สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

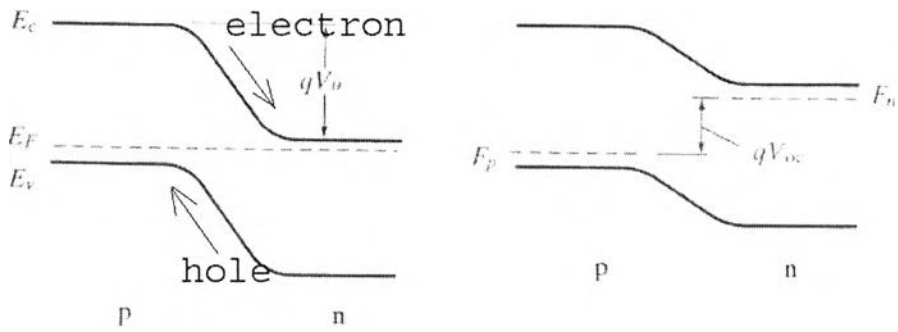
บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.1 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์แบบ p-n มีหลักการทำงานคือ เมื่อมี Photon ที่มีพลังงานสูงกว่าแถบพลังงานต้องห้าม ($h\nu > E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานไว้และกระโดดข้ามไปยัง Conduction band ได้และเกิดโฮลที่ Valence band คือเกิด electron-hole pair ขึ้นและพาหะทั้งสองจะถูกสนามไฟฟ้าที่หัวต่อกวาด โดยอิเล็กตรอนจะถูกกวาดไปทางสาร n และจะถูกขับเคลื่อนไปยังขั้วโลหะที่ทำหน้าที่รวบรวมพาหะ จากนั้นพาหะจะถูกส่งออกไปยังโหลดที่ต้องการ

โฮลจะถูกกวาดไปทางสาร p เมื่อเกิดการสะสมของอิเล็กตรอนและโฮลมากพอจะทำให้กำแพงศักย์ลดต่ำลงเกิดความต่างของระดับพลังงานเฟอร์มิขึ้นเป็นแรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{oc}) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงระดับพลังงานลดต่ำลงจนเกิดแรงดันเปิดวงจร

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าค่า V_{oc} ถูกกำหนดโดยค่า E_g คือ $qV_{oc} \leq E_g$

ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Schottky เมื่อได้รับ Photon จะเกิดปรากฏการณ์ Photovoltatic ขึ้น ซึ่งมีได้ 3 แบบ คือ

1. เมื่อแสงถูกดูดกลืนที่ชั้นโลหะและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากกว่า $q\Phi_B$ กระโดดข้ามแบเรียเข้าไปในชั้นสารกึ่งตัวนำ

2. แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะถูกดูดกลืนบริเวณหัวต่อ (บริเวณที่มีความโค้งงอของแถบพลังงาน) จะทำให้เกิด electron-hole pair ขึ้น

3. แสงที่มีความยาวคลื่นยาวจะถูกดูดกลืนลึกเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิด electron-hole pair ขึ้น electron-hole pair ที่เกิดขึ้นจะถูกกวาดโดยสนามไฟฟ้าที่ที่อยู่บริเวณหัวต่อ (บริเวณแถบพลังงานโค้งงอ) ให้ไหลไปคนละทาง ออกไปยังขั้วโลหะได้

2.1.2 องค์ประกอบที่เป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของการเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์

คุณสมบัติของสสารที่สำคัญต่อการกำหนดลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้า คือ ความนำไฟฟ้าสามารถเขียน σ เป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma = ne\mu_n + pe\,\mu_p \qquad (1)$$

โดยที่ μ_n และ μ_p คือ ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนหรือโฮลตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วในการเคลื่อนที่ (Drift Velocity) ต่อสนามไฟฟ้าหนึ่งหน่วย

องค์ประกอบอื่นๆที่สำคัญที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของพาหะที่ควรนำมาพิจารณาคือ

ค่าเวลาชีวิตพาหะ (Carrier lift time, τ_pหรือ τ_n) คือ เวลาเฉลี่ยตั้งแต่การเกิด electron-hole pair ขึ้นจนกระทั่งอิเล็กตรอนหรือโฮลเกิดการรวมตัวกันหายไป

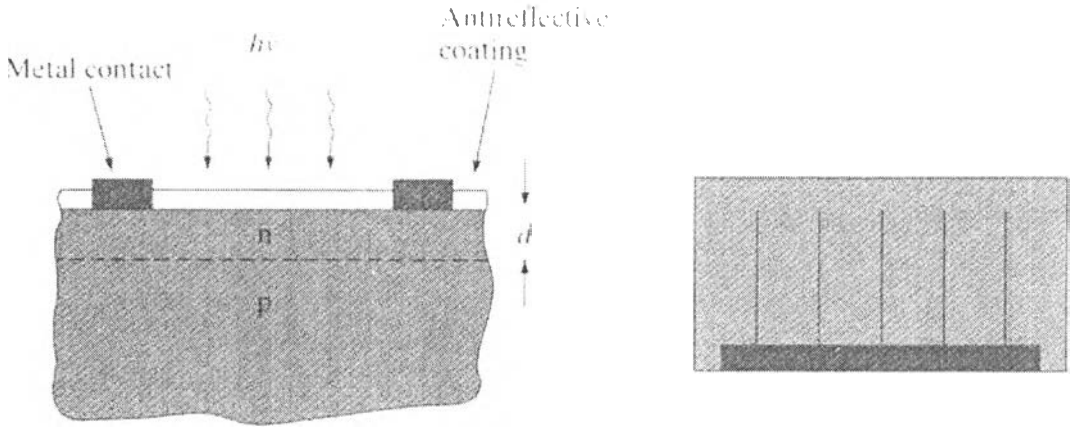
ค่าความยาวในการแพร่ซึม (Diffusion length, L_Pหรือ L_N) คือระยะเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนหรือโฮลแพร่ซึมไปก่อนเกิดการรวมตัว

ค่าระยะปลอดการชน (Mean Free Path , $\bar{t}$) คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างการชนของพาหะครั้งที่ต่อกัน ขณะที่พาหะเคลื่อนที่ในสสาร

2.1.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อให้ได้ค่าพลังงานที่มาก ต้องออกแบบโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ให้มีพื้นที่กว้างๆเพื่อรับแสงและหัวต่อต้องอยู่ใกล้ๆกับผิวหน้า เพื่อให้แสงตกกระทบถึงหัวต่อให้ได้มากที่สุด หากหัวต่ออยู่ลึกเกินไปจะได้จำนวนพาหะที่ดูดกลืนแสงน้อยลง ทำให้ได้ปริมาณกระแสน้อยลง และที่ผิวหน้าจะมีการเคลือบสาร Antireflective coating เพื่อลดการสะท้อนของแสงและลดการรวมตัวกันที่บริเวณผิวหน้า

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) (ข)

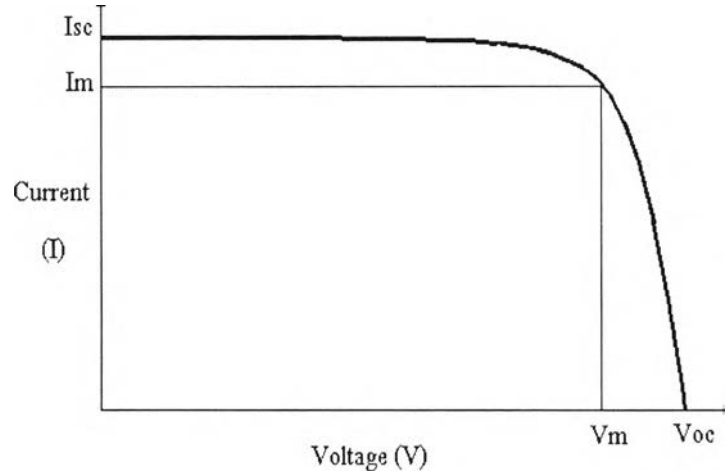
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) Planar junction (ข) ภาพ top view แสดงขั้วต่อโลหะแบบนิ้วมือ

จากรูปที่ 2.2 (ก) ความหนาของชั้น n (ระยะ d) ต้องน้อยกว่าค่าความยาวในการแพร่ซึมของโฮล (L_p) ในสาร n เพื่อให้โฮลที่เกิดขึ้นสามารถแพร่ไปยัง metal junction ได้ก่อนการรวมตัว เช่นเดียวกันความหนาของชั้น p ต้องบางพอที่จะให้อิเลคตรอนที่เกิดขึ้นเดินทางถึง metal junction ได้ก่อนเกิดการรวมตัว ซึ่งความหนาที่เหมาะสมจะต้องเข้ากันระหว่างค่าความยาวในการแพร่ซึมของอิเล็กตรอน (L_n) ในสาร p

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างคือ ค่าความต้านทานต้องมีค่าน้อยมาก เพื่อไม่ให้ไปลดค่ากำลังที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ จากการที่ความหนาของชั้น n ต้องบาง metal contact ต้องมีการออกแบบเป็นพิเศษ ถ้าชั้น n นี้มีการต่อออกภายนอกที่ขอบจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานสูง เพื่อป้องกันผลกระทบนี้ ดังนั้นขั้วโลหะมักถูกออกแบบให้เป็นรูปนิ้วมือดังรูปที่ 2.2 (ข) และทางด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องเป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มิคที่ดีฉาบไว้

2.1.4 ลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงและทำการวัด I-V curve จะได้กราฟดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดง I-V curve

สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์พิจารณาได้จาก

1. ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc})
2. ค่าความเข้มกระแสลัดวงจร (I_{sc})
3. ค่า Fill Factor (F.F.) โดยคิดจาก

$$F.F. = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \tag{2}$$

โดย V_m คือค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและ I_m คือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด

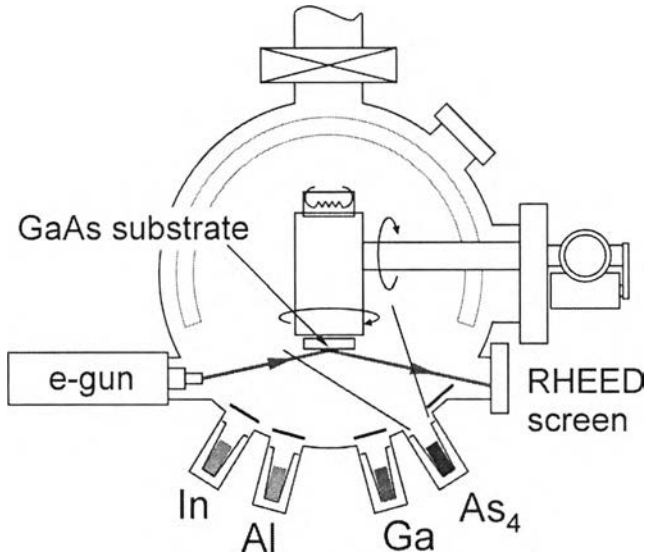
จากค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวนี้สามารถนำมาคิดประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานได้ดังนี้

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \times F.F. \times 100 \tag{3}$$

โดย P_{in} คือกำลังที่ป้อนให้เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งกำหนดได้จากความเข้มแสงอาทิตย์ (วัตต์ต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย)

2.2 การปลูกผลึกด้วยวิธี Molecular Beam Epitaxy

เครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลประกอบไปด้วย 4 Chamber หลัก คือ Growth chamber, Transfer chamber, Introduction chamber และ Load-lock chamber แผนผังในส่วนของระบบที่ใช้ในการปลูกผลึกในรูปที่2.4 สามารถแบ่งเป็น 4 ส่วนหลักๆ คือ



รูปที่ 2.4 แผนภาพภายใน growth chamber ของเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุล

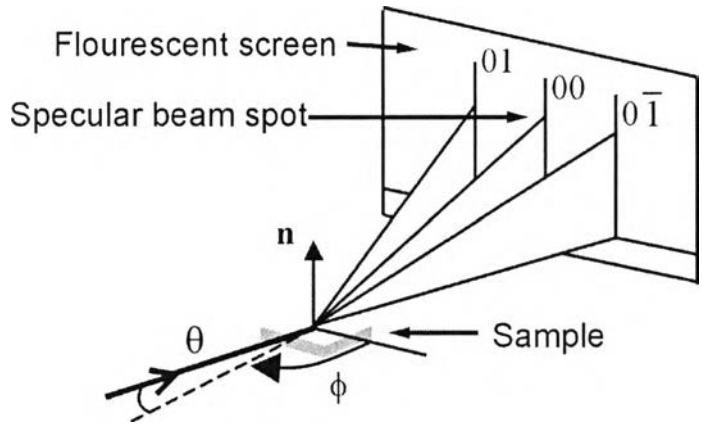
ส่วนที่ 1 : สารที่ใช้เป็นแหล่งให้ลำโมเลกุล คือ สารที่เราต้องการปลูกลงบนแผ่นฐาน สารนี้จะถูกบรรจุอยู่ใน effusion cell และถูกควบคุมการให้ลำโมเลกุลโดยการควบคุมจังหวะเปิด – ปิด ชัตเตอร์ที่อยู่ด้านหน้าของแต่ละ Cell โดยปริมาณลำโมเลกุลที่กำเนิดจากสารแต่ละชนิดนั้น สามารถควบคุมได้จากปริมาณความร้อนที่ให้กับสาร

ส่วนที่ 2 : แผ่นฐาน คือแว่นผลึกที่ใช้รองรับลำโมเลกุลเพื่อให้เกิดเป็นผลึกเดี่ยว (Single crystal) ดังนั้นแผ่นฐานจึงต้องมีค่าคงตัวผลึก (lattice constant) เท่ากันหรือใกล้เคียงกับสารที่ใช้ในการสร้างชั้นผลึก เพื่อให้การปลูกผลึกได้ผลึกเดี่ยวที่ไม่มีจุดบกพร่องหรือมีน้อยมาก ทำให้สามารถนำไปใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์ได้ แผ่นฐานนี้จะถูกหมุนและให้ความร้อนระหว่างการปลูกผลึก โดยการหมุนเพื่อให้โครงสร้างที่ปลูกมีความสม่ำเสมอกันมากขึ้น

ส่วนที่ 3 : ระบบสุญญากาศ ในเทคนิคการปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลนี้ มีส่วนที่เป็นจุดด้อย คือ ความจำเป็นที่ต้องให้สภาพความดันพื้นฐาน (Background pressure) ในระหว่างการปลูกอยู่ในระดับ ultra high vacuum (UHV : : $< 10^{-7}$ Torr) ดังนั้นในระบบของเครื่องปลูกผลึกด้วยลำโมเลกุลนี้จึงต้องใช้ ไอออนปั๊ม (Ion pump) และ ไทเทเนียม ซับลิเมชั่นปั๊ม (Ti sublimation pump) ในการ

ลดระดับความดันลง และในระหว่างการปลูกผลึกจะต้องใช้ไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen , LN_2) ให้ความเย็นแก่ chamber เพื่อให้โมเลกุลของสารต่างๆมาเกาะที่ผนังด้านในมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดระดับความดันในขณะปลูกผลึกอีกวิธีหนึ่ง

ส่วนที่ 4 : ระบบการตรวจสอบรูปแบบ RHEED คือ ระบบที่ใช้ในการสังเกตลักษณะการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้า ทั้งก่อนและระหว่างการปลูกผลึก ซึ่งระบบ RHEED ที่ติดตั้งในgrowth chamber นี้ ประกอบด้วย ปืนยิงอิเล็กตรอน (Electron gun) ขนาด10 - 20 kV และแผ่นฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent screen) ซึ่งเป็นฉากรับและแสดงภาพ RHEED ที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ RHEED



รูปที่ 2.5 ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ RHEED

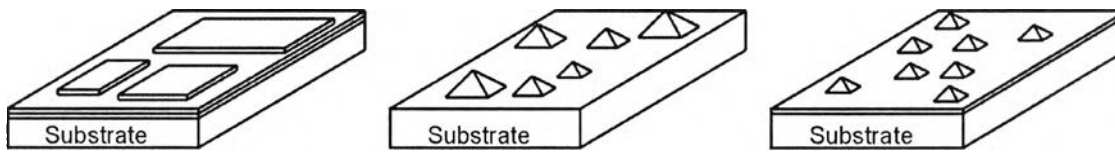
ลำอิเล็กตรอนจะถูกยิงตกกระทบบนแผ่นฐานทำมุม θ ประมาณ $1-2^{\circ}$ กับระนาบผิวหน้าของแผ่นฐาน ซึ่งลำอิเล็กตรอนนี้จะแทรกสอดกันโดยมีลักษณะการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้าเปรียบเสมือน เกรตติ้ง ซึ่งขึ้นกับทิศทางผลึก ทำให้ในบางทิศทางจะเกิดรูปภาพสะท้อนบนแผ่นฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่า รูปแบบ RHEED โดยรูปแบบของภาพที่ได้จะบ่งบอกการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้า โดยการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้านี้ขึ้นอยู่กับ ชนิดของแผ่นฐาน อุณหภูมิของแผ่นฐานและสภาพบรรยากาศโดยรอบเป็นสำคัญ ดังนั้นการตรวจสอบ รูปแบบ RHEED นี้ จึงสามารถใช้เป็นวิธีเทียบอุณหภูมิที่แท้จริงบนผิวหน้า กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลได้วิธีหนึ่ง

โดยลักษณะของผลึกที่ปลูกได้จากเครื่องปลูกผลึกแบบลำโมเลกุลนี้สามารถแบ่งออกด้วยกัน 3 โหมด ได้แก่

1. Frank-van der Merwe เป็นรูปแบบการก่อตัวแบบ 2 มิติ ผลึกจะก่อตัวในแนวระนาบเป็นชั้นๆ ดังแสดงในรูป ที่ 2.6 (ก) การก่อตัวลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในลำโมเลกุลกับอะตอมบนผิวหน้าของแผ่นฐานมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม-อะตอมในลำโมเลกุล ซึ่งเป็นรูปแบบการเกิดผลึกที่พบในการปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำบนผิวหน้าผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีค่าคงที่โครงผลึกเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

2. Volmer-Weber เป็นรูปแบบการก่อตัวของผลึกแบบ 3 มิติ เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมที่ปลูกลงไปมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในลำโมเลกุลกับอะตอมบนผิวหน้าของแผ่นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) การเกิดผลึกในรูปแบบนี้จะพบในการปลูกผลึกที่มีค่าคงที่โครงผลึกแตกต่างกันมากๆ

3. Stranski-Krastanow เป็นรูปแบบการก่อตัวของผลึกแบบ 2 มิติในช่วงแรก และแบบ 3 มิติในช่วงหลัง ซึ่งทำให้ได้เกาะ (island) แบบ 3 มิติบนฟิล์มบางแบบ 2 มิติของสารที่ปลูกลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ค) การก่อตัวรูปแบบนี้เกิดขึ้นในการปลูกผลึกที่มีค่าคงที่โครงผลึกของสารที่ปลูกลงไปต่างกับค่าคงที่โครงผลึกของอะตอมของแผ่นฐานไม่มากนัก (น้อยกว่า 10%) ซึ่งในการสร้างโครงสร้างควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองก็คือการใช้การปลูกผลึกในโหมด Stranski-Krastanow นั้นเอง



(ก) Frank-van der Merwe (ข) Volmer-Weber (ค) Stranski-Krastanow

รูปที่ 2.6 รูปแบบการก่อตัวของผลึกในโหมด (ก) Frank-van der Merwe (ข) Volmer-Weber และ (ค) Stranski-Krastanow

2.2.1 กลไกการเกิดผลึกของการปลูกผลึกด้วยวิธี MBE

กลไกการปลูกผลึกของการปลูกผลึกจากลำโมเลกุลสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ 3 และหมู่ 5 เนื่องจากความสามารถของการเกาะติดพื้นผิวแผ่นผลึกฐานของธาตุหมู่ 3 ซึ่งตามปกติแล้วผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานก่อนการปลูกจะถูกปกคลุมด้วยบรรยากาศของโมเลกุลธาตุหมู่ 5 เพื่อ

ชดเชยการสูญเสียในขณะที่แผ่นผลึกมีอุณหภูมิสูงจึงทำให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเป็นชั้นของอะตอมหมู่ 5 ดังนั้นอะตอมหมู่ 3 จึงเรียงตัวเกาะลงบนชั้นของอะตอมหมู่ 5 จนกลายเป็นชั้นของอะตอมธาตุหมู่ 3 จากนั้นอะตอมของธาตุหมู่ 5 จะทำปฏิกิริยาเกาะลงบนชั้นอะตอมของธาตุหมู่ 3 หรือถูกดูดซับจากอะตอมของธาตุหมู่ 3 โดยลักษณะการเรียงตัวของอะตอมหมู่ 3 และหมู่ 5 นั้นเรียงตัวสลับกันไปตลอดการปลูกผลึก ซึ่งอะตอมของธาตุหมู่ 5 ได้จากการแตกตัวของโมเลกุลที่อยู่ในรูป Dimer หรือ Tetramer ทำให้กระบวนการเกิดผลึกเป็นลักษณะได้สัดส่วนตามโครงสร้าง โดยโมเลกุลส่วนเกินของธาตุหมู่5 นั้นถูกปล่อยคายออกจากผิวของแผ่นผลึกฐานแต่อุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผ่นฐานมีความสำคัญสำหรับการปลูกผลึกด้วยวิธีนี้ ดังนั้นหากผิวหน้าของแผ่นฐานมีอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดผลดังนี้

1. ถ้าแผ่นฐานมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ 5 จะทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ 5 ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

2. ถ้าแผ่นฐานมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดระเหิดของธาตุหมู่ 3 จะทำให้เกิดการปล่อยคายอะตอมของธาตุหมู่ 3 ออกจากผิวแผ่นผลึกฐาน

ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิจุดระเหิดของสารประกอบหมู่ 3กับหมู่ 5 ชนิดต่างๆ

สารประกอบ	T_{cs}(°C)	$T_{max(v4)}$ (°C)	$T_{max(v2)}$(°C)	Jv4/J3
AlP	>700	640	700	~1.0/1
GaP	670	490	750	~1.0/1
InP	363	>450	>500	~3.0/1
AlAs	>750	630	750	~1.5/1
GaAs	~620	480	>760	~1.0/1
InAs	~370	~450	~550	~5.0/1

โดย T_{cs}(°C) หมายถึงอุณหภูมิของการระเหิด

$T_{max(v4)}$ (°C) หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดในบรรยากาศ Tetramer โมเลกุลของธาตุหมู่ 5

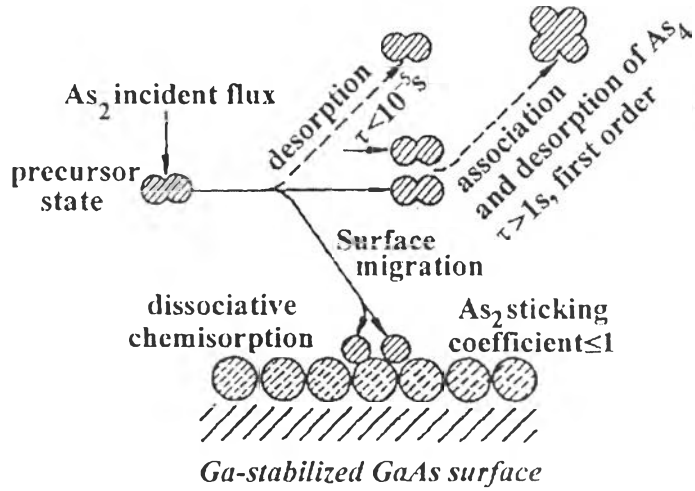
$T_{max(v2)}$(°C) หมายถึงอุณหภูมิสูงสุดในบรรยากาศ Dimer โมเลกุลของธาตุหมู่ 5

Jv4/J3 หมายถึงอัตราส่วน flux ของหมู่ 5 ต่อหมู่ 3 ที่เกิดจากการสลาย

ดังนั้นอุณหภูมิของแผ่นผลึกฐานจึงควรอยู่ในระดับที่ไม่ทำให้เกิดสาเหตุในข้อ 2 จึงต้องมีการชดเชยอะตอมของธาตุหมู่ 5 ที่เสียไปเนื่องจากผลจากข้อ 1 ซึ่งค่าอุณหภูมิการระเหิดของสารประกอบชนิดต่างๆมีตามตาราง

การอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการปลูกผลึกจากลำโมเลกุลสามารถใช้แบบจำลองตาม รูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นตัวอย่างของ GaAs ซึ่งปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ 2 กรณีคือ

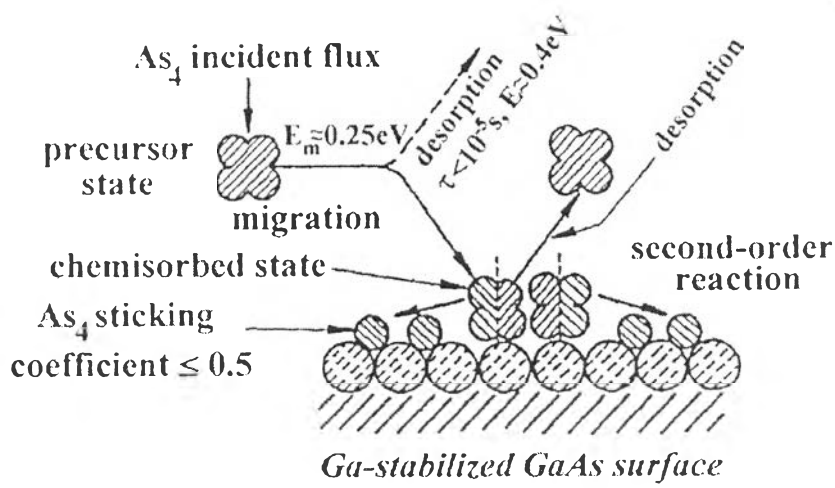
กรณี Ga- As_2-(100) GaAs ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มจากอะตอมของ Ga เกาะติดบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานเรียงตัวเป็นชั้น จากนั้นโมเลกุลของ As_2 ทำปฏิกิริยากับอะตอมของ Ga โดยแตกตัวเป็นอะตอม As และเกาะตัวบนชั้นอะตอม สำหรับอัตราการเกาะของโมเลกุล ที่ผิวหน้าแผ่นผลึกฐานขึ้นอยู่กับค่า Flux ของ Ga สำหรับโมเลกุล ส่วนเกินจะระเหิดไปในรูปของโมเลกุล As_2 และ As_4 ทำให้การเกิดผลึกเป็นแบบ Stoichiometric Growth ดังรูปที่ 2.7



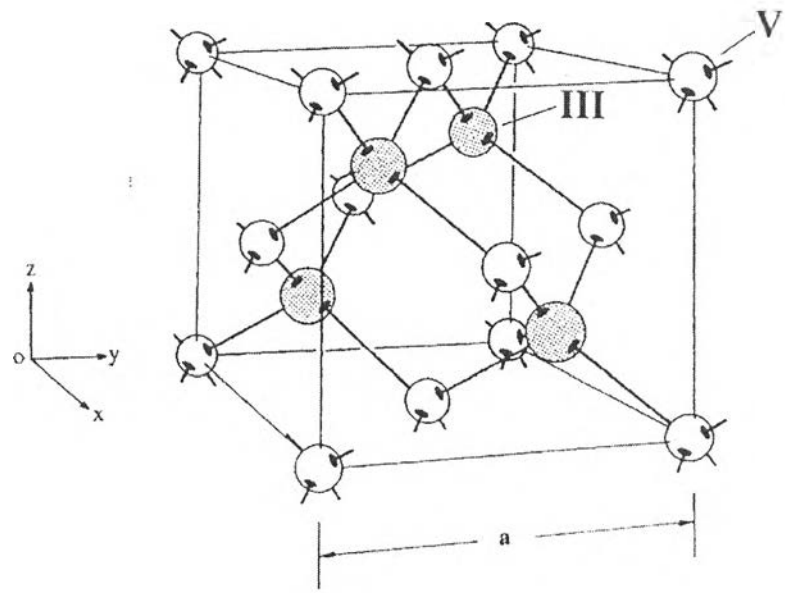
รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAs ในกรณี Ga- As_2-(100) GaAs

กรณี Ga- As_4-(100)GaAs ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อนกว่า โดยโมเลกุล As_4 คู่หนึ่งทำปฏิกิริยากับอะตอม Ga ที่อยู่ใกล้เคียงซึ่งอะตอม Ga ได้เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกฐาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโมเลกุล As_4 แต่ละโมเลกุลแตกตัวให้อะตอม As 2 อะตอมเกาะลงบนผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานด้วยการดูดซับจากอะตอมของ Ga ที่เกาะที่ผิวหน้า ส่วนอะตอมของ As ส่วนที่เหลือจำนวน 4 อะตอมนั้นจะรวมตัวเป็น As_4 และถูกปล่อยออกจากผิวไป ดังนั้นกรณีนี้จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ค่าความหนาแน่นของโมเลกุล As_4 หรือ Flux ของ As_4 (J_{As4}) มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นของโมเลกุล Ga หรือ Flux ของ Ga (J_{Ga}) เพื่อให้จำนวนโมเลกุล As_4 มีจำนวน มากเพียงพอ

สำหรับปฏิกิริยาที่มีส่วนที่เกาะเรียงตัวในผลึกและในส่วนที่ปล่อยคายออกซึ่งเป็นส่วนที่สูญเสียไป และการสูญเสียนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแผ่นผลึกฐานมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงปฏิกิริยาของการเกิดผลึก GaAsในกรณี Ga-As_4-(100) GaAs



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างแบบ Zincblende

โครงสร้างของสารประกอบกึ่งตัวนำของธาตุหมู่3-5 มีโครงสร้างผลึกแบบ Zincblende ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงผลึกเพชร โดยการเรียงตัวของอะตอมของธาตุหมู่ 3 และหมู่ 5 เรียงตัวสลับกันเป็นชั้นๆไปตามทิศทาง (100) ในโครงผลึก ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมใน

โครงสร้างนี้เป็นแบบโควาเลนท์ (Covalent Bond) และระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นขึ้นกับชนิดของอะตอมที่มาประกอบกันเป็นสารประกอบในโครงผลึก ดังนั้นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่เป็นสมบัติเฉพาะของสารประกอบแต่ละชนิดคือค่าคงตัวผลึก (Lattice Constant: a) ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวแปรทางกายภาพของสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่3-5 ชนิด 2 ธาตุ

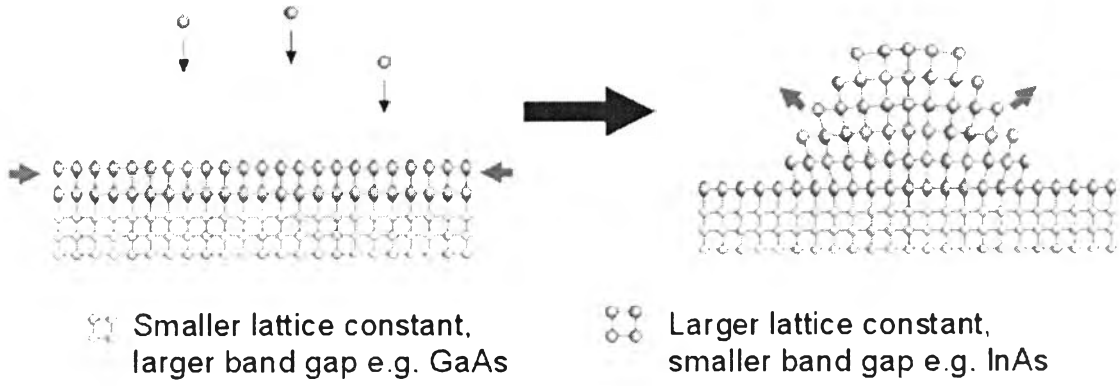
สารประกอบ	ค่าคงตัวผลึก	ค่าแถบพลังงาน	ชนิดของแถบพลังงาน
AlP	5.451	2.45	แถบพลังงานไม่ตรง
AlAs	5.66005	2.16	แถบพลังงานไม่ตรง
AlSb	6.1355	1.58	แถบพลังงานไม่ตรง
GaP	5.4512	2.26	แถบพลังงานไม่ตรง
GaAs	5.6355	1.42	แถบพลังงานตรง
GaSb	6.0959	0.72	แถบพลังงานตรง
InP	5.8686	1.35	แถบพลังงานตรง
InAs	6.0584	0.36	แถบพลังงานตรง
InSb	6.4794	0.17	แถบพลังงานตรง

จากตารางจะเห็นว่าค่าคงตัวผลึกของ GaAs กับ InAs มีค่าต่างกัน (6.0584-5.6355)/ 6.0584*100 = 7% มีค่าน้อยกว่า 10% ดังนั้นจากหัวข้อที่ 3 การปลูก InAs บน GaAs จะอยู่ใน mode Stranski-Krastanow ซึ่งจะได้ dot ของ InAs เกาะอยู่บนฟิล์มบางของ InAs

2.2.2 โครงสร้างแบบควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง

เทคนิคการปลูกผลึกแบบจัดเรียงตัวเองนี้ เป็นเทคนิคที่ใช้สร้างควอนตัมดอตที่เพิ่งถูกค้นพบมาเมื่อไม่นานมานี้ เทคนิคนี้มีส่วนสำคัญคือ เมื่อทำการปลูกผลึกสารที่มีค่าคงที่โครงผลึกใหญ่ และ มีค่าความกว้างแถบพลังงานแคบ ลงบน แผ่นฐานซึ่งเป็นสารที่มีค่าคงที่โครงผลึกเล็กและ มีค่าความกว้างแถบพลังงานกว้าง จะทำให้เกิดการผ่อนคลาย (Relaxation) ของอะตอมที่ปลูกลงไปเมื่อปลูกชั้นนั้นเกินความหนาค่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้การเกิดผลึกต่อไปมีลักษณะเป็น 3 มิติ (ดูรูปที่ 2.10) โดยกลุ่มเกาะของอะตอมที่เกิดจากการผ่อนคลายนี้จะสามารควบคุมการสร้างให้มีขนาด

พอเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นโครงสร้างควอนตัมดอตได้ โดยเรียกควอนตัมดอตที่สร้างได้จากการปลูกผลึกนี้ว่า ควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง (Self-organized quantum dot)



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดของโครงสร้างควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง เนื่องมาจากการผ่อนคลาย (Relaxation) พลังงานความเครียดจากโครงผลึก

วิธีการสร้างควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีข้อดี เมื่อเทียบกับการสร้างควอนตัมดอตด้วยวิธีอื่นๆ คือ เราไม่จำเป็นต้องสร้างลวดลายในระดับนาโนเมตร ซึ่งยังเป็นกระบวนการที่ยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างอยู่มากในการทำในปัจจุบัน และ ควอนตัมดอตที่เกิดขึ้นยังมีจำนวนต่อพื้นที่มากอีกด้วย นอกจากนี้ควอนตัมดอตที่สร้างได้ด้วยวิธีนี้ อาจจะกล่าวได้ว่า ไม่มีจุดบกพร่องในโครงสร้างเลย เนื่องจาก ไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการกัดทางเคมีในการสร้าง ทำให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นชั้นแอคทีฟในสิ่งประดิษฐ์เลเซอร์สารกึ่งตัวนำและนำไปใช้ในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ

แต่วิธีการปลูกแบบจัดเรียงตัวเองนี้ ก็มีข้อเสีย คือ เราไม่สามารถควบคุมตำแหน่งที่จะเกิดควอนตัมดอตได้และควอนตัมดอตที่สร้างได้ด้วยวิธีนี้จะมีความไม่สม่ำเสมอในเชิงขนาดอยู่ด้วย ทำให้สิ่งประดิษฐ์ที่สร้างได้ด้วยเทคนิคนี้มีความไม่อุดมคติอยู่ ซึ่งความไม่อุดมคตินี้จะส่งผลถึงลักษณะการเปล่งแสงของผลึกที่ปลูกได้

2.3 พื้นฐานของโครงสร้าง Low-Dimension

เมื่อวางอะตอมใกล้กัน อะตอมจะยึดเหนี่ยวกันทำให้พลังงานของอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกันกลายเป็นแถบพลังงานที่มีความต่อเนื่องและมีจำนวนมากกว่าหนึ่งแถบ โดยมีแถบพลังงานต้องห้าม (energy gap) คั่นกลางระหว่างแถบคอนดักชัน (conduction band) และแถบวาเลนซ์(valence band) ที่อุณหภูมิ 0 K แถบคอนดักชันปราศจากอิเล็กตรอน ในขณะที่แถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 0 K แถบพลังงานทั้งอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งทำหน้าที่เป็นพาหะนำไฟฟ้า การ

ควบคุมการเคลื่อนที่ของพาหะในแถบพลังงานทั้งสองเป็นพื้นฐานสำคัญของการควบคุมการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในโครงสร้าง low-dimension พาหะจะถูกกักบริเวณในทิศทางใดทิศทางหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งทิศทาง และความยาวในการกักเป็นอัตราส่วนของความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (De Broglie wavelength) แปรผกผันกับค่ามวลประสิทธิผลของพาหะ(Carrier effective mass,m) และค่าอุณหภูมิ (T) ดังสมการ (4)

$$\lambda_{de_Broglie} = \frac{h}{p} = \frac{h}{3m^{*}k_{B}T} \qquad (4)$$

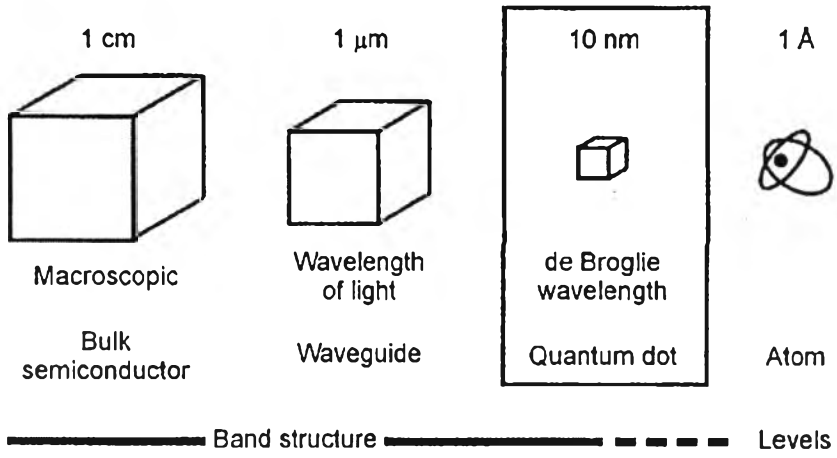
โดย h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)

P คือ โมเมนตัมของพาหะ (carrier momentum)

k_B คือ ค่าคงตัวของโบลซ์แมน (Boltzmann's constant)

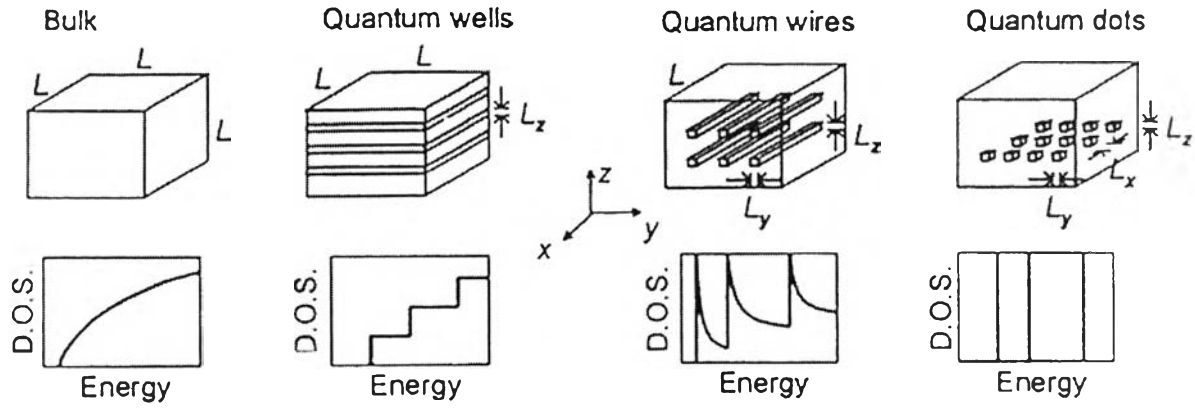
ความยาวคลื่นเดอบรอยล์สำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ III-V มีค่าประมาณ 20 nm ที่อุณหภูมิ 300 K ผลของการกักพาหะที่คาดว่าจะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้นมีมากมาย เช่นการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานย่อย (intersubband transition) ในโครงสร้างควอนตัมเวลล์ (Quantum well) ซึ่งเป็นหลักการสำหรับสร้าง Detector ซึ่งทำงานในย่าน far – infrared ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 9 μm

รูปที่ 2.11 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของ Bulk, ท่อนำคลื่น (Waveguide), ควอนตัมดอต (Quantum dot) และ อะตอม ซึ่งขนาดของโครงสร้างควอนตัมดอตอยู่ในระดับของความยาวคลื่นเดอบรอยล์ สำหรับท่อนำคลื่นอยู่ในระดับไมโครเมตร ส่วนโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของ Bulk กับอะตอมนั้นแตกต่างกัน ในส่วนของ Bulk นั้นอธิบายโดยทฤษฎีแถบพลังงาน ส่วนอะตอมนั้นอธิบายโดยระดับพลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบขนาดของ Bulk, ท่อนำคลื่น (Waveguide), ควอนตัมดอต (Quantum dot) และ อะตอม

ความหนาแน่นของสถานะ (Density of state, D.O.S.) ของ bulk และของโครงสร้าง Low-dimension ถูกแสดงในรูปที่ 2.12 ชั้นแถบพลังงานที่ต่างกันระหว่างโครงสร้าง Low-dimension กับวัสดุรอบข้างทำให้เกิดการกักพาหะ ในกรณีที่อิเล็กตรอนและโฮลถูกกักอยู่ในวัสดุชนิดเดียวกัน กำแพงพลังงานสูงสุดจะถูกกำหนดโดยแถบพลังงานที่ยกขึ้นในแถบคอนดักชันหรือแถบวาเลนซ์ ในควอนตัมเวลล์ อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในระนาบ X-Y ในควอนตัมไวร์ อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในทิศทาง X และในควอนตัมดอต พาหะถูกกักอยู่กับที่ ในกรณีควอนตัมดอตเป็นการกักแบบ 3 มิติทำให้เกิดการ Quantization ของพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ง)



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 2.12 โครงสร้างและความหนาแน่นสถานะ (D.O.S) ของ (ก) Bulk, (ข) ควอนตัมเวลล์, (ค) ควอนตัมไวร์ และ (ง) ควอนตัมดอต โดย L อยู่ในระดับ μm ในขณะที่ L_x, L_y, L_z อยู่ในระดับ nm

ในกรณีของโครงสร้างในรูปที่ 2.12 (ก) พาหะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทุกทิศทุกทาง สำหรับควอนตัมเวลล์ในรูปที่ 2.12 (ข) พาหะจะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนไหวเฉพาะในแนวแกน Z โดยสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในแนวระนาบ X-Y สำหรับควอนตัมไวร์ รูปที่ 2.12 (ค) พาหะถูกกักขังแบบ 2 มิติจึงเดินทางอย่างอิสระได้เพียงมิติเดียว (แกนX) สำหรับควอนตัมดอตในรูปที่ 2.12 (ง) พาหะถูกขังแบบ 3 มิติ พาหะจึงไม่มีมิติหรือพิกัดที่จะเคลื่อนไหวได้เลย ระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถมีได้ในแต่ละโครงสร้างข้างต้นเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$E_{bulk} = E(k) = \frac{h^2 k^2}{2m^*} \quad \text{สำหรับ bulk} \qquad (5)$$

$$E_{QW} = E(k) = \frac{h^2 k_{\parallel}^{\,2}}{2m^*} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ quantum well} \qquad (6)$$

$$E_{QWR} = E(k) = \frac{h^2 k_{\perp}^{\,2}}{2m^*} + E_{m,y} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ quantum wire} \qquad (7)$$

$$E_{QD} = E_{l,x} + E_{m,y} + E_{n,z} \quad \text{สำหรับ quantum dot} \qquad (8)$$

โดย $k(k_x, k_y, k_z)$ คือ เวกเตอร์คลื่น (wave vector) ของพาหะ

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$$

$$k_{||}^2 = k_x^2 + k_y^2$$

$$k_{\perp}^2 = k_x^2$$

$E_{l,x}$, $E_{m,y}$ และ $E_{n,z}$ คือ พลังงานที่เป็นฟังก์ชันของตัวเลขควอนตัม (quantum number) l , m และ n

ความหนาแน่นสถานะต่อหน่วยปริมาตรซึ่งเป็นค่าจำนวนสถานะ (number of states) ระหว่างพลังงาน E และ E + dE ของแต่ละโครงสร้างหาได้จาก

$$D_{bulk}(E) = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m^*}{h^2}\right)^{3/2} E^{1/2} \tag{9}$$

$$D_{QW}(E) = \frac{m^*}{\pi\hbar^2}\sum_n \Theta(E - E_{n,z}) \tag{10}$$

$$D_{QWR}(E) = \frac{N_{wi}}{\pi}\frac{\sqrt{2m^*}}{h}\sum_{m,n}\frac{1}{\sqrt{E - E_{m,y} - E_{n,z}}} \tag{11}$$

$$D_{QD}(E) = 2N_D\sum_{l,m,n}\delta(E - E_{l,x} - E_{m,y} - E_{n,z}) \tag{12}$$

โดย Θ คือ Heaviside's unit step function

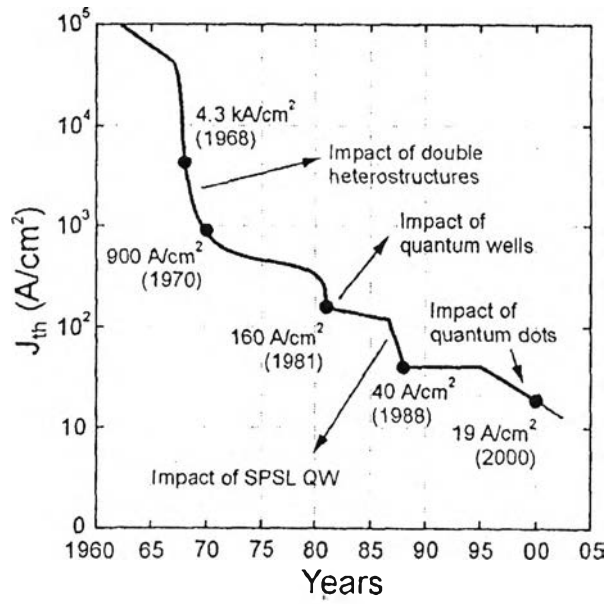
N_{wi} คือ area density ของควอนตัมไวร์

δ คือ เดลต้าฟังก์ชัน (delta function)

N_D คือ volume density ของควอนตัมดอต

ในกรณีของควอนตัมดอต ความหนาแน่นของสถานะเป็นเดลต้าฟังก์ชัน ซึ่งคล้ายกับระดับพลังงานไม่ต่อเนื่องของอะตอม ในส่วนซึ่งอธิบายมาด้านบนเป็นกรณีอุดมคติ แต่ในการปลูกผลึกจริงอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ซึ่งทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างควอนตัมดอตเปลี่ยนแปลง

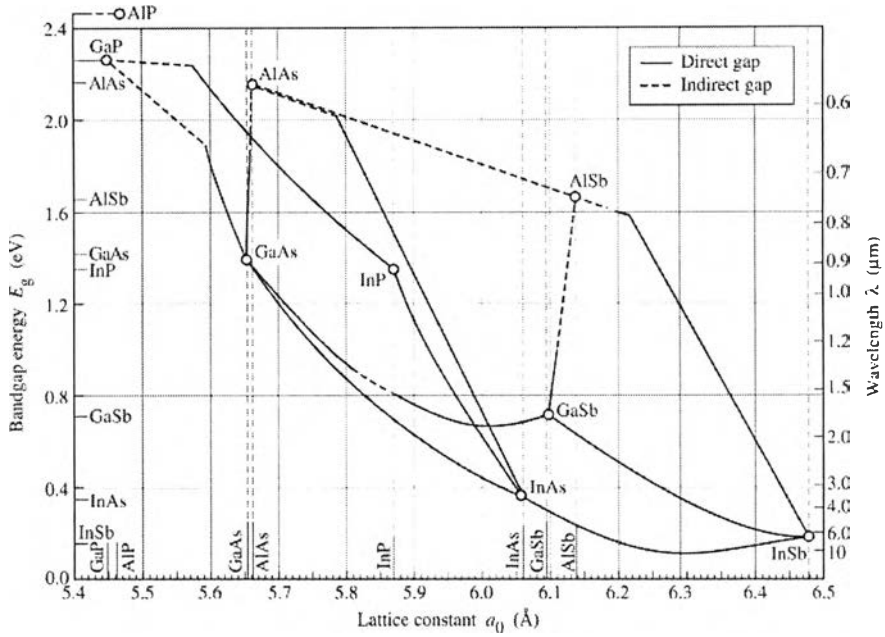
เมื่อโครงสร้างนาโนเปลี่ยนจาก Bulk เป็นโครงสร้าง low-dimension ดังแสดงในรูปที่ 2.11 การเปลี่ยนค่าความหนาแน่นสถานะจะมีผลต่อคุณสมบัติพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำโครงสร้างนาโนมาประยุกต์ใช้ เช่น เลเซอร์สารกึ่งตัวนำที่นำควอนตัมดอตมาประยุกต์ใช้มีกระแสเทรสโฮล (Threshold current) ต่ำเนื่องจากมีความหนาแน่นสถานะเป็นเดลต้าฟังก์ชัน รูปที่ 2.13 แสดงวิวัฒนาการของค่ากระแสเทรสโฮลของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่าลดลงเมื่อนำโครงสร้าง low-dimension มาเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้าง



รูปที่ 2.13 วิวัฒนาการของค่ากระแสเทรสโฮลที่ใช้สำหรับขับแสงเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ

เมื่อเราพิจารณาเจาะจงลงไปถึงระบบสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สร้างโครงสร้างควอนตัมดอดแบบจัดเรียงตัวเอง จะพบว่า เราสามารถสร้างควอนตัมดอตได้ในหลายระบบสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่าง เช่น ระบบสาร In(Ga)As / GaAs InP / InGaP SiGe / Si เป็นต้น เนื่องจากระบบสารในตัวอย่างข้างต้นมีค่าแถบกว้างพลังงานแคบว่าวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นฐาน และ มีขนาดค่าคงที่โครงผลึกกว้างกว่า ทำให้การเกิดผลึกสามารถเกิดเป็นโครงสร้างควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองได้ โดยการเลือกสร้างควอนตัมดอตจากแต่ละระบบสารนั้นจะพิจารณาจากค่าความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจากโครงสร้าง ซึ่งค่านี้ขึ้นกับขนาดของโครงสร้างและชนิดของสาร

ในการทดลองนี้เลือกระบบสาร InAs / GaAs ซึ่งสามารถให้ค่าความยาวคลื่นในช่วงที่เราต้องการได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดค่าคงที่โครงผลึก และ ค่าความกว้างแถบพลังงานของระบบสารประกอบกึ่งตัวนำ III – As ที่อุณหภูมิห้อง

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

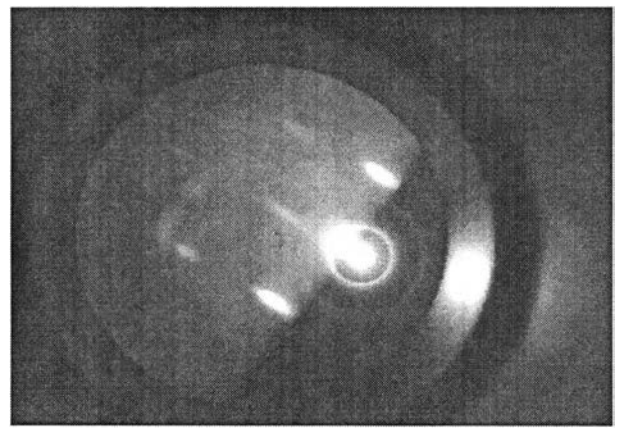
2.4 การวัดรูปแบบ RHEED (reflection high-energy electron diffraction)

2.4.1 การเทียบวัดค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานในระหว่างการปลูกผลึกด้วย RHEED

การเทียบค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานในระหว่างการปลูกผลึกด้วย RHEED มีอยู่ 2 วิธีคือ

1. การเทียบวัดจากค่าอุณหภูมิที่ชั้นออกไซด์ระเหยออกจากผิว (Oxide desorption)

เป็นที่ทราบกันดีว่า ชั้นออกไซด์ของ GaAs ที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นฐานนั้นจะระเหยออกจากผิวที่อุณหภูมิ 580 ° C ดังนั้น โดยการสังเกตลักษณะ RHEED ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิของแนวฐานในครั้งแรกก่อนเริ่มทำการปลูกผลึก จะทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลนั้น แตกต่างจาก ค่าอุณหภูมิจริงบนผิวหน้าของแผ่นฐาน GaAs อยู่เท่าไร รูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบ RHEED เมื่อเริ่มมีการระเหยออกของออกไซด์บนผิวชิ้นงาน



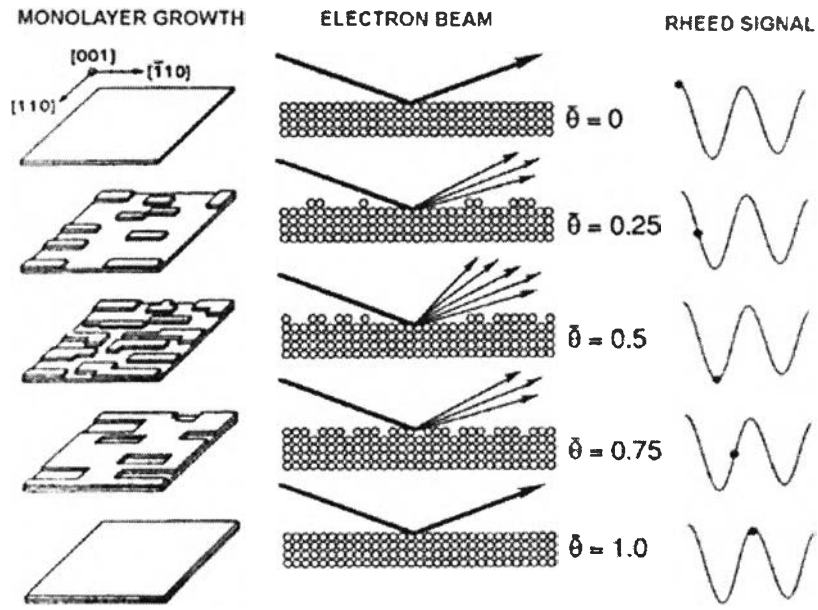
รูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบ RHEED เมื่อเริ่มมีการระเหยออกของออกไซด์บนผิวชิ้นงาน

2. การเทียบวัดจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้า

หลังจากทำการปลูกผลึกชั้น GaAs บัฟเฟอร์ ให้ได้ความหนาค่าหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่ามากกว่า 200 nm เพื่อทำการปรับผิวหน้าให้เรียบและเป็นการหลีกเลี่ยงความสกปรกและจุดบกพร่องบนผิวหน้า ทำให้ผลึกมีคุณภาพดีขึ้น จากนั้นเราสามารถทำการเทียบวัดอุณหภูมิของผิวหน้า ได้โดยการทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของแผ่นฐานแล้วทำการสังเกตรูปแบบ RHEED โดยจะพบว่าหากเราทำการลดอุณหภูมิลงภายใต้ความดันไอ As คงที่ รูปแบบ RHEED จะมีการเปลี่ยนแปลงจากลักษณะรูปแบบชนิด (2x4) เป็นชนิด (2x2) หรือ c(4x4) ที่อุณหภูมิ 500°C ดังนั้นการสังเกตรูปแบบ RHEED นี้จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิจริงบนผิวหน้าของแผ่นฐานได้ รูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบ RHEED เมื่อเริ่มมีการระเหยออกของออกไซด์บนผิวชิ้นงาน

2.4.2 การเทียบวัดความเร็วการปลูกผลึกด้วย RHEED

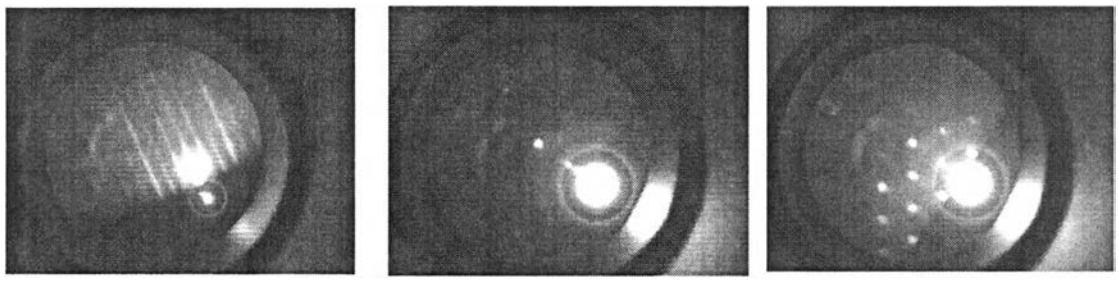
นอกจากการเทียบวัดค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานในระหว่างการปลูกผลึกด้วยการสังเกตรูปแบบ RHEED ที่กล่าวมาแล้ว เรายังสามารถใช้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรูปแบบ RHEED ในการวัดค่าความเร็วในการปลูกผลึกได้อย่างแม่นยำอีกด้วย วิธีการเทียบวัดความเร็วในการปลูกผลึกของสารต่างๆ อธิบายได้ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงของรูปแบบ RHEED ณ จุดใดๆ บนแผ่นฟลูออเรสเซนต์จะขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของการเรียงตัวของอะตอมบนผิวหน้า คือ หากว่าอะตอมบนผิวหน้ามีการเรียงตัวกันอย่างดีแล้ว ภาพรูปแบบ RHEED จะมีความเข้มสูงที่สุด เพราะผิวหน้าจะเปรียบเสมือนเกรตติ้งที่สมบูรณ์ สามารถสะท้อนลำอิเล็กตรอนได้อย่างดี แต่เมื่อมีอะตอมส่วนเกินอยู่บนผิวหน้า (คือในระหว่างการปลูกผลึก) ที่ยังมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะเรียงตัวครบ 1 ชั้นผลึก (monolayer) แล้ว ค่าความเข้มของแผนภาพ RHEED ณ จุดใดๆ จะมีความเข้มลดลง โดยยังมีลักษณะรูปแบบคงเดิมและในขณะที่ทำการปลูกผลึกลงบนแผ่นฐาน ปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของแผนภาพ RHEED จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า RHEED intensity oscillation โดยค่าความถี่ของสัญญาณ RHEED intensity oscillation นี้ คือ ความเร็วในการปลูกผลึกนั่นเอง โดยสัญญาณ RHEED intensity oscillation นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่จุด specular beam (ดูรูปที่ 2.5) ดังนั้นในการสังเกตการ oscillation จึงมักจะกระทำที่จุดนี้การเกิด RHEED intensity oscillation เพื่อวัดค่าความเร็วในการปลูกผลึกที่อธิบายมานี้ แสดงสรุปได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงลักษณะการเกิด RHEED intensity oscillation

2.4.3 การสังเกตรูปแบบ RHEED ในการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง

ในการปลูกควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเองนั้น เราสามารถทำการสังเกตุการเกิดควอนตัมดอตระหว่างการปลูกผลึกได้โดยสังเกตรูปแบบ RHEED นั่นคือ เมื่อเราทำการปลูกชั้น InAs ลงไปแล้ว ในช่วงแรกอะตอมจะก่อตัวในลักษณะ 2 มิติ โดยเมื่อเราทำการปลูกลงไปจนชั้น InAs นี้มีค่าความหนาวิกฤติ ซึ่งมีค่าประมาณ 1.6-1.8 ML จะทำให้อะตอมเกิดการผ่อนคลาย (Relaxation) เกิดเป็นควอนตัมดอตแบบจัดเรียงตัวเอง รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างรูปแบบ RHEED ในระหว่างการปลูกผลึกชั้น InAs ควอนตัมดอต โดยให้ความเร็วในการปลูกชั้น InAs เท่ากับ 0.01 ML/s จากรูปจะเห็นว่า สัญญาณ RHEED จะลดลงเมื่อเริ่มทำการปลูกชั้น InAs ในช่วงแรก และ เมื่อเกิดการผ่อนคลายจะทำให้รูปแบบ RHEED ที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่มีลักษณะ Streaky ไปเป็นลักษณะ Spotty โดยค่าความเข้มของสัญญาณ RHEED ในช่วงหลังจะเพิ่มขึ้นซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดการเรียงตัวของอะตอมในลักษณะ 3 มิติ ในโหมด Stranski-Krastanow และเรียกชั้นที่มีลักษณะ 2 มิติ ที่เกิดขึ้นก่อนเกิดควอนตัมดอตว่า Wetting layer



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2.17 รูปแบบของ RHEED (ก) Streaky pattern (ข) Spotty pattern @ > 1.7 ML (ค) Spotty pattern @ = 1.8 ML