

สัมมนาฟิสิกส์ระดับปริญญาตรี (420497) ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เสนอโดย นางสาวสิริมาศ ป้องจันทา รหัส 44044477

วันที่ 16 เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ.2547

เรื่อง ไดโอดเปล่งแสงและการประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์นพฤทธิ์ จินันทยา

บทคัดย่อ

ไดโอดเปล่งแสงเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย หลักการทำงานของไดโอดเปล่งแสงคือ เมื่อไบแอสตรงเข้าสู่ไดโอดเปล่งแสง อิเล็กตรอนจะถูกฉีดแบบแพร่ซึมจากชั้น n เข้าสู่ชั้น p และโฮลจะถูกฉีดแบบแพร่ซึมจากชั้น p เข้าสู่ชั้น n พาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดเหล่านี้ จะไปรวมตัวกับพาหะข้างมาก ผลของการรวมตัวนี้ก่อให้เกิดการเปล่งแสง ในส่วนของการประยุกต์มีการนำไดโอดเปล่งแสงไปใช้อย่างหลากหลาย ในที่นี้จะกล่าวถึงไดโอดเปล่งแสงชนิดสว่างพิเศษโดยสังเขป

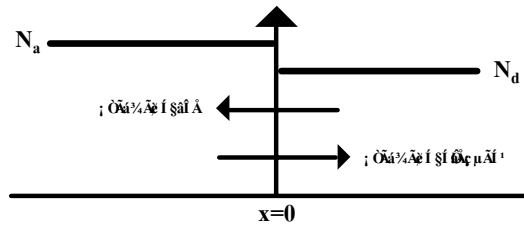
1. บทนำ

ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode : LED) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงด้วยปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence) โครงสร้างพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงเป็นรอยต่อชนิด p-n ของสารกึ่งตัวนำแสงที่เปล่งออกมา ประกอบด้วยคลื่นความถี่เดียวและเฟสต่อเนื่องกันแตกต่างจากแสงธรรมชาติที่ตาคนมองเห็น อันประกอบด้วย คลื่นซึ่งมีเฟสและความถี่ต่าง ๆ กันมารวมกัน ส่วนมากนิยมนำไดโอดเปล่งแสงมาทำตัวบ่งบอกสัญญาณปิด-เปิด ในอุปกรณ์ ไฟฟ้า สัญญาณไฟจราจร อุปกรณ์ส่องสว่างแบบต่างๆ ดันกำเนิดแสงให้กับจอภาพ เป็นตัวเลขของโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น โครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงถูกหุ้มด้วยเลนส์ที่ทำจากอีพ็อกซีอีโอดีหนึ่ง เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับชิปสารกึ่งตัวนำ (semi-conductor chip) ที่อยู่ภายใน และเป็นส่วนที่กรองช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต้องการออกมา การเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสง เกิดขึ้นจากการแผ่รังสีพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากชิปสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะให้แสงสีที่แตกต่างกันไปตามวัสดุที่ใช้ทำชิป โดยทั่วไป มักเป็นสารประกอบของธาตุแกลเลียม อาร์เซนิก และฟอสฟอรัส การนำไดโอดเปล่งแสงมาทำหลอดไฟนั้น จำเป็นต้องมีกรรมวิธีสร้างแสงสีขาว ซึ่งอาจจะใช้วิธีรวมแสงจากหลอดไดโอดเปล่งแสงหลายๆดวงเข้าด้วยกัน หรือ การใช้ฟอสฟอรัส ฉาบภายในเลนส์รวมแสงอีพ็อกซี ซึ่งจะทำให้เกิดแสงสีขาวนวล เช่นเดียวกับ หลอดฟลูออเรสเซนต์ ไดโอดเปล่งแสงมีแนวโน้มว่า จะถูกนำมาใช้แทนที่หลอดไส้ที่เราใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพราะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ

2. รอยต่อพีเอ็น

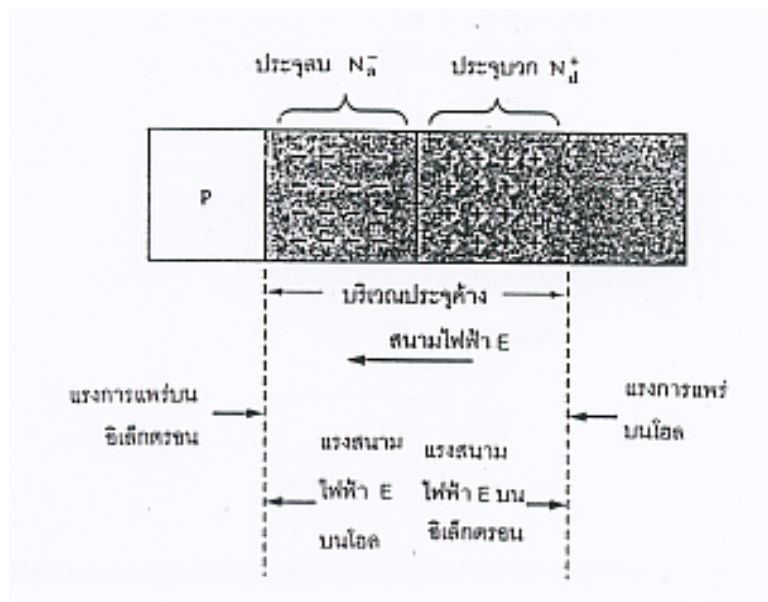
เมื่อ p และ n ถูกนำมาสัมผัสเป็นเนื้อเดียวกัน ระดับพลังงานเฟอร์มิจะคงที่ค่าเดียวกันตลอดทั้งชิ้นสารกึ่งตัวนำ รอยต่อที่แยกระหว่างบริเวณ n และ p เรียกว่า รอยต่อเมทัลลurgical junction) ความเข้มข้นการโคปสารเจือบริเวณ p และบริเวณ n แสดงดังรูปที่ 2.1 ในที่นี้ จะพิจารณาว่าเป็นรอยต่อแบบขั้นบันได (step junction) ซึ่งความเข้มข้นการโคปจะเป็นแบบสม่ำเสมอในแต่ละบริเวณ และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดของการโคปที่ตรงรอยต่อ เริ่มต้นที่รอยต่อเมทัลลurgical junction จะมีความเข้มข้นเกรเดียนต์อย่างมาก ทั้งความเข้มข้นของอิเล็กตรอนและความเข้มข้นของโฮล อิเล็กตรอนพาหะส่วนมาก (majority carrier electron) ในบริเวณ n จะเริ่มแพร่เข้าไปในส่วน p และโฮลพาหะส่วนมาก (majority carrier holes) ในส่วน p จะเริ่มแพร่เข้าไปในส่วน n ถ้าสมมุติว่าไม่มีแหล่งจ่ายจากภายนอกต่อกับสารกึ่งตัวนำแล้ว กระบวนการแพร่จะไม่สามารถกระทำต่อเนื่องได้ตลอดไป เมื่ออิเล็กตรอนแพร่จากบริเวณ n จะทิ้งประจุบวกไว้ที่อะตอมผู้ให้ (donor atoms) ในทำนองเดียวกันเมื่อโฮลแพร่จากส่วน p จะทิ้งประจุลบไว้ที่อะตอมผู้รับ (acceptor atoms) ประจุลบและประจุบวกทั้งหมดในบริเวณ p และบริเวณ n จะเหนี่ยวนำให้

เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงต่อเมทัลลोजัคัลในทิศทางจากประจุบวกไปยังประจุลบ หรือจากบริเวณ n ไปบริเวณ p



รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบการโคปของรอยต่อ pn ที่ถูกโคปอย่างสม่ำเสมอในอุดมคติ

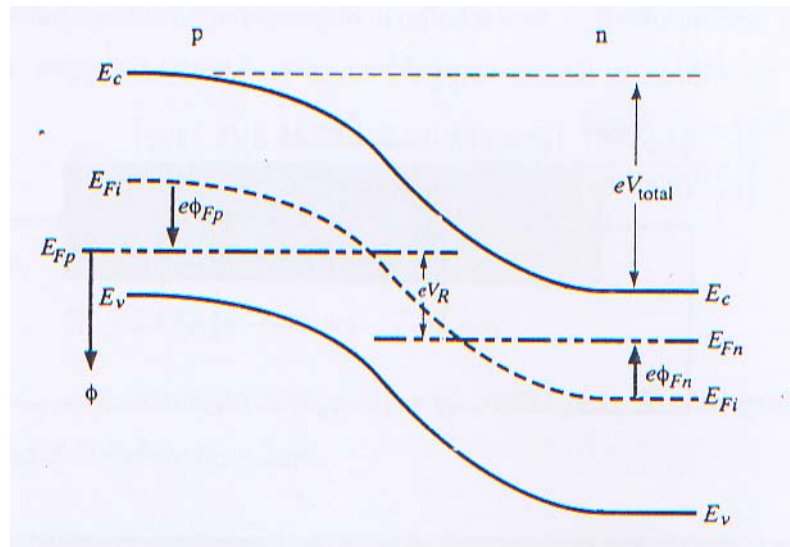
บริเวณประจุบวกและประจุลบถูกแสดงในรูป 2.2 บริเวณทั้งสองนี้ถูกเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) อิเล็กตรอนและโฮล จะถูกกวาดออกจากบริเวณประจุค้างด้วยสนามไฟฟ้า เพราะว่าบริเวณประจุค้างจะปลอดจากประจุที่เคลื่อนที่ได้ใดๆ ดังนั้นบางทีบริเวณนี้จะถูกเรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ความหนาแน่นเกรเดียนท์ยังคงปรากฏในความเข้มข้นพาหะส่วนมากที่ขอบของบริเวณประจุค้าง ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่าความหนาแน่นเกรเดียนท์กำลังผลิต แรงการแพร่ (diffusion force) ที่กระทำต่อพาหะส่วนมาก แรงการแพร่เหล่านี้กำลังกระทำบนอิเล็กตรอนและโฮลที่ขอบของบริเวณประจุค้าง สนามไฟฟ้าในบริเวณประจุค้างจะผลิตแรงอีกแรงหนึ่งบนอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงการแพร่ สำหรับอนุภาคแต่ละชนิดที่สมดุลความร้อน แรงการแพร่และแรงสนามไฟฟ้าจะสมดุลกันพอดี



รูปที่ 2.2 แสดงบริเวณประจุค้าง, สนามไฟฟ้า และแรงกระทำบนพาหะประจุ

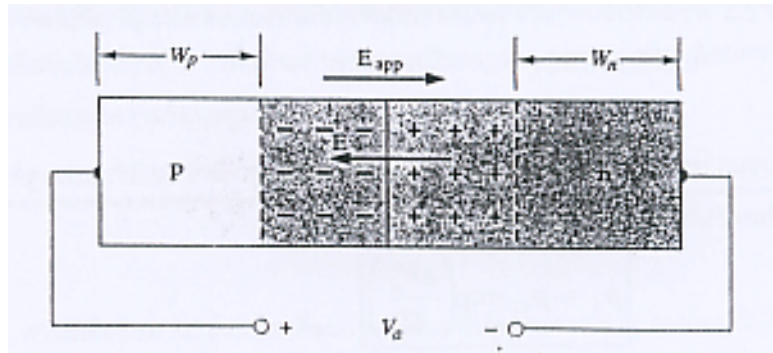
ถ้าให้ความต่างศักย์ระหว่างบริเวณ p และบริเวณ n จะทำให้รอยต่อ pn ไม่อยู่ในเงื่อนไขของสมดุลต่อไป ระดับพลังงานเฟอร์มิจะไม่เป็นค่าคงที่ตลอดทั้งระบบ รูปที่ 2.3 แสดง

แถบพลังงานของรอยต่อ pn สำหรับกรณีเมื่อความต่างศักย์บวกถูกให้แก่บริเวณ n เมื่อเทียบกับบริเวณ p เมื่อศักย์บวกลดต่ำลง (reverse bias) ระดับเฟอร์มีด้านเอ็น จะต่ำกว่าระดับเฟอร์มีด้าน p ความต่างของระดับพลังงานทั้งสองจะเท่ากับความต่างศักย์ที่ให้เข้าไปในหน่วยของพลังงาน นอกจากนี้ ขนาดของสนามไฟฟ้าในบริเวณประจุค้าง จะเพิ่มขึ้นเหนือค่าที่สมดุลความร้อน เนื่องจากความต่างศักย์ที่ให้เข้าไป สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุบวกพุ่งเข้าไปยังประจุลบ ซึ่งหมายความว่าจำนวนของประจุบวกและประจุลบต้องเพิ่มขึ้น ถ้าสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสำหรับความเข้มข้นสารเจือที่ให้เข้าไป จำนวนของประจุค้างต้องเพิ่มขึ้น และความกว้างบริเวณประจุค้างมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

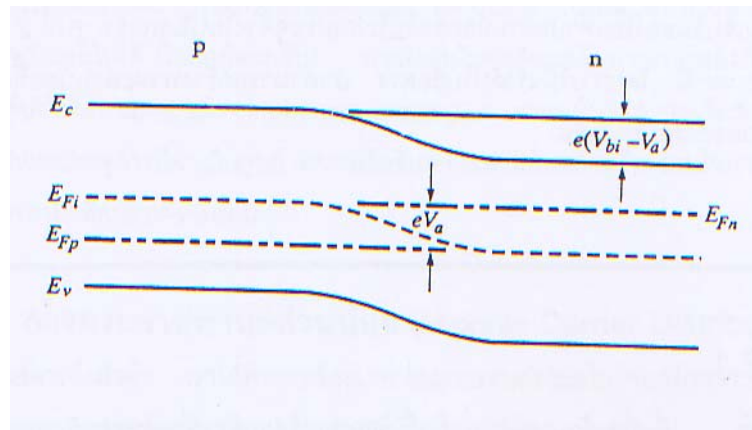


รูปที่ 2.3 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อ pn ภายใต้การไบแอสย้อนกลับ

ถ้าให้ความต่างศักย์บวกที่บริเวณ p เมื่อเทียบกับบริเวณ n กำแพงศักย์จะมีค่าลดลง รูปที่ 2.4 แสดงรอยต่อ pn ที่ให้ความต่างศักย์ V_a สนามไฟฟ้าในเนื้อสารบริเวณ p และบริเวณ n มีค่าน้อยมาก โดยปกติแล้ว ความต่างศักย์ที่ให้ทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณรอยต่อสนามไฟฟ้า E_{app} ที่เหนี่ยวนำ โดยความต่างศักย์ที่ให้เข้าไปภายนอก จะอยู่ในทิศทางข้ามกับสนามไฟฟ้าประจุค้างที่สมดุลความร้อน ดังนั้นสนามไฟฟ้าสุทธิในบริเวณประจุค้างจะลดต่ำกว่าค่าที่สมดุล ค่าสมดุลที่ระหว่างการแพร่และแรงจากสนามไฟฟ้าที่สมดุลความร้อนจะถูกครอบงำ แรงสนามไฟฟ้าที่ป้องกันพาหะส่วนมากจากการข้ามบริเวณประจุค้างจะลดลง อิเล็กตรอนพาหะส่วนมากจากด้าน n ในตอนนี้ได้ถูกฉีดข้ามบริเวณปลอดพาหะเข้าไปในด้าน p และโฮลพาหะส่วนมากจากด้าน p ถูกฉีดข้ามบริเวณปลอดพาหะเข้าไปในด้าน n กระแสจะถูกสร้างขึ้นในรอยต่อ pn เนื่องจากการไบแอสนี้ คือการไบแอสตรง (forward bias) แถบพลังงานของรอยต่อ pn ไบแอสตรง แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงรอยต่อ pn เมื่อได้รับไบแอสตรง



รูปที่ 2.5 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อ pn เมื่อได้รับไบแอสตรง

3. หลักการทำงานพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสง

ในการทำงานของไดโอดเปล่งแสง เมื่อเราป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบไบแอสตรง อิเล็กตรอนจะถูกฉีดแบบแพร่ซึม (Diffusion) ซึ่งพาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดเหล่านี้จะไปรวมตัว (Recombine) กับพาหะข้างมากที่มีอยู่ก่อน ทำให้เกิดการเปล่งแสง บริเวณที่พาหะรวมตัวกันแบบเปล่งแสงได้นั้นมีความกว้างเท่ากับระยะทางที่พาหะจะแพร่ซึมได้ ระยะทางแพร่ซึมนี้ขึ้นกับอัตราการรวมตัวของพาหะและค่าคงตัวของการแพร่ซึมของพาหะ ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในไดโอดเปล่งแสง คือ

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

ในช่วงความต่างศักย์ต่ำ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในไดโอดเปล่งแสง จะเป็นชนิดรีคอมบิเนชัน (Recombination) แต่เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าจะเป็นชนิดแพร่ซึม (Diffusion current)

3.1 กระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึม

พิจารณาไดโอดเปล่งแสงซึ่งมีรอยต่อ p-n ของสารกึ่งตัวนำและมีความหนาแน่นของสารเจือปนชนิด p และ n ที่มีลักษณะเป็นชั้นบันได กำหนดให้สารเจือปนชนิด n มีความหนาแน่นเท่ากับ N_D และสารเจือปนชนิด p มีความหนาแน่นเท่ากับ N_A ในสภาพสมดุลเชิงความร้อนจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล ระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ในย่าน n และ p จึงอยู่ที่ระดับพลังงานเดียวกัน โดยแถบพลังงานที่รอยต่อ p-n มีลักษณะโค้งลาดโดยที่แถบพลังงานของย่าน n มีระดับต่ำกว่าของย่าน p ความแตกต่างของแถบพลังงาน (V_b) ที่เกิดขึ้นนี้ เนื่องจาก ที่รอยต่อ p-n มีชั้นปลอดพาหะ (Depletion layer) ซึ่งมีสาเหตุมาจาก อิเล็กตรอนจากย่าน n ไหลแบบแพร่ซึมสู่อาน p โสไลจากย่าน p ไหลแบบแพร่ซึมสู่อาน n ดังนั้นที่ชั้นปลอดพาหะในย่าน n จึงเหลือเฉพาะไอออนบวกของโดเนอร์และย่าน p เหลือเฉพาะไอออนลบของแอคเซปเตอร์

จากนั้นเมื่อให้ความต่างศักย์ (V_f) แก่ไดโอดเปล่งแสง จะทำให้รอยต่อ p-n เสียสภาพสมดุลเชิงความร้อน ความหนาแน่นของพาหะเปลี่ยนแปลง ถ้าให้ E_{Fn} และ E_{Fp} แสดงระดับพลังงานเฟอร์มีจำลอง (Quasi Fermi level) ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

ในชั้นปลอดพาหะโดยประมาณแล้วความแตกต่างของระดับเฟอร์มีจำลองของย่าน n และ p มีค่าเท่ากับ $E_{Fn} - E_{Fp}$ (eV) การให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบไบแอสตรงเข้าสู่ไดโอดจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในย่าน p และโฮลในย่าน n เป็นดังนี้

$$n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.2)$$

$$p_n = p_{n0} \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.3)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่เพิ่มขึ้นในชั้นปลอดพาหะที่ขอบย่าน n และ p อันเนื่องจากการไบแอสตรง มีค่าเป็น

$$\Delta n = n_p - n_{p0} = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.4)$$

$$\Delta p = p_n - p_{n0} = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

พาหะอิเล็กตรอนส่วนเกินเหล่านี้จะแพร่ซึมเข้าสู่ย่าน p และรวมตัวกับพาหะข้างมากคือโฮลในย่าน p ทำนองเดียวกัน โฮลส่วนเกินก็จะแพร่ซึมเข้าสู่ย่าน n และรวมตัวกับพาหะข้างมากคืออิเล็กตรอนในย่าน n ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินเหล่านี้ จะลดลงตามระยะทางแบบเอกซ์โพเนนเชียล

กระแสไฟฟ้าไหลที่เกิดจากการแพร่ซึมของพาหะแปรผันตรงกับความลาดของความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินและเรียกว่า กระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึม (Diffusion current) ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึมของอิเล็กตรอน J_n และของโฮล J_p จึงมีค่าดังนี้

$$J_n = eD_n \left(-\frac{dn}{dx} \right) \quad (3.6)$$

$$J_p = eD_p \left(-\frac{dp}{dx} \right) \quad (3.7)$$

โดยที่ D_n และ D_p คือ ค่าคงตัวของการแพร่ซึม (Diffusion constant) ของอิเล็กตรอนและของโฮลตามลำดับ ดังนั้นเราจะได้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลดังนี้

$$J_n = \frac{eD_n}{L_n} n_{p0} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

$$J_p = \frac{eD_p}{L_p} p_{n0} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

ดังนั้น สรุปได้ว่า การให้ความต่างศักย์แบบไบแอสตรงเข้าสู่ไดโอดเปล่งแสง จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึมไหล และกระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึมนี้มีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮล ดังนี้

$$\begin{aligned} J &= J_n + J_p = \left(\frac{eD_n}{L_n} n_{p0} + \frac{eD_p}{L_p} p_{n0} \right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \\ &= J_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

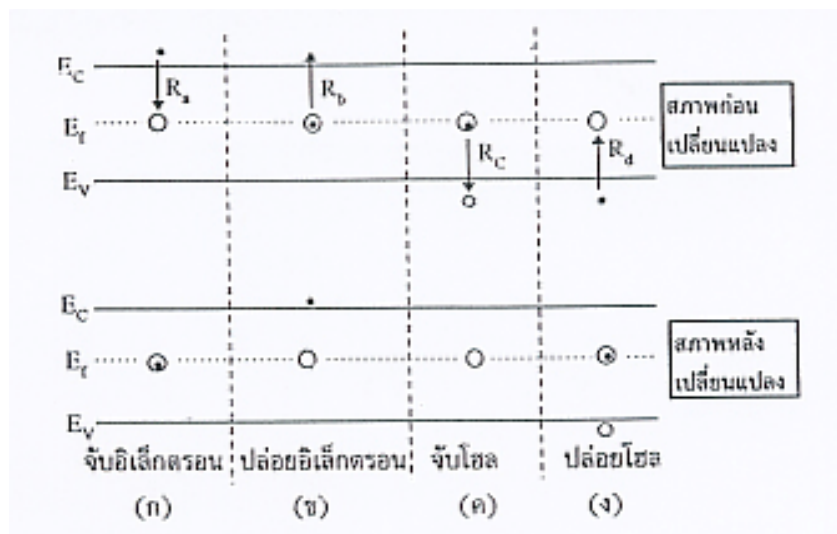
ในกรณีที่ให้ความต่างศักย์แบบไบแอสตรงที่มีค่าสูงๆ จะประมาณได้ว่าไม่มีพจน์ -1 ทำให้กระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึมแปรผันตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการนี้

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \right] \quad (3.11)$$

3.2 กระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอเรชันและรีคอมบิเนชัน

(Generation & Recombination Current)

ในการไบแอสนั้น นอกจากจะมีกระแสแพร่ซึมไหลแล้ว ยังมีกระแสอีกชนิดหนึ่งไหลด้วย เรียกว่า กระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอเรชันและรีคอมบิเนชัน กระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอเรชันและรีคอมบิเนชันนี้ ไม่มีส่วนในการทำให้เกิดการเปล่งแสง เพราะเป็นกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการจับพาหะ (Carrier capture) และปล่อยพาหะ (Carrier emission) ไปมาระหว่างระดับแก็ปสเตต (ที่อยู่ในแถบพลังงานต้องห้าม) และแถบนำหรือแถบเวเลนซ์ บริเวณที่เกิดกระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอเรชันและรีคอมบิเนชันในไดโอดเปล่งแสงคือ ชั้นปลดพาหะ



รูปที่ 3.1 กลไกการเกิดและการรวมตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำ

พิจารณารูป 3.1 ซึ่งแสดงกระบวนการเกิดและการรวมตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำ 4 ชนิด คือ

(ก) อิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชันลงไปที่ระดับแก็ปสเตต และถูกจับที่ระดับแก็ปสเตตที่ยังว่าง

(empty state)

(ข) อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากระดับแก็ปสเตต (Occupied state) ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน

(ค) โฮลกระโดดขึ้นจากแถบเวเลนซ์ และไปถูกจับที่ระดับแก็ปสเตตที่ยังว่าง

(ง) โฮลถูกปล่อยออกจากระดับแก็ปสเตตลงสู่แถบเวเลนซ์

ในกรณีสมดุลเชิงความร้อนจะ ได้ว่า

$$\begin{aligned} e_n &= c_n n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \\ e_p &= c_p n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

แต่ถ้าสารกึ่งตัวนำอยู่ในสภาพไม่สมดุลเชิงความร้อน เราจะพิจารณาดังวิธีการใหม่ดังต่อไปนี้
ให้อัตราการเกิดพาหะ (Generation rate) คือ G จะได้ว่า

$$\begin{aligned} G &= R_a - R_b \\ G &= R_c - R_d \end{aligned} \quad (3.13)$$

ในสภาพคงที่ อัตราการรวมตัวของพาหะ (Recombination rate) U มีค่าเท่ากับอัตราการเกิดพาหะ G ทำให้ได้ว่า

$$G = U = \frac{c_0 N_t (pn - n_i)^2}{n + p + 2n_i \cosh((E_t - E_i)/kT)} \quad (3.14)$$

ถ้ารอยต่อ p-n อยู่ในสภาพคงที่ นั่นคือ $np = n_i^2$ ดังนั้นอัตราการรวมตัว U จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในสภาพกำลังไบแอสตรงนั้น เนื่องจาก $np > n_i^2$ ดังนั้น U จึงมีค่ามากกว่าศูนย์ พาหะส่วนเกินบางตัวที่เราฉีดเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะถูกนำไปใช้ในการรวมตัวโดยมีกลไกขบวนการจับพาหะ (Capture process) แสดงอิทธิพลหลัก เราจึงเรียกกระแสไฟฟ้าเช่นนี้ว่า กระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอร์ชันและรีคอมบิเนชัน

ฟังก์ชัน U จะมีค่าสูงสุดเมื่อส่วนในสมการมีค่าต่ำสุด ซึ่งได้แก่กรณี $n_{n0} + p_{n0}$ และ $n_{n0} = p_{n0}$ (n_i, E_t และ E_i ถูกกำหนดตายตัว) เงื่อนไขเช่นนี้เกิดขึ้นได้ในกรณีที่ระดับพลังงาน E_i อยู่กึ่งกลางระหว่างระดับพลังงาน E_{fp} และ E_{fn} ในชั้นปลอดพาหะ เพราะฉะนั้นจะได้ค่า U สูงสุดเป็น

$$U_{\max} = \frac{c_0 N_t n_i}{2} \exp\left(\frac{eV}{2kT}\right) \quad (3.15)$$

เมื่อเราทราบค่าอัตราการรวมตัวของพาหะแล้ว เราจะสามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอร์ชันและรีคอมบิเนชันได้จากนิยาม

$$J_{GR} = \int_0^w eU dx \quad (3.16)$$

เมื่อ w คือความกว้างของชั้นปลอดพาหะ และจะได้ความหนาแน่นกระแสเป็น

$J_{GR} = J_r \exp(\frac{eV}{2kT})$ โดย $J_r = \frac{e n_i}{2\tau}$ ให้ τ เป็นเวลาอายุประสิทธิผลของการรวมตัว (Effective recombination lifetime) และมีค่าเท่ากับ $\tau = \frac{1}{c_0 N_t}$

จากที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในไดโอดเปล่งแสงขณะกำลังไบแอสตรงนั้น ได้แก่ ผลรวมของกระแสไฟฟ้าชนิดแพร่ซึม และ กระแสไฟฟ้าชนิดเจเนอร์ชันและรีคอมบิเนชัน กล่าวคือ

$$J_{total} = J_{diff} + J_{GR}$$

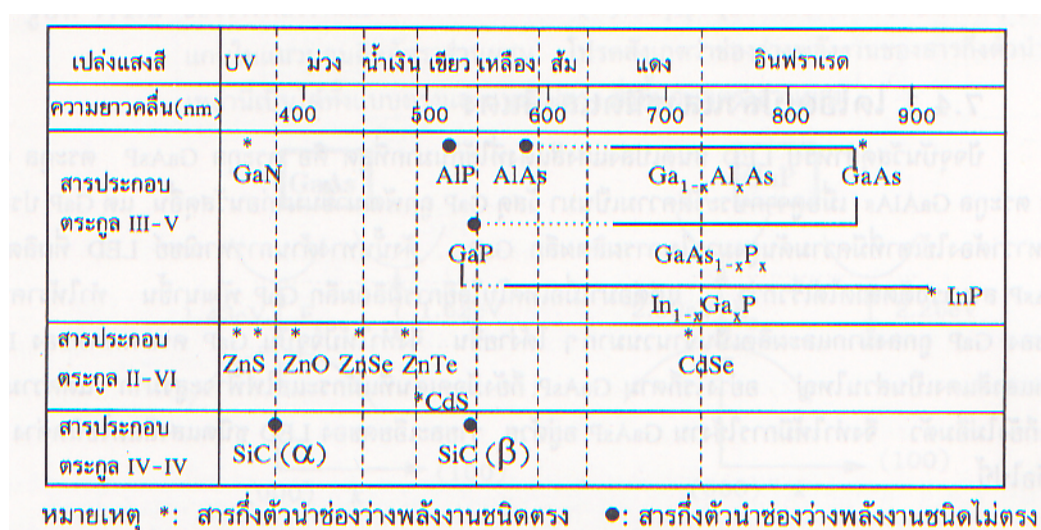
$$= J_s \exp(\frac{eV}{kT}) + J_r \exp(\frac{eV}{2kT}) \quad (3.17)$$

4. สีของไดโอดเปล่งแสง

ความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงจะขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ที่รวมตัวกับโฮล ซึ่งค่าความยาวคลื่นนี้ สามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานโฟตอนตามสูตร

$$\lambda(\mu m) = \frac{1.23981}{\Delta E(eV)} \quad (4.1)$$

ดังนั้น ถ้าต้องการให้แสงที่เปล่งออกมาเป็นแสงที่มนุษย์มองเห็น ความยาวคลื่นแสงต้องมีค่า $\lambda < 0.7 \mu m$ เพราะฉะนั้นต้องเลือกสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานมากกว่า 1.77 eV



รูปที่ 4.1 แสดงสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆและความยาวคลื่นของแสงที่เปล่ง

โดยเทียบจากช่องว่างพลังงาน

4.1 ไดโอดเปล่งแสงชนิดสีแดง

วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นไดโอดเปล่งแสงสีแดงมากที่สุดคือ กระจก GaAsP กระจก GaP และกระจก GaAlAs รายละเอียดของแต่ละกระจกเป็นดังนี้

4.1.1 กระจก GaAsP

ผลึก GaAs เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงเท่ากับ 1.4 eV ให้แสงอินฟราเรดที่สว่างดีมาก การที่จะให้ได้แสงสีแดงนั้น จะต้องขยายช่องพลังงานให้กว้างขึ้น โดยการเติมอะตอมฟอสฟอรัส (P) เข้าไป กลายเป็น GaAsP อัตราส่วนของจำนวนอะตอมของ อาร์เซนิก (As) และฟอสฟอรัส (P) ใน $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของไดโอดเปล่งแสงมาก เช่นถ้า $x=0.4$ จะได้ไดโอดเปล่งแสงสีแดง ถ้า $x=0.7$ จะได้ไดโอดเปล่งแสงสีเหลือง และมีความยาวคลื่นแสงประมาณ 650~660 nm

4.1.2 กระจก GaP

ผลึก GaP เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง แต่สามารถทำให้ GaP เปล่งแสงสว่างได้โดยการเติมอะตอมของสังกะสี (Zn) และออกซิเจน (O) เพื่อให้เป็น Zn-O เป็นศูนย์กลางการรวมตัวแบบเปล่งแสงชนิดไอโซอิเล็กทรอนิกส์แตร็ป (Isoelectronic traps) GaP มีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.24 eV แต่เนื่องจากระดับพลังงานของ Zn และ O อยู่ห่างกัน 1.8 eV แสงที่ได้จึงเป็นแสงสีแดงความยาวคลื่นย่าน 690~700 nm

4.1.3 กระจก GaAlAs

ค่าคงตัวแลตทิซของ GaAs และ AlAs มีความแตกต่างกันน้อยมากเพียง 0.14% จึงสามารถสร้างสารประกอบจากวัสดุกระจกเหล่านี้ได้ง่าย ถ้าสร้างสารประกอบของ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ และเพิ่มค่า x (คือเพิ่มปริมาณของ Al) จะทำให้ช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น โดยทั่วไปจะใช้ค่า $x=0.3$ ซึ่งจะได้ไดโอดเปล่งแสงสีแดงความยาวคลื่น 660 nm (1.88 eV) และมีความสว่างมาก

4.2 ไดโอดเปล่งแสงชนิดแสงสีเหลืองและสีส้ม

วัสดุสำหรับ LED ที่เปล่งแสงสีเหลืองและสีส้มคือ GaAsP พื้นฐานคือ GaP บน GaP จะปลูกชั้น $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ชนิดพี โดยโคปด้วยเทลลูเรียม (Te) และชนิดเอ็น โดยโคปด้วยไนโตรเจน (N) การปรับค่า x ให้มีค่าในช่วง 0.85 ~ 0.9 จะได้ไดโอดเปล่งแสงชนิดแสงสีเหลือง (ความยาวคลื่น ~590 nm) ถ้าปรับค่า x ให้มีค่าในช่วง 0.65~0.75 จะได้ไดโอดเปล่งแสงชนิดแสงสีส้ม (ความยาวคลื่น 610~630 nm)

4.3 ไดโอดเปล่งแสงชนิดแสงสีเขียว

วัสดุที่นิยมนำมาทำไดโอดเปล่งสีเขียวคือ GaP อะตอมของไนโตรเจนถูกโคปเข้าสู่ GaP และจะสร้างระดับอยู่ใต้ขอบแถบคอนดักชันที่ตื้นมากเพียง 20 meV จึงทำให้ได้แสงสีเขียวความยาวคลื่น 565 nm

4.4 ไดโอดเปล่งแสงชนิดแสงสีน้ำเงิน

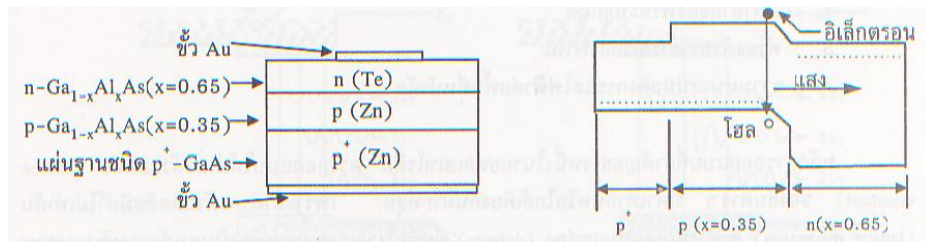
วัสดุที่นำมาทำไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน ได้แก่ GaN, SiC, ZnC และ ZnSe ซึ่งมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่า 2.53 eV ในจำนวนวัสดุทั้ง 4 ชนิดนี้ วัสดุ SiC เท่านั้นที่ผลิตเป็นรอยต่อพีเอ็นได้ ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก อะตอมที่โคปให้ SiC เป็นชนิดพี คือ อะลูมิเนียม (Al) และชนิดเป็นเอ็น คือ ไนโตรเจน (N) การเปล่งแสงนั้นใช้หลักการรวมตัวของพาหะคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ

5. การประยุกต์ใช้ไดโอดเปล่งแสง : Super bright LED

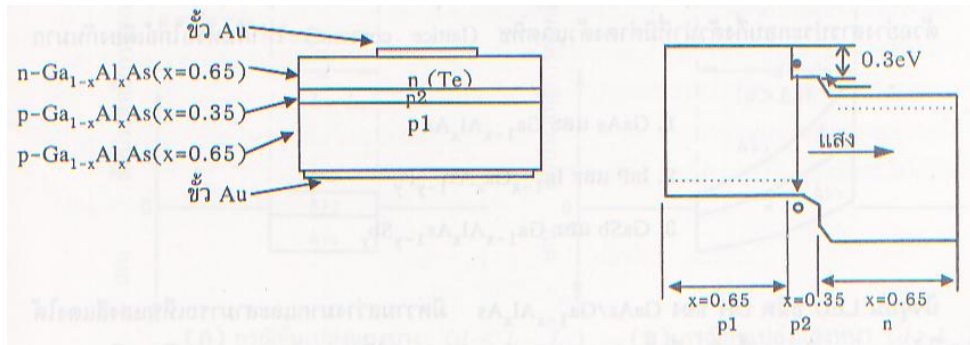
ไดโอดเปล่งแสง ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันมากมาย เช่น การนำไดโอดเปล่งแสงเป็นคิสเพลย์แสดงตัวเลข เป็นตัวส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงในการสื่อสารด้วยแสง หรือแม้แต่ไฟฉาย ผลงานของไดโอดเปล่งแสงอีกอย่างหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมอย่างสูงในตอนนี้คือ ไดโอดเปล่งแสงชนิดสว่างพิเศษ (Super bright LED)

ไดโอดเปล่งแสงชนิดสว่างพิเศษ จะให้แสงสว่างมากกว่าไดโอดเปล่งแสงธรรมดา เนื่องจากเป็นไดโอดที่มีโครงสร้างรอยต่อดับเบิลเฮเทโร ดังนั้นเมื่อไบแอสกระแสตรงเข้าสู่ไดโอดชนิดนี้แล้ว พาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกฉีดเข้าสู่ชั้นเปล่งแสงซึ่งมีช่องว่างพลังงานแคบ และถูกกักอยู่ในชั้นเปล่งแสงด้วยกำแพงศักย์ทั้งสองด้าน จึงทำให้ประสิทธิภาพของการเปล่งแสงมีค่าสูง การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะทำให้กำลังของแสงเอาต์พุตเพิ่มขึ้นตามกระแส ถ้าในการผลิตให้ชั้นเปล่งแสงบางมากๆ จะทำให้กำลังของแสงเอาต์พุตขึ้นกับกระแสไฟฟ้าแบบยกกำลังสอง แต่ถ้าชั้นเปล่งแสงบางมากเกินไป เวลาฉีดพาหะ พาหะบางส่วนที่มีพลังงานสูงอาจจะกระโดดข้ามชั้นเปล่งแสงและขึ้นกำแพงศักย์ออกไปโดยไม่ได้รวมตัว ดังนั้นโดยปกติแล้วจะออกแบบให้ชั้นเปล่งแสงหนาประมาณ 1-2 μm ในที่นี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของรอยต่อเฮเทโร โดยสังเขปดังนี้

รอยต่อเฮเทโรได้แก่ รอยต่อ p-n ที่ใช้วัสดุผลึกต่างชนิดกันหรือส่วนผสมไม่เหมือนกัน ดังนั้นช่องว่างพลังงานของชั้น p จึงไม่เท่ากับของชั้น n และถ้าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีช่องว่างพลังงานของ p และ n แตกต่างกันเพียงชุดเดียว เรียกว่า รอยต่อซิงเกิลเฮเทโร (Single hetero-junction : SH) ดังแสดงตัวอย่างในรูป 5.1 ถ้าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ชั้นเปล่งแสง (Active layer) มีช่องว่างพลังงานแคบ และมีชั้นที่มีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าจำนวน 2 ชั้น ประกบไว้ทั้งด้านบนและด้านล่าง (Clad layer) เรียกว่า รอยต่อดับเบิลเฮเทโร (Double hetero-junction : DH) ดังแสดงตัวอย่างในรูป 5.2



รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้าง SH และลักษณะแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงชนิดรอยต่อเฮเทอโร



รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้าง DH และลักษณะแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงชนิดรอยต่อเฮเทอโร

หน้าที่ของชั้นที่มีช่องว่างพลังงานกว้างคือ การเป็นกำแพงศักย์เพื่อกักไม่ให้พาหะที่ถูกฉีดเข้ามาไหลไปออกสู่บริเวณอื่น (Blocking effect) แต่ทำให้พาหะเหล่านั้นรวมตัวกับพาหะชนิดตรงข้ามในชั้นเปล่งแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปความสูงของกำแพงศักย์มีค่าประมาณ 0.3 eV นอกจากนี้ ชั้นที่มีช่องว่างพลังงานกว้างยังส่งผลให้แสงที่เปล่งสามารถเล็ดลอดทะลุผ่านออกสู่ภายนอกได้ดี ถูกดูดกลืนภายในน้อยลง ดังนั้นไดโอดเปล่งแสงที่สว่างมากในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างแบบดับเบิลเฮเทอโรทั้งสิ้น ในกรณีความหนาของชั้นเปล่งแสงมีค่าไม่เกิน $1 \mu\text{m}$ กำลังของแสงที่เปล่งในชั้นเปล่งแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความหนาของชั้นเปล่งแสงน้อยลงและเมื่อมีจำนวนของพาหะมากขึ้น

หลักการออกแบบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ควรออกแบบให้ค่าคงตัวแลตทิซ (Lattice constant) ของชั้นต่างๆมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เพราะถ้าค่าคงตัวแลตทิซมีค่าไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดจุดบกพร่อง ขึ้นที่บริเวณรอยต่อ กลายเป็นศูนย์กลางของการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสงและจะเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังของแสงเอาต์พุตลดลง ซึ่งไดโอดเปล่งแสงชนิด DH ของ GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs จะมีความสว่างมากและสามารถเห็นแสงแดงได้ชัดเจนแม้ใช้งานนอกอาคาร จึงนำมาใช้สร้างไดโอดเปล่งแสงชนิดสว่างพิเศษ

6. สรุป

ไดโอดเปล่งแสงเป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้รอนต่อพีเอ็นทำให้เกิดการเปล่งแสง กล่าวคือ เมื่อไบแอสตรงให้กับไดโอดเปล่งแสงแล้วจะมีกระแสไหลผ่านบริเวณรอยต่อพีเอ็น ทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำที่นำกระแสได้ โดยแสงสีต่างๆที่เกิดขึ้น เกิดจากการจับคู่กันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ดังนั้นสีแต่ละสีของไดโอดเปล่งแสงจึงขึ้นอยู่กับระดับพลังงานต้องห้าม ในปัจจุบันไดโอดเปล่งแสงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และไดโอดเปล่งแสงชนิดสว่างพิเศษ ก็กำลังได้รับความนิยมอย่างสูง โดยไดโอดเปล่งแสงชนิดสว่างพิเศษเป็นไดโอดที่มีโครงสร้างรอยต่อดับเบิลเฮเทโร ซึ่งทำให้ไดโอดเปล่งแสงชนิดนี้มีประสิทธิภาพของการเปล่งแสงมีค่าสูง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์นพฤทธิ์ จินันทยา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนเป็นที่ปรึกษา จนสัมมนาฉบับนี้เสร็จลุล่วงได้ ขอขอบพระคุณ อาจารย์กนกพจน์ อารีกุล และอาจารย์สิทธิชัย ปิ่นกาญจน์โรจน์ ที่ให้ความรู้ และแหล่งข้อมูลในการทำสัมมนา ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภูษงค์ กิจอำนาจสุข สำหรับหนังสือดีๆ เพื่อเพิ่มพูนความรู้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่สั่งสอนและสั่งสมความรู้มาจนทุกวันนี้

สุดท้ายนี้ ขอบขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนนิสิตทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

Donald A. Neamen , **Semiconductor Physics and Devices : basic principles** , Richard D. Irwin
 , United States of America .

E. Fred Schubert. 2003. **Light-Emitting Diodes**. The press syndicate of the university of
Cambridge, United Kingdom.

Kevin M. Kramer and W. Nicholas G. Hitchon , **Semiconductor Devices A Simulation
Approach** , Prentice-Hall , New Jersey .

คู่มือ เครื่องหมาย. 2542. **สิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม
1**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ไพรัช รัชพงษ์ และ สมเกียรติ สุขเดช , **สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ** , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี
(ไทย-ญี่ปุ่น) , กรุงเทพฯ .

สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว มนตรี อัสวาศัตถ์ถนอม และบรรยง โตประเสริฐพงศ์ , **ฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์** ,
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , กรุงเทพฯ .