

บทที่ 4

การศึกษาผลตอบสนองเปกตรัมจากโครงสร้างมัลติควันตัมเวลด์ของ แกเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์

นอกจากทฤษฎีทางกลศาสตร์ควันตัมที่ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคในโครงสร้างควันตัมเวลด์แล้ว การศึกษาผลตอบสนองเปกตรัมที่ได้จากโครงสร้างมัลติควันตัมเวลด์เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาค และยังเป็นพื้นฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในสิ่งประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพสูง

บทนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการคำนวณฟังก์ชันคลื่นและความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบต่างๆ โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางกลศาสตร์ควันตัม ส่วนที่สองเป็นผลตอบสนองเปกตรัมในโครงสร้างมัลติควันตัมเวลด์ของแกเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ได้จากกระบวนการทางแสง อันได้แก่ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ และการทะลุผ่านแสง และที่ได้จากคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าและในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้าง

4.1 พลังงาน ฟังก์ชันคลื่น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาค

จากหัวข้อที่ 3.1.1 และ 3.1.2 อนุภาคที่เคลื่อนที่ภายใต้บ่อพลังงานศักย์ทั้งแบบ infinite square well และแบบ finite square well จะมีพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง พลังงานที่ไม่ต่อเนื่องดังกล่าวรวมทั้งฟังก์ชันคลื่น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคสามารถคำนวณได้จากสมการชโรดิงเจอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงให้เห็นทราบถึง พลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง ฟังก์ชันคลื่น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ infinite square well และภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well ที่มีจำนวนบ่อพลังงานศักย์ทั้งแบบ 1, 2 และ 5 บ่อ ตามลำดับ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางกลศาสตร์ควันตัม “INTERQUANTA” หรือ “IQ” ของ S. Brandt และ H. D. Dahmen [30] ซึ่งได้นำมาแสดงในรูปของตารางที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ฟังก์ชันคลื่นและความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ infinite square well เมื่อความกว้างของบ่อพลังงานศักย์มีค่า (ก) 2 หน่วย (ข) 3 หน่วย (ค) 6 หน่วย

	(ก) 2 หน่วย	(ข) 3 หน่วย	(ค) 6 หน่วย
$\psi(x)$	<p>Stationary States in the Infinite Square Well</p>	<p>Stationary States in the Infinite Square Well</p>	<p>Stationary States in the Infinite Square Well</p>
$ \psi(x) ^2$	<p>Stationary States in the Infinite Square Well</p>	<p>Stationary States in the Infinite Square Well</p>	<p>Stationary States in the Infinite Square Well</p>

ตารางที่ 4.2 ฟังก์ชันคลื่นและความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายในฟังก์ชันแบบ finite square well เมื่อความกว้างของบ่อพลังงานมีค่า (ก) 2 หน่วย (ข) 4 หน่วย (ค) 6 หน่วย

	(ก) 2 หน่วย	(ข) 4 หน่วย	(ค) 6 หน่วย
$\psi(x)$	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>
$ \psi(x) ^2$	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>

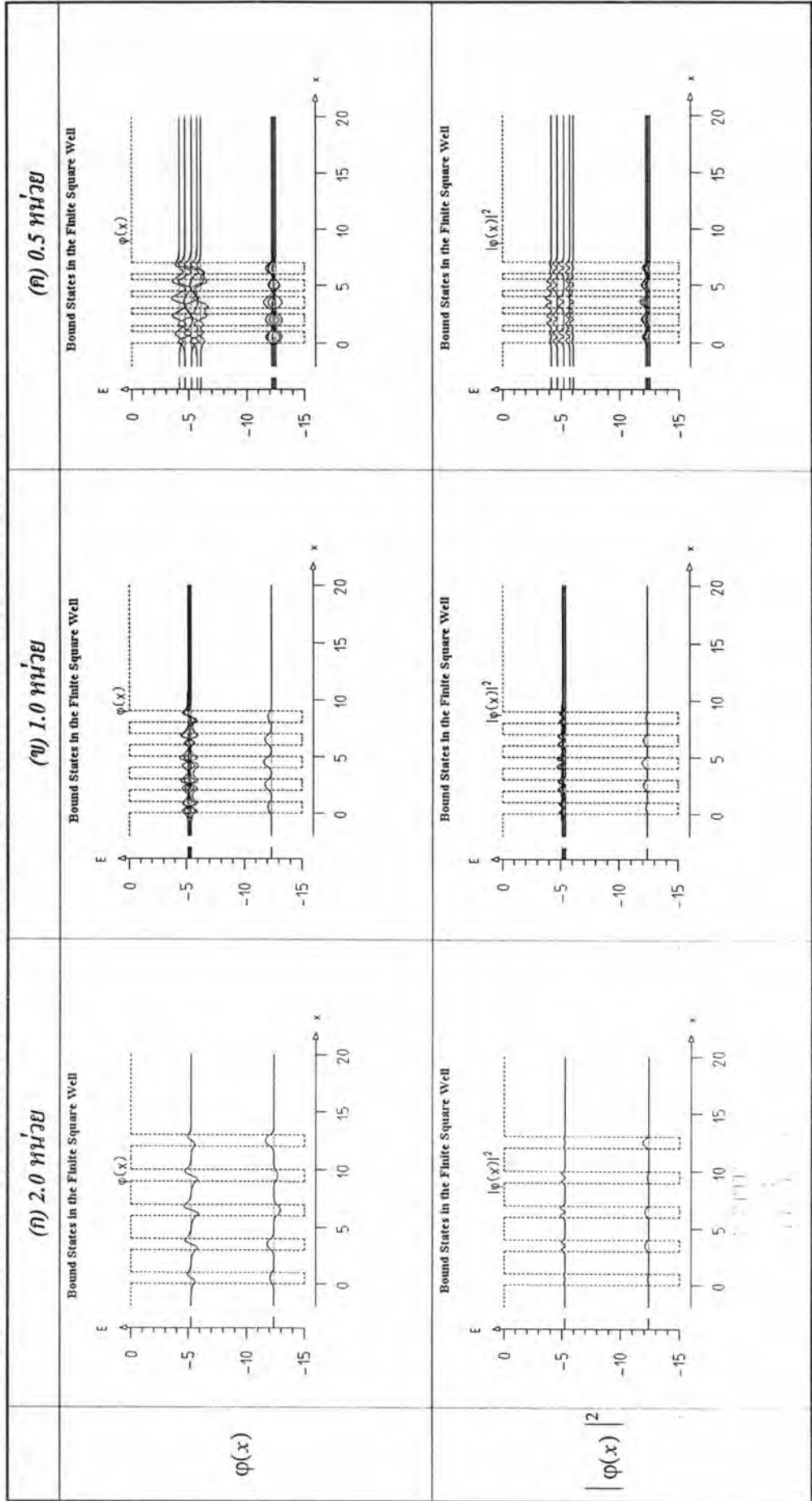
ตารางที่ 4.3 ฟังก์ชันคลื่นและความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well เมื่อความสูงของบ่อพลังงานศักย์มีค่า (ก) 2 หน่วย (ข) 4 หน่วย (ค) 6 หน่วย

	(ก) 2 หน่วย	(ข) 4 หน่วย	(ค) 6 หน่วย
$\psi(x)$	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>
$ \psi(x) ^2$	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>

ตารางที่ 4.4 ฟังก์ชันคลื่นและความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ 2 MQW เมื่อความหนาของชั้นก้ำแพะระหว่างบ่อพลังงานศักย์มีค่า (ก) 1.00 หน่วย (ข) 0.25 หน่วย (ค) 0.10 หน่วย

	(ก) 1.00 หน่วย	(ข) 0.25 หน่วย	(ค) 0.10 หน่วย
$\psi(x)$	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>
$ \psi(x) ^2$	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>	<p>Bound States in the Finite Square Well</p>

ตารางที่ 4.5 ฟังก์ชันคลื่นและความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ 5 MQW เมื่อความหนาของชั้นก้ำแกงระหว่างบ่อพลังงานศักย์มีค่า (ก) 2.0 หน่วย (ข) 1.0 หน่วย (ค) 0.5 หน่วย



ตารางที่ 4.1 แสดงฟังก์ชันคลื่น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ infinite square well เมื่อความกว้างของบ่อพลังงานศักย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ใน 1 มิติ (ทิศทาง x) อนุภาคจะมีพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง โดยที่ความกว้างของบ่อพลังงานศักย์ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องดังกล่าวอยู่ชิดกันมากขึ้น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคจะมีได้เฉพาะที่ภายในบริเวณบ่อพลังงานศักย์เท่านั้น

ตารางที่ 4.2 แสดงฟังก์ชันคลื่น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well เมื่อความกว้างของบ่อพลังงานศักย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ใน 1 มิติ (ทิศทาง x) อนุภาคจะมีพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องในแบบเดียวกันกับกรณีของพลังงานศักย์แบบ infinite square well และระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องดังกล่าวจะอยู่ชิดกันมากขึ้นเมื่อความกว้างของบ่อพลังงานศักย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น สำหรับความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคจะมีได้ทั้งที่ภายในบริเวณบ่อพลังงานศักย์ และที่บริเวณชั้นกำแพงที่อยู่ติดกับบ่อ

ตารางที่ 4.3 แสดงฟังก์ชันคลื่น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well เมื่อความสูงของบ่อพลังงานศักย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่ความสูงของบ่อพลังงานศักย์เป็นอีกตัวแปรที่มีผลต่อค่าระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องของอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคจะยังคงมีพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง โดยระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องดังกล่าวจะอยู่ห่างออกจากกันเมื่อความสูงของบ่อพลังงานศักย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคจะมีได้ทั้งที่ภายในบริเวณบ่อพลังงานศักย์ และที่บริเวณชั้นกำแพงที่อยู่ติดกับบ่อ

ตารางที่ 4.4 แสดงฟังก์ชันคลื่น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well ของบ่อพลังงานศักย์ 2 บ่อที่มีขนาดเท่ากัน และถูกกั้นไว้ด้วยชั้นกำแพงเรียกโครงสร้างพลังงานศักย์แบบนี้ว่า พลังงานศักย์แบบ 2 MQW เมื่อความหนาของชั้นกำแพงที่กั้นระหว่างบ่อพลังงานศักย์ทั้งสองมีค่ามาก ระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องของแต่ละบ่อจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน และเมื่อความกว้างของชั้นกำแพงมีค่าที่ลดลง ระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องของแต่ละบ่อจะถูกแยกออกเป็นค่าระดับพลังงานที่ต่างกัน โดยมีค่าความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคในชั้นกำแพงที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อความกว้างของชั้นกำแพงมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.5 แสดงฟังก์ชันคลื่น และความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well ของบ่อพลังงานศักย์ 5 บ่อที่มีขนาดเท่ากัน และถูกกั้นไว้ด้วยชั้นกำแพงเรียกโครงสร้างพลังงานศักย์แบบนี้ว่า พลังงานศักย์แบบ 5 MQW การแยกออกเป็นค่าระดับพลังงานที่ต่างกันของแต่ละบ่อ เมื่อความหนาของชั้นกำแพงที่กั้นระหว่างบ่อพลังงานศักย์มีค่าลดลง ทำให้เกิดเป็นแถบพลังงาน เรียกว่า แถบ minibands โดยยังคงมีค่าความน่าจะเป็นของการพบอนุภาคในชั้นกำแพงที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อความกว้างของชั้นกำแพงมีค่าลดลง

4.2 โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่ใช้ในการศึกษาผลตอบสเปกตรัม

โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่ใช้ในการศึกษาผลตอบสเปกตรัมได้ถูกเตรียมขึ้นด้วยการปลูกผลึกโดย molecular beam epitaxy ลงบนแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์ (semi-insulating gallium arsenide substrate) ซึ่งมีสภาพต้านทานที่สูงมาก และเป็นแผ่นฐานที่ถูกนำมาใช้งานมากในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระบวนการผลิตแบบพลาแนร์ (planar processed devices) คุณสมบัติเฉพาะของแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ใช้ในการปลูกผลึกโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

นอกจากนี้แล้วแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์ยังมีคุณสมบัติเฉพาะอื่นๆที่แตกต่างออกไปจากแผ่นฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ทั่วไป โดยในหัวข้อที่ 3.2.2 พบว่าสารกึ่งตัวนำทั่วไปรวมทั้งแกลเลียมอาร์เซไนด์จะมีผลตอบสนองต่อแสงเมื่อแสงที่ตกกระทบมีโฟตอนที่มีความถี่สูงกว่าขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้น และทำให้ได้สเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ค่อนข้างกว้าง (รูปที่ 3.14) แต่สำหรับกรณีของแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์นั้น ผลตอบสนองต่อแสงที่ได้จะมีลักษณะเป็นยอดแหลมที่ความยาวคลื่นเท่ากับขอบช่องว่างพลังงาน (band edge) ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ [31]

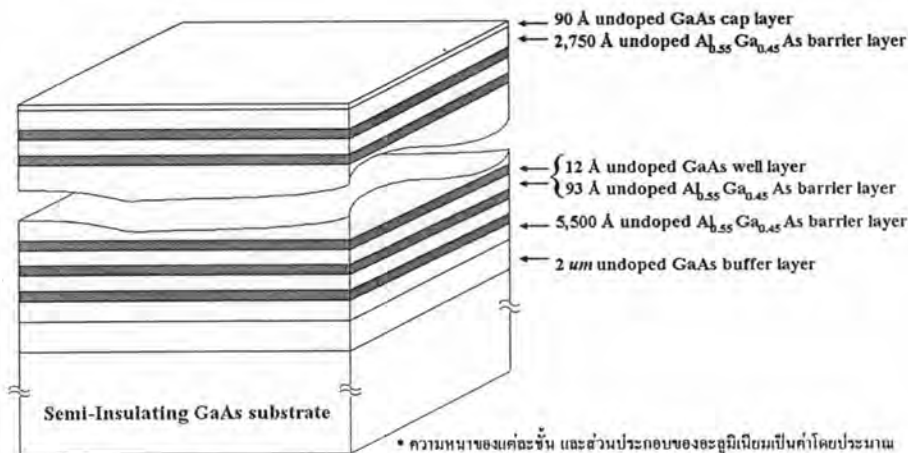
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติเฉพาะของแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์

วิธีการปลูกผลึก	Horizontal Bridgeman
ชนิดของสารเจือปน	Cr, O
สภาพต้านทาน	$\geq 10^5 \Omega \cdot cm$
ความหนา	450 μm
เส้นผ่านศูนย์กลาง	$\approx 50 mm$
ทิศทางผลึก (Orientation)	(100)

โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ของแกลเลียมอาร์เซไนด์/อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ใช้ในการศึกษาผลตอบสเปกตรัมถูกเตรียมขึ้นจากเครื่อง MBE รุ่น 32P ของบริษัท RIBER ประเทศฝรั่งเศส ลงบนแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิประมาณ $600^{\circ}C$ มีอัตราการปลูกผลึก (growth rate) โดยเฉลี่ยประมาณ $0.8 \mu m/ชั่วโมง$ และทำการปลูกผลึกแบบต่อเนื่องตลอดทั้งโครงสร้าง

โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์นี้ประกอบด้วยชั้นเวลล์ทั้งหมด 50 ชั้น และจะขอเรียกชื่อว่า โครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW หรือ 50 MQW โดยมีความหนาของชั้นผลึกที่ปลูกขึ้นทั้งหมดประมาณ 3.35 μm และมีความหนาโดยรวมเฉพาะของชั้นโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ประมาณ 1.35 μm ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการประมาณความหนาของชั้นผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ สำหรับส่วนประกอบของอะลูมิเนียมในอะลูมิเนียมแกลเลียม-อาร์เซไนต์เป็นค่าที่หาได้จากการแทนค่าฟลักซ์โมเลกุลของธาตุต่างๆขณะเริ่มทำการปลูกผลึกลงในสมการที่ (2.1) และเมื่อกำหนดให้ $\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} \cong \frac{60}{40}$ ค่าระดับพลังงานระหว่างระดับ $E_1 - E_{hh1}$ ที่อุณหภูมิห้องของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ ได้ถูกคำนวณโดยใช้สมการโซริงเจอร์ภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well พบว่ามีค่าประมาณ 1.841 eV

รูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดที่สำคัญของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW และตารางที่ 4.7 แสดงค่าของอุณหภูมิและฟลักซ์โมเลกุลของธาตุต่างๆที่ใช้ในการปลูกผลึก



รูปที่ 4.1 โครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิและฟลักซ์โมเลกุลของแกลเลียม อะลูมิเนียม และอาร์เซนิค

ธาตุ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ฟลักซ์ (Torr)
แกลเลียม	930	6.9×10^{-7}
อะลูมิเนียม	1,100	4.7×10^{-7}
อาร์เซนิค	225	3.5×10^{-5}

4.3 ผลตอบสเปกตรัมที่ได้จากกระบวนการทางแสง

กระบวนการทางแสงที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล และเกิดเป็นการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น

เมื่อแสงที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำมีโฟตอนที่มีพลังงานอย่างน้อยที่สุด เท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนดังกล่าวจะถูกดูดกลืนและเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น และในทางกลับกัน คู่อิเล็กตรอนและโฮลสามารถรวมตัวกันและคายพลังงานส่วนเกินออกมา ซึ่งพลังงานส่วนเกินนี้อาจจะถูกถ่ายเทออกมาเป็นความร้อนให้แก่โครงผลึก (nonradiative transition) หรืออาจจะอยู่ในลักษณะของแสงที่เปล่งออกมาจากสารกึ่งตัวนำก็ได้ (radiative transition) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันแบบเปล่งแสงของคู่อิเล็กตรอนและโฮล โดยอาศัยการกระตุ้นด้วยแสง และการทะลุผ่านแสงซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนแสงของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW

4.3.1 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

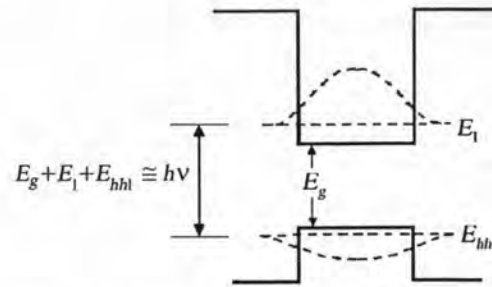
4.3.1.1 หลักการวัดสเปกตรัม

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ คือ ปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการกระตุ้นพาหะด้วยแสง โดยมีกระบวนการเริ่มจากการที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างพลังงานเข้าไป ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและโฮลอยู่ในแถบพลังงาน จากนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะคายพลังงานออกมาบางส่วนให้แก่โครงผลึกและตกกลับมายังระดับพลังงานต่ำสุดของแถบคอนดักชัน E_c เพื่อที่จะรวมตัวกันกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ที่มีพลังงานสูงสุดแล้วเปล่งแสงออกมา

ในโครงสร้างควันตัมเวลล์ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ถูกใช้ เป็นเทคนิคหนึ่งในการตรวจสอบคุณภาพของผลึกโดยที่ไม่ทำให้ผลึกได้รับความเสียหาย การรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอนและโฮลในโครงสร้างควันตัมเวลล์ (รูปที่ 4.2) จะทำให้ได้สเปกตรัมที่มียอดแหลมเกิดขึ้นเนื่องจากโฟตอนที่ถูกลายออกมา ซึ่งมีค่าโดยประมาณ ดังนี้

$$h\nu \cong E_g + E_l + E_{hh1} \quad (4.1)$$

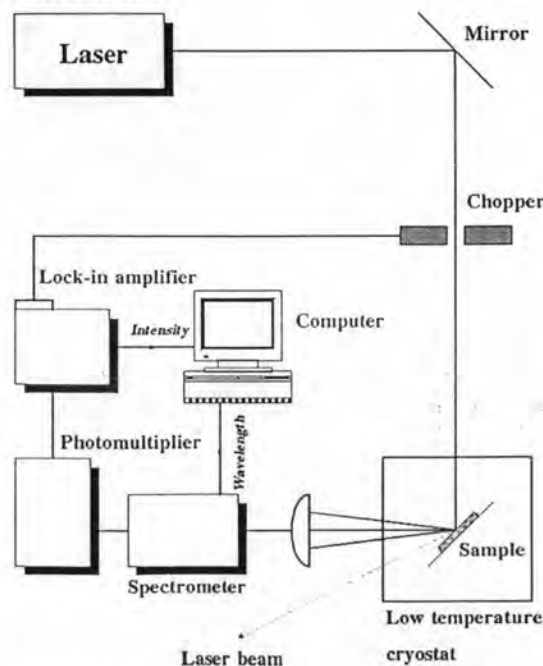
เมื่อ E_g คือ ขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นเวสต์ และ E_1 , E_{hh1} เป็นระดับพลังงานควันไตซ์ของอิเล็กตรอนและโฮลหนักตามลำดับ [1, 32-33]



รูปที่ 4.2 ขนาดพลังงานที่ได้จากโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในโครงสร้างควันตัมเวสต์

ระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

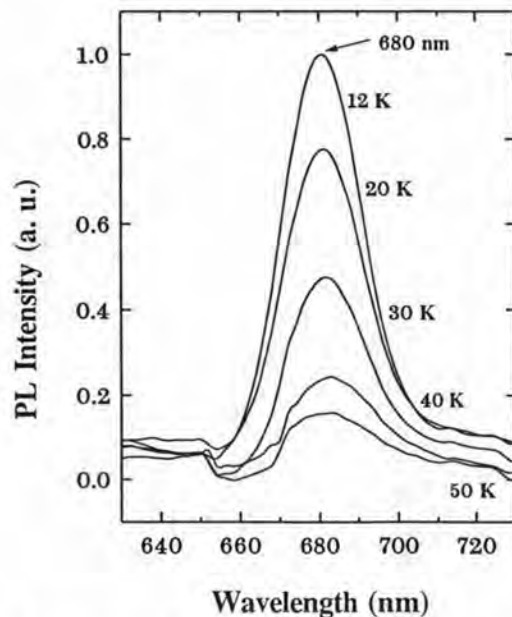
ระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 โดยประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่จะใช้เป็นตัวกระตุ้น ได้แก่ อาร์กอนไอออนเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 488 nm แหล่งทำความเย็น (variable-temperature cryostat) ให้กับชิ้นงาน (sample) เพื่อลดอุณหภูมิในขณะที่ทำการวัด สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) สำหรับแยกความยาวคลื่นแสง และโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier) สำหรับขยายสัญญาณแสงที่ได้จากชิ้นงาน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยชุดอุปกรณ์สำหรับลดสัญญาณรบกวน อันประกอบด้วย ตัวตัดแสงทางกล (chopper) และ lock-in amplifier เพื่อใช้ขยายสัญญาณที่ความถี่เฉพาะค่า



รูปที่ 4.3 ระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

จุดประสงค์ของการมีแหล่งทำความเย็นให้แก่ชิ้นงานในระบบการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ คือ เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน และช่วยให้เกิดการรวมตัวของพาหะมากขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลของสเปกตรัมที่มากที่สุด จะต้องมีการลดอุณหภูมิของชิ้นงานลงให้ต่ำลงมากที่สุดด้วย [1] อย่างไรก็ตาม การวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ สามารถทำได้ โดยการเพิ่มกำลังของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ให้มีค่ามากขึ้นจนเพียงพอสำหรับใช้กระตุ้นพาหะ [34]

4.3.1.2 ผลการวัดสเปกตรัม



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ 12, 20, 30, 40 และ 55 K ของ โครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW

สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW มียอดแหลมที่ความยาวคลื่นประมาณ 680 nm เป็นยอดที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานระหว่างระดับพลังงานคว้นไตซ์ของอิเล็กตรอนและโฮลหนัก ($E_1 - E_{hh1}$) และเป็นความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกันกับค่าที่คำนวณได้จากสมการชโรดิงเงอร์ภายใต้พลังงานศักย์แบบ finite square well (673.5 nm) ยอดแหลมที่ได้มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมิมีค่าสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามการกระจายพลังงานของฟังก์ชัน Fermi-Dirac (Fermi-Dirac distribution function)

4.3.2 การทะลุผ่านแสง (Transmittance)

4.3.2.1 หลักการวัดสเปกตรัม

เมื่อแสงตกกระทบบสารกึ่งตัวนำจะทำให้แสงถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่สะท้อนออกที่ผิวด้านหน้า ส่วนที่ถูกดูดกลืน และส่วนที่สามารถทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำออกมา ดังนั้นการวัดค่าการทะลุผ่านแสงจึงให้ข้อมูลส่วนหนึ่งที่ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติบางอย่างที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำได้

ระบบการวัดการทะลุผ่านแสง

สิ่งสำคัญในการหาค่าการทะลุผ่านแสงเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์จะต้องกระทำเมื่อกำลังแสงที่ถูกส่งผ่านออกมามีค่ามากกว่าศูนย์ โดยมีหลักการวัดอย่างง่ายดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 แต่สำหรับการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW นั้น ทำโดยใช้เครื่อง scanning spectrophotometer รุ่น UV-3103PC ของบริษัท SHIMADZU ซึ่งทำการแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆกัน ส่วนแรกเป็นลำแสงอ้างอิง I_0 ที่ส่งผ่านไปยังตัวตรวจจับแสงเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับลำแสงอีกส่วน ส่วนที่สองเป็นลำแสงที่ตกกระทบบชิ้นงานก่อนแล้วทะลุผ่านชิ้นงานออกไปสู่ตัวตรวจจับแสงอีกตัวหนึ่งด้วยความเข้มแสง I_d เมื่อชิ้นงานมีความหนา d

ค่าการทะลุผ่านแสงจะถูกคำนวณโดยมีสมการดังนี้ คือ

$$T(\%) = \frac{I_d}{I_0} \times 100 \quad (4.2)$$

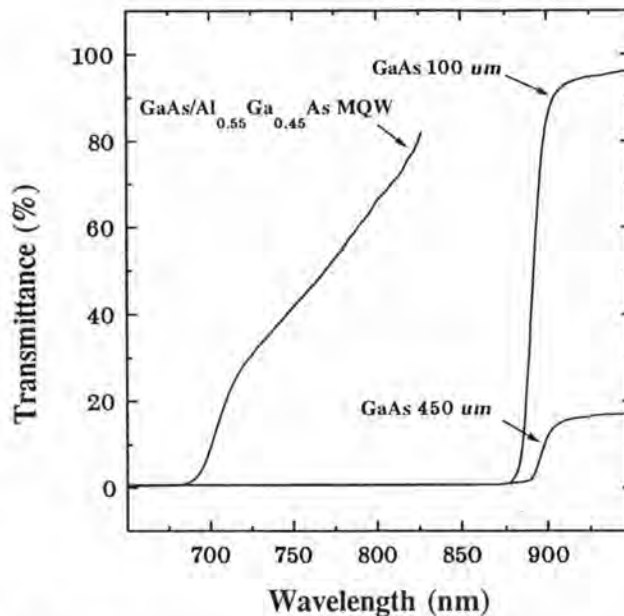
นอกจากนี้ ค่าการทะลุผ่านแสงจากโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่มีข้อมูลที่สมบูรณ์นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับนำไปใช้เป็นข้อมูลส่วนหนึ่งสำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของโครงสร้างร่วมกับข้อมูลอีกส่วนที่ได้จากค่าการสะท้อนแสง (reflectance) [14]

4.3.2.2 ผลการวัดสเปกตรัม

โครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW ถูกเตรียมขึ้นบนแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์ (รูปที่ 4.1) ซึ่งมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.424 eV ดังนั้นแสงที่ผ่านชิ้นงานจะถูกดูดกลืนโดยแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ทำหน้าที่เป็นแผ่นฐานและที่ทำหน้าที่เป็นชั้น buffer ทั้งหมด ตั้งแต่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 870.8 nm ลงไป ดังนั้นในการหาค่าการทะลุผ่านแสงของโครงสร้างมัลติ-

ควันทัมเวลต์จึงต้องทำการกัด (etching) เอาแผ่นฐานและชั้น buffer ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ออกให้หมดก่อน จึงจะทำการวัดค่าได้

โครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW ถูกนำมากัดแผ่นฐานและชั้น buffer ออกโดยใช้ H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O = 1 : 8 : 80 โดยปริมาตร เพื่อทำการกัดอย่างหยาบ จากนั้นจึงใช้ H₃PO₄ : H₂O₂ : H₂O = 1 : 8 : 80 โดยปริมาตร และ H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O = 4 : 1 : 1 โดยปริมาตร ซึ่งมีอัตราการกัดน้อยกว่า 0.5 $\mu\text{m}/\text{นาที}$ เพื่อทำการกัดแกลเลียมอาร์เซไนด์ทั้งหมดออกอย่างละเอียด พร้อมไปกับการกัดแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ (calibrated bulk etching) [34]



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW และของแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความหนา 100 และ 450 μm ที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 4.5 เป็นผลการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงที่อุณหภูมิห้อง พบว่าแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์ได้ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 870 nm จนหมด ($E_{g, \text{GaAs}} = 1.424$ eV และ $E_{g, \text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}} = 2.012$ eV) โดยความหนาของแผ่นฐานที่ลดลงทำให้การทะลุผ่านแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 870 nm มีค่ามากขึ้น

ส่วนในโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW ซึ่งถูกกัดแผ่นฐานและชั้น buffer ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ออกแล้วนั้น แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 680 nm อันเป็นค่าที่อยู่ในช่วงเดียวกันกับผลที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ไม่สามารถทะลุ

ผ่านโครงสร้างไปได้ โดยสังเกตได้จากความชันของสเปกตรัมที่เพิ่มมากขึ้นที่บริเวณความยาวคลื่นดังกล่าว นั่นคือ แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 680 nm บางส่วนได้ถูกดูดกลืนโดยโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW และบางส่วนได้ถูกสะท้อนกลับออกไป สำหรับสเปกตรัมที่ได้ในช่วงความยาวคลื่นที่สูงกว่า 825 nm เป็นต้นไปจนถึงช่วงการทะลุผ่านแสงของแกลเลียมอาร์เซไนด์นั้น ผลจากการวัดมีสัญญาณที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้ จึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์ในช่วงดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม จุดประสงค์ในการวัดค่าการทะลุผ่านแสงของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW นี้คือเพื่อที่จะนำไปใช้สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และดังที่ได้กล่าวมาในตอนต้นแล้วว่าค่าการทะลุผ่านแสงที่ให้ข้อมูลสมบูรณ์นั้นจะต้องกระทำเมื่อแสงที่ถูกส่งผ่านออกมา มีค่ามากกว่าศูนย์ ดังนั้นการหาค่าสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของแผ่นฐานกึ่งฉนวนแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ให้ข้อมูลสมบูรณ์ในช่วงความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 870 nm นั้น สามารถทำได้โดยการลดความหนาของแกลเลียมอาร์เซไนด์ให้ลดลงเหลือน้อยกว่า $2\ \mu\text{m}$ เพื่อให้การทะลุผ่านแสงมีปริมาณมากกว่า $1/e$ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความยาวคลื่น 870 nm มีค่าประมาณ $5 \times 10^3\text{ cm}^{-1}$ และในทำนองเดียวกันสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW ที่จะให้ข้อมูลสมบูรณ์ในช่วงความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 680 nm สามารถทำได้โดยการลดความหนาของโครงสร้างให้น้อยกว่า $1\ \mu\text{m}$ เพื่อให้เห็นความชัดเจนของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากระดับพลังงานควันไตซ์ในชั้นเวลล์ของโครงสร้าง (ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความยาวคลื่น 680 nm มีค่าประมาณ 10^4 cm^{-1}) แต่เนื่องจากโครงสร้างได้ถูกออกแบบให้มีความหนาที่มากกว่า $1\ \mu\text{m}$ สเปกตรัมที่ได้ในรูปที่ 4.5 ของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW จึงยังไม่สมบูรณ์และไม่สามารถนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงได้ แต่สามารถชี้ให้เห็นได้ว่าแสงที่ผ่านโครงสร้างจะถูกดูดกลืนได้ที่ความยาวคลื่นประมาณ 680 nm นอกจากนี้ได้แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงซึ่งจะชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการดูดกลืนแสงและกระบวนการทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ไว้ในหัวข้อที่ 4.4

4.4 ผลตอบสเปกตรัมที่ได้จากคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์

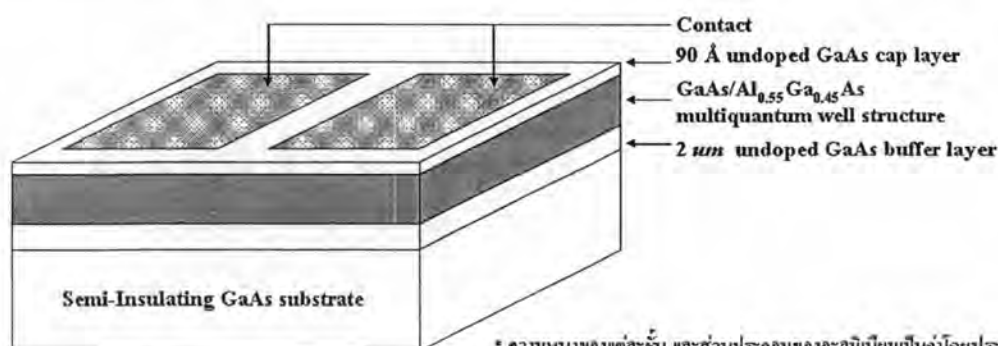
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลตอบสเปกตรัมที่ได้จากการวัดคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการทางแสงและกระบวนการทางไฟฟ้าของโครงสร้างควันตัมเวลล์ โดยอาศัยการวัดค่าผลตอบสนองต่อแสงจากโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์พลาเนอร์ของ โลหะ - สารกึ่งตัวนำ - โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal planar devices)

[1, 23] โดยการใส่สนามไฟฟ้าให้แก่โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่ผิวหน้าและในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้าง

4.4.1 คุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้า

โครงสร้างสารกึ่งตัวนำต่างชนิดที่มีการซ้อนทับกันหลายๆชั้น และมีผิวสัมผัสขดก็อยู่ที่ด้านบนของผิวหน้าได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ตรวจจับแสง เพื่อให้ได้ความไวของการตอบสนองที่สูง ค่ากระแสมืดที่ต่ำ (low dark current) มีอัตราขยาย (gain) ที่แรงดันค่าต่ำ และเพื่อให้ได้ผลตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการ [35-37]

โครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW ถูกนำมาหาผลตอบสนองต่อแสงโดยการใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง MSM เพื่อใส่สนามไฟฟ้าให้แก่โครงสร้างผ่านผิวสัมผัสขดก็ของทองคำ (Au) ที่ผิวหน้า คุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าของโครงสร้างหาได้จากค่าผลตอบสนองต่อแสงของชิ้นงานที่มีขนาดประมาณ $3 \times 5 \text{ mm}^2$ และมีพื้นที่รับแสงขนาดประมาณ $1 \times 5 \text{ mm}^2$ อยู่ระหว่างขั้วโลหะที่ผิวหน้าสองขั้ว ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.6



* ความหนาของแต่ละชั้น และส่วนประกอบของอะตอมเป็นค่าโดยประมาณ

รูปที่ 4.6 โครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW เพื่อใส่สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้า

4.4.1.1 หลักการวัดสเปกตรัม

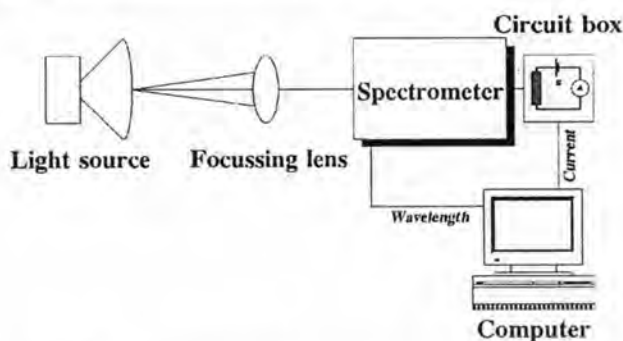
ผลตอบสนองต่อแสงของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้า หาได้จากสมการที่ (3.33) โดยการวัดขนาดของกระแสโฟโตที่เกิดขึ้นเมื่อใส่แรงดันค่าต่างๆเทียบกับกำลังงานของแสงที่ตกกระทบ

ระบบการวัดผลตอบสนองต่อแสง

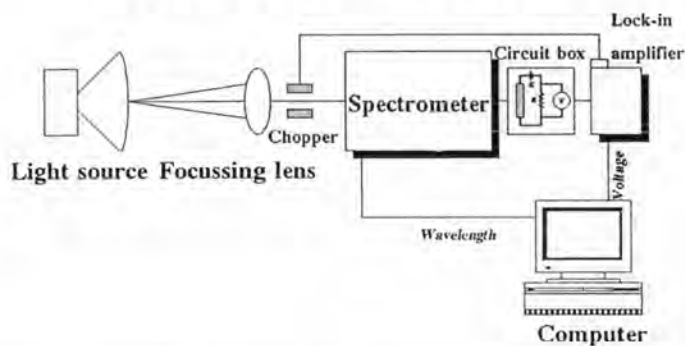
ระบบการวัดผลตอบสนองต่อแสง ประกอบด้วย optical power meter สำหรับทำการวัดค่ากำลังงานของแสงที่ตกกระทบ และระบบการวัดกระแสโฟโต 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดทั้งสแตนขนาด 250 วัตต์ สเปกโตรมิเตอร์สำหรับ แยกความยาวคลื่นแสง และกล่องวงจรที่มีชิ้นงานต่ออนุกรมกับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟตรงและแอมมิเตอร์ (รูปที่ 4.7)

แบบที่ 2 ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดทั้งสแตนขนาด 250 วัตต์ สเปกโตรมิเตอร์ชุดเดียวกับแบบที่ 1 แต่มีชุดอุปกรณ์สำหรับลดสัญญาณรบกวนที่ประกอบด้วย ตัวตัดแสงทางกล และ lock-in amplifier รวมทั้งกล่องวงจรที่มีชิ้นงานต่ออนุกรมกับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟตรงและตัวต้านทานที่มีโวลต์มิเตอร์ต่อขนาน (รูปที่ 4.8)



รูปที่ 4.7 ระบบการวัดผลตอบสนองต่อแสง แบบที่ 1

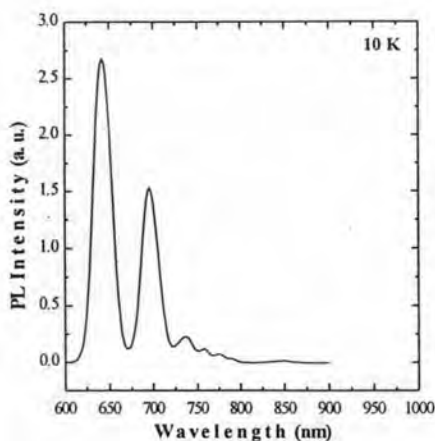


รูปที่ 4.8 ระบบการวัดผลตอบสนองต่อแสง แบบที่ 2

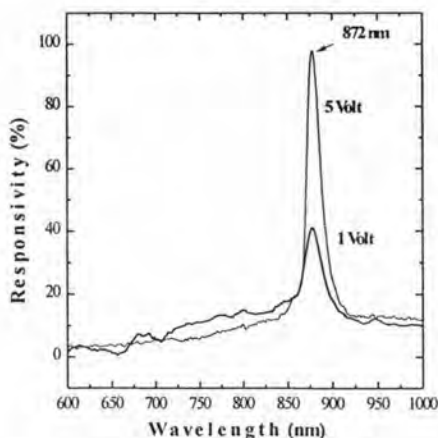
4.4.1.2 ผลการวัดสเปกตรัม

เหตุผลของการเตรียมโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW ซึ่งมีจำนวนชั้นเวลล์ที่มีขนาดเท่ากัน 50 ชั้น นั้น ส่วนหนึ่งเกิดจากการที่ได้มีการนำโครงสร้างของ GaAs/AlGaAs ชนิด 4 × 6 MQW ที่ประกอบด้วยชั้นเวลล์ที่มีความกว้างแตกต่างกัน 6 ค่า และแต่ละค่าประกอบด้วย

จำนวนชั้นเวลล์ 4 ชั้น และมีสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของโครงสร้างเป็นดังในรูปที่ 4.9 มาทำการวัดผลตอบสนองต่อแสงภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าโดยใช้ระบบการวัดแบบที่ 2 เพื่อตัดสัญญาณรบกวน พบว่าผลตอบสนองต่อแสงที่ได้เป็นผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากแผ่นฐานกึ่งฉนวน แกลเลียมอาร์เซไนด์เท่านั้น เนื่องมาจากจำนวนสเตทของโครงสร้างมีลดทวิ้นดัมเวลล์ดังกล่าวมีจำนวนไม่เพียงพอที่จะตรวจจับสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 [38-39]



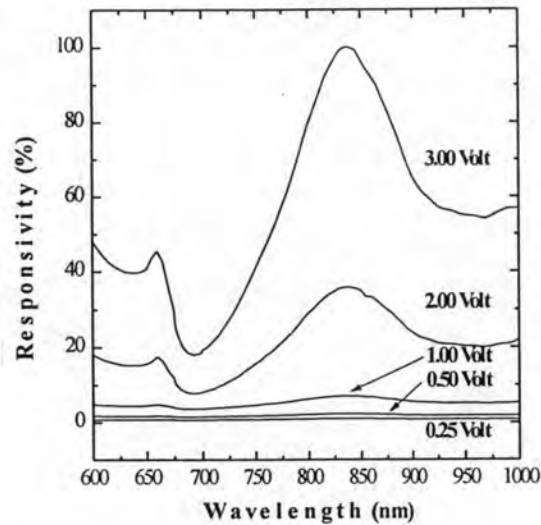
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ 10 K ของโครงสร้าง 4×6 GaAs/AlGaAs MQW (จาก S. Sopotpan et al., Technical Digest of the International PVSEC-9, 1996 [39])



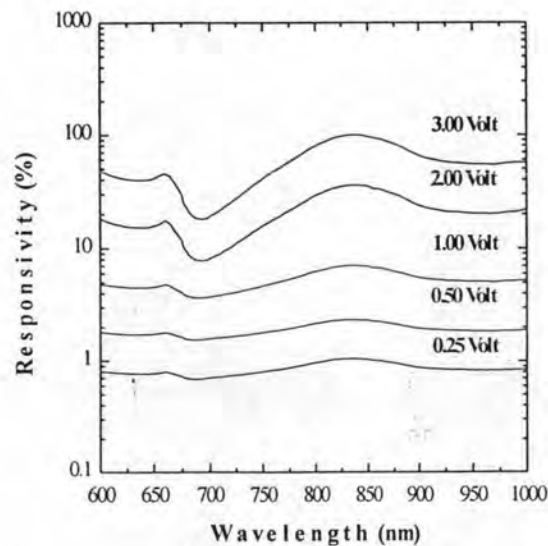
รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองต่อแสงภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าของโครงสร้าง 4×6 GaAs/AlGaAs MQW โดยใช้ระบบการวัดแบบที่ 2

จากผลการทดลองในขั้นต้นของโครงสร้างดังกล่าว ทำให้มีการเพิ่มจำนวนชั้นเวลล์ในโครงสร้างใหม่ที่ปลูกขึ้นโดยใช้ความหนาของชั้นเวลล์เพียงค่าเดียว ซึ่งได้แก่โครงสร้างของ

GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW สำหรับผลตอบสนองต่อแสงภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าโดยใช้ระบบการวัดแบบที่ 1 ของโครงสร้างที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และเนื่องจากสิ่งประดิษฐ์ MSM มีอัตราขยายได้ที่แรงดันค่าต่ำ จึงได้แสดงผลตอบสนองต่อแสงไว้ในรูปที่ 4.12 ซึ่งมีสเกล log เพื่อเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นความชัดเจนของสเปกตรัมที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ



รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองต่อแสงภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าขนาด 0.25, 0.50, 1.0, 2.0 และ 3.0 โวลต์ ของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW โดยใช้ระบบการวัดแบบที่ 1



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองต่อแสงภายใต้สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าขนาด 0.25, 0.50, 1.0, 2.0 และ 3.0 โวลต์ ของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW โดยใช้ระบบการวัดแบบที่ 1 (สเกล log)

เนื่องจากความหนา และจำนวนสแตทที่เพิ่มมากขึ้นของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ จึงทำให้สเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นผลมาจากทั้งในส่วนของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ทำหน้าที่เป็นชั้น buffer และในส่วนของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์

สเปกตรัมที่ได้มีผลตอบสนองต่อแสงที่เด่นชัดในช่วงความยาวคลื่น $700 - 900 \text{ nm}$ ซึ่งเป็นผลมาจากชั้น buffer ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่หนาประมาณ $2 \mu\text{m}$ ในขณะที่เดียวกันสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็นได้ชัดเจนที่บริเวณช่วงความยาวคลื่นประมาณ $670 - 720 \text{ nm}$ ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่มีความแตกต่างของระดับพลังงานควันไตซ์ที่เทียบเคียงได้กับบริเวณดังกล่าว และเพราะสาเหตุที่โครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ถูกนำมาใช้งานโดยมีสนามไฟฟ้าส่วนหนึ่งในแนวขนานกับรอยต่อ จึงทำให้พาหะในโครงสร้างมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ในแนวขนานกับรอยต่อด้วย ตามสมการที่ (3.29) สเปกตรัมที่ได้บริเวณความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 670 nm จึงมีลักษณะที่ต่อเนื่อง

4.4.2 คุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ภายใต้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึก

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าพาหะในโครงสร้างควันตัมเวลล์ที่เคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ จะมีระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องหรือถูกควันไตซ์ และพาหะดังกล่าวจะสามารถทะลุออกจากโครงสร้างได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าที่ใส่ให้ในแนวตั้งฉากกับรอยต่อ ผลตอบสนองต่อแสงในกรณีนี้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจเพราะสามารถนำเอาโครงสร้างควันตัมเวลล์ไปประยุกต์ใช้งานกับแสงที่มีความยาวคลื่นเฉพาะค่าได้ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาผลตอบสนองต่อแสงของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ขึ้นเพื่อใส่สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึก

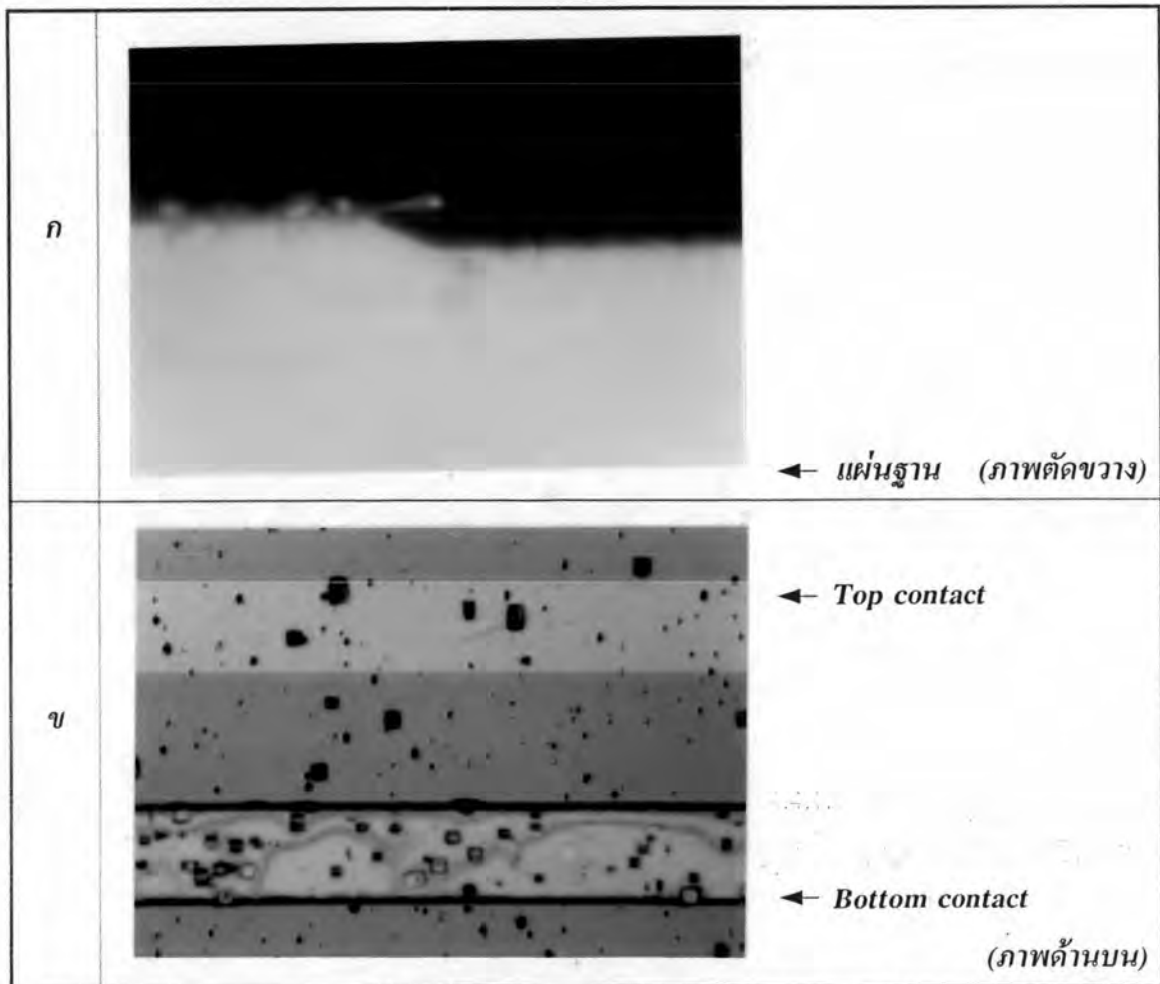
การใส่สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกนั้นต้องอาศัยกระบวนการทำขั้วโลหะที่มีความละเอียดอย่างยิ่ง เนื่องจากโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่เตรียมขึ้นนั้นมีขนาดเล็กมาก สิ่งประดิษฐ์ที่ได้จึงมีขนาดเล็กมากด้วย กระบวนการทำขั้วโลหะเพื่อใส่สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้าง $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ MQW มีขั้นตอนโดยสังเขป ดังแสดงในรูปที่ 4.13 คือ

- 1 นำชิ้นงานที่ทำความสะอาดแล้วมาทำการเคลือบ photoresist ฉายแสง ultraviolet ผ่านหน้ากาก (mask) และ develop เพื่อให้เกิดเป็นลายเส้นตรงที่มีความกว้าง $100 \mu\text{m}$ แต่ละเส้นห่างกัน $450 \mu\text{m}$ จากนั้นใช้ $\text{KI} : \text{I}_2 : \text{H}_2\text{O} = 12 \text{ g} : 3 \text{ g} : 10 \text{ ml}$ เพื่อทำการกัดโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ที่หนาประมาณ $1.35 \mu\text{m}$ ออกทั้งหมด และจะกัดชั้นผลึกลงไปจนไปหยุดอยู่ที่ชั้น buffer ของแกลเลียมอาร์เซไนด์ เคลือบ Au ลงบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ก ซึ่งจะเห็นได้ว่า

photoresist จะบังไม่ให้ Au เคลือบลงไปทีบริเวณชั้นผลึกของโครงสร้างมัลติควันตัมเวลล์ จากนั้นล้าง photoresist ออก จะเหลือแต่ลายเส้นตรงของ Au ที่ชั้น buffer

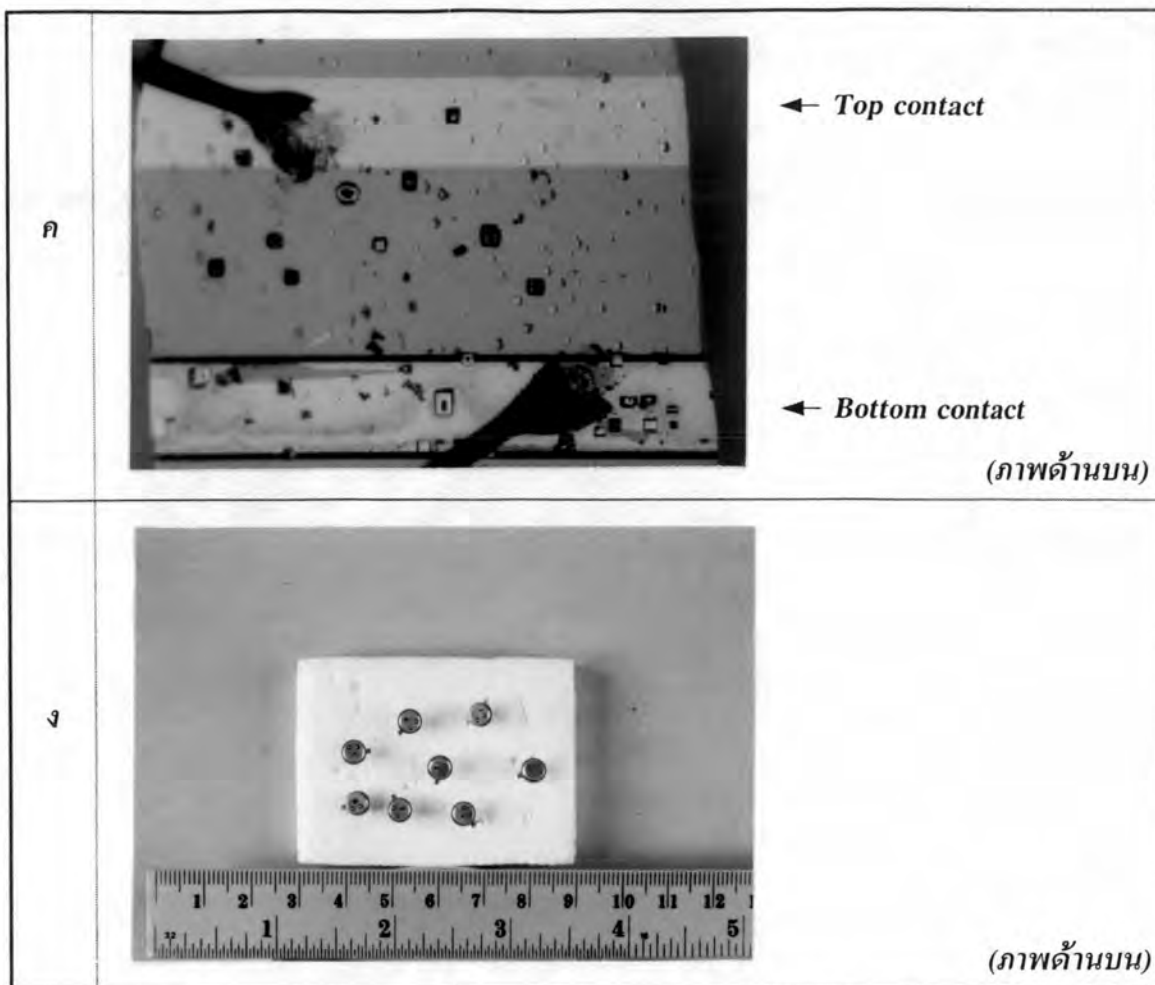
2 นำชิ้นงานในข้อ 1 มาเคลือบ photoresist และฉายแสง ultraviolet ผ่านหน้ากากชุดเดิม และ develop อีกครั้ง เพื่อให้เกิดเป็นช่องเส้นตรงที่มีความกว้าง $100\ \mu\text{m}$ และอยู่ระหว่างลายเส้นตรง $100\ \mu\text{m}$ ของ Au ที่ชั้น buffer จากนั้นเคลือบ Au ลงไปที่ผิวหน้าของชิ้นงานอีกครั้ง หลังจากล้าง photoresist ออก จะเหลือลายเส้นตรงขนาด $100\ \mu\text{m}$ ที่ผิวด้านบนของชิ้นงานสลับกับลายเส้นตรง $100\ \mu\text{m}$ ที่ชั้น buffer ของชิ้นงาน (รูปที่ 4.13 ข)

3 นำชิ้นงานในข้อ 2 มาตัดเพื่อให้มีขนาดประมาณ $500 \times 500\ \mu\text{m}^2$ ติดลงบนแท่น header และเชื่อมลวดโลหะโดยใช้ ultrasonic bonding ด้วยเครื่อง wire bonder (รูปที่ 4.13 ค และ 4.13 ง)



รูปที่ 4.13 กระบวนการทำขั้วโลหะเพื่อใส่สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้าง

$\text{GaAs}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ MQW (ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพด้านบน

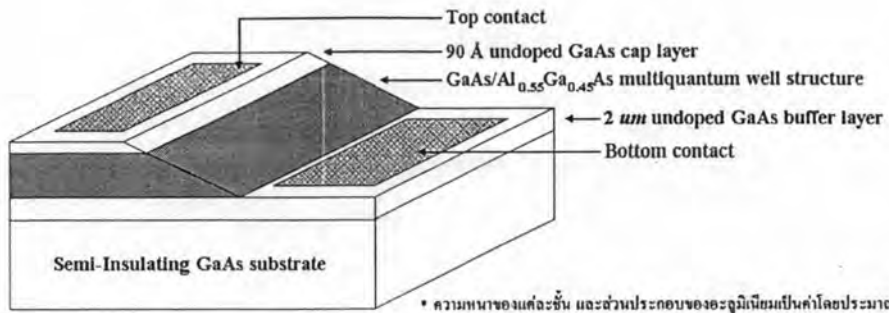


รูปที่ 4.13 (ต่อ) กระบวนการทำขั้วโลหะเพื่อใส่สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW (ค) ภาพด้านบน (ง) ภาพด้านบน

4.4.2.1 หลักการวัดสเปกตรัม

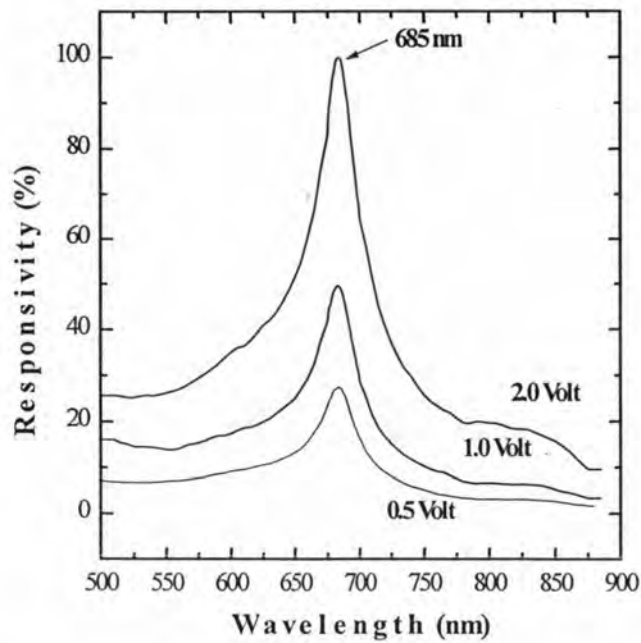
หลักการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงภายใต้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW มีหลักการและระบบการวัดเหมือนกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4.1.1

รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW ที่ผ่านกระบวนการทำขั้วโลหะและถูกนำไปใช้ในการวัดผลตอบสนองต่อแสง

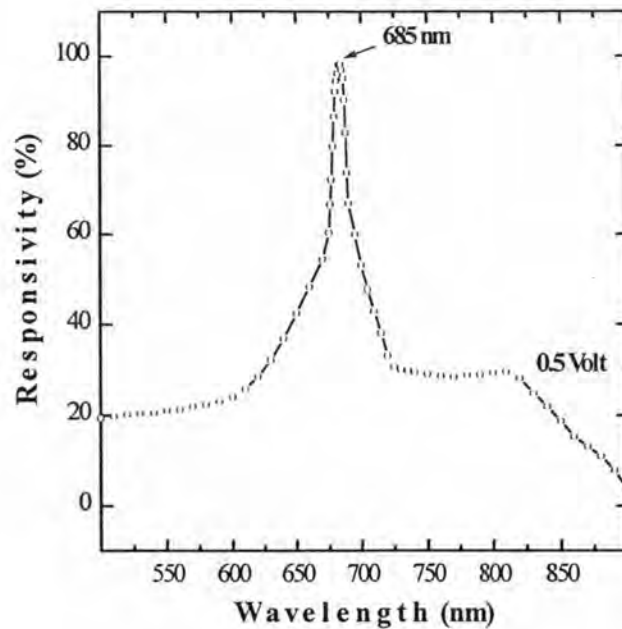


รูปที่ 4.14 โครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW เพื่อใส่สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึก

4.4.2.2 ผลการวัดสเปกตรัม



รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองต่อแสงภายใต้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW โดยใช้ระบบการวัดแบบที่ 1



รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองต่อแสงภายใต้สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้าง GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As MQW โดยใช้ระบบการวัดแบบที่ 2

เมื่อแสงตกกระทบบนโครงสร้างที่มีสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับชั้นผลึกของโครงสร้างมีผลคือคลื่นตัวเวลาด์ จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงของพาหะที่อยู่ระหว่างระดับพลังงานคลื่น ไตซ์ในแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ ($E_1 - E_{hh1}$) และการทะลุของพาหะผ่านชั้นกำแพงออกไปสู่ขั้วโลหะ

ในรูปที่ 4.15 สเปกตรัมที่ได้มีผลตอบที่มีลักษณะเป็นยอดแหลมอยู่ที่ความยาวคลื่น 685 nm ส่วนในรูปที่ 4.16 เป็นผลการทดลองที่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวนออกซึ่งยังคงมีผลตอบสเปกตรัมที่เหมือนกับในรูปที่ 4.15 และค่าความยาวคลื่นที่จุดยอดมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณ (673.5 nm)