

บทที่ 3

โครงสร้างควันตัมเวลล์

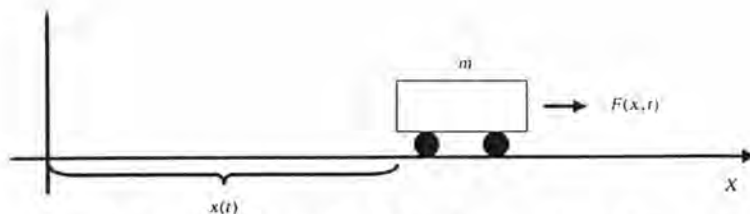
งานวิจัยของ R. Tsu และ L. Esaki แห่งบริษัท ไอบีเอ็ม ที่ได้ค้นพบการค้นพบการทะลุ (tunneling) ของพาหะนำไฟฟ้าในผลึกสารกึ่งตัวนำต่างชนิดที่มีการเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ ได้ทำให้เกิดการวิจัยและพัฒนาของโครงสร้างควันตัมเวลล์เพื่อใช้ในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดกำเนิดแสงและชนิดตรวจจับแสงประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างแพร่หลาย [1-2] แม้ว่าแนวความคิดของโครงสร้างดังกล่าว รวมทั้งทฤษฎีทางกลศาสตร์ควันตัม (quantum mechanics) จะเป็นเรื่องที่น่าสนใจได้ยาก และต้องอาศัยความรู้ ความเข้าใจทางด้านคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ขั้นสูงก็ตาม

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทางกลศาสตร์ควันตัม สมการชโรดิงเจอร์ (Schrödinger equation) ภายใต้พลังงานศักย์แบบ infinite square well และ finite square well เพื่อเป็นพื้นฐานความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างควันตัมเวลล์ จากนั้นจะกล่าวถึงคุณสมบัติเฉพาะของแกแลเลียมอาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมแกแลเลียมอาร์เซไนด์ และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งสอง

3.1 สมการชโรดิงเจอร์ (Schrödinger Equation)

ในกรณีของวัตถุมวล m ที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปตามแนวแกน x ด้วยแรงที่มีขนาดไม่คงที่ และเปลี่ยนแปลงตามเวลา $F(x,t)$ จะสามารถหาค่าระยะทางที่วัตถุนั้นเคลื่อนที่ที่เวลาใดๆ $x(t)$ ได้ โดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน ($F = ma$) และเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและระยะทาง คือ $a = d^2x / dt^2$ และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและพลังงานศักย์ คือ $F = -\partial V / \partial x$ จะทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ของวัตถุตามสมการที่ (3.1) คือ

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = - \frac{\partial V}{\partial x} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ภายใต้แรงที่มากระทำของวัตถุมวล m

สมการที่ (3.1) เป็นการอธิบายถึงการเคลื่อนที่ของวัตถุ ที่สามารถวัดขนาดของตัวแปรต่างๆได้ แต่ในกรณีของอนุภาคขนาดเล็กๆที่เคลื่อนที่แบบเดียวกันตามแนวแกน x นั้น สมการดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ เนื่องจากไม่สามารถทราบตำแหน่งที่แน่นอนของอนุภาค และจากคุณสมบัติของอนุภาคขนาดเล็กๆที่เป็นได้ทั้งอนุภาคและคลื่นจึงได้มีความพยายามที่จะอธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ด้วยทฤษฎีทางกลศาสตร์ควันตัม โดยการกำหนดตัวแปรที่เรียกว่า “ฟังก์ชันคลื่น (wave function), $\psi(x,t)$ ” ขึ้น และหาผลเฉลยของตัวแปรนี้จากสมการของไชโรดิงเจอร์

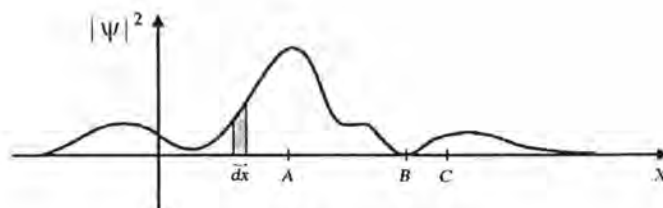
$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V\psi \quad (3.2)$$

เมื่อ $i = \sqrt{-1}$ และ $\hbar = h/2\pi$, h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) จะเห็นข้อเปรียบเทียบจากสมการทั้งสองได้ว่า ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ $x(t)$ ภายใต้พลังงานศักย์ได้ถูกกำหนดโดยสมการที่ (3.1) จากกฎข้อที่สองของนิวตัน ในขณะที่ผลเฉลยของฟังก์ชันคลื่น $\psi(x,t)$ ของอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์นั้นถูกกำหนดโดยสมการไชโรดิงเจอร์ในสมการที่ (3.2) อย่างไรก็ตามค่าระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่แสดงถึงความหมายโดยตรงในทางกายภาพ แต่ค่าของฟังก์ชันคลื่นนั้นเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์กับพลังงานและโมเมนตัม และยังสามารถนำไปใช้คำนวณค่าทางสถิติของอนุภาคได้จากความสัมพันธ์

$$|\psi(x,t)|^2 dx = \text{ความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคที่บริเวณตำแหน่ง } x \text{ ถึง } x + dx \text{ ที่เวลา } t \text{ ใดๆ} \quad (3.3)$$

โดยที่ความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคตลอดช่วงของค่า x จะต้องมีค่าเท่ากับ 1

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x,t)|^2 dx = 1 \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันคลื่น

รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างของฟังก์ชันคลื่นที่อธิบายถึงความหมายของสมการที่ (3.3) โดยที่บริเวณตำแหน่ง A จะมีโอกาสพบอนุภาคสูงกว่าที่บริเวณตำแหน่ง B และพื้นที่ในส่วนแรเงาแสดงถึงความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคบริเวณตำแหน่ง dx

ค่าของฟังก์ชันคลื่น $\psi(x,t)$ เป็นค่าที่ขึ้นกับเวลา t ดังนั้นถ้าพิจารณาปัญหาด้านพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของอนุภาคในกรณีที่พลังงานศักย์ V มีค่าไม่ขึ้นกับเวลา จะสามารถแยกตัวแปรทาง เวลาออกจากฟังก์ชันคลื่นได้ตามสมการที่ (3.5)

$$\psi(x,t) = \varphi(x)f(t) \quad (3.5)$$

โดยที่ $\partial \psi / \partial t = \varphi (df / dt)$ และ $\partial^2 \psi / \partial x^2 = f(d^2 \varphi / dx^2)$ เป็นผลที่ได้จากการแยกตัวแปรทางเวลาของฟังก์ชันคลื่น และเมื่อแทนค่าลงในสมการไชโรดิงเจอร์ จะได้

$$i\hbar \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\varphi} \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + V \quad (3.6)$$

พบว่าทางซ้ายของสมการที่ (3.6) ขึ้นกับค่าตัวแปรทางเวลา t และทางขวาขึ้นกับค่าตัวแปรของระยะทาง x เมื่อกำหนดให้ทั้งทางซ้ายและทางขวาของสมการมีค่าเท่ากับตัวแปร E ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับการแยกตัวแปร (separation constant) สมการไชโรดิงเจอร์จะถูกแยกออกเป็นสองสมการ ดังสมการที่ (3.7) และสมการที่ (3.8) ตามลำดับ

$$\frac{df}{dt} = -\frac{iE}{\hbar} f \quad (3.7)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \varphi}{dx^2} + V\varphi = E\varphi \quad (3.8)$$

ผลเฉลยของสมการที่ (3.7) มีค่าขึ้นกับตัวแปรทางเวลา และเท่ากับ $f(t) = e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ ส่วนสมการที่ (3.8) นั้นเรียกว่า “สมการชโรดิงเจอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา (time-independent Schrödinger equation)” และเป็นสมการที่มีความสำคัญมากเมื่อพิจารณาถึงปัญหาคำนวณค่าทางสถิติของอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นเมื่อทราบค่าที่แน่นอนของพลังงานศักย์ จะทำให้สามารถหาผลเฉลยของฟังก์ชันคลื่นที่ไม่ขึ้นกับเวลา $\varphi(x)$ ได้ นอกจากนี้ค่าของฟังก์ชันคลื่นที่ไม่ขึ้นกับเวลายังสามารถนำไปใช้เพื่อคำนวณค่าทางสถิติของอนุภาคได้เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ฟังก์ชันคลื่นมีค่าขึ้นกับเวลา แสดงให้เห็นได้โดยการนำผลเฉลยของสมการที่ (3.7) และ (3.8) แทนลงในสมการที่ (3.5) จะได้

$$\psi(x,t) = \varphi(x)e^{-\frac{iEt}{\hbar}} \quad (3.9)$$

และจากสมการที่ (3.9) นำมาคำนวณหาค่าของความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาค ได้ว่า

$$|\psi(x,t)|^2 = \psi^* \psi = \varphi^* e^{+\frac{iEt}{\hbar}} \varphi e^{-\frac{iEt}{\hbar}} = |\varphi(x)|^2 \quad (3.10)$$

สมการที่ (3.10) นี้แสดงให้เห็นว่า ค่าฟังก์ชันคลื่นที่ไม่ขึ้นกับเวลาจะให้ผลของความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคได้เท่ากับค่าฟังก์ชันคลื่นที่ขึ้นกับเวลา ซึ่งทำให้การคำนวณเกี่ยวกับปัญหาคำนวณค่าทางสถิติของอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์ที่ไม่ขึ้นกับเวลามีความง่ายมากยิ่งขึ้น

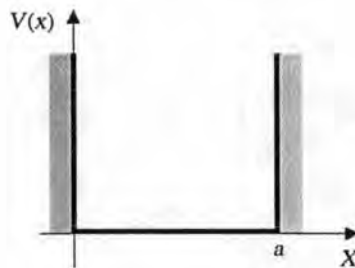
3.1.1 พลังงานศักย์แบบ Infinite Square Well

จากหัวข้อที่ 3.1 พบว่าเมื่อพลังงานศักย์มีค่าไม่ขึ้นกับเวลา จะสามารถคำนวณหาผลเฉลยของฟังก์ชันคลื่นได้จากสมการชโรดิงเจอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา และค่าฟังก์ชันคลื่นที่ได้ยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคได้เช่นเดียวกับกรณีของฟังก์ชันคลื่นที่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการใช้ประโยชน์จากผลที่ได้ดังกล่าวเพื่อหาผลเฉลยของฟังก์ชันคลื่นภายใต้พลังงานศักย์ที่ทราบค่าของ infinite square well ซึ่งเป็นตัวอย่างของแบบจำลองพลังงานศักย์ที่สามารถนำมาใช้อธิบายถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคในโครงสร้างคว้นดัมเวลล์ได้

เมื่ออนุภาคที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน x ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ให้อยู่ภายในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง โดยกำแพงที่มีความสูงเป็นอนันต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ อนุภาคถูกขังอยู่ภายในบ่อพลังงานศักย์ที่มีความสูงเป็นอนันต์ จะสามารถหาค่าฟังก์ชันคลื่นของอนุภาคดังกล่าวได้จากสมการ โชรดิเงอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา

เมื่อกำหนดให้ infinite square well มีค่าพลังงานศักย์เป็น

$$\begin{aligned} V(x) &= 0 && \text{เมื่อ } 0 \leq x \leq a \\ &= \infty && \text{ที่บริเวณอื่นๆ} \end{aligned} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.3 พลังงานศักย์แบบ infinite square well

เนื่องจากที่บริเวณด้านในบ่อพลังงานศักย์ พลังงานศักย์ $V(x)$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการ โชรดิเงอร์ภายในบ่อพลังงานศักย์จะเป็น

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \varphi}{dx^2} = E \varphi \quad (3.12)$$

และที่บริเวณด้านนอกของบ่อพลังงานศักย์ไม่มีโอกาสพบอนุภาคได้ ดังนั้นจะได้ค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) คือ $\varphi(0) = \varphi(a) = 0$ ทำให้ได้ผลเฉลยของสมการที่ (3.12) เป็นสองสมการดังสมการที่ (3.13) และ (3.14) ตามลำดับ

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2ma^2} \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.13)$$

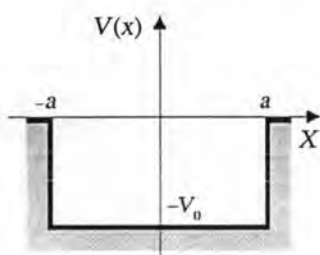
$$\varphi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.14)$$

สมการที่ (3.13) อธิบายถึงอนุภาคที่เคลื่อนที่ในแนวแกน x อยู่ในบ่อพลังงานศักย์จะมีระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง เป็น $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ โดยที่ E_1 เป็นค่าพลังงานที่ต่ำที่สุดของอนุภาคและโอกาสที่จะพบอนุภาคในแต่ละระดับพลังงานดังกล่าวสามารถถูกคำนวณได้จากค่าของฟังก์ชันคลื่น $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n$ ในสมการที่ (3.14) [19-20]

3.1.2 พลังงานศักย์แบบ Finite Square Well

พลังงานศักย์แบบ infinite square well เป็นกรณีอุดมคติ แต่ก็สามารถนำมาใช้เพื่ออธิบายพื้นฐานด้านพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ สำหรับผลเฉลยของฟังก์ชันคลื่นที่ได้จากกรณีอนุภาคเคลื่อนที่ตามแนวแกน x ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ให้อยู่ภายในบริเวณกำแพงพลังงานศักย์ที่มีความสูงจำกัด หรืออนุภาคถูกขังอยู่ในบ่อพลังงานศักย์ที่มีความสูงจำกัด จะสามารถหาได้จากสมการชโรดิงเจอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well ในทำนองเดียวกันกับกรณี infinite square well

$$\begin{aligned} V(x) &= -V_0 \text{ เมื่อ } -a \leq x \leq a \\ &= 0 \text{ ที่บริเวณอื่นๆ} \end{aligned} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.4 พลังงานศักย์แบบ finite square well

สมการที่ (3.15) เป็นพลังงานศักย์แบบ finite square well และที่สถานะที่ถูกจำกัดขอบเขต (bound state) หรือที่บริเวณพลังงาน $E < 0$ ผลเฉลยทั่วไปของฟังก์ชันคลื่นจากสมการชโรดิงเจอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลาจะอยู่ในรูปของสมการที่ (3.16), (3.17) และ (3.18)

$$\varphi(x) = Ae^{Kx} \quad \text{เมื่อ } x < -a \quad (3.16)$$

$$\varphi(x) = B \sin(\ell x) + C \cos(\ell x) \quad \text{เมื่อ } -a < x < a \quad (3.17)$$

$$\varphi(x) = De^{-Kx} \quad \text{เมื่อ } x > a \quad (3.18)$$

เมื่อ A, B, C และ D เป็นค่าคงที่ใดๆ โดยที่ $K \equiv \sqrt{\frac{-2mE}{\hbar}}$ และ $\ell \equiv \sqrt{\frac{2m(E + V_0)}{\hbar}}$ สมการที่ (3.16), (3.17) และ (3.18) เป็นผลเฉลยทั่วไปของฟังก์ชันคลื่นที่ได้จากการแก้สมการชโรดิงเจอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา แต่เนื่องจากพลังงานศักย์แบบ finite square well มีลักษณะเป็นฟังก์ชันคู่ (even function) ดังนั้นผลเฉลยของฟังก์ชันคลื่นที่ได้ในช่วง $-a < x < a$ ในสมการที่ (3.17) จึงเป็นได้เพียงฟังก์ชันคู่หรือฟังก์ชันคี่ (odd function) อย่างไม่อย่างหนึ่งเท่านั้น ซึ่งจะทำให้ผลเฉลยที่แท้จริงของสมการที่ (3.17) เป็นดังสมการที่ (3.19)

$$\varphi(x) = B \sin(\ell x) \quad \text{หรือ} \quad \varphi(x) = C \cos(\ell x) \quad \text{เมื่อ } -a < x < a \quad (3.19)$$

และจากเงื่อนไขขอบเขตและความต่อเนื่องที่บริเวณ $x = \pm a$ และการแก้สมการที่ (3.16), (3.18) และ (3.19) ทำให้ได้ข้อสรุปสำคัญ 2 ข้อ คือ

1 กรณีบ่อพลังงานศักย์มีขนาดกว้างและลึกมาก สามารถประมาณค่าระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องภายในบ่อพลังงานศักย์ ($E < 0$) ได้ว่า

$$E_n + V_0 \cong \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2m(2a)^2} \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.20)$$

สมการที่ (3.20) อธิบายว่าเมื่อบ่อพลังงานศักย์แบบ finite square well มีความกว้างและลึกมาก ค่าพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องของอนุภาคจะสามารถประมาณได้โดยใช้สมการที่ (3.13) ซึ่งเป็นกรณีของบ่อพลังงานศักย์แบบ infinite square well ที่มีความกว้างของบ่อเท่ากับ $2a$

2 กรณีบ่อพลังงานศักย์มีขนาดแคบและตื้น เมื่อบ่อพลังงานศักย์มีขนาดเล็กลง จะทำให้ระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องมีจำนวนลดลงเรื่อยๆตามขนาดของบ่อ แต่ไม่ว่าบ่อพลังงานศักย์จะมีขนาดลดลงมากเพียงใดก็ตาม จะยังคงมีระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องของอนุภาคเหลืออยู่อย่างน้อย 1 ระดับพลังงานเสมอ [19-20]

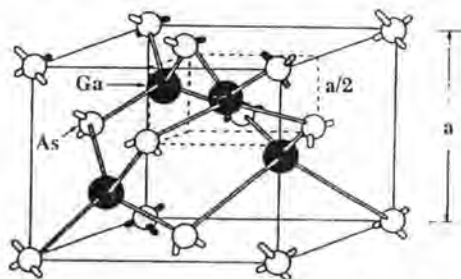
3.2 โครงสร้างควันทัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนต์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนต์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า อนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ภายในบ่อพลังงานศักย์ทั้งแบบ infinite square well และแบบ finite square well จะมีพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง และในทำนองเดียวกัน โครงสร้างควันทัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนต์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ เป็นโครงสร้างที่สามารถจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของอนุภาคได้ในลักษณะเดียวกันกับแบบจำลองพลังงานศักย์ทั้งสอง เพราะเมื่อนำอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนต์มาประกบติดกับแกลเลียมอาร์เซไนต์ซึ่งมีขนาดช่องว่างพลังงานที่แคบกว่า จะทำให้อนุภาคที่เดิมเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแกลเลียมอาร์เซไนต์ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกด้วยกำแพงพลังงานศักย์ที่เกิดจากอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ เรียกแกลเลียมอาร์เซไนต์ว่าเป็นชั้นเวลล์ และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ว่าเป็นชั้นกำแพงในโครงสร้างควันทัมเวลล์ ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างควันทัมเวลล์ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำทั้งสอง จึงสามารถทำได้โดยการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก่อน แล้วจึงศึกษาถึงคุณสมบัติของโครงสร้างควันทัมเวลล์ต่อไป

3.2.1 คุณสมบัติเฉพาะของแกลเลียมอาร์เซไนต์และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนต์

แกลเลียมอาร์เซไนต์

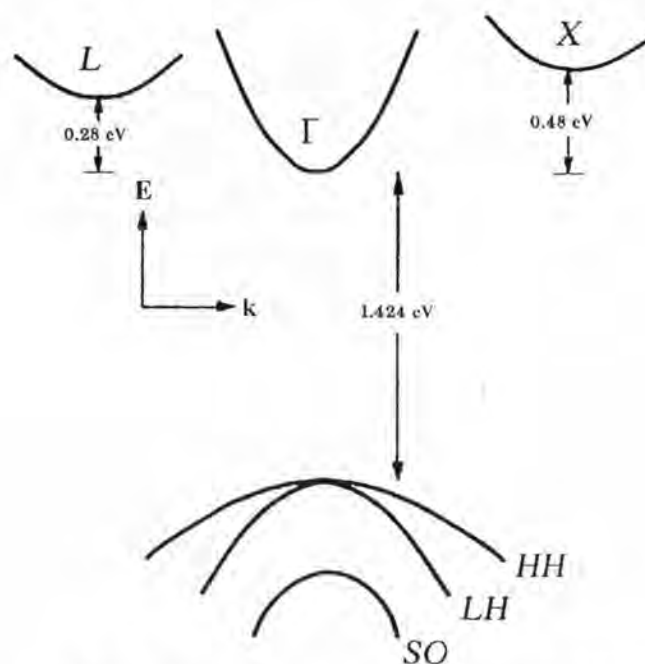
แกลเลียมอาร์เซไนต์ (GaAs) เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่ได้รับความนิยมอย่างมาก หลังจากที่ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์กันน์ และเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ อันเนื่องมาจากสาเหตุที่แกลเลียมอาร์เซไนต์มีความคล่องตัวของพาหะที่สูงทำให้สามารถนำมาใช้ในสิ่งประดิษฐ์ที่ต้องการความเร็วสูงได้ อีกทั้งการมีช่องว่างพลังงานแบบตรงที่ทำให้สิ่งประดิษฐ์ที่ได้มีคุณสมบัติในการเปล่งแสงและดูดกลืนแสงที่ดี



รูปที่ 3.5 โครงสร้างผลึกของแกลเลียมอาร์เซไนต์

แกเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำไบนารีกลุ่ม III-V ที่ประกอบด้วยอะตอมของแกเลียม (Ga) และอาร์เซนิก (As) สร้างพันธะและเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบเป็นโครงสร้างผลึกแบบ zincblende ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ระยะระหว่างอะตอมของอาร์เซนิกที่ประกอบเป็นโครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (cubic lattice) คือค่าคงที่ของโครงผลึก และในรูปที่ 3.6 แสดงช่องว่างพลังงานแบบตรงของแกเลียมอาร์เซไนด์โดยที่ในแถบคอนดักชัน (conduction band) ประกอบด้วยเส้นโค้งของแถบพลังงานที่มีตำแหน่งต่ำสุดอยู่ที่ Γ , L และ X ที่ตำแหน่ง $(k_x, k_y, k_z) = (000)$ ตามทิศทางในแนว [111] และตามทิศทางในแนว [100] ตามลำดับ ในสภาวะปกติจะสามารถพบอิเล็กตรอนได้ที่เส้นโค้ง Γ บริเวณตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำที่สุด และอยู่ใกล้กับแถบวาเลนซ์ (valence band) ที่มีพลังงานมากที่สุดที่ตำแหน่ง $(k_x, k_y, k_z) = (000)$ ส่วนในแถบวาเลนซ์ จะประกอบด้วยแถบพลังงานซึ่งแยกกันออกเป็น 3 แถบ ที่มีความโค้งแตกต่างกันและมีจุดสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันคือที่ $(k_x, k_y, k_z) = (000)$ ส่วนที่มีความโค้งน้อยเรียกว่าแถบโฮลหนัก (heavy-hole band หรือ HH) ส่วนที่มีความโค้งมากรองลงมาเรียกว่าแถบโฮลเบา (light-hole band หรือ LH) ในส่วนล่างสุดเป็นแถบที่มีความโค้งมากที่สุดและแยกออกมาจากแถบพลังงานทั้งสองข้างต้นค่อนข้างมาก เรียกแถบพลังงานนี้ว่าแถบ split-off หรือ SO ระยะห่างระหว่างจุดต่ำสุดของเส้นโค้ง Γ ในแถบคอนดักชัน และจุดสูงสุดของแถบโฮลหนักที่ตำแหน่ง $(k_x, k_y, k_z) = (000)$ คือ ขนาดของช่องว่างพลังงานแบบตรงของแกเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งมีค่าประมาณ 1.424 eV ที่อุณหภูมิห้อง (300 K)



รูปที่ 3.6 โครงสร้างแถบพลังงานของแกเลียมอาร์เซไนด์

อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์

อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ (AlGaAs) เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเตอรันารีอีกชนิดหนึ่งในกลุ่ม III-V ที่จัดเป็นสารกึ่งตัวนำอัลลอย (alloy semiconductor) และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ zincblende เช่นเดียวกับแกเลียมอาร์เซไนด์โดยที่อะตอมของอะลูมิเนียม (Al) จะเข้าไปแทนที่ในบางส่วนของตำแหน่งอะตอมแกเลียมแบบสุ่มตามค่าส่วนประกอบของอะลูมิเนียม x ดังนั้นในอะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่มีอัตราส่วนอะตอมระหว่างอะตอมของอะลูมิเนียมต่ออะตอมของแกเลียมเป็น x ต่อ $1-x$ หรือที่เรียกว่า $Al_xGa_{1-x}As$ จึงประกอบด้วยอะตอมของอะลูมิเนียมจำนวน x อะตอม และอะตอมของแกเลียมจำนวน $1-x$ อะตอม ถูกเรียงตัวอยู่ในตำแหน่งอะตอมของธาตุกลุ่มที่ III และถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของอาร์เซนิกซึ่งจะอยู่ในตำแหน่งอะตอมของธาตุกลุ่มที่ V ส่วนคุณสมบัติเฉพาะของอะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ เช่น ค่าคงที่โครงสร้างผลึก และโครงสร้างแถบพลังงานนั้นจะอยู่ระหว่างสารประกอบกึ่งตัวนำไบนารีของแกเลียมอาร์เซไนด์และอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์ (AlAs) ตามส่วนประกอบของอะลูมิเนียมที่มีอยู่

ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์มีค่าแปรตามแบบเชิงเส้นกับปริมาณของสารประกอบกึ่งตัวนำไบนารีที่เป็นส่วนประกอบตามกฎของ Vegard ในสมการที่ (3.21)

$$a_{Al_xGa_{1-x}As} = xa_{AlAs} + (1-x)a_{GaAs} \quad (3.21)$$

เมื่อ $a_{Al_xGa_{1-x}As}$, a_{AlAs} และ a_{GaAs} คือ ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ อะลูมิเนียมอาร์เซไนด์ และแกเลียมอาร์เซไนด์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึกของแกเลียมอาร์เซไนด์ ($a_{GaAs} = 5.6533 \text{ \AA}$) และของอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์ ($a_{AlAs} = 5.660 \text{ \AA}$) นั้นมีค่าน้อยมาก จึงทำให้การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำต่างชนิดระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสองไม่มีปัญหาทางด้านการไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึก (lattice-mismatched)

[1]

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแถบพลังงานในอะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์จะไม่เป็นไปในลักษณะเชิงเส้นตามส่วนประกอบของอะลูมิเนียมแบบในกรณีของค่าคงที่โครงสร้างผลึก โดยนอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแถบพลังงานแล้ว ส่วนประกอบของอะลูมิเนียมที่ถูกผสมเข้าไปยังทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องว่างพลังงานอีกด้วย

เมื่อส่วนประกอบของอะลูมิเนียม มีค่าน้อยกว่า 0.45 อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์จะให้โครงสร้างแถบพลังงานที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง [1] โดยมีขนาดช่องว่างพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์และเส้นโค้ง Γ เป็นไปตามสมการที่ (3.22)

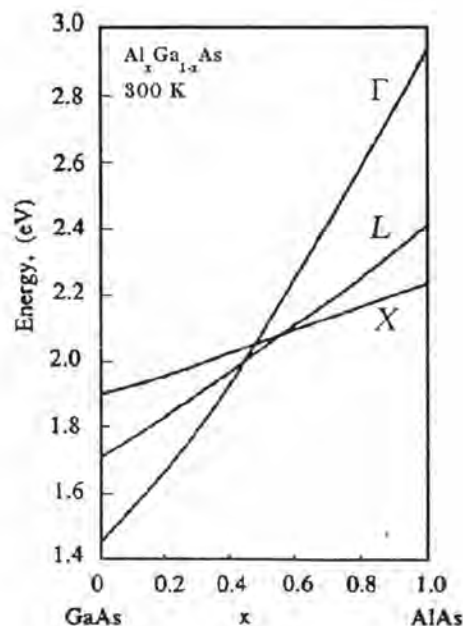
$$E_g^\Gamma(x) = 1.425 + 1.247x + 1.147(x - 0.45)^2 \quad (3.22)$$

และเมื่อส่วนประกอบของอะลูมิเนียมมีค่ามากกว่า 0.45 อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์จะให้โครงสร้างแถบพลังงานที่มีช่องว่างพลังงานเป็นแบบไม่ตรง โดยมีขนาดช่องว่างพลังงานที่เท่ากับความแตกต่างระหว่างแถบวาเลนซ์และเส้นโค้ง X หรือแถบวาเลนซ์และเส้นโค้ง L ตามสมการที่ (3.23) และ (3.24) ตามลำดับ

$$E_g^X(x) = 1.9 + 0.125x + 0.143x^2 \quad (3.23)$$

$$E_g^L(x) = 1.708 + 0.642x \quad (3.24)$$

รูปที่ 3.7 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดช่องว่างพลังงานที่เพิ่มขึ้น และชนิดของช่องว่างพลังงานที่เปลี่ยนจากแบบตรงไปเป็นแบบไม่ตรงของอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่อส่วนประกอบของอะลูมิเนียมมีค่าเพิ่มจาก 0 จนถึง 1.0



รูปที่ 3.7 ขนาดช่องว่างพลังงานของอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ส่วนประกอบของอะลูมิเนียมค่าต่างๆ (จาก P. Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, 1994 [1])

ทั้งค่าคงที่โครงสร้างผลึก ขนาดช่องว่างพลังงาน และคุณสมบัติเฉพาะอื่นๆของแกเลียมอาร์เซไนด์ และอะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และเมื่อต้องการเปรียบเทียบค่าคงที่โครงสร้างผลึก และขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 1.1

ตารางที่ 3.1 โครงสร้างผลึก ค่าคงที่โครงสร้างผลึก และคุณสมบัติเฉพาะอื่นๆของแกเลียมอาร์เซไนด์ และอะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ (จาก M. Shur, Physics of semiconductor devices, 1990 [21])

	<i>GaAs</i>	<i>Al_xGa_{1-x}As</i>
โครงสร้างผลึก	zincblende	zincblende
ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (<i>A</i>)	5.6533	5.6533+0.0078 <i>x</i>
มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน (<i>m₀</i>)	0.067 (0 K) 0.063 (300 K)	density of states effective mass 0.067+0.083 <i>x</i> (Γ) 0.85-0.14 <i>x</i> (X) 0.56+0.10 <i>x</i> (L)
มวลประสิทธิผลของโฮล (<i>m₀</i>)	โฮลหนัก : 0.51 (T<100 K) 0.50 (300 K) โฮลเบา : 0.084 (T<100 K) 0.076 (300K)	density of states effective mass โฮลหนัก : 0.62+0.14 <i>x</i> โฮลเบา : 0.087+0.063 <i>x</i> split-off : 0.15+0.09 <i>x</i>
ขนาดช่องว่างพลังงาน (eV)	1.424 (300 K) 1.507 (77 K) 1.519 (0 K)	1.424+1.247 <i>x</i> (<i>x</i> <0.45) 1.9+0.125 <i>x</i> +0.143 <i>x</i> ² (0.45< <i>x</i> <1.0)
ดัชนีหักเหแสง	3.3	ดูในรายการอ้างอิง [22]
อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (V)	4.07	4.07-1.1 <i>x</i> (<i>x</i> <0.45) 3.64-0.14 <i>x</i> (0.45< <i>x</i> <1.0)

3.2.2 คุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในโครงสร้างควันตัมเวลล์ของ แกเลียมอาร์เซไนต์/อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนต์

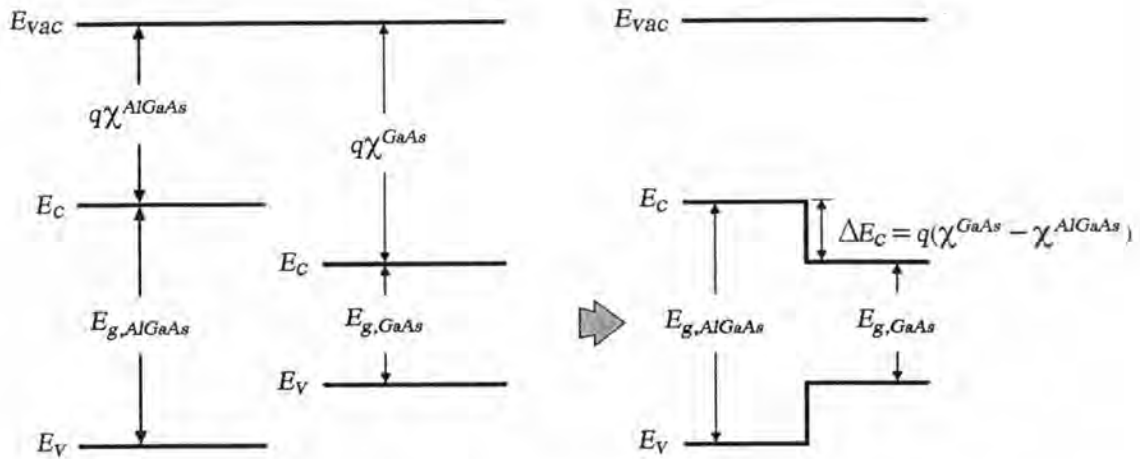
จากแนวความคิดที่ว่าอิเล็กตรอนมีคุณสมบัติเป็นทั้งอนุภาคและคลื่นเช่นเดียวกับแสง และแนวความคิดของเดอบรอยล์ (de Broglie) ที่ว่าการมีค่าไม่ต่อเนื่องในทฤษฎีทางกลศาสตร์ควันตัม มีสาเหตุมาจากการแทรกสอด (interference) ของคลื่นอิเล็กตรอน ทำให้โครงสร้างควันตัมเวลล์แตกต่างไปจากสารกึ่งตัวนำทั่วไปซึ่งมีค่าความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (de Broglie wavelength) หรือค่าเฉลี่ยระยะทางปลอดการชนของอิเล็กตรอน (ประมาณ 200-400 Å) ที่น้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของผลึกสารกึ่งตัวนำ [1]

ในโครงสร้างควันตัมเวลล์ เมื่อค่าเฉลี่ยระยะทางปลอดการชนของพาหะ (mean free path of carrier) มีค่าเทียบเคียงได้กับขนาดของผลึกสารกึ่งตัวนำแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า quantum-sized effects ทำให้คุณสมบัติเฉพาะต่างๆของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่เป็นอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การมีผลตอบสเปกตรัมที่ขึ้นกับขนาดความกว้างของชั้นเวลล์และความสูงของชั้นก้ำแพง การดูดกลืนแสงของ exciton ที่อุณหภูมิต่ำ การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นซึ่งขึ้นกับขนาดของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึก และการมีฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมแบบขั้นบันได เป็นต้น

โครงสร้างควันตัมเวลล์เป็นโครงสร้างหนึ่งของสารกึ่งตัวนำที่ทำให้ค่าเฉลี่ยระยะทางปลอดการชนของพาหะในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมีค่าลดลงจนใกล้เคียงกันกับขนาดของผลึก โดยการลดขนาดของผลึกลงจาก 3 มิติไปเป็น 2 มิติ ซึ่งเกิดขึ้นจากการเรียงสลับกันของสารกึ่งตัวนำสองชนิดที่มีขนาดช่องว่างพลังงานต่างกัน สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างพลังงานแคบ และมีความหนาที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยระยะทางปลอดการชนของพาหะ จะถูกแทรกอยู่ระหว่างสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างพลังงานที่กว้างกว่า ทำให้พาหะในสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นถูกขัง (confined) และมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำทั้งสอง อยู่ในสภาวะที่ถูกควันไทซ์ (quantized) คือมีค่าพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องดังได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1 เรียกสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างพลังงานที่แคบกว่าว่าเป็นชั้นเวลล์ และเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างพลังงานที่กว้างกว่าว่าชั้นก้ำแพง

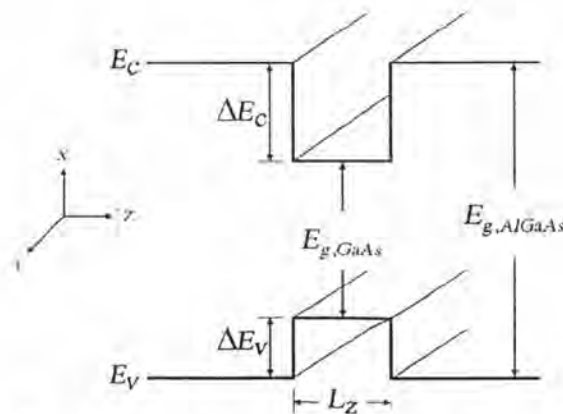
เนื่องจากคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างควันตัมเวลล์นั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่เป็นส่วนประกอบ ดังนั้นโครงสร้างแถบพลังงานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโครงสร้าง เมื่อพิจารณาที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง กฎอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity rule) ไม่สามารถนำมาใช้หาค่าความ

ไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงานที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสองได้ เนื่องจากไดโพล (dipole) ที่เกิดจากประจุที่ใช้ร่วมกันบริเวณรอยต่อ



รูปที่ 3.8 กฎอเล็กตรอนอัฟฟินิตีที่บริเวณรอยต่อของแกลเลียมอาร์เซไนด์กับ อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

รูปที่ 3.8 แสดงกฎอเล็กตรอนอัฟฟินิตีที่บริเวณรอยต่อระหว่างแกลเลียมอาร์เซไนด์กับ อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ และ $q\chi^{GaAs}$, $q\chi^{AlGaAs}$ เป็นค่าอเล็กตรอนอัฟฟินิตีหรือพลังงาน ที่วัดจากระดับสุญญากาศถึงระดับพลังงานต่ำสุดของแถบคอนดักชัน E_c ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ และอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 โครงสร้างควันตัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์

อย่างไรก็ตาม J. Singh [23] กล่าวว่า สำหรับความไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงานที่บริเวณรอยต่อของแกลเลียมอาร์เซไนด์กับอะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ในโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่ได้จากผลการทดลองนั้นมีค่าโดยประมาณตามสมการที่ (3.25) คือ

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} \cong \frac{60}{40} \text{ ถึง } \frac{65}{35} \quad (3.25)$$

คุณสมบัติที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการทางแสงและกระบวนการทางไฟฟ้า หรือคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของโครงสร้างควันตัมเวลล์มีหลายประการด้วยกัน จะขอกกล่าวถึงเฉพาะส่วนเกี่ยวข้องที่สำคัญ ดังต่อไปนี้ คือ

ก) การเคลื่อนที่ของอนุภาค

การเคลื่อนที่ของอนุภาคในโครงสร้างควันตัมเวลล์นั้นประกอบด้วยเคลื่อนที่ใน 3 ทิศทาง คือในแนวแกน X, Y และ Z (รูปที่ 3.9) เมื่อพิจารณาอนุภาคที่เป็นอิเล็กตรอน พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแนวแกน X และ Y นั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการชโรดิงเจอร์ที่ไม่ได้ถูกจำกัดโดยบ่อพลังงานศักย์ ($-\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \frac{d^2\phi_x}{dx^2} = E_x\phi_x$ และ $-\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \frac{d^2\phi_y}{dy^2} = E_y\phi_y$) ส่วนพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแนวแกน Z อย่างง่าย ๆ นั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการชโรดิงเจอร์ภายใต้บ่อพลังงานศักย์แบบ infinite square well ($-\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \frac{d^2\phi_z}{dz^2} + V_z\phi_z = E_z\phi_z$) ซึ่งมีผลเฉลยเป็นดังต่อไปนี้ [23] คือ

$$E_x = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_e^*} \quad (3.26)$$

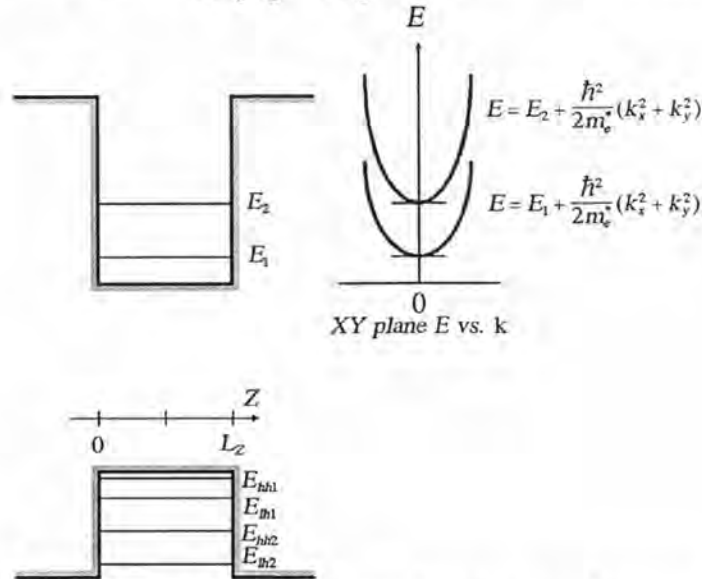
$$E_y = \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m_e^*} \quad (3.27)$$

$$E_z = E_\ell = \frac{\pi^2 \hbar^2 \ell^2}{2m_e^* L_z^2} \quad \text{เมื่อ } \ell = 1, 2, 3, \dots \quad (3.28)$$

เมื่อ k_x และ k_y เป็น wave vector ในทิศทาง X และ Y ตามลำดับ และ m_e^* เป็นมวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน และผลเฉลยของสมการชโรดิงเจอร์ในทิศทาง Z ทำให้อิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันมีระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง เรียกว่าระดับพลังงานควันตัมของอิเล็กตรอน

E_ℓ (quantized subband electron energies) ซึ่งมีค่าขึ้นกับความกว้างของชั้นเวสต์ L_z (ในทำนองเดียวกันจะได้ระดับพลังงานควันไตซ์ของโฮลทั้งโฮลหนัก $E_{hh\ell}$ และโฮลเบา $E_{lh\ell}$ ในแถบวาเลนซ์ เมื่อ $\ell = 1, 2, 3, \dots$) ดังนั้นจะได้พลังงานรวมทั้งหมดของอิเล็กตรอน ตามสมการที่ (3.29) คือ

$$E(\ell, k_x, k_y) = \frac{\pi \hbar^2 \ell^2}{2m_e^* L_z^2} + \frac{\hbar^2}{2m_c^*} (k_x^2 + k_y^2) \quad \text{เมื่อ } \ell = 1, 2, 3, \dots \quad (3.29)$$



รูปที่ 3.10 พลังงานของอิเล็กตรอนในโครงสร้างควันไตซ์ตามแนวทิศทาง Z และในระนาบ XY

ข) ความหนาแน่นสถานะ (Density of States)

ในสารกึ่งตัวนำทั่วไปที่มีขนาดเป็น 3 มิติ ค่าความหนาแน่นสถานะในแถบคอนดักชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะมีค่าที่ต่อเนื่องเป็นรูปพาราโบลาเมื่อเทียบกับระดับพลังงานที่สูงขึ้นจากระดับพลังงาน E_c [1] ตามสมการที่ (3.30)

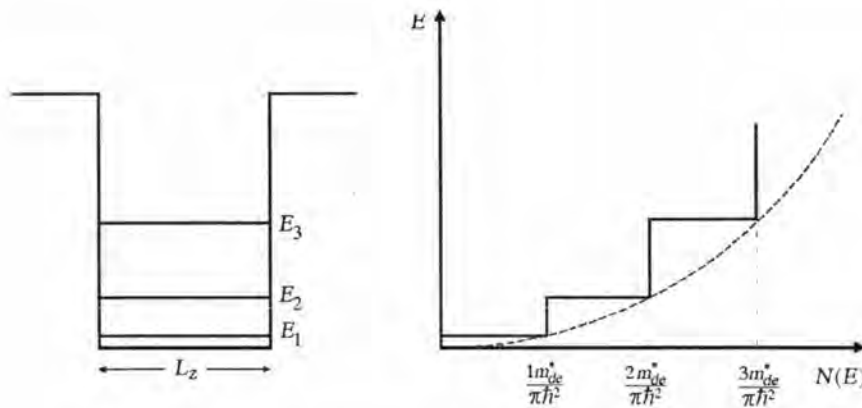
$$N(E)dE = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2} \left(\frac{m_{dc}}{\hbar^2} \right)^2 (E - E_c)^{3/2} dE \quad (3.30)$$

เมื่อ m_{dc} คือค่า density of states effective mass ของอิเล็กตรอน และเมื่อ m_{dh} คือค่า density of states effective mass ของโฮล จะทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสถานะในแถบวาเลนซ์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรกับระดับพลังงานที่ต่ำกว่าระดับพลังงาน E_v ได้ในทำนองเดียวกัน

สมการที่ (3.30) เป็นค่าความหนาแน่นสเตทในช่วงพลังงาน dE ของสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเป็น 3 มิติ ดังนั้น จึงเรียกว่า ความหนาแน่นสเตทแบบ 3 มิติ (three-dimensional density of states) แต่สำหรับในกรณีของโครงสร้างควันตัมเวลล์นั้น ค่าความหนาแน่นสเตทในแถบคอนดักชันต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะถูกจำกัดด้วยความหนาของชั้นเวลล์ ทำให้ความหนาแน่นสเตทในกรณีนี้เรียกว่า ความหนาแน่นสเตทแบบ 2 มิติ (two-dimensional density of states) [1] ซึ่งมีค่าตามสมการที่ (3.31) คือ

$$N(E)dE = \frac{m_{de}}{\pi \hbar^2 L_z} dE \quad (3.31)$$

สมการที่ (3.31) เป็น ค่าความหนาแน่นสเตทในช่วงพลังงาน dE ของโครงสร้างควันตัมเวลล์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นสเตทของโครงสร้างที่ในแต่ละระดับพลังงานควันไตซ์ของอิเล็กตรอนจะได้ค่าที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องเป็นขั้นบันได (steplike density of states) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และเส้นประในรูปแสดงค่าความหนาแน่นสเตทแบบ 3 มิติในสารกึ่งตัวนำที่มีปริมาตรเท่ากับชั้นเวลล์ของโครงสร้าง [1, 20, 23]



รูปที่ 3.11 ระดับพลังงานควันไตซ์และความหนาแน่นสเตทแบบขั้นบันได
ในแถบคอนดักชันของโครงสร้างควันตัมเวลล์

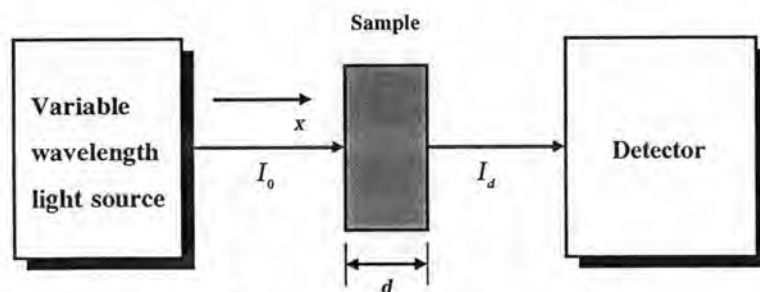
ค) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและผลตอบสนองต่อแสง

(Absorption Coefficients and Responsivity)

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความสามารถของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นในการดูดกลืนแสงที่ตกกระทบ โดยมีสมการที่แสดงความสัมพันธ์ คือ

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.32)$$

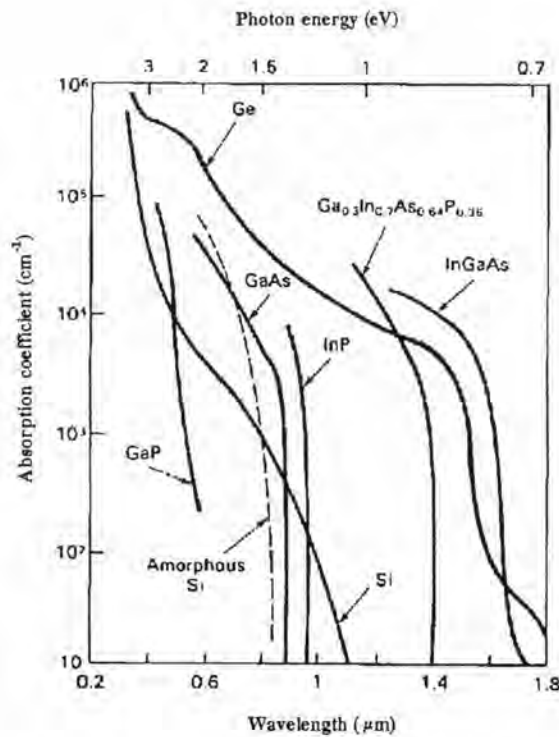
เมื่อ I_0 , $I(x)$ และ α เป็นค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบบนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ค่าความเข้มแสงที่เหลืออยู่ที่ตำแหน่งซึ่งห่างจากผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำเป็นระยะทาง x และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำตามลำดับ



รูปที่ 3.12 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3.32) จะพบว่าเมื่อสารกึ่งตัวนำมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมาก ความเข้มแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ นั่นคือแสงที่มากกระทบส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนที่บริเวณผิวด้านหน้า และเมื่อสารกึ่งตัวนำมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงน้อย สารกึ่งตัวนำชนิดนี้จะสามารถดูดกลืนแสงได้แม้ที่บริเวณที่ลึกมากกว่าก็ตาม

ในสารกึ่งตัวนำทั่วไปที่มีขนาดเป็น 3 มิติ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างมากที่บริเวณขอบช่องว่างพลังงาน และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อพลังงาน โฟตอนมีค่าสูงกว่าขนาดช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 3.13 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ (จาก M. Shur, Physics of semiconductor devices, 1990 [21])

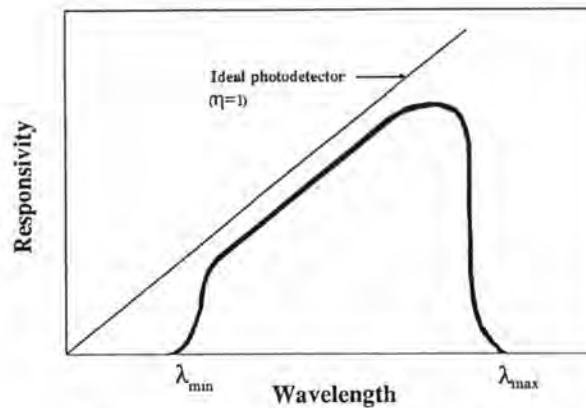
ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าผลตอบสนองต่อแสงของสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่ในการตรวจรับแสง มีความเกี่ยวพันกันโดยค่าผลตอบสนองต่อแสง (\mathcal{R}) นั้นขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิภาพคว้นตัม (quantum efficiency) ตามสมการที่ (3.33) และค่าประสิทธิภาพทางคว้นตัม (η) มีค่าขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความหนาของสารกึ่งตัวนำตามสมการที่ (3.34)

$$\mathcal{R} = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda (\mu\text{m})}{1.24} \quad (A/W) \quad (3.33)$$

$$\eta \propto (1 - e^{-\alpha d}) \quad (3.34)$$

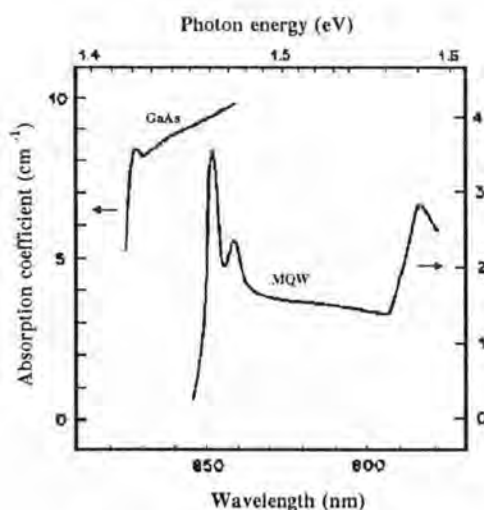
เมื่อ I_{ph} คือ ค่ากระแสโฟโต (photocurrent) ที่เกิดจากแสงตกกระทบบที่มีกำลังงานเป็น P_{inc} ในสารกึ่งตัวนำที่มีความหนา d ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำทั่วไปที่นำมาใช้ตรวจรับแสงจะมีผลตอบสนองต่อแสงเป็นดังรูปที่ 3.14 ค่าความยาวคลื่นมากที่สุด (λ_{max}) ที่เป็นจุดสิ้นสุดของผลตอบสนองต่อแสงมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้น ในขณะที่ค่า

ความยาวคลื่นน้อยที่สุด (λ_{\min}) เป็นค่าที่เกิดขึ้นจากการที่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปมีค่ามากขึ้นที่ความยาวคลื่นสั้นจึงทำให้แสงที่มากตกกระทบทั้งหมดถูกดูดกลืนเฉพาะที่บริเวณผิวหน้าด้านนอก ซึ่งจะมีสเตทที่ผิวหน้า (surface states) อันเป็นจุดบกพร่อง (defects) อยู่ภายในช่องว่างพลังงาน [1, 24]



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองต่อแสงในสารกึ่งตัวนำทั่วไป

ส่วนในกรณีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของโครงสร้างควันตัมเวลล์นั้น หากพิจารณาจำนวนสเตทที่เกิดขึ้นในโครงสร้างควันตัมเวลล์เดี่ยว จะพบว่าด้วยปริมาณที่น้อยมากอันเนื่องมาจากความหนาของชั้นเวลล์ที่ต้องมีค่าเทียบเคียงได้กับค่าเฉลี่ยระยะทางปลดการชนของพาหะ ทำให้โครงสร้างควันตัมเวลล์เดี่ยวมีจำนวนสเตทน้อยมากไปด้วยจนทำให้ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงได้อย่างง่ายๆ อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนสเตทโดยการเพิ่มจำนวนชั้นของเวลล์ในโครงสร้างให้มากขึ้นที่เรียกว่าโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ (multiquantum well) ได้ทำให้การหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงทำได้ง่ายยิ่งขึ้น และเนื่องจากระดับพลังงานควันไตซ์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์มีความแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำทั่วไป จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ได้มีความแตกต่างไปด้วย โดยมีการดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่นเฉพาะค่าซึ่งเท่ากับความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานควันไตซ์ในแถบพลังงานทั้งสองของโครงสร้าง



รูปที่ 3.15 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแกเลียมอาร์เซไนด์และของโครงสร้าง
มัลติควันตัมเวลล์ของแกเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์
(จาก D. A. B. Miller et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 41, No. 8, 1982 [25])

รูปที่ 3.15 แสดงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแกเลียมอาร์เซไนด์เทียบกับโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ของแกเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิห้อง จุดยอดที่พลังงานค่าต่ำในสเปกตรัมของแกเลียมอาร์เซไนด์นั้นเกิดจากผลของ exciton ที่ยังเหลืออยู่ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนจุดยอดที่พลังงานค่าต่ำและจุดยอดที่พลังงานค่าสูงในสเปกตรัมของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์เกิดจาก exciton ที่อยู่ระหว่างระดับพลังงานควันไทซ์ของอิเล็กตรอนและโฮลหนัก และอิเล็กตรอนและโฮลเบาตามลำดับ [25] และสำหรับค่าผลตอบสนองต่อแสงของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์นั้นจะได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.4

ง) Exciton และผลของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึก

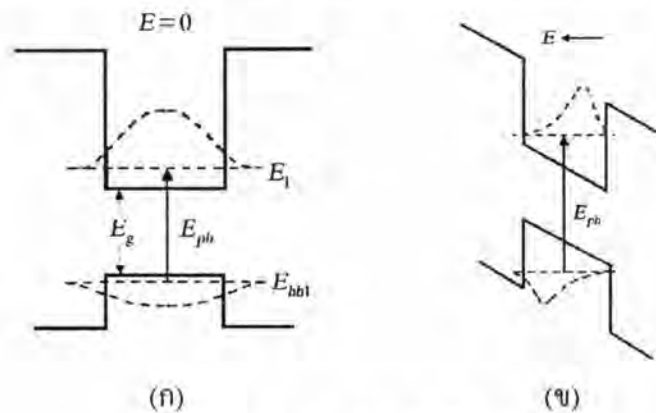
(Exciton and Effect of Transverse Electric Field)

เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยแสงแล้ว ไม่สามารถเปลี่ยนระดับพลังงานขึ้นไปยังแถบคอนดักชันได้ เนื่องจากถูกแรงกูดอมบ์จากโฮลดึงดูดไว้ทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปได้แค่ระดับพลังงานที่ใกล้กับ E_c คู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ดึงดูดกันด้วยแรงกูดอมบ์นี้เรียกว่า exciton [26]

ในกรณีของแกเลียมอาร์เซไนด์พลังงานที่ดึงดูดคู่อิเล็กตรอนและโฮล (exciton binding energy) ใกล้เคียงกัน มีค่า 4.4 meV และมีค่าใกล้เคียงกันกับพลังงานที่เกิดขึ้นจากการสั่นของโครงผลึกเนื่องจากความร้อน (ประมาณ 4 meV) จึงทำให้การวัดผลของ exciton ที่อุณหภูมิห้องทำได้

ค่อนข้างยาก แต่ในกรณีของโครงสร้างควันตัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ อิเล็กตรอนและโฮลถูกจำกัดบริเวณให้อยู่แต่ในชั้นเวลล์เท่านั้น จึงทำให้ผลของ exciton เกิดขึ้นได้แม้กระทั่งที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งแสดงให้เห็นได้จากการดูดกลืนแสงหรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้องของ โครงสร้าง (รูปที่ 3.15)

เมื่อมีสนามไฟฟ้าใส่ในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกให้แก่โครงสร้างควันตัมเวลล์ จะทำให้บัพพลังงานศักย์ที่เกิดจากชั้นเวลล์และชั้นก้ำแพงมีรูปร่างที่เปลี่ยนไปจากเดิม ค่าฟังก์ชันคลื่นที่ได้จึงมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า โดยมีแนวโน้มที่จะทะลุออกไปสู่ชั้นก้ำแพง [1, 27]



รูปที่ 3.16 โครงสร้างควันตัมเวลล์

(ก) เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์

(ข) เมื่อมีสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึก

ในรูปที่ 3.16 แสดงความแตกต่างของโครงสร้างควันตัมเวลล์เมื่อมีสนามไฟฟ้าและไม่มีสนามไฟฟ้า โดยที่ E_{ph} คือ พลังงานแสงที่พาหะใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากระดับควันไตซ์ในแถบคอนดักชันไปยังระดับพลังงานควันไตซ์ในแถบวาเลนซ์ จะเห็นได้ว่าค่าฟังก์ชันคลื่นของพาหะในแถบพลังงานทั้งสองของสารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการใส่สนามไฟฟ้าให้แก่โครงสร้างในทิศทางตั้งฉากกับรอยต่อของโครงสร้าง โดยมีแนวโน้มที่จะทะลุออกไปยังชั้นก้ำแพงซึ่งอยู่ข้างๆ ตามขนาดของสนามไฟฟ้า

พฤติกรรมเคลื่อนที่ของพาหะ ความหนาแน่นสเปกตรัมแบบขั้นบันได สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง exciton และสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่ทำให้เกิดความแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบกับการพัฒนาของเทคโนโลยีของสารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์จึงทำให้โครงสร้างควันตัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ถูกนำมาประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ใช้งานที่ความยาวคลื่นเฉพาะค่าได้ดีที่อุณหภูมิห้อง

นอกจากคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้แล้ว โครงสร้างควันตัมเวลล์ยังมีคุณสมบัติเฉพาะอื่นๆ เช่น การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นซึ่งขึ้นกับขนาดของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกที่อยู่ระหว่างดำเนินการวิจัยเพื่อนำมาใช้ในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต [3, 27-29]

3.3 โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์

โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ (multi-quantum well structure) หรือ MQW เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นเวลล์และชั้นก้ำแพงหลายๆชั้นซ้อนทับกัน เพื่อเป็นการเพิ่มจำนวนสเตทของระดับพลังงานควันตัมให้มากขึ้นกว่าโครงสร้างควันตัมเวลล์เดี่ยว โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์จึงเป็นโครงสร้างที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการประสิทธิภาพในด้านการเปล่งแสงและรับแสงที่สูงขึ้น

เมื่อมีสนามไฟฟ้าที่ใส่ในแนวตั้งฉากให้แก่โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์จะทำให้เกิดการทะลุของฟังก์ชันคลื่นที่ออกไปสู่ชั้นก้ำแพงที่กั้นระหว่างชั้นเวลล์มีค่ามากยิ่งขึ้น ในทำนองเดียวกันกับกรณีของโครงสร้างควันตัมเวลล์เดี่ยว (รูปที่ 3.16)