

บทที่ 2

ทฤษฎี

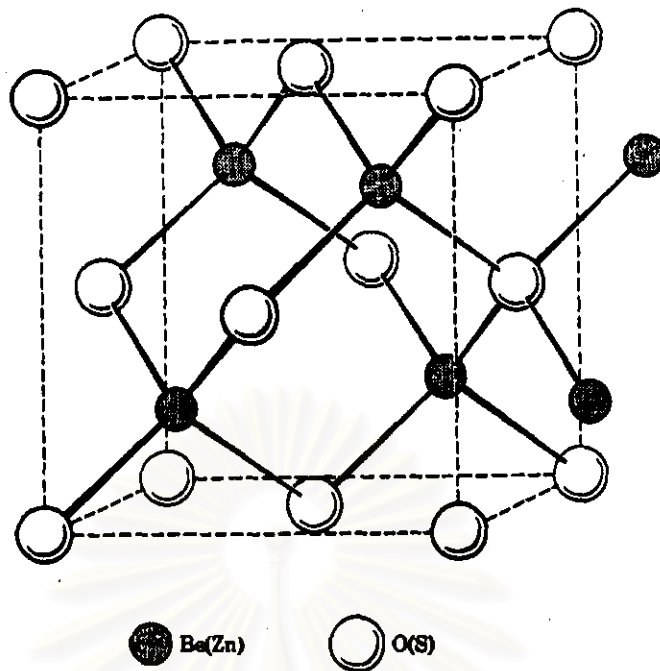
ถึงแม้จะมีการศึกษาวัสดุอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์กันมาเป็นระยะเวลาานพอสมควรแล้ว แต่สมบัติของวัสดุนี้ก็ยังไม่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย การศึกษาวัสดุอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องค้นคว้าความรู้พื้นฐานที่ได้มีการศึกษาเริ่มต้นไว้แล้ว และนำความรู้ที่ได้มาปรับใช้ในงานวิจัยนี้ ความรู้ที่จำเป็นดังกล่าวสามารถแบ่งเป็นหัวข้อได้ ดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุแกลเลียมอาร์เซไนด์, อินเดียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

2.1.1 โครงสร้างและค่าคงที่ที่สำคัญ

จากการวัดโครงสร้างผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำที่เกิดจากธาตุหมู่ III และ V ด้วยวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสี X (X-ray diffraction) พบว่าผลึกที่ประกอบไปด้วยธาตุสองธาตุจะมีโครงสร้างแบบ Zinc-blende ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยมีอะตอมของธาตุทั้งสองกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งผลึก อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ผลึกมีธาตุหมู่ III สองชนิด เช่น ผลึกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ จะพบว่าโครงสร้างผลึกที่พบได้ทั่วไปมีสองแบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบ Cu-Pt ซึ่งมีการเรียงตัวของอะตอมแบบซ้ำๆ กันในทิศทางใดทิศทางหนึ่งใน 4 ทิศทางของ $\{111\}$ และโครงสร้างแบบ Cu-Au-I ซึ่งจะมีการเรียงซ้ำในทิศทางหนึ่งใน 4 ทิศทางของ $\{100\}$ ในโครงสร้างทั้งสองแบบนี้ได้มีการคำนวณพบว่า โครงสร้างแบบ Cu-Au-I จะมีระดับพลังงานต่ำกว่าโครงสร้างแบบ Cu-Pt ผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีธาตุสามชนิดจะมีโครงสร้างแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรและเงื่อนไขต่างๆ ในขณะทำการปลูกผลึกนั้น เช่น ชนิดของแผ่นฐาน ระยะเวลาของแผ่นฐาน อุณหภูมิของแผ่นฐาน และเทคนิคพิเศษที่ใช้ในการปลูกผลึก เป็นต้น [2]

ค่าคงที่ที่สำคัญของวัสดุชนิดหนา (Bulk Material) ของผลึกชนิดอินเดียมอาร์เซไนด์และแกลเลียมอาร์เซไนด์แสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 จะสังเกตเห็นได้ว่าวัสดุอินเดียมอาร์เซไนด์จะมีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron Mobility) สูงมาก แต่มีค่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามแคบกว่า และมีค่าคงที่โครงสร้างผลึกมากกว่า เมื่อนำเอาวัสดุทั้งสองมารวมกันกลายเป็นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) จะทำให้ได้วัสดุที่มีลักษณะสมบัติอยู่กึ่งกลางระหว่างอินเดียมอาร์เซไนด์และแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยมีค่าคงที่ต่างๆ เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบ Zinc-blende

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของวัสดุอินเดียมอาร์เซไนด์ และแกเลียมอาร์เซไนด์ [3-5]

วัสดุ	ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน μ (300 K, cm^2/Vs)	ความกว้างแถบพลังงานต้องห้าม E_g (eV)	ค่าคงที่โครงผลึก a (Å)
GaAs	9,200	1.424	5.6533
InAs	30,000	0.354	6.0584

$$E_g = 0.324 + 0.7(1-x) + 0.4(1-x)^2 \quad \text{ในกรณีที่ไม่มีความเค้น}$$

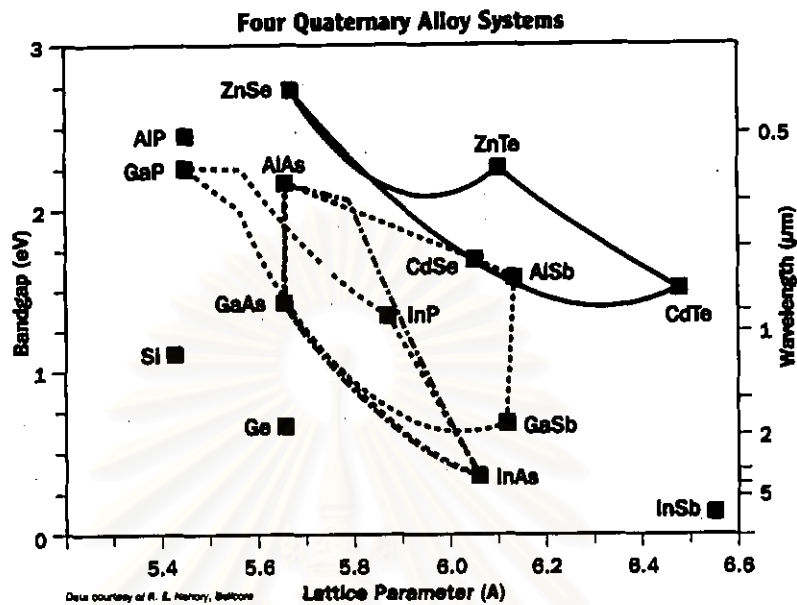
$$E_g = 0.36 + 0.505(1-x) + 0.555(1-x)^2 \quad \text{ในกรณีที่มีความเค้น}$$

$$HH-LH \text{ Splitting} = 0.42x(\text{eV}) \quad (1)$$

$$a(\text{Å}) = 6.058 - 0.405(1-x) \quad (2)$$

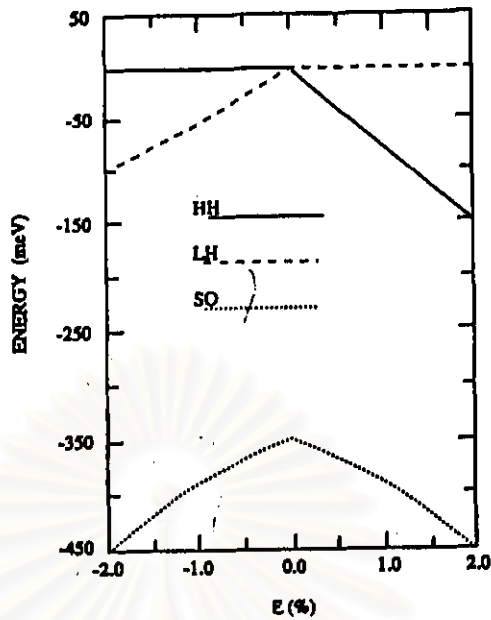
HH-LH Splitting คือ การแยกออกจากกันของระดับพลังงานของโฮลหนักและโฮลเบา [6] จะเกิดกรณีที่ชั้นอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่สร้างมีความเค้น รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึกกับค่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามของสารประกอบกึ่งตัวนำในระบบธาตุ 4 ชนิด (Quaternary Compound Semiconductor) ในรูปแสดงวงจรรของธาตุ 4 วงจรได้แก่ InGaAsP,

InAlGaAs, GaAlAsSb และ ZnCdSeTe รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความห่างระหว่างระดับพลังงานของโฮลหนักและโฮลเบาที่เปอร์เซ็นต์ความเค้น ϵ (%) [7]

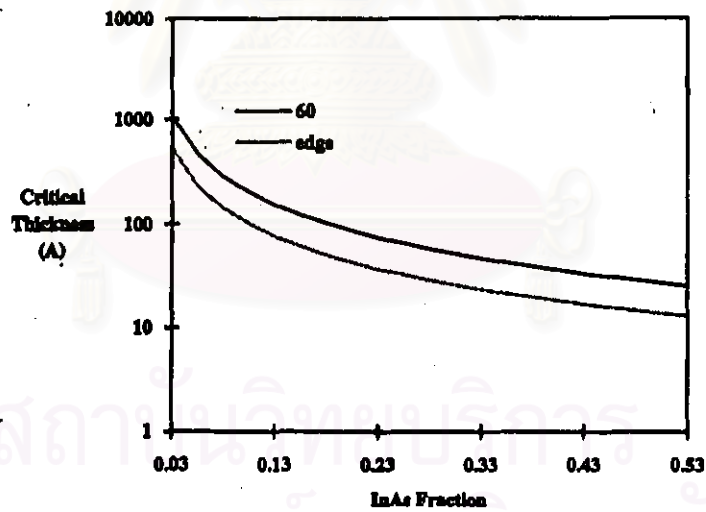


รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึกและค่าความกว้างแถบพลังงานของสารประกอบกึ่งตัวนำในระบบธาตุ 4 ชนิด (Quaternary Compound)

ในกรณีการสร้างชั้นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งมีค่าคงที่โครงสร้างผลึกมากกว่าบนแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกน้อยกว่า จะเกิดภาวะความไม่เข้ากันของผลึก (Lattice Mismatched) รอยต่อระหว่างชั้นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์และแกลเลียมอาร์เซไนด์จะมีความเค้น (Strained) เกิดขึ้น ถ้าปลูกชั้นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์เพียงบางๆ ก็จะได้ชั้นอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความสมบูรณ์ของผลึกคืออยู่ แต่เมื่อปลูกจนความหนาของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์มีขนาดถึงค่าความหนาวิกฤต (Critical Thickness) ผลึกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ก็จะเริ่มเกิดความบกพร่อง (Defects) ขึ้น ค่าความหนาวิกฤตจะสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนอะตอม (x) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [8] ในรูปนี้ เส้นกราฟทั้งสองแทนค่าความหนาวิกฤตโดยกำหนดเงื่อนไขจากชนิดของข้อบกพร่องทางตำแหน่ง (Dislocation) ซึ่งชนิดที่พบในโครงสร้างผลึกแบบ Zinc-blende ได้แก่ แบบขอบ (Edge Dislocation) และแบบ 60° จากระนาบ (100) ตามธรรมชาติโครงสร้างแบบ Zinc-blende จะมีข้อบกพร่องทางตำแหน่งชนิด 60° มากกว่าแบบขอบ การประมาณค่าความหนาวิกฤตจึงใช้เส้นกราฟ 60° เป็นหลัก



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความห่างของระดับพลังงานของโฮลหนักและโฮลเบา กับเปอร์เซ็นต์ความเค้น E (%)



รูปที่ 2.4 ค่าความหนาวิกฤตสำหรับ $In_xGa_{1-x}As$ ที่ปลูกบน $GaAs$

2.1.2 ลักษณะสมบัติทางแสง

วัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ อินเดียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (Direct Bandgap) จึงทำให้เกิดการรวมตัวแบบเปล่งแสง มากกว่าการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง วัสดุทั้งสามจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์ทางแสง ค่าความยาวคลื่น

ของแสงที่เปล่งออกมาจากวัสดุทั้งสามขึ้นอยู่กับความกว้างของแถบพลังงานต้องห้าม และเป็นไปตามสมการที่ (3)

$$\lambda(nm) = \frac{1240}{E_g(eV)} \quad (3)$$

ดังนั้น ที่อุณหภูมิ 300 K ค่าความยาวคลื่นของแสงที่วัสดุแกเลียมอาร์เซไนด์ และอินเดียมอาร์เซไนด์ชนิดหนาเปล่งออกจะอยู่ที่ประมาณ 870 nm และ 3500 nm ส่วนวัสดุอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ชนิดหนาซึ่งมีความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามอยู่ระหว่างค่า 1.424 eV และ 0.354 eV ก็จะมีค่าความยาวคลื่นอยู่ระหว่างค่า 870 nm และ 3500 nm ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวครอบคลุมแสงย่านอินฟราเรด ซึ่งเป็นย่านที่มีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น งานสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง อุปกรณ์เก็บข้อมูลชนิด CDROM เป็นต้น

2.2 การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy, MBE)

2.2.1 หลักการ

กระบวนการที่ใช้ในการสร้างชั้นผลึกหรือชั้นอพิแทกซี (Epitaxy) มีหลายวิธี การปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลเป็นการปลูกผลึกภายใต้ภาวะสุญญากาศระดับสูง (Ultrahigh Vacuum) ภายในห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) โดยการพ่นไอของอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ต้องการปลูกตรงไปยังผิวหน้าแผ่นฐาน (Substrate) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงพอเหมาะแก่การเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างอะตอมและก่อตัวเป็นโครงสร้างผลึกในที่สุด ก๊าซที่ใช้เป็นแหล่งอะตอมหรือโมเลกุลนั้นมีหลายลักษณะ ทั้งที่เป็นแหล่งก๊าซบริสุทธิ์จากถังโดยตรง หรือเป็นของแข็งบริสุทธิ์ที่ไม่เป็นผลึก เช่น แท่งอาร์เซนิกบริสุทธิ์ แท่งอินเดียมบริสุทธิ์ เป็นต้น แล้วนำมาทำให้ร้อนภายในเบ้า (Crucible) แล้วจึงพ่นเป็นไอออกมา ภายใต้ภาวะสุญญากาศระดับสูงนั้นอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกพ่นไปยังผิวหน้าแผ่นฐานจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ไปมาบนผิวหน้า จนกว่าแต่ละอะตอมจะไปตั้งยังตำแหน่งที่มีพลังงานเหมาะสม แล้วก่อพันธะที่ช่วยลดพลังงานของผิวหน้าแผ่นฐานนั้น ทำให้ได้ชั้นผลึกที่มีความสมบูรณ์และมีความบริสุทธิ์สูง และเนื่องจากในสภาวะก๊าซจะมีอะตอมหรือโมเลกุลของธาตุต่างๆ น้อยกว่าสถานะอื่น (เช่น สถานะของเหลวในกระบวนการ Liquid Phase Epitaxy) ทำให้กระบวนการนี้มีอัตราการเกิดผลึก (Growth Rate) ต่ำ ทำให้เราสามารถควบคุมความหนาของชั้นผลึกได้อย่างแม่นยำ และผลึกที่ได้ก็จะมีคุณภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ ด้วย

2.2.2 กลไกในการเกิดผลึก

เมื่อสารที่อยู่ภายในเข้าเปลี่ยนแปลงสภาพกลายเป็นไอ และถูกพ่นออกไปยังผิวหน้าแผ่นฐานอะตอมของธาตุหมู่ III และ V จะจับตัวรวมกันอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น In-As และ Ga-As หรืออยู่ในรูปโมเลกุลของ As_2 หรือ As_4 ปกคลุมอยู่ที่ผิวหน้า คู่ของอะตอมดังกล่าวจะเคลื่อนตัวไปมาบนผิวหน้าแผ่นฐานก่อนจะแตกตัวออกเป็นอะตอมเนื่องจากความร้อน แล้วจึงก่อพันธะเป็นโครงผลึกกลไกหลังจากที่สารประกอบแตกตัวออกเป็นอะตอมสามารถศึกษาได้จากการก่อตัวของผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งเป็นตัวแทนของธาตุหมู่ III และ V ดังนี้ [9]

- ก. เมื่ออะตอมแกเลียมเคลื่อนตัวมาบริเวณที่มีอาร์เซนิคอยู่ในผิวหน้าของโครงผลึก อะตอมแกเลียมจะแบ่งสถานะ SP^2 สองสถานะแก่อะตอมอาร์เซนิค เหลือสถานะ SP^2 ที่มีอิเล็กตรอนไม่ครบสองตัวอีกหนึ่งสถานะอยู่ในลักษณะตั้งฉากกับผิวหน้าของผลึก เนื่องจากสถานะที่เหลือนี้มีความเป็นตัวรับ (Acceptor) ที่แรงโดยธรรมชาติ ดังนั้นพันธะระหว่างอะตอมแกเลียมและอาร์เซนิคที่เพิ่งเกิดขึ้นจึงไม่เสถียร อะตอมแกเลียมจะสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าโมเลกุล Ga-As ที่หนักกว่า ดังนั้นอะตอมแกเลียมจึงสามารถเคลื่อนตัวภายใต้บรรยากาศของอาร์เซนิคที่ต่ำกว่าได้ดีและไกลกว่าเมื่อเคลื่อนที่ภายใต้บรรยากาศของอาร์เซนิคที่สูง
- ข. เมื่ออะตอมแกเลียมเคลื่อนตัวมาบริเวณที่มีแกเลียมอยู่ในผิวหน้าของโครงผลึก อะตอมแกเลียมดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะก่อพันธะโลหะกับอะตอมของแกเลียมที่อยู่ผิวหน้า ในพันธะโลหะอิเล็กตรอนจะมีการกระจายที่กว้างซึ่งจะทำให้อะตอมแกเลียมเคลื่อนตัวไปจากผิวหน้าแกเลียมได้ง่าย เงื่อนไขนี้จะทำให้เกิดผลึกในลักษณะที่เป็นชั้นอะตอมทีละชั้นได้ เนื่องจากแกเลียมจะไม่เกาะติดกับแกเลียมชั้นถัดมาที่จะเกิดขึ้นได้จึงเป็นได้เพียงชั้นอาร์เซนิคเท่านั้น
- ค. เมื่ออะตอมอาร์เซนิคเคลื่อนตัวมาบริเวณที่มีอาร์เซนิคอยู่ในผิวหน้าของโครงผลึก อะตอมของอาร์เซนิคที่อยู่ในโครงผลึกจะจัดตัวเองโดยสร้างพันธะ P^3 หรือ SP^3 กับอะตอมอาร์เซนิคที่อยู่ติดกัน ดังนั้นผิวหน้าอาร์เซนิคจะค่อนข้างเสถียรเมื่อเทียบกับผิวหน้าของแกเลียมโมเลกุลของ As_2 และ As_4 เองก็เสถียร ดังนั้นอะตอมของอาร์เซนิคจึงถูกดูดซับเข้าไปยังผิวหน้าอาร์เซนิคได้น้อย และสามารถเคลื่อนตัวไปได้ดี เงื่อนไขนี้ส่งผลเช่นเดียวกับกรณีที่อะตอมแกเลียมเคลื่อนตัวไปบริเวณที่มีแกเลียมอยู่ที่ผิวหน้าของผลึก
- ง. เมื่ออะตอมอาร์เซนิคเคลื่อนตัวมาบริเวณที่มีแกเลียมอยู่ในผิวหน้าของโครงผลึก ผิวหน้าของผลึกที่ประกอบไปด้วยแกเลียมจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากเนื่องจากยังเหลือสถานะ SP^2 ที่ยังมีอิเล็กตรอนไม่ครบอยู่ ดังนั้นโมเลกุลอาร์เซนิคที่เคลื่อนตัวมาบริเวณนี้จะแตกตัวออกเป็นอะตอมอาร์เซนิคและก่อพันธะกับผิวหน้านี้อะตอมอาร์เซนิคเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะก่อพันธะ SP^3 ที่มีเสถียรภาพสูงกับอะตอมแกเลียมข้างใต้และกับอะตอมอาร์เซนิคที่อยู่ข้างๆ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอะตอมอาร์เซนิคบนผิวหน้าแกเลียมจึงช้ามาก อย่างไรก็ตาม อะตอมอาร์เซ

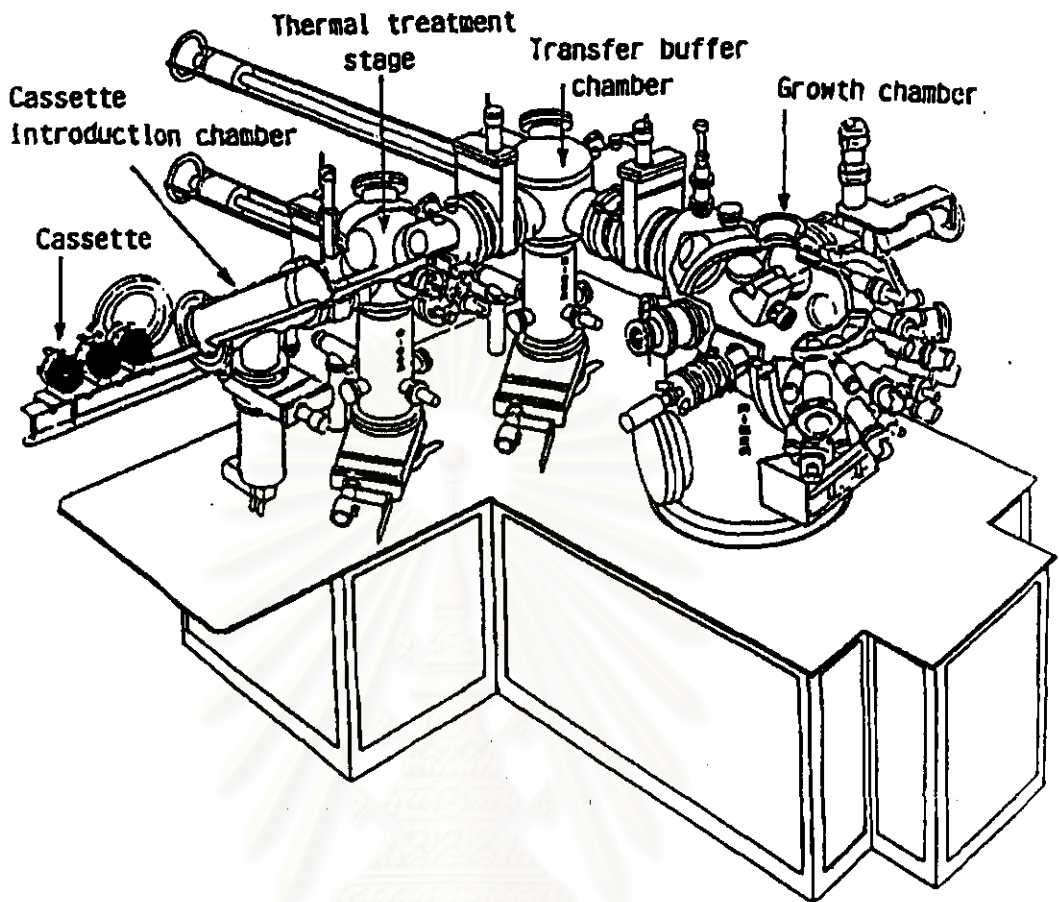
นิกเดียวกัน ไม่สามารถสร้างพันธะ SP³ กับอะตอมแกเลียมที่อยู่ข้างใต้ได้โดยปราศจากอะตอมอาร์เซนิกที่อยู่ข้างๆ ดังนั้นอะตอมอาร์เซนิกนี้จึงเคลื่อนตัวต่อไปไปยังบริเวณที่มีอะตอมอาร์เซนิกอื่นๆ ด้วย

กระบวนการทั้งหมดข้างต้นเกิดตลอดทั่วผิวหน้าผลึกซึ่งประกอบไปด้วยไอของธาตุและโมเลกุลต่างๆ ไอดังกล่าวจะเกิดขบวนการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือโมเลกุลของกระบวนการและทำให้มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องของผลึกได้ ระยะที่อะตอมหรือโมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ไปได้โดยไม่มี การชนกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นเรียกว่า ระยะปลอดการชน (Mean Free Path) ระยะปลอดการชน มีผลต่อความสมบูรณ์ของผลึก ดังนั้นการควบคุมเงื่อนไขความดันของไอของสารแต่ละชนิดจึงเป็น ปัจจัยสำคัญที่จะต้องทำการศึกษาเพื่อที่จะได้เงื่อนไขที่ทำให้สร้างผลึกที่มีคุณภาพดี

อนึ่ง การแตกตัวของโมเลกุล Ga-As, In-As, As₂ และ As₄ ในกระบวนการเกิดผลึกขึ้นอยู่กับพลังงานกระตุ้นที่ให้แก่มอเลกุลเหล่านั้น เช่น การกระตุ้นจากความร้อนของแผ่นฐาน การกระตุ้นจากการเร่งอนุภาคด้วยสนามไฟฟ้า หรือการกระตุ้นด้วยแสง เป็นต้น การแตกตัวเหล่านี้ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวไปบนผิวหน้าของอะตอมของธาตุแต่ละชนิด และการเคลื่อนตัวของอะตอมต่างๆ ดังกล่าว จะมีผลต่อคุณภาพของผลึกที่ได้ ดังนั้น การศึกษาถึงอุณหภูมิแผ่นฐานอันเป็นเงื่อนไขพื้นฐาน สำหรับการปลูกผลึกจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างผลึกที่มีคุณภาพดี

2.2.3 ระบบ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีระบบสำหรับปลูกผลึกโดยวิธีการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล เป็นเครื่องที่สร้างโดยบริษัท RIBER รุ่น 32P ประกอบไปด้วยห้องสำหรับบรรจุแผ่นฐาน (Loading Chamber) ห้องสำหรับเตรียมแผ่นฐาน (Introduction Chamber) ห้องสำหรับเคลื่อนย้าย (Transfer Chamber) และห้องปลูกผลึก (Growth Chamber) เรียงต่อเนื่องกันไปตามลำดับ โดยแต่ละห้องจะมีประตูสำหรับแยกบรรยากาศของแต่ละห้อง และมีปั๊มชนิดไอออน (Ion Pump) และติตาเนียมซับลิเมชัน (Titanium Sublimation Pump) ห้องละหนึ่งคู่ (ยกเว้นห้องบรรจุแผ่นฐาน) แต่ละห้องจะมีความดันบรรยากาศแตกต่างกันไปขึ้นกับประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มและสภาพของห้อง โดยปกติห้องเคลื่อนย้ายจะมีภาวะสุญญากาศที่สุดเนื่องจากมีปริมาตรน้อย และห้องบรรจุจะมีสภาวะสุญญากาศเลวที่สุดเนื่องจากอยู่ใกล้ชิดกับบรรยากาศภายนอกมากที่สุด โครงสร้างของระบบปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบปลูกผลึกด้วยถ้ำโมเตกุด RIBER 32P

การเคลื่อนย้ายแผ่นฐานไปมาระหว่างห้องทำได้โดยการใช้ก้านจับระบบแม่เหล็ก (Magnetic Holder) จับเอาบล็อกโมลิบดีนัม (Molybdenum Block) เข้าไปในรถเลื่อน (Trolley) ที่สามารถเลื่อนไปมาบนรางที่เชื่อมห้องบรรจุ ห้องเตรียม และห้องเคลื่อนย้ายไว้ด้วยกัน ก้านจับและรถเลื่อนนี้ถูกควบคุมได้จากภายนอกโดยไม่รบกวนภาวะสุญญากาศของระบบ

การควบคุมกระบวนการสร้างชั้นผลึกทำได้ผ่านระบบคอมพิวเตอร์ หน่วยควบคุมที่แท้จริงนั้นเป็นระบบควบคุมแบบ FIC 11 ของบริษัท EUROTHERM ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตทอนุกรม RS232 ระบบควบคุม FIC 11 ทำหน้าที่ควบคุมหน่วยจ่ายกำลัง (Power Supply Unit) ของเซตของธาตุแต่ละชนิดเพื่อให้เข้าแต่ละอันมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนด ควบคุมอุณหภูมิของหัวจับบล็อก (Manipulator) ในห้องปลูกผลึก ควบคุมการเปิดปิดชัตเตอร์ และวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิและความดัน ในการปลูกผลึกสามารถทำได้โดยการสร้างโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิและชัตเตอร์ของแต่ละเซตให้เปิด-ปิดตามเวลาที่กำหนด

เครื่องมือวัดอื่นๆ ที่ประกอบอยู่ในระบบปลูกผลึกรุ่นนี้ ได้แก่

เครื่องวิเคราะห์มวล (Mass Spectroscopy) สำหรับตรวจดูบรรยากาศของห้องปลูก
ผลึกว่าประกอบไปด้วยธาตุใดๆ ตกค้างอยู่บ้าง

ระบบสร้างแผนภาพ RHEED (RHEED Pattern System) สำหรับตรวจดูสภาพ
พื้นผิวของผลึกขณะทำการปลูกว่ามีความเป็นผลึกหรือไม่ อุปกรณ์ของระบบนี้ประกอบด้วย ปืน
อิเล็กตรอนพร้อมระบบโฟกัส และฉากรับแผนภาพการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอน

ปั๊มที่มีอยู่ในระบบการปลูกผลึกนี้ ประกอบด้วย

ปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm Pump) เป็นปั๊มที่ทำงานโดยปราศจากน้ำมันหล่อลื่น
ป้องกันมิให้มีไอน้ำมันพัดเข้าไปในระบบสุญญากาศ ใช้สร้างสภาวะสุญญากาศจากความดัน
บรรยากาศสู่ระดับประมาณ 10^{-3} torr เป็นปั๊มที่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาเพื่อใช้กับห้องทั้งสี่ได้ จะใช้
ในกรณีที่ต้องการเริ่มสร้างสภาวะสุญญากาศจากความดันบรรยากาศหลังจากปล่อยบรรยากาศเข้า
ไปในแต่ละห้อง

ปั๊มดูดซับ (Absorption Pump) เป็นปั๊มที่ใช้สร้างสภาวะสุญญากาศต่อจากปั๊มได
อะแฟรม ปั๊มนี้อาศัยวัสดุดูดซับอะตอมของก๊าซซึ่งจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงต้องเติม
ไนโตรเจนเหลวให้แก่ปั๊มตลอดเวลาที่ใช้งาน ปั๊มนี้สร้างสภาวะสุญญากาศได้ตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^{-4} torr

ปั๊มไอออน (Ion Pump) จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซแตกตัวเป็นไอออน
และถูกดึงดูดมากักไว้ด้วยสนามไฟฟ้า ปั๊มนี้สร้างสภาวะสุญญากาศได้ตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^{-12} torr อย่าง
ไรก็ตาม อัตราการดูดก๊าซของปั๊มนี้น้อยมาก ทำให้สิ่งอากาศออกได้ช้า หากใช้ที่ความดันใกล้เคียง
 10^{-3} กับห้องที่มีปริมาตรใหญ่ๆ จะใช้เวลานานมาก จะทำให้ปั๊มได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องใช้
ปั๊มดูดซับดึงความดันบรรยากาศลงให้ได้มากที่สุดก่อนจะเปิดใช้ไอออนปั๊ม

ปั๊มติตานิยมซับดิเมชัน (Titanium Sublimation Pump) จะปล่อยอะตอมของติต
านิยมออกไปด้วยลาวความร้อนติตานิยม อะตอมของติตานิยมจะไปจับเอาอะตอมของก๊าซอื่นๆ
เกิดเป็นสารประกอบและเคลื่อนไปเกาะยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่น ที่ผนังห้องปลูกผลึก หรือถูกดูดโดย
ปั๊มไอออน ดังนั้น เพื่อให้ปั๊มชนิดนี้ทำงานได้ดีจำเป็นต้องป้อนไนโตรเจนเหลวแก่ผนังห้องปลูก
ผลึก ปั๊มนี้จะไม่ถูกใช้ขณะทำการปลูกชั้นผลึกอยู่

2.3 โครงสร้างควอนตัมเวลด์ (Quantum Well Structure)

นับเริ่มตั้งแต่มีการศึกษาเกี่ยวกับสเปกตรัมของวัตถุดำ ศาสตร์ที่เรียกว่า กลศาสตร์ควอนตัม
(Quantum Mechanics) ก็ได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นลำดับ สามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ใน
ธรรมชาติได้ใกล้เคียงมาก เช่น ทฤษฎีของบอร์ ก็สามรถคำนวณสเปกตรัมของก๊าซไฮโดรเจนได้
เป็นต้น ในปัจจุบัน กลุ่มนักวิจัย โดยเฉพาะทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้มีการประยุกต์เอาความรู้จาก
กลศาสตร์ควอนตัมมาสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่อาศัยหลักการการทำงานจากปรากฏการณ์ควอนตัม ส่งผล

ให้สิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น เทเซอร์โคโอด ทราสซิสเตอร์ เซลแสงอาทิตย์ เป็นต้น ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง มีความเร็วสูง และประหยัดพลังงานมากขึ้น

หลักของกลศาสตร์ควอนตัมก็คือ ความพยายามที่จะอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับหรือเกิดขึ้นจากวัตถุขนาดเล็กมากๆ ได้ เนื่องจากตลอดช่วงเวลาของการพัฒนาศาสตร์ทางด้านนี้ การทดลองต่างๆ ได้แสดงให้เห็นว่า บางครั้งคลื่นก็แสดงคุณสมบัติที่ควรจะเป็นของวัตถุออกมา เช่น จากการทดลองปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก พบว่าแสงประพุดติตัวเหมือนอนุภาคที่สามารถวิ่งชน ทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออกจากผิวโลหะได้ หรือบางครั้งวัตถุเล็กๆ ก็แสดงคุณสมบัติของคลื่นออกมา เช่น ปรากฏการณ์การแทรกสอดของลำอิเล็กตรอน เป็นต้น เหล่านี้เองที่ท้าทายเหล่านักวิทยาศาสตร์ให้พยายามสร้างวิธีการคำนวณเพื่ออธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ หนึ่งในวิธีการคำนวณที่เป็นที่รู้จักวิธีหนึ่งก็คือ การคำนวณด้วยสมการของชโรดิงเจอร์ (Schrodinger Wave Equation) ซึ่งอยู่ในรูปของ

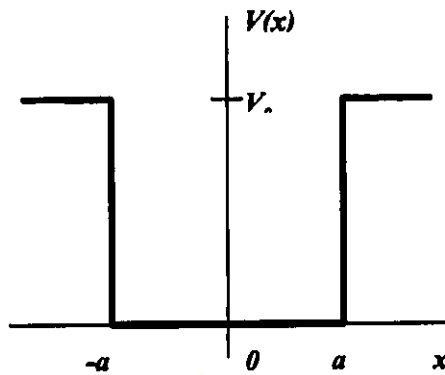
$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(\mathbf{r}, t) \psi \quad (4)$$

ψ ก็คือ ฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) อันเป็นฟังก์ชันที่ใช้อธิบายภาวะความเป็นคลื่นของวัตถุ [10] ฟังก์ชันคลื่น ไม่มีความหมายทางฟิสิกส์ ผลลัพธ์ไม่ได้แทนปริมาณใดทางฟิสิกส์เลย อย่างไรก็ตาม ปริมาณ

$$P(\mathbf{r}, t) = |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 \quad (5)$$

เป็นปริมาณทางสถิติที่เรียกว่า ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นทางตำแหน่ง (Position Probability Density) ซึ่งหมายความว่า ค่า $P(\mathbf{r}, t) dx dy dz$ เป็นค่าความน่าจะเป็นที่จะได้พบอนุภาคที่แทนได้ด้วยฟังก์ชันคลื่นนั้นอยู่ภายในปริมาตร $dx dy dz$ รอบจุด \mathbf{r} ณ เวลา t วิธีการคำนวณของชโรดิงเจอร์นี้เป็นวิธีการคำนวณพื้นฐานที่นักวิจัยส่วนใหญ่ใช้เป็นหลักในการอธิบายปรากฏการณ์ โดยเฉพาะปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคเล็กๆ เช่นอิเล็กตรอน หรือใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบสร้างสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้าเพื่อให้สิ่งประดิษฐ์แสดงปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ

ตัวอย่างการคำนวณด้วยวิธีของชโรดิงเจอร์อย่างง่าย ๆ ตัวอย่างหนึ่ง ได้แก่ โครงสร้างควอนตัมเวลล์ (Quantum Well) ซึ่งเกิดจากการเก็บกักอนุภาควิถีภายในบ่อพลังงานศักย์ 1 มิติ (One Dimension) บ่อพลังงานศักย์ก็คือ อาณาบริเวณเล็กๆ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ซึ่งมีระดับพลังงานศักย์ต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ บ่อพลังงานศักย์สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างควอนตัมเวลต์แบบที่มีระดับพลังงานศักย์จำกัดและเป็นขั้น

จากรูปจะเห็นได้ว่า บริเวณ $|x| < a$ เป็นบริเวณที่มีระดับพลังงานศักย์เป็นศูนย์ ขณะที่บริเวณ $|x| > a$ เป็นบริเวณที่มีระดับพลังงานศักย์ V_0 เมื่อพิจารณาตามสมการที่ (4) อนุภาคที่อยู่ภายในบ่อจะ เป็นไปตามสมการที่ (6)

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dx^2} + V_0 u = Eu \quad (6)$$

โดย u คือ ฟังก์ชันคลื่นของอนุภาคภายในเขตในมิติเดียว สมการนี้มีผลเฉลยทั่วไปสำหรับกรณี $E < V_0$ เป็น

$$\begin{aligned} u(x) &= A \sin(\alpha \cdot x) + B \cos(\alpha \cdot x) & ; |x| < a \\ u(x) &= C e^{-\beta x} + D e^{\beta x} & ; |x| > a \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= + \left[\frac{2mE}{\hbar^2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \beta &= + \left[\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (8)$$

เนื่องจากฟังก์ชันคลื่นต้องมีค่าจำกัด ดังนั้นค่า D ต้องเป็นศูนย์เมื่อแทนในคำตอบสำหรับกรณี $x > a$ และค่า C ต้องเป็นศูนย์เมื่อแทนในคำตอบสำหรับกรณี $x < -a$ เมื่อพิจารณาความต่อเนื่องของฟังก์ชัน คลื่น ณ บริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทั้งค่าของฟังก์ชันคลื่นและความชัน du/dx จะได้

$$\begin{aligned} A \sin(\alpha \cdot a) + B \cos(\alpha \cdot a) &= C e^{-\beta a}, & \alpha \cdot A \cos(\alpha \cdot a) - \alpha \cdot B \sin(\alpha \cdot a) &= -\beta \cdot C e^{-\beta a} \\ -A \sin(\alpha \cdot a) + B \cos(\alpha \cdot a) &= D e^{-\beta a}, & \alpha \cdot A \cos(\alpha \cdot a) + \alpha \cdot B \sin(\alpha \cdot a) &= \beta \cdot D e^{-\beta a} \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} 2A \sin(\alpha \cdot a) &= (C - D)e^{-\beta a}, & 2\alpha \cdot A \cos(\alpha \cdot A) &= -\beta \cdot (C - D)e^{-\beta a} \\ 2B \cos(\alpha \cdot a) &= (C + D)e^{-\beta a}, & 2\alpha \cdot B \sin(\alpha \cdot A) &= \beta \cdot (C + D)e^{-\beta a} \end{aligned}$$

หาก $A \neq 0$ และ $C \neq D$ จะได้

$$\alpha \cdot \cot(\alpha \cdot a) = -\beta \quad (9)$$

เช่นเดียวกัน หาก $B \neq 0$ และ $C \neq -D$ จะได้

$$\alpha \cdot \tan(\alpha \cdot a) = \beta \quad (10)$$

เนื่องจากการกำจัดตัวแปร β โดยใช้สมการ (9) และ (10) จะทำให้ได้ $\tan^2(\alpha a) = -1$ ซึ่งจะทำให้ได้ α เป็นจำนวนจินตภาพ และ β เป็นลบ ซึ่งขัดกับสมการที่ (8) และเมื่อไม่พิจารณาค่าขอบเมื่อ A, B, C และ D เป็นศูนย์พร้อมกันทั้งหมด ทำให้ต้องแยกคำตอบออกเป็นสองกรณี ได้แก่

กรณีแรก เมื่อ $A = 0, C = D$ และ $\alpha \cdot \tan(\alpha \cdot a) = \beta$

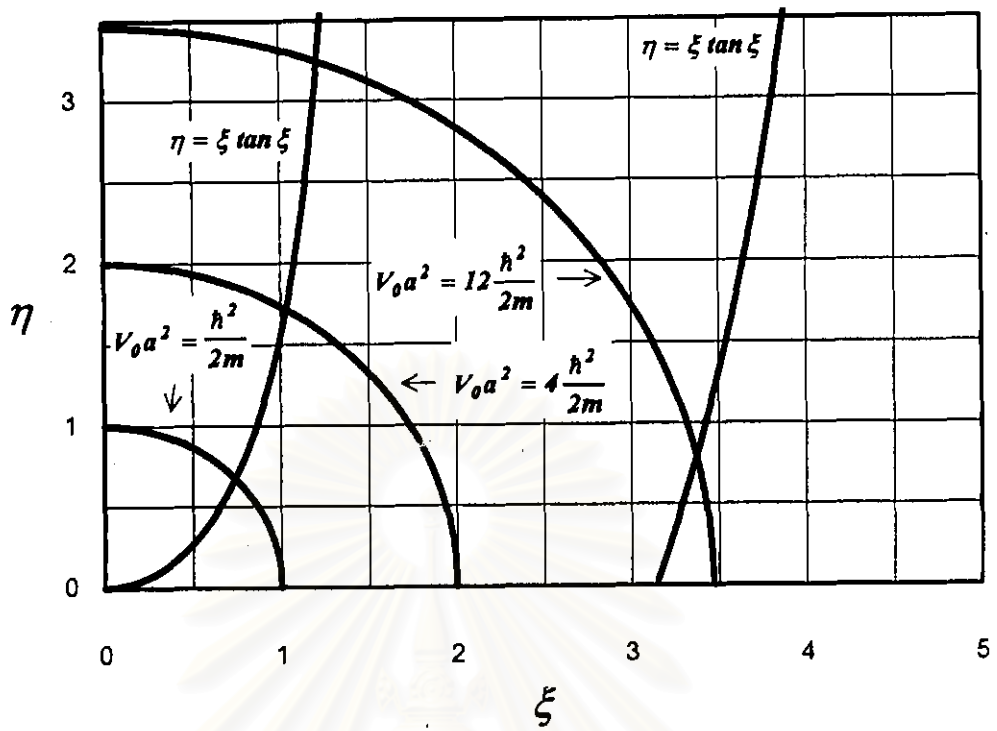
กรณีที่สอง เมื่อ $B = 0, C = -D$ และ $\alpha \cdot \cot(\alpha \cdot a) = -\beta$

การหาฟังก์ชันคลื่นและค่าพลังงานที่สมมูลกัน (E) ทำได้โดยวิธีเชิงเลขและเชิงภาพ วิธีเชิงภาพเริ่มด้วยการกำหนดให้ $\xi = \alpha a$ และ $\eta = \beta a$ จากสมการที่ (10) จะได้ $\xi \tan \xi = \eta$ โดยมี

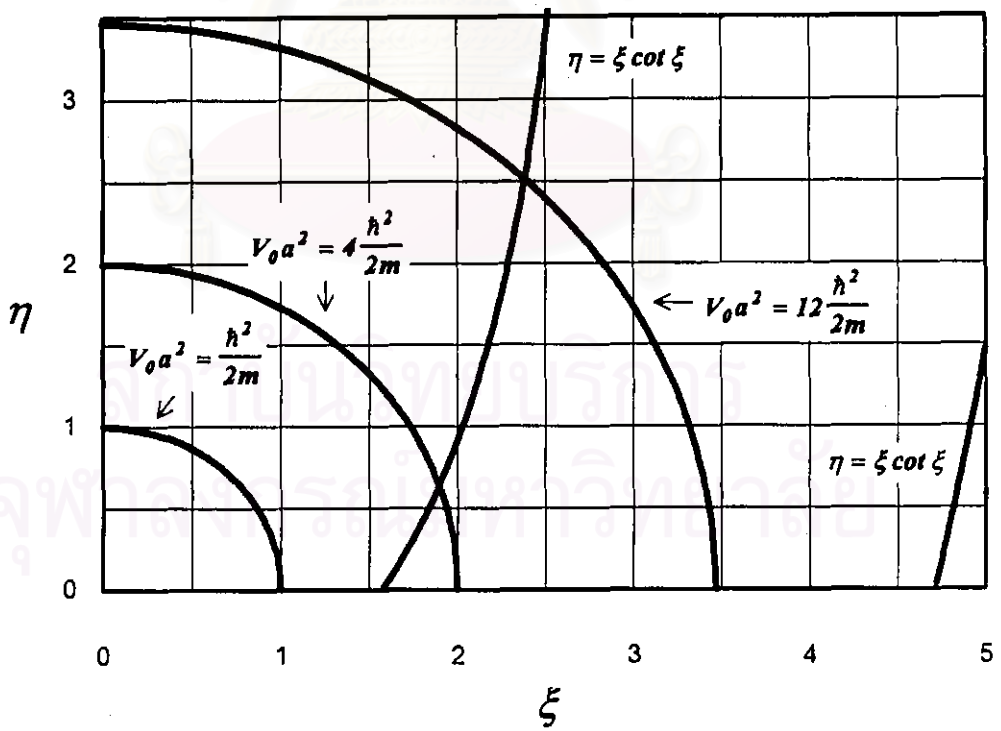
$$\xi^2 + \eta^2 = \frac{2mV_0 a^2}{\hbar^2}$$

เมื่อวาดกราฟของสมการทั้งสองโดยมีแกนนอนเป็น ξ และแกนตั้งเป็น η จะได้กราฟดังรูปที่ 2.7

เนื่องจากค่า ξ และ η ถูกกำหนดให้เป็นบวกเท่านั้น ดังนั้นวงกลมที่ได้จึงมีเพียงในจตุภาคที่ 1 ในรูปที่ 2.7 แสดงวงกลมที่มีรัศมี 3 ค่า ซึ่งจะให้คำตอบหรือจุดตัดจำนวนไม่เท่ากัน ขึ้นกับความยาวรัศมี ในรูปที่ 2.8 ก็คล้ายคลึงกับรูปที่ 2.7 แต่เป็นรูปที่ได้จากสมการที่ (9) จะเห็นได้ว่าการหาค่าตอบก็จะอยู่ในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 2.7 การหาคำตอบจากสมการของโซรดิงเจอร์ด้วยวิธีทางภาพ (Graphical Solution)



รูปที่ 2.8 การหาคำตอบจากสมการของโซรดิงเจอร์ด้วยวิธีทางภาพ (Graphical Solution)

เนื่องจากโครงสร้างควอนตัมเวลล์มีลักษณะสมมาตร ดังนั้น $V(x) = V(-x)$ และเมื่อแทนสมการที่ (6) ด้วย $-x$ จะได้

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u(-x)}{dx^2} + V(x)u(-x) = Eu(-x)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า สำหรับค่า E ค่าหนึ่ง จะมีฟังก์ชันคลื่นที่สมมูลกันสองฟังก์ชัน ได้แก่ $u(x)$ และ $u(-x)$ ถ้าหากไม่มีฟังก์ชันใดๆ สองฟังก์ชันหรือมากกว่านั้นที่สมมูลกับระดับพลังงาน E นี้ ฟังก์ชันทั้งสองก็จะต่างกัน เป็นไปตามสมการ

$$u(x) = \epsilon u(-x)$$

เมื่อเปลี่ยนเครื่องหมาย x อีกครั้งแล้วหารกับสมการข้างต้น จะทำให้ได้

$$\epsilon^2 = 1 \quad \text{หรือ} \quad \epsilon = \pm 1$$

จากค่า ϵ จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันคลื่นที่เป็นคำตอบของสมการที่ (6) ถ้าไม่เป็นฟังก์ชันคู่ก็ต้องเป็นฟังก์ชันคี่ ไม่อย่างใดก็อย่างหนึ่ง ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า ฟังก์ชันดังกล่าวมีพาริตีเป็นคู่หรือคี่ (Even or Odd Parity)

หากค่าระดับพลังงาน E มีฟังก์ชันที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน ฟังก์ชันเหล่านั้นไม่จำเป็นจะต้องเป็นฟังก์ชันคู่หรือคี่ อย่างไรก็ตาม ฟังก์ชันใดๆ สามารถเขียนได้อยู่ในรูป

$$u(x) = u_e(x) + u_o(x) \tag{11}$$

โดยจากสมบัติ $u_e(x) = u_e(-x)$ และ $u_o(x) = -u_o(-x)$ จะได้ $u_e(x) = \frac{1}{2}[u(x) + u(-x)]$ และ $u_o(x) = \frac{1}{2}[u(x) - u(-x)]$ เมื่อแทนสมการที่ (11) ลงในสมการที่ (6) จะได้

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u_e}{dx^2} + (V - E)u_e - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u_o}{dx^2} + (V - E)u_o = 0 \tag{12}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u_e}{dx^2} + (V - E)u_e + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u_o}{dx^2} - (V - E)u_o = 0 \tag{13}$$

เมื่อบวกและลบสมการที่ (12) และ (13) จะเห็นได้ว่าสุดท้ายฟังก์ชัน $u(x)$ ก็จะปรากฏอยู่ในสมการในลักษณะเดียวกับ $u_1(x)$ และ $u_0(x)$ นั่นคือ ฟังก์ชันใดๆ ดังกล่าวก็ต้องเป็นไมฟังก์ชันคู่ก็ฟังก์ชันคี่อย่างใดอย่างหนึ่งนั่นเอง

การคำนวณเพื่อหาค่าระดับพลังงานควอนตัม (E) ทำได้ด้วยการใช้วิธีเชิงภาพดังที่ได้กล่าวแล้ว โดยการอ่านค่าจุดตัดจากกราฟมาแทนในสมการที่ (8) ก็จะได้ค่า E ส่วนอีกวิธีหนึ่งทำได้โดยวิธีเชิงเลข ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างในการคำนวณเชิงเลขโดยอาศัยวิธีการคำนวณของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) [11]

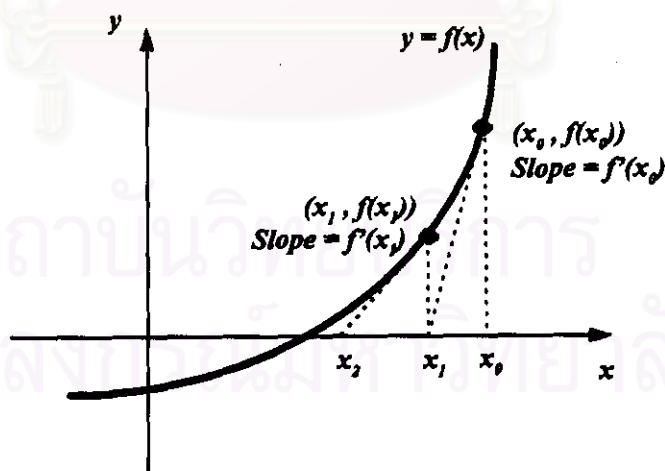
แทนค่า α และ β ลงในสมการที่ (10) จะได้

$$\left[\frac{2mE}{\hbar^2}\right]^{\frac{1}{2}} \cdot \tan\left(\left[\frac{2mE}{\hbar^2}\right]^{\frac{1}{2}} a\right) = \left[\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

จัดรูปใหม่ จะได้

$$V_0 \cos^2\left(\left[\frac{2mE}{\hbar^2}\right]^{\frac{1}{2}} a\right) - E = 0 \quad (14)$$

ซึ่งเป็นสมการในรูป $f(x) = 0$ สมการในรูปนี้สามารถหาค่าตอบ x ได้โดยดูค่าจุดตัดแกน x ของกราฟ $y = f(x)$ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การหาค่าตอบจากสมการด้วยวิธีของ Newton-Raphson

จากรูปที่ 2.9 จะได้ความสัมพันธ์

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0)}{x_0 - x_1}$$

$$x_1 = \frac{x_0 f'(x_0) - f(x_0)}{f'(x_0)}$$

หรือเขียนในรูปทั่วไปได้เป็น

$$x_{i+1} = \frac{x_i f'(x_i) - f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (15)$$

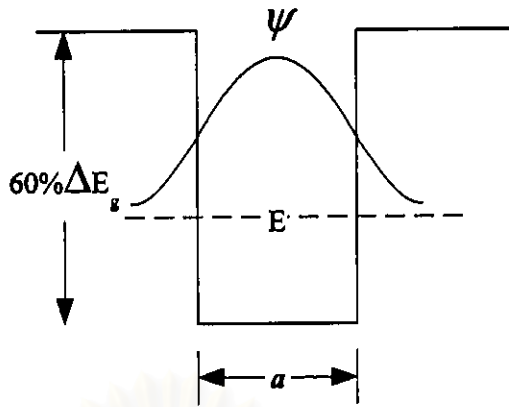
ดังนั้น เมื่อคำนวณค่า x_{i+1} ได้แล้วนำไปแทนเพื่อหาค่า x ถัดไป ค่า x ที่ได้จะเข้าใกล้จุดตัดมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับของความคลาดเคลื่อนที่ต้องการ ก็จะได้ค่าใกล้เคียงคำตอบที่แท้จริง ในกรณีของสมการที่ (14) ตัวแปรต้นก็คือค่า E เมื่อจัดรูปจะได้

$$f(E) = V_0 \cos^2 \left(\left[\frac{2ma^2}{\hbar^2} \right]^{\frac{1}{2}} E^{\frac{1}{2}} \right) - E$$

$$f'(E) = -V_0 \frac{\left[\frac{2ma^2}{\hbar^2} \right]^{\frac{1}{2}} \sin \left(\left[\frac{2ma^2}{\hbar^2} \right]^{\frac{1}{2}} E^{\frac{1}{2}} \right) \cos \left(\left[\frac{2ma^2}{\hbar^2} \right]^{\frac{1}{2}} E^{\frac{1}{2}} \right)}{E^{\frac{1}{2}}} - 1$$

เงื่อนไขที่พอเพียงสำหรับการคำนวณค่า E ได้แก่ ค่า $f(E)$ ที่ควรมีค่าใกล้ 0 มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ ในตัวอย่างนี้อาจใช้ค่าสัมพัทธ์ $f(E)/E < 0.00001$ หรือน้อยกว่า 0.001% ค่าตอบที่ได้จะเป็นค่าระดับพลังงานควอนตัมของสถานะคู่ (Even State) ที่เกิดจากพาริตีคู่ สมการที่ (9) จะให้ค่าระดับพลังงานควอนตัมของสถานะคี่ (Odd State) ที่เกิดจากพาริตีคี่

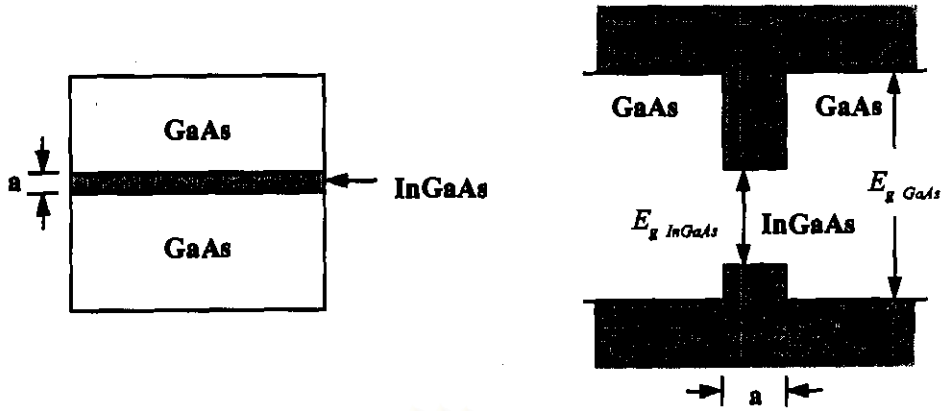
กล่าวโดยสรุปคือ เมื่อทราบเงื่อนไขของโครงสร้างควอนตัมเวลล์ จะทำให้สามารถคำนวณระดับพลังงานควอนตัมภายในเวลล์ได้ รูปร่างของฟังก์ชันคลื่นและระดับพลังงานควอนตัมระดับแรกของควอนตัมเวลล์ที่แถบนำไฟฟ้าของอินเดียมเทลลูไรด์/เทลลูไรด์แสดงได้ดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระดับพลังงานควอนตัมและรูปร่างของฟังก์ชันคลื่น

ส่วนปลายของฟังก์ชันคลื่นทั้งสองข้างที่อยู่ในชั้นก้ำแพงในรูปที่ 2.10 จะมีสมการอยู่ในรูปเอกโปเนนเชียล มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ระยะอนันต์นับจากเวลต์ออกไป แสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะสามารถทะลุออกมานอกเวลต์ได้ ระยะที่ค่าของฟังก์ชันคลื่นลดลงเหลือประมาณ 0.37 ของค่าฟังก์ชันคลื่นที่รอยต่อระหว่างชั้นก้ำแพงและเวลต์เรียกว่าระยะทะลุ (Penetration Length) ซึ่งเป็นระยะเฉลี่ยที่ถือว่าอิเล็กตรอนมีโอกาสปรากฏอยู่ในชั้นก้ำแพง ถ้าหากชั้นก้ำแพงแคบกว่าระยะทะลุนี้ อิเล็กตรอนก็จะมีโอกาสทะลุก้ำแพงออกไปได้ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์การทะลุทะลวง (Tunnel Effect) [12]

ตัวอย่างการคำนวณด้วยสมการของชโรดิงเจอร์ในเรื่องโครงสร้างควอนตัมเวกต์ดังกล่าวในอดีตเป็นเพียงตัวอย่างที่ปรากฏอยู่ในหนังสือ ไม่สามารถพิสูจน์ให้เห็นจริงได้ว่าเกิดระดับพลังงานควอนตัม E ภายในเวลต์ อย่างไรก็ตาม จากการพัฒนาวิธีการปลูกผลึกด้วยลำไมเลกุลซึ่งสามารถปลูกชั้นผลึกที่บางมากๆ ได้ ทำให้มีนักวิจัยได้ทดลองปลูกผลึกเป็นโครงสร้างควอนตัมเวกต์ โดยอาศัยความแตกต่างของความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามของผลึกของสารประกอบต่างชนิดกันซึ่งปลูกต่อกันทำให้เกิดโครงสร้างของบ่อพลังงานศักย์ ชั้นผลึกที่มีแถบพลังงานต้องห้ามกว้างซึ่งประกบอยู่ทั้งสองข้างของชั้นผลึกที่มีแถบพลังงานต้องห้ามแคบจะประพฤติตัวเป็นก้ำแพงของบ่อพลังงาน มีแถบพลังงานต้องห้ามที่แคบกว่าเป็นกั้นบ่อ ตัวอย่างโครงสร้างควอนตัมเวกต์ที่เกิดขึ้นในผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างและแถบพลังงานของควอนตัมเวลล์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์

อนุภาคที่ถูกกักอยู่ในบ่อพลังงานศักย์ในโครงสร้างควอนตัมเวลล์ดังกล่าวจะมีทั้งอิเล็กตรอนในบ่อพลังงานที่แถบนำไฟฟ้า และโฮลในบ่อพลังงานที่แถบวาเลนซ์ อนุภาคทั้งสองจะมีระดับพลังงานอยู่ที่ระดับพลังงานควอนไตซ์ E ตามที่คำนวณได้ดังตัวอย่างข้างต้น โดยการแทนค่า m , \hbar , a และ V_0 ลงไปในสมการ ค่า V_0 ของบ่อพลังงานที่แถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความกว้างของแถบพลังงานต้องห้าม (ΔE_g) ของผลึกทั้งสอง โดยผลึกอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์เองจะมีความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามขึ้นกับค่าอัตราส่วนของอะตอมหมู่ III ความลึกของบ่อที่แถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์มีค่าแตกต่างกันตามกระบวนการที่ใช้ในการวัดเพื่อตรวจสอบโครงสร้างควอนตัมเวลล์ เช่น หากใช้วิธีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ในการตรวจสอบโครงสร้าง นักวิจัยกลุ่มต่างกันได้ค่าความลึกของบ่อที่แตกต่างกัน [13] แต่จะอยู่ในช่วงประมาณ 65% ของ ΔE_g สำหรับบ่อในแถบนำไฟฟ้า และ 35% ของ ΔE_g สำหรับบ่อในแถบวาเลนซ์ ในขณะที่คณะวิจัยที่ใช้วิธีการวัด C-V ในการตรวจสอบระดับพลังงานจะได้ค่าประมาณ 80% และ 20% ของ ΔE_g ตามลำดับ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ค่า 60% และ 40% ของ ΔE_g เนื่องจากวิธีการวัดที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นวิธีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

2.4 ผลของโครงสร้างควอนตัมเวลล์และความแคบที่มีต่อระดับพลังงานควอนไตซ์

ในการคำนวณหาระดับพลังงานตามหัวข้อที่แล้ว จะพบว่าตัวแปรตัวหนึ่งที่ปรากฏในสมการต่างๆ ได้แก่ค่ามวลของอนุภาค ในที่นี้หมายถึงมวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน โฮลหนักและโฮลเบา ในกรณีของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดหนา ระดับพลังงานของโฮลหนักและโฮลเบาที่ $k = 0$ จะมีค่าเท่ากัน แต่ถ้าพิจารณาโครงสร้างควอนตัมเวลล์ที่ไม่มีสภาวะความแคบในเวลล์ ระดับพลังงานควอนไตซ์ที่เกิดขึ้นภายในเวลล์ที่แถบวาเลนซ์จะมีของทั้งโฮลหนักและโฮลเบาแยกออกจากกันอัน

เนื่องจากค่ามวลของอนุภาคทั้งสองที่แตกต่างกัน โดยจะมีระดับพลังงานคอนไดซ์ของโฮลหนัก อยู่ใกล้กันเวกต์ของแถบวาเลนซ์มากกว่าระดับพลังงานคอนไดซ์ของโฮลเบา (ระดับพลังงาน คอนไดซ์ของโฮลหนักจะอยู่สูงกว่า) การรวมตัวแบบเปล่งแสงระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลภายใน คอนดัมเวกต์จึงมีโฟตอนที่มีพลังงานต่างกันสองค่า แม้จะมีค่าใกล้เคียงกันมากก็ตาม

ในกรณีที่ผลึกมีสภาวะความเค้น จะมีผลกระทบหลายประการต่อสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความกว้างแถบพลังงานต้องห้าม ค่ามวลประสิทธิผลที่แถบนำไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงที่แถบวาเลนซ์ [14] ในกรณีที่ผลึกไม่มีความเค้น ผิวหน้าระดับพลังงานคงที่ (Equi-Energy Surface) ของบ่อ Γ จะมีรูปเป็นทรงกลม ความเค้นที่เกิดขึ้นในผลึกจะทำให้รูปร่างทรงกลม นี้เปลี่ยนรูปไปเป็นทรงรี ดังนั้นการวิเคราะห์จึงต้องแบ่งมวลออกเป็นมวลประสิทธิผลในแนวขนาน และแนวตั้งฉาก ซึ่งโดยปกติแล้วค่ามวลทั้งสองจะแตกต่างกัน ตารางที่ 2.2 แสดงค่ามวล ประสิทธิผลของวัสดุอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์/แกเลียมอาร์เซไนด์บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซ ไนด์และอินเดียมฟอสไฟด์ อินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีค่า $x = 0.53$ จะมีค่าคงที่โครงสร้างที่เข้า กันได้กับแผ่นฐานอินเดียมฟอสไฟด์ การสร้างชั้นอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความเค้นแบบอัด บนแผ่นฐานอินเดียมฟอสไฟด์จึงเริ่มต้นที่ค่าอัตราส่วนอะตอมอินเดียมต่อแกเลียม 53% และค่า x ในกรณีนี้จะเปลี่ยนไปเป็นค่าที่เพิ่มจากอัตราส่วนนี้ขึ้นไป ($\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$)

ตารางที่ 2.2 ค่ามวลประสิทธิผลของอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ในสภาวะต่างๆ บนแผ่นฐานแกเลียมอาร์เซไนด์และแผ่นฐานอินเดียมฟอสไฟด์ [15]

x	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$			$\text{In}_{0.53+x}\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$		
	$m^*_{\text{unstrained}}$	$m^*_{\text{ strained}}$	$m^*_{\perp\text{strained}}$	$m^*_{\text{unstrained}}$	$m^*_{\text{ strained}}$	$m^*_{\perp\text{strained}}$
0.00	0.066	0.066	0.066	0.045	0.045	0.045
0.05	0.064	0.065	0.064	0.044	0.044	0.045
0.10	0.062	0.064	0.063	0.042	0.043	0.045
0.15	0.060	0.063	0.063	0.040	0.041	0.044
0.20	0.058	0.062	0.062	0.037	0.039	0.044
0.25	0.056	0.061	0.061	0.035	0.037	0.044
0.30	0.054	0.060	0.061	0.033	0.035	0.043
0.35	0.052	0.058	0.060	0.031	0.033	0.043
0.40	0.050	0.057	0.060	0.028	0.030	0.043

ผลกระทบประการต่อมา ได้แก่ ผลกระทบต่อความกว้างแถบพลังงานต้องห้าม ความเค้น จะทำ ความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามเปลี่ยนไปดังที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อสมบัติของวัสดุ ระดับ พลังงานของโฮลหนักและโฮลเบาจะมีค่าเปลี่ยนไปเป็นไปตามรูปที่ 2.3 ผลกระทบอีกประการหนึ่ง ก็คือ ผลกระทบต่อโครงสร้างแถบพลังงานวาเลนซ์ในโครงสร้างคอนดัมเวกต์ จากรูปที่ 2.3 จะเห็น

ได้ว่า ในกรณีความเค้นแบบดึง (Tensile Strain) ถ้าความเค้นมากระดัดพลังงานควอนไตซ์ของโฮลหนักจะอยู่ต่ำลง เข้าใกล้ระดับพลังงานควอนไตซ์ของโฮลเบามากขึ้น ผลที่เกิดตามมาก็จะทำให้มวลประสิทธิผลของโฮลเพิ่มขึ้น และช่วยเพิ่มความหนาแน่นของสถานะ (Density of State) ที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งก็คือการเพิ่มโอกาสที่จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างโครงสร้างที่ทำหน้าที่ดูดซับแสง (Absorption) ได้ดี ในกรณีความเค้นแบบอัด (Compressive Strain) ปรากฏการณ์ที่เกิดจะกลับกัน ระดับพลังงานควอนไตซ์ของโฮลเบาจะอยู่ต่ำกว่าอยู่แล้ว อันเป็นการแยกระดับพลังงานทั้งสองออกจากกันมากขึ้นไปอีก ระดับพลังงานควอนไตซ์ที่อยู่ห่างกันจะให้ผลกลับกันกับกรณีความเค้นแบบดึง กล่าวคือมวลประสิทธิผลของโฮลจะลดลงจนเกือบจะเท่ากับมวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนที่แถบนำไฟฟ้า ทำให้ความหนาแน่นของสถานะลดลง และทำให้การรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นกับระดับพลังงานของโฮลหนักมากกว่าโฮลเบาที่อยู่ห่างออกไปมาก ทั้งสามประการจะส่งผลให้โครงสร้างที่ได้เปล่งแสงที่มีสเปกตรัมที่แคบ และมีโอกาสเกิดภาวะประชากรผกผัน (Population Inversion) ได้ง่าย เหมาะสำหรับนำไปทำเป็นชั้นเปล่งแสงของเลเซอร์ไดโอด

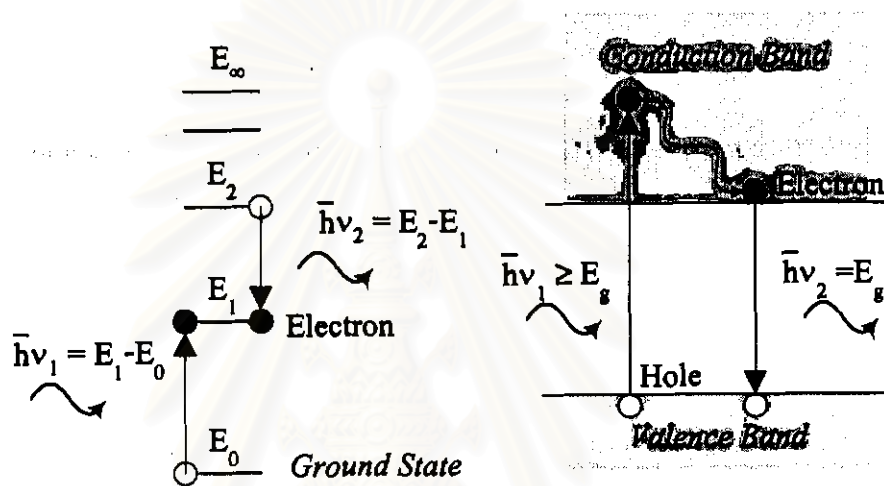
ในกรณีของโครงสร้างควอนดัมเวลต์ของวัสดุอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ ภายในเวลต์จะเกิดสภาวะความเค้นแบบอัด ปริมาณความเค้นที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนอะตอมระหว่างอินเดียมและแกลเลียม และขึ้นกับความหนาของชั้นเวลต์ ดังนั้นในการทดลองแปรเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ดังกล่าว จึงมีผลกระทบต่อลักษณะของยอดแหลมที่ได้จากการนำโครงสร้างควอนดัมเวลต์ของอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์/แกลเลียมอาร์เซไนด์ไปทำการวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ ดังจะได้กล่าวต่อไปในหัวข้อผลการทดลองและการวิเคราะห์

2.5 การวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence)

ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนส์เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงของวัสดุเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง กลไกหลักในปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนส์ได้แก่ การดูดกลืนแสง และการรวมตัวแบบเปล่งแสง

การดูดกลืนแสงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแสงและอะตอมหรือโมเลกุลของธาตุหรือวัสดุต่างๆ อนุภาคที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดในกระบวนการดูดกลืนแสงคืออิเล็กตรอน เมื่อโฟตอนของแสงวิ่งมากระทบอะตอม โมเลกุล หรือผลึก หากพลังงานของโฟตอนมีค่าตรงกันกับค่าความแตกต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนระหว่างสถานะก่อนดูดกลืนแสงและสถานะหลังจากดูดกลืนแสงพอดี อิเล็กตรอนก็จะย้ายสถานะจากสถานะแรกไปอยู่ในอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่า ในกรณีอะตอมเดี่ยว ระดับพลังงานภายในอะตอมไม่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นการดูดกลืนแสงจึงเกิดได้เฉพาะกับโฟตอนที่มีพลังงานเฉพาะบางค่าเท่านั้น แต่ในกรณีของผลึกสารกึ่งตัวนำ

สถานะว่างที่อิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ได้มีอยู่อย่างค่อนเนื่องในแถบนำไฟฟ้า ดังนั้นหากโฟตอนมีพลังงานมากกว่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้าม ก็จะเกิดปรากฏการณ์ดูดกลืนแสงเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามจากการคำนวณถึงความน่าจะเป็นในการเกิดปรากฏการณ์ดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ พบเงื่อนไขเพิ่มเติมบางประการ คือ ในการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากการดูดกลืนแสง ค่าโมเมนตัม $\hbar k$ ของอิเล็กตรอนทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะจะต้องคงที่เสมอ กฎข้อนี้เรียกว่ากฎแห่งการเลือกของโมเมนตัม (Momentum Selection Rule) หรือกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม [16] ปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงดังกล่าวข้างต้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กลไกการดูดกลืนและการคายโฟตอนใน (ก) อะตอมเดี่ยว และ (ข) สารกึ่งตัวนำ

เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า สถานะเดิมก็จะว่าง ในกรณีของสารกึ่งตัวนำก็คือ จะเกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะคงสภาวะอยู่ได้ช่วงเวลาหนึ่ง เรียกว่า ช่วงเวลาอายุพาหะ (Carrier Lifetime) โดยระหว่างเวลานั้นอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเกินกว่าความกว้างแถบพลังงานต้องห้ามซึ่งได้เปลี่ยนสถานะไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าขอบของแถบพลังงานต้องห้ามก็จะคายพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปของโฟนอน แล้วตกกลับมาอยู่ที่ขอบของแถบนำไฟฟ้า จากนั้นก็จะกลับมารวมตัวกับโฮลอีกครั้งหนึ่ง กระบวนการนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์การรวมตัว (Recombination)

การรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดผลใน 2 ลักษณะ ลักษณะแรกจะเกิดการเปล่งแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮล เรียกว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสง (Radiative Recombination) และอีกลักษณะหนึ่งเป็นการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟนอนแก่โครงผลึก เรียกว่า การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (Non-Radiative Recombination) โดยทั่วไปปรากฏการณ์ทั้งสองลักษณะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน การเปล่งแสงที่สังเกตได้จะขึ้นอยู่กับว่า

ปรากฏการณ์ลักษณะใดเกิดมากกว่ากัน ถ้าให้ τ_R และ τ_N แทนช่วงเวลาอายุพาหะนับตั้งแต่ถูกกระตุ้นจนเกิดการรวมตัวแบบเปล่งแสงและไม่เปล่งแสง ตามลำดับ จะสามารถคำนวณประสิทธิภาพของการรวมตัวแบบเปล่งแสงได้ ดังสมการ

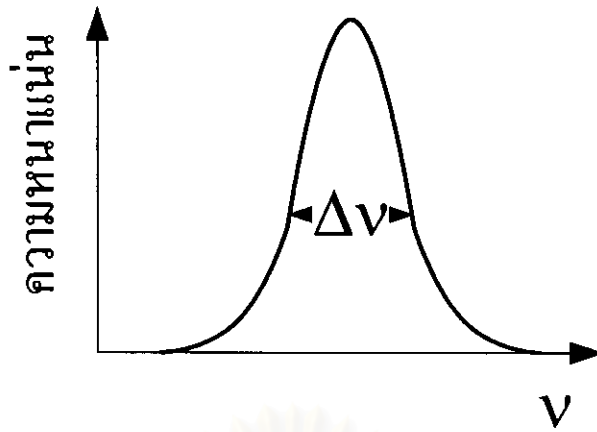
$$\eta_e = \frac{1/\tau_R}{1/\tau_R + 1/\tau_N} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_R}{\tau_N}}$$

ดังนั้น หาก τ_N/τ_R มีค่ามาก ประสิทธิภาพการเปล่งแสงของผลึกสารกึ่งตัวนำนั้นก็จะได้ โดยทั่วไป การรวมตัวที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำจะมีประสิทธิภาพการเปล่งแสงของผลึกที่ดีกว่า เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำย่อมมีจำนวนโฟนอนน้อย สิ่งที่จะมารบกวนการรวมตัวแบบเปล่งแสงย่อมมีน้อย ดังนั้น เพื่อให้การวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์มีสัญญาณแรง จึงควรวัดที่อุณหภูมิต่ำ

วิธีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์เป็นวิธีการวัดโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนส์ สเปกตรัมของแสงที่วัดสุเปล่งออกมาจะเป็นตัวบอกคุณสมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆ ได้ ในกรณีของโครงสร้างควอนตัมเวลต์ซึ่งมีระดับพลังงานควอนไตซ์อยู่ในเวลต์ ระดับพลังงานควอนไตซ์ย่อมอยู่ต่ำกว่าขอบของแถบนำไฟฟ้าของผลึกที่เป็นชั้นก้ำแกง อิเล็กตรอนซึ่งมีแนวโน้มที่จะอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดย่อมจะตกมาอยู่ที่ระดับพลังงานควอนไตซ์ก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกับโฮลและเกิดการเปล่งแสงขึ้น ดังนั้น สเปกตรัมของแสงที่ได้จากการวัดโครงสร้างควอนตัมเวลต์ด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์จะให้ข้อมูลที่สามารนำไปคำนวณกลับเป็นค่าระดับพลังงานควอนไตซ์ได้ และทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างควอนตัมเวลต์ได้

สเปกตรัมที่ได้จากการวัดด้วยวิธีโฟโตลูมิเนสเซนส์แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งได้จากการเปลี่ยนระหว่างสองสถานะ สมมติให้ฟังก์ชันในรูปที่ 2.13 มีสมการเป็น $S(\nu)$ ดังนั้น $S(\nu)d\nu$ จึงแทนความน่าจะเป็นที่จะเกิดการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์ทั้งในปรากฏการณ์การดูดกลืนและการเปล่งแสงในย่านความถี่ ν ถึง $\nu + d\nu$ ได้ และดังนั้น ฟังก์ชัน $S(\nu)$ จึงต้องสอดคล้องกับสมการ

$$\int_0^\infty S(\nu)d\nu = 1$$



รูปที่ 2.13 การกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian)

รูปร่างและค่าความกว้างของฟังก์ชัน $S(V)$ ที่ได้จากการเปล่งแสงแบบสะเปะสะปะ (Spontaneous Emission) สามารถอธิบายได้โดยกลไกหลายแบบ ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มหลักได้สองกลุ่ม คือ กลไกแบบเอกพันธ์ (Homogeneous) และแบบไม่เป็นเอกพันธ์ (Inhomogeneous) กลไกแบบเอกพันธ์จะพิจารณาอาณาบริเวณที่เกิดกลไกตลอดทั่วพื้นที่แบบสม่ำเสมอ ขณะที่กลไกแบบไม่เป็นเอกพันธ์จะพิจารณาผลเฉพาะจุดที่มีผลกระทบต่อรูปร่างฟังก์ชัน ความกว้างของฟังก์ชันในกลไกแบบเอกพันธ์โดยหลักแล้วเกิดจากการกระทำของโฟนอนทั้งแบบเสียง (Acoustic Phonon) และแบบแสง (Optical Phonon) ผลกระทบจากโฟนอนต่อความกว้างของฟังก์ชันขึ้นตรงกับความหนาแน่นของโฟนอน ในกรณีของโฟนอนแบบเสียง ความหนาแน่นของโฟนอนชนิดนี้จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ส่วนโฟนอนแบบแสงมีค่าคงที่ขึ้นกับความถี่ จำนวนของโฟนอนที่เกี่ยวข้องเนื่องจากความร้อนจะมีการกระจายแบบโบส-ไอน์สไตน์ (Bose-Einstein Statistics) สมการสำหรับความกว้างของฟังก์ชันในกลไกแบบเอกพันธ์แสดงได้ดังนี้

$$\Delta V_{\text{homo}} = AT + \frac{\zeta_{op}}{e^{\frac{\hbar\omega_{LO}}{k_B T}} - 1} \quad (16)$$

พจน์แรกของสมการที่ 16 แทนการเกิดโฟนอนแบบเสียงที่ขึ้นตรงต่ออุณหภูมิด้วยค่าคงที่ A พจน์ที่สองแทนการเกิดโฟนอนแบบแสง ζ_{op} คือค่าคงที่ในการขยายความกว้างของฟังก์ชันโดยโฟนอนแบบแสง และ ω_{LO} คือความถี่ของโฟนอนแบบแสง เมื่อคำนวณค่าที่อุณหภูมิต่ำจะพบว่าพจน์หลังจะมีค่ามากกว่าพจน์แรกมาก ทำให้สมการที่ 16 ประมาณได้เป็น

$$\Delta V_{\text{homo}} = \frac{\zeta_{op}}{e^{\frac{\hbar\omega_{LO}}{k_B T}} - 1}$$

เนื่องจากโฟนอนเป็นผลมาจากการสั่นสะเทือนของโครงผลึก ดังนั้นลักษณะความกว้างของฟังก์ชันจึงเป็นไปตามฟังก์ชันลอเรนซ์เซียน (Lorentzian)

ในกรณีของการขยายความกว้างของฟังก์ชันแบบไม่เป็นเอกพันธ์ปัจจัยที่เป็นสาเหตุในกลไกนี้ได้แก่ การสั่นสะเทือนเฉพาะจุด ความเค้นเฉพาะที่ ความแตกต่างของความหนาแน่นของสิ่งเจือปน ณ ตำแหน่งต่างๆ ความแตกต่างของอัตราส่วนอะตอมของสารประกอบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวและรอยต่อในรอยต่อของสารต่างชนิด และในโครงสร้างควอนตัมเวลต์ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้มีเพียงความหนาแน่นของสิ่งเจือปนเท่านั้นที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ปัจจัยอื่นมีการกระจายแบบสุ่ม (Random) ทำให้สามารถแสดงได้ว่าการขยายความกว้างของฟังก์ชันเป็นแบบฟังก์ชันเกาสเซียน (Gaussian) [17]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย