

บทที่ 4

การแอนนัลซ์ด้วยแสงเลเซอร์

4.1 การแอนนัลซ์ประติษฐานรังสีในตัวนำในเตาอุณหภูมิสูง

ในกระบวนการผลิตสิ่งประติษฐานรังสีตัวนำนั้น มีขั้นตอนที่สำคัญคือ การแพร่ซึมสารเจือปน (Impurity Diffusion) เข้าไปในเนื้อสารรังสีตัวนำ การแพร่ซึมนี้ต้องทำในเตาแพร่ซึมที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 องศาเซลเซียส นานประมาณ 5-30 นาที ขึ้นกับความลึกของหัวต่อพี-เอ็น ที่ต้องการ การสร้างหัวต่อพี-เอ็น แบบนี้แผ่นผลึกสารรังสีตัวนำจะได้รับความร้อนทั่วทั้งแผ่นเป็นเวลานาน และยังคงมีขั้นตอนต่างๆ ที่ต้องเอาแผ่นผลึกสารรังสีตัวนำเข้า-ออก จากเตาอุณหภูมิสูงหลายครั้ง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมินี้มีส่วนที่จะทำให้เกิดความผิดปกติ (Defects) ขึ้นในเนื้อสารรังสีตัวนำ เนื่องจากเกิดความเค้น และความเครียดทางโครงสร้างผลึก (Lattice stress and strain) การเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (Dislocation) ของอะตอม⁽¹⁾ เป็นผลให้อะตอมของสารเจือปนที่ทำการแพร่ซึมมีอยู่อย่างหนาแน่นมากที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกสารรังสีตัวนำ ถ้าหัวต่อพี-เอ็นที่สร้างนี้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) อะตอมสารเจือปนที่มีอยู่อย่างหนาแน่นที่บริเวณผิวหน้าที่ทำการแพร่ซึมนี้จะ เป็นอะตอมที่คอยจับพาหะอิสระ (Free carriers) ที่เกิดขึ้นบริเวณนี้เรียกว่า แถบพาหะตาย (Dead layer) พาหะอิสระที่เกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบจะมีค่าเวลาชีวิต (Life-time) ความคล่องตัว (Mobility) ตลอดจนระยะทางในการแพร่ซึม (Diffusion length) สั้น เนื่องจากถูกจับรวมตัว (Recombination) โดยแท็ป (Trap) ที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ การตอบสนองต่อแสงที่ตกกระทบเพื่อให้กำเนิดพาหะอิสระจะถูกจำกัดให้อยู่ในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นเท่านั้น⁽⁴⁾

เพื่อที่จะขจัดความผิดปกติในสารรังสีตัวนำ จำเป็นต้องทำการแอนนัลซ์ประติษฐานรังสีตัวนำที่ได้ในเตาแอนนัลซ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อลดความผิดปกติในเนื้อสาร แต่การแอนนัลซ์ในเตาดังที่กล่าวมาแล้วนี้ ก็ยังต้องทำที่อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงอยู่ ทำให้ค่าเวลาชีวิต ความคล่องตัว และระยะทางในการแพร่ซึมของพาหะมีค่าลดลง

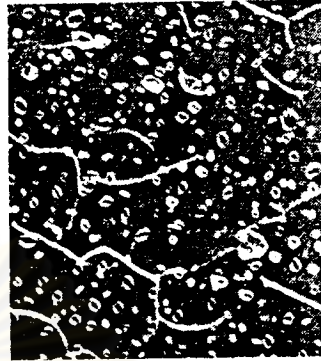
นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการสร้างหัวต่อพี-เอ็น ที่มีความลึกมากๆ เช่น มีหน่วยเป็นไมโครเมตรนั้น ต้องมีการไดร์อิน (Drive in) สารเจือปนเข้าไปในเนื้อสารรังสีตัวนำเป็นเวลานานนับชั่วโมง

ทำให้เกิดความผิดปกติในเนื้อสารกึ่งตัวนำมากขึ้น หัวต่อพี-เอ็น ที่ได้จึงมีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร และ การทำไดร็อพหรือแอนนัลในเตาอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานนั้น ต้องมีการสร้างชั้นออกไซด์เป็นหน้าากาก กันไม่ให้สารเจือปนในเนื้อสารกึ่งตัวนำแพร่ซึมออกไป (Out diffusion) ทำให้มีชั้นตอนที่ยุ่งยากซับซ้อน ทั้งยังทำให้เกิดความสกปรกขึ้นมากด้วย เพราะชั้นตอนต่างๆ ที่ทำในเตานั้นอาจมีความสกปรกเกิดขึ้นได้

สำหรับในการผลิตสร้างหัวต่อพี-เอ็น โดยการยิงอ้อนของสารเจือปนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ (Ion implantation) นั้นเป็นวิธีการสร้างหัวต่อพี-เอ็น ที่สามารถควบคุมความลึกของหัวต่อ (Junction depth) และความเข้มข้นของสารเจือปน (Impurity concentration) ในเนื้อสารได้ดี แต่ผลจากการวิ่งชนของอ้อนที่มีพลังงานสูงจะทำให้เกิดความผิดปกติในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำมาก จำเป็นต้องมีการแอนนัลแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำนี้ในเตาอุณหภูมิสูง ประมาณ 900-1000 องศาเซลเซียส เพื่อแก้ความผิดปกติที่เกิดขึ้น การแก้ความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยการแอนนัลในเตานี้เป็นการแก้ความผิดปกติในสภาวะเป็นของแข็ง ทำให้ความผิดปกติที่เกิดจากการวิ่งชนของอ้อนพลังงานสูงนี้ยังหลงเหลืออยู่ ความผิดปกตินี้สามารถจะเห็นได้โดยการส่องดูด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) และด้วยการถ่าย x-ray (x-ray diffraction) รูปที่ 4.1 เป็นภาพถ่ายผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ทำการยิงอ้อนพลังงานสูงฝังเข้าไปในเนื้อซิลิกอน แล้วทำการแอนนัลโดยรูป ก. นั้นเป็นการยิงด้วยอ้อนของโบรอน (B^+) ที่มีพลังงานขนาด 35 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ความหนาแน่นของอ้อนที่ยิงขนาด 3×10^{15} อ้อน/ตารางเซนติเมตร แล้วแอนนัลในเตาแอนนัลอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ส่วนรูป ข. นั้นเป็นการยิงด้วยอ้อนของอาร์เซนิก (As^+) ที่มีพลังงานขนาด 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ความหนาแน่นของอ้อนที่ยิงขนาด 1×10^{16} อ้อน/ตารางเซนติเมตร แล้วแอนนัลในเตาแอนนัลอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (4)



รูป ก.



รูป ข.

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ถูกยิงด้วยอ็อนของโบรอนแล้วแอนดิลที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในรูป ก. และยิงด้วยอ็อนของอาร์เซนิคแล้วแอนดิลที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในรูป ข. (4)

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าเม้นจะแอนดิลในเตาอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน 30 นาที ความผิดปกติที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าแผ่นซิลิกอนยังมีอยู่

นอกจากนี้ก่อนที่จะทำการแอนดิลยังต้องทำการสร้างชั้นออกไซด์เป็นหน้ากากกันไม่ให้สารเจือปนแพร่ซึมออกจากเนื้อสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดความยุ่งยากในวิธีการผลิตมากขึ้น และในระหว่างขั้นตอนต่างๆ ที่ทำนั้นอาจทำให้เกิดความสกปรกเกิดขึ้นได้

ส่วนในการทำขั้วต่อไฟฟ้า (contact) ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำนั้น เพื่อให้ขั้วต่อไฟฟ้าระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้น ซึ่งอาจจะทำขึ้นโดยการฉาบโลหะบนสารกึ่งตัวนำโดยการฉาบในสุญญากาศ (Vacuum evaporation) หรือชุบโลหะแบบไร้กระแสไฟฟ้า (Electroless plating) เป็นขั้วต่อไฟฟ้าที่ติดนั้นจำเป็นต้องทำการแอนดิลแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำฉาบโลหะในเตาอุณหภูมิสูง เพื่อให้อะตอมของโลหะนั้นแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ อุณหภูมิที่ใช้ในการแอนดิลนั้นอยู่ในช่วงประมาณ 500 องศาเซลเซียส⁽³⁾ สำหรับโลหะอะลูมิเนียมผลจากการแอนดิลนั้นทำให้ได้ขั้วต่อไฟฟ้าระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะสมบัติดีขึ้น แต่ผิวโลหะด้านที่ไม่ได้สัมผัสกับแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำนั้น มักจะเกิดเป็นฝ้าต่างเนื่องจากความสกปรกหรือความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอของ Carrier gas ที่ใช้ไหลผ่านเตา ทำให้การต่อสายบนขั้วต่อไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ทำได้ยาก

การแอนนัลในเตาอุณหภูมิสูงนี้เป็นการให้ความร้อนแก่แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำทั้งชิ้น ถ้าชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ทำการแอนนัลนี้เป็นไอซีพที่ต้องการทำการแอนนัล เฉพาะตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในวงจรของไอซีพแล้ว การแอนนัลในเตาจะไม่สามารถทำได้ แต่สิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดนี้สามารถจะปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์

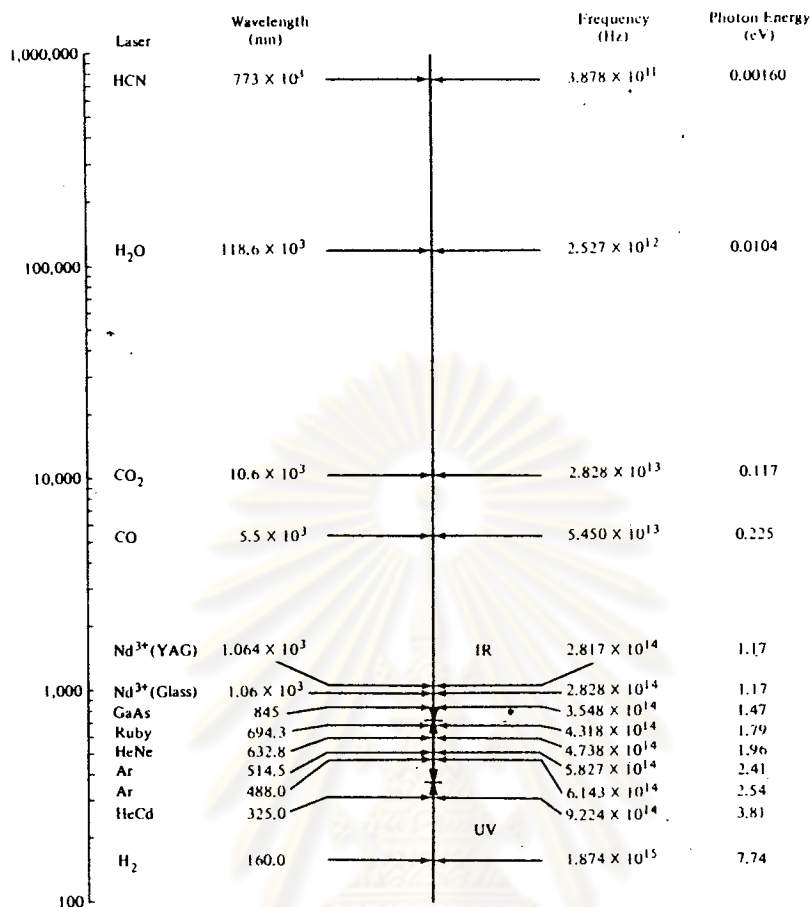
4.2 การนำเอาแสงเลเซอร์มาใช้ในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

การศึกษาถึงการนำแสงเลเซอร์มาใช้ในกระบวนการทางสารกึ่งตัวนำ ได้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกเป็นเวลากว่า 10 ปีมาแล้วในการสร้างไดโอดแบบหัวต่อผสม (Alloy diode)⁽¹⁰⁾ ความสนใจในการประยุกต์แสงเลเซอร์มาใช้ในกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำได้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1975 เมื่อกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียใน Kazan ได้ศึกษาถึงการแอนนัลสารกึ่งตัวนำเพื่อแก้ความผิดที่เกิดจากการยิงอิออนพลังงานสูงฝังเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ โดยใช้แสงเลเซอร์ทั้งแบบคลื่นต่อเนื่อง และแบบคิว-สวิทช์ และได้ให้ข้อเสนอแนะว่า "ด้วยแสงเลเซอร์แบบ คิว-สวิทช์ สามารถทำให้เกิดผลในทางตรง (Direct effect) อย่างทันทีทันใดต่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดคลื่นกระแทก (Shock wave) ในเนื้อสารกึ่งตัวนำที่ถูกฉายด้วยแสงเลเซอร์"⁽¹⁰⁾ กลุ่มนักวิทยาศาสตร์รัสเซีย และกลุ่มนักวิทยาศาสตร์อีกหลายกลุ่มในประเทศยุโรปตะวันออกก็ได้ทำการศึกษา ต่อมาในปีเดียวกันนี้เองกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลีก็ได้ทำการศึกษาถึงการนำแสงเลเซอร์มาใช้ในกระบวนการด้านสารกึ่งตัวนำ ในปี ค.ศ.1977 กลุ่มนักวิทยาศาสตร์ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย Oak Ridge National Laboratory มหาวิทยาลัย Stanford และห้องปฏิบัติการวิจัยของบริษัท Bell Telephone ได้เริ่มต้นศึกษาถึงการประยุกต์นำแสงเลเซอร์มาใช้ในกระบวนการทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดความสนใจอย่างกว้างขวางในการทำวิจัยด้านนี้ ในปี ค.ศ.1978 ได้มีการศึกษาถึงการสร้างชั้นอิพิทักเซียลในสภาวะของแข็ง (Solid phase epitaxial) แล้วแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องที่กวาดไปมา (Scan) และในปีเดียวกันนี้ได้มีการศึกษาถึงการสร้างชั้นอิพิทักเซียลจากชั้นซิลิกอนอสัญฐาน (Amorphous silicon) แล้วแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์⁽¹⁰⁾

ได้มีการประชุมทางวิชาการระหว่างประเทศของสมาคมวิจัยทางด้านวัสดุ (Annual - Material Research Society Conference) ในเดือน พฤศจิกายน ปี ค.ศ.1978 เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เนโรเปียม:แอนด์เลเซอร์ (Nd:YAG Laser) ที่ความยาวคลื่น 1.06 และ 0.53 ไมโครเมตร เลเซอร์ทับทิม (Ruby laser) ที่ความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร และเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความยาวคลื่น 10.6 ไมโครเมตร ในกระบวนการทางด้านวัสดุ (Material processing)⁽¹⁰⁾

แสงเลเซอร์ที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้น มีทั้งแบบคลื่นต่อเนื่อง และแบบคิว-สวิตช์ ที่ให้เอาท์พุทออกมาเป็นพัลส์ ที่มีช่วงความกว้างของพัลส์ตั้งแต่ 10 nsec ถึง 1 μ sec เลเซอร์ที่ใช้มีทั้งเลเซอร์อาร์กอน (Argon Laser) เลเซอร์แย็ค (YAG - Laser) เลเซอร์ทับทิม (Ruby Laser) และเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide Laser) (10,11,12,13) โดยเลเซอร์แต่ละชนิดจะมีพลังงานโฟตอน (Photon energy) ต่างๆ กันไป สำหรับเลเซอร์อาร์กอนนั้นมีพลังงานโฟตอนเท่ากับ 2.54 อิเล็กตรอนโวลท์ เลเซอร์แย็คมีพลังงานโฟตอนเท่ากับ 1.17 อิเล็กตรอนโวลท์ เลเซอร์ทับทิมมีพลังงานโฟตอนเท่ากับ 1.79 อิเล็กตรอนโวลท์ และเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์มีพลังงานโฟตอนเท่ากับ 0.117 อิเล็กตรอนโวลท์⁽¹⁴⁾ ดังนั้นการเลือกชนิดและขนาดของเลเซอร์ที่จะนำไปใช้จึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับงาน ถ้าเลือกใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานโฟตอนน้อยกว่าช่วงพลังงาน (Energy gap) ของสารกึ่งตัวนำแล้ว การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนชั้นสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกฉายด้วยแสงเลเซอร์นั้น จะมีน้อยกว่าเมื่อชั้นสารนั้นถูกฉายด้วยแสงเลเซอร์ชนิดที่มีพลังงานโฟตอนมากกว่าด้วยกำลังเลเซอร์ที่เท่ากันหรือมากกว่า⁽¹⁰⁾ ตัวอย่างเช่น เลเซอร์แย็คที่มีความยาวคลื่นประมาณ 1.06 ไมโครเมตร พลังงานโฟตอนเท่ากับ 1.17 อิเล็กตรอนโวลท์ เมื่อฉายลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีช่วงพลังงานประมาณ 1.104 อิเล็กตรอนโวลท์ ย่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนมากกว่าเมื่อฉายด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความยาวคลื่น 10.6 ไมโครเมตร และมีพลังงานโฟตอนเท่ากับ 0.117 อิเล็กตรอนโวลท์ เมื่อกำลังของเลเซอร์ทั้ง 2 ชนิดเท่ากัน เนื่องจากสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดยังมีคุณสมบัติในการดูดกลืนพลังงานจากแสงเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ไม่เท่ากัน





รูปที่ 4.2 ความยาวคลื่นและพลังงานโฟตอนของเลเซอร์ชนิดต่างๆ (32)

ในปัจจุบันนี้ทั้งแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง และแบบคิว-สวิตช์ได้ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานแทนพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาอุณหภูมิสูง ในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

การใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน มีผลดีต่อกระบวนการผลิตและผลผลิตสารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของแสงเลเซอร์ คือ

- 1) เป็นแหล่งที่ให้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ได้สูง
- 2) สามารถเลือกชนิดของแสงเลเซอร์เพื่อให้มีพลังงานโฟตอนที่เหมาะสมกับช่วงพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ถูกฉายได้
- 3) ขนาดของบริเวณที่จะให้พลังงานนั้น สามารถปรับให้มีขนาดใหญ่เล็กตามต้องการได้ด้วยการโฟกัสแสงเลเซอร์
- 4) สามารถเลือกที่จะให้พลังงานกับชิ้นสารแบบคลื่นต่อเนื่อง หรือแบบพัลส์
- 5) ลดเวลาที่ใช้ในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ และสะอาดกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการที่ทำในเตาอุณหภูมิสูง

6) ลดชั้นตอนต่างๆ ลง เทียบกับชั้นตอนเมื่อใช้เตาอุณหภูมิสูง

การเปรียบเทียบระหว่างการแอนนิลสารกึ่งตัวนำโดยใช้เตาอุณหภูมิสูง และแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง และแบบคิว-สวิตช์ นั้นแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบการแอนนิลสารกึ่งตัวนำด้วยเตาอุณหภูมิสูง

กับการแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง และแบบคิว-สวิตช์⁽¹⁰⁾

Comparison of furnace annealing and laser solid- and liquid-phase regrowth

	Furnace	CW Laser	Pulsed Laser
Regrowth mechanism	Solid-phase epi	Solid-phase epi	Liquid-phase epi
Anneal parameters	Regrowth takes place at less than 550°C. Regrowth quality depends on time and temperature	Regrowth quality depends on power and dwell time	Single crystal recovery above threshold power; poly below threshold
Dose dependence	High doses regrow poorly; for low doses of dopant, regrowth rate increases with dose	Same as furnace	Essentially no dose dependence
Orientation dependence	Poor regrowth for (111) orientation; best regrowth for (100) orientation	Same as furnace	No orientation dependence
Microstructure	Never completely defect free: some dislocations	Lower dislocation density than furnace	Perfect crystal: extended defect-free regions
Implant profile and substitutionality	No redistribution below solubility limit (above 850°C); normal diffusion above about 850°C; grain boundary outdiffusion and "push out" occurs above solubility limit	No redistribution below solubility limit; same as furnace above solubility limit	Always redistribution within melt; zone refining; substitutionality exceeds equilibrium values
Surface topography	Featureless	Usually featureless, but surface slip and cracking cause "overannealing" at (111) orientation	Appearance of frozen liquid; gross surface damage at excessively high laser powers

Note: The most perfect crystal results from liquid regrowth. However, this method causes redistribution of implanted dopants and, frequently, a wave-like surface irregularity. Excessively high laser intensities can cause boiling of the silicon and produce a roughened surface.

ในการแอนนิลสารกึ่งตัวนำด้วยแสงเลเซอร์นั้น ชั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลดังต่อไปนี้

" เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนชิ้นสารแสงจะ interact กับอิเล็กตรอนในชิ้นสาร และถ่ายทอดพลังงานให้กับอิเล็กตรอนเหล่านั้น โดยที่ไม่ทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนไหว (Atomic motion) ในสารกึ่งตัวนำ การกระตุ้นนี้จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pairs) ซึ่งเกิดจากการกระโดดข้ามแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น (Semiconductor band gap) เมื่อแสงเลเซอร์ที่ฉายนั้นมีความเข้มสูงพอ จำนวนอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมาก ทำให้เกิดการชนกันอย่างรวดเร็ว (Collide rapidly) ระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับโฮล เกิดพลาสมาอุณหภูมิสูงที่มีความหนาแน่นมาก (A relatively dense high-temperature plasma) ในขณะเริ่มต้นนั้นชิ้นสารที่บริเวณถูกฉายแสงจะยังไม่เกิดความร้อน เนื่องจากอะตอมที่อยู่ในโครงร่างผลึก

(Lattice of atoms) ยังไม่ได้ถูกกระตุ้นให้อยู่ในสภาวะที่มีการสั่นสูง (High vibrational - excitation) อิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่ชนกันจะแบ่งพลังงานกับโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นในชิ้นสาร (The vibration modes of the solid) ทำให้เกิดโฟนอน (Phonons) เวลาในการเกิดขึ้นตอนเหล่านี้อยู่ในช่วงเวลา 10^{-10} วินาที หรือน้อยกว่าสำหรับซิลิกอน ดังนั้นในช่วงเวลาประมาณ 20 nsec ของเลเซอร์พัลส์ที่ฉาย ขึ้นตอนในการแบ่งพลังงานที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงร่างผลึกจะถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นจากพลาสมาของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole plasma) ผลที่เกิดขึ้นเป็นความร้อนของเนื้อสาร อิเล็กตรอน โฮล และการสั่นของโครงร่างผลึกจะตอมรอบๆ จุดสมดุลย์ที่บริเวณฉายแสง แสงเลเซอร์จึงเสมือนเป็นแหล่งความร้อน และทำให้เกิดกระบวนการทางความร้อน (Thermal processes) ในเนื้อสาร" โมเดลนี้เรียกว่า โมเดลทางความร้อน (Thermal model) ⁽¹⁰⁾

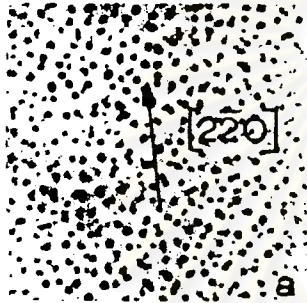
ในการสร้างหัวต่อพี-เอ็น ในเตาแพร่ซึมแล้วทำการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์ที่ R.T. Young และ J. Narayan ⁽¹¹⁾ ได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นทำการแพร่ซึมด้วยโบรอนในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนในเตาแพร่ซึมแบบความถี่สูง (rf - heated furnace) แล้วทำการแอนนัลด้วยเลเซอร์พัลส์แบบคิว-สวิทช์ ($\lambda = 0.694$ ไมโครเมตร ช่วงเวลาของพัลส์ ~50 ns) พลังงานของเลเซอร์ที่ใช้ในการแอนนัลอยู่ในช่วง 1.5-1.8 จูล/ตารางเซนติเมตร/พัลส์ ตารางที่ 4.2 เป็นลักษณะสมบัติของหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำการแพร่ซึมด้วยโบรอนก่อนและหลังการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหัวต่อพี-เอ็น ที่แพร่ซึมด้วยโบรอน ก่อนและหลังการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์ ⁽¹¹⁾

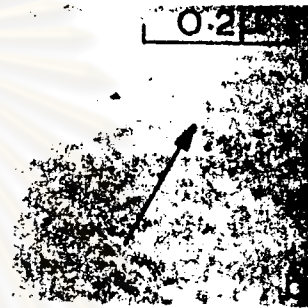
Electrical parameters of boron-diffused silicon.

Sample	Diffusion temperature and time	Before laser treatment			After laser treatment		
		N_s (cm^{-2})	ρ_s (Ω/\square)	μ (cm^2/Vs)	N_s (cm^{-2})	ρ_s (Ω/\square)	μ (cm^2/Vs)
D1	900°C/59 min	2.1×10^{15}	79	31	1.4×10^{16}	13.0	39
D2	950°C/30 min	3.8×10^{15}	44	29	2.5×10^{16}	8.6	38
D3	1000°C/10 min	5.8×10^{15}	28	30	3.4×10^{16}	6.3	38

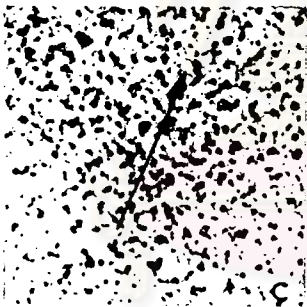
ส่วนรูปที่ 4.3 เป็นภาพถ่ายผิวหน้าแผ่นซิลิกอนที่แพร่ซึมด้วยโบรอน รูป ก. นั้นเป็นผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังจากการแพร่ซึมด้วยโบรอนในเตาแพร่ซึมที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จะเห็นว่าเกิดความผิดปกติที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนมาก รูป ข. นั้นเป็นผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนในรูป ก. เมื่อแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์ที่แบบคิว-สวิตซ์ พลังงานขนาด 1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าความผิดปกติที่ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอนได้หายไปหมด แต่เมื่อนำแผ่นผลึกซิลิกอนในรูป ข. นี้ไปแอนนัลในเตาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ความผิดปกติที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนนี้ก็กลับเกิดขึ้นใหม่อีกครั้งในรูป ค.



รูป ก.



รูป ข.



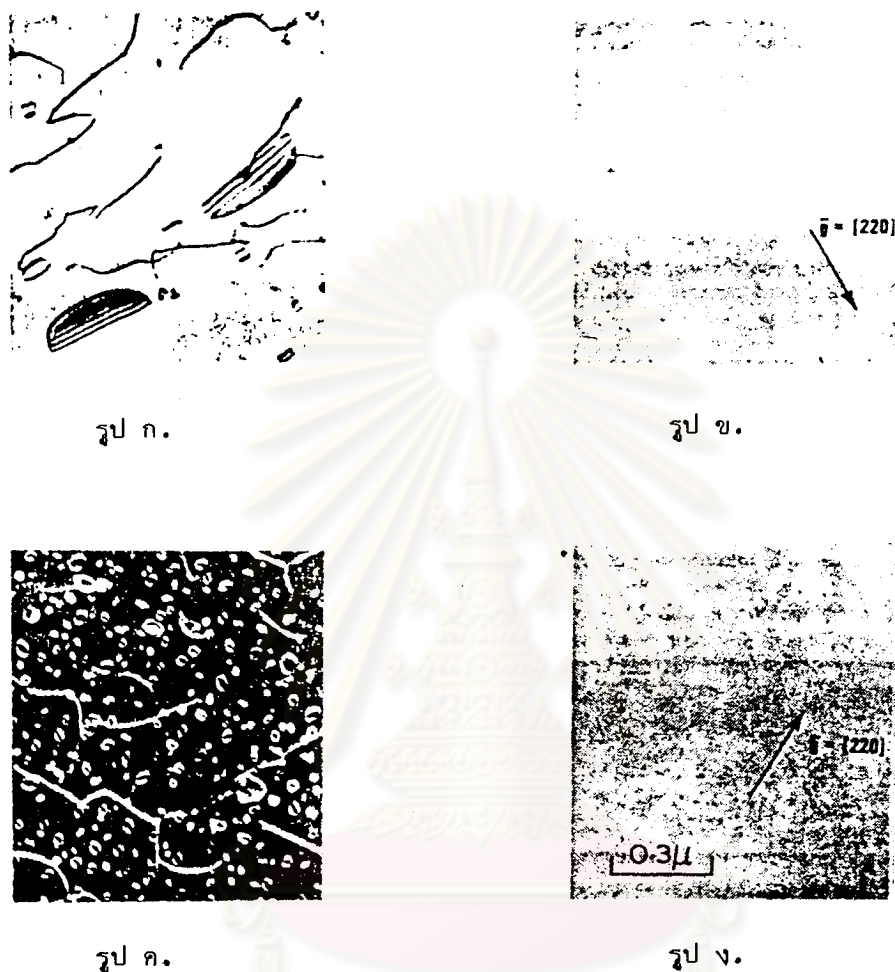
รูป ค.

- รูปที่ 4.3 รูป ก. แสดงผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำการแพร่ซึมด้วยโบรอนในเตาแพร่ซึมที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
รูป ข. หลังจากแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตซ์จาก เลเซอร์ที่แบบ พลังงานขนาด 1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร
รูป ค. หลังจากให้นำแผ่นผลึกซิลิกอนนี้กลับเข้าไปแอนนัลในเตาอุณหภูมิสูง 950 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที⁽¹¹⁾

จากการวัดเส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบมิตของเมสซาไดโอดที่สร้าง พบว่ามีคุณลักษณะสมบัติใกล้เคียงไดโอดในอุดมคติ (Ideal diode) มาก ในการสับไบแอสตรงนั้นไดโอดนี้ประพฤติตัวเป็นไปตามสมการ $I = I_0 \{ \exp(qv/nkT) - 1 \}$ ในช่วงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าไบแอส

มีค่า 0.20 ถึง 0.55 โวลท์ ค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์ (Ideality factor) n มีค่า 1.5 ± 0.1 สำหรับก่อนแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์ หลังจากแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แล้วค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์ได้เปลี่ยนเป็น 1.2 ± 0.1 ซึ่งแสดงว่าการแอนนัลนี้สามารถลดผลของการรวมตัว (Recombination effects) ที่เกิดขึ้นที่บริเวณเขตปลอดพาหะ (Space charge region)

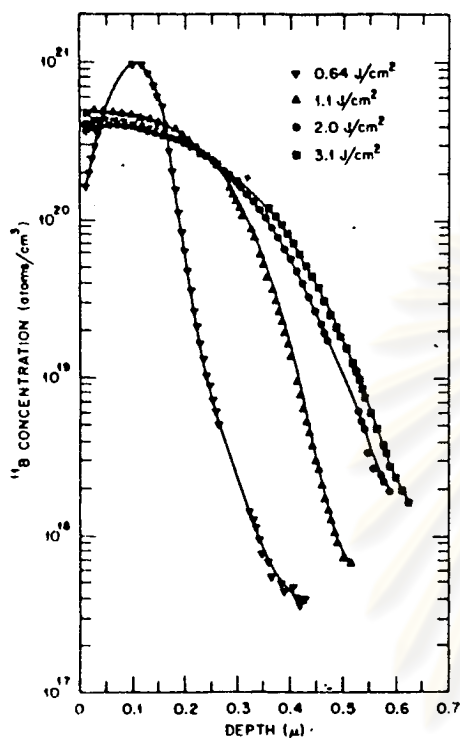
สำหรับการสร้างหัวต่อพี-เอ็น โดยการยิงอ็อนสารเจือปนที่มีพลังงานสูงเข้าไปฝังในเนื้อสารกึ่งตัวนำนั้น เป็นวิธีที่ทำให้รวดเร็ว สามารถควบคุมความเข้มข้นของสารเจือปน และความลึกของหัวต่อได้ดี แต่ความผิดปกติในเนื้อสารกึ่งตัวนำจะมีมากเนื่องจากการวิ่งชนของอ็อนที่มีพลังงานสูง จึงจำเป็นต้องทำการแอนนัลเพื่อลดความผิดปกติ การแอนนัลในเตาอุณหภูมิสูงสามารถลดความผิดปกติในเนื้อสารกึ่งตัวนำได้ แต่ความคล่องตัวและค่าเวลาชีวิตของพาหะยังมีค่าน้อยอยู่ เมื่อได้มีการทดลองใช้แสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ ทำการแอนนัลหัวต่อพี-เอ็น นี้พบว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการยิงอ็อนเข้าไปฝังในเนื้อสารลดลง ทั้งยังทำให้ความคล่องตัวและค่าเวลาชีวิตของพาหะสูงขึ้น R.T. Young, R.F. Wood และ J. Narayan ได้ทำการทดลองยิงอ็อนของโบรอนที่มีพลังงานขนาด 35 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ความหนาแน่นของอ็อน 3×10^{15} อ็อน/ตารางเซนติเมตร ฝังลงไปในพื้นที่ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น และยิงอ็อนของอาร์เซนิกที่มีพลังงานขนาด 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ความหนาแน่นของอ็อน 1×10^{16} อ็อน/ตารางเซนติเมตร ฝังลงไปในพื้นที่ผลึกซิลิกอนชนิดพี เพื่อสร้างหัวต่อพี-เอ็น แบ่งหัวต่อพี-เอ็น ทั้งสองชนิดออกเป็นสองพวก พวกแรกแอนนัลในเตา พวกที่สองแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์จากเลเซอร์พัลส์ ซึ่งมีช่วงเวลาพัลส์ 50 nsec พลังงานขนาด 1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร หลังจากแอนนัลแล้วทำการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะในหัวต่อ พบว่าค่าเวลาชีวิตของหัวต่อที่แอนนัลด้วยแสงเลเซอร์นั้นมีค่ามากกว่าของหัวต่อที่แอนนัลด้วยเตา เมื่อทำการตรวจดูผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอนนี้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าสำหรับหัวต่อพี-เอ็น ที่แอนนัลในเตานั้นยังตรวจพบดิสโลเคชัน (Dislocation) และดิสโลเคชันลูป (Dislocation loop) เหลืออยู่ในบริเวณที่ทำกรยิงอ็อน (Implanted region) ส่วนผิวหน้าของหัวต่อพี-เอ็น ที่แอนนัลด้วยเลเซอร์นั้นไม่พบความผิดปกติ ดังรูปที่ 4.4⁽⁴⁾



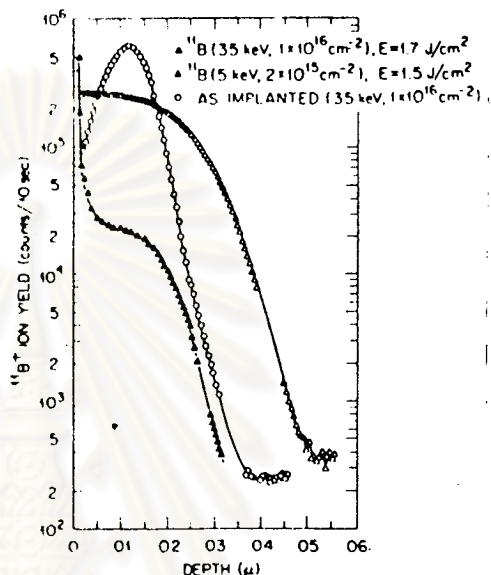
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน รูป ก. และ ข. เป็นผิวหน้าของ หัวต่อพี-เอ็น ที่ยิงด้วยอ็อกซอนของโบรอน ส่วนรูป ค. และ ง. เป็นผิวหน้าของหัวต่อพี-เอ็น ที่ยิง ด้วยอ็อกซอนของอาร์เซนิก การแอนนیلนั้นรูป ก. และ ค. แอนนیلในเตาอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และ 900 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ตามลำดับ ส่วนรูป ข. และ ง. นั้น แอนนیلด้วยแสงเลเซอร์พลังงานขนาด 1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร⁽⁴⁾

นอกจากนี้ R.T. Young ยังได้นำเอาหัวต่อพี-เอ็น ทั้งสองพวกนี้มาทำการแอนนิลด้วย แสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตซ์ ด้วยพลังงาน 0.6 ถึง 3.1 จูล/ตารางเซนติเมตร พบว่าการกระจาย ของสารเจือปน (Impurity profile) มีการเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงนี้สังเกตเห็นได้ เมื่อพลังงานของแสงเลเซอร์มากกว่า 0.64 จูล/ตารางเซนติเมตร สำหรับหัวต่อที่ยิงด้วยอ็อกซอน

โบรอน ดังรูปที่ 4.5 ก. ส่วนหัวต่อที่ยิงด้วยไอออนอาร์เซนิกนั้นพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ใช้จะต้องมากกว่า 1.7 จูล/ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.5 ข.



รูป ก.

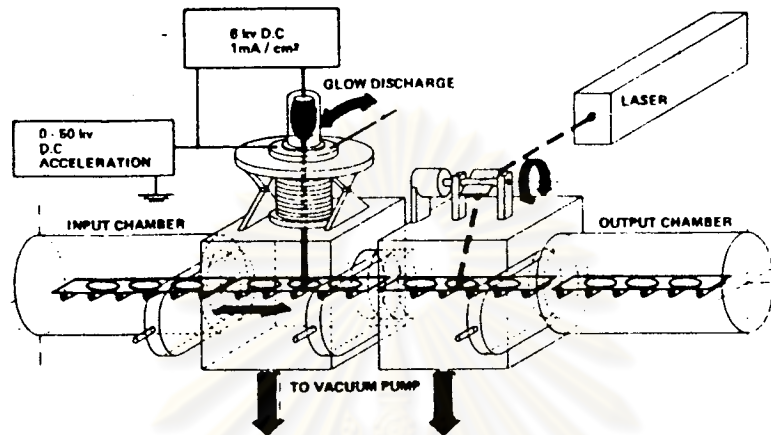


รูป ข.

รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของอะตอมโบรอน (ก) และอาร์เซนิก (ข) ก่อนและหลังแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ ที่ขนาดพลังงานต่าง (4)

นอกจากนี้ยังมีกลุ่มนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มได้ทำการทดลองแอนนัลหัวต่อพี-เอ็น ที่เตรียมขึ้นโดยการยิงไอออนพลังงานสูงฝังด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ (15,16,17) ผลที่ได้ก็เหมือนกับที่ R.T. Young และคณะได้ทำการทดลองไว้

วิธีการสร้างหัวต่อพี-เอ็น โดยการยิงไอออนสารเจือปนฝังเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ แล้วแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบพัลส์ สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เชิงอุตสาหกรรมได้ (18) หลักการของกระบวนการผลิตนี้มี ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการยิงอิออนสารเจือปนฝังในเนื้อซิลิกอนแล้วแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบพัลส์กวาดไปมาบนแผ่นผลึกซิลิกอน (18)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างด้วยวิธีนี้ R.T. Young และ R.F. Wood ได้ทำการทดลองยิงอิออนโบรอนฝังลงไปบนเนื้อแผ่นผลึกซิลิกอนแล้วแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์พัลส์แบบคิว-สวิตช์ ด้วยพลังงานขนาด 1.0 - 2.0 จูล/ตารางเซนติเมตร เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีประสิทธิภาพสูงถึง 16 % ที่ AM 1^(19,20) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกเลียมอาร์เซไนด์เมื่อแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์พัลส์ด้วยพลังงานขนาด 0.8 ถึง 1.8 จูล/ตารางเซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 22 % AM 1⁽²¹⁾

การสร้างหัวต่อพี-เอ็น ที่ได้กล่าวมาแล้ว 2 แบบ นั้นใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพของหัวต่อพี-เอ็น ให้ดีขึ้น แสงเลเซอร์ยังสามารถสร้างหัวต่อพี-เอ็น โดยตรงได้อีกด้วยโดยมีหลักการดังนี้

ฉาบผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำด้วยสารเจือปน เป็นชั้นฟิล์มบางๆ (Thin film) แล้วฉายด้วยแสงเลเซอร์แบบพัลส์ที่มีพลังงานสูง ทำให้สารเจือปนแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ความเข้มข้นของสารเจือปนที่แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำโดยวิธีการแพร่ซึมแบบนี้ จะมีค่าสูงกว่าการแพร่ซึมในเตาอุณหภูมิสูง ทั้งนี้เพราะการแพร่ซึมโดยใช้แสงเลเซอร์ฉายนี้เป็นการแพร่ซึมในสภาวะของเหลว (Liquid phase) ผิดกับการแพร่ซึมในเตาอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นการแพร่ซึมในสภาวะเป็น

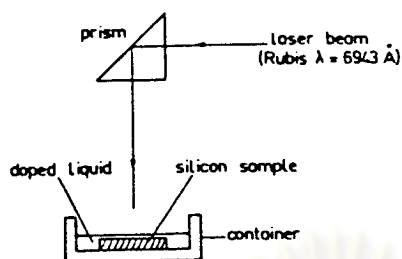
ของแข็ง (Solid phase) การสร้างหัวต่อพี-เอ็น วิธีนี้ทำให้ได้หัวต่อพี-เอ็นที่อุณหภูมิต่ำ หัวต่อที่ได้จึงมีความผิดปกติทางโครงสร้างน้อย ความคล่องตัวและค่าเวลาชีวิต ตลอดจนค่าความยาวในการแพร่ซึมของพาหะจะมีค่าสูงขึ้น หัวต่อพี-เอ็น ที่ได้จึงมีคุณภาพดี การควบคุมความลึกของหัวต่อทำได้โดยการปรับพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ฉายให้เหมาะสม การฉาบสารเจือปนที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้โดย

- 1) ระเหิดให้สารเจือปนกระจายมาฉาบที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำในสุญญากาศ (Vacuum evaporation)
- 2) ทาผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ (Paint on) ด้วยสารละลายที่มีสารเจือปนละลายอยู่
- 3) แช่สารกึ่งตัวนำไว้ในสารละลายที่มีสารเจือปนละลายอยู่

การสร้างหัวต่อพี-เอ็น ด้วยวิธีฉาบผิวหน้าแผ่นซิลิกอนด้วยสารเจือปนในสุญญากาศนี้

J. Narayan, R.T. Young และ R.F. Wood ได้ทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีนี้ โดยนำแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นระนาบผลึก (100) ความต้านทานสไลด์ 5 โอห์ม-เซนติเมตร มาฉาบด้วยโบรอนในสุญญากาศที่ความดัน 3×10^{-6} ทอร์รี่ ด้วยอัตราความหนา 5 ถึง 10 อังสตรอม/นาที่ นาน 5 นาที แล้วฉาบด้วยแสงเลเซอร์พัลส์แบบคิว-สวิทช์ พลังงานขนาด 1.5 ถึง 1.7 จูล/ตารางเซนติเมตร ช่วงเวลาพัลส์ประมาณ 50 nsec เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 11 % ที่ AM 1⁽²²⁾

สำหรับการสร้างหัวต่อพี-เอ็น โดยการแช่แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำในสารละลายที่มีสารเจือปนละลายอยู่นั้น R. Stuck, E. Fogarassy และคณะ ได้ทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนที่มีระนาบผลึก (111) ชนิดที่ความต้านทานสไลด์ 1.5 ถึง 3 โอห์ม/ตารางเซนติเมตร หนา 300 ไมโครเมตร แช่ในสารละลายไตรบูทิลฟอสเฟต (Tributylphosphate) ($C_{12}H_{27}O_4P$) ซึ่งมีความเข้มข้นของอะตอมฟอสฟอรัสประมาณ 2.5×10^{21} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือสารละลายของแอนติโมนีไทรคลอไรด์ ($SbCl_3$) ในเอทานอลความเข้มข้นของอะตอมแอนติโมนีประมาณ 1.5×10^{21} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วฉายด้วยแสงเลเซอร์พัลส์แบบคิว-สวิทช์ พลังงานขนาด 1.1 ถึง 2.0 จูล/ตารางเซนติเมตร ช่วงเวลาพัลส์ประมาณ 20 nsec ความหนาของสารละลายที่ปกคลุมผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอนหนาประมาณ 0.1 มิลลิเมตร วิธีในการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.7⁽²³⁾



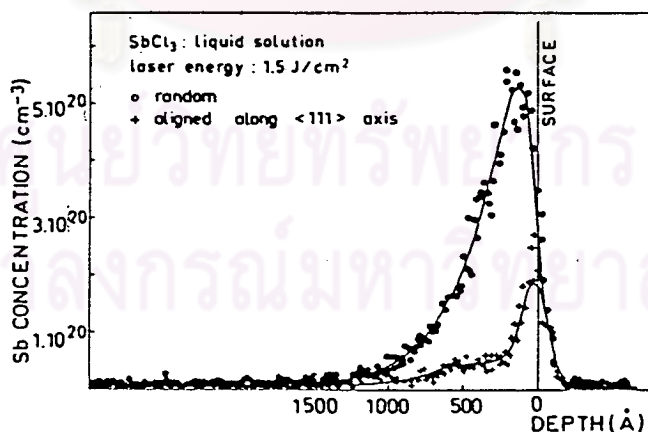
doped liquid :

- 1) tributylphosphate ($C_{12}H_{27}O_4P$)
- 2) antimony trichloride ($SbCl_3$) + ethanol

Schematic arrangement used for the laser irradiation.

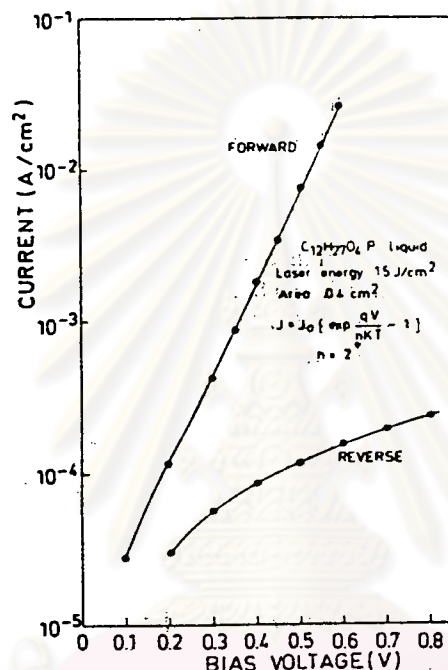
รูปที่ 4.7 การสร้างหัวต่อพี-เอ็น ด้วยวิธีแช่แผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายที่มีสารเจือปนละลายอยู่แล้วฉายด้วยแสงเลเซอร์ที่แบบคิว-สวีทซ์ พลังงานขนาด 1.1 ถึง 2.0 จูล/ตารางเซนติเมตร ช่วงเวลาพัลส์ประมาณ 20 nsec⁽²³⁾

จากการดูการกระจายตัวของแอนติโมนีด้วยวิธี Rutherford backscattering spectrometry (RBS) โดยใช้ลำของฮีเลียมไอออน ($4 He^+$) ที่มีพลังงานขนาด 1 เมกะอิเล็กตรอน-โวลต์ ได้การกระจายตัวของแอนติโมนี ดังรูปที่ 4.8⁽²³⁾



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของแอนติโมนีที่วัดโดยวิธี Rutherford backscattering spectrometry ลักษณะติดตั้งของแผ่นซิลิกอนที่ใช้เป็นเป้าหมายเป็นแบบลุ่มและจัดวางตามแกนผลึก (111)⁽²³⁾

เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบมิตของหัวต่อที่สร้างด้วยวิธีนี้เป็นไปตามสมการของไดโอดในอุดมคติ กระแสรั่วไหลของไดโอดนี้มีค่าประมาณ 10^{-4} แอมป์/ตารางเซนติเมตร ที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ 0.5 โวลท์ รูปที่ 4.9 เป็นเส้นลักษณะสมบัติกระแสแรงเคลื่อนไฟฟ้าของไดโอดนี้



รูปที่ 4.9 เส้นลักษณะสมบัติกระแสแรงเคลื่อนไฟฟ้าของไดโอดแบบ เมสาขนาด 0.4

ตารางเซนติเมตร ที่ทำจากหัวต่อพี-เอ็น ที่แช่ในสารละลายไตรบูทิลฟอสเฟต แล้วฉายด้วยแสงเลเซอร์ (23)

เซลล์แสงอาทิตย์นี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 13 % ที่ AM 1 (23)

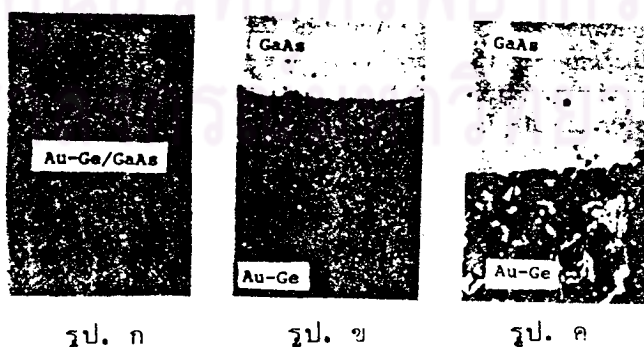
ในการทำขั้วต่อไฟฟ้าระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะแล้วแอนน็ลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตซ์ ที่มีพลังงานเหมาะสม ขั้วต่อไฟฟ้าหลังแอนน็ลจะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

A.H. Oraby, K.Murakami และคณะ ได้ทำการทดลองฉาบโลหะผสมระหว่างทองคำ-เยอรมันเนียม (Gold-Germanium) หน้า 300-1200 อังสตรอม ลงบนผิวหน้าแผ่นผลึกแกเลียม-อาร์เซไนต์แบบผิวขัดมันระนาบผลึก (100) แพร่ซึมด้วยซิลิกอน (ความหนาแน่นของอะตอมซิลิกอน = 1.33×10^{16} , 7.5×10^{17} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) แล้วแอนน็ลด้วยแสงเลเซอร์แบบ

คิว-สวิตช์ จากแอ็คเลเซอร์ การแอนนัลนี้ฉายแสงเลเซอร์เข้าหาแผ่นผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ด้านที่ไม่ได้ฉาบโลหะผสมทองคำ-เยอรมันเนียม เนื่องจากช่วงพลังงานของแกเลียมอาร์เซไนด์เท่ากับ 1.4 อิเล็กตรอนโวลท์ แต่พลังงานโฟตอนของแอ็คเลเซอร์นั้นมีค่าเพียง 1.17 อิเล็กตรอนโวลท์ ดังนั้นแสงเลเซอร์จากแอ็คเลเซอร์จะไม่ถูกดูดกลืนด้วยแกเลียมอาร์เซไนด์ ทำให้แสงเลเซอร์นี้สามารถทะลุผ่านแกเลียมอาร์เซไนด์ไปยังบริเวณผิวต่อระหว่างแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียมได้ จากการทดลองพบว่าเมื่อพลังงานของแสงเลเซอร์สูงเกิน (Threshold energy) 0.04 จูล/ตารางเซนติเมตร ผิวสัมผัสระหว่างแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียม ได้เปลี่ยนเป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic contact)

นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านทานจำเพาะของผิวสัมผัส (Specific contact resistance) เปลี่ยนแปลงอย่างผกผันกับพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ฉาย เมื่อแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.5 จูล/ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของผิวสัมผัสมีค่าอยู่ระหว่าง $(1-4) \times 10^{-5}$ โอห์ม/ตารางเซนติเมตร ในขณะที่ความต้านทานจำเพาะของผิวสัมผัสที่แอนนัลในเตาอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นาน 60 วินาที มีค่า 1.3×10^{-4} โอห์ม/ตารางเซนติเมตร

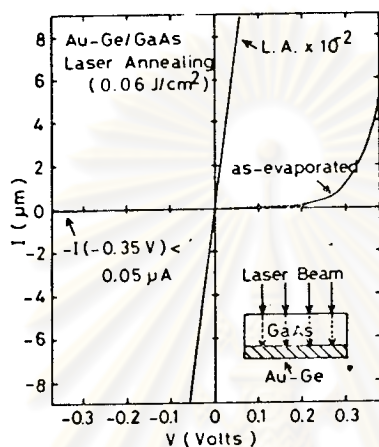
รูปที่ 4.10 เป็นภาพถ่ายตัดขวางของบริเวณผิวสัมผัสแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียม รูป ก. คือภาพก่อนทำการแอนนัล รูป ข. คือภาพหลังแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์พลังงานขนาด 0.08 จูล/ตารางเซนติเมตร ส่วนรูป ค. นั้นคือภาพที่แอนนัลในเตาอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 วินาที⁽²⁴⁾



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายผิวสัมผัสระหว่างแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียม
รูป ก. ก่อนทำการแอนนัล รูป ข. ทำการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์พลังงานขนาด 0.08 จูล/ตารางเซนติเมตร รูป ค. แอนนัลในเตาอุณหภูมิสูง 450 องศาเซลเซียส นาน 60 วินาที⁽²⁴⁾

ในรูป ข. จะเห็นว่าผิวสัมผัสที่ได้จากการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์จะเรียบ และมีความผิดปกติน้อยกว่าในรูป ค. ซึ่งแอนนัลในเตาอุทกมิสูง

ส่วนรูปที่ 4.11 เป็นเส้นลักษณะสมบัติกระแสแรงเคลื่อนไฟฟ้าของผิวสัมผัสนี้ก่อนและหลังแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานขนาด 0.06 จูล/ตารางเซนติเมตร

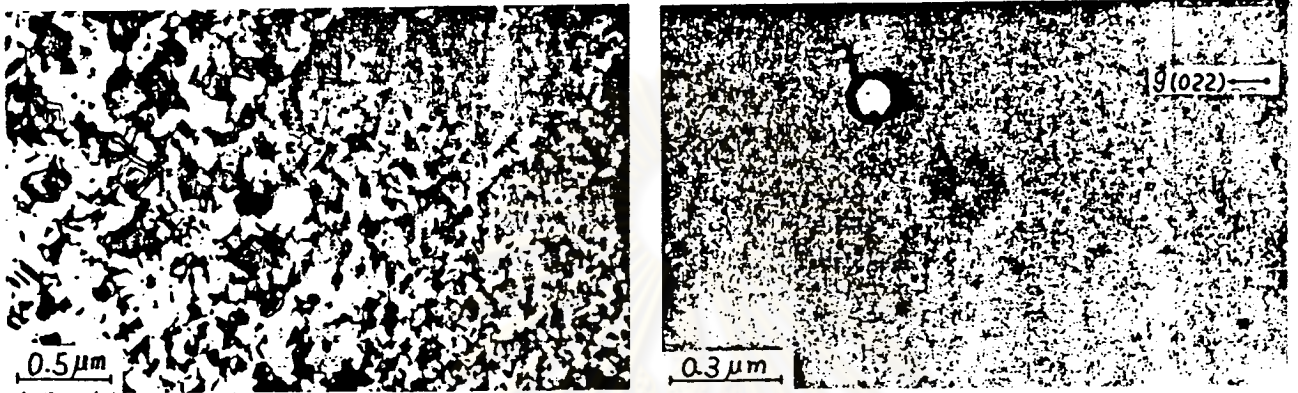


รูปที่ 4.11 เส้นลักษณะสมบัติกระแสแรงเคลื่อนไฟฟ้าของผิวสัมผัสแกเลียมอาร์เซไนด์กับทองคำ-เยอรมันเนียม ก่อนและหลังแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์ พลังงาน 0.06 จูล/ตารางเซนติเมตร (24)

ในการสร้างอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอด ไอซี นั้นต้องใช้แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ดี แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ดีสามารถเตรียมได้โดยการสร้างชั้นอิพิทักเซียล (Epitaxial) บนแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้จะให้แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่ได้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์

S.S. Lau, R.C. Eckardt และคณะ ได้ทำการทดลองนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีระนาบผลึก (100) มาสร้างชั้นซิลิกอนอสัญฐานหนา 2000-4000 อังสตรอม โดยการระเหิดไอในสุญญากาศด้วยอัตราประมาณ 40 อังสตรอม/วินาที ที่ความดัน $(5-10) \times 10^{-7}$ ทอร์รี่ แล้วฉายด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากแอ็คเลเซอร์ ซึ่งมีช่วงเวลาพัลส์ประมาณ 20 nsec เส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ประมาณ 5 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่าชั้นขอบซิลิกอนที่ทำการฉายในสุญญากาศหนา 3800 อังสตรอม สามารถเปลี่ยนไปเป็นชั้นซิลิกอนแบบอิพิทักเซียลได้ด้วยการฉายแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน 2.5 และ 5.0 จูล/ตารางเซนติเมตร เพียงพัลส์เดียว (12)

ภาพถ่ายผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำการสร้างขึ้นซิลิกอนอสัญฐานแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ก. ส่วนรูป ข. นั้น เป็นภาพของผิวผลึกหลังจากแอนนیلด้วยแสงเลเซอร์พลังงานขนาด 2.5 จูล/ตารางเซนติเมตร



รูป ก.

รูป ข.

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายผิวหน้าแผ่นซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในรูป ก. เป็นผิวหน้าของซิลิกอนอสัญฐานที่ฉาบก่อนแอนนیل รูป ข. เป็นผิวหน้าซิลิกอนอสัญฐานที่ทำการแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์ พลังงานขนาด 2.5 จูล/ตารางเซนติเมตร วงกลมที่เห็นในภาพเป็นจุดที่ฉายแสงเลเซอร์ซิลิกอนบริเวณนี้กลายเป็นผลึกซิลิกอนสมบูรณ์ (Single crystal) จึงไม่เกิดคิสโลเคชัน⁽¹²⁾

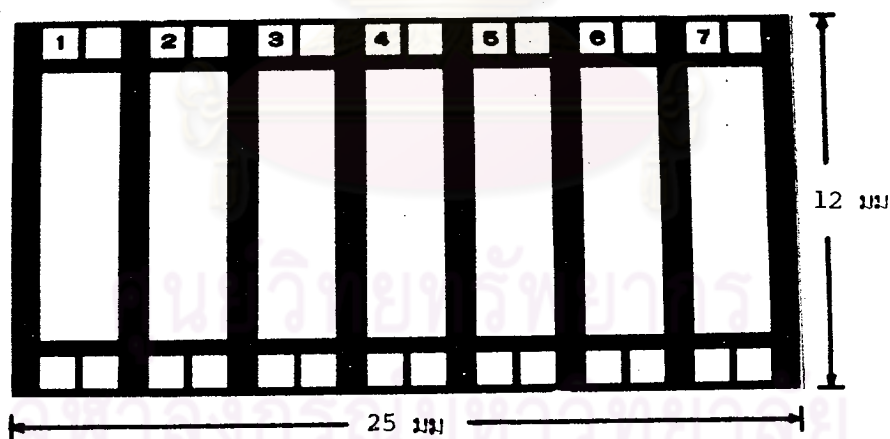
นอกจากนี้อาจสร้างขึ้นอีพิทักเซียลของซิลิกอน โดยใช้ลำโมเลกุลของซิลิกอน (Silicon molecular beam) ตกทับถมบนแผ่นซิลิกอนแล้วแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์หับทิมแบบคว-สวิตซ์ ดังที่ L. Smit, T. de Jong และคณะ ได้ทำการทดลองไว้⁽²⁵⁾

เทคนิคการใช้แสงเลเซอร์ในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้น ไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ปัจจุบันนี้ยังได้ประยุกต์นำไปใช้ในกระบวนการผลิตทรานซิสเตอร์ และไอซีด้วย ดังเช่น ผลงานของคณะของ M. Wittmer และคณะของ HAN-SHENG LEE^(26,27) ทั้งนี้เพราะคุณสมบัติพิเศษต่างๆ ของแสงเลเซอร์ที่สามารถโฟกัส เพื่อให้พลังงานของแสงเลเซอร์รวมเป็นจุดเล็กๆ จึงสามารถแอนนิลเฉพาะจุดบนสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นได้

4.3 การทดลองแอนน็ลลิสสารกึ่งตัวนำด้วยแสงเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์

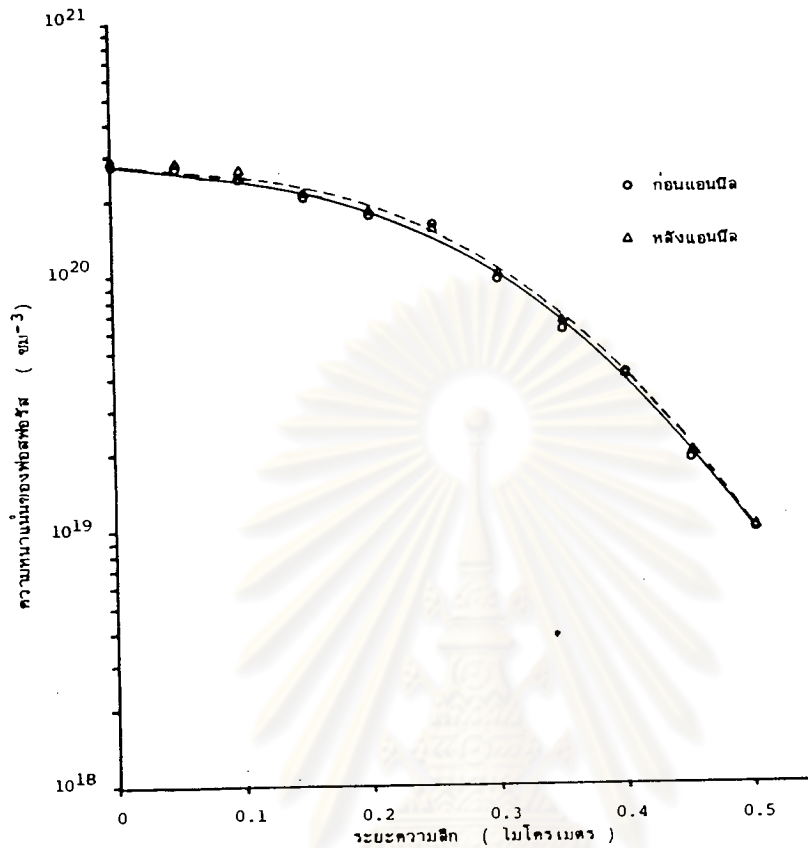
การทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำด้วยท่อไฟฟ้าด้วยนิเกิล เมื่อแอนน็ลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นเองในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หัวต่อพี-เอ็น นี้สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีที่มีค่าความต้านทานจำเพาะในช่วง 8 ถึง 10 โอห์ม-เซนติเมตร หนาประมาณ 250 ไมโครเมตร ทำการแพร่ซึมด้วยฟอสฟอรัสในเตาแพร่ซึมที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ด้วยเงื่อนไขมาตรฐานในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ⁽²⁸⁾ แบ่งหัวต่อพี-เอ็น ที่ได้ออกเป็น 2 พวง

พวงแรกมีแพทเทิร์นตามรูปที่ 4.13 ซึ่งแบ่งเป็นช่อง 7 ช่อง เพื่อศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อทำการฉายด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดพลังงานต่างๆ ฉายแสงเลเซอร์นี้บนช่องที่ 2 ถึง 6 ยกเว้นช่องที่ 1 และ 7 ซึ่งจะใช้เป็นตัวแทนเปรียบเทียบ พลังงานที่ใช้ในการแอนน็ลอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 8.0 จูล/ตารางเซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ประมาณ 1.0 มิลลิเมตร ความเร็วในการเลื่อนชิ้นสารกึ่งตัวนำประมาณ 4 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 4.13 แพทเทิร์นที่ใช้ในการแอนน็ล

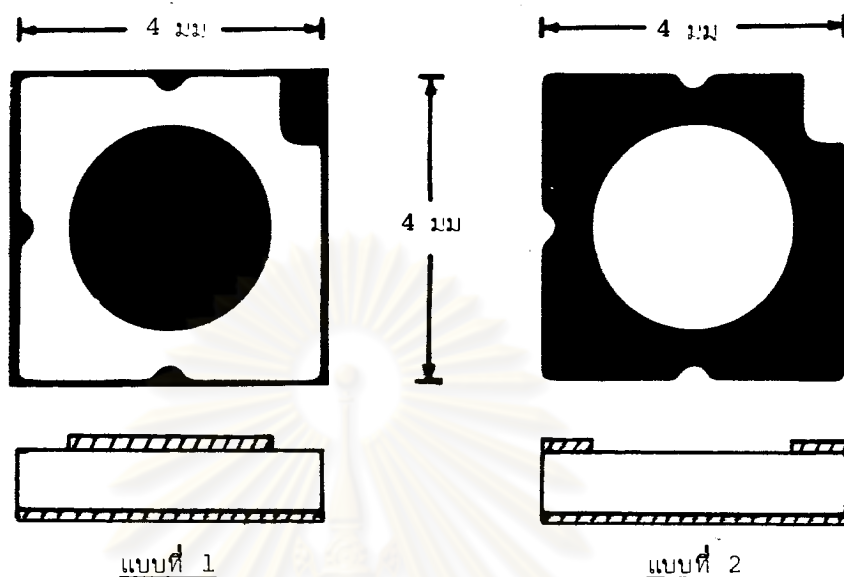
จากนั้นนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่สร้างหัวต่อและแอนน็ลแล้วนี้ไปทำการลอกชั้นออกไซด์ ด้วยวิธีอะโนดิกออกซิเดชัน (Anodic oxidation)⁽²⁹⁾ หากการกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสในหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำการแอนน็ลด้วยแสงเลเซอร์ขนาดพลังงานต่างๆ กัน ได้การกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสเหมือนกันทั้ง 7 ช่อง ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสของหัวต่อพี-เอ็น ที่สร้างก่อนและหลังแอนนیل ด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิทช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานขนาด 2.0 ถึง 8.0 จูล/ตารางเซนติเมตร

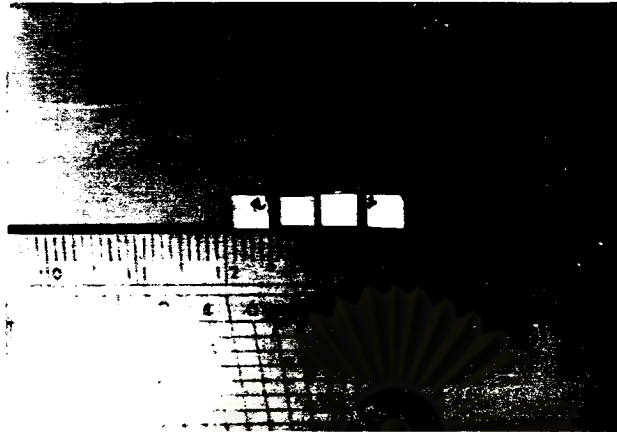
การกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสที่ได้จากการทำการลอกชั้นออกไซด์ แล้ววัดความต้านทานแผ่น (Sheet resistance) ทำให้สามารถรู้ความหนาแน่นของอะตอมฟอสฟอรัส จากรูปที่ 4.14 พบว่าการแอนนิลหัวต่อพี-เอ็น นี้ด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิทช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานในช่วง 2.0 ถึง 8.0 จูล/ตารางเซนติเมตร ไม่สามารถทำให้การกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสที่แพร่เข้าไปในแผ่นผลึกซิลิกอนเปลี่ยนแปลงไปได้

หัวต่อพี-เอ็น พวกที่สองนั้น นำไปทำขั้วต่อไฟฟ้าด้วยการชุบนิเกิลแบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ด้วยแพทเทิร์นตามรูปที่ 4.15 ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอนที่เป็นชนิดพีนั้นทำการชุบนิเกิลแบบใช้กระแสไฟฟ้าเต็มทั้งหน้า



รูปที่ 4.15 แพ้ทเทริน์ที่ใช้ในการทำขั้วโลหะด้านหน้าและด้านข้าง ส่วนที่แลเงาคือ บริเวณที่ขุบนิเกิล

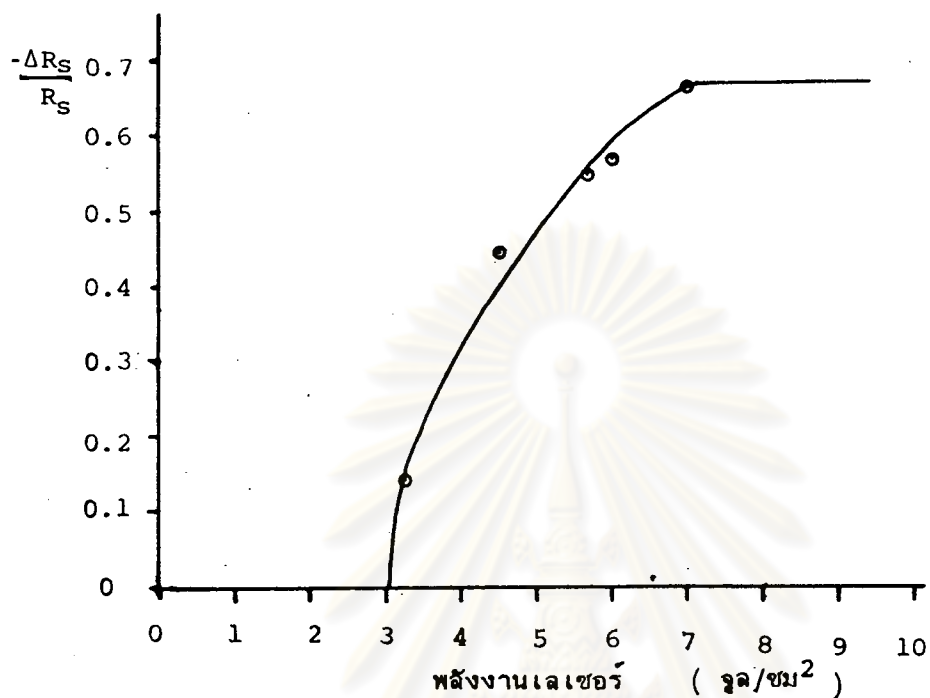
เมื่อขุบนิเกิลทำขั้วต่อไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว นำเอาหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำขั้วต่อไฟฟ้านี้ไปอบในเตาอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้ขั้วต่อไฟฟ้าที่สร้างขึ้นแห้งและติดแน่นไม่ลอกง่าย ตัดแผ่นซิลิกอนนี้ออกเป็นชิ้นเล็กๆ ตามแพ้ทเทริน์ที่ได้ทำไว้ต่อสายแล้วทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ที่ตกคร่อมหัวต่อเมื่อไบแอสตรง และไบแอสกลับ หลังจากนั้นฉายแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตซ์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เส้นผ่าศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ประมาณ 1.0 มิลลิเมตร พลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 2.0 ถึง 8.0 จูล/ตารางเซนติเมตร ความเร็วในการเลื่อนชิ้นสารกึ่งตัวนำประมาณ 4 มิลลิเมตร/นาที แสงเลเซอร์ที่ฉายนี้อาจแบบเต็มหน้าทางด้านที่ทำเป็นแพ้ทเทริน์ทั้งแบบที่ 1 และ 2 ในรูปที่ 4.15 ภาพถ่ายของหัวต่อพี-เอ็น ที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 หัวต่อพี-เอ็น ที่ใช้ในการทดลอง

นำหัวต่อพี-เอ็น ที่ได้ทำการฉายแสงเลเซอร์แล้ว มาวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า นำค่าที่ทำการวัดก่อนและหลังฉายแสงเลเซอร์ไปพล็อตลงในกระดาษแบบเซมิล็อก (Semi - log scale) เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น ก่อนและหลังแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์จะขนานกัน คำนวณหาค่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อ (Series resistance) ⁽³⁰⁾ ก่อนและหลังแอนนัล พบว่าค่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อจะมีค่าลดลงเมื่อแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์ การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อนี้เปลี่ยนแปลงเป็นส่วนกลับกับพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการแอนนัล นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อจะเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่อแสงเลเซอร์ที่ฉายมีพลังงานมากกว่า 3.0 จูล/ตารางเซนติเมตร และเมื่อแสงเลเซอร์ที่ฉายมีพลังงานเกินกว่า 7.0 จูล/ตารางเซนติเมตร การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานอนุกรมก่อนและหลังแอนนัลนั้นไม่เปลี่ยนแปลง กราฟรูปที่ 4.17 แสดงค่าความต้านทานอนุกรมที่เปลี่ยนแปลงไปกับพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ฉาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานอนุกรมกับพลังงานของแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์

การเปลี่ยนแปลงของหัวต่อพี-เอ็น ที่ฉายด้วยแสงเลเซอร์ พลังงานค่าต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงพลังงานของแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ ที่ใช้ในการแอนเนิลหัวต่อพี-เอ็น กับค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์ และค่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อก่อนและหลังแอนเนิล

ตัวอย่างที่	พลังงานของแสงเลเซอร์ (จล/ซม. ²)	ค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์		ความต้านทานอนุกรมของหัวต่อ (R_s)	
		ก่อน	หลัง	ก่อน (โอห์ม)	หลัง (โอห์ม)
1	3.3	2.32	2.32	7	6
2	4.5	2.31	2.30	9	5
3	5.7	2.32	2.32	14	7
4	6.0	2.33	2.33	19	8
5	7.0	2.33	2.33	15	5

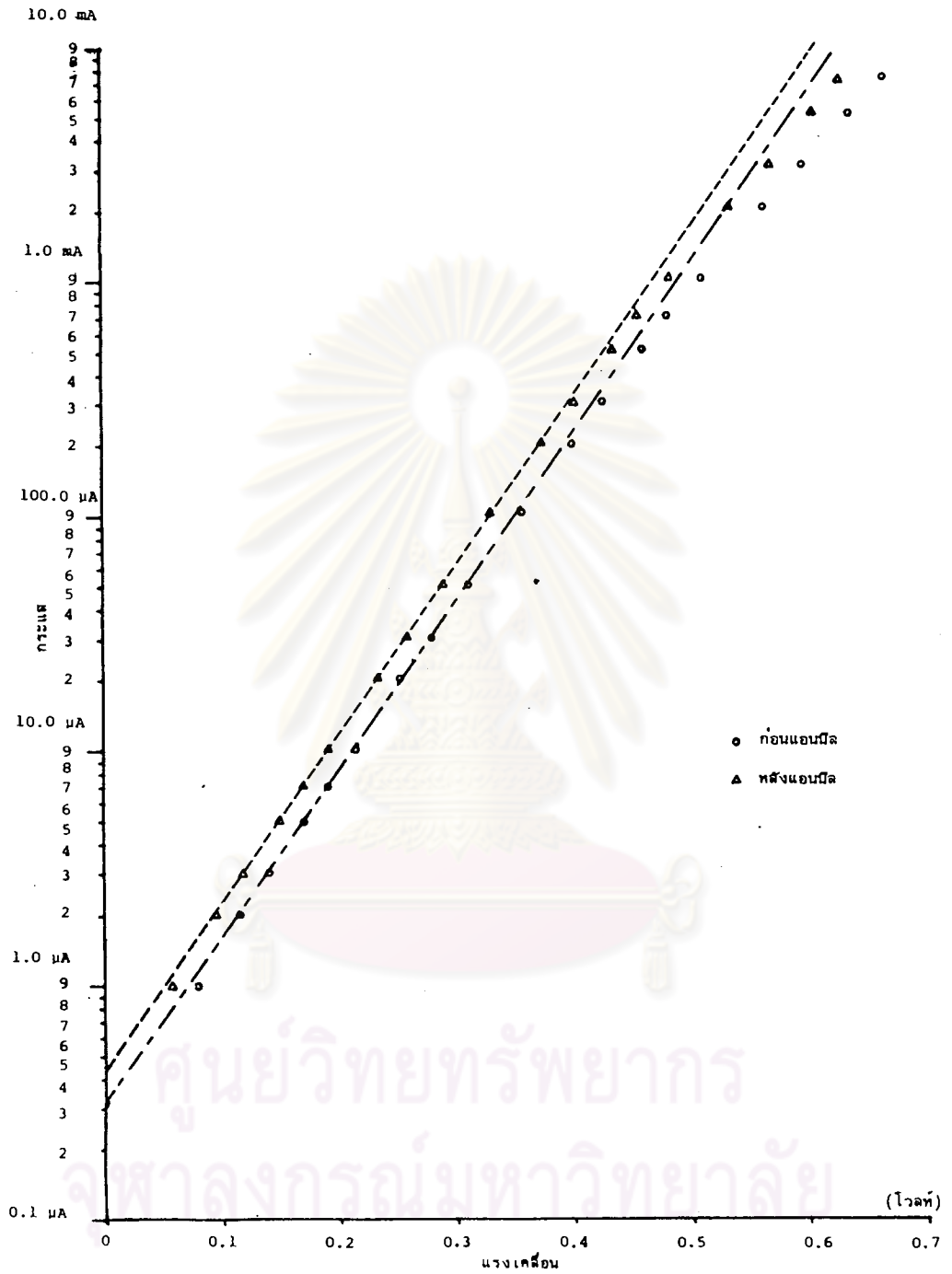
ตัวอย่างของ เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ของหัวต่อพี-เอ็น ที่แอนนูลด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งมีค่าพลังงานขนาด 6.0 จูล/ตารางเซนติเมตร มีแสดงไว้ในรูปที่ 4.18 และ 4.19

รูปที่ 4.18 เป็น เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ของหัวต่อเมื่อไบแอสตรง จะเห็นว่าเส้นคุณลักษณะสมบัติทั้งก่อนและหลังแอนนูลนั้นขนานกัน

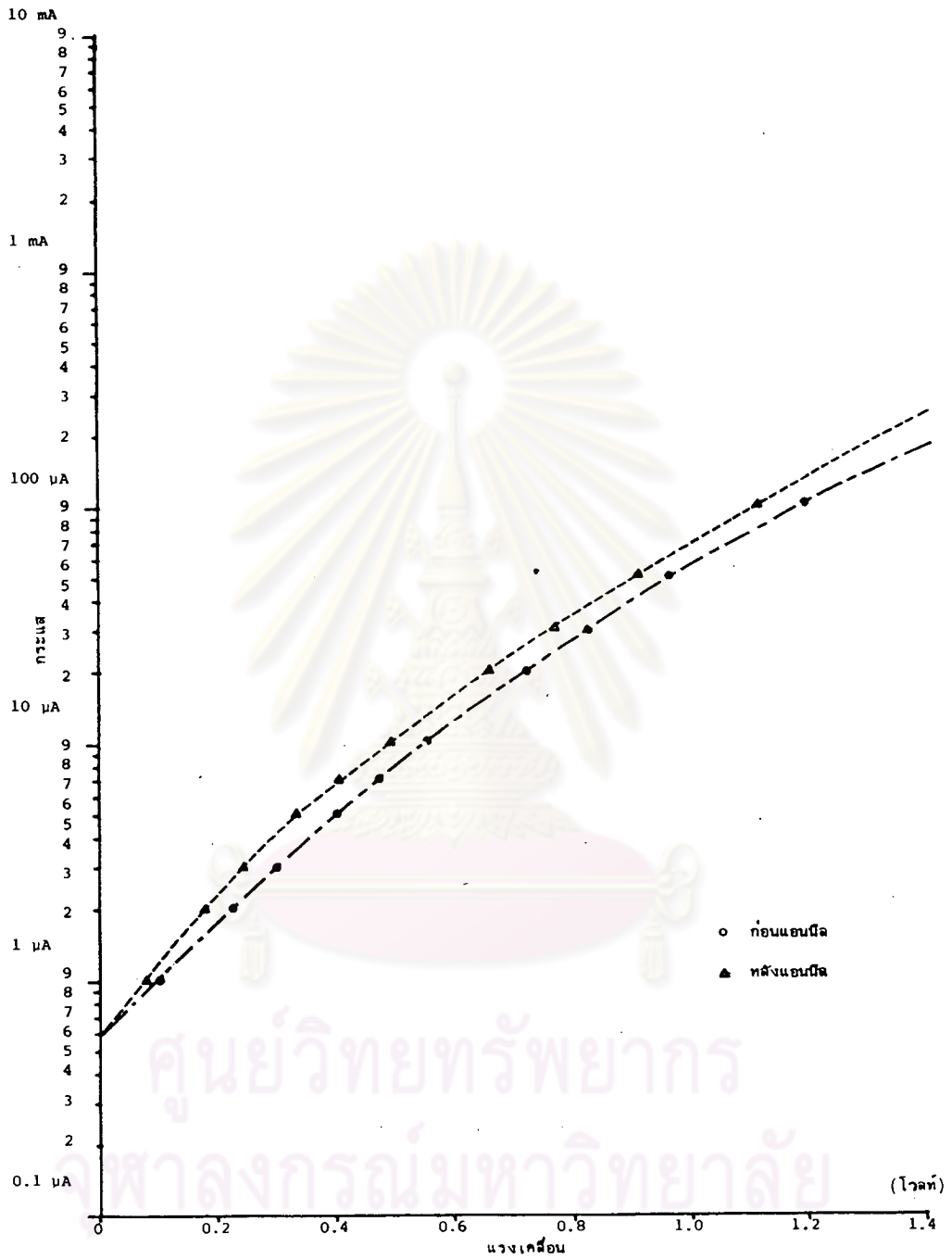
รูปที่ 4.19 เป็น เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ของหัวต่อเมื่อไบแอสกลับ ซึ่งเส้นทั้งสองมีลักษณะคล้ายกัน



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสตรง ก่อนและหลังทำการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานขนาด 6.0 จูล์/ตารางเซนติเมตร

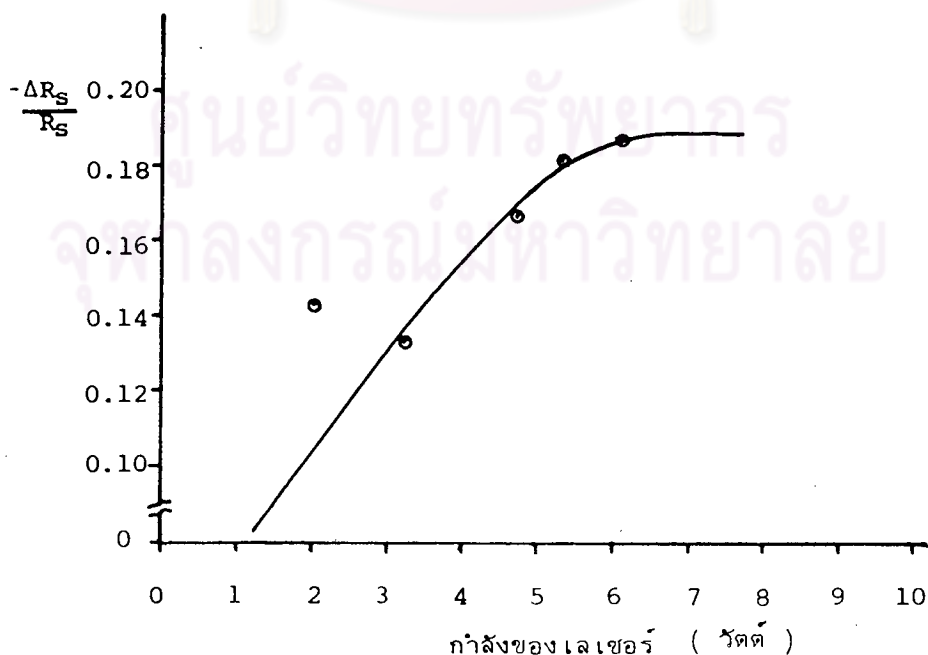


รูปที่ 4.19 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสกลับก่อนและหลังทำการแอนนูลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานขนาด 6.0 จูล/ตารางเซนติเมตร

การทดลองที่ได้ทดลองมาแล้วนั้น เป็นการทดลองที่ใช้แสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวแอนนิล แต่เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตช์ กับแบบคลื่นต่อเนื่อง ว่าแบบใดจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงมากกว่ากันในการแอนนิลหัวต่อพี-เอ็น จึงได้ทำการทดลองใช้แสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องจากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แอนนิลหัวต่อพี-เอ็น แทน การทดลองนี้มีดังนี้

นำหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำขั้วต่อไฟฟ้าด้วยนิเกิลมาวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า แล้วทำการแอนนิลด้วยการฉายแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องจากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลำแสง 1.0 มิลลิเมตร ลงบนผิวหน้าหัวต่อพี-เอ็น ด้านที่ทำแพทเทิร์นทั่วทั้งหน้า เลื่อนหัวต่อพี-เอ็น ให้ถูกฉายแสงด้วยความเร็วประมาณ 20 มิลลิเมตร/นาที กำลังของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการแอนนิลอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการแอนนิลนาน 6 นาที (การบอกพลังงานของแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องนี้นิยมบอกในรูปกำลังของแสงเลเซอร์ที่กระทบกับเวลาที่ฉายแสง) จากการวัดอุณหภูมิของหัวต่อพี-เอ็น ด้วยเทอร์โมคัพเพอริลที่ทำขึ้นจากโลหะคู่เหล็ก-คอนสแตนแตน (Type J) พบว่าระหว่างทำการแอนนิลนั้นอุณหภูมิของหัวต่อสูงประมาณ 100 องศาเซลเซียส หลังจากแอนนิลแล้วทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า

จากเส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ก่อนและหลังแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องพบว่าค่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย รูปที่ 4.20 แสดงค่าความต้านทานอนุกรมที่เปลี่ยนแปลงไปกับพลังงานของแสงเลเซอร์ที่ฉาย



รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานอนุกรมกับกำลังของแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง

ส่วนค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์ของหัวต่อพี-เอ็น ก่อนและหลังแอนนัลไม่เปลี่ยนแปลงดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

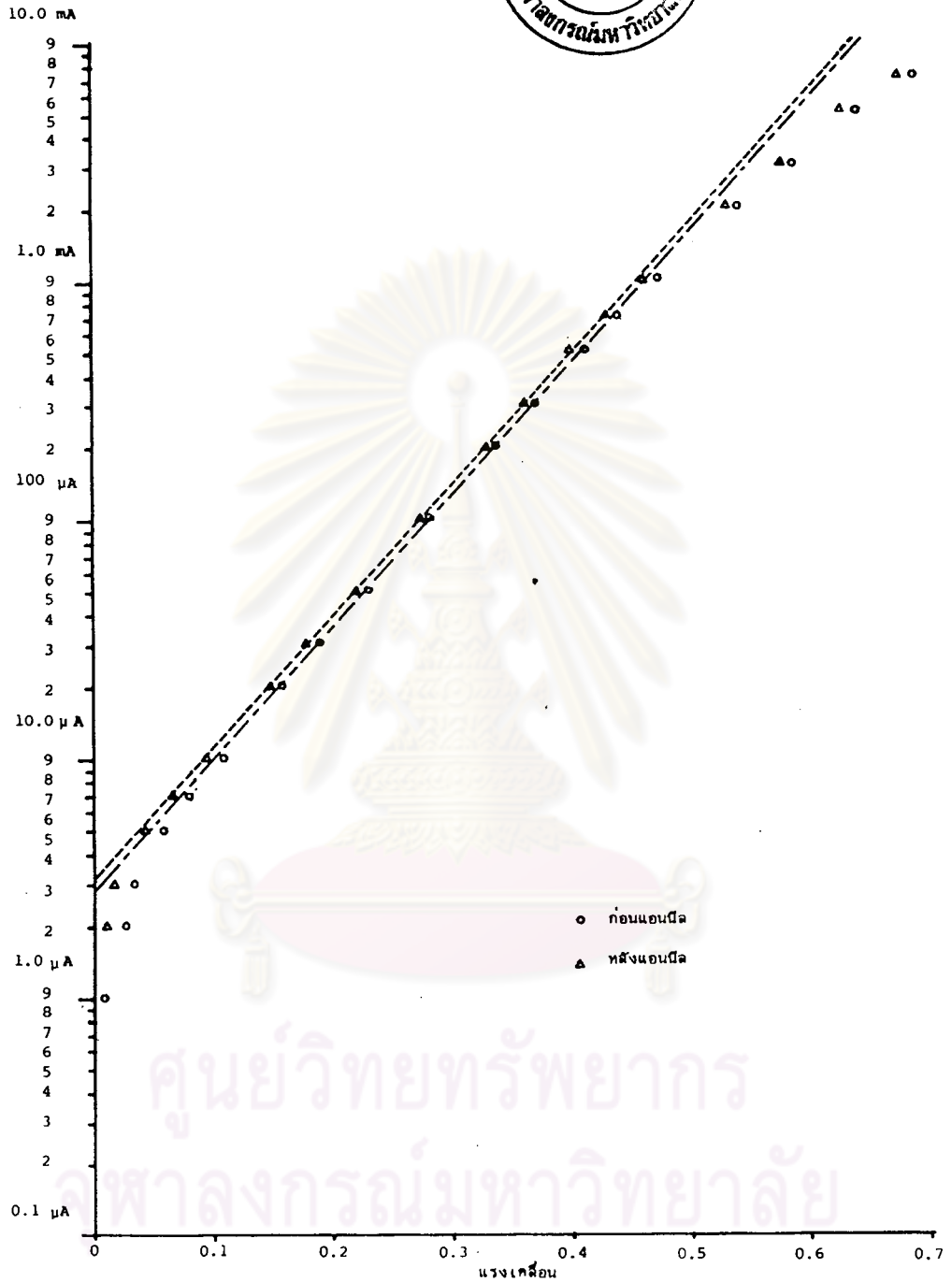
ตารางที่ 4.4 แสดงกำลังของแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เวลาที่ฉายแสงเลเซอร์ พลังงานที่เทียบเท่าค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์และค่าความต้านทานอนุกรม และหลังแอนนัล

ตัวอย่างที่	กำลังของแสงเลเซอร์ (วัตต์)	เวลาที่ฉายแสง (นาท)	พลังงานของแสงเลเซอร์ (จูล/ซม. ²)	ค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์		ความต้านทานอนุกรมของหัวต่อ (R_S)	
				ก่อน	หลัง	ก่อน (โอห์ม)	หลัง (โอห์ม)
6	2.0	6	4500	2.31	2.31	14	12
7	3.2	6	7200	2.31	2.31	15	13
8	4.7	6	10500	2.33	2.33	18	15
9	5.3	6	12000	2.32	2.32	11	9
10	6.1	6	13800	2.33	2.32	16	13

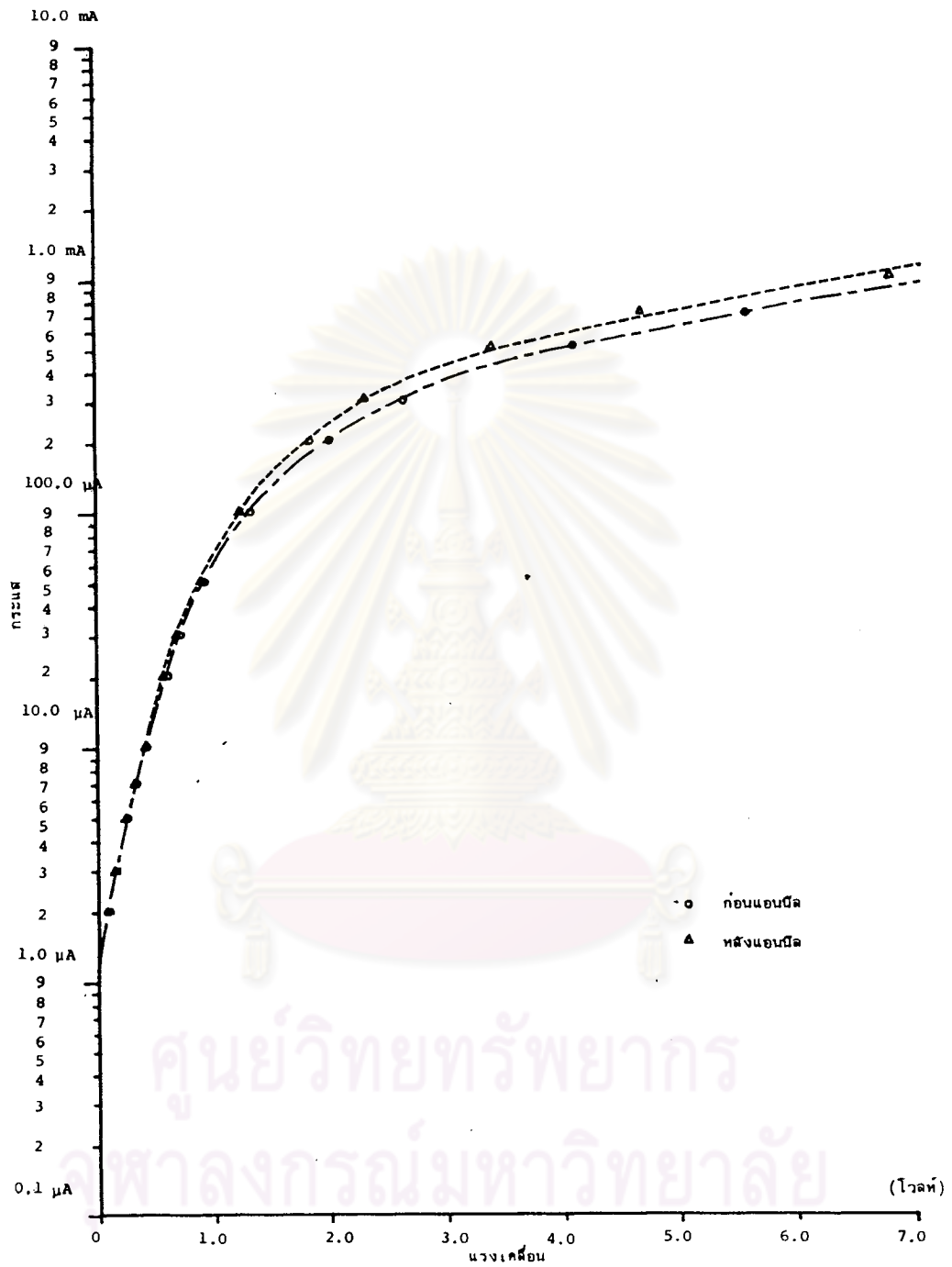
หมายเหตุ การคิดพลังงานของเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องนี้คิดวิธีเดียวกับแบบคิว-สวิทช์ ดังได้แสดงไว้ในภาคผนวก

จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าการแอนนัลหัวต่อพี-เอ็น ด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิทช์ นั้นถึงแม้พลังงานที่ใช้ในการแอนนัลจะมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในกรณีแบบคลื่นต่อเนื่อง แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานอนุกรมกลับลดลงมากกว่ากรณีที่แอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง ที่เป็นเช่นนี้เพราะพลังงานของแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิทช์ นั้นถึงแม้จะให้พลังงานเฉลี่ยน้อยกว่าแต่พลังงานของพัลส์แต่ละพัลส์จะมีค่าสูงมาก การใช้พลังงานที่มีค่าสูงแต่ช่วงเวลาสั้นๆ กระตุ้นต่อหัวต่อพี-เอ็น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในหัวต่อมากกว่าการใช้แสงเลเซอร์ที่ให้พลังงานไม่สูงแต่สม่ำเสมอ

รูปที่ 4.21 และ 4.22 เป็นเส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น ที่เป็นตัวอย่างที่ 10 แบบไบแอสตรงและไบแอสกลับ ก่อนและหลังการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องจากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.21 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสตรงก่อนและหลังทำการแอนนีสด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ กำลังของแสงเลเซอร์ที่แอนนีสขนาด 6.1 วัตต์ แอนนีสนาน 6 นาที

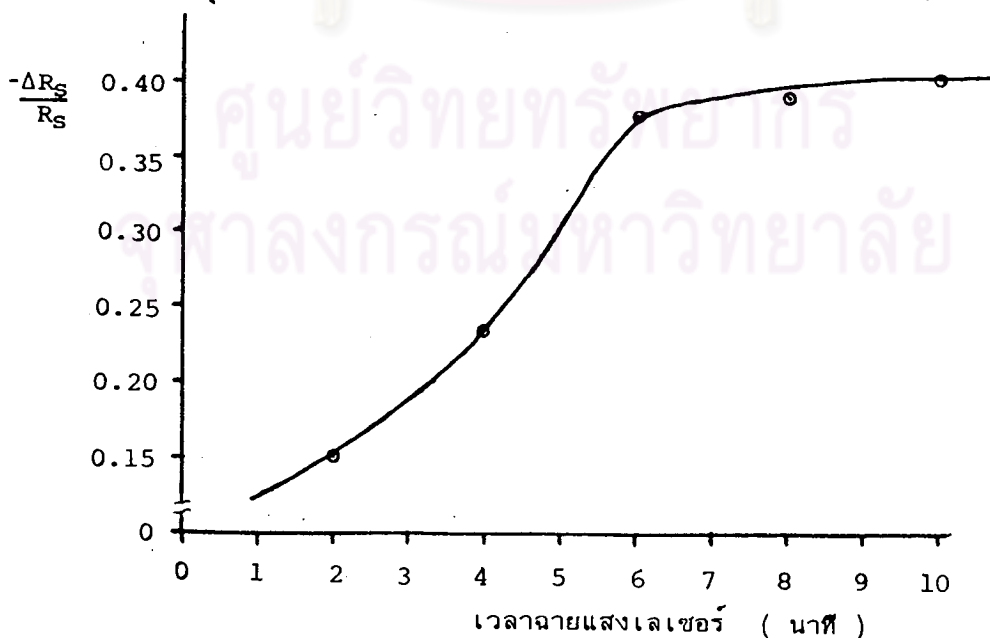


รูปที่ 4.22 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสกลับก่อนและหลังทำการแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ กำลังของแสงเลเซอร์ที่แอนนิล 6.1 วัตต์ แอนนิลนาน 6 นาที

4.4 การเปรียบเทียบผลการแอนนิลระหว่างเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์กับเลเซอร์แย์ค

เนื่องจากได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2 ว่าการเลือกชนิดของเลเซอร์ที่จะนำมาใช้ในการแอนนิลสารกึ่งตัวนำนั้นมีความสำคัญมาก ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองแอนนิลหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำหัวต่อไฟแล้วด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์แย์ค ซึ่งมีความยาวคลื่น 1.06 ไมโครเมตร

นำหัวต่อพี-เอ็น ที่ทำหัวต่อไฟฟ้าเรียบร้อยแล้วมาวัดเส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ทั้งแบบไบแอสตรงและไบแอสกลับ แล้วนำไปแอนนิลด้วยการฉายแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องจากเลเซอร์แย์คขนาดกำลังเอาต์พุต 2 วัตต์ การฉายแสงเลเซอร์นี้จะฉายเต็มหน้าหัวต่อพี-เอ็น แสงเลเซอร์ถูกโฟกัสให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลำแสงประมาณ 0.7 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้ในการแอนนิลอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 นาที ความเร็วในการเคลื่อนหัวต่อพี-เอ็น ประมาณ 20 มิลลิเมตร/นาที ระหว่างการแอนนิลวัดอุณหภูมิของหัวต่อพี-เอ็น นี้ด้วยเทอร์โมคัพเพิลชนิดนี้พบว่าอุณหภูมิของหัวต่อสูงประมาณ 150 องศาเซลเซียส นำหัวต่อพี-เอ็น ที่แอนนิลแล้วนี้ไปวัดคุณสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้า พบว่าในกรณีไบแอสตรงนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นให้ผลเช่นเดียวกับการแอนนิลด้วยแสงเลเซอร์แบบคิว-สวิตซ์ จากเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ คือ ความต้านทานของหัวต่อลดลง โดยที่ค่าไอเดยริตีแฟคเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลง แต่สำหรับในกรณีไบแอสย้อนกลับนั้นปรากฏว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าพังทลายแบบย้อนกลับของหัวต่อพี-เอ็น ซึ่งเดิมมีค่าอยู่ประมาณ 4 โวลต์ และเป็นการพังทลายแบบอ่อน (Soft breakdown) ได้เพิ่มขึ้นไปเป็นประมาณ 10-25 โวลต์ รูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานอนุกรมของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อแอนนิลด้วยเลเซอร์แย์คที่เวลาต่าง ๆ กัน



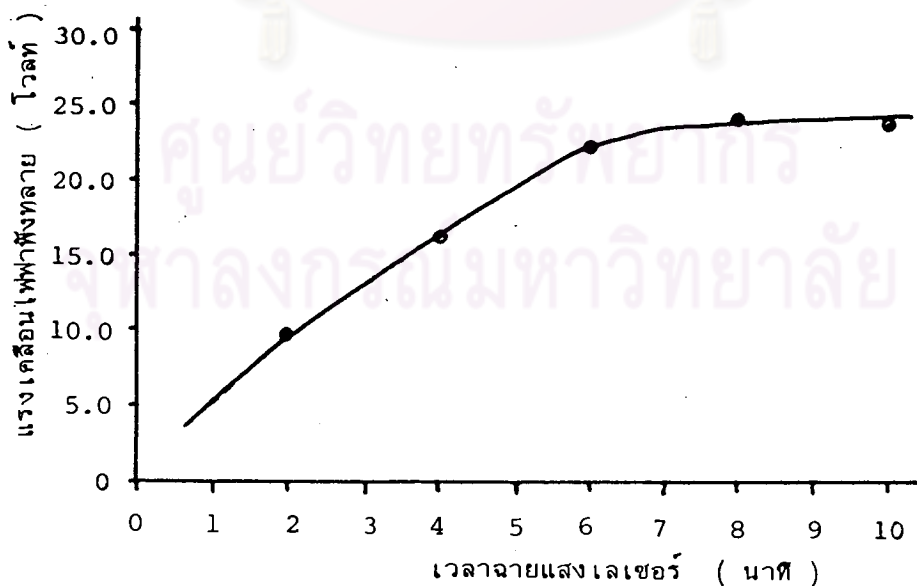
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานอนุกรมของหัวต่อกับ เวลาฉายแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องจากเลเซอร์แย์ค

ตารางที่ 4.5 แสดงกำลังของแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์แย็คเวลาที่ฉายแสงเลเซอร์พลังงานเทียบกว่าค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์ และค่าความต้านทานอนุกรมของหัวต่อ

ตัวอย่างที่	กำลังของแสงเลเซอร์ (วัตต์)	เวลาที่ฉายแสง (นาท)	พลังงานของแสงเลเซอร์ (จูล/ซม. ²)	ค่าไอเดียริตี้แฟคเตอร์		ความต้านทานอนุกรมของหัวต่อ (R_S)	
				ก่อน	หลัง	ก่อน (โอห์ม)	หลัง (โอห์ม)
11	2.0	2	1500	2.32	2.32	20	17
12	2.0	4	3000	2.34	2.34	17	13
13	2.0	6	4500	2.34	2.33	16	10
14	2.0	8	6000	2.31	2.31	18	11
15	2.0	10	7500	2.33	2.33	20	12

หมายเหตุ การคิดพลังงานของแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องนี้ คิดวิธีเดียวกับแบบคิว-สวิทช์ ดังได้แสดงไว้ในภาคผนวก

ส่วนรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.6 แสดงการเพิ่มขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าพังทลายแบบย้อนกลับของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อแอนนิลด้วยเลเซอร์แย็คที่เวลานานต่างกัน



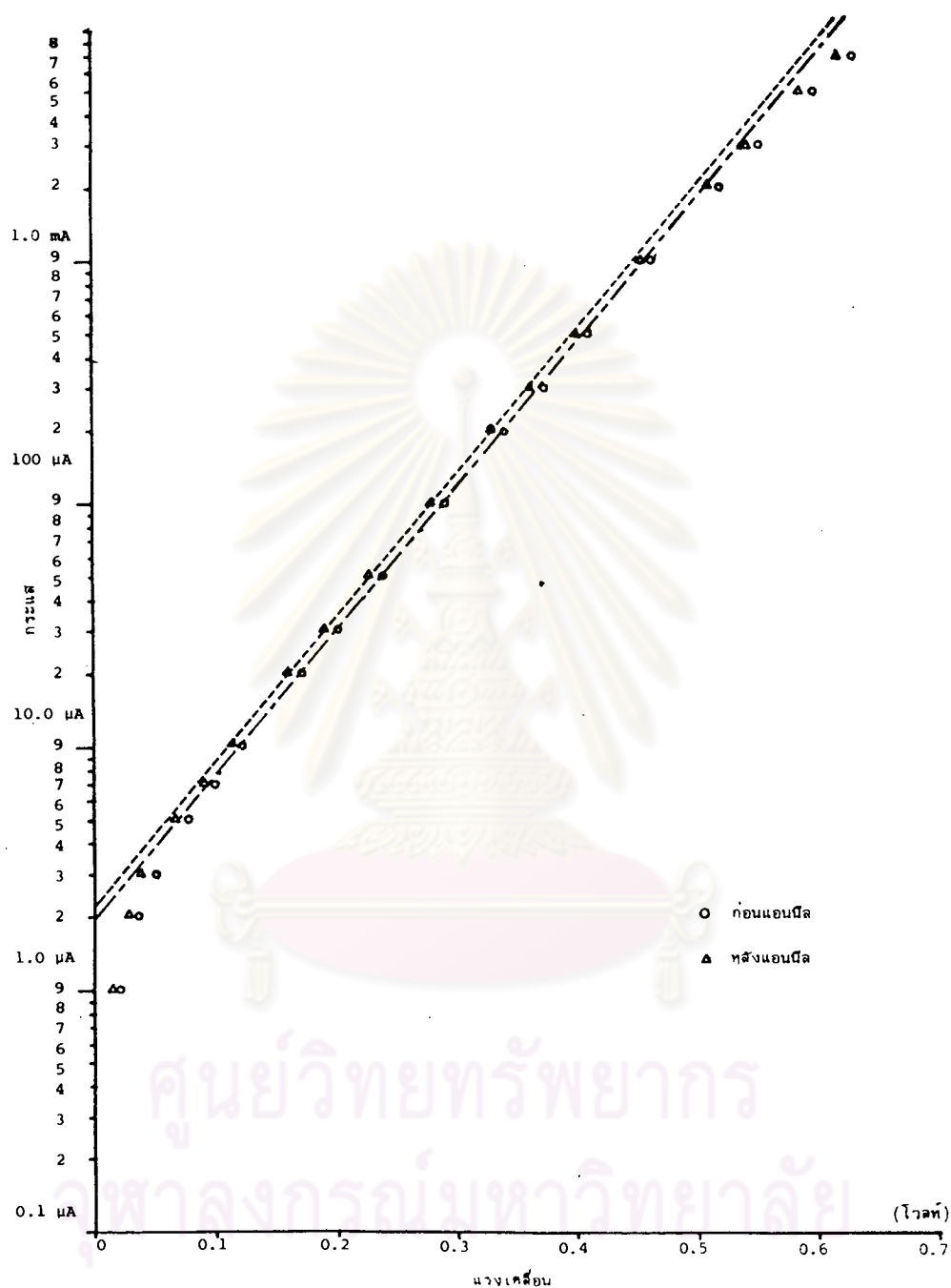
รูปที่ 4.24 การเพิ่มขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าพังทลายของหัวต่อพี-เอ็น กับเวลาฉายแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องจากเลเซอร์แย็ค

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าพลังงานหลายแบบย้อนกลับ เมื่อแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์แอนด์ที่เวลาต่างกัน

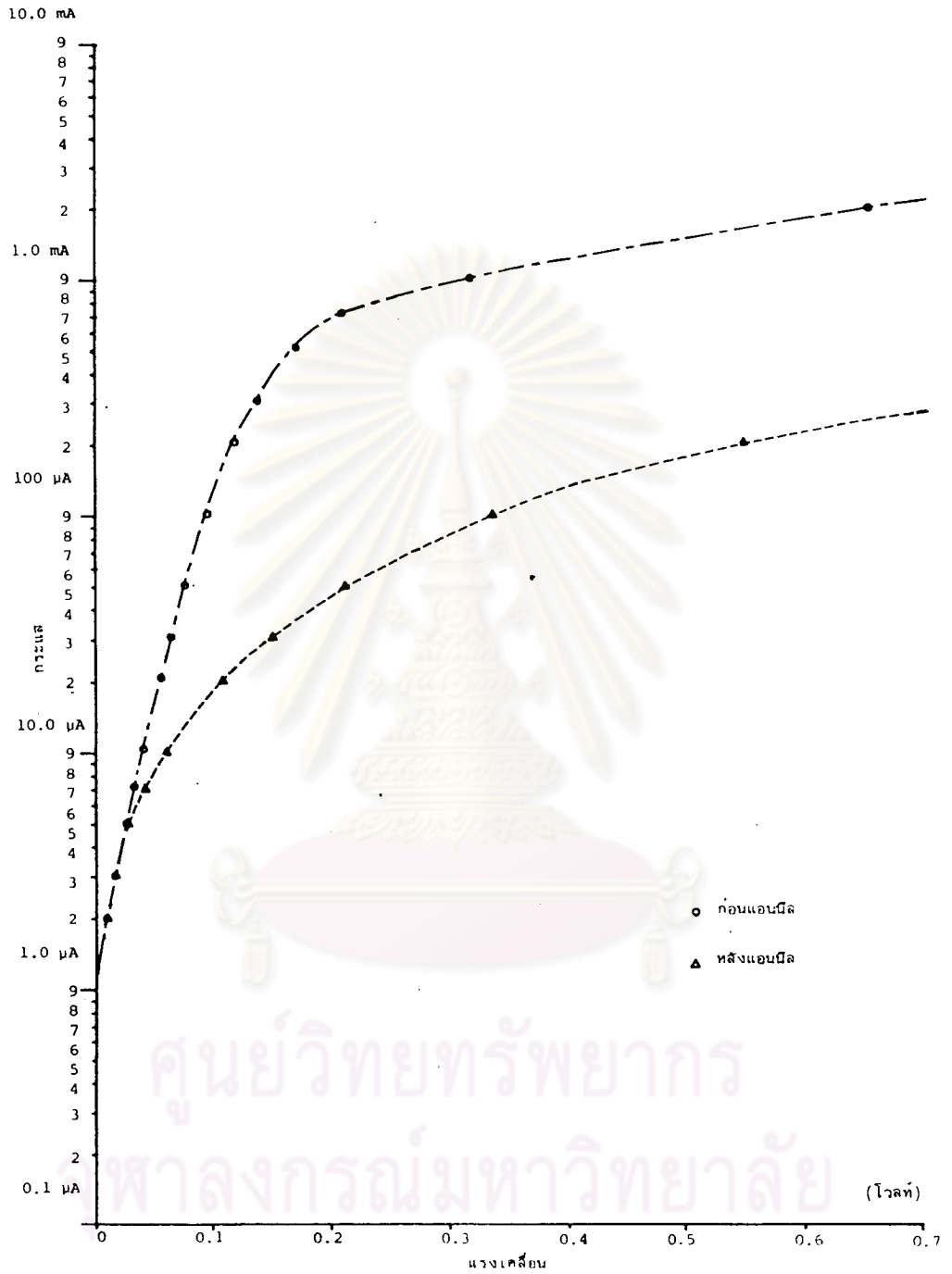
ตัวอย่างที่	เวลาในการแอนนัล (นาท)	แรงเคลื่อนไฟฟ้าพลังงานหลาย	
		ก่อน (โวลท์)	หลัง (โวลท์)
11	2	3.5	9.7
12	4	3.5	16.3
13	6	3.4	22.3
14	8	3.4	24.2
15	10	3.4	23.8

รูปที่ 4.25 และ 4.26 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อที่ใช้เป็นตัวอย่างตัวที่ 12

จากการทดลองนี้ จะเห็นว่า เมื่อใช้แสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์แอนด์ทำการแอนนัลหัวต่อพี-เอ็น เปรียบเทียบกับการใช้แสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์พบว่า เลเซอร์แอนด์สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหัวต่อพี-เอ็น ได้มากกว่าเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ ถึงแม้พลังงานของแอนด์เลเซอร์จะน้อยกว่าก็ตาม การเปลี่ยนแปลงที่ได้จากแอนด์เลเซอร์นั้นสามารถทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าลดลง และยังสามารถทำให้ค่าแรงเคลื่อนพลังงานหลายแบบย้อนกลับมีค่าสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ เพราะความผิดปกติในเนื้อซิลิกอนที่ทำหัวต่อพี-เอ็น อาจลดลงเมื่อทำการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่องของเลเซอร์แอนด์



รูปที่ 4.25 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสตรง ก่อนและหลังทำการแอนนูลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง จากเลเซอร์แยกกำลังเอาที่หุทของแสงเลเซอร์ที่แอนนูลขนาด 2 วัตต์ แอนนูลนาน 4 นาที



รูปที่ 4.26 เส้นลักษณะสมบัติกระแส-แรงเคลื่อนไฟฟ้าของหัวต่อพี-เอ็น เมื่อไบแอสกลับก่อนและหลังทำการแอนนัลด้วยแสงเลเซอร์แบบคลื่นต่อเนื่อง จากเลเซอร์แฉีกกำลังของแสงเลเซอร์ที่แอนนัลขนาด 2.0 วัตต์ แอนนัลนาน 4 นาที