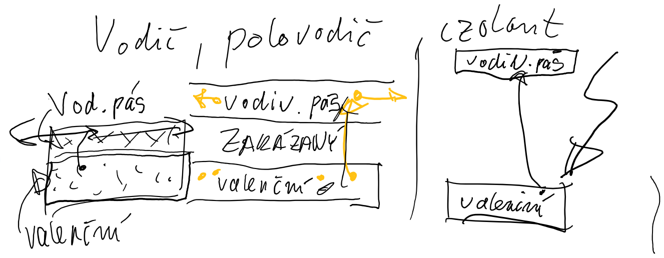


Příklad CP3.4:

Vypočtěte maximální vlnovou délku světla, které ještě bude absorbováno v GaAs v důsledku excitace elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Určete hybnost fotonu s touto vlnovou délkou. Rychlost světla c = 3.10^8 m/s, h= $6,6.10^{-34}$Js, E_g= 1,42 eV.

Při absorpci musí být energie fotonu větší než šířka zakázaného pásu polovodiče E_g

$$1\,eV = 1 \cdot e \cdot 1V = 1 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$$

?

$$E = Q \cdot U$$

$$m = \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{s^{-1}}$$

$$\lambda = c \cdot \frac{1}{f}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$E_G = 1{,}42\,eV$$

$$\boxed{E_{fotonu} = h \cdot \nu = h\frac{c}{\lambda}}$$

$$1{,}42\,eV = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{\lambda}$$

$$1{,}42 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1{,}42 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 8{,}7 \cdot 10^{-7} = 870\,nm$$

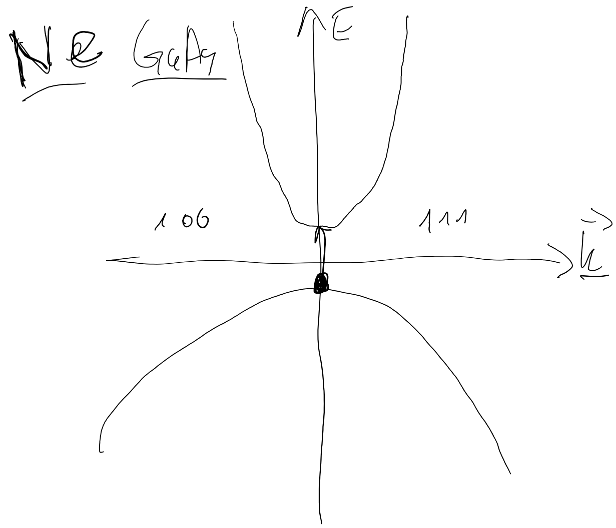
$$J = Nm = \frac{kg\,m^2}{s^2}$$

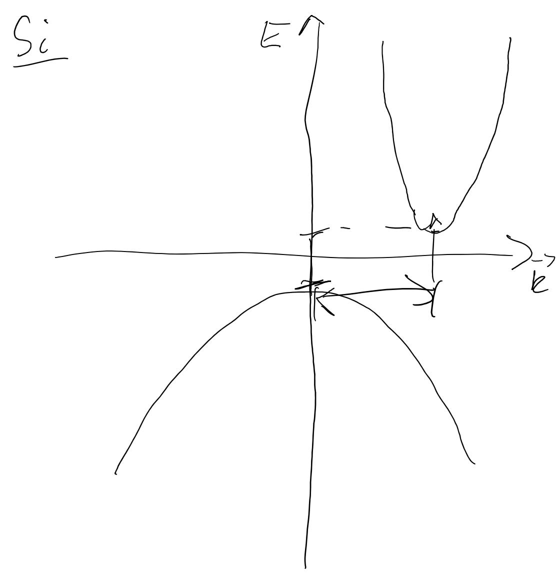
$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34}}{8{,}7 \cdot 10^{-7}} = 7{,}6 \cdot 10^{-28}\,kg\,m\,s^{-1}$$

Příklad CP3.5:

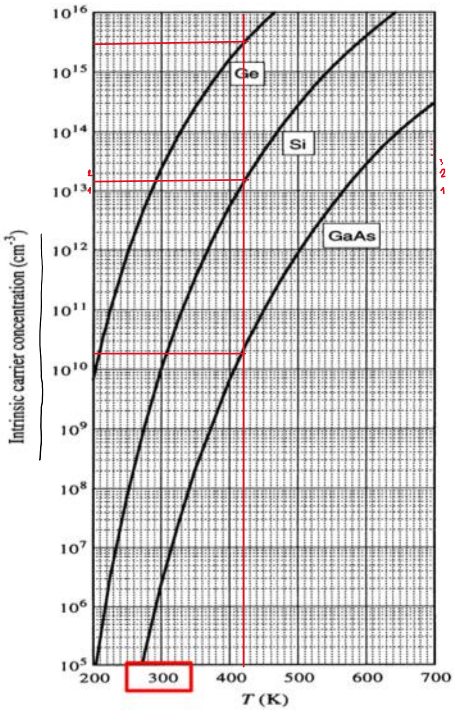
Může absorpce záření z příkladu CP3.4 (λ=870 nm, p=$7,6 \cdot 10^{-28}$ kg·m·s^{-1}) vést k podobné excitaci v křemíku (E_g=1,12eV)?

Ne





Intrinzický (vlastní) polovodič určení koncentrace elektronů a děr.



$$p_0 = n_0 = n_i$$

Ve vlastním polovodiči jsou se koncentrace elektronů a děr rovnají tzv. intrinzické koncentraci n_i.

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

Intrinzická koncentrace je exponenciálně závislá na šířce zakázaného pásu E_g a teplotě T.

T = 300 K

n_i = 2×10^6 cm^{-3} GaAs (E_g = 1.42eV) $\xrightarrow{10^4\times}$ $n_i = 2 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}

$\boxed{1{,}5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}}$ Si (E_g = 1.12eV) $\xrightarrow{10^3\times}$ $n_i = 1{,}5 \cdot 10^{13}$ cm^{-3}

2×10^{13} cm^{-3} Ge (E_g = 0.74eV) $\xrightarrow{1{,}5 \cdot 10^2}$ $n_i = 3 \cdot 10^{15}$ cm^{-3}

T = 420K

Odečtěte z grafu hodnoty n_i pro T = 420 K (150°C). Kolikrát se koncentrace zvýší?

C3.3 Intrinzický a dotovaný polovodič

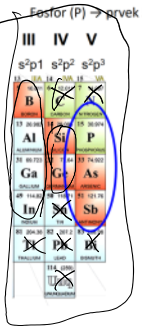
Příklad CP3.6:

Určete koncentraci elektronů n_0 a děr p_0 v křemíku dotovaném fosforem o koncentraci 10^{17} cm^{-3}. Teplota T=300 K, intrinzická koncentrace n_i= 1.5x10^{10} cm^{-3}.

$n_0 = ?$

$p_0 = ?$

Fosfor (P) → prvek 5. skupiny → oproti Si jeden valenční elektron navíc → donor → typ N.



Rovnice nábojové neutrality pro polovodič typu N: $n_0 = N_D^+ + p_0$ (1)

Vztah mezi koncentrací elektronů a Fermiho hladinou $n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$ (2)

Vzájemná rovnováha koncentrací elektronů a děr $\boxed{n_0 \cdot p_0 = n_i^2}$ (3)

Pro N_D= 10^{17} cm^{-3} je $N_D >> n_i$ a rovnice (1) se zjednoduší $n_0 = N_D$.

$n_0 \approx 10^{17}$ cm^{-3}

Dosazením do (3): $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{2{,}25 \cdot 10^{20}}{10^{17}} = 2{,}25 \cdot 10^3 \text{cm}^{-3}$

$N_D^+ = 10^{17}$ cm^{-3} Fosforem

$(1)\ n_0 = \underbrace{N_D^+}_{10^{17} \text{ cm}^{-3}} + p_0 = N_D^+ = 10^{17}$ cm^{-3}

$(3)\ p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1{,}5 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 2{,}25 \cdot 10^3$ cm^{-3}

Příklad CP3.7:

Určete polohu Fermiho hladiny vzhledem ke středu zakázaného pásu (E_i) pro polovodič z příkladu CP3.7. T=300 K, n_i= 1.5x10^{10} cm^{-3}, k = 1.38x10^{-23} J.K^{-1}, e = 1.602x10^{-19} C.

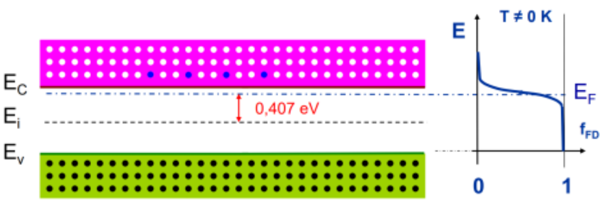
Dosazením do (2) vyjádřeno v eV: $E_F - E_i = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_0}{n_i} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \cdot 300}{1.602 \times 10^{-19}} \ln \frac{10^{17}}{1.5 \cdot 10^{10}} = 0.407\ [eV]$

$n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \Rightarrow \frac{n_0}{n_i} = \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$

$\ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right) = \frac{E_F - E_i}{kT} \Rightarrow E_F - E_i = kT \cdot \ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right)$

$E_F - E_i = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot \ln\left(\frac{10^{17}}{1{,}5 \cdot 10^{10}}\right) = 6{,}5 \cdot 10^{-10}$ J

$= 0{,}407$ eV



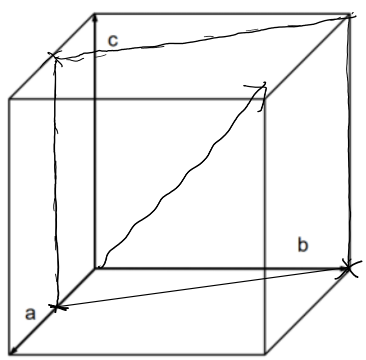
Příklad CP3.2:

Nakreslete v kubické krystalové mříži rovinu s Millerovým indexem (210) a krystalografický směr [001]. Určete další ekvivalentní směry ke směru [001].

100 $\boxed{010}$

002

003



002
003
$\frac{1}{2}\ \ 1\ \ \infty$

$[\bar{1}\ \bar{1}\ \bar{1}]$

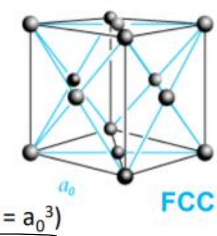
Pomůcka: daná rovina vytíná na jednotlivých osách úseky dané reciprokým hodnotám Millerových indexů, tj. ½, 1, ∞

C3.1 Krystalová mříž

Příklad CP3.3:

Vypočtěte objemovou koncentraci n_{Si} atomů Si v krystalu křemíku.

krystalová soustava křemíku je diamantová = 2 x FCC
mřížková konstanta křemíku: a_0 = 5,43 Å = 0,543 nm



$$\left(8\cdot\frac{1}{8}+\frac{1}{2}\cdot 6\right)\cdot 2 = 8$$

Koncentrace n = počet atomů v elementární buňce / objem buňky ($V = a_0^3$)

Počet atomů v buňce :

$$1\text{Å} = 10^{-10}\ m$$

$$n_{Si} = ? = \boxed{\frac{N_{Si}}{V}} = \boxed{\frac{8}{1{,}601\cdot 10^{-22}}} = 5\cdot 10^{22}\ cm^{-3}$$

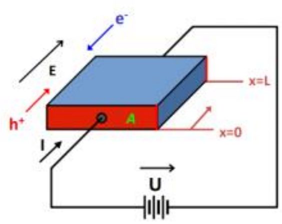
$$a_0 = 5{,}43\text{A} = 0{,}543\ nm$$

$$a_0^3 = (0{,}543\cdot 10^{-9})^3 = 1{,}601\cdot 10^{-28}\ m^3 = 1{,}601\cdot 10^{-22}\ cm^3$$

$1\ m \rightarrow 100\ cm$
$1\ m^2 \rightarrow 100\times 100\ cm^2$
$1\ m^3 \rightarrow 100\times 100\times 100\ cm^3$
$10^6\ cm^3$

Příklad CP4.1:

Určete proud protékající integrovaným odporem v křemíkovém IO o délce 1 mm a průřezu 100 μm². Vodivá dráha je dotována bórem o koncentraci 10^{17} cm⁻³, intrinzická koncentrace nositelů náboje v křemíku n_i= 1.5x10¹⁰ cm⁻³. Proud určete pro teplotu 300 K a úbytek napětí na odporu 10V.



Diferenciální tvar:

$$J = J_n + J_p = en\mu_n E + ep\mu_p E = \sigma E$$

$$\frac{A}{m^2}$$

$$\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)e$$

počet elektronů, pohyblivost elektronů, počet děr, pohyblivost děr, $1{,}6\cdot 10^{-19}\ C$

$$U = RI$$

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

$$R = \frac{1}{\sigma}\cdot\frac{l}{S}$$

σ – měrná vodivost

P polovodič:

$$p_0 = n_0 + N_A$$

$$p_0 = N_A \quad (N_A \gg n_i)$$

$$n_i^2 = p_0 \cdot n_0$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1{,}5\cdot 10^{10})^2}{10^{17}}$$

Řešení:

$l = 1\ mm$
$S = 100\ \mu m^2$
$N_A^- = 10^{17}\ cm^{-3}$
$n_i = 1{,}5\cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

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

$10\times 10\ \mu m$
$0{,}010\times 0{,}010\ mm$
$0{,}001\times 0{,}001\ cm = 10^{-6}\ cm$

$N_A = 10^{\dots}$

$n_i = 1{,}5 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$

$T = 300\ K$

$U = 10\ V$

$0{,}010 \times 0{,}010\ mm$

$0{,}001 \times 0{,}001\ cm = 10^{-6}\ cm$

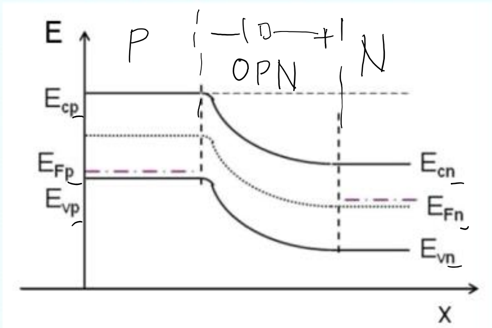
$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1{,}5\cdot10^{10})^2}{10^{17}} = \underline{\underline{2250}}$

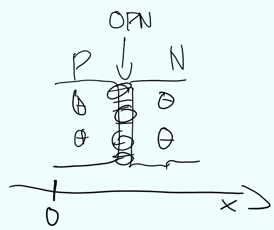
$\sigma = e \cdot p_0 \cdot \mu_p = 1{,}602\cdot10^{-19} \cdot 10^{17} \cdot 200 = 3{,}2\ \Omega cm^{-1}$

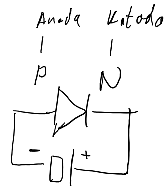
$R = \frac{1}{3{,}2} \cdot \frac{10^{-1}}{10^{-6}} = 31250\ \Omega$

$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{31250} = \frac{1}{3125} = 320\ \mu A$

Na obrázku je energetický diagram přechodu PN.







Určete polarizaci zobrazeného přechodu vnějším napětím: závěrná (na P +, na N -) ×

Závěrná na (P − a na N +)

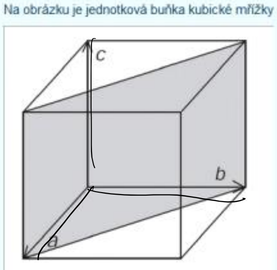
Určete difúzní napětí přechodu P^+N v meV, kde $N_A = 10^{20}\ cm^{-3}$ a $N_D = 10^{17} cm^{-3}$ při teplotě 300K.

Intrinsickou koncentraci v křemíku uvažujte $n_i = 1.10^{10}\ cm^{-3}$ a kT = 26 meV.

5,99 × $\boxed{\text{mV.}}$

$$U_D = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}\right) = 26 \cdot \ln\left(\frac{\cancel{10^{20} cm^{-3}} \cdot 10^{17} \cancel{cm^{-3}}}{\cancel{10^{20} cm^{-6}}}\right) = \frac{26\ meV}{1 e} \cdot \ln\left(10^{17}\right) = 1{,}01 \cdot 10^2\ mV = \underline{\underline{101\ mV}}$$

Na obrázku je jednotková buňka kubické mřížky s mřížkovými vektory **a**, **b**, **c**.

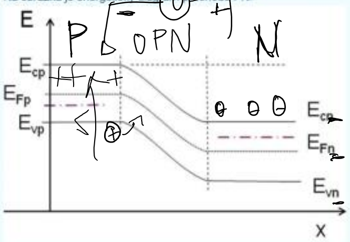


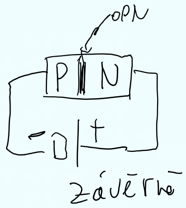
(1 1 0)

Určete Millerovy indexy šedě vyznačené roviny : (1 1 0) ✓

V monokrystalu galium arzenidu se vyskytují vazby: kovalentní a iontové ✓ asi jo

Na obrázku je energetický diagram přechodu PN.





Určete polarizaci zobrazeného přechodu vnějším napětím: závěrná (- na P, + na N) ✓

Vypočtěte vzdálenost $|E_F - E_i|$ v meV v Si při $p_0 = 10^{18}\ cm^{-3}$ v rovnováze při teplotě 300 K.

Intrinsickou koncentraci v křemíku uvažujte $n_i = 1.10^{10}\ cm^{-3}$ a $kT = 26$ meV.

479 ✓ meV

Correct

Marks for this submission: 1/1.

$$p_0 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

$$\frac{p_0}{n_i} = \exp(\ )$$

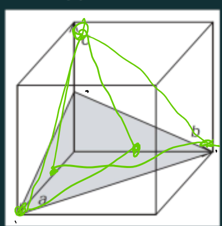
$$\ln \frac{p_0}{n_i} = (\ ) \quad / kT$$

$$E_i - E_F = kT \ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right)$$

$$= 26 \cdot \ln\left(\frac{10^{18}}{10^{10}}\right) =$$

$$= 479\ meV$$

Na obrázku je jednotková buňka kubické mřížky s mřížkovými vektory **a**, **b**, **c**.



(1 1 2)

Určete Millerovy indexy šedě vyznačené roviny : [redacted] ✓

S touto rovinou je ekvivalentní (vykazuje stejné fyzikální vlastnosti) rovina: (2 1 1) ✓

(2 1 1)

(1 2 1)

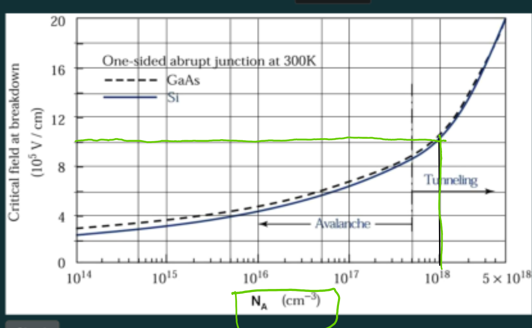
Check

$$E_{crit} = \frac{eN_D}{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si}} w_{OPN} = \frac{eN_D}{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si}} \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{Si} U_{BR}}{eN_D}} = \sqrt{\frac{2eN_D U_{BR}}{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si}}}$$

$$U_{BR} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{Si}}{2eN_D} E_{crit}^2 = \frac{8.85 \times 10^{-14} \cdot 11.8}{2 \cdot 1.6 \times 10^{-19} \cdot 10^{15}} (3 \times 10^5)^2 = 293\ V$$

Určete průrazné napětí strmého přechodu PN^+ v křemíku, kde $N_A = 1.10^{18}\ cm^{-3}$ při teplotě 300 K. Permitivitu křemíku uvažujte 1pF/cm.

Hodnotu kritického elektrického pole odečtěte z grafu. 3.125 ✓ V.



Check

You have correctly selected 1.

Correct

Marks for this submission: 1/1.

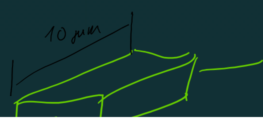
$$E_{crit} = 10 \cdot 10^5 \frac{V}{cm} = 10^6 \frac{V}{cm}$$

$$N_A = 1.10^{18}\ cm^{-3} \quad T = 300\ K$$

$$\varepsilon_{Si} = 1pF/cm$$

PN^+

Určete proud protékající integrovaným odporem v křemíkovém IO o délce 10 μm a o průřezu 10 μm^2 s dotací fosforem na koncentraci $10^{17}\ cm^{-3}$ při teplotě 300 K a úbytku napětí na odporu 10V. Pohyblivost elektronů a děr v křemíku odečtete z grafu. 11.2 ✓ mA.



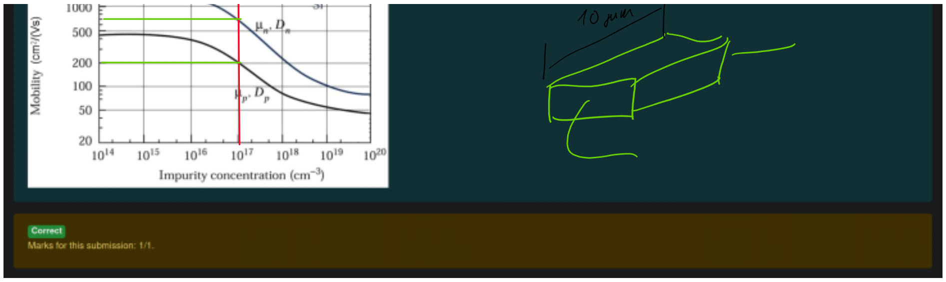
$l = 10\ \mu m = 0{,}00\ 0\ 10$

$S = 10\ \mu m^2$

$N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

$T = 300\ K$

III	IV	V
B	C	~~X~~



$N_D = 10^{17}\,cm^{-3}$

$T = 300K$

$U = 10V$

$10\,\mu m^2 = 10 \times 1\,\mu m$

$= 0{,}001 \times 0{,}0001$

III	IV	V
B	C	~~X~~
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	~~Sb~~

$\mu_p = 200 \frac{cm^2}{Vs}$

$\mu_n = 700 \frac{cm^2}{Vs}$

$\sigma = e(n\mu_n + \cancel{p\mu_p})$

? ?

$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$

$n_0 = \cancel{p_0} + N_D$

$1cm = 10mm$

$= 10\,000\,\mu m$

$10\,\mu m^2 = 10\,\mu m \cdot 1\,\mu m$

$?\ mm^2 = 0{,}01\,mm \cdot 0{,}001\,mm$

$cm^2 = 0{,}001\,cm \cdot 0{,}0001\,cm$

$\sigma = \underbrace{1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{17} \cdot 700} = 11{,}2\ \Omega\,cm$

$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{11{,}2} \cdot \frac{0{,}001}{0{,}001 \cdot 0{,}0001} = 892\ \Omega$

$\underline{I = 11{,}2\,mA}$