



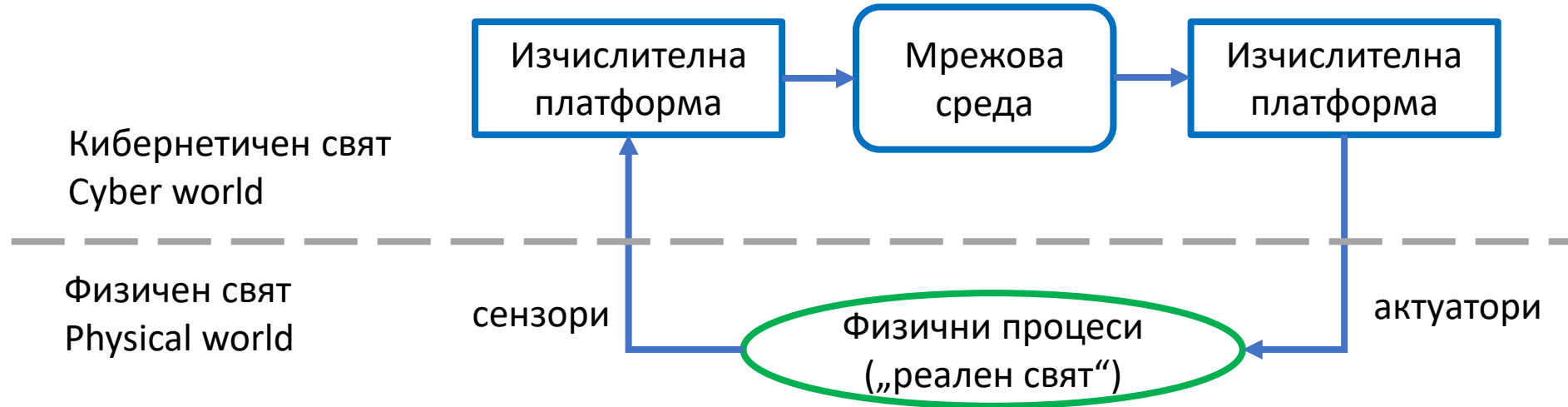
Полупроводници

Защо изучаваме полупроводниковите елементи?

Основни понятия и приложения

За какво служат полупроводниковите елементи?

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

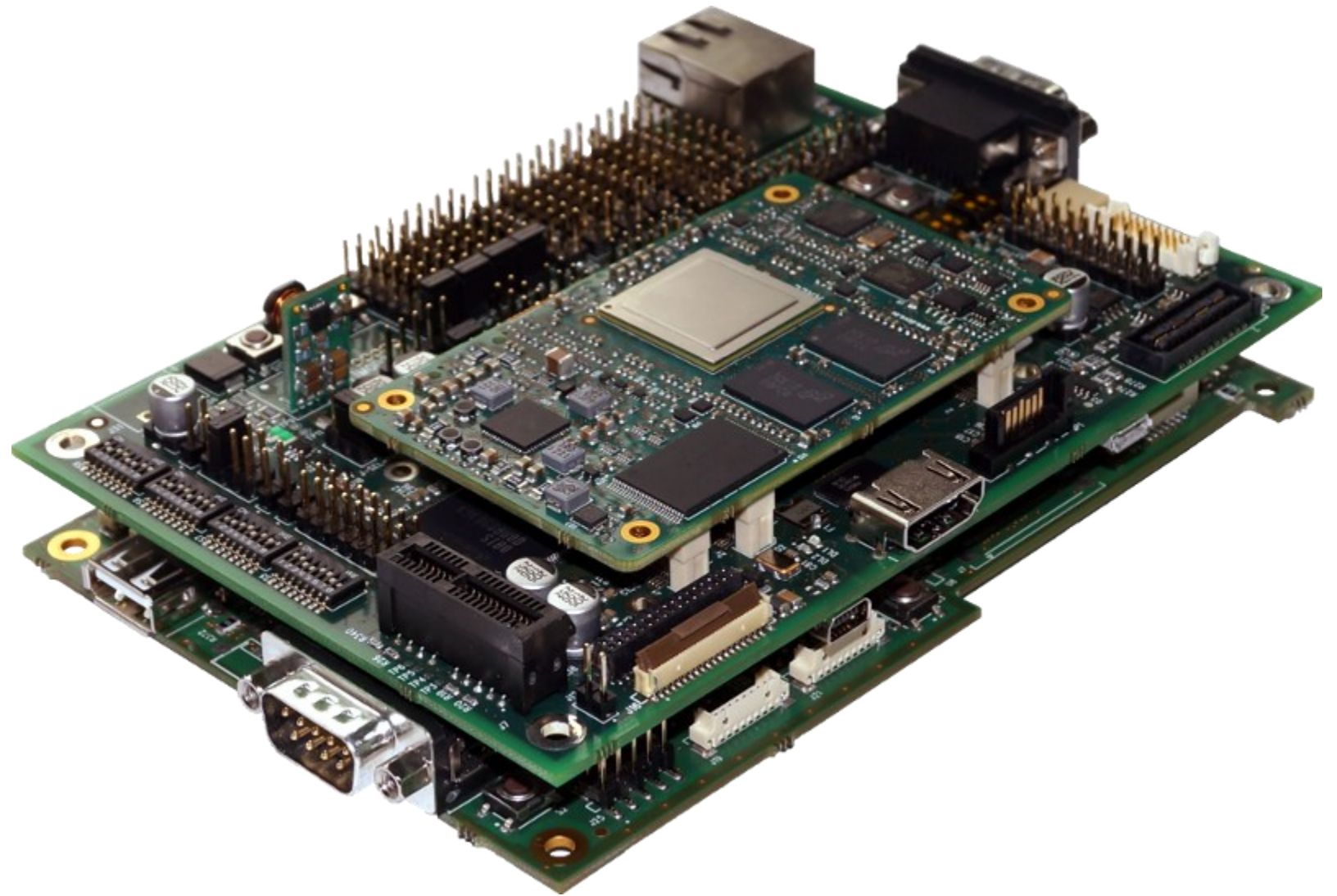


Сензорът е устройство, което измерва физична величина

Актуаторът е устройство, което променя физична величина

Изчислителна платформа – обработка на данни

Полеви транзистори
Изправителни диоди
Ценерови диоди

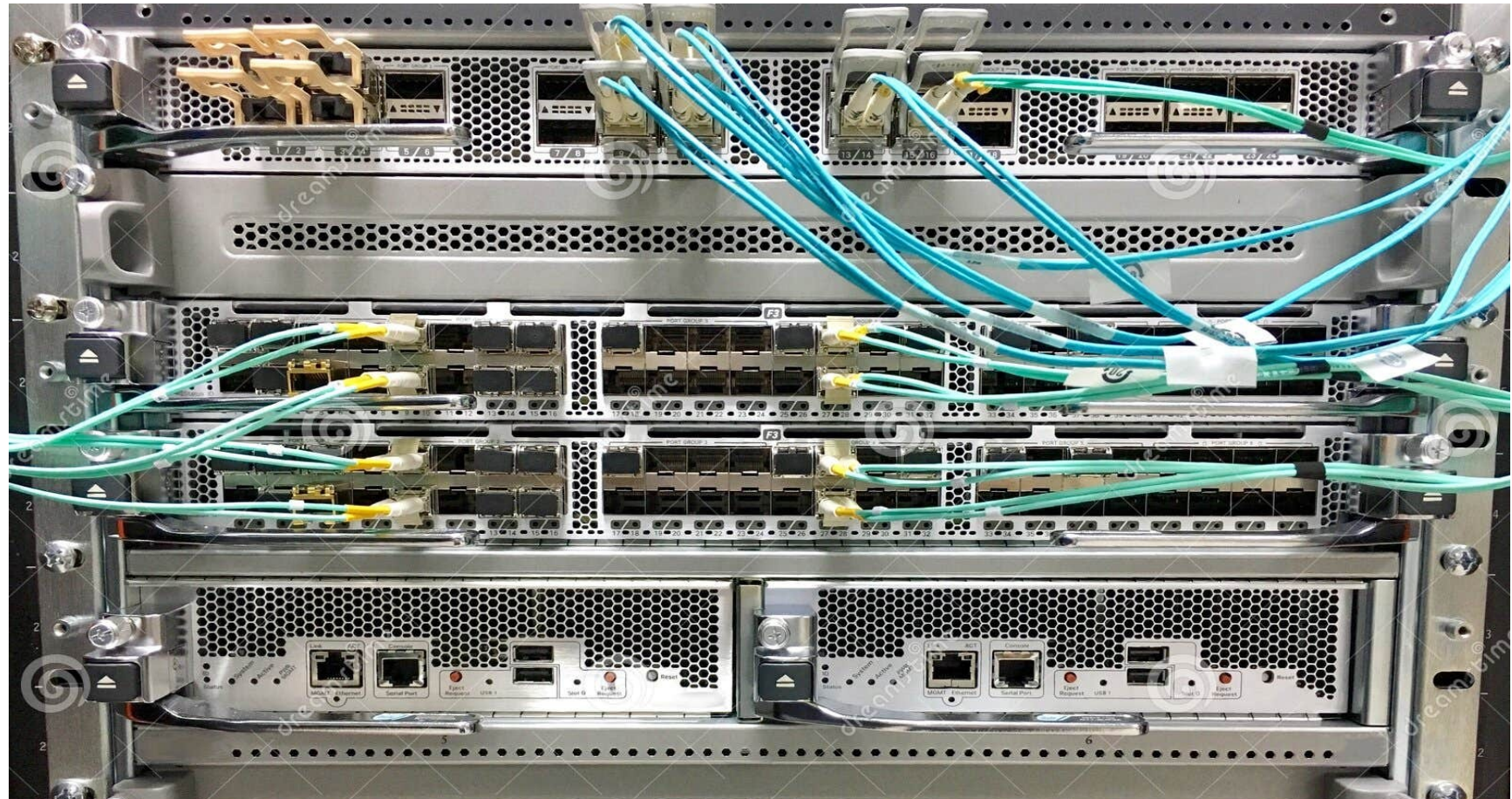


Мрежа – пренос на данни

Полеви транзистори

Светодиоди / Лазерни диоди

Фотодиоди



Сензори – преобразуват физична величина в електрически сигнал

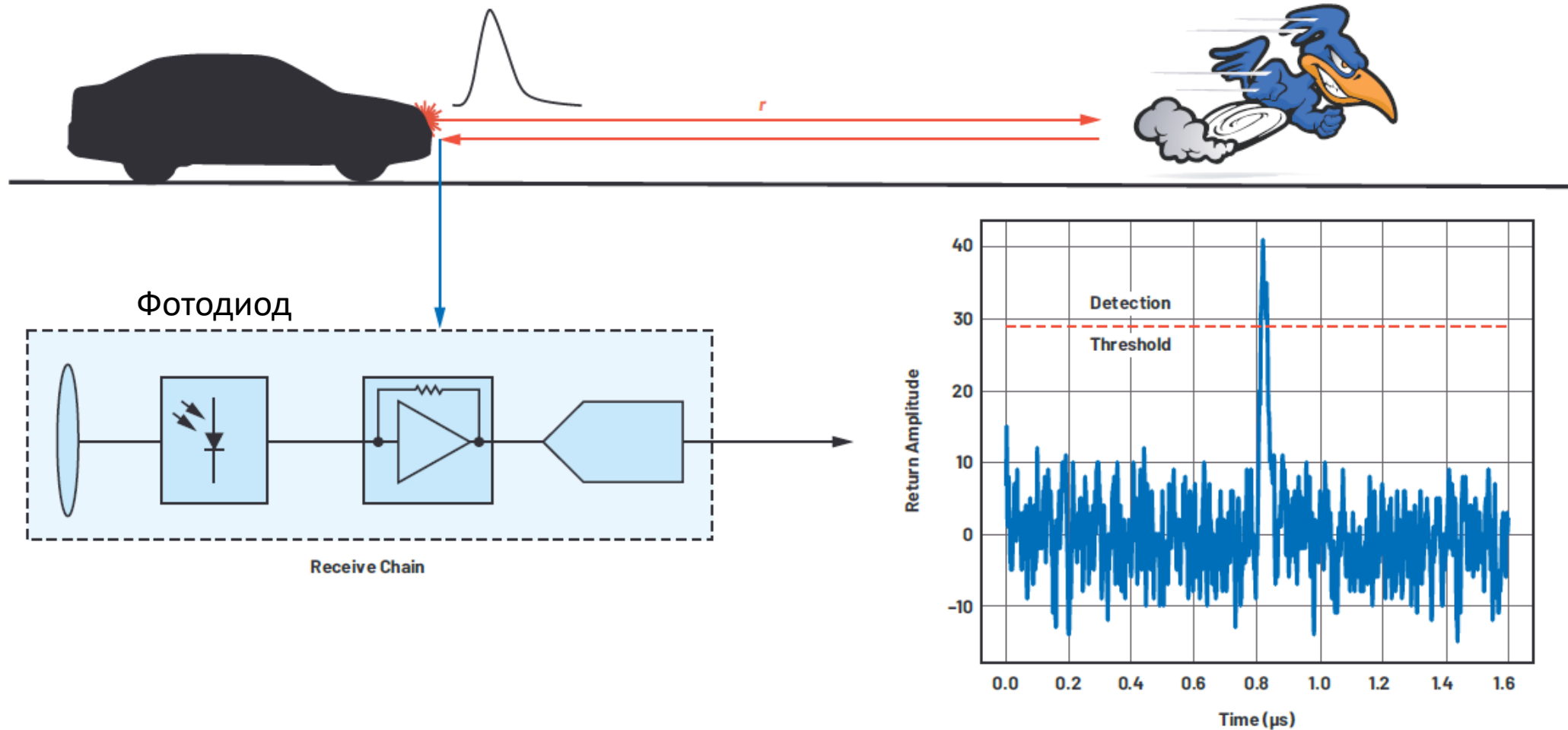
Фотодиоди

Усилватели (транзистори)

Измерване на температура (диоди)

Акселерометри (ускорение, позиция)

Пример – LIDAR (Light Detection and Ranging)



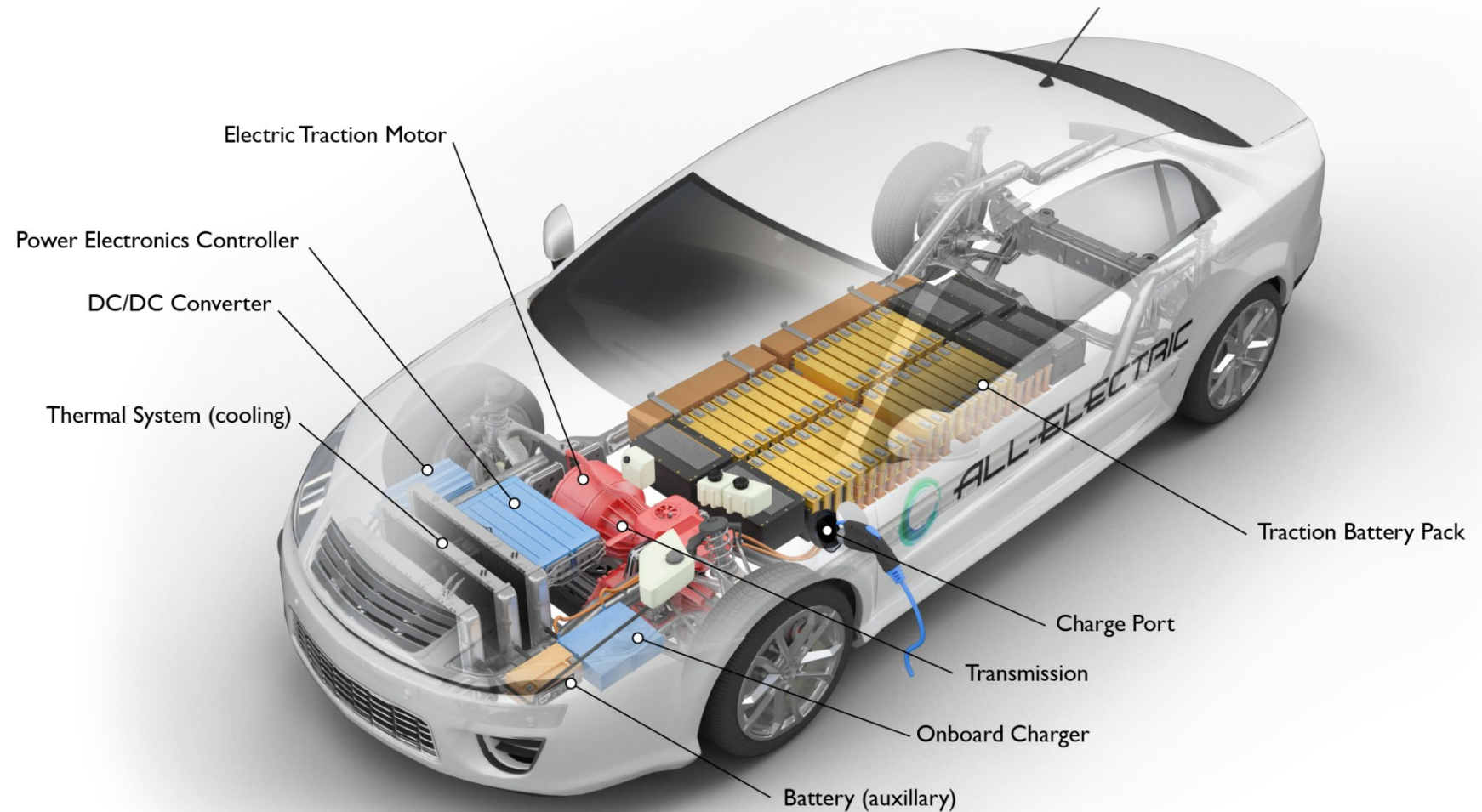
Актуатори – променя физична величина

Фарове, светлини (светодиоди)

Управление на електромотори (MOS транзистори, диоди)

Зареждане на батерии (MOS транзистори, диоди)

Пример – EV Powertrain

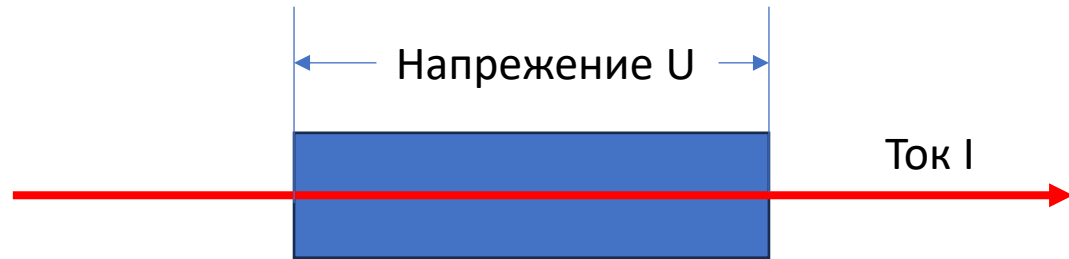


Съпротивление и Проводимост

Електрически ток – насочено движение на токоносители (електрони или йони)

Електрическо съпротивление – мерило на това доколко един материал „се противи“ на протичането на електрически ток

Съпротивлението на един предмет се дефинира като отношение на напрежението върху него към тока през него. Обратната стойност се нарича проводимост.



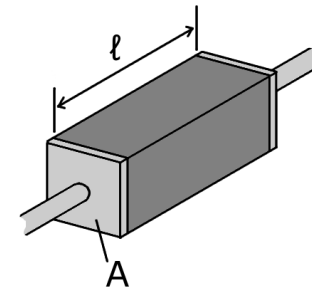
$$R = \frac{U}{I}$$

Съпротивлението зависи от материала, от който е направен предмета и от неговите размери.

Характеристики на материала, които не зависят от размерите

Специфично съпротивление - $\rho [\Omega \cdot m]$ – ом-метър

Специфична проводимост - $\sigma [S \cdot m^{-1}]$ - сименс на метър



$$R = \rho \frac{\ell}{A},$$

$$G = \sigma \frac{A}{\ell}.$$

Съпротивление и Проводимост

Мерни единици

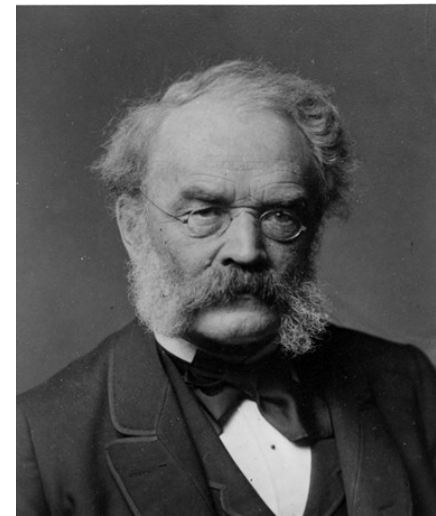
Електрическо съпротивление - Ом [Ω]

Електрическа проводимост – Сименс [S]



Georg Simon Ohm

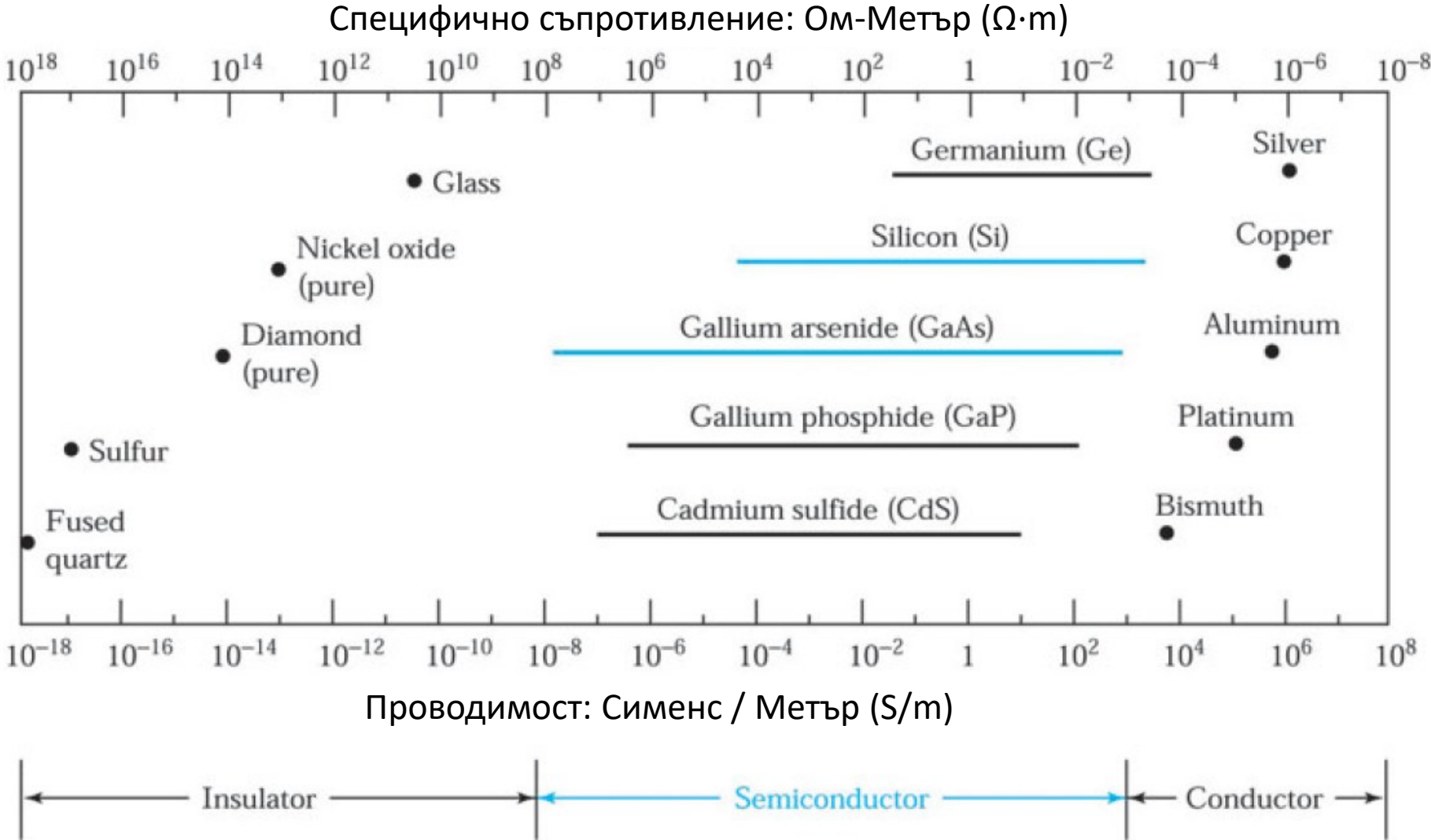
Формулирал връзката между напрежението върху проводник и тока, който протича през него.



Ernst Werner Siemens

Изобретил е електрическият травай, тролейбус, електрическият локомотив и асансьор.

Изолатори, проводници и полупроводници



Проводимост на полупроводниците

Какво прави полупроводниците „специални“?

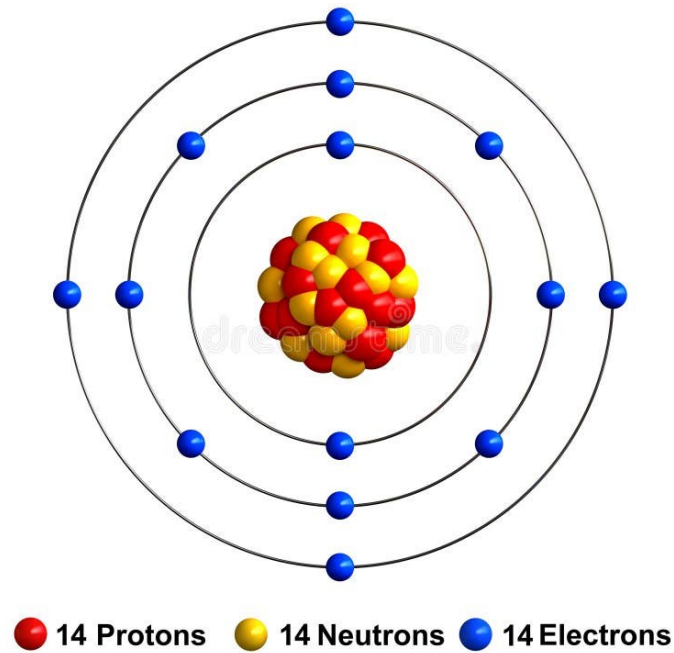
1. Тяхната проводимост може да бъде прецизно контролирана чрез добавяне на примесни атоми (в много-ниски концентрации: $1\mu\text{g}$ – 1mg примеси на 1kg чист полупроводник)

2. Също така, тя силно зависи от:

- Температура
- Осветеност
- Магнитно поле

Тези свойства на полупроводниците ги прави едни от най-важните материали в електрониката.

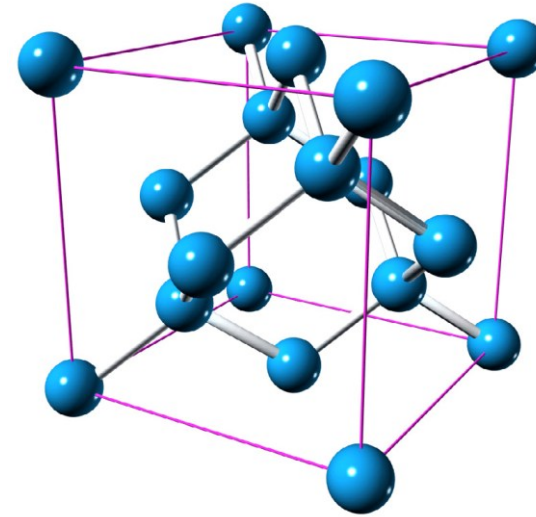
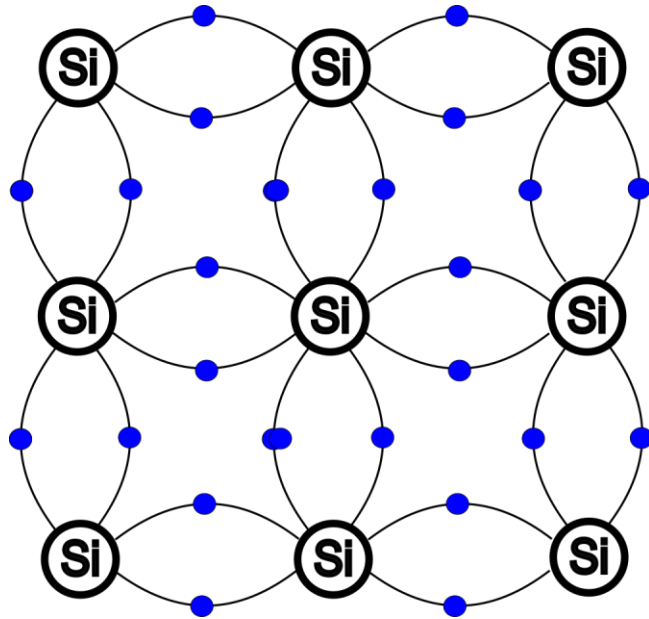
Структура на атом на силиций (Si)



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.

Кристална структура на силиций



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.

Енергийни зони

Защо материалите са проводници или изолатори?

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

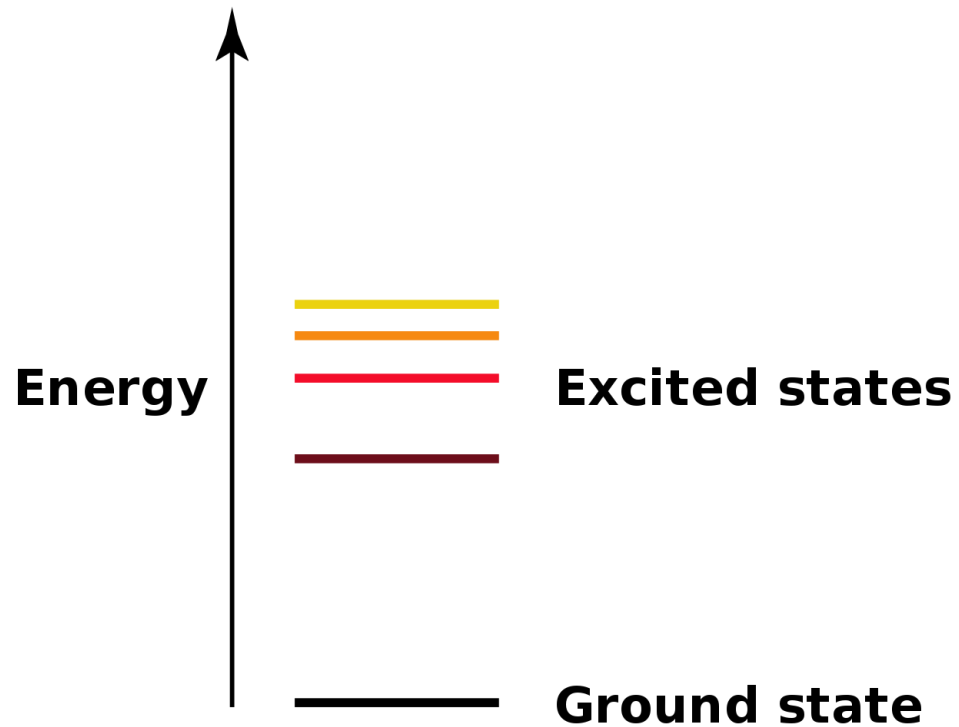
R – константа на Ридберг

Z – атомно число

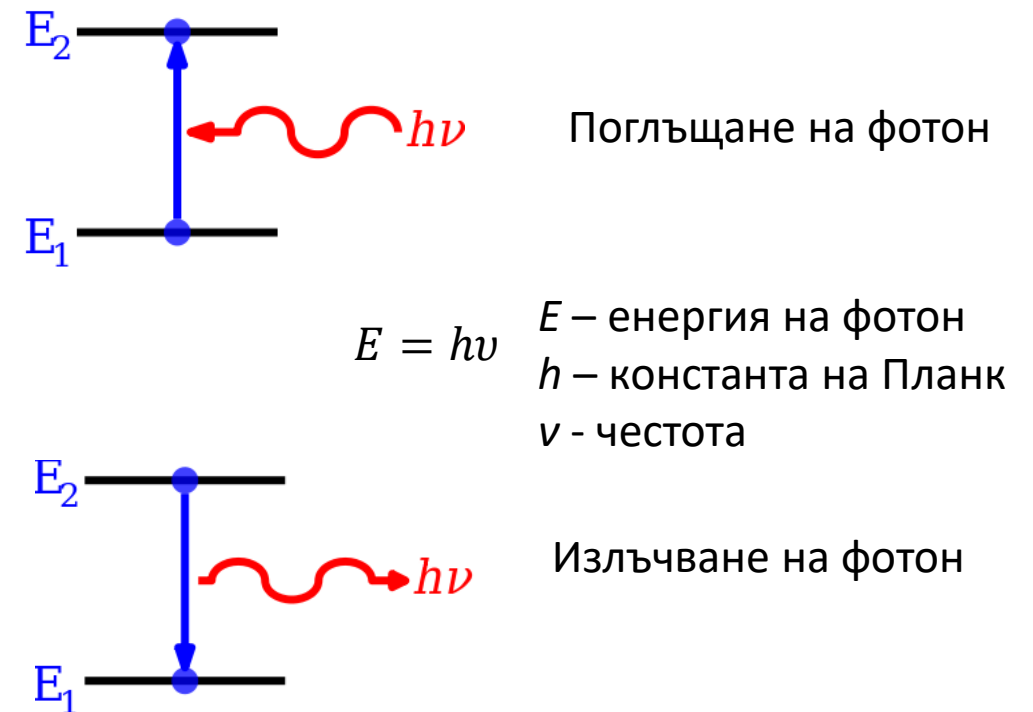
n – квантово число (1,2,3 ...)

Енергийни нива

Енергийни нива на електрон в атом



Преходи между енергийни нива



Принцип на Паули

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.

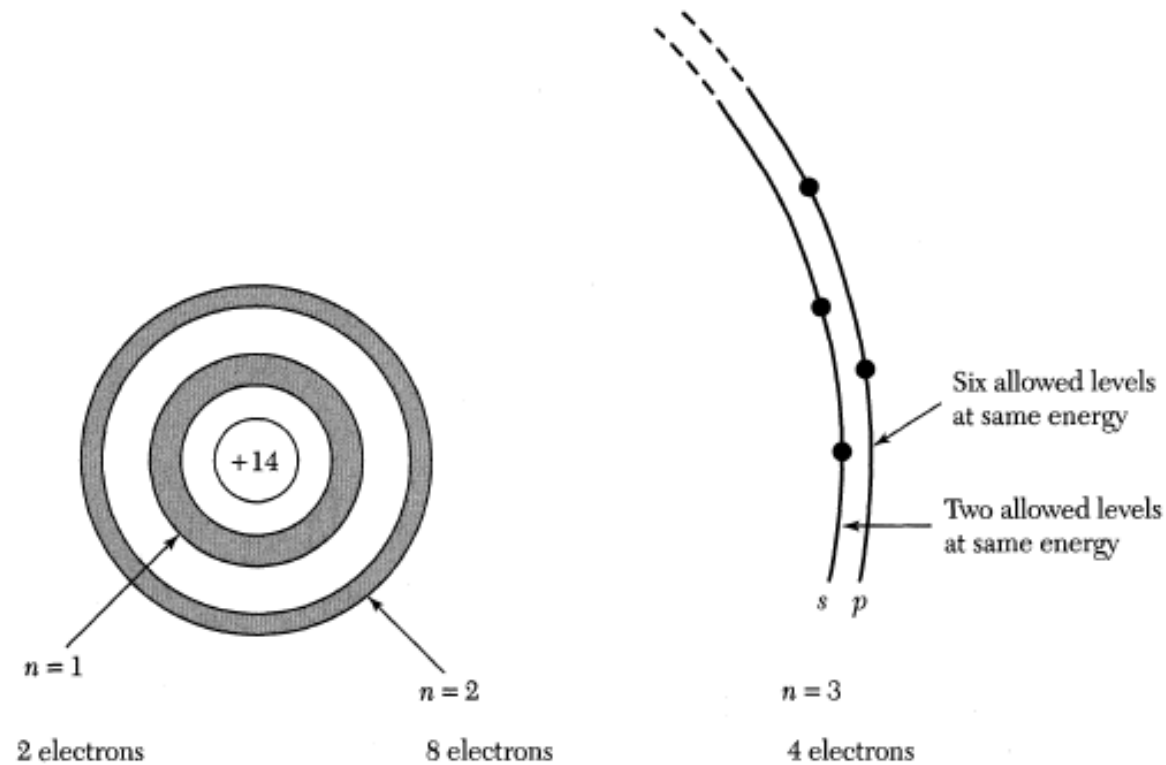
квантови числа

n – главно

l – орбитално

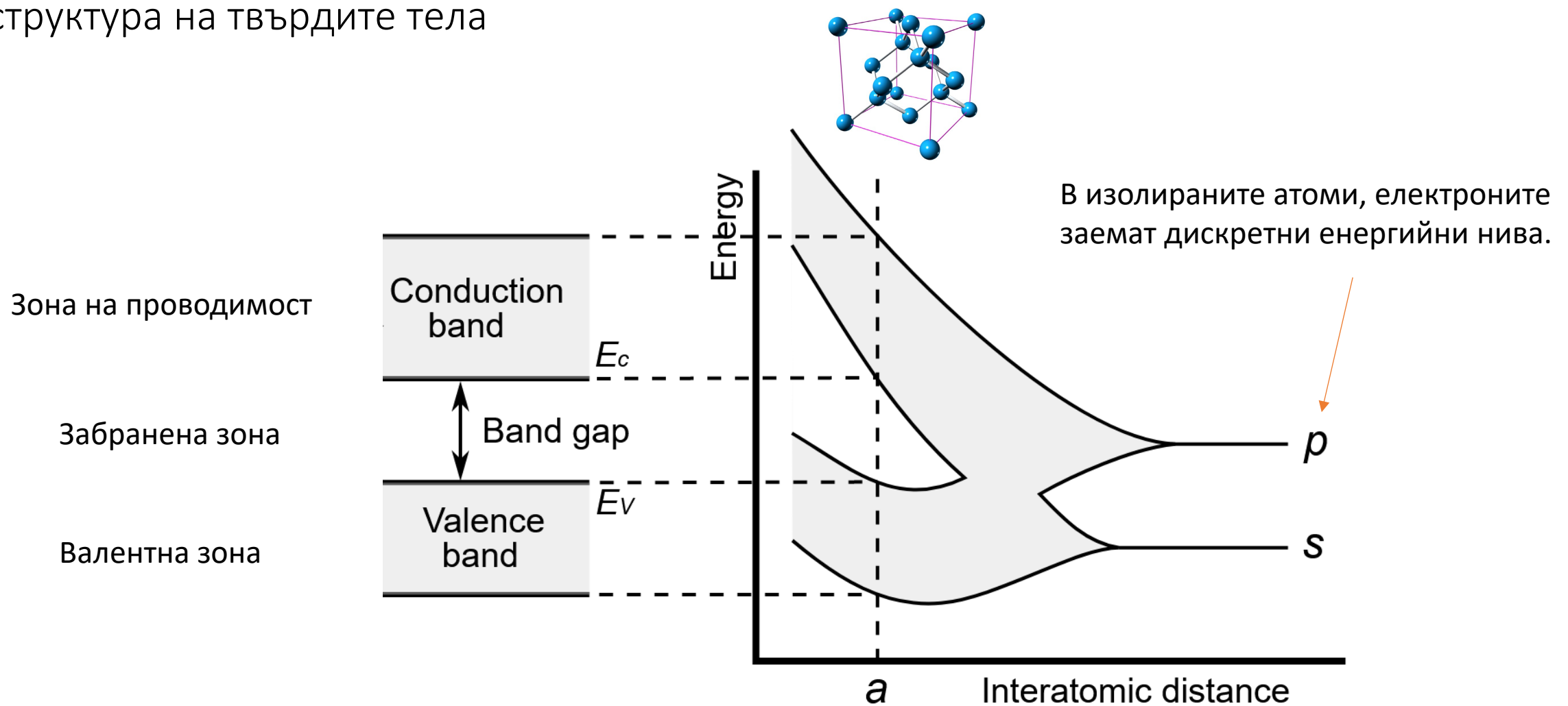
m – магнитно

s - спиново



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

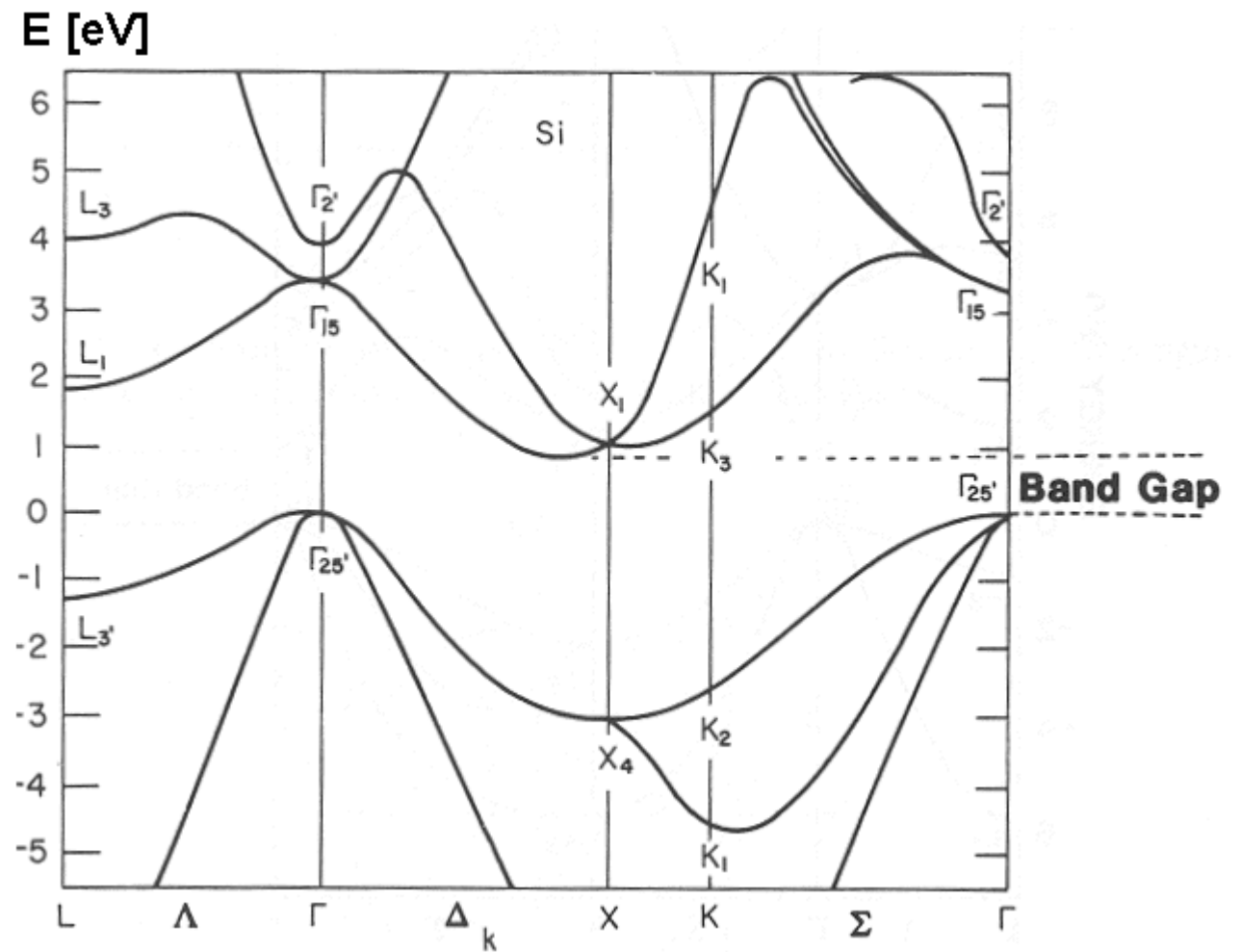
Зонна структура на твърдите тела



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“.

Зонна структура на силиций



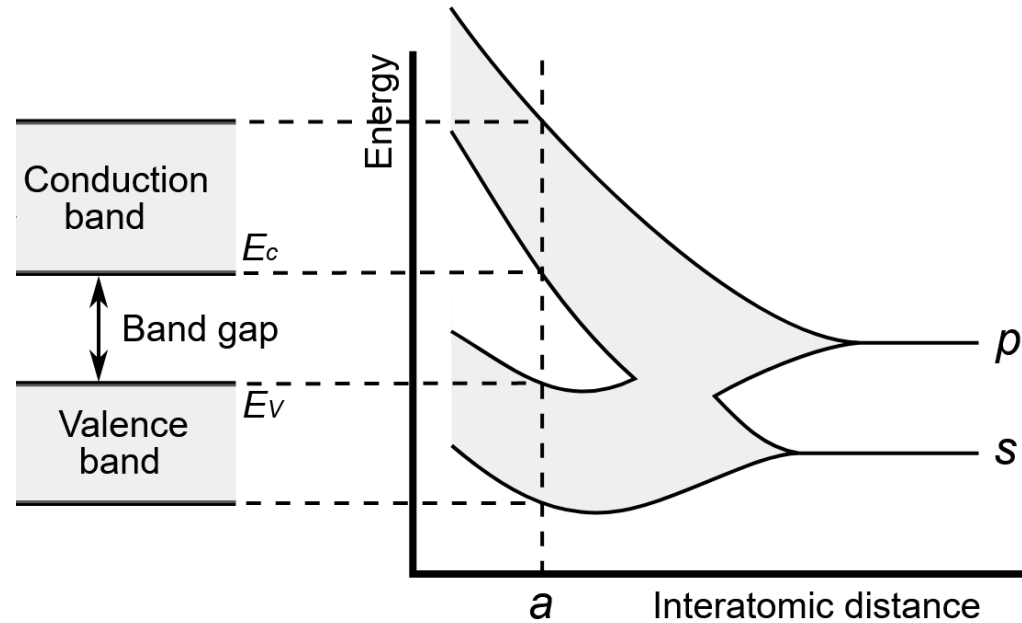
Границите на енергийните зони зависи не са „плоски“. Те зависят от ориентацията на кристалната решетка спрямо посоката на движение на токоносителите.

Широчина на забранената зона

$$E_g = E_c - E_v$$

Bandgap energy

Широчина на
забранената зона



Валентаната зона е запълнена от свързани електрони. Те не могат да се движат и да участват във формиране на електрически ток.

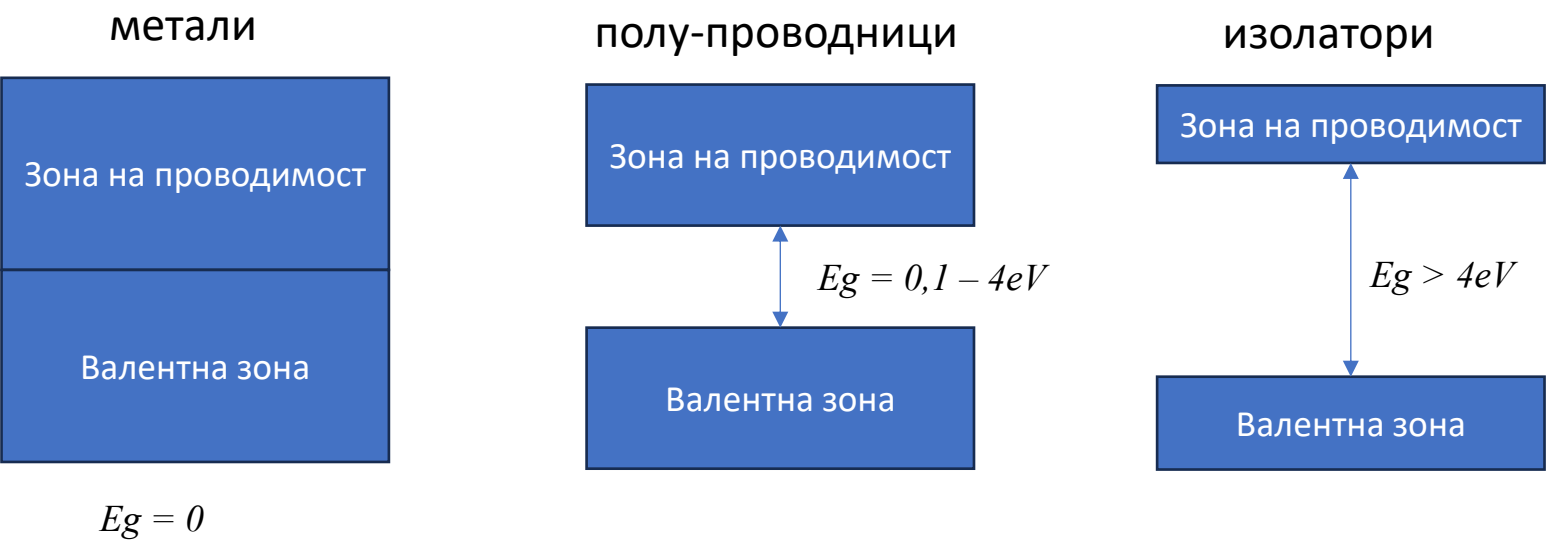
В зоната на проводимост могат да се намират високо-енергийно свободни електрони. Те се движат свободно, защото тази зона е почти празна.

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.

Широчина на забранената зона

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

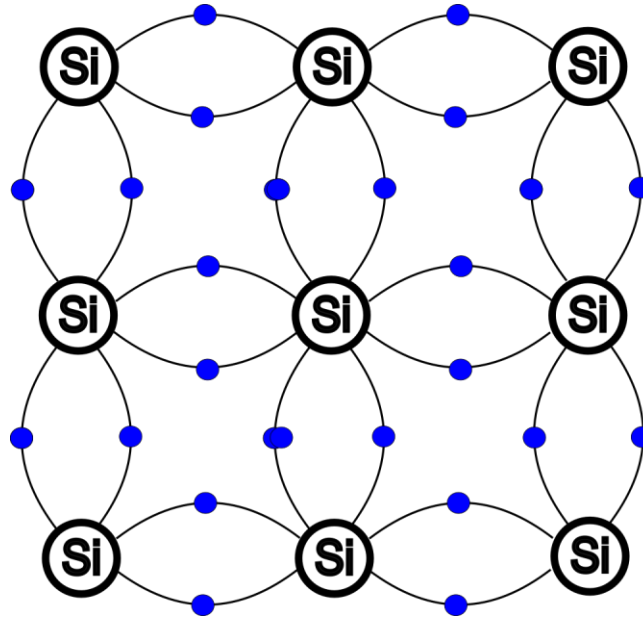


	Si	4H-SiC	GaAs	GaN
Energy Gap (eV)	1.12	3.26	1.43	3.5

Как да направим силицият полезен?

Донори, акцептори и ниво на Ферми

Перфектният силициев кристал

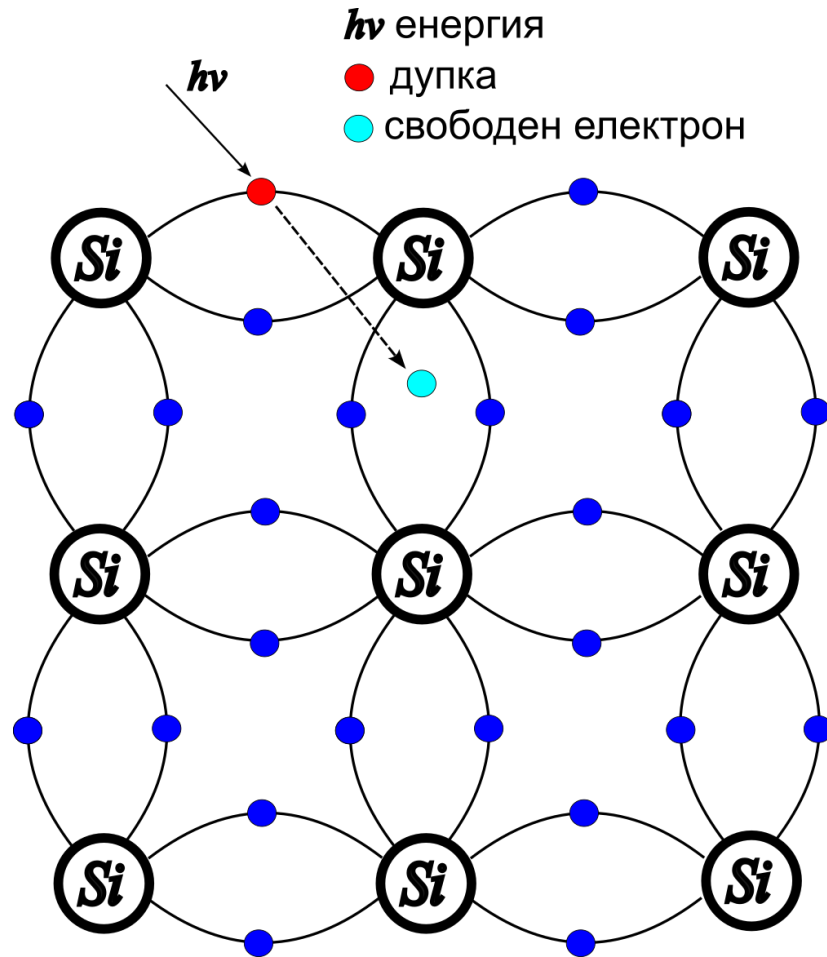


Ако всички ковалентни връзки са цели (при температура $T=0\text{K}$), силицият е идеален изолатор. В това си състояние той е безполезен за целите на електрониката.

За да създадем свободни токоносители, трябва да разкъсаме част от ковалентните връзки. Това става като внесем външна енергия в кристалната решетка – например топлина или лъчиста енергия.

Токоносители в полупроводника: електрони и дупки

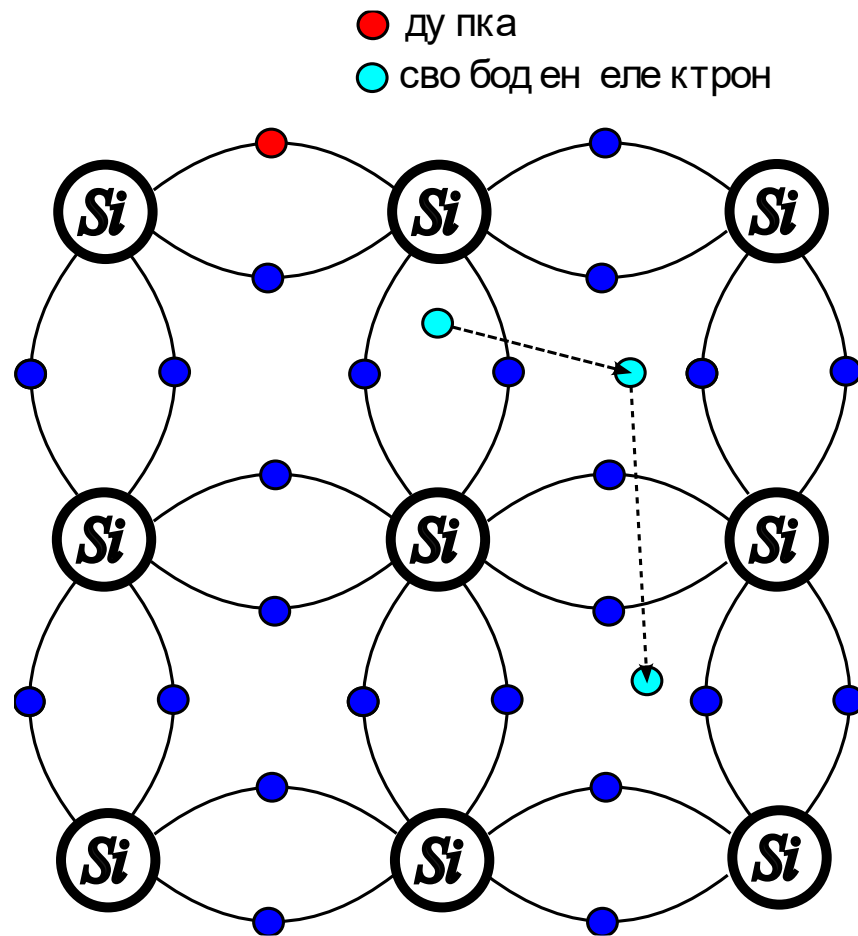
Привнесена енергия (фотон или фонон) разкъсва валентните връзки и образува **свободни** токоносители.



Два типа носители на заряд:

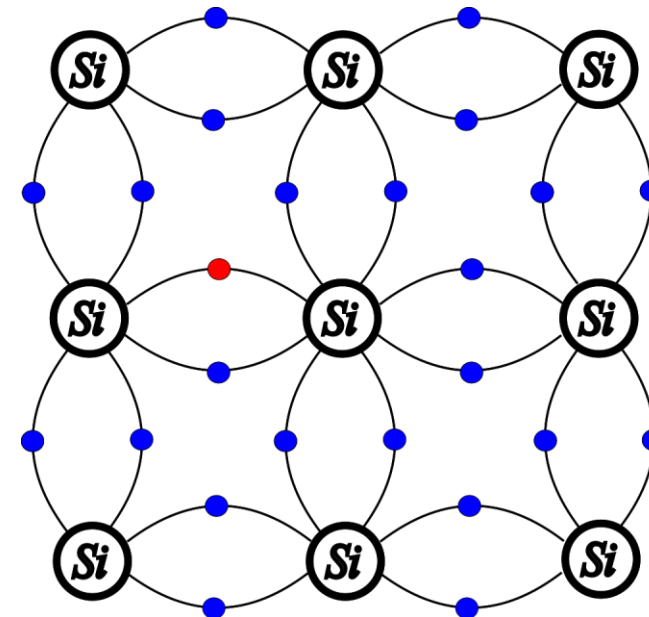
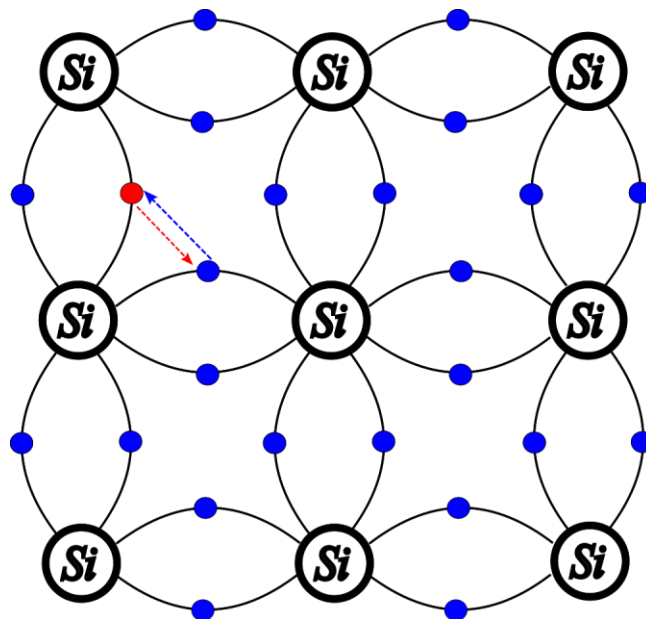
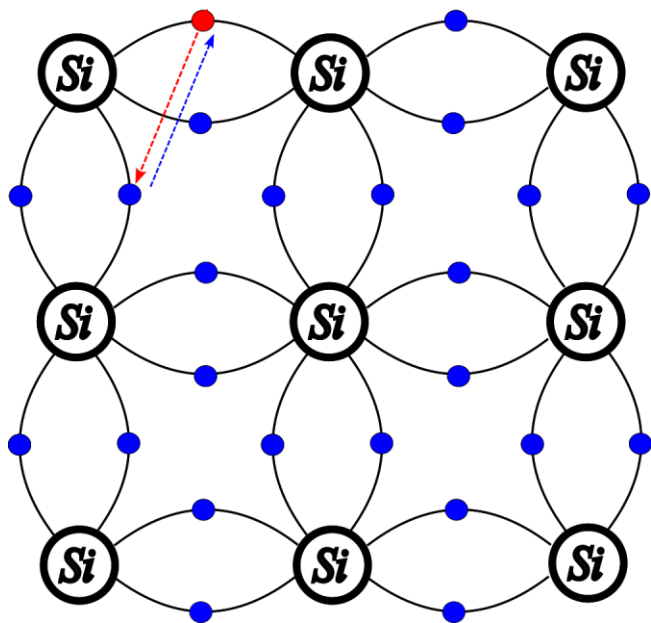
- свободни електрони, отрицателен заряд
- дупки – квази-частици, които имат поведение на подвижни положителни заряди

Движение на свободните електрони



Веднъж напуснали ковалентната връзка, електрони се движат свободно между атомите на кристалната решетка.

Движение на дупките



Реално се движат електрони, но при описанието на процесите в полупроводниковите елементи е удобно да разглеждаме дупките като подвижни токоносители с положителен заряд.

Ще използваме термините „ток от електрони“ и „ток от дупки“.

Резюме

В чистият, или както се нарича „собствен“ (intrinsic) полупроводник, температура създава еднакъв брой дупки и свободни електрони.

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

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** .

При стайна температура, за силиция $n_i = 10^{10}$ токоносители в кубичен сантиметър. За сравнение, за медта това число е 10^{22} . Чистият силиций е лош проводник на електричество и е безполезен за създаване на електронни прибори.

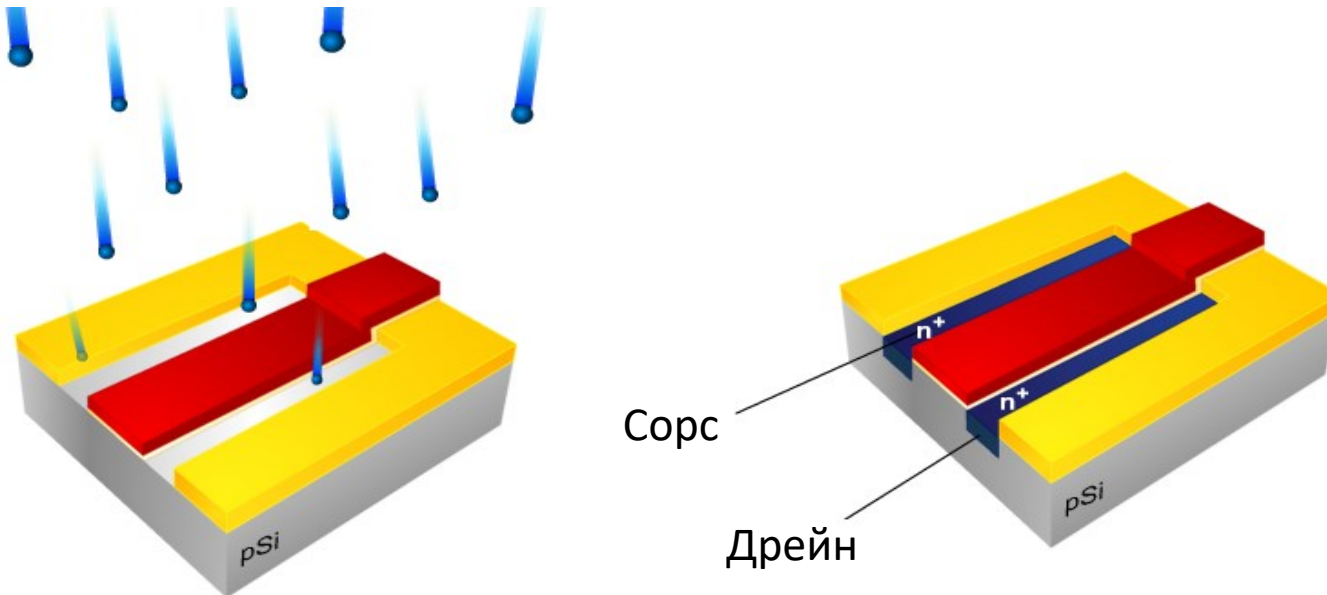
Освен това, собствената концентрация зависи експоненциално от температурата. При малки промени на температурата, електрическите свойства се променят силно, което затруднява създаването на полезни електронни схеми.

Контролиране на проводимостта посредством примеси

За да направим полупроводниците полезни, ние трябва да добавим токоносители, типът и концентрацията на които можем прецизно да контролираме.

Можем да увеличим количеството на токоносителите чрез добавяне на примеси. Този процес се нарича „легиране“ (doping).

В зависимост от валентността на приместите, ще получим т.нар. **n-тип** или **p-тип** полупроводник.



Periodic Table of Elements (Partial View):

Atomic Number	Symbol	Name	Electron Configuration
1	H	Hydrogen	1s ¹
2	He	Helium	1s ²
3	Li	Lithium	[He]2s ¹
4	Be	Beryllium	[He]2s ²
11	Na	Sodium	[Ne]3s ¹
12	Mg	Magnesium	[Ne]3s ²
17	Cl	Chlorine	[Ne]3s ² 3p ⁵
13	B	Boron	[He]2s ² 2p ¹
14	C	Carbon	[He]2s ² 2p ²
15	N	Nitrogen	[He]2s ² 2p ³
16	O	Oxygen	[He]2s ² 2p ⁴
17	F	Fluorine	[He]2s ² 2p ⁵
18	Ne	Neon	[He]2s ² 2p ⁶
19	K	Potassium	[Ar]4s ¹
20	Ca	Calcium	[Ar]4s ²
21	Sc	Scandium	[Ar]4s ² 3d ¹
22	Ti	Titanium	[Ar]4s ² 3d ²
23	V	Vanadium	[Ar]4s ² 3d ³
24	Cr	Chromium	[Ar]3d ⁵ 4s ¹
25	Mn	Manganese	[Ar]4s ² 3d ⁵
26	Fe	Iron	[Ar]4s ² 3d ⁶
27	Co	Cobalt	[Ar]4s ² 3d ⁷
28	Ni	Nickel	[Ar]4s ² 3d ⁸
29	Cu	Copper	[Ar]4s ¹ 3d ¹⁰
30	Zn	Zinc	[Ar]4s ² 3d ¹⁰
31	Ga	Gallium	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ¹
32	Ge	Germanium	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ²
33	As	Arsenic	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ³
34	Se	Selenium	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁴
35	Br	Bromine	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁵
36	Kr	Krypton	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁶
37	Rb	Rubidium	[Kr]5s ¹
38	Sr	Strontium	[Kr]5s ²
39	Y	Yttrium	[Kr]5s ² 4d ¹
40	Zr	Zirconium	[Kr]5s ² 4d ²
41	Nb	Niobium	[Kr]5s ¹ 4d ⁴
42	Mo	Molybdenum	[Kr]5s ¹ 4d ⁵
43	Tc	Technetium	[Kr]5s ² 4d ⁵
44	Ru	Ruthenium	[Kr]5s ¹ 4d ⁷
45	Rh	Rhodium	[Kr]5s ¹ 4d ⁸
46	Pd	Palladium	[Kr]4d ¹⁰
47	Ag	Silver	[Kr]5s ¹ 4d ¹⁰
48	Cd	Cadmium	[Kr]5s ² 4d ¹⁰
49	In	Indium	[Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ¹
50	Sn	Tin	[Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ²
51	Sb	Antimony	[Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ³
52	Te	Tellurium	[Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁴
53	I	Iodine	[Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁵
54	Xe	Xenon	[Kr]5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁶
55	Cs	Cesium	[Xe]6s ¹
56	Ba	Barium	[Xe]6s ²
72	Hf	Hafnium	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ²
73	Ta	Tantalum	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ³
74	W	Tungsten	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁴
75	Re	Rhenium	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁵
76	Os	Osmium	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁶
77	Ir	Iridium	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ⁷
78	Pt	Platinum	[Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ⁹
79	Au	Gold	[Xe]6s ¹ 4f ¹⁴ 5d ¹⁰
80	Hg	Mercury	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰
81	Tl	Thallium	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ¹
82	Pb	Lead	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ²
83	Bi	Bismuth	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ³
84	Po	Polonium	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁴
85	At	Astatine	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁵
86	Rn	Radon	[Xe]6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁶

Основен полупроводник – силиций (Si) – четвърта валентност.

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

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

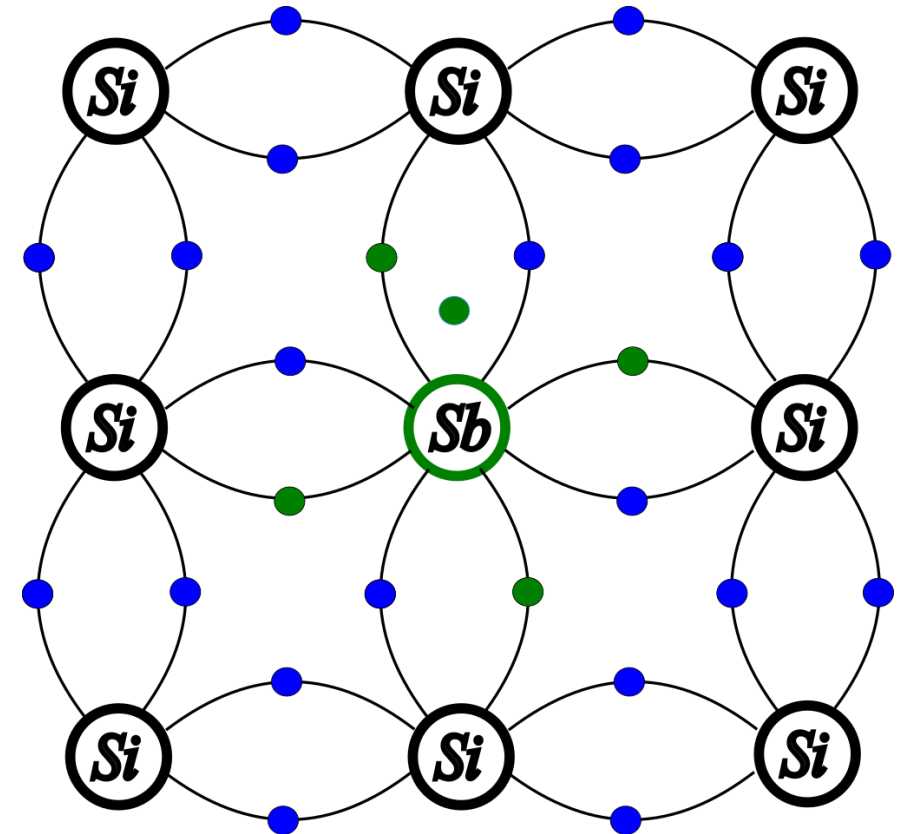
Четири от валентните електрони на донорния атом образуват ковалентни връзки със съседни силициеви атоми. Те са здраво свързани.

Петият електрон остава слабо свързан с ядрото и при незначително количество енергия може лесно се отдели от атома и става **свободен електрон**.

Резултат: N-тип силиций

- изобилие от свободни електрони - основни токоносители и
- много малко дупки - неосновни токоносители.

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



Р-тип полупроводник

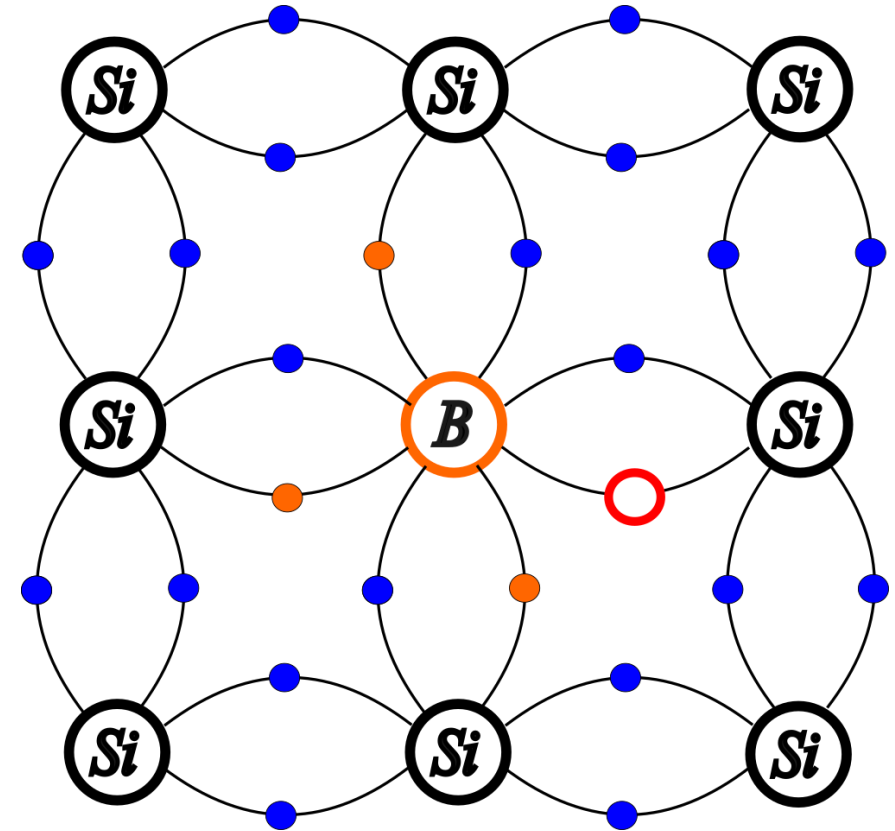
В силициев кристал са добавени акцепторни примеси от Бор (B), който е от трета валентност.

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.

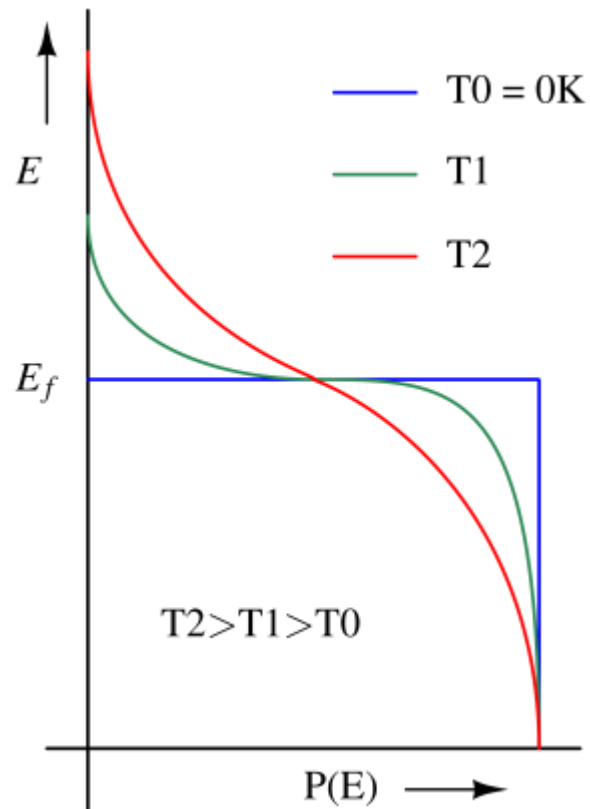
Резултат: Р-тип силиций

- изобилие от дупки - основни токоносители и
- много малко свободни електрони - неосновни токоносители.



Ниво на Ферми

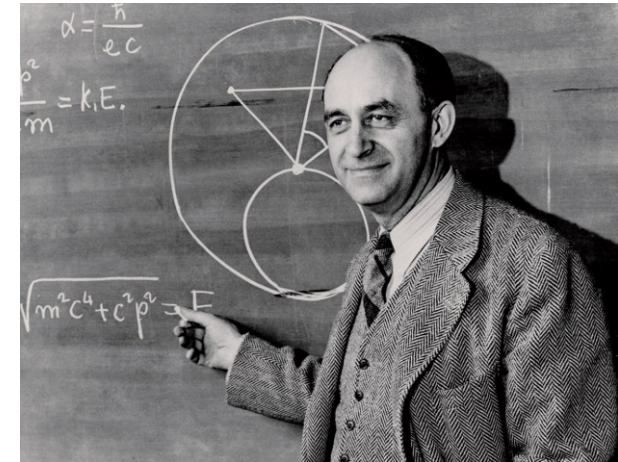
Вероятността интерпретация на нивото на Ферми (E_F) е че при дадена температура, това е енергийното ниво, което електроните могат да заемат с вероятност 50%, т.е. това е статистическият център на енергията на електроните.



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

При температура 0K, всички електрони имат енергии по-ниски от нивото на Ферми. За по-високи температури, вероятността електрон да се намира на по-високо енергийно ниво започва постепенно да нараства.

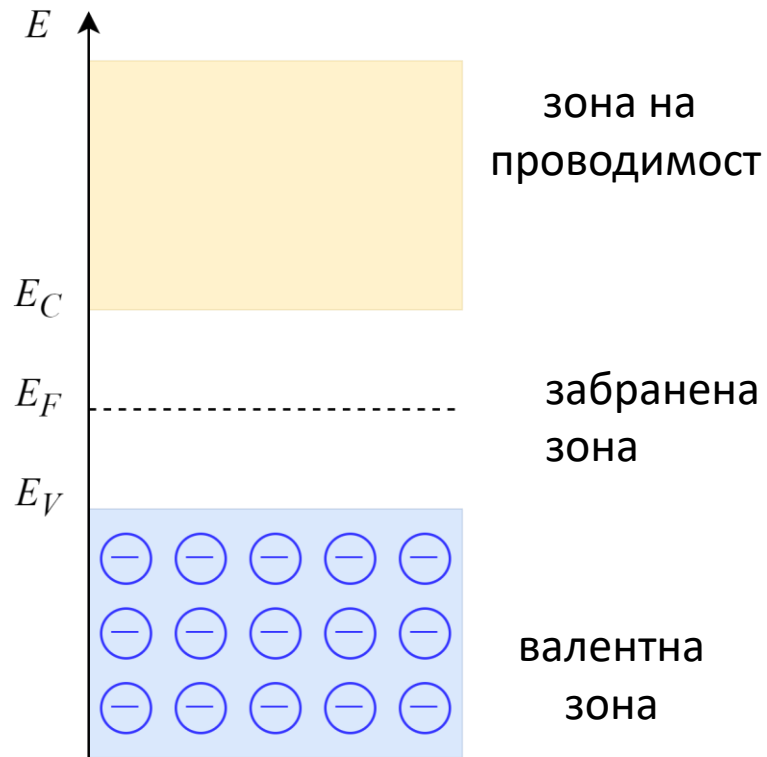
Местоположението на нивото на Ферми ни казва какъв тип полупроводник имаме и колко проводим е той. Тази концепция е важна за да разберем как работи PN прехода.



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%, т.е. това е статистическият център на енергията на електроните.



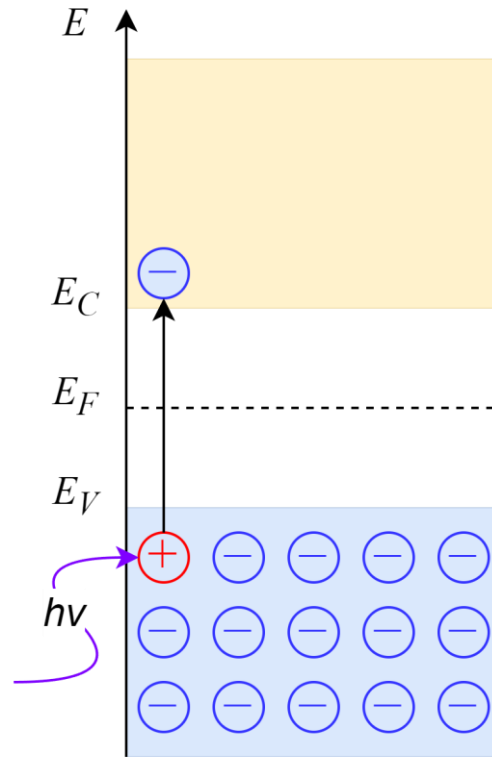
В полупроводниците, нивото на Ферми се намира в забранената зона.

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

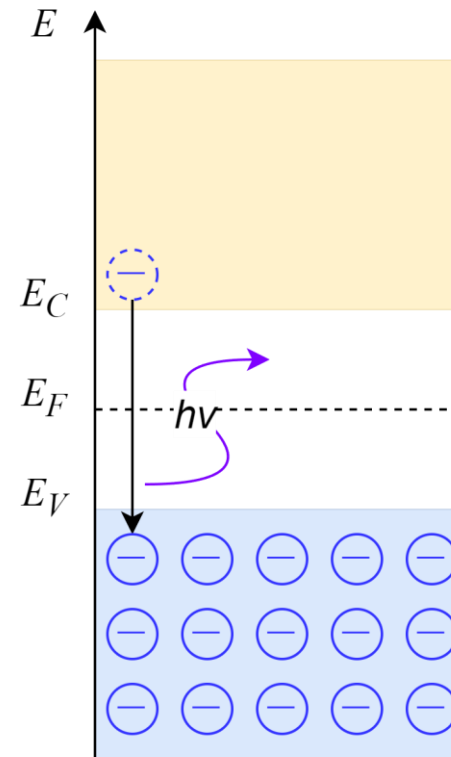
Посредством добавяне на примеси, местоположението на нивото на Ферми може да бъде променено. По този начин се изработват полупроводникови елементи (диоды, транзистори) със специфични параметри.

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 - $h\nu$.

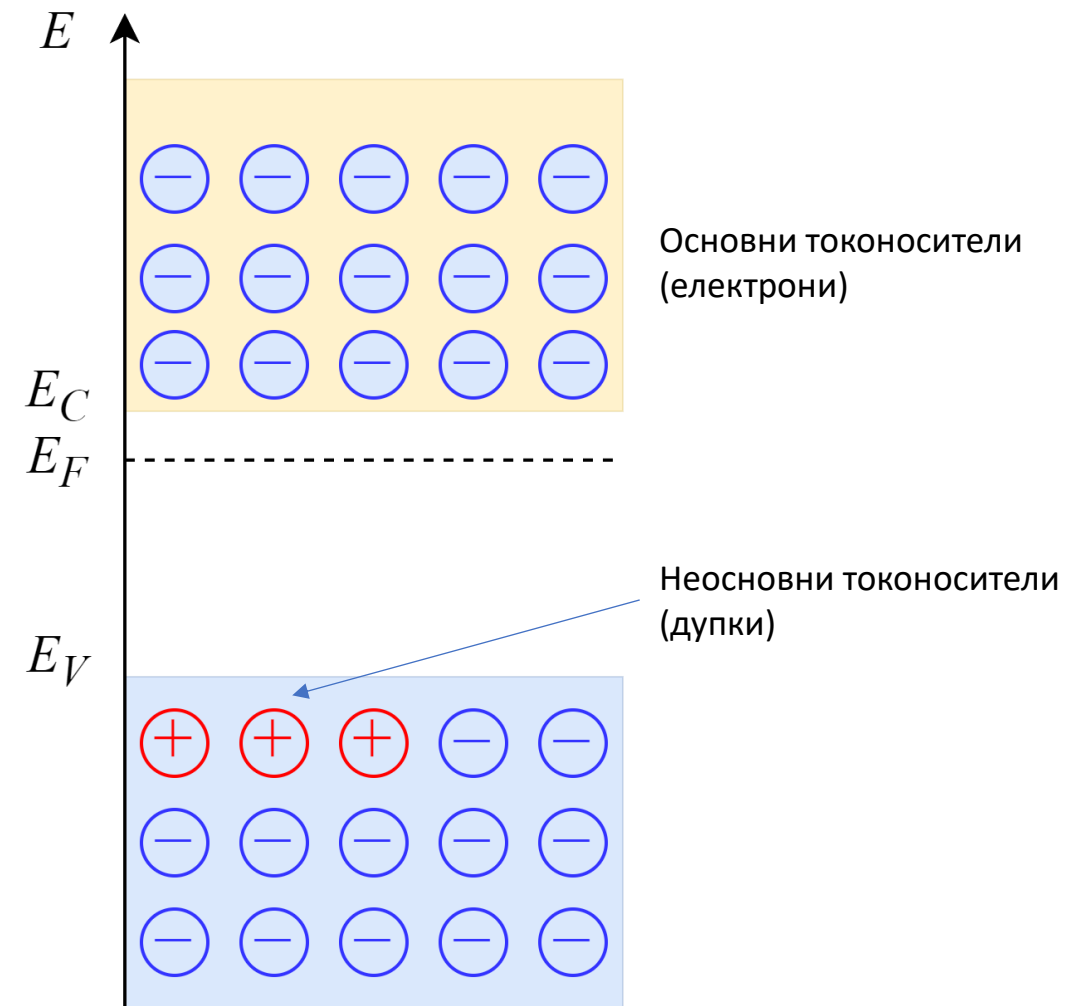
Тя може да дойде от трептенията на атомите на кристала (фонони), от лъчиста радиация (фотони) или от механични деформации.

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

Ниво на Ферми в N-тип полупроводници

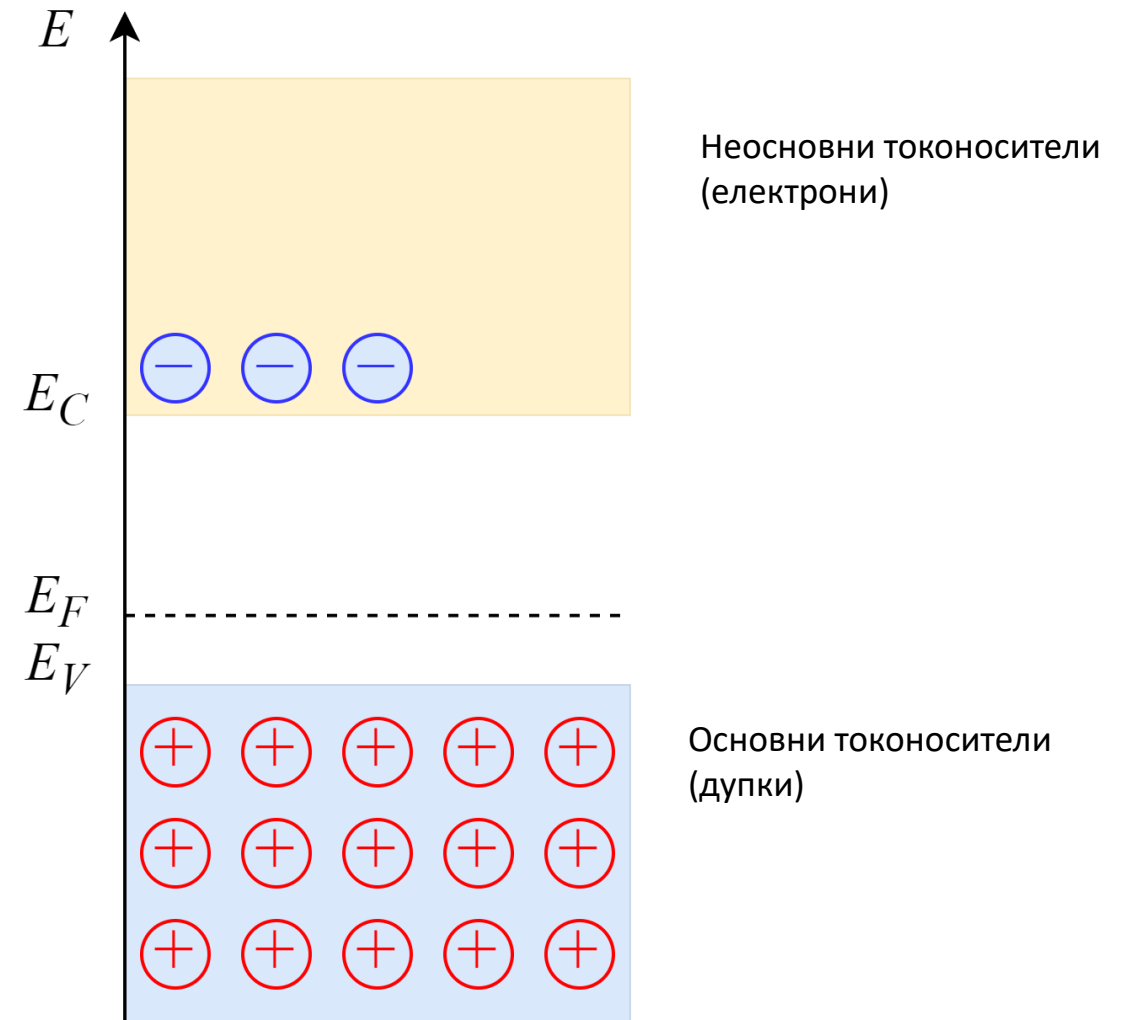
Донорните примеси създават излишък на електрони, в резултат на което нивото на Ферми се премества по-близо до зоната на проводимост.

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.



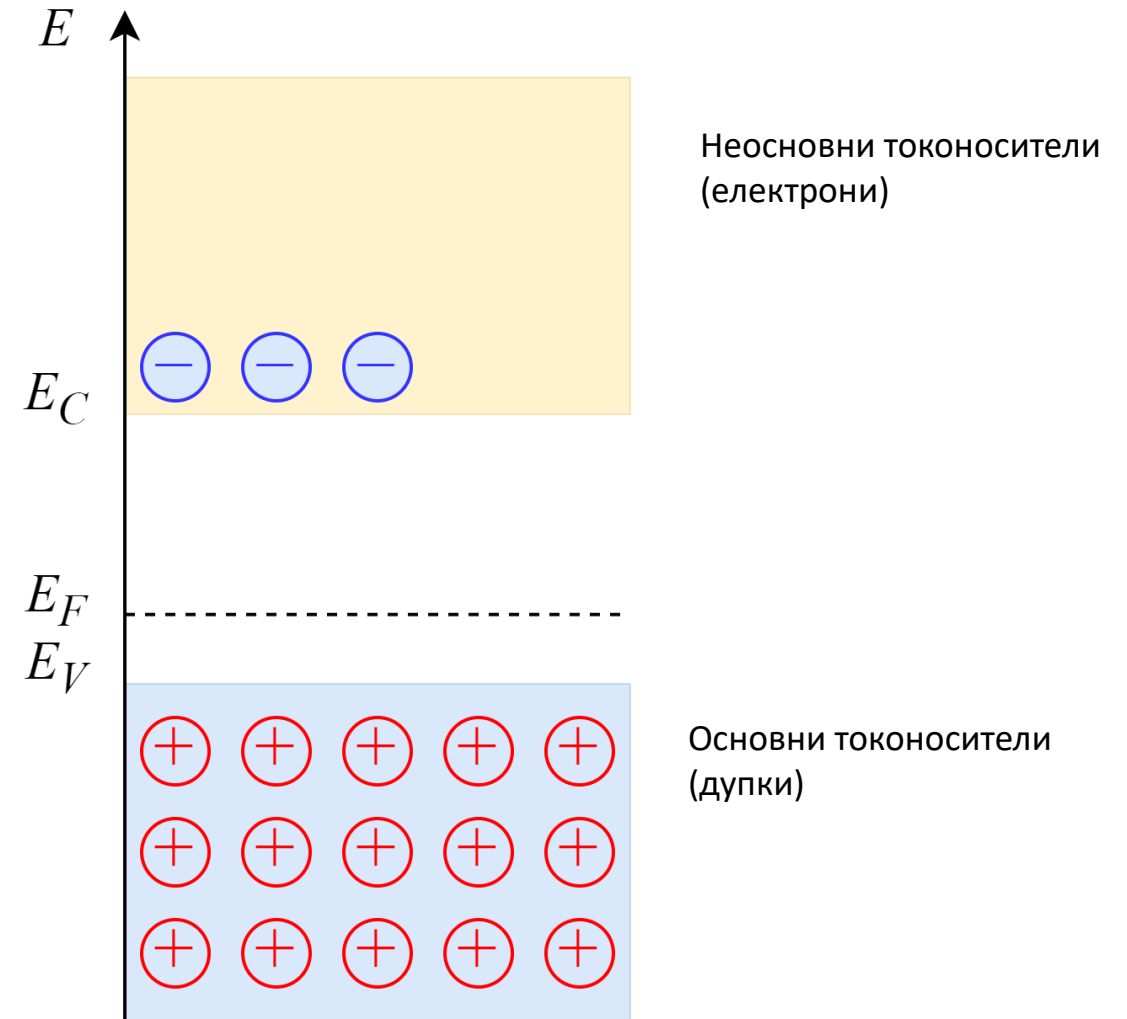
Ниво на Ферми в Р-тип полупроводници

Акцепторните примеси създават излишък на дупки, в резултат на което нивото на Ферми се премества по-близо до валентната зона.



Ниво на Ферми в Р-тип полупроводници

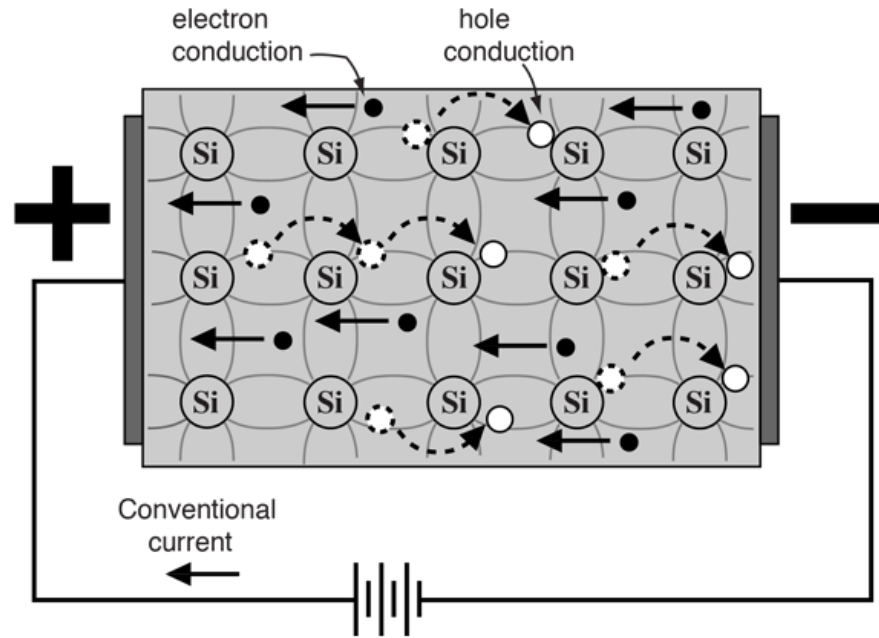
Акцепторните примеси създават излишък на дупки, в резултат на което нивото на Ферми се премества по-близо до валентната зона.



Как проте́ча ток в полупроводни́ците?

Дрейф и Дифузия

Движение на токоносители под действие на электрическое поле



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 **дрейф (drift)**, а средната скорост, с която се преместват – дрейфова скорост (drift velocity) 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.

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

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

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

ϱ – концентрация на токоносителите

μ – подвижност на токоносителите ($cm^2/V.s$)

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)

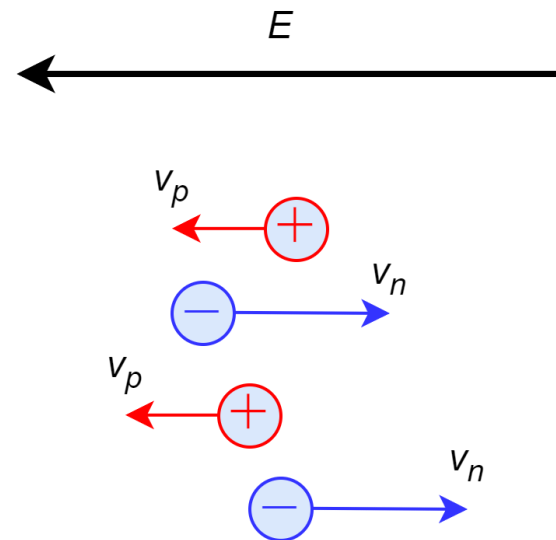
q – заряд на електрона = $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (Кулони)

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



Движение на токоносителите в резултат на разлика в концентрациите

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

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

Резюме

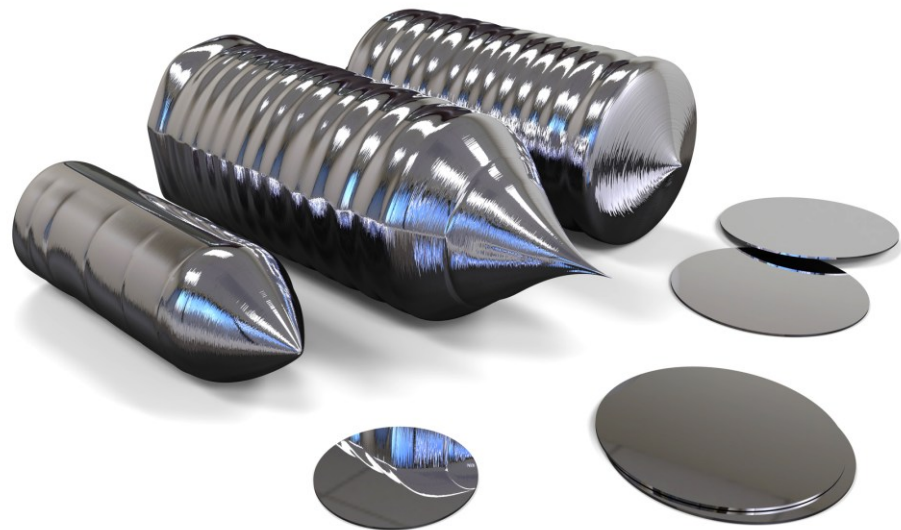
Токоносителите могат да се движат чрез дрейф и дифузия и да формират съответно дрейфова и дифузионни съставки на тока.

	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

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

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

Силициев монокристал и пластини



Силициеви пластини с интегрални схеми

