Machine Translated by Google

618327-2560

ฟิสิกส์ของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์
และอุปกรณ์

นพ.อรทัย วัชรกิจจากร

บทที่ 7

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

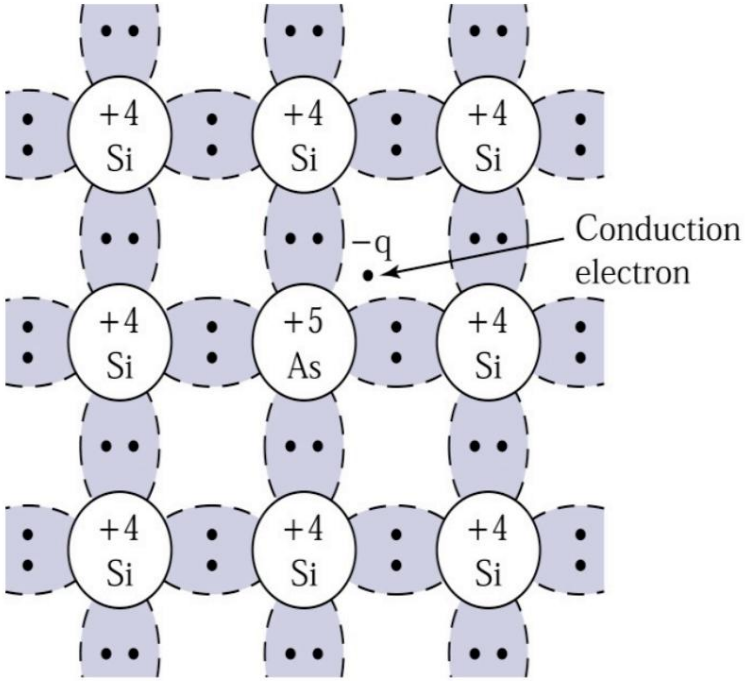
- เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกเจือปนด้วยสารเจือปนบางชนิด สารดังกล่าวจะกลายเป็นสาร เจือปนจากภายนอก
  เซมิคอนดักเตอร์ •

ระดับพลังงานของมันก็เปลี่ยนไปด้วย

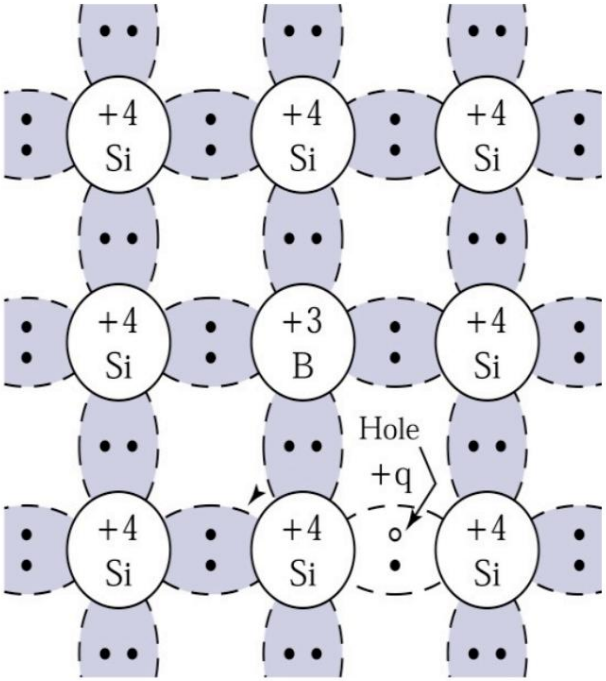
Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- รูปภาพแสดงภาพแผนผังของพันธะ n-type (a) และชนิด p (b)



(a)



(b)

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- สำหรับอะตอมประเภท n จากสิ่งเจือปนในกลุ่ม V จะปล่อยอิเล็กตรอนเพื่อการนำไฟฟ้าในฐานะตัวพาประจุอิสระ
- อิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมของสิ่งเจือปนจะต้องการพลังงานน้อยกว่ามากในการนำไฟฟ้า (หรือถูกทำให้เป็นไอออน)
- อะตอมของสิ่งเจือปนเรียกว่า "ผู้ให้"
- พลังงานไอออไนเซชันของผู้บริจาคคือ EC – ED โดยที่ ED คือพลังงานระดับผู้บริจาค

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- สำหรับ p-type อะตอมจากกลุ่ม III จะจับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ และสร้างโฮลซึ่งเป็นตัวพาประจุอิสระ

- EA เรียกว่า "ระดับตัวรับ" และ EA – EV เรียกว่า "พลังงานระดับการแตกตัวของตัวรับ"

- พลังงานระดับการแตกตัวของตัวรับนี้มีขนาดเล็ก เนื่องจากสิ่งเจือปนของตัวรับสามารถรับอิเล็กตรอนได้อย่างง่ายดาย

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- พลังงานไอออไนเซชันหรือพลังงานยึดเหนี่ยวที่สร้างตัวพาประจุอิสระในสารกึ่งตัวนำสามารถแสดงได้โดยประมาณโดย

$$\text{อี} - \frac{- \text{ฉัน}^{*4}}{8 - \text{อีอี}_{0} \; s - {}^{2\,2}_{\text{ชม.}}} \qquad (1)$$

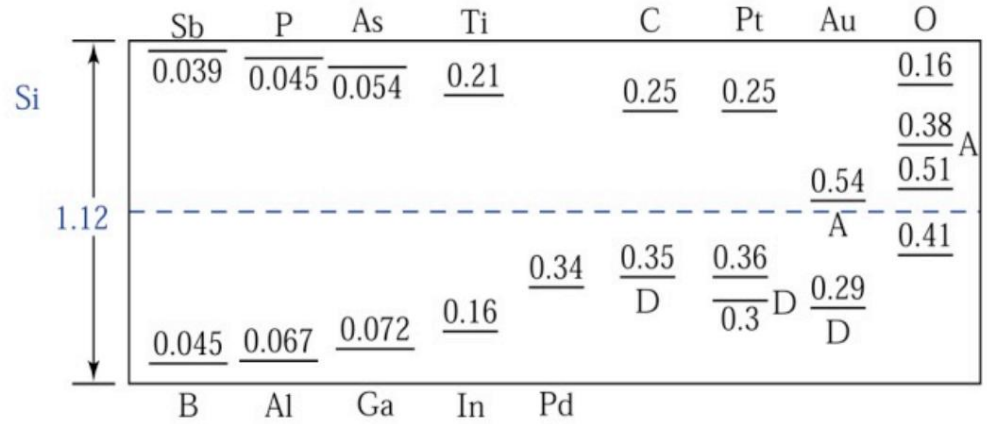
ที่ไหน

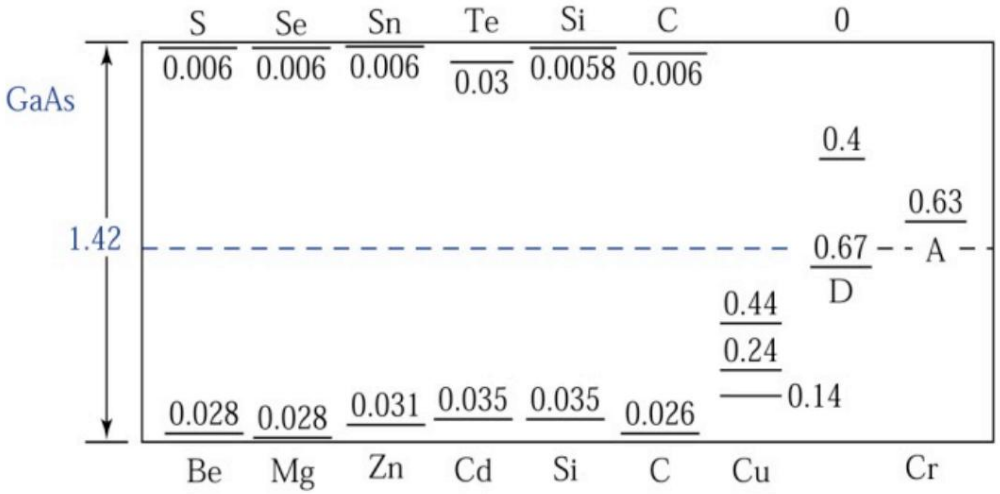
มม. - $-_{\text{อี}}$ สำหรับอะตอมผู้บริจาค

มม. - $-_{\text{ชม.}}$ สำหรับอะตอมตัวรับ

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ





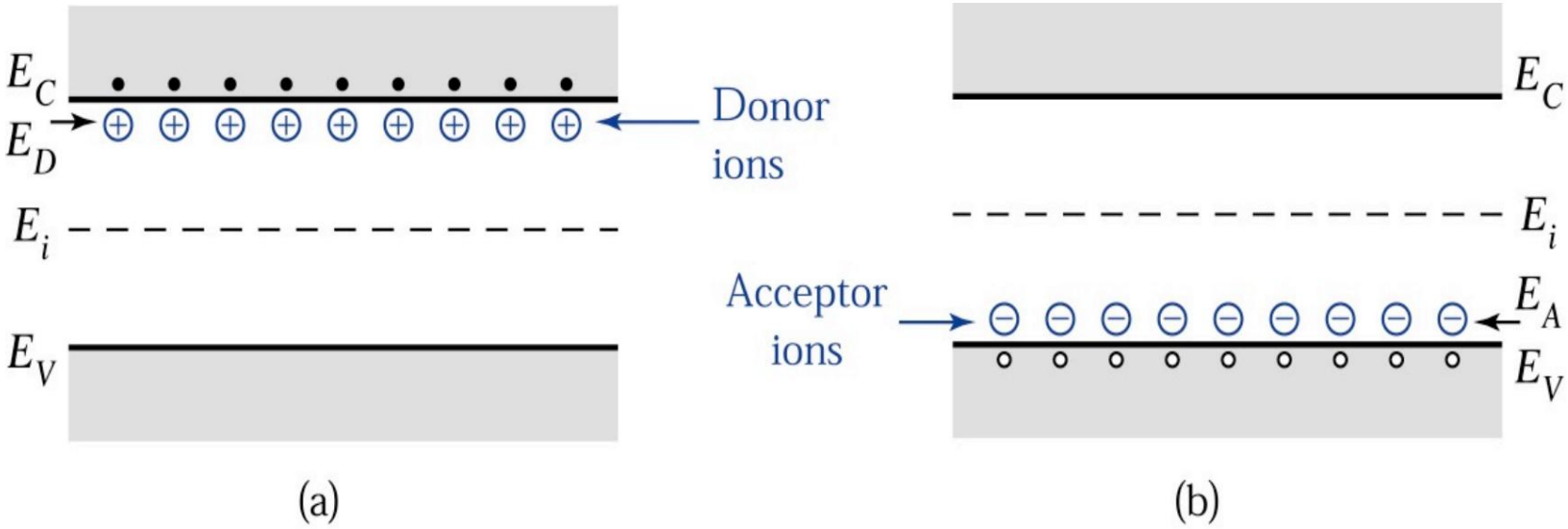
Machine Translated by Google

ตัวอย่างที่ 1

- คำนวณพลังงานยึดเหนี่ยวโดยประมาณสำหรับผู้บริจาคใน
  เกอ กำหนดให้ er = 16 และ ฉัน = 0.12ม0.

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ



(ก) ไอออนของผู้บริจาค และ (ข) ไอออนของตัวรับ

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- พิจารณา สารกึ่งตัวนำ ชนิด n หาก ND คือจำนวนอิเล็กตรอนผู้บริจาคที่ระดับพลังงาน

ED แล้วเราให้นิยามว่าเป็นจำนวนตัวพาอิเล็กตรอนอิสระ (จำนวน ND ที่ไปเป็นการนำไฟฟ้า) หรือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ไอออนสามารถเขียนเป็น

(2)

เอ็ม+เอ็นอีเอฟอี ไอ๋อ -

ดีดี ดี

ù) û

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- สำหรับ p-type อาร์กิวเมนต์จะคล้ายกัน ดังนั้น ความหนาแน่นของรูอิสระหรืออะตอมตัวรับไอออน ความหนาแน่นเขียนเป็น

$$n = N_A^- \exp\left(-\frac{E_F - E_A}{kT}\right) \qquad (3)$$

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

เราสามารถหาความสัมพันธ์ของระดับแฟร์มีกับอุณหภูมิได้สามกรณี:

- อุณหภูมิต่ำมาก
- อุณหภูมิปานกลาง
- อุณหภูมิสูงมาก.

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- อุณหภูมิต่ำมาก

$$E_F - E_D >> kT$$

$$n = N_D^+$$

$$N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = N_D \left[1 - \frac{1}{e^{(E_D - E_F)/kT} + 1} \right]$$

$$N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = N_D \left[\frac{1}{e^{(E_F - E_D)/kT} + 1} \right]$$

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

$$N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = N_D \left[\frac{1}{e^{(E_F - E_D)/kT}} \right]$$

Divding by N_C and taking ln

$$\frac{-(E_C - E_F)}{kT} = \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right) - \frac{(E_F - E_D)}{kT}$$

$$E_F = \left(\frac{E_C + E_D}{2}\right) + \frac{kT}{2}\ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)$$

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- อุณหภูมิปานกลาง

$$E_F - E_D < kT << E_g$$

In this case, all donors are ionized

$$n = N_D$$

$$N_C e^{-(E_C - E_F)/kT} = N_D$$

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- -อีอี - ซี เอฟ เอ็น ดี
- ---------- æ) ลบ ---------- เชี่ย เอ็น ซี ÷ ...
KT

อีอี เคที ซี เอฟ ใน เออเออ เอ็น ดี
ç ÷ = +
ใช่ เอ็น + ซี

อีอี เคที ซี เอฟ ใน เออ เอ็น ซี โอ้ (4)
---------- เชี่ย เอ็น ดี ÷ เอ็ม

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- อุณหภูมิสูงมาก
  - ในกรณีนี้ ผู้บริจาคทั้งหมดจะแตกตัวเป็นไอออน และอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า
  - นี่ทำหน้าที่เหมือนกับสารกึ่งตัวนำที่แท้จริงหรือ EF = Ei
  - อาจเป็นประโยชน์ในการแสดงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและหลุมในรูปของความเข้มข้นที่แท้จริง ของ ni และระดับแฟร์มีที่ แท้จริง Ei

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

สำหรับ n-type จาก

$$n = N_C \exp\left[-(E_C - E_F)/kT\right]$$

$$n = N_C \exp\left[-(E_C - E_F)/kT\right]$$

$$= N_C \exp\left[-(E_C - E_i)/kT\right]\exp\left[(E_F - E_i)/kT\right]$$

$$n = n_i \exp\left[(E_F - E_i)/kT\right] \qquad (5)$$

ในทำนองเดียวกัน ประเภทด้านบน เรามี

$$p = n_i \exp\left[(E_i - E_F)/kT\right] \qquad (6)$$

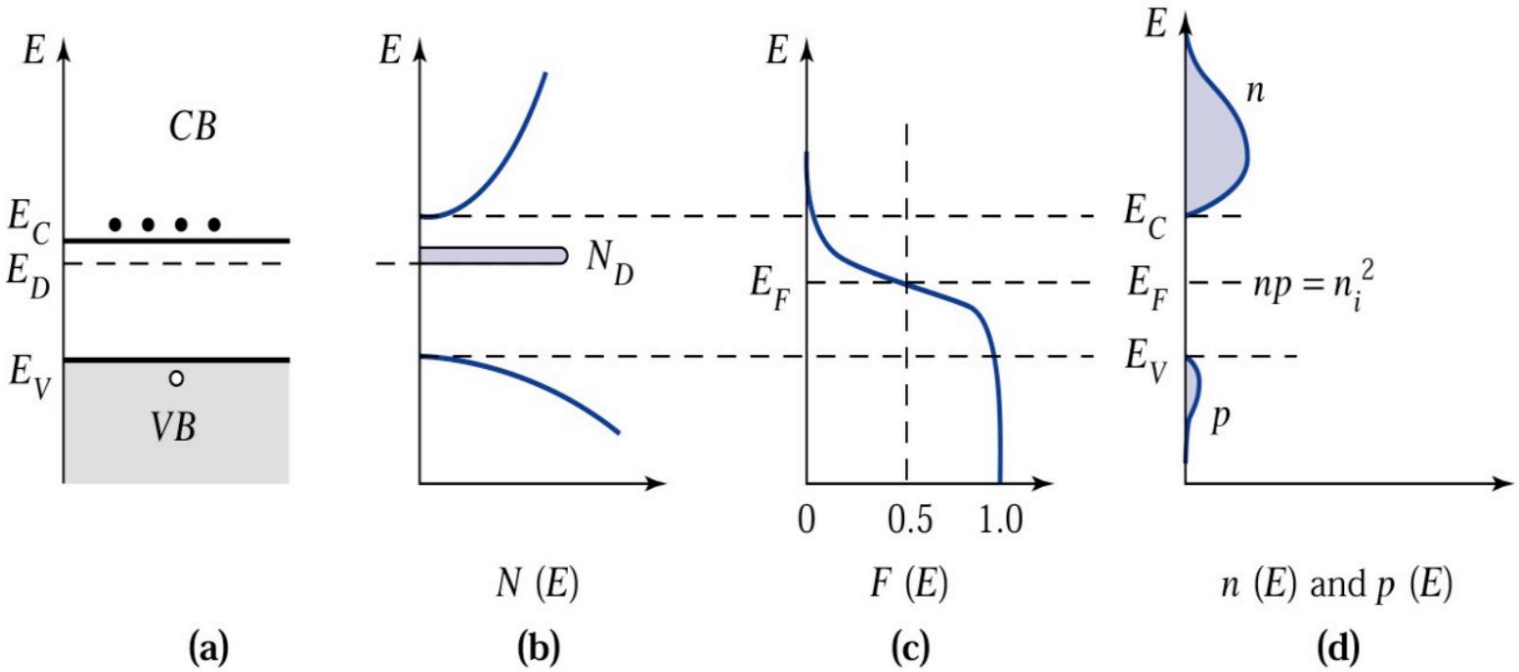
นี้ใช้ได้กับทั้งปัจจัยภายในและภายนอก

$$n.p = n_i^2$$

สารกึ่งตัวนำภายใต้ภาวะสมดุลทางความร้อน

Machine Translated by Google

สารกึ่งตัวนำชนิด ท



(ก) แผนภาพแบนด์ (ข) ความหนาแน่นของสถานะ (ค) ฟังก์ชันการแจกแจงของแฟร์มี (ง) ความเข้มข้นของตัวพา

<u>สังเกตว่า np</u> = ni 2.

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- เราได้เรียนรู้วิธีการค้นหาตำแหน่งใหม่ของระดับเฟร์มีสำหรับสารกึ่งตัวนำนอกแท้

- ตอนนี้เรามาพิจารณาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนใหม่ในกรณีที่มีทั้งตัวให้ ND และตัวรับ NA พร้อมกัน • ระดับเฟร์มีจะปรับตัวเพื่อรักษาความเป็นกลางของประจุโดยรวม

$$n_N = \text{[redacted]} \quad (7)$$

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- โดยการแก้สมการ (7) ด้วยสมการสมดุล $n_i p_i = n^2_{ฉัน}$ - ความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและโฮลใน n-type ผลผลิตเซมิคอนดักเตอร์

$$u_{ฉัน} = \frac{1}{2}\left(u_{ฉัน} - u_{ฉัน} + \sqrt{u_{ฉัน}^2 + 4u_{ฉัน}^2}\right) \qquad (8)$$

$$พี_u = \frac{u_{ฉัน}^2}{u_u} \qquad (9)$$

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- เช่นเดียวกับ สารกึ่งตัวนำ ชนิด p อิเล็กตรอน และความเข้มข้นของหลุมจะแสดงเป็น

$$\text{พี}_{\text{พี}} = \text{เอ็น}_{\text{ฉัน}} \text{เอ็น}_{\text{ฉัน}} \sqrt{\frac{\text{ฉี}}{\text{ฉี}_{\text{ฉัน}}} + \left(\frac{\text{ฉี}_{\text{ฉัน}}}{2\text{ฉี}}\right)^2} \qquad (10)$$

$$u_{\text{พี}} = \frac{u_{\text{ฉัน}}^2}{\text{พี}_{\text{พี}}} \qquad (11)$$

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- โดยทั่วไป ในกรณีที่สิ่งเจือปนทั้งหมดแตกตัวเป็นไอออน สุทธิ

  ความเข้มข้นของสิ่งเจือปน ND – NA มีค่ามากกว่า

  ความเข้มข้นของตัวพาที่แท้จริง ni ; ดังนั้นเราอาจ

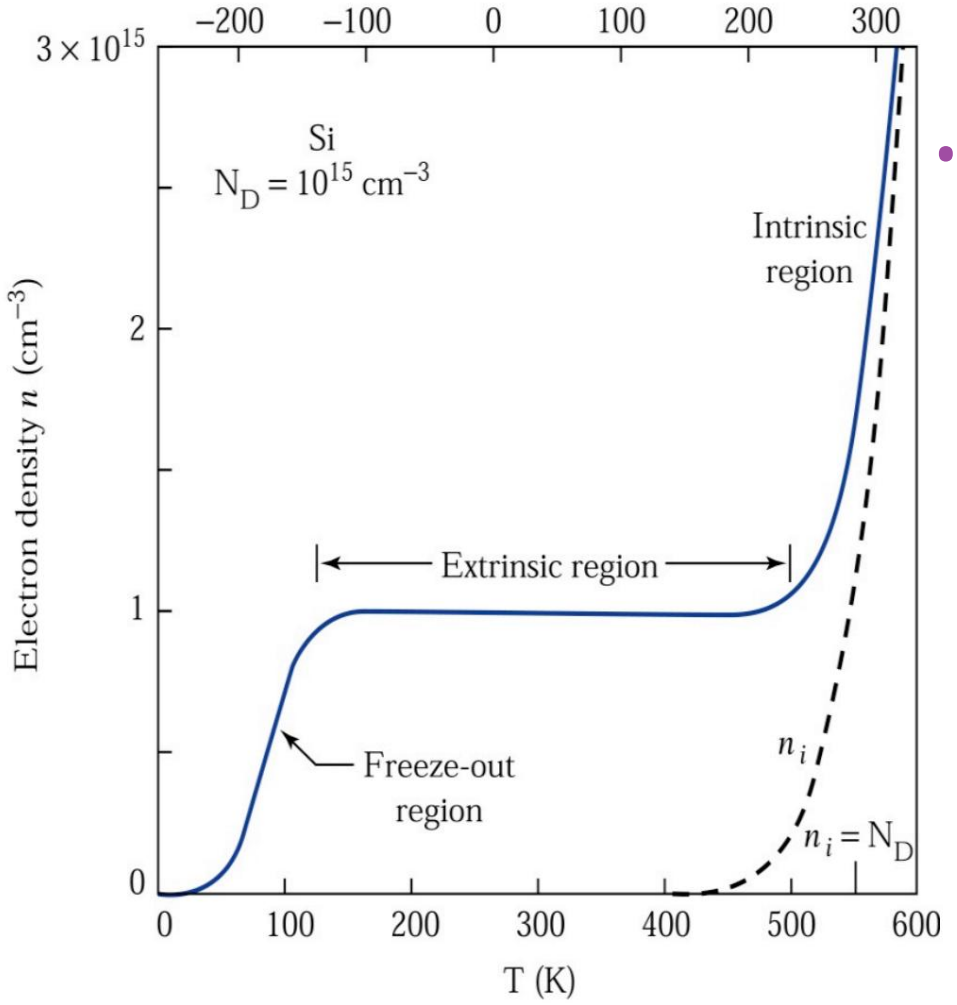
  เพียงเขียนความสัมพันธ์ข้างต้นใหม่เป็น

นนนนนน ถ้า - เอ

พีเอ็นเอ็นเอ็นเอ็น ถ้า > ดี

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ



- รูปภาพแสดงอิเล็กตรอนความหนาแน่นใน Si เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสำหรับผู้บริจาคความเข้มข้นของ ND = 1015 ซม.-3.

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- ที่อุณหภูมิต่ำ สิ่งเจือปนของผู้บริจาคไม่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ทั้งหมด ซึ่งเรียกว่า "บริเวณการแข็งตัว" เนื่องจากอิเล็กตรอนบางส่วนจะถูกแช่แข็งที่ระดับผู้บริจาค
- เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สิ่งเจือปนทั้งหมดจะแตกตัวเป็นไอออน และจะยังคงเท่าเดิมในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง
- ภูมิภาคนี้เรียกว่า "ภูมิภาคภายนอก"

Machine Translated by Google

ผู้บริจาคและผู้รับ

- จนอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีกและไปถึงจุดที่มีอิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์
- สิ่งนี้ทำให้ความเข้มข้นของตัวพาที่แท้จริงนั้นเทียบได้กับความเข้มข้นของตัวให้
- ในภูมิภาคนี้ เซมิคอนดักเตอร์ทำหน้าที่เหมือนเป็น ส่วนประกอบที่แท้จริง

Machine Translated by Google

สารกึ่งตัวนำเสื่อม

- หากเซมิคอนดักเตอร์ถูกเจือปนอย่างหนักทั้งสำหรับ n-type หรือ p-type EF จะสูงกว่า EC หรือต่ำกว่า EV ตามลำดับ
- สารกึ่งตัวนำเรียกว่า สารเสื่อมสภาพ เซมิคอนดักเตอร์
- ส่งผลให้ bandgap ลดลงด้วย

Machine Translated by Google

สารกึ่งตัวนำเสื่อม

- การลดช่องว่างของแบนด์ ดีเช่น Si ที่ ห้อง อุณหภูมิจะแสดงโดย

$$\text{ดีอี}_{\text{จี}} = 22\sqrt{\frac{\text{เอ็น}}{10^{18}}}\ \text{ฉันวี} \qquad (12)$$

โดยที่การเจือปน N มีหน่วยเป็น cm- 3

Machine Translated by Google

ตัวอย่างที่ 2

- Si ถูกเจือด้วย อะตอมของ อาร์เซนิก 1,016 อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หาความเข้มข้นของตัวพาและระดับแฟร์มีที่อุณหภูมิห้อง (300K)

<u>โซลน์</u>

ที่อุณหภูมิห้อง ไอออนไนเซชันของสิ่งเจือปนสมบูรณ์

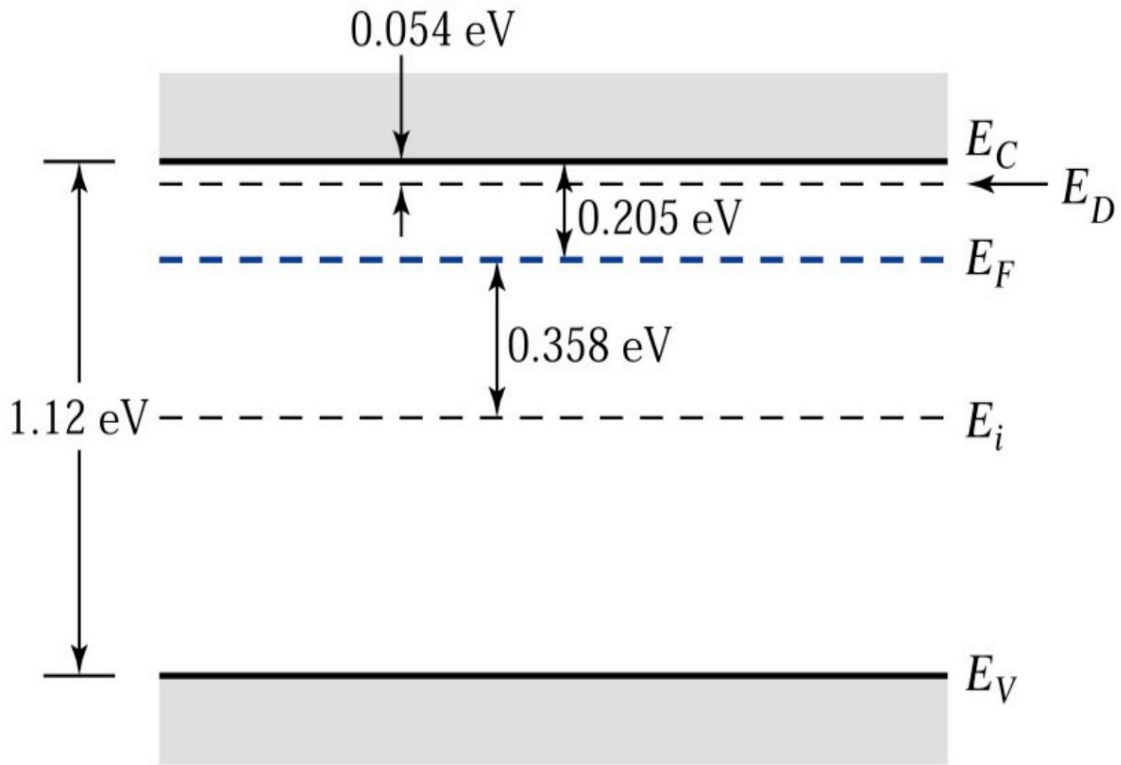
อะตอมมีความเป็นไปได้สูง ดังนั้นเรามี n = ND = 1016 cm-3

Machine Translated by Google

ตัวอย่างที่ 2

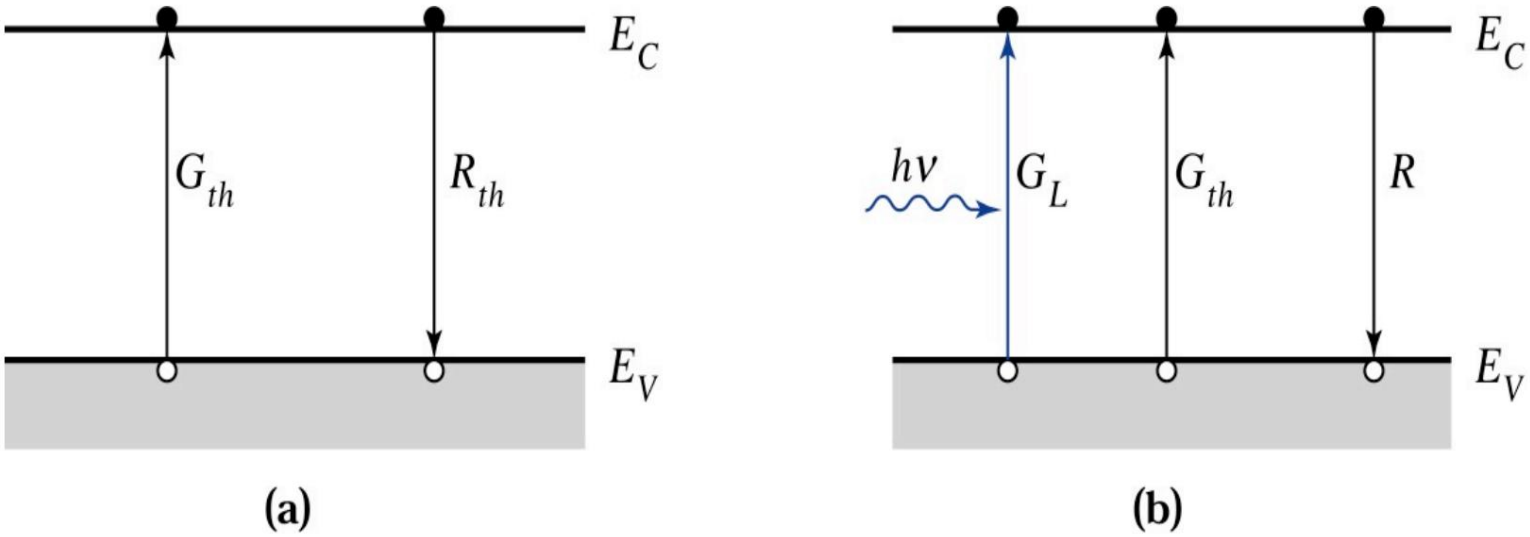
- โซลน์
- ระดับแฟร์มีที่วัดจากระดับแฟร์มีที่แท้จริง

เป็น



Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง



- เมื่อพันธะระหว่างอะตอมข้างเคียงถูกทำลาย คู่อิเล็กตรอน-หลุมถูกสร้างขึ้น
- อิเล็กตรอนวาเลนซ์เคลื่อนที่ขึ้นไปที่ แถบการนำไฟฟ้าเนื่องจากได้รับพลังงานความร้อน • ส่งผลให้มีช่องว่างเหลืออยู่ในแถบวาเลนซ์

Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง

- กระบวนการนี้เรียกว่า การสร้างพาหะ โดยมีอัตราการสร้าง Gth (จำนวนการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลต่อหน่วยปริมาตรต่อเวลา)

- เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ลงจากแถบการนำไปยังแถบวาเลนซ์เพื่อรวมตัวใหม่กับโฮล กระบวนการย้อนกลับนี้เรียกว่า การรวมตัวใหม่

- อัตราการรวมตัวกันแสดงโดย Rth

Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง

- ภายใต้ภาวะสมดุลทางความร้อน อัตราการผลิต Gth เท่ากับอัตราการรวมตัวใหม่ Rth เพื่อรักษาสภาพของ

$$\text{พีเอ็นเอ็น} = \frac{2}{\text{อัน}} \qquad (13)$$

- อัตราการรวมตัวกันโดยตรง R สามารถเป็นได้แสดงออกมาเป็น

$$\text{s n พี} = \qquad (14)$$

ที่ไหน บี คือค่าคงที่ของความเป็นสัดส่วน

Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง

- ดังนั้นสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด n เรามี

$$GR = np - n_0 p_0 \qquad (15)$$

โดยที่ n_0 และ p_0 แสดงถึงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและหลุมที่ภาวะสมดุลทางความร้อน

Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง

- หากใช้แสงกับเซมิคอนดักเตอร์ แสงจะสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลด้วยอัตรา GL ความเข้มข้นของตัวพาจะสูงกว่าค่าสมดุล • อัตราการสร้างและการรวมตัวกันใหม่จะกลายเป็น

GG G = +L th

(16)

อาร์ = เอ็น พี เอ็นบี (0 น ด)(+ ด) เอ็นพีพี 0

(17)

โดยที่ Dn และ Dp คือความเข้มข้นของตัวพาส่วนเกิน

Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง

$$D_n \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{n - n_0}{\tau_n} \qquad (18ก)$$

$$D_p \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p - p_0}{\tau_p} \qquad (18\ ข)$$

• Dn = Dp เพื่อรักษาความเป็นกลางของประจุโดยรวม • อัตราสุทธิของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของรูจะแสดงเป็น

$$\frac{D_p p_n}{D_n} = \frac{p - p_0}{\tau_p} \qquad (19)$$

Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง

- ในสภาวะคงที่ dpn/dt = 0 จาก (19) เราได้

จี อาร์ จี ยู ° ล ไทย (20)

โดยที่ U คืออัตราการรวมตัวสุทธิ

การแทนที่ (15) และ (17) ใน (20) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

คุณ = ไม่มี (np u0 ดี ดี) (21)

Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง

- สำหรับการฉีดระดับต่ำ Dp, pn0<< nn0, (21) จะกลายเป็น

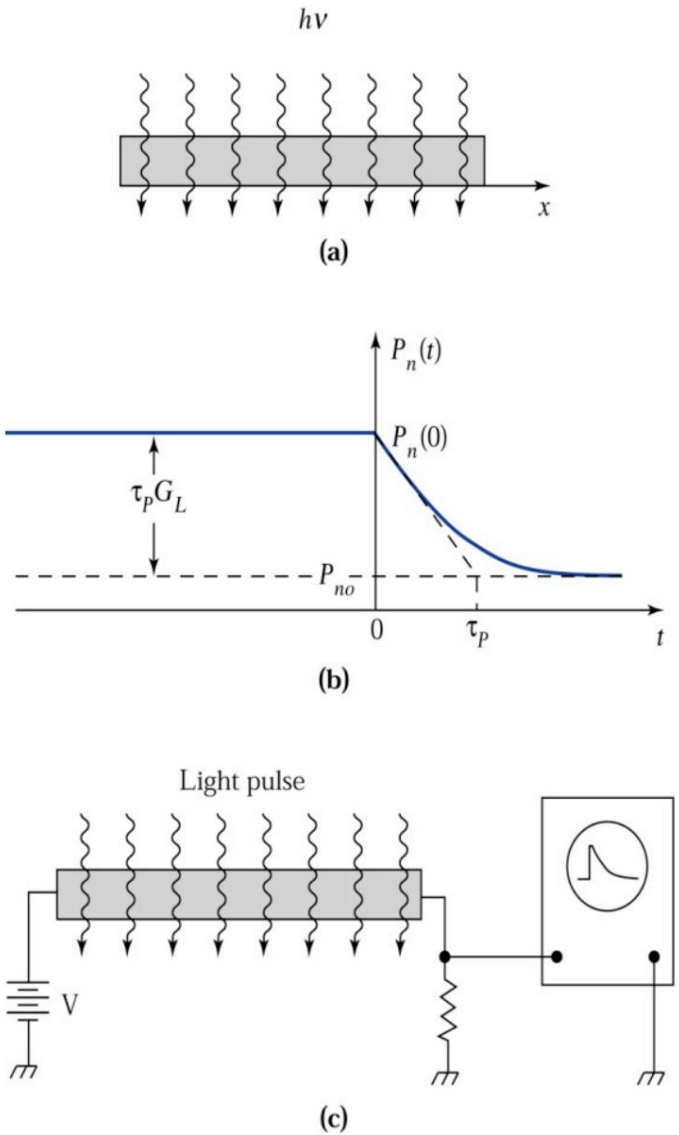
$$\text{คุณไม่มีสิทธิ์} = \frac{\text{พี}_{\text{u}0}\text{พี}_{\text{u}0} - \text{พี}_{\text{u}0}\text{พี}_{\text{u}0}}{1/\text{บี}_{\text{u}0}} - \frac{\text{พี}_{\text{u}0}}{\text{ที}_{\text{พี}}} \qquad (22)$$

- ที่ไหน $\text{ที}_{\text{พี}}$ เรียกว่า ผู้ให้บริการรายย่อยส่วนเกินตลอดชีพ

$$\text{n}_{\text{p}}\text{L}_{\text{p}} = \text{หน้า G}_{\text{ที}} \qquad (23)$$

Machine Translated by Google

การรวมตัวโดยตรง



- เราอาจเขียน pn ใน หน้าที่ของ t เป็น

pt (p)G = +0 ที เอ็กซ์พอต ที ที

u เอ็นพีแอล พี

(24)

Machine Translated by Google

ตัวอย่างที่ 3

- ตัวอย่าง Si ที่มี nn0 = 1014 cm-3 ได้รับการส่องสว่างด้วยแสงและ คู่อิเล็กตรอน-โฮล 1013 คู่ /cm3 สร้างทุกไมโครวินาที ถ้า = 2 μs หา $ที_{น} - ที_{พี}$ การเปลี่ยนแปลงในความเข้มข้นของพาหะกลุ่มน้อย