




کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b>	 <b>دوره های آزاد رایانه ای</b> SBU-MIT OCW Joint Project 
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	<b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

## درس ۳ = فیزیک نیمه هادی (II)

### انتقال حامل



۱۵ سپتامبر ۲۰۰۵

### محتویات

۱. حرکت حرارتی
۲. رانش حامل
۳. نفوذ حامل


### تکلیف خواندنی

Sodini و Howe، فصل ۲، بخش های ۲/۶\_ ۲/۴

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b> <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

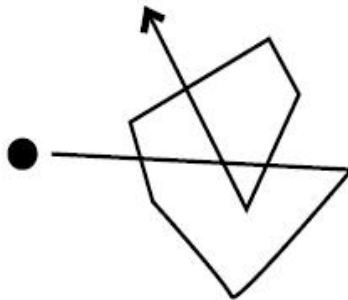
## سوالات کلیدی

- مکانیزمهای فیزیکی به وجود آورنده جریان در نیمه هادیها چه هستند؟
- الکترونها و حفره های یک نیمه هادی چگونه در یک میدان الکتریکی رفتار می کنند؟
- اگر تراکم الکترونها و حفره های نیمه هادی در فضا ناپیکنواخت باشد چگونه رفتار می کنند؟

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

## ۱- حرکت حرارتی

- در تعادل حرارتی، حامل‌ها در حال سکون نیستند
- به اتم‌های سیلیکون در حال ارتعاش برخورد می‌کنند. (حرکات Browni)
- به طور الکترواستاتیک با ناخالصی باردار و با یکدیگر تعامل دارند





مشخصه ثابت زمانی حرکات حرارتی. متوسط زمان آزاد بین برخوردها

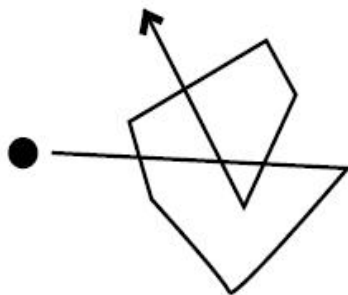
$$\tau_c \equiv \text{زمان برخورد [s]}$$

در بین برخوردها، حامل‌ها تندی زیادی کسب می‌کنند

$$v_{th} \equiv \text{تندی حرارتی [cm/s]}$$

اما به جایی نمی‌رسند!

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b> <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT



مشخصه طولی حرکات حرارتی

$\lambda \equiv$  متوسط مسیر آزاد [cm]

$$\lambda = v_{th} \tau_c$$

جاگذاری اعداد برای سیلیکون در دمای ۳۰۰K

$$\tau_c \approx 10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ s}$$


$$v_{th} \approx 10^7 \text{ cm/s}$$

$$\Rightarrow \lambda \approx 1 \sim 10 \text{ nm}$$

به عنوان مرجع در ماسفت‌های مدرن امروزی دارای:

$$L_g \approx 50 \text{ nm}$$

← حامل‌ها در ادوات مدرن برخوردارهای زیادی دارند

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

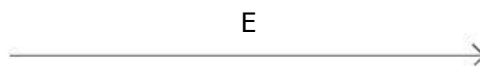
## ۲- رانش حامل

میدان الکتریکی را بر نیمه های اعمال کنید:

$$E \equiv \text{میدان الکتریکی [V/cm]}$$

نیروی خالص بر حامل

$$F = \pm qE$$





بین برخوردها، حاملها در جهت میدان افزایش سرعت می یابند

برای الکترونها

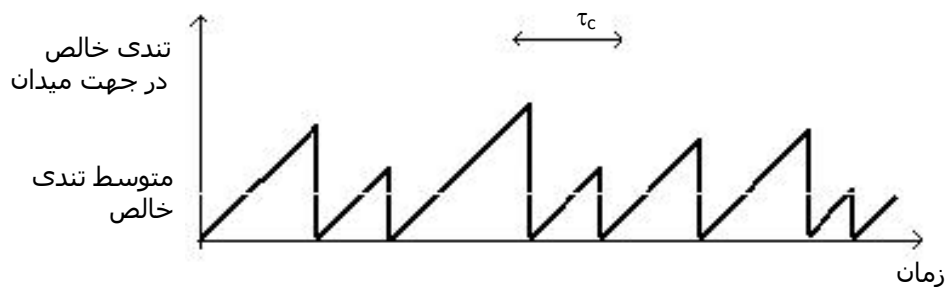
$$v(t) = at = -\frac{qE}{m_n} t$$

برای حفرهها

$$v(t) = \frac{qE}{m_p} t$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b> <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

اما تندی به طور اتفاقی در هر ثابت زمانی تغییر می یابد (به طور متوسط)



بنابراین، متوسط تندی خالص در جهت میدان

$$\bar{v} = v_d = \pm \frac{qE}{2m_{n,p}} \tau_c = \pm \frac{q\tau_c}{2m_{n,p}} E$$

این تندی رانش خوانده می شود [cm/s].

تعریف:



$$\mu_{n,p} = \frac{q\tau_c}{2m_{n,p}} \text{ [قابلیت جابجایی cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}]$$

بنابراین برای الکترون ها:

$$v_{dn} = -\mu_n E$$

برای حفره ها:

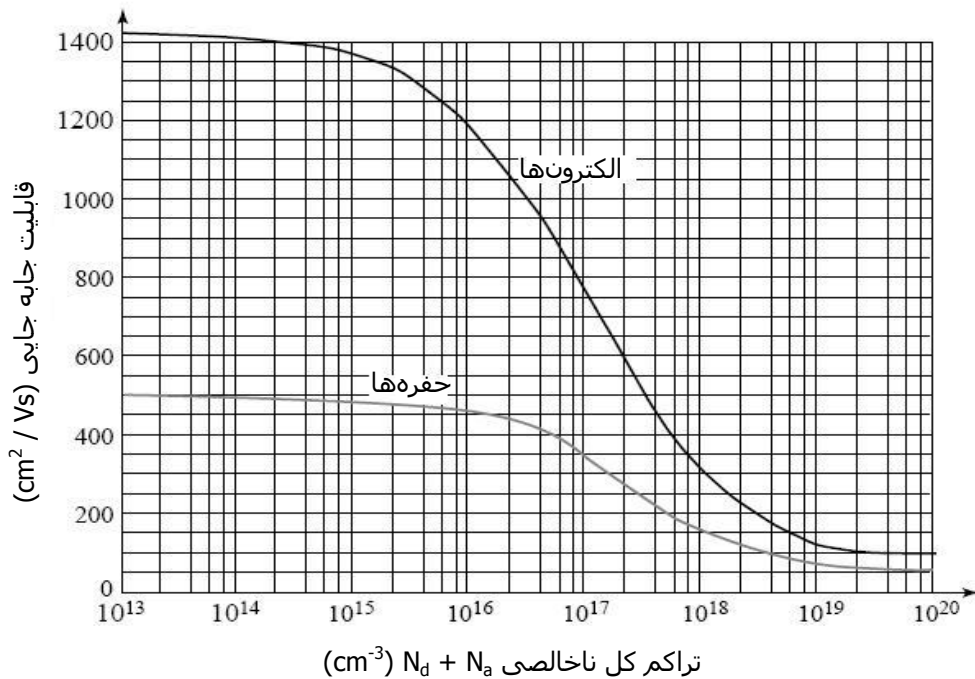
$$v_{dp} = \mu_p E$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b> <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT



قابلیت جابه جایی اندازه سهولت رانش حامل است

- اگر  $\tau_c \uparrow$ ، زمان طولانی تر بین برخوردها  $\leftarrow \mu \uparrow$  قابلیت جابه جایی بیشتر
- اگر  $\downarrow m$ ، ذرات سبکتر  $\leftarrow \mu \uparrow$  قابلیت جابه جایی بیشتر

قابلیت جابه جایی به میزان ناخالصی بستگی دارد. برای سیلیکون در  $300K$ :



- برای مقدار ناخالصی کم،  $\mu$  توسط تصادف با لایه‌های شبکه کریستال محدود می‌شود
- برای مقدار متوسط و بالای ناخالصی،  $\mu$  توسط برخورد با ناخالصی‌های یونیزه شده محدود می‌شود
- سنگین‌تر بودن حفره‌ها از الکترون‌ها  $\Leftarrow$  برای میزان ناخالصی یکسان، جابه جایی الکترون  $<$  جابه جایی حفره‌ها،  $\mu_n > \mu_p$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b> <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

## جریان رانشی

تندی خالص ذرات باردار  $\Leftarrow$  جریان الکتریکی

چگالی جریان رانشی متناسب است با:  
 تندی رانش حامل

تراکم حامل

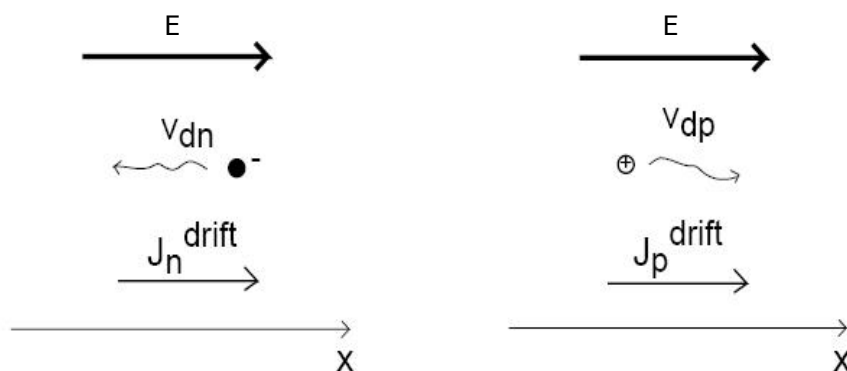
بار حامل



جریان رانشی:

$$J_n^{\text{drift}} = -qnv_{dn} = qn\mu_n E$$

$$J_p^{\text{drift}} = qp v_{dp} = qp\mu_p E$$

به علامات توجه کنید:



کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b> <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

کل جریان رانشی:

$$J^{\text{drift}} = J_n^{\text{drift}} + J_p^{\text{drift}} = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

به شکل قانون اهم می باشد:

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho}$$


که در آن:

$$\sigma \equiv [\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}] \text{ قابلیت هدایت}$$

$$\rho \equiv [\Omega \cdot \text{cm}] \text{ قابلیت مقاومت}$$

آنگاه:

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

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: <b>ابزارهای ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

معمولاً قابلیت مقاومت برای مشخص کردن میزان ناخالصی استفاده می‌شود.

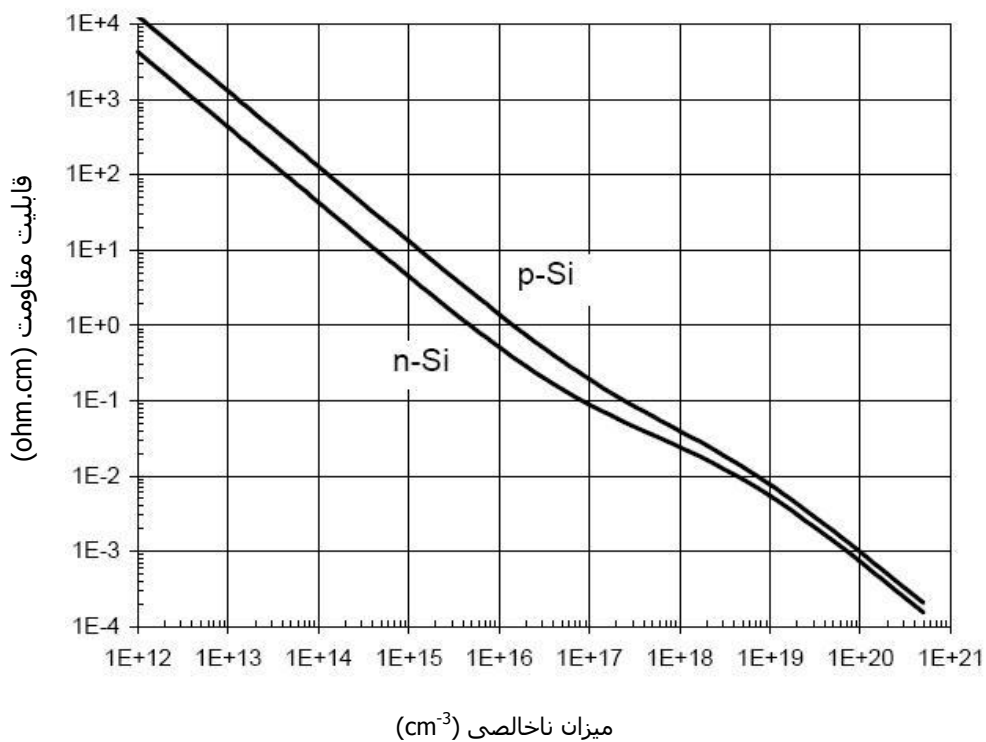
● در نیمه هادی نوع n :



$$\rho_n \approx \frac{1}{qN_d\mu_n}$$

● در نیمه هادی نوع p :

$$\rho_p \approx \frac{1}{qN_a\mu_p}$$

برای سیلیکون در ۳۰۰k :



کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	<b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

مثال عددی:

● سیلیکون با  $N_d = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  در دمای  $300\text{K}$

$$\mu_n \approx 1000 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$$

$$\rho_n \approx 0.21 \Omega.\text{cm}$$

● با اعمال  $|E| = 1 \text{ kV/cm}$


$$|v_{dn}| \approx 10^6 \text{ cm/s} \ll v_{th}$$

$$|J_n^{drift}| \approx 4.8 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$$

● زمان رانش در درازای  $L = 0.1 \mu\text{m}$ :

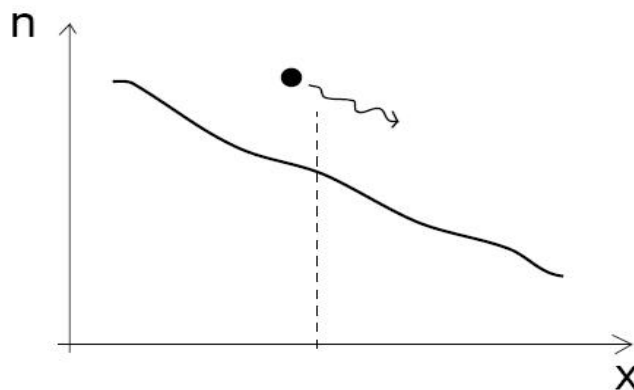
$$t_d = \frac{L}{v_{dn}} = 10 \text{ ps}$$

سریع!

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT



### ۳- نفوذ حامل

نفوذ: حرکات ذرات در پاسخ به شیب تراکم



عناصر نفوذ:

- یک محیط (کریستال سیلیکون)
- شیبی از ذرات (الکترون‌ها و حفره‌ها) داخل محیط
- برخورد و تصادف بین ذرات و محیط منجر به حرکت ذرات در جهات تصادفی می شود:
- ← به طور کلی، حرکت ذرات به سمت پایین شیب است

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	<b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

ارتباط کلیدی نفوذ (قانون اول Fick):

شیب تراکم  $\propto$  فلوی نفوذ

فلو  $\equiv$  تعداد ذرات عبور کننده از واحد سطح در واحد زمان [ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

برای الکترون‌ها:

$$F_n = -D_n \frac{dn}{dx}$$

برای حفره‌ها:

$$F_p = -D_p \frac{dp}{dx}$$


ضریب نفوذ الکترون [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]  $D_n \equiv$

ضریب نفوذ حفره [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]  $D_p \equiv$

D سهولت نفوذ حامل در مقابل شیب تراکم را اندازه می‌گیرد:

$$F^{\text{diff}} \uparrow \Leftarrow D \uparrow$$

D به وسیله اتم‌های ارتعاش کننده شبکه و ناخالصی‌های یونیزه شده محدود می‌شود

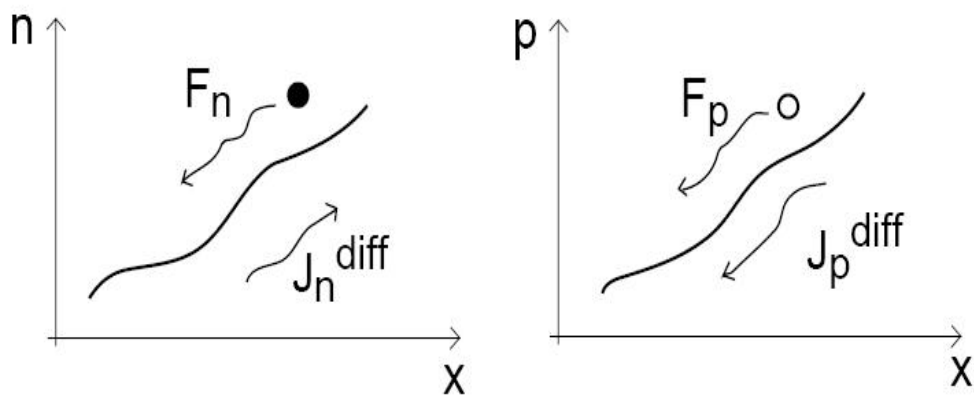
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT



فلوی حامل  $\times$  بار = چگالی جریان نفوذ

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

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

به علامات توجه کنید:



کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	<b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

## رابطه انشتاین

فیزیک رانش و نفوذ در اصل یکسان است

برخوردهای بین ذرات و اتمهای محیط

← باید رابطه‌ای بین  $D$  و  $\mu$  وجود داشته باشد

رابطه انشتاین [که در ۶/۰۱۲ آنرا بدست نمی‌آوریم و فقط از آن استفاده می‌کنیم]:

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

در نیمه هادی‌ها:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$$

$$\frac{kT}{q} \equiv [V] \text{ ولتاژ حرارتی}$$



در ۳۰۰K:

$$\frac{kT}{q} \approx 25\text{mV}$$

برای مثال: برای  $N_d = 3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$

$$\mu_n \approx 1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \rightarrow D_n \approx 25 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\mu_p \approx 400 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \rightarrow D_p \approx 10 \text{ cm}^2/\text{s}$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b> <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

## جریان کل



عموماً، جریان توسط رانش و نفوذ به طور جداگانه ایجاد می‌شود. جریان کل:

$$J_n = J_n^{\text{drift}} + J_n^{\text{diff}} = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_p^{\text{drift}} + J_p^{\text{diff}} = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_{\text{total}} = J_n + J_p$$

9

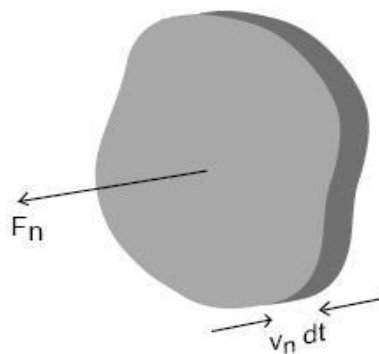
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b> <b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

## خلاصه: رابطه بین $J$ , $F$ , $v$

در نیمه هادی‌ها: ذرات باردار حرکت می‌کنند

⇐ ذرات فلز می‌یابند ⇐ چگالی جریان الکتریکی

فلوی ذره: تعداد ذراتی که از واحد سطح عمود بر جریان ذرات در واحد زمان عبور می‌کنند





رابطه بین فلوی ذره و تندی

$$F_n = n v_n \quad F_p = p v_p$$

چگالی جریان: مقدار باری که از واحد سطح عمود بر جریان ذرات در واحد زمان عبور می‌کند

$$J_n = -q F_n = -q n v_n \quad J_p = q F_p = q p v_p$$

بدون در نظر گرفتن اینکه حامل توسط رانش حرکت می‌کند یا نفوذ

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 <b>عنوان درس:</b>	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	<b>ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک</b>	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

## نتایج کلیدی

● الکترون‌ها و حفره‌ها در نیمه هادی‌ها دارای قابلیت جابه جایی بوده و بار دارند  $\Rightarrow$  حاملین جریان الکتریکی

● جریان رانشی: تولید شده توسط میدان الکتریکی

$$J^{\text{drift}} \propto E$$

● جریان نفوذی: تولید شده توسط شیب تراکم

$$J^{\text{diff}} \propto \frac{dn}{dx}, \frac{dp}{dx}$$

● حامل‌ها در پاسخ به میدان‌ها و شیب‌ها سریع حرکت می‌کنند

● جریان‌های رانشی و نفوذی در ادوات جدید قابل اندازه گیری هستند