مبانی میکروالکترونیک

سرفصل ها:

- فیزیک نیمه هادی
- مداررهای دیودی
- فیزیک ترانزیستور دو قطبی
- تقویت کننده ها با استفاده از ترانزیستورهای دوقطبی
- فیزیک ترانزیستور ماسفت
- تقویت کننده ها با استفاده از ترانزیستورهای MOS
- ترانزیستور JFET

References

- "مبانی میکروالکترونیک" تالیف بهزاد رضوی، مترجم محمود دیانی، محمد حسین زارع، انتشارات نص، ۱۳۸۸.
- B. Razavi, “Fundamentals of Microelectronics”, John Wiley & Sons, 2006.
- "مبانی میکروالکترونیک" مولف بهزاد رضوی، مترجمان عماد ابراهیمی، محمد آسیایی، انتشارات امید انقلاب، ۱۳۸۹.
- "مدارهای میکروالکترونیک" جلد ۱، عادل شفیق سدره، کنت اسمیت- ترجمه محمود دیانی- ویرایش پنجم، انتشارات نص، ۱۳۸۵.
- "مبانی الکترونیک" علی میر عشقی- ویراست ۲، نشر شیخ بهایی.

نحوه ارزیابی

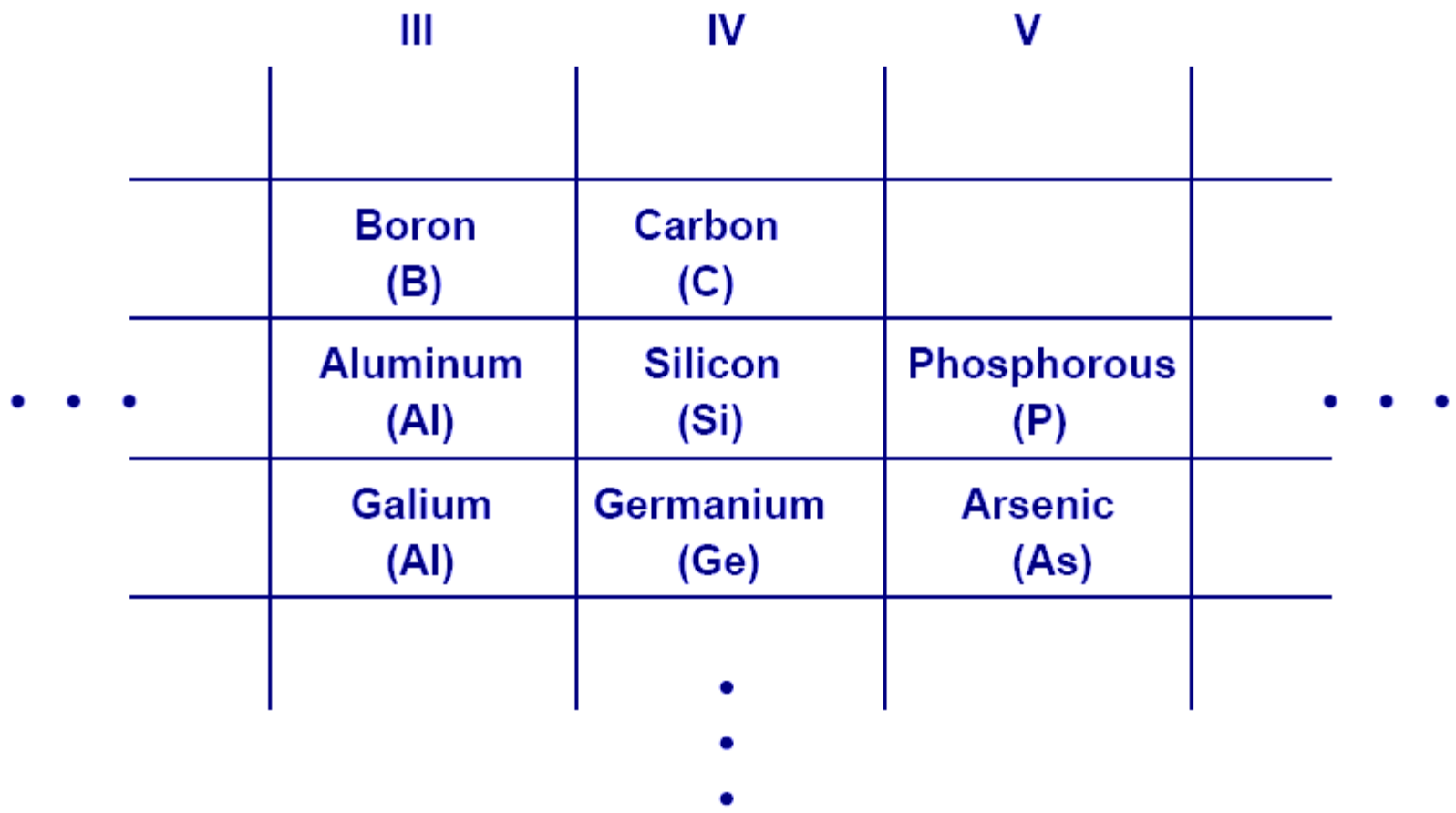
تمرین	5%	
Quiz#1	5%	دوشنبه ساعت ۱۳ الی ۱۴ ۱۳۹۴/۷/۲۷
Quiz#2	5%	دوشنبه ساعت ۱۳ الی ۱۴ ۱۳۹۴/۸/۱۱
Quiz#3	5%	دوشنبه ساعت ۱۳ الی ۱۴ ۱۳۹۴/۸/۲۵
Quiz#4	5%	دوشنبه ساعت ۱۳ الی ۱۴ ۱۳۹۴/۹/۱۶
حضور در کلاس	5%	
پایان ترم	70%	

فیزیک نیمه هادی ها

- مواد نیمه هادی و خواص آنها
- دیود پیوندی PN
- پدیده شکست معکوس در دیودها

جدول تناوبی مندلیف

Periodic Table: جدول تناوبی



طبقه بندی مواد

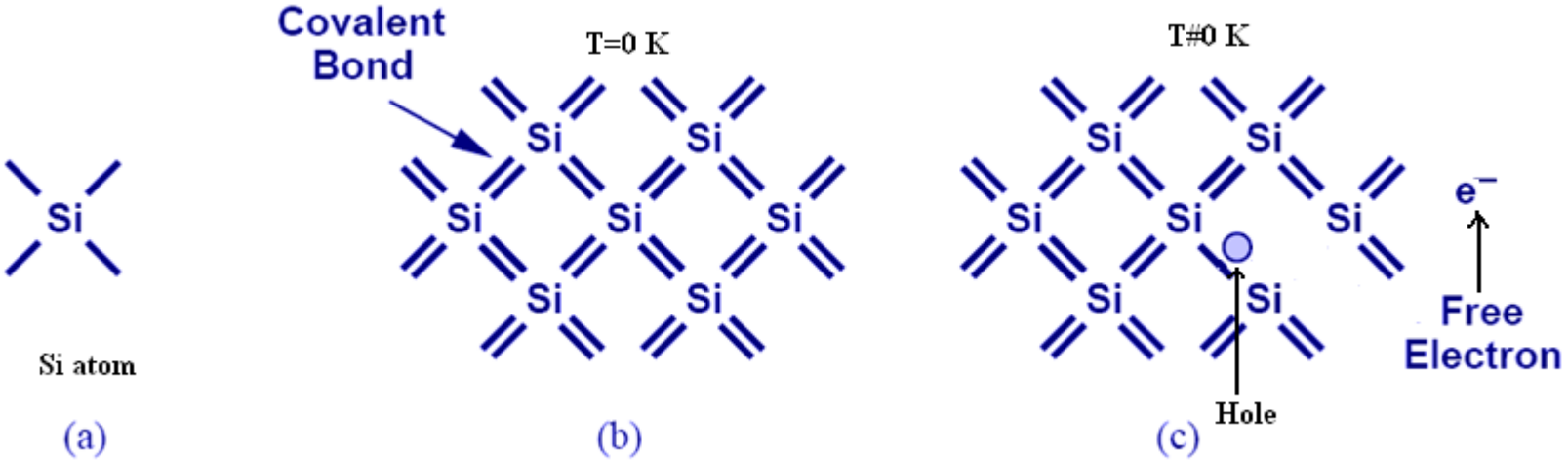
- **عایق**
  - چگالی الکترون های آزاد: $n=0$
  - مقاومت ویژه: $\rho>10^5 \Omega\text{-cm}$
- **هادی**
  - چگالی اتم ها در یک ماده جامد: $10^{23}\ \text{atom/cm}^3$
  - هر اتم از یک ماده هادی m الکترون آزاد دارد. $m=1, 2, 3, \ldots$
  - لذا یک ماده هادی دریای الکترون ازاد است و چگالی الکترون های آزاد آن برابر است با: $n=m\times10^{23}$
  - مقاومت ویژه: $\rho<10^{-2}\Omega\text{-cm}$
- **نیمه هادی**
  - $10^{-2}\Omega\text{-cm} < \rho < 10^5\Omega\text{-cm}$
  - در یک نیمه هادی چگالی الکترون های آزاد به دما بستگی دارد:
    - At T=0K ➔ n=0
    - For Si semiconductor, at T=300K ➔ $n\cong 10^{10}$ free electron/cm^3
  - نیمه هادی های رایج: Si, Ge, GaAs

ویژگی های مهم نیمه هادی ها

- درجه خلوص بسیار زیاد **(99.9999999% purity)**
- ساختار بلورین اتم ها (شبیه به الماس)

pure: خالص
Crystalline : بلورین
Diamond: الماس

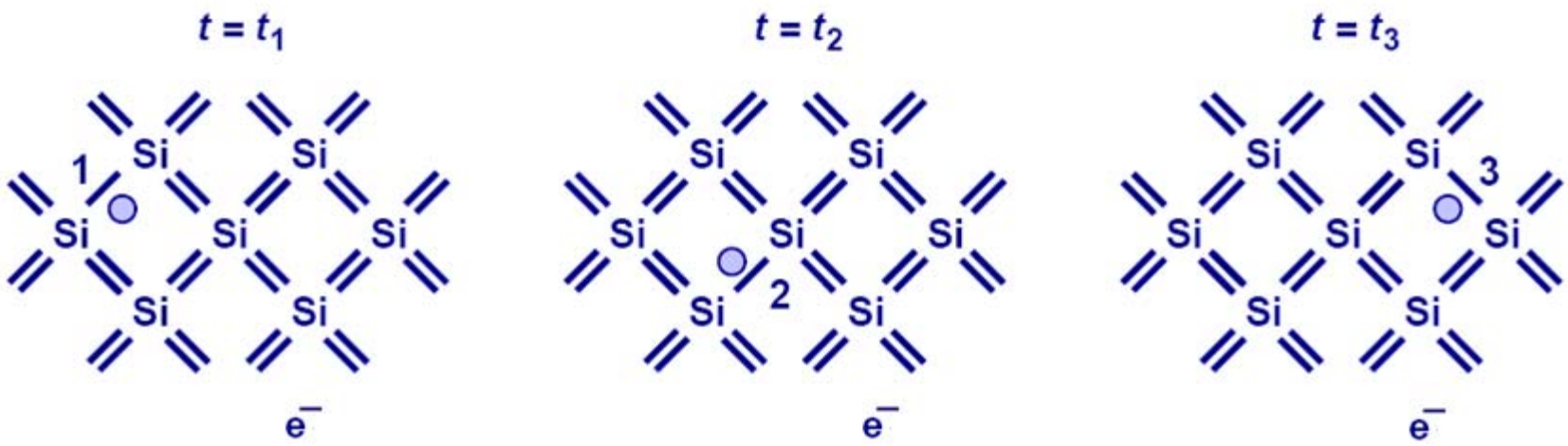
نیمه هادی سیلیکن



covalent bond: پیوند کووالانس intrinsic: ذاتی lattice: شبکه

- سیلیکن ۴ الکترون ظرفیت دارد. بنابراین با ۴ اتم مجاورش می تواند ۴ پیوند کووالانس برقرار کند.
- وقتی دما افزایش می یابد بعضی از الکترون های شرکت کننده در پیوندهای کووالانس آزاد می شوند.
- مقدار انرژی لازم جهت شکسته شدن یک پیوند و به تبع آن آزاد شدن یک الکترون برابر است با: E_g=1.1 eV
- شبکه اتم های سیلیکن فوق کاملا خالص و عاری از هر گونه ناخالصی است. این نیمه هادی خالص را نیمه هادی ذاتی می نامند. (intrinsic semiconductor)

الکترون آزاد و حفره



Hole: حفره

- جای خالی الکترون آزاد در پیوند **Si** با **Si** را حفره گویند.
- با شکسته شدن یک پیوند کووالانس و آزاد شدن یک الکترون عملا یک حفره هم ایجاد می شود.
- حفره ها می توانند بوسیله الکترون های آزاد پر شوند.
- چگالی حجمی الکترون های آزاد: **n**
- چگالی حجمی حفره ها: **p**

چگالی الکترون های آزد در نیمه هادی ذاتی سیلیکن

$$n_i = 5.2\times10^{15} T^{3/2} \exp\frac{-E_g}{2kT} electrons/cm^3$$

$$n_i(T = 300^0 K) = 1.08\times10^{10} electrons/cm^3$$

$$n_i(T = 600^0 K) = 1.54\times10^{15} electrons/cm^3$$

$$E_g = 1.1\, eV$$

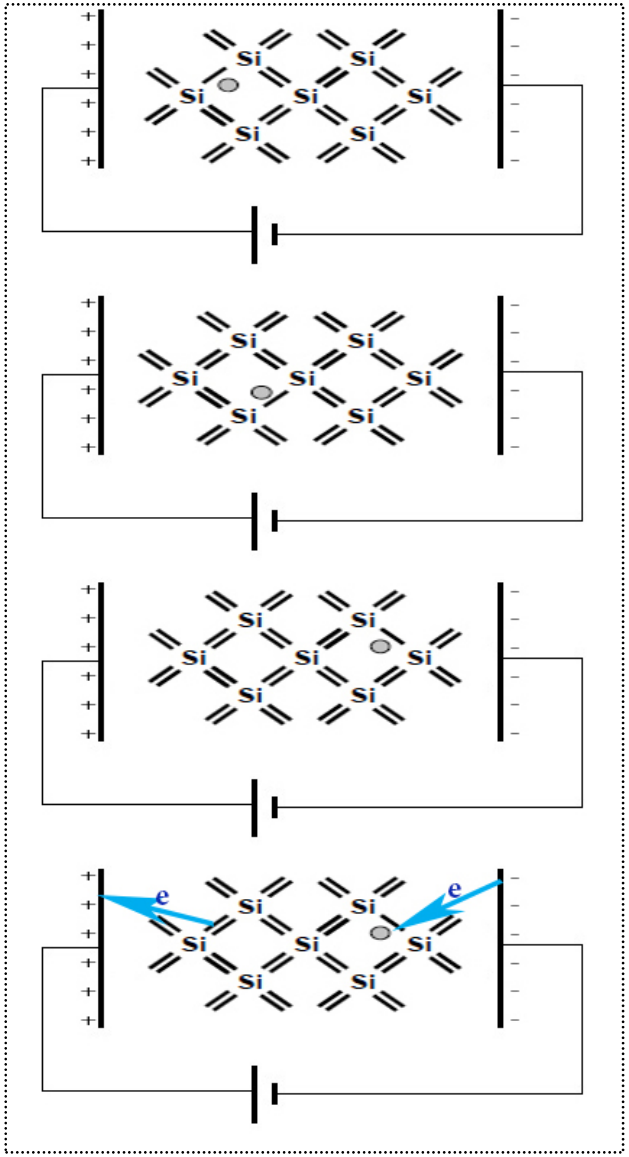
$$k = 1.3806488\times10^{-23}\ \mathrm{m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}}$$

Intrinsic: ذاتی

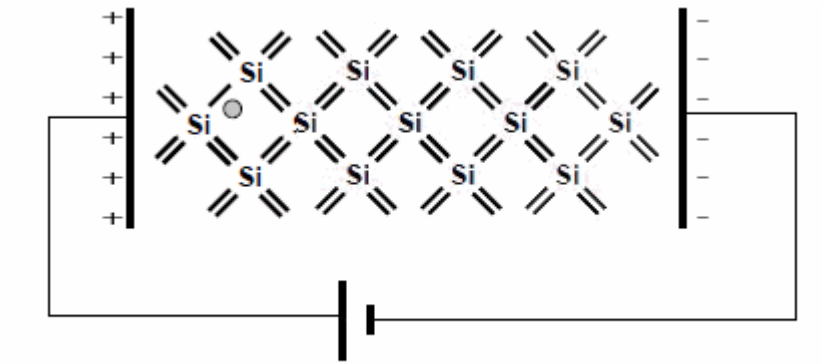
Density: چگالی relationship : رابطه Exponential: نمایی Band gap: شکاف باند

- E_g بیانگر انرژی مورد نیاز به منظور شکستن یک پیوند کووالانس و به تبع آن آزاد کردن یک الکترون است.
- یک رابطه نمایی بین چگالی الکترون های آزاد و E_g وجود دارد.
- در یک نیمه هادی ذاتی سیلیکن داریم: $n=p=n_i$
- بنابراین در دمای صفر کلوین هیچ الکترون آزاد و حفره ای در نیمه هادی سیلیکن وجود ندارد: $n=p=0$

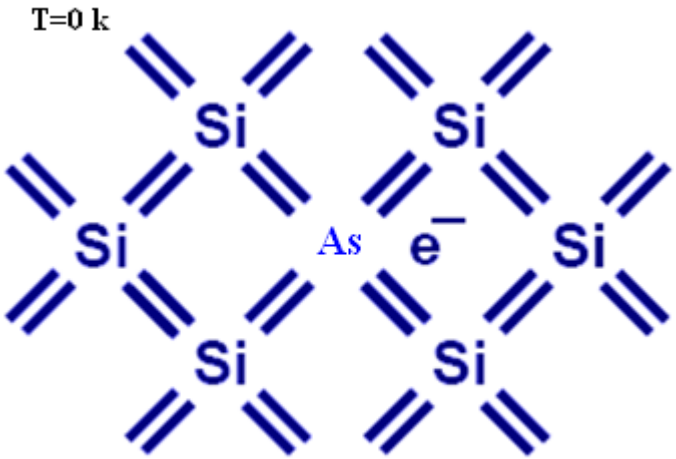
مکانیسم حرکت حفره



انیمیشن مکانیسم حرکت حفره در نیمه هادی



ناخالصی نوع N



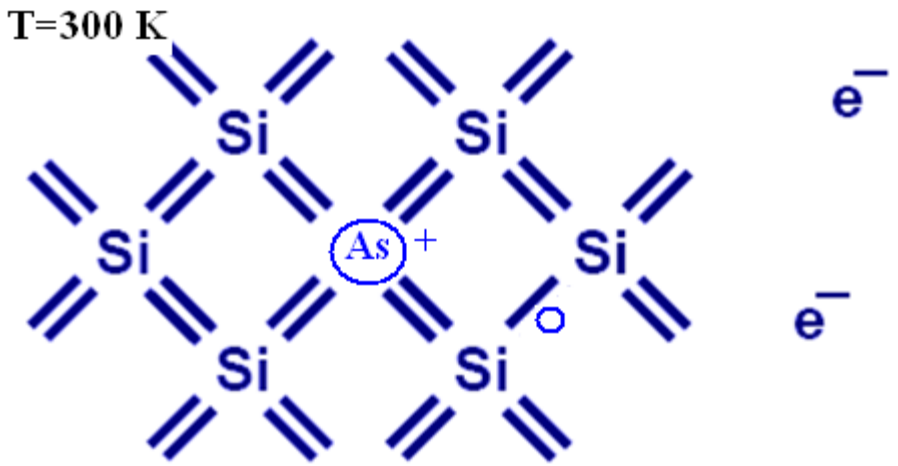
	III	IV	V	
	Boron (B)	Carbon (C)		
. . .	Aluminum (Al)	Silicon (Si)	Phosphorous (P)	. . .
	Galium (Al)	Germanium (Ge)	Arsenic (As)	

Pure: خالص Dope: دوپینگ کردن

Donor: بخشنده
Dopant: ماده ناخالص ساز
Extrinsic: غیر ذاتی

- **سیلیکن ذاتی را می توان به صورت هوشمندانه توسط اتم های دیگر ناخالص کرد. این کار باعث تغییر خواص الکتریکی سیلیکن می شود.**
- **به نیمه هادی سیلیکن که به صورت هوشمندانه توسط اتم های دیگر ناخالص شده باشد نیمه هادی غیر ذاتی می گویند.**
- **ناخالص های گروه 5 جدول تناوبی مندلیف را ناخالصی های بخشنده گویند و چگالی اتم های ناخالصی بخشنده را با N_D نشان می دهند.**
- **یک نیمه هادی غیرذاتی در صفر کلوین هیچ الکترون آزاد و حفره ای ندارد: n=p=0**

ناخالصی نوع N

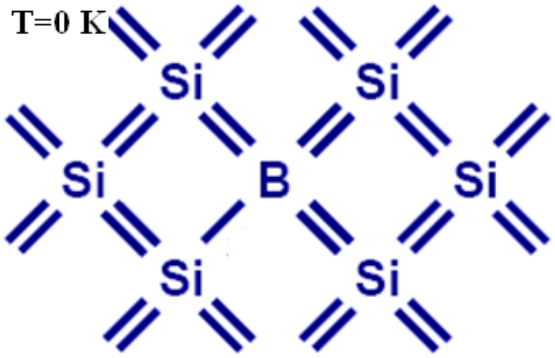


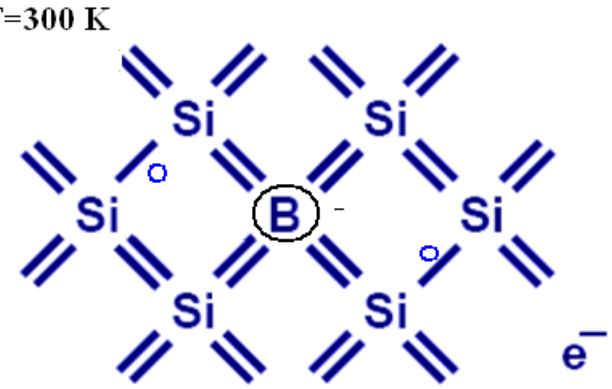
$$n = N_D + p$$

Pure: خالص Dope: دوپینگ کردن

- حدود 0.05eV برای یونیزه کردن As لازم است.
- این انرژی در دمای -200°C فراهم است.
- اگر Si بوسیله As ناخالص شود در آن صورت ماده نیمه هادی تعداد بیشتری الکترون آزاد خواهد داشت و اصطلاحا آن را نیمه هادی نوع N می نامند.

ناخالصی نوع P





$n=p=0$

$p = N_A + n$

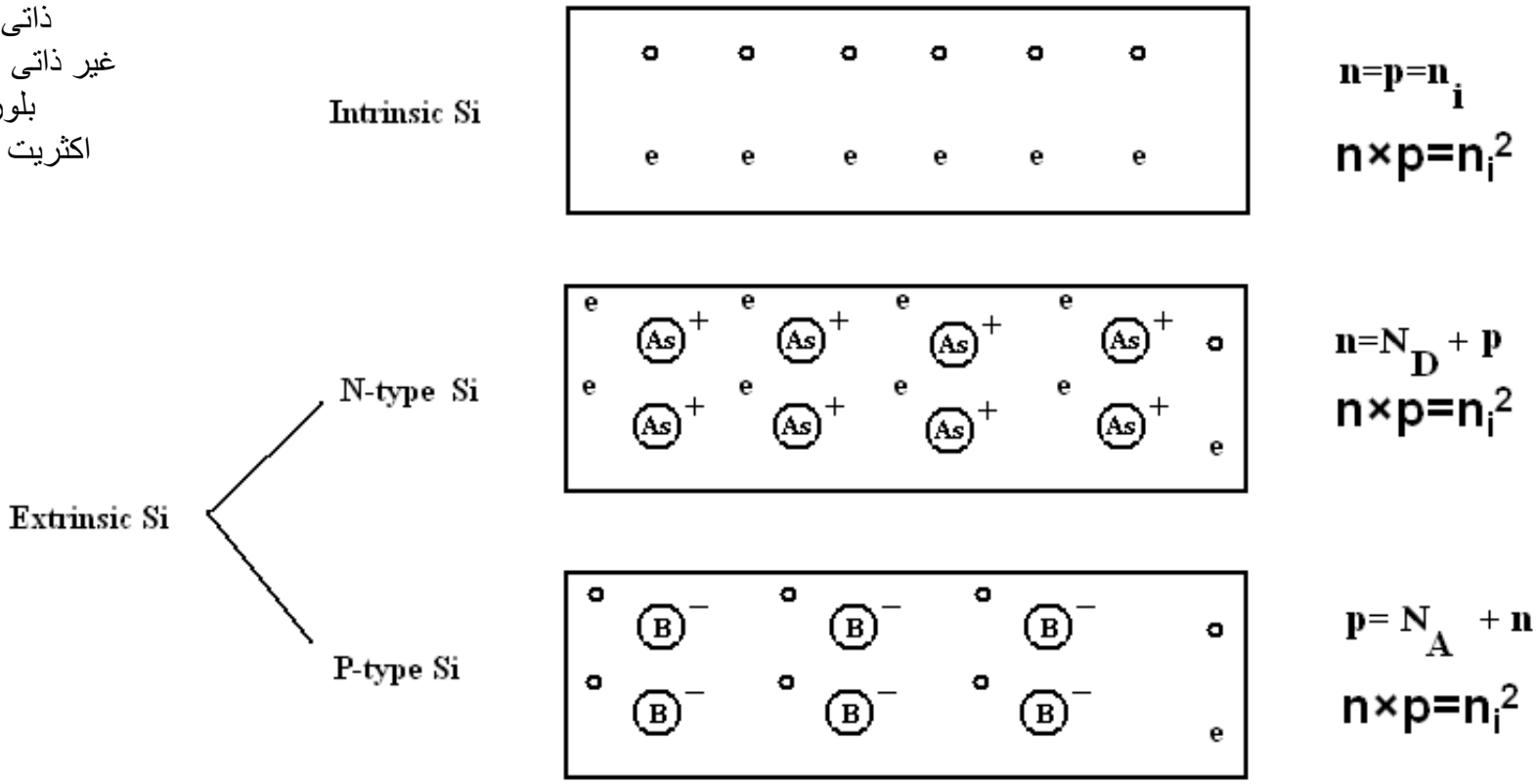
III	IV	V
Boron (B)	Carbon (C)	
Aluminum (Al)	Silicon (Si)	Phosphorous (P)
Galium (Al)	Germanium (Ge)	Arsenic (As)

Acceptor: پذیرنده

- ناخالص های گروه 3 جدول تناوبی مندلیف را ناخالصی های پذیرنده گویند و چگالی اتم های ناخالصی پذیرنده را با N_A نشان می دهند.
- در دماهای بسیار پایین اتم های B یونیزه می شوند.
- اگر Si بوسیله B ناخالص شود در آن صورت ماده نیمه هادی تعداد بیشتری حفره خواهد داشت و اصطلاحا آن را نیمه هادی نوع P می نامند.

جمع بندی

Summary : جمع بندی
Intrinsic: ذاتی
Extrinsic: غیر ذاتی
Crystal: بلور
Majority: اکثریت



$n=p=n_i$

$n \times p = n_i^2$

$n=N_D + p$

$n \times p = n_i^2$

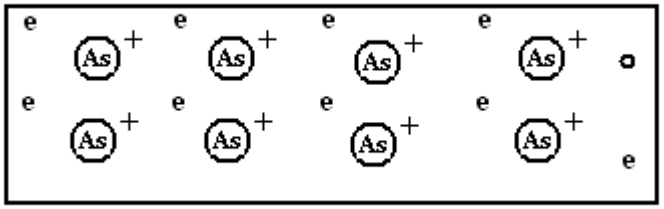
$p= N_A + n$

$n \times p = n_i^2$

- در فیزیک مدرن اثبات می شود که در نیمه هادی های ذاتی و غیر ذاتی همواره رابطه زیر برقرار است: $n \times p = n_i^2$

محاسبه n و p در نیمه هادی سیلیکن نوع N

N-type Si



$n=N_D+p$

$$\left.\begin{aligned} n &= N_D + p \\ n \times p &= n_i^{\,2} \end{aligned}\right\} \Longrightarrow (N_D + p)p = n_i^{\,2} \Longrightarrow p^2 + N_D p - n_i^{\,2} = 0$$

$$p = \frac{-N_D + \sqrt{N_D^{\,2} + 4n_i^{\,2}}}{2} = \frac{N_D}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^{\,2}}{N_D^{\,2}}}\right) \cong \frac{N_D}{2}\left(-1 + 1 + \frac{1}{2}\frac{4n_i^{\,2}}{N_D^{\,2}}\right) = \frac{n_i^{\,2}}{N_D}$$

$$p \approx \frac{n_i^{\,2}}{N_D}$$

$$n \approx N_D$$

- در عمل چگالی اتم های ناخالصی در محدوده زیر قرار دارد:

10^{14} dopant/cm^3 <N_D < 10^{18} dopant/cm^3

dopant: ناخالص‌ساز

چگالی حفره ها و الکترون ها

Majority: اکثریت
Minority: اقلیت

$$np = n_i^2$$

P-type
- Majority Carriers : $p \approx N_A$
- Minority Carriers : $n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$

N-type
- Majority Carriers : $n \approx N_D$
- Minority Carriers : $p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$

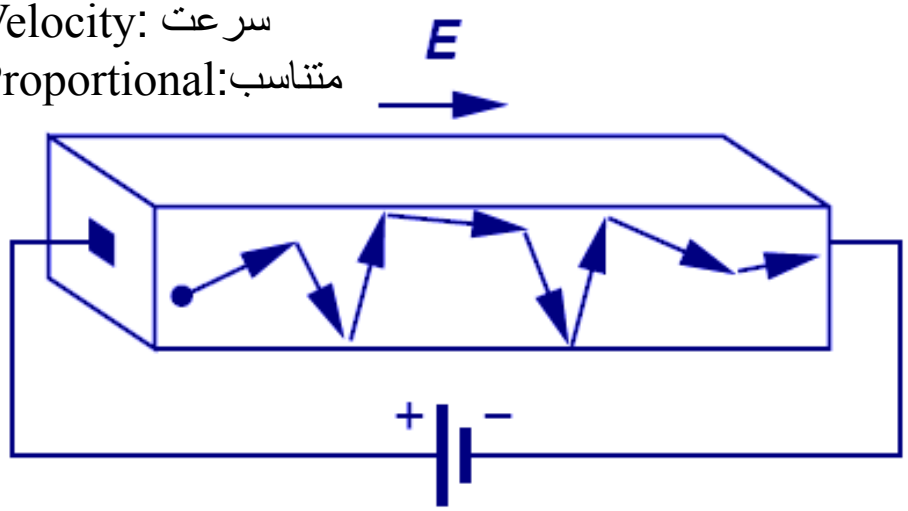
مکانیسم انتقال بار در نیمه هادی ها

Transportation: انتقال
Drift: رانش
Diffusion: نفوذ

- **جریان رانشی**
- **جریان نفوذی**

جریان رانشی

Transportation: انتقال
Drift: رانش
Velocity: سرعت
Proportional:متناسب



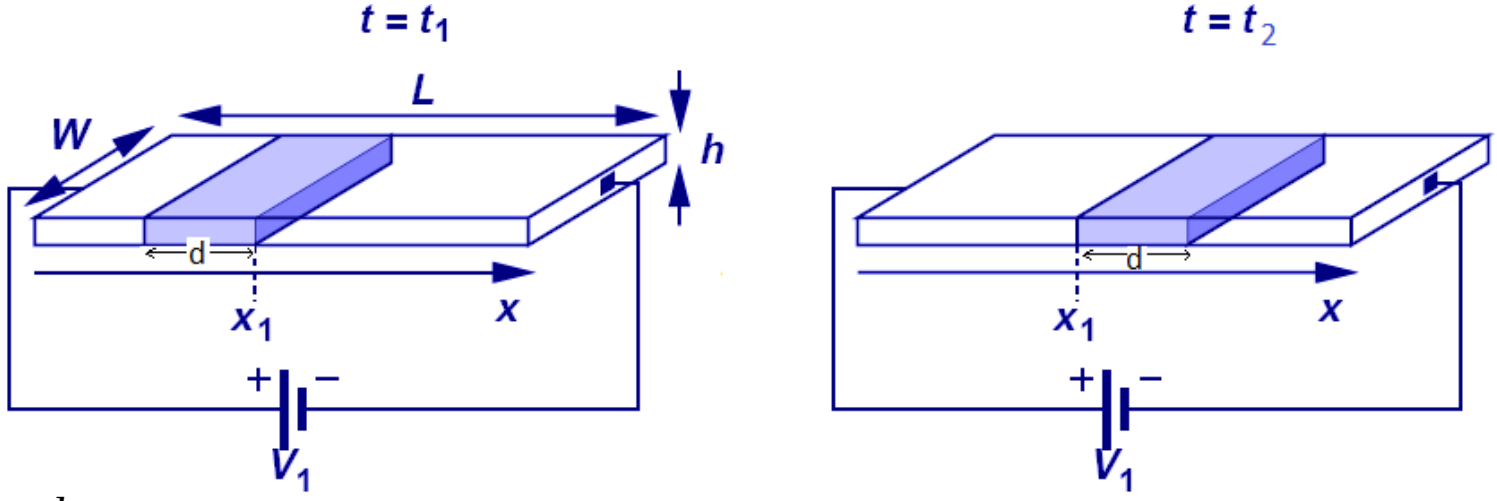
$$\vec{v}_h = \mu_p \vec{E}$$

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

- در جریان رانشی حامل های بار به دلیل وجود یک میدان الکتریکی حرکت می کنند.
- سرعت حرکت حامل های بار متناسب با اندازه میدان الکتریکی است.

مفاهیم کلی در مورد عبور جریان رانشی

Current Flow: عبور جریان



سرعت حرکت حامل های بار: $v = \frac{d}{t_2 - t_1}$

$$I_n = \frac{Q}{t_2 - t_1} = \frac{(d \times W \times h) \times n \times -q}{t_2 - t_1} = \frac{d}{t_2 - t_1}(W \times h) \times n \times -q$$

cross-section: مقطع عرضی

For electron carriers: $I_n = -v_e \cdot W \cdot h \cdot n \cdot q$

For hole carriers: $I_p = v_h \cdot W \cdot h \cdot p \cdot q$

عبور جریان رانشی

J: چگالی سطحی جریان $J = \frac{I}{A} = \frac{I}{W \times h}$

$$J_n = \frac{I_n}{W \times h} = -\vec{v}_e \cdot n \cdot q = \mu_n E \cdot n \cdot q$$

$$J_p = \frac{I_p}{W \times h} = \vec{v}_h \cdot p \cdot q = \mu_p E \cdot p \cdot q$$

$$J_{tot} = \mu_n E \cdot n \cdot q + \mu_p E \cdot p \cdot q$$

$$= q(\mu_n n + \mu_p p)E = \sigma E$$

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

$$J = \frac{I}{A}$$

$$J = \sigma E$$

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

σ: رسانایی

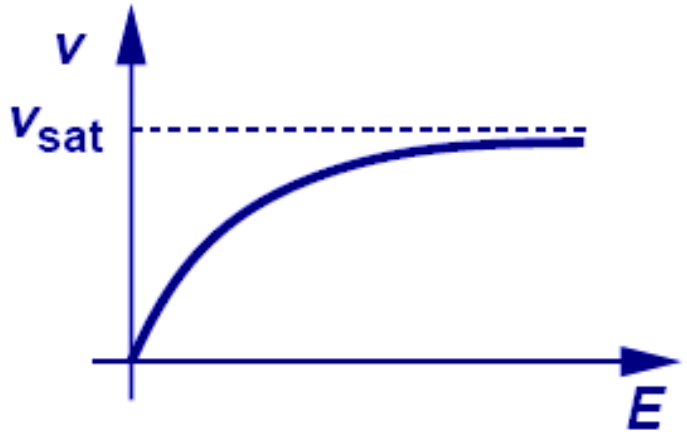
ρ:مقاومت ویژه

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

- **به دلیل اینکه اندازه سرعت حامل ها برابر با μE است. می توان روابط فوق را ساده تر کرد.**
- **توجه شود که جریان رانشی دارای دو مولفه جریان رانشی الکترون ها و جریان رانشی حفره ها است.**

پدیده اشباع سرعت حرکت حامل ها

Saturation: اشباع

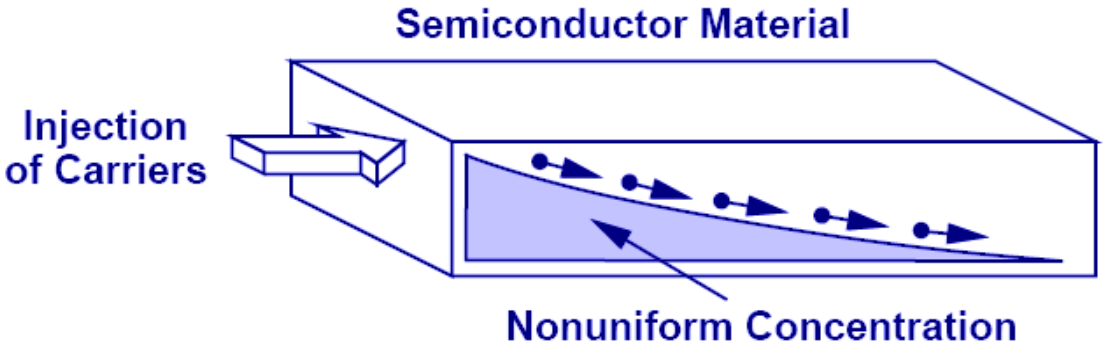


$$v = \frac{\mu_0}{1+\frac{\mu_0 E}{v_{sat}}} E$$

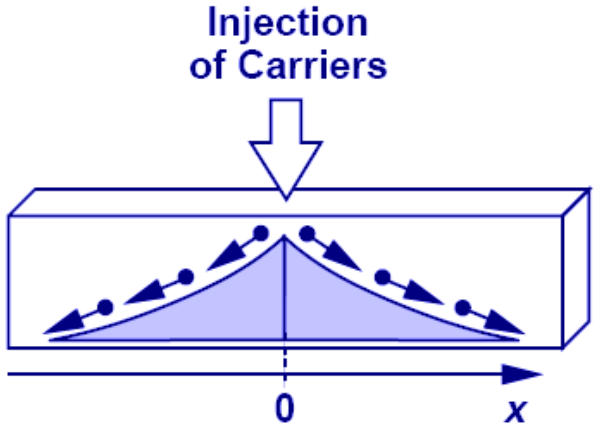
Treat: پرداختن

- در عمل سرعت الکترون به صورت متناسب با میدان الکتریکی افزایش نمی یابد و با افزایش میدان الکتریکی نهایتا سرعت الکترون ها به یک مقدار مشخصی محدود می شود. به این پدیده، پدیده اشباع سرعت حرکت الکترون می گویند.
- پدیده اشباع سرعت حرکت الکترون به طور دقیق تردر دروس تحصیلات تکمیلی مورد مطالعه قرار می گیرد.

جریان نفوذی



Diffusion: نفوذ
Injection: تزریق
Concentration: غلظت
Analogous: قابل مقایسه
Droplet: قطره کوچک



- **حامل های بار از جایی که چگالی حامل ها بیشتر است به سمت مکانی که چگالی حامل ها در آن مکان کمتر است، نفوذ می کنند و باعث ایجاد جریان نفوذی می شوند. این پدیده قابل مقایسه با پدیده نفوذ یک قطره کوچک جوهر در یک ظرف بزرگ آب است.**

جریان نفوذی (ادامه)

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

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

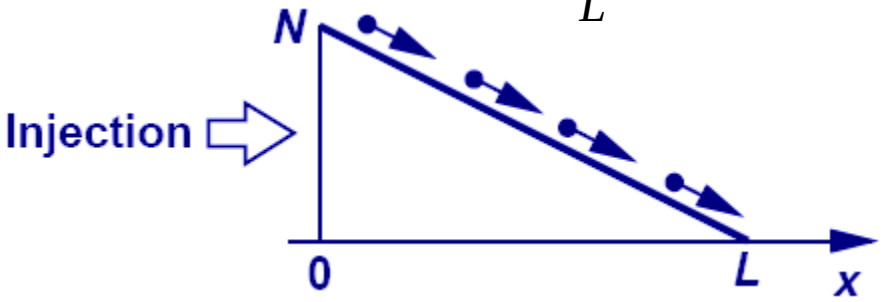
$$J_{tot} = q(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx})$$

Gradient: شیب
Along: در امتداد

- **جریان نفوذی متناسب با گرادیان چگالی حامل ها (dn/dx) در امتداد عبور جریان است.**
- **در محاسبه جریان نفوذی بایستی هم الکترون ها و هم حفره ها را در نظر گرفت.**

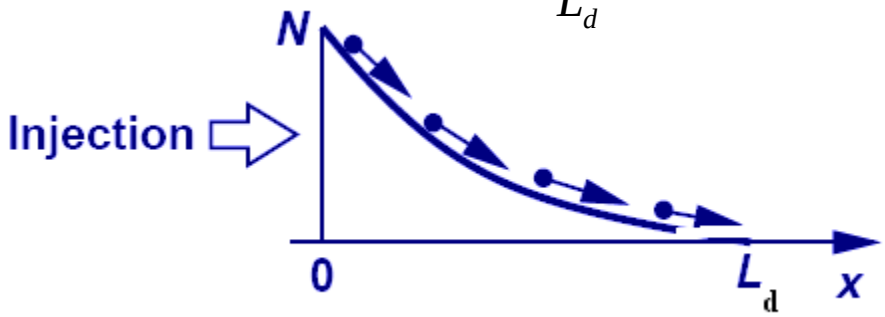
مثال

$$n(x) = \frac{N}{L}(x - L)$$



$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} = -qD_n \cdot \frac{N}{L}$$

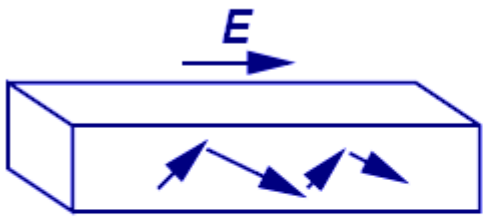
$$n(x) = N \exp \frac{-x}{L_d}$$



$$J_n = qD \frac{dn}{dx} = \frac{-qD_n N}{L_d} \exp \frac{-x}{L_d}$$

رابطه انیشتین

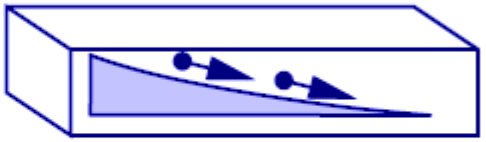
Drift Current



$$J_n = q n \mu_n E$$

$$J_p = q p \mu_p E$$

Diffusion Current



$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$$

Mysterious: مرموز
Relation: رابطه

- **اگرچه مبانی فیزیک جریان رانشی و جریان نفوذی متفاوت است ولی رابطه انیشتین ارتباطی مرموز بین این دو برقرار می کند.**

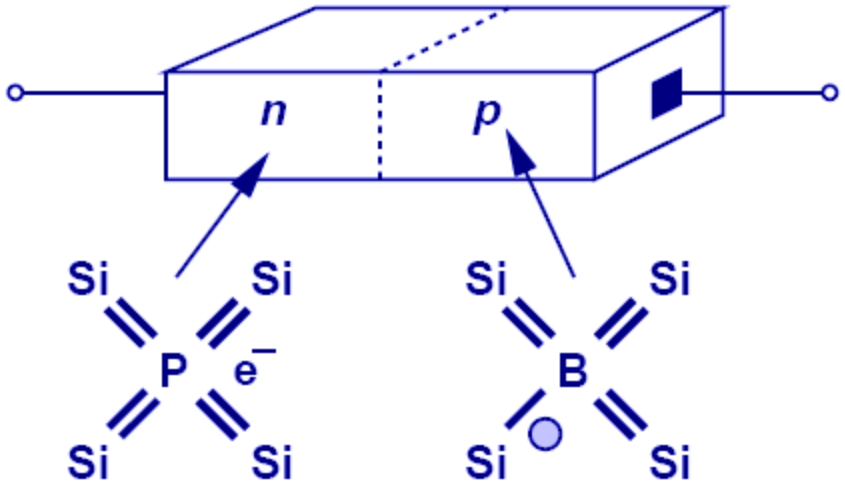
جمع بندی

Drift Diffusion

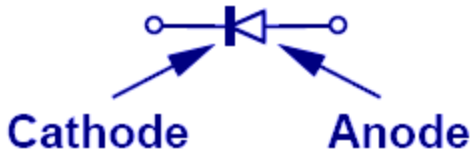
$$J = \sigma E + \left[qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx} \right]$$

$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$$

اتصال PN
(دیود)



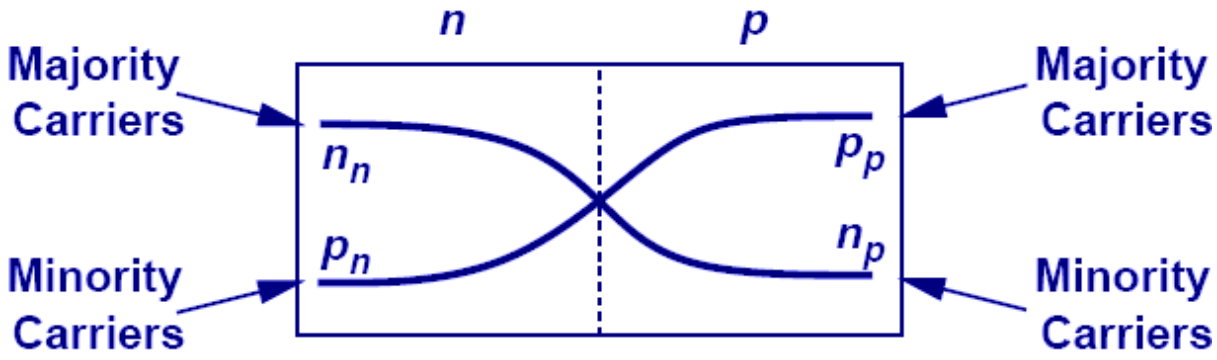
(a)



(b)

- اگر در یک سمت نیمه هادی از ناخالصی نوع **N** و در سمت مقابل از ناخالصی نوع **P** استفاده شود، در آن صورت پیوند **PN** یا همان دیود ایجاد خواهد شد.

عبور جریان نفوذی



n_n : Concentration of electrons on n side

p_n : Concentration of holes on n side

p_p : Concentration of holes on p side

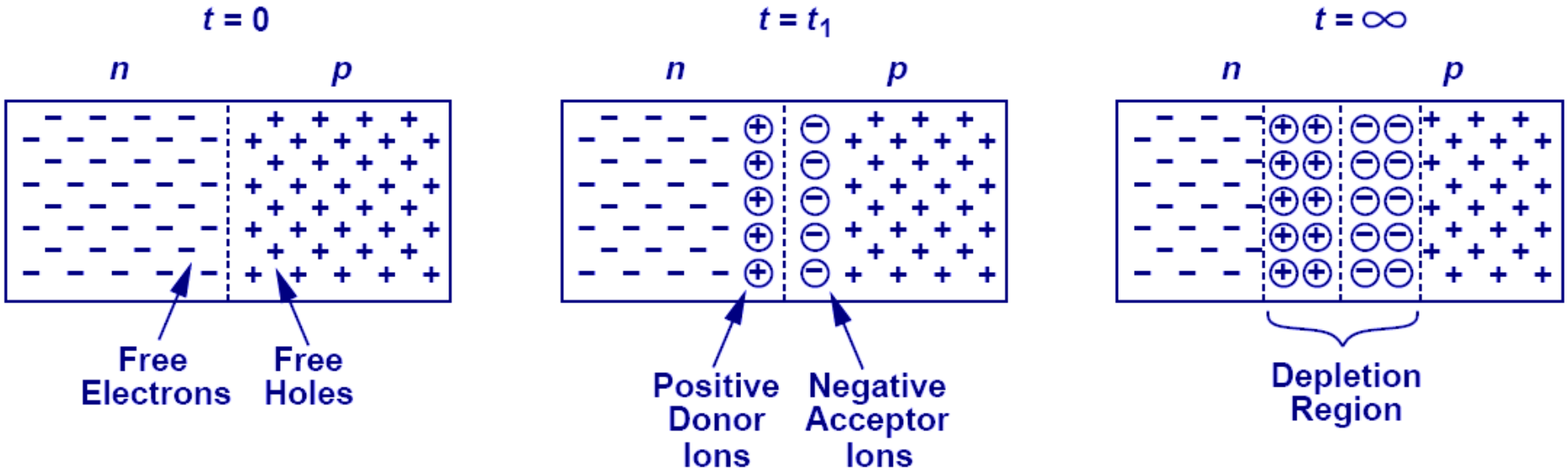
n_p : Concentration of electrons on p side

Across: از یک طرف به طرف دیگر
Excess: اضافه
Flow: جاری شدن

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

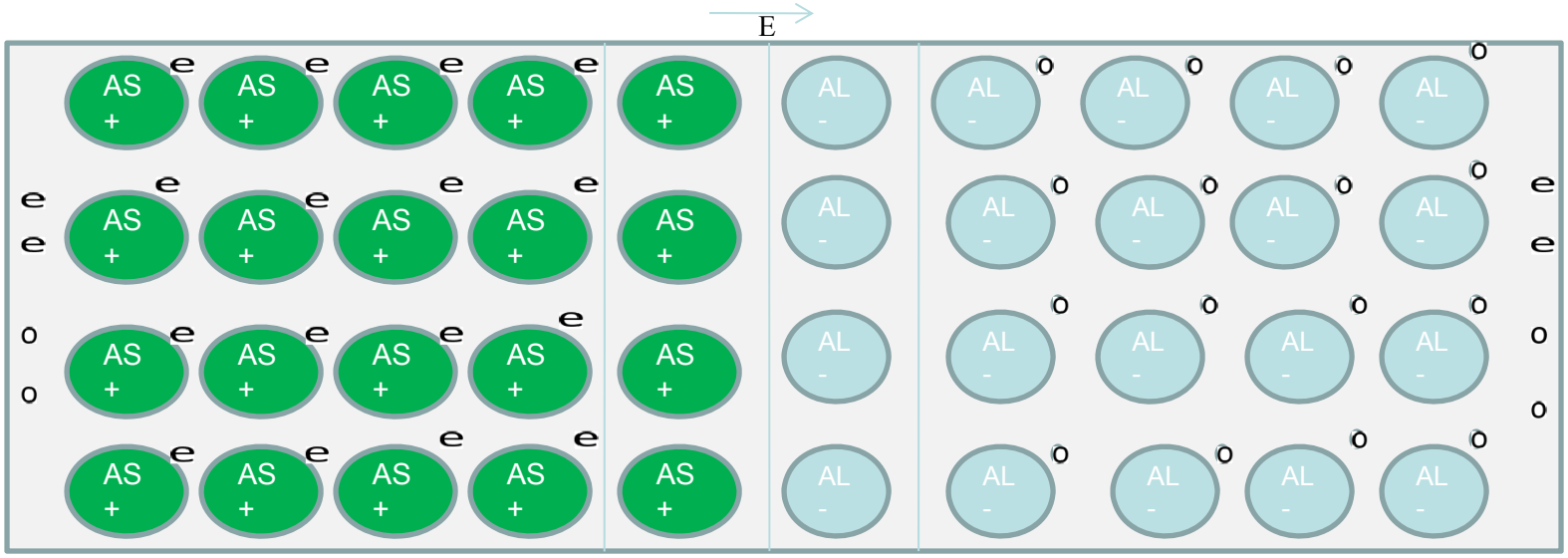
ناحیه تهی

Depletion: تخلیه- تهی
Ion: یون



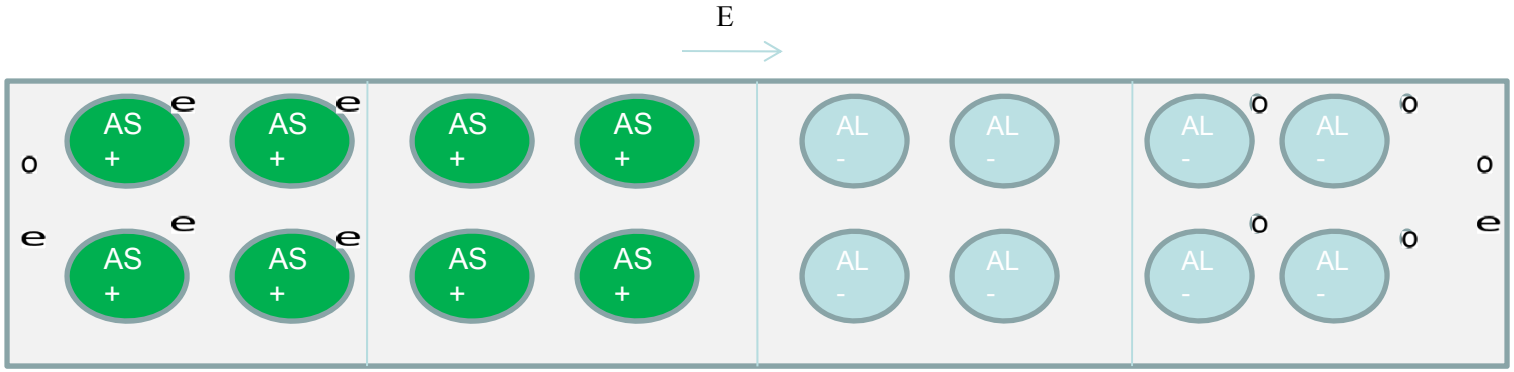
- **هنگامی که الکترون های آزاد و حفره ها از یک طرف محل اتصال به طرف مقابل نفوذ می کنند، ناحیه ای ایجاد می شود که در آن جا فقط یون وجود دارد و آن جا تهی از حامل های بار است. به این ناحیه، ناحیه تهی یا تخلیه می گویند.**

ناحیه تهی



پیوند PN با چگالی ناخالصی زیاد

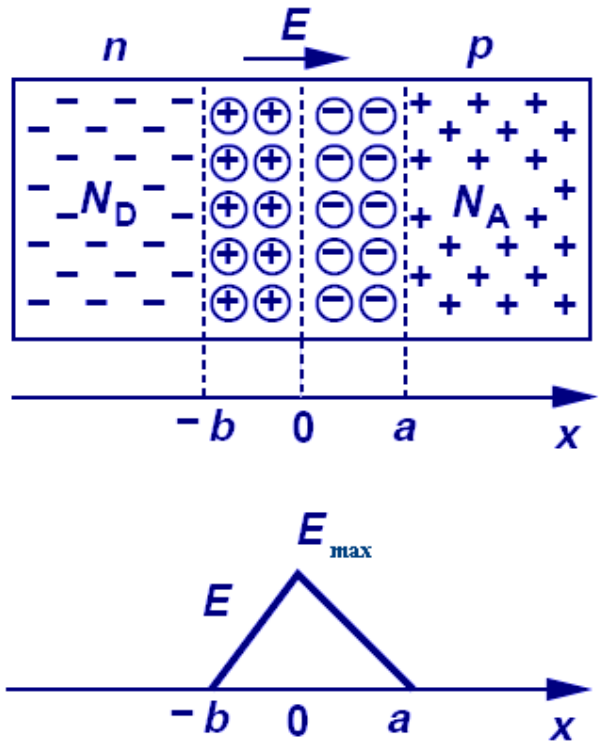
عرض ناحیه تخلیه



پیوند PN با چگالی ناخالصی کم

عرض ناحیه تخلیه

Current Flow Across Junction: Drift

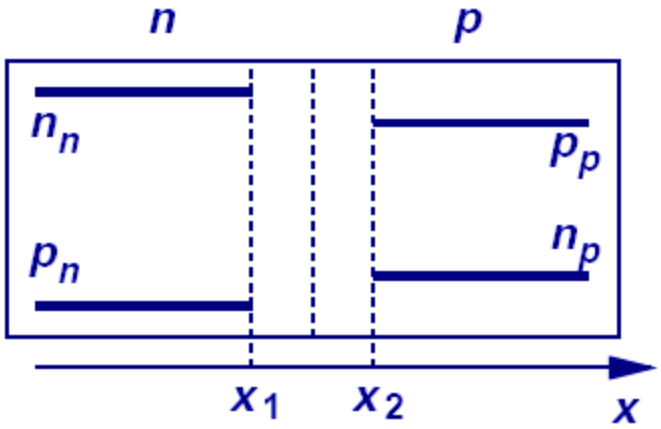


- یون های ثابت موجود در ناحیه تخلیه یک میدان الکتریکی ایجاد می کنند. این میدان الکتریکی سبب ایجاد جریان رانشی می شود.

حالت تعادل

$$n_n = N_D$$

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



$$p_p = N_A$$

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

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

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

Equilibrium: تعادل

Net: برآیند

- **در حالت تعادل جریان رانشی برابر با جریان نفوذی و جهت آن برخلاف جریان نفوذی است. بنابراین جریان برآیند برابر با صفر است.**
- **شکل فوق چگالی حامل های بار در پیوند PN و در حالت تعادل نشان می دهد.**

پتانسیل داخلی

Built-in Potential: پتانسیل داخلی

Derivation: استخراج

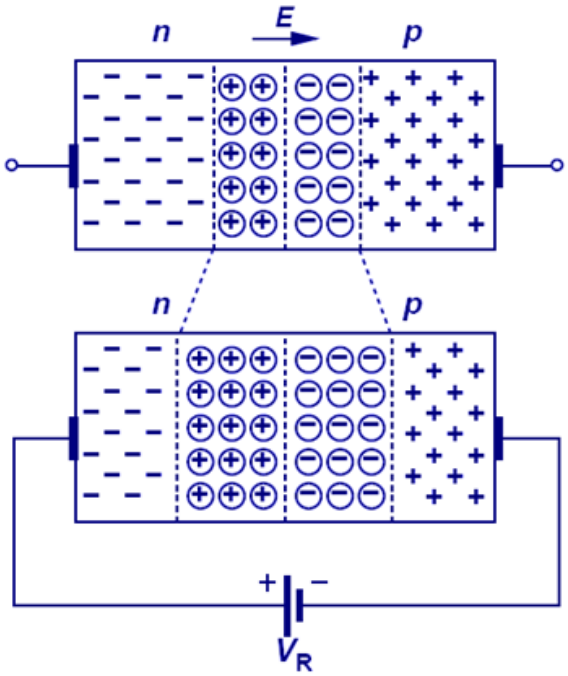
$$q\mu_p pE = -qD_p \frac{dp}{dx} \qquad -\mu_p p \frac{dV}{dx} = -D_p \frac{dp}{dx}$$

$$\mu_p \int_{x_1}^{x_2} dV = D_p \int_{p_n}^{p_p} \frac{dp}{p} \qquad V(x_2) - V(x_1) = \frac{D_p}{\mu_p} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}, V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

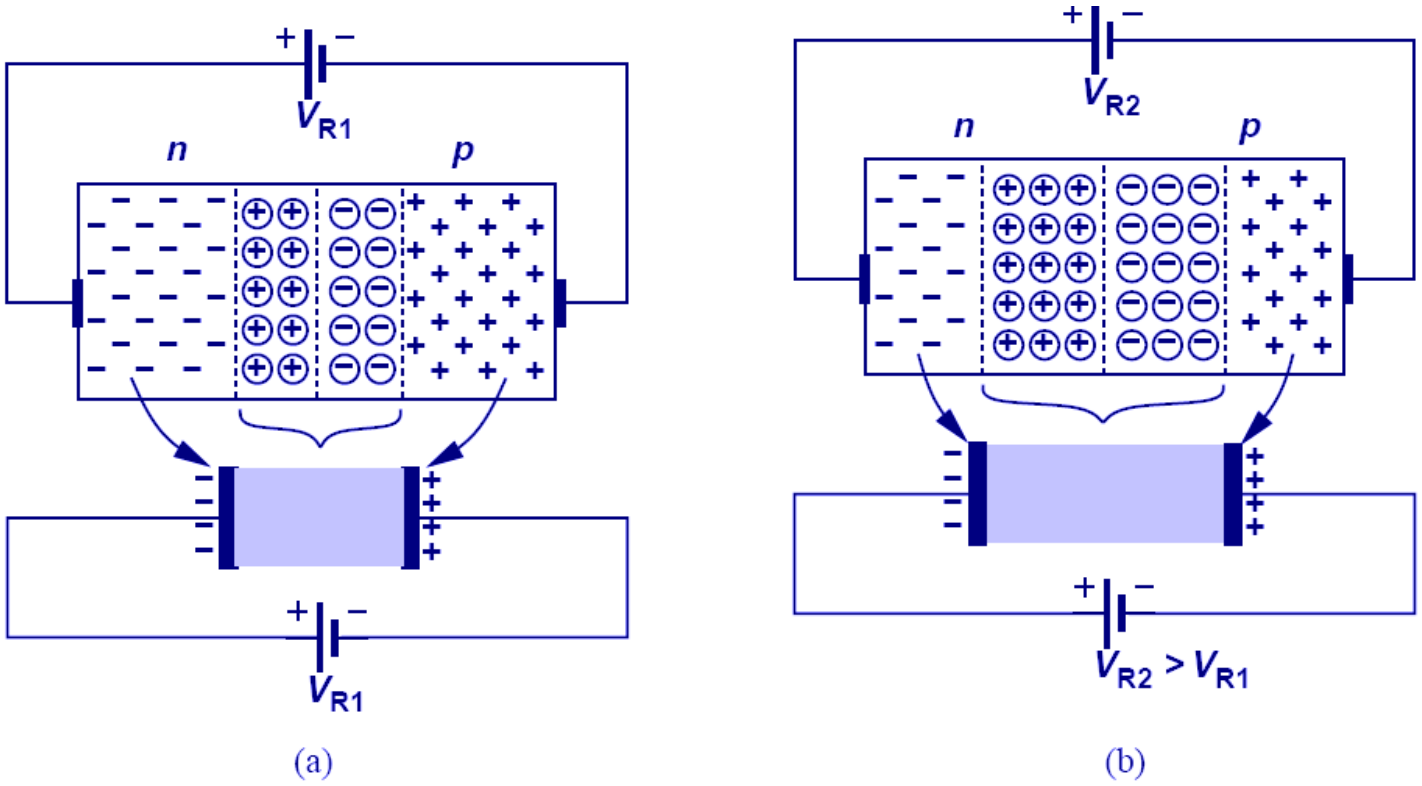
- **به دلیل وجود میدان الکتریکی در دو طرف محل اتصال، در آن جا یک پتانسیل الکتریکی داخلی ایجاد می شود. نحوه محاسبه این پتانسیل الکتریکی در بالا بیان شده است.**

دیود در حالت بایاس معکوس



- هرگاه ولتاژی که از بیرون به ناحیه **N** از یک دیود اعمال می کنیم نسبت به ناحیه **P** پتانسل بیشتری داشته باشد، اصطلاحا می گوییم که دیود در شرایط بایاس معکوس است.
- در شرایط بایاس معکوس میدان الکتریکی خارجی هم جهت با میدان الکتریکی داخلی است. بنابراین میدان الکتریکی قوی تری در محل پیوند **PN** ایجاد می شود و به تبع آن عرض ناحیه تخلیه افزایش می یابد.

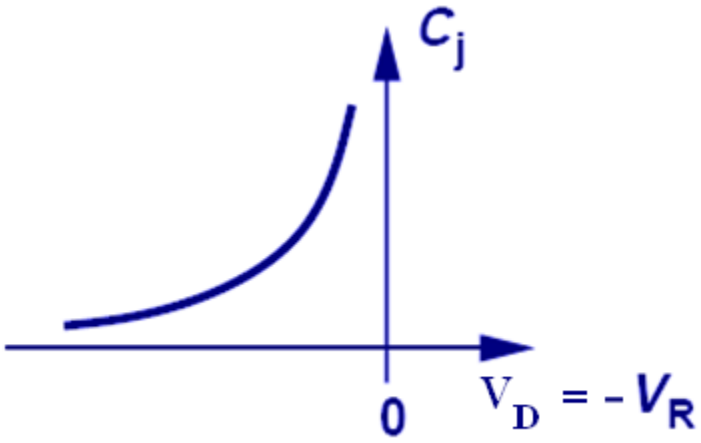
کاربردهای دیود در ناحیه بایاس معکوس
(خازن متغیر با ولتاژ)



Voltage-Dependent Capacitor: خازن متغیر با ولتاژ

- یک پیوند PN در حالت بایاس معکوس را می توان همانند یک خازن در نظر گرفت. با تغییر V_R عرض ناحیه تخلیه تغییر کرده و به تبع آن مقدار خازن تغییر می کند.
- یک پیوند PN در حالت بایاس معکوس همانند خازن متغیر با ولتاژ عمل می کند.

خازن متغیر با ولتاژ



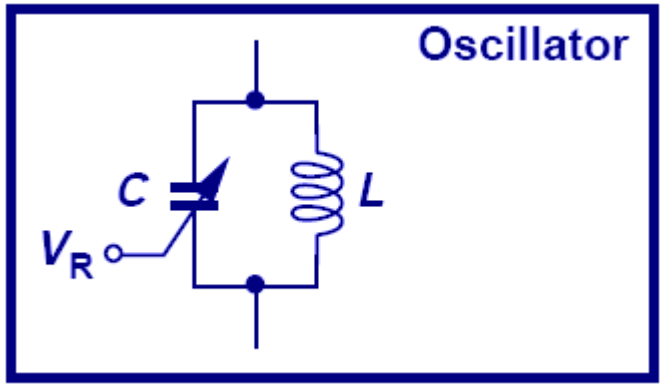
$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1+\frac{V_R}{V_0}}}$$

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{si} q}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_0}}$$

- رابطه فوق در درس فیزیک الکترونیک اثبات می شود.

نوسان ساز کنترل شده با ولتاژ (VCO)

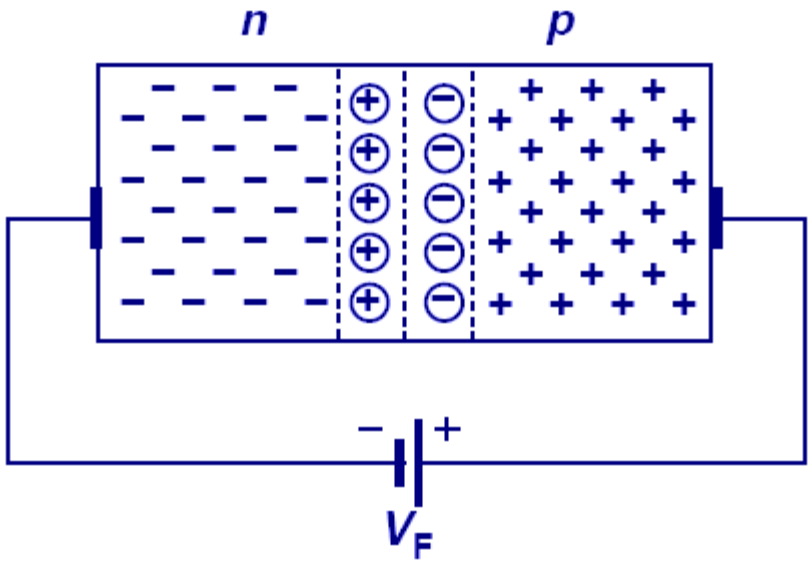
Oscillator: نوسان ساز
Tank: مخزن



$$f_{res} = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{LC}}$$

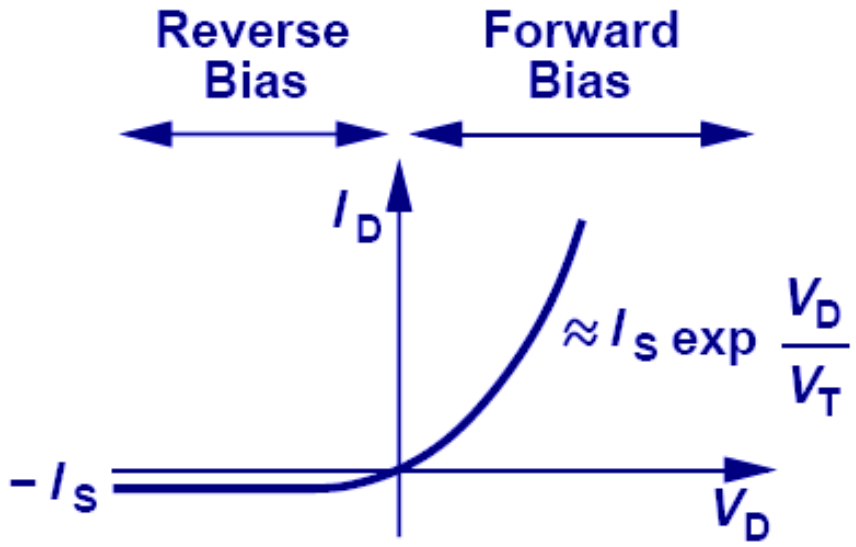
- یک کاربرد بسیار مهم پیوند **PN** در حالت بایاس معکوس این است که از آن در مدار **VCO** استفاده می شود. یاداوری می شود که در نوسان ساز ها معمولا از مدار تانک **LC** استفاده می شود.
- با تغییر V_R مقدار **C** تغییر کرده و در نتیجه فرکانس نوسان تغییر می کند.

دیود در ناحیه بایاس مستقیم



- هرگاه ولتاژ اعمال شده از بیرون به گونه ای باشد که نیمه هادی **N** پتانسیل کمتری نسبت به نیمه هادی **P** داشته باشد در آن صورت دیود در بایاس مستقیم خواهد بود.
- در این حالت میدان الکتریکی خارجی بر خلاف جهت میدان الکتریکی داخلی خواهد بود. لذا میدان الکتریکی برایند کاهش می یابد. به عبارت دیگر عرض ناحیه تخلیه کمتر می شود.
- کاهش میدان الکتریکی برآیند سبب غلبه جریان نفوذی بر جریان رانشی شده و جریان الکتریکی از **P** به **N** برقرار می شود.

مشخصه جریان بر حسب ولتاژ



$$I_D = I_S(\exp\frac{V_D}{V_T} - 1)$$

$$I_s = Aqn_i^2(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p})$$

L_n : Diffusion Length of Electrons

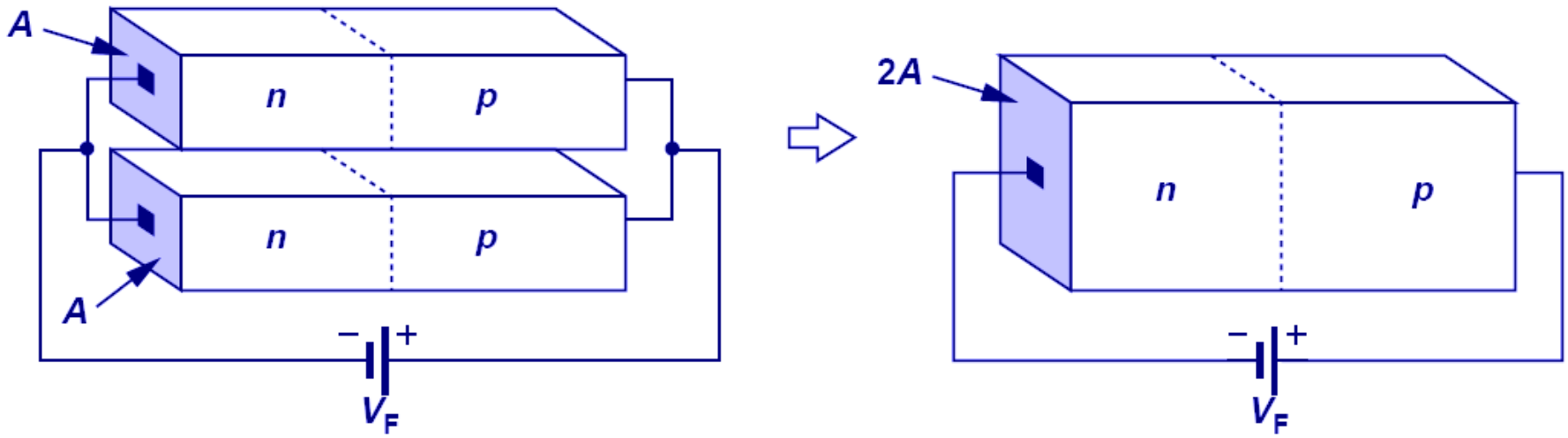
L_p : Diffusion Length of holes

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

$$if \quad T = 300K \Rightarrow V_T = 26mV$$

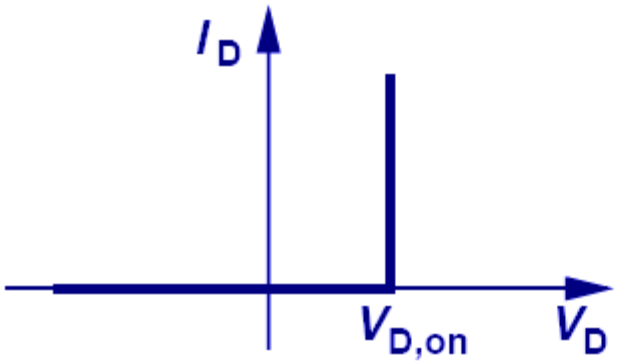
- رابطه جریان بر حسب ولتاژ در حالت بایاس مستقیم نمایی است.
- رابطه جریان بر حسب ولتاژ در حالت بایاس معکوس تقریبا ثابت است.

موازی کردن پیوند های PN

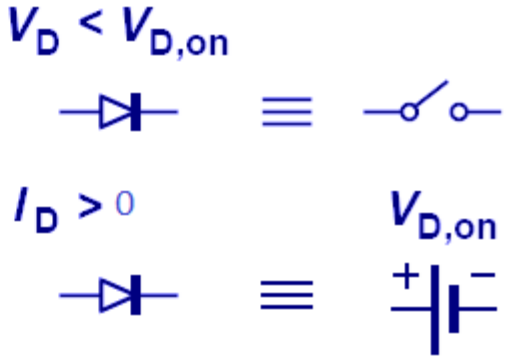


- موضوع فوق با توجه به اینکه I_s متناسب با **A** است (اسلاید قبل)، کاملا واضح است.

مدل دیود با ولتاژ ثابت

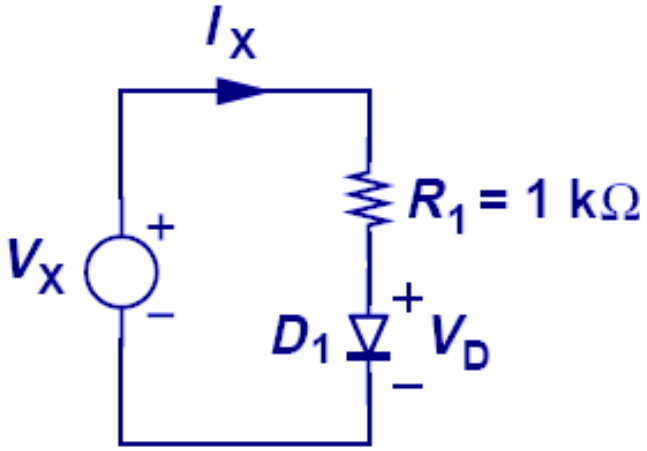


(a)



(b)

مثال

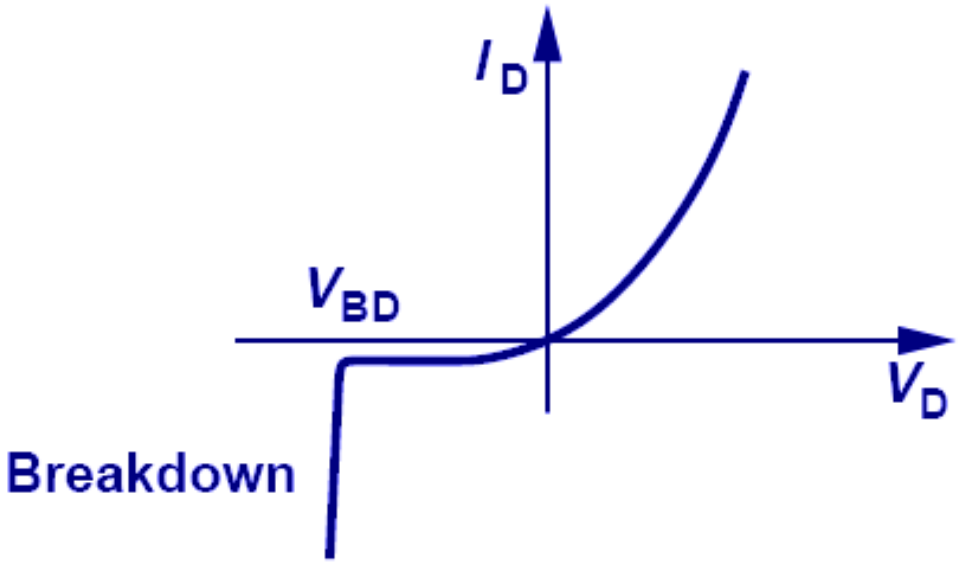


$$V_X = I_X R_1 + V_D = I_X R_1 + V_T \ln \frac{I_X}{I_S}$$

$$I_X = 2.2mA \quad for \quad V_X = 3V$$

$$I_X = 0.2mA \quad for \quad V_X = 1V$$

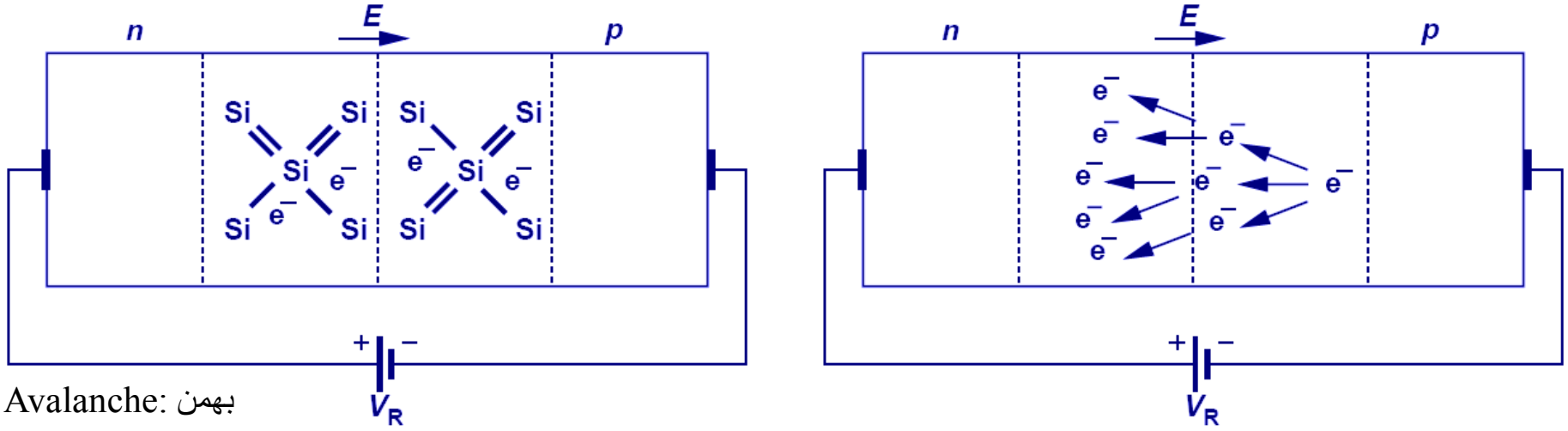
پدیده شکست معکوس



Breakdown: شکست
Enormous: زیاد- از حد معمول بزرگ تر

- **هرگاه ولتاژ معکوس زیادی به دیود اعمال شود، پدیده شکست رخ می دهد و جریان معکوس زیادی از دیود عبور می کند.**

پدیده شکست زنری و بهمنی



Avalanche: بهمن

Collide: به هم خوردن

- هر گاه در حالت بایاس معکوس ولتاژ معکوس زیادی اعمال شود، در آن صورت در ناحیه تخلیه میدان الکتریکی قوی خواهیم داشت. این میدان قوی سبب شکسته شده پیوند کووالانس Si با Si می شود و به تبع آن الکترون آزاد و حفره ازاد در ناحیه تهی ایجاد می شود. با توجه به جهت میدان الکتریکی در ناحیه تهی قاعدتا جریان معکوس از دیود عبور خواهد کرد. به این پدیده، پدیده شکست زنری گویند.
- پدیده شکست بهمنی به الکترون ها و حفره های پر انرژی بر می گردد. این حامل های پر انرژی در ناحیه تخلیه به اتم های سیلیکن برخورد می کنند و سبب شکسته شدن پیوند های کووالانس و به تبع آن ایجاد الکترون و حفره ازاد می شود. این پدیده به صورت بهمنی تکرار می شود و نهایتا جریان معکوس بزرگی از دیود عبور می کند.