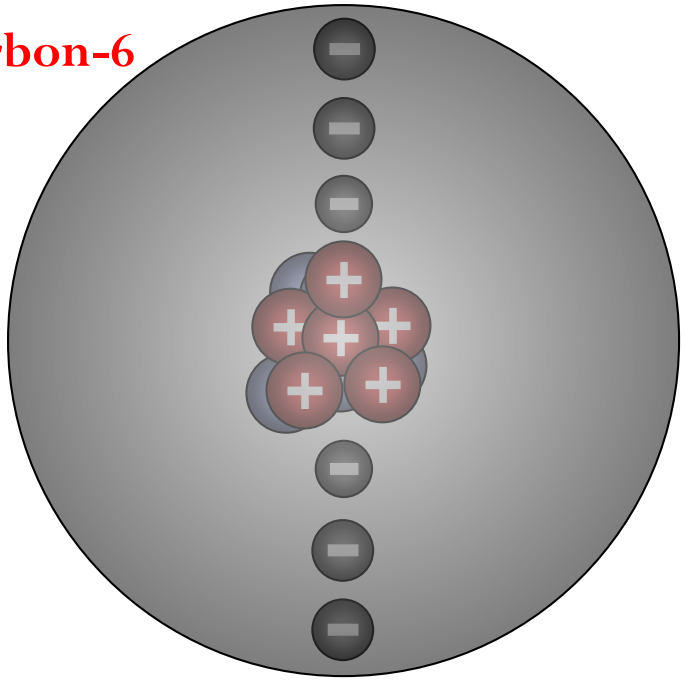
فصل ۱

نیمه هادیها semiconductors

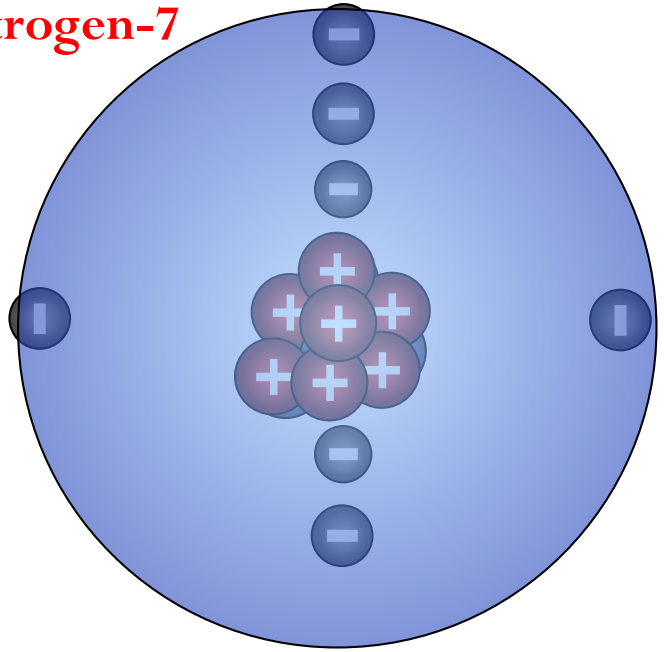
رسول
دلیرروی فرد

ساختمان داخلی یک اتم از پروتونها و الکترونها تشکیل شده است، بطوریکه الکترونها به دور هسته تشکیل دهنده اتم در حال چرخش هستند.

Carbon-6

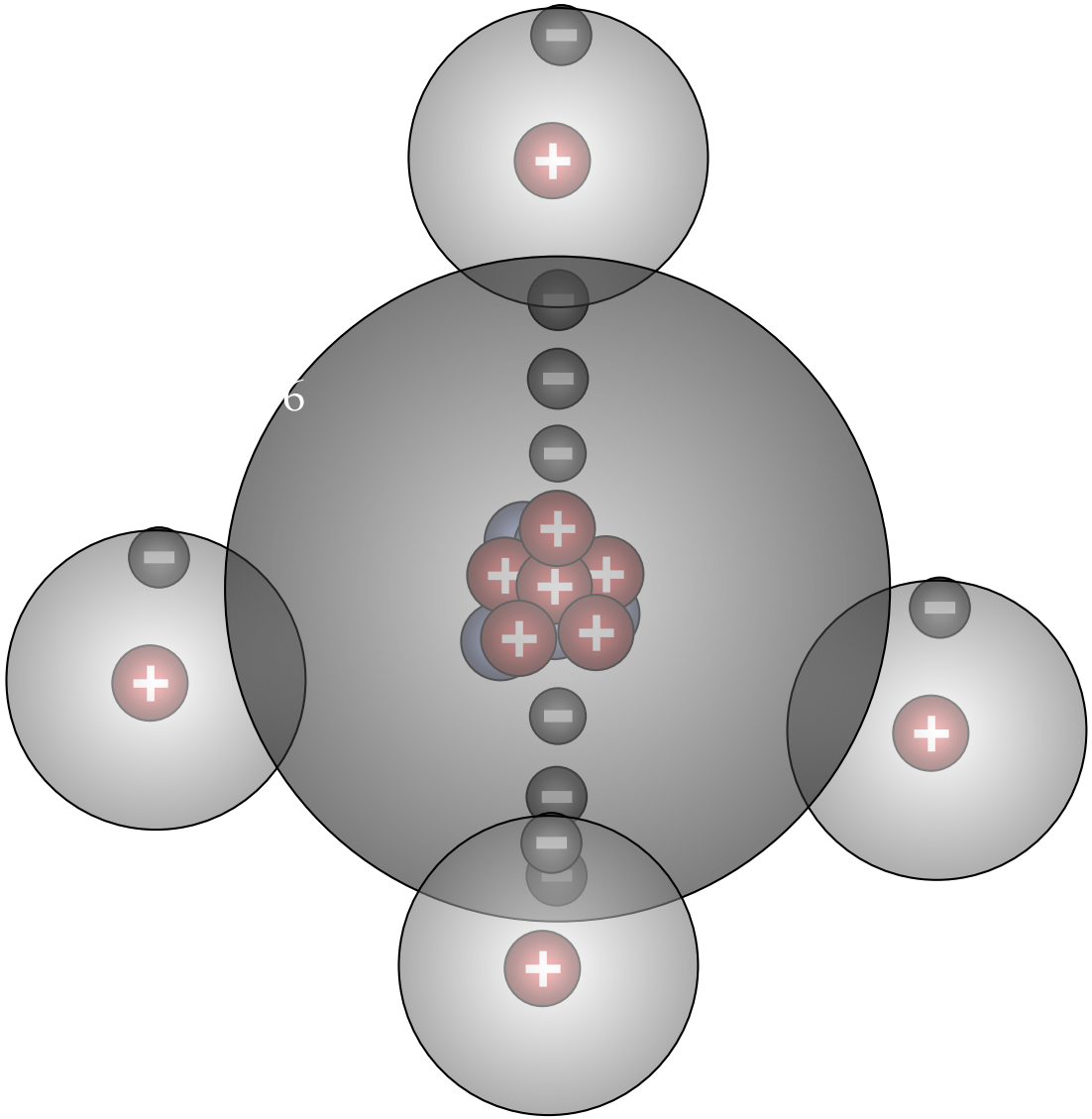


Nitrogen-7



وقتی که دو یا چند عنصر با هم ترکیب می شوند، الکترونها خود را به اشتراک می گذارند تا یک پیوند محکم را بوجود آورند.

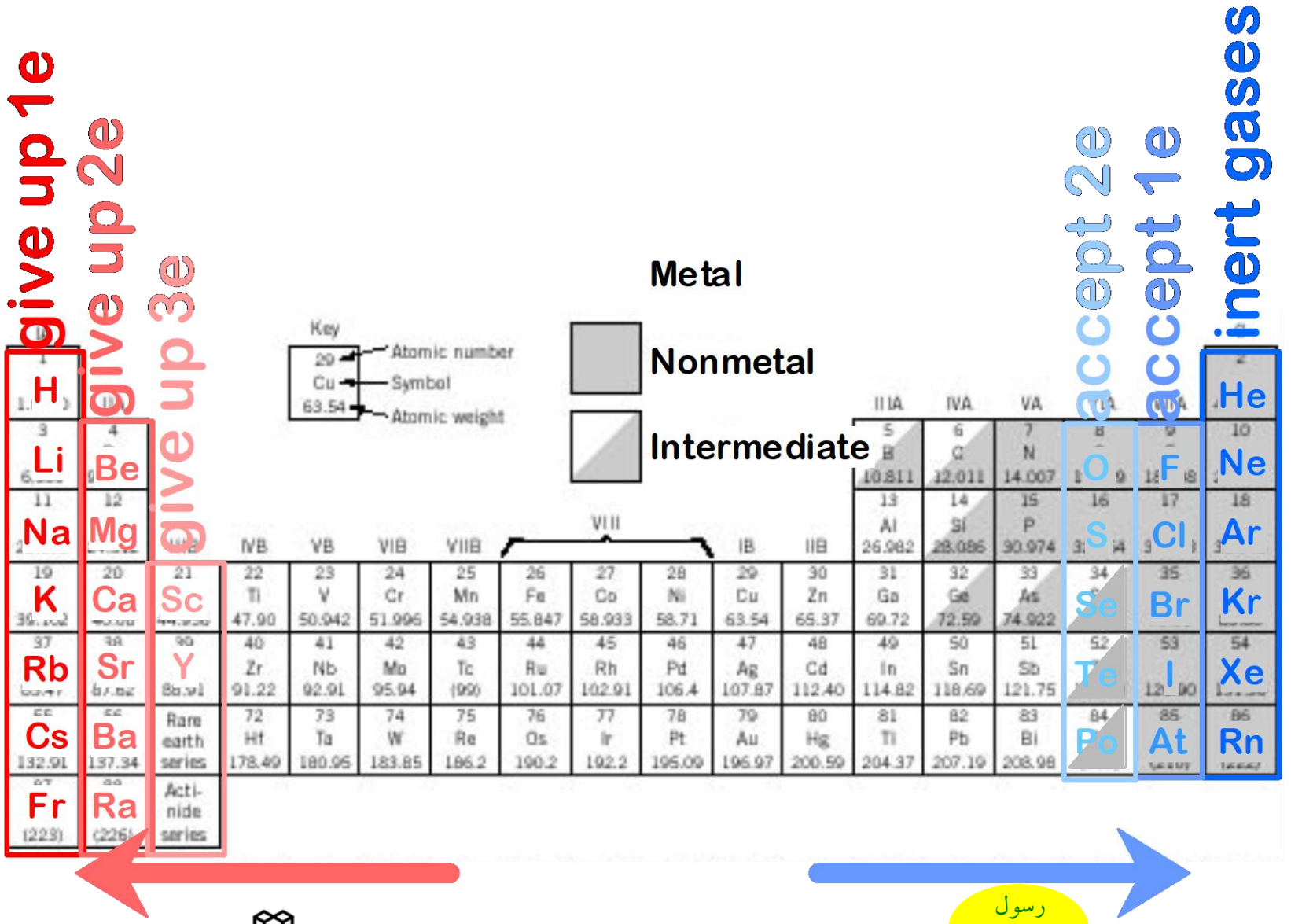
رسول
دلیرروی فرد



عناصر از نظر هدایت الکتریکی به سه دسته تقسیم می شوند :

رسول
دلیرروی فرد

۱- هادی ۲- نیمه هادی ۳- عایق



رسول دلیرروی فرد

در ساختمان اتمی عناصر ، هر الکترون دارای یک سطح انرژی (تراز) معینی هستند.

سه سطح انرژی قابل تفکیک وجود دارد.

۱) باند ظرفیت valance band

الکترونها در این باند در پیوندها شرکت دارند و آزاد نمی باشند.

۲) باند هدایت conduction band

الکترونها در این باند آزاد بوده و به اتم خاصی وابسته نمی باشند.

۳) باند ممنوعه band gap

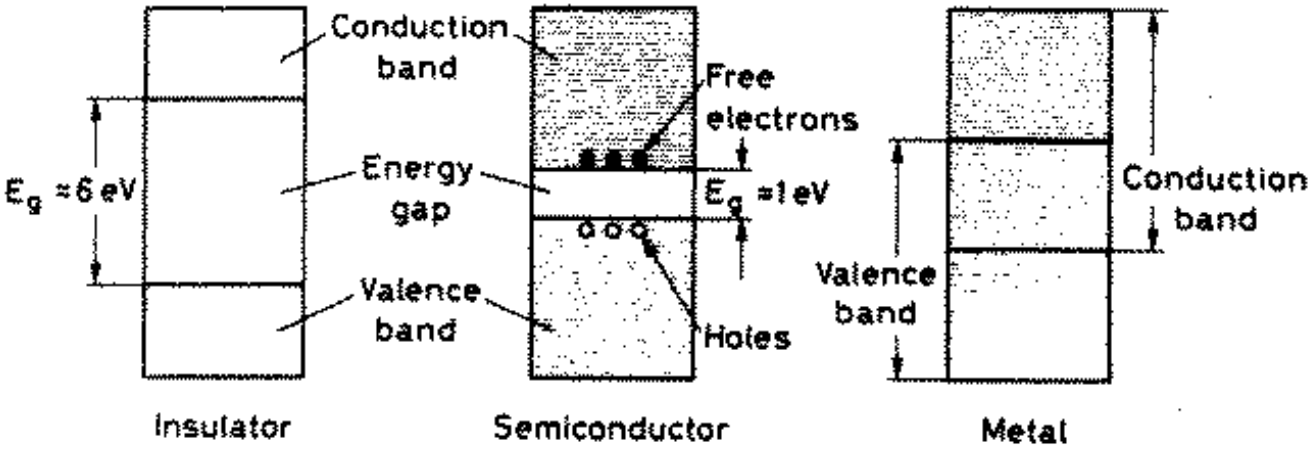
حد فاصل دو باند ظرفیت و هدایت می باشد که هیچ الکترونی در این سطح وجود ندارد.

تفاوت عناصر به میزان باند ممنوعه مربوط می شود، بطوریکه :

۱- هادیها دارای باند ممنوعه نیستند و در حقیقت باندهای ظرفیت و هدایت در هم ادغام شده اند.

۲- عایقها دارای باند ممنوعه بسیار بزرگی هستند، بنحویکه امکان انتقال الکترون از باند ظرفیت به باند هدایت خیلی کم است.

۳- نیمه هادیها دارای باند ممنوعه بزرگی نیستند و با اعمال انرژی لازم می توان الکترونها را از باند ظرفیت به باند هدایت فرستاد.



رسول
دلیرروی فرد

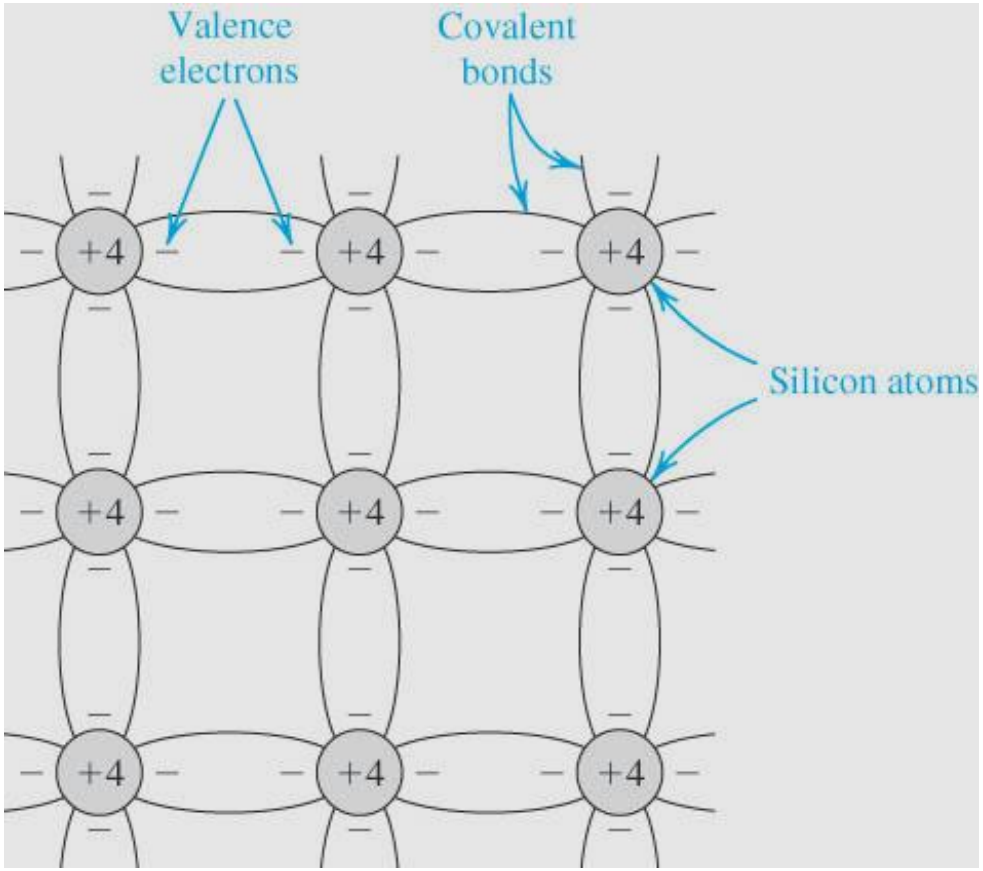
در جدول ذیل ضریب مقاومتی برخی عناصر نسبت به عبور جریان نشان داده شده است :

- some representative resistivities (ρ):
  - $R = \rho L/A$, R = resistance, L = length, A = cross section area; resistivity at 20° C

	resistivity in Ω m	resistance(in Ω)(L=1m, diam =1mm)
aluminum	2.8×10^{-8}	3.6×10^{-2}
brass	$\approx 8\times10^{-8}$	10.1×10^{-2}
copper	1.7×10^{-8}	2.2×10^{-2}
platinum	10×10^{-8}	12.7×10^{-2}
silver	1.6×10^{-8}	2.1×10^{-2}
carbon	3.5×10^{-5}	44.5
germanium	0.45	5.7×10^{5}
silicon	≈ 640	$\approx 6\times10^{8}$
porcelain	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{16} - 10^{18}$
teflon	10^{14}	10^{20}
blood	1.5	1.9×10^{6}
fat	24	3×10^{7}

در صفر درجه کلوین در نیمه هادی، هیچ الکترون آزاد در باند هدایت وجود ندارد (مشابه عایق ها).

نیمه هادیها معمولا بصورت کریستال وجود دارند و اتمها در پیوند کووالانس شرکت دارند.

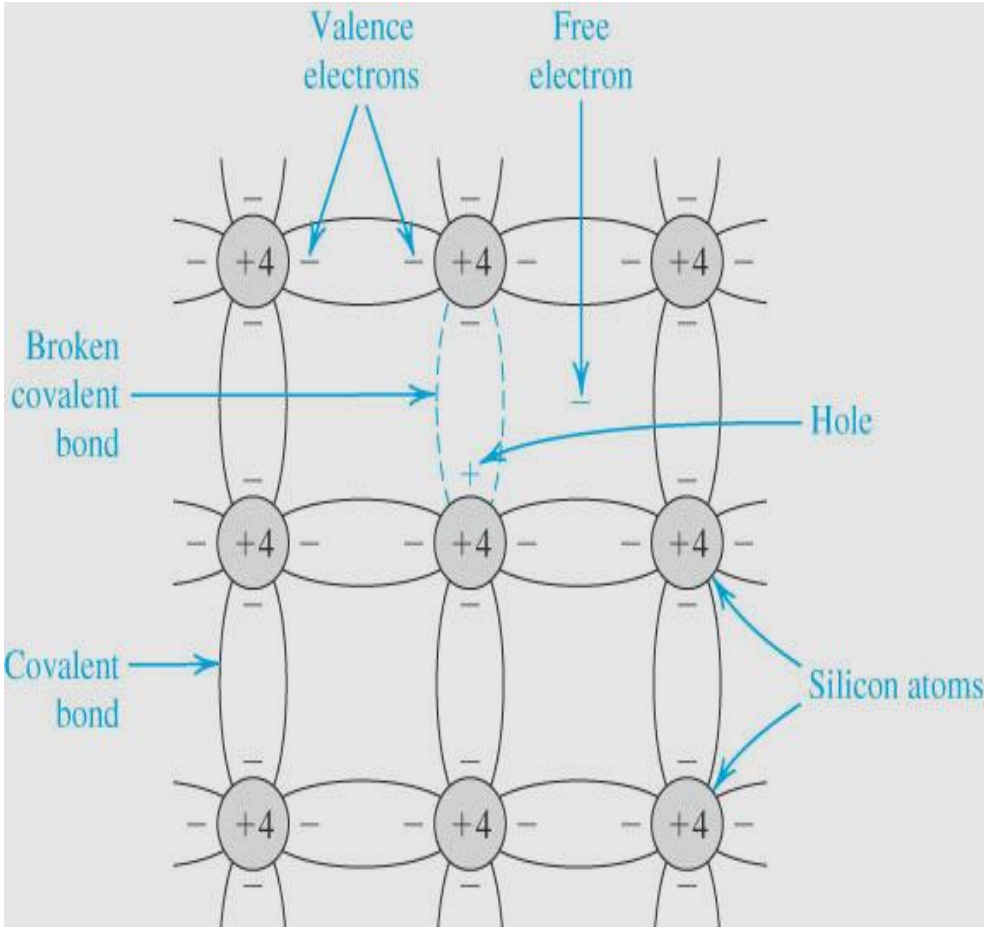


بطوریکه که در آن هر اتم سیلیکون توسط پیوندهای کووالانسی با چهار اتم دیگر پیوند برقرار میکند.

در دمای اتاق، حرارت باعث میشود تا تعدادی از پیوندهای کووالانسی شکسته شده و الکترونهای آزاد بوجود آیند.

رسول دلیرروی فرد

حفره و الکترون



- وقتی که یک پیوند کووالانسی شکسته میشود، یک الکترون اتم اصلی خود را ترک میکند آنچه که بر جای میماند یک اتم با بار مثبت است که آماده پذیرش یک الکترون را دارد. این محل خالی یک حفره نامیده میشود.
- این حفره میتواند توسط الکترونی که از اتم دیگری جدا شده پرشود. اینکار باعث میشود تا حفره در محل دیگری تشکیل شود. بدین ترتیب با جابجا شدن الکترونها، حفره ها هم جابجا خواهند شد. یعنی جریانی از حفره ها!

رسول
دلیرروی فرد

- مقداربارالکتریکی حفره برابر با بار الکترون اما مثبت است. در عمل تعداد حفره ها و الکترونهای آزاد (تعداد ناقلهای ذاتی) با هم برابرهستند لذا بارالکتریکی کل نیمه هادی برابر با صفر است.

$$n_i^2 = BT^3 e^{-E_{g0}/KT}$$

K ثابت بولتزمن و برابر $8.62\times10^{-5}\ ev/{}^{\circ}K$ است.

T دما بر حسب درجه کلوین است.

E_{g0} عرض باند ممنوعه در صفر درجه کلوین است.

مقدار E_g در هر دما بر حسب درجه کلوین از رابطه زیر بدست می آید :

$$Si: \quad E_g = 1.21 - 3.6\times10^{-4}T$$

$$Ge: \quad E_g = 0.785 - 2.23\times10^{-4}T$$

رسول
دلیرروی فرد

B بستگی به جنس نیمه هادی دارد و مقدار آن برای Si و Ge به ترتیب برابر 5.4×10^{31} و 3.5×10^{31} است.

در دمای معمولی (۲۵ درجه سانتیگراد) ، مقدار ناقلهای ذاتی برابر است با :

$$Si: \quad n_i = p_i = 1.5\times10^{10} / cm^3$$

$$Ge: \quad n_i = p_i = 2.5\times10^{13} / cm^3$$

مواد نیمه هادی مذکور به دلایل متعددی مورد توجه قرار گرفته اند :

۱- تا حد بسیار زیادی می توان آن را خالص فرض کرد ولی با اضافه کردن یک در میلیون ناخالصی (از نوع مناسب) می توان آن را از یک حالت هدایت ضعیف به یک هادی خوب تبدیل نمود.

رسول
دلیرروی فرد

۲- مشخصات آنها را می توان با بکار بردن گرما و نور بطور قابل ملاحظه ای تغییر داد که این موضوع مطلب مهمی در ساخت قطعات حساس به نور و گرما است.

ناخالصی ها در نیمه هادیها

جهت افزایش هدایت الکتریکی، به نیمه هادی ناخالصی افزوده می شود.

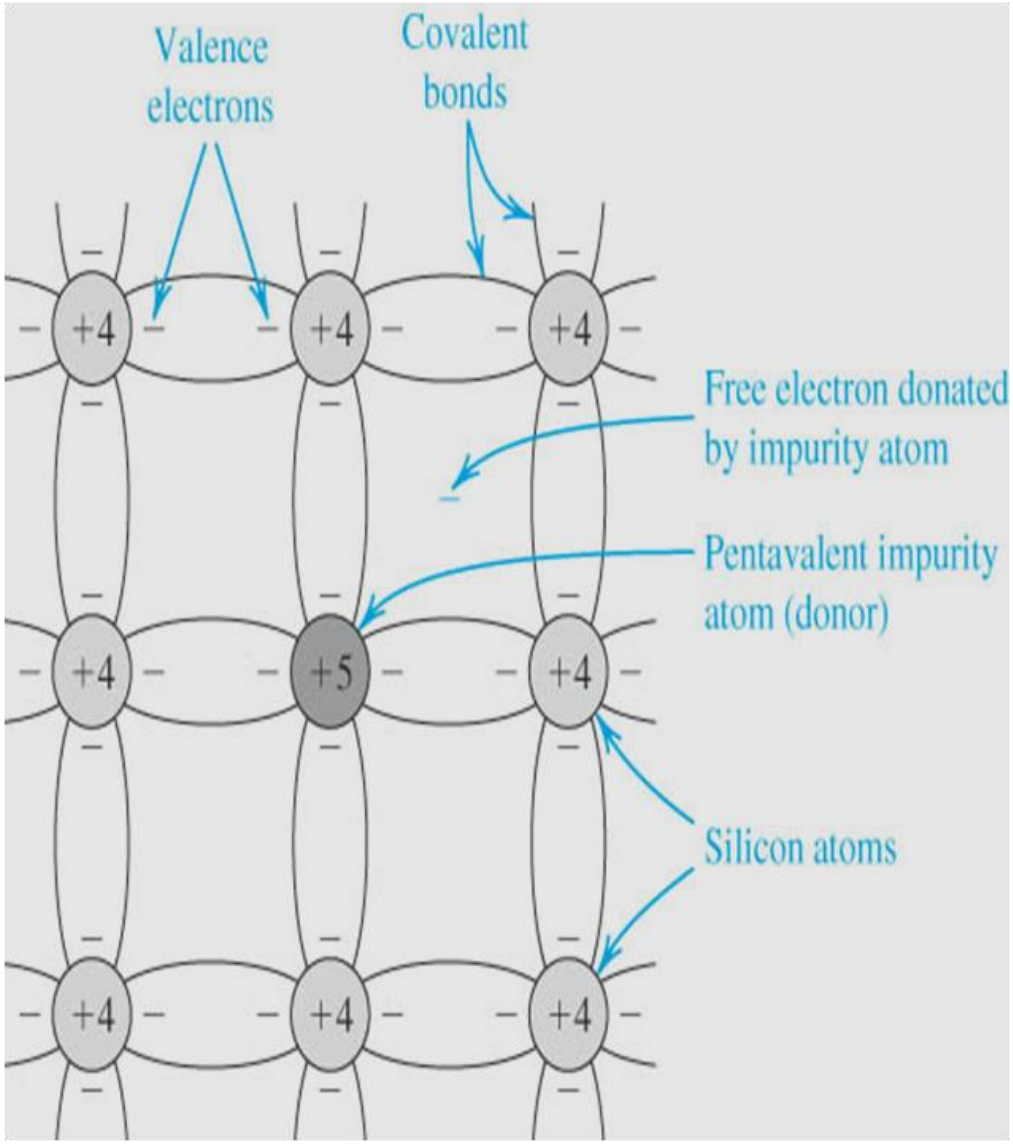
- در یک نیمه هادی خالص تعداد حفره ها و الکترونها برابر است. اما می توان با افزودن ناحالصی به نیمه هادی این برابری را به هم زد.

- یک نیمه هادی ناخالص که تعداد الکترونهای آزاد آن بیشتر از حفره هایش باشد، N-type و نیمه هادی با اکثریت حفره ها P-type نامیده می شود.

رسول
دلیرروی فرد

نیمه هادی نوع N

- برای ساختن نیمه هادی نوع N به سیلیکون یک ناخالصی مثل فسفر که در لایه کووالانس خود ۵ الکترون دارد، اضافه می شود.
- با افزودن ناخالصی، اتم های فسفر جایگزین برخی ازاتم های سیلیکون شده و هر یک با ۴ چهار اتم های مجاور پیوند کووالانسی برقرار می کنند. اما فقط ۴ الکترون لایه آخر آن در پیوند با ۴ همسایه شرکت کرده و یک الکترون لایه آخر بصورت آزاد باقی می ماند که باعث تبدیل نیمه هادی به نوع N می شود.



- ناخالصی مثل فسفر که یک الکترون آزاد به نیمه هادی اضافه می کند Doner یا دهنده نامیده می شود.

رسول دلیرروی فرد

میزان ناخالصی اضافه شده خیلی بیش از تعداد ناقلهای ذاتی است.

اگر غلظت اتمهای بخشنده برابر N_D باشد، در حالت تعادل حرارتی غلظت الکترونهای آزاد برابر خواهد بود با :

$$n = N_D + n_i \simeq N_D$$

بر طبق اصول فیزیک نیمه هادی ها، در تعادل حرارتی حاصلضرب غلظت الکترون و حفره ثابت است :

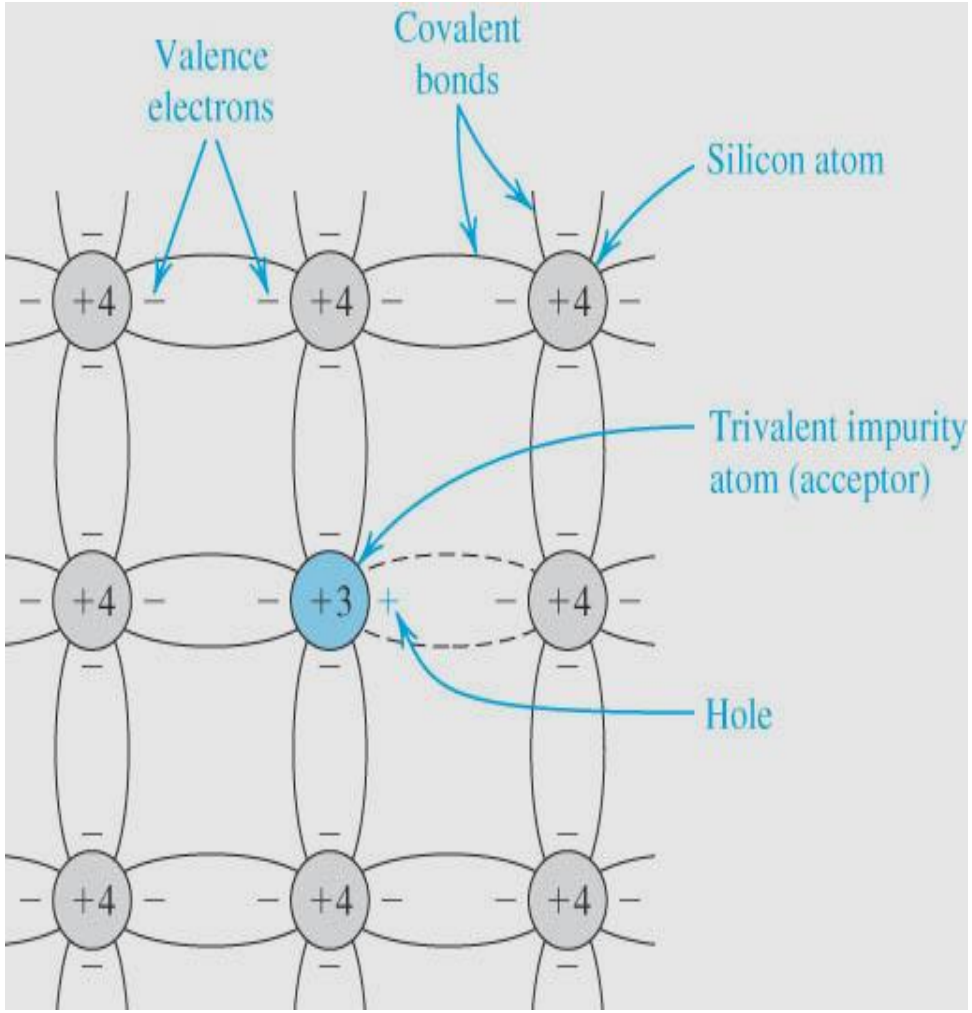
$$np = n_i^2$$

پس تعداد حفره ها برابر است با :

$$p \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$$

نیمه هادی ناخالص از لحاظ الکتریکی خنثی است. زیرا بار حاملهای اکثریت با بار اتمها خنثی می شود.

نیمه هادی نوع P



- اگر ناخالصی اضافه شده ماده ای نظیر برم باشد که تعداد الکترونهای لایه آخر آن ۳ عدد است، هر اتم ناخالصی فقط با ۳ اتم سیلیکون پیوند کووالانسی برقرار کرده و ایجاد یک حفره خواهد نمود.
- تعداد این حفره ها در تعادل حرارتی با غلظت اتمهای ناخالصی رابطه دارد:

$$p = N_A + p_i \simeq N_A$$

- تعداد الکترونهای آزاد برابر است با :

$$n \simeq \frac{n_i^2}{N_A}$$

- ناخالصی مثل برم که یک حفره آزاد به نیمه هادی اضافه می کند، Accceptor یا پذیرنده نامیده می شود.

رسول دلیرروی فرد

هدایت الکتریکی در هادیها :

این کار توسط ناقلهای آزاد (الکترونها) صورت می گیرد.

این هدایت تحت تأثیر میدان خارجی ε (باطری) تحقق می پذیرد.

با توجه به چگالی ناقلها ، چگالی جریان بصورت زیر محاسبه می گردد :

سرعت حرکت الکترون آزاد $V_d = \mu_e \varepsilon$

μ_e را ضریب روانی یا حرکت پذیری (mobilbity) الکترون گویند.

ε میدان الکتریکی است که عنصر هادی در آن قرار دارد.

سرعت فوق را سرعت رانشی Drift Velocity نامیده اند.

اگر n را تعداد الکترونهای آزاد که با سرعت فوق تحت میدان، تولید جریان می کند، آنگاه چگالی جریان برابر است با : $J_n = neV_d = ne\mu_n \varepsilon$

ضریب هدایت الکتریکی $\sigma_n = ne\mu_n = \frac{1}{\rho}$

رسول
دلیرروی فرد

هدایت الکتریکی در نیمه هادیها :

با توجه به وجود ناقلهای الکترون و حفره، جریان تابعی از هر دو است.

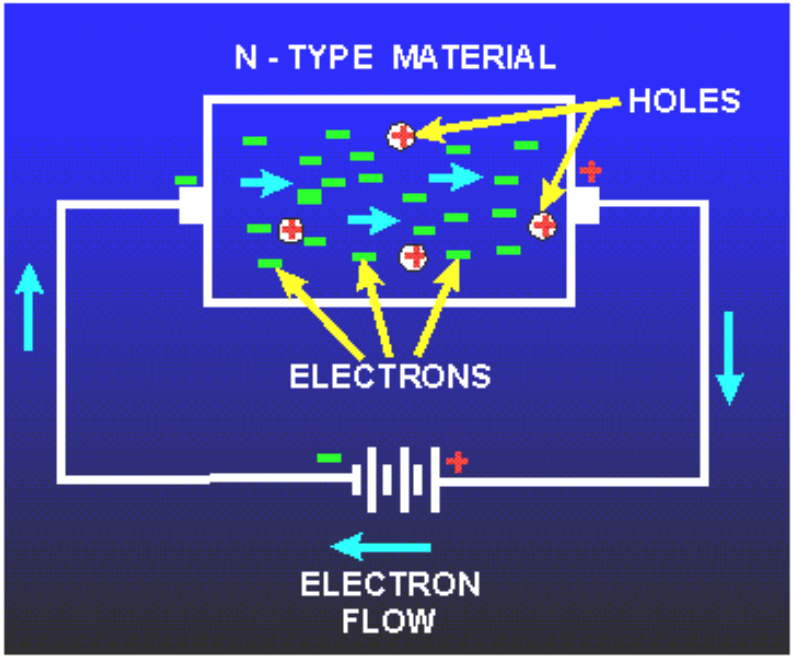
در نیمه هادیها دو نوع جریان وجود دارد : جریان رانشی یا هدایتی (با وجود میدان خارجی) ، جریان نفوذی یا انتشاری (بدون میدان خارجی)

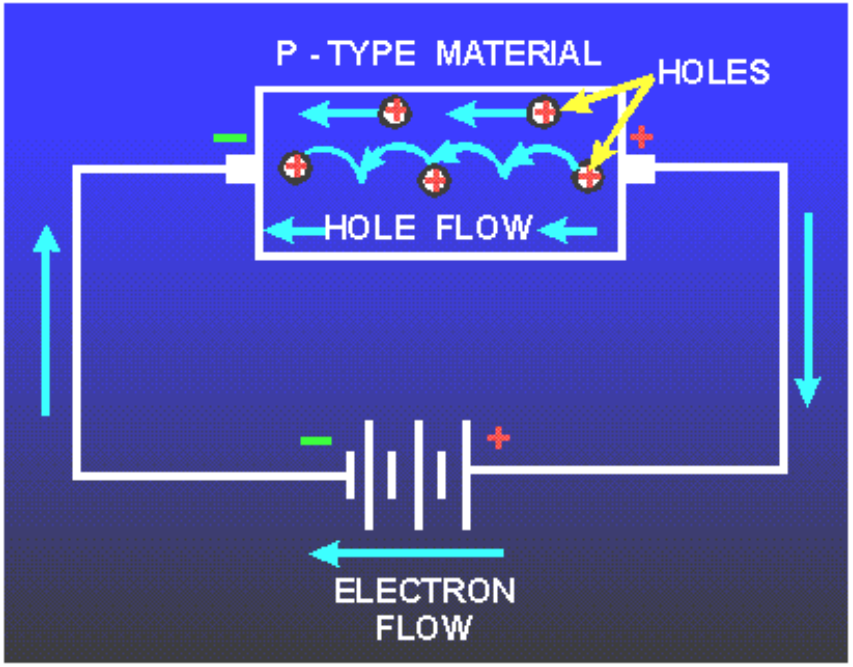
۱- جریان رانشی Drift در نیمه هادیها

مشابه هادیها است، با این تفاوت که هم الکترونها و هم حفره ها نقش دارند.

الکترونها مستقیما در اثر میدان (و در خلاف جهت میدان) حرکت می کنند و حفره ها نیز در حقیقت با جابجایی الکترونهای باند ظرفیت، جریانی هم جهت جریان الکترونهای آزاد بوجود می آورند.

$$J = ne\mu_n\varepsilon + pe\mu_p\varepsilon \qquad \sigma = ne\mu_n + pe\mu_p = \frac{1}{\rho}$$





حرکت الکترونها ناشی از الکترونهای آزاد می باشد، و حرکت حفره ها ، حرکت الکترونهای باند ظرفیت می باشد، و ضریب روانی الکترونهای آزاد بیش از الکترونهای باند ظرفیت است، لذا ضریب روانی حرکت الکترونها از حفره ها بیشتر است.

رسول
دلیرروی فرد

Semiconductor	Bandgap eV	Mobility of Electrons (μ_n) $\frac{cm^2}{V\text{-}s}$	Mobility of Holes (μ_p) $\frac{cm^2}{V\text{-}s}$	Dielectric Constant (k)	Resistivity $\Omega \cdot cm$	Density $\frac{gm}{cm^3}$	Melting Temperature °C
Silicon (Si)	1.11	1350	480	11.8	2.5×10^5	2.33	1415
Amorphous Silicon (a:Si:H)	1.70	1	10^{-2}	~11.8	10^{10}	~2.30	—
Germanium (Ge)	0.67	3900	1900	16.0	43	5.32	936
SiC (α)	2.86	500		10.2	10^{10}	3.21	2830
Gallium Arsenide (GaAs)	1.43	8500	400	13.2	4×10^8	5.31	1238
Diamond	~5.50	1800	1500	5.7	$>10^{18}$	3.52	~4200
α-Sn	0.10	2000	1000	—	10^{-4}	5.80	232

۲- جریان نفوذی Diffusion در نیمه هادیها

این جریان به جهت کسرت یک ناقل در یک طرف نیمه هادی و کمبود آن در طرف دیگر ، بوجود می آید.

این حرکت تولید میدان داخلی می کند ، به نحوی که با این حرکت مقابله کرده و در نهایت تعادل برقرار می گردد.

این جریان ، یک جریان داخلی است و در خارج از نیمه هادی برقرار نمی گردد.

$$J_p = -D_p e \frac{dp}{dx} \quad , \quad J_n = -D_n e \frac{dn}{dx}$$

$\frac{dp}{dx}$, $\frac{dn}{dx}$ به ترتیب تغییرات تعداد الکترونها و حفره ها در طول نیمه هادی هستند.

D_n , D_p به ترتیب ثابت انتشار الکترون و حفره هستند.

$$Si: D_n = 34 \ , \ D_p = 13$$

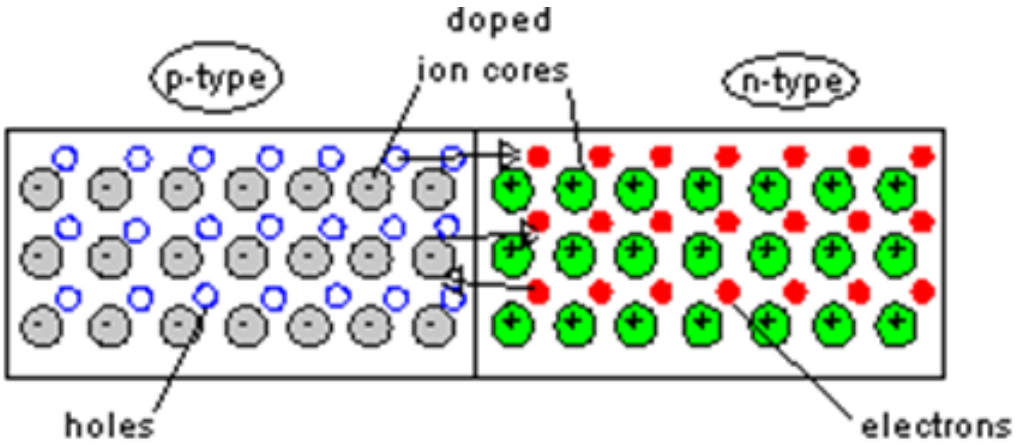
$$Ge: D_n = 99 \ , \ D_p = 47$$

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T = 26\,mV$$ معادل ولتی دما

رسول
دلیرروی فرد

اتصال p-n

با اتصال دو نیمه هادی P و N به یکدیگر اتصال P-N بوجود می آید.



در نیمه هادی نوع N ، الکترون زیاد و در نیمه هادی نوع P ، حفره زیاد وجود دارد.

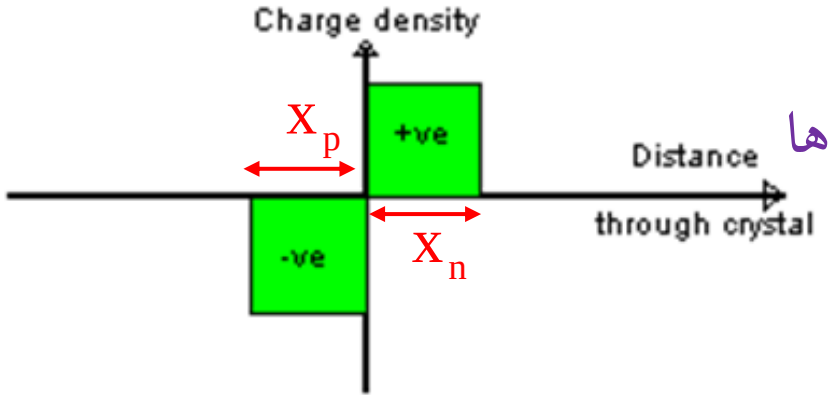
پس در محل اتصال جریان نفوذی برقرار شده و منجر به تخلیه ناقلها در محل اتصال می گردد.

به این ناحیه که شامل یونهای مثبت و منفی و فاقد ناقل آزاد می باشد، ناحیه تخلیه یا تهی گویند.

رسول
دلیرروی فرد

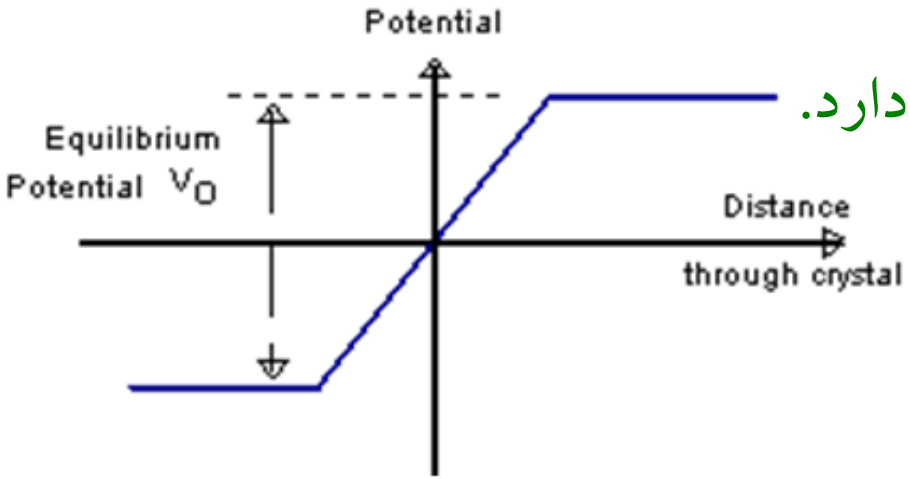
وجود این یونهای ساکن باعث ایجاد میدانی در خلاف جهت جریان نفوذی و به حالت تعادل رسیدن اتصال می گردد.

به این مجموعه دیود نیمه هادی گویند.



میزان طول نفوذ الکترونها به ناحیه P و حفره ها به ناحیه N ، رابطه معکوس با چگالی ناقل اکثریت در نواحی P و N دارد.

$$x_p N_A = x_n N_D$$



این اتصال، رفتاری متفاوت با یک مقاومت دارد.

زیرا میدان داخلی ناشی از جریان نفوذی، اجازه عبور جریان را تنها در یک جهت می دهد.

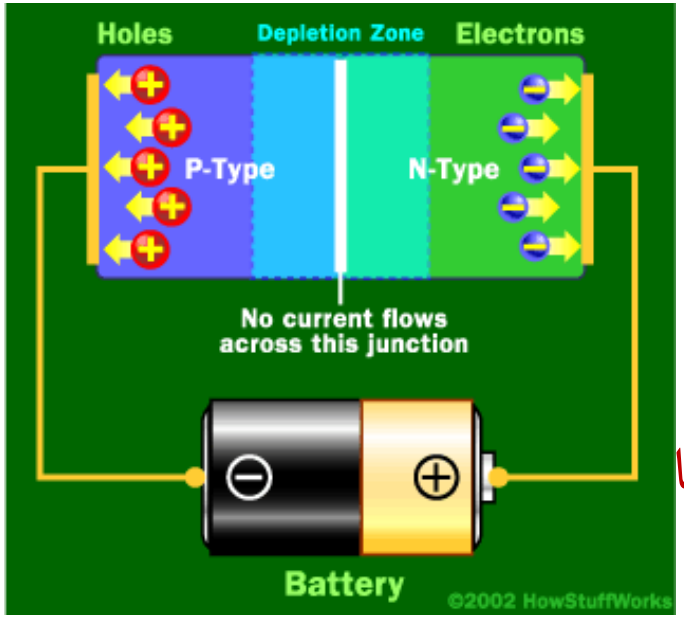
رسول
دلیرروی فرد

میدان بوجود آمده در محل اتصال ، ایجاد سد پتانسیلی می نماید که باید برای برقراری جریان ، این سد پتانسیل از بین برود.

مقدار این سد پتانسیل از رابطه مقابل بدست می آید :

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

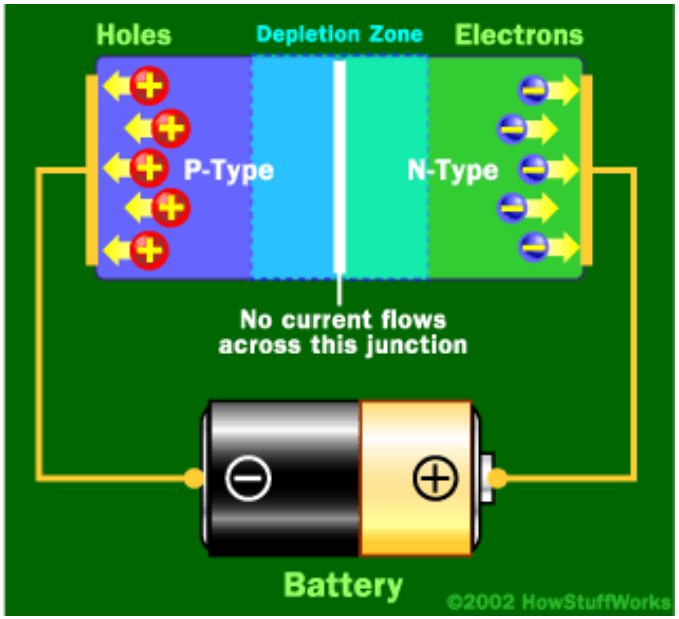
مقدار تقریبی این سد برای سیلیسیم و ژرمانیوم، به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۲ ولت است.



اتصال p-n در گرایش معکوس

- خروج الکترون از ناحیه n باعث خواهد شد تا تعداد بارهای مثبت آن افزایش یابد که خود به معنای اضافه شدن به عرض ناحیه تخلیه است.
- اتفاق مشابهی برای حفره ها در ناحیه p می افتد و با حذف آنها از این ناحیه عرض ناحیه تخلیه زیاد شده و در نتیجه ولتاژ ناحیه تخلیه نیز افزایش یافته و باعث کاهش جریان نفوذی در ناحیه تخلیه میشود.

رسول
دلیرروی فرد



پس دیود در گرایش معکوس تقریبا هدایتی ندارد.

البته جریان ضعیف ناقلهای اقلیت وجود دارد که در مقایسه با گرایش مستقیم ناچیز است.

به این جریان ، جریان اشباع معکوس می گویند.

مقدار این جریان تقریبا ثابت است. I_0 یا I_s

اگر ولتاژ معکوس اعمالی به دیود، به مقدار قابل توجهی باشد، پدیده شکست معکوس اتفاق می افتد و اگر جریان عبوری محدود نشود، دیود می سوزد.

شکست فوق به دو صورت انجام می شود : ۱- پدیده بهمنی ۲- پدیده زنری

پدیده بهمنی برای دیودهایی رخ می دهد که ولتاژ شکست معکوس آنها بزرگ بوده (معمولا بیش از ۶ ولت) و در اثر افزایش ولتاژ و افزایش سرعت الکترونها، احتمال برخورد آنها با اتمهای ساکن ناحیه تخلیه افزایش می یابد.

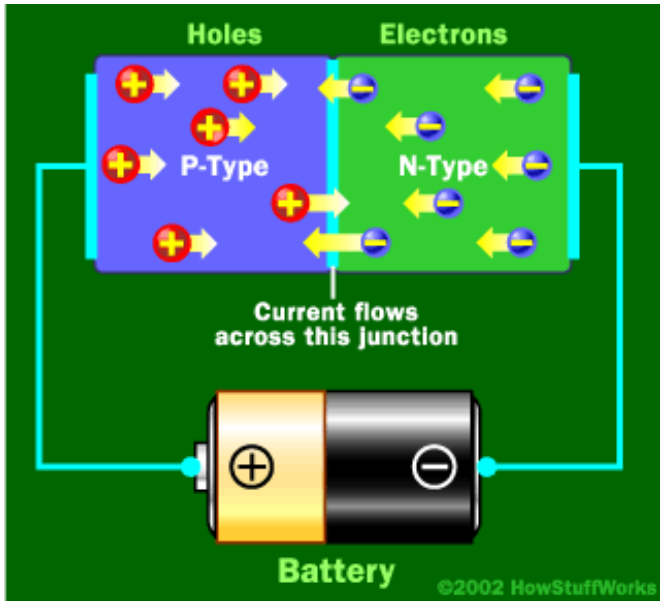
رسول
دلیرروی فرد

با این برخوردها و شکسته شدن پیوندهای کووالانس بین اتمها و آزاد شدن یک الکترون، برخورد بعدی اتفاق می افتد و این روند بصورت بهمنی افزایش می یابد.

پدیده شکست زنری بخاطر شکسته شدن پیوند کووالانس در اثر افزایش میدان بوجود می آید و در دیودها با ولتاژ شکست پائین (معمولا کمتر از ۶ ولت) رخ می دهد.

تأثیر دما بر تغییرات ولتاژ شکست زنری و بهمنی یکسان نیست.

افزایش دما باعث کاهش ولتاژ شکست زنری و افزایش ولتاژ شکست بهمنی می گردد.

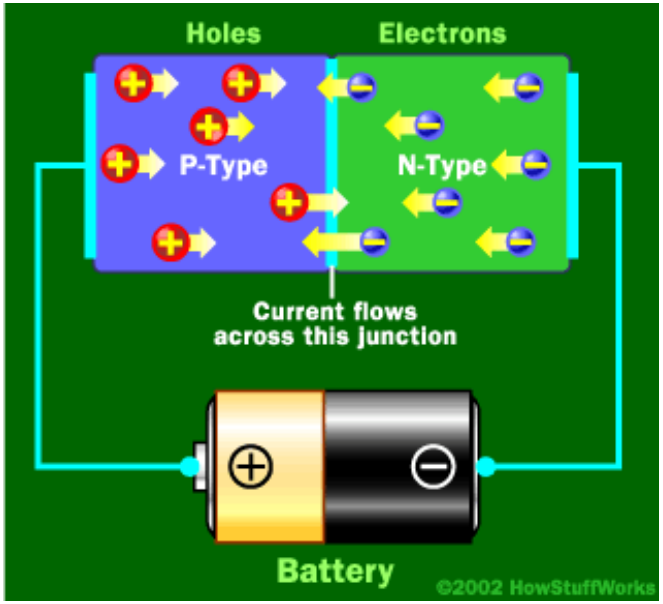


اتصال p-n در گرایش مستقیم

با اعمال میدان خارجی بر خلاف میدان داخلی، عرض ناحیه تخلیه کاهش می یابد.

میدان خارجی موجب می شود که الکترونها درناحیه N و حفره ها در ناحیه P به سمت ناحیه تخلیه رانده شوند و بخشی از یونهای تشکیل شده را خنثی نمایند.

رسول
دلیرروی فرد



با کاسته شده عرض ناحیه تخلیه، ولتاژ سد پتانسیل کم شده و اجازه عبور الکترون و حفره بیشتری می دهد.

پس جریان نفوذی نیز افزایش می یابد.

این عمل تا جایی ادامه دارد که سد از بین رفته و نیمه هادی مثل یک هادی عمل می کند.

رابطه جریان و ولتاژ در دیود نیمه هادی چنین است :

$$i_D = I_S(e^{v_D/\eta V_T} - 1)$$

رسول
دلیرروی فرد