

เทคนิคการวิเคราะห์ความบกพร่องแบบใหม่โดยวิธีอนุพันธ์ในรอยต่อพีเอ็น

NOVEL DEFECT ANALYSIS METHOD BY DERIVATIVE TECHNIQUE FOR P-N JUNCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-D-018-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOVEL DEFECT ANALYSIS METHOD BY DERIVATIVE TECHNIQUE FOR P-N JUNCTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

KMITL-2013-EN-D-018-064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

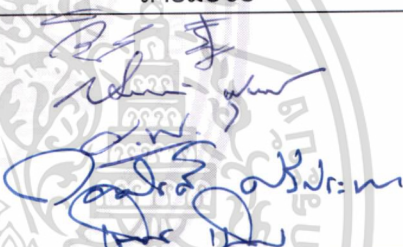


COPYRIGHT 2013
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการวิเคราะห์ความบกพร่องแบบใหม่โดยวิธีอนุพันธ์ในรอยต่อพี-เอ็น
Thesis Title Novel Defect Analysis Method by Derivative Technique for p-n Junction
นักศึกษา นายวีระ เพ็งจันทร์
รหัสประจำตัว 50060012
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-D-018-064

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
ดร.อัมพร	โพธิ์ชัย	
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
รศ.ดร.เต็มพงษ์	เพ็ชรกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2556 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการวิเคราะห์ความบกพร่องแบบใหม่โดยวิธีอนุพันธ์ ในรอยต่อพี-เอ็น
นักศึกษา	วีระ เพ็งจันทร์
รหัสประจำตัว	50060012
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการแบบใหม่ในการวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้นในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ไดโอดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยวิธีอนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง เพื่อนำไปวิเคราะห์ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน ด้วยการศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของกระแสรั่วไหลกับความบกพร่องของซิลิคอนในบริเวณปลดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น ในขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอดที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆกันใช้เทคโนโลยีการผลิตซีมอสแบบมาตรฐาน ขั้นตอนการยิงฝังประจุที่อาจทำให้เกิดความบกพร่องในซิลิคอนขึ้น ดังนั้นเงื่อนไขของการยิงฝังประจุ จะถูกใช้ในการศึกษา จากนั้นจึงทำการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดัน และค่าความประจุไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น ทั้งแรงดันไบอัสตรงและแรงดันย้อนกลับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 27 °C ถึง 100 °C หลังจากนั้นนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้น ตลอดจนการเปรียบเทียบผลของกระบวนการผลิตที่มีผลต่อกระแสรั่วไหลและด้านการสูญเสียพลังงานของอุปกรณ์ไดโอด ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าวิธีการแบบใหม่ที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่และการก่อเกิดพาหะ ตลอดจนค่าพลังงานกระตุ้น เพื่อใช้อธิบายถึงความบกพร่องทั้งที่มีลักษณะสม่าเสมอและไม่สม่าเสมอของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพี-เอ็น และเนื่องจากคุณลักษณะของเทคนิคอนุพันธ์ที่สามารถหาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และการก่อเกิดพาหะ และค่าพลังงานกระตุ้นได้จากข้อมูลที่อุณหภูมิเพียงอุณหภูมิเดียว ทำให้สะดวกและรวดเร็ว เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

Thesis	NOVEL DEFECT ANALYSIS METHOD BY DERIVATIVE TECHNIQUE FOR P-N JUNCTION
Student	WEERA PENGCHAN
Student ID	50060012
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul

ABSTRACT

This thesis presents the novel method for analyzing the generation and recombination lifetime and the activation energy in p-n junctions of diodes by using the derivatives analysis technique of the diode characteristics on forward bias for analyzing the defects in the silicon crystals. The relationship between the component of the leakage current and the defects in the depletion region are studied. In order to study the leakage current components, a difference area and perimeter diodes have been fabricated on wafer compatible with standard CMOS technology. The ion implantation process may cause defects in the silicon. Thus, the ion implantation conditions are studied. Then, the current-voltage (I-V) and the capacitance-voltage (C-V) characteristics were measured on wafer with reverse and forward voltage which the temperature were controlled at 27 °C – 100 °C in dark shield box. After that the data obtained from measurements were analyzed for the components of the leakage current, the generation and recombination lifetime and the activation energy in p-n junctions. Including, the result comparison of fabrication process, which affects to the total leakage current and the power loss of diodes. The result of analysis indicate that the novel method, which used to analyze the defects with uniform and non-uniform of crystals within p-n junctions, can determine for the generation and recombination lifetime and the activation energy in depletion region. The technical features of the derivatives which can determine the generation and recombination lifetime and the activation energy from a single temperature data set. Therefore, the cause of the convenient, fast and the cost effective for the analysis of the defects in the silicon crystals. This can be very useful for development of Microelectronics Industry in Thailand.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการดำเนินงาน และรวมไปถึงการสนับสนุนการศึกษาค้นคว้าอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับคำปรึกษาที่มีประโยชน์และแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ด้วย

ขอขอบคุณ คุณอนุชา เรืองพาณิชย์ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์(TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับคำปรึกษาด้านเทคนิคการวัด ข้อมูลการออกแบบและการจำลองแบบกระบวนการสร้าง

ขอขอบคุณ คุณฐิติมา สุขสถิตย์ ที่เป็นเสมือนคู่มือและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่บิดามารดา และพี่ๆทุกท่าน ที่สนับสนุนในการศึกษาและกำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าตลอดมา

วีระ เพ็งจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	6
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction).....	8
2.1.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุล.....	8
2.1.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias).....	11
2.1.3 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias).....	12
2.2 คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า – แรงดัน.....	13
(Capacitance - Voltage Characteristics)	
2.2.1 ค่าความจุไฟฟ้ามอส (MOS Capacitance).....	13
2.2.2 ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction Capacitance).....	17
2.2.2.1 ค่าความจุไฟฟ้าจากชั้นปลอดพาหะ (Depletion capacitance)...	17
2.2.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าการแพร่ (Diffusion capacitance).....	19
2.3 กระบวนการสร้างอุปกรณ์แบบซีมอส (CMOS Fabrication).....	21
2.3.1 การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้น (Wafer Preparation).....	22
2.3.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation).....	22
2.3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography).....	23
2.3.4 กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion Process)	24
2.3.4.1 การแพร่สารเจือชั้นต้น (Pre-deposition).....	24
2.3.4.2 การขับลึก (Drive-in).....	26
2.3.5 กระบวนการฝังประจุไอออน (Ion Implantation Process).....	26

สารบัญ(ต่อ)

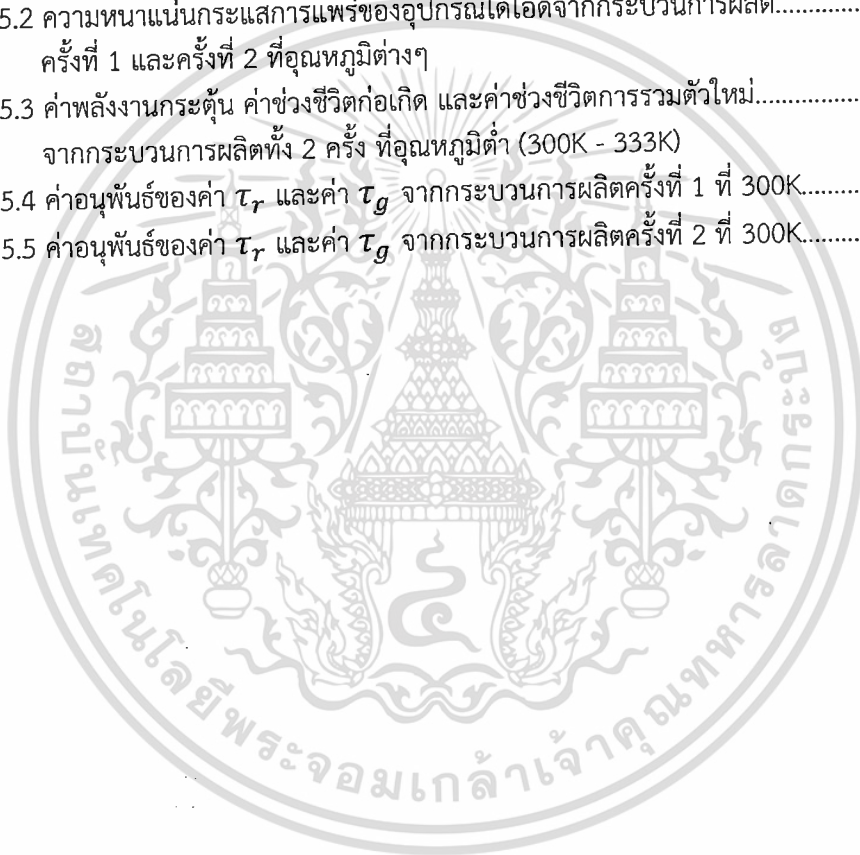
	หน้า
2.3.6 กระบวนการสกัด (Etching).....	27
2.3.7 กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมี.....	27
(Chemical Vapor Deposition-CVD)	
2.3.8 กระบวนการทางโลหะ (Metallization).....	27
2.3.9 กระบวนการเก็บบรรจุ (Packaging).....	28
2.4 ความบกพร่องในโครงสร้างผลึก (Defect in Crystals).....	28
2.4.1 โครงสร้างของสารของแข็ง.....	28
2.4.1.1 ออสัณฐาน หรือ อะมอร์ฟัส (amorphous).....	28
2.4.1.2 ผลึก (Crystalline).....	29
2.4.2 โครงสร้างผลึก.....	30
2.4.2.1 ยูนิตเซลล์ หรือหน่วยเซลล์ (Unit cell).....	30
2.4.2.2 ยูนิตเซลล์ 3 มิติ.....	31
2.4.3 โครงสร้างผลึกเพชร.....	31
2.4.4 พันธะอะตอม.....	32
2.4.4.1 พันธะไอออนิก.....	32
2.4.4.2 พันธะโควาเลนต์.....	32
2.4.4.3 พันธะโลหะ.....	33
2.4.4.4 พันธะ Van Der Waals.....	34
2.4.5 ความไม่สมบูรณ์และสิ่งแปลกปลอมในของแข็ง.....	34
2.4.5.1 ความไม่สมบูรณ์ในของแข็ง.....	34
2.4.5.2 สิ่งแปลกปลอมในของแข็ง.....	35
2.5 การก่อกำเนิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ.....	36
(Carrier of Generation and Recombination)	
2.5.1 นิยาม.....	36
2.5.2 การเกิดพาหะนำประจุ คู่อิเล็กตรอน-โฮล.....	36
2.5.3 ภาวะสมดุลความร้อน (Thermal equilibrium).....	37
2.5.4 กระบวนการ R-G (Recombination - Generation Process).....	38
2.5.4.1 กระบวนการ R-G โดยตรง (Direct R-G Process).....	39
2.5.4.2 กระบวนการ R-G โดยอ้อม (Indirect R-G Process).....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	42
3.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด.....	43
3.3 เครื่องมือและวิธีการวัดข้อมูล.....	47

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4 วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง.....	48
3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสด้วยองค์ประกอบของกระแส.....	48
3.4.2 การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นด้วยสมการอาร์เรนเนียส.....	50
3.4.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนช่วงชีวิตก่อเกิดและช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่.....	52
ที่สัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น	
3.4.4 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ในเนื้อสาร.....	56
ด้านพื้นที่ (The area bulk recombination current density - J_{rbA})	
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	60
4.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานภายในรอยต่อพีเอ็น.....	60
4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสในไดโอด.....	63
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของค่าความจุไฟฟ้าในไดโอด.....	66
4.4 การวิเคราะห์ความกว้างชั้นปลอดพาหะ.....	67
4.5 การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดในไดโอด (Generation Lifetimes).....	70
4.6 การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรนเนียส.....	73
4.7 การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ในไดโอดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์.....	74
อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง	
บทที่ 5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงาน.....	84
ในรอยต่อพีเอ็น	
5.1 กระแสรั่วไหลและการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์.....	84
5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงาน.....	88
5.2.1 ความสัมพันธ์ด้านองค์ประกอบผลรวมของกระแสรั่วไหล.....	88
5.2.2 ความสัมพันธ์ด้านองค์ประกอบของค่าความหนาแน่นกระแส.....	90
5.2.3 ความสัมพันธ์ด้านองค์ประกอบของค่าความหนาแน่นกระแสก่อเกิด.....	93
5.2.3.1 องค์ประกอบด้านความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่.....	93
5.2.3.2 องค์ประกอบด้านค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด.....	94
5.3 การวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกจากพลังงานกระตุ้นด้วย.....	95
สมการของอาร์เรนเนียส	
5.4 การวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์.....	97
อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันตรง	
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	101
เอกสารอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 รูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ไดโอด.....	48
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของอุณหภูมิและความหนาแน่นกระแส.....	51
ตารางที่ 4.1 รูปแบบเรขาคณิตของไดโอด.....	61
ตารางที่ 4.2 ค่าอนุพันธ์ของค่า T_r และค่า T_g จากกระแสไบอัสตรง ที่อุณหภูมิ 27 °C.....	82
ตารางที่ 4.3 ค่าอนุพันธ์ของค่า T_r และค่า T_g จากกระแสไบอัสตรง ที่อุณหภูมิ 40 °C.....	83
ตารางที่ 5.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์ซีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร....	84
ตารางที่ 5.2 ความหนาแน่นกระแสการแพร่ของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิต.....	90
ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ	
ตารางที่ 5.3 ค่าพลังงานกระตุ้น ค่าช่วงชีวิตก่อก่เกิด และค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่.....	96
จากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิต่ำ (300K - 333K)	
ตารางที่ 5.4 ค่าอนุพันธ์ของค่า T_r และค่า T_g จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ที่ 300K.....	99
ตารางที่ 5.5 ค่าอนุพันธ์ของค่า T_r และค่า T_g จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ที่ 300K.....	99



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 กอร์ดอน มัวร์ (Gordon E. Moore).....	1
รูปที่ 1.2 กราฟกฎของมัวร์.....	2
รูปที่ 1.3 ทฤษฎีการลดขนาดวงจรโดยสนามไฟฟ้าคงที่.....	3
รูปที่ 1.4 โครงสร้างของไดโอดชนิด $p^+ - N_{sub}$ ที่มีความกว้างบริเวณเขตปลอดพาหะ.....	5
เป็นระยะ W_A	
รูปที่ 1.5 โครงสร้างของไดโอดชนิด $p^+ - N_{sub}$ ที่มีค่าอนุพันธ์ W_{A_nx}	6
รูปที่ 2.1 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด.....	8
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น.....	9
รูปที่ 2.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น.....	10
รูปที่ 2.4 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	11
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	12
รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	12
รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	13
ย้อนกลับ V_A	
รูปที่ 2.8 (ก) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุของช่วงสะสมพาหะ.....	14
(ข) การกระจายของประจุช่วงสะสมพาหะ เมื่อแรงดันเกตที่เปลี่ยนแปลง	
รูปที่ 2.9 (ก) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุของช่วงการลดพาหะ.....	14
(ข) การกระจายของประจุช่วงการลดพาหะ เมื่อแรงดันเกตที่เปลี่ยนแปลง	
รูปที่ 2.10 (ก) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุของส สำหรับแบบการทำงานช่วงการกลับ.....	15
(ข) การกระจายของประจุช่วงการกลับ สำหรับแรงดันเกตที่เปลี่ยนแปลง	
รูปที่ 2.11 ค่าความจุไฟฟ้าในอุดมคติที่ความถี่ต่ำกับแรงดันของตัวเก็บประจุของ.....	16
บนฐานรองชนิดพี	
รูปที่ 2.12 ค่าความจุไฟฟ้าในอุดมคติที่ความถี่ต่ำกับแรงดันของตัวเก็บประจุของ.....	16
ที่มีฐานรองชนิดเอ็น	
รูป 2.13 ชั้นปลอดพาหะซึ่งแสดงพฤติกรรมเป็นตัวเก็บประจุ.....	18
(a) ประจุในชั้นปลอดพาหะซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	
(b) การเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะ จะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง และลดลงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยทั่วไปมีค่าในช่วงของพิโคฟารัดต่อตารางมิลลิเมตร	
รูปที่ 2.14 ความเข้มข้นของโฮลในรอยต่อ p^+n	19
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส.....	21
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของความหนาซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชัน.....	23
(ก) กระบวนการแบบแห้ง	
(ข) กระบวนการแบบชื้น ($95^\circ\text{C H}_2\text{O}$)	

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 ค่า solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน.....	24
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ.....	25
รูปที่ 2.19 ความหนาของชั้น SiO ₂ ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส.....	25
รูปที่ 2.20 ลักษณะโครงสร้างภายในของสารของแข็งโดยพิจารณาความเป็นระเบียบ.....	29
ในการจัดเรียงอะตอม (ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (poly crystalline)	
และ (ค) ผลึกรูปเดี่ยว (single crystalline)	
รูปที่ 2.21 ลักษณะรูปแบบของผลึก ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของยูนิตเซลล์จำนวนมากมาย.....	30
(ก) ลักษณะของแลตทิซ (ข) หนึ่งยูนิตเซลล์ของแลตทิซ	
(ค) การเรียงตัวของยูนิตเซลล์ เพื่อประกอบเป็นผลึกหรือแลตทิซที่สมบูรณ์	
(ง) ลักษณะของยูนิตเซลล์อีกรูปแบบหนึ่ง	
รูปที่ 2.22 ลักษณะของแลตทิซแบบ 3 มิติ (ก) แบบ Simple Cubic Cell.....	31
(ข) ยูนิตเซลล์ของแลตทิซแบบ Simple Cubic Cell ที่ถูกต้อง	
(ค) แบบ Body Centered Cubic (ง) แบบ Face Centered Cubic	
รูปที่ 2.23 (ก) หนึ่งยูนิตเซลล์ของโครงสร้างเพชร และ (ข) ภาพขยายส่วนมุมของ.....	32
ยูนิตเซลล์ ซึ่งเป็นการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมหนึ่งกับ 4 อะตอมข้างเคียง	
รูปที่ 2.24 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของไฮโดรเจน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในโมเลกุล.....	33
ไฮโดรเจน	
รูปที่ 2.25 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในผลึกซิลิคอน.....	33
รูปที่ 2.26 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) ความบกพร่องแบบช่องว่าง และ.....	35
(ข) ความบกพร่องแบบแทรกตัว	
รูปที่ 2.27 ความบกพร่องแบบแนวเส้นในสองมิติ.....	35
รูปที่ 2.28 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) สิ่งแปลกปลอมแบบแทนที่ และ.....	35
(ข) สิ่งแปลกปลอมแบบแทรกตัว	
รูปที่ 2.29 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก.....	37
หรือ T>0 K (ก) แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ (ข) แบบจำลองแถบพลังงาน	
รูปที่ 2.30 (ก) การรวมตัวใหม่ (recombination) ของอิเล็กตรอน-โฮล.....	38
(ข) ในภาวะสมดุลความร้อน ความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าคงที่	
รูปที่ 2.31 (ก) การเกิดพาหะโดยตรง หรือ Band to Band Generation.....	39
(ข) การรวมตัวใหม่โดยตรง หรือ Band to Band Recombination	
รูปที่ 2.32 (ก) การเกิดพาหะโดยอ้อม หรือ R-G Center Generation.....	40
(ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อม หรือ R-G Center Recombination	
รูปที่ 2.33 ตำแหน่งของระดับ R-G center ที่เกิดจากอะตอมสารเจือต่างๆในซิลิคอน.....	40
รูปที่ 2.34 ขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอน ที่เกิดในกระบวนการ R-G โดยอ้อม.....	41
เนื่องจากผลของระดับ R-G Center	

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$	42
รูปที่ 3.2 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$	42
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส.....	43
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด.....	46
รูปที่ 3.5 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	47
รูปที่ 3.6 ตู้พร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์.....	47
รูปที่ 3.7 แผนผังการวัดคุณสมบัติไดโอด.....	48
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_A)$ และ $1/kT$	51
รูปที่ 3.9 กลไกการเกิดคูโฮล-อิเล็กตรอนของพาหะส่วนเกิน.....	52
รูปที่ 3.10 กระบวนการรวมตัวใหม่.....	57
(ก) การรวมตัวใหม่จากแถบผู้แถบ	
(ข) การรวมตัวใหม่ระดับเดียว	
(ค) การรวมตัวใหม่หลายระดับ	
รูปที่ 4.1 รอยต่อพี-เอ็นในโครงสร้างซีมอส.....	60
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$	61
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$	62
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าเก็บความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อ.....	62
ชนิด $n^+ - P_{sub}$	
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าเก็บความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อ.....	63
ชนิด $p^+ - N_{well}$	
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลในรอยต่อของไดโอด.....	63
รูปที่ 4.7 กราฟความหนาแน่นกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน.....	65
รูปที่ 4.8 กราฟความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน.....	67
รูปที่ 4.9 ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปของไดโอดรอยต่อ.....	68
$n^+ - P_{sub}$	
รูปที่ 4.10 ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปของไดโอดรอยต่อ.....	69
$p^+ - N_{well}$	
รูปที่ 4.11 ความกว้างชั้นปลอดพาหะพื้นที่กับค่าไบอัสย้อนกลับของไดโอดรอยต่อที่แตกต่างกัน	70
รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่.....	71
ของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$	
รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่.....	72
ของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$	
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของช่วงชีวิตการก่อกำเนิดและความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่.....	72
ของไดโอดที่มีรอยต่อแตกต่างกัน	

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิ.....	73
ซึ่งมีเงื่อนไขการให้แรงดันที่แตกต่างกัน	
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้นและค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ.....	74
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรง.....	76
สำหรับไดโอดชนิดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$	
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสอิมิต์ด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรง.....	77
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรง.....	78
สำหรับไดโอดชนิดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$	
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของค่า $(qn_i W_A / J_{rbAO})$ กับค่า $\exp(qV/2kT)$	79
รูปที่ 4.21 ค่าอนุพันธ์ของความชันและจุดตัดที่ค่า $\exp(qV/2kT) = 0$	79
สำหรับค่าอนุพันธ์ในช่วงชีวิตก่อก่เกิดพาหะและการรวมตัวใหม่	
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่กับค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ.....	80
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการก่อก่เกิดพาหะกับค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ.....	80
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับพลังงานของ $ E_a - E_i $ และค่าความกว้าง.....	81
ชั้นปลอดพาหะ	
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1.....	85
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2.....	85
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง.....	87
ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ	
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของค่าการสูญเสียพลังงานต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน.....	87
ไบอัสย้อนกลับ	
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอด.....	88
จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -1 โวลต์	
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอด.....	89
จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -5 โวลต์	
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอด.....	90
พาหะด้านพื้นที่	
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ.....	91
เปรียบเทียบกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2	
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสก่อก่เกิดด้านพื้นที่กับอุณหภูมิจาก.....	92
กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -1 โวลต์	

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสก่อให้เกิดด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ..... จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -5 โวลต์	92
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ.....	93
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการก่อกับอุณหภูมิ.....	94
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสแสดด้านพื้นที่กับอุณหภูมิของ..... กระบวนการผลิตครั้งที่ 1	95
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสแสดด้านพื้นที่กับอุณหภูมิของ..... กระบวนการผลิตครั้งที่ 2	96
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสการแพร่และค่าความเข้มข้นพาหะอินทรีนซิก..... กับอุณหภูมิ	98



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปี พ.ศ. 2490 วิลเลียมชอคเลย์และกลุ่มเพื่อนนักวิจัยที่สถาบัน เบลล์แลป ได้คิดค้นสิ่งที่สำคัญ และเป็นประโยชน์ต่อชาวโลกมาก เป็นการเริ่มต้นก้าวเข้าสู่ยุคอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า โซลิดสเตทเขา ได้ตั้งชื่อสิ่งที่ประดิษฐ์ขึ้นมาว่า "ทรานซิสเตอร์" แนวคิดในขณะนั้นต้องการควบคุมการไหลของ กระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำได้ดีด้วยหลอดสุญญากาศแต่หลอดมี ขนาดใหญ่เทอะทะใช้กำลังงานไฟฟ้า มาก ทรานซิสเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่นำมาแทนหลอดสุญญากาศได้เป็นอย่างดีทำให้เกิดอุตสาหกรรม สารกึ่งตัวนำตามมา และก้าวหน้าขึ้นเป็นลำดับ

พ.ศ. 2508 อุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวได้แพร่หลาย มีบริษัทผู้ผลิตทรานซิสเตอร์ จำนวนมากการประยุกต์ใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์กว้างขวางขึ้น มีการนำมาใช้ในเครื่องจักร อุปกรณ์ ต่างๆ ตั้งแต่ของใช้ในบ้านจนถึงในโรงงานอุตสาหกรรม

กอร์ดอน มัวร์ (Gordon E. Moore) ผู้อำนวยการวิจัยและพัฒนาของบริษัทแฟร์ชาวด์ เคมิ คอนดักเตอร์เป็นผู้อยู่ในวงการวิจัยและพัฒนา ผลิตภัณฑ์ และการค้นคว้า ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ต่อมาเขาได้เป็นผู้บุกเบิกและร่วมสร้างบริษัทอินเทลจนมีชื่อเสียงโด่งดังและประสบผลสำเร็จ การผลิต และการค้นคว้าทางด้านสารกึ่งตัวนำส่วนใหญ่ของแฟร์ชาวด์จะอยู่ในกำมือของมัวร์เขาได้ คลุกคลีกับเทคโนโลยีมาอย่างต่อเนื่อง และยาวนานจากการสังเกตและคาดคะเน แนวโน้มทาง เทคโนโลยีของมัวร์ ในที่สุดเขาได้ตั้งกฎของมัวร์ (Moore's Law) จนเป็นที่ยอมรับ และทำให้การ คาดคะเนอนาคตได้ใกล้เคียงความเป็นจริง



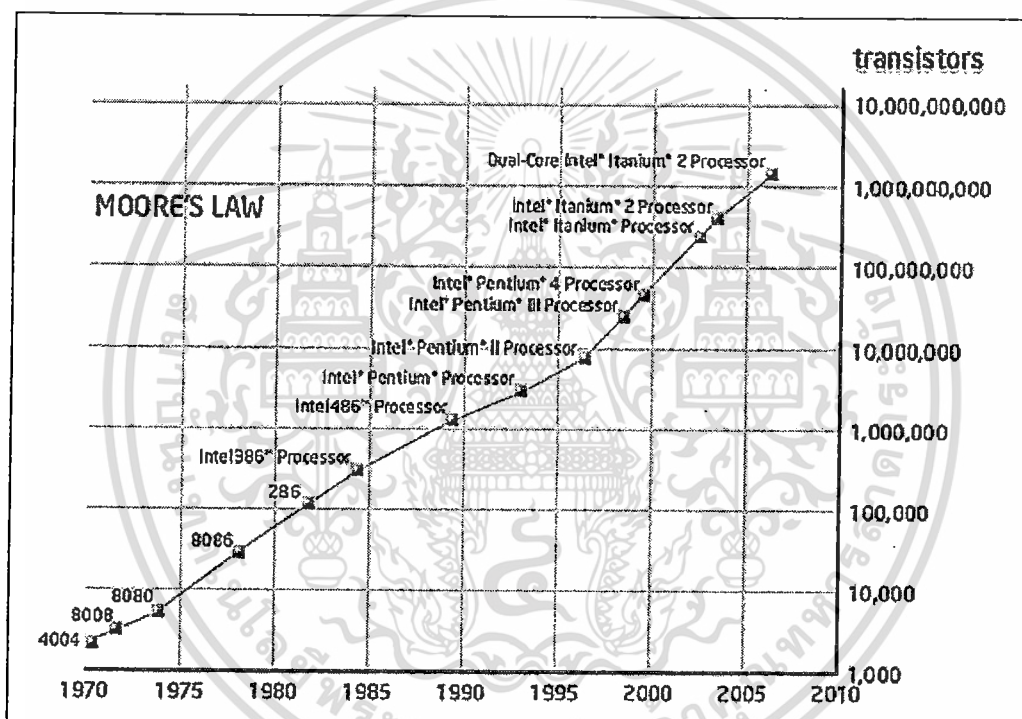
รูปที่ 1.1 กอร์ดอน มัวร์ (Gordon E. Moore)

ทฤษฎีของมัวร์ได้กล่าวไว้ว่าความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและความซับซ้อนของเทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถผลิตไอซีที่มีความหนาแน่นได้เป็นสองเท่าทุกๆ ช่วง ระยะเวลาหนึ่ง เขาได้ทำการพล็อตกราฟแบบสเกลล็อกให้ดูจากอดีตและพบว่าเป็นเช่นนั้นจริง นอกจากนี้ความก้าวหน้าอื่นๆ อีกหลายอย่างก็เป็นไปตามกฎของมัวร์ด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างทรานซิสเตอร์มีพัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง บริษัท แฟร์ชาวด์ เซมิคอนดักเตอร์เป็นบริษัทแรกที่เริ่มใช้เทคโนโลยีการผลิตทรานซิสเตอร์แบบ planar หรือเจือสารเข้าทางแนวราบ เทคโนโลยีนี้เป็นต้นแบบของการสร้างไอซีในเวลาต่อมา จากหลักฐานที่กล่าวอ้างไว้พบว่า บริษัทแฟร์ชาวด์ได้ผลิตทรานซิสเตอร์แนวราบตั้งแต่ประมาณปี พ.ศ. 2502 และบริษัทเท็กซัสอินสตรูเมนต์ได้ผลิตไอซีได้ในเวลาต่อมา และกอร์ดอนมัวร์ก็ได้กล่าวไว้ว่า จุดเริ่มต้นของกฎของมัวร์เริ่มต้นจากการเริ่มมีทรานซิสเตอร์แนวราบ

คำว่า “กฎของมัวร์” นั้นถูกเรียกโดยศาสตราจารย์ Carver Mead ซึ่งกล่าวว่าจำนวนทรานซิสเตอร์จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในทุกๆปี ในช่วงปี 1965 นั้นก็เป็นจริงตามคำของมัวร์ แต่เชื่อว่าเป็นเช่นนั้นในระยะสั้นๆเท่านั้น ต่อมามัวร์จึงได้เปลี่ยนรูปกฎของเขามาเป็นเพิ่มขึ้นสองเท่าในทุกๆสองปี ในปี 1975 [1]



รูปที่ 1.2 กราฟกฎของมัวร์

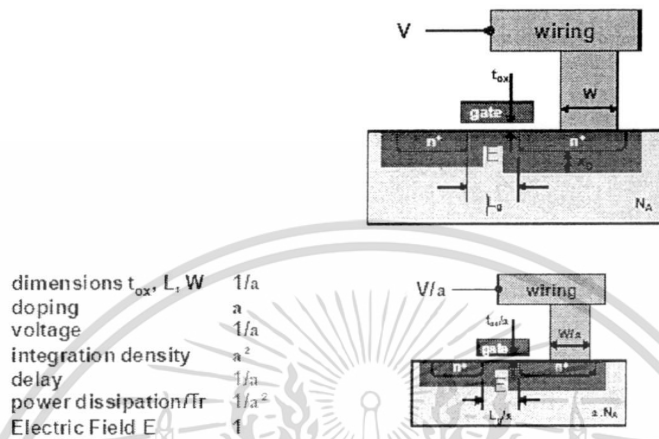
ขณะที่จำนวนส่วนประกอบ (เช่น ทรานซิสเตอร์) ต่อชิป (chip) ถูกเพิ่มขึ้น ขนาดรวมของชิปจะถูกจำกัดด้วยการใช้งานและราคาที่เหมาะสม (ขนาดทั่วไปของ DRAM ไม่เกิน 145 mm² และ ไมโครโปรเซสเซอร์ (MPU) ขนาดไม่เกิน 310 mm²) สิ่งนี้สามารถทำได้โดยการลดขนาดลงอย่างต่อเนื่องของขนาดวงจรรวมซึ่งสามารถแสดงในรูปที่ 1.2 กราฟกฎของมัวร์ [2] ผลจากแนวโน้มเช่นนี้ทำให้แผ่นวงจรมีขนาดเล็กลง โดยเป็นไปตามแผนเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ (semiconductor technology roadmap) นานมากกว่าสี่สิบปี [3]

จากมุมมองด้านเทคโนโลยีพบว่า ความหนาแน่นของอุปกรณ์ในวงจรรวมมีการเพิ่มอย่างต่อเนื่องตามที่นำเสนอโดยกฎของมัวร์ ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์แก่แนวคิดของ R. Dennard [4] เขาได้นำเสนอแนวคิดการลดขนาดอุปกรณ์ลงขณะที่สนามไฟฟ้ามีค่าคงที่ ซึ่งทำให้วงจรมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความเร็วสูงขึ้นและใช้พลังงานลดลง ดังรูปที่ 1.3 และต่อมากลายเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

Constant field scaling



รูปที่ 1.3 ทฤษฎีการลดขนาดวงจรรวมโดยสนามไฟฟ้าคงที่

บริษัทอินเทลก้าวอย่างตามกฎของมัวร์ด้วยการเสนอเทคโนโลยีกระบวนการสร้างใหม่ทุกๆสองปี ภายใต้ผลิตภัณฑ์ที่ถูกกว่า เร็วกว่าและดีกว่าแก่ลูกค้า ในปี 2004 สองปีภายหลังการนำเสนอครั้งแรกด้วยเทคโนโลยีของกระบวนการสร้างระดับ 90 นาโนเมตร บริษัทอินเทลได้แสดงเทคโนโลยีของกระบวนการสร้างระดับ 65 นาโนเมตร ด้วยอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเล็กมากทำให้ได้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีความเร็วสูง แต่ผลจากการลดขนาดของทรานซิสเตอร์ทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มขึ้นมาก และการจัดการความร้อนหรือการควบคุมพลังงานระดับต่ำในอุปกรณ์เป็นสิ่งจำเป็นที่สำคัญต่อความเชื่อมั่นในการใช้งานที่ความเร็วสูง จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพิ่มขึ้นต่อมาในการออกแบบวงจรรวมในปัจจุบัน [5]

ในการลดขนาดลงของอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์นั้นไม่เพียงแต่เป็นการลดความกว้างของช่องทางเดินกระแส (เกตโพลีซิลิคอน / เกตออกไซด์) เท่านั้น แต่ยังรวมถึงการลดความลึกของส่วนหัวเดรน-ซอสด้วย [6-8]

พัฒนาการของเทคโนโลยีการรวมชั้นโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (CMOS) ในสมัยใหม่ มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของชิพ และลดต้นทุนการผลิต [9] เทคโนโลยีนี้ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตไมโครชิพเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจจับได้อีกด้วย คุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ชนิดนี้คือการรวมตัวตรวจจับหลายๆชนิดเข้าด้วยกันและยังมีการใช้พลังงานระดับต่ำด้วย จากเหตุผลของต้นทุนการผลิตอุปกรณ์เหล่านี้ เทคโนโลยีซีเอ็มออสระดับซับไมครอน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เทคโนโลยีนี้การเจือสารด้วยระดับความเข้มข้นสูงลงบนแผ่นฐานรองเป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อให้สามารถควบคุมปรากฏการณ์ช่องแคบ (short channel effect) และกระแสรั่วไหลระดับต่ำ (low leakage current) รวมถึงถึงการป้องกันปรากฏการณ์ Latch-up ที่เกิดขึ้นอีกด้วย [10] ความเข้มข้นของบ่อแยกชนิดเอ็นหรือชนิดพีถูกเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเจือสารด้วยการฝังประจุ กระบวนการนี้จะนำไปสู่การทำลายโครงสร้างของผลึกในแผ่นฐานรองซิลิคอน ซึ่งถูกคาดหวังว่าจะสามารถกำจัดได้ภายหลังการแอนนีสลิ่ง (annealing)[11] วิธีการบำบัดด้วยความร้อนในเวลาสั้นๆ และที่อุณหภูมิต่ำให้แก่ความลึกรอยต่อภายหลังการฝังประจุเป็นสิ่งจำเป็น แต่อาจจะไม่เพียงพอที่จะกำจัดความบกพร่อง (Defect) ที่เกิดจากการฝังประจุได้ [12] ความบกพร่องเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสรั่วไหลในแต่ละส่วนของรอยต่อพี-เอ็นได้

ความบกพร่องอาจพบในแผ่นซิลิคอน อันเกิดขึ้นเนื่องจากเทคนิคการปลูกผลึกซิลิคอน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการรั่วไหลของรอยต่อและผลผลิตรวมของอุปกรณ์ [13,14] ทั้งกระแสรั่วไหลและผลผลิตรวมของอุปกรณ์ ขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่นซิลิคอน เช่น แผ่นซิลิคอนแบบ Czochralski (Cz) หรือแบบ Epitaxial (Epi) [15] แผ่นซิลิคอนแบบ Epitaxial จะมีกระแสรั่วไหลต่ำกว่าและได้ผลผลิตรวมของอุปกรณ์มากกว่าแบบ Czochralski แต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายต่อชิปแล้วพบว่าแบบ Epitaxial จะใช้มากกว่า ด้วยเหตุนี้จึงเป็นข้อจำกัดของการใช้แผ่นซิลิคอนแบบ Epitaxial ในการสร้างวงจรมicroโปรเซสเซอร์ ขณะที่แผ่นซิลิคอนแบบ Czochralski ถูกใช้อย่างแพร่หลายในวงจรมหาความจุต่างๆ [9]

กระแสรั่วไหลในรอยต่อพี-เอ็น เป็นพารามิเตอร์หลักที่สำคัญอันหนึ่งในเทคโนโลยีชิปไมครอน ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ กระแสรั่วไหลนี้มีความสัมพันธ์อย่างมากกับความบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในซิลิคอน ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากกระบวนการสร้างและ/หรือการปลูกผลึกซิลิคอน ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในการจำกัดกระแสรั่วไหลโดยการควบคุมความบกพร่องเหล่านี้ทั้งก่อนและหลังกระบวนการสร้างให้มีขนาดที่เล็กลงและมีปริมาณความหนาแน่นลดลงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณาในเทคโนโลยีอนาคต

ในทางกลับกัน การศึกษาถึงความบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในซิลิคอน ทำได้โดยการวิเคราะห์จากกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น โดยการใช้เทคนิคการสร้างไดโอดให้มีโครงสร้างที่เหมาะสม สามารถใช้ศึกษาพารามิเตอร์ของฐานรองซิลิคอนที่เกี่ยวข้อง โดยการพิจารณากระแสรั่วไหล ซึ่งเทคนิคที่รู้จักกันแพร่หลายคือ Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) [16,17]

Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เพื่อการศึกษาความบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ เครื่อง DLTS จะกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของความบกพร่องและวัดค่าความหนาแน่นของความบกพร่องที่มีอยู่ในวัสดุ บางส่วนของพารามิเตอร์จะถูกพิจารณาเพื่อใช้ระบุลักษณะและวิเคราะห์ความบกพร่องเหล่านั้น โดยทั่วไปนิยมใช้กับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น เพื่อใช้ศึกษาความบกพร่องที่ปรากฏอยู่ในบริเวณชั้นปลดพาหะ (depletion region)

เทคนิคของ DLTS มีความไวมากกว่าเทคนิคการวิเคราะห์สารกึ่งตัวนำแบบอื่นๆ ตัวอย่างเช่น เครื่อง DLTS สามารถตรวจจับสิ่งปนเปื้อน (impurities) และความบกพร่องที่มีความหนาแน่นจำนวน 1 ใน 10^{12} ของอะตอมในแผ่นซิลิคอน ด้วยคุณลักษณะเด่นนี้รวมถึงการออกแบบเทคนิคที่เรียบง่ายทำให้เครื่อง DLTS เป็นที่นิยมมากในห้องปฏิบัติการวิจัยและโรงงานผลิตวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเทคนิคนี้ได้นำเสนอครั้งแรกโดย David Vern Lang จาก Bell Telephone Laboratories ในปี 1974 [18] และเขาได้สิทธิบัตรในสหรัฐอเมริกาในปี 1975 [19]

ดร.อัมพร โพธิ์ไธ นักวิจัยประจำของศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC/NECTEC) ได้คิดค้นเทคนิคการวิเคราะห์ความบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ [20] โดยมีลักษณะของการวิเคราะห์คล้ายกับเทคนิค DLTS แต่ใช้เครื่องมือวัดพื้นฐานในการวัดคุณสมบัติของไดโอด และการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของความบกพร่องที่ปรากฏในแผ่น

ซิลิคอนได้ เทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์ที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ผลวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้ ที่สำคัญสามารถใช้ทดแทนเครื่อง DLTS ที่มีราคาสูงหลักร้อยล้านบาทได้

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่ายังมีบางส่วนที่เป็นข้อจำกัดในการวิเคราะห์ผลอุปกรณ์ เช่น การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้น ซึ่งต้องวัดข้อมูลที่อุณหภูมิที่ต่างกันอย่างน้อย 3 อุณหภูมิ เป็นต้น วิทยานิพนธ์นี้ จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ดังกล่าว เพื่อให้ได้วิธีการวิเคราะห์ที่สะดวก รวดเร็ว และให้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดมากขึ้น ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์นี้จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความบกพร่องของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตความกว้างชั้นปลอดพาหะที่อยู่ภายในช่วงแรงดันไฟฟ้าภายในของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นที่มีความลึกรอยต่อที่มีความลึกน้อยได้อีกด้วย โดยผู้วิจัยคาดหวังว่า วิทยานิพนธ์นี้จะ เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยหรือประเทศอื่น ๆ ที่มีขีดจำกัดในการซื้อเครื่องจักรที่มีราคาสูง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

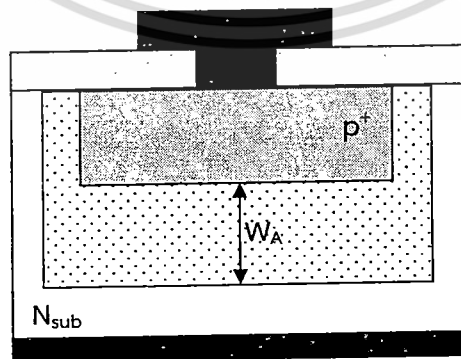
วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้

1. เพื่อศึกษาวิธีการแบบใหม่ในการหาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่และการก่อเกิดพาหะ ตลอดจนค่าพลังงานกระตุ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ความบกพร่องของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
2. เพื่อศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงานในรอยต่อพีเอ็น โดยการประยุกต์ใช้งานจากวิธีการที่นำเสนอ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ความบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในรอยต่อพี-เอ็นที่นำเสนอ โดย ดร.อัมพร โพธิ์ไธย ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์ดังกล่าวได้วิเคราะห์ความบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะ ซึ่งมีความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะเป็นระยะ W_A แสดงดังรูปที่ 1.4

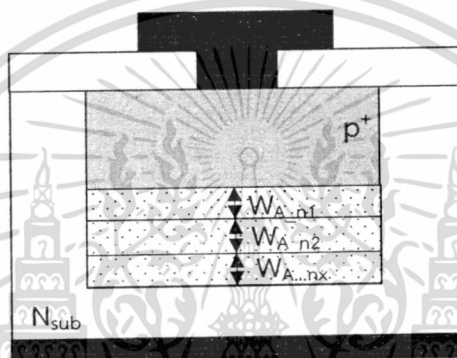
ในการวิเคราะห์เพื่อตรวจหาความบกพร่องที่เกิดขึ้น โดยคิดคำนวณด้วยเทคนิคการอินทิเกรตค่าของกระแสรั่วไหลจากขอบเขตของ W_A เริ่มจาก 0 ถึง W_A จากผลการทดลองพบว่าค่าการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะเป็นค่าโดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในช่วงของความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะ



รูปที่ 1.4 โครงสร้างของไดโอดชนิด $p^+ - N_{sub}$ ที่มีความกว้างบริเวณเขตปลอดพาหะเป็นระยะ W_A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อตรวจหาความบกพร่องที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคการหาค่าอนุพันธ์ของกระแสรั่วไหลจากขอบเขตจาก 0 ถึง W_A ($W_A = W_{A_n1} + W_{A_n2} + \dots + W_{A_nx}$) ดังแสดงในรูปที่ 1.5 โดยผู้วิจัยคาดหวังว่าเทคนิคแบบใหม่นี้จะเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่สะดวก รวดเร็ว และให้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น สามารถหาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่และการก่อเกิดพาหะ ตลอดจนค่าพลังงานกระตุ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ถึงความบกพร่องทั้งที่มีลักษณะสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ (uniform/non-uniform defects) ของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเนื่องจากการใช้แรงดันไบอัสตรง จึงสามารถวิเคราะห์ความบกพร่องของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตความกว้างชั้นปลอดพาหะที่อยู่ภายในช่วงแรงดันไฟฟ้าภายในของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นที่มีความลึกรอยต่อที่มีความลึกน้อยได้อีกด้วย



รูปที่ 1.5 โครงสร้างของไดโอดชนิด $p^+ - N_{sub}$ ที่มีค่าอนุพันธ์ W_{A_nx}

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อศึกษา ปรับปรุง และพัฒนาเทคนิคการวัดและวิเคราะห์ผลเพื่อใช้อธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นเนื้อหาส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นที่การวัดคุณสมบัติ การเก็บข้อมูล การวิเคราะห์และอธิบายผลที่เกิดขึ้นเป็นหลัก ในส่วนของการออกแบบ และกระบวนการสร้างของอุปกรณ์ จึงเป็นเนื้อหารองลงไป

ขอบเขตของการศึกษาหลัก ได้แก่ การวัดคุณสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นด้านกระแสและแรงดันทั้งแรงดันไบอัสตรงและแรงดันย้อนกลับ ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันทั้งแรงดันไบอัสตรงและแรงดันย้อนกลับ การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคณิตศาสตร์ทั้งการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรนเนียส และเทคนิคแบบใหม่ที่นำเสนอโดยการหาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ในไดโอดด้วยคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง ตลอดจนการวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงานในรอยต่อพีเอ็น โดยการประยุกต์ใช้งานจากวิธีการที่นำเสนอ

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ออกแบบโครงสร้างเรขาคณิตของอุปกรณ์ประเภทไดโอด
2. กระบวนการสร้างอุปกรณ์
3. วัดคุณสมบัติของอุปกรณ์
4. นำผลที่ได้วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และเปรียบเทียบผลวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุปผลการวิเคราะห์

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 บทที่ 1 บทนำ ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของประเด็นปัญหาของการวิจัยอย่างเป็นขั้นตอน วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์ สมมุติฐานของการวิจัยซึ่งเป็นการอธิบายแนวคิดในการวิจัยเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ จากนั้นกล่าวถึงขอบเขตของการศึกษาวิจัย ซึ่งมุ่งเน้นที่การวัดคุณสมบัติ การเก็บข้อมูล การวิเคราะห์และอธิบายผลที่เกิดขึ้นเป็นหลัก สุดท้ายเป็นการสรุปขั้นตอนในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย เช่น ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction) คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า - แรงดัน (Capacitance - Voltage Characteristics) ความบกพร่องในโครงสร้างผลึก (Defect in Crystal) กระบวนการสร้างอุปกรณ์แบบซีมอส (CMOS Fabrication) ทฤษฎีเกี่ยวกับการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Carrier of Generation and Recombination) ตลอดจนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอาร์เรเนียนีส (Arrhenius Technique)

บทที่ 3 การออกแบบ กระบวนการสร้างและการวัดผล ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมการทดลอง ซึ่งเริ่มจากการออกแบบอุปกรณ์ไดโอดเพื่อใช้ในการวัดคุณสมบัติต่างๆ กระบวนการสร้างซึ่งเป็นการสร้างด้วยกระบวนการมาตรฐานของซีมอส การวัดผลจากอุปกรณ์ไดโอด ทั้งสัญญาณกระแสและค่าความจุไฟฟ้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวัด การวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานภายในรอยต่อพีเอ็น การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสและค่าความจุไฟฟ้าในไดโอด การวิเคราะห์ความกว้างชั้นปลอดพาหะ การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดในไดโอด การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรเนียนีส และการวิเคราะห์ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ในไดโอดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งานในด้านการวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงานในรอยต่อพีเอ็น ในบทนี้จะกล่าวถึงกระแสรั่วไหลและการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงาน การวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกจากพลังงานกระตุ้นด้วยสมการของอาร์เรเนียนีส และการวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสหน้า

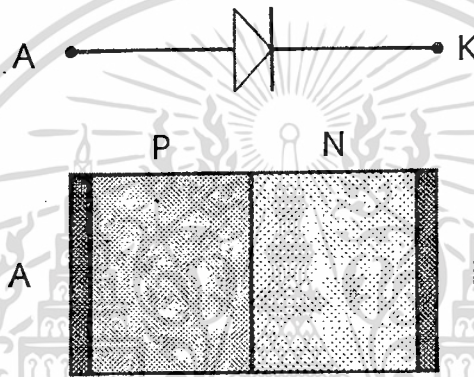
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการวิจัย และข้อเสนอแนะที่จะเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาในอนาคตต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)

โครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็นถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ และไดโอด ซึ่งในการสร้างโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น มักนิยมใช้วิธีการแพร่สารเจือชนิดเอ็นหรือชนิดพี เข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [21] และในส่วนนี้จะกล่าวคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้แก่ ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุลย์ ในสภาวะที่ได้รับไบอัสตรง และในสภาวะที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ

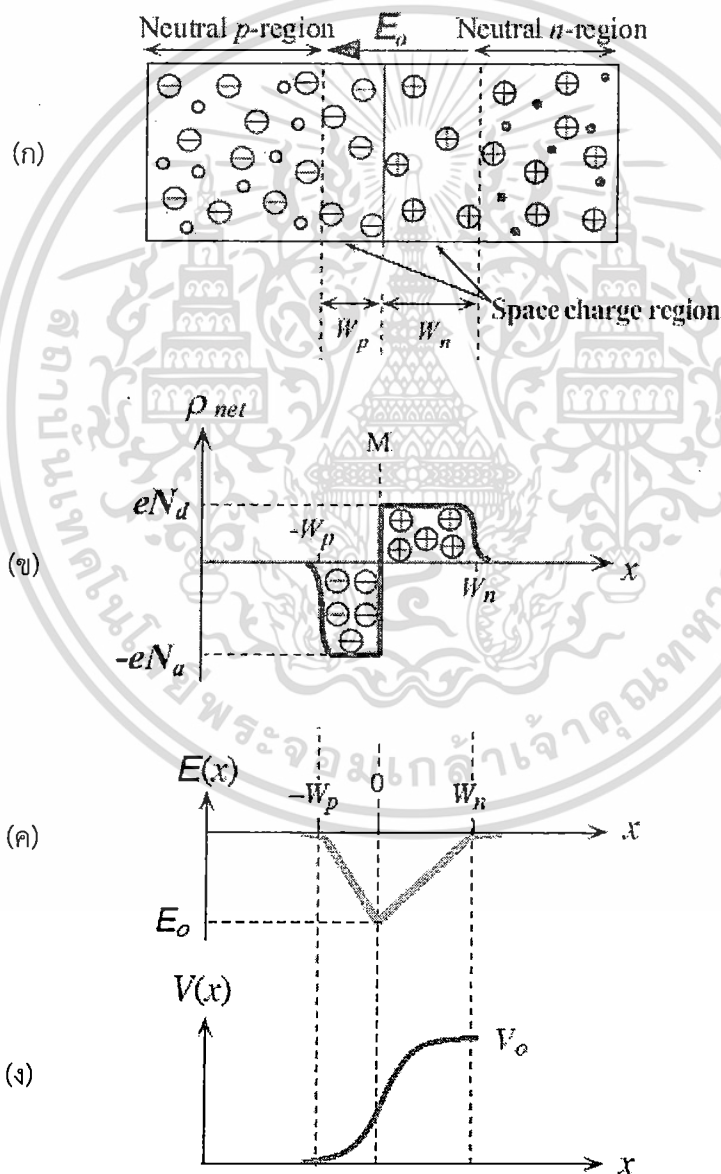


รูปที่ 2.1 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด

2.1.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุลย์

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น เนื่องจากความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุพาหะจากทางด้านที่มีความหนาแน่นของประจุพาหะมากกว่าไปยังด้านที่มีความหนาแน่นของประจุพาหะน้อยกว่า กล่าวคือ โฮลทางด้านพีในบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปในด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นในบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปทางด้านพี การแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อพี-เอ็น และสิ่งที่ได้ตามมาคือจะมีการรวมตัว (recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอน ผลจากการรวมตัวของประจุพาหะทั้งสอง จะทำให้อะตอมของสารเจือบริเวณใกล้ๆกับรอยต่อพี-เอ็นกลายเป็นไอออน (ion) คืออะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านเอ็น จะสูญเสียอิเล็กตรอน อะตอมนี้จึงแสดงตัวเป็นไอออนบวก และอะตอมของสารเจือชนิดพีทางด้านพี จะสูญเสียโฮลไป จึงทำให้อะตอมนี้แสดงตัวเป็นไอออนลบ เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าขึ้น ณ บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ก) สนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นอัตราการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะทั้งสองชนิดจะค่อยๆลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในมีปริมาณมากพอที่จะยับยั้งไม่ทำให้ประจุพาหะทั้งสองชนิดแพร่ข้ามรอยต่อได้ การแพร่จึงหยุดลง และอยู่ในภาวะสงบนิ่ง ซึ่งเรียกว่ารอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลย์ (equilibrium) [22]

นอกจากนี้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้บริเวณภายในรอยต่อที่ไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิด คงมีแต่อะตอมของสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็น ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาพไอออนลบและไอออนบวก บริเวณดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (depletion region) ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ข) การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น แสดงในรูปที่ 2.2(ค) ซึ่งค่า E_0 เป็นค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด และสนามไฟฟ้าที่มีอยู่บริเวณนี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นด้วย จึงดูคล้ายกับว่าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุลนี้มีแรงดันไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เองที่เป็นกำแพงศักย์ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ แสดงในรูปที่ 2.2(ง)



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อหรือที่เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) แสดงได้ดังสมการที่ (2.1)

$$V_o = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.1)$$

- ซึ่ง V_o คือ แรงดันไฟฟ้าภายใน (โวลต์)
 K คือ ค่าคงที่โบลต์ซมาน (8.62×10^{-5} eV/K)
 T คือ อุณหภูมิองศาสมบูรณ์ (K)
 q คือ ประจุอิเล็กตรอน (1.62×10^{-19} คูโลมบ์)
 N_A คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (cm^{-3})
 N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (cm^{-3})
 n_i คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})

และในภาวะสมดุล ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

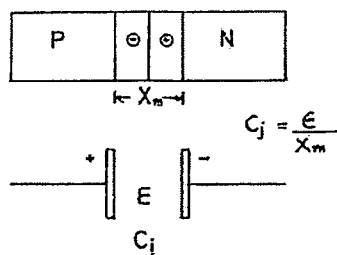
$$X_o = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_o (N_A N_D)}{q N_A N_D}} \quad (2.2)$$

- โดยที่ X_o คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุล
 ε คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ
 V_o คือ แรงดันไฟฟ้าภายใน (โวลต์)

นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) ค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$C_j = \sqrt{\frac{eq N_A N_D}{2(N_A + N_D)V_o}} \quad (2.3)$$

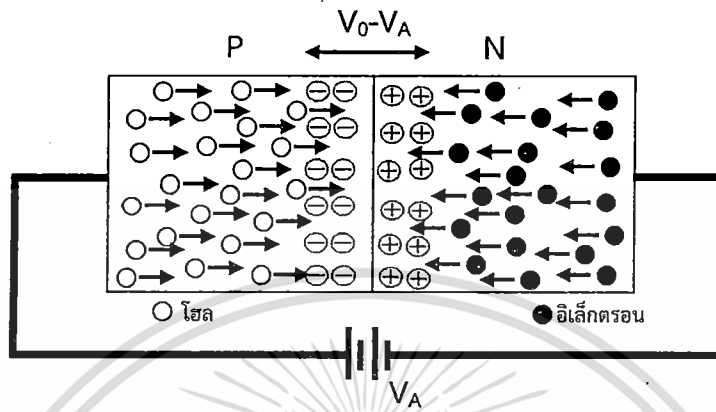
โดย C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (F/cm^2)



รูปที่ 2.3 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

2.1.2. รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias)

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง ซึ่งหมายถึงทางด้านพีมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง

แรงดันไบอัสจากภายนอกค่า V_A จะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็น และอยู่ในลักษณะที่หักล้างกับแรงดันไฟฟ้าภายในที่บริเวณรอยต่อ นั่นคือค่าแรงศักย์ที่รอยต่อจะลดลงจึงมีผลทำให้โฮลจากด้านพีและอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นถูกฉีด (injection) ข้ามรอยต่อพี-เอ็นได้ ปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนี้ จะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสในลักษณะของเอ็กโปเนนเชียล (exponential function) จากการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เอง จะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5)

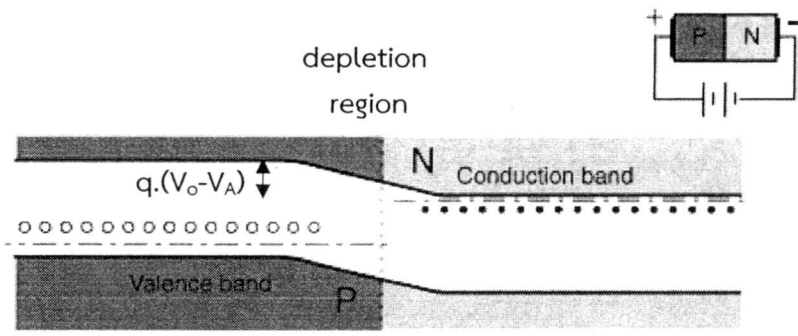
$$I = I_o (e^{qV_A / K T} - 1) \quad (2.4)$$

และ

$$I_o = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (2.5)$$

- โดยที่
- I คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น (A)
 - I_o คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)
 - V_A คือ แรงดันไบอัสที่ให้ภายนอก (V)
 - A คือ พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็น (cm^2)
 - D_e, D_h คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ (cm^2/s)
 - L_e, L_h คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ (cm)

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของด้านพีและเอ็นจะไม่เท่ากัน และค่าแรงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ และเป็นผลให้มีกระแสไหลในวงจรได้

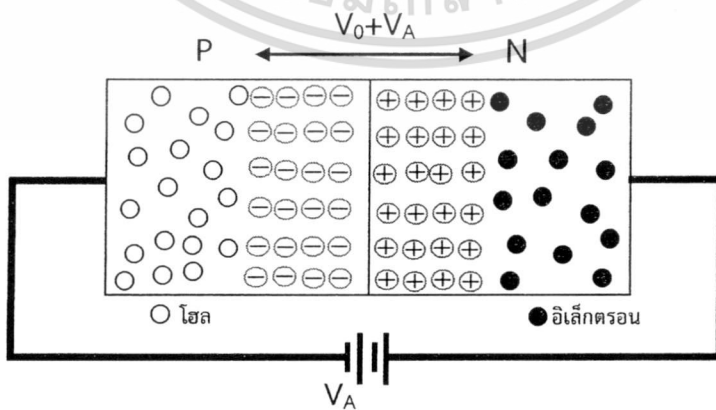


รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

2.1.3. รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias)

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อพี-เอ็น มีค่า V_A โวลต์แล้ว จะพบว่าแรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายใน ซึ่งปรากฏที่บริเวณรอยต่อ (V_0) ดังนั้นจะทำให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และโฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้ รอยต่อพี-เอ็นในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวน ไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ อย่างไรก็ตามพบว่าในขณะที่โฮลทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านพี ซึ่งมีจำนวนน้อยสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงปรากฏมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับกระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในขณะรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งอาจพิจารณาได้จากสมการที่ 2.4 เมื่อแทนค่าของ V_A ด้วย $-V_A$ ดังนั้นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

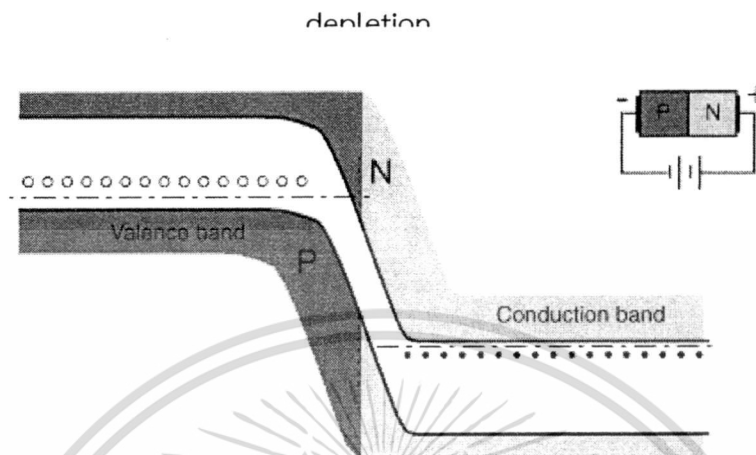
$$I \approx -I_0 \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของแถบพลังงาน แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งพบว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้ จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ที่ อุณหภูมิค่าหนึ่งๆ



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A

2.2 คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า - แรงดัน (Capacitance - Voltage Characteristics) [23]

2.2.1 ค่าความจุไฟฟ้ามอส (MOS Capacitance)

โครงสร้างตัวเก็บประจุมอส คือหัวใจของมอสเฟต ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ประเภทมอส และรอยต่อออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ สามารถหาได้จากกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดัน (C-V) ของอุปกรณ์ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์นิยามได้ดังนี้

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (2.7)$$

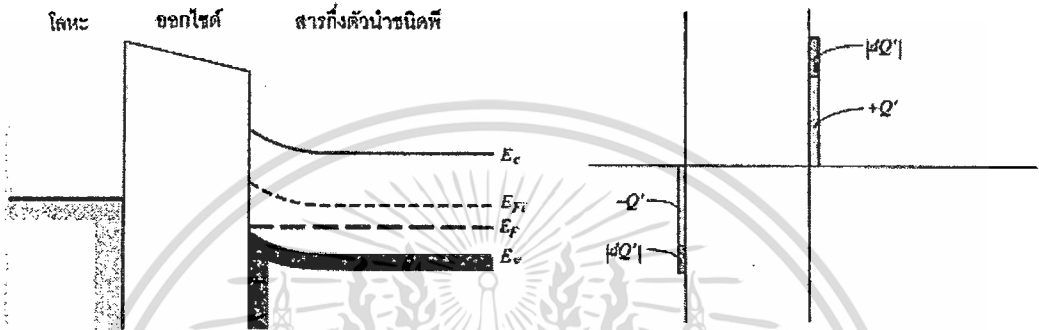
ซึ่ง dQ คือการเปลี่ยนแปลงของประจุ ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน dV ซึ่งตกคร่อมตัวเก็บประจุ ค่าความจุไฟฟ้าเป็นตัวพารามิเตอร์สัญญาณขนาดเล็ก และวัดได้โดยผสมแรงดันสัญญาณขนาดเล็กกระแสสลับบนแรงดันกระแสตรง ค่าความจุไฟฟ้าถูกวัดกับแรงดันที่บริเวณเกทที่ให้เข้าไป

ในการพิจารณาคุณสมบัติ C-V ในทางอุดมคติของตัวเก็บประจุมอส เริ่มต้นโดยสมมุติว่ามีประจุเป็นศูนย์ในออกไซด์ และไม่มีประจุที่รอยต่อออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ

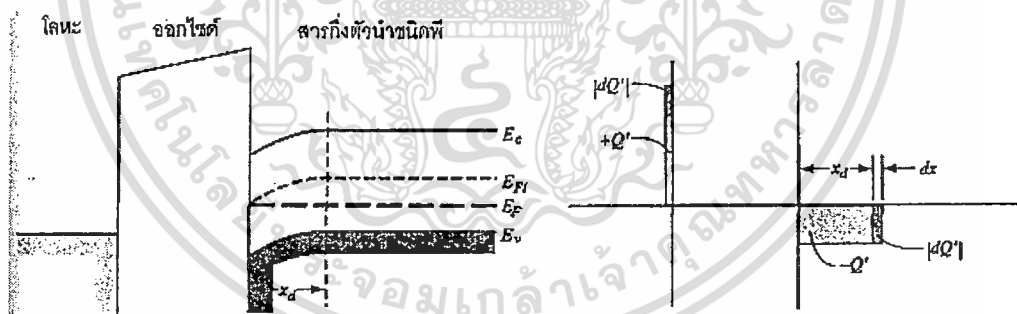
มีเงื่อนไขการทำงานสามเงื่อนไขที่สำคัญในตัวเก็บประจุมอส คือ การสะสม (accumulation) การลด (depletion) และการกลับ (inversion) รูปที่ 2.8(ก) แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอสที่มีฐานรองชนิดพี เมื่อเกทได้รับแรงดันลบเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นสะสมของโฮลในสารกึ่งตัวนำที่รอยต่อออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ การเปลี่ยนแปลงแรงดันเล็กน้อยคร่อมโครงสร้างมอส จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุบนเกทโลหะและประจุของโฮลด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ข) การ

เปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นประจุปรากฏขึ้นที่ขอบของอ็อกไซด์คล้ายกับตัวเก็บประจุ ค่าความจุไฟฟ้า C' ต่อหน่วยพื้นที่ของตัวเก็บประจุมอสของช่วงสะสมนี้คือ ค่าความจุไฟฟ้าอ็อกไซด์นั่นเอง

$$C'(acc) = C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \tag{2.8}$$



รูปที่ 2.8 (ก) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอสของช่วงสะสมพาหะ
(ข) การกระจายของประจุช่วงสะสมพาหะ เมื่อแรงดันเกตที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.9 (ก) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอสของช่วงการลดพาหะ
(ข) การกระจายของประจุช่วงการลดพาหะ เมื่อแรงดันเกตที่เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 2.9(ก) แสดงการกระจายประจุของอุปกรณ์ ค่าความจุไฟฟ้าอ็อกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณพลอตพาหะจะอนุกรมกัน การเปลี่ยนแปลงอนุพันธ์ของความหนาแน่นประจุถูกแสดงไว้ในรูป ค่าความจุไฟฟ้ารวมของการต่ออนุกรม คือ

$$\frac{1}{C'(depl)} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C'_{SD}} \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

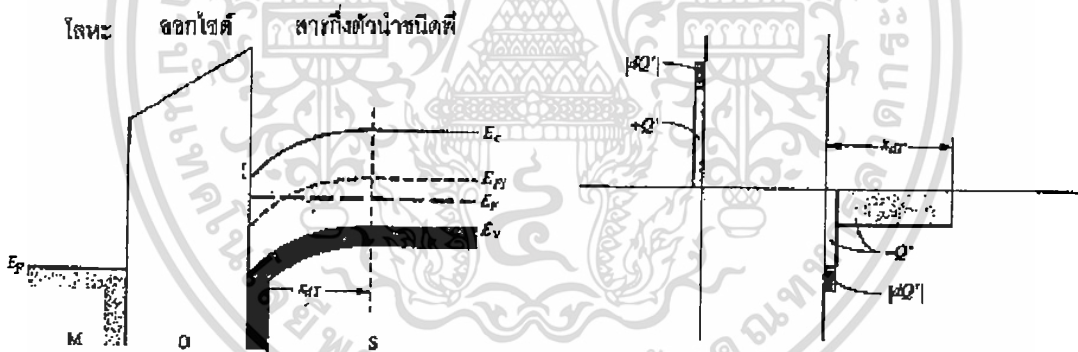
หรือ
$$C'(depl) = \frac{C_{ox} C'_{SD}}{C_{ox} + C'_{SD}} \tag{2.10}$$

เพราะว่า $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$ และ $C'_{SD} = \frac{\epsilon_s}{X_d}$ สมการที่ (2.10) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$C'(depl) = \frac{C_{ox}}{1 + \frac{C_{ox}}{C'_{SD}}} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox} + \left(\frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s}\right) X_d} \tag{2.11}$$

เมื่อความกว้างบริเวณประจุค้างเพิ่มขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าทั้งหมด $C'(depl)$ จะลดลง จุดเริ่มการกลับ มีเงื่อนไขเมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะเป็นค่าสูงสุด เงื่อนไขนี้ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าน้อยที่สุด C'_{min} ซึ่งหาได้โดย

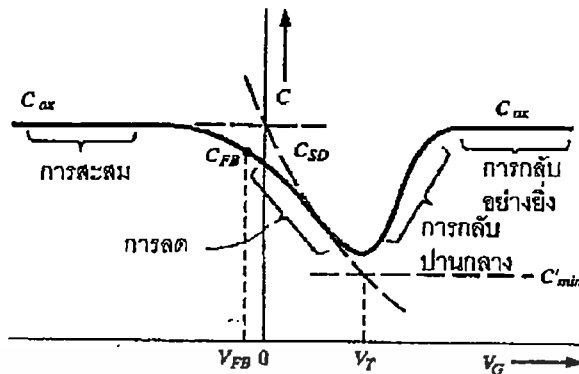
$$C'_{min} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox} + \left(\frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s}\right) X_{dT}} \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.10 (ก) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุโมส สำหรับแบบการทำงานช่วงการกลับ
(ข) การกระจายของประจุช่วงการกลับ สำหรับแรงดันเกตที่เปลี่ยนแปลง

รูปที่ 2.10(ก) ไดอะแกรมแถบพลังงานของอุปกรณ์โมส สำหรับเงื่อนไขการกลับ ในกรณีอุดมคติ การเปลี่ยนแปลงเล็กๆในแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุโมส จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นประจุในชั้นกลับ ความกว้างบริเวณประจุค้างจะไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าประจุในชั้นกลับสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันตัวเก็บประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) ค่าความจุไฟฟ้าช่วงนี้คือ ค่าความจุไฟฟ้าออกไซด์ หรือ

$$C'(inv) = C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \tag{2.13}$$

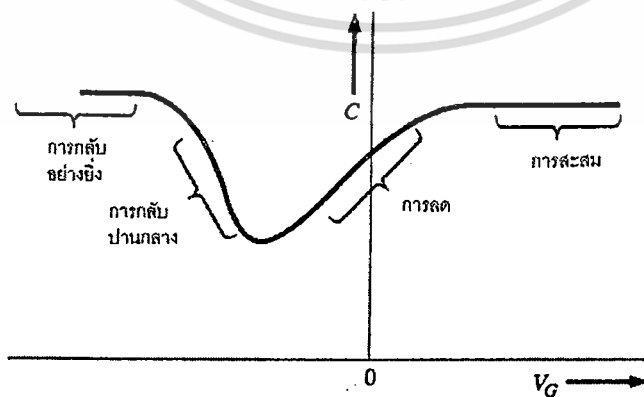


รูปที่ 2.11 ค่าความจุไฟฟ้าในอุดมคติที่ความถี่ต่ำกับแรงดันของตัวเก็บประจุ MOSFET พื้นฐานรองชนิดพี

รูปที่ 2.11 แสดงค่าความจุไฟฟ้าในอุดมคติที่ความถี่ต่ำกับแรงดัน หรือคุณสมบัติ C-V ของตัวเก็บประจุ MOSFET พื้นฐานรองชนิดพี ส่วนเส้นประทั้งสามจะเป็นองค์ประกอบ C_{ox} , C'_{SD} และ C'_{min} เส้นทึบคือ ค่าความจุไฟฟ้าสุทธิของตัวเก็บประจุ MOSFET ชั้นกลับปานกลาง (moderate inversion layer) ซึ่งแสดงในรูปคือบริเวณการเปลี่ยนระหว่างจุดเมื่อความหนาแน่นประจุค้างเปลี่ยนแปลงกับแรงดันเกต จุดบนเส้นกราฟที่ตรงกับเงื่อนไขแถบราบ (C'_{FB}) เกิดขึ้นระหว่างเงื่อนไขการสะสมพาหะและการลดพาหะ ค่าความจุไฟฟ้าแถบราบคือ

$$C'_{FB} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox} + \left(\frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s} \right) \sqrt{\left(\frac{kT}{q} \right) \left(\frac{\epsilon_s}{qN_a} \right)}} \quad (2.14)$$

สำหรับรูปแบบของคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าในอุดมคติที่ความถี่ต่ำกับแรงดัน ที่ได้จากตัวเก็บประจุแบบ MOSFET พื้นฐานรองเป็นชนิดเอ็น ทำได้โดยการเปลี่ยนเครื่องหมายของแกนแรงดัน เงื่อนไขการสะสมประจุได้จากแรงดันไบอัสที่เป็นลบ เส้นกราฟในทางอุดมคติสำหรับกรณีนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ค่าความจุไฟฟ้าในอุดมคติที่ความถี่ต่ำกับแรงดันของตัวเก็บประจุ MOSFET พื้นฐานรองชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction Capacitance) [24]

เห็นได้ชัดแล้วว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นมีประจุบวกและประจุลบกระจายทั่วตลอดช่วง W การเพิ่มของค่าความจุไฟฟ้าสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของประจุต่อแรงดันตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น

$$C = \frac{dQ}{dV} \tag{2.15}$$

ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพี-เอ็น แบ่งเป็น 2 ชนิดดังนี้

2.2.2.1 ค่าความจุไฟฟ้าจากชั้นปลอดพาหะ (Depletion capacitance)

หรือ ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อ (Junction capacitance) เกิดขึ้นจากประจุของสารเจือในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ถ้ากำหนดให้ค่าความหนาแน่นประจุในด้านพีเท่ากับค่าความหนาแน่นประจุในด้านเอ็น เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นประจุในด้านพีพบว่า

$$Q_A = \frac{Q}{A} = e x_{p0} N_A \tag{2.16}$$

$$= e \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} W$$

ดังนั้น

$$Q_A = \frac{Q}{A} = e \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)^{-1} W \tag{2.17}$$

ซึ่ง

$$x_{p0} = \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \tag{2.18}$$

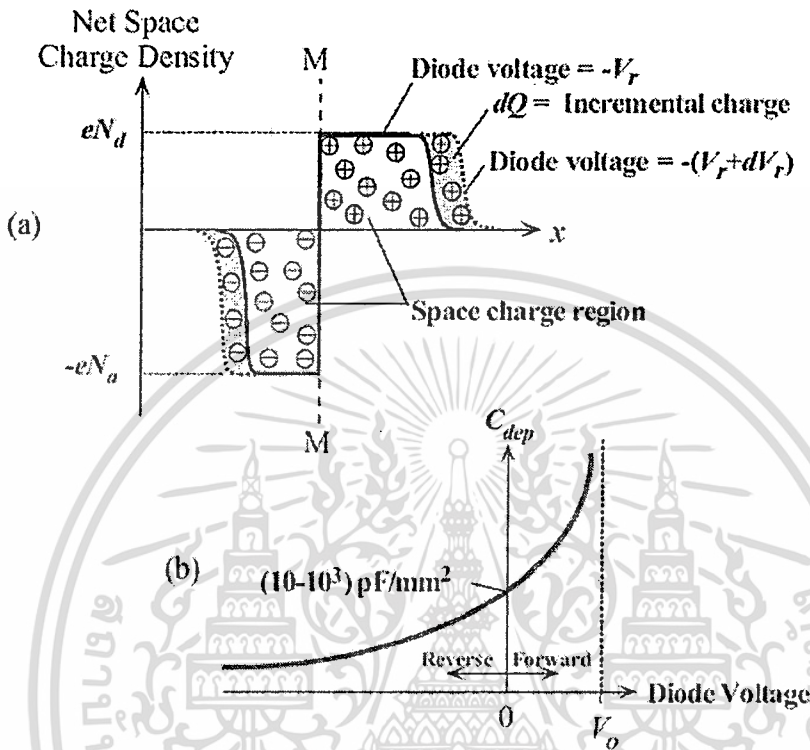
และ

$$W = \left[\frac{2\varepsilon}{e} (V_0 - V) \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right) \right]^{1/2} \tag{2.19}$$

- โดยที่
- Q_A เป็นค่าความหนาแน่นประจุต่อพื้นที่ (C)
 - A เป็นพื้นที่ของตัวเก็บประจุ (cm^2)
 - x_{p0} เป็นความกว้างชั้นปลอดพาหะในด้านพีขณะสมดุลความร้อน (cm)
 - N_D เป็นความเข้มข้นอะตอมสารเจือผู้ให้ (atom/cm^3)
 - N_A เป็นความเข้มข้นอะตอมสารเจือผู้รับ (atom/cm^3)
 - W เป็นความกว้างชั้นปลอดพาหะ (cm)
 - e เป็นประจุอิเล็กตรอน (C)
 - ε เป็นค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อสาร

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ V ซึ่งเปลี่ยนแปลงด้วยค่า dV จะได้ $V + dV$ โดยค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ W เปลี่ยนแปลงตามสมการที่ (2.19) เป็นผลให้จำนวนของประจุในชั้นปลอด

พาหะกลายเป็น ดังแสดงในรูป 2.13(a) ซึ่งเกิดในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดย $V = -V_r$ และ $dV = -dV_r$



รูป 2.13 ชั้นปลอดพาหะซึ่งแสดงพฤติกรรมเป็นตัวเก็บประจุ
 (a) ประจุในชั้นปลอดพาหะซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ
 (b) การเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะ จะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง และลดลงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยทั่วไปไม่มีค่าในช่วงของพีโคฟารัดต่อตารางมิลลิเมตร

จากสมการที่ (2.15), (2.17) และสมการที่ (2.19) จะได้ค่าความจุไฟฟ้ายต่อพื้นที่เป็น

$$C_A = \frac{dQ}{dV} = \frac{d}{dV} e \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)^{-1} W \tag{2.20}$$

$$C_A = \frac{d}{dV} e \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)^{-1} \left[\frac{2\epsilon}{e} (V_0 - V) \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right) \right]^{1/2} \tag{2.21}$$

$$C_A = e \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)^{-1/2} \left(\frac{2\epsilon}{e} \right)^{1/2} \frac{1}{2} \left(\frac{-1}{\sqrt{V_0 - V}} \right) \tag{2.22}$$

ดังนั้น $C_A = \frac{C}{A} = \frac{\epsilon}{W} \tag{2.23}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.23) พบว่าค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อ มีลักษณะคล้ายตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน $\epsilon A/W$ แต่ค่า W เปลี่ยนแปลงตามสมการที่ (2.19) ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับเนื่องจากประจุที่เพิ่มขึ้น $W \propto (V_0 + V_r)^{1/2}$ ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อถูกแสดงให้เห็นทั้งเงื่อนไขเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและย้อนกลับ ดังรูปที่ 2.13(b)

เมื่อพิจารณากรณีการแพร่สารเจือแบบไม่สมมาตรของรอยต่อ p+n ที่มี $N_A \gg N_D$

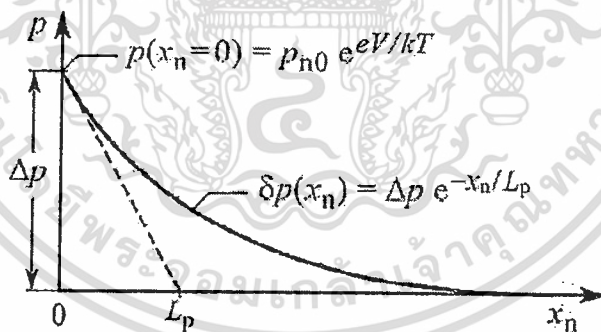
$$C_A = \frac{C}{A} = \frac{\epsilon}{W} = \epsilon / \left[\frac{2\epsilon}{e} (V_0 - V) \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right) \right]^{1/2} \tag{2.24}$$

ดังนั้น ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อ p+n

$$C_A = \frac{C}{A} = \sqrt{\frac{e\epsilon N_D}{2(V_0 - V)}} \tag{2.25}$$

2.2.2.2 ค่าความจุไฟฟ้าการแพร่ (Diffusion capacitance)

เกิดขึ้นจากการฉีดของพาหะอิสระ (free carrier) ในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง เมื่อพิจารณารอยต่อ p+n ซึ่งมีการฉีดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะ ซึ่งความเข้มข้นของโฮลที่ถูกฉีดจะแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความเข้มข้นของโฮลในรอยต่อ p+n

ความเข้มข้นของโฮลแสดงด้วย

$$\delta p(x_n) = \Delta p e^{-x_n/L_p} \tag{2.26}$$

ประจุรวมของโฮลที่ถูกฉีด

$$Q_A = \frac{Q}{A} = e \int_0^\infty \delta p(x_n) dx_n \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_A = e\Delta p \int_0^\infty e^{-x_n/L_p} dx_n \quad (2.28)$$

$$= e\Delta p L_p \quad (2.29)$$

จาก $\Delta p = p_{n0}(e^{eV/kT} - 1)$ (2.30)

ดังนั้น $Q_A = eL_p p_{n0}(e^{eV/kT} - 1)$ (2.31)

เมื่อพิจารณาในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง

$$V \gg \frac{kT}{e} = 0.026 \text{ V} \quad (2.32)$$

ดังนั้น $Q_A = eL_p p_{n0} e^{eV/kT}$ (2.33)

จากสมการที่ (2.15) และสมการที่ (2.33) จะได้ค่าความจุไฟฟ้าการแพร่ต่อพื้นที่เป็น

$$C_A = \frac{C}{A} = \frac{dQ}{dV} = eL_p p_{n0} e^{eV/kT} \frac{e}{kT} \quad (2.34)$$

$$C_A = \frac{C}{A} = \frac{e^2}{kT} L_p p_{n0} e^{eV/kT} \quad (2.35)$$

จากสมการไดโอดของ Shockley สำหรับรอยต่อ p+n

$$J = e \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{eV/kT} - 1) \quad (2.36)$$

$$\approx e \frac{D_p}{L_p} p_{n0} e^{eV/kT} ; V \gg kT/e \quad (2.37)$$

จากสมการที่ (2.35) และสมการที่ (2.37) จะได้

$$C_A = \frac{e^2}{kT} L_p \frac{J}{e} \frac{L_p}{D_p} e^{-eV/kT} e^{eV/kT} \quad (2.38)$$

$$= \frac{e}{kT} \frac{L_p^2}{D_p} J \quad (2.39)$$

และจาก $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ หรือ $L_p^2 = D_p \tau_p$ (2.40)

แทนสมการที่ (2.40) ในสมการที่ (2.39) จะได้

$$C_A = \frac{e}{kT} \tau_p J \quad (2.41)$$

ดังนั้นจะได้ค่าความจุไฟฟ้าการแพร่เป็น

$$C = \frac{e}{kT} \tau_p I \quad (2.42)$$

กำหนดให้ D_e, D_h คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ (cm^2/s)

L_e, L_h คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ (cm)

J คือ ความหนาแน่นกระแส (A/cm^2)

τ_p คือ ช่วงเวลาการก่อกำเนิดโฮล (s)

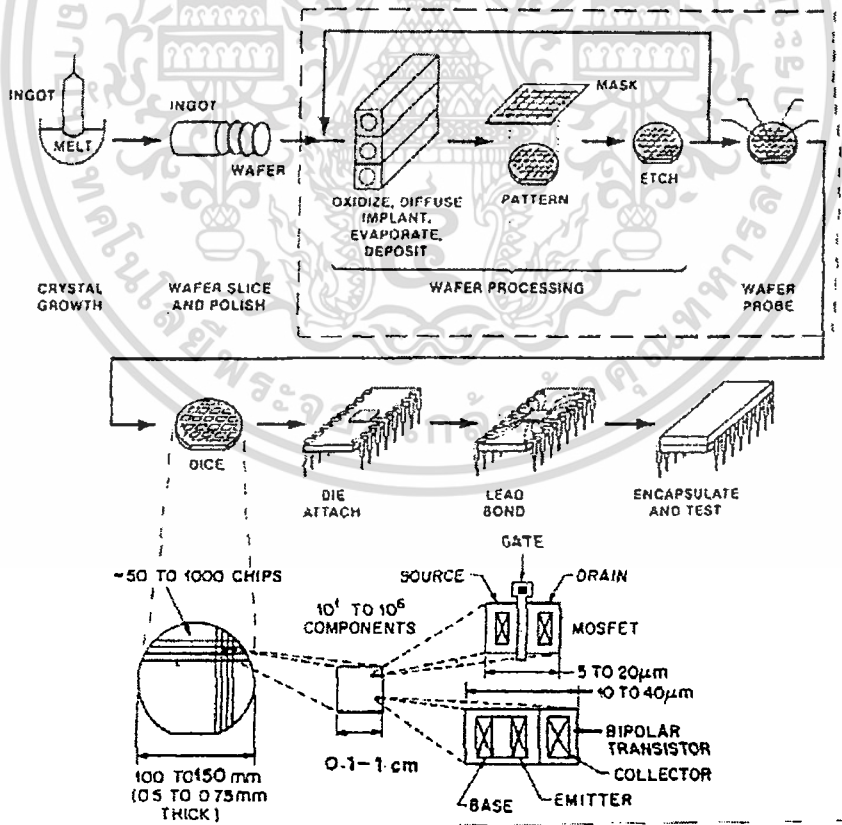
k คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มาน ($=8.617 \times 10^{-5} \text{ eV}/\text{K}$)

T คือ อุณหภูมิ (K)

2.3 กระบวนการสร้างอุปกรณ์แบบซีมอส (CMOS Fabrication)

กระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส [25] มีขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่

2.15



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้น (Wafer Preparation) [26]

ในการเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้นมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติที่มีต่อวงจรรวม เนื่องจากอุปกรณ์ประเภทมอสทรานซิสเตอร์ทำงานด้วยกระแสที่บริเวณผิว ดังนั้นการเลือกแผ่นฐานรองจึงต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์ต่างๆของแผ่นฐานรองด้วย เช่น ความเข้มข้นฐานรอง ระบายผลึก ค่าพิทความต้านทานและอื่นๆ แผ่นฐานรองซิลิคอนเริ่มต้น ที่มีความเหมาะสมและนิยมใช้ในการสร้างอุปกรณ์ประเภทมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งมี 2 ชนิดด้วยกันคือ

- ฐานรองชนิดพี ระบาย (100)
- ฐานรองชนิดเอ็น ระบาย (100)

ภายหลังจากเลือกแผ่นฐานรองซิลิคอน ต้องมีการทำความสะอาดเพื่อเป็นการล้างสิ่งเจือปนอื่นๆ รวมทั้งออกไซด์ที่เกิดบนผิวของแผ่นซิลิคอนออก เพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนสะอาด

2.3.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

ภายหลังจากขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่น

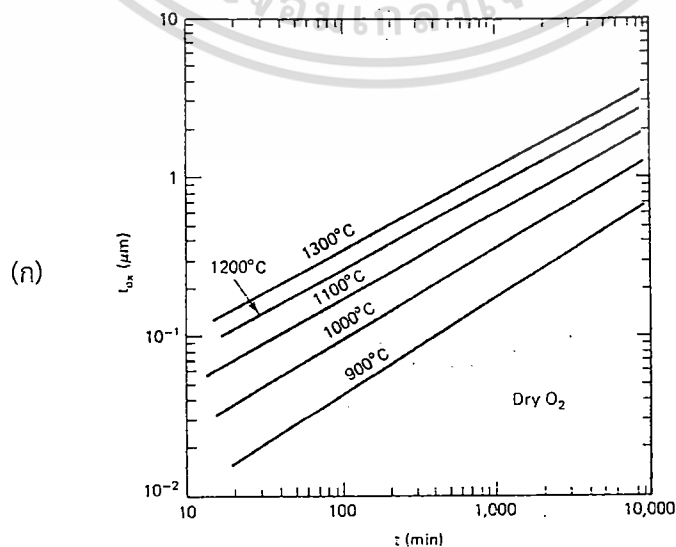
ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) จะใช้เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่าง คือ

1. เพื่อเป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ (diffusion mask) ใช้ในขั้นตอนการแพร่ชั้นสารเจือ
2. เพื่อป้องกันผิวหน้าแผ่นซิลิคอนเพื่อป้องกันอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

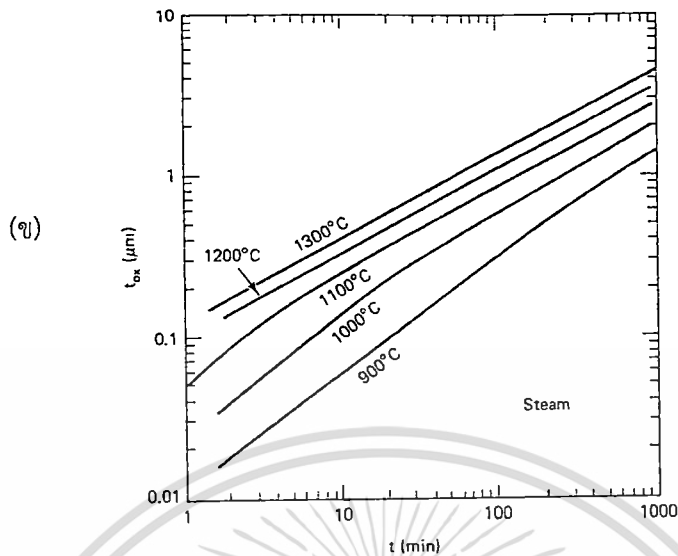
ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์หลักดังกล่าว โดยทั่วไปมีความหนาอยู่ในช่วง 5,000 - 10,000 Å กระบวนการสร้างนี้เรียกว่า กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation process) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) หรือบรรยากาศที่มีไอน้ำ ($\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$) ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 950 ถึง 1,150 °C

อัตราการแพร่ของ O_2 และ H_2O ใน SiO_2 จะเพิ่มขึ้นอย่างเอ็กโปเนนเชียลกับอุณหภูมิ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.16 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าซิลิคอน เป็นดังนี้

- 1) ปฏิกิริยาแบบแห้ง : $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$
- 2) ปฏิกิริยาแบบชื้น : $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของความหนาซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชัน
(ก) กระบวนการแบบแห้ง
(ข) กระบวนการแบบชื้น (95 °C H₂O)

จากความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 2.16 พบว่าซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบชื้นจะเกิดเร็วกว่าที่ได้จากกระบวนการแบบแห้งถึง 4 เท่า แต่ซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างซิลิคอนไดออกไซด์สูงกว่าแบบชื้น

2.3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

ภายหลังจากออกซิเดชันแผ่นผลึกซิลิคอนแล้ว ชั้นของ SiO₂ จะเคลือบผิวซิลิคอนทั้งหมดเพื่อป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในเนื้อซิลิคอน ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ จึงจำเป็นต้องเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ออก ซึ่งเรียกว่า กระบวนการทางแสง (photolithography) โดยกระบวนการดังกล่าว มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทำวงจรรวม ซึ่งต้องมีการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์หลายครั้ง

การสร้างลวดลายฟิล์มเพื่อการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ ต้องใช้น้ำยาไวแสง (photo resist) ซึ่งน้ำยาไวแสงมี 2 ชนิด คือ

1. น้ำยาไวแสงเชิงลบ (negative photo resist) ได้แก่ DTFR way coat
2. น้ำยาไวแสงเชิงบวก (positive photo resist) ได้แก่ AZ -1350

น้ำยาไวแสงทั้งสองชนิดนี้ ให้ผลที่แตกต่างกัน ซึ่งภายหลังจากที่แผ่นซิลิคอนถูกสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนด้วยเครื่องสปินเนอร์ (spinner) และทำการอบฟิล์มครั้งแรก (prebake) จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนไปทำการจัดวางมาสก์ด้วยกระจกมาสก์ตามลวดลายที่ต้องการ แล้วฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่องจัดวางมาสก์ (mask aligner) หลังจากฉายแสงแล้วทำการสร้างลวดลายฟิล์มด้วยน้ำยาสร้างลวดลายฟิล์ม (developer) แล้วทำการอบแห้งฟิล์มครั้งหลังอีกครั้ง (postbake) ทำการทาด้านหลังแผ่นและอบแห้งอีกครั้ง จากนั้นนำไปทำการกัด (etching) ซึ่งเป็นการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ไม่มีฟิล์มคลุมอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

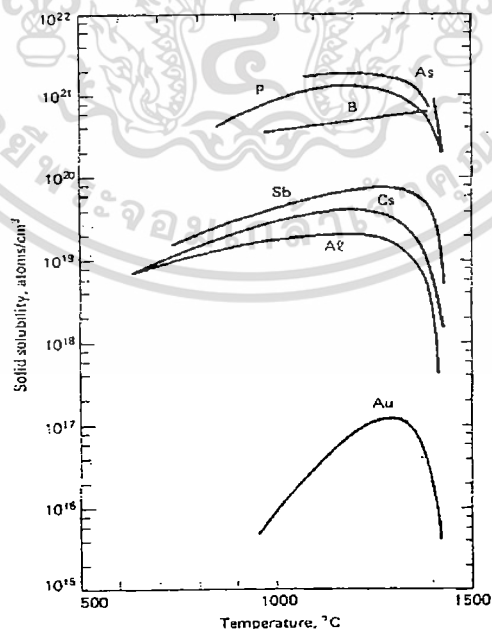
โดยทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer) ที่มี $\text{HF} : \text{NH}_4\text{F} = 1:6$ และมี อัตราการกัดประมาณ $1,000 \text{ \AA/นาที่}$ จนกระทั่งชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ถูกกัดออกจนหมด และ ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีคือ การลอกฟิล์ม (photo resist & stripping) ซึ่ง น้ำยาไวแสงเชิงบวก เช่น AZ-1350 สามารถลอกออกได้ง่ายในสารละลายออร์แกนิก เช่น อะซีโตน ส่วนน้ำยาไวแสงเชิงลบลอกออกด้วยการต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ภายหลังจากการลอกฟิล์มแล้ว ต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนอีกครั้ง ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการอื่นๆต่อไป

2.3.4 กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion Process)

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นกระบวนการแพร่สารเจือลงในแผ่นฐานรอง ด้วยวิธีการแพร่ที่ อุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรอง และถ้าความเข้มข้นอะตอมของสารเจือสูงกว่าของแผ่นฐานรอง ทำให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น

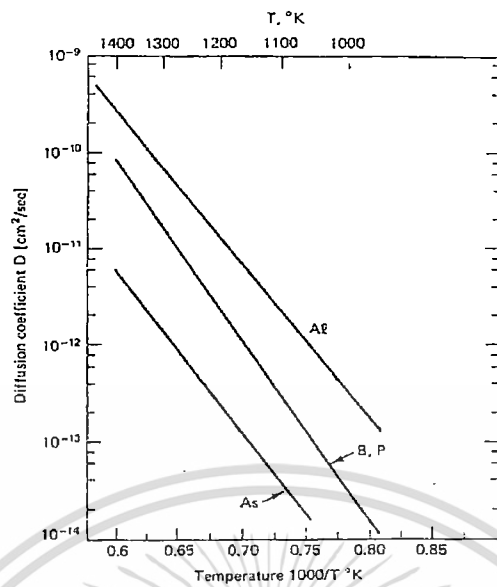
ขั้นตอนของการแพร่สารเจือ ทำโดยการกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็น บรรยากาศของสารเจือ ซึ่งแหล่งสารเจือโบรอน ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และใช้สารเจือ ฟอสฟอรัสในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองซิลิคอนเข้าไปยังบรรยากาศของ สารเจือ อะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นฐานรองและแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรอง ความเข้มข้น ของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิ ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการแพร่ มีอิทธิพลต่อความลึก และความเข้มข้นของการแพร่ ในกระบวนการแพร่สารเจือ แบ่งได้เป็นสองขั้นตอนคือ การแพร่ สารเจือขั้นต้น (Pre-deposition) และการขับลึก (Drive-in)

2.3.4.1 การแพร่สารเจือขั้นต้น (Pre-deposition)



รูปที่ 2.17 ค่า solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน

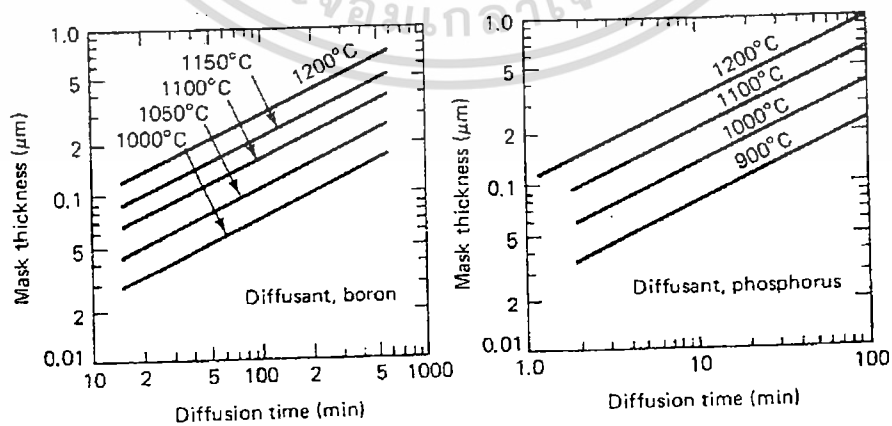
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ

การแพร่สารเจือขึ้นต้นในอุณหภูมิสูง เป็นการควบคุมปริมาณของสารเจือโดยการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแพร่สารเจือ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆจะมีปริมาณสารเจือสูงสุดในการแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรองซิลิคอน ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการแพร่เข้าในของแข็ง (solid solubility) และปริมาณสารเจือที่ผิวผลึกฐานรองเรียกว่า ความเข้มข้นผิว (surface concentration: N_s) โดยความสัมพันธ์ของค่า solid solubility กับอุณหภูมิในการแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และรูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ

สำหรับความสามารถในการแพร่ของสารเจือ เช่น As, P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิคอนได้ออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิคอน ดังนั้นชั้นซิลิคอนได้ออกไซด์ จึงถูกใช้เป็นหน้ากาก (mask) เพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของผลึกฐานรอง โดยความหนาของชั้นซิลิคอนได้ออกไซด์ ที่ใช้พิจารณาจากอุณหภูมิ เวลา และสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ความหนาของชั้น SiO₂ ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายอะตอมสารเจือในผลึกฐานรองซิลิกอน แสดงดังสมการที่ (2.43)

$$N(x,t) = N_s \operatorname{erfc}(x / \sqrt{4D_p t_p}) \quad (\text{ions/cm}^3) \quad (2.43)$$

- ซึ่ง N_s = ความเข้มข้นที่ผิว (cm^{-3})
 x = ระยะลึกของการแพร่สารเจือจากผิว (cm)
 D_p = ความสามารถในการแพร่ที่อุณหภูมิการแพร่เริ่มต้น (cm^2/sec)
 t_p = เวลาที่ใช้ในการแพร่เริ่มต้น (sec)

การหาค่าความเข้มข้น $N(x,t)$ ที่ความลึก x ภายหลังจากการแพร่เริ่มต้นเป็นเวลา t_p ต้องแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการที่ (2.43) สิ่งที่สำคัญ 2 ประการในการแพร่เริ่มต้น คือ ความลึกรอยต่อพี-เอ็น (X_j) ที่ได้จากการแพร่เริ่มต้น และจำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด (Q) ภายหลังจากแพร่ ซึ่ง

$$Q = N_s \sqrt{4D_p t_p} / \pi \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (2.44)$$

2.3.4.2 การขับลึก (Drive-in)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารเจือบริเวณผิวที่ได้จากขั้นตอนการแพร่เริ่มต้น แพร่ลงไปในเนื้อสารมากขึ้น ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นผลึกซิลิกอน แสดงดังสมการที่ (2.45)

$$N(x,t) = \left(Q / \sqrt{\pi D_d t_d} \right) \exp(-x^2 / 4D_d t_d) \quad (\text{ions/cm}^3) \quad (2.45)$$

- ซึ่ง Q = จำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด (cm^{-2})
 D_d = สัมประสิทธิ์การแพร่ในการขับลึก
 t_d = เวลาที่ใช้ในการขับลึก

ความลึกรอยต่อ ภายหลังจากทำการขับลึก โดยให้ $N(x,t) = N_B$ จะได้

$$X_j = \sqrt{4D_d t_d} \ln \left[Q / (N_B \sqrt{\pi D_d t_d}) \right] \quad (\text{cm}) \quad (2.46)$$

2.3.5 กระบวนการฝังประจุไอออน (Ion Implantation Process) [27]

เป็นกระบวนการทางวิศวกรรมวัสดุ โดยการเร่งประจุไอออนด้วยสนามไฟฟ้าและฝังเข้าไปยังเนื้อวัสดุที่ต้องการ กระบวนการนี้ถูกใช้เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางไฟฟ้า ฟิสิกส์ หรือเคมี กระบวนการฝังประจุไอออนถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำและการผลิตโลหะตลอดจนการประยุกต์ใช้งานในการวิจัยทางวัสดุศาสตร์

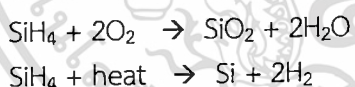
กระบวนการฝังประจุไอออนถูกใช้ในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ โดยไอออนของสารเจือที่นิยมใช้ได้แก่ โบรอน ฟอสฟอรัส หรืออาร์ซีนิก ซึ่งถูกผลิตจากแหล่งกำเนิดจากแก๊สที่มีความบริสุทธิ์สูง ภายหลังจากการฝังประจุในสารกึ่งตัวนำ อะตอมสารเจือจะสร้างประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำภายหลังจากแอนนیل (annealing) โพลีถูกสร้างจากสารเจือชนิดพีและอีเล็กตรอนถูกสร้างจากสารเจือชนิดเอ็น โดยกระบวนการฝังประจุไอออนถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ทางแสงในปี 1970

2.3.6 กระบวนการสกัด (Etching)

ภายหลังจากการสร้างลวดลายของน้ำยาไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี บางส่วนของวัสดุ เช่น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นซิลิคอนไนไตรด์ จะถูกสกัดออกไปด้วยกระบวนการสกัด วิธีการสกัดที่นิยมกันโดยทั่วไปคือการใช้สารเคมี และสกัดด้วยพลาสมา[28] ทั้งสองกรณีให้ผลลัพธ์คล้ายกันคือการสกัดจะหยุดลงที่ขอบด้านล่างของชั้นฟิล์มที่ต้องการสกัดออก ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการสกัดและเวลา ในการสกัดรูปทรงที่ละเอียดนิยมใช้การสกัดด้วยพลาสมามากกว่าการใช้สารเคมี โดยทั่วไปใช้สารละลายของ HF-HNO₃ สำหรับการสกัดซิลิคอน HF สำหรับซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้ H₃PO₄ ร้อนสำหรับซิลิคอนไนไตรด์ และ H₃PO₄ เย็น สำหรับสกัดโลหะอลูมิเนียม ก๊าซที่ใช้ทำพลาสมามักใช้ฟลูโอโรไนหรือคลอรีน เช่น CF₄

2.3.7 กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มด้วยไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition-CVD) [29]

CVD ถูกใช้เพื่อสร้างชั้นฟิล์มของวัสดุบนแผ่นฐานรองซิลิคอน เช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ ซิลิคอนไนไตรด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป (Polycrystalline Silicon) กระบวนการทาง CVD ปกติกระทำที่อุณหภูมิช่วง 300 - 900 °C และโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีดังนี้



ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างด้วยกระบวนการนี้จะไม่เชื่อมติดแน่นกับผิวซิลิคอนเหมือนกับการสร้างด้วยกระบวนการความร้อน ทั้งยังมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าอีกด้วย ดังนั้นจึงถูกใช้แทนในบางกรณีที่ไม่สามารถสร้างจากความร้อนหรือใช้เป็นชั้นฉนวนบนซิลิคอน ด้วยการใช้พลังงานพลาสมา และปฏิกิริยาเคมีภายใต้อุณหภูมิต่ำเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ ใช้อุณหภูมิต่ำเพียง 300 °C เท่านั้น[27]

2.3.8 กระบวนการทางโลหะ (Metallization)

ภายหลังจากสร้างอุปกรณ์ตามลำดับขั้นตอนต่างๆจนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงแยกกันอยู่ในสภาพที่ยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเชื่อมต่อส่วนต่างๆของอุปกรณ์เข้าด้วยกันตามรูปแบบโครงสร้างที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ทำงานตามหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนการเชื่อมต่อส่วนต่างๆของอุปกรณ์ด้วยโลหะ เรียกว่า กระบวนการทางโลหะ (Metallization) สำหรับการเลือกโลหะที่ใช้เคลือบบนแผ่นซิลิคอน

เพื่อให้เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกหรือแถบความนำต่อเชื่อมภายใน (Interconnector) ของวงจรรวมควรมีคุณสมบัติ เช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีค่าความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำภายนอกได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) ทอง (Au) และเงิน (Ag) เป็นต้น

เทคนิคในกระบวนการทางโลหะ มีหลายอย่างด้วยกัน เช่น การระเหยด้วยไส้ความร้อน (Filament Evaporation) การสปัตเตอริง (Sputtering) ภายหลังจากทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอน และทำการโฟโตลิโทกราฟีแล้ว จะได้ลวดลายของวงจรรวมตามที่ต้องการไว้ โดยอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำเชื่อมต่อ และก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มมิกขึ้น แต่รอยสัมผัสนี้อาจไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องทำการซินเตอร์ริง (sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสเป็นโอห์มมิกที่สมบูรณ์และไม่เปลี่ยนแปลงต่อสภาพแวดล้อมโดยง่าย

2.3.9 กระบวนการเก็บบรรจุ (Packaging)

การเก็บบรรจุเป็นกระบวนการป้องกันความเสียหายของชิ้นงาน อันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกหรือสารเคมีภายนอก นอกจากนี้ยังช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นขณะใช้งานได้ด้วย ซึ่งการเก็บบรรจุเป็นกระบวนการต่อเนื่องจากกระบวนการแอสเซมบลี (Assembly processing) โดยการนำแผ่นซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการสร้างไปตัดแบ่งเพื่อแยกตัวอุปกรณ์วงจรรวมออกเป็นชิ้นๆ ที่เรียกว่า ไดซ์ (dice) หรือชิพ จากนั้นจึงนำเอาชิพไปติดตั้งบนฐานรอง และต่อสายออกมายังขาที่ฐานรอง เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน เมื่อเสร็จจากการแอสเซมบลี จึงนำไปทำการเก็บบรรจุปิดผนึกให้แน่น และนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆต่อไป

2.4 ความบกพร่องในโครงสร้างผลึก (Defect in Crystals) [30]

2.4.1 โครงสร้างของสารของแข็ง

สารของแข็งหรือวัสดุสถานะของแข็ง (solid state materials) เกิดขึ้นได้โดยการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมจำนวนมากมายของธาตุ แต่ละอะตอมจะเกาะเกี่ยวกันอย่างแข็งแรง ลักษณะการเรียงตัวของอะตอมภายในสารของแข็งและรูปแบบการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอม จะมีผลไปถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารของแข็งนั้นด้วย อาจพิจารณาจัดแบ่งลักษณะโครงสร้างของสารของแข็ง ตามลักษณะการเกาะเกี่ยวและการเรียงตัวของอะตอมได้เป็น 2 ประเภท คือ

- ก. โครงสร้างแบบอผลึก (non crystalline) หรืออสัณฐาน หรืออะมอร์ฟัส (amorphous)
- ข. โครงสร้างแบบผลึก (crystalline)

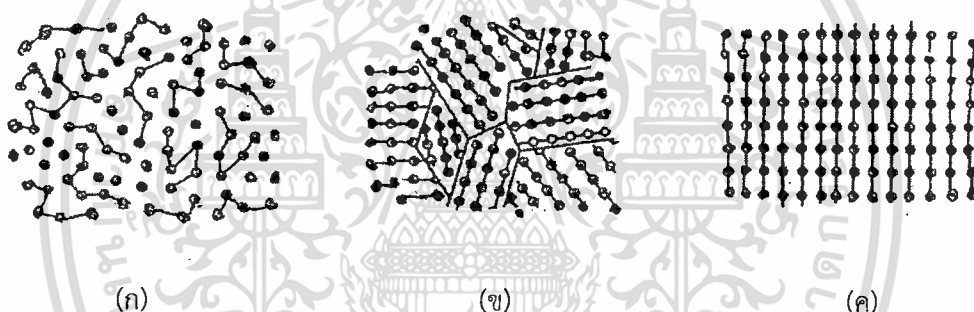
2.4.1.1 อสัณฐาน หรือ อะมอร์ฟัส (amorphous)

อสัณฐาน หรือ อะมอร์ฟัส หมายถึงลักษณะโครงสร้างของสารของแข็ง ซึ่งมีการจัดเรียงของอะตอมเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน อะตอมต่างๆจะเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายไร้รูปแบบ และไม่มีตำแหน่งที่อยู่ที่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ก) ทำให้วัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่แน่นอน เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อม ซึ่งไม่สามารถจะควบคุมได้ จึงไม่เหมาะสมหรือไม่สามารถที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัย และทดลองสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำแบบอะมอร์ฟัสกันอย่างกว้างขวาง คือ มีสิ่งประดิษฐ์บางชนิดสามารถสร้างจากอะมอร์ฟัสได้ แต่คุณภาพหรือประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ จะต้องได้รับการพัฒนาต่อไป ดังนั้นการผลิตในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่ใช่เป็นที่นิยม และจุดเด่นของวัสดุประเภทนี้ก็คือ การใช้ต้นทุนในการสร้างต่ำ เพราะไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทำให้วัสดุเป็นผลึก ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์จากอะมอร์ฟัส ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบางของอะมอร์ฟัสซิลิคอน เป็นต้น

2.4.1.2 ผลึก (Crystalline)

ผลึก หมายถึง สารของแข็งที่มีลักษณะโครงสร้างภายใน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างมีระเบียบ มีรูปแบบที่แน่นอน โดยอะตอมต่างๆจะมีตำแหน่งที่อยู่แน่นอน ในทางปฏิบัติจะหาผลึกที่สมบูรณ์แบบร้อยเปอร์เซ็นต์ได้ยาก เพราะอย่างไรก็ตาม มักจะเกิดความบกพร่อง (defect) หรือจุดตำหนิ บ้างไม่มากนักน้อย ทำให้ความเป็นระเบียบของอะตอมสูญเสียไป ความบกพร่องมีหลายลักษณะ และมีสาเหตุการเกิดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.20 ลักษณะโครงสร้างภายในของสารของแข็งโดยพิจารณาความเป็นระเบียบในการจัดเรียงอะตอม (ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (poly crystalline) และ (ค) ผลึกรูปเดียว (single crystalline)

ดังนั้นจึงแบ่งวัสดุสารของแข็งที่เป็นผลึกออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) ผลึกไม่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีความบกพร่องเป็นจำนวนมาก หรือมีลักษณะของผลึกแต่ไม่ต่อเนื่อง หรือมีความเป็นระเบียบน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ข) วัสดุดังกล่าวนิยมเรียกกันว่า ผลึกโพลีคริสตัล (Poly Crystalline) หรือผลึกหลายรูป

ข) ผลึกที่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีความบกพร่อง หรือตำหนิมีจำนวนน้อย อะตอมส่วนใหญ่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีรูปแบบที่แน่นอนเหมือนกันทั้งหมด ผลึกชนิดนี้นิยมเรียกกันว่า ผลึกรูปเดียว (Single Crystalline) ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ค)

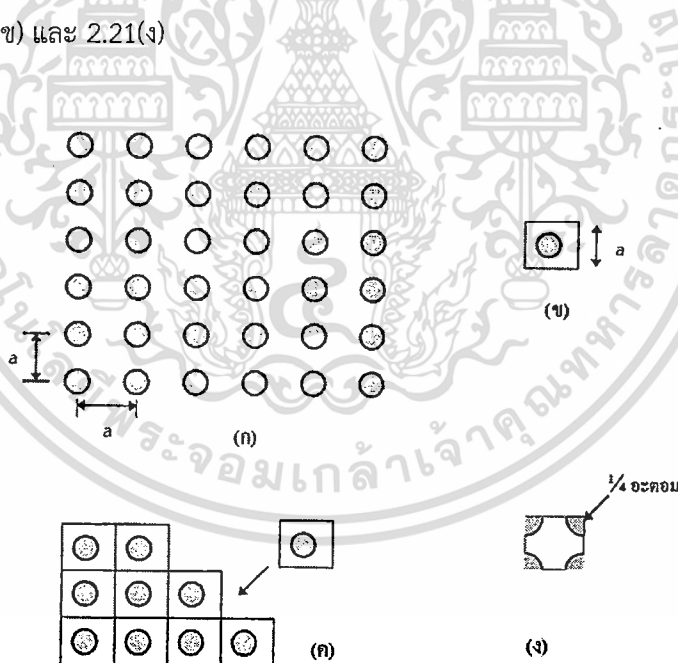
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ส่วนมากที่ใช้งานกันในปัจจุบัน สร้างมาจากผลึกรูปเดียวของซิลิคอน และอาจมีบ้างที่ใช้ผลึกหลายรูป เพื่อการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของสิ่งประดิษฐ์ เช่น การนำเอาผลึกหลายรูปของซิลิคอน หรือเรียกง่าย ๆ ว่า โพลีซิลิคอน สร้างเป็นส่วนเกต (gate) ของทรานซิสเตอร์ประเภทมอส (MOS Transistor) เป็นต้น

2.4.2 โครงสร้างผลึก

ในผลึกสารของแข็งใดๆ อะตอมจะเกาะเกี่ยวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยมีรูปแบบการเรียงตัวเป็นลักษณะหนึ่งๆโดยเฉพาะ ผลึกสารของแข็งแต่ละชนิด อาจมีรูปแบบของผลึกที่เหมือนกันหรือไม่ก็ได้ แต่ผลึกสารของแข็งชนิดเดียวกัน จะต้องมรูปแบบที่เหมือนกัน รูปแบบมาตรฐานของการจัดเรียงตัวของอะตอมของผลึกสารของแข็งมีหลายรูปแบบ การกำหนดระนาบ (plane) และทิศทาง (direction) ของผลึกนิยมแสดงด้วยตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ซึ่งจะให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน และสะดวกที่จะใช้เพื่อการอธิบาย อ้างอิง หรือเปรียบเทียบ โครงสร้างของผลึกได้อย่างถูกต้องและชัดเจน

2.4.2.1 ยูนิทเซลล์ หรือหน่วยเซลล์ (Unit cell)

คำว่า ยูนิทเซลล์ หรือ หน่วยเซลล์ หมายถึงส่วนที่เล็กที่สุดหรือส่วนที่เล็กที่สุดของผลึกที่มีความสมบูรณ์ และสามารถแสดงรูปแบบของผลึกได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผลึกสารของแข็งจึงถูกพิจารณาได้ว่า ประกอบขึ้นมาจากหน่วยเซลล์เล็กๆเหล่านี้ จำนวนมากมายมาเรียงต่อกันอย่างต่อเนื่อง รูปที่ 2.21(ก) ซึ่งเป็นรูปแสดงการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ และต่อเนื่องในลักษณะ 2 มิติ ภาพลักษณะนี้ถูกเรียกว่า แลททิซของผลึก (crystal lattice) วงกลมแสดงแกนของอะตอม ซึ่งแต่ละอะตอมจะอยู่ห่างจากกันเป็นระยะ a หรือก็คือ ระยะห่างระหว่างอะตอม (atomic spacing) หรือบางครั้งนิยมเรียกว่า ค่าคงตัวของแลททิซ (lattice constant) เพื่อที่จะอธิบายคุณสมบัติแลททิซเหล่านี้ อาจใช้หน่วยเซลล์ของแลททิซนี้ มาแสดงแทนแลททิซทั้งหมด ซึ่งในที่นี้ ลักษณะของยูนิทเซลล์แสดงดังในรูปที่ 2.21(ข) และ 2.21(ง)

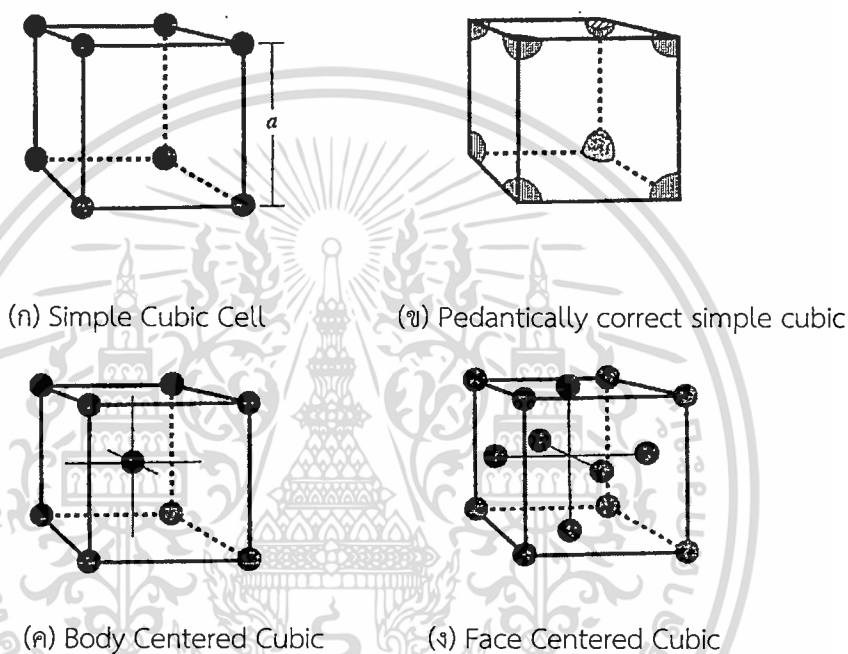


รูปที่ 2.21 ลักษณะรูปแบบของผลึก ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของยูนิทเซลล์ จำนวนมากมาย

- (ก) ลักษณะของแลททิซ
- (ข) หนึ่งยูนิทเซลล์ของแลททิซ
- (ค) การเรียงตัวของยูนิทเซลล์ เพื่อประกอบเป็นผลึกหรือแลททิซที่สมบูรณ์
- (ง) ลักษณะของยูนิทเซลล์อีกรูปแบบหนึ่ง

2.4.2.2 ยูนิตเซลล์ 3 มิติ

ในทางปฏิบัติ ผลึกสารกึ่งตัวนำ จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติ ดังนั้นเพื่อความเข้าใจที่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องอธิบายลักษณะของยูนิตเซลล์ในลักษณะ 3 มิติ (3D unit cells) จากลักษณะของผลึกที่มีรูปแบบของแลททิซ เมื่อเขียนเป็นรูป 3 มิติ จะได้ดังในรูปที่ 2.22(ก) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของผลึกรูปแบบนี้ เรียกว่า เซลล์ลูกบาศก์พื้นฐาน (Simple Cubic Cell) โดยมีอะตอมอยู่ที่มุมทุกมุมของรูปลูกบาศก์ ยูนิตเซลล์ของแลททิซนี้ในลักษณะ 3 มิติ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.22(ข) ซึ่งจะเห็นว่าภายในกรอบหรือขอบเขตของลูกบาศก์นี้ที่มุมทุกมุม จะมีเพียง $1/8$ ของอะตอมเท่านั้นที่บรรจุอยู่ภายในกรอบของยูนิตเซลล์นี้



รูปที่ 2.22 ลักษณะของแลททิซแบบ 3 มิติ (ก) แบบ Simple Cubic Cell

(ข) ยูนิตเซลล์ของแลททิซแบบ Simple Cubic Cell ที่ถูกต้อง

(ค) แบบ Body Centered Cubic (ง) แบบ Face Centered Cubic

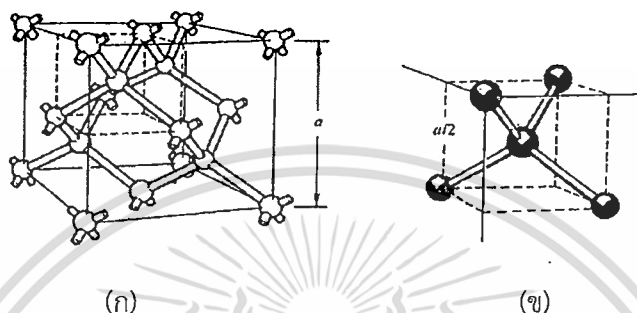
ดังนั้น หนึ่งยูนิตเซลล์ ประกอบด้วยจำนวนอะตอมเท่ากับ $1/8 \times 8 = 1$ อะตอม และเมื่อนำยูนิตเซลล์เหล่านี้มาเรียงกันอย่างต่อเนื่อง และเป็นระเบียบ กระจายออกไปทุกทิศทุกทาง จะทำให้ได้โครงสร้างของแลททิซ มีลักษณะเป็นผลึกแบบ เซลล์ลูกบาศก์พื้นฐาน ดังในรูปที่ 2.22(ก)

นอกจากนี้แล้วยังมีโครงสร้างของผลึกรูปแบบอื่นๆ อีกหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.22(ค) และ 2.22(ง) คือ โครงสร้างแบบ Body Centered Cubic และแบบ Face Centered Cubic ตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างแบบ Body Centered Cubic หนึ่งยูนิตเซลล์ จะประกอบด้วยนี้้อะตอม 2 อะตอมและกรณีแบบ Face Centered Cubic จะต้องใช้นี้้อะตอมถึง 4 อะตอม เป็นต้น

2.4.3 โครงสร้างผลึกเพชร

ลักษณะโครงสร้างผลึก หรือแลททิซของวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว เช่น ซิลิคอน หรือเยอรมานียม ในลักษณะ 3 มิติ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.23(ก) ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้ถูกเรียกว่า

โครงสร้างผลึกเพชร (Diamond structure) ลักษณะของยูนิตเซลล์ จะพบว่ามียะตอมอยู่ที่จุดมุมของกล่องลูกบาศก์ทุกมุม นอกจากนี้ตรงกลางของด้านทุกด้านก็จะมีอะตอมอยู่เช่นกัน และภายในกล่องลูกบาศก์นี้จะมีอะตอมอยู่ในอีก 4 อะตอม ดังในรูปที่ 2.23(ก) แต่ละอะตอมจะเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.23(ข) ซึ่งผลึกสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่จะประกอบด้วยยูนิตเซลล์เล็กๆ เหล่านี้จำนวนมากมายเรียงกันอย่างเป็นระเบียบออกไปในทุกๆ ด้าน



รูปที่ 2.23 (ก) หนึ่งยูนิตเซลล์ของโครงสร้างเพชร และ (ข) ภาพขยายส่วนมุมของยูนิตเซลล์ ซึ่งเป็นการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมหนึ่งกับ 4 อะตอมข้างเคียง

2.4.4 พันธะอะตอม [31]

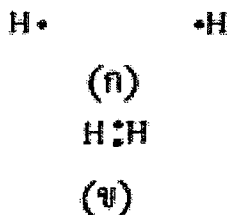
การก่อตัวเป็นของแข็ง เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอะตอมและใช้พลังงานรวมน้อยที่สุดจะขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอม ชนิดของพันธะ ถ้าพันธะระหว่างอะตอมไม่แข็งแรงพอ ก็ไม่สามารถรวมกันก่อตัวเป็นของแข็งขึ้นมาได้ ซึ่งอาจแบ่งรูปแบบพันธะอะตอมเป็น 4 แบบคือ

2.4.4.1 พันธะไอออนิก

ธาตุในหมู่ 1 ของตารางธาตุ มีแนวโน้มที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจึงกลายเป็นประจุบวก ขณะที่ธาตุหมู่ 4 มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนและตัวมันจะกลายเป็นประจุลบ ประจุที่ตรงกันข้ามจะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และทำให้เกิดพันธะที่เรียกว่า พันธะไอออนิก ถ้าไอออนมีความใกล้เคียงกันมากจะเกิดแรงผลักรันและทำให้เกิดการจัดระยะที่สมดุลเกิดขึ้นระหว่างสองไอออนในผลึก ไอออนประจุลบมีแนวโน้มที่จะถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุบวก และไอออนประจุบวกมีแนวโน้มที่จะถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุลบ ดังนั้นโครงข่ายต่างๆกันเป็นเครือข่ายของอะตอมเหล่านี้จะสร้างเป็นแลตทิซขึ้นมา ตัวอย่างของพันธะไอออนิก ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

2.4.4.2 พันธะโควาเลนต์

แรงปฏิกิริยาระหว่างอะตอมมีแนวโน้มที่จะก่อตัวทำให้พลังงานวาเลนซ์ให้เข้ามาอยู่ใกล้กัน เรียกว่าพันธะโควาเลนต์ ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน ไฮโดรเจนมีอิเล็กตรอนหนึ่งตัวและต้องการอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัว เพื่อทำให้พลังงานวงนอกสุดเต็ม ในรูปที่ 2.24(ก) แสดงถึงอะตอมของไฮโดรเจนขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาแก่กัน และรูปที่ 2.24(ข) แสดงโมเลกุลไฮโดรเจนภายหลังที่ยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งพันธะโควาเลนต์เป็นพันธะที่ทำให้อิเล็กตรอนระหว่างอะตอมสามารถใช้ร่วมกันได้ เพื่อที่จะให้ระดับพลังงานวาเลนซ์ของอะตอมแต่ละอะตอมมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม



รูปที่ 2.24 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของไฮโดรเจน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลไฮโดรเจน

อะตอมของธาตุหมู่ 4 ของตารางธาตุ เช่น ซิลิคอน และเยอรมาเนียม มีแนวโน้มที่จะสร้างพันธะโควาเลนต์ขึ้น แต่ละธาตุเหล่านี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสี่ตัว และต้องการอิเล็กตรอนอีกสี่ตัว เพื่อให้พลังงานวาเลนซ์เต็ม ถ้าอะตอมซิลิคอนมีอะตอมใกล้เคียงสี่ตัว แต่ละอะตอมข้างเคียงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ใช้ร่วมกันอยู่อีกสี่ตัว ดังนั้นอะตอมจะมีผลเหมือนกับว่ามีอิเล็กตรอนอยู่แปดตัวที่ระดับพลังงานวงนอกสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.25(ก) ซึ่งแสดงถึงอะตอมซิลิคอนพร้อมกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนสี่ตัว ขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาแก่กัน และรูปที่ 2.25(ข) แสดงถึงพันธะในซิลิคอนที่เกิดพันธะโควาเลนต์แล้ว ซึ่งอะตอมตรงกลางมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ใช้ร่วมกันอยู่แปดตัว



รูปที่ 2.25 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในผลึกซิลิคอน

2.4.4.3 พันธะโลหะ

ธาตุหมู่ 1 นั้นจะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนหนึ่งตัว ถ้าอะตอมโซเดียมสองอะตอมนำมาใกล้กัน วาเลนซ์อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยาต่อกัน เพื่อจะสร้างพันธะขึ้นมา ของแข็งโซเดียมจะมีโครงสร้างแบบ body centered cubic โดยแต่ละอะตอมมีอะตอมข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแปดอะตอม ซึ่งแต่ละอะตอมใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจจะมองเป็นว่าออรบิทัลของโลหะถูกล้อมรอบด้วยทะเลของประจุลบของอิเล็กตรอน และของแข็งก็จะถูกยึดกันไว้ด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต

2.4.4.4 พันธะ Van Der Waals

เป็นพันธะที่อ่อนที่สุด เช่น โมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ที่ยึดกันด้วยพันธะระหว่างอออน ประจุรวมทั้งหมดของประจุบวกที่ศูนย์กลางของโมเลกุล จะไม่เท่ากับผลรวมของประจุลบที่ศูนย์กลางโมเลกุล จากการที่ไม่สมมาตรกันของการกระจายประจุนี้เองจะส่งผลให้เกิดไดโพล (dipole) เล็กๆ ขึ้น ซึ่งมีผลกระทบบต่อไดโพลของโมเลกุล HF อื่นๆ ด้วย ปฏิกริยาอย่างอ่อนที่ยึดกันไว้ระหว่างไดโพล จะก่อตัวเป็นของแข็งด้วยพันธะ Van der Waals ซึ่งจะมีคุณสมบัติคือ มีจุดหลอมเหลวต่ำ ในความเป็นจริงแล้วสารชนิดนี้ส่วนมากจะมีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้องเสียส่วนใหญ่

2.4.5 ความไม่สมบูรณ์และสิ่งแปลกปลอมในของแข็ง

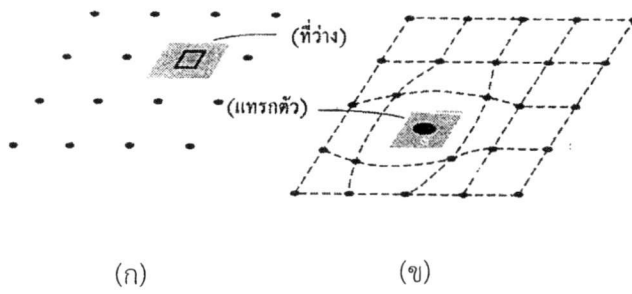
ในความเป็นจริง แลททิซจะไม่สมบูรณ์ทั้งหมด แต่จะมีความไม่สมบูรณ์หรือความบกพร่องอยู่ ความไม่สมบูรณ์มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร และในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความบกพร่องและสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้

2.4.5.1 ความไม่สมบูรณ์ในของแข็ง

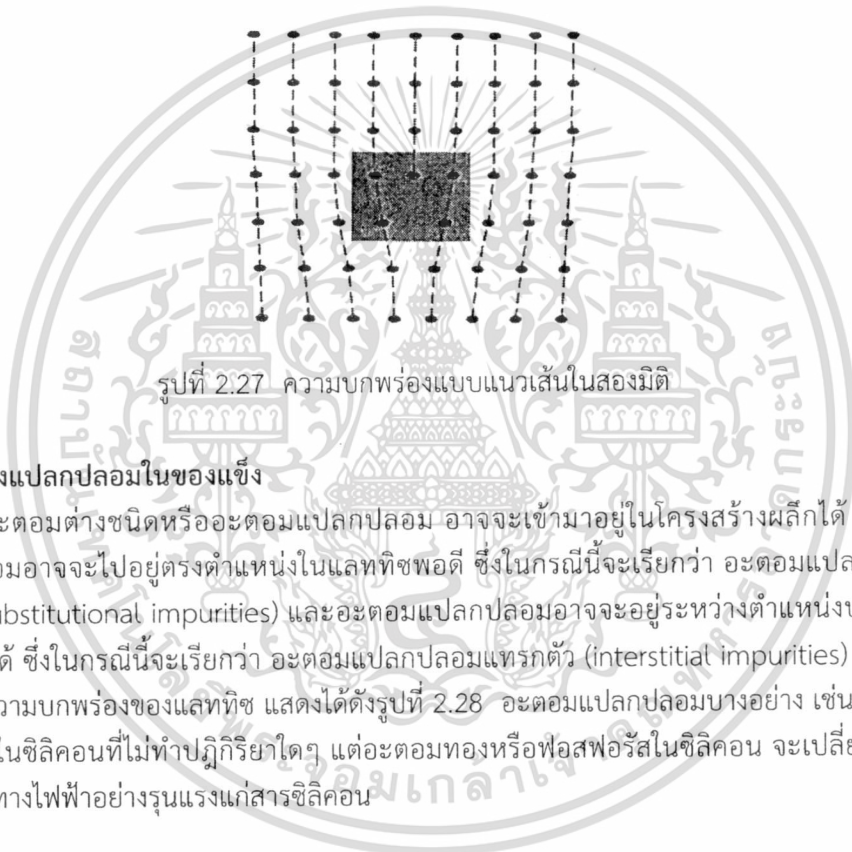
ความไม่สมบูรณ์ชนิดหนึ่งที่ผลึกทั้งหลายจะมีเหมือนกันคือ การสั่นของอะตอมเนื่องจากความร้อน โดยปกติผลึกรูปเดี่ยวที่สมบูรณ์ จะประกอบด้วยอะตอมอยู่ตรงตำแหน่งที่แน่นอนในแลททิซ อะตอมจะถูกแยกกันด้วยระยะระยะหนึ่ง ซึ่งสมมุติว่ามีค่าคงที่ค่าหนึ่ง อะตอมในผลึกจะมีพลังงานความร้อนค่าหนึ่ง ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ พลังงานความร้อนนี้เป็นสาเหตุทำให้อะตอมสั่นในลักษณะที่ไม่เป็นแบบแผนจากจุดบนแลททิซที่สภาวะสมดุล การเคลื่อนที่แบบไม่เป็นแบบแผนนี้เป็นสาเหตุให้ระยะห่างระหว่างอะตอมไม่คงที่ ทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์ที่จะเกิดขึ้นได้เล็กน้อย ความไม่สมบูรณ์แบบนี้เรียกว่า การสั่นของแลททิซ (lattice vibration) จะมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ความไม่สมบูรณ์อีกชนิดหนึ่งเรียกว่า ความบกพร่องแบบจุด (point defect) มีหลายรูปแบบที่ต้องพิจารณา ผลึกในความจริงนั้น อะตอมอาจจะหายไปจากตำแหน่งในแลททิซ ความบกพร่องนี้เรียกว่า ที่ว่าง (vacancy) ดังแสดงในรูปที่ 2.26(ก) อีกกรณีหนึ่งอะตอมอาจจะวางตัวที่ตำแหน่งระหว่างตำแหน่งความบกพร่องที่เรียกว่า การแทรกตัว (interstitial) ดังแสดงในรูปที่ 2.26(ข) ในกรณีความบกพร่องแบบที่ว่าง และความบกพร่องแบบแทรกตัว ไม่เพียงแต่จะทำให้โครงสร้างเสียหาย พันธะเคมีจะถูกทำลายด้วย และมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร ช่องว่างและการแทรกตัวอาจแสดงปฏิกริยาต่อกันระหว่างความบกพร่องทั้งสอง และทำให้เกิดผลที่แตกต่างไปจากความบกพร่องแบบช่องว่างและความบกพร่องแบบแทรกตัว เป็นที่รู้จักกันว่าความบกพร่อง Frenkel

ความบกพร่องจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับอะตอมหรือตำแหน่งของอะตอม ในระหว่างการก่อตัวของผลึกรูปเดี่ยว จะทำให้เกิดความบกพร่องขึ้นจำนวนมาก ความบกพร่องตามแนวเส้นจะปรากฏเมื่อแถวของอะตอมเรียงตัวผิดพลาดจากตำแหน่งที่ควรอยู่ในแลททิซ ความบกพร่องนี้เรียกว่า ความบกพร่องแบบแนวเส้น (line defect) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 เช่นเดียวกับความบกพร่องแบบจุด ความบกพร่องแบบแนวเส้นจะทำลายทั้งโครงสร้างปกติของแลททิซและพันธะอะตอมในผลึก ความบกพร่องนี้จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้



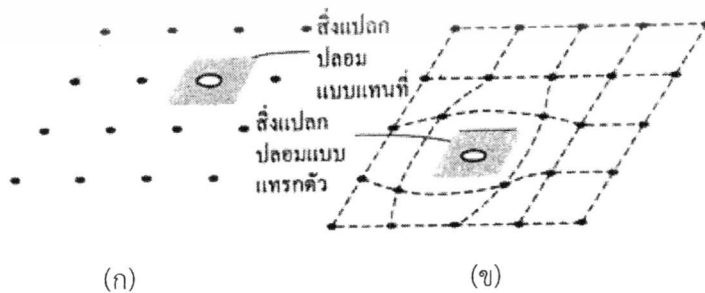
รูปที่ 2.26 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) ความบกพร่องแบบช่องว่าง และ (ข) ความบกพร่องแบบแทรกตัว



รูปที่ 2.27 ความบกพร่องแบบแนวเส้นในสองมิติ

2.4.5.2 สิ่งแปลกปลอมในของแข็ง

อะตอมต่างชนิดหรืออะตอมแปลกปลอม อาจจะเข้ามาอยู่ในโครงสร้างผลึกได้ อะตอมแปลกปลอมอาจจะไปอยู่ตรงตำแหน่งในแลตทิซพอดี ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่า อะตอมแปลกปลอมแทนที่ (substitutional impurities) และอะตอมแปลกปลอมอาจจะอยู่ระหว่างตำแหน่งปกติของแลตทิซก็ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่า อะตอมแปลกปลอมแทรกตัว (interstitial impurities) ทั้งสองกรณีคือ ความบกพร่องของแลตทิซ แสดงได้ดังรูปที่ 2.28 อะตอมแปลกปลอมบางอย่าง เช่น อะตอมออกซิเจนในซิลิคอนที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ แต่อะตอมทองหรือฟอสฟอรัสในซิลิคอน จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างรุนแรงแก่สารซิลิคอน



รูปที่ 2.28 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) สิ่งแปลกปลอมแบบแทนที่ และ (ข) สิ่งแปลกปลอมแบบแทรกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมปริมาณจำนวนอะตอมแปลกปลอมที่ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไปในทางที่ต้องการได้ เทคนิคที่จะนำอะตอมแปลกปลอมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำเพื่อเปลี่ยนความนำไฟฟ้าเรียกว่าการโด๊ป (doping) มีวิธีต่างๆไปของการโด๊ปอยู่สองวิธี คือ กระบวนการแพร่สารเจือ (diffusion) และกระบวนการฝังประจุไอออน (ion implantation)

2.5 การก่อกำเนิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Carrier of Generation and Recombination) [30]

2.5.1 นิยาม

การเกิดของพาหะ (Carrier Generation) หมายถึง กระบวนการซึ่งทำให้มีพาหะเกิดขึ้นใหม่ โดยจะเป็นการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (Recombination) หมายถึง กระบวนการตรงข้ามหรือย้อนกลับกับการเกิดของพาหะ กล่าวคือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับโฮล ทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนหายไป

2.5.2 การเกิดพาหะนำประจุ คู่อิเล็กตรอน-โฮล

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 K เช่น อุณหภูมิห้อง 300 K พลังงานความร้อน จะมีค่ามากกว่า ($>E_g$) ที่ จะกระตุ้นอิเล็กตรอนวาเลนซ์บางส่วนที่อยู่ในพันธะโควาเลนต์ ให้สามารถเอาชนะพลังงานที่ อิเล็กตรอนถูกยึดเหนี่ยวไว้จากนิวเคลียส และหลุดออกมาจากพันธะได้ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การ แตกของพันธะ (Bond breaking) อิเล็กตรอนวาเลนซ์จะหลุดออกไปจากพันธะกลายเป็น อิเล็กตรอนนำไฟฟ้า (Conduction electron) มีคุณสมบัติคล้าย อิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) เคลื่อนที่อยู่นในแลตทิซของสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.29(ก) เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกมาจาก พันธะ ก็จะทำให้เกิดที่ว่างขึ้นในพันธะที่แตกออกนั้น

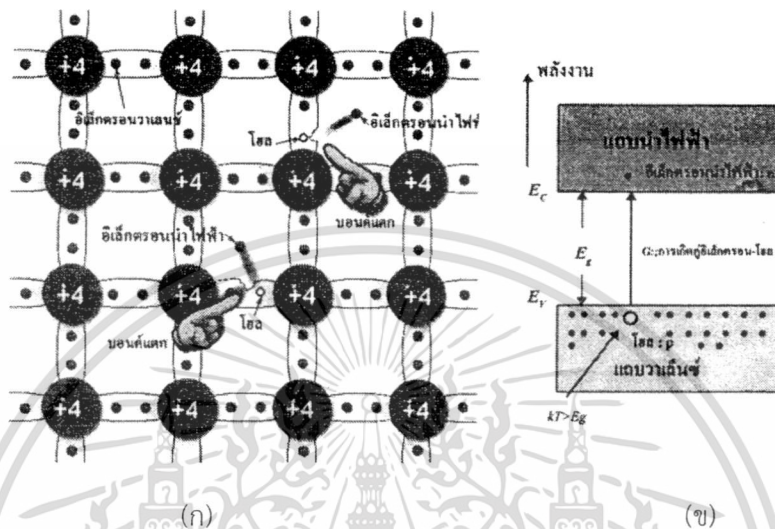
ซึ่งว่างดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า โฮล (Hole) และมีสภาพเป็นพาหะนำประจุ โดยมีประจุไฟฟ้า เท่ากับอิเล็กตรอน แต่เป็นประจุชนิดบวก (+q) สามารถนำไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับอิเล็กตรอนอิสระ และ โฮลจะเคลื่อนที่ที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์ ทุกครั้งที่พันธะแตกออก จะได้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮล 1 คู่ เรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pair : EHP)

การเกิดพาหะอิเล็กตรอน-โฮล โดยการกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอกนี้ถูกเรียกว่า การ เกิดพาหะ (Carrier Generation) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานความร้อนมีค่ามากขึ้น จะทำให้การแตก ของพันธะโควาเลนต์มีจำนวนมากขึ้น ความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้า อิเล็กตรอน และโฮล จึงมีค่า เพิ่มขึ้นมากด้วย ดังนั้นความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงมีค่าเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ คุณสมบัตินี้ถูก เรียกว่า ความนำไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน (Thermal conductivity)

นอกจากพลังงานจากความร้อนแล้ว พลังงานโฟตอน (Photon) จากแสง ก็สามารถทำให้เกิด พาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล ได้เช่นกัน เมื่อพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่า ($E=h\nu$) การเกิดพาหะเนื่องจาก แสงในสารกึ่งตัวนำนี้ถูกเรียกว่า การเกิดพาหะเนื่องจากแสง (Photon carrier generation)

การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากพลังงานจากภายนอก เมื่อพิจารณาจากรูปแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.29(ข) พบว่าพลังงานจากภายนอก เช่น ความร้อน (kT) หรือโฟตอน ($h\nu$) ที่มีค่า มากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (E_g) จึงสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดด ข้ามช่องว่างพลังงาน ขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า มีสภาพเป็นอิสระ และ

ซึ่งทำให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งเรียกว่าโฮล เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนเปลี่ยนไปอยู่ที่ระดับที่สูงขึ้น ในทางตรงข้ามกรณีของโฮล ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าชนิดบวก เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น โฮลจะเคลื่อนที่ลดระดับต่ำลง เพราะพลังงานของโฮลเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน



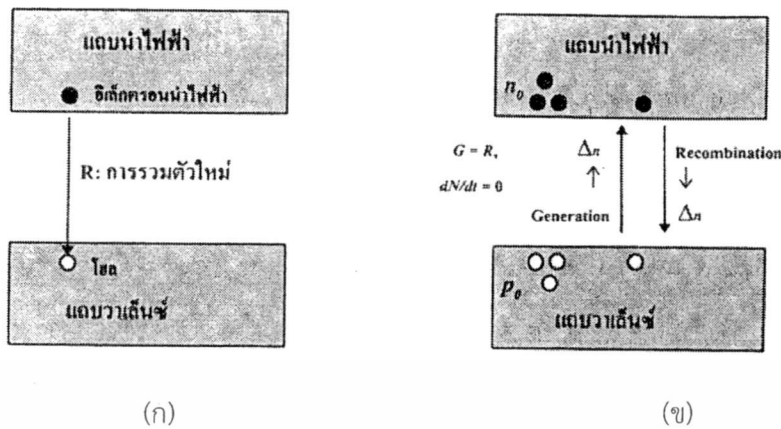
รูปที่ 2.29 การเกิดคู่วาเลนซ์อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากการกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก หรือ $T > 0\text{ K}$ (ก) แบบจำลองพันธะโคเวเลนต์ (ข) แบบจำลองแถบพลังงาน

2.5.3 ภาวะสมดุลความร้อน (Thermal equilibrium)

จากการที่อิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นพร้อมๆกัน และเกิดเป็นคู่ๆ ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจึงมีค่าเท่ากัน สมการความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮล จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิ (T) และขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงาน (E_g) ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะมีค่าคงที่ นั่นคือ ในทุกๆวินาทีจะมีคู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ดังนั้นถ้าพิจารณาว่า สารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานความร้อนคงที่อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานๆ เหตุใดความหนาแน่นของพาหะจึงไม่ได้เพิ่มขึ้น ทั้งๆที่คู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ได้รับความร้อน แต่กลับพบว่า ความหนาแน่นของพาหะมีค่าคงที่ คำตอบคือ ในเวลาเดียวกันกับที่มีการเกิดพาหะนั้น ก็มีปรากฏการณ์ การรวมตัวใหม่ (Recombination) ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.30(ก) คือ จะมีอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้า ลดระดับพลังงาน กลับลงไปรวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนและโฮลลดลง พลังงานของอิเล็กตรอนที่ลดลงหรือหายไป คือพลังงานที่สูญเสียไป เนื่องจากการชนกับแลตทิซในผลึก ยิ่งความหนาแน่นของพาหะเพิ่มมากขึ้น อัตราการรวมตัวก็เพิ่มขึ้น และในที่สุด อัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ (R : Recombination Rate) จะมีค่าเท่ากับ อัตราการเกิด (G : Generation Rate) ดังแสดงในรูปที่ 2.30(ข) จึงเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นของพาหะมีค่าคงที่ เพราะจำนวนอิเล็กตรอน (โฮล) ที่เกิดขึ้น จะเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอน (โฮล) ที่หายไปเพราะการรวมตัวใหม่ เรียกสภาวะนี้ว่า ภาวะสมดุลความร้อน (Thermal equilibrium)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 (ก) การรวมตัวใหม่ (recombination) ของอิเล็กตรอน-โฮล
 (ข) ในภาวะสมดุลความร้อน ความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าคงที่

ดังนั้นภาวะสมดุลความร้อน หมายถึง ภาวะที่ความหนาแน่นของพาหะมีค่าคงที่ เนื่องจากอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเกิดขึ้นพร้อมกัน กระบวนการทั้งสองนี้เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกัน และถูกเรียกว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (Recombination-Generation Process) บางครั้งเรียกสั้นๆว่า กระบวนการ R-G (R-G Process)

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ ในภาวะสมดุลความร้อน ที่อุณหภูมิ T ใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และรวมตัวกันอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน จึงทำให้ความหนาแน่นของพาหะมีค่าคงที่

ในสารตัวนำเอ็กทรินซิก ความหนาแน่นของพาหะถูกกำหนดด้วยปริมาณของอะตอมสารเจือและความหนาแน่นของอินทรินซิก แต่ในภาวะสมดุลความร้อน อัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะต้องมีค่าเท่ากัน และสมการตามกฎของแมสแอคชั่น คือ

$$n \cdot p = n_i^2 \tag{2.47}$$

ในขณะที่สารกึ่งตัวนำถูกรบกวน เช่น มีการกระตุ้นด้วยพลังงานภายนอก ได้แก่ ความร้อนหรือแสง หรือสนามไฟฟ้า และไม่อยู่ในภาวะสมดุล สมการแมสแอคชั่นไม่สามารถใช้ได้ เพราะความหนาแน่นของพาหะมีการเปลี่ยนแปลง แต่ในที่สุดระบบก็พยายามจะเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน เช่นเดิม ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการทำให้เกิดพาหะส่วนน้อยเพิ่มขึ้นจากเดิม ที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งสารกึ่งตัวนำ ขณะนี้ภาวะสมดุลถูกรบกวน แต่ระบบจะพยายามกลับคืนสู่ภาวะสมดุล โดยอัตราการรวมตัวใหม่ มีค่าสูงกว่าอัตราการเกิดของพาหะ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในภาวะไม่สมดุลอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่จะไม่เท่ากัน เนื่องจากระบบพยายามจะกลับคืนสู่ภาวะสมดุลนั่นเอง เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว อัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวก็จะมีค่าเท่ากันอีกครั้ง

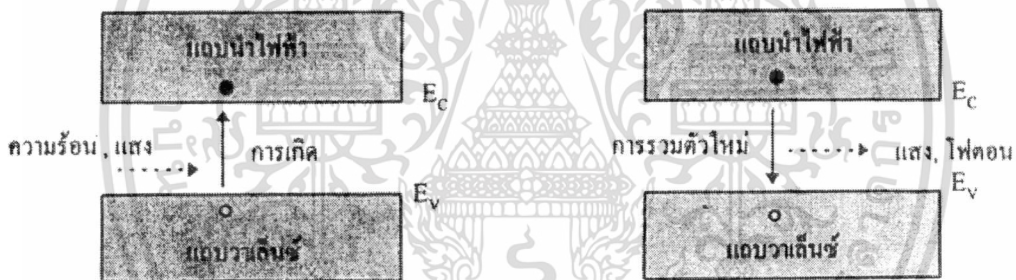
2.5.4 กระบวนการ R-G (Recombination - Generation Process)

โดยทั่วไป กระบวนการ R-G ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ อาจพิจารณาจัดแบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4.1 กระบวนการ R-G โดยตรง (Direct R-G Process)

เป็นกระบวนการก่อเกิดและรวมตัวใหม่ของพาหะ ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง (Direct Band Gap Semiconductor) เช่น สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบกลุ่ม III-V ได้แก่ แกลเลียมอาเซไนด์ แกลเลียมฟอสไฟด์ และอินเดียมแอนติโมนายด์ ซึ่งลักษณะของ E-k Diagram จะแบ่งเป็นช่องแถบตรง การรวมตัวใหม่โดยตรงนี้ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอน (Photon) กระบวนการเกิดและการรวมตัวใหม่โดยตรง แสดงดังในรูปที่ 2.31 กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ ในแถบวาเลนซ์ ได้รับพลังงานมากพอจากความร้อนหรือแสง ซึ่งต้องมากกว่า E_g eV. อิเล็กตรอนจึงสามารถย้ายขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง ด้วยการข้ามช่องว่างพลังงาน (E_g) ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า การก่อเกิดพาหะโดยตรง (Direct Generation) ซึ่งเป็นลักษณะการย้ายที่อยู่จากแถบพลังงานแถบหนึ่งไปยังอีกแถบหนึ่ง ซึ่งบางครั้งเรียกว่า การเกิดพาหะจากแถบหนึ่งไปอีกแถบหนึ่ง (Band to Band Generation) ซึ่งจะทำให้ได้คู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้นในทางกลับกัน เมื่ออิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้า ลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การรวมตัวใหม่โดยตรง (Direct recombination) ซึ่งจะทำให้ อิเล็กตรอนอิสระ และโฮลหายไป คล้ายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะ กระบวนการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะเช่นนี้ถูกเรียกว่า กระบวนการ R-G โดยตรง



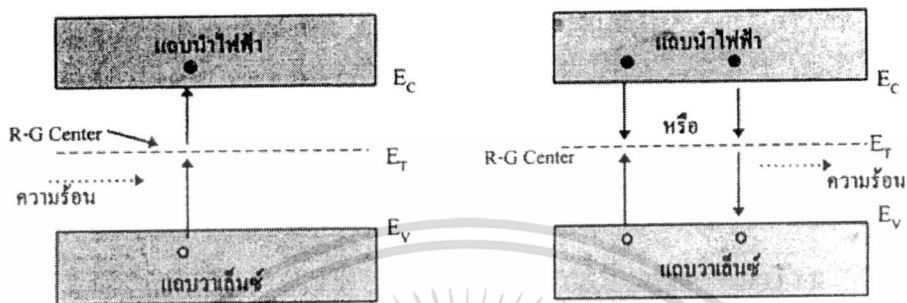
รูปที่ 2.31 (ก) การเกิดพาหะโดยตรง หรือ Band to Band Generation
(ข) การรวมตัวใหม่โดยตรง หรือ Band to Band Recombination

2.5.4.2 กระบวนการ R-G โดยอ้อม (Indirect R-G Process)

กระบวนการนี้เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง (Indirect band gap) เช่น ซิลิคอน เยอรมาเนียม โดยเมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ ได้รับพลังงานจะมีการย้ายระดับ แต่ไม่สามารถที่จะข้ามช่องว่างแถบพลังงาน E_g ไปยังแถบความนำไฟฟ้าได้โดยตรง แต่เกิดขึ้นเป็นสองขั้นตอน โดยในขั้นแรก อิเล็กตรอนจะอาศัยระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นที่พัก ก่อนที่จะข้ามต่อไปยังแถบนำไฟฟ้าในขั้นที่สอง ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า การก่อเกิดพาหะโดยอ้อม และในทางกลับกันการรวมตัวใหม่โดยอ้อมก็คือ กระบวนการย้อนกลับของการก่อเกิดพาหะโดยอ้อมนั่นเอง โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้า จะลดลงไปอยู่ที่ระดับพลังงานในช่องว่างพลังงานในขั้นแรก ก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ในขั้นที่สอง ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ถูกเรียกว่า การก่อเกิดและการรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ หรือ กระบวนการ R-G โดยอ้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่อะตอมซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอะตอมเยอรมาเนียมไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย ระดับพลังงานซึ่งช่วยให้เกิดกระบวนการ R-G แบบนี้ถูกเรียกว่า ศูนย์กลางการก่อกำเนิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะ (R-G Center) หรือบางครั้งก็เรียกว่า R-G แทรป (R-G Traps)



รูปที่ 2.32 (ก) การเกิดพาหะโดยอ้อม หรือ R-G Center Generation
(ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อม หรือ R-G Center Recombination

ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา และอาจมีผลให้มีการสั่นของแลตทิซได้ (Lattice vibration) การสั่นของแลตทิซจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน ซึ่งเรียกว่า โฟนอน (Phonon) ออกมาในที่สุด



รูปที่ 2.33 ตำแหน่งของระดับ R-G center ที่เกิดจากอะตอมสารเจือต่างๆในซิลิคอน

โดยทั่วไปแล้ว ระดับพลังงาน R-G center มักปรากฏอยู่บริเวณใกล้กับกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.33 เนื่องจากโอกาสของการรวมตัวใหม่จะมีค่าสูงสุดเมื่อระดับ R-G center อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานพอดี ซึ่งจะเห็นว่า แตกต่างจากระดับอะตอมสารเจือผู้ให้ และอะตอมสารเจือผู้รับ ซึ่งจะอยู่ใกล้กับขอบล่างของแถบนำไฟฟ้า (E_C) และขอบบนของแถบวาเลนซ์ ในทางปฏิบัติมีการเติมอะตอมของธาตุบางชนิดลงไปในสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้เกิดเป็นระดับ R-G center หรือระดับแทรป (Trap) ซึ่งใช้ช่วยควบคุมและทำให้อายุของพาหะส่วนน้อยในสารกึ่งตัวนำมีค่าลดลง ซึ่งมีผลเพิ่มอัตราเร็วในการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ในกรณีของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนนิยมใช้อะตอมทองคำและเหล็ก ซึ่งบางส่วนของอะตอมเหล่านี้ จะทำให้เกิดระดับ R-G center ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับอะตอมผู้ให้ (E_D) และบางส่วนจะทำให้เกิดระดับ R-G center อยู่สูงกว่าระดับอะตอมผู้รับ (E_A) ซึ่งจะเห็นว่า ต่างก็อยู่ใกล้กับบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานระดับของ R-G center เนื่องจากอะตอมสารเจือชนิดต่างๆในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน จะปรากฏอยู่ในแถบพลังงานที่ระดับต่างๆกัน แสดงดังในรูปที่ 2.33

กระบวนการ R-G โดยอ้อม จะเกิดขึ้นได้ด้วย ขั้นตอนย่อยที่สำคัญ 4 ขั้นตอน ดังนี้คือ

1. การจับอิเล็กตรอน (Electron capture)

อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะลดระดับลงมายังระดับแตรป (E_T) ซึ่งคล้ายกับว่าอิเล็กตรอนจะถูกจับไว้ที่ระดับแตรป ดังในรูปที่ 2.34(ก)

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Electron emission)

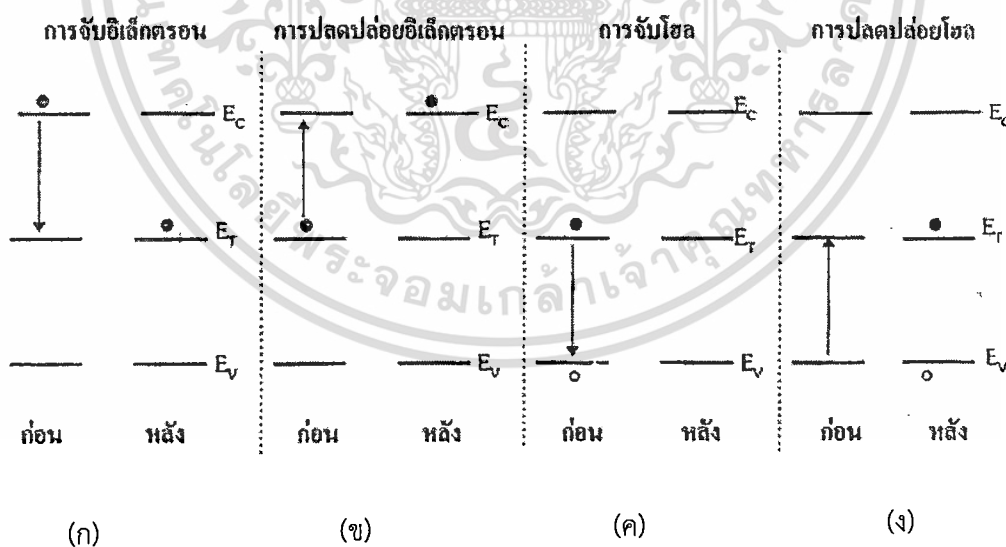
อิเล็กตรอนจากระดับแตรป (E_T) กระโดดขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า ซึ่งคล้ายกับว่าอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากระดับแตรป ดังในรูปที่ 2.34(ข)

3. การจับโฮล (Hole capture)

อิเล็กตรอนจากระดับแตรป (E_T) ลดระดับลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ และทำให้โฮลหายไปจึงคล้ายกับว่า โฮลถูกจับไว้ที่ระดับแตรป ดังในรูปที่ 2.34(ค)

4. การปลดปล่อยโฮล (Hole emission)

โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดขึ้นไปอยู่ที่ระดับแตรป (E_T) จึงทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งคล้ายกับว่า โฮลถูกปลดปล่อยออกมาจากระดับแตรป ดังในรูปที่ 2.34(ง)



รูปที่ 2.34 ขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอน ที่เกิดในกระบวนการ R-G โดยอ้อม เนื่องจากผลของระดับ R-G Center

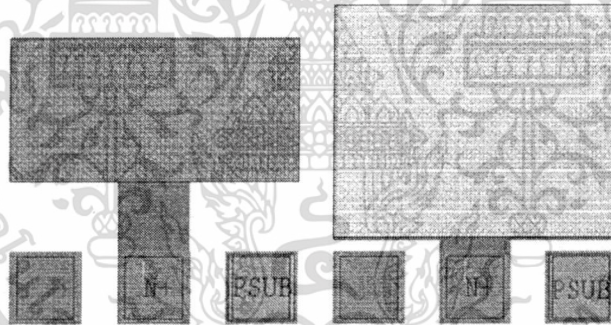
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ซึ่งเป็นการวิจัยและพัฒนา ที่มุ่งศึกษา ปรับปรุง และพัฒนา เทคนิคการวัดและวิเคราะห์ผลเพื่อใช้อธิบายถึงปรากฏการณ์หรือจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นเพื่อให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุวัตถุประสงค์ จึงได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

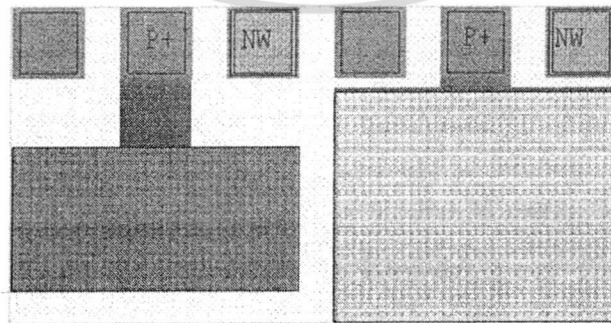
3.1 การออกแบบการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอดในการศึกษา โดยโครงสร้างพื้นฐาน ของไดโอดที่ใช้ในการศึกษา เมื่อแบ่งตามชนิดของรูปทรงเรขาคณิต มี 2 โครงสร้าง ได้แก่

- ไดโอดพื้นที่กว้าง (Large Area Diode) มีรูปทรงเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยม โดยออกแบบให้มีพื้นที่ ขนาดกว้าง $200\ \mu\text{m}$ ยาว $400\ \mu\text{m}$ ความยาวเส้นรอบรูป $1,200\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) และรูปที่ 3.2(ก)
- ไดโอดรูปคดเคี้ยว (Meander Diode) มีรูปทรงเป็นพื้นที่คดเคี้ยว โดยออกแบบให้มีพื้นที่ ขนาดกว้าง $2\ \mu\text{m}$ ยาว $400\ \mu\text{m}$ จำนวน 100 แถบ ความยาวเส้นรอบรูป $80,400\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข) และรูปที่ 3.2(ข)



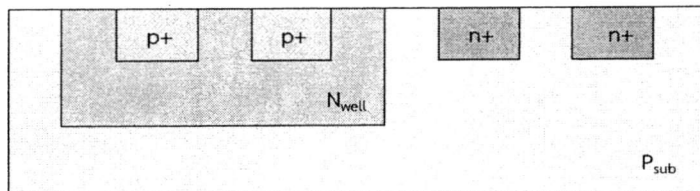
(ก) ไดโอดพื้นที่กว้าง (ข) ไดโอดรูปคดเคี้ยว
รูปที่ 3.1 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{\text{sub}}$



(ก) ไดโอดพื้นที่กว้าง (ข) ไดโอดรูปคดเคี้ยว
รูปที่ 3.2 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{\text{well}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ผลเพื่อใช้อธิบายถึงจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ เน้นที่รอยต่อพี-เอ็นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส ซึ่งมีโครงสร้างรอยต่อของ $p^+ - N_{well}$ และ $n^+ - P_{sub}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส

ดังนั้นโครงสร้างของไดโอดที่ใช้ในการศึกษา เมื่อแบ่งตามชนิดของรอยต่อพี-เอ็น มี 2 ชนิด ได้แก่

- ไดโอดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างรอยต่อของ $p^+ - N_{well}$
- ไดโอดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างรอยต่อของ $n^+ - P_{sub}$

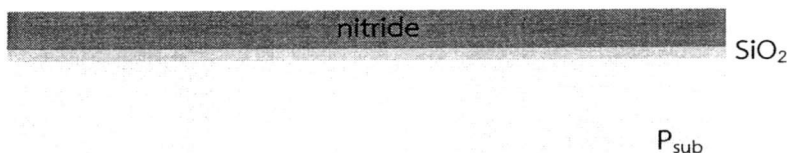
3.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด

ไดโอดที่ใช้ในการศึกษา จะถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอสขนาด 0.8 ไมโครเมตร ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.4

- 1) แผ่นฐานรองซิลิคอน ชนิดพี ระบาย (100) พักความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หนา 25 nm

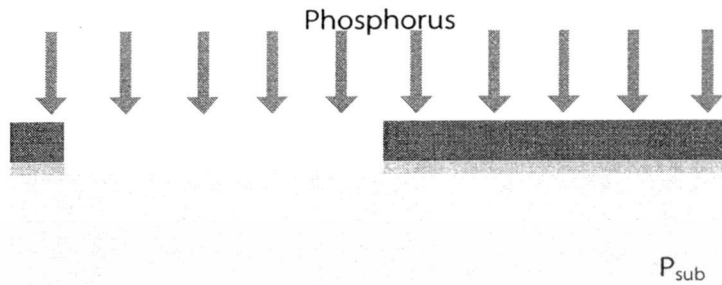


- 2) สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ หนา 150 nm บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

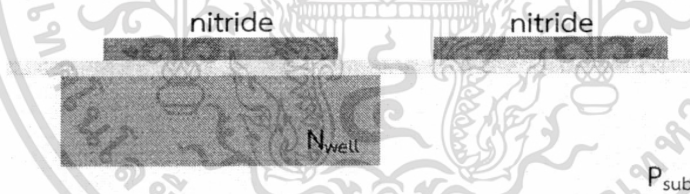
- 3) เปิดช่องซิลิคอนไนไตรต์ เพื่อสร้างบริเวณบ่อแยกชนิดเอ็น (N_{well}) จากนั้นทำการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส ด้วยพลังงาน 140 keV ปริมาณสารเจือ 3.6e12 ions/cm²



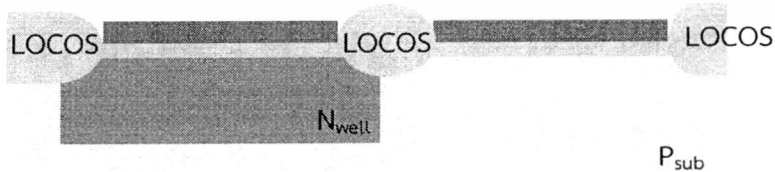
- 4) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ พร้อมขับไล่อะตอมฟอสฟอรัส (Phosphorus Drive-in)



- 5) สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรต์ หนา 150 nm เพื่อเป็นพื้นที่สร้างอุปกรณ์ (Active area)

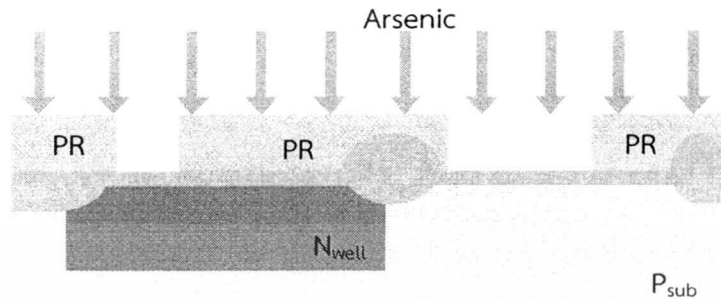


- 6) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา (Field Oxide) หนา 650 nm

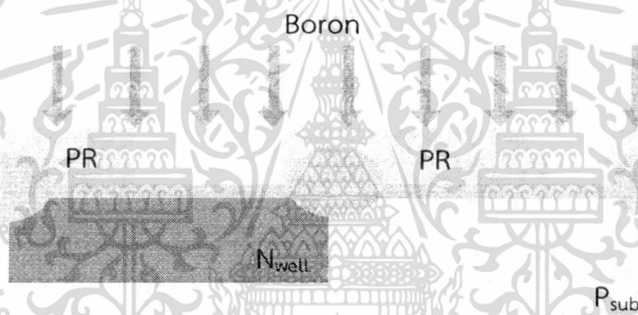


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

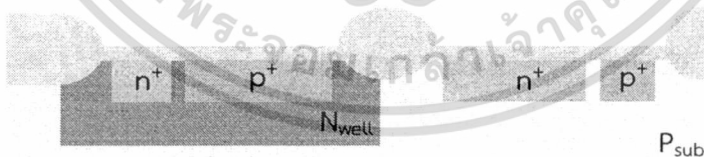
- 7) สกัดชั้นซิลิคอนไนไตรต์ออก ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง (Photo Resist) เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างขั้ว n^+ หลังจากนั้นทำการยิงฝังประจุอาร์เซนิก ด้วยพลังงาน 50 keV ปริมาณสารเจือ $5e15 \text{ ions/cm}^2$



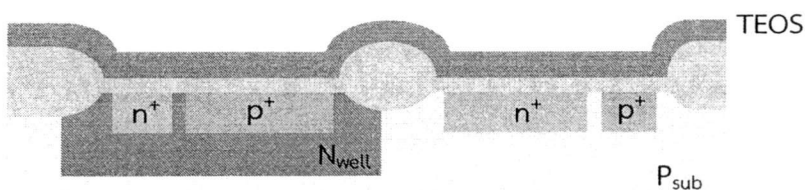
- 8) ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง (Photo Resist) เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างขั้ว p^+ หลังจากนั้นทำการยิงฝังประจุโบรอน ด้วยพลังงาน 40 keV ปริมาณสารเจือ $3e15 \text{ ions/cm}^2$



- 9) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ พร้อมขับสีกสารเจืออาร์เซนิกและสารเจือโบรอน (Arsenic & Boron Drive-in)

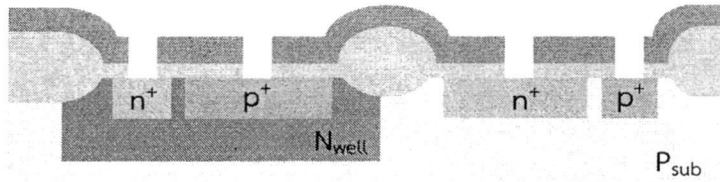


- 10) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด TEOS เพื่อเป็นฉนวนป้องกันอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 11) ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง (Photo Resist) เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างช่องสำหรับขั้วโลหะ (contact-spacer)



- 12) ทำการสร้างชั้นโลหะ Ti/TiN และ AlCuSi ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง



- 13) ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง (Photo Resist) เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างขั้วโลหะและสกัดชั้นโลหะ Ti/TiN และ AlCuSi เพื่อให้ได้ลวดลายโลหะ



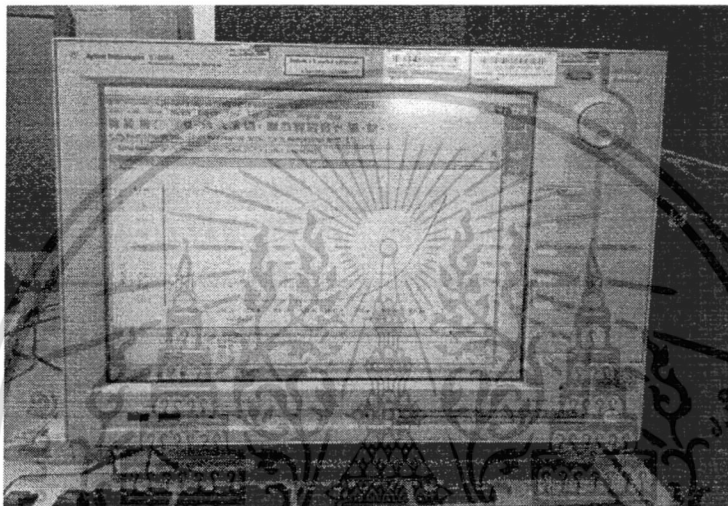
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด

ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการสร้างอุปกรณ์ 2 ครั้ง ซึ่งในกระบวนการสร้างครั้งที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นฐานรองซิลิคอน ชนิดพี ระบาย (100) เป็นพิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ และทำการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส ด้วยพลังงาน 140 keV ปริมาณสารเจือ $7 \times 10^{12} \text{ ions/cm}^2$ เพื่อสร้างบริเวณบ่อแยกชนิดเอ็น (N_{well})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือและวิธีการวัดข้อมูล

ภายหลังเสร็จสิ้นจากกระบวนการสร้าง นำไดโอดไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ทั้งด้านไบอัสตรงและย้อนกลับ และคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device Analyzer) รุ่น B1500A ของบริษัท Agilent Technologies และตู้มีดพร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์ (Black Box & Probe Station) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ



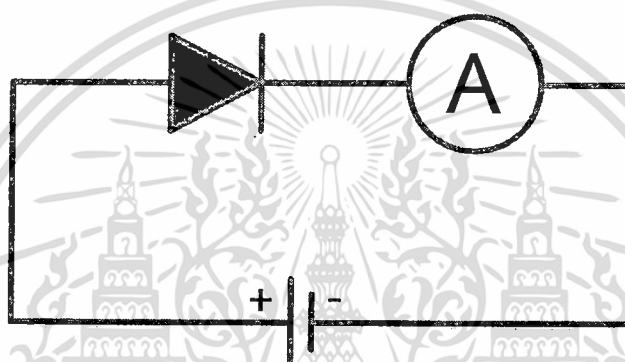
รูปที่ 3.6 ตู้พร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการวัดค่าคุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆกันบนแผ่นฐานรองซิลิคอน ถูกทำการวัดด้วยการให้ค่าแรงดันเป็นช่วงละ 0.01 โวลต์ จากแรงดันย้อนกลับ (reverse : V_R) ไปถึงแรงดันตรง (forward : V_F) โดยที่แรงดันจะถูกให้กับแผ่นฐานรองชนิดพีที่อยู่ด้านหลัง (หรือ บ่อแยกเอ็น : N_{well}) และทำการวัดค่ากระแสที่ขั้ว n^+ ด้านบน (หรือ ขั้ว p^+) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ $27\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในตู้พร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์

คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ถูกกระทำกับไดโอดแบบเดียวกันด้วยความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต ที่อุณหภูมิ $27\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความกว้างชั้นปลอดพาหะของพื้นที่ในแผ่นฐานรอง สามารถคำนวณหาได้จากคุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V)

ซึ่งแผนผังการวัดคุณสมบัติอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังการวัดคุณสมบัติไดโอด

3.4 วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสด้วยองค์ประกอบของกระแส

ในหาค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) ทำได้ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรวมที่ได้จากอุปกรณ์ไดโอดตามหัวข้อ 3.1 ที่ผ่านมา ซึ่งข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ไดโอด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ไดโอด

ประเภทไดโอด	พื้นที่ (cm^2)	เส้นรอบรูป (cm)
แบบพื้นที่กว้าง	8×10^{-4}	0.12
แบบรูปคดเคี้ยว	8×10^{-4}	8.04

องค์ประกอบรวมของกระแสรวมสำหรับไดโอดพื้นที่กว้าง (I_{LA}) และไดโอดรูปคดเคี้ยว (I_{ME}) แสดงได้ดังสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2) ตามลำดับ [32]

$$I_{(LA)} = I_{A(LA)} + I_{P(LA)} \quad (3.1)$$

$$I_{(ME)} = I_{A(ME)} + I_{P(ME)} \quad (3.2)$$

โดยที่ $I_{A(LA)}$ เป็นกระแสต้านพื้นที่ของไดโอดพื้นที่กว้าง (A)
 $I_{P(LA)}$ เป็นกระแสต้านเส้นรอบรูปของไดโอดพื้นที่กว้าง (A)
 $I_{A(ME)}$ เป็นกระแสต้านพื้นที่ของไดโอดรูปคดเคี้ยว (A)
 $I_{P(ME)}$ เป็นกระแสต้านเส้นรอบรูปของไดโอดรูปคดเคี้ยว (A)

จากสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2) เปลี่ยนรูปใหม่ในรูปของความหนาแน่นกระแส ดังสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4) ตามลำดับ

$$I_{(LA)} = A_{(LA)}J_A + P_{(LA)}J_P \quad (3.3)$$

$$I_{(ME)} = A_{(ME)}J_A + P_{(ME)}J_P \quad (3.4)$$

โดยที่ J_A เป็นความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่ของไดโอด (A/cm^2)
 J_P เป็นความหนาแน่นกระแสต้านเส้นรอบรูปของไดโอด (A/cm)
 $A_{(LA)}$ เป็นขนาดพื้นที่ของไดโอดพื้นที่กว้าง (cm^2)
 $P_{(LA)}$ เป็นความยาวเส้นรอบรูปของไดโอดพื้นที่กว้าง (cm)
 $A_{(ME)}$ เป็นขนาดพื้นที่ของไดโอดรูปคดเคี้ยว (cm^2)
 $P_{(ME)}$ เป็นความยาวเส้นรอบรูปของไดโอดรูปคดเคี้ยว (cm)

จากตารางที่ 3.1 แทนค่าขนาดพื้นที่และความยาวเส้นรอบรูปของไดโอดในสมการที่ (3.3) และสมการที่ (3.4) ตามลำดับ ดังนี้

$$I_{(LA)} = 8 \times 10^{-4} J_A + 0.12 J_P \quad (3.5)$$

$$I_{(ME)} = 8 \times 10^{-4} J_A + 8.04 J_P \quad (3.6)$$

ค่าความหนาแน่นกระแสด้านเส้นรอบรูปของไดโอด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.5) และสมการที่ (3.6)

$$J_P = \frac{I_{(ME)} - I_{(LA)}}{7.92} \quad (3.7)$$

ค่าความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ของไดโอด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.5) และสมการที่ (3.7)

$$J_A = \frac{I_{(LA)} - 0.12 J_P}{8 \times 10^{-4}} \quad (3.8)$$

3.4.2 การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นด้วยสมการอาร์เรเนียส

สมการอาร์เรเนียส ถูกคิดค้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนชื่อ สวานเต ออกัส อาร์เรเนียส (Svante August Arrhenius) ซึ่งมีรูปแบบสมการอย่างง่ายแต่สามารถใช้คำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เป็นสมการที่สัมพันธ์กับความจริงที่ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้นตามไปด้วย สมการอาร์เรเนียส เป็นความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ($T - \text{kelvin}$) และพลังงานกระตุ้น ($E_a - \text{eV}$) ดังแสดงในสมการที่ (3.9)

$$k = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (3.9)$$

โดยที่ A เป็นค่าคงที่

R เป็นค่าคงที่ของโบลต์มานน์ ($8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)

โดยทั่วไปสมการอาร์เรเนียส มักถูกเขียนให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ ดังนี้

$$\ln(k) = \ln\left(A e^{\frac{-E_a}{RT}}\right) \quad (3.10)$$

หรือ
$$\ln(k) = -E_a \left(\frac{1}{RT}\right) + \ln(A) \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(k)$ และ $1/RT$ จะได้กราฟเส้นตรงที่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น $y = mx + b$

โดยที่
$$\begin{aligned} y &= \ln(k) \\ m &= -E_a \\ x &= 1/RT \\ b &= \ln(A) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟ (m) ซึ่งการคำนวณที่ถูกต้องควรมีอุณหภูมิ (แกน Y) แตกต่างกัน 3 ค่า และมีช่วงอุณหภูมิอย่างน้อย 5 °C

สำหรับการประยุกต์ใช้สมการอาร์เรเนียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นซึ่งได้จากสมการความหนาแน่นกระแส (J_A) ของไดโอด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.12a) [33]

$$J_A = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (3.12a)$$

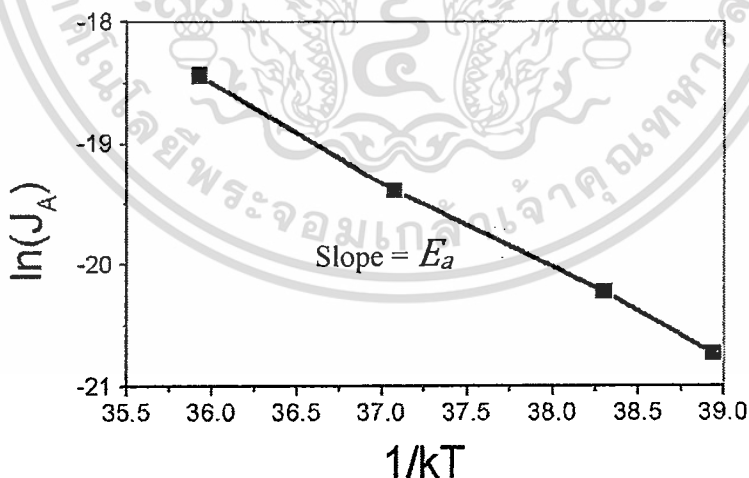
หรือ
$$\ln(J_A) = -E_a \left(\frac{1}{kT} \right) + \ln(A) \quad (3.12b)$$

ตัวอย่างการหาค่าพลังงานกระตุ้นด้วยสมการอาร์เรเนียส จากผลการทดลองดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของอุณหภูมิและความหนาแน่นกระแส

อุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิ (K)	$1/kT$	J_A (A/cm ²)	$\ln(J_A)$
27	300	38.94	1.25×10^{-9}	-20.50
30	303	38.30	1.64×10^{-9}	-20.25
40	313	37.08	3.80×10^{-9}	-19.39
50	323	35.93	9.77×10^{-9}	-18.44

จากข้อมูลในตารางที่ 3.2 นำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(J_A)$ และ $1/kT$ ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.12b) จะได้กราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(J_A)$ และ $1/kT$

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.8 พบว่าความชันของเส้นกราฟมีค่า 0.6 ซึ่งหมายถึงว่าค่าพลังงานกระตุ้นจากการคำนวณด้วยสมการอาร์เรเนียส มีค่า 0.6 eV

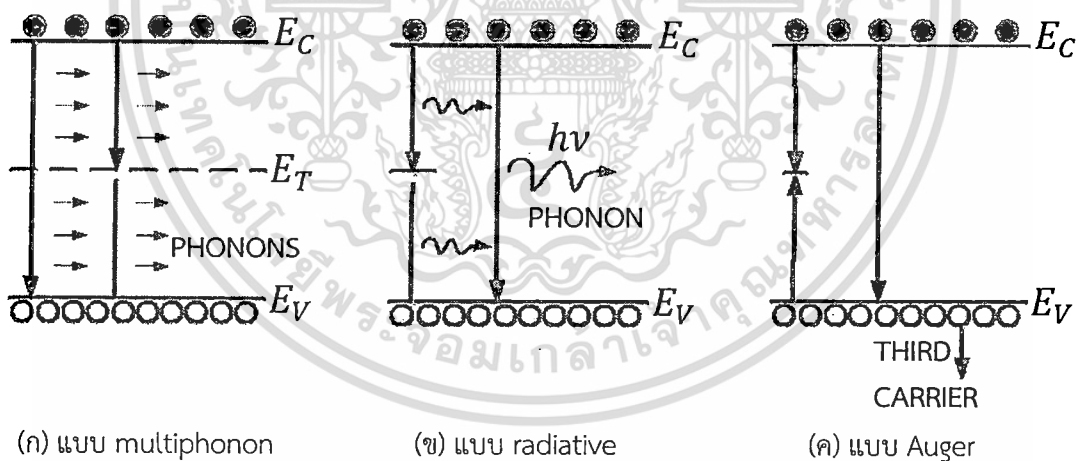
3.4.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนช่วงชีวิตก่อนเกิดและช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ที่สัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น [34]

ช่วงชีวิตพาหะแบ่งเป็นสองประเภทคือ ช่วงชีวิตการก่อเกิด (generation lifetimes - τ_g) เป็นช่วงเวลาที่พาหะเกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อน และช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ (recombination lifetimes - τ_r) ถูกใช้เมื่อมีพาหะส่วนเกินเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำและเป็นช่วงเวลาที่การรวมตัวใหม่ของพาหะเกิดขึ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างได้จากช่วงการฉีดพาหะระดับสูง (high-level injection) และระดับต่ำ (low-level)

พาหะส่วนเกินหมายถึง ความเข้มข้นของโฮลและอิเล็กตรอนที่เกินจากความเข้มข้นในภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งพาหะส่วนเกินเหล่านี้จะอยู่ในสถานะไม่สมดุล ดังนั้นจึงเกิดความพยายามรวมตัวใหม่เพื่อให้สารกึ่งตัวนำอยู่ในภาวะสมดุลอีกครั้ง

ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่เป็นช่วงเวลาเฉลี่ยที่เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair - ehp) ของพาหะส่วนเกิน โดยทั่วไปถ้าในช่วงการฉีดพาหะระดับต่ำจะหมายถึงช่วงชีวิตพาหะส่วนน้อยเมื่อพาหะส่วนน้อยมีความโดดเด่นในกระบวนการรวมตัวใหม่ ซึ่งความเข้มข้นพาหะส่วนน้อยมีจำนวนน้อยกว่าพาหะส่วนมาก แต่ในกรณีของการฉีดพาหะระดับสูง จะไม่มีช่วงชีวิตพาหะส่วนน้อยเนื่องจากการรวมกันจากช่วงชีวิตของพาหะส่วนมากและพาหะส่วนน้อย

รูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นถึงกลไกพื้นฐานของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของพาหะส่วนเกิน ซึ่งเมื่อคู่อิเล็กตรอนเกิดการรวมตัวกัน จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาด้วยกลไกทางกายภาพอย่างใดอย่างหนึ่ง



รูปที่ 3.9 กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของพาหะส่วนเกิน

ในรูปที่ 3.9 (ก) พลังงานถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของโฟนอนหรือการสั่นของโครงสร้างผลึก กลไกแบบนี้ถูกเรียกว่าการรวมตัวใหม่แบบ multiphonon ขั้นตอนการรวมตัวใหม่เกิดขึ้นได้โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบความนำเคลื่อนที่โดยตรงไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ หรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังศูนย์กลางการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะก่อนไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ โดยกรณีหลังซึ่งพบได้ในซิลิคอนมักเกิดขึ้นมากกว่ากรณีแรก การรวมตัวใหม่แบบ multiphonon มักรู้จักกันในชื่อของการรวมตัวใหม่ของ Shockley-Read-Hall (SRH)

ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ของ SRH สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.13) [35]

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{po}(n_o+n_1+\Delta n)+\tau_{no}(p_o+p_1+\Delta p)}{p_o+n_o+\Delta n} \quad (3.13)$$

โดยที่ $\tau_{po} = \frac{1}{\sigma_p v_p N_T}$ (3.14)

$$\tau_{no} = \frac{1}{\sigma_n v_n N_T} \quad (3.15)$$

$$p = p_o + \Delta p \quad (3.16)$$

$$n = n_o + \Delta n \quad (3.17)$$

$$n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \quad (3.18)$$

$$p_1 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_T}{kT}\right) \quad (3.19)$$

ซึ่ง σ_p, σ_n ค่า capture cross-section ของโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ

v_p, v_n ค่า thermal velocity ของโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ

N_T ค่าความเข้มข้นที่ศูนย์กลาง G-R

p_o, n_o ความเข้มข้นของโฮลและอิเล็กตรอน ณ ภาวะสมดุลย์ ตามลำดับ

p, n ผลรวมความเข้มข้นของโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ

n_i ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})

E_T ระดับพลังงานศูนย์กลาง G-R หรือพลังงานกระตุ้น (eV)

E_i ระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (eV)

k ค่าคงที่โบสท์มาน (8.62×10^{-5} eV/K)

T อุณหภูมิองศาสมบูรณ์ (K)

โดยทั่วไปในซิลิคอนฐานรองชนิดพีพบเสมอว่า $n_o \ll p_o$ และ $n_1 \ll p_o, p_1 \ll p_o$ ทำให้สมการ (3.13) เปลี่ยนรูปได้เป็น

$$\tau_{SRH} \approx \frac{\tau_{po}}{\left(1 + \frac{p_o}{\Delta n}\right) + \tau_{no}} \quad (3.20)$$

ในกรณีที่พลังงานคูโฮล-อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกผ่านในรูปของโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) กลไกการรวมตัวใหม่แบบนี้เรียกว่า การรวมตัวใหม่แบบ radiative โดยขั้นตอนการรวมตัว

ใหม่เกิดขึ้นมีทั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแถบความนำตรงไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ หรือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังศูนย์กลางการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะก่อนไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ สำหรับช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่แบบ radiative สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.21) [35]

$$\tau_{rad} \approx \frac{1}{B(p_0 + \Delta n)} \quad (3.21)$$

โดยที่ B เป็นค่าสัมประสิทธิ์การรวมตัวใหม่แบบ radiative สำหรับซิลิคอน $B \approx 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s}$ กลไกการรวมตัวแบบที่สาม ถูกแสดงในรูปที่ 3.9 (ค) โดยขั้นตอนการรวมตัวใหม่เกิดขึ้นมีทั้ง อิเล็กตรอนจากแถบความนำหรือโฮลในแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังศูนย์กลางการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะ เรียกการรวมตัวใหม่แบบนี้ว่า การรวมตัวใหม่แบบ Auger สำหรับช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่แบบ Auger สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.22) [35]

$$\tau_{Auger} \approx \frac{1}{C_p(p_0^2 + 2p_0\Delta n + \Delta n^2) + C_n(n_0^2 + 2n_0\Delta n + \Delta n^2)} \quad (3.22)$$

โดยที่ C_p, C_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์การรวมตัวใหม่แบบ Auger

จากสมการที่ (3.20), (3.21) และสมการที่ (3.22) ซึ่งใช้อธิบายทั้งการฉีดพาหะในระดับต่ำ และระดับสูง โดยเงื่อนไขการฉีดพาหะในระดับต่ำ (ll) เกิดเมื่อความเข้มข้นพาหะส่วนเกินมีน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเข้มข้นพาหะส่วนมากในภาวะสมดุล ($\Delta n \ll p_0$) และการฉีดพาหะในระดับสูง (hl) เกิดเมื่อความเข้มข้นพาหะส่วนเกินมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นพาหะส่วนมากในภาวะสมดุล ($\Delta n \gg p_0$)

สำหรับช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ของการฉีดพาหะในระดับต่ำ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.23) ถึงสมการที่ (3.25) [35]

$$\tau_{SRH}(ll) \approx \tau_{no} \quad (3.23)$$

$$\tau_{rad}(ll) \approx \frac{1}{Bp_0} \quad (3.24)$$

$$\tau_{Auger}(ll) \approx \frac{1}{C_p p_0^2} \quad (3.25)$$

และการฉีดพาหะในระดับสูง สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.26) ถึงสมการที่ (3.28) [35]

$$\tau_{SRH}(hl) \approx \tau_{no} + \tau_{po} \quad (3.26)$$

$$\tau_{rad}(hl) \approx \frac{1}{B\Delta n} \quad (3.27)$$

$$\tau_{Auger}(hl) \approx \frac{1}{(C_p + C_n)\Delta n^2} \quad (3.28)$$

สำหรับช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ทุกระดับการฉีดพาหะ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.29) [35]

$$\tau_r = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}}} \quad (3.29)$$

ในแต่ละกระบวนการรวมตัวใหม่ que แสดงผ่านมาจะเกิดกระบวนการก่อเกิด เกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ แต่คุณลักษณะที่สำคัญของการก่อเกิดแบบ SRH คือมีการกระตุ้นของพลังงานความร้อน แต่กระบวนการรวมตัวใหม่จะไม่มี โดยกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและพลังงานกระตุ้น ซึ่งสามารถพบได้จากการคำนวณอัตราการก่อเกิดแบบ SRH อัตราการก่อเกิดคูโฮล-อิลีกตรอนด้วยความร้อน แสดงได้ดังสมการที่ (3.30) [35]

$$G = \frac{n_i^2 - pn}{\tau_{po}(n+n_1) + \tau_{no}(p+p_1)} \quad (3.30)$$

G ซึ่งเป็นอัตราการก่อเกิดในเนื้อสาร มีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในภาวะสมดุล ($pn = n_i^2$) กระบวนการก่อเกิด จะเกิดเมื่ออุปกรณ์ที่อยู่ในภาวะที่ไม่สมดุล ($pn < n_i^2$) และปรับเปลี่ยนให้อยู่ในภาวะสมดุล โดยการก่อเกิดคูโฮล-อิลีกตรอน

ในกรณีของอุปกรณ์ที่ได้แรงดันย้อนกลับ ($pn < n_i^2$, $pn \approx 0$) จะมีอัตราการก่อเกิดแสดงได้ดังสมการที่ (3.31) [35]

$$G \approx \frac{n_i^2}{\tau_{po}n_1 + \tau_{no}p_1} \quad (3.31)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่เป็น [36]

$$G = \frac{n_i}{\tau_g} \quad (3.32)$$

โดย τ_g เป็นช่วงชีวิตก่อเกิด จากสมการที่ (3.18), (3.19) และสมการที่ (3.31) ทำให้ได้นิยามของช่วงชีวิตก่อเกิด ดังสมการที่ (3.33) [37]

$$\tau_g = \tau_{po} \exp\left[\frac{E_T - E_i}{kT}\right] + \tau_{no} \exp\left[\frac{E_i - E_T}{kT}\right] \quad (3.33)$$

ค่าของอัตราส่วนของ τ_g/τ_r สำหรับการฉีดพาหะในระดับต่ำ [37] สามารถแสดงดังสมการที่ (3.34)

$$\frac{\tau_g}{\tau_r} = 2 \sqrt{\frac{\tau_{po}}{\tau_{no}}} \cosh \left[\left(\frac{E_T - E_i}{kT} \right) + 0.5 \ln \left(\frac{\tau_{po}}{\tau_{no}} \right) \right] \quad (3.34)$$

จากสมการที่ (3.14) และสมการที่ (3.15) พบว่า $\tau_{po}/\tau_{no} = \sigma_n/\sigma_p$ เมื่อค่า thermal velocity ของโฮลและอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากัน โดยทั่วไปอัตราส่วน σ_n/σ_p มีค่าระหว่าง 0.01 -100 ซึ่งอัตราส่วน σ_n/σ_p ที่ปรากฏอยู่ในสมการที่ (3.34) มีผลน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (3.34) สามารถเขียนเป็นรูปอย่างง่ายดังสมการที่ (3.35)

$$\frac{\tau_g}{\tau_r} \approx 2 \cosh \left(\frac{E_T - E_i}{kT} \right) \quad (3.35)$$

ในกรณีศูนย์กลางการเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะที่มี $E_T \neq E_i$ พบว่าช่วงชีวิตก่อนเกิดมีค่ามากกว่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ประมาณ 50 - 500 เท่า [36] ดังนั้นอัตราส่วน τ_g/τ_r อาจประมาณได้ดังสมการที่ (3.36)

$$\frac{\tau_g}{\tau_r} = \exp \left(\frac{|E_T - E_i|}{kT} \right) \quad (3.36)$$

3.4.4 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารด้านพื้นที่

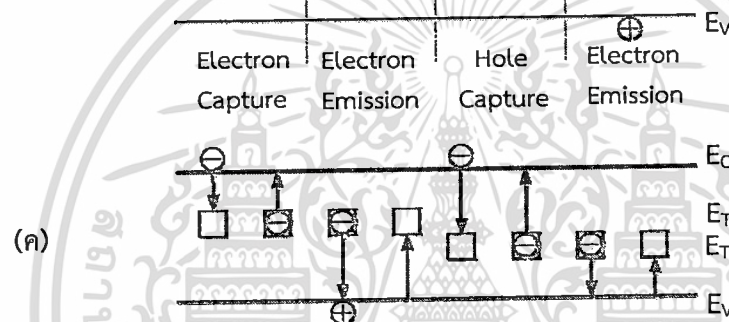
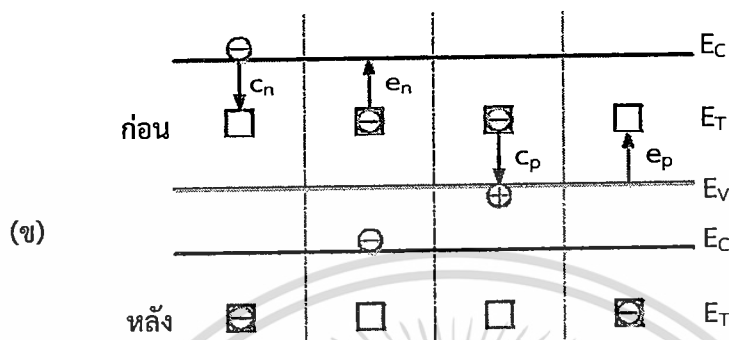
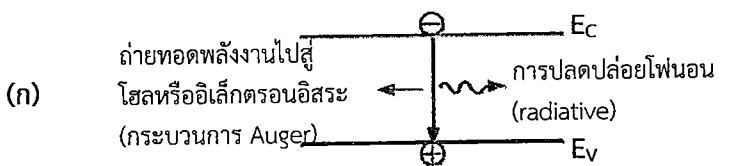
(The area bulk recombination current density - J_{rbA}) [38]

เมื่ออุปกรณ์อยู่ในสถานะไม่สมดุล ($pn \neq n_i^2$) จะเกิดการปรับเปลี่ยนเพื่อให้เข้าสู่ภาวะสมดุล ($pn = n_i^2$) ด้วยกระบวนการรวมตัวใหม่ ซึ่งมีกระบวนการพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 (ก) แสดงถึงการรวมตัวของคูโฮล-อิเล็กตรอนที่มีการรวมตัวใหม่จากแถบสู่แถบ การเคลื่อนที่แบบนี้อิเล็กตรอนจากแถบความนำเคลื่อนที่โดยตรงไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ และเกิดการปลดปล่อยโฟนอน (กระบวนการ radiative) หรือถ่ายทอดพลังงานไปสู่โฮลหรืออิเล็กตรอนอิสระ (กระบวนการ Auger) ซึ่งเป็นกระบวนการตรงข้ามกับ impact ionization

รูปที่ 3.10 (ข) แสดงถึงการรวมตัวใหม่ระดับเดียว (single-level) ซึ่งมีการเปลี่ยนในแถบพลังงานเพียงระดับเดียวเท่านั้น

รูปที่ 3.10 (ค) แสดงถึงการรวมตัวใหม่หลายระดับ (multiple-level) ซึ่งมีการเปลี่ยนระดับพลังงานหลายๆระดับในแถบพลังงาน



รูปที่ 3.10 กระบวนการรวมตัวใหม่

(ก) การรวมตัวใหม่จากแถบสู่แถบ

(ข) การรวมตัวใหม่ระดับเดียว

(ค) การรวมตัวใหม่หลายระดับ

จากทฤษฎีของ Shockley-Read-Hall สำหรับการรวมตัวใหม่ระดับเดียว พบว่าอัตราการรวมตัวใหม่ (U) หน่วย $\text{cm}^{-3}\text{sec}^{-1}$ แสดงดังสมการที่ (3.37) [39]

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_T (pn - n_i^2)}{\sigma_n [n + n_i \exp(\frac{E_T - E_i}{kT})] + \sigma_p [p + n_i \exp(-\frac{E_T - E_i}{kT})]} \quad (3.37)$$

และ ผลคูณของพี-เอ็น เป็น [38]

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{q(\phi_p - \phi_n)}{kT}\right) \quad (3.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \equiv n_i \exp\left(\frac{\psi - \phi}{kT}\right) \quad (3.39)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \equiv n_i \exp\left(\frac{\phi - \psi}{kT}\right) \quad (3.40)$$

โดยที่ ϕ_n และ ϕ_p เป็นระดับ quasi-Fermi สำหรับอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

สำหรับกรณีแรงดันตรง $\phi_p - \phi_n$, $pn > n_i^2$ และความแตกต่างศักย์ดาไฟฟ้าสถิตย์ตกคร่อมรอยต่อ $V = \phi_p - \phi_n$

แทนค่าสมการที่ (3.38) ในสมการที่ (3.37) จะได้

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_T n_i^2 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]}{\sigma_n \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \right] + \sigma_p \left[p + n_i \exp\left(-\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \right]} \quad (3.41)$$

เมื่อกำหนดให้ $\sigma_p = \sigma_n = \sigma$ และแทนค่า n และ p จากสมการที่ (3.39) และสมการที่ (3.40) ในสมการที่ (3.41) ทำให้อัตราการรวมตัวใหม่เปลี่ยนเป็น

$$U = \frac{\sigma v_{th} N_T n_i \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]}{\left[\exp\left(\frac{q(\psi - \phi_n)}{kT}\right) + \exp\left(\frac{q(\phi_p - \psi)}{kT}\right) \right] + \left[\exp\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) + \exp\left(-\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \right]} \quad (3.42)$$

ค่าสูงสุดของอัตราการรวมตัวใหม่ (U) ในบริเวณปลอดพาหะ เมื่อ $2\psi = \phi_p + \phi_n$ และ $2 \cosh(x) = \exp(x) + \exp(-x)$ และในกรณีของการฉีดพาหะในระดับต่ำ [$\tau_r \approx \tau_{SRH}(l) \approx \tau_n = 1/\sigma v_{th} N_T$] ทำให้อัตราการรวมตัวใหม่ที่ (3.42) เปลี่ยนรูปเป็น

$$U = \frac{1}{2\tau_r} \frac{n_i \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]}{\left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) + \cosh\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \right]} \quad (3.43)$$

เมื่อพิจารณาขั้นตอนการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะในหัวข้อ 3.4.3 ที่ผ่านมา กระแสจากแรงดันตรงและแรงดันย้อนกลับ ไม่เพียงประกอบด้วยกระแสการแพร่ (I_d) เท่านั้น แต่ยังประกอบด้วยกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ที่ศูนย์กลางการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะ ซึ่งเป็นกระแสภายในความกว้างชั้นปลอดพาหะของเนื้อสาร โดยในกรณีกระแสจากแรงดันตรง เมื่อพิจารณากระแสการรวมตัวพบว่า [38]

$$J_{rbA} = \int_0^{W_A} qU dx \quad (3.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารด้านพื้นที่เป็น

$$J_{rbA} = \frac{qn_i W_A}{2\tau_r} \frac{[\exp(\frac{qV}{kT}) - 1]}{[\exp(\frac{qV}{2kT}) + \cosh(\frac{E_T - E_i}{kT})]} \quad (3.45)$$

โดยการแทนค่าสมการที่ (3.35) ลงในสมการที่ (3.45) ทำให้ได้

$$J_{rbA} = \left[\frac{qn_i W_A}{2\tau_r \exp(\frac{qV}{2kT}) + \tau_g} \right] [\exp(\frac{qV}{kT}) - 1] \quad (3.46)$$



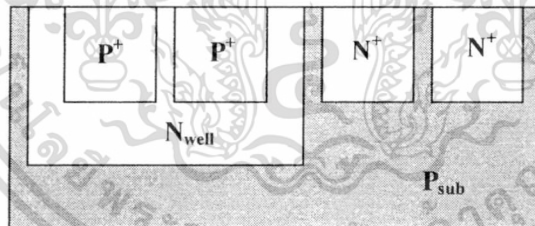
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานภายในรอยต่อพีเอ็น

พัฒนาการของเทคโนโลยีการรวมชั้นโลหะ-อ็อกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (CMOS) ในสมัยใหม่ มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของชิพ และลดต้นทุนการผลิต [9] เทคโนโลยีนี้ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตไมโครชิพเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจจับได้อีกด้วย คุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ชนิดนี้คือการรวมตัวตรวจจับหลายๆชนิดเข้าด้วยกันและยังมีการใช้พลังงานต่ำ ด้วยเหตุผลของต้นทุนการผลิตอุปกรณ์เหล่านี้ เทคโนโลยีซีมอส 0.8 ไมครอน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เทคโนโลยีนี้การเจือสารด้วยระดับความเข้มข้นสูงลงบนแผ่นฐานรองเป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อให้สามารถควบคุมปรากฏการณ์ช่องแคบ (short channel effect) และกระแสรั่วไหลระดับต่ำ ความเข้มข้นของบ่อแยกชนิดเอ็นหรือชนิดพีถูกเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณการเจือสารด้วยการฝังประจุ กระบวนการนี้นำไปสู่การทำลายโครงสร้างผลึกในแผ่นฐานรอง ซึ่งถูกคาดหวังว่าจะกำจัดได้ภายหลังการแอนนีสลิ่ง (annealing) [11] วิธีการบำบัดด้วยความร้อนในเวลาสั้นๆและที่อุณหภูมิต่ำ ให้แก่ความลึกรอยต่อภายหลังการฝังประจุเป็นสิ่งจำเป็น แต่อาจจะไม่เพียงพอที่จะกำจัดจุดบกพร่องที่เกิดจากการฝังประจุได้ [12] จุดบกพร่องเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสรั่วไหลในแต่ละส่วนของรอยต่อพี-เอ็นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รอยต่อพี-เอ็นในโครงสร้างซีมอส

กระแสรั่วไหลในรอยต่อพี-เอ็นเป็นพารามิเตอร์หลักอันหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ กระแสรั่วไหลนี้มีความสัมพันธ์กับจุดบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในซิลิคอน จุดบกพร่องหาได้จากช่วงชีวิตการก่อเกิด (τ_g) ดังนั้นทางหนึ่งในการศึกษาจุดบกพร่อง สามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ช่วงชีวิตการก่อเกิด โดยทั่วไปแล้วช่วงชีวิตการก่อเกิดสามารถคำนวณได้จากกระแสการก่อเกิด [40]

ในการศึกษาคั้งนี้ ไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นเป็นชั้นต้นๆ ซึ่งใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.8 ไมครอน ถูกสร้างบนแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร พิกัดความต้านทาน 5 โอห์ม-เซนติเมตร บ่อแยกชนิดเอ็นได้จากการฝังประจุฟอสฟอรัส 4×10^{12} อีออน/ตารางเซนติเมตร ด้วยพลังงาน 140 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ บริเวณ n⁺ ถูกฝังประจุอาซิติก 5×10^{15} อีออน/ตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติเมตร ด้วยพลังงาน 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และฝังประจุโบรอน 3×10^{15} อีออน/ตารางเซนติเมตร ด้วยพลังงาน 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับบริเวณ p^+ และสุดท้ายรอยต่อจะถูกเชื่อมต่อกับชั้นโลหะอลูมิเนียม

เพื่อใช้ในการศึกษาองค์ประกอบของกระแสรั่วไหล ไดโอดพื้นที่ (A) และไดโอดเส้นรอบรูป (P) แบบต่างๆ จะถูกสร้างบนแผ่นฐานรองซิลิคอน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

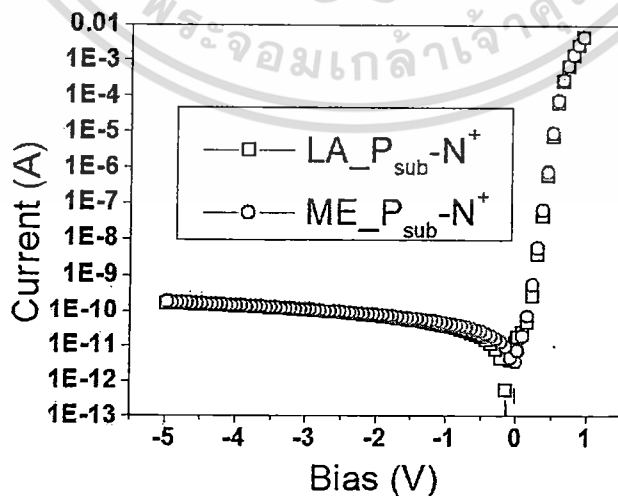
ตารางที่ 4.1 รูปแบบเรขาคณิตของไดโอด

ชนิดของไดโอด	พื้นที่ (ซม ²)	เส้นรอบรูป (ซม)
Large Area (LA) ($n^+ - P_{sub}$)	8×10^{-4}	0.12
Meander (ME) ($n^+ - P_{sub}$)	8×10^{-4}	8.04
Large Area (LA) ($p^+ - N_{well}$)	8×10^{-4}	0.12
Meander (ME) ($p^+ - N_{well}$)	8×10^{-4}	8.04

วิธีการวัดค่าคุณลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆกันบนแผ่นฐานรองซิลิคอน ถูกทำการวัดด้วยการให้ค่าไบอัสเป็นช่วงละ 0.01 โวลต์ จากแรงดันย้อนกลับ (reverse : V_R) ไปถึงแรงดันตรง (forward : V_F) โดยที่แรงดันไบอัสจะถูกให้กับแผ่นฐานรองชนิดพีที่อยู่ด้านหลัง (หรือ บ่อแยกเอ็น : N_{well}) และทำการวัดค่ากระแสที่ขั้ว n^+ ด้านบน (หรือ ขั้ว p^+) ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 27°C ในกล่องดำ

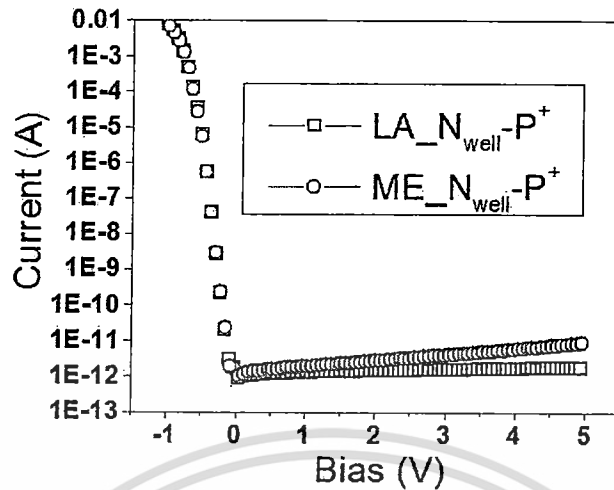
คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ถูกกระทำกับไดโอดแบบเดียวกันด้วยความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต ที่อุณหภูมิ 27°C ความกว้างชั้นปลอดพาหะของพื้นที่ในแผ่นฐานรอง สามารถคำนวณหาค่าจากคุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V)

รูปที่ 4.2 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$ โดยมีรูปแบบเรขาคณิตของไดโอดที่แตกต่างกัน และรูปที่ 4.3 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$ โดยมีรูปแบบเรขาคณิตของไดโอดที่แตกต่างกัน



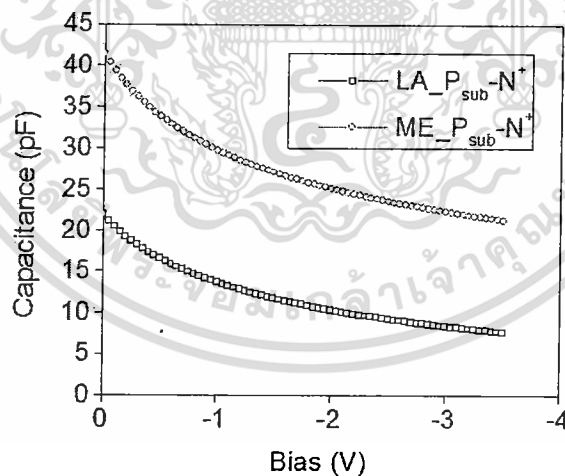
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



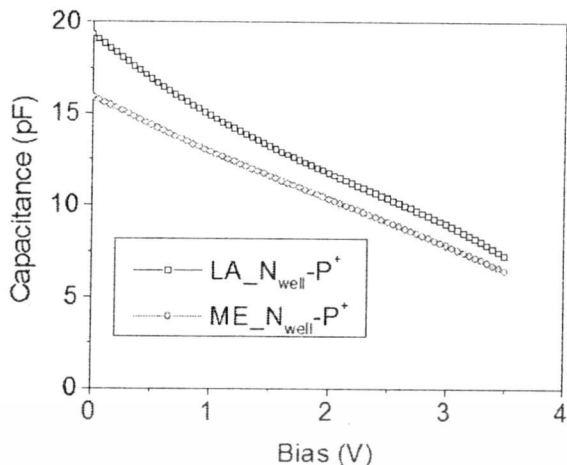
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$ โดยมีรูปแบบเรขาคณิตของไดโอดที่แตกต่างกัน และรูปที่ 4.5 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$ โดยมีรูปแบบเรขาคณิตของไดโอดที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณลักษณะของความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่แตกต่างกันจะได้อธิบายในหัวข้อ 4.4 ต่อไป



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$

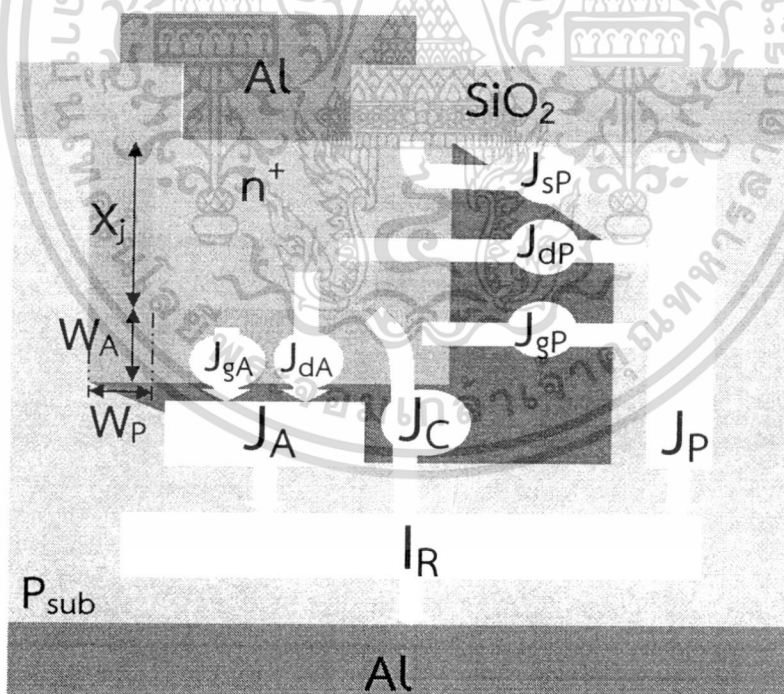
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด p⁺ - N_{well}

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสในไดโอด

ในการวิเคราะห์กระแสรั่วไหล (leakage current) ที่ไหลผ่านรอยต่อของไดโอดภายใต้เงื่อนไขการไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.6 [41]



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลในรอยต่อของไดโอด

จากรูปพบว่าองค์ประกอบรวมของกระแสรั่วไหลเกิดจากจากการกระจายตัวทางกายภาพของกระแสในแต่ละส่วนที่แตกต่างกัน เช่น กระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ (I_A) กระแสรั่วไหลด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นรอบรูป (I_P) กระแสรั่วไหลที่มุม (I_C) และกระแสรั่วไหลแผ่ (I_{Par}) ซึ่งนิยามผลรวมของกระแสรั่วไหล (I_R) สามารถเขียนในรูปสมการที่ (4.1) [16]

$$I_R = I_A + I_P + I_C + I_{Par} \quad (4.1)$$

แต่จากการวิเคราะห์พบว่า $I_A + I_P \gg I_C + I_{Par}$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนในรูปสมการที่ (4.1) ใหม่เป็นสมการที่ (4.2) [32]

$$I_R = I_A + I_P \quad (4.2)$$

หรือ

$$I_R = AJ_A + PJ_P \quad (4.3)$$

โดยที่ J_A (A/cm^2) เป็นความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ (area current density) ที่เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของไดโอด (A) ส่วน J_P (A/cm^2) เป็นความหนาแน่นกระแสด้านเส้นรอบวง (perimeter current density) ที่เป็นสัดส่วนกับเส้นรอบรูป (P) ซึ่งสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบย่อยทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่นกระแสการก่อด้านพื้นที่ (area generation current density - J_{gA}) ความหนาแน่นกระแสการก่อด้านเส้นรอบวง (perimeter generation current density - J_{gP}) ความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่ (area diffusion current density - J_{dA}) ความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านเส้นรอบวง (perimeter diffusion current density - J_{dP}) และความหนาแน่นกระแสการก่อกำเนิดที่ผิวด้านเส้นรอบวง (perimeter surface generation current density - J_{sP}) ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (4.4) และสมการที่ (4.5) ตามลำดับ

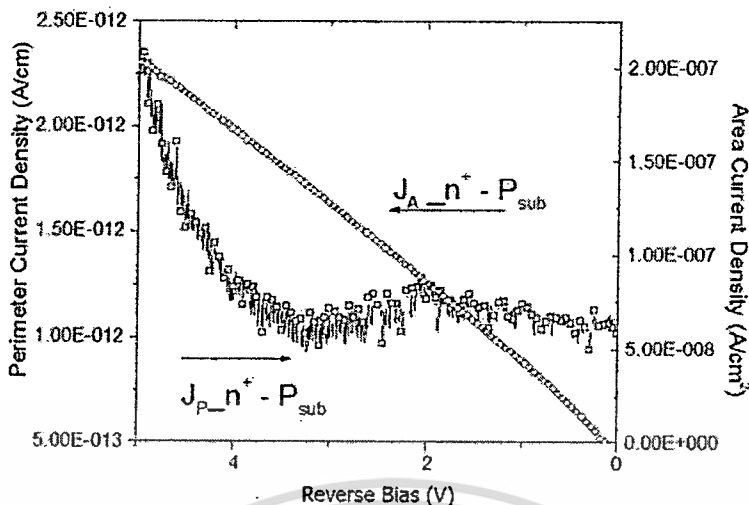
$$J_A = J_{gA} + J_{dA} \quad (4.4)$$

และ

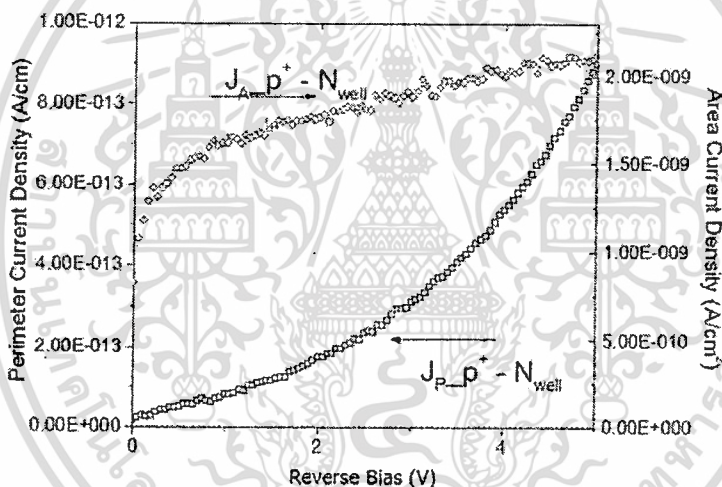
$$J_P = J_{gP} + J_{dP} + J_{sP} \quad (4.5)$$

ในการวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อของไดโอดภายใต้เงื่อนไขการไบอัสตรง (forward bias) ซึ่งเป็นองค์ประกอบกระแสการรวมตัวใหม่ (recombination current component) ดังนั้นพารามิเตอร์ J_{gA} และ J_{gP} เปลี่ยนรูปใหม่เป็น J_{rA} และ J_{rP} ตามลำดับ ซึ่ง J_{rA} เป็นความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ด้านพื้นที่ (area recombination current density) และ J_{rP} เป็นความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ด้านเส้นรอบวง (perimeter recombination current density)

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบวงของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกันกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.7) และ สมการที่ (3.8)



(ก) ไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$



(ข) ไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$

รูปที่ 4.7 กราฟความหนาแน่นกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน

จากรูปที่ 4.7 พบว่าความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่จะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นกระแสด้านเส้นรอบวงทั้งไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$ และไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่เป็นกระแสหลักในผลรวมของกระแสรวมทั้งหมด ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 5.2 ต่อไป

4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของค่าความจุไฟฟ้าในไดโอด

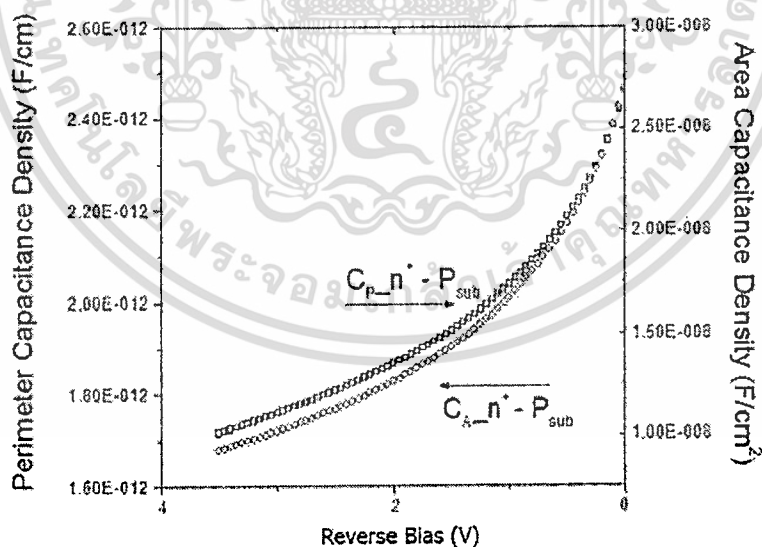
ในการวิเคราะห์ลักษณะเดียวกันกับองค์ประกอบของกระแส และการสมมุติว่าผลรวมค่าความจุไฟฟ้าย่อยต่อ C_j เป็นการรวมแบบเชิงเส้นขององค์ประกอบของค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้

$$C_j = AC_A + PC_P \quad (4.6)$$

โดย C_A (F/cm²) เป็นความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ ซึ่งเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของไดโอด (A), C_P (F/cm) เป็นความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบรูป ซึ่งเป็นสัดส่วนกับเส้นรอบรูปของไดโอด (P)

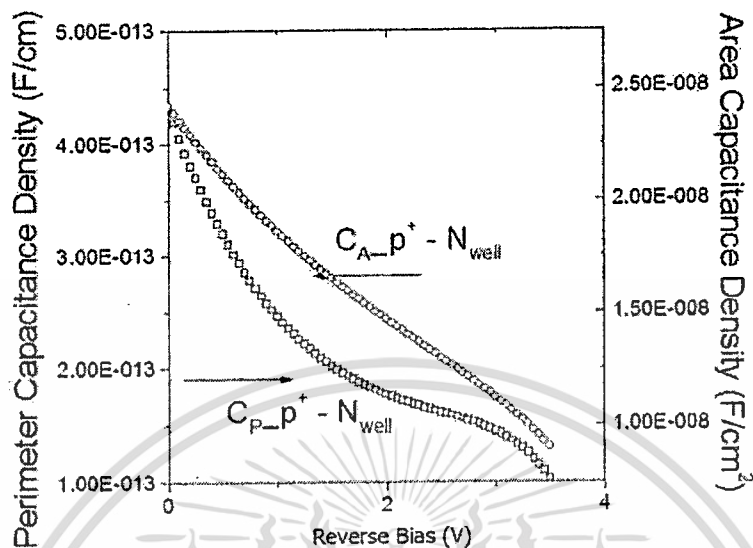
โดยทั่วไป ผลรวมค่าความจุไฟฟ้าย่อยต่อ (C_j) ถูกวัดค่าการตอบสนองของรอยต่อที่มีต่อสัญญาณแรงดันขนาดเล็กที่क्रमบนแรงดันไฟตรง ความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ (C_A) และความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าเส้นด้านรอบรูป (C_P) สามารถสมมุติว่าเป็นการรวมแบบเชิงเส้นขององค์ประกอบทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ดังแสดงในสมการที่ (4.6)

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ และด้านเส้นรอบวงของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์เทียบเคียงตามสมการที่ (3.7) และ สมการที่ (3.8) ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา



(ก) ไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$

รูปที่ 4.8 กราฟความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน

จากรูปที่ 4.8 พบว่าความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่จะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบวงทั้งไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - P_{sub}$ และไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่เป็นค่าความจุไฟฟ้าหลักในผลรวมของค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด

4.4 การวิเคราะห์ความกว้างชั้นปลอดพาหะ

โดยการพิจารณาสมการที่ (4.7) ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ (W_A) สามารถหาได้จากความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ (C_A)

$$W_A = \frac{\kappa_{si}\epsilon_0}{C_A} \quad (4.7)$$

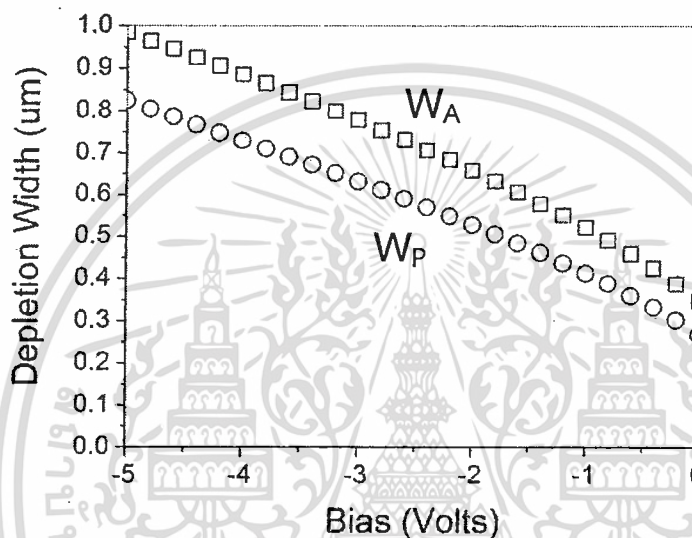
โดยที่ κ_{si} เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิคอน (11.8) และ ϵ_0 (F/cm) เป็นค่าเพอร์มิททิวิตี้ของสุญญากาศ (8.854×10^{-14} F/cm)

และในกรณีความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบรูป (C_P) ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป (W_P) สามารถหาได้จากสมการที่ (4.8)

$$W_P = \frac{\kappa_{si}\epsilon_0(x_j + W_A)}{C_P} \quad (4.8)$$

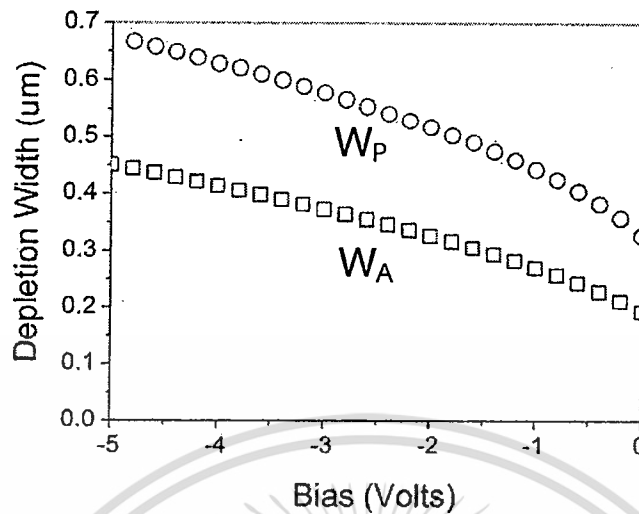
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปกับแรงดันย้อนกลับของไดโอดรอยต่อ $n^+ - P_{sub}$ ถูกแสดงดังรูปที่ 4.9 จากรูปความสัมพันธ์พบว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ มีค่ามากกว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป ประมาณ 1.2 เท่าที่แรงดัน 5 โวลต์ และมีค่า 1.3 เท่าที่แรงดัน 0 โวลต์ ในกรณีนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากผลของชั้น LOCOS Isolation จากกระบวนการสร้างเพื่อกำหนดขอบเขตของสารเจือชั้น n^+ ที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูปมีการขยายตัวได้น้อยกว่าด้านพื้นที่



รูปที่ 4.9 ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปของไดโอดรอยต่อ $n^+ - P_{sub}$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปกับแรงดันย้อนกลับของไดโอดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ ถูกแสดงดังรูปที่ 4.10 จากรูปความสัมพันธ์พบว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ มีค่าน้อยกว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป ประมาณ 1.5 เท่าที่แรงดัน 5 โวลต์ และมีค่า 1.7 เท่าที่แรงดัน 0 โวลต์ ในกรณีนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากผลของกระบวนการสร้างชั้น N_{well} ที่มีการยิงฝังประจุ ซึ่งการกระจายตัวของอะตอมฟอสฟอรัสที่ผิวหน้ามักมีความเข้มข้นน้อยกว่าที่ลึกลงไปทำให้ค่าเฉลี่ยของการขยายตัวของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การขยายตัวของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป และอาจเป็นผลเนื่องจากพื้นที่รอยต่อส่วน p^+ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือของโบรอนที่เกิดจากกระบวนการยิงฝังประจุแบบ Voltage Threshold Adjust (VTA) จึงเป็นผลให้ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูปกว้างกว่าด้านพื้นที่



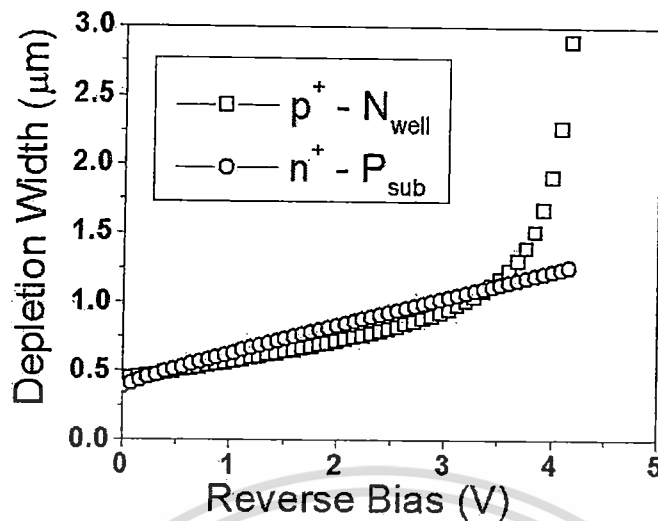
รูปที่ 4.10 ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปของไดโอดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$

จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ยังพบว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดรอยต่อ $n^+ - P_{sub}$ มีค่ามากกว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ โดยมีสาเหตุเนื่องจากความเข้มข้นอะตอมสารเจือในบ่อแยกชนิดเอ็นของไดโอดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ มีความเข้มข้นสูง (ประมาณ 10^{16} cm^{-3}) ส่วนความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองชนิดพีของไดโอดรอยต่อ $n^+ - P_{sub}$ มีค่าน้อยกว่า (ประมาณ 10^{15} cm^{-3}) ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นผลให้ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดรอยต่อ $n^+ - P_{sub}$ มีค่ามากกว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ ซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ (4.9) [38]

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si}}{q} V_{bi} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} \quad (4.9)$$

โดย q เป็นประจุอิเล็กตรอน ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$) V_{bi} เป็นศักดาภายใน (Volts) N_A เป็นความเข้มข้นสารเจือผู้รับ (cm^{-3}) และ N_D เป็นความเข้มข้นสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})

รูปที่ 4.11 แสดงถึงเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่กับค่าไบอัสย้อนกลับที่มีการเจือสารแตกต่างกันของไดโอดที่มีรอยต่อ $n^+ - P_{sub}$ เปรียบเทียบกับไดโอดที่มีรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ พบว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่เพิ่มขึ้นตามค่าไบอัสย้อนกลับ จากค่าความชันของเส้นกราฟ พบว่าการเจือสารที่รอยต่อ $n^+ - P_{sub}$ มีความสม่ำเสมอ แต่การเจือสารที่รอยต่อ $p^+ - N_{well}$ มีลักษณะเป็นเส้นสูงชัน เพิ่มขึ้นไม่สม่ำเสมอ สาเหตุเนื่องจากการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วนบ่อแยก N_{well} ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของเส้นกราฟจึงแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายของการเจือสารฟอสฟอรัสในบ่อแยก (ซึ่งหมายถึง ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึก)



รูปที่ 4.11 ความกว้างชั้นปลอดพาหะพื้นที่กับค่าไบอัสย้อนกลับของไดโอดรอยต่อที่แตกต่างกัน

4.5 การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดในไดโอด (Generation Lifetimes)

ปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันดีว่ากระแสรั่วไหลของรอยต่อพี-เอ็น เป็นหนึ่งในหลักพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.2 กระแสรั่วไหลประกอบด้วยกระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ กระแสรั่วไหลด้านเส้นรอบรูป และกระแสรั่วไหลที่มุม ซึ่งกระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ประกอบด้วยกระแสการก่อเกิดและกระแสการแพร่ ดังแสดงในสมการที่ (4.4) โดยผลรวมของกระแสรั่วไหลนี้ มีความสัมพันธ์กับจุดบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในซิลิคอนซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด (τ_g) และค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ (τ_r) ซึ่งเป็นสาเหตุให้กระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและค่าการรวมตัวใหม่เนื่องจากจุดบกพร่องสามารถวิเคราะห์จากคุณสมบัติในเนื้อสารซิลิคอนโดยการศึกษาจากกระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ ซึ่งภายใต้เงื่อนไขการไบอัสย้อนกลับ ความหนาแน่นกระแสการก่อเกิดด้านพื้นที่มีค่าเป็น [8]

$$J_{gA} = \frac{qn_i W_A}{\tau_g} \quad (4.10)$$

โดยที่ค่า q (C) เป็นประจุอิเล็กตรอน ($=1.602 \times 10^{-19}$ C) ค่า n_i (cm^{-3}) เป็นความเข้มข้นพาหะอินทรินซิก ($=1.08 \times 10^{10}$ cm^{-3}) ค่า W_A (cm) เป็นความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ และค่า τ_g (sec) เป็นช่วงชีวิตการก่อเกิด

ดังนั้นสมการที่ (4.4) สามารถเปลี่ยนรูปใหม่เป็น

$$J_A = \frac{qn_i W_A}{\tau_g} + J_{dA} \quad (4.11)$$

แต่ $J_{dA} \ll J_A$ ดังนั้น J_A สามารถเขียนในรูปใหม่ได้เป็น

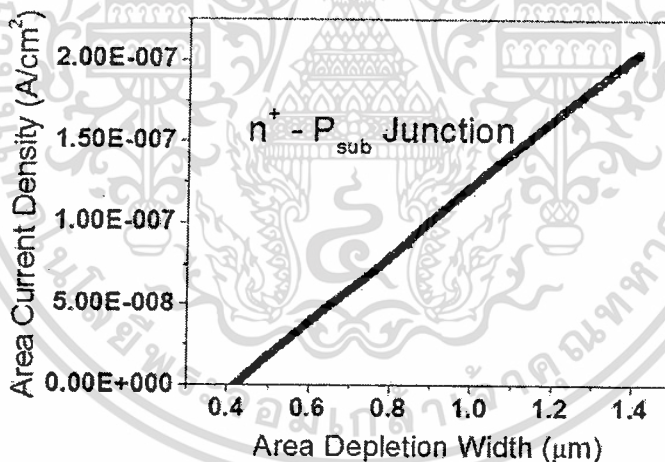
$$\tau_g = \frac{qn_i W_A}{J_A} \quad (4.12)$$

ดังแสดงในสมการที่ (4.12) พบว่าช่วงชีวิตการก่อกำเนิดขึ้นอยู่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะพื้นที่และความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ ดังนั้นวิธีการหาค่า τ_g จะถูกนำเสนอ ดังต่อไปนี้

ความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ สามารถคำนวณจากสมการที่ (4.11) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ และความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ โดยจุดตัดแกนที่ $W_A = 0$ จะแสดงค่าของ J_{dA} ขณะที่ความชันแสดงค่าของ (qn_i/τ_g) ดังแสดงในสมการที่ (4.13)

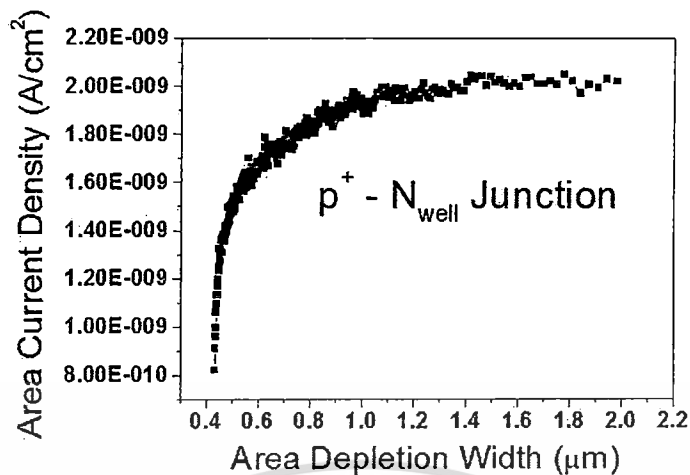
$$J_A = \left(\frac{qn_i}{\tau_g}\right) W_A + J_{dA} \quad (4.13)$$

ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ ที่แสดงดังสมการที่ (4.13) ซึ่งนำไปสู่กราฟรูปที่ 4.12 และ 4.13



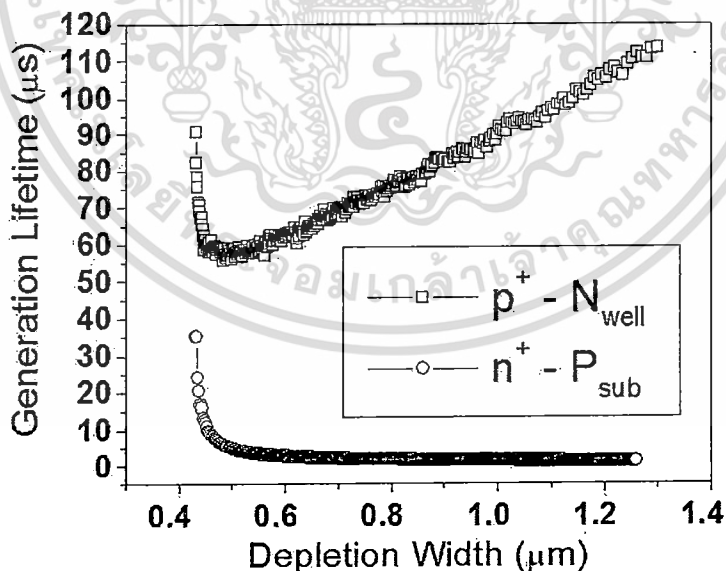
รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - P_{sub}$

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าช่วงชีวิตการก่อกำเนิด มีค่าคงที่ตลอดช่วงของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์กับแผ่นฐานรองซิลิคอนที่เจือสารอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$

ในกรณีของรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด มีค่าไม่คงที่ สาเหตุเนื่องจากแผ่นฐานรองซิลิคอนได้ผ่านกระบวนการยึ่งฝังประจุสารเจือฟอสฟอรัสที่บริเวณบ่อแยกชนิดเอ็น (n-well) เพื่อสร้างอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี ดังนั้นบริเวณนี้จึงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดจุดบกพร่องในช่วงชีวิตการก่อเกิด สามารถหาได้จากสมการที่ (4.12) เส้นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ของช่วงชีวิตการก่อเกิดและความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของช่วงชีวิตการก่อเกิดและความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดที่มีรอยต่อแตกต่างกัน

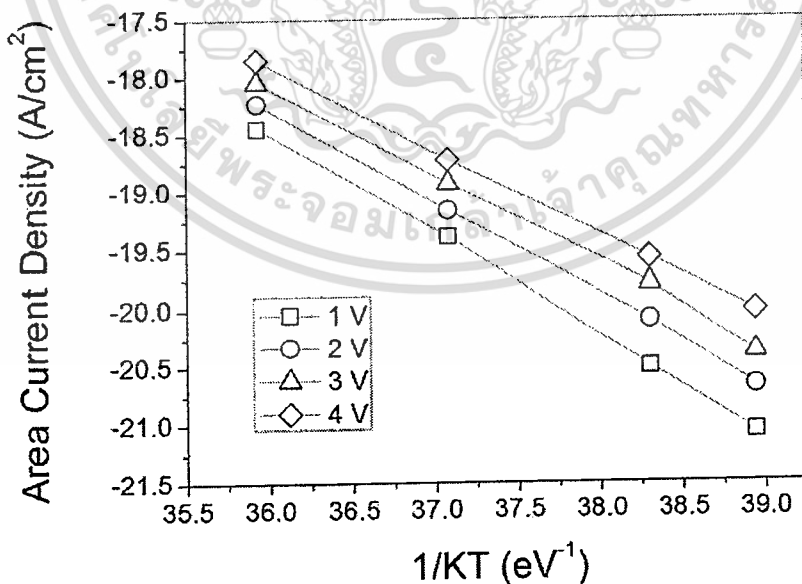
ในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของช่วงชีวิตการก่อเกิดและความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$ และ $p^+ - N_{well}$ ซึ่งพบว่าเส้นกราฟช่วงชีวิตการก่อเกิดของรอยต่อ $n^+ - P_{sub}$ มีความเรียบสม่ำเสมอมากกว่าของรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ ซึ่งมีความชันของเส้นกราฟที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบไม่สม่ำเสมอ สิ่งนี้มีความหมายความเป็นนัยว่า จุดบกพร่องสามารถเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของ $p^+ - N_{well}$ มากกว่ารอยต่อของ $n^+ - P_{sub}$

ช่วงชีวิตการก่อเกิดสามารถวิเคราะห์ได้จากคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน และค่าความจุไฟฟ้า - แรงดันของรอยต่อพี - เอ็น สารเจือฟอสฟอรัสของกระบวนการยึ้งประจุเพื่อสร้างบ่อแยกสามารถเห็นได้ว่าจุดบกพร่องที่เกิดขึ้น จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้เป็นสาเหตุให้ช่วงชีวิตการก่อเกิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดค่าของกระแสการก่อเกิด ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.12) สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า กระแสรั่วไหลของรอยต่อพี-เอ็นสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือของฐานรองด้วยกระบวนการยึ้งประจุสารเจือ

4.6 การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรนเนียส

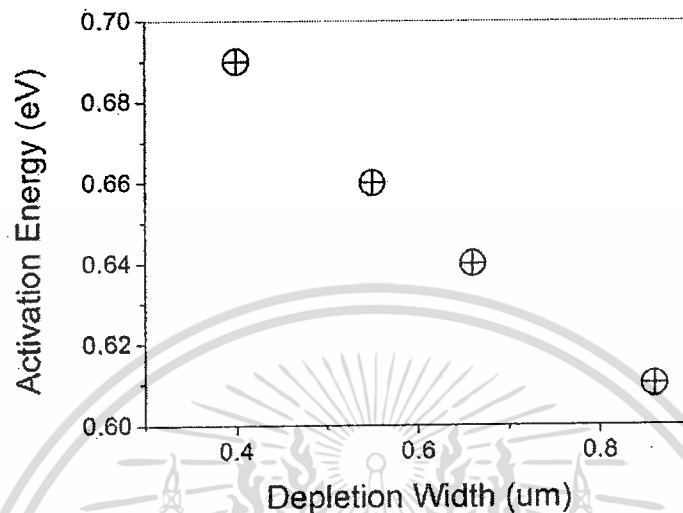
กระบวนการยึ้งประจุสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างบ่อแยกสามารถเห็นได้ว่าความบกพร่องที่เกิดขึ้น โดยความบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้นสามารถวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะว่าเป็นความบกพร่องประเภทใดได้ด้วยค่าพลังงานความบกพร่องหรือค่าพลังงานกระตุ้น (Defect or Activation Energy) ซึ่งเป็นค่าพลังงานเฉพาะของความบกพร่องแต่ละประเภท

พลังงานกระตุ้น สามารถวิเคราะห์หาได้ด้วยเทคนิคของการพล็อตเส้นกราฟจากสมการอาร์เรนเนียส จากสมการที่ (3.12b) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ ซึ่งมีเงื่อนไขการให้แรงดันย้อนกลับที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ ซึ่งมีเงื่อนไขการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าความชันเส้นกราฟของแต่ละแรงดันหมายถึงค่าพลังงานกระตุ้นที่เกิดขึ้นในแผ่นซิลิคอน จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้นและค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้นและค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ

จากรูปที่ 4.16 พบว่ามีค่าพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกันกระจายอยู่ในชั้นรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งอาจหมายถึงว่ามีความบกพร่องหลายประเภทที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้าง โดยแสดงให้เห็นว่ามีความไม่สม่ำเสมอของความบกพร่องเกิดขึ้น (non-uniform defects) ภายในชั้นปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น และน่าจะเป็นผลจากกระบวนการยิงฝังประจุสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างบ่อแยกที่ทำให้ความบกพร่องเกิดขึ้นในโครงสร้างผลึก

สำหรับชนิดของความบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้น คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการจับตัวของกลุ่มก้อนอะตอมฟอสฟอรัส (Phosphorus cluster) ที่ตกค้างในโครงสร้างผลึกซิลิคอนและไม่สามารถกำจัดออกได้ด้วยกระบวนการแอนนิลลิง เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นถึงวิธีการวิเคราะห์หาว่ามีความบกพร่องเกิดขึ้นในรอยต่อพี-เอ็นหรือไม่เท่านั้น จึงไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของชนิดของความบกพร่องที่เกิดขึ้น

4.7 การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ในไดโอดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง

จากหัวข้อ 4.5 และหัวข้อ 4.6 ที่ผ่านมาพบว่าเป็นการวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน แต่จากวิธีของการวิเคราะห์พบว่ามีการใช้ค่าเฉลี่ยในการคำนวณค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและค่าพลังงานกระตุ้นในบริเวณรอยต่อหรือบริเวณปลอดพาหะในลักษณะการอินทิเกรตชัน (Integration) ของปริมาณกระแสที่ไหลผ่านบริเวณปลอดพาหะ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอการวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่า

พลังงานกระตุ้นในอุปกรณ์ไดโอดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ในลักษณะการอนุพันธ์ (derivative) ของปริมาณกระแสที่ไหลผ่านบริเวณปลอดพาหะ ดังมีรายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ดังนี้

ผลรวมของกระแสไบอัสตรงของรอยต่อพี-เอ็นประกอบด้วยองค์ประกอบของกระแสที่มีรูปทรงเรขาคณิตแตกต่างกัน เช่น กระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ (I_A) และกระแสรั่วไหลด้านเส้นรอบรูป (I_P) ดังแสดงในสมการที่ (4.14)

$$I_F = I_A + I_P = AJ_A + PJ_P \quad (4.14)$$

โดยที่ J_A (A/cm^2) เป็นค่าความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ของไดโอด ($A - cm^2$)

J_P (A/cm) เป็นค่าความหนาแน่นกระแสด้านเส้นรอบรูปของไดโอด ($P - cm$)

จากหัวข้อ 3.1 ในกรณีทีไดโอดพื้นที่กว้าง (Large Area Diode) และไดโอดรูปคดเคี้ยว (Meander Diode) มีขนาดพื้นที่เท่ากัน ค่า J_A และค่า J_P สามารถคำนวณหาได้จาก

$$J_A = \frac{I_{FLA} - P_{LA}J_P}{A_{LA}} \quad (4.15)$$

และ

$$J_P = \frac{I_{FLA} - I_{FME}}{P_{LA} - P_{ME}} \quad (4.16)$$

โดยที่ I_{FLA} และ I_{FME} เป็นค่ากระแสช่วงแรงดันไบอัสตรงของไดโอดพื้นที่กว้างและไดโอดรูปคดเคี้ยวตามลำดับ

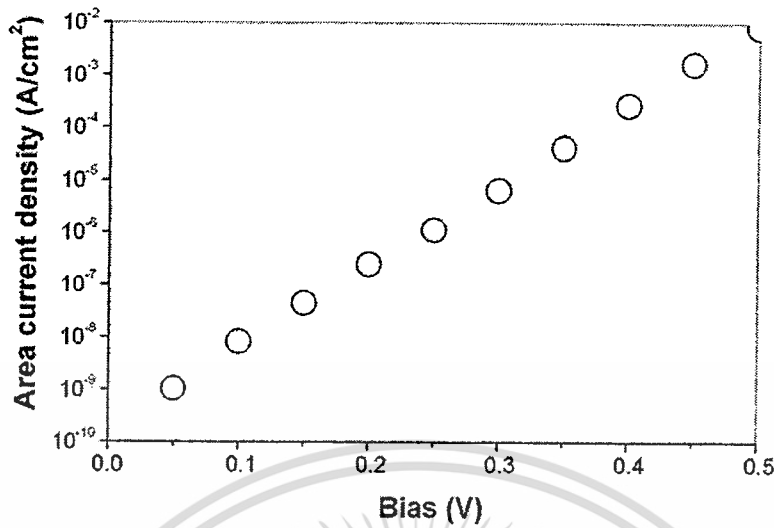
P_{LA} และ P_{ME} เป็นความยาวเส้นรอบรูปของไดโอดพื้นที่กว้างและไดโอดรูปคดเคี้ยวตามลำดับ

A_{LA} เป็นขนาดพื้นที่ของไดโอดพื้นที่กว้าง

ค่า J_A สามารถแยกออกด้วยองค์ประกอบทางกายภาพเป็นความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารด้านพื้นที่ (J_{rba}) และความหนาแน่นกระแสการแพร่ (J_{da}) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.17)

$$J_A = J_{da} + J_{rba} \quad (4.17)$$

จากข้อมูลกระแสและแรงดันที่ได้จากการวัดและความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.15) สามารถหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรงสำหรับไดโอดชนิดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรงสำหรับไดโอดชนิดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$

จากสมการไอโอดแบบอุดมคติ (สมการไดโอดของชอคเลย์) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4.18)$$

โดยที่ ค่า I_0 (A) เป็นกระแสอิ่มตัว

ค่า q (C) เป็นประจุอิเล็กตรอน ($=1.602 \times 10^{-19}$ C)

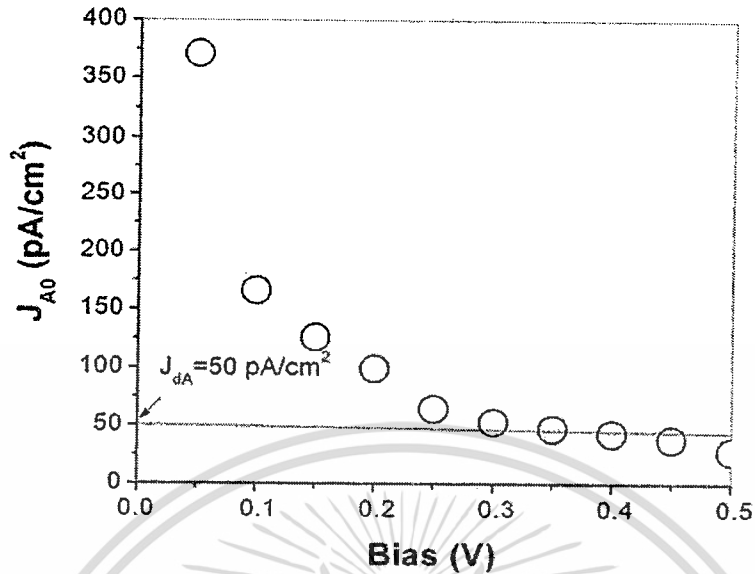
ค่า k เป็นค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ ($=8.617 \times 10^{-5}$ eV/K)

ค่า T (K) เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์

จากสมการที่ (4.18) และด้วยการแทนค่ากระแสด้วยค่าความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่ ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวต้านพื้นที่ ดังแสดงในสมการที่ (4.19)

$$J_{A0} = \frac{J_A}{\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]} \quad (4.19)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.19) สามารถหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวต้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรงได้ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่แรงดันไบอัสตรงค่าต่ำๆ ($V < 0.25$ โวลต์) ค่า J_{A0} จะถูกควบคุมด้วยกระแสการรวมตัวใหม่ ขณะที่ J_{A0} เมื่อค่าแรงดันไบอัสตรงอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.45 โวลต์ จะแสดงค่าของความหนาแน่นกระแสการแพร่ต้านพื้นที่ (J_{dA}) และด้วยการอนุมานค่า J_{dA} ในช่วงเชิงเส้น (ในช่วง 0.25 ถึง 0.45 โวลต์) ถึง $V=0$ จะได้ค่า J_{dA} เท่ากับ 50 pA/cm²



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสอิมิต์วด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรง

โดยทั่วไป ค่า J_A สามารถเขียนให้อยู่ในรูปดังแสดงในสมการที่ (4.20) [8]

$$J_A = \left[J_{dA} + \frac{qn_i W_A}{2\tau_r \exp\left(\frac{qV}{2kT} + \tau_g\right)} \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4.20)$$

ซึ่งค่า q (C) เป็นประจุอิเล็กตรอน ค่า n_i (cm⁻³) เป็นความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ค่า k (eV/K) เป็นค่าคงที่ของโบลต์มานน์ ค่า T (K) เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ และค่า W_A (cm) เป็นความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่

จากสมการที่ (4.20) พบว่าความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ขึ้นอยู่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่ ดังนั้นวิธีการคำนวณค่า τ_g และค่า τ_r จะถูกนำเสนอต่อไปนี้

ด้วยการพิจารณาสมการที่ (4.21) ค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่สามารถหาได้จากค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ (C_A)

$$W_A = \frac{K_{Si} \epsilon_0}{C_A} \quad (4.21)$$

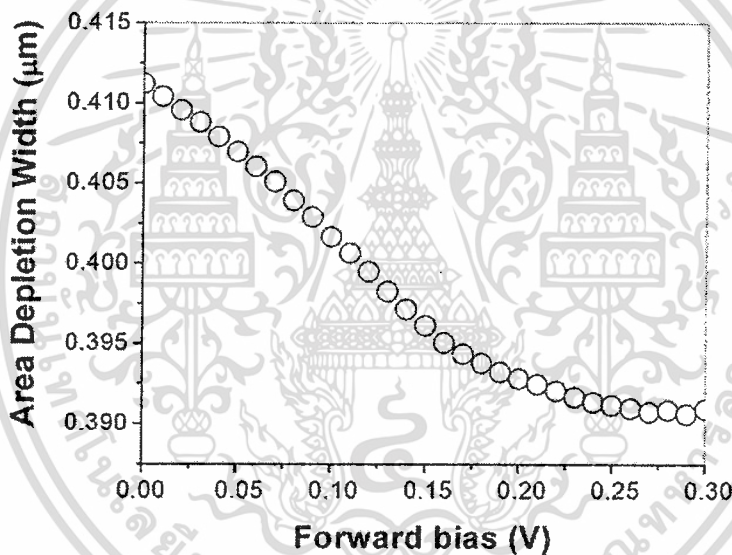
โดยที่ K_{Si} เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิคอน และ ϵ_0 (F/cm) เป็นค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ

และในลักษณะเดียวกันกับการแยกองค์ประกอบของกระแส โดยสมมุติว่าผลรวมของค่าความจุไฟฟ้ารายต่อ เป็นองค์ประกอบเชิงเส้นขององค์ประกอบค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันทางเรขาคณิต ดังแสดงในสมการที่ (4.22)

$$C_j = AC_A + PC_P \quad (4.22)$$

โดยที่ค่า C_A (F/cm²) เป็นความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ ซึ่งเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของไดโอด (A - cm²), ค่า C_P (F/cm) เป็นความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบรูป ซึ่งเป็นสัดส่วนกับเส้นรอบรูปของไดโอด (P - cm)

โดยทั่วไปผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าย่อยต่อจะถูกวัดค่าจากการแสดงผลการตอบสนองของรอยต่อที่มีต่อแรงดันสัญญาณขนาดเล็กที่คร่อมอยู่บนแรงดันไบตรง ความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่และความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบรูปสามารถอธิบายในรูปองค์ประกอบเชิงเส้นขององค์ประกอบค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันทางเรขาคณิต ซึ่งผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าย่อยต่อสามารถใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรงสำหรับไดโอดชนิดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.19



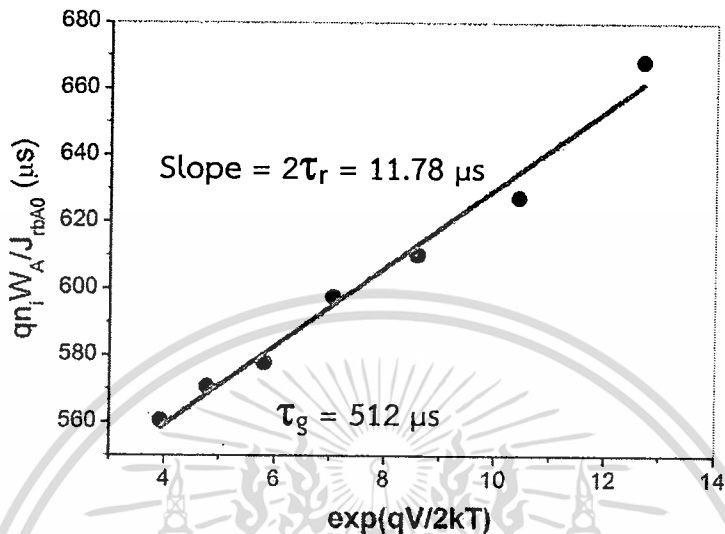
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรงสำหรับไดโอดชนิดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$

จากสมการที่ (4.17) และสมการที่ (4.20) พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสอิมิตวการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารด้านพื้นที่ (J_{rbaO}) เท่ากับ $J_{A0} - J_{dA}$ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (4.20) ผลลัพธ์ภายหลังการจัดเรียงรูปใหม่แสดงได้ดังสมการที่ (4.23)

$$\frac{qn_i W_A}{J_{rbaO}} = 2\tau_r \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) + \tau_g \quad (4.23)$$

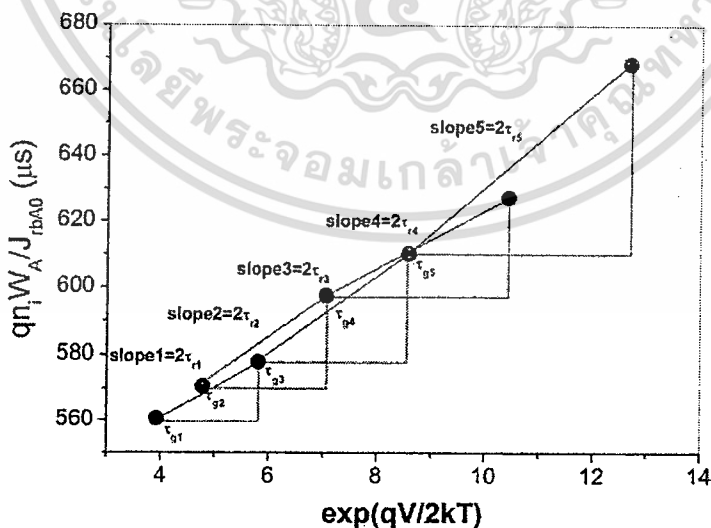
จากการพล็อตความสัมพันธ์ของค่า ($qn_i W_A / J_{rbaO}$) กับค่า $\exp(qV/2kT)$ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยค่า $2\tau_r$ และค่า τ_g สามารถหาจากค่าความชันและจุดตัดที่ค่า

$\exp(qV/2kT) = 0$ ตามลำดับ และจากข้อมูลที่ได้พบว่ามีค่า τ_r และค่า τ_g มีค่า 5.89 μs และ 512 μs ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของค่า $(qn_i W_A / J_{rbAO})$ กับค่า $\exp(qV/2kT)$

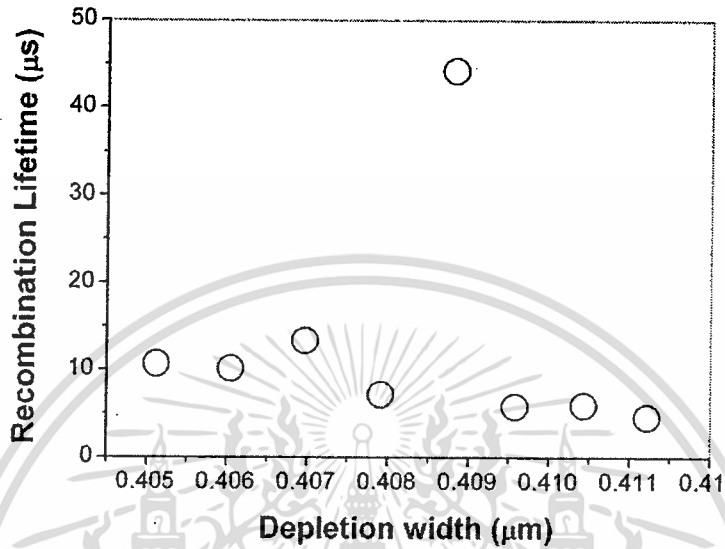
จากค่า τ_r และค่า τ_g ที่หาได้จากรูปที่ 4.20 พบว่าเป็นค่าจากการเฉลี่ยค่าของข้อมูล ดังนั้น วิชานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g จากกระแสไบอัสตรง ค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g หาได้จากค่าอนุพันธ์ของความชันและจุดตัดที่ค่า $\exp(qV/2kT) = 0$ ดังแสดงในรูปที่ 4.21



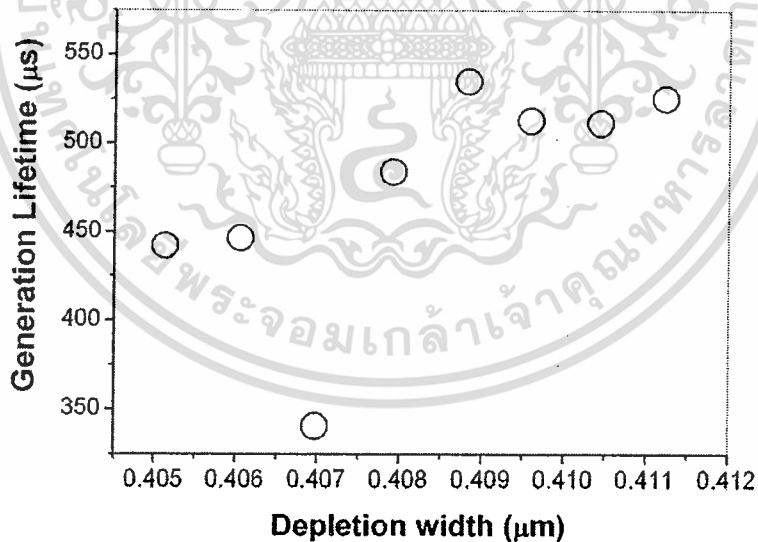
รูปที่ 4.21 ค่าอนุพันธ์ของความชันและจุดตัดที่ค่า $\exp(qV/2kT) = 0$ สำหรับค่าอนุพันธ์ของช่วงชีวิตก่อเกิดพาหะและการรวมตัวใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g จากกระแสไบอัสตรงที่หาได้สามารถนำไปพล็อตหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่และค่าช่วงชีวิตก่อนเกิดพาหะกับค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่กับค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ



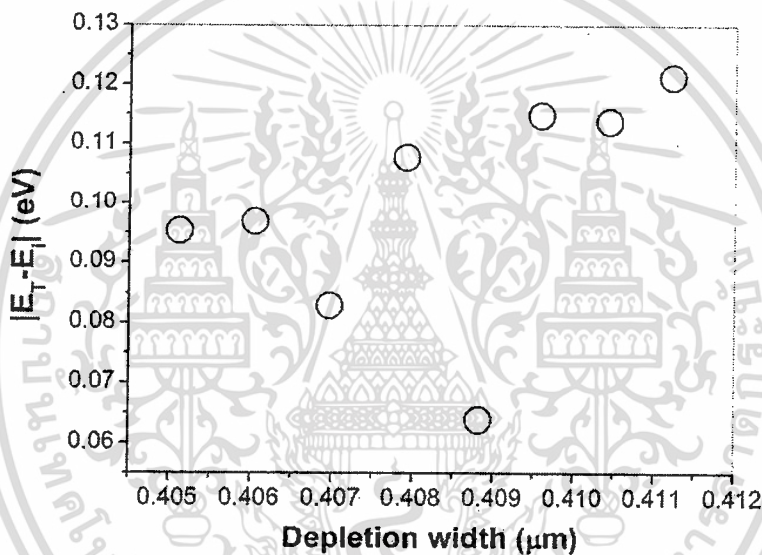
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดพาหะกับค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ

จากรูปที่ 4.22 พบว่าค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอในช่วง 4.5 μs ถึง 13.5 μs แต่ที่ตำแหน่งค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ 0.409 μm พบว่าค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ มีค่าสูงประมาณ 44 μs ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้อาจมีความผิดปกติหรือความบกพร่องของโครงสร้างผลึก

และในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 4.23 พบว่าค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดพาหะ มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอในช่วง 440 us ถึง 525 us แต่ที่ตำแหน่งค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ 0.407 μm พบว่าค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดพาหะ มีค่าสูงประมาณ 340 us ซึ่ง ณ ตำแหน่งนี้อาจมีความผิดปกติหรือความบกพร่องของโครงสร้างผลึกเกิดขึ้นเนื่องจากค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดพาหะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g ในเนื้อสารของแผ่นซิลิคอนในสมการที่ (3.36) หรือสมการที่ (4.24) ดังนั้นค่าระดับพลังงานของ $|E_T - E_i|$ จะสามารถหาคำนวณหาได้ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.24

$$\tau_g = \tau_r \exp\left(\frac{|E_T - E_i|}{kT}\right) \quad (4.24)$$



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับพลังงานของ $|E_T - E_i|$ และค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ

จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับพลังงานของ $|E_T - E_i|$ และค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะที่อยู่ภายในช่วงแรงดันไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) ซึ่งพบว่าค่าระดับพลังงานของ $|E_T - E_i|$ มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดช่วงความกว้างชั้นปลอดพาหะ ยกเว้นที่ตำแหน่งค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ 0.407 μm และ 0.409 μm ตามลำดับ ซึ่งอาจมีความผิดปกติหรือความบกพร่องของโครงสร้างผลึกเกิดขึ้น เนื่องจากค่าระดับพลังงานของ $|E_T - E_i|$ มีความแตกต่างจากตำแหน่งอื่น โดยค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถคำนวณหาจากอัตราส่วนของค่าช่วงชีวิตโดยใช้สมการที่ (4.24) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g จากกระแสไบอัสตรง ที่อุณหภูมิ 27 °C

$\tau_g (\mu s)$	$\tau_r (\mu s)$	$ E_T - E_i (eV) $	$E_a (eV)$
525.36	4.59	0.12	0.68
511.56	5.99	0.11	0.67
512.82	5.77	0.11	0.67
535.02	44.19	0.06	0.62
484.03	7.17	0.10	0.66
340.87	13.33	0.08	0.64
446.52	10.13	0.10	0.66
442.44	10.69	0.10	0.66

จากตารางที่ 4.2 แสดงถึงค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g ที่หาได้จากแรงดันไบอัสตรง ที่อุณหภูมิ 27 °C และความสัมพันธ์จากสมการที่ (4.24) พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่หาได้จากวิธีการหาค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g ที่นำเสนอนี้มีค่าใกล้เคียงกับวิธีการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรเนเนียสจากกระแสรั่วไหลที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา และยังมีค่าใกล้เคียงกับวิธีหาค่าเฉลี่ยดังรูปที่ 4.20 ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าค่าอนุพันธ์ของค่าช่วงชีวิตก่อเกิดพาหะ (τ_r) และค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ (τ_g) ที่หาได้จากวิธีการใหม่ที่น่าสนใจมีค่าที่สมเหตุสมผล และอาจสรุปคุณลักษณะของวิธีการแบบใหม่ที่น่าสนใจเป็น

- สามารถใช้ข้อมูลของกระแสและแรงดันจากแรงดันไบอัสตรง ทำให้วัดข้อมูลได้สะดวกและรวดเร็ว
- สามารถหาค่าอนุพันธ์ของค่าช่วงชีวิตก่อเกิดพาหะ (τ_r) ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ (τ_g) และค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากอุณหภูมิเดียว เนื่องจากคุณลักษณะของเทคนิคอนุพันธ์ซึ่งสามารถหาค่าได้จากข้อมูลที่อุณหภูมิเพียงอุณหภูมิเดียว ซึ่งแตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรเนเนียสที่ต้องการหาข้อมูลจากอุณหภูมิหลายอุณหภูมิหรืออย่างน้อย 3 อุณหภูมิ
- ด้วยข้อจำกัดของเทคนิคสมการอาร์เรเนเนียสที่เป็นค่าเฉลี่ยและต้องตั้งอยู่ในสมมุติฐานว่าความบกพร่องที่เกิดขึ้นมีลักษณะสม่ำเสมอตลอดทั้งโครงสร้างผลึก โดยแตกต่างจากวิธีการแบบใหม่ที่น่าสนใจซึ่งสามารถวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่และการก่อเกิดพาหะตลอดจนค่าพลังงานกระตุ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ถึงความบกพร่องทั้งที่มีลักษณะสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ (uniform/non-uniform defects) ของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- สามารถตรวจหาความผิดปกติหรือความบกพร่องของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตความกว้างชั้นปลอดพาหะที่อยู่ภายในช่วงแรงดันไบอัสตรง ซึ่งจะสนับสนุนต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นสมัยใหม่ ที่มีแนวโน้มของรอยต่อพี-เอ็นที่มีความลึกน้อยมาก

สำหรับค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g ที่หาได้จากแรงดันไบอัสตรง ที่อุณหภูมิ 40 °C แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g จากกระแสไบอัสตรง ที่อุณหภูมิ 40 °C

$\tau_g(\mu s)$	$\tau_r(\mu s)$	$ E_T - E_i(eV) $	$E_a(eV)$
570.58	5.43	0.12	0.68
564.32	6.15	0.12	0.68
558.2	6.08	0.12	0.68
582.58	50.12	0.06	0.62
540.65	9.34	0.10	0.66
395.72	15.12	0.08	0.64
501.45	13.56	0.09	0.65
498.56	12.59	0.09	0.65

จากตารางที่ 4.3 แสดงถึงค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g ที่หาได้จากแรงดันไบอัสตรง ที่อุณหภูมิ 40 °C พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่หาได้มีค่าใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิ 27 °C ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองว่าวิธีการใหม่ที่นำเสนอนี้สามารถใช้วิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นจากข้อมูลที่อุณหภูมิต่างๆได้เช่นกัน

บทที่ 5

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหล ด้านการสูญเสียพลังงานในรอยต่อพีเอ็น

บทนี้เป็นการศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดข้อมูลของรอยต่อพีเอ็นโดยเฉพาะรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่บ่อแยกชนิดเอ็นเพื่อทำให้เกิดอุปกรณ์พีเอ็นทรานซิสเตอร์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ซีมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งกระบวนการสร้างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นกระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์ซีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร ภายหลังจากกระบวนการสร้าง ทำการวัดค่ากระแสรั่วไหลของไดโอดที่ออกแบบและวิเคราะห์ผลเพื่อใช้อธิบายถึงปรากฏการณ์หรือความบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

5.1 กระแสรั่วไหลและการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์

การวิจัยครั้งนี้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอดในการศึกษา โดยโครงสร้างพื้นฐานของไดโอดที่ใช้ในการศึกษา มีรูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$ แสดงดังรูปที่ 3.2 และทำการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์ซีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร แบบเป็น 2 กระบวนการผลิต ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5.1

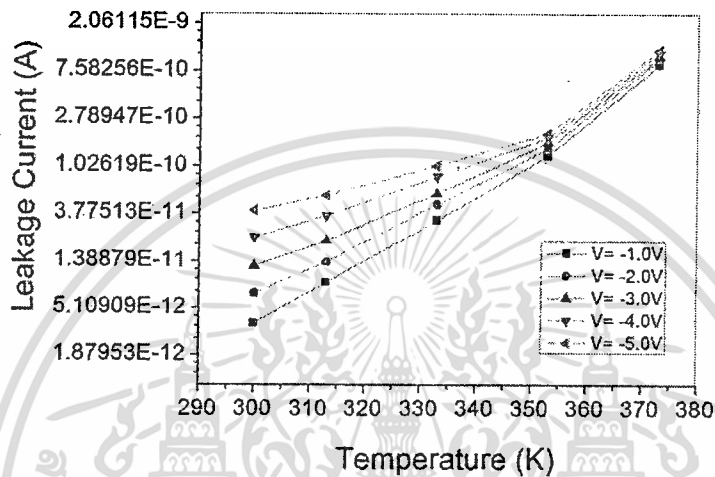
ตารางที่ 5.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์ซีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร

Fabrication 1	Fabrication 2
Lot : PI Φ 5 Φ P802 Wafer ID: D12	Lot : PI10P8001A (Chiang Rai Split lot) Wafer ID: D17
#Start wafer : P type <100> 5 ohm-cm	#Start wafer : P type <100> 5 ohm-cm
#PHOTOSTEP: NWELL NWELL implant : Phos 3.6 E12 cm-2 140 keV NWELL Drive in : 1050 °C 180 min N2 1000 °C 80 min Wet O2	#PHOTOSTEP: NWELL NWELL implant : Phos 7 E12 cm-2 140 keV NWELL Drive in : 1050 °C 180 min N2 1000 °C 80 min Wet O2
#VTA implant: BF2 1 E12 cm-2 70 keV	#VTA implant: BF2 1 E12 cm-2 70 keV
#PHOTOSTEP: NPLUS N+ implant < As 5E15 cm-2 100 keV>	PHOTOSTEP:NPLUS N+ Implant: As 5E15 cm-2 @ 100 keV
#PHOTOSTEP: PPLUS P+ implant<BF ₂ 3E15 cm-2 70keV>	#PHOTOSTEP: PPLUS P+ implant<BF ₂ 3E15 cm-2 70keV>
#SD Anneal: 900 °C 40 min	#SD Anneal: 900 °C 40 min

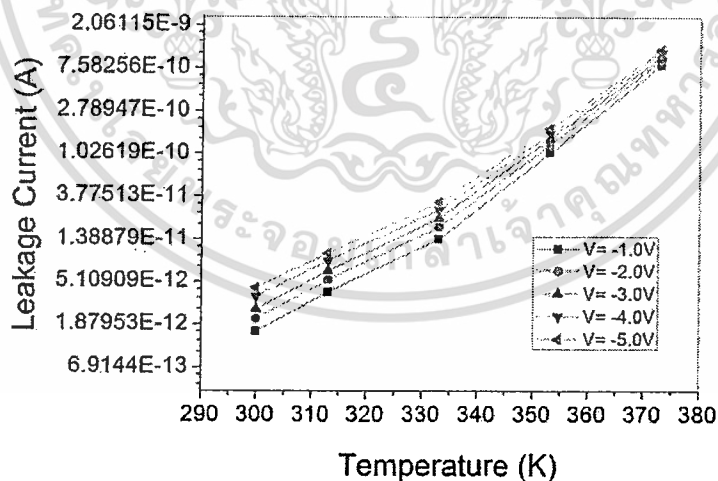
ข้อแตกต่างระหว่างทั้ง 2 กระบวนการผลิต ได้แก่ ปริมาณสารเจือ (dose) ของฟอสฟอรัสในกระบวนการยิงฝังประจุ ซึ่งกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีปริมาณสารเจือ $3.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีปริมาณสารเจือ $7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายหลังกระบวนการสร้าง ไดโอดที่ใช้ในการศึกษาจะถูกวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้านแรงดันย้อนกลับเพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ ไดโอดตั้งแต่ 300 K ถึง 373 K จากการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดภายใต้ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง สามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิต ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2

จากรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 พบว่า

- ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากระแสรั่วไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตลอดช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น โดยทั้ง 2 กระบวนการผลิตมีแนวโน้มคล้ายกัน

- อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากระแสรั่วไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตลอดช่วงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้น โดยทั้ง 2 กระบวนการผลิตมีแนวโน้มคล้ายกัน
- กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่ากระแสรั่วไหลมากกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ตลอดช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น
- ความสัมพันธ์ของเส้นกราฟมีความชันที่เพิ่มขึ้นและมีสองความชันในแต่ละเส้นกราฟ โดยทั้ง 2 กระบวนการผลิตมีแนวโน้มคล้ายกัน

จากแนวโน้มของข้อมูลข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า

กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่ากระแสรั่วไหลเกิดขึ้นต่างกัน เนื่องจากกระบวนการในการการผลิตมีความแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ เส้นกราฟมีสองความชันในแต่ละเส้น ทั้ง 2 กระบวนการผลิต เนื่องจากในความชันช่วงแรกหรือในช่วงที่อุณหภูมิไม่สูงมาก กระแสรั่วไหลที่ได้จะขึ้นกับกระแสที่เกิดในฐานรอง (bulk generation current) ซึ่งสามารถควบคุมด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับ ส่วนความชันช่วงหลังหรือช่วงที่มีอุณหภูมิสูง กระแสรั่วไหลที่ได้จะขึ้นอยู่กับกระแสการแพร่ (diffusion current) ซึ่งไม่สามารถควบคุมด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับ แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยสังเกตได้ว่ากระแสการแพร่จะแสดงผลชัดเจนที่อุณหภูมิ 353 K ขึ้นไป

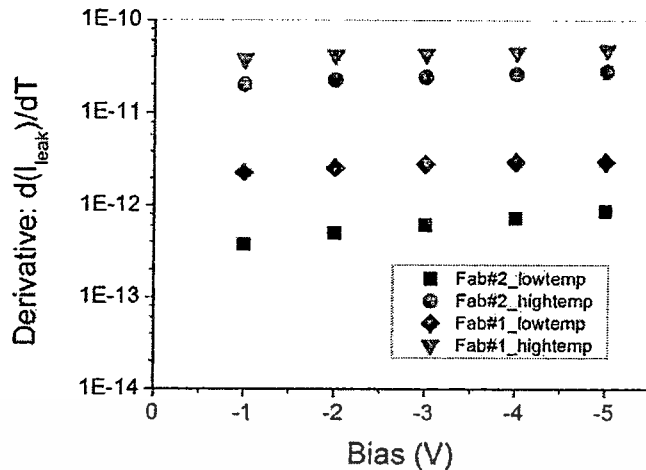
จากข้อมูลยังพบว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีกระแสการแพร่ที่มากกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ตั้งแต่อุณหภูมิ 333 K ขึ้นไป เนื่องจากว่าในกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีขั้นตอนของการให้ปริมาณสารเจือ (dose) ของฟอสฟอรัสในกระบวนการยิงฝังประจุเข้มข้นน้อยกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ซึ่งมีผลให้กระแสการแพร่ในกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 จะแสดงผลชัดเจนกว่า ดังสมการของช็อคเลย์ (Shockley equation) ที่แสดงในสมการที่ (5.1) และสมการที่ (5.2) ตามลำดับ [25]

$$J = J_{so} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (5.1)$$

$$J_{so} = \left[\left(\frac{qD_h}{L_h N_D}\right) + \left(\frac{qD_e}{L_e N_A}\right) \right] n_i^2 \quad (5.2)$$

J	ความเข้มข้นกระแสรวม (A/cm^2)
J_{so}	ความเข้มข้นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A/cm^2)
D_h, D_e	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ (cm^2/sec)
L_h, L_e	ระยะการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ (cm)
N_D, N_A	ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับ ($atom/cm^3$)
n_i	ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})
k	ค่าคงที่โบลต์ซมาน (8.617×10^{-5} eV/K)
T	อุณหภูมิจากสมการ (K)

จากนั้นหาความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ หรือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน (Power Loss Coefficient) ของทั้ง 2 กระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 5.3

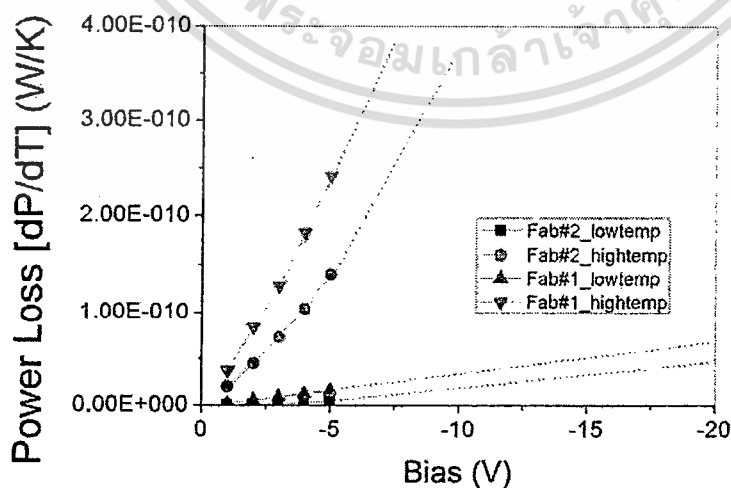


รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ

จากรูปที่ 5.3 พบว่า กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมากกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ตลอดช่วงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ทั้งช่วงอุณหภูมิต่ำและสูง โดยทั้ง 2 กระบวนการผลิตมีแนวโน้มคล้ายกัน

จากข้อมูลข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีการสูญเสียพลังงานที่รอยต่อพี-เอ็นมากกว่าในกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของอะตอมฟอสฟอรัสที่ได้จากกระบวนการยึ่งประจุตั้งที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จากข้อมูลในรูป 5.3 สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการสูญเสียพลังงานที่รอยต่อพี-เอ็นต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ โดยมีเส้นคาดคะเนแนวโน้มของการสูญเสียพลังงานที่รอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูป 5.4 ความสัมพันธ์ของค่าการสูญเสียพลังงานต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงาน

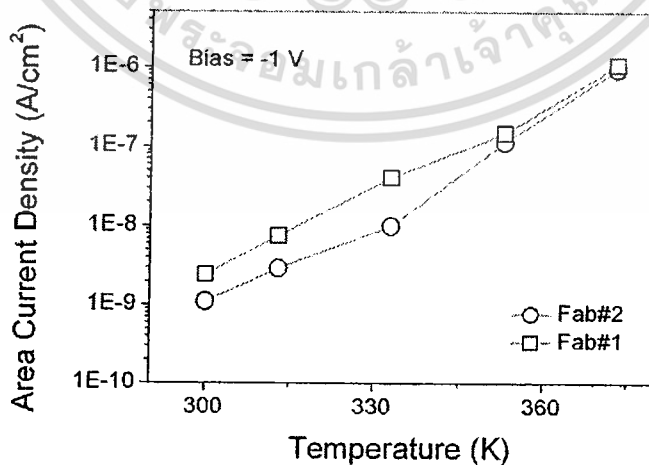
ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลเพื่อใช้อธิบายถึงการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ โดยเฉพาะที่รอยต่อพี-เอ็นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้าง การวิเคราะห์ผลจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์องค์ประกอบของกระแสย่อยส่วนต่างๆของกระแสรั่วไหลที่ส่งผลถึงการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้น

5.2.1 ความสัมพันธ์ด้านองค์ประกอบผลรวมของกระแสรั่วไหล

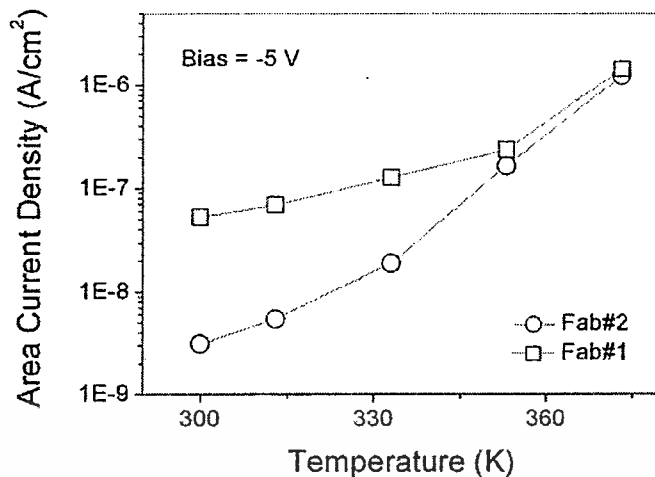
จากข้อมูลที่ได้จากหัวข้อ 5.1 ทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลรวมของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4.1) ถึง (4.3) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$I_R = I_A + I_P = AJ_A + PJ_P \quad (5.3)$$

จากสมการที่ (5.3) พบว่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็นประกอบด้วยผลรวมของกระแสด้านพื้นที่รอยต่อและกระแสด้านเส้นรอบรูปรอยต่อ ซึ่งแนวโน้มในอนาคตของเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมจะมีความลึกของรอยต่อพี-เอ็นที่ลดลงมาก ($X_j < 1\mu m$) เพื่อให้วงจรรวมมีความหนาแน่นของการบรรจุอุปกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพด้านความเร็วของอุปกรณ์ โดยการลดตัวเก็บประจุไฟฟ้าแฝงที่บริเวณฉนวนอุปกรณ์[2] และสัดส่วนของกระแสด้านเส้นรอบรูปรอยต่อกับกระแสด้านพื้นที่รอยต่อ (I_P/I_A) ของทุกไดโอดที่มีการลดสัดส่วนอุปกรณ์ (scale down) จะมีค่าลดลงเสมอโดยอิทธิพลของบริเวณปลอดพาหะด้านพื้นที่ที่มากกว่าด้านเส้นรอบรูปรอยต่อ ทำให้กระแสด้านพื้นที่รอยต่อมีความเด่นชัดมากกว่าเมื่อเทียบกับองค์ประกอบของกระแสชนิดอื่น[3] ด้วยเหตุนี้ในการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น จึงใช้เฉพาะความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ (Area current density; J_A) เพื่อหาความสัมพันธ์องค์ประกอบของกระแสในเนื้อสาร (Bulk current)



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -1 โวลต์



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -5 โวลต์

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดนำมาหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -1 โวลต์ และ -5 โวลต์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6

จากรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -1 โวลต์ ค่าความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตลอดช่วงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีอิทธิพลของกระแสการแพร่เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งคุณลักษณะของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีแนวโน้มเดียวกัน

จากรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -5 โวลต์ คุณลักษณะของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่ที่ค่าสูงมากขึ้นตามแรงดันไบอัสที่ให้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 353 K โดยมีอิทธิพลของกระแสก่อเกิดเป็นองค์ประกอบหลัก และในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 353 K กระแสการแพร่จึงจะโดดเด่นมากขึ้น ส่วนคุณลักษณะของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีค่าความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่ที่ค่าสูงมากขึ้นตลอดช่วงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีอิทธิพลของกระแสการแพร่เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกันกันที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -1 โวลต์

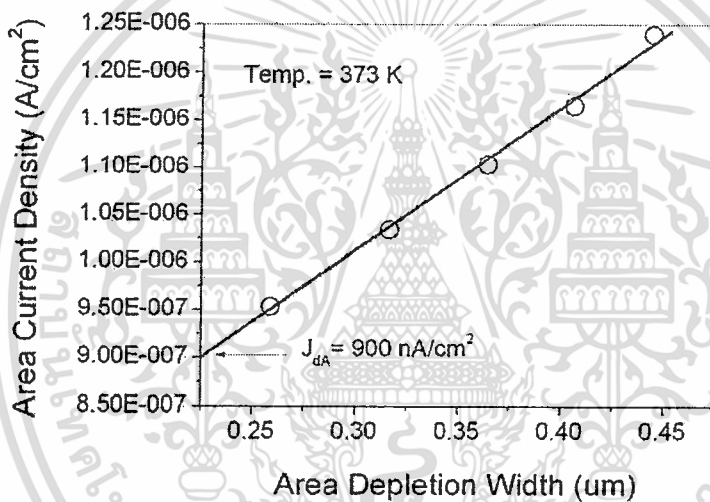
ความสัมพันธ์ที่ได้จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 สามารถสรุปได้จากการแยกองค์ประกอบของผลรวมของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น พบว่าอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ได้รับอิทธิพลของกระแสก่อเกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 353 K และกระแสการแพร่จึงจะโดดเด่นมากขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 353 K ส่วนอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ได้รับอิทธิพลของกระแสการแพร่เป็นองค์ประกอบหลักตลอดช่วงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งการวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบของกระแสการแพร่และกระแสก่อเกิด จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.2.2 ความสัมพันธ์ด้านองค์ประกอบของค่าความหนาแน่นกระแส

จากหัวข้อที่ผ่านมาที่ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิต ซึ่งพบว่าคุณลักษณะของอุปกรณ์ไดโอดได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่และกระแสก่อเกิด โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.4)

$$\text{หรือ} \quad J_{gA} = J_A - J_{dA} \quad (5.4)$$

เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสการแพร่ สามารถทำได้ด้วยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ ดังแสดงในสมการที่ (4.4) และสมการที่ (4.10) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยจุดตัดแกนเป็นค่าความหนาแน่นกระแสการแพร่ (J_{dA}) และตัวอย่างการคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสการแพร่ แสดงดังรูปที่ 5.7



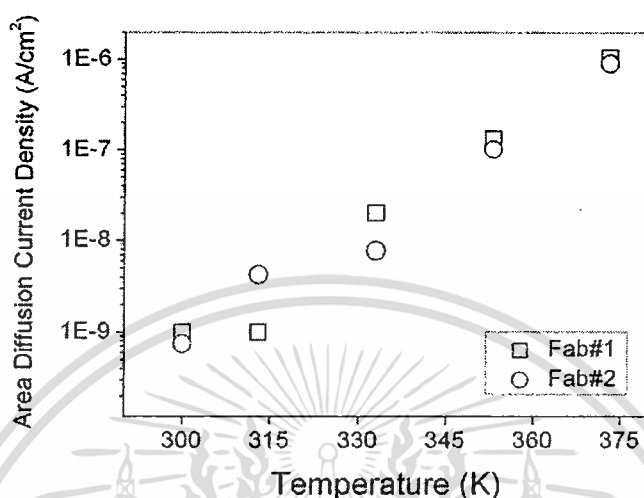
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่

จากการคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสการแพร่ของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 สามารถแสดงดังในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความหนาแน่นกระแสการแพร่ของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (K)	ความหนาแน่นกระแสการแพร่ (A/cm²) จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1	ความหนาแน่นกระแสการแพร่ (A/cm²) จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 2
300	1 nA	0.75 nA
313	1 nA	4.25 nA
333	20 nA	7.75 nA
353	133 nA	103 nA
373	1.04 µA	900 nA

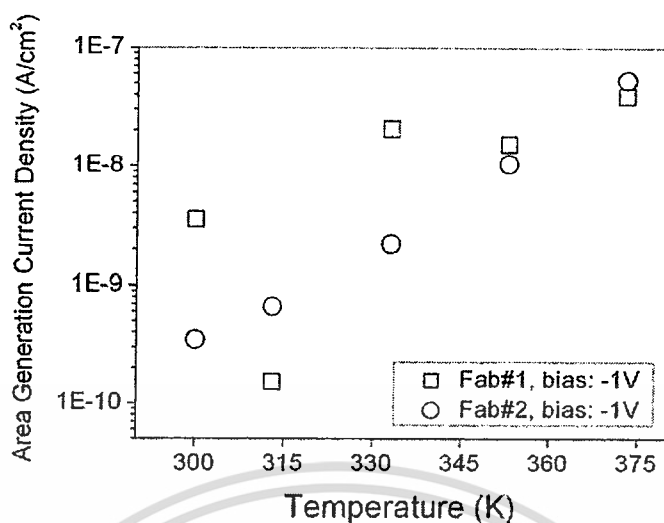
จากข้อมูลในตารางที่ 5.2 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการแพร่ ด้านพื้นที่กับอุณหภูมิได้ ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ เปรียบเทียบกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

จากรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่กับ อุณหภูมิเปรียบเทียบกันระหว่างกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 พบว่าความหนาแน่นกระแส การแพร่ด้านพื้นที่ของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น คล้ายกัน แต่ในกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 จะมีความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่มากกว่าของ กระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ตลอดช่วงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยมีข้อสังเกตว่าที่อุณหภูมิ 313 K ความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่ของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่า 1 nA ซึ่งจากแนวโน้มของ ข้อมูลความสัมพันธ์บนเส้นกราฟ เป็นไปได้ว่าข้อมูลจุดนี้อาจมีความผิดพลาดจากกระบวนการวัดผล ข้อมูลของกระแสรั่วไหล และข้อมูล ณ จุดนี้ควรจะมีค่าสูงกว่านี้

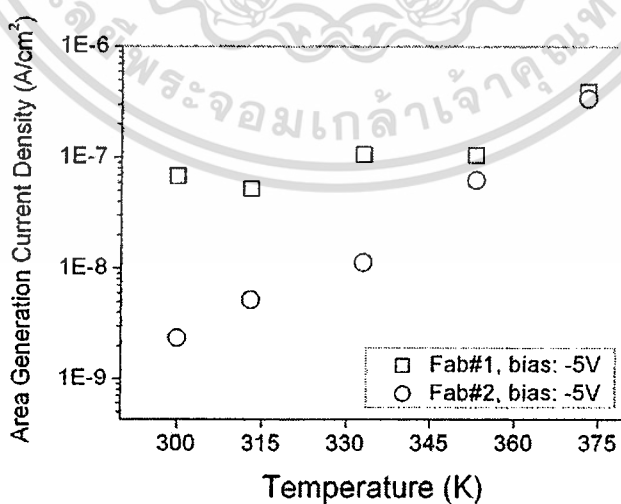
จากข้อมูลในตารางที่ 5.2 สมการที่ (5.4) และข้อมูลของค่าความหนาแน่นกระแสแสดด้านพื้นที่ สามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสแสดก่อเกิด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ตามลำดับ



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสก่อเกิดด้านพื้นที่กับอุณหภูมิจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -1 โวลต์

จากรูปที่ 5.9 พบว่าความหนาแน่นกระแสก่อเกิดด้านพื้นที่จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -1 โวลต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นคล้ายกัน แต่กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 พบว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 333 K ได้รับอิทธิพลจากกระแสก่อเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ให้ ส่วนที่อุณหภูมิ 313 K ข้อมูล ณ จุดนี้ควรจะมีค่าสูงกว่าซึ่งเป็นไปได้ว่าข้อมูลจุดนี้อาจมีความผิดพลาดจากกระบวนการวัดผลข้อมูลของกระแสรั่วไหล และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 353 K ขึ้นไป พบว่าแนวโน้มของข้อมูลความสัมพันธ์บนเส้นกราฟเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่ที่โดดเด่นขึ้น

สำหรับกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 พบว่าแนวโน้มของข้อมูลความสัมพันธ์บนเส้นกราฟเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเป็นเชิงเส้นอย่างชัดเจน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่ที่โดดเด่นขึ้นโดยตรง



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสก่อเกิดด้านพื้นที่กับอุณหภูมิจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -5 โวลต์

จากรูปที่ 5.10 พบว่าความหนาแน่นกระแสก่อเกิดด้านพื้นที่จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่า -5 โวลต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ให้อย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 353 K ซึ่งได้รับอิทธิพลจากกระแสก่อเกิด และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 353 K ขึ้นไป พบว่าแนวโน้มของข้อมูลความสัมพันธ์บนเส้นกราฟเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่ที่โดดเด่นขึ้น

สำหรับกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 พบว่าแนวโน้มของข้อมูลความสัมพันธ์บนเส้นกราฟเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเป็นเชิงเส้นอย่างชัดเจน ซึ่งได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่ที่โดดเด่นขึ้นโดยตรง

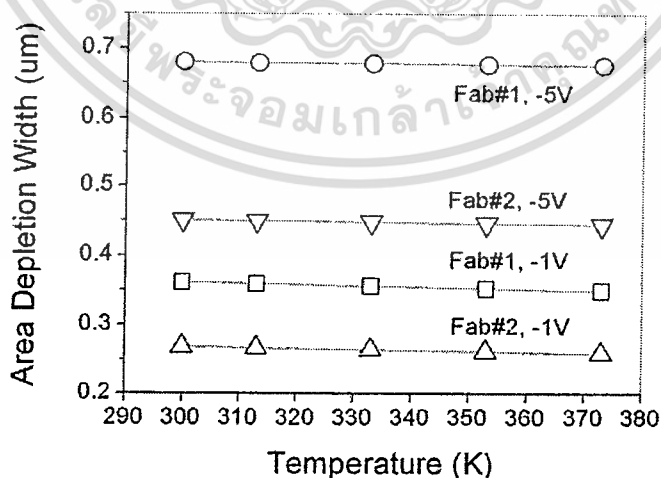
จากข้อมูลในรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 สรุปได้ว่ากระแสรั่วไหลของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ได้รับอิทธิพลจากกระแส 2 ชนิด กล่าวคือจะได้รับอิทธิพลจากกระแสก่อเกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 353 K และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 353 K ขึ้นไป จะได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่ที่โดดเด่นขึ้น สำหรับกระแสรั่วไหลของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่ที่โดยตรง ตลอดช่วงของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

5.2.3 ความสัมพันธ์ด้านองค์ประกอบของค่าความหนาแน่นกระแสก่อเกิด

จากหัวข้อที่ผ่านมาที่ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิต ซึ่งพบว่าคุณลักษณะของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง ได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่และกระแสก่อเกิด เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกระแสก่อเกิดที่มีผลต่อกระแสรั่วไหล ใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.7) และ (4.10)

5.2.3.1 องค์ประกอบด้านความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่

จากสมการที่ (4.7) และข้อมูลที่วัดได้ นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.11

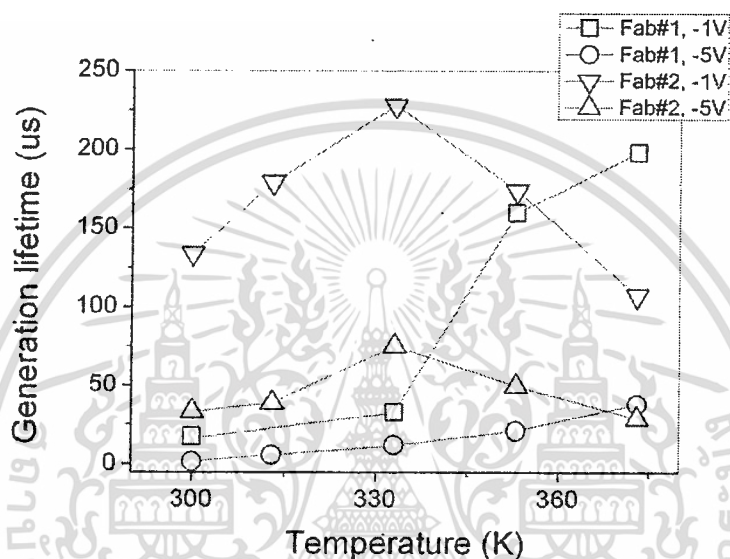


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 5.11 พบว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นจากระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสก่อกเกิด

5.2.3.2 องค์ประกอบด้านค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิด

จากสมการที่ (4.10) และข้อมูลที่วัดได้ นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิดกับอุณหภูมิ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิดกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 5.12 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิดกับอุณหภูมิ พบว่าคุณลักษณะของอุปกรณ์ไดโอดจากระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง มีค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 353 K อุปกรณ์ไดโอดจากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิดที่มากกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ซึ่งหมายถึงว่ากระแสรั่วไหลของรอยต่อพี-เอ็นจากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีค่าน้อยกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิดต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดจากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีค่ามากกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 แสดงให้เห็นว่าโดยภาพรวมของอุปกรณ์ไดโอดจากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ซึ่งมีการปริมาณสารเจือจางกระบวนการยึงฝังประจุฟอสฟอรัสเข้มข้นมากกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ทำให้กระแสรั่วไหลของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าน้อยกว่า (ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกน้อยกว่า)

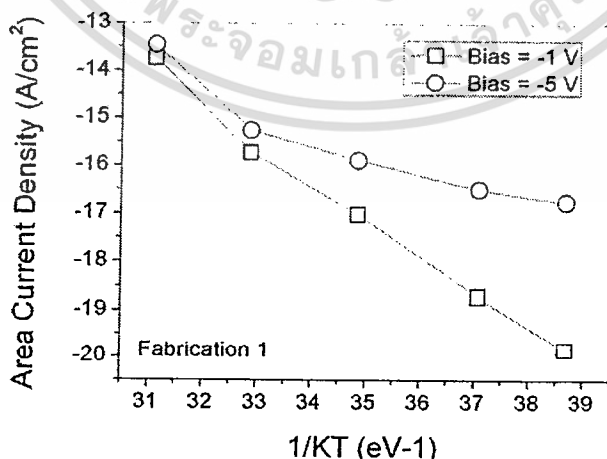
สำหรับในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 353 K พบว่าคุณลักษณะของอุปกรณ์ไดโอดจากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีแนวโน้มของค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิดที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีแนวโน้มของค่าช่วงชีวิตการก่อกเกิดที่ลดลง

แต่จากข้อมูลความสัมพันธ์บนเส้นกราฟในรูป 5.12 พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างด้วยกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 สามารถใช้งานดีกว่าอุปกรณ์ที่สร้างด้วยกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น เนื่องจากเส้นกราฟมีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิค่อนข้างมาก สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนของกระบวนการสร้างอุปกรณ์ โดยเฉพาะกระบวนการแอนนีสลิ่ง (Annealing) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญเพื่อซ่อมแซมและจัดเรียงตัวโครงสร้างของผลึกที่เสียหายจากกระบวนการยิงฝังประจุให้กลับอยู่ในสภาพที่ปกติเหมือนเดิม อาจทำได้ไม่สมบูรณ์หรือมีเงื่อนไขของกระบวนการแอนนีสลิ่งที่ไม่เหมาะสม จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความบกพร่องในโครงสร้างผลึกเกิดขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงของค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ มักขึ้นกับความบกพร่องในโครงสร้างผลึกแต่ละชนิด และจากข้อมูลความสัมพันธ์บนเส้นกราฟในรูปแสดงให้เห็นว่าความบกพร่องในโครงสร้างผลึกของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง มีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกต่างชนิดกัน ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.3 การวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกจากพลังงานกระตุ้นด้วยสมการของอาร์เรเนียส

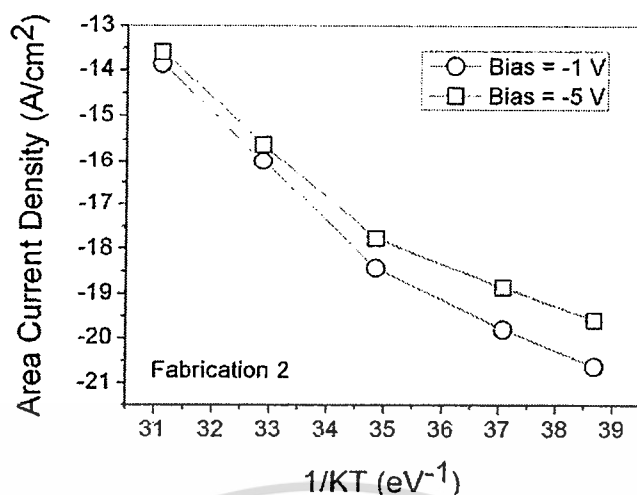
ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลเพื่อใช้อธิบายถึงความบกพร่องในโครงสร้างผลึกของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง ที่มีแนวโน้มว่ามีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกต่างชนิดกัน ซึ่งส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ การวิเคราะห์ผลในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานกระตุ้น (Activation Energy) โดยคำนวณหาด้วยเทคนิคสมการของอาร์เรเนียส ซึ่งมีสัมพันธ์กับค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่

การคำนวณหาพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการของอาร์เรเนียส ได้ถูกกล่าวผ่านมาแล้วในหัวข้อที่ 3.4.2 และความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.10) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลจากการวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์จากกระบวนการสร้างทั้ง 2 ครั้ง มาทำการหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่และอุณหภูมิ ด้วยเทคนิคสมการของอาร์เรเนียส จะได้ความสัมพันธ์บนเส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2

ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ จากค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้จากความชันของเส้นกราฟและความสัมพันธ์ของอัตราส่วน τ_g/τ_r ในสมการที่ (3.34) ถูกแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าพลังงานกระตุ้น ค่าช่วงชีวิตก่อเกิด และค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ จากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิต่ำ (300K - 333K)

Item	E_a (eV)	τ_g (μ s)	τ_r (μ s)
Fabrication : 1 (-1V)	0.7	17.68	0.08
Fabrication : 1 (-5V)	0.3	1.73	7.42e-5
Fabrication : 2 (-1V)	0.6	133.74	28.46
Fabrication : 2 (-5V)	0.5	33.14	3.25

จากตารางที่ 5.3 พบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง อยู่ในช่วง 0.3 eV - 0.7 eV ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

- กระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง อาจมีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกต่างชนิดกัน เพราะมีค่าพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกัน และส่งผลให้เกิดกระแสรั่วไหลและการสูญเสียพลังงานที่แตกต่างกัน
- กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าระดับพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 0.3 eV ถึง 0.7 eV ซึ่งเป็นไปได้ที่กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 จะมีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกหลายชนิด (non-uniform defects) ส่วนกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ค่าระดับพลังงานกระตุ้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน (uniform defects)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อพิจารณาถึงค่าช่วงชีวิตก่อนเกิดและค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ของอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตเดียวกันแต่ให้แรงดันไบอัสแตกต่างกัน ที่ -1 โวลต์และ -5 โวลต์ พบว่าค่าช่วงชีวิตก่อนเกิดและค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งมีสาเหตุจากการขยายตัวของชั้นปลอดพาหะอยู่ในความลึกที่ต่างกัน และจากผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถบ่งบอกถึงความไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นภายในของบริเวณรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์

จากตารางที่ 5.3 ยังพบว่าค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ที่แรงดันไบอัส -5 โวลต์ มีค่าผิดพลาด ซึ่งโดยทั่วไปอัตราส่วน τ_g/τ_r ไม่ควรมากกว่า 500 เท่า [36] ข้อผิดพลาดนี้อาจเกิดจากการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการของอาร์เรเนียส ซึ่งเทคนิคสมการของอาร์เรเนียสยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ เช่นการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างน้อย 3 อุณหภูมิ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งโดยตรง อีกทั้งไม่สามารถวิเคราะห์ในกรณีที่มีช่วงของกระแสการแพร่รวมอยู่ในกระแสรั่วไหล และค่าช่วงชีวิตก่อนเกิดและค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ ที่ได้จากการคำนวณด้วยค่าเฉลี่ยของเส้นกราฟทั้งสิ้น ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแบบใหม่ที่น่าเสนอ ดังหัวข้อที่จะกล่าวต่อไป

5.4 การวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันตรง

ผลจากวิเคราะห์ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่ากระแสรั่วไหลไม่เพียงได้รับอิทธิพลโดยตรงจากกระแสก่อนเกิดเท่านั้น แต่ยังมีแนวโน้มว่าได้รับอิทธิพลจากกระแสการแพร่ด้วย ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 5.3 ที่ผ่านมาถึงการคำนวณค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่จากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้งที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอที่เกิดขึ้นภายในของบริเวณรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ โดยหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง

จากหัวข้อ 5.2.2 ที่ผ่านมามีพบว่าอุปกรณ์ไดโอดจากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง มีกระแสรั่วไหลที่ประกอบด้วยกระแสการแพร่และกระแสก่อนเกิด ดังแสดงในสมการที่ (5.5) [38]

$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_r} \frac{n_i^2}{N_D}} + \frac{q n_i W}{\tau_g} \quad (5.5)$$

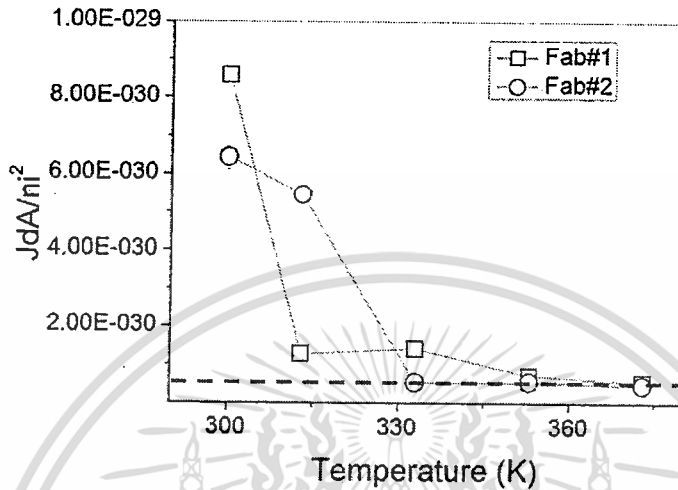
โดยที่ J_R (A/cm) เป็นผลรวมของกระแสรั่วไหลย้อนกลับด้านรอยต่อชนิดเอ็น

D_p (cm²/s) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

N_D (cm⁻³) เป็นค่าความเข้มข้นพาหะด้านรอยต่อชนิดเอ็น

จากสมการที่ (5.5) จะเห็นได้ว่ากระแสการแพร่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วยพารามิเตอร์เพียง 2 ตัวคือค่า n_i และค่า τ_r เท่านั้น

จากข้อมูลที่วัดได้ เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสการแพร่และค่าความเข้มข้นพาหะอินทรีนซิก ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงขึ้นอุณหภูมิ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสการแพร่และค่าความเข้มข้นพาหะอินทรีนซิกกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 5.15 ใช้สมมติฐานว่าถ้าค่าสัดส่วนของ J_{dA}/n_i^2 มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (เส้นไขปลา) กับอุณหภูมิ แสดงว่าค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่จะไม่ขึ้นอุณหภูมิ แต่จากกราฟพบว่า

- ค่าสัดส่วนของ J_{dA}/n_i^2 มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ช่วงอุณหภูมิ 300K – 333K ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่มีอิทธิพลหรือลักษณะเด่นกับกระแสการแพร่โดยตรงในอุณหภูมิช่วงนี้
- ขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 333K – 373K ค่าสัดส่วนของ J_{dA}/n_i^2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มข้นพาหะอินทรีนซิก (n_i^2) มีอิทธิพลหรือลักษณะเด่นกับกระแสการแพร่โดยตรงในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งทั่วไปค่าความเข้มข้นพาหะอินทรีนซิก (n_i) จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลกับอุณหภูมิและขึ้นอยู่กับค่าของพลังงานก่้างแถบพลังงาน (E_g) ของวัสดุ ในกรณีของซิลิคอน ค่า n_i สามารถคำนวณได้ด้วย [42]

$$n_i = 1.640 \times 10^{15} T^{1.706} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (5.6)$$

$$E_g = 1.17 - \frac{4.73 \times 10^{-4} T^2}{(T+636)} \quad (5.7)$$

ที่ผ่านมาเนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคสมการของอาร์เรนเนียสในการวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ที่เป็นองค์ประกอบของกระแสการแพร่ ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเสนอการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง

จากข้อมูลที่วัดได้ เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์ของช่วงชีวิตก่อนเกิดพาหะและการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารของแผ่นซิลิคอน และความสัมพันธ์จากสมการที่ (4.24) ดังนั้นค่าพลังงานกระตุ้น สามารถหาคำนวณหาได้ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 ค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ที่ 300K

τ_g (μ s)	τ_r (μ s)	E_a (eV)
0.47	0.23	0.57
0.60	0.27	0.58
1.87	0.52	0.59
30.89	2.29	0.63
57.56	3.28	0.63

ตารางที่ 5.5 ค่าอนุพันธ์ของค่า τ_r และค่า τ_g จากกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ที่ 300K

τ_g (μ s)	τ_r (μ s)	E_a (eV)
36.74	16.87	0.58
54.68	22.36	0.58
70.80	26.41	0.58
176.31	48.94	0.59
481.32	101.74	0.60

จากข้อมูลในตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 โดยภาพรวมสรุปได้ว่า

- เมื่อเปรียบเทียบค่าอนุพันธ์ของช่วงชีวิตก่อนเกิดพาหะและการรวมตัวใหม่ จากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300K พบว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าอนุพันธ์ของช่วงชีวิตก่อนเกิดพาหะและการรวมตัวใหม่น้อยกว่าหรือสั้นกว่าของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 จากข้อมูลจึงมีความหมายว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีโครงสร้างผลึกที่มีความบกพร่องที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2
- กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าระดับพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 0.57 eV ถึง 0.63 eV ซึ่งเป็นไปได้ที่กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 จะมีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกหลายชนิด (non-uniform defects) ส่วนกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ค่าพลังงานกระตุ้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือค่อนข้างคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน (uniform defects)
- เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการของอาร์เรนเนียส ในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่หาได้จากทั้ง 2 วิธีการมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือ กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าพลังงานกระตุ้นหลายระดับ ส่วนกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีค่าพลังงานกระตุ้นระดับเดียว และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการผลิตครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 1 ที่หาได้จากทั้ง 2 วิธีจะแตกต่างกัน ส่วนค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ที่หาได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า

- จากการวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน อาจเป็นผลเนื่องจากกระบวนการยิงฝั่งประจุฟอสฟอรัสมีเงื่อนไขที่เหมาะสมกับกระบวนการแอนนีลิ่งซึ่งช่วยจัดเรียงตัวโครงสร้างของผลึกที่เสียหายจากกระบวนการยิงฝั่งประจุให้กลับอยู่ในสภาพที่ปกติเหมือนเดิมได้ดีกว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1
- เนื่องจากปริมาณสารเจือฟอสฟอรัสของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีความเข้มข้นมากกว่า จึงส่งผลให้ความกว้างชั้นปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นแคบลง และกระแสก่อกัดจึงลดลงด้วย ทำให้กระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีกระแสรั่วไหลรวมในรอยต่อพี-เอ็นน้อยกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1
- วิธีการวิเคราะห์แบบใหม่ที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่และการก่อกัดพาหะ ตลอดจนค่าพลังงานกระตุ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ถึงความบกพร่องทั้งที่มีลักษณะแบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอ (uniform/non-uniform defects) ของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบบใหม่ในการวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้นในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ไดโอดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน โดยการศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของกระแสรั่วไหลกับความบกพร่องของซิลิคอนในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น

เนื้อหาหลักของผลการทดลองแบ่งเป็น 2 บท ในบทที่ 4 เป็นผลการทดลองคุณสมบัติพื้นฐานของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ได้แก่ การวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานภายในรอยต่อพีเอ็น การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสและค่าความจุไฟฟ้าในไดโอด การวิเคราะห์ความกว้างชั้นปลอดพาหะ การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดในไดโอด การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรเนี่ยส และในหัวข้อสุดท้ายได้นำเสนอวิธีการแบบใหม่ในการวิเคราะห์ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้นในไดโอดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง ส่วนบทที่ 5 เป็นการประยุกต์ใช้งานในด้าน การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงานในรอยต่อพีเอ็น ในบทนี้จะกล่าวถึงกระแสรั่วไหลและการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์ การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงาน การวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกจากพลังงานกระตุ้นด้วยสมการของอาร์เรเนี่ยส และการวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง

ในขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ไดโอดที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างกัน 2 แบบคือ Large Area Diode และ Meander Diode โดยออกแบบให้มีขนาดพื้นที่เท่ากันทั้ง 2 แบบ เพื่อให้สอดคล้องและง่ายต่อการคำนวณหาพารามิเตอร์อื่นๆที่แสดงในหัวข้อที่ 3.4 สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอดใช้เทคโนโลยีการผลิตซีมอสแบบมาตรฐานขนาด 0.8 ไมโครเมตร ที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยขั้นตอนการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสเพื่อสร้างบ่อแยกชนิดเอ็นอาจทำให้เกิดความบกพร่องในซิลิคอนขึ้นได้ ถึงแม้ว่าในขั้นตอนของกระบวนการสร้างอุปกรณ์ โดยเฉพาะกระบวนการแอนนัลลิ่ง (Annealing) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญเพื่อซ่อมแซมและจัดเรียงตัวโครงสร้างของผลึกที่เสียหายจากกระบวนการยิงฝังประจุให้กลับอยู่ในสภาพที่ปกติเหมือนเดิม อาจทำได้ไม่สมบูรณ์หรือมีเงื่อนไขของกระบวนการแอนนัลลิ่งที่ไม่เหมาะสม จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความบกพร่องในโครงสร้างผลึกเกิดขึ้น ดังนั้นการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่ทำให้เกิดความบกพร่องจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขในการศึกษาและจากคุณลักษณะของกระแสรั่วไหลในรอยต่อพี-เอ็น จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้น เพื่อแสดงถึงความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน

ภายหลังจากกระบวนการสร้างทำการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดัน และค่าความจุไฟฟ้าของ รอยต่อพี-เอ็น โดยให้ทั้งแรงดันไบอัสตรงและแรงดันย้อนกลับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ตั้งแต่ $27^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ ในตู้มีดพร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาทำการ วิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของกระแสรั่วไหล ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และ ค่าพลังงานกระตุ้นในรอยต่อพี-เอ็น ตลอดจนการเปรียบเทียบผลของกระบวนการผลิตที่มีผลต่อ ผลรวมของกระแสรั่วไหลและด้านการสูญเสียพลังงานของอุปกรณ์ไดโอด

ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าอนุพันธ์ของช่วงชีวิตก่อเกิดพาหะและการรวมตัว ใหม่ จากกระบวนการผลิตทั้ง 2 ครั้ง พบว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าอนุพันธ์ของช่วงชีวิตก่อเกิด พาหะและการรวมตัวใหม่น้อยกว่าหรือสั้นกว่าของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 จึงมีความหมายว่า กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีโครงสร้างผลึกที่มีความบกพร่องที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าของกระบวนการ ผลิตครั้งที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าระดับพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการของอาร์เรน เนียส กับการวิเคราะห์ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของ คุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดันไบอัสตรง พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่หาได้จากทั้ง 2 วิธีการมี แนวโน้มคล้ายคลึงกัน คือกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าพลังงานกระตุ้นหลายระดับ ซึ่งจะมี ความบกพร่องในโครงสร้างผลึกหลายชนิด ส่วนกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีค่าพลังงานกระตุ้นระดับเดียว หรือมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกัน และ เมื่อพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 ที่หาได้จากทั้ง 2 วิธีจะมีค่าพลังงาน กระตุ้นที่แตกต่างกัน คือการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสมการของอาร์เรนเนียส มีค่าอยู่ในช่วง 0.3 eV ถึง 0.7 eV และการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์อนุพันธ์ของคุณลักษณะของไดโอดช่วงแรงดัน ไบอัสตรง มีค่าอยู่ในช่วง 0.57 eV ถึง 0.63 eV ส่วนค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ที่หาได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 eV ถึง 0.6 eV และอยู่ในช่วง 0.58 eV ถึง 0.60 eV ตามลำดับ

กระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกันและมีลักษณะ สม่ำเสมอมากกว่า เป็นผลเนื่องจากกระบวนการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสมีเงื่อนไขที่เหมาะสมกับ กระบวนการแอนนีลลิ่งซึ่งช่วยจัดเรียงตัวโครงสร้างของผลึกที่เสียหายจากกระบวนการยิงฝังประจุให้ กลับอยู่ในสภาพที่ปกติเหมือนเดิมได้ดีกว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และเนื่องจาก ปริมาณสารเจือฟอสฟอรัสของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีความเข้มข้นมากกว่า จึงส่งผลให้ความ กว้างชั้นปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นแคบลง และกระแสก่อเกิดจึงลดลงด้วย ทำให้กระบวนการผลิต ครั้งที่ 2 มีกระแสรั่วไหลรวมในรอยต่อพี-เอ็นน้อยกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1

วิธีการวิเคราะห์แบบใหม่ที่น่าเสนอ สามารถวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่และการ ก่อเกิดพาหะ ตลอดจนค่าพลังงานกระตุ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ถึงความบกพร่องทั้งที่มีลักษณะแบบ สม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอ (uniform/non-uniform defects) ของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น ภายในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตความกว้างชั้นปลอดพาหะที่อยู่ ภายในช่วงแรงดันไบอัสตรง และเนื่องจากคุณลักษณะของเทคนิคอนุพันธ์ซึ่งสามารถหาค่าช่วงชีวิต การรวมตัวใหม่ ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดพาหะ และค่าพลังงานกระตุ้นได้จากข้อมูลที่อุณหภูมิเพียง อุณหภูมิเดียวหรือที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่แท่นวัดคุณสมบัติ อุปกรณ์สำหรับวางแผนซิลิคอนซึ่งมีราคาหลายแสนบาท อีกทั้งสามารถใช้ข้อมูลของกระแสและ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Robert R Schler. "Moore's Law : Past, Present, and Future." *IEEE Spectrum*, June 1997, Vol 34 No 6 pp.53-59.
- [2] Moore G.E. "Cramming more Components onto Integrated Circuits." *Electronics*, 38 (8) (April 19, 1965); reproduced in Proc. IEEE, 86, 82 (1998).
- [3] Semiconductor Industry Association. "The International Technology Roadmap for Semiconductors." 2009 Edition.
- [4] Dennard R.H.et al. "Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions." *IEEE J. Solid-State Circ.* Vol.9., pp.256, 1974.
- [5] Intel Corporation. "Designing for Power : Intel Leadership in Power Efficient Silicon and System Design." [Online]. Available : <http://www.intel.com/technology>
- [6] B, Yu, H, Wang, A, Joshi, Q, Xiang, E, Ibok, and M.R. Lin. "15nm gate length planar CMOS transistor." *IEDM Tech. Digest.* pp.937-939, 2001.
- [7] I.H. Nam, J.S. Sim, S.I. Hong, B.G. Park, J.D. Lee, S.W. Lee, M.S. Kang, Y.W. Kim, K.P. Suh, and W.S. Lee. "Ultrathin gate oxide grown on nitrogen-implanted silicon for deep submicron CMOS transistors." *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.48(12), pp.2310-2316, 2001.
- [8] H.C.H. Wang, C.C. Wang, C.S. Chang, T. Wang, P.B. Griffin, and C.H. Diaz. "Interface induced uphill diffusion of boron: an effective approach for ultrashallow junction." *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 22(2), pp. 65-67, 2001.
- [9] Semiconductor Industry Association (SIA), "The National Technology Roadmap for Semiconductor", San Jose, CA, 2001, [Online]. Available : <http://public.itrs.net/>
- [10] K.K. Bourdelle, Y. Chen, R.A. Ashton, L.M. Rubin, A. Agarwal, and W.A. Morris. "Evaluation of high doses, high energy boron implantation into Cz substrates for epi-replacement in CMOS technology." *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 48(9), pp. 2043-2049, 2001.
- [11] H. Ryssel and I. Ruge. "Ion Implantation." John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [12] Y. Tamai, M.M. Oka, A. Nakada and T. Ohmi. "influence of substrate dopant concentration on electrical properties and residual defects in pn junction formed by low-temperature post-implantation annealing." *J. Appl. Phys.*, Vol. 87(7), pp. 3488-3496, 2000.

- [26] วีระ เพ็งจันทร์. 2541. “การศึกษาการออกแบบและสร้างวงจรรวมสะท้อนกระแสโครงสร้างมอสแบบเกตโลหะ”. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] W. Scot Ruska. *Microelectronics Processing : An Introduction to the Manufacture of Integrated Circuits*. International Edition. Singapore. McGraw-Hill, Inc. 1988.
- [28] Dewitt G. O. *Modern MOS Technology: Process, Devices, and Design*. The United States of America. McGraw-Hill, Inc. 1984.
- [29] W.R. Runyan and K.E. Bean. *Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology*. The United States of America. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1990.
- [30] สมเกียรติ ศุภเดช. *เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์*. พิมพ์ครั้งที่ 1. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง. 2542.
- [31] เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. *ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ*. พิมพ์ครั้งที่ 2. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง. 2554.
- [32] C. Claeys, E. Simoen, A. Poyai, and A. Czerwinski, “Electrical Quality Assessment of Epitaxial Wafers Based on p-n Junction Diagnostics.” *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 146(9), pp.3429-3434, 1999.
- [33] A. Poyai, E. Simoen, C. Claeys, A. Czerwinski, and E. Gaubas, “Improved extraction of the activation energy of the leakage current in silicon p-n Junction diodes.” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78(14), pp.1997-1999, 2001.
- [34] Schroder D.K. *Semiconductor Materials and Device Characterization*. John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [35] Shockley, W. and Read, W.T. “Statistics of the recombination of holes and electrons.” *Phys. Rev.*, 87:835-842 (1952); Hall, R.N., Electron-hole recombination in germanium. *Phys. Rev.*, 87:387 (1952).
- [36] Schroder, D.K. “The concept of generation lifetime in semiconductors.” *IEEE Trans. Electro. Dev.* ED-29:1336-1338 (1982).
- [37] W.C. O’Mara, R.B. Herring, and L.P. Hunt., *Handbook of semiconductor silicon technology*. Noyes Publications, New Jersey, 1990.
- [38] S.M. Sze., *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, New York. 1981.
- [39] C. T. Sah, R. N. Noyce, and W. Shockley “Carrier Generation and Recombination in p-n Junction and p-n Junction Characteristics.” *Proc. IRE*, 45, 1228 (1957).
- [40] A. Poyai, C. Claeys, and E. Simoen, “Improved extraction of carrier concentration and depletion width from capacitance-voltage characteristics of silicon n+-p-well junction diodes.” *Appl. Phys. Lett*, Vol. 80(7), pp. 1192-1194, 2002.

- [41] H. Aharoni, T. Ohmi, M.M. Oka, A. Nakada, and Y. Tamai, "Analysis of n+p silicon junctions with varying substrate doping concentrations made under ultraclean processing technology." J. Appl. Phys., Vol. 81 (3), pp. 1270-1288, 1997.
- [42] A.B. Sproul and M.A. Green, "Intrinsic carrier concentration and minority carrier mobility of silicon from 77 to 300 K." J. Appl. Phys., Vol.73(3), pp.1214-1255, 1993.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร อภัยวงศ์

คณบดี คณะศึกษาศาสตร์

โรงเรียนสาธิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิร

วิทยาเขต ๒ ภูเก็ต

ภูเก็ต

ต.เมืองเก่า อ.เมืองภูเก็ต

จังหวัดภูเก็ต ๘๓๐๐๑

๒๕๖๕-๐๕-๒๖

โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิร

วิทยาเขต ๒ ภูเก็ต

ภูเก็ต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วีระ เพ็งจันทร์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ อัมพร โพธิ์ไย “การศึกษาจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพีเอ็นสำหรับการสร้างซีมอสขนาด 0.8 ไมครอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON-33), 1 – 3 ธันวาคม 2553, โรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน จ.เชียงใหม่
- วีระ เพ็งจันทร์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ อัมพร โพธิ์ไย “การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นของความบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการฝังประจุ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32), 28 - 30 ตุลาคม 2552, โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท จ.ปราจีนบุรี
- วีระ เพ็งจันทร์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ อนุชา เรืองพาณิชย์ “การศึกษาตัวต้านทานชนิดปอแยกเอ็นสำหรับการสร้างซีมอสขนาด 0.8 ไมครอนด้วย TCAD” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON-32), 28 - 30 ตุลาคม 2552, โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท จ.ปราจีนบุรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เป็นเลิศทางวิชาการ
ด้วยคุณธรรมและคุณภาพ

วิชา

เลข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	วีระ เพ็งจันทร์
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 4 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2512
ที่อยู่	110/138 ม.10 ถนนรามคำแหง 188 เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510
ประวัติการศึกษา	2541 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง 2533 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	รายละเอียดในภาคผนวก
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) CMOS Fabrication Technology / Application 2) TCAD Process Simulation for Microelectronics 3) Integrated Circuits Failure / Defects Analysis
ประสบการณ์ทำงาน	
ปัจจุบัน - 2552	นักวิจัยชำนาญการ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
2543 - 2552	นักวิจัยชำนาญการ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
2541 - 2543	นักวิจัย ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
2535 - 2541	เจ้าหน้าที่วิจัย ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ปัจจุบัน - 2550	คณะกรรมการตรวจสอบและประเมินคุณภาพการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้