

รายงานการวิจัย

การสร้างไดโอดทนแรงดันพังทลายสูง

High Breakdown Voltage Diode Fabrication

คณะผู้วิจัย

- 1. นายจิรวัดน์ ปานกลาง (หัวหน้าโครงการ)
- 1. พศ. ดร. วิสุทธิ ลีตี่รุ่งเรือง (ผู้ร่วมวิจัย)
- 3. นายกอบศักดิ์ ศรีประภา (ผู้ช่วยนักวิจัย)

สถานที่ทำการวิจัย

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้สนับสนุนงานวิจัย

สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ

RCH  
 TK  
 7871.86  
 ๑512๗

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 28196

วัน, เดือน, ปี ๓.๐.๒540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำออกเผยแพร่โดยไม่แจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสร้างไดโอดทนแรงดันพังทลายสูง  
(ภาษาอังกฤษ) High Breakdown Voltage Diode Fabrication

หัวหน้าโครงการ นายจิรวุฒิ ปานกลาง

### บทคัดย่อ

แรงดันพังทลายเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของอุปกรณ์ไดโอด ซึ่งสามารถแสดงถึงการทนต่อสภาวะไบอัสย้อนกลับได้สูงสุด ในรายงานฉบับนี้นำเสนอแนวทางในการออกแบบและสร้างไดโอดให้มีแรงดันพังทลายสูง จากการศึกษพบว่า การพังทลายของรอยต่อพีเอ็นของไดโอด จะแปรผกผันกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนฐานรอง และขึ้นกับลักษณะทางเรขาคณิตของรูปทรงของรอยต่อ นอกจากนี้ เทคนิคการใช้ฟิล์ดริงค์และฟิล์ดเพลตร่วมกับโครงสร้างของไดโอด เพื่อพัฒนาให้ไดโอดมีความสามารถทนแรงดันไบอัสย้อนกลับได้สูงขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ขอบด้านข้างของรอยต่อพีเอ็นมีค่าลดลง ซึ่งผลการทดลองพบว่า ค่าแรงดันพังทลายจะมีค่าสูงขึ้นอีก 30 เปอร์เซ็นต์

### Abstract

One of the important parameter of the PN Junction diode is the reverse breakdown voltage. The design and fabrication of the high reverse breakdown voltage diode are present in this report. From experimental results, it indicated that the reverse breakdown voltage are inversely proportional to substrate doping concentration and depend on the geometrical pattern of the junction too. Futher more the use of field ring and field plate techniques are combined with the diode structure. These techniques cause the blocking capability of the diode is increasing. Because of the junction edge terminal is reduced. The experimental data show that the reverse breakdown voltage are 30% higher.

## สารบัญ

หน้า

### บทที่ 1 ทฤษฎีรอยต่อพีเอ็น

- 1.1 บทนำ
- 1.2 รอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุลขณะไม่มีแรงดันไบอัส
- 1.3 รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง
- 1.4 รอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ
- 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพีเอ็น
- 1.6 กระแสรั่วที่รอยต่อพีเอ็น
- 1.7 การพังทลายของรอยต่อพีเอ็น

### บทที่ 2 การออกแบบและการสร้าง

- 2.1 การเลือกชนิดและข้อมูลจำเพาะของฐานรอง
- 2.2 การออกแบบรูปทรงทางเรขาคณิต
- 2.3 การออกแบบฟิล์มรีดริงค์และฟิล์มเพลท
- 2.4 กระบวนการสร้าง

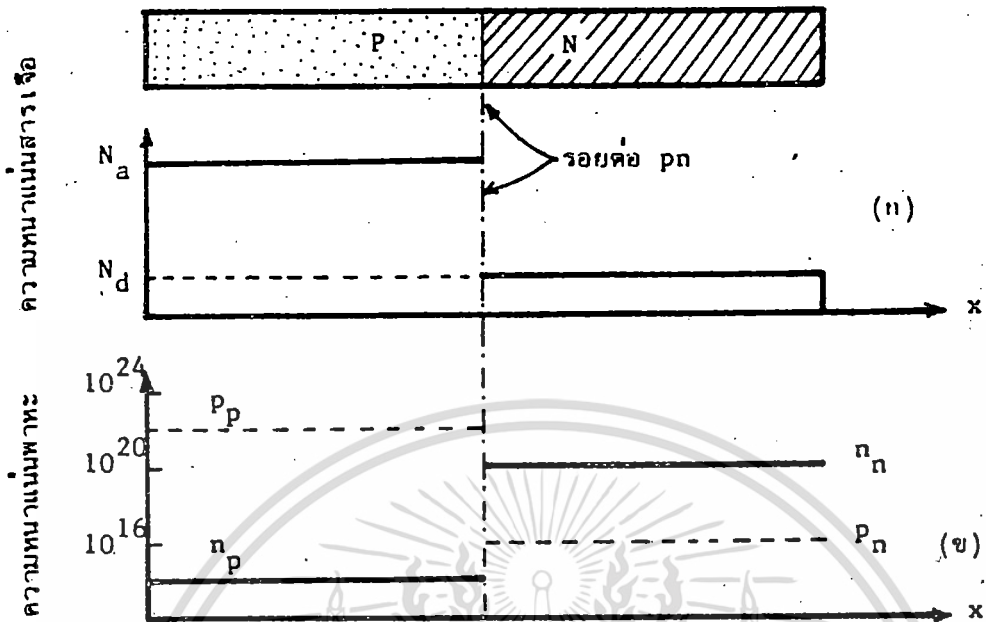
### บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง

- 3.1 การทดลองและผลการทดลองค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อพีเอ็นที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบต่าง ๆ
- 3.2 การทดลองและผลการทดลองค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อพีเอ็นที่มีฟิล์มรีดริงค์และฟิล์มเพลท
- 3.3 การทดลองและผลการทดลองค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อพีเอ็นที่มีความเข้มของประจุพาหะในฐานรองค่าต่าง ๆ

### บทที่ 4 สรุปและบทวิจารณ์

ภาคผนวก ก. ประวัติผู้วิจัย

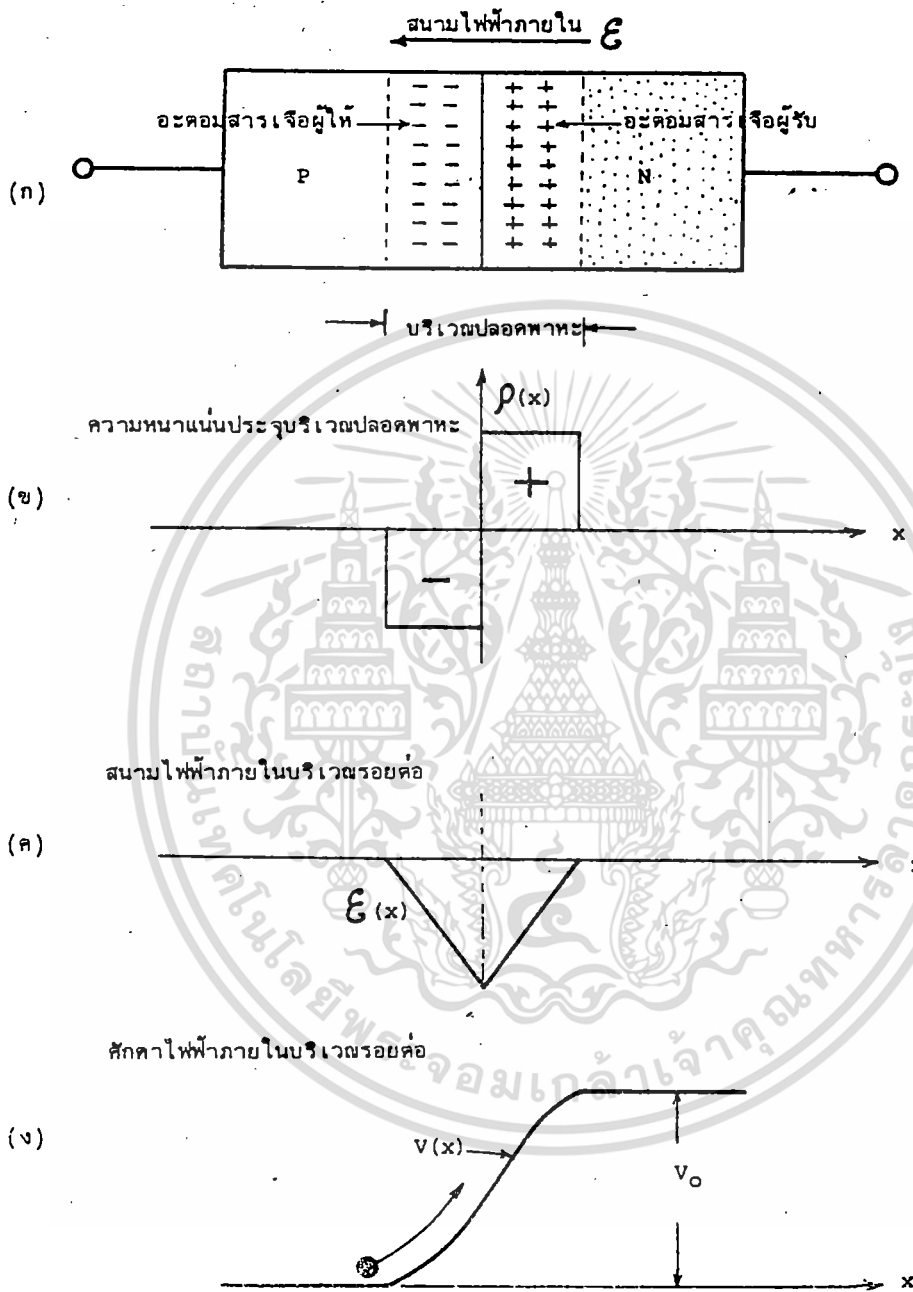
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดง ก. ลักษณะการกระจายของอิตรอมสารเจือและ  
ข. ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพีเอ็นชนิดขึ้นันได้

เมื่อรอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น จะเห็นว่าเนื่องจากด้านทั้งสองของรอยต่อ มีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของพาหะ กล่าวคือโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีค่ามากกว่าโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีค่ามากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี และเป็นสาเหตุทำให้เกิดมีแรงกระทำต่อพาหะให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ เพื่อให้ด้านทั้งสองของรอยต่อมีพาหะเท่ากัน ดังนั้นพาหะจากทางด้านซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า จะแพร่ไปทางด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า นั่นคือ โฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้ามาทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี การแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อนี้ จะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ ๆ รอยต่อเป็นอันดับแรก และดังนั้น อะตอมสารเจือผู้รับทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็นไอออนลบ และอะตอมสารเจือผู้ให้ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็นไอออนบวก ประจุไฟฟ้าของไอออนดังกล่าวนี้ จะทำให้เริ่มเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งเราจะเรียกว่า "สนามไฟฟ้าภายใน" สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะช่วยต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี และอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ แต่อย่างไรก็ดี การแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะเหล่านี้ จะยังคงดำเนินอยู่ต่อไป กระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีผลพอดีทำให้โฮลและอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ pn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = N_v \cdot e^{-(E_{fp} - E_v)/kT} \quad (1.2)$$

โดยที่

$N_c, N_v$  คือ effective densities of state ในแถบความนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับจะในกรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor)

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \cdot e^{-E_g/2kT} \quad (1.3)$$

โดยที่

$E_g$  คือ ความกว้างของช่องว่างพลังงาน =  $E_c - E_v$

จะเมื่อพิจารณาว่า effective mass ของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากันแล้วจะได้ว่า

$$N_c = N_v$$

ดังนั้น  $n_i = N_c \cdot e^{-E_g/2kT} = N_v \cdot e^{-E_g/2kT} \quad (1.4)$

เมื่อนำสมการ 1.4 ไปหาสมการ 1.1 และ 1.2 ก็จะได้

$$\frac{n}{n_i} = e^{-(E_c - E_{fn} - E_g/2)/kT} \quad (1.5)$$

และ

$$\frac{P}{P_i} = e^{-(E_{fp} - E_v - E_g/2)/kT} \quad (1.6)$$

จะเพื่อความสะดวกเราจะให้ระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์ เป็นระดับเปรียบเทียบโดยให้  $E_v = 0$  และดังนั้น  $E_c = E_g$  สมการ 1.5 และ 1.6 อาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$n = n_i \cdot e^{(E_{fn} - E_g/2)/kT} = n_i \cdot e^{(E_{fn} - E_{in})/kT} \quad (1.7)$$

$$P = n_i \cdot e^{(E_g/2 - E_{fp})/kT} = n_i \cdot e^{(E_{ip} - E_{fp})/kT} \quad (1.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.11)

$$\frac{E_{ip} - E_{fp}}{kT} = \log_e \left( \frac{P_p}{n_i} \right)$$

รวมสมการ 1.10 และ 1.11 เข้าด้วยกัน ดังนั้น

$$\frac{E_{fn} - E_{in} + E_{ip} - E_{fp}}{kT} = \log_e \left( \frac{n_n}{n_i} \right) + \log_e \left( \frac{P_p}{n_i} \right) \quad (1.12)$$

แต่เนื่องจากเป็นภาวะสมดุลย์  $E_{in} = E_{ip}$  (ดูในรูปที่ 1.4) ดังนั้น

$$\frac{E_{in} - E_{ip}}{kT} = -\log_e \left( \frac{n_n \cdot P_p}{n_i^2} \right) \quad (1.13)$$

จากสมการ 1.13 และ 1.9

$$V_o = -\frac{kT}{q} \cdot \log_e \left( \frac{n_n P_p}{n_i^2} \right) \quad (1.14)$$

เมื่อพิจารณาว่าจำนวนของอะตอมสารเจือทั้งหมดถูกอ็อกซิไดซ์ หรือก็คือ

$$\left. \begin{array}{l} n_n = N_d \\ P_p = N_a \end{array} \right\} \quad (1.15)$$

โดยที่

$N_d, N_a$  คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้และผู้รับตามลำดับ

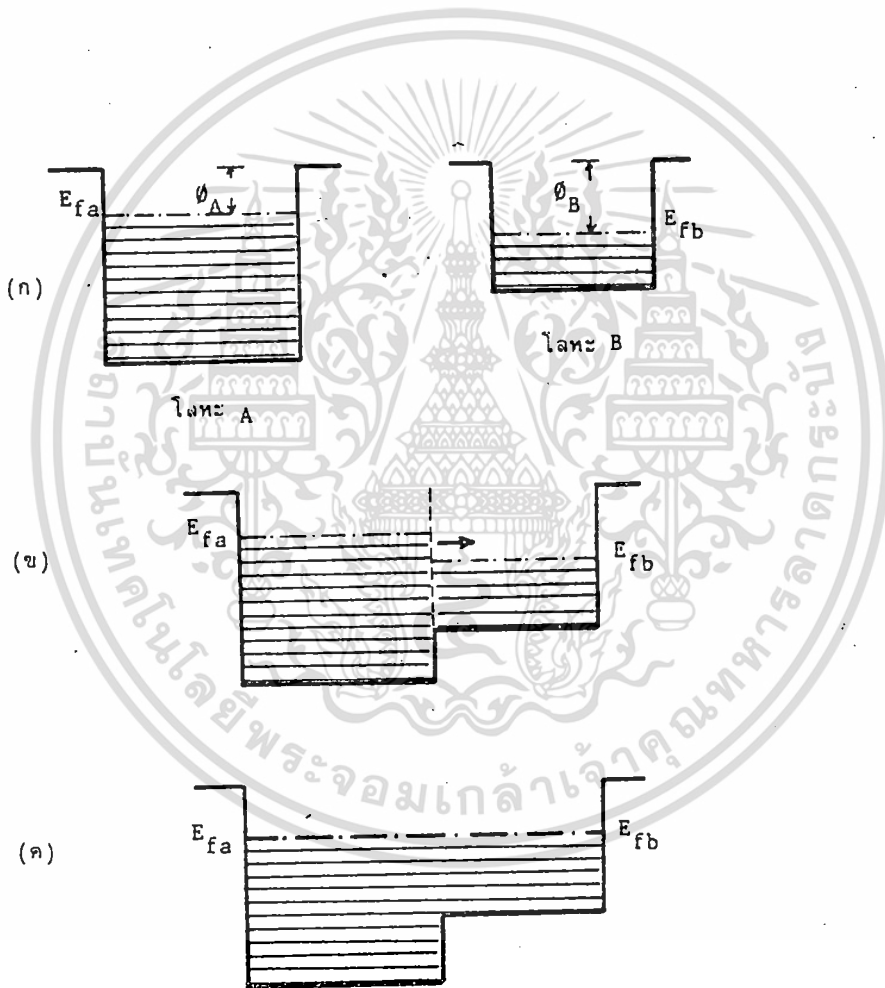
ดังนั้นสมการ 1.14 อาจเขียนได้ว่า

$$V_o = -\frac{kT}{q} \cdot \log_e \left( \frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) \quad (1.16)$$

สำหรับการที่สารทั้งสองชนิดเมื่อนำมาสัมผัสให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นแล้ว ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสอง จะอยู่ในระดับเดียวกัน ขณะที่ เป็นภาวะสมดุลย์นั้น เราสามารถอธิบายเปรียบเทียบให้เห็นได้ชัดยิ่งขึ้น โดย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาศัยหลักการพิจารณาโลหะสองชนิด เช่น ชนิด A และชนิด B นำมาต่อกัน โลหะดังกล่าวนี้มี  $\phi_A$  และ  $\phi_B$  เป็นค่าฟังก์ชันงาน (work function) ตามลำดับ รูปที่ 1.5 (ก) แสดงภาวะก่อนที่โลหะทั้งสองจะถูกนำมาต่อกัน และรูปที่ 1.5 (ข) แสดงภาวะขณะต่อกัน ส่วนรูป (ค) แสดงภาวะสมดุลย์ภายหลังที่โลหะทั้งสองชนิดต่อกันแล้ว

จากรูปที่ 1.5 จะเห็นว่าทันทีที่โลหะทั้งสองชนิดต่อกัน อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านของโลหะที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิที่สูงกว่า (โลหะ A) เข้ามายังระดับพลังงานที่ว่างอยู่ของโลหะอีกด้านหนึ่งซึ่งมีระดับเฟอร์มิต่ำกว่า (โลหะ B) เข้ามายังระดับพลังงานที่ว่างอยู่ของโลหะอีกด้านหนึ่งซึ่งมีระดับเฟอร์มิต่ำกว่า (โลหะ B) ดังนั้นจะทำให้ด้าน B มีอำนาจประจุไฟฟ้าลบ และทางด้าน A มีประจุไฟฟ้าบวกประจุไฟฟ้าดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดมีความต่างศักย์ขึ้นระหว่างโลหะทั้งสองชนิด จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ

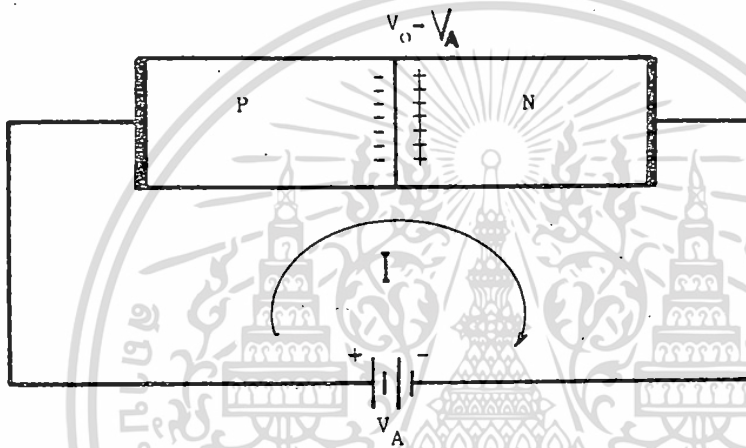


รูปที่ 1.5 แสดงระดับพลังงานของโลหะสองชนิดเมื่อนำมาสัมผัสกัน

ก. ภาวะก่อนสัมผัส ข. ขณะสัมผัส และ ค. ภาวะสมดุลย์หลังสัมผัสแล้ว

### 1.3 รอยต่อ พี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

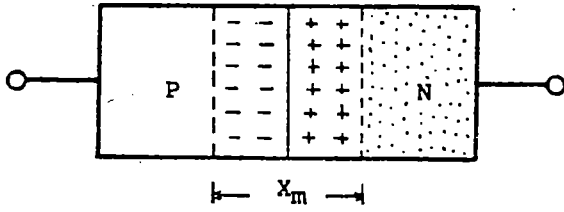
ในขณะภาวะสมดุลย์เมื่อไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ ให้แก่รอยต่อ จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อทั้งนี้เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อซึ่งขัดขวางการแพร่ของพาหะ ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 1.7 โดยการต่อขั้วลบของแบตเตอรี่เข้ากับด้านเอ็นและต่อขั้วบวกเข้ากับด้านพี



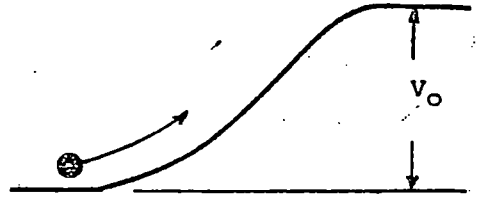
รูปที่ 1.7 แสดงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง

และโดยการพิจารณาว่า ความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดพีและชนิดเอ็นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงดันไบอัสตรงภายนอก  $V_A$  จากแบตเตอรี่ทั้งหมดจะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นและอยู่ในลักษณะที่หักล้างหรือช่วยลดศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อในขณะนี้ก็คือ  $(V_0 - V_A)$  นั่นคือศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อจะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 1.8 ข. ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นและโฮลจากด้านพี ก็จะสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังด้านตรงข้ามได้โดยสะดวก รอยต่อพี-เอ็นขณะนี้จะจึงทำตัวเสมือนเป็นตัวนำยอมให้กระแสไหลผ่านได้เป็นอย่างดี กระแสดังกล่าวนี้จะถูกต้านทานก็เฉพาะ ความต้านทานอันเนื่องมาจากเนื้อสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมาก และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะในขณะนี้จะลดลง และแคบกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้รับไบอัส ดังในรูปที่ 1.8 ข.

(ก)

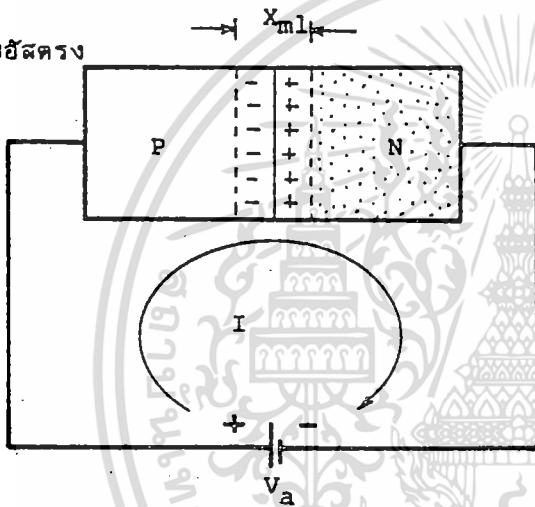


บริเวณปลอดพาหะขณะไม่มีไบอัส

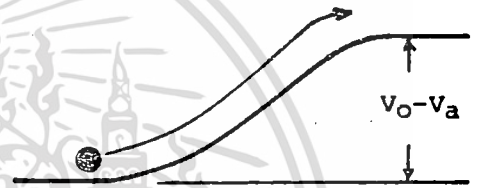


ศักดาภายในขณะไม่มีไบอัส

(ข) กรณีไบอัสตรง



บริเวณปลอดพาหะจะแคบลง

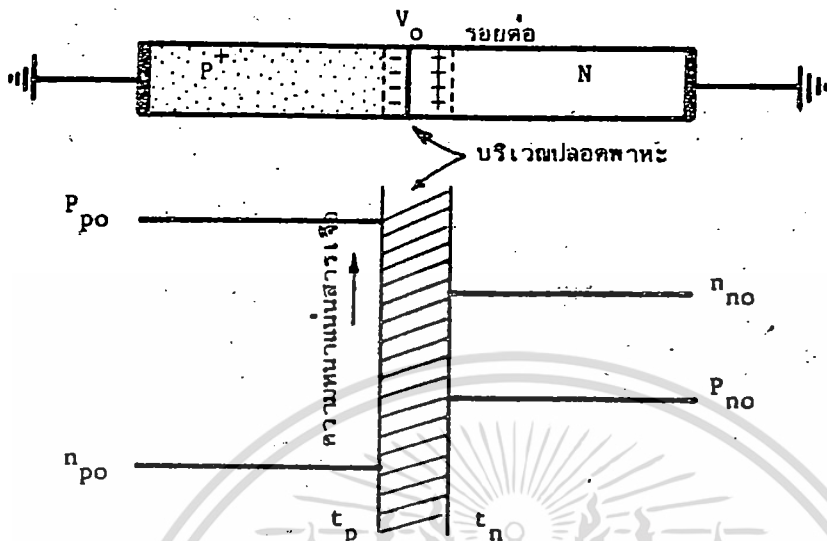


ศักดาภายในขณะไบอัสตรงจะลดลง

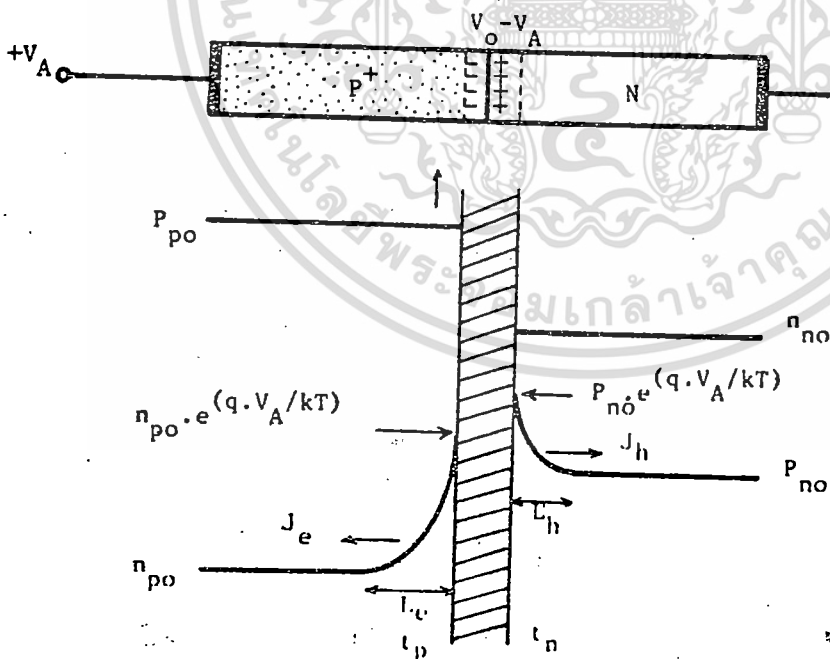
รูปที่ 1.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ และศักดาภายในรอยต่อ ขณะที ก. ไม่มีไบอัส ข. ได้รับไบอัส

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง จะทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองด้านของรอยต่อแตกต่างกันเองที่เราใช้อธิบายว่าจะเกิดมีกระแสพาหะส่วนมากไหลข้ามรอยต่อได้ ดูในรูปที่ 1.9 ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 10 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะไม่มีไบอัส



รูปที่ 1.11 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับแรงดัน

ไบอัสตรง เอกสารนี้เป็นเอกสารฟรีที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (1.20) ในสมการ (1.21)

$$P_{n|tn} = n_i e^{-E_{fp}/kT} \cdot \frac{n_i e^{E_{fn}/kT}}{n_{no}} = \frac{n_i^2 e^{(E_{fn}-E_{fp})kT}}{n_{no}} \quad (1.22)$$

ซึ่งจากคำนิยามเราให้

$$\frac{E_{fn} - E_{fp}}{q} = V_A$$

ซึ่งเป็นแรงดันไบอัสตรงดังนั้น

$$P_{n|tn} = \frac{n_i^2}{n_{no}} \cdot e^{qV_A/kT} \quad (1.23)$$

โดยที่จากกฎของแมสแอคชั่น (mass action's Law)

$$P_{no} \cdot n_{no} = n_i^2 \quad (1.24)$$

และในทำนองเดียวกันเราก็สามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$n_{p|tp} = n_{po} \cdot e^{qV_A/kT} \quad (1.25)$$

ดังนั้นเราจึงสรุปได้ว่า พาหะส่วนน้อยที่บริเวณปลายด้านทั้งสองของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเอกโพเนนเชียลกับแรงดันไบอัสตรงที่ป้อนให้แก่รอยต่อ เมื่อพิจารณาดูที่รอยต่อจะเห็นว่า กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อก็คือกระแสของการแพร่ของพาหะส่วนน้อยซึ่งสามารถเขียนได้โดยกฎของฟิค โดยแยกเป็น กระแสการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ

$$\text{กระแสโฮล } J_h = -q \cdot D_h \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \cong q D_h \cdot \frac{(P_{n|tn} - p_{no})}{L_h} \quad (1.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า  $P_n|_{t_n}$  ลงในสมการ 1.26 ดังนั้น

$$J_h = q \cdot D_h \cdot \frac{(P_{no} e^{q \cdot V_A / kT} - P_{no})}{L_h} = \frac{q \cdot D_h P_{no}}{L_h} \cdot (e^{q \cdot V_A / kT} - 1) \quad (1.27)$$

และในทำนองเดียวกันจะได้ว่ากระแสอิเล็กตรอน

$$J_e \cong \frac{q \cdot D_e n_{po}}{L_e} \cdot (e^{q \cdot V_A / kT} - 1) \quad (1.28)$$

แต่เนื่องจากกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่สวนกัน ดังนั้นกระแสสุทธิจะกลายเป็นผลรวมของกระแสทั้งสอง นั่นคือ

$$\begin{aligned} I_{รวม} &= A(J_h + J_e) \\ &= A \cdot q \left( \frac{D_h P_{no}}{L_h} + \frac{D_e n_{po}}{L_e} \right) (e^{q \cdot V_A / kT} - 1) \end{aligned} \quad (1.29)$$

โดยที่ A คือพื้นที่ของรอยต่อ-เอ็น และถ้ากำหนดให้  $I_0$  คือกระแสอิ่มตัว โดย

$$I_0 \equiv A \cdot q \left( \frac{D_h P_{no}}{L_h} + \frac{D_e n_{po}}{L_e} \right)$$

หรือ

$$= A \cdot q n_i^2 \cdot \left( \frac{D_h}{L_h n_n} + \frac{D_e}{L_e P_p} \right) \quad (1.30)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} n_{no} \cdot P_{no} &= n_i^2 \\ P_{po} \cdot n_{po} &= n_i^2 \\ n_{no} &= n_n \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{po} = P_p$$

แล้วตั้งนั้นสมการที่ 1.29 จะกลายเป็น

$$I = I_o(e^{qV_A/kT} - 1) \quad (1.31)$$

ซึ่งสมการนี้เป็นสมการของไดโอด หรือบางทีก็เรียกว่า Shockley diode equation หรือสมการเรคตีไฟร์ สมการนี้ใช้สำหรับการอธิบายถึงการเกิดกระแสของการแพร่ของพาหะส่วนน้อยซึ่งถูกฉีดข้ามรอยต่อ ในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงหรือไบอัสย้อนกลับ และต้องเข้าใจว่าขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสจากภายนอกนั้น รอยต่อจะอยู่ในภาวะไม่สมดุลระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองจะมีระดับแตกต่างกันและแรงดันไบอัส  $V_A =$

สมการที่ (1.17) และ (1.18) ซึ่งเป็นสมการกฎของรอยต่อนั้นแสดงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อกับแรงดันไบอัส ที่นี้เราลองมาพิจารณาถึงความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะใดกับระยะทาง โดยเริ่มพิจารณาโฮลเป็นอันดับแรก

จากสมการหนึ่งมิติของสมการต่อเนื่องสำหรับพาหะส่วนน้อยที่เกิดขึ้นใหม่

$$\frac{\partial}{\partial t}(\delta p) = \frac{\delta p}{\tau_{Lh}} - \mu_h \epsilon_x \frac{\partial}{\partial x}(\delta p) + D_h \frac{\partial^2(\delta p)}{\partial x^2} \quad (1.32)$$

โดยที่  $\delta p$  คือส่วนที่เพิ่มขึ้นของโฮล

$\tau_{Lh}$  คือ อายุของโฮล

$\mu_h$  คือ ความคล่องตัวของโฮล

$\epsilon_x$  คือ สนามไฟฟ้าตามแนวแกน x

$D_h$  คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่ของโฮล

เราพิจารณาว่าที่นอกบริเวณปลอดพาหะสนามไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ และในภาวะ Steady

State ค่า  $\frac{\partial}{\partial t}(\delta p) = 0$ , ดังนั้น จากสมการ (1.32) จะได้ว่า

$$\frac{d^2}{dx^2}(\delta p) = \frac{\delta p}{\tau_{Lh}D_h} = \frac{\delta p}{(L_h)^2} \quad (1.33)$$

โดยที่  $L_h \sqrt{\tau_{Lh}D_h}$  (1.34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการแก้สมการอนุพันธ์ (1.33) จะได้ว่า

$$\delta p = C_1 e^{-x/L_h} + C_2 e^{x/L_h} \quad (1.35)$$

โดยที่  $C_1, C_2$  เป็นค่าคงที่

จากความเป็นจริงที่ว่า  $(\delta p)$  จะมีค่าเป็นศูนย์ที่ระยะทาง  $x$  ห่างออกไปจากรอยต่อมาก ๆ เนื่องจากผลของการรวมตัวที่เกิดขึ้น ดังนั้นค่า  $C_2$  จากสมการ (1.35) จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\delta p = C_1 e^{-x/L_h} \quad (1.36)$$

และค่า  $(\delta p)$  ก็คือ ผลต่างของความหนาแน่นโพลที่ตำแหน่ง  $x$  ใด ๆ  $(p(x))$  กับโพลซึ่งมีอยู่ในภาวะสมดุลย์  $(p_{no})$  ดังนั้น

$$p(x) = C_1 e^{-x/L_h} + p_{no} \quad (1.37)$$

ถ้าพิจารณาให้ที่  $t_n$  คือจุดเริ่มต้น นั่นคือเมื่อ  $x = 0, P(x) = P_{n|t_n}$  ดังนั้นจากเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวนี้

$$C_1 = P_{n|t_n} - P_{no}$$

และ

$$P(x) = (P_{n|t_n} - P_{no}) e^{-x/L_h} + P_{no} \quad (1.38)$$

ซึ่งสมการ 1.38 เป็นสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโพลที่ถูกฉีดเข้ามาทางด้านเอ็นในช่วง  $L_n$  ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของระยะทาง  $x$  ใด ๆ เมื่อระยะ  $x$  มีค่าเท่ากับ  $L_n$  จะเห็นว่า

$$P(x) = P_{no}$$

ซึ่งหมายถึงความหนาแน่นของโพลจะลดลงอย่างเอกโปเนนเชียลและมีค่าต่ำสุดเป็นค่า  $P_{no}$  ในภาวะสมดุลย์

และในทำนองเดียวกันสมการแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้ามาทางด้านพีในช่วง  $L_p$  ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของระยะทาง  $X$  ใด ๆ ก็สามารถทำได้โดย

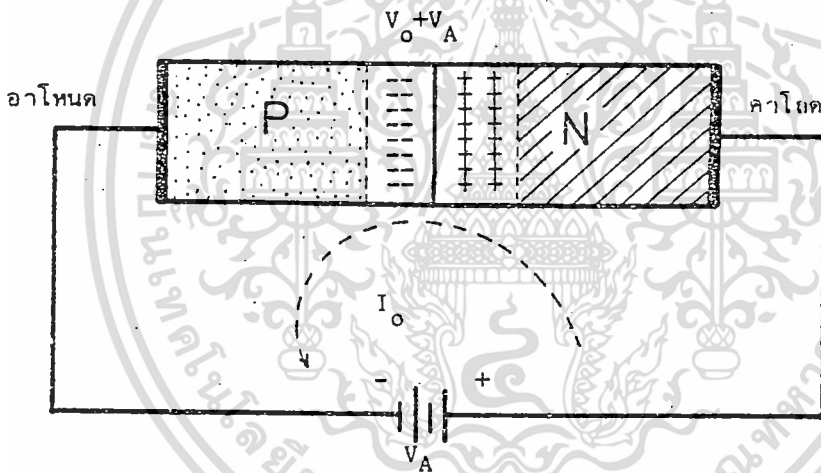
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n(x) = (n_{p|p} - n_{po})e^{-x/L_e + n_{po}} \quad (1.39)$$

และจากที่พิจารณาว่า สนามไฟฟ้านอกบริเวณปลอดพาหะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยเกิดขึ้นได้เนื่องจากการแพร่ และกระแสที่ไหลจึงเป็นกระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อยเกิดขึ้นได้เนื่องจากการแพร่ และกระแสที่ไหลจึงเป็นกระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย

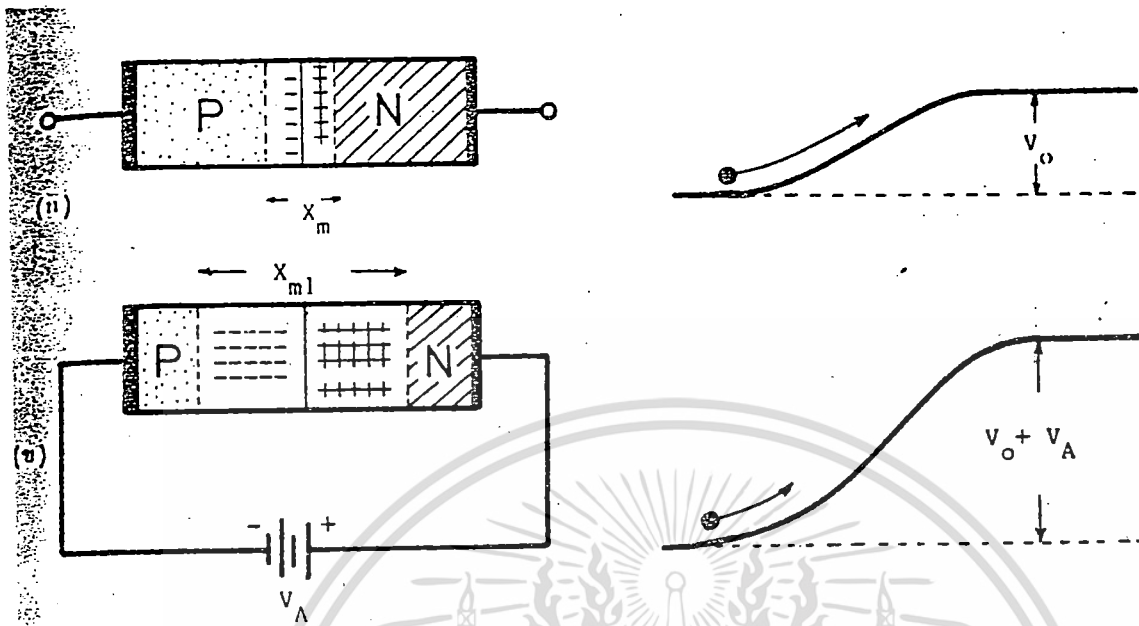
#### 1.4 รอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

ในตอนนี้อาจพิจารณาถึงกรณีที่ยรอยต่อพี-เอ็น ได้รับไบอัสย้อนกลับดังในรูปที่ 1.12 กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นถ้าหากให้แรงดันย้อนกลับแก่รอยต่อมีค่า  $V_A$  จะเห็นว่า แรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_A$  แล้ว จะเห็นว่า แรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_A$  จากภายนอกจะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายใน



รูปที่ 1.12 แสดงรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ที่ยรอยต่อให้มีค่าสูงขึ้นจากเดิม ดังนั้นแรงดันตกคร่อมรอยต่อในขณะนี้ก็คือ  $(V_0 + V_A)$  นั่นคือ ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.13 ข. ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้รอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้จะจึงกระทำตัวคล้ายฉนวนซึ่งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้และความกว้างบริเวณปลอดพาหะในขณะนี้จะจะมีค่าเพิ่มขึ้นและกว้างมากกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้รับไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 1.13 ข.



รูปที่ 1.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความกว้างบริเวณปลอดพาหะและศักกภายในรอยต่อขณะที่ ก. ไม่มีไบอัส ข. ได้รับไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันย้อนกลับ จะทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน  $q \cdot V_A$  และนี่เองที่เราใช้อธิบายว่าจะเกิดมีกระแสของพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ดังแสดงในรูปที่ 1.14 เนื่องจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_A$  จะทำให้โฮลจากส่วนเอ็น และอิเล็กตรอนจากส่วนพีซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ ๆ บริเวณปลอดพาหะมีจำนวนลดลง และสามารถหาได้จากกฎของรอยต่อเช่นกันโดย

$$P_n|_{tn} = P_{no} \cdot e^{-qV_A/kT} \quad (1.40)$$

และ

$$n_p|_{tp} = n_{po} \cdot e^{-qV_A/kT} \quad (1.41)$$

และแสดงได้ดังรูปที่ 1.15

นอกจากนี้สมการซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของพาหะส่วนน้อยที่ใกล้ๆ บริเวณหลอดพาหะซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทาง  $X$  ก็สามารถทำได้เหมือนกับในตอนที่แล้วคือ

$$P(x) = (P_n|_{t_n} - P_{no}) e^{-x/L_h + P_{no}}$$

แทนสมการ (1.40) ลงไปจะได้ว่า

$$p(X) = (p_{no} \cdot e^{-q \cdot V_A / kT} - P_{no}) e^{-x/L_h + P_{no}}$$

ดังนั้น

$$P(x) = P_{no} \left( (e^{-q \cdot V_A / kT} - 1) \cdot e^{-x/L_h + 1} \right) \quad (1.42)$$

และในกรณีของอิเล็กตรอน

$$N(X) = N_{PO} \cdot \left( (e^{-q \cdot V_A / kT} - 1) e^{-x/L_e + 1} \right) \quad (1.43)$$

อย่างไรก็ดี จากสมการของไดโอดในตอนที่แล้ว

$$I = I_o \cdot (e^{q \cdot V_A / kT} - 1) \quad (1.31)$$

เมื่อแทนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $-V_A$  จะลงไปได้ว่า

$$I = I_o \cdot (e^{-q \cdot V_A / kT} - 1) \quad (1.44)$$

โดยปกติ ที่อุณหภูมิห้อง  $T = 300^\circ\text{K}$  เทอมของ  $e^{-q \cdot V_A / kT}$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการที่ 1.44 จะกลายเป็น

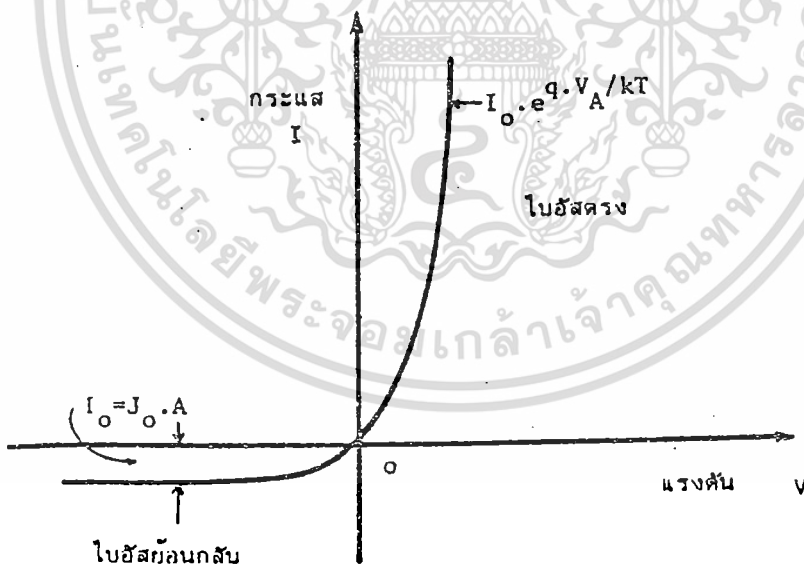
$$I = -I_o \quad (1.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเครื่องหมายลบแสดงว่าเป็นกระแสย้อนกลับ ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงจะเห็นว่ากระแส  $I_0$  เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งจะมีค่าน้อยมาก และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้ นอกจากนี้กฎของรอยต่อ

### 1.5 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

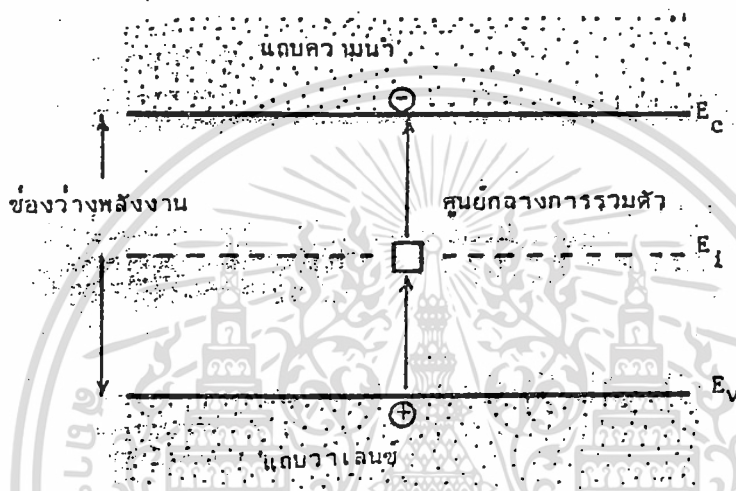
จากสมการ (1.31) ซึ่งเป็นสมการของไดโอดนั้น จะเห็นว่าสามารถนำมาใช้ได้กับการให้ไบอัสทั้งสองแบบ และถ้าหากเรารู้อยู่ละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารที่ถูกนำมาใช้สร้างรอยต่อพี-เอ็น นี้แล้ว เราก็สามารถหาค่าของกระแสอิ่มตัว  $I_0$  ได้ จากสมการ (1.30) และลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ก็อาจเขียนได้จากสมการไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 1.16 ซึ่งแกนนอนคือแรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยต่อและแกนตั้งค่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อค่าของแรงดันซึ่งปรากฏอยู่ในสมการของไดโอดนั้นคือแรงดันที่เราให้เป็นไบอัสซึ่งปรากฏตกคร่อมรอยต่อดังนั้นแรงดันไบอัสที่ให้เกือบทั้งหมดจะปรากฏตกคร่อมที่บริเวณปลดพาหะ แต่อย่างไรก็ดี ในกรณีที่ความนำไฟฟ้าของเนื้อสารมีค่าต่ำมาก หรือในกรณีที่กระแสผ่านรอยต่อมีค่าสูงๆ จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมเนื่องสารนอกบริเวณปลดพาหะมีค่ามาก เมื่อจะคิดค่าของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ จะต้องคำนึงไปลบจากแรงดันที่เราให้ไบอัสก่อนจึงจะสามารถนำไปแทนค่าในสมการของไดโอดได้



รูปที่ 1.16 แสดงลักษณะสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองสาเหตุนี้จะทำให้ผลึกเกิดความไม่สมบูรณ์ และเกิดมีระดับพลังงานที่เรียกว่า deep level เกิดขึ้นในช่องว่างของแถบพลังงาน โดยที่ระดับพลังงานนี้จะอยู่บริเวณส่วนกลางของช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงาน deep level ดังกล่าวนี จะแสดงตัวเป็นบันไดที่ปักสำหรับพาหะอิเล็กตรอนหรือโฮล ขณะเคลื่อนที่ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำ ดังแสดงในรูปที่ 1.17 และดังนั้นระดับพลังงาน deep level นี้จึงสามารถทำให้เกิด “การเกิดของพาหะ” (generation) หรือ “การรวมของพาหะ” recombination) ได้



รูปที่ 1.17 แสดงการเกิดของพาหะและการรวมของพาหะโดยระดับพลังงาน deep level ซึ่งอยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน

ในขณะที่ย่อยต่อได้รับแรงดันไปอัสย้อนกลับ แรงดันทั้งหมดจะตกคร่อมรอยต่อในส่วนของบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นที่บริเวณปลอดพาหะนี้จะไม่มีการพาหะอยู่เลย แต่อย่างไรก็ดีถ้าหากผลึกไม่สมบูรณ์ระดับพลังงาน deep level ซึ่งบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานจะแสดงตัวเป็น “ศูนย์กลางการรวมตัว” (recombination center) ซึ่งสามารถทำให้เกิดมีพาหะขึ้นได้ โดย อัตราการเกิดพาหะต่อลบ ซ.ม.

$$g = \frac{n_i}{2\tau} \quad (1.46)$$

โดยที่  $\tau$  คือ อายุของพาหะส่วนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 ประสิทธิภาพของการฉีดอิเล็กตรอนและโฮล

ในตอนทึ่ 1.3 เราเคยหามาแล้วว่า กระแสของโฮลและกระแสอิเล็กตรอนซึ่งแพร่ข้ามรอยต่อขณะได้รับไบอัสตรงคือ

$$J_h = \frac{qD_h P_{no}}{L_h} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (1.27)$$

และ

$$J_e = \frac{qD_e n_{po}}{L_e} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (1.28)$$

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างกระแสทั้งสองก็คือ

$$\frac{J_h}{J_e} = \frac{D_h P_{no}}{L_h} \cdot \frac{L_e}{D_n n_{po}} = \frac{D_h}{L_h n_n} \cdot \frac{L_e \cdot P_p}{D_e}$$

และจากสมการความสัมพันธ์ของอินส์ไตน์

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{D_h}{\mu_h} = \frac{kT}{q}$$

ดังนั้น

$$\frac{J_h}{J_e} = \frac{L_e}{L_h} \cdot \frac{\mu_h}{\mu_e} \cdot \frac{N_a}{N_d}$$

และถ้าหาสมมติว่า  $L_p = L_n$  ดังนั้น

$$\frac{J_h}{J_e} = \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \quad (1.48)$$

จากสมการ 1.48 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของกระแสโฮลและกระแสอิเล็กตรอนอาจประมาณได้ว่า เป็นอัตราส่วนของความนำไฟฟ้าของสารชนิดพี และชนิดเอ็นที่ประกอบขึ้นมาเป็นรอยต่อนั้นเอง และถ้าหาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรานิยามได้ว่า ประสิทธิภาพของการฉีดพาสีชนิดใด ก็คืออัตราส่วนของกระแสอันเนื่องมาจากพาสีนั้นกับกระแสรวม แล้วดังนั้น

$$\eta_e = \frac{J_e}{J_h + J_e} = \frac{1}{1 + \frac{J_h}{J_e}} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_n}} \quad (1.49)$$

และ

$$\eta_h = \frac{J_h}{J_h + J_e} = \frac{1}{1 + \frac{J_e}{J_h}} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_p}} \quad (1.50)$$

โดยที่  $\eta_e$  คือ ประสิทธิภาพของการฉีดของอิเล็กตรอน

$\eta_h$  คือ ประสิทธิภาพของการฉีดของโฮล

จากสมการ (1.49) และ (1.50) จะเห็นได้ว่าในกรณีที่เป็นรอยต่อแบบสมมาตรแล้ว  $\sigma_n = \sigma_p$  ดังนั้นกระแสของอิเล็กตรอนและกระแสโฮลจะเท่ากัน และสัมประสิทธิ์ของการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนจะเท่ากันคือ แต่สำหรับกรณีที่เป็นรอยต่อแบบไม่สมมาตรแล้ว  $\sigma_n \neq \sigma_p$  ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นไหลผ่านรอยต่อนั้นจะเกิดจากพาสีซึ่งเป็นพาสีส่วนมากของด้านที่มีความหนาแน่นของสารเจือสูงกว่า

ประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ ก็คือผลคูณของขนาดความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ กับค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในแต่ละส่วน ดังนั้นในส่วนที่มีความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าลบก็คือ

$$P_p = -N_a \cdot q \quad (2.51)$$

และในส่วนเอ็น ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าบวกก็คือ

$$P_n = N_d \cdot q \quad (2.52)$$

โดยที่  $N_a$  และ  $N_d$  คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับและผู้ให้ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วเราให้จุดเริ่มต้นของระยะทาง  $x$  อยู่ที่ ปลายสุดด้านหนึ่งของส่วนพีซึ่งติดกับบริเวณปลอดพาหะ ดังแสดงในรูป 2.18 (ที่  $x=0$ ) ดังนั้นจากสมการของ Poisson's equation ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าที่จุดต่างๆ กับประจุไฟฟ้ากล่าวคือ

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

เมื่อพิจารณาว่าในส่วนที่ I สำหรับ  $0 \leq x \leq d$

$$\frac{\partial^2 V_1}{\partial x^2} = -\frac{\rho_p}{\epsilon} = -\frac{q \cdot N_a}{\epsilon} \quad (2.53)$$

และในส่วน II ซึ่ง  $d_p \leq x \leq d_p + d_n$

$$\frac{\partial^2 V_2}{\partial x^2} = -\frac{\rho_n}{\epsilon} = -q \cdot \frac{N_d}{\epsilon} \quad (2.54)$$

จากสมการอนุพันธ์ (2.53) เราสามารถแก้สมการได้โดยการอินทิเกรต 2 ครั้งและใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ว่า  $x = 0$  ค่า  $V = 0$  ดังนั้นในที่สุดก็จะได้

$$V_1(x) = \frac{q \cdot N_a x^2}{2\epsilon} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแทนค่า  $x = d_p$  ในสมการ (2.55) , (2.58) เพื่อหาค่า  $C_2$

ดังนั้น

$$\frac{q \cdot N_a \cdot d_p^2}{2\epsilon} = -\frac{q \cdot N_d \cdot d_p^2}{2\epsilon} + \frac{q \cdot d_p^2 \cdot (N_a + N_d)}{\epsilon} + C_2$$

หรือ

$$C_2 = -\frac{q \cdot d_p^2 \cdot (N_a + N_d)}{2\epsilon}$$

แทนค่า  $C_2$  ลงในสมการ (2.58) ดังนั้น

$$V_2(x) = -\frac{q \cdot N_d \cdot x^2}{2\epsilon} + \frac{q \cdot d_p \cdot (N_a + N_d)}{\epsilon} \cdot x - \frac{q \cdot d_p^2 \cdot (N_a + N_d)}{2\epsilon} \quad (2.59)$$

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาว่าที่จุดไกลสุดของบริเวณปลอดพาหะคือที่  $x = d_p + d_n$  ค่าของสนามไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$\left. \frac{\partial V_2}{\partial x} \right|_{x=d_p+d_n} = 0$$

หรือ

$$0 = -\frac{q \cdot N_d}{\epsilon} \cdot (d_n + d_p) + \frac{q \cdot d_p \cdot (N_a + N_d)}{\epsilon} \quad (2.60)$$

ดังนั้น

$$N_d \cdot d_n + N_d \cdot d_p = N_a \cdot d_p + N_d \cdot d_p$$

$$\frac{d_p}{d_n} = \frac{N_d}{N_a} \quad (2.61)$$

หรือ

$$N_a \cdot d_p = N_d \cdot d_n$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.61) จะเห็นว่าอัตราส่วนของความยาวของบริเวณปลอดพาหะก็คือส่วนกลับของอัตราส่วนของความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ในกรณีที่เป็นรอยต่อแบบสมมาตรความกว้างของบริเวณปลอดพาหะซึ่งลึกเข้าไปทางด้านพี ( $d_p$ ) จะเท่ากับที่ลึกเข้าไปทางด้านเอ็น ( $d_n$ ) แต่ในกรณีที่เป็นรอยต่อแบบไม่สมมาตรกับบริเวณปลอดพาหะและแรงดันจะปรากฏที่ด้านหนึ่งด้านใด ซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือน้อยกว่า เช่นแสดงในรูปที่ 2.18 เป็นกรณีที่สารเจือชนิดพี หรือชนิดผู้รับมีความหนาแน่นมากกว่าสารเจือชนิดเอ็น ดังนั้น  $d_p < d_n$  และถ้าให้  $V_0$  คือศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $x = d_p + d_n$  ซึ่งเราถือว่าค่าสนามเป็นศูนย์

ดังนั้นจากสมการ (2.59)

$$V_2 \Big|_{x=d_p+d_n} = V_0 = -\frac{q \cdot N_d \cdot (d_p + d_n)^2}{2\epsilon} + \frac{q \cdot d_p \cdot (N_a + N_d)}{\epsilon} (d_n + d_p) - \frac{q \cdot d_p^2 (\Lambda}{2}$$

จากสมการข้างบนนี้ เมื่อพิจารณาโดยใช้สมการ (2.61) แล้วจะเห็นว่าขณะอยู่ในภาวะสมดุลของความร้อน

$$d_n = \left[ \frac{2\epsilon \cdot V_0 \cdot N_d}{q \cdot N_a \cdot (N_a + N_d)} \right]^{1/2} \quad (2.62)$$

และ

$$d_p = \left[ \frac{2\epsilon \cdot V_0 \cdot N_d}{q \cdot N_a \cdot (N_a + N_d)} \right]^{1/2} \quad (2.63)$$

ดังนั้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะทั้งหมดที่รอยต่อก็คือ

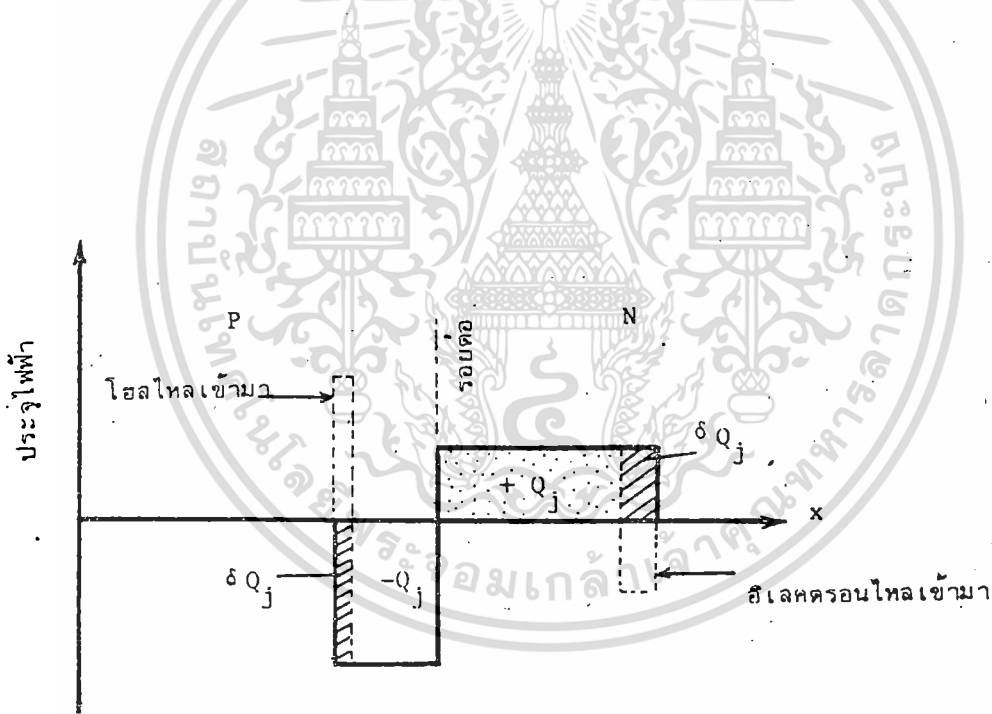
$$d_p + d_n = \left[ \frac{2\epsilon \cdot (V_0 + V_A) \cdot (N_a + N_d)}{q \cdot N_a \cdot N_d} \right]^{1/2} \quad (2.64)$$

จากสมการ (2.64) จะเห็นว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กลดลงถ้าหากว่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือจะมีค่าสูงขึ้น และสมการที่ (2.62), (2.63), (2.64) สามารถที่จะนำไปใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้กับกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสจากภายนอก เช่น ในกรณีที่รอยต่อได้รับไบอัสตรงมีค่า  $V_A$  ดังนั้นค่าของ  $V_0$  ในสมการเหล่านี้จะต้องถูกแทนด้วยค่า  $(V_0 - V_A)$  ซึ่งจะเห็นได้ว่ากรณีนี้จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าน้อยลง หรือในทางตรงกันข้าม เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า  $-V_A$  ดังนั้นค่าของ  $V_0$  ในการสมการต่างๆ ก็จะต้องถูกแทนด้วยค่า  $(V_0 + V_A)$  ซึ่งจะเห็นได้ว่า จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นกล่าวคือ

$$d_p + d_n = \left[ \frac{2\epsilon \cdot (V_0 + V_A)(N_a + N_d)}{q \cdot N_a \cdot N_d} \right]^{1/2} \quad (2.65)$$

ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจะเกี่ยวข้องกับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้วย เช่น สมมติว่ารอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_A$  ดังนั้นแรงดันที่ปรากฏตกคร่อมที่รอยต่อก็คือ  $(V_0 + V_A)$  ซึ่งเราจะเขียนเป็น  $V_j$  และสมมติว่าประจุไฟฟ้าซึ่งสะสมอยู่บริเวณรอยต่อทั้งสองด้าน แทนด้วย  $+Q_j$  และลบ  $-Q_j$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงการสะสมของประจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีซึ่งแรงดันที่รอยต่อมีค่าลดลง  $\delta V_j$  จะมีผลทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าลดลง ดังนั้นประจุไฟฟ้าซึ่งสะสมอยู่ที่รอยต่อก็จะลดลงด้วยค่า  $\delta Q_j$  ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.19 เป็นส่วนที่ถูกแรงเงา ดังนั้นค่าของความจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะ  $C_j$  ก็คือ

$$C_j = \frac{dQ_j}{dV_j} \quad (2.66)$$

ค่าของประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่สะสมอยู่บริเวณด้านทั้งสองของรอยต่อ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ก็คือ

$$Q_j = q \cdot N_d \cdot d_n = q \cdot N_a \cdot d_p \quad (2.67)$$

โดยการใช้สมการ (2.62) หรือ (2.63) เพื่อแทนค่า  $d_n$  หรือ  $d_p$  ในสมการ (2.67) และแทนค่า  $V_0$  ด้วยค่า  $V_j$  ดังนั้น

$$Q_j = \left( \frac{2\varepsilon \cdot q \cdot V_j \cdot N_a \cdot N_d}{N_a + N_d} \right)^{1/2} \quad (2.68)$$

แทนค่า  $Q_j$  ในสมการที่ (2.66) ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ในหน่วยหน่วยพื้นที่ ก็คือ

$$C_j = \frac{d}{dv_j} \left( \frac{2\varepsilon \cdot q \cdot N_a \cdot N_d}{N_a + N_d} \right)^{1/2} \cdot V_j^{1/2}$$

หรือ

$$C_j = \left( \frac{2\varepsilon \cdot q \cdot N_a \cdot N_d}{N_a + N_d} \right) \cdot \frac{1}{V_j^{1/2}} \text{ F / m}^2 \quad (2.69)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.69) จะเห็นว่าสำหรับในกรณีของรอยต่อพี-เอ็น ชนิดชั้นชั้นบันได ค่าของความจุไฟฟ้าที่รอยต่อจะแปรผกผันกับค่า  $V_j$  ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อโดย

$$\propto V_j^{1/2}$$

ซึ่ง

$$V_j = (V_0 \pm V_A)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.53)

$$\frac{\partial^2 V_1}{\partial x^2} = \frac{q \cdot N_a}{\epsilon} \quad (2.53)$$

จากนิยามของ

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\partial \epsilon}{\partial x}$$

โดยที่  $\epsilon$  คือสนามไฟฟ้า  $\frac{\partial V}{\partial x}$

ดังนั้น

$$-\frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{q \cdot N_a}{\epsilon}$$
$$-\int_0^\epsilon d\epsilon = \int_0^{d_p} q \cdot \frac{N_a}{\epsilon} dx$$

ที่  $x = d_p$  ค่า  $\epsilon$  จะเป็นค่าสูงสุด

$$-\epsilon_{\max} = q \cdot \frac{N_a}{\epsilon} \cdot x \Big|_0^{d_p}$$

$$= \frac{q \cdot N_a}{\epsilon} \cdot d_p \quad (2.72)$$

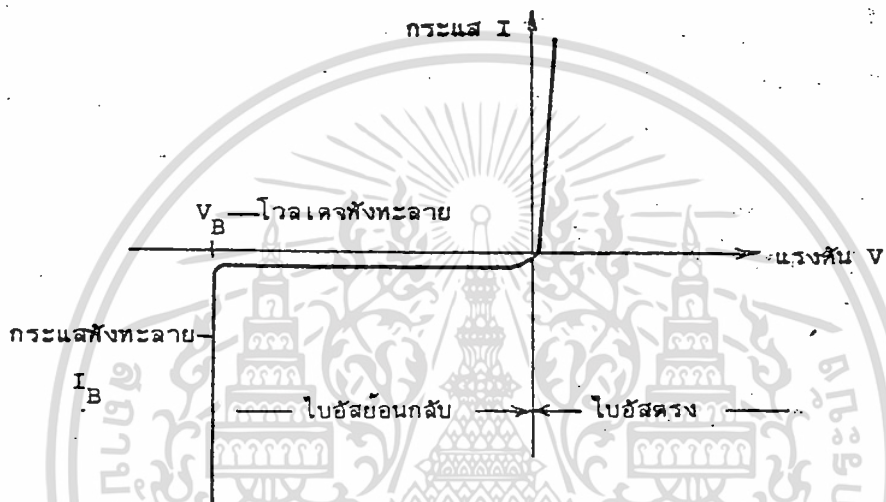
จากสมการ (2.62) แทนค่า  $d_p$  ลงใน (2.72)

ดังนั้น

$$-\epsilon_{\max} = q \frac{N_a}{\epsilon} \left( \frac{2 \cdot \epsilon \cdot V_o \cdot N_d}{q \cdot N_d \cdot (N_a + N_d)} \right)^{1/2} \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

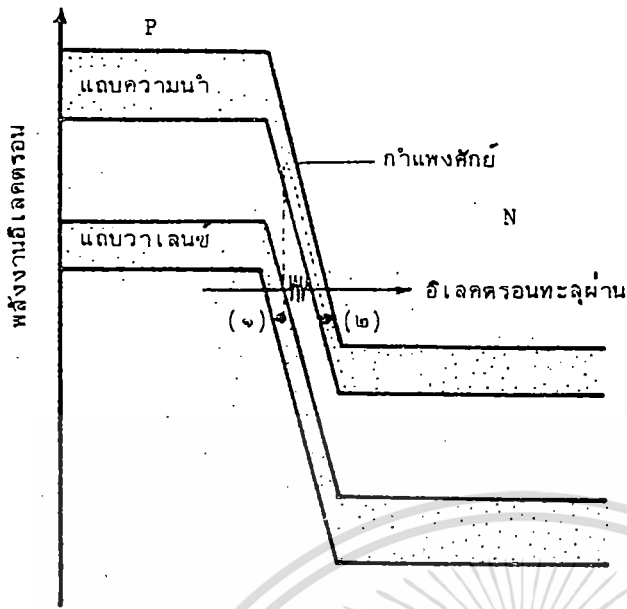
กันข้ามกับระดับพลังงานที่ว่าง ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 2 ในแถบความนำของด้านเอ็น โดยมีกำแพงศักย์ขวางกั้นอยู่ เมื่อรอยต่อไบอัสย้อนกลับค่าหนึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่บริเวณรอยต่อที่มีค่าสูง จนมีผลทำให้อิเลคตรอนจากแถบวาเลนซ์สามารถที่จะทะลุผ่านกำแพงศักย์นี้ข้ามไปยังแถบความนำอีกด้านหนึ่งได้จึงทำให้เกิดกระแสย้อนกลับเป็นจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อ



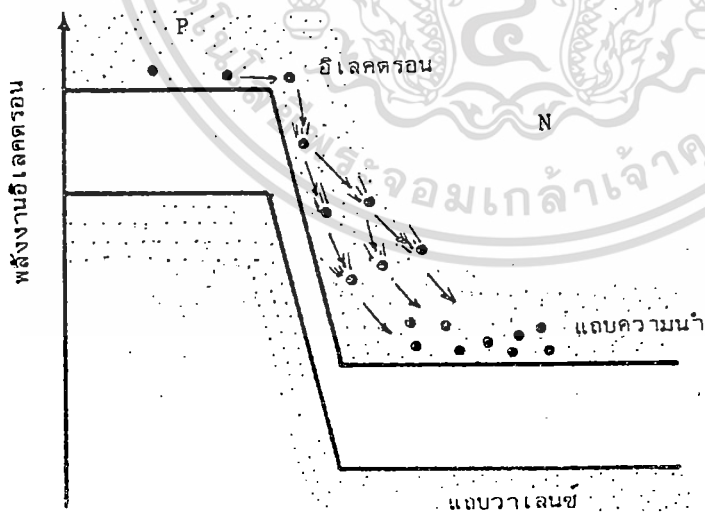
รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพีเอ็นขณะที่ได้รับแรงดันย้อนกลับมีค่ามากๆ

กรณของการพังทลายแบบอะวาลันซ์ นั้นจะเกิดขึ้นได้ในรอยต่อพีเอ็นทั่วๆ ไปถึงแม้ว่ารอยต่อนั้นจะมีระยะปลอดพาหะกว้างเช่น กรณีของรอยต่อชนิดคลาด หรือเมื่อความหนาแน่นของสารเจือในด้านทั้งสอปหรือ ด้านหนึ่งด้านใด มีค่าพอประมาณไม่สูงเท่ากับกรณีที่เกิดการพังทลายแบบซีเนอร์ ในภาวะเช่นนี้ การพังทลายจะเกิดขึ้นได้ เมื่อกระแสของพาหะ แต่ละชนิดในบริเวณปลอดพาหะ มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดการชนกันและเป็นสาเหตุให้เกิดอิเลคตรอนอิสระ และโฮลขึ้น ทั้งอิเลคตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นนี้จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ ทำให้มีความเร่งและเกิดการชนกับอะตอมอื่น ทำให้เกิดมีร ทำให้เกิดอิเลคตรอนอิสระและโฮลขึ้นใหม่ทวีคูณตามลำดับ ต่อๆ ไป คล้ายกับเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงปรากฏการณ์การพังทะลายแบบซีเนอร์ของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปที่ 2.22 แสดงปรากฏการณ์การพังทลายแบบอะวาลันซ์

ดังในรูป 2.22 ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีกระแสย้อนกลับเป็นจำนวนมากไหลผ่านรอยต่อนี้ และค่าแรงดันพังทลายจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่รอยต่อด้วย ซึ่งแตกต่างจากกรณีของ การพังทลายแบบซีเนอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับความกว้างของช่องว่างพลังงาน และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ เท่านั้น

ปกติปรากฏการณ์การพังทลายแบบอะวาลันซ์นี้จะเกิดขึ้นในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าสูงๆ

ผลของการทวีคูณการเกิดพาหะ (carrier multiplication)  $M$  แสดงได้โดย

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^n} \quad (2.75)$$

โดยที่  $n = 3.6$  สำหรับสารกึ่งตัวนำเยอรมันเนียมชนิดเอ็นและตามลำดับ

$n = 4.2$  สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นและพีตามลำดับ

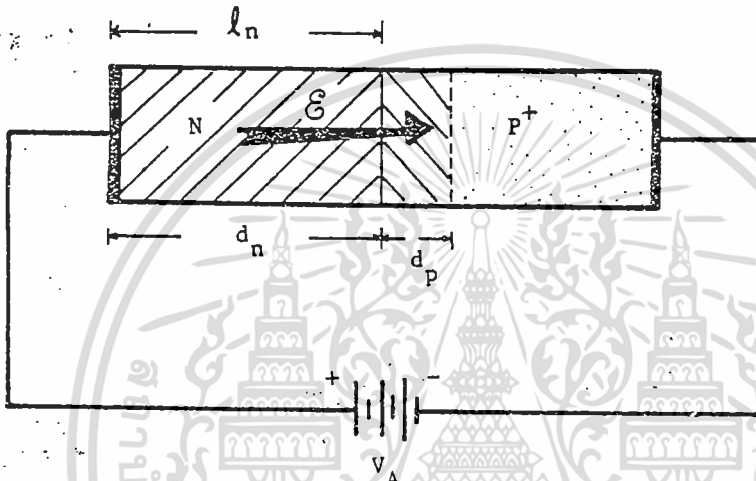
$V_A =$  แรงดันไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อ

$V_B =$  แรงดันไบอัสย้อนกลับที่จะทำให้เกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์

จากสมการ (2.75) เมื่อค่า  $V_A$  มีค่าใกล้  $V_B$  ค่าของ  $M$  หรือค่าของกระแสย้อนกลับจะเข้าใกล้ค่อนันต์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์การพังทลายเกิดขึ้น การพังทลายดังกล่าวนี้จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายให้แก่รอยต่อแต่อย่างใด โดยปกติในรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีคุณสมบัติของการพังทลายที่แน่นอนได้ และสามารถนำเอาคุณสมบัติของการพังทลายที่แน่นอนได้ และสามารถนำเอาคุณสมบัติของการพังทลายนี้ไปใช้งานให้เป็นประโยชน์โดยประกอบร่วมกับวงจรจิลคทรอนิกส์ ทำหน้าที่รักษาแรงดันให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่งๆ ได้ เช่น ซีเนอร์ไดโอด เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังมีผลอันอื่นๆ อีกที่ทำให้มีกระแสย้อนกลับเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากอย่างเห็นที่เห็นได้ คล้ายกับการพังทลายเช่น การพันซ์ทรู (punch-through) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแผ่ขยายของบริเวณปลอดพาหะออกไปกว้างมาก กระทั่งทำให้เกิดกระแสย้อนกลับเป็นจำนวนมาก ดูในรูป 2.25 เช่น ในรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งส่วนเอ็นมีความหนาแน่นของสารเจือต่ำๆ เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ บริเวณปลอดพาหะจะแผ่ขยายเข้าไปทางด้านเอ็น และที่แรงดันไบอัสค่าสูงๆ ค่าหนึ่ง เช่น  $V_{pc}$  ซึ่งเราเรียกว่า

แรงดันพังทลาย (punch through Voltage) บริเวณหลอดพาหะขยายทางด้านเอ็นถึงรอยสัมผัส

โอห์มิก



รูปที่ 2.25 แสดงปรากฏการณ์พังทลายในรอยต่อ-เอ็น

ในส่วนเอ็นจะเกิดพาหะส่วนน้อยเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก และถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทำให้เคลื่อนที่ไปทางด้านพี ทำให้มีกระแสย้อนกลับไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก เราเรียกไดโอดในภาวะเช่นนี้ว่า เกิดการ พังทลาย โดยที่เราสามารถที่จะหาค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการพังทลายในรอยต่อชนิดชั้นนั้นได้โดยพิจารณาจากสมการ (2.63) ซึ่งเป็นความกว้างของบริเวณหลอดพาหะทางด้านเอ็น ในขณะที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ  $V$

$$d_n = \left( \frac{2\epsilon(V_0 + V)N_a}{q \cdot N_d(N_a + N_d)} \right)^{1/2} \quad (2.63)$$

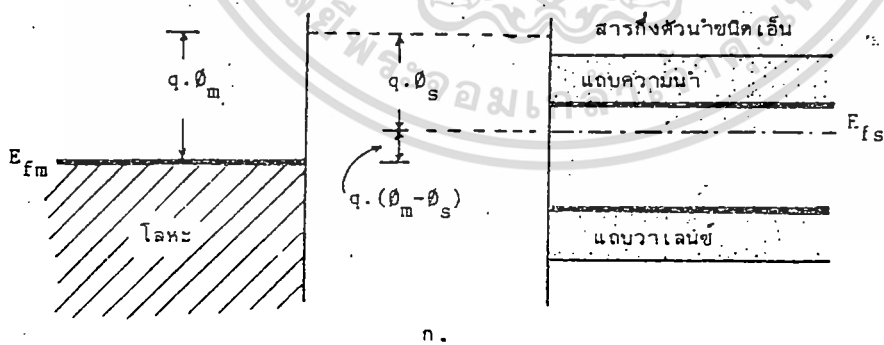
ถ้าหากเราพิจารณาว่า  $N_a \gg N_d$  และ  $V \gg V_0$  แล้ว ดังนั้นจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปที่ปลายทั้งสองด้านของไดโอดจะถูกสร้างรอยสัมผัสโอห์มิกเพื่อการต่อเส้นลวดความนำมารอยสัมผัสโอห์มิกนี้สร้างขึ้นได้โดยอาศัยการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำและโลหะ เช่นอลูมิเนียมเป็นต้น แต่อย่างไรก็ดี รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ อาจจะไม่ใช่อรอยสัมผัสโอห์มิกก็ได้ เช่น บางครั้งอาจแสดงคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำ ที่สัมผัสกัน นอกจากนี้เห็นว่า ไม่ว่าจะรอยสัมผัสหรือรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จะมีคุณสมบัติเป็น รอยสัมผัสโอห์มิก หรือ รอยสัมผัสแบบเคตีไฟร์ก็ตาม ต่างก็ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดีดังนั้นในตอนนี้อาจได้พิจารณาถึงคุณสมบัติของรอยต่อที่ถูกสร้างขึ้นระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพีต่อไปตามลำดับ

### 2.11.1 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ถ้าหากเราสมมติให้ฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ คือ  $\phi_m$  และมีค่ามากกว่า ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น  $\phi_s$  ดังนั้นลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานโลหะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถเขียนแยกกันได้ดีดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ก) และเมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังกล่าวนี้มาสัมผัสกัน เนื่องจากค่าของฟังก์ชันงานของสารทั้งสองจนกระทั่งในที่สุดจะอยู่ในภาวะสมดุลย์ ซึ่งการถ่ายเทพริชจะหยุดลงในภาวะนี้ระดับเฟอร์มิมีสารทั้งสองชนิดจะอยู่ที่ระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ข) ปรากฏการณ์ที่กล่าวมานี้อธิบายได้ว่า เนื่องจากอิเล็กตรอนสารกึ่งตัวนำ เคลื่อนที่ไหลผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้านโลหะจึงทำให้เกิดมีอ็อนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ขึ้นที่สารกึ่งตัวนำ และเกิดมีประจุลบขึ้นทางด้านโลหะ ทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าภายในขึ้นที่บริเวณรอยต่อ สนามไฟฟ้างกล่าวนี้



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นใน

ขณะ (ก) ก่อนสัมผัสและ (ข) ภายหลังจากสัมผัส ในกรณีที่  $\phi_m > \phi_s$

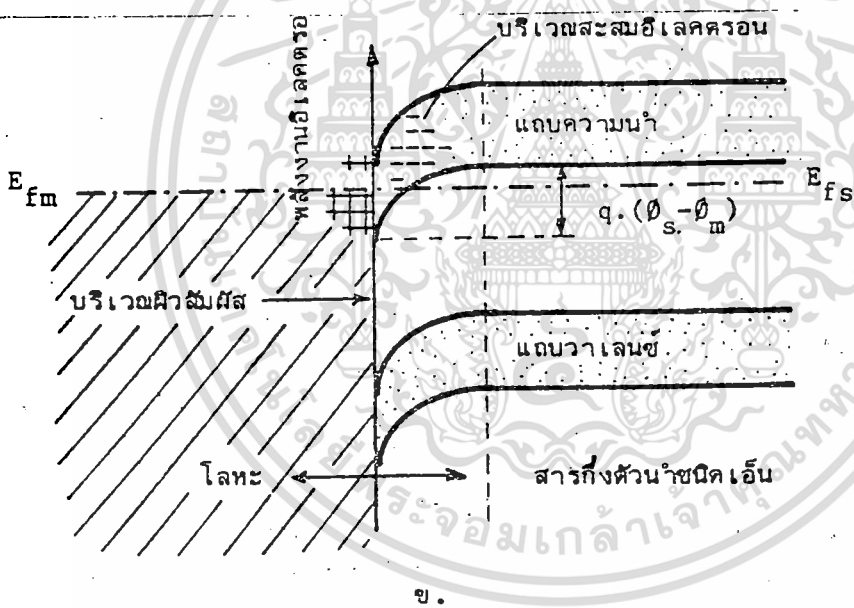
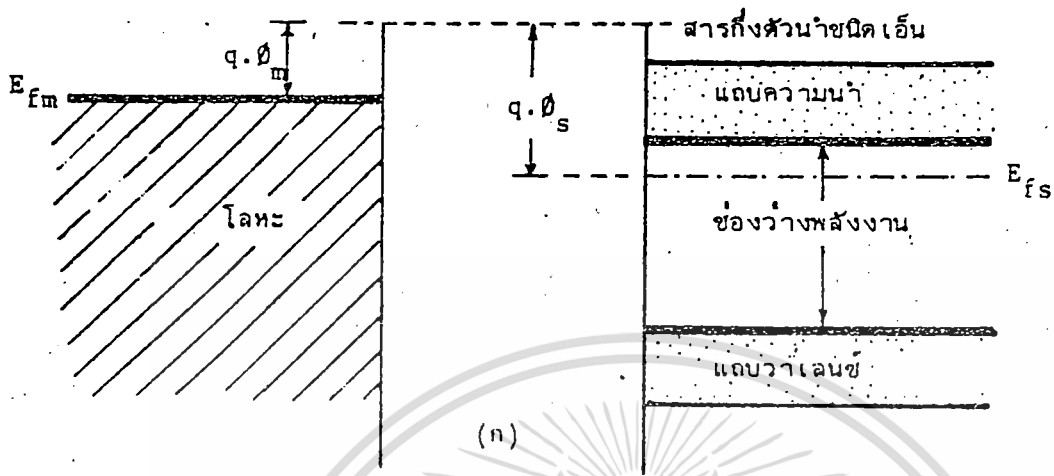
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อเราไม่คิดถึงผลของการฉีดพาหะส่วนน้อยคือโฮลแล้ว ค่าของความหนาแน่นของกระแสรวมที่รอยต่อนี้ก็คือ ผลต่างของกระแสอิเล็กตรอนทั้งสองกระแสเช่นกันก็คือ

$$J_{รวม} \propto \exp\left(\frac{-q \cdot V_B}{kT}\right) \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot V}{kT}\right) - 1\right) \quad (2.80)$$

โดยที่  $V_B$  : กำแพงศักย์ที่รอยต่อขณะสมดุลย์  
 $V$  : แรงดันไบอัสภายนอกที่ให้แก่อรอยต่อ

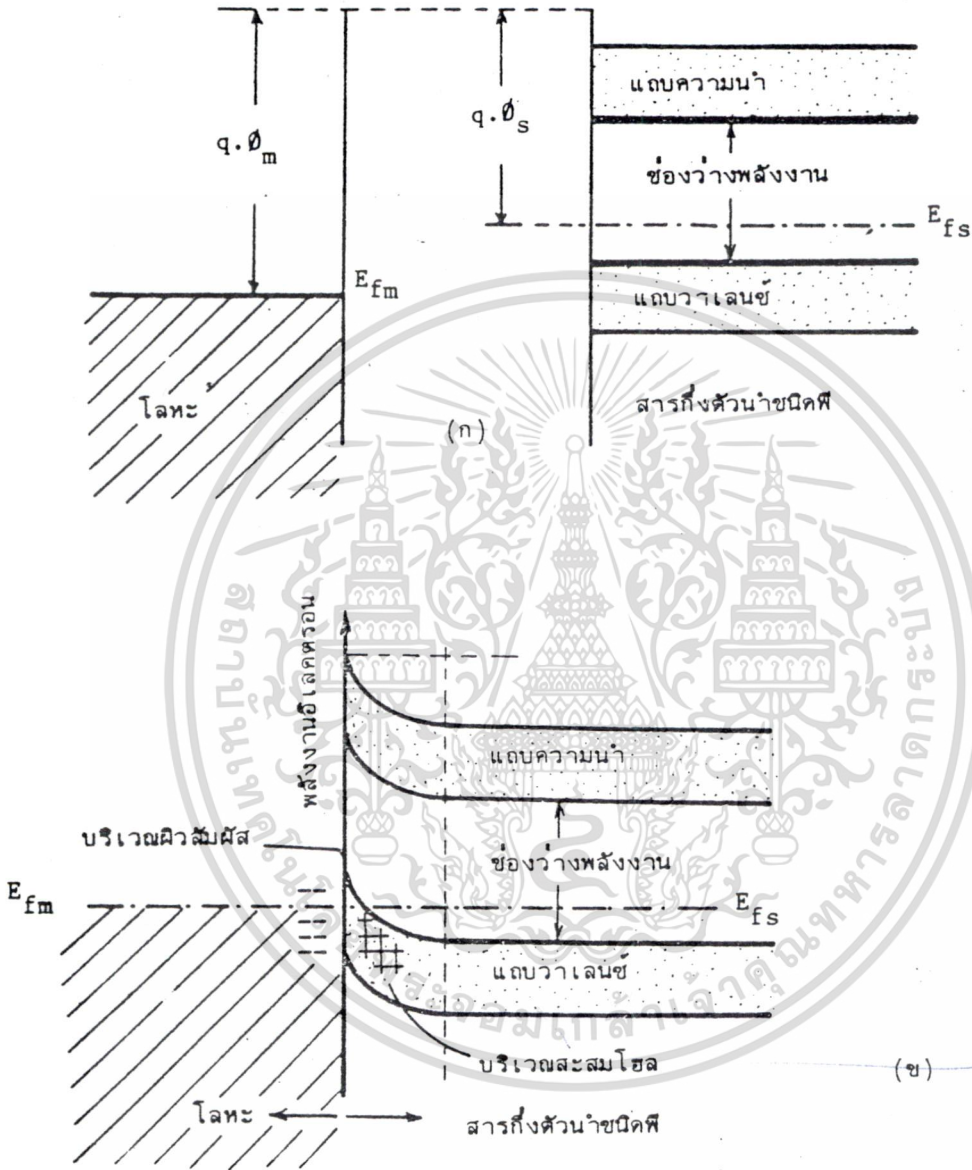
เมื่อพิจารณาสมการ (2.80) ดูให้ดีจะเห็นว่า มีลักษณะเหมือนกันกับสมการของไดโอดสำหรับรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งกล่าวถึงมาแล้ว ดังนั้นลักษณะคุณสมบัติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อนี้จึงมีลักษณะคล้ายกับของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบนี้เรียกกันว่า รอยต่อ ช็อตคีย์ (Schottky junction) หรือ ช็อตคีย์ไดโอด (Schottky diodes) และต่อไปถ้าหากเป็นกรณีซึ่ง  $\phi_m < \phi_s$  ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำเมื่อก่อนและหลังที่จะถูกนำมาสัมผัสกัน ถูกแสดงดังในรูปที่ 2.28 (ก) และ (ข) ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อก่อนสัมผัสระดับเฟอร์มิของโลหะ  $E_{fm}$  จะอยู่ที่ระดับสูงกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ  $E_{fs}$  และเมื่อนำมาสัมผัสกันแล้ว จะทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุพาหะผ่านรอยต่อ โดยที่อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุพาหะผ่านรอยต่อ โดยที่อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ทำให้เกิดอ็อนบวกขึ้นทางด้านโลหะทางด้านโลหะ และเป็นสาเหตุให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่รอยต่อ การไหลของอิเล็กตรอนจะหยุดลงเมื่อสนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงพอที่จะทำให้สามารถต้านทานการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ และเป็นภาวะสมดุลย์ ซึ่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ที่ระดับเดียวกันผ่านตลอดรอยต่อ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสะสมอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อดังในรูปที่ 2.28 (ข) ซึ่งแสดงได้โดยการงอโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นในภาวะสมดุลย์นี้ จะเห็นได้ว่าที่รอยต่อจะไม่มีกำแพงศักย์ที่จะป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไปทางด้านโลหะ กล่าวคืออิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อนี้ได้ทั้งสองทิศทาง กล่าวคือรอยต่อนี้ไม่มีคุณสมบัติในการเรคตีไฟร์ รอยต่อเช่นนี้



รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นใน  
 ขณะ (ก) ก่อนสัมผัสและ (ข) ภายหลังจากสัมผัส ในกรณีที่  $\phi_m < \phi_s$

เราเรียกว่า รอยต่อแบบโอห์มิก หรือรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีในขณะ (ก) ก่อนสัมผัส และ (ข) ภายหลังจากสัมผัส ในกรณีที่  $\phi_s < \phi_m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย/ผู้วิจัยหลัก/ผู้วิจัยร่วม

#### 1. หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นายจิรวัดน์ ปานกลาง  
ภาษาอังกฤษ) Mr. Jirawath Parnklang

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 6

#### 3. ประวัติการศึกษา

ปีที่ยังการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อ ปริญญาและ ชื่อเต็ม	สาขาวิชา	วิชาเอก	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2535	ปริญญาโท	วศ.ม. วิศวกรรม ศาสตร์ มหาบัณฑิต	วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระ บัง	ไทย
2531	ปริญญาตรี	วท.บ. วิทยาศาสตร์ บัณฑิต	ฟิสิกส์ ประยุกต์	โซลิตเซลล์ อิเล็กทรอนิกส์	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระ บัง	ไทย

#### 4. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชา

วิศวกรรมพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ (Solar Electricity Engineering)

#### 5. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ : ระบุสถานภาพในการทำ วิจัยว่า เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละเรื่อง

5.1 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อเรื่อง ปีที่พิมพ์และสถานภาพในการทำวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้