

به نام خدا

بررسی و تحلیل فرآیندهای دیفیوژن

استاد: جناب آقای دکتر محمدنژاد

✓ تعریف:

- وارد کردن اتم‌های ناخالصی با استفاده از حرارت در نیمه هادی، به منظور تغییر هدایت الکتریکی آن

✓ ارائه روش‌های نفوذ ناخالصی در سیلیکن و ژرمانیوم برای اولین بار توسط پفن در سال ۱۹۵۲

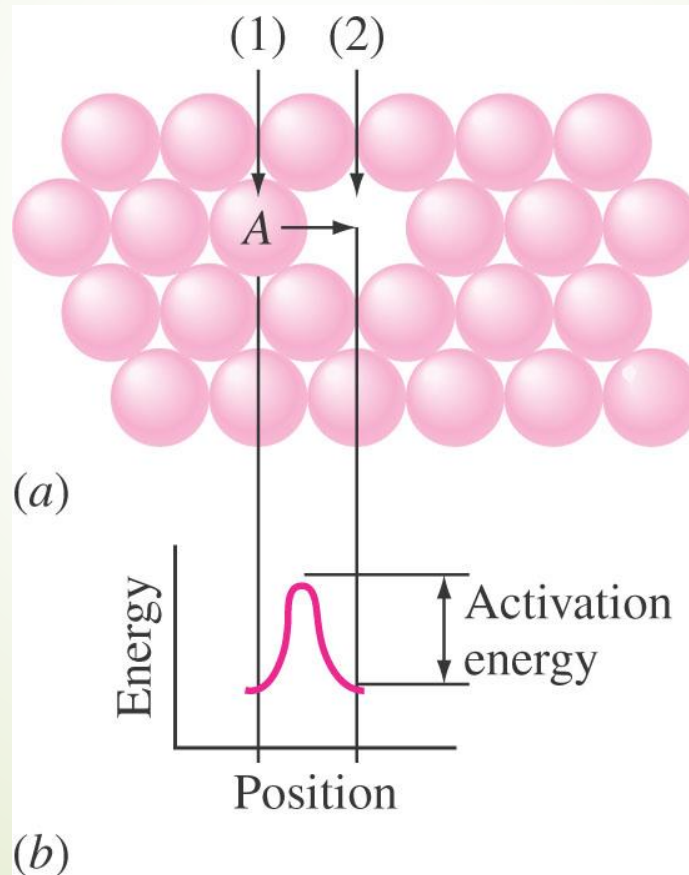
✓ ارائه دو نظریه برای بررسی فرآیند نفوذ:

نظریه پیوستگی بر اساس معادلات Fick

بررسی نفوذ بر اساس نقص‌های نقطه‌ای، اتم‌های غیرپیوندی و مکان‌های خالی موجود در شبکه بلور

مدل‌های نفوذ در جامدات

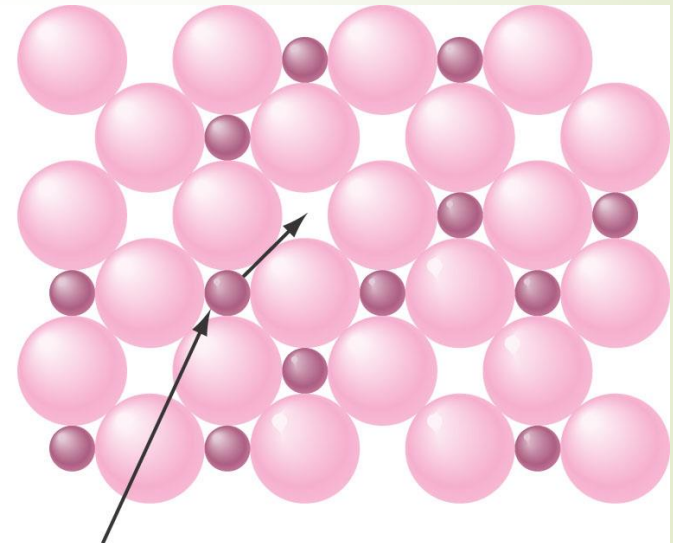
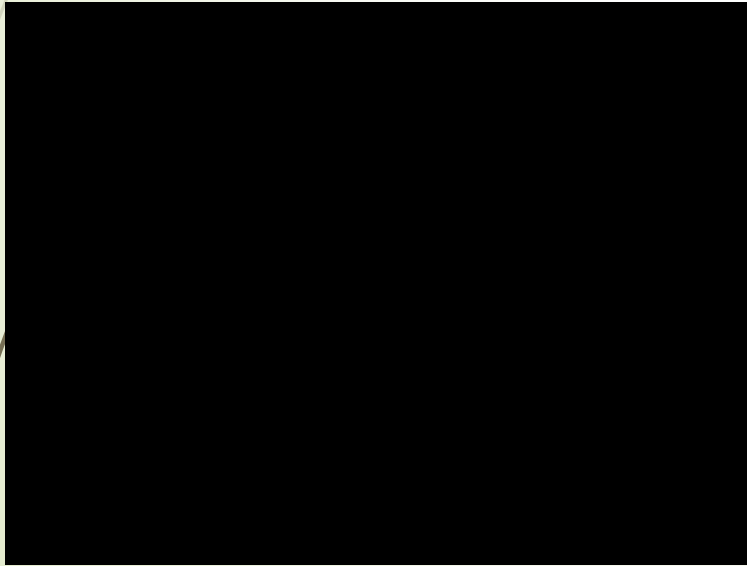
✓ مکانیسم مکان‌های خالی (نفوذ آرسنیک و آنتیموان در سیلیکن)



مدل‌های نفوذ در جامدات (ادامه)

✓ مکانیسم پخش بینابینی

✓ انتشار اتم‌های ناخالصی کوچکتر از اتم‌های اصلی شبکه با این مکانیسم



Interstitial atom
diffusing into
interstitial vacancy

معادلات نفوذ یک بعدی Fick

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

✓ قانون اول نفوذ فیک

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$



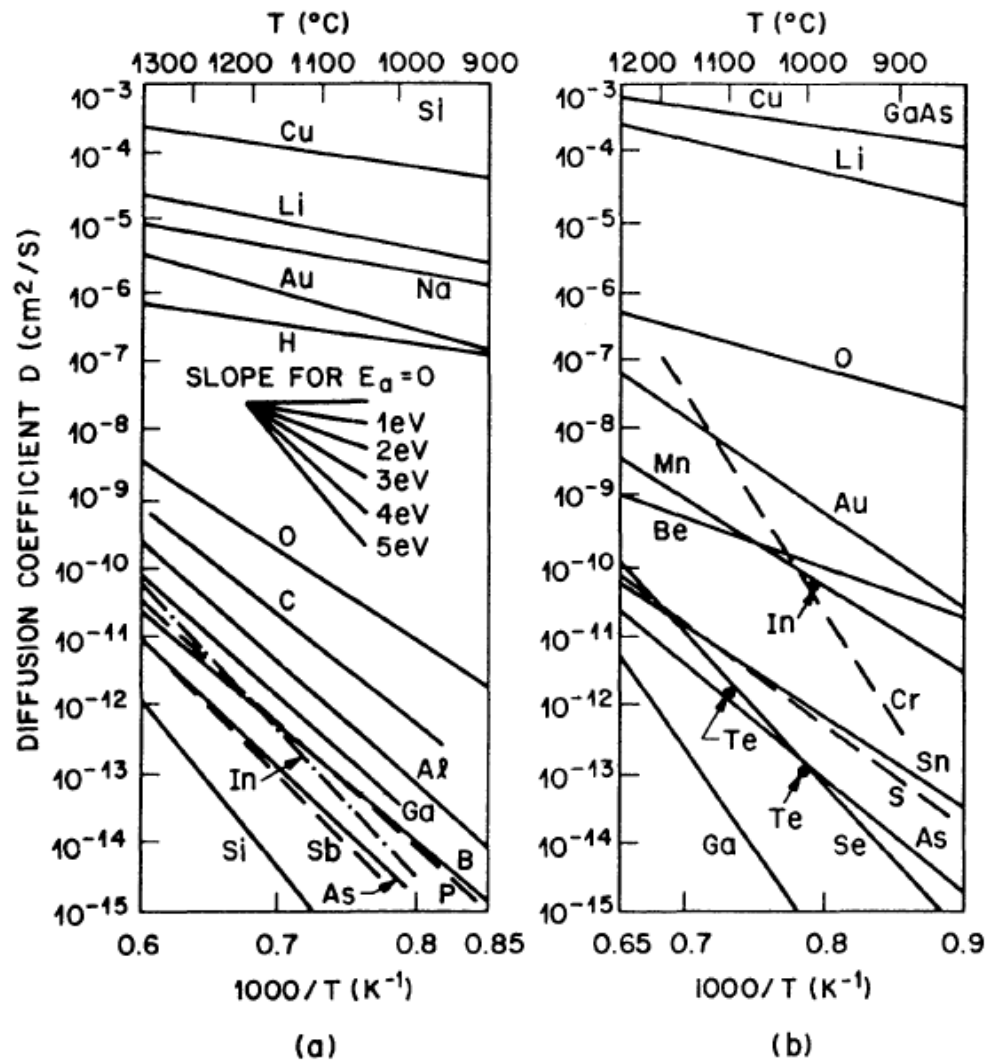
قانون بقای ماده

در صورتی پایین بودن تراکم ماده حل شده، ضریب نفوذ ثابت فرض می شود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

✓ قانون دوم نفوذ فیک

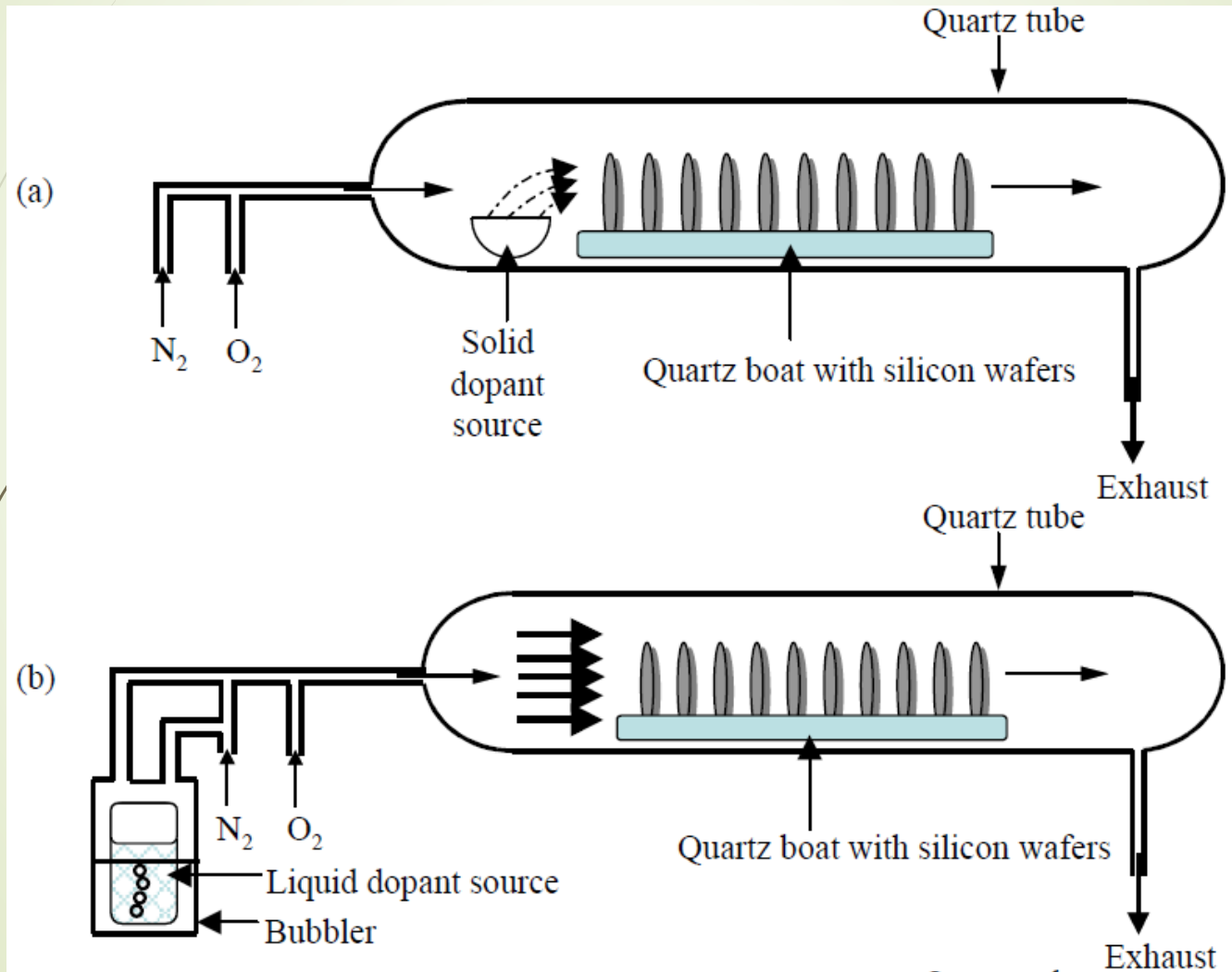
ضریب نفوذ وابسته به حرارت



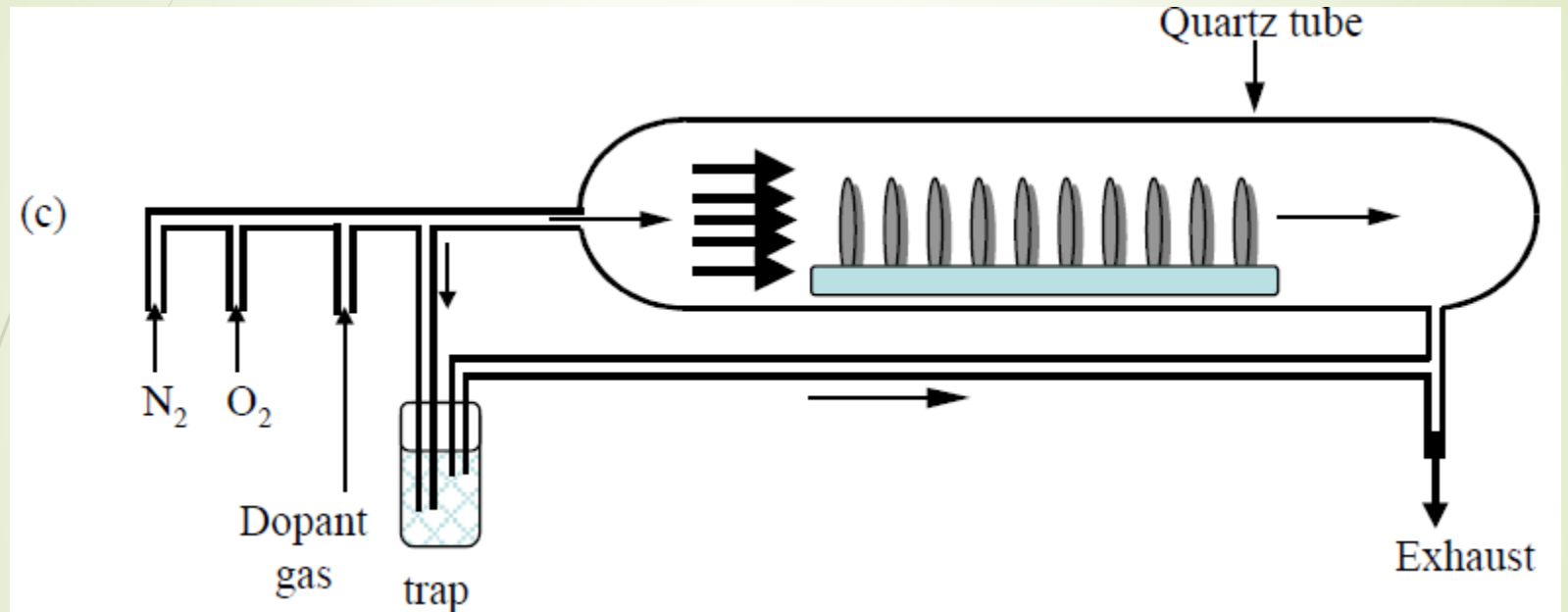
$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

Diffusion coefficient (also called diffusivity) as a function of the reciprocal of temperature for (a) silicon and (b) gallium arsenide

فرآیند نفوذ ناخالصی در سیلیکن



فرآیند نفوذ ناخالصی در سیلیکن (ادامه)



✓ درجه حرارت ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد

فرآیند نفوذ و پروفایل‌های دیفیوژن

✓ الف) نشست اولیه:

$$C(x, 0) = 0$$

شرط اولیه:

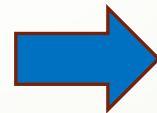
$$C(0, t) = C_s$$

$$C(\infty, t) = 0$$

شرایط مرزی:

$$erf(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

$$erfc(x) \equiv 1 - erf(x)$$



$$C(x, t) = C_s erfc\left\{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right\}$$

$$Q(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} C_s \sqrt{Dt} \cong (1.13) C_s \sqrt{Dt}$$

فرآیند نفوذ و پروفایل‌های دیفیوژن (ادامه)

✓ الف) نشست ثانویه (نفوذ عمیق):

$$C(x, 0) = 0$$

شرط اولیه:

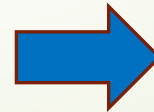
$$\int_0^{\infty} C(x, t) dx = S$$

شرایط مرزی:

$$C(\infty, t) = 0$$

$$C(x, t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left\{\frac{-x^2}{4Dt}\right\}$$

$$C_s = C(x, t) |_{x=0} = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}}$$



$$C(x, t) = C_s e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

تابع مکمل خطا و منحنی گوس

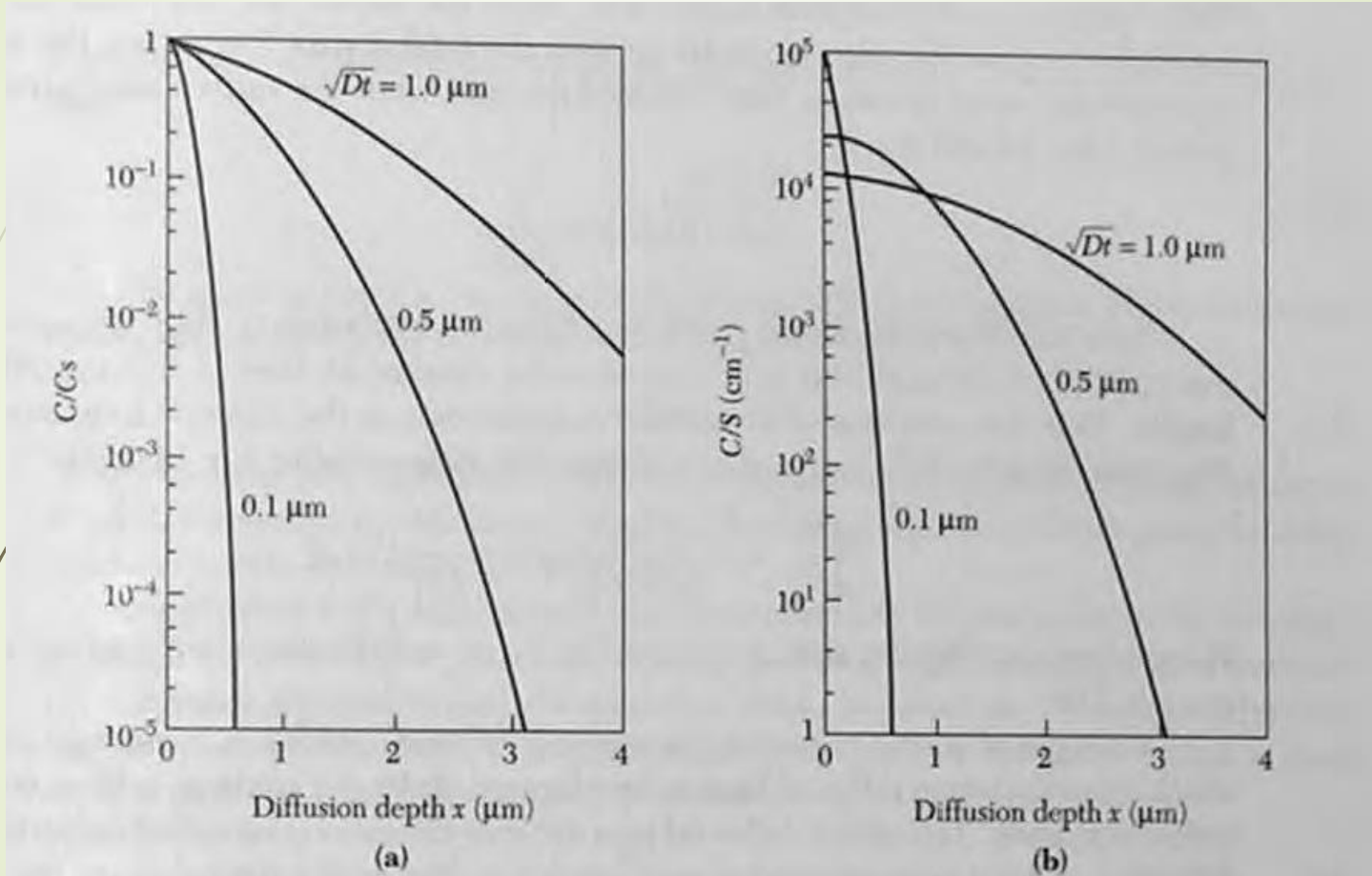


Figure 6.5 Diffusion profiles. (a) Normalized complementary error function versus distance for successive diffusion times. (b) Normalized Gaussian function versus distance.

روش‌های اندازه‌گیری

✓ ارزیابی نتایج نفوذ با اندازه‌گیری سه پارامتر زیر:

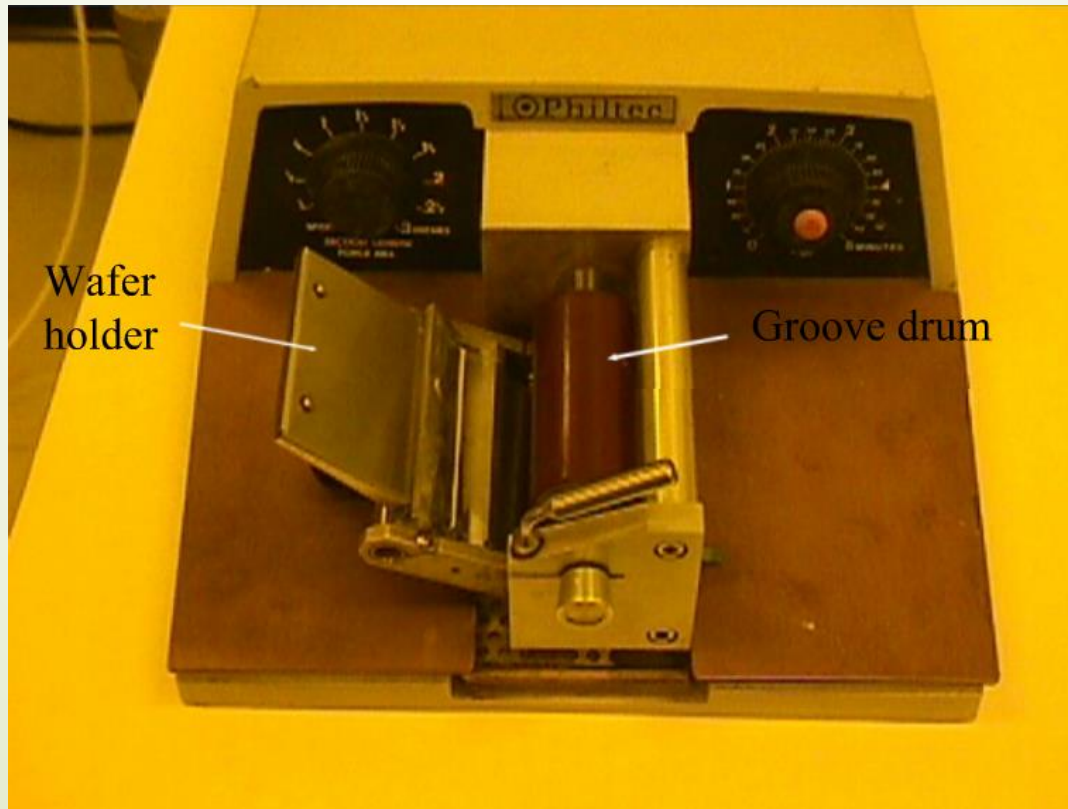
الف) عمق پیوند

ب) مقاومت سطحی

ج) پروفایل پخش ناخالصی

اندازه‌گیری عمق پیوند

- ✓ مخلوط ۱۰۰ سی سی اسید HF و چند قطره HNO_3 برای رنگ کردن
- ✓ تابش به مدت ۱ الی ۲۰ دقیقه
- ✓ تیرگی ناحیه p نسبت به n



اندازه‌گیری عمق پیوند (ادامه)

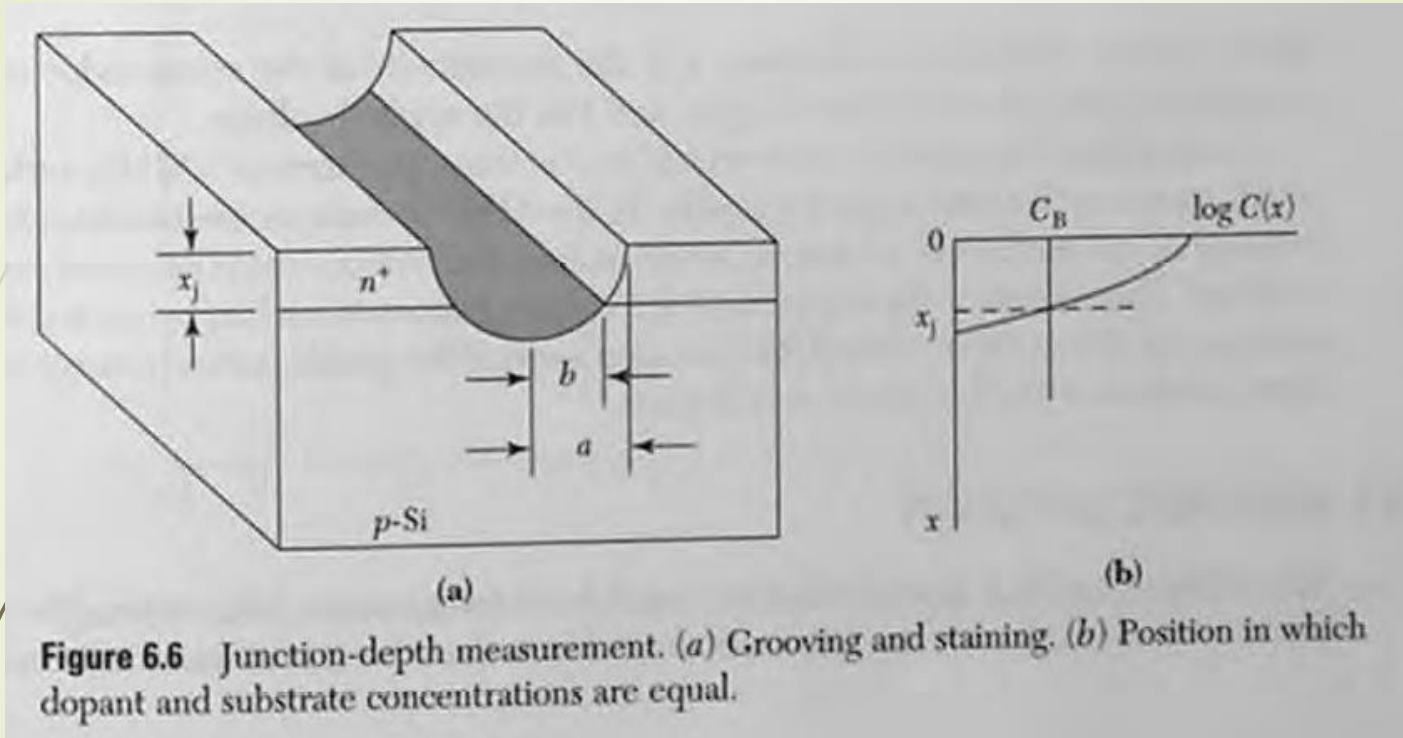


Figure 6.6 Junction-depth measurement. (a) Grooving and staining. (b) Position in which dopant and substrate concentrations are equal.

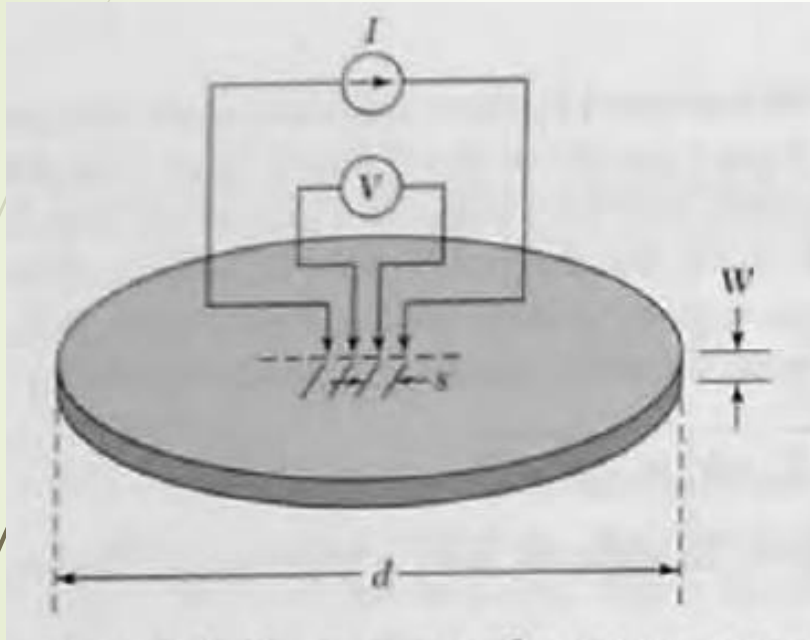
$$x_j = \sqrt{R_0^2 - b^2} - \sqrt{R_0^2 - a^2}$$

$$x_j \cong \frac{a^2 - b^2}{2R_0}$$

$$C(x_j) = C_b$$

اندازه‌گیری مقاومت سطحی

✓ الف) روش پروب چهار نقطه‌ای



$$\rho = \frac{V}{I} \cdot W \cdot CF \quad \Omega\text{-cm}$$

✓ در صورتی که مقدار d/s از ۲۰ بزرگتر باشد، ضریب تصحیح به عدد ۴,۵۴ نزدیک می‌شود.

$$R_s = \frac{1}{q \int \mu C(x) dx}$$

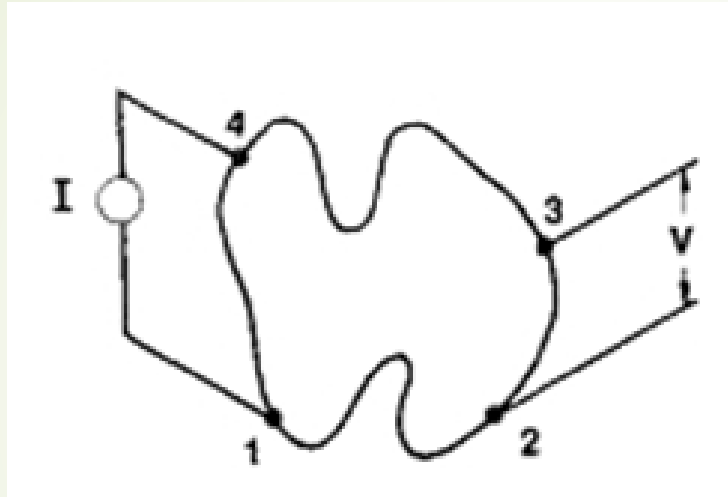
اندازه گیری مقاومت سطحی (ادامه)

Correction factor C.F. for the measurement of sheet resistances with the four-point probe⁴¹

d / s	Circle	Square		Rectangle	
		$a/d = 1$	$a/d = 2$	$a/d = 3$	$a/d \geq 4$
1.0				0.9988	0.9994
1.25				1.2467	1.2248
1.5			1.4788	1.4893	1.4893
1.75			1.7196	1.7238	1.7238
2.0			1.9475	1.9475	1.9475
2.5			2.3532	2.3541	2.3541
3.0	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005	2.7005
4.0	2.9289	3.1127	3.2246	3.2248	3.2248
5.0	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750	3.5750
7.5	3.9273	4.0095	4.0361	4.0362	4.0362
10.0	4.1716	4.2209	4.2357	4.2357	4.2357
15.0	4.3646	4.3882	4.3947	4.3947	4.3947
20.0	4.4364	4.4516	4.4553	4.4553	4.4553
40.0	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129	4.5129
∞	4.5324	4.5324	4.5325	4.5325	4.5324

اندازه‌گیری مقاومت سطحی (ادامه)

✓ (ب) روش ون در پو



$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \right) F(Q)$$

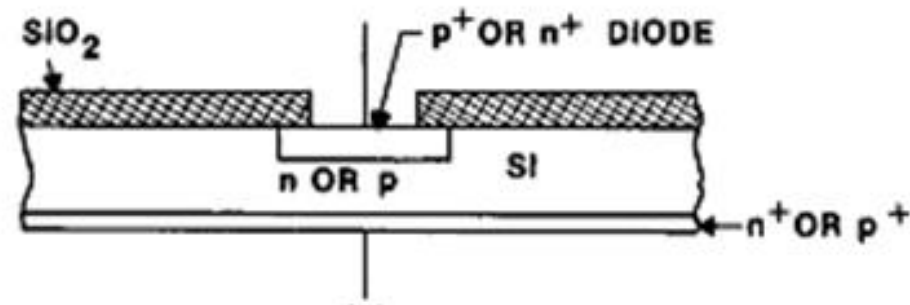
where $R_{12,34} = \frac{V_{12}}{I_{34}}$ and $R_{23,41} = \frac{V_{23}}{I_{41}}$

اندازه‌گیری نمودارهای ناخالصی

الف) روش C-V

- ✓ خازن ناحیه تخلیه تابعی از ولتاژ بایاس معکوس می‌باشد.
- ✓ در صورتی که تراکم ناخالصی‌ها در یک طرف پیوند خیلی زیاد باشد و در طرف دیگر به شدت کاهش پیدا کند:

$$C(x) = \frac{2}{q\epsilon_s \frac{d}{dV} \left[\frac{1}{C(V)} \right]^2} = \frac{C^3(V)}{q\epsilon_s} \cdot \frac{1}{\left[\frac{dC(V)}{dV} \right]}$$
$$x = \frac{\epsilon_s}{C(V)}$$



اندازه‌گیری نمودارهای ناخالصی (ادامه)

$$V = V_R + V_{bi}$$

$$V_{bi} \cong \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{C_A C_D}{n_i^2} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(N_A \frac{N_D}{n_i^2} \right)$$

$$C(V) = \left(\frac{q\epsilon_s}{2} C_B \right)^{1/2} \left(V_{bi} \pm V_R - \frac{2kT}{q} \right)^{-1/2}$$
$$= \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} (\beta V_{bi} \pm \beta V - 2)^{-1/2}$$

$$L_D = \text{the Debye length} = \left(\frac{\epsilon_s}{qC_B} \cdot \frac{kT}{q} \right)^{1/2}$$

اندازه‌گیری نمودارهای ناخالصی (ادامه)

(ب) روش هدایت تفاضلی:

✓ برداشتن یک لایه نازک از سطح سیلیکن به روش اکسیداسیون آندی و سپس

خوردن اکسید با محلول HF

✓ اندازه‌گیری مقاومت سطحی با روش پروب چهار نقطه‌ای به صورت تناوبی

✓ ثابت بودن دما و جابجا نشدن اتم‌های ناخالصی در طول فرآیند

✓ ثابت بودن نمودار توزیع ناخالصی

$$R_s = \frac{1}{q \int \mu C(x) dx}$$

✓ مناسب نبودن این روش برای پیوندهای کم عمق به دلیل داخل شدن پروب‌ها در داخل سیلیکن

خلاصه

- ✓ استفاده از قوانین نفوذ فیک با ضرایب ثابت برای عناصر گروه‌های ۳ و ۵ هنگامی که تراکم ناخالصی‌ها از تراکم ذاتی حامل‌ها کمتر باشد.
- ✓ استفاده از معادلات نفوذ فیک با ضرایب وابسته به تراکم در تراکم‌های بالا
- ✓ اگرچه روش‌های کاشت یون از دقت و ظرافت بالاتری برخوردارند، بنا بر دلایل اقتصادی، روش‌های نفوذ از اهمیت بالایی برخوردارند.

مراجع

- 1- S. M. Sze, "VLSI Technology", 2'Ed, McGrow-Hill, (1988)
- 2- S. M. Sze, "VLSI Technology", 1'Ed, McGrow-Hill, (1988)
- 3- J. Crank, "THE Mathematics of Diffusion", (1991)
- 4- Grove, "Physycs & Technology of Semiconductor Devices"
- 5- Simon M. Sze, "Fundamentals Of Semiconductor Fabrication", (2004)



با تشکر از توجه شما