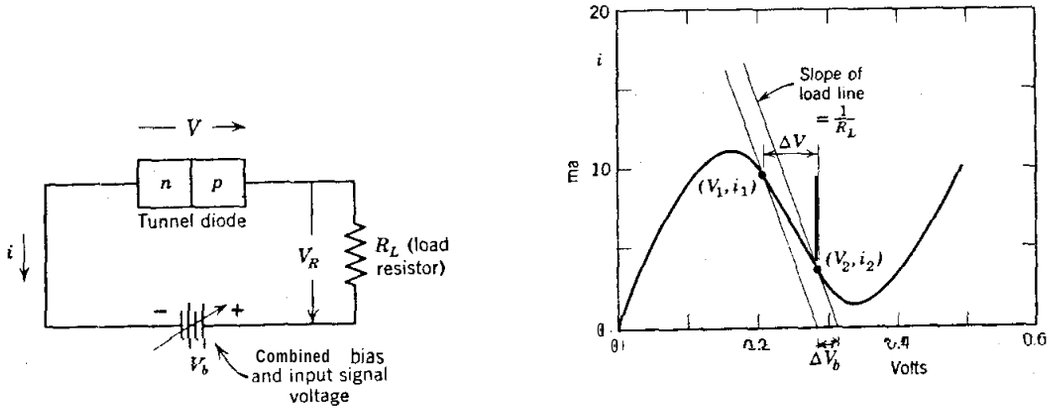
เลเตอร์ ในกรณีการใช้งานแบบแอมปลิฟายเออร์ เมื่อใส่สัญญาณให้กับทันเนลไดโอดช่วง NDC ในลักษณะของไบอัสตาม และพิจารณาจากรูป 6.17 ถ้าเลือก $R_L$ ที่ทำให้ความชันของโหลดไลน์ (load line) มากกว่าความชันของ NDC เล็กน้อย จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของ $V_b$ เพียงเล็กน้อยจะทำให้ $V_R$ เปลี่ยนแปลงไปมากกว่า




รูป 6.17 การขยายสัญญาณโดยทันเนลไดโอด

เนื่องจากขบวนการลอดทะลุเกิดขึ้นเกือบจะทันทีทันใดดังนั้นทันเนลไดโอดจึงสามารถทำงานได้ แม้ความถี่ของสัญญาณจะสูงมาก เช่นระดับ 10 $GH_z$

## 6.4 กันน์ไดโอด

สำหรับกันน์ไดโอดนี้คุณลักษณะต่างๆ เกิดจากสภาพก้อนสารทั้งก้อน (bulk) มิได้มาจากคุณสมบัติของผิวสัมผัสหรือรอยต่อใดๆ คือจริงๆ แล้วมิได้มีสภาพเป็นไดโอด เราสามารถใช้งานกันน์ไดโอดจากปลายทั้งสองด้านอย่างเท่าเทียมกัน (ไม่มีลักษณะของไบอัสตามหรือไบอัสย้อน) การใช้งานหรือการทำงานของกันน์ไดโอดมีพื้นฐานมาจากคุณสมบัติ NDC ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบ GaAs (ดูหัวข้อ 4.4) คุณสมบัตินี้ทำให้สามารถใช้กันน์ไดโอดในลักษณะของแอมปลิฟายเออร์ ออสซิลเลเตอร์และอนุกลที่เกี่ยวข้องอื่นๆ

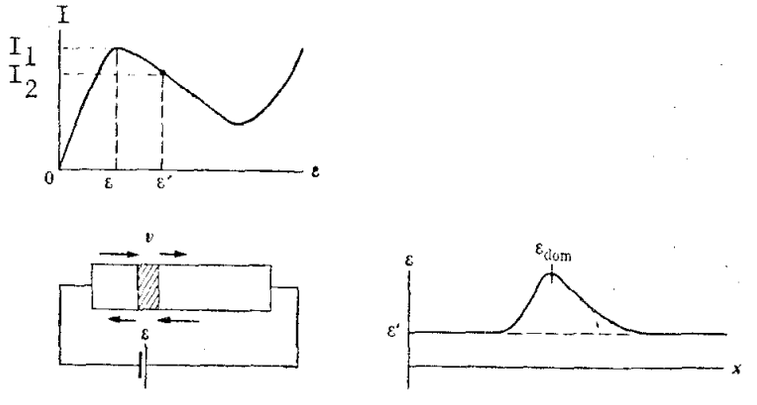
คุณสมบัติของกันน์ไดโอดที่มาจากสารทั้งก้อนนี้ทำให้กันน์ไดโอดมีข้อดีกว่าไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นธรรมดา เพราะความหนาแน่นของพาหะนำประจุสามารถทำให้มีค่าสูงมากกว่าไดโอดแบบธรรมดามากๆ ได้จากการโดป และกระแสเกิดจากการเคลื่อนย้ายของพาหะนำประจุเอก

ในช่วง NDC ของกันน์ไดโอดสามารถนำมาใช้งานได้หลายรูปแบบทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำและวงจรภายนอกพิจารณารูปแบบของ "กันโมด (Gunn mode)" ซึ่งการค้นพบครั้งแรกเป็นแบบนี้ ในรูปแบบนี้กันน์ไดโอดทำงานในลักษณะของไมโครเวฟเจนเนอร์เรเตอร์ (microwave generator) ซึ่งความถี่ (ปกติอยู่ในย่าน $GH_z$) มีค่าดังนี้

$$v_0 = v_d / L \qquad \text{.....(6-39)}$$

เมื่อ L เป็นความยาวของสารกึ่งตัวนำ (ปกติจะมีค่าประมาณ $10^2$ μ) และ $v_d$ เป็นความเร็ว "drift" เฉลี่ย จะเห็นว่าคาบของการสั่นมีค่าเท่ากับความยาวของสารกึ่งตัวนำ

สาเหตุที่ทำให้เราสังเกตพบการออสซิลเลตพิจารณาได้ดังต่อไปนี้ เนื่องจาก NDC เป็นสภาวะที่ไม่เสถียร จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเป็นในลักษณะที่มีชั้นของสนามไฟฟ้าค่าสูงเกิดขึ้นภายในสารกึ่งตัวนำซึ่งเรียกว่าโดเมน (domain)



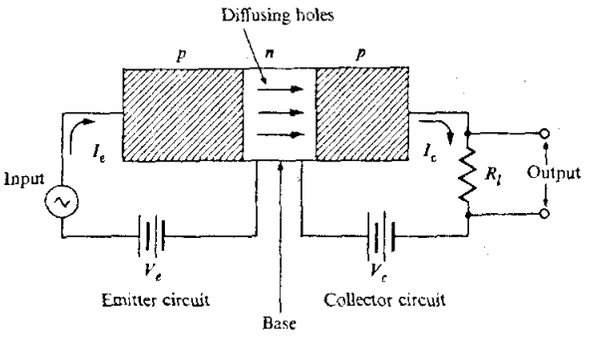

รูป 6.18 การเคลื่อนที่ของโดเมน (แรเงา) และค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลง

โดเมน เกิดจากการที่อิเลคตรอนบริเวณด้านลบก่อตัวขึ้นและเคลื่อนที่ไปทางขวา เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าดังรูป 6.18 การเคลื่อนที่ของกลุ่มอิเลคตรอนนี้จะเป็นไปพร้อมกับการค่อยๆ เปลี่ยนรูปร่างไปสู่รูปร่างที่เสถียรขึ้น เกรเดียนท์ของความหนาแน่นของกลุ่มอิเลคตรอนพวกนี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าค่าสูงคือ โดเมน ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกลุ่มอิเลคตรอน เมื่อกลุ่มอิเลคตรอนพวกนี้เดินทางไปถึงขั้วบวก (ตำแหน่ง L) ก็จะยุบตัวหายไปและมีการก่อตัวขึ้นใหม่ทางด้านลบอีก ขณะที่รูปร่างของกลุ่มอิเลคตรอนเข้าสู่รูปร่างคงที่ กระแสจะมีค่า $I_1$ และเมื่อกลุ่มอิเลคตรอนหายไปกระแสจะมีค่า $I_2$ (ซึ่งเริ่มไม่เสถียร) การก่อตัวของอิเลคตรอนที่ขั้วลบแล้วเคลื่อนย้ายไปสู่ขั้วบวกและหายไปที่นั่น จึงเกิดขึ้นซ้ำๆ ตลอดเวลา และค่ากระแสจะเปลี่ยนแปลงระหว่าง $I_2$ กับ $I_1$ ทุกขณะของการเริ่มก่อตัวและก่อนหายไป ทำให้เกิดการออสซิลเลทของกระแสขึ้น ความยาวของแท่งสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นกันน์ไดโอดจะต้องมีค่าน้อยมาก เพื่อให้การก่อตัวของกลุ่มอิเลคตรอนมีเพียงกลุ่มเดียว เพราะถ้ามีหลายกลุ่มจะเกิดการรบกวน (noise) ขึ้น

## 6.5 ทรานซิสเตอร์

ในบรรดาอนุกลสารกึ่งตัวนำทั้งหมดสิ่งที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดคือทรานซิสเตอร์ (transitor : ย่อมาจาก transfered resistor ซึ่งคำนี้เรียกตามลักษณะการทำงานของทรานซิสเตอร์ ซึ่งย้ายกระแสจากวงจรหนึ่งไปสู่อีกวงจรหนึ่ง) ทรานซิสเตอร์ทำให้เกิดการปฏิวัติทางเทคโนโลยีการสื่อสารจากการเข้าไปแทนที่หลอดและทำให้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์พัฒนาได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทรานซิสเตอร์มีหลายแบบแต่ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือจังค์ชันทรานซิสเตอร์ (junction transistor) ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป และอีกแบบหนึ่งคือฟิลด์-เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ (field effect transitor : FET) ทรานซิสเตอร์จะมีโครงสร้างหลักเป็นรอยต่อแบบพี-เอ็น-พี หรือ เอ็น-พี-เอ็น

6.5.1 <u>จังค์ชันทรานซิสเตอร์</u>




รูป 6.19 โครงสร้างและลักษณะการทำงานของจังค์ชันทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อ พี-เอ็น-พี

รูป 6.19 แสดงแนวความคิดเบื้องต้นของการทำงานของจังค์ชันทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นลักษณะ พี-เอ็น-พี จังค์ชัน (p-n-p junction) ส่วนทรานซิสเตอร์แบบ เอ็น-พี-เอ็น จะไม่กล่าวถึงเพราะการทำงานก็เป็นลักษณะเดียวกัน

ชิ้นสารกึ่งตัวนำจะถูกโดปให้ปลายทั้งสองด้านเป็นชนิดพีส่วนตรงกลางเป็นชนิดเอ็น (อาจใช้แท่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วโดปซดเซยปลายทั้งสองให้เป็นชนิดพี) ดังนั้นจะมี 2 พี-เอ็น จังค์ชัน โดยมีด้านเอ็นร่วมกัน ในภาพจะเห็นจังค์ชันด้านซ้ายต่อกับวงจรภายนอกในลักษณะไบอัสตาม ซึ่งเป็นวงจรอิมิตเตอร์ (emitter circuit) และด้านขวาต่อกับวงจรภายนอกแบบไบอัสย้อนเป็นวงจรคอลเลคเตอร์ (collector circuit) ส่วนบริเวณเอ็นตรงกลางเรียกว่า เบส (base)

การทำงานของทรานซิสเตอร์ในลักษณะแอมปลิฟายเออร์เป็นดังนี้คือ จากรูป 6.19 และเรื่องราวของพี-เอ็นจังค์ชันในหัวข้อที่แล้วจะเห็นว่าวงจรอิมิตเตอร์ซึ่งถูกไบอัสตามจะฉีดหรือ "ปล่อย (emit)" โฮลเข้ามาในเบส โฮลเหล่านี้จะแพร่ตัวในเบสซึ่งเป็นชนิดเอ็นและถูก "รวบรวม (collected)" ให้ข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านพีของวงจรคอลเลคเตอร์โดยวงจรภายนอกซึ่งให้ไบอัสย้อน ทำให้เกิดกระแสในวงจรคอลเลคเตอร์ เมื่อสัญญาณถูกป้อนรวมเข้ามากับแรงดันไบอัสทางด้านอิมิตเตอร์ จะทำให้เกิดพัลซ์ของโฮลแพร่ข้ามรอยต่อเข้ามาในเบส จากนั้นจะถูกรวบรวมให้แพร่ข้ามรอยต่อของวงจรคอลเลคเตอร์และเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสขึ้นในวงจรนั้น ซึ่งเราสามารถวัดหรือนำไปใช้ได้จากความต้านทานโหลด $R_L$ ของวงจรคอลเลคเตอร์ดังภาพ สาเหตุที่ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณหรือเป็นแอมปลิฟายเออร์ได้ก็เพราะ เราสามารถทำให้ขนาดของกระแสในวงจรอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์มีค่าเท่ากันหรือพอๆ กัน โดย $R_L$ จะเป็นเท่าใดก็ได้ ($R_L$ ที่เหมาะสมคือ $R_L$ ที่จะได้เอาท์พุทสูงสุดซึ่งจะขึ้นกับความต้านทานภายใน) ดังนั้นเอาท์พุทโวลเตจคร่อม $R_L$ จึงสามารถทำให้มีค่าสูงกว่าสัญญาณด้านอินพุทมาก และกำลังไฟฟ้าก็ถูกขยายตามไปด้วย

ถ้ากำหนดให้โวลเตจและกระแสในวงจรอิมิตเตอร์คือ $V_e$ และ $I_e$ จากสมการ (6-25)

$$I_e \qquad I_{eo}\, e^{eV_e/k_BT} \qquad \ldots\ldots\ldots(6\text{-}40)$$

เมื่อ $I_{eo}$ เป็นกระแสอิ่มตัวของอิมิตเตอร์ จากในหัวข้อที่แล้วเราทราบว่า ในวงจรอิมิตเตอร์ที่ได้รับไบอัสตามจะปล่อยโฮลเข้าไปในด้านเอ็นคือเบส โฮลเหล่านี้จะแพร่ตัวในเบสข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านพีของวงจรคอลเลคเตอร์ซึ่งมีไบอัสย้อน อย่างไรก็ดีโฮลเหล่านี้บางส่วนจะหายไป (เช่นจากการรวมตัวกันกับอิเลคตรอน) สมมุติให้เหลือโฮลอยู่ในอัตราส่วน $\alpha$ ดังนั้นกระแสในคอลเลคเตอร์จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I_c = I_{co} + \alpha I_e \qquad \text{. . , . . . . . .(6-41)}$$

เมื่อ $I_{co}$ เป็นกระแสอิ่มตัวของวงจรคอลเลคเตอร์และใช้การประมาณจากสมการ (6-27) ส่วนเทอมที่สองคือกระแสเนื่องจากโฮลที่เหลืออยู่ แต่เนื่องจาก $I_{co}$ มีค่าน้อยมาก เราจะประมาณสมการ (6-41) เป็น

$$I_c \simeq \alpha I_e \qquad \text{.....(6-42)}$$

ศักย์ไฟฟ้าคร่อมความต้านทานโหลดคือ

$$V_L = R_L I_c = \alpha R_L I_e$$

สมมุติว่าสัญญาณอินพุทที่เข้ามาทางวงจรอิมิตเตอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแส $dI_e$ อัตราขยายโวลเตจ (voltage gain) $dV_L/dV_e$ สามารถหาได้จากสมการ(6-40) และ (6-43) ได้ผลดังนี้คือ

$$\frac{dV_L}{dV_e} = \alpha \frac{R_L I_e}{k_B T / e} \qquad \text{.....(6-44)}$$

สำหรับอัตราขยายกำลัง (power gain) $dP_L / dP_e$ หาได้จากการเขียน $P_L = V_L I_c$ และ $P_e = V_e I_e$ ซึ่งจะได้

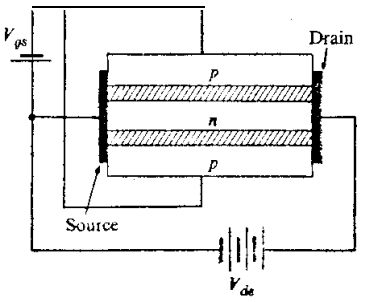
$$dP_L/dP_e = \frac{2 \alpha^2 I_e R_L}{(k_B T/e)\left[1 + \log (I_c/I_{eo})\right]} \qquad \text{.....(6-45)}$$

สมการทั้งสองใช้สำหรับการหาอัตราขยายจากสัญญาณกระแสตรงน้อยๆ (small - signal) ถ้าให้ $I_e$ = 10mA, $I_{eo}$ = 10μA, T = 300°K, $\alpha \simeq 1$ และ $R_L = 2\times10^3\ \Omega$ จะได้ค่าอัตราขยายโวลเตจและอัตราขยายกำลังประมาณ 800 และ 200 ซึ่งมีค่าสูงมากทีเดียว

สำหรับอัตราขยายกระแส $dI_c/dI_e$ มีค่าประมาณเท่ากับ $\alpha$ โดยคำนวณจากสมการ (6-42) จะเห็นว่าถ้าจะให้อัตราขยายใดๆ มีค่าสูง $\alpha$ จะต้องมีค่าสูง แต่อย่างไรก็ดี $\alpha$ จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ทั้งนี้เนื่องจากโฮลที่แพร่เข้ามาในเบสจะหายไปบางส่วนเนื่องจากขบวนการรวมตัวกันใหม่ อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ $\alpha$ มีค่าน้อยกว่า 1 ก็คือ ที่วงจรอิมิตเตอร์กระแสมิได้เกิดจากการแพร่ของโฮลอย่างเดียว แต่เกิดจากการแพร่ของอิเลคตรอนจากเบสเข้าไปในด้านพีของอิมิตเตอร์ด้วย การแพร่ของอิเลคตรอนนี้เป็นส่วนหนึ่งของ $I_e$ แต่กลับไม่มีส่วนอะไรกับ $I_c$ นั่นคือไม่ช่วยในเรื่องการขยายเลย ในการที่จะทำให้ $\alpha$ มีค่ามากหรือโฮลจากเบสผ่านไปสู่คอลเลตเตอร์มากที่สุด เบสจะต้องบางและช่วงชีวิตของโฮลในเบสจะต้องยาวนั่นคือระยะการแพร่ $L_p$ มีค่ามากกว่าความหนาของเบสมากๆ และต้องให้ $I_e$ มีองค์ประกอบจากกระแสของอิเลคตรอนน้อยที่สุดโดยการทำให้ความเข้มข้นของการเจือปนของเบสน้อยกว่าอิมิตเตอร์ด้านพีมากๆ คือรอยต่อของวงจร - อิมิตเตอร์จะเป็น $p^+ - n$ (ดูสมการ 6-38)

### 6.5.2 <u>ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์</u>

หัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงทรานซิสเตอร์แบบจังค์ชันซึ่งนับว่ามีความสำคัญและใช้กันแพร่หลายที่สุด อย่างไรก็ดียังมีทรานซิสเตอร์อีกหลายชนิดที่ออกแบบมาสำหรับใช้งานที่มีจุดประสงค์พิเศษเฉพาะบางเรื่องทรานซิสเตอร์กลุ่มนี้ที่มีความสำคัญคือ ฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์ (FET) รูป 6.20 แสดงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ดังกล่าว ซึ่งเป็น พี-เอ็น-พีจังค์ชัน สำหรับโครงสร้างแบบ เอ็น-พี-เอ็น จะไม่กล่าวถึงเพราะหลักการเป็นเช่นเดียวกัน ในรูปจะเห็นว่าแบตเตอรีต่อเข้ากับชั้นเอ็นและทำให้เกิดกระแสในทิศทางขนานกับผิวสัมผัส (รอยต่อ) กระแสนี้จะถูกควบคุมโดยสนามไฟฟ้าตามขวางซึ่งเกิดจากการต่อแรงดันไฟฟ้าเข้ากับด้านพี จากนั้นโดยการรวมหรือป้อนสัญญาณผสมเข้ามากับสนามไฟฟ้านี้ สัญญาณจะได้รับการขยายที่ความต้านทานโหลด (เอาท์พุท)




รูป 6.20 โครงสร้างของฟิลด์เอฟเฟคทรานซิสเตอร์บริเวณแรเงา คือบริเวณอับพาหะนำประจุ

การทำงานของ FET เกิดขึ้นโดยบริเวณอับพาหะนำประจุทั้งสอง (บริเวณแรเงาในรูป 6.20) ซึ่งกั้นอยู่ระหว่างชั้นเอ็นและชั้นพี การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดังกล่าว จะทำให้ความหนาของชั้นที่นำกระแส (ชั้นเอ็น) ซึ่งเรียกว่าแชนเน็ล (channel) เปลี่ยนแปลงไปด้วย และเนื่องจากชั้นของบริเวณอับพาหะนำประจุไม่มีพาหะอิสระ จึงไม่มีส่วนกับการนำกระแส ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นอับพาหะนำประจุจึงทำให้การนำกระแสของแชนเน็ลเปลี่ยนแปลงไปด้วย ถ้าชั้นอับพาหะนำประจุมีความหนามากขึ้นแชนเน็ลก็จะแคบลง คือนำกระแสได้น้อยลง ถ้าชั้นอับพาหะนำประจุมีความหนาลดลงแชนเน็ลก็จะกว้างขึ้นซึ่งทำให้นำกระแสได้มากขึ้นตามไปด้วย

ถ้าให้ความหนาของชั้นเอ็นมีค่า w และ $w_o$ เป็นความหนาของชั้นอับพาหะนำประจุที่ยื่นเข้ามาในชั้นเอ็นดังรูป 6.20 (การเกิดบริเวณอับพาหะนำประจุดูจากหัวข้อ 6.1) จะได้ความหนาของแชนเน็ลขณะที่ยังไม่มีสนามไฟฟ้าตามขวาง, $w_c$, ดังนี้

$$w_c = w - 2w_0 \qquad \text{.....(6-46)}$$

ค่า $w_o$ หาได้จากสมการ (6-10) ถ้าให้ $N_d << N_a$ จะได้

$$w_0 \simeq \left( \frac{e \bar{\varepsilon} \phi_o}{eN_d} \right)^{1/2} \qquad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}47)$$

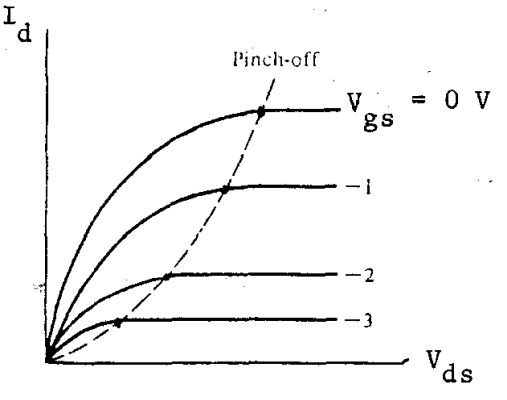
สนามไฟฟ้าตามขวางเกิดจากการใส่ไบอัสย้อนให้กับ พี-เอ็นจังค์ชัน ทั้งสองด้านโดยต่อวงจรดังรูป 6.20 ผลของการไบอัสย้อนจะทำให้ $w_o$ มีค่ามากขึ้น (สมการ 6-15) นั่นคือ $w_c$ มีค่าลดลงหรือความต้านทานในแชนเน็ลมากขึ้น ดังนั้นสนามไฟฟ้าตามขวางนี้จึงมีลักษณะเหมือนประตู "เกท (gate)" ซึ่งควบคุมการไหลของอิเลคตรอนผ่านช่องนำไฟฟ้า (แชนเน็ล) ด้านของเอ็นที่อิเลคตรอนไหลเข้ามาสู่แชนเน็ลเรียกว่า "ซอร์ช (source)" ซึ่งก็คือด้านที่ต่อกับขั้วลบนั่นเอง ส่วนด้านตรงข้ามซึ่งมีอิเลคตรอนไหลออกสู่วงจรภายนอกเรียกว่า "เดรน (drain)" ในกรณี FET ชนิด n-p-n ซอร์ชจะเป็นด้านที่ต่อกับขั้วบวกซึ่งโฮลจะไหลเข้ามาสู่แชนเน็ล

จะเห็นว่าเมื่อศักย์ไฟฟ้าของไบอัสย้อนมีค่าสูงขึ้น แชนเน็ลก็จะแคบลงและกระแสก็จะมีค่าน้อยลงนั่นคือสัญญาณที่มากับไบอัสย้อน จะมีผลทำให้เอาท์พุทเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อศักย์ไฟฟ้าไบอัสย้อนมีค่าสูงขึ้นถึงค่าหนึ่งหรือเมื่อศักย์ไฟฟ้าระหว่าง เดรนกับซอร์ช มีค่ามากขึ้นย่านอัพพาหะนำประจุจะยื่นเข้าไปในแชนเน็ลมากจนกระทั่งแชนเน็ลหรือช่องนำกระแสถูกปิด ซึ่งเรียกว่าเกิด "พินช์ออฟ (pinch off)" ศักย์ไฟฟ้าไบอัสย้อนที่ทำให้เกิดพินช์ออฟ, $V_p$, หาได้โดยการแทน $\phi_o$ ในสมการ (6-47) ด้วย $\phi_o + V_p$ และให้ $w_c$ ในสมการ (6-46) เป็นศูนย์ จากนั้นหาค่าประมาณโดยให้ $V_p >> \phi_o$ จะได้ค่า $V_p$ ดังนี้

$$V_p \simeq \frac{e N_d w^2}{8\bar{\varepsilon}} \qquad \ldots\ldots\ldots (6\text{-}48)$$

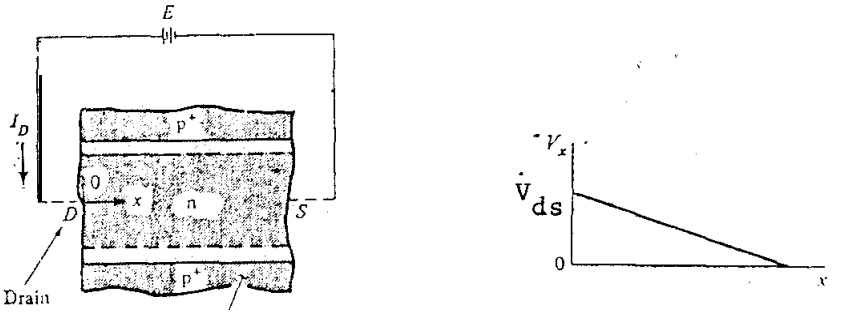
รูป 6.21 แสดงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของ FET ระหว่างกระแสเดรน (drain current) $I_d$, กับเดรน-ซอร์ชโวลเตจ (drain-source voltage) $V_{ds}$, ที่ศักย์ไบอัสย้อน

$V_{gs}$ ค่าต่างๆ จะเห็นว่าในช่วงแรกๆ กระแสกับโวลเตจสัมพันธ์กันในลักษณะไอห์มมิค คือเป็นเส้นตรง แล้วค่อยๆ โค้งเข้าสู่ค่าอิ่มตัวที่โวลเตจค่าสูง

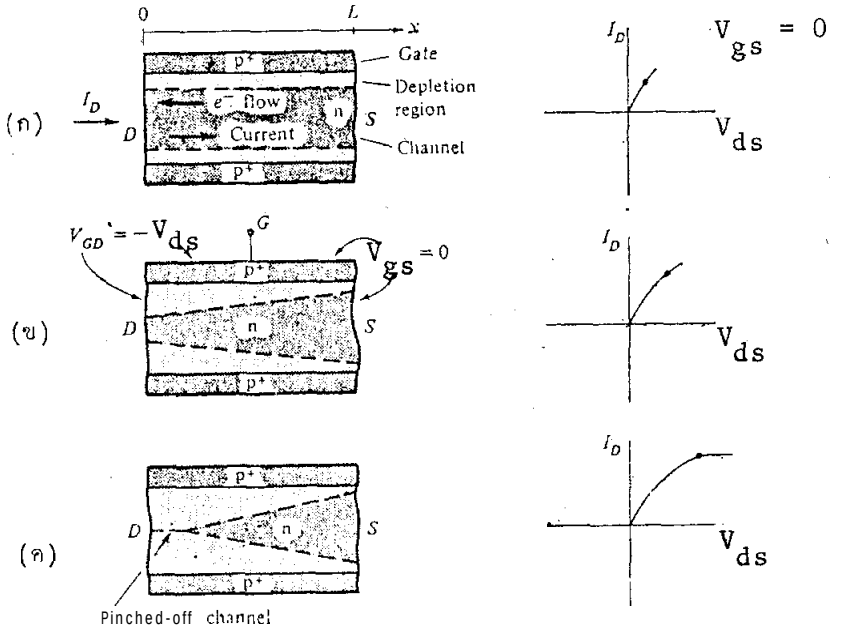



รูป 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและโวลเตจของ FET

การอิ่มตัวของกระแสเกิดขึ้นเนื่องจากการที่พินช์ออฟมิได้เกิดจากอิทธิพลของไบอัสโวลเตจเพียงอย่างเดียว พิจารณาชั้นเอ็นซึ่งเป็นแชนเน็ล จากขั้วเดรนซึ่งเป็นบวกไปสู่ขั้วซอร์ซซึ่งเป็นลบศักย์ไฟฟ้าจะค่อยๆ ลดลงไปตามตำแหน่งทั้งนี้เนื่องมาจากการตกของโวลเตจ (voltage drop ; IR) ซึ่งถ้า $I_d$ ยิ่งมีค่ามากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก็จะยิ่งมาก รูป 6.22 แสดงการลดลงของศักย์ไฟฟ้าดังกล่าว ดังนั้นบริเวณใกล้ๆ เดรนจะมีศักย์ไฟฟ้าบวกมากกว่าด้านซอร์ซ และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตามขวางขึ้น ซึ่งจะทำให้ย่านอับพาหะนำประจุยื่นเข้ามาในแชนเน็ลมากกว่าเดิมโดยที่บริเวณเดรนจะยื่นเข้ามามากกว่าบริเวณซอร์ซ ยิ่ง $I_d$ (หรือ $V_{ds}$) มีค่ามากบริเวณที่ยื่นเข้ามาก็จะยิ่งมากและเกิดพินช์ออฟขึ้น (แชนเน็ลถูกปิดที่บริเวณเดรน) รูป 6.23 แสดงการยื่นเข้ามาของย่านอับพาหะนำประจุเนื่องจาก $I_d$ เมื่อ $V_{gs}$ ยังเป็นศูนย์




รูป 6.22 การลดลงของศักย์ไฟฟ้าในแชนเน็ล




รูป 6.23 แสดงการเกิดพินช์ออฟ เริ่มจาก $V_{ds}$ น้อยๆ การเปลี่ยนแปลงเป็นแบบโอห์มมิค จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวหลังพินช์ออฟ

ศักย์ไฟฟ้าภายในดังกล่าวซึ่งจะเกิดขึ้นแม้ไม่มี $V_{gs}$ นี้ จะเป็นตัวจำกัดขนาดค่าของกระแสที่จะไหลผ่านแชนเน็ลให้มีค่าสูงสุดที่ค่าอิ่มตัว ที่กระแสค่านี้จะเกิดพินช์ออฟหรือแชนเน็ลลูกปิดโดยชั้นอัปพาหะนำประจุ (แต่กระแส $I_d$ ยังคงมีอยู่เพราะถ้าไม่มีกระแสก็จะไม่มีสนามไฟฟ้าตามขวางและทำให้ไม่มีพินช์ออฟเช่นกัน)

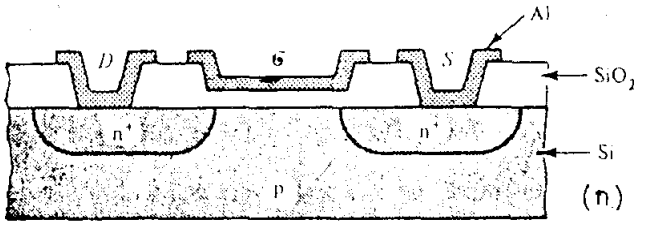
การใช้งานของ FET ในแง่แอมปลิฟายเออร์จะใช้ในย่านพินช์ออฟ จะเห็นว่าเมื่อป้อนสัญญาณผสมเข้ามากับศักย์ไฟฟ้าเกต (ศักย์ไฟฟ้าไบอัสย้อนระหว่างเกตกับซอร์ช) $V_{gs}$, จะทำให้ $V_{ds}$ เปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของ $V_{gs}$ จะทำให้ $V_{ds}$ เปลี่ยนแปลง (ตามเส้นจุดประของรูป 6.21) ในย่านพินช์ออฟนี้ค่ากระแส $I_d$ จะอยู่ในฟอร์ม (A เป็นค่าคงที่)

$$I_d = A \left( \frac{V_{gs}}{V_p} - 1 \right)^2 \qquad \text{.....(6-49)}$$

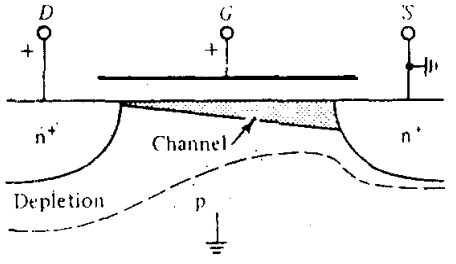
FET จะมีความไวสูงคือทำงานภายใต้สัญญาณที่มีค่าน้อยๆ และศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุด เมื่อการโดปชั้นเอ็นมีความเข้มต่ำกว่าชั้นพีมากๆ (ชั้นพีเป็น $p^+$) ผลของการโดปแบบนี้จะทำให้การเปลี่ยนแปลง $V_{gs}$ เพียงเล็กน้อยทำให้ความหนาของชั้นอับพาหะนำประจุเปลี่ยนแปลงไปมาก ซึ่งจะทำให้ $I_d$ เปลี่ยนแปลงไปมากด้วย (ใน FET จะไม่มีกระแสตามขวางเพราะศักย์ไฟฟ้า 2 ด้านเท่ากัน) FET มีข้อดีกว่าทรานซิสเตอร์แบบจังค์ชันตรงที่การขยายของ FET เกิดจากการไหลของพาหะนำประจุเอก (ในแชนเน็ล) ขณะที่ในทรานซิสเตอร์แบบจังค์ชันกระแสเกิดจากการแพร่ของพาหะนำประจุรองซึ่งพาหะนำประจุรองพวกนี้มีความหนาแน่นแปรเปลี่ยนไปตามสิ่งแวดล้อม (อุณหภูมิ, แสง) ได้ง่าย ซึ่งจะทำให้คุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ผิดไป ส่วนในกรณีของพาหะนำประจุเอกความหนาแน่นจะไม่ค่อยมีผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมมากนัก ($n \simeq N_D$)

ทรานซิสเตอร์ดังที่ได้อธิบายไว้นั้นมักจะเรียกว่า จังค์ชันเฟต (junction FET , JFET) เพื่อให้ต่างกับ FET อีกชนิดหนึ่งซึ่งชั้นพีถูกแทนด้วยฉนวนไฟฟ้าบางๆ และชั้นถัดไปเป็นโลหะศักย์ไฟฟ้าเกต (gate voltage) จะต่อเข้ากับชั้นโลหะนี้ FET ประเภทนี้คือ MISFET (metal -insulator-semiconductor FET) ตามปกติชั้นของฉนวนไฟฟ้ามักเป็นพวกออกไซด์ เช่น $S_iO_2$ ดังนั้นจึงมักนิยมเรียก MISFET นี้ว่า มอสเฟต (MOSFET) การผสมหรือป้อนสัญญาณผ่าน MOSFET ยังคงเป็นเช่นเดียวกับ JFET ถึงแม้จะมีชั้นฉนวนไฟฟ้ากั้นอยู่แต่สนามไฟฟ้าเกตก็ยังคงเข้าไปมีอิทธิพลต่อแชนเน็ล การทำงานของ MOSFET ยังคงคล้ายๆ กับ JFET รูป 6.24 แสดง

ภาพตัดขวางของ MOSFET และผลของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแชนเน็ล โดยที่ G คือขั้วเกต D เป็นขั้วเดรนและ S เป็นขั้วซอร์ซ ถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าบวกแก่ G เมื่อเทียบกับฐาน (ชนิดพี) ประจุลบจะถูกเหนี่ยวนำขึ้นใต้บริเวณฉนวนและทำให้เกิดชั้นเอ็นที่ใต้บริเวณเกตเป็นช่องนำไฟฟ้าหรือแชนเน็ลนั่นเอง ความกว้างของแชนเน็ลขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่เกตนี้




(ก) รูปตัดขวาง




(ข) ภาพแสดงช่องเอ็นซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้นและย่านปลอดพาหะ

รูป 6.24 มอสเฟท

MOSFET ใช้อย่างแพร่หลายมาก โดยเฉพาะพวกวงจรไอซี

## 6.6 อนุกลด้านแสง

ในอนุกลด้านแสงของสารกึ่งตัวนำไฟตอนจะมีบทบาทมากที่สุด อนุกลพวกนี้อาจแบ่งออกได้เป็น 3 พวกใหญ่ ๆ คือ

1. อนุกลที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นแสง ที่สำคัญคือ LED (light emitting diode) และเลเซอร์ หลักการสำคัญในอนุกลประเภทนี้คือ อิเลคโตรลูมิเนส-เซนซ์
2. อนุกลที่ใช้เป็นตัววัดความเข้มของแสง (photodetector) ได้แก่ เครื่องวัดแสงสว่าง เครื่องวัดอินฟราเรดหรืออุลตราไวโอเลต เป็นต้น หลักการของอนุกลประเภทนี้คือ การเปลี่ยนแปลงของสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสง (photoconductivity) และไฟโตโวลเทอิคเอฟเฟค (photovoltaic effect)
3. อนุกลที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า คือ เซลสุริยะ (solar cell) หลักการสำคัญของเซลสุริยะคือ โฟโตเวลเทอิคเอฟเฟค

เนื่องจากอนุกลเหล่านี้เกี่ยวพันกับโฟตอนโดยตรง รูป 6.25 จึงได้นำสเปคตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่าง ๆ มาแสดงไว้ โดยแสดงช่วงพลังงาน ความถี่และความยาวคลื่น

### 6.6.1 แอลอีดี

แอลอีดี (LED) เป็นอนุกลที่เปล่งแสงออกมาจากการกระตุ้นซึ่งส่วนใหญ่เป็นการกระตุ้นโดยกระแสไฟฟ้า แสงที่เปล่งออกมาจะอยู่ในย่านตั้งแต่อินฟราเรดขึ้นไปถึงอุลตราไวโอเลต ลักษณะของแอลอีดีส่วนใหญ่จะเป็นพี-เอ็นจังค์ชันซึ่งถูกไบอัสตาม อย่างไรก็ดีแอลอีดีบางพวกก็ใช้การกระตุ้นในลักษณะของอะวาลันช์เบรคดาวน์ ทันเนลไดโอด ฯลฯ ได้อีกหลาย ๆ แบบ เราพอจะแบ่งแอลอีดีที่สำคัญ ๆ ออกเป็น 3 พวก ตามลักษณะแสงที่เปล่งออกมาคือ

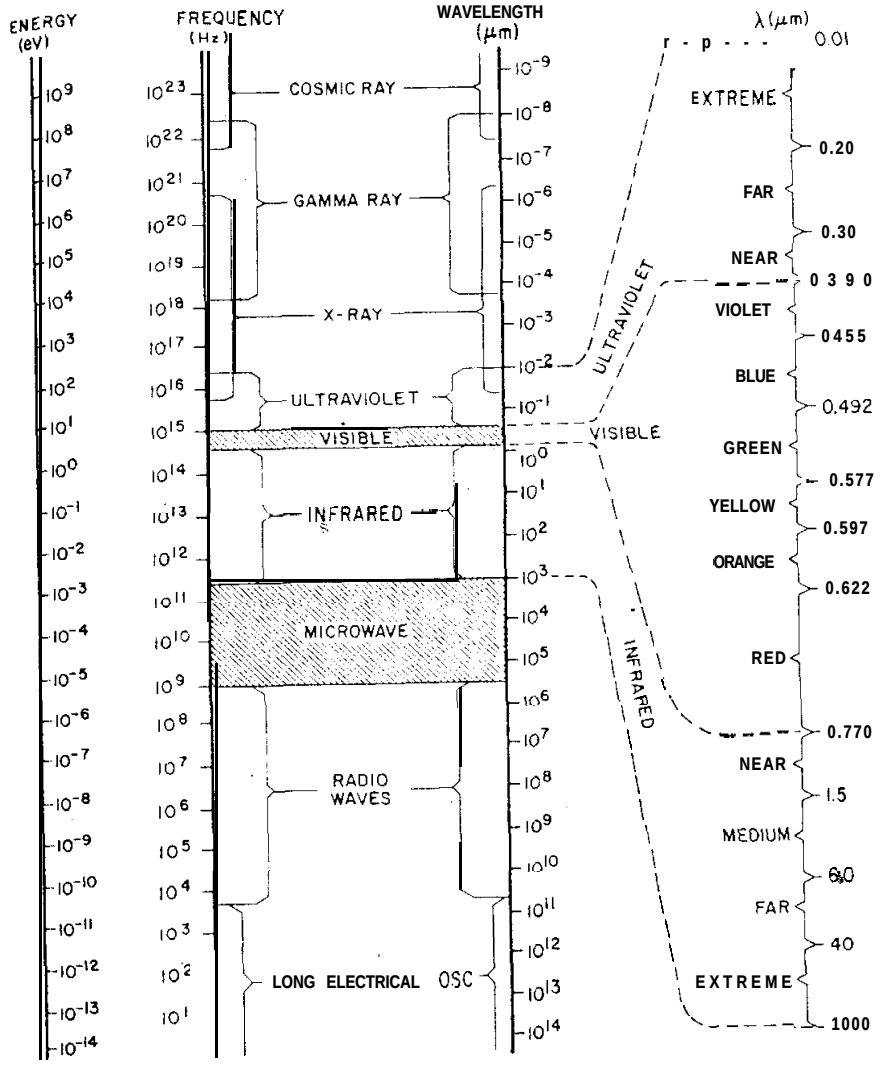
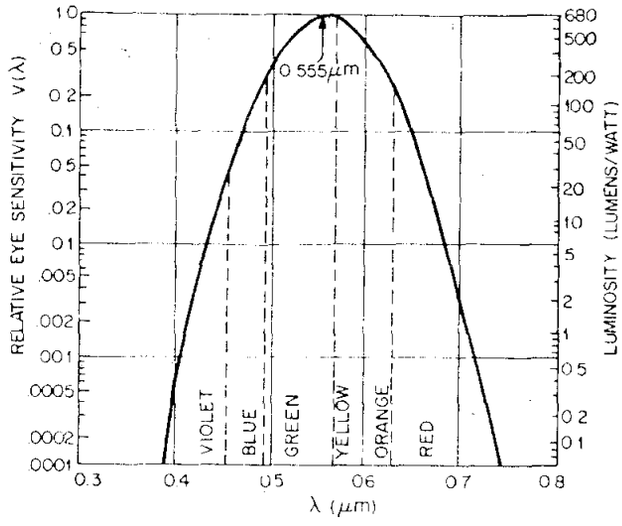



Fig. 1 Chart of electromagnetic spectrum

รูป 6.25 แผนภูมิของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

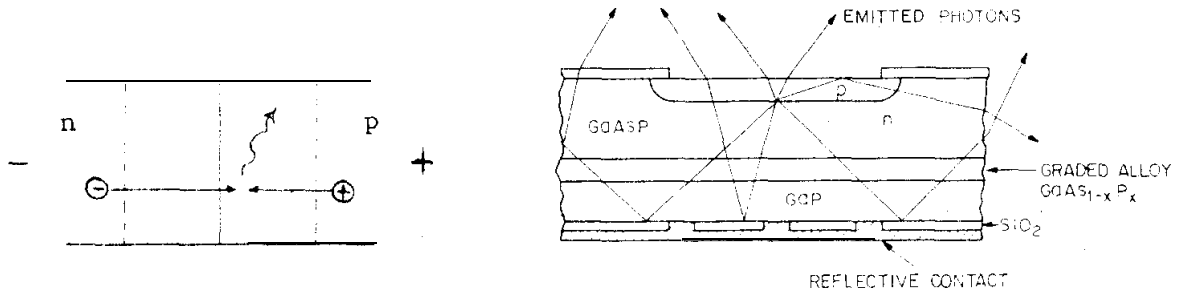
- แอลอีดีแสงสว่าง (visible LED)
- แอลอีดีอินฟราเรด (infrared LED)
- แอลอีดีอุลตราไวโอเลต (ultraviolet LED)

รูป 6.26 แสดงความไวของตามนุษย์ที่จะสัมผัสแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าตาของมนุษย์จะมองเห็นได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 0.555 μ




รูป 6.26 ความไวของตาที่จะมองเห็นแสงต่าง ๆ

การทำงานของแอลอีดีซนิดพี-เอ็นจังค์ชันซึ่งมีไบอัสตามแสดงไว้ในรูป 6.27 พิจารณาโฮลจากด้านพี เมื่อเข้าไปสู่ด้านเอ็นจะเป็นพาหะนำประจุรองและเกิดการรวมตัวกับอิเลคตรอนทำให้เปล่งแสงออกมา ส่วนอิเลคตรอนจากด้านเอ็นก็จะเป็นพาหะนองเดียวกัน ในกรณีนี้จะเห็นว่าเราต้องการให้พาหะนำประจุรองพวกนี้เกิดการรวมตัวกันใหม่เร็วที่สุด ดังนั้นข้อสำคัญประการหนึ่งของการออกแบบแอลอีดีก็คือ ช่วงชีวิตของพาหะนำประจุรองจะต้องสั้น ตามปกติช่วงชีวิตจะต้องสั้นมากจนกระทั่งขบวนการรวมตัวกันใหม่เกิดอยู่ภายในบริเวณอัยพาหะนำประจุนั่นเอง นอกจากนี้เพื่อที่จะให้

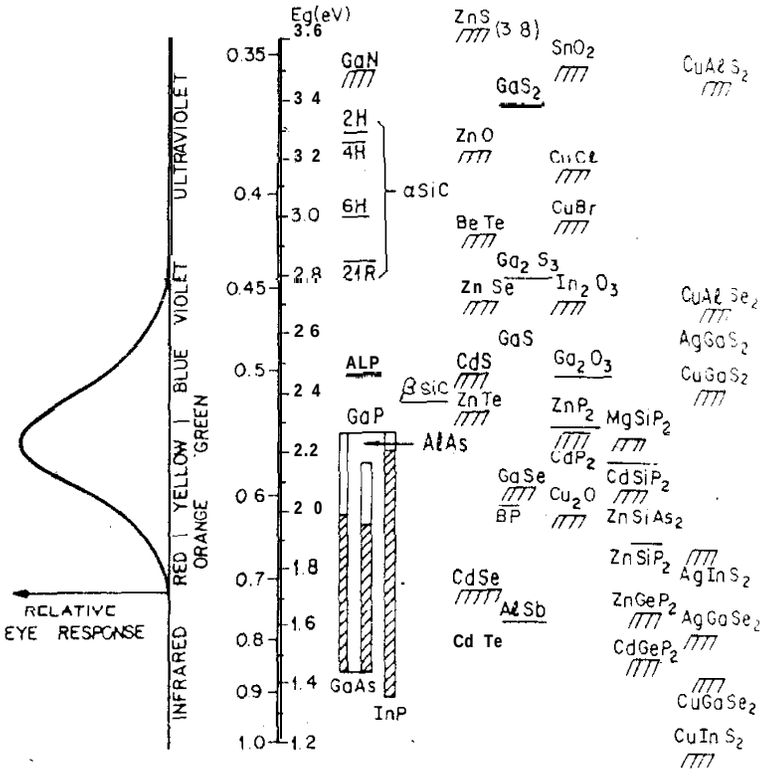



รูป 6.27 การทำงานของแอลอีดีและภาพตัดขวาง

การเปล่งแสงมีค่ามากกว่าการดูดกลืนและความเข้มของแสงที่เปล่งออกมามีค่ามาก (ดูหัวข้อ 6.6.2 เพิ่มเติม) ความหนาแน่นของพาหะนำประจุรองเหล่านี้จะต้องมาก นั่นคือกระแสไบอัสจะต้องสูง นอกจากนี้ก็คือลักษณะของแถบพลังงาน ถ้าเป็นไดเรค-แกพ จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอินไดเรค-แกพ (ซึ่งขบวนการรวมตัวกันใหม่จะต้องมีโฟนอนเข้ามาช่วย)

ในกรณีของแอลอีดีแสงสว่าง เนื่องจากตาของมนุษย์สามารถสัมผัสได้กับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือประมาณ 1.8 eV ($\sim$ 0.7 $\mu$) ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่จะใช้ทำแอลอีดีกลุ่มนี้จะต้องมี $E_g > 1.8$ eV ที่สำคัญที่สุดก็คือสารประกอบ $GaAs_{1-x}P_x$ ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่ม สาม - ห้า การแปรค่าส่วนประกอบระหว่าง As กับ P สามารถทำให้ $E_g$ เปลี่ยนแปลงไปได้ รูป 6.28 แสดงสารกึ่งตัวนำที่มี $E_g$ เหมาะสมในการประดิษฐ์แอลอีดีแบบต่าง ๆ

กรณีแอลอีดีย่านอินฟราเรดสารกึ่งตัวนำที่ใช้จะต้องมี $E_g < 1.5$ eV ที่สำคัญคือ $Ga_x In_{1-x} As_{1-y} P_y$ และ CdTe สำหรับย่านอุลตราไวโอเลต จะต้องใช้สารกึ่งตัวนำที่มี $E_g > 3$ eV เช่น ZnS เป็นต้น

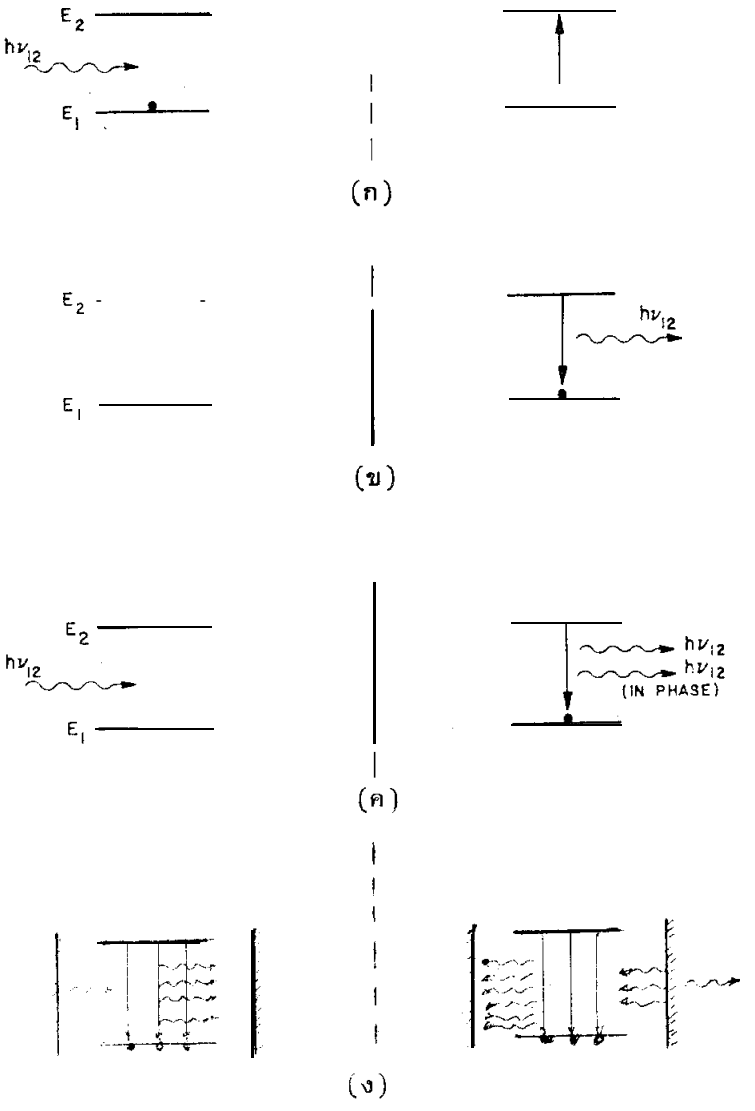



รูป 6.28 สารกึ่งตัวนำที่ใช้ประดิษฐ์แอลอีดี

## 6.6.2 เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

คำว่า LASER ย่อมาจาก "light amplification by stimulated emission of radiation" รูป 6.29 (ก) แสดงการดูดกลืนแสง รูป 6.29 (ข) เป็นการเปล่งแสงแบบสปอนเตเนียส (spontanious emission) รูป 6.29 (ค) แสดงการเปล่งแสงแบบสติมูเลท

(stimulated emission) และรูปสุดท้าย เป็นรูปแบบของการขยายแสง เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ เป็นอนุกลสารกึ่งตัวนำที่ใช้ขยายสัญญาณในย่านอินฟราเรดไปถึงย่านแสงสว่างและอุลตราไวโอเลต ส่วนอนุกลอย่างอื่น (ไดโอด, ทรานซิสเตอร์) ขยายสัญญาณในย่านไมโครเวฟหรือต่ำกว่า



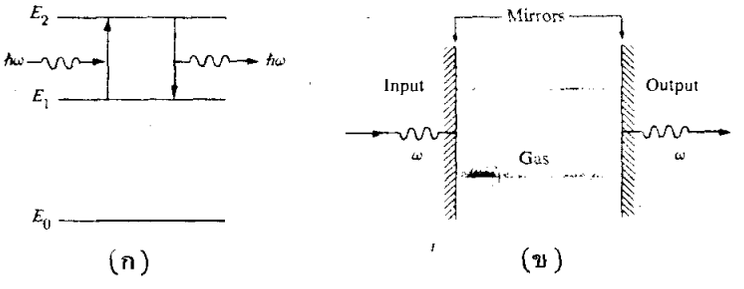

รูป 6.29 การดูดกลืนแสงและเปล่งแสงแบบต่าง ๆ

รูป 6.29 (ง) แสดงลักษณะการขยายแสงโดยการเปล่งแสงแบบสติมูเลทของระดับพลังงานที่มีความหนาแน่นของอิเลคตรอนกลับกัน (invert population) ซึ่งเป็นหลักการสำคัญในการให้เลเซอร์ทุกชนิดทำงานได้

ในกรณีของเลเซอร์แบบกาซ ถ้าพิจารณาระดับพลังงาน 1 และ 2 ใด ๆ ในภาพ 6.30 (ก) ความหนาแน่นของอิเลคตรอนที่ระดับนั้น ๆ (population) ในสภาวะสมดุลจะสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\Delta E/k_B T} \qquad \ldots\ldots\ldots(6\text{-}50)$$

เมื่อ $\Delta E = E_2 - E_1$ จะเห็นว่าในสถานะการณ์ปกติ $n_1 > n_2$




รูป 6.30 ระดับพลังงานและเลเซอร์คาวิตี

เมื่อมีแสงความถี่ $\nu = \Delta E/h$ ผ่านเข้ามา จะถูกดูดกลืนถ้าระบบกาซมีความยาว L และแสงเดินทางไปในทิศตามยาวดังรูป 6.30 (ข) ความเข้มของแสงที่ปลายสุดจะเป็น

$$I = I_o e^{-\alpha L} \qquad .....(6-51)$$

เมื่อ $\alpha$ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและ $I_o$ เป็นความเข้มที่จุดเริ่มต้น ขณะที่เกิดการดูดกลืนแสงจะเกิดสติมูเลททรานซิชันจากระดับ 2 ไปสู่ระดับ 1 ด้วย ซึ่งจะมีการเปล่งแสงออกมาและเนื่องจากแสงที่เปล่งออกมานี้เสริมกับสัญญาณแสงที่เข้าไป เราจึงเรียกการเปล่งแสงขณะนั้นว่าการเปล่งแสงแบบสติมูเลท จะเห็นว่าขบวนการดูดกลืนทำให้สัญญาณอ่อนลงแต่การเปล่งแสงจะเป็นตัวช่วยเสริมถึงแม้ทฤษฎีควอนตัมจะได้กล่าวไว้ว่า โอกาสของการเกิดการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับโอกาสของการเกิดการเปล่งแสงก็ตาม แต่ผลลัพท์จะอยู่ในลักษณะที่การดูดกลืนแสงจะมากกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากความหนาแน่นของอิเลคตรอนที่ระดับพลังงานล่างมีค่ามากกว่าของระดับบนคือ $n_1 > n_2$ ดังนั้นเราอาจเขียน

$$\alpha = B(n_1 - n_2) \qquad .....(6-52)$$

เมื่อ B เป็นค่าคงที่ที่เหมาะสม นั่นคือ $\alpha$ แปรผันกับผลต่างของความหนาแน่นของอิเลคตรอนที่ระดับพลังงานทั้งสอง และเนื่องจาก $n_1 > n_2$ ดังนั้นตามปกติ $\alpha > 0$

หลักเบื้องต้นของเลเซอร์ (ซึ่งจะต้องขยายสัญญาณ) ก็คือจะต้องทำให้ $n_2 > n_1$ นั่นคือ $\alpha < 0$ และจากสมการ (6-51) ในสถานะการณ์ใหม่นี้

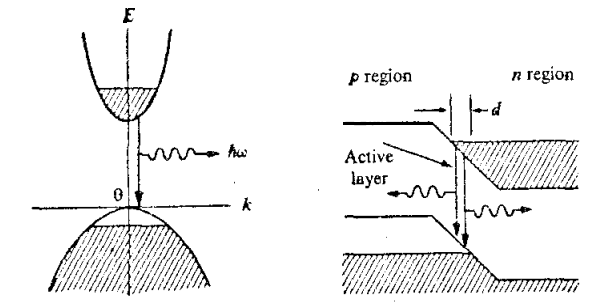
$$I = I_o e^{|\alpha| L} > I_o \qquad .....(6-53)$$

นี่นคือสัญญานถูกขยาย เพราะมีการ เปล่งแสงมากกว่าการดูดกลืน

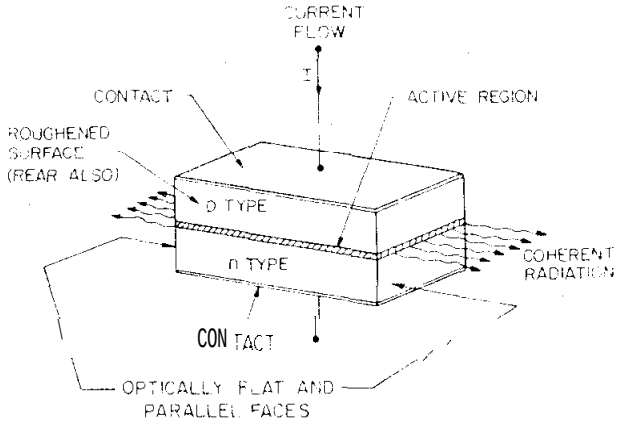
ในขณะใช้งานของ เล เซอร์ กาซจะอยู่ในคาวิตีซึ่งประกอบด้วยกระจก เงาขนานกัน 2 แผ่น (Fabry-Perot cavity, L มีค่า เป็นจำนวน เต็มของ $\lambda/2$) แสง เล เซอร์จะผ่านออกมาทางกระจกด้านหนึ่ง ข้อแม้ของการ เกิดแสง เล เซอร์ก็คือ $|\alpha| 2\ L = 1$ (กรณีการทำงานอย่างต่อ เนื่องด้วยความ เข้มคงที่) นั่นคือความ เข้มของแสงมีค่า เท่า เดิมในการ เดินทางไปครบรอบ (2L) ในคาวิตี ในกรณีนี้จะ เกิดภาวะคงที่คือ โฟตอนที่ถูกดูดกลืนกับโฟตอนที่ เดินทางออกนอกคาวิตีทั้งหมด (รวมทั้งโฟตอนที่ออกมา เป็นแสง เล เซอร์ด้วย) จะมีค่า เท่ากับโฟตอนจากการ เปล่งแสงทั้งหมด

การทำให้ $n_2 > n_1$ หรือ "population inversion" กระทำได้โดย "pump" หรือกระตุ้นโดยให้พลังงานกับอะตอมในระบบกาซหรือใช้แสงความ เข้มสูงและมีความถี่ $\nu = (E_2 - E_o)/h$ กระตุ้นให้มี $n_2$ มากขึ้น สำหรับโฟตอนที่ทำให้ เกิดการขยายคือ โฟตอนที่ เกิดจากการ เปล่งแสงโดยทรานซิชันของอิ เลคตรอนจาก $E_2$ ไปสู่ $E_1$ ที่ เดินทางขนานไปกับคาวิตีแล้วสะท้อนกลับซึ่งทำให้มีการ เปล่งแสงแบบสติมู เลทติดตามมาดังรูป 6.29 (ง) และมีบางส่วนที่ "leak" ผ่านกระจกออกไป เป็นแสง เล เซอร์

การทำงานของ เล เซอร์สารกึ่งตัวนำจะมีหลักการ เบื้องต้น เช่น เดียวกับของ เล เซอร์ชนิดกาซ แต่ เนื่องจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดขึ้นมากที่บริ เวณ "absorption edge" คือ $h\nu \geq E_g$ ดังนั้นการ เกิด เล เซอร์จะต้องทำให้ เกิดความหนาแน่นกลับกันระหว่างแถบความนำกับแถบวา เลนซ์ซึ่งทำให้ เกิดขึ้นได้โดยใช้พี-เอ็นจังค์ชันที่โดปอย่างหนัก เป็น $n^+ - p^+$ ซึ่งระดับเฟอร์มิจะ เข้าไปอยู่ในแถบพลังงาน ดังนั้น เมื่อให้ไบอัสตามจะ เกิดความหนาแน่นกลับกันของอิ เลคตรอนขึ้นที่บริ เวณ "active layer" ดังรูป 6.31 (ก) อิ เลคตรอนถูกฉีด เข้ามาจากด้าน เอ็นอย่างสม่ำ เสมอ และ เกิดการรวมตัวกับโฮลขึ้นที่ "active layer" ขณะ เดียวกันโฮลก็ถูกฉีด เข้ามาจากด้านพี เช่นกัน และ เพื่อที่จะทำให้ เกิดภาวะคงที่ดัง เช่นในกรณีของ เล เซอร์แบบกาซ (คือโฟตอนจากการ เปล่งแสงมีจำนวน เท่ากับโฟตอนที่ถูกดูดกลืนรวมกับโฟตอนที่ผ่านออกไปนอกแท่งสาร




(ก)




(ข)

รูป 6.31 ความหนาแน่นกลับกัน (ก) และ เลเซอร์สารกึ่งตัวนำ (ข)

กึ่งตัวนำ) ความหนาแน่นของอิเลคตรอนและโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาจะต้องสูงพอ นั่นคือ ความหนาแน่นของกระแสไบอัสจะต้องสูง ค่าความหนาแน่นของกระแสต่ำสุดที่จะทำให้เกิดเลเซอร์ที่สภาวะคงที่ได้เรียกว่า "threshold current density, $J_{th}$"

"แอคทีฟเลเยอร์" จะขนานกับผิวของรอยต่อพี-เอ็นและแสงเลเซอร์จะทะลุขนานออกมาดังรูป 6.31 (ข) สำหรับคาวิตีในกรณีนี้คือผิวของแท่งสารกึ่งตัวนำนั่นเองผิวดังกล่าวเป็นผิวขัดมันทำหน้าที่สะท้อนแสงกลับไปกลับมาในคาวิตีและปล่อยแสงบางส่วน "รั่ว (leak)" ออกมาเป็นเลเซอร์สำหรับ $J_{th}$ ตามปกติจะมีค่าประมาณ 100 $A/cm^2$ ที่อุณหภูมิต่ำมาก เลเซอร์-สารกึ่งตัวนำตัวแรกที่สร้างขึ้นใช้ GaAs ซึ่งให้แสง $\lambda = 8400\ A^{o}$ ที่ $77^{o}K$ และ $J_{th} \simeq 5 \times 10^{4}\ A/cm^2$ ปัจจุบันสามารถสร้างเลเซอร์สารกึ่งตัวนำซึ่งทำงานอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ

ห้อง คือ $J_{th}$ ต่ำลงมาระดับ 100 $A/cm^2$ โดยวิธีการเพิ่มจังค์ชันที่เหมาะสมเข้าไปอีกซึ่งทำให้เรียกเลเซอร์พวกนี้ว่า "heterojunction laser"

การเกิดเลเซอร์จะเกิดขึ้นเฉพาะกรณีของสารกึ่งตัวนำพวกไดเรค-แกพ เท่านั้นส่วนพวกอินไดเรค-แกพ เนื่องจากขบวนการรวมตัวกันของอิเลคตรอนกับโฮลต้องมีโฟนอนเข้ามาช่วยไม่สามารถรวมกันได้โดยตรง จึงยังไม่สามารถสร้างเป็นเลเซอร์ได้ (โอกาสของการรวมตัวกันใหม่ในสารกึ่งตัวนำอินไดเรค-แกพมีค่าน้อยกว่าของพวกไดเรคแกพ มาก)

ข้อดีของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำคือมีขนาดเล็ก (ยาว ≃ 0.1 ม.ม. ความหนาของแอคทีฟเลเยอร์ประมาณ 1 ไมครอน), ไม่มีอะไรยุ่งยากในการทำงานคือเพียงแต่ให้ไบอัสตามเท่านั้น, ประสิทธิภาพสูงสามารถผลิตได้ทีละมากๆ (mass production), สามารถเชื่อมต่อเข้ากับวงจรอิเลคโทรนิคส์ได้โดยตรง นอกจากนี้ยังสามารถผสม (modulate) สัญญาณได้โดยตรงจากกระแสไบอัสและที่สัญญาณความถี่สูงได้ด้วย สำหรับข้อเสียคือ ความยาวคลื่นของเลเซอร์จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและประกอบด้วยโฟตอนความยาวคลื่นหลายขนาด (ไม่โมโนโครแมติค) และจากการที่มีขนาดเล็ก จึงทำให้ลำแสงถ่างออก แต่อย่างไรก็ดีในวงการไฟเบอร์ออพติคส์ (fiber optics) หรือการสื่อสารโดยใช้แสงแล้ว เลเซอร์สารกึ่งตัวนำนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง

### 6.6.3 <u>เครื่องวัดแสง</u>

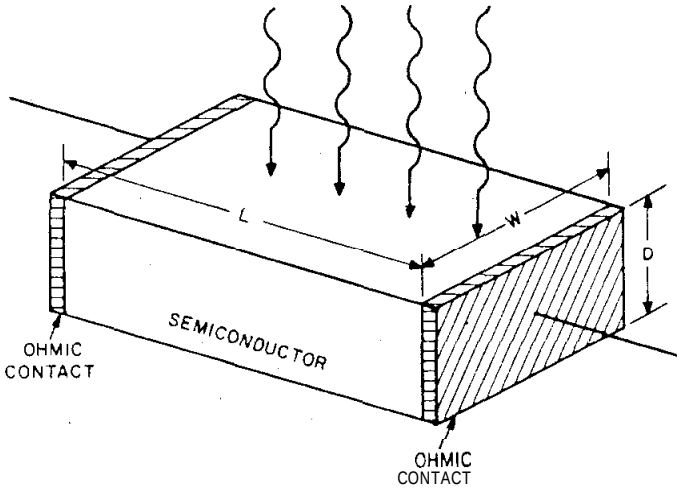
เครื่องวัดแสงหรือโฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) เป็นอนุกลสารกึ่งตัวนำที่สามารถตรวจวัดสัญญาณแสงผ่านขบวนการทางอิเลคโทรนิคส์ การทำงานอาศัยสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสงโดยจะมีขบวนการหลัก 3 ประการ คือ

1. พาหะนำประจุถูกสร้างขึ้นจากการที่แสงตกกระทบและเกิดคู่ของอิเลคตรอน-โฮล

2. พาหะที่ถูกสร้างขึ้นซึ่งมีความหนาแน่นขึ้นกับความเข้มของแสงที่ตกกระทบ จะเคลื่อนย้ายหรือแพร่ออกไปและหรือมีการขยายอย่างทวีคูณเพิ่มจำนวนมากขึ้น

3. กระแสดังกล่าวจะถูกตรวจวัดโดยวงจรภายนอกไป เป็นค่าที่เราต้องการวัด เช่น ความเข้มของแสง เป็นต้น

โฟโตดีเทคเตอร์มีความสำคัญมากในขบวนการสื่อสารโดยใช้แสงโดยเฉพาะย่านอินฟราเรด คือมีหน้าที่แปลงสัญญาณแสงที่ส่งมาตามเส้นใยแสง (optical fiber) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โฟโตดีเทคเตอร์มีหลายแบบ เช่น โฟโตคอนดัคเตอร์ (photoconductor) โฟโตไดโอด (photodiode) โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor) ทั้งหมดอาศัยการเปลี่ยนแปลงของกระแสเนื่องจากแสงที่ตกกระทบทั้งสิ้น

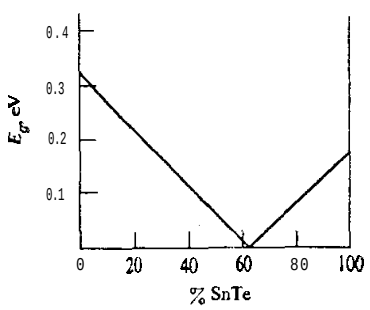



รูป 6.32 โฟโตคอนดัคเตอร์

โฟโตคอนดัคเตอร์มีลักษณะดังรูป 6.32 อาศัยการเปลี่ยนแปลงของสภาพนำไฟฟ้าจากสารกึ่งตัวนำทั้งก้อน เมื่อมีแสงตกกระทบ ที่รู้จักกันดีสร้างจาก CdS ซึ่งใช้ทั่วไปในเครื่องวัดแสงของกล้องถ่ายรูป CdS มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง 2.4 eV ที่สำคัญอีกกลุ่มหนึ่งคือ

โฟโตคอนดัคเตอร์ที่วัดอินฟราเรด สำหรับแสงอินฟราเรดนี้ถึงแม้เราจะมองไม่เห็นแต่ที่อุณหภูมิปกติสิ่งต่างๆ บนโลกจะเปล่งแสงอินฟราเรดออกมามาก งานวิจัยด้านนี้จึงมีประโยชน์อย่างยิ่ง โฟโตคอนดัคเตอร์สำหรับอินฟราเรดจะต้องมีข้อแม้หลายอย่าง เช่น $E_g$ ต้องน้อย เพื่อที่จะวัดแสงอินฟราเรดพลังงานต่ำได้ ต้องบริสุทธิ์มาก เพื่อให้ $\sigma_o$ มีค่าน้อยที่สุด (ดูสมการ 5-20) ต้องอยู่ในที่อุณหภูมิต่ำมาก เพื่อให้การโลดของอิเลคตรอนทั้งหลายหยุดชงักลง และจะเกิดการโลดเฉพาะเมื่อมีแสงอินฟราเรดผ่านเข้ามาเท่านั้น

ตะกั่วชาลโคจีไนด์ (Lead chalcogenide หรือ Lead-salts chalcogenide) ได้แก่ PbS , PbSe , PbTe ใช้กันมากในโฟโตคอนดัคเตอร์ที่วัดอินฟราเรดซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 5 μ สำหรับอินฟราเรดที่มีพลังงานต่ำๆ จะต้องใช้สารกึ่งตัวนำที่มี $E_g$ น้อยมาก ปัจจุบันเราสามารถเปลี่ยนแปลง $E_g$ ของสารกึ่งตัวนำได้หลายวิธี เช่นการผสม เป็นต้น รูป 6.33 แสดงการแปรเปลี่ยน $E_g$ จาก 0 eV ถึง 0.33 eV ของ PbTe โดยการผสมด้วย SnTe




รูป 6.33 การเปลี่ยนแปลงของ $E_g$ ใน PbTe - SnTe ที่อุณหภูมิห้อง

สำหรับแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นมากจริงๆ เรามักจะตรวจวัดจากการโลดของพาหะนำประจุจากอะตอมเจือปนแทนที่จะวัดจากการโลดข้ามช่องว่างแถบพลังงานตามปกติ อนุกลพวกนี้เรียกว่า "เอกซ์ทรินซิคโฟโตคอนดัคเตอร์" เนื่องจากระดับพลังงานของอะตอม

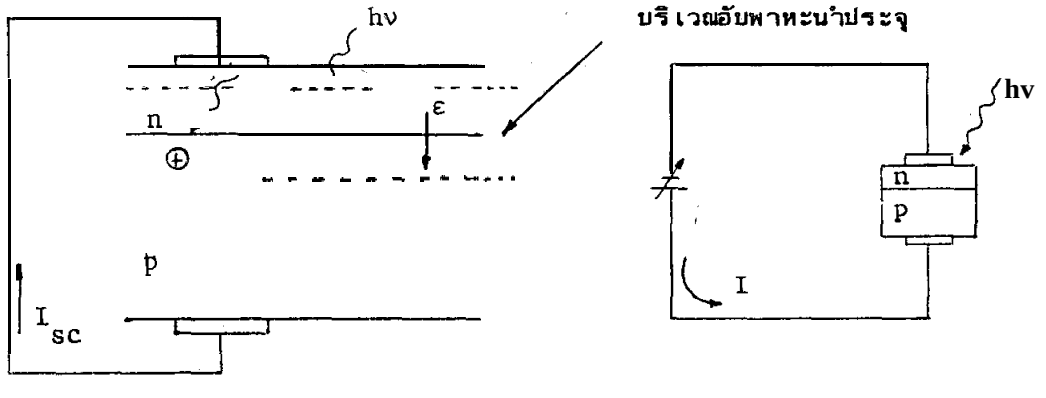
เจือปน (โดเนอร์, แอคเซฟเตอร์) มีค่าประมาณ 0.01 eV ดังนั้นจึงใช้วัดอินฟราเรดย่านความยาวคลื่น 10 - 100 μ อย่างไรก็ตีอนุกลพวกนี้จะทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ

ที่กล่าวมาทั้งหมด เป็นไฟโตคอนดัคเตอร์ซึ่งอาศัยคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำทั้งก้อน แต่สำหรับไฟโตไดโอดและไฟโตทรานซิสเตอร์จะอาศัยคุณสมบัติของจังค์ชัน และไฟโตโวลเทอิคเอฟเฟค ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไปคือ เรื่องเซลสุริยะ ซึ่งมีหลักการแบบเดียวกัน

6.6.4 **เซลสุริยะ**

สำหรับพี-เอ็นจังค์ชันใดๆ เมื่อมีแสงที่มี $h\nu > E_g$ ตกกระทบจะเกิดคู่อิเลคตรอน-โฮลขึ้น สำหรับอิเลคตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณอับพาหะนำประจุจะถูกสนามไฟฟ้าภายในกวาดออกไปโดยอิเลคตรอนเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น ส่วนโฮลเคลื่อนที่ทางด้านพี ดังรูป 6.34 ปรากฏการณ์นี้คือไฟโตโวลเทอิคเอฟเฟค

รูป 6.34 แสดงลักษณะของไฟโตไดโอด ชั้นพีหรือเอ็นที่แสงตกกระทบจะต้องบางเพื่อให้แสงถูกดูดกลืนอยู่ภายในบริเวณอับพาหะนำประจุมากที่สุด เมื่อเราต่อไบอัสตามให้กับไฟโตไดโอด คุณลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะไดโอดได้รับแสงจะอยู่ในรูป (ดูสมการ 6-23)



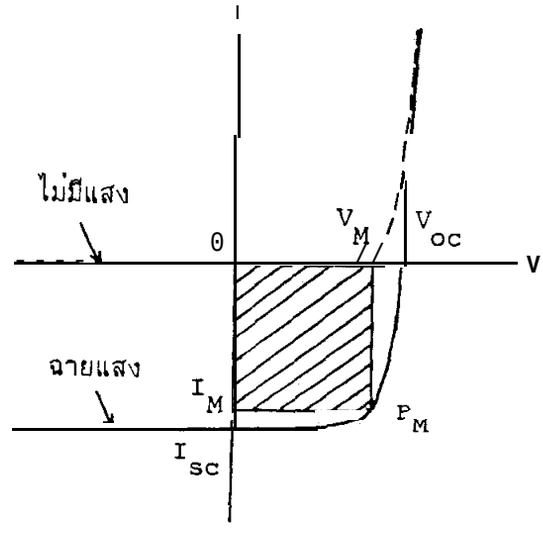

รูป 6.34 ไฟโตโวลเทอิคเอฟเฟคแสดงกระแสวงจรปิดและแสดงไบอัสตามของไฟโตไดโอด

$$I = I_o \left(e^{eV/k_BT} - 1\right) - I_{sc} \qquad \text{.....(6-54)}$$

เมื่อ $I_{sc}$ คือกระแสวงจรปิด (short-circuit current) ซึ่งเป็นกระแสที่ เกิดจากการแพร่ของพาหะที่ เกิดจากการดูดกลืนแสงในบริ เวณรอยต่อและถูกกวาดออกไปโดยสนามไฟฟ้าภายในดังรูป 6.34 ดังนั้นการทำงานของโฟโตไดโอดสำหรับวัดแสงจึงอยู่ที่คุณลักษณะกระแสแรงดันไฟฟ้าที่ เปลี่ยนไป เนื่องจากแสงดังรูป 6.35

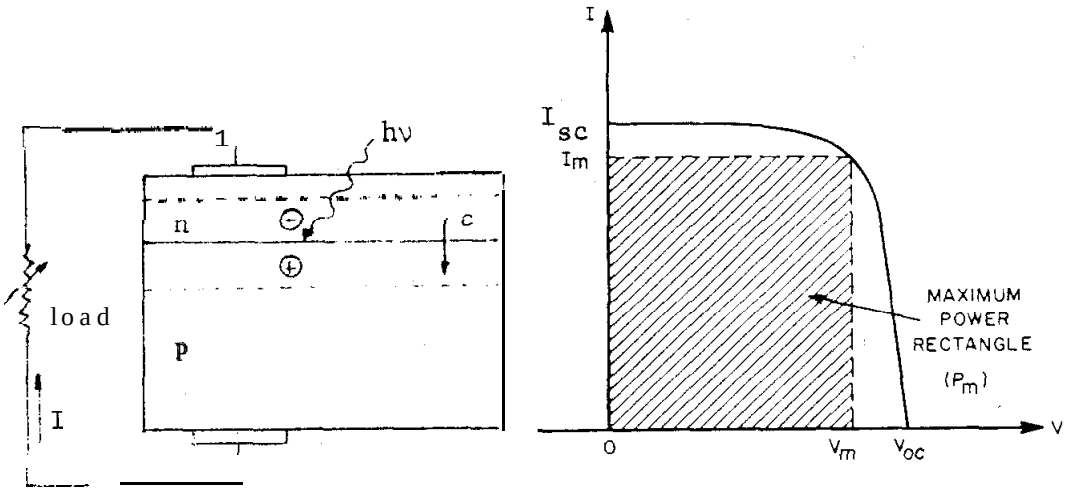
เมื่อไม่มีกระแสหรือ $I = 0$ ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะนั้นคือ แรงดันไฟฟ้าของไดโอด เนื่องจากแสงนั่น เอง ซึ่ง เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าวงจร เปิด (open-circuit voltage, $V_{oc}$) จากสมการ (6-54) จะได้

$$V_{oc} = \frac{k_BT}{e} \log \left( \frac{I_{sc} + I_o}{I_0} \right) \qquad \text{.....(6-55)}$$




รูป 6.35 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด

เมื่อโฟโตไดโอดทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ความต้านทานโหลดดังรูป 6.36 โฟโตไดโอดจะทำหน้าที่เช่นเดียวกับแบตเตอรีและเราเรียกโฟโตไดโอดนั้นว่า เซลสุริยะ คุณสมบัติกระแส-แรงดันของเซลสุริยะเป็นไปดังรูป 6.35 นั่นเอง แต่เนื่องจากเราสนใจกำลังไฟฟ้าที่-




รูป 6.36 เซลสุริยะและคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

เซลสุริยะจ่ายออกมาสู่วงจรภายนอก เราจึงเขียนในลักษณะดังรูป 6.36 จุด "max" คือจุดที่กำลังไฟฟ้าของเซลสุริยะมีค่าสูงสุด ซึ่งกระแสขณะนั้นคือ $I_m$ และแรงดันไฟฟ้าคือ $V_m$

ในสมัยแรกๆ เซลสุริยะเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่สำคัญของดาวเทียมและยานอวกาศ ปัจจุบันนอกจากจะใช้ในยานอวกาศที่ขึ้นไปในอวกาศเป็นเวลานานๆ แล้วยังนำมาใช้เป็นแหล่งกำ-เนิดไฟฟ้าบนพื้นโลกอีกด้วย ถ้าให้มุมที่ดวงอาทิตย์กระทำกับเส้นซีนิท (zenith) เป็นมุม $\theta$ แล้วเราจะนิยามให้ sec $\theta$ เป็นค่า "air mass , AM" ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้ทราบว่าบรรยากาศของโลกมีผลต่อความเข้มของแสงอาทิตย์มากน้อยเพียงใด เวลาเที่ยงตรงดวงอาทิตย์อยู่กลางท้องฟ้า $\theta = 0$ จะเป็นตำแหน่ง AM 1 ซึ่งอิทธิพลของบรรยากาศที่มีต่อแสงอาทิตย์มีค่าน้อยที่สุด และที่ $\theta = 60^{\circ}$ คือบ่าย 2 โมง หรือ 2 โมงเช้าจะเป็นตำแหน่ง AM 2 สำหรับ AM 0 เป็นค่าที่

บรรยากาศของโลกไม่มีผลต่อความเข้มของแสงอาทิตย์เลย นั่นคือ เป็นความเข้มของแสงอาทิตย์ที่บริเวณอวกาศรอบๆ โลก ที่ AM 0 กำลังของแสงอาทิตย์จะมีค่าประมาณ 1353 $W/m^2$ ที่ AM 1 925 $W/m^2$ ที่ AM 2 691 $W/m^2$ ค่าเฉลี่ยตลอดวันของกำลังแสงอาทิตย์บนผิวโลกจะใช้ที่ AM 1.5 ซึ่งมีกำลังประมาณ 844 $W/m^2$

ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลสุริยะจะขึ้นกับค่า $I_{sc}$ , $V_{oc}$ , $I_m$ และ $V_m$ คือ ถ้าให้ $\eta$ เป็นประสิทธิภาพ

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\ \%$$

หรือ
$$\eta = \frac{100\ I_m\ V_m}{P_{in}}\ \% \qquad \text{.....(6-56)}$$

เมื่อ $P_m$ คือกำลังสูงสุดที่เซลสุริยะจ่ายให้แก่วงจรภายนอก $P_{in}$ คือกำลังของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลสุริยะ

ค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่งในเรื่องราวของประสิทธิภาพของเซลสุริยะ คือค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (fill factor , F.F.) ซึ่งมีนิยามดังนี้

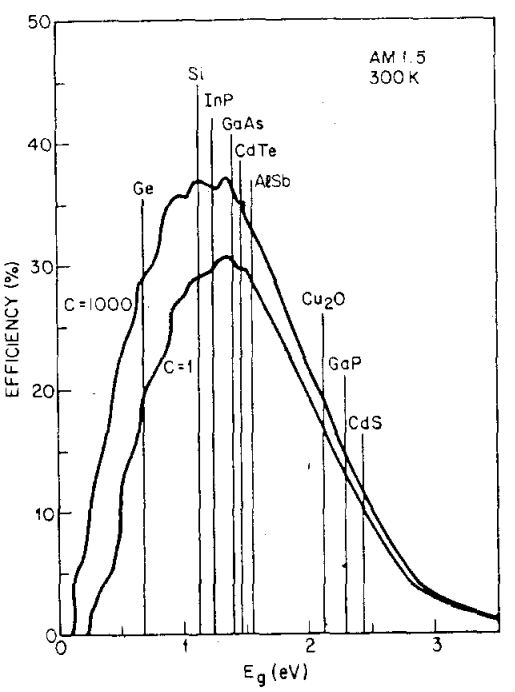
$$F.F. = I_m\ V_m\ /\ I_{sc}\ V_{oc}\ , \qquad \text{.....(6-57)}$$

ดังนั้น
$$\eta = \frac{F.F.\ I_{sc}\ V_{oc}}{P_{in}} \times 100\ \% \qquad \text{.....(6-58)}$$

เซลสุริยะที่ดีจึงต้องมีค่า F.F. , $I_{sc}$ และ $V_{oc}$ สูง ปัจจุบันเซลสุริยะที่สร้างจาก Si มี

ประสิทธิภาพประมาณ 15 % และจาก GaAs ประมาณ 20 % ค่า $E_g$ มีผลต่อ $I_{sc}$ ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลสุริยะจึงขึ้นกับ $E_g$ ด้วย รูป 6.37 แสดงประสิทธิภาพของเซลสุริยะซึ่งคำนวณจากทฤษฎีเทียบกับ $E_g$ กราฟเส้นบนเป็นประสิทธิภาพเมื่อใช้เลนส์รวมแสงอาทิตย์ให้มีความเข้ม 1000 เท่า (1000 sun)

สารกึ่งตัวนำสามารถสร้างเป็นเครื่องนับอนุภาค (counter) พลังงานสูงระดับ MeV ได้ด้วย เช่น อิเลคตรอน โปรตอน หรือพวกรังสีเอกซ์ แกมมา โดยใช้หลักการเดียวกับโฟโตคอนดัคเตอร์ นอกจากนี้ปัจจุบันเราสามารถสร้างทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน คาปาซิเตอร์ (ไดโอดทำหน้าที่เป็นคาปาซิเตอร์ได้) ไว้ในแผ่นสารกึ่งตัวนำเล็กๆ เพียงแผ่นเดียว ซึ่งอาจทำหน้าที่ต่างๆ ได้ตามต้องการโดยมีหลายๆ วงจรอยู่ในชิ้นเดียวกัน เราเรียกอนุกลพวกนี้ว่าไอซี (Integrated circuit , IC)




รูป 6.37 ประสิทธิภาพของเซลสุริยะเทียบกับ $E_g$

# บทสรุป

1. <u>พี-เอ็นจังค์ชัน</u>

การแพร่ของพาหะนำประจุของพี-เอ็นจังค์ชันทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสและสนามไฟฟ้าภายใน

$$\phi_o = \frac{k_B T}{e} \log \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$

$$\varepsilon_0 = 2\phi_o / w$$

ความหนาของบริเวณอับพาหะนำประจุมีค่าดังนี้

$$w_n = \left[ 2\bar{\varepsilon} \phi_o N_a/N_d (N_d + N_a) e \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$w_p = \left[ 2\bar{\varepsilon} \phi_o N_d/N_a (N_d + N_a) e \right]^{\frac{1}{2}}$$

2. <u>พี-เอ็นจังค์ชันไดโอด</u>

$$I = I_o (e^{eV/k_B T} - 1)$$

เมื่อ $I_o$ เป็นค่ากระแสอิ่มตัว

$$I_o = en_i^2 A \left( \frac{D_n}{L_n p_o} + \frac{D_p}{L_p n_o} \right)$$

ในกรณีไบอัสย้อนที่แรงดันไฟฟ้าค่าสูงจะเกิดการทะลายทางไฟฟ้าซึ่งมีกลไกที่สำคัญสองแบบคือ อะวาลันช์เบรคดาวน์ และซีเนอร์เบรคดาวน์ ในกรณีแรกพาหะนำประจุที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการชนของอิเลคตรอนที่มีพลังงานสูงซึ่งศักย์ทะลายกรณีนี้จะมีค่าสูง ในกรณีหลังพาหะนำประจุที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการไหลลอดทะลุรอยต่อของอิเลคตรอนซึ่งศักย์ทะลายจะมีค่าต่ำ (แต่สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงมาก)

3. <u>ทันเนลไดโอด</u>

กรณีไบอัสตามจะเกิดสภาพของ NDC ขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าช่วงหนึ่ง ทันเนลไดโอดจะมีประโยชน์มากในช่วง NDC นี้

4. <u>กันน์ไดโอด</u>

การเกิด NDC ของกันน์ไดโอดเกิดจากคุณสมบัติทั้งก้อนของสารกึ่งตัวนำ อันเนื่องมาจากโครงสร้างแถบพลังงานแบบ GaAs และไม่มีลักษณะเป็นจังค์ชันแต่อย่างใด

5. <u>ทรานซิสเตอร์</u>

จังค์ชันทรานซิสเตอร์ แบบ พี-เอ็น-พี ชั้นเอ็นตรงกลางคือเบส ด้านหนึ่งของทรานซิสเตอร์จะมีไบอัสตามเรียกว่า วงจรอิมิตเตอร์ ซึ่งจะฉีดโฮลเข้าไปในเบส อีกด้านหนึ่งจะมีไบอัสย้อนเรียกว่าวงจรคอลเลคเตอร์ ซึ่งจะรวบรวมโฮลจากเบสข้ามรอยต่อเข้าไปในวงจรคอลเลคเตอร์

$$I_c = I_{co} + \alpha I_e \simeq \alpha I_e$$

JFET แบบพี-เอ็น-พี แรงดันไบอัสย้อนจะจ่ายให้กับชั้นพีทั้งสอง เทียบกับชั้น เอ็น ความหนาของแชน เน็ลถูกควบคุมโดยสนามไฟฟ้า เกต ซึ่งจะทำให้กระแสในแชน เน็ล ถูกควบคุมด้วย

MOSFET มีการทำงานแบบ เดียวกับ JFET ต่างกันที่ชั้นพีถูกแทนที่ด้วยชั้นออกไซด์ และโลหะ แชน เนลของ MOSFET ถูก เหนี่ยวนำให้ เกิดขึ้นโดยสนามไฟฟ้าจาก เกต

6. <u>อนุกลด้านแสง</u>

- LED คือไดโอดที่ถูกไบอัสตาม

- LASER คือไดโอดที่ถูกไบอัสตาม และให้แสง เล เซอร์โดยการออกแบบคาวิตี และไบอัสด้วยกระแสมากกว่า $J_{th}$ มีความสำคัญมากใน เรื่องการสื่อสารโดยแสง

- โฟโตคอนดัค เตอร์ อาศัยสภาพนำไฟฟ้าที่ เปลี่ยนไป เนื่องจากแสง เป็นหลัก ที่สำคัญมากคือโฟโตคอนดัค เตอร์อินฟรา เรดใช้สารพวกตะกั่วซาลโคจีไนด์

- โฟโตไดโอดและ เซลสุริยะ อาศัยหลักโฟโตโวล เทอิค เอฟ เฟค คุณสมบัติ กระแส-แรงดันไฟฟ้า เมื่อได้รับแสงคือ

$$I = I_o \left(e^{eV/k_BT} - 1\right) - I_{sc}$$

เมื่อโฟโตไดโอดทำหน้าที่ทำนอง เดียวกับแบต เตอรี คือจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจร ภายนอก จะ เรียกว่า เซลสุริยะ

$$F.F. = I_m V_m / I_{sc} V_{oc}$$

$$\eta = \frac{F.F.\ I_{sc}\ V_{oc}}{P_{in}} \times 100\ \%$$

AM* = ค่า "air mass" ; * = sec $\theta$

เมื่อ $\theta$ เป็นมุมที่ดวงอาทิตย์ทำกับเส้นซินิท

# คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายการเกิดสนามไฟฟ้าภายในของพี-เอ็นจังค์ชัน

2. ที่ว่ากรณีไบอัสย้อน กระแสเกิดจากการแพร่ของพาหะนำประจุเอก จงวาดภาพและอธิบายข้อความดังกล่าว

3. ในเรื่องของจังค์ชันทรานซิสเตอร์ถ้าจะให้ $I_e$ มีส่วนจากอิเลคตรอนน้อยๆ เบสจะต้องโดปด้วยความเข้มต่ำกว่าของอิมิตเตอร์มากๆ จงอธิบายข้อความดังกล่าว (ใช้สมการ 6-38 และพิจารณา $I_o$ เป็นสองส่วนจากของอิเลคตรอนและโฮล)

4. จงอธิบายการทำงานของ MOSFET

5. ในแผนผังแถบพลังงานของพี-เอ็นจังค์ชัน อิเลคตรอนที่มีพลังงานสูงจะ "ลอย" ที่มีพลังงานต่ำจะ "จม" โดยการใช้แผนผังเดิมและพิจารณาโฮลในแถบวาเลนซ์ โดยให้โฮลที่มีพลังงานสูงจะ "จม" และพลังงานต่ำจะ "ลอย" จงพิสูจน์สมการ (6-22)

6. จงพิสูจน์สมการ (6-20)

7. ชิ้นสารกึ่งตัวนำเจอร์เมเนียมชนิดเอ็น มี $N_D = 10^{16}$ ซ.ม.$^{-3}$ พี-เอ็นจังค์ชันสร้างโดยการโดปชดเชยด้วยอินเดียม สมมติว่าความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีที่เกิดขึ้นมีค่า $3\times10^{18}$ ซ.ม.$^{-3}$

   (ก) จงคำนวณหาระดับเฟอร์มิที่ $300^{\circ}K$ ในย่านพีและย่านเอ็น

   (ข) เขียนแผนผังแถบพลังงานที่สภาวะสมดุลของจังค์ชันและหาศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสจากรูป

   (ค) เปรียบเทียบ $\phi_o$ จากข้อ (ข) กับที่คำนวณได้โดยสมการ (6-4)

8. จงพิสูจน์สมการ (6-44) และ (6-48)

9. เหตุใด เอกซ์ทรินซิคโฟโตคอนดัค เตอร์จึงทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เท่านั้น