentru $U < U_r$, o dreaptă ce coincide cu abscisa

$$\frac{1}{R_d}$$

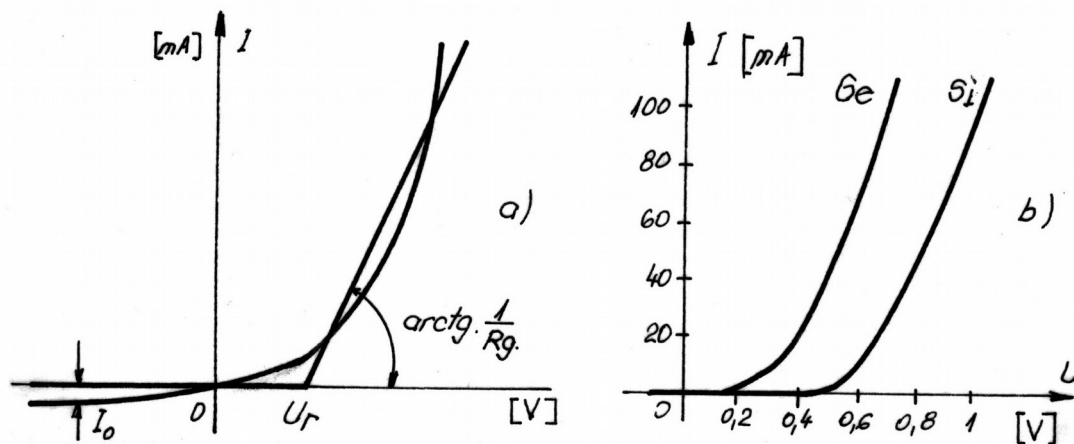
b) pentru $U > U_r$, o dreaptă cu panta

Tensiunea U_r se numește “Tensiune de prag”, iar R_d se numește : “rezistență diferențială”.

Mărimile I_0 , U_r și R_d reprezintă parametrii statici de comutare a diodelor utilizată în circuite numerice. Cum se vede din figura 4.9.a atât timp cât tensiunea aplicată la bornele diodei este mai mică decât tensiunea de prag U_r , curentul prin diodă este foarte mic, neglijabil (mai mic decât 1 % din valoarea maximă a curentului prin diodă). Când tensiunea devine mai mare decât U_r curentul prin diodă crește foarte mult cu tensiunea.

În figura 4.9.b se prezintă, comparativ, caracteristica volt-ampere pentru o diodă cu germaniu și una cu siliciu.

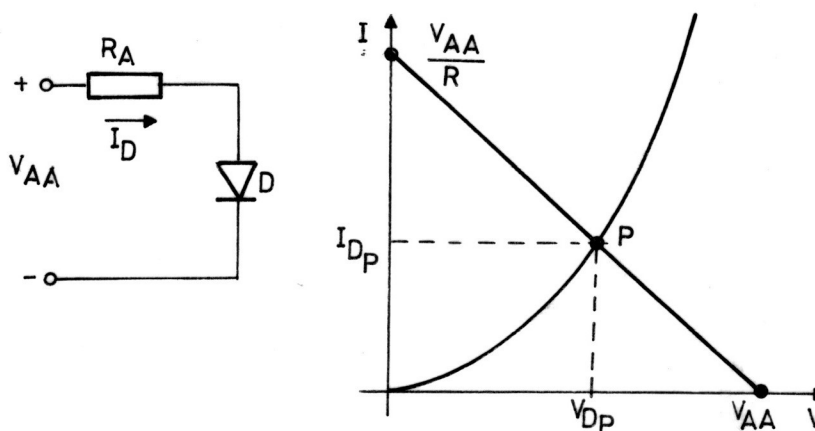
Figura 4.9



Pentru temperatura normală (25°C) parametri statici ai diodelor au valori tipice prezentate în tabelul 4.1.

DETERMINAREA PUNCTULUI DE FUNCȚIONARE LA O DIODĂ SEMICONDUCTOARE

Punctul de funcționare a unei diode se obține prin intersecția caracteristicii curent- tensiune cu dreapta de sarcină. Dreapta de sarcină la rândul ei este dependentă de tensiunea aplicată la bornele circuitului electronic ce conține dioda, cât și de valoarea rezistenței echivalente legată în serie cu dioda.



Figura

4.10

Astfel în figura 4.10 se reprezintă modul de determinare a punctului de funcționare a unei diode pentru un circuit simplu.

Dacă se scrie ecuația pe circuitul din figura 4.10.a se poate trasa dreapta de sarcină:

$$V_{AA} = I_D \cdot R_A + V_D \quad (4.15)$$

Unde pe baza relației de mai sus se trasează dreapta de sarcină, care intersectează ce două axe în punctul V_{AA} pentru axa orizontală, respectiv în punctul V_{AA}/R_A pe axa verticală. Punctul de funcționare pentru dioda ce are caracteristica curent – tensiune prezentată în figura 4.10. b se obține în punctul P, unde curentul prin diodă este I_{Dp} iar căderea de tensiune pe diodă este V_{Dp} .

Pentru a modifica punctul de funcționare pentru o diodă se poate re - dimensiona rezistența R_A . În figura 4.11 este ilustrată dependența drepte de sarcină cu rezistența R_A și modul cum se modifică punctul de funcționare. În acest caz modificarea punctului de funcționare se poate face doar static.

Punctul de funcționare se mai poate modifica prin modularea tensiunii de la intrare V_{AA} . În figura 4.12 este ilustrată dependența dreptei de sarcină cu tensiunea de alimentare, V_{AA} , iar în figura 4.13 se arată modul cum variația semnalului de la intrare, în timp, $I_d(t)$ determină modificarea, în timp, a mărimii de la ieșirea diodei $V_d(t)$, unde:

$$I_d(t) = \frac{V_{AA}(t)}{R_A}$$

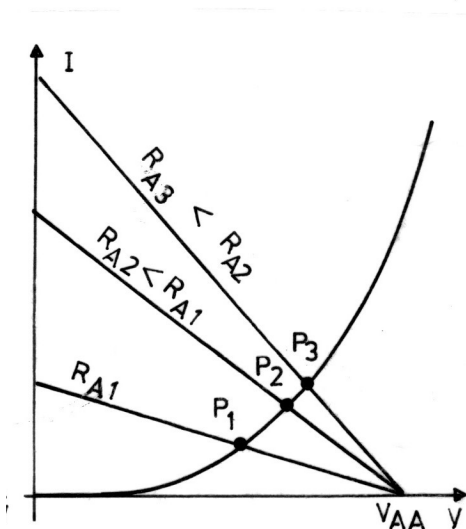


Figura 4.11

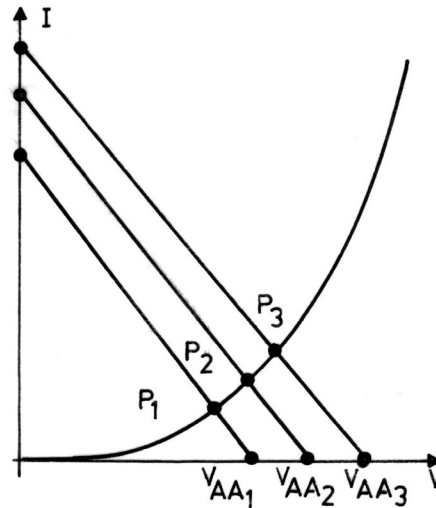


Figura 4.12