

การตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้าง และสมบัติเชิงแสงของ InGaPn ที่ปลูกบน
วัสดุฐานรอง GaAs (001) ด้วยวิธีเมทอดออร์แกนิกเวเทอร์เฟสอีพิแทกซี
INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES
OF InGaPn GROWN ON GaAs (001) BY METAL ORGANIC VAPOR
PHASE EPITAXY (MOVPE)



โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้าง และสมบัติเชิงแสงของ InGaPN ที่ปลูกบน
วัสดุฐานรอง GaAs (001) ด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเวเฟอร์เฟสอีพิแทกซี



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES
OF InGaPN GROWN ON GaAs (001) BY METAL ORGANIC VAPOR
PHASE EPITAXY (MOVPE)**



MR SANSANA KENGKAROONKRIT

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้าง และสมบัติเชิงแสงของ InGaPN ที่ปลูกบนวัสดุฐานรอง GaAs (001) ด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิก เวเฟอร์เฟสอีพิแทกซี

INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF InGaPN GROWN ON GaAs (001) BY METAL ORGANIC VAPOR PHASE EPITAXY (MOVPE)

ชื่อนักศึกษา นายศันสนะ เก่งการณกิจ

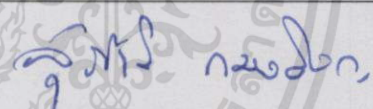
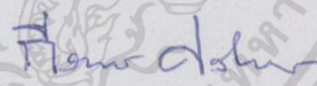
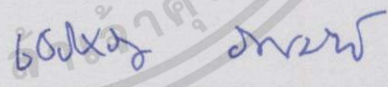
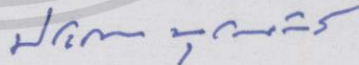
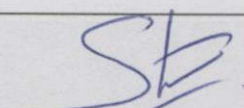
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประธาน บุรณศิริ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อาจารย์สุรชาติ กมลฉีก	
ดร.กฤษฎ์ ศรีนวลจันทร์	
ดร.เชษฐา รัตนพันธ์	
ดร.ประธาน บุรณศิริ (อาจารย์ที่ปรึกษา)	
ผศ.ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์ (อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม)	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้าง และสมบัติเชิงแสงของ InGaPN ที่ปลูกบนวัสดุฐานรอง GaAs (001) ด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเวเพอร์เฟสอีพิแทกซี
ชื่อนักศึกษา	นายศันสนะ เก่งการณกิจ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ประธาน บุรณศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.ศกุนทรธรรม เสนาะพิมพ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ มุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของการอบด้วยความร้อนที่มีการต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงของ InGaPN ที่ปลูกผลึกบน GaAs ระนาบ (001) ด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเวเพอร์เฟสอีพิแทกซี (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) ซึ่งเงื่อนไขการปลูก คือ ใช้ไดเมทิลไฮดราซีน (Dimethylhydrazine, DMHy) ที่เป็นสารตั้งต้นของไนโตรเจน อยู่ที่ $300 \mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 0, 30, 60, 120, 180 วินาที รวมทั้งสิ้น 5 ชั้น โดยศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของ InGaPN ที่ปลูกผลึกบน GaAs ระนาบ (001) โดยจากการคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ปริมาณของอินเดียม ปริมาณไนโตรเจน และค่า lattice-mismatch จากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง และการกระเจิงแบบรามาน ศึกษาสมบัติเชิงแสงของโดยการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากเทคนิคการเปล่งแสง (Photoluminescence)

จากการศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างพบว่า การอบด้วยความร้อนทำให้ค่าคงที่โครงผลึกเปลี่ยนแปลงไปที่ช่วงเวลา 180 วินาที จาก 5.675 \AA เป็น 5.682 \AA เมื่อนำข้อมูลไปหาปริมาณของอินเดียมในโครงผลึกพบว่ามีค่าเท่ากับ คือ 56.624 % และมีการตรวจสอบปริมาณอินเดียมด้วยเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน โดยพิจารณาโหมดการสั่นของพันธะ Ga-P-LO ซึ่งจะบ่งชี้ถึงอัตราส่วนของอินเดียมในฟิล์ม InGaPN โดยตรง พบว่า สัดส่วนของอินเดียมในโครงผลึกมีค่าต่างไปตามเวลาที่ใช้อบด้วยความร้อน ซึ่งที่ As grown จะมีค่าน้อยที่สุด คือ 54.8% และนำค่าปริมาณอินเดียมที่ได้ ไปคำนวณหาค่าปริมาณไนโตรเจน ร่วมกับการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง พบว่า ที่ 180 วินาที มีค่าน้อยที่สุด คือ 0.40%

จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงพบว่า ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการอบด้วยความร้อน โดยที่ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เวลา 180 วินาที เปลี่ยนแปลงจาก 1.82 ± 0.02 eV เป็น 1.80 ± 0.02 eV

จากสมบัติเชิงโครงสร้าง และเชิงแสงสามารถสรุปได้ว่า การอบด้วยความร้อน จะทำให้โครงสร้างผลึกมีขนาดมากขึ้น และขนาดของช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดลดลง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาณไนโตรเจนในโครงสร้างผลึก InGaPN ที่ปลูกผลึกบน GaAs ระนาบ (001) มีปริมาณลดลง



Title	Investigation of structural and optical properties of InGaPN grown on GaAs (001) by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE)
Students	Sansana Kengkaroonkrit
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Dr.Prathan Buranasiri
Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Sakuntam Sanorpim

ABSTRACT

We have investigated the annealing effect on the structural and optical properties of InGaPN grown on GaAs (001) by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE). This conditions is using Dymethylhydrazine (DMHy) , that are precursors of nitrogen , 300 $\mu\text{mol/min}$. And annealing time at 0 , 30 , 60 , 120 and 180 second. Investigating structural property of InGaPN grown on GaAs (001) by calculation of lattice parameter , Indium content , Nitrogen content and lattice mismatch from high resolution X-ray diffraction technique and Raman Scattering technique. Investigating optical property by measured energy gap from Photoluminescence technique.

From investigating structural property found that annealing effect make the lattice constant changed in 180 second from 5.675 \AA to 5.682 \AA . This data can be calculated Indium content in InGaPN is 54.76%. And verify Indium content by Raman scattering. Consider GaP-LO peaks that identify Indium content in InGaPN films directly. Indium content in InGaPN had different on annealing time. Which in As grown time had 54.8% , as the minimum value. And use Indium content calculated cooperate with high resolution X-ray diffraction technique found at 180s had 0.40% , as the minimum value.

From investigating optical property found that energy gap decreased when increased annealing time. The energy gap in 180 second had changed from $1.82 \pm 0.02 \text{ eV}$ to $1.80 \pm 0.02 \text{ eV}$.

From structural property and optical property can be concluded that rapid thermal annealing make lattice constant increased and energy gap decreased. Which indicated that the nitrogen content in InGaPN/GaAs (001) has been decreased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ จะสำเร็จไม่ได้ถ้าปราศจากการช่วยเหลือทางด้านความรู้พื้นฐาน และให้คำปรึกษาอันมีประโยชน์จากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประธาน นุรณศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ คุณมานพ ติระรัตนสมโภช ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญทางด้านเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ดูแลและให้คำแนะนำการใช้งานเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) สำหรับผลการทดลองที่ใช้วิเคราะห์ในโครงการนี้

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณ พี่นักศึกษาปริญญาเอก ปริญญาโท และเพื่อนๆ ในกลุ่มวิจัยที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำโครงการให้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศันสนะ เก่งการุณกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สารกึ่งตัวนำ GaP	6
2.2 การปรับเปลี่ยนอัตราส่วน In และ N ใน InGaPN	7
2.3 การอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว	9
2.3 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกฎของแบรกก์	10
2.4 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง	12
2.5 โฟนอน	14
2.6 การกระเจิงแบบรามาน	14
2.7 โฟโตลูมิเนสเซนซ์	15
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ที่มาและลักษณะของชิ้นงาน	19
3.2 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง	20
3.3 การหาค่าขนาดโครงสร้างผลึกของ InGaPN ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง	21
3.4 การวิเคราะห์หาอัตราส่วนของ In และ N ใน InGaPN	25
3.5 การหาค่าตำแหน่งของโหนดสั้นในโครงสร้างผลึก GaP	27
3.6 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม InGaPN	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 ลักษณะของชิ้นงาน InGaPN	30
4.2 การตรวจสอบหาค่า x และ y ในฟิล์ม $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_y\text{N}_y$	31
4.3 การตรวจสอบสมบัติเชิงแสงของ InGaPN	37
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ขนาดโครงผลึกและช่องว่างแถบพลังงานของ GaP, GaN, InP และ InN	2
1.2	แสดงขั้นตอนการวิจัยและดำเนินการ	4
3.1	ค่าคงที่การยึดหยุ่นของ GaP, GaN, InP และ InN	26
3.2	โหมดการสั้นของพันธะระหว่างอะตอมในผลึก GaP	27
4.1	ขนาดโครงผลึกของตัวอย่างของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกัน	35
4.2	ขนาดโครงผลึก ค่าคงที่โครงผลึก ค่าความไม่เท่ากัน (Lattice mismatch) ปริมาณอินเดียม และไนโตรเจน ของตัวอย่างของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกัน	35
4.3	ปริมาณ In ที่คำนวณจากข้อมูลเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน	37
4.4	ปริมาณ In และ N ที่คำนวณจากข้อมูลเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน ร่วมกับเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง	37
4.5	ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม InGaPN ของชิ้นงานที่อบด้วยความร้อน (RTA) เป็นเวลาต่างกัน	39

สารบัญรูปภาพ

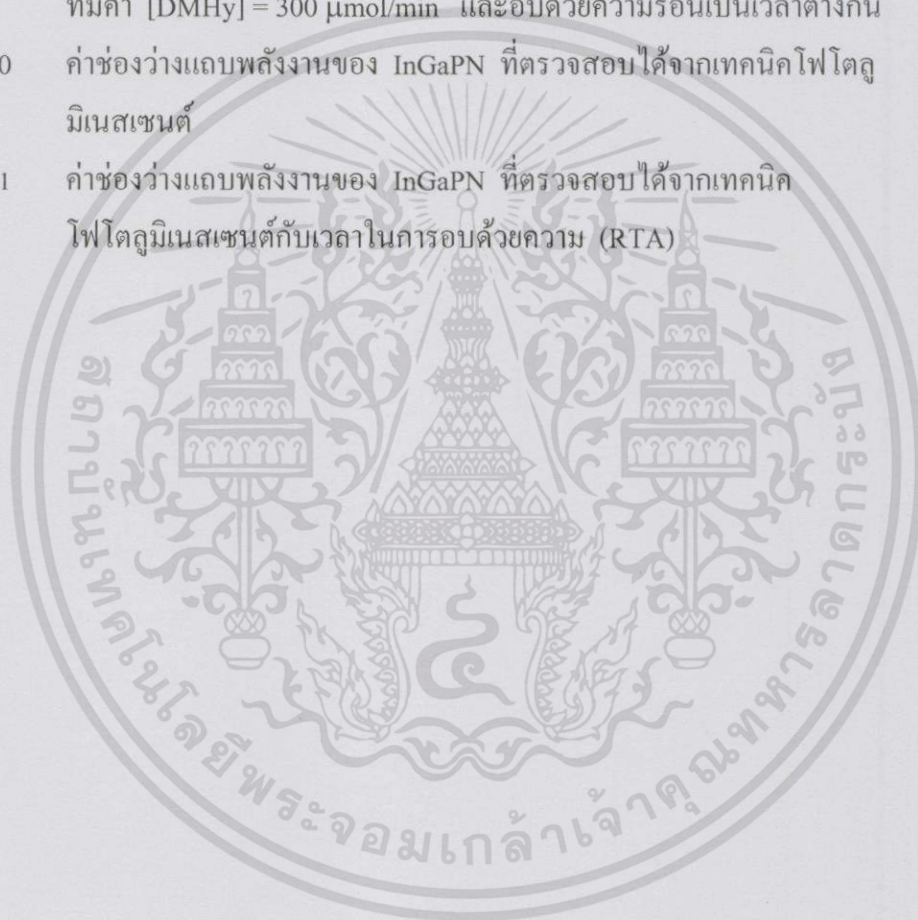
รูปที่		หน้า
1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) และค่าขนาดโครงสร้างผลึก (\AA) ของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม สาม-ห้า และอัลลอย	2
2.1	โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ GaP	6
2.2	แผนภาพของแถบพลังงานที่มีสถานะของพลังงานตามตำแหน่ง (localized energy band)	9
2.3	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบกับโครงสร้างผลึกบนระนาบ (001)	10
2.4	ก. ลักษณะโครงสร้างของซิงเบลนที่ไม่มีค่าความเครียด ข. ลักษณะโครงสร้างของซิงเบลนที่มีค่าความเครียดแบบคอมแพททิฟ ค. ลักษณะโครงสร้างของซิงเบลนที่มีค่าความเครียดแบบเทนไซล์	11
2.5	มุม Ω และมุม Ω_2 ของฟิล์ม InGaPN และวัสดุฐานรอง GaP ที่ระนาบ (115)	12
2.6	ทางเดินของลำรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดผ่านตัวทำเอกรงค์ ก่อนจะไปเลี้ยวเบนที่ชิ้นงานออกมา จากนั้นตัววิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่ามุมของลำรังสีเอกซ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้นก่อนจะเดินทางเข้าตัวตรวจจับ	13
2.7	การหมุนของฐานรองชิ้นงานตัวอย่างในสามแกน	14
2.8	ก. การกระเจิงแบบสโตกส์ ข. การกระเจิงแบบแอนติสโตกส์	15
2.9	แสดงแถบเวเลนซ์และแถบคอนดักชันของสารกึ่งตัวนำ	16
3.1	ลักษณะจำลองของชิ้นงาน InGaPN ที่ปลูกบนผลึก GaAs ที่ระนาบ (001)	19
3.2	เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง (บริษัท Bruker รุ่น Bruker AXS D8 DISCOVER) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	21
3.3	ก. การวางตัวของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ฐานรองชิ้นงาน และตัวตรวจจับ ข. รูปจำลองการทำงานในโหมดการสแกนแบบ z	22
3.4	รูปจำลองการทำงานในโหมดการสแกนแบบ Ω ที่ระนาบ (000)	22

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.5	รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม InGaPN และวัสดุฐานรอง GaAs ที่ระนาบ (004) ของชั้นงานที่มีปริมาณ DMHy เท่ากับ $300 \mu\text{mol/นาที่}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 30 วินาที	23
3.6	แสดงการเลื่อนตำแหน่ง (จากเส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นสีแดง) ค่าสูงสุดของ GaAs ที่ระนาบ (004) ชั้นงานที่มีปริมาณ DMHy เท่ากับ $300 \mu\text{mol/นาที่}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อทำการปรับข้อมูลก่อนการวิเคราะห์หาค่าแลคทิกซพารามิเตอร์ในแนวตั้งฉาก	24
3.7	แสดงภาพของการเลี้ยวเบนในโหมดแมปปิงที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (115) ของวัสดุฐานรอง GaAs และฟิล์ม InGaPN ของตัวอย่างที่มีปริมาณ DMHy เท่ากับ $300 \mu\text{mol/นาที่}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 30 วินาที	25
3.8	แผนผังจำลองขั้นตอนการหาค่าอัตราส่วน In ในชั้นฟิล์ม InGaPN	26
3.9	การเลื่อนตำแหน่งของผลต่างรามานในโหมดการสั่นต่างๆ ในผลึก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ เมื่อเปลี่ยนค่า x	28
3.10	การจัดอุปกรณ์ภายในเครื่องเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปคโตรสโกปี	29
4.1	รูปชั้นงาน InGaPN ที่ As grown	30
4.2	รูปชั้นงาน InGaPN ที่อบด้วยความร้อนเป็นเวลา 30s , 60s , 120 s และ 180s	31
4.3	รูปการเลี้ยวเบนและตำแหน่งของมุม $2\theta_{004}$ ของแต่ละชั้นงาน	32
4.4	รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = $300 \mu\text{mol/min}$	32
4.5	รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = $300 \mu\text{mol/min}$ และอบด้วยความร้อน 30s	33
4.6	รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = $300 \mu\text{mol/min}$ และอบด้วยความร้อน 60s	33
4.7	รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = $300 \mu\text{mol/min}$ และอบด้วยความร้อน 120s	34

สารบัญรูปลูกภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อน 180s	34
4.9	ข้อมูลจากเทคนิคการกระเจิงแบบรามานของชั้นงาน InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกัน	36
4.10	ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN ที่ตรวจสอบได้จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์	38
4.11	ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN ที่ตรวจสอบได้จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์กับเวลาในการอบด้วยความ (RTA)	38



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

สารกึ่งตัวนำตระกูลไนไตรด์หมู่สาม-ห้า หมายถึงสารกึ่งตัวนำที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุหมู่สามและหมู่ห้าในตารางธาตุ ซึ่งเป็นสารอัลลอยกึ่งตัวนำที่ได้รับความสนใจศึกษา เนื่องจากเป็นอัลลอยกึ่งตัวนำที่สามารถปรับแต่งสมบัติต่างๆ ได้ เช่น ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (band gap energy) และโครงสร้างผลึก (crystal structure) เป็นต้น

ปัจจุบันสารกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมฟอสไฟด์ไนไตรด์ (InGaPN) และสารกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์ (InGaAsN) ได้รับความสนใจพัฒนา และนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง เช่น ไดโอดเปล่งแสง (light Emitting Diodes, LEDs) เลเซอร์ไดโอด (Laser Diodes, LDs) นอกจากนี้ อัลลอยกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ยังถูกสนใจนำมาพัฒนาเป็นวัสดุชั้นดูดกลืนของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar cells) เนื่องจากมีกำแพงศักย์ (potential barrier) สูงเมื่อเทียบกับแกลเลียมอาร์เซไนต์ (GaAs) และแกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP) อีกทั้งค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN ยังอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เพื่อสร้างพาหะไฟฟ้า (Charge carrier)

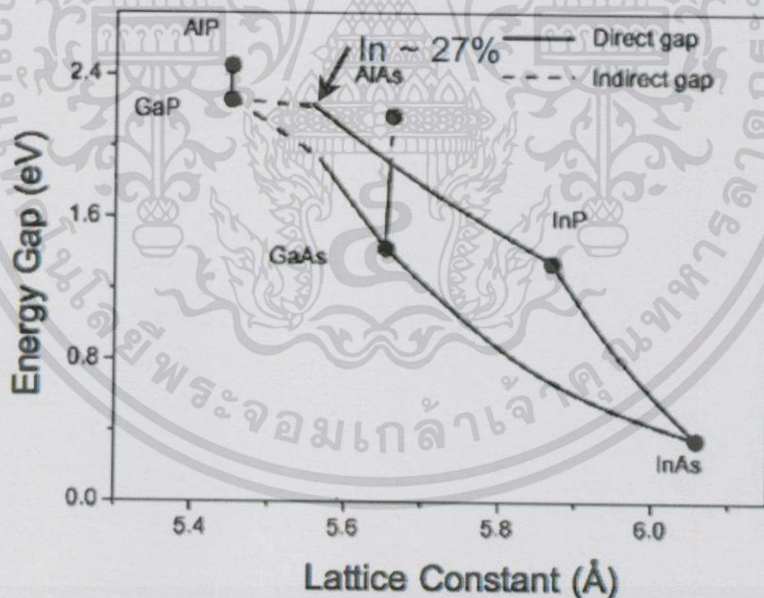
ลักษณะพิเศษของ InGaPN ที่ถูกปลูกผลึกบน GaAs ระนาบ (001) คือความเข้ากันได้ของขนาดโครงผลึก (lattice mismatching) โดยปรับเปลี่ยนตามอัตราส่วนของปริมาณอินเดียม (In) และปริมาณไนโตรเจน (N) การปรับเปลี่ยนนี้เป็นไปตามกฎของเวการ์ด์ (Vegard's law) และการปรับเปลี่ยนนี้จะส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง (Structural properties)

ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่าขนาดโครงผลึกของ InP นั้นมีค่ามากกว่าของ GaP ดังนั้นตามกฎของเวการ์ด์ การเพิ่มปริมาณ In ใน GaP เพื่อปลูกผลึก InGaP จึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขนาดโครงผลึก ซึ่งตรงข้ามกับ GaN ที่มีขนาดโครงผลึกน้อยกว่าของ GaP ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ N ใน GaP เพื่อปลูกผลึก GaPN จึงมีผลทำให้ขนาดโครงผลึกน้อยลง การปรับเปลี่ยนปริมาณ In (x) และ N (y) จะมีผลทำให้ขนาดโครงผลึกของ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{N}_y$ มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งวิธีนี้สามารถลดความเครียด (Strain) ของชั้นฟิล์ม และปัญหาที่เกิดจากความเครียดได้

ตารางที่ 1.1 ขนาดโครงผลึกและช่องว่างแถบพลังงานของ GaP, GaN, InP และ InN

สาร	ขนาดโครงผลึก: a (Å)	ค่าช่องว่างแถบพลังงาน : E_g (eV)
GaP	5.450 ^[9]	2.26 (Direct Bandgap) ^[16] , 2.78 (Indirect Bandgap) ^[17]
GaN	4.503 ^[8]	3.25 ^[14]
InP	5.868 ^[4]	1.35 ^[22]
InN	4.980 ^[8]	1.80 ^[13,23,26]

ในลักษณะเดียวกันกับการปรับแต่งขนาดโครงผลึก ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN ก็สามารปรับเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่า x และ y ตามกฎของเวกการ์ด แต่ในกรณีของ ช่องว่างแถบพลังงานนั้นจะเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น โดยมีพจน์ของพารามิเตอร์ความโค้ง (Bowing parameter) เพิ่มขึ้นมา ซึ่งพจน์ของพารามิเตอร์ความโค้งนี้จะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงานและขนาดโครงผลึกมีลักษณะโค้ง และเป็นไปตามรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (eV) และค่าขนาดโครงผลึก (Å) ของ สารกึ่งตัวนำกลุ่ม สาม-ห้า และอัลลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่โดยทั่วไปแล้ว GaP จะมีช่องว่างแถบพลังงานแบบไม่ตรง (indirect gap) ซึ่งส่งผลทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaP ไม่ได้รับผลของการเพิ่มอัตราส่วน x มากนัก จึงมีงานวิจัย [20] ที่ศึกษาผลของการเพิ่มอัตราส่วน In ใน InGaP ได้ผลสรุปว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaP นั้นจะเปลี่ยนเป็นค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct gap) ที่ค่า x มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 27 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.1

วิธีการลดค่าช่องว่างแถบพลังงาน นอกจากเพิ่มค่า x (อัตราส่วนของ In) แล้ว การเพิ่มค่า y (เพิ่มอัตราส่วนของ N) ก็ยังสามารถลดค่าช่องว่างแถบพลังงานได้เช่นกัน เนื่องจาก InGaPN นั้น มีค่าพารามิเตอร์ความโค้งสูงทำให้การเจือ N เพียงเล็กน้อยก็สามารถเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงานได้มาก

อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราส่วนของ N ยังสามารถทำได้จำกัด ซึ่งปัญหาที่พบในการเพิ่มปริมาณ N จำนวนมากใน InGaPN คือการลดลงของความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมา [4,8,9] เป็นแนวโน้มตรงกันข้ามกับการเพิ่มปริมาณ In ที่ทำให้การปลดปล่อยของแสงมีความเข้มเพิ่มขึ้น [8] นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ N เข้าไปในผลึกนั้นจะทำให้ยากกว่าการเพิ่มปริมาณ In เนื่องจากขนาดของอะตอมของ N ที่แตกต่างจากขนาดอะตอมของ P มาก

การอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid Thermal Annealing, RTA) มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงโครงสร้างของสารออลลอยกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{N}_y$ ที่ปลูกผลึกบน GaP (001) [2] จากการทดลองนี้ ผลการตรวจสอบเชิงแสง (โฟโตลูมิเนสเซนซ์; Photoluminescence, PL) ยังคงลักษณะเดิมหลังจากการทำ RTA แสดงให้เห็นว่ากลไกในการรวมตัวกัน (recombination mechanism) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังกระบวนการ RTA ยิ่งไปกว่านั้นผลของ HRXRD ยืนยันว่า $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{N}_y$ ที่เป็นแลตทิซเมทนั้น มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงที่ไม่ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในชั้นงานลดลง

ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงได้ทำการเลือกตัวอย่างที่มีค่าสัดส่วน In ประมาณร้อยละ 52.8 ของประมาณธาตุหมู่สาม (In และ Ga) เพื่อทำให้ฟิล์ม InGaPN มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง โดยจะทำการศึกษาศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์ม InGaPN ที่ปลูกบน GaAs ระนาบ (001) ที่มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากัน แต่อบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกันด้วยการวิเคราะห์จากวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง (HRXRD) และสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม InGaPN ที่ปลูกบน GaAs ระนาบ (001) ด้วยเทคนิคการเปล่งแสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของ InGaPN โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง และเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน
- 2) ศึกษาสมบัติเชิงแสงของ InGaPN โดยใช้เทคนิคการเปล่งแสง
- 3) ศึกษาถึงผลการอบด้วยความร้อนต่อสมบัติเชิงโครงสร้าง และเชิงแสง ของ InGaPN

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการนี้จะศึกษาสมบัติของ InGaPN ที่ปลูกผลึกบน GaAs ระนาบ (001) ด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเฟสอีพิแทกซี (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) ซึ่งเงื่อนไขการปลูก คือ ใช้ไดเมทิลไฮโดรราซีน (Dimethylhydrazine, DMHy) ที่เป็นสารตั้งต้นของไนโตรเจนอยู่ที่ $300 \mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 0, 30, 60, 120, 180 วินาที รวมทั้งสิ้น 5 ชั้น

ศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของ InGaPN ที่ปลูกผลึกบน GaAs ระนาบ (001) โดยจากการคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ปริมาณของอินเดียม และไนโตรเจน และค่า lattice-mismatch จากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง และเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน

ศึกษาสมบัติเชิงแสงของ InGaPN ที่ปลูกผลึกบน GaAs ระนาบ (001) โดยการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากเทคนิคการเปล่งแสง (Photoluminescence)

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.2 แสดงขั้นตอนการวิจัยและดำเนินการ

ระยะเวลา	ขั้นตอนการดำเนินการ
มิถุนายน - กรกฎาคม 2556	- ศึกษาทฤษฎีสารกึ่งตัวนำที่เกี่ยวข้อง
สิงหาคม - กันยายน 2556	- ศึกษาทฤษฎีเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง (HRXRD) - นำชิ้นงานมาวิเคราะห์
ตุลาคม 2556	สอบเตรียมความพร้อมวิชาโครงการพิเศษ
พฤศจิกายน - ธันวาคม 2556	- นำชิ้นงานมาศึกษาสมบัติเชิงแสงโดยเทคนิคการเปล่งแสง
มกราคม - กุมภาพันธ์ 2556	- รวบรวมข้อมูลที่ได้ นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟ และนำมาเปรียบเทียบกัน - สรุป วิเคราะห์ และวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถคำนวณหาค่าแลตทิซพารามิเตอร์ ปริมาณของอินเดียม และไนโตรเจน และค่า lattice-mismatch ในสารประกอบ InGaPN ได้
- 2) สามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ในสารประกอบ InGaPN ได้
- 3) สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างผลึกของฟิล์ม InGaPN ปลูกบน GaAs (001) ให้มีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น เป็นชั้นดูดกลืนในเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น



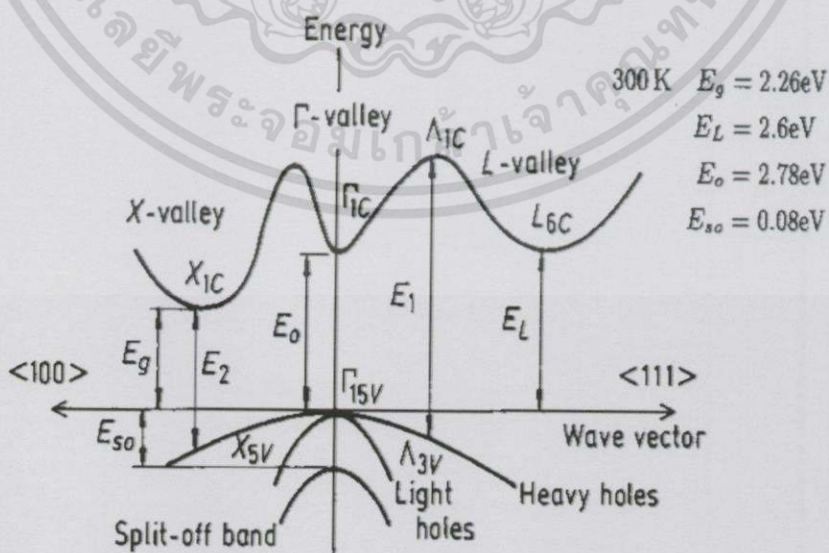
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์สมบัติสารกึ่งตัวนำผสม InGaPN จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะและสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงโครงสร้างหรือสมบัติเชิงแสงของสาร ซึ่งในโครงการนี้ได้เน้นศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้าง (Structural Properties) เพื่อนำไปพัฒนากระบวนการวิเคราะห์หาค่า x และ y ในฟิล์ม $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-y}\text{N}_y$ ที่ปลูกผลึกบนวัสดุฐานรอง GaAs ผิวระนาบ (001)

2.1 สารกึ่งตัวนำ GaP

สารกึ่งตัวนำ GaP เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่มสาม-ห้า ที่มีโครงสร้างเป็นแบบซิงเบลนด์ (Zincblende structure) โดย GaP มีขนาดโครงสร้างผลึก และค่าช่องว่างแถบพลังงานตามตารางที่ 1.1 ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaP มีค่าสอดคล้องกับโฟตอน ความยาวคลื่น 548 nm ซึ่งสามารถดูดกลืน หรือเปล่งแสงสีเขียว ดังนั้น GaP จึงนิยมนำไปใช้ในการผลิตไดโอดเปล่งแสงสีเขียว นอกจากนี้ GaP ยังเป็นองค์ประกอบหลักในสาร InGaP ซึ่งมีอัตราส่วน In น้อยกว่า Ga แต่เนื่องจากค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaP เป็นช่องว่างแบบไม่ตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ทำให้การปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ GaP นั้นมีประสิทธิภาพต่ำ และการเพิ่มอัตราส่วน In ใน InGaP จะส่งผลทำให้ช่องว่างแถบพลังงานเปลี่ยนเป็นแบบตรงได้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ GaP [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ GaP รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า แถบนำ (Conduction band) ที่ตำแหน่ง Γ นั้นไม่ใช่จุดต่ำสุดของแถบพลังงาน แต่จุดที่ต่ำสุดอยู่บริเวณใกล้ๆ กับตำแหน่ง X ซึ่งอยู่ในทิศ $\langle 100 \rangle$ ซึ่งเป็นตำแหน่งต่ำสุด และเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของอิเล็กตรอนสูงสุด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยพลังงานเพื่อกลับมารวมกับโฮล (hole) ที่แถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) ตรงข้ามกับความเข้มข้นของโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์ที่มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง Γ ของแถบวาเลนซ์ ทำให้เกิดความแตกต่างของโมเมนตัมหรือค่า k ของอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะมารวมกับโฮลนั้นมีค่าน้อย การปลดปล่อยพลังงานในรูปของความร้อนทำให้ความเข้มแสงที่ถูกปลดปล่อยออกมาไม่สูงนัก

การเพิ่มอัตราส่วน In และ N ในฟิล์ม InGaPN เข้าไปสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะของแถบพลังงานของ GaP ให้เป็นช่องว่างแบบตรง

2.2 การปรับเปลี่ยนอัตราส่วน In และ N ใน InGaPN

InGaPN เป็นอัลลอยสารกึ่งตัวนำตระกูลไนไตรด์หมู่สาม-สาม-ห้า ซึ่งเกิดจากการใส่ธาตุ In และ N เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ GaP เพื่อเป็นการปรับเปลี่ยนสมบัติของสารกึ่งตัวนำ GaP โดยสมบัติที่สนใจปรับเปลี่ยนในโครงการนี้ คือ ขนาดของโครงผลึก และค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN

2.2.1 การปรับเปลี่ยนขนาดโครงผลึกของ InGaPN

การปรับเปลี่ยนค่าขนาดโครงผลึกโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของธาตุหมู่สาม (เปลี่ยนค่า x) และหมู่ห้า (เปลี่ยนค่า y) จะเป็นไปตามกฎของเวอการ์ด์ (Vegard's Law) ดังสมการที่ 2.1

$$P_{\text{InGaPN}} = (1-x) \cdot [(1-y) \cdot P_{\text{GaP}} + y \cdot P_{\text{GaN}}] + x \cdot [(1-y) \cdot P_{\text{InP}} + y \cdot P_{\text{InN}}] \quad (2.1)$$

โดย x คือ ค่าอัตราส่วนของปริมาณ In ต่อปริมาณ In รวมกับ Ga มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

y คือ ค่าอัตราส่วนของปริมาณ N ต่อปริมาณ P รวมกับ N มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

$P_{\text{InGaPN}}, P_{\text{GaP}}, P_{\text{GaN}}, P_{\text{InP}}, P_{\text{InN}}$ คือค่าพารามิเตอร์ของ InGaPN, GaP, GaN, InP และ InN ตามลำดับ (ในที่นี้หมายถึงขนาดโครงผลึก)

จากค่าคงที่ต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 1.1 จะเห็นว่าการปรับค่า x ให้มีค่าเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มอัตราส่วน In จะทำให้ขนาดโครงผลึกของ InGaPN จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งตรงกันข้ามกับค่า y หรืออัตราส่วนของ N ที่เมื่อเพิ่มขึ้นแล้วจะทำให้ขนาดโครงผลึกของ InGaPN มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การปรับเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN

การปรับเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN นั้นก็มีแนวโน้มเป็นไปตามกฎของเวกการ์ด (Vegard's law) เช่นเดียวกับขนาดโครงสร้างผลึก แต่แตกต่างกันตรงที่ค่าช่องว่างแถบพลังงานไม่เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยจะมีพจน์ที่เพิ่มมาในรูปของพารามิเตอร์ความโค้ง (Bowing Parameter) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ซึ่งเป็นสมการเวกการ์ดของสารอัลลอย AB_xC_{1-x}

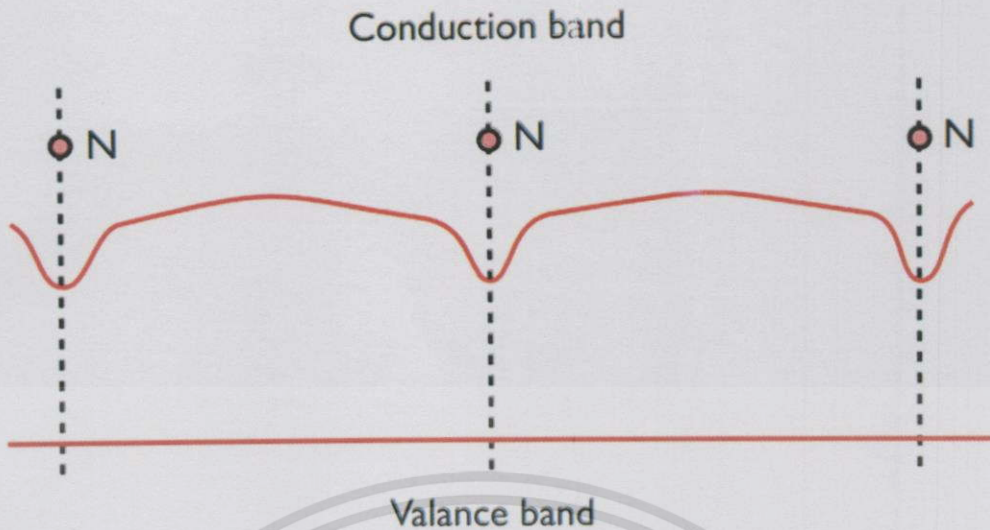
$$E_{ABC} = y \cdot E_{AB} + (1-x) \cdot E_{AC} + b \cdot y \cdot (1-x) \quad (2.2)$$

โดย b คือ ค่าพารามิเตอร์ความโค้งซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสาร เช่น ค่าพารามิเตอร์ความโค้งของ $In_xGa_{1-x}P$ พบว่ามีค่าอยู่ที่ 0.786 eV [12] สำหรับค่าช่องว่างแถบพลังงานในตำแหน่ง Γ และมีค่าเท่ากับ 0.18 eV [21] สำหรับค่าช่องว่างแถบพลังงานในตำแหน่ง X เป็นต้น

จากค่าพารามิเตอร์ความโค้งของ InGaP นั้นจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่ง Γ นั้นมีค่าพารามิเตอร์ความโค้งที่มากกว่าที่ตำแหน่ง X ทำให้ที่ตำแหน่ง Γ มีอัตราการลดลงของค่าช่องว่างแถบพลังงานมากกว่าที่ตำแหน่ง X ดังนั้นแม้ว่าที่ตำแหน่ง X ของ GaP จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานที่น้อยกว่า แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วน In มากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าหนึ่ง ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ตำแหน่ง Γ ก็จะมีค่าที่น้อยกว่าที่ตำแหน่ง X ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนชนิดของช่องว่างแถบพลังงานจากช่องว่างแบบไม่ตรงมาเป็นแบบตรง ซึ่งสถานะดังกล่าวได้ถูกตรวจสอบพบว่าต้องใช้อัตราส่วนของ In ประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์ [20] ของธาตุหมู่ 3 หรือ $x = 0.27$ ดังแสดงในรูปที่ 1.1

ส่วนค่าพารามิเตอร์ความโค้งของ GaPN นั้นมีค่าประมาณ 14 eV [12] ซึ่งนับว่าเป็นสารที่มีค่าพารามิเตอร์ความโค้งที่สูงมากและมีประโยชน์ในงานที่มีต้องการปรับเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงาน เพราะค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของ N ไปเพียงเล็กน้อย แต่การปรับเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยการเพิ่มอัตราส่วนของ N มากๆ นั้น มีปัญหาในการปลูกผลึกเพราะความไม่เข้ากันของอะตอม N และ P และยังถูกพบว่าการเพิ่มอัตราส่วน N ทำให้การปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเข้มน้อยลงด้วย [8-9]

การที่ InGaPN เป็นสารอัลลอยที่มีการผสมกันของอะตอมของธาตุ 4 ธาตุ ซึ่งธาตุแต่ละธาตุจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron Affinity, EA) หรือความสามารถในการดึงดูดของอิเล็กตรอน โดยเฉพาะอะตอม N ที่ค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนสูงจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบอะตอม N มีค่ามากกว่าบริเวณอื่นจึงไปลดค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณนั้นให้ลดลง ค่าช่องว่างแถบพลังงานในบริเวณนั้นจึงมีค่าน้อยกว่าบริเวณอื่นดังรูปที่ 2.2 เราเรียกระดับพลังงานในแต่ละตำแหน่งมีค่าไม่เท่ากันว่า สถานะของพลังงานตามตำแหน่ง (localized energy band)



รูปที่ 2.2 แผนภาพของแถบพลังงานที่มีสถานะของพลังงานตามตำแหน่ง (localized energy band)

2.3 การอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว

การอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว [19] (Rapid thermal anneal : RTA) เป็นกระบวนการที่ใช้ผลึกอุปกรณ์สังเคราะห์สารกึ่งตัวนำ โดยให้ความร้อนต่อชิ้นงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ จะทำให้งผลกระทบท่อสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ การอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกัน จะให้สมบัติที่ต่างกันด้วย อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสามารถให้ความร้อนในระยะเวลาสั้นๆ เพื่อจะเปลี่ยนสมบัติของฟิล์มบางที่มีต่อฟิล์มบางด้วยกัน หรือฟิล์มบางต่อฐานรอง (substrate) สามารถเปลี่ยนความหนาของชั้นฟิล์ม เปลี่ยนสถานะของฟิล์มที่ปลูกขึ้นได้ ด้วยการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดจากไอออนขณะปลูกฟิล์ม มีการย้ายหรือทำให้สารเจือปนในฟิล์มเคลื่อนที่เข้าไปในโครงสร้างโครงผลึกมากขึ้น

วิธีการอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว (RTA) จะใช้หลอดไฟทั้งสแตน-แฮโรเจน เป็นหลอดไฟพื้นฐานในการให้ความร้อนต่อชิ้นงาน ซึ่งจะแตกต่างจากเตาอบให้ความร้อน คือ จะใช้เวลาในการอบเป็นระยะเวลาหลายนาที่ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโครงผลึกเพียงชิ้นเดียว

การที่จะทำให้เกิดกระบวนการอบด้วยความร้อนในระยะเวลาเพียงสั้นๆนั้น จะต้องควบคุมอุณหภูมิ และความสม่ำเสมอของกระบวนการอบ รวมถึงการวัดอุณหภูมิและควบคุมความเครียดของชิ้นงาน เช่นเดียวกับการส่งผ่านความร้อน

อย่างไรก็ตามเมื่อไม่นานนี้ กระบวนการอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid thermal anneal : RTA) เป็นกระบวนการที่ใช้อบชิ้นงานที่ถูกผลิตเพื่อการดูดกลืนฟลักซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในขณะนี้ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งการกระจายตัวของฟอสฟอรัส ในการสร้างรอยต่อสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น ตามลำดับ

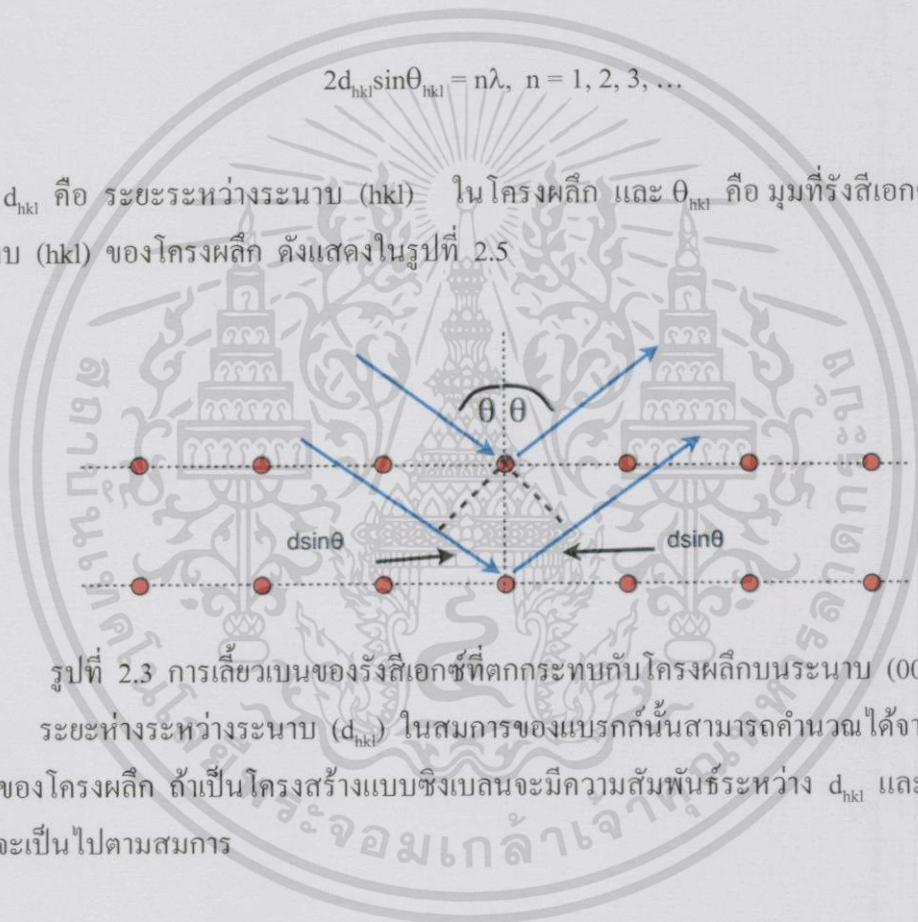
2.4 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกฎของแบรกก์

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) เป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ตรวจสอบโครงสร้างของผลึกและคุณภาพของผลึก ซึ่งช่วยให้เราสามารถคำนวณหาองค์ประกอบทางเคมีได้

การตรวจสอบด้วยเทคนิคนี้จะวัดความเข้มของรังสีเอกซ์แทรกสอดผ่าน โครงผลึกและให้ผลการแทรกสอดแบบเสริมกัน ซึ่งพิจารณาจากความแตกต่างของเส้นทางเดิน (Path difference) ของรังสีเอกซ์ทั้งสองขบวน โดยการแทรกสอดนั้นต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขตามสมการกฎของแบรกก์ (Bragg's law)

$$2d_{hkl} \sin\theta_{hkl} = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

โดย d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ (hkl) ในโครงผลึก และ θ_{hkl} คือ มุมที่รังสีเอกซ์กระทำกับระนาบ (hkl) ของโครงผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



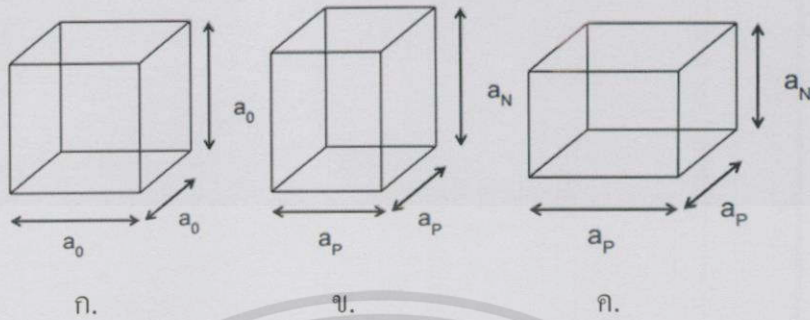
รูปที่ 2.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบกับโครงผลึกบนระนาบ (001)

ระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{hkl}) ในสมการของแบรกก์นั้นสามารถคำนวณได้จากขนาดและชนิดของโครงผลึก ถ้าเป็นโครงสร้างแบบซิงเกิลนจะมีความสัมพันธ์ระหว่าง d_{hkl} และขนาดโครงผลึกจะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a_0^2} \quad (2.4)$$

แต่ถ้าเป็นโครงสร้างแบบซิงเกิลนมีค่าความเครียดเกิดขึ้นจะทำให้โครงผลึกเปลี่ยนจากคิวบิกเป็นเทตระโกโนล (Tetragonal structure) ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่าง d_{hkl} และขนาดโครงผลึกเป็นไปตามสมการ (ลักษณะโครงสร้างแบบต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.6)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a_p^2} + \frac{l^2}{a_N^2} \quad (2.5)$$



- รูปที่ 2.4 ก. ลักษณะ โครงสร้างของซิงเบรลนที่ไม่มีค่าความเครียด
 ข. ลักษณะ โครงสร้างของซิงเบรลนที่มีค่าความเครียดแบบคอมแพทซีฟ
 ค. ลักษณะ โครงสร้างของซิงเบรลนที่มีค่าความเครียดแบบเทนไซล์

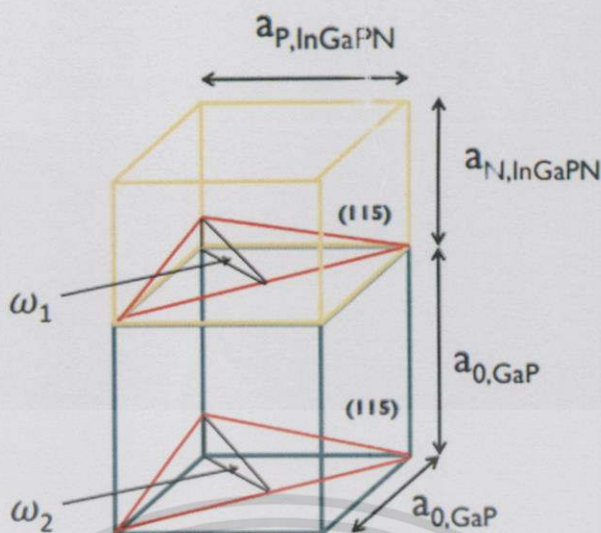
การวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่แทรกสอดออกมาจาก โครงผลึกต่อค่ามุมที่รังสีตกกระทบกับรังสีแทรกสอด ($2\theta_{hkl}$) จากนั้นใช้สมการของแบรกก์ (สมการที่ 2.3) คำนวณหาค่า d_{hkl} ของแต่ละระนาบ และใช้สมการที่ 2.4 หรือ 2.5 (ขึ้นกับรูปร่างของโครงผลึก) คำนวณหาขนาดโครงผลึก

นอกจากนี้การหาขนาดโครงผลึกยังทำได้จากการสแกนแบบแมปปิง (mapping scanning mode) เพื่อได้ค่าความแตกต่างของมุม ω ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งมีผลต่างของมุม ω มีค่าเท่ากับ

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{2}}{5}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{2} \cdot a_N}{5 \cdot a_p}\right) \quad (2.6)$$

หรือจัดรูปสมการใหม่ คือ

$$a_p = \frac{\sqrt{2}}{5} a_N \left[\tan \left(\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}}{5} \right) - \Delta\omega \right) \right]^{-1} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.5 มุม ω_1 และมุม ω_2 ของฟิล์ม InGaPN และวัสดุฐานรอง GaP ที่ระนาบ (115)

2.5 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (High Resolution X-ray Diffraction, HRXRD) เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงมาจากเทคนิค XRD ให้มีค่าสอดคล้องกับกฎของแบรกก์มากขึ้นและยังมีการเพิ่มความแม่นยำสูงขึ้น จากสมการของแบรกก์ (สมการที่ 2.3) เราจะได้ความคลาดเคลื่อนว่า

$$\frac{\Delta d_{hkl}}{d_{hkl}} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta \theta}{\tan \theta} \quad (2.8)$$

สมการที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของ d_{hkl} นั้นเกิดมาจากสองส่วนหลักๆ คือ ความผิดพลาดที่เกิดจากค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์และค่าความผิดพลาดที่เกิดจากมุมของแบรกก์ ซึ่งในเทคนิค HRXRD ได้มีการปรับปรุงให้มีค่าความผิดพลาดน้อยลง โดยมีวิธีการ

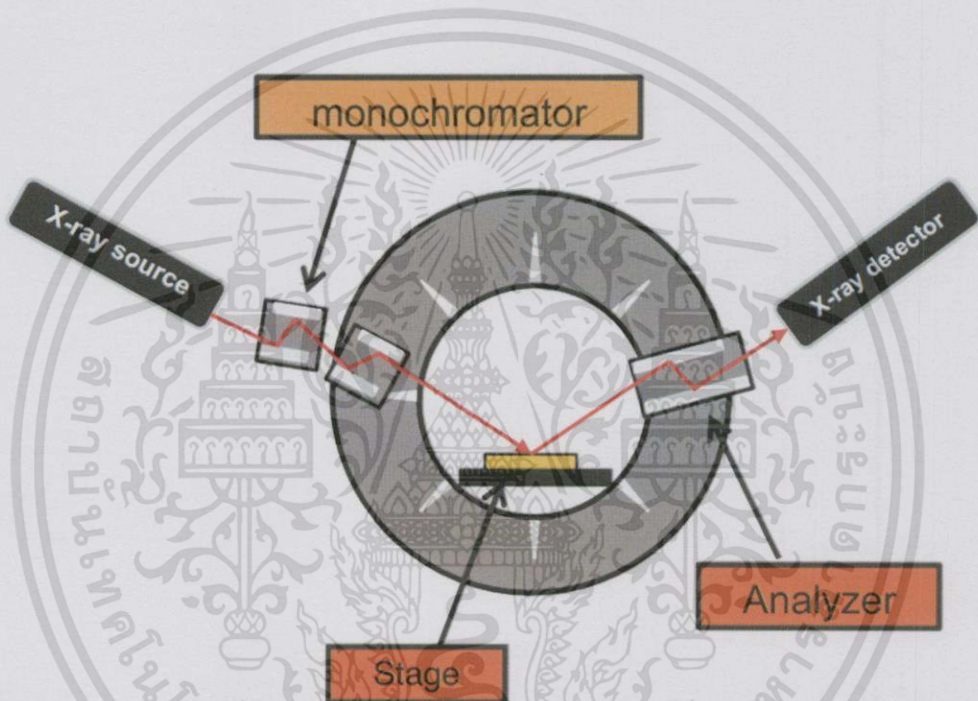
1) การทำความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ให้มีความเป็นเอกรงค์ เนื่องจากการใช้ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์หลายค่าในการวิเคราะห์นั้นมีความซับซ้อน ยุ่งยาก และขาดความแม่นยำ ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความสมบูรณ์สูงจึงจำเป็นต้องให้ค่าความยาวคลื่นที่มีค่าเดียว (coherent wave) ด้วยการใช้ตัวทำแสงเอกรงค์ (monochromator) เป็นตัวกรองรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray source) และใช้ตัววิเคราะห์ (analyzer) สำหรับกรองรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนมาจากชิ้นงาน ก่อนเข้าสู่ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-ray detector) ดังรูปที่ 2.8 ในการทดลองนั้นจะกรองให้ได้รังสีเอกซ์ในชั้น $K\alpha_1$ เพราะเป็นความยาวคลื่นที่มีความเข้มข้นสูงที่สุด เพื่อได้ค่าความยาวที่มีค่าเดียวนั้นจะเป็นต้องอาศัยตัวกรองผลึกของแข็งที่มีความบริสุทธิ์สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

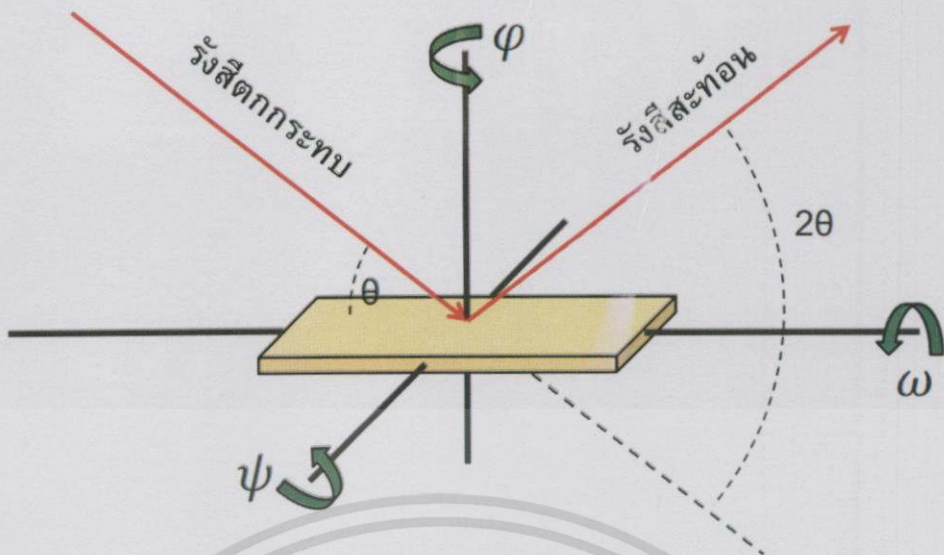
โดยในปัจจุบันนิยมเลือกให้ผลึกของ Ge (220) และ Si (220) เมื่อผ่านขั้นตอนการในการทำให้ค่าความยาวคลื่นมีค่าเดียวทั้งหมดจะได้ค่า $\Delta\lambda/\lambda$ ที่มีค่าน้อยมากในระดับ 10^{-4}

2) ค่ามุมของแบรกก์สามารถบันทึกได้ค่าละเอียดขึ้น ในปัจจุบันนี้ นั้นสามารถปรับค่าความละเอียดในการเพิ่มหนึ่งขั้น (Step size) ได้ในระดับทศนิยมตำแหน่งที่ 4 คือ 0.0002 องศา ซึ่งทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน $\Delta\theta/\tan\theta$ อยู่ในระดับ 10^{-4} เช่นเดียวกับค่าความยาวคลื่น

3) ฐานวางชิ้นงานมีการปรับระดับได้ โดยฐานของชิ้นงานนั้นสามารถปรับได้ในสามทิศทาง Ψ , Ω และ Φ เพื่อให้การวางตัวของระนาบผลึกตรงกับเงื่อนไขของแบรกก์มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.6 ทางเดินของลำรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดผ่านตัวทำเอกรงค์ ก่อนจะไปเลี้ยวเบนที่ชิ้นงานออกมา จากนั้นตัววิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่ามุมของลำรังสีเอกซ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น ก่อนจะเดินทางเข้าตัวตรวจจับ



รูปที่ 2.7 การหมุนของฐานรองชิ้นงานตัวอย่างในสามแกน

2.6 โฟนอน (Phonon)

การเรียงตัวของอะตอมในผลึกนั้นจะมีความเป็นระเบียบโดยจะพันธะเชื่อมต่อกันซึ่งเราสามารถพิจารณาให้คล้ายกับมวลหลายๆ ก้อนที่ยึดติดกันด้วยสปริง (พันธะ) และโฟนอนก็คืออนุภาคเสมือนที่เกิดจากการควอนไทซ์ (Quantization) การสั่นของอะตอมในผลึกนั่นเอง

การสั่นของโครงผลึกนั้นจะมีอยู่ด้วยกันอยู่ 2 โหมด คือ

1. โฟนอนในโหมด TO (transverse optical phonon, TO-phonon) เป็นการสั่นของโฟนอนในแนวตามขวางกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น
2. โฟนอนในโหมด LO (longitudinal optical phonon, LO-phonon) เป็นการสั่นของโฟนอนในแนวตามยาวกับแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น

โฟนอนในแต่ละโหมดนั้นจะมีความถี่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างอะตอม ซึ่งเราสามารถใช้สมบัตินี้ในการวิเคราะห์หาว่ามีชนิดของพันธะของสารตัวอย่างได้

2.7 การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering)

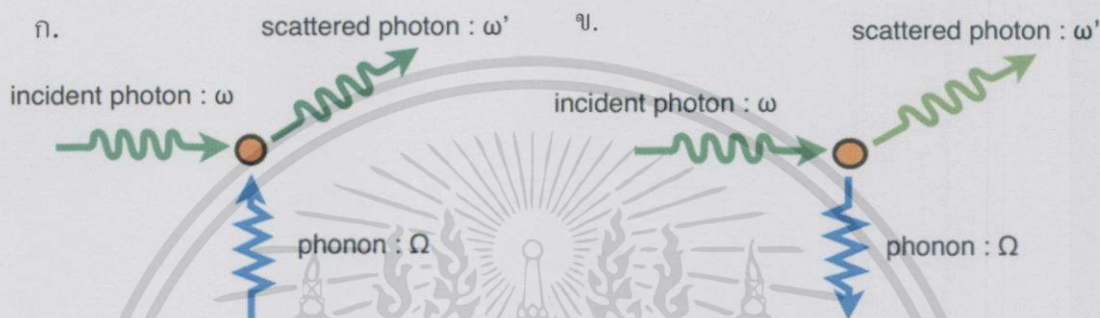
การกระเจิงแบบรามานเกิดจากการถ่ายเท (หรือรับ) พลังงานจากโฟตอน (Photon) ไปเพื่อสร้าง (หรือ ทำลาย) โฟนอนของสารตัวอย่าง การกระเจิงแบบรามานนั้นจะเป็นการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นทำให้ค่าพลังงาน และค่าโมเมนตัมของโฟตอนเปลี่ยนไป แบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1. การกระเจิงแบบสโตกส์ (Stokes scattering) เป็นการกระเจิงที่ทำให้โฟนอนออกมาในผลึก ทำให้โฟตอนที่กระเจิงออกมามีพลังงานลดลง
2. การกระเจิงแบบแอนติสโตกส์ (Anti-Stokes scattering) เป็นการกระเจิงที่ดูดกลืนโฟนอนจากในผลึกทำให้โฟตอนที่กระเจิงออกมามีพลังงานเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระเจิงทั้งสองประเภทถูกแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งไปตอนที่กระเจิงออกมาจะมีพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป เราจะวัดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานนี้ในรูปของผลต่างรามาน (Raman shift)

$$E = E_i - E_f = \left(hc \frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_f} \right) = hc \cdot \text{raman shift} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.8 ก. การกระเจิงแบบสโตกส์ ข. การกระเจิงแบบแอนติสโตกส์

2.8 โฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence)

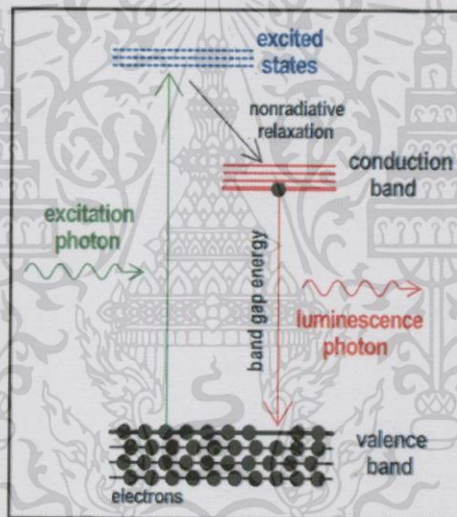
ในการทดลองนี้ ระดับชั้นพลังงานของโครงสร้างแบบควอนตัมเวลล์ของสารกึ่งตัวนำที่สังเกตโดยใช้เทคนิคการเปล่งแสง (Photoluminescence) เลเซอร์ที่ถูกใช้ในการกระตุ้นในสารกึ่งตัวนำ GaAs และเมื่อได้กลับสู่สถานะ de-excite อิเล็กตรอนเหล่านั้นจะเปล่งแสงออกมาระเบิดแสงที่เกิดขึ้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรมิเตอร์ และจุดยอดของสเปกตรัมถูกแสดงได้โดยการวัดระดับพลังงานโดยตรงในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

วัสดุสารกึ่งตัวนำที่นิยม และนำมาใช้งาน คือ GaAs ความสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีส่วนประกอบของ GaAs เป็นรองจาก Si อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ Si กันอย่างแพร่หลายเนื่องจาก GaAs สามารถทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดีกว่า Si จึงทำให้ GaAs ถูกใช้สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเร็วสูง เช่น โทรศัพท์มือถือ ที่มีการใช้อุปกรณ์ขยายกำลังสัญญาณจาก GaAs สำหรับการสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่ความถี่ 1.8-1.9 GHz และ 2.5 GHz นอกจากนี้ GaAs ยังถูกเรียกได้ว่า เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานตรง ไม่เหมือนกับ Si ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานไม่ตรงเนื่องมาจาก GaAs เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานตรง ทำให้นำ GaAs มาสร้างให้เป็นแหล่งกำเนิดแสงใน LEDs และเลเซอร์ไดโอด สารอัลลอยด์ GaAs ถ้ามีการรวมตัวกับ Al กับ In ซึ่งถูกใช้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการสื่อสารด้วยแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแข็งทั้งหมด รวมถึงสารกึ่งตัวนำ จะมีช่องว่างแถบพลังงาน สำหรับการนำอิเล็กตรอน ในการเข้าใจภาพรวมของช่องว่างแถบพลังงาน สิ่งแรกที่ต้องพิจารณานั้นคืออิเล็กตรอนบางส่วน ในของแข็ง ไม่ได้ถูกคิดไว้กับอะตอม แต่สามารถกระโดดจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมอื่นๆ ได้ อะตอมเหล่านั้นจะสูญเสียอิเล็กตรอนในการจับในของแข็งด้วยจำนวนที่แตกต่างกัน และ ดังนั้นอะตอมเหล่านั้นจึงมีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน อิเล็กตรอนที่จะมีระดับพลังงานที่เหนือกว่า ระดับพลังงานคงที่ที่แน่นอน เราเรียกว่า “พาหะอิเล็กตรอน (Conduction electron)” ในขณะที่ อิเล็กตรอนมีระดับพลังงานต่ำกว่าค่าคงที่ เราเรียกว่า “เวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence electron)”

ในแผนภาพแสดงให้เห็นว่า ในสารกึ่งตัวนำจะมีแถบคอนดักชัน และแถบเวเลนซ์คำว่า “แถบ” ได้ถูกนำมาใช้เนื่องจากว่าอิเล็กตรอนมีจำนวนมากในแต่ละแถบพลังงานหลัก และจะมี ช่องว่างระหว่างแถบสถานะคอนดักชันและเวเลนซ์ภายใต้สภาพปกติของอิเล็กตรอนจะไม่มี พลังงานระหว่างแถบคอนดักชัน และแถบเวเลนซ์อย่างแน่นอน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 แสดงแถบเวเลนซ์และแถบคอนดักชันของสารกึ่งตัวนำ

ถ้าอนุภาคของแสง (โฟตอน) มีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม ดังนั้น พลังงานของแสงจะสามารถถูกดูดกลืนและทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก แถบเวเลนซ์ ขึ้น ไปสู่แถบคอนดักชันได้ โดยข้ามผ่านแถบพลังงานต้องห้ามไป ในกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงนั้น โดยทั่วไปอิเล็กตรอนจะมีพลังงานมากเกินไป และจะมีการสูญเสียพลังงานก่อนที่จะเป็นส่วนที่ เหลือในระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดในแถบคอนดักชัน ในตอนนี้อิเล็กตรอนจะตกลงมาที่แถบเวเลนซ์ ในที่สุด ระหว่างที่อิเล็กตรอนตกลงมานั้น จะมีการสูญเสียพลังงานโดยเปลี่ยนกลับไปในรูปแบบ ของการเปล่งแสง (Photon) ซึ่งการเปล่งแสงนี้เป็นการเปล่งแสงจากวัสดุ ดังนั้นพลังงานในการ

เปล่งแสง (Photon) เป็นการวัดค่าของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ซึ่งกระบวนการกระตุ้นด้วยแสง และทำให้วัสดุเปล่งแสงออกมา เราเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนส์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การปลูกผลึกโดยวิธีเอ็มโอวีพีอีและการหาลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำ III-(III)-V-ไนไตรด์เจือจาง : InGaPN ปลูกผลึกบน GaAs : ดาเรศ แก้วเกตุ [1]

งานวิจัยนี้ ศึกษาลักษณะเฉพาะของ InGaPN/GaAs ที่เกี่ยวข้องกับการใช้เป็นชั้นดูดซับใน เซลล์แสงอาทิตย์ถูกวิเคราะห์ เพื่อตรวจสอบการวางตัวของแถบพลังงาน บ่อศักย์ InGaPN/GaAs และ GaAs/InGaPN คุณภาพผลึกสูงถูกปลูกบนลงบนชั้นสเตรต GaAs (001) ด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเวเปอร์เฟสอีพีแทกซีผลจากโฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ 10K ของบ่อศักย์ แสดงพิเศษในช่วงพลังงานอินฟราเรด พิเศษของบ่อศักย์ GaAs/InGaPN คงอยู่ถึงอุณหภูมิ 240K ในขณะที่พิศพิเศษบ่อศักย์ InGaPN/GaAs ถูกทำให้หายไปที่อุณหภูมิประมาณ 120K สถานการณ์นี้แสดงว่าทั้งสองบ่อศักย์เป็น โครงสร้างควอนตัมชนิดที่สอง ความต่างของแถบวาเลนซ์และแถบการนำถูกประมาณเป็น 450 และ 160 meV ตามลำดับ

เพื่อที่จะศึกษาช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN และการเปลี่ยนแปลงของมันกับอุณหภูมิชั้น InGaPN ที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนต่าง ๆ กัน ถูกปลูกแบบสโตนคอลลิงลงบนชั้นสเตรต GaAs (001) เมื่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น โฟโตลูมิเนสเซนส์และโฟโตรีเฟลคแทนซ์แสดงถึงช่องว่างแถบพลังงานที่ลดลง โฟโตลูมิเนสเซนส์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิพร้อมด้วยการพิศดิ่ง แสดงให้เห็นถึงการขึ้นกับอุณหภูมิของช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN ที่มีผลน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจน ค่าคงที่ที่ได้จากการพิศดิ่งแสดงค่าที่เข้าใกล้ลักษณะเฉพาะของ III-ไนไตรด์ (คือ GaN และ InN) เมื่อเพิ่มไนโตรเจน ผลจากการกระเจิงรามานในช่วง $400 - 900 \text{ cm}^{-1}$ แสดงลักษณะเฉพาะคล้าย GaN สิ่งนี้แสดงถึงพันธะ Ga-N มีปริมาณมากกว่าพันธะ In-N ในชั้นงาน InGaPN ซึ่งทำให้สมบัติการขึ้นอยู่กัอุณหภูมิน้อย อาจเกิดจากผลของพันธะ Ga-N นี้

2.9.2 ผลการอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วของ InGaPN ที่ปลูกผลึกลงบน GaP ด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเวเปอร์เฟสอีพีแทกซี : ดร.สกุลธรรม เสนาะพิมพ์ [2]

งานวิจัยนี้ได้รายงานผลการตรวจสอบอิทธิพลของการอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid Thermal Annealing : RTA) ต่อสมบัติเชิงแสงและสมบัติเชิงโครงสร้างของอัลลอยกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{N}_y$ ($x = 0.176$ และ $0 \leq y \leq 0.087$) ที่ปลูกผลึกลงบน GaP (001) ด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเวเปอร์เฟสอีพีแทกซี (MOVPE) การเปล่งแสงด้วยการกระตุ้นด้วยโฟตอน (Photoluminescence : PL) และการเปล่งแสงเมื่อที่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นโฟตอนที่ใช้กระตุ้น (PL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

excitation, PLE) ได้ถูกวัดเพื่อสังเกตก่อนและหลังกระบวนการ RTA และใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง (high-resolution X-Ray diffraction, HRXRD) เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นในโตรเจนที่เปลี่ยนแปลงไปหลังกระบวนการ RTA ที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 30 วินาที พบว่าสำหรับชิ้นงานที่มีไนโตรเจนเจือน้อยกว่า $y < 0.074$ การทำ RTA ทำให้เกิดการเลื่อนเป็นอย่างมากของตำแหน่ง PL และตำแหน่งการดูดกลืนแสงไปยังตำแหน่งที่มีพลังงานสูงขึ้น ผลการทดลองดังกล่าวได้บ่งชี้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงโครงสร้างบางอย่างของฟิล์มบางอัลลอยกึ่งตัวนำนี้ สำหรับในกรณีที่มี $y \geq 0.074$ ทั้งผลของ PL และ PLE ยังคงลักษณะเดิมหลังจากการทำ RTA แสดงให้เห็นว่ากลไกในการรีคอมบิเนชัน (Recombination mechanism) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังกระบวนการ RTA ยิ่งไปกว่านั้นผลของ HRXRD ชี้ชัดว่า $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{N}_y$ ที่เป็นแลตทิซแมทเทิร์น มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงที่ไม่ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในชิ้นงานลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

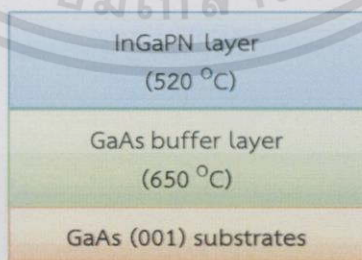
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ที่มาและลักษณะของชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ InGaPN ที่ปลูกผลึกบนวัสดุฐานรอง GaAs ที่ระนาบ (001) ชิ้นงานทั้งหมดถูกปลูกด้วยเทคนิคเมทอลออร์แกนิกเวเพอร์เฟสอีพิแทกซี (Metal-organic vapor phase epitaxy, MOVPE) และอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid thermal anneal : RTA) ซึ่งได้รับอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการของศาสตราจารย์ ดร.เคนทาโร โอนาเบะ ภาควิชาวัสดุขั้นสูง มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

ชิ้นงานชุดนี้ประกอบด้วยชิ้นงานที่เป็นผลึกฟิล์มบาง InGaPN บนวัสดุฐานรอง GaAs ซึ่งถูกปลูกบนระนาบ (001) ด้วยอุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส โดยใช้สาร Trimethylindium (TMIn), Trimethylgallium (TMGa), Tertiarybutylphosphine (TBP), Tertiarybutylarsine (TBA) และ Dimethylhydrazine (DMHy) เป็นสารตั้งต้นของ In, Ga, P และ N ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คงค่าความเข้มข้นของ TMIn ไว้ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 53 ของธาตุหมู่ 3 มีการปรับค่าความเข้มข้นของ DMHy 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงในเวลา 0, 30, 60, 120 และ 180 วินาทีรวมทั้งสิ้น 5 ชิ้นงาน

ขั้นตอนการปลูกเริ่มต้นจากการนำวัสดุฐานรอง GaAs ที่ระนาบ (001) มาปลูกชั้นบัฟเฟอร์ด้วย GaAs ด้วยความหนาประมาณ 400 nm เพื่อทำการปรับผิวหน้าของวัสดุฐานรองให้เรียบ จากนั้นทำการปลูกชั้นฟิล์ม InGaPN ด้วยความหนาประมาณ 200nm ซึ่งเงื่อนไขการปลูกคาดหวังว่าจะได้โครงสร้างของชิ้นงานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะจำลองของชิ้นงาน InGaPN ที่ปลูกบนผลึก GaAs ที่ระนาบ (001)

3.2 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง

เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง (High Resolution X-ray diffraction, HRXRD) ใช้สำหรับการหาโครงสร้างผลึกทั้งในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับผิวรอยต่อของฟิล์มบาง เป็นเครื่องของบริษัท Bruker รุ่น Bruker AXS D8 DISCOVER ที่ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นทองแดง (Cu) และใช้ผลึก Ge (220) เป็นตัวทำรังสีเอกรงค์ เพื่อให้ได้ความยาวคลื่น $K\alpha_1$ อยู่ที่ 1.5406 \AA

เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะประกอบด้วยกัน 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์พร้อมตัวทำรังสีเอกรงค์ (X-ray source and monochromator) ฐานรองรับชิ้นงาน (Stage) ที่สามารถปรับได้ 3 แกนหมุน และตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-ray detector) ดังรูปที่ 3.2

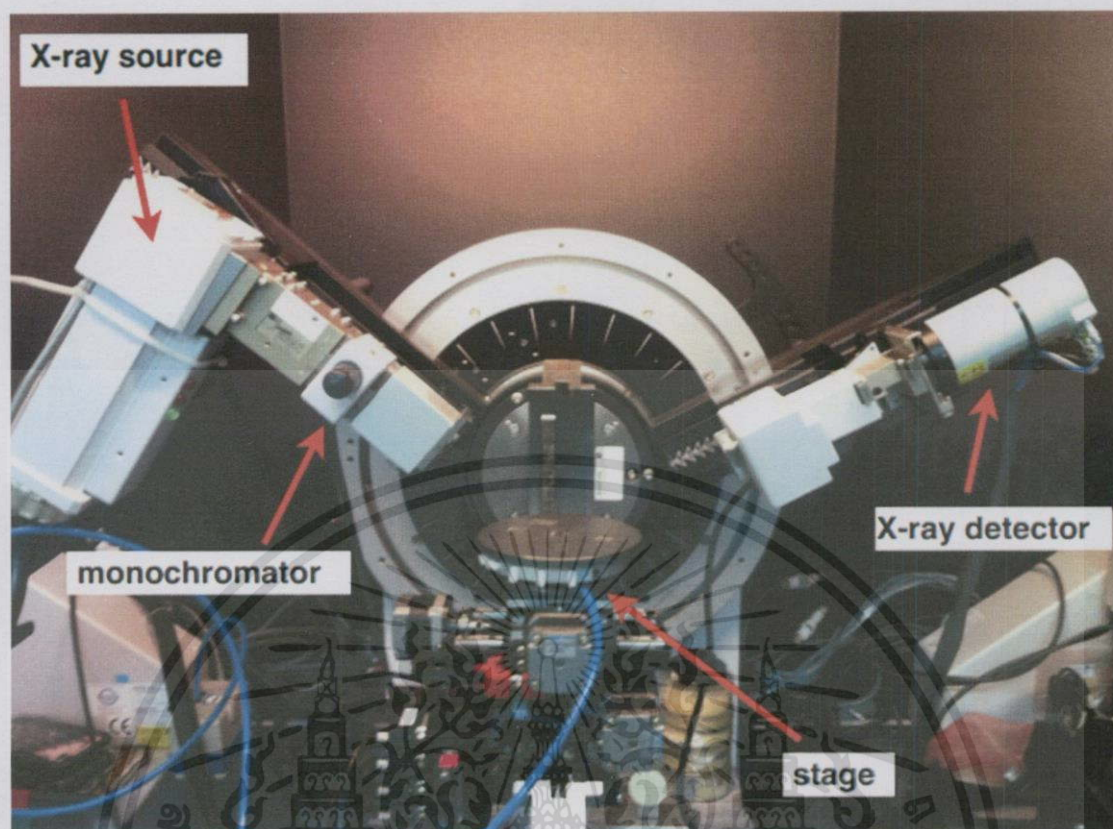
เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูงถูกใช้เพื่อทำการทดลองในการสแกนสองโหมดคือ

1. โหมดการสแกนแบบ $2\theta/\omega$ ($2\theta/\omega$ scan)

การสแกนโหมด $2\theta/\omega$ เป็นการสแกนโดยให้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์หมุนไปครั้งละ $\Delta\theta$ และตัวตรวจจับรังสีเอกซ์หมุนไปด้วยครั้งละ $\Delta(2\theta)$ ในขณะที่ตั้งตำแหน่งของระนาบที่ต้องการวัดเพื่อตรวจจับรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบภายในชิ้นงานให้ตรงกับเงื่อนไขของแบรกก์ ข้อมูลของการทดลองในโหมดนี้จะอยู่ในรูปมุมการเลี้ยวเบนและค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตรวจจับได้ในหน่วยครั้งต่อวินาที โหมดการสแกนแบบนี้มักใช้สำหรับการหาโครงสร้างผลึกของชิ้นงาน และการกระจายตัวของขนาดโครงสร้างผลึกโดยพิจารณาจากความกว้างของพีด (peak) การเลี้ยวเบน

2. โหมดการสแกนแบบแมปปิง (mapping scan)

การสแกนโหมดแมปปิงเป็นการรวมกันของสองโหมดแรกให้อยู่ในรูปแบบการสแกนสองมิติ โดยจะทำการเปลี่ยนทั้งค่ามุม 2θ และมุม ω ดังนั้นการสแกนในโหมดนี้ในแต่ละจุด จะได้ข้อมูลมาสามข้อมูล คือ ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ มุม 2θ และมุม ω ซึ่งจะถูกใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่ามุม 2θ และมุม ω



รูปที่ 3.2 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแฮกสูง (บริษัท Bruker รุ่น Bruker AXS D8 DISCOVER) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การหาค่าขนาดโครงสร้างผลึกของ InGaPn ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแฮกสูง

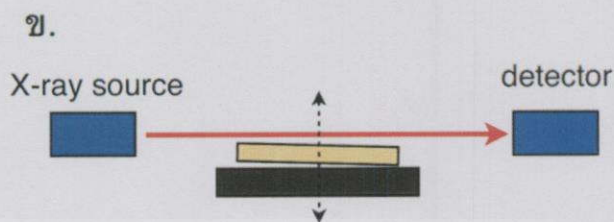
เนื่องจากการวางตัวของชิ้นงานนั้น ไม่ได้อยู่ในระนาบที่ตรงพอดี เพื่อเป็นการปรับระนาบให้ตรง เราจึงต้องทำการตั้งศูนย์ของเครื่องมือ (Zero setting) เสียก่อน

ขั้นตอนในการตั้งศูนย์ของเครื่องมือดังนี้

1. การวางชิ้นงานที่ฐานรองชิ้นงาน จากนั้นให้วางตำแหน่งให้แกนของแหล่งกำเนิดของรังสีเอกซ์ตรงกับตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 3.3 ก.

2. ทำการสแกนให้โหมคการสแกนในแกน z (z scan) เพื่อหาความสูงของชิ้นงาน โดยดูจากความสูงที่ทำให้ชิ้นงานขึ้นมาบังรังสีเอกซ์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 ข.

ข้อควรระวังเนื่องจากการทำสแกนในโหมคนี้ลำรังสีเอกซ์จะเดินทางเข้าสู่ตัวตรวจจับโดยตรงเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ตัวตรวจจับเสียหายเนื่องจากตรวจจับรังสีที่มีความเข้มข้นมากไป จึงจำเป็นต้องใช้ตัวดูดซับ (absorber) ที่มีค่าการดูดซับสูงสุด



รูปที่ 3.3 ก. การวางตัวของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ฐานรองชิ้นงาน และตัวตรวจจับ

ข. รูปจำลองการทำงานในโหมดการสแกนแบบ z

3. ทำการสแกนแบบ ω ที่ระนาบ (000) เพื่อหาแนวการวางตัวของชิ้นงานว่าชิ้นงานนั้นเอียงทำมุมเท่าไรกับฐานรองชิ้นงาน ดังที่แสดงในรูป 3.4



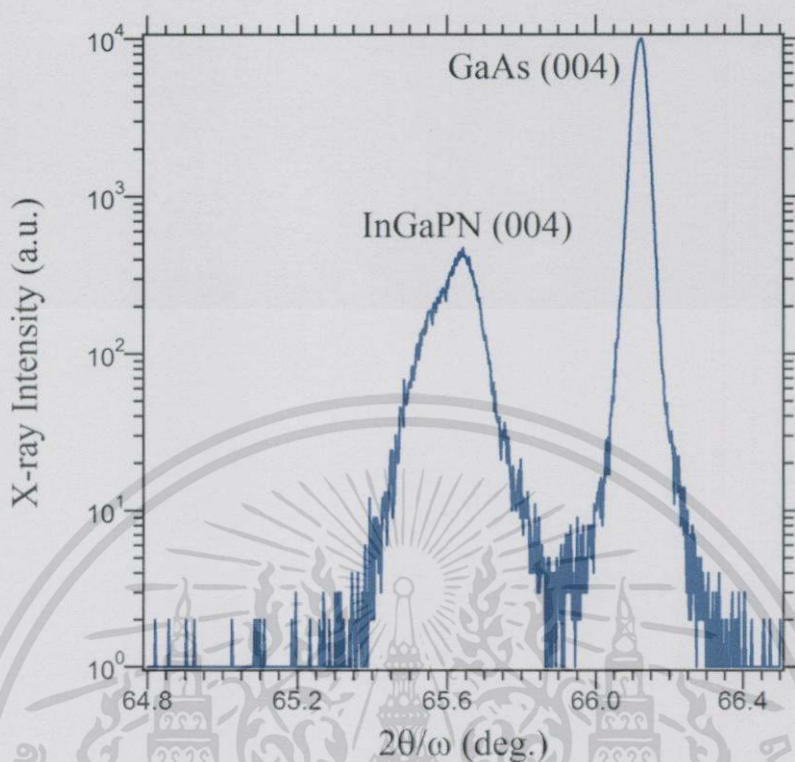
รูปที่ 3.4 รูปจำลองการทำงานในโหมดการสแกนแบบ ω ที่ระนาบ (000)

เนื่องจากชิ้นงาน InGaPN ที่ปลูกผลึกอยู่บน GaAs (001) นั้นถูกคาดว่าจะมีค่าความเครียดเกิดขึ้น ซึ่งทำให้ค่าขนาดโครงผลึกในแนวนอนและตั้งฉากจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นการวิเคราะห์ขนาดโครงผลึกจึงแบ่งเป็นสองส่วน คือ ขนาดโครงผลึกในแนวตั้งฉาก (a_n) และในแนวนอน (a_p)

3.3.1 การหาค่าขนาดโครงผลึกในแนวตั้งฉาก (a_n) ของ InGaPN

การหาค่าขนาดโครงผลึกในแนวตั้งฉากนั้นจะทำการทดลองด้วยโหมดการสแกนแบบ $2\theta/\omega$ ที่เกี่ยวข้องกับผลึกในการสะท้อนแบบสมมาตร ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกที่ระนาบ (004) ซึ่งจะได้ข้อมูลตามรูปภาพดังรูปที่ 3.5

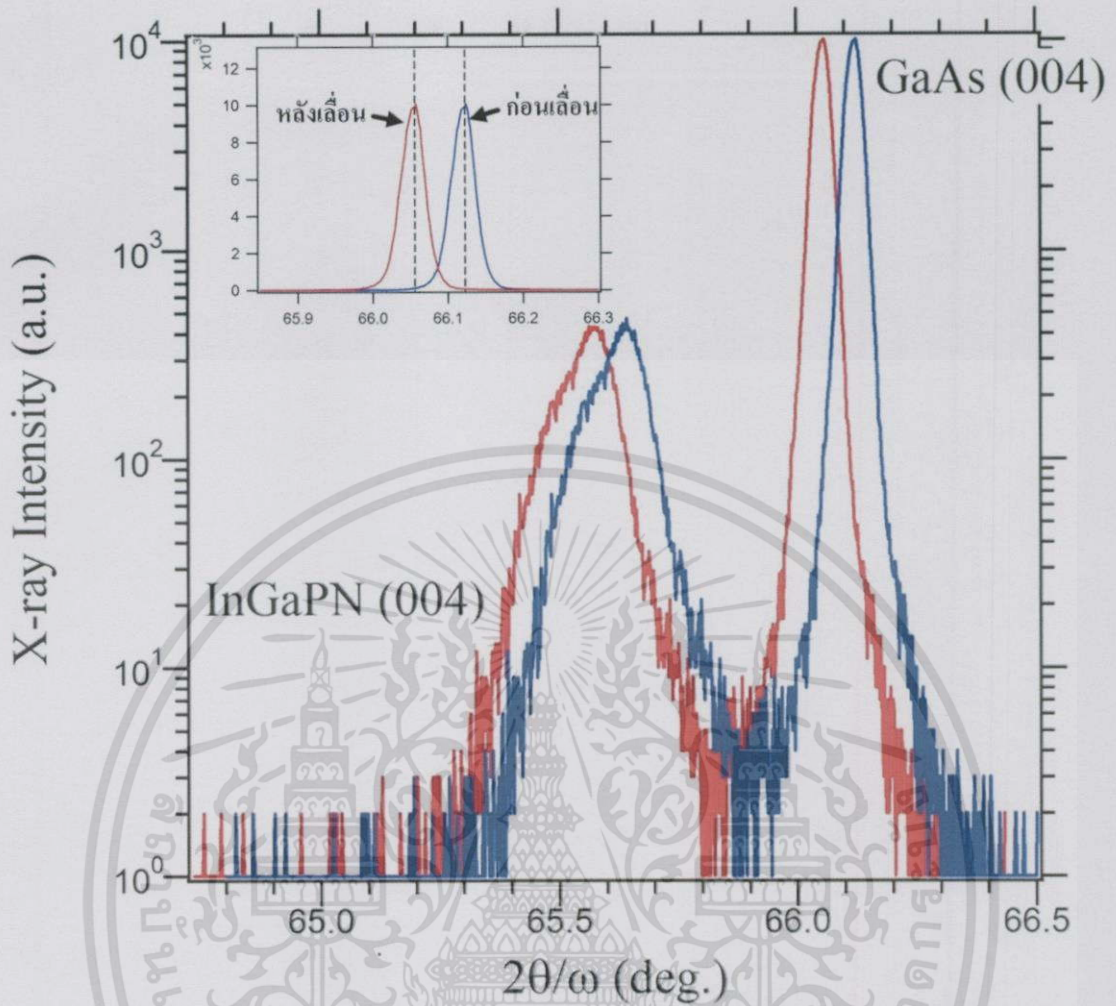
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 รูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม InGaPN และวัสดุฐานรอง GaAs ที่ระนาบ (004) ของชั้นงานที่มีปริมาณ DMHy เท่ากับ $300 \mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 30 วินาที

แม้ผ่านการตั้งศูนย์ของเครื่องแล้วก็ตาม แต่ก็ยังเป็นเพียงการปรับตามแนวด้วยสายตาของผู้ทดลองอยู่ดี ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุดจึงจำเป็นต้องอาศัยปรับแนวที่ได้จากการคำนวณเพื่อปรับตำแหน่งยอดสูงสุดของการเลี้ยวเบนจากวัสดุฐานรอง GaAs ระนาบ (004) ให้ตรงกับค่าที่ได้จากวัสดุฐานรอง GaAs ที่มีขนาดโครงผลึก 5.6535 \AA ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับโดยทั่วไป ดังรูปที่ 3.6 ก่อนแล้วจึงทำการจะทำการฟิต (Curve Fitting) เพื่อหาตำแหน่งที่ความเข้มสูงสุดของ InGaPN ที่สะท้อนจากระนาบ (004) โดยฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian's distribution) จากนั้นนำตำแหน่งที่ความเข้มสูงสุดของ InGaPN ไปคำนวณในสมการของแบรกก์ (สมการที่ 2.3) และสมการที่ 2.5 โดยแทนค่า $h=k=0$ และ $l=4$ จะได้ค่าของขนาดโครงผลึกในแนวตั้งฉาก (a_n) ออกมา

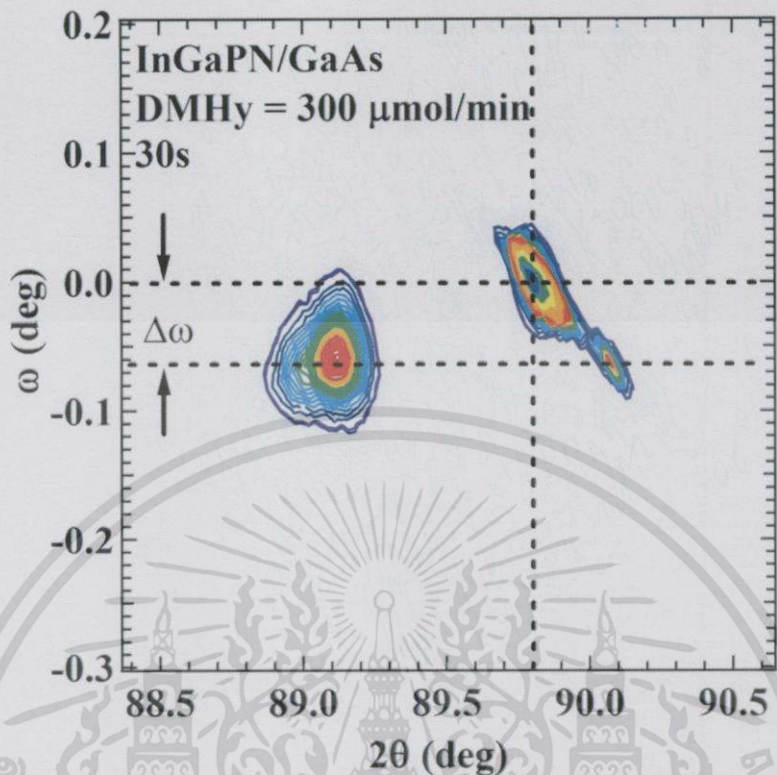
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงการเลื่อนตำแหน่ง (จากเส้นสีน้ำเงินเป็นเส้นสีแดง) ค่าสูงสุดของ GaAs ฐานะนาบ (004) ซึ่งงานที่มีปริมาณ DMHy เท่ากับ $300 \mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อทำการปรับข้อมูลก่อนการวิเคราะห์หาค่าแลคทิซพารามิเตอร์ในแนวตั้งฉาก

3.3.2 การหาค่าขนาดโครงสร้างผลึกในแนวขนาน (a_p) ของ InGaPN

การหาค่าขนาดโครงสร้างผลึกในแนวขนานนั้นต้องใช้ข้อมูลของค่าขนาดโครงสร้างผลึกในแนวตั้งฉากพร้อมกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูงโหมดแมปปิ้งที่วัดด้วยการเลี้ยวเบนแบบไม่สมมาตรที่ระนาบ (115) ที่จะได้ค่าเป็นผลต่างของระนาบเอียง (115) ระหว่างวัสดุฐานรอง GaAs และฟิล์ม InGaPN ($\Delta\theta$) ซึ่งจะได้ข้อมูลดังรูปที่ 3.7 หลังจากได้ข้อมูลมาแล้วเราก็ทำการหาค่าผลต่างของมุม θ เพื่อนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ 2.7 สำหรับการหาคำนวณหาขนาดโครงสร้างผลึกในแนวขนาน



รูปที่ 3.7 แสดงภาพของการเลี้ยวเบนในโหมดแมปิ้งที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (115) ของวัสดุฐานรอง GaAs และฟิล์ม InGaPN ของตัวอย่างที่มีปริมาณ DMHy เท่ากับ 300 μmol/min และอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 30 วินาที

3.4 การวิเคราะห์หาอัตราส่วนของ In และ N ใน InGaPN

การหาอัตราส่วนของ In และ N ในสารกึ่งตัวนำ InGaPN นั้น สามารถหาได้จากขนาดโครงผลึกแนวขนาน (a_p) และแนวตั้งฉาก(a_N) โดยสมการ

$$a_0 = \frac{2C_{12}a_p + C_{11}a_N}{2C_{12} + C_{11}} \tag{3.1}$$

โดย C_{11} และ C_{12} คือค่าคงที่การยืดหยุ่น (Elastic Constant) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดสารแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่การยืดหยุ่นของ GaP, GaN, InP และ InN [11]

สาร	C_{11} (10^{11} dyn/cm ²)	C_{12} (10^{11} dyn/cm ²)
GaP	14.12	6.253
GaN	2.93	1.59
InP	10.11	5.61
InN	1.87	1.25

ส่วนค่าคงที่ของการยืดหยุ่นของสารอัลลอยนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 ดังนี้

$$C_{12} = \frac{(1-x)[(1-y)a_{\text{GaP}} C_{12}^{\text{GaP}} + ya_{\text{GaN}} C_{12}^{\text{GaN}}] + x[(1-y)a_{\text{InP}} C_{12}^{\text{GaP}} + ya_{\text{InN}} C_{12}^{\text{GaN}}]}{a_0} \quad (3.2)$$

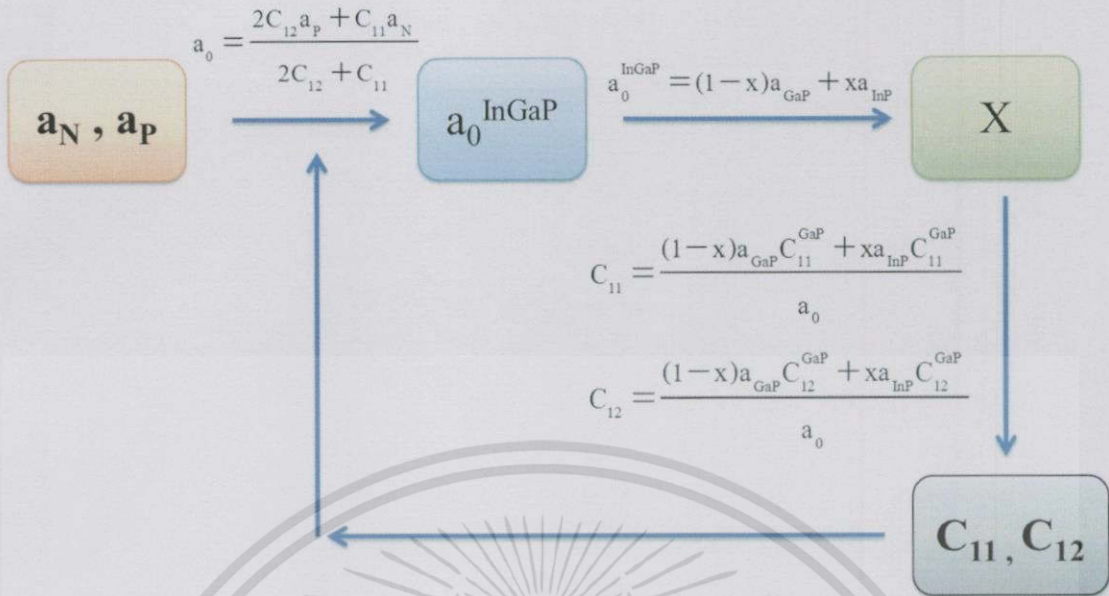
$$C_{11} = \frac{(1-x)[(1-y)a_{\text{GaP}} C_{11}^{\text{GaP}} + ya_{\text{GaN}} C_{11}^{\text{GaN}}] + x[(1-y)a_{\text{InP}} C_{11}^{\text{GaP}} + ya_{\text{InN}} C_{11}^{\text{GaN}}]}{a_0} \quad (3.3)$$

เมื่อเราได้ขนาดของโครงผลึกแล้วจึงทำการหาค่าอัตราส่วน In และ N จากสมการของเวกการ์ด

$$a_{\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{N}_y} = (1-x)[(1-y)a_{\text{GaP}} + ya_{\text{GaN}}] + x[(1-y)a_{\text{InP}} + ya_{\text{InN}}] \quad (3.4)$$

แต่เนื่องจากมีสองตัวแปรที่ต้องหาคือ ค่า x และ y ดังนั้นในการคำนวณจำเป็นต้องรู้ตัวแปรหนึ่งในสองตัวดังกล่าวก่อน ซึ่งในกรณีฟิล์มบาง InGaPN เราสามารถหาค่าอัตราส่วนของ In หรือค่า x ได้จากชั้นฟิล์ม InGaP ที่ปลูกภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

ขั้นตอนในการหาค่าของ x เริ่มจากใช้ตัวอย่างที่ไม่มีคาร์บอน DMHy หรือ ไม่มี N เจืออยู่นั้น ทำการทดลองด้วยเครื่อง HRXRD เพื่อให้หาค่าของ a_N และ a_P จากนั้นนำไปคำนวณด้วยสมการที่ 3.1 , 3.2 , 3.3 และ 3.4 ตามลำดับก่อนจะวนไปแทนค่าเรื่อยๆ คู่จนค่าต่างๆเข้าสู่ค่าคงที่ ซึ่งขั้นตอนต่างๆถูกแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนผังจำลองขั้นตอนการหาอัตราส่วน In ในชั้นฟิล์ม InGaP

3.5 การหาตำแหน่งของโหมดคลื่นในโครงสร้างผลึก GaP

การเกิดโหมดการสั่นระหว่างอะตอมในผลึกนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานของโฟตอนที่สะท้อนจากชั้นงานเทียบกับโฟตอนตกกระทบหรือเกิดผลต่างรามาน (Raman shift) การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโฟตอนนั้นมีรูปแบบที่คงตัวโดยจะขึ้นอยู่กับพันธะของสารประกอบภายในของผลึก ซึ่งสำหรับ GaP มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 โหมดการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมในผลึก GaP

โหมดการสั่น	รามานชิฟ (cm ⁻¹)
GaP TO	366 [15]
GaP LO	403.2 [15] , 404.9 [6]

3.5.1 การเลื่อนตำแหน่งของโหมดการสั่นในโครงสร้างผลึก In_xGa_{1-x}P

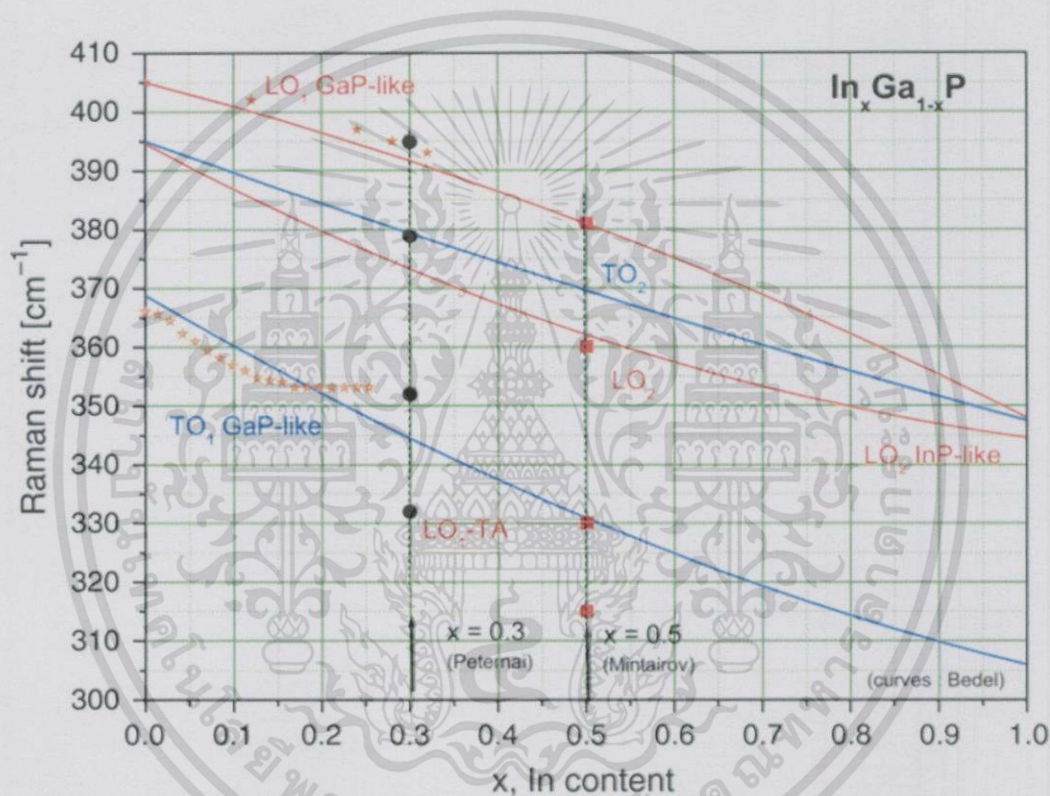
สารอัลลอย In_xGa_{1-x}P ที่มีการเปลี่ยนอัตราส่วนของ In (เปลี่ยนค่า x) จะเกิดการเลื่อนตำแหน่งของผลต่างรามาน การเลื่อนตำแหน่งของผลต่างรามานนั้นเกิดจากการเพิ่มขึ้นของพันธะระหว่าง In และ P (การลดลงของพันธะระหว่าง Ga และ P) จะทำให้เกิดความเครียดเฉพาะจุด (localize strain) ซึ่งส่งผลให้โหมดการสั่นเปลี่ยนแปลงไป โดยการเลื่อนของตำแหน่งของแต่ละโหมดการสั่นนั้นจะเป็นไปตามสมการที่ 3.6 และ 3.7 [6,15] และแสดงในรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta\omega_{\text{GaP-like LO}} = -38.97 \cdot x - 18.18 \cdot x^2 \tag{3.5}$$

$$\Delta\omega_{\text{InP-like LO}} = -80.36 \cdot x - 30.26 \cdot x^2 \tag{3.6}$$

เมื่อ x คืออัตราส่วนของ In ในฟิล์ม InGaP อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาค่า x ตามสมการที่ 3.6 และ 3.7 จำเป็นต้องสอบเทียบกับการวิเคราะห์หาค่า x ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง



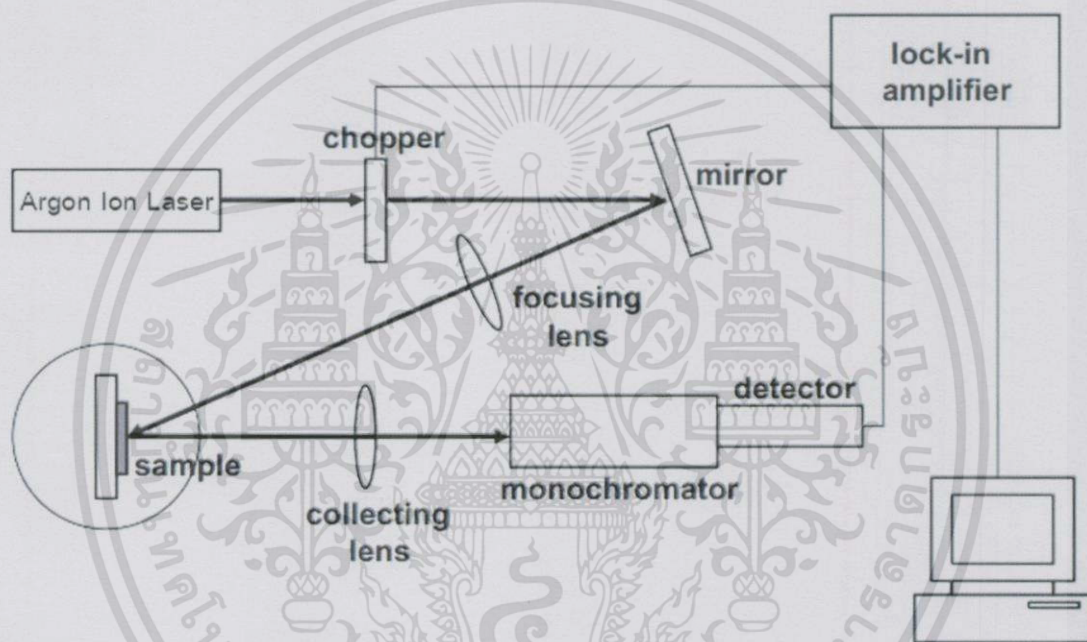
รูปที่ 3.9 การเลื่อนตำแหน่งของผลต่างรามานในโหมดการสั่นต่างๆในผลึก $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ เมื่อเปลี่ยนค่า x [15]

3.6 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม InGaPN

ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นการเปล่งแสงธรรมชาติจากวัสดุภายใต้การกระตุ้นเชิงแสง นั่นคือ เมื่อแสง (โฟตอน) ความถี่เดียว ซึ่งพลังงานไม่น้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งเป็นการคาดการณ์นั่นเองว่าคู่อิเล็กตรอนกับโฮล จะถูกผลิตขึ้นมาอย่างไรก็ตามสถานะกระตุ้นเป็นสถานะที่เสถียรของอิเล็กตรอนการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลจะส่งผลให้เกิดการเปล่งแสงโดยพลังงานส่วนเกินออกมาเราเรียกกระบวนการนี้ว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ ลักษณะของเส้นเอกสาร์นี้ เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมพลังงานสามารถใช้ในการตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับระดับพลังงาน เช่น ระดับช่องว่างแถบพลังงาน ระดับความไม่บริสุทธิ์ และระดับข้อบกพร่องที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ สมบัติเชิงแสงของ InGaPN ซึ่งตรวจสอบได้ด้วยเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโตรสโกปี ซึ่งการตรวจสอบสมบัติเชิงแสงนั้น ได้รับการดำเนินการ และความอนุเคราะห์จาก ห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) การจัดอุปกรณ์โฟโตลูมิเนสเซนส์แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยใช้ Argon Ion Laser ซึ่งถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงสีเดียว



รูปที่ 3.10 การจัดอุปกรณ์ภายในเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโตรสโกปี

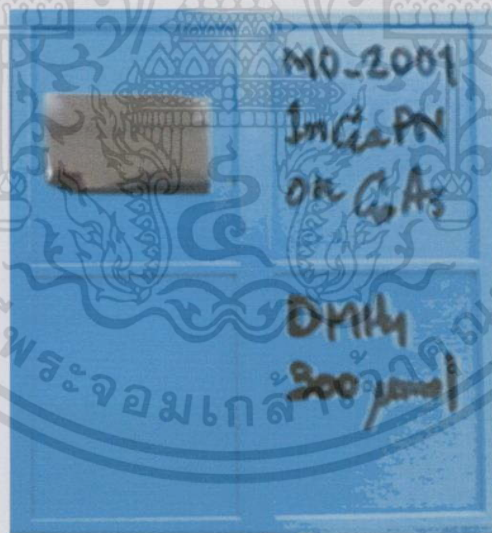
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

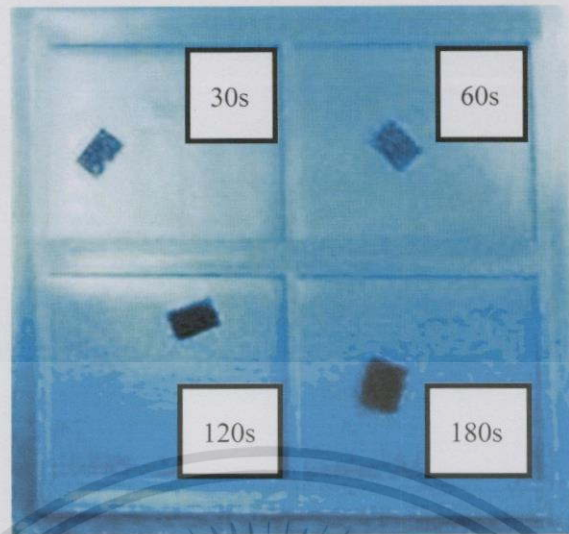
4.1 ลักษณะของชิ้นงาน InGaPN

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ InGaPN ที่ปลูกผลึกบนวัสดุฐานรอง GaAs ที่ระนาบ (001) ชิ้นงานทั้งหมดถูกปลูกด้วยเทคนิคเมทัลออร์แกนิกเฟสเอพิตอกซี (Metal-organic vapor phase epitaxy, MOVPE) และอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid thermal anneal : RTA) ซึ่งได้รับอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการของศาสตราจารย์ ดร.เคนทาโร โอนาเบะ ภาควิชาวัสดุขั้นสูง มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

ชิ้นงานชุดนี้ประกอบด้วยชิ้นงานที่เป็นผลึกฟิล์มบาง InGaPN บนวัสดุฐานรอง GaAs ซึ่งถูกปลูกบนระนาบ (001) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คงค่าความเข้มข้นของ TMIn ไว้ด้วยปริมาณร้อยละ 53 ของธาตุหมู่ 3 มีการปรับค่าความเข้มข้นของ DMHy 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงในเวลา 0, 30, 60, 120 และ 180 วินาทีรวมทั้งสิ้น 5 ชิ้นงาน



รูปที่ 4.1 รูปชิ้นงาน InGaPN ที่ As grown



รูปที่ 4.2 รูปชิ้นงาน InGaPN ที่อบด้วยความร้อนเป็นเวลา 30s, 60s, 120 s และ 180s

4.2 การตรวจสอบค่า x และ y ในฟิล์ม $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}_{1-y}\text{N}_y$

การตรวจสอบค่าของ x และ y ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบผ่านขนาดโครงสร้างผลึกของฟิล์ม InGaPN โดยใช้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแสงสูง (HRXRD) ในโหมดการวัด $2\theta/\omega$ ที่เลี้ยวเบนแบบสมมาตรในระนาบ (004) เพื่อหาค่าแลททิซพารามิเตอร์ในแนวตั้งฉากกับระนาบผิววัสดุฐานรอง และใช้โหมดการวัดแบบปิงที่เลี้ยวเบนแบบไม่สมมาตรในระนาบ (115) เพื่อหาแลททิซพารามิเตอร์ในแนวขนานกับระนาบผิววัสดุฐานรอง

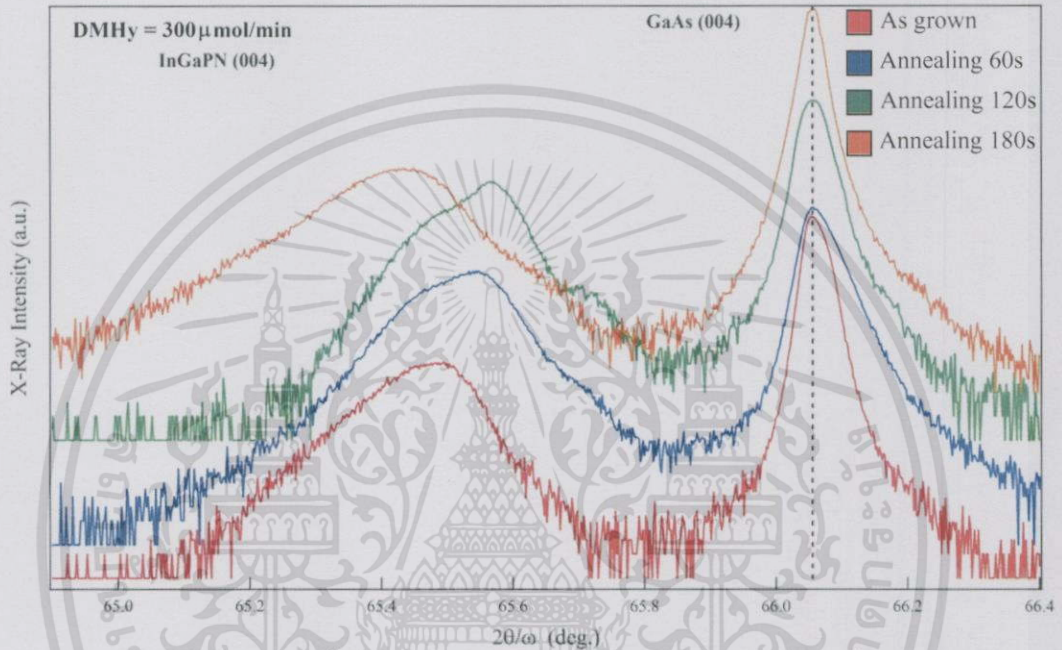
4.2.1 การหาขนาดโครงสร้างผลึกในแนวตั้งฉาก (a_{\perp})

จะทำการฟิต (Curve fitting) เพื่อหาค่าตำแหน่งที่ความเข้มสูงสุดของ InGaPN ที่สะท้อนจากระนาบ (004) โดยใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian's distribution) จากนั้นทำมุม $2\theta_{004}$ ที่ได้จากการฟิต ไปคำนวณโดยใช้สมการของแบรกก์ที่ระนาบ (004) (สมการที่ 2.3) ซึ่งจะได้ค่าของระยะห่างระหว่างระนาบ (004) หรือ d_{004} และจากข้อสันนิษฐานว่าแลททิซพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึก InGaPN จะถูกทำให้เปลี่ยนค่าไปเนื่องจากความเครียดที่เกิดขึ้น จึงใช้สมการที่ 2.5 ซึ่งเป็นของสมการที่ใช้อธิบายโครงสร้างแบบเทตระโกนอล มาเพื่อใช้หาค่าแลททิซพารามิเตอร์ในแนวตั้งฉากของผลึก InGaPN ได้ดังตารางที่ 4.1

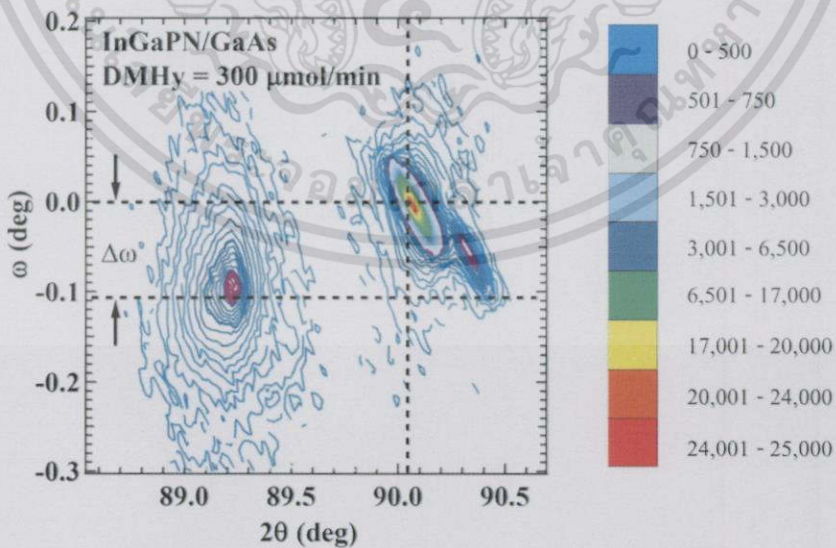
เมื่อได้ค่าขนาดโครงสร้างผลึกในแนวตั้งฉากแล้วเรานำค่านั้นมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าแลททิซพารามิเตอร์ในแนวขนาน

4.2.2. การหาค่าขนาดโครงสร้างผลึกในแนวขนาน (a_p)

การคำนวณต้องใช้ค่าขนาดโครงสร้างผลึกในแนวตั้งฉากใช้ร่วมกับค่า $\Delta\omega$ ที่ได้มาจากการตรวจวัดในโหมดแมปปิง มาคำนวณด้วยสมการที่ 2.7 เพื่อหาขนาดโครงสร้างผลึกในแนวขนาน ซึ่งแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการอบมากขึ้น ทำให้ค่า $\Delta\omega$ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น



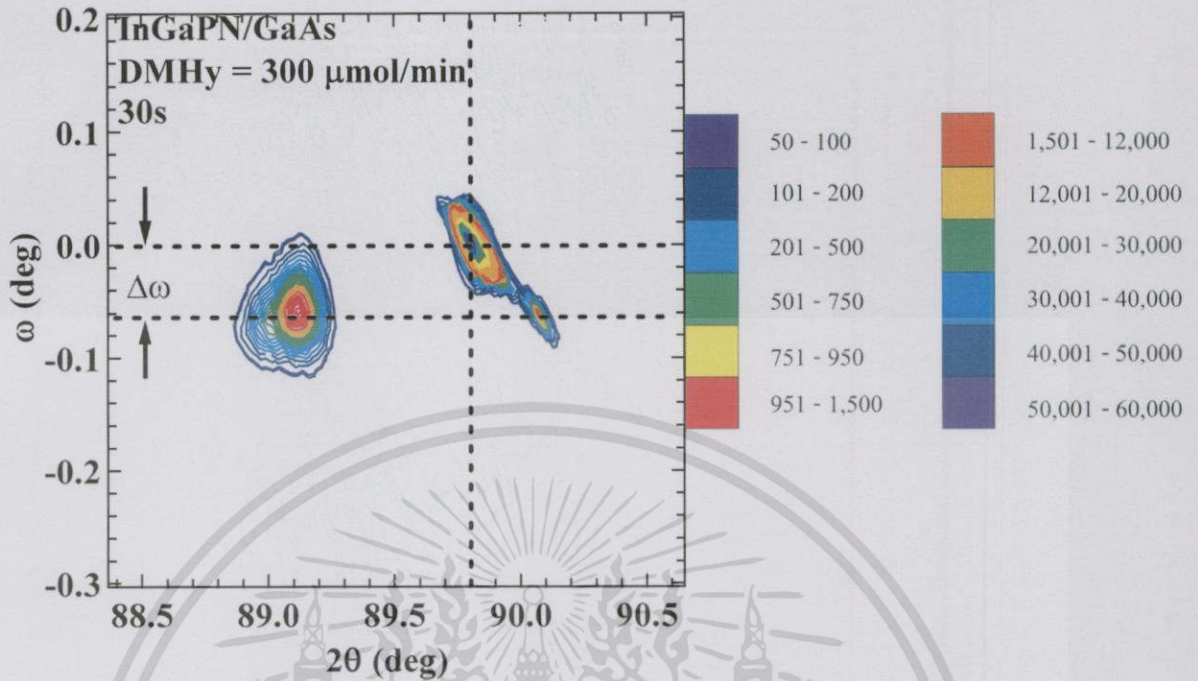
รูปที่ 4.3 รูปการเลี้ยวเบนและตำแหน่งของมุม $2\theta_{004}$ ของแต่ละชิ้นงาน



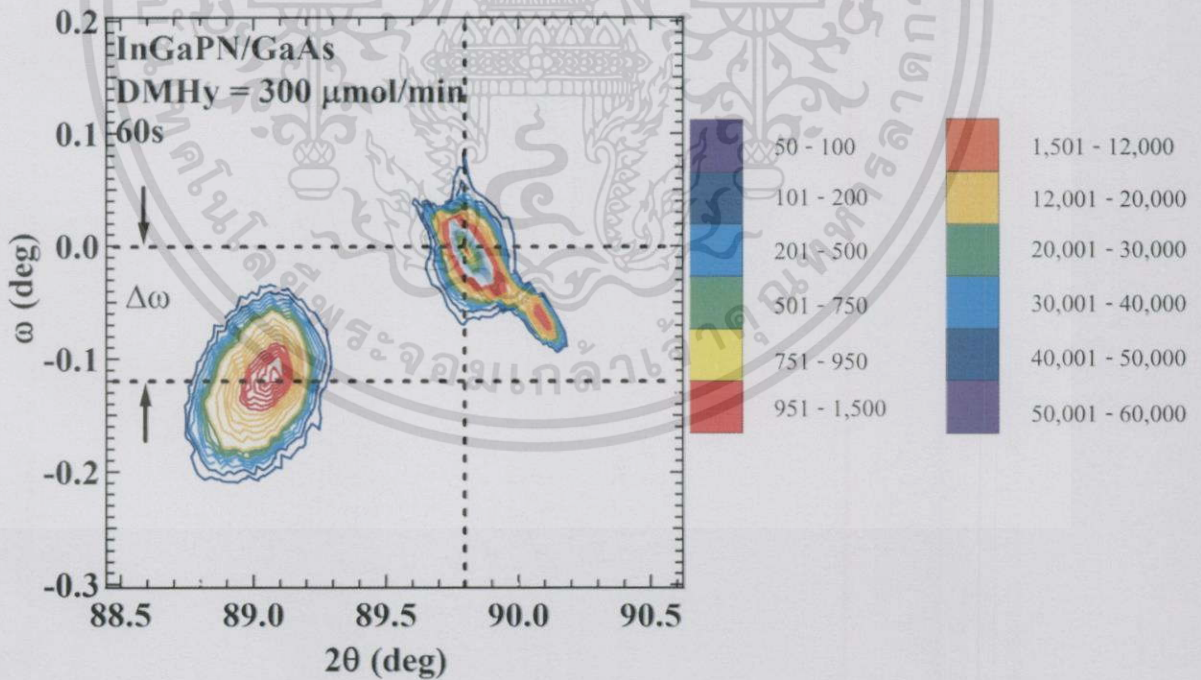
รูปที่ 4.4 รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs(001)

ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol/min}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

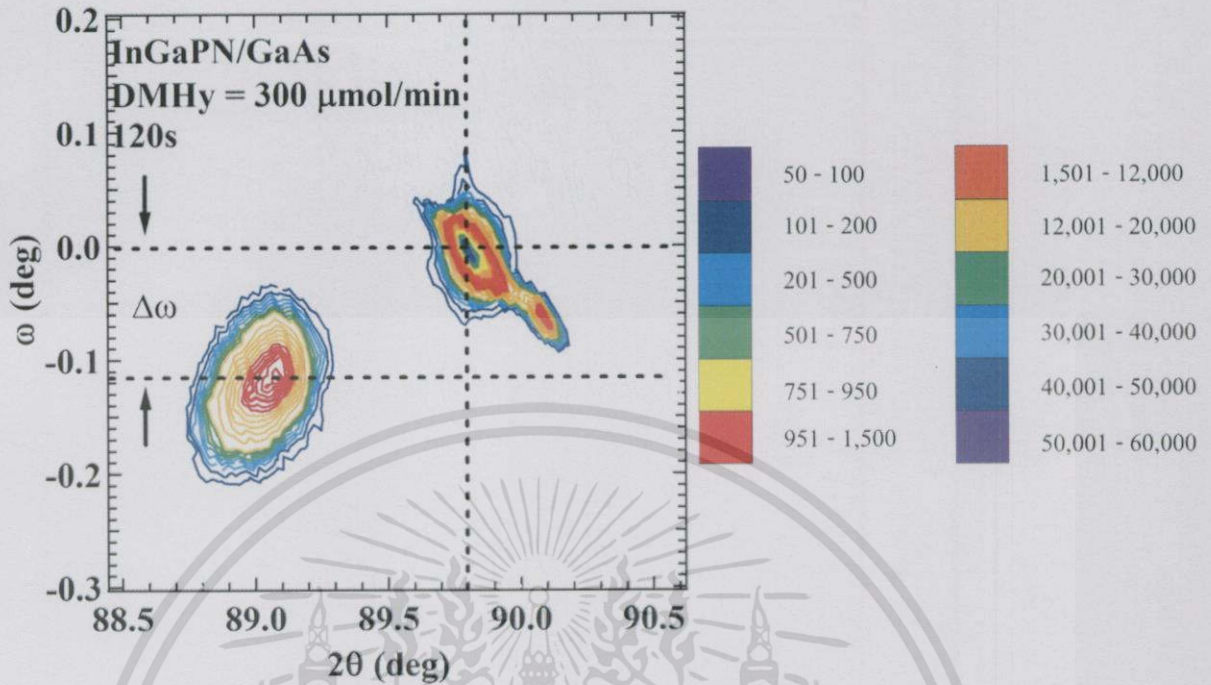


รูปที่ 4.5 รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs(001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อน 30s

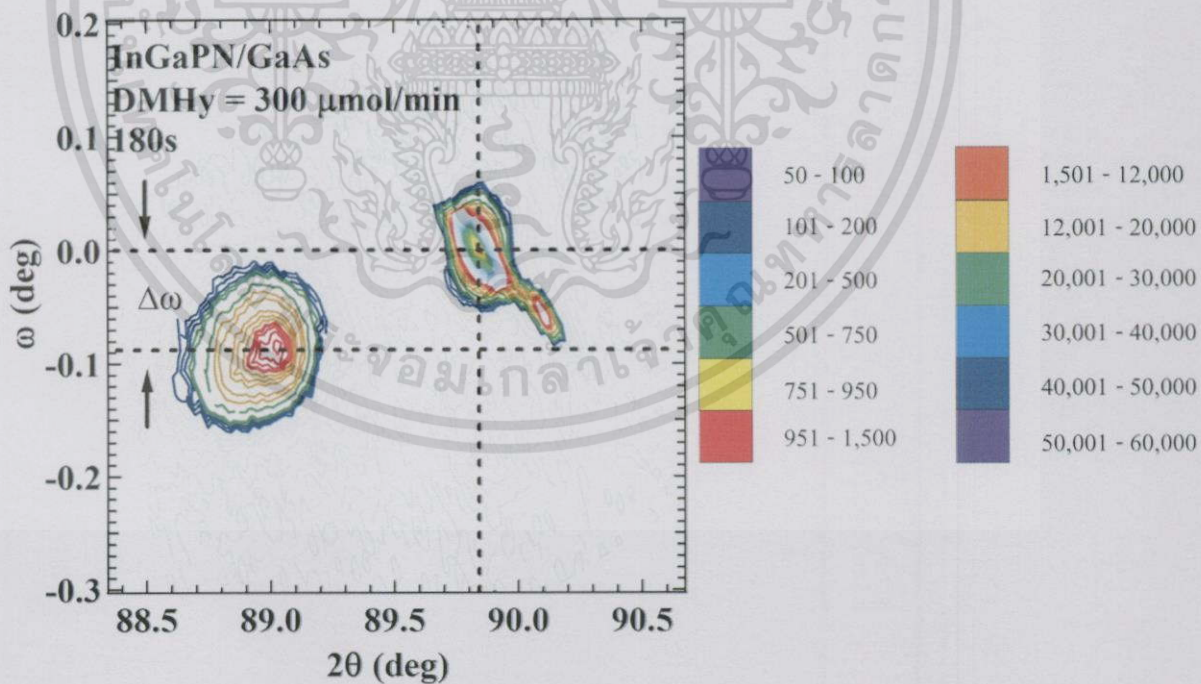


รูปที่ 4.6 รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs(001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อน 60s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs(001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol/min}$ และอบด้วยความร้อน 120s



รูปที่ 4.8 รูปการเลี้ยวเบนในโหมดการสแกนแบบ mapping ของ InGaPN/GaAs(001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol/min}$ และอบด้วยความร้อน 180s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดโครงสร้างผลึกของตัวอย่างของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกัน

ตัวอย่าง	RTA (s)	$2\theta_{004}$ (องศา)	a_N (\AA)	$\Delta\omega_{115}$ (องศา)	a_p (\AA)
1	As grown	65.495	5.695	-0.1027	5.656
2	30 s	65.643	5.683	-0.06378	5.659
3	60 s	65.551	5.690	-0.077527	5.661
4	120 s	65.611	5.686	-0.127383	5.638
5	180 s	65.455	5.698	-0.084468	5.666

การคำนวณหาปริมาณของ In และ N ในสารกึ่งตัวนำ InGaPN นั้น สามารถหาได้จากขนาดโครงสร้างผลึกแนวขนาน (a_p) และแนวตั้งฉาก (a_N) โดยสมการที่ 3.1 จากนั้นทำตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.5 ซึ่งได้ค่า x (สัดส่วนของ In) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดโครงสร้างผลึก ค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าความไม่เท่ากัน (Lattice mismatch) ปริมาณอินเดียม และไนโตรเจน ของตัวอย่างของ InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกัน

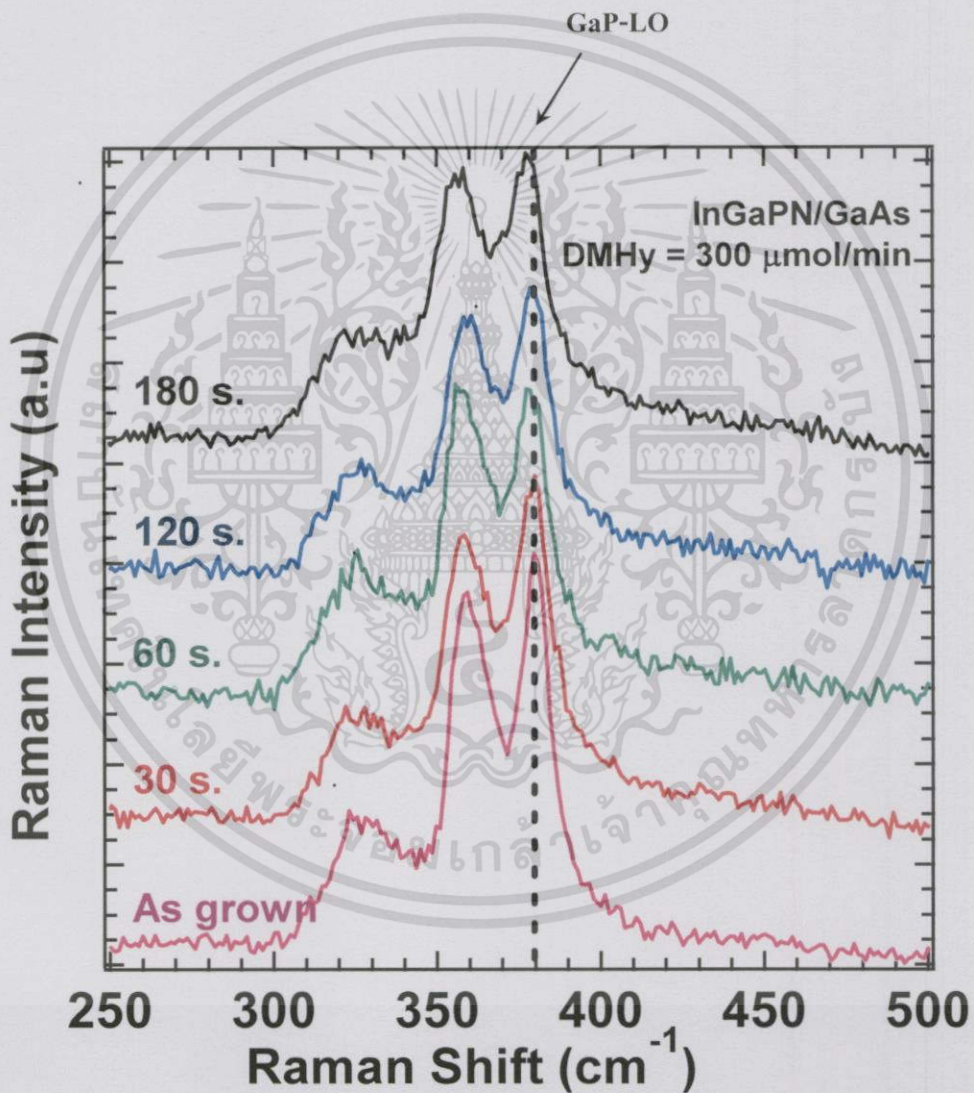
ตัวอย่าง	RTA (s)	a_N (\AA)	a_p (\AA)	a_0 (\AA)	Lattice mismatch (%)	% In (x)	% N (y)
1	As grown	5.695	5.656	5.675	0.39	56.624	0.78
2	30 s	5.683	5.659	5.671	0.32	56.624	1.68
3	60 s	5.690	5.661	5.676	0.40	56.624	1.19
4	120 s	5.686	5.638	5.662	0.15	56.624	2.70
5	180 s	5.698	5.666	5.682	0.51	56.624	0.53

เพื่อเป็นการตรวจสอบข้อสันนิษฐานว่าปริมาณ In ในผลึก InGaPN คงที่เมื่อเวลาในการอบด้วยความร้อน (RTA) หรือไม่ เราจึงทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน โดยพิจารณาโหมดการสั่นของพันธะ GaP ซึ่งจะบ่งชี้ถึงปริมาณของ In ในฟิล์ม InGaPN โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 โหมดการสั่นของพันธะ In-P และ Ga-P ในฟิล์ม InGaPN

การกระเจิงแบบรามานทำการทดลองด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโคปที่เลือกใช้ความยาวคลื่นในการกระตุ้นโฟตอนที่ 514.5 nm ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 ข้อมูลของทั้งสองชุดแสดงแนวโน้มเดียวกัน คือ พีคของ GaP-LO นั้นมีการเลื่อนตำแหน่งไปยังผลต่างรามาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของพันธะ In นั้นมีจำนวนใหญ่ขึ้น จึงทำให้การคำนวณปริมาณ In ในหัวข้อ 4.1.2 นั้นมีความผิดพลาด เพื่อให้การหาค่าปริมาณ In นั้นถูกต้องมากขึ้น เราจึงทำการคำนวณหาค่าปริมาณ In จากการเลื่อนตำแหน่งของพีค GaP-LO ตามสมการที่ 3.5 ซึ่งถูกแสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.9 ข้อมูลจากเทคนิคการกระเจิงแบบรามานของชั้นงาน InGaPN/GaAs (001) ที่มีค่า [DMHy] = 300 $\mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ปริมาณ In ที่คำนวณจากข้อมูลเทคนิคการระเหิดแบบรามาาน

ตัวอย่าง	RTA (s)	GaP like LO (cm^{-1})	% In (x)
1	As grown	379.48	54.8
2	30 s	378.83	56.4
3	60 s	376.83	58.9
4	120 s	377.63	56.7
5	180 s	378.43	56.3

ปริมาณอินเดียมที่คำนวณได้จากเทคนิคการระเหิดแบบรามาานนั้น มีค่าต่างกับค่าที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูงมาก ดังนั้นการแก้ปัญหาจากสมการของเวอร์การ์คั้นนั้น จึงสามารถหาปริมาณในโตรเจนที่ถูกต้องได้ เมื่อเรารู้ค่าปริมาณอินเดียม

ตารางที่ 4.4 ปริมาณ In และ N ที่คำนวณจากข้อมูลเทคนิคการระเหิดแบบรามาานร่วมกับเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง

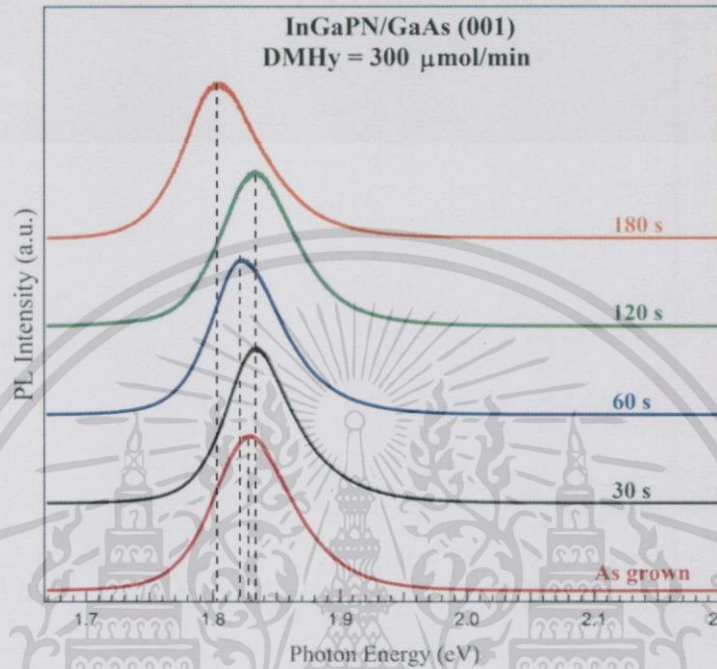
ตัวอย่าง	RTA (s)	% In (x)	% N (y)
1	As grown	54.8	0.39
2	30 s	56.4	1.57
3	60 s	57.1	1.41
4	120 s	56.7	1.55
5	180 s	56.3	0.40

4.3 การตรวจสอบสมบัติเชิงแสงของ InGaPN

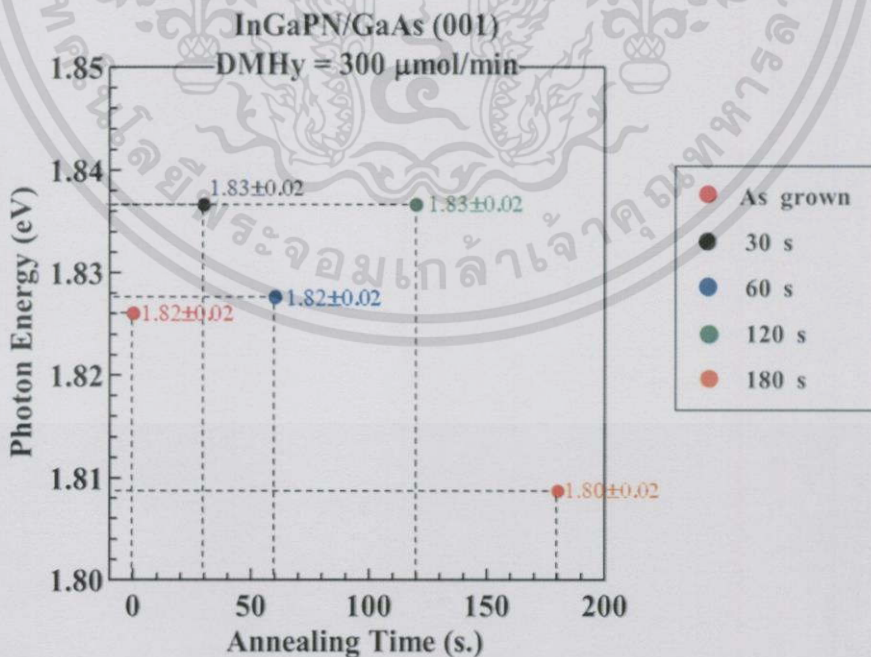
การตรวจสอบสมบัติเชิงแสงนั้น คือการตรวจสอบค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN ด้วยเครื่องโฟโตลูมิเนสเซนส์ จะเป็นการศึกษาช่องว่างแถบพลังงานผ่านหลักการคายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นออกมาในรูปโฟตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 แสดงความเข้มแสงที่เปล่งออกมาในรูปแบบพลังงานของโฟตอน โดยเราวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานจากตำแหน่งพีคสูงสุดที่วัดได้ของแต่ละชั้นงานแสดงดังตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าไม่คงที่



รูปที่ 4.10 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN ที่ตรวจสอบได้จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์

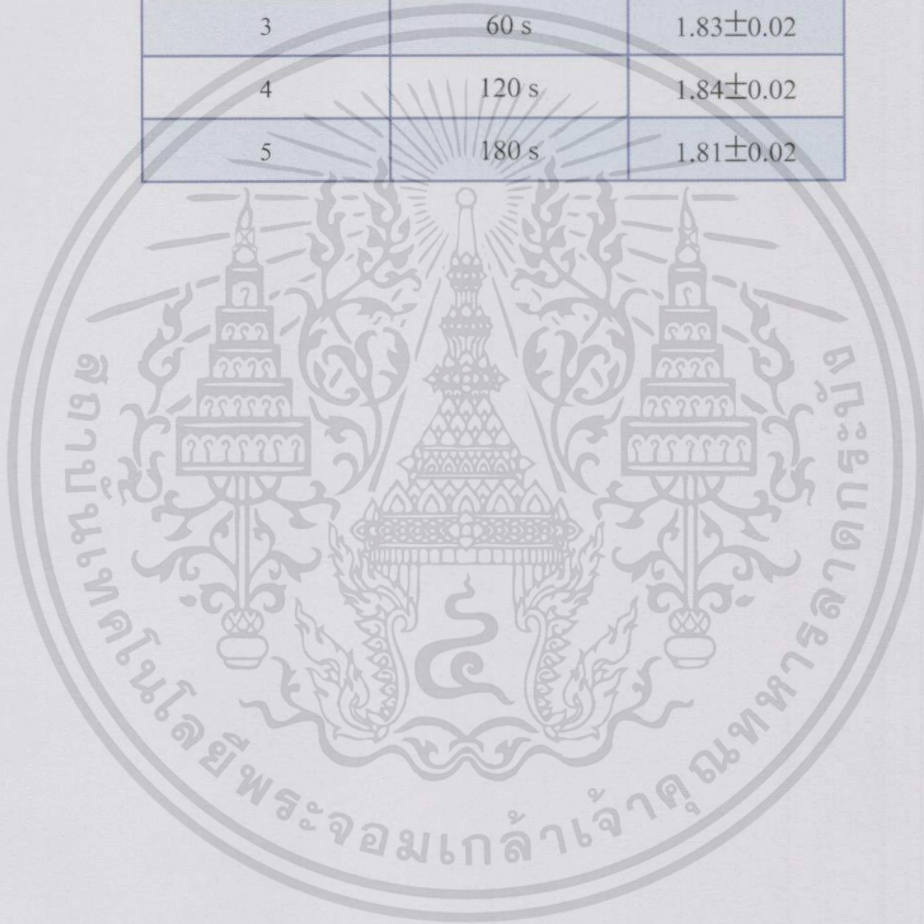


รูปที่ 4.11 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ InGaPN ที่ตรวจสอบได้จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์ กับเวลาในการอบด้วยความ (RTA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม InGaPN ของชิ้นงานที่อบด้วยความร้อน (RTA) เป็นเวลาต่างกัน

ตัวอย่าง	RTA (s)	E_g (eV)
1	As grown	1.83 ± 0.02
2	30 s	1.84 ± 0.02
3	60 s	1.83 ± 0.02
4	120 s	1.84 ± 0.02
5	180 s	1.81 ± 0.02



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการงานวิทยาศาสตร์นี้ ได้ศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของ InGaPN โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง และเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน ศึกษาสมบัติเชิงแสงของ InGaPN โดยใช้เทคนิคการเปล่งแสงและศึกษาถึงผลการอบด้วยความร้อนต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและเชิงแสง ของฟิล์ม InGaPN ที่ปลูกบนผลึก GaAs ระนาบ (001) โดยให้สารตั้งต้น DMHy เท่ากับ $300 \mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกันคือ 30 , 60 , 120 และ 180 วินาที

จากการศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์ม InGaPN ที่ปลูกบนผลึก GaAs ระนาบ (001) โดยให้สารตั้งต้น DMHy เท่ากับ $300 \mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกันคือ 30 , 60 , 120 และ 180 วินาที พบว่า ค่าคงที่โครงสร้างผลึกนั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอินเดียมและปริมาณไนโตรเจน ที่ได้จากการคำนวณหาข้อมูลเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง และข้อมูลการกระเจิงแบบรามานร่วมกัน โดยปริมาณอินเดียมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณไนโตรเจนนั้นมีจำนวนลดลง จากเดิม เมื่อเพิ่มเวลาในการอบด้วยความร้อนให้มากขึ้น

จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์ม InGaPN ที่ปลูกบนผลึก GaAs ระนาบ (001) โดยให้สารตั้งต้น DMHy เท่ากับ $300 \mu\text{mol}/\text{min}$ และอบด้วยความร้อนเป็นเวลาต่างกันคือ 30 , 60 , 120 และ 180 วินาที พบที่เวลาการอบด้วยความร้อน 180 วินาที พบว่า มีขนาดโครงสร้างผลึกลดลง จาก $1.82 \pm 0.02 \text{ eV}$ เป็น $1.80 \pm 0.02 \text{ eV}$

และจากข้อมูลที่ได้ศึกษาทั้งสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงนั้น สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มเวลาในการอบด้วยความร้อนนั้น ทำให้ปริมาณไนโตรเจนภายในโครงสร้าง InGaPN ลดลง อยู่ในช่วงการดูดกลืนแสงของชั้น Top cell ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multi junction Solar cells

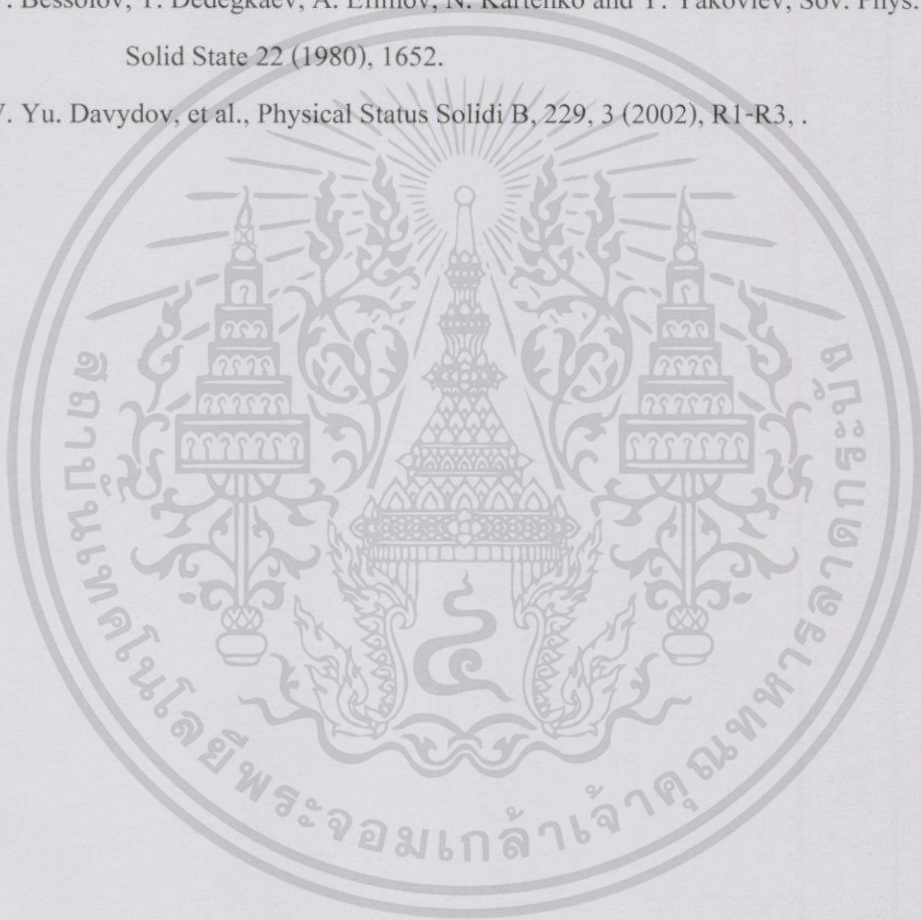
ซึ่งจากการศึกษาในโครงการงานวิทยาศาสตร์นี้ ทำให้ทราบเงื่อนไขที่ทำให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ที่ช่วงประมาณ 1.8 eV ที่เป็นช่วงพลังงานที่ทำให้ได้ค่าดูดกลืนพลังงานจากแสงอาทิตย์สูงสุด ซึ่งเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารอ้างอิง

- [1] คารศ แก้วเกตุ. 2549. การปลูกผลึกโดยวิธีเอ็มโอวีพีอี และการหาลักษณะเฉพาะของสารกึ่งตัวนำ III-(III)-V-ไนไตรด์เจือจาง : InGaPNปลูกผลึกบน GaAs. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์คุณวุฒิปริญญาตรี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2555.
- [2] สกฤตธรรม เสนาะพิมพ์, ดร. ผลการอบด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วของ InGaPNที่ปลูกผลึกลงบน GaPด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเวเปอร์เฟสเอพิแทกซี. *Journal of Crystal Growth* 298 (2007), 150-153.
- [3] E. Bedel, R. Carles, G. Landaet J. B. Renucci. *Revue de Physique Applique* 19 (1984), 17.
- [4] F. Nakajima, W. Ono, S. Kuboya, R. Katayama, K. Onabe, J. *Crystal Growth* 298 (2007) 103.
- [5] G. Giesecke, H. Pfister, *Acta Crystallogr.* 11 (1958), 369.
- [6] H. Lee, D. Biswas, M.V. Klein, H. Morkoc, D.E. Aspen, B.D. Choe, J. Kim and C.O. Griffiths, *J. Appl. Phys.* 75 (1994), 5040.
- [7] H. Nagai, *J. Appl. Phys.* 45 (1974), 3789.
- [8] H.P. Xin, C. W. Tu, *Appl. Phys. Lett.* 77 (2000) 2180.
- [9] H.P. Xin, R.J. Welty, Y.G. Hong, C.W. Tu, *J. Crystal Growth* 227-228 (2001) 558
- [10] I. Akasaki, H. Amano, *Jpn. J. Appl. Phys.* 36 (1997), 5393.
- [11] *Inorganic Materials*, Vol. 34, No. 7, 1998, pp. 691–694. Translated from *Neorganicheskie Materialy*, Vol. 34, No. 7, 1998, pp. 833–837
- [12] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan, *J. Appl. Phys.* 89 (2001), 5815
- [13] K. Ikuta, Y. Inoue, and O. Takai, *Thin Solid Films* 334 (1998), 49.
- [14] Logothetidis S, Petals J, Cardona M and Moustakes TD, *Phys.Rev.B* 50 (1994), 18017
- [15] L. Peternai, J. Kova, G. Irmer, S. Hasenöhrl, J. Nova and R. Srnánek. *Microelectronics J.* 37 (2006), 487.
- [16] M. B. Panish and H. C. Casey, *J. Appl. Phys.* 40 (1969), 163
- [17] M. Fischetti, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 38 no. 3 (1991), 634.
- [18] O. Maida, H. Miyatake, T. Teraji, and T. Ito. *Diamond & Related Materials* 17 (2008), 435.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] Rapid Thermal Annealing, Available : en.wikipedia.org/wiki/Rapid_thermal_processing
- [20] R.J. Nelson, N. Holonyak Jr., Solid State Commun. 20 (1976), 549.
- [21] S. Adachi, Physical Properties of III-V Semiconductor Compounds. Wiley, (1992).
- [22] Streetman, Ben G, Sanjay Banerjee . Solid State electronic Devices (5th ed.). New Jersey: Prentice Hall. (2000) p. 524.
- [23] T. L. Tansley and C. P. Foley, J. Appl. Phys. 59 (1986), 3241.
- [24] T. Yodo, M. Tamura, M. Lopez, and Y. Kajikawa. J. Appl. Phys. 76 (1994), 7630.
- [25] V. Bessolov, T. Dedegkaev, A. Efimov, N. Kartenko and Y. Yakovlev, Sov. Phys. Solid State 22 (1980), 1652.
- [26] V. Yu. Davydov, et al., Physical Status Solidi B, 229, 3 (2002), R1-R3, .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

