

การวิเคราะห์ค่าผลผลิตโดยแบบจำลองค่าผลผลิตบนพื้นฐานการวิเคราะห์ความ  
บกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์

YIELD ANALYSIS BY YIELD MODEL BASED ON THE DEFECT ANALYSIS WITH  
DERIVATIVE METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-043-087

การวิเคราะห์ค่าผลผลิตโดยแบบจำลองค่าผลผลิตบนพื้นฐานการวิเคราะห์ความ  
บกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์

YIELD ANALYSIS BY YIELD MODEL BASED ON THE DEFECT ANALYSIS WITH  
DERIVATIVE METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-043-087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

YIELD ANALYSIS BY YIELD MODEL BASED ON THE DEFECT ANALYSIS WITH  
DERIVATIVE METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

KMITL-2016-EN-M-043-087

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ค่าผลผลิตโดยแบบจำลองค่าผลผลิตบนพื้นฐานการวิเคราะห์ความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์

Thesis Title Yield Analysis by Yield Model Based on the Defect Analysis with Derivative Method

นักศึกษา นายวรารกร แพรภักดิ์พิศุทธิ์

รหัสประจำตัว 54612451

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-087

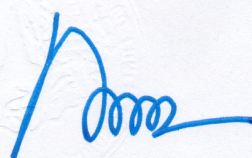
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	นิยมเจริญ	
ดร.รังสรรค์	เมืองเหลือ	
ดร.อัมพร	โพธิ์โย	
ดร.วีระ	เพ็ญจันทร์	
รศ.ดร.เต็มพงษ์	เพ็ชรกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 14.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ (รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี) ยืนยันด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ณ บัดนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ค่าผลผลิตโดยแบบจำลองค่าผลผลิตบนพื้นฐานการวิเคราะห์ความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์
นักศึกษา	นายวรากร แพรภักดิ์พิศุทธิ์
รหัสประจำตัว	54612451
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าผลผลิตโดยแบบจำลองค่าผลผลิตบนพื้นฐานการวิเคราะห์ความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์ ที่เกิดขึ้นในรอยต่อพีเอ็นที่สร้างจากเทคโนโลยีกระบวนการสร้างอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบซีมอสขนาด 0.8 ไมครอน บนแผ่นซิลิคอน โดยการวัดคุณสมบัติของกระแส-แรงดัน และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ที่แรงดันไบอัสตรง 0 - 0.5 โวลต์ อุณหภูมิ 300 เคลวิน จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด และช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ของพาหะ จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงเป็นรูปแบบแผนภูมิ 3 มิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความบกพร่องเกิดขึ้นในโครงสร้างของแผ่นซิลิคอน และมีการกระจายตัวของความบกพร่องเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น โดยค่าผลผลิตบนแผ่นซิลิคอนทั้งหมดพบว่ามีค่าร้อยละ 83.87 และจากการวิเคราะห์ความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์ สามารถหาร้อยละของค่าผลผลิตได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 2 ที่จำนวนการสุ่ม 25 ซิป ซึ่งเป็นระดับความละเอียดสูงสุดตามมาตรฐาน ANSI/ASQC Z1.9 บนแผ่นซิลิคอน

Thesis	YIELD ANALYSIS BY YIELD MODEL BASED ON THE DEFECT ANALYSIS WITH DERIVATIVE METHOD
Student	Mr. Warakorn Praepattharapisut
Student ID.	54612451
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Toempong Petchakul

## ABSTRACT

This thesis presents yield analysis by yield model based on the defect analysis with derivative method in P-N junction on the silicon wafer that was fabricated with 0.8 micron CMOS technology. The diode characteristics, current-voltage and capacitance-voltage will be measured at forward bias voltage from 0 to 0.5 V and temperature 300 K. The generation and recombination lifetime can be obtained, and can be presented as 3 dimensions graph. The result shows there are defects in the silicon wafer and the defect distribution is non-uniformity for entire of wafer. As a results, silicon wafer yield is 83.87%. And the defect analysis with derivative method can get the consistent value as yield model with the 2 % tolerance at sample size 25 chips that is the highest level in ANSI/ASQC Z1.9 standard.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ที่ได้ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดจนถึงแนะนำในเรื่องต่างๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร. วีระ เพ็งจันทร์ สำหรับความรู้ แนวความคิด และแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์โย และ คุณอนุชา เรืองพานิช ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ในการติดต่อประสานงาน สนับสนุนห้องวิจัยในการวัดและเก็บข้อมูล การให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือเพื่อทำการทดลอง

ขอบคุณ สมุจเฉท ม่วงทอง เพื่อนร่วมภาควิชาและหลักสูตร ในการติดต่อและประสานงาน

ขอบคุณเพื่อนร่วมงาน และบริษัท แม็กซิม อินทริเกรตเต็ด โปรดักส์ ประเทศไทย จำกัด ที่เป็นที่ทำงานและที่เก็บข้อมูล รวมถึงเป็นแหล่งเงินทุน

ขอบคุณ นางสาวปวันรัตน์ ครบุรี ที่เป็นเสมือนที่ปรึกษา และคอยกระตุ้นให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้สั่งสอนวิชาความรู้ รวมไปถึงบิดามารดา ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

วรากร แพรภทพิศุทธิ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของอิเล็กทรอนิกส์.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	6
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	6
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	6
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	6
1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 รอยต่อพีเอ็น.....	8
2.1.1 คุณสมบัติรอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุล.....	9
2.1.2 คุณสมบัติรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง.....	13
2.1.3 คุณสมบัติความจุไฟฟ้าในรอยต่อพีเอ็น.....	16
2.1.3.1 ความจุไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ.....	16
2.1.3.2 ความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่.....	18
2.2 ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ (Defect in Semiconductor).....	19
2.3 การก่อกำเนิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ.....	22
(Carrier Generation and Carrier Recombination)	
2.3.1 แผนภาพการก่อกำเนิดและการรวมตัวใหม่.....	22
2.3.2 ช่วงชีวิตการก่อกำเนิดและการรวมตัวใหม่.....	23
2.3.2.1 ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่.....	23
2.3.2.2 ช่วงชีวิตการก่อกำเนิด.....	26
2.4 แบบจำลองค่าผลผลิต (Yield Model).....	27
2.4.1 ค่าผลผลิต (Yield).....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด IV ว่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.1.1 ความบกพร่องที่เด่นชัด .....	28
2.4.1.2 ความบกพร่องแบบสุ่ม .....	28
2.4.1.2.1 ค่าเฉลี่ยของความบกพร่อง (Average of Defect) .....	29
2.4.1.2.2 ฟังก์ชันของแบบจำลองค่าผลผลิต.....	29
2.4.2 รูปแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution).....	30
2.4.2.1 การแจกแจงแบบทวินาม (Binomial Distribution) .....	30
2.4.2.2 การแจกแจงแบบปัวซอง (Poisson Distribution).....	31
2.4.2.3 การแจกแจงแบบปัวซองจากการประมาณค่า.....	31
ของการแจกแจงแบบทวินาม	
2.4.2.4 การแจกแจงแบบสามเหลี่ยมหรือซิมป์สัน (Simpson Distribution)...	33
2.4.2.5 การกระจายแบบคงที่หรือสี่เหลี่ยม (uniform Distribution).....	33
2.4.2.6 การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution).....	33
2.4.3 แบบจำลองค่าผลผลิตที่ได้จากการแจกแจงความน่าจะเป็น .....	34
2.4.3.1 แบบจำลองค่าผลผลิตของปัวซอง (Poisson Yield Model).....	34
2.4.3.2 แบบจำลองค่าผลผลิตของปัวซองที่มีการปรับปรุง.....	35
(Compound Poisson Yield Model)	
2.4.3.3 แบบจำลองค่าผลผลิตจากการแจกแจงของเดลตาฟังก์ชัน.....	35
2.4.3.4 แบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม ...	36
2.4.3.5 แบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจง .....	38
แบบคงที่หรือสี่เหลี่ยม	
2.5 กระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	38
2.5.1 กระบวนการการผลิตแผ่นซิลิคอน .....	38
2.5.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน.....	39
2.5.3 กระบวนการทางแสง .....	42
2.5.4 กระบวนการแพร่สารเจือปน.....	43
2.5.5 กระบวนการยิงฝังประจุ.....	44
2.5.6 การเคลือบด้วยปฏิกิริยาเคมีของไอระเหย.....	45
2.5.7 การสร้างขั้วโลหะ.....	45
2.5.8 กระบวนการสปัตเตอริง.....	46
2.5.9 กระบวนการขัดผิวแบบเคมีกล.....	46
2.5.10 กระบวนการสกัด .....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อมายังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.11 เทคโนโลยีการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ .....	46
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	48
3.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส .....	49
3.3 เครื่องมือและกระบวนการวัด.....	53
3.4 วิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง.....	55
3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสด้วยองค์ประกอบของกระแส .....	55
3.4.2 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสในเนื้อสารด้านพื้นที่.....	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	59
4.1 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของกระแสในไดโอด.....	59
4.2 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของค่าความจุไฟฟ้าในไดโอด.....	61
4.3 การวิเคราะห์ความกว้างของชั้นปลอดพาหะ.....	62
4.4 การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตในไดโอดด้วยเทคนิคอนุพันธ์.....	63
4.5 การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของปัวซอง..	70
4.6 การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟี..	74
จากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม	
4.7 การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟี..	75
จากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบคงที่หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า	
4.8 การทดลองเปรียบเทียบค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตที่นำมาคำนวณ .....	77
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	79
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	79
5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัย .....	80
เอกสารอ้างอิง .....	81
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ .....	83
ประวัติผู้เขียน .....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตัดВИ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระดับขนาดและจำนวนอุปกรณ์ของวงจรรวม .....	3
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับสีของชั้นออกไซด์ของซิลิคอน .....	41
2.2 ความแตกต่างของกระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดขั้วเกตอะลูมิเนียม (Al-Gate).....	47
และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดขั้วเกตโพลีซิลิคอน (Polygate)	
3.1 ข้อมูลทางเรขาคณิตของไดโอดแบบพื้นที่กว้างและไดโอดแบบคดเคี้ยว .....	55
4.1 ค่าของ $\tau_r$ และค่า $\tau_g$ ของจุดตัวอย่างและค่าเฉลี่ย.....	66
4.2 Sample Size Code Letter ตามมาตรฐาน MIL STD 414 หรือ ANSI/ASQC Z1.9 .....	70
4.3 Master Table ตามมาตรฐาน MIL STD 414 หรือ ANSI/ASQC Z 1.9 .....	71
4.4 การหาค่าความหนาแน่นของความบกพร่องจากค่าจำนวนชิปที่สุ่ม.....	73
4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตของปั๊มของ เปรียบเทียบกับ .....	73
ค่าผลผลิตที่ได้จริง	
4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจง .....	75
ความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม เปรียบเทียบกับค่าผลผลิตที่ได้จริง	
4.7 ค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีด้วยการแจกแจง .....	76
ความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เปรียบเทียบกับค่าผลผลิตที่ได้จริง	
4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบจากแบบจำลองค่าผลผลิต .....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ทราวนซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นตัวแรกของซีคเคเลย์.....	1
1.2 วงจรรวมที่สร้างขึ้นโดย (ก) กิลล์ปี และ (ข) นอยซ์ .....	2
1.3 แผนผังขั้นตอนการสร้างวงจรรวม .....	4
2.1 รอยต่อพีเอ็นแบบรอยต่อของโลหะผสม .....	8
2.2 รอยต่อพีเอ็นแบบวิธีการแพร่สารเจือ .....	9
2.3 ลักษณะของพาหะและอะตอมสารเจือในรอยต่อพีเอ็น .....	9
2.4 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นลักษณะของรอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุล .....	10
2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสของพาหะที่ตำแหน่งต่างๆในขณะได้รับไบอัสตรง .....	15
2.6 แผนภาพโครงสร้างอะตอมและระดับพลังงานของซิลิคอนโดย ก) ผลึกสมบูรณ์ และ ข) มีความบกพร่อง	20
2.7 ความบกพร่องในรูปร่างต่างๆ.....	21
ก) Foreign interstitial ข) dislocation ค) self-interstitial ฉ) precipitate ง) extrinsic stacking faults จ) foreign substitutionals ฉ) vacancy ช) intrinsic stacking fault ซ) foreign substitutionals	
2.8 แผนภาพระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือระดับเล็ก .....	23
และกระบวนการจับและปล่อยของอิเล็กตรอน	
2.9 กลไกกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนเกิน โดย .....	24
ก) การรวมตัวใหม่แบบมัลติโฟนอน ข) การรวมตัวใหม่แบบแฟรงก์ลี และ ค) การรวมตัวใหม่แบบโอเจอร์	
2.10 กลไกกระบวนการก่อเกิดโดย.....	26
ก) การก่อเกิดโดยโฟนอน ข) การก่อเกิดโดยใช้พลังงานโฟตอน ค) การก่อเกิดเนื่องจากการชน	
2.11 เดลตาฟังก์ชัน.....	36
2.12 ฟังก์ชันของเกาส์เซียน .....	36
2.13 ฟังก์ชันของซิมป์สัน .....	37
2.14 ฟังก์ชันของการแจกแจงแบบคงที่ .....	38
2.15 โครงสร้างภายในของเครื่องผลิตผลึกซิลิคอนแบบของโซชาร์ลสกี (Czochralski).....	39
2.16 คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงแบบบวก (Positive) และแบบลบ (Negative).....	42
2.17 เตาแพร่สารเจือที่ใช้ในการผลิตวงจรรวม .....	44
2.18 หลักการกระบวนการยิงฝึประจุ .....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดชนิด P <sup>+</sup> -N <sub>well</sub> ที่ใช้ในการทดลอง .....	48
3.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส .....	53
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	54
3.4 ตู้มิตพร้อมแทนวัตคุณสมบัติอุปกรณ์.....	54
4.1 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลในไดโอด.....	59
4.2 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลในไดโอดในเงื่อนไขไบอัสตรง .....	60
4.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของความหนาแน่นของกระแส.....	61
4.4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของความหนาแน่นของควมจุไฟฟ้า .....	62
4.5 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของค่าควมกว้างชั้นปลอดพาหะ.....	63
4.6 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสอิมิตตัวด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรง .....	65
4.7 ความสัมพันธ์ของค่า $qniW_A/J_{brA0}$ และ $e^{(qV/2kT)}$ .....	66
4.8 แผนภาพแสดงตำแหน่งพิกัดที่จะระบุบนแผ่นซิลิคอน .....	67
4.9 ค่าของ $\tau_g$ เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งบนแผ่นซิลิคอน.....	68
4.10 ค่าของ $\tau_r$ เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งบนแผ่นซิลิคอน .....	68
4.11 การกระจายของค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด .....	69
4.12 การกระจายของค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่.....	69
4.13 ตำแหน่งที่จะทำการสุ่มบนแผ่นซิลิคอน.....	71
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับจำนวนชิปที่ทำการทดสอบ .....	74
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับจำนวนชิปที่ทำการทดสอบ .....	75
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับจำนวนชิปที่ทำการทดสอบ .....	76
4.17 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่าผลผลิตที่ได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตแบบต่างๆ.....	77

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของอิเล็กทรอนิกส์

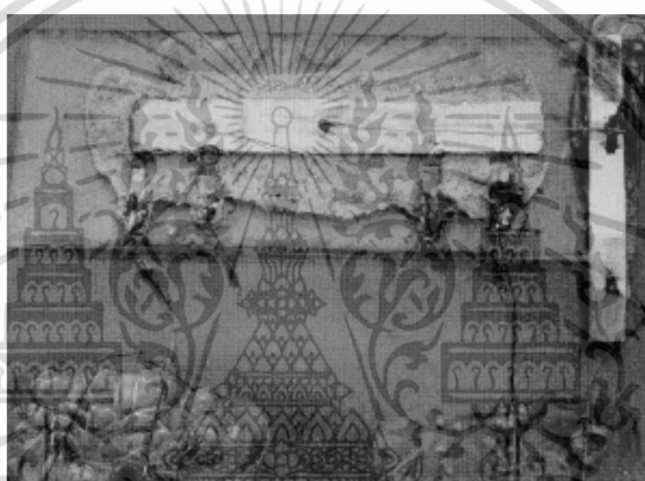
อิเล็กทรอนิกส์เป็นวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของประจุในก๊าซ ในสุญญากาศ หรือในสารกึ่งตัวนำ นับตั้งแต่การค้นพบอันยิ่งใหญ่ของนักวิทยาศาสตร์ ได้แก่ อังเดร มารี แอมแปร์ (Ampere) ชาร์ลส ออกัสติน เดอ คูลอมบ์ (Coulomb) ไมเคิล ฟาราเดย์ (Faraday) โยฮัน คาร์ล ฟรีดริช เกาส์ (Gauss) โจเซฟ เฮนรี (Henry) กุสตาฟ โรเบิร์ต เคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff) เจมส์ เคล็ก แมกซ์เวลล์ (Maxwell) และจอร์จ ไฮมอน โอห์ม (Ohm) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จนไปถึงการสร้างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เริ่มจากในปี ค.ศ. 1904 จอห์น แอมโบรส เฟลมมิง (Fleming) ได้สร้างอุปกรณ์ที่คล้ายกับไดโอด โดยเรียกอุปกรณ์นี้ว่า วาล์ว (Valve) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดความร้อนและขั้วแผ่นโลหะ บรรจุอยู่ในสุญญากาศ โดยมีคุณสมบัติที่นำกระแสเมื่อให้แรงดันบวก และไม่นำกระแสเมื่อให้แรงดันลบ และด้วยคุณสมบัตินี้เองจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในวงจรวิทยุ ต่อมาในปี ค.ศ. 1906 กรีนลีฟ วิทเทอร์ พิการ์ด (Pickard) ได้นำผลึกของซิลิคอนมาใช้เป็นวาล์ว แต่เนื่องจากมีเสถียรภาพต่ำจึงไม่เป็นที่นิยม และในปีเดียวกัน ลี เดอ ฟอเรสต์ (DeForest) ได้สร้างหลอดไตรโอด ซึ่งเรียกว่า audion โดยเพิ่มขั้วที่สามเข้ามาเพื่อควบคุมการไหลของประจุ และด้วยหลักการนี้จึงสามารถสร้างวงจรขยายเป็นครั้งแรกจากอุปกรณ์นี้ได้



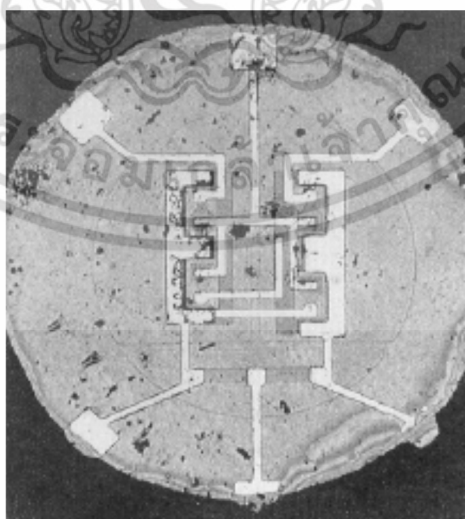
รูปที่ 1.1 ทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นตัวแรกของซีอคเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาวัสดุหลอดสุญญากาศได้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง และนำไปใช้งานในหลายๆประเภท ทั้งการสื่อสาร คอมพิวเตอร์ และระบบควบคุม ในขณะที่หลอดสุญญากาศเริ่มมีข้อจำกัดในการใช้พลังงาน และปัญหาการเกิดความเสียหายที่ฉีกหลุดจากการใช้งาน ต่อมาได้มีการสร้างทรานซิสเตอร์แบบจุดสัมผัสตัวแรกเมื่อปี ค.ศ. 1947 ของวิลเลียม ช็อคเคีย์ (Shockley) แต่ประสิทธิภาพยังไม่สูงนัก ช็อคเคีย์ ซึ่งเป็นหัวหน้าทีมวิจัยในขณะนั้น พบว่าปัญหาของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้เกิดที่จุดสัมผัส จึงต้องการที่จะพัฒนาทรานซิสเตอร์แบบบรอยต์ต่อ โดยรูปแบบของอุปกรณ์ตัวใหม่นี้ มีการทำงานที่ขึ้นอยู่กับพาหะของประจุทั้งสองชนิด และเมื่อให้ค่าแรงดันเพียงเล็กน้อย จะทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมาก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1950 ซึ่งเป็นทศวรรษแห่งการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยี จึงได้มีการผลิตทรานซิสเตอร์สู่ท้องตลาด



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.2 วงจรรวมที่สร้างขึ้นโดย (ก) กิลล์ปี และ (ข) นอยซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

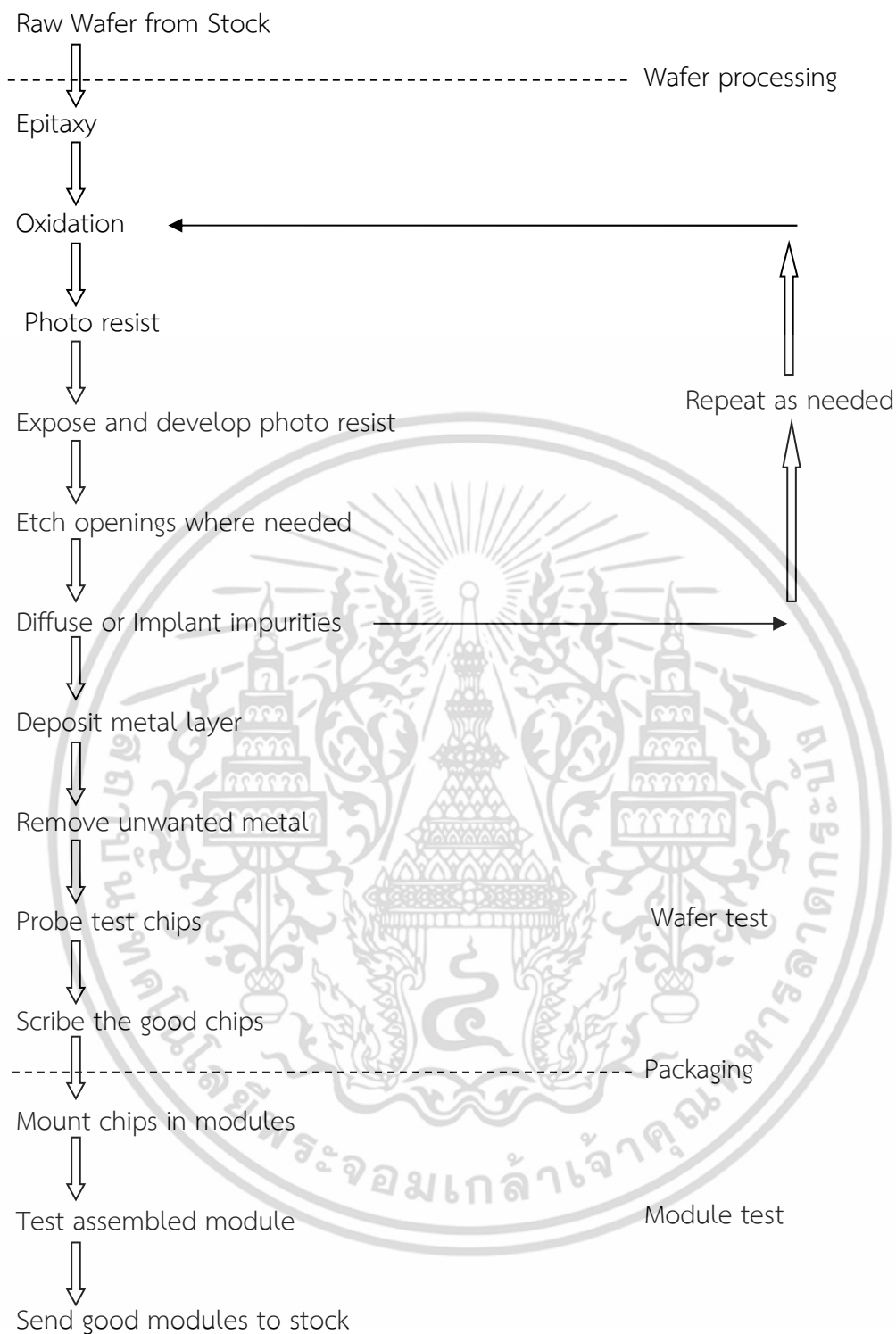
ในปี ค.ศ. 1958 แจ็ค กิลล์ปี (Kilby) ได้นำเสนอวงจรแบบผลึกเดี่ยว โดยใช้เพียงเยอรมาเนียมในการสร้างวงจร ขณะเดียวกัน โรเบิร์ต นอยซ์ (Noyce) ได้พัฒนาวงจรให้มีหลายๆอุปกรณ์อยู่บนซิลิคอนเพียงชิ้นเดียว ซึ่งต่อมาเรียกอุปกรณ์ลักษณะนี้ว่า วงจรรวม (Integrated Circuit: IC) และด้วยวิธีการนี้จึงสามารถลดขนาด น้ำหนัก และราคาของวงจรรวมได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1961 บริษัท แฟร์ชาลด์ (Fairchild) และ เท็กซัส อินสตรูเมนต์ (Texas Instrument) เป็นสองบริษัทแรกที่ได้มีการผลิตวงจรรวมในเชิงพาณิชย์ จนในปัจจุบันสามารถสร้างวงจรหรือระบบที่ใช้อุปกรณ์หลายพันตัวได้ด้วยการสร้างบนผลึกซิลิคอนชิป (Chip) เพียงชิ้นเดียว ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาทั้งการออกแบบวงจรรวมที่เชื่อถือได้มากขึ้นจากการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ และการพัฒนากระบวนการสร้าง ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง มีจำนวนของอุปกรณ์ต่อชิปเพิ่มขึ้น และสามารถสร้างวงจรรวมที่ซับซ้อนมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งเห็นได้ว่าเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวม มีแนวโน้มระดับขนาดและจำนวนของอุปกรณ์บนวงจรรวมที่เพิ่มมากขึ้น [1]

ตารางที่ 1.1 ระดับขนาดและจำนวนของอุปกรณ์บนวงจรรวม

ระดับของวงจรรวม	จำนวนอุปกรณ์ที่สร้างบนชิป
Small-scale integration : SSI	2 ถึง 50 ตัว
Medium-scale integration : MSI	50 ถึง 5,000 ตัว
Large-scale integration : LSI	5,000 ถึง 100,000 ตัว
Very Large-scale integration : VLSI	100,000 ถึง 10,000,000 ตัว
Ultra Large-scale integration : ULSI	10,000,000 ถึง 1,000,000,000 ตัว
Super Large-scale integration: SLSI	มากกว่า 1,000,000,000 ตัว

ในกระบวนการสร้างวงจรรวมสารกึ่งตัวนำ มีอุปกรณ์หลายล้านตัวถูกสร้างพร้อมๆกันในกระบวนการที่ซับซ้อนหลายขั้นตอนบนแผ่นซิลิคอน จากนั้นแผ่นซิลิคอนจะถูกนำมาทดสอบการทำงานของแต่ละชิป ขั้นตอนการประกอบชิปที่ผ่านการทดสอบแล้วบรรจุลงบนตัวถัง และการทดสอบขั้นสุดท้ายในรูปของชิ้นงาน และส่งชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสู่ตลาด ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 1.3 [2]

วงจรรวมในปัจจุบันมีความซับซ้อนมากขึ้นจากการลดขนาดของอุปกรณ์ และการเพิ่มขึ้น (Layer) ของแต่ละชิป ดังนั้นแผ่นซิลิคอนจะต้องผ่านขั้นตอนในกระบวนการผลิตมากมาย จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขได้ทั้งหมด จึงเกิดสิ่งที่ไม่ต้องการขึ้นในกระบวนการผลิต [3] ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ขึ้นในแผ่นซิลิคอน ความไม่สมบูรณ์หรือความบกพร่องเหล่านั้น ทำให้วงจรรวมไม่สามารถใช้งานได้ หรือทำงานได้ไม่ตรงตามเงื่อนไขการทำงานของวงจรที่ต้องการ [4]



รูปที่ 1.3 แผนผังขั้นตอนการสร้างวงจรรวม

ในการทดสอบคุณสมบัติของวงจรรวม แบ่งเป็น 3 ระดับ โดยในระดับแรกเป็นการวัดคุณสมบัติต่างๆซึ่งต้องรวดเร็วพอที่จะสามารถกลับไปตรวจสอบกระบวนการผลิตในขณะนั้นได้ ตัวแปรที่วัดอาจเป็นคุณสมบัติของแผ่นซิลิคอน เช่น ค่าความต้านทานจากการยิงฝังประจุ หรือจากตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ เช่น แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์แต่ละตัว ซึ่งผลลัพธ์ที่วัดได้จากการทดสอบระดับแรก แสดงให้เห็นได้จาก จำนวนของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทดสอบตามเงื่อนไข หรือหมายถึงร้อยละของผลผลิตจากกระบวนการผลิต การทดสอบในระดับที่สอง เป็นการทดสอบทางไฟฟ้าของแต่ละอุปกรณ์บนแผ่นซิลิคอน โดยทดสอบการทำงานตามเงื่อนไขการทำงานของวงจร ซึ่งทำหลังจากที่ผ่านกระบวนการสร้างมาแล้ว เพื่อกำจัดตัวชิปที่มีแนวโน้มที่ไม่สมบูรณ์ออก และระดับสุดท้าย เป็นการทดสอบกับวงจรรวมที่ถูกบรรจุในตัวถังเรียบร้อยแล้ว ซึ่งการทดสอบที่ระดับนี้เพื่อให้แน่ใจว่าวงจรรวมทุกตัวผ่านเงื่อนไขตามข้อกำหนดของลูกค้า [5]

ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะรอยต่อพีเอ็น ซึ่งในการทดสอบหาค่าความบกพร่องที่เกิดขึ้น มีตั้งแต่การหาค่าความเก็บประจุไฟฟ้า การวัดค่ากระแส การวัดค่าประจุ จนถึงการวัดแบบ Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) [6] ที่ใช้ในการศึกษาหาความบกพร่องที่อยู่ในชั้นปลอดพาหะซึ่งถือว่ามีแนวโน้มเชื่อถือมากที่สุด แต่ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ซับซ้อนอย่างมาก และมีราคาแพง จากนั้น ดร.อัมพร โพธิ์ไย ได้คิดค้นวิธีการวัดที่ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับ DLTS แต่ใช้เพียงอุปกรณ์พื้นฐานวัดคุณสมบัติของไดโอดในขณะไบอัสกลับ และการคำนวณเพิ่มเติม [7] อย่างไรก็ตาม ดร.วีระ เพ็งจันทร์ พบว่าวิธีการวัดแบบที่กล่าวมานั้น ยังมีความยุ่งยากที่ต้องใช้อุณหภูมิถึง 3 ช่วง จึงได้นำเสนอวิธีการวัดไดโอดในขณะได้รับไบอัสตรง และวัดเฉพาะช่วงอุณหภูมิห้องเท่านั้น [8]

ในกระบวนการทดสอบวงจรรวม มีการคาดหวังค่าผลผลิตที่ได้จากการสร้างเท่ากับ 100% ซึ่งหมายความว่าชิปทุกตัวสามารถทำงานได้ โดยค่าผลผลิต (Yield) คืออัตราส่วนของจำนวนชิปที่ผ่านการทดสอบการทำงานตามเงื่อนไขของวงจร เทียบกับจำนวนชิปทั้งหมดบนแผ่นซิลิคอนนั้นๆ ดังนั้นผู้ผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจึงมักนำค่าผลผลิตมาเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้มาตรฐานเดียวกัน

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น เมื่อศึกษาค้นคว้าปัจจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการศึกษาในประเด็นของการหาค่าผลผลิตของวงจรรวมจากกระบวนการสร้างในหลายแนวทาง ทั้งการหาค่าผลผลิตตั้งแต่ในรูปแบบของแผ่นซิลิคอน ไปจนถึงค่าผลผลิตในตัวถังที่บรรจุแล้ว ผู้วิจัยเห็นว่าปัญหานี้เป็นปัญหาหนึ่งที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของกระบวนการผลิตวงจรรวมที่มีความสำคัญ ซึ่งสามารถแก้ไข และพัฒนาต่อไปได้ ในการวิจัยนี้จึงได้กำหนดปัญหาและค้นคว้าทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาแนวคิดในการหาค่าผลผลิตจากการวิเคราะห์หาความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์ ร่วมกับการใช้แบบจำลองค่าผลผลิต (Yield Model) ในรูปแบบต่างๆ เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกันระหว่างค่าผลผลิตของแผ่นซิลิคอนทั้งแผ่น และค่าผลผลิตของแผ่นซิลิคอนที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบต่างๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการทดสอบค่าคุณสมบัติต่างๆของชิปที่ตำแหน่งต่างๆของแผ่นซิลิคอนแบบสุ่ม จากนั้นนำมาคำนวณเพื่อคาดเดาค่าผลผลิตที่ได้ และเปรียบเทียบกับค่าผลผลิตที่ได้จริง

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ค่าผลผลิตบนพื้นฐานการวิเคราะห์ความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์
2. เพื่อศึกษาแบบจำลองค่าผลผลิตที่ใช้ในการคำนวณค่าผลผลิต

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการทดสอบวัดบนแผ่นซิลิคอน พบว่าในการหาค่าผลผลิตถ้ามีจำนวนชิปต่อแผ่นมาก ทำให้ในการวัดและประเมินค่าผลผลิตที่ได้ใช้เวลาานาน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอรูปแบบการวัด โดยนำแบบจำลองค่าผลผลิตเข้ามาช่วยในการคาดเดาร้อยละของค่าผลผลิตที่ได้ โดยไม่จำเป็นต้องวัดค่าทุกตำแหน่ง และผู้วิจัยคาดหวังว่าด้วยวิธีการนี้จะทำให้การวัดค่าและการประเมินคุณภาพของการผลิตสะดวกมากขึ้น

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษา ได้แก่ การวัดคุณสมบัติของไดโอดชนิดรอยต่อพีเอ็นบนแผ่นซิลิคอน ด้านกระแสและแรงดัน และค่าความจุไฟฟ้าและแรงดัน การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ การคำนวณหาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่ และการคำนวณด้วยแบบจำลองค่าผลผลิต

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษากระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอด
2. วัดคุณสมบัติของไดโอด
3. ผลที่ได้นำมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาความบกพร่องที่เกิดขึ้นบนแผ่นซิลิคอน และค่าผลผลิตที่ได้จริง
4. เปรียบเทียบค่าผลผลิตที่ได้ระหว่างการคำนวณจากแบบจำลองค่าผลผลิต กับค่าผลผลิตที่ได้จริง
5. สรุปผลการทดลอง

## 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทโดย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาของการวิจัย วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์ สมมติฐานของการวิจัยซึ่งเป็นการอธิบายแนวคิดในการวิจัย จากนั้นกล่าวถึงขอบเขตของการวิจัย ซึ่งเน้นไปที่การวัดและการเก็บข้อมูล การวิเคราะห์และอธิบายผลที่เกิดขึ้น และสุดท้ายเป็นการสรุปขั้นตอนของการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็น ที่สภาวะสมดุล และที่สภาวะไบอัสตรง ทั้งคุณสมบัติ กระแส-แรงดัน และคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ แบบจำลองค่าผลผลิต และกระบวนการสร้างวงจรรวม

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย กล่าวถึงการออกแบบการทดลอง และการวัดผล ขั้นตอนเตรียมการทดลอง ซึ่งเริ่มจากการเตรียมกระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซิมอส ที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติต่างๆ รวมถึงวิธีการใช้เครื่องมือวัดเพื่อวัดคุณสมบัติต่างๆของไดโอด

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล กล่าวถึง การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของ กระแสในไดโอด การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของค่าความจุไฟฟ้าในไดโอด การวิเคราะห์ความกว้างของชั้นปลอดพาหะการวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตในไดโอดด้วยเทคนิคอนุพันธ์ การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของปั๋วซอง การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบคงที่หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตที่นำมาคำนวณ

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงการสรุปผลที่ได้จากการวิจัย และข้อเสนอแนะที่จะเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

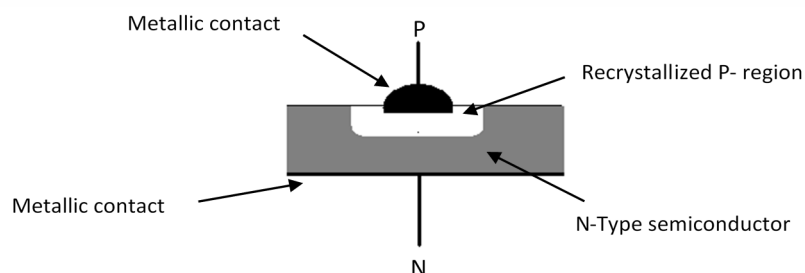
### 2.1 รอยต่อพีเอ็น

รอยต่อพีเอ็น (P-N Junction) หมายถึง รอยต่อระหว่างผลึกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งด้านหนึ่งมีคุณสมบัติชนิดพี และอีกด้านหนึ่งมีคุณสมบัติชนิดเอ็น เป็นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเกือบทุกชนิด ดังนั้นการศึกษาพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีของรอยต่อพีเอ็น จึงมีความสำคัญต่อความเข้าใจในโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ในทางปฏิบัติ ไม่สามารถประดิษฐ์รอยต่อพีเอ็นโดยการนำก้อนสารกึ่งตัวนำชนิดพีมาประกบกันกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้โดยตรง แม้ว่าพยายามขัดผิวของสารกึ่งตัวนำทั้งสองก้อนในส่วนที่มาประกบกันอย่างดีที่สุดแล้วก็ตาม เหตุผลหลักที่ทำให้การประดิษฐ์รอยต่อพีเอ็นด้วยวิธีการดังกล่าวไม่ประสบความสำเร็จคือ [9]

- เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองมาประกบกัน ก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำที่ติดกันจริงมีเพียงบางจุดเท่านั้น ซึ่งทำให้การทำงานในลักษณะรอยต่อพีเอ็นไม่เกิดขึ้น
- ถึงแม้ผิวของเนื้อสารกึ่งตัวนำได้ขัดผิวมาอย่างดีแล้ว ก็ยังมีจุดที่โครงสร้างผลึกชำรุดอยู่มากมาย นอกจากนี้ยังมีพันธะโควาเลนต์ที่ขาดหรือไม่สมบูรณ์อยู่มาก
- ที่บริเวณผิวของเนื้อสารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับซิลิคอน มีชั้นออกไซด์บางๆ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและง่ายดายนที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นชั้นออกไซด์ทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดพีถูกกันออกจากชนิดเอ็น ทำให้ไม่เกิดลักษณะการทำงานของรอยต่อพีเอ็นขึ้น

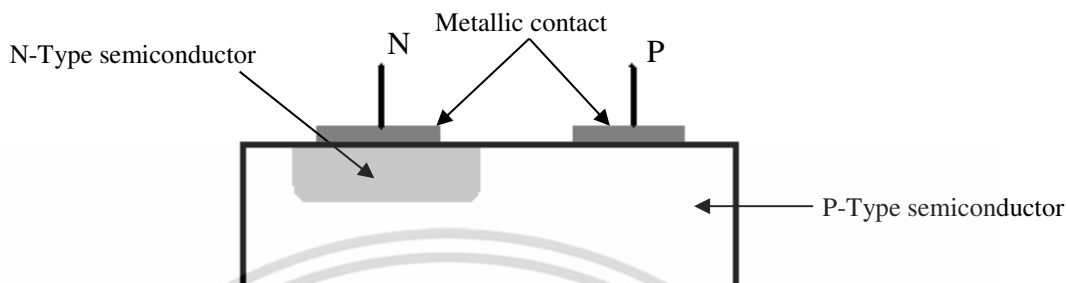
ลักษณะรอยต่อพีเอ็นในยุคแรก ใช้วิธีการแบบรอยต่อของโลหะผสม (Alloyed junction) โดยการใส่โลหะบางชนิดละลายเข้าสู่เนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ทำให้บริเวณที่ละลายปนกันของโลหะกับสารชนิดเอ็นนั้นกลายเป็นบริเวณสารชนิดพี ดังรูปที่ 2.1 โลหะที่ทำหน้าที่เป็นขั้วพี ซึ่งบริเวณที่ละลายดังกล่าวภายหลังการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) กลายเป็นบริเวณพีของรอยต่อพีเอ็น



รูปที่ 2.1 รอยต่อพีเอ็นแบบรอยต่อของโลหะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

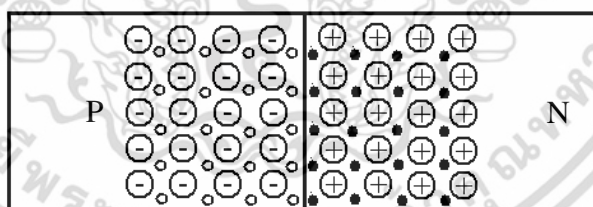
ในปัจจุบัน ใช้วิธีการแพร่สารเจือภายใต้อุณหภูมิสูง เข้าสู่เนื้อสารเพื่อประดิษฐ์รอยต่อพีเอ็น ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการแพร่สารเจือปนเข้าสู่ก้อนสารกึ่งตัวนำชนิดพี จนกระทั่งทำให้บริเวณผิวกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และทำให้เกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้นภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.2 รอยต่อพีเอ็นแบบวิธีการแพร่สารเจือ

### 2.1.1 คุณสมบัติรอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุล

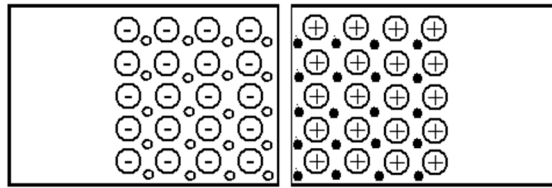
รอยต่อพีเอ็นถูกสร้างขึ้นได้ด้วยวิธีต่างๆหลายวิธี และทำให้ได้รอยต่อที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายและวิเคราะห์คุณสมบัติของรอยต่อพีเอ็นในเบื้องต้น จึงพิจารณารอยต่อพีเอ็นชนิดชั้นบันได ซึ่งเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีอะตอมสารเจือชนิดพีกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ เช่นเดียวกับเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีอะตอมสารเจือชนิดเอ็นกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [10]



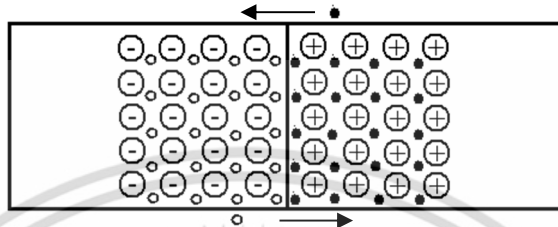
รูปที่ 2.3 ลักษณะของพาหะและอะตอมสารเจือในรอยต่อพีเอ็น

ในการพิจารณารอยต่อชนิดชั้นบันได สมมติการไหลของกระแสใน 1 มิติเฉพาะในทิศทางแกน  $x$  เท่านั้น ซึ่งกระแสมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของรอยต่อที่มีขนาดสม่ำเสมอตลอดแนวแกน  $x$  โดยในความเป็นจริง ทิศทางการไหลของกระแสจะไปในทุกทิศทาง

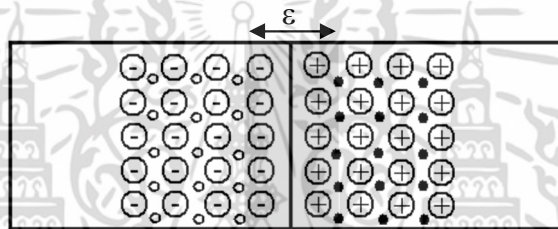
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. เนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นก่อนเกิดรอยต่อพีเอ็น



ข. หลังจากเกิดรอยต่อพีเอ็น



ค. รอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุล

รูปที่ 2.4 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของรอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุล

ในขณะที่รอยต่อพีเอ็นยังไม่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็นแยกจากกัน ดังรูป 2.4ก โดยมีค่าความหนาแน่นของพาหะเท่ากับจำนวนไอออนที่ถูกไอออไนซ์ จึงทำให้แต่ละด้าน มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า และเมื่อรอยต่อพีเอ็นถูกสร้างขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะทั้งสองไม่เท่ากัน ทำให้พาหะเคลื่อนที่แพร่ไปฝั่งตรงข้าม เพื่อให้พาหะทั้งสองด้านมีความหนาแน่นเท่ากัน ดังรูปที่ 2.4ข โดยการแพร่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ทำให้ไอออนอะตอมของผู้ให้ (Donor) และผู้รับ (Acceptor) แสดงประจุไฟฟ้าออกมา จึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในรอยต่อที่เรียกว่า สนามไฟฟ้าภายใน (Built-in Electric Field) ดังรูปที่ 2.4ค ในช่วงแรก แรงจากสนามไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าแรงที่เกิดจากการแพร่ พาหะจึงสามารถข้ามรอยต่อได้ ทำให้สนามไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่อัตราการแพร่มีค่าลดลง จนในที่สุด กระแสที่เกิดจากการแพร่ของพาหะ (Diffusion current) จะเท่ากับ กระแส drift ของพาหะ (Drift current) หรือผลรวมของกระแสทั้งสองมีค่ารวมกันเป็นศูนย์ และเรียกสภาวะนี้ว่า ภาวะสมดุล (Equilibrium) โดยในบริเวณรอยต่อที่มีสนามไฟฟ้านั้นไม่มีพาหะปรากฏอยู่ เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า จึงเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) และค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต่างศักย์ที่เกิดจากสนามไฟฟ้านี้เรียกว่า ศักย์ภายใน (Built-in potential -  $V_{bi}$ ) โดยกระแสของโฮลในภาวะสมดุลสามารถอธิบายจากสมการ

$$J_{p(Diffusion)} + J_{p(Drift)} = 0 \quad (2.1)$$

และสำหรับกระแสของอิเล็กตรอน

$$J_{n(Diffusion)} + J_{n(Drift)} = 0 \quad (2.2)$$

หรือที่สภาวะสมดุล ผลลัพธ์รวมของกระแสโฮลและกระแสอิเล็กตรอน ที่ไหลข้ามรอยต่อมีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งคู่ โดยสมการกระแสจากการแพร่ของโฮลจากทางด้านพีมีค่าเป็น

$$J_{p(Diffusion)} = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.3)$$

จากสนามไฟฟ้าที่รอยต่อที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดกระแส drift ของโฮล

$$J_{p(Drift)} = pq\mu_p \quad (2.4)$$

ดังนั้นกระแสโฮลรวม หรือกระแสโฮลสุทธิที่ไหลผ่านรอยต่อคือ

$$\begin{aligned} J_p &= J_{p(Diffusion)} + J_{p(Drift)} \\ &= qD_p \frac{dp}{dx} - pq\mu_p \end{aligned} \quad (2.5)$$

และในกรณีของอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็น สามารถพิจารณาในทำนองเดียวกันกับกรณีของโฮล

$$\begin{aligned} J_n &= J_{n(Diffusion)} + J_{n(Drift)} \\ &= qD_n \frac{dn}{dx} + nq\mu_n \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดยที่  $J_{p(Diffusion)}$  คือ ความหนาแน่นกระแสจากการแพร่ของโฮล ( $A/cm^2$ )

$J_{p(Drift)}$  คือ ความหนาแน่นกระแสจากผลของสนามไฟฟ้าของโฮล ( $A/cm^2$ )

$J_{n(Diffusion)}$  คือ ความหนาแน่นกระแสจากการแพร่ของอิเล็กตรอน ( $A/cm^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$J_{n(Drift)}$	คือ ความหนาแน่นกระแสจากผลของสนามไฟฟ้าจากอิเล็กตรอน ( $A/cm^2$ )
$q$	คือ ประจุของพาหะ ( $1.62 \times 10^{-19}$ คูโลมบ์)
$p, n$	คือ ความหนาแน่นของโฮล และอิเล็กตรอน ( $atoms/cm^3$ )
$D_p, D_n$	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล และอิเล็กตรอน ตามลำดับ ( $cm^2/s$ )
$\mu_p, \mu_n$	คือ สภาพคล่องของโฮล และอิเล็กตรอน ( $cm^2/V-S$ )
$\mathcal{E}$	คือ สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ ( $V/cm$ )

สำหรับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรอยต่อ การพิจารณาหาค่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆบริเวณรอยต่อ สามารถหาได้โดยใช้ สมการปัวซอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ โดยพิจารณาเพียง 1 มิติ จะได้

$$\frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} = \frac{\rho(x)}{K_s \epsilon_0} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\mathcal{E}(x)$  คือ สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ  
 $\rho(x)$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆ  
 $K_s$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ  
 $\epsilon_0$  คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ  
 $\epsilon$  คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ โดย  $\epsilon = K_s \epsilon_0$

และเมื่อค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $\mathcal{E}_{max}$ ) ที่  $x=0$  จะได้

$$\mathcal{E}_{max} = -\frac{qN_A x_p}{\epsilon} = -\frac{qN_D x_n}{\epsilon} \quad (2.8)$$

สำหรับศักย์ไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อที่ตำแหน่ง  $x$  ใดๆในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อในภาวะสมดุล สามารถพิจารณาได้จากสมการสนามไฟฟ้า

$$\mathcal{E} = -\frac{dV(x)}{dx}$$

$$V(x) = -\int \mathcal{E}(x) dx$$

$$\frac{qN_A x_p^2}{2\epsilon} = V_{bi} - \frac{qN_D x_n^2}{2\epsilon} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความกว้างของชั้นปลอดพาหะมีค่าเป็น

$$W = \left[ \frac{2\varepsilon}{q} \cdot \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

โดยที่	$\varepsilon_{max}$	คือ ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/cm)
	$N_A, N_D$	คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือผู้รับ และผู้ให้ตามลำดับ (atom/cm <sup>3</sup> )
	$x_p, x_n$	คือ ความกว้างชั้นปลอดพาหะในด้านพี และด้านเอ็นตามลำดับ (cm)
	$W$	คือ ความกว้างชั้นปลอดพาหะ (cm)
	$k$	คือ ค่าคงที่โบลต์ซมาน (8.62 x 10 <sup>-5</sup> eV/K)
	$T$	คือ อุณหภูมิองศาสมบูรณ์ (K)
	$n_i$	คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm <sup>-3</sup> )

### 2.1.2 คุณสมบัติรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

เมื่อยรอยต่อพีเอ็นได้รับไบอัสตรง (Forward Bias) โดยให้ศักย์ไฟฟ้าด้านพีเป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มีความเท่ากับ  $V_A$  โดยแรงดันทั้งหมดตกคร่อมที่รอยต่อพีเอ็น และมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกับศักย์ภายในที่รอยต่อ ทำให้เกิดการหักล้างของแรงดัน โดยศักย์ภายในมีค่าลดลงจากเดิมเป็น  $V_{bi} - V_A$  ทำให้โฮลส่วนหนึ่งจากด้านพี สามารถฉีดข้ามรอยต่อไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งจากด้านเอ็น สามารถฉีดข้ามรอยต่อไปยังด้านพี และผลจากที่มีพาหะข้ามรอยต่อ จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเรียกว่า กระแสไบอัสตรง (Forward Current) ซึ่งมีค่าเท่ากับ กระแสของโฮลและอิเล็กตรอน และทำให้สนามไฟฟ้าที่รอยต่อ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ และประจุไฟฟ้าที่รอยต่อลดลงด้วย โดยมีค่าความกว้างของของบริเวณปลอดพาหะเป็น

$$W = \left[ \frac{2\varepsilon}{q} \cdot \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

การวิเคราะห์รอยต่อพีเอ็นในสภาวะไบอัสตรง พิจารณาจากพาหะที่ข้ามรอยต่อไปฝั่งตรงข้าม และกลายเป็นพาหะส่วนน้อย โดยปริมาณที่พาหะทั้งสองข้ามรอยต่อนั้นจะแปรผันอย่างเอกซ์โพเนนเชียลกับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{P_{p0}}{P_{n0}} = e^{(qV_{bi}/kT)} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $p_{p0}$ ,  $p_{n0}$  คือ ความเข้มข้นของโฮลในเนื้อสารชนิดพี และชนิดเอ็นตามลำดับ ( $\text{cm}^{-3}$ )

พิจารณาในกรณีของโฮลเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง  $V_A$

$$\frac{p_{p0}(-x_p)}{p_{n0}(x_n)} = e^{(q(V_{bi}-V_A)/kT)} \quad (2.13)$$

และจะได้

$$p(x_n) = p_{n0} e^{(qV_A/kT)} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $p(x_n)$  คือความหนาแน่นของโฮลที่ตำแหน่ง  $x_n$  ซึ่งเป็นขอบของบริเวณปลอดพาหะที่ติดกับด้านเอ็น เมื่อพิจารณาปริมาณของโฮลในส่วนที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta p$ ) ที่ตำแหน่ง  $x_n$  จะได้

$$\Delta p = p_{n0} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.15)$$

ในทำนองเดียวกัน กรณีของอิเล็กตรอนจะได้

$$n(-x_p) = n_{p0} e^{(qV_A/kT)} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $n(-x_p)$  คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง  $x_p$  ซึ่งเป็นขอบของบริเวณปลอดพาหะที่ติดกับด้านพี เมื่อพิจารณาปริมาณของอิเล็กตรอนในส่วนที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta n$ ) ที่ตำแหน่ง  $x_p$  จะได้

$$\Delta n = n_{p0} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.17)$$

ซึ่งทั้งสองสมการ 2.14 และ 2.16 เรียกว่า สมการกฎของรอยต่อ (Law of Junction)

เนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของพาหะซึ่งถูกฉีดข้ามรอยต่อ มีการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนหาได้จากสมการที่ 2.18 - 2.21

$$J_p(x') = q \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} (e^{qV_A/kT} - 1) \cdot e^{-x'/L_p} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_p(x=x_n) = J_p(x'=0) = q \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.19)$$

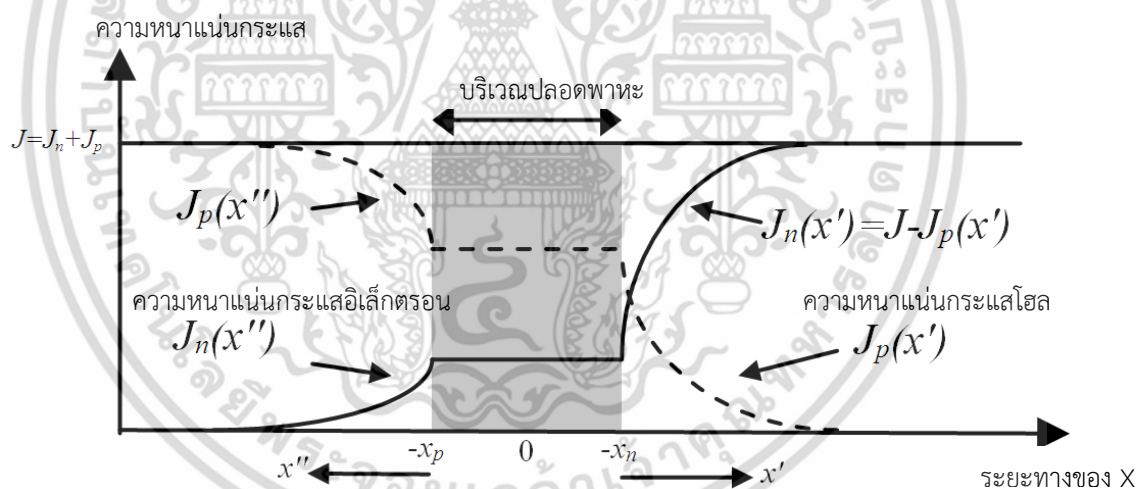
$$J_n(x'') = q \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} (e^{qV_A/kT} - 1) \cdot e^{-x''/L_n} \quad (2.20)$$

$$J_n(x=x_n) = J_n(x''=0) = q \frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.21)$$

โดยที่  $J_p, J_n$  คือ ความหนาแน่นกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ ( $A/cm^2$ )

$L_p, L_n$  คือ ระยะการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ (cm)

ซึ่งรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสของพาหะที่ตำแหน่งต่างๆ ในขณะที่ได้รับไบอัสตรง



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสของพาหะที่ตำแหน่งต่างๆ ในขณะที่ได้รับไบอัสตรง

ในช่วงบริเวณปลอดพาหะ ความหนาแน่นของกระแสโฮลและอิเล็กตรอนถูกพิจารณาว่ามีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นผลรวมของความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น ( $J$ ) คือ ผลรวมของความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นกระแสของโฮล ที่ไหลผ่านบริเวณปลอดพาหะ และสามารถเขียนเป็นผลรวมของความหนาแน่นกระแสได้ดังสมการที่ 2.22

$$J = J_n(-x_p) + J_p(x_n) \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสมการนี้มีค่าคงที่ทุกตำแหน่งภายในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพีเอ็น ดังนั้นกระแสรวมทั้งหมด ( $I$ ) ที่ไหลผ่านบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพีเอ็นจะมีค่าเป็น

$$I = AJ = qAn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.23)$$

$$I = I_0 (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (2.24)$$

$$I_0 = qAn_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \quad (2.25)$$

โดยที่  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพีเอ็น ( $\text{cm}^2$ )

$I_0$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A)

ซึ่งสมการที่ 2.24 นี้เรียกว่า สมการไดโอดในอุดมคติ (Ideal Diode's equation) หรือสมการของ ช็อกเลย์ (Shockley's Equation)

### 2.1.3 คุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อพีเอ็น

ไดโอดชนิดรอยต่อพีเอ็น สามารถแสดงคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุได้ โดยทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้า 2 ประเภทที่แตกต่างกัน ได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อหรือค่าความจุไฟฟ้าทรานซิสชัน (Junction Capacitance or Transition Capacitance) และค่าความจุไฟฟ้าจากการแพร่หรือค่าความจุไฟฟ้าจากประจุสะสม (Diffusion Capacitance or Charge Storage Capacitance) โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าจากรอยต่อเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ ซึ่งมีโครงสร้างที่คล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นโลหะขนาน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีเดียวกับตัวเก็บประจุทั่วไป ส่วนค่าความจุไฟฟ้าจากการแพร่ เกิดขึ้นในขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง ซึ่งจะมีการฉีดพาหะทั้งโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ และแพร่ซึมต่อไปยังด้านตรงข้าม ทำให้ด้านทั้งสองของรอยต่อ มีการสะสมประจุไฟฟ้าจากพาหะ จึงทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากการสะสมของประจุจากการแพร่ขึ้นมาอีก โดยวิธีการวิเคราะห์นั้นจะแตกต่างกับความจุไฟฟ้าจากรอยต่อ

#### 2.1.3.1 ค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ

ที่รอยต่อพีเอ็นแบบชั้นบับไดในภาวะสมดุล ในบริเวณปลอดพาหะประกอบด้วย ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ และประจุไฟฟ้าลบจากไอออนลบของอะตอมผู้รับ ซึ่งมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างเท่ากับ  $W$  และมีสภาพคล้ายสารไดอิเล็กทริก จึงถูกพิจารณาว่ามีโครงสร้างที่เหมือนกับตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนาน ดังนั้นที่บริเวณรอยต่อพีเอ็นนี้ จึงมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้านี้คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ในการวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้า โดยพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเมื่อได้รับไบอัสคือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณประจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะ นั่นคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่รอยต่อ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าประจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ ( $C_j$ ) โดย

$$C_j = \frac{dQ}{dV} \quad (2.26)$$

ส่วนความสัมพันธ์ของความกว้างของบริเวณปลอดพาหะและค่ากำแพงศักย์ของรอยต่อพีเอ็นในภาวะสมดุล

$$W = \left[ \frac{2\varepsilon}{q} \cdot V_{bi} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

และเมื่อมีแรงดันไบอัส  $V_A$

$$W = \left[ \frac{2\varepsilon}{q} \cdot (V_{bi} \pm V_A) \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $Q$  คือขนาดของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละด้านของบริเวณปลอดพาหะ โดยปริมาณของประจุบวกทั้งหมดและประจุลบทั้งหมด มีค่าเท่ากันและเท่ากับปริมาณของประจุไฟฟ้าที่รอยต่อ

$$Q = qAN_D x_n = qAN_A x_p \quad (2.29)$$

ทำให้ได้

$$x_p = \left[ \frac{2\varepsilon}{qN_A} \frac{N_D}{(N_A + N_D)} (V_{bi} \pm V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

และ

$$x_n = \frac{N_A x_p}{N_D} = \left[ \frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_D}{N_A (N_A + N_D)} (V_{bi} \pm V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่า  $x_n$  ลงในสมการที่ 2.29 จะได้

$$Q = AqN_D \left[ \frac{2\epsilon}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} (V_{bi} \pm V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

และนำค่า  $Q$  ไปแทนในสมการ จะได้

$$C_j = A \left[ \frac{q\epsilon}{2} \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)} \frac{1}{(V_{bi} \pm V_A)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

และในกรณีที่รอยต่อพีเอ็นเป็นแบบ  $p^+ - n$  หรือ  $N_A \gg N_D$  จะสามารถเขียนได้เป็น

$$C_j = \frac{A}{2} \left[ \frac{2q\epsilon N_D}{(V_{bi} \pm V_A)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

### 2.1.3.2 ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่

ในขณะที่รอยต่อพีเอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง นอกจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะที่บริเวณใกล้กับรอยต่อเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดพาหะข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านตรงข้าม โดยความหนาแน่นของพาหะมีค่าลดลงตามระยะทางจากรอยต่อ เนื่องจากการรวมตัวระหว่างพาหะส่วนน้อยกับพาหะส่วนมาก ดังนั้นจึงมีการสะสมประจุไฟฟ้าของพาหะส่วนน้อยบริเวณใกล้ๆ รอยต่อ ซึ่งจำนวนประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไบอัสที่รอยต่อนั้นได้รับ ดังนั้นขณะที่รอยต่อได้รับไบอัสตรง จึงเกิดค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มอีกชนิดหนึ่งคือ ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่

ในการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้า พิจารณาว่าเมื่อรอยต่อได้รับไบอัสตรง กำแพงศักย์ที่รอยต่อลดลง ทำให้พาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลถูกฉีดแพร่ข้ามรอยต่อได้ โดยถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไบอัสตรง ทำให้ปริมาณของพาหะมีการเปลี่ยนแปลง โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงก็คือ ค่าความจุไฟฟ้าของการแพร่ ( $C_d$ ) โดยพิจารณาจาก

$$C_d = \frac{dQ}{dV}$$

$$C_d = \frac{\tau dI}{dV} = \frac{\tau}{r_d} = \tau g_d \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\tau$  คืออายุเฉลี่ยของพาหะ หรือเวลาคงที่ของการแพร่ (S) มีค่าเท่ากับ  $\tau = \frac{L^2}{D}$

$L$  คือระยะการแพร่ของพาหะ (cm)

$D$  คือค่าคงที่ของการแพร่ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$r_d$  คือความต้านทานของรอยต่อ (Ohm)

$g_d$  คือค่าความนำไฟฟ้าของรอยต่อ ( $\text{Ohm}^{-1}$ )

ซึ่งการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอน ทำให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าจากการแพร่ของโฮล ( $C_{dp}$ ) ค่าความจุไฟฟ้าจากการแพร่ของอิเล็กตรอน ( $C_{dn}$ ) และค่าความจุไฟฟ้ารวม คือผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าทั้งสอง ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะทั้งสองคือ

$$C_{dp} = \frac{q}{kT} \tau_p A q n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.36)$$

ในกรณีที่  $N_A \gg N_D$  หรือเป็นรอยต่อ  $p^+-n$  จะได้

$$C_{dp} = \frac{q}{kT} \tau_p A q n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D} e^{\frac{qV_A}{kT}}$$

$$C_{dp} = \frac{A q^2 L_p}{kT} \frac{n_i^2}{N_D} e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.37)$$

ในทำนองเดียวกัน กรณีของ  $n^+-p$  จะได้ว่า

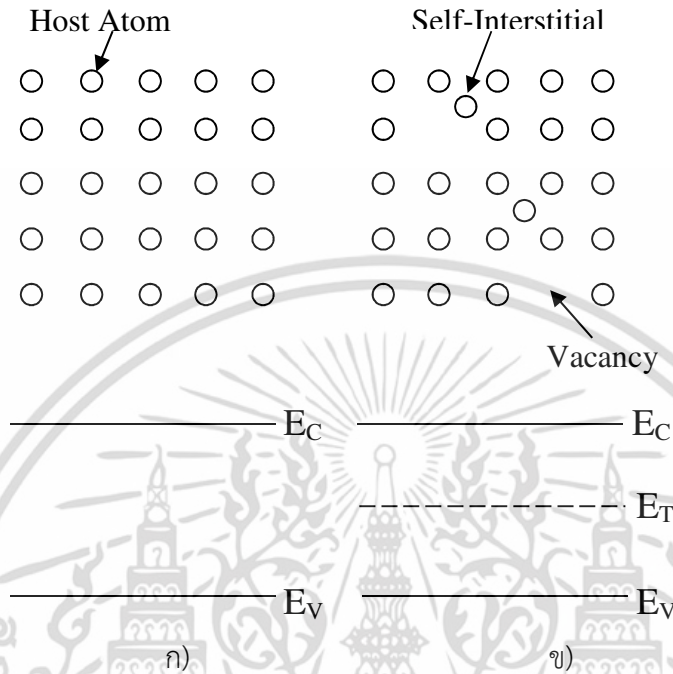
$$C_{dn} = \frac{A q^2 L_n}{kT} \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.38)$$

## 2.2 ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ (Defect in Semiconductor)

ในรูปแบบผลึกที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 2.6ก อะตอมของสารตั้งต้นอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมในผลึก และไม่มีอะตอมแปลกปลอมหรือโครงสร้างที่เกิดความบกพร่อง โดยไม่มีระดับพลังงานระหว่างแถบพลังงานวาเลนซ์และแถบพลังงานความนำไฟฟ้าในผลึกที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในความเป็นจริงผลึกทั่วไปไม่มีรูปแบบเช่นนั้น โดยอาจมีผลมาจากอะตอมแปลกปลอมที่เกิดขึ้น หรือจากโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถแสดงถึงรูปแบบอะตอมและระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้ดังรูป 2.6 ข [11]



รูปที่ 2.6 แผนภาพโครงสร้างอะตอมและระดับพลังงานของซิลิคอนโดย ก) ผลึกสมบูรณ์ และ ข) มีความบกพร่อง

กล่าวได้ว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิดมีความบกพร่อง โดยอาจเกิดจากอะตอมแปลกปลอมหรือความบกพร่องทางโครงสร้างของผลึก ในส่วนอะตอมของสารแปลกปลอมที่ตั้งใจทำให้เกิดอาจเรียกได้อีกอย่างว่า อะตอมของสารเจือ (ในกรณีเจือระดับต่ำ) หรือศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ (ในการเจือระดับลึก) เพื่อลดค่าของช่วงชีวิตของพาหะในอุปกรณ์ หรือเพิ่มความต้านทานของฐานรอง ในบางครั้งสารแปลกปลอมที่ไม่ได้ตั้งใจให้เกิดนั้น อาจเกิดจากกระบวนการปลูกผลึกหรือกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยรูปแบบของความบกพร่องนั้นสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.7 และสามารถแบ่งได้เป็น

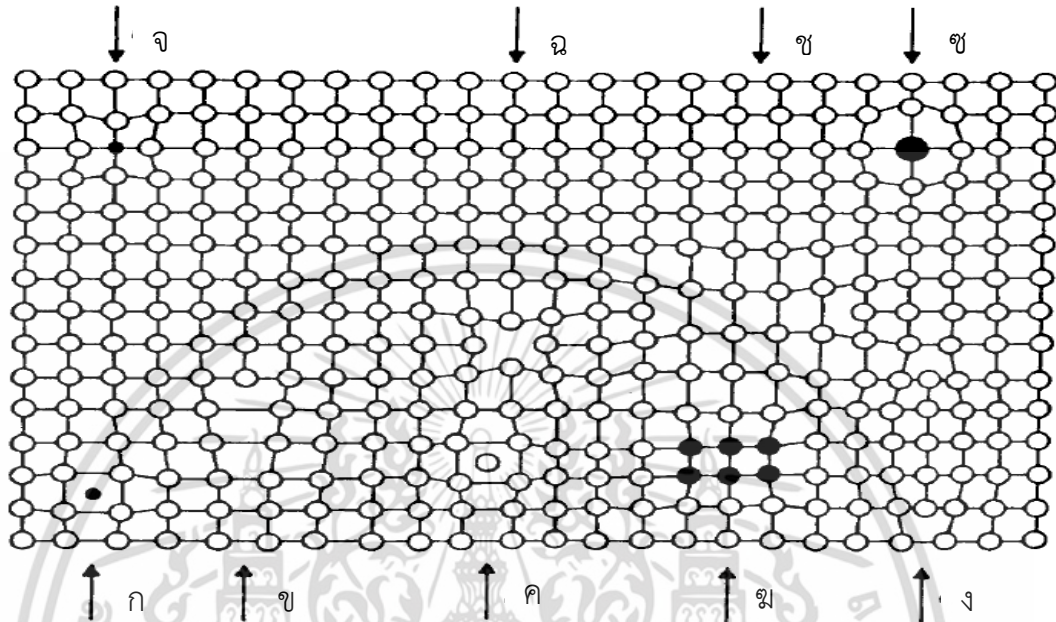
**2.2.1 ความบกพร่องแบบจุด (Point Defects)**

- อะตอมแปลกปลอมแทรกอยู่ระหว่างพันธะของอะตอมหลัก โดยไม่สร้างพันธะเพิ่ม (Foreign interstitials) : อะตอมของสารแปลกปลอมเข้าแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของอะตอมหลักมีผลทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยว ดังรูปที่ 2.7ก.

- อะตอมของสารหลักแทรกอยู่ระหว่างพันธะ (Self- interstitials) : ในทำนองเดียวกับ Foreign interstitials แต่อะตอมที่ไปแทรกนั้นเป็นอะตอมหลักเอง ดังรูป 2.7ค.

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อะตอมแปลกปลอมไปแทนที่อะตอมหลัก (Foreign substitutionals) : อะตอมของสารแปลกปลอมเข้าไปแทนที่ของอะตอมเดิมในผลึก โดยอะตอมที่มาแทนที่มีขนาดใหญ่หรือเล็กกว่าอะตอมเดิม จะทำให้โครงสร้างของผลึกบิดเบี้ยว ดังรูป 2.7จ.



รูปที่ 2.7 ความบกพร่องในรูปแบบต่างๆ ก) Foreign interstitial ข) dislocation ค) self-interstitial ฉ) precipitate ง) extrinsic stacking faults จ) foreign substitutionals ฉ) vacancy ช) intrinsic stacking fault ซ) foreign substitutionals

- อะตอมพันธะว่างหรือขาดหายไป (Vacancies) : เกิดการสูญหายของอะตอมในโครงสร้าง หากขนาดของที่ว่างไม่เท่ากับขนาดของอะตอมที่หายไป อะตอมรอบๆเคลื่อนตัวเข้ามาใกล้กับที่ว่าง และทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยวไปจากเดิม ดังรูป 2.7ฉ.

### 2.2.2 ความบกพร่องแบบเส้น (line Defects)

- แถวของอะตอมขาดหายไปหลายๆอะตอมทำให้โครงสร้างผิดรูป (Dislocations) : มีการขาดหายของอะตอมซึ่งอะตอมเหล่านี้เรียงชิดเป็นแนวเส้น เกิดตำหนิเป็นแนวยาวและโครงสร้างบิดเบี้ยวไปจากแนวปกติ ดังรูปที่ 2.7ข.

### 2.2.3 ความบกพร่องเชิงพื้นที่ (Area Defects)

- การที่ระนาบของอะตอมขาดหายไปทำให้การเรียงแถวของอะตอมไม่สมบูรณ์ (Stacking Faults) ดังรูป 2.7ง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 ความบกพร่องเชิงปริมาตร (Volume Defects)

- กลุ่มก้อนหรือตะกอนที่ไม่เกี่ยวข้องกันเข้าไปแทรกในโครงสร้างของผลึก (Precipitates) ดังรูป 2.7ข.

## 2.3 การก่อเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Carrier Generation and Carrier Recombination)

การก่อเกิดของพาหะ (Carrier Generation) หมายถึง กระบวนการซึ่งทำให้มีพาหะเกิดขึ้นใหม่ โดยจะเป็นการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล [12]

การรวมตัวใหม่ของพาหะ (Carrier Recombination) หมายถึง กระบวนการตรงข้ามหรือย้อนกลับกับการก่อเกิด เป็นการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระกับโฮล ทำให้พาหะทั้งสองลดลงหรือหายไป

โดยกระบวนการทั้งสองนี้เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกัน โดยในสภาวะสมดุลความร้อน อัตราการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่ต้องมีค่าเท่ากัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำนั้นถูกรบกวนจากพลังงานภายนอก ความหนาแน่นของพาหะเปลี่ยนแปลง และระบบพยายามกลับสู่ภาวะสมดุลโดยทำให้อัตราการรวมตัวใหม่มีค่ามากกว่าอัตราการก่อเกิด เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว ค่าอัตราทั้งสองกลับมาเท่ากันอีกครั้ง

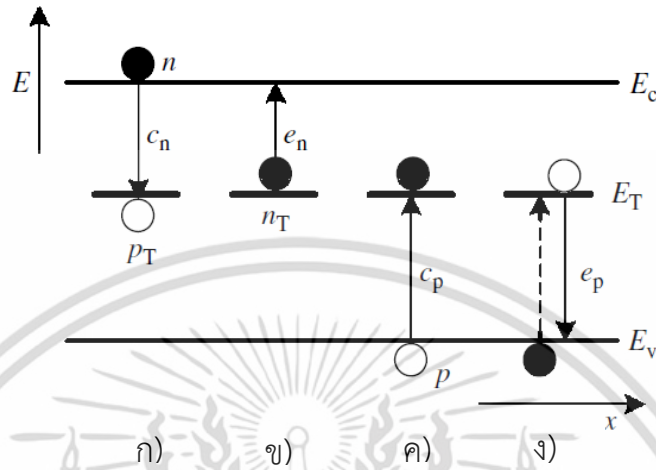
### 2.3.1 แผนภาพการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่

รูปแบบระดับพลังงานของผลึกที่สมบูรณ์ประกอบด้วยแถบวาเลนซ์และแถบความนำ ซึ่งถูกแยกด้วยช่องว่างพลังงานที่ไม่มีระดับพลังงานในช่องว่างนั้น เมื่อผลึกเชิงเดี่ยวถูกรบกวนด้วยอะตอมแปลกปลอมหรือความบกพร่องจากโครงสร้าง ทำให้เกิดระดับพลังงานต่างๆในช่องว่างพลังงาน ซึ่งแทนด้วยเส้น  $E_T$  ดังรูป 2.8 แต่ละเส้นแทนด้วยจุดบกพร่องแต่ละจุด ซึ่งอาจเรียกว่า ศูนย์กลางการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่ หรือ แทรป (Trap) ซึ่งศูนย์กลางการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่อยู่ในช่องว่างระดับพลังงาน และถูกเรียกว่าระดับพลังงานของสารเจือระดับลึก ซึ่งเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่เมื่อมีพาหะส่วนเกินในสารกึ่งตัวนำ และเป็นศูนย์กลางการก่อเกิดเมื่อความหนาแน่นของพาหะน้อยกว่าจุดสมดุลในบริเวณปลอดพาหะ

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดผลึกเดี่ยว เช่น ซิลิคอน เยอรมาเนียม หรือแกลเลียมอาร์เซไนต์ สารเจือระดับลึกมักเป็นสารเจือโลหะ แต่ก็อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในผลึกด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ แต่บางทีจะปรากฏในรูปแบบของค่าคุณสมบัติที่ต่างออกไป ในสารกึ่งตัวนำบางชนิดสารเจือในระดับลึกมีผลทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น สำหรับผลึกสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีรูปร่าง ความบกพร่องส่วนใหญ่จะเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในโครงสร้างผลึก

พิจารณาสารเจือระดับลึกในรูปที่ 2.8 โดยมีศูนย์กลางการก่อเกิด-รวมตัวใหม่  $E_T$  และความหนาแน่นของสารเจือ  $N_T$  ตัวต่อลบ.ซม. โดยมีอิเล็กตรอนจำนวน  $n$  ตัวในแถบความนำ และโฮลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนวไสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวน  $p$  ตัวในแถบวาเลนซ์โดยสารเจือระดับต่ำ เพื่อแสดงถึงกระบวนการจับและการปล่อย กำหนดให้จุดศูนย์กลางจับอิเล็กตรอนจากแถบความนำดังรูป 2.8k หลังจากทีอิเล็กตรอนถูก จับที่



รูปที่ 2.8 แผนภาพระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือระดับลึก และกระบวนการจับและปล่อยของอิเล็กตรอน

ศูนย์กลาง สามารถปล่อยอิเล็กตรอนกลับไปแถบความนำดังรูป 2.8ข หรือจับโฮลจากแถบวาเลนซ์ดังรูปที่ 2.8ค หลังจากสองเหตุการณ์นี้ได้ศูนย์กลางที่มีโฮลหรือปล่อยโฮลกลับแถบวาเลนซ์ดังรูป 2.8ง หรือจับอิเล็กตรอนดังรูป 2.8ก ซึ่งจะมีเพียง 4 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแถบความนำ ระดับพลังงานของสารเจือ และ แถบวาเลนซ์ สำหรับเหตุการณ์ดังรูป 2.8ง สามารถแสดงได้ว่า อิเล็กตรอนออกมาจากแถบวาเลนซ์ดังรูปลูกศรเส้นประ จากรูปกระบวนการรวมตัวใหม่เป็นไปตามรูปที่ 2.8ก และ 2.8ค และกระบวนการก่อเกิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.8ง และ 2.8ข

### 2.3.2 ช่วงชีวิตของการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่

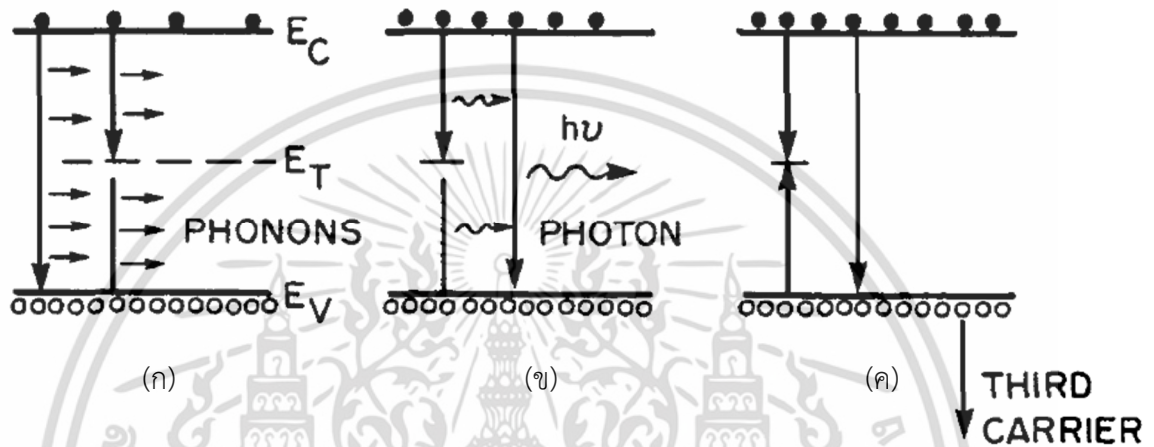
สามารถแบ่งค่าของช่วงชีวิตของพาหะได้ 2 ประเภทคือ ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ (Recombination Lifetime) และช่วงชีวิตการก่อเกิด (Generation Lifetime)

#### 2.3.2.1 ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่

เป็นช่วงเวลาเฉลี่ยที่พาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล ส่วนเกินคงอยู่ โดยค่าช่วงชีวิตนี้กล่าวถึงช่วงชีวิตของพาหะส่วนน้อย เมื่อเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนน้อยในการฉีดระดับต่ำโดยที่ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของพาหะส่วนมากที่ภาวะสมดุล สำหรับการฉีดระดับสูง เป็นการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนมากกับพาหะส่วนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดขึ้นของคู่อิเล็กตรอน-โฮลต้องใช้พลังงานเท่ากับช่องว่างพลังงาน เมื่อคู่พาหะส่วนเกินรวมตัวกันจะให้พลังงานกลับคืนในหลายรูปแบบ โดยมี 3 กลไก ดังรูปที่ 2.9 ในกลไกแรก พลังงานถูกออกมาในรูปของโฟนอน (Phonon) หรือการสั่นสะเทือนของแลตทิซ ซึ่งแสดงดังลูกศรเล็ก โดยเรียกกลไกดังกล่าวว่า การรวมตัวใหม่แบบมัลติโฟนอน (Multi-Phonon) ในการรวมตัวนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนจากแถบความนำลงมารวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์โดยตรง หรือที่ศูนย์กลางการรวมตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.9ก



รูปที่ 2.9 กลไกกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนเกิน โดย ก) การรวมตัวใหม่แบบมัลติโฟนอน ข) การรวมตัวใหม่แบบแผ่รังสี และ ค) การรวมตัวใหม่แบบโอเจอร์

โดยจำนวนโฟนอนที่ใช้สำหรับการรวมตัวจากแถบพลังงานแบบไดเร็ก มีมากกว่าที่ใช้ในการรวมตัวระหว่างแถบความนำกับศูนย์กลางการรวมตัว แต่สุดท้ายแล้วพลังงานที่ใช้ทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน โดยการรวมตัวที่ศูนย์กลางการรวมตัวมักเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบอินไดเร็ก และการรวมตัวแบบนี้มีชื่ออีกอย่างว่า shockley-read-hall หรือ SRH โดยมีค่าเท่ากับ

$$\tau_{SRH} = \frac{[\tau_{p0}(n_0 + n_1 + \Delta n) + \tau_{n0}(p_0 + p_1 + \Delta p)]}{p_0 + n_0 + \Delta n} \tag{2.39}$$

โดยที่

$$\tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p v_p N_T} \tag{2.40}$$

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n v_n N_T} \tag{2.41}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma_p$  และ  $\sigma_n$  เป็นค่า capture cross-section ของโฮล และอิเล็กตรอน ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน  $v_p$  และ  $v_n$  คือค่า thermal velocity ของโฮล และอิเล็กตรอน ตามลำดับ  $N_T$  คือค่าความเข้มข้นของศูนย์กลางการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่  $p_0, n_0$  คือค่าความเข้มข้นของโฮลและอิเล็กตรอนที่ภาวะสมดุล และค่าของ  $p_1$  และ  $n_1$  หาได้จาก

$$p_1 = n_i e^{-\frac{(E_T - E_i)}{kT}} \quad (2.42)$$

$$n_1 = n_i e^{\frac{(E_T - E_i)}{kT}} \quad (2.43)$$

โดย  $E_i$  คือระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์

ในกลไกที่สอง เมื่อพลังงานจากคู่อิเล็กตรอน-โฮล ถูกปล่อยออกมาเป็นโฟตอน ดังรูปที่ 2.9 กลไกที่เกิดขึ้นเรียกว่า radiative recombination ซึ่งเกิดกับสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแบบไดเร็ก เช่น GaAs หรือสารอื่นๆที่นำมาสร้างไดโอดเปล่งแสง รวมถึง แสงเลเซอร์ โดยมีค่าช่วงชีวิตเป็น

$$\tau_{rad} = \frac{1}{B(p_0 + n_0 + \Delta n)} \quad (2.44)$$

โดย  $B$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การรวมตัวใหม่

รูปแบบที่สามของกระบวนการรวมตัวใหม่เป็นดังรูปที่ 2.9ค พลังงานจากคู่อิเล็กตรอน-โฮล ถูกถ่ายทอดไปให้อิเล็กตรอนตัวอื่นในแถบความนำหรือโฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า Auger recombination โดยมีค่าช่วงชีวิตเป็น

$$\tau_{Auger} = \frac{1}{C_p(p_0^2 + 2p_0\Delta n + \Delta n^2) + C_n(n_0^2 + 2n_0\Delta n + \Delta n^2)} \quad (2.45)$$

โดยที่  $C_p$  และ  $C_n$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมตัวใหม่ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ

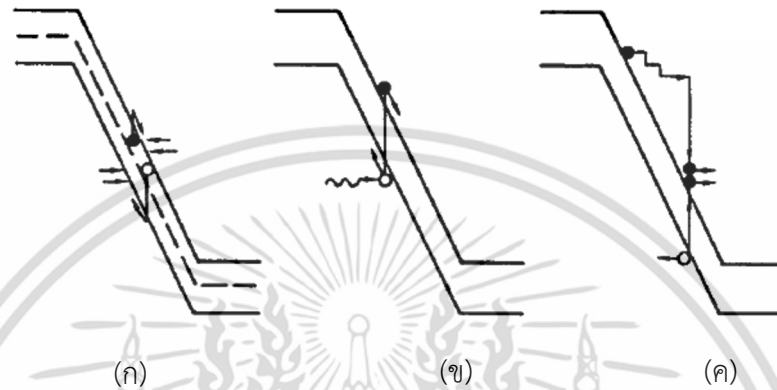
ดังนั้นช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ สามารถเขียนได้เป็น

$$\tau_r = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}}} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.2 ช่วงชีวิตการก่อเกิด

จากรูปแบบของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ได้กล่าวไว้แล้ว พบว่ามีกระบวนการก่อเกิด ซึ่งเกิดขึ้นไปพร้อมกัน โดยรูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการตรงข้ามกันกับการรวมตัวใหม่ ซึ่งการก่อเกิดโดยใช้กระบวนการกระตุ้นด้วยอุณหภูมิตั้งรูปที่ 2.10ก อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากจุดศูนย์กลางการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่ไปที่แถบความนำ และโฮลจะถูกกระตุ้นไปที่แถบวาเลนซ์



รูปที่ 2.10 กลไกกระบวนการก่อเกิดโดย ก) การก่อเกิดโดยโฟนอน ข) การก่อเกิดโดยใช้พลังงานโฟตอน ค) การก่อเกิดเนื่องจากการชน

กระบวนการตรงข้ามของการรวมตัวใหม่ระหว่างระดับพลังงานคือ การดูดกลืนพลังงานโฟตอน เพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังรูปที่ 2.10ข ซึ่งเป็นกระบวนการในการสร้างโฟโตไดโอดหรือตัวนำทางแสง โดยเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจากโฟตอนที่มากกระตุ้น ส่วนกระบวนการตรงกันข้ามของกระบวนการโอเจอร์ เป็นการก่อเกิดเนื่องจากการชนในรูปที่ 2.10ค

โดยคุณลักษณะที่สำคัญในการก่อเกิดแบบ SRH คือ การกระตุ้นจากความร้อน ในขณะที่กระบวนการรวมตัวใหม่ไม่มีการกระตุ้นจากความร้อนเข้ามา โดยกระบวนการกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและพลังงานกระตุ้น โดยสามารถหาได้จากค่าการคำนวณค่าอัตราการก่อเกิดแบบ SRH ( $G$ ) ซึ่งทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังสมการ

$$G = \frac{n_i^2 - pn}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)} \quad (2.47)$$

โดยที่  $G$  มีค่าเป็นศูนย์ที่ภาวะสมดุล หรือ  $n_i^2 = pn$  เมื่อรอยต่อไม่อยู่ในภาวะสมดุลจะทำให้  $n_i^2 > pn$  ซึ่งมีผลให้มีกระบวนการก่อเกิดขึ้น จากนั้นสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพื่อให้เข้าสู่ภาวะสมดุล

ในกรณีที่มีการไบอัสกลับ ซึ่งมีผลทำให้  $n_i^2 > pn$  สามารถเขียนอัตราการก่อเกิดได้เป็น

$$G \approx \frac{n_i^2}{\tau_{p0}n_1 + \tau_{n0}p_1} \quad (2.48)$$

หรือ

$$G = \frac{n_i^2}{\tau_g} \quad (2.49)$$

โดยที่  $\tau_g$  คือค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ซึ่งแสดงถึงค่าเฉลี่ยของเวลาที่เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยอ้างอิงจากสมการที่ 2.42 - 2.43 จะได้

$$\tau_g = \tau_{p0} \cdot e^{\left[\frac{E_T - E_i}{kT}\right]} + \tau_{n0} \cdot e^{\left[\frac{-(E_T - E_i)}{kT}\right]} \quad (2.50)$$

## 2.4 แบบจำลองค่าผลผลิต (Yield Model)

### 2.4.1 ค่าผลผลิต (Yield)

ในการผลิตหรือสร้างวงจรรวม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสารกึ่งตัวนำจำนวนมากถูกสร้างขึ้นเป็นวงจรรวม ซึ่งถูกจัดกลุ่มอยู่ภายในพื้นที่ชิป และมีการทำงานเฉพาะอย่างในการนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ตามที่ได้ออกแบบไว้ โอกาสที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกตัวและจุดเชื่อมต่อทุกจุดนั้นจะทำงานได้อย่างปกติ ขึ้นอยู่กับการควบคุมกระบวนการผลิตสารกึ่งตัวนำ [13]

ผู้ผลิตวงจรรวมชนิดสารกึ่งตัวนำที่ประสบความสำเร็จ ควรมุ่งเน้นและจัดการในเรื่องการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต ตัวอย่างเช่น เวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบกระบวนการ (Cycle Time) อัตราของงานที่ต้องกลับมาทำซ้ำ (Rework Rate) การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control : SPC) โดยหนึ่งในปัจจัยหลักที่สามารถนำมาวัดความสำเร็จของกระบวนการสร้างวงจรรวมชนิดสารกึ่งตัวนำ คือ ค่าผลผลิตหรือจำนวนชิปที่ทำงานได้ต่อจำนวนชิปทั้งหมดบนแผ่นซิลิคอนหนึ่งแผ่น

ในการควบคุมค่าร้อยละของค่าผลผลิต ใช้ค่าทางสถิติซึ่งถือเป็นสิ่งที่สำคัญ ไปจนถึงสามารถคาดเดาได้ถึงค่าผลผลิตที่เกิดขึ้นในอนาคต โดยปัจจัยต่างๆ เช่น การเพิ่มบุคลากร การสร้างโรงงานใหม่ การเพิ่มการลงทุนหลักอื่นๆ มีผลต่อเนื่องกับการคาดเดาของค่าผลผลิต ดังนั้นการศึกษาความสูญเสียของค่าผลผลิตเป็นสิ่งที่สำคัญมาก

โดยค่าผลผลิตที่เกี่ยวข้องกับการผลิตวงจรรวมชนิดสารกึ่งตัวนำ มี 3 ส่วน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแรก เกี่ยวข้องกับวงจรรวมที่ไม่สามารถผ่านเข้าไปถึงการทดสอบขั้นสุดท้ายได้ ซึ่งอาจเกิดจากการแตกของแผ่นซิลิคอน หรือเกิดขึ้นจากกระบวนการที่ผิดพลาด เช่น ทำผิดขั้นตอนหรือข้ามขั้นตอน

ส่วนที่สอง สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกพิจารณาถึง ความบกพร่องที่เด่นชัด (Gross Defect) ซึ่งทำให้ได้ค่าผลผลิตจากความบกพร่องกลุ่มนี้เรียกว่า ค่าผลผลิตที่เด่นชัด (Gross Yield) กลุ่มที่สอง พิจารณาความบกพร่องแบบสุ่ม (Random Defect) ที่จะได้ค่าผลผลิตจากความบกพร่องแบบสุ่ม (Random Defect Yield)

ส่วนสุดท้าย เกี่ยวข้องกับค่าผลผลิตที่อยู่ในรูปตัวถังแล้ว

ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้อธิบายถึง ค่าผลผลิตที่เกิดจากความบกพร่องในส่วนที่สองซึ่งเกี่ยวข้องกับ ความบกพร่องที่อยู่บนแผ่นซิลิคอนโดยตรง

#### 2.4.1.1 ความบกพร่องที่เด่นชัด

ค่าผลผลิตที่เด่นชัด โดยทั่วไปเกิดจากกระบวนการผลิตที่ผิดพลาด และทำให้ชิปบางส่วนที่อยู่บนแผ่นซิลิคอนนั้นไม่สามารถทำงานได้ ในการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ หรือทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นหัวใจหลักในการผลิตวงจรรวม โดยคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้าง เช่น การแพร่สารเจือ การยิงฝังประจุ การปลูกผลึกซิลิคอน หรือแม้แต่กระบวนการสร้างชั้นฉนวน โดยที่ค่าเงื่อนไขในกระบวนการสร้างที่มากหรือน้อยเกินไป มีผลทำให้อุปกรณ์แสดงคุณสมบัติที่ไม่ถูกต้อง เช่น อัตราขยาย ค่าแรงดันพังทลาย ค่าความต้านทาน เป็นต้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรรวมบนแผ่นซิลิคอนอาจเสียทั้งหมดหรือเสียเพียงบางส่วน เนื่องจากกระบวนการสร้างไม่ถูกต้องตามเงื่อนไข โดยความบกพร่องเหล่านี้ไม่ได้ทำให้เกิดความบกพร่องที่เป็นรูปแบบสุ่ม แต่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์อย่างชัดเจน

การวัดค่าผลผลิตที่เด่นชัด ใช้ส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างชิปบนแผ่นซิลิคอน หรือสไคร์ปไลน์ (scribe line) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้เลื่อยเพชรตัดแผ่นซิลิคอนออกมาเป็นชิปแต่ละตัว โดยมีการสร้างอุปกรณ์ ณ ตำแหน่งนั้นพร้อมกับการสร้างอุปกรณ์วงจรรวม ในแต่ละกระบวนการสร้าง ผู้ผลิตสามารถทราบได้ว่าคุณสมบัติของอุปกรณ์เป็นไปตามเงื่อนไขกำหนดของวงจรรวมนั้นหรือไม่ โดยมีค่าช่วงของความแปรปรวนของวงจรรวม เรียกว่า ช่วงของกระบวนการ (Process Window) ซึ่งถ้าผลจากการทดสอบอุปกรณ์ที่อยู่บนสไคร์ปไลน์ผิดจากข้อกำหนด อุปกรณ์ที่อยู่ในวงจรรวมอาจมีปัญหาเช่นกัน

#### 2.4.1.2 ความบกพร่องแบบสุ่ม

การหาสาเหตุที่อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ และ ทรานซิสเตอร์ชนิดสนามไฟฟ้าไม่ทำงาน นิยมใช้การวิเคราะห์หาความบกพร่องของแต่ละตัว และนำมาหาค่าผลผลิตที่ได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ถึงปัจจุบัน แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดเมื่อการผลิตวงจรรวมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันมีความซับซ้อนมากขึ้น ผู้ผลิตสารกึ่งตัวนำจึงพยายามหาวิธีตรวจสอบ และนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลค่าของผลผลิตที่ได้ และเนื่องจากรูปแบบของความบกพร่องแบบสุ่มนั้นมีความซับซ้อน จึงเป็นไปได้ยากที่สามารถตรวจสอบได้จากการตรวจสอบด้วยสายตา

ปัญหานี้ได้ถูกแก้ไขด้วยรูปแบบความบกพร่อง โดยบอกถึงความน่าจะเป็นที่ความบกพร่องนั้น มีผลเสียต่ออุปกรณ์ ซึ่งเรียกว่า ความน่าจะเป็นของความบกพร่อง (Probability of failure) โดยนำมาใช้ร่วมกับค่าจำนวนของความบกพร่อง เพื่อหาค่าความหนาแน่นของความบกพร่องเฉลี่ยต่อหนึ่งชิป รูปแบบของความบกพร่องแบบสุ่มนี้ สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท

#### 2.4.1.2.1 ค่าเฉลี่ยของความบกพร่อง (Average of Defect)

เป็นทฤษฎีที่กล่าวถึง ค่าเฉลี่ยของอุปกรณ์ที่เสียที่เกิดขึ้นจากความบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ โดยรูปแบบที่นำมาใช้คำนวณค่าเฉลี่ยของความบกพร่องแสดงดังสมการ

$$\lambda = AD \quad (2.51)$$

โดยที่  $\lambda$  คือค่าเฉลี่ยของความบกพร่องหรืออุปกรณ์ที่เสียต่อชิป ที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์  $A$  เป็นพื้นที่ของชิป และ  $D$  คือความหนาแน่นของความบกพร่อง ซึ่งมีหน่วยเป็นจำนวนความบกพร่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

#### 2.4.1.2.2 ฟังก์ชันของแบบจำลองค่าผลผลิต

แบบจำลองค่าผลผลิตที่นำมาใช้ในการคำนวณร้อยละของค่าผลผลิตเฉลี่ย มีจุดมุ่งหมายต่าง ๆ กัน เช่น สำหรับการผลิตหลายๆ ชิ้นงาน ร้อยละของค่าผลผลิตถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองค่าผลผลิต เพื่อที่พนักงานในกระบวนการผลิตจะได้สังเกตและแจ้งได้ทันทีในกรณีที่ค่าผลผลิตต่ำกว่าเป้าหมาย รวมถึงใช้ในการประเมินค่าใช้จ่ายในการผลิตสำหรับพิจารณาผลิตภัณฑ์ และใช้สำหรับหาค่าการรวมตัวของวงจรรวมที่มากที่สุด

การนำเสนอแบบจำลองค่าผลผลิตแบบสุ่มนั้นได้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป และยังมี การถกเถียงถึงแบบจำลองค่าผลผลิตที่สมบูรณ์ที่สุด แต่ในขณะเดียวกันแต่ละแบบจำลองค่าผลผลิตนั้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่นำเสนอในขณะนั้น

โดยทั่วไปแบบจำลองค่าผลผลิตเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของความบกพร่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $D$ ) กับ พื้นที่ของชิป ( $A$ ) ในบางครั้งอาจมีการเพิ่มค่าตัวคูณประกอบ  $C$  ด้วย [14]

$$Y = f(A, D, C) \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าร้อยละของค่าผลผลิตสามารถคำนวณได้จาก การหาค่าอัตราส่วนของจำนวนชิ้นงาน หรือชิปที่สามารถใช้งานได้กับจำนวนชิ้นงานทั้งหมด และยังสามารถคาดเดาได้จากความน่าจะเป็นที่ ชิ้นงานนั้นไม่มีความบกพร่องจากโอกาสทั้งหมด ซึ่งวิธีนี้กล่าวถึงวิธีการใช้ความน่าจะเป็นและสถิติในการคาดเดาร้อยละของค่าผลผลิต โดยอ้างอิงการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบทวินาม ปัวซอง สามเหลี่ยมหรือซิมป์สัน และแบบสี่เหลี่ยม

## 2.4.2 รูปแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution)

ในการทดลอง มีค่าตัวแปรที่ต้องการวัดซึ่งมีค่าไม่คงที่หรือเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละการวัด เรียกว่า ตัวแปรสุ่ม ตัวอย่างของตัวแปรสุ่ม เช่น ค่ากระแสที่วัดได้ในหลอดทดลองจากการทดลอง โดย ที่การแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม เป็นฟังก์ชันที่แสดงว่าตัวแปรสุ่มมีค่าเท่ากับ ค่าใดค่าหนึ่งในแซมเปิลสเปซ (Sample Space) ด้วยความน่าจะเป็น

ซึ่งประเภทของการแจกแจง สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดตามชนิดของตัวแปรสุ่มคือ การแจกแจงแบบต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีรูปแบบต่างกันไป

### 2.4.2.1 การแจกแจงแบบทวินาม (Binomial Distribution)

สมมติถ้ามีการโยนเหรียญ และให้ความน่าจะเป็นที่ได้ด้านหัว มีค่าเท่ากับ  $p$  และในทำนองเดียวกันให้  $q$  เป็นความน่าจะเป็นของอีกกรณีหรือด้านก้อย เนื่องจากความน่าจะเป็นในการโยนเหรียญมีได้เพียง 2 ค่านี้เท่านั้น จึงสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$p + q = 1 \quad (2.53)$$

และในการโยนเหรียญหลายๆครั้งโดยความน่าจะเป็นที่จะได้ ด้านหัว หรือ ด้านก้อย อย่างน้อยหนึ่งครั้ง ยังมีค่าเท่าเดิม ดังนั้น

$$(p + q)^N = 1 \quad (2.54)$$

หรืออีกนัยหนึ่ง  $q = 1 - p$  ดังนั้นสมการที่ 2.54 สามารถเขียนได้เป็น

$$(p + q)^N = \sum_{k=0}^N \frac{N!}{k!(N-k)!} \cdot p^k (1-p)^{N-k} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นสมการการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบทวินาม เมื่อโยนเหรียญจำนวน  $N$  ครั้ง และได้จำนวนครั้งที่ออกหน้า หัว เป็น  $k$  โดยที่  $k$  เป็นค่าจำนวนเต็มตั้งแต่ 0 ถึง  $N$  ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่ได้จำนวนครั้งที่ออกหัว เป็น  $n$  และก้อย  $N-n$  ครั้งเป็น

$$P(n; N, p) = \frac{N!}{n!(N-n)!} \times p^n (1-p)^{N-n} \quad (2.56)$$

#### 2.4.2.2 การแจกแจงแบบปัวซอง (Poisson Distribution)

สมมติให้เหตุการณ์ที่สนใจเกิดขึ้นตลอดช่วง (Interval) หรือพื้นที่ที่กำหนด ถ้าช่วงสามารถแบ่งได้เป็นช่วงย่อย (Subinterval) โดยที่ [15]

- ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งเหตุการณ์ในช่วงย่อยๆ นั้นเป็นศูนย์
- ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์หนึ่งในแต่ละช่วงย่อยมีค่าเท่ากัน และเป็นสัดส่วนกันกับความยาวของช่วงนั้น และ
- การเกิดขึ้นของเหตุการณ์นั้นเป็นอิสระต่อกันในแต่ละช่วงย่อย

โดยเรียกกระบวนการแบบนี้ว่าเป็นกระบวนการแบบปัวซอง (Poisson Process) โดยถ้าค่าเฉลี่ยของเหตุการณ์นั้นหรือ  $\lambda$  มีค่ามากกว่า 0 ตัวแปรสุ่ม  $n$  หมายถึงจำนวนของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงนั้น มีการแจกแจงแบบปัวซอง (Poisson distribution) โดยมีค่าเป็น

$$P(n; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^n}{n!} \quad (2.57)$$

#### 2.4.2.3 การแจกแจงแบบปัวซองจากการประมาณค่าของการแจกแจงแบบทวินาม

จากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาในการโยนเหรียญ เมื่อจำนวนในการทดสอบ(หรือโยน)  $N$  มีจำนวนมากครั้งและความน่าจะเป็นของ  $p$  มีค่าน้อยมาก และกำหนดให้

$$\lambda = Np \quad (2.58)$$

สมมติให้การโยนเหรียญทุกครั้งไม่ขึ้นด้านหัวเลย ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น  $(1-p)^N$  หรือ  $P(0; N, p)$  ทำให้ได้

$$P(0; N, p) = \left(1 - \frac{\lambda}{N}\right)^N \quad (2.59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการใส่ฟังก์ชันลอการิทึมทั้งสองฝั่ง และใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) เข้ามาแทนที่สมการที่ 2.59 มีค่าเป็น

$$\ln P(0; N, p) = N \ln \left( 1 - \frac{\lambda}{N} \right) = -\lambda - \frac{\lambda^2}{2N} - \dots \quad (2.60)$$

เมื่อทราบว่า  $N$  มีค่าสูงมาก ดังนั้นค่าที่ตามมาในพจน์ที่สองเป็นต้นไปจึงมีค่าน้อยมาก และไม่นำมาคิด ทำให้ได้สมการ

$$P(0; N, p) \approx e^{-\lambda} \quad (2.61)$$

ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นที่โยนเหรียญแล้วไม่ออกด้านหัว

ต่อมานำสมการ  $P(0; N, p)$  ไปหารออกด้วยความน่าจะเป็น  $P(n-1; N, p)$  และอ้างถึงสมการที่ 2.59 และ 2.61 จะได้

$$\frac{P(0; N, p)}{P(n-1; N, p)} = \frac{Np - (n-1)p}{n(1-p)} \approx \frac{\lambda}{n} \quad (2.62)$$

เมื่อ  $N$  มีค่ามากกว่า  $n$  มาก และ  $p$  มีค่าน้อยมากพอที่จะไม่นำมาคิด จากสมการนี้ สามารถหาค่าความน่าจะเป็นที่ได้ ด้านหัว อย่างน้อย 1 ครั้งเป็น

$$P(1; N, p) = \frac{\lambda}{1!} P(0; N, p) = \lambda e^{-\lambda} \quad (2.63)$$

ความน่าจะเป็นที่จะได้ ด้านหัว 2 ครั้งเป็น

$$P(2; N, p) = \frac{\lambda^2}{2!} e^{-\lambda} \quad (2.64)$$

และเมื่อ  $n$  ครั้ง

$$P(n; N, p) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \quad (2.65)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสมการของปัวซอง ซึ่งประมาณจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบทวินาม โดยจำนวนของเหตุการณ์นั้นเกิดขึ้นแบบสุ่มและเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นอิสระต่อกัน ความน่าจะเป็นที่จะได้จำนวนเหตุการณ์  $n$  ในช่วงที่กำหนดคือ

$$P(n; \lambda) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \quad (2.66)$$

#### 2.4.2.4 การแจกแจงแบบสามเหลี่ยมหรือซิมป์สัน (Simpson's Distribution)

เป็นรูปแบบการแจกแจงของความน่าจะเป็นที่มีการกระจายของข้อมูลเป็นรูปแบบสามเหลี่ยม ที่มีค่าอยู่ในช่วงของข้อมูลต่ำสุด  $a$  และสูงสุด  $b$  โดยมีค่าความน่าจะเป็นสูงสุดที่จุด  $m$  ซึ่งสามารถเสมือนแบบจำลองของการกระจายแบบปกติ โดยมีรูปแบบของสมการเป็น

$$P(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(m-a)} & ; a \leq x \leq m \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-m)} & ; m \leq x \leq b \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.67)$$

#### 2.4.2.5 การแจกแจงแบบคงที่หรือสี่เหลี่ยม (Uniform Distribution)

เป็นรูปแบบการแจกแจงอย่างง่ายที่สุดรูปแบบหนึ่ง โดยมีการกระจายของข้อมูลเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์เท่าๆกัน และมีการกำหนดช่วงของข้อมูลจากค่าต่ำสุด  $a$  ถึงค่าสูงสุด  $b$  ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟหรือค่าความน่าจะเป็นทั้งหมดมีค่าเป็น 1 โดยมีรูปแบบของสมการเป็น [16]

$$P(x) = \frac{1}{b-a} \quad (2.68)$$

#### 2.4.2.6 การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

เป็นรูปแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นที่นิยมใช้ และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลจำนวนหนึ่งหลายๆชุดข้อมูล โดยมีการกระจายของชุดข้อมูลทั้งหมดเป็นรูปกราฟระฆังคว่ำแบบสมมาตร (Bell Shape) โดยมีรูปแบบของสมการเป็น

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า  $\mu$  และ  $\sigma^2$  เป็นค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของข้อมูลของตัวแปรสุ่ม  $x$  ตามลำดับ โดยสามารถแปลงข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบเส้นโค้งปกติมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม  $Z$  ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และความแปรปรวนเป็น 1

### 2.4.3 แบบจำลองค่าผลผลิตที่ได้จากการแจกแจงความน่าจะเป็น

พิจารณาจากการแจกแจงความน่าจะเป็นของความหนาแน่นของความบกพร่องแต่ละรูปแบบ ในหัวข้อที่ 2.4.2 ที่กล่าวมา สามารถแบ่งได้เป็น

#### 2.4.3.1 แบบจำลองค่าผลผลิตของปั๊วช่อง (Poisson Yield Model)

จากการแจกแจงความน่าจะเป็นของปั๊วช่อง เมื่อค่าความน่าจะเป็นของการพบความบกพร่องบนชิปมีค่าเท่ากันตลอดทั้งแผ่น จากสมการของการแจกแจงความน่าจะเป็นของปั๊วช่อง จะได้

$$P(n; \lambda) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda} \quad (2.70)$$

โดยที่  $\lambda = AD$  เป็นค่าของความบกพร่องต่อชิปหนึ่งตัว  $D$  คือความหนาแน่นของความบกพร่อง และ  $A$  คือ พื้นที่ของชิป ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่จะพบชิปที่ไม่มีความบกพร่อง หรือเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตจะเป็น

$$Y = P(0; \lambda) = e^{-\lambda} \quad (2.71)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวนี้เป็นแบบจำลองค่าผลผลิตของปั๊วช่อง โดยมีสมมติฐานที่ว่าค่าความบกพร่อง  $D$  หรือ  $\lambda$  นั้นจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นซิลิคอนทั้งแผ่น และมีค่าคงที่ตลอดทุกแผ่นทุกกลุ่มที่ทำการผลิต

โดยแบบจำลองค่าผลผลิตของปั๊วช่องเป็นที่นิยมจนถึงกลางทศวรรษที่ 1970 ในขณะที่พื้นที่ของชิปมีขนาดประมาณ 0.25 ตารางเซนติเมตร และพบว่ามี การเพิ่มตัวคูณประกอบเพื่อให้การใช้แบบจำลองค่าผลผลิตสมบูรณ์ยิ่งขึ้น แต่เมื่อขนาดพื้นที่ของชิปมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้พบข้อจำกัดในการใช้งานว่า เมื่อขนาดของพื้นที่มีค่ามากขึ้น หรือค่าของความหนาแน่นเฉลี่ยต่อชิปมีค่ามากกว่า 1 ( $\lambda > 1$ ) ค่าร้อยละของค่าผลผลิตที่ได้จะมีค่าไม่แม่นยำ โดยจะคำนวณร้อยละของค่าผลผลิตได้ต่ำกว่าความเป็นจริง [17]

### 2.4.3.2 แบบจำลองค่าผลผลิตของปัวซองที่มีการปรับปรุง (compound Poisson Yield Model)

จากแบบจำลองค่าผลผลิตของปัวซองในหัวข้อ 2.4.3.1 ที่มีการใช้งานและพบว่าได้ค่าผลผลิตต่ำกว่าความเป็นจริง ในปี 1964 เมอร์ฟี (B.T.Murphy) เสนอความคิดเห็นว่า ค่าความหนาแน่นของความบกพร่องมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งแผ่นซิลิคอน แต่มีการกระจายเป็นกลุ่มในบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนแผ่นซิลิคอน และมีค่าต่างกันในแต่ละชุดการผลิต เพื่อคำนวณให้ได้ใกล้เคียงความเป็นจริง จึงได้นำรูปแบบสมการของปัวซองมาประกอบกับฟังก์ชันของการกระจายของความบกพร่อง  $f(D)$  ทำให้ความน่าจะเป็นของการพบความบกพร่องบนชิป มีสมการเป็น [18]

$$P(n; AD) = \int f(D) \frac{AD^n}{n!} e^{-AD} dD \quad (2.72)$$

ซึ่งทำให้แบบจำลองค่าผลผลิตเป็น

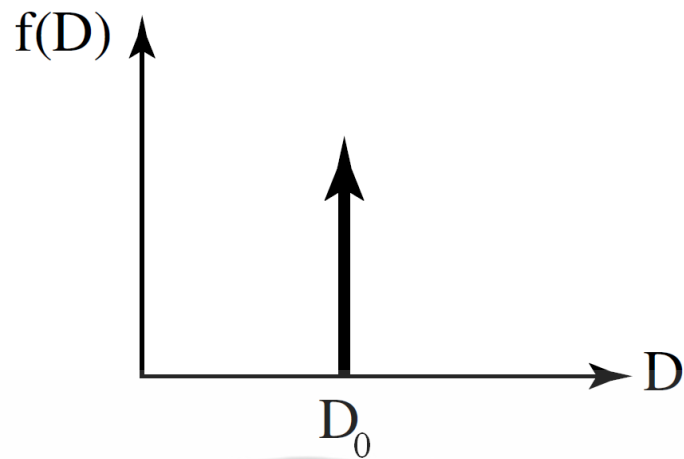
$$Y = P(0; AD) = \int f(D) e^{-AD} dD \quad (2.73)$$

จากสมการที่ 2.73 เมื่อพิจารณาฟังก์ชันของการกระจายของความบกพร่อง  $f(D)$  เนื่องจากยังไม่ทราบรูปแบบของฟังก์ชันของการกระจายของความบกพร่อง จึงมีการสร้างสมมติฐานในรูปแบบต่างๆ โดยพบว่ามีผู้ที่พยายามนำเสนอฟังก์ชันนี้ในรูปแบบต่างๆกัน

### 2.4.3.3 แบบจำลองค่าผลผลิตจากการแจกแจงของเดลตาฟังก์ชัน

จากสมการที่ 2.72 เมื่อสมมติให้การกระจายของความบกพร่องนั้นเป็นแบบสุ่มและมีค่าคงที่ตลอดแผ่นซิลิคอน ดังนั้นค่าฟังก์ชันของความหนาแน่นของความบกพร่องสามารถมีค่าเดียวคือ  $D_0$  ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของความบกพร่อง ในกรณีนี้ สามารถเขียนฟังก์ชันการกระจายความหนาแน่นของความบกพร่อง ( $f(D)$ ) เป็น เดลตาฟังก์ชัน (Delta Function) ดังสมการที่ 2.74 และแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

$$f(D) = \delta(D - D_0) \quad (2.74)$$



รูปที่ 2.11 เดลตาฟังก์ชัน

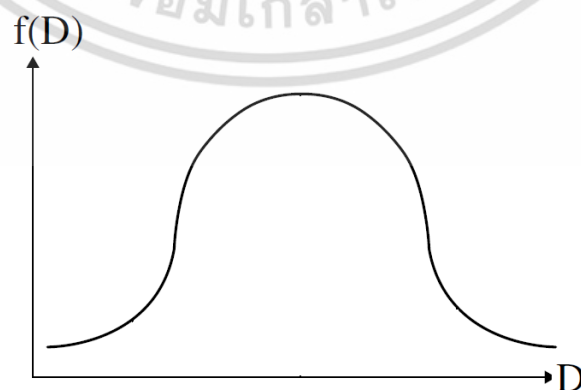
โดยเป็นฟังก์ชันที่มีค่าเพียงจุดเดียวที่  $D = D_0$  เท่านั้น จากนั้นนำสมการไปแทนค่า ทำให้ได้แบบจำลองค่าผลผลิตเป็น

$$Y = \int \delta(D - D_0) e^{-AD} dD = e^{-AD} \quad (2.75)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับแบบจำลองค่าผลผลิตของปีของ ดังที่ได้กล่าวไว้ในสมการที่ 2.71

#### 2.4.3.4 แบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม

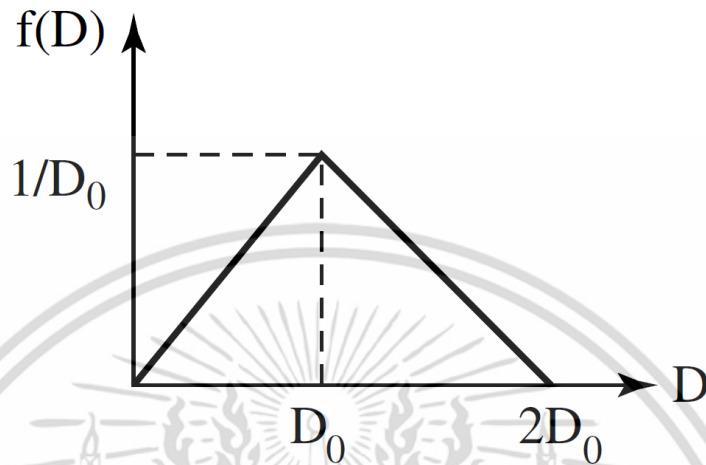
จากการพิจารณาค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความบกพร่อง โดยเมอร์ฟีได้เสนอว่ารูปแบบของฟังก์ชันการกระจาย ควรใช้การกระจายแบบเส้นโค้งปกติหรือเกาส์เซียน (Gaussian distribution) [19] ที่แผ่นซิลิคอนส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นของความบกพร่องเท่ากับค่าเฉลี่ยของค่าความหนาแน่น และมีบางแผ่นมีค่าที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าเฉลี่ยดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฟังก์ชันของเกาส์เซียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่พบว่าในการอินทิเกรตหรือปริพันธ์ของสมการเกาส์เซียนนั้น ไม่สามารถแก้สมการที่มีความซับซ้อนออกมาได้อย่างโดยง่าย [20] จึงมีการประมาณฟังก์ชันดังกล่าวโดยใช้ฟังก์ชันการกระจายสามเหลี่ยมของซิมป์สันดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ฟังก์ชันของซิมป์สัน

ซึ่งสมการจากรูปที่ 2.13 มีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 f(D) &= \frac{D}{D_0^2} && ; 0 \leq D \leq D_0 \\
 &= \frac{1}{D_0} \left( 2 - \frac{D}{D_0} \right) && ; D_0 \leq D \leq 2D_0 \quad (2.76) \\
 &= 0 && ; elsewhere
 \end{aligned}$$

ทำให้ได้แบบจำลองค่าผลผลิตจากการกระจายความหนาแน่นของความบกพร่องแบบสามเหลี่ยมเป็น

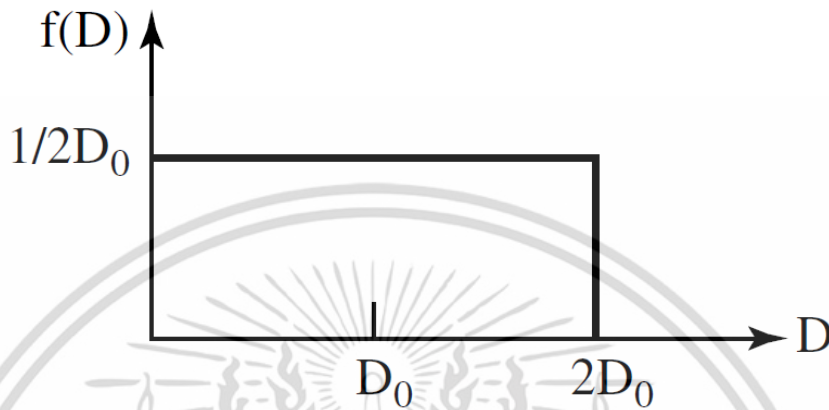
$$\begin{aligned}
 Y &= \int_0^{D_0} \frac{D}{D_0^2} e^{-AD} dD + \int_{D_0}^{2D_0} \frac{1}{D_0} \left( 2 - \frac{D}{D_0} \right) e^{-AD} dD \\
 Y &= \left( \frac{1 - e^{-AD_0}}{AD_0} \right)^2 \quad (2.77)
 \end{aligned}$$

โดยสมการที่ 2.77 เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เพื่อตรวจสอบผลกระทบจากความหนาแน่นของความบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3.3 แบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงแบบคงที่หรือสี่เหลี่ยม

เมื่อกำหนดฟังก์ชันความหนาแน่นของความบกพร่อง เป็นรูปแบบการแจกแจงแบบคงที่หรือแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยให้ความหนาแน่นของความบกพร่องนั้นกระจายแบบคงที่หรือมีค่าเท่าๆกันถึงค่า  $2D_0$  โดยไม่มีค่าใดที่สูงกว่ากัน ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นการประมาณค่าของเกาส์เซียนอย่างหยาบ



รูปที่ 2.14 ฟังก์ชันการแจกแจงแบบคงที่

ซึ่งมีการแจกแจงดังสมการ

$$f(D) = \begin{cases} \frac{1}{2D_0} & ; 0 \leq D \leq 2D_0 \\ 0 & ; \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.78)$$

ทำให้ได้แบบจำลองของค่าผลผลิตจากการกระจายความบกพร่องแบบคงที่เป็น

$$Y = \int_0^{2D_0} \frac{1}{2D_0} e^{-AD} dD$$

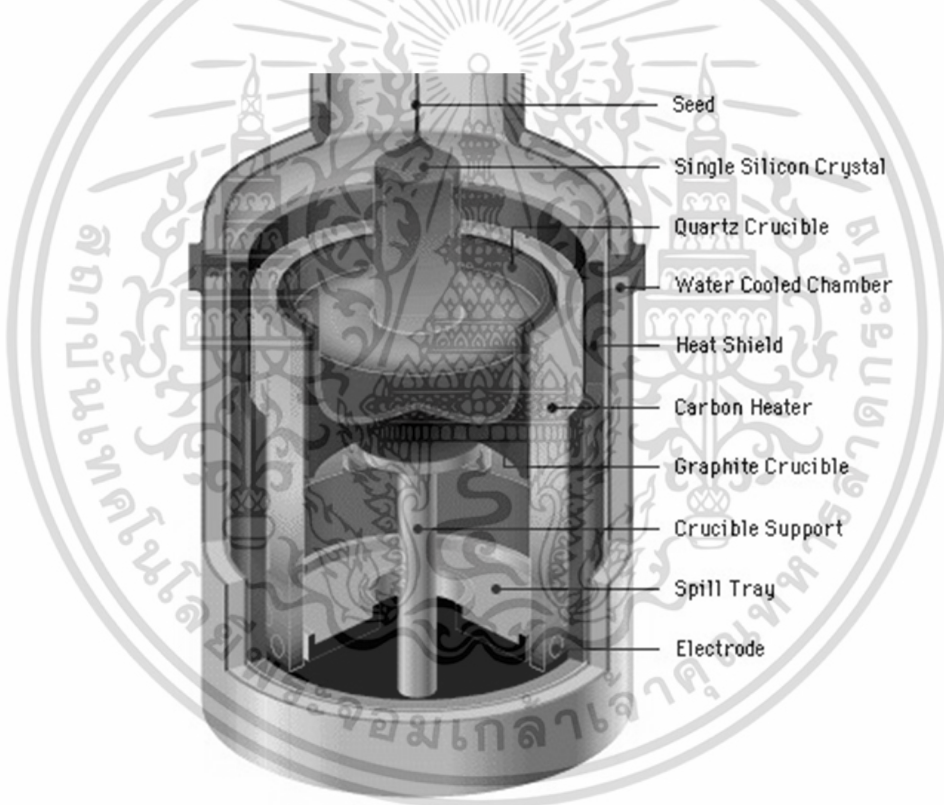
$$Y = \left( \frac{1 - e^{-2AD_0}}{2AD_0} \right) \quad (2.79)$$

## 2.5 กระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

### 2.5.1 กระบวนการผลิตแผ่นซิลิคอน

ในระยะแรกที่มีการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เรามักใช้สารกึ่งตัวนำแบบเยอรมาเนียม แต่ตั้งแต่คริสต์ทศวรรษที่ 1960 สารกึ่งตัวนำที่ได้รับความนิยมคือ ซิลิคอน ด้วยเหตุผลของความง่ายในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประดิษฐ์ในหลายๆประการ โดยในปัจจุบัน มักผลิตผลึกซิลิคอนตามวิธีของโซชาร์ลสกี (Czochralski) โดยรูปที่ 2.15 เป็นภาพตัดขวางของเครื่องมือผลิตแผ่นซิลิคอน โดยสารเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิต คือ ผลึกซิลิคอนบริสุทธิ์แบบหลายผลึก (Polycrystalline Silicon) ลงในภาชนะภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย และเผาภาชนะให้มีความร้อนประมาณ 1700 องศาเซลเซียสต่อไปทำการแห่แท่งผลึกเริ่มต้น (Seed Crystal) ซึ่งมีทิศทางผลึกในลักษณะที่ต้องการให้แท่งผลึกมีความยาวในทิศทางที่ต้องการให้สัมพันธ์กับพื้นผิวของสารละลาย เมื่อค่อยๆดึงแท่งผลึกเริ่มต้นขึ้นช้าๆ โดยมีการหมุนแท่งผลึกไปด้วย และภาชนะที่บรรจุซิลิคอนเหลวก็จะหมุนไปในทิศทางตรงข้ามกัน จึงได้แท่งผลึกซิลิคอน ที่ยาวขึ้นเรื่อยๆ โดยในปัจจุบัน เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งผลึกมีขนาด 8 ถึง 12 นิ้ว และความยาวของแท่งผลึกมีขนาด 1 ถึง 2 เมตร โดยในระหว่างที่ทำการดึงแท่งผลึก มีการผสมสารเจือปนที่ต้องการลงในสารละลายซิลิคอน จากนั้นทำการเลื่อยแท่งซิลิคอนออกเป็นแผ่นบางๆที่เรียกว่า แผ่นเวเฟอร์ (Wafer) และทำการขัดผิวของแผ่นเวเฟอร์เพื่อนำไปทำแผ่นวงจรรวมต่อไป

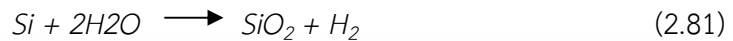


รูปที่ 2.15 โครงสร้างภายในของเครื่องผลิตผลึกซิลิคอนแบบของโซชาร์ลสกี (Czochralski)[22]

## 2.5.2 กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน

เนื่องจากชั้นออกไซด์ของซิลิคอนมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี จึงใช้ชั้นออกไซด์ในการแยกอุปกรณ์แต่ละตัว เป็นชั้นป้องกันอนุภาคสารเจือปนผ่านได้ นอกจากนี้ยังสามารถสร้างเป็นชั้นออกไซด์ที่มีความต้านทานจำเพาะและทนค่าแรงดันได้สูง โดยทั่วไปการสร้างชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นเวเฟอร์แบบซิลิคอนกระทำโดยการอบแผ่นให้มีความร้อนในช่วง 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานนี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์หรือเรียกว่า การออกซิเดชันแบบแห้ง หรือสร้างภายใต้บรรยากาศของไอน้ำหรือเรียกว่าการออกซิเดชันแบบเปียก โดยที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าว โมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ) และโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) สามารถแพร่ผ่านชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ได้โดยง่าย ซึ่งเมื่อแพร่เข้าถึงรอยต่อระหว่างชั้น ( $SiO_2$ ) กับ Si ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นออกไซด์ได้เพิ่มเติมดังสมการ



ซึ่งเห็นได้ว่าเนื้อของซิลิคอนหายไปส่วนหนึ่งเมื่อเกิด  $SiO_2$  ด้วย โดยมีข้อพิจารณาคือ ในขณะที่มีการออกซิเดชัน สารเจือปนที่อยู่ในซิลิคอนมีการกระจายตัวเพิ่มเติม เพราะว่าอุณหภูมิของการออกซิเดชันมีค่าในช่วงที่สารเจือปนมีการแพร่ตัวได้ง่าย โดยมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในเนื้อซิลิคอนและในชั้นออกไซด์ และค่าสัมประสิทธิ์การแยกตัว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสารเจือปนในชั้นออกไซด์มีค่าต่ำกว่าในเนื้อซิลิคอนมากจึงใช้ชั้นออกไซด์เป็นฉนวนกั้นของสารเจือปนได้

ชั้นออกไซด์ที่สร้างจากกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง มีความหนาแน่นสูงกว่าชั้นออกไซด์จากกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก และสามารถทนค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าได้สูงกว่า แต่อัตราการเพิ่มความหนาแน่นของชั้นออกไซด์จากกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกมีค่าสูงกว่ากระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งมาก ดังนั้นในกรณีของการสร้างบริเวณเกตของมอสทรานซิสเตอร์ จะใช้การออกซิเดชันแบบแห้งเป็นหลัก และใช้การออกซิเดชันแบบเปียกในกรณีที่เราต้องการชั้นออกไซด์ที่หนามากเท่านั้น

สำหรับความหนาแน่นของชั้นออกไซด์ สามารถประมาณได้อย่างคร่าวๆ โดยการเปรียบเทียบสีของชั้นออกไซด์กับแถบสีมาตรฐาน เพราะเมื่อความหนาแน่นเปลี่ยนไป แสงที่มีสีจะทำให้การสะท้อนจากชั้นออกไซด์มีความเข้มสูงสุดก็จะเปลี่ยนสีไป โดยสีที่มีความเข้มสูงสุดจะมีความยาวคลื่นพอดีที่เมื่อ คลื่นแสงเดินทางครบระยะสองเท่าของความหนาแน่นของออกไซด์ จะเกิดการแทรกสอดเสริม กับแสง ณ ผิวของชั้นออกไซด์พอดี ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของชั้นออกไซด์กับสีที่สะท้อนจากผิวของชั้นออกไซด์ในกรณีที่ส่องด้วยแสงที่เลียนแบบแสงแดดจากหลอดเรืองแสง ซึ่งตารางนี้มีประโยชน์สำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นของชั้นออกไซด์ได้

นอกจากวิธีดังกล่าว สามารถวัดความหนาแน่นของชั้นออกไซด์ได้ละเอียดโดยการใช้เครื่องเอลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) โดยการใช้แสงสีเดียวที่ถูกโพลาไรซ์แล้วในลักษณะมุมเดียวกับชั้นออกไซด์ โดยแสงสะท้อนทั้งผิวของชั้นออกไซด์และรอยต่อ ซึ่งความแตกต่างของมุมที่เกิดจากการโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนทั้งสองนำมาคำนวณได้ละเอียดขึ้น อีกวิธีหนึ่งที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมคือ การใช้เครื่องมือวัดระดับทางกล (AFM) โดยการลากเข็มไปตามผิวที่มีชั้นออกไซด์ปกคลุม และบริเวณที่ไม่มี

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับสีของชั้นออกไซด์ของซิลิคอน

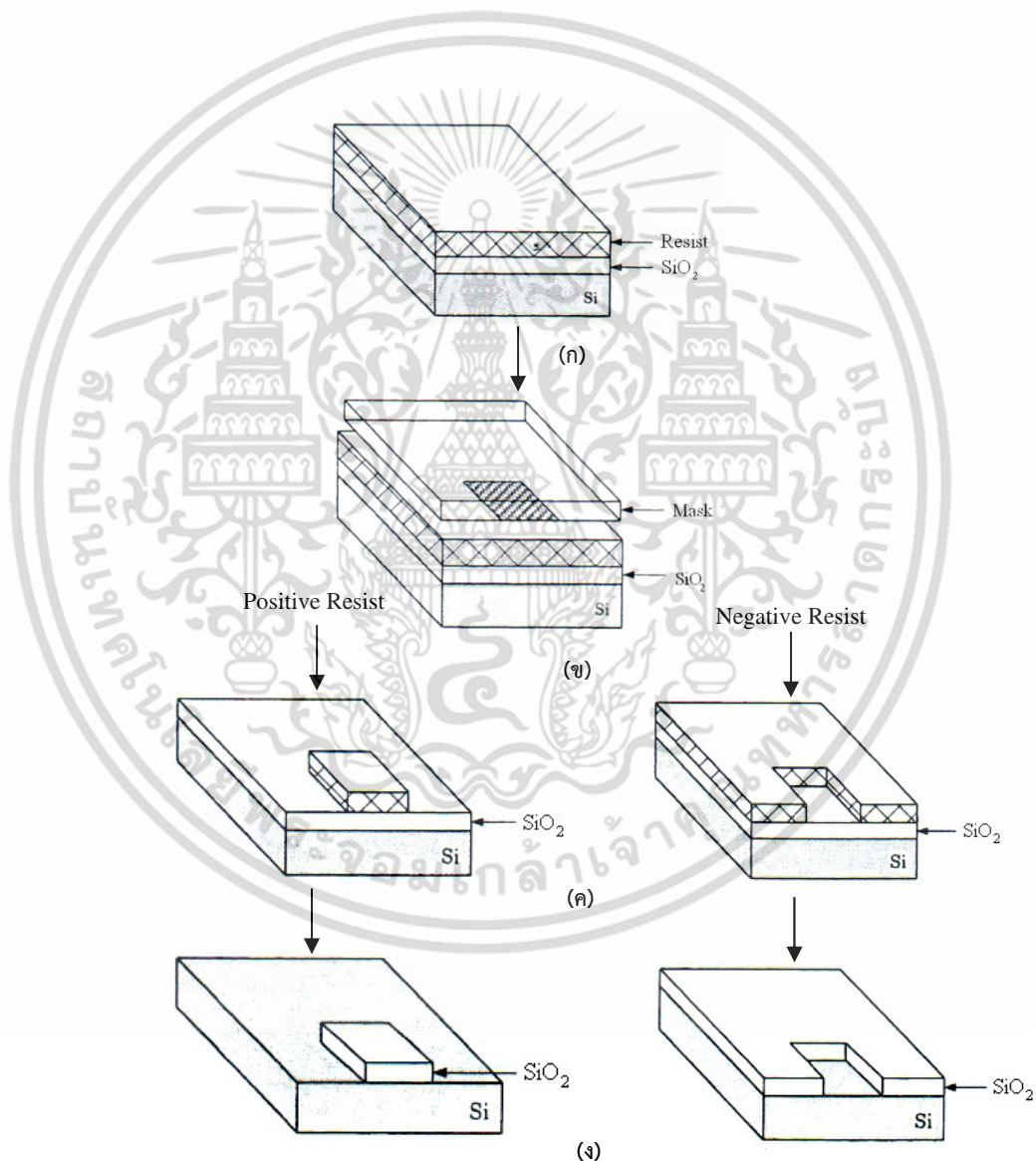
Film Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Color and Comments	Film Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Color and Comments
0.05	Tan	0.68	Bluish" (not blue but borderline between violet and blue green; appears more like a mixture between violet red and blue green and looks grayish)
0.07	Brown	0.72	Blue green to green (quite broad)
0.10	Dark violet to red violet	0.77	"Yellowish"
0.12	Royal Blue	0.80	Orange (rather broad for orange)
0.15	Light blue to metallic blue	0.82	Salmon
0.17	Metallic to very light yellow green	0.85	Dull, light red violet
0.20	Light gold to yellow; slightly metallic	0.86	Violet
0.22	Gold with slight yellow orange	0.87	Blue violet
0.25	Orange to melon	0.89	Blue
0.27	Red violet	0.92	Blue green
0.30	Blue to violet blue	0.95	Dull yellow green
0.31	Blue	0.97	Yellow to "yellowish"
0.32	Blue to blue green	0.99	Orange
0.34	Light green	1.00	Carnation pink
0.35	Green to yellow green	1.02	Violet red
0.36	Yellow green	1.05	Red violet
0.37	Green yellow	1.06	Violet
0.39	Yellow	1.07	Blue violet
0.41	Light orange	1.10	Green
0.42	Carnation pink	1.11	Yellow green
0.44	Violet red	1.12	Green
0.46	Red violet	1.18	Violet
0.47	Violet	1.19	Red Violet
0.48	Blue violet	1.21	Violet red
0.49	Blue	1.24	Carnation pink to salmon
0.50	Blue green	1.25	Orange
0.52	Green (broad)	1.28	Yellowish"
0.54	Yellow green	1.32	Sky blue to green blue
0.56	Green yellow	1.40	Orange
0.57	Yellow to "yellowish" (not yellow but is in the position where yellow is to be expected; at times appears to be light creamy gray or metallic)	1.45	Violet
0.58	Light orange or yellow to pink borderline	1.46	Blue violet
0.60	Carnation pink	1.50	Blue
0.63	Violet red	1.54	Dull yellow green

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นออกไซด์ จึงสามารถวัดความแตกต่างจากระดับของผิวได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ อาจใช้วิธีการแทรกสอดของแสงจากการสะท้อนของผิวทั้งสอง โดยการวัดความแตกต่างระหว่างแถบมืดและสว่าง ทำให้ได้ความหนาที่ละเอียดเช่นกัน

### 2.5.3 กระบวนการทางแสง

ในการสร้างวงจรรวมในทุกขั้นตอนต้องใช้กระบวนการทางแสง โดยอาศัยกระจกต้นแบบ เพื่อสร้างลวดลายต่างๆ ให้ปรากฏอยู่บนแผ่นซิลิคอน โดยใช้น้ำยาไวแสงเป็นหลัก และสามารถแบ่งออกได้เป็น น้ำยาไวแสงแบบบวก และน้ำยาไวแสงแบบลบ โดยแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงแบบบวก (Positive) และแบบลบ (Negative)[9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนของกระบวนการทางแสง มีดังนี้

- การอบแผ่นซิลิคอน เพื่อขจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 150 - 200 องศาเซลเซียสภายใต้สุญญากาศหรือไนโตรเจนแห้ง
- การเคลือบด้วยสารช่วยเกาะติดบนแผ่นซิลิคอน สารนี้คือ ไอรอะเหยของเฮกซาเมทิลไดไซลาเซน (HMDS) ทำให้ชั้นผิวของน้ำยาไวแสงติดผิวของแผ่นซิลิคอนได้ดีขึ้น
- การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการหยดน้ำยาไวแสงที่มีความหนืดและปริมาณที่กำหนดลงบนแผ่นซิลิคอนซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบ โดยเงื่อนไขที่มีผลต่อความหนาของชั้นน้ำยาไวแสง
- หลังจากที่แผ่นซิลิคอนเคลือบด้วยชั้นน้ำยาไวแสงแล้ว ทำการอบที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแข็งตัว
- ในขั้นตอนการฉายแสงยูวี นำกระจกต้นแบบ ซึ่งมีลวดลายวงจรที่ต้องการมาวางไว้ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน และทำการฉายแสงด้วยความเข้มแสงและเวลาที่กำหนด เพื่อให้เกิดความคมชัดของลวดลายได้ดีที่สุด
- กระบวนการขึ้นรูปลวดลาย ทำโดยการจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลายดีเวลลอป (Develop) ประเภทต่าง และควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้มีค่าคงที่เสมอ
- หลังจากที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปลวดลาย นำแผ่นซิลิคอนไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เพื่อให้ชั้นของสารไวแสงที่เหลืออยู่บนแผ่นซิลิคอนมีความคงทนต่อการนำไปกระบวนการสร้างอื่นต่อไป

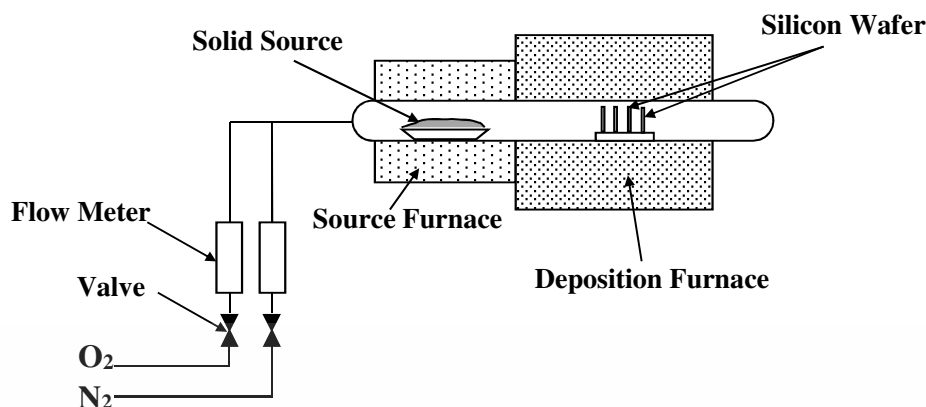
#### 2.5.4 กระบวนการแพร่สารเจือปน

ในกระบวนการแพร่สารเจือเข้าสู่ผิวของแผ่นซิลิคอน มักเลือกแพร่สารเจือปนเฉพาะบางบริเวณ โดยมีชั้นกั้นบนบริเวณที่ไม่ต้องการแพร่สารเจือ ซึ่งอาจเป็นชั้นออกไซด์ โดยระดับอุณหภูมิที่มักใช้ในการแพร่สารเจืออยู่ในช่วง 900 ถึง 1200 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่ความร้อนสูง โครงสร้างของผลึกของซิลิคอน มีการขยายตัวเพียงพอให้อะตอมของสารเจือสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของแผ่นซิลิคอนได้ โดยกระบวนการแทรกตัวของอะตอมสารเจือเข้าไปในแผ่นซิลิคอน มีสองวิธีคือแบบแทนที่ของอะตอมซิลิคอน ซึ่งอะตอมของสารเจือเข้าไปในโครงสร้างที่ว่างเปล่า หรือแทนที่อะตอมของซิลิคอนจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก หรือในกรณีที่อะตอมของสารเจือปนมีพลังงานมากพอ อาจชนอะตอมของซิลิคอนให้หลุดออก แล้วเข้าไปแทนที่อะตอมนั้น อีกวิธีคือ แทรกตัวอยู่ระหว่างโครงผลึกซิลิคอน

ในการแพร่สารเจือนั้น ใช้การเรียงแผ่นซิลิคอนตามแนวตั้งตามร่องของภาชนะที่ทำจากควอทซ์บริสุทธิ์ โดยวางอยู่ตรงกึ่งกลางของท่อควอทซ์ซึ่งมีขดลวดความร้อนอยู่โดยรอบ ระบบนี้ถูกเรียกว่า เตาแพร่สารเจือ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เหตุผลสำคัญสำหรับกระบวนการใช้กระบวนการแพร่

สารเจือคือ การสร้างรอยต่อพีเอ็นตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

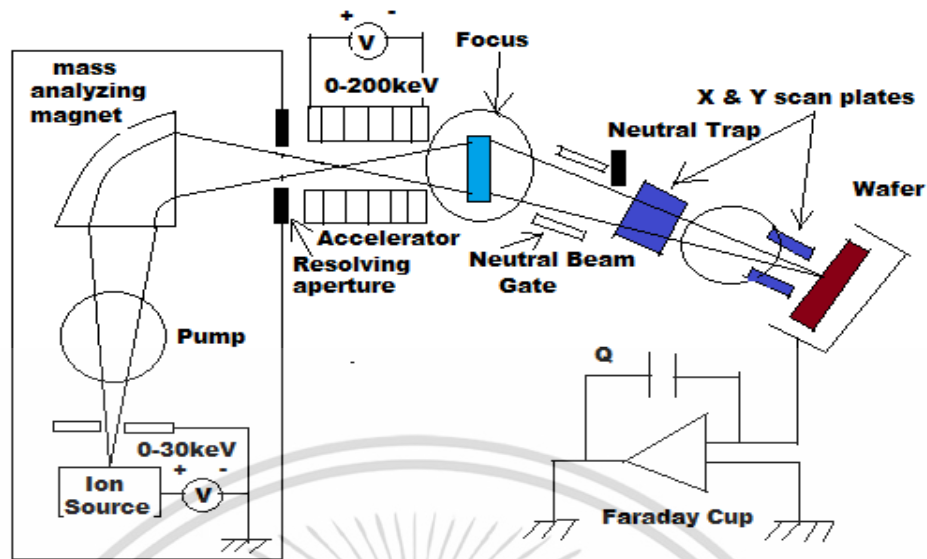


รูปที่ 2.17 เตาแพร่สารเจือที่ใช้ในการผลิตวงจรรวม[23]

### 2.5.5 กระบวนการยิงฝังประจุ

เนื่องจากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนยังมีข้อดีอยู่หลายประการ โดยเฉพาะการควบคุมความลึกของรอยต่อ และเป็นการยากในการสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น ที่มีความกว้างของชั้นเบสแคบมาก และมีค่าคงที่ตลอดการผลิต นอกจากนี้ด้วยกระบวนการแพร่สารเจือ ยังไม่สามารถแพร่สารเจือที่มีค่าความหนาแน่นสูงมากเข้าสู่ผิวซิลิคอนได้ ด้วยข้อจำกัดทางด้านสภาพสารละลายได้ในของแข็ง จึงเกิดกระบวนการยิงฝังประจุในวงจรรวม โดยประจุถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ให้มีความเร็วสูงและมีพลังงานจลน์ตามที่ต้องการ เมื่อประจุวิ่งเข้าสู่ผิวของสารกึ่งตัวนำและเกิดการชนกับโครงสร้างของซิลิคอน ซึ่งการชนแต่ละครั้ง พลังงานจลน์ของประจุจะมีค่าลดลง และสุดท้ายประจุฝังตัวอยู่ในระดับที่พลังงานจลน์ของประจุลดลงเป็นศูนย์ โดยทั่วไปถ้าพลังงานจลน์เฉลี่ยของประจุนั้นมีค่าสูง ระดับความลึกเฉลี่ยที่ประจุฝังตัวก็ลึกยิ่งขึ้น ข้อได้เปรียบคืออุณหภูมิของแผ่นซิลิคอนในขณะที่ถูกยิงฝังประจุมีอุณหภูมิต่ำ และยังสามารถเติมสารเจือเพื่อให้ความหนาแน่นสูงขึ้นได้อีก โดยหลักการของกระบวนการนี้แสดงได้ดังรูป 2.18

ในกระบวนการยิงฝังประจุ จะมีชั้นกั้นบนแผ่นซิลิคอนในบริเวณที่ไม่ต้องการยิงฝังประจุ โดยมีความหนาแน่นมากพอที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคของประจุทะลุผ่านเข้าไปยังเนื้อซิลิคอนได้ โดยอาจใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ชั้นซิลิคอนไนไตรต์ (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) หรือชั้นน้ำยาไวแสง หลังจากกระบวนการยิงฝังประจุ ต้องนำแผ่นซิลิคอนไปผ่านกระบวนการความร้อน เพื่อซ่อมโครงสร้างผลึกที่เสียหายให้กลับสู่สภาพเดิม และเพื่อกระตุ้นให้อนุภาคของประจุที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อซิลิคอนให้มีสภาพเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดพีหรือเอ็น



รูปที่ 2.18 หลักการกระบวนกรยิงฝังประจุ[24]

### 2.5.6 การเคลือบด้วยปฏิกิริยาเคมีของไอระเหย

เพื่อสร้างชั้นฟิล์มวัสดุบางๆเคลือบผิวของฐานรอง โดยอาศัยปรากฏการณ์การแยกสลายตัวของไอระเหยเนื่องมาจากความร้อน ซึ่งทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวของฐานรองกลายเป็นชั้นวัสดุเคลือบผิวของฐานรองได้ ข้อดีคือสามารถทำการเคลือบได้โดยความดันบรรยากาศไม่จำเป็นต้องเป็นระบบสุญญากาศ

การเคลือบสารแบบโพลีซิลิคอน ใช้หลักการสลายตัวด้วยความร้อนของไอระเหยของสารซิลเลน (Silane;  $\text{SiH}_4$ ) เพื่อสร้างชั้นโพลีซิลิคอนในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ โดยการเติมสารเจือ ซึ่งมีผลทำให้ความต้านทานจำเพาะมีค่าต่ำ

ในการเคลือบสารแบบซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อใช้ในการป้องกันผิวหน้าของวงจรรวม โดยการใช้อิระเหยของซิลเลนภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน ณ อุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส

ในการเคลือบสารซิลิคอนไนไตรท์มาใช้ในการผลิตวงจรรวมได้หลายกรณี เช่น ใช้เป็นชั้นป้องกันของวงจรรวม หรือใช้เป็นหน้ากากของการออกซิเดชันบางกรณีได้

### 2.5.7 การสร้างขั้วโลหะ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำต้องมีการต่อเป็นวงจรรวม และวงจรรวมที่สร้างขึ้นต้องมีขั้วไฟฟ้าเพื่อรับส่งสัญญาณจากภายนอก โดยทั่วไปมักใช้โลหะในการต่ออุปกรณ์เข้าด้วยกัน โดยโลหะสองชนิดที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากที่สุดคือ อะลูมิเนียมและทอง แต่ทองเป็นโลหะที่สามารถแพร่ตัวเข้าสู่สารกึ่งตัวนำแบบซิลิคอนได้ง่าย และอาจทำให้เกิดศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์และโฮล ทำให้อายุเฉลี่ยของพาหะนำประจุลดลง ดังนั้นในการเคลือบผิวของวงจรรวมด้วยทอง มักกันชั้นทองออกจากผิวซิลิคอนด้วยชั้นโลหะบางๆ เพื่อไม่ให้ทองแพร่ตัวเข้าสู่ซิลิคอนได้ การเคลือบด้วยอะลูมิเนียมเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากราคาถูก และอะลูมิเนียมยังสามารถเกาะติดผิวของซิลิคอนได้ดี

### 2.5.8 กระบวนการสปีดเตอริง

เป็นกระบวนการเพื่อใช้ในการเคลือบชั้นวัสดุบาง เช่น ชั้นโลหะ ในกระบวนการผลิตวงจรรวม ซึ่งสามารถเคลือบบริเวณผิวที่ไม่เรียบแบบชั้นได้ดี และเคลือบชั้นวัสดุที่เป็นสารประกอบหรือโลหะเจือได้ดี

### 2.5.9 กระบวนการขัดผิวแบบเคมีกล

ปัญหาของกระบวนการสร้างวงจรรวมแบบใหม่คือ ใช้แถบโลหะหรือแถบโพลีซิลิคอนในการนำไฟฟ้าหลายชั้น จึงมีความจำเป็นต้องมีกระบวนการที่จะทำให้ผิวของแผ่นซิลิคอนมีความเรียบเพียงพอต่อการเคลือบสารชั้นฉนวนและชั้นโลหะในแต่ละชั้น โดยกระบวนการในสมัยแรกจะใช้สารไดออกไซด์จากกระบวนการเคลือบด้วยปฏิกิริยาเคมีของไอระเหยที่ค่อนข้างหนาในการเคลือบผิวแผ่นซิลิคอน และแผ่นซิลิคอนถูกขัดด้วยสารละลายเข้มข้นประเภทต่าง โดยมีสารกัดแก้วและอนุภาคประเภทซิลิกาผสมอยู่ ในปัจจุบัน มีการดัดแปลงกระบวนการนี้เพื่อขัดผิวของแผ่นซิลิคอนที่ถูกเคลือบด้วยโลหะ ซึ่งกรณีนี้สารละลายเข้มข้นมีลักษณะเป็นกรด หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนของการขัดผิวต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเพื่อขจัดสารตกค้างที่อาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนผิวของแผ่นซิลิคอนนั้น

### 2.5.10 กระบวนการสกัด

หลังจากกระบวนการทางแสง เป็นการสกัดเพื่อให้เกิดลวดลายปรากฏอยู่บนแผ่นซิลิคอน ในระยะเริ่มแรกของการผลิตวงจรรวม ใช้กระบวนการทางสารละลายเคมี เพื่อทำการสกัดแผ่นซิลิคอนบริเวณที่ไม่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่ออก แต่เนื่องจากกระบวนการนี้ควบคุมได้ยาก และอาจเกิดความเสียหายกับลวดลายได้ง่าย ในปัจจุบันวิธีการนี้ใช้เฉพาะการใช้งานที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนัก สำหรับบริเวณที่ต้องการความละเอียดแน่นอนมาก หรือลายเส้นต่างๆมีขนาดเล็กมักใช้วิธีการสกัดแบบพลาสมาเป็นส่วนใหญ่

### 2.5.11 เทคโนโลยีการสร้างมอสทรานซิสเตอร์

ในปัจจุบัน ความก้าวหน้าของของเทคโนโลยีในการสร้างวงจรรวมทำให้สามารถผลิตมอสทรานซิสเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงขึ้น และมีขนาดเล็กลง โดยตารางที่ 2.2 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างกระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ซึ่งใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วเกต กับมอสทรานซิสเตอร์ที่ใช้โพลีซิลิคอนเป็นขั้วเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ความแตกต่างของกระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ชนิดขั้วเกตอะลูมิเนียม (Al-Gate) และมอสทรานซิสเตอร์ชนิดขั้วเกตโพลีซิลิคอน (Polygate)

Parameter	Al- Gate	PolyGate
Linewidths	> 5 $\mu\text{m}$	< 10 $\mu\text{m}$
Doping	Thermal Diffusion	Ion Implantation
Isolation	PN- junction	Oxide (LOCOS)
Gate Material	Aluminum	Doped PolySilicon
Gate Process	Non-Self Aligned	Self- Aligned
Gate Etching	Wet /isotropic	Plasma / anisotropic



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

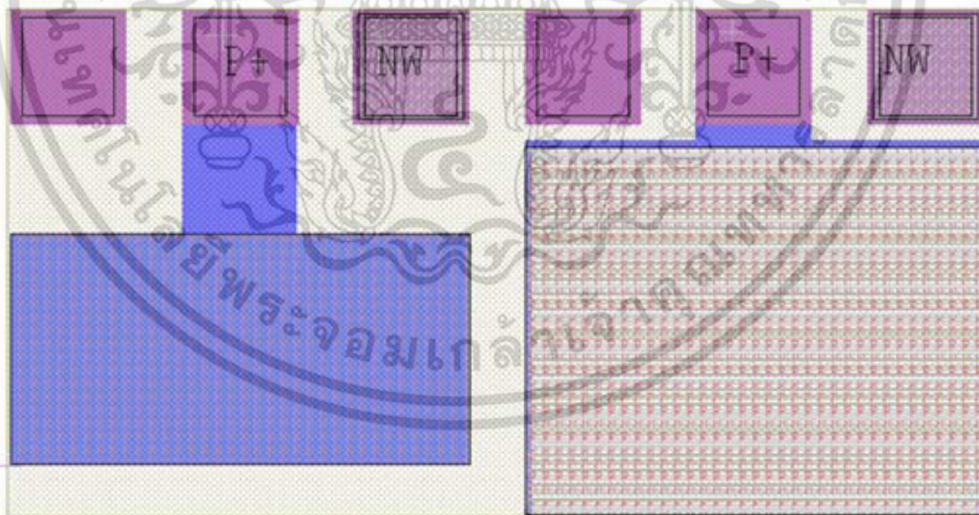
### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงการวิจัยเชิงทดลองเพื่อศึกษา ปรับปรุง และพัฒนาเทคนิค เพื่ออธิบายความบกพร่องที่เกิดขึ้นในผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ

#### 3.1 การออกแบบการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ใช้อุปกรณ์ไดโอดในการศึกษา โดยโครงสร้างพื้นฐานของไดโอดเมื่อแบ่งตามชนิดของรูปทรงเรขาคณิต มี 2 โครงสร้างได้แก่

- ไดโอดแบบพื้นที่กว้าง (Large Area Diode) มีรูปทรงเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมโดยมีพื้นที่ขนาดกว้าง 200 ไมโครเมตร ยาว 400 ไมโครเมตร และมีความยาวรอบรูปเป็น 1,200 ไมโครเมตร ดังแสดงดังรูปที่ 3.1 ก
- ไดโอดแบบคดเคี้ยว (Meander Diode) มีรูปทรงเป็นพื้นที่คดเคี้ยว มีพื้นที่ขนาดกว้าง 2 ไมโครเมตร ยาว 400 ไมโครเมตร จำนวน 100 แถบ ความยาวรอบรูป 80,400 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ข



ก)

ข)

รูปที่ 3.1 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดชนิด P<sup>+</sup>-N<sub>well</sub> ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส

สำหรับอุปกรณ์ไดโอดที่ใช้ในการศึกษา ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการสร้างที่เป็นมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอสขนาด 0.8 ไมโครเมตร ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.2

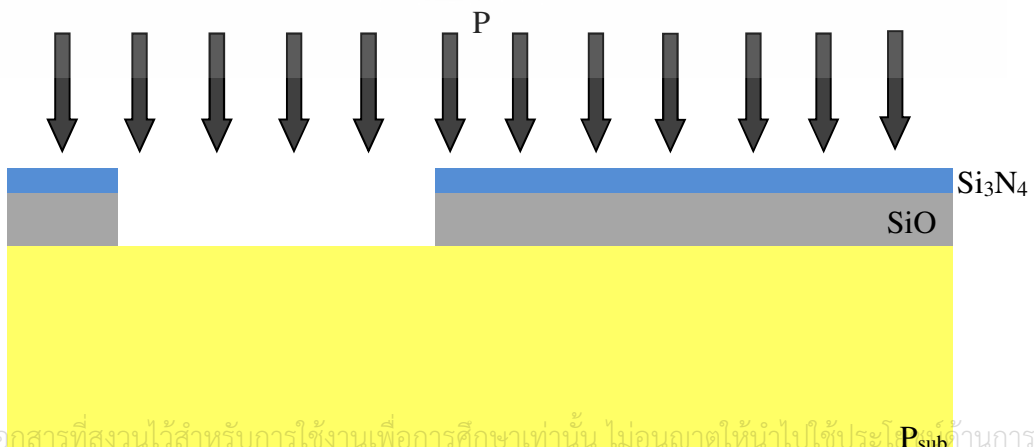
- 1) สร้างแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี หนาบาง (100) พิกัดความต้านทาน  $5 \Omega\text{-cm}$  สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 25 นาโนเมตร



- 2) สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรต์ หนา 150 นาโนเมตรบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

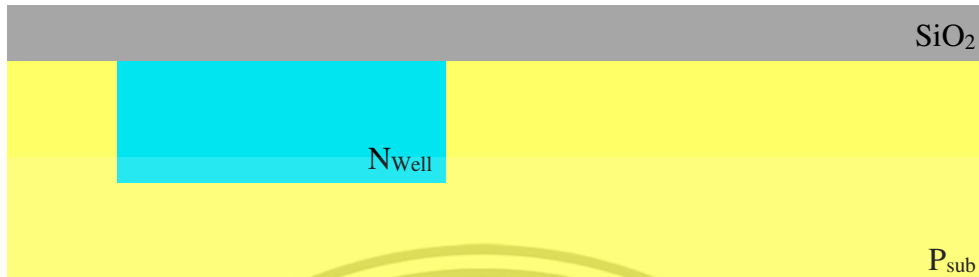


- 3) เปิดช่องซิลิคอนไนไตรต์ เพื่อสร้างบริเวณบ่อแยกชนิดเอ็น จากนั้นทำการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส ด้วยพลังงาน 140 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยปริมาณของสารเจือ  $7 \times 10^{12} \text{ ion/cm}^2$

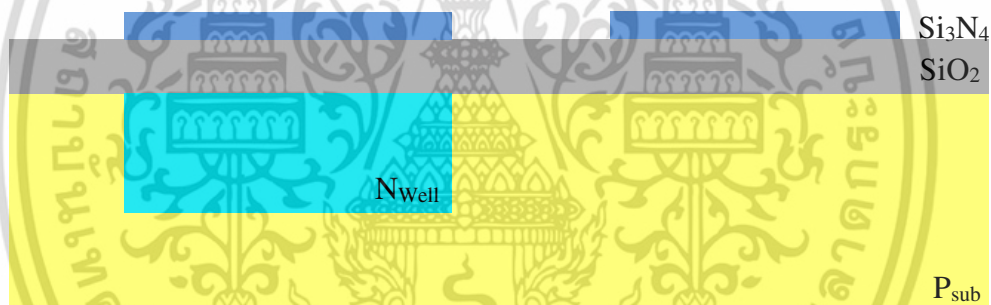


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

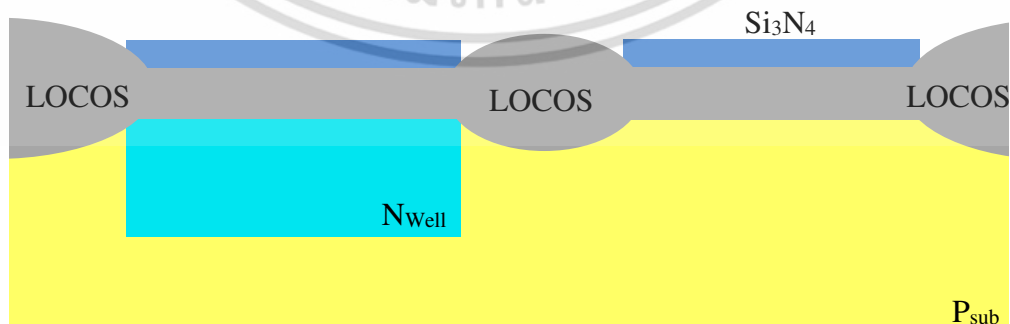
- 4) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ พร้อมชั้นลิทสารเจือฟอสฟอรัส



- 5) สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรต์หนา 150 นาโนเมตร เพื่อเป็นพื้นที่สร้างอุปกรณ์

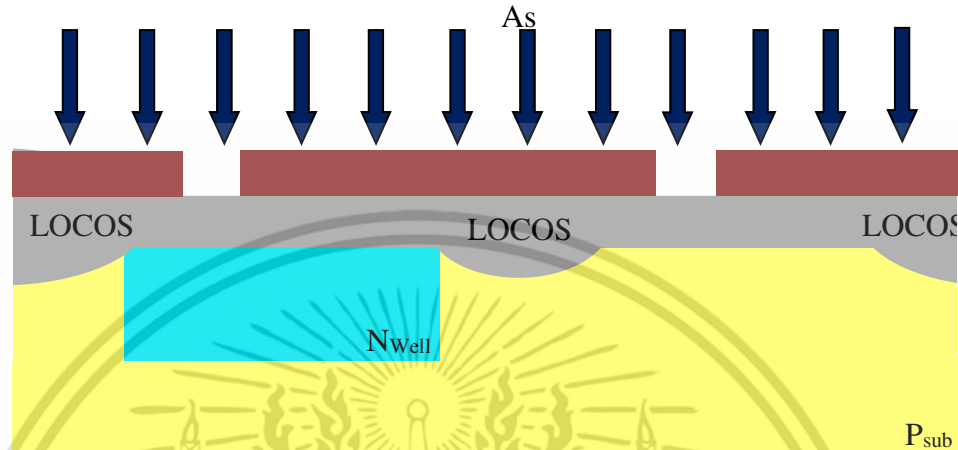


- 6) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 650 นาโนเมตร

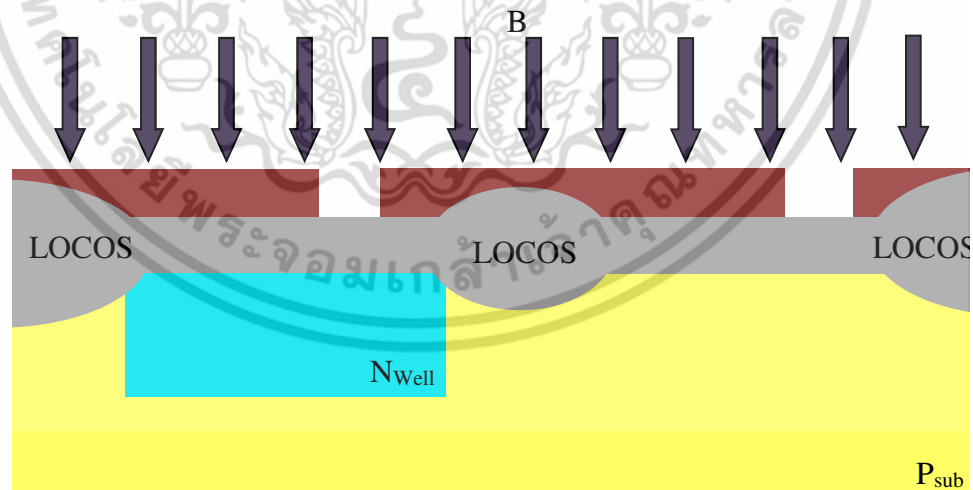


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) สกัดชั้นซิลิคอนไนไตรต์ออก ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างขั้ว n+ หลังจากนั้นทำการยิงฝังประจุอาซีนิก (As) ด้วยพลังงาน 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ปริมาณสารเจือ  $50 \times 10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup>

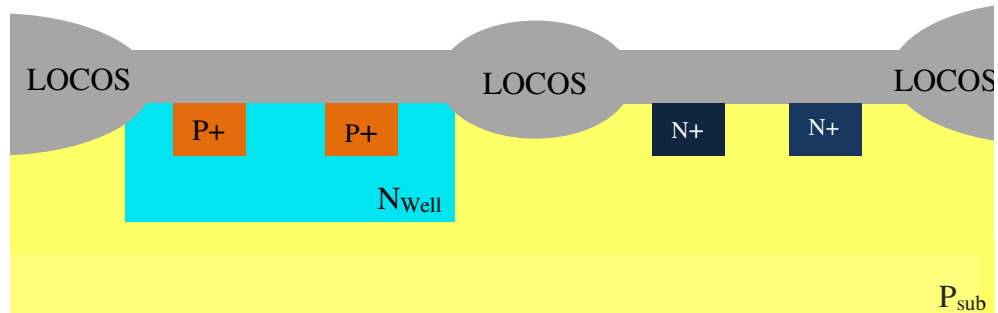


- 8) ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างขั้ว p+ หลังจากนั้นทำการยิงฝังประจุโบรอน (B) ด้วยพลังงาน 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ปริมาณสารเจือ  $3 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>

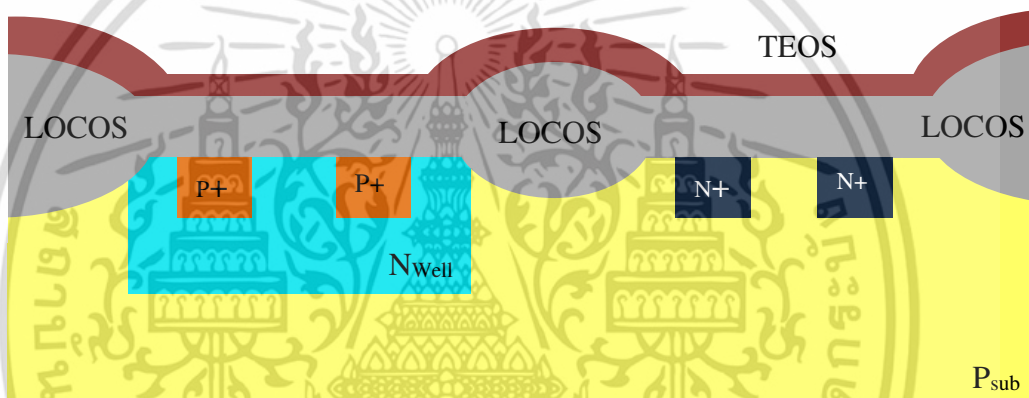


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

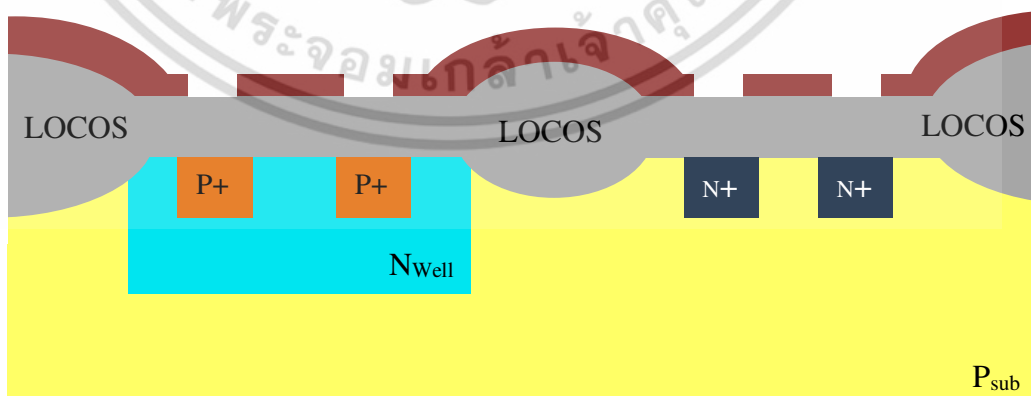
9) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ พร้อมกับชั้นสารเจืออาซิติกและสารเจือโบรอน



10) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด TEOS เพื่อเป็นฉนวนป้องกันอุปกรณ์

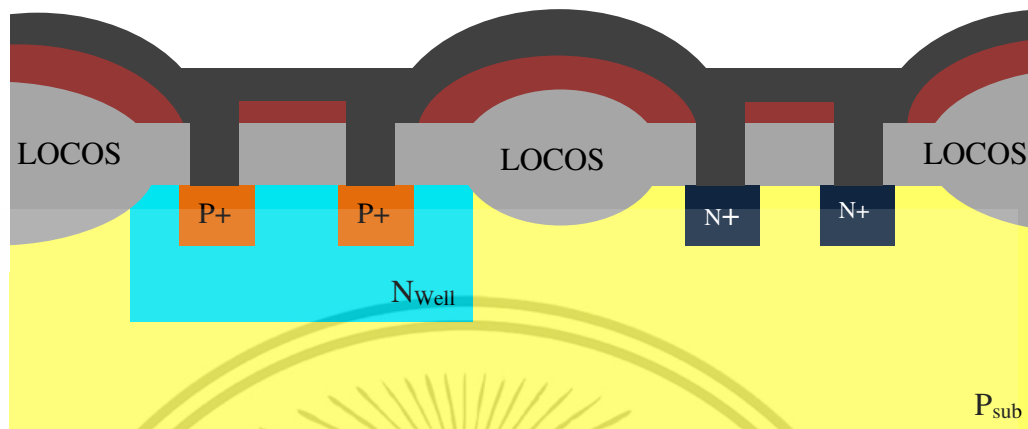


11) ทำการสร้างสวดลายน้ำยาไวแสง เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างช่องสำหรับขั้วโลหะ

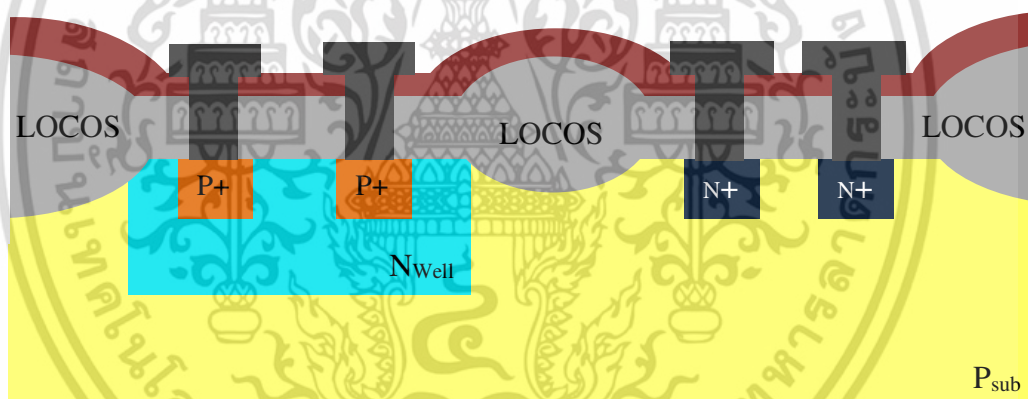


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12) ทำการสร้างชั้นโลหะ Ti/TiN และ AlCuSi ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง



13) ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างขั้วโลหะและสกัดชั้นโลหะ Ti/TiN และ AlCuSi เพื่อให้ได้ลวดลายโลหะ

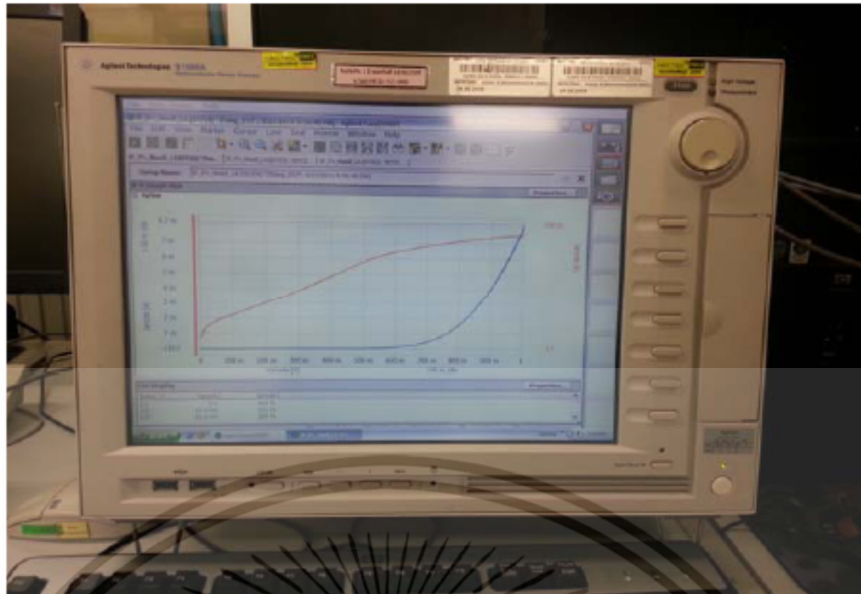


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส

### 3.3 เครื่องมือและกระบวนการวัด

หลังจากที่เสร็จสิ้นจากกระบวนการสร้าง ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด ได้แก่ คุณสมบัติกระแส-แรงดัน และคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ซึ่งวัดเฉพาะช่วงแรงดันไบอัสตรง โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติอุปกรณ์ของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device Analyzer) ของบริษัท Agilent Technologies รุ่น B1500A และตู้มีดพร้อมแทนวัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ (Black Box & Probe Station) ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.4 ตู้มิดพร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์

ในการวัดค่าคุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆกันบนแผ่นฐานรองซิลิคอน ทำโดยการให้ค่าแรงดันไบอัสตรงเป็นช่วง 0 ถึง 0.5 โวลต์ ช่วงละ 0.01 โวลต์ โดยที่จ่ายแรงดันให้กับบ่อแยกเอ็น และการวัดกระแสที่ขั้วพี ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 27 องศาเซลเซียส หรือ 300 เคลวิน (K) ในตู้มิดพร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน กระทำกับไดโอดแบบเดียวกันด้วยความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความกว้างของชั้นปลอดพาหะของพื้นที่ในบ่อแยกชนิดเอ็น สามารถคำนวณหาค่าจากคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน

### 3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสด้วยองค์ประกอบของกระแส

ในการหาค่าความหนาแน่นกระแสสามารถหาได้ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรวมที่ได้จากอุปกรณ์ไดโอด ซึ่งข้อมูลทางรูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ไดโอด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางเรขาคณิตของไดโอดแบบพื้นที่กว้างและไดโอดแบบคดเคี้ยว

ประเภทของไดโอด	พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)	เส้นรอบรูป (เซนติเมตร)
แบบพื้นที่กว้าง	$8 \times 10^{-4}$	0.12
แบบคดเคี้ยว	$8 \times 10^{-4}$	8.04

องค์ประกอบรวมของกระแสรวมสำหรับไดโอดพื้นที่กว้าง  $I_{(LA)}$  และไดโอดรูปคดเคี้ยว  $I_{(ME)}$  แสดงได้ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

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

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

โดยที่  $I_A$  คือกระแสทางด้านพื้นที่ และ  $I_P$  คือกระแสทางด้านเส้นรอบรูป จากสมการทั้ง 2 สามารถเปลี่ยนรูปใหม่ในรูปของความหนาแน่นกระแสดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

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

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

โดยที่  $J_A$  และ  $J_P$  คือค่าความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปของไดโอด ตามลำดับ  $A_{LA}$  และ  $A_{ME}$  คือขนาดของพื้นที่ของไดโอดทั้งสองชนิด  $P_{LA}$  และ  $P_{ME}$  คือความ

ยาวเส้นรอบรูปของไดโอดทั้งสองชนิด จากข้อมูลในตารางที่ 3.1 เราสามารถแทนค่าพื้นที่และความยาวเส้นรอบรูปของไดโอดในสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ ทำให้ได้

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

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

ค่าความหนาแน่นกระแสต้านเส้นรอบรูปของไดโอด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.5 และ สมการที่ 3.6

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

และค่าความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่ของไดโอด 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 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสในเนื้อสารต้านพื้นที่

จากทฤษฎีของ Shockley-Read-Hall สำหรับการรวมตัวใหม่ระดับเดียว พบว่าอัตราการรวมตัวใหม่ แสดงดังสมการ

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_T (pn - n_i^2)}{\sigma_n \left[ n + n_i e^{\left( \frac{E_T - E_i}{kT} \right)} \right] + \sigma_p \left[ p + n_i e^{\left( -\frac{E_T - E_i}{kT} \right)} \right]} \quad (3.9)$$

และ ผลคูณของพี-เอ็น เป็น

$$pn = n_i^2 e^{\left( \frac{q(\phi_p - \phi_n)}{kT} \right)} \quad (3.10)$$

$$n = n_i e^{\left( \frac{E_F - E_i}{kT} \right)} \equiv n_i e^{\left( \frac{\psi - \phi}{kT} \right)} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = n_i e^{\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)} \equiv n_i e^{\left(\frac{\phi - \psi}{kT}\right)} \quad (3.12)$$

โดยที่  $\phi_p$  และ  $\phi_n$  เป็นระดับ quasi-fermi สำหรับอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

ในกรณีไบอัสตรง  $\phi_p - \phi_n$ ,  $pn > n_i^2$  และความแตกต่างศักย์ไฟฟ้าสถิตตกคร่อมรอยต่อ  $V$   
 $= \phi_p - \phi_n$

แทนค่าสมการที่ 3.10 ในสมการที่ 3.9 จะได้

$$U = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_T n_i^2 \left( e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right)}{\sigma_n \left[ n + n_i e^{\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right)} \right] + \sigma_p \left[ p + n_i e^{\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right)} \right]} \quad (3.13)$$

เมื่อกำหนดให้  $\sigma_p = \sigma_n = \sigma$  และแทนค่า  $n$  และ  $p$  จากสมการที่ 3.11 และสมการที่ 3.12  
 ในสมการที่ 3.13 ทำให้อัตราการรวมตัวใหม่มีค่าเป็น

$$U = \frac{\sigma v_{th} N_T n_i^2 \left( e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right)}{\left[ e^{\left(\frac{q(\psi - \phi_n)}{kT}\right)} + e^{\left(\frac{q(\phi_p - \psi)}{kT}\right)} \right] + \left[ e^{\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right)} + e^{\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right)} \right]} \quad (3.14)$$

โดยค่าสูงสุดของอัตราการรวมตัวใหม่ในบริเวณปลอดพาหะ เมื่อ  $2\psi = \phi_p + \phi_n$  และ  
 $2 \cosh(x) = e^x + e^{-x}$

และในกรณีของการฉีดพาหะในระดับต่ำ  $\left( \tau_r \approx \tau_{SRH}(l) \approx \tau_n = \frac{1}{\sigma v_{th} N_T} \right)$  ทำให้สมการ  
 ที่ 3.14 เปลี่ยนเป็น

$$U = \frac{1}{2\tau_r} \frac{n_i \left( e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right)}{\left[ e^{\left(\frac{qV}{2kT}\right)} + \cosh\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \right]} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาขั้นตอนการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะ กระแสจากแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับ ไม่เพียงประกอบด้วยกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ที่ศูนย์กลางการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะ ซึ่งเป็นกระแสภายในความกว้างชั้นปลอดพาหะของเนื้อสาร โดยในกรณีกระแสจากแรงดันตรง เมื่อพิจารณากระแสการรวมตัวพบว่า

$$J_{rbA} = \int_0^{W_A} qU dx \quad (3.16)$$

ดังนั้นค่าสูงสุดของความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารด้านพื้นที่ ( $J_{rbA}$ ) เป็น

$$J_{rbA} = \frac{qn_i W_A}{2\tau_r} \frac{\left( e^{\left( \frac{qV}{kT} \right)} - 1 \right)}{\left[ e^{\left( \frac{qV}{2kT} \right)} + \cosh\left( \frac{E_T - E_i}{kT} \right) \right]} \quad (3.17)$$

จากค่าอัตราส่วนของ  $\tau_g/\tau_r$  สำหรับการฉีดพาหะระดับต่ำ สามารถแสดงดังสมการที่ 3.18

$$\frac{\tau_g}{\tau_r} = 2 \sqrt{\frac{\tau_{p0}}{\tau_{n0}}} \cosh\left[ \left( \frac{E_T - E_i}{kT} \right) + 0.5 \ln\left( \frac{\tau_{p0}}{\tau_{n0}} \right) \right] \quad (3.18)$$

เมื่อค่า thermal velocity ของพาหะทั้งสองมีค่าเท่ากันทำให้  $\tau_{p0}/\tau_{n0} = \sigma_n/\sigma_p$  โดยทั่วไปค่าของ  $\sigma_n/\sigma_p$  มีค่าระหว่าง 0.01 - 100 ซึ่งทำให้อัตราส่วนของ  $\tau_{p0}/\tau_{n0}$  ในสมการที่ 3.18 มีผลน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ 3.18 สามารถเขียนเป็นรูปอย่างง่ายดังสมการที่ 3.19

$$\frac{\tau_g}{\tau_r} \approx \cosh\left( \frac{E_T - E_i}{kT} \right) \quad (3.19)$$

โดยการแทนค่าสมการที่ 3.19 ลงในสมการที่ 3.17 ทำให้ได้

$$J_{rbA} = \frac{qn_i W_A}{2\tau_r e^{\left( \frac{qV}{2kT} \right)} + \tau_g} \left( e^{\left( \frac{qV}{kT} \right)} - 1 \right) \quad (3.20)$$

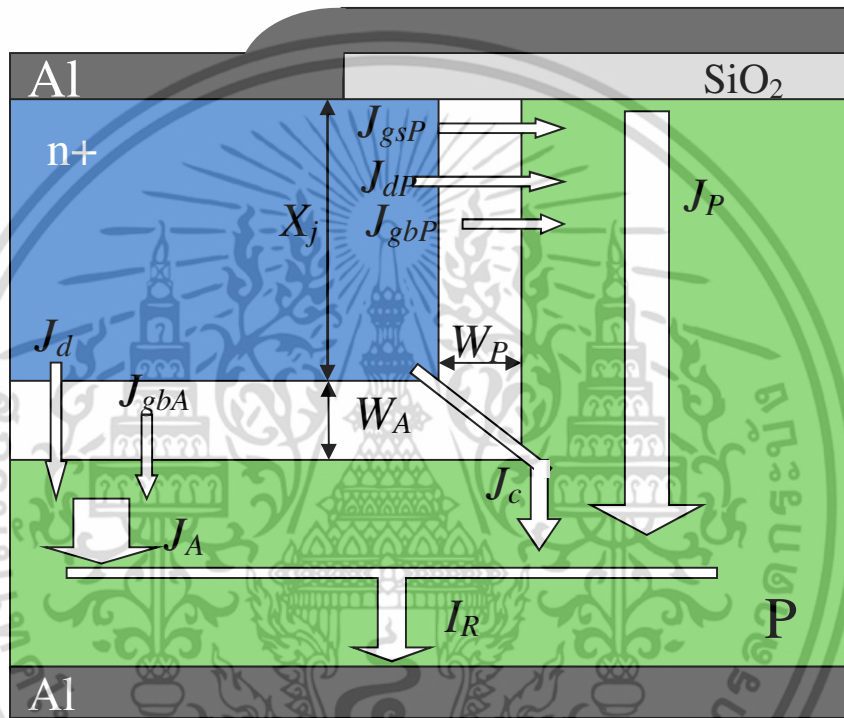
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสในไดโอด

ในการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลที่ไหลผ่านรอยต่อของไดโอด สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลในไดโอด

องค์ประกอบรวมของกระแสรั่วไหล ( $I_R$ ) เกิดจากลักษณะการกระจายตัวทางกายภาพของกระแสในแต่ละส่วนที่ต่างกัน เช่น กระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ ( $I_A$ ) กระแสรั่วไหลด้านเส้นรอบรูป ( $I_P$ ) กระแสรั่วไหลที่มุม ( $I_C$ ) และกระแสรั่วไหลแฝง ( $I_{par}$ ) ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการที่ 4.1

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

แต่จากการวิเคราะห์พบว่า  $I_A + I_P \gg I_C + I_{par}$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 4.1 ใหม่เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

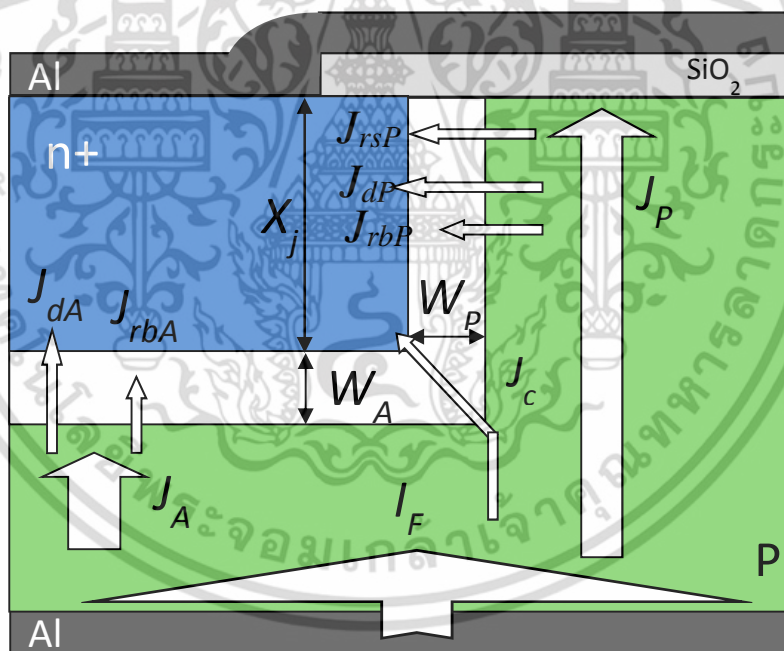
หรือ

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

โดยที่  $J_A$  เป็นค่าความหนาแน่นของกระแสด้านพื้นที่โดยเป็นส่วนกับพื้นที่  $J_P$  เป็นค่าความหนาแน่นของกระแสด้านเส้นรอบรูปที่เป็นสัดส่วนกับเส้นรอบรูป ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบย่อยเป็น ความหนาแน่นกระแสการก่อเกิดด้านพื้นที่ ( $J_{gA}$ ) ความหนาแน่นกระแสการก่อเกิดด้านเส้นรอบรูป ( $J_{gP}$ ) ความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่ ( $J_{dA}$ ) ความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านเส้นรอบวง ( $J_{dP}$ ) ความหนาแน่นกระแสการก่อเกิดที่พื้นผิวด้านเส้นรอบรูป ( $J_{rA}$ ) ดังสมการ

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

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



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลในไดโอดในเงื่อนไขไบอัสตรง

ในการวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อของไดโอดภายใต้เงื่อนไขการไบอัสตรง ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบกระแสการรวมตัวใหม่ ทำให้  $J_{gA}$   $J_{gP}$  เปลี่ยนรูปใหม่เป็น  $J_{rA}$   $J_{rP}$  ตามลำดับ ซึ่ง  $J_{rA}$  เป็นความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ด้านพื้นที่ และ  $J_{rP}$  เป็นความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ด้านเส้นรอบวง ดังนั้น สมการที่ 4.4 และ 4.5 สามารถเขียนใหม่ภายใต้เงื่อนไขของการ

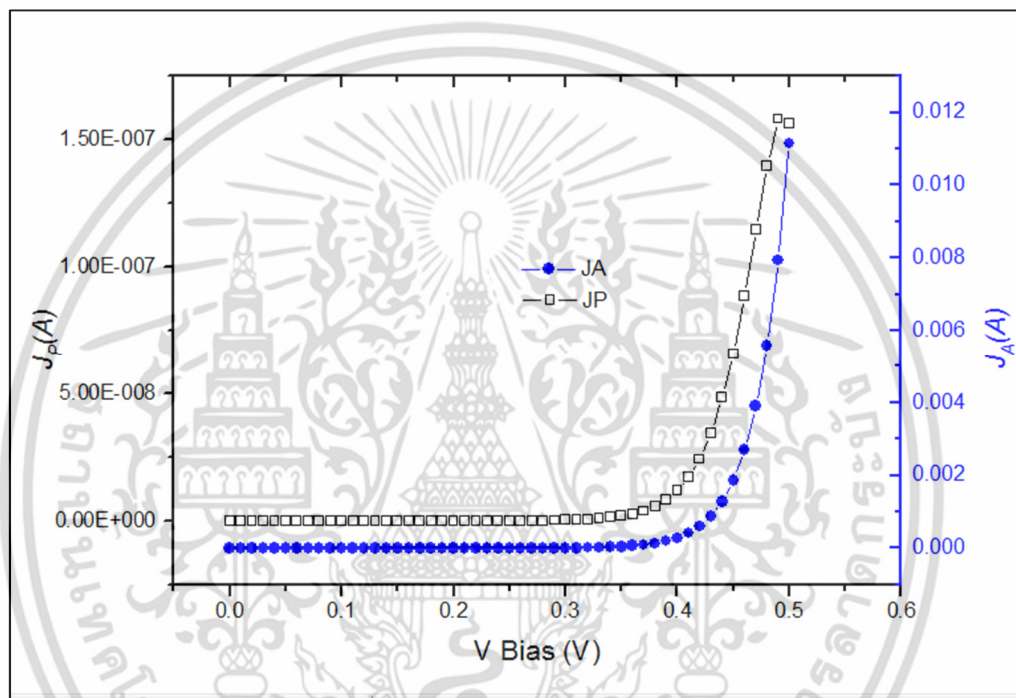
ไบอัสตรงได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_A = J_{rA} + J_{dA} \quad (4.6)$$

$$J_P = J_{rbP} + J_{dP} + J_{rsP} \quad (4.7)$$

และจากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของกระแสด้านพื้นที่มีค่ามากกว่าความหนาแน่นของกระแสด้านเส้นรอบวงอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.3 จึงถือว่าค่าของความหนาแน่นของกระแสทั้งหมดขึ้นกับความหนาแน่นของกระแสด้านพื้นที่เป็นองค์ประกอบหลัก



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของความหนาแน่นของกระแส

#### 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของค่าความจุไฟฟ้าในไดโอด

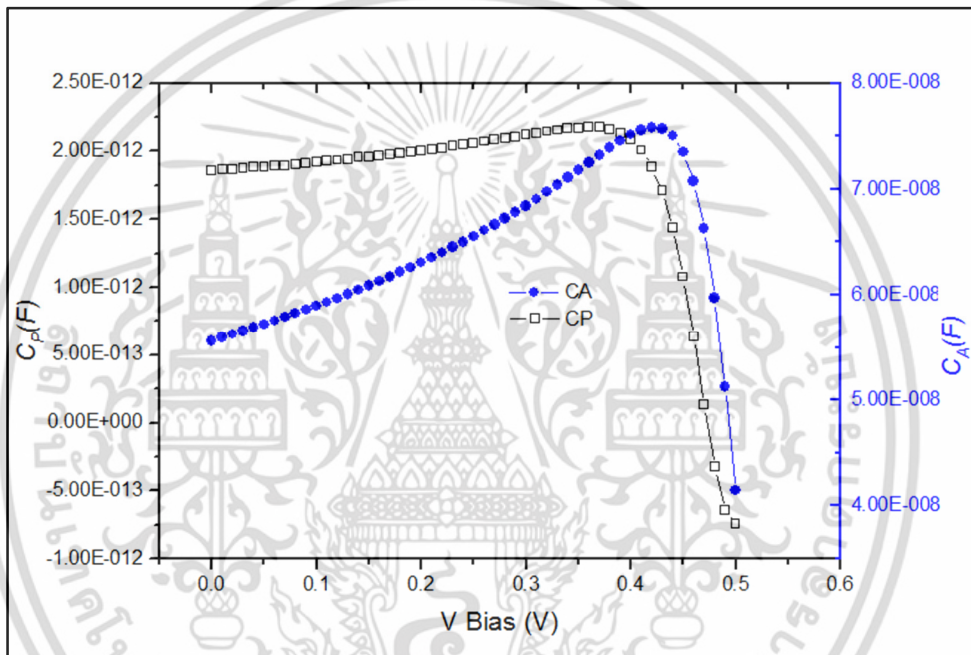
ในการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้า คิดในลักษณะเดียวกันกับองค์ประกอบของกระแส โดยการสมมติว่าค่าผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ( $C_j$ ) เป็นการรวมองค์ประกอบของค่าความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดย

$$C_j = AC_A + PC_P \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่า  $C_A$  และ  $C_P$  เป็นค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ที่เป็นสัดส่วนกับพื้นที่ และค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบรูป ซึ่งเป็นสัดส่วนกับเส้นรอบรูปของไดโอด โดยทั่วไป ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อถูกวัดโดยการตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็กที่คร่อมบนแรงดันไฟตรง

และจากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ที่จะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบวงอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับกรณีของความหนาแน่นกระแส ดังรูปที่ 4.4 จึงถือว่าค่าของความหนาแน่นของความจุไฟฟ้าทั้งหมดขึ้นกับความหนาแน่นของความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่เป็นองค์ประกอบหลัก



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า

### 4.3 การวิเคราะห์ความกว้างของชั้นปลอดพาหะ

จากการพิจารณาสมการ ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ ( $W_A$ ) สามารถหาได้จากความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่

$$W_A = \frac{K_{si}\epsilon_0}{C_A} \quad (4.9)$$

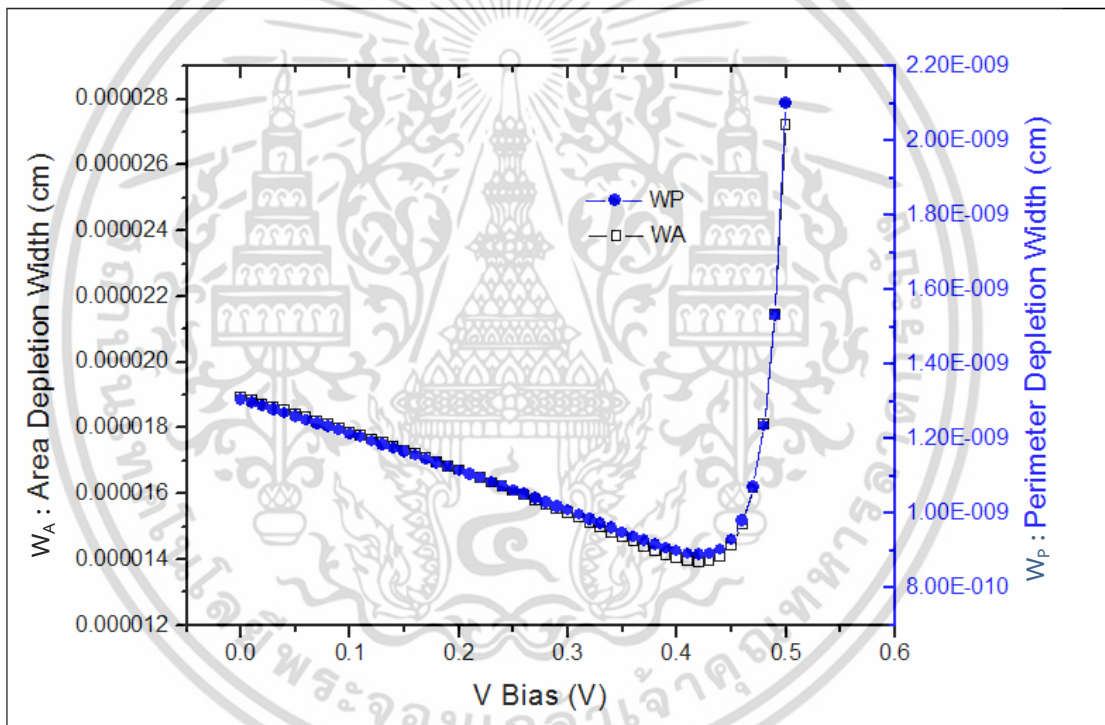
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $K_{si}$  เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของซิลิคอน (=11.8) และ  $\epsilon_0$  เป็นค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-14}$  F/cm) และในกรณีความหนาแน่นค่าความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบรูป ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป สามารถหาได้จากสมการ 4.10

$$W_p = \frac{K_{si} \epsilon_0 (x_j + W_A)}{C_p} \quad (4.10)$$

โดยที่  $X_j$  คือความลึกของรอยต่อพี-เอ็น (cm)

จากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ พบว่า มีค่ามากกว่าค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป อย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ

#### 4.4 การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตในไดโอดด้วยเทคนิคอนุพันธ์

จากหัวข้อที่ 3.4.1 ในกรณีที่ไดโอดแบบพื้นที่กว้างและไดโอดแบบคดเคี้ยว มีขนาดพื้นที่เท่ากัน ค่า  $J_A$  และ  $J_P$  สามารถคำนวณได้จาก

$$J_A = \frac{I_{FLA} - P_{LA} J_P}{A_{LA}} \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $I_{FLA}$  และ  $I_{FME}$  เป็นค่ากระแสช่วงแรงดันไบอัสตรงของไดโอดแบบพื้นที่กว้าง และแบบแคบ  
 เคี้ยวตามลำดับ

$P_{LA}$  และ  $P_{ME}$  เป็นความยาวเส้นรอบรูปของไดโอดแบบพื้นที่กว้าง และแบบแคบเคี้ยว  
 ตามลำดับ

$A_{LA}$  เป็นขนาดพื้นที่ของไดโอดแบบพื้นที่กว้าง

ค่า  $J_A$  สามารถแยกองค์ประกอบเป็นความหนาแน่นกระแสการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารด้าน  
 พื้นที่ ( $J_{rBA}$ ) และ ความหนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่ ( $J_{dA}$ ) ดังความสัมพันธ์ในสมการ 4.12

$$J_A = J_{dA} + J_{rBA} \quad (4.12)$$

จากสมการไดโอดในอุดมคติหรือสมการของช็อคเลย์

$$I = I_0 \left[ e^{(qV/kT)} - 1 \right] \quad (4.13)$$

โดยที่  $I_0$  เป็นค่ากระแสอิ่มตัว  
 $Q$  เป็นประจุอิเล็กตรอน  
 $k$  เป็นค่าคงที่ของโบลต์มานน์  
 $T$  เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์

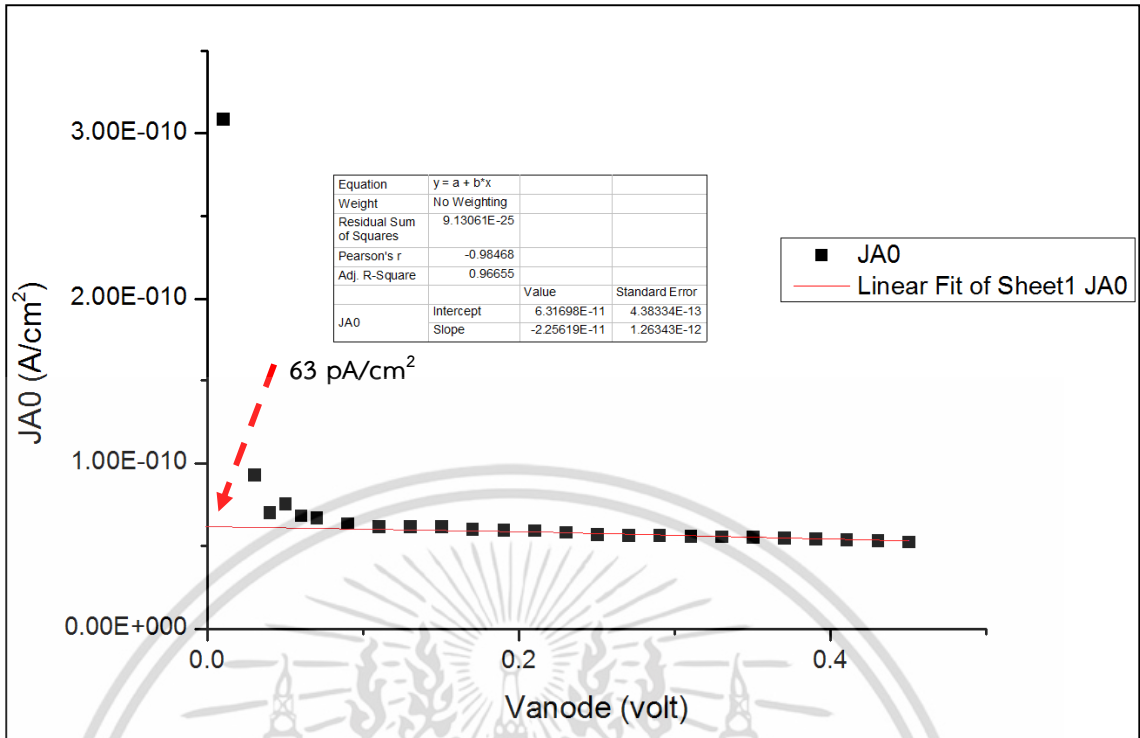
จากสมการข้างต้น แทนค่าด้วยค่าความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ ทำให้ได้ค่าความหนาแน่น  
 กระแสอิ่มตัวด้านพื้นที่ ดังแสดงในสมการ 4.14

$$J_{A0} = \frac{J_A}{\left[ e^{(qV/kT)} - 1 \right]} \quad (4.14)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.14 สามารถหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแส  
 อิ่มตัวด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรงดังรูปที่ 4.6 และพบว่าที่แรงดันที่ค่าต่างๆ ค่า  $J_{A0}$  ถูกควบคุม  
 ด้วยกระแสการรวมตัวใหม่ และเมื่อแรงดันไบอัสมีค่า 0.2 โวลต์ถึง 0.4 โวลต์ ค่า  $J_{A0}$  ขึ้นกับความ  
 หนาแน่นกระแสการแพร่ด้านพื้นที่ ดังนั้นจึงทำการอนุมานค่าของ  $J_{A0}$  จากค่าที่แรงดันไบอัสเป็นศูนย์  
 จากการประมาณค่าของ  $J_{dA}$  เป็นเชิงเส้นในช่วง 0.2 โวลต์ถึง 0.4 โวลต์ที่  $V = 0$  จะพบว่า  $J_{dA}$  มีค่า

เท่ากับ 63 pA/cm<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสในตัวด้านพื้นที่และแรงดันไบอัสตรง

โดยทั่วไปค่าของ  $J_A$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$J_A = J_{dA} + \left[ \frac{qn_i W_A}{2\tau_r e^{\left(\frac{qV}{2kT}\right)} + \tau_g} \right] \cdot \left[ e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right] \quad (4.15)$$

ซึ่งค่า  $n_i$  เป็นค่าความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ( $\text{cm}^{-3}$ ) และค่า  $W_A$  เป็นความกว้างของชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ (cm)

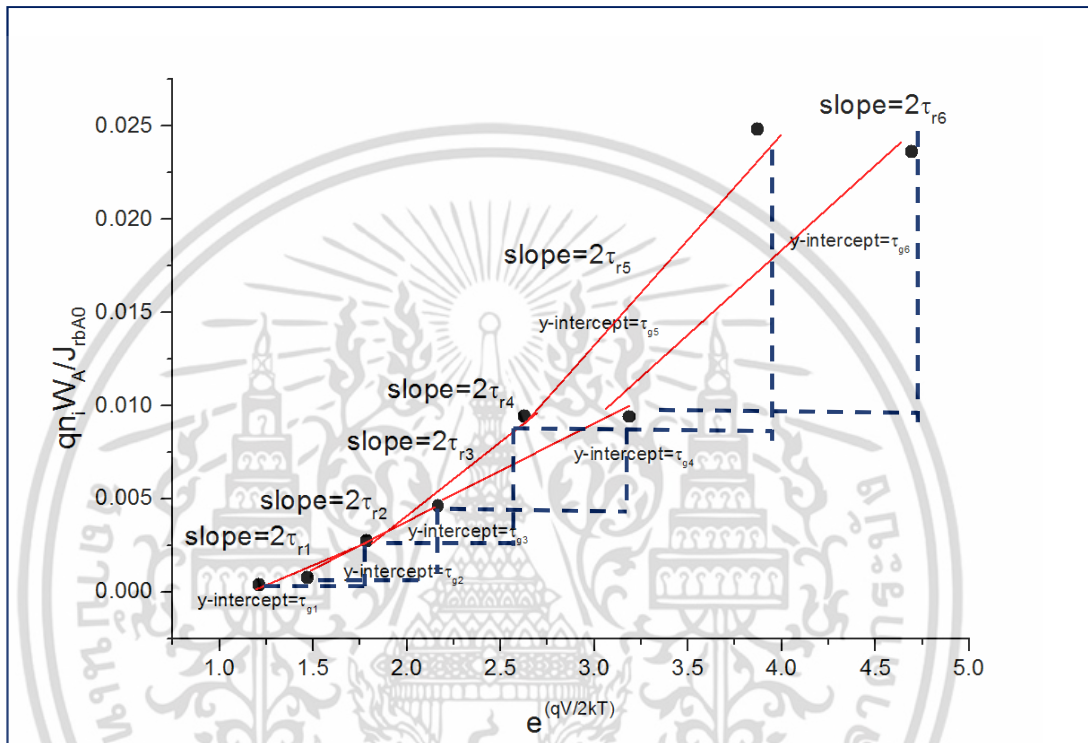
พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ขึ้นอยู่กับค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และการแสการแพร่ด้านพื้นที่ ดังนั้นการคำนวณหาค่า  $\tau_r$  และ  $\tau_g$  จะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

จากสมการที่ 4.12 พบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสในตัวของการรวมตัวใหม่ในเนื้อสารด้านพื้นที่  $J_{rbA0}$  เท่ากับ  $J_{A0} - J_{dA}$  ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.15 และผลลัพธ์ภายหลังการจัดเรียงรูปใหม่แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{qn_i W_A}{J_{rbA0}} = 2\tau_r e^{\left(\frac{qV}{2kT}\right)} + \tau_g \quad (4.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่า  $qn_i W_A / J_{rbA0}$  กับค่า  $e^{(qV/2kT)}$  ได้ดังรูปที่ 4.7 โดยค่า  $\tau_r$  สามารถหาได้จากการคำนวณการถดถอยเชิงเส้นของ 3 จุดที่ต่อเนื่องกัน เพื่อประมาณค่าความชัน และค่า  $\tau_g$  สามารถคำนวณได้จากการประมาณจุดตัดบนแกน Y ที่ค่า  $qn_i W_A / J_{rbA0} = 0$  ตามลำดับ โดยจากรูปสามารถประมาณค่าของความชัน และจุดตัดแกน Y ได้ทั้งหมด 6 ค่าซึ่งจะนำค่าเหล่านี้ไปประมวลผล โดยเป็นค่าที่เก็บได้จากชิปตัวอย่างบนแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่า  $qn_i W_A / J_{rbA0}$  และ  $e^{(qV/2kT)}$

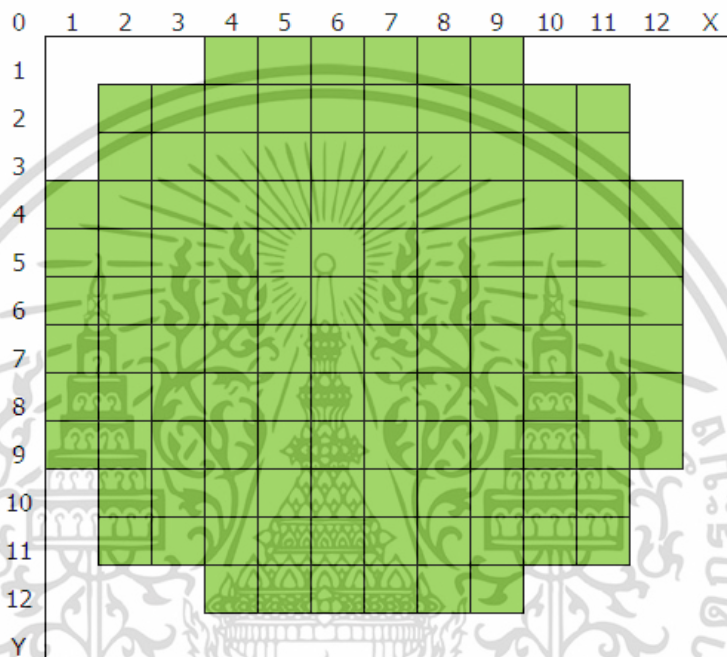
ตารางที่ 4.1 ค่าของ  $\tau_r$  และค่า  $\tau_g$  ของจุดตัวอย่างและค่าเฉลี่ย

ข้อมูลลำดับที่	$\tau_r$ (s)	$\tau_g$ (s)
1	0.004232	0.005012
2	0.005513	0.007258
3	0.007994	0.011947
4	0.004505	0.004183
5	0.012777	0.026722
6	0.00904	0.016155
ค่าเฉลี่ย	0.003672	0.011879

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ได้ค่า  $\tau_x$  และค่า  $\tau_y$  ของแต่ละจุดบนกราฟแล้ว นำมาคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ย เพื่อหาค่ากลางของข้อมูล ตารางที่ 4.1 แสดงถึงค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดของแต่ละจุด และค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการคำนวณ

ซึ่งจากข้อมูลที่ได้นั้นเป็นข้อมูลของการศึกษาเพียงหนึ่งชิปบนแผ่นซิลิคอนเท่านั้น จากการศึกษาและเก็บข้อมูลชิปที่อยู่บนแผ่นซิลิคอนทั้งหมดจำนวน 124 ชิป สามารถเขียนแผนภาพที่แสดงตำแหน่งพิกัดของแต่ละชิปบนแผ่นซิลิคอนได้ดังรูปที่ 4.8

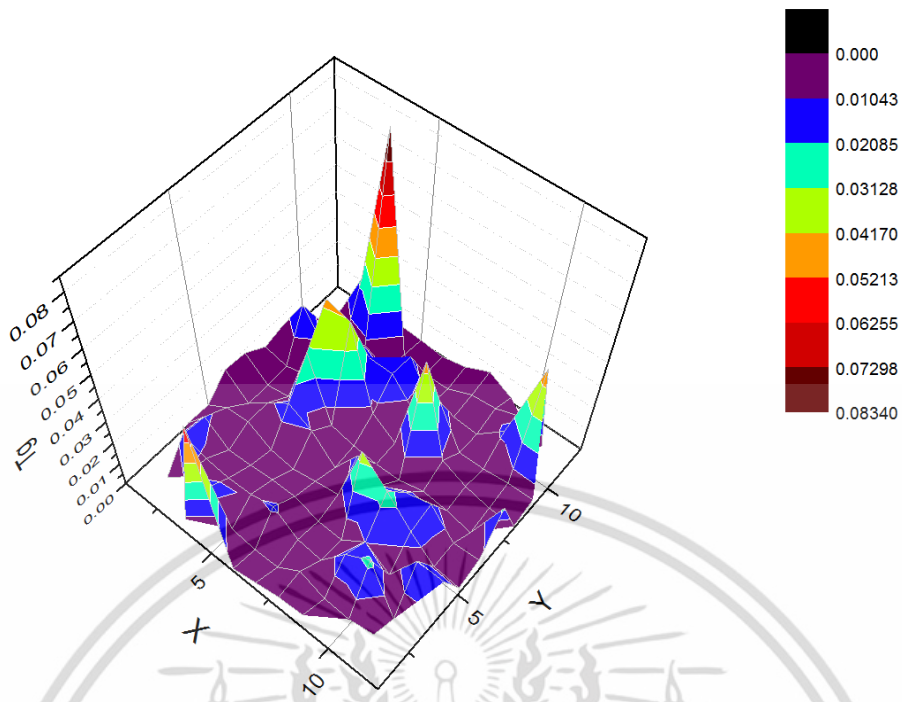


รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงตำแหน่งพิกัดของชิปบนแผ่นซิลิคอน

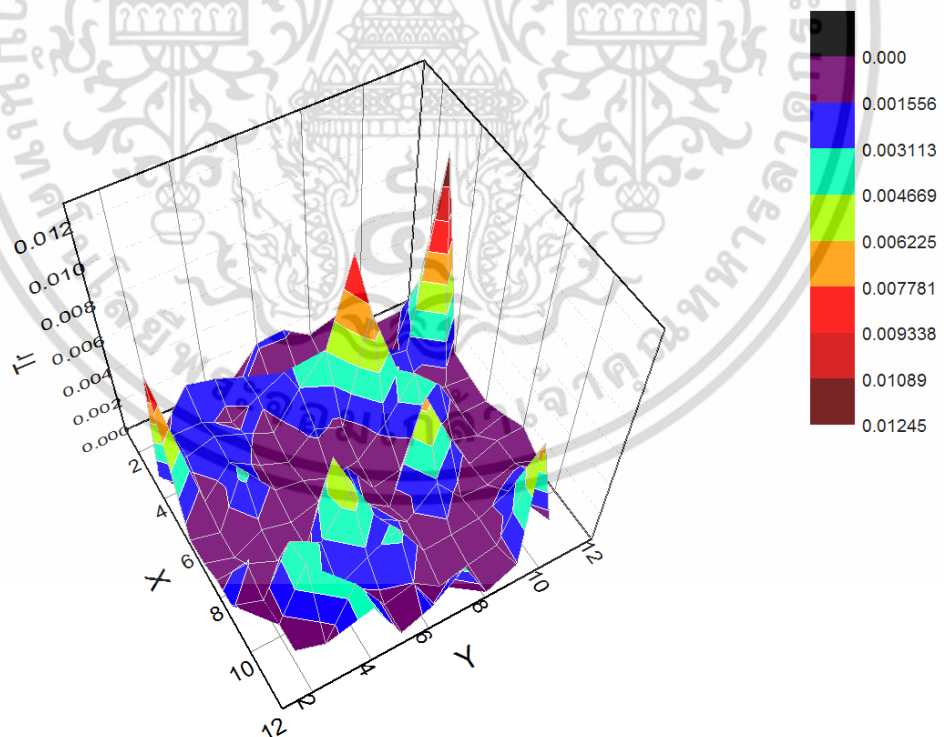
หลังจากที่ได้คำนวณหาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่แล้ว นำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งกับแผนภาพในรูปที่ 4.8 จากนั้นแสดงผลเป็นรูปภาพ 3 มิติ ที่แสดงถึงระดับค่าช่วงชีวิตทั้งสอง ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 และแสดงเป็นรูป 2 มิติดังรูปที่ 4.11 และ 4.12

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าค่าการกระจายของช่วงชีวิตการก่อเกิดและการรวมตัวใหม่นั้นไม่เป็นระดับเดียวกันตลอดทั้งแผ่นซิลิคอน (Non-Uniformity) โดยที่ค่าจุดยอดของแต่ละแผนภาพหมายถึงค่าของช่วงชีวิตที่มากผิดปกติ หรือมีความบกพร่องเกิดขึ้นในตำแหน่งนั้น โดยค่า  $\tau_x$  ที่มากกว่า 0.02085 S และค่า  $\tau_y$  ที่มากกว่า 0.003113 S จะถือว่ามีความบกพร่องเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนั้น

โดยรูปที่ 4.12 แสดงการกระจายของค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ในรูปแผนภาพ 2 มิติ ซึ่งทำให้เห็นตำแหน่งพิกัดที่เกิดความบกพร่องบนแผ่นซิลิคอน โดยรูปที่ 4.12 นี้มีตำแหน่งที่พบความบกพร่อง 20 ตำแหน่ง จึงสามารถหาค่าผลผลิตได้เป็น 83.87% ซึ่งได้มาจาก  $(124-20)/124$

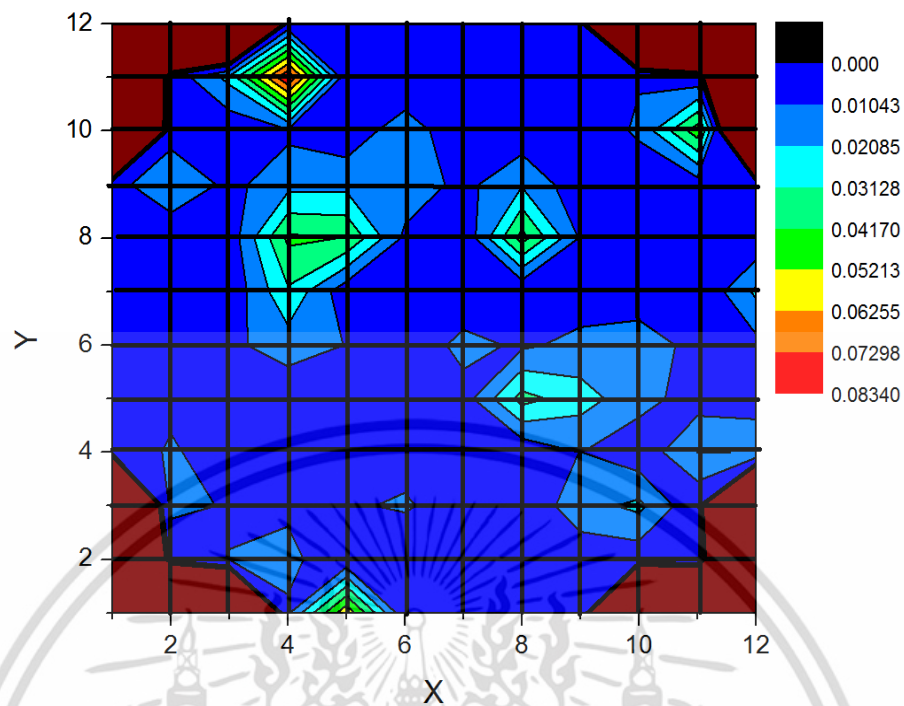


รูปที่ 4.9 ค่าของ  $\tau_x$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งบนแผ่นซิลิคอน

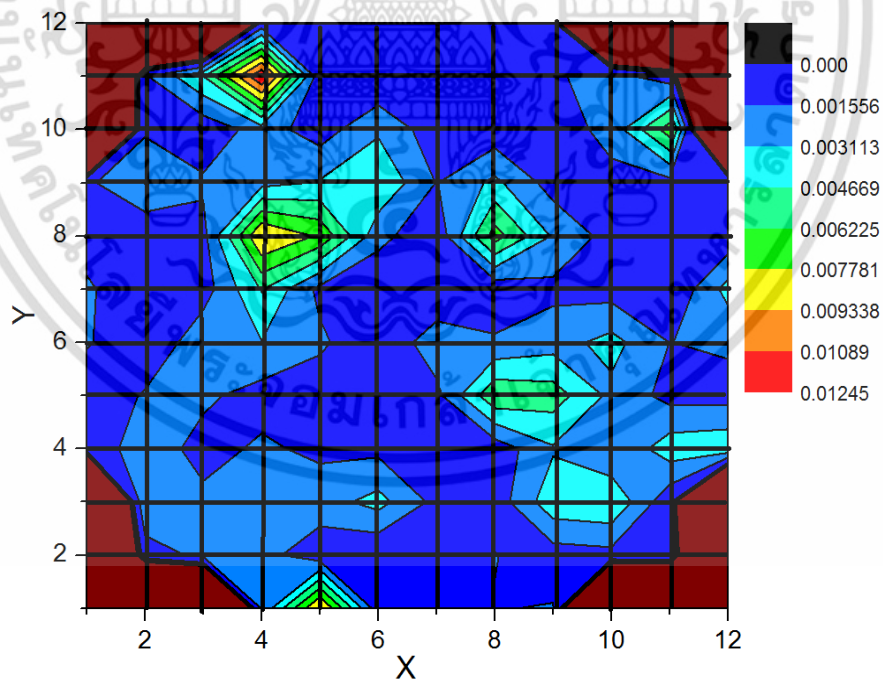


รูปที่ 4.10 ค่าของ  $\tau$  เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งบนแผ่นซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การกระจายของค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด



รูปที่ 4.12 การกระจายของค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของปั๊วของ

จากแบบจำลองค่าผลผลิตในบทที่ 2 ซึ่งกล่าวถึงค่าเฉลี่ยของความบกพร่องต่อชิป หรือ  $\lambda$  โดยสามารถหาได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ผลคูณของค่าเฉลี่ยของความบกพร่องต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ กับพื้นที่ของชิป แต่เนื่องจากในการหาค่าความบกพร่องนี้ต้องใช้เวลาและทรัพยากรมาก เพื่อที่จะทดสอบแผ่นซิลิคอนทั้งแผ่น ดังนั้น การทดสอบแบบสุ่มตัวอย่างจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดเวลาไปได้

การทดลองนี้ จำเป็นต้องหาค่าจำนวนของชิปที่ทำการสุ่มเพื่อคาดคะเนเปอร์เซ็นต์ของผลผลิต โดยนำมาตราฐาน MIL STD 414 หรือ ANSI/ASQC Z1.9 มาใช้ ซึ่งเป็นมาตรฐานหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตด้วยกระบวนการทางสถิติ โดยมาตรฐาน MIL STD 414 หรือ ANSI/ASQC Z1.9 นี้ คือมาตรฐานวิธีการเลือกจำนวนที่จะนำมาสุ่มเพื่อช่วยในการตัดสินใจต่อชิ้นงานทั้งกลุ่มโดยมีถึง 5 ระดับตั้งแต่ระดับที่ 1 (I) ถึงระดับที่ 5 (V) และแสดงข้อมูลบางส่วนดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 [25]

โดยตารางที่ 4.2 จะแสดงค่า Lot Size หรือจำนวนงานทั้งกลุ่มที่ต้องการทดสอบตั้งแต่จำนวน 3 ชิ้นขึ้นไป ในการใช้งานจะต้องหาจำนวนงานทั้งกลุ่ม เพื่อเลือก Sample Size Code Letter ตัวอย่างเช่น ที่ชิ้นงานทั้งหมด 5 ชิ้น จะสามารถหาค่า Sample Size Code Letter ในแต่ละระดับได้เป็น B, B, B, B และ C ตามลำดับ และนำตัวอักษรไปหาค่าจำนวนสุ่มในตารางที่ 4.3 ต่อไป

ตารางที่ 4.2 Sample Size Code Letter ตามมาตรฐาน MIL STD 414 หรือ ANSI/ASQC Z1.9

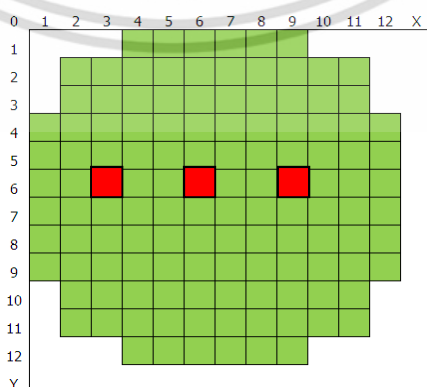
Lot Size	Inspection Levels				
	I	II	III	IV	V
3 to 8	B	B	B	B	C
9 to 15	B	B	B	B	D
16 to 25	B	B	B	C	E
26 to 40	B	B	B	D	F
41 to 65	B	B	C	E	G
66 to 110	B	B	D	F	H
111 to 180	B	C	E	G	I
181 to 300	B	D	F	H	J
301 to 500	C	E	G	I	K
501 to 800	D	F	H	J	L
801 to 1300	E	G	I	K	L
1301 to 3200	F	H	J	L	M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 Master Table ตามมาตรฐาน MIL STD 414 หรือ ANSI/ASQC Z1.9

Sample size code letter	Number of Sample
B	3
C	4
D	5
E	7
F	10
G	15
H	20
I	25
J	30
K	35
L	40
M	50

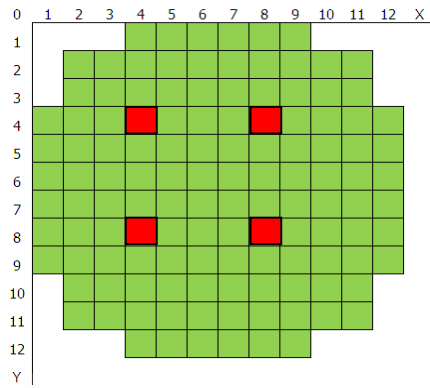
เนื่องจากแผ่นซีลิกอนแผ่นนี้ถูกทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความบกพร่องและมีค่าร้อยละของค่าผลผลิตมาแล้วในหัวข้อที่ 4.4 จึงให้สมมติว่าแผ่นซีลิกอนแผ่นนี้ยังไม่เคยถูกทดสอบมาก่อน จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อจำนวนชิปบนแผ่นซีลิกอนเท่ากับ 124 ชิป จะได้ตัว Sampling size code letter แต่ละระดับเป็น B, C, E, G และ I ตามลำดับ ซึ่งแต่ละตัวอักษรนำไปหาค่าจำนวนที่ใช้สุ่ม ในตารางที่ 4.3 ได้เป็น 3, 4, 7, 15 และ 25 ชิปตามลำดับ โดยจำนวนเหล่านี้คือจำนวนของชิปที่ทำการสุ่มทดสอบในแต่ละครั้งซึ่งจะมีการกำหนดตำแหน่งบนแผ่นซีลิกอนแบบสุ่มจากรูปจำลองของแผ่นดังรูปที่ 4.8 ซึ่งแต่ละตำแหน่งที่ทำการทดสอบตามจำนวนของชิปที่ทำการสุ่มนั้น แสดงดังรูปที่ 4.13ก ถึง 4.13จ



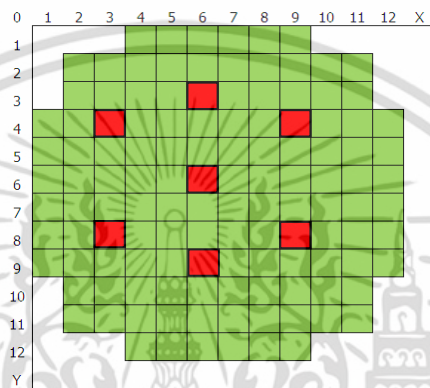
ก) จำนวนสุ่ม = 3

รูปที่ 4.13 ตำแหน่งที่จะทำการสุ่มบนแผ่นซีลิกอน

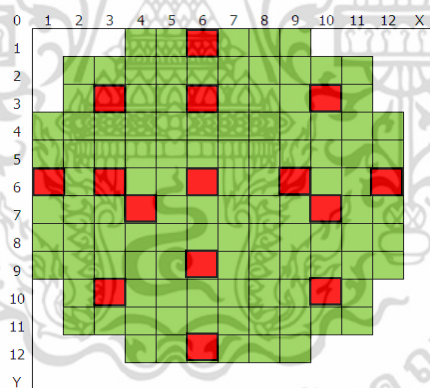
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



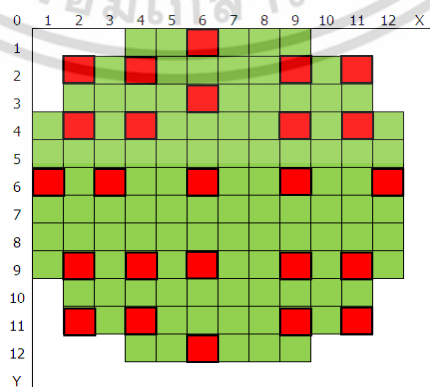
ข) จำนวนส้ม = 4



ค) จำนวนส้ม = 7



ง) จำนวนส้ม = 15



จ) จำนวนส้ม = 25

รูปที่ 4.13 ตำแหน่งที่จะทำการสุ่มบนแผ่นซิลิคอน (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการนับชิปที่มีความบกพร่องและคำนวณค่าของความหนาแน่นของความบกพร่อง ( $\lambda = AD$ ) ได้จากอัตราส่วนของจำนวนชิปที่มีความบกพร่องกับจำนวนของชิปที่ทำการสุ่ม ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การหาค่าความหนาแน่นของความบกพร่องจากค่าจำนวนชิปที่สุ่ม

จำนวนชิปที่ทำการสุ่ม	จำนวนชิปที่มีความบกพร่อง	ความหนาแน่นของความบกพร่อง
3	0	0
4	2	0.5
7	2	0.2857
15	4	0.2667
25	4	0.16

จากนั้นนำค่าความหนาแน่นของความบกพร่องที่ได้นี้ไปแทนค่าในแบบจำลองค่าผลผลิตของปิวซอง ในสมการที่ 4.17 ซึ่งจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าผลผลิตในแต่ละจำนวนการสุ่ม

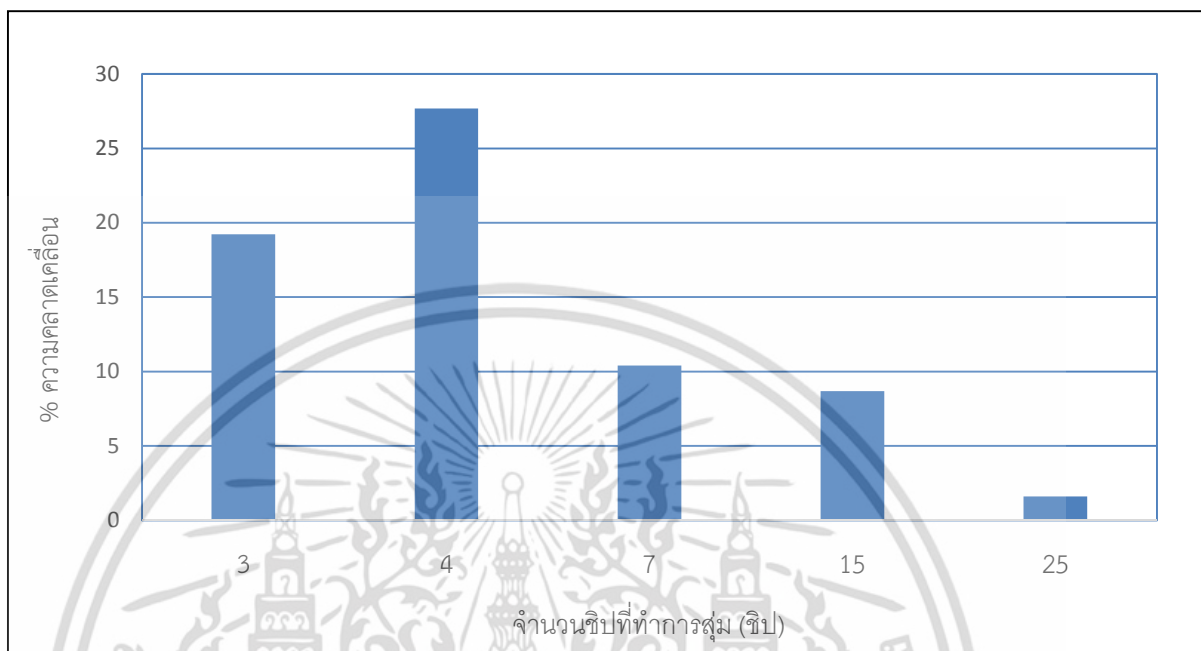
$$Y = e^{-\lambda} \quad (4.17)$$

และทำการเปรียบเทียบระหว่างร้อยละของค่าผลผลิตที่แท้จริง (ที่ได้คำนวณไว้ก่อนหน้า) กับร้อยละของค่าผลผลิตจากแบบจำลองค่าผลผลิตจากสมการที่ 4.19 ภายใต้เงื่อนไขจำนวนของชิปที่ทำการสุ่มที่จำนวนต่างๆกัน ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าผลผลิตที่คำนวณได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตของปิวซอง เปรียบเทียบกับค่าผลผลิตที่แท้จริง

จำนวนชิปที่ทำการสุ่ม	ค่าผลผลิตจากการคำนวณ(%)	ค่าผลผลิตที่แท้จริง (%)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
3	100	83.87	19.2321
4	60.65	83.87	27.6820
7	75.15	83.87	10.3998
15	76.59	83.87	8.67672
25	85.21	83.87	1.60293

จากตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อค่าจำนวนชิปที่ทำการสุ่มเพิ่มขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าผลผลิตที่คำนวณได้ กับร้อยละของค่าผลผลิตที่ได้จริง มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อน กับจำนวนชิปที่ทำการทดสอบ

#### 4.6 การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม

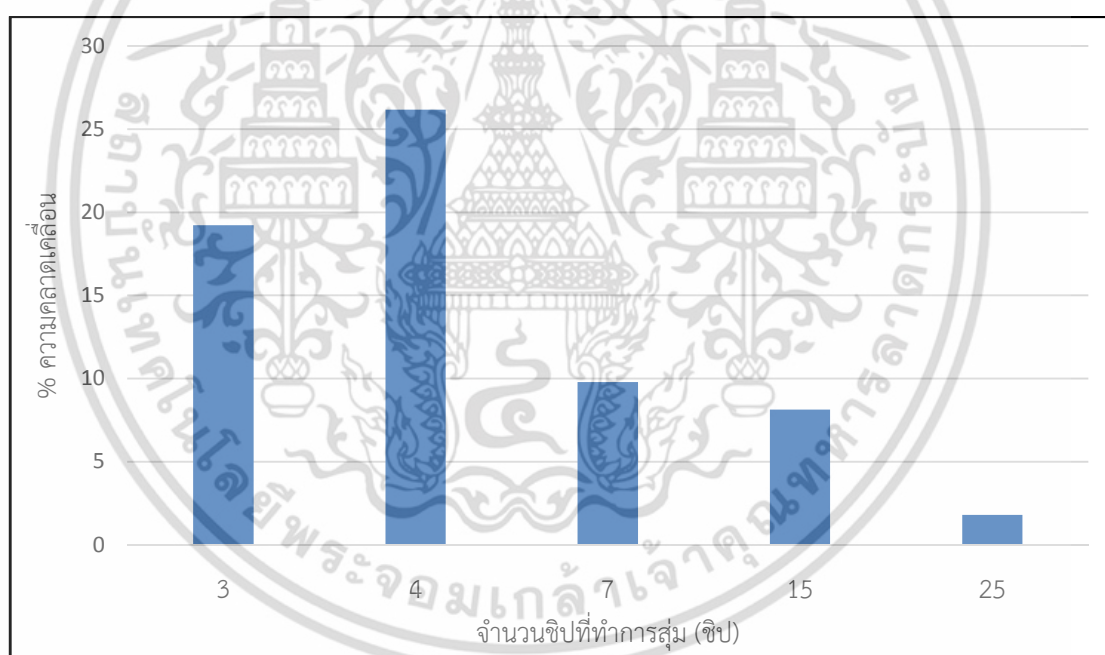
จากข้อมูลของการทดลองที่กล่าวไว้ในตารางที่ 4.4 ได้ค่าความหนาแน่นของความบกพร่องเฉลี่ยต่อชิป ที่ขึ้นอยู่กับจำนวนชิปที่ทำการสุ่ม โดยการทดลองนี้ได้นำข้อมูลค่าความหนาแน่นของความบกพร่องมาแทนค่าในสมการที่ 4.18 ซึ่งเป็นแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม เพื่อหาค่าร้อยละของค่าผลผลิต และหาความคลาดเคลื่อนที่ได้ สรุปออกมาเป็นตารางที่ 4.6

$$Y = \left( \frac{1 - e^{-\lambda}}{\lambda} \right)^2 \quad (4.18)$$

ตารางที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าผลผลิตที่คำนวณได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม เปรียบเทียบกับค่าผลผลิตที่ได้จริง

จำนวนชีพที่ทำการสุ่ม	ค่าผลผลิตจากการคำนวณ(%)	ค่าผลผลิตที่ได้จริง(%)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
3	100	83.87	19.2321
4	60.65	83.87	26.1628
7	75.15	83.87	9.7873
15	76.59	83.87	8.1372
25	85.21	83.87	1.8137

จากตารางที่ 4.6 พบว่า เมื่อค่าจำนวนชีพที่ทำการสุ่มเพิ่มขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าผลผลิตที่คำนวณได้ กับร้อยละของค่าผลผลิตที่ได้จริง มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อน กับจำนวนชีพที่ทำการทดสอบ

#### 4.7 การทดลองเปรียบเทียบร้อยละของค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบคงที่หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในทำนองเดียวกับการทดลองที่ 4.6 โดยนำค่าความหนาแน่นของความบกพร่องเฉลี่ยต่อชีพมาแทนค่าในสมการที่ 4.19 ซึ่งเป็นแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

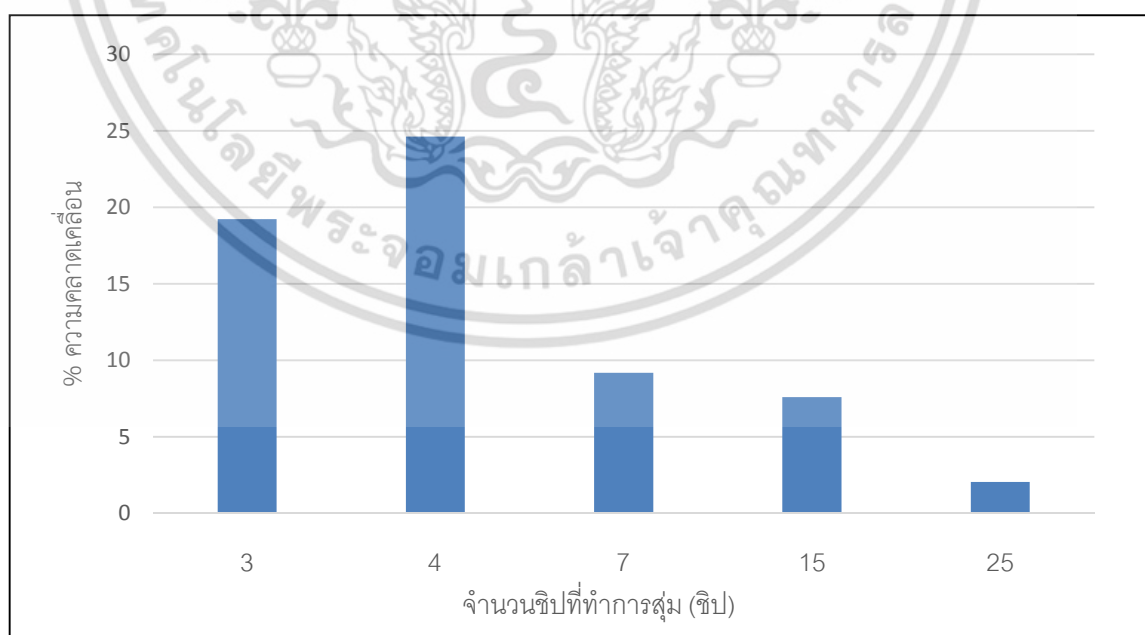
แบบคงที่หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อหาร้อยละของค่าผลผลิต และเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่ได้ลงในตารางที่ 4.7

$$Y = \left( \frac{1 - e^{-2\lambda}}{2\lambda} \right) \quad (4.19)$$

**ตารางที่ 4.7** ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าผลผลิตที่คำนวณได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟี ด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เปรียบเทียบกับค่าผลผลิตที่ได้จริง

จำนวนชิปที่ทำการสุ่ม	ค่าผลผลิตจากการคำนวณ(%)	ค่าผลผลิตที่ได้จริง (%)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
3	100	83.87	19.2321
4	61.93	83.87	24.6309
7	75.66	83.87	9.1745
15	77.04	83.87	7.5933
25	85.39	83.87	2.0370

จากตารางที่ 4.7 พบว่า เมื่อค่าจำนวนชิปที่ทำการสุ่มเพิ่มขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าผลผลิตที่คำนวณได้ กับร้อยละของค่าผลผลิตที่ได้จริง มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.16



**รูปที่ 4.16** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อน กับจำนวนชิปที่ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

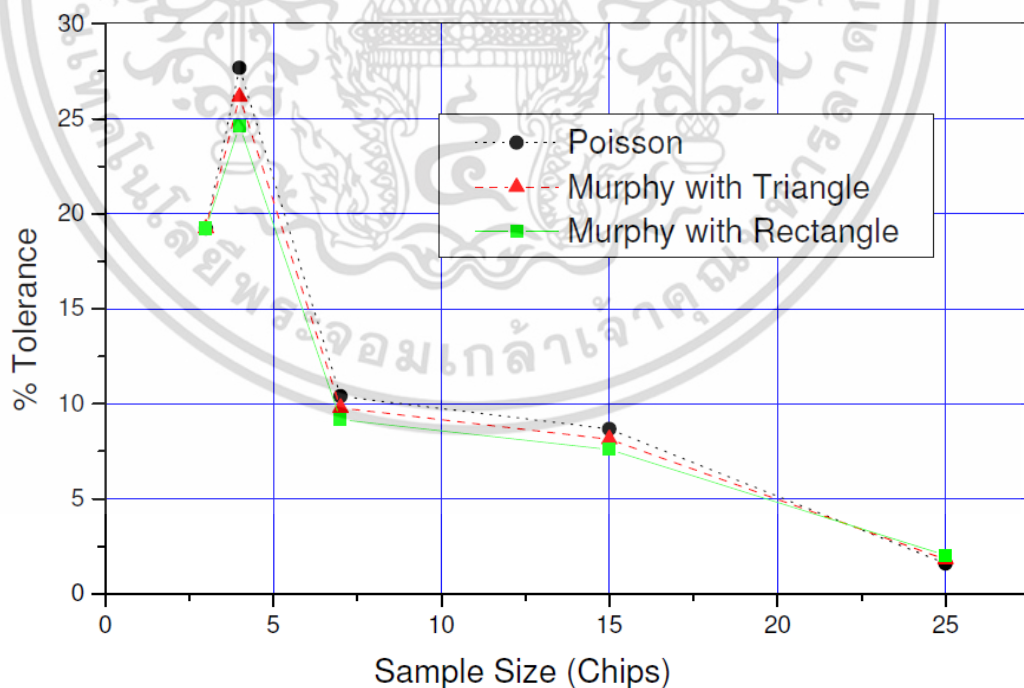
#### 4.8 การทดลองเปรียบเทียบค่าผลผลิตกับแบบจำลองค่าผลผลิตที่นำมาคำนวณ

จากการทดลองที่ 4.5 – 4.7 นำค่าที่ได้จากทั้งสามการทดลองมาเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อน ดังในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบจากแบบจำลองค่าผลผลิต

จำนวนชิปที่ทำการสุ่ม	ค่าความคลาดเคลื่อน(%)		
	ปัวซอง	เมอร์ฟี (สามเหลี่ยม)	เมอร์ฟี (สี่เหลี่ยม)
3	19.2321	19.2321	19.2321
4	27.6820	26.1628	24.6309
7	10.3998	9.7873	9.1745
15	8.67672	8.1372	7.5933
25	1.60293	1.8137	2.0370

จากตารางที่ 4.8 นำไปวาดกราฟเพื่อเปรียบเทียบ ค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองค่าผลผลิตแบบต่างๆ ดังแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่าผลผลิตที่ได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.16 ที่จำนวนชิปที่ทำการสุ่มมีค่าน้อย ตั้งแต่ 3 ถึง 15 ชิป พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองค่าผลผลิตของปัวซองมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ในขณะที่แบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แต่เมื่อจำนวนชิปที่ทำการสุ่มมีค่ามากขึ้นที่ 25 ชิป แบบจำลองค่าผลผลิตของปัวซองกลับมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในขณะที่แบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด อย่างไรก็ตามโดยภาพรวม แบบจำลองค่าผลผลิตทั้งสามรูปแบบ มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึงการศึกษาการวิเคราะห์หาความบกพร่องที่เกิดขึ้นในรอยต่อพีเอ็น ในอุปกรณ์ประเภทซีมอสชนิด  $P^+-N_{well}$  โดยถูกสร้างจากเทคโนโลยีกระบวนการสร้างอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบซีมอสขนาด 0.8 ไมโครเมตร นำมาหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดในช่วงแรงดันไบอัสตรง ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส หรือ 300 เคลวิน จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของกระแสรั่วไหล กับค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ ซึ่งหมายถึงความบกพร่องที่เกิดขึ้นบริเวณหลอดพาหะในรอยต่อพีเอ็น จากนั้นนำผลที่ได้มาคิดเป็นร้อยละของค่าผลผลิตที่แท้จริง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองค่าผลผลิตทั้ง 3 สมการ ได้แก่ แบบจำลองค่าผลผลิตของปัวซอง แบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยม และแบบจำลองค่าผลผลิตของเมอร์ฟีจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยม โดยการใช้มาตรฐานการสุ่ม ANSI/ASQC Z1.9 เพื่อหาร้อยละของค่าผลผลิตที่ได้ในแต่ละรูปแบบของแบบจำลองค่าผลผลิต และหาจำนวนการสุ่มที่สามารถคาดการณ์ร้อยละของค่าผลผลิตในแต่ละรูปแบบที่ใกล้เคียงกับร้อยละของค่าผลผลิตที่แท้จริง

ส่วนของการวิเคราะห์ความบกพร่องโดยวิธีอนุพันธ์ จากการสร้างไดโอดทั้งสองแบบ คือ แบบพื้นที่กว้าง และแบบคดเคี้ยว บนแผ่นซิลิคอน ตามมาตรฐานการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส จากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยการทดลองนี้มุ่งเน้นเฉพาะไดโอดที่เป็นชนิดรอยต่อแบบ  $P^+-N_{well}$  เพื่อศึกษาผลของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสจากการยิงฝังประจุที่สร้างเป็นบ่อแยกชนิดเอ็น ภายหลังจากกระบวนการสร้างไดโอด ได้ทำการวัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด ทั้งคุณสมบัติกระแส-แรงดัน และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในช่วงแรงดันไบอัสตรง นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของกระแส ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ ด้วยวิธีอนุพันธ์ บนแต่ละชิปที่อยู่บนแผ่นซิลิคอน จากนั้นนำผลที่ได้มาแสดงเป็นรูปแบบแผนภูมิ 3 มิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความบกพร่องเกิดขึ้นในโครงสร้างของแผ่นซิลิคอน และมีการกระจายตัวของความบกพร่องเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น โดยค่าผลผลิตบนแผ่นซิลิคอนทั้งหมดพบว่ามีค่าร้อยละ 83.87

และส่วนการวิเคราะห์ร้อยละของค่าผลผลิตเปรียบเทียบกับแบบจำลองค่าผลผลิตแบบต่างๆ เมื่อนำผลลัพธ์จากแบบจำลองค่าผลผลิตทั้งสามรูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองของปัวซอง แบบจำลองของเมอร์ฟีจากการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม และแบบจำลองของเมอร์ฟีจากการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยม มาเปรียบเทียบกับร้อยละของค่าผลผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์ความบกพร่องโดยวิธีอนุพันธ์ พบว่าการวิเคราะห์ความบกพร่องโดยวิธีอนุพันธ์ สามารถหาร้อยละของค่าผลผลิตได้สอดคล้องกับ

การวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 2 ที่จำนวนการสุ่ม 25 ซิป ซึ่งเป็นระดับความละเอียดสูงสุดตามมาตรฐาน ANSI/ASQC Z1.9 บนแผ่นซิลิคอน

โดยภาพรวมอาจสรุปว่า วิธีการการวิเคราะห์ความบกพร่องโดยวิธีอนุพันธ์ สามารถวิเคราะห์หาความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของแผ่นซิลิคอน และแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความบกพร่องที่เกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น โดยที่แบบจำลองค่าผลผลิตทั้ง 3 รูปแบบไม่สามารถแสดงได้ และยังสามารถหาค่าร้อยละของค่าผลผลิตได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองค่าผลผลิตทั้งสามรูปแบบ ที่จำนวนการสุ่มที่ระดับความละเอียดสูงสุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัย

เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้แผ่นซิลิคอนเพียงแผ่นเดียว ในการเปรียบเทียบร้อยละค่าผลผลิตที่ได้จากแบบจำลองค่าผลผลิตทั้งสามรูปแบบกับการวิเคราะห์โดยวิธีอนุพันธ์ ทำให้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากการวัดและวิเคราะห์ค่าความบกพร่อง ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งต่อไป จึงควรทำการวัดเปรียบเทียบจำนวนแผ่นให้มากขึ้น

นอกจากแบบจำลองค่าผลผลิตที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ ยังมีแบบจำลองค่าผลผลิตอีกหลายรูปแบบ เช่น แบบจำลองค่าผลผลิตของมัวร์ (Moore) ซึ่งผู้ที่ทำการวิจัยเรื่องแบบจำลองค่าผลผลิตสามารถนำแบบจำลองค่าผลผลิตรูปแบบอื่น มาใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งต่อไปได้

ในกระบวนการวัดและเก็บข้อมูลมีการใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูง ดังนั้นการตั้งค่าหรือสอบเทียบของเครื่องมือวัดก่อนนำมาใช้งานเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ค่าที่เที่ยงตรงและแม่นยำ

วิธีการวัดวิเคราะห์หาความบกพร่องที่เกิดขึ้นในรอยต่อพีเอ็น ทำให้พบว่ามีความบกพร่องเกิดขึ้นบนแผ่นซิลิคอนจากกระบวนการสร้าง แต่ไม่ได้หมายความว่าไดโอดรอยต่อนี้ไม่สามารถใช้งานได้ จึงอาจต้องพิจารณาในปัจจัยอื่นๆต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Jacob Millman and Arvin Grabel. **Microelectronics**. Singapore : McGraw-Hill, Inc. 1987.
- [2] Albert V. Ferris-Prabhu. **Introduction to Semiconductor Device Yield Modeling**. USA : Artech House, Inc. 1992.
- [3] Chistopher Hess. “Extraction of Wafer-Level Defect Density Distributions to Improve Yield Prediction”, **IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing**. Vol. 12. No 2. 1999.
- [4] Mark Burns and Gordon W. Roberts. **An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement**. USA : Oxford University Press. 2001.
- [5] W.R. Runan and K.E.Bean. **Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology**. USA : Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1990
- [6] Dieter K. Schroder. **Semiconductor Material and Device Characterization**. USA : John Wiley & Sons, Inc. 2006
- [7] Poyai, A. “**Defect Assessment in Advanced Semiconductor Materials and Devices**”. Ph.D. Thesis of Catholic University Leuven, Belgium. 2002.
- [8] วีระ เพ็งจันทร์. “**เทคนิคการวิเคราะห์ความบกพร่องแบบใหม่โดยวิธีอนุพันธ์ในรอยต่อพีเอ็น**”. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [9] สิริชัย โกโคยุดม. **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับวงจรรวมยุคใหม่**. พิมพ์ครั้งที่ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2551.
- [10] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไอซ์**. พิมพ์ครั้งที่4. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [11] William C. O’Mara, Robert B. Herring and Lee P. Hunt. **Handbook of semiconductor silicon technology**. USA : Noyes Publications. 1990.
- [12] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. พิมพ์ครั้งที่5. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [13] Charles H. Stapper, Frederick M. Armstrong and Kiyotaka Saji. “Integrated circuit yield statistics”. **Proceeding of IEEE**. Vol. 71. No. 4. 1983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] James Cunningham. “The Use and Evaluation of Yield Models in Integrated Circuit Manufacturing”. **IEEE transaction on Semiconductor Manufacturing**, Vol 3, No. 2. 1990.
- [15] Douglas C. Montgomery, George C. Runger and Norma Faris. **Engineering Statistics**. USA : John Wiley & Son, Inc. 2007.
- [16] Douglas A. Lind, William G. Marchal and Samuel A. Wathen. **Statistical Techniques in Business & Economics**. USA : McGraw-Hill, Inc. 2015.
- [17] Dewitt G. O. **Modern MOS Technology: Process, Devices, and Design**. McGraw-hill, Inc. 1984.
- [18] Timothy L. Michalka, Ramesh C. Varshney and James D. Meindl. “A Discussion of Yield Modeling with Defect Clustering, Circuit Repair, and Circuit Redndancy”. **IEEE transaction on Semiconductor Manufacturing**. Vol 3. No. 3. 1990.
- [19] B. T. Murphy. “Cost-Size Optima of Monolithic Integrated Circuits”. **Proceeding of IEEE**. Vol 52. No. 12. 1964.
- [20] Charles H. Strapper. “On Murphy’s Yield Integral”. **IEEE transaction on Semiconductor Manufacturing**. Vol 4. No. 4. 1991.
- [21] Gary S. May and Costas J. Spanos. **Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control**. USA : John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [22] Stefano Meroli. **Two growth techniques for mono-crystalline silicon : Czochralski vs Float Zone**. [Online]. Available : [http://meroli.web.cern.ch/meroli/Lecture\\_silicon\\_floatzone\\_czochralski](http://meroli.web.cern.ch/meroli/Lecture_silicon_floatzone_czochralski). 2012.
- [23] คณะวิชาช่างไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรี แห่งที่ 1. **การสร้างวงจบบนแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Fabrication)**. [Online]. Available : <http://sanong2003.tripod.com/icm1-03.htm>.
- [24] Bhargav Veepuri. **8.1. Microtech ion implant,1,2**. [Online]. Available : <http://www.slideshare.net/bhargavveepuri/81-microtech-ion-implant12>. 2013.
- [25] Douglas C. Montgomery. **Introduction to Statistic Quality Control**. USA : John Wiley & sons, Inc. 2009.

## ภาคผนวก

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

- Warakorn Praepattharapisut, Weera Pengchan, Toempong Petchakul, Amporn Poyai “**Defect Distribution and Yield Analysis Technique on Silicon Wafer**” Advanced Material Research, Vol 911 (2014), pp. 271-275.
- วรากร แพรภัทรพิศุทธิ์ วีระ เพ็งจันทร์ เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ อัมพร โพธิ์ไย “**การศึกษาการกระจายตัวของความบกพร่องโดยวิธีอนุพันธ์ในรอยต่อพี-เอ็น**”การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON-36), 11 - 13 ธันวาคม 2556, โรงแรม เฟลิกซ์ ริเวอร์ แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี
- วรากร แพรภัทรพิศุทธิ์ วีระ เพ็งจันทร์ เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ อัมพร โพธิ์ไย “**การวิเคราะห์ผลผลิตบนแผ่นซิลิคอนด้วยสมการผลผลิตและการวิเคราะห์ความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์**”การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37), 19 - 21 พฤศจิกายน 2557, โรงแรม พูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จ.ขอนแก่น
- Warakorn Praepattharapisut, Weera Pengchan, Toempong Petchakul, Amporn Poyai “**Yield Analysis by Poisson Yield Model based on the Defect Analysis with Derivative Method**” The 2014 International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON 2014) 14-17 May 2014, Nakhon Ratchasima, Thailand
- Warakorn Praepattharapisut, Weera Pengchan, Toempong Petchakul, Amporn Poyai “**Yield Analysis based on the Defect Analysis with Derivative Method**” Applied Mechanics and Materials, Vol 781 (2015), pp. 160-163.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวรากร แพรภักทรพิศุทธิ์
วัน เดือน ปีเกิด	2 ตุลาคม 2526 ที่ จ.นครสวรรค์
ที่อยู่	234/92 ถ.พหลโยธิน ต.นครสวรรค์ตก อ.เมืองฯ จ.นครสวรรค์ 60000
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การศึกษาความบกพร่องในสารกึ่งตัวนำ 2) ระบบสมองกลฝังตัว
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2548-ปัจจุบัน	Test Product Engineer บริษัท แม็กซิมอินทริเกรตเต็ดโปรดักส์ ประเทศไทย จำกัด
ผลงานวิจัย	
พ.ศ.2556	“การศึกษาการกระจายตัวของความบกพร่องโดยวิธีอนุพันธ์ใน รอยต่อพี-เอ็น” - การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON36)
พ.ศ.2557	“Yield Analysis by Poisson Yield Model based on the Defect Analysis with Derivative Method” - The 2014 International Conference on Electrical Engineering /Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON 2014) “Defect Distribution and Yield Analysis Technique on Silicon Wafer” - Advanced Material Research, Vol 911 (2014), pp. 271-275. “การวิเคราะห์ผลผลิตบนแผ่นซิลิคอนด้วยสมการผลผลิตและวิธีการ วิเคราะห์ ความบกพร่องด้วยวิธีอนุพันธ์” - การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON37)
พ.ศ.2558	”Yield Analysis based on the Defect Analysis with Derivative Method” - Applied Mechanics and Materials, Vol 781 (2015), pp. 160-163.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้