

การสร้างเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ และการประยุกต์ใช้งานในการแอนนิลซิลิกอน



นายธานี แดงพวงไพบุลย์

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2526

ISBN 974-562-275-3

013328

I15834207

CO₂ Laser Construction and Its Application in Silicon Annealing

Mr.Thanee Dangpuangpaiboon



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1983

ISBN 974-562-275-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ และการประยุกต์ใช้งานในการแอนิเมชัน
ซิลิกอน

โดย

นายธานี แดงพวงไพบูลย์

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุณนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร.บวรียง โดประเสริฐพงศ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บวรียง โดประเสริฐพงศ์)

ดร.กฤษณ์ รัตนธรรมพันธ์

..... กรรมการ

(อาจารย์ กฤษณ์ รัตนธรรมพันธ์)

ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

ดร.ยุธนา กุลวิหิต

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุธนา กุลวิหิต)

ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้าง เล เซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ และการประยุกต์ใช้งานในการ
แอนเน็ลซิลิกอน

ชื่อนิสิต นายธานี แดงพวงไพบุลย์

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2526



บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกได้แก่การสร้าง เล เซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เล เซอร์นี้สามารถใช้งานได้ทั้งแบบคลื่นต่อเนื่อง และแบบคิว-สวิตช์ ซึ่งมีกำลังเอาต์พุต 10 วัตต์ และ 1 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ส่วนที่สองได้แก่การนำแสง เล เซอร์ทั้งแบบคลื่นต่อเนื่อง และแบบคิว-สวิตช์ ไปแอนเน็ลหัวต่อพี-เอ็น ที่สร้างบนแผ่นซิลิกอน

ผลการทดลองพบว่า การแอนเน็ลด้วยแสง เล เซอร์แบบคิว-สวิตช์ พลังงานขนาด 2.0-8.0 จูล/ตารางเซนติเมตร ไม่สามารถทำให้การกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสที่แพร่ซึม เปลี่ยนแปลงไป แต่สำหรับหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำขั้วต่อไฟฟ้าด้วยนิเกิล ความต้านทานอนุกรมจะมีค่าน้อยลงเมื่อ แอนเน็ลด้วยแสง เล เซอร์พลังงานประมาณ 3.0 จูล/ตารางเซนติเมตร และความต้านทานอนุกรมนี้ จะลดลงจนมีค่าอิมิตัวเมื่อแสง เล เซอร์มีพลังงานประมาณ 7.0 จูล/ตารางเซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title CO₂ laser Construction and Its Application in Silicon
 Annealing
Name Mr.Thanee Dangpuangpaiboon
Thesis Advisor Associate Professor Somsak Panyakeow, Ph. D.
Department Electrical Engineering
Academic Year 1983



ABSTRACT

This thesis consists of two parts. The first part was the construction of CO₂ laser. This laser could be operated both in CW and Q-switch modes with power outputs of 10 watt and 1 kilowatt respectively. The second part was the application of laser with CW and Q-switch modes in the annealing process of silicon P-N junction.

The experimental results showed that the annealing of Q-switch laser with energy between 2.0 to 8.0 joule/cm² could not change the impurity profile of phosphorus, but the P-N junction with nickel contact would have less series resistance at 3.0 joule/cm² and this series resistance become saturated at 7.0 joule/cm².

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ. ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ผศ. ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร ผศ. ดร.บรรยง โตประเสริฐพงษ์ ผศ. ดร.ยุธนา กุลวิฑิต และ อาจารย์ ดร.วิโรจน์ ต้นตราภรณ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการทำวิจัยและแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนจนถึงการให้ความสะดวกในด้านตำราและเอกสารที่ใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้เขียนขอขอบคุณต่อ Mr. Patrick Rousset เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัย สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คุณสมพร จงจิตร พี่ๆ และเพื่อนๆ ที่ได้ช่วยเหลือในงานวิจัยและด้านธุรการมาด้วยดีโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ ขอขอบคุณต่อทบวงมหาวิทยาลัยฯ บัณฑิตวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการวิจัย สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในการให้ทุนสำหรับงานวิจัยแก่ผู้เขียนเป็นอย่างมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
รายการตารางประกอบ	ณ
รายการรูปประกอบ	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
2. การสร้าง เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์	3
2.1 ระบบ เลเซอร์ที่สร้างและส่วนประกอบ	3
2.2 หลอดเลเซอร์	3
2.3 ระบบควบคุมความดันของก๊าซ	6
2.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำ	11
2.5 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงเคลื่อนสูงและระบบกราวด์	13
2.6 การควบคุมอุณหภูมิของหลอดเลเซอร์	15
2.7 แครวิตีของเลเซอร์	16
2.8 แท่นจัดระบบแสง	19
2.9 แท่นเลื่อนตัวอย่าง	20
3. ลักษณะสมบัติของระบบ เลเซอร์ที่สร้าง	21
3.1 ลักษณะสมบัติของแรงดันของก๊าซกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าในการเกิดดีสชาร์จ	21
3.2 การปรับกระจกแครวิตีเพื่อการใช้งาน เลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง	25
3.3 วิธีวัดกำลังเอาต์พุทของเลเซอร์	27
3.4 กำลังเอาต์พุทของเลเซอร์เมื่อใช้งานแบบคลื่นต่อเนื่อง	29
3.5 การปรับกระจกแครวิตีและชั้นตอนในการใช้งาน เลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ ...	31
3.6 กำลังเอาต์พุทของเลเซอร์เมื่อใช้งานแบบคิว-สวิตช์	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. การแอนนีสลิวซ์ต่อไฟฟ้าด้วยแสงเลเซอร์	45
4.1 การแอนนีสลิวซ์ประติษฐ์สารกึ่งตัวนำในเตาอุณหภูมิสูง	45
4.2 การนำเอาแสงเลเซอร์มาใช้ในกระบวนการผลิตสิ่งประติษฐ์สารกึ่งตัวนำ	48
4.3 การทดลองแอนนีสลิวซ์สารกึ่งตัวนำด้วยแสงเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์	64
4.4 การเปรียบเทียบผลการแอนนีสลิวซ์ระหว่างเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์กับ- เลเซอร์แย็ค	76
5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	81
5.1 ข้อสรุปจากการทดลอง	81
5.2 ข้อดี-ข้อเสีย ของการแอนนีสลิวซ์ด้วยแสงเลเซอร์	82
5.3 ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	87
ประวัติผู้เขียน	102

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

หน้า

ตารางที่

4.1-	แสดงการเปรียบเทียบการแอนนิลสารกึ่งตัวนำด้วยเตาอุณหภูมิสูง กับการแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง และแบบคิว-สวิตช์	51
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหัวต่อพี-เอ็น หลังการแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์ .	52
4.3	แสดงพลังงานของแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการแอนนิลหัวต่อพี-เอ็น กับค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์ และค่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อ ก่อนและหลังแอนนิล	68
4.4	แสดงกำลังของแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เวลาที่ฉายแสงเลเซอร์ พลังงานที่เทียบเท่า ค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์ และค่าความต้านทานอนุกรมก่อนและหลังแอนนิล	73
4.5	แสดงกำลังของแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์แย์ค เวลาที่ฉายแสงเลเซอร์ พลังงานเทียบเท่า ค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์ และค่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อ	77
4.6	แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่พังทลายแบบย้อนกลับ เมื่อแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์แย์คที่เวลาต่างๆ กัน	78

ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 หลอดเลเซอร์	4
2.2 อิเล็กโทรดอคูมิเนียม	4
2.3 ส่วนหัว เลเซอร์ที่ใช้ยึดผลึกโซเดียมคลอไรด์และกระจกเว้า	5
2.4 ระบบควบคุมความดันก๊าซ	7
2.5 ตั้งบรรจุก๊าซและวาล์วควบคุม	7
2.6 บาโรมิเตอร์วัดความดันภายในหลอดเลเซอร์	9
2.7 วาล์วดูดก๊าซออกและปล่อยก๊าซเข้า	10
2.8 บีมสแตยกราฟที่ใช้	10
2.9 ระบบจ่ายไฟของเลเซอร์	11
2.10 วงจรไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำ	12
2.11 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงเคลื่อนต่ำ	12
2.12 วงจรไฟฟ้าแรงเคลื่อนสูง	14
2.13 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงเคลื่อนสูง	15
2.14 การควบคุมอุณหภูมิของหลอดเลเซอร์	16
2.15 กระจกด้านที่ให้แสงเลเซอร์ออก	16
2.16 กระจกด้านที่ให้แสงเลเซอร์สะท้อนกลับหมด	17
2.17 แคริตซ์ของเลเซอร์แบบคิว-สวิตซ์	18
2.18 ระบบควบคุมและตรวจวัดความเร็วมอเตอร์	18
2.19 วงจรตรวจวัดความเร็วรอบของการหมุน	19
2.20 แท่นเสียดตัวอย่างที่จะฉายแสงเลเซอร์	20
3.1 กราฟแสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุทและเอาต์พุทของหม้อแปลง	22
3.2 กราฟแสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าอินพุทและเอาต์พุทของระบบจ่ายไฟฟ้าแรงเคลื่อนสูง	23
3.3 กราฟแสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ป้อน และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอดเลเซอร์ ที่ความดันของตัวกลางเลเซอร์ค่าต่างๆ กัน	24

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า	
3.4	เทอร์โมคัพเพิลล์ที่ใช้ในการวัดกำลังเอาต์พุทของเลเซอร์	27
3.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัพเพิลล์ เมื่อให้ความร้อนที่ค่าต่างๆ	28
3.6	กราฟแสดงแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากเทอร์โมคัพเพิลล์ที่ใช้วัดกำลังเอาต์พุทของเลเซอร์	30
3.7	กราฟแสดงกำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่างๆ เมื่อความดันก๊าซผสมค่าต่างๆ กัน	32
3.8	กราฟแสดงกำลังเอาต์พุทของเลเซอร์ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่างๆ เมื่อความดันก๊าซผสมค่าต่างๆ กัน	33
3.9	กราฟแสดงกำลังเอาต์พุทสูงสุดที่ความดันก๊าซผสมค่าต่างๆ กัน	34
3.10	กราฟแสดงประสิทธิภาพของหลอดเลเซอร์ที่ความดันและแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าต่างๆ	35
3.11	กราฟแสดงประสิทธิภาพของหลอดเลเซอร์ที่ความดันและแรงเคลื่อนไฟฟ้าค่าต่างๆ	36
3.12	กราฟแสดงประสิทธิภาพของหลอดเลเซอร์ที่ความดันต่างๆ กัน	37
3.13	กราฟแสดงการหมุนของมอเตอร์และแรงเคลื่อนไฟฟ้า AC ที่ป้อน	38
3.14	กราฟแสดงกำลังเอาต์พุทเฉลี่ยของลำแสงเลเซอร์ที่ทำงานแบบคว-สวิตซ์ที่มีความดันและแรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนค่าต่างๆ โดยที่ความถี่ในการหมุนของกระจกแควิตี้ประมาณ 70 รอบ/นาที	40
3.15	กราฟแสดงกำลังเอาต์พุทเฉลี่ยของลำแสงเลเซอร์ที่ทำงานแบบคว-สวิตซ์ที่ค่าความดันและแรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงสูงที่ป้อนค่าต่างๆ โดยที่ความถี่ในการหมุนของกระจกแควิตี้ประมาณ 70 รอบ/นาที	41
3.16	กราฟแสดงกำลังเอาต์พุทเฉลี่ยสูงสุดของลำแสงเลเซอร์ที่ทำงานแบบคว-สวิตซ์ที่ค่าความดันตัวกลางเลเซอร์ต่างๆ โดยความถี่ในการหมุนของกระจกแควิตี้ประมาณ 70 รอบ/นาที	42

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

หน้า

3.17	กราฟแสดงกำลังเอาต์พุตเฉลี่ยของเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ 1 pulse ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงสูงที่ทำให้กำลังเอาต์พุตสูงสุดที่ความดันค่าต่างๆ	43
3.18	กราฟแสดงกำลังเอาต์พุตเฉลี่ยของเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ 1 pulse ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงสูงที่ทำให้กำลังเอาต์พุตสูงสุดที่ความดันค่าต่างๆ	44
4.1 ก	ภาพถ่ายผิวหนังของแผ่นซิลิกอนที่ถูกยิงด้วยไอออนของโบรอน แล้วแอนนัลที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	47
4.1 ข	ภาพถ่ายผิวหนังของแผ่นซิลิกอนที่ถูกยิงด้วยไอออนของอาร์เซนิก แล้วแอนนัลที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	47
4.2	ความยาวคลื่นและพลังงานโฟตอนของเลเซอร์ชนิดต่างๆ	50
4.3 ก	ผิวหนังแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำการแพร่ซึมด้วยโบรอนในเตาแพร่ซึมที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที	53
4.3 ข	ผิวหนังแผ่นผลึกซิลิกอนหลังแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์ทับทิม พลังงานขนาด 1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร	53
4.3 ค	ผิวหนังแผ่นผลึกซิลิกอนเมื่อแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แล้วกลับเข้าไปแอนนัลในเตาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที	53
4.4 ก	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงผิวหนังหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำการยิงด้วยไอออนของโบรอน แล้วแอนนัลในเตาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที	55
4.4 ข	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงผิวหนังหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำการยิงด้วยไอออนของโบรอน แล้วแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์พลังงานขนาด 1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร	55
4.4 ค	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงผิวหนังหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำการยิงด้วยไอออนของอาร์เซนิก แล้วแอนนัลในเตาอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที	55
4.4 ง	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงผิวหนังหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำการยิงด้วยไอออนของอาร์เซนิก แล้วแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์พลังงาน 1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร	55

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

หน้า

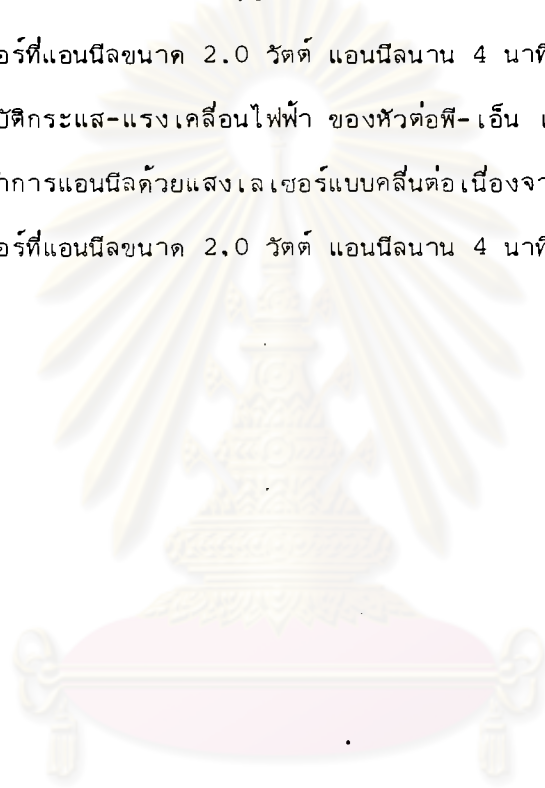
4.5 ก	การกระจายตัวของอะตอมโบรอนก่อนและหลังแอนนihilด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตซ์ ที่ขนาดพลังงานต่างๆ	56
4.5 ข	การกระจายตัวของอะตอมอาร์เซนิกก่อนและหลังแอนนihilด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตซ์ ที่ขนาดพลังงานต่างๆ	56
4.6	กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการยิงอ้อนสารเจือปนฝังในเนื้อซิลิกอนแล้วแอนนihilด้วยแสงเลเซอร์แบบพัลส์กวาดไปมาบนแผ่นผลึกซิลิกอน	57
4.7	การสร้างหัวต่อพี-เอ็น ด้วยวิธีแช่แผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายที่มีสารเจือปนละลายอยู่แล้วฉายด้วยแสงเลเซอร์พัลส์แบบคิว-สวิตซ์ พลังงานขนาดถึง 20 จูล/ตารางเซนติเมตร ช่วงเวลาพัลส์ประมาณ 20 nsec	59
4.8	การกระจายตัวของแอนนีโมนิที่วัดโดยวิธี Rutherford backscattering spectrometry ลักษณะติดตั้งของแผ่นซิลิกอนที่ใช้เห็นนั้นเป็นแบบลุ่ม และจัดวางตามแกนผลึก (111)	59
4.9	เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของไดโอดแบบเมสขนาด 0.4 ตารางเซนติเมตร ที่ทำจากหัวต่อพี-เอ็น ที่แช่ในสารละลายไตรบูทิลฟอสเฟต แล้วฉายด้วยแสงเลเซอร์	60
4.10 ก	ภาพถ่ายผิวสัมผัสระหว่างแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียม ก่อนทำการแอนนihil	61
4.10 ข	ภาพถ่ายผิวสัมผัสระหว่างแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียม หลังแอนนihilด้วยแสงเลเซอร์พลังงานขนาด 0.08 จูล/ตารางเซนติเมตร	61
4.10 ค	ภาพถ่ายผิวสัมผัสระหว่างแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียม หลังแอนนihilในเตาอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 60 วินาที	61
4.11	เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของผิวสัมผัสแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียม ก่อนและหลังแอนนihilด้วยแสงเลเซอร์พลังงาน 0.06 จูล/ตารางเซนติเมตร	62
4.12 ก	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงผิวหน้าของซิลิกอนอัญฐานก่อนแอนนihil	62

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
4.12 ข ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงผิวหน้าของซิลิกอนอสัญฐาน หลังแอนนัลด้วยแสง เลเซอร์พลังงานขนาด 2.5 จูล/ตารางเซนติเมตร	63
4.13 แพ้ทเทิร์นที่ใช้ในการแอนนัล	64
4.14 การกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสของหัวต่อพี-เอ็น ที่สร้างก่อนและหลัง แอนนัล ด้วยแสง เลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานขนาด 2.0 ถึง 8.0 จูล/ตารางเซนติเมตร	65
4.15 แพ้ทเทิร์นที่ใช้ในการทำขั้วโลหะด้านหน้าและด้านข้าง	66
4.16 หัวต่อพี-เอ็น ที่ใช้ในการทดลอง	67
4.17 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานอนุกรมกับพลังงานของแสง เลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ .	68
4.18 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสตรง ก่อนและหลังทำการแอนนัลด้วยแสง เลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอน ไดออกไซด์ พลังงานขนาด 6.0 จูล/ตารางเซนติเมตร	70
4.19 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสกลับ ก่อนและหลังทำการแอนนัลด้วยแสง เลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จาก เลเซอร์ คาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานขนาด 6.0 จูล/ตารางเซนติเมตร	71
4.20 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานอนุกรมกับกำลังของแสง เลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง .	72
4.21 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสตรง ก่อนและหลังทำการแอนนัลด้วยแสง เลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง จากเลเซอร์ คาร์บอนไดออกไซด์กำลังของแสง เลเซอร์ที่แอนนัลขนาด 6.1 วัตต์ แอนนัล นาน 6 นาที	74
4.22 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสกลับ ก่อนและหลังทำการแอนนัลด้วยแสง เลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง จากเลเซอร์ คาร์บอนไดออกไซด์กำลังของแสง เลเซอร์ที่แอนนัลขนาด 6.3 วัตต์ แอนนัล นาน 6 นาที	75
4.23 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานอนุกรมของหัวต่อกับ เวลาฉายแสง เลเซอร์ แบบคลื่นต่อเนื่อง จากแอ็ค เลเซอร์	76

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

	หน้า
4.24 การเพิ่มขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าฟังกหลายของหัวต่อพี-เอ็น กับเวลาฉายแสง เลเซอร์แบบคี่ต่อเนื่องจากเลเซอร์แอ็ค	77
4.25 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสตรง ก่อน และหลังทำการแอนนัล ด้วยแสงเลเซอร์แบบคี่ต่อเนื่องจากเลเซอร์แอ็ค กำลัง ของแสงเลเซอร์ที่แอนนัลขนาด 2.0 วัตต์ แอนนัลนาน 4 นาที	79
4.26 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสกลับ ก่อนและหลังทำการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคี่ต่อเนื่องจากเลเซอร์แอ็ค กำลัง ของแสงเลเซอร์ที่แอนนัลขนาด 2.0 วัตต์ แอนนัลนาน 4 นาที	80



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย