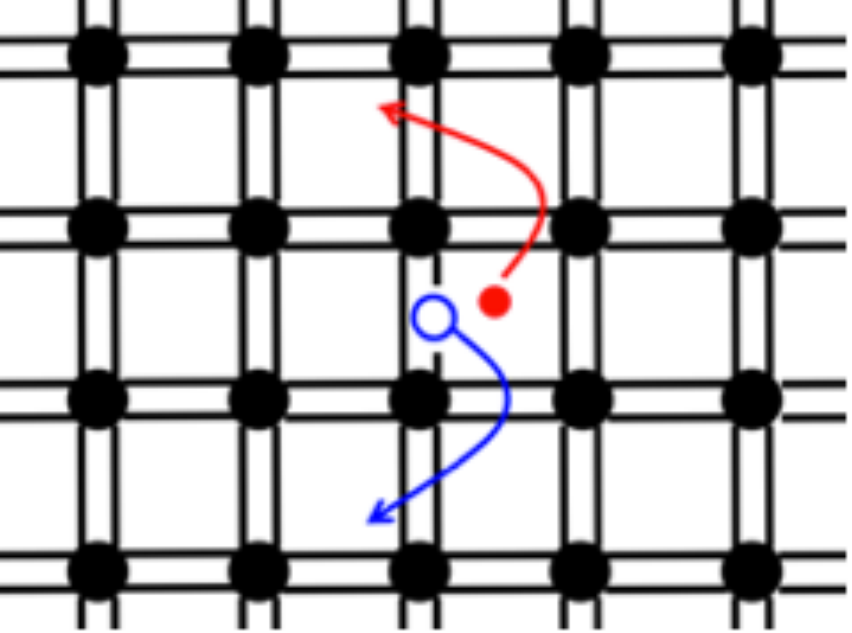
به نام خدا

فیزیک الکترونیک
چگالی حامل ها در حالت تعادل گرمایی

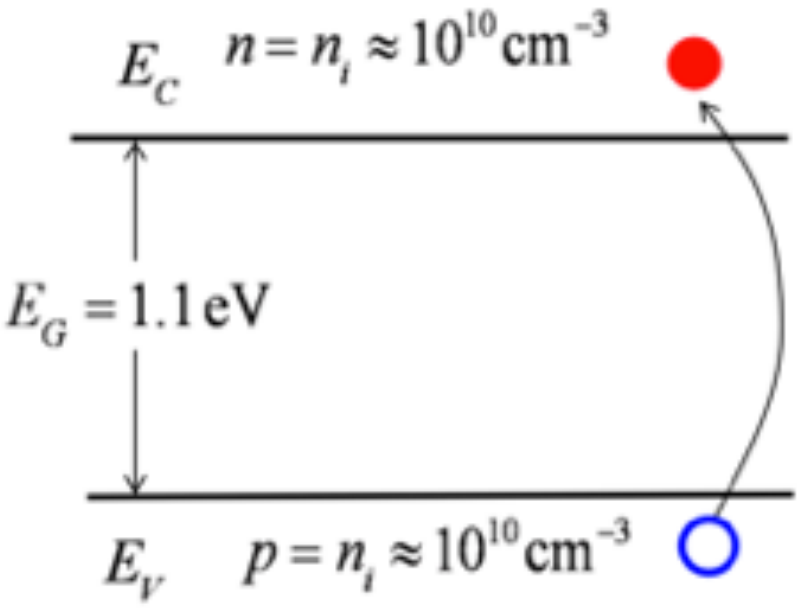
ارائه دهنده: حسین کرمی طاهری
برگرفته از محتوای آموزشی پروفسور Mark Lundstrom

نیمه هادی ذاتی: الکترون و حفره



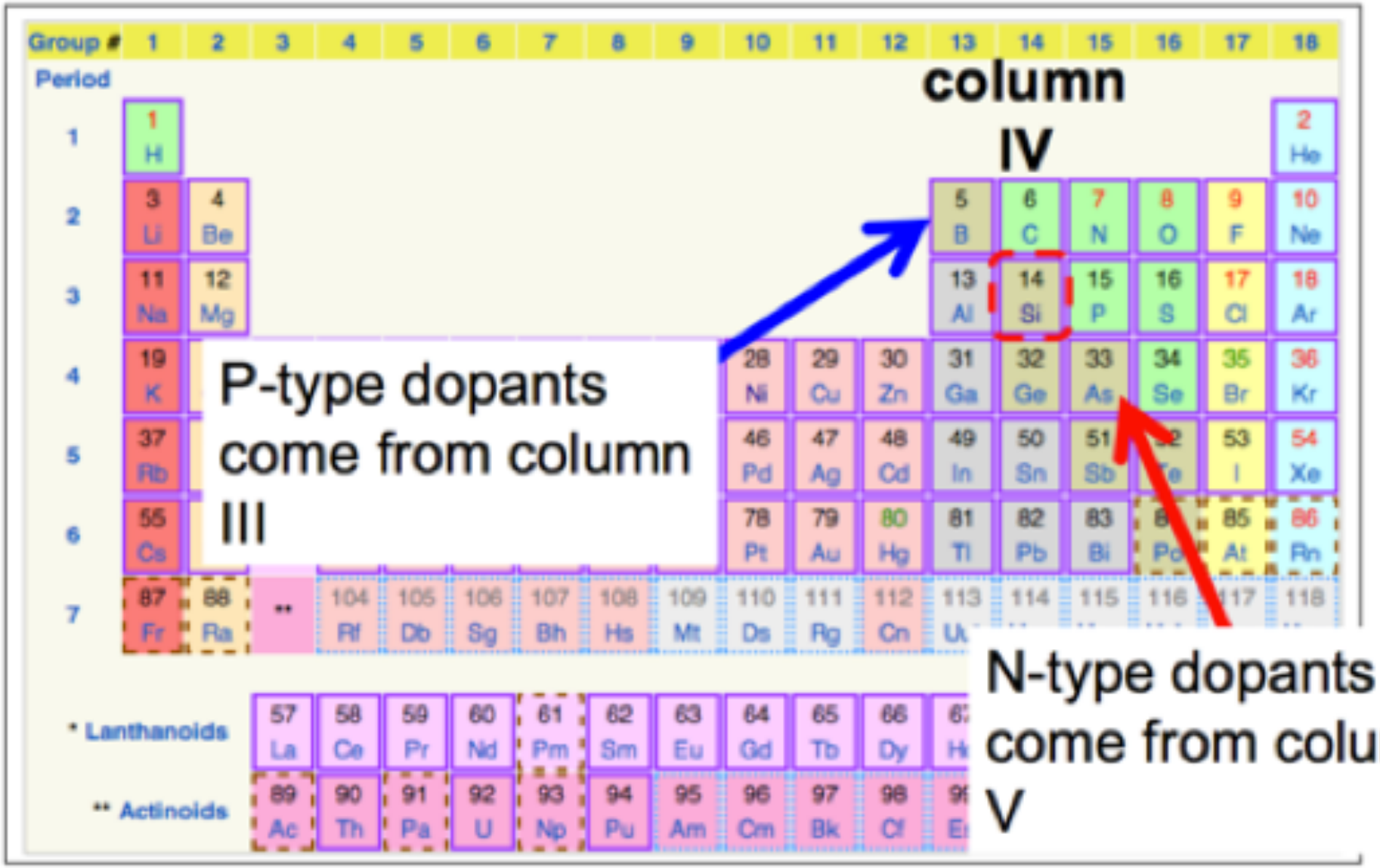
Intrinsic Si

- در دمای صفر مطلق تمام الکترون ها در پیوند هستند.
- با افزایش دما برخی از الکترون ها پیوند خود را می شکنند.
  - ✓الکترون آزاد شده می تواند در جریان شرکت کنند.
  - ✓الکترون های در پیوند نیز می توانند در جریان شرکت کنند.

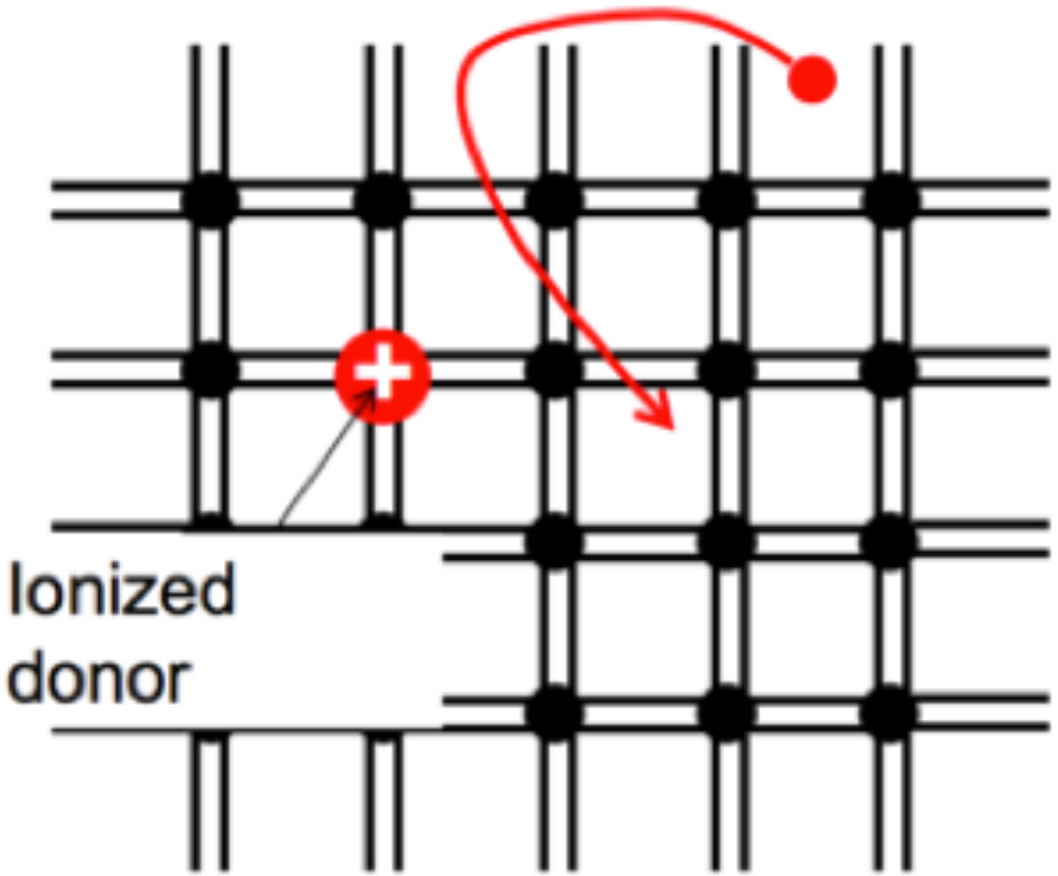


- حفره ها با بار مثبت تنها جهت مدل کردن جریان الکترون های در پیوند تعریف می شوند.

ناخالصی های گیرنده و دهنده الکترون



نیمه هادی نوع n



- الکترون پنجم پیوند ضعیف خود را در دمای اتاق می شکند.
- انرژی پیوند الکترون در اتم هیدروژن:

$$E_B = -\frac{m_0 q^4}{2(4\pi\varepsilon_0\hbar)^2} = -13.6\text{eV}$$

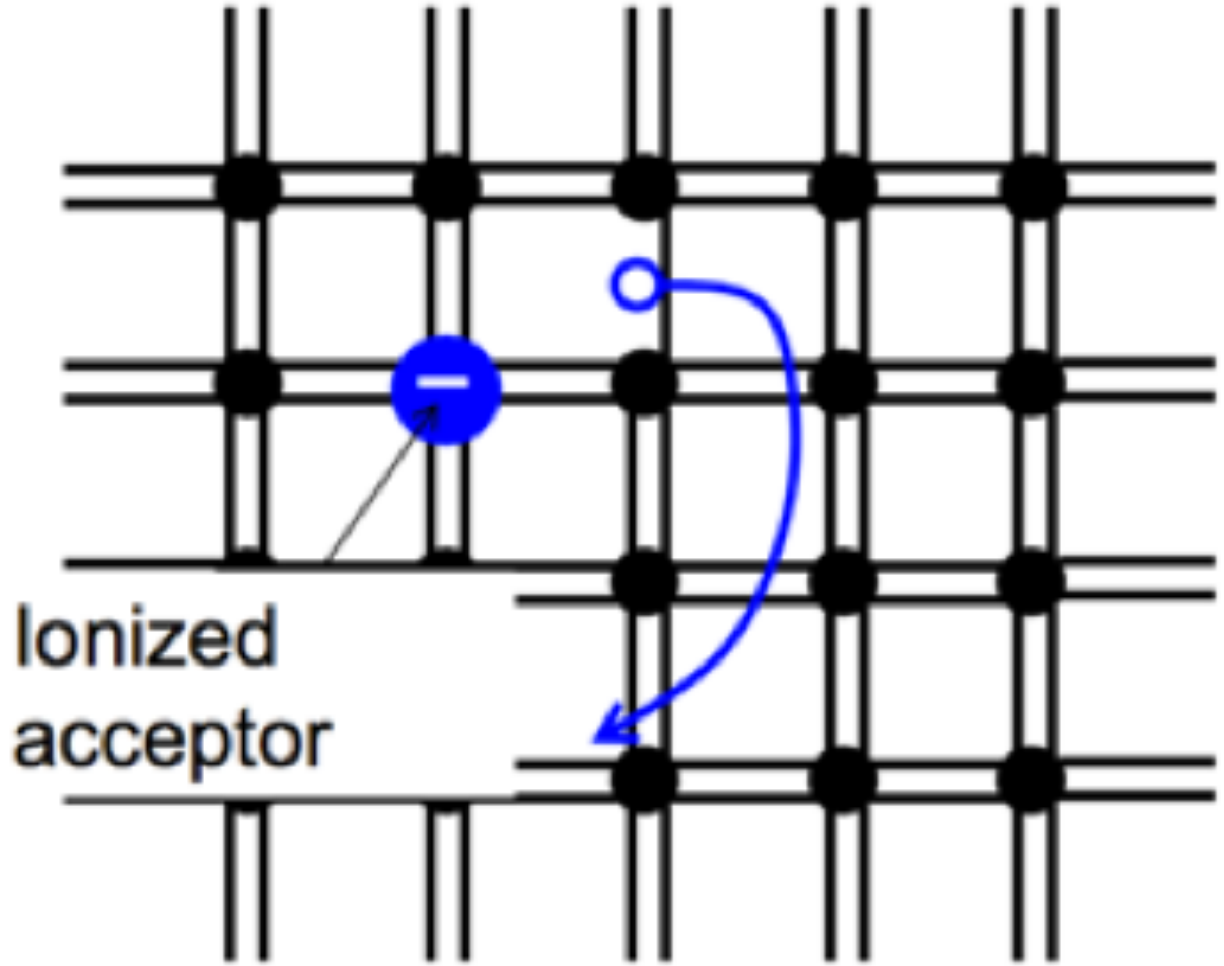
- انرژی پیوند الکترون پنجم اتم های دهنده (Donor):

$$\varepsilon = K_s\varepsilon_0 = 11.8\varepsilon_0, m_n^* = 1.18m_0$$
$$E_B = -0.1\text{eV}$$

چگالی الکترون های باند هدایت:

$$n_0 \cong N_D^+ \cong N_D \, , p_0 = ?$$

نیمه هادی نوع p

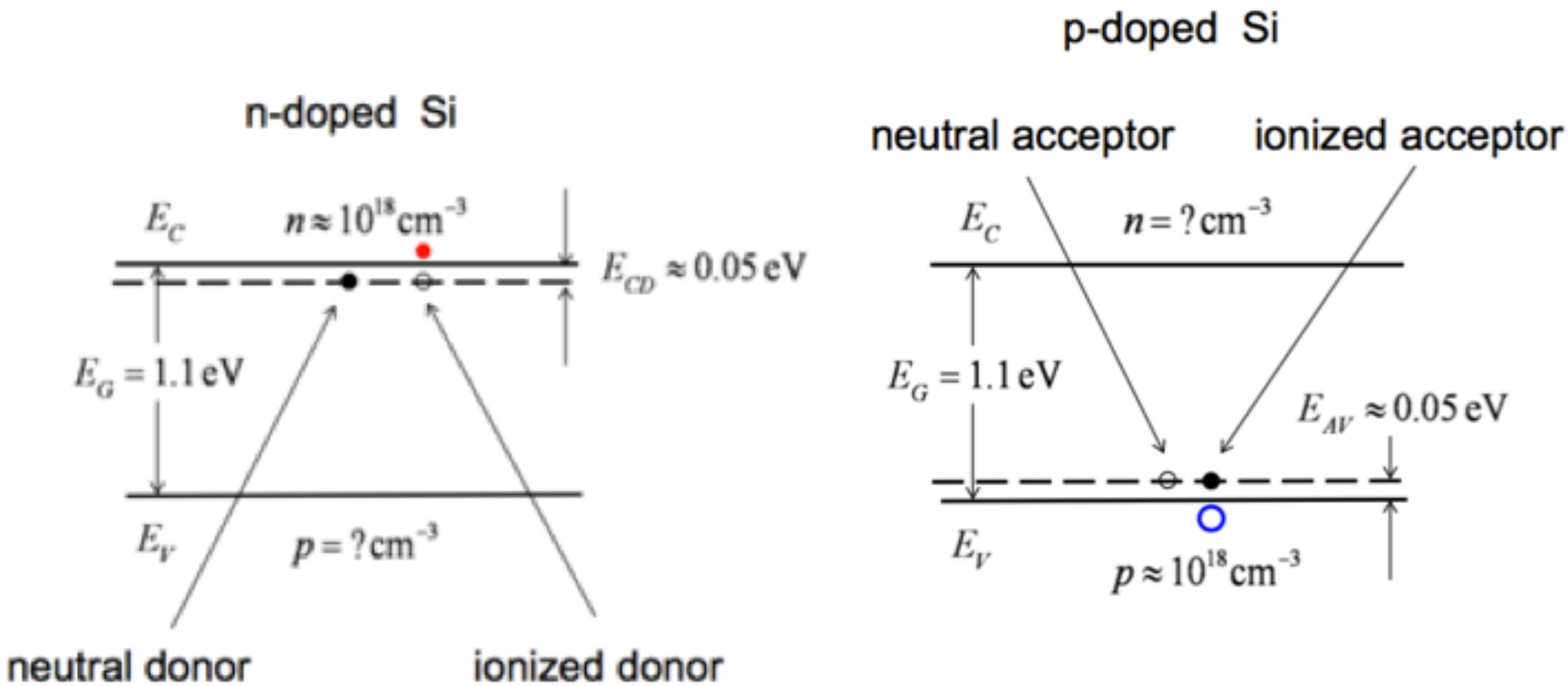


- ناخالصی از نوع گیرنده (Acceptor) الکترون
- ناخالصی به راحتی الکترون چهارم را با ایجاد یک حفره تکمیل می کند.
- ناخالصی تبدیل به یون منفی می شود.
- چگالی حفره ها در باند ظرفیت:

$$p_0 \cong N_A^- \cong N_A$$

$$n_0 = ?$$

دیاگرام باند نیمه هادی ناخالص شده با $N = 10^{18} cm^{-3}$

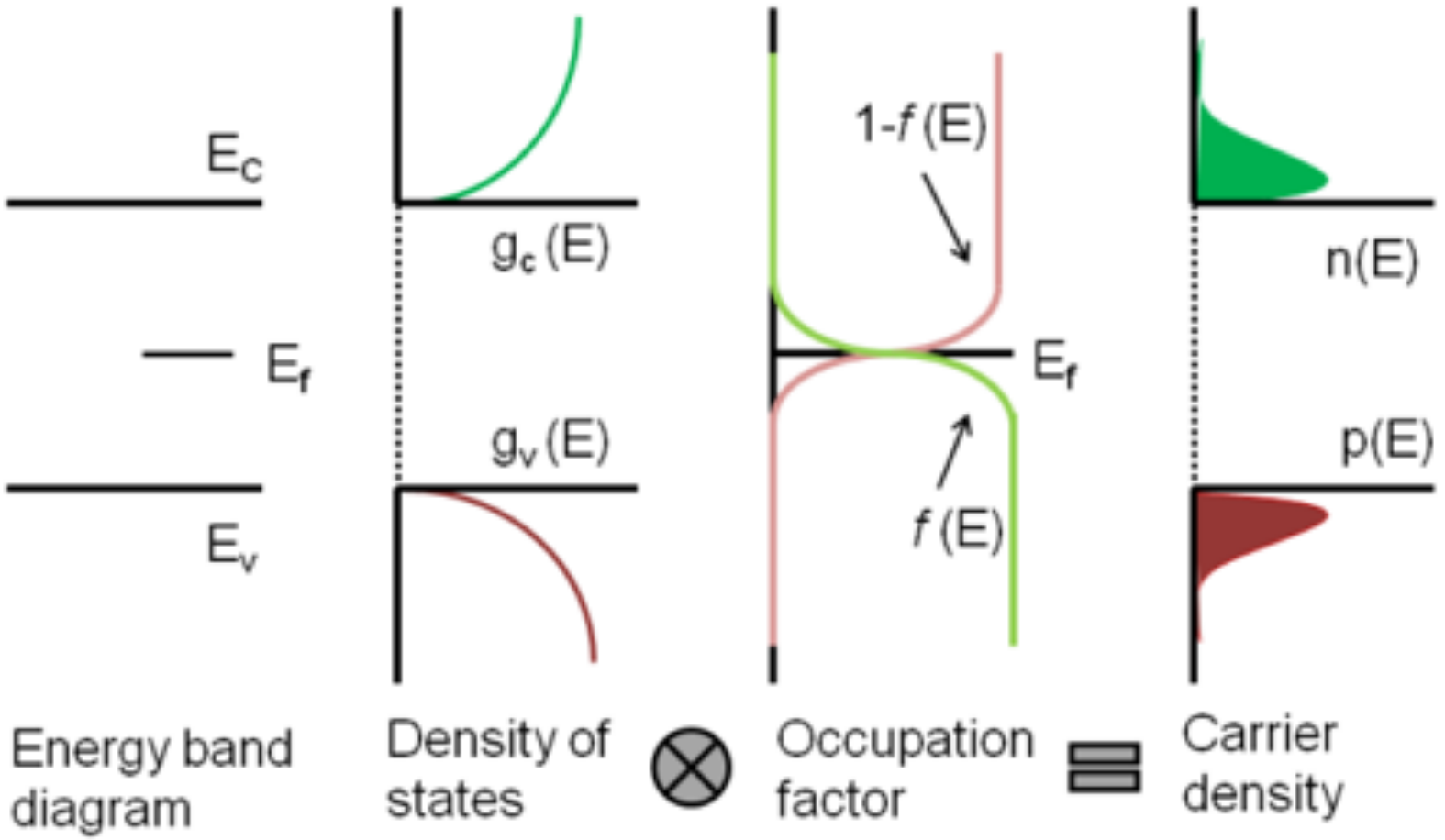


روابط چگالی حامل ها

- تابع چگالی حالات Density of States: تعداد حالات مجاز برای الکترون ها در واحد حجم و انرژی

- تابع توزیع فرمی: احتمال اشغال یک حالت با انرژی E توسط الکترون

$$f_0(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/k_B T}}$$



تمرین: رسم و توضیح تابع توزیع فرمی برای انرژی فرمی صفر و دماهای مختلف در نرم افزار MATLAB

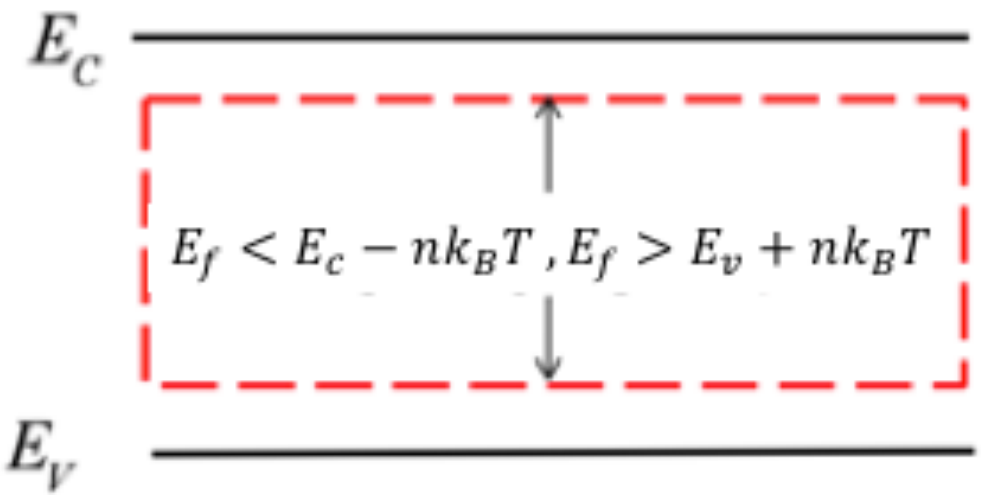
چگالی حامل ها در حالت تعادل گرمایی

$$n_0 = \int_{E_c}^{E_c^{top}\to\infty} n_0(E)dE = \int_{E_c}^{E_c^{top}\to\infty} g_c(E)f_0(E)dE$$

$$p_0 = \int_{E_v^{bot}\to-\infty}^{E_v} p_0(E)dE = \int_{E_v^{bot}\to-\infty}^{E_v} g_v(E)\big(1-f_0(E)\big)dE$$

- برای مواد حجیم دارای باند هدایت دارای مدل جرم مؤثر: $g_c(E) \propto \sqrt{E-E_c}$
- برای مواد حجیم دارای باند هدایت دارای مدل جرم مؤثر: $g_v(E) \propto \sqrt{E_v-E}$

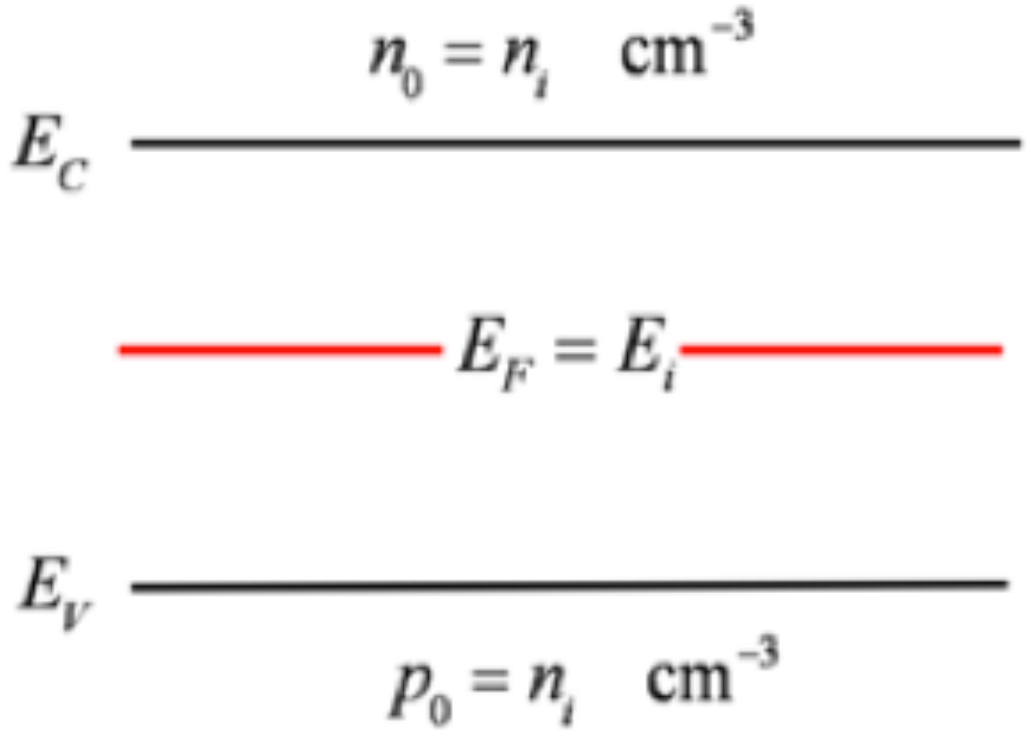
نیمه هادی غیر تبهگن (Non-degenerate)



- $E_f < E_c - nk_BT$,$E_f > E_v + nk_BT$
- $f_0(E > E_c) = \frac{1}{1+e^{(E-E_f)/k_BT}} \cong e^{(E_f-E)/k_BT}$
- $1 - f_0(E < E_v) \cong e^{(E-E_f)/k_BT}$
- $n_0 = N_c e^{(E_f-E_c)/k_BT}$, $p_0 = N_v e^{(E_v-E_f)/k_BT}$
- N_c چگالی حالات مؤثر باند هدایت و N_v چگالی حالات مؤثر باند ظرفیت
- $n_0 p_0 = N_c N_v e^{-E_g/k_BT} = n_i^2$ و انرژی فرمی نیمه هادی ذاتی E_i
- تمرین: $E_i \cong \frac{E_c+E_v}{2}$,$n_0 = N_c e^{\frac{E_f-E_c}{k_BT}} = n_i e^{\frac{E_f-E_i}{k_BT}}$, $p_0 = N_v e^{\frac{E_v-E_f}{k_BT}} = n_i e^{\frac{E_i-E_f}{k_BT}}$

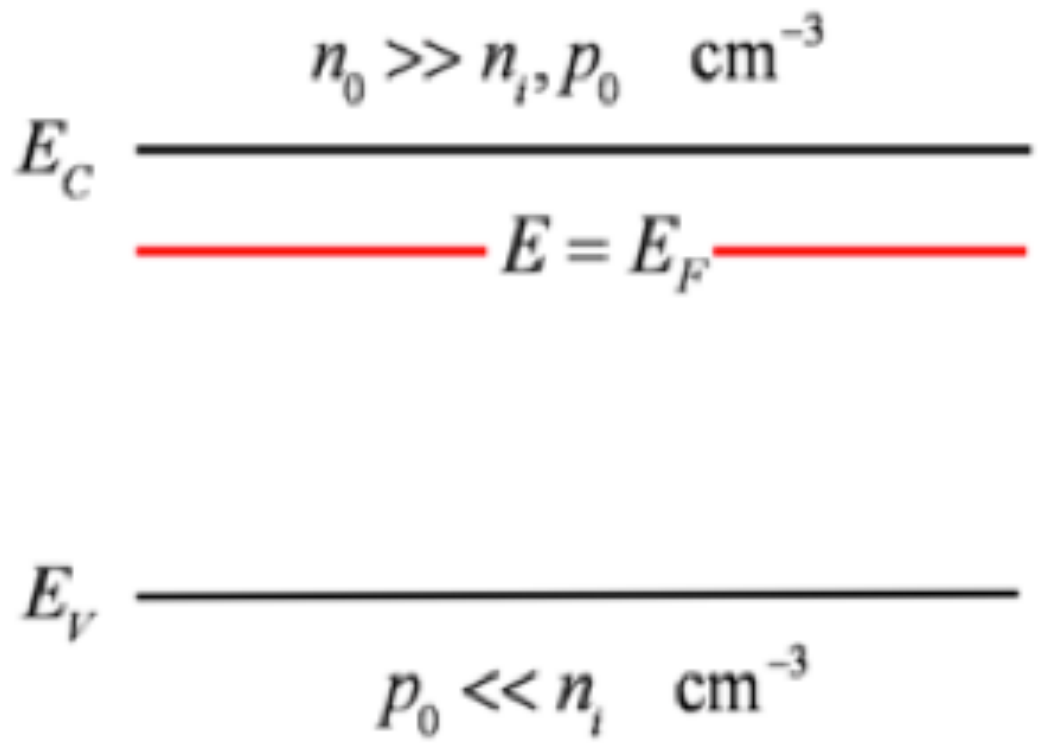
نیمه هادی ذاتی در حالت تعادل گرمایی و دیگر شرایط

- $E_f = E_i$
- $n_0 p_0 = n_i^2$
- $n_0 = p_0 = n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$
- $n_0 = N_c e^{\frac{E_f - E_c}{k_B T}} = n_i e^{\frac{E_f - E_i}{k_B T}}$
- $p_0 = N_v e^{\frac{E_v - E_f}{k_B T}} = n_i e^{\frac{E_i - E_f}{k_B T}}$



نیمه هادی نوع n در حالت تعادل گرمایی و دیگر شرایط

- $n_0 p_0 = n_i^2$
- $n_0 = N_D$
- $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{n_i^2}{N_D}$
- $n_0 = N_c e^{\frac{E_f - E_c}{k_B T}} = n_i e^{\frac{E_f - E_i}{k_B T}}$
- $p_0 = N_v e^{\frac{E_v - E_f}{k_B T}} = n_i e^{\frac{E_i - E_f}{k_B T}}$
- انرژی فرمی؟ تمرین



نیمه هادی نوع p در حالت تعادل گرمایی و دیگر شرایط

- $n_0 p_0 = n_i^2$
- $p_0 = N_A$
- $n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{n_i^2}{N_A}$
- $n_0 = N_c e^{\frac{E_f - E_c}{k_B T}} = n_i e^{\frac{E_f - E_i}{k_B T}}$
- $p_0 = N_v e^{\frac{E_v - E_f}{k_B T}} = n_i e^{\frac{E_i - E_f}{k_B T}}$
- انرژی فرمی؟ تمرین