به نام خدا

الکترونیک(۱)

مدرس: میریوسفی
دانشگاه فنی و حرفه ای البرز

نام درس : الکترونیک(۱)

تعداد واحد :۳

نوع واحد : نظری

پیشنیاز : مدارهای الکتریکی (۱)

هدف : آشنایی با خواص فیزیکی، ساختار، مدل سازی عناصر نیمه هادی و کاربرد آن ها در مدارهای ساده

الکترونیک ۱

تعداد واحد: ۲ (نظری)

پیشنیـــــاز: مدارهای الکتریکی ۱ **همنیـــــاز:** -

هـدف: آشنایی با خواص فیزیکی، ساختار و مدل‌سازی عناصر نیمه‌هادی و کاربرد آنها در مدارهای ساده

شرح درس:

مقدمه: فیزیک نیمه هادی، نیمه هادی‌های ذاتی و غیر ذاتی، پیوندPN

دیود و مدارهای دیودی

ترانزیستور دوقطبی(BJT): بایاسینگ و پایداری حرارتی، رفتار و مدل سیگنال کوچک

تقویت کننده‌های پایه: ولتاژ، جریان، هدایت انتقالی، مقاومت انتقالی، مدل‌های ایده‌آل و غیر ایده‌آل

تقویت کننده‌های تک طبقه BJT: امیتر مشترک، بیس مشترک، کلکتور مشترک

ترانزیستورهای FET (MOSFET و JFET): بایاسینگ، رفتار و مدل سیگنال کوچک

تقویت کننده های تک طبقهMOSFET: سورس مشترک، گیت مشترک، درین مشترک

مراجع و منابع

مبانی الکترونیک دکتر سید علی میرعشقی جلد اول (مرجع اصلی)

مدارهای میکرو الکترونیک سدرا اسمیت

اصول میکروالکترونیک دکتر بهزاد رضوی

مدارهای مجتمع آنالوگ پاول گری رابرت میر

****

تحلیل و طراحی مدارهای الکترونیک مهندس تقی شفیعی جلد اول (مرجع حل تمرین)

ارزشیابی

- امتحان پایانی ۱۵–۱۴ نمره
- میان ترم + quiz ۴–۳ نمره
- تمرین و فعالیت کلاسی ۳–۲ نمره Don’t copy

ارتباط

- از طریق پست الکترونیک

miryoosefi@ yahoo.Com (subject:electronic1)

- از طریق تلگرام

@miryousefi

رئوس مطالب

- مقدمه ای بر فیزیک الکترونیک
- دیود و مدارهای دیودی
- ترانزیستور دو قطبی (بایاسینگ، مدل سیگنال کوچک، تحلیل ac)
- ترانزیستور اثر میدان(بایاسینگ، مدل سیگنال کوچک، تحلیل ac)

فصل اول

مقدمه ای بر فیزیک الکترونیک

طبقه بندی مواد از نظر هدایت الکتریکی

❖**فلزات هادی رسانا** copper, silver, gold, aluminum

عناصری هستند که جریان الکتریکی را به خوبی از خود عبور می دهند.

(در لایه آخر خود کمتر از چهار الکترون دارند)(مقاومت ویژه کمتر از $10^{-2}\ \Omega$ -cm)

❖ **نیمه رساناها نیمه هادی** ژرمانیم سیلسیم

هدایت الکتریکی کمتر از هادی ها ولی قابل کنترل می باشد.

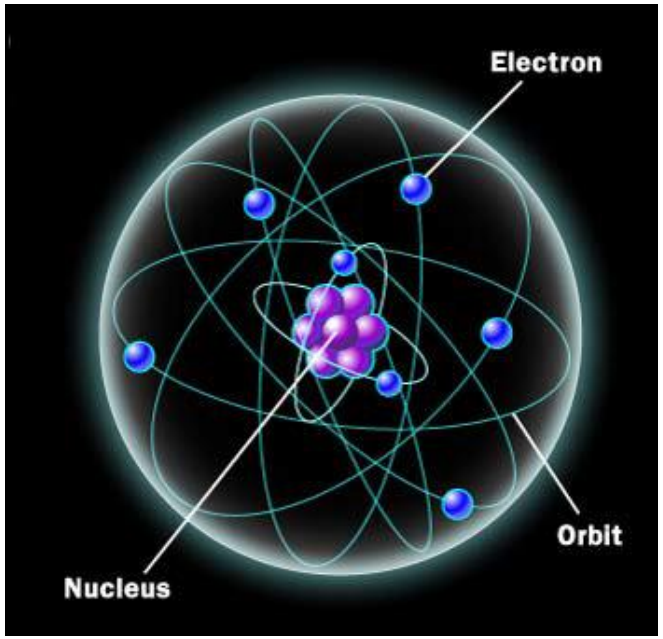
(در لایه آخر خود چهار الکترون دارند) (مقاومت ویژه بین $10^{-2}\ \Omega$ -cm و $10^{5}\ \Omega$ -cm)

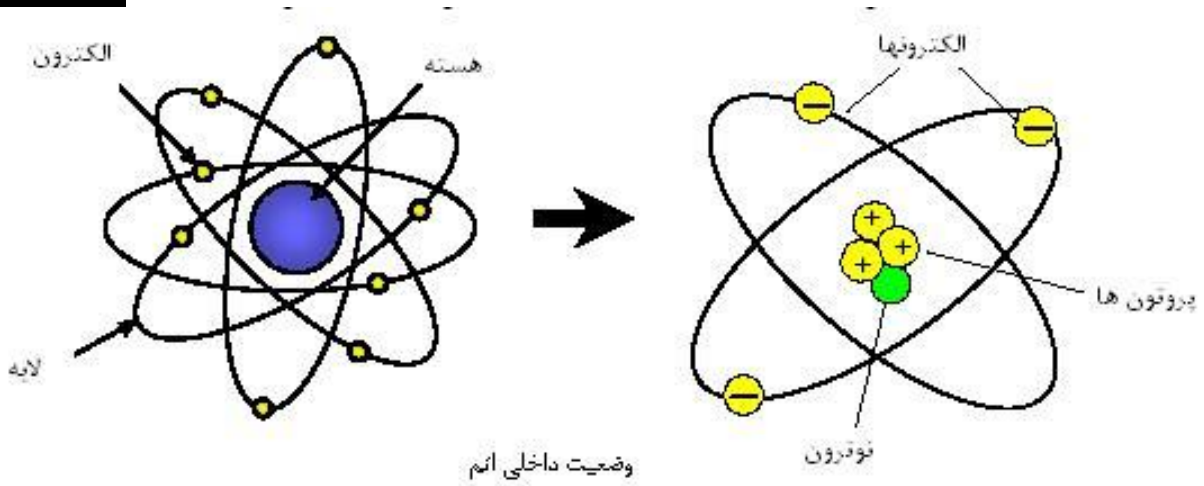
❖ **عایقها نارسانا** air, glass, rubber, most plastics

در میدان های الکتریکی معمولی جریان الکتریکی را هدایت نمی کند.

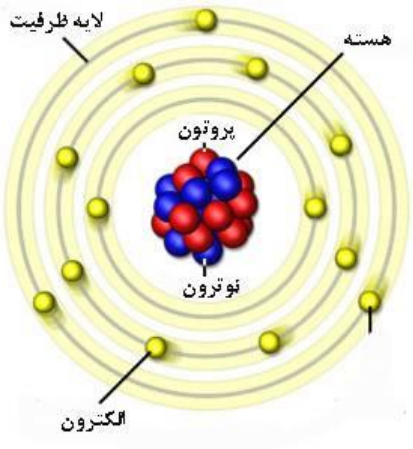
(در لایه آخر خود بیشتر از چهار الکترون دارند) (مقاومت ویژه بیشتر از $10^{5}\ \Omega$ -cm)

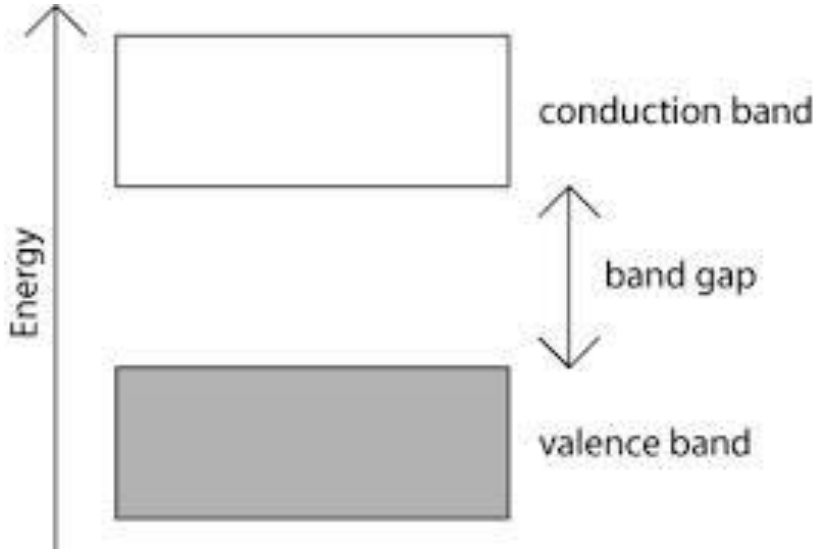
ساختمان اتم


Electron
Orbit
Nucleus

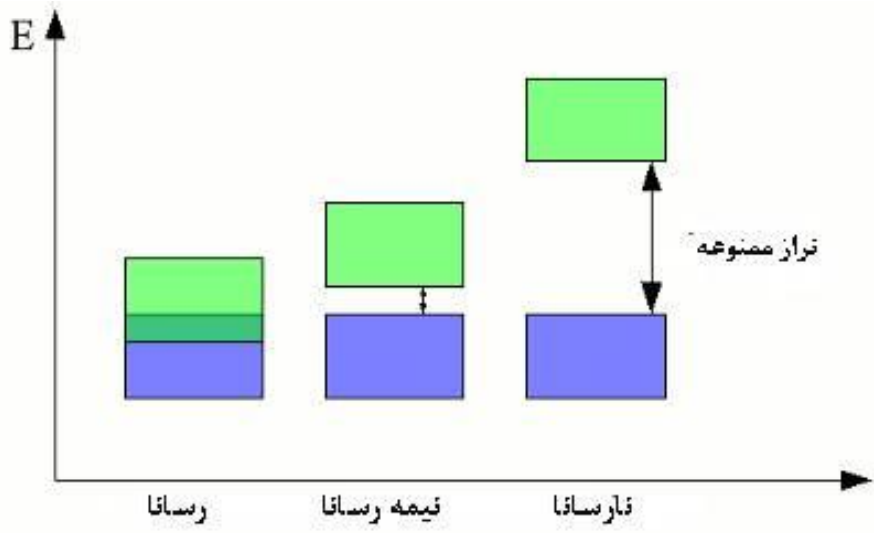

الکترون
هسته
لایه
وضعیت داخلی اتم
الکترونها
پروتون ها
نوترون

الکترون ها در یک اتم حول هسته در مدارهای ثابتی چرخش می کنند. هر کدام از این حلقه ها دارای سطح انرژی بصورت گسسته هستند که الکترون های این سطح اجازه ندارند وارد حلقه های دیگر با سطوح انرژی متفاوت شوند. البته این قاعده درباره یک اتم تنها در فضای ایزوله شده می باشد. در صورتی که اتم های دیگری در کنار این اتم قرار گیرند سطوح انرژی الکترون ها در این سیستم چند اتمه، بدلیل نیروهای متقابل الکترون های اتم های مختلف به یکدیگر، به صورت معناداری نسبت به قبل تفاوت کرده و این در صورت افزایش تعداد اتم ها بصورتی پیش خواهد رفت که دیگر بین سطوح فواصل گسسته کوچک شده و در نهایت سطوح بصورت پیوسته خواهند شد.

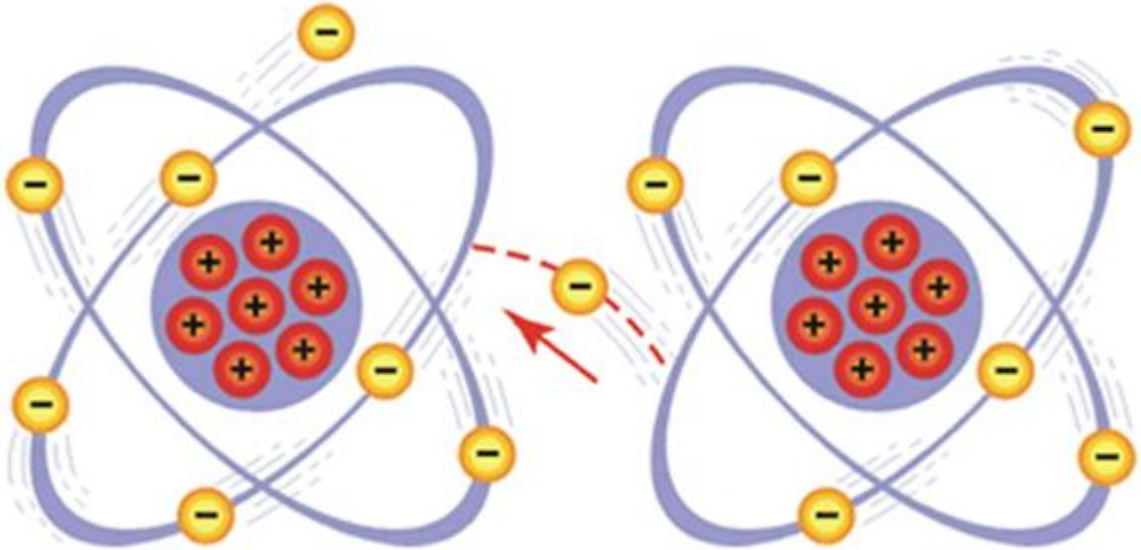




پهنای ترازهدایت و تراز ظرفیت و اختلاف بین آنها به نوع ماده بستگی دارد



الکترون های آزاد



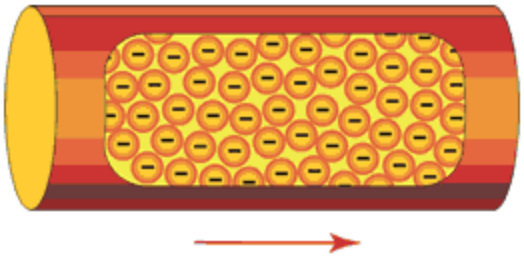
الکترون ها ی خارجی ترین لایه می توا نند بوسیله ی یک نیروی خارجی مثل میدان مغناطیسی ،اصطکاک و یا واکنش های شیمیایی از مدارشان خارج شوند . در این صورت « الکترون های آزاد» نامیده می شوند

Conductors

An electric current is produced when free electrons move from one atom to the next. Materials that permit many electrons to move freely are called conductors.

Good Conductors:

- **Copper**
- **Silver**
- **Aluminum**
- **Zinc**
- **Brass**
- **Iron**



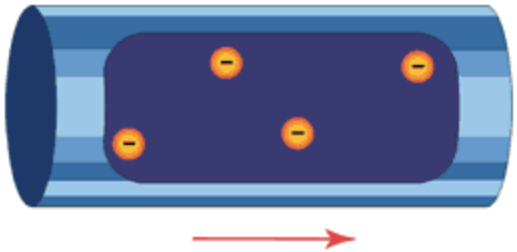
هادی

Ins

Materials that allow few electrons to flow are called insulators.

Good Insulators:

- **Plastic**
- **Rubber**
- **Glass**
- **Mica**
- **Ceramic**

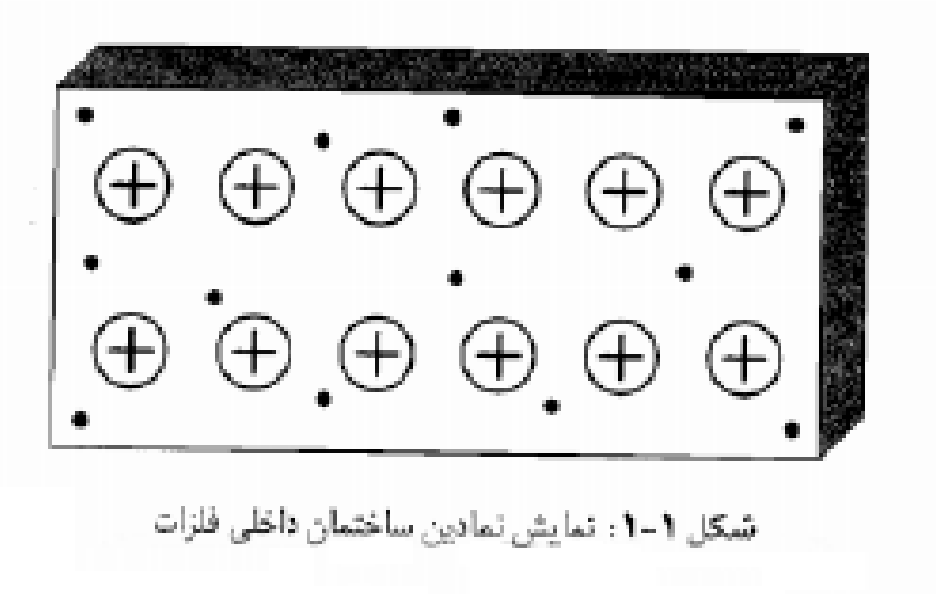


عایق

هدایت الکتریکی در هادی ها

چگالی الکترون آزاددر فلزات حدودا 10^{23} الکترون در سانتی متر مکعب

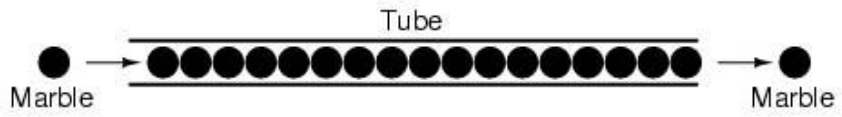
نظریه گاز الکترون

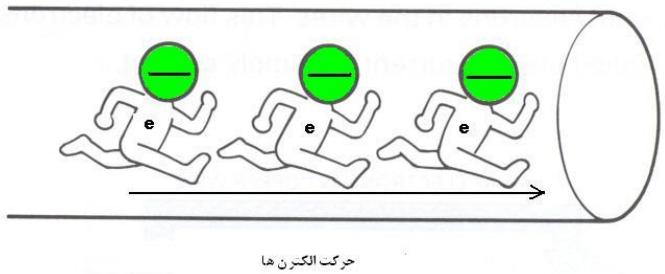


شکل ۱-۱: نمایش تعادین ساختمان داخلی فلزات

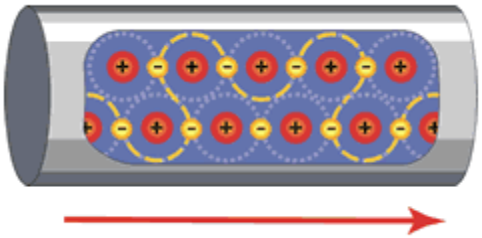
عامل هدایت الکتریکی در فلزات: الکترونهای آزادی هستند که تحت تاثیر میدان الکتریکی خارجی به حرکت در می آیند

اعمال میدان الکتریکی به هادی





جریان الکتریکی، شارش الکترون های آزاد در یک ماده از یک اتم به اتم بعدی و در یک جهت مشخص می باشد که آن را با نماد « I» نشان می دهند.



در صورت اعمال میدان الکتریکی به یک قطعه هادی الکترون ها در خلاف جهت میدان حرکت می کنند

هدایت الکتریکی هادی

با اعمال میدان الکتریکی به یک جسم:

v سرعت حرکت *الکترونهای آزاد*

E شدت میدان الکتریکی

μ_e قابلیت تحرک الکترونهای آزاد

$$v = \mu_e E$$

در هر سیال چگالی جریان برابراست با:

v سرعت

P چگالی حجمی

$$J = \rho v$$

در مورد توده الکترون های آزاد

$$J = \rho v = (nq)v$$

بنابراین

$$J = (nq)\mu_e E = (nq\mu_e)E = \sigma E$$

σ رسانایی ویژه فلز $(\Omega\text{-cm})^{-1}$

P چگالی حجمی

نمایش نقطه ای قانون اهم

بررسی مواد نیمه هادی

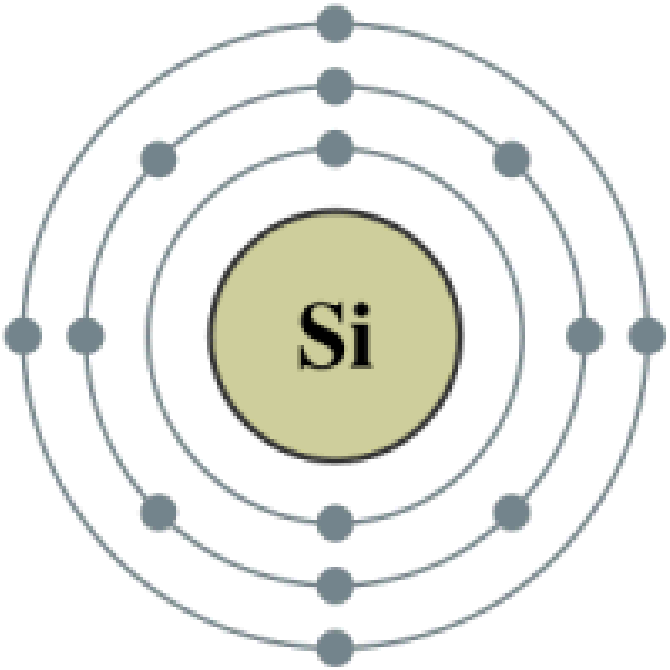
مواد نیمه هادی

- ✓ نیمه هادی ها عناصری هستند که از لحاظ هدایت الکتریکی ، ما بین هادی و عایق قرار دارند، و مدار آخر نیمه هادیها ، دارای ۴ الکترون می‌باشد.

- ✓ هدایت الکتریکی نیمه هادی با عواملی مثل تحریک نوری، افزایش دما و تغییر میزان ناخالصی تغییر می کند.

- ✓ ژرمانیم و سیلیکون دو عنصری هستند که خاصیت نیمه هادی ها را دارا می‌باشند و به دلیل داشتن شرایط فیزیکی خوب ، برای ساخت نیمه هادی دیود ترانزیستور ، آی سی (IC) و .... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

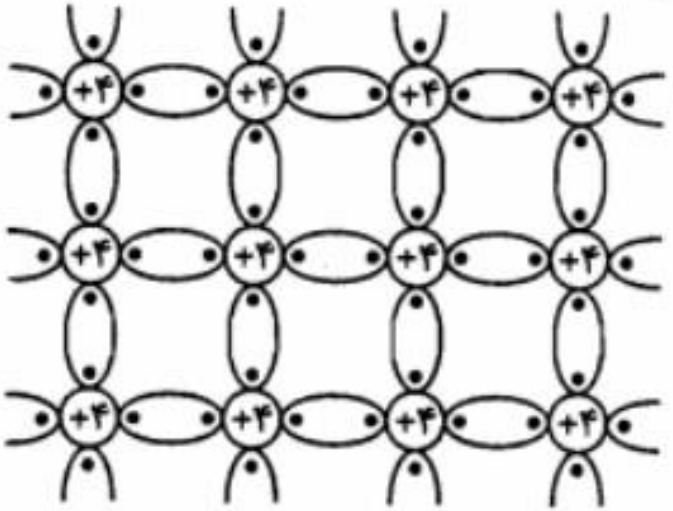
نیمه هادی ذاتی



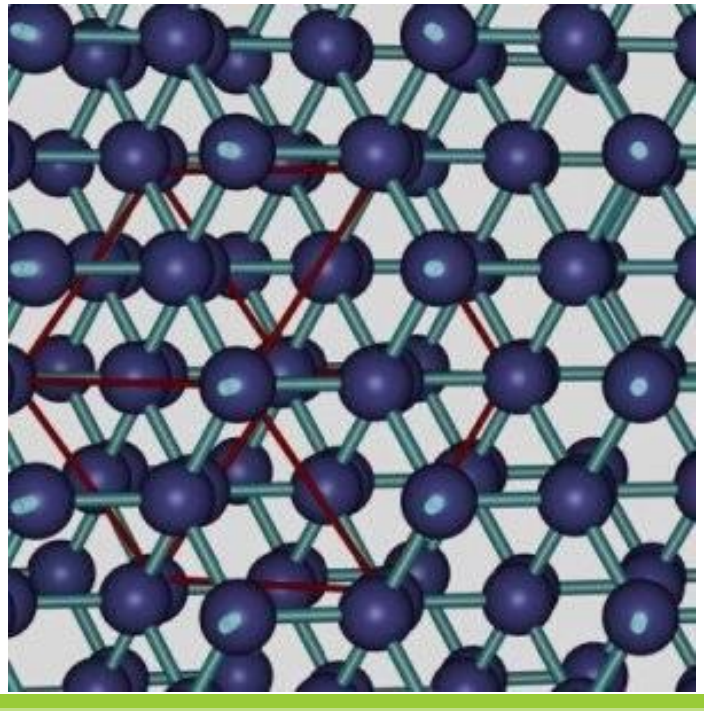
عدد اتمی سیلیسیوم ۱۴ است که بدان معنی است که در هسته ۱۴ عدد پروتون و در حلقه های پیرامون هسته به همان تعداد الکترون قرار دارند.

در مدل اتمی، با توجه به تعداد الکترون های سیلیسیوم، نحوه قرار گرفتن این الکترون ها ۴ الکترون ظرفیت در لایه آخر قرار دارند.

ساختار کریستالی نیمه هادی ذاتی در صفر مطلق

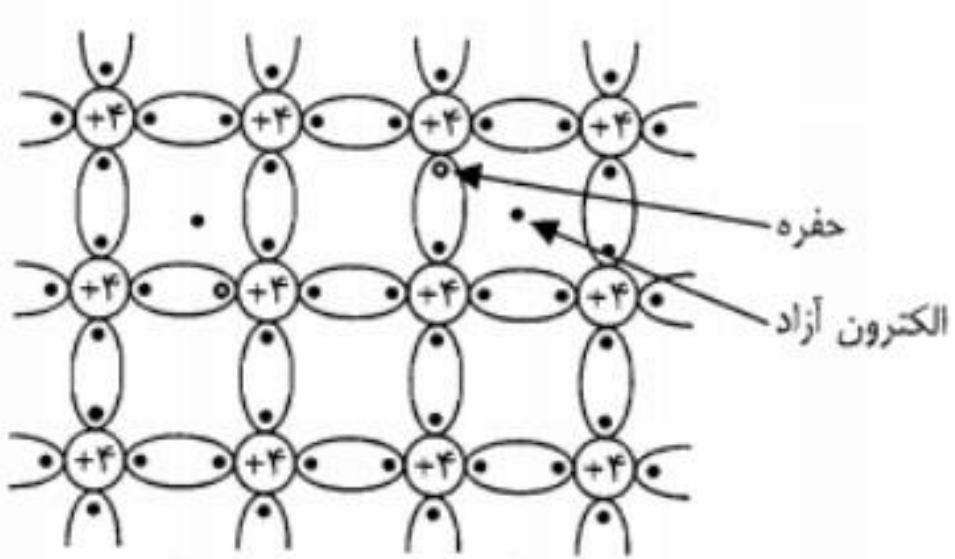


شکل ۱-۲: نمایش دو بعدی ساختمان شبکه بلوری سیلیکن



نیمه رسانای ذاتی: یک نیمه رسانای کامل و فاقد هرگونه ناخالصی یا نقائص بلوری؛ دردمای 0^{K} (صفر مطلق)هیچگونه حامل باری در آن وجود ندارد.

ساختار کریستالی نیمه هادی ذاتی در دمای محیط



شکل ۱-۳: نحوه ایجاد حفره در یک پیوند کووالان اتمهای بلور سیلیکن

در دماهای بالاتر، براثر برانگیزش گرمایی الکترونهای نوار ظرفیت به نوار هدایت،زوج الکترون وحفره تولید می شود.

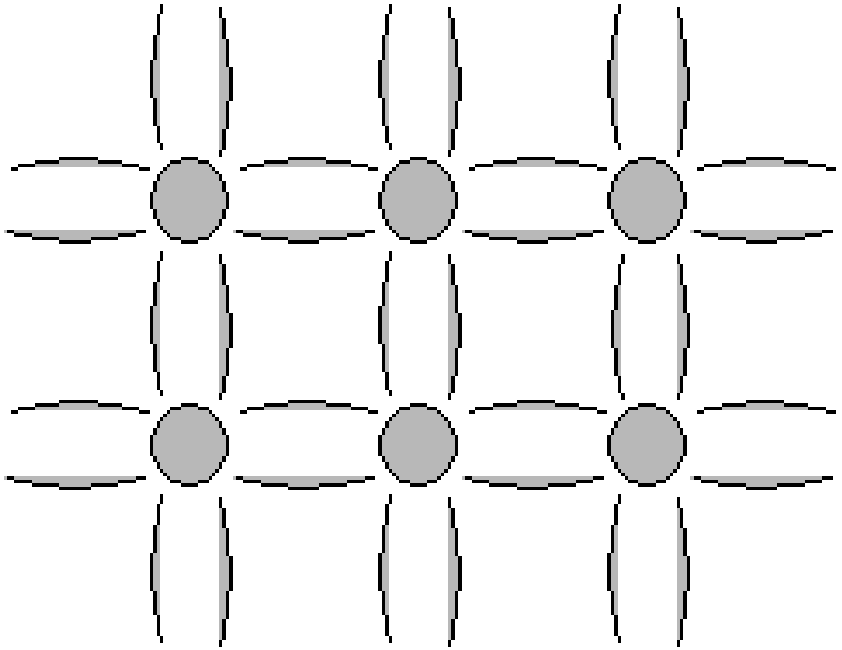
$$n = p = n_i \ (cm^{-3})$$

$$np = n_i^2$$

قانون اثر جرم

سیلیکن	$n_i = 1{,}5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$
ژرمانیم	$n_i = 2{,}5 \times 10^{13}\ cm^{-3}$

ساختار کریستالی نیمه هادی ذاتی در دمای محیط

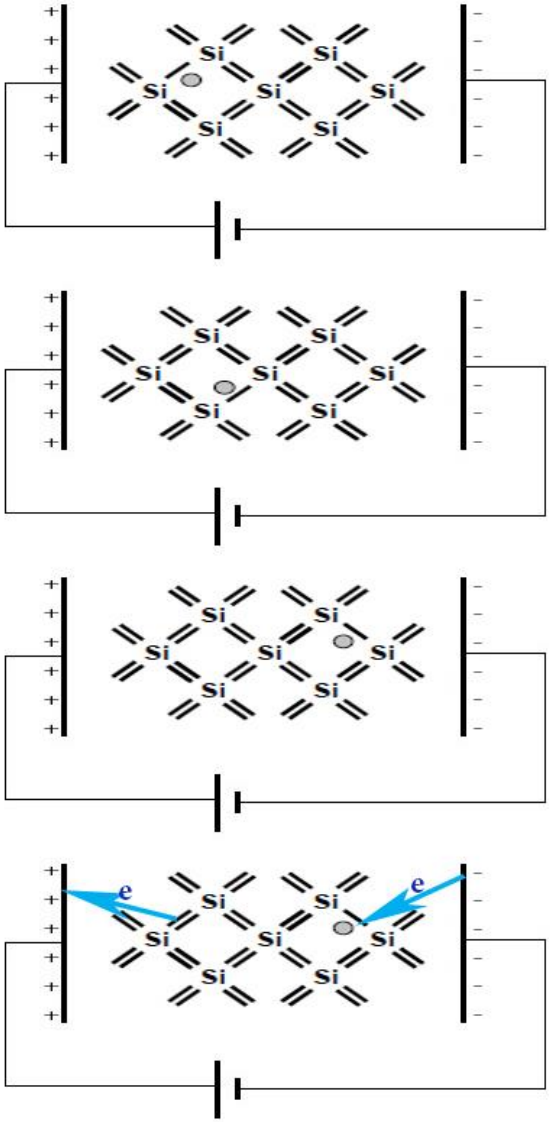


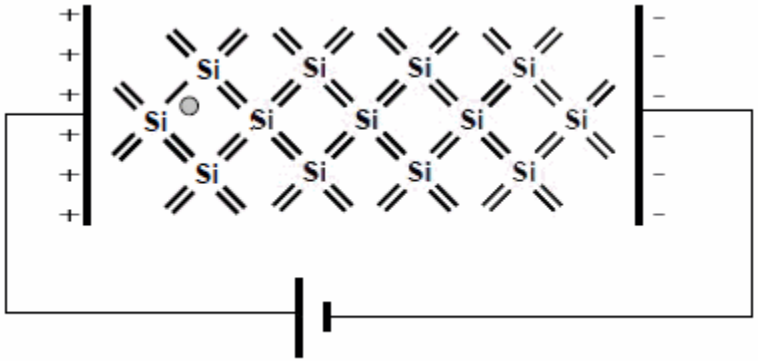
تولید زوج الکترون وحفره : با گسستن هر پیوند کووالانسی بواسطه برانگیزش گرمایی یک الکترون از اتم مادر جدا شده، بار مثبتی هم اندازه با بار الکترون بر جا می ماند. که به آن حفره گفته می شود.

هدایت الکتریکی در نیمه هادی ها توسط دو نوع حامل بار الکتریکی صورت می گیرد

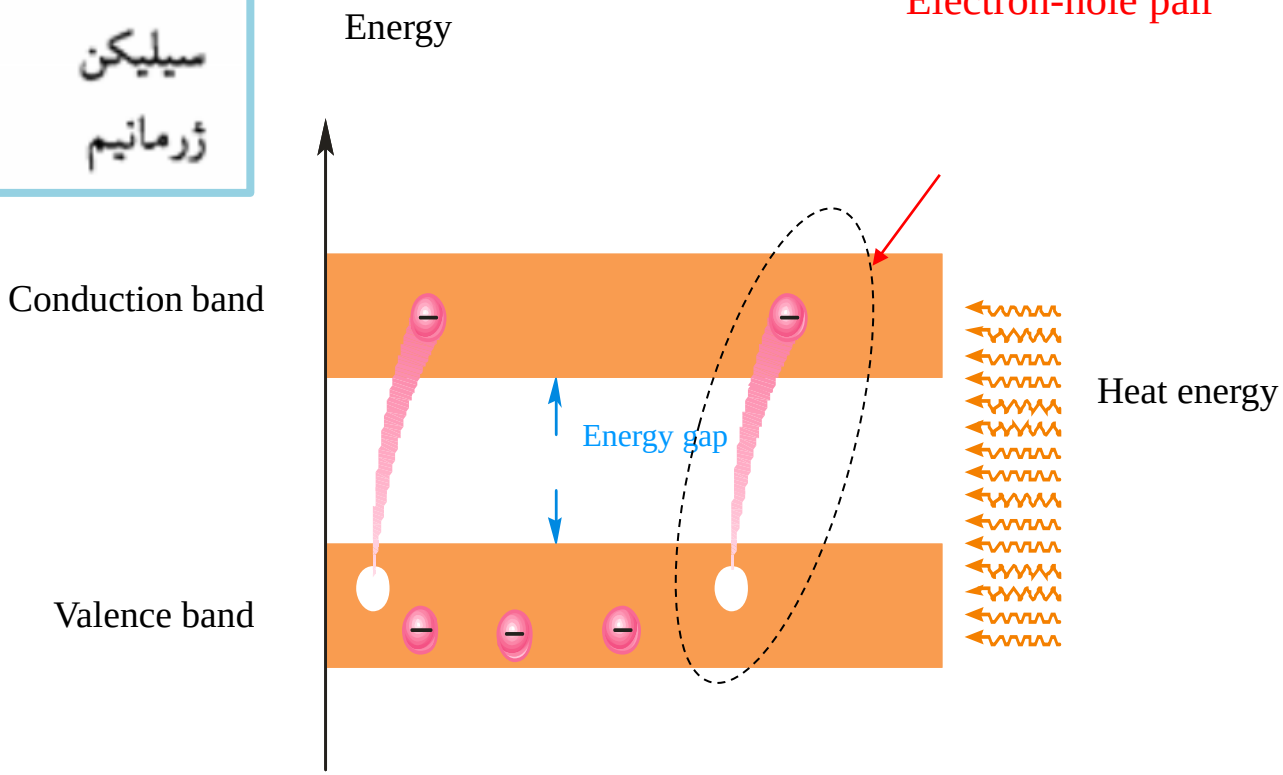
الکترون و حفره

مکانیسم حرکت حفره





$n_i = ۱٫۵ \times ۱۰^{۱۰}\ cm^{-۳}$	سیلیکن
$n_i = ۲٫۵ \times ۱۰^{۱۳}\ cm^{-۳}$	ژرمانیم



انرژی لازم برای شکستن پیوند کووالان و آزاد کردن یک الکترون را عرض نوار یا باندانرژی Egمی نامند.

Eg=1.1ev Si

Eg=0.72ev Ge

افزودن ناخالصی به نیمه هادی

سیلیکن	$n_i = ۱٫۵ \times ۱۰^{۱۰}\ cm^{-۳}$
ژرمانیم	$n_i = ۲٫۵ \times ۱۰^{۱۳}\ cm^{-۳}$

از آنجایی که تعداد الکترونها و حفره های موجود در کریستال ژرمانیم و سیلیسیم در دمای محیط کم است یکی از راههای افزایش حاملهای بار، افزودن ناخالصی است.

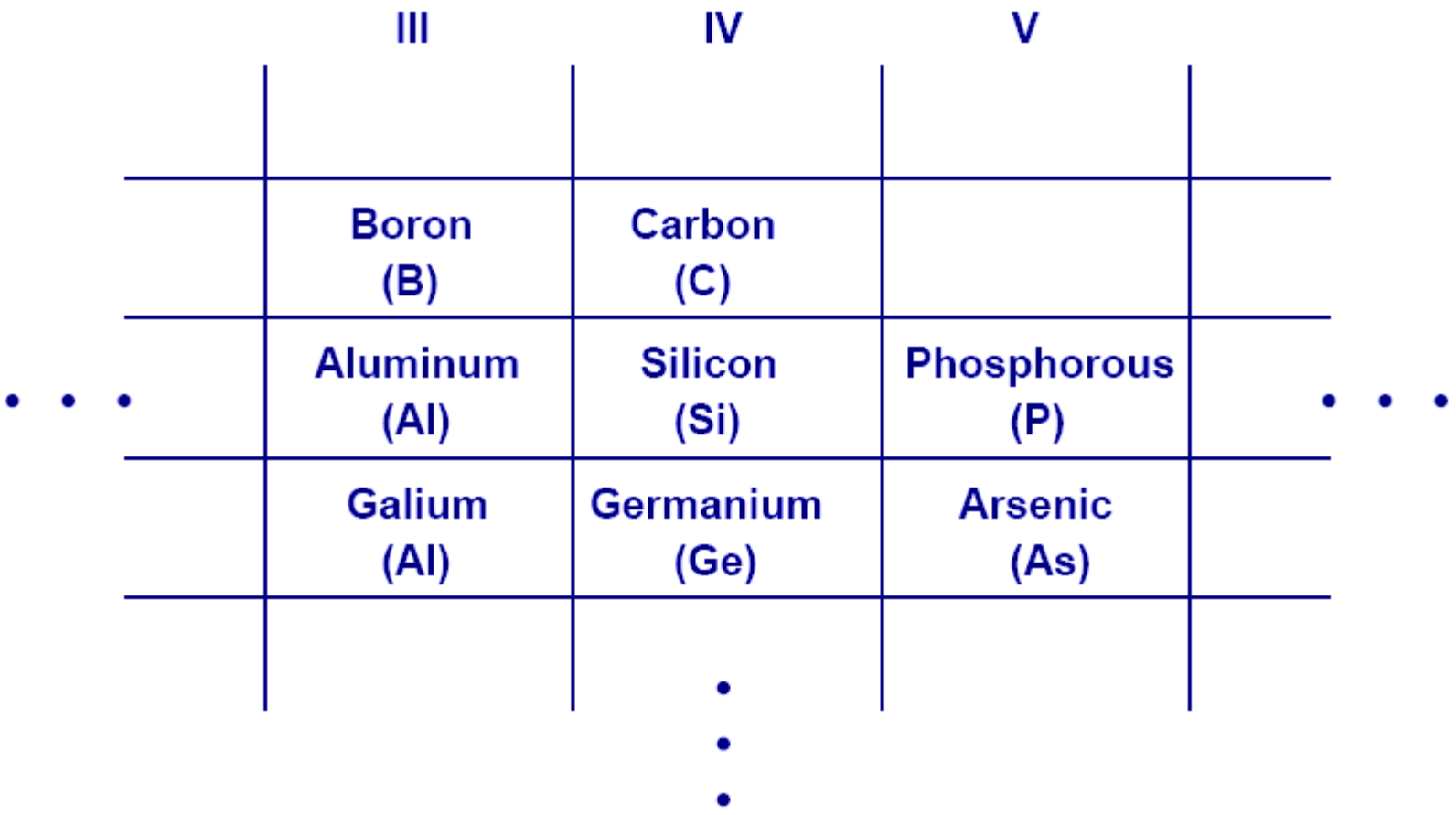
شبکه کریستالی به ازای هر $۱۰^{۷}$ از اتم سیلیسیوم یک اتم ناخالصی اضافه می شود(ناخالصی معمولی) و به ازای هر $۱۰^{۴}$ از اتم سیلیسیوم یک اتم ناخالصی اضافه می شود(ناخالصی زیاد).

با اضافه شدن یک اتم ناخالصی به شبکه بسته به نوع ناخالصی، تنها یک الکترون یا تنها یک حفره اضافی ایجاد خواهد شد. این مستقل از دما می باشد.

افزودن ناخالصی به نیمه هادی

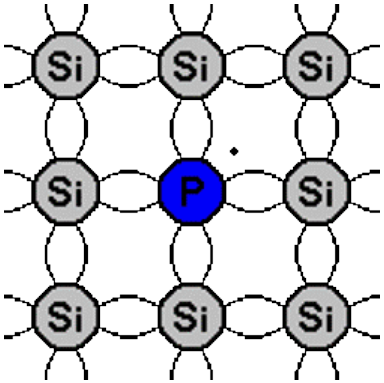
پنج ظرفیتی نوع N

سه ظرفیتی نوع P

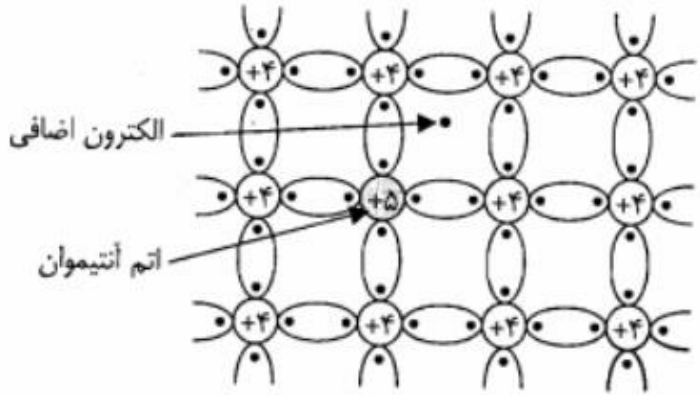


افزودن ناخالصی پنج ظرفیتی نوع N (بخشنده Donor)

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

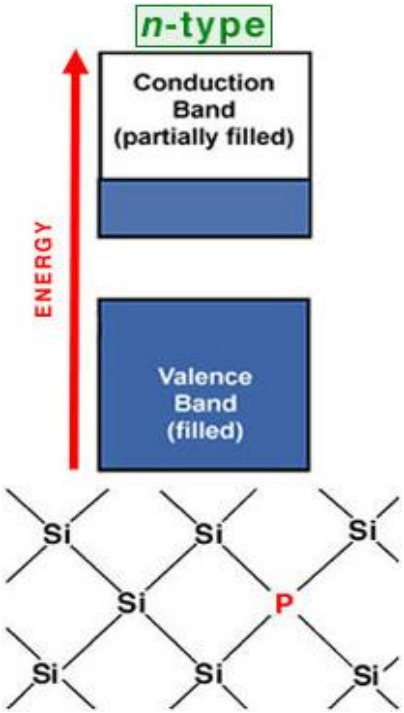


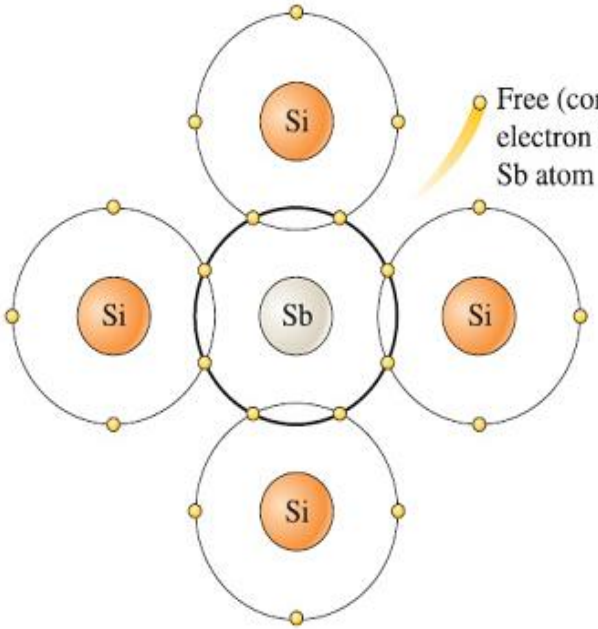
عنصر ۵ ظرفیتی مانند آرسنیک یا آنتیوان یا فسفر

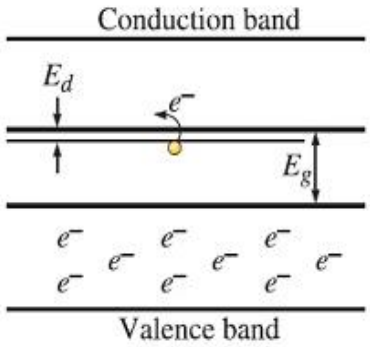


شکل ۱-۵: نمایش ساختمان شبکه بلور سیلیکن با ناخالصی بخشنده آنتیموان

افزودن ناخالصی پنج ظرفیتی نوع N







افزودن ناخالصی پنج ظرفیتی نوع N

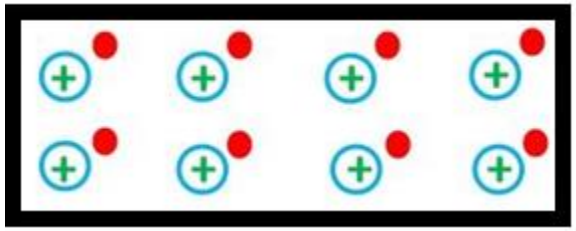
چگالی اتم های ناخالصی بخشنده ND

حامل اکثریت الکترون

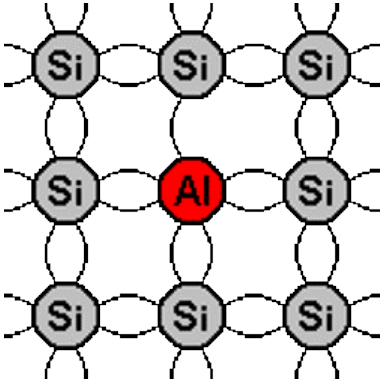
حامل اقلیت حفره

$$np = n_i^2$$

$$p_N \cong \frac{n_i^2}{N_D}$$

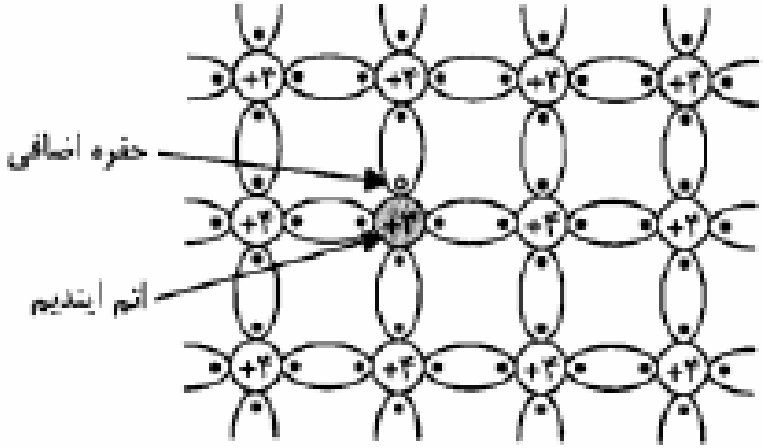


افزودن ناخالصی سه ظرفیتی نوع P پذیرنده(Acceptor)



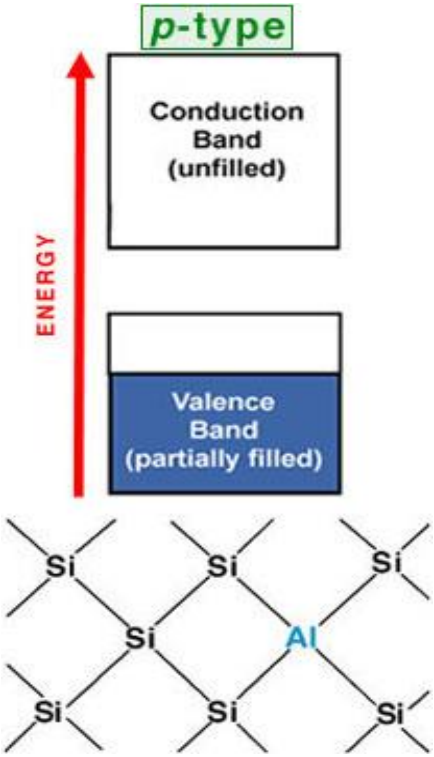
ماده ۳ ظرفیتی مانند آلومنیوم یا گالیم

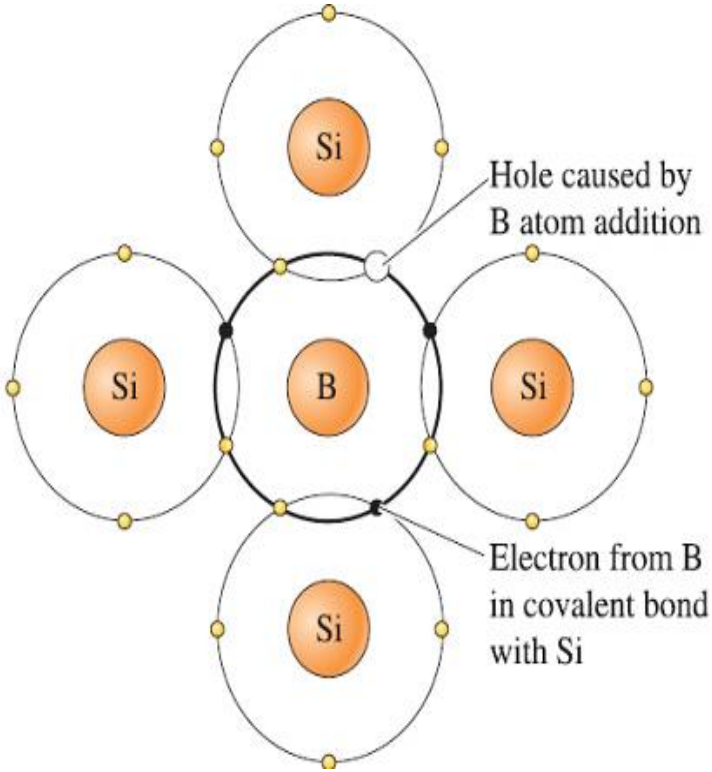
III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

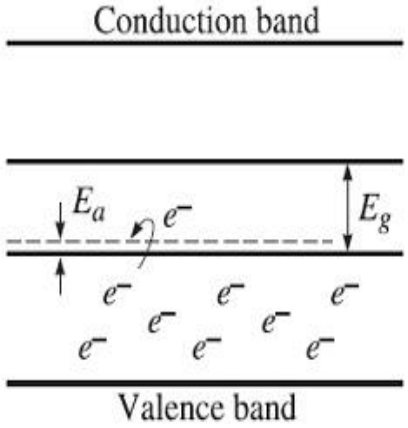


شکل ۱-۶: نمایش ساختمان شبکه بلوری سیلیکن با ناخالصی پذیرنده ایندیم

افزودن ناخالصی سه ظرفیتی نوع P

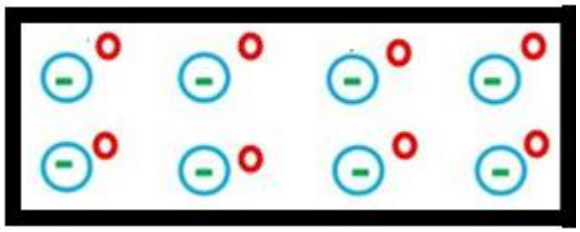






افزودن ناخالصی سه ظرفیتی نوع P

چگالی اتم های ناخالصی پذیرنده	NA
حامل اکثریت	حفره
حامل اقلیت	الکترون



$$np = n_i^2$$

$$n_p \cong \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$p + N_D = n + N_A$$

افزودن هم زمان هر دو نوع ناخالصی

پارامترهای مهم نیمه هادی

پارامتر	سیلیکن	ژرمانیم
عدد اتمی	۱۴	۳۲
وزن اتمی (g)	۲۸٫۱	۷۲٫۶
جرم حجمی (g/cm^3)	۲٫۳۳	۵٫۳۲
ضریب دی‌الکتریک نسبی ε_r	۱۲	۱۶
عرض نوار انرژی E_G (eV)	۱٫۱	۰٫۷۲
مقاومت ویژه σ^{-1} ($\Omega-cm$)	۲۳۰۰۰۰	۴۵
قابلیت تحرک الکترون آزاد μ_n ($cm^2/V\text{-}sec$)	۱۳۰۰	۳۸۰۰
قابلیت تحرک حفره μ_p ($cm^2/V\text{-}sec$)	۵۰۰	۱۸۰۰
ثابت انتشار الکترون آزاد D_n (cm^2/sec)	۳۴	۹۹
ثابت انتشار حفره D_p (cm^2/sec)	۱۳	۴۷

مولفه های جریان الکتریکی در نیمه هادی

جریان انتشاری
یا نفوذی
Diffusion

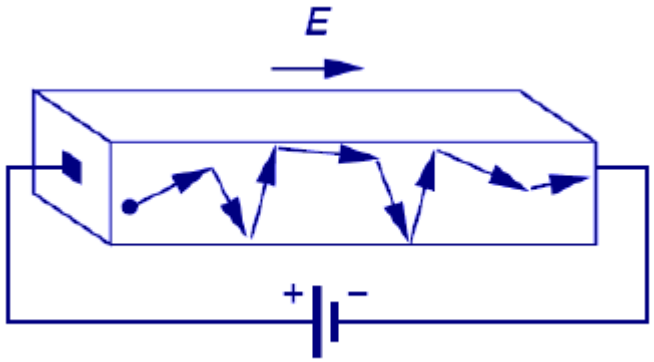
جریان هدایتی
یا رانشی
Drift

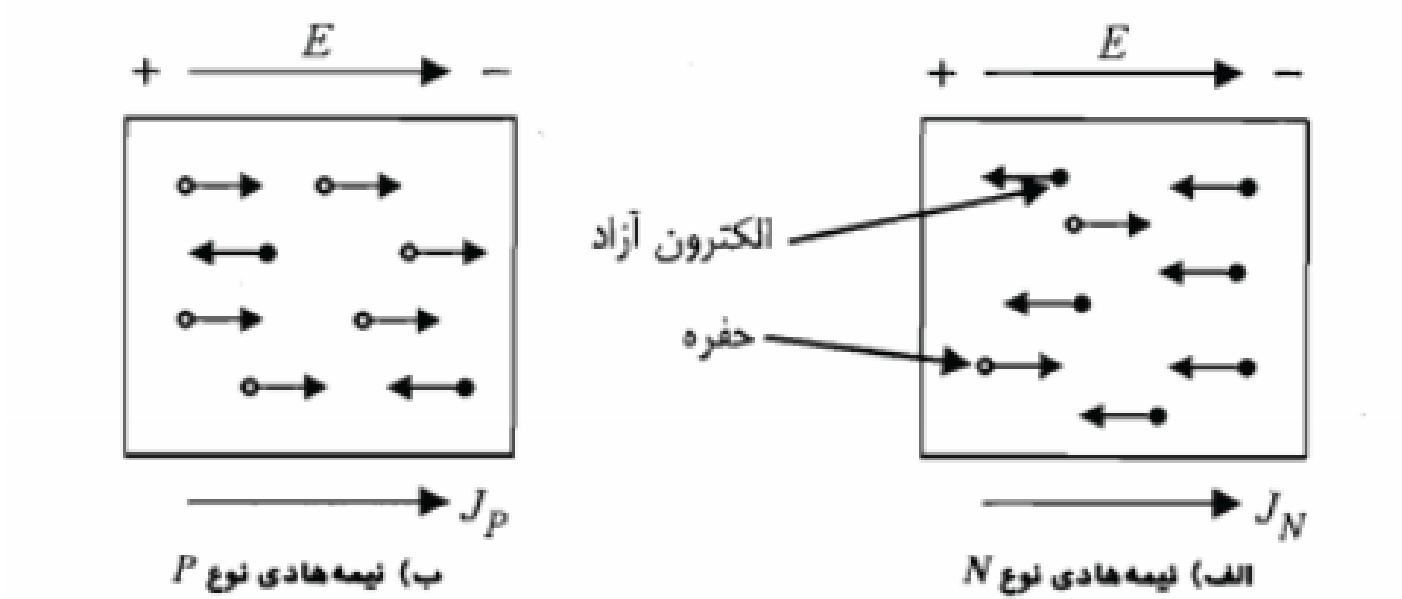
جابجایی حامل ها در
اثر تراکم
غیریکنواخت حامل ها

جابجایی حامل ها در
اثر اعمال میدان
الکتریکی

جریان هدایتی

جابجایی حامل ها در اثر اعمال میدان الکتریکی





جریان هدایتی

در صورت اعمال میدان الکتریکی به یک قطعه نیمه هادی الکترون ها در خلاف جهت میدان حرکت می کنند و جهت حرکت حفره ها بر عکس می باشد.

با توجه به تاثیر گذاری دو حامل بار در مواد نیمه هادی

$$\vec{v}_h = \mu_p \vec{E}$$

$$\vec{v}_e = -\mu_n \vec{E}$$

$$v = \mu_e E$$

$$J = \rho v = (nq)v$$

$$\mathbf{J = (n\,q\,\mu_n + p\,q\,\mu_p)\,E}$$

بنابراین برای دو نیمه هادی نوع N و P خواهیم داشت:

$$J_N = (N_D \mu_n + p_N \mu_p) qE = \sigma_N E$$

$$J_P = (N_A \mu_p + n_p \mu_n) qE = \sigma_p E$$

جریان هدایتی

بنابراین برای دو نیمه هادی نوع N و P خواهیم داشت:

$$J_N = (N_D \mu_n + p_N \mu_p) qE = \sigma_N E$$

$$J_P = (N_A \mu_p + n_p \mu_n) qE = \sigma_p E$$

با صرفنظر از چگالی حامل های اقلیت

چگالی حامل‌های اکثریت $n_N \cong N_D$

چگالی حامل‌های اقلیت $p_N \cong \frac{n_i^2}{N_D}$

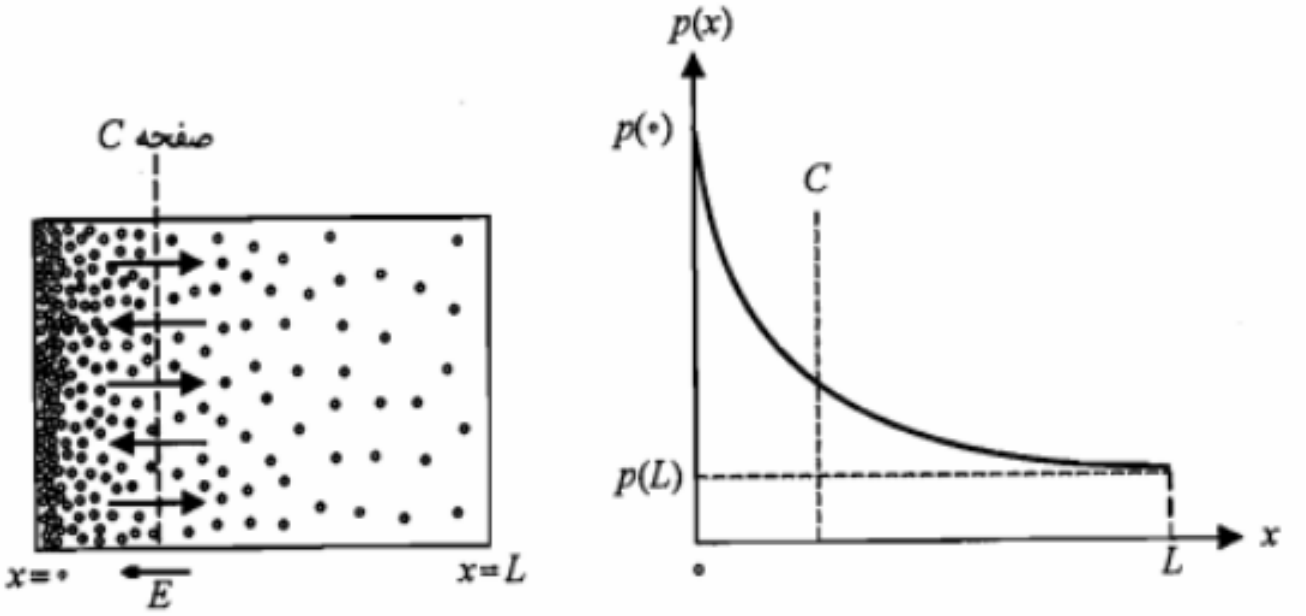
$$J_N \cong N_D \, q \, \mu_n \, E$$

چگالی حامل‌های اکثریت $p_P \cong N_A$

چگالی حامل‌های اقلیت $n_P \cong \frac{n_i^2}{N_A}$

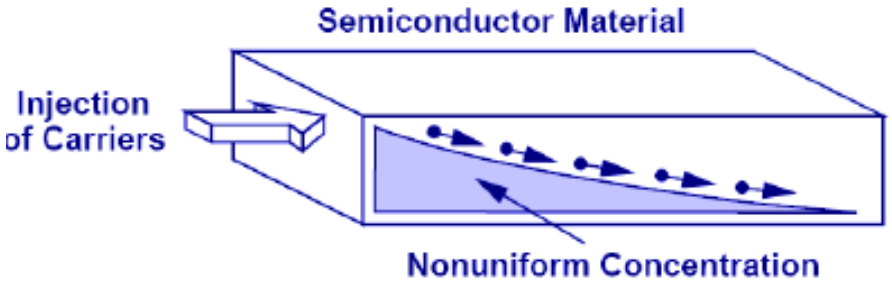
$$J_P \cong N_A \, q \, \mu_p \, E$$

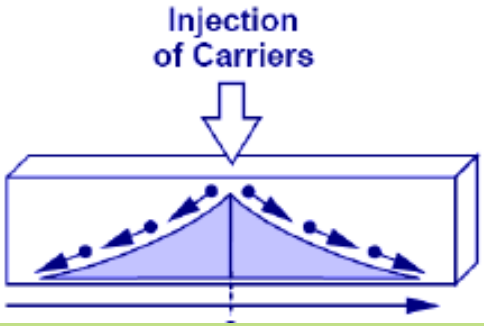
جریان انتشاری



شکل ۱-۸: یک قطعه نیمه‌هادی نوع P، دارای چگالی غیریکنواخت حفره‌ها همراه با

جابجایی حامل ها در
اثر تراکم
غیریکنواخت حامل ها





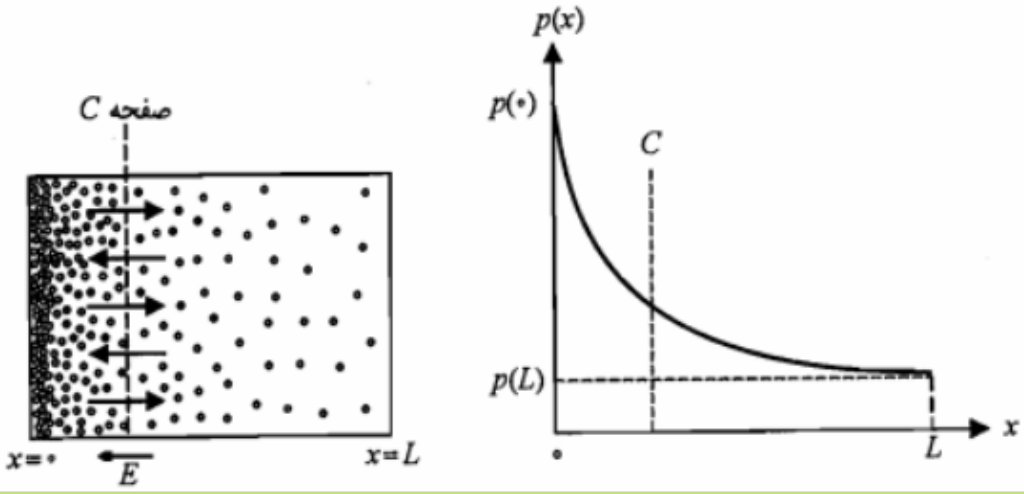
جریان انتشاری

اگر تزریق ناخالصی در یک نیمه هادی به صورت غیریکنواخت انجام شده باشد

Jp چگالی جریان انتشاری
P(x) چگالی حفره ها
Dp ثابت انتشار

$$J_p \propto q\frac{dp(x)}{dx}$$

$$J_p = -D_P\, q\frac{dp(x)}{dx}$$



$$J_n = qD_n\frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -qD_p\frac{dp}{dx}$$

$$J_{tot} = q(D_n\frac{dn}{dx} - D_p\frac{dp}{dx})$$

جریان انتشاری

یون های ساکن اتم های ناخالصی پذیرنده یک میدان الکتریکی داخلی ایجاد می کنند

این میدان الکتریکی داخلی به نوبه خود یک جریان هدایتی به وجود می‌آورد که اندازه آن درست برابر جریان انتشاری، ولی در خلاف جهت آن است. از مساوی قرار دادن اندازه این دو جریان می‌توان شدت میدان الکتریکی داخلی را در هر نقطه x محاسبه نمود.

$$q\mu_p p(x) E(x) = qD_p \frac{dp(x)}{dx} \qquad (۱۵-۱)$$

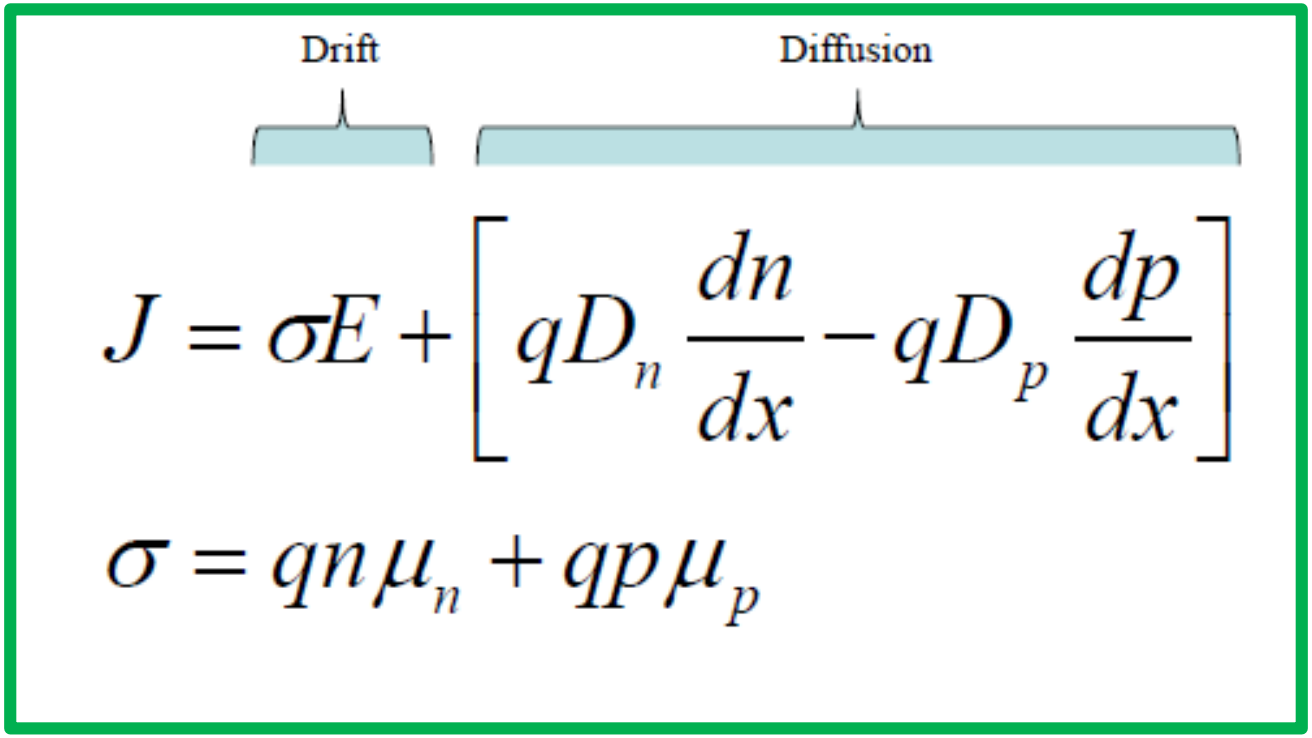
یا

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx} \qquad (۱۶-۱)$$

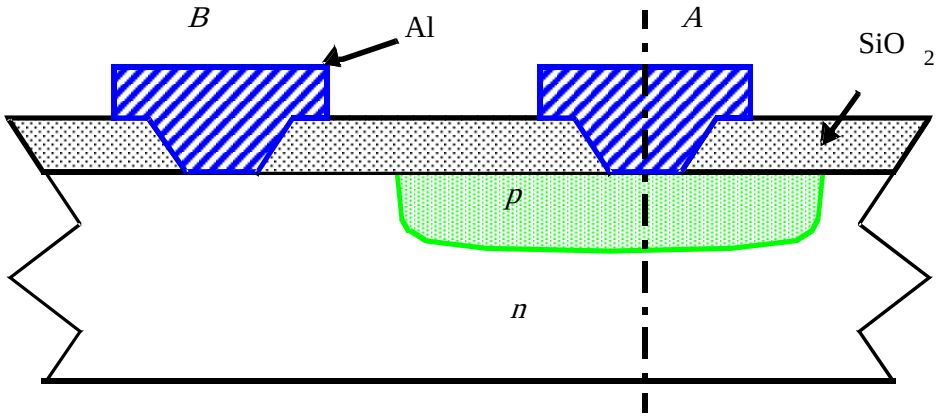
$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T = KT/q$$

$$E(x) = \frac{V_T}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

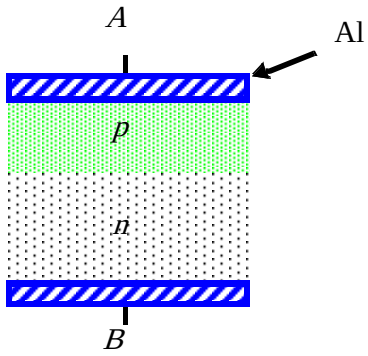
مولفه های جریان الکتریکی در نیمه هادی



پیوند P-N

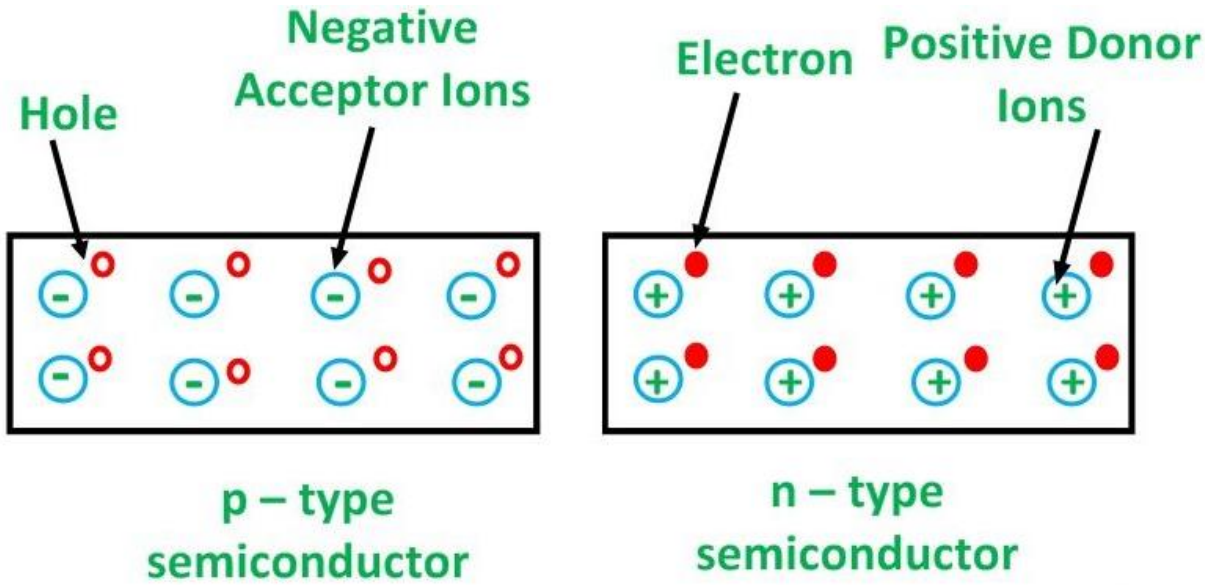


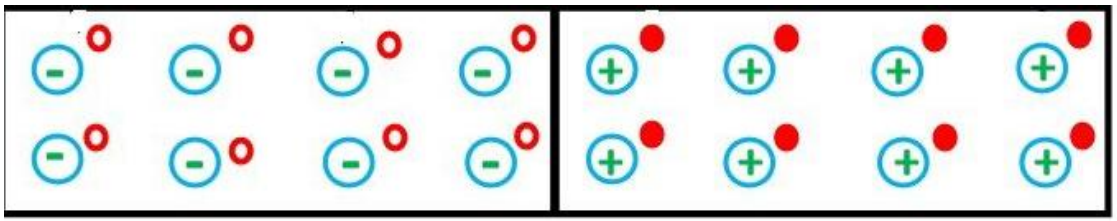
Cross-section of *pn*-junction in an IC process

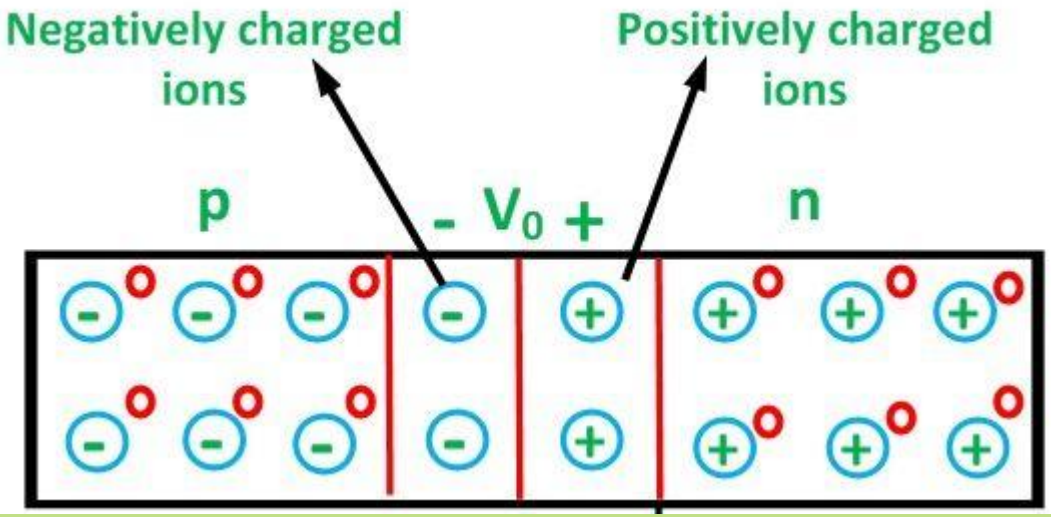


One-dimensional representation

پیوند P-N

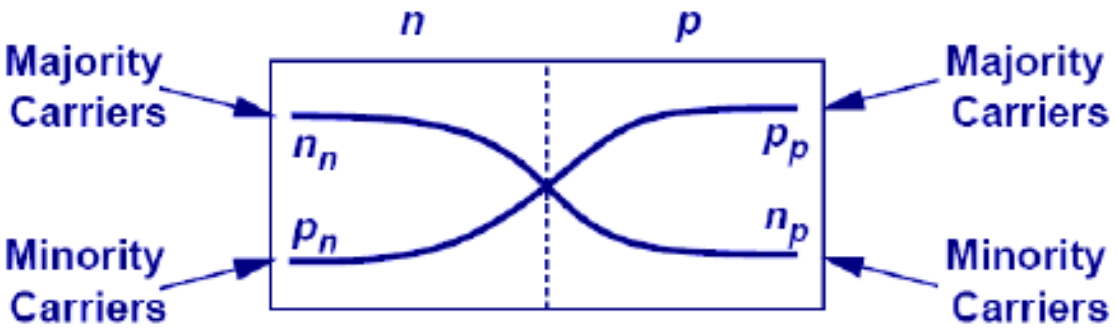

Hole
Negative
Acceptor Ions
Electron
Positive Donor
Ions
p – type
semiconductor
n – type
semiconductor




Negatively charged
ions
Positively charged
ions
p
- V0 +
n

پیوند P-N

به دلیل اینکه چگالی حامل ها در دو طرف محل اتصال متفاوت است، جریان نفوذی در محل اتصال برقرار می شود.



n_n : Concentration of electrons on n side

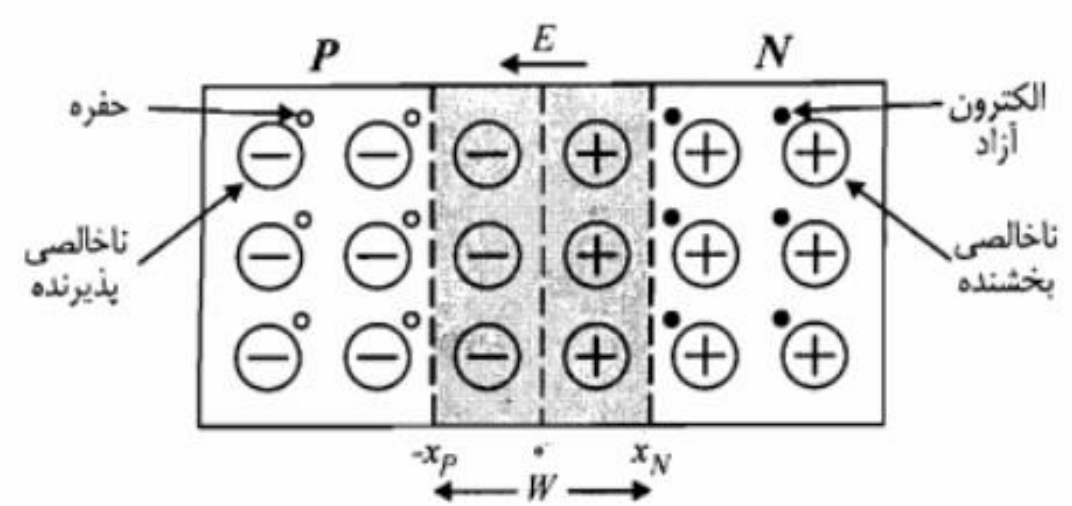
p_n : Concentration of holes on n side

p_p : Concentration of holes on p side

n_p : Concentration of electrons on p side

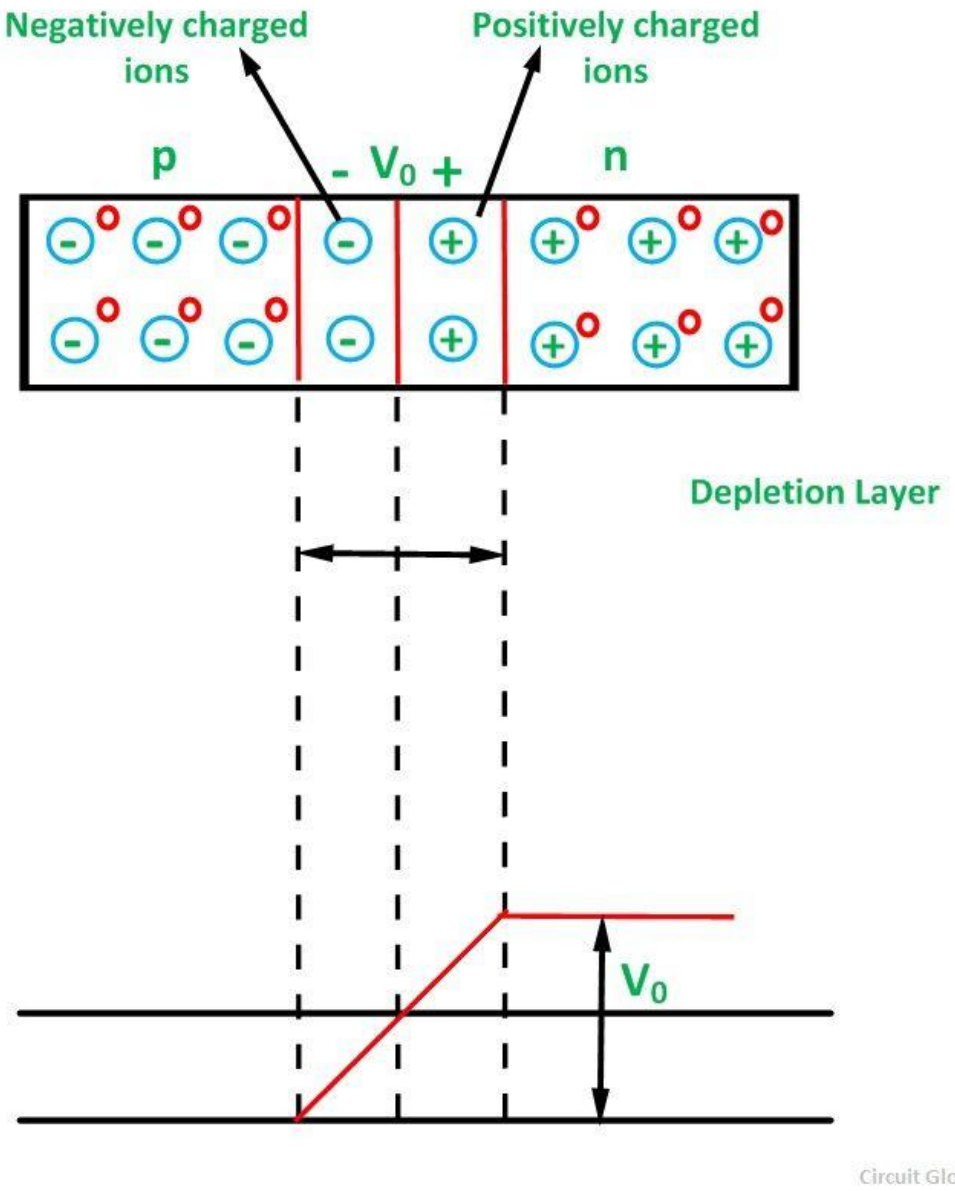
پیوند P-N

ناحیه تهی ناحیه تخلیه ناحیه
بار فضایی space charge region



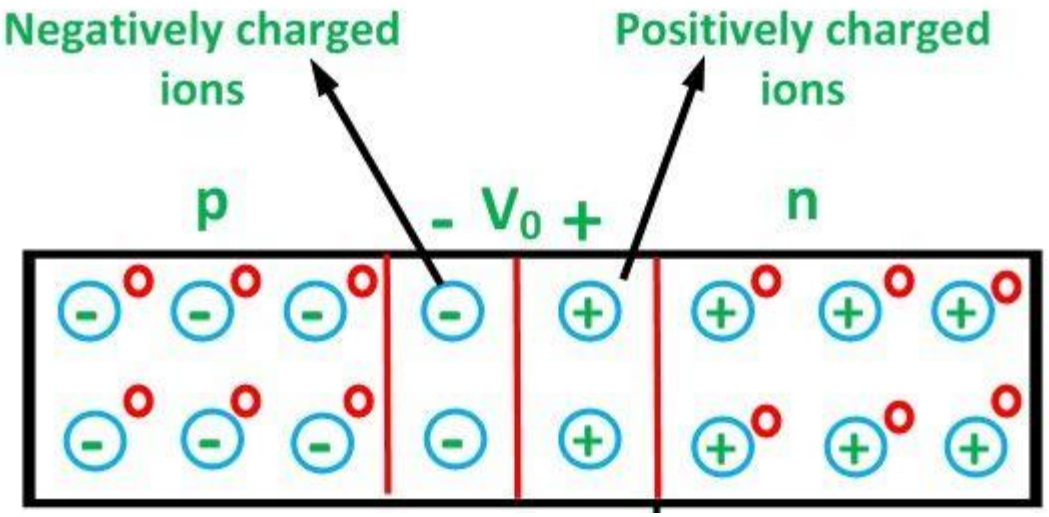
شکل ۱-۱۱: نحوه تشکیل ناحیه تهی به عرض W در اطراف پیوند $P-N$

پیوند P-N

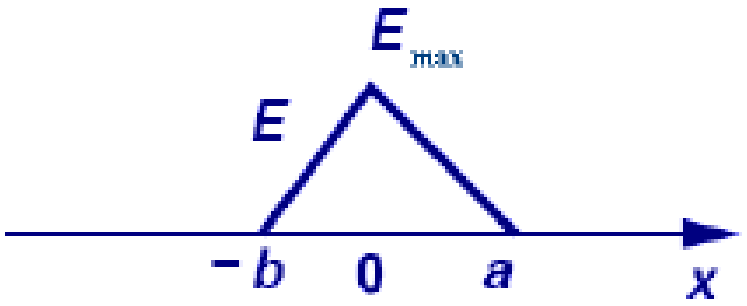


جهت میدان الکتریکی ایجاد شده به گونه ایست که از انتشار بیشتر حامل های بار جلوگیری می کند
بنابراین عرض ناحیه تهی ثابت می ماند

وجود بارهای ساکن در دو طرف پیوند، سبب ایجاد یک اختلاف پتانسیل داخلی می شود

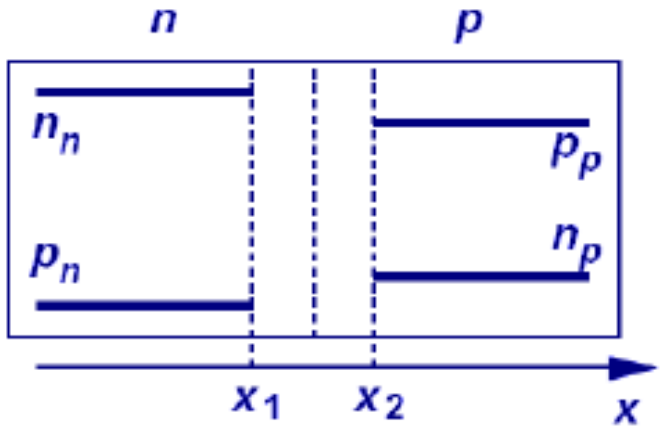


یون های ثابت موجود در ناحیه تخلیه یک میدان الکتریکی ایجاد می کنند. این میدان الکتریکی سبب ایجاد جریان رانشی می شود.



$$n_n = N_D \qquad p_p = N_A$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \qquad n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$$



$$I_{drift,p} = I_{diff,p}$$
$$I_{drift,n} = I_{diff,n}$$

در حالت تعادل جریان رانشی برابر با جریان نفوذی و جهت آن برخلاف جریان نفوذی است. بنابراین جریان برآیند برابر با صفر است.

اختلاف پتانسیل در ناحیه تهی پیوند P-N

اختلاف پتانسیل تماس

$$E(x) = \frac{V_T}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

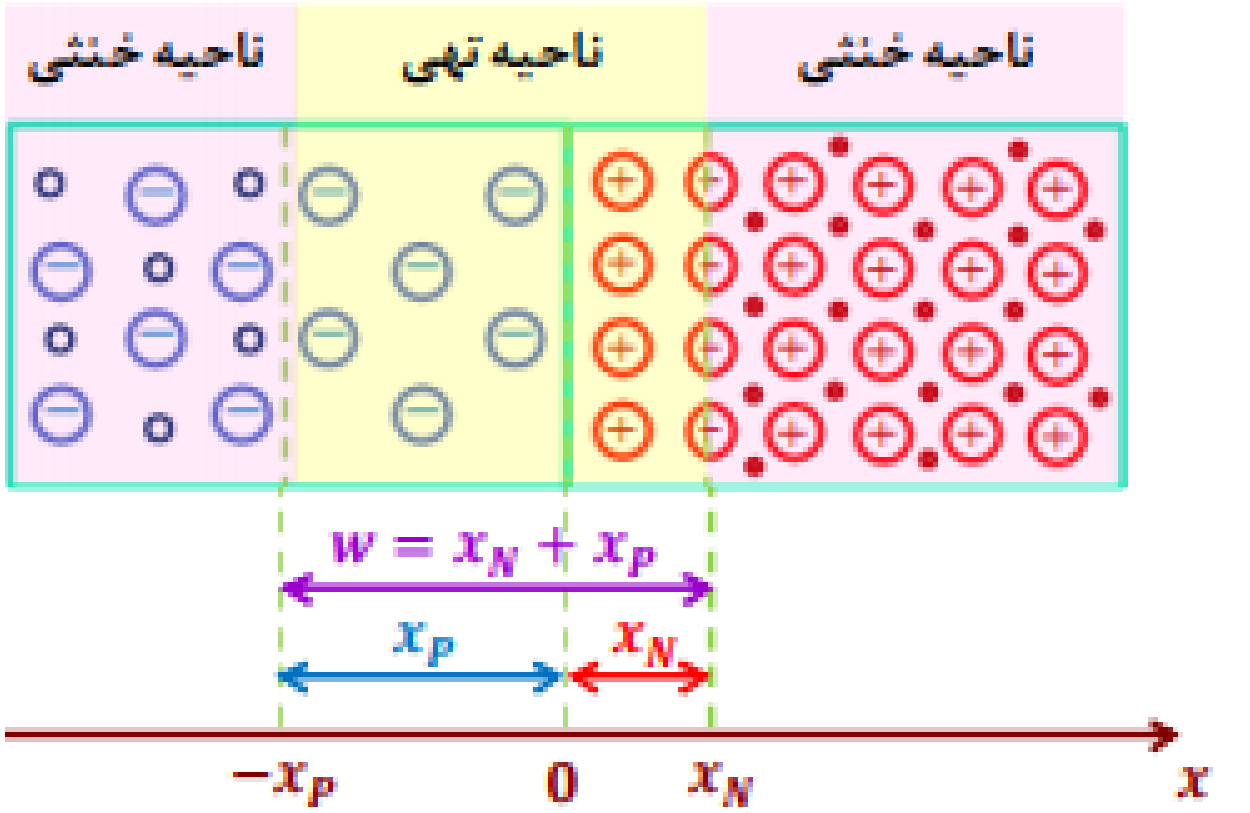
$$E = -dV/dx)$$

$$dV = -V_T \frac{dp(x)}{p(x)}$$

انتگرالگیری از رابطه در ناحیه تهی (Xp- تا Xn)

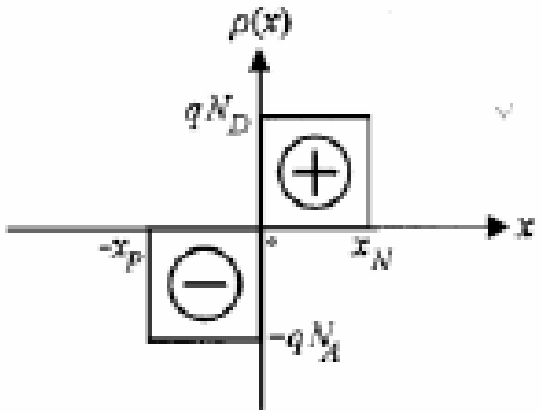
$$V_\circ = V_T Ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

شدت میدان و پتانسیل الکتریکی در ناحیه تهی



شدت میدان در ناحیه تهی پیوند P-N

دوقطبی الکتریکی



شکل ۱-۱۲: تغییرات چگالی بار الکتریکی در ناحیه تهی پیوند P-N شکل ۱-۱۱

معادله پواسون

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

ε ضریب دی الکتریک ناحیه تهی

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

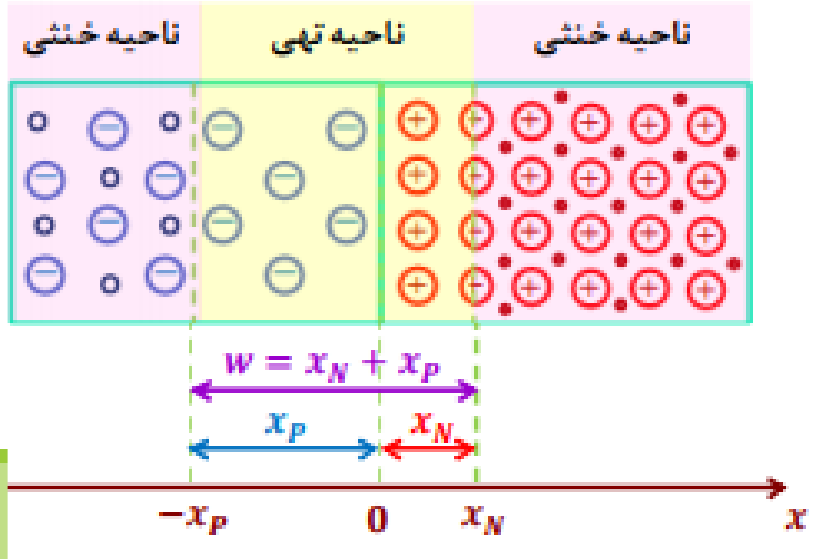
ε_0=8.854*10 $^{-12}$ F /m

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \longrightarrow E(x) = -\frac{dV}{dx} = \int \frac{\rho}{\varepsilon} dx$$

$$E_{\cdot} = \int_{-x_P}^{\cdot} \left(\frac{-qN_A}{\varepsilon}\right) dx = -\frac{qN_A x_P}{\varepsilon}$$

$$E_{\cdot} = \int_{x_N}^{\cdot} \left(\frac{qN_D}{\varepsilon}\right) dx = -\frac{qN_D x_N}{\varepsilon}$$

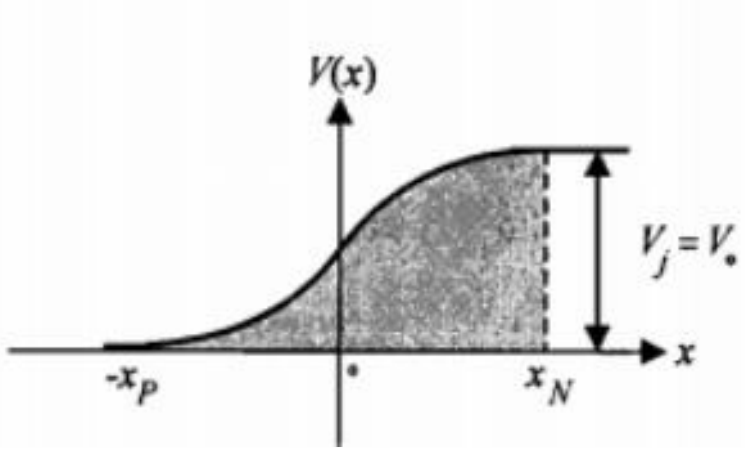
$$\longrightarrow \boxed{N_A x_P = N_D x_N}$$



$$V_0 = V_T \, Ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$E_0 = \int_{-x_P}^{0} \left(\frac{-qN_A}{\varepsilon} \right) dx = -\frac{qN_A x_P}{\varepsilon}$$

$$E_0 = \int_{x_N}^{0} \left(\frac{qN_D}{\varepsilon} \right) dx = -\frac{qN_D x_N}{\varepsilon}$$



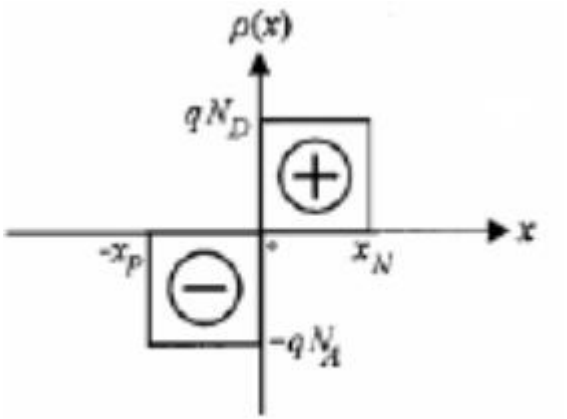
$$V = -\int E \, dx$$

$$N_A x_P = N_D x_N$$

جایگذاری و انتگرالگیری

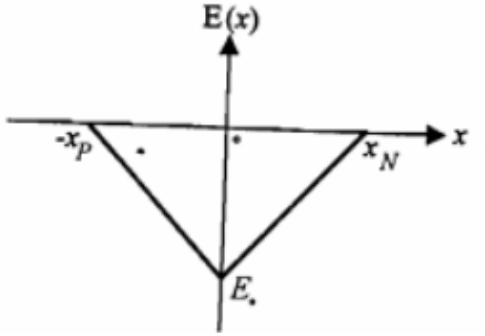
$$x_P = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{qN_A (1 + N_A/N_D)} \right]^{1/2}$$

$$x_N = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{qN_D (1 + N_D/N_A)} \right]^{1/2}$$

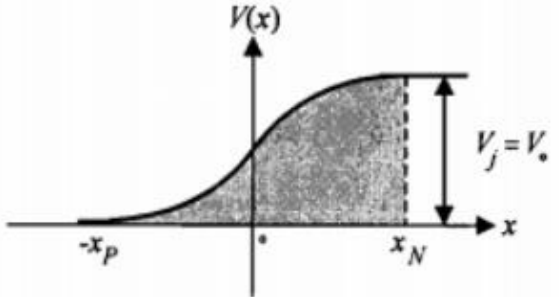


$$E_{\circ} = \int_{-x_P}^{\circ} \left(\frac{-qN_A}{\varepsilon}\right) dx = -\frac{qN_A x_P}{\varepsilon}$$

$$E_{\circ} = \int_{x_N}^{\circ} \left(\frac{qN_D}{\varepsilon}\right) dx = -\frac{qN_D x_N}{\varepsilon}$$

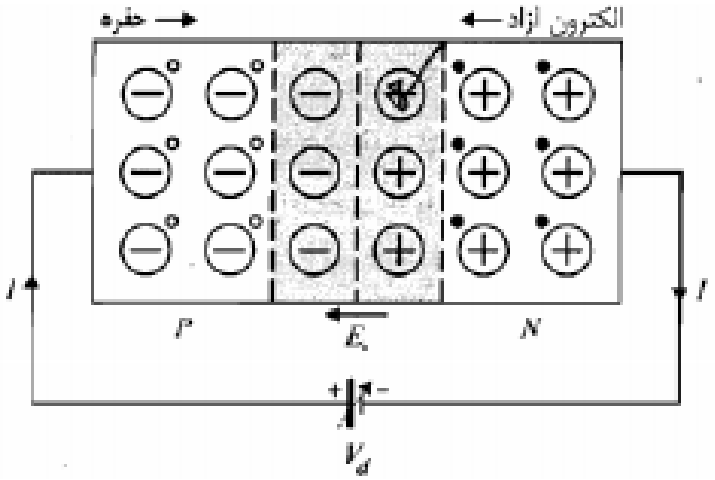


$$V = -\int E\,dx$$



اتصال پیوند P-N به پتانسیل خارجی(بایاس)

بایاس مستقیم



بایاس معکوس