Machine Translated by Google

618327-2560

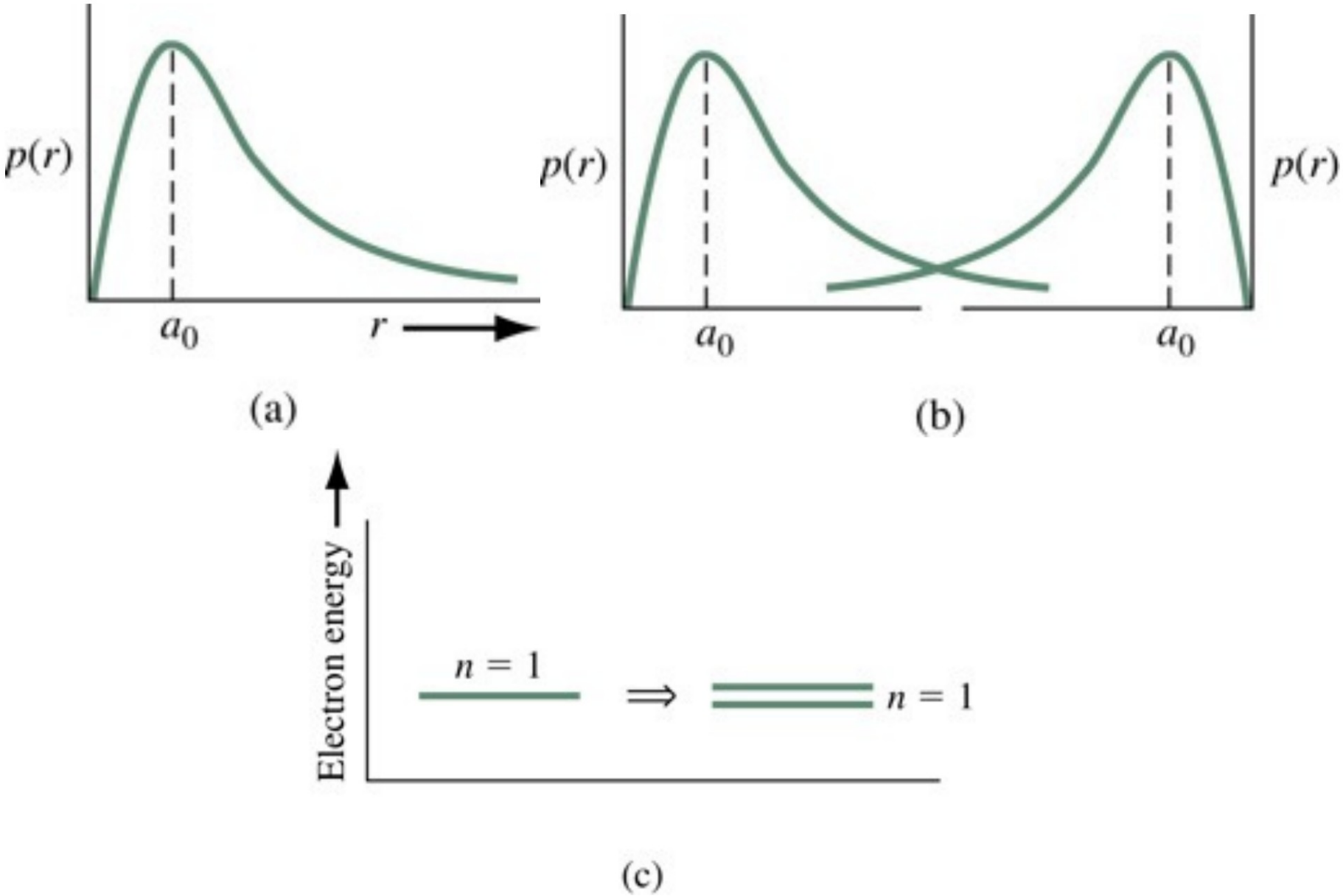
ฟิสิกส์ของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์

นพ.อรทัย วัชรกิจจากร

บทที่ 5

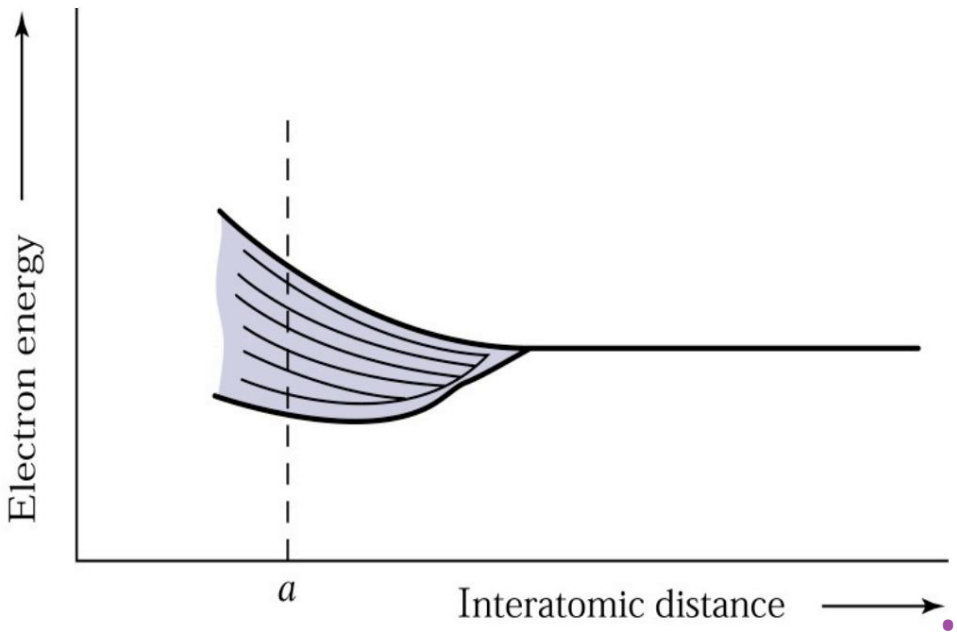
Machine Translated by Google

Energy Bands



Machine Translated by Google

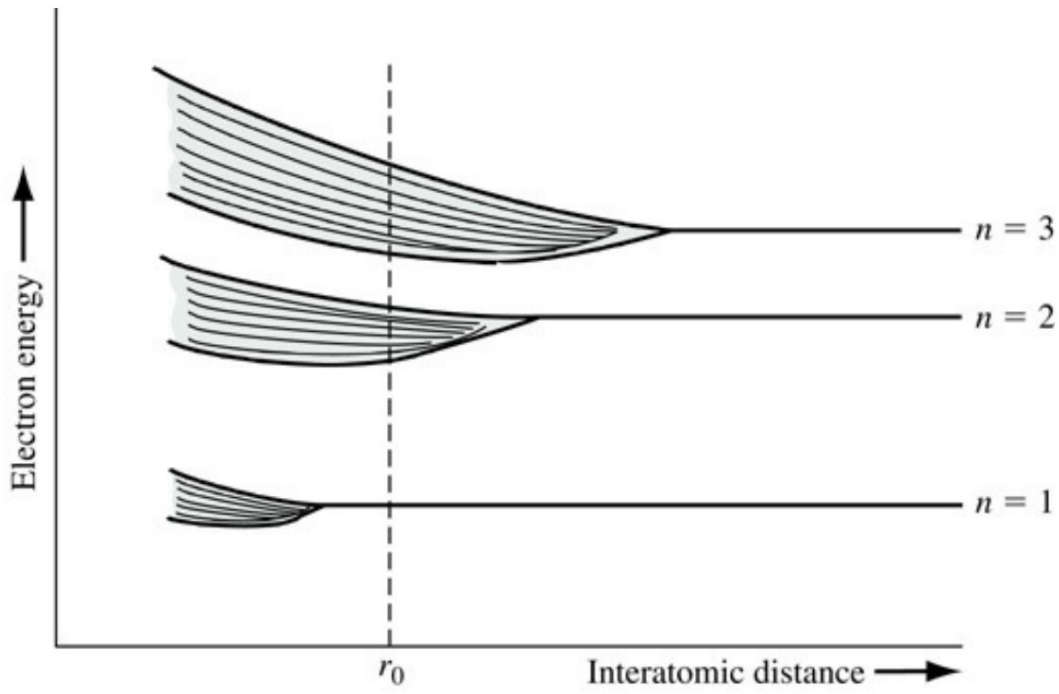
แบนด์พลังงาน



- พิจารณาอะตอมที่เหมือนกันสองอะตอมเมื่อมันอยู่ห่างกันมากพลังงานที่ได้รับอนุญาตระดับสำหรับควอนตัมหลักที่กำหนดจำนวน (n = 1) ประกอบด้วยหนึ่งสองเท่าระดับเสื่อม (อะตอมทั้งสองมีพลังงานเท่ากันทุกประการ)
- เมื่อนำมาใกล้กันระดับพลังงานเสื่อมลงสองเท่าจะแบ่งออกเป็นสองระดับโดยการโต้ตอบกันระหว่างอะตอม

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน



- มีอะตอมแยกอยู่ N อะตอม

  นำมารวมกันเป็น

  ของแข็งวงโคจรของภายนอก

  อิเล็กตรอนของอะตอมต่างชนิดกัน

  ทับซ้อนและโต้ตอบกันด้วย

  กันและกัน.

- สิ่งนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใน

  ระดับพลังงานและ N

  แยกห่างกันอย่างใกล้ชิด

  ระดับที่เกิดขึ้น

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- พิจารณา อะตอม ซิลิกอน แยกตัวออกมา อิเล็กตรอน 10 ตัวจาก 14 ตัวครอบครองพลังงาน

  ระดับที่มีรัศมีวงโคจรเล็กกว่าระดับอะตอมมาก

  การแยกตัวในคริสตัล

- อิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่เหลืออีกสี่ตัวมีพันธะที่อ่อนมาก

  และอาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีได้

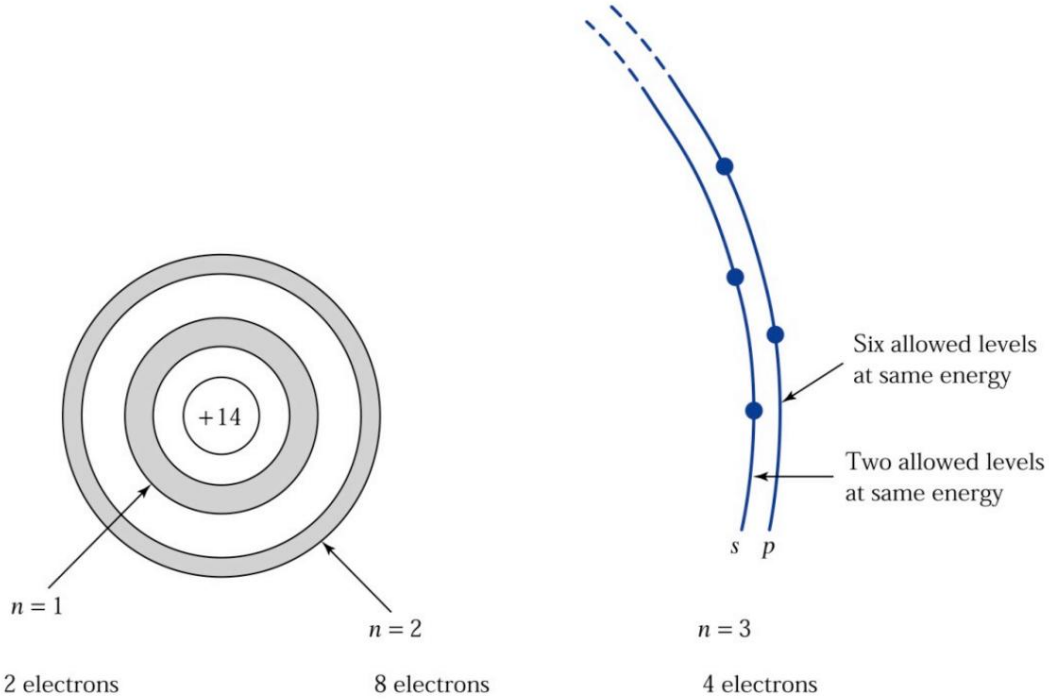
- ดังนั้น อิเล็กตรอนวาเลนซ์จึงเป็นตัวที่ต้องพิจารณา

- เปลือกชั้นในทั้ง 2 ด้านเต็มและยึดติดกันอย่างแน่นหนา

  นิวเคลียส

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

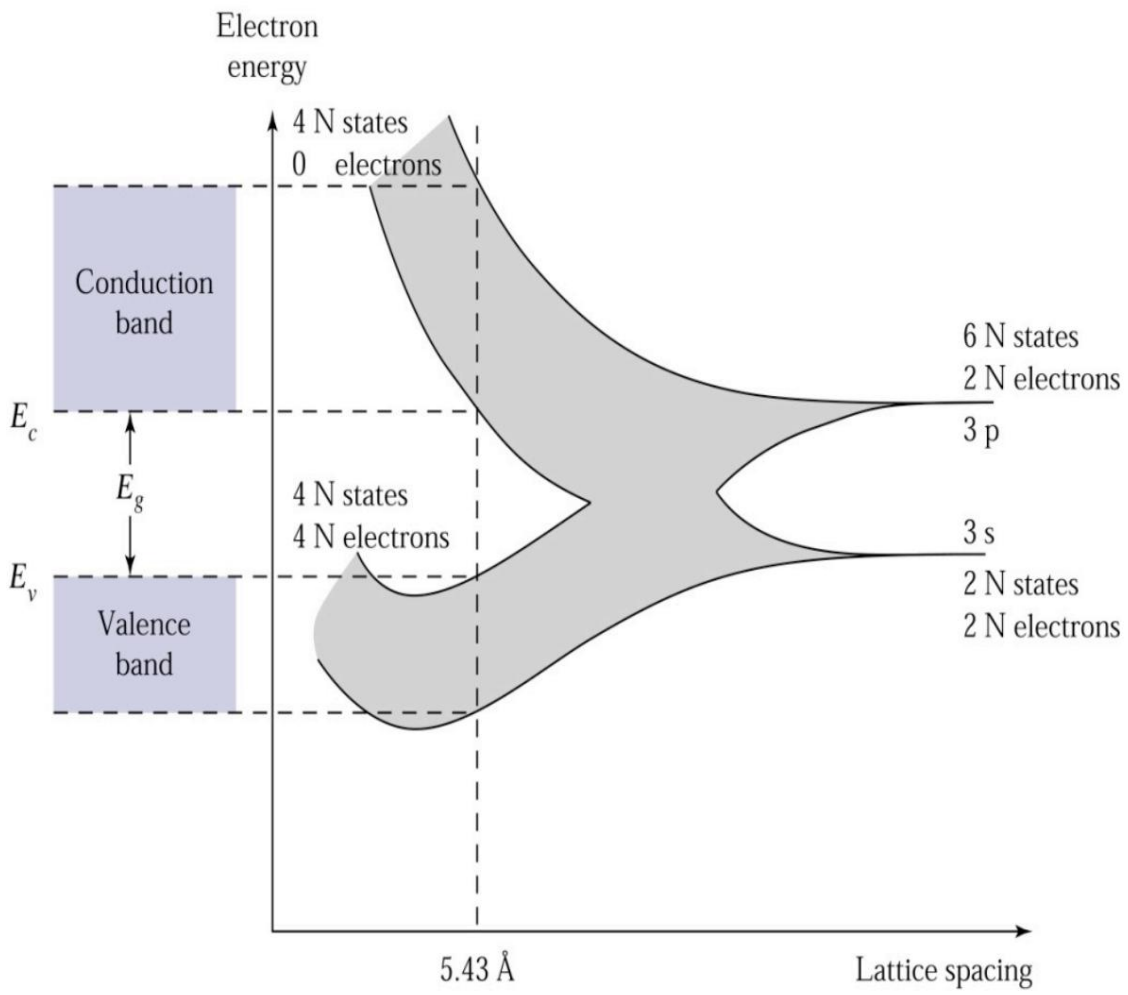


- เมื่อระยะห่างระหว่างอะตอมลดลง 3s และ 3p

  เปลือกย่อยของ อะตอมซิลิกอน N จะโต้ตอบและทับซ้อนกัน

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน



- ที่ สมดุล ระยะห่างระหว่างอะตอม แบนด์จะแยกออกเป็นสี่สถานะควอนตัมอีกครั้ง อะตอมในแถบล่าง (แถบวาเลนซ์) และสี่สถานะควอนตัมต่ออะตอมในแถบบน (แถบการนำไฟฟ้า)

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- ที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (T = 0 K) อิเล็กตรอนจะครอบครองสถานะพลังงานต่ำที่สุด เพื่อให้ทุกสถานะในระดับพลังงานต่ำแบนด์จะเต็มและทุกสถานะในแบนด์บนจะเป็นว่างเปล่า.
- ส่วนล่างของแถบการนำไฟฟ้าเรียกว่า Ec และด้านบนของแถบวาเลนซ์เรียกว่า Ev

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- พลังงานแบนด์แก๊ป Eg คือความกว้างของระดับพลังงานต้องห้ามระหว่างด้านล่างของแถบการนำไฟฟ้า และส่วนบนของแถบวาเลนซ์
- พลังงานแบนด์แก็ปคือพลังงานที่จำเป็นในการทำลายพันธะในสารกึ่งตัวนำเป็นอิสระและอิเล็กตรอนไป แถบการนำไฟฟ้าและทิ้งรูไว้ในแถบวาเลนซ์

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

แผนภาพพลังงาน-โมเมนตัม • พลังงาน E ของอิเล็กตรอนอิสระกำหนดโดย

$$E = \frac{p^2}{2m_0} \qquad (1)$$

โดยที่ p คือโมเมนตัม m0 คือมวลอิเล็กตรอนอิสระ

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- ในสารกึ่งตัวนำ

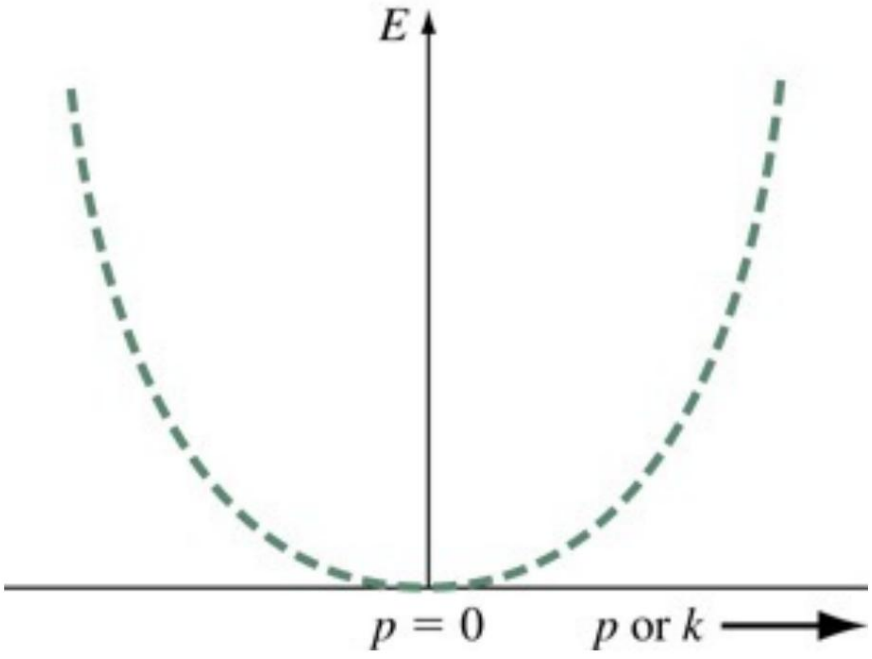
  อิเล็กตรอนในการนำไฟฟ้า

  วงดนตรีจะคล้ายกับวงฟรี

  อิเล็กตรอนในที่ที่มันมีอิสระที่จะ

  เคลื่อนไหวอยู่ภายในคริสตัล

  ตามที่แสดงในรูปด้านขวา



Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- อย่างไรก็ตาม สมการข้างต้นสำหรับ E ไม่สามารถทำได้ใช้เนื่องจากศักย์ของนิวเคลียสเป็นระยะ
- อย่างไรก็ตาม หากแทนที่ m0 ด้วย มวลที่มีประสิทธิภาพในสมการ (1) จะได้พลังงาน E ของอิเล็กตรอนเป็น

$$E = \frac{p^2}{2m_e}$$

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- มวลที่มีประสิทธิภาพในของแข็งเป็นผลมาจาก อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่อยู่ใต้แกนนิวเคลียสของ สนามไฟฟ้าที่ใช้ในสภาวะที่มีประจุไฟฟ้าเป็นระยะ ศักยภาพ.
- นี่ต่างจากมวลในอวกาศว่าง
- มวลที่มีประสิทธิภาพของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- ในกลศาสตร์ควอนตัม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะถูกอธิบายโดยกลุ่มของมัน

$$\text{วี}_{\text{จี}} = \frac{\text{งว}}{\text{ดีเค}}$$

อี = น = ว

$$\text{วี}_{\text{จี}} = \frac{1}{\text{ก}}\frac{\text{¶อี}}{\text{!¶}}$$

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

ความเร่งสามารถหาได้จาก

เอ = ดีวี จีดีอี 1 ใช่ ¶ ใช่แล้ว ! ¶ ดที ดที เค

เอ = 1 ก. 2 2 เคที (2)

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- สำหรับส่วนคลาสสิก จะแสดง dE เป็นงานที่ทำโดยอนุภาคที่เดินทางเป็นระยะทาง vgdt ภายใต้อิทธิพลของแรง eE

dE F dx

- (ฟ ว ดt n-

จี

1 จี

งจ ฉ ดt è ø !

เออ เออ ¶

เค่

¶

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

สิ่งนี้จะนำไปสู่

$$\frac{\text{ดีเค}_{\text{เอฟ}}}{\text{ดีที}} \qquad (3)$$

การแทนค่า (3) ลงใน (2)

$$\text{เอ} = \frac{1}{2}\left(\frac{\text{อี}_{\text{เอฟ}}}{\text{เค}}\right)^2 \text{เป็น}$$

$$\text{เอ} = \frac{1}{2}\frac{\text{อี}^2}{\text{เค}^2}\text{เอฟ} \qquad (4)$$

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

จาก F = ma เราได้

$$\text{ม.}_{\text{อี}} = \frac{\text{เออ}_1\ \text{เออ}_2\ \text{อี}_{\text{ออ}}}{\text{ซ}_{\text{ร}}\ \text{ซ}_{\text{ร}}} \left(\frac{1}{\text{ก}_1} - \frac{1}{\text{ก}_2}\right) \qquad (5)$$

ใช่แล้ว โอ้ม เอ่ ม

สามารถเขียนนิพจน์ที่คล้ายกันสำหรับหลุมที่มีมวลที่มีประสิทธิภาพ mh

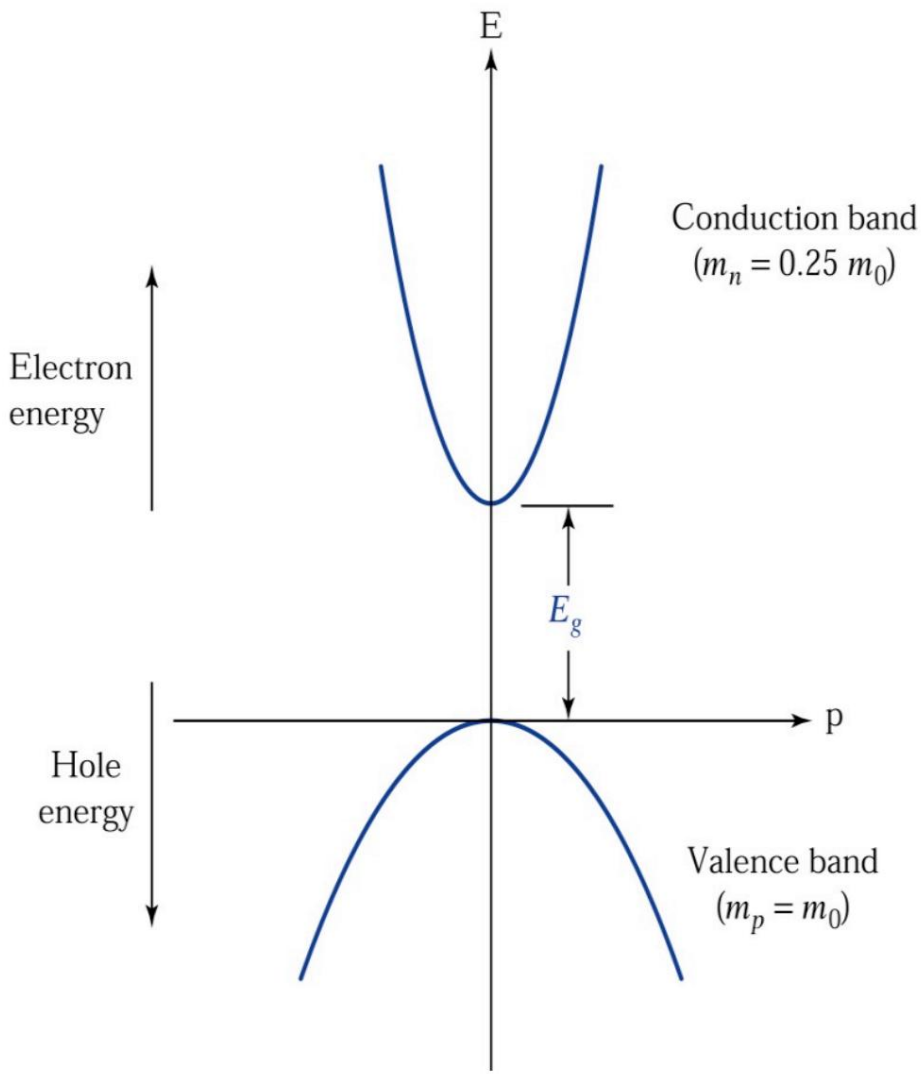
Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- แผนภาพพลังงาน-โมเมนตัมแบบแผนผังสำหรับสารกึ่งตัวนำพิเศษที่มี = 0.25 m0 และ
  เอ็มเอช = ม.0.
  จัน

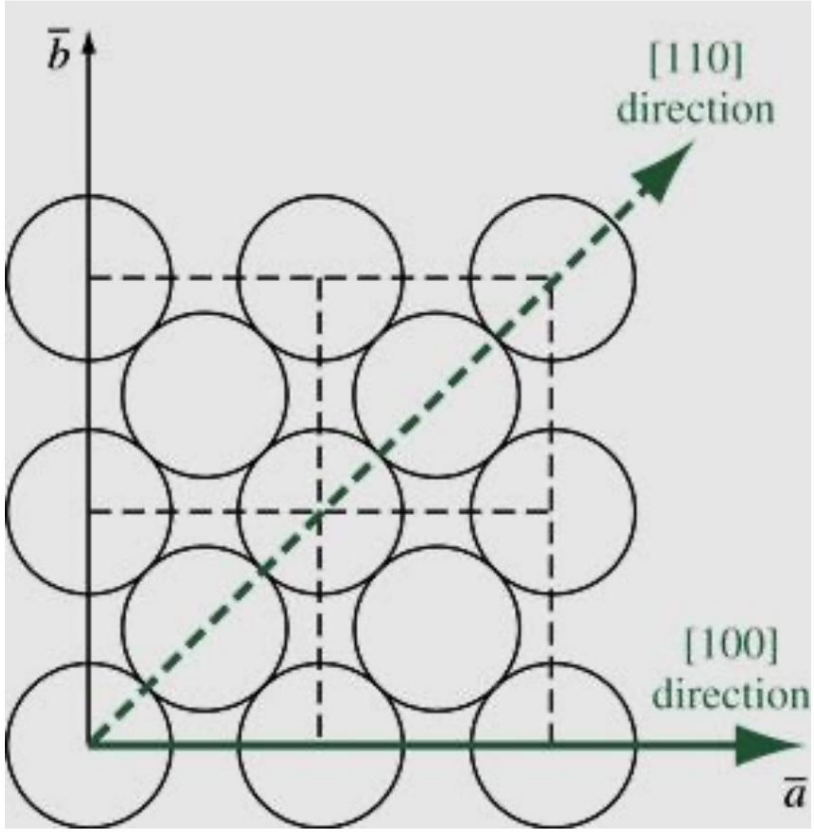
- พลังงานอิเล็กตรอนจะถูกวัดจากด้านบน และพลังงานหลุมจะถูกวัดจากด้านล่าง

- ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและโมเมนตัมนี้เรียกว่า "แผนภาพแถบพลังงาน"



Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน



พิจารณาโครงสร้างผลึก 3 มิติ

ระยะห่างของโครงตาข่ายแตกต่างกันด้วย

ทิศทางคริสตัล

เช่น FCC ด้วย [110] และ [100]

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในลักษณะต่าง ๆ

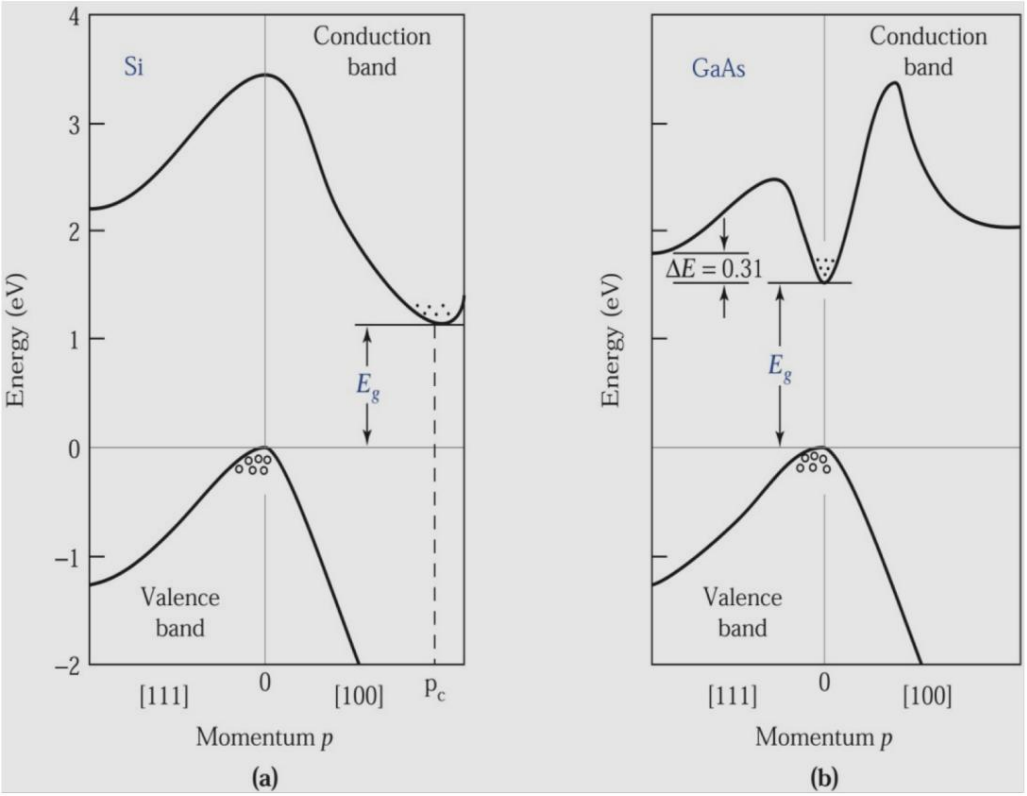
ทิศทางทำให้ทั้งสองต่างกัน

รูปแบบศักย์เป็นระยะและ

เงื่อนไขขอบเขตอวกาศ k

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน



- แผนภาพแถบพลังงานอาจเป็น

  แบ่งสารกึ่งตัวนำออกเป็น 2 ประเภท

  กลุ่มเป็น สารกึ่งตัวนำ โดยตรง

  และ สารกึ่งตัวนำทาง อ้อม

- โครงสร้างแถบพลังงานของ Si

  และ GaAs วงกลม (°) หมายถึง

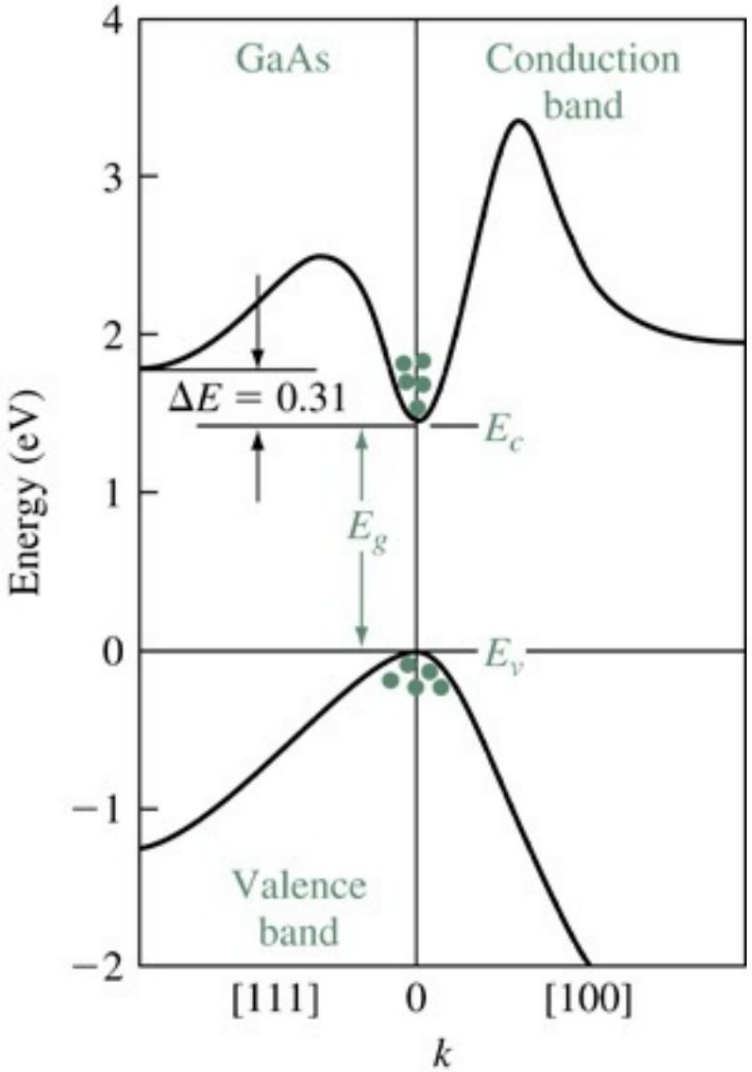
  รูในแถบวาเลนซ์และ

  จุด (•) หมายถึงอิเล็กตรอนใน

  แถบการนำไฟฟ้า

Machine Translated by Google

Energy Bands



(a)

- มาพิจารณารูป GaAs

  เป็น สารกึ่งตัวนำโดยตรง ที่มี

  แบนด์แก๊ปโดยตรงเนื่องจากมันไม่ได้

  ต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม

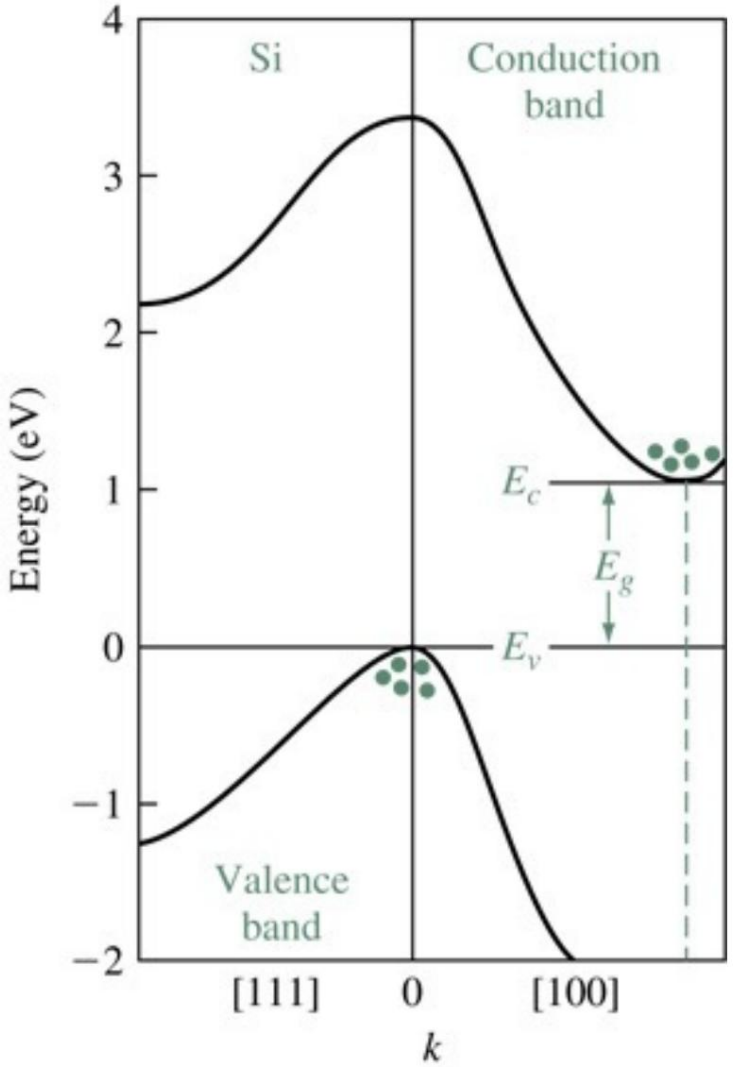
  สำหรับการเปลี่ยนผ่านอิเล็กตรอนจาก

  แถบวาเลนซ์ไปที่

  แถบการนำไฟฟ้า

Machine Translated by Google

Energy Bands



(b)

- ไม่เหมือนในกรณีของ Si อิเล็กตรอน

  การเปลี่ยนผ่านจากแถบวาเลนซ์ไปเป็น

  แถบการนำไฟฟ้าไม่ต้องการ

  เป็นเพียงการเปลี่ยนแปลงด้านพลังงานเท่านั้นแต่ยัง

  การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม (เรียกว่า ทางอ้อม

  สารกึ่งตัวนำ)

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

- ความแตกต่างระหว่างแบนด์แก๊ปแบบตรงและแบบอ้อมคือสิ่งสำคัญสำหรับการทำแหล่งกำเนิดแสงเช่น LED หรือเลเซอร์
- แหล่งกำเนิดแสงเหล่านี้ต้องการเซมิคอนดักเตอร์โดยตรงการผลิตโฟตอนอย่างมีประสิทธิภาพ

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

การนำไฟฟ้าในโลหะ เหล็กกล้า และฉนวน

- การนำไฟฟ้าของโลหะ เซมิคอนดักเตอร์

  และฉนวนสามารถอธิบายได้ด้วยแถบพลังงานของมัน

- สิ่งเหล่านี้สามารถทำได้โดยพิจารณาสองสิ่งสูงสุด

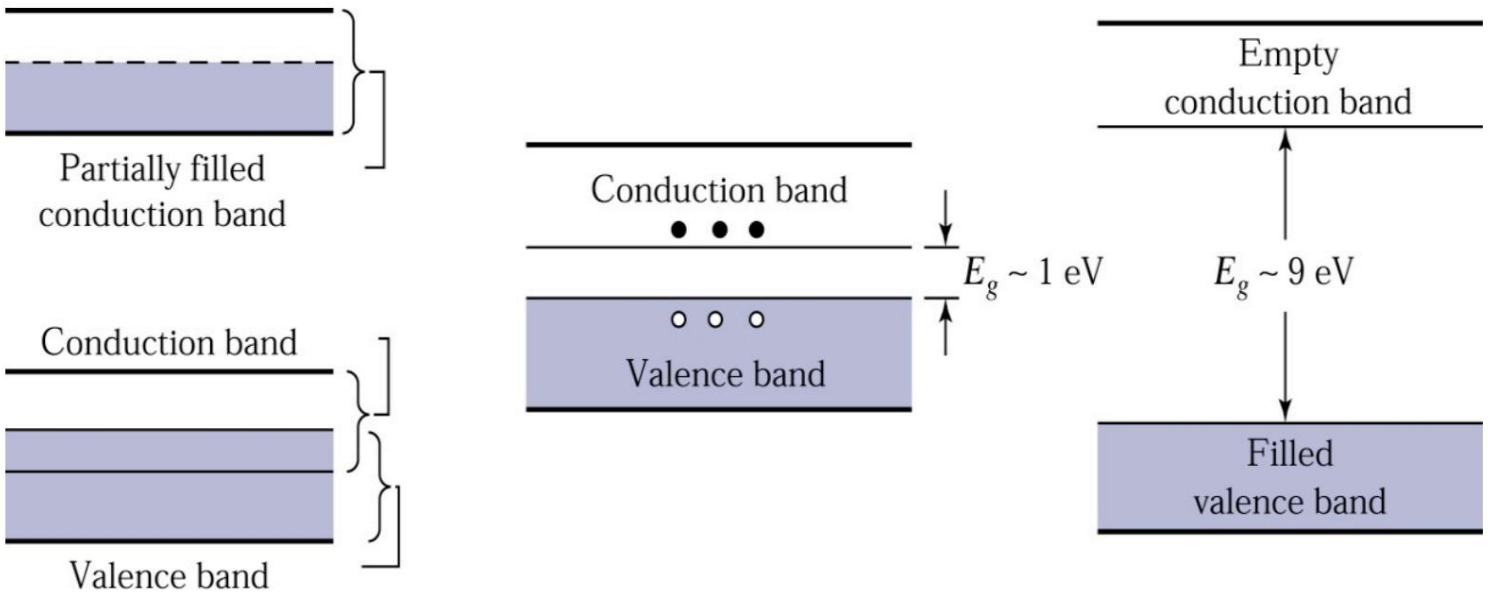
  แถบวาเลนซ์ และแถบการนำของวัสดุ

- การยึดครองอิเล็กตรอนของแถบการนำไฟฟ้ากำหนด

  ค่าการนำไฟฟ้าของของแข็ง

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

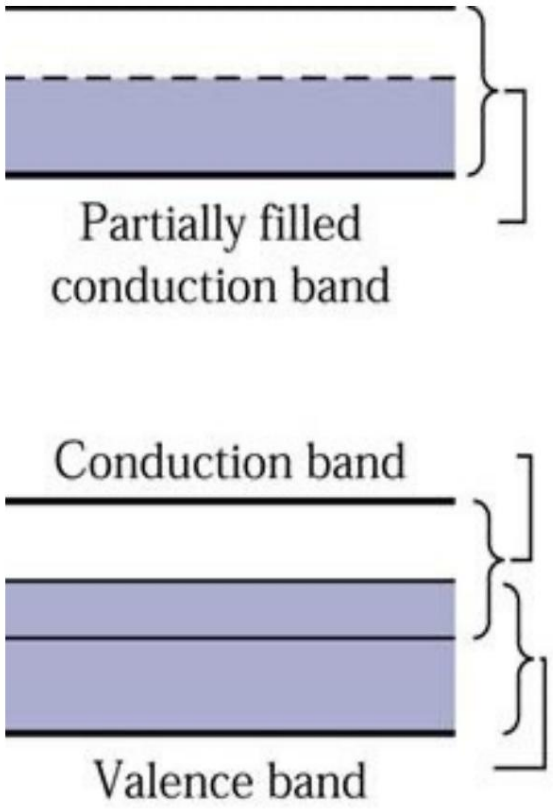


- (ซ้าย) ตัวนำที่มีสองทางเลือก (แถบการนำไฟฟ้าที่เติมบางส่วนที่แสดงในส่วนบนหรือแถบที่ทับซ้อนกันที่แสดงในส่วนล่าง)

- (กลาง) สารกึ่งตัวนำ • (ขวา) ฉนวน

Machine Translated by Google

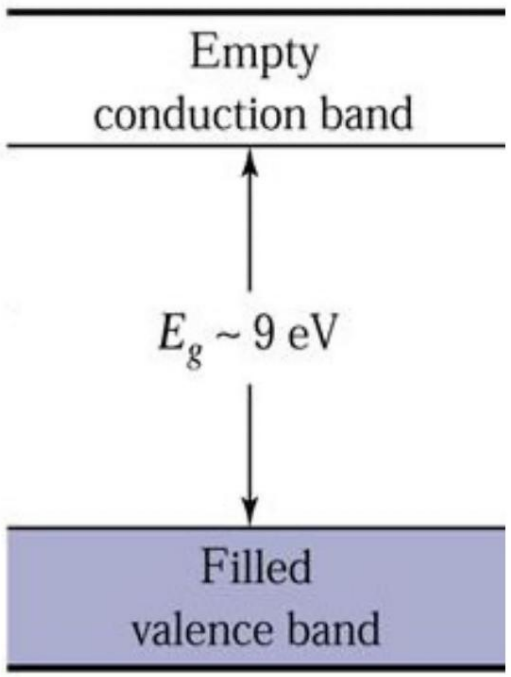
แบนด์พลังงาน



- โลหะ : อนุญาตให้ครอบครองได้สูงสุด แบนด์หรือแถบการนำไฟฟ้าคือ เติมเพียงบางส่วน (เช่น Cu) หรือ ทับซ้อนกับแถบวาเลนซ์ (เช่น Zn หรือ Pb) ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงเป็น มีอิสระที่จะย้ายไปยังระดับพลังงานถัดไป โดยมีการใช้พื้นที่ประยุกต์เพียงเล็กน้อย

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน



- ฉนวน : วาเลนซ์

  อิเล็กตรอนสร้างพันธะที่แข็งแกร่ง

  ระหว่างอะตอมข้างเคียงของพวกมัน

  พันธะเหล่านี้ยากที่จะทำลาย

- ดังนั้นแถบวาเลนซ์จึงเต็ม

  เติมและแถบการนำไฟฟ้าเป็น

  ว่างเปล่าโดยสิ้นเชิง

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน

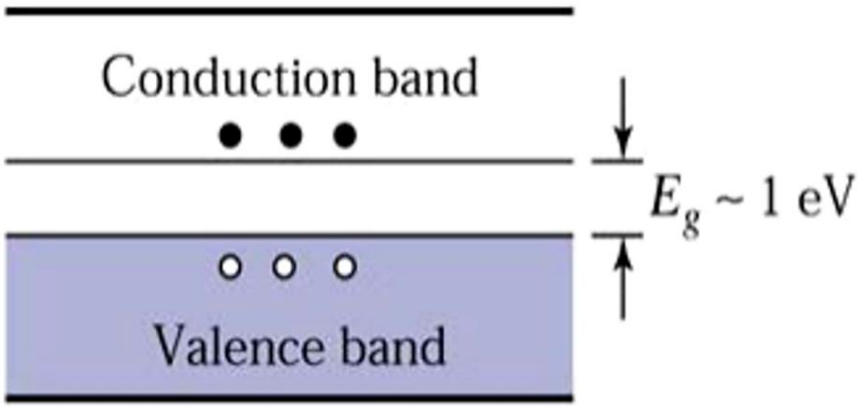
- นอกจากนี้ ทั้งสองแบนด์นี้ยังถูกแยกจากกันด้วยแบนด์แก็ปที่กว้าง
- พลังงานความร้อนหรือพลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ใช้คือ

  ไม่เพียงพอที่จะเพิ่มอิเล็กตรอนบนสุดในวาเลนซ์

  แถบขึ้นไปจนถึงแถบการนำไฟฟ้า
- ดังนั้นจึงไม่มีการนำไฟฟ้า ——

Machine Translated by Google

แบนด์พลังงาน



- เซมิคอนดักเตอร์: นี่คือ

  คล้ายกับฉนวนแต่

  แบนด์แก๊ปมีขนาดเล็กกว่ามาก

  มากกว่าในกรณีของฉนวน

- เมื่อ T = 0 K อิเล็กตรอนทั้งหมดจะอยู่ในแถบวาเลนซ์และไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในแถบการนำไฟฟ้า

ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีในอุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนบางส่วนจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า

- นอกจากนี้ ยังต้องใช้สนามไฟฟ้าขนาดเล็กเพียงเล็กน้อยเพื่อเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน ส่งผลให้เกิดสภาพนำไฟฟ้า