www.salampnu.com

سایت مرجع دانشجوی پیام نور

- ✓ نمونه سوالات پیام نور : بیش از ۱۱۰ هزار نمونه سوال همراه با پاسخنامه تستی و تشریحی
- ✓ کتاب ، جزوه و خلاصه دروس
- ✓ برنامه امتحانات
- ✓ منابع و لیست دروس هر ترم
- ✓ دانلود کاملا رایگان بیش از ۱۴۰ هزار فایل مختص دانشجویان پیام نور

www.salampnu.com

طرح درس

مقدمات نظري فيزيكي نيمرسانا

مشخصه هاي عدم تعادل نيمرسانا

پيوندگاه p-n

باتري خورشيدي و ديود نور گسيل

ترانزيستورهاي با اثر ميدان پيوندي

ترانزيستورهاي پيوندي دو حاملي

اهداف درس

شناخت اصول نيمرسانا

معرفي نيمرساناهاي كاربردي

كاربرد نيمرسانا در فيزيك ،صنعت و ...

جايگاه درس

درس فيزيك قطعات نيمرسانا از دروس اختياري دوره كارشناسي فيزيك مي باشد.

فصل اول : مقدمات نظریه فیزیکی نیمرساناها

- ساختار بلور

جامدات را می توان به انواع بلوری ،چند بلوری ،و آمورف رده بندی کرد.

کتابخانه الکترونیکی PNUEB
WWW.PNUEB.COM

مشخصه‌های جریان ـ ولتاژ dc

$$p_n - p_{no} = \Delta p_n$$

$$D_p \frac{d^2 \Delta p_n}{dx^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = \frac{\partial p_n}{\partial t} = 0$$

$$\Delta p = K_1 \exp\left(-\frac{x}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) + K_2 \exp \frac{x}{\sqrt{D_p \tau_p}}$$

که K_1 و K_2 ثابتهایی هستند که باید تعیین شوند. شرایط مرزی عبارت‌اند از

$$p_n = \begin{cases} p_n(0) = p_{no} e^{V/V_T}, & x = 0 \quad \text{به‌ازای} \\ p_{no}, & x = \infty \quad \text{به‌ازای} \end{cases}$$

$$\Delta p_n = p_{no}(e^{V/V_T} - 1) e^{-x/L_p}$$

1. جامدات چند بلوری

- نواحی کوچک متعددی وجود دارند ،که هر یک ساختار خوش سازمانی دارد ، لیکن این سازمان با نواحی مجاور آن متفاوت است.

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

ماد L_p طول پخش حفره

$$I_p = qA\frac{D_p p_{po}}{L_p}(e^{V/V_T} - ۱)e^{-x/L_p}$$

جریان حفره درلبهٔ لایهٔ بارفضایی به‌ازای $x = ۰$ ارزیابی می‌شود

$$I_p(۰) = qA\frac{D_p p_{no}}{L_p}(e^{V/V_T} - ۱)$$

$$I_p = I_p(۰)e^{-x/L_p}$$

$$\Delta n_p = n_{po}(e^{V/V_T} - 1)e^{-x'/L_n}$$

$$I_n = I_n(0)e^{-x'/L_n}$$

$$I_n(0) = qA\frac{D_n n_{no}}{L_n}(e^{V/V_T} - 1)$$

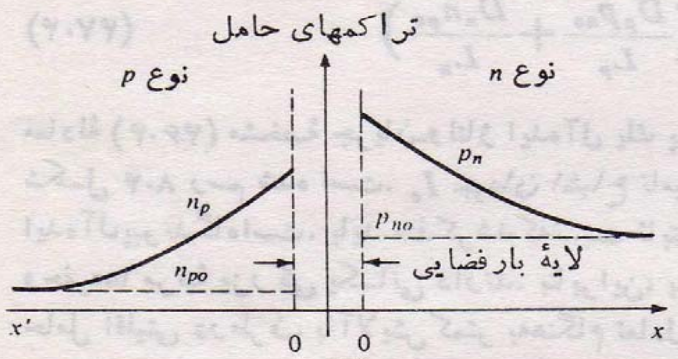
$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

L_n طول پخش الکترون

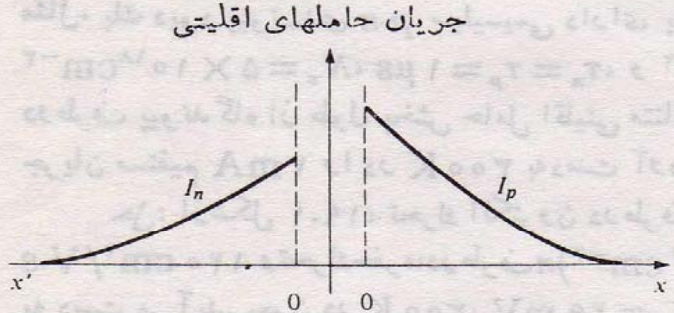
2. جامدات آمورف

- ساختار خوش-تعریفی ندارند؛ در حقیقت ، وجه تمایزشان ، بی شکلی آنها است.

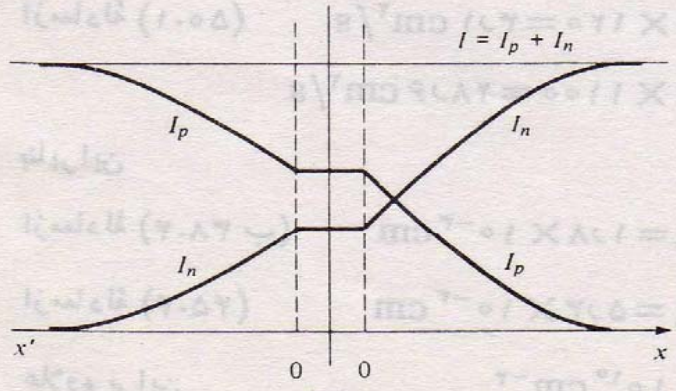
$$I = I_n(0) + I_p(0) = I_o(e^{V/V_T} - 1)$$



(الف)



(ب)

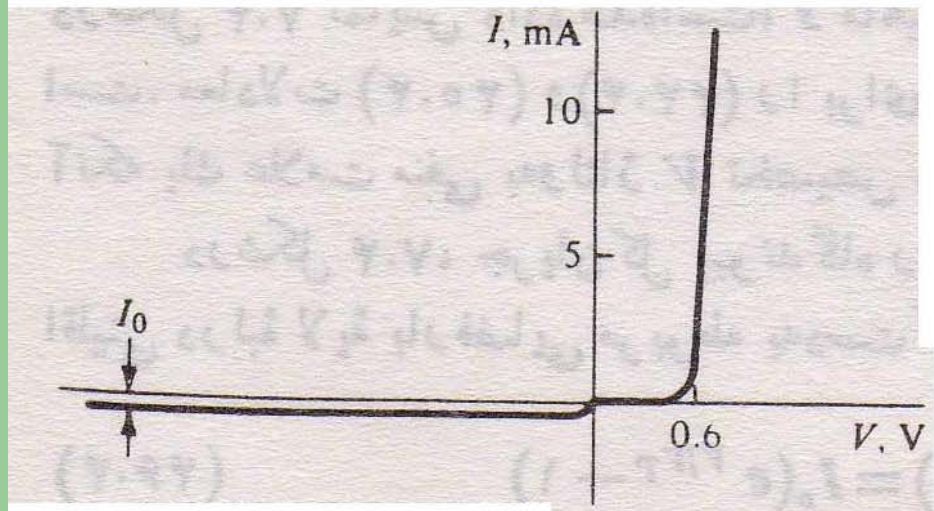


(ج)

p-n در پیش‌ولت
حاملهای اقلیتی،
اقلیتی، و (ج)
صفره.

3. جامدات بلورین

- اتمها در یک آرایه منظم سه بعدی مرتب شده اند که یک ساختار تناوبی به نام *شبکه* را تشکیل می دهند.
- می توان یک *سلول واحد* مشخص کرد که از تکرار آن در سه بعد ، جامد بلورین به وجود می آید.



مشخصهٔ جریان-ولتاژ یك پیوندگاه p-n.

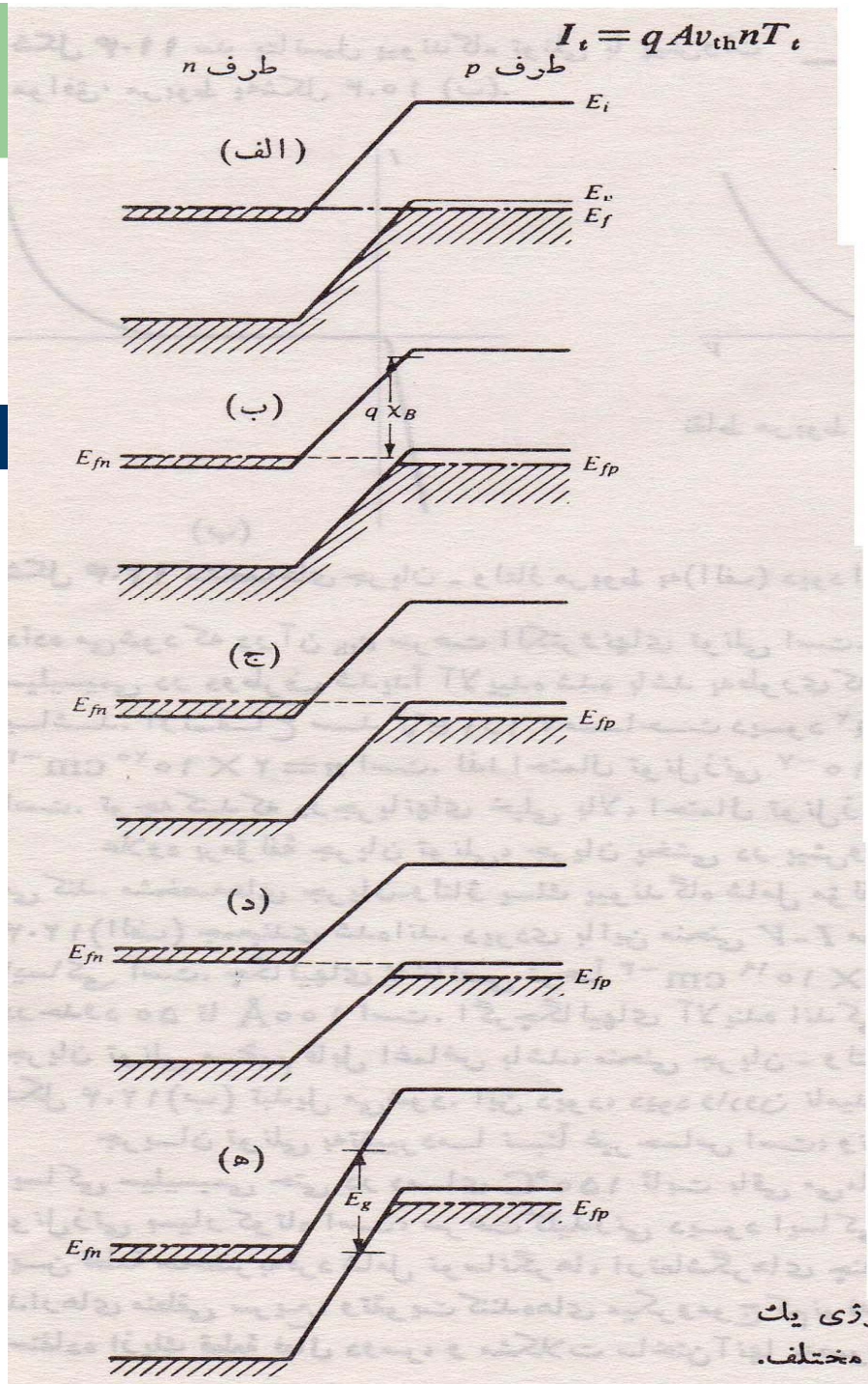
$$I_o = qA\left(\frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_n n_{po}}{L_n}\right)$$

I_o جریان اشباع

انواع ساختارهای بلورین مرتبط با این درس

- بلور مکعبی ساده(sc)
- بلور مکعبی مرکز حجمی(bcc)
- بلور مکعبی مرکز سطحی(fcc)
- ساختار الماسی
- ساختار کانی روی-سولفید

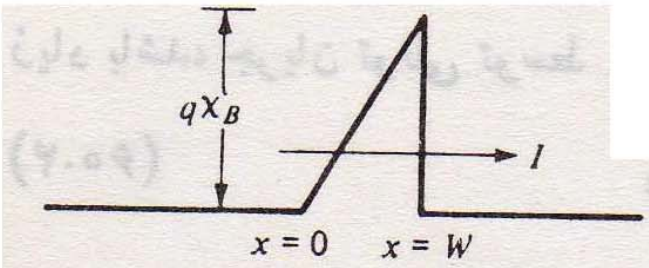
$$I_t = qAv_{th}nT_t$$



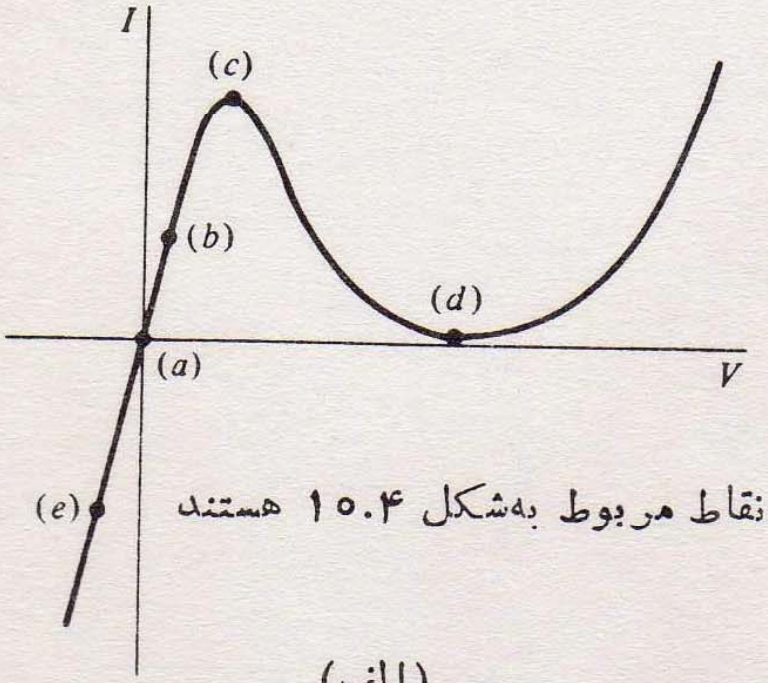
نمودار نوار انرژی یك تونلی با پیش‌ولتهای مختلف.

بلور مکعبی ساده(sc)

- هر گوشه از شبکه مکعبی توسط یک اتم اشغال شده است که هشت سلول واحد مجاور در آن سهم دارند.
- تعداد کمی از بلورها دارای این ساختارند،و پولونیم تنها عنصری است که به این شکل تبلور می یابد.

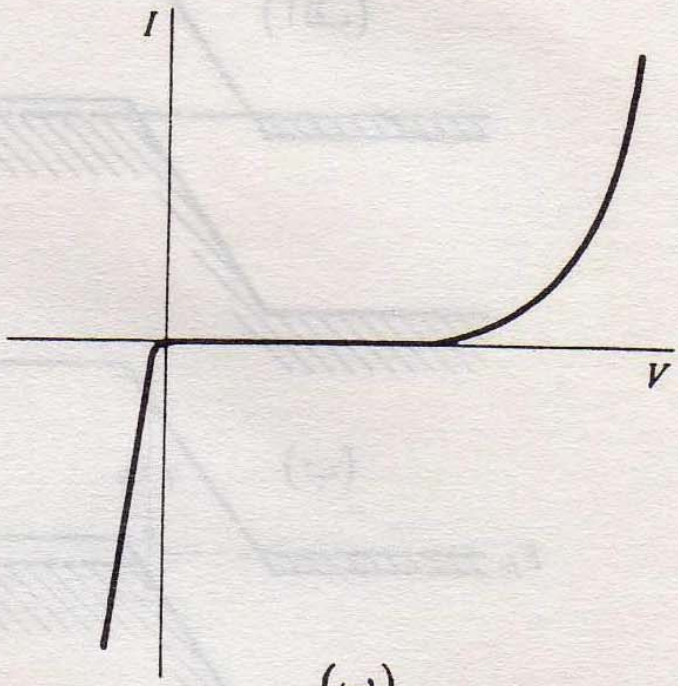


سد پتانسیل پیوندگاه تونلی با پیش‌ولت موافق،



نقاط مربوط به‌شکل ۱۰.۴ هستند

(الف)

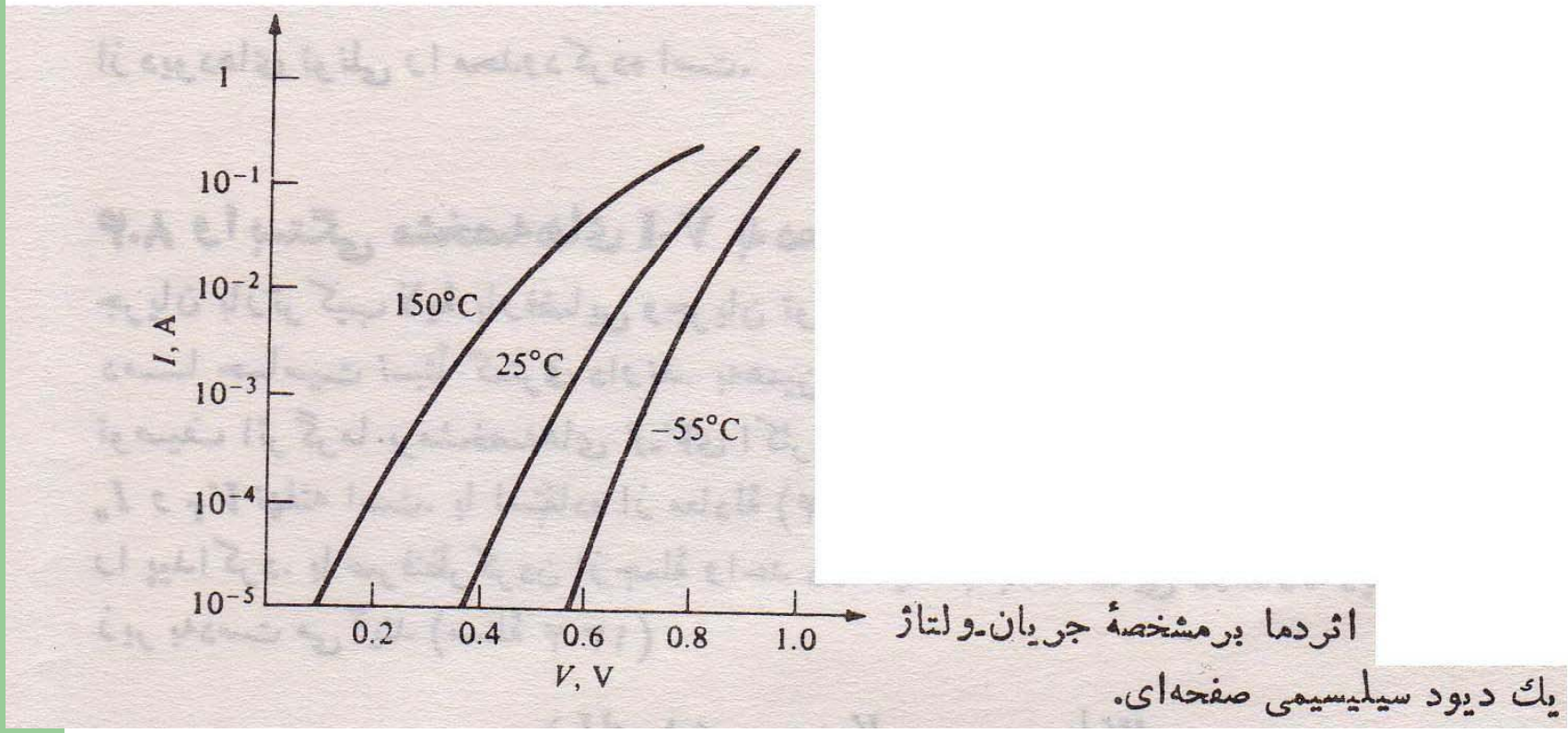


(ب)

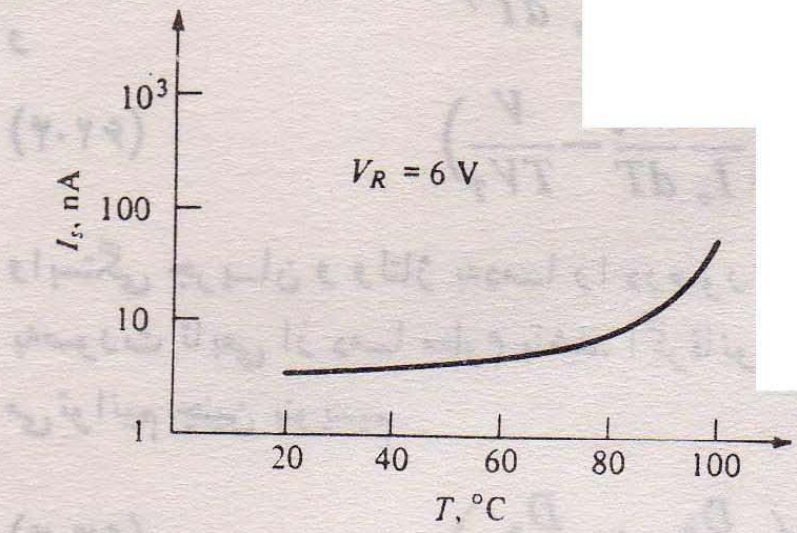
مشخصه‌های جریان ـ ولتاژ مربوط به(الف) دیود ایساکی و(ب) دیود وارون.

بلور مکعبی مرکز حجمی(bcc)

- علاوه بر اتمهای گوشه ها ،یک اتم نیز در مرکز مکعب واقع شده است.
- بلورهایی که شامل این ساختارند شامل سدیم،مولیبدن،و تنگستن هستند.



اثردما برمشخصهٔ جریان-ولتاژ یك دیود سیلیسیمی صفحه‌ای.



جریان اشباع وارون به‌صورت تابعی ازدما دریك دیود p-n سیلیسیمی.

$$\frac{1}{I}\frac{dI}{dT} = \frac{E_{go} - qV}{kT^2}$$

بلور مکعبی مرکز سطحی(fcc)

- علاوه بر هشت اتم گوشه ها شامل یک اتم در هر یک از شش رخ مکعب است.
- تعداد زیادی از عناصر دارای این شکل بلوری هستند، مانند آلومینیم، مس، طلا، نیکل، و پلاتین.

تحلیل و سیگنال کم‌دامنهٔ ac

دراین بخش نحوهٔ به‌دست آوردن مقاومت ظاهری دیود را ابتدا با پیدا کردن توزیع حامل سیگنال کم‌دامنه ارائه می کنیم. با نهادن یك ولتاژ کوچك بر ولتاژ dc ی V، ولتاژ اعمال شدهٔ کل عبارت خواهد بود از

$$v = V + v_a e^{j\omega t}$$

ساختار الماسی

- این ساختار را می توان به صورت دو زیر شبکه fcc در هم فرورفته تصور کرد که یکی از آنها نسبت به دیگری به اندازه یک چهارم فاصله در امتداد قطر مکعب جا به جا شده است.

شرط کم‌دامنه بودن سیگنال این است که سیگنال ac ی اعمال‌شدهٔ v_a در مقایسه با V_T کوچك باشد.

$$\exp \frac{v_a e^{j\omega t}}{V_T} = 1 + \frac{v_a}{V_T} e^{j\omega t}, \quad \frac{v_a}{V_T} \ll 1 \text{ به‌ازای}$$

$$p_n(0) = P_n(0) + p_{a1} e^{j\omega t}$$

$$p_{a1} = \frac{p_{no} v_a}{V_T} e^{V/V_T}$$

$$p_n = P_n + p_a e^{j\omega t}$$

معادلهٔ ac عبارت است از

$$D_p \frac{d^2 p_a}{dx^2} - \frac{p_a}{\tau_p} = j\omega p_a$$

که برای آن شرایط مرزی ac عبارت‌اند از

$$p_n = \begin{cases} p_{a1}, & x = 0 \quad \text{به‌ازای} \\ 0, & x = \infty \quad \text{به‌ازای} \end{cases}$$

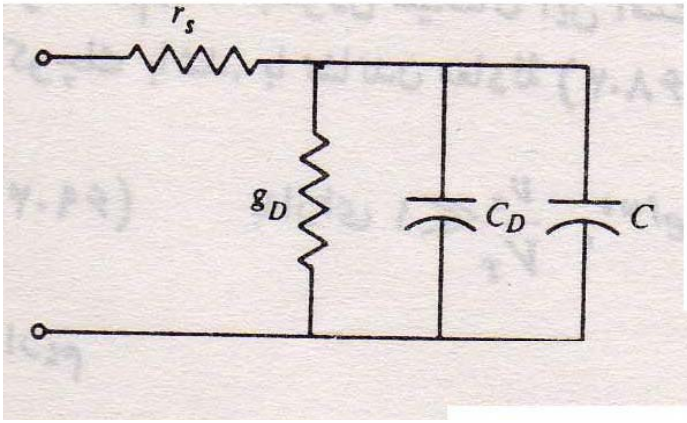
$$p_a = p_{a1} \exp\left(\frac{-x}{L_p}\sqrt{1 + j\omega\tau_p}\right)$$

با مشتق‌گیری ازاین‌چگالی حفره نشاندن نتیجه درمعادلهٔ جریان حفره در $x = 0$

$$i_p(0) = \frac{v_a}{V_T} I_p(0)\sqrt{1 + j\omega\tau_p}$$

ساختار کانی روی-سولفید

- گالیم آرسنید (GaAs)دارای این ساختار است که به این ترتیب به وجود می آید که در ساختار الماسی ،اتمهایGa بر روی یک شبکه fcc و اتمهای Asبر روی شبکه fcc دیگر قرار می گیرند.
- مواد دیگر این خانواده عبارتند از گالیم فسفید،روی-سولفید،و کادمیم سولفید.



مدار معادل یك دیود.

$$i_n(0)=\frac{v_a}{V_T}I_n(0)\sqrt{1+j\omega\tau_n}$$

جریان ac کل پیوندگاه p-n

$$i=i_p(0)+i_n(0)$$

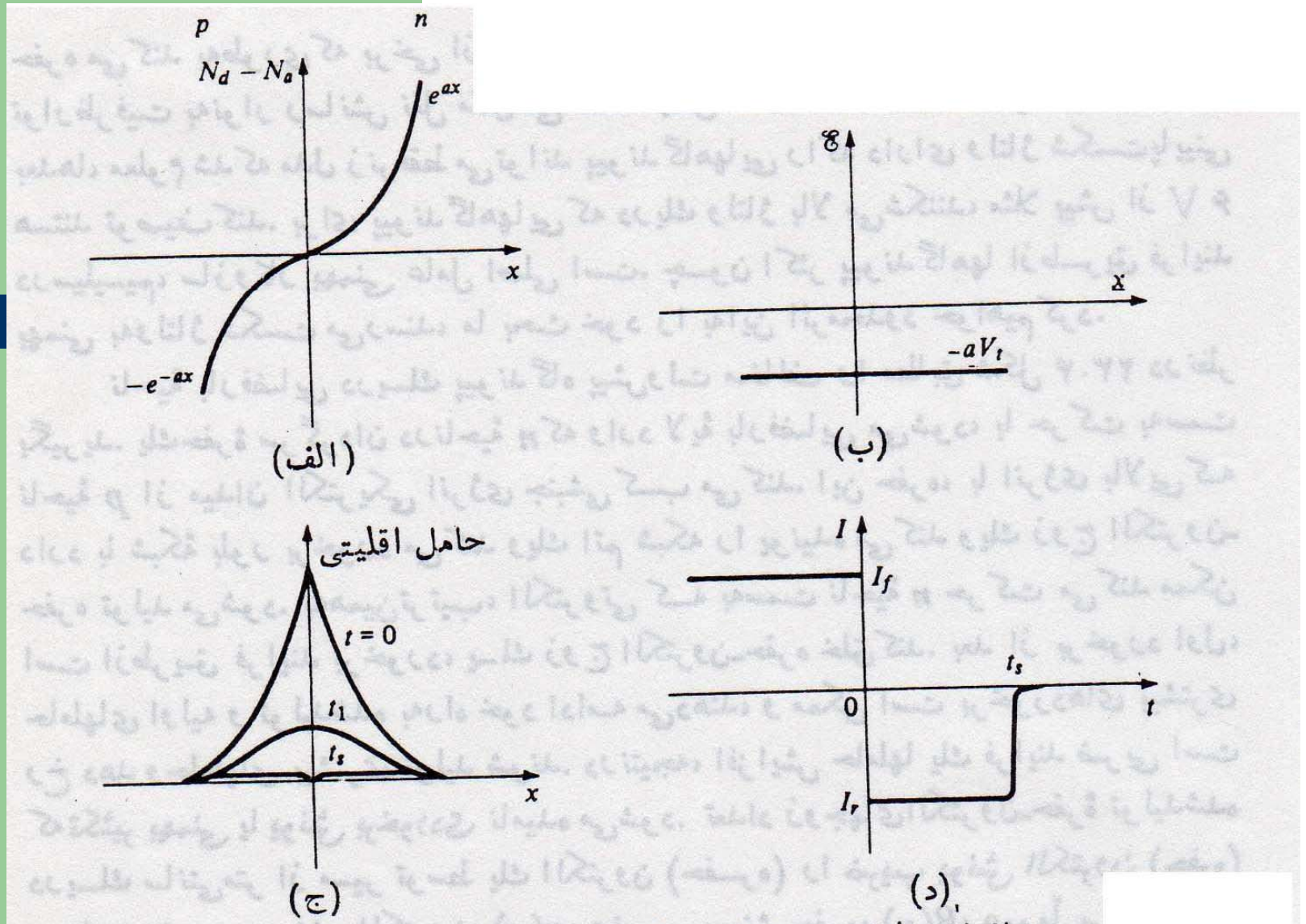
برای یك پیوندگاه p^+-n، $i_p(0)=i$ و $I_p(0)=I$. لذا، دسانش ظاهری (گذارایی) دیود به

$$y=\frac{i_p(0)}{v_a}=\frac{I}{V_T}\sqrt{1+j\omega\tau_p}\approx\frac{I}{V_T}+j\frac{\omega\tau_p I}{2V_T}$$

تبدیل می‌شود. با به‌کاربردن $\omega\tau_p \gg 1$ برای تقریب بسامد پایین

الکترونهای رسانش

- خارجی ترین الکترونها،به نام *الکترونهای ظرفیت* ، در تعیین خواص الکتریکی جامد از اهمیت ویژه ای برخوردارند.
- در قید تک تک اتمها نیستند و آزادند که بر اثر اعمال یک میدان الکتریکی، در رسانش جریان مشارکت کنند.



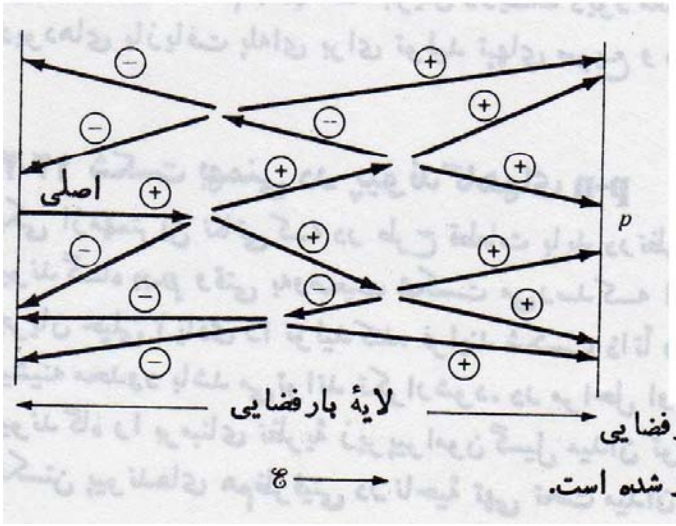
دیود «بازیافت‌پله‌ای» یا «شلاقی»: (الف) نمایهٔ ناخالصی در نزدیکی پیوندگاه، (ب) توزیع میدان الکتریکی، (ج) توزیع حامل اقلیتی تزریقی، و (د) شکل موج جریان.

پیوند والانسی

- الکترونهای ظرفیت در میان پیکربندی زوجی که به پیوند والانسی معروف است مشترکند.
- در دماهای پایین ،این الکترونها مقیدند،و در رسانش شرکت نمی کنند.
- نیمرساناها در دماهای پایین نظیر عایق، و در دماهای زیاد نظیر رسانا رفتار می کند.

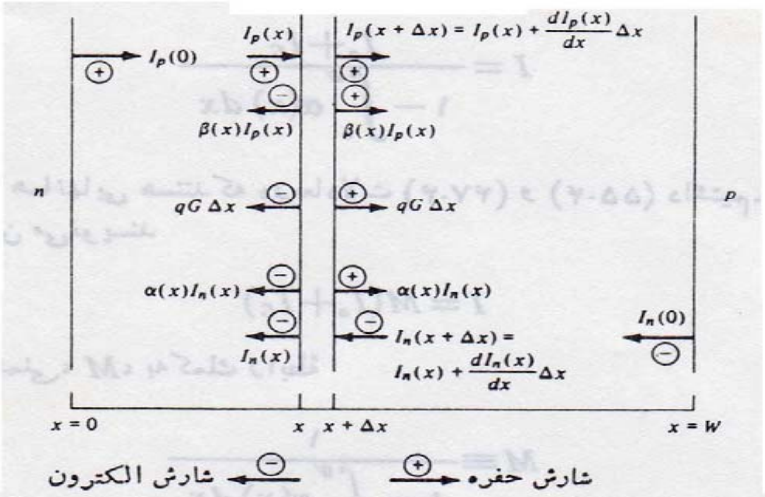
رسانش

- در دماهای بالا ،انرژی گرمایی برخی از الکترونها را قادر می سازد که پیوند را بشکنند،و این الکترونهای رها شده آزادند در رسانش جریان شرکت کنند.


اصلی
p
لایهٔ بارفضایی
تکثیربهمنی درناحیهٔ بارفضایی
که توسط حفرهٔ تزریقی ازطرف n آغاز شده است.
ℰ

تهیجاه(حفره)

- هرگاه یک الکترون ظرفیت در یک نیمرسانا آزاد شود، یک تهیجاه در پیوند والانسی ،باقی می گذارد.
- این تهیجاه،ممکن است توسط یکی از الکترونهای ظرفیت مجاورش پر شود،که نتیجه آن تغییر مکان در موضع تهیجاه است و ممکن است چنین تصور شود که تهیجاه در داخل ساختار بلور در حال حرکت است.این ذره مجازی حفره نامیده می شود.
- حفره ،حامل بار مثبت و تحت تاثیر یک میدان الکتریکی خارجی در خلاف جهت الکترون حرکت می کند.



مؤلفه‌های جریان در یک پیوندگاه p-n با پیش‌ولت مخالف در وضعیت بهمنی.

$$I_p(x+\Delta x)-I_p(x)=\alpha(x)[I_n(x)+I_p(x)]\,\Delta x+qAG\,\Delta x$$

$$\frac{dI_p(x)}{dx}=\alpha(x)I+qAG$$

$$I=I_n(x)+I_p(x)=\text{const}.$$

$$-\frac{dI_n(x)}{dx}=\alpha(x)I+qAG$$

علامت منفی درطرف‌چپ این معادله نتیجه‌ای است که ازکاهش الکترونها از x تا $x+\Delta x$ حاصل می‌شود.

$$I_p(x)-I_p(0)=I\int_0^x\alpha(x)\,dx+\int_0^x qAG\,dx$$

$$-I_n(W)+I_n(x)=I\int_x^W\alpha(x)\,dx+\int_x^W qAG\,dx$$

انرژی

- رابطه تکانه-انرژی یک الکترون در بلور:

$$E_k = \frac{P^2}{2m_e}$$

- m_e جرم موثر الکترون، E_k انرژی جنبشی ، P تکانه بلور

$$I = \frac{I_0 + I_G}{1 - \int_0^W \alpha(x)\,dx}$$

$$I = M(I_0 + I_G)$$

که عامل تکثیر بهمنی، M، به‌کمك رابطهٔ

$$M \equiv \frac{1}{1 - \int_0^W \alpha(x)\,dx}$$

تعریف می‌شود. ازلحاظ نظری، وضعیت شکست بهمنی وقتی رخ می‌دهد که M به‌بینهایت نزدیك شود. بنابراین، شرط شکست عبارت است از

$$\int_0^W \alpha(x)\,dx = 1$$

ضریب یونش را

می‌توان با استفاده از فرمول تجربی

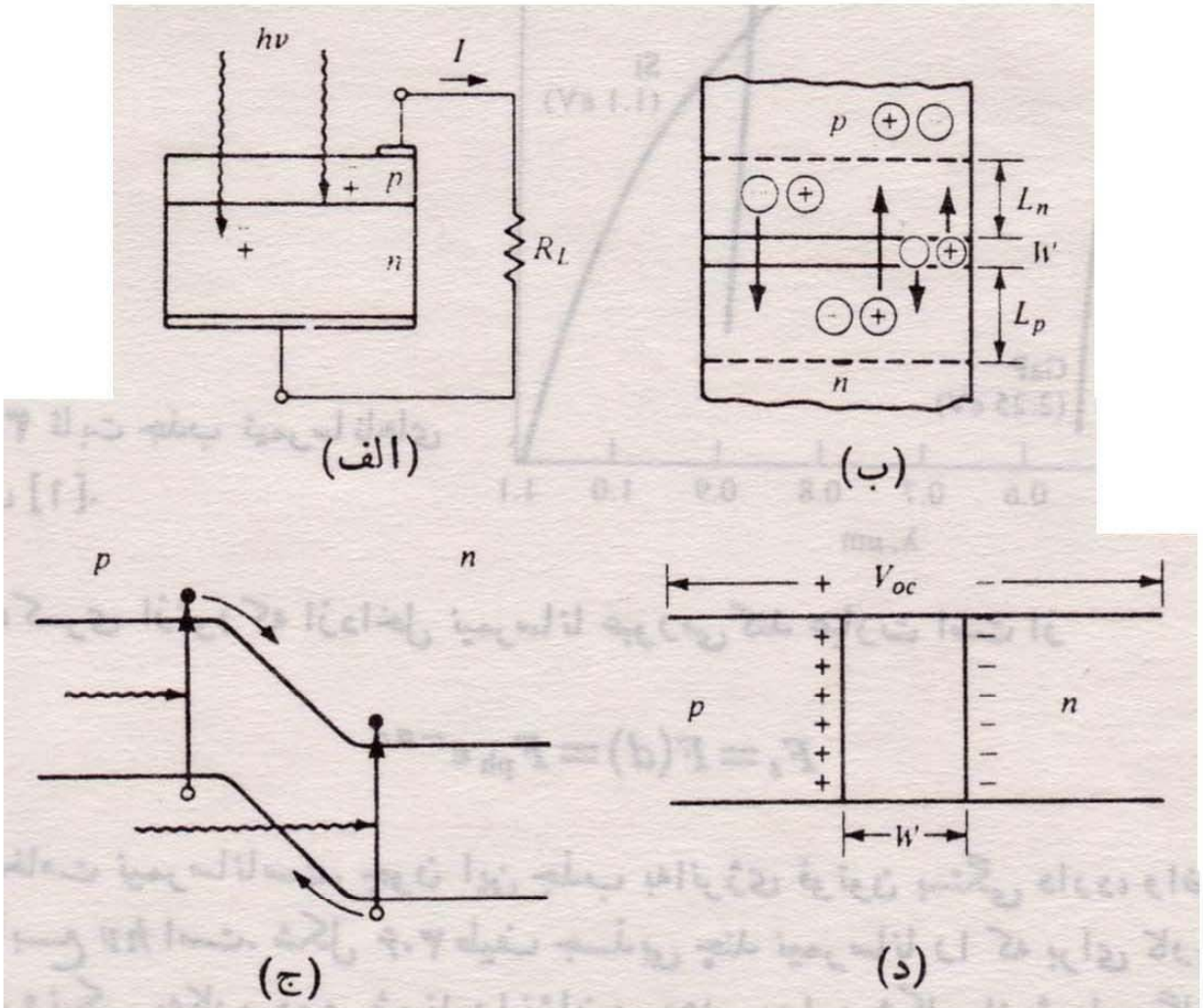
$$\alpha = A \exp \frac{-B}{|\mathcal{E}|}$$

به‌دست آورد، که در آن A و B ثابتهای مربوط به ماده هستند.

1فیز

گاف انرژی

- در نیمرسانا ،الکترونهای ظرفیت گرد هم می آیند تا نواری از ترازهای انرژی ،موسوم به نوار ظرفیت،را اشغال کنند.نوار ترازهای انرژی مجاز بعدی،موسوم به نوار رسانش ،به اندازه گاف ممنوع انرژی E_gاز نوار قبلی فاصله دارد.
- گاف انرژی سیلیسیم E_g =1.12 eV

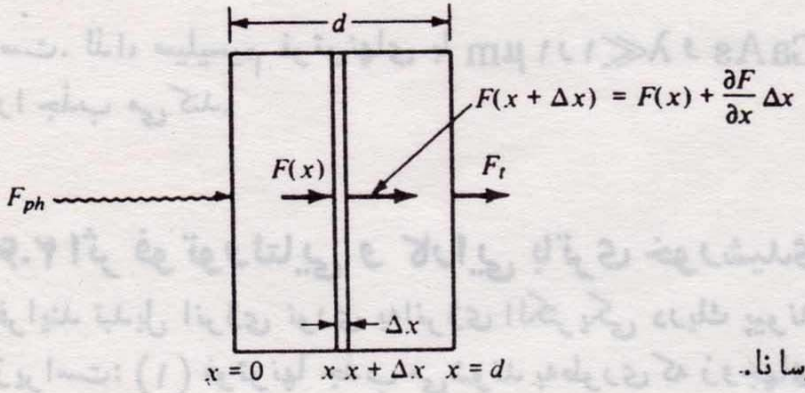


تبدیل انرژی نوری به‌انرژی الکتریکی: (الف) باتری خورشیدی با مقاومت بار، (ب) پخش الکترونها وحفره‌ها که جریان تولید می کند، (ج) نمودار نوار انرژی (ب)، و(د) برقراری ولتاژ مدار کوتاه (نمایش طرح‌واره).

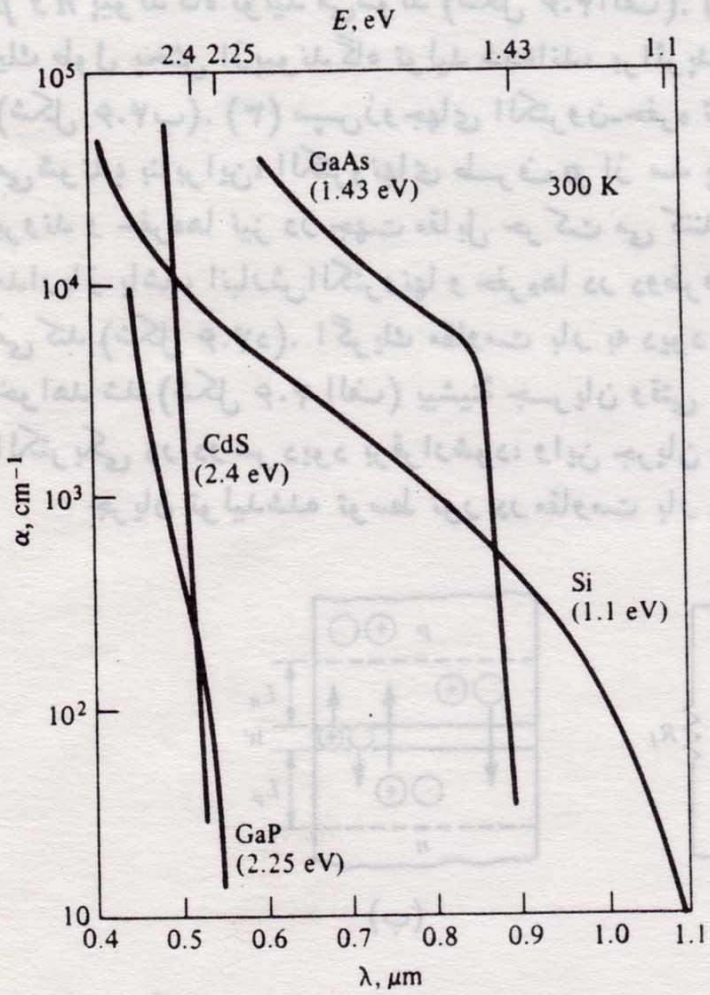
انواع گاف نوار

- گاف نوار مستقیم : مانند GaAs
- گاف نوار غیر مستقیم : مانند Si

نمودار



جذب نور دریك نیمرسانا.



ثابت جذب نیمرساناهای گوناگون [1].

1فیز

نیمرسانا

- نیمرسانای ذاتی
- نیمرسانای غیر ذاتی : رسانندگی بلور با افزودن ناخالصیها کنترل می شود.
  - نیمرسانای نوع P
  - نیمرسانای نوع n

مثال. ولتاژ مدار باز یک باتری n^+-p سیلیسیمی را برای آلایش بستر بین 10^{15} و $10^{18}\ cm^{-3}$ محاسبه کنید. فرض کنید $L_n = 100\ \mu m$، $D_n = 36\ cm^2/s$، و $I_L/A = 35\ mA/cm^2$، و این مقادیر مستقل از تراکم آلایش هستند.

حل: چون در یک پیوند گاه n^+-p داریم: $N_d \gg N_a$،

$$I_o = qAn_i^2\left(\frac{D_p}{L_pN_d} + \frac{D_n}{L_nN_a}\right) \approx \frac{qAn_i^2D_n}{L_nN_a} = \frac{1.3\times10^5\,A}{N_a}\ A/cm^2$$

$$V_{oc} = 26\ln\left(1 + \frac{35\times10^{-3}N_a}{1.3\times10^5}\right)\ mV$$

N_a, cm^{-3}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}
V_{oc}, mV	504	565	625	684

انرژی های یونش

- انرژی یونش پذیرنده : تراز انرژی E_a،که از روی انرژی لبه نوار ظرفیت E_v اندازه گرفته می شود.
- انرژی یونش بخشنده :E_d ،از لبه نوارE_c اندازه گیری می شود.

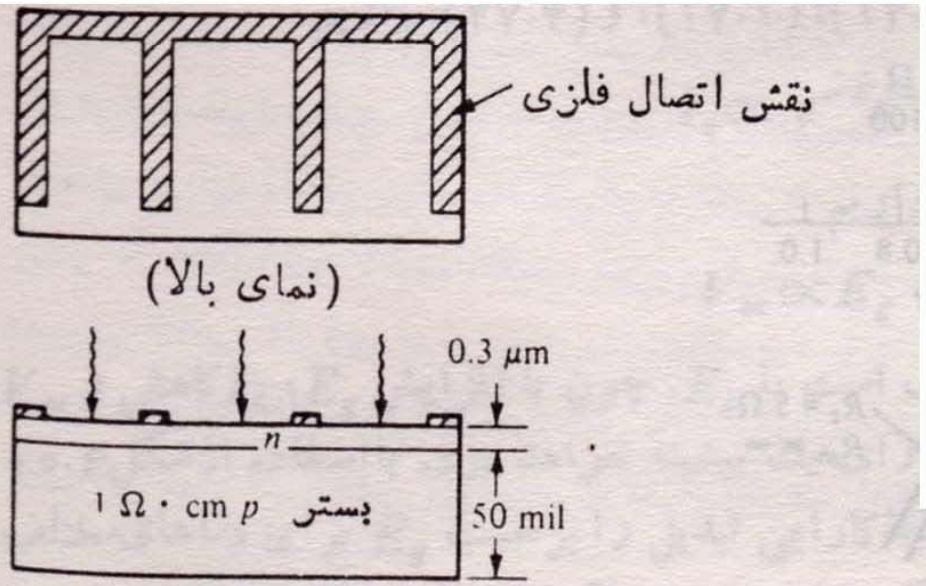
بازتاب سطحی

تعداد فوتونهایی که به‌داخل سطح نفوذ می‌کنند به‌دلیل بازتاب در سطح از تعداد فوتونهای فرودی کمتر است.

$$R=\frac{(n-1)^2+(\lambda\alpha/4\pi)^2}{(n+1)^2+(\lambda\alpha/4\pi)^2}$$

که در آن $n=n_2/n_1$ و n_1 و n_2 به‌ترتیب ضریب شکست هوا و نیمرسانا هستند.[1] علاوه بر این α، ضریب جذب نیمرساناست.

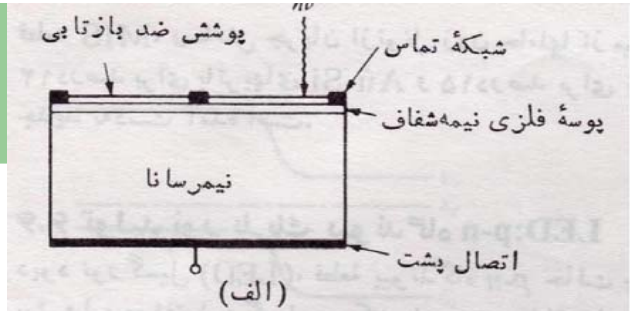
1فیزیک قطعات نیمه رسانا

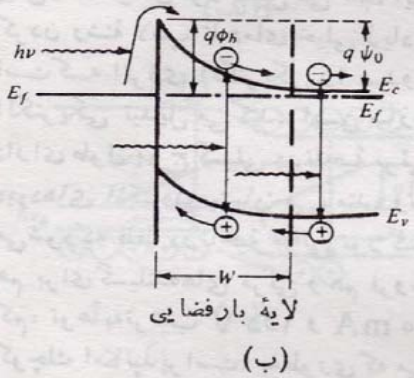


نمای بالا و کناری یك
باتری خورشیدی p-بر-n.

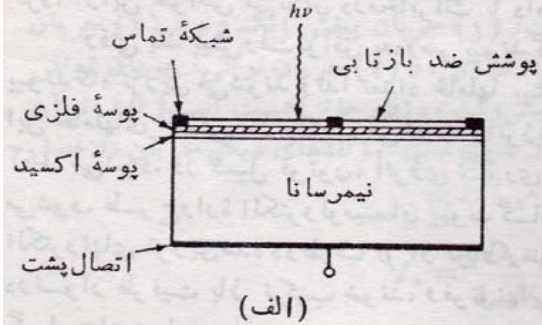
انرژی و چگالی حالتها

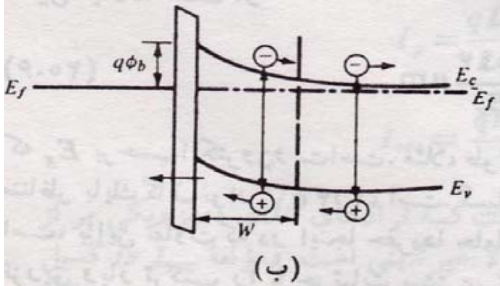
- انرژی جنبشی الکترون: $E - E_c$
- انرژی جنبشی حفره : $E_v - E$





باتری‌خورشیدی سد شوتکی:
(الف) ساختار قطعه و (ب) نمودار نوار انرژی.





باتری خورشیدی فلز- عایق نیمرسانا: (الف) ساختار قطعه و (ب) نمودار نوار انرژی.

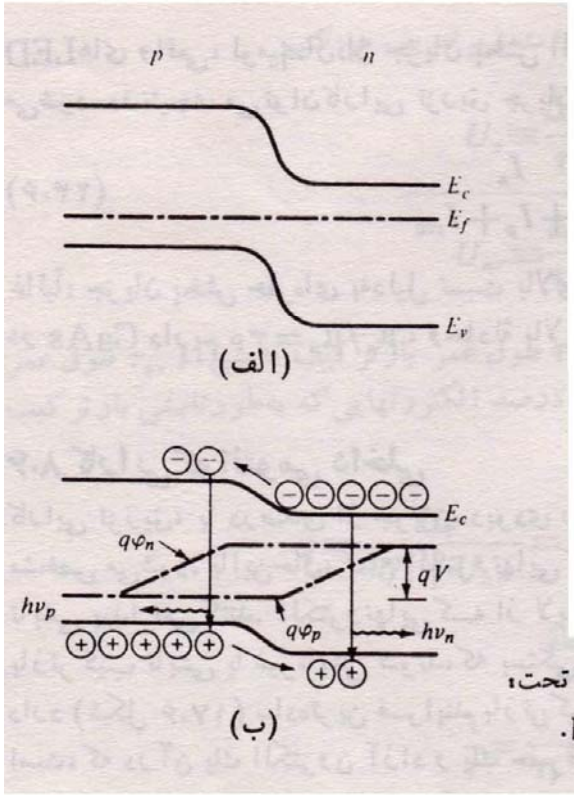
تابع توزیع

- احتمال اینکه تراز انرژی E توسط یک الکترون اشغال شود با تابع توزیع فرمی-دیراک به دست می اید :

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1}$$

- E_f تراز فرمی، k ثابت بولتزمن، T دما بر حسب کلوین

نمودار



یك پیوندگاه الکترولومینسان تحت:
(الف) پیش‌ولت صفر، (ب) پیش‌ولت موافق V.

چگالی حاملها در تعادل گرمایی

- تعداد کل الکترونها در نوار رسانش با انتگرالگیری حاصلضرب چگالی حالتها و احتمال اشغال حاصل می شود

$$n = \int_{Ec}^{\infty} f(E)N(E)dE$$

$$= N_c e^{-(E-E_f)/kT}$$

تزریق حاملهای اقلیتی و کارایی تزریق

در یک LED با پیش‌ولت موافق بازشناخت: (۱) جریان پخش الکترونی، (۲) جریان پخش حفره‌ای، (۳) جریان بازترکیب لایهٔ بارفضایی، و (۴) جریان تونلی، جریان تونلی

$$I_n = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_a}\left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

$$I_p = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_d}\left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

$$I_{rec} = \frac{qn_i W}{2\tau} e^{qV/2kT}$$

$$\gamma = \frac{I_n}{I_n + I_p + I_{rec}}$$

چگالی حاملها

- N_cچگالی موثر حالتها در نوار رسانش

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

- چگالی حفره ها در نوار ظرفیت

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} [1 - f(E)] N(E) dE$$

- چگالی موثر حالتها در نوار ظرفیت

$$N_v = 2\left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

کارایی کوانتومی داخلی

$$U_r \equiv \frac{\Delta n}{\tau_r}$$

$$U_{nr} \equiv \frac{\Delta n}{\tau_{nr}}$$

که در آن Δn چگالی الکترون اضافی، τ_r طول عمر بازترکیب تابشی، و τ_{nr} طول عمر غیرتابشی است. کارایی تابشی

$$\eta \equiv \frac{U_r}{U_r + U_{nr}} = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}} = \frac{\tau}{\tau_r}$$

که در آن τ طول عمر مؤثر است

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + c_n N_t / B N_a}$$

که از تقریب $n_o + p_o = N_a + N_a/n_i^2 \approx N_a$ استفاده شده است.

$$\eta = \left[1 + \frac{N_t c_{p3} p}{N_a c_{n2} n} \exp\left(-\frac{E_t - E_a}{kT}\right)\right]^{-1}$$

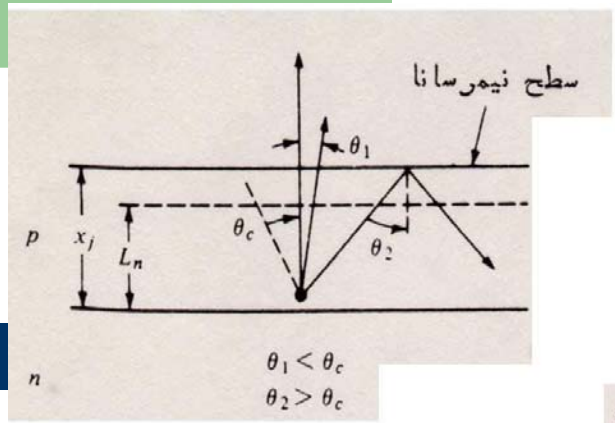
کارایی کوانتومی داخلی کلی

$$\eta_i = \eta\gamma$$

کارایی کوانتومی خارجی

$$\sin\theta_c = \frac{1}{n} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\sqrt{K_\varepsilon}}$$

که در آن n ضریب شکست نیمرسانا، با هـوا (n_1) به‌عنوان مرجع خارجی است.



بازتاب داخلی و زاویهٔ بحرانی در یك LED.

$$\bar{T} = \frac{۴n}{(۱+n)^۲}$$

گسیل کلی نور در داخل زاویهٔ فضایی θ_c عبارت است از

$$\bar{T} = T \sin^۲ \frac{\theta_c}{۲}$$

$$\eta_{ext} = \frac{\eta_i}{۱ \times \bar{\alpha} V / A\bar{T}} = \frac{\eta_i}{۱ + \bar{\alpha} x_j / \bar{T}}$$

که در آن $\bar{\alpha}$ ضریب جذب متوسط، V حجم دیود، و A مساحت

np در نیمرسانا

$$np = N_c N_v e^{-E_g / kT}$$

- E_gانرژی گاف ممنوع با رابطه تجربی :

$$E_g = E_{go} - \beta T$$

$$pn = K_1 T^3 e^{-E_{go} / kT}$$

- حاصلضرب npدر یک نیمرسانا در یک دمای معلوم و تحت تعادل گرمایی مقدار ثابتی است.
- حاصلضرب pn تنها به به چگالی حالتهای انرژی مجاز و انرژی گاف ممنوع بستگی دارد،لیکن از چگالی ناخالصی یا مکان تراز فرمی مستقل است.

بهرهٔ جریان و مشخصه‌های جریان-ولتاژ

اکنـــون کارایی تزریق گسیلنده، γ، و ضریب ترابری پایه[1] β_T را به‌صورت زیـــر تعریف می‌کنیم

$$\gamma \equiv \frac{I_{nE}}{|I_E|} = \frac{I_{nE}}{I_{nE}+I_{pE}+I_{rg}}$$

$$\beta_T \equiv \frac{I_{nC}}{I_{nE}}$$

علاوه‌براین، نسبت منفی افزایش جریان گردآور به‌تغییر جریان گسیلنده از صفر تا I_E را به‌عنوان بهرهٔ جریان α تعریف می‌کنیم

$$\alpha \equiv -\frac{I_C - I_{CO}}{I_E}$$

1فیزیک قطعات نیمه رسانا

قانون اثر جرم

- در نیمرسانای ذاتی $n=p=n_i$
  n_i چگالی حامل ذاتی

- قانون اثر جرم، که برای هر دو نوع نیمرسانای ذاتی و غیر ذاتی تحت تعادل گرمایی صادق است:

$$np = n_i^2$$

$$\alpha = \frac{I_{nC}}{I_{nE} + I_{pE} + I_{rg}} = \gamma \beta_T$$

α عبارت است از حاصلضرب ضریب ترابری و کارایی گسیلنده.

$$I_C = -\alpha I_E + I_{CO}$$

که جریان خروجی گردآور را به‌جریان ورودی گسیلنده، با پایه به‌عنوان پایانهٔ مشترک، مربوط می‌کند. بنابراین، α را بهرهٔ جریان پایه ـ مشترک نیز می‌نامند.

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CO}}{1-\alpha} = h_{FE} I_B + I_{CEO}$$

$$h_{FE} \equiv \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

$$I_{CEO} \equiv \frac{I_{CO}}{1-\alpha}$$

نماد h_{FE}، که به β هم معروف است، بهرهٔ جریان گسیلنده-مشترک نامیده می‌شود.

تراز فرمی

- تراز فرمی در نیمرسانای ذاتی ، E_i با قرار دادن $E_f = E_i$

$$E_i = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{3}{4}kT\ln\frac{m_h}{m_e}$$

- اگر جرم موثر الکترون و حفره مساوی باشند،تراز فرمی ذاتی در وسط گاف ممنوع واقع خواهد شد.
- در نیمرسانای ذاتی با قرار دادن $E_f = E_i$ به دست می آید:

$$n = n_i e^{(E_f - E_i)/kT}$$

$$p = n_i e^{(E_i - E_f)/kT}$$

به‌دست آوردن مؤلفه‌های جریان و عبارتهای مربوط به بهره

$$I_n = qAD_n \frac{dn_p}{dx}$$

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} = 0$$

جواب عمومی

$$n_p - n_{po} = K_1 e^{-x/L_n} + K_2 e^{x/L_n}$$

است که در آن

$$n_p(0) = n_{po} e^{V_E/V_T}$$

$$n_p(x_B) = 0$$

$$n_p - n_{po} = \frac{n_{po}(e^{V_E/V_T} - 1)\sinh[(x_B - x)/L_n]}{\sinh(x_B/L_n)}$$

درشرایط پیش‌ولت متعارف، داریم $V_E/V_T \gg 1$،

$$n_p = \frac{n_{po} e^{V_E/V_T} \sinh[(x_B - x)/L_n]}{\sinh(x_B/L_n)}$$

تراکم حفره در نیمرسانای n

$$n = p + N_d$$

$$n + N_a = p + N_d$$

$$n_n = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} + N_d}{2}$$

$$p_n = \frac{\sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} - N_d}{2}$$

- الکترون، حامل اکثریت
- حفره ،حامل اقلیت

$$n_p = n_{po} e^{V_E/V_T}\left(1 - \frac{x}{x_B}\right)$$

$$I_{nE} = \frac{qAD_n n_{po}}{L_n}(e^{V_E/V_T} - 1)\coth\frac{x_B}{L_n}, \quad x = 0 \quad \text{در}$$

$$I_{nC} = \frac{qAD_n n_{po}}{L_n}(e^{V_E/V_T} - 1)\operatorname{csch}\frac{x_B}{L_n}, \quad x = x_B \quad \text{در}$$

$$\beta_T = \operatorname{sech}\frac{x_B}{L_n}$$

تراز فرمی در نوع n

- در بیشتر موارد،تراکم آلاینده بخشنده به مراتب بیشتر از تراکم ذاتی است؛ یعنی ، $n_i / N_d << 1$

$$n_n = N_d + \frac{n_i^2}{N_d} \approx N_d$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$E_f = E_c - kT \ln \frac{N_c}{N_d}$$

به‌ازای $x_B / L_n \ll ۱$

$$I_{nE} = qAD_n \frac{n_i^۲}{N_a x_B} (e^{V_E/V_T} - ۱)$$

$$\beta_T = ۱ - \frac{۱}{۲} \frac{x_B^۲}{L_n^۲}$$

$$I_{pE} = qAD_p \frac{n_i^2}{N_{dE} x_E} (e^{V_E/V_T} - 1)$$

که در آن N_{dE} و x_E به‌ترتیب عبارت‌اند از تراکم بخشنده و عرض گسیلنده. اگر x_E درمقایسه با L_p، طول پخش حفره در گسیلنده، بزرگ باشد x_E را باید با L_p جایگزین کرد.

$$I_{rg} = \frac{qAn_i W_E}{2\tau_o} e^{V_E/2V_T}$$

که در آن W_E عرض لایهٔ تهی گسیلنده است.

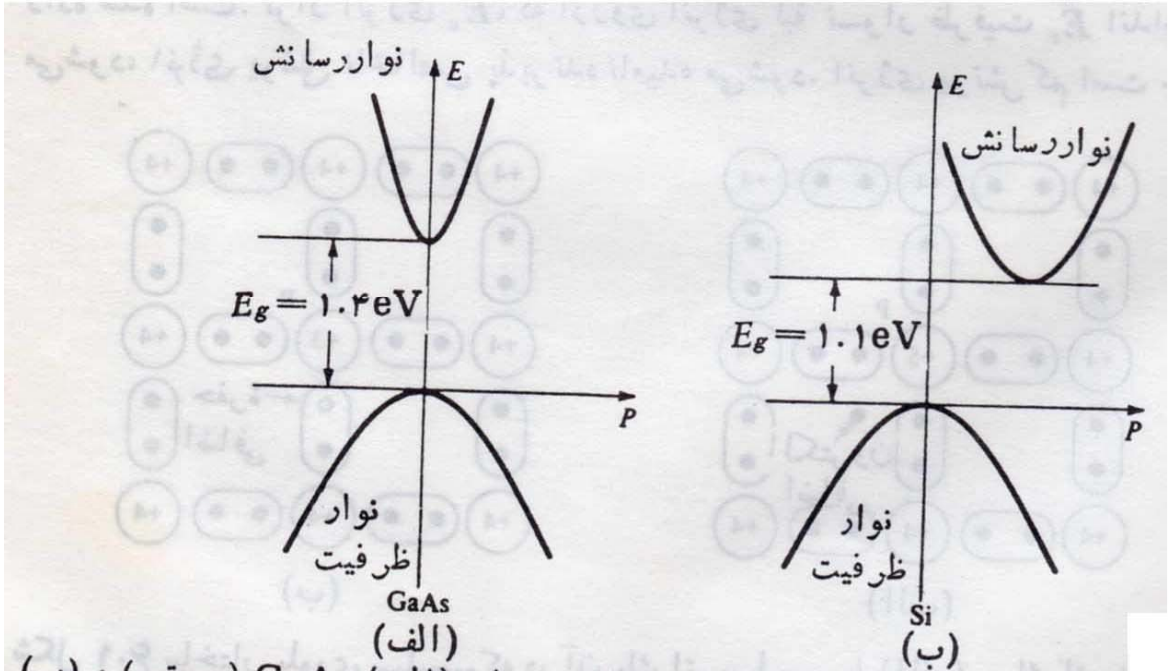
$$I_B = qAn_i^2 \left[\left(\frac{D_p}{N_{dE} x_E} + \frac{D_n x_B}{2N_a L_n^2} \right) (e^{V_E/V_T} - 1) + \frac{W_E}{2\tau_o n_i} e^{V_E/2V_T} \right] \propto e^{V_E/\eta V_T}$$

تراز فرمی در نوع p

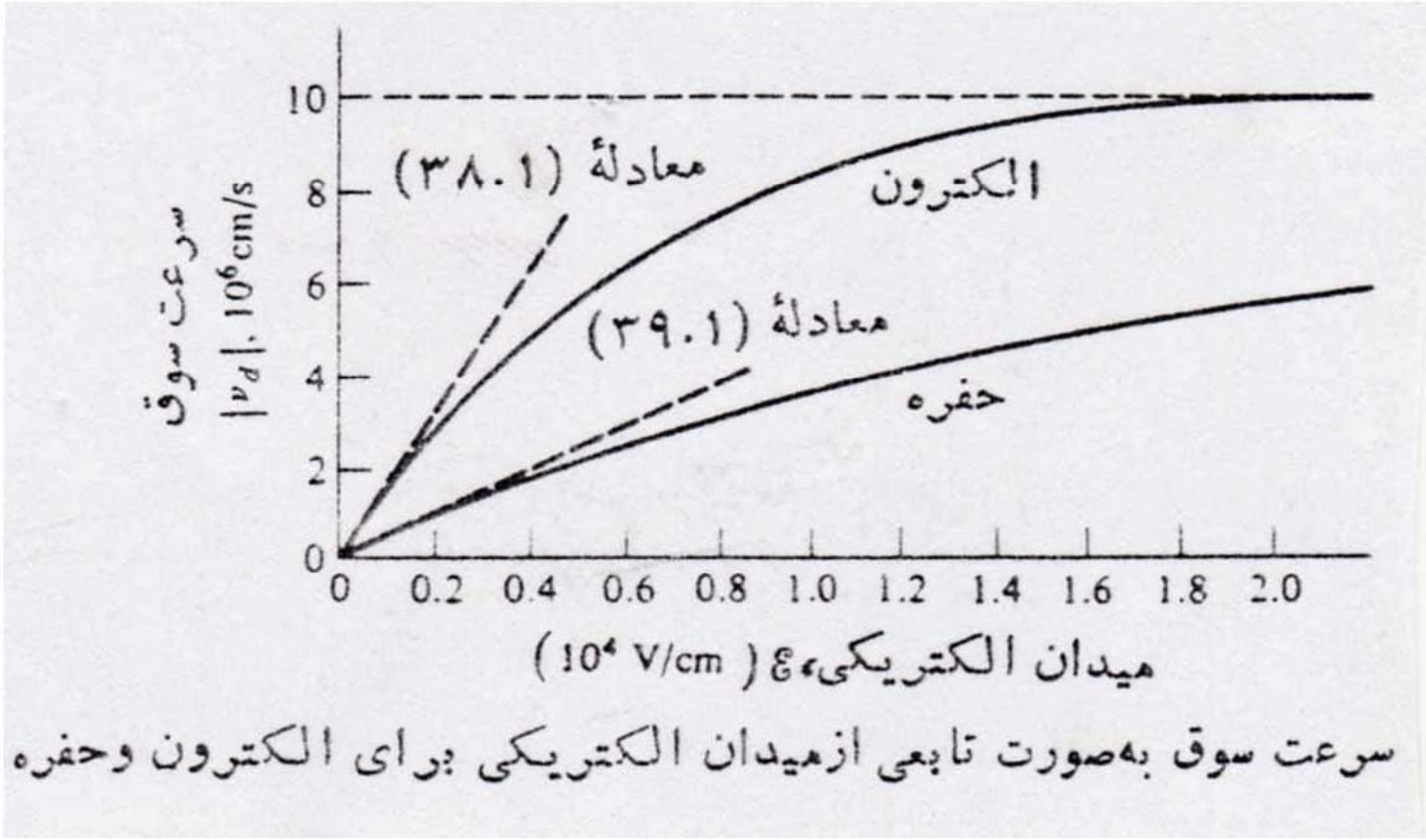
$$n_p = \frac{n_i^2}{N_a}$$

$$p_p = N_a$$

$$E_f = E_v + kT \ln \frac{N_v}{N_a}$$



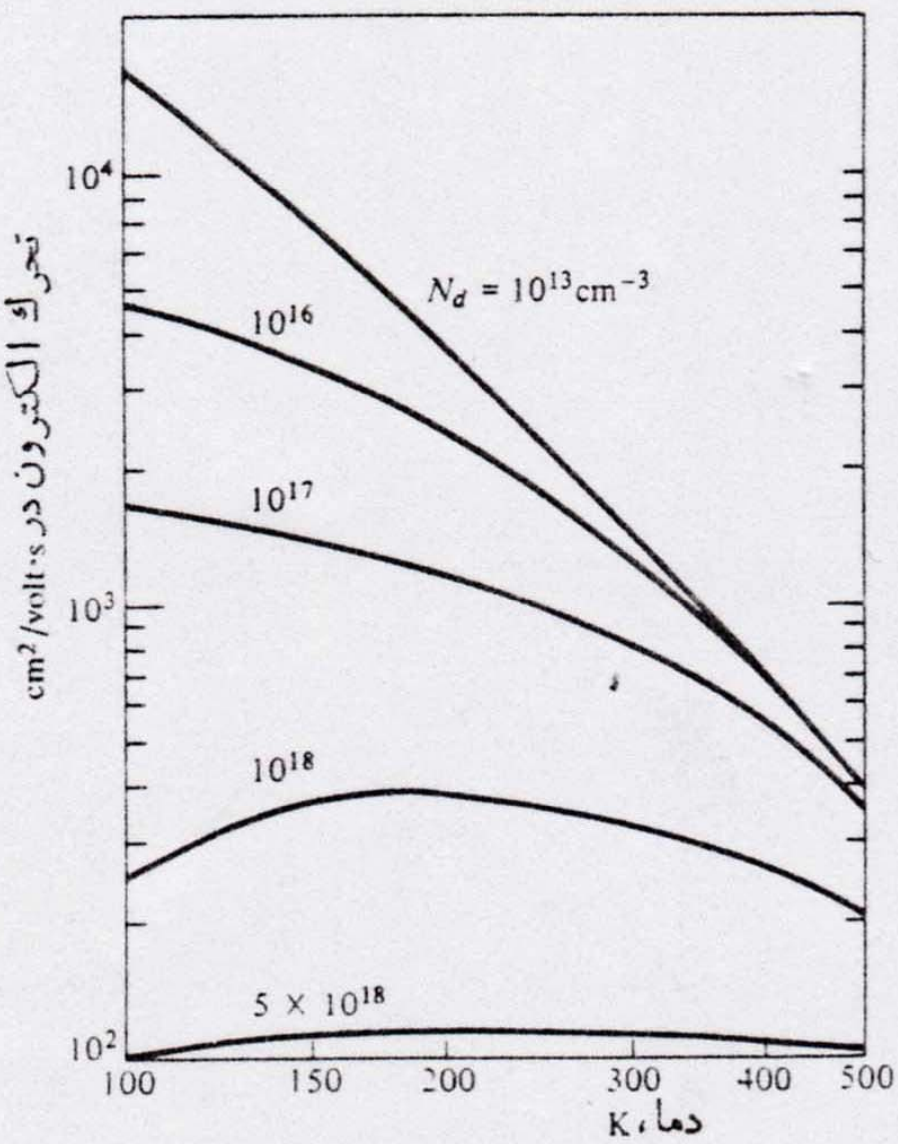
نمودار نوار انرژی، انرژی برحسب تکانه ، برای (الف) GaAs (مستقیم) و (ب) Si (غیرمستقیم).



سرعت سوق به‌صورت تابعی ازمیدان الکتریکی برای الکترون وحفره

پراکندگی حفره ها و الکترونها

1. پراکندگی شبکه ای
2. اتمهای ناخالصی یونیده
3. اگرتراکم اتمهای ناخالصی خنثی زیاد باشد،این اتمها می توانند موجب پراکندگی شوند.
4. نیروی کولنی بین حاملها



تحرك به صورت تابعی
از دما در سیلیسیم.

سرعت سوق

$$\bar{a} = -q\varepsilon / m_e^*$$

$$\Delta v = \bar{a}\tau_m$$

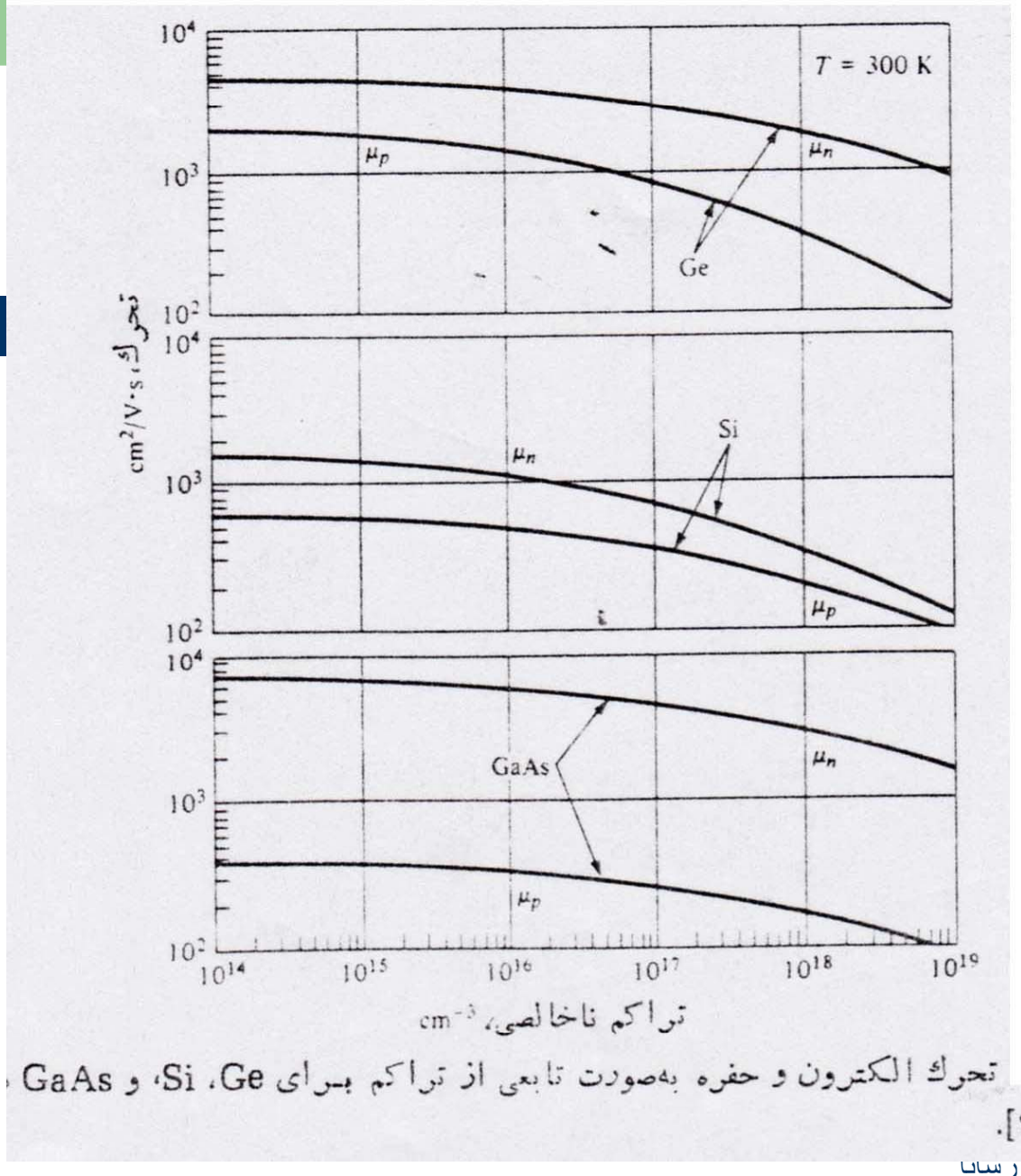
$$v_d = \frac{\Delta v}{2} = -\frac{q\tau_m}{2m_e^*}\varepsilon$$

$$v_d = -\frac{q\tau_m}{2m_e^*}\varepsilon = -\mu_n\varepsilon$$

$$\mu_n \equiv q\tau_m / m_e^*$$

$$v_d = \mu_p\varepsilon$$

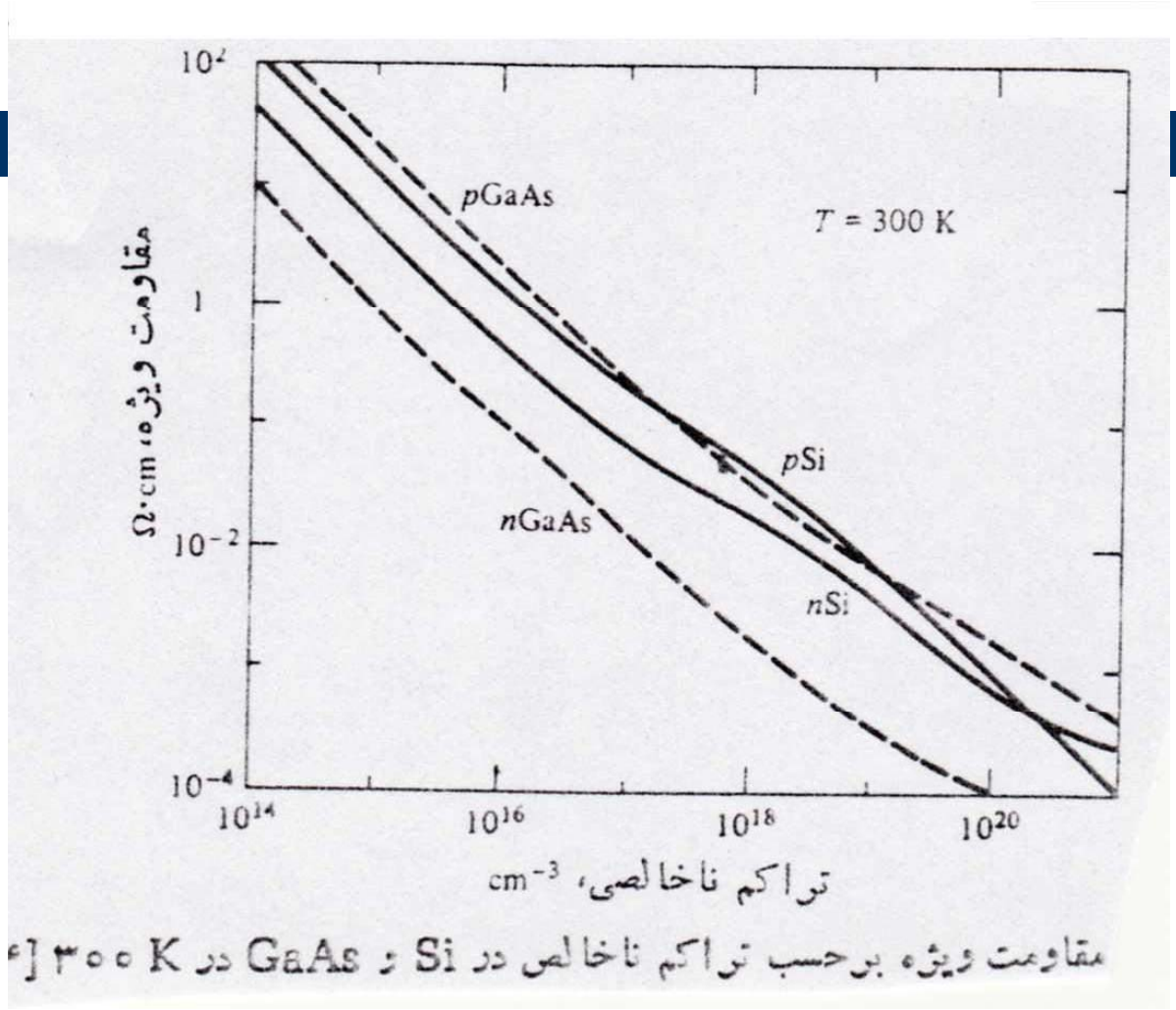
- μ_n تحرک الکترون
- μ_p تحرک حفره



تحرک الکترون و حفره به‌صورت تابعی از تراکم برای Ge، Si، و GaAs در ۳۰۰ K [۴].

وابستگی تحرک

- تحرک با دما افزایش می‌یابد.
- تحرک با افزایش تراکم ناخالصی در یک دمای معین کاهش می‌یابد.
- نتیجه تجربی مهم دیگری برای تحرک، بصورت تابعی از تراکم ناخالصیهای بخشنده و پذیرنده در شکل در تراکمهای پائین ناخالصی، تحرک ثابت است.

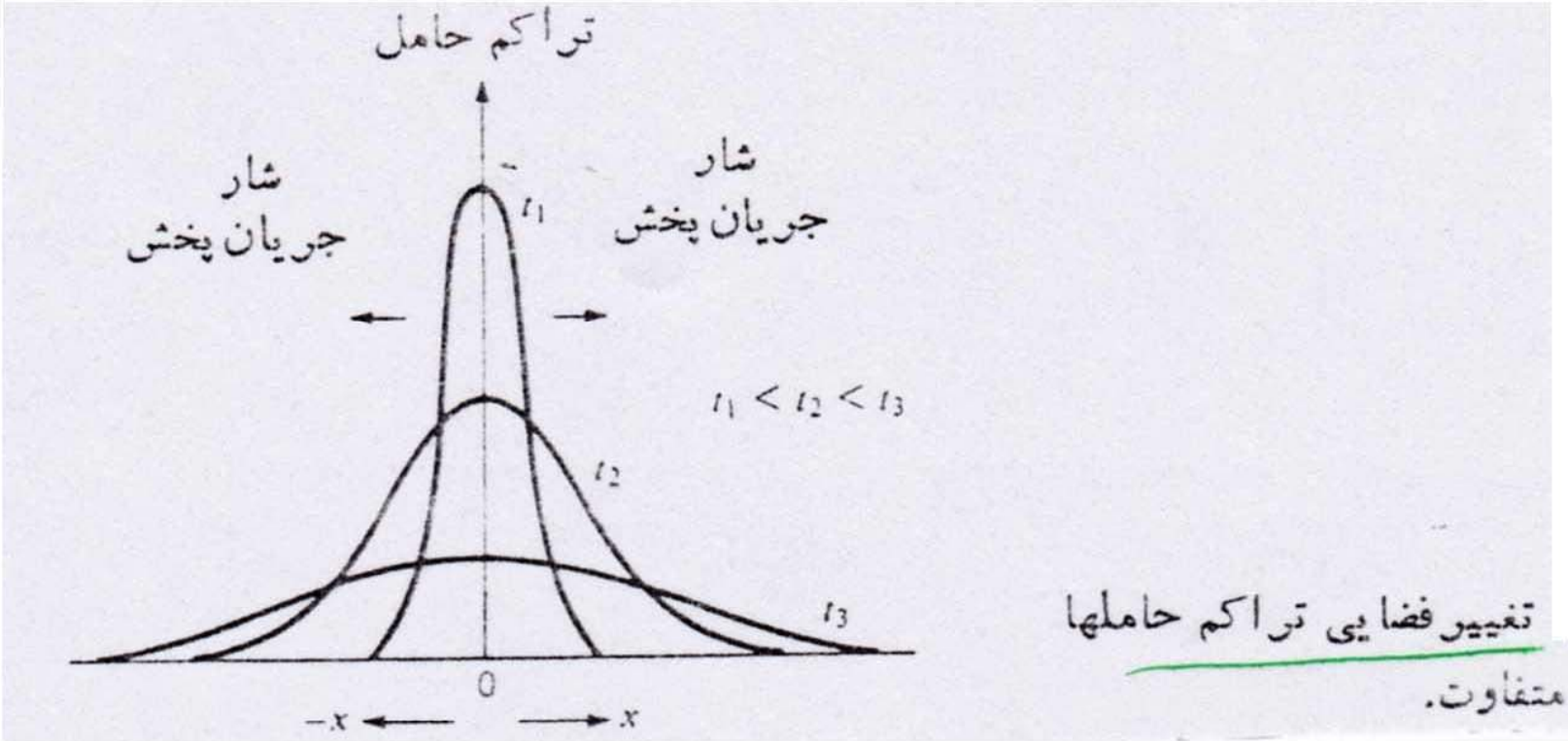


مقاومت ویژه برحسب تراکم ناخالص در Si و GaAs در ۳۰۰ K [۶]

رسانش

$$I_n = -qAnv_d = qAn\mu_n \mathcal{E}$$

- ترابری حاملهای تحت تأثیر یک میدان الکتریکی اعمال شده، جریانی به نام جریان سوق تولید می‌کند.
- n الکترون در واحد حجم است.
- در آن q قدرمطلق بار الکتریکی، A مساحت سطح مقطع، و L طول میله است.



تغییر فضایی تراکم حاملها
درزمانهای متفاوت.

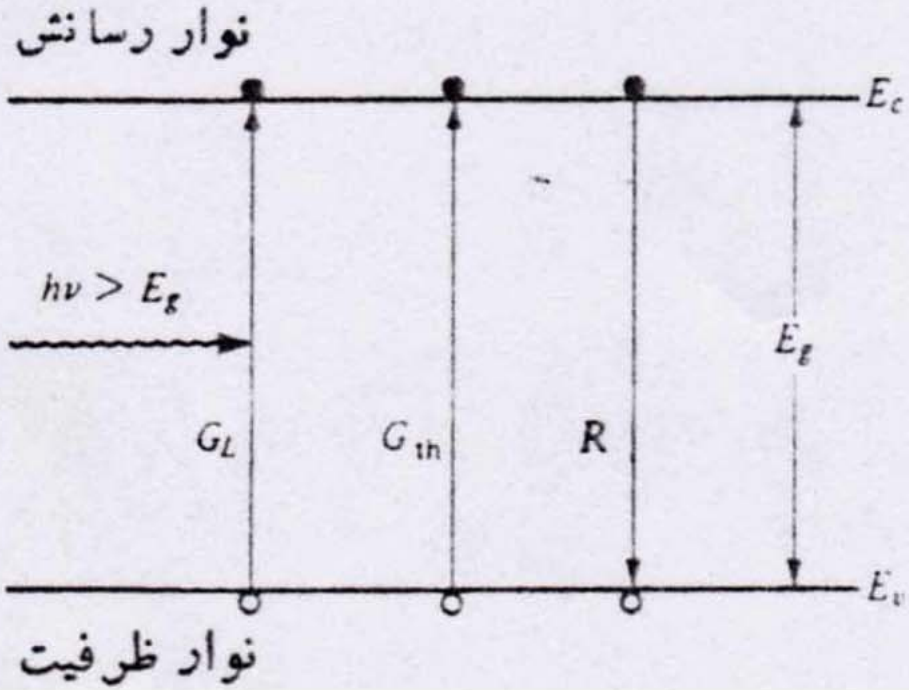
مقاومت ویژه

$$\frac{V}{I_n} = \frac{L}{qAn\mu_n}$$

$$R \equiv \rho \frac{L}{A} \equiv \frac{V}{I_n}$$

$$\frac{1}{\rho} = \sigma = q\mu_n n$$

- $\mathcal{E}$ را با V/L جایگزین کرده و نسبت ولتاژ به جریان را پیدا کنیم، داریم
- مقاومت میله به کمک رابطه
- تعریف می‌شود که ρ مقاومت ویژه است.

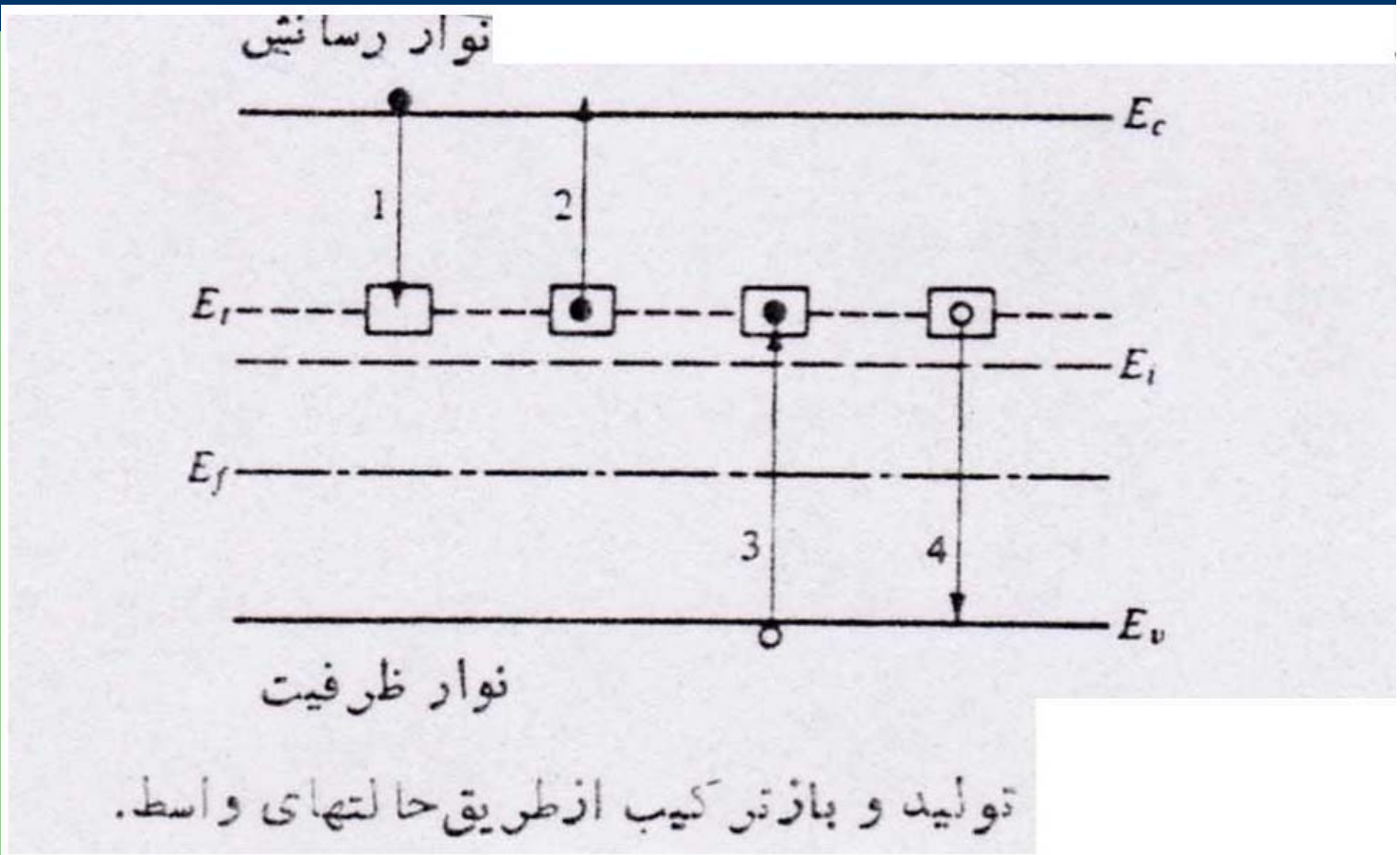


تولید و بازترکیب نوار به نوار
زوجهای الکترون ـ حفره.

جریان حفره

- که σ رسانندگی است. به کمک قیاس، جریان سوق حفره را می‌توان چنین نوشت.
- مقاومت ویژه کل نیمرسانا که شامل اثر الکترونها و حفره هاست، چنین خواهد شد.

$$I_p = qAp\mu_p\mathcal{E}$$

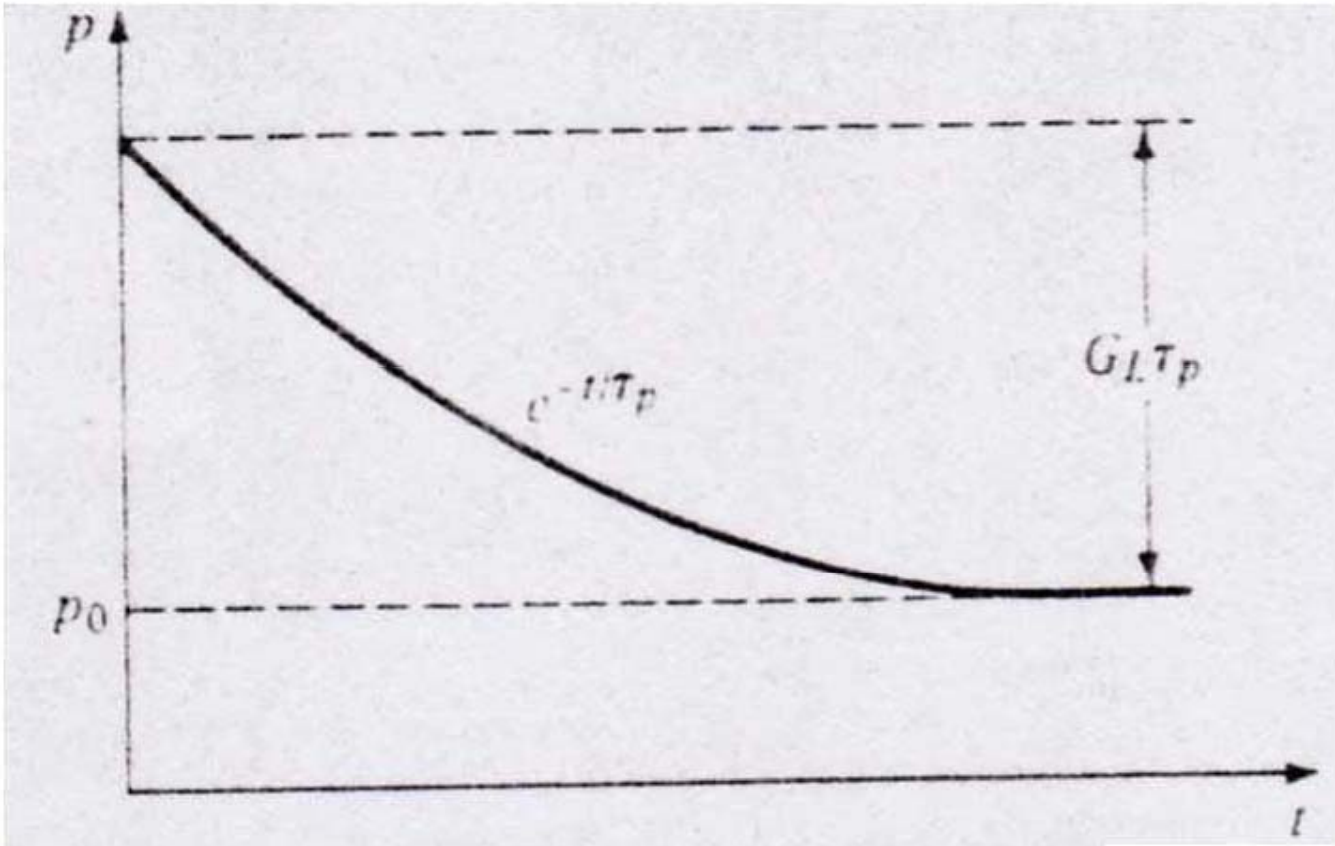


تولید و بازترکیب ازطریق حالتهای واسط.

هدایت ویژه

- مقاومت ویژه نیمرسانا پارامتر مهمی در طراحی قطعات است1 رابطهٔ بین تراکم ناخالصی و مقاومت ویژه را برای هر دو نوع سیلیسیم و GaAs نوع n و p در دمای اتاق نشان می‌دهد. انحراف از خطی بودن در این منحنیها بعلت اثر غیرخطی تحرک است.

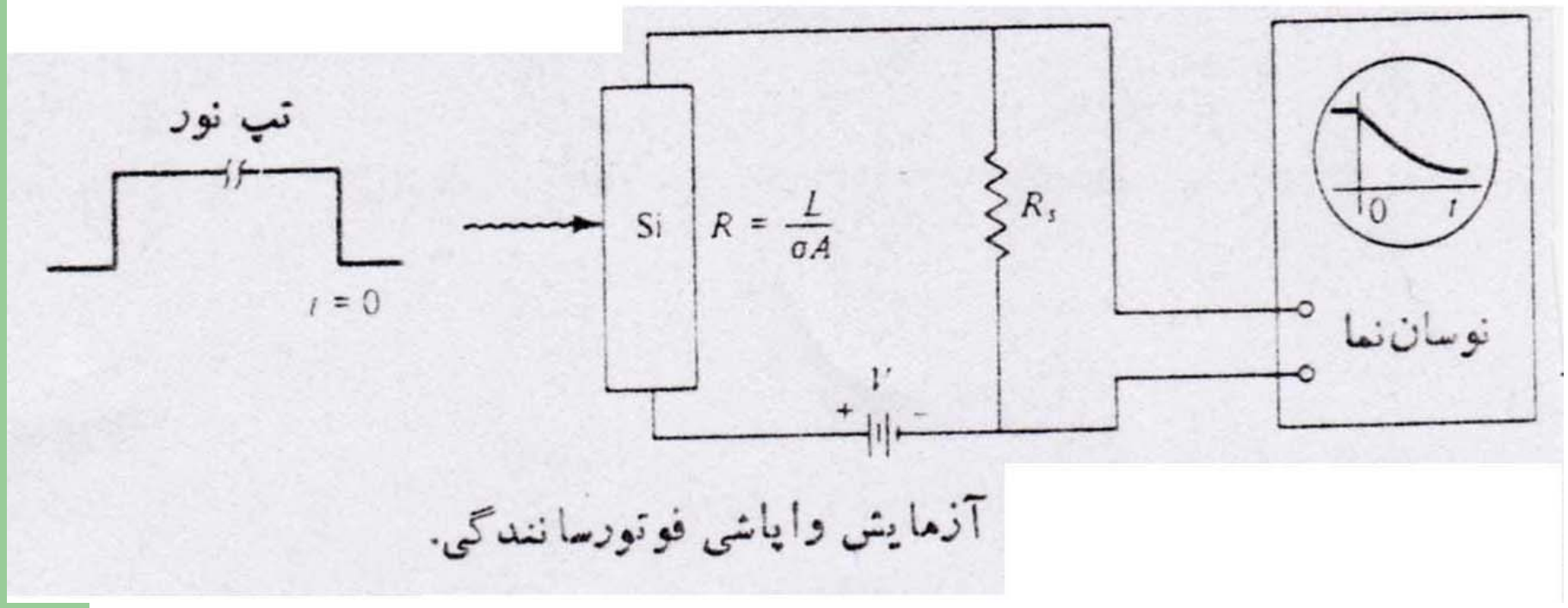
$$\frac{1}{\rho} = q\mu_n n + q\mu_p p$$



واپاشی حاملهای اضافی بعد از قطع منبع نور.

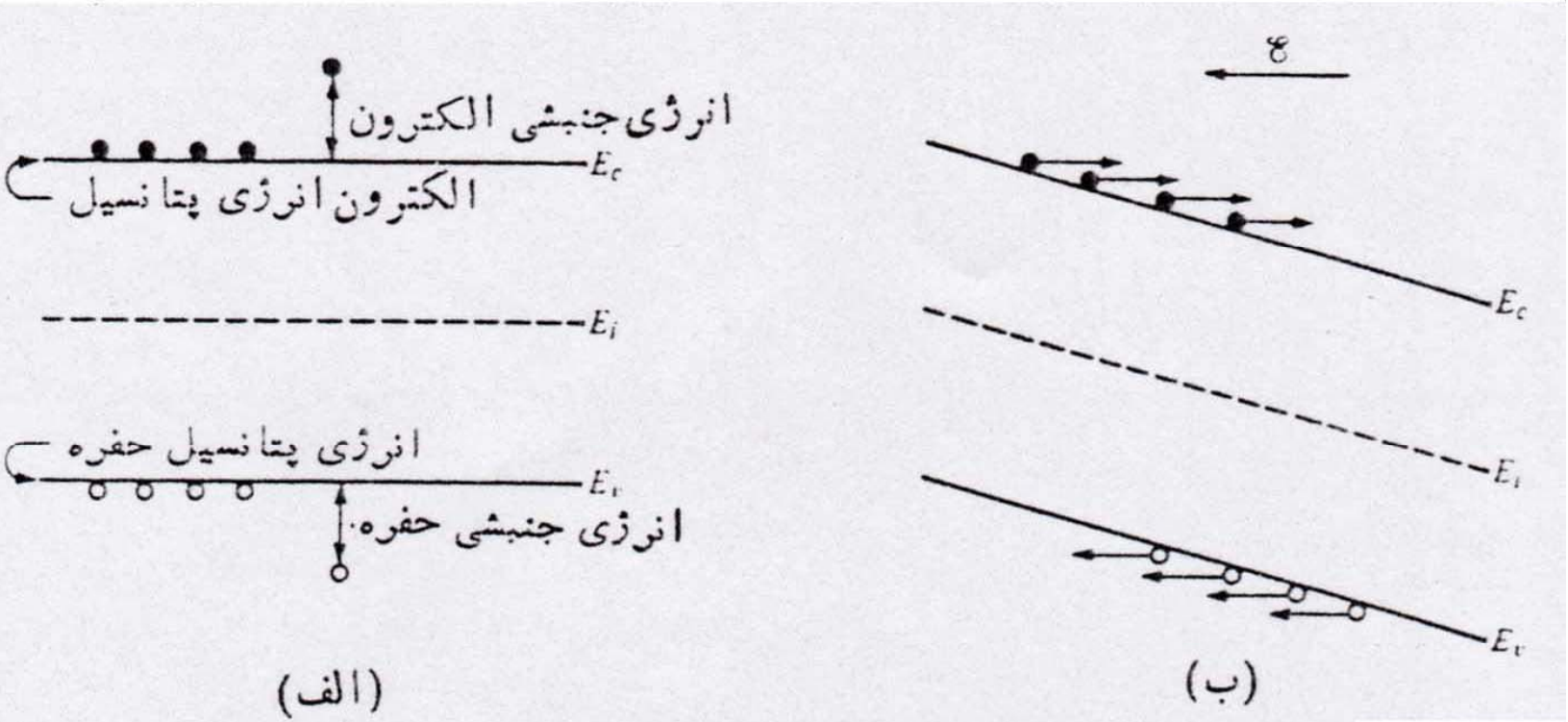
پخش

- پخش حاملها وقتی رخ می‌دهد که یک تغییر فضایی تراکم وجود داشته باشد، زیرا حاملها سعی می‌کنند از ناحیه با تراکم زیاد به ناحیه با تراکم کم حرکت کنند.

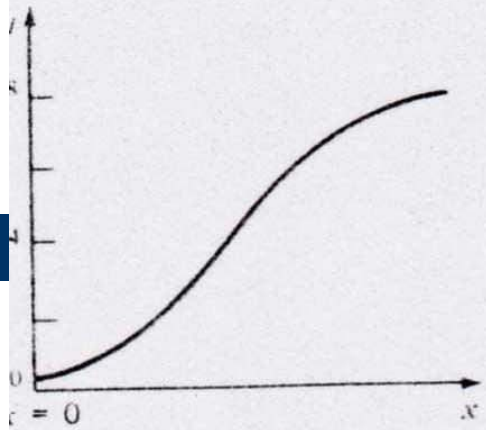


آزمایش واپاشی فوتورسانندگی.

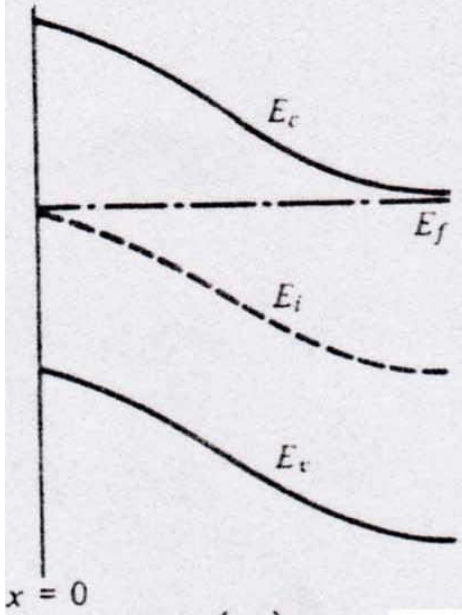
- مقاومت ویژه برحسب تراکم ناخالص در Si و GaAs در 300 K



نمودار نوار انرژی یك نیمرسانا تحت (الف) میدان الکتریکی صفر و (ب)میدا
الکتریکی.



(الف)



(ب)

(الف) توزیع بخشنده و (ب) نمودار نوار انرژی متناظر برای نیمرسانایی که به‌طور غیریکنواخت آلاییده شده است.

شارپخش

- شار بخش از قانون اول فیک پیروی می‌کند.

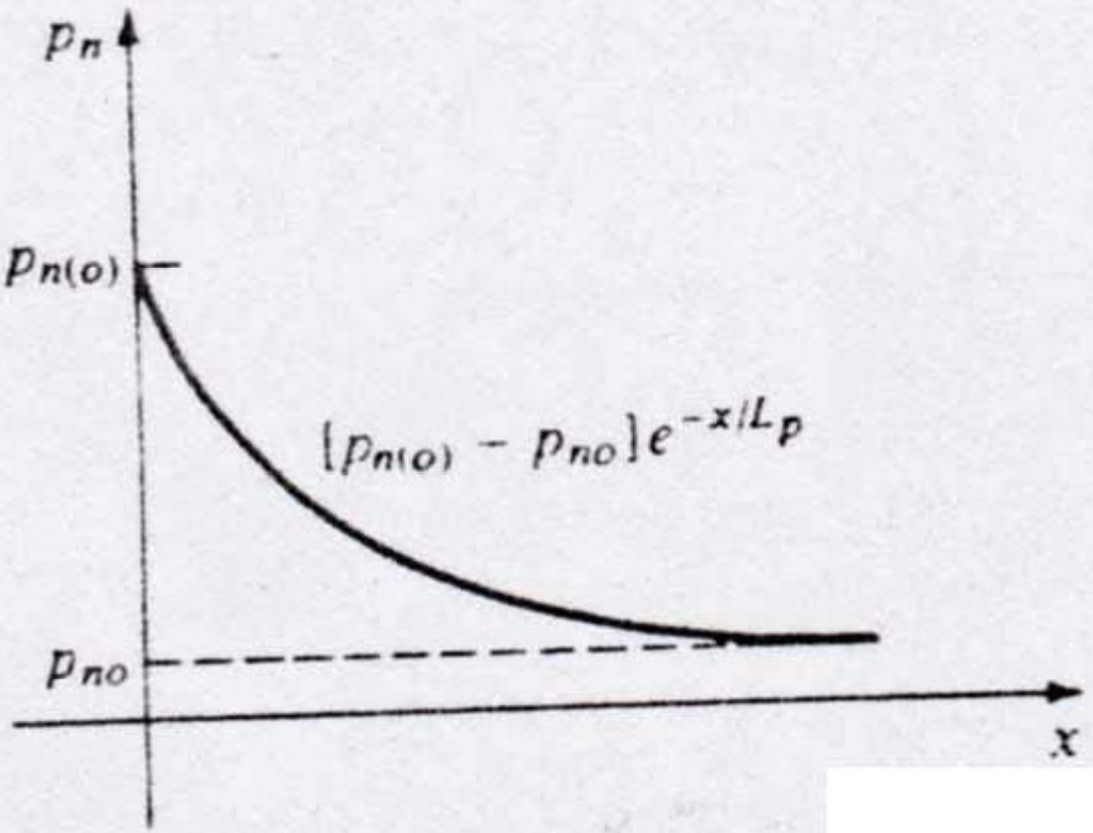
$$F = -D\frac{dN}{dx}$$

- که در آن F شار حاملها = تعداد عبورکرده $1cm^2/s$، D ثابت پخش، و N چگالی حاملها. بنابراین جریان پخش الکترونها و حفره ها از دو رابطه

$$I_n = qAD_n \frac{dn}{dx}$$

-

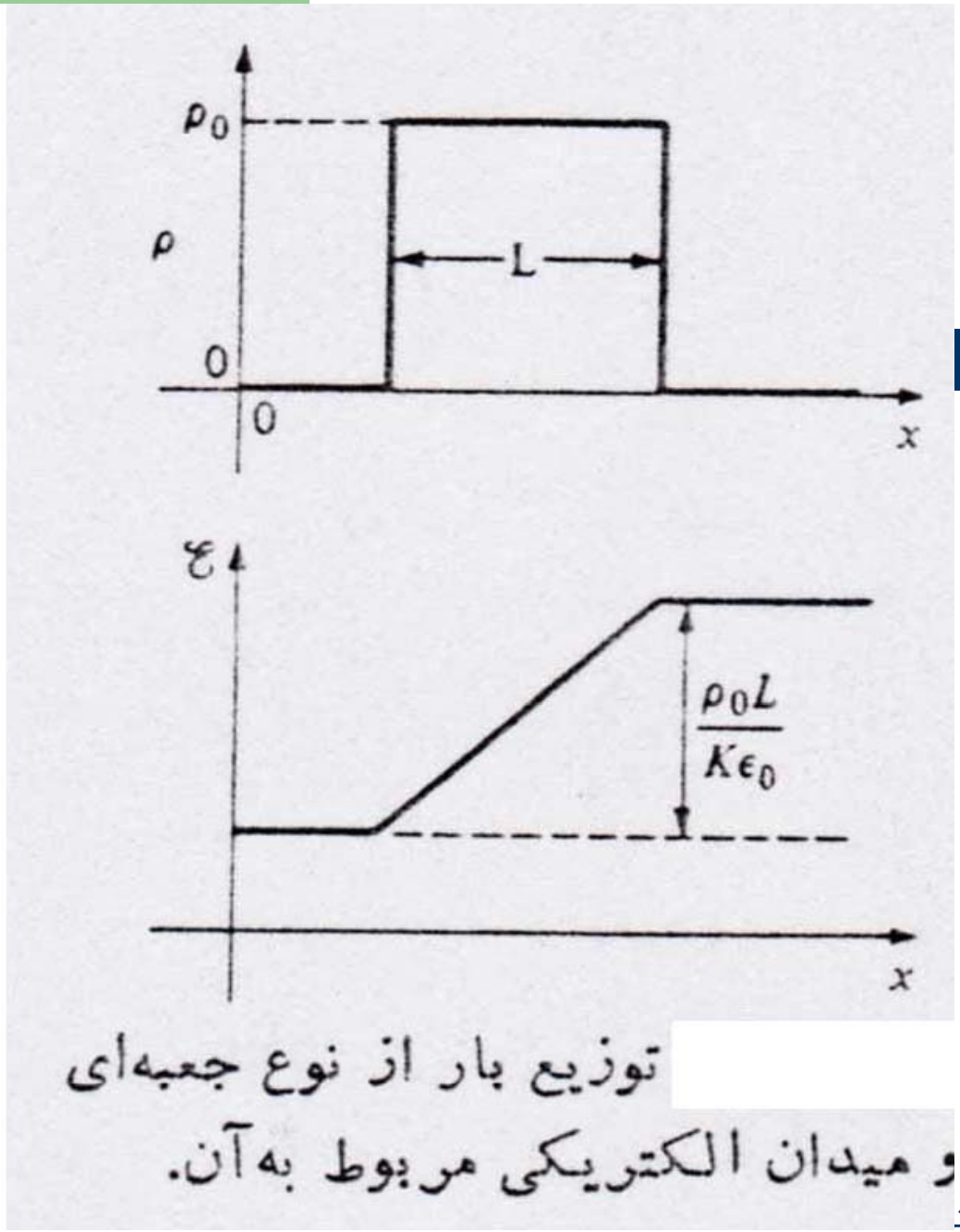
$$I_p = -qAD_P \frac{dp}{dx}$$



توزیع حامـــل اقلیتی حالت ماندا برای یک برش نیمرسانا بـــا تزریق در $x = o$.

رابطه اینشتین

- بدست می‌آید که در آنها، D_n و D_p به ترتیب ثابتهای پخش برای الکترونها و حفره ها هستند. علامت منفی در معادله نشان می‌دهد که جریان حفره ای در خلاف جهت شیب حفره هاست. این مطلب در نشان داده شده است. در فصل 2 نشان داده خواهد شد که ثابتهای پخش توسّط رابطه اینشتین با تحرک در ارتباطند.
- $$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}$$



توزیع بار از نوع جعبه‌ای

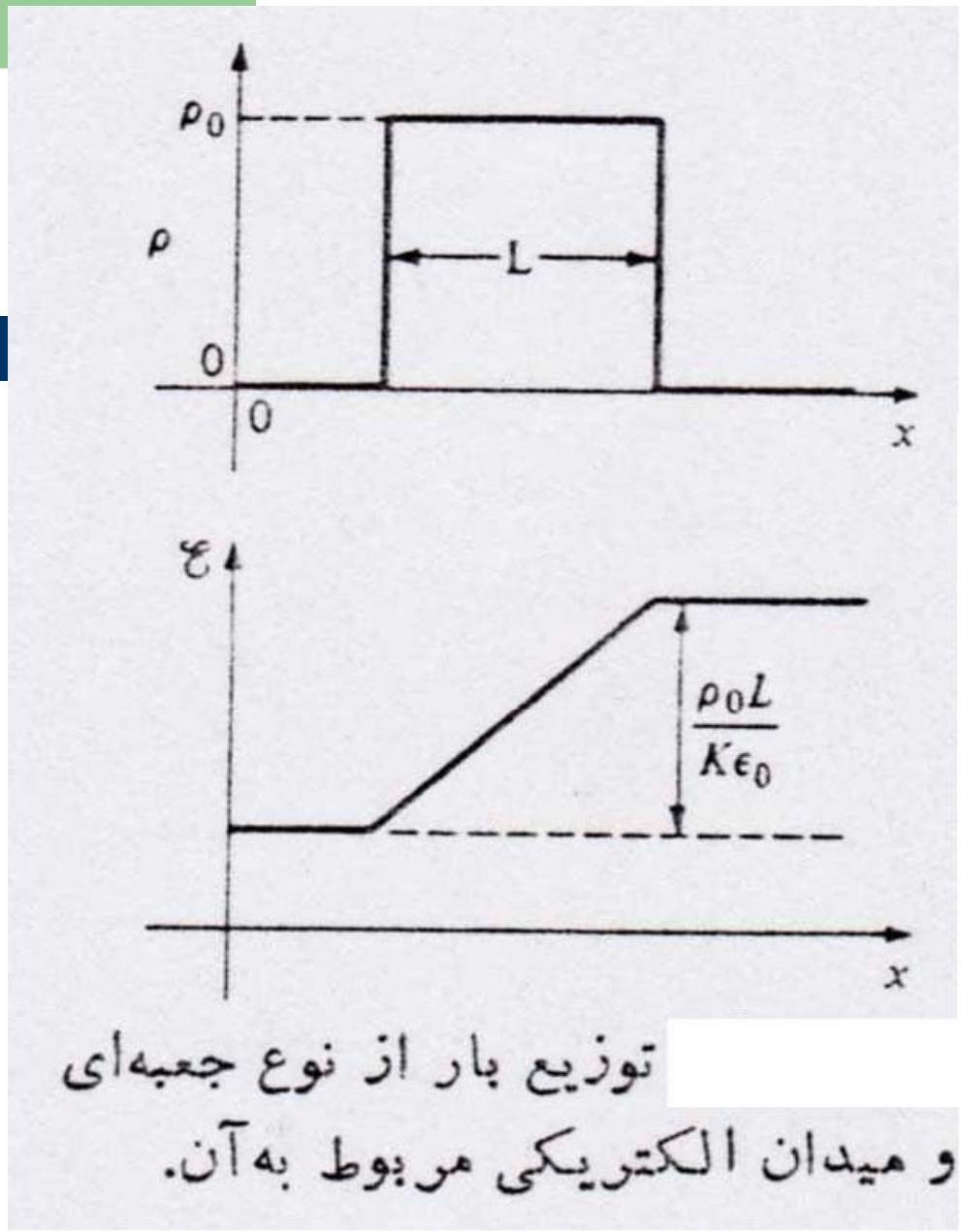
و میدان الکتریکی مربوط به آن.

مثال

- برای یک نمونه سیلیسیم با آلایش نسبتاً سبک در دمای اتاق داریم:

Dn = 38 cm2/s و 13 cm2/s = Dp. جریانهای کل الکترونی و حفره ای از حاصلجمع مؤلفه های سوق و پخش بدست می‌آید.

$$I_n = qA(\mu_n n \mathcal{E} + D_n \frac{dn}{dx})$$

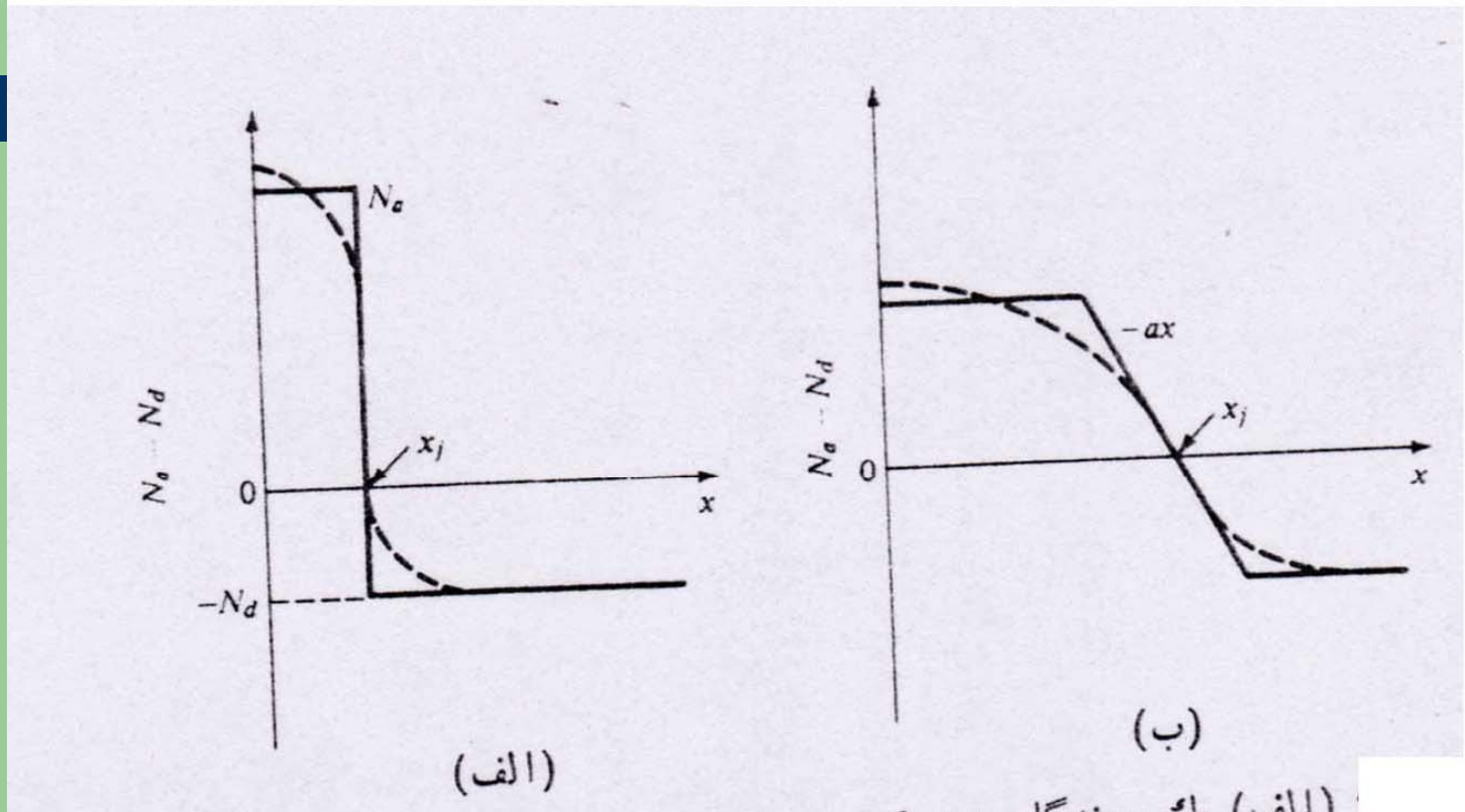


توزیع بار از نوع جعبه‌ای
و میدان الکتریکی مربوط به آن.

جریان کل

- شکل 1-23 شیب ثابت تراکم حالت پایای حفره ها، جریان پخش تولید می‌کند.

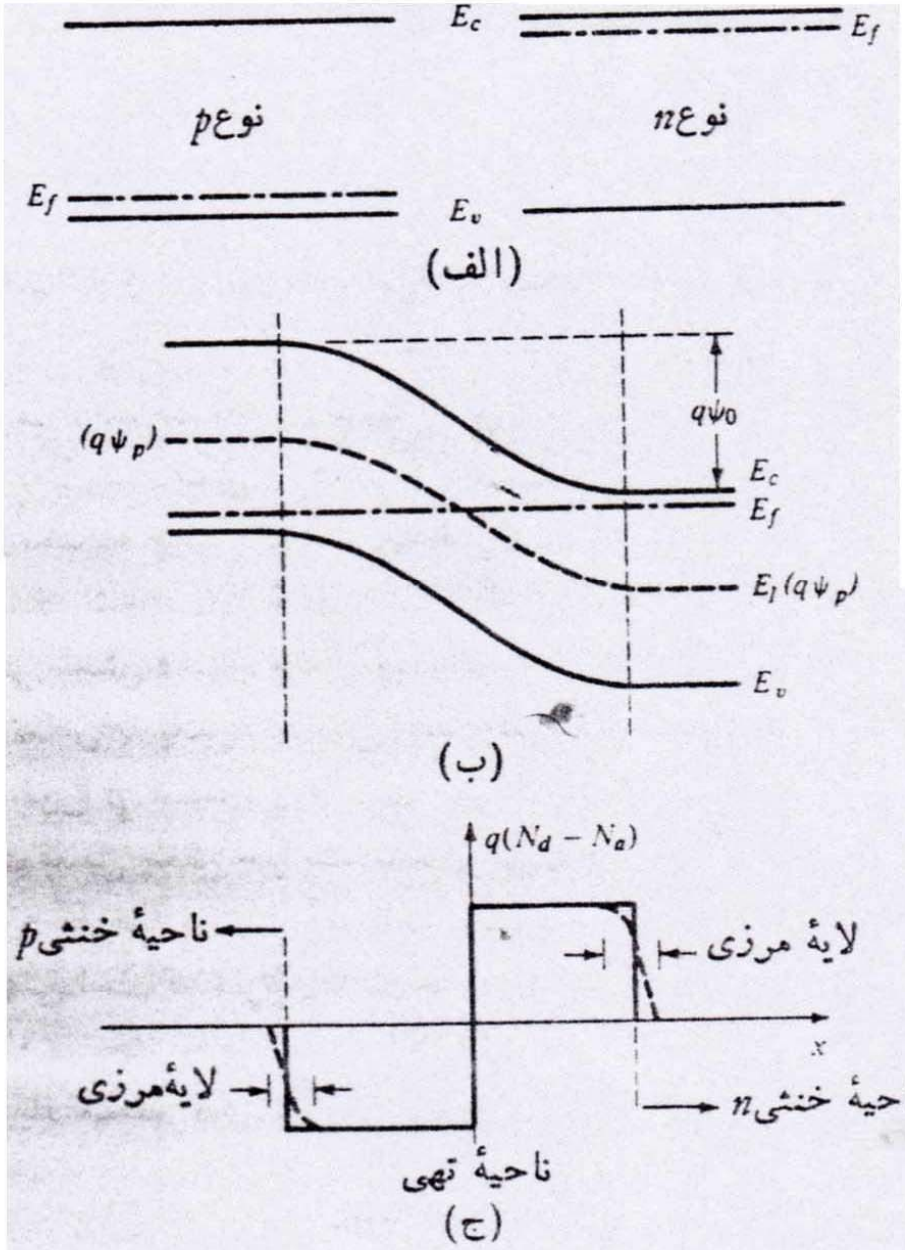
$$I_p = qA(\mu_p p\mathcal{E} - D_P \frac{dp}{dx})$$



(الف) یك پیوندگاه پخشی کم‌عمق (نقطه‌چین) با تقریب پیوندگاه پله‌ای (خط‌پر)
و (ب) یك پیوندگاه پخش عمیق (نقطه‌چین) با تقریب پیوندگاه شیبدارخطی (خط‌پر).

مشخّصات عدم تعادل نیمرساناها

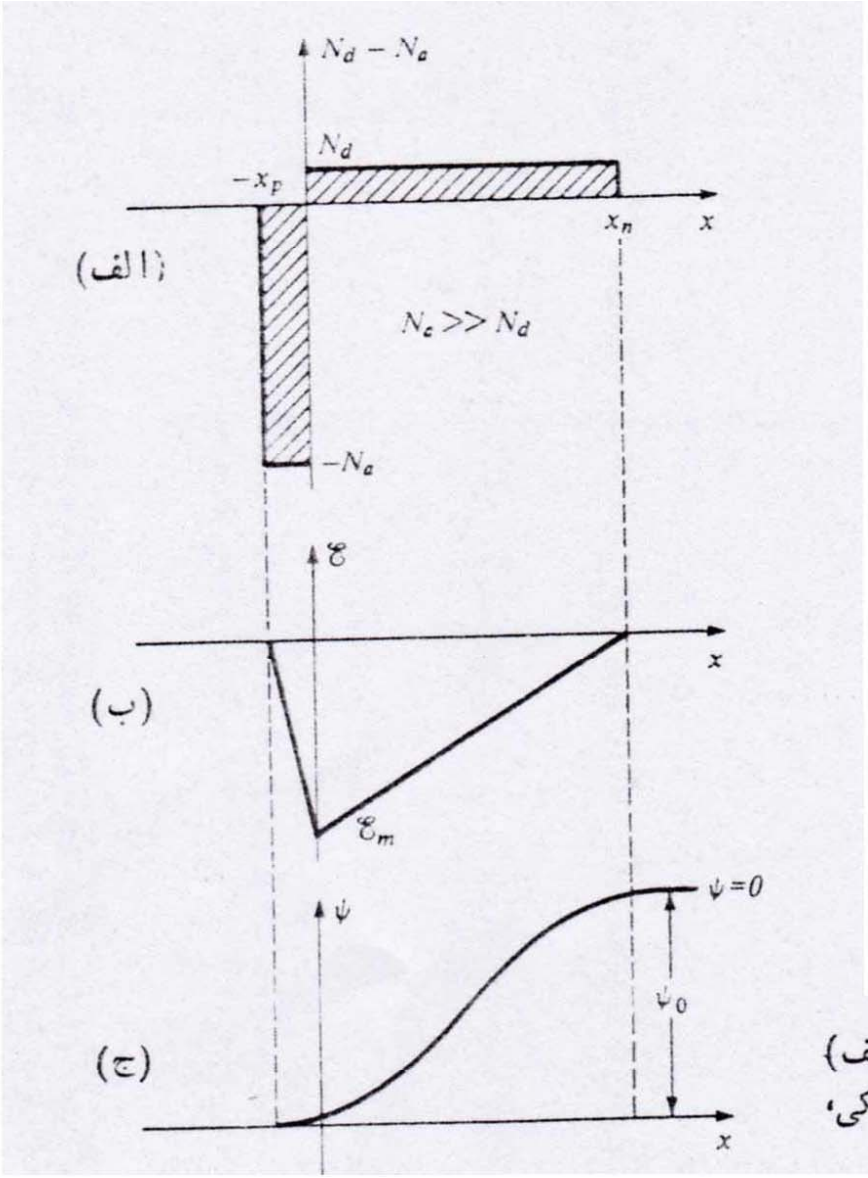
- عدم تعادل، شرطی را توصیف می‌کند که در آن چگالی حاملهای آزاد، با مقادیر تعادل گرمایی آنها متفاوت اند. از آنجا که اکثر قطعات نیمرسانا تحت شرایط عدم تعادل عمل می‌کنند لازم است بدانیم که این حاملهای آزاد چگونه وارد و منتقل می‌شوند. علاوه بر این، لازم است تعیین کنیم که چگونه تعادل گرمایی دوباره برقرار می‌شود. این فصل با موضوع وارد کردن بارهای اضافی بوسیله تولید و تزریق شروع می‌شود.



(الف) سیلیسیم نوع p و نوع n قبل ازتماس، (ب) نمودار نوار انرژی بعد ازتماس، و (ج) توزیع بارفضایی مربوط به (ب).

مشخّصات عدم تعادل نیمرساناها

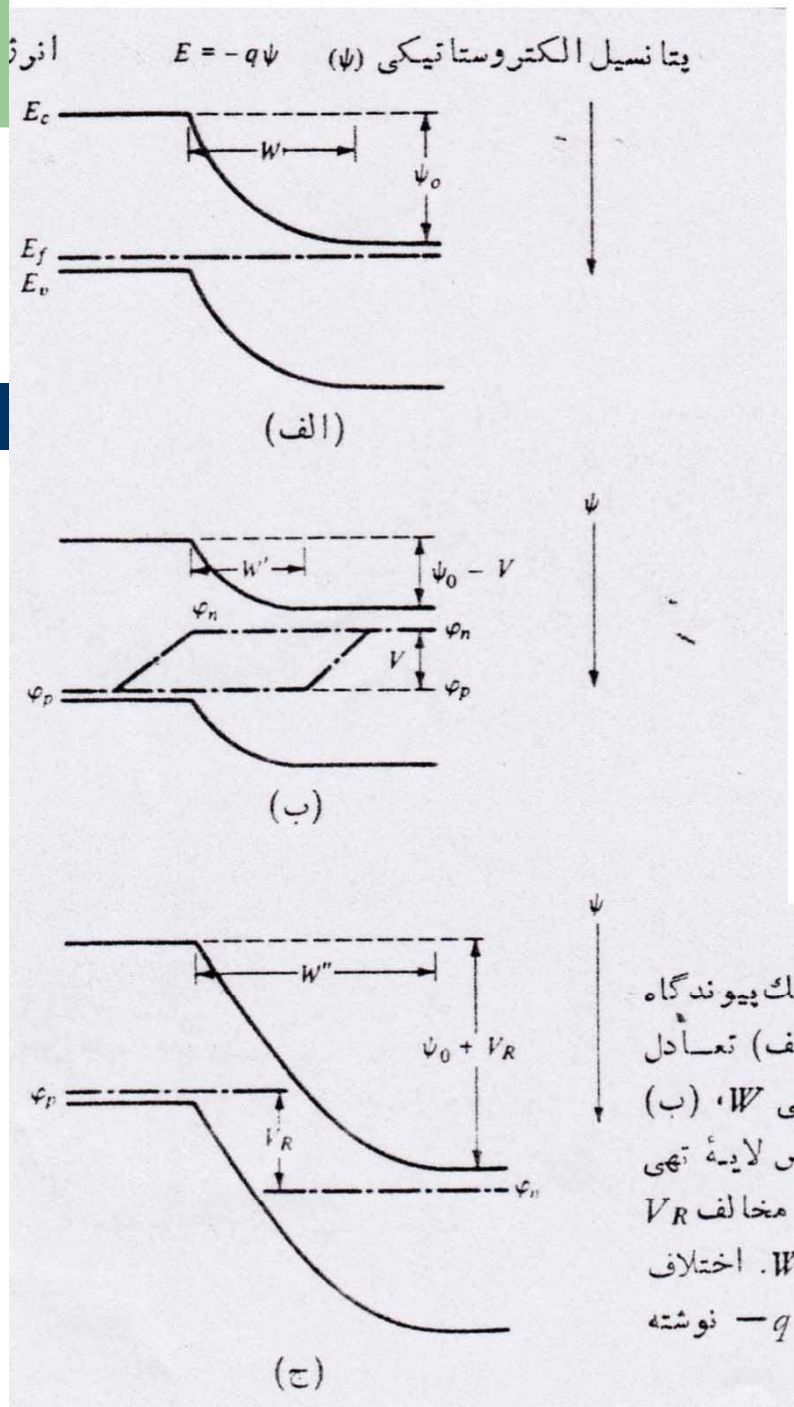
- نشان خواهیم داد که، بطور متوسط، حاملهای اضافی قبل از اینکه توسّط فرایند بازترکیب نابود شوند برای مدتی دوام خواهند آورد. حاملهای اضافی، در خلال طول عمرشان می‌توانند در یک فاصله مفید سوق داده یا پخش شوند تا تولید جریان کنند. هدف اصلی از این فصل پیدا کردن قوانین بنیادی حاکم بر بازترکیب و ترابری الکترونها و حفره های غیرتعادلی است. این قوانین بنیادی را در فصلهای بعدی بکار می بریم تا مشخص های ولتاژ – جریان دیودها و ترانزیستورها را بدست آوریم.



پیوندگاه پله‌ای یکطرفه: (الف) توزیع بار فضایی، (ب) میدان الکتریکی، و (ج) نمودارهای پتانسیل.

تولید، بازترکیب، و تزریق حاملها

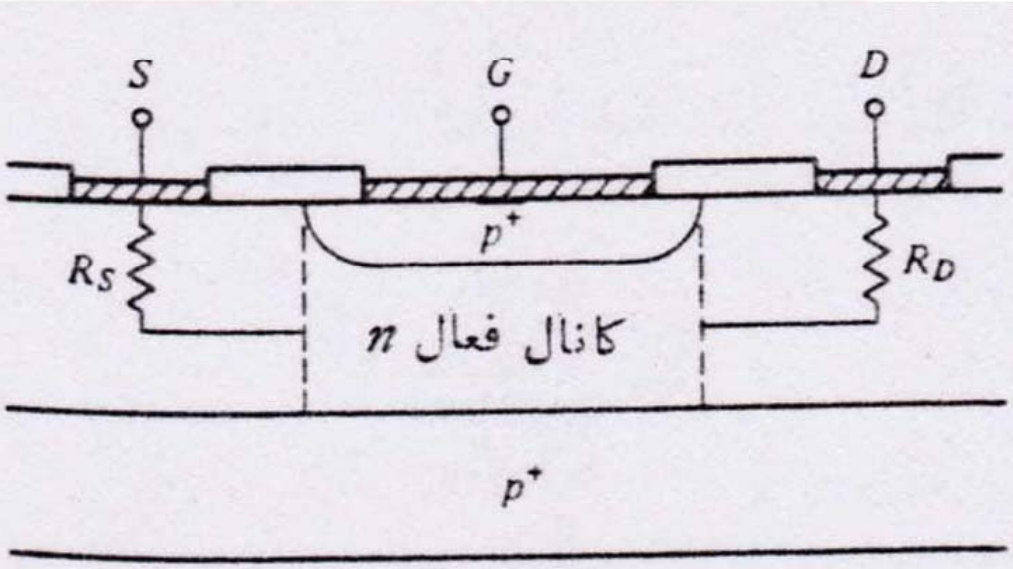
- تحت تعادل گرمایی، حاملهای نیمرسانا دارای انرژی گرمایی متوسطی هستند که به دمای محیط بستگی دارد. این انرژی گرمایی، برخی از الکترونهای ظرفیت را قادر می‌سازد که خود را به نمودار رسانش برسانند. گذار الکترون به سمت بالا، یک حفره در پشت سر خود جا می‌گذارد، بطوریکه یک زوج الکترون – حفره تولید می‌شود. این فرایند را تولید حامل می نامند که در شکل با G_{th} نمایش داده شده است. وقتی یک الکترون از نوار رسانش به نوار ظرفیت می‌رود، یک زوج



توزیع پتانسیل یك پیوندگاه پله‌ای یکطرفه تحت (الف) تعادل گرمایی با عرض لایهٔ تهی W، (ب) پیش‌ولت موافق V با عرض لایهٔ تهی $W' < W$، و (ج) پیش‌ولت مخالف V_R با عرض لایهٔ تهی $W'' > W$. اختلاف پتانسیل، یعنی ψ_o، بدون q — نوشته شده است.

بازترکیب

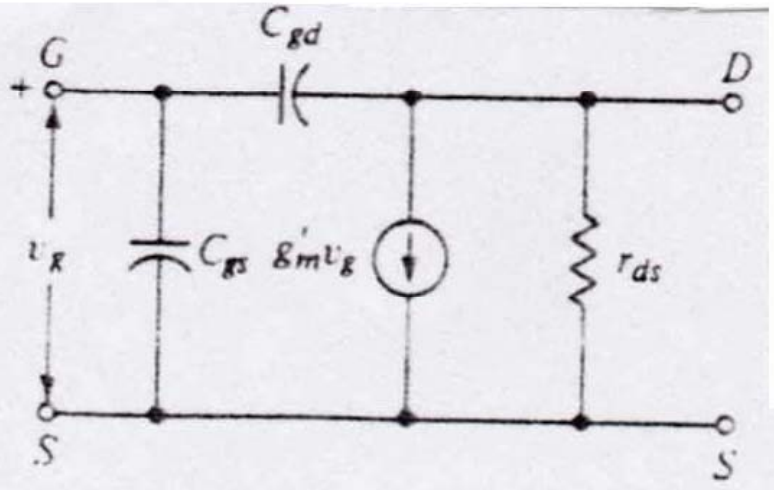
- الکترون – حفره نابود می‌شود. این فرایند معکوس، که بازترکیب نامیده می‌شود، در شکل 2-1 با R نمایش داده شده است. تحت تعادل گرمایی، آهنگ تولید و آهنگ بازترکیب باید مساوی باشند، بطوریکه تراکم حامل ثابت باقی بماند. بنابراین، شرط $pn = n_i^2$ برقرار می‌ماند.



مقاومتهای سری دریك JFET.

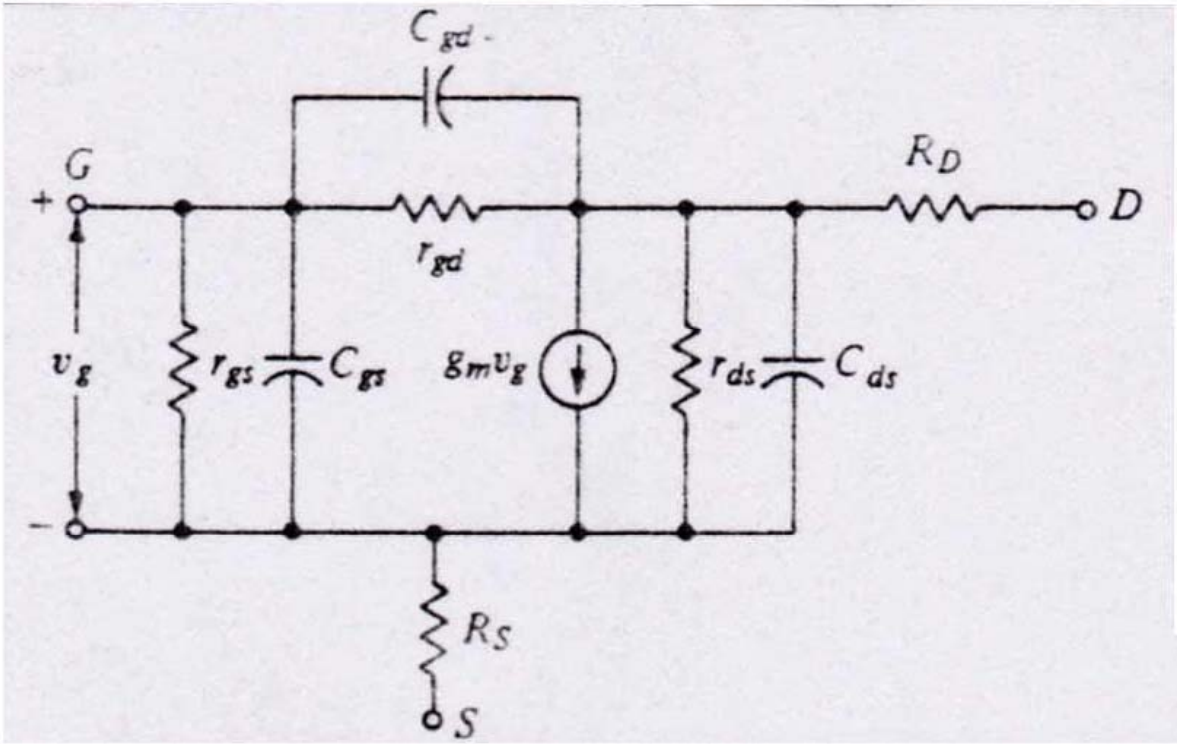
تزریق حامل

- شرط تعادل را می‌توان با وارد کردن حاملهای آزاد و بیشتر کردن آنها از مقادیر تعادل گرمایی شان، آشفته کرد. این فرایند، که تزریق حامل نامیده می‌شود، می‌تواند به کمک وسائل نوری یا الکتریکی انجام شود. تزریق نوری شامل یک نور فرودی تکفام است که حاصلضربب hv بدست می‌آید، که v بسامد نور و h ثابت پلانک است.



مدار معادل ساده‌شدهٔ سیگنال کم‌دامنه.

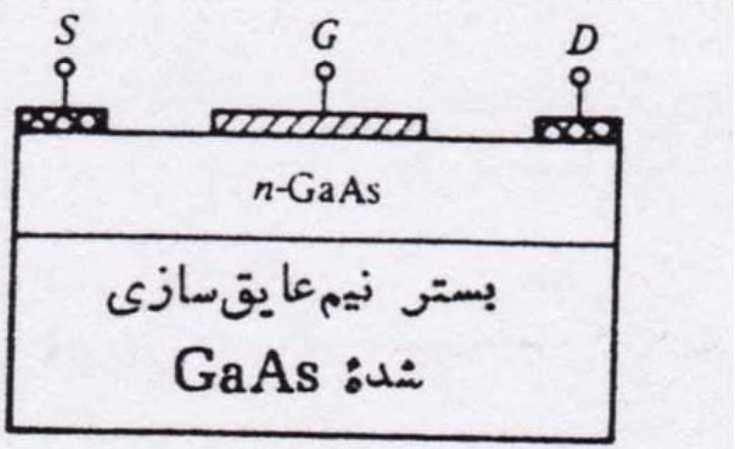
- وقتی انرژی نوری توسّط یک الکترون واقع در نور ظرفیت جذب شود، الکترون به نوار رسانش برانگیخته می‌شود و یک حفره در نوار ظرفیت آفریده می‌شود. آهنگ تولید زوجهای الکترون – حفره توسط نور در شکل 2-1 با GL نشان داده شده است. تزریق حاملها، چگالیهای الکترون و حفره را افزایش می‌دهد بطوریکه pn>ni2.



مدار معادل سیگنال کم‌دامنه.

حاملهای اضافی

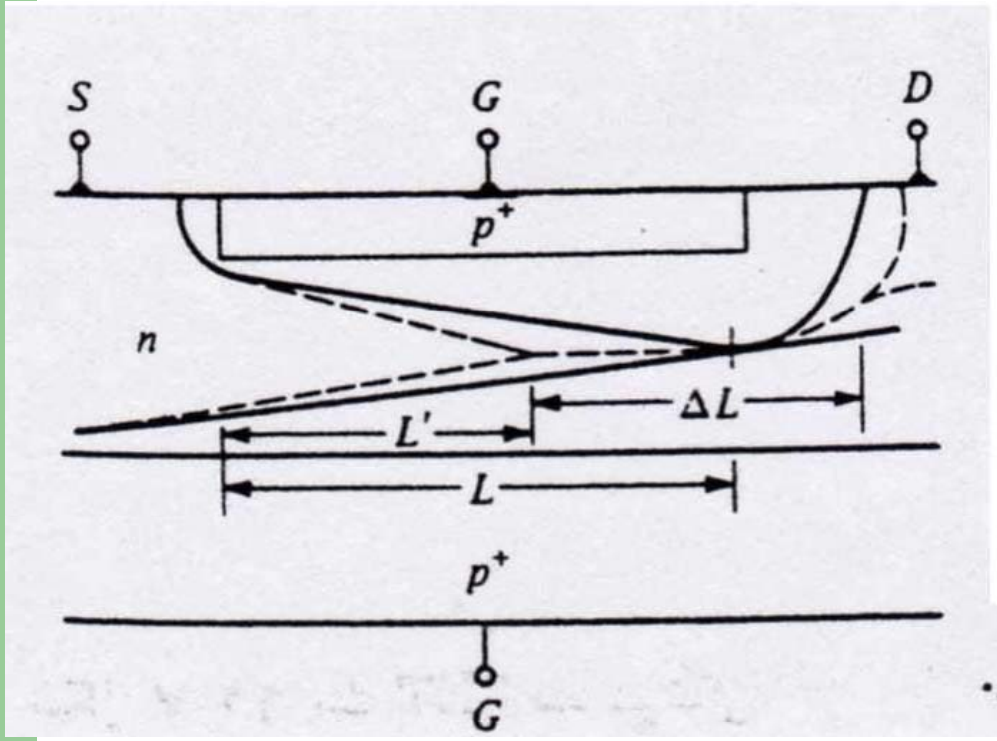
- حاملهای زیادی را حاملهای اضافی می نامند.
الکترونها و حفره های اضافی همیشه تعدادشان یکی است، بطوریکه خنثی بودن بار فضایی پایدار می‌ماند.
ساز و کارهای تزریق، بازترکیب و ترابری این حاملهای اضافی، در تعیین مشخّصات اکثر قطعات نیمرسانا از اهمیت خاصی برخوردارند.



یك FET سد شوتکی.

تراز تزریق حاملها

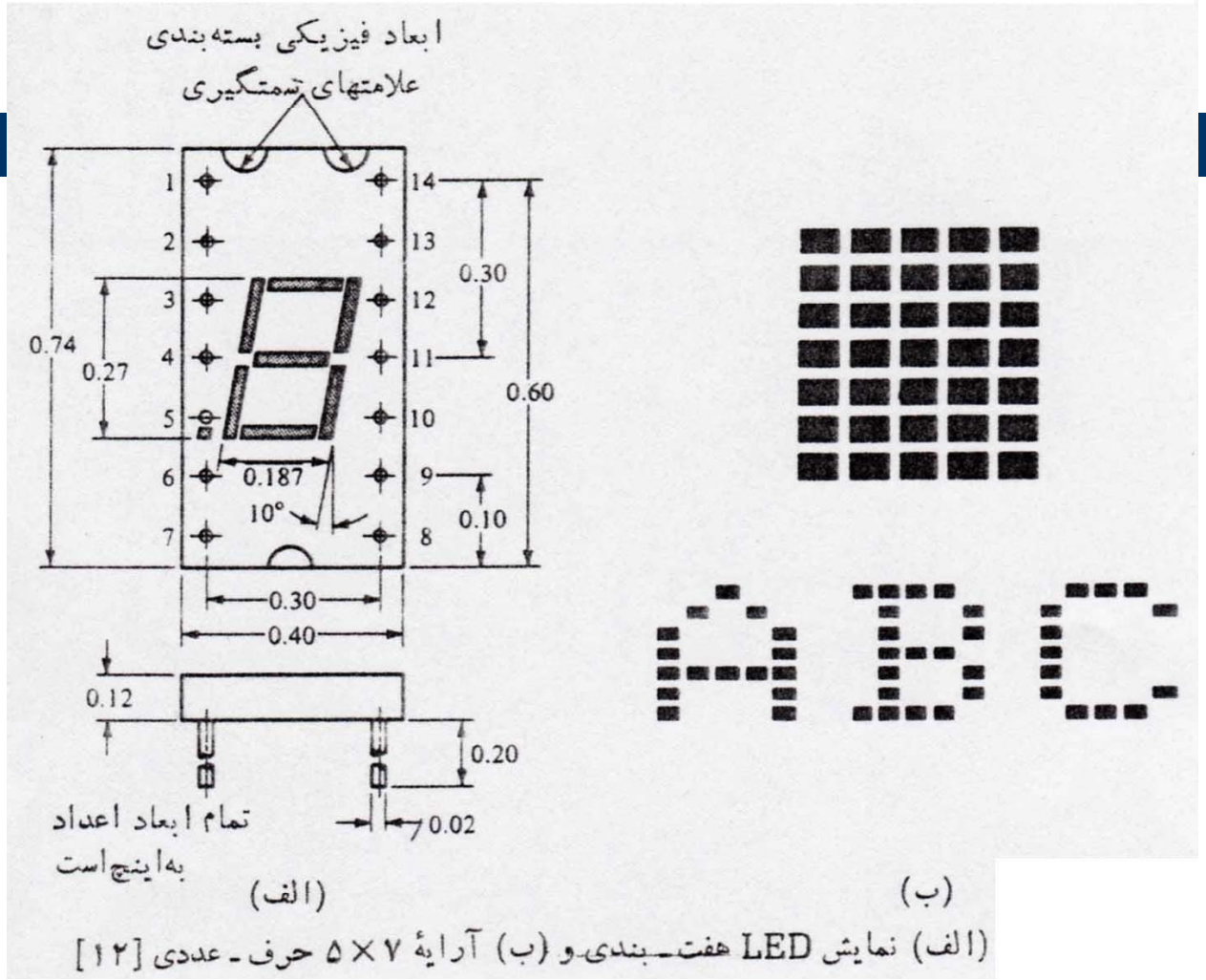
- تعداد حاملهای تزریق شده، در نیمرسانا معمولاً رفتار قطعه را کنترل می‌کند. یک پولک سیستم نوع n را که بطور یکنواخت تحت تابش یک منبع نوری، با شرایط ثابت، است، در نظر بگیرید. قبل از اینکه منبع نور روشن شود، پولک سیستم در تعادل است و هیچ حامل اضافی وجود ندارد. چگالی حامل اکثریتی برابر با تراکم اتمهای بخشنده است، و چگالی حامل اقلیتی را می‌توان از معادله (1-28) محاسبه کرد. بعد از روشن شدن منبع نور، دو حالت مختلف ممکن است وجود



مدوله‌سازی طول کانال بعدازتنگش.

تزریق کم وزیاد

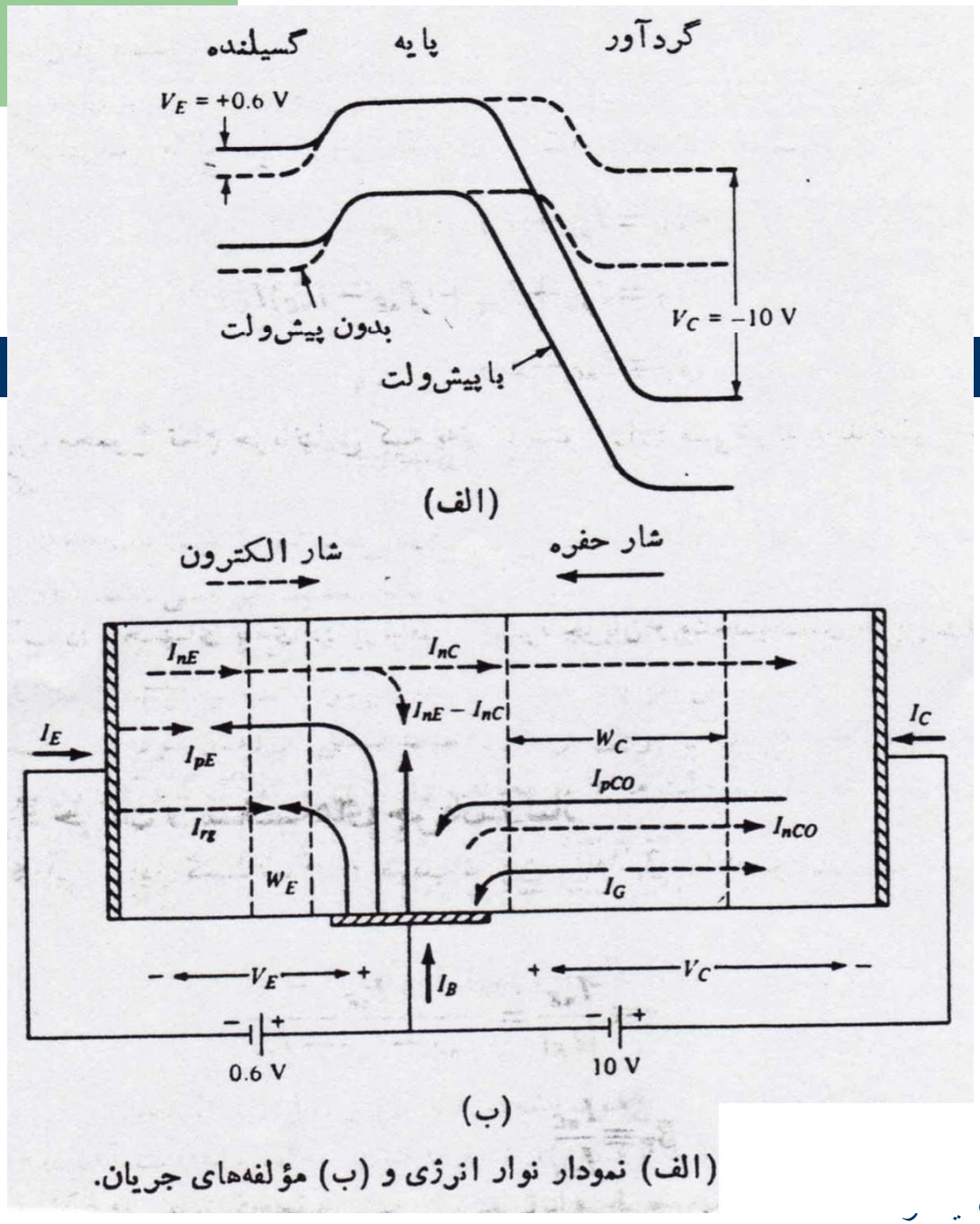
- داشته باشد . اگر چگالی حامل تزریق شده در مقایسه با تراکم بخشنده کم باشد، چگالی حامل اکثریتی اساساً بدون تغییر باقی می‌ماند، در حالی که چگالی حامل اقلیتی با چگالی حامل تزریق شده برابر است. این حالت را تزریق کم می نامند.اگر چگالی حامل تزریق شده از تراکم بخشنده تجاوز کند آن را تزریق زیاد می‌نامند.



(الف) نمایش LED هفت‌ـبندیـو (ب) آرایهٔ ۷ × ۵ حرف ـ عددی [۱۲]

جدول سیلیسیم نوع n با $N_d=25/2\times10^{15}\ cm^{-3}$

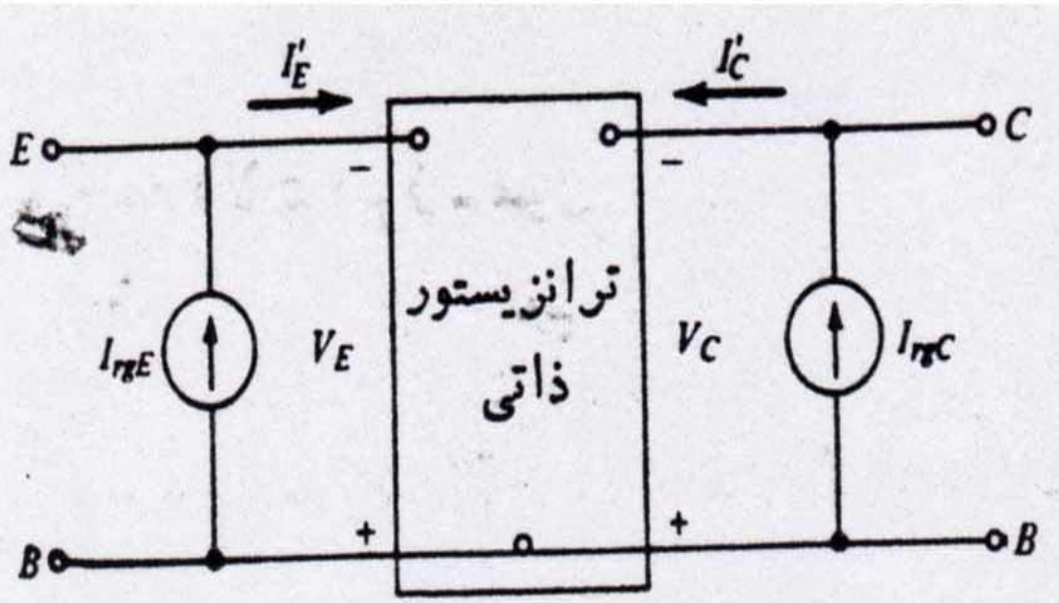
چگالی حامل، cm^{-3}	میزان تزریق: تعادل	زیاد	کم
Δn اضافی	0	10^{13}	10^{16}
n_n اکثریتی	2.25×10^{15}	2.26×10^{15}	1.225×10^{-16}
p_n اقلیتی	10^{5}	10^{13}	10^{16}



(الف) نمودار نوار انرژی و (ب) مؤلفه‌های جریان.

سازوکارهای بازترکیب

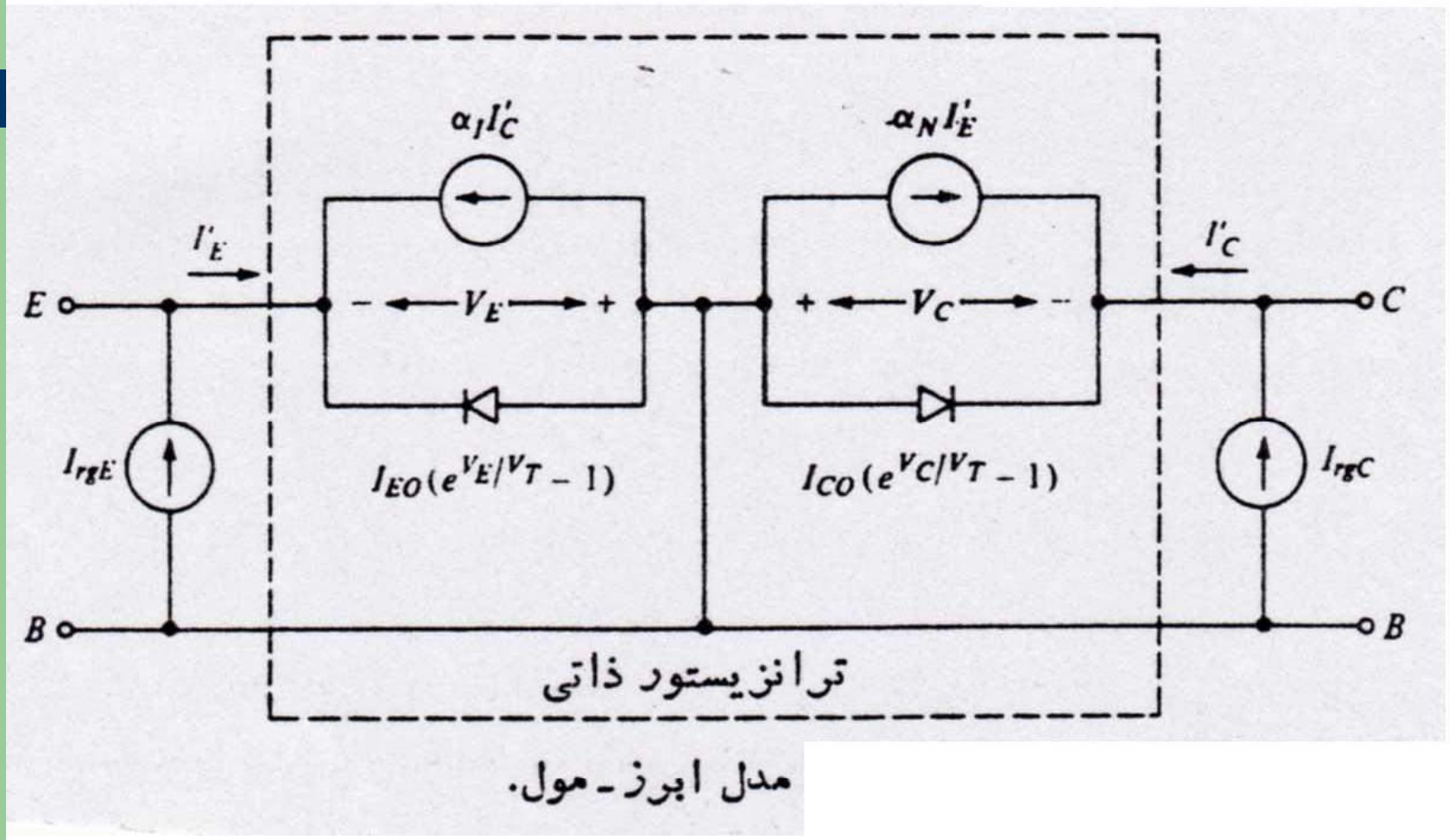
- الکترونهای اضافی واقع در نوار رسانش ممکن است با حفره های نوار ظرفیت بازترکیب شوند.
- وقتی یک فوتون گسیل شود، فرآیند را بازترکیب تابشی می نامند. از طرف دیگر، فقدان گسیل فوتون مبین یک فرایند بازترکیب غیرتابشی است.
- مهمترین فرآیندهای بازترکیب عبارتند از بازترکیبهای مستقیم و غیرمستقیم، که ممکن است بطور همزمان در نیمرسانا رخ دهند.



مدارمعادل، که در آن I_{rg}
از ترانزیستور ذاتی حذف شده‌است.

بازترکیب مستقیم

- آهنگ این گذار متناسب است با الکترونهای موجود در نوار رسانش و تعداد حالات اشغال نشده در نوار ظرفیت
- آهنگ بازترکیب مستقیم $R = Bnp$
- که B یک ضریب احتمال است که ماهیت احتمالی بازترکیب را بیان می‌کند.
- در تعادل، آهنگ بازترکیب باید با آهنگ تولید گرمایی برابری کند. بنابراین، داریم $R = R_{th}$ و $G_{th} = R_{th} = Bn_0p_0$ که شاخص پائین o معرف شرط تعادل گرمایی است.



مدل ابرز ـ مول.

آهنگ بازترکیب وتولید

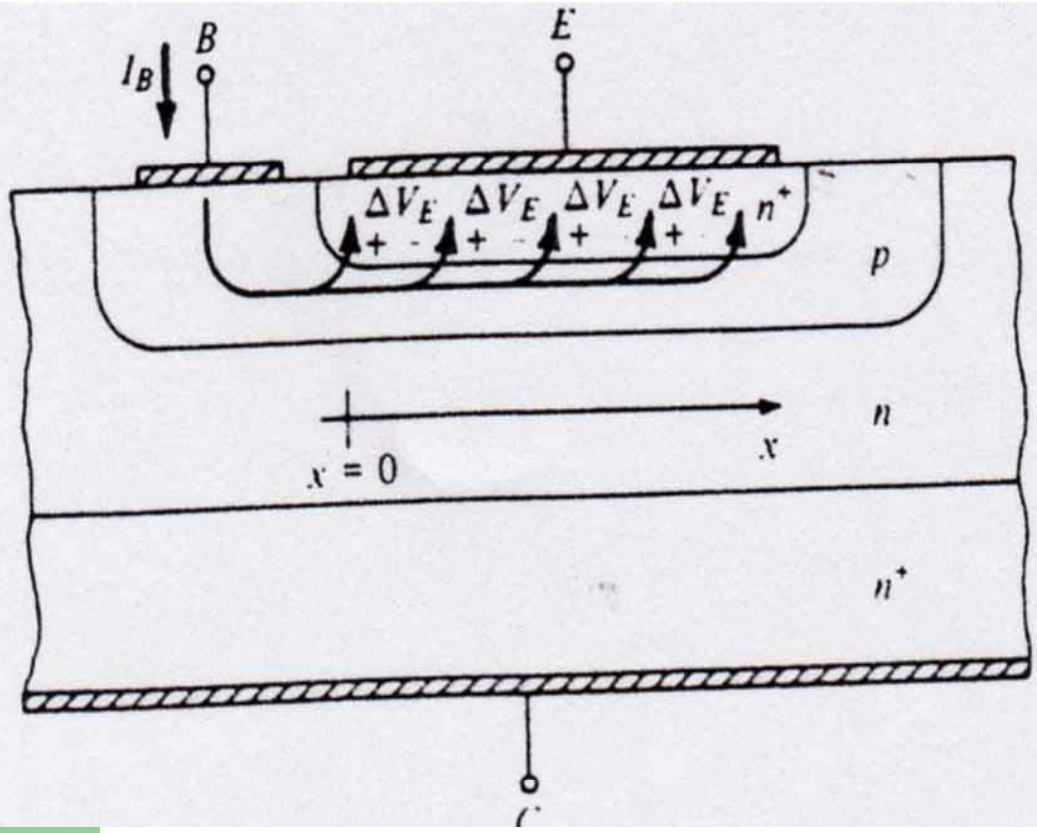
- وقتی یک منبع نور اعمال شود تا زوجهای الکترون- حفره را با آهنگ G_L تولید کند، چگالی حاملها بیشتر از مقادیر تعادلی آنها خواهد بود. آهنگهای بازترکیب و تولید تبدیل شوند به

$$R = Bnp = B\,(n_0 = \Delta n)(p_0 + \Delta p)$$

$$G = G_{th} + G_L$$

- در آنها Δn و Δp چگالیهای بار اضافی اند که چنین تعریف می‌شوند.

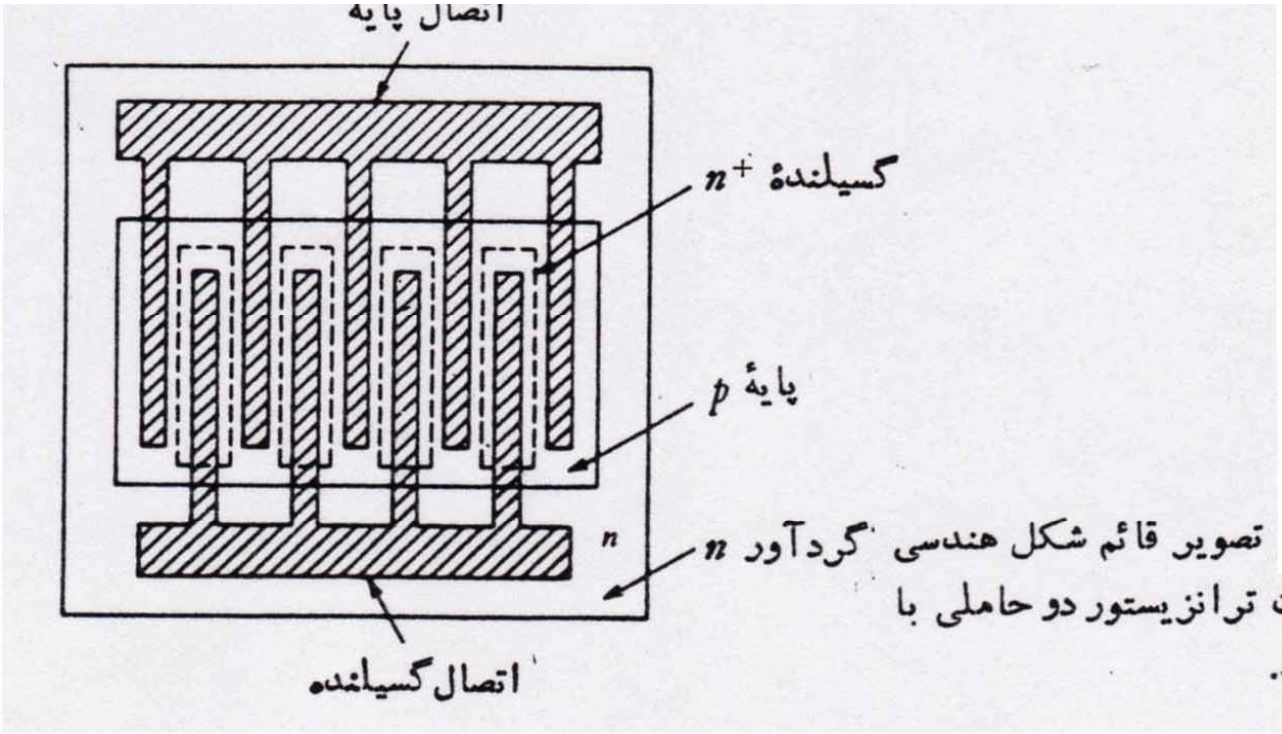
$$\Delta n \equiv n - n_0 \quad \Delta p \equiv p - p_0$$



جریان جانبی پایه و افت اهمی در پایه، که به‌بیشترین پیش‌ولت موافق در $x = 0$ منتهی می‌شود.

حالت پایا

- تحت نوردهی حالت پایا، آهنگهای بیان شده در معادلات باید مساوی باشند. بنابراین داریم.
- $$G_L = R - G_{th} \equiv U$$
- که U آهنگ بازترکیب خالص است. با جایگذاری معادلات در خواهیم داشت:
- $$G_L = B(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) - Bn_0p_0$$
- چون $\Delta n = \Delta p$، بطوریکه خنثی بودن بار فضایی برقرار باشد، معادله را می‌توان چنین بازنویسی کرد.
- $$B\Delta p^2 + B(n_0 + p_0)\Delta p = G_L$$



تصویر قائم شکل هندسی مشبکی یک ترانزیستور دو حاملی با توان متوسط.

طول عمرحاملها

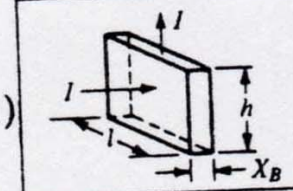
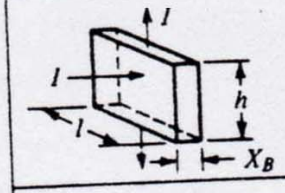
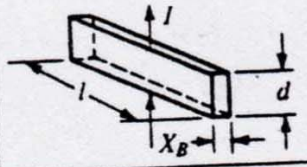
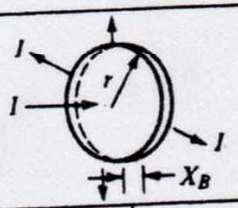
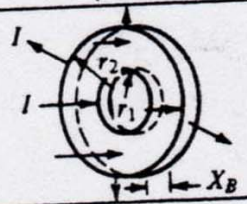
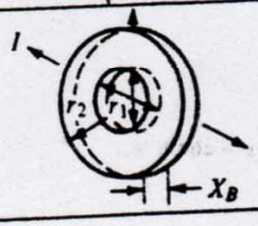
- در تزریق کم، داریم $\Delta p << n_0 + p_0$. در نتیجه، معادله را می‌توان بصورت

$$\Delta p = \frac{G_L}{B(n_o + p_o)} = G_L \tau = U \tau$$

- ساده کرد، که در آن

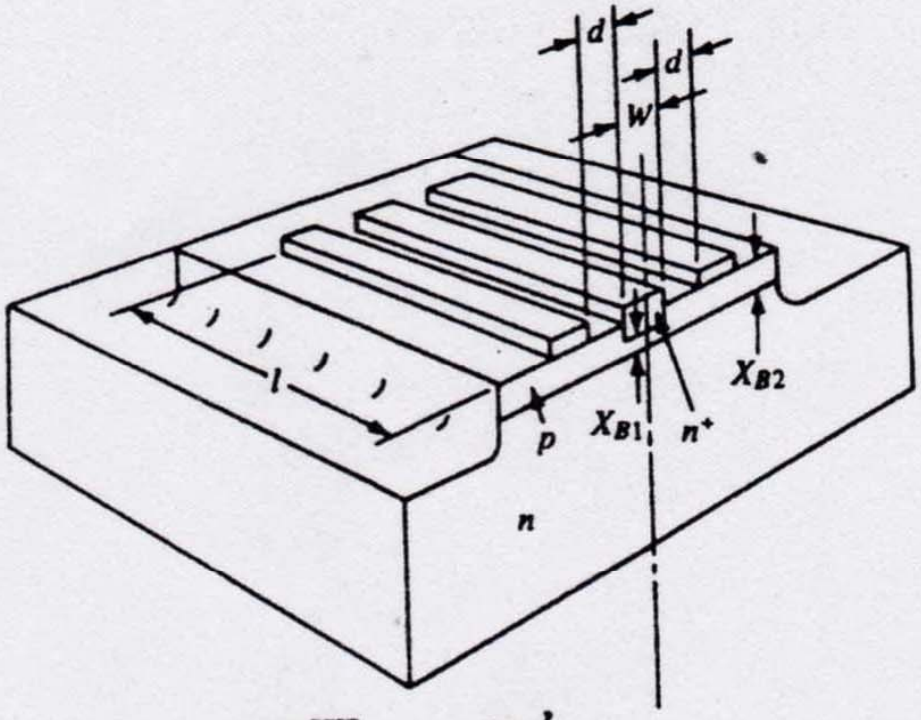
$$\tau \equiv \frac{\Delta p}{U} = \frac{1}{B(n_o + p_o)}$$

- کمیت τ طول عمر حامل حاملهای اضافی نامیده می‌شود.
- τ معرف زمان متوسطی است که یک حفره قبل از بازترکیب با الکترون آزاد باقی می‌ماند.

	شکل هندسی	مقاومت
(الف)		$R = \frac{\rho}{3X_B}\frac{h}{l}$
(ب)		$R = \frac{\rho}{12X_B}\frac{h}{l}$
(ج)		$R = \frac{\rho}{X_B}\frac{d}{l}$
(د)		$R = \frac{\rho}{8\pi X_B}$
(ه)		$R = \frac{\rho}{4\pi X_B}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$
(و)		$R = \frac{\rho}{2\pi X_B}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$

جمعبندی فرمولهای مقاومت برای تعدادی عناصر با شکلهای هندسی متفاوت. این فرمولها را می‌توان در ترکیبهای تقریبی به‌کار برد وعبارتهایی تقریبی برای مقاومت پایهٔ ترانزیستور به‌دست آورد[۵].

- در نیمرسانا با ساختار نوار انرژی مستقیم مثل GaAs، بازترکیب نوار به نوار سازوکار غالب است. انرژی آزاد شده توسّط بازترکیب به شکل فوتون گسیل می‌شود، و فرایند تابشی است.

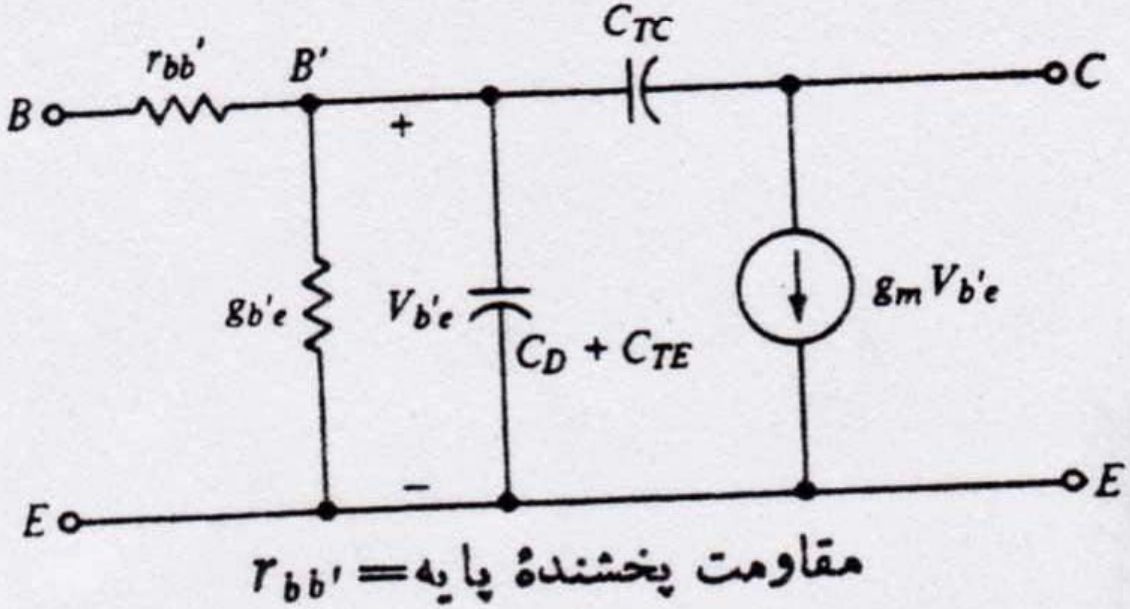


یك عبارت تقریبی برای مقاومت پاشیدگی پایه مربوط به شکل هندسی نواری ترانزیستور [۵].

$$r'_B = \frac{\rho_B W}{12 X_{B1} L} + \frac{\rho_B d}{2 X_{B2} L}$$

بازترکیب غیرمستقیم

- در سیلیسیم یا ژرمانیم، پائینترین انرژی در نوار رسانش با بالاترین انرژی در نوار ظرفیت در فضای تکانه برهم منطبق نمی‌شوند. بنابراین، الکترون واقع در نوار رسانش هنگام گذار به طرف پائین باید تکانه و همچنین انرژی خود را تغییر دهد تا اصول پایستگی را برقرار سازد. در نتیجه، احتمال بازترکیب نوار به نوار مستقیم در سیلیسیم یا ژرمانیم بسیار کم است. در حقیقت، حاملهای واقع در سیلیسیم خیلی آسانتر از طریق مراکز بازترکیب یا تله ها، که در داخل گاف ممنوع قرار گرفته‌اند، بازترکیب می‌شوند. یک مرکز بازترکیبی ممکن است متوالیاً یک حفره و سپس یک الکترون را به دام اندازد تا چرخه بازترکیبی را کامل کند.



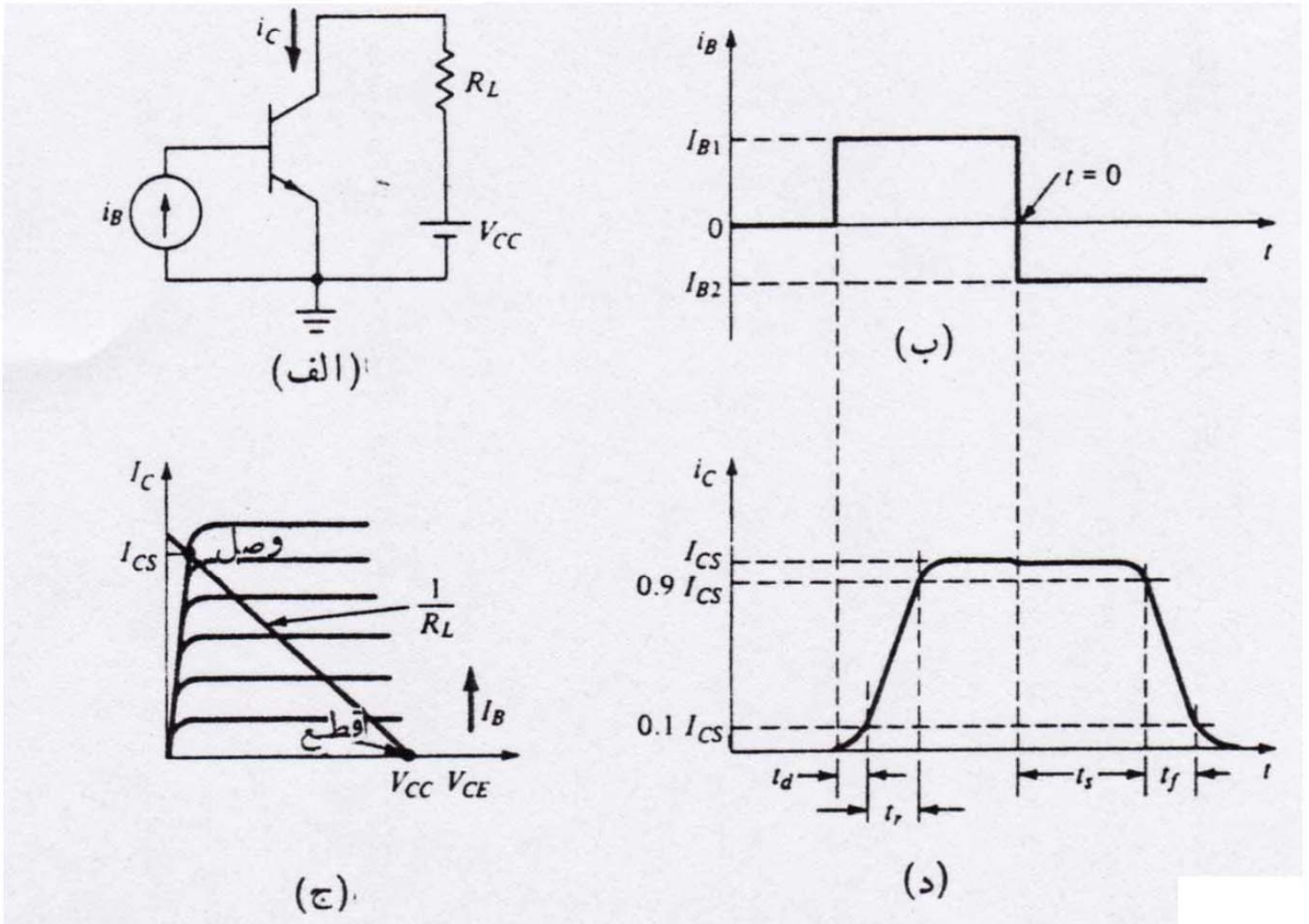
مقاومت پخشندهٔ پایه = $r_{bb'}$

مدارمعادل دورگهٔ pi.

فرایندهای گذار

- چهار فرایند گذار نشان داده شده است:
- (1) الکترون توسّط یک مرکز خالی به دام می‌افتد،
- (2) یک الکترون از مرکز اشغال شده گسیل می‌شود،
- (3) یک مرکز اشغال شده، حفره ای را به دام می اندازد، و
- (4) یک مرکز خالی، یک حفره گسیل می‌کند. چون احتمال اشتغال یک مرکز از تابع فرمی – دیراک که توسّط معادله پیروی می‌کند، داریم:

$$f_t = (e^{(E_t - E_f)/kT} + ۱)^{-۱}$$

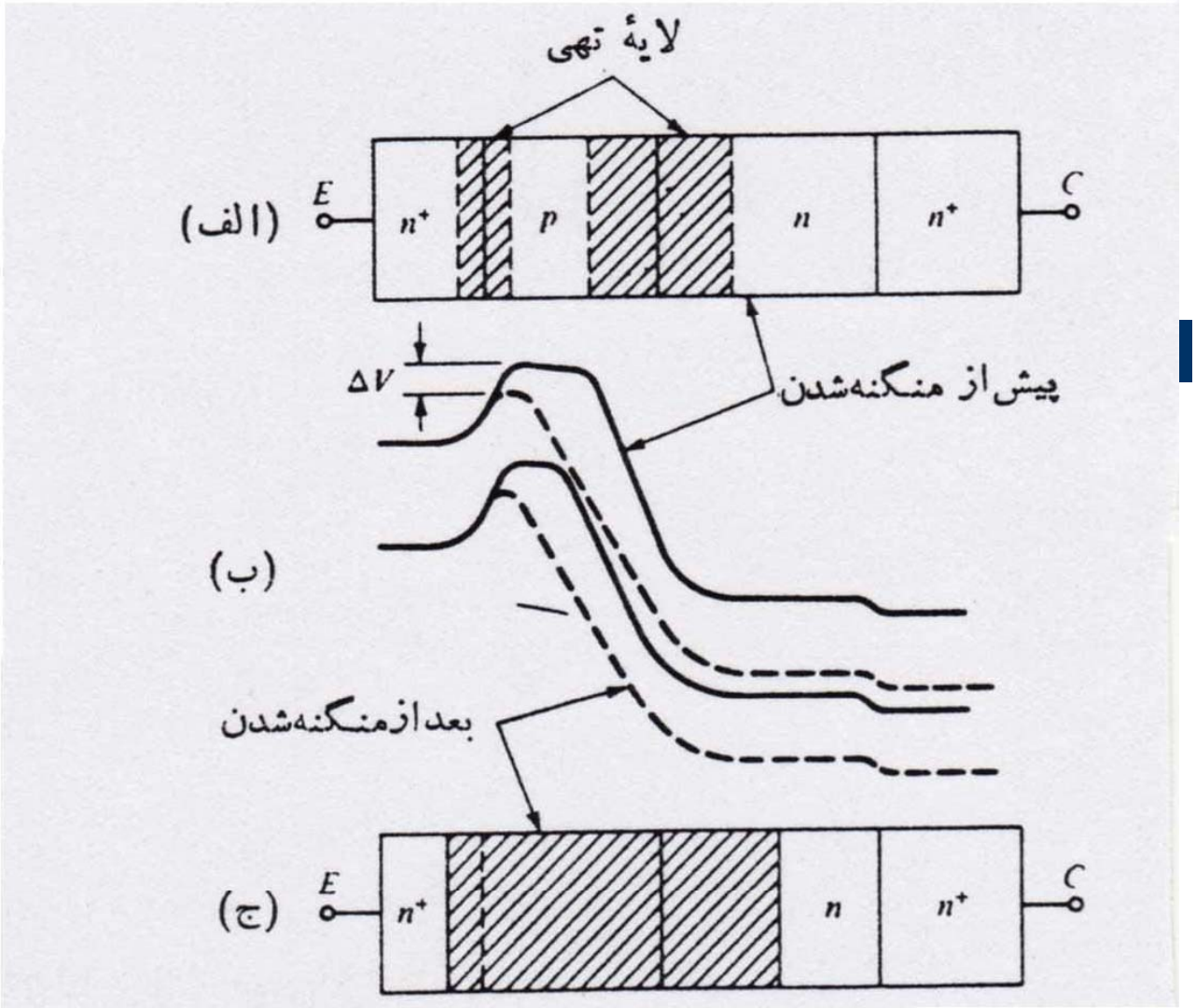


عمل کلیدزنی یك ترانزیستور دوحاملی: (الف) نمودار مدار، (ب) جریان پایه، (ج) مشخصه‌های I-Vی خروجی، و (د) شکل موج جریان خروجی.

آهنگ به دام افتادن

- بنابراین تعداد مراکز اشغال شده مساوی $N_t f_t^0$ و تعداد مراکز خالی مساوی $N_t(1-f_t^0)$ است. شاخص بالا حالت تعادل را مشخص می‌کند.
- با دنبال کردن هماناستدلالی که برای بدست آوردن آهنگ بازترکیب مستقیم بکار بردیم، در می یابیم که آهنگ به دام افتادن الکترون توسّط مرکز خالی بصورت رابطه زیر است.

$$R_1 = c_n n N_t (1 - f_t)$$



منکنه‌شدن یك ترانزیستور n-p-n: (الف) نواحی بارفضایی قبل از منکنه‌شدن، (ب) نمودارهای نوار انرژی، و (ج) نواحی بارفضایی بعداز منکنه‌شدن.

- در آن n چگالی الکترون در نوار رسانش و c_n ضریب به دام افتادن است، که مقدار نوعی آن $10^{-8} cm^3/s$ است.

آهنگ گسیل

- آهنگ گسیل الکترون به نوار رسانش از یک مرکز اشغال شده از رابطه $R_2 = e_n N_t f_t$ داده می‌شود که در آن e_n ضریب گسیل است.

آهنگ به دام افتادن وگسیل حفره

- به کمک قیاس، آهنگ به دام افتادن و گسیل حفره ها توسّط مراکز را می‌توان بصورت زیر تعریف کرد:

$$R_{۳} = c_p p N_t f_t$$

$$R_{۴} = e_p N_t (۱ - f_t)$$

- که c_p و e_p به ترتیب ضرایب به دام افتادن و گسیل حفره هستند.

تعادل گرمایی

- در تعادل گرمایی، تعداد الکترونهای گسیل شده از مراکز باید با تعداد الکترونهای به دام افتاده یکسان باشد، یعنی $R_1 = R_2$. با مساوی قرار دادن معادلات و استفاده از معادله، حاصل می‌شود.

$$c_n n_i e^{(E_f - E_i)/kT} N_t (1 - f_t) = e_n N_t f_t$$

- علاوه بر این چون

$$\frac{1 - f_t}{f_t} = e^{(E_t - E_f)/kT}$$

- داریم

$$e_n = c_n n_i e^{(E_t - E_i)/kT}$$

آهنگ گسیل حفره

- با استفاده از همین روش و معادله ، آهنگ گسیل حفره عبارت است از

$$e_p = c_p n_i e^{(E_i - E_t)/kT}$$

عدم تعادل

- حال مورد عدم تعادل را با اعمال یک منبع انرژی خارجی، مثلا، یک منبع نور، بررسی می‌کنیم، بطوریکه یک آهنگ تولید G_L بطور یکنواخت در سرتاسر نیمرسانا وجود دارد.

حالت پایا

- تحت شرایط حالت پایا، الکترونهایی که در نوار رسانش وارد و از آن خارج می‌شوند باید مساوی باشند. این را اصل موازنه جزء به جزء می نامند، و نتیجه آن این است که

$$G_L = R_1 - R_2$$

موازنه

- به همین ترتیب، موازنه جزء به جزء حفره ها در نوار ظرفیت منجر می‌شود به

$$G_L = R_3 - R_4$$

موازنه جزء به جزء

با مساوی قرار دادن معادلات، داریم

$$R_1 - R_2 = R_3 - R_4$$

$$C_n n N_t (1 - f_t) - e_n N_t f_t = c_p N_t f_t - e_p N_t (1 - F_t)$$

با فرض $c_n = c_p = c$ ، مي توان f_t را از معادله به دست آورد.

$$f_t = \frac{n + n_i e^{(E_i - E_t)/kT}}{n + p + 2n_i \cosh[(E_t - E_i)/kT]}$$

آهنگ بازترکیب خالص

بنابراین، آهنگ باز ترکیب خالص عبارت است از:

$$U \equiv R_1 - R_2 = \frac{cN_t(pn - n_i^2)}{n + p + 2n_i \cosh[(E_t - E_i)/kT]}$$

از معادلة در مي يابيم كه در تعادل، يعني $pn = n_i^2$ ، آهنگ بازترکیب خالص صفر است. این نکته نیز جالب توجه است که آهنگ باز ترکیب بیشینه وقتي رخ ميدهد كه Et=Ei.

کارآمدترین مراکز باز ترکیب

کارآمدترین مراکز بازترکیب، در مرکز یا نزدیك به مرکز گاف ممنوع قرار گرفته اند. جز تراز Ei، سایر مراکز کمتر مؤثر خواهند بود. زیرا احتمال به دام انداختن یك نوع از حاملها بیش از احتمال به دام انداختن یك نوع از حاملها بیش از احتمال به دام انداختن نوع دیگر است.

آهنگ برای بازترکیب کم

وقتي نتايج اخير را بر سيليسيم نوع n با مركزي واقع در Ei اعمال ميكنيم، آهنگ باز تركيب خالص براي تزريق كم $n_n \approx n_{no}$ تبديل ميشود به

$$U = C_p N_t \frac{P_n n_n - n_i^2}{n_n + p_n + 2n_i} \approx c_p N_t (p_n - p_{no})$$

بنابراین، آهنگ باز ترکیب خالص عبارت است از:

$$U \equiv R_1 - R_2 = \frac{cN_t(pn - n_i^2)}{n + p + 2n_i \cosh[(E_t - E_i)/kT]}$$

از معادلة در مي يابيم كه در تعادل، يعني $pn = n_i^2$ ، آهنگ بازترکیب خالص صفر است.

آهنگ بیشینه

آهنگ باز ترکیب بیشینه وقتي رخ میدهد که Et=Ei. به عبارت دیگر، کارآمدترین مراکز بازترکیب، در مرکز یا نزدیك به مرکز گاف ممنوع قرار گرفته اند. جز تراز Ei، سایر مراکز کمتر مؤثر خواهند بود. زیرا احتمال به دام انداختن یك نوع از حاملها بیش از احتمال به دام انداختن یك نوع از حاملها بیش از احتمال به دام انداختن نوع دیگر است.

طول عمرحفره

- با استفاده از

$$n_n = n_{no} >> p_n + 2n_i \quad \text{و} \quad n_i^2 = n_{no}\, p_{no}$$

نيم رساني نوع n

$$\tau_p = \frac{1}{c_p N_t}$$

طول عمرالکترون

- طول عمر حامل اقليتي

طول عمر حامل اقليتي در
نيمرساناي نوع p از رابطة

$$\tau_n = \frac{1}{c_n N_t}$$

4-2- پاسخ باز ترکیب گذرا

معني فيزيكي طول عمر حامل به بهترين وجهي توسط پاسخ گذرا بعد از قطع ناگهاني منبع نور نمايش داده ميشود.

معادلة عمومي كه آهنگ تغيير حاملهاي اضافي.

$$d\frac{\Delta p}{dt} = G_L - U \qquad d\frac{\Delta p}{dt} = G_L - \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

تراكم حامل اضافي حالت پايا در t<<0 عبارت است از $\Delta p = G_L \tau_p$

آزمایش فوتورسانندگی

$$\Delta p = G_L \tau_p e^{-t/\tau_p}$$

$$\sigma = q[\mu_n n(t) + \mu_p p(t)]$$

$$n(t) = n_\circ + \Delta n(t),\ p(t) = p_\circ + \Delta p(t),\ \Delta n = \Delta p$$

$$\sigma(t) = \sigma_\circ + q(\mu_n + \mu_p)\Delta p(t)$$

$$\sigma_\circ = q(\mu_n n_\circ + \mu_p n_\circ)$$

بسامد نوسان نما

در مدار مربوط به آزمايش، ولتاژي كه توسط نوسان نما اندازه گرفته مي شود، عبارت است از

$$v = \frac{R_s V}{R + R_s} \approx \frac{R_s V}{R} \ , \ R >> R_s$$

$$R = L / \sigma A$$

با استفاده از

$$v = \frac{\sigma \ R_s V}{L}$$

بازترکيب سطحي

حضور ناپيوستگي در ساختار شبکه در سطح نيمرسانا، تعداد زيادي حالتهاي انرژي را در گاف ممنوع توليد مي کند. اين حالتهاي انرژي، که حالتهاي سطحي ناميده مي شوند، آهنگ بازترکيب را در ناحيه سطح به شدت زياد مي کند.

بازترکیب سطحی

آهنگ باز ترکیب سطحي در واحد سطحي

$$U_s = c\,N_{ts}\,[p_n(\circ) - p_{no}]$$

که pn(0) عبارت است از چگالي حامل اقليتي سطحي متوسط و N_{ts} عبارت است از چگالي مراکز بازترکیب متوسط بر واحد سطح در لاية سطحي.

چون حاصلضرب cN_{ts} داراي بعد سانتي متر بر ثانيه است، آن را سرعت بازترکیب سطحي S مي نامند.

$$U_s = S\,[p_n(\circ) - p_{no}]$$

$$-q\,D_p \left.\frac{d\,p_n}{d\,x}\right|_{x=\circ} = qU_s = q\,S\,[p_n(\circ) - p_{no}]$$

ميدان وپتانسيل هاى الكتريكى

ميدان الكتريكي ε به صورت شيب منفي پتانسيل V تعريف مي شود.

$$\varepsilon = -\frac{dV}{dx}$$

$$-qV = E$$

مي توانيم ميدان الكتريكي را چنين بيان كنيم

$$\varepsilon = \frac{1}{q}\frac{dE_i}{dx} = -\frac{d\psi}{dx}$$

$$\psi = -\frac{E_i}{q}$$

پتانسیل فرمی

نماد ψ پتانسيل الكتروستاتيكي ، پتانسيل فرمي

$$\varphi \equiv -\frac{E_f}{q}$$

$$n = n_i e^{(\psi-\varphi)/V_T}$$

$$p = n_i e^{(\psi-\varphi)/V_T}$$

رابطه اینشتین

$$V_T \equiv \frac{kT}{q}$$

در 300 k، مقدار V_T برابر 8/25 mV است.

تعادل گرمایی

در تعادل گرمايي، پتانسيل فرمي ثابت است، و ميتوان آن را به عنوان مرجع صفر كرد. بنابراين،

$$p = n_i e^{-\psi / V_T}$$

$$I_p = q A(\mu_p p \varepsilon - D_p \frac{d p}{d x}) = \circ$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = V_T = \frac{k T}{q}$$

نيمرسانای ناهمگن

توزيع ناخالصي ناهمگن، به يك ميدان الكتريكي داخلي منتهي مي شود.
يك قرص سيليسيم از نوع n با توزيع ناخالصي نمايش يافته را در نظر بگيريد.
با فرض اينكه اتمهاي ناخالصي يونيده اند، چگالي الكترون n الف) برابر
$N_d(x)$ است.

$$E_i = E_f - kT \ln \frac{N_d(x)}{n_i}$$

انرژی قرص ناهمگن

- به ازاي $N_d=n_i$ داريم: E_i-E_f. به ازاي مقادير $N_d>n_i$، انرژي E_iي وسط گاف زير E_f است و تفاضل E_f-E_i با افزايش N_d زياد مي شود.

پتانسیل و میدان

$$\psi = V_T \ln \frac{N_d(x)}{n_i}$$

$$\varepsilon = -\frac{V_T}{N_d} \frac{d N_d}{d x}$$

ترازهای فرمی وار

تحت شرايط عدم تعادل، مي توان دو كميت E_{fn} و E_{fR} را براي جانشيني تراز فرمي معرفي كرد.

مثال. ترازهاي فرمي وار در 300 K (دماي اتاق) را براي نيمرسانايي با

$$G_L = 10^{18} cm^{-3} s^{-1}, n_i = 10^{10} cm^{-3}, \tau_n = 10 \mu s \ , N_a = 10^{16} cm^{-3}$$

حل:

$$\Delta n = \Delta p = \tau_n G_L = 10^{13} cm^{-3}$$

بنابراين:

$$p = p_\circ + \Delta p = N_a + \Delta p \approx 10^{16} cm^{-3}$$

$$n = n_\circ + \Delta n = \frac{n_i^2}{N_a} + \Delta n = 10^4 + 10^{13} \approx 10^{13} cm^{-3}$$

ادامه مثال

در 300 K داريم kT =26 meV،

$$E_{fn} - E_i = kT \ln \frac{n}{n_i} = 0/026 \ln \frac{10^{13}}{10^{10}} = 0/18 eV$$

تراز فرمي وار براي حفره ها

$$E_i - E_{fp} = 0/026 \ln \frac{10^{16}}{10^{10}} = 0/36 eV$$

حاصلضرب p_n در وضعيت عدم تعادل

$$pn = n_i^2 \exp \frac{\varphi_p - \varphi_n}{V_T}$$

در حالت تعادل، $\varphi_n = \varphi_p = \varphi$, $pn = n_i^2$. با افزايش تزريق، تفاضل E_{fn}-E_i افزايش مي يابد. بنابراين، E_{fn} از E_i دور مي شود به طرف E_c مي رود.

چگالی جریان

$$\frac{dn}{dx} = \frac{n}{V_T}\left(\frac{d\psi}{dx} - \frac{d\varphi_n}{dx}\right)$$

$$J_n = \frac{I_n}{A} = -q\mu_n \frac{d\varphi_n}{dx} = -\sigma(x)\frac{d\varphi_n}{dx}$$

$$J_P = \frac{I_P}{A} = -q\mu_P \frac{d\varphi_P}{dx} = -\sigma(x)\frac{d\varphi_P}{dx}$$

که J_n و J_p به ترتیب چگالي جریان الکترون و حفر اند، اینها قوانین اصلاح شدة اهم هستند.

معادلات حاكم برنيمرسانا

پيوستگي شارش حاملها مستلزم اين است كه آهنگ تغيير تعداد حفره ها در Δx مساوي با حفره هاي بازتركيبي به علاوة حفره هاي ترك كنندة نمود باشد.
شارش خالصي حفره به خارج از نمو عبارت است از :

$$\frac{J_p(x+\Delta x)}{q} - \frac{J_p(x)}{q} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x}\Delta x$$

$$U\,\Delta x = \frac{p - p_\circ}{\tau_p}\Delta x$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t}\Delta x$$

معادله پیوستگی

$$\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} + \frac{p - p_\circ}{\tau_p} = -\frac{\partial p}{\partial t}$$

پیوستگي جريان الكترون

$$-\frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} + \frac{n - n_\circ}{\tau_n} = -\frac{\partial n}{\partial t}$$

$$J_p = \frac{I_p}{A} = q(\mu_p p \varepsilon - D_p \frac{d p}{d x})$$

$$J_n = \frac{I_n}{A} = q(\mu_n n \varepsilon - D_n \frac{d n}{d x})$$

جواب عمومی

توزيع حامل اقليتي حالت پايا در يك تراشة همگن نيمه نامتناهي از نيمرساناي نوع n را مشروط بر اينكه يك چگالي $p_n(0)$-P_{no} توليد شده باشد،

در نيمرساناي همگن، $\varepsilon = 0$

$$J_p = -q D_p \frac{d\, p_n}{d\, x}$$

$$D_p \frac{d^2 p_n}{d\, x^2} - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} = \circ$$

جواب عمومي

$$p_n - p_{no} = A e^{x/I_p} + B e^{-x/L_p}$$

طول پخش

که در آن $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ ، و به طور پخش حفره هاي معروف است.

چون به ازاي $x = \infty$ هيچ حامل اضافي توليد نمي شود،

در $x = \infty$ يا $A = 0$ ، $p_n - p_{no} = 0$

$p_n(0)$-P_{no} حاصل مي شود $Bp_n(0)$-P_{no}.

$$p_n = p_{no} + [p_n(0) - p_{no}]e^{-x/L_p}$$

اثر بار فضایی

نيمرسانا به صورت يك كل، خنثي است.

مي توان با استفاده از معادلة پواسون نواحي باردار را توصيف و رابطة آنها با ميدان الكتريكي را پيدا كرد

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\rho}{K\varepsilon_{\circ}}$$

$$\varepsilon = \int \frac{\rho\, dx}{K\varepsilon_{\circ}}$$

بارخالص فضايي

بار خالص فضايي در نيمرسانا عبارت است از مجموع بارهاي مثبت منهاي مجموع بارهاي منفي.

بار خالص فضايي

$$\rho = q[p + N_d - (n + N_a)]$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{q}{K\varepsilon_\circ}[(n-p)+(N_a - N_d)]$$

پيوندگاه p-n

مرز متالورژيكي بين يك ناحيه p و يك ناحيه n را پيوندگاه p-n مي نامند. روش تشكيل يك پيوندگاه p-n، عبارت از پخش ناخالصي است، توزيع ناخالصي حاصل يا به تابع خطاي مكمل نزديك است و يا به تابع گاوسي. در عمل، پيوند p-n پخشي را معمولاً با يك پيوندگاه پله اي با يك پيوندگاه شيبدار خطي تقريب مي زنند.

پيوند در تعادل

تراز فرمي در مادة نوع n نزديك به لبة نوار رسانش، و در مادة نوع p نزديك به لبة نوار ظرفيت است. وقتي اين مواد به هم متصل مي شوند، تراز فرمي در وضعيت تعادل بايد ثابت باشد. در غير اين صورت، يك شارش جريان وجود خواهد داشت.

شرط ثابت بودن ترازفرمی

- شرط ثابت بودن تراز فرمي اين است كه الكترونها از طرف n به طرف p، و حفره هاي در جهت مقابل انتقال يابند.

معادله پواسون

رابطة بين توزيع بار و پتانسيل الكتروستاتيكي توسط معادلة پواسون داده مي شود.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{K\varepsilon_\circ} = \frac{q}{K\varepsilon_\circ}[(n-p)-(N_d-N_a)]$$

با انتخاب پتانسيل فرمي به عنوان مرجع صفر مي توان آنها را به صورت زير نوشت

$$n = n_i e^{\psi/V_T}$$

نواحی

$$p = n_i e^{-\psi / V_T}$$

معادلات را مي توان در نواحي گوناگون پيوندگاه p-n به كار برد. اين نواحي عبارتند از

1) نواحي خنثاي دور از پيوندگاه
2) ناحية تهي، جايي كه بارهاي ثابت وجود دارند ليكن حاملهاي آزاد وجود ندارند، و
3) لايه هاي مرزي بين نواحي خنثي و تهي.

ناحيه خنثی

در نواحي خنثي، چگالي بار فضايي كل صفر است.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = 0$$

$$n - p - N_d + N_a = 0$$

براي ناحيه خنثاي نوع n، $N_0=0$ ، $p<<n$.

$N_0=p=0$.

$$\psi_n = V_T \ln \frac{N_d}{n_i}$$

ناحيه خنثی p

براي ناحيه خنثاي نوع p، پتانسيل ناحية خنثاي نوع p

$$\psi_p = -V_T \ln \frac{N_a}{n_i}$$

اختلاف پتانسيل بين نواحي خنثاي طرف n و طرف p

$$\psi_o = \psi_n - \psi_p = V_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

ψ_o به پتانسيل داخلي يا پتانسيل پخشي معروف است. به شرط تعادل گرمايي در يك پيوندگاه p-n وجود دارد.

ناحيه تهی

براي ناحية كاملاً تهي شده، چگالي حاملهاي آزاد صفر (n=p=0)

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{q}{K\varepsilon_\circ}(N_a - N_d)$$

در لايه هاي مرزي
عرض لاية مرزي تقريباً 3 برابر طول مشخصه اي معروف به طول دبي غيرذاتي L_D است.

$$L_D = \left(\frac{K\varepsilon_\circ V_T}{q|N_d - N_a|}\right)^{1/2}$$

LD مقياسي براي تيزي لبة ناحية تهي است.

تقريب ناحيه تهی

با چشمپوشي از لايه هاي مرزي، ناحيه بار فضايي يك پيوندگاه پله اي را مي توان به خوبي توسط توزيع نوع جعبه اي نمايش يافته نشان داد. در اين ناحيه، حاملهاي آزاد را مي توان ناديده گرفت، به طوري كه معادلة پواسون براي طرف n و طرفp به شكل سادة زير در مي آيد.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \begin{cases} -\frac{qN_d}{K\varepsilon_\circ}, & \circ < x < x_n \quad \text{به ازاي} \\ -\frac{qN_a}{K\varepsilon_\circ}, & -x_p < x < \circ \quad \text{به ازاي} \end{cases}$$

عرض لايه بارفضايی

خنثايي بار فضايي براي نيمرسانا، به عنوان يك كل، مستلزم اين است كه بارها در دو طرف پيوندگاه مساوي باشند. لذا

$$N_a x_p = N_d x_n$$

X_p و x_n، به ترتيب عرض لاية تهي در طرف p و طرف n است. عرض لاية بار فضايي كل از رابطة

$$W = x_p + x_n$$

پیوندپله ای یکطرفه

پیوندگاه پله اي يكطرفه، تقريبي عالي براي پيوندگاه پخشي با عمق كم است.
مثلاً اگر $N_a>>N_d$ ، داريم $x_n>x_p$ و $w\sim x_n$.
آن است كه لاية بار فضايي در طرفي كه آلايش زياد است، قابل چشمپوشي است.
مي توان تنها با حل معادلة پواسون در طرفي كه آلايش كم است

$$\frac{d\psi}{dx} = -\frac{qN_d}{K\varepsilon_\circ}(x - x_n)$$

ميدان بيشينه

به ازاي $x=x_n$، داريم $d\psi / dx = 0$

چون $\varepsilon = -d\psi / dx$

$$\varepsilon = \varepsilon_m \left(1 - \frac{x}{x_n}\right)$$

$$\varepsilon_m = \frac{-q\, N_d\, x_n}{k\, \varepsilon_o}$$

ε_m ميدان الكتريكي بيشينه

$$\psi = \frac{-q\, N_d\, x_n^2}{2\, k\, \varepsilon_o} \left(1 - \frac{x}{x_n}\right)^2$$

عرض لايه تهی

که شرط مرزي $\psi = \circ$ در $x=x_n$ به کار رفته است.

$$\psi_o = |\psi(\circ)| = \frac{-q N_d x_n^2}{2 k \varepsilon_o}$$

ψ_o پتانسيل داخلي است زيرا مساوي اختلاف پتانسيل بين xn و 0 است.

عرضه لايه تهي

$$W = x_n = \left(\frac{2 K \varepsilon_\circ \psi_\circ}{q N_d} \right)^{1/2}$$

مثال

مثال. يك ديود p-n سيليسيمي از نوع پيوندگاه پله اي ، به ترتيب، با $N_d=10^{16}cm^{-3}$ و $N_a=4*10^{18}$ در طرف n و طرف p آلاييده شده است. پتانسيل داخلي، عرض لاية تهي، و ميدان بيشينه را در پيش ولت صفر و دماي اتاق محاسبه كنيد.

$$\psi_o = 0/026 \ln \frac{4\times10^{18}\times10^{16}}{2/25\times10^{20}} = 0/83V$$

$$W = x_n = \left(\frac{2K\varepsilon_\circ\psi_\circ}{qN_d}\right)^{1/2} = 3/25\times10^{-5}cm$$

$$\varepsilon_m = \frac{-qN_d x_n}{k\varepsilon_o} = -5\times10^4 V/cm$$

پيوند شيبدار خطی

در يك پيوندگاه شيبدار خطي، توزيع بار فضايي در لاية تهي از رابطه

$$N_d - N_a = ax$$

a شيب تراكم ناخالصي است. معادلة پواسون

$$\frac{d^2\psi}{d\,x^2} = -\frac{q}{K\,\varepsilon_\circ}\,ax$$

عرض درهنگام تعادل

عرض لاية تهي و ولتاژ داخلي به هنگام تعادل عبارتند از

$$W = \left(\frac{12 K \varepsilon_{\circ} \psi_{\circ}}{q a} \right)^{1/3}$$

$$\psi_{\circ} = 2 V_T \ln \frac{a W}{2 n_i}$$

پیش ولت دادن به پیوندگاه

وقتي يك منبع ولتاژ خارجي به دو سر پيوندگاه p-n وصل شود، تعادل گرمايي آشفته مي شود و جرياني در نيمرسانا به راه ميافتد.

اگر يك ولتاژ مثبت V در طرفp نسبت به طرف n اعمال كنيم، ارتفاع سد پتانسيل در پيوندگاه p-n، به $\psi_\circ - V$ كاهش مييابد.

اين قطبيت ولتاژ در جهت پيش ولت موافق، p-n به دست مي دهد.

اتصال پيش ولت مخالف

اگر ولتاژ منفي VR– به طرف p نسبت به طرف n اعمال شود، ارتفاع سد پتانسيل به ..... افزايش مي يابد. سد پتانسيل افزايش يافته مانع انتقال حاملها از ميان پيوندگاه مي شود. شارش جريان از ميان پيوندگاه فوق العاده كم، و مقاومت ظاهري پيوندگاه بسيار زياد خواهد بود.

پيش ولت مخالف

عرض لاية تهي براي پيوندگاه پله اي به

$$W = \left[\frac{2 K \varepsilon_{\circ} (\psi_{\circ} + V_R)}{q N_d} \right]^{1/3}$$

و براي پيوندگاه شيبدار خطي

$$W = \left[\frac{12 K \varepsilon_{\circ} (\psi_{\circ} + V_R)}{q a} \right]^{1/2}$$

تراکم حاملهای اقلیتی در مرز پیوندگاه

n_{no} و n_{po} به ترتیب عبارتند از چگالیهای تعادلی الکترون در طرف n و در طرف p.

$$\psi_{\circ} = V_T \ln \frac{p_{po} n_{no}}{n_i^{۲}} = V_T \ln \frac{n_{no}}{n_{po}}$$

$$n_{no} = n_{po} e^{\psi o / V_T}$$

به همین ترتیب، داریم

$$p_{po} = n_{no} e^{\psi o / V_T}$$

تراکم حاملها

با اعمال پیش ولت موافق V، پتانسیل پیوندگاه ψ_0-V کاهش می‌یابد.

$$n_n = n_p e^{(\psi_o / V)V_T}$$

n_n و n_p چگالیهای الکترون در لبه لایه بار فضایی برای تزریقهای کم، چگالی الکترون تزریق شده در طرف n در مقایسه با n_{no} کوچک است. $n_n = n_{no}$

$$n_p = n_{po} e^{V / V_T}$$

بهمین ترتیب داریم

$$P_n = P_{no} e^{V / V_T}$$

اثر بار فضایی و تقریب پخش

- رفتار حاملها را در طرف خنثای n، وقتی به آن حفره تزریق
- یک میدان آنی توسّط بار مثبت ناشی از حفره های اضافی تزریق شده برقرار
- ناحیه با بار اضافی، میدان کوچکی وجود دارد.
- حاملهای اکثریتی را شکل می‌دهد تا خنثی بودن بار فضایی را برقرار کنند در حالی که حاملهای اقلیتی به سختی تحت تأثیر این میدان قرار می‌گیرند.

تقریب پخش

- در ناحیه ای که حاملها به آن تزریق شده‌اند، شرط خنثایی بار فضایی برقرار است. حاملهای اقلیتی، که خنثی شده‌اند، غیربار‌دار هستند، و بر اثر پخش در ناحیه خنثی انتقال می یابند. این پدیده به تقریب پخش معروف است.

E = 0

$$I_p = -qAD_P \frac{dp_n}{dx}$$

معادلات

و معادله پیوستگی حفره

$$\frac{\partial P_n}{\partial t} = D_P \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p}$$

معادله پخش برای حفره هاست.

جریان الکترون و معادلات پخش در طرف pی پیوندگاه عبارتند از

$$I_n = qAD_n \frac{dn_p}{dx}$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n}$$

دیود کوتاه

در برخی از دیودها، طول طرف کم آلاییده تر، W_n ، ممکن است در حدود طول پخش باشد. این دیود را دیود کوتاه می نامیم.

جریان حامل اقلیتی در انتهای دورتر طرف n دیود پیوندی p^+-n توسّط

$$I_p /_{x-w_n} = qS\Delta_{p_n} A$$

S سرعت بازترکیب سطحی

جریان بازترکیب

پیش ولت موافق، تراکم حاملها را در لبه های لایه بار فضایی افزایش می‌دهد، $pn>n_i^2$.

در لایه بار فضایی پیوندگاه انتظار بازترکیب وجود دارد. جریان بازترکیب توسّط

$$I_{rec} = qA\int_{\cdot}^{W} U dx$$

تعریف می‌شود.

بازترکیب حداکثر وقتی رخ می‌دهد که n = p

جریان تونلی

- وقتی طرف p و طرف n هردو به میزان زیادی با ناخالصیها آلاینده شوند، برخی از حاملها ممکن است به داخل سد پتانسیل نفوذ و یک جریان اضافی تولید کنند. (1) تراز فرمی در داخل نوار رسانش یا نوار ظرفیت قرار گرفته باشد؛ (2) عرض لایه بار فضایی چندان باریک باشد که احتمال تونل زنی زیاد باشد، و (3) در یک تراز انرژی، الکترونهایی در نوار رسانش نوع n و حالات خالیی در نوار ظرفیت نوع p وجود داشته باشند.

وابستگی مشخّصات I-V به دما

$$\left.\frac{DV}{DT}\right|_{I=const.} = \frac{V}{T} - V_T\left(\frac{1}{I_0}\frac{dI_0}{dT}\right)$$

و

$$\left.\frac{DI}{DT}\right|_{V=const.} = I\left(\frac{1}{I_0}\frac{dI_0}{dT} - \frac{V}{TV_T}\right)$$

جریان اشباع

$$I_0 = qAn_i^2\left(\frac{D_p}{L_pN_d} + \frac{D_n}{L_nN_a}\right)$$

پارامترهای داخل پرانتز به تغییر دما نسبتاً غیرحساس اند.

$$I_0 \propto n_i^2 \propto T^2 e^{-E_{go}/kT}$$

وابستگی دمایی شدت جریان

$$\frac{I}{I_{\cdot}}\frac{dI_{\cdot}}{dT}=\frac{۳}{T}+\frac{E_E}{kT^{۲}}\approx\frac{E_{go}}{kT^{۲}}$$

جمله 3/T قابل اغماض است.

$$\frac{dV}{dT}=\frac{qV-E_{go}}{qT}$$

$$\frac{۱dI}{IdT}=\frac{E_{go}-qV}{kT^{۲}}$$

ظرفیت پخشی

برای یک پیوندگاه p^+-n، $i_p(0) = i$ و $I_p(0) = I$. لذا، رسانش ظاهری (گذرایی) دیود به

$$y = \frac{i_p(0)}{v_a} = \frac{I}{V_T}\sqrt{1 + j\omega\tau_p} \approx \frac{1}{V_T} + j\frac{\omega\tau_p I}{2V_T}$$

با بکار بردن $1 >> \omega\tau_p$

ظرفیت پخشی

$$\frac{1dI}{IdT} = \frac{E_{go} - qV}{kT^2}$$

ظرفیت گذار، نمایه سازی ناخالصی، و دیود ظرفیت متغیر (و راکتور)

$$Q = qAN_dW = A\sqrt{۲qK\varepsilon_۰(\psi_۰ + V_R)N_d}$$

ظرفیت و سیگنال کم دامنه لایه بار فضایی

$$C \equiv \frac{dQ}{dV_R}$$

$$C = A\left[\frac{qK\varepsilon_۰N_d}{۲(V_R + \psi_۰)}\right]^{۱/۲}$$

C را ظرفیت گذار یا ظرفیت لایه تهی می نامند.

$$\frac{۱}{C^۲} = \frac{۲}{qK\varepsilon_۰N_dA^۲}(V_R + \psi_۰)$$

تراکم ناخالصی

در یک پیوندگاه p-n با نمایه ناخالصی نامعلوم، می‌توان با استفاده از منحنی ظرفیت – ولتاژ، توزیع ناخالصی را در طرفی که آلایش آن کمتر است پیدا کرد.

$$dQ = qAN(W)dW$$

N(W) تراکم ناخالصی در لبه لایه بار فضایی W است.

$$D\mathcal{E} = \frac{dV}{W} \qquad D\mathcal{E} = \frac{dQ}{K\varepsilon_{\cdot}A}$$

$$\frac{dQ}{dV} = \frac{AK\varepsilon_{\cdot}}{W} \equiv C$$

$$N(W) = \frac{۲}{qK\varepsilon_{\cdot}A^{۲}} \frac{۱}{d(۱/C^{۲})/dV}$$

مثال

مثال. یک پیوندگاه p-n را که توسّط پخش دومرحله ای به داخل یک نمونه $N_d = ۲\times ۱۰^{۱۵} cm^{-۳}$ تراکم سطحی بور $۱۰^{۱۸} cm^{-۳}$ ، و عمق پیوندگاه 5 μm است. پتانسیل داخلی 8/0 V است؛ ظرفیت پیوندگاه را در پیش ولت مخالف 5 V بدست آورید.

حل: $N_{BC} = ۲\times ۱۰^{۱۵} cm^{-۳}$ و $N_o = ۱۰^{۱۸} cm^{-۳}$ $N_{BC} / N_o = ۲\times ۱۰^{-۳}$

$$\frac{\psi_. + V_R}{N_{BC}} = \frac{۵/۸}{۲\times ۱۰^{۱۵}} = ۲/۹\times ۱۰^{-۱۵}$$

حال $C = ۴\times ۱۰^{۳}\ pF / cm^{۲}$

دیود ظرفیت متغیر

ظرفیت یک پیوندگاه p-n با پیش ولت مخالف، برای مدارهای کوک شونده LC که در آنها بسامد تشدید توسّط یک ولتاژ خارجی کنترل می‌شود مفید است. به دیود ظرفیت متغیر معروف است.

$$C = C_{\cdot}(V_R + \psi_{\cdot})^{-n}$$

آن V_R ولتاژ معکوس است.

بسامد تشدید

برای پیوندگاه پله ای یکطرفه n = 2/1. بسامد تشدید یک مدار LCای

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{(V_R + \psi_.)^{n/2}}{\sqrt{LC_.}}$$

n = 2 خصوصیت ویژه در دیود «ظرفیت متغیر» فوق آنی بدست می‌آید.

انباشت بار و گذار معکوس: دیود بازیافت پله ای

با یک پیش ولت موافق ثابت، حاملها به دیود پیوندی p-n تزریق و در آنجا انبار می‌شود. انباشت بار موقتی حاملهای اقلیتی را بازیافت معکوس گذارمی نامند.

معادله کنترل بار

بار انباشته کل در طرف n را چنین تعریف می‌کنیم.

$$Q_s = qA\int_{.}^{W_R} \Delta p_n dx$$

که W_n ضخامت طرف n از پیوندگاه تا محل اتصال اهمی

$$I_p(\cdot) - I_P(W_n) = \frac{dQ_s}{dt} + \frac{Q_s}{\tau_p}$$

این معادله را معادله کنترل بار می نامند.

بار انباشته

در یک دیود طویل $I_p(W_n)$ صفر است. جریان پیش رو حالت پایای دیود با قرار دادن $dQ_s/dt = 0$ بدست می‌آید.

$$I_f = I_p(\cdot) = \frac{Q_{sf}}{\tau_p}$$

Q_{sf} بار انباشته در حالت پایای وضعیت پیش ولت موافق است لذا

$$Q_{sf} = I_f \tau_p$$

زمان انباشت

جریان منفی I_r با مخالفت کردن پیش ولت در $t = 0$ معادله کنترل بار به

$$-I_r = \frac{dQ_s}{dt} + \frac{Q_s}{\tau_p}$$

تبدیل می‌شود.

$$Q_s(t) = \tau_p[-I_r + (I_f + I_r)e^{-t/\tau_P}]$$

حال زمان انباشت t_s را لحظه ای تعریف می‌کنیم که در آن تمام بار انباشته از بین رفته باشد، یعنی $Q_s \cong 0$

$$erf\sqrt{\frac{t_s}{\tau_P}} = \frac{I_f}{I_r + I_f} \qquad t_s = \tau_p \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_r}\right)$$

شکست بهمنی در پیوندگاههای p-n

پیوندگاه p-n وقتی به وضعیت شکست می‌رسد که اندک افزایشی در پیش ولت مخالف، جریان خیلی زیادی را تولید کند.

باتری خورشیدی و دیود نور گسیل

سازوکار تبدیل انرژی نوری به انرژی الکتریکی را اثر فوتوولتایی می‌گویند. تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی نوری، اثر الکترولومینسان نامیده می‌شود. پیوندگاه p-n که تحت اعمال جریان با پیش ولت موافق نور گسیل می‌کند، به دیود نورگسیل (LED)

جذب (در آشامی) نوری در نیمرسانا

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_{ph}} = \frac{۱/۲۴}{E_{ph}}\ \mu m$$

وقتی نیمرسانایی تحت نوردهی قرار می‌گیرد، فوتونهای با انرژی کمتر از E_g توسّط نیمرسانا جذب نمی‌شوند.

جذب فوتون

- به ازای $E_{ph} = E_g$ ، فوتونها جذب می‌شوند زوجهای الکترون – حفره خلق می‌کنند. انرژی اضافی $E_{ph} - E_g$ به شکل گرما تلف می‌شود.

شار فوتون

چشمه نوری نور تکفام با $h\nu > E_g$ و شار F_{ph} فوتونهای جذب شده در Δx

$$\alpha F(x)\Delta x$$

که α ضریب تناسب است و ضریب جذب نامیده می‌شود. از پیوستگی نور

$$F(x+\Delta x)-F(x)=\frac{dF(x)}{dx}\Delta x=-\alpha F(x)\Delta x$$

یا

$$-\frac{dF(x)}{dx}=\alpha F(x)$$

با شرط مرزی $F = F_{ph}$ در $x = 0$

$$F(x)=F_{ph}e^{-\alpha x}$$

$$F_t=F(d)=F_{ph}e^{-\alpha d}$$

که d ضخامت نیمرسانا است. α تابع hv است.

اثر فوتوولتایی و کارایی باتری خورشیدی

فرایند تبدیل انرژی نوری به انرژی الکتریکی در یک پیوندگاه p-n شامل مراحل اساسی زیر است:

(1) فوتونها جذب می‌شوند بطوریکه زوجهای الکترون – حفره در هر دو طرف p و n پیوندگاه تولید می‌شوند.

(2) الکترونها و حفره هایی که در فاصله یک طول پخش از پیوندگاه تولید شده‌اند، بر اثر پدیده بخش به ناحیه بار فضایی می‌رسند

(3) سپس زوجهای الکترون – حفره توسّط میدان الکتریکی قوی از هم جدا می‌شوند.

حساسیت چشم و روشنایی

واکنش چشم انسان، که ضریب درخشانی نامیده می‌شود، روشنایی LED را بعنوان مقیاسی برای اثر مرئی تابش

$$B = ۱۱۵۰ L \frac{J}{\lambda} \frac{A_j}{A_s} \eta_{ext}, \; fL$$

λ طول موج گسیل برحسب μm ، J چگالی جریان، A/cm^2 ، L ضریب درخشانی در lm/W ، A_j مساحت پیوندگاه p-n و A_s مساحت سطح مشاهده شده گسیلنده. واحد روشنایی فوت لمبرت (fL) است.

گسیلنده های GαAs

LEDهای GaAs نوعی را با بخش ناخالصی حالت جامد می‌سازند، عنصر نوع p که به داخل یک بستر نوع n آلاینده با قلع، تلور، یا سیلیسیم پخش شده است، بکار می‌رود.

LEDهای GaP ها

- دیودهای گالیم فسفید، با گاف انرژی 3/2 eV، بسته به ساز و کار بازترکیب، نور سرخ یا سبز گسیل می‌کنند، بازترکیب در نیمرسانای با گاف غیرمستقیم مثل GaP، از طریق ترازهای ناخالصی رخ می‌دهد.

دیود GaP سرخ

ساز و کار تابش در دیود سرخ از طریق یک زوج ناخالصی بخشنده – پذیرنده صورت می‌گیرد. وقتی بخشنده ها و پذیرنده ها بطور همزمان در نیمرسانا حضور داشته باشند، بخشی از حالات بخشنده و پذیرنده اشغال خواهد بد.

انرژی فوتو تابشی

$$h\nu = E_g - (E_d + E_a) + \frac{q^{۲}}{K_s \varepsilon_{.} r}$$

دیود GaP ی سبز

- گسیل نور سبز در GaP مشاهده شده این اثر را به بازترکیب در اتم ازت در جایگاه یک اتم فسفر نسبت می‌دهند.
- جانشین فسفر توسّط یک اتم ازت را ایزوالکترونیک (هم الکترونی) می نامند.

ترانزیستور با اثر میدان پیوندی (JFET):

- یک نیمرسانای سه پایانه است که در آن شارش جریان جانبی توسّط میدان الکتریکی عمودی اعمال شده از خارج کنترل می‌شود.

تولیدJFET

- JFET را می‌توان به روش پخش مضاعف، با کانال و دریچه بالایی پخشی تولید کرد.
- JFET هایی هستند که کانال آنها از نوع n است، زیرا کانال ناخالصیهای بخشنده آلایش یافته و جریان کانال ناشی از الکترونهاست.

تنگش

- وقتی نواحی بار فضایی به هم می‌رسند و تمام حاملهای آزاد از ناحیه وصل شده کاملاً تخلیه می‌شوند. این وضعیت را تنگش می نامند.
- افزایش باز هم بیشتر ولتاژ در رو بعد از تنگش، جریان دررو را چندان افزایشی نخواهد داد.

پیوندگاه دریچه

پیوندگاه های دریچه، از نوع پیوندگاه های پله ای یکطرفه هستند، عرض لایه تهی در JFET از رابطه زیر بدست می آید:

$$W(x)=\left\{\frac{2K\varepsilon_o[V(x)+\psi_o-V_G]}{qN_d}\right\}^{1/2}$$

که در آن $V(x) - V_g$ ولتاژ سرتاسر پیوندگاه x با پیش ولت مخالف در x است.

جریان دررو

جریان دررو گرادیان الکترونها صفر است و مؤلفه جریان پخش را می‌توان نادیده گرفت.

$$I_D = -q\mu_n nA\varepsilon = ۲q\mu_n N_d (a-W)Z\frac{dV}{dx}$$

I_p معروف جریان در رو و 2(a-W)Z سطح مقطع است.

رسانایی کانال بدون لایه های تهی

$$G_{\cdot} = \frac{۲qaZ\mu_n N_d}{L}$$

ولتاژ تنگش داخلی

عرض لایه بار فضایی در نقطه تنگش دقیقاً برابر با عرض کنال است. ولتاژ تنگش با قرار دادن $W = a$ و $V - V_G = V_P$

$$V_p + \psi_{\cdot} = \frac{qa^{۲} N_d}{۲K\varepsilon_{\cdot}} = V_{PO}$$

که V_p ولتاژ اعمال شده خارجی برای رسیدن به وضعیت تنگش، یعنی، ولتاژ تنگش است. V_{PO} ولتاژ تنگش داخلی

ناحیه خطی

شیب منحنیهای I – V در نزدیکی مبدأ تابعی از ولتاژ دریچه است. این ناحیه کار، ناحیه خطی نام دارد.

رابطه جریان – ولتاژ ناحیه خطی با قرار دادن $V_D << \psi_0 - V_G$ بدست می‌آید.

$$(\psi_. - V_G)^{۳/۲}(۱+\frac{V_D}{\psi_. - V_G})^{۳/۲} \approx (\psi_. - V_G)^{۳/۲}(۱+\frac{۳}{۲}\frac{V_D}{\psi_o - V_G})$$

$$I_D = G_o(۱-\sqrt{\frac{\psi_. - V_G}{V_{PO}}})V_D$$

ناحیه اشباع

در نقطه تنگش

$$V_D - V_G = V_P$$

مشخصه های جریان - ولتاژ بعد از تنگش، ناحیه اشباع نامیده می شود زیرا جریان در رو اشباع است.

جریان اشباع دررو

جریان در رو در اشباع، I_{DS}

$$I_{DS} = G_o\left(\frac{۲}{۳}\sqrt{\frac{\psi_o - V_G}{V_{PO}}} - ۱\right)(\psi_o - V_G) + \frac{G_o V_{PO}}{۳}$$

جریان اشباع در رو را بصورت تابعی از ولتاژ دریچه بیان می‌کند. این را مشخصه انتقال می نامند.

$$I_{DS} = I_{DSS}\left(۱ - \frac{V_G}{V_{PO}}\right)^{۲}$$

I_{DSS}، جریان اشباع در رو در ولتاژ دریچه صفر، را مشخص می کند.

جریان نشتی دریچه

- جریان نشتی دریچه، مجموع جریانهای اشباع معکوس، تولید، و نشتی سطحی
- در هر JFET صفحه ای، مؤلفه نشتی سطحی معمولاً ناچیز

ولتاژ شکست

شکست در انتهای دررو کانال رخ می‌دهد زیرا دارای بالاترین پیش ولت مخالف است.

ولتاژ شکست

$$V_B = V_{DO} + V_G$$

ترانزیستورهای دوپیوندی دوحاملی

- قطعه ای است سه پایانی وکارآمدومی تواندهم به عنوان تقویت کننده به کاربرده شودوهم به عنوان کلید(BJT)

ترانزیستورهای n-p-n-p

- قطعاتی باپایداری دوگانه هستندکه کارآنهابستگی به سازوکارفیدبک داخلی دهردوبه حالتهای پایداربامقاومت ظاهری بالاوپایین می انجامد.
- قطعات توان پایین برای مدارهای کلیدزنی ومنطقی وقطعات توان بالابرای کلیدهایacکنترل فاز مبدلهای توان وبرشگرهای dc کاربرددارند.

ترانزیستور نوع n-p-n

- متشکل ازیک لایه سیلیسیومی نوعpکه بین دولایه سیلیسیوم نوع nساندویچ شده است

ترانزیستور نوع p-n-p

متشکل ازیک لایه نوعnکه بین دولایه ازماده نوعpساندویچ شده است

مشخصه های اساسی ترانزیستور

- گسیلنده
- پایه
- گردآور

ناحیه قطع

- وضعیتی است که پیوندگاههای گسیلنده وگردآور هردودارای پیش ولت مخالف باشند

ناحیه فعال عادی

- پیوندگاه گسیلنده دارای پیش ولت موافق وپیوندگاه گردآوردارای پیش ولت مخالف است

ناحیه اشباع

- هردوپیوندگاه دارای پیش ولت موافقند
- درناحیه فعال عادی ترانزیستور به عنوان یک تقویت کننده عمل میکند
- یک کلیدترانزیستوری بین نواحی اشباع(وصل)وقطع(خاموش) افت وخیز میکند

ترانزیستورهای پایه شیبدار

- توزیع شیبدار ناخالصی درپایه میدان الکتریکی داخلی ایجادمیکند.
- این میدانکه حفره هارادرجای خودنگه میداردرجهتی است که به ترابری الکترونهای تزریق شده دربیشترنواحی پایه کمک میکند.

عدد گومل

- تعداداتمهای ناخالصی درپایه راعددگومل گویند
- هرچه عددگومل کوچکترباشد عرض پایه باریکتروجریان الکترون بیشترخواهدبود.

جریان پایه

- جریان حامل اکثریتی است که عمودبرجهت جریان حامل اقلیتی تزریق شده ازگسیلنده شارش می یابد.
- این جریان پایه یک افت پتانسیل جانبی درهردوناحیه غیرفعال وفعال پایه تولید میکند.

اثر تجمع جریان

- درناحیه فعال تزریق حامل اقلیتی ازلبه پایه به طرف داخل آن نزول میکند.تزریق نایکنواخت حامل باعث ایجاد نایکنواختی درامتدادپیوندگاه گسیلنده میشودویک چگالی زیادترجریان درنزدیکی لبه هاخواهدبودکه اثرتجمع جریان نام دارد.

مقاومت پخش پایه

- عبارت است ازحاصل جمع مقاومتهای پایه فعال وغیرفعال

پاسخ ترانزیستورها به بسامد

انواع بسامدها:

- بسامدقطع پایه-مشترک
- بسامدگسیلنده-مشترک
- حاصلضرب بهره درپهنای نوار

www.salampnu.com

سایت مرجع دانشجوی پیام نور

- ✓ نمونه سوالات پیام نور : بیش از ۱۱۰ هزار نمونه سوال همراه با پاسخنامه تستی و تشریحی
- ✓ کتاب ، جزوه و خلاصه دروس
- ✓ برنامه امتحانات
- ✓ منابع و لیست دروس هر ترم
- ✓ دانلود کاملا رایگان بیش از ۱۴۰ هزار فایل مختص دانشجویان پیام نور

www.salampnu.com