

ผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาต่อสมบัติเชิงโครงสร้างที่มีต่อ
ฟิล์มอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์

Effect on structural properties of gamma irradiations
on InGaAsN films

พรสิริ วนรัฐกาล

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
ปีการศึกษา 2560

ชื่อเรื่อง	ผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาต่อสมบัติเชิงโครงสร้างที่มีต่อฟิล์มอินเดียม แกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์
ผู้วิจัย	พรสิริ วนรัฐกาล
สถาบัน	มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
ปีที่พิมพ์	2563
สถานที่พิมพ์	มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
แหล่งที่เก็บรายงานฉบับสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
จำนวนหน้างานวิจัย	48 หน้า
คำสำคัญ	อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์ การฉายรังสี รังสีแกมมา ค่าคงที่โครงสร้างผลึก เท่ากัน แอนติเฟสโตเมน
ลิขสิทธิ์	มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์ ได้รับความสนใจเพื่อการผลิตเป็นวัสดุชั้น
ดูดกลืนที่สามของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายรอยต่อ มีความเหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะต่าง ๆ
โดยเฉพาะการใช้งานในอวกาศ สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์
ปลูกแบบค่าคงที่โครงสร้างผลึกเท่ากันกับวัสดุฐานรองเจอร์มาเนียมและฉายรังสีแกมมาถูกนำมาตรวจสอบ
ซึ่งฟิล์มบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์ถูกฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณการดูดกลืน 0 0.5 1.0
1.5 และ 2.0 เมกะเกรย์ การฉายรังสีแกมมาอาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพต่อ
ฟิล์มบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์

ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง
กราดชนิดฟิลด์อิมิสชันแสดงโดเมนระดับไมครอนจำนวนมากบนพื้นผิวแสดงถึงแอนติเฟสโตเมน ค่า
ความขรุขระแบบค่าเฉลี่ยยกกำลังสองมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.0 เมกะ
เกรย์ ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนกำลังแยกสูงและการกระเจิงแบบรามานแสดงให้เห็น
ถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนโตรเจนและการเกิดความผ่อนคลายในชั้นฟิล์มอินเดียมแกลเลียม
อาร์เซไนต์ไนไตรด์หลังจากที่ได้รับการฉายรังสีแกมมา ภาพภาคตัดขวางในโหมดพื้นมีดจากกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านยืนยันว่าพบความหนาแน่นของแอนติเฟสโตเมนปริมาณมาก

บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบัฟเฟอร์แกเลียมอาร์เซไนด์และวัสดุฐานรองเจอร์มาเนียมส่งต่อมายังบริเวณชั้นฟิล์มอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ไนไตรด์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ไนไตรด์เป็นผลมาจากการฉายรังสีแกมมา



Research Title Effect on structural properties of gamma irradiations on
InGaAsN films

Researcher(s) Pornsiri Wanarattikan
Institution Huachiew Chalermprakiet University
Year of Publication 2020
Publisher Huachiew Chalermprakiet University
Sources Huachiew Chalermprakiet University
No. of Pages 48 pages
Keywords InGaAsN, Irradiation, Gamma-ray, Lattice-matched, Antiphase domain
Copyright Huachiew Chalermprakiet University

Abstract

The InGaAsN films were proposed to be the third absorber layer in multijunction solar cell which used for advanced space application. The effect of gamma-ray irradiation on the structural properties of InGaAsN grown under the lattice-matching condition with Ge (001) substrate were investigated. The InGaAsN films were irradiated by gamma rays with irradiation strength of 0, 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 MGy. This irradiation cause damage and degradation of the InGaAsN films.

Atomic force microscopy and field emission scanning electron microscopy results showed a lot of submicron-sized domains on surface morphologies which referred to antiphase domains (APDs). Root mean square roughness was decreased in samples exposed to an irradiation strength above 1.0 MGy. The high-resolution x-ray diffraction and Raman scattering results indicated an increase in N incorporation and strain relaxation after irradiation. Cross-sectional dark-field TEM images confirmed that a high density of APDs clearly shows at the interface of GaAs and Ge through the

InGaAsN layers. Based on experimental measurements, the main cause of structural properties change in the InGaAsN films were induced by gamma-ray irradiation.



คำนำ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาที่มีต่อสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ไนไตรด์ สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ได้รับความสนใจเพื่อการผลิตเป็นวัสดุชั้นดูดกลืนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายรอยต่อและถูกนำไปใช้บนสถานีอวกาศและดาวเทียม ดังนั้นอาจจะถูกทำลายโดยรังสี และอนุภาคต่าง ๆ ที่มีพลังงานสูง จึงเป็นที่มาของการศึกษางานวิจัยฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ผู้ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัย และงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร. สกฤตธรรม เสนาะพิมพ์ ที่ปรึกษางานวิจัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือจนกระทั่งลุล่วงไปได้ และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาวิณี กลางท่าไค้ ที่ให้คำแนะนำในส่วนของการทำงานทดลองครั้งนี้

พรสิริ วนรัฎฐิการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
คำนำ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
นิยามศัพท์เฉพาะ	2
สมมติฐานของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
กรอบแนวคิดในการวิจัย	6
รังสีแกมมา	7
ปริมาณการดูดกลืนรังสี	8
อันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อวัสดุสารกึ่งตัวนำ	8
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	9
โครงสร้างฟิล์มบาง InGaAsN	9
เงื่อนไขการฉายรังสีแกมมา	10
หลักการของเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบและการทดลอง	10
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	22
ผลของการฉายรังสีแกมมาที่มีผลต่อพื้นผิวและชั้นฟิล์มของ InGaAsN	22
ผลการฉายรังสีแกมมาต่อขนาดโครงสร้างผลึกของ InGaAsN	29
ผลการฉายรังสีแกมมาต่อโหมดการสั่นของชั้นงาน InGaAsN	32
ผลการฉายรังสีแกมมาต่อโครงสร้างระดับไมโครของฟิล์ม InGaAsN	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปลผลการทดลอง	43
บรรณานุกรม	45
ภาคผนวก	48
ประวัติย่อผู้วิจัย	



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ค่า Raman shift ของโครงสร้างที่เกี่ยวข้องคู่กับพันธะของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN	15
3.2	แสดงอัตราส่วนของ R_A และ R_B สำหรับโครงสร้างลูกบาศก์แบบกลางหน้า (Face center cubic: FCC)	17
4.1	ค่า RMS roughness ของชิ้นงาน InGaAsN ที่ปริมาณรังสีดูดกลืนแตกต่างกัน	25



สารบัญรูปภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blende)	4
2.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ 2 ธาตุ (Bandgap energy) และค่าคงที่โครงสร้างผลึก (Lattice constant)	5
2.3	แผนภาพการเกิดรังสีแกมมา โดยสารกัมมันตรังสีโคบอลต์-60	7
3.1	โครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge	9
3.2	การจำลองการคำนวณความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงาน	11
3.3	แผนภาพการกระเจิงแบบรามานแบบสโตกส์และแอนการติสโตกส์	14
3.4	แผนภาพการเลี้ยวของอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน	16
3.5	รูปแบบการเลี้ยวเบนของชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ FCC โดยจุด A มาจากลำอิเล็กตรอนที่ส่องผ่านชิ้นงานมาตรงๆ และจุด B คือลำอิเล็กตรอนที่มาจาก การเลี้ยวเบน	18
3.6	(a) ชิ้นงาน InGaAsN/GaAs/Ge (b) เครื่องตัดชิ้นงาน (c) แบบจำลองชิ้นงานเมื่อตัดเสร็จ	19
3.7	(a) ขั้นตอนการประกบชิ้นงาน (b) ขั้นตอนการติดชิ้นงานก่อนนำไปขัดบาง	20
3.8	เครื่องขัดชิ้นงานและแผ่นฟิล์มขัดเพชรที่มีขนาดผลึกเพชรแตกต่างกัน	21
3.9	อุปกรณ์ใส่กริดเพื่อยึดชิ้นงานและเครื่องไอออนมิลลิง	21
4.1	พื้นผิวของ InGaAsN/Ge ขนาด $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ ที่มีปริมาณรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy	23
4.2	พื้นผิวของ InGaAsN/Ge ขนาด $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ ที่มีปริมาณรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy	24
4.3	ภาคตัดขวางของ ชั้นฟิล์ม InGaAsN ปลูกลงบนชั้นบัฟเฟอร์ GaAs และบนวัสดุฐานรอง Ge ตามลำดับ	25
4.4	พื้นผิวของชั้นฟิล์ม InGaAsN กำลังขยาย 10000 เท่า มีปริมาณรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy	26
4.5	พื้นผิวของชั้นฟิล์ม InGaAsN กำลังขยาย 20000 เท่า มีปริมาณรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy	27

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.6	พื้นผิวของชั้นฟิล์ม InGaAsN กำลังขยาย 50000 เท่า มีปริมาณรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy	28
4.7	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูงของฟิล์ม InGaAsN ที่อบรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy ตามลำดับ	30
4.8	กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูงของฟิล์ม InGaAsN ที่ปริมาณรังสีดูดกลืนแตกต่างกัน	31
4.9	รามานสเปกตรัมของ InGaAsN/GaAs/Ge ที่มีปริมาณรังสีดูดกลืนแตกต่างกัน	32
4.10	รามานสเปกตรัมของ InGaAsN/GaAs/Ge ในช่วง $400-700\text{ cm}^{-1}$ ที่มีปริมาณรังสีดูดกลืนที่แตกต่างกัน	34
4.11	ภาคตัดขวางภาพพื้นสว่างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ไม่ได้อบรังสี	35
4.12	ดัชนีระนาบโครงสร้างผลึกที่มาจาก การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจากบริเวณชั้นฟิล์ม InGaAsN (0 MGy) ในแกนโซน [110]	36
4.13	ภาคตัดขวางพื้นมืดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ไม่ได้อบรังสี (0 MGy) มาจากระนาบ (111)	37
4.14	ภาคตัดขวางภาพพื้นมืดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge (0 MGy) ที่มาจากระนาบ (a) (002) (b) (00 $\bar{2}$) (c) (1 $\bar{1}\bar{1}$) (d) ($\bar{1}$ 11) (e) (1 $\bar{1}$ 1) (f) ($\bar{1}$ 1 $\bar{1}$) (g) ($\bar{2}$ 20) และ (h) (2 $\bar{2}$ 0)	39
4.15	ภาคตัดขวางภาพพื้นสว่างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ถูกฉายรังสีแกมมามีปริมาณการดูดกลืน 1.5 MGy	39
4.16	ดัชนีระนาบโครงสร้างผลึกที่มาจาก การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจากบริเวณชั้นฟิล์ม InGaAsN (1.5 MGy) ในแกนโซน [110]	40
4.17	ภาคตัดขวางภาพพื้นมืดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ที่อบรังสี 1.5 MGy ที่มาจากระนาบ (a) (002) (b) (00 $\bar{2}$) (c) (1 $\bar{1}\bar{1}$) (d) ($\bar{1}$ 11) (e) (1 $\bar{1}$ 1) (f) ($\bar{1}$ 1 $\bar{1}$) (g) ($\bar{2}$ 20) และ (h) (2 $\bar{2}$ 0)	41

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ไนไตรด์ (Indium Gallium Arsenide Nitride, InGaAsN) เป็นสารกึ่งตัวนำผสมหมู่สาม-ห้า-ไนไตรด์ (III-V-Nitride) ที่สามารถปลูกให้ขนาดโครงสร้างผลึกเข้ากันได้กับขนาดโครงสร้างผลึกของวัสดุฐานรอง GaAs หรือ Ge ปัจจุบันสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ได้รับความสนใจเพื่อการผลิตเป็นวัสดุชั้นดูดกลืนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายรอยต่อ (multijunction solar cells) [1, 2] เนื่องจากสามารถปรับช่องว่างของแถบพลังงานและขนาดโครงสร้างผลึกได้โดยการปรับปริมาณไนโตรเจน (N) และอินเดียม (In) มีผลให้ค่าช่องว่างของแถบพลังงานลดลง จนมีค่า 1.0 eV และขนาดโครงสร้างผลึกเข้ากันได้กับ GaAs เท่ากับ 5.653 อังสตรอม หรือ Ge เท่ากับ 5.658 อังสตรอม การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายรอยต่อนั้น โดยทั่วไปจะนำไปใช้บนสถานีอวกาศและดาวเทียม [3] อีกทั้งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายรอยต่อได้ถูกนำมาใช้บนพื้นโลกอีกด้วย ดังนั้น สมบัติของวัสดุที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายรอยต่อจะต้องมีความเหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะต่าง ๆ โดยเฉพาะการใช้งานในอวกาศ เนื่องจากอาจจะถูกทำลายโดยรังสี และอนุภาคต่าง ๆ ที่มีพลังงานสูง เช่น โปรตอน อิเล็กตรอน รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น ซึ่งรังสีและอนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้ เมื่อตกกระทบบนวัสดุจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระ หรือหลุดออกจากผิววัสดุ ก่อให้เกิดความบกพร่องของพันธะในโครงสร้างผลึกของวัสดุ

เนื่องจากรังสีแกมมาที่ใช้ในการทดลองเกิดจากการสลายตัวของโคบอลต์ 60 ซึ่งมีพลังงานของโฟตอนเท่ากับ 1.17 และ 1.33 MeV จึงคาดว่าจะเกิดปรากฏการณ์คอมปัดันในชั้นงาน InGaAsN และส่งผลให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมชนอะตอมอื่น ๆ ภายในโครงสร้าง ดังนั้นจึงมีความร้อนสะสมและเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก เช่น การเกิดช่องว่างในตำแหน่งแลตทิซ (vacancy) หรืออะตอมที่แทรกระหว่างอะตอมอื่น ๆ (interstitial) หลังการฉายรังสีแกมมาลงบนชิ้นงานอาจทำให้คุณสมบัติและคุณภาพของชิ้นงานเปลี่ยนไป เช่น ขนาดโครงสร้างผลึก โหมดการสั่น และลักษณะพื้นผิว เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลต่อช่องว่างแถบพลังงานซึ่งเป็นสมบัติพื้นฐานของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่จะใช้กำหนดช่วงการดูดซับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังนั้นการฉายรังสีแกมมาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ จึงจำเป็นต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มบาง InGaAsN เมื่อได้รับรังสี

ที่มีพลังงานสูง โดยใช้รังสีแกมมาซึ่งเป็นรังสีที่มีพลังงานสูงโดยมีพลังงานมากกว่า 100 keV ฉายลงบนฟิล์มบาง InGaAsN ในปริมาณความเข้มของรังสีที่แตกต่างกัน หลังจากนั้น สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุนี้จะถูกตรวจสอบ เช่น ผิวหน้าของฟิล์มซึ่งคาดว่าจะได้รับผลกระทบจากรังสีแกมมา จะถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แรงระหว่างอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) จากนั้น โครงสร้างผลึกและปริมาณของไนโตรเจน (Nitrogen, N) ในฟิล์มจะถูกตรวจสอบและวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูง (High Resolution X-ray Diffraction, HRXRD) และรามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy) สุดท้ายจะตรวจสอบปริมาณความบกพร่องเชิงโครงสร้างของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาที่ต่อลักษณะพื้นผิวและความบกพร่องของโครงสร้าง (defect) ในฟิล์ม InGaAsN
2. เพื่อหาปรากฏการณ์หลักที่เกิดในฟิล์ม InGaAsN ที่ถูกฉายด้วยรังสีแกมมา

ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN เมื่อถูกอาบรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจากการตรวจสอบด้วยเทคนิคต่างๆ

นิยามศัพท์เฉพาะ

Multi-junction solar cells เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายรอยต่อ ถูกสร้างจากวัสดุที่ให้มีความแถบพลังงานต่างกันในแต่ละชั้น โดยวัสดุชั้นดูดกลืนชั้นบนสุดจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานสูงสุด (ความยาวคลื่นสั้น)

Gamma ray รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีย่านความยาวคลื่นประมาณ 0.1 nm ถึงน้อยกว่า 10^{-5} nm

สมมติฐานของการวิจัย (Hypothesis)

1. รังสีแกมมามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN
2. เมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเกิดความบกพร่องเชิงโครงสร้าง (structural defects)

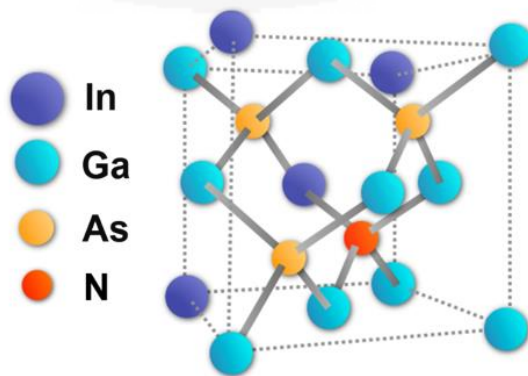
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN เมื่อถูกฉายรังสีแกมมาด้วยปริมาณต่างๆ
2. ได้รับองค์ความรู้ใหม่จากการวิจัย

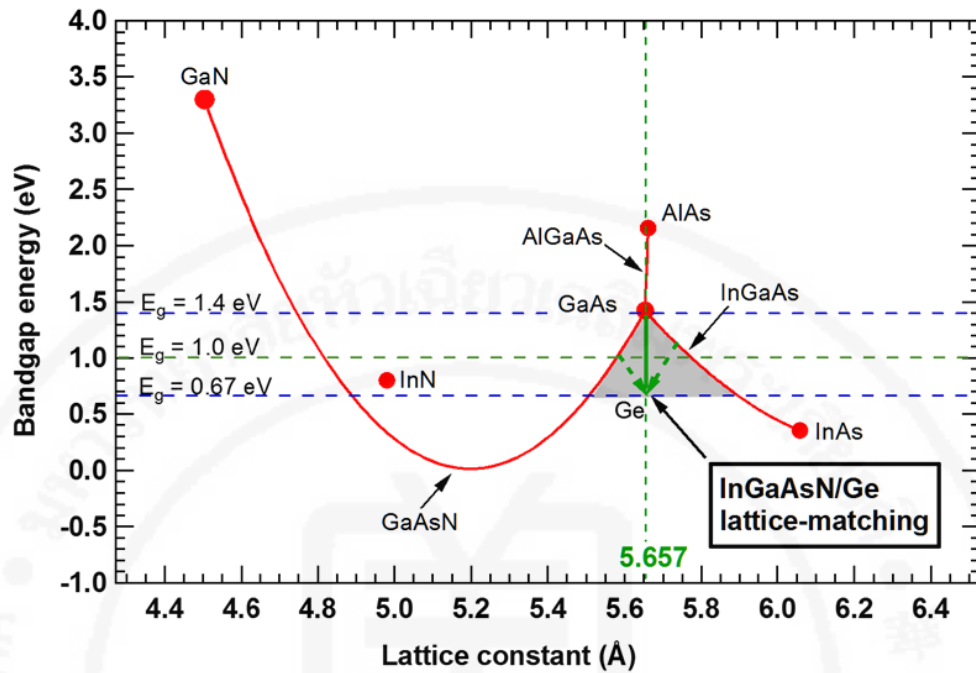


บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ฟิล์มบาง InGaAsN เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำไปใช้เป็นชั้นดูดกลืนหนึ่งของเซลล์สุริยะแบบหลายรอยต่อที่มีประสิทธิภาพสูง โดยโครงสร้างหลักเป็นโครงผลึกของ GaAs ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blende) เมื่อเติมไนโตรเจน (N) เป็นธาตุหมู่ 5 จะสามารถเข้าไปแทนที่ อาร์เซนิก (As) ที่เป็นธาตุหมู่เดียวกัน และเมื่อเติมอินเดียม (In) เป็นธาตุหมู่ 3 จะสามารถเข้าไปแทนที่ แกลเลียม (Ga) ได้ และยังคงโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์เช่นเดิม ดังแสดงในภาพที่ 2.1 สารกึ่งตัวนำ InGaAsN ได้รับความสนใจอย่างมากเพราะสมบัติทางกายภาพมีความเหมาะสม โดยเฉพาะเมื่อมีการเติมปริมาณ N เข้าไปทำให้เกิดการลดลงของช่องว่างแถบพลังงานเนื่องจากมีค่าตัวแปร bowing ขนาดใหญ่ [4, 5] และสามารถทำให้มีขนาดโครงสร้างผลึกที่เข้ากันได้กับวัสดุฐานรอง (lattice-matched) ด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณ In และ N ในฟิล์มเพื่อปรับค่าคงที่โครงผลึกและค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากรายงานวิจัยพบว่าการเติมปริมาณ N เพียงเล็กน้อยนั้นทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลงอย่างมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.2 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่แสดงถึงการปลูกผลึกแบบอพิแทกซี (epitaxy) และการหาลักษณะเฉพาะของเปลี่ยนแปลงช่องว่างแถบพลังงานเพื่อพัฒนาสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าโดยอาศัยองค์ประกอบของอัลลอยผสมระหว่างอินเดียมและไนโตรเจน นอกจากนี้ การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างและทางแสงของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN พบว่าเมื่อมีการเข้าไปแทนที่ของไนโตรเจนส่งผลให้เกิดการผ่อนคลายของโครงผลึก (strain relaxation) จะทำให้เกิดความบกพร่องเชิงโครงสร้างประเภทดิสโลเคชัน (dislocation) ซึ่งจะเกิดขึ้นตรงบริเวณรอยต่อและส่งผลขึ้นมาถึงพื้นผิวของชั้นฟิล์มเกิดเป็นลายตาราง เรียกว่า cross-hatch pattern ยิ่งไปกว่านั้นสมบัติทางแสงของอัลลอยกึ่งตัวนำลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจน [6-8]



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blende)



ภาพที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ 2 ธาตุ (Bandgap energy) และค่าคงที่โครงผลึก (Lattice constant)

ในการปลูกผลึกแบบอพิแทกซ์ของชั้นฟิล์ม InGaAsN นั้น เงื่อนไขสำคัญสำหรับการปลูกผลึกคือ ค่าคงที่โครงผลึกระหว่างชั้นฟิล์มและวัสดุฐานรองควรมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน เพื่อลดการเกิดความบกพร่องเชิงโครงสร้างโดยวัสดุฐานรองมีหลายชนิด ได้แก่ GaAs, Si, Ge เป็นต้น ในที่นี้การปลูกผลึกแบบอพิแทกซ์ของชั้นฟิล์ม InGaAsN ให้มีค่าคงที่โครงผลึกพอดีกับวัสดุฐานรองสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณ In และ N จะทำให้ค่าคงที่โครงผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงและยังส่งผลให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของ In และ N อีกด้วยนอกจากนี้ยังพบได้ว่าเมื่อเติมปริมาณ N เพียง 1% เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของ As จะพบว่าช่องว่างแถบพลังงานลดลงจาก 1.42 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็น 1.25 อิเล็กตรอนโวลต์ที่อุณหภูมิห้อง [9] จากเหตุผลตรงนี้ สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบสี่ชนิด (quaternary compound) สามารถปลูกให้ค่าคงที่โครงผลึกเท่ากับ GaAs และ Ge ได้ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำ InGaAsN เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นดูดกลืนในเซลล์สุริยะแบบหลายรอยต่อ ซึ่งมีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในอวกาศอีกด้วย ซึ่งในอวกาศนั้นก็จะมีอนุภาคพลังงานสูง ได้แก่ รังสีแกมมา โปรตรอนและเบตา เป็นต้น

Lai และคณะ [10] พบว่าเมื่อสาร GaAs ถูกฉายรังสีแกมมาในปริมาณการดูดกลืนช่วง 1-300 Mrad ส่งผลต่อการเกิดความบกพร่องที่ซับซ้อน ผลกระทบหลักของข้อบกพร่องทางโครงผลึกต่อ GaAs จะทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานและเกิดการตกกลับลงมายังแถบวาเลนซ์ตามเดิม

(recombination center) และช่วงเวลาที่ยืดหยุ่นก่อนการตกกลับ (recombination lifetime) เป็นตัวกำหนดสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ และลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำนั้น ดังนั้นเพื่อเพิ่มสมรรถนะของอัลลอยสารกึ่งตัวนำในสภาพแวดล้อมที่มีการแผ่รังสีสูง จึงมีความจำเป็นต้องเข้าใจพื้นฐานของความบกพร่องเชิงโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นในอัลลอย การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากสถานะที่มีการแผ่รังสี

Klangtakai และคณะ [11] พบว่าเมื่อสารกึ่งตัวนำ $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ เมื่อ x คือปริมาณไนโตรเจนมีค่า 1.9 และ 5.1 at% ถูกฉายรังสีแกมมาในปริมาณการดูดกลืนช่วง 0-2.0 MGy พบความหนาแน่นของช่องว่างที่ผิวหน้าของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการดูดกลืนรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นในความเข้มข้นของ $\text{N} = 1.9$ at% ในทางตรงกันข้ามที่ปริมาณ $\text{N} = 5.1$ at% พบ cross-hatch pattern ที่ความหนาแน่นของเส้นเพิ่มขึ้นจนกระทั่งปริมาณการดูดกลืนที่ 2.0 MGy พบความหนาแน่นของเส้นลดลง และส่งผลต่อสมบัติเชิงโครงสร้างโดยเกิดการผ่อนคลายของโครงผลึกเนื่องมาจากเกิดการพุ่งออกของไนโตรเจน (N out-diffusion) เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณการดูดกลืนรังสีเกิน 1.0 MGy ความเสียหายและผลกระทบดังกล่าวเกิดจากความร้อนจากรังสีแกมมา

Papaz และคณะ [3] พบว่าเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ GaAs ถูกฉายรังสีแกมมาในปริมาณการดูดกลืน 500 kGy โดยเซลล์แสงอาทิตย์นี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอวกาศ การฉายรังสีแกมมาส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงต่อการรวบรวมลักษณะของการส่งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ในที่มีดและภายใต้แสง อีกทั้งการลดลงของสมบัติเชิงโครงสร้างและเชิงแสง ตลอดจนสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังนั้นการศึกษาของอัลลอยกึ่งตัวนำที่มีสมบัติในการใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์มีความสำคัญ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN โดยชิ้นงานนี้มีคุณสมบัติเป็นส่วนหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์หลายรอยต่อ (multijunction solar cell) จึงต้องได้รับการตรวจสอบทั้งสมบัติเชิงโครงสร้างและเชิงแสง อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ สามารถศึกษาได้เพียงสมบัติทางโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN ปลุกลงบนวัสดุฐานรอง Ge เท่านั้น

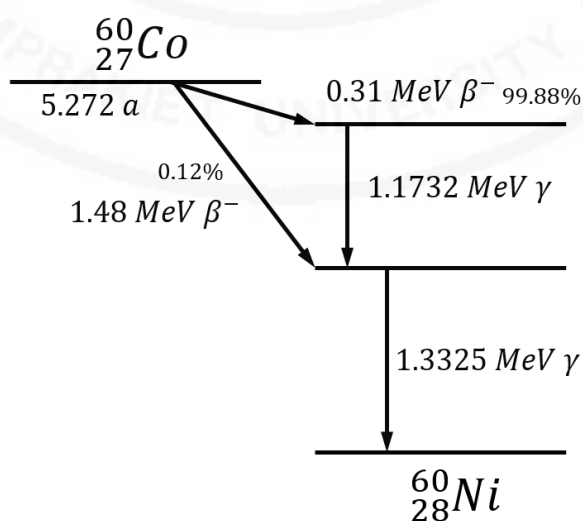
กรอบแนวคิดในการวิจัย

งานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ยังมีผู้วิจัยไม่มากนัก ดังนั้นการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับรังสีพลังงานสูงนั้นจึงมีความสำคัญในการศึกษาหาปรากฏการณ์หลักที่จะเกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้จะใช้รังสีแกมมาเป็นตัวฉายให้แก่สารกึ่งตัวนำ รังสีแกมมาเป็นรังสีที่มีพลังงานสูง รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นและความถี่สูง ซึ่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่าโฟตอน รังสีแกมมาไม่มีมวลหรือประจุ ดังนั้นการแทรกซึมของรังสีแกมมาเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อาจทำให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำโดยเกิดการชนกันกับอิเล็กตรอนในโครงผลึก แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ได้แก่ สารโคบอลต์ 60 (^{60}Co) ถูกใช้เพื่อสังเกตผลกระทบการเกิดไอออนซ์ของรังสีบนส่วนประกอบและวัสดุ เพราะมีพลังงานเพียงพอที่จะเปลี่ยนลักษณะทางเคมีของสารกึ่งตัวนำ จากสาเหตุดังกล่าว เมื่อสารกึ่งตัวนำ InGaAsN ได้รับรังสีแกมมาที่ได้รับพลังงานหรือปริมาณการดูดกลืน (absorb dose) ที่ปริมาณต่างๆ อาจจะทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปหรือเกิดความบกพร่องเชิงโครงสร้างขึ้นเช่น เกิดช่องว่างหรือการแทรกของอะตอมในโครงผลึก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาและตรวจสอบโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN จะถูกนำไปตรวจสอบด้วยเทคนิคต่างๆ ที่เป็นที่ยอมรับในงานวิจัยทางด้านโครงผลึก ได้แก่ เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เทคนิคการกระเจิงแบบรามาน และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นต้น

รังสีแกมมา

ในอวกาศรังสีแกมมาเกิดจากแหล่งกำเนิดที่มีอุณหภูมิที่สูงมากเช่น ดวงอาทิตย์ ซูเปอร์โนวา ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสที่มีพลังงานสูงปรับตัวให้อยู่ในสถานะที่มีพลังงานต่ำ และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน พลังงานของรังสีแกมมาที่พบทั่วไปอยู่ในช่วง 1 MeV ถึง 1 GeV ภาพที่ 2.3 สารกัมมันตรังสีโคบอลต์-60 มีค่าครึ่งชีวิต 5.26 ปี จะสลายไปเป็นนิเกิล-60 (^{60}Ni) อยู่ในสถานะกระตุ้นที่มีพลังงานสูงกว่าสถานะพื้นอยู่ 1.48 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) และจะสลายไปเป็นนิเกิล-60 มีการปลดปล่อยอนุภาคบีตาพลังงาน 0.31 MeV และมีส่วนน้อยที่สลายเป็นนิเกิล-60



ภาพที่ 2.3 แผนภาพการเกิดรังสีแกมมา โดยสารกัมมันตรังสีโคบอลต์-60

ที่อยู่ในสถานะกระตุ้นที่มีพลังงานสูงกว่าสถานะพื้นอยู่ 1.3325 MeV นิกเกิล-60 ที่สถานะกระตุ้นสูงจะสลายให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.1732 MeV และสลายต่อให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.3325 MeV จนอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะพื้น

ปริมาณการดูดกลืนรังสี (radiation absorbed dose)

ปริมาณการดูดกลืนรังสี คือพลังงานที่ตัวกลางได้รับจากรังสีที่ผ่านเข้ามาต่อหน่วยมวล หน่วยมาตรฐานสากลของปริมาณรังสีดูดกลืนคือ จูลต่อกิโลกรัม (J/kg) มีชื่อเรียกว่า เกรย์ (Gray, Gy) โดย 1 Gy เท่ากับ 1 J/kg นอกจากนี้ยังมีหน่วยเดิมที่ใช้วัดปริมาณการดูดกลืนรังสีคือหน่วย แรด (rad) สามารถเทียบได้ว่า 1 Gy เท่ากับ 100 rad

อันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อวัสดุสารกึ่งตัวนำ

เมื่อรังสีแกมมาหรือโฟตอนทำอันตรกิริยากับวัสดุ อาจเกิดการชนกับนิวเคลียส อิเล็กตรอน หรือสสารรอบนิวเคลียส การชนดังกล่าวอาจเป็นการชนแบบยืดหยุ่น ไม่ยืดหยุ่น หรืออาจส่งผลให้โฟตอนถูกดูดกลืนโดยสมบูรณ์ ดังนั้นถ้ารังสีแกมมาที่มีพลังงานระดับต่างๆ ตกกระทบบนวัสดุ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ดังนี้

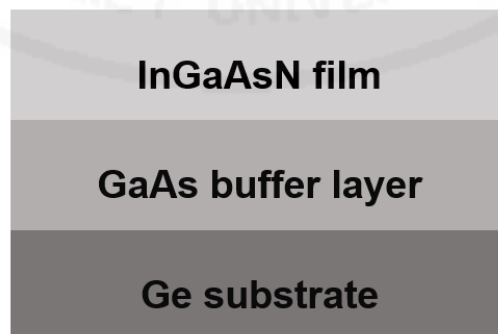
1. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับฟังก์ชันงานของอะตอมเข้ามาชนกับอะตอมจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมและผิวของวัสดุ
2. ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (compton effect) เมื่อโฟตอนพลังงานสูงเข้ามาชนกับอิเล็กตรอนภายในอะตอม จะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ และโฟตอนที่กระเจิงออกมาจะมีพลังงานลดลง
3. การเกิดอนุภาคคู่ (pair production) เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานสูง ($E > 3 \text{ MeV}$) ชนกับอะตอมของธาตุหนัก โฟตอนจะถูกดูดกลืนไว้ทั้งหมด และจะเกิดคู่ออนุภาคที่มีมวลเท่ากันแต่ประจุต่างกันคือ อิเล็กตรอนและโพสิตรอน

เนื่องจากรังสีแกมมาที่ใช้ในการทดลองเกิดจากการสลายตัวของ Co-60 ซึ่งมีพลังงานของโฟตอนอยู่ในช่วง 1.17 และ 1.33 MeV จึงคาดว่าจะเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันบนชั้นงาน InGaAsN และส่งผลให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมชนอะตอมอื่นๆ ภายในโครงสร้าง ดังนั้นจึงมีความร้อนสะสมและเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึก เช่น การเกิดช่องว่างในตำแหน่งแลสทิส (vacancy) หรืออะตอมที่แทรกระหว่างอะตอมอื่น ๆ (interstitial)

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

โครงสร้างฟิล์มบาง InGaAsN

ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่ใช้นำมาเป็นกรณีศึกษาเพื่อตรวจสอบด้วยเครื่องมือต่างๆ คือฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนต์ในไตรด์ปลูกลงบนชั้นบัฟเฟอร์แกลเลียมอาร์เซไนต์โดยมีเจอร์มาเนียมเป็นวัสดุฐานรอง (InGaAsN/GaAs/Ge) ซึ่งปลูกฟิล์มด้วยวิธีเมทอลออร์แกนิกเวปอร์เฟสอีพิแทกซี (Metal organic vapor phase epitaxy, MOVPE) ดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยเงื่อนไขการปลูกฟิล์มบาง InGaAsN เริ่มจากชั้นบัฟเฟอร์ GaAs ความหนาประมาณ 400 นาโนเมตร และปลูก InGaAsN ความหนาประมาณ 350 นาโนเมตร ปลูกที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส สารตั้งต้นประกอบด้วย ไตรเมทิลอินเดียม (Trimethylindium: TMIIn) เป็นสารตั้งต้นของอินเดียม (In) ไตรเมทิลแกลเลียม (Trimethylgallium: TMGa) เป็นสารตั้งต้นของแกลเลียม (Ga) เทอร์ติวารีบิวทิลอาร์ซีน (Tertiarybutylarsine: TBAs) เป็นสารตั้งต้นของอาร์เซนิก (As) โดยมีอัตราส่วนเป็น $[TMIIn]/([TMGa]+[TMIIn]) = 0.153$ $[TBAs]/[TMGa] = 15$ และ ไตรเมทิลไฮโดรราซีน (Dimethylhydrazine: DMHy) เป็นสารตั้งต้นของไนโตรเจน มีอัตราการไหล 4300 ไมโครโมลต่อ นาที โดยค่าอัตราส่วนดังกล่าวเป็นเงื่อนไขการปลูกผลึกแบบค่าโครงที่ผลึกเท่ากัน การปลูกผลึกทำขึ้น ณ ห้องปฏิบัติการของศาสตราจารย์เคนทาโร โอนะเบะ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ชั้นสูง มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge

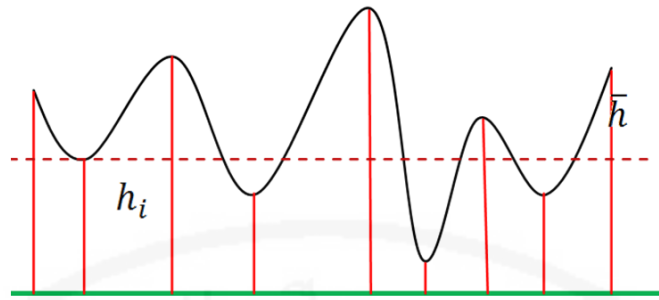
เงื่อนไขการฉายรังสีแกมมา

ฟิล์มบาง InGaAsN/GaAs/Ge แบ่งออกเป็น 5 ชั้น เพื่อไปฉายรังสีแกมมาจำนวน 4 ชั้น ที่ศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ใช้เครื่องฉายรังสีแบบ Carrier Type Gamma Irradiator รุ่น JS 8900 IR-155 โดยใช้สารกัมมันตรังสีโคบอลต์-60 เป็นแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา โคบอลต์-60 นั้นได้จากธาตุโคบอลต์-59 ที่มีอยู่ในธรรมชาติเป็นจำนวนมากและอยู่ในสภาพที่เสถียร อาศัยนิวตรอนนาน 18 เดือน โดยโคบอลต์-60 ที่ได้จะเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีและมีครึ่งชีวิต 5.26 ปี และจะสลายไปเป็นนิกเกิล-60 มีการปลดปล่อยอนุภาคบีตาพลังงาน 0.318 MeV และรังสีแกมมาพลังงาน 1.33 MeV และ 1.17 MeV ทำที่อุณหภูมิห้องด้วย ^{60}Co gamma-ray cell ซึ่งมีพลังงานอยู่ในช่วง 1.17-1.33 MeV ที่อัตราการแผ่รังสี 8.47 kGy/h ประมาณ 59-237 ชั่วโมง จะได้ปริมาณรังสีเป็น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 MGy ดังนั้นชิ้นงานที่ถูกอบรังสีทั้ง 4 ชั้น จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ถูกอบรังสี ดังนั้นชิ้นงานทั้งหมดจะมี 5 ชั้นด้วยกัน

หลักการของเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบและการทดลอง

เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) เพื่อดูลักษณะของพื้นผิวและหาค่าความขรุขระ (roughness) ของผิวเมื่อถูกอบรังสี หลักการทำงานคือ จะใช้วัดแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างที่เกิดขึ้นจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปลายหัวเข็มขนาดเล็กและพื้นผิวของชิ้นงาน เพื่อมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวของชิ้นงานนั้น โดย AFM สามารถนำมาใช้ในการศึกษาทั้งวัสดุที่นำไฟฟ้าและไม่นำไฟฟ้าในระดับนาโนเมตรได้ การทำงานของ AFM สามารถแบ่งได้เป็น 3 โหมดที่สำคัญ ได้แก่ โหมดสัมผัส (contact mode) โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode) และโหมดกึ่งสัมผัส (tapping mode) ในการทดลองนี้ ได้ใช้โหมดกึ่งสัมผัสในการตรวจสอบพื้นผิวและความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงาน โหมดกึ่งสัมผัสเป็นเทคนิคที่มีการนำหัวเข็มขนาดเล็กกับพื้นผิวชิ้นงานในระยะที่ใกล้กันมากแต่ยังไม่สัมผัสที่ผิวหน้าของชิ้นงาน เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะที่เดียวกันก็ยังมีกระแสหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อมๆกับการเคลื่อนที่เพื่อสแกนไปยังบริเวณต่างๆบนผิวงาน ดังนั้น จึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไกลเข็มปลายแหลมซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายพื้นผิวชิ้นงาน

นอกจากนี้ โหมดกึ่งสัมผัสสามารถใช้ตรวจสอบความขรุขระแบบค่าเฉลี่ยยกกำลังสองของพื้นผิวและแสดงการจำลองการคำนวณความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงานในภาพที่ 3.2 ค่าความขรุขระแบบค่าเฉลี่ยยกกำลังสองสามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ RMS roughness เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงของพื้นผิวภายในพื้นที่ที่กำหนด ตามสมการ (3.1)



ภาพที่ 3.2 การจำลองการคำนวณความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงาน

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}{N}} \quad (3.1)$$

เมื่อ h_i คือ ความสูงของพื้นผิวแต่ละตำแหน่ง

\bar{h} คือ ความสูงเฉลี่ยของพื้นผิวทั้งหมด

N คือ จำนวนจุดภายในพื้นผิวทั้งหมด

ในการวัดผลการทดลองจากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมจะทำการสแกนชิ้นงานในพื้นที่ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ และ $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ เพื่อนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบความขรุขระของชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น

เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope หรือ FESEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่ง que ถ่ายภาพพื้นผิวตัวอย่างด้วยการสแกนด้วยลำแสงอิเล็กตรอนพลังงานสูงในรูปแบบแรสเตอร์ทั่วพื้นผิวของตัวอย่าง FESEM มีประสิทธิภาพมากกว่า SEM มาตรฐานภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสามารถขยายภาพได้สูงกว่า 1,000,000 เท่า และความสามารถแยกแยะรายละเอียด (Resolution) ที่ 1.5 นาโนเมตร ทำให้ FESEM เป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการขยายภาพความละเอียดสูง นอกจากนี้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่นๆ เพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เช่น เชื่อมต่อกับเครื่องตรวจวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer หรือ EDS) เพื่อศึกษาชนิดของ ปริมาณและการกระจายขององค์ประกอบธาตุในวัสดุที่นำมาตรวจสอบ อีกทั้งยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ โดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction หรือ EBSD) และสามารถประยุกต์ใช้เชื่อมกับอุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ ได้อีกหลายประเภท ดังนั้น FESEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาวิจัยด้วยกำลังขยายที่สูง จึงสามารถใช้ศึกษาระดับจุลภาคได้

การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของระบบกล้อง FESEM จะประกอบด้วยหลายหัววัดขึ้นอยู่กับรุ่นของเครื่อง FESEM ที่ใช้ ดังนั้นหัววัดหลักที่ทุกเครื่องควรมีได้แก่ 1. หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

(Secondary Electron Detector) 2. หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Detector) และ 3. หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนสแกนิงทะลุผ่าน (Scanning Transmission Electron Detector) ดังนั้นภาพที่ได้จะแบ่งตามลักษณะของหัววัดที่ต่างกัน ได้แก่ 1. ภาพสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image ; SEI) 2. ภาพสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image ; BEI) และ 3. ภาพสัญญาณอิเล็กตรอนสแกนิงทะลุผ่าน (Transmission Electron Image ; TEI)

ในการทดลองนี้ได้วัดผลจากหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จึงได้ภาพเป็น SEI เป็นสัญญาณภาพที่ได้จากหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ที่รับเอาพลังงานจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของชิ้นงานเมื่อถูกลำอิเล็กตรอนชนแล้วมาประมวลผล ภาพที่ได้จะมีความคมชัด มีมิติหรือมีรูปร่างซับซ้อนมากกว่าภาพที่ถ่ายได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยทั่วไปการใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนศักย์เร่งอิเล็กตรอนได้ในช่วง 0.5-30 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยายถึงประมาณ 300,000 เท่า ดังนั้นชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นถูกวัดผลโดยใช้ศักย์เร่งอิเล็กตรอน 5.0 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 10,000 20,000 และ 50,000 เท่า

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูง (High Resolution X-ray Diffraction, HRXRD) เพื่อตรวจสอบค่าคงที่โครงผลึก (lattice parameter) และคุณภาพโครงผลึก (crystalline quality) มีความแม่นยำสูง และมีประสิทธิภาพสูง สำหรับการตรวจสอบการกระจายตัวของระยะห่างระหว่างระนาบของโครงผลึก (d-spacing) หลักการคือทำให้การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ใกล้เคียงกับเงื่อนไขของแบรกก์ (Bragg's law) มากที่สุด สำหรับรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวหรือช่วงของความยาวคลื่นแคบมาก จะได้ว่า

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta \theta}{\tan \theta} \quad (3.2)$$

เมื่อ Δd คือ ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม

$\Delta \lambda$ คือ ช่วงความกว้างของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

$\Delta \theta$ คือ การกระจายตัวของมุม θ

จากสมการ (3.2) จะเห็นว่าเมื่อพจน์ของค่าความยาวคลื่นมีค่าน้อย ส่งผลต่อพจน์ของระยะห่างระหว่างระนาบอะตอม ดังนั้นเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูงจะมีค่าอัตราส่วนของความยาวคลื่นประมาณ 10^{-4} จึงทำให้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูงมีความแม่นยำมากกว่าการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทั่วไปที่มีค่าอัตราส่วนของความยาวคลื่นประมาณ 10^{-3} โดยทั่วไปลำของรังสีเอ็กซ์จะ

ปลดปล่อยความยาวคลื่นออกมาเป็น K_{α_1} K_{α_2} และ K_{β} ในการทดลองนี้ใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นของ K_{α_1} มีค่า 1.54056 อังสตรอม เพราะมีค่าความเข้มสูงสุดและเลือกโหมดการวัด $2\theta/\omega$ โดยมีการเปลี่ยนแปลงมุมแบรกก์ (2θ) เนื่องจากระยะห่างระหว่างอะตอมในแต่ละชั้นของโครงสร้างผลึกไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่ามุมแบรกก์และมุม ω นั้นเปลี่ยนค่าตามการเคลื่อนที่ของหัววัดรังสีเอ็กซ์และแหล่งกำเนิดของรังสีเอกซ์ ตามลำดับ จากนั้นสามารถคำนวณค่าระยะห่างระหว่างอะตอมที่ระนาบใดๆ (d_{hkl}) และค่าคงที่โครงสร้างผลึกในแนวตั้งฉากได้จากสมการเงื่อนไขแบรกก์ (สมการ 3.3) และ เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนระนาบของโครงผลึกโดยสอดคล้องกับสมการเงื่อนไขแบรกก์แล้ว จะสามารถวัดความเข้มสูงสุดของรังสีสะท้อนได้ สำหรับชิ้นงาน InGaAsN มีโครงสร้างแบบรูปทรงสี่มุม (tetragonal) สามารถคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึกได้ดังสมการ (3.4)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.3)$$

$$d_{hkl} = \frac{a_{//}}{\sqrt{h^2 + k^2}} + \frac{a_{\perp}}{\sqrt{l^2}} \quad (3.4)$$

เมื่อ a_{\perp} คือค่าคงที่โครงสร้างผลึกแนวตั้งฉากกับผิววัสดุฐานรอง

$a_{//}$ คือค่าคงที่โครงสร้างผลึกแนวขนานกับผิววัสดุฐานรอง

กราฟที่ได้จาก HRXRD ในโหมดการสแกน $2\theta/\omega$ ที่ระนาบ 004 สามารถใช้หาค่า a_{\perp} จากสมการ

$$(3.5) \text{ เมื่อทราบค่ามุมเลี้ยวเบน } 2\theta \text{ เมื่อ } \theta = \frac{2\theta}{2}$$

$$a_{\perp} = \frac{2\lambda}{\sin \theta} \quad (3.3)$$

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาเฉพาะค่าคงที่โครงสร้างผลึกแนวตั้งฉากกับผิววัสดุฐานรอง เนื่องจากชิ้นงานก่อนอาบรังสีและหลังอาบรังสีเป็นชิ้นงานที่มีโครงสร้างผลึกเดียวกันและปลูกแบบค่าคงที่โครงสร้างผลึกใกล้เคียงกับวัสดุฐานรอง Ge (nearly lattice-matched)

เทคนิคการกระเจิงแบบรามาน เพื่อวิเคราะห์ถึงการสั่นของผลึกซึ่งจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งของความถี่ (Raman shift) เมื่อการโดปหรือการเจือของสารเข้าไปในโครงผลึกหลัก หรือแม้กระทั่งมีความบกพร่องเชิงโครงสร้างในโครงผลึก การกระเจิงแบบรามานมีหลักการในการตรวจสอบการกระเจิงแบบ

ไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานและโมเมนตัมของโฟตอน ในรูปการสั่นของโครงผลึกที่เรียกว่า โฟนอน (phonon)

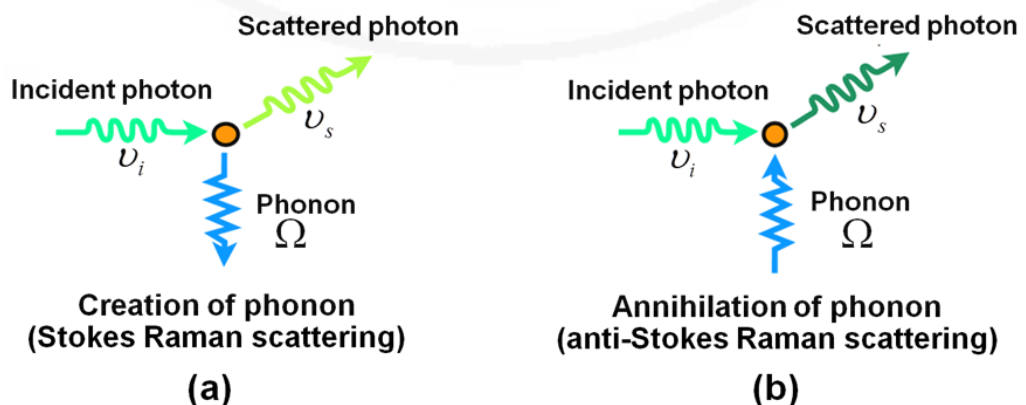
เมื่อแสงหรือโฟตอนตกกระทบวัสดุ จะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมภายในโครงผลึก จากภาพที่ 3.3 กำหนดให้ $\nu_i - \Omega$ และ $\nu_i + \Omega$ คือสโตกส์และแอนติสโตกส์ ตามลำดับ นั่นคือการทำให้โฟตอนที่กระเจิงออกมามีพลังงานเปลี่ยนไปจากเดิม ถ้าหากแสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานลดลงเรียกว่า การกระเจิงแบบสโตกส์ (Stokes Raman Scattering) และแสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานเพิ่มขึ้นเรียกว่า กระเจิงแบบแอนติสโตกส์ (Anti-Stokes Raman Scattering) แสดงในภาพ 3.3 การกระเจิงแบบรามานจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้นอยู่กับพันธะเคมีของวัสดุ ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างความถี่ของโฟตอนที่มาตกกระทบกับความถี่ของโฟตอนที่กระเจิงออกมาเรียกว่า รามานชิฟต์ (Raman shift) แสดงในสมการ (3.4)

$$Raman\ shift\ (cm^{-1}) = \frac{1}{\lambda_{incident}} - \frac{1}{\lambda_{scattered}} \quad (3.4)$$

เมื่อ $\lambda_{incident}$ คือ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ

$\lambda_{scattered}$ คือ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่กระเจิงออกมา

รามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่สามารถตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ เช่น การเพิ่มความเข้มข้นของธาตุ การวางตัวของโครงผลึก และความบกพร่องเชิงโครงสร้าง เป็นต้น โดยมีงานวิจัยอย่างแพร่หลายเกี่ยวสารกึ่งตัวนำในกลุ่มไนโตรเจนเจือจาง (III-As-N) ได้แก่ GaAsN และ InGaAsN และแสดงในตาราง 3.1 ดังนั้นในการทดลองนี้จะตรวจสอบว่าการอาบรังสีส่งผลต่อการเปลี่ยนของการเติมปริมาณไนโตรเจนในโครงผลึก



ภาพที่ 3.3 แผนภาพการกระเจิงแบบรามานแบบสโตกส์และแอนติสโตกส์

ตารางที่ 3.1 ค่า Raman shift ของโครงสร้างที่เกี่ยวข้องคู่กับพันธะของสารกึ่งตัวนำ InGaAsN
[12-16]

โครงสร้าง	Raman shift (cm ⁻¹)
GaAs (TO)	268
GaAs (LO)	286
cubic-Ge	300
cubic-InN (TO)	457
cubic-InN (LO)	588
N-related local vibrational mode (N-LVM)	470

หมายเหตุ : โหมดการสั่นของโฟนอนในแนวขวาง (Transverse Optical mode ; TO) และ โหมดการสั่นของโฟนอนในแนวนอน (Longitudinal Optical mode ; LO)

งานวิจัยนี้การวัดผลการกระเจิงแบบรามานถูกวัดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงในการกระตุ้นคือ เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร และขนาดของลำแสง (Spot size) มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 ไมโครเมตร และหัววัดแสงชนิด CCD ทำการวัดชิ้นงานละ 3 ตำแหน่ง ตำแหน่ง 3 ครั้ง วัดในช่วง 150-900 cm⁻¹ การตรวจสอบชิ้นงานเบื้องต้นที่ผ่านมานั้น ชิ้นงานที่ถูกนำไปตรวจสอบจะไม่ถูกทำลาย เมื่อผ่านกระบวนการตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้างทั้งหมดแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นการตรวจสอบโครงสร้างระดับไมโคร-นาโน เพื่อศึกษาความบกพร่องเชิงโครงสร้าง ชิ้นงานจะถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM ซึ่งต้องผ่านกระบวนการเตรียมชิ้นงานและในเทคนิคนี้เองชิ้นงานถูกทำลายและหมดไปได้ โดยโหมดการตรวจสอบ ได้แก่ โหมดการเลี้ยวเบน (diffraction mode) และโหมดการสร้างภาพ (image mode) เพื่อวิเคราะห์ข้อบกพร่องของโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้ เช่น ดิสโลเคชัน การจัดเรียงอะตอม และ ขอบเขตที่ผิดไปจากโครงสร้างเดิม (stacking faults) นอกจากนี้ เทคนิคการสร้างภาพแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ภาพพื้นสว่าง (bright field image) และภาพพื้นมืด (dark field image)

โหมดการเลี้ยวเบน (diffraction mode) ในกล้อง TEM แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ส่องผ่านชิ้นงานที่มีความบางมากและไปปรากฏที่หน้าจอฟอสเฟอร์เป็นจุดที่เรียกว่า จุดเลี้ยวเบน (diffraction spot) การเรียงตำแหน่งของจุดเลี้ยวเบนอยู่ในรูปแบบ 2 มิติ เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน (diffraction pattern) ดังนั้นในโครงสร้างผลึกศาสตร์ ประกอบด้วย

การวางตัวของโครงผลึก โครงสร้างผลึกและค่าคงที่โครงผลึก สามารถอนุมานได้มาจากรูปแบบการเลี้ยวเบน นอกจากนี้รูปแบบการเลี้ยวเบนใช้เพื่อการระบุระนาบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนเพื่อนำมาสร้างภาพใน 2 โหมดข้างต้น การเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในโครงผลึกเป็นไปตามเงื่อนไขของแบรกก์ ภาพที่ 3.4 แสดงแผนภาพรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในกล้อง TEM โดยเวกเตอร์ \vec{g} คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับระนาบสะท้อน $\{hkl\}$ มาจากลำอิเล็กตรอนตกกระทบ เรียกเวกเตอร์แลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice vectors) ขนาดของเวกเตอร์ \vec{g} เท่ากับส่วนกลับของระยะห่าง (d-spacing) ของระนาบ hkl ค่าระยะห่างของระนาบในโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกแสดงตามสมการ (3.5)

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3.5)$$

ดังนั้น

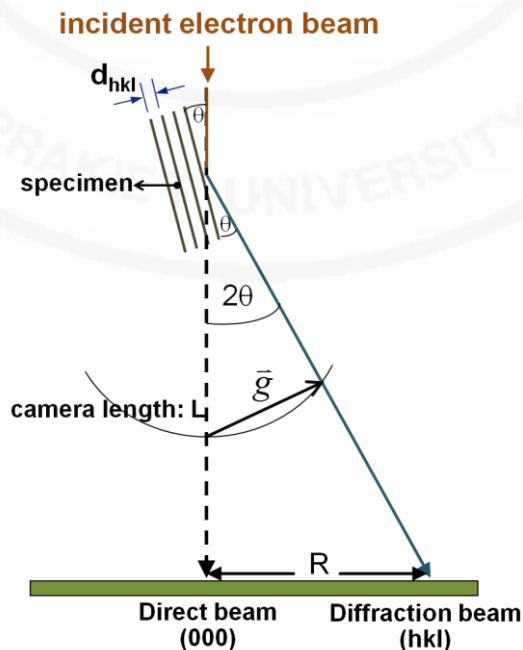
$$|\vec{g}| = \frac{1}{d} = \frac{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{a} \quad (3.6)$$

เมื่อ h, k, l คือจำนวนเต็มของดัชนีมิลเลอร์ของระนาบสะท้อน

d คือระยะห่างระหว่างระนาบในโครงสร้างผลึกในทิศทาง $[hkl]$

a คือค่าคงที่โครงผลึกของโครงสร้างแบบคิวบิก

\vec{g} คือเวกเตอร์ เวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับระนาบสะท้อน $\{hkl\}$



ภาพที่ 3.4 แผนภาพการเลี้ยวของอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน

ภาพที่ 3.4 แสดงแผนภาพรูปแบบการเกิดการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในกล้อง TEM มาแสดงยังหน้าจอฟอสเฟอร์ ถ้ามุมการเลี้ยวเบนมีค่าน้อยจะได้ $R/L = 2\theta$ ประกอบกับสมการของเงื่อนไบบรกก์ พิจารณาลำดับที่ 1 ($n = 1$) จะได้เป็น

$$\frac{R}{L} = \frac{\lambda}{d}$$

หรือ

$$Rd = \lambda L \quad (3.7)$$

ดังนั้น λL คือค่าคงที่ของกล้อง เมื่อแทนค่าสมการ (3.7) ลงในสมการ (3.6) ได้เป็น

$$\frac{R}{\lambda L} = \frac{1}{d} = \frac{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{a} \quad (3.8)$$

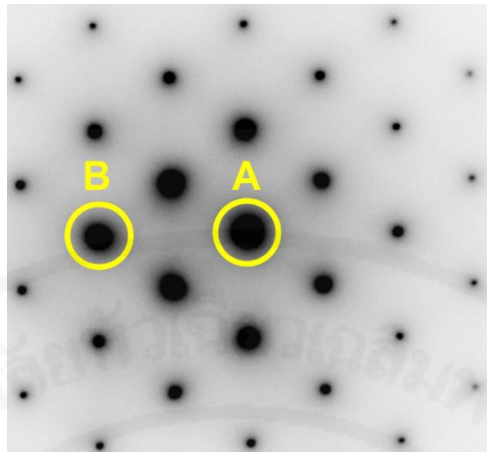
เมื่อ L, λ และ a คือ ค่าคงที่ของความยาวกล้อง ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนและค่าคงที่โครงผลึกตามลำดับ ดังนั้น ถ้าต้องการหาอัตราส่วนของ R_A ต่อ R_B จะได้เป็น

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{d_B}{d_A} = \frac{\sqrt{h_A^2 + k_A^2 + l_A^2}}{\sqrt{h_B^2 + k_B^2 + l_B^2}} \quad (3.9)$$

เมื่อ $h_A k_A l_A$ และ $h_B k_B l_B$ คือดัชนีมิลเลอร์ที่มาจากระนาบการเลี้ยวเบนของลำอิเล็กตรอนแสดงเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของ R_A และ R_B ดังแสดงค่าอัตราส่วน R_A ต่อ R_B ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนของ R_A และ R_B สำหรับโครงสร้างลูกบาศก์แบบกลางหน้า (Face center cubic : FCC) [17]

		R_A						
		hkl	{111}	{200}	{220}	{311}	{222}	{400}
R_B	{111}		1	1.16	1.63	1.91	2	2.31
	{200}		0.87	1	1.41	1.66	2.45	2.83
	{220}		0.61	0.71	1	1.17	1.22	1.41
	{311}		0.52	0.60	0.85	1	1.04	1.21
	{222}		0.50	0.58	0.82	0.96	1	1.15
	{400}		0.43	0.50	0.71	0.83	0.87	1



ภาพที่ 3.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ FCC โดยจุด A มาจากลำอิเล็กตรอนที่ส่องผ่านชิ้นงานมาตรงๆ และจุด B คือลำอิเล็กตรอนที่มาจาก การเลี้ยวเบน

โหมดการสร้างภาพ (Image mode) ลำดับแรกเมื่อลำอิเล็กตรอนส่องผ่านชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบจะเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนแสดงเป็นจุดเลี้ยวเบนบนหน้าจอฟอสเฟอร์แสดงในภาพที่ 3.5 จากนั้นนำช่องเปิดใกล้วัตถุ (objective aperture) เลือกลำอิเล็กตรอนที่ส่งโดยตรงผ่านชิ้นงานมาสร้างภาพ ภาพที่แสดงจะเรียกว่า “ภาพพื้นสว่าง” (จุด A) ในขณะที่เลือกลำอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆจุด A มาสร้างภาพ ภาพที่แสดงจะเรียกว่า “ภาพพื้นมืด” (จุด B) สำหรับภาพที่มาจากภาพพื้นสว่างและพื้นมืดนั้นมีความเปรียบต่างของแอมพลิจูด (amplitude contrast) ซึ่งการเกิดความต่างกันนี้เกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความเปรียบต่างของมวล-ความหนา (mass-thickness contrast) เนื่องจากความไม่เป็นผลึกหรือความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างของชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบ ในงานวิจัยนี้มีความสนใจศึกษาภาพพื้นมืดที่ได้จากความเปรียบต่างเนื่องจากโครงสร้างผลึกเดี่ยว (single crystal) ความคมชัดในภาพพื้นสว่างและภาพพื้นมืดจะเกิดจากความเปรียบต่างจากการเลี้ยวเบนมาจากการกระเจิงของระนาบของอะตอมในโครงสร้างผลึก ดังนั้นเมื่อลำอิเล็กตรอนมาตกกระทบลงบนชิ้นงานจะเป็นไปตามเงื่อนไขของแบรกก์

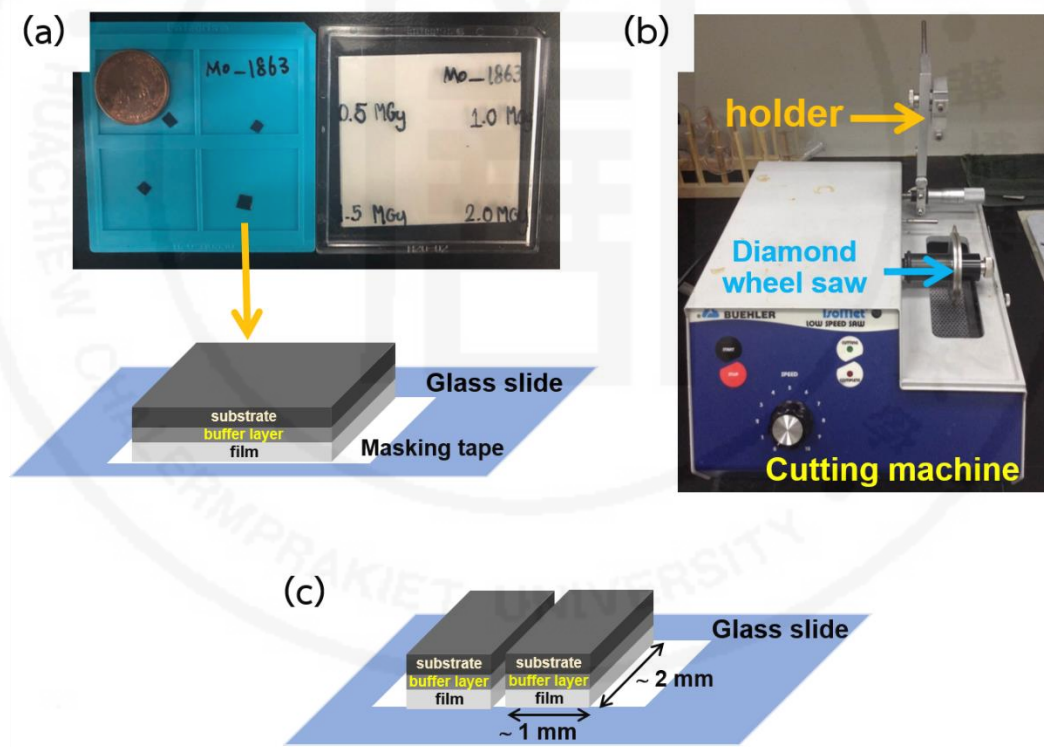
ความเปรียบต่าง (contrast: C) จึงถูกกำหนดในรูปของความแตกต่างของความเข้มในพื้นที่ที่อยู่ติดกัน ΔI เทียบกับพื้นที่ที่ 2

$$C = \frac{I_1 - I_2}{I_2} = \frac{\Delta I}{I_2} \quad (3.10)$$

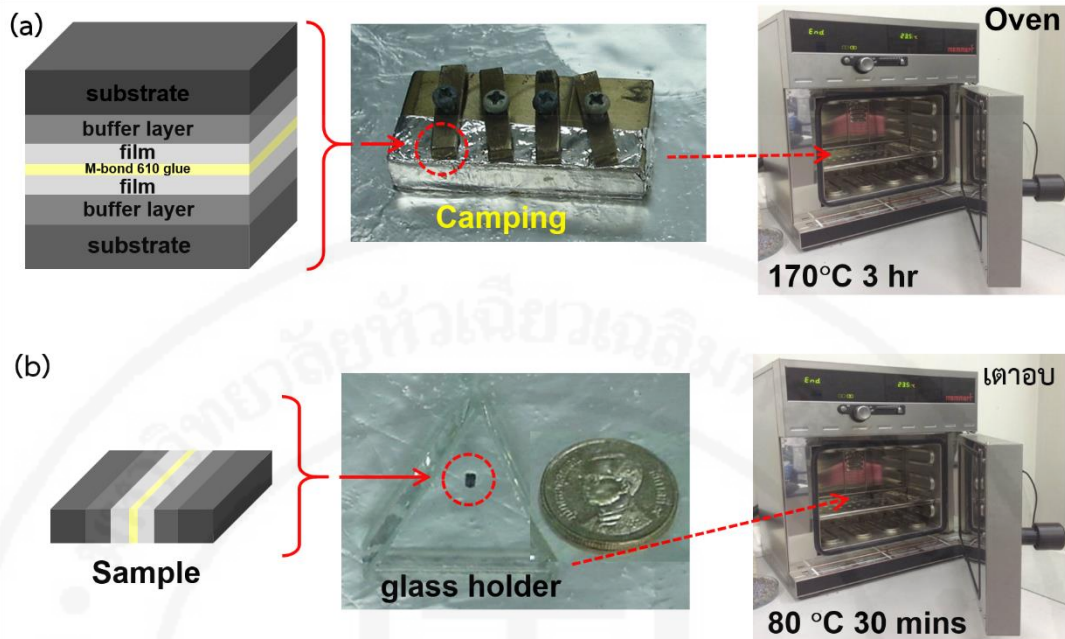
เมื่อ I_1 และ I_2 คือความเข้มของพื้นที่ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

การเตรียมชิ้นงานแบบตัดขวาง สำหรับนำไปตรวจสอบด้วยกล้อง TEM มี 4 ขั้นตอน ดังนี้

การตัดชิ้นงาน (cutting step) ก่อนตัดชิ้นงานต้องทำความสะอาดผิวหน้าด้วยอะซิโตน (acetone) และตามด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ (methyl alcohol) ทุกครั้งเพื่อกำจัดคราบความมันต่าง ๆ ให้ออกจากผิวหน้า ใช้เครื่องตัดชิ้นงานซึ่งใช้ใบเลื่อยที่ทำมาจากเพชร (diamond wheel saw) ตัด ใช้ชิ้นงานมีขนาดประมาณ 1×2 ตารางมิลลิเมตร มีขั้นตอนดังนี้ 1. นำชิ้นงานมาติดที่กระจกสไลด์ 2. นำชิ้นงานไปล็อกกับตัวจับของเครื่องตัด 3. ใช้ใบเลื่อยที่ทำมาจากเพชรตัดชิ้นงานด้วยความเร็วรอบต่ำ ในการตัด ได้ชิ้นงานขนาดที่เหมาะสมสำหรับใช้กับกริด (grid) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ในขั้นตอนสุดท้ายก่อนเข้าตรวจสอบด้วยกล้อง TEM ขั้นตอนการตัดชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดชิ้นงานแสดงดังภาพ 3.6



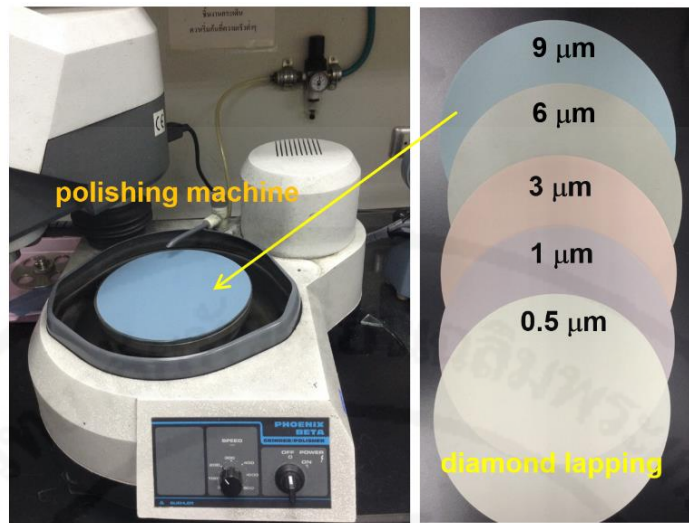
ภาพที่ 3.6 (a) ชิ้นงาน InGaAsN/GaAs/Ge (b) เครื่องตัดชิ้นงาน (c) แบบจำลองชิ้นงานเมื่อตัดเสร็จ



ภาพที่ 3.7 (a) ขั้นตอนการประกบชิ้นงาน (b) ขั้นตอนการติดชิ้นงานก่อนนำไปขัดบาง

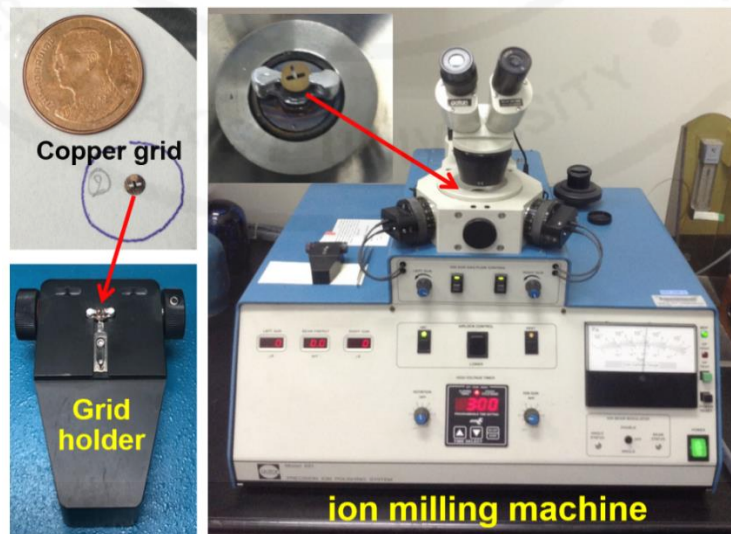
การประกบชิ้นงานเข้าด้วยกัน (clamping step) หลังจากตัดชิ้นงานในขั้นตอนแรกเสร็จก่อน จะประกบชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันนั้นต้องทำความสะอาดผิวหน้าชิ้นงานอีกครั้ง จากนั้นใช้กาวแบบ พิเศษ M-BOND 610 ทาลงบนผิวหน้า แล้วนำชิ้นงานมาประกบกัน เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานติดกันสนิทจึงใช้ตัวช่วยยึดการประกบกัน (clamping holder) และนำไปอบในตู้อบโดยใช้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง เพื่อให้กาวแห้งสนิท แสดงในภาพ 3.7 (a) จากนั้นเมื่อ ชิ้นงานประกบติดกันแล้ว จะนำชิ้นงานมีติดบนกระจกสามเหลี่ยมโดยใช้กาวร้อน และนำไปเข้าเตาอบที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 30 นาที แสดงในภาพ 3.7 (b) เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการขัด ชิ้นงานต่อไป

การขัดชิ้นงาน (polishing step) หลังจากได้ชิ้นงานที่ประกบกันแล้ว ในส่วนของขั้นตอนการ ขัดชิ้นงานซึ่งต้องการให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงานนั้น ชิ้นงานต้องมีความหนาประมาณ 100 นาโน เมตร ทำการขัดชิ้นงานโดยใช้แผ่นฟิล์มขัดเพชร (diamond lapping film) ขนาดของเพชรเริ่มจาก 9 6 3 1 และ 0.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ นำแผ่นฟิล์มขัดเพชรวางลงบนเครื่องขัดชิ้นงาน และขัดชิ้นงาน ให้มีความหนาเหลือครึ่งหนึ่งของความหนาเริ่มต้น และกลับชิ้นงานเพื่อขัดอีกด้านหนึ่งจนเหลือความ หนาประมาณ 50 ไมโครเมตร ถ้าขัดให้เหลือความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร อาจทำให้ชิ้นงานแตก และเกิดความเสียหายได้ แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่องขัดชิ้นงานและแผ่นฟิล์มขัดเพชรที่มีขนาดผลึกเพชรแตกต่างกัน

การใช้ลำไอออนเพื่อให้ตัวอย่างบางลง (ion milling step) ในขั้นตอนนี้ ชิ้นงานที่ผ่านการขัดมาแล้วจะถูกนำมาติดที่กริดทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร เพื่อนำมาเข้าเครื่องไอออนมิลลิ่ง (ion milling machine) แสดงดังภาพที่ 3.9 ซึ่งเครื่องไอออนมิลลิ่งนี้ทำงานโดยใช้ลำไอออนของก๊าซอาร์กอนในระดับพลังงานกิโลโวลต์ (keV) ยิงเข้าที่ชิ้นงานเพื่อกระแทกลอกผิวหน้าบาง ๆ ออก โดยเป็นกระบวนการที่มีความสะอาดสูง จนกระทั่งชิ้นงานมีความบางพอที่อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ จากนั้นตัวอย่างที่เตรียมเสร็จในกระบวนการนี้พร้อมนำเข้าสู่กล้อง TEM



ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์ใส่กริดเพื่อยึดชิ้นงานและเครื่องไอออนมิลลิ่ง

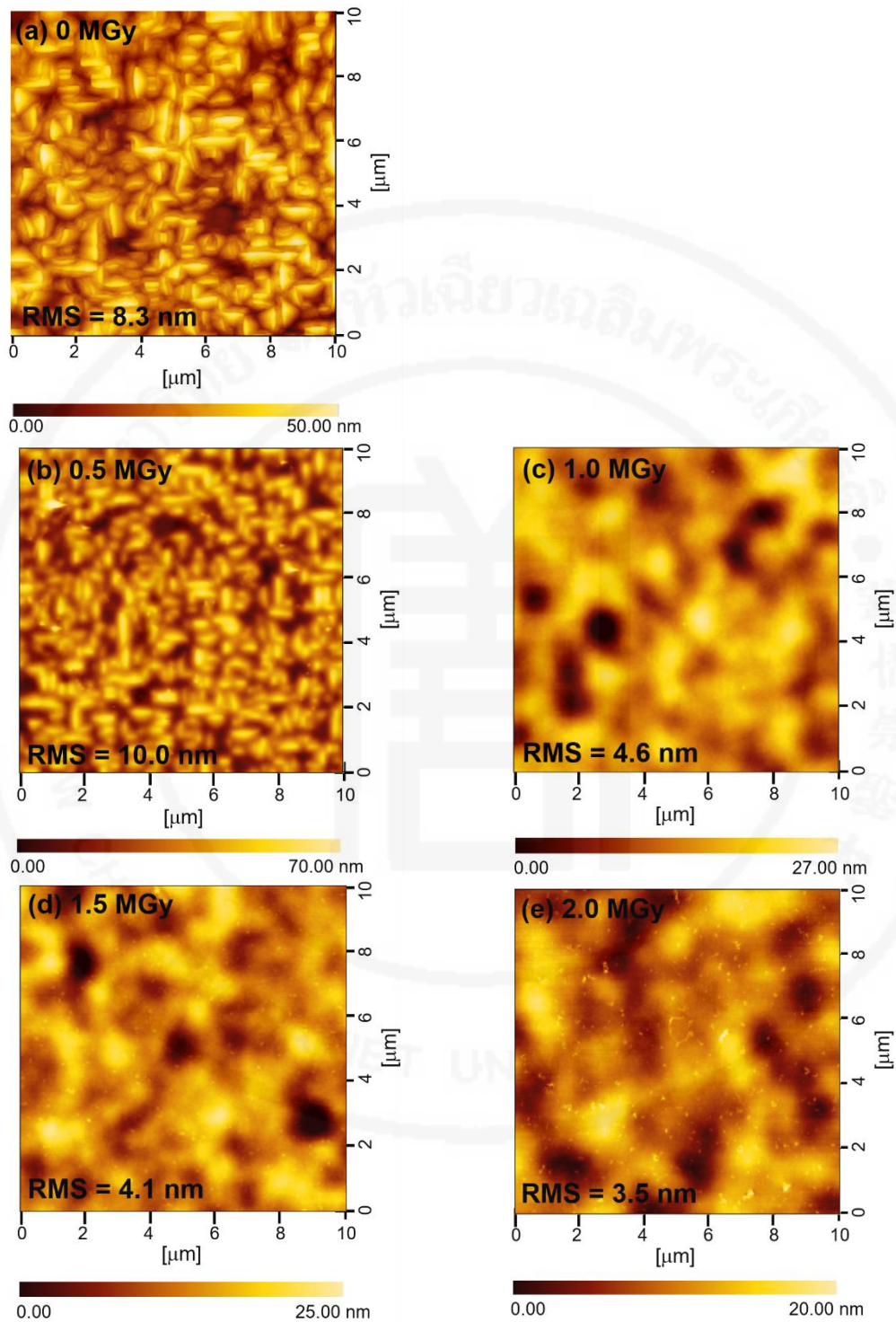
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

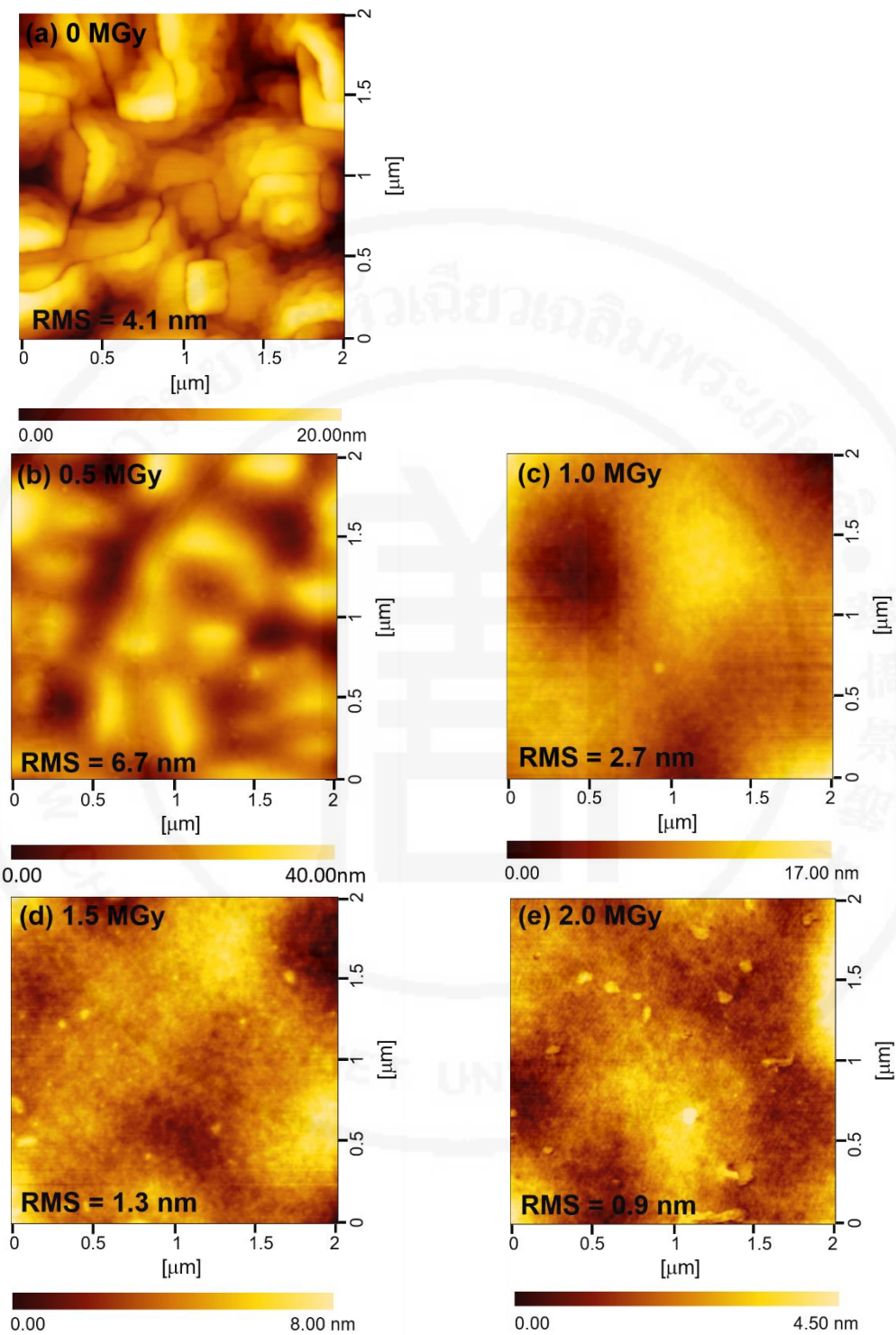
ฟิล์มบาง InGaAsN ที่ปลูกบนวัสดุฐานรอง Ge (InGaAsN/Ge) เจือไนการปลูกแบบค่าโครงสร้างผลึกเท่ากัน จำนวน 1 ชั้น ถูกนำมาแบ่งออกเป็น 5 ชั้น และนำไปอาบรังสีแกมมาจำนวน 4 ชั้น ที่อุณหภูมิห้องด้วย ^{60}Co gamma-ray cell ซึ่งมีพลังงานอยู่ในช่วง 1.17-1.33 MeV ได้ปริมาณรังสีเป็น 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 MGy ตามลำดับ รวมกับชั้นงานที่ไม่อาบรังสี 1 ชั้น เป็น 5 ชั้นงาน ดังนั้นในบทนี้จะศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม InGaAsN ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) ตรวจสอบผลการฉายรังสีแกมมาที่มีผลต่อขนาดโครงสร้างผลึกของฟิล์ม InGaAsN ด้วยเทคนิคเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูง (HRXRD) ผลการฉายรังสีแกมมาต่อโหมดการสั่นของชั้นงาน InGaAsN ด้วยเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน รวมทั้งถูกนำไปตรวจสอบความบกพร่องเชิงโครงสร้าง (defect) ในฟิล์ม InGaAsN เมื่อถูกฉายรังสีแกมมาที่มีปริมาณการดูดกลืนรังสีต่างๆ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

ผลของการฉายรังสีแกมมาที่มีผลต่อพื้นผิวและชั้นฟิล์มของ InGaAsN

ชั้นงาน InGaAsN/Ge ไปตรวจสอบพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ขนาด $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ และ $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ พบว่าลักษณะพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของขอบเขต (grain size) ใหญ่ขึ้น และค่าความขรุขระ (roughness) ในการวิเคราะห์พื้นผิวของชั้นงานด้วยเทคนิค AFM จะคำนวณค่าความขรุขระแบบค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง (Root Mean Square หรือ RMS roughness) ผลการทดลองพบว่าค่า RMS roughness แสดงค่าดังตารางที่ 4.1 มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.0 MGy แสดงถึงพื้นผิวมีความเรียบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแต่ละขอบเขตมาซ้อนทับกันทำให้กลายเป็นขอบเขตเดียวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 4.1 ภาพพื้นผิวของ InGaAsN/Ge ขนาด $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ที่มีปริมาณรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy

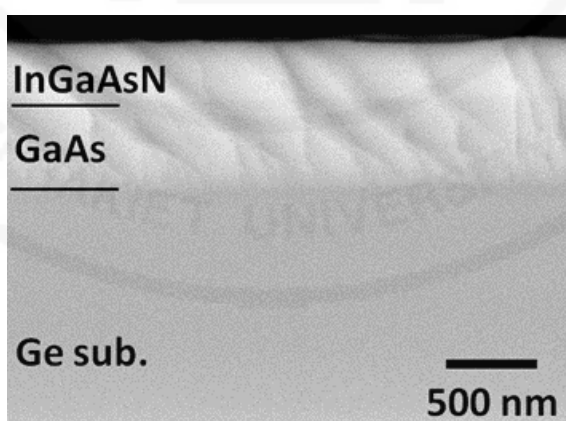


ภาพที่ 4.2 ภาพพื้นผิวของ InGaAsN/Ge ขนาด $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ ที่มีปริมาณรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy

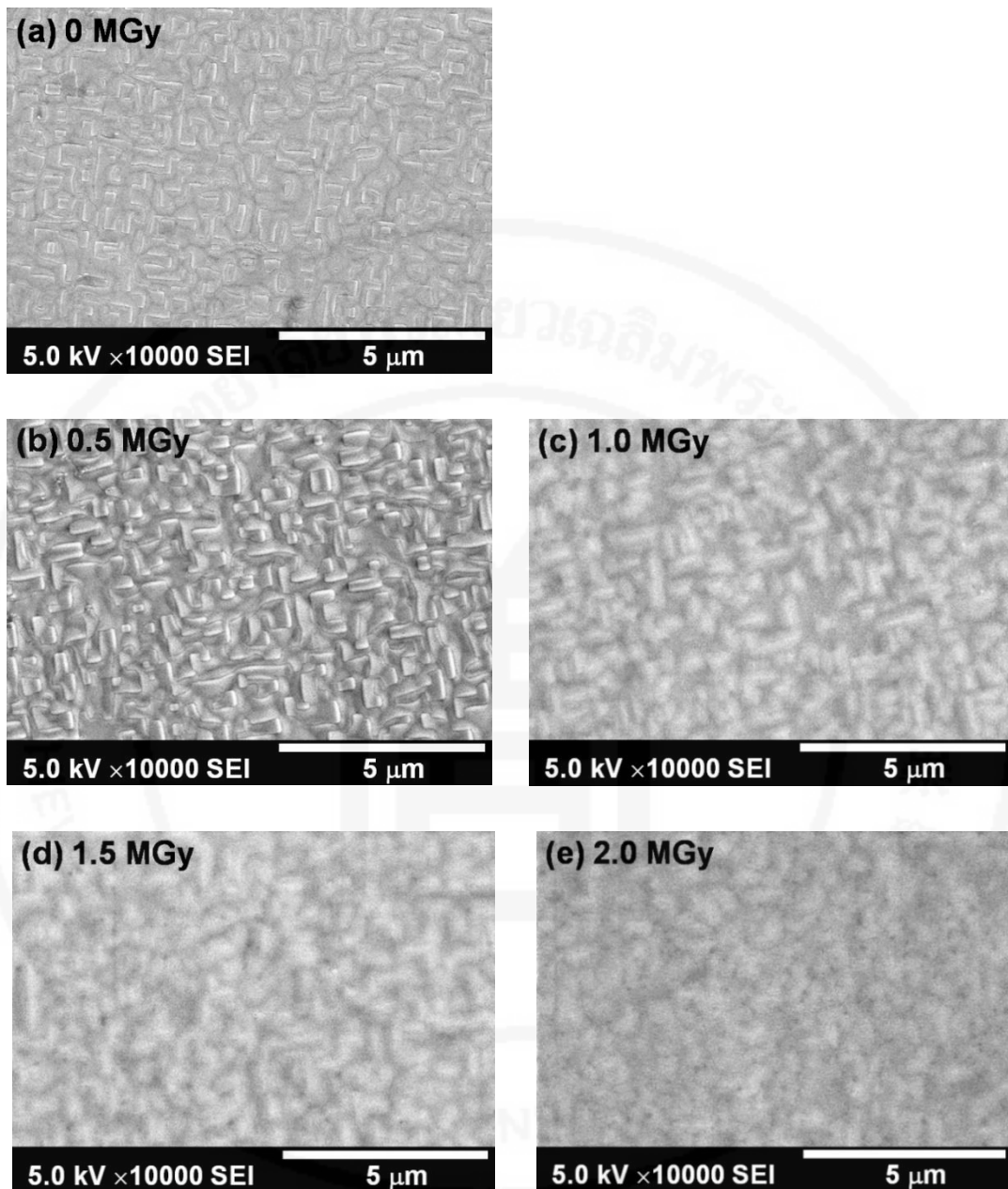
ตารางที่ 4.1 ค่า RMS roughness ของชั้นงาน InGaAsN ที่ปริมาณรังสีดูดกลืนแตกต่างกัน

RMS roughness (nm)	ปริมาณรังสี (MGy)				
	0	0.5	1.0	1.5	2.0
ขนาด 10×10 μm^2	8.3 nm	10.0 nm	4.6 nm	4.1 nm	3.5 nm
ขนาด 2×2 μm^2	4.1 nm	6.7 nm	2.7 nm	1.3 nm	0.9 nm

ภาพที่ 4.3 แสดงภาคตัดขวางของชั้นฟิล์ม InGaAsN ปลูกลงบนชั้นบัฟเฟอร์ GaAs และบนวัสดุฐานรอง Ge ตามลำดับ ตรวจสอบพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) โดยวัดความหนาของชั้นฟิล์ม InGaAsN ได้ประมาณ 350 นาโนเมตร และชั้นบัฟเฟอร์ GaAs ความหนาประมาณ 550 นาโนเมตร จากนั้นตรวจสอบพื้นผิวด้วยโหมดการวัดแบบ Secondary Electron Image (SEI) โดยใช้ศักย์เร่งอิเล็กตรอนที่ 5.0 kV และวัดที่กำลังขยาย 10000 20000 และ 50000 เท่า ตามลำดับ ภาพที่ 4.4 แสดงพื้นผิวของฟิล์ม InGaAsN กำลังขยาย 10000 เท่า (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy พบลักษณะพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.0 MGy ทำให้ขนาดของขอบเขต (grain size) ใหญ่ขึ้นและเมื่อตรวจสอบโดยใช้กำลังขยายเพิ่มขึ้นทำให้เห็นชัดเจนว่าแต่ละ grain มาซ้อนทับกัน ส่งผลให้พื้นผิวมีความเรียบเพิ่มมากขึ้น

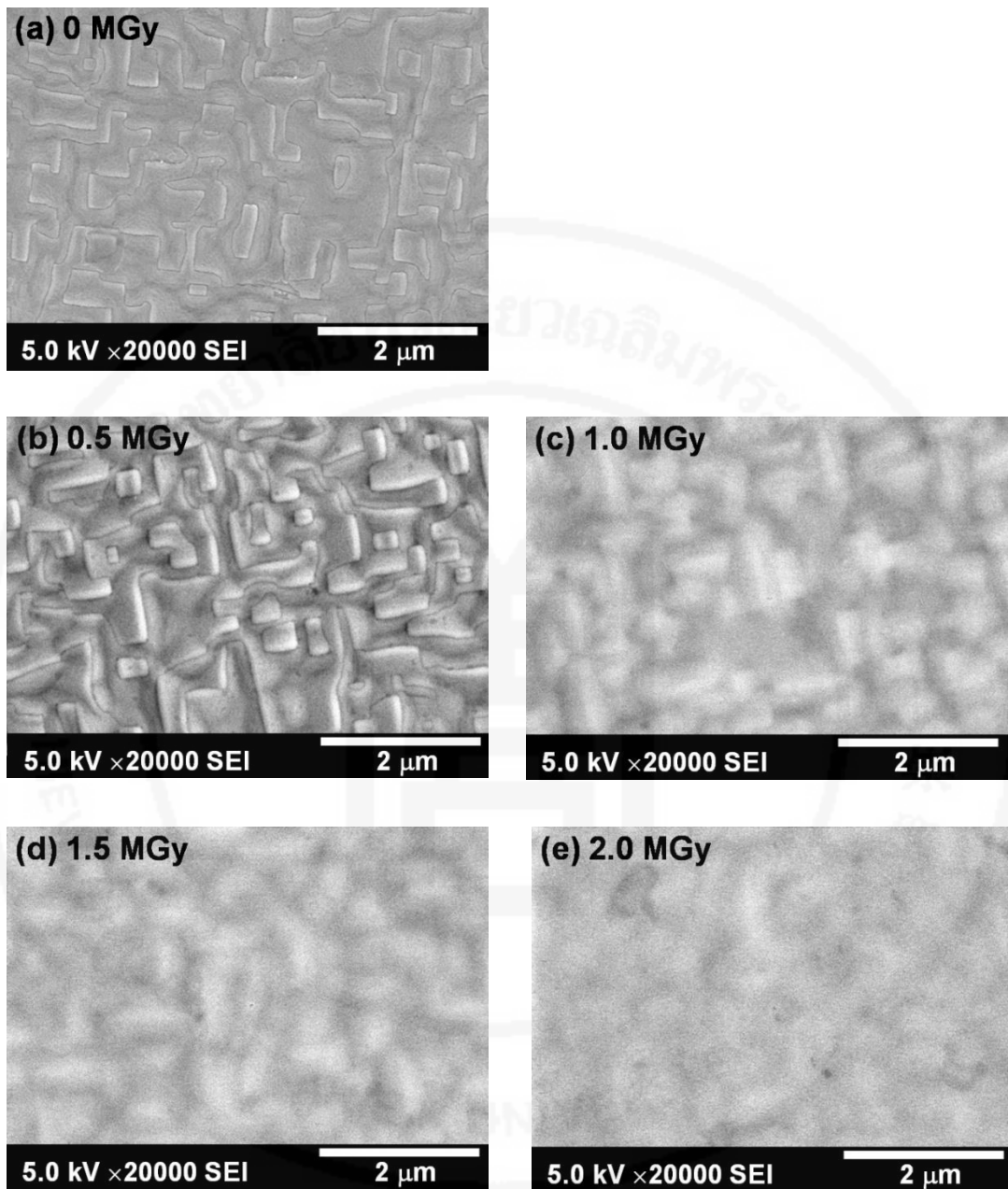


ภาพที่ 4.3 ภาพภาคตัดขวางของ ชั้นฟิล์ม InGaAsN ปลูกลงบนชั้นบัฟเฟอร์ GaAs และบนวัสดุฐานรอง Ge ตามลำดับ



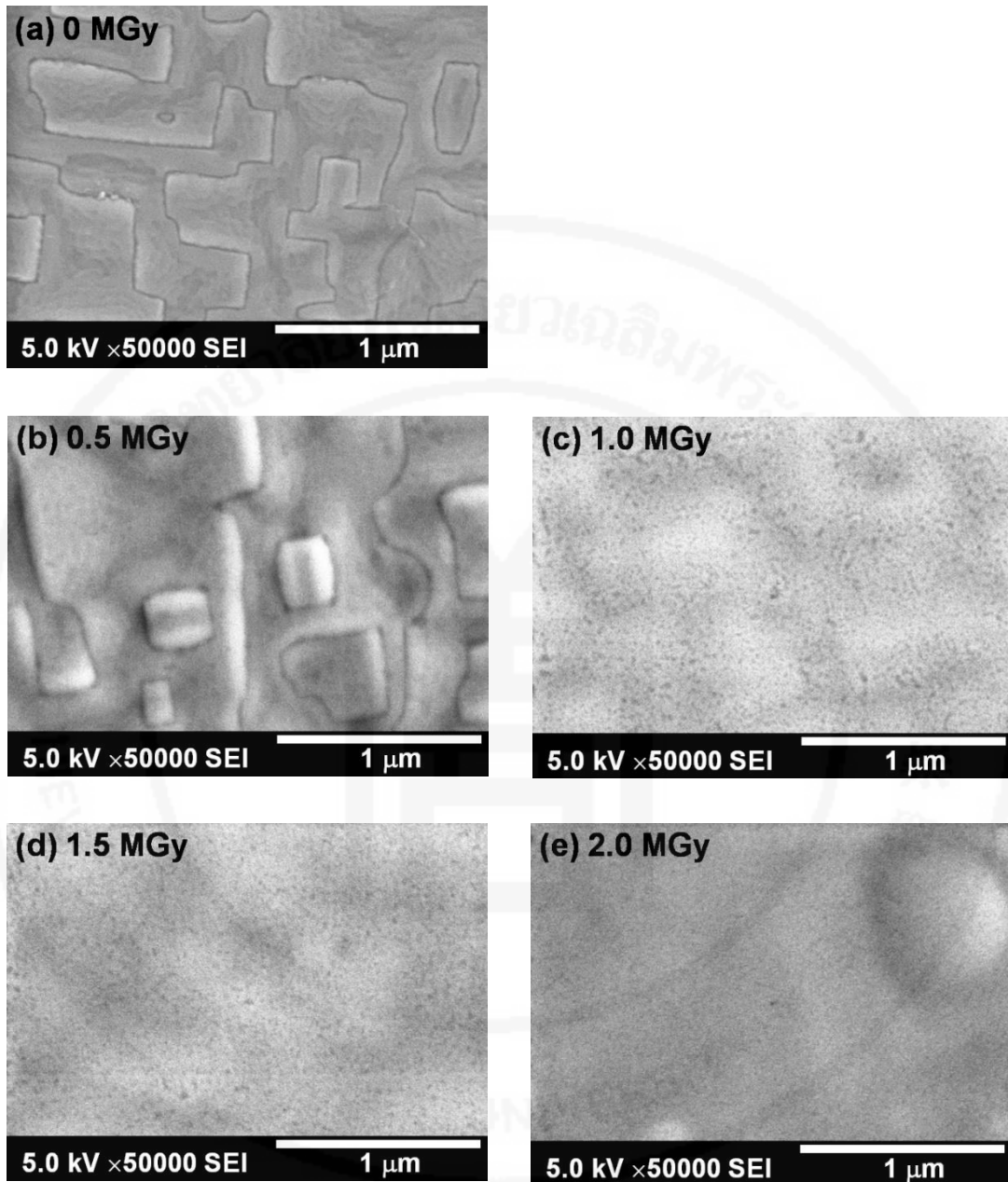
ภาพที่ 4.4 ภาพพื้นผิวของชั้นฟิล์ม InGaAsN กำลังขยาย 10000 เท่า มีปริมาณรังสีแกมมา

(a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy



ภาพที่ 4.5 ภาพพื้นผิวของชั้นฟิล์ม InGaAsN กำลังขยาย 20000 เท่า มีปริมาณรังสีแกมมา

(a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy



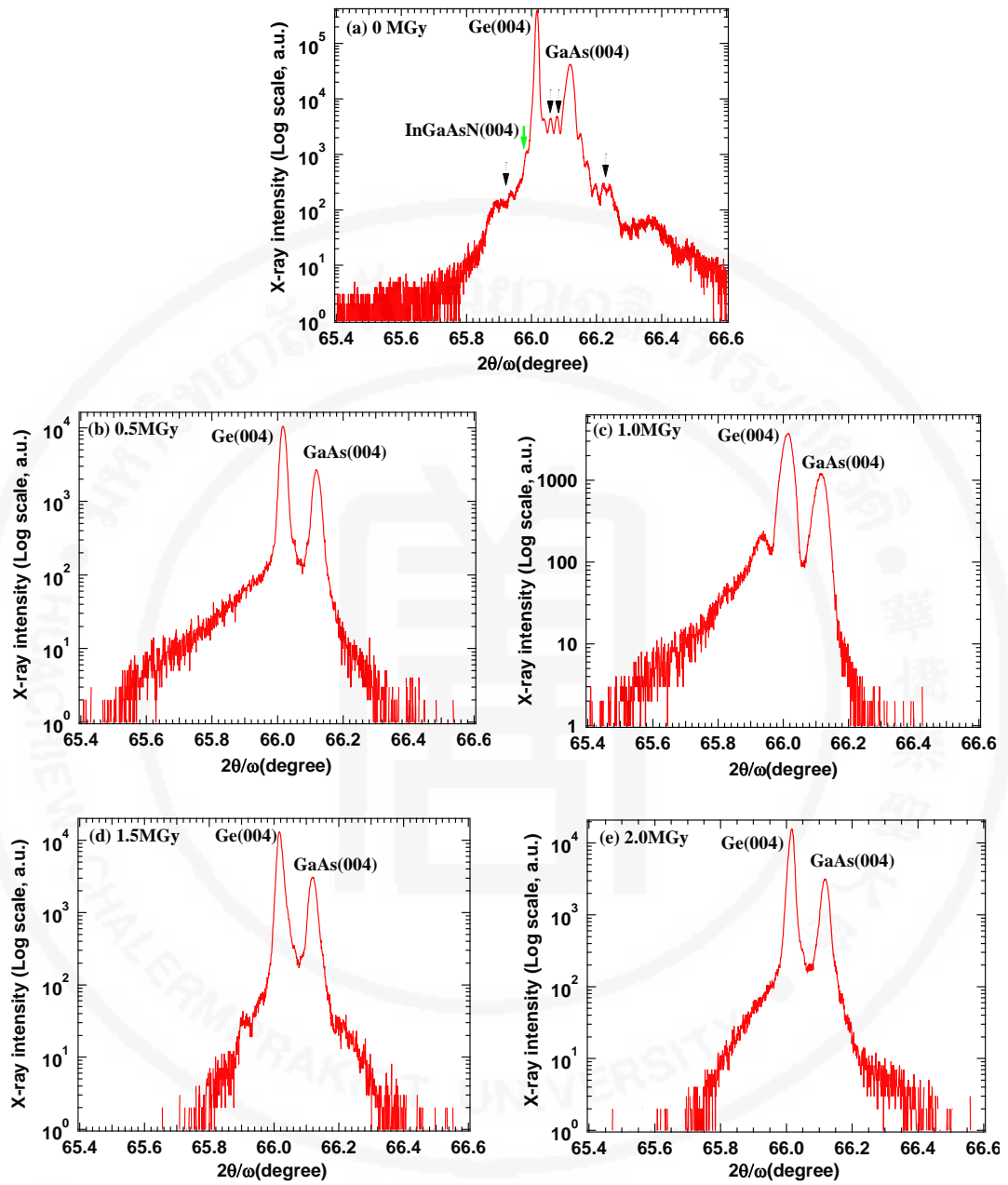
ภาพที่ 4.6 ภาพพื้นผิวของชั้นฟิล์ม InGaAsN กำลังขยาย 50000 เท่า มีปริมาณรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy

การเกิด grain size บนพื้นผิวของฟิล์มบาง InGaAsN ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ปลูกลงบนวัสดุฐานรอง Ge แสดงถึงภายในเกิดความบกพร่องเชิงโครงสร้างเรียกว่าแอนติเฟสโดเมน [18] ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งผลการทดลองจากการตรวจสอบด้วยเทคนิคนี้มีความสอดคล้องกับผล

การตรวจสอบจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมพบว่าค่า RMS roughness มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.0 MGy

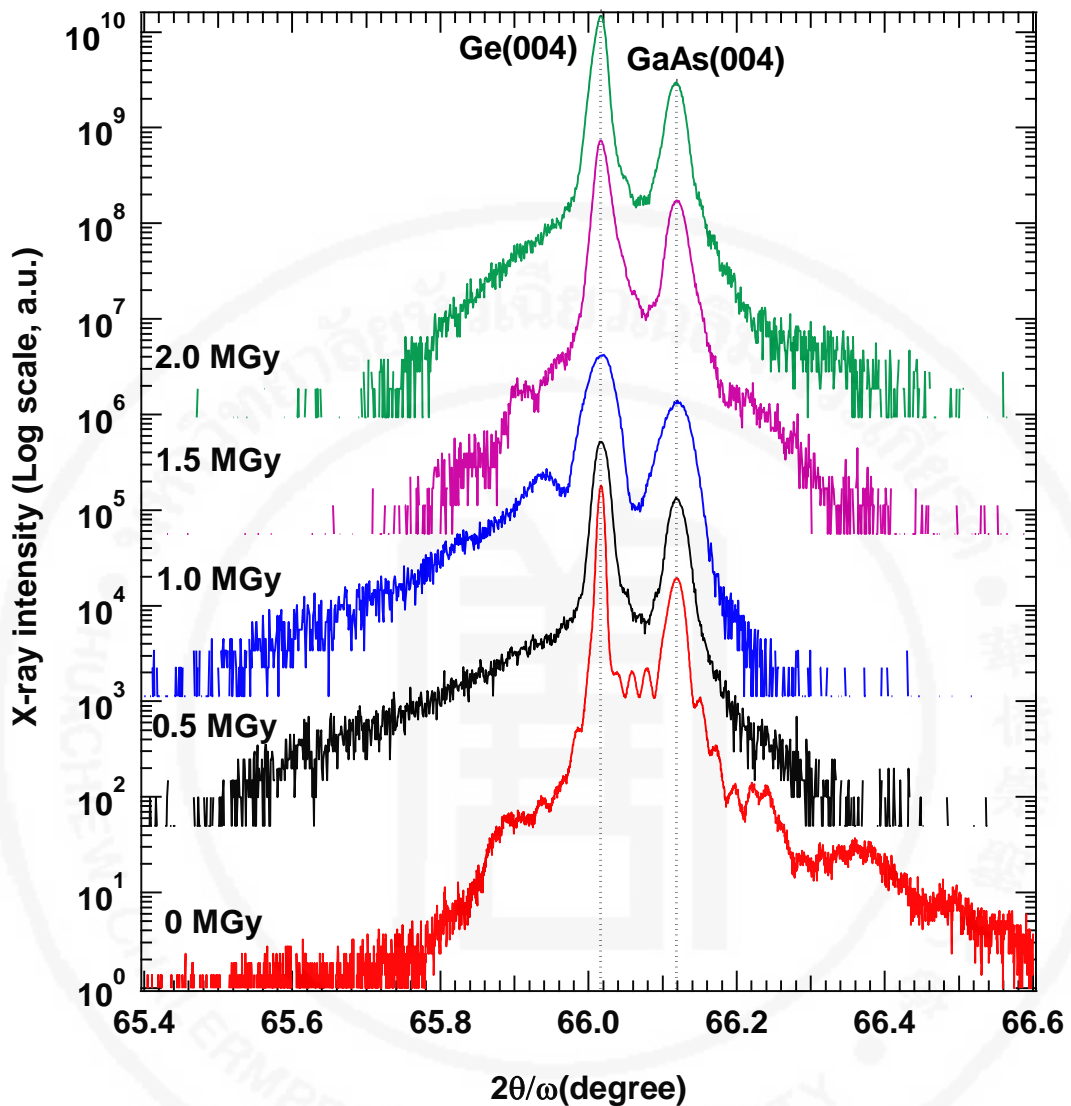
ผลการฉายรังสีแกมมาต่อขนาดโครงสร้างผลึกของ InGaAsN

ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน $2\theta/\omega$ ของฟิล์ม InGaAsN อาบรังสีแกมมา (a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy ตามลำดับ ที่ปลูกบนวัสดุฐานรอง Ge โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูง (HRXRD) ที่ระนาบ 004 ภาพที่ 4.7 (a) - (e) พบพีคการเลี้ยวเบนที่มีความเข้มสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง $2\theta/\omega$ เท่ากับ 66.017 องศา เมื่อนำไปคำนวณตามเงื่อนไขของแบรกก์ มีขนาดโครงสร้างผลึกเท่ากับ 5.657 Å ซึ่งเป็นของวัสดุฐานรอง Ge และพบพีคการเลี้ยวเบนถัดมาทางด้านขวาที่ตำแหน่ง $2\theta/\omega$ เท่ากับ 66.119 องศา มีขนาดโครงสร้างผลึกเท่ากับ 5.653 Å เป็นของชั้นบัฟเฟอร์ GaAs ภาพที่ 4.7 (a) 0 MGy พบไหล่พีคของฟิล์ม InGaAsN (004) แสดงด้วยลูกศรสีเขียว ซึ่งอยู่ติดกับพีคของวัสดุฐานรอง Ge เนื่องจากชั้นงานถูกปลูกแบบ lattice-matched ทำให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึกระหว่างฟิล์มกับวัสดุฐานรองมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบ Pendellösung fringes แสดงด้วยลูกศรสีดำ การพบพีคของ Pendellösung fringes แสดงให้เห็นว่าบริเวณพื้นผิวของชั้นฟิล์มและบริเวณรอยต่อมีความเรียบ เมื่อชั้นงาน InGaAsN/Ge ถูกฉายด้วยรังสีด้วยปริมาณต่างๆ ตั้งแต่ 0.5 – 2.0 MGy พบว่าไม่ปรากฏพีคของ Pendellösung fringes แสดงในภาพ 4.7 (b) - (e) แสดงให้เห็นว่าการอาบรังสีแกมมาส่งผลต่อความเรียบที่บริเวณพื้นผิวของชั้นฟิล์มและบริเวณรอยต่อลดลง



ภาพที่ 4.7 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูงของฟิล์ม InGaAsN ที่อาบรังสีแกมมา

(a) 0 MGy (b) 0.5 MGy (c) 1.0 MGy (d) 1.5 MGy และ (e) 2.0 MGy ตามลำดับ

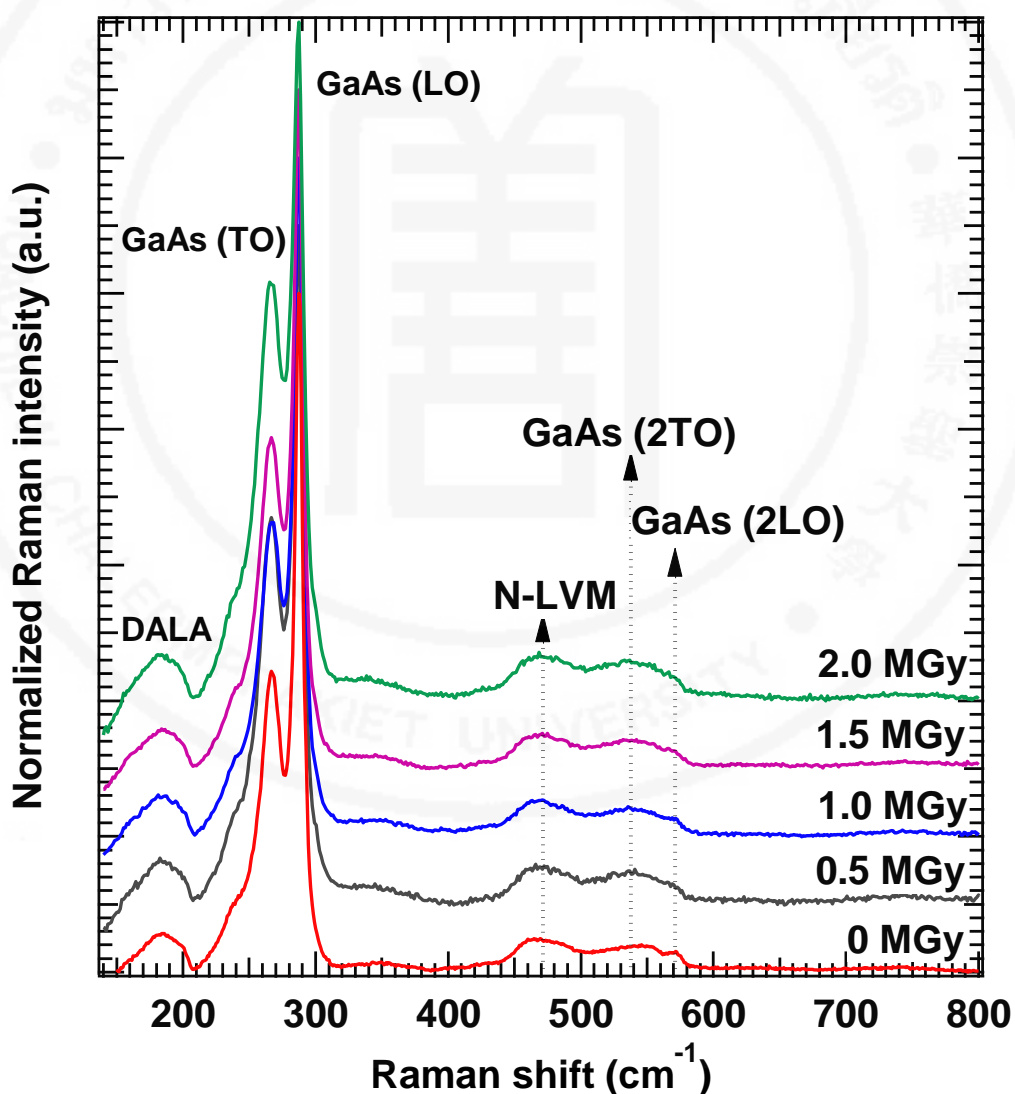


ภาพที่ 4.8 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูงของฟิล์ม InGaAsN ที่ปริมาณรังสีดูดกลืนแตกต่างกัน

ภาพที่ 4.8 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กำลังแยกสูงของฟิล์ม InGaAsN ที่อาบรังสีแกมมา 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 MGy เมื่อนำกราฟมาเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของพีค (broaden curve) ทั้งพีคของชั้นบัฟเฟอร์ GaAs และวัสดุฐานรอง Ge พบว่าเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นความกว้างของพีคก็เพิ่มขึ้นแสดงถึงการกระจายตัวของค่าคงที่โครงผลึก และเป็นไปได้ว่าเมื่อชิ้นงานได้รับปริมาณรังสีแล้วค่าคงที่โครงผลึกพยายามผ่อนคลายตัวเอง (strain relaxation)

ผลการฉายรังสีแกมมาต่อโหมดการสั่นของชั้นงาน InGaAsN

ภาพที่ 4.9 แสดงรามานสเปกตรัมของ InGaAsN/GaAs/Ge ที่มีปริมาณรังสีแกมมา 0 MGy 0.5 MGy 1.0 MGy 1.5 MGy และ 2.0 MGy ที่มีผลต่างของพลังงานของแสงที่ตกกระทบกับพลังงานที่แสงกระเจิง (Raman shift) ในช่วง $150\text{-}800\text{ cm}^{-1}$ ในทุกปริมาณรังสีแกมมา จากกราฟพบพีคที่ได้มีความกว้างมาก (broad peak) ในช่วง $160\text{-}215\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงโหมดการสั่นแบบอะคูสติกตามยาวที่เกิดความผิดปกติ (disorder-activated longitudinal acoustic (DALA) phonon mode) [19]

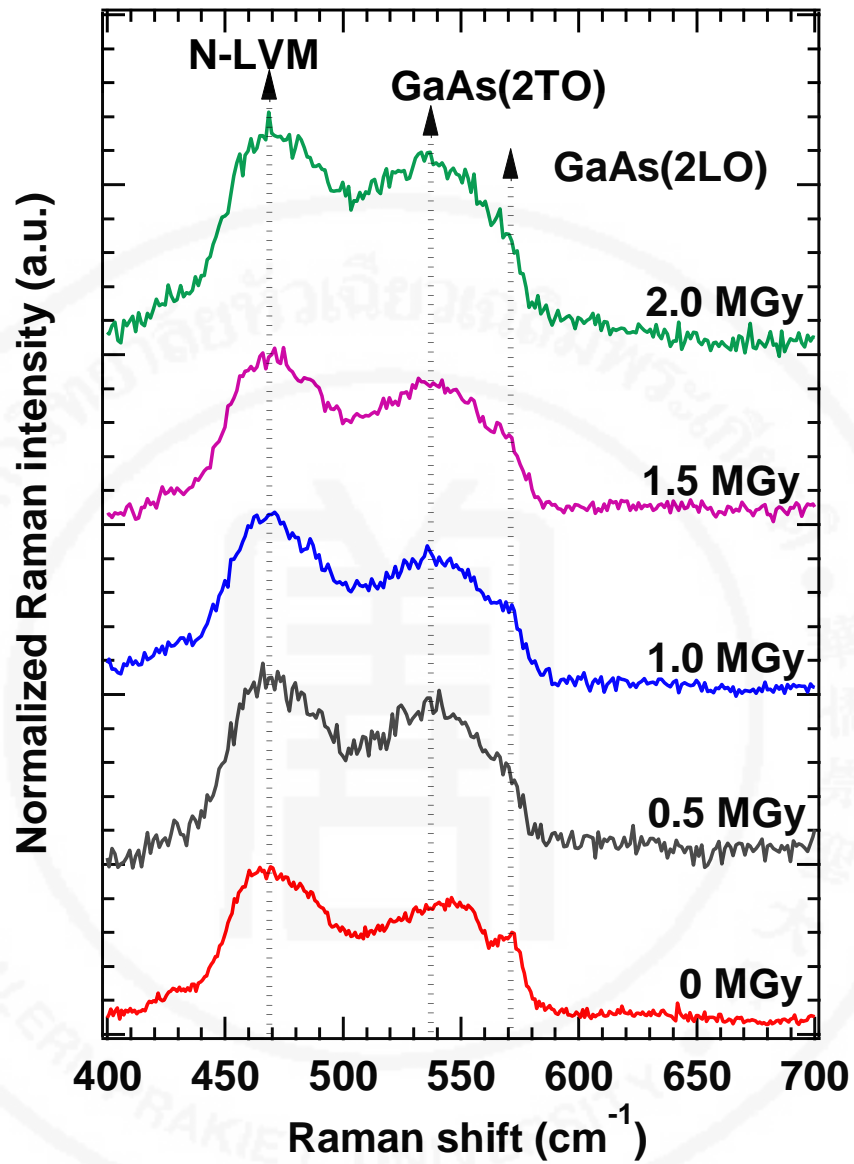


ภาพที่ 4.9 รามานสเปกตรัมของ InGaAsN/GaAs/Ge ที่มีปริมาณรังสีแตกต่างกัน

ที่ตำแหน่ง 237 cm^{-1} พบไหล่พิค (shoulder peak) โดยในกรณีการสั่นของพันธะ InAs จะมีพิคที่ 217 cm^{-1} เป็นโหมดการสั่นตามขวางของโฟนอน (Transverse optical phonon mode, TO) และมีพิคที่ 237 cm^{-1} เป็นโหมดการสั่นตามยาวของโฟนอน (Longitudinal optical phonon mode, LO) ดังนั้นแสดงว่าไหล่พิค 237 cm^{-1} คือ โหมดการสั่นตามยาวของโฟนอนของ InAs [20] ต่อมาพบพิคที่ 268 cm^{-1} และ 290 cm^{-1} แสดงโหมดการสั่นตามขวางของโฟนอนและโหมดการสั่นตามยาวของโฟนอนของ GaAs ตามลำดับ [19] โดยปกติในกฎการเลือก (selection rule) ของการกระเจิงแบบรามานจะไม่ปรากฏโหมดการสั่นของโฟนอนตามขวาง แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้พบโหมดการสั่นของโฟนอนตามขวางของ GaAs อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากโครงสร้างผลึกในแนวขนานและแนวตั้งฉากไม่เท่ากันเป็นผลจากความไม่สม่ำเสมอของจัดเรียงอะตอมของ Ga และ As นอกจากนี้พบพิคของรามานสเปกตรัมในช่วง $450\text{-}600\text{ cm}^{-1}$ ที่มีความเข้มต่ำ ดังนั้นเพื่อให้เห็นลักษณะรามานสเปกตรัมที่ชัดเจนจึงได้มุ่งเน้นไปที่รามานสเปกตรัมในช่วง $400\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ ดังแสดงในภาพที่ 4.10

ภาพที่ 4.10 พบพิคที่ 470 cm^{-1} เป็นโหมดการสั่นเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับไนโตรเจน (N-related local vibrational mode, N-LVM) จะเห็นได้ว่าสอดคล้องกับชั้นงานที่มีชั้นฟิล์มเป็น InGaAsN ซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบและที่ตำแหน่งพิคนี้แสดงถึงโหมดการสั่นของอะตอมไนโตรเจนที่มีอะตอมข้างเคียงเป็นอะตอมของแกลเลียม 4 อะตอม [16, 19, 21, 22] ต่อจากนั้นพบพิคที่ 540 cm^{-1} และไหล่พิคที่ 570 cm^{-1} ซึ่งเป็นรามานสเปกตรัมที่แสดงถึงโหมดการสั่นอันดับสองของโฟนอนตามยาวและตามขวางของ GaAs ตามลำดับ

นอกจากนี้ จากผลการทดลองด้วยเทคนิคการกระเจิงแบบรามานพบว่าเมื่อฉายปริมาณรังสีแกมมาที่ 0.5 MGy จะเห็นว่าความเข้ม (intensity) ของพิค N-LVM เพิ่มขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ว่าการอบชั้นงานด้วยรังสีแกมมาช่วยให้อะตอมของไนโตรเจนเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึก (lattice site) แทนที่ตำแหน่งของอะตอมอาร์เซนิกซึ่งเป็นธาตุหมู่ 5 เช่นกัน ทำนองเดียวกันกับการนำชั้นงานไปอบด้วยความร้อน (annealing) [23] เมื่อฉายปริมาณรังสีแกมมาที่ 1.0 MGy จะเห็นความเข้ม (intensity) ของพิค N-LVM ลดลง อย่างไรก็ตาม จึงตรวจสอบโดยการหาพื้นที่ใต้พิค N-LVM ด้วยโมเดลสมการ Lorentz Fit พบว่าเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นค่าพื้นที่ใต้พิค N-LVM เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าอะตอมของไนโตรเจนเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกแทนที่ตำแหน่งของอะตอมอาร์เซนิกเพิ่มมากขึ้นด้วย



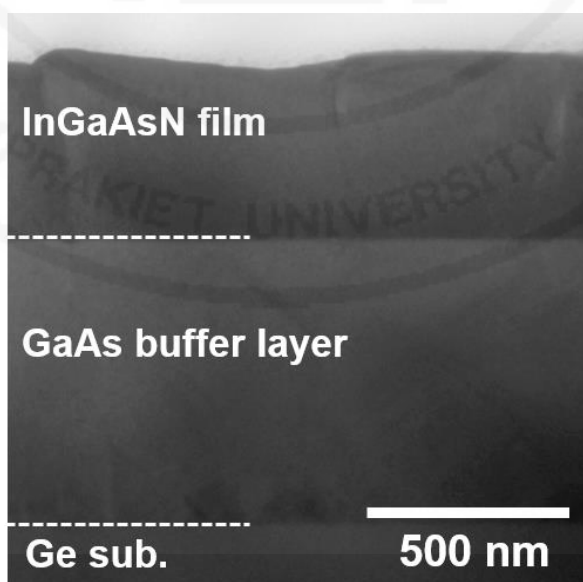
ภาพที่ 4.10 รามานสเปกตรัมของ InGaAsN/GaAs/Ge ในช่วง $400\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ ที่มีปริมาณรังสี

ดูดกลืนที่แตกต่างกัน

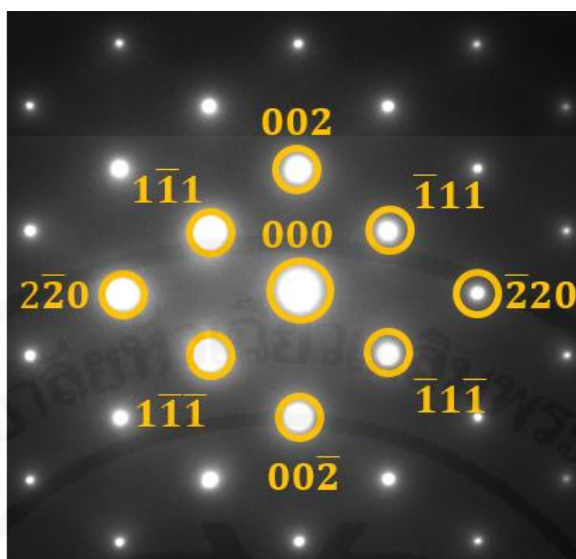
ผลการฉายรังสีแกมมาต่อโครงสร้างระดับไมโครของฟิล์ม InGaAsN

การตรวจสอบสมบัติเชิงโครงสร้างระดับไมโครของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge จะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน การตรวจสอบโครงสร้างด้วยหลายวิธีข้างต้นที่ผ่านมาพบการเปลี่ยนแปลงจากผลการฉายรังสีเมื่อชิ้นงานถูกฉายรังสีมากกว่า 1 MGy ขึ้นไป ดังนั้นการทดลองส่วนสุดท้ายนี้จะเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างก่อนฉายรังสีและหลังฉายรังสีที่ปริมาณการดูดกลืน 1.5 MGy

ภาพที่ 4.11 แสดงภาคตัดขวางภาพพื้นสว่างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ไม่ได้ฉายรังสี จากภาพพบชั้นของฟิล์ม InGaAsN ชั้นบัฟเฟอร์ GaAs และชั้นของวัสดุฐานรอง Ge ตามลำดับ วัดความหนาของชั้นฟิล์ม InGaAsN และความหนาของชั้นบัฟเฟอร์ GaAs ได้เป็น 390 และ 600 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับการวัดความหนาด้วยเทคนิคกล้อง FESEM จะเห็นว่าการตรวจสอบด้วยโหมดการสร้างภาพพื้นสว่างนั้นเห็นรายละเอียดของความบกพร่องเชิงโครงสร้างไม่ชัดเจน จึงต้องตรวจสอบด้วยโหมดการสร้างภาพพื้นมืด โดยก่อนการตรวจสอบด้วยโหมดภาพพื้นมืดนั้นต้องใช้โหมดการเลี้ยวเบนของลำอิเล็กตรอนตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ดังนั้นภาพที่ 4.12 แสดงดัชนีระนาบโครงสร้างผลึกที่มาจากผลการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจากบริเวณชั้นฟิล์ม InGaAsN (0 MGy) ในแกนโชน [110]

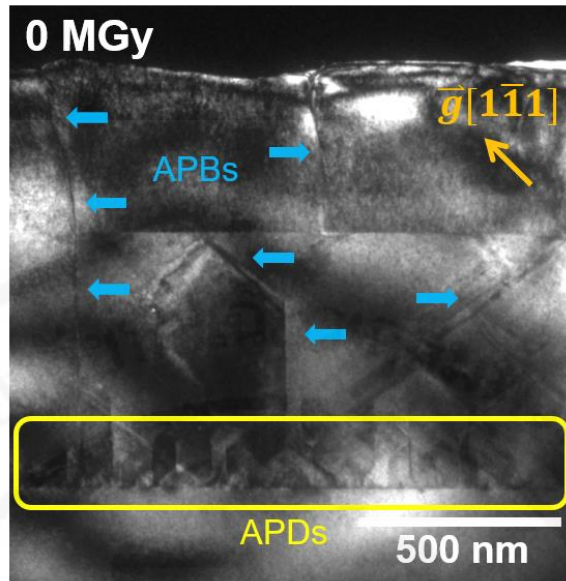


ภาพที่ 4.11 ภาคตัดขวางภาพพื้นสว่างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ไม่ได้ฉายรังสี



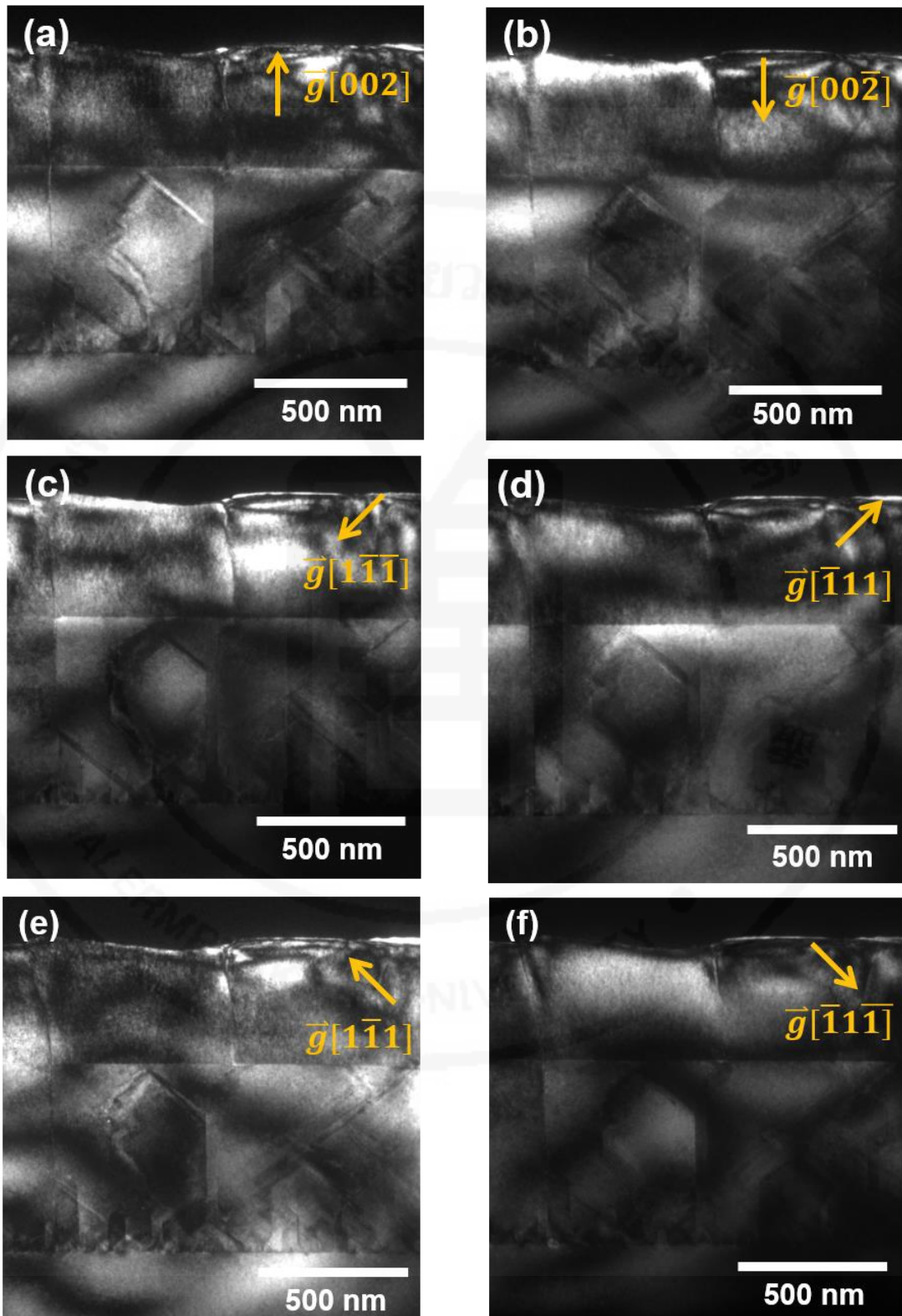
ภาพที่ 4.12 ดัชนีระนาบโครงสร้างที่มาจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจากบริเวณชั้นฟิล์ม InGaAsN (0 MGy) ในแกนโชน [110]

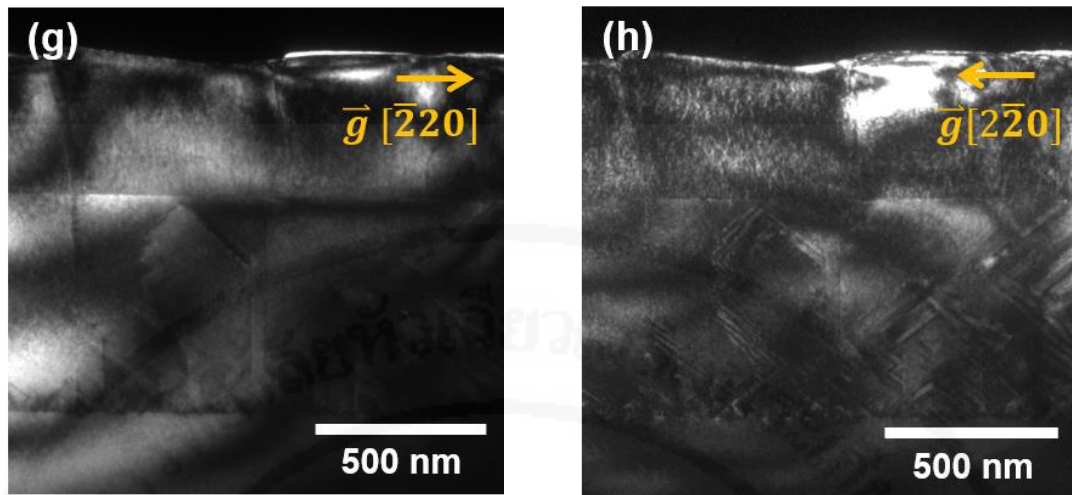
เพื่ออธิบายลักษณะของความบกพร่องเชิงโครงสร้างที่เกิดขึ้นในชั้นงานจึงยกตัวอย่างภาพที่ 4.13 เป็นภาคตัดขวางที่เห็นความเปรียบต่างชัดเจนที่สุด ภาพที่ 4.13 แสดงภาคตัดขวางพื้นมีดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ไม่ได้อาบรังสี (0 MGy) มาจากระนาบ $(1\bar{1}1)$ จะเห็นว่าพบความเปรียบต่างชัดเจนทั้งชั้นบัฟเฟอร์ GaAs และชั้นฟิล์ม InGaAsN โดยการตรวจสอบด้วยการสร้างภาพพื้นมีดจะมีข้อดีคือสามารถเห็นรายละเอียดของความบกพร่องเชิงโครงสร้างได้ชัดเจน สาเหตุของลักษณะความเปรียบต่างที่เห็นจากภาพในเบื้องต้นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ GaAs และ InGaAsN นั้น มี Ga และ In เป็นธาตุหมู่ 3 สำหรับ As และ N เป็นธาตุหมู่ 5 โดยมี Ge เป็นธาตุหมู่ 4 ทำหน้าที่เป็นวัสดุฐานรอง ดังนั้นการปลูกผลึกของธาตุหมู่ 3 และ หมู่ 5 (InGaAsN และ GaAs) ซึ่งเป็นวัสดุมีขั้ว และมีโครงสร้างผลึกเป็นคิวบิกแบบกลางหน้าลงบนวัสดุฐานรองที่เป็นธาตุหมู่ 4 (Ge) ซึ่งเป็นวัสดุไม่มีขั้วและมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพชร (diamond structure) โดยทั่วไปจะพบความบกพร่องเชิงโครงสร้างเรียกว่า แอนติเฟสโดเมน (antiphase domain: APD) [24, 25] เนื่องจากวัสดุฐานรองเป็นธาตุหมู่ 4 ในชั้นแรกนั้น อะตอมของธาตุหมู่ 3 หรือ หมู่ 5 สามารถจับคู่พันธะกับธาตุหมู่ 4 ก็ได้ จึงทำให้เกิดการแบ่งขอบเขตขึ้น หรือเรียกว่า ขอบเขตแอนติเฟส (antiphase boundary: APB) [24, 25] ดังนั้นจะพบความบกพร่องเชิงโครงสร้างประเภทแอนติเฟสโดเมนมากในบริเวณรอยต่อของชั้นบัฟเฟอร์และวัสดุฐานรอง นอกจากนี้พบว่าจำนวนของแอนติเฟสโดเมนลดลงในบริเวณชั้นฟิล์ม InGaAsN เนื่องจากโครงสร้างผลึกของ InGaAsN และ GaAs มีโครงสร้างเดียวกันและถูกปลูกแบบค่าคงที่โครงสร้างผลึกเท่ากัน



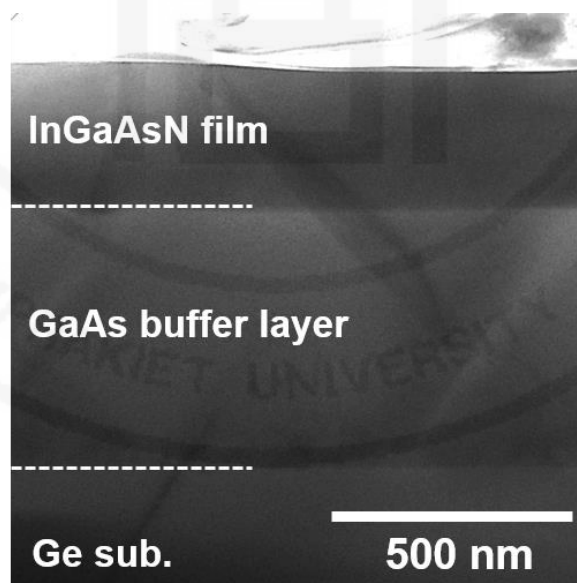
ภาพที่ 4.13 ภาคนตัดขวางพื้นมีดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ไม่ได้แอบรังสี (0 MGy) มาจากระนาบ ($1\bar{1}1$)

ภาพที่ 4.14 แสดงภาคนตัดขวางภาพพื้นมีดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge (0 MGy) ที่เลี้ยวเบนมาจากระนาบ ระนาบ (a) (002) (b) ($00\bar{2}$) (c) ($1\bar{1}\bar{1}$) (d) ($\bar{1}11$) (e) ($1\bar{1}\bar{1}$) (f) ($\bar{1}11$) (g) ($2\bar{2}0$) และ (h) ($2\bar{2}0$) ประโยชน์ของการตรวจสอบด้วยโหมดภาพพื้นมีดโดยเลื่อนช่องเปิดเลนส์วัตถุให้ไปตรงกับตำแหน่งแนวของลำอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากระนาบต่าง ๆ แต่เมื่อตรวจสอบโดยใช้ลำอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากระนาบตรงกันข้ามในภาพรูปแบบการเลี้ยวอิเล็กตรอน ได้แก่ (a) (002) ตรงข้ามกับ (b) ($00\bar{2}$) (c) ($1\bar{1}\bar{1}$) ตรงข้ามกับ (d) ($\bar{1}11$) (e) ($1\bar{1}\bar{1}$) ตรงข้ามกับ (f) ($\bar{1}11$) และ (g) ($2\bar{2}0$) ตรงข้ามกับ (h) ($2\bar{2}0$) ทำให้เห็นความเปรียบเทียบของความบกพร่องได้ชัดเจนมากขึ้น จะเห็นว่าความเปรียบเทียบรูปร่างของความบกพร่องให้ความมืดและความสว่างตรงข้ามกัน เนื่องจากระนาบที่มาจากกระเจิงมีจากการเกิดแอนติเฟสโดเมน เนื่องจากการหมุนรอบทิศทาง $[001]$ ไป 90 องศา หรือการหมุนไป 180 องศา รอบทิศทาง $[110]$ ในแนวอน $[26]$ นอกจากนี้ อาจเกิดจากการปลูกผลึกของอะตอม Ga และอะตอม As ที่ยังไม่สมบูรณ์ในชั้นแรก (monolayer) ที่ยังครอบคลุมไม่ทั่วชั้นของวัสดุฐานรอง Ge

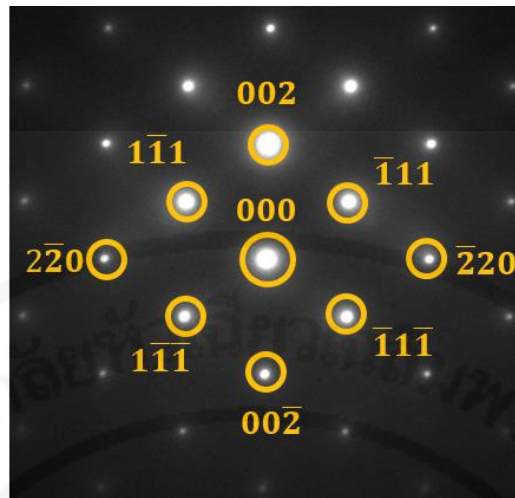




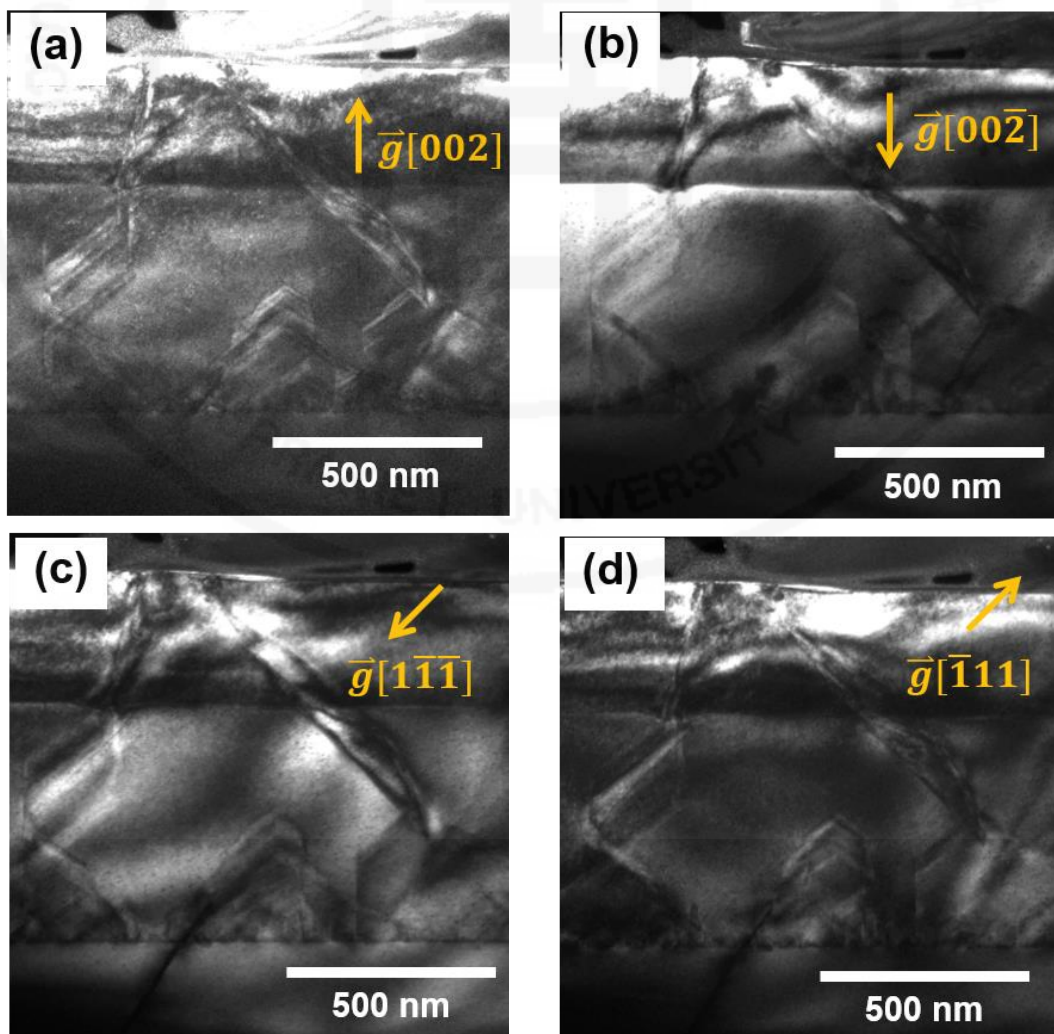
ภาพที่ 4.14 ภาคตัดขวางภาพพื้นมืดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge (0 MGy) ที่มาจากระนาบ (a) (002) (b) (00 $\bar{2}$) (c) (1 $\bar{1}\bar{1}$) (d) ($\bar{1}11$) (e) (1 $\bar{1}\bar{1}$) (f) ($\bar{1}11$) (g) ($\bar{2}\bar{2}0$) และ (h) (2 $\bar{2}0$)

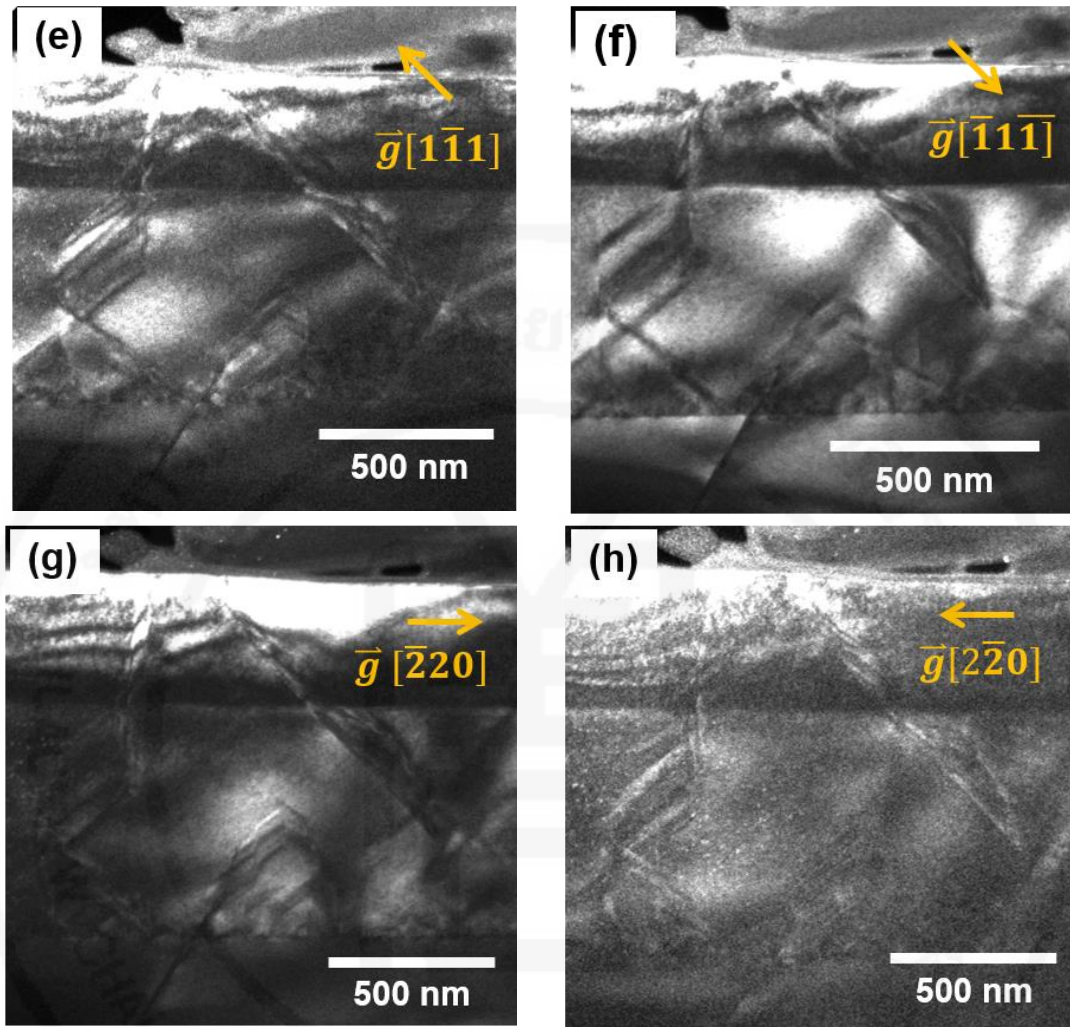


ภาพที่ 4.15 ภาคตัดขวางภาพพื้นสว่างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ถูกฉายรังสีแกมมามีปริมาณการดูดกลืน 1.5 MGy



ภาพที่ 4.16 ดัชนีระนาบโครงสร้างผลึกที่มาจากผลการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจากบริเวณชั้นฟิล์ม InGaAsN (1.5 MGy) ในแกนโซน [110]





ภาพที่ 4.17 ภาคตัดขวางภาพพื้นมิตของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ที่อาบรังสี 1.5 MGy ที่มาจากระนาบ (a) (002), (b) (00 $\bar{2}$), (c) (1 $\bar{1}\bar{1}$), (d) ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$), (e) (1 $\bar{1}\bar{1}$), (f) ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$), (g) ($\bar{2}\bar{2}\bar{0}$) และ (h) (2 $\bar{2}\bar{0}$)

ภาพที่ 4.15 แสดงภาคตัดขวางภาพพื้นสว่างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN/GaAs/Ge ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณการดูดกลืน 1.5 MGy พบความแตกต่างบริเวณชั้นบัพเฟอร์ GaAs ต่อเนื่องมายังชั้นฟิล์ม InGaAsN เพื่อให้เห็นความแตกต่างของความบกพร่องเชิงโครงสร้างชัดเจน ตรวจสอบโดยใช้โหมดการสร้างภาพพื้นมิต ภาพที่ 4.16 แสดงดัชนีระนาบโครงสร้างผลึกที่มาจาก การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจากบริเวณชั้นฟิล์ม InGaAsN (1.5 Mgy) ในแกนโซน [110] จะพบว่าดัชนี ระนาบโครงสร้างผลึกยังคงสอดคล้องและมีรูปแบบเดียวกันกับภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อขึ้นงาน InGaAsN/GaAs/Ge ถูกอาบรังสีแกมมาแล้วนั้นโครงสร้างผลึกยังคงเป็นคิวบิกแบบกลางหน้า จากนั้น ตรวจสอบด้วยโหมดสร้างภาพพื้นมิต แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าบริเวณรอยต่อของชั้นบัพเฟอร์ GaAs

และวัสดุฐานรอง Ge ยังคงพบแอนติเฟสโดเมนปริมาณมากเหมือนกับชิ้นงานก่อนอบรังสี แต่เมื่อสังเกตบริเวณชั้นบัฟเฟอร์ พบความแตกต่างของความบกพร่องเชิงโครงสร้างลักษณะคล้ายสามเหลี่ยมขนาดใหญ่มาซ้อนทับกัน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่พบว่าค่า RMS roughness มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.0 MGy นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดขอบเขตแอนติเฟสจากยอดของแอนติเฟสโดเมนส่งต่อไปยังชั้นฟิล์มบาง InGaAsN จึงมีความเป็นไปได้ว่าชิ้นงานที่ถูกฉายรังสีเกิดความบกพร่องเชิงโครงสร้างเพิ่มขึ้น



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ InGaAsN ปลูกลงบนชั้นบัฟเฟอร์ GaAs และวัสดุฐานรอง Ge (001) โดยมีเงื่อนไขการปลูกผลึกเป็นแบบค่าคงที่โครงสร้างผลึกเท่ากัน ซึ่งงานถูกแบ่งออกเป็น 5 ชั้น นำไปฉายรังสีแกมมาที่มีปริมาณการดูดกลืน 0 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 MGy จากนั้นนำมาตรวจสอบด้วยเทคนิค AFM FESEM HRXRD และรามานสเปกโตรสโคปีสุดท้ายจะตรวจสอบปริมาณความบกพร่องเชิงโครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิคกล้อง TEM

ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้อง AFM พบว่าพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของขอบเขตใหญ่ขึ้นและค่า RMS roughness มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.0 MGy แสดงถึงพื้นผิวมีความเรียบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแต่ละ grain มาซ้อนทับกัน สอดคล้องกับผลการตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM เมื่อตรวจสอบโดยใช้กำลังขยายเพิ่มขึ้นทำให้เห็นชัดเจนว่า แต่ละ grain มาซ้อนทับกัน ส่งผลให้พื้นผิวมีความเรียบเพิ่มมากขึ้น

ผลการตรวจสอบขนาดโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูง พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง InGaAsN ที่ไม่ได้ฉายรังสีแกมมามีค่าใกล้เคียงกับค่าวัสดุฐานรอง Ge เป็นไปตามเงื่อนไขการปลูกผลึก และพบ Pendellösung fringes แสดงถึงบริเวณพื้นผิวของชั้นฟิล์มและบริเวณรอยต่อมีความเรียบ เมื่อขึ้นงาน InGaAsN/Ge ถูกฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณการดูดกลืนตั้งแต่ 0.5 MGy ขึ้นไป พบว่าไม่ปรากฏฟิสิกของฟิล์ม InGaAsN แสดงว่าขนาดค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มมีค่าเท่ากับวัสดุฐานรอง และไม่พบ Pendellösung fringes แสดงว่าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มและวัสดุฐานรองมีความเรียบลดลง

ผลการตรวจสอบด้วยโหมดการสั่นของขึ้นงานด้วยเทคนิคการกระเจิงแบบรามาน พบโหมดการสั่นเฉพาะของไนโตรเจน (N-LVM) เนื่องจากขึ้นงานมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในชั้นฟิล์ม ดังนั้นเมื่อขึ้นงานถูกฉายรังสีแกมมาความเข้มฟิสิก N-LVM เพิ่มขึ้นแสดงถึงมีอะตอมของไนโตรเจนเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงสร้างผลึกเพิ่มมากขึ้นทำนองเดียวกันกับการนำขึ้นงานไปอบด้วยความร้อน

ผลการตรวจสอบโครงสร้างระดับไมโครของฟิล์ม InGaAsN ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โดยการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของความบกพร่องเชิงโครงสร้างระหว่างขึ้นงานไม่ได้ฉายรังสีและฉายรังสีที่มีปริมาณการดูดกลืน 1.5 MGy จากการตรวจสอบด้วยโหมดภาพพื้นมิตพบความบกพร่องเชิงโครงสร้างประเภท ขอบเขตแอนติเฟสและแอนติเฟสโดเมน ทั้ง

ชั้นงานที่ฉายรังสีและไม่ได้ฉายรังสีแกมมา อย่างไรก็ตาม พบว่าชั้นงานที่ถูกฉายรังสีมีลักษณะของความเปรียบต่างเพิ่มขึ้น

ผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาต่อโครงสร้างผลึกฟิล์มบาง InGaAsN/GaAs/Ge สามารถทำให้อะตอมของไนโตรเจนในชั้นฟิล์ม InGaAsN เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ไม่ได้อยู่ในโครงผลึก (interstitial sites) ไปแทนที่ตำแหน่งอะตอมของอาร์เซนิกหรือไปแทนที่ช่องว่างในโครงผลึก (vacancy sites) เนื่องจากเกิดการถ่ายเทพลังงานของรังสีแกมมาส่งไปยังอะตอมของไนโตรเจน



บรรณานุกรม

- [1] Friedman DJ, Geisz JF, Kurtz SR, Olson JM, 1-eV solar cells with GaInNAs active layer. *J Cryst Growth*. 1998;195:409-15.
- [2] Kaplar RJ, Kwon D, Ringel SA, Allerman AA, Kurtz SR, Jones ED, *et al.* Deep levels in p- and n-type InGaAsN for high-efficiency multi-junction III-V solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2001;69:85-91.
- [3] Papež N, Gajdoš A, Dallaev R, Sobola D, Sedlák P, Motúzc R, *et al.* Performance analysis of GaAs based solar cells under gamma irradiation. *Applied Surface Science*. 2020;510:145329-1-8.
- [4] Tansua N, Mawst LJ, The role of hole leakage in 1300-nm InGaAsN quantum well lasers *Appl. Phys Lett*. 2003;82:1500–2.
- [5] Klangtakai P, Sanorpim S, Yoodee K, Ono W, Nakajima F, Katayama R, *et al.* Characterization of MOVPE grown GaAs_{1-x}N_x/GaAs multiple quantum wells emitting around 1.3- μ m-wavelength region, in: *Proceedings of the 2nd IEEE-NEMS*. 2007:701–706.
- [6] Wanarattikan P, Sanorpim S, Denchitcharoen S, Uesugi K, Kikuchi T, Kuboya S, *et al.* Effect of N incorporation on growth behavior of InGaAsN/GaAs/Ge multi-layered structure by MOVPE, *Advanced Materials Research*. 2013;802:129-133.
- [7] Sanorpim S, Nakajima F, Ono W, Katayama R, Onabe K. High-nitrogen-content InGaAsN films on GaAs grown by metalorganic vapor phase epitaxy with TBAs and DMHy. *Phys Status Solidi A*. 2006;203:1612-7.
- [8] Gelczuk Ł, Józwiak G, Moczala M, Dłuzewski P, Dabrowska-Szata M, Gotszalk TP. Strain relaxation induced surface morphology of heterogeneous GaInNAs layers grown on GaAs substrate. *J Cryst Growth*. 2017;470:108-12.
- [9] Kudrawiec R, Sek G, Misiewicz J, Li LH, Harmand JC. Investigation of recombination processes involving defect-related states in (Ga,In)(As,Sb,N) compounds. *Eur Phys J Appl Phys*. 2004;27:313-6.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Lai ST, Alexiev D, Nener BD. Comparison between deep level defects in GaAs induced by gamma, 1 MeV electron, and neutron irradiation. *J Appl Phys.* 1995;78(6):3686-90.
- [11] Klangtakai P., Sanorpim S., Wattanawareekul A., Suwanyangyaun P., Srepusharawoot P., Onabe K. Effect of gamma-ray irradiation on structural properties of GaAsN films grown by metal organic vapor phase epitaxy. *J Cryst Growth.* 2015;418:145–152.
- [12] Hashimoto A, Kitano T, Nguyen AK, Masuda A, Yamamoto A, Tanaka S, et al. Raman Characterization of Lattice-matched GaInAsN Layers Grown on GaAs (001) Substrates. *Sol Energ Mater Sol Cell.* 2003;75:313-7.
- [13] Verma P, Jain KP, Abbi SC. Raman Scattering Probe of Ion-implanted and Pulse Laser Annealed GaAs. *J Appl Phys.* 1996;79(8):3921-6.
- [14] Wakaki M, Iwase M, Show Y, Koyama K, Sato S, Nozaki S. et al. Raman Spectroscopy of Germanium Films Deposited with Cluster-beam Technique. *Physica B.* 1996;219&220:535-7.
- [15] Iwahashi Y, Yaguchi H, Nishimoto A, Orihara M, Hijikata Y, Yoshida S. RF-MBE Growth of Cubic InN Films on MgO (001) Substrates. *Phys Status Solidi C,* 2006;3(6):1515-8.
- [16] Alt HCh, Egorov AYu, Riechert H, Wiedemann B, Meyer JD, Michelmann RW, et al. Local Vibrational Mode Absorption of Nitrogen in GaAsN and InGaAsN Layers Grown by Molecular Beam Epitaxy. *Physica B,* 2001;302–303:282-90.
- [17] Williams DB, Carter CB, *Transmission Electron Microscope, A textbook for Materials Science.* A Division of Plenum Press Publishing corporation; Springer; 2002.
- [18] Uesugi K, Kikuchi T, Kuboya S, Sanorpim S, Onabe K. MOVPE Growth of InGaAsN Films on Ge (001) On-axis and Vicinal substrates. *Phys Status Solidi C.* 2011;9:542-5.
- [19] Parayanthal P., Pollak FH. Raman scattering characterization of $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ heterojunctions: Epilayer and interface. *Appl. Phys. Lett.* 1982;4:961-3.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] Begum N, Bhatti AS, Jabeen F, Rubini S, Martelli F, 2010, Phonon Confinement Effect in III-V Nanowires [book online]. IntechOpen [cited 2019 Nov 10] Available from <http://www.intechopen.com/books/nanowires/phonon-confinement-effect-in-iii-v-nanowires>.
- [21] Mintairov AM, Blagnov PA, Melehin VG, Faleev NN, Merz JL, Qiu Y. Ordering Effects in Raman Spectra of Coherently Strained GaAs_{1-x}N_x. Physical Review B, 1997;24:15836-41.
- [22] Series D, Geppert T, Kohler K, Ganser P, Wagner J. Dilute Group III-AsN: Bonding of Nitrogen in GalnAsN and AlGaAsN on GaAs and Realization of Long Wavelength (2.3 μm) GalnAsN QWs on InP. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 2003;744:M10.2.1
- [23] Klangtakai P, Sanorpim S, Yoodee K, Ono W, Nakajima F, Katayama R, et al. Post-growth thermal annealing of high N-content GaAsN by MOVPE and its effect on strain relaxation. J Cryst Growth. 2007;298:140-4.
- [24] Holt D.B. Antiphase Boundary in Semiconducting Compounds. J Phys Chem Solid 1969;30:1297-308.
- [25] Kroemer H. Polar-on-nonpolar Epitaxy. J Cryst Growth. 1987;81:193-204.
- [26] Né meth I, Kunert B, Stolz W, Volz K. Ways to quantitatively detect antiphase disorder in GaP films grown on Si (001) by transmission electron microscopy. J Cryst Growth. 2008;310:4763-7.



ภาคผนวก

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล ผศ.ดร.พรสิริ วนรัฐีกาล

ประวัติการศึกษา วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

วท.ม. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปร.ด. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สถานที่ติดต่อ สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ โทรศัพท์ 0-2312-6300 ต่อ 1416

