

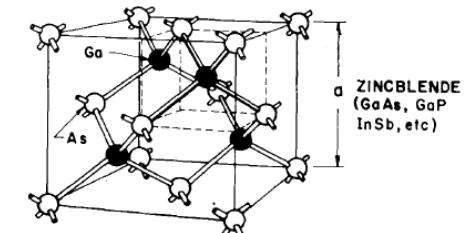
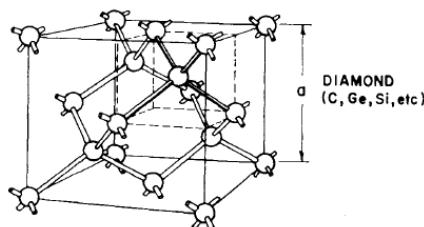
618327-2560

PHYSICS OF ELECTRONIC MATERIALS AND DEVICES

Dr. Orrathai Watcharakitchakorn

Lecture 3

Introduction to Semiconductor



Physical Constants and units

រាជរដ្ឋ

Avogadro's number:

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$$

Boltzmann's constant

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot \left(\frac{\text{joule}}{\text{K}} \right)$$

Electronic charge (magnitude):

$$e = 1.60 \cdot 10^{-19} \cdot (\text{coul})$$

Free electron rest mass

$$m_e = 9.1094 \cdot 10^{-31} \cdot (\text{kg})$$

Permeability of free space:

$$\mu_0 = (4 \cdot \pi) \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{\text{henry}}{\text{m}} \right)$$

Permittivity of free space

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{\text{farad}}{\text{cm}} \right)$$

Planck's constant:

$$h = 6.625 \cdot 10^{-34} \cdot (\text{joule} \cdot \text{sec})$$

Proton rest mass

$$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \cdot (\text{kg})$$

Speed of light in vacuum:

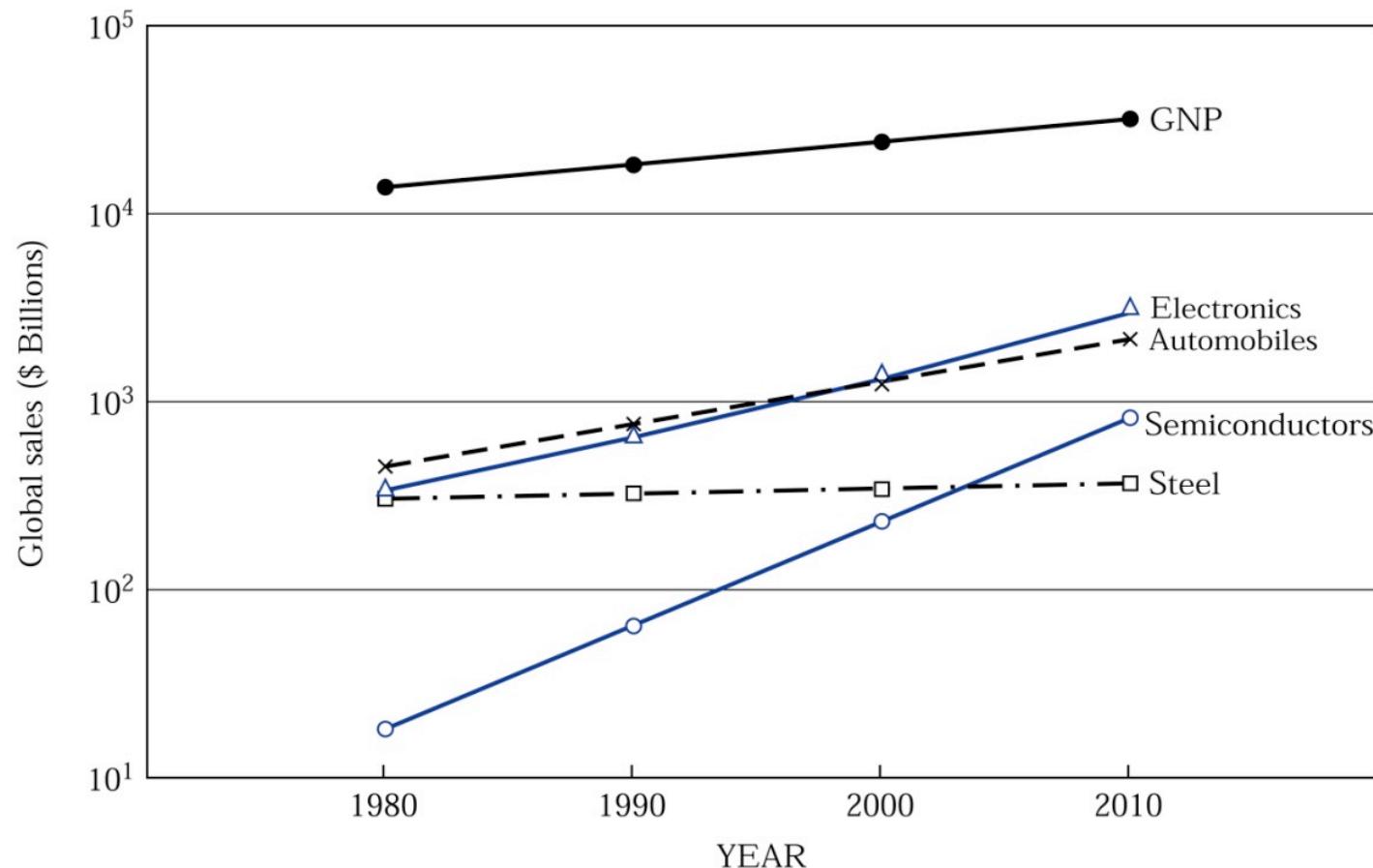
$$c = 2.998 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right) \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Introduction

- Electronic industry has become the largest industry in the world since 1998.
- Semiconductor devices are the foundation of this kind of industry.
- In order to understand how electronic devices and optoelectronic devices work, we need to be familiar with material properties and electron behavior in the material.
- เพื่อเข้าใจอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เราจะต้องคุ้นเคยกับคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ และ พฤติกรรมของอิเล็กtron ในวัสดุ

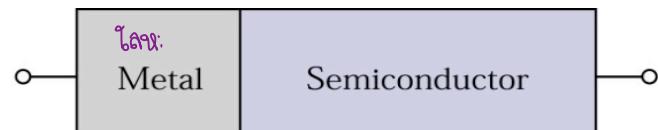
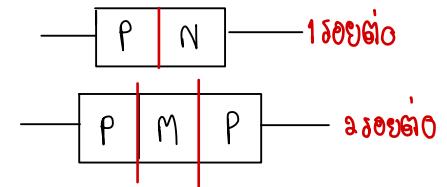
Introduction

ការប្រែប្រើប្រែនូវការកងរោគ

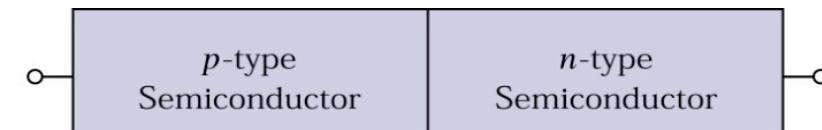


- S/C industry have a contribution of 25% of the electronic industry in the early of 21st century.

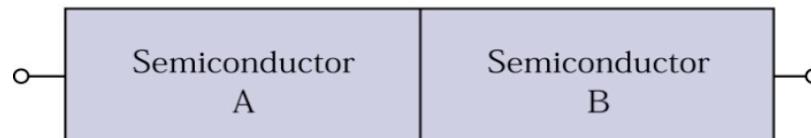
Basic blocks of S/C devices



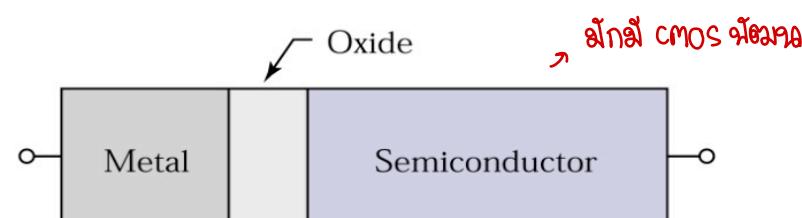
(a)



(b)



(c)



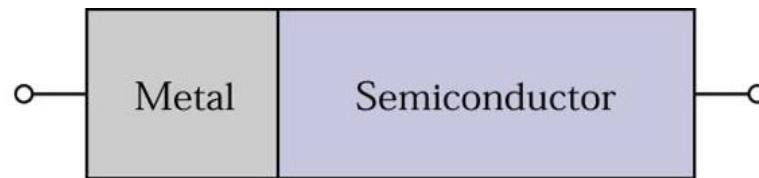
(d)

និង ឯកសារណ៍នៃការរាយការណ៍

- (a) Metal-semiconductor interface;
- (b) p-n junction; ត្រូវដឹងថា p-type មែនជាដីលីមីនុយ៉ាទេ និង n-type មែនជាដីលីមីនុយ៉ាទេ ដើម្បីបង្កើតស្ថាបនកម្ម និងស្ថាបនកម្ម នៅក្នុងសារពិនិត្យ។
- (c) Heterojunction interface;
- (d) Metal-oxide-semiconductor structure.

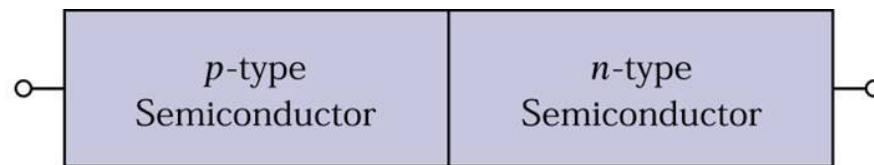
ខ្លួន Si ត្រូវ Valence 4 ដ៏កេចនាការណ៍ឡើង
ដើម្បីសរើ P ក្នុងទីតាំងខាងក្រោម ឬ ស្ថាបនកម្ម នៅក្នុងសារពិនិត្យ។
ការបង្កើតស្ថាបនកម្មនៃក្រុងខ្លួន Si ត្រូវ Valence 4 ដ៏កេចនាការណ៍ឡើង
ដើម្បីសរើ N ក្នុងទីតាំងខាងលើខ្លួន Si នៅក្នុងសារពិនិត្យ។
ស្ថាបនកម្មនៃក្រុងខ្លួន Si ត្រូវ Valence 4 ដ៏កេចនាការណ៍ឡើង
ដើម្បីសរើ N ក្នុងទីតាំងខាងលើខ្លួន Si នៅក្នុងសារពិនិត្យ។

Metal-semiconductor



- A metal-semiconductor contact was the first semiconductor device in 1874.
- This can be used as a *rectifying contact* or as an *ohmic contact*.
- Rectifying contact allows current to flow easily only in one direction (e.g. gate of MESFET).
- Ohmic contact passes current in either direction with a negligibly small voltage drop (e.g. source and drain of MESFET).

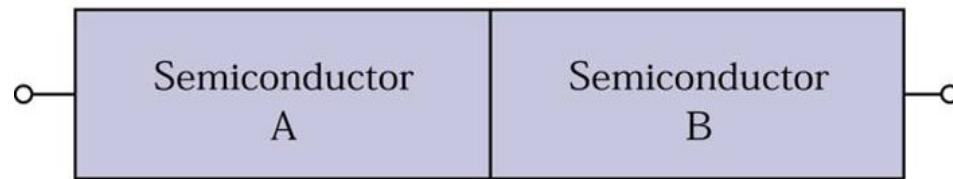
p-n junction



- Formed by putting p-type semiconductor (positively charged carriers) to n-type semiconductor (negatively charged carriers).
- This is a key building block for most semiconductor devices.
- By adding another p-type semiconductor, p-n-p bipolar transistor can be formed, but if three p-n junctions are used, this can form p-n-p-n device called a **thyristor**.

Heterojunction

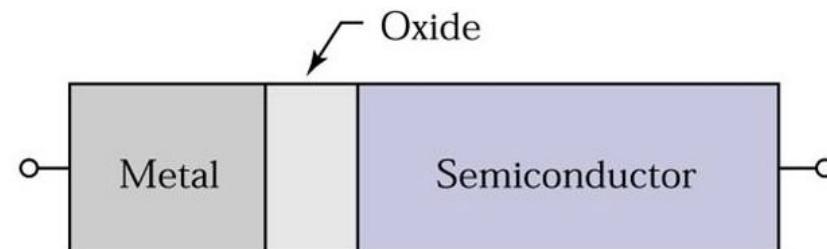
កំពើផ្សេងគ្នាលើសម្រាប់តិចុលាកាមទីផ្សារ



- The heterojunction interface is formed between two different semiconductors. This kind of junction is the key component for high-speed and photonic devices.
- (e.g. GaAs and AlAs to form heterojunction)

អាជីវកម្មនៃ គារទិន្នន័យ, នៅក្នុង

Metal-oxide-semiconductor



- The metal-oxide semiconductor is famously called **MOS** structure.
- This structure usually uses with two p-n junctions to form a famous device called MOSFET (MOS field-effect transistor).

Semiconductor materials

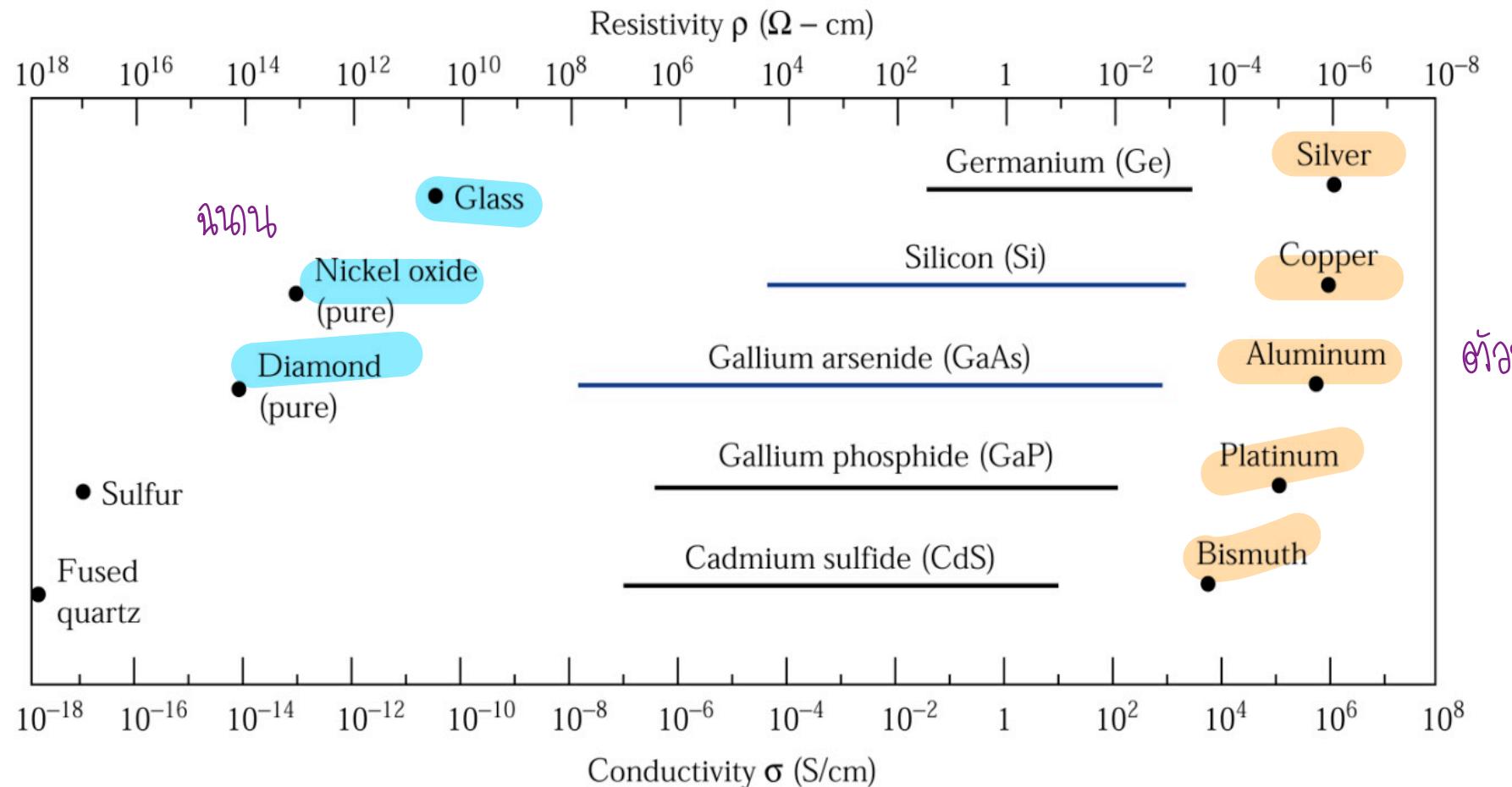
- We may group solid-state materials by using electrical conductivities σ into 3 classes: insulators, semiconductors, and conductors.
 - **Conductors** (สารที่เป็นตัวนำ) have high conductivities (ค่าความนำไฟฟ้า) ($10^4 - 10^6 \text{ S/cm}$) such as copper (Cu:ทองแดง) and silver (Ag:เงิน). $\sigma: \frac{1}{\Omega}$
 - **Semiconductor** (สารกึ่งตัวนำ) have conductivities between those of insulators and those of conductors.
 - **Insulators** (绝缘) have very low conductivities (ค่าความนำไฟฟ้า) ($10^{-18} - 10^{-8} \text{ S/cm}$) such as quartz or glass.

***At room temperature ที่อุณหภูมิห้อง

Semiconductor materials

- The conductivity of a semiconductor is sensitive to temperature, illumination, magnetic field, and amounts of impurity atoms.
- This sensitivity makes semiconductor one of the most important materials for electronic applications. สารกึ่งตัวนำฯ: ทำงานตั้งกรดตุนโดยแสง, อุณหภูมิ, สนามแม่เหล็กไฟฟ้า, dope
- 0 องศาเซลเซียส : 0, Kevin (0 K)
แต่ถ้าที่อุณหภูมิศูนย์องศาสามบูรณ์ สารกึงตัวนำบริสุทธิ์ส่วนใหญ่กลایเป็นฉนวนไปค่าความต้านทานของสารกึงตัวนำขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมาก กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ศูนย์องศาสามบูรณ์ พวກสารกึงตัวนำมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้นมาก แต่สารตัวนำที่ดีจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว คุณลักษณะต่างๆ ของสารกึงตัวนำเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นของอุณหภูมิทั้งสิ้น

Semiconductor materials



Periodic table

Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B Boron	C Carbon	N Nitrogen	O Oxygen
3	Mg Magnesium	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
4	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium
5	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium
6	Hg Mercury		Pb Lead		

Periodic table

PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	1 H Hydrogen 1.008	2 He Helium 4.0026	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.0122	5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180	11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.085	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.948		
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.0122	5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180	11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.085	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.948	19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078		
3	11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798	37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62
4	37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29	55 Cs Caesium 132.91	56 Ba Barium 137.33
5	55 Cs Caesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57-71	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)
6	89-103	104 Rf Rutherfordium (267)	105 Db Dubnium (268)	106 Sg Seaborgium (269)	107 Bh Bohrium (270)	108 Hs Hassium (277)	109 Mt Meitnerium (278)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (282)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (286)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (290)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)				
7		57 La Lanthanum 138.91	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.91	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.93	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.05	71 Lu Lutetium 174.97				
8		89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.04	91 Pa Protactinium 231.04	92 U Uranium 238.03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (266)				

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.



Ptable
.com

Semiconductor materials (FCC)

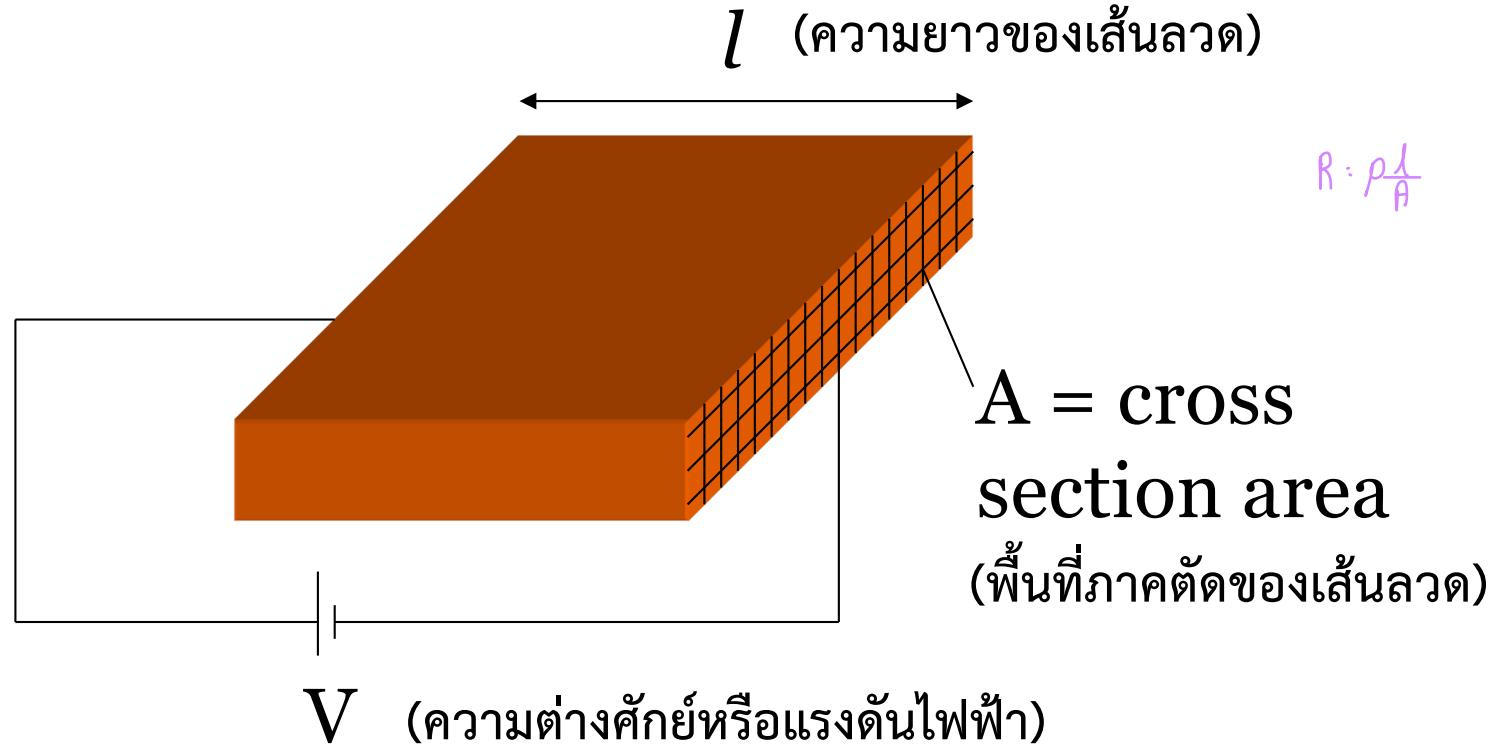
- If we look at the periodic table, the element semiconductors, such as silicon (**Si**) or germanium (**Ge**), can be found in column IV of the table. จากตารางธาตุจะเห็นว่า Si และ Ge อยู่หน้า 4
- In the early 1950s, **Ge** was the most important semiconductor material, but, since the early 1960s, Si has played a major role and virtually displaced **Ge** as the main material for semiconductor material
- สารกึ่งตัวนำในธรรมชาติมีจำนวนมากมาย สามารถแยกตามกลุ่มต่างๆ ในตารางธาตุได้ตาม พฤติกรรมที่คล้ายกัน กลุ่มที่รู้จักกันดีได้แก่หน้า 4 เช่น **C, Si, Ge, Sn, Pb** ธาตุพวนนี้ มี **valence electron 4** ตัว โครงสร้างมีการตกผลึกตาม **แบบผลึกเพชร** จึงมีความแข็งแรงมากและมีลักษณะเป็น **fcc** ด้วย basis ประกอบจากอะตอมเหมือนกัน 2 อะตอม แต่ละอะตอมจะยึดจับกับอีก 4 อะตอมข้างเคียงที่อยู่ใกล้ที่สุด รวมตัวกันเป็น tetrahedron

Advantages of Si over Ge

SiO_2 ຈະອາກສ້າງເປັນ layer ໃນປະກາດຕ່າງໆ

- Better properties at room temperature
- High-quality silicon dioxide (SiO_2) can be grown thermally.
- Si is second only to oxygen in great quantity.
- Devices made from Si cost less than any other semiconductor material
- Silicon technology is by far the most advanced among all semiconductor technologies.

Resistivity and Mobility



- Consider a conductor of length ' l ' with applied voltage ' V '.

Resistivity and Mobility

- From Ohm's law:

$$V = IR \quad \text{ให้เน้นถึงความลักษณะของ } V, I \quad (1)$$

where ρ = resistivity [$\Omega\text{-m}$] (สภาพความต้านทานไฟฟ้า)

σ = conductivity [S/m] = $1/\rho$ (สภาพการนำไฟฟ้า)

$$J = \sigma E \quad \begin{array}{l} \text{ส่วนต้นนำไฟฟ้า} \\ \text{} \\ \frac{I}{A}, \sigma E \end{array} ; \frac{I}{A} = J \quad (2)$$

where $V/l = E$ (electric field) สนามไฟฟ้า

J = current density [A/m^2] ความหนาแน่นกระแส

Resistivity and Mobility

- Under influence of electric field, electron experience a force

$$F = qE = ma \quad (3)$$

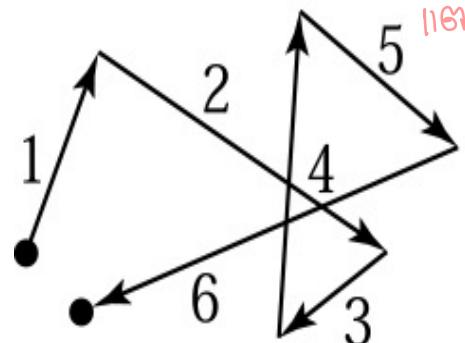
សង្គម
សរុប

where q = electron charge = 1.6×10^{-19} C

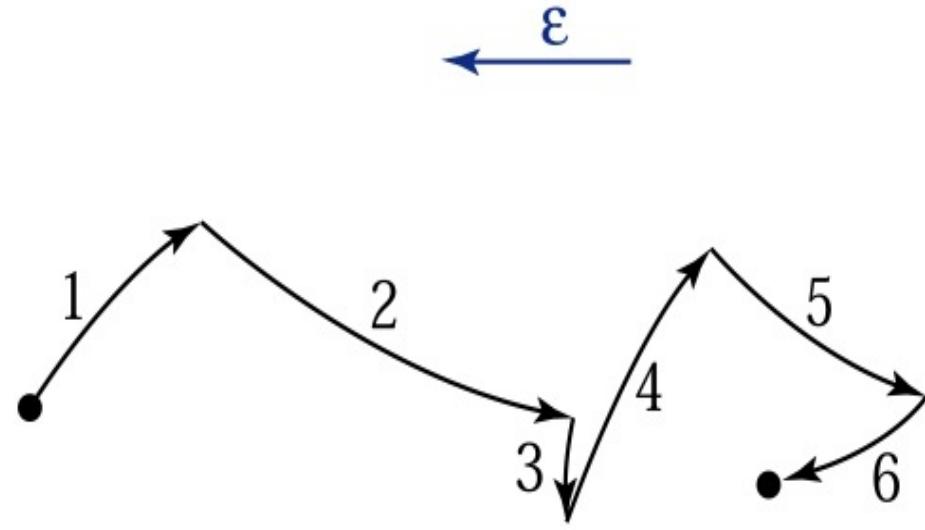
m = mass of electron

a = acceleration

$\varepsilon = 0$ ສົມຈາກກ່ອງ 0 K
ດີເລີກຕະໂນວັ້ງ random
ແຕ່ຫຼັກສິ່ງສອນໄຟ້ງານ



(a)



(b)

Schematic path of an electron in a semiconductor.

(a) Random thermal motion.

(b) Combined motion due to random thermal motion and an applied electric field.

Resistivity and Mobility

- พิจารณาอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำเมื่อยู่ภายในสนามไฟฟ้าสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้วยแรงเคลื่อน $-eE$ ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จะชนกับตัวกลางที่อยู่นิ่งเกิดแรงเสียดทานขึ้น เราสมมติว่าแรงเสียดทานอยู่ในรูปของ $-m^*v/\tau$ V คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน และ τ เป็นค่าคงที่เรียกว่า collision time หรือ life time ของการเคลื่อนที่ จากกฎข้อสองของนิวตัน

จากสมการที่ (3)

m_e^* คือมวลยังผลของอิเล็กตรอน

จะเห็นว่าแรงเสียดทานจะพยายามทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนเป็นศูนย์ เมื่อถึง steady-state ผลกระทบของแรงทั้งหมดเป็นศูนย์ หรือ $dv/dt = 0$ สมการ (4) กลายเป็น

$$\frac{m_e^* dv}{dt} = -eE - \frac{m_e^* V}{\tau} \quad (4)$$

← ความเร็ว →
- collision time / life time เวลาที่ต้องเจอกัน
EF: ma

$$\frac{m_e^* v_D}{\tau} = -eE \quad (5)$$

$$v_D = -\frac{e\tau}{m_e^*} E \quad \begin{array}{l} \text{ความเร็วคงที่} \\ \text{โดยเฉลี่ย} \end{array}$$

- ความเร็วของอิเล็กตรอนมีทิศตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้า เนื่องจากประจุของมันเป็นลบนั่นเอง

Resistivity and Mobility

- Without any applied electric field, the random motion of electron leads to zero net displacement over a long period of time.
- The average distance between collisions is called the mean free path, l . (ระยะทางอิสระเฉลี่ย) *เฉลี่ยห่างกันกี่ครั้งกัน*
- The average time between collisions is called the mean free time, τ .
- With applied electric field, electron does not have constant acceleration. It suffers collision that leads it to move with an average velocity called “**drift velocity**” (ความเร็วลอยเลื่อน) .

Resistivity and Mobility

A drift velocity can be written as

$$v_D = \mu_e E \quad \text{หมาย: ทางด้าน คล่องตัว สูง}$$

(6)

where μ_e = mobility of electron [$\text{m}^2/\text{V.s}$]

(ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน)

By moving electrons in conductor, this leads to have a current proportional to number of electrons crossing a unit area [m^2] per unit time.

จำนวนประจุที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยต่อหน่วยเวลา

$$J = N_e \cdot q \cdot v_D \quad (7)$$

where N_e = number of free electrons per unit volume
(จำนวนประจุต่อหน่วยปริมาตร)

Resistivity and Mobility

A drift velocity can be written as

$$v_D = a\tau \quad \text{ເວລາ}$$
$$v_D = \left(\frac{q\tau}{m} \right) E$$

$$v_D = \mu_e E$$

ຄວາມຄේදවත්

where μ_e = mobility of electron [m²/V-s]

a = ຄວາມເර්ං (m/s²)

- We can obtain the drift velocity v_D by equating the momentum (force \times time) applied to an electron during the free flight between collisions to the momentum gained by the electron in the same period. The equality is valid because in a steady state all momentum gained between collisions is lost to the lattice in the collision.

Resistivity and Mobility

ຢູ່ອົມສາດວໄນ້ງໍາ↑ ຄວາມໂຮງຄອຍລື້ນ↑ ຈກ

- As electric field E increases, v_D also increases, therefore, J also increases.
 - This makes the conductor behave like a perfect source.
 - However, the velocity v_D saturates to a maximum value limited by thermal velocity.
 - The mean thermal velocity (v_{th}) ความเร็วอิมตัว of electron can be found from

ອັສຄູກ: ມີງອຳນົກ ຕາສ່ວນ (ຄກມວຽງເປັນຕົວ)

Resistivity and Mobility

เราสามารถคำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนได้โดยใช้ทฤษฎีจลน์ของก้าช

$$k = {}^{\circ}\text{C} + 273.15$$

$$\frac{1}{2} m_e v_{th}^2 = \frac{1}{2} kT$$

$$v_{th} = \sqrt{\frac{kT}{m}}$$

(8)

\rightarrow K
ความเร็วอิมต้า
(กัลว์)

where m_e = effective mass of electron

k = Boltzmann's constant = 1.38×10^{-23} J/K

T = absolute temperature (K)

$kT/2$ = average thermal energy of electron in one-dimension

Resistivity and Mobility

$$\text{ความต้านทาน} = \rho \cdot \frac{I}{A} \quad (9)$$

$$\sigma = N_e q \mu_e = \mu_e (N_e q) \quad (10)$$

- where $N_e q$ = charge density

↙

จำนวนชาร์จต่อหน่วยพื้นที่

ค่าความต้านทานนี้มีน้ำหนักด้วยความเร็วในการเดินทางของประจุ

Resistivity and Mobility

- The conductivity depends on the charge density and mobility. ค่าความเคลื่อนตัว
- Metals have high conductivity due to their high density of electrons although their mobilities (μ_{metal} ของตัวโลหะ: $\sim 10 \text{ cm}^2/\text{V.s}$) are very low compared to those of semiconductors ($\mu_{\text{S/C}} \sim 10^3 \text{ cm}^2/\text{V.s}$). ของตัวบันนี่จะน่า

Resistivity and Mobility

- The mobility is linearly dependent to the mean free time between collisions which is caused by two major mechanisms: ***lattice scattering¹ and impurity scattering².***

- Lattice scattering*** is caused by the thermal vibrations of the lattice atoms at any temperature above absolute zero. $T = 0 \text{ K}$ ฯ: ก็ lattice scattering
กระบวนการการสแกทเทอร์ริ่งของแลทิซ

เมื่อ T ความค้อนตัว ↓ เก็ตเอนจิ้น
 $\downarrow T^{-3/2}$

ເວັບເສີ່ງຄົງກຳນົດເກົດກຽມ

Resistivity and Mobility

- As the temperature gets higher, the mobility will get lower. This shows that the mobility will decrease in proportion to $T^{-3/2}$. ฟ้าบน

การเจลสารไวโอดีนซ์

ซึ่งก่อให้เกิดความเร็วที่ต่ำลงจากการเจลของสารไวโอดีนซ์

- Impurity scattering** is caused when a charge carrier past an ionized dopant impurity.

กระบวนการสแคทเทอร์ริ่งของอะตอมสารเจือไอօนในซ์

- The carrier will be deflected due to the Coulomb force. The probability of impurity scattering depends on the total concentration of ionized impurities.

Resistivity and Mobility

- Unlike lattice scattering, for impurity scattering, the mobility due to impurity scattering will increase as the temperature gets higher.

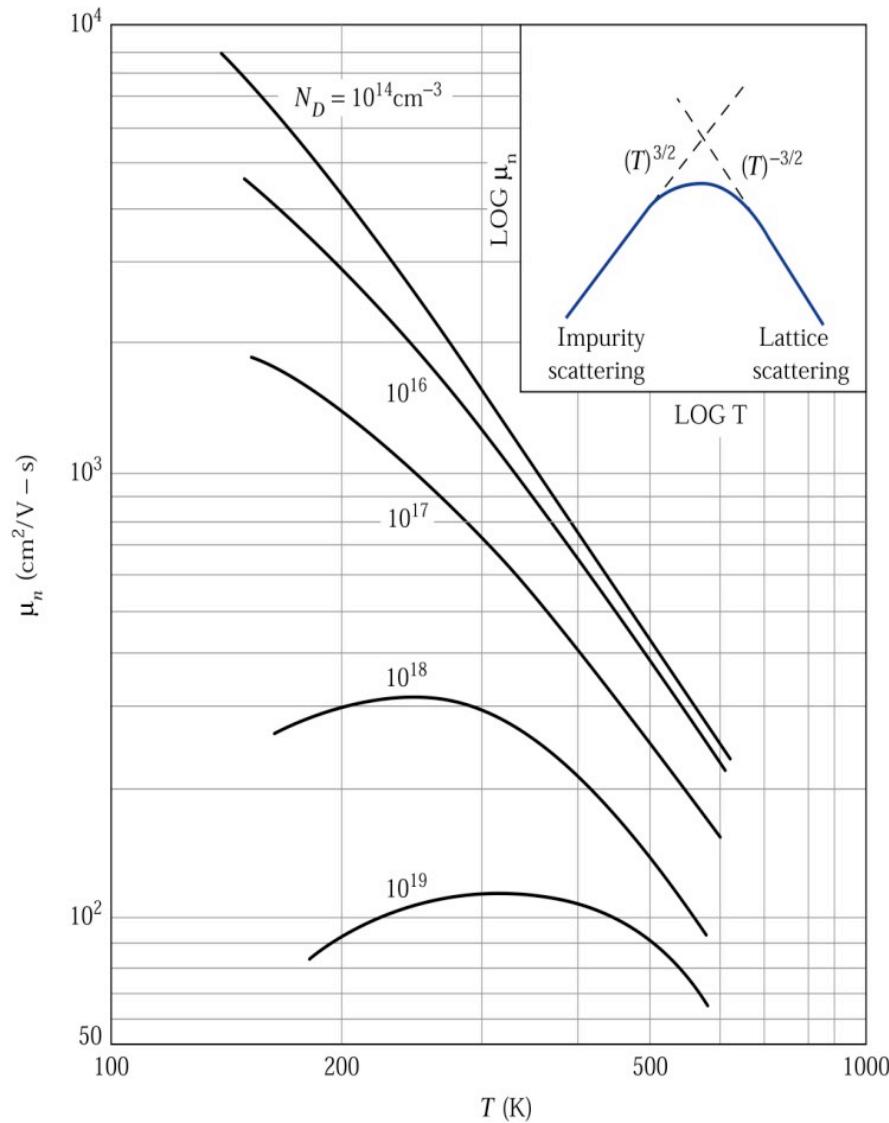
อะตอมสารเจือที่เติมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เพื่อควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสาร สารเจือเหล่านี้จะไอออกในช่องที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นแรงปฏิกิริยาคูลومบ์ประกายขึ้นระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล และสารที่ไอออกในช่องปฏิกิริยาคูลอมบ์นี้จะทำให้เกิดการสแกทเทอร์ริงหรือการชนกัน และมีผลเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความเร็วของพาหะที่มีประจำตัว

- This mobility in this case is shown to vary as $T^{3/2}/N_T$, where N_T is the total impurity concentration. (ความเข้มข้นสารเจือที่ไอออกในช่องทั้งหมดในสารกึ่งตัวนำ)

$T \uparrow$, mobility \uparrow

ความคล่องตัว

Resistivity and Mobility



$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} \quad (9)$$

where

μ_L = mobility due to lattice scattering

μ_I = mobility due to impurity scattering

Resistivity and Mobility

กระแสต่าจากหูลอก holes ໄດ້ໃນທີ່ສໍາງເລື່ອງກັນ

- In semiconductors, both **electrons** and **holes** contribute to current in the same direction.
- Hole current and electron current are not necessarily equal because they have **different effective masses**. (มวลຍັງຜລ) ຂອງບົງຜລຈາກ ດີ, holeໄວ້ເກົ່ານີ້

$$J_{S/C} = (N_e q \mu_e + N_h q \mu_h) E \quad (10)$$

↓

ຄວາມນຳການນີ້

Example 1

- Calculate the mean free time of an electron and mean free path having a mobility of $1,000 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ at 300 K. Assume $m_e = 0.26m_0$, where m_0 = electron rest mass = $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

$$V_D = \frac{-e\tau}{m_e^*} E ; V_D = \mu_e E$$

$$\mu_e E = \frac{-e\tau}{m_e^*} E$$

$$\mu_e = \frac{-e\tau}{m_e^*}$$

$$\tau = \frac{\mu_e \times m_e^*}{-e}$$

↓

$$\text{คำสั่งนี้ - นี่เป็นการเปลี่ยนหน่วย }$$
$$0.26m_0 \therefore m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} \rightarrow \text{cm} \rightarrow \text{m}$$

$$\tau = \frac{\mu_e \times m_e^*}{e} = \frac{(1000 \times 10^{-4})(0.26 \times 9.1 \times 10^{-31})}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 1.478 \times 10^{-13} \text{ s} = 0.1478 \times 10^{-13} \text{ s} = 0.1478 \text{ fs}$$

$$\text{กิจวัตร th : } \sqrt{\frac{kT}{m}} = \sqrt{\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{0.26 \times 9.1 \times 10^{-31}}} = 1.32 \times 10^5 \text{ m/s}$$

$$\lambda = v_{th} \cdot \tau$$

$$\lambda = 1.32 \times 10^5 \times 0.1478 \times 10^{-13} = 19.536 \text{ nm} \#$$

Example 2



- In metals, $\mu_e = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ and $l = 1 \text{ cm}$, $V = 10 \text{ volts}$ is applied. Find the drift velocity v_D and compare to thermal velocity v_{th} . Assume $m_e = 0.26m_0$, where m_0 = electron rest mass = $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

$$V_D = \mu_e E \quad (\frac{\text{V}}{\text{m}})$$
$$V_D = 5 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{V}\cdot\text{s}} \times \frac{10 \text{V}}{1 \times 10^{-2} \text{m}}$$

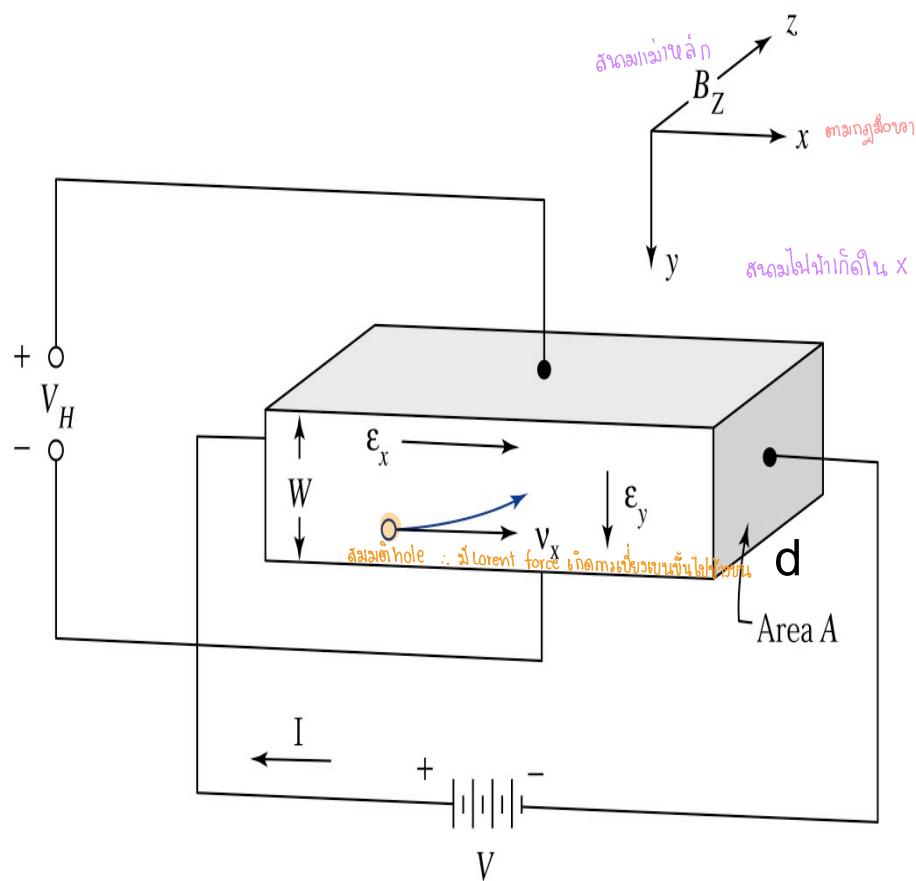
$$V_D = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 5 \text{ m/s}$$

Compare សរុបអាមេរិក $v_{th} \gg v_D$
 $v_D \ll v_{th}$

$$v_{th} = \sqrt{\frac{kT}{m}} = \sqrt{\frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{0.86 \times 9.1 \times 10^{-31}}}$$
$$v_{th} = 1.32 \times 10^5 \text{ m/s}$$

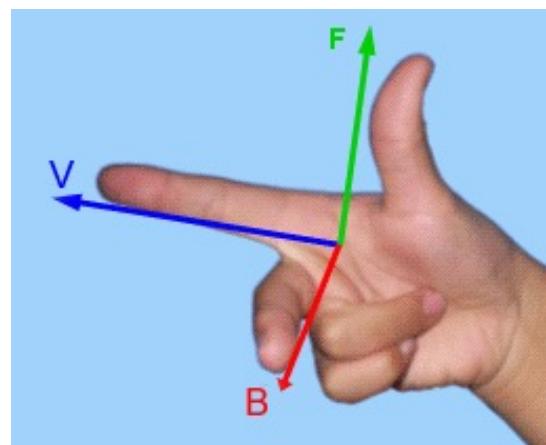
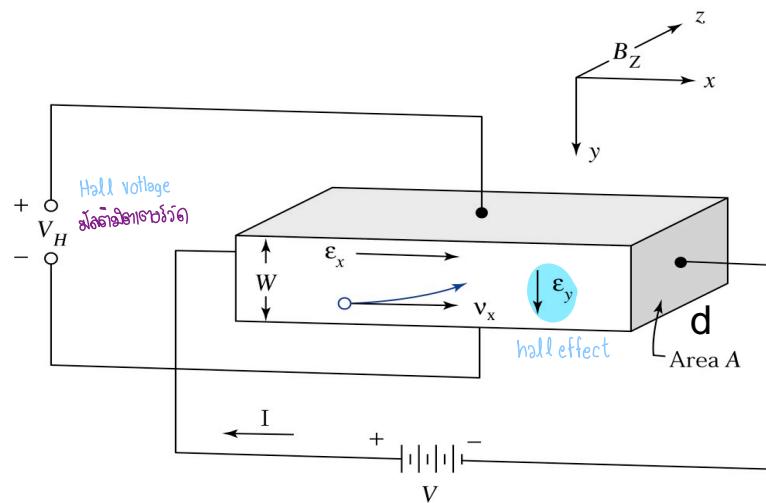
T: 300 K

Hall effect



- Assume a p-type semiconductor sample, with electric field applied along x-direction and a magnetic field applied along z-axis, the Lorentz force $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ($= qv_x B_z$) due to the magnetic field will exert an average upward force on the holes flowing in the x-direction.

Hall effect



- Therefore, drifting holes experienced an upward force which deflects holes upward toward the top of the sample and makes them accumulate there. This sets up an electric field E_H in y -direction called "**Hall field**". This establishment of the electric field is known as the **Hall Effect**.

Hall effect

- This establishment of the electric field is known as the ***Hall Field***.
↑ ມີຄໍາອະນາສົມດູລ
- At the steady-state, the electric field along the y-axis exactly balances the Lorentz force (or it is called “an equilibrium”); that is

$$qE_y = qv_x B_z \text{ or } E_y = v_x B_z$$

Hall effect

ສາມගອດຕາງຈະສັບປາງຈຳນົດ p-ຫ

ຜັກວົດໄລ້ + : ຈົນຄຸມ | ຜັກວົດໄລ້ - ຈົນຕົກ

- This Hall coefficient for **n-type** semiconductor is similar to the **p-type** one except it has an opposite sign as

ถ้าເປັນຈົນຕົກ **n-type** ຈະເປັນເຄື່ອງໝາຍລົບ

$$J = N_h q v = \frac{N_h q E_H}{B}$$
$$E_H = \left(\frac{1}{N_h q} \right) B J$$

↑ ສາມລົງ ການໃກ່ເລີດ
↑ ຄວາມເຂົ້າຂາຍແນະນຳຂອງກຽມເກສ

where $R_H = \left(\frac{1}{N_h q} \right)$
= Hall coefficient

$$R_H = -\frac{1}{q N_e} = \frac{1}{N_e q}$$

N_e = number of free electrons per unit volume
(ຈຳນວນປະຈຸບັນທີ່ອໜ່ວຍປິຣິມາຕຣ)

Hall effect

- This Hall effect is often used to distinguish an n-type from a p-type sample and also used to calculate the **free charge density** and the **carrier mobility** if the conductivity is known.
- For example, we know that the induced voltage V_H known as “Hall Voltage” between the top and bottom is expressed by

$$V_H = E_H W$$

↑ ឧបតកម្មលទ្ធផលនៃអក. ខេណ្ឌចំពោះ

Hall effect

- Using a voltmeter to measure V_H then

$$E_H = \frac{V_H}{W}$$

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

$\Rightarrow A = Wd$



, សម្រេចការ
 $E_H = \left(\frac{1}{N_h q} \right) B J$

$$\frac{V_H}{W} = \left(\frac{1}{N_h q} \right) B J$$

$$\frac{V_H}{W} : \frac{B \cdot J}{N_h q}$$

$$\frac{V_H \cdot N_h}{W} : \frac{B \cdot J}{q}$$

$$N_h = \frac{B \cdot J \cdot W}{V_H \cdot q}$$

$$N_h = \frac{BI}{V_H q d}$$

$N_h : \frac{B \cdot I}{V_H \cdot q} \times$
 $\frac{W}{V_H \cdot q}$

$$N_h : \frac{BI}{V_H \cdot q \cdot d}$$

Hall effect

កំណត់ទិន្នន័យ

- If the conductivity σ is known, mobility can be found as

$$\sigma = (N_h q) \mu_h = \frac{\mu_h}{R_H}$$

$$\mu_h = R_H \sigma$$

$$\cancel{\mu_h = R_H (N_h q) \mu_h}$$
$$\frac{1}{N_h q} = R_H$$

Example 3

A sample of Si is doped with 10^{16} phosphorus atoms/cm³. Find the Hall voltage in a sample with $W = 500 \mu\text{m}$, $A = 2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, $I = 1 \text{ mA}$, and $B_z = 1 \text{ Tesla}$.

P 982/5 N-type

Note: 1 Tesla = 1 Wb/m² = 10^4 G .

$$V_H = \frac{E_H \cdot H}{J}$$

$$V_H = (R_H \cdot J \cdot B) \cdot H$$

$$V_H = (-625 \cdot 0.4 \cdot 10^4) \cdot 500 \times 10^4 \text{ cm}$$

$$\therefore -1.25 \text{ mV}$$

$$N\text{-type : } R_H = \frac{1}{qNe} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16}} = -625 \text{ cm}^3/\text{A}$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{1 \times 10^{-3}}{2.5 \times 10^{-3}} = 0.4$$

$$1 \text{ Tesla} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \frac{1 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{10^{-2} \text{ m}^2} = \frac{10^4 \text{ Wb}}{10^2 \text{ m}^2} = \frac{10^2 \text{ Wb}}{10^0 \text{ m}^2} = 10^2 \text{ Wb/m}^2$$

$$\frac{V_H}{J B H} = R_H$$

$$= 3$$

$$20 \text{ mV} \cdot 0.1 \times 5 \text{ mm}$$