

การปลูกผลึกเกลือมอร์เช่ในเคแบบเอพิแทกซ์จากเฟสของเหลว
ในชุดอุปกรณ์แนวตั้ง



นาย อนุพงศ์ สว่างประภา

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

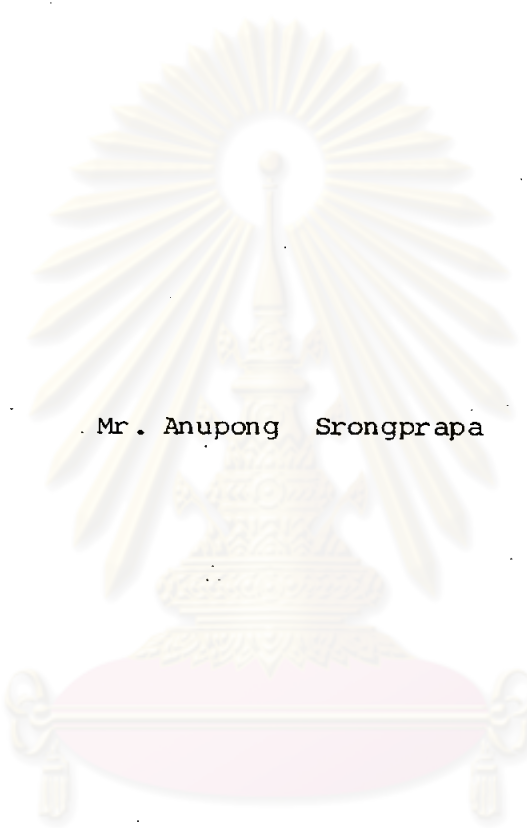
พ.ศ. 2529

ISBN 974-566-986-5

013455

118186780

Epitaxial Growth of Gallium Arsenide Crystals from the Liquid
Phase in a Vertical Apparatus



Mr. Anupong Srongprapa

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science

Department of Physics
Graduate School

Chulalongkorn University

1986

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปลูก สลิกเกล เลียมอาร์ เซไนต์แบบเอพิแทกซ์จาก เฟสของเหลว
ในชุดอุปกรณ์แนวตั้ง

โดย

นายอนุพงศ์ สรประภา

ภาควิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.บรรยง โทประเสริฐพงศ์



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรชัย พิศาลบุตร)

รักษาการในตำแหน่งรองคณบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนในตำแหน่งคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร สิ่งทะพันธ์)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ ฉัตรภรณ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประไพพรรณ ฉันทิกุล)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรยง โทประเสริฐพงศ์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือ ความพยายามและการร่วม
แก้ปัญหาอย่างใกล้ชิดของ รศ.ดร.บรรยง โทประเสริฐพงศ์ อีกทั้งได้การสนับสนุนอย่าง
ดียิ่งจาก ศ.ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร. มนตรี สวัสดิ์สูงมาร ดร.เกรียงศักดิ์
เฉลิมศิริกุล ดร. ชุมพล อันตรเสน และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์
สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งหมด ความเอื้อเฟื้อที่ได้รับจาก ศ.ดร.วิรุฬห์
สายคณิต ผศ. สมพงษ์ จัตราภรณ์ แห่งห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์
ควยคีเสมอมา และตลอดจนจาก ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ ซึ่งเป็นผู้มอบส่วนประกอบ
ต่าง ๆ ของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยพร้อมคำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องที่สำคัญ
แล้วแต่มีส่วนร่วมอย่างมากเช่นกัน ผู้เขียนตระหนักดีและขอขอบคุณทุกท่านเอาไว้เป็นอย่างสูง

ท้ายสุดขอขอบคุณต่อทบวงมหาวิทยาลัย ฯ ซึ่งได้พิจารณาให้ทุนในโครงการผลิต
และพัฒนาอาจารย์แก่ผู้เขียนในการศึกษาระดับปริญญาโทครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ



	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๖
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๖
กิตติกรรมประกาศ	๖
สารบัญตาราง	๘
สารบัญรูป	๘
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 แกลเลียมอาร์เซไนด์	4
บทที่ 3 เอพิแทกซีเฟสของเหลว	8
3.1 การปลูกผลึกแบบทรานเซียน	9
3.2 ความหนาของชั้นเอพิแทกซี	13
3.2.1 การพิจารณาทางเทอร์โมไดนามิกส์	14
3.2.2 บทบาทของขบวนการแพร่	15
3.2.3 โซลิวต์ก่อนเวกซ์	20
3.3 เสถียรภาพของระนาบผิวต่อ	22
3.3.1 คอนสติกชัน ซุปเปอร์ คูลิ่ง	23
3.3.2 ทฤษฎีพลศาสตร์ของเสถียรภาพสัณฐานผิวต่อ	24
3.3.3 บทบาทของพลังงานอิสระบนพื้นผิว	25
บทที่ 4 อุปกรณ์และขั้นตอนการปลูกผลึก	27
4.1 อุปกรณ์	27
4.2 ขั้นตอนการเตรียมปลูกผลึก	31
4.2.1 การทำความสะอาดชิ้นส่วนที่อยู่ใกล้หรือต้องสัมผัสกับ	
สารละลายโดยตรงโดยใช้ความร้อน	31

	หน้า
4.2.2 การทำความสะอาดชิ้นส่วนที่อยู่ใกล้หรือต้องสัมผัสสารละลาย	32
4.2.3 การเตรียมข้อเตรท	33
4.2.4 การเตรียมสารละลายอิมมัว	34
4.2.5 การปลูกผลึก	35
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	36
5.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางผลึกและองค์ประกอบของ ชั้นเอพิแทกซี ..	36
5.1.1 การดูความเป็นผลึกเดี่ยวโดยการถ่ายภาพการกระเจิง กลับของรังสีเอ็กซ์แบบเลาอี	36
5.1.2 การตรวจสอบองค์ประกอบโดยวิธีอีเลคตรอนโพรบ ไมโครอานาไลซิส	37
5.2 ผลการตรวจสอบคุณภาพพื้นผิวของชั้นเอพิแทกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์	38
5.2.1 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีอีควิลิเบรียมคูลลิ่ง ..	38
5.2.2 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีสเต็ปคูลลิ่ง	40
5.2.3 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีซูเปอร์คูลลิ่ง	53
5.2.4 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีทีเฟสโซลูชันคูลลิ่ง ..	57
5.2.5 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกชั้นโดยวิธีทรานเซียนโทมค ลิควิดเอพิแทกซี	59
5.2.6 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกชั้นภายหลังการกัดผิวหน้า ข้อเตรทออกในสารละลายแอสเลียม	62
5.2.7 พื้นผิวของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกบนข้อเตรทที่วางตัวในแนว ระนาบในสารละลาย	66
5.3 ผลการตรวจสอบและวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์ อีเลคตรอนแบมกวาด	68
5.3.1 ผลการตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกชั้นโดย วิธีอีควิลิเบรียมคูลลิ่ง	69
5.3.2 ผลการตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซีซึ่งปลูกชั้นโดย วิธีสเต็ปคูลลิ่ง	73

	หน้า
5.3.3 ผลการ ตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้น โดยวิธีสปเปอร์คูลิ่ง	100
5.3.4 ผลการ ตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้น โดยวิธีทีเฟสโซลูชันคูลิ่ง	106
5.3.5 - ผลการ ตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้น โดยวิธีทรานเซียนโหมค ลีควิด เอพิแทกซ์	109
5.3.6 ผลการ ตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้น ภายหลังการกัดผิวหน้าชั้นสเตรคออกในสารละลายแกลเลียม	113
5.3.7 ผลการ ตรวจสอบความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกชั้น บนชั้นสเตรคที่วางตัวในแนวระกำในสารละลาย	119
5.4 สมบัติทางไฟฟ้าของชั้นเอพิแทกซ์	121
5.4.1 การ ตรวจสอบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและ แรงดัน	
5.4.1 (ก) ในกรณีของหัวต่อที่เกิดระหว่างชั้นเอพิแทกซ์ กับชั้นสเตรคชนิดอื่น	121
5.4.1 (ข) ในกรณีของหัวต่อที่เกิดระหว่างชั้นเอพิแทกซ์ กับชั้นสเตรคชนิดที่	123
5.4.2 การ วัดโดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์	124
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ	128
เอกสารอ้างอิง	130
ประวัติผู้เขียน	135

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1	เงื่อนไขการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีอควิลิเบรียมคูลลิ่งสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เมื่อสารละลายถูกทำให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 792 °ซ 38
5.2	เงื่อนไขการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีสเต็ปคูลลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เมื่อสารละลายถูกทำให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 792 °ซ 41
5.3	เงื่อนไขการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีซูเปอร์คูลลิ่งสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เมื่อสารละลายถูกทำให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 792 °ซ 54
5.4	เงื่อนไขการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีทูเฟสโซลูชันคูลลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เมื่อสารละลายถูกทำให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 792 °ซ 58
5.5	เงื่อนไขการทดลองปลูกผลึกด้วยวิธีทรานเซียนโทมคลิควิคเอพิแทกซ์สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เมื่อสารละลายถูกทำให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 792 °ซ 60
5.6	เงื่อนไขการปลูกผลึกภายหลังการกักผิวหน้าชั้นสเตรตออกในสารละลายแกลเลียม สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ 62
5.7	เงื่อนไขการปลูกผลึกบนชั้นสเตรตซึ่งวางตัวตามแนวระดับในสารละลายซึ่งถูกทำให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ 792 °ซ 67
5.8	ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีอควิลิเบรียมคูลลิ่งสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยทางทฤษฎี..... 69
5.9	ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีสเต็ปคูลลิ่ง สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยทางทฤษฎี 74
5.10	ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีซูเปอร์คูลลิ่งสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้โดยทางทฤษฎี 100
5.11	ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีทูเฟสโซลูชันคูลลิ่งสำหรับตัวอย่างต่าง ๆ 106
5.12	ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ ซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีทรานเซียนโทมคลิควิคเอพิแทกซ์ สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ 109

ตารางที่	หน้า
5.13 ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิเทกซี ซึ่งปลูกภายหลังการกัดผิวหน้า ชั้นสเตรตออกในสารละลายแคลเลียม สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ	113
5.14 ผลการวัดความหนาของชั้นเอพิเทกซี ซึ่งปลูกบนชั้นสเตรตซึ่งวางตัว ในแนวระดับในสารละลาย สำหรับตัวอย่างต่าง ๆ	119
5.15 ข้อมูลการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ และผลการคำนวณหาความ เข้มข้นของพาหะในชั้นเอพิเทกซีของตัวอย่างหมายเลข 55	127



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างผลึกแบบ Zinc blende	5
2.2	โครงสร้างแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์คำนวณโดยวิธีกึ่งเวียมของ Cohen	6
2.3	Brillouin zone แรกและจุดวิกฤตสำหรับ lattice ของโครงสร้าง Zinc blende	6
3.1	แผนภูมิเฟสของระบบ Ga-As	8
3.2	ขบวนการทำให้สารละลายเย็นลงสำหรับการปลูกผลึกใน 4 วิธีที่แตกต่างกัน ..	10
3.3	(ก) ชุดอุปกรณ์แนวเอียง (ข) ชุดอุปกรณ์แนวตั้ง และ (ค) ชุดอุปกรณ์แนวระดับ.....	11
3.4	บริเวณโซลิตัสในอุณหภูมิต่างกันของ GaAs binary diagram	13
3.5	ลักษณะโปรไฟล์ความเข้มข้นของอาร์เซนิคที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเฟสของแข็งและของเหลว	19
3.6	โซลิตัส คอนเวกชันในระยะเริ่มต้นและในภายหลังผลที่ตามมาทำให้ได้ชั้นเอพิแทกซ์ที่เอียงลาดลง	22
3.7	การแจกแจงของอุณหภูมิแสดงให้เห็นถึงการเกิดคอนสตีติวชันซูเปอร์คูลลิ่ง ...	23
4.1	ลักษณะภายนอกของชุดอุปกรณ์แนวตั้งซึ่งใช้ในงานวิจัย	27
4.2	ลักษณะการแกว่งของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากการทำงานของตัวควบคุม.....	28
4.3	รายละเอียดส่วนประกอบของตัว chamber	29
4.4	Temperature profile ของเตาเมื่อยังไม่มีถ้วยควอทซ์.....	29
4.5	ลักษณะของชั้นส่วนสำคัญได้แก่ (ก) ถ้วยควอทซ์ (ข) วงแหวนแกรไฟต์ และ (ค) ก้านควอทซ์ต่าง ๆ.....	30
4.6	การลดลงของอุณหภูมิภายหลังการดับเตา.....	31

รูปที่	หน้า
4.7 โปรไฟล์ของอุณหภูมิกับเวลา (ก) การพยายามปรับให้ลดลงด้วยอัตรา คงที่ (ข) การตั้งอุณหภูมิให้ลดลงเป็นขั้นเพื่อทำการแลกเปลี่ยนด้วยวิธี สเต็ปคูลลิ่ง	32
4.8 Solubility ของสารประกอบ III-V ใน Ga หรือ In	34
5.1 ภาพถ่ายของแบบการเลี้ยวเบนเนื่องจากการกระเจิงกลับของรังสีเอ็กซ์ แบบเลาอี่ โทยผลึกชั้นเอพิแทกซี	36
5.2 สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หาชนิดของธาตุนกพื้น เอพิแทกซีด้วยวิธีอเลคตรอน โพรบ ไมโครอนาลิซิส	37
5.3 - 5.5 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างต่าง หลังจากที่มีการตัดออก ไปวิเคราะห์ในบางส่วน พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิว สำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีอควิลิเบรียม คูลลิ่ง	
5.3 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 3	39
5.4 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 4	39
5.5 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 5	40
5.6 5.29 ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างต่าง หลังจากที่มีการตัดออกไป วิเคราะห์ในบางส่วนพร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวสำหรับ ผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีสเต็ป คูลลิ่ง	
5.6 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 6	41
5.7 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 7	42
5.8 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 8	42
5.9 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 9	43
5.10 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 10	43
5.11 พื้นผิวของตัวอย่าง หมายเลข 11	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างต่าง ๆ หลังจาก
 ที่มีการ คัดออก ไปวิเคราะห์ในบางส่วนพร้อมมาพขยายแสดง
 รายละเอียดของพื้นผิวสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีสเปคูลิ่ง
 (ต่อ)

5.12	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 13	.....	44
5.13	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 14	.....	45
5.14	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 15	.....	45
5.15	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 19	.....	46
5.16	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 20	.....	46
5.17	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 22	.....	47
5.18	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 23	.....	47
5.19	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 24	.....	48
5.20	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 25	.....	48
5.21	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 26	.....	49
5.22	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 27	.....	49
5.23	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 29	.....	50
5.24	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 40	.....	50
5.25	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 46	.....	51
5.26	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 47	.....	51
5.27	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 48	.....	52
5.28	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 49	.....	52
5.29	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 50	.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30-5.34	
	ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างต่าง ๆ หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วน พร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีซูเปอร์คูลิ่ง
5.30	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 38 55
5.31	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 39 55
5.32	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 44 56
5.33	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 54 56
5.34	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 55 57
5.35-5.36	
	ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดตัวอย่างต่าง ๆ หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วนพร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธี ทุเฟส โซลูชันคูลิ่ง
5.35	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 1 58
5.36	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 2 59
5.37-5.39	
	ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างต่าง ๆ หลังจากที่มีการตัดออกไปวิเคราะห์ในบางส่วนพร้อมภาพขยายแสดงรายละเอียดของพื้นผิวสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีทรานเซียนโทมดลิวิตเอพิแทกซี
5.37	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 32 60
5.38	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 35 61
5.39	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 37 61

รูปที่		หน้า
5.40-5.44	ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลขต่าง ๆ หลังจากที่มีการ คัดออก ไปวิเคราะห์ในบางส่วนพร้อมรายละเอียด ของพื้นผิวสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นมาภายหลังการกัดผิวหน้าออก ในสารละลายแคลเซียม	
5.40	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 28	64
5.41	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 30	64
5.42	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 33	65
5.43	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 45	65
5.44	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 56	66
5.44	แสดง ตัวอย่างขั้วส. คร ที่ซึ่งส่วนปลายของมันจะฝังอยู่ในแนวระดับ ทันทีที่ถูกแช่ในแคลเซียมเหลว	67
5.46-5.47	ภาพแสดงผิวหน้าและขนาดของตัวอย่างหมายเลขต่าง ๆ หลังจาก ที่มีการ คัดออก ไปวิเคราะห์ในบางส่วนพร้อมรายละเอียดของ พื้นผิวสำหรับผลึกซึ่งปลูกไว้บนขั้วส. คร ที่ซึ่งวางตัวตามแนวระดับ ในสารละลาย	
5.46	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 51	67
5.47	พื้นผิวของตัวอย่างหมายเลข 52	68
5.53-5.99	ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิตัวอย่างต่าง ๆ พร้อมภาพถ่ายเส้นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซ์ ๗ บริเวณที่ คลอง จอจกัน สำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีสเฟ็คูลิ่ง	
5.53	แสดงผิวและเส้นของตัวอย่างหมายเลข 6	76
5.54	แสดงผิวและเส้นของตัวอย่างหมายเลข 7	77
5.55	แสดงผิวและเส้นของตัวอย่างหมายเลข 8	78
5.56	แสดงผิวและเส้นของตัวอย่างหมายเลข 9	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.57-5.76	ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างต่าง ๆ พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณ ที่คดงอจกกัน สำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีสตีปคูลลิ่ง (ต่อ)	
5.57	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 10	80
5.58	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 11	81
5.59	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 12	82
5.60	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 13	83
5.61	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 14	84
5.62	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 15	85
5.63	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 19	86
5.64	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 20	87
5.65	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 22	88
5.66	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 23	89
5.67	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 24	90
5.68	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 26	91
5.69	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 27	92
5.70	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 29	93
5.71	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 40	94
5.72	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 46	95
5.73	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 47	96
5.74	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 48	97
5.75	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 49	98
5.76	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 50	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.77-5.81	ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างต่าง ๆ พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คลองจอกกันสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีซูเปอร์คูลิ่ง	
5.77	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 38	101
5.78	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 39	102
5.79	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 44	103
5.80	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 54	104
5.81	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 55	105
5.82-5.83	ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างต่าง ๆ พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คลองจอกกันสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีทูเฟสโซลูชัน คูลิ่ง	
5.82	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 1	107
5.83	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 2	108
5.84-5.86	ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างต่าง ๆ พร้อมภาพถ่ายสันแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คลองจอกกันสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นโดยวิธีทรานเซียนโทมดลิวิดเอพิแทกซี	
5.84	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 32	110
5.85	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 35	111
5.86	แสดงผิวและสันของ ตัวอย่างหมายเลข 37	112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.87-5.91	ภาพขยายแสดงรายละเอียดทางซีกหนึ่งของพื้นผิวตัวอย่างต่าง ๆ พร้อมภาพถ่ายเส้นแสดงความหนาของชั้นเอพิแทกซี ณ บริเวณที่คลอง จอห์นสำหรับผลึกซึ่งปลูกขึ้นภายหลังการกัด ผิวหน้าด้วยสเตรตออกในสารละลายเกลเลียม	
5.87	แสดงผิวและสันของตัวอย่างหมายเลข 28	114
5.88	แสดงผิวและสันของตัวอย่างหมายเลข 30	115
5.89	แสดงผิวและสันของตัวอย่างหมายเลข 33	116
5.90	แสดงผิวและสันของตัวอย่างหมายเลข 45	117
5.91	แสดงผิวและสันของตัวอย่างหมายเลข 56	118
5.92	ภาพแสดงการวัดความหนาของชั้นเอพิแทกซีในแนวที่ตั้งฉากกับ บนตัวอย่างหมายเลข 52 ซึ่งเป็นการปลูกผลึกบนชั้นสเตรตที่วาง ในแนวนอนในสารละลาย	120
5.93 (ก)	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในกรณีของชั้นเอพิแทกซี กับชั้นสเตรตชนิดเอ็น เมื่อหลังจากการจายไอ ทอง เยอร์มันเนียม และนี้เกิด	122
5.93 (ข)	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในกรณีของชั้นเอพิแทกซี กับชั้นสเตรตชนิดเอ็น เมื่อภายหลังการแอนนัล	123
5.94 (ก)	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในกรณีของชั้นเอพิแทกซี กับชั้นสเตรตชนิดพี เมื่อหลังจากการจายไอทอง เยอร์มันเนียม และนี้เกิดที่ด้านของชั้นเอพิแทกซีและจายไอ ทอง สังกะสี ที่ด้าน ของชั้นสเตรต โดยยังไม่มี การแอนนัล	123

รูปที่

5.94 (ข)	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในกรณีของชิ้นเอพิแทกซี- กับซีบีสเตรตชนิดพี ภายหลังการแอนนัล.....	123
5.95	ภาพแสดงการระบุดัชนีของตัวอย่างฮอลล์.....	124
5.96	ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันโดยการจ่ายกระแส เข้าระหว่างขั้วที่ 1 และ 2 และวัดความต่างศักย์คร่อมระหว่าง ขั้วที่ 3 และ 4 ตามรูปที่ 5.95.....	126



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย