

ЕЛЕКТРОНИКА

Вовед

Предмет на електрониката

Дефиниција:

"The science and technology of the conduction of electricity in a vacuum, a gas, or a semiconductor, and devices based thereon".

„Наука и технологија за проведувањето електрицитет во вакуум, гасови или полупроводници и елементите базирани на тоа“

Полнеж на електронот:

$$q = -q_e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Маса на електронот:

$$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Полнеж и струја

Единица за количество полнеж е Кулон (C):

$$1\text{C} = 6.24 \times 10^{18} q_e,$$

шест милијарди милијарди електрони.

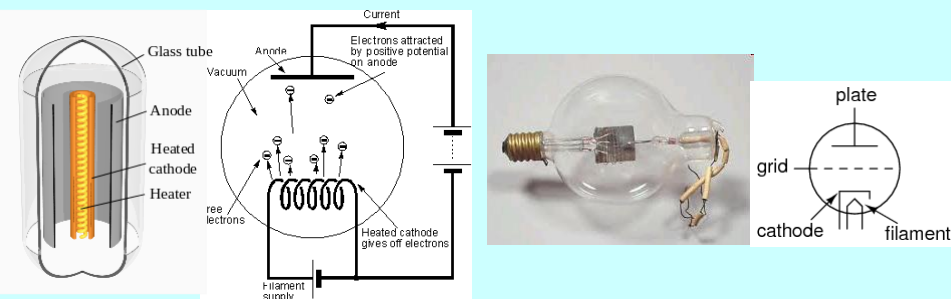
Единица за јачина на електрична струја:

$$1\text{A} = 1\text{C/s}$$

(сите жители на Земјата со по еден куфер полн со милијарда електрони да поминат низ некој напречен пресек (врата) во една секунда ☺)

Почетоци на електрониката

Електронски цевки:



Диода, 1904, Џон Амброс Флеминг Триода (аудион), 1906, Ли Де Форест

... и денес



Аудио засилувач денес (\$250000)

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

5

Потенцијална бариера (инф.)

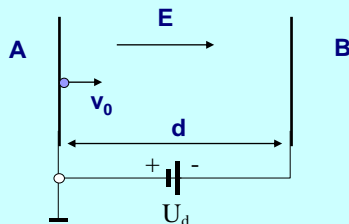
Како функционираат електронските цевки ?

По принципот на **ПОТЕНЦИЈАЛНА БАРИЕРА**

Задача:

Електрон е исфрлен од плочата А со почетна брзина $v_0 = 5.93 \times 10^6$ m/s во правец и насока кон плочата В. Што ќе се случи ако полето меѓу плочите е $E = 1000$ V/m насочено од А кон В? Плочите се на растојание $d = 20$ cm.

Што ќе се случи ако полето е обратно (В е на повисок потенцијал од А)?



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

6

Потенцијална бариера (инф.)

Решение:

На електронот делува електрична сила **спротивно од насоката на полето** и тој успорува.

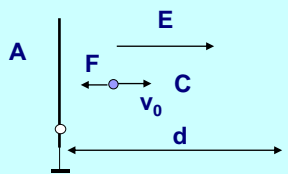
Почетна (кинетичка) енергија: $E = E_k = mv_0^2/2 = 9,1 \cdot 10^{-31} \times (5,93 \cdot 10^6)^2/2 = 160 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Силата врз електронот: $F = Eq_e = 1000 \text{ V/m} \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 1600 \cdot 10^{-19} \text{ N}$

на секој сантиметар му одзема енергија: $E_{1\text{cm}} = 0,01 \text{ m} \times 1600 \cdot 10^{-19} \text{ N} = 16 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Затоа електронот **по 10cm ќе запре** и под дејство на силата ќе тргне назад.

Ако плочата А има потенцијал 0V, тогаш плочата В ќе има потенцијал $V_{BA} = -E \cdot d = -1000 \text{ V/m} \times 0,2 \text{ m} = -200 \text{ V}$, а точката на „запирање“ (C) $V_{CA} = -1000 \times 0,1 = -100 \text{ V}$.



Ако полето беше насочено обратно, тогаш електронот само би забрзал кон плочата В и би удрил во неа.

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

7

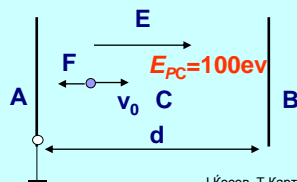
Потенцијална бариера 2 (инф.)

Одговор: (Што ќе се случи ако ...?)

Електронот како да се одбил од некоја бариера – **ПОТЕНЦИЈАЛНА БАРИЕРА**.

Енергијата што електронот ја добива (губи) при изминување потенцијална разлика од 1V се означува како 1eV.

$$1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$



ЗАКОН ЗА ОДРЖУВАЊЕ НА ЕНЕРГИЈАТА:

$$E_{KA} + E_{PA} = E_{KC} + E_{PC}$$

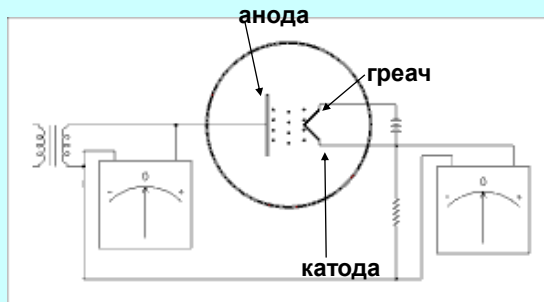
$$mv_0^2/2 + 0 = 0 + (-q_e) \cdot V_{CA}$$

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

8

Примена на електронските цевки (информативно)

- Вакуумската диода се користи за **насочување** наизменична струја



http://www.angelfire.com/electronic/funwithtubes/Basics_03_Diodes.html

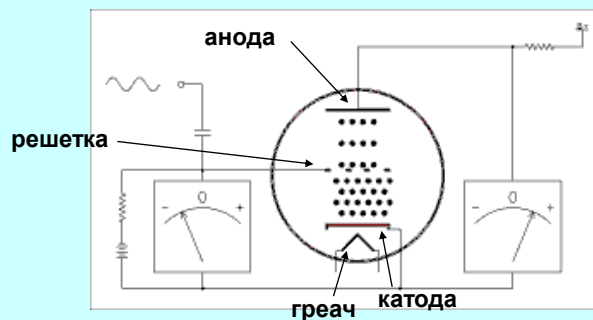
Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

9

Примена на електронските цевки 2 (информативно)

-Вакуумската триода се користи за **засилување**

(управување со голема струја и напон меѓу анодата и катодата со помош на мал напон и многу мала струја на решетката)



http://www.angelfire.com/electronic/funwithtubes/Basics_04_Triodes.html

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

10

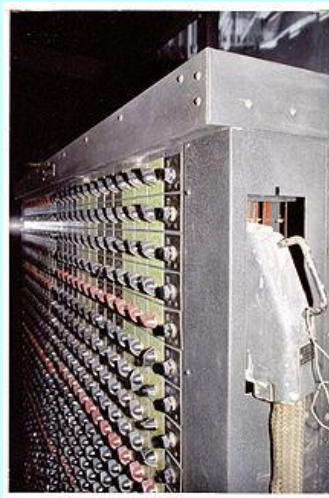
Примена на електронските цевки 3 (информативно)

компјутерот ENIAC:
(1946 год.)

- 17 468 цевки
- 70 000 отпорници
- 10 000 кондензатори
- 5000000 спојни точки

30 тони

$0,9 \times 2,4 \times 30\text{m.}$



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

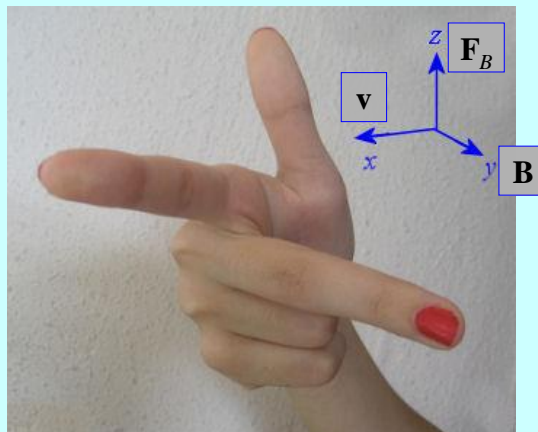
Електрон во магнетно поле (инф.)

Сила врз полнеж што се движи со брзина v :

$$\vec{F}_B = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Силата е нормална на v и на B (правило на десната рака).

Брзината не го менува интензитетот ами само правецот (карактеристика на кружно движење).



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

12

Електрон во магнетно поле 2 (инф.)

-ЕЛЕКТРОН ВО МАГНЕТНО ПОЛЕ

Брзината не го менува интензитетот ами само правецот (карактеристика на кружно движење).

Светлиот лак е јонизиран разреден гас по судирот со електрони што се движат во магнетно поле.



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

13

Електрон во комбинирано поле (инф.)

- ЕЛЕКТРОН ВО ЕЛЕКТРИЧНО И ВО МАГНЕТНО ПОЛЕ =
= МАГНЕТРОН

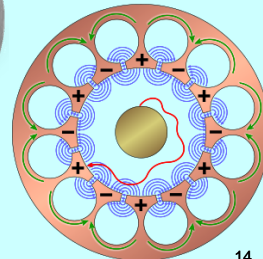
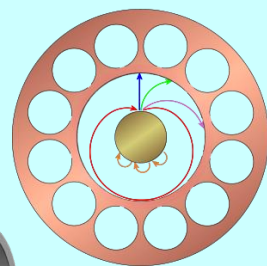


Примена:

– кај радары

<http://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Magnetron.en.html>

-микробранови печки



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

14

- Други примени на вакуумските електронски цевки:

- катоден осцилоскоп;
- електронски микроскоп;
- тлеалки (индикатори, фазомери)

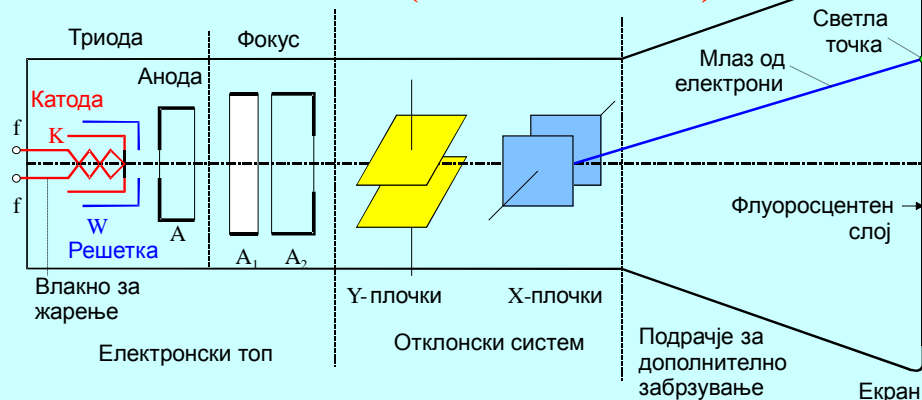
- Електронски цевки полнети со гас:

- Гајгер-милеров бројач;
- флуоросцентни светилки;
- ...

Катодна цевка (осцилоскоп) (инф.)

- Катодната цевка служи за исцртување на **временска зависност** на електричен сигнал (напон). Затоа се нарекува и **осцилограф**.
- Исцртувањето го прави електронски млаз врз фосфоросцентен материјал (екран).
- Млазот **хоризонтално** се отклонува електростатски со напон на вертикални плочки **пропорционален со време**
- Вертикално млазот се отклонува пропорционално со набљудуваниот напон

Катодна цевка (осцилоскоп)



- Отклонот на млазот е директно пропорционален со напонот на плочките: $d = S_E U$
- S_E – чувствителност на катодната цевка

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

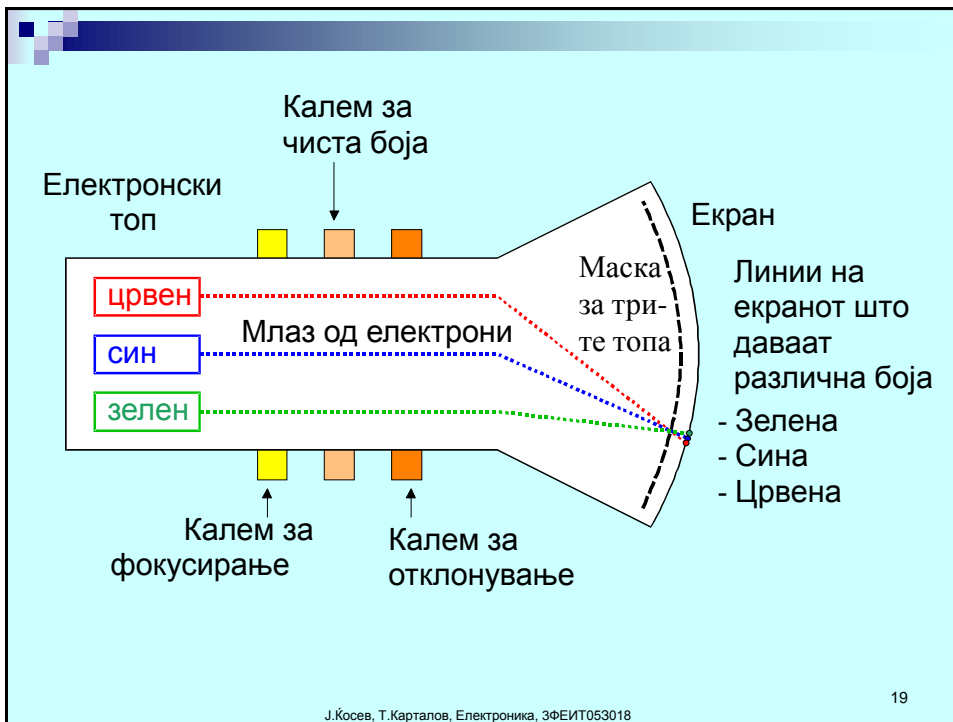
17

Катодна цевка за репродукција на слика во боја (CRT = Cathode Ray Tube)

- Екранот содржи вертикални линии од три флуоресцентни материјали: **црвен**, **зелен** и **син**. (RGB = Red Green Blue)
- Три топа истовремено ги бомбардираат (секој својата колона) и формираат светли точки со комбинации од трите основни бои.
- Окоото врши адитивно мешање на боите, а перзистенцијата прави низата од 50 полуслики да ни изгледа како подвижна слика.
- Ваквиот начин на прикажување слики денес **заминува во историјата**, а го заменува LCD и LED технологијата

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

18



ЕЛЕКТРОНИ ВО ЦВРСТО ТЕЛО

Електрони во цврсто тело (инф.)

- Цврстите материјали ги делиме на **аморфни** и **кристални**. Кристалните материјали имаат правилен геометриски распоред на атомите во вид на **решетка** (кристална решетка).
- Атомот е сочинет од јадро и **електрони**. Јадрото го чинат честици со позитивен полнеж **протони** и неутрални честици **неутрони**.

Боров модел на атомот (инф.)

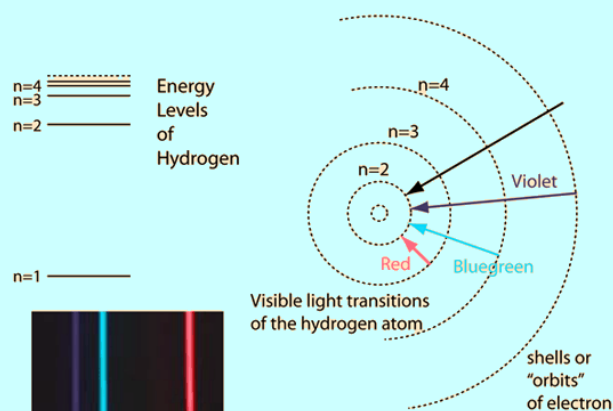
- Електроните се **негативно** наелектризирани **честици**. Тие кружат околу јадрото по строго одредени патеки.
- Атомот во целина е неутрален.
- Електроните во атомот можат да имаат само одредени **дискретни енергии**.

- Електронот може да премине од една на друга патека (од енергетско ниво E_a на ниво E_b), ако прими или оддаде енергија со фреквенција f :

$$f = \frac{E_a - E_b}{h} \text{ (Hz)}$$

- h е Планковата константа: $6.626 \times 10^{-34} \text{ (Js)}$

Квантизирани нивоа кај водородот



- Патеката на електронот околу атомот е кружница со радиус **r**.
- Според брановата природа патеката на електронот треба да е цел број пати брановата должина:

$$2\pi r = n\lambda = \frac{nh}{mv}$$

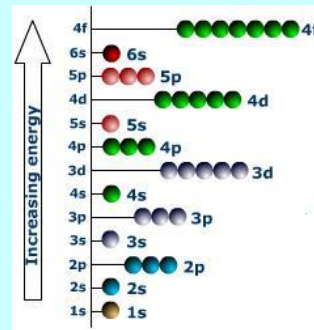
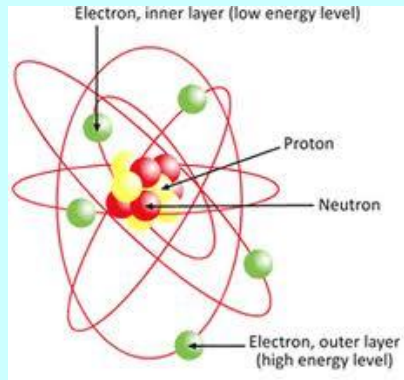
- **n** – т.н. основен квантен број (**n**=1, 2, 3,...).

- Можните енергии на електронот кај изолиран атом изнесуваат:

$$E = - 13.6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ (eV)}$$

- **Z** – број на протони во јадрото.
- Енергијата на електронот надвор од атомот се зема дека е со референтно ниво 0.

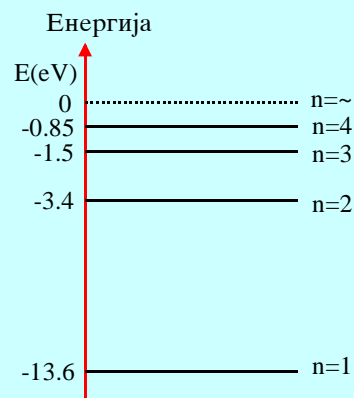
- За електричните особини на материјата клучни се електроните од највисокото енергетско ниво – **валентните електрони**.



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

27

Дијаграм на дискретните енергетски нивоа кај атомот на водородот



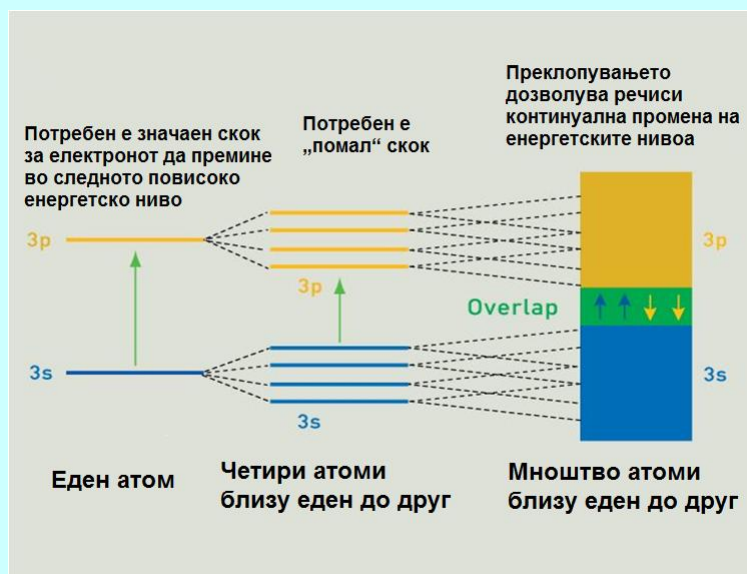
Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

28

- Во квантната механика состојбата на електронот е опишана со **квантни броеви**
 - = множество вредности кои даваат прифатливи решенија на Шредингеровата бранова равенка за водородниот атом (цели броеви и половинки)
- **Паулиев принцип на забрана:** Во еден квантен систем не постојат два електрона со идентични квантни броеви
 - = идентично ниво енергија
- Кристалната решетка претставува квантен систем со интеракција меѓу атомите
 - \Rightarrow доаѓа до раслојување на енергетските нивоа во **енергетски појаси**

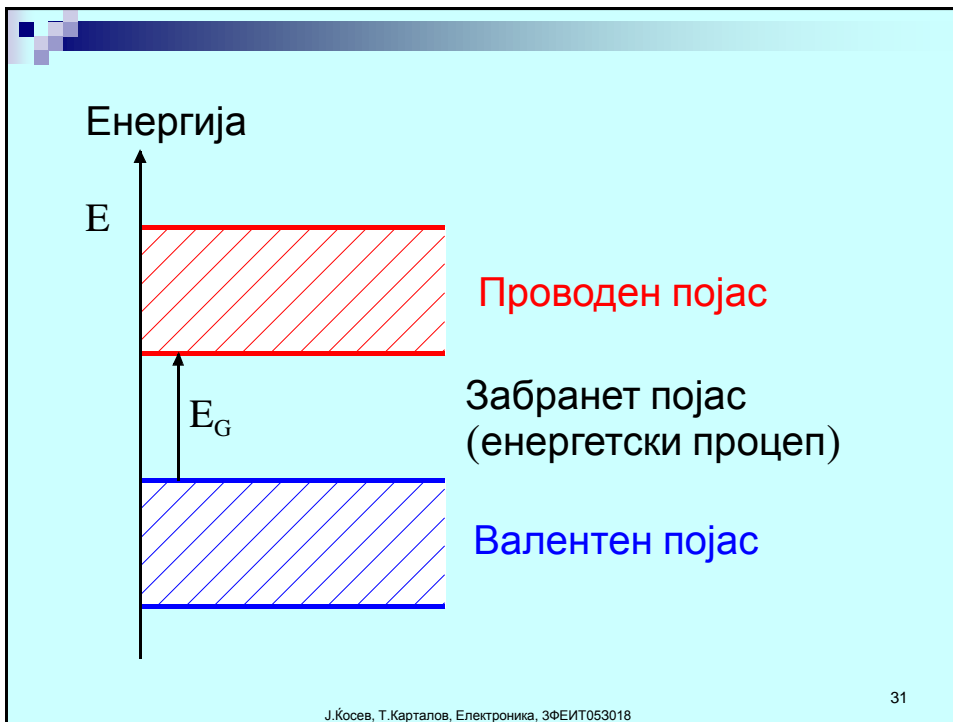
Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

29



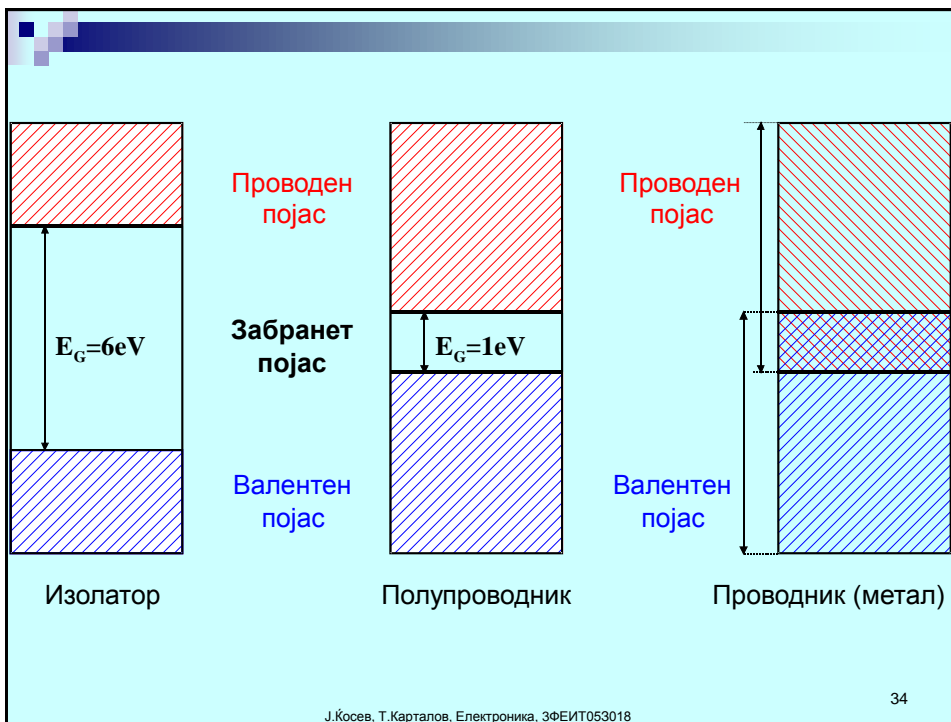
Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

30

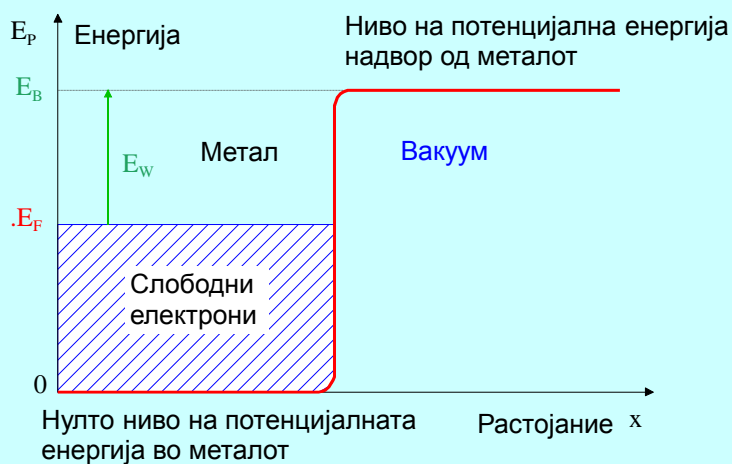


- **Валентен појас:** највисок енергетски појас што е комплетно пополнет со електрони на $T=0K$.
 - **Забранет појас:** појас со нивоа на кои електроните не можат да се најдат
 - со широчина E_G
 - **Проводен појас:** појас со нивоа над забранетиот појас кој на $0K$ е празен
 - **Слободни електрони.**
- Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018
- 32

- Според електричните својства материјалите се делат на изолатори, полупроводници и проводници
- Ова директно зависи од широчината на забранетиот појас (а таа зависи од растојанието меѓу атомите)
- **Металите** имаат над 10^{22} слободни електрони во 1cm^3 . Тие се добри проводници на ел. струја.
- **Изоляторите** имаат под 10^2 слободни електрони во 1cm^3 . Тие се лоши проводници на ел. струја.
- **Полупроводниците** имаат околу 10^8 - 10^{12} слободни електрони во 1cm^3 . Тие се слаби проводници.



Емисија на електрони од цврсто тело



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

35

- E_B – енергетска бариера што ги задржува слободните електрони во металот
- E_W – работна функција на металот,
 $E_W = 2$ до 5 eV .

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

36

Емисија на електрони од металите

Термојонска емисија

Емисија на електрони со загревање на металот (жарење) – пр. **катодата** кај електронските цевки.

Емисија со електрично поле

Емисија на електрони поради многу силно ел. поле при површината на металот ($>1\text{GV/m}$) - пр. извор на електрони кај **електронските микроскопи**

Секундарна емисија

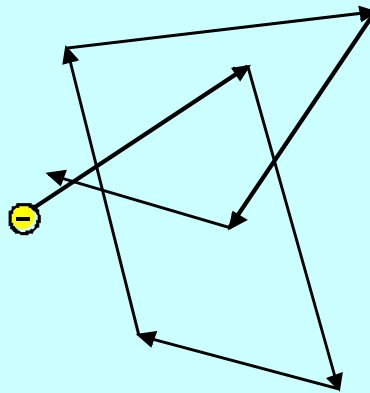
Емисија поради бомбардирање на површината од металот со електрони или јони – на пример **фотомултипликатор**

Фотоемисија

Емисија предизвикана со зрачење врз површината на металот (бомбардирање со фотони) – пример: **светломер**

Подвижност на носителите и проводност на материјалот

Движење на електронот во кристалот:



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

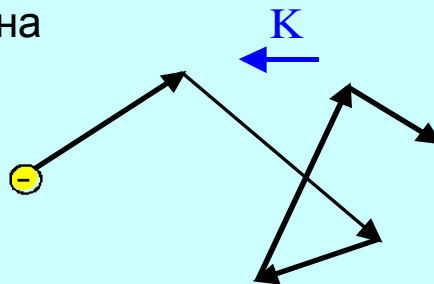
39

Влијание врз движењето на носителите од електрично поле K

- v_d - дрифтна брзина

$$\vec{v}_d = \mu \vec{K}$$

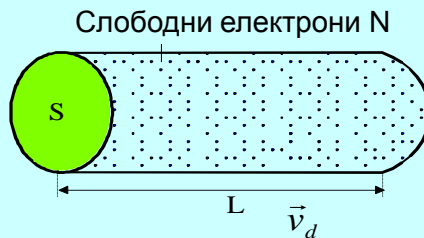
- μ – подвижност на електроните (cm^2/Vs)



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

40

Одредување на јачината на струјата низ проводник (отпорник) - дрифтна струја



Од дефиницијата за ел. струја:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{q \cdot N}{L/v_d} = \frac{q \cdot nSL}{L} v_d = qnv_d S \Rightarrow J = \frac{I}{S} = qnv_d$$

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

41

- $n = N/LS$ - концентрација на слободните електрони во cm^{-3}
- $J = qnv_d = qn\mu K$ – густина на електричната струја
- Од Омовиот закон и отпорност на отпорник:

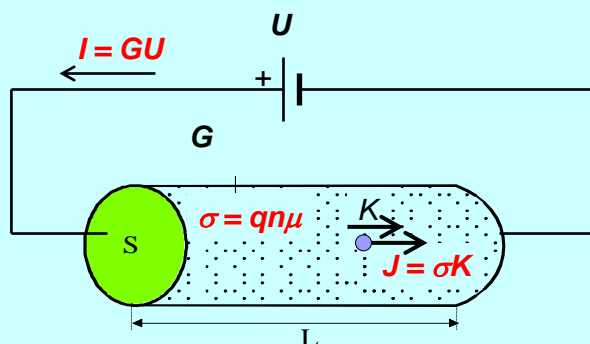
$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{\rho \frac{L}{S}} = \sigma S \frac{U}{L} \Rightarrow J = \frac{I}{S} = \sigma \frac{U}{L} = \sigma K$$

- $\sigma = qn\mu$
- специфична проводливост на материјалот во S/cm .

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

42

Дрифтна струја (Омов закон во диференцијална форма)



- $\rho = 1/\sigma$ - специфична отпорност на материјалот во Ωcm
- **Џулова** топлина

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

43

ПОЛУПРОВОДНИЦИ

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

44

Видови полупроводници

■ Елементарни

□ Ge, Si

■ Комбинирани

□ GaAs, SiC,

□ AlGaAS

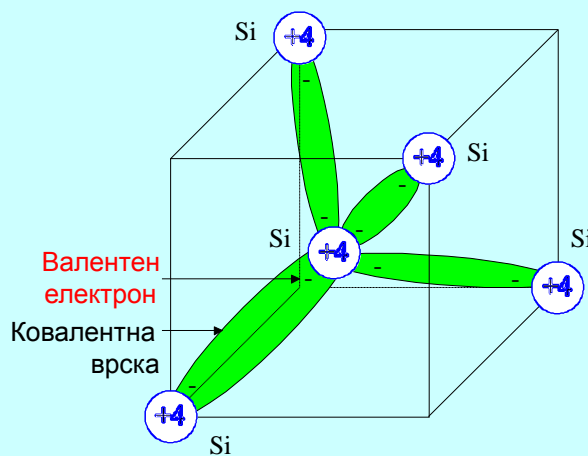
		IIIA	IVA	VA	VIA	
	5	B Boro	C Carbonio	N Azoto	O Ossigeno	
	13	Al Alluminio	Si Silicio	P Fosforo	S Zolfo	
	30	Zn Zinco	Ga Gallio	Ge Germanio	As Arsenico	Se Selenio
	48	Cd Cadmio	In Indio	Sn Stagno	Sb Antimonio	Te Tellurio
	80	Hg Mercurio	Ti Titanio	Pb Piombo	Bi Bismuto	Po Polonio

 Conduttori	$\rho < 10^{-5} \Omega m$	(rame: $3 \cdot 10^{-8} \Omega m$)
 Semiconduttori	$10^{-5} < \rho < 10^3 \Omega m$	(silicio: $2300 \Omega m$)
 Isolanti	$\rho > 10^3 \Omega m$	(diamante: $10^{14} \Omega m$)

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

45

Чисти полупроводници (беспримесни)



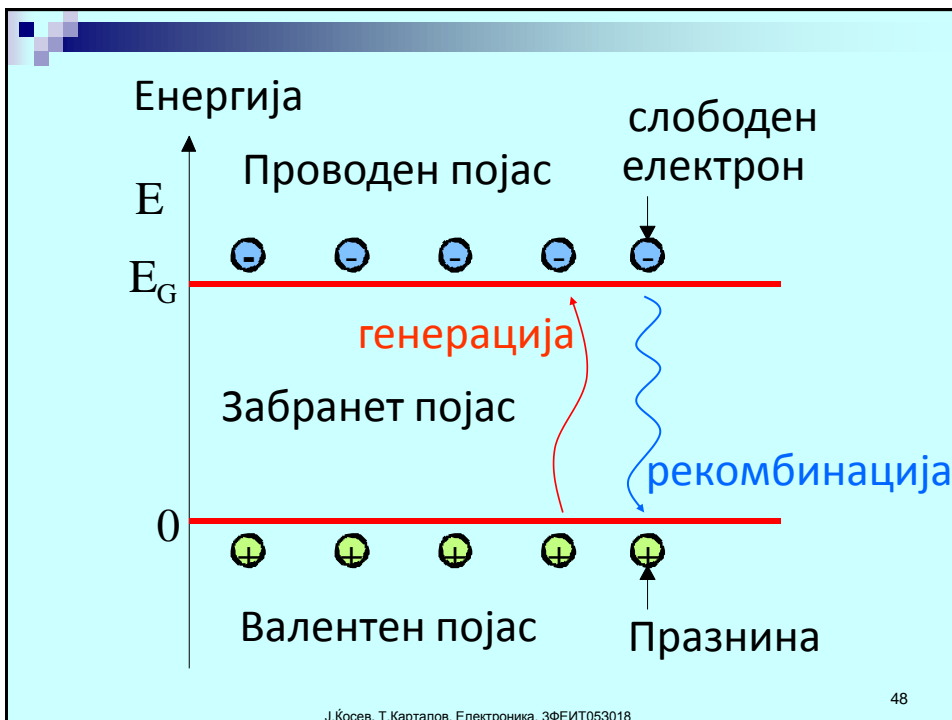
Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

46

Својства	Si
Атомски број	14
Атомска тежина	28,1
Густина (gr/cm ⁻³)	2,33
ϵ (релативна)	11,7
Атоми (cm ⁻³)	$5 \cdot 10^{22}$
E_G , 300 K, (eV)	1,12
n_i , (300 K), (cm ⁻³)	$1.5 \cdot 10^{10}$
μ_p , (cm ² /Vs), (300K)	500
μ_n , (cm ² /Vs), (300K)	1450
D_p , (cm ² /s)	13
D_n , (cm ² /s)	37,5
ρ , 300 K, (Ω cm)	230.000

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

47



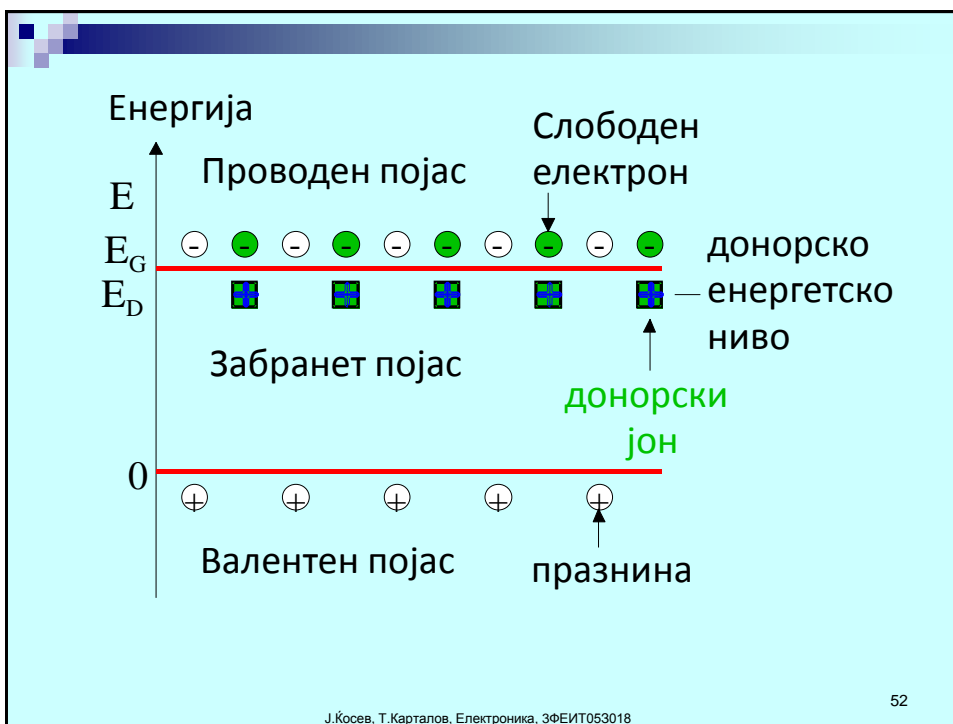
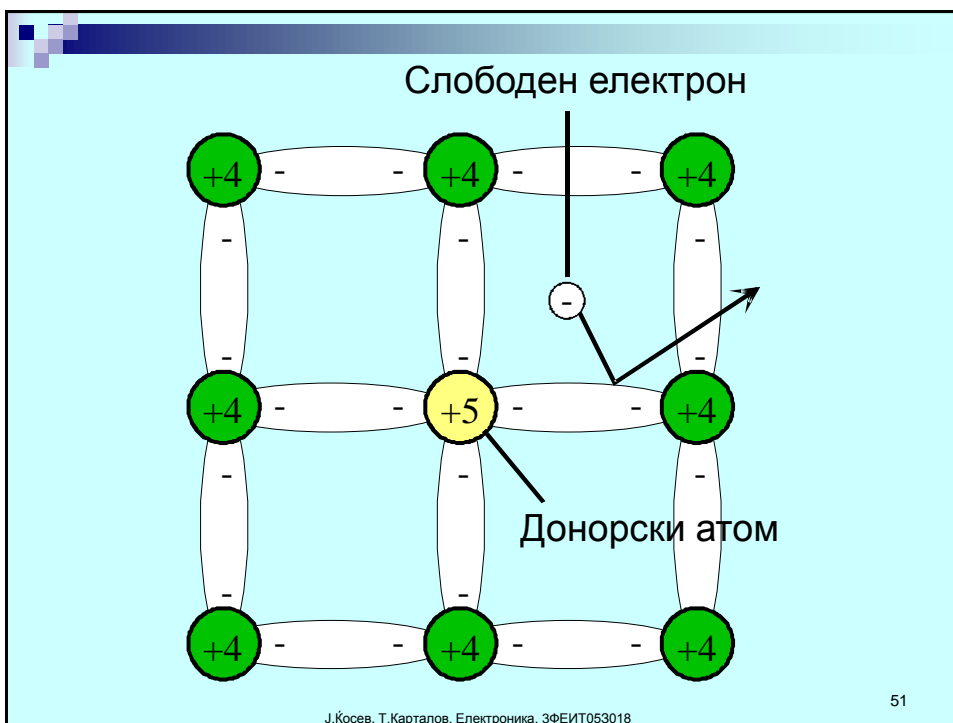
Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

48

- $n = p = n_i$ (динамичка рамнотежа)
- n_i – интринсична концентрација

Полупроводник од **n**-тип

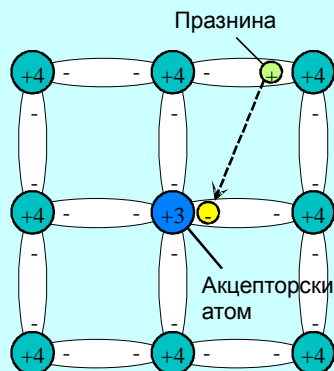
- со додавање **петвалентни** примеси:
азот, фосфор ...

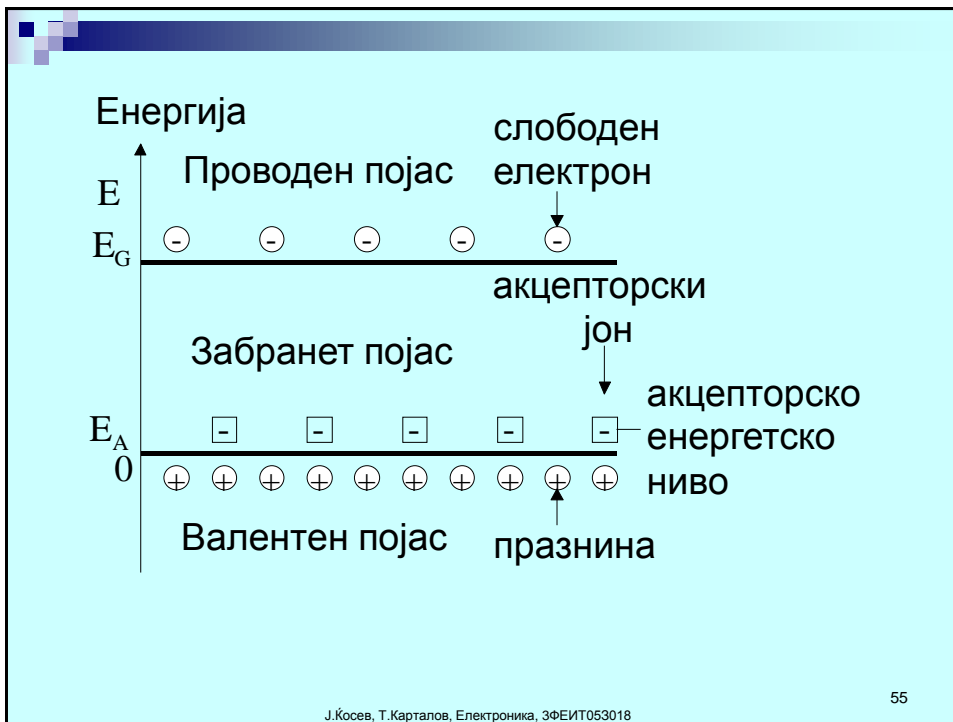


- **Слободните електрони:** мајоритетни носители.
- **Празнините:** миноритетни носители.

Полупроводник од р-тип

- Се добива со додавање **тривалентни** примеси: бор, алуминиум, галиум ...





- **Празнините** се мајоритетни носители,
- **Слободните електрони** се миноритетни носители.

Генерација и рекомбинација во полупроводникот

- **Генерација:** Електронот добива доволно енергија да се ослободи од ковалентната врска и прескокне во проводната зона. (Се создава пар електрон-празнина.)
- **Рекомбинација:** Електронот губи енергија и се враќа во валентната зона во некоја празнина. (Исчезнува пар слободен електрон - празнина.)

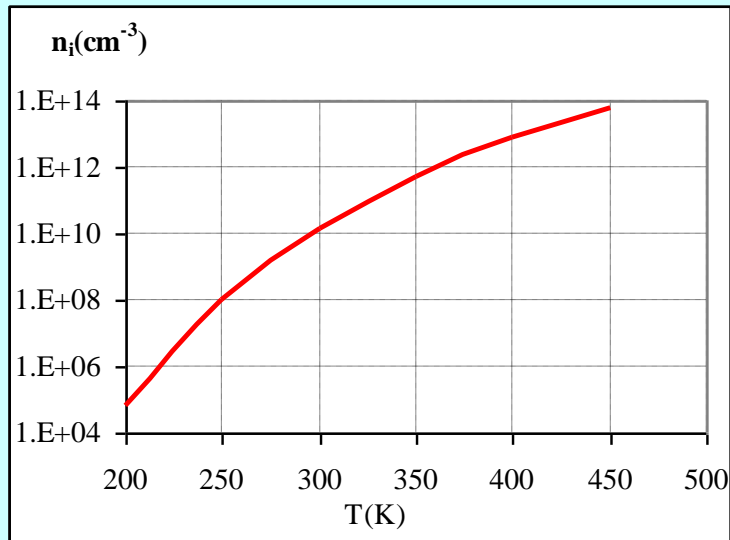
$$g = r$$

Закон за термодинамичка рамнотежа

$$np = n_i^2 \quad (1)$$

$$n_i^2 = CT^3 e^{-\frac{E_G}{kT}}$$

$$n_i^2 = 1.5 \cdot 10^{33} T^3 e^{-\frac{14030}{T}} \text{ (cm}^{-6}\text{)}$$



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

59

Концентрација на носителите во полупроводникот

- Закон за **електрична неутралност**:

$$\mathbf{N_D + p = N_A + n} \quad (2)$$

- Специфична проводливост:

$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$$

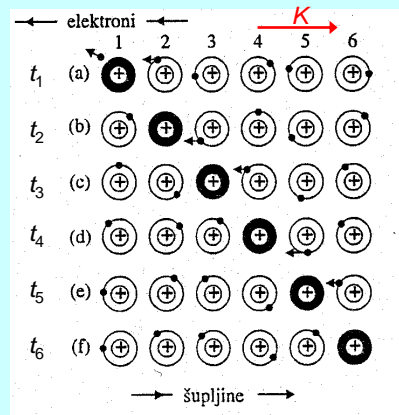
- n и p : од системот равенки (1) и (2)

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

60

Механизам на проведување струја кај празнините

- Полето ги „турка“ валентните електрони од соседните атоми да прескокнуваат кон лево
- Ефективно: празнината се движи кон десно



Истиот ред атоми во валентниот појас во шест последователни моменти

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

61

Примесни полупроводници

- Кај **n-тип** полупроводник:

$$N_A \approx 0, n_i \ll N_D \Rightarrow n \gg p, n \approx N_D$$

$$\sigma_n = qN_D\mu_n$$

- Кај **p-тип** полупроводник:

$$N_D \approx 0, n_i \ll N_A \Rightarrow p \gg n, p \approx N_A$$

$$\sigma_p = qN_A\mu_p$$

(нумерички пример: $N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$)

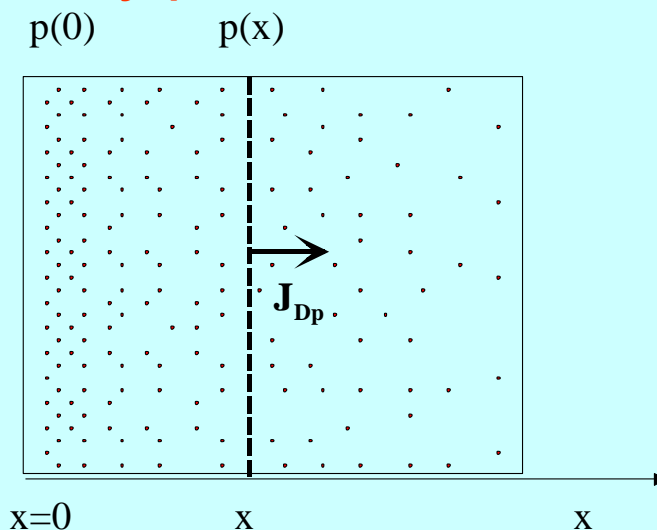
Цел: Преку примесите управуваме со концентрациите на носители (проводноста) практично независно од температурата!

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

62

Дифузија во полупроводниците

- Тенденција на слободните честици е да се распределат **рамномерно во просторот**
- Движењето е пропорционално со **градиентот на концентрацијата**
- Во полупроводниците се појавуваат високи градиенти на концентрациите на електрони и празнини



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

63

Ако концентрацијата празнини опаѓа долж x (dp/dx негативен), тогаш струјата е во насока на x (позитивна) :

$$J_{Dp} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

- D_p - **дифузна константа** на празнините (во cm^2/s)

$$J_{Dn} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

64

- релација на Ајнштајн :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} = V_T (V)$$

V_T — напонски еквивалент на температурата (изразена во келвини):

$$V_T = \frac{T}{11600} (V)$$

- За собна температура: $T=300K$, $V_T \approx 25mV$.

- Вкупната струја низ полупроводникот има **четири компоненти** — две дрифтни (електронска и празнинска) и две дифузни (ел. и пр.) :

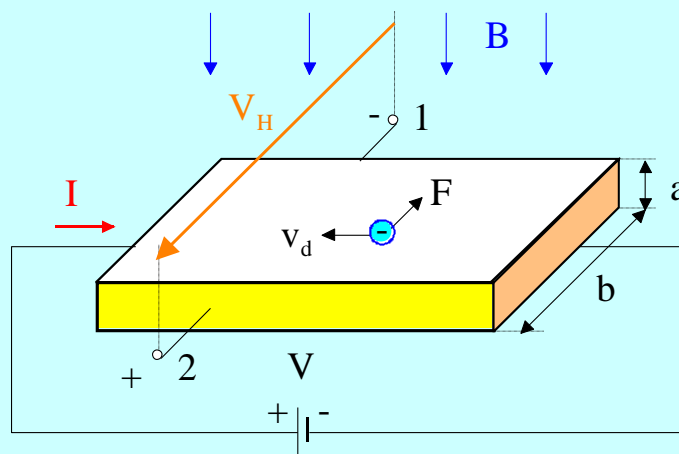
$$J = J_p + J_n$$

$$J_p = J_{Kp} + J_{Dp} = q p \mu_p K - q D_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = J_{Kn} + J_{Dn} = q n \mu_n K + q D_n \frac{dn}{dx}$$

Халов ефект

(доказ за постоење на два типа носители)



$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

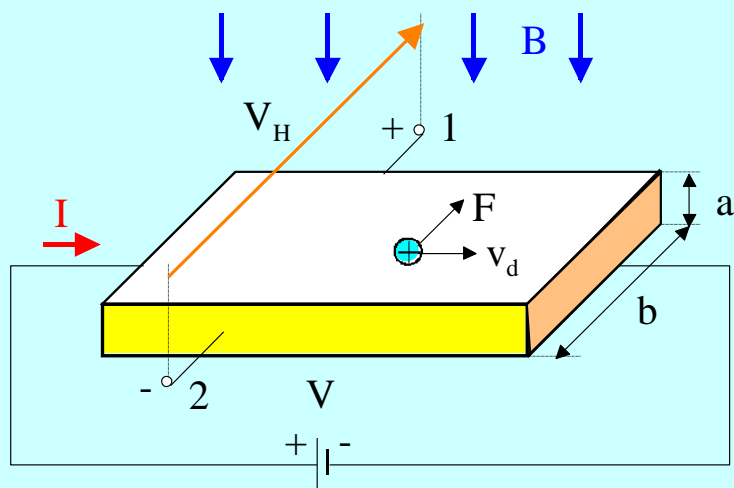
На електроните делува сила од магнетното поле

Електроните се натрупуваат кон страната 1 и се појавува потенцијална разлика (Халов напон)

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

67

И празнините се натрупуваат на истата страна поради што Халовиот напон кај р-тип полупроводник има обратна насока:



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

68

Одредување на Халовиот напон

$$F = q \frac{V_H}{b} = qv_d B \quad I = qnv_d S \Rightarrow$$

$$V_H = bB \cdot \frac{I}{qn \cdot ab} = \frac{BI}{qna}$$

Примена на Халовиот ефект

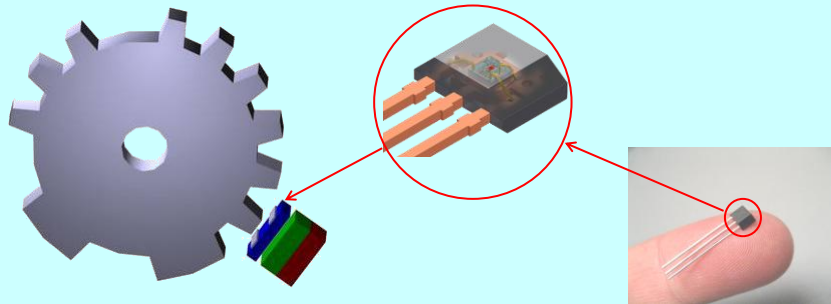
Халов коефициент: $R_H = \frac{1}{qn} = \frac{aV_H}{BI}$

Подвижност на носители: $\mu = \sigma R_H$

Концентрација на примеси: $n = \frac{BI}{qaV_H}$

Примена на Халовиот ефект

Халов сензор: $B = \frac{aV_H}{R_H I}$



Коло за множење две
величини:

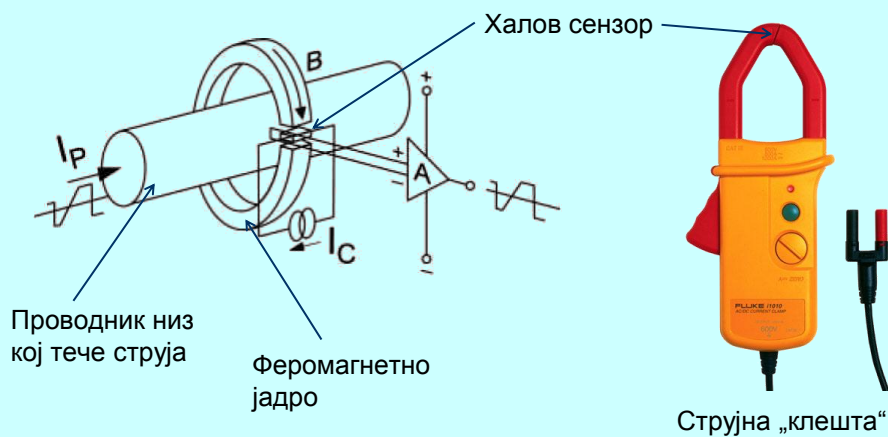
$$V_H = \frac{BI}{aR_H} = kI_1 I$$

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

71

Примена на Халовиот ефект

Бесконтактно мерење на струја:



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

72