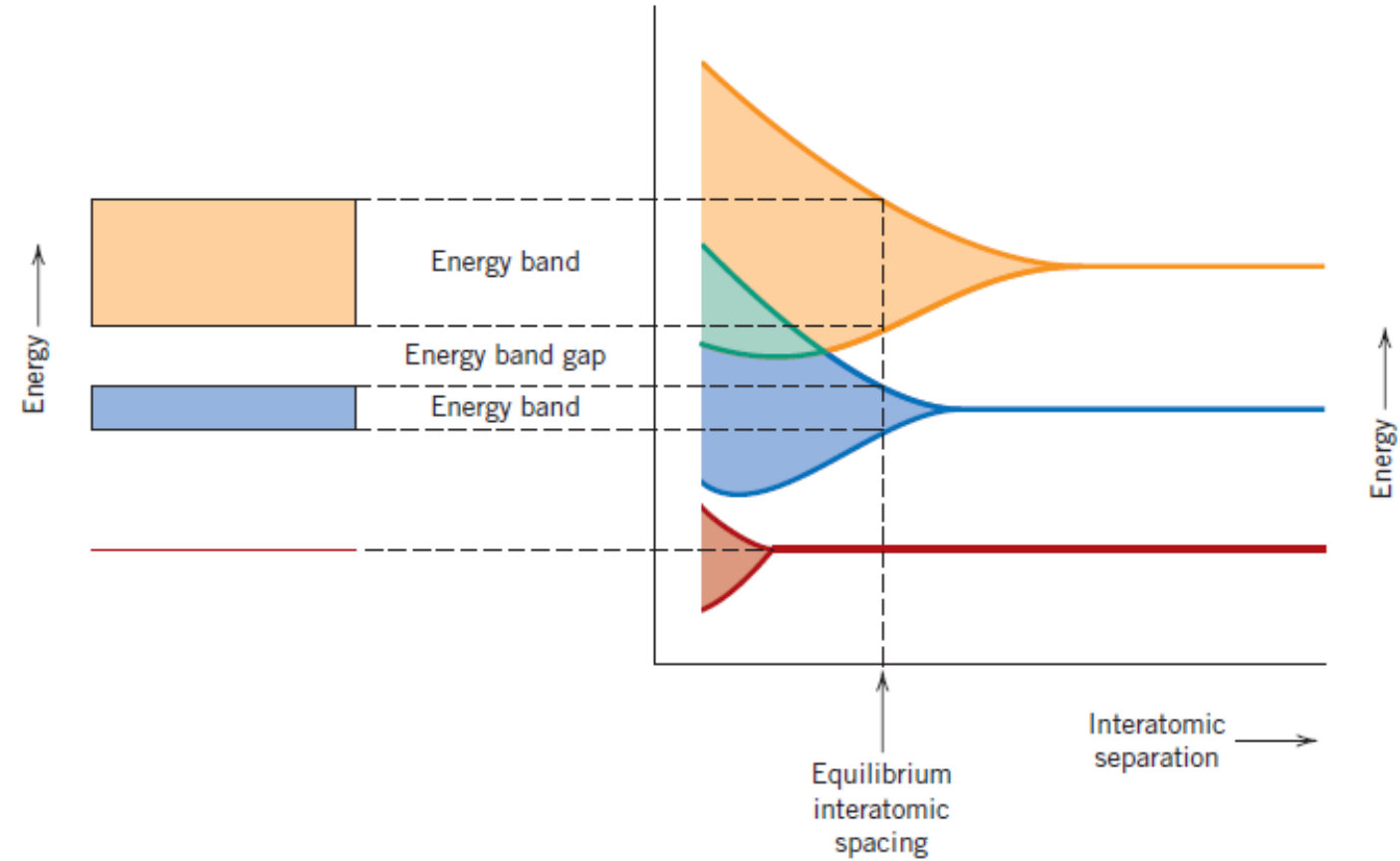
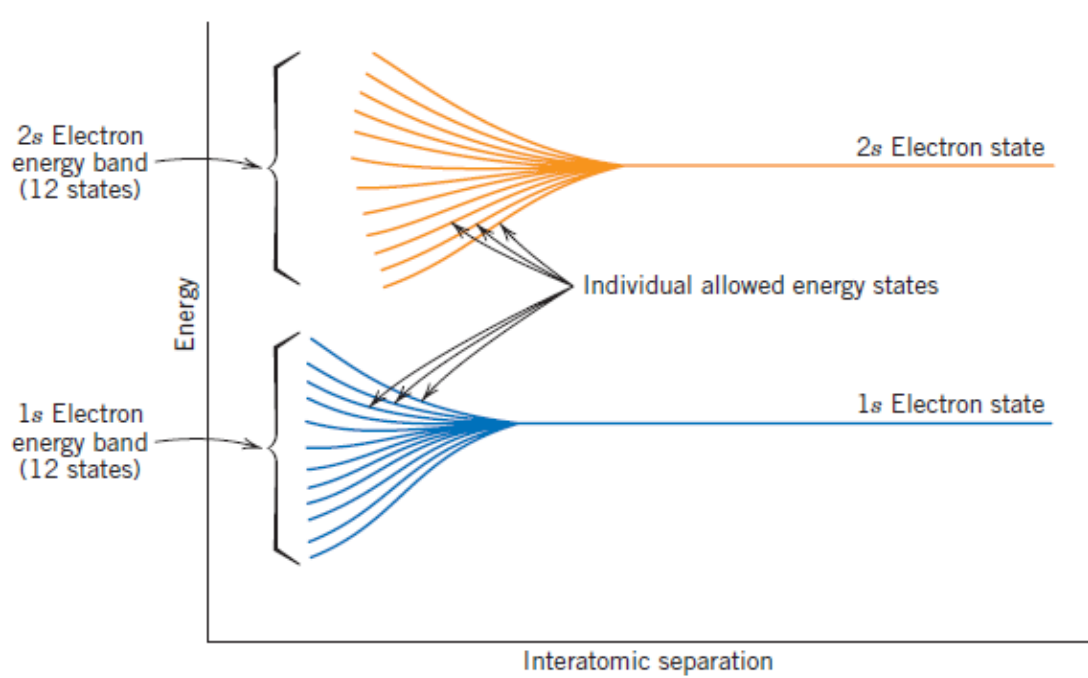
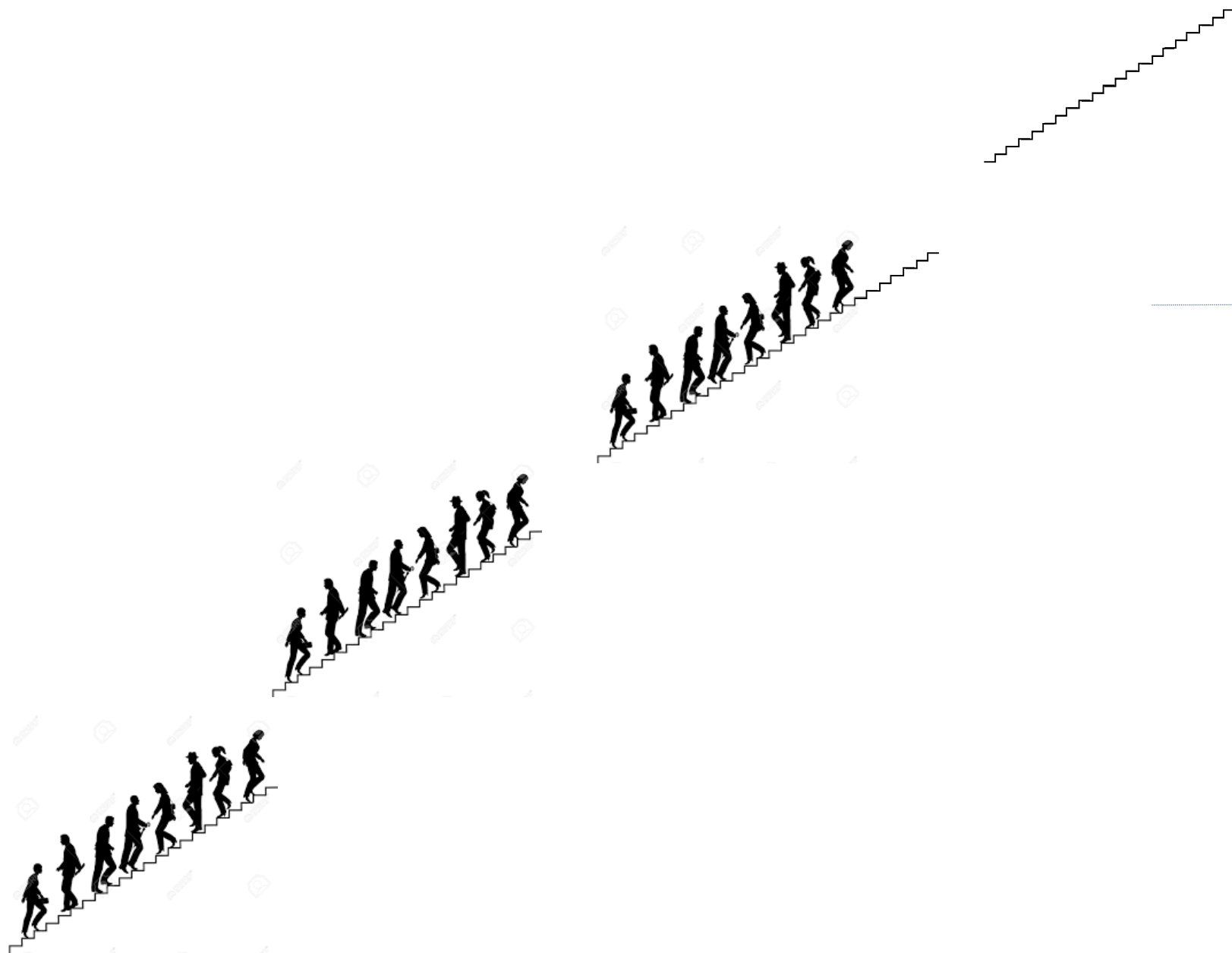


Pásová struktura pevných látek:

<https://www.youtube.com/watch?v=3npADYVtQOM>

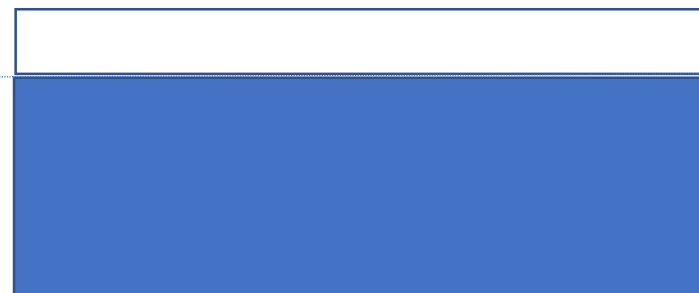
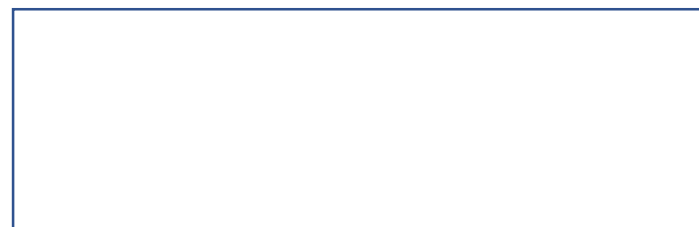


Pásová struktura pevných látek:

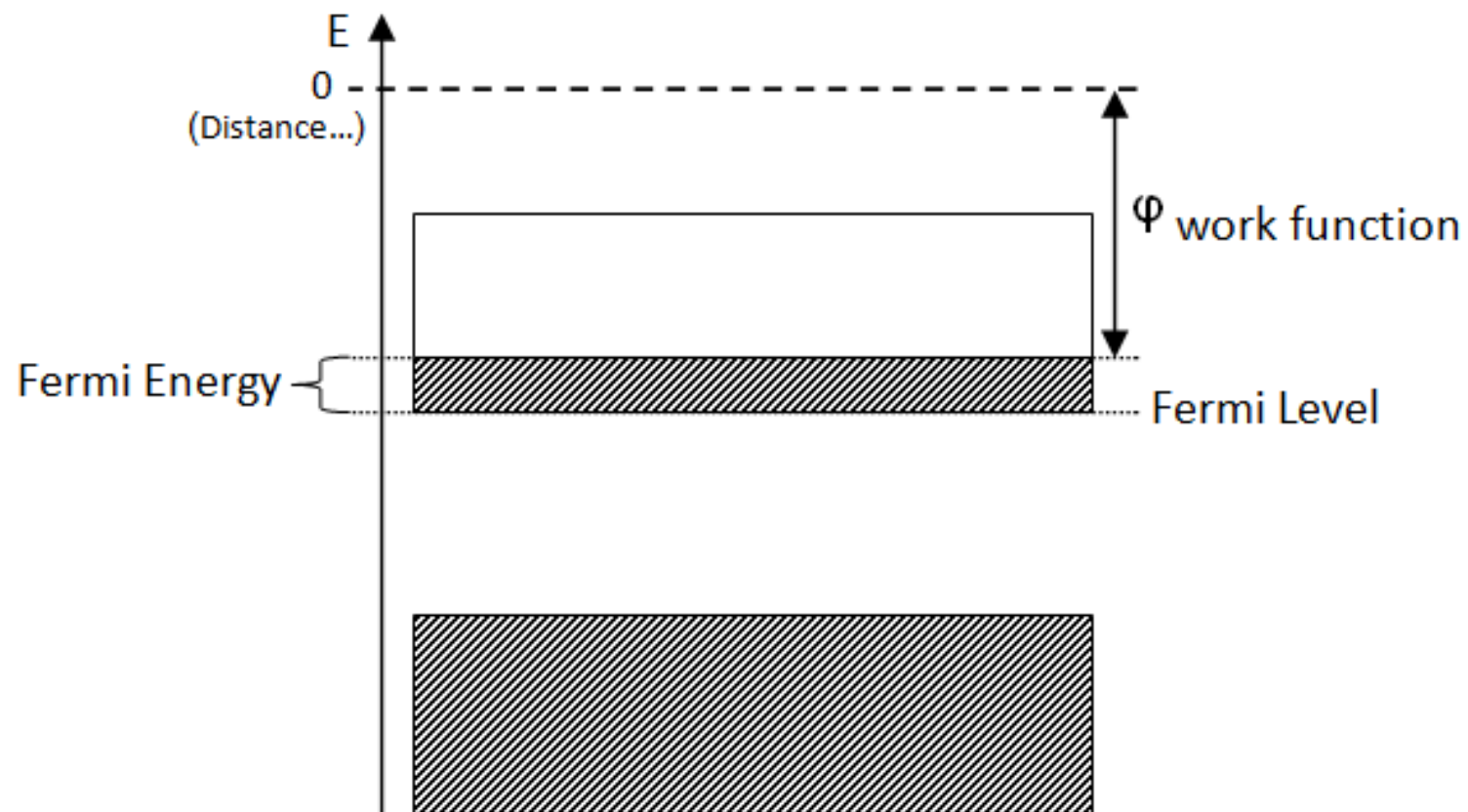


E

E_F



Fermiho hladina:



Měrná vodivost, měrný elektrický odpor:

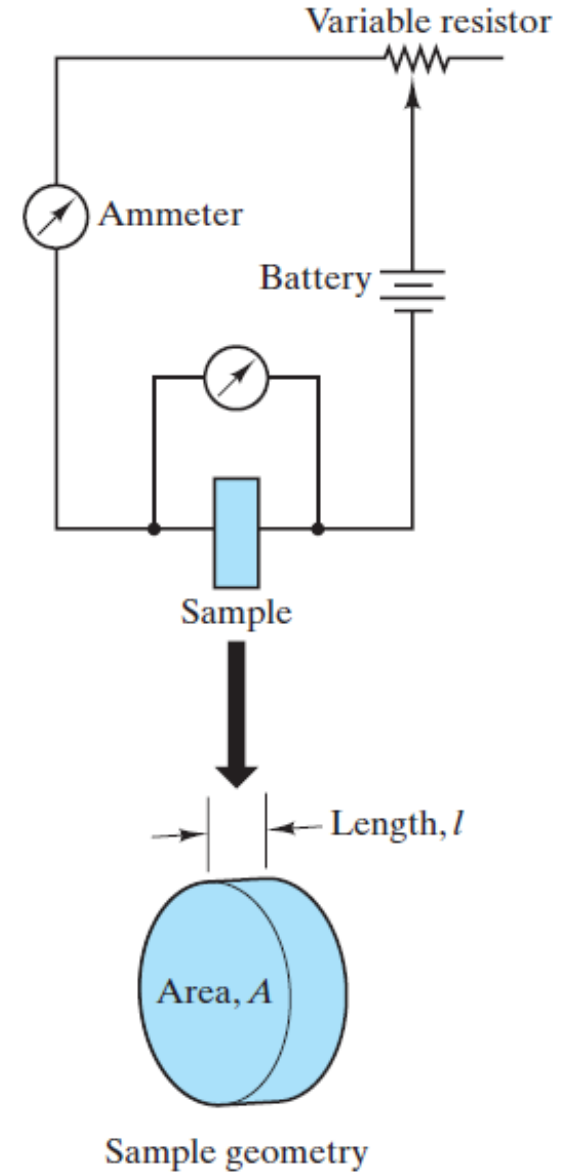
<https://www.khanacademy.org/science/high-school-physics/dc-circuits/electric-current-resistivity-and-ohms-law/v/resistivity-and-conductivity>

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{1}{\sigma}$$

$$\sigma = n_n q_n \mu_n + n_p q_p \mu_p$$

měrná vodivost je dána příspěvkem kladných i záporných volných nosičů náboje (volných elektronů, děr, kladných a záporných iontů apod.)

je úměrná hustotě volného náboje, velikosti náboje a pohyblivosti

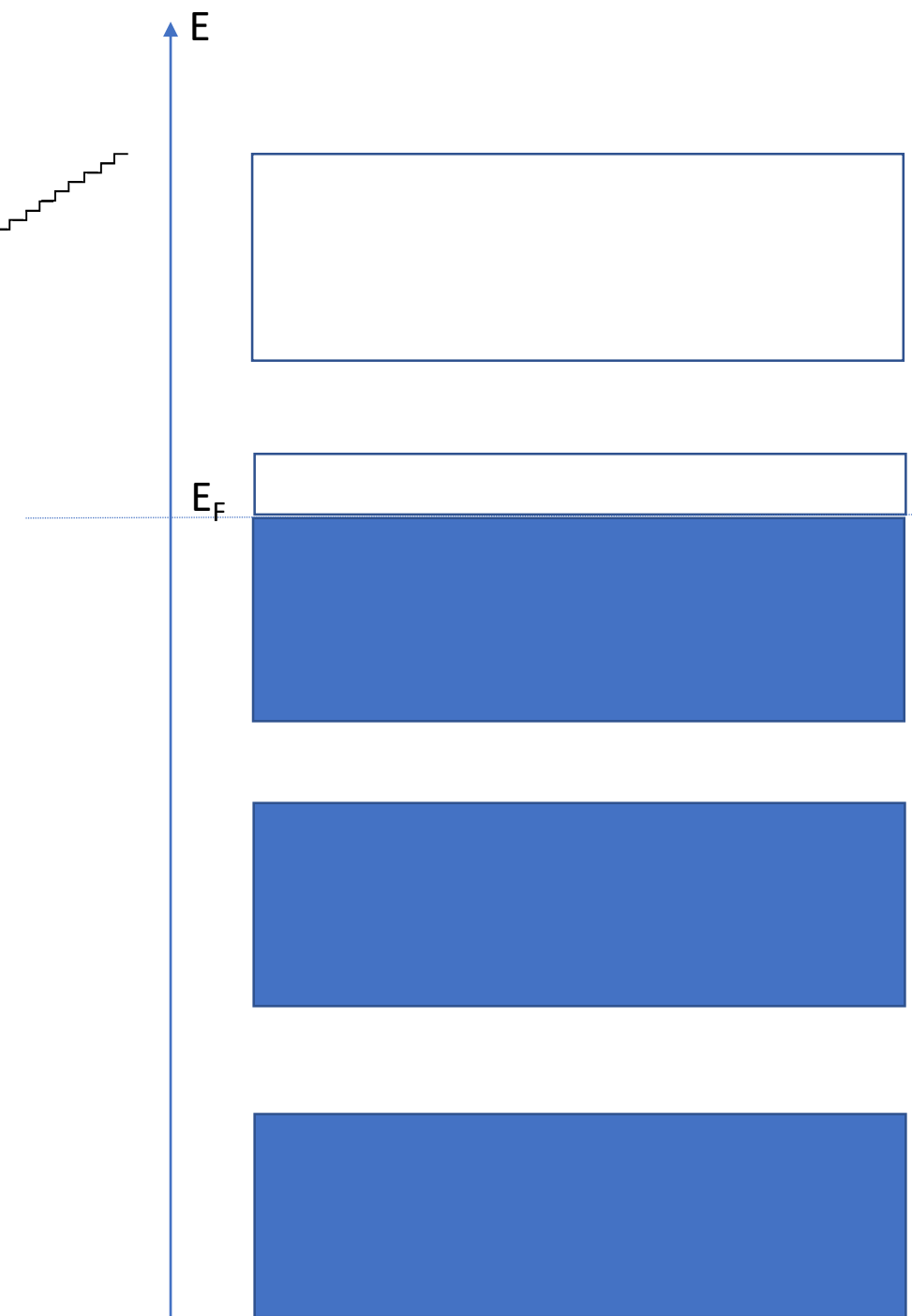
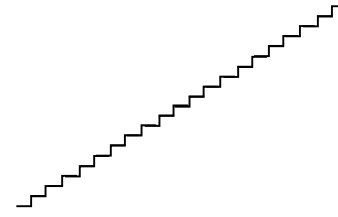
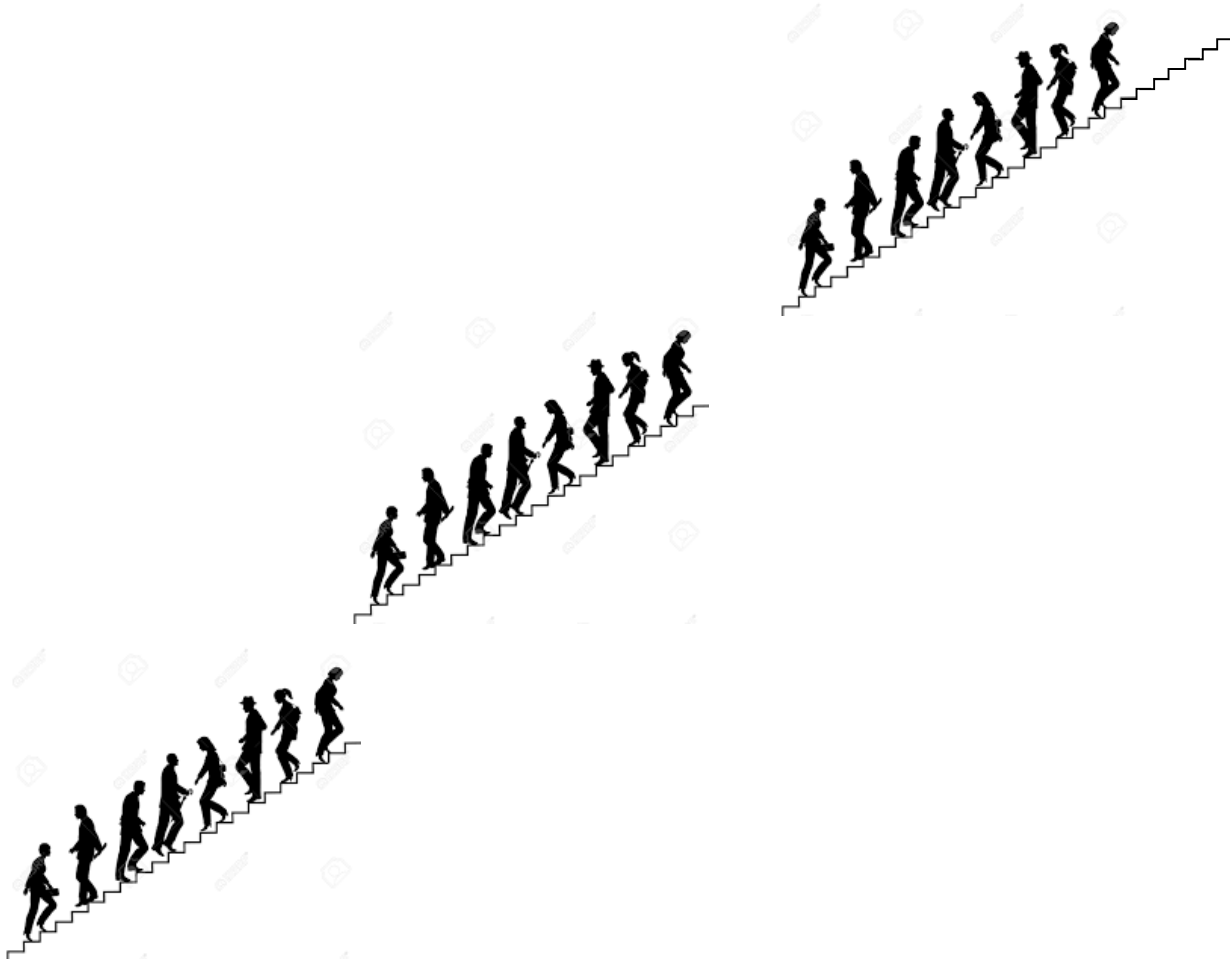


Q: Které elektrony mohou vést elektrický proud?

A: Ty, které mohou získat extra energii od elektrického pole.

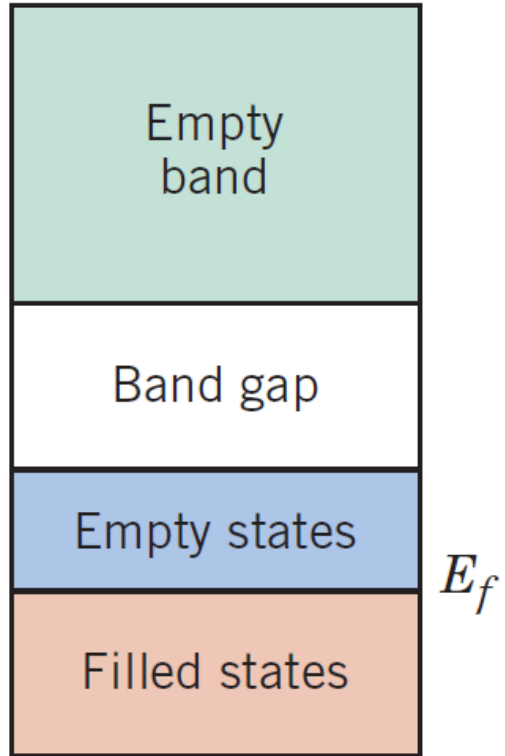
Q: Které elektrony mohou tedy získat energii od elektrického pole?

A: Zejména ty nad úrovní Fermiho hladiny. Dostupnost neobsazených hladin v blízkých atomech jim poskytuje vysokou pohyblivost. Říkáme jim někdy volné elektrony.



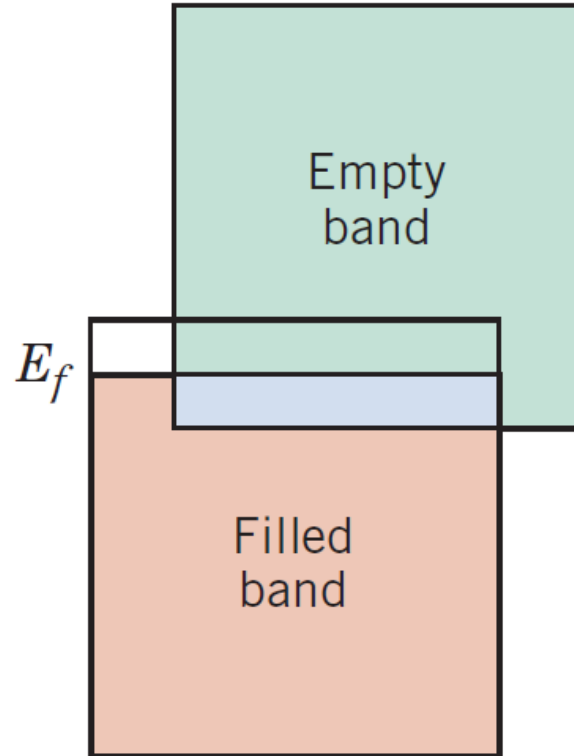
Pásová struktura pevných látek:

měď



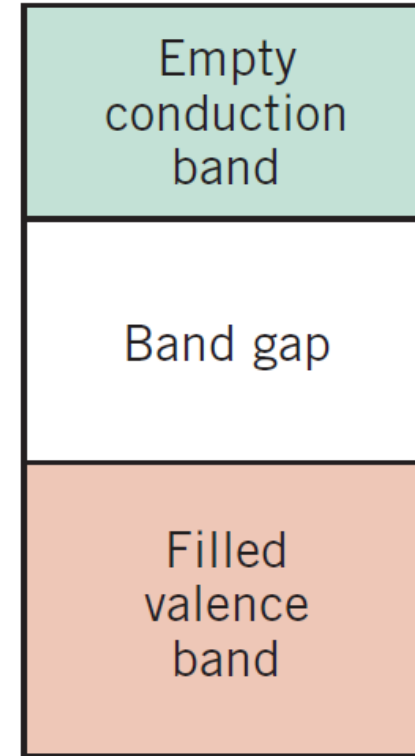
(a)

hořčík



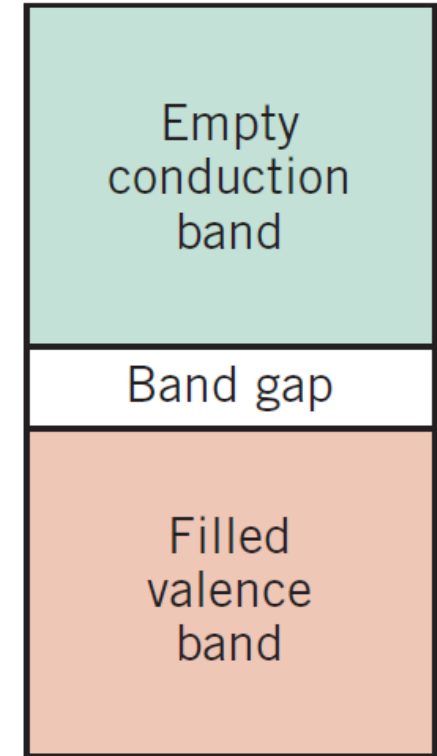
(b)

NaCl



(c)

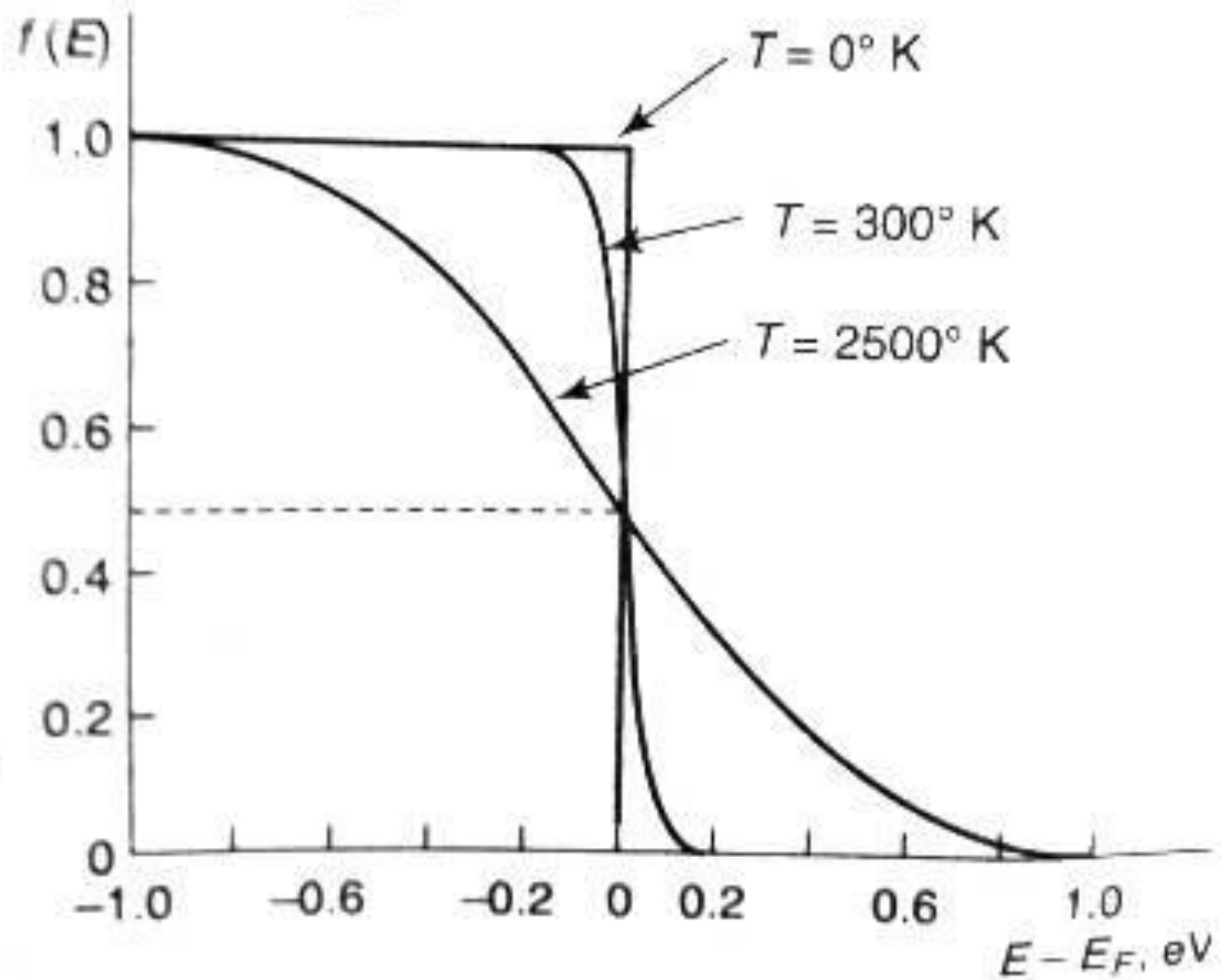
křemík



(d)

Fermi – Dirakovo rozdělení:

<https://www.youtube.com/watch?v=1DHCV3LgITY>



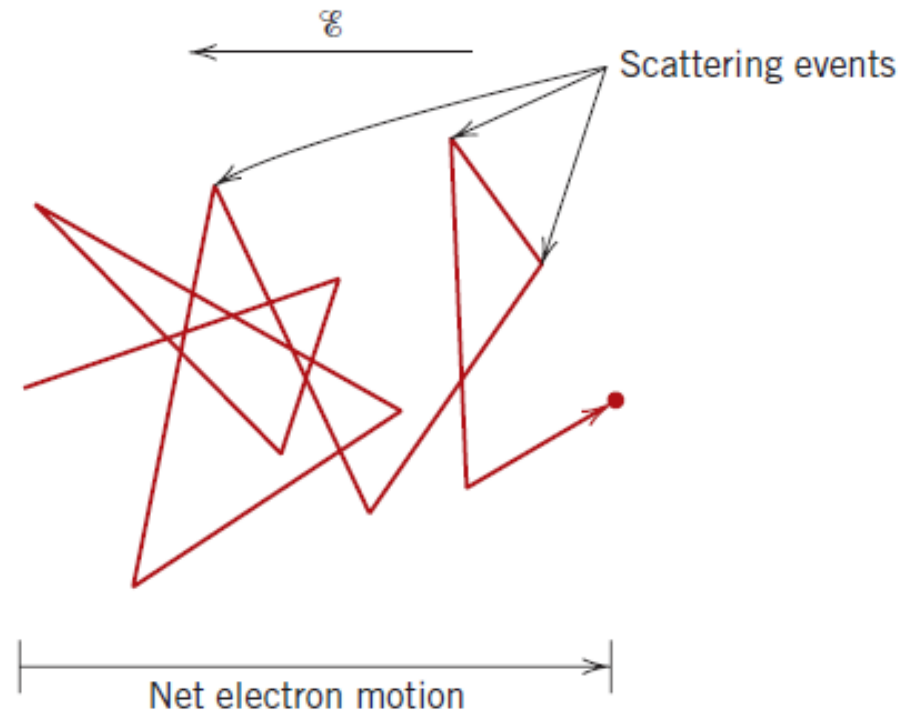
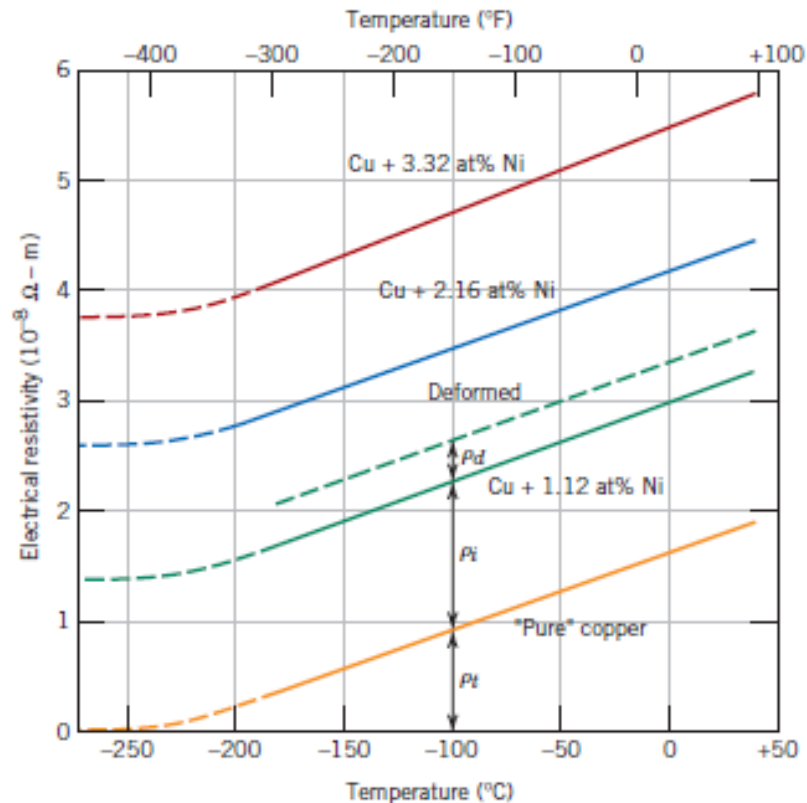
Vodiče:

- látky s velmi malou, nebo nulovou, šířkou pásu zakázaných energií
- elektrický proud vedou velmi pohyblivé volné elektrony, které jsou tepelně excitované nad Fermiho hladinu a tvoří elektronový plyn, kde lze elektrony snadno urychlit elektrickým polem

$$\sigma = n_n q_n \mu_n$$

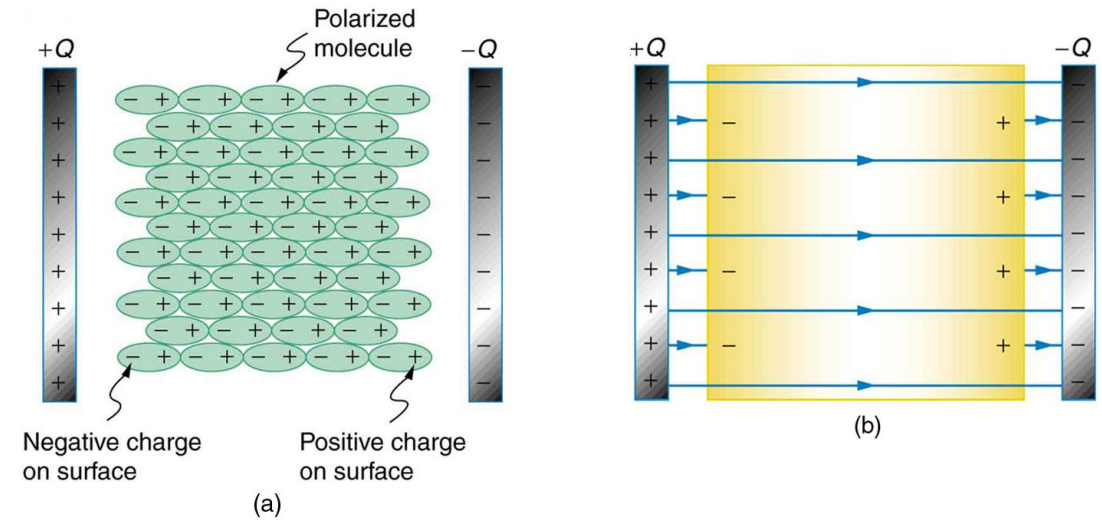
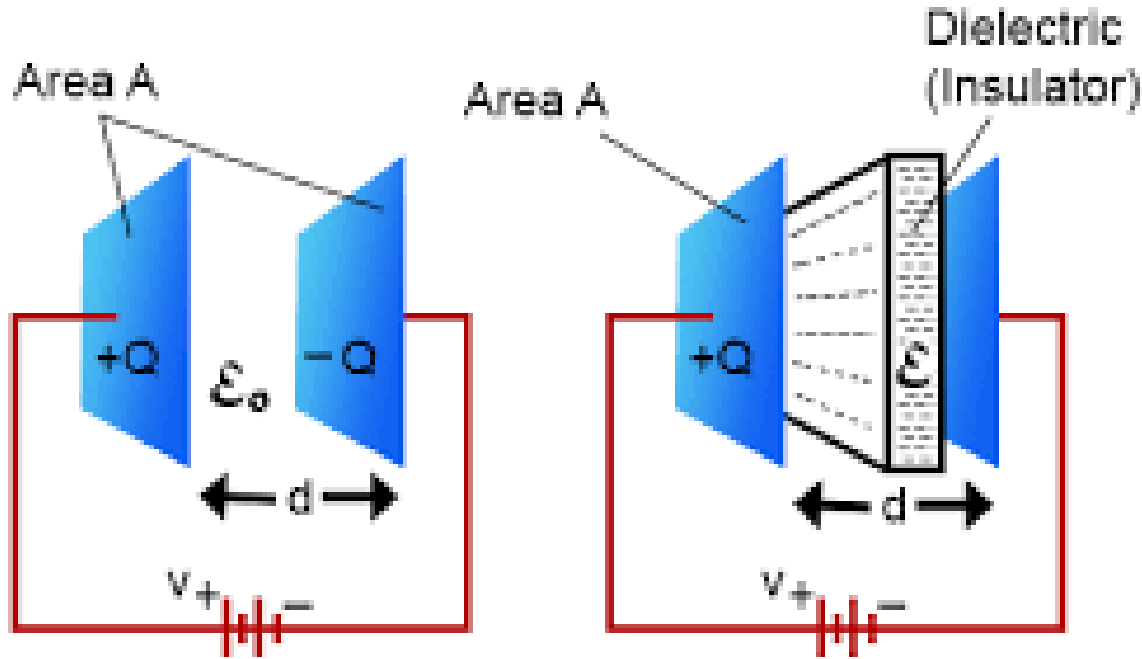
$$\mu_n = \frac{v_{drift}}{E}$$

- různé kovy mají různou vodivost, což je dáno rozdílnou koncentrací volných elektronů a jejich různou mobilitou v různých kovech, která je dána množstvím srážek s nedokonalostmi v krystalové mřížce kovu
- u kovů měrná vodivost s teplotou KLESÁ, měrný odpor ROSTE



Nevodiče:

- látky s velmi malou měrnou vodivostí (typicky $10^{-10} - 10^{-16} \text{ 1}/\Omega\text{m}$)
- mají šířku pásu zakázaných energií $> 2 \text{ eV}$
- vodivost je často způsobena nečistotami a příměsemi, než tepelně excitovanými elektrony
- charakterizuje je dielektrická konstanta a dielektrická pevnost



- bez dielektrika je hustota náboje na deskách X , po vložení dielektrika se hustota náboje na deskách ϵ_r krát zvětší, protože se dielektrikum vlivem elektrického pole polarizuje
- dielektrická pevnost, (kV/mm) je velikost pole, která vede k průrazu dielektrika

Polovodiče:

- látky s velmi malou měrnou vodivostí (typicky $10^{-4} - 10^4$ $1/\Omega\text{m}$)
- mají šířku pásu zakázaných energií < 2 eV
- vodivost je často způsobena jak elektrony, tak i děrami

Vlastní polovodiče

<https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/in-in-semiconductors/in-in-basics-of-semiconductors/v/intrinsic-semiconductors-class-12-india-physics-khan-academy>

- jeden či více vazebných elektronů tepelně uvolní, stane se vodivostním elektronem a
 - tento elektron může vést elektrický proud
 - volné místo, díra, může být zaplněno jiným vazebným elektronem. Díra se může pohybovat a také vést elektrický proud, ale mnohem pomaleji, než volný elektron

Properties of Some Common Semiconductors at Room Temperature (300 K)

Material	Energy gap, E_g (eV)	Electron mobility μ_e [$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]	Hole mobility, μ_h [$\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]	Carrier density, $n_e (= n_h)(\text{m}^{-3})$
Si	1.107	0.140	0.038	14×10^{15}
Ge	0.66	0.364	0.190	23×10^{18}
CdS	2.59 ^a	0.034	0.0018	—
GaAs	1.47	0.720	0.020	1.4×10^{12}
InSb	0.17	8.00	0.045	13.5×10^{21}

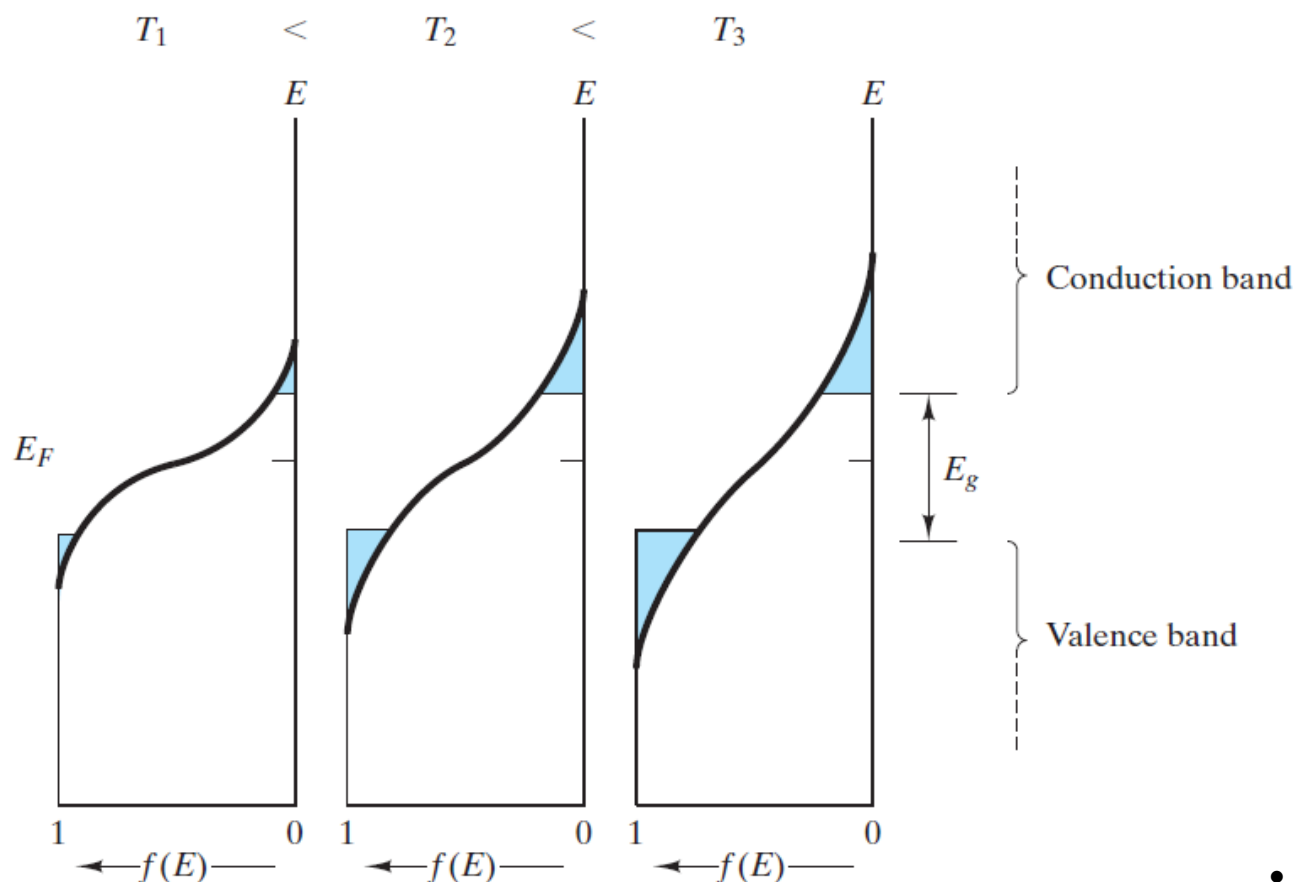
^aThis value is above our upper limit of 2 eV used to define a semiconductor. Such a limit is somewhat arbitrary. In addition, most commercial devices involve impurity levels that substantially change the nature of the band gap (see discussion of extrinsic semiconductors).

Source: Data from C. A. Harper, Ed., *Handbook of Materials and Processes for Electronics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.

Vlastní polovodiče

- koncentrace volných elektronů je stejná jako koncentrace děr a bude záležet na překryvu „ocasů“ Fermi-Dirakova rozdělení s volnými stavy ve vodivostním pásu

$$\sigma = nq(\mu_n + \mu_p)$$



$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \sim e^{-E_g/2kT}$$

- jelikož je stejná pravděpodobnost vzniku elektronu a díry, E_F leží přesně uprostřed pásu zakázaných energií
 $E - E_F = E_g/2$
- jelikož za pokojové teploty $e^{(E-E_F)/kT} \gg 1$

$$\sigma \sim n \sim e^{-E_g/2kT}$$

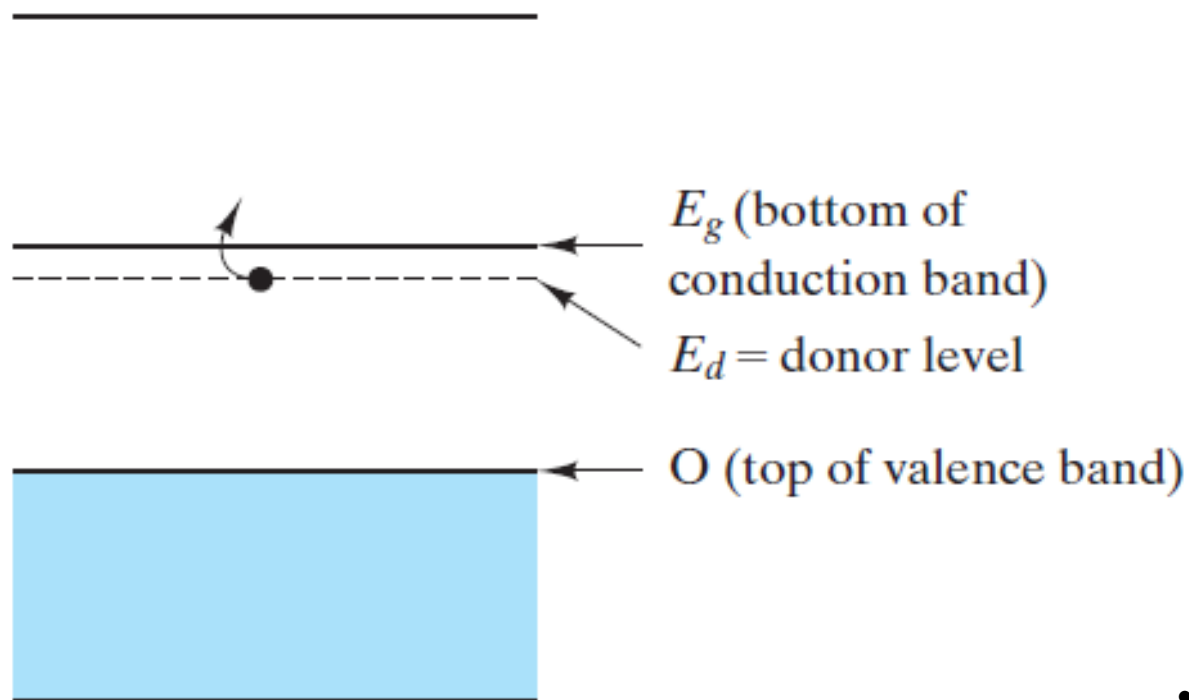
$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT}$$

- u vlastních polovodičů měrná vodivost s teplotou ROSTE, měrný odpor KLESÁ

Nevlastní (příměsová) polovodiče typu n

- vlastní polovodiče mají své vlastnosti „sami o sobě“, nevlastní díky příměsi – dopantu. Příměs je dopována velmi pečlivě a ve velmi malém množství do extrémně čistých materiálů.

<https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/in-in-semiconductors/in-in-basics-of-semiconductors/v/extrinsic-semiconductors-n-type-class-12-india-physics-khan-academy>



u nevlastních n typu polovodičů dochází k tepelné excitaci nejen z valenčního pásu, ale také z hladin donoru, které jsou ale mnohem blíže k vodivostnímu pásu

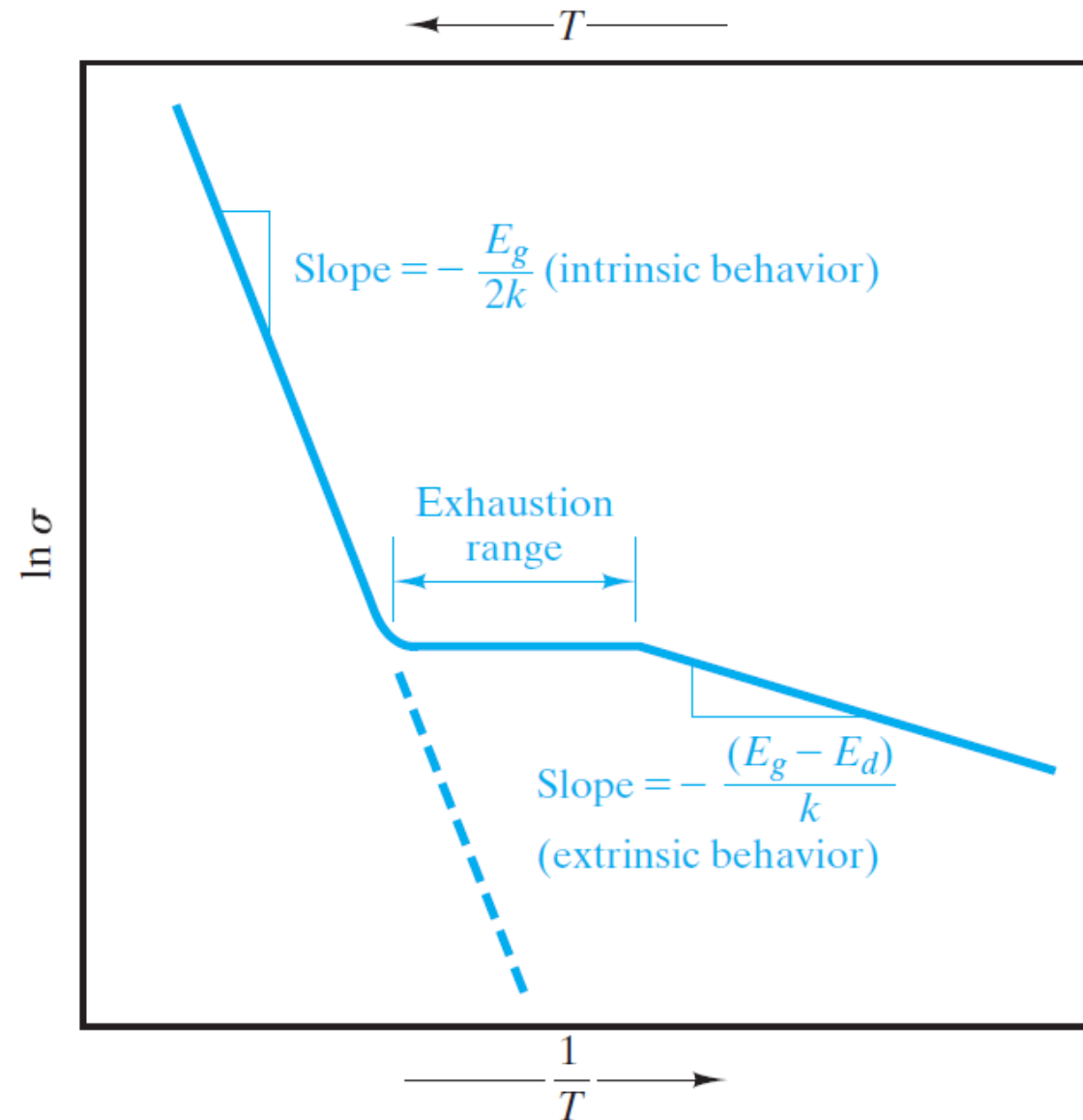
$$f(E) = \frac{1}{e^{(E_g - E_d)/kT} + 1} \sim e^{-(E_g - E_d)/kT}$$

$$\sigma \sim n$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-(E_g - E_d)/kT}$$

- u nevlastních polovodičů měrná vodivost s teplotou ROSTE, měrný odpor KLESÁ

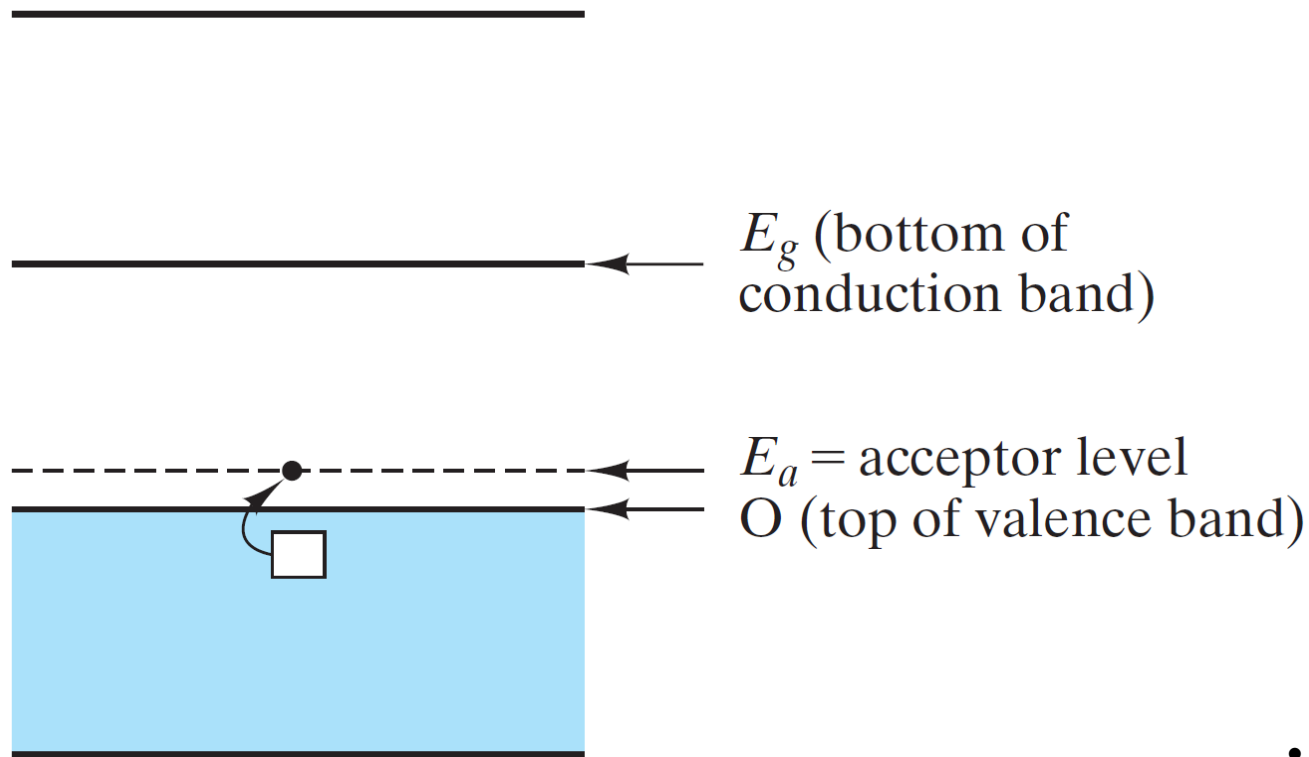
Nevlastní (příměšové) polovodiče typu n



Nevlastní (příměsová) polovodiče typu p

- vlastní polovodiče mají své vlastnosti „sami o sobě“, nevlastní díky příměsi – dopantu. Příměs je dopována velmi pečlivě a ve velmi malém množství do extrémně čistých materiálů.

<https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/in-in-semiconductors/in-in-basics-of-semiconductors/v/extrinsic-semiconductors-p-type>



u nevlastních p typu polovodičů dochází k tepelné excitaci nejen do vodivostního pásu, ale zejména do hladin donoru, které jsou mnohem blíže k valenčnímu pásu

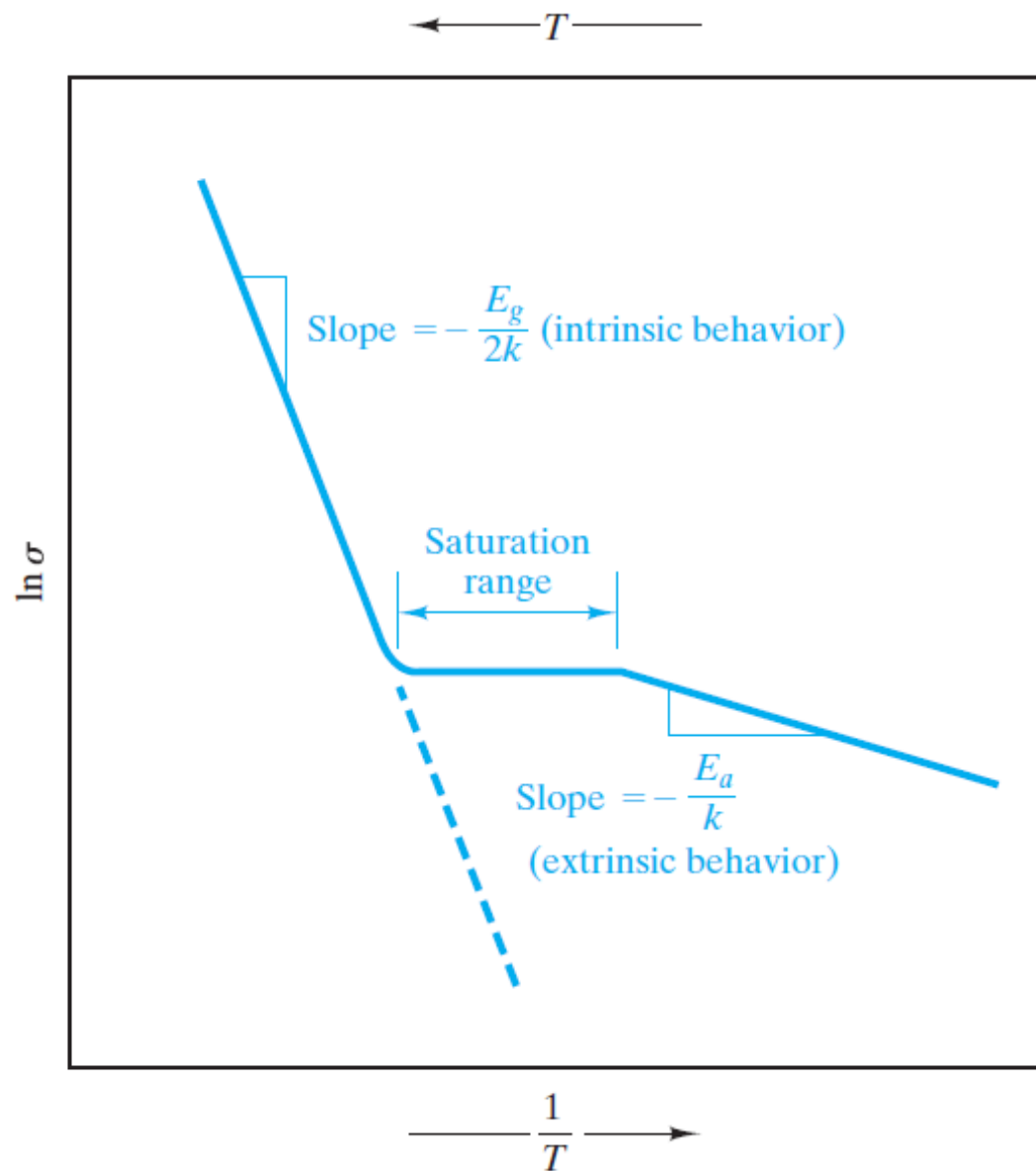
$$f(E) = \frac{1}{e^{E_a/kT} + 1} \sim e^{-E_a/kT}$$

$$\sigma \sim n$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_a/kT}$$

- u nevlastních polovodičů měrná vodivost s teplotou ROSTE, měrný odpor KLESÁ

Nevlastní (příměšové) polovodiče typu p



Some Extrinsic, Elemental Semiconductors

Element	Dopant	Periodic table group of dopant	(Maximum solid solubility of dopant atoms/m ³)
Si	B	III A	600×10^{24}
	Al	III A	20×10^{24}
	Ga	III A	40×10^{24}
	P	V A	$1,000 \times 10^{24}$
	As	V A	$2,000 \times 10^{24}$
Ge	Sb	V A	70×10^{24}
	Al	III A	400×10^{24}
	Ga	III A	500×10^{24}
	In	III A	4×10^{24}
	As	V A	80×10^{24}
	Sb	V A	10×10^{24}

Source: Data from W. R. Runyan and S. B. Watelski, in *Handbook of Materials and Processes for Electronics*, C.A. Harper, Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.

Impurity Energy Levels for Extrinsic Semiconductors

Semiconductor	Dopant	$E_g - E_d$ (eV)	E_a (eV)	
Si	P	0.044	—	
	As	0.049	—	
	Sb	0.039	—	
	Bi	0.069	—	
	B	—	0.045	
	Al	—	0.057	
	Ga	—	0.065	
	In	—	0.160	
	Tl	—	0.260	
	Ge	P	0.012	—
As		0.013	—	
Sb		0.096	—	
B		—	0.010	
Al		—	0.010	
Ga		—	0.010	
In		—	0.011	
Tl		—	0.010	
GaAs		Se	0.005	—
		Te	0.003	—
	Zn	—	0.024	
	Cd	—	0.021	

Source: Data from W. R. Runyan and S. B. Watelski, in *Handbook of Materials and Processes for Electronics*, C. A. Harper, Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.

<https://www.khanacademy.org/science/in-in-class-12th-physics-india/in-in-semiconductors/in-in-basics-of-semiconductors/v/minority-charge-carriers-in-extrinsic-semiconductors-class-12-india-physics-khan-academy>