

- 11.1 Supondo que há uma concentração de dadores N_D e aceitadores N_A , e que se está no regime em que as impurezas estão completamente ionizadas, derive expressões exactas e aproximadas para a densidade n de electrões e a densidade p de buracos.
- 11.2 Um lingote de Si foi dopado com $N_A = 12 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ átomos de B. Estime a concentração de portadores e o nível de Fermi à temperatura ambiente. $m_e^{\text{DOS}} = 1.026m_e$, $m_h^{\text{DOS}} = 0.0591m_e$, e $E_g = 1.11 \text{ eV}$.
- 11.3 Um lingote de Si foi dopado com B. Estime a energia de ionização do dopante num modelo hidrogenóide em que usa a massa efectiva e a constante dieléctrica do Si.
- 11.4 Num semiconductor foi observada a seguinte concentração n de electrões na banda de condução em função da temperatura T :

$T(\text{K})$	100	200	300	400	600	800	1000	1200	1400	1500	1600
$n (10^{22} \text{ m}^{-3})$	2.14	4.71	4.93	4.97	4.99	5.00	5.50	9.34	19.90	28.53	39.87

A densidade intrínseca é dada por

$$n_i = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m_e^2} \right)^{3/4} \exp(-E_g/2k_B T)$$

- Qual é a concentração e tipo de dopantes?
- Faça uma estimativa do valor do hiato de energia E_g ?
- Qual é a energia do potencial químico (em relação à energia do mínimo da banda de condução) para $T = 600 \text{ K}$, assumindo $m_e^*/m_h^* \simeq 1.5$?
- Qual é a concentração de buracos p na banda de valência à temperatura de $T = 600 \text{ K}$?

Problema numérico para fazer em casa

11.5 Um lingote de Si foi dopado com $N_A = 12 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ átomos de B. Calcule a concentração de portadores e o nível de Fermi em função da temperatura. Use $m_e^{\text{DOS}} = 1.026m_e$, $m_h^{\text{DOS}} = 0.0591m_e$, e $E_g = 1.11 \text{ eV}$. O nível fundamental do B como impureza está 0.0444 eV acima do máximo da banda de valência.

Os estados de impurezas aceitadoras são formados a partir dos estados da banda de valência (transformação unitária), ou seja não “acrescentam” novos estados ao sistema, apenas alteram as suas energias. Para simplificar faça as contas com um único estado de impureza por dopante com apenas degenerescência de spin.

- a) O Si tem uma constante dielétrica $\epsilon_r \simeq 16.2$. Usando o modelo hidrogenóide e m_h^{DOS} como representativo das massas efectivas calcule o raio de Bohr dos estados ns . Estime o valor do número quântico n para o qual há sobreposição de orbitais entre átomos vizinhos, o que vai limitar a validade do modelo hidrogenóide. Estime a temperatura para a qual a existência de um nível de impureza $3s$ é relevante.
- b) Reveja os resultados do problema 13.2 das práticas.
- c) Calcule sem a aproximação de ionização completa ou de grande diferença entre a concentração intrínseca n_i e a densidade de dopantes N_A , a concentração de portadores e o nível de Fermi em função da temperatura tendo em conta os estados associados ao dopante. Quais são as temperaturas limites da zona de exaustão?