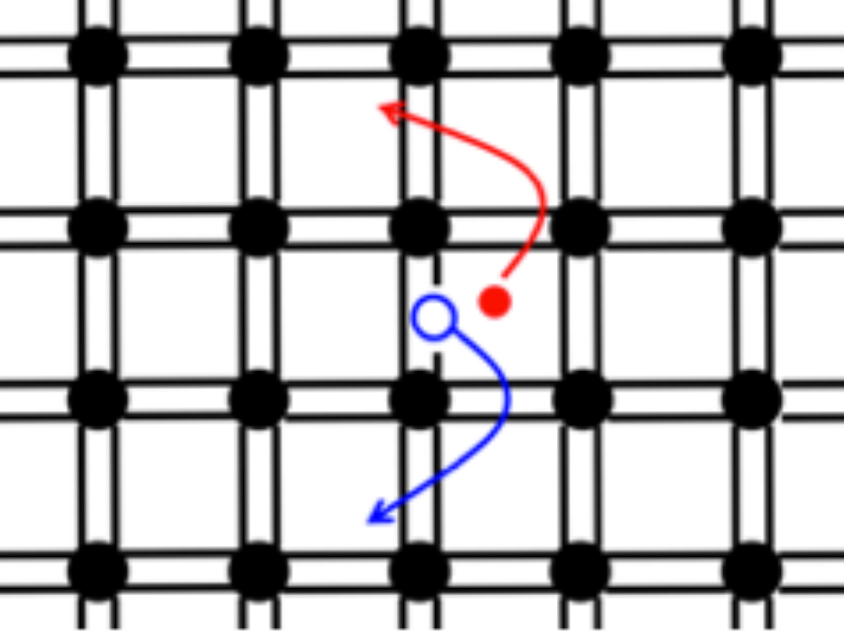


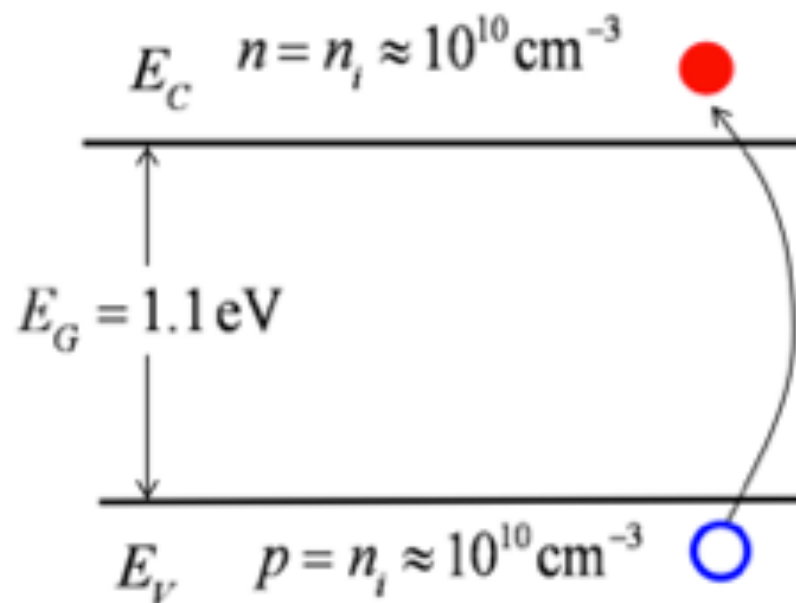
به نام خدا

فیزیک الکترونیک چگالی حامل ها در حالت تعادل گرمایی

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



Intrinsic Si



نیمه هادی ذاتی: الکترون و حفره

- 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 کند.

✓ الکترون های در پیوند نیز می توانند در جریان شرکت کنند.

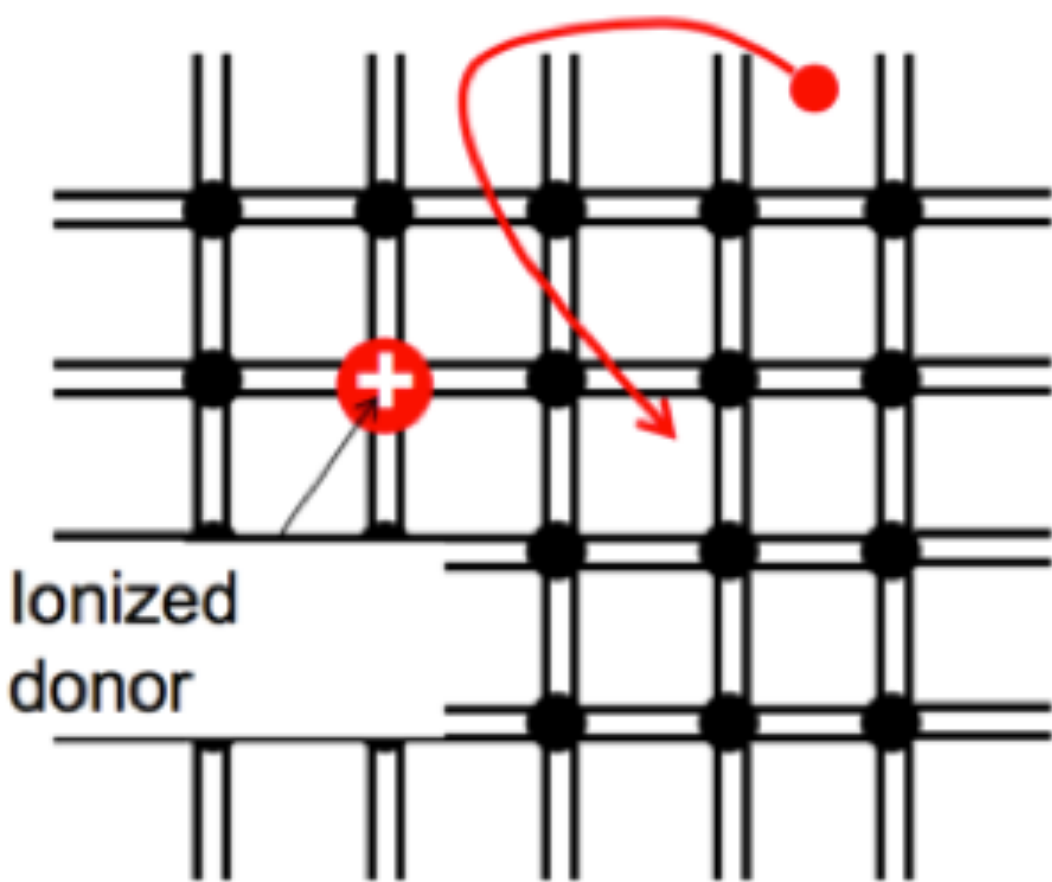
- حفره ها با بار مثبت تنها جهت مدل کردن جریان الکترون های در پیوند تعریف می شوند.

ناخالصی های گیرنده و دهنده الکترون

Group #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period	column																	
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	P-type dopants come from column III							28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb							46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
6	55 Cs							78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
* Lanthanoids	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
** Actinoids	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

N-type dopants
come from column
V

نیمه هادی نوع n



- الکترون پنجم پیوند ضعیف خود را در دمای اتاق می شکند.

- انرژی پیوند الکترون در اتم هیدروژن:

$$E_B = -\frac{m_0 q^4}{2(4\pi\epsilon_0 \hbar)^2} = -13.6\text{eV}$$

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

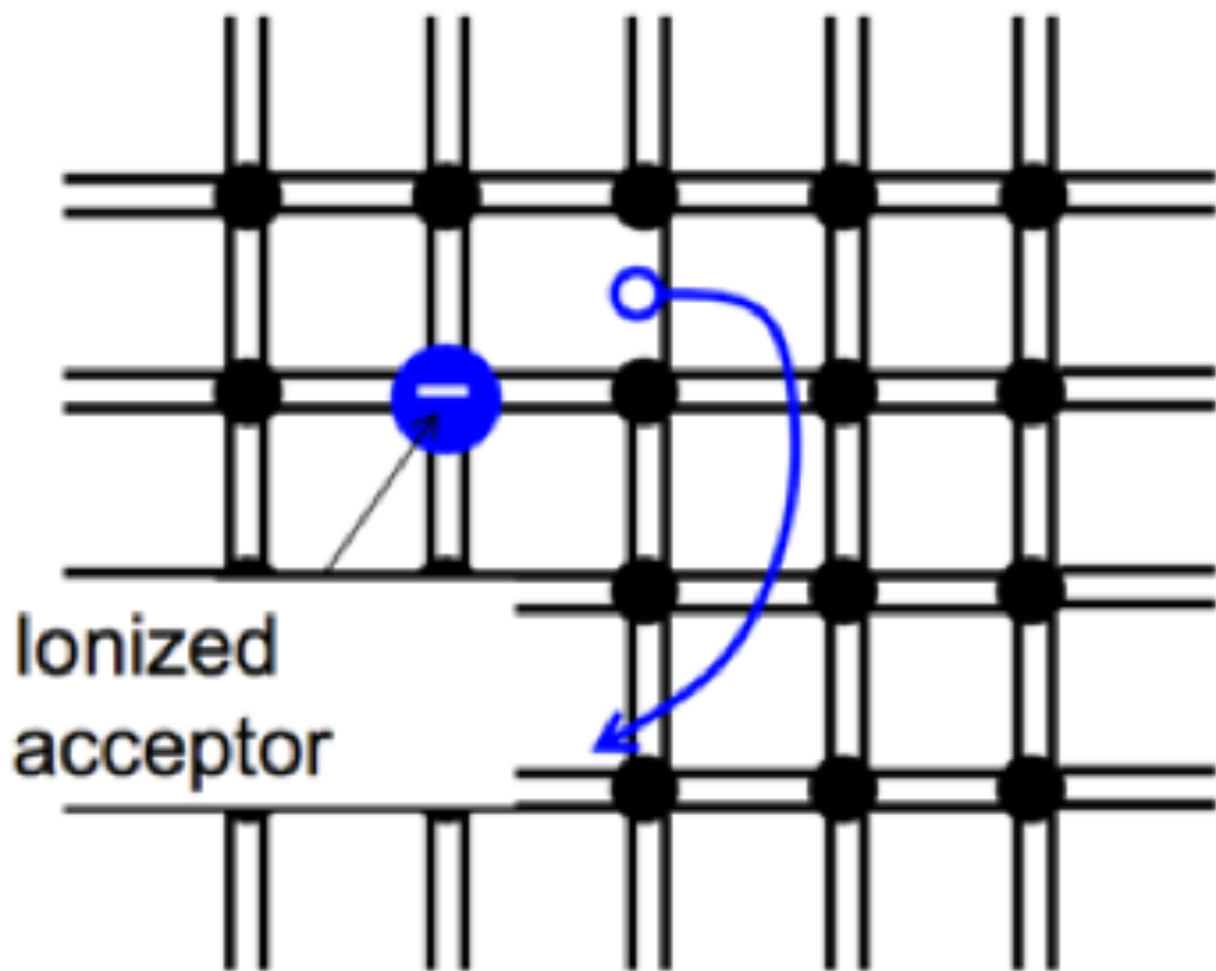
$$\epsilon = K_s \epsilon_0 = 11.8\epsilon_0, m_n^* = 1.18m_0$$

$$E_B = -0.1\text{eV}$$

چگالی الکترون های باند هدایت:

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

نیمه هادی نوع p

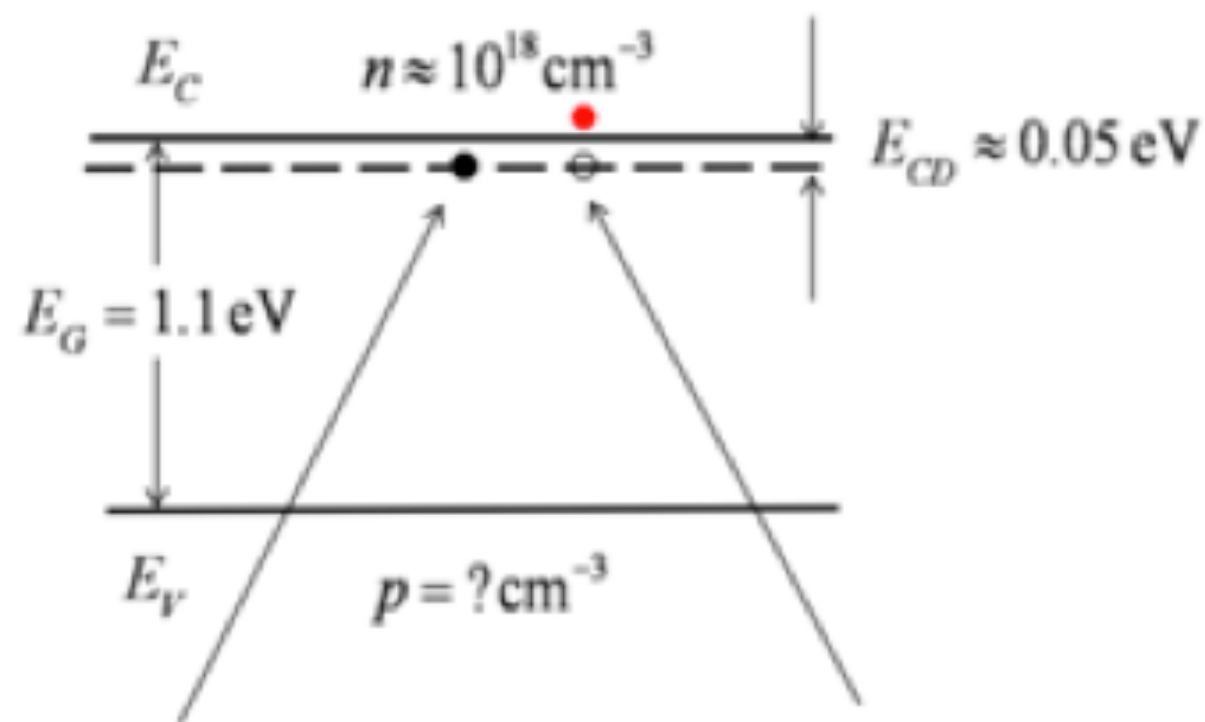


- ناخالصی از نوع گیرنده (Acceptor) الکترون
- ناخالصی به راحتی الکترون چهارم را با ایجاد یک حفره تکمیل می کند.
- ناخالصی تبدیل به یون منفی می شود.
- چگالی حفره ها در باند ظرفیت:

$$p_0 \cong N_A^- \cong N_A$$
$$n_0 = ?$$

دیاگرام باند نیمه هادی ناخالص شده با $N = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
 p-doped Si

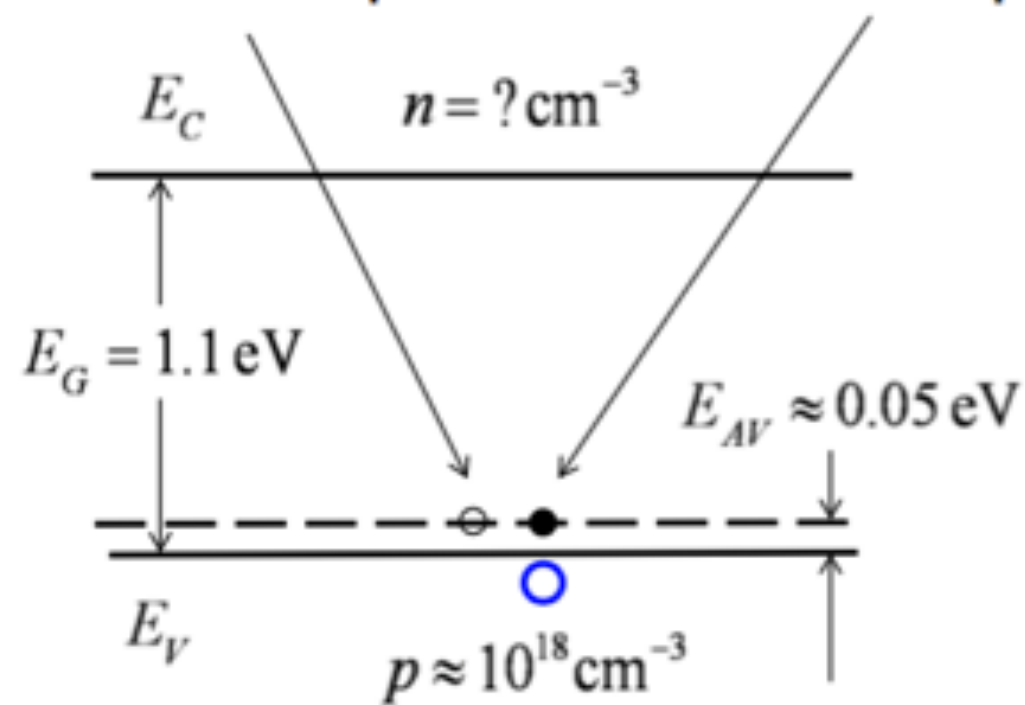
n-doped Si



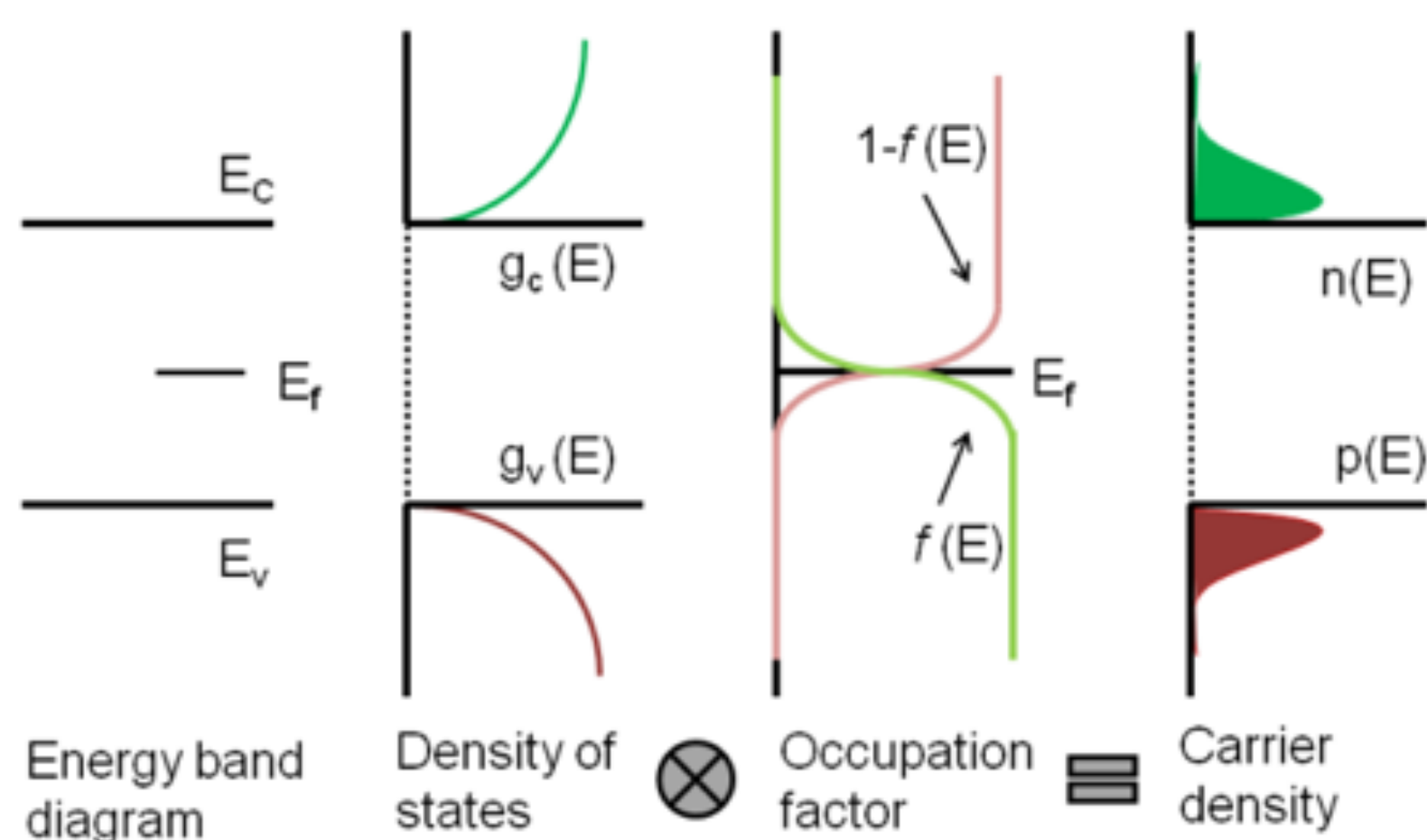
neutral donor

ionized donor

neutral acceptor ionized acceptor



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

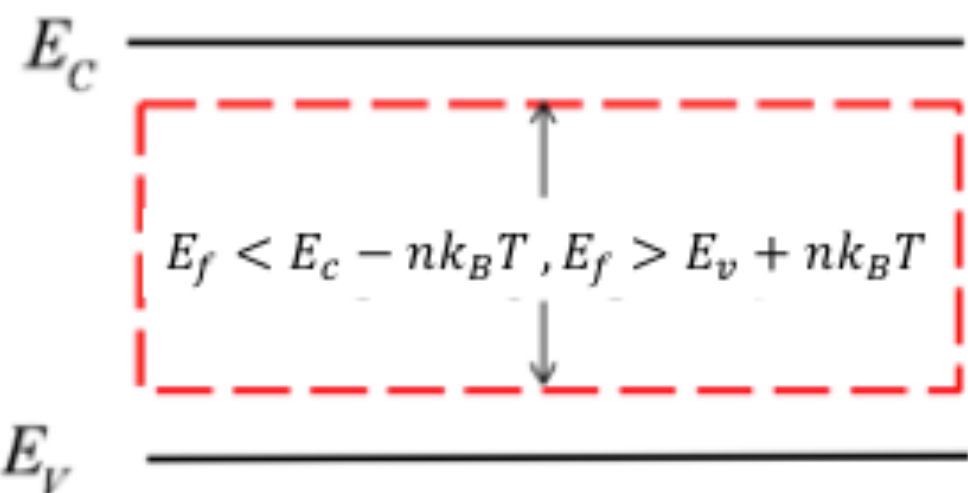
چگالی حامل ها در حالت تعادل گرمایی

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

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

- 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)



$$E_f < E_c - nk_B T, E_f > E_v + nk_B T \cdot$$

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

$$1 - f_0(E < E_v) \cong e^{(E - E_f)/k_B T} \cdot$$

$$n_0 = N_c e^{(E_f - E_c)/k_B T}, p_0 = N_v e^{(E_v - E_f)/k_B T} \cdot$$

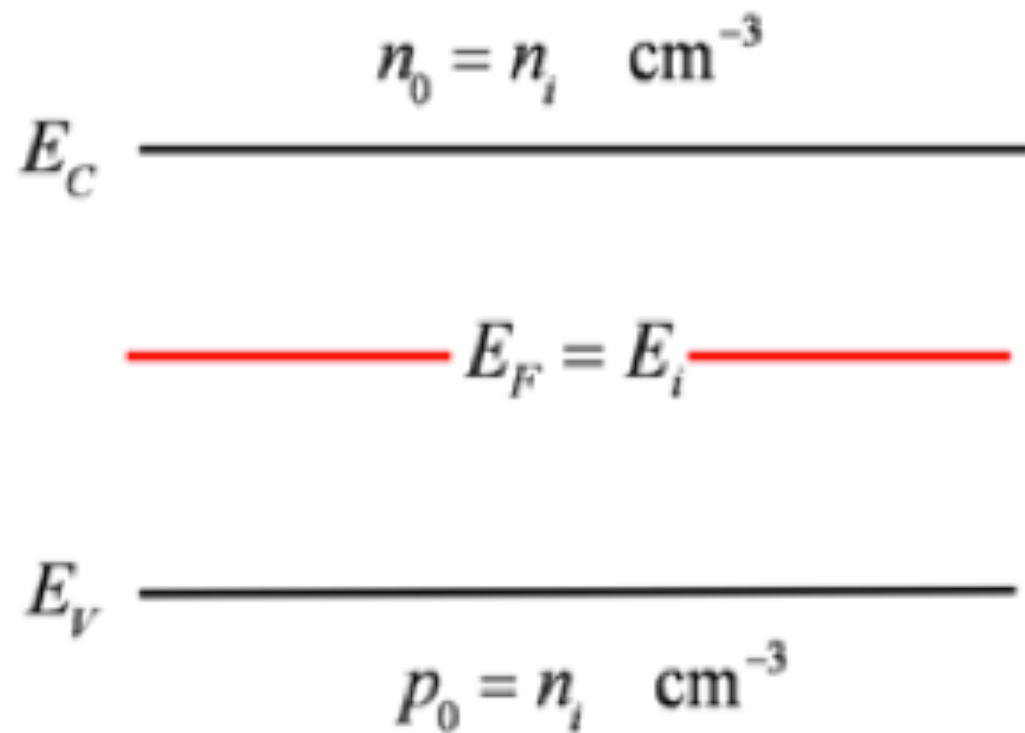
N_c چگالی حالات مؤثر باند هدایت و N_v چگالی حالات مؤثر باند ظرفیت

$$n_0 p_0 = N_c N_v e^{-E_g/k_B T} = n_i^2 \cdot$$

$$n_0 = N_c e^{\frac{E_f - E_c}{k_B T}} = n_i e^{\frac{E_f - E_i}{k_B T}}, p_0 = N_v e^{\frac{E_v - E_f}{k_B T}} = n_i e^{\frac{E_i - E_f}{k_B T}}, E_i \cong \frac{E_c + E_v}{2} \cdot \text{تمرین:}$$

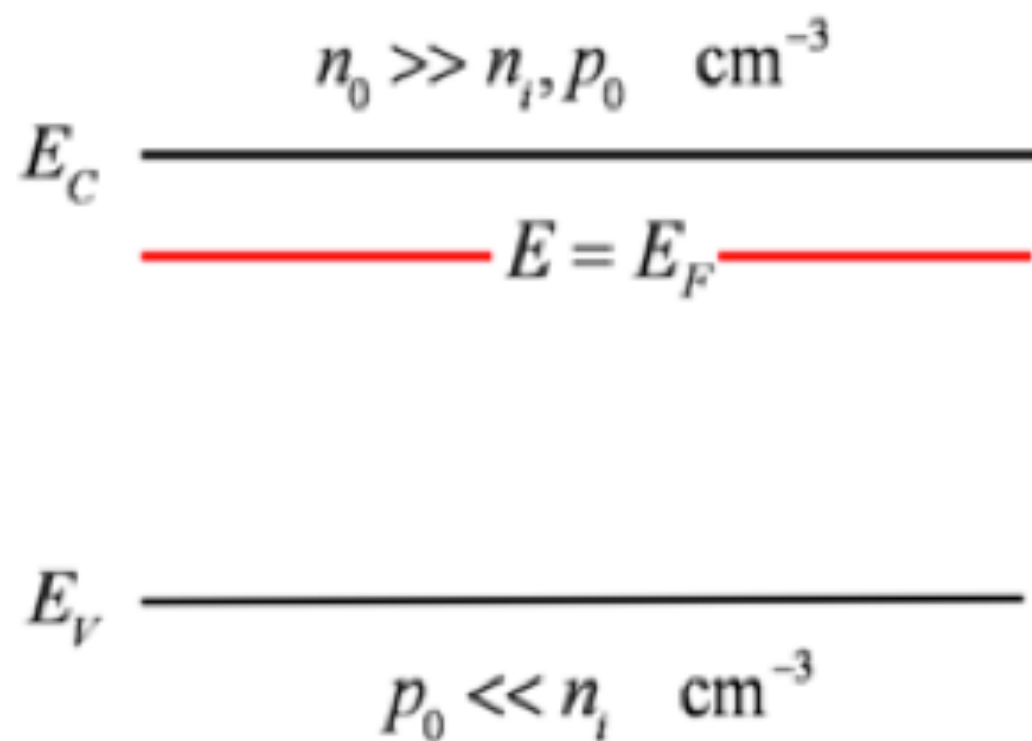
نیمه هادی ذاتی در حالت تعادل گرمایی و دیگر شرایط

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



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

