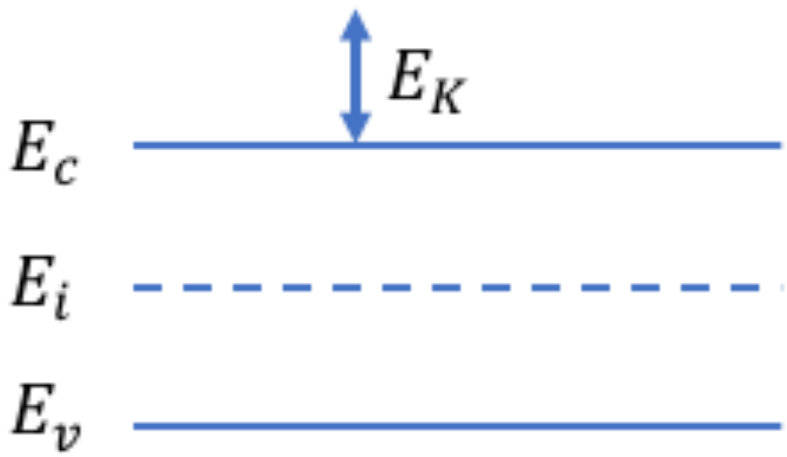
به نام خدا

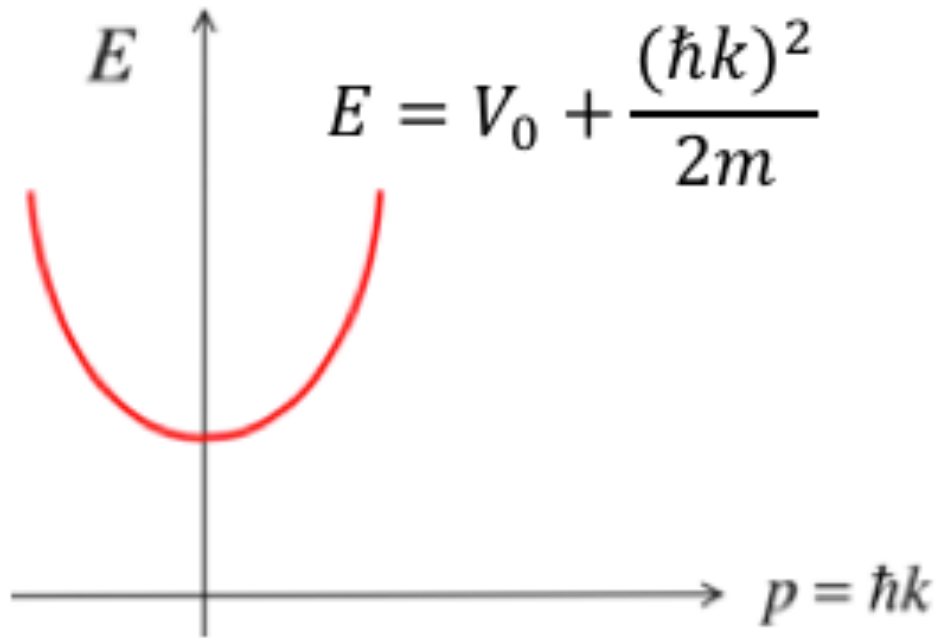
فیزیک الکترونیک
معادلات الکتروستاتیکی و پیوستگی

ارائه دهنده: حسین کرمی طاهری

معادلات الکتروستاتیکی

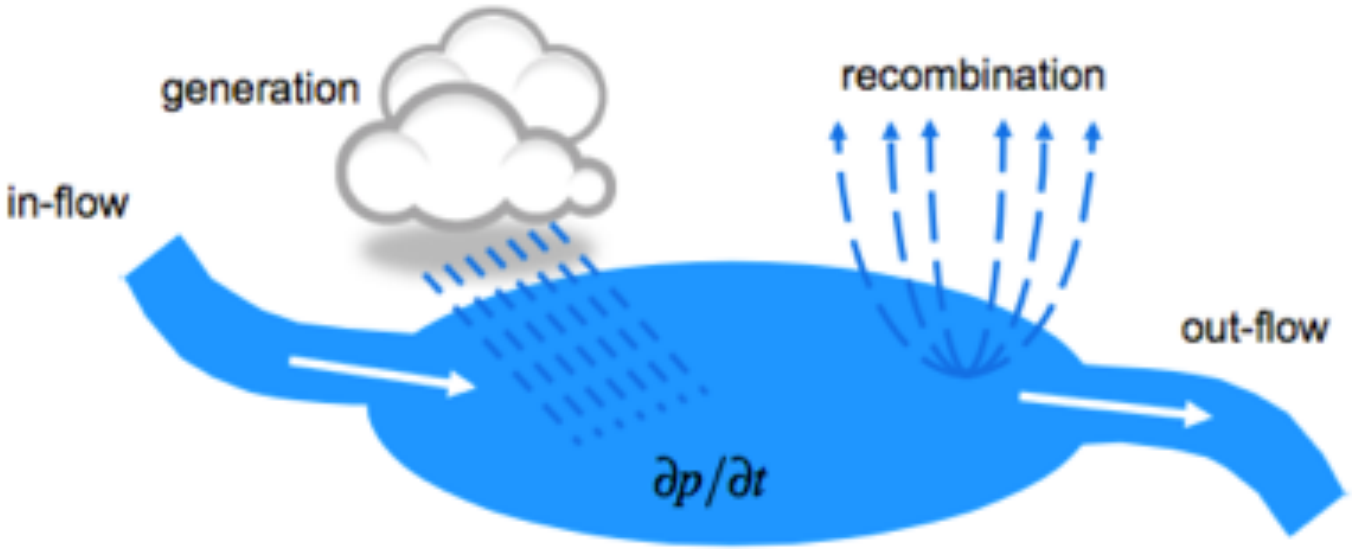
- $\frac{d^2\psi_i}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{\rho}{\varepsilon_s} = \frac{q(n-p+N_A^- - N_D^+)}{\varepsilon_s}$
- پتانسیل الکتریکی با ψ_i نمایش داده شده است.
- $\psi_i = -\frac{E_i}{q}$

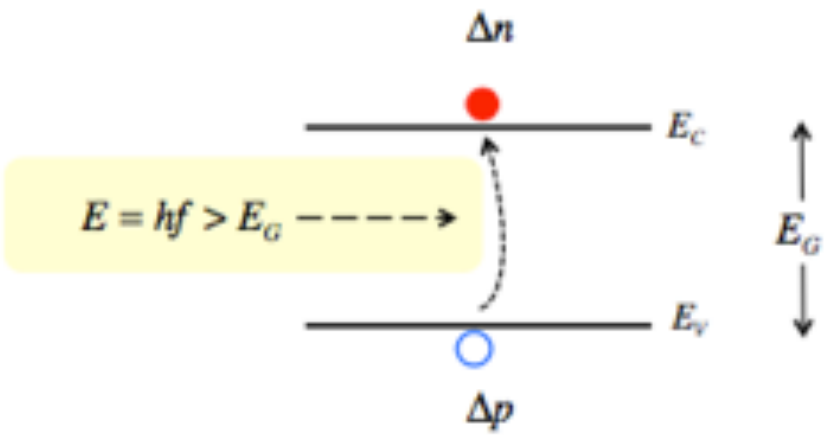




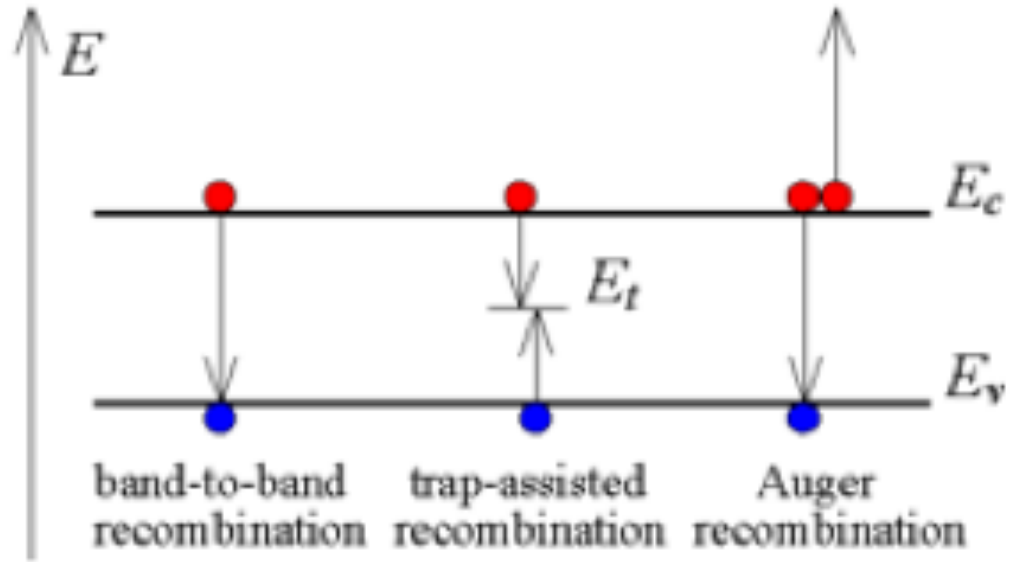
معادلات پیوستگی

- نرخ تولید خارجی G
- نرخ بازترکیب خالص U



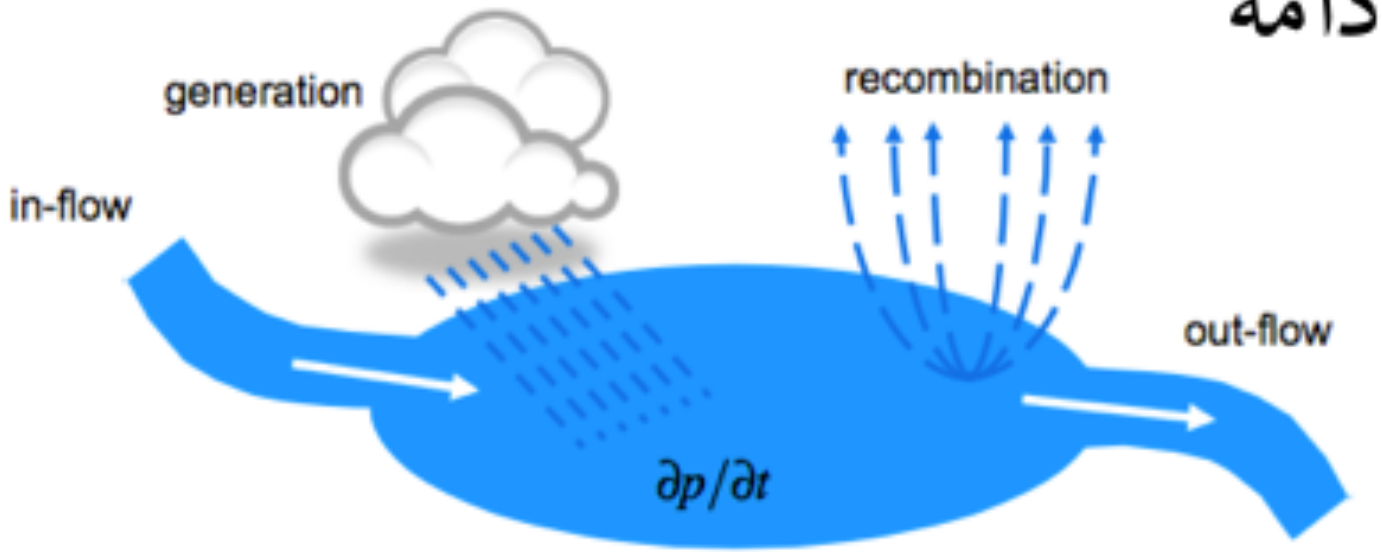


تولید



بازترکیب

معادلات پیوستگی- ادامه



- نرخ تولید خارجی G
- نرخ بازترکیب خالص U

- تغییرات چگالی حامل های الکترون و حفره همواره در هر زمان و در هر مکانی با هم برابرند.
- معمولا تغییرات چگالی حامل اقلیت با توجه به سهولت بیشتر مورد بررسی قرار می گیرند.

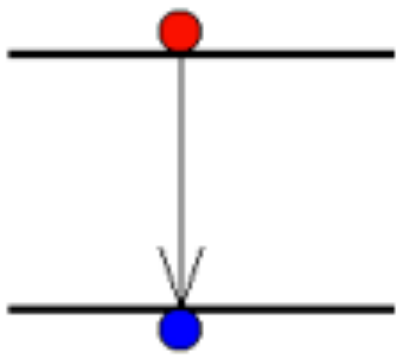
- $\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{q}\nabla . J_p$
- $\frac{\partial n_p}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q}\nabla . J_n$

نرخ بازترکیب خالص- نیمه هادی با گاف انرژی مستقیم

- $U = R_e - G_{th}$

- نرخ بازترکیب خالص: U، نرخ بازترکیب: R_e، نرخ تولید **حرارتی**: G_{th}

- $R_e = R_{ec} pn \implies G_{th} = R_{ec} n_i^2 \implies U = R_{ec}(np - n_i^2)$



- در حالت تعادل: U صفر است.
- $pn > n_i^2 \Leftarrow$ بازترکیب غالب.
- $pn < n_i^2 \Leftarrow$ تولید حرارتی غالب.

نرخ بازترکیب خالص- نیمه هادی با گاف انرژی مستقیم

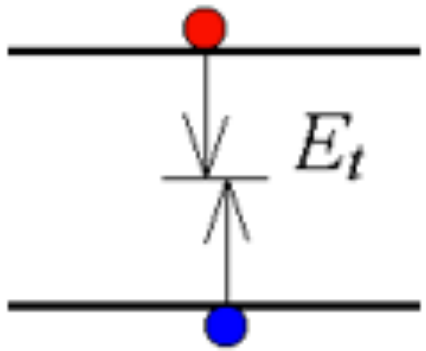
- رژیم تزریق کم یا Low Level Injection: تغییرات چگالی حامل ها نسبت به دوپینگ (چگالی حامل های اکثریت در حالت تعادل) بسیار کم تر است.

- نیمه هادی نوع n در رژیم تزریق کم: $\Delta n = n_n - n_{n0}\ ,\ \Delta p = p_n - p_{n0}$
- $\Delta n = \Delta p \ll n_{n0} = N_D \implies p_n = p_{n0} + \Delta p\ , n_n = n_{n0} + \Delta p \cong n_{n0}$
- $U \cong R_{ec}\left[(p_{n0} + \Delta p)n_{n0} - n_i^2\right] = R_{ec}\Delta p\ n_{n0} = \frac{\Delta p}{\tau_p}$
- $\tau_p = \frac{1}{R_{ec}n_{n0}} = \frac{1}{R_{ec}N_D}$ طول عمر حامل

- تمرین: نشان دهید در نیمه هادی نوع p در رژیم تزریق کم: $U = \frac{\Delta n}{\tau_n}, \tau_n = \frac{1}{R_{ec}N_A}$

نرخ بازترکیب خالص- نیمه هادی با گاف غیر مستقیم

- $U \approx \frac{C_0 N_t (pn - n_i^2)}{n + p + 2n_i}$



trap-assisted recombination

- چگالی تله ها: N_t

- در رژیم تزریق کم)نیمه هادی نوع :(n

- $U \approx \frac{C_0 N_t [(p_{n0} + \Delta p) n_{n0} - n_i^2]}{n_{n0}} = C_0 N_t \Delta p = \frac{\Delta p}{\tau_p} \ , \ \tau_p = \frac{1}{C_0 N_t}$

معادلات پیوستگی در رژیم تزریق کم

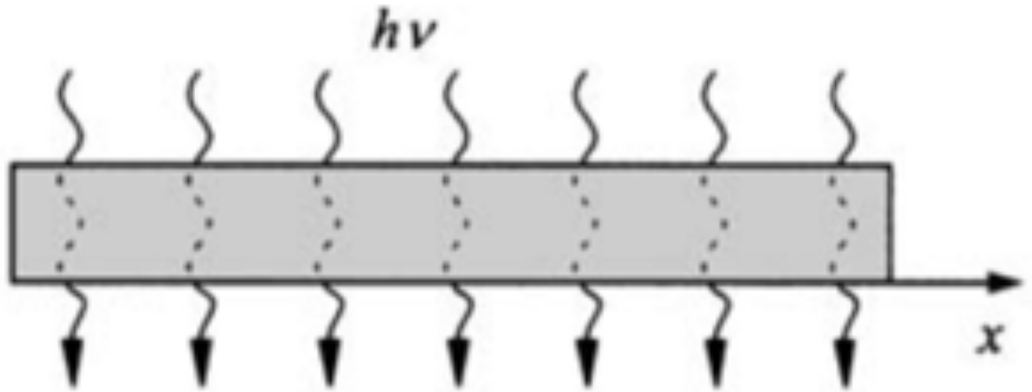
$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{q}\nabla . J_p \implies \frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - p_n \mu_p \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 P_n}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q}\nabla . J_n \implies \frac{\partial n_p}{\partial t} = G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x}$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + n_p \mu_n \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n E \frac{\partial n_p}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2}$$

مثال اول



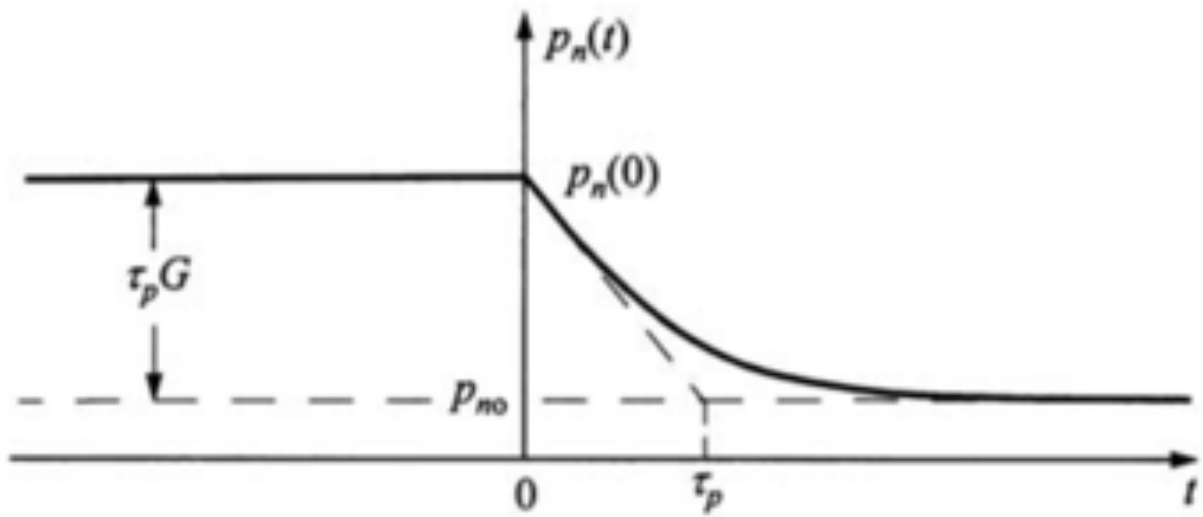
- نیمه هادی نوع n
- نرخ تولید یکنواخت G_p
- ضخامت بسیار کم نیمه هادی
- میدان الکتریکی و مشتق مکانی آن برابر صفر $E = \frac{\partial E}{\partial x} = 0$
- مشتق مکانی چگالی حامل ها برابر صفر $\frac{\partial p_n}{\partial x} = 0$
- تابش نور در $t = 0$ به صورت ناگهانی قطع می شود
- مطلوب است محاسبه چگالی حامل ها در زمان های مختلف

حل مثال اول

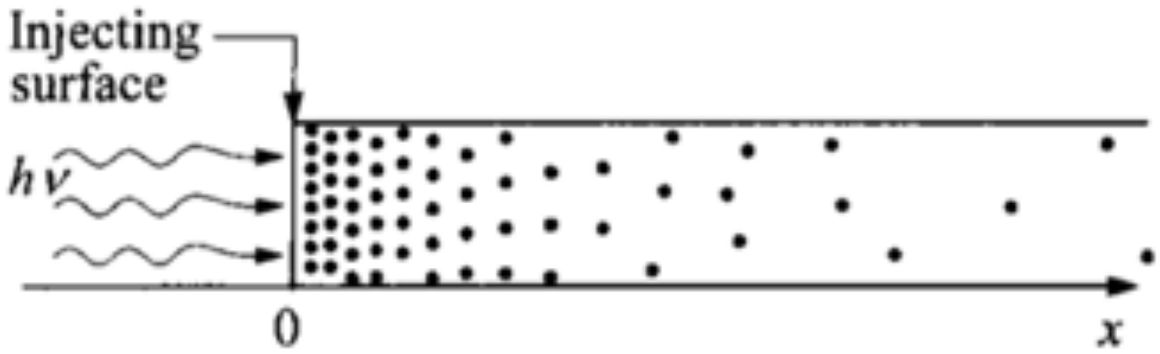
$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - p_n \mu_p \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 P_n}{\partial x^2}$$

- $\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$
- زمان های قبل از قطع تابش نور: حالت دائمی $\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0$
- $0 = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} \Longrightarrow p_n(t \leq 0) = p_{n0} + G_p \tau_p$
- زمان های پس از قطع تابش نور: $G_p = 0$
- $\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$, $p_n(t = 0) = p_{n0} + G_p \tau_p$
- $p_n(t \geq 0) = p_{n0} + G_p \tau_p e^{-\frac{t}{\tau_p}}$

تمرین: مطلوب است محاسبه چگالی الکترون ها



مثال دوم

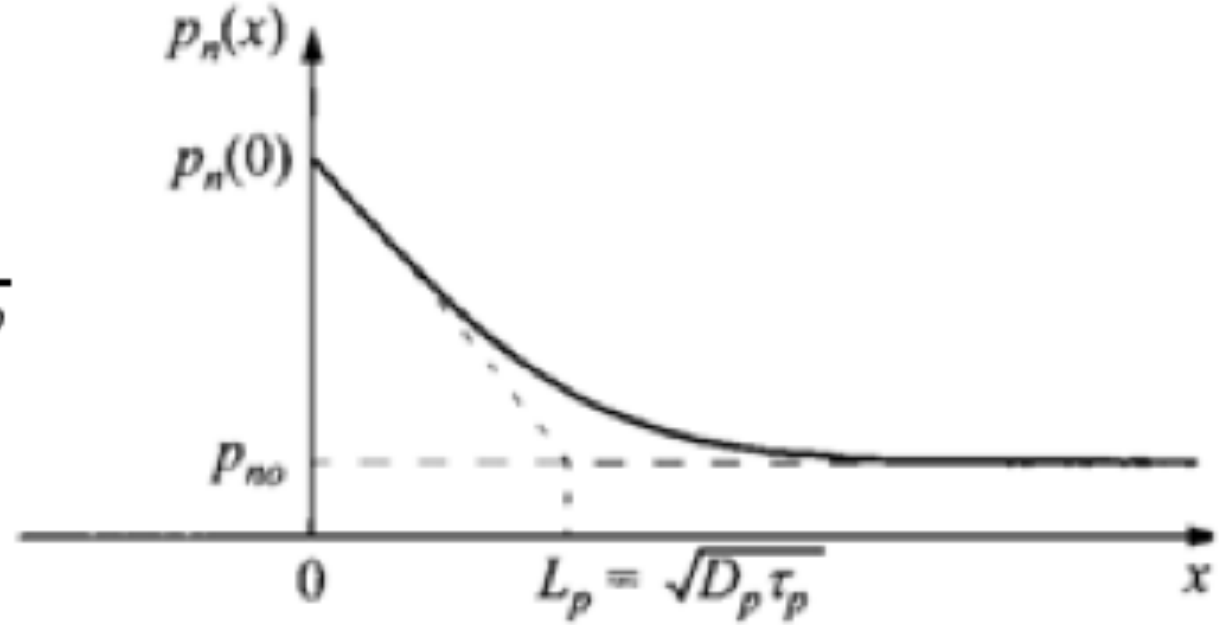


- نیمه هادی نوع n
- تابش فوتون های با انرژی بالا
- جذب فوتون ها در سطح $x = 0$
- چگالی حفره ها در سطح $p_n(0)$
- میدان الکتریکی و مشتق مکانی آن برابر صفر $E = \frac{\partial E}{\partial x} = 0$
- مطلوب است محاسبه چگالی حامل ها در زمان های مختلف پس از تابش طولانی مدت نور

حل مثال دوم

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - p_n \mu_p \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 P_n}{\partial x^2}$$

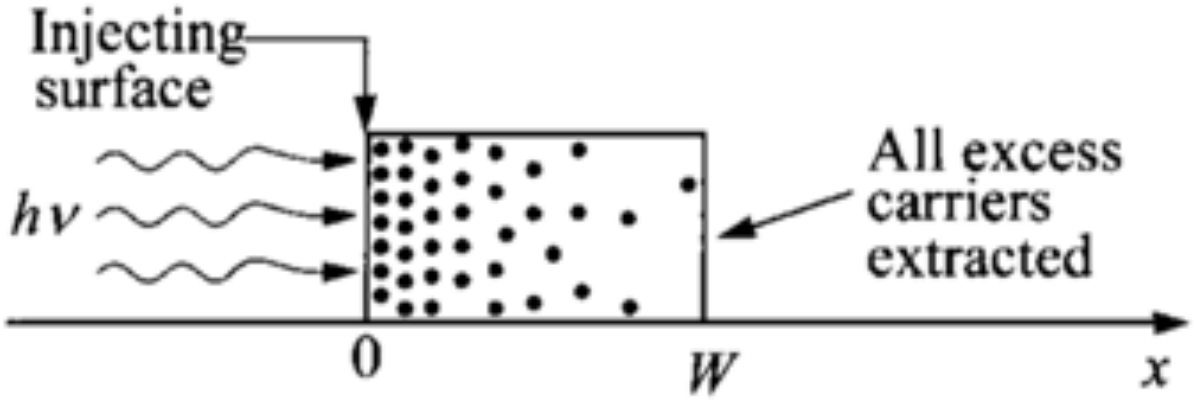
- تابش طولانی مدت نور: حالت دائمی $\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0$
- $\frac{\partial p_n}{\partial t}(x > 0) = 0 = 0 - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 P_n}{\partial x^2}$
- $p_n(x = 0) = \checkmark$
- $p_n(x \to \infty) = p_{n0}$

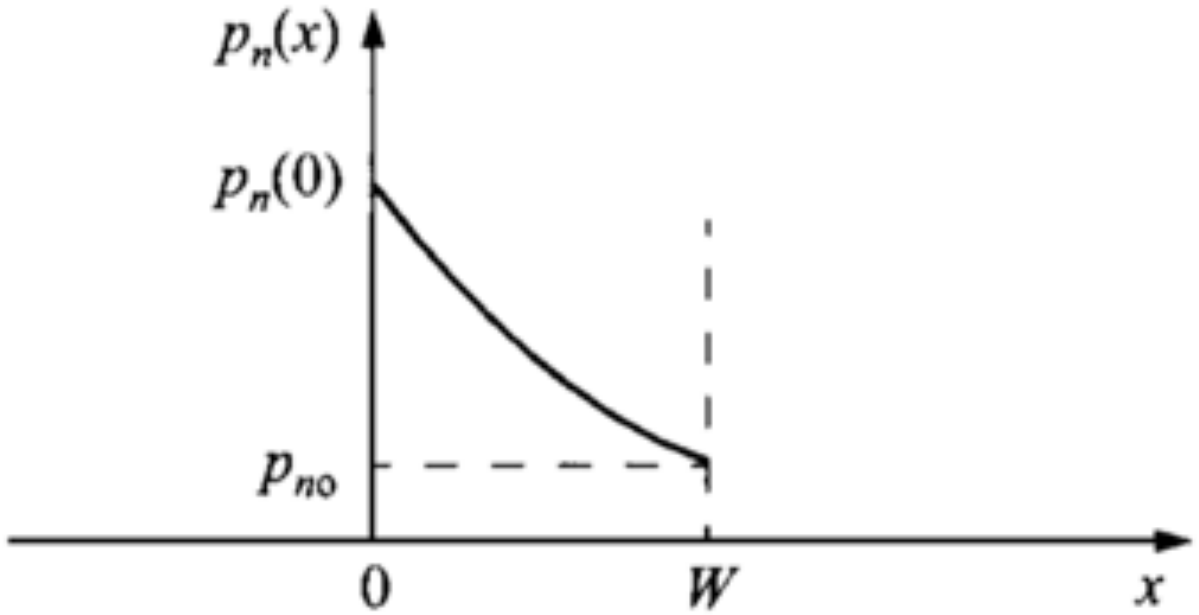


- $p_n(x > 0) = p_{n0} + [p_n(0) - p_{n0}]e^{-\frac{x}{L_p}}$
- $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ طول نفوذ حفره ها

تمرین: محاسبه چگالی الکترون ها

حالت خاص (کاربرد: ترانزیستورهای دو قطبی)





- $p_n(x) =$

$$p_{n0} + [p_n(0) - p_{n0}] \frac{\sinh\left[\frac{W-x}{L_p}\right]}{\sinh\frac{W}{L_p}}$$

- $J_{diff,p}|_{x=W} = -qD_p \frac{dp}{dx}|_{x=W} =$

$$qD_p \frac{p_n(0) - p_{n0}}{L_p \sinh\frac{W}{L_p}}$$