

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH
Prírodovedecká fakulta



Polovodičové prvky

Peter Kollár

Košice 2023

Polovodičové prvky

Vysokoškolský učebný text

Autor: prof. RNDr. Peter Kollár, DrSc.
Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Recenzenti: doc. RNDr. Ing. Jozef Onufer, PhD.
Fakulta elektroniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

RNDr. Vladimír Tkáč, PhD.
Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Tento text je publikovaný pod licenciou **CC BY NC ND** Creative Commons Attribution-NonCommercial-No-derivates 4.0 („Uveďte pôvod – Nepoužívajte komerčne - Nespracováajte“)



Za odbornú a jazykovú stránku tejto publikácie zodpovedá autor. Rukopis neprešiel redakčnou ani jazykovou úpravou.

Dostupné od: 15.02.2023

Umiestnenie: www.unibook.upjs.sk

ISBN 978-80-574-0187-2 (e-publikácia)

Obsah	2
1. Úvod	3
2. Základné vlastnosti polovodičov	5
2.1. Štruktúra tuhých látok	6
2.2. Vedenie elektrického prúdu v polovodičoch	10
2.3. Fermiho Diracova rozdeľovacia funkcia	11
2.4. Vlastný polovodič	13
2.5. Prímesový polovodič	19
3. Polovodičové súčiastky bez aktívneho PN priechodu	25
3.1. Termistor	26
3.2. Súčiastka na báze Hallovho javu	30
3.3. Magnetorezistor	32
3.4. Varistor	34
3.5. Gunnova dióda	39
3.6. Kryosar	42
3.7. Tenzoelektrické súčiastky	43
4. Polovodičové súčiastky s jedným aktívnym PN priechodom	44
4.1. PN priechod – všeobecne	45
4.2. Usmerňovač, detektor	55
4.3. Varikap	58
4.4. Stabilizačná dióda	60
4.5. Tunelová dióda	62
4.6. Dvojbázová dióda – tranzistor s jedným PN priechodom	64
5. Kontakt kov – polovodič	66
5.1. Kontakt kov – polovodič všeobecne	67
5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt	70
6. Polovodičové súčiastky s dvoma aktívnymi PN priechodmi	77
6.1. Štruktúra bipolárneho tranzistora	79
6.2. Pásmová štruktúra bipolárneho tranzistora	80
6.3. Prúdy v bipolárnom tranzistore	81

6.4.	Zapojenie bipolárneho tranzistora do obvodu	82
6.5.	Obvodové parametre tranzistora	84
6.6.	Obvodové parametre tranzistora SE	85
6.7.	Pohyb voľných nábojov v tranzistore	86
6.8.	Charakteristiky tranzistora	87
6.9.	Použitie tranzistora – spínač	88
6.10.	Použitie tranzistora – zosilňovač	89
6.11.	Ukážky tranzistorov	90
6.12.	Diak	91
7.	Polovodičové súčiastky s viacerými PN priechodmi	92
7.1.	Tyristor	93
7.2.	Tetródový tyristor – dynistor	101
7.3.	Triak	103
7.4.	Kvadrak	109
8.	Unipolárne tranzistory	111
8.1.	Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom	113
8.2.	Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom	121
9.	Technológia výroby polovodičových prvkov	132
10.	Integrované obvody	149
10.1.	Základné charakteristiky	150
10.2.	Odpor	153
10.3.	Kondenzátor	154
10.4.	Tranzistor	155
10.5.	Dióda	158
10.6.	Stupeň integrácie	160
11.	Optoelektronika	161
11.1.	Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku	162
11.2.	Prijímače	169
11.3.	Zdroje	176
11.4.	Nábojovo viazané štruktúry	180
12.	Literatúra	183

1. Úvod

Učebný text Polovodičové prvky vznikol postupne v predchádzajúcich rokoch ako pomôcka pre študentov 2. ročníka magisterského štúdia fyziky kondenzovaných látok. Má slúžiť študentom na podporu vnímania prednášok, vzhľadom na to, že dôležité texty, matematické vzťahy a obrázky dostanú už vopred, v podobe akej budú prezentované na prednáške. Jednotlivé stránky si tak študenti môžu dopĺňať počas prednášky vlastnými poznámkami buď do elektronickej alebo tlačenej formy. Takto vznikne pre študenta pomôcka, ktorá ako verím, napomôže pri záverečnom opakovaní poznatkov získaných počas semestra v rámci prípravy pred skúškou. Tento učebný text nemá slúžiť ako samostatná literatúra, ale má napomôcť orientácii v literatúre, ktorej je dostatok v anglickom jazyku, ale vo väčšine prípadov je písaná pre vedeckých pracovníkov, výskumníkov a študentov, **pre ktorých je táto** tematika ťažisková a netvorí iba jednu z mnohých súčastí vzdelávania a tak nie je pre ňu v študijnom programe rezervovaný väčší rozsah.

Autor

3

Výroba, výskum a vývoj polovodičových prvkov bol a stále je kľúčový moment pre rozvoj elektroniky, bez ktorej si v súčasnosti nevieme predstaviť moderný svet. Elektronika dala výrazný impulz výrobe výrobkov vyžadujúcich náročné technologické operácie pri individuálnej výrobe komplikovaných výrobkov a taktiež aj vo veľkosériovej produkcii. Produktom takýchto postupov využívajúcich elektroniku a tým aj polovodičové prvky sú technologické zariadenia na produkciu ďalších zariadení - výrobné linky), zariadenia na prenos a uskladnenie informácií (počítače, senzory, mobilné telefóny, tablety, telekomunikačné zariadenie), dopravné zariadenia (lietadla, vlaky, automobily a pod.) a zariadenia, ktoré robia život človeka príjemným a pohodlným (spotrebná elektronika, domáca čierna a biela technika). Samotné polovodičové prvky až na výnimky vytlačili aktívne prvky vákuovej techniky ako sú elektrónky rôzneho druhu. Významnými míľnikmi v rozvoji polovodičových prvkov bol objav PN prechodu, tranzistora, integrovaného obvodu a rozvoj optoelektroniky.

Z hľadiska štúdia fyziky kondenzovaných látok predmet polovodičové prvky prirodzene nadväzuje a rozvíja poznatky z teórie elektromagnetického poľa, teórie tuhých látok a transportných vlastností tuhých látok. Je dôležitou disciplínou pre pochopenie obvodovej elektroniky. Poznatky predmetu polovodičové prvky môžu byť tiež nápomocné v experimentálnom výskume kondenzovaných látok.

Kľúčové slová: polovodičový prvok, vlastný a prímiesový polovodič, dióda tranzistor, tyristor, integrovaný obvod, optoelektronika.

Recenzenti:

doc. RNDr. Ing. Jozef Onufer, PhD., Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra fyziky

RNDr. Vladimír Tkáč, PhD., Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Prírodovedecká fakulta, Ústav fyzikálnych vied, Katedra fyziky kondenzovaných látok

4

2. Základné vlastnosti polovodičov

2.1. Štruktúra tuhých látok	6
2.2. Vedenie elektrického prúdu v polovodičoch	10
2.3. Fermiho Diracova rozdeľovacia funkcia	11
2.4. Vlastný polovodič	13
2.5. Prímesový polovodič	19

5

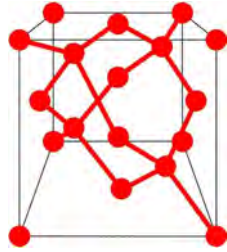
2.1. Štruktúra tuhých látok

polovodiče - prvky

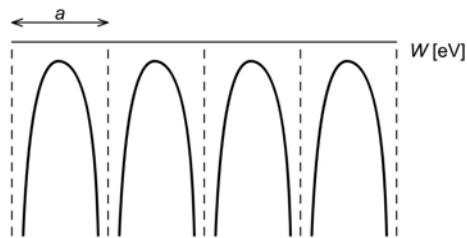
5 10,8 B	6 12,0 C			
	14 28,1 Si	15 30,9 P	16 32,0 S	
	32 72,6 Ge	33 74,9 As	34 78,9 Se	
	50 118,7 Sn	51 121,7 Sb	52 127,6 Te	53 126,9 I

6

2.1. Štruktúra tuhých látok



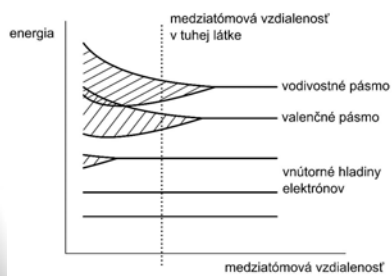
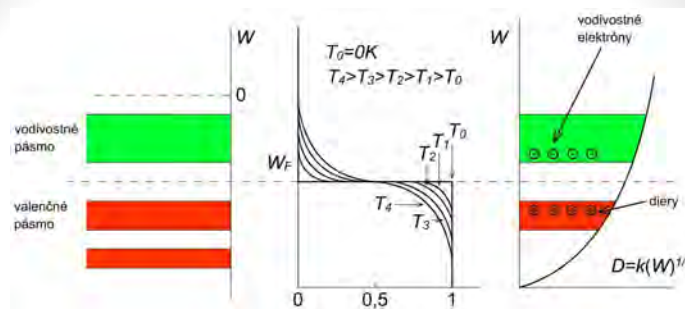
Ge, Si mriežka
typu diamant



periodický
potenciál

7

2.1. Štruktúra tuhých látok

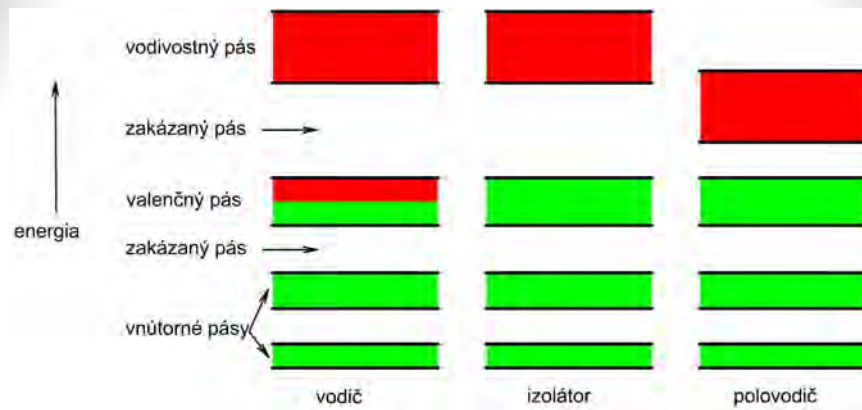


Fermi Dirac

$$f(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)}$$

8

2.1. Štruktúra tuhých látok



9

2.2. Vedenie elektrického prúdu v polovodičoch

polovodič	ΔW_g [eV]	polovodič	ΔW_g [eV]
Ge	0,76	GaAs	1,4
Si	1,11	GaP	2,22
Cu_2O	1,8	CdS	2,42
Sn	0,1	InSb	0,18

prímesový

typ N, donory P, As, Sb

typ P, akceptory B, Al, In, Ga

10

2.3. Fermiho Diracova rozdeľovacia funkcia

$$f(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)}$$

$f(W)$ – Fermiho Diracova rozdeľovacia funkcia

ak $W = W_F \rightarrow f(W) = \frac{1}{2}$

W_F – Fermiho energia

k – Boltzmanova konštanta

T – teplota

Ak

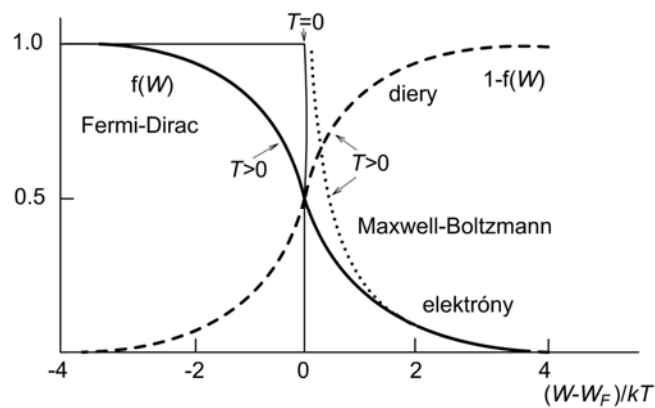
$(W - W_F) \gg kT$

Fermiho Diracova rozdeľovacia funkcia →
→ Maxwellovu Boltzmanovu funkciu

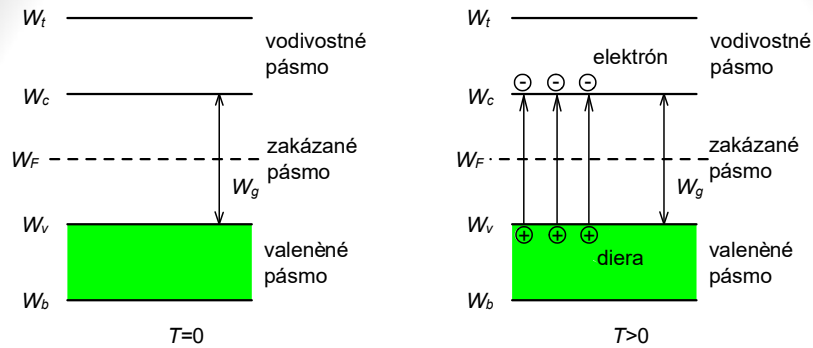
$$f(W) = \exp\left(-\frac{W - W_F}{kT}\right)$$

2.3. Fermiho Diracova rozdeľovacia funkcia

$$f(W)_p = 1 - f(W)_n = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W_F - W}{kT}\right)}$$



2.3. Vlastný polovodič



vlastný polovodič

13

2.3. Vlastný polovodič

$p_i = n_i$ podmienka elektroneutrality

n_i - počet elektrónov vo vodivostnom pásme

p_i - počet dier vo valenčnom pásme

$\langle W, (W + dW) \rangle$

$N_c(W)$ - hustota elektrónových stavov vo vodivostnom pásme

$N_v(W)$ - hustota elektrónových stavov vo valenčnom pásme

$$n(W)dW = 2N_c f(W)_n dW$$

$$n_i = 2 \int_{W_c}^{W_t} N_c f(W)_n dW \quad \text{- elektróny}$$

$$p_i = 2 \int_{W_b}^{W_v} N_v f(W)_p dW \quad \text{- diery}$$

2.3. Vlastný polovodič

$$n_i = 2 \int_{W_c}^{W_t} N_c f(W)_n dW \quad \text{- elektróny}$$

$$p_i = 2 \int_{W_b}^{W_v} N_v f(W)_p dW \quad \text{- diery}$$

pre elektróny dosadíme za $N_c, f(W)_n$

$$n_i = 4\pi \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} \int_0^\infty \frac{W^{1/2} dW}{\exp[(W - W_F)/kT] + 1}$$

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp(W_F/kT)$$

h - Planckova konštanta
 m_n^* - efektívna hmotnosť elektrónu
 m_p^* - efektívna hmotnosť diery

2.3. Vlastný polovodič

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp(W_F/kT)$$

alebo vo všeobecnosti

$$n_i = N_c \exp \left[-\frac{(W_c - W_F)}{kT} \right] \quad N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

pre diery

$$p_i = N_v \exp \left[-\frac{(W_F - W_v)}{kT} \right] \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

2.3. Vlastný polovodič

$p_i = n_i$ podmienka elektroneutrality

$$p_i = N_v \exp\left[-\frac{(W_F - W_v)}{kT}\right] \quad n_i = N_c \exp\left[-\frac{(W_c - W_F)}{kT}\right]$$

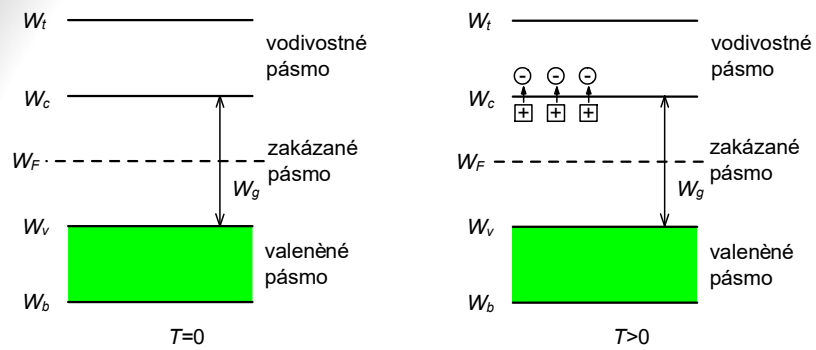
$$W_F = \frac{W_c + W_v}{2} + \frac{1}{2} kT \ln(N_v/N_c)$$

$$W_F = \frac{W_g}{2} + \frac{3}{4} kT \ln(m_p^*/m_n^*) \quad m_p^* > m_n^*$$

2.3. Vlastný polovodič

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} \exp(-W_g/2kT)$$

2.4. Prímesový polovodič

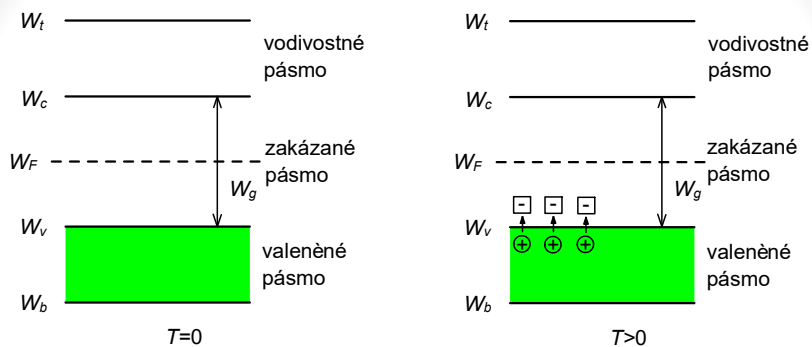


polovodič typu N

donory P, As, Sb

19

2.4. Prímesový polovodič



polovodič typu P

akceptory B, Al, In, Ga

20

2.4. Prímesový polovodič

$$pn = n_i^2 = \text{konšt.} \quad \text{podmienka elektroneutrality}$$

úplná ionizácia prímiesí

$$\text{pre Ge stačí } 300 \text{ K} \quad kT = 0,026 \text{ eV} > W_D \approx 0,01 \text{ eV}$$

predpokladáme

$$\text{veľkú koncentráciu donorov} \quad N_D \gg n_i$$

$$\text{v nedegenerovanom polovodiči} \quad N_D < 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$n = N_c \exp \left[-\frac{(W_c - W_F)}{kT} \right] = N_D$$

ide o prípad vyčerpania donorov

$$W_F = W_c - kT \ln \left(\frac{N_c}{N_D} \right)$$

21

2.4. Prímesový polovodič

$$N_D \ll N_c \quad \text{malá koncentrácia donorov}$$

$$N_D \approx n_i \quad \text{nedá sa zanedbať koncentrácia minoritných dier}$$

typ polovodičov sa označuje v

(škála degenerácie P⁺-P- π -i-v-n-N-N⁺)

$$n - p = N_D$$

$$n = \frac{1}{2} N_D \left[1 + \left(1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad p = \frac{2n_i^2}{N_D} \left[1 + \left(1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1}$$

22

2.4. Prímesový polovodič

$$n = \frac{1}{2}N_D \left[1 + \left(1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad p = \frac{2n_i^2}{N_D} \left[1 + \left(1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1}$$

výrazy sa zjednodušia

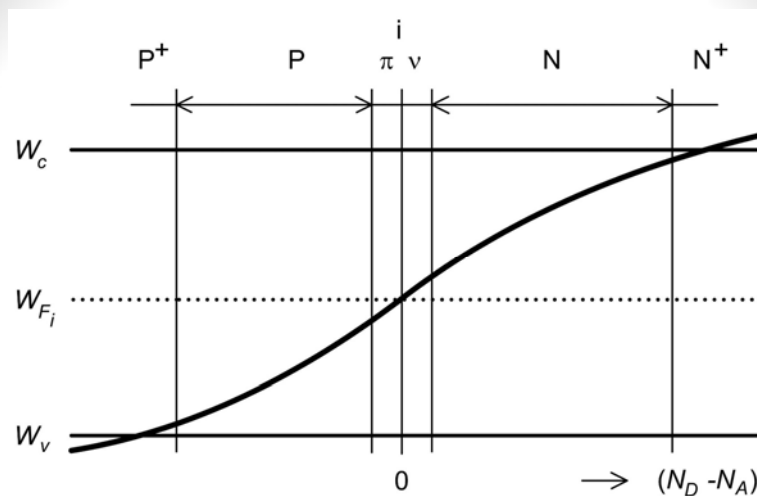
$$N_D \gg n_i, N_D < N_c$$

$$n = n_i + \frac{N_D}{2}, p = n_i - \frac{N_D}{2}$$

analogicky pre polovodič typu P

23

2.4. Prímesový polovodič



24

3. Polovodičové súčiastky bez aktívneho PN priechodu

3.1. Termistor	26
3.2. Súčiastka na báze Hallovho javu	30
3.3. Magnetorezistor	32
3.4. Varistor	34
3.5. Gunnova dióda	39
3.6. Kryosar	42
3.7. Tenzoelektrické súčiastky	43

25

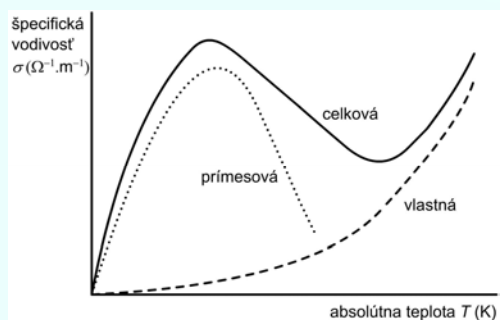
3.1. Termistor

TERMal resISTOR

polovodiče

$$\rho = \langle 10^{-4} - 10^8 \rangle \Omega \cdot \text{cm}$$

materiál	rezistivita
Ge nečisté	10^{-4}
Ge pre tranzistory	10^{-2}
Ge vlastná	10^0
Si vlastná	10^3
sklo	10^7



26

3.1. Termistor

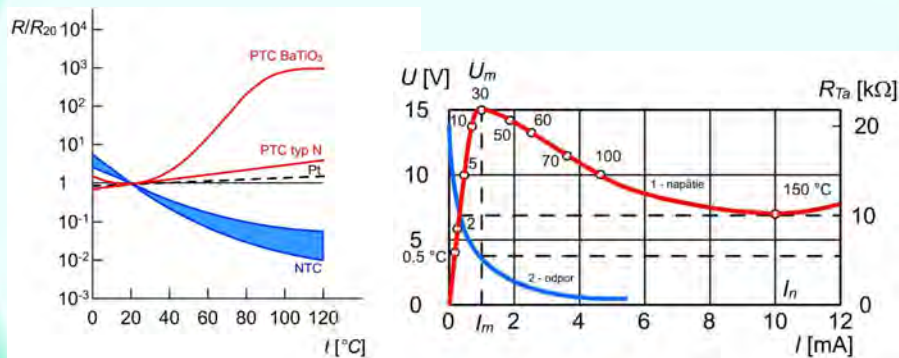
záporný teplotný súčiniteľ odporu - NTC
 kladný teplotný súčiniteľ odporu - PTC

$$R_T = R_{T_0} \exp\left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

$$\beta = \frac{TT_0}{T_0 - T} \ln\left(\frac{R_T}{R_{T_0}}\right) \quad \beta \in \langle 2000, 4000 \rangle$$

27

3.1. Termistor



1 – priebeh úbytku napätia
 2 – priebeh odporu

28

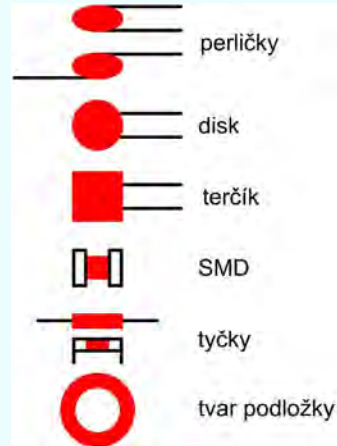
3.1. Termistor

Technológia výroby

Vyrábaný z oxidov kovov Mn, Co, Cu, Ti, Fe a Ni. Používajú sa zmesi dvoch alebo viacerých práškov. Dá sa vyrobiť široký rozsah hodnôt a teplotných závislostí.

Použitie

meranie teploty,
meranie toku kvapalín a plynov



29

3.2. Súčiastka na báze Hallovoho javu

$$U_H = \pm \frac{R_H I B}{d}$$

$$-R_H = \mu_H \rho = \frac{r_H}{en}$$

U_H - Hallovo napätie

R_H - Hallova konštanta

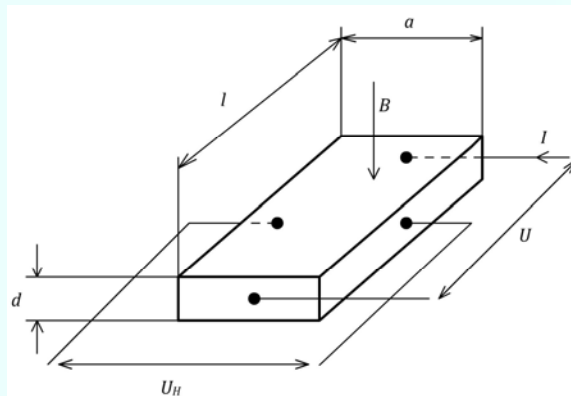
I - Prúd Hallovo sondou

B - Magnetická indukcia

r_H - Hallovo rozptylový činiteľ

μ_H - Hallova pohyblivosť

ρ - špecifický odpor



30

3.2. Súčiastka na báze Hallovho javu

Technológia výroby

A^{III}B^V

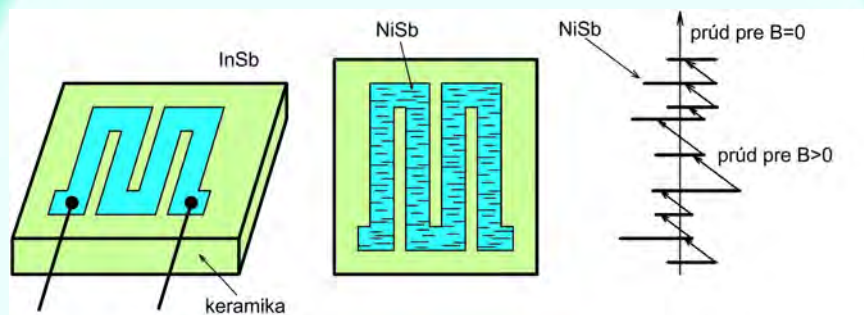
In₅Sb₃, InAs, GaAs

Použitie

meranie magnetických
polí, elektrického prúdu,
elektrického výkonu

31

3.3. Magnetorezistor



$$\frac{\Delta R}{R} = K\mu^2 B^2$$

32

3.3. Magnetorezistor

Technológia výroby

InSb, NiSb ihličky

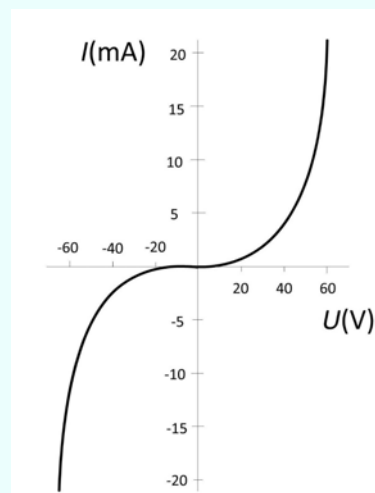
Použitie

meranie magnetických polí (aj pole Zeme),
kompasy, meranie elektrického prúdu,
detekcia pohybujúcich sa vozidiel

33

3.4. Varistor

VARIable resISTOR



34

3.4. Varistor

Zmena vodivosti s priloženým napätím

1. Odpor hraníc zrn
2. Lokálny ohrev v mieste kontaktu zrn
3. Parciálne PN prechody
4. Čiastočný elektrický prieraz oxidických vrstiev

35

3.4. Varistor

$$\alpha = \frac{R_v}{r_v} = \frac{U}{I} \frac{dI}{dU}$$

R_v - statický odpor varistoru

r_v - dynamický odpor varistoru

$\alpha = 0$ - ak je lineárna charakteristika

$$I = BU^\alpha$$

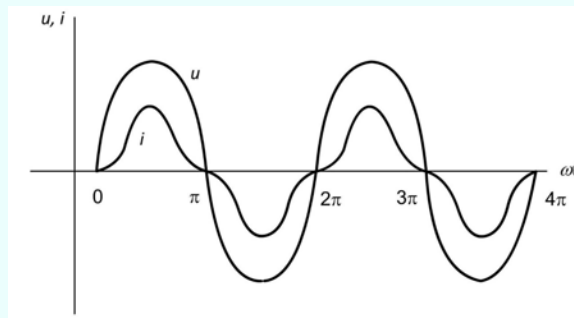
$$\text{ak } \alpha = \frac{1}{\beta} \text{ a } A = B^{-\frac{1}{\alpha}}$$

$$U = AI^\beta$$

β - súčiniteľ nelinearity varistoru

36

3.4. Varistor



Priebeh striedavého napätia a prúdu na varistore

37

3.4. Varistor

Technológia výroby

sintrovanie práškov

$\text{ZnO-TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$,

$\text{ZnO-MnO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$

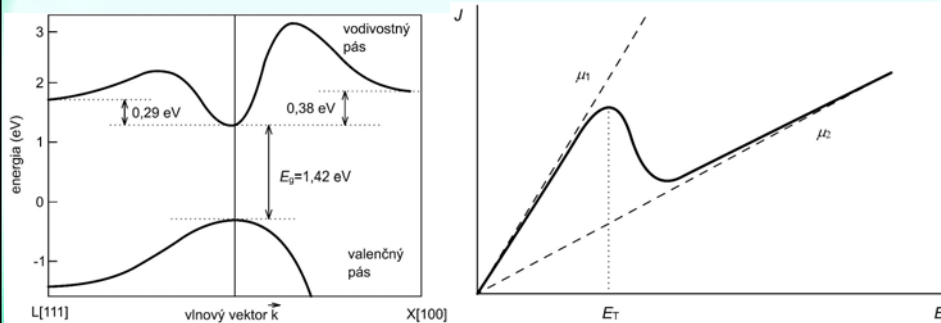
Použitie

ochranné prvky v obvode,
bleskoistky vvn

38

3.5. Gunnova dióda

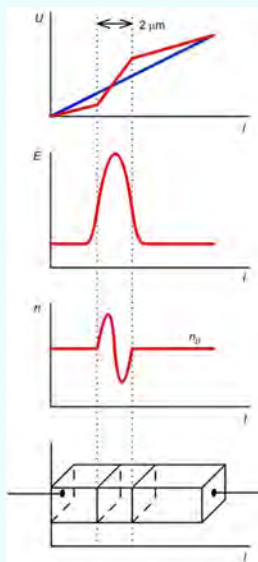
Ridley
Watkins
Hilsum



hlavné minimum	$m^* = 0.072m_0$	$\mu_{n+} = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
vedľajšie minimum	$m^* = 1.2m_0$	$\mu_{n+} = 150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

39

3.5. Gunnova dióda



1. Gunnov mód
2. Oneskorený mód
3. Zhasínajúci mód
4. Mód LSA

40

3.5. Gunnova dióda

Technológia výroby

GaAs typu N

Použitie

generátor a zosilňovač v GHz oblasti (1 GHz až 88 GHz)

kontinuálny mód – 20 mW - 400 mW

impulzný mód – 0,5 kW - 6 kW

41

3.6. Kryosar

CRYO - Switching by Avalanche and Recombination

prevádzka pri nízkych teplotách (LHe)

2 stavy:

1. veľký odpor
2. malý odpor (zvyškové nosiče, alebo nosiče po ionizácii spôsobujú lavínovú ionizáciu)

Technológia výroby

Ge - vrstevnatá štruktúra

Použitie

spínacie prvky,
detektory ionizujúceho
žiarenia

42

3.7. Tenzoelektrické súčiastky

$$\alpha_m = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l} \text{ - činiteľ mechanickej citlivosti závisí od:}$$

- zmeny medziatómovej vzdialenosti, čo vedie k zmene šírky zakázaného pásma a k zmene koncentrácie voľných nosičov a tým aj vodivosti
- typu polovodiča, kryštalografického smeru v polovodiči
- teploty

Technológia výroby

Si – typ P, Ge, GaSb, InSb,
TePb₂

Použitie

meranie mechanického
namáhania

mikrofón

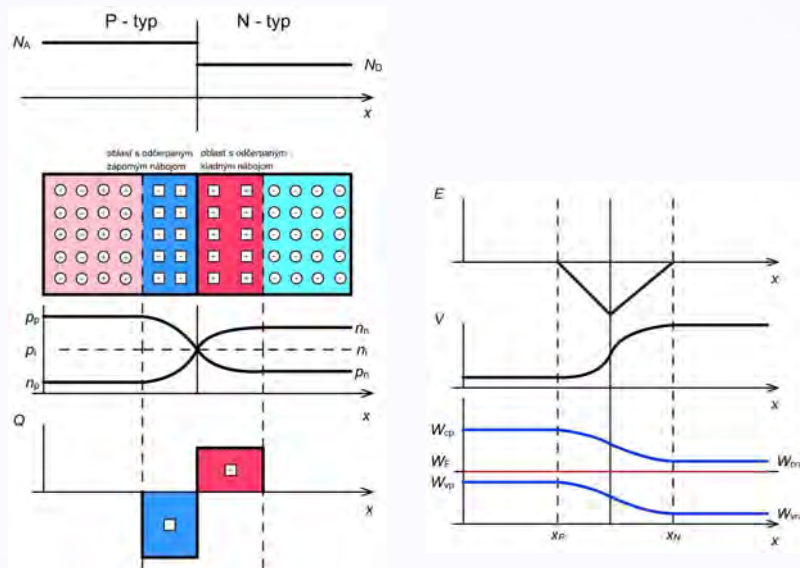
43

4. Polovodičové súčiastky s jedným aktívnym PN priechodom

4.1. PN priechod – všeobecne	45
4.2. Usmerňovač, detektor	55
4.3. Varikap	58
4.4. Stabilizačná dióda	60
4.5. Tunelová dióda	62
4.6. Dvojbázová dióda – tranzistor s jedným PN priechodom	64

44

4.1. PN priechod – všeobecne



45

4.1. PN priechod – všeobecne

výpočet VA charakteristiky

$$en\mu_n E_D = eD_n \frac{dn_n}{dx} (*)$$

E_D – intenzita difúzneho elektrického poľa

$$D = \mu \frac{kT}{e} \text{ - Einsteinova rovnica}$$

$$\mu = \frac{e}{kT} D \text{ - pohyblivosť}$$

$$U_D = E_D d \text{ - difúzne napätie}$$

d – šírka PN priechodu

46

4.1. PN priechod – všeobecne

Pomocou 1. Fickovho zákona možno úpravou vzťahu (*) získať

$$\int_{(n_{0n})_P}^{(n_{0n})_N} \frac{dn}{n} = \frac{\mu}{D_N} \int_{-l_p}^{+l_n} E_D dx \quad (**)$$

$(n_{0n})_N$ - je rovnovážna koncentrácia elektrónov v polovodiči N

$(n_{0n})_P$ - je rovnovážna koncentrácia elektrónov v polovodiči P

$(n_{0p})_N$ - je rovnovážna koncentrácia dier v polovodiči N

$(n_{0p})_P$ - je rovnovážna koncentrácia dier v polovodiči P

l_p - je dĺžka polovodiča typu P

l_n - je dĺžka polovodiča typu N

47

4.1. PN priechod – všeobecne

keďže $\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{e}{kT}$

tak $\ln \frac{(n_{0n})_N}{(n_{0n})_P} = \frac{eU_D}{kT}$ je riešenie rovnice (**)

kde $U_D = \int_{-l_p}^{+l_p} E_D dx$ je difúzne napätie na PN priechode

$(n_{0n})_N = (n_{0n})_P \exp\left(\frac{eU_D}{kT}\right)$ – koncentrácia elektrónov v polovodiči N

$(n_{0n})_P = (n_{0n})_P \exp\left(\frac{eU_D}{kT}\right)$ – koncentrácia elektrónov v polovodiči P

48

4.1. PN priechod – všeobecne

Ak porušíme rovnováhu, čiže k U_D pripojíme U , zníži sa potenciálová bariéra na hodnotu $U_D - U$, difúzne sily sa oslabia.

$$(n_n)_P = (n_{0n})_N \exp\left(-\frac{e(U_D - U)}{kT}\right) = (n_{0n})_P \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$$

$$(n_p)_N = (n_{0p})_P \exp\left(-\frac{e(U_D - U)}{kT}\right) = (n_{0p})_N \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$$

Pre prúdovú hustotu

$$J = J_{0n} + J_{0p} = \left[\frac{eD_n(n_{0n})_P}{l_n} + \frac{eD_p(n_{0p})_N}{l_p} \right] \left[\exp\left(\pm \frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

49

4.1. PN priechod – všeobecne

$$J = J_{0n} + J_{0p} = \left[\frac{eD_n(n_{0n})_P}{l_n} + \frac{eD_p(n_{0p})_N}{l_p} \right] \left[\exp\left(\pm \frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$\left[\frac{eD_n(n_{0n})_P}{l_n} + \frac{eD_p(n_{0p})_N}{l_p} \right] = J_S - \text{nasýtený záverný prúd}$$

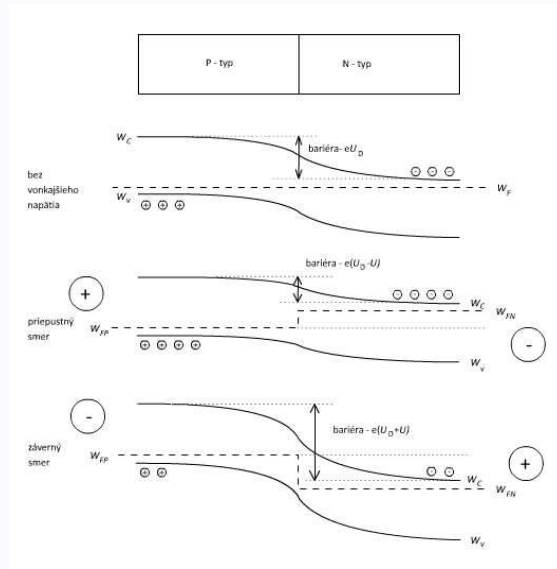
$$J = J_S \left[\exp\left(\pm \frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I = I_S \left[\exp\left(\pm \frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad - \text{pre prúd Shockleyho rovnica}$$

V závernom smere $I = -I_S$

50

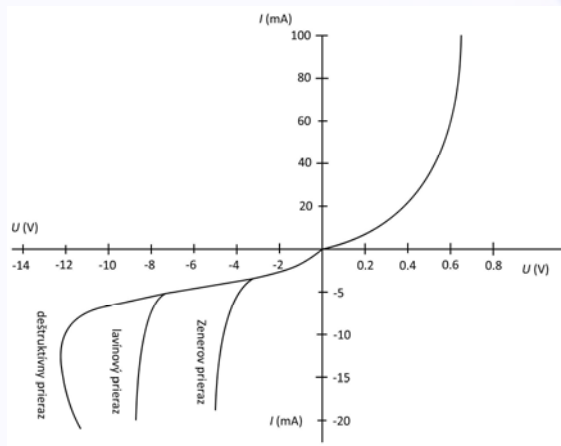
4.1. PN priechod – všeobecne



51

4.1. PN priechod – všeobecne

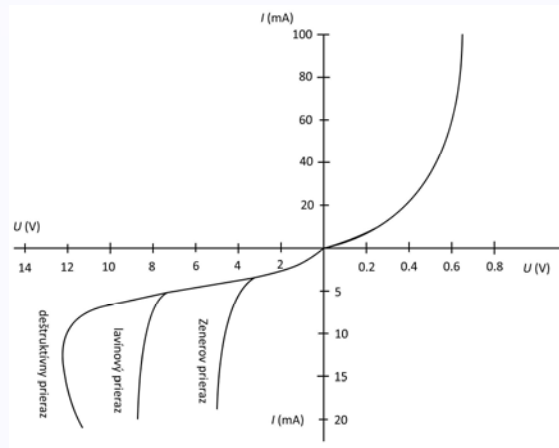
- vplyv generácie a rekombinácie párov elektrón - diera v oblasti priestorového náboja
- vplyv sériového odporu kryštalického polovodiča mimo PN priechodu
- povrchové javy
- tunelovanie nosičov medzi lokálnymi hladinami, napr. GaAs
- veľká hodnota prúdu vstrekaného do PN priechodu



52

4.1. PN priechod – všeobecne

prieraz



53

4.1. PN priechod – všeobecne

	jav	súčiastka
1	potenciálová bariéra, nesymetria VA charakteristiky	detektor, usmerňovač
2	nedeštruktívny elektrický prieraz	stabilizačné diódy
3	kapacita priechodu	kapacitná dióda – varikap, varaktor
4	fotoelektrický jav na PN priechode	fotodióda, čítač častíc, slnečný článok
5	kvantovomechanické tunelovanie	tunelová dióda, inverzná dióda, Esakiho dióda
6	termoelektrické vlastnosti polovodičov	termoelektrický článok, chladiaci článok
6	spontánna emisia žiarenia	svietiaci dióda, LED
7	stimulovaná emisia žiarenia	diódový LASER

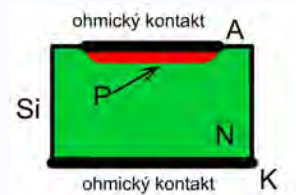
54

4.2. Usmerňovač, detektor

hrotová dióda



plošná dióda

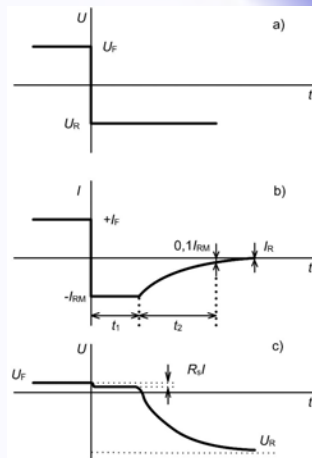


55

4.2. Usmerňovač, detektor

spínacie vlastnosti PN priechodu

- priebeh priloženého napätia
- priebeh prúdu v priepustnom a závernom smere pri prepínaní
- priebeh napätia na priechode
- rozloženie koncentrácie menšinových nosičov v rôznych dobách po prepínaní



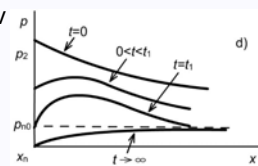
p - je koncentrácia menšinových nosičov

t_1 - je doba vyprázdnenia

t_2 - je doba poklesu

$t_1 + t_2$ - je záverná zotavovacia doba

$p(0, t_1) = p_{n0}$



56

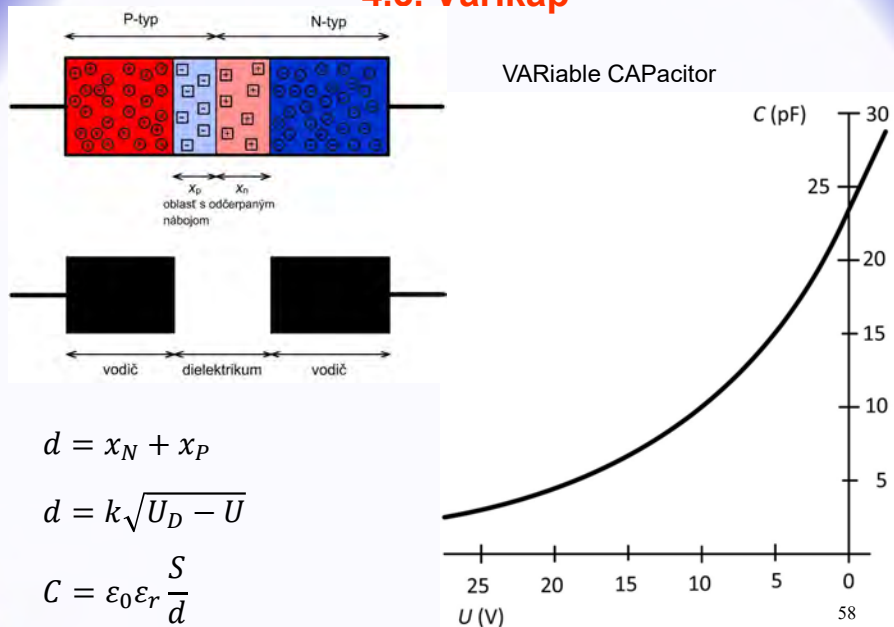
4.2. Usmerňovač, detektor

prieraz

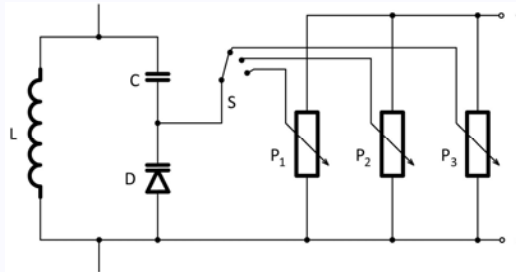
$$J_0 \sim T^{3+\frac{\gamma}{2}} \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right)$$

57

4.3. Variakap



4.3. Varikap



59

4.4. Stabilizačná dióda

$$I = MI_S \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$M = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{U}{U_p}\right)^n\right]} \text{ - multiplikačný faktor}$$

$$n = \langle 2,4 \rangle$$

$$U \rightarrow U_p$$

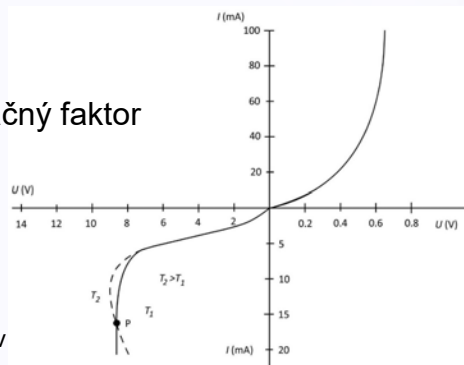
$$eU \leq 4W_g \text{ tunelový (Zenerov) jav}$$

$$4W_g \leq eU \leq 6W_g \text{ kombinácia oboch javov}$$

$$eU \geq 6W_g \text{ lavínový jav}$$

ak je stabilizované napätie z intervalu $U_Z = \langle 5.2, 5.6 \rangle$

tak, teplotný súčiniteľ stabilizačného napätia $S_Z = \frac{1}{U_Z} \frac{\delta U_Z}{\delta T} \approx 0$



60

4.4. Stabilizačná dióda

Zenerov jav

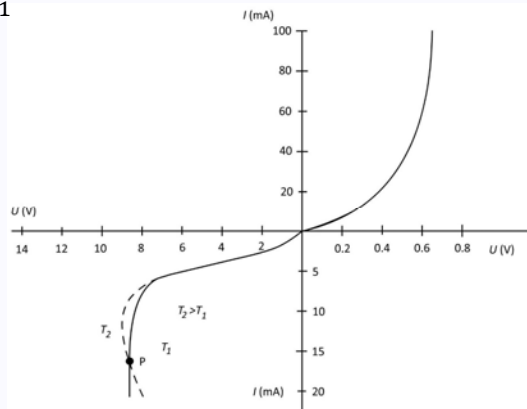
$$P = \left[1 + \frac{W_0^2 \sinh^2 \beta w}{4W(W_0 - W)} \right]^{-1} \quad - \text{pravdepodobnosť prestupu obdĺžnikovej bariéry}$$

$$\beta = [2m(W_0 - W)/\hbar^2]^{-1}$$

W - energia elektrónu

W_0 - výška bariéry

w - hrúbka bariéry



Lavínový prieraz

mechanizmus javu – nárazová ionizácia

61

4.5. Tunelová dióda

tunelová dióda, Esakiho dióda, inverzná dióda

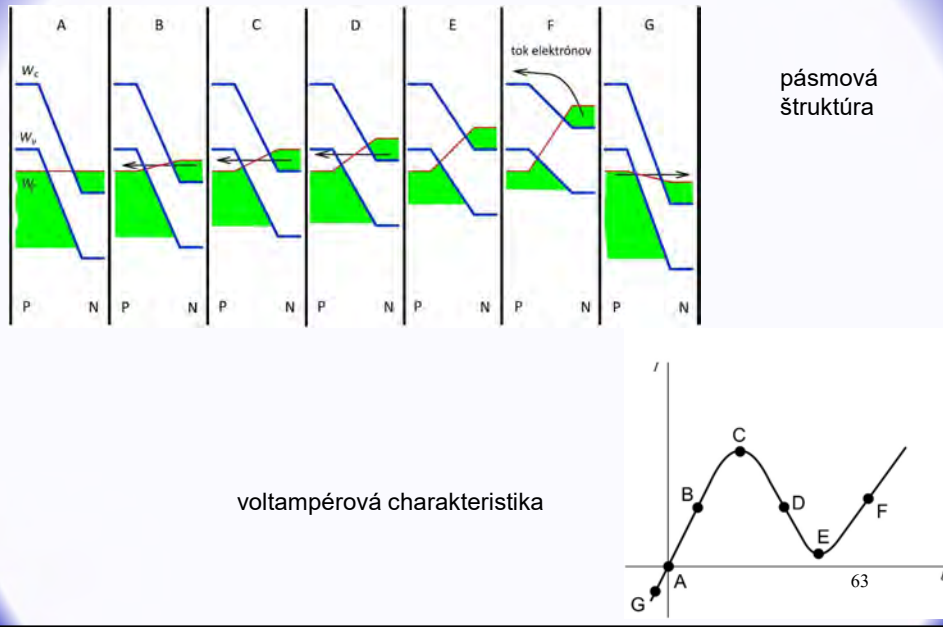
degenerované polovodiče: Ge, Si, GaAs

koncentrácia prímiesí $10^{18}/\text{cm}^{-3}$

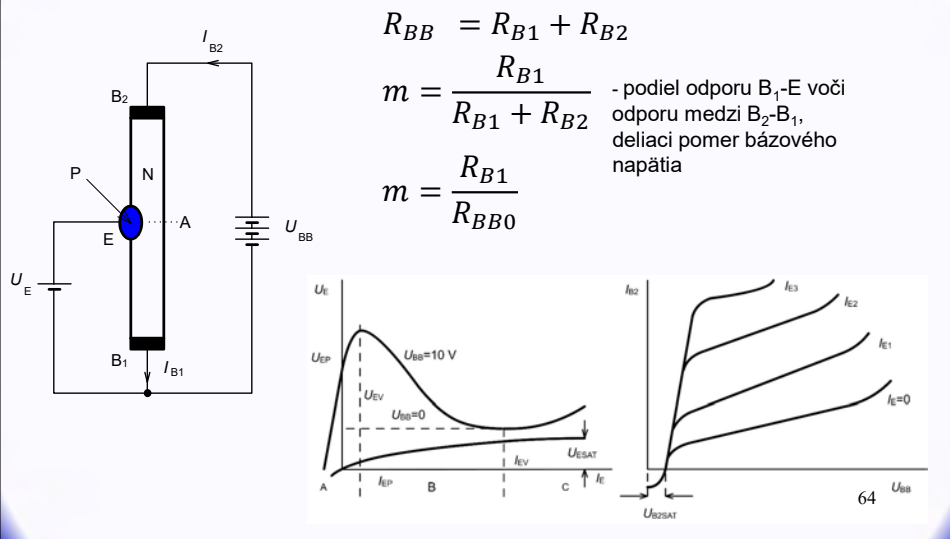
úzke, strmé PN priedchody

62

4.5. Tunelová dióda



4.6. Dvojbázová dióda – tranzistor s jedným PN priechodom



4.6. Dvojbázová dióda – tranzistor s jedným PN priechodom

Technológia výroby

zliatinová, planárna
alebo epitaxne-planárna

Použitie

využíva sa oblasť záporného
diferenciálneho odporu pre stavbu
generátorov a na zosilňovače na
všeobecné použitie

65

5. Kontakt kov - polovodič

5.1. Kontakt kov – polovodič všeobecne	67
5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt	70

66

5.1. Kontakt kov – polovodič všeobecne

Φ_B - energia bariéry

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi$$

$$\Phi_K = \Phi_M - \Phi_S$$

$$\Phi_K = eV_D$$

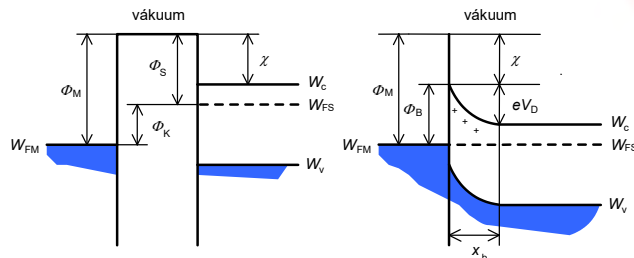
$$\Phi_K = \Phi_M - \Phi_S = \Phi_M - [\chi + (W_C - W_F)]$$

χ - afinita

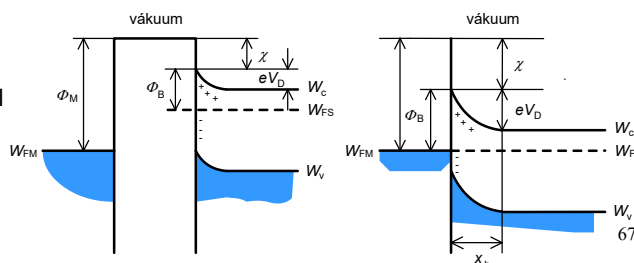
V_D - difúzny potenciál

x_b - hrúbka oblasti s priestorovým nábojom

ideálny

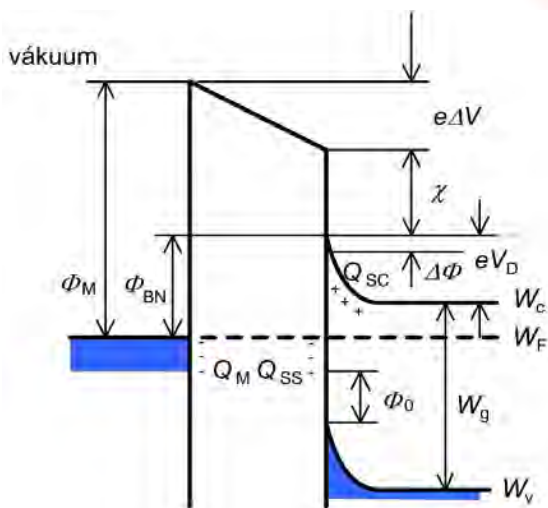


s povrchovými stavmi



5.1. Kontakt kov – polovodič všeobecne

reálny



68

5.1. Kontakt kov – polovodič všeobecne

1. priepustný smer

S → M: pri náraste napätia
v priepustnom smere prúd narastie $\exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$ krát

$$\text{Tok elektrónov } I_{S \rightarrow M} = I_0 \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$$

Celkový prúd

$$I_p = I_{S \rightarrow M} - I_{M \rightarrow S} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

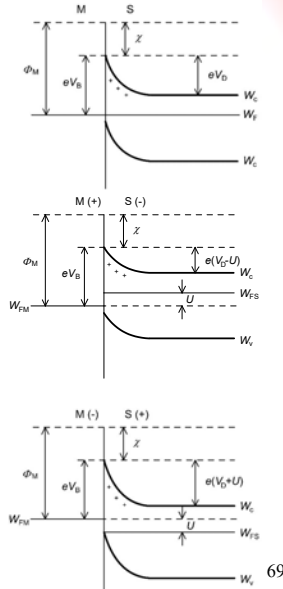
2. záverný smer

$$I_{M \rightarrow S} = I_0$$

$$I_{S \rightarrow M} = I_0 \left[1 - \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \right] \approx I_0$$

$$\frac{I_{dier}}{I_{dier} + I_{el}} = 0.1 \%$$

nedochádza k
virtuálnemu
skladovaniu náboja



69

5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt

$$W_0 = \frac{e\hbar}{2} \left(\frac{N_D}{m^* \epsilon_r \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad \text{charakteristická rovnica}$$

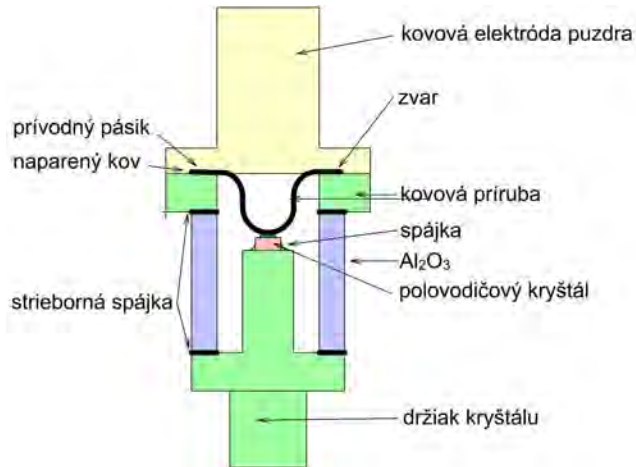
$$\frac{kT}{W_0} \gg 1 \quad \text{tepelná emisia, slabo dotovaný polovodič, Schottkyho dióda}$$

$$\frac{kT}{W_0} \approx 1 \quad \text{tepelná emisia a tunelovanie sa podieľajú rovnako, TFE jav – tepelná emisia a emisia elektrickým poľom}$$

$$\frac{kT}{W_0} \ll 1 \quad \text{tunelový jav, lineárna VA charakteristika, ohmický kontakt}$$

70

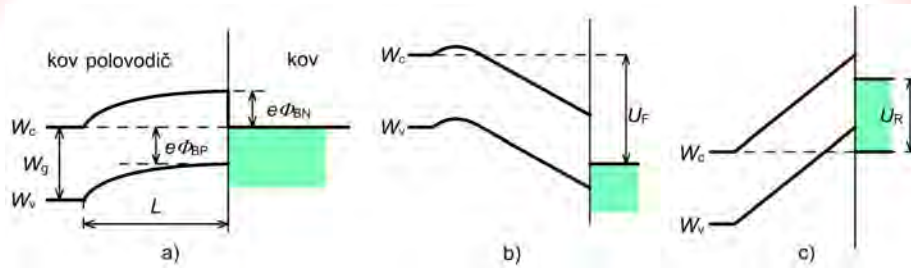
5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt



71

5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt

SCA – space charge limited



- a) bez napätia
- b) priepustný smer
- c) záverný smer

72

5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt



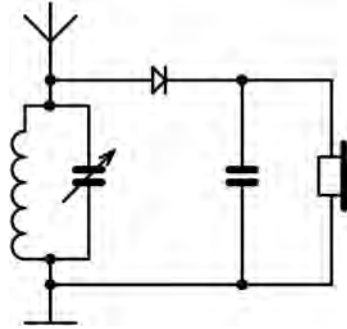
73

5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt

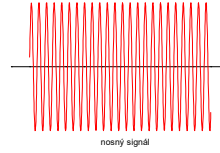


74

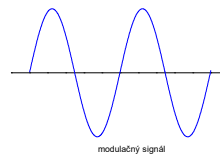
5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt



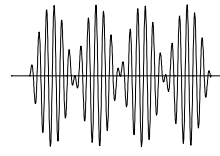
Amplitúdová modulácia



nosný signál



modulačný signál



amplítudovo modulovaný signál

75

5.2. Schottkyho dióda a lineárny kontakt

Technológia výroby

Si typu N, GaAs typu N

Použitie

detektory, usmerňovače na v_f a spínacie obvody, v TTL logike, súčasť MOSFET elektródy C a E)

76

6. Polovodičové súčiastky s dvoma aktívnymi PN priechodmi

6.1.	Štruktúra bipolárneho tranzistora	79
6.2.	Pásmová štruktúra bipolárneho tranzistora	80
6.3.	Prúdy v bipolárnom tranzistore	81
6.4.	Zapojenie bipolárneho tranzistora do obvodu	82
6.5.	Obvodové parametre tranzistora	84
6.6.	Obvodové parametre tranzistora SE	85
6.7.	Pohyb voľných nábojov v tranzistore	86
6.8.	Charakteristiky tranzistora	88
6.9.	Použitie tranzistora – spínač	87
6.10.	Použitie tranzistora – zosilňovač	89
6.11.	Ukážky tranzistorov	90
6.12.	Diak	91 ⁷⁷

Objav bipolárneho tranzistora

J. Bardeen, W. H. Brattain: The transistor, a semiconductor triode, Phys. Rev., 74, 230 (1948)

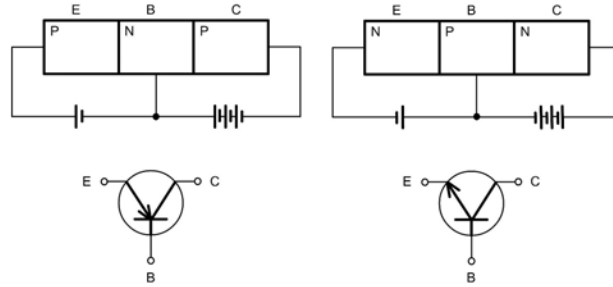
J. Bardeen, W. H. Brattain: Physical principles involved in transistor action, Bell. Syst. Techn. Journ., 28, 239 (1949)

W. Shockley: Theory of P-N junction in semiconductors and P-N junction transistors, Bell. Syst. Techn. Journ., 28, 435 (1949)

Nobelova cena

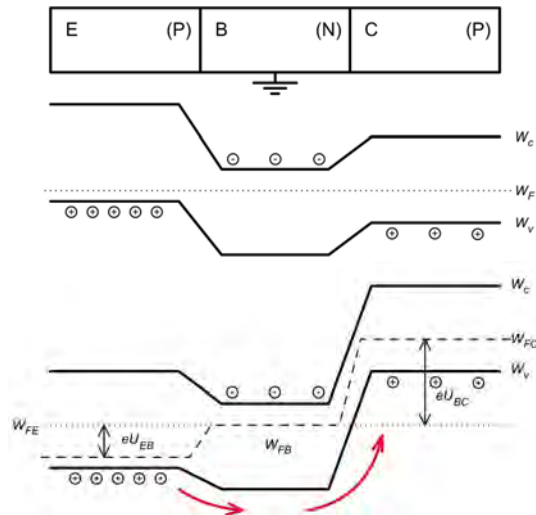
6.1 Štruktúra bipolárneho tranzistora

TRANsfer reSISTOR



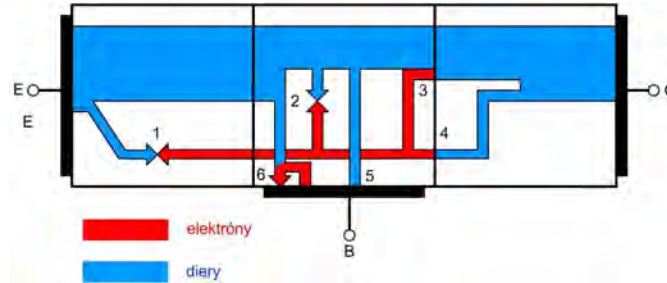
79

6.2. Pásmová štruktúra bipolárneho tranzistora



80

6.3. Prúdy v bipolárnom tranzistore



1. oblasť objemovej rekombinácie v E
2. oblasť objemovej rekombinácie v B
3. oblasť nárazovej ionizácie
4. oblasť tepelnej generácie menšinových nosičov
5. oblasť rekombinácie na kontakte B
6. oblasť rekombinácie na povrchu B

81

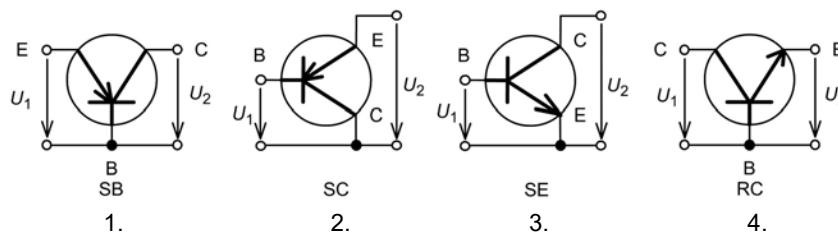
6.4. Zapojenie bipolárneho tranzistora do obvodu

základné funkcie:

1. lineárny zosilňovač
2. bezkontaktný spínač

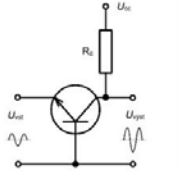
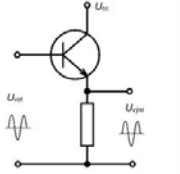
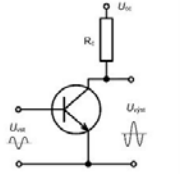
základné zapojenia:

1. so spoločnou bázou
2. so spoločným kolektorom
3. so spoločným emitorom
4. regulačný stupeň



82

6.4. Zapojenie bipolárneho tranzistora do obvodu

parameter	SB	SC	SE
napäťové zosilnenie	10-100	< 1	10-1000
prúdové zosilnenie	0,9-0,998	10-500 a viac	10-500 a viac
výkonové zosilnenie	10-100	10-100	100-10 ⁴
vstupný odpor	(10-100) Ω	10 ² -10 ⁵ a viac	100 Ω- jednotky kΩ
výstupný odpor	(0,1-1) MΩ	desiatky až stovky Ω	desiatky kΩ
fázový posun			
medzi vstupným a výstupným napätím	0°	0°	180°
medzi vstupným a výstupným prúdom	0°	0°	0°
použitie	pre vysoké frekvencie, menič impedancie	pre potreby veľkého vstupného odporu a malého výstupného odporu	najlepšie prispôsobenie, veľké zosilnenie, najčastejšie použitie

83

6.5. Obvodové parametre tranzistora



$$h_{11} = \frac{u_1}{i_1} \quad \text{vstupný odpor}$$

$$h_{12} = \frac{u_1}{u_2} \quad \text{spätňý napäťový prenos}$$

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1} \quad \text{prúdový zosilňovací činiteľ}$$

$$h_{22} = \frac{i_2}{u_2} \quad \text{výstupná vodivosť}$$

84

6.6. Obvodové parametre tranzistora SE

$$\alpha_{dyn} = \left(\frac{\Delta i_c}{\Delta i_E} \right)_{u_{CE}=\text{konšt}} \quad \alpha_{stat} = \left(\frac{I_c}{I_E} \right)_{u_{CE}=\text{konšt}}$$

$$\beta_{dyn} = \left(\frac{\Delta i_c}{\Delta i_B} \right)_{u_{CE}=\text{konšt}} \quad \beta_{stat} = \left(\frac{I_c}{I_B} \right)_{u_{CE}=\text{konšt}}$$

$$\beta = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_B} = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_E - \Delta i_c} = \frac{\frac{\Delta i_c}{\Delta i_E}}{\frac{\Delta i_E - \Delta i_c}{\Delta i_E}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\alpha = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_E} = \frac{\beta \Delta i_B}{\beta \Delta i_B - \Delta i_B} = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

85

6.7. Pohyb voľných nábojov v tranzistore

PNP tranzistor

pohyb dier v B

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau} = \mu_p |\vec{E}_B| \frac{\partial p}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

pohyb elektrónov v E

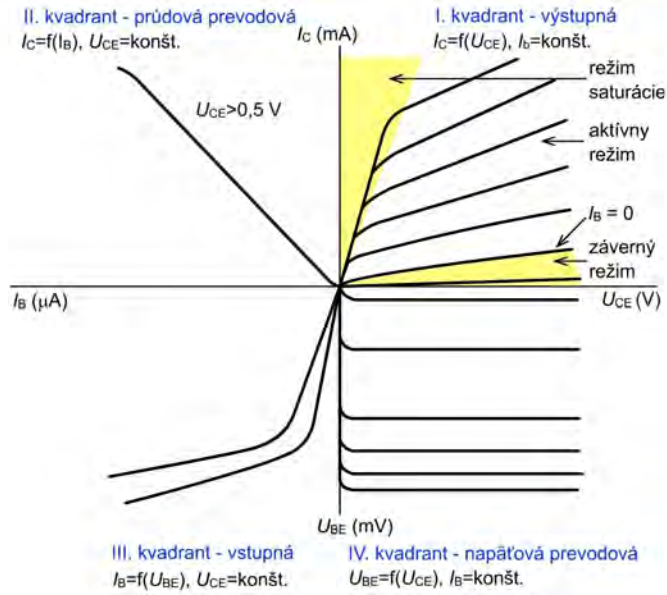
$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

pohyb elektrónov v C

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \mu_n |\vec{E}_C| \frac{\partial n}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

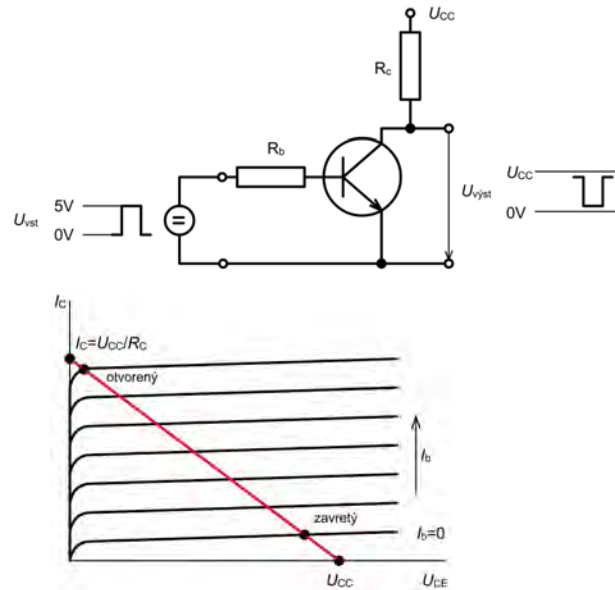
86

6.8. Charakteristiky tranzistora



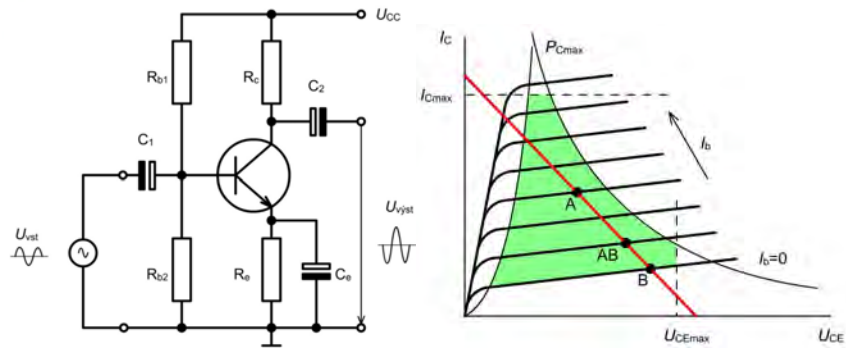
87

6.9. Použitie tranzistora (spínač)



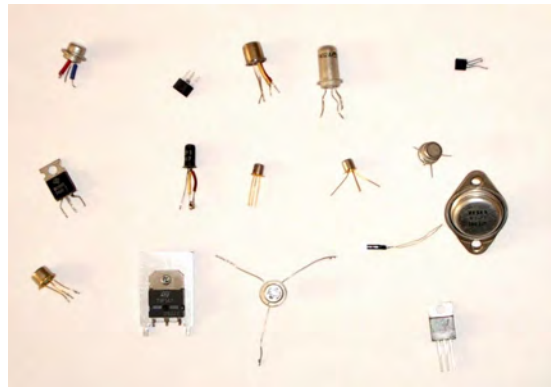
88

6.10. Použitie tranzistora (zosilňovač)



89

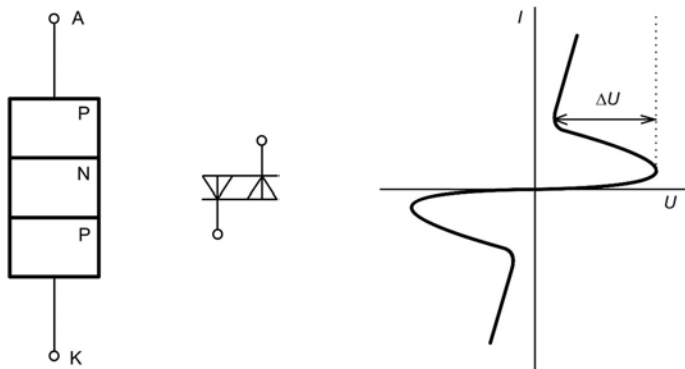
6.11. Ukážky tranzistorov



90

6.12 Diak

DIAC – Diode for Alternating Current



spolu s triakom tvoria kvadrak

91

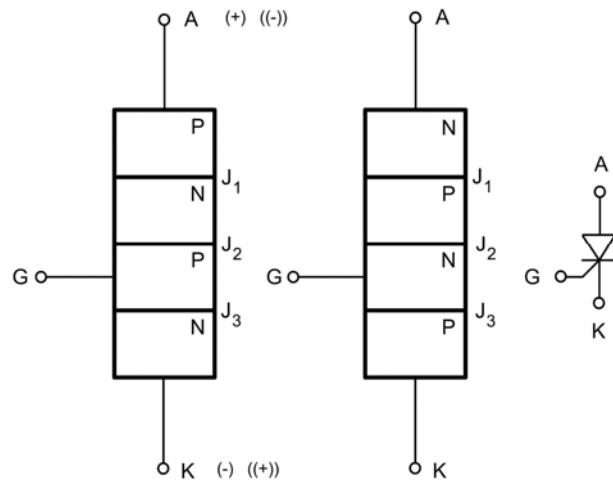
7. Polovodičové súčiastky s viacerými PN prechodmi

7.1.	Tyristor	93
7.2.	Tetródový tyristor – dynistor	101
7.3.	Triak	103
7.4.	Kvadrak	109

92

7.1. Thyristor

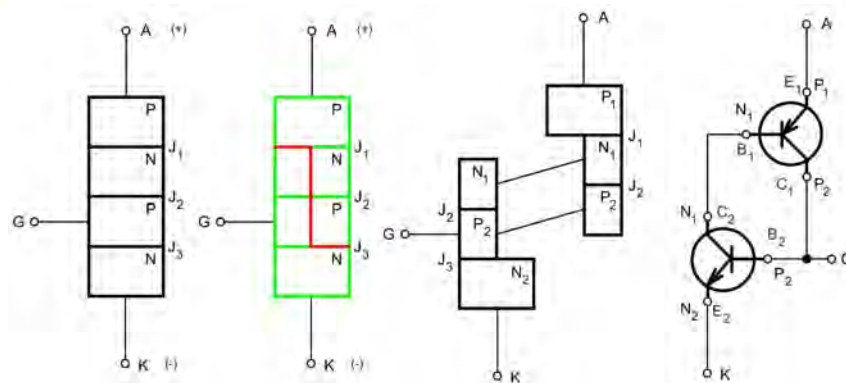
Thyristor



93

7.1. Thyristor

Thyristor

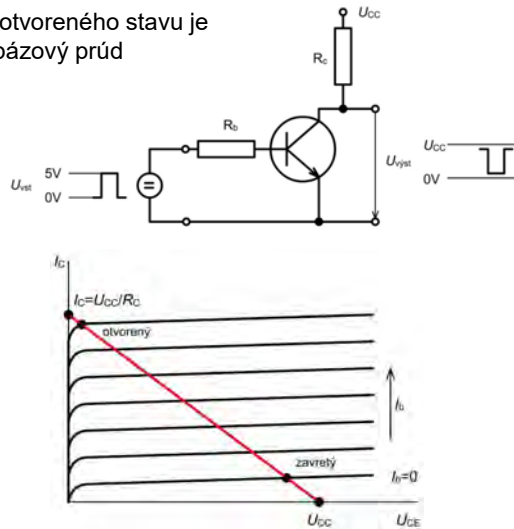


94

7.1. Tyristor

Tranzistor ako spínač (uvedené pre porovnanie s činnosťou tyristora)

na uvedenie do otvoreného stavu je potrebný trvalý bázoový prúd



7.1. Tyristor

na uvedenie do otvoreného stavu je potrebný krátky prúdový impulz

$$I_{pE1}(1 - \alpha_{P1}) - I_{pC} = I_{nC} + I_{nE2}\alpha_{P2} - I_{nE1}$$

rekombinačné prúdy do B_1 a B_2

$$I_{pE2}(1 - \alpha_{P2}) - I_{nC} = I_{pC} + I_{nE1}\alpha_{P1} - I_{nE}$$

α – prenosový činiteľ do bázy

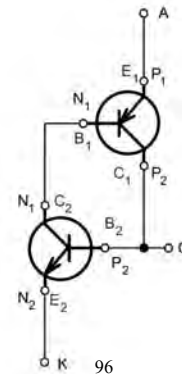
$$I(1 - \alpha_{B1} - \alpha_{B2}) = I_C$$

$$\alpha_{B1} = \gamma_{E1}\alpha_{P1}, \alpha_{B2} = \gamma_{E2}\alpha_{P2}, \gamma_{E1} = I_{pE} / I, \gamma_{E2} = I_{pE2}$$

$$I = I_{pE} + I_{nE1} = I_{pE}$$

$$I(1 - \alpha_{B1}M_p - \alpha_{B2}M_n) = I_{nC}M_n + I_{pC}M_p$$

$$I = I_0 \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right)$$



7.1. Tyristor

$$U_{E1} + U_{E2} = \frac{kT}{e} \left[\left(\frac{1}{I_{E10}} + 1 \right) \left(\frac{1}{I_{E20}} + 1 \right) \right]$$

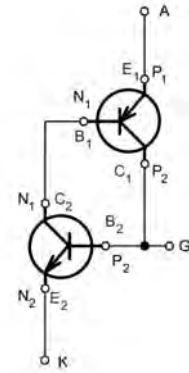
$$I_C(U_C) = -I_{C0} \left(\exp \frac{eU_C}{kT} - 1 \right)$$

$$I(1 - \alpha_{B1} - \alpha_{B2}) = -I_{C0} \left(\exp \frac{eU_C}{kT} - 1 \right)$$

$$\alpha_{B1} + \alpha_{B2} < 1 \rightarrow U_C < 0$$

$$\alpha_{B1} + \alpha_{B2} = 1 \rightarrow U_C = 0$$

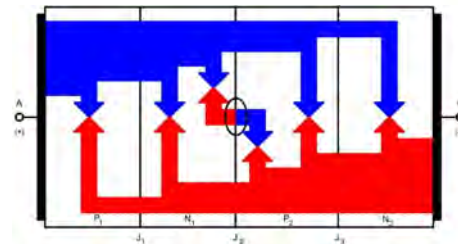
$$\alpha_{B1} + \alpha_{B2} > 1 \rightarrow U_C > 0$$



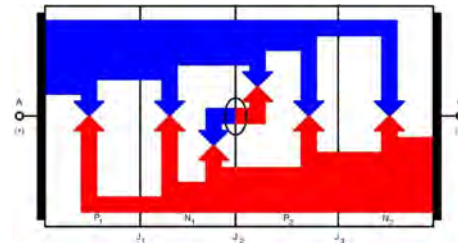
97

7.1. Tyristor

blokovací stav

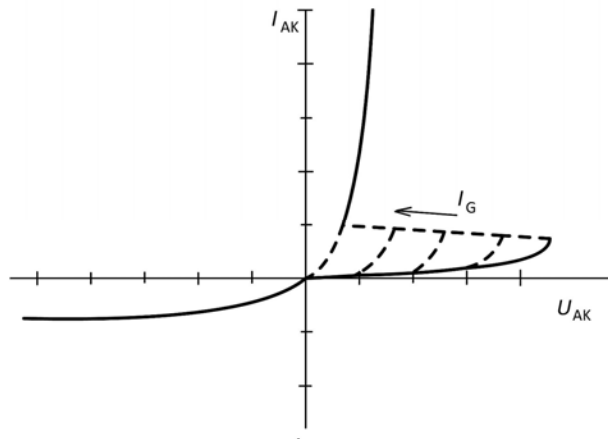


zopnutý stav



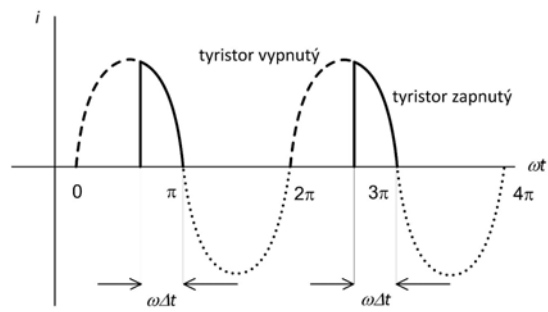
98

7.1. Tyristor



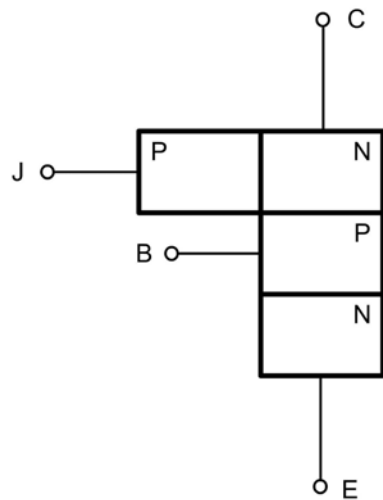
99

7.1. Tyristor



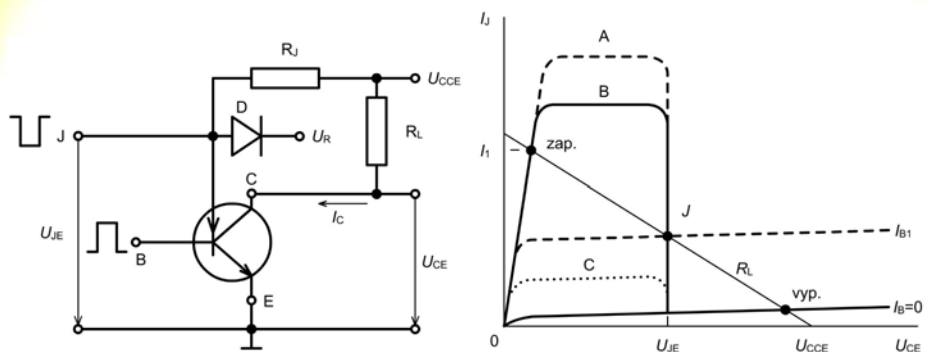
100

7.2. Tetródový tyristor - dynistor



101

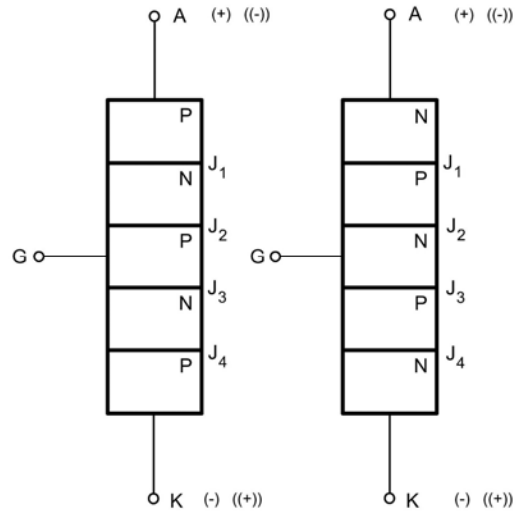
7.2. Tetródový tyristor - dynistor



102

7.3.Triak

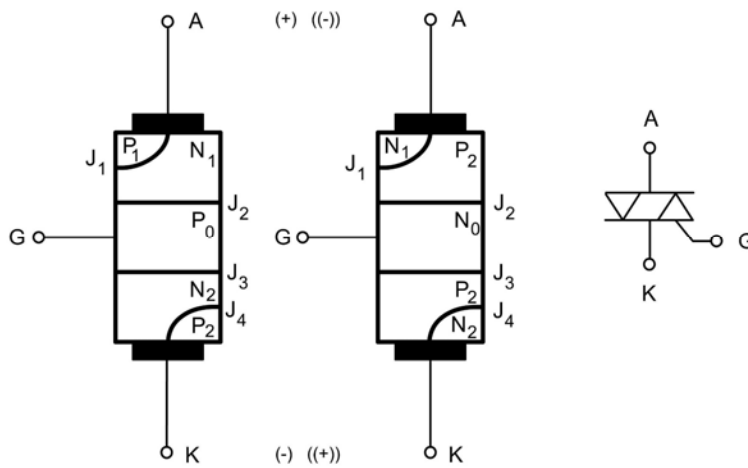
TRIAC TRIode AC - switch



103

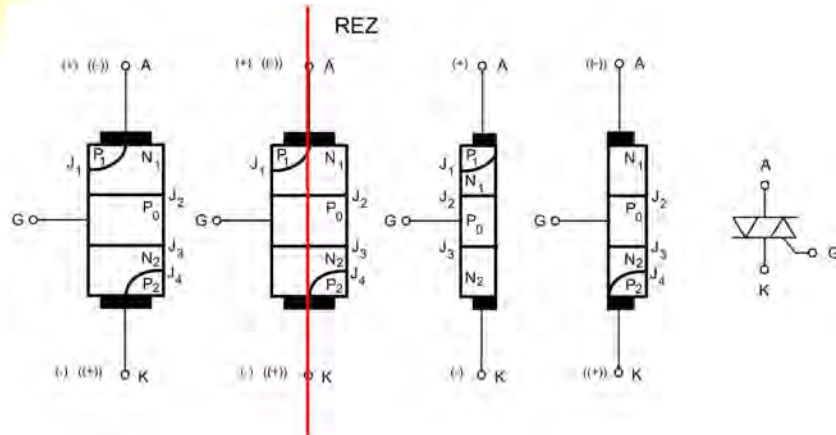
7.3.Triak

TRIAC TRIode AC - switch



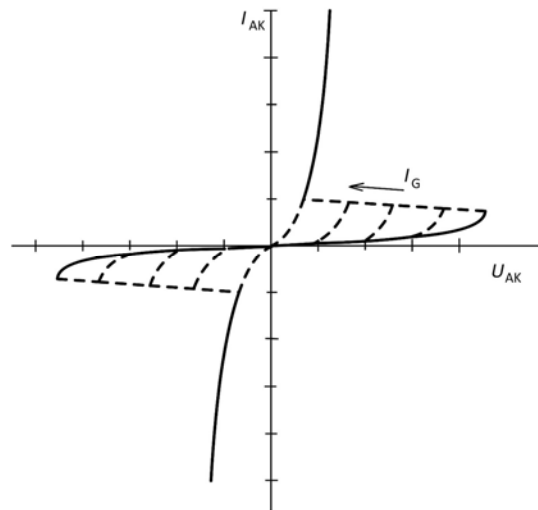
104

7.3.Triak



105

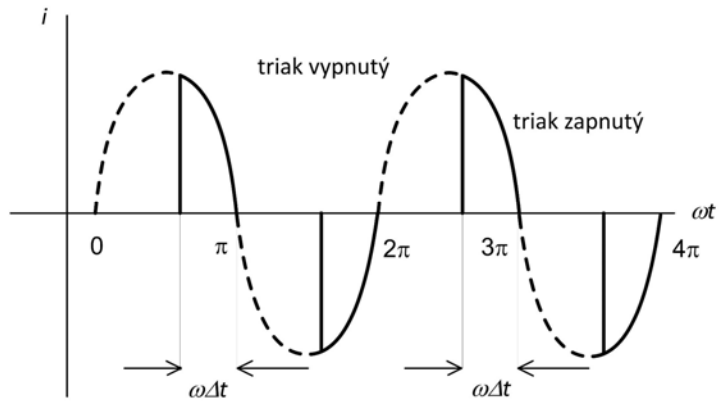
7.3.Triak



106

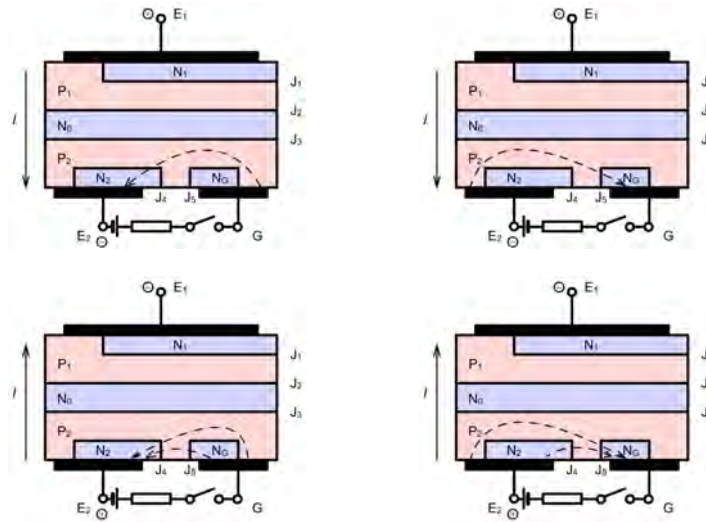
7.3.Triak

TRIAC TRIode AC - switch



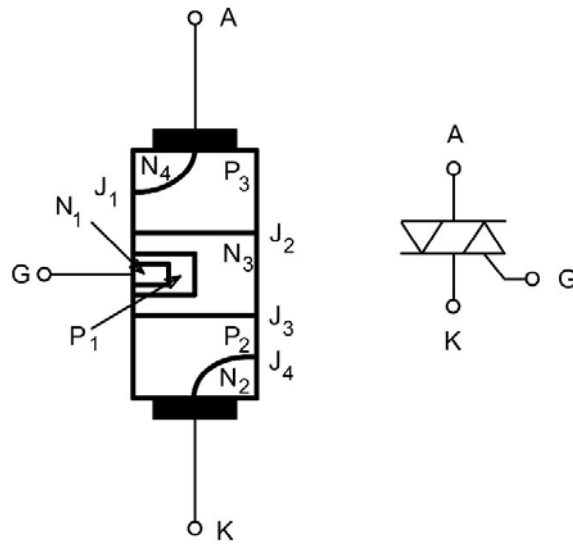
107

7.3.Triak



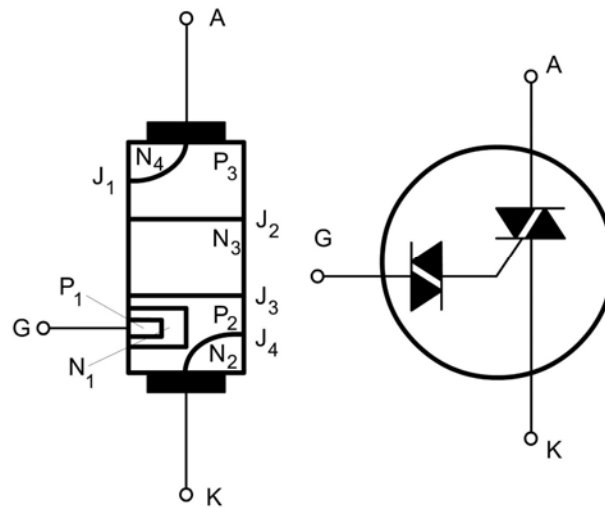
108

7.4. Kvadrak



109

Kvadrak



110






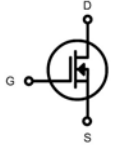
8. Unipolárne tranzistory

- 8.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom 113
- 8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom 121

111

Unipolárne tranzistory

tranzistory riadené elektrickým poľom

			P kanál
			N kanál
JFET	MOS FET s indukovaným kanálom	MOS FET s technologickým kanálom	

112

8.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom

JFET – junction field effect tranzistor,
tranzistor riadený elektrickým poľom s priechodovým hradlom

vstupný odpor $10^{10} \Omega$

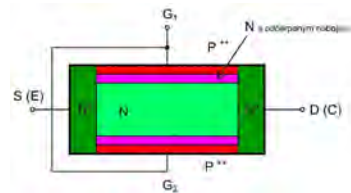
fetrón

$G_1 = G_2 = G = 0$ - riadiace elektródy sú prepojené

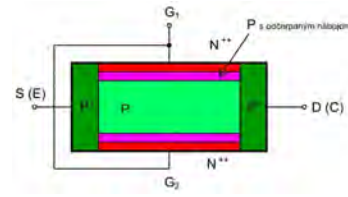
$$U_{GE} = 0$$

$$U_{CE} = 0$$

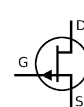
G - gate, hradlo
E - emitter, emitor
C - collector, kolektor
S - source
D - drain



kanál N



kanál P



113

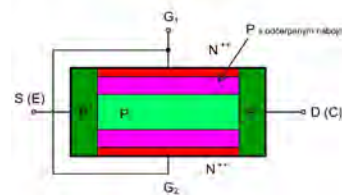
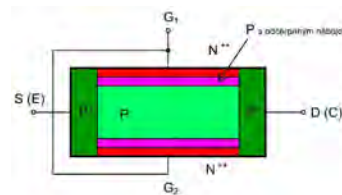
8.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom

$$U_{GE} = 0$$

$$U_{CE} = 0$$

$$U_{GE} = U_{GE1} > 0$$

$$U_{CE} = 0$$



114

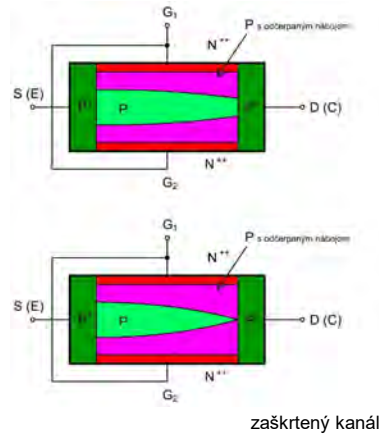
3.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom

$$U_{GE} = U_{GE} > 0$$

$$U_{CE} = U_{CE} < 0$$

$$U_{GE} = U_{GE} > U_{GE}$$

$$U_{CE} = U_{CE} < 0$$

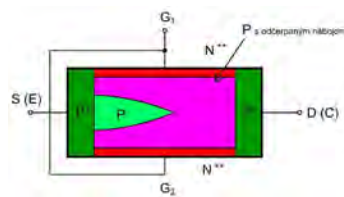


115

3.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom

$$U_{GE} = U_{GE2}$$

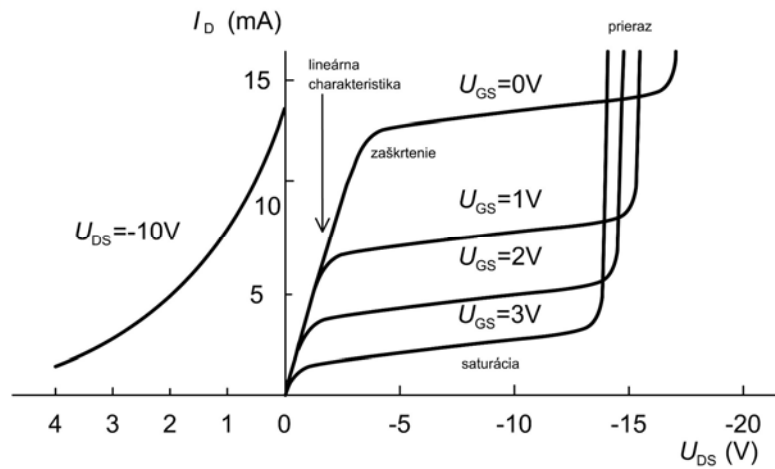
$$U_{CE} < U_{CEsat}$$



116

8.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom

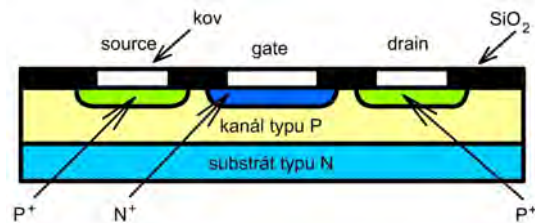
VA charakteristika



117

8.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom

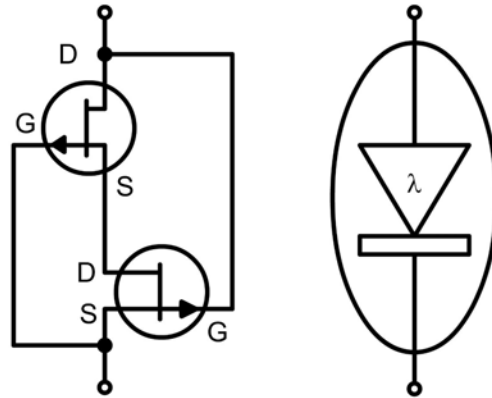
VA štruktúra



118

8.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom

použitie JFET ako λ dióda



119

8.1. Unipolárne tranzistory s priechodovým hradlom

tranzistory riadené elektrickým poľom MOS

MOS FET – metal oxide semiconductor field effect tranzistor
tranzistor riadený elektrickým poľom izolovaným hradlom

vstupný odpor $10^{14} \Omega$

MIS FET – metal insulator semiconductor field effect tranzistor
IG FET – insulated gate field effect transistor

MOS FET – SiO_2

MNS FET – Si_3N_4

MNOS – $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$

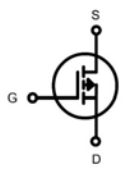



MAS – Al_2O_3

MAOS – $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$

120

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom

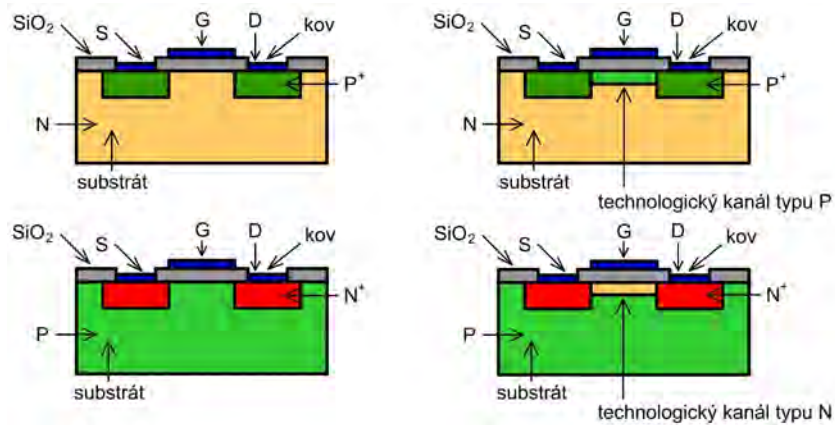
tranzistory riadené elektrickým poľom MOS

		P kanál
		N kanál
MOS FET s indukovaným kanálom	MOS FET s technologickým kanálom	

121

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom

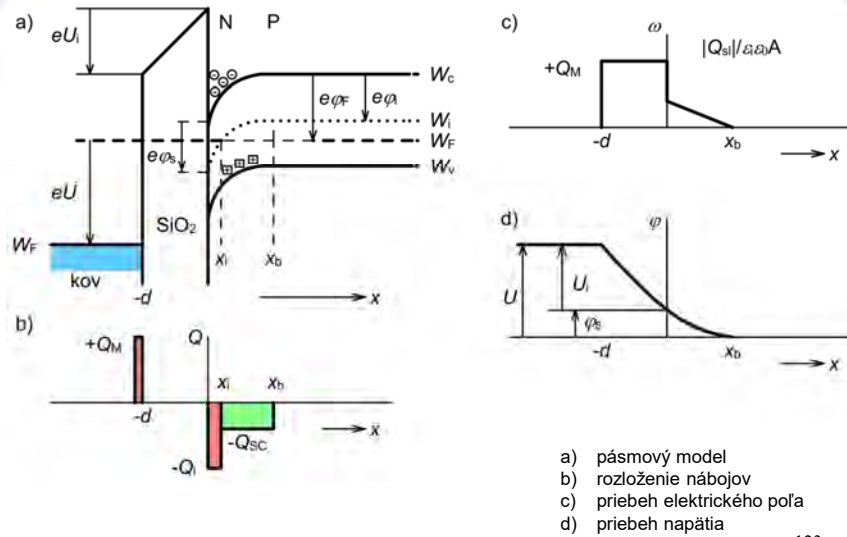
tranzistory riadené elektrickým poľom MOS



122

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom

ideálna štruktúra

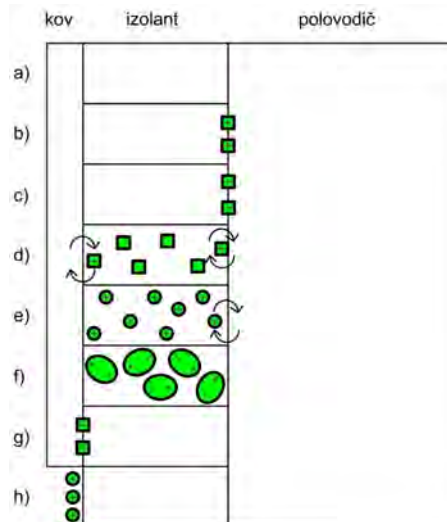


123

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom

poruchový náboj v štruktúre MOS (MIS)

- a) ideálna štruktúra
- b) rýchle stavy na rozhraní I-S
- c) nepohyblivý náboj na rozhraní I-S
- d) pasce
- e) pohyblivé ióny v izolačnej vrstve
- f) polarizované dipóly
- g) nepohyblivé náboje na rozhraní M-I
- h) povrchové ióny na izolačnej vrstve

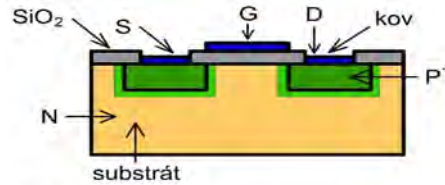


124

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom

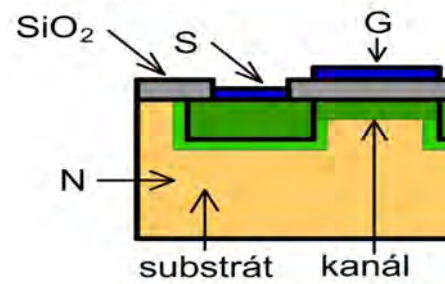
$$U_{GS} = 0$$

$$U_{DS} = 0$$



$$U_{GS} = U_{GS1} < 0$$

$$U_{DS} = 0$$

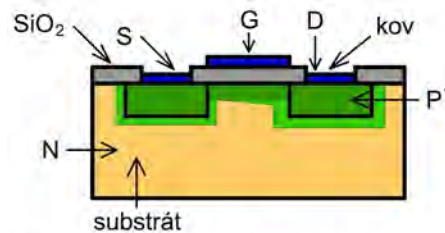


125

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom

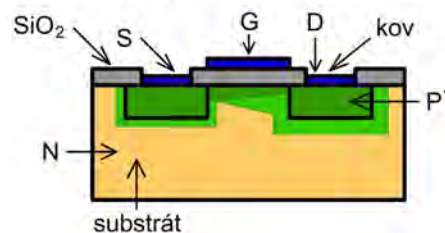
$$U_{GS} = U_{GS1} < 0$$

$$U_{DS} = U_{DS} < 0$$



$$U_{GS} = U_{GS2} < 0$$

$$U_{DS} = U_{DS2} < U_{DS}$$



126

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom

$$U_{GS} = U_{GS1} < 0$$

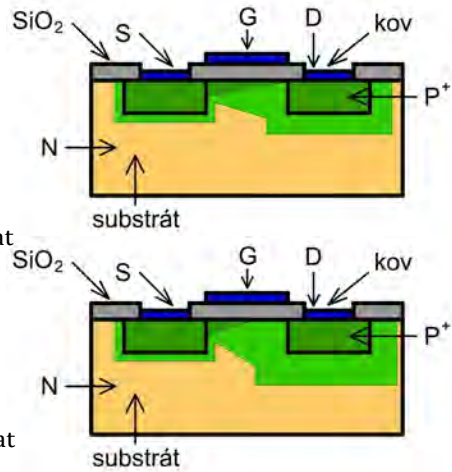
$$U_{DS} = U_{DS3} < U_{DS2}$$

$$U_{DS} = U_{DS3} = U_{DSsat}$$

$$U_{GS} = U_{GS1} < 0$$

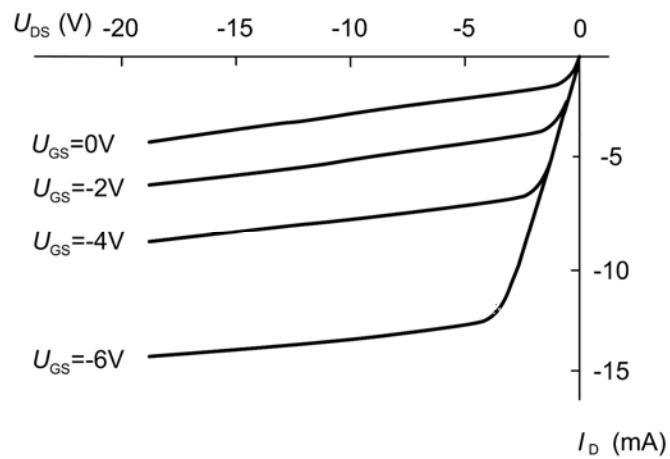
$$U_{DS} = U_{DS4} < U_{DS}$$

$$U_{DS} = U_{DS4} < U_{DSsat}$$



127

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom



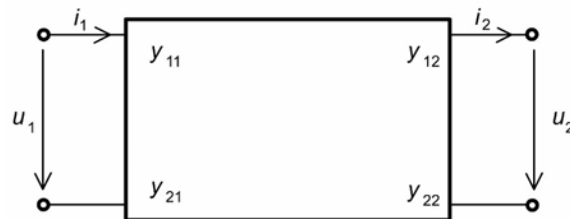
128

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom

typ	schematická značka	prevodová charakteristika	výstupná charakteristika
ochudobňovací s kanálom typu N			
obohacovací s kanálom typu N			
ochudobňovací s kanálom typu P			
obohacovací s kanálom typu P			

129

8.2. Unipolárne tranzistory s izolovaným hradlom



$$y_{11} = \frac{i_1}{u_1} \quad \text{vstupná vodivosť nakrátko}$$

$$y_{12} = \frac{i_1}{u_2} \quad \text{prenosová admitancia v spätnom smere}$$

$$y_{21} = \frac{i_2}{u_1} \quad \text{prenosová admitancia v priamom smere}$$

$$y_{22} = \frac{i_2}{u_2} \quad \text{výstupná vodivosť nakrátko}$$

130

Unipolárne tranzistory

Technológia výroby

planárna alebo
epitaxne-planárna

Použitie

zosilňovače, spínače

131

9. Technológia výroby polovodičových prvkov

132

Technológia výroby polovodičových prvkov

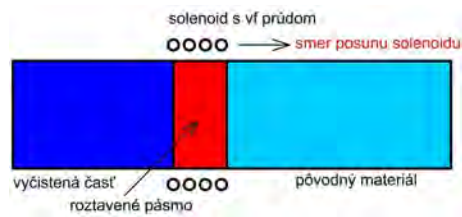
Čisté materiály:

prvky: Ge, Si (najčastejšie), Se (xerografia)

zlúčeniny: GaAs, GaP, InAs, InSb

kremík – z piesku

- redukcia koksom → ferossilícium,
- spaľovanie v Cl
- destilácia
- extrakcia – čistota 10^{-4} ppm
- chemický prevod na trichlórsilán (SiHCl_3)
- redukcia v atmosfére s prebytkom H_2 v tepelnom procese → tyčinka 3mm priemer, dĺžka 1 m
- ohrev prúdom na 100°C – rast kryštálov polykryštalického materiálu na 10 cm
- pásmové tavenie

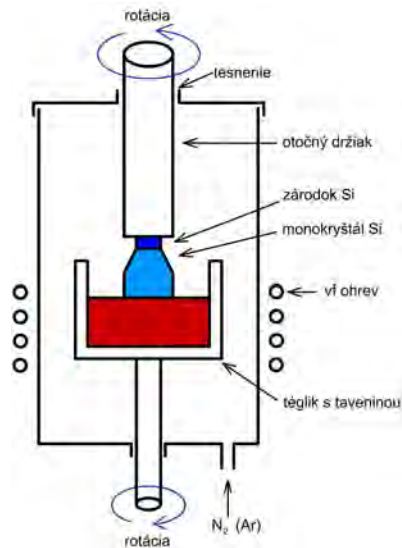


Pásmové tavenie

133

Technológia výroby polovodičových prvkov

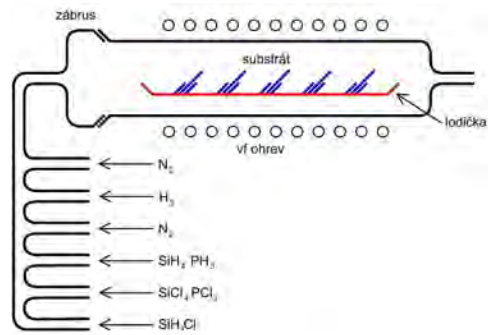
pestovanie monokryštálov - princíp Czochralského metódy



134

Technológia výroby polovodičových prvkov

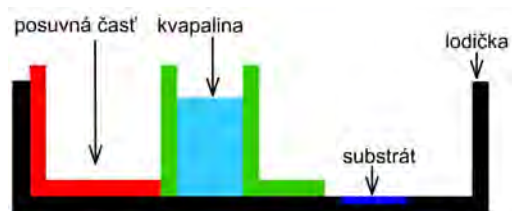
pestovanie monokryštálov - epitaxný rast z plynnej fázy



135

Technológia výroby polovodičových prvkov

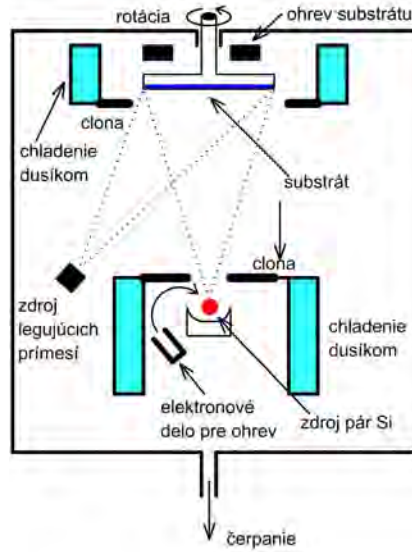
pestovanie monokryštálov - epitaxný rast z kvapalnej fázy



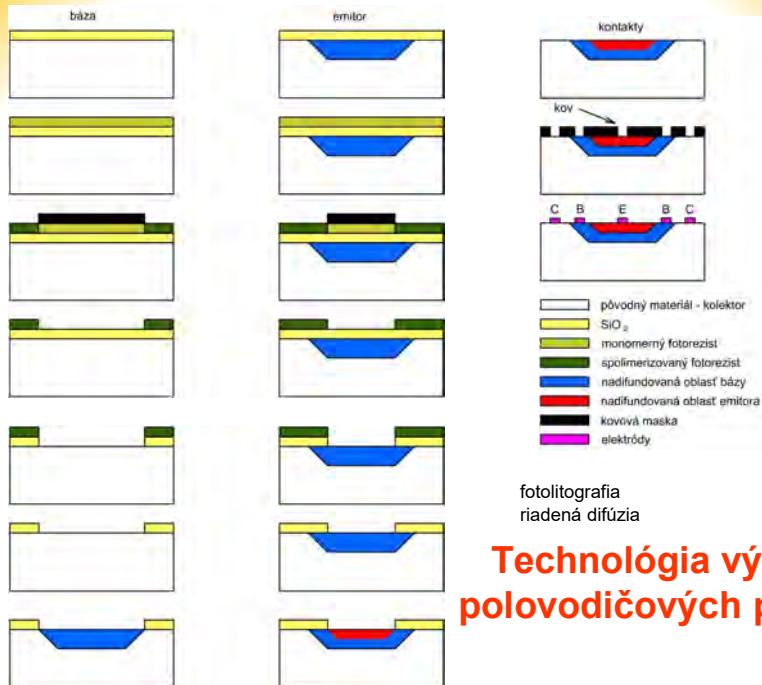
136

Technológia výroby polovodičových prvkov

pestovanie monokryštálov - MBE



137

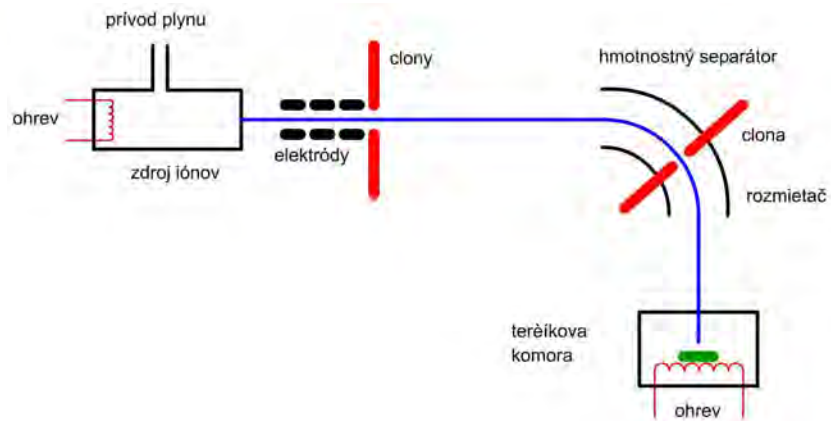


Technológia výroby polovodičových prvkov

138

Technológia výroby polovodičových prvkov

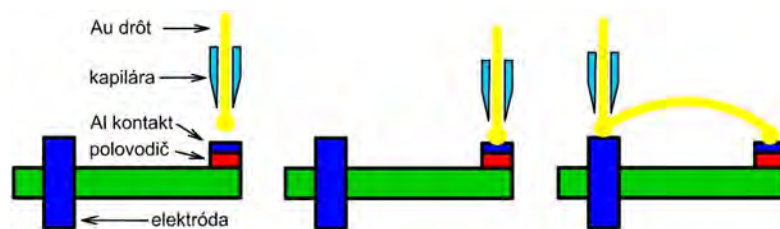
iónová implantácia



139

Technológia výroby polovodičových prvkov

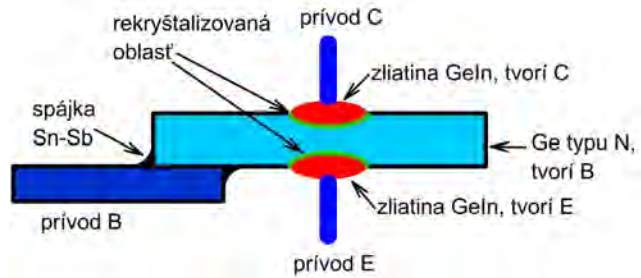
vytváranie kontaktov



140

Technológia výroby polovodičových prvkov

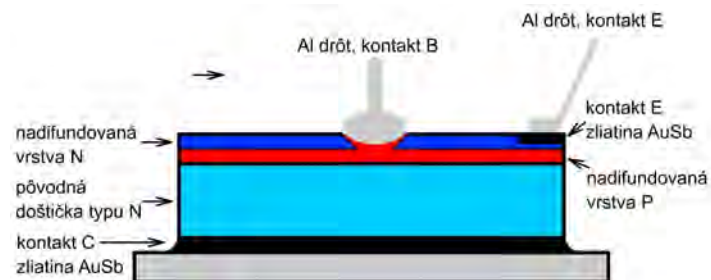
zliatinový bipolárny tranzistor



141

Technológia výroby polovodičových prvkov

tranzistor vyrobený dvojistou difúziou



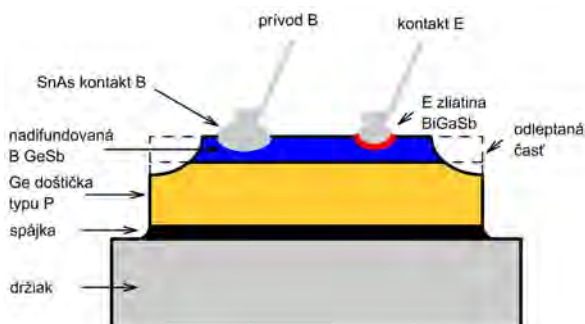
142

Technológia výroby polovodičových prvkov

difúzne zliatinový tranzistor

priechod BE – vytvorený zliatinovou technológiou

priechod BC – vytvorený difúznou technológiou



143

Technológia výroby polovodičových prvkov

Zliatinové tranzistory

Výhody: veľká emisná účinnosť emitora, malé odpory kolektorovej a emitorevej oblasti, možnosť dosiahnutia vysokých prúdových hustôt.

Nevýhody: veľké kapacity priedochov, veľké elektrické pole v oblasti BC – malé prierazné napätie, nerovinné PN priedochy.

Difundované tranzistory

Výhody: možnosť dosiahnuť veľkoplošné rovinné PN priedochy, tenká báza – vysoké medzné frekvencie, veľké prierazné napätia PN priedochov, malé kapacity, malý zvyškový kolektorový prúd.

Nevýhody: veľké sériové odpory kolektorovej a emitorevej oblasti, malá emisná účinnosť emitora.

Zliatinovo difúzne tranzistory

Výhody: veľká emisná účinnosť emitora, malé odpory emitorevej oblasti, vysoké prúdové hustoty emitora, veľké prierazné napätia priedochu CB, malá kapacita priedochu CB, malý zvyškový kolektorový prúd.

Nevýhody: nerovinný priedoch BE, veľký sériový odpor kolektorovej oblasti.

Epitaxne difúzne a zliatinové tranzistory

Výhody: malé pracovné napätia, malé hromadenia menšinových nosičov, menšie skreslenia, saturačné napätia na kolektore menej závislé od teploty.

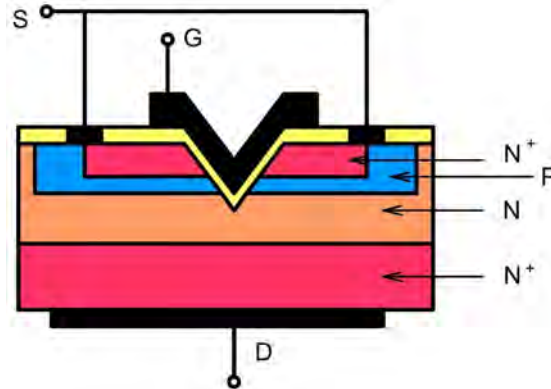
Planárne epitaxné tranzistory

Výhody: malý zvyškový kolektorový prúd, veľký prúdový zosilňovací činiteľ pri malých prúdoch kolektora, malý šum, menšie tolerancie v napájacích napätiach a menšie tolerancie v kapacite kolektora, väčšia stabilita a spoľahlivosť.

144

Technológia výroby polovodičových prvkov

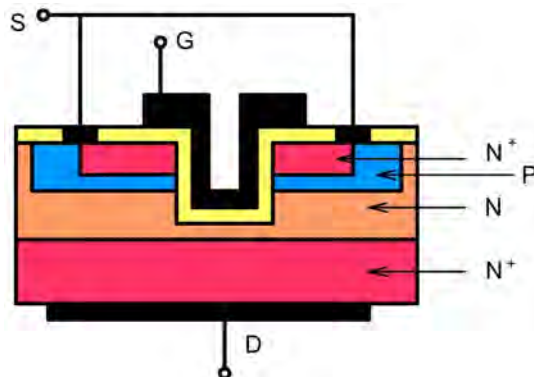
V-MOS



145

Technológia výroby polovodičových prvkov

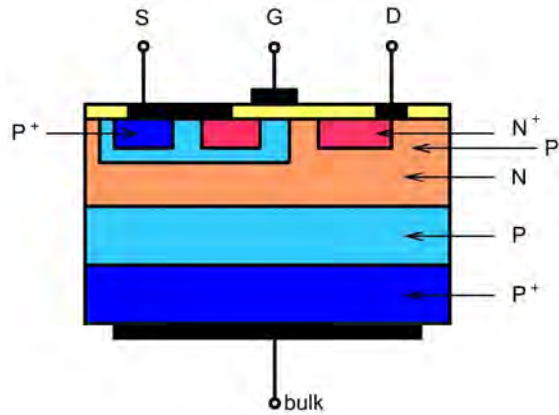
U-MOS



146

Technológia výroby polovodičových prvkov

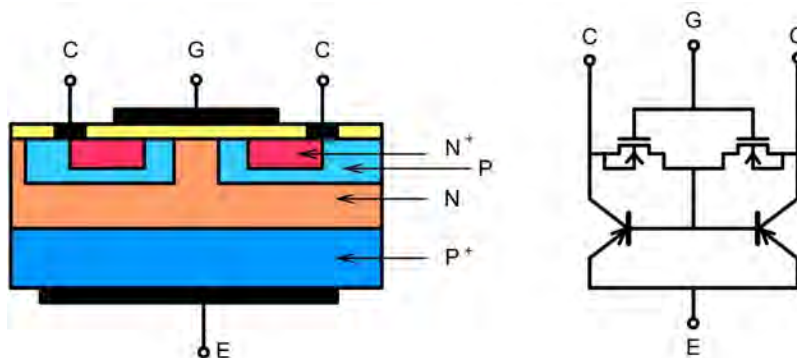
tranzistor s laterálnou vrstvou



147

Technológia výroby polovodičových prvkov

IGBT – insulated gate field effect transistor, bipolárny tranzistor s izolovaným hradlom



148

10. Integrované obvody

10.1.	Základné charakteristiky	150
10.2.	Odpor	153
10.3.	Kondenzátor	154
10.4.	Tranzistor	155
10.5.	Dióda	158
10.6.	Stupeň integrácie	160

149

10.1. Základné charakteristiky

pasívne súčiastky

- odpor
- kondenzátor

aktívne súčiastky

- dióda
- tranzistor
- súčiastky s viac PN priedochmi

150

10.1. Základné charakteristiky

Rozdelenie integrovaných obvodov:

1. podľa použitej technológie výroby integrované obvody delíme na:

- a) **monolitické** – vyrábajú sa na jednom monokryštály kremíka. Prvky využívajú princíp a vlastnosti PN priechodu – vytvorenie tranzistorov, diód, kapacít, odporov a ďalších súčiastok a izolácií. Vzájomné prepojenia jednotlivých prvkov sú vytvorené naparenými hliníkovými spojmami.
- b) **vrstvové** – vyrábajú sa na izolačnej podložke zo skla alebo keramiky nanášaním vodivých, polovodivých, odporových a izolačných vrstiev, ktorými sú realizované jednotlivé prvky a prepojenia.
- c) **hybridné** – využívajú obe predchádzajúce technológie. Vrstvovou technológiou sa na izolačnej platničke vytvoria pasívne prvky a spoje. Do obvodu sa vsadia aktívne prvky alebo celé štruktúry vytvorené monolitickou technológiou.

151

10.1. Základné charakteristiky

vzťah súčiastka - obvod

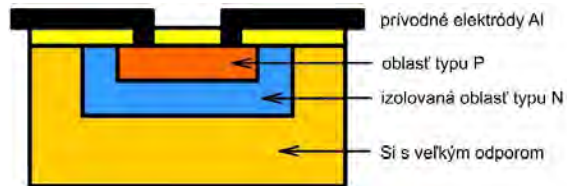
Rozdelenie integrovaných obvodov:

1. podľa druhu signálu:

- a) analógové
- b) digitálne
- c) D/A, A/D prevodníky

152

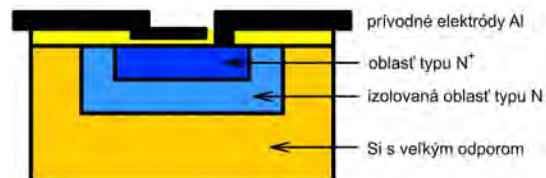
10.2. Odpor



oblasť typu P – odpor 50-200 Ω ,
oblasť typu N – odpor 2-3 Ω .
Pri zmenšení hrúbky do 3 k Ω .
Presnosť odporov $\pm 10\%$
teplotný súčiniteľ kladný 0,5-2 K⁻¹
PN priechod – vyššie hodnoty odporu
pri závernej polarizácii

153

10.2. Kondenzátor

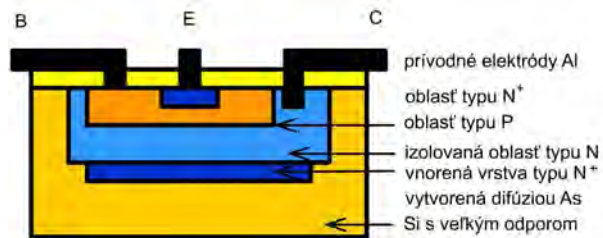


PN priechod v závernom smere,
parazitná kapacita 14×10^{-4} pF/ μm^2 ,
kapacita závisí na napätí,
sériový odpor 10-50 Ω ,
maximálna kapacita 400 pF,
tolerancia kapacity 20%

S izolačným dielektrikom
SiO₂ hrúbky 70 μm kapacita $3-5 \times 10^{-4}$ pF/ μm^2
sériový odpor 2-3 Ω ,

154

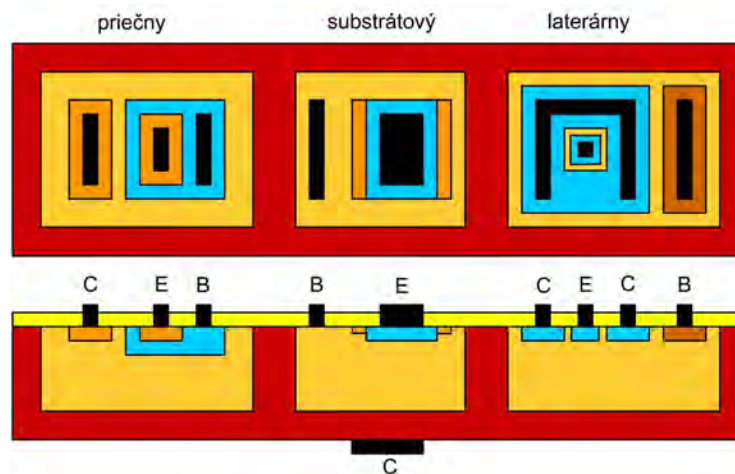
10.4. Tranzistor



kolektorový odpor 10-100 Ω ,
 parazitná kapacita s podložkou 2-5 pF,
 h_{21e} tolerancia $\pm 50\%$,
 výkonová úroveň 100 mW

155

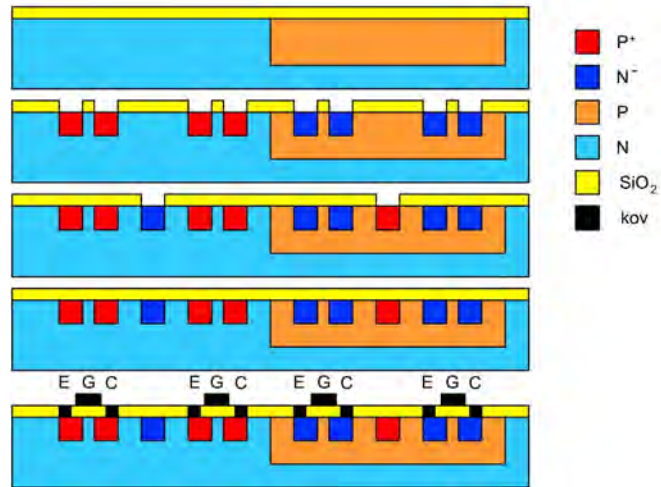
10.4. Tranzistor



156

10.4. Tranzistor

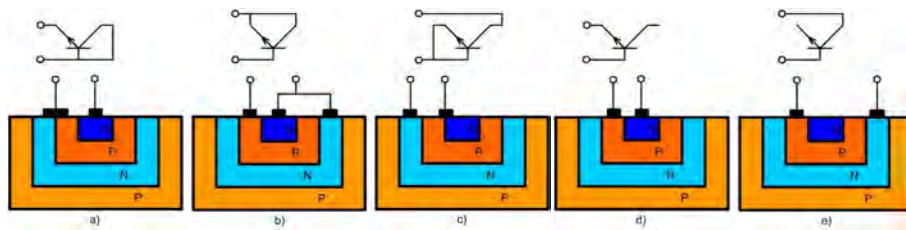
CMOS



157

10.5. Dióda

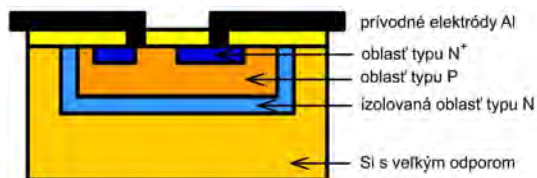
správne sú a) a c)



158

10.5. Dióda

dióda



prieťah BE – záverné napätie 3-5 V,
stabilizačná dióda, rýchla spínacia dióda
prieťah BC – záverné napätie 20-30 V,
usmerňovacia dióda

159

10.6. Integrované obvody

Stupeň integrácie

Stupeň	Integrácia – miniaturizácia	Počet hradiel	Počet súčiastok	Rozmery doštičky (mm)
1	SSI – integrácia malého stupňa	10 - 15	30 - 50	1 x 1
2	MSI – integrácia stredného stupňa	25 - 100	75 - 300	1,5 x 2
3	LSI – integrácia veľkého stupňa	> 100	500 - 1 500	2,5 x 3
4	VLSI – integrácia veľmi vysokého stupňa	> 1000	> 2 500	4 x 4
5	ULSI – integrácia ultra vysokého stupňa	> 10000	> 100 000	> 10 x 10

Parameter	TTL	ECL	I ² L	PMOS	NMOS	CMOS
plocha hradla (mm ²)	12,5 - 37,5	12,5 - 37,5	2,5 - 3,7	5 - 7	3,7 - 5	6,25 - 18,7
oneskorenie hradla (ns)	3 - 10	0,5 - 2	5	100	40 - 100	15 - 20
príkion hradla (mW)	1 - 3	5 - 15	0,2	2 - 3	0,2-0,5	0,001
príkion x rýchlosť (pJ)	10	10	1	200	10 - 50	3
logický zisk	10	25	8	5	5	100

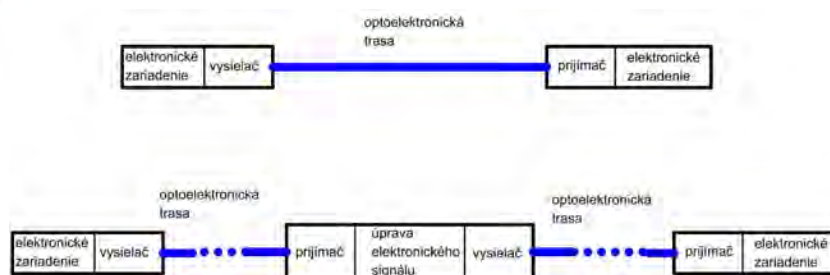
160

11. Optoelektronika

11.1.	Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku	163
11.2.	Prijímače	169
11.3.	Zdroje	177
11.4.	Nábojovo viazané štruktúry	180

161

11.1. Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku



stredné vlny - rozhlasové vysielanie, pásmo 525 kHz – 1.7 MHz, šírka kanála 9 kHz, cca 130 kanálov
veľmi krátke vlny – rozhlasové vysielanie, pásmo 87,5 – 108 MHz, šírka kanála 100 kHz, cca 205 kanálov
svetlo – prenos dát – pásmo $3,8 \times 10^{14}$ Hz – $7,5 \times 10^{14}$ Hz, šírka kanála 100 kHz, $3,7 \times 10^9$ VKV kanálov

162

11.1. Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku

Fotoelektrický jav (vnútorný)

Einsteinov vzťah

$$h\nu = W_g + \frac{1}{2}mv^2$$

h – Planckova konštanta

ν – frekvencia dopadajúceho žiarenia

W_g – šírka zakázaného pásma

m – hmotnosť elektrónu

v – rýchlosť elektrónu

absorbpcia

$J = J_0 \exp(-Kx)$ - intenzita dopadajúceho žiarenia

$$K = \frac{1}{J} \frac{dJ}{dx} \text{ - absorpčný koeficient}$$

n_1 – hustota stavov v obsadenom pásme

n_2 – hustota stavov vo voľnom pásme

A - konštanta

P_{12} – pravdepodobnosť preskoku

x – hrúbka polovodiča

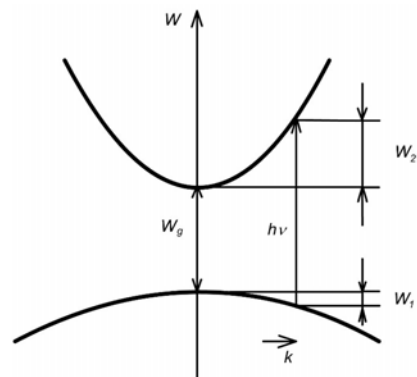
$$K = AP_{12}n_1n_2$$

163

11.1. Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku

pre polovodiče, ktoré majú minimum vo vodivostnom pásme pre $k = 0$

$$h\nu = W_g + W_1 + W_2$$



164

11.1. Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku

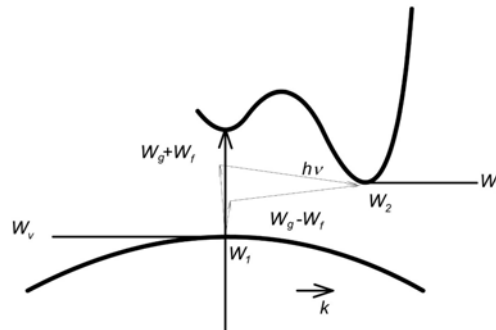
pre polovodiče (Si, Ge), ktoré majú minimum vo vodivostnom pásme pre $k \neq 0$

$$h\nu = W_g + W_2 + W_1 + W_f$$

– emisia fonónu

$$h\nu = W_g + W_2 + W_1 - W_f$$

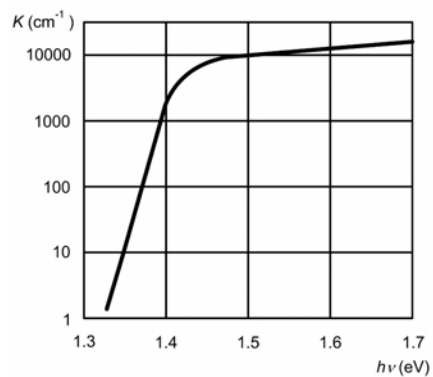
– emisia fonónu



165

11.1. Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku

absorbčná hrana



166

11.1. Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku

vnútorný fotoelektrický jav

$$\Delta I = A\Delta\sigma|E| - \text{fotoprúd homogénneho polovodiča}$$

$$\Delta\sigma = e(\mu_n + \mu_p)\tau\eta KQ - \text{prírastok vodivosti}$$

A – prierez polovodiča

$|E|$ – absolútna hodnota intenzity elektrického poľa v polovodiči

e – náboj elektrónu

μ_n – pohyblivosť elektrónov

μ_p – pohyblivosť dier

KQ – tok absorbovaných fotónov

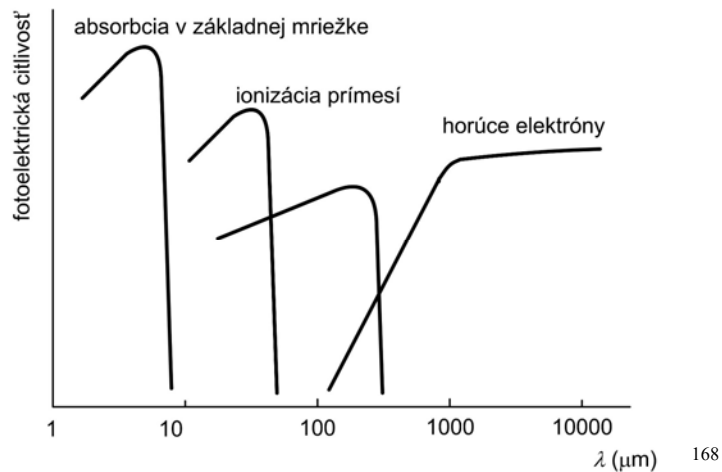
η – kvantová účinnosť

τ – doba života párov elektrón-diera

167

11.1. Základné vlastnosti polovodičov pre optoelektroniku

mechanizmy fotoelektrickej vodivosti



11.2. Prijímače

Fotoelektrické odpory

- monokryštalická doštička alebo sintrovaná doštička vo vhodnom puzdre, s elektródami, hermeticky uzavretá s okienkom
- vodivosť sa mení zmenou vlastnej alebo prímiesovej vodivosti prostredníctvom zmeny koncentrácie voľných nosičov alebo ich pohyblivosťou
- najčastejšie je to polovodič typu N

$$\Delta\sigma = e\mu_n\Delta n + en\Delta\mu_n$$

vo väčšine prípadov je rozhodujúca zmena počtu voľných nosičov

$$\Delta I = A\Delta\sigma|E|$$

$$\Delta\sigma = e(\mu_n + \mu_p)\tau\eta KQ$$

A – prierez polovodiča

$|E|$ – absolútna hodnota intenzity elektrického poľa v polovodiči

e – náboj elektrónu

μ_n – pohyblivosť elektrónov

μ_p – pohyblivosť dier

KQ – tok absorbovaných fotónov

η – kvantová účinnosť

τ – doba života párov elektrón-diera

n – koncentrácia elektrónov

Δn – nárast koncentrácie elektrónov

$\Delta\mu_n$ – nárast pohyblivosti elektrónov

169

11.2. Prijímače

fotoodpor

$$\Delta\sigma = e\mu_n\Delta n + en\Delta\mu_n$$

$$\Delta n = g\tau_n$$

g – generácia elektrónov

τ_n – stredná doba života nosičov vzбудených svetlom

$$\Delta\sigma = eg\mu_n\tau_n$$

$\tau\mu$ – citlivosť fotoodporu

$$G = \tau\mu \frac{U}{L^2} - \text{fotoelektrický zisk}$$

U – napätie na elektródach

L – vzdialenosť medzi elektródami

170

11.2. Prijímače

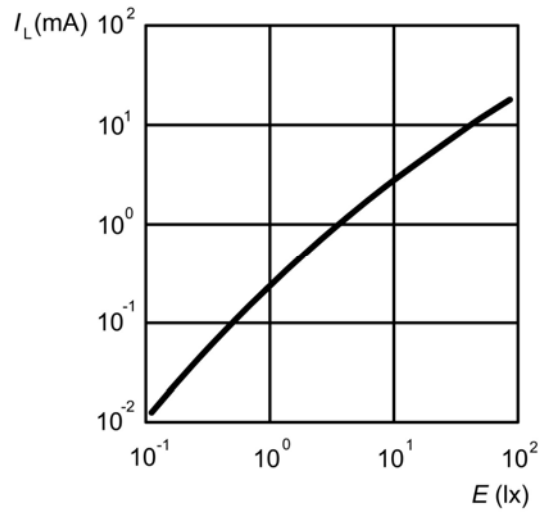
$$I_L = I - I_D = BE^x$$

I_L – prúd za svetla

I_L – prúd za tmy

E – osvetlenie

x – exponent ≤ 1



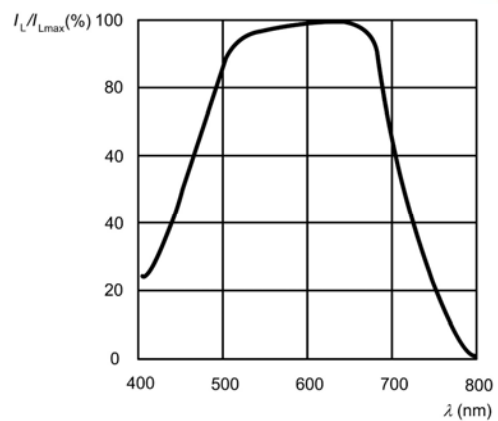
171

11.2. Prijímače

$$\sigma = \frac{I_L}{E} \text{ - citlivosť}$$

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta I_L}{E} \text{ - dynamická citlivosť}$$

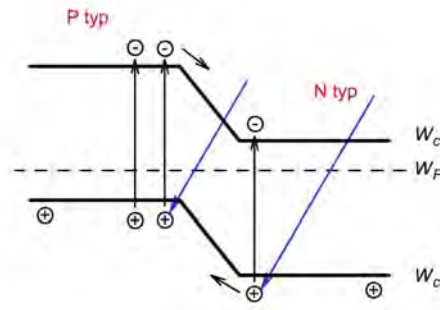
$$\sigma_\lambda \sigma = \frac{I_L}{E_\lambda} \text{ - spektrálna citlivosť}$$



172

11.2. Prijímače

Fotodióda



173

11.2. Prijímače

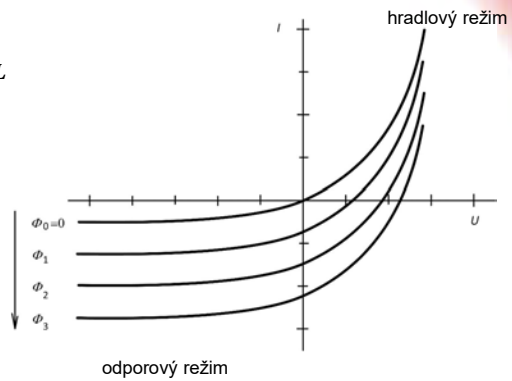
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] - I_L$$

$$I = -(I_D + I_L)$$

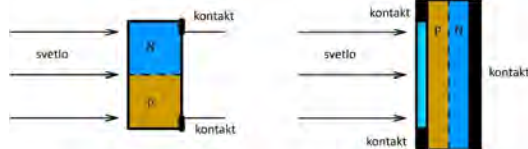
I_0 – zvyškový prúd fotodiódy

I_D – prúd fotodiódy za tmy

I_L – prúd fotodiódy za svetla



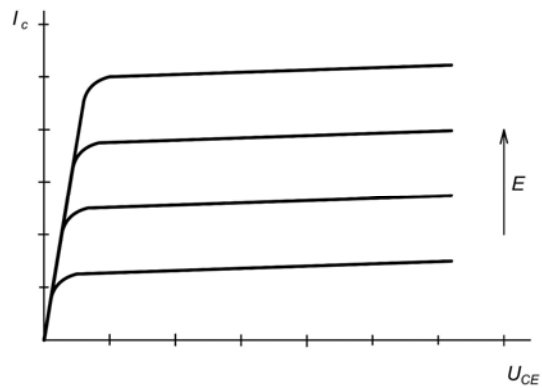
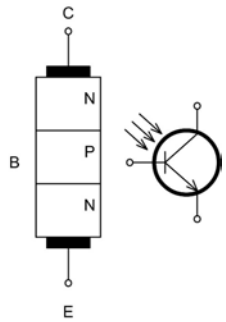
konštrukcia fotodiódy



174

11.2. Prijímače

fototranzistor



175

11.3. Zdroje

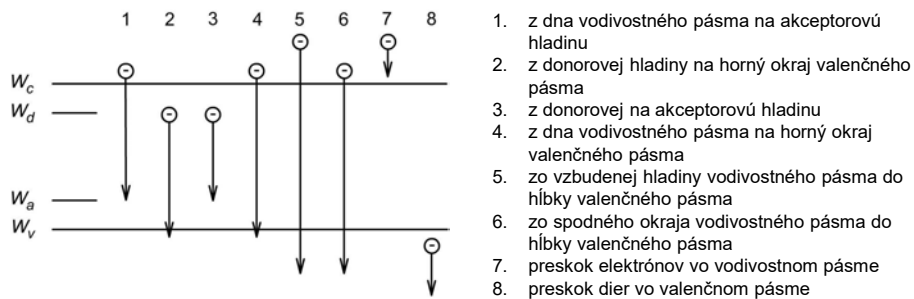
Luminiscencia

1. Fotoluminiscencia
2. Katódoluminiscencia
3. Rádioluminiscencia
4. Elektroluminiscencia
5. Chemoluminiscencia

176

11.3. Zdroje

Elektroluminiscencia v polovodičoch

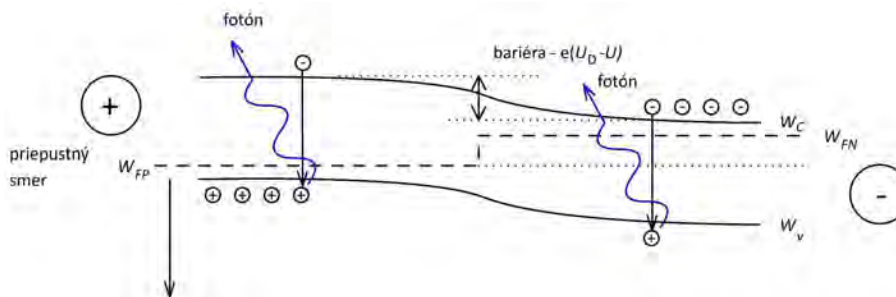


177

11.3. Zdroje

LED – light emitting diode

spontánna emisia žiarenia
svetlo nie je monochromatické, len sa takým javí
v jednom puzdre viac diód, skladanie svetla - biele svetlo

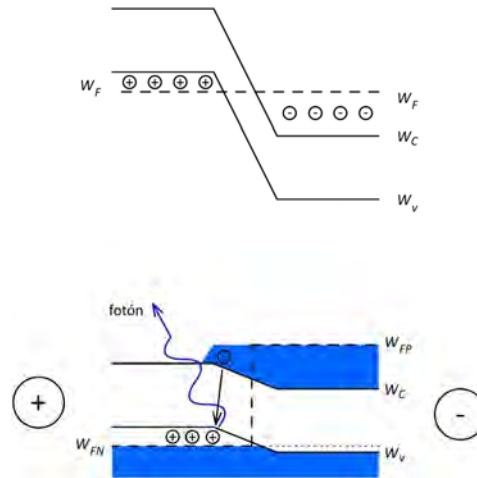


178

11.3. Zdroje

LASER – light amplification by stimulated emission of radiation

stimulovaná emisia žiarenia
degenerované polovodiče
populačná inverzia
záporná teplota



179

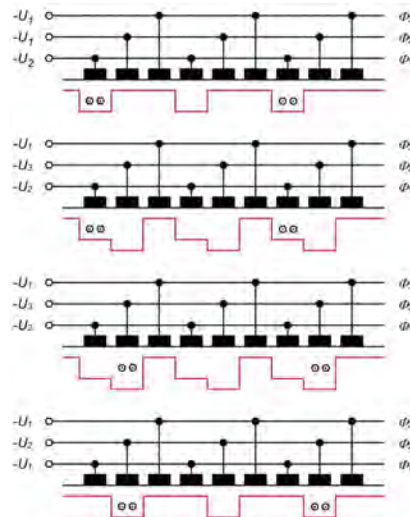
11.4. Nábojovo viazané štruktúry

CCD – charge coupled devices

Φ_1, Φ_2, Φ_3 – hodiny

3 – fázový režim

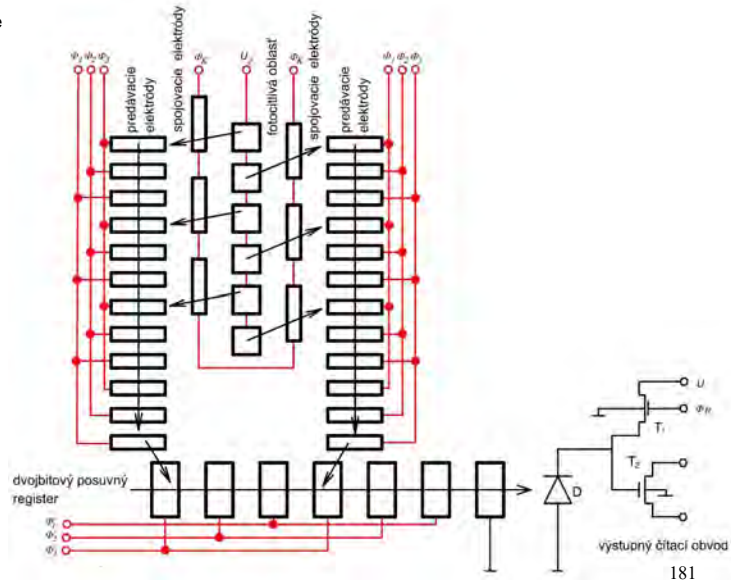
$-U_3 < -U_2 < -U_1 = 0$



180

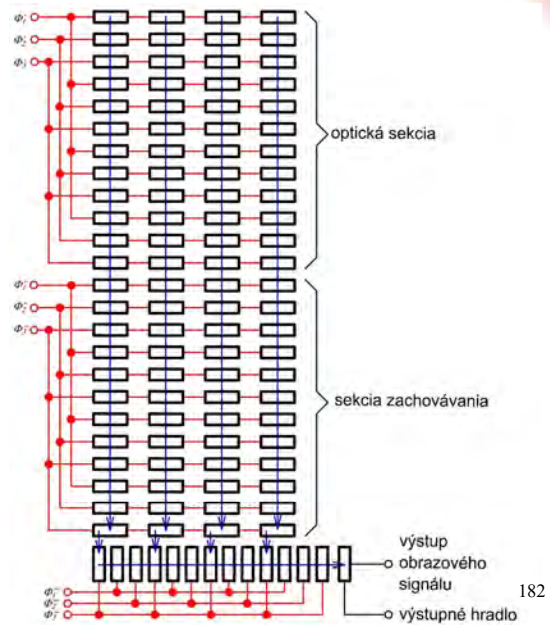
11.4. Nábojovo viazané štruktúry

časové rozdelenie



11.4. Nábojovo viazané štruktúry

priestorové rozdelenie



výstup
obrazového
signálu
výstupné hradlo

182

12. Literatúra

1. J. Doleček: Moderní učebnice elektroniky, BEN, Praha 2005
2. H. Frank, V.Šnejdar: Principy a vlastnosti polovodičových součástek. SNTL Praha 1976.
3. P. Mihálka: Polovodičové súčiastky, Alfa Bratislava 1976.
4. P. Mihálka: Optoelektronika, Alfa Bratislava 1981
5. I. Burger, L.Hudec: Elektronické prvky, Alfa Bratislava 1989.
6. J. R. Nosov, V. A. Šilin: Polovodičové nábojově vázané struktury, SNTL Praha 1982
7. D. J. Roulston, An introduction to the physics of semiconductor devices, Oxford University Press, 1999
8. R. Dalven: Introduction to Applied Solid State Physics, Plenum publishing corporation New York, 1990
9. H. Frank: Fyzika a technika polovodičů, SNTL Praha, 1990
10. J. Voves, J. Kodeš: Elektronické součástky nové generace, Grada, Praha, 1995

183

Polovodičové prvky

Vysokoškolský učebný text

Autor: prof. RNDr. Peter Kollár, DrSc.

Vydavateľ: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach
Vydavateľstvo ŠafárikPress

Rok vydania: 2023

Počet strán: 93

Rozsah: 3 AH

Vydanie: prvé

ISBN 978-80-574-0187-2 (e-publikácia)

