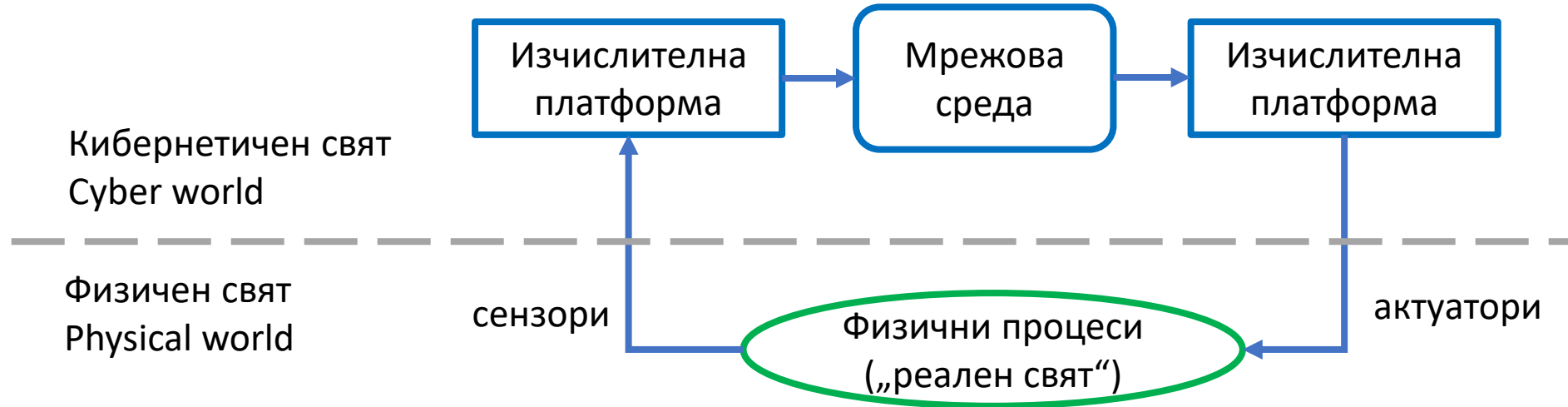




Полупроводници

За какво служат полупроводниковите прибори?

Те са основни градивни елементи на кибер-физични системи (cyber-physical systems)

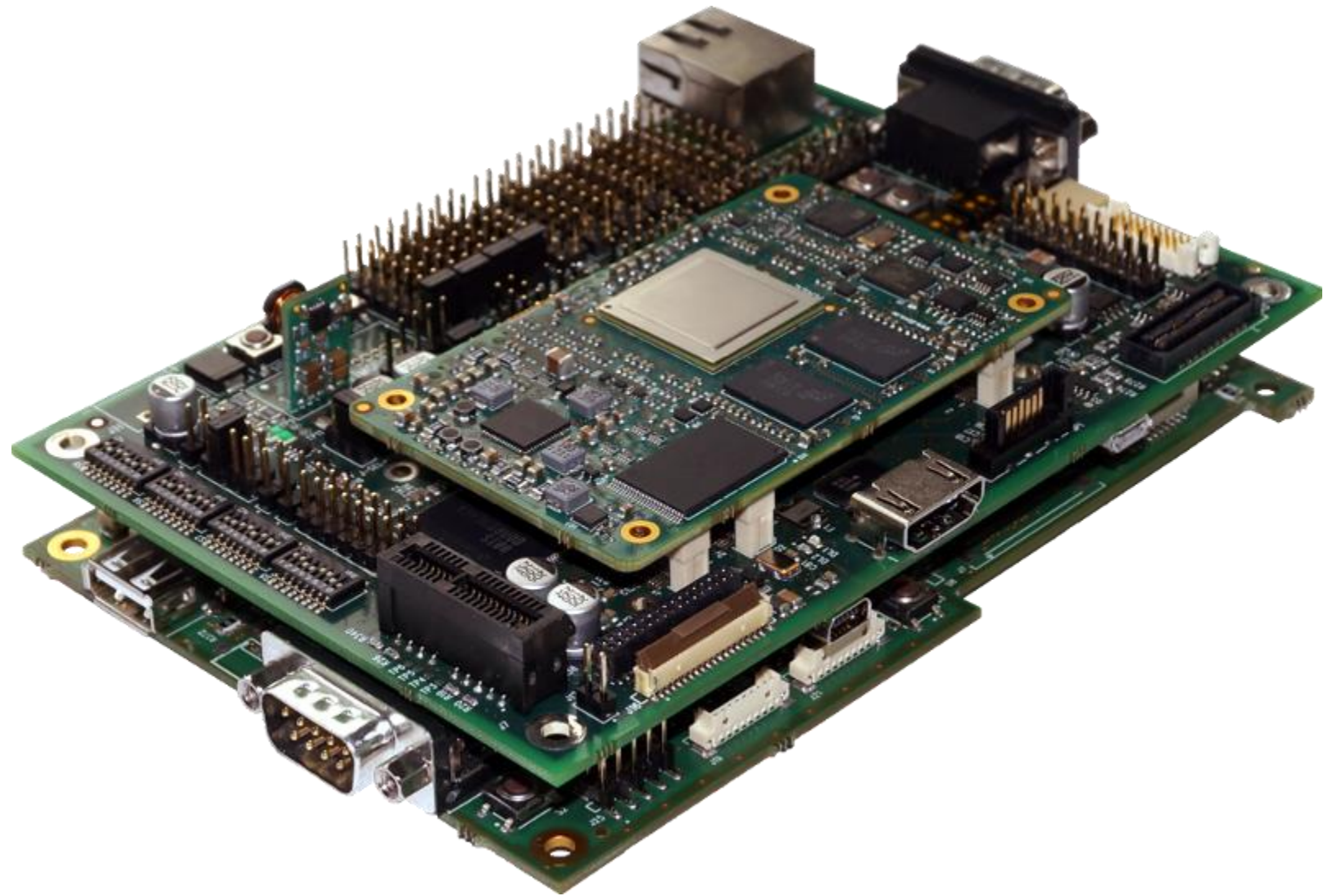


Сензорът е устройство, което измерва физична величина

Актуаторът е устройство, което променя физична величина

Изчислителна платформа – обработка на данни

Полеви транзистори
Изправителни диоди
Ценерови диоди

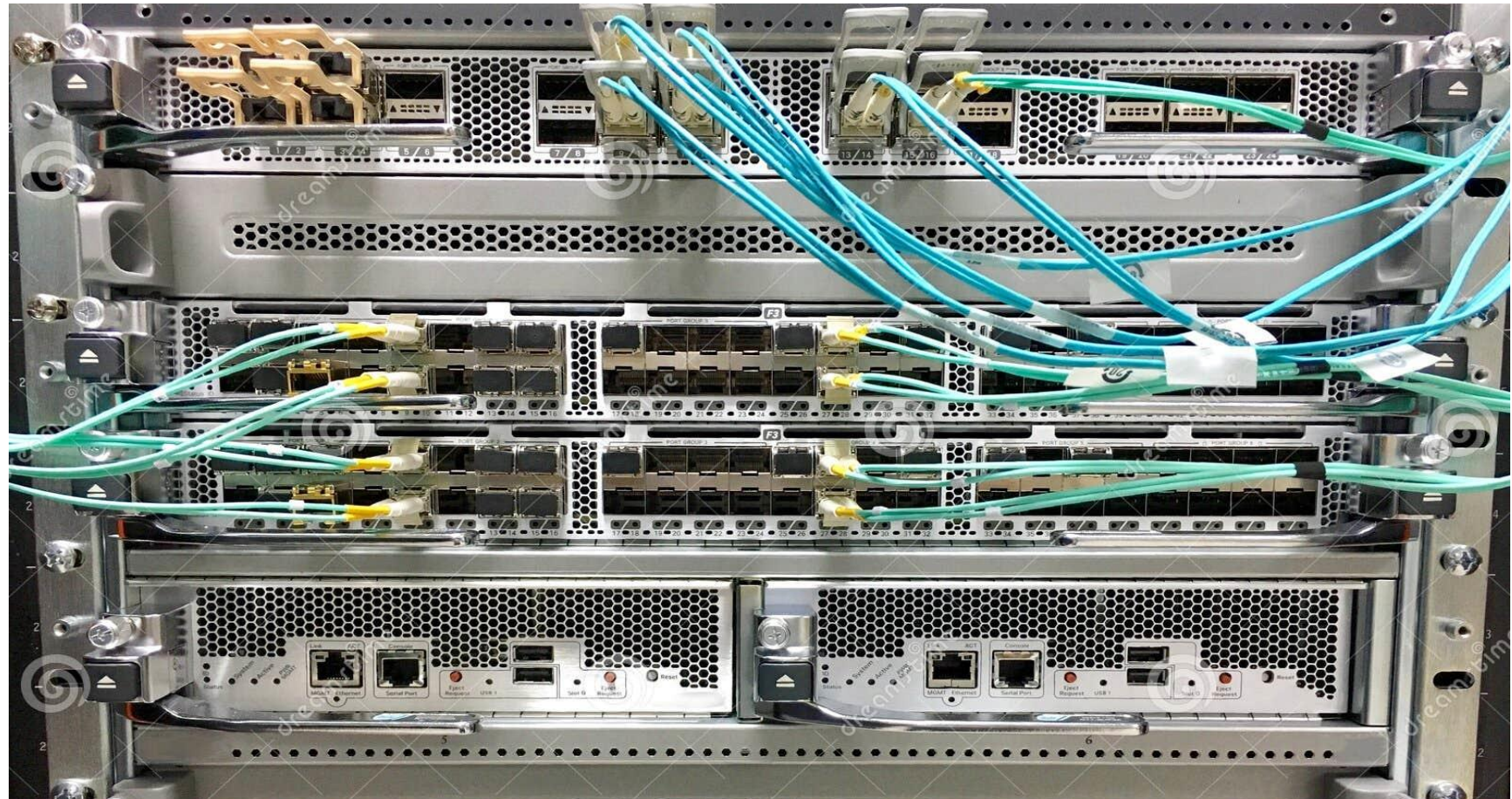


Мрежа – пренос на данни

Полеви транзистори

Светодиоди / Лазерни диоди

Фотодиоди



Сензори – преобразуват физична величина в електрически сигнал

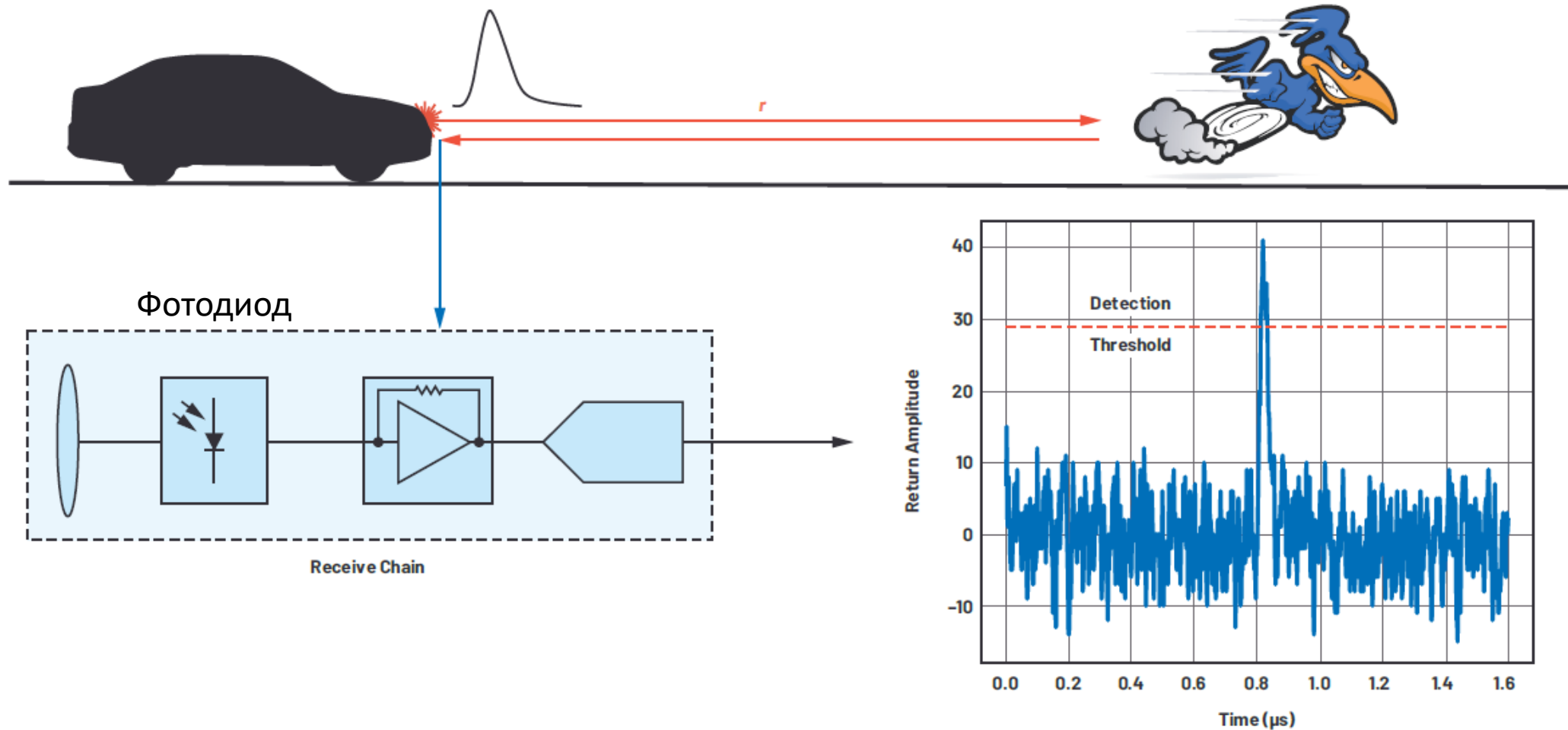
Фотодиоди

Усилватели (транзистори)

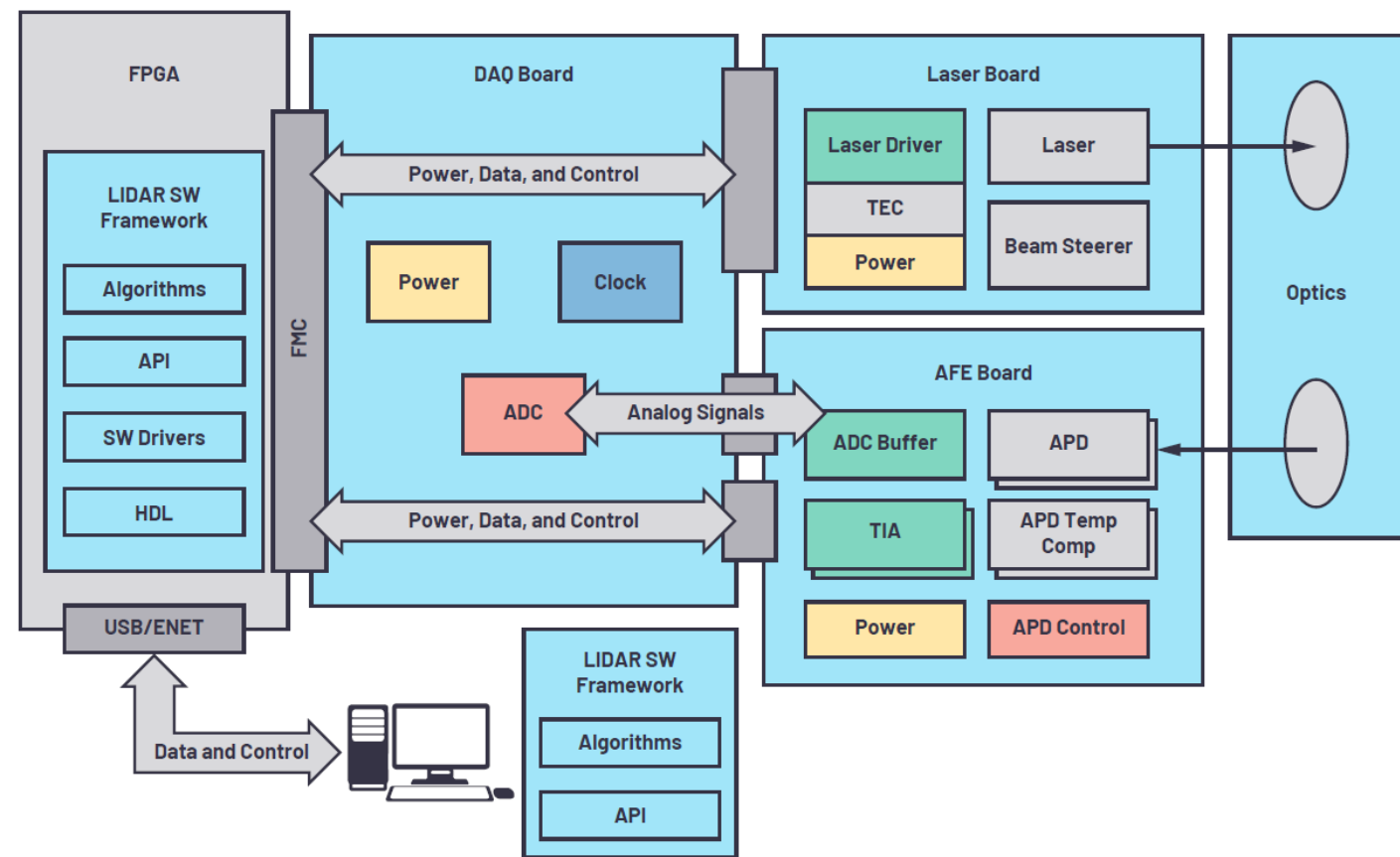
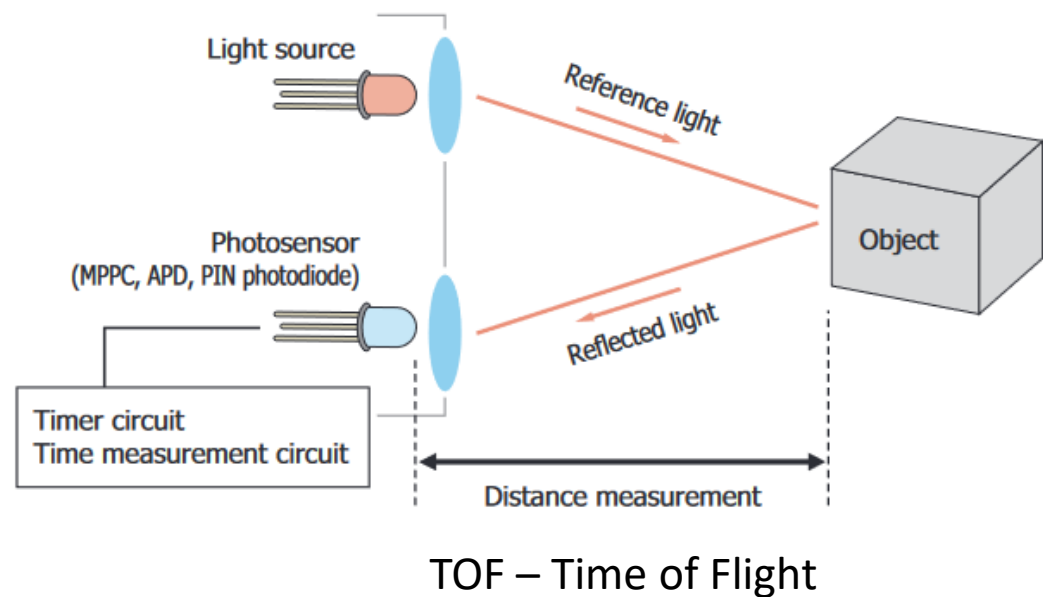
Измерване за температура (диоди)

Акселерометри (ускорение, позиция)

Пример – LIDAR (Light Detection and Ranging)



Пример – LIDAR (Light Detection and Ranging)



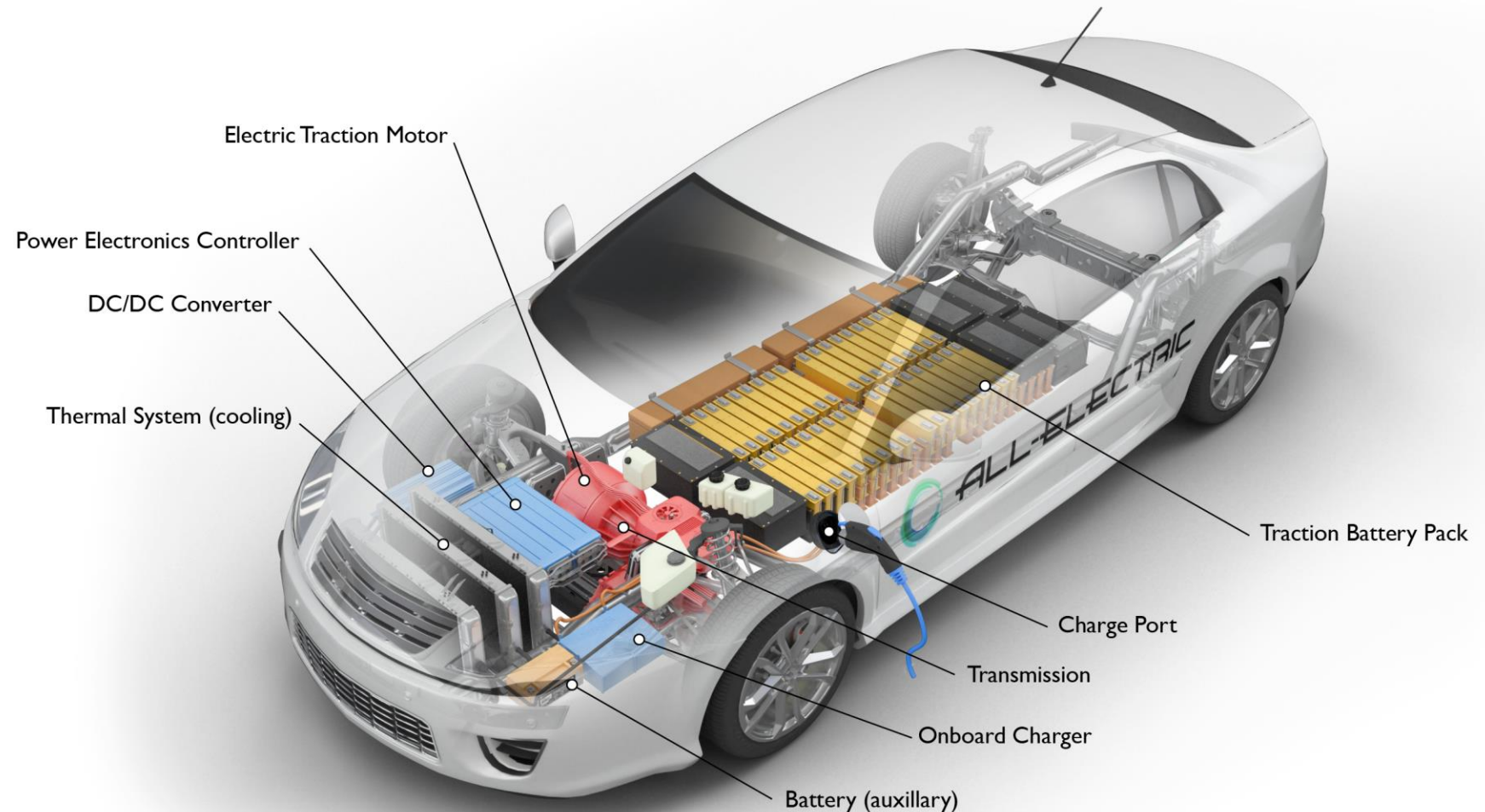
Актуатори – променя физична величина

Фарове, светлини (светодиоди)

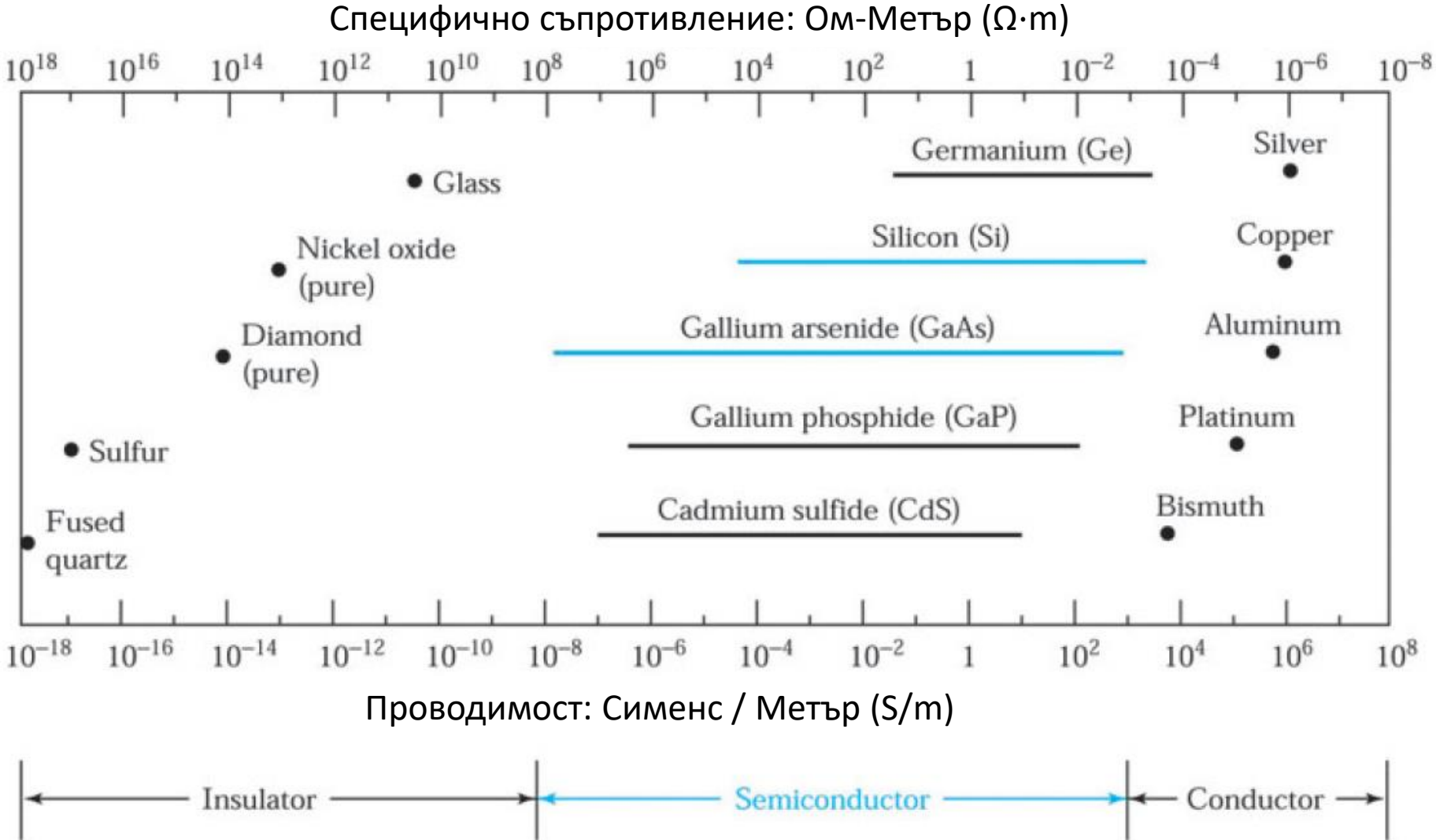
Управление на електромотори (MOS транзистори, диоди)

Зареждане на батерии (MOS транзистори, диоди)

Пример – EV Powertrain



Изолатори, проводници и полупроводници



Проводимост на полупроводниците

Проводимостта на полупроводниците силно зависи от:

- Температура
- Осветеност
- Магнитно поле
- Примесни атоми (в много-ниски концентрации: 1ug – 1mg примеси на 1kg чист полупроводник)

Тази чувствителност на проводимостта прави полупроводниците едни от най-важните материали в електрониката.

Как функционират полупроводниците?

Въпроси

- Колко са токоносителите?
- Къде се намират?
- Как се движат?

Енергийни нива

Класическа механика (“Макро свят”) – едно тяло може да притежава произволно кинетична енергия

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Квантова механика – свързаните частици (напр. електроните в атомите) могат да заемат определени, **дискретни** енергийни нива.

$$E_n = -hcR \frac{Z^2}{n^2}$$

h – константа на Планк

c – скорост на светлината

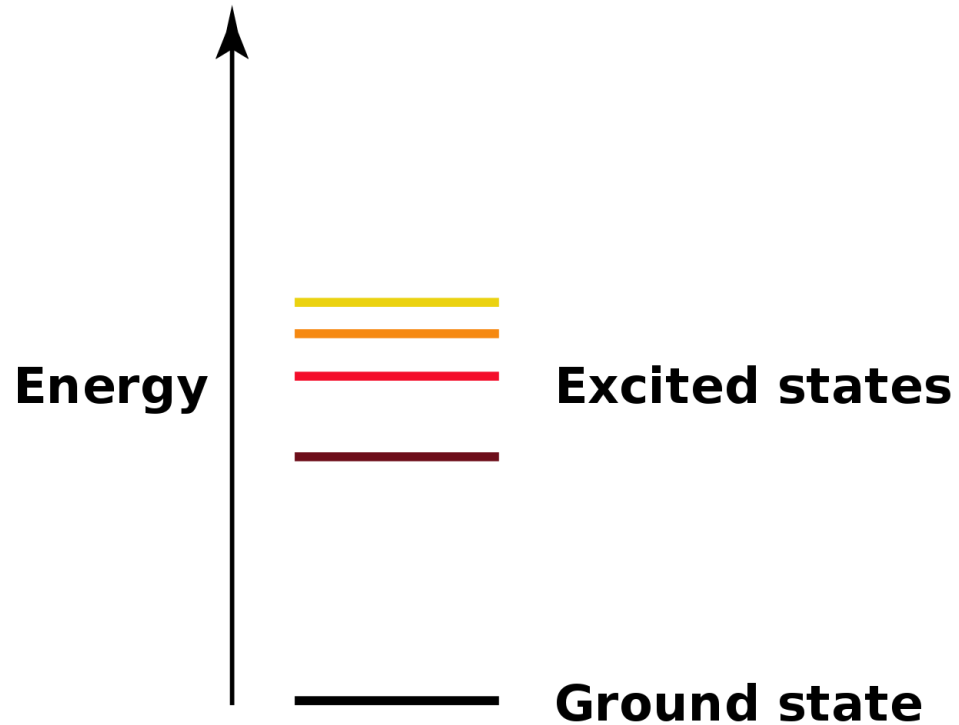
R – константа на Ридберг

Z – атомно число

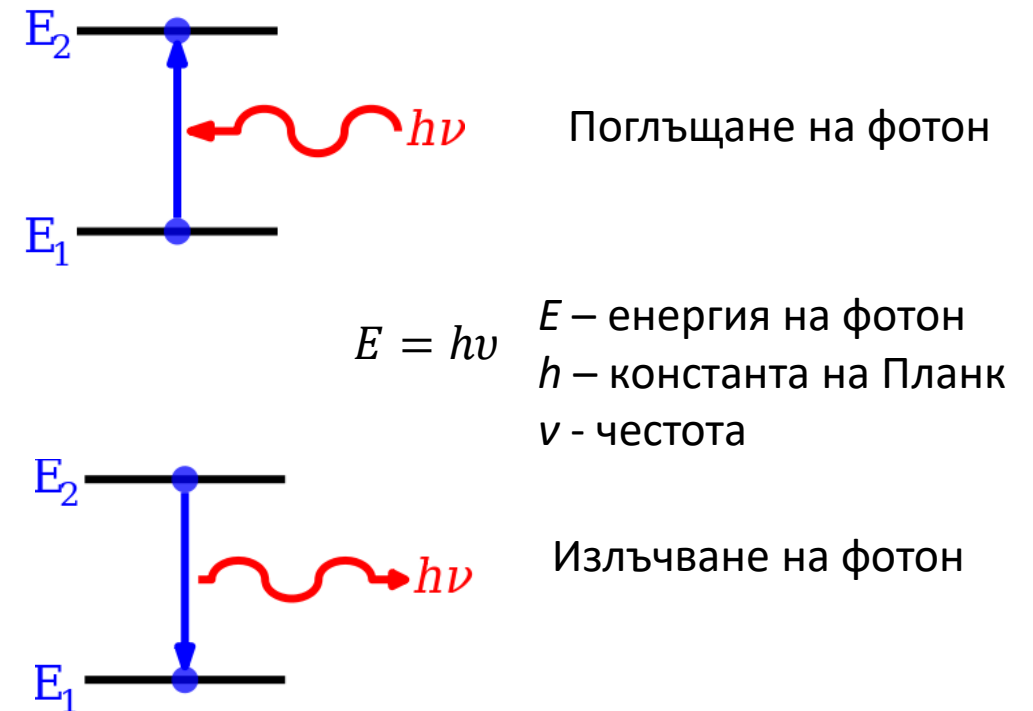
n – квантово число (1,2,3 ...)

Енергийни нива

Енергийни нива на електрон в атом



Преходи между енергийни нива

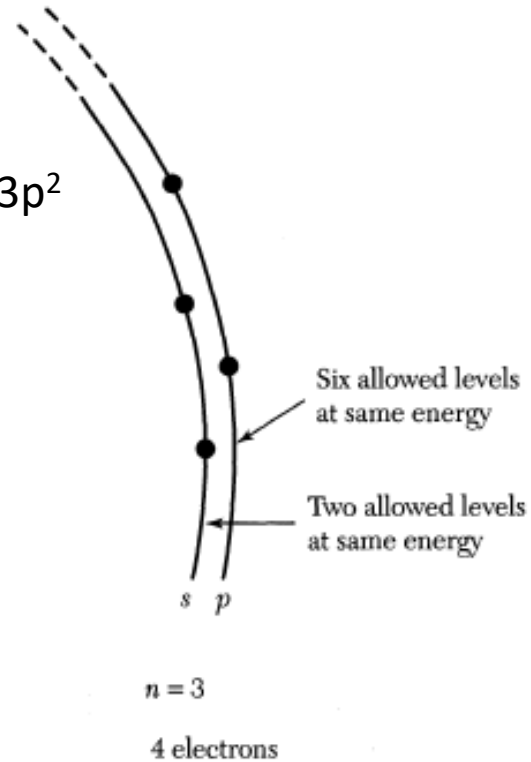
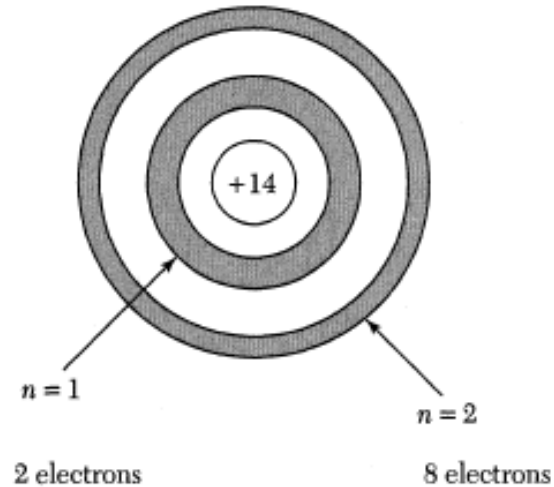


Структура на атом на Силиций (Si)



Атомно число $Z=14$

Конфигурация на електроните 3s²3p²



Wolfgang Pauli – Австрийски физик, един от създателите на квантовата механика

Електроните от най-външната орбита са относително слабо свързани с атома. Те се наричат **валентни електрони** и определят химическите и електрическите свойства на елементите.

Атомите на силиция (Si) имат по четири валентни електрона.

Принцип на Паули - в дадена квантова система не е възможно да съществуват едновременно два електрона с еднакво квантово състояние, т.е. да се характеризират с четири еднакви квантови числа.

квантови числа

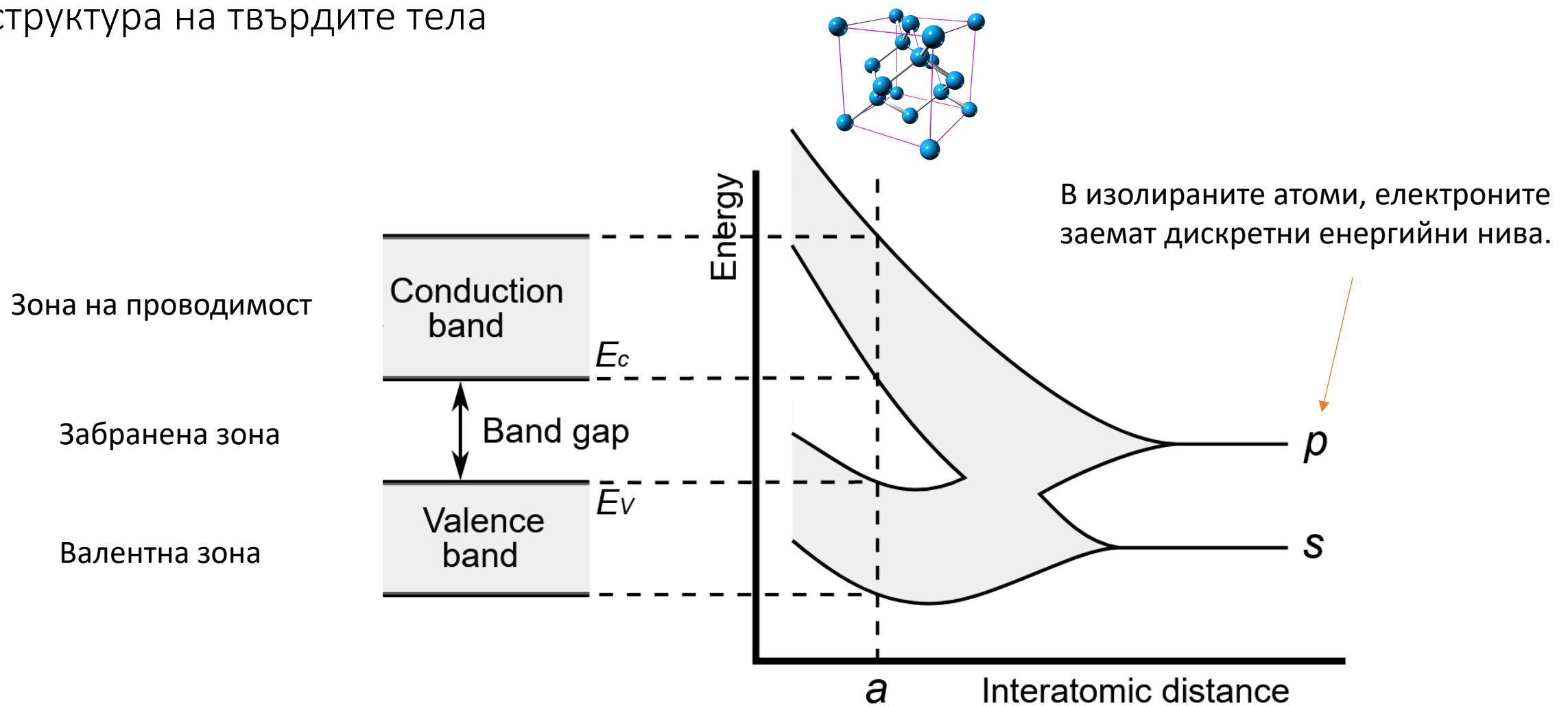
n – главно

l – орбитално

m – магнитно

s - спиново

Зонна структура на твърдите тела



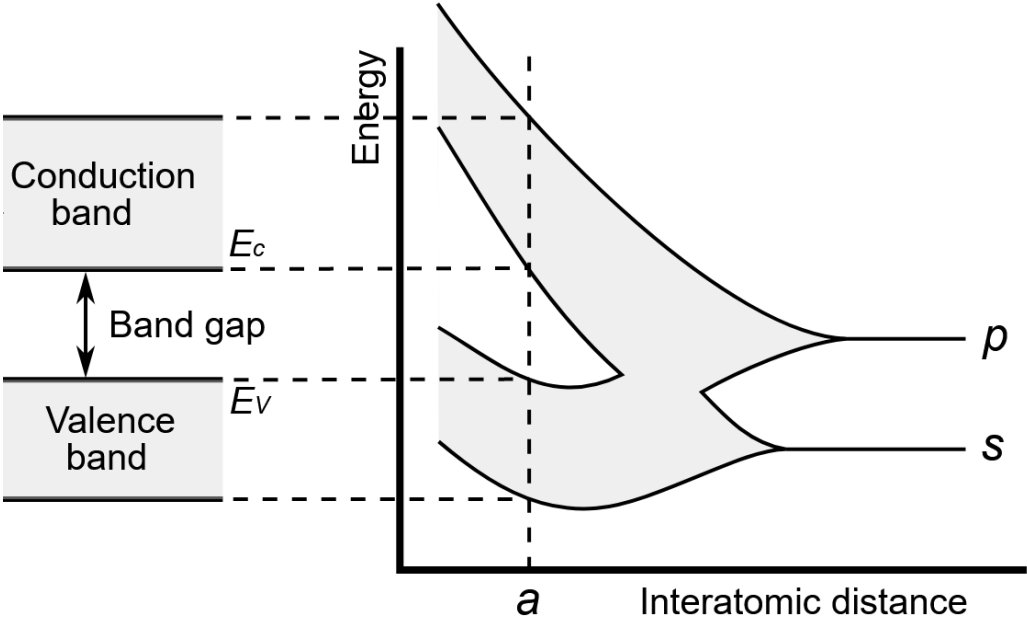
При доближаване на атомите (например в кристална решетка), всяко дискретно енергийно ниво се разделя на няколко нива. При достатъчно много атоми, нивата се преобразуват в енергийни зони.

Най-външните енергийни зони са наречени „зона на проводимост“ и „валентна зона“. Те са разделени с т.нар. „забранена зона“.

Широчина на забранената зона

$E_g = E_c - E_v$
Bandgap energy

Широчина на
забранената зона



E_g е енергията, която трябва да получи един електрон за да премине в зоната на проводимост и да участва в протичането на ток.

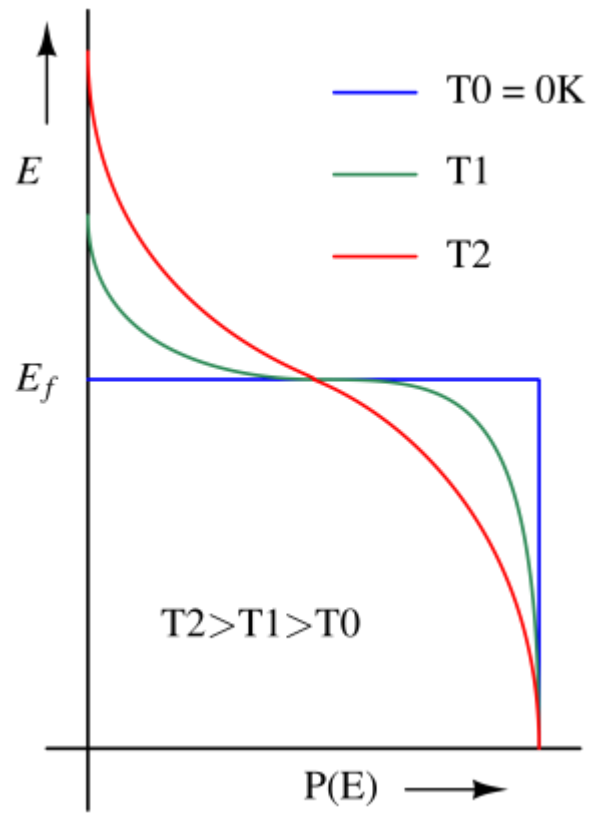
Широчината на забранената зона (E_g) е определяща за електрическите свойства на елементите.

Properties	Si	4H-SiC	GaAs	GaN
Crystal Structure	Diamond	Hexagonal	Zincblende	Hexagonal
Energy Gap (eV)	1.12	3.26	1.43	3.5

Ниво на Ферми

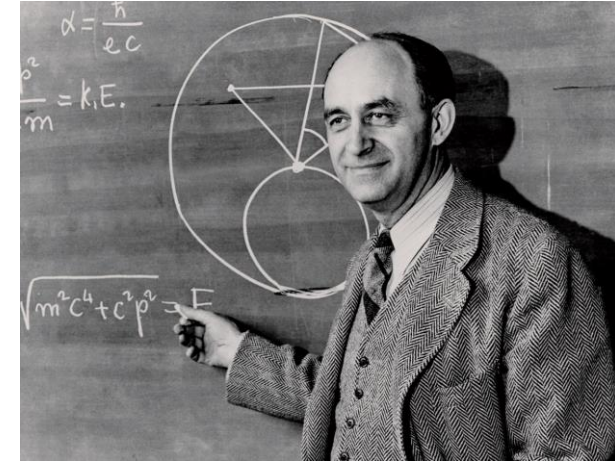
Ниво на Ферми (E_F) е най-високото енергийно състояние, на което може да има електрони при температура 0K.

За по-високи температури, вероятността електрон да се намира на по-високо енергийно ниво започва постепенно да нараства.



$$P(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)}$$

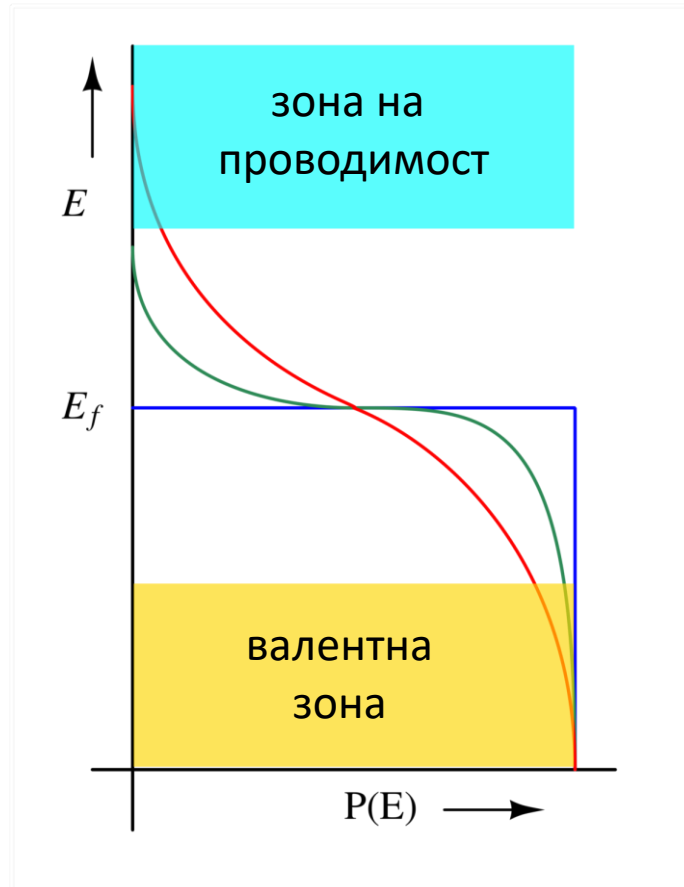
Разпределението на Ферми-Дирак описва вероятността $P(E)$ електрон да заема състояние с енергия E .



Enrico Fermi – Италиански физик, създател на първият ядрен реактор.

Ниво на Ферми в полупроводниците

Вероятността интерпретация на нивото на Ферми (E_F) е че при дадена температура, това е енергийното ниво, което електроните могат да заемат с вероятност 50%.



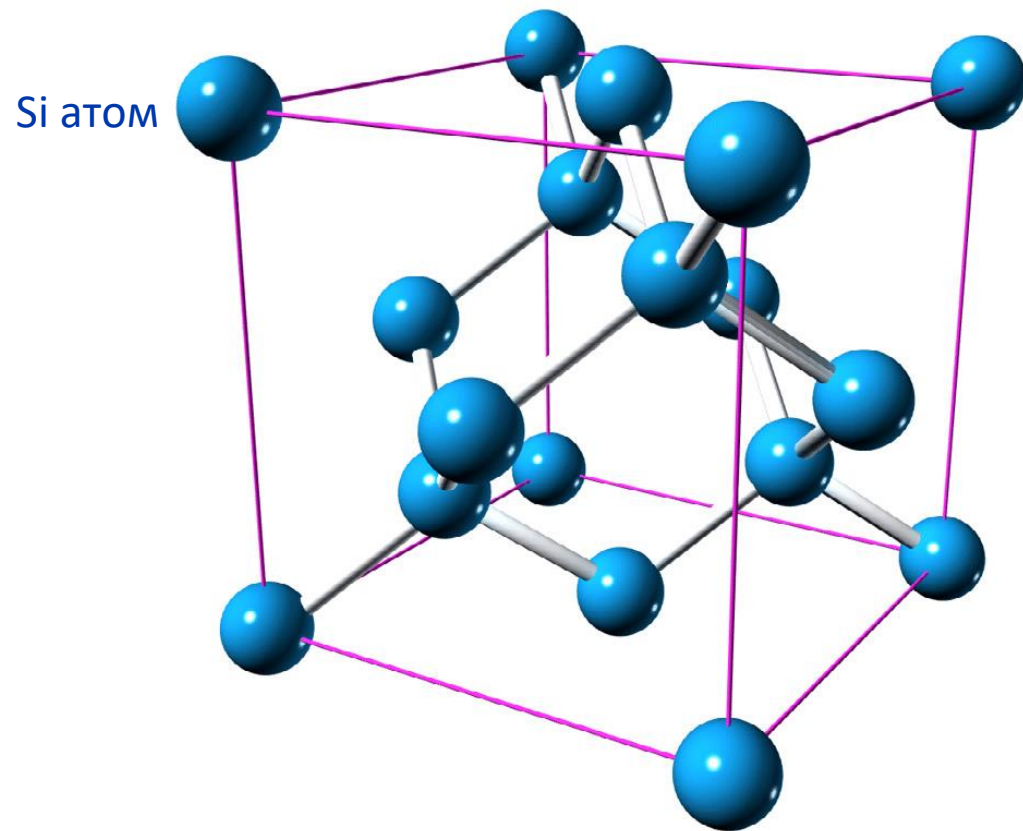
В полупроводниците, нивото на Ферми се намира в забранената зона.

Колкото то е по-близо до зоната на проводимост, толкова по-лесно е на електроните да преминават от валентната зона в зоната на проводимост и да се създаде предпоставка за протичане на ток.

За **чистите** полупроводници (т.е. такива без примеси), нивото на Ферми се намира близо до **средата** на забранената зона.

Посредством добавяне на примеси, местоположението на нивото на Ферми може да бъде променено. По този начин се изработват полупроводникови елементи (диоди, транзистори) със специфични параметри.

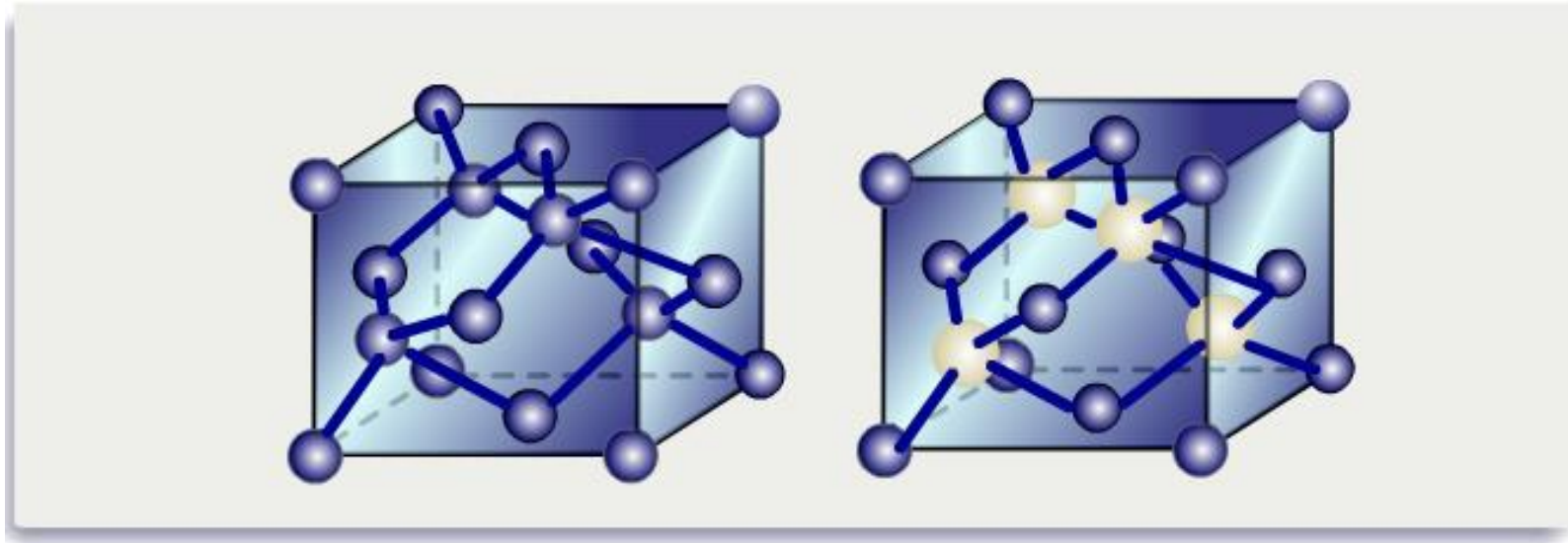
Кристална структура на Si



диамантена кубична
кристална структура

Всеки Si атом е свързан с четири други атома.

Видове полупроводници



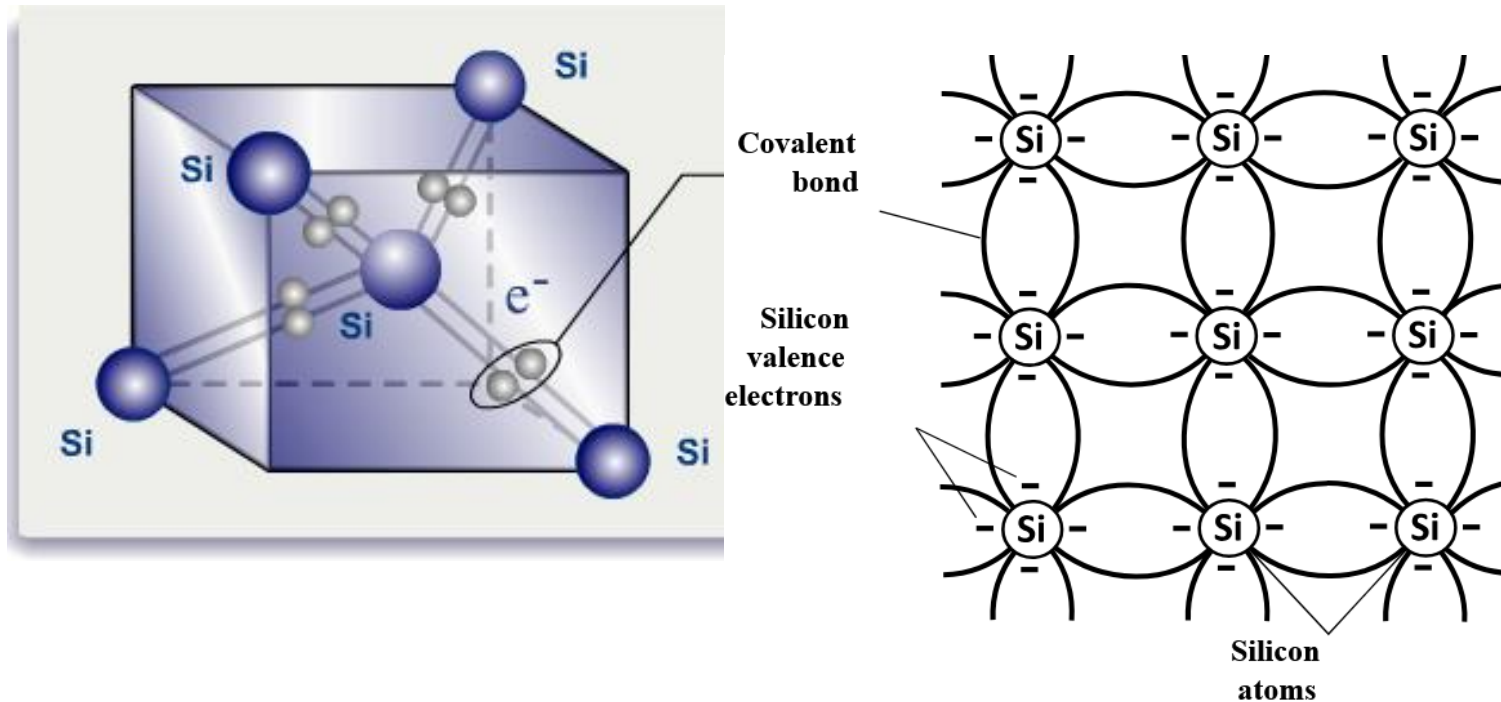
Собствен полупроводник (intrinsic semiconductor) – в кристалната решетка няма примесни атоми.

Примесен полупроводник (extrinsic semiconductor) – в кристала са въведени примесни атоми.

Концентрацията на въведените примесни атоми влияе значително върху електрическото поведение на полупроводниците.

Собствени полупроводници

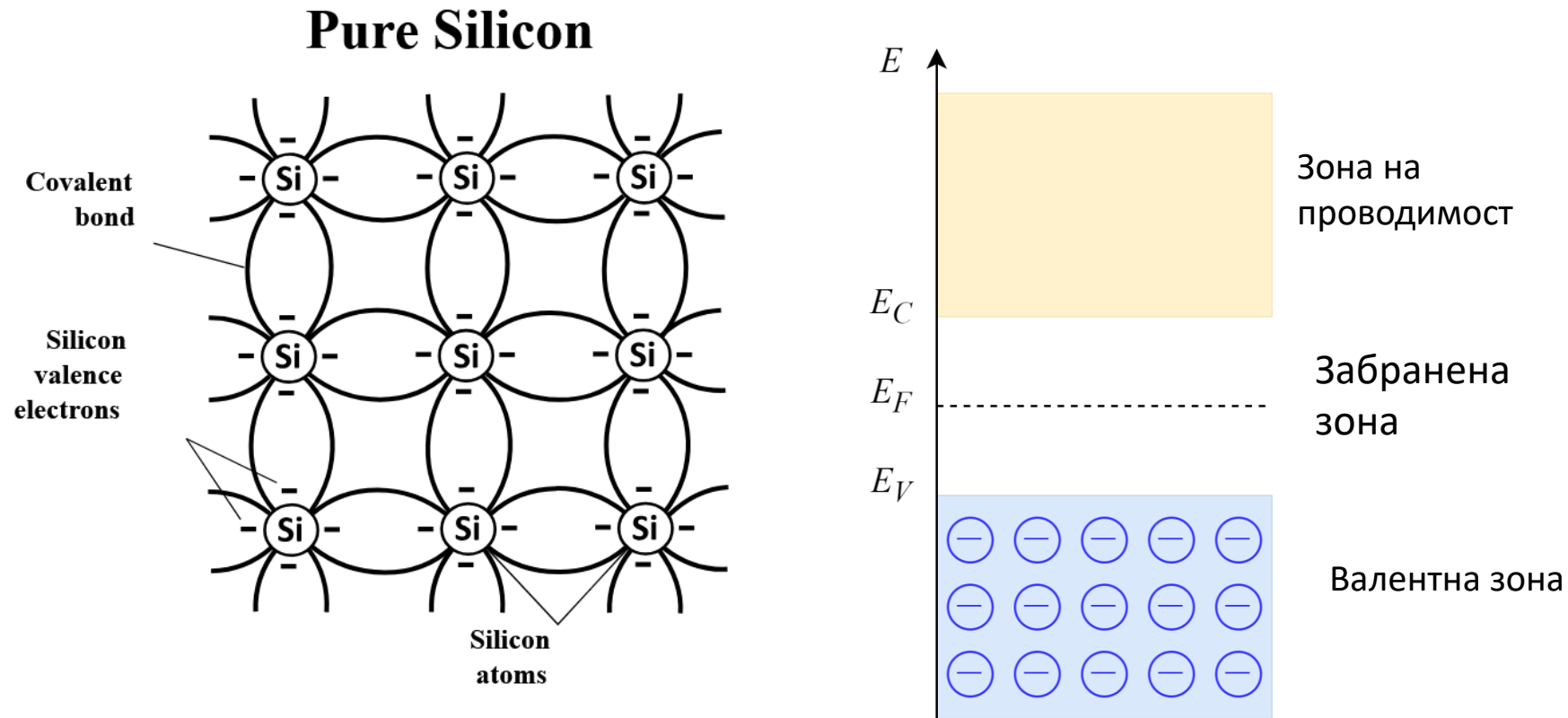
Собствен полупроводник - Si



Чист полупроводник без внесени примеси се нарича **собствен полупроводник**.

Всеки един от четирите валентни електрона на Si атом формира **ковалентна връзка** с валентен електрон от съседни Si атоми. Така валентният електрон става общ за два съседни атома. Ковалентните връзки задържат атомите заедно в кристала.

Собствен полупроводник - Si



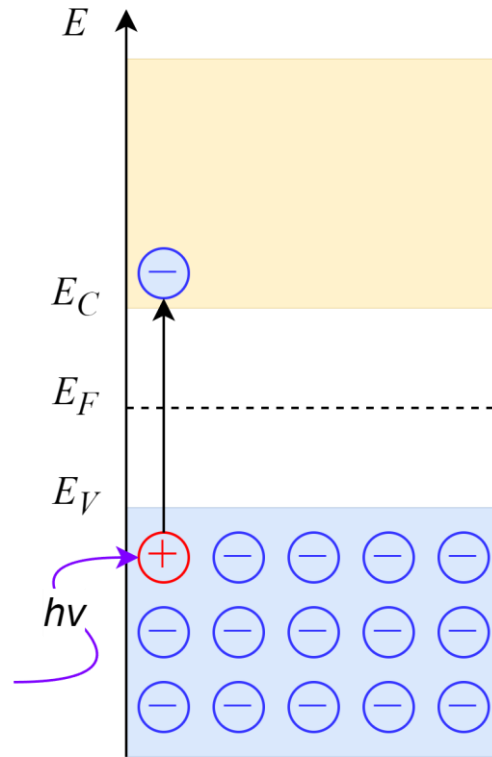
При $T=0\text{K}$ (абсолютна нула) в собствен полупроводник всички ковалентни връзки са запълнени и няма свободни носители на заряд.

Това съответства на напълно запълнена валентна зона и празна зона на проводимост.

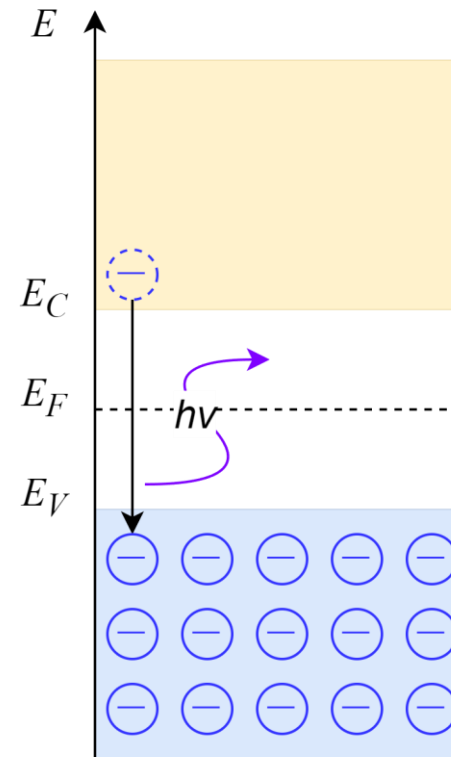
При тези условия няма подвижни носители на заряд и полупроводникът е **изолатор**.

Собствен полупроводник - токоносители

Процесът на формиране на двойка свободни носители на заряд – електрон и дупка, под действие на допълнителна енергия, се нарича **генерация**.



Процесът, при който електрон от свободната зона губи енергия и се връща обратно във валентната зона, се нарича **рекомбинация**.



За да се формират свободни носители на заряд е необходима енергия - $h\nu$.

Тя може да дойде от трептенията на атомите на кристала (фонони), от лъчиста радиация (фотони) или от механични деформации.

При достатъчна енергия се **разкъсват ковалентни връзки**. Електронът се откъсва от атома и става **свободен**, оставяйки празно място – **дупка** с положителен заряд.

Собствен полупроводник – термодинамично равновесие

При постоянна температура настъпва **термодинамично равновесие** между процесите на генерация и рекомбинация.

$$n \cdot p = n_i^2$$

n – концентрация на електроните

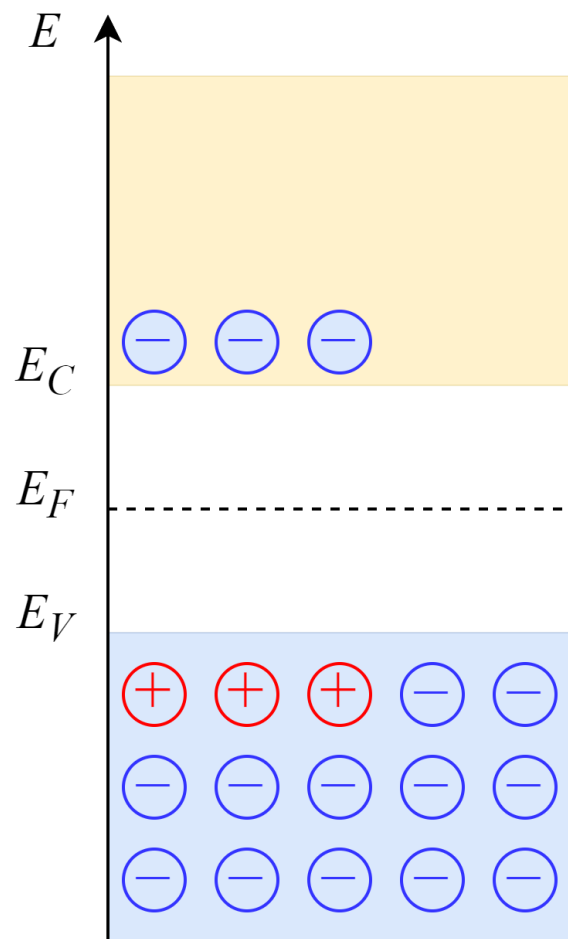
p – концентрация на дупките

n_i – собствена концентрация

В чистия полупроводник, за дадена температура, се установява постоянна концентрация, наречена **собствена концентрация n_i** .

Собствената концентрация на токоносителите зависи само от **температурата** и от широчината на забранената зона.

Собствен полупроводник – температурна зависимост



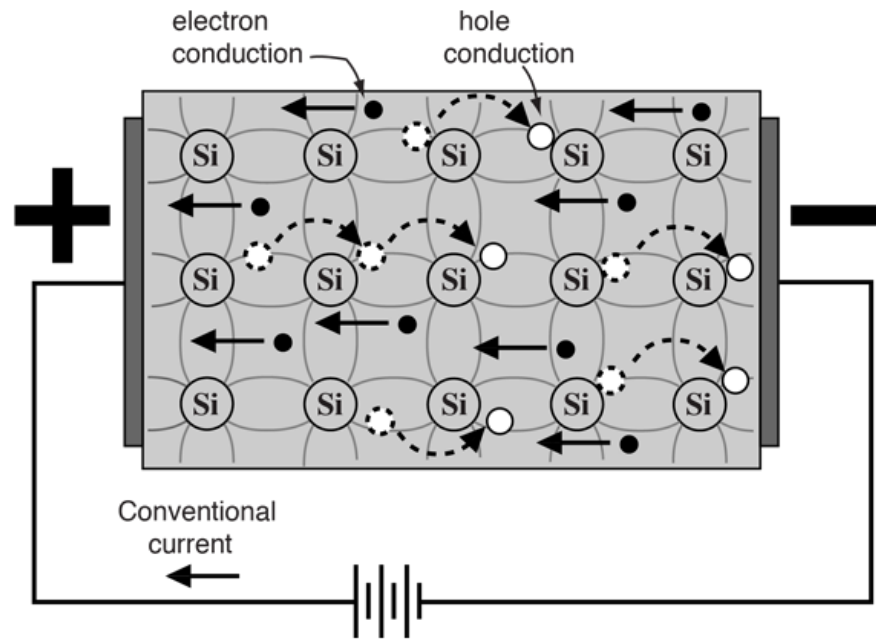
В собствен полупроводник при стайна температура има незначителен брой свободни токоносители.

Техният брой, и респективно големината на тока, **силно зависят от температурата**.

Поради тези причини чистите полупроводници не се използват за направа на полупроводникови елементи.

Движение на токоносителите в собствен полупроводник

Движение на токоносителите



Дрейфова скорост

$$v_n = \mu_n E \quad v_p = \mu_p E$$

v_n – скорост на електроните (cm/s)

v_p – скорост на дупките (cm/s)

E – интензитет на приложеното електрическо поле (V/cm)

μ_p – подвижност на дупките ($cm^2/V.s$)

μ_n – подвижност на електроните ($cm^2/V.s$)

Електроните и дупките са **подвижни частици**. Те могат да се преместват между възлите на кристалната решетка под въздействие на електрическо поле, т.е. да участват в протичането на ток. Затова се наричат **токоносители**.

Движението на токоносителите под действие на електрическо поле се нарича **дрейфово**, а средната скорост, с която се преместват – дрейфова скорост v_E .

Параметърът μ , свързващ дрейфовата скорост с интензитета на електрическото поле, се нарича **подвижността на токоносителите**.

Дрейфов ток

Плътността на дрейфовият ток J_E се определя от заряда, пренесен от токоносителите за единица време през единица сечение.

Тази зависимост се нарича закон на Ом.

$$J_E = q \rho \mu E \text{ (A/cm}^2\text{)}$$

E – интензитет на приложеното електрическо поле (V/cm)

q – заряд на електрона = 1.6×10^{-19} C (Кулони)

ρ – концентрация на токоносителите

μ – подвижност на токоносителите (cm²/V.s)



Georg Simon Ohm е немски физик и математик, открил връзката между потенциалната разлика приложена върху проводник и токът през него.

Дрейфов ток в полупроводници

Плътност на дрейфовият ток съставен от дупки

$$J_{pE} = q p \mu_p E \text{ (A/cm}^2\text{)}$$

Плътност на дрейфовият ток съставен от електрони

$$J_{nE} = - q n \mu_n E \text{ (A/cm}^2\text{)}$$

Общият дрейфов ток е сумата от двата компонента

$$J_E = J_{pE} + J_{nE}$$

E – интензитет на приложеното електрическо поле (V/cm)

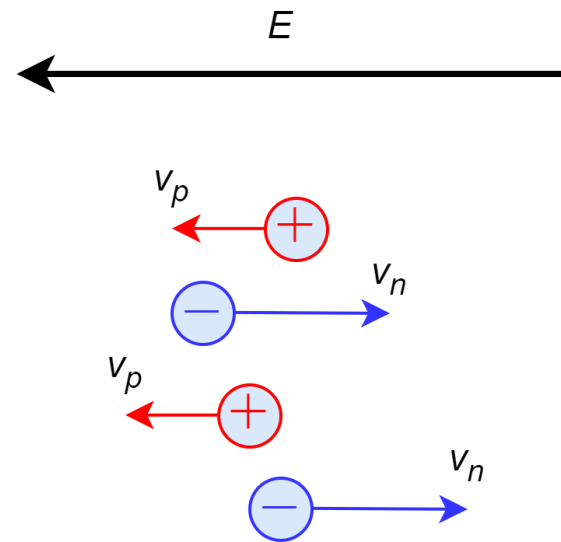
q – заряд на електрона = $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (Кулони)

p – концентрация на дупките

n – концентрация на свободните електрони

μ_p – подвижност на дупките ($cm^2/V.s$)

μ_n – подвижност на електроните ($cm^2/V.s$)



Дифузия

Дифузия е процес на пренос на субстанция или енергия (напр. атом, йон или молекула) от област с по-висока концентрация към област с по-ниска концентрация



Дифузен ток

Дифузен ток – движение на заряди причинено от разлика в концентрацията на токоносителите в различни области на полупроводника. Плътността на дифузния ток се определя от закона на Fick.

$$J_D = -qD \frac{d\rho}{dx}$$

D – коефициент на дифузия

q – заряд на електрона = $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (Кулони)

ρ – концентрация на токоносителите

Плътност на дифузния ток от дупки

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

Плътност на дифузния ток от електрони

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

	Дрейфов ток	Дифузен ток
Причинява се от	Електрическо поле	Разлика в концентрацията на токоносителите
Посока на тока	Посоката на електрическото поле	Градиента на концентрация на токоносителите
Закони	Закон на Ом	Закон на Фик

Уравнение на Айнщайн

Връзката между коефициент на дифузия и подвижност е изразена чрез уравнението на Айнщайн.

$$D = \varphi_T \mu$$

D коефициент на дифузия

μ подвижност

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} \approx \frac{T}{11600}$$

температурен потенциал

k – константа на Болцман, T – темпетатура (K), q – заряд на електрона

$$\varphi_T = 0.0258 \text{ V} \approx 26 \text{ mV}$$

За „стайна температура“ (300 K)

Общ ток в полупроводника

Токоносителите могат да се движат чрез дрейф и дифузия и да формират съответно дрейфова и дифузионни съставки на тока.

$$J_n = J_{nE} + J_{nD} = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{pE} + J_{pD} = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx}$$

Примесни полупроводници

PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

Electron Configuration

PubChem																2
																18
1															2	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															18	
1															1	

Основен полупроводник – силиций (Si) – четвърта валентност.

Примесите от **пета валентност** – арсен (As), фосфор (P), антимон (Sb) се наричат **донори**, защото отдават един от валентните си електрони си към полупроводниковия кристал.

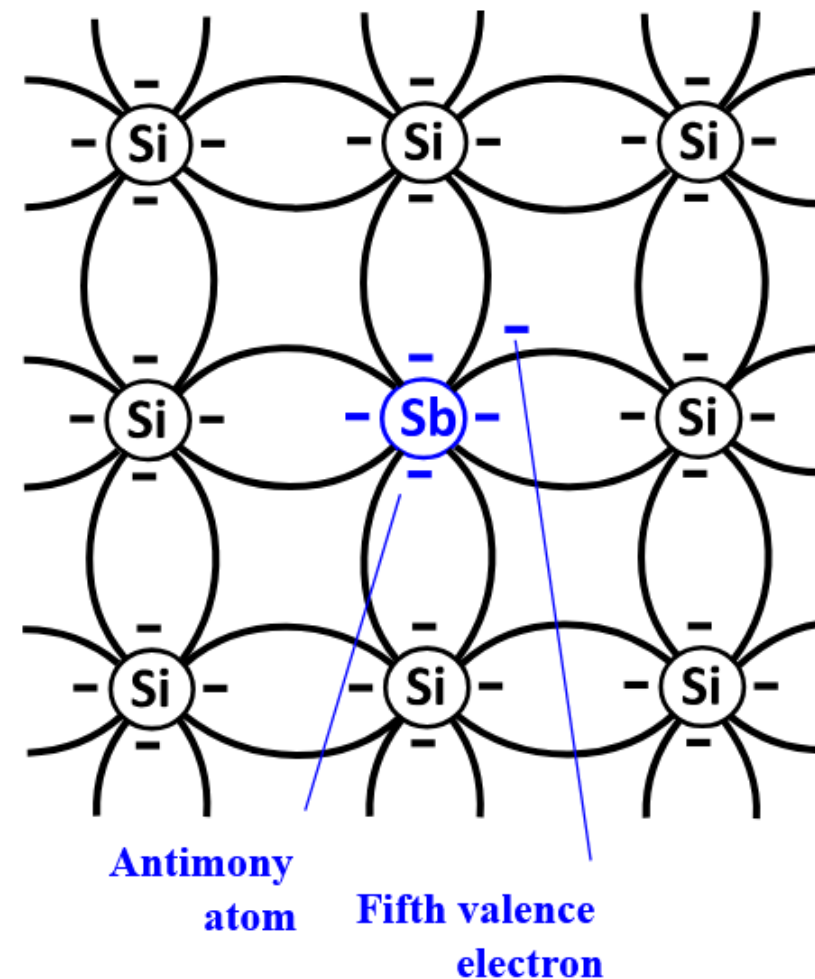
Примеси от **трета валентност** – бор (B), алуминий (Al), галий (Ga) се наричат **акцептори**, защото приемат един електрон от съседен атом и така оставят дупка (празно място) в полупроводниковия кристал.

n-тип полупроводник — формиране на токоносители

В силициев кристал са добавени донорни примеси от Антимон (Sb), който е от пета валентност.

Четири от валентните електрони на донорния атом образуват ковалентни връзки със съседни силициеви атоми. Петият електрон остава слабо свързан с ядрото и при незначително количество енергия може лесно се отдели от атома и става **свободен електрон**.

Когато неутрален Sb атом отдаде електрон, той става положително зареден йон. Йоните са свързани в кристалната решетка и не участват при формиране на тока.



n-тип полупроводник — формиране на токоносители

Йонизацията на донорите довежда до образуване само на един тип подвижни токоносители — свободни електрони.

Те са доминиращ тип токоносители и се наричат **основни токоносители**, а полупроводникът — **n** тип полупроводник.

$$n \gg p$$

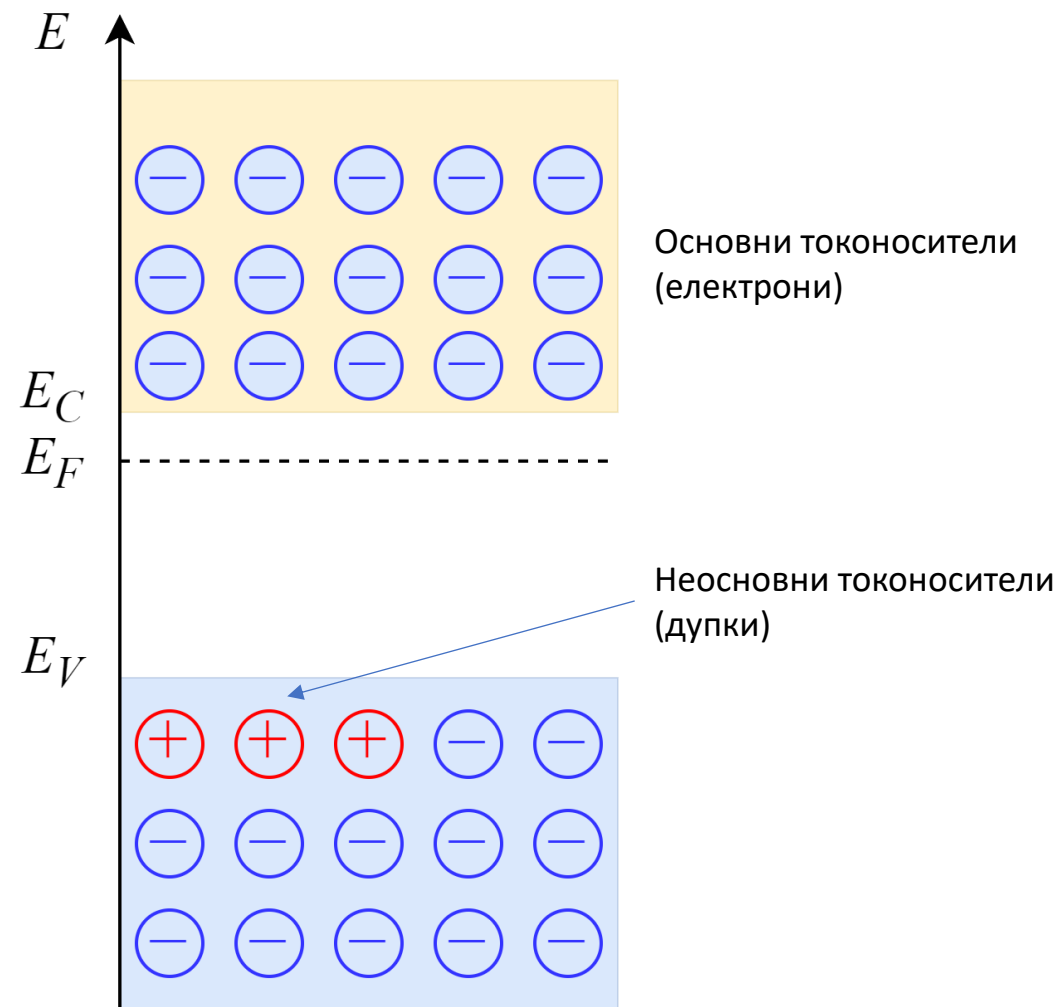
n — концентрация на електроните

p — концентрация на дупките

n-тип полупроводник

Електрони - основни носители (majority carriers)

Дупки — неосновни носители (minority carriers)



n-тип полупроводник — концентрация на токоносители

Концентрацията на основни токоносители (електрони) се определя от количеството на въведените в кристала примеси.

То може да бъде контролирано с висока точност при производството.

$$n = N_D$$

n – концентрация на електроните

N_D – концентрация на донорните йони

Неосновните токоносители (дупки) се формират при разкъсване на ковалентни връзки.

Концентрациите на двата типа токоносители са свързани посредством законът за действие на масите:

$$np = n_i^2$$

p – концентрацията на дупките

n_i – концентрация на токоносителите в собствен полупроводник

Концентрацията на **основните токоносители** не зависи от температурата в нормалния температурен диапазон на експлоатация на ПП елементи.

Концентрацията на **неосновните токоносители** много силно зависи от температурата.

$$p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

n-тип полупроводник — ниво на Ферми

Добавянето на донорни или акцепторни примесни атоми към полупроводник ще промени разпределението на електрони и дупки в материала.

Тъй като енергията на Ферми е свързана с функцията на разпределение, енергията на Ферми ще се промени с добавянето на допантни атоми.

$g_c(E)$ – плътност на състоянията в зоната на проводимост

$g_v(E)$ – плътност на състоянията във валентната зона

$f_F(E)$ – функция на Ферми-Дирак

n_0 – концентрация на електрони

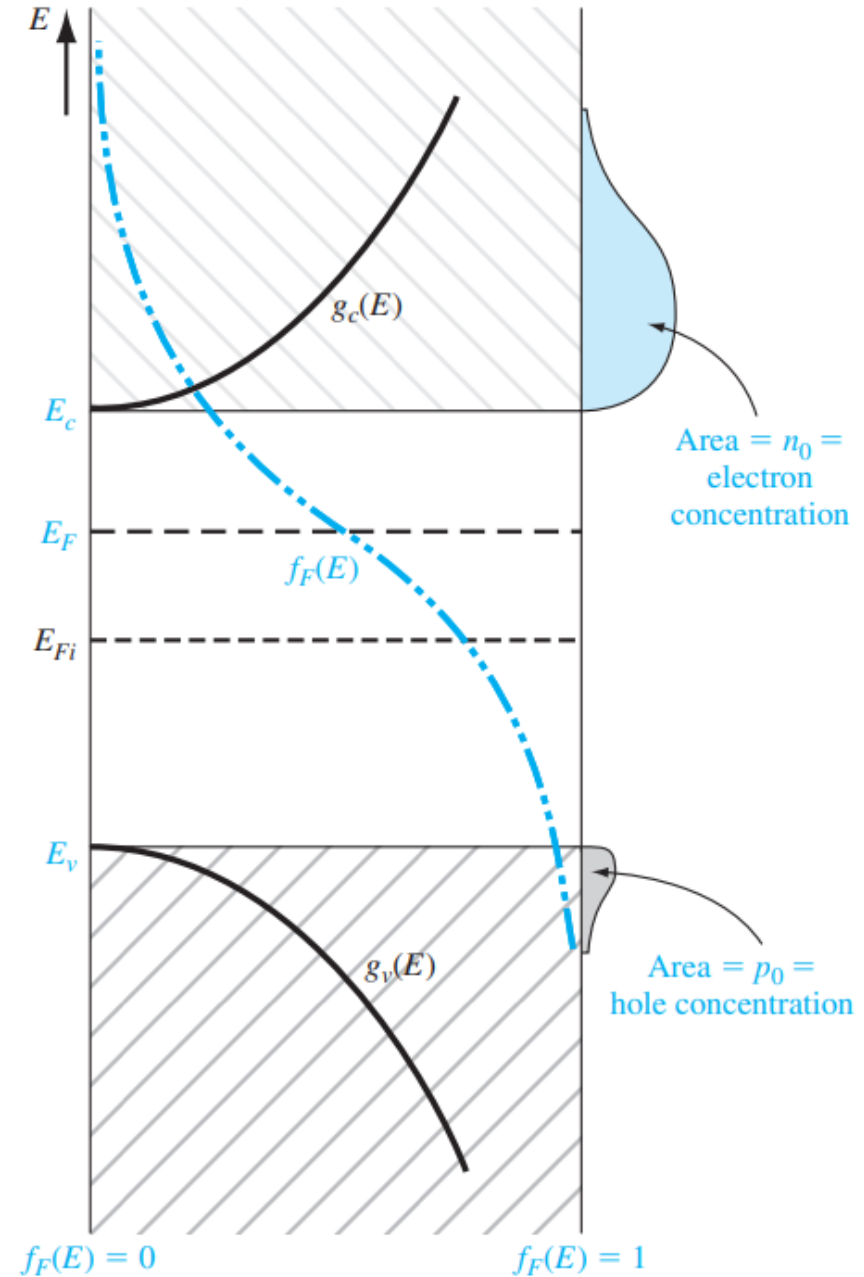
p_0 – концентрация на дупки

$$n_0 = \int g_c(E) f_F(E) dE$$

$$p_0 = \int g_v(E)[1 - f_F(E)] dE$$

$$n_0 = N_c \exp \left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT} \right]$$

$$p_0 = N_v \exp \left[\frac{-(E_F - E_v)}{kT} \right]$$


$$f_F(E) = 0$$
$$f_F(E) = 1$$

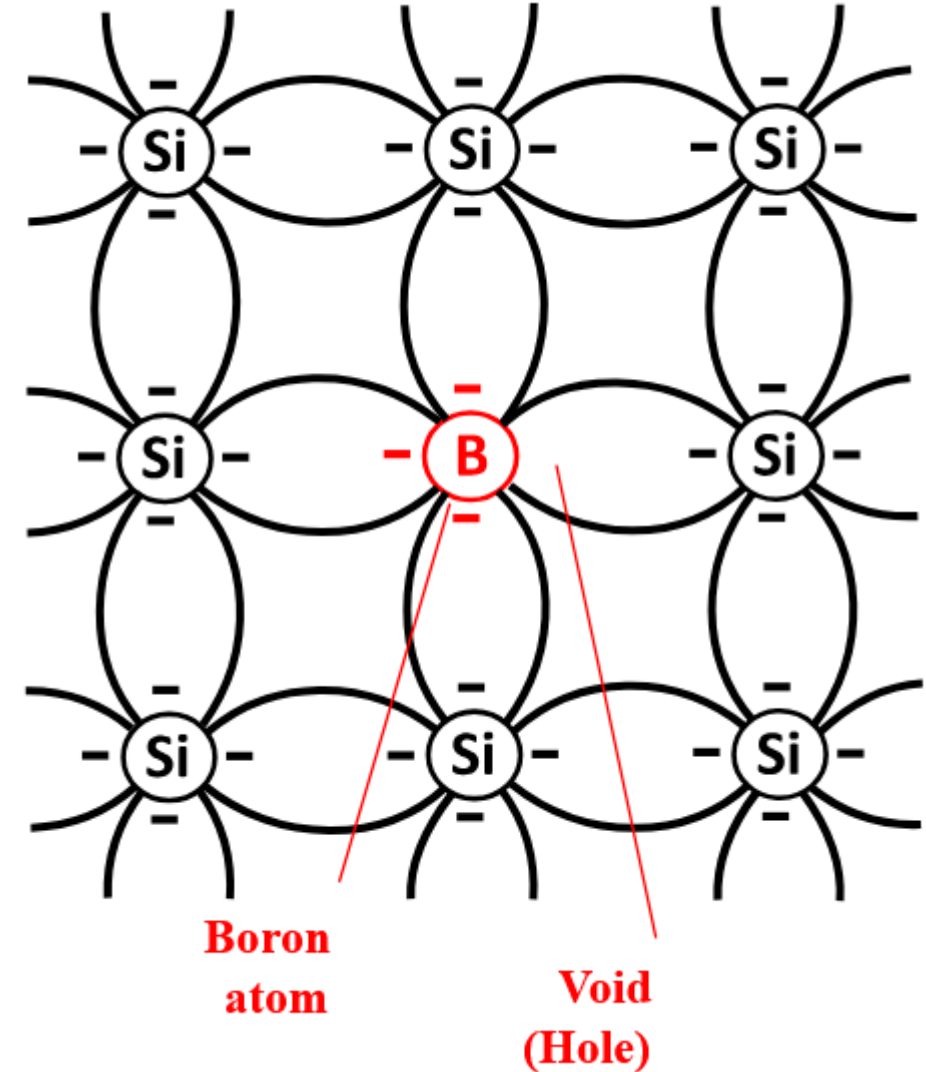
p-тип полупроводник — основни и неосновни токоносители

В силициев кристал са добавени акцепторни примеси от Бор (B), който е от трета валентност.

Три от валентните електрони на акцепторния атом образуват ковалентни връзки със съседни силициеви атоми.

На мястото на четвъртата ковалентна връзка остава ваканция („дупка“), която може да бъде заета от свободен електрон.

При разглеждане на процесите в полупроводниците, **дупките** се разглеждат като **подвижни токоносители с положителен заряд**.



р-тип полупроводник — формиране на токоносители

Йонизацията на акцепторите довежда до образуване само на един тип подвижни токоносители – дупки. Те са доминиращ тип токоносители и се наричат **основни токоносители**, а полупроводникът – **р** тип полупроводник.

$$p \gg n$$

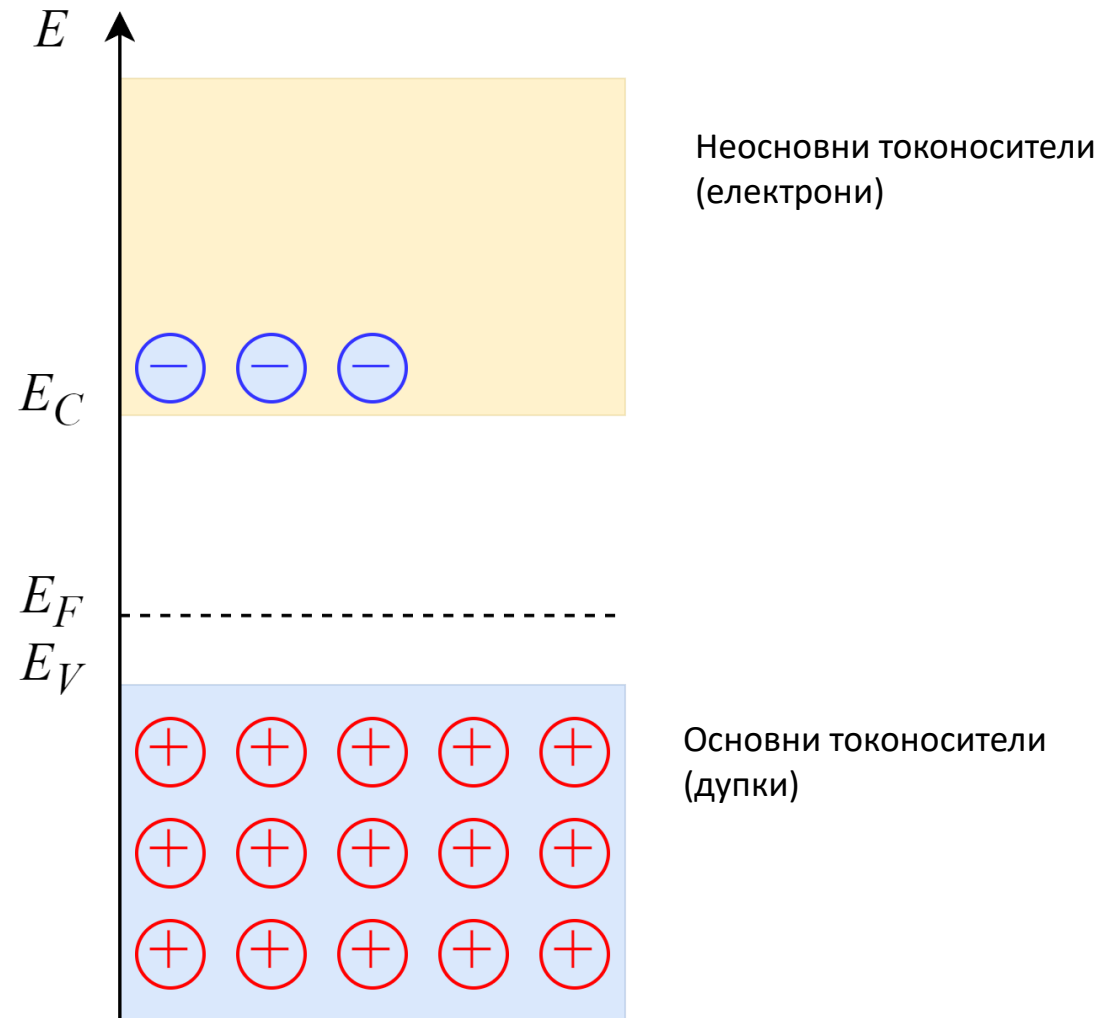
n – концентрация на електроните

p – концентрация на дупките

р-тип полупроводник

Дупки - основни носители (majority carriers)

Електрони – неосновни носители (minority carriers)



p-тип полупроводник — ниво на Ферми

Добавянето на донорни или акцепторни примесни атоми към полупроводник ще промени разпределението на електрони и дупки в материала.

Тъй като енергията на Ферми е свързана с функцията на разпределение, енергията на Ферми ще се промени с добавянето на допантни атоми.

$g_c(E)$ – плътност на състоянията в зоната на проводимост

$g_v(E)$ – плътност на състоянията във валентната зона

$f_F(E)$ – функция на Ферми-Дирак

n_0 – концентрация на електрони

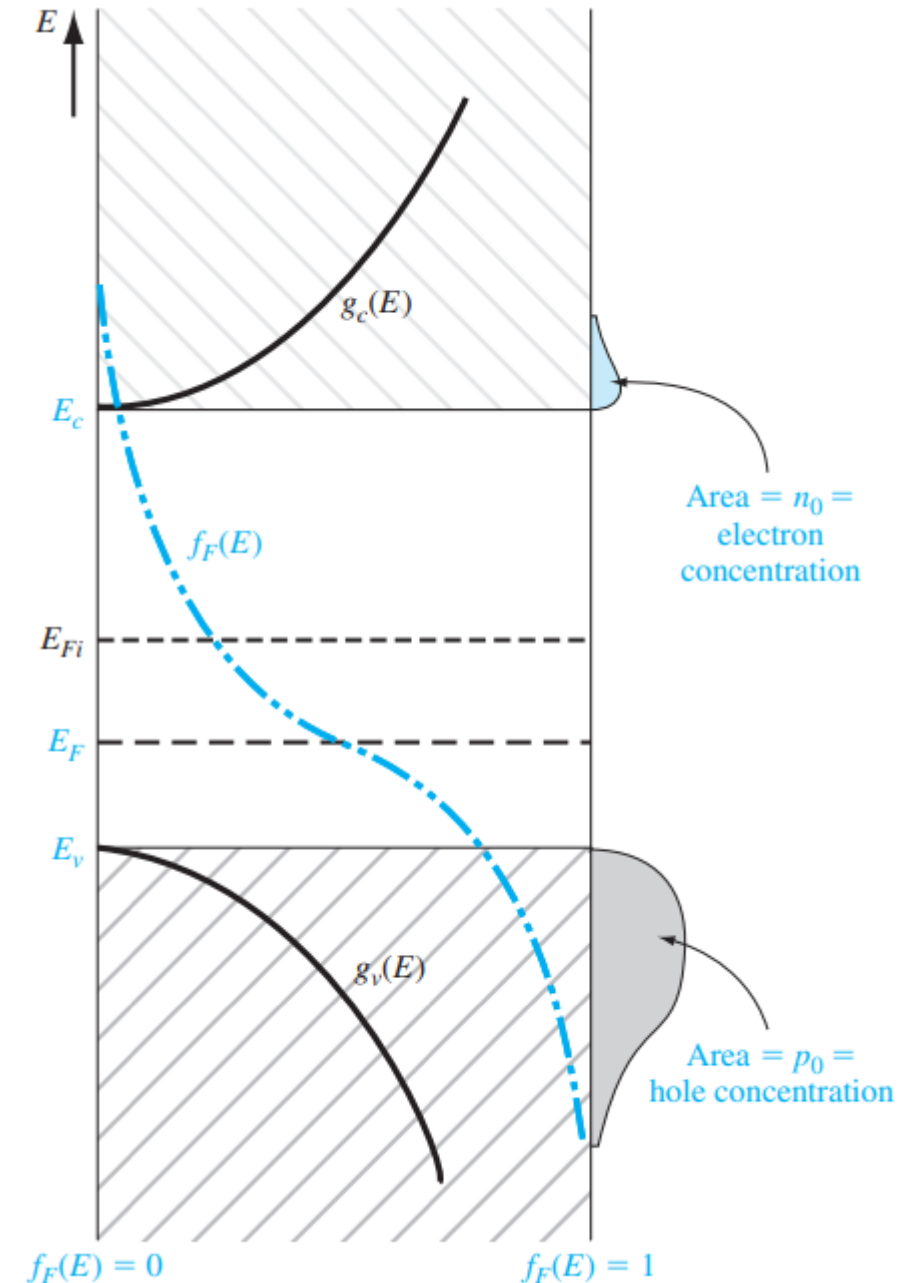
p_0 – концентрация на дупки

$$n_0 = \int g_c(E) f_F(E) dE$$

$$p_0 = \int g_v(E) [1 - f_F(E)] dE$$

$$n_0 = N_c \exp \left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT} \right]$$

$$p_0 = N_v \exp \left[\frac{-(E_F - E_v)}{kT} \right]$$



Допълнителни материали

- D. Neamen, Semiconductor Physics and Devices
- Introduction to Semiconductor Physics and Devices <https://www.youtube.com/watch?v=OVnVN0vSXn0>

