

บทที่ 5

การเปล่งแสงของแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ถูกเจือด้วยเบริลเลียมและคาร์บอน ในปริมาณสูง

5.1 บทนำ

5.1.1 หลักการการเปล่งแสง

การเปล่งแสง (Photoluminescence, PL) อาศัยหลักการที่เมื่อให้พลังงานแก่สารกึ่งตัวนำโดยการฉายแสง อิเล็กตรอนจะรับพลังงานไว้และหากพลังงานที่ได้รับมากเพียงพอ อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ (Valence band, VB) ไปยังแถบการนำ (Conduction band, CB) เมื่อเวลาผ่านไปอิเล็กตรอนจะลดระดับพลังงานเพื่อรวมกับโฮล (hole) ในแถบวาเลนซ์อีกครั้งโดยการเปล่งแสงออกมาเพื่อลดระดับพลังงาน การทดลองการเปล่งแสงจึงทำการบันทึกข้อมูลของความถี่และความเข้มของแสงที่เปล่งออกมา รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแกเลียมอาร์เซไนด์และโอกาสที่เป็นไปได้ในการที่อิเล็กตรอนในแถบการนำจะลดระดับมารวมกับโฮลในแถบวาเลนซ์

5.1.2 การแคบลงของช่องว่างแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ชนิดพีที่ถูกเจือ ในปริมาณสูง

การศึกษาก่อนหน้านี้ [9, 29-33] ที่ให้เห็นว่าการเติมอะตอมเจือปนในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ มีผลทำให้ช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy, E_g) และระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy, E_f) มีค่าลดลง การศึกษาการแคบลงของช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap narrowing, BGN) และการลดระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือมีผู้ศึกษาหลายกลุ่มด้วยกัน โดยมากจะอาศัยการทดลองการเปล่งแสงและการกระตุ้นการเปล่งแสง (Photoluminescence Excitation, PLE) โดยในการทดลองการกระตุ้นการเปล่งแสงนั้น จะทำการฉายแสงที่ระดับพลังงานต่างๆ แล้วทำการวัดความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาที่ความถี่หนึ่งซึ่งโดยมากจะเลือกที่ระดับพลังงานใกล้กับพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน ผู้ที่ศึกษาผลการแคบลงของช่องว่างแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ชนิดพีที่ถูกเจือในปริมาณสูงมีดังต่อไปนี้

Casey และ Stern [29] ได้ทำการคำนวณสเปกตรัมของการดูดกลืน (absorption) และการปลดปล่อย (emission) ที่ความเข้มข้นพาหะสูงกว่า $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ที่ 297 K และได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะกับช่องว่างพลังงานเป็น

$$E_g = 1.424 - (1.6 \times 10^{-8}) p^{\frac{1}{3}} \quad (5.1)$$

โดย E_g อยู่ในหน่วยของ eV และ p คือความเข้มข้นพาหะมีหน่วย cm^{-3}

Tikkov และคณะ[30] ได้ทำการปรับแก้สเปกตรัมการเปล่งแสงด้านพลังงานต่ำของ GaAs:Zn ที่ 4.4 K โดยการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นสถานะร่วมอย่างง่ายที่สุด (simplest joint density of state, $f(E)$) เป็น

$$f(E) = \alpha (E - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

โดยทำการทดลองในสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นพาหะในช่วง $2 \times 10^{18} - 5 \times 10^{19} cm^{-3}$ พบว่าการเปลี่ยนของช่องว่างแถบพลังงานเป็น

$$\Delta E_g = E_g(0) - E_g(p) \quad (5.3)$$

$$\Delta E_g = (2.2 \times 10^{-8}) p^{\frac{1}{3}} \quad (5.4)$$

เมื่อ $E_g(0)$ คือ ช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs ที่ไม่มีการเจือ (1.519 eV ที่อุณหภูมิ 4.4 K)

$E_g(p)$ คือ ช่องว่างแถบพลังงานของ p-type GaAs ที่มีความเข้มข้นพาหะเป็น p (หน่วย cm^{-3})

Tikkov และคณะ ยังใช้ข้อมูลทางด้านพลังงานสูงของสเปกตรัมการเปล่งแสงหาระดับพลังงานเฟอร์มิ ซึ่งหาได้จากจุดที่ความเข้มแสงที่เปล่งออกมาลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง โดยได้สรุปว่าเมื่อความเข้มข้นพาหะเพิ่มขึ้น ระดับพลังงานเฟอร์มิจะลดระดับเข้ามาในแถบวาเลนซ์ ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ (นิยามให้ระดับพลังงานที่เข้ามาในแถบวาเลนซ์เป็นบวก และ $E=0$ ที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์) เป็น

$$E_F = (6 \times 10^{-15}) p^{\frac{2}{3}} \quad (5.5)$$

Wang และคณะ [31, 34] ได้ทำการทดลองวัดสเปกตรัมของการเปล่งแสงและ การกระตุ้นการเปล่งแสงใน p^+ -GaAs:C ที่ 300 K เสนอว่าสามารถหาช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมของการเปล่งแสง โดยค่า E_g หาได้จากการตัดกันของพื้นหลัง (background) กับเส้นที่ลากลงมาจากยอดของสเปกตรัมทางด้านพลังงานต่ำเนื่องจากค่าเริ่มต้นนี้เป็นค่าเริ่มที่อิเล็กตรอนสามารถกระโดดจากแถบ

การนำ มายังแถบวาเลนซ์ได้ และสามารถหาค่า $E_g + E_f$ (ระดับพลังงานเฟอร์มิต่ำกว่าพลังงานของแถบวาเลนซ์) ได้จากสเปกตรัมการกระตุ้นการเปล่งแสง ผลจากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นพาหะ 6.2×10^{19} , 1.6×10^{20} และ $4.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ระดับพลังงานเฟอร์มิมีค่า 0.08, 0.22 และ 0.24 eV และช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเป็น 1.324, 1.307 และ 1.291 eV ตามลำดับ พบว่า

$$\Delta E_g = (2.00 \pm 0.19 \text{ cm.eV}) \times 10^{-8} p^{\frac{1}{3}} \quad (5.6)$$

$$E_f = (4.97 \pm 0.79 \text{ cm}^2.\text{eV}) \times 10^{-15} p^{\frac{2}{3}} \quad (5.7)$$

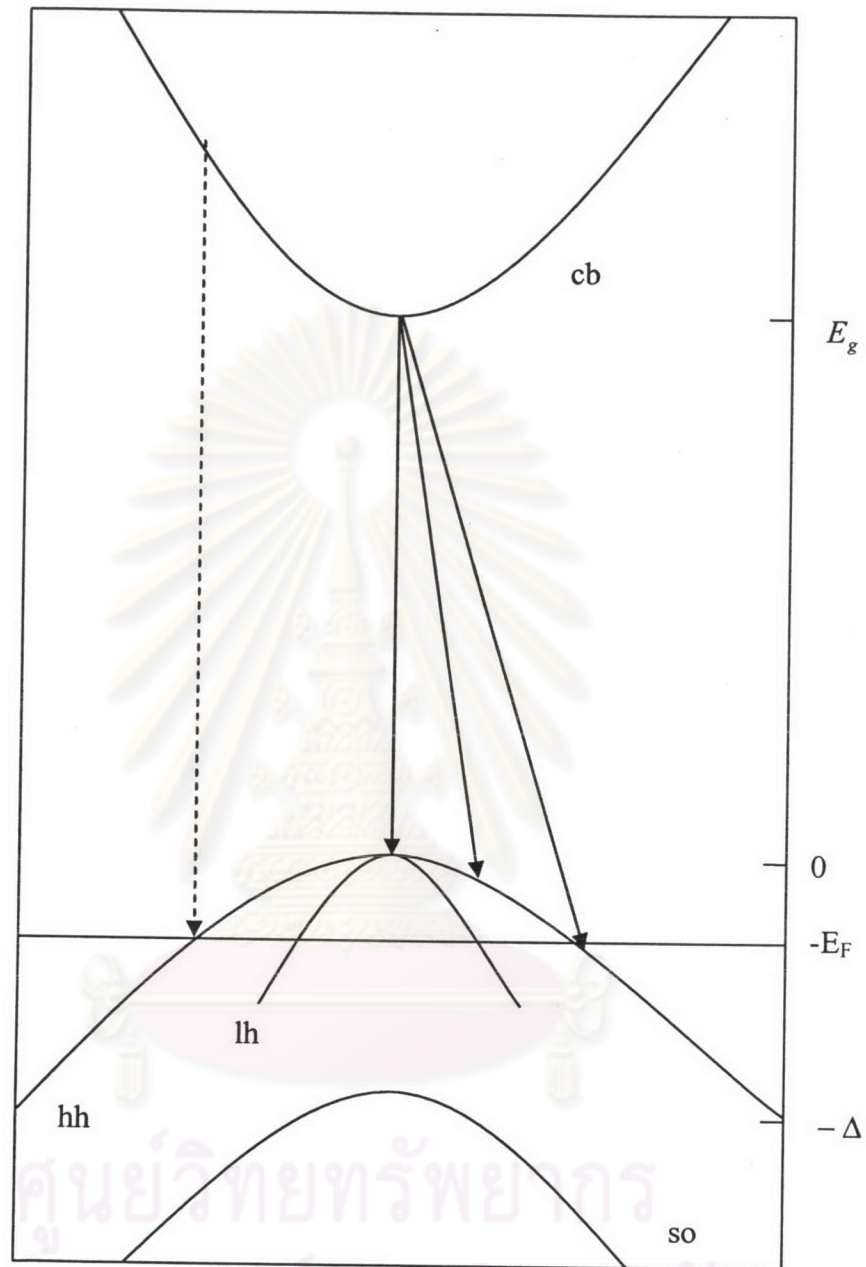
Olego และ Cardona [33] ได้ทำการทดลองการเปล่งแสงเพื่อวัดช่องว่างแถบพลังงานและการแคบลงของช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs:Zn ที่ 0 K โดยหาจากสมการ Varshni พบว่าที่ระดับความเข้มข้นพาหะ 1.6×10^{19} , 4×10^{19} และ $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ให้ผลของการลดลงของช่องว่างแถบพลังงานเป็น 63, 83 และ 101 meV ตามลำดับ มีความสัมพันธ์เป็น

$$\Delta E_g = (2.35 \pm 0.08 \text{ cm.eV}) \times 10^{-8} p^{\frac{1}{3}} \quad (5.8)$$

Lee และคณะ [32] ได้ทำการทดลองวัดการเปล่งแสงใน GaAs:C โดยใช้สารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นพาหะในช่วง 6.4×10^{18} - $1.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 17 K ให้ความสัมพันธ์ของการแคบลงของช่องว่างแถบพลังงานเป็น

$$\Delta E_g = 9.83 \times 10^{-9} p^{1/3} + 3.9 \times 10^{-7} p^{1/4} + 3.9 \times 10^{-12} p^{1/2} \quad (5.9)$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์และโอกาสที่เป็นไปได้ในการที่ อิเล็กตรอนในแถบการนำจะลดระดับมารวมกับโฮลในแถบวาเลนซ์แบบอ้อม (indirect transition) แทน ตั้งคือพลังงาน แถมนอนคือเลขคลื่นโดยในแถบวาเลนซ์ (valence band, VB) โครงสร้างแถบพลังงาน จะแยกออกเป็น 3 แถบด้วยกันคือโฮลหนัก (heavy-hole, hh), โฮลเบา (light-hole, lh) และสปลิตออฟ (split-off, so) โดยส่วนแถบบนสุดคือแถบการนำ (conduction band, CB)

5.1.3 สมการความเข้มแสงของการเปล่งแสง

G. Borghs และคณะ [9] ได้ทำการวิเคราะห์ความเข้มของการเปล่งแสงโดยใช้ฟังก์ชันเป็น

$$I(E) \propto \int_0^\alpha \rho_e(E_e) \rho_h(E_h) |M(E_e, E_h)|^2 f_e(E_e) f_h(E_h) dE_e \quad (5.10)$$

เมื่อ $I(E)$ คือ ความเข้มแสงที่มีพลังงาน E ($E = E_e - E_h$)

$\rho_e(\rho_h)$ คือ ความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน(โฮล)

$E_e(E_h)$ คือ พลังงานของอิเล็กตรอน(โฮล)

$f_e(f_h)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีของอิเล็กตรอน(โฮล)

$|M(E_e, E_h)|^2$ คือ เมตริกซ์ซึ่งบอกถึงโอกาสของการเปลี่ยนสถานะ

$$f_e = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_e - E_F}{kT}}} \quad (5.11)$$

$$f_h = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_F - E_h}{kT}}} \quad (5.12)$$

โดยจากการคำนวณของ S. Vijarnwanaluk[30] ในสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือในปริมาณสูงพบว่าหลังจากที่อิเล็กตรอนได้รับการกระตุ้นขึ้นไปยังแถบการนำแล้ว อิเล็กตรอนใช้เวลาโดยกระบวนการกระเจิงให้ลดระดับพลังงานลงมายังตำแหน่ง $k=0$ ได้เร็วกว่าการที่อิเล็กตรอนจะลดระดับพลังงานแล้วลงไปยังแถบวาเลนซ์ที่ค่า k ค่าเดิมซึ่งเป็นผลจากการเติมอะตอมเจือปนเป็นปริมาณมากทำให้เกิดการไม่อนุรักษ์โมเมนตัม นอกจากนี้ G. Borghs และคณะ [9] ยังเสนอว่าเราสามารถประมาณ $|M(E_e, E_h)|^2$ เป็นค่าคงที่ได้ จึงสามารถเขียนสมการที่ (5.10) ได้เป็น

$$I(E) \propto \rho_h(E) f_h(E) \quad (5.13)$$

โดย

$$\rho_h(E_h) = A(E - E_g)^{1/2} \quad (5.14)$$

ดังนั้น

$$I(E) = \frac{A(E - E_g)^{\frac{1}{2}}}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}} \quad (5.15)$$

โดย E'_F และ A คือ ระดับพลังงานจากจุดต่ำสุดของแถบการนำถึงระดับพลังงานเฟอร์มิและค่าคงที่ตามลำดับ การปรับแก้สมการที่ (5.15) กับสเปกตรัมการเปล่งแสงที่ได้จากทดลองให้ค่าพารามิเตอร์ของ E'_F และ E_g ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าของระดับพลังงานเฟอร์มิได้โดยมีความสัมพันธ์เป็น

$$E_F = E'_F - E_g \quad (5.16)$$

การนิยามระดับพลังงานเฟอร์มิในสมการที่ (5.15) ให้ค่าที่เป็นบวกในกรณีที่ระดับพลังงานเฟอร์มิเข้ามาในแถบวาเลนซ์ และให้ค่าเป็นลบในกรณีที่ระดับพลังงานเฟอร์มิมีระดับสูงกว่าแถบวาเลนซ์

5.1.4 การคำนวณความเข้มข้นพาหะ

ผลจากการทราบค่าระดับพลังงานเฟอร์มิสามารถนำมาคำนวณเป็นความเข้มข้นพาหะ(p) ได้สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ความเข้มข้นของโฮลซึ่งเป็นพาหะหมู่มากสามารถหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ [30] ดังต่อไปนี้

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} \rho_h(E) f_h(E) dE \quad (5.17)$$

โดย

$$\rho_h(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_h^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (E_V - E)^{\frac{1}{2}} \quad (5.18)$$

$$m_h^* = (m_{lh}^{\frac{3}{2}} + m_{hh}^{\frac{3}{2}})^{\frac{2}{3}} \quad (5.19)$$

E_V เป็นพลังงานของจุดบนสุดในแถบวาเลนซ์ m_{lh} และ m_{hh} เป็นมวลโฮลเบา (light-hole) และโฮลหนัก (heavy-hole) ตามลำดับ m_h^* คือมวลโฮลเฉลี่ยในแถบวาเลนซ์ แทนสมการ (5.12) และ (5.18) ในสมการที่ (5.17) จะได้

$$\begin{aligned}
 p &= N_V F(\eta) \\
 N_V &= 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \\
 F(\eta) &= \frac{2}{\pi^{\frac{1}{2}}} \int_0^{\infty} \frac{x^{\frac{1}{2}}}{1 + e^{x-\eta}} dx \\
 \eta &= \frac{E_V - E_F}{kT} \\
 x &= \frac{E_V - E}{kT}
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

โดยที่ η คือ ระดับดีเจนเนอเรซี (degree of degeneracy)

$F(\eta)$ คือ เฟอ์มี-ดิเรกอินทิกรัล (Fermi-Dirac integral) ซึ่งหาได้จากการคำนวณแต่ละค่าของ η

N_V คือ ความหนาแน่นสถานะยังผลของแถบวาเลนซ์ (Effective density of state of the valence band) สามารถเขียนสมการของ N_V ในรูปของ m_h^* และ T เป็น

$$N_V = (2.5 \times 10^{19}) \left(\frac{m_h^*}{m_e} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{2}{3}} \tag{5.21}$$

โดย N_V และ T มีหน่วย cm^{-3} และ K

ในการทดลองของ S. Vijarnwanaluk[30] ได้ทำการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่าง $F(\eta)$ และ η โดยใช้เชิงตัวเลขด้วยการอินทิเกรตจาก $n=0$ ถึง $n=100$ ซึ่งแบ่งออกเป็นช่วงๆ ละ 0.1 ได้ผลเปรียบเทียบสรุปได้เป็นสมการพหุนามกำลังสองดังนี้

$$F(\eta) = 0.80 + 0.72\eta + 0.17\eta^2 \tag{5.22}$$

การปรับแก้สเปกตรัมที่ได้จากการทดลองการเปล่งแสงกับสมการที่ (5.15) จะทำให้ทราบค่าของ E_g และ E_F ซึ่งหากนิยามให้ $E_V = 0$ ก็จะทำให้ได้ค่า η แทนค่านี้ในสมการที่ (5.22) ทำให้ทราบค่า $F(\eta)$ และสามารถทราบค่าของ N_V ได้จากสมการที่ (5.21) โดย m_h^* หาได้จากสมการที่ (5.19) ซึ่งค่าของมวลทั้งหมดได้จากตารางที่ 4.1 โดย $m_{hh} = 0.45m_0$ และ $m_{hh} = 0.082m_0$ ซึ่งจะได้ $m_h^* = 0.47m_0$

เมื่อ m_e คือมวลของอิเล็กตรอน การทราบค่าของ $F(\eta)$ และ N_V ทำให้สามารถนำมาคำนวณเป็นความเข้มข้นพาหะได้จากสมการที่ (5.20)

5.2 การทดลอง

การทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:C ได้ทำการทดลองด้วยเครื่อง RM1000 ของบริษัท Renishaw ณ Imperial College ประเทศอังกฤษ ที่อุณหภูมิต้อง โดยสารตัวอย่างมีความเข้มข้นพาหะ 1.4×10^{17} , 3.9×10^{18} , 3.3×10^{19} และ $1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ และใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 488 nm (2.541 eV) เป็นตัวกระตุ้น นอกจากนี้ยังทำการทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:C กับเครื่อง RM1000 ของบริษัท Renishaw ณ บริษัท Renishaw อีกด้วย โดยสารตัวอย่างมีความเข้มข้นพาหะ 5.2×10^{18} , 6.6×10^{19} , 9.1×10^{19} และ $1.05 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514.5 nm (2.410 eV) เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งมีกำลังของแสงเลเซอร์ตกที่สารตัวอย่าง $150 \mu\text{W}$

การทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:Be ได้ทำการทดลองด้วยเครื่อง RM1000 ของบริษัท Renishaw ณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อุณหภูมิต้อง โดยสารตัวอย่างมีความเข้มข้นพาหะในช่วง $2.81 \times 10^{18} - 7.44 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 488 nm (2.541 eV) เป็นตัวกระตุ้น ทำการวัดความเข้มและพลังงานของแสงที่เปล่งออกมาตั้งแต่ 1.2 – 2.4 eV

5.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.3.1 GaAs:C

ผลการทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:C ที่อุณหภูมิต้อง ซึ่งใช้แสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 488 และ 514 nm เป็นตัวกระตุ้น แสดงเป็นเส้นทึบในรูปที่ 5.2 โดยสเปกตรัมที่ได้มีลักษณะเป็นครึ่งลูกคลื่น ในช่วงพลังงาน 1.4 – 1.5 eV ที่ระดับความเข้มข้นพาหะต่ำที่สุดและจะขยายออกจนมีความกว้างอยู่ในช่วง 1.3 – 1.6 eV ที่ระดับความเข้มข้นพาหะมากที่สุด และที่ระดับความเข้มข้นนี้จะสังเกตเห็นยอด (peak) เล็กๆ ที่ตำแหน่งพลังงาน 1.7 eV ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนลงมาในแถบวาเลนซ์สปินออบิตสปลิตออฟ (spin orbit split off valence band) โดยเส้นประในรูปที่ 5.2 แสดงผลการปรับแก้สมการที่ (5.15) กับสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:C ที่ 300 K ยกเว้นข้อมูลในช่วง 1.6 – 2.1 eV เพื่อหลีกเลี่ยงผลเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบการนำลงมาในแถบวาเลนซ์สปินออบิตสปลิตออฟ ค่าที่ได้จากการปรับแก้สมการที่ (5.15) แสดงในตารางที่ 5.1 การปรับแก้สมการให้ผลที่เข้ากันได้กับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ยกเว้นในกรณีที่มีการเติม

อะตอมเจือปนมากที่สุดคือที่ $1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ที่ให้ผลต่างจากผลการทดลองบ้างเล็กน้อย ได้ทำการคำนวณค่า ΔE_g โดยให้ $E_g(0) = 1.423 \text{ eV}$ ที่ 300 K ซึ่งเป็นค่าที่รายงานโดย J. S. Blakemore [5] แสดงในรูปที่ 5.3 Jain และคณะ [35] ได้เสนอว่าการแคบลงของช่องว่างแถบพลังงานจะเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นพาหะคือ

$$\Delta E_g = Ap^{\frac{1}{3}} + Bp^{\frac{1}{4}} + Cp^{\frac{1}{2}} \quad (5.23)$$

เมื่อ A, B และ C เป็นค่าคงที่ แต่ในกรณีของ $p\text{-GaAs}$ สามารถใช้ความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้ได้คือ

$$\Delta E_g \propto p^{\frac{1}{3}} \quad (5.24)$$

จึงได้ทำการปรับแก้ผลของ ΔE_g และ p ด้วยสมการที่ (5.24) ผลการปรับแก้สมการแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 5.3 ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น

$$E_g(p) = E_g(0) - Ap^{\frac{1}{3}} \quad (5.25)$$

$$A = (1.76 \pm 0.04) \times 10^{-8} p^{\frac{1}{3}} \text{ cm.eV}$$

ผลที่ได้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้านี้โดย Wang และคณะ [31, 34] ซึ่งได้ทำการทดลองใน GaAs:C ที่อุณหภูมิห้องเช่นเดียวกัน และยังเป็นผลที่สอดคล้องกับค่าที่รายงานโดย Casey และ Stern [29] ซึ่งต่างกันที่อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง

ผลของค่า $E'_F - E_g$ คือค่าของระดับพลังงานเฟอร์มิ (E'_F) ที่อยู่ต่ำกว่าแถบวาเลนซ์ในกรณีที่มีการเจือในปริมาณสูง ผลการคำนวณระดับพลังงานเฟอร์มิแสดงในตารางที่ 5.1 โดยที่ระดับความเข้มข้นพาหะ $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ให้ค่าระดับพลังงานเฟอร์มิเป็นลบหมายถึง ระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ในระดับที่สูงกว่าแถบวาเลนซ์ หรือระดับพลังงานเฟอร์มียังอยู่ในช่วงของช่องว่างแถบพลังงาน รูปที่ 5.4 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิ (E'_F) กับความเข้มข้นพาหะที่หาจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (ρ_{Hall}) ซึ่งได้จากการปรับแก้สมการที่ (5.15) กับการทดลองการเปล่งแสง การสมมติให้ความหนาแน่นสถานะของแถบวาเลนซ์มีฟังก์ชันเป็นพาราโบลา ($\rho(E) \propto (E_V - E)^{\frac{1}{2}}$) ทำให้ [12]

$$E_F \propto p^{\frac{2}{3}} \quad (5.26)$$

ดังนั้นจึงได้ทำการปรับแก้ข้อมูลของ E_F กับ $p^{\frac{2}{3}}$ ตามสมการที่ (5.26) ผลการปรับแก้สมการแสดงเป็นเส้นประในรูปที่ 5.4 ซึ่งให้ผลเป็น

$$E_F = Bp^{\frac{2}{3}} \quad (5.27)$$

$$B = (7.80 \pm 0.38) \times 10^{-15} \text{ cm}^2 \cdot \text{eV}$$

ซึ่งค่า B ที่ได้นี้สอดคล้องกับค่าที่รายงานโดย Titkov และคณะ [30]

ผลจากการทราบค่า E_g และ E_F จากการปรับแก้สมการที่ (5.15) กับสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองการเปล่งแสงทำให้สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นพาหะได้โดยใช้สมการที่ (5.20) ซึ่งค่า η และ $F(\eta)$ พร้อมผลการคำนวณความเข้มข้นพาหะแสดงในตารางที่ 5.2 ความเข้มข้นพาหะที่ได้นี้เป็นความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการทดลองการเปล่งแสงใช้สัญลักษณ์เป็น p_{pl} รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการทดลองการเปล่งแสง (p_{pl}) และความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (p_{Hall}) โดยเส้นประแสดงผลการปรับแก้ข้อมูลของความเข้มข้นพาหะกับสมการ

$$p_{pl} = Cp_{Hall} \quad (5.28)$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่และผลการปรับแก้สมการที่ (5.28) กับข้อมูลได้ความสัมพันธ์เป็น

$$p_{pl} = (1.00 \pm 0.06)p_{Hall} \quad (5.29)$$

ซึ่งผลที่ได้นี้จะเห็นว่าสามารถเข้ากับข้อมูลที่ความเข้มข้นพาหะสูงกว่า $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ได้เป็นอย่างดีและผลที่ได้ก็ยังคงแสดงถึงความสอดคล้องกันระหว่างการวัดความเข้มข้นพาหะจากสเปกตรัมการเปล่งแสงและปรากฏการณ์ฮอลล์ ในกรณีที่ความเข้มข้นพาหะต่ำกว่า $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ พบว่าความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงให้ค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากความเข้มข้นพาหะที่วัดโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากสมการที่ใช้ในการปรับแก้สเปกตรัมการเปล่งแสงเป็นสมการที่

สมมุติให้อิเล็กตรอนเกิดการเปลี่ยนสถานะแบบอ้อมซึ่งเกิดในกรณีที่มีเติมอะตอมเจือปนในปริมาณสูง การสมมุติเช่นนี้จึงไม่ครอบคลุมถึงกรณีที่มีการเติมอะตอมเจือปนที่ไม่มากพอ

สเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:C ที่ถูกปรับแก้กับสมการที่ (5.15) ให้ผลของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) และระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับการทดลอง ก่อนหน้านี้ ค่า E_F สามารถนำมาคำนวณค่าความเข้มข้นพาหะได้ โดยความเข้มข้นพาหะที่ได้ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองวัดความเข้มข้นพาหะโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีความเข้มข้นพาหะมากกว่า $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการวัดความเข้มข้นพาหะด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งมีค่าไม่เกิน 30% [11]



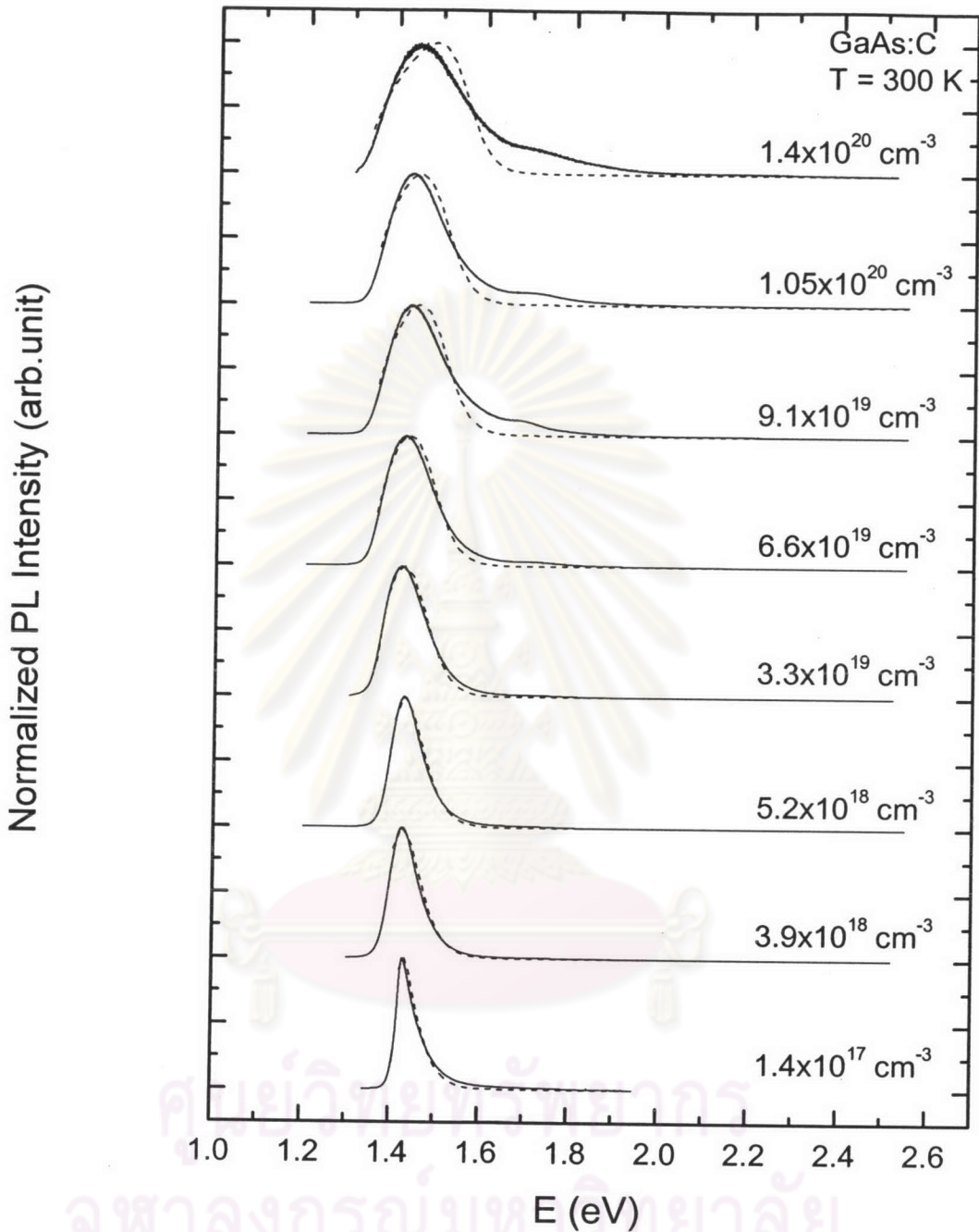
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการปรับแก้แก้สมการที่ (5.15) กับสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:Be และ GaAs:C โดย $E_g(0)$ คือความเข้มข้นพาหะที่ไม่มีภาวะการเจือซึ่งมีค่า 1.423 eV [5]

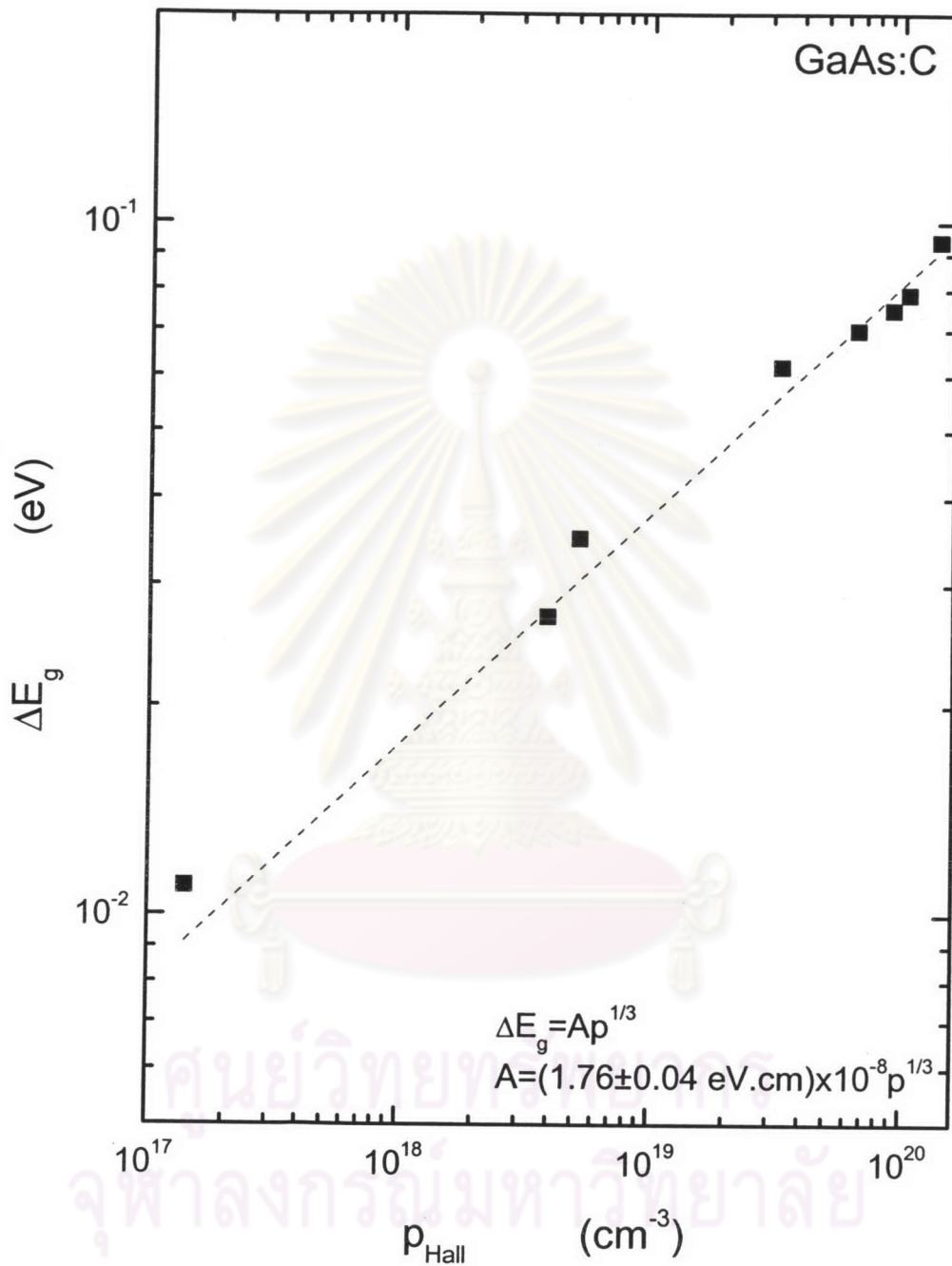
สารตัวอย่าง	$p(Hall)$ (cm^{-3})	E_g (eV)	E'_F (eV)	$E_V - E_F$ (eV)	$\Delta E_g = E_g(0) - E_g(p)$ (eV)	
GaAs:C	10981	1.4×10^{17}	1.412	1.408	-0.004	0.011
	10983	3.9×10^{18}	1.396	1.430	0.034	0.027
	10514	5.2×10^{18}	1.388	1.446	0.058	0.035
	10985	3.3×10^{19}	1.361	1.460	0.099	0.062
	10977	6.6×10^{19}	1.353	1.476	0.123	0.070
	10986	9.1×10^{19}	1.348	1.504	0.156	0.075
	10511	1.05×10^{20}	1.344	1.502	0.158	0.079
	10512	1.4×10^{20}	1.329	1.544	0.215	0.094
GaAs:Be	11433	2.81×10^{18}	1.4163	1.5412	0.1249	0.0067
	11443	1.04×10^{19}	1.4158	1.5469	0.1311	0.0072
	11985	2.83×10^{19}	1.4155	1.5455	0.1300	0.0075
	11989	7.44×10^{19}	1.4152	1.5614	0.1462	0.0078

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการคำนวณหาความเข้มข้นพาหะจากสเปกตรัมการเปล่งแสง (p_{pl})

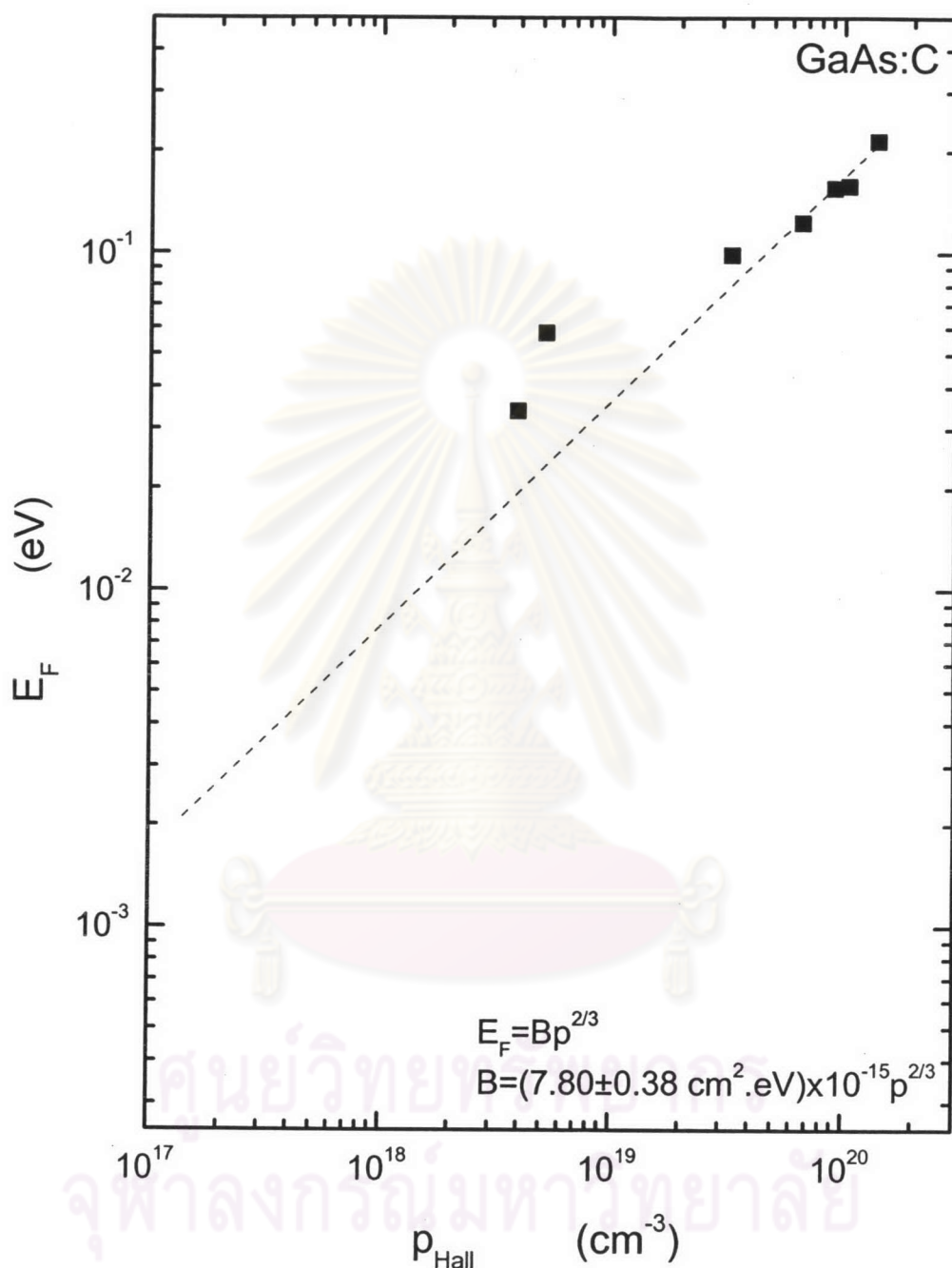
สารตัวอย่าง	P_{Hall} (cm^{-3})	η	$F(\eta)$	P_{pl} (cm^{-3})	
GaAs:C	10981	1.4×10^{17}	-0.154	0.693	5.58×10^{18}
	10983	3.9×10^{18}	1.308	2.032	1.64×10^{19}
	10514	5.2×10^{18}	2.231	3.252	2.62×10^{19}
	10985	3.3×10^{19}	3.808	6.006	4.84×10^{19}
	10977	6.6×10^{19}	4.731	8.011	6.45×10^{19}
	10986	9.1×10^{19}	6.000	11.240	9.05×10^{19}
	10511	1.05×10^{20}	6.077	11.453	9.23×10^{19}
	10512	1.4×10^{20}	8.269	18.378	1.48×10^{20}
GaAs:Be	11433	2.81×10^{18}	4.804	8.182	6.59×10^{19}
	11443	1.04×10^{19}	5.042	8.753	7.05×10^{19}
	11985	2.83×10^{19}	5.000	8.650	6.97×10^{19}
	11989	7.44×10^{19}	5.623	10.224	8.23×10^{19}



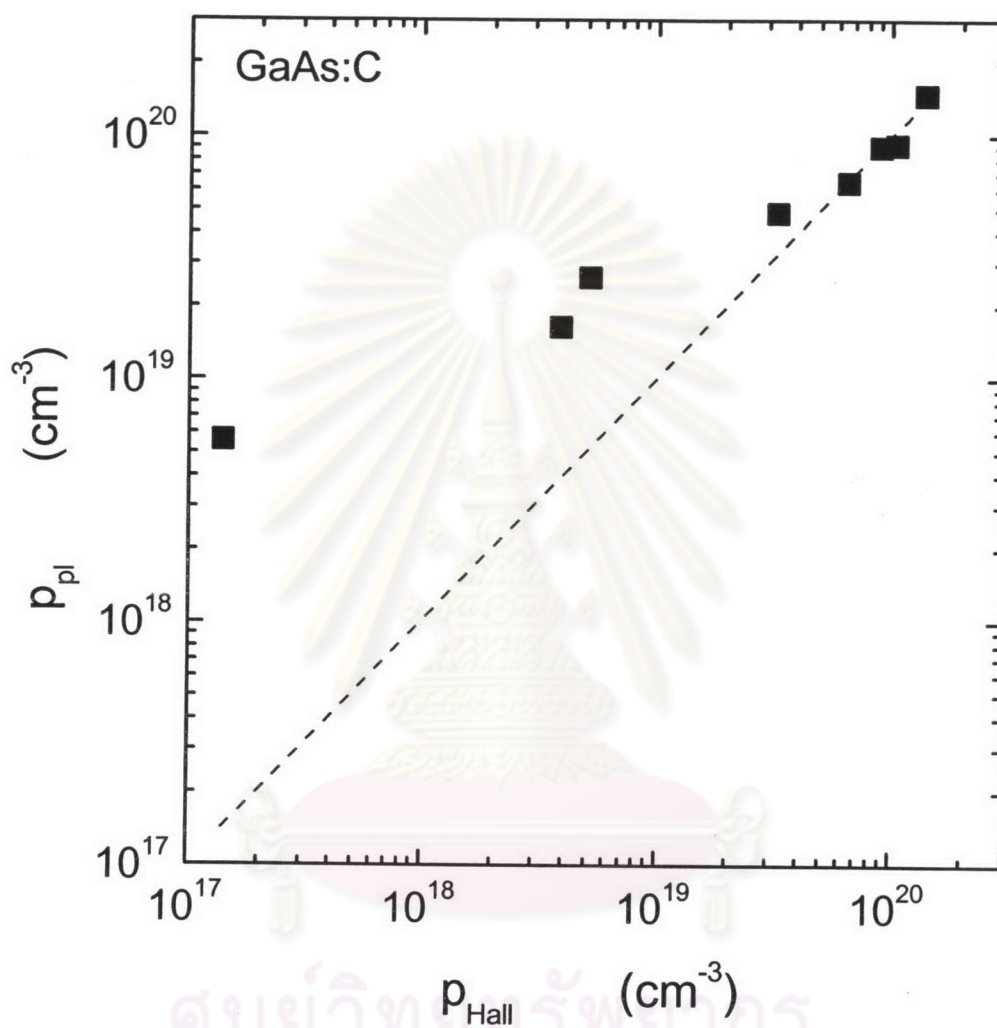
รูปที่ 5.2 เส้นที่บแสดงผลการทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:C ที่อุณหภูมิห้อง ที่มีลำเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 488 nm เป็นตัวกระตุ้นในสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นพาหะ 1.4×10^{17} , 3.9×10^{18} , 3.3×10^{19} และ $1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งทำการทดลอง ณ Imperial College และใช้ลำเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514.5 nm เป็นตัวกระตุ้นในสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นพาหะ 5.2×10^{18} , 6.6×10^{19} , 9.1×10^{19} และ $1.05 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งทำการทดลอง ณ บริษัท Renishaw โดยเส้นประแสดงผลการปรับแก้สมการที่ (5.12) กับสเปกตรัมการเปล่งแสงที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 5.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างแถบพลังงานในสาร GaAs:C เทียบกับช่องว่างแถบพลังงานที่ไม่มีการเจือ ($\Delta E_g = E_g(0) - E_g(p)$) โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นพาหะเพิ่มขึ้นผลต่างของช่องว่างแถบพลังงานจะมากขึ้นด้วย เส้นประแสดงผลการปรับแก้ข้อมูลกับสมการ $\Delta E_g = Ap^{1/3}$ เมื่อ A เป็นค่าคงที่ให้ความสัมพันธ์เป็น $\Delta E_g = (1.76 \pm 0.04 \text{ eV.cm}) \times 10^{-8} p^{1/3}$



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะและระดับพลังงานเฟอร์มิที่ต่ำกว่าแถบวาเลนซ์ (นิยามให้วัดเข้ามาในแถบวาเลนซ์เป็นบวกและ $E_V=0$ ที่ $k=0$) ของ GaAs:C เส้นประแสดงผลการปรับแก้ข้อมูลกับสมการที่ (5.26) ซึ่งให้ความสัมพันธ์เป็น $E_F = (7.80 \pm 0.38 \text{ cm}^2 \cdot \text{eV}) \times 10^{-15} p^{2/3}$



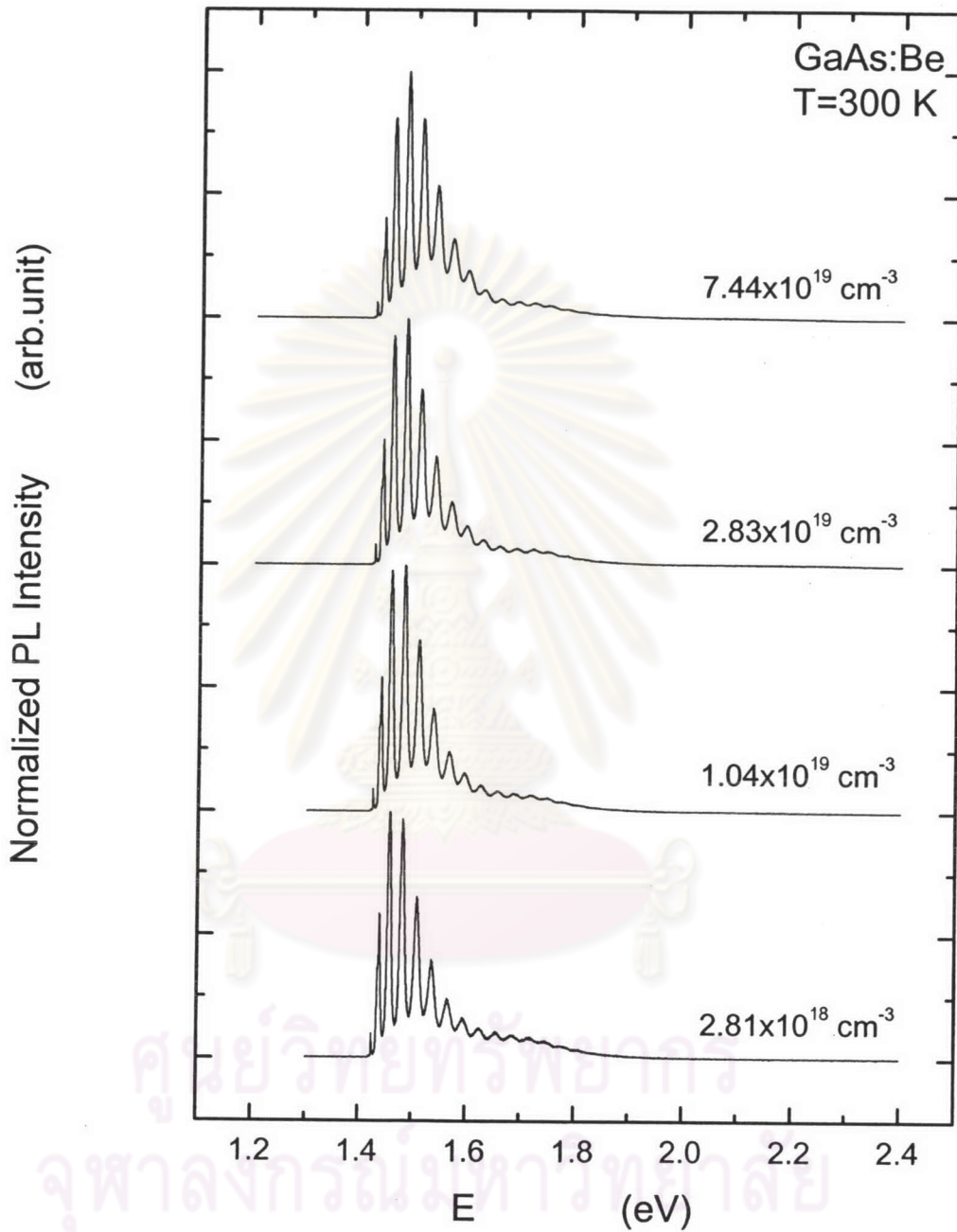
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะที่วัดโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (p_{Hall}) และความเข้มข้นพาหะที่วัดโดยปรากฏการณ์การเปล่งแสง (p_{pl}) เส้นประแสดงผลการปรับแก้ข้อมูลกับสมการเชิงเส้นให้ความสัมพันธ์เป็น $p_{pl} = (1.00 \pm 0.06)p_{Hall}$

5.3.2 GaAs:Be

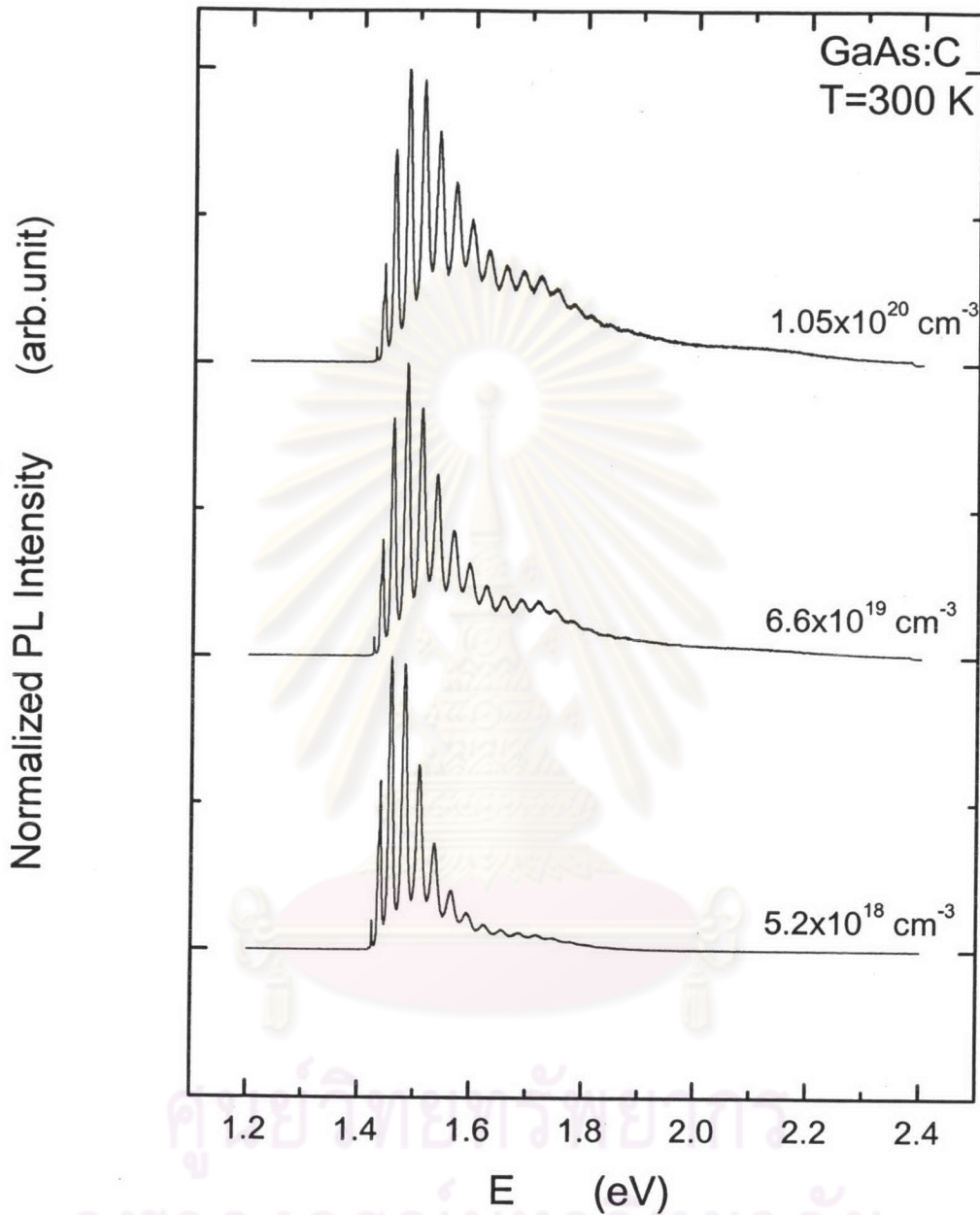
ผลการทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:Be ที่แต่ละระดับความเข้มข้นพาหะ ซึ่งทำการทดลอง ณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ แสดงในรูปที่ 5.6 โดยสเปกตรัมจะมีลักษณะคลื่นแบบไซน์ (sine wave) ที่มีหลายลูกคลื่น อยู่ในช่วง 1.4 – 1.7 eV ผลของสเปกตรัมที่สังเกตได้นี้คาดว่าเกิดจากการแทรกสอดของแสงที่เกิดจากผิวของฟิล์มบางบนแผ่นกรองแสงที่ใช้ในการกรองความถี่ของแสงก่อนที่จะเข้าสู่ระบบการวัดความเข้มแสง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากทางสถาบันวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติได้ทำการเปลี่ยนและใช้แผ่นกรองแสงที่เป็นคนละชนิดกับที่ใช้ในการทดลอง ณ Imperial college และบริษัท Renishaw จึงให้ผลที่แตกต่างกัน เพื่อยืนยันผลที่เกิดขึ้นจึงทำการทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:C ที่ความเข้มข้นพาหะ 5.2×10^{18} , 6.6×10^{19} และ $1.05 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งเป็นสารตัวอย่างชุดเดียวกับที่ทำการทดลอง ณ Imperial college และบริษัท Renishaw ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.7 โดยผลที่ได้ให้ผลที่แตกต่างจากการทดลอง ณ Imperial college และบริษัท Renishaw จริง แสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองเป็นผลที่เกิดจากการแทรกสอดจริงไม่ได้เป็นลักษณะเฉพาะของ GaAs:Be แต่อย่างใด นอกจากนี้ผลการทดลองการเปล่งแสง ณ ศูนย์วิจัยวัสดุและโลหะแห่งชาติ (MTEC) ก็ให้ผลที่มีลักษณะเช่นเดียวกันนี้ จึงเป็นการยากที่จะทำการแปลความจากข้อมูลที่ได้ เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ทำการปรับสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:Be ให้เรียบ(smooth) โดยการใช้วิธีแบบฟูเรียร์ (Fourier) ผลที่ได้แสดงเป็นเส้นทึบในรูปที่ 5.8 โดยสเปกตรัมที่ได้อยู่ในช่วงพลังงาน 1.4 – 1.6 eV ได้ทำการปรับแก้สเปกตรัมที่ได้จากการปรับให้เรียบกับสมการที่ (5.15) แสดงโดยเส้นประในรูปที่ 5.8 โดยในการปรับแก้สเปกตรัมได้ใช้ข้อมูลตั้งแต่ 1.2 – 2.4 eV ยกเว้นข้อมูลในช่วง 1.6 – 2.1 eV เพื่อป้องกันผลการปรับแก้สมการที่คลาดเคลื่อนจากยอดเล็กๆที่ตำแหน่งประมาณ 1.7 eV ค่าที่ได้จากการปรับแก้สมการแสดงในตารางที่ 5.1 การปรับแก้สมการให้ผลที่เข้ากันได้ค่อนข้างดีกับข้อมูลที่ได้จากการปรับสเปกตรัมการเปล่งแสงให้เรียบ

รูปที่ 5.9 แสดงค่าผลต่างของค่าช่องว่างแถบพลังงาน (ΔE_g) กับความเข้มข้นพาหะที่วัดโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (p_{Hall}) ซึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้นพาหะเพิ่มขึ้น ΔE_g จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของ ΔE_g ใน GaAs:C

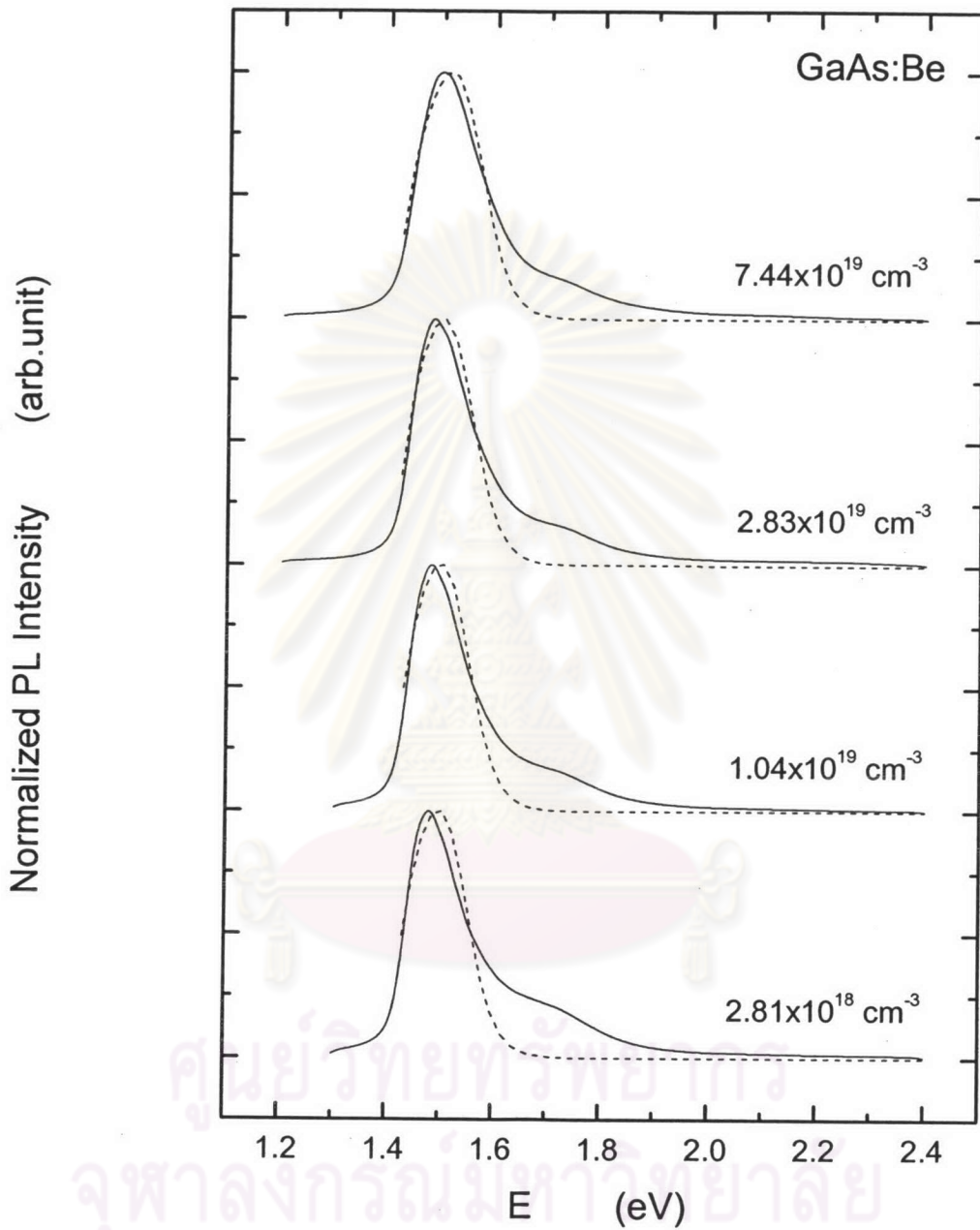
รูปที่ 5.10 แสดงผลของระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) กับความเข้มข้นพาหะที่วัดโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (p_{Hall}) พบว่าเมื่อความเข้มข้นพาหะเพิ่มขึ้น ระดับพลังงานเฟอร์มิก็มีค่าเพิ่มขึ้นหรือกล่าวได้ว่า ระดับพลังงานเฟอร์มิจะลดระดับไปอยู่ใต้แถบวาเลนซ์มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นพาหะเพิ่มขึ้นยกเว้นที่ความเข้มข้นพาหะ $2.83 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และพบว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของ GaAs:Be จะลดระดับลงไปอยู่ภายใต้แถบวาเลนซ์มากกว่าในกรณีของ GaAs:C เมื่อเทียบในกรณีที่มีความเข้มข้นพาหะใกล้เคียงกัน



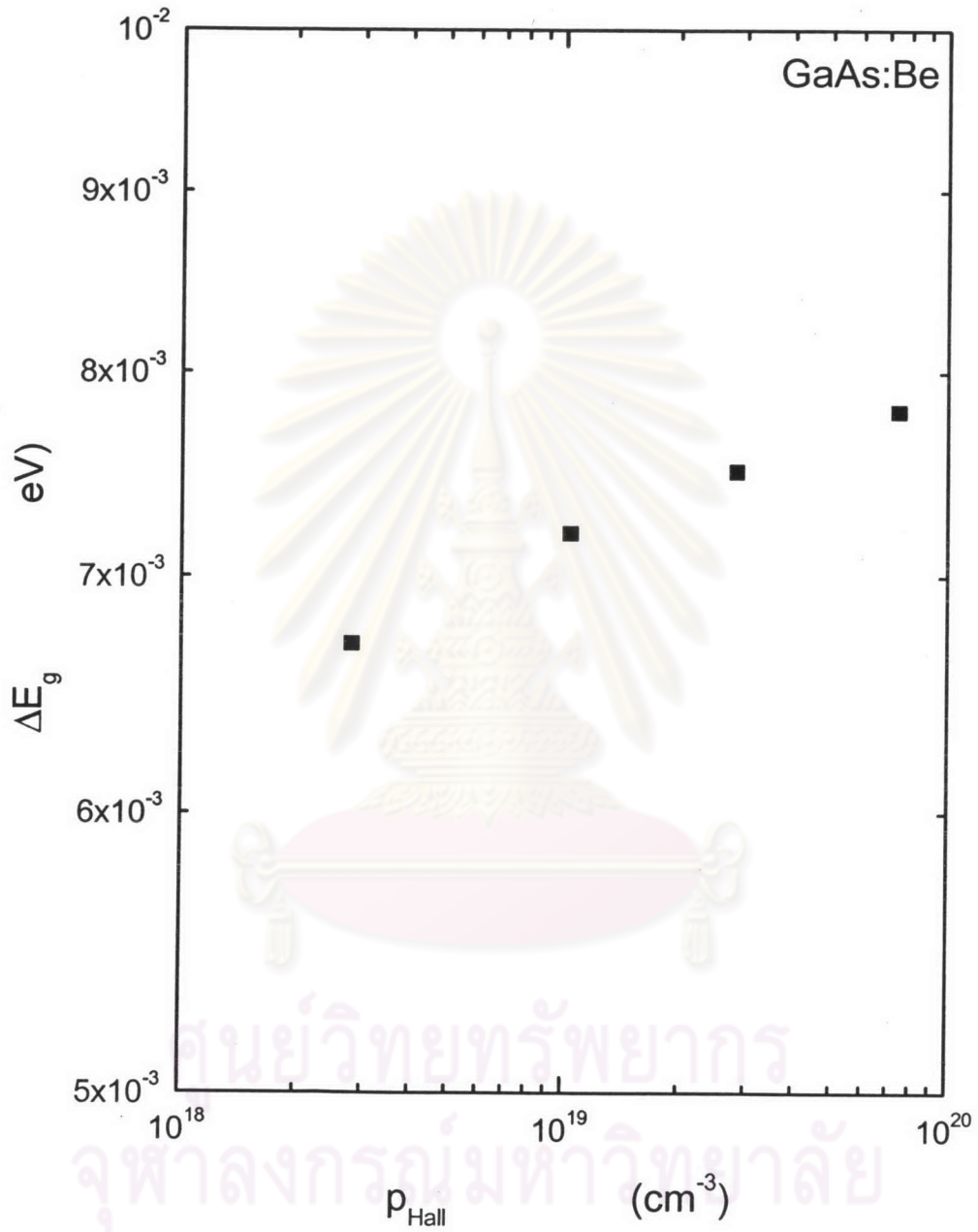
รูปที่ 5.6 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:Be ที่มีความเข้มข้นพาหะ 2.81×10^{18} , 1.04×10^{19} , 2.83×10^{19} และ $7.44 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 K โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน 2.541 eV เป็นตัวกระตุ้น โดยทำการทดลอง ณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ ซึ่งการแทรกสอดที่เห็นเกิดจากการแทรกสอดที่ผิวของฟิล์มบางบนแผ่นกรองแสงกรองแสง



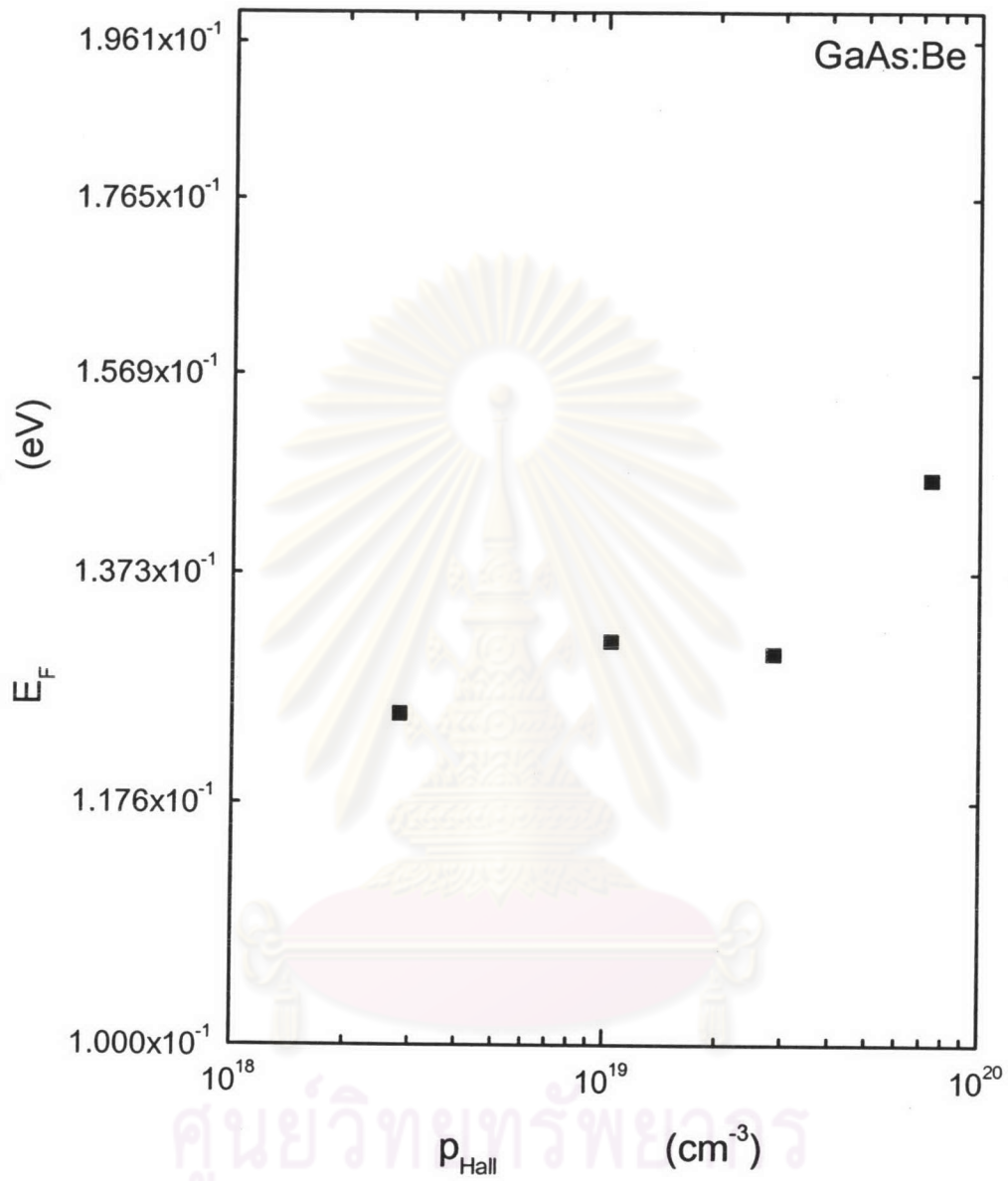
รูปที่ 5.7 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:C ที่มีความเข้มข้นพาหะ 5.2×10^{18} , 6.6×10^{19} และ $1.05 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 K โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน 2.541 eV เป็นตัวกระตุ้น โดยทำการทดลอง ณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ



รูปที่ 5.8 เส้นที่บแสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของ GaAs:Be ที่ทำการปรับให้เรียบ (smooth) ด้วยวิธีฟูเรียร์ ที่ความเข้มข้นพาหะ 2.81×10^{18} , 1.04×10^{19} , 2.83×10^{19} และ $7.44 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน 2.541 eV เป็นตัวกระตุ้น เส้นประแสดงผลการปรับแก้สเปกตรัมที่ได้กับสมการที่ (5.15)



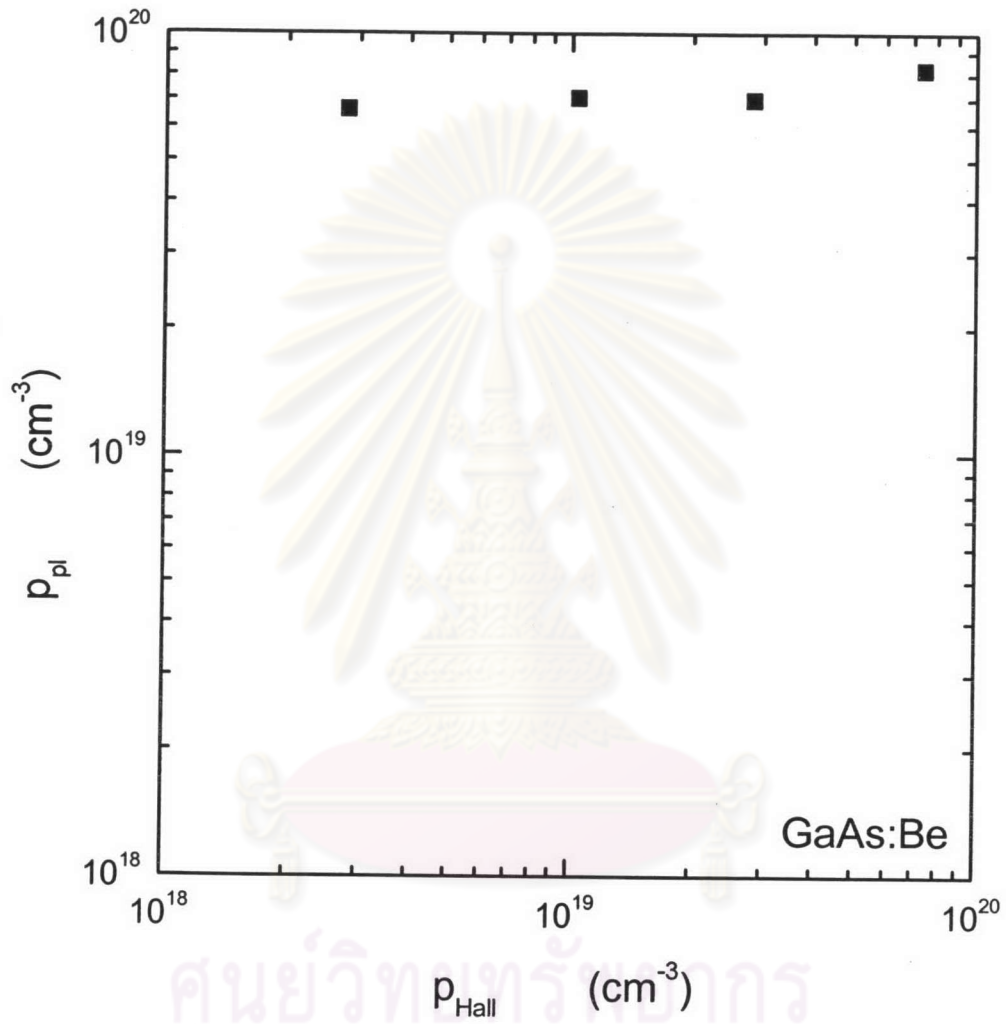
รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของช่องว่างแถบพลังงาน (ΔE_g) และความเข้มข้นพาหะ (p_{Hall}) ของ GaAs:Be ซึ่งได้จากการปรับแปรการเปล่งแสงที่ทำให้เปรียบกับสมการที่ (5.15)



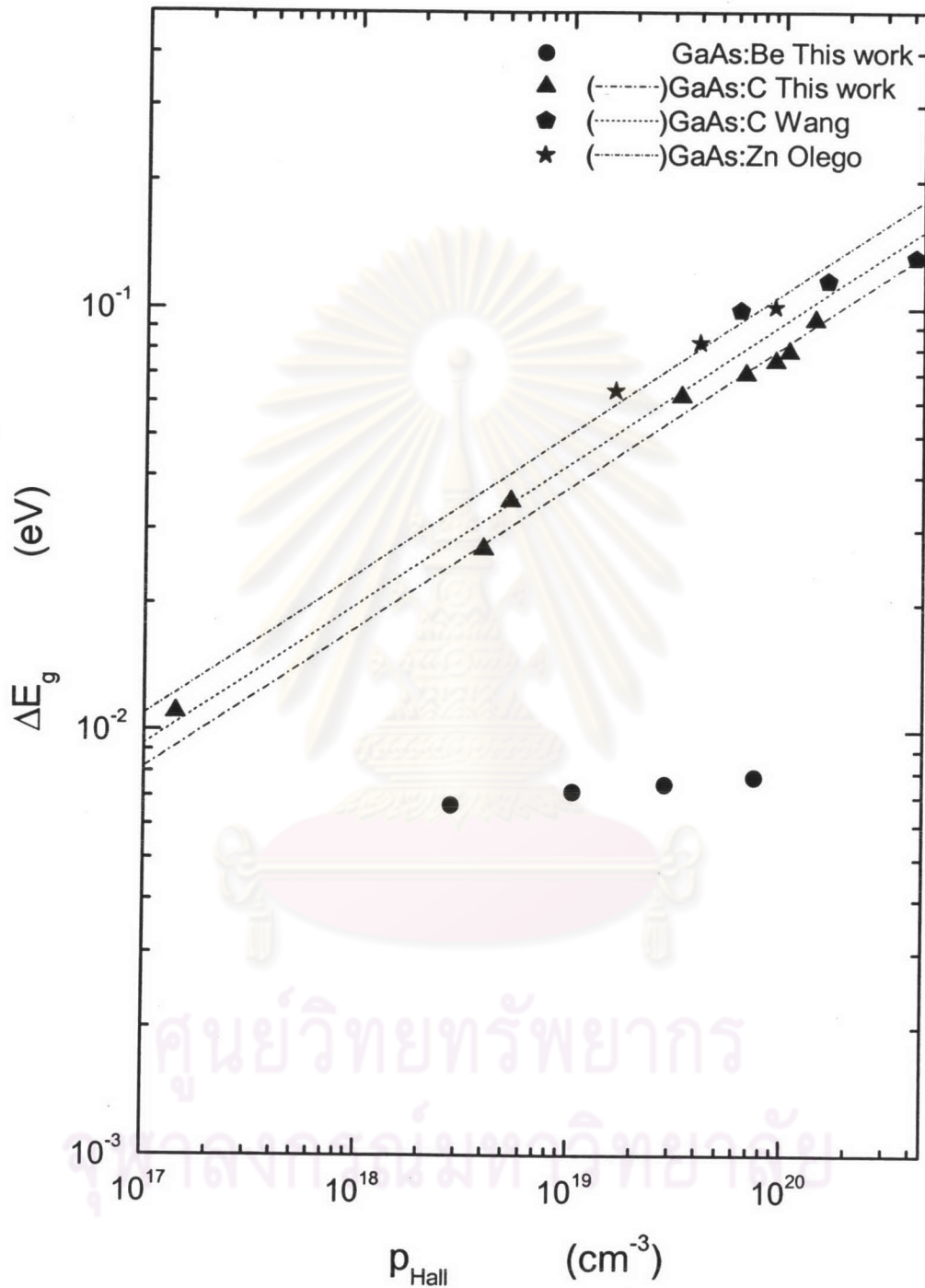
รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นพาหะ (p_{Hall}) และระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ที่ต่ำกว่าแถบวาเลนซ์ของ GaAs:Be ซึ่งได้จากการปรับแก้สเปกตรัมการเปล่งแสงที่ทำให้เปรียบกับสมการที่ (5.15)

รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการทดลองทางแสง (p_{pl}) และความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (p_{Hall}) ของ GaAs:Be โดยตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ p_{pl} ผลจากการคำนวณพบว่าค่า p_{pl} ใน GaAs:Be มีค่าแตกต่างจาก p_{Hall} โดยเฉพาะในกรณีที่มีความเข้มข้นพาหะน้อย

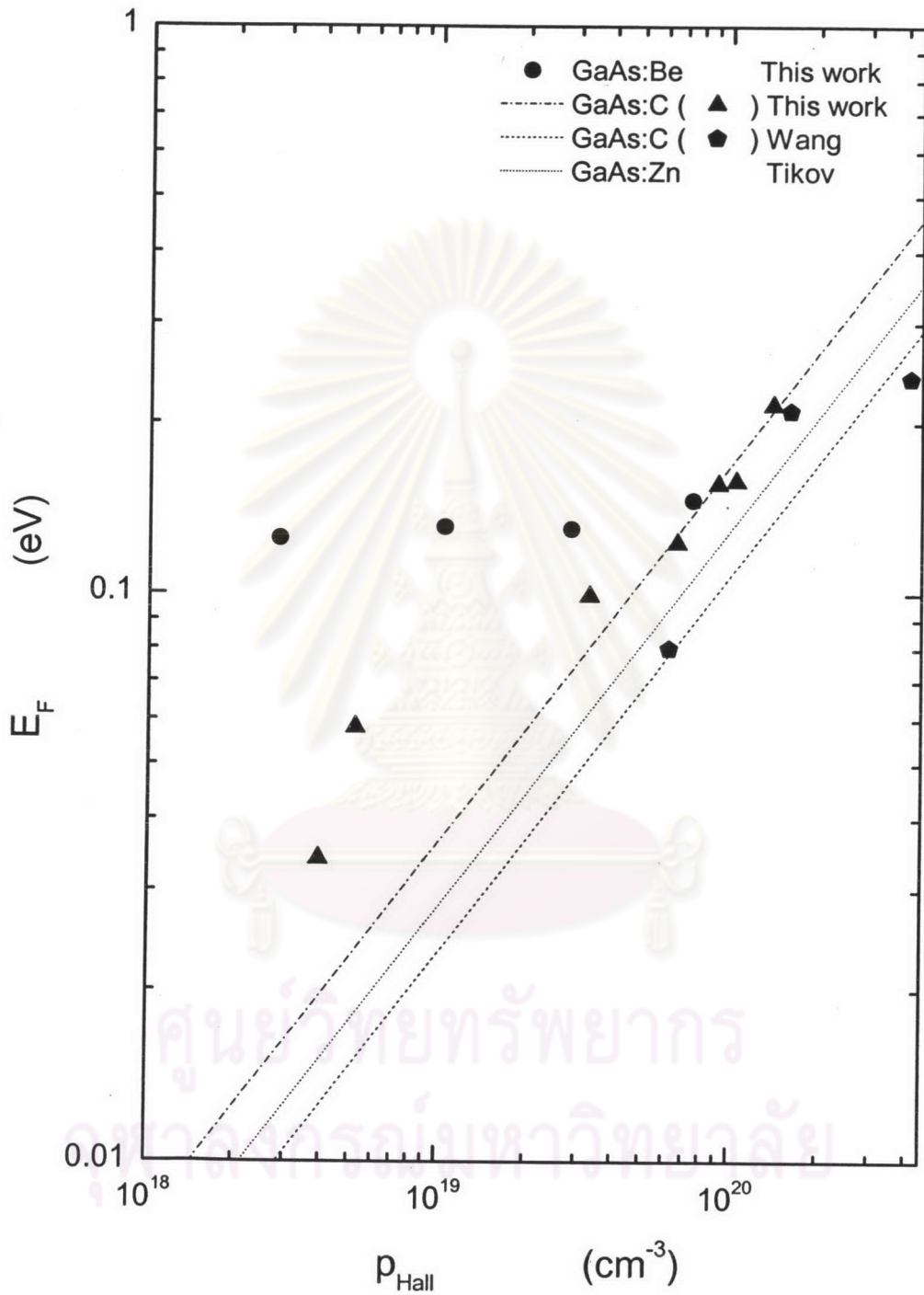
ผลจากการทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:Be ให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับการทดลองการเปล่งแสงที่ใช้อะตอมชนิดอื่นเช่น C และ Zn ที่เจือปนใน GaAs โดยรูปที่ 5.12 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่าง ΔE_g กับ p_{Hall} ซึ่งได้จากการทดลองการเปล่งแสงในครั้งนี้และยังรวมข้อมูลของ Wang และคณะ [34] ซึ่งใช้ GaAs:C และงานของ Olego และคณะ [33] ซึ่งใช้ GaAs:Zn ในการทดลองอีกด้วย โดยเส้นประในแต่ละกรณี แสดงถึงผลการปรับแก้สมการที่ (5.24) กับผลการทดลองที่ได้ ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของระดับช่องว่างแถบพลังงานที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นพาหะในกรณีที่ใช้ Be เป็นอะตอมเจือปน มีค่าน้อยกว่าการใช้อะตอมชนิดอื่นเป็นอะตอมเจือปน Zhang และคณะ [36] ได้รายงานว่าการเปล่งแสงใน GaAs:Be มีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นพาหะแตกต่างจากกรณีของ GaAs:Zn แต่ยังไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้ ซึ่งความแตกต่างนี้อาจมีผลต่อการปรับแก้สมการที่ (5.15) กับสมการเปล่งแสงจึงทำให้ผลของ GaAs:Be แตกต่างจากการใช้อะตอมตัวอื่นเจือปนใน GaAs นอกจากนี้รูปที่ 5.13 ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_F และ p_{Hall} เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่มีการเจือ Be, C และ Zn โดย E_F ของ GaAs:C ได้จากการทดลองในครั้งนี้และข้อมูลที่ได้จาก Wang และคณะ [31] และ E_F ของ GaAs:Zn ได้จากการวิเคราะห์ของ Tikov และคณะ [30]



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการทดลองทางแสง (p_{pl}) และ ความเข้มข้นพาหะที่ได้จากการวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (p_{Hall}) ของ GaAs:Be



รูปที่ 5.12 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่าง ΔE_g กับ p_{Hall} ซึ่งได้จากการทดลองการเปล่งแสงในครั้ง
นี้และยังรวมข้อมูลของ Wang และคณะ [34] ซึ่งใช้ GaAs:C และงานของ Olego และคณะ [33] ซึ่ง
ใช้ GaAs:Zn ในการทดลองอีกด้วย โดยเส้นประในแต่ละกรณี แสดงถึงผลการปรับแก้สมการที่ (5.24)
กับผลการทดลองที่ได้



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_F และ p_{Hall} เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีที่มีการเจือ Be, C และ Zn โดย E_F ของ GaAs:C ได้จากการทดลองในครั้งนี้และข้อมูลที่ได้จาก Wang และคณะ [31] และ E_F ของ GaAs:Zn ได้จากการวิเคราะห์ของ Tikov และคณะ [30]

5.4 สรุปผลการทดลอง

สเปกตรัมการเปล่งของ GaAs:C ที่อุณหภูมิห้องได้ถูกปรับแก้กับสมการ $I(E) \propto \rho_h(E)f_h(E)$ เพื่อทราบค่าพารามิเตอร์ E_g และ E'_F โดยอาศัยผลจากการไม่อนุรักษ์โมเมนตัม ($k \neq 0$) เนื่องจากการเติมอะตอมเจือปนในสารเป็นปริมาณมากทำให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงโดย

$E_g(p) = E_g(0) - (1.76 \pm 0.04 \text{ cm.eV}) \times 10^{-8} p^{1/3}$ นอกจากนี้ผลของการเติมอะตอมเจือปนยังทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิซึ่งเดิมอยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำลดระดับพลังงานลงมาอยู่ต่ำกว่าแถบวาเลนซ์เป็นฟังก์ชัน $E_F = (7.80 \pm 0.38 \text{ cm}^2 \cdot \text{eV}) \times 10^{-15} p^{2/3}$ เมื่อ E_F วัดลงมาจากแถบวาเลนซ์ผลจากการคำนวณค่าความเข้มข้นพาหะจากปรากฏการณ์การเปล่งแสงกับความเข้มข้นพาหะจากปรากฏการณ์ฮอลล์ให้ความสัมพันธ์ $p_{pl} = (1.00 \pm 0.06) p_{Hall}$ โดยข้อมูลจะสอดคล้องในกรณีที่มีความเข้มข้นพาหะสูงกว่า $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งเป็นผลจากสมการที่ใช้ในการปรับแก้สเปกตรัม ซึ่งใช้กับกรณีที่มีการเจือในปริมาณสูง ฉะนั้นผลจากการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงมาหาความเข้มข้นพาหะ โดยวิธีการนี้เป็นวิธีที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง

ผลการทดลองการเปล่งแสงของ GaAs:Be พบสเปกตรัมที่มีลักษณะที่คาดว่าเกิดจากการแทรกสอดเนื่องจากแผ่นกรองแสงที่ใช้ จึงได้ทำการปรับสเปกตรัมให้เรียบ (smooth) ด้วยวิธีฟูเรียร์ สเปกตรัมที่ได้ถูกปรับแก้กับสมการที่สมมติให้อิเล็กตรอนเกิดการเปลี่ยนสถานะแบบทางอ้อม ผลการปรับสเปกตรัมที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างแถบพลังงานต่อระดับความเข้มข้นพาหะในสารที่ใช้อะตอม Be เจือปนมีค่าน้อยกว่าการใช้อะตอม C หรือ Zn เจือปน ซึ่งผลนี้ไม่เป็นที่แน่ชัดว่าเป็นลักษณะเฉพาะของ Be หรือเป็นผลเนื่องจากการปรับสเปกตรัม