

การศึกษาคุณสมบัติของ P-I-N สวิตซ์ซิงไดโอด  
STUDYING THE CHARACTERISTICS OF  
P-I-N SWITCHING DIODE



โดย  
นาย สิโรจน์ ปกพัฒนกุล  
นาย สุขสันต์ แซ่เล้า

เลขที่.....  
เลขทะเบียน.....42288  
วัน, เดือน, ปี 16 พ.ศ. 2545

.b.....  
.i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติของ P-I-N สวิตซ์ซิ่งไดโอด  
STUDYING THE CHARACTERISTICS OF  
P-I-N SWITCHING DIODE



ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2543

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

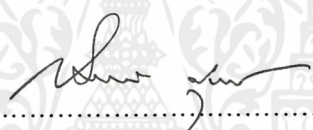
เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของ P-I-N สวิตซ์ซิ่งไดโอด

(STUDYING THE CHARACTERISTICS OF P-I-N SWITCHING DIODE)

ผู้จัดทำ

1 นาย สิโรจน์ ปกพัชระเกตุ เลขประจำตัว 40010858

2.นาย สุขสันต์ แซ่เต๋ เลขประจำตัว 40010863



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติของ P-I-N สวิตซ์ซิ่งไดโอด

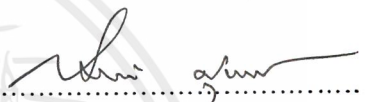
STUDYING THE CHARACTERISTICS OF P-I-N SWITCHING DIODE

นาย สิโรจน์ ปกพัฒนกุล เลขประจำตัว 40010858

นาย สุขสันต์ แซ่เล่า เลขประจำตัว 40010863

โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



  
.....  
(ดร. อรุณ งามวิไล ๑๖/๑๒/๖๕ :)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาคุณสมบัติของ P-I-N สวิตช์ซึ่งไดโอด

สิโรจน์ ปกพัฒนกุล

สุขสันต์ แซ่เต๋

รศ.ดร. สมเกียรติ์ สุขเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

### บทคัดย่อ

เนื่องจากได้มีการศึกษาถึงคุณสมบัติของ PIN ไดโอดแล้วว่ามีคุณสมบัติในการสวิตช์ซึ่งและมีคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส หรือ Current Controlled Negative Resistance (CCNR) ดังนั้นในโครงการนี้จะศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ขนาดของพื้นที่ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระยะของ  $i$  ผลของการครีงผลของความเข้มของแสง ว่ามีผลต่อคุณสมบัติการสวิตช์ซึ่งของ PIN ไดโอดอย่างไรบ้าง เพื่อที่จะได้นำไปพัฒนาการสร้าง PIN ไดโอด ให้ได้ PIN ไดโอดที่มีประสิทธิภาพดีในอนาคต

# STUDYING THE CHARACTERISTICS OF P-I-N SWITCHING DIODE

Sirot Pokpattanakul

Suksan Saelao

Assoc. Prof. Dr. Somkiat Supadech

## ABSTRACT

In the past , there was a studying of the switching characteristics and current controlled negative resistance (CCNR) in Silicon PIN Diode . In this project we study the result of the change in some parameters such as the area of N-type or P-type semiconductor , length of intrinsic layer , result of guardring , and photo effect . The study is to develop the PIN diode fabrication methodology .

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

ABSTRACT

บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีประกอบการสร้าง	3
2.1 PIN ไดโอดเบื้องต้น	3
2.2 คุณสมบัติของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ	4
2.2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทองคำและซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ	4
2.2.2 ลักษณะระดับพลังงานของทองในซิลิกอน	4
2.2.3 ค่าพิกัดความต้านทานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ	12
2.2.4 ทองคำเป็นตัวควบคุม lifetime (lifetime controller)	14
2.3 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)	14
2.3.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ	14
2.3.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current control negative resistance)	14
2.3.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage control negative resistance)	15
2.4 การฉีดประจุคู่ควบ (Double injection)	15
2.5 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบ S ในโครงสร้าง p-i-n ไดโอด	15
บทที่ 3 การออกแบบ	23
บทที่ 4 ขบวนการสร้าง	41
4.1 การเตรียมแผ่นฐานรองพื้นฐาน	41
4.2 ขบวนการออกซิเดชัน	41
4.2.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)	42
4.2.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)	42
4.3 ขบวนการเปิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้า (Photolithography)	44
4.4 ขบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion)	46
4.4.1 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วน P <sup>+</sup>	46
4.4.2 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วน N <sup>+</sup>	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
4.4.3 การแพร่อะตอมทองคำบริสุทธิ์เพื่อสร้างส่วน i	47
4.4.4 ขบวนการสร้างขั้วโลหะ(Metallization)	47
บทที่ 5 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง	49
5.1 การทดลองวัดคุณสมบัติ I-V ของ PIN ไดโอด	49
5.1.1 ศึกษาผลของระยะ I ที่มีต่อ $I_s, I_H, V_s, V_H$	49
5.1.2 ศึกษาผลของขนาด (พื้นที่) ของส่วนพีและส่วนเอ็น ที่มีต่อ $I_s, I_H, V_s, V_H$	54
5.1.3 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อ $I_s, I_H, V_s, V_H$	60
5.1.4 การศึกษาผลของการ์ดริงที่มีต่อ $I_s, I_H, V_s, V_H$	63
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	64
เอกสารอ้างอิง	
กิตติกรรมประกาศ	



## บทที่ 1

## บทนำ

ซิลิกอนไดโอดแบบ PIN (p-type Intrinsic n-type Diode) สามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบ S หรือที่เรียกว่า Current Controlled Negative Resistance ซึ่งมีกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดความต้านทานเชิงลบดังกล่าวก็คือ การฉีดพาหะคู่ควบ (Double Injection) ผ่านส่วน i ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมของทองคำ

อะตอมทองคำที่แพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะเป็นอะตอมของสารเจือที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากขนาดของ โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ดังนั้นการแพร่ของอะตอมจึงเป็นไปได้อย่างรวดเร็วมากกว่าสารเจือที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารกึ่งตัวนำ เมื่ออะตอมทองคำเข้าไปแทรกตัวอยู่ในสารกึ่งตัวนำแล้วจะเกิดระดับพลังงานของอะตอมทองคำในผลึกซิลิกอน 2 ระดับในช่องว่างแถบพลังงานของซิลิกอน คือระดับพลังงานเสมือนผู้ให้ (Donor like level) ที่ระดับพลังงาน 0.35 eV เหนือระดับพลังงานวาเลนซ์ของซิลิกอนและระดับเสมือนผู้รับ (Acceptor like level) ที่ระดับพลังงาน 0.54 eV ใต้แถบความนำลงมา ระดับพลังงานทั้งสองจะทำหน้าที่จับประจุพาหะอิเล็กตรอน และโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาในสารกึ่งตัวนำ (ประสิทธิภาพในการจับประจุอิเล็กตรอนของอะตอมทองคำมีค่าต่ำกว่าความสามารถในการจับโฮล) โดยซิลิกอนจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัว (Recombination Center) ของประจุพาหะทั้งสอง ดังนั้น ความเข้มข้นของประจุทั้งสองที่ใช้ในการนำกระแสของสารกึ่งตัวนำจึงมีแนวโน้มลดลงทำให้ค่าพิคกความต้านทานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นและในกรณีที่เติมสารเจือทองคำในสภาวะที่เหมาะสม จะสามารถทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฐานแผ่นรองมีลักษณะใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ กล่าวคือปริมาณของประจุพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆซึ่งมีผลต่อ PIN ไดโอด เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือชนิดพี การเปลี่ยนแปลงระยะ i การเปลี่ยนแปลงของ I-V Characteristic Curve อันเนื่องมาจากแสงที่ให้กับ PIN ไดโอด เป็นต้น โดยเราสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$I_S, I_H, V_S, V_H = f(i, A_p, A_n, I_0)$$

โดยที่

$I_S$  คือ กระแสสวิตช์ซิ่ง (Switching Current)

$I_H$  คือ กระแสโฮลคิง (Holding Current)

$V_S$  คือ แรงดันสวิตช์ซิ่ง (Switching Voltage)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_H$  คือ แรงดันโฮลดิ้ง ( Holding Voltage )

$i$  คือ ระยะเวลาของส่วนอินทรีนซิค

$A_p$  คือ พื้นที่ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$A_N$  คือ พื้นที่ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$I_0$  คือ กระแสรั่ว



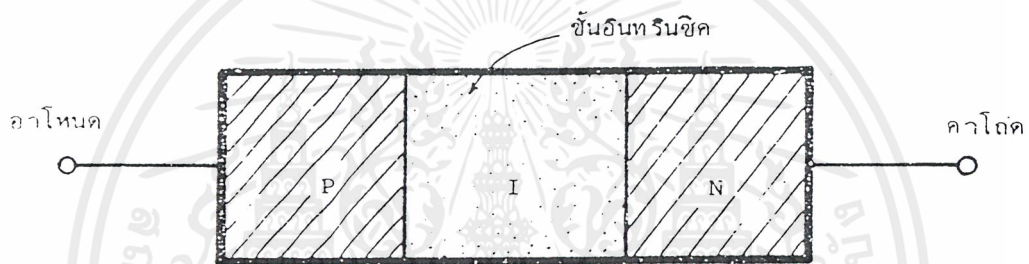
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีประกอบการสร้าง

#### 2.1 PIN ไดโอดเบื้องต้น

ไดโอดชนิดนี้ก็คือคล้ายกับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นทั่วไป แต่ทว่าส่วนพีและส่วนเอ็นถูกแยกจากกันด้านส่วน  $i$  ซึ่งย่อมาจากคำว่า intrinsic ดังนั้นลักษณะโครงสร้างของไดโอดชนิดนี้จึงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของ p-i-n ไดโอด

ในทางปฏิบัติส่วน  $i$  มักจะไม่ใช่อินทรินซิกจริงๆ แต่จะมีคุณสมบัติค่อนข้างไปทางชนิดพีที่มีค่าความต้านทานสูงๆ (ซึ่งเราเรียกว่าชั้น  $\pi$ ) หรือไม่มีก็จะมีคุณสมบัติค่อนข้างไปทางชนิดเอ็นที่มีค่าความต้านทานสูงๆ (ซึ่งเราเรียกว่าชั้น  $\nu$ ) ในที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ บริเวณปลดอดพาหะที่รอยต่อระหว่าง p-i และ n-i จะขยายกว้างขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าจะลดลง นอกจากนี้ส่วน  $i$  ยังช่วยทำให้แรงดันพังทลายของไดโอดนี้มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะส่วน  $i$  เป็นตัวแบ่งกันให้ส่วนพีและส่วนเอ็นอยู่ห่างจากกัน ผลอันนี้จะทำให้ไดโอดชนิดนี้มีค่าแรงดันพังทลายสูงกว่าไดโอดธรรมดาทั่วไป ในขณะที่ไม่มีแรงดันไบอัสหรือได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ค่าความต้านทานของไดโอดก็คือค่าความต้านทานของส่วน  $i$  ซึ่งมีค่าสูงแต่ในขณะที่ได้รับไบอัสตรง โหลดจากส่วนพีจะฉีดเข้าไปในส่วน  $i$  และอิเล็กตรอนจากส่วนเอ็นก็จะถูกฉีดเข้าไปในส่วน  $i$  ด้วย ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ไดโอดนี้ลดลง เนื่องจากค่าความต้านทานของไดโอดชนิดนี้สามารถควบคุมได้ด้วยแรงดันไบอัส ดังนั้นจึงมักจะถูกนำไปใช้งานไมโครเวฟทำหน้าที่เป็น voltage-controlled attenuators

## 2.2 คุณสมบัติของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ

### 2.2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทองคำและซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ

ทองคำเป็นธาตุโลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 1 และ 3 โดยมีอะตอมมีคัมเบอร์เท่ากับ 79 และมีจุดหลอมเหลว (Melting point) ที่อุณหภูมิ 1063 องศาเซลเซียส

R. Hultgren ได้ศึกษาและพบว่าจุดเดือดของทองคำคือ 2808 องศาเซลเซียส (3081 องศาเคลวิน) สำหรับความดันของไอ (Vapor pressure) ของทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ และอัตราการ evaporate แสดงได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งรวบรวมโดย Hultgren

ความดันไอของทองคำมีค่าใกล้เคียงกับ palladium และมี ค่าน้อยกว่าทองแดงและเงิน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนความดันไอของทองคำที่จุดเดือด 3081 K แสดงดังในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้แล้ว Raub และ Plate ได้รายงานไว้ว่า ทองคำเป็นโลหะเพียงชนิดเดียวที่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิสูงๆ สำหรับ ค่าพิถกความต้านทาน (Resistivity) ของทองคำบริสุทธิ์ ตามรายงานของ Linde ที่อุณหภูมิ 0 และ 20 องศาเซลเซียส จะมีค่า 2.06 และ 2.125 ไมโครโอห์ม.ซม. (Microhm.cm) ตามลำดับ ส่วนค่าพิถกความต้านทานของทองคำที่จุดหลอมเหลวจะมีค่าเป็น 6 เท่า ของที่ 20 องศาเซลเซียส คือเท่ากับ 13.68 microhm cm (จากรายงานของ Roll และ Motz)

ทองเป็นสารเจือขบลึก (deep impurity) ที่สำคัญในซิลิกอน ทั้งนี้เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) สูง คือ ประมาณ  $2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$  ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นจึงสามารถควบคุมปริมาณของทองในซิลิกอนได้โดยการควบคุมอุณหภูมิอะตอมทองจะแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial) ของซิลิกอนโดยไม่มีบอนด์ใดๆ ยึดกับอะตอมของซิลิกอน ดังรูปที่ 2.5 อัตราการแพร่ชนิดนี้จะเร็วกว่าอัตราการแพร่แบบเข้าไปแทนที่ (Substitutional diffusion)

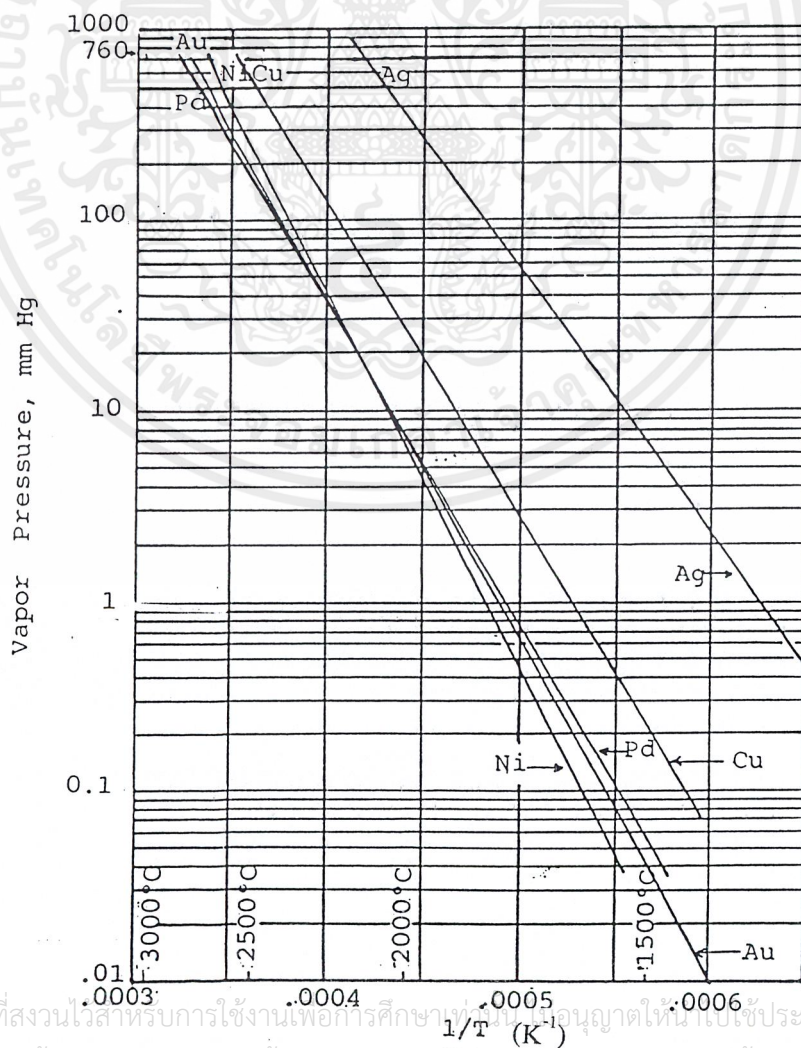
เมื่ออะตอมทองแพร่เข้าไปในซิลิกอนจะไปควบคุมช่วงอายุ (lifetime) และพิถกความต้านทาน (Resistivity) ทั้งชนิดเอ็นและพี กล่าวคือจะทำให้อายุพาหะ (carrier lifetime) ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และเอ็น มีค่าลดลง เราจึงเรียกทองว่าเป็น (carrier lifetime killer) เช่นสามารถนำมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์พวกความเร็วสูง (High speed switching devices) เช่น ทีวีซิงโครไดโอด และวงจรรวมดิจิทัลแบบต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

สำหรับ ค่าโซลิด โซลูบิลิตี (Solid solubility) ของทองในซิลิกอนจะมีค่าสูงสุดประมาณ  $10^{17}$  อะตอม/ลบ.ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2.6

### 2.2.2 ลักษณะระดับพลังงานของทองในซิลิกอน

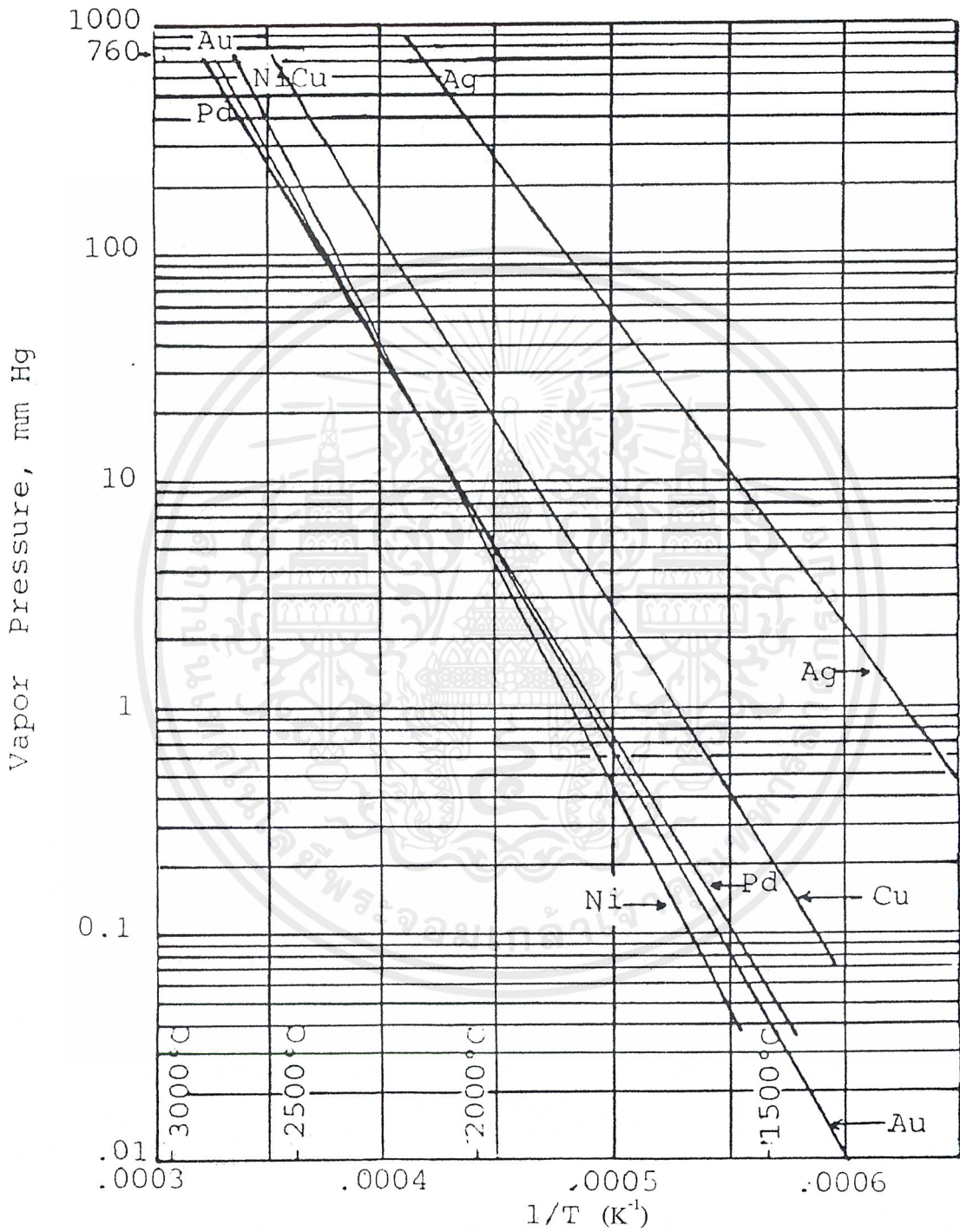
อุณหภูมิ T (K)	Vapor Pressure ( mm Hg )	Rate of Evaporation ( g cm <sup>-2</sup> sec <sup>-1</sup> )
1300	0.0000088	2.7 x 10 <sup>-7</sup>
1336	0.000022	4.82 x 10 <sup>-7</sup>
1600	0.0036	7.3 x 10 <sup>-5</sup>
1700	0.176	3.3 x 10 <sup>-4</sup>
1900	0.210	4.0 x 10 <sup>-3</sup>
2300	8.81	1.5 x 10 <sup>-1</sup>
2400	18.40	3.08 x 10 <sup>-1</sup>
2800	204.1	3.2
3081	760	11.2

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความดันไอและอัตราการ evaporate  
ของทองคำที่อุณหภูมิต่างๆ



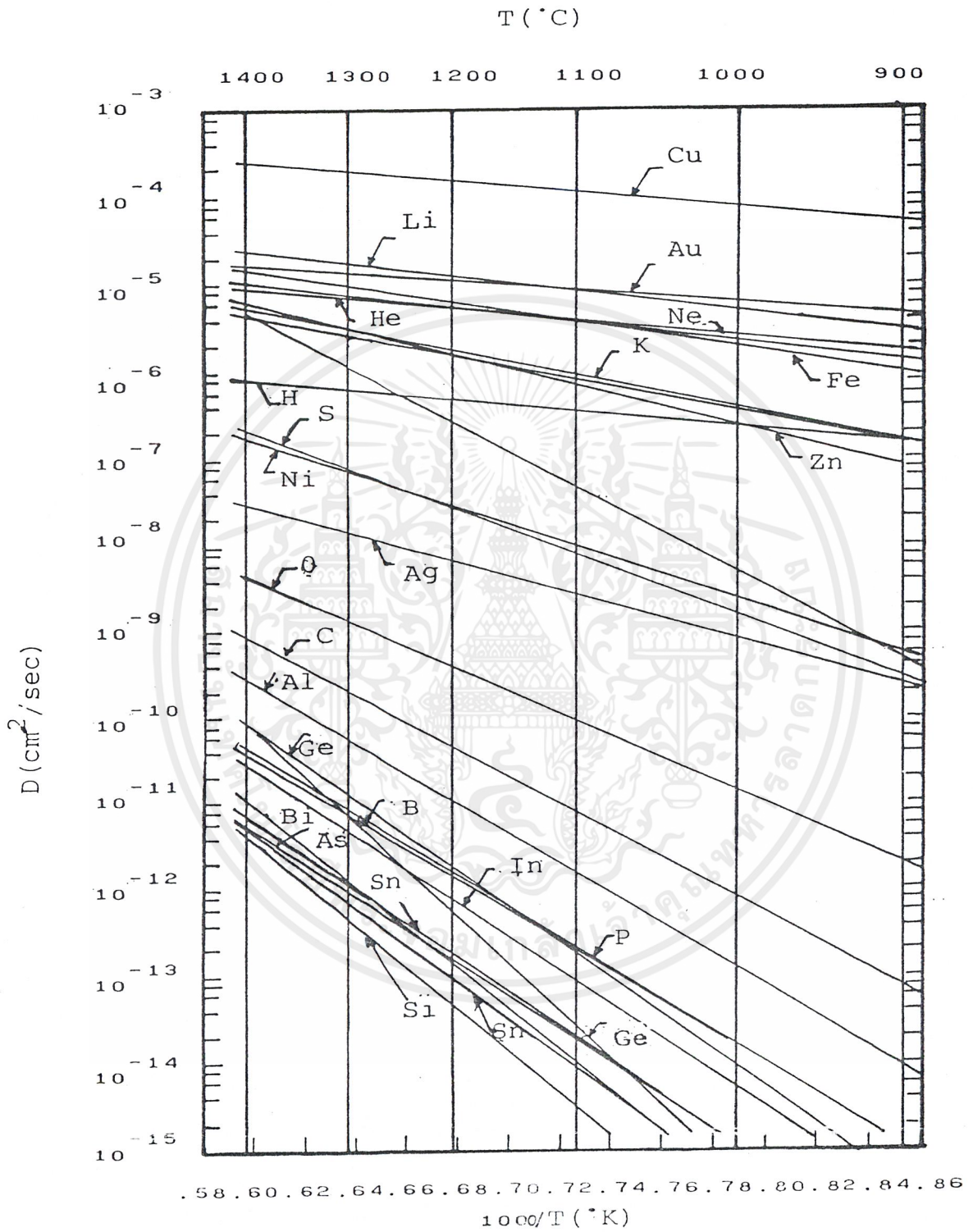
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังอาจมีข้อผิดพลาดในข้อมูลเอกสารขออภัยที่เป็นอย่างยิ่ง

รูปที่ 2.2 แสดงค่าความดันไอของทองคำ, palladium, ทองแดง และเงิน



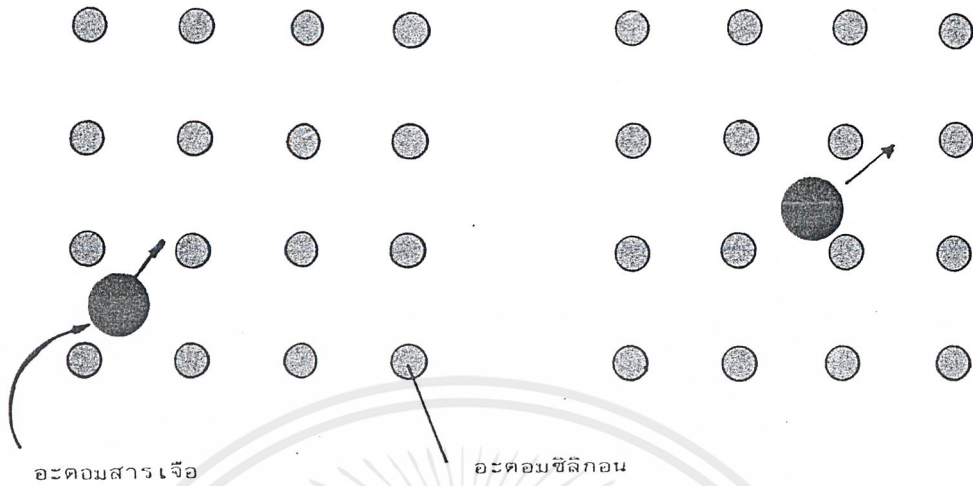
รูปที่ 2.3 แสดงค่าความดันไอและอัตราการ evaporate ของทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

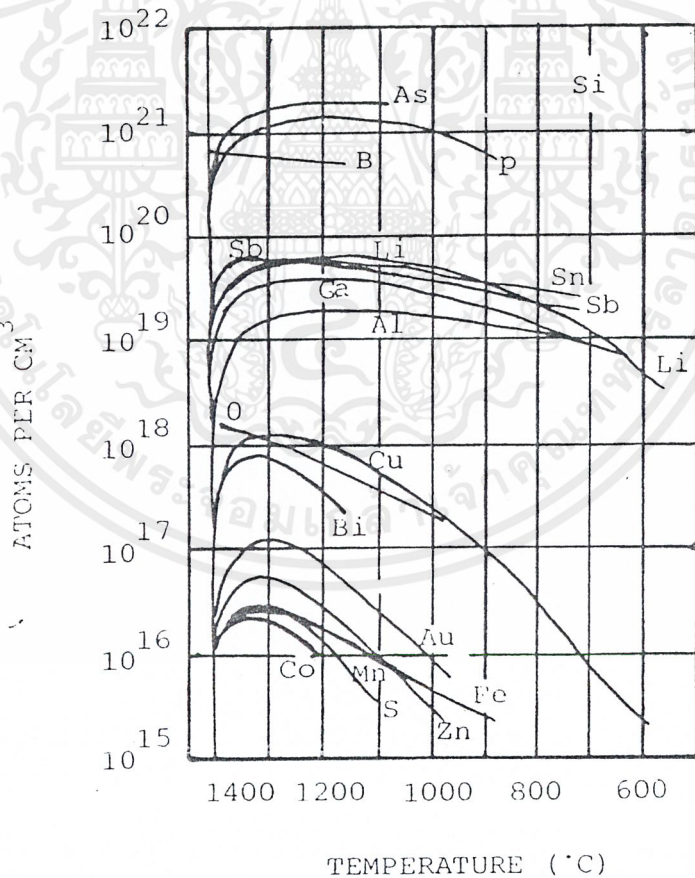


รูปที่ 2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

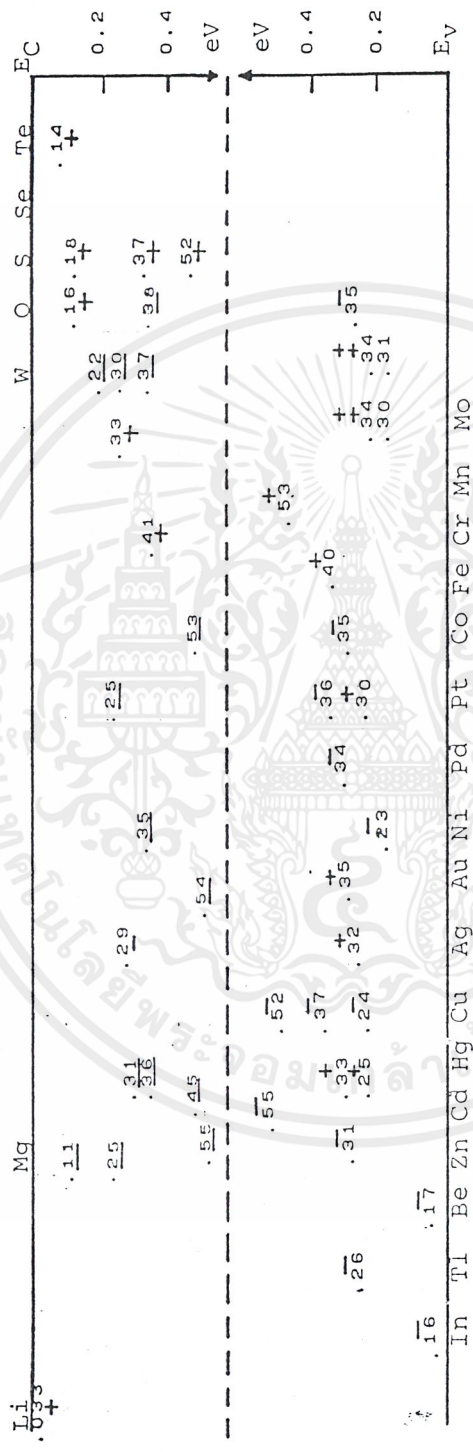


รูปที่ 2.5 แสดงการแพร่ของอะตอมทองเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิกอน



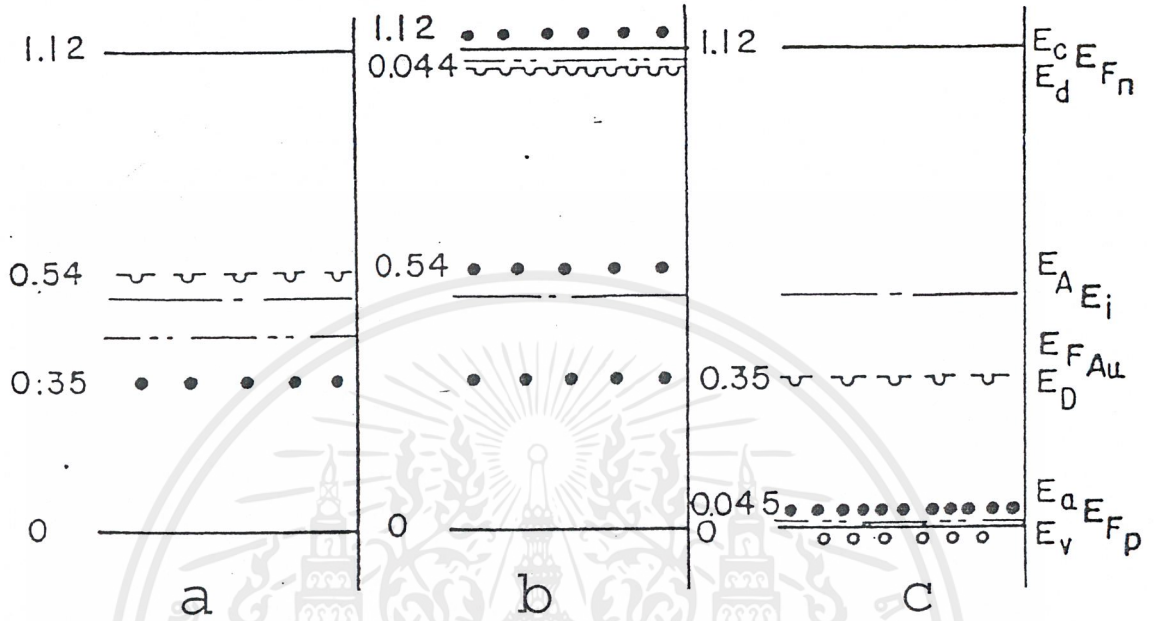
รูปที่ 2.6 แสดงค่า Solid Solubility ของสารเจือชนิดต่างๆในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงระดับพลังงานแบบลึก deep energy level ในซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงไดอะแกรมระดับพลังงานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ เมื่อ

- a. ไม่เติมอะตอมสารเจือ
- b. เติมสารเจือชนิดเอ็นซึ่งสมมติให้มีค่ามากกว่าอะตอมทอง
- c. เติมสารเจือชนิดพีซึ่งสมมติให้มีค่ามากกว่าอะตอมทอง

เมื่อเติมทองในซิลิกอนลงในซิลิกอนจะเกิดระดับพลังงาน deep donor level โดยจะอยู่เหนือจากแถบวาเลนซ์ ( valence band ) 0.35 eV และเกิด acceptor level ใต้แถบความนำ (conduction band) ลงมา 0.54 eV ดังรูปที่ 2.7

สำหรับรูปที่ 2.8 แสดงถึงระดับพลังงานของทองในซิลิกอน เมื่อไม่เติมระดับพลังงานของสารเจือแบบดัดัน ดังในรูป (a) และเมื่อเติมระดับพลังงานของสารเจือแบบดัดันชนิดเอ็น และชนิดพี ดังรูป (b) และ (c) ตามลำดับ

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ ซึ่งมี  $N_D > N_A$  และเมื่อ  $N_{Au} > N_D - N_A$  แล้วสามารถหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้ดังนี้ คือ

$$n = \frac{N_D - N_A}{N_{Au} - (N_D - N_A)} g_A N_C \exp \left( - \frac{E_C - E_A}{kT} \right)$$

เมื่อ  $n \gg p$ ,  $n \ll (N_D - N_A)$  และ  $n \ll N_{Au} - (N_D - N_A)$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้บุคคลภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ จะถือว่าผิดกฎหมาย และจะดำเนินการฟ้องดำเนินคดีตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

โดยที่

$N_D$  : ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (donor concentration) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-3}$

$N_A$  : ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (acceptor concentration) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-3}$

$N_{Au}$  : ความหนาแน่นอะตอมของทอง (gold atom concentration) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-3}$

$n$  : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (electron concentration) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-3}$

$g_A$  : แฟกเตอร์ของความเสื่อม (degeneracy factor) ซึ่งจะสัมพันธ์กับระดับพลังงานผู้รับของทอง (Gold acceptor level) โดยมีค่าเท่ากับ 2

$E_A$  : ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้รับ มีหน่วยเป็น eV

$E_C$  : ระดับพลังงานที่ขบถล่างสุดของแถบความนำ มีหน่วยเป็น eV

$N_C$  : effective densities of state ในแถบความนำ มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-3}$

ในสารกึ่งตัวนำพี ที่ถูกแพร่ด้วยทอง ซึ่งมี  $N_A > N_D$  และเมื่อ  $N_{Au} > N_A - N_D$  แล้วจะได้

ความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = \frac{N_A - N_D}{N_{Au} - (N_A - N_D)} \frac{N_V}{g_D} \exp\left(-\frac{E_D - E_V}{kT}\right)$$

เมื่อ

$E_V$  : ระดับพลังงานที่ขบถบนสุดของแถบวาเลนซ์

$E_D$  : ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้ให้

$g_D$  : แฟกเตอร์ของความเสื่อม (degeneracy) ซึ่งสัมพันธ์กับระดับพลังงานผู้ให้ของทอง (gold donor level) โดยมีค่าเท่ากับ 0.5

$k$  : ค่าคงที่ของโบลทซ์แมน (Boltzmann's constant) คือมีค่า  $1.38 \times 10^{-16} \text{ erg}^\circ\text{K}$  หรือเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$

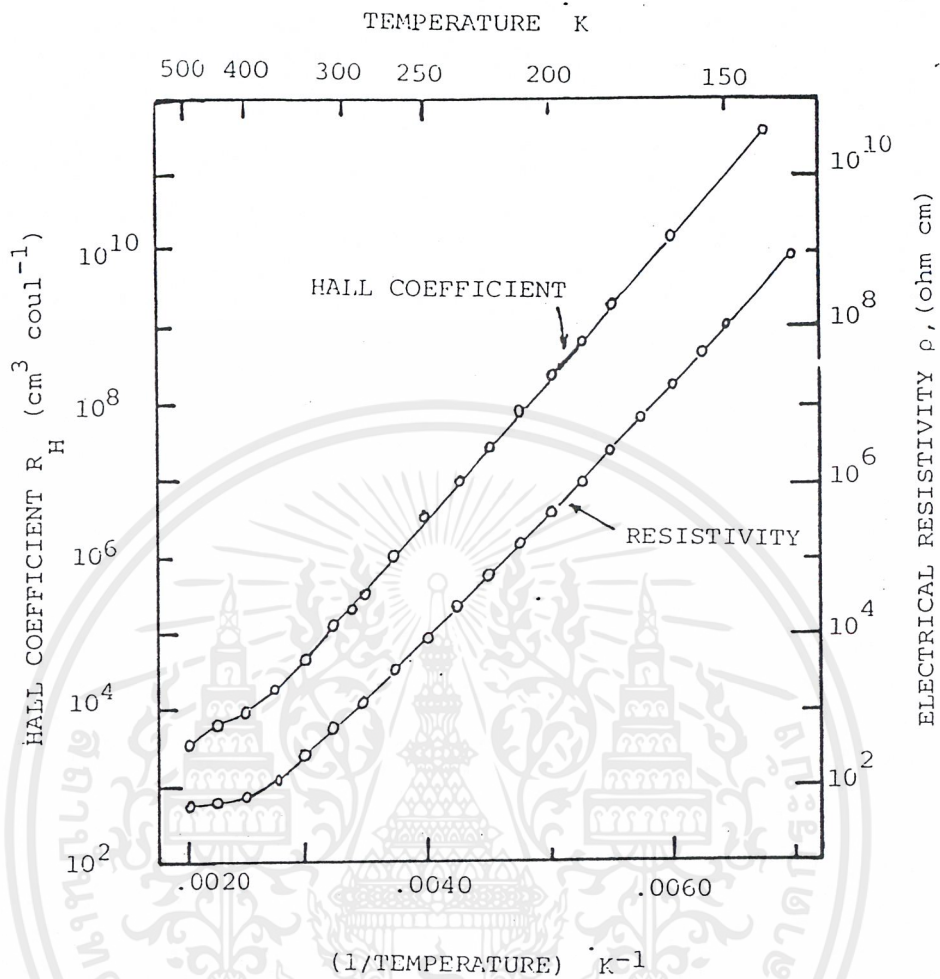
$T$  : อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature) มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน ( $^\circ\text{K}$ )

$N_V$  : effective densities of state เมื่ออยู่ในภาวะสมดุล มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-3}$

และถ้า  $p \ll N_D - N_A$  และ  $p \ll N_{Au} - (N_D - N_A)$  จะได้ความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = \frac{N_{Au} - (N_D - N_A)}{N_D - N_A} \frac{N_V}{g_A} \exp\left(-\frac{E_A - E_V}{kT}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และค่าพิคัดความต้านทานของซิลิกอนชนิดพี เมื่ออุณหภูมิของการแพร่ทองเปลี่ยนแปลงไป

### 2.2.3 ค่าพิคัดความต้านทานของซิลิกอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ

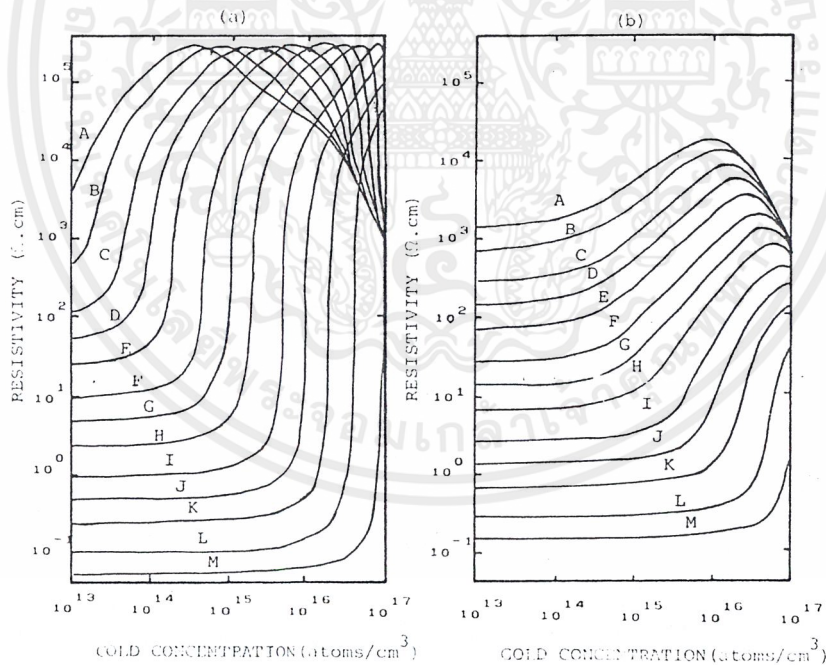
สัมประสิทธิ์ของฮอลล์และค่าพิคัดความต้านทานของซิลิกอนชนิดพี ซึ่งถูกแพร่ด้วยทองคำ จะเป็นสัดส่วนกลับของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.10

ในซิลิกอนชนิดเอ็นเมื่อถูกแพร่ด้วยทองคำ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำตกลงมาในระดับพลังงาน (Deep acceptor level) ซึ่งอยู่ห่างจากใต้แถบความนำประมาณ  $0.54 \pm 0.02$  eV หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คืออิเล็กตรอนในแถบความนำจะถูกจับ (trap) ด้วย acceptor level คือเกิดปรากฏการณ์ชดเชย (compensation) ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวลดลง ค่าพิคัดความต้านทานจึงเพิ่มขึ้นและช่วงอายุ (life time) ของพาหะจะลดลง เมื่อปริมาณอะตอมของทองให้มากขึ้น จะทำให้ Deep acceptor level มีจำนวนพอที่จับ อิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำได้เกือบหมด ค่าพิคัดความต้านทานจะมีค่าสูงขึ้นจะกลายเป็นอินทรินซิก (intrinsic type) และยังเพิ่มปริมาณของทองขึ้น

อีกจะหาให้ค่าพิกัดความต้านทานจะลดลง ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็น p - type โดยมีพาหะอิสระ ส่วนใหญ่เป็นโฮล

สำหรับซิลิกอนพีเมื่อเติมอะตอมของทองลงไป จะเกิดระดับพลังงานที่เรียกว่า Deep donor level ห่างจากแถบวาเลนซ์ประมาณ  $0.35 \pm 0.02$  eV ซึ่งอยู่สูงกว่าระดับ เฟอร์มี (Fermi level) ดังนั้น อิเล็กตรอนจาก deep donor level ตกลงมายังระดับพลังงานที่ต่ำกว่าในแถบวาเลนซ์ซึ่งจะรวมตัวกับ โฮลลดลง ค่าพิกัดความต้านทานจึงมีค่าสูงขึ้น ถ้าเพิ่มปริมาณอะตอมของทองจนกระทั่งโฮลใน แถบวาเลนซ์รวมตัวกับอิเล็กตรอนเกือบหมด จะทำให้ค่าพิกัดความต้านทานกลายเป็น n - type ดังนั้นจะเห็นว่าระดับพลังงาน deep donor level นี้ ทำหน้าที่คล้ายกับมีการจับ โฮล (trap hole) ในแถบ วาเลนซ์ได้

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลวิน กับความหนาแน่นของอะตอมในสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และ พี แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 (a) และ (b) ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานและ

ความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำ (a) ชนิดเอ็น (b) ชนิดพี มีค่าความหนาแน่นดังนี้ ( $\text{cm}^{-3}$ )

A = $1 \times 10^{13}$	B = $2 \times 10^{13}$	C = $5 \times 10^{14}$	D = $1 \times 10^{14}$	E = $2 \times 10^{14}$
F = $5 \times 10^{14}$	G = $1 \times 10^{15}$	H = $2 \times 10^{15}$	I = $5 \times 10^{15}$	J = $1 \times 10^{15}$
K = $2 \times 10^{16}$	L = $5 \times 10^{16}$	M = $1 \times 10^{17}$		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 ทอกรักษาเป็นตัวควบคุม lifetime (lifetime controller)

ทอกรักษาจะแสดงคุณสมบัติเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ของพาหะส่วนน้อยในซิลิกอนชนิดเอ็นและพี ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในซิลิกอนชนิดเอ็นที่มี  $N_D \gg N_{Au}$  จะทำให้ระดับพลังงานของทอกรักษาอยู่เต็มกลายเป็น acceptor ชนิดที่มีประจุลบ ( $N_{Au}^-$ ) จะทำหน้าที่เป็น hole trapping คือจับกับโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยทำให้  $\tau_p$  จะลดลงขณะที่มีการจับโฮลจากมิอิเล็กตรอนจากแถบความนำเคลื่อนลงมายัง recombination center

สำหรับซิลิกอนชนิดพี ที่มี  $N_A \gg N_{Au}$  deep donor level จะจับโฮลกลายเป็น donor ชนิดที่มีประจุบวก ( $N_{Au}^+$ ) และจะสามารถจับหรือ แทรป (trap) กับอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย ทำให้  $\tau_n$  มีค่าลดลง

ค่า lifetime ของพาหะส่วนน้อย แสดงได้โดย

$$\tau_{fo} = 1 / (\sigma_{jo} V_j N)$$

โดยที่  $\tau_{fo}$  : ช่วงอายุ (lifetime) (sec)

$\sigma_{jo}$  : capture cross-section ( $\text{cm}^2$ )

$V_j$  : ความเร็วของอุณหภูมิจึง (thermal velocity) ของพาหะ ( $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

$N$  : ความหนาแน่นของ trapping center ( $\text{cm}^{-3}$ )

อนึ่ง สำหรับค่า capture cross-section และ thermal velocity ของพาหะที่อุณหภูมิจึง 300 องศาเซลเซียส จะอยู่ในช่วง  $10^{-14}$ - $10^{-16}$   $\text{cm}^2$  และ  $10^7$   $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$

ส่วนค่าของ lifetime หลังจากแพร่ทอกรักษาจะเป็นส่วนกลับของอุณหภูมิจึงที่ใช้ในการแพร่สารเจือทอกรักษา ดังแสดงในรูปที่ 2.11 หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ lifetime จะลดลงเมื่อปริมาณของทอกรักษาเพิ่มขึ้น

## 2.3 ความต้านทานเชิงลบ (Negative Resistance)

เป็นความต้านทานที่กระแสไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่แรงดันตกคร่อมตัวมันมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.12 (a)

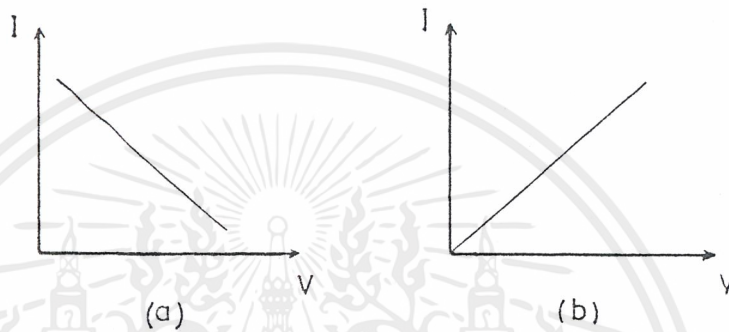
### 2.3.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ

#### 2.3.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบ S (Current control negative resistance)

ความต้านทานเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายตัวอักษรตัว S ดังรูป 2.13 ความต้านทานเชิงลบแบบ S นี้ สามารถเกิดได้โดยการควบคุมด้วยกระแส กล่าวคือ เมื่อกระแส มีค่าเท่ากับกระแสวิกฤต  $I_{th}$  (Threshold current) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบนี้ขึ้นจึงเรียกความต้านทานดังกล่าวนี้ว่า Current Controlled Negative Resistance (VCNR)

### 2.3.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบ N (Voltage controlled negative resistance )

ลักษณะของความต้านทานเชิงลบชนิดนี้ จะคล้ายกับตัวอักษรตัว N ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นได้โดยการควบคุมด้วยแรงดัน โดยต้องมีค่าเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง ( Peak Voltage ) จึงเรียกความต้านทานเชิงลบดังกล่าวนี้ว่า Voltage Control Negative Resistance (VCNR) ซึ่งจะพบใน Tunnel diode และซิลิกอนพลานารีไดโอดแบบ IG p+i-n+ ไดโอด



รูปที่ 2.12 แสดงคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง

- ชนิดที่เป็นความต้านทานเชิงลบ
- ชนิดที่ไม่มีความต้านทานเชิงลบ

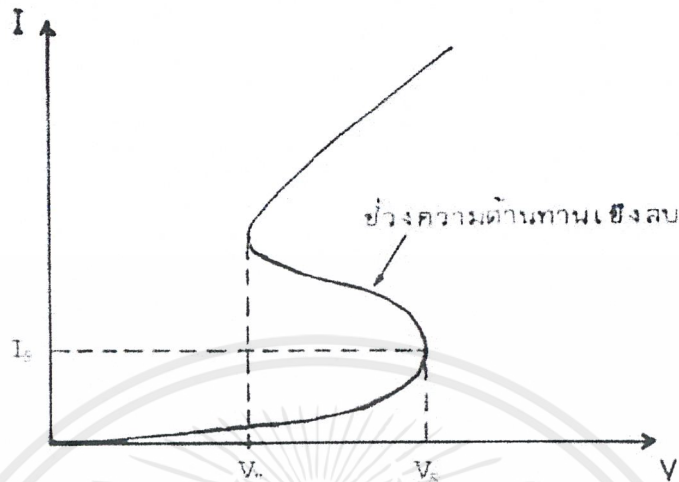
## 2.4 การฉีดประจุคู่ควบ ( Double injection )

เป็นการฉีดประจุพาหะของอิเล็กตรอนและโฮล เข้ามาในส่วนอินทรีนซิค หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่าส่วน i ซึ่งเป็นฉนวนหรือสารกึ่งฉนวน และสามารถสร้างขึ้นมาได้โดยการแพร่สารเจืออะตอมของทองเข้าไปในผลึกซิลิกอนชนิด เอ็น หรือ พี ทำให้เกิดส่วน i ชนิด n ( V - Type ) หรือ p- (  $\pi$ -Type ) ขึ้นนอกจากนี้แล้วสารกึ่งตัวนำที่มีค่าพิคัดความต้านทานสูงๆ ( high resistivity ) ตั้งแต่ 500  $\Omega$ .cm ขึ้น ไปก็ถือได้ว่าเป็นอินทรีนซิคด้วย

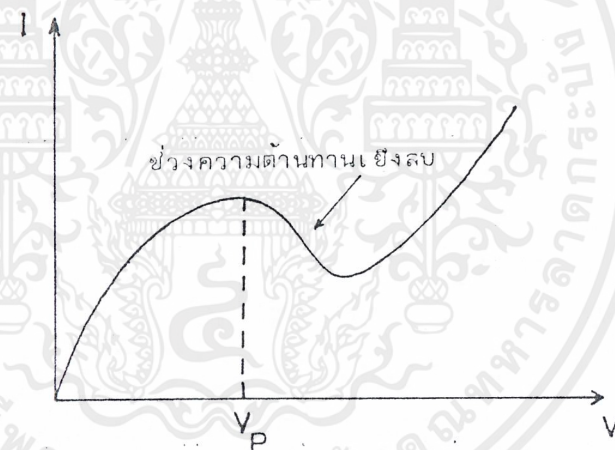
เมื่ออิเล็กตรอนและโฮลถูกฉีดเข้ามาในส่วน i จะเกิดการจับโฮล (trap) หรือรวมกัน (recombination) ที่ Trapping center หรือ deep level ในส่วน i ขึ้นในช่วงหนึ่งหลังจากเกิดการอิมตัวคือ อิเล็กตรอน และโฮล ถูกแพร่จนเต็ม trapping center แล้วอิเล็กตรอนและโฮลจึงสามารถผ่านส่วน i นี้ได้เรียกว่าเกิดการฉีดพาหะคู่ควบ (Double Injection) ดังแสดงใน รูปที่ 2.15

## 2.5 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบ S ในโครงสร้าง p-i-n ไดโอด

กลไกการทำงานสำคัญใน p-i-n ไดโอดนี้คือการฉีดประจุพาหะคู่ควบ (Double Injection) ผ่านเนื้อสาร (bulk) ส่วน i ซึ่งเป็นอินทรีนซิคและมีความต้านทานสูงและสามารถสร้างโดยการแพร่สารเจืออะตอมทองเข้าไปในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น และเนื่องจากทองเป็นอะตอมสารเจือชนิดพิเศษ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ S (CCNR)



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความต้านทานเชิงลบแบบ N (VCNR)

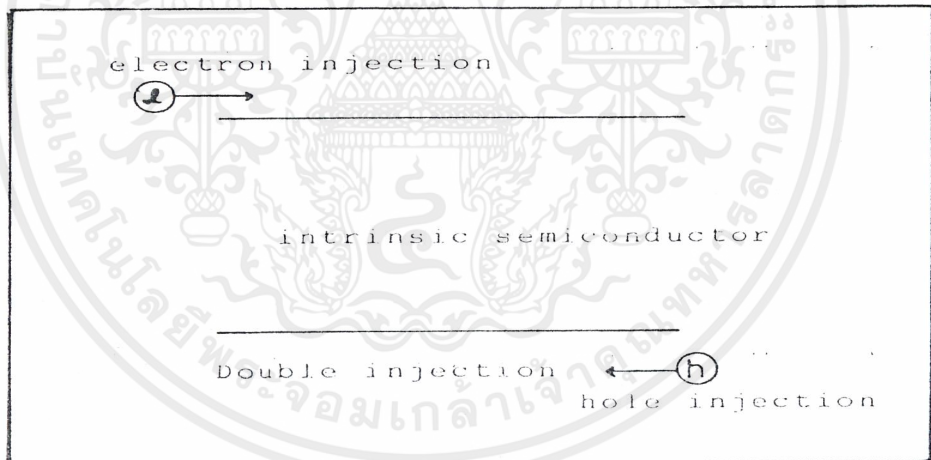
ที่เรียกว่า deep impurity จะทำให้ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น กลายเป็น  $i$  ซึ่งมีความต้านทานสูงและความนำไฟฟ้าจะลดลง โดยจะเกิดระดับพลังงานในบริเวณใกล้เคียงกับส่วนกลาง ในช่องว่างพลังงานนี้ว่า deep level หรือ trapping center ดังแสดงในรูปที่ 2.16

ในภาวะเริ่มต้นคือ เมื่อมีแรงดันไบอัส = 0 โวลต์ สมมติให้อิเล็กตรอนอยู่ทุก ๆ trapping center ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งในภาวะนี้จะไม่มีการแพร่ไหลผ่านส่วน  $i$  ดังรูปที่ 2.18 ต่อมาเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าน้อยๆ จะทำให้เกิดประจุพาหะคือ อิเล็กตรอนจากแถบความนำของส่วนเอ็นและโฮลจากแถบวาเลนซ์ของส่วน  $i$  จะถูกฉีดเข้ามาในส่วน  $i$  โดยโฮลจะถูกจับ (trap) ที่ trapping center ดังรูปที่ 2.19 ทำให้กระแสที่ไหลผ่านไดโอดซึ่งเป็นเพียง single injection ของอิเล็กตรอนเท่านั้นที่มีปริมาณน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ในภาวะดังกล่าวนี้ส่วน  $i$  จะแสดงตัวมีความนำไฟฟ้าน้อย

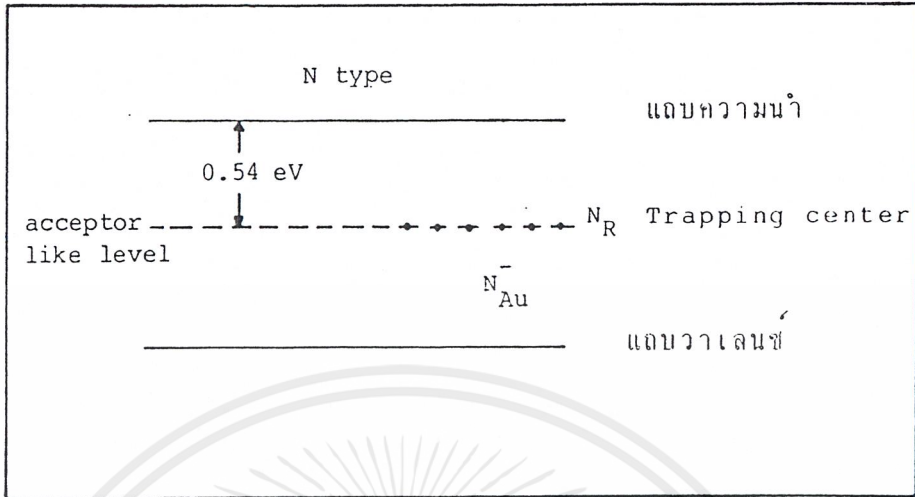
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสให้สูงขึ้นจนใกล้เคียงกับค่าแรงดันวิกฤต (Threshold voltage)  $V_{th}$  ทั้งโฮลและอิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้ามาในส่วน  $i$  เป็นปริมาณมากจนกระทั่ง trapping center เกือบทั้งหมดมีโฮลอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน เมื่อได้รับแรงดันไบอัสใกล้เคียงกับแรงดันวิกฤต แสดงดังรูปที่ 2.22

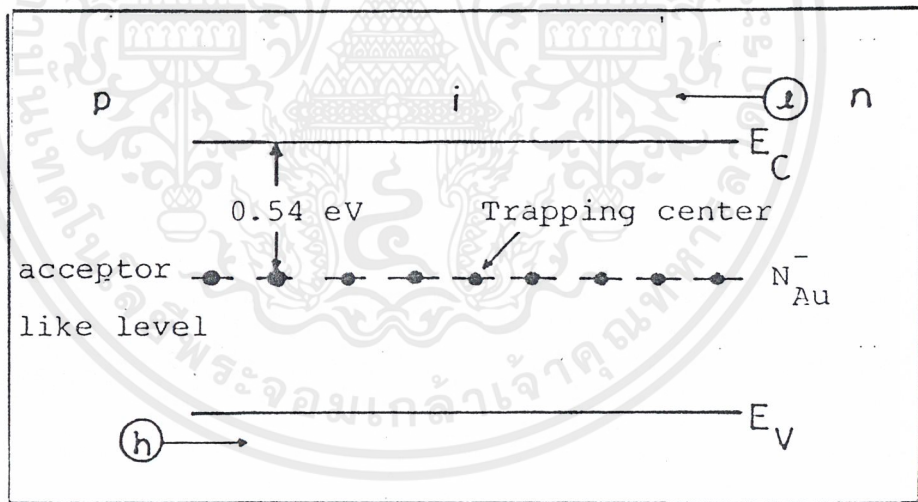
และเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสต่อไปอีกจนถึงแรงดันวิกฤต  $V_{th}$  ซึ่งตรงกับภาวะที่โฮลถูกจับจนเต็ม trapping center ทั้งหมด จะเกิดการฉีดประจุพาหะคู่ควบ (Double injection) ผ่านส่วน  $i$  ในภาวะนี้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดเข้ามา จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านส่วน  $i$  ไปได้โดยสะดวกและ เป็นปริมาณมาก ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดได้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.25 คือคล้ายกับว่าส่วน  $i$  เปลี่ยนสถานะจากที่มีความนำค่าต่ำเป็นความนำสูง ช่วงของการเปลี่ยนภาวะดังกล่าวนี้จะเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (Current Control Negative resistance) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.15 แสดงการฉีดอิเล็กตรอนและโฮลผ่านส่วน  $i$  จนทำให้เกิด Double injection

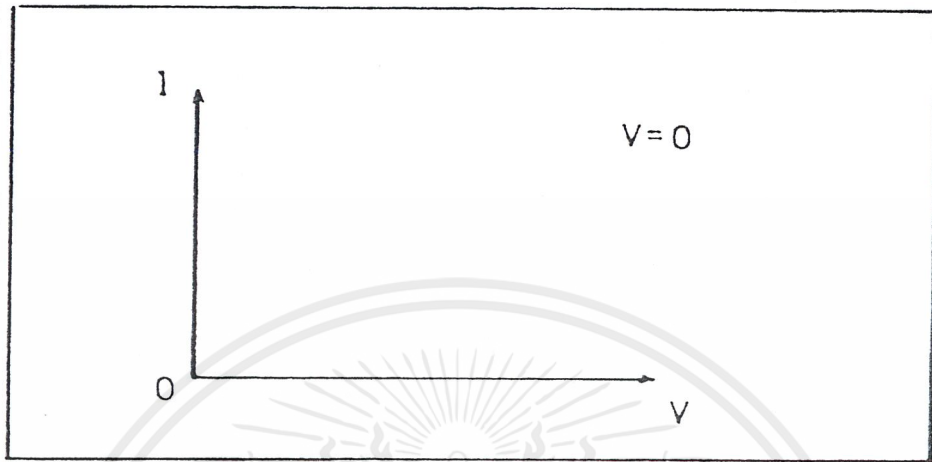


รูปที่ 2.16 แสดงระดับพลังงานแบบ Deep level หลังจาก N- Type ถูกแพร่อะตอมทองแล้ว

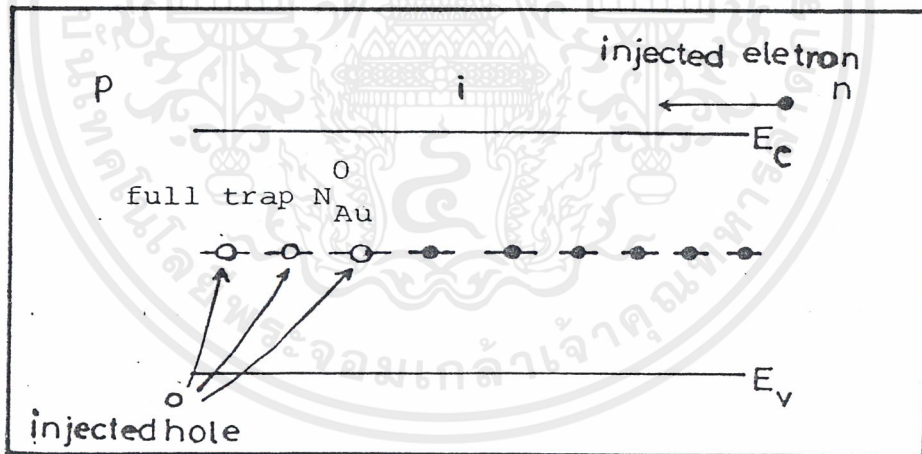


รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะที่อิเล็กตรอนถูกจับจนเต็ม Trapping centers ซึ่งยังไม่กระแสไหลผ่านส่วน i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

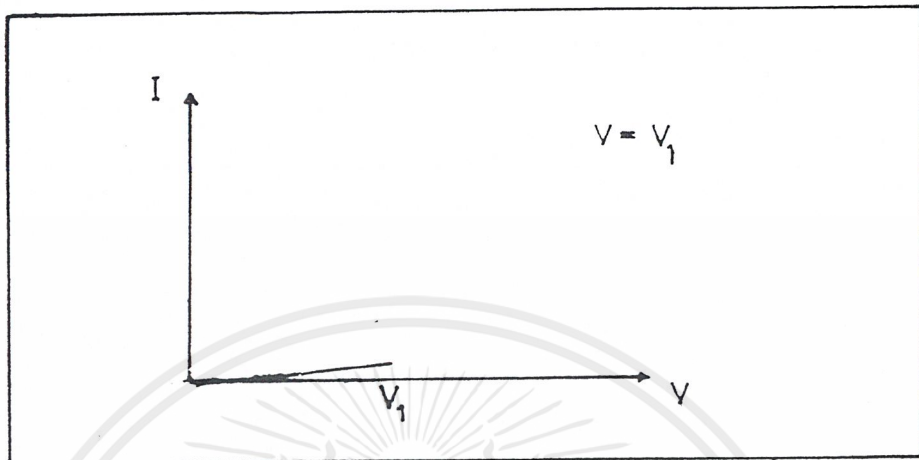


รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ซึ่งยังไม่กระแสไหลผ่านส่วน i

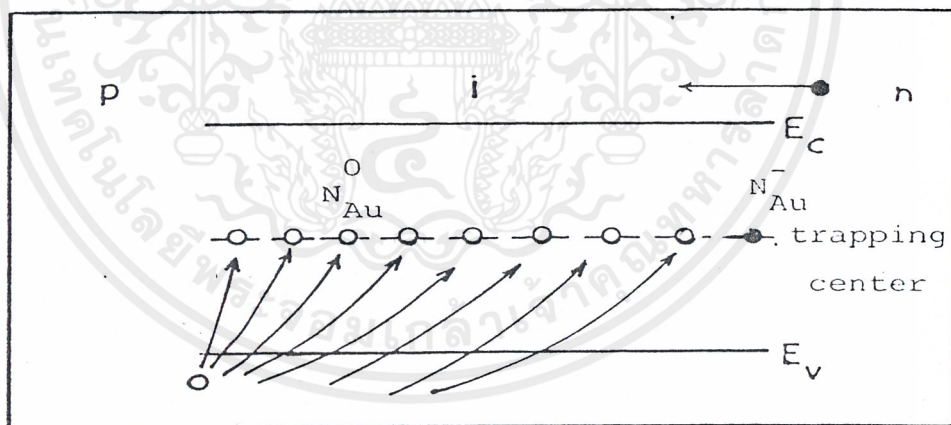


รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการเกิด Single injection ของอิเล็กตรอนขณะที่แรงดันไบอัสต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

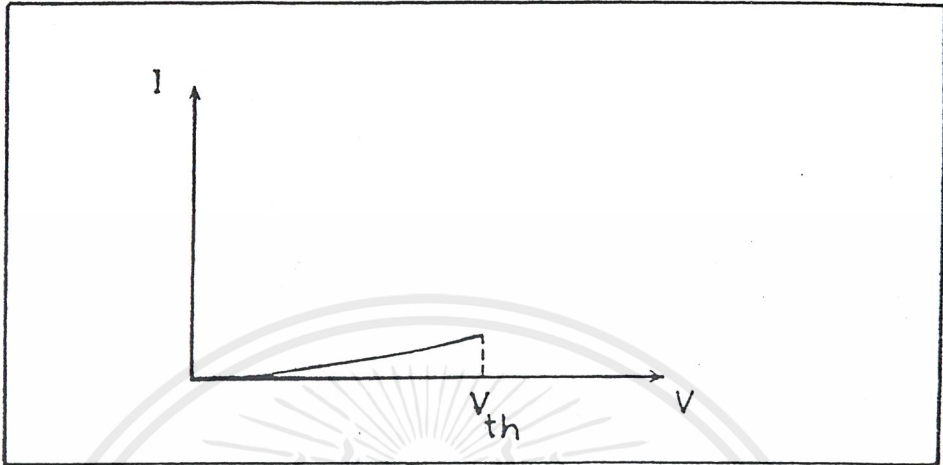


รูปที่ 2.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันหลังจากที่อิเล็กตรอนถูกจับจนเต็ม Trapping center แล้ว ขณะที่มีความดันไบอัสต่ำ

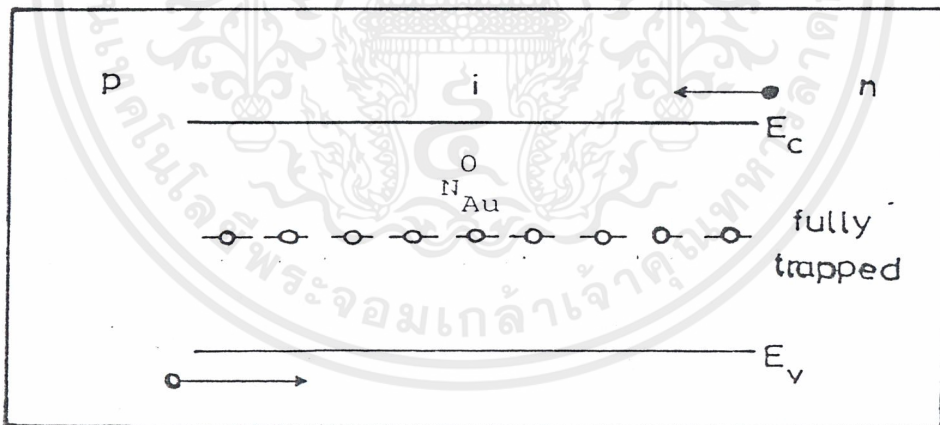


รูปที่ 2.21 แสดงการจับโฮลที่เกือบเต็ม Trapping center

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

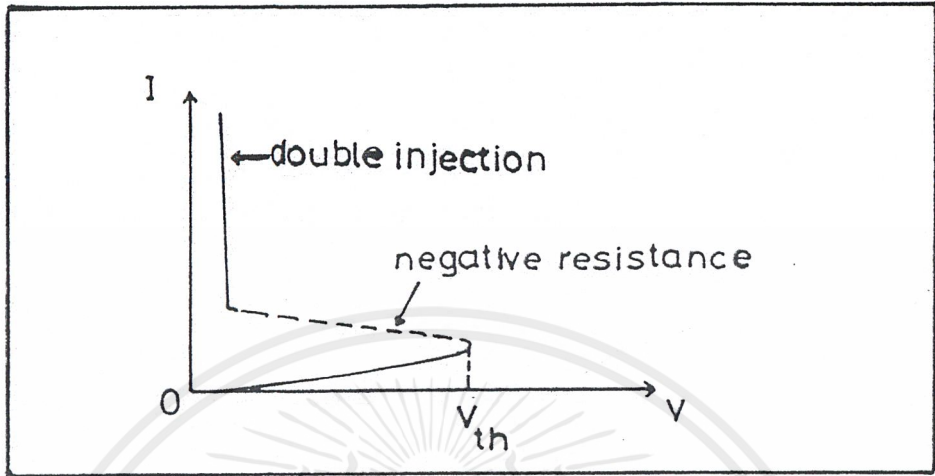


รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน เมื่อแรงดันไบอัสมีค่าใกล้เคียงแรงดันวิกฤติ



รูปที่ 2.23 แสดงภาวะหลังจากที่อิเล็กตรอนและโฮลถูกจับงานเต็ม Trapping center

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงการฉีดประจุคู่ควบ Double injection และการเกิดความต้านทานเชิงลบ

### บทที่ 3

#### การออกแบบ

ในการออกแบบจะเป็นการสร้าง PIN ไดโอด โดยเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ซึ่งในการที่จะพัฒนานั้นจะต้องอาศัยเงื่อนไขของพารามิเตอร์จากสมการทั่วไปของไดโอดดังสมการ 3.1 มาสร้างพารามิเตอร์ในการออกแบบ

$$I_0 = Aq \left[ \frac{D_p p_{no}}{L_p} + \frac{D_e n_{po}}{L_e} \right] \quad 3.1$$

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

- A : พื้นที่ของรอยต่อพีเอ็น  
 $D_{ip}$  : สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล  
 $D_e$  : สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน  
 $p_{no}$  : ความหนาแน่นของโฮลทางด้านเอ็นใน สภาวะสมดุล  
 $n_{po}$  : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านพีใน สภาวะสมดุล  
 $L_p$  : ระยะการแพร่ของโฮล  
 $L_e$  : ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน  
 $I_0$  : กระแสอิ่มตัว  
 $N_i^2$  : ความหนาแน่นของประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์  
 $\frac{kT}{q}$  : มีค่าเท่ากับ 0.026 V ที่ 300 K  
 $V_A$  : แรงดันไบอัส

จากสมการดังกล่าวจะพบว่ากระแส I นั้นจะแปรผันกับ  $I_0$ ,  $V_A$ , และ T ซึ่งจะเห็นว่า  $V_A$  และ T จะไม่ใช่ผลของการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจึงต้องพิจารณาที่  $I_0$  และ  $I_0$  นี้เองจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อโครงสร้างคือ A ซึ่งหมายถึง พื้นที่ของรอยต่อพีเอ็น แต่ในการพิจารณานั้นจะพิจารณาว่าพื้นที่ของด้านที่เกิดจากความลึกซึ่งเกิดจากการเติมอะตอมสารเจือปนนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ในแนวระนาบจึงอาจกล่าวได้ว่าพื้นที่ในแนวระนาบเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญก็ได้ นอกจากพารามิเตอร์ที่ได้จากสมการ ไดโอดแล้วยังได้พิจารณาพารามิเตอร์ที่เกิดจากกระแสรั่วที่ผิว (Generation-Recombination), ปริมาณอะตอมทองคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PIN ไดโอด

หมวด A พื้นที่  $n = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$

$p = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$

A1.1 ระยะ  $i = 60 \mu\text{m}$

A2.1 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

A3.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

A4.1 ระยะ  $i = 140 \mu\text{m}$

A5.1 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$

หมวด B พื้นที่  $n = (160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m})$

$p = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$

B1.1 ระยะ  $i = 60 \mu\text{m}$

B2.1 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

B3.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

B4.1 ระยะ  $i = 140 \mu\text{m}$

B5.1 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$

หมวด C พื้นที่  $n = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$

$p = (160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m})$

C1.1 ระยะ  $i = 60 \mu\text{m}$

C2.1 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

C3.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

C4.1 ระยะ  $i = 140 \mu\text{m}$

C5.1 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$

หมวด D พื้นที่  $n = (160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m})$

$p = (160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m})$

D1.1 ระยะ  $i = 60 \mu\text{m}$

D2.1 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

D3.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

D4.1 ระยะ  $i = 140 \mu\text{m}$

D5.1 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมวด E พื้นที่  $n = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$

$$p = (120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m})$$

E1.1 ระยะ  $i = 60 \mu\text{m}$

E2.1 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

E3.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

E4.1 ระยะ  $i = 140 \mu\text{m}$

E5.1 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$

หมวด F พื้นที่  $n = (120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m})$

$$p = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$$

F1.1 ระยะ  $i = 60 \mu\text{m}$

F2.1 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

F3.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

F4.1 ระยะ  $i = 140 \mu\text{m}$

F5.1 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$

หมวด G พื้นที่  $n = (120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m})$

$$p = (120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m})$$

G1.1 ระยะ  $i = 60 \mu\text{m}$

G2.1 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

G3.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

G4.1 ระยะ  $i = 140 \mu\text{m}$

G5.1 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$

หมวด H พื้นที่  $n = (60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m})$

$$p = (60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m})$$

ไม่มี Guarding ยกเว้น ที่  $160 \mu\text{m}$

H1 ระยะ  $i = 20, 40, 60, 100 \mu\text{m}$

H2 ระยะ  $i = 120, 140, 160, 160 \mu\text{m}$

หมวด I

I1 ระยะ i = 40  $\mu\text{m}$

พื้นที่ 1  $n = (180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m})$

$p = (180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m})$

พื้นที่ 2  $n = (140 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m})$

$p = (140 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m})$

พื้นที่ 3  $n = (100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m})$

$p = (100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m})$

พื้นที่ 4  $n = (60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m})$

$p = (60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m})$

I2 ระยะ i = 80  $\mu\text{m}$

พื้นที่ 1  $n = (180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m})$

$p = (180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m})$

พื้นที่ 2  $n = (140 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m})$

$p = (140 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m})$

พื้นที่ 3  $n = (100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m})$

$p = (100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m})$

พื้นที่ 4  $n = (60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m})$

$p = (60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m})$

I3 ระยะ i = 120  $\mu\text{m}$

พื้นที่ 1  $n = (180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m})$

$p = (180 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m})$

พื้นที่ 2  $n = (140 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m})$

$p = (140 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m})$

พื้นที่ 3  $n = (100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m})$

$p = (100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m})$

พื้นที่ 4  $n = (60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m})$

$p = (60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมวด J พื้นที่  $n = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$

$$p = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$$

J1.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

เปิด Guarding 1 ด้าน

J2.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

เปิด Guarding ทุกด้าน

หมวด K พื้นที่  $n = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$

$$p = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$$

เพิ่ม Gate  $p^+$

K1.1 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

K2.1 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

K3.1 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$

หมวด L พื้นที่  $n = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$

$$p = (200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m})$$

สร้างเป็นลักษณะ Bi-direction

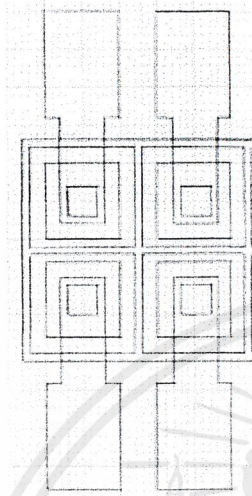
L1 ระยะ  $i = 60 \mu\text{m}$

L2 ระยะ  $i = 100 \mu\text{m}$

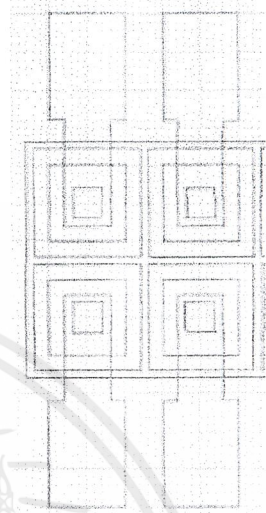
L3 ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$

L4 ระยะ  $i = 140 \mu\text{m}$

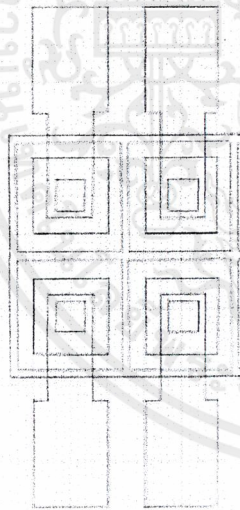
L5 ระยะ  $i = 160 \mu\text{m}$



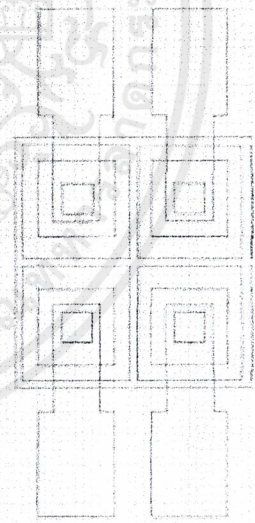
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้าง A1.1 และ A1.2



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้าง A2.1 และ A2.2

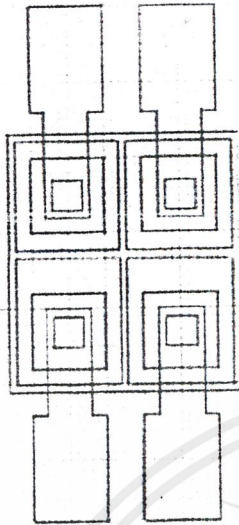


รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้าง A3.1 และ A3.2

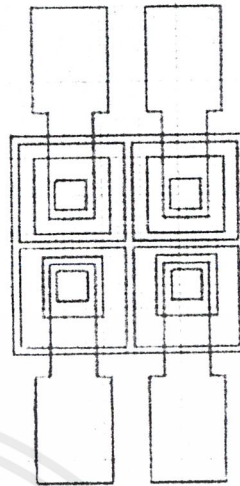


รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้าง A4.1 และ A4.2

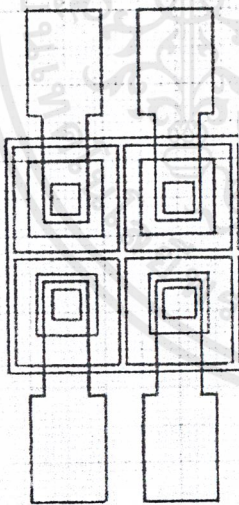
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



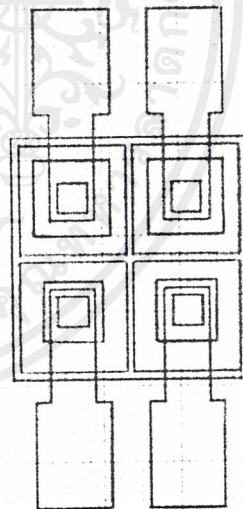
รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้าง A5.1 และ A5.2



รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้าง B1.1 และ B1.2

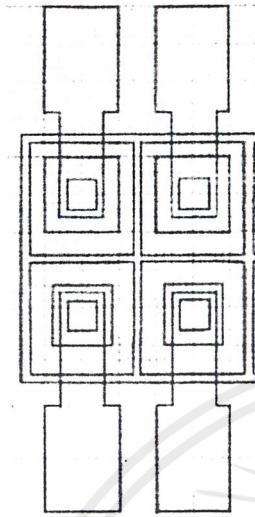


รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้าง B2.1 และ B2.2

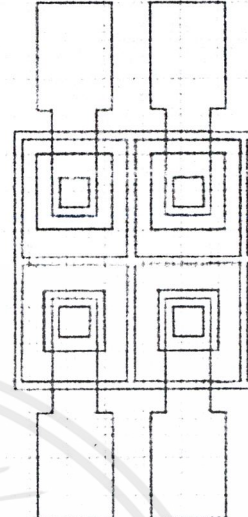


รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้าง B3.1 และ B3.2

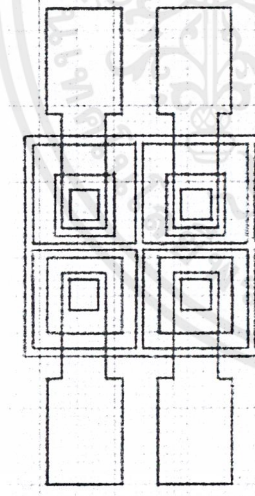
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



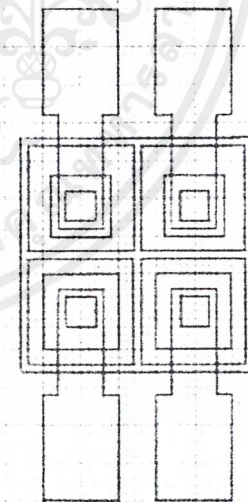
รูปที่ 3.10 แสดงโครงสร้าง B4.1 และ B4.2



รูปที่ 3.11 แสดงโครงสร้าง B5.1 และ B5.2

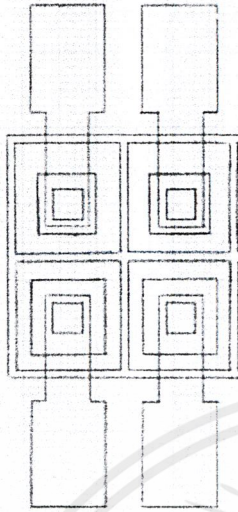


รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้าง C1.1 และ C1.2

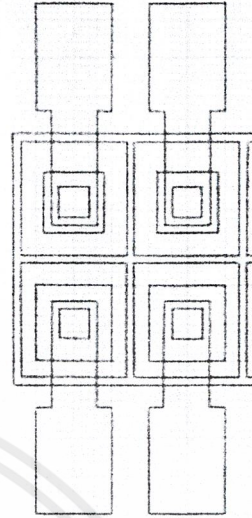


รูปที่ 3.13 แสดงโครงสร้าง C2.1 และ C2.2

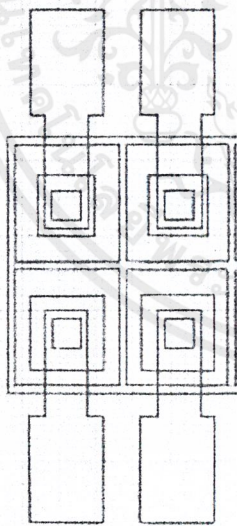
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



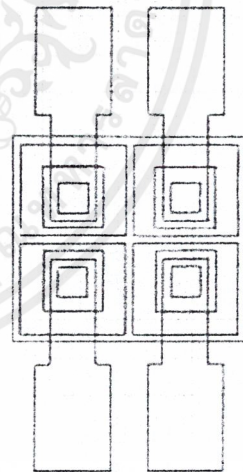
รูปที่ 3.14 แสดง โครงสร้าง C3.1 และ C3.2



รูปที่ 3.15 แสดง โครงสร้าง C4.1 และ C4.2

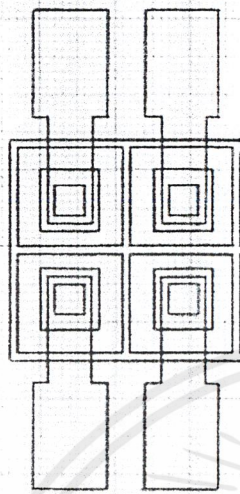


รูปที่ 3.16 แสดง โครงสร้าง C5.1 และ C5.2

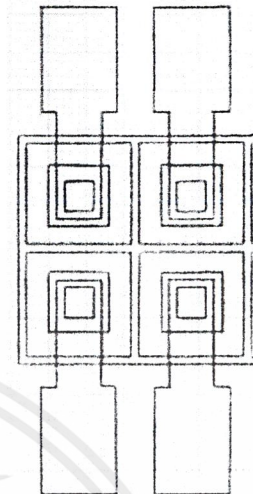


รูปที่ 3.17 แสดง โครงสร้าง D1.1 และ D1.2

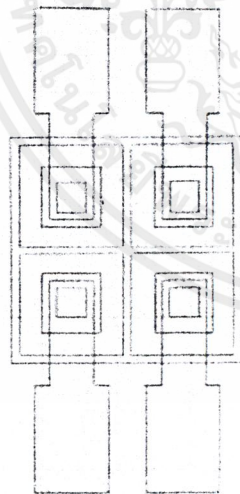
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



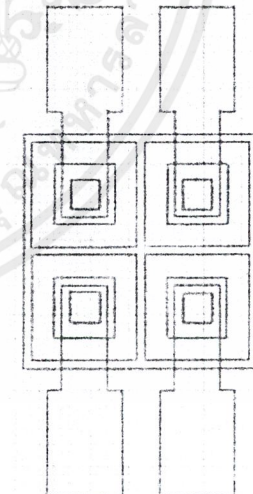
รูปที่ 3.18 แสดง โครงสร้าง D2.1 และ D2.2



รูปที่ 3.19 แสดง โครงสร้าง D3.1 และ D3.2

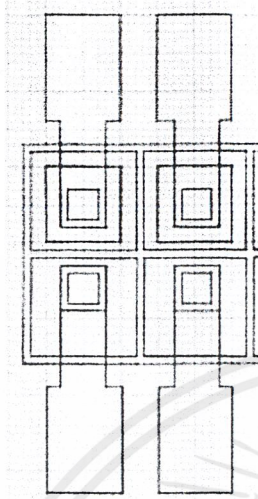


รูปที่ 3.20 แสดง โครงสร้าง D4.1 และ D4.2

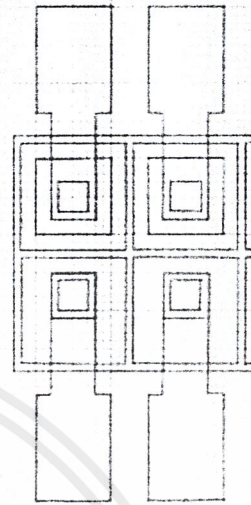


รูปที่ 3.21 แสดง โครงสร้าง D5.1 และ D5.2

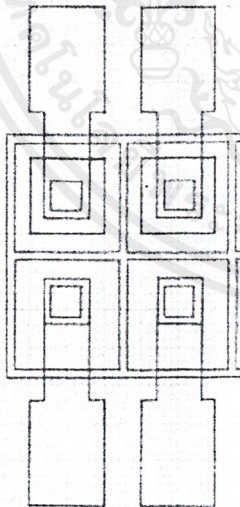
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



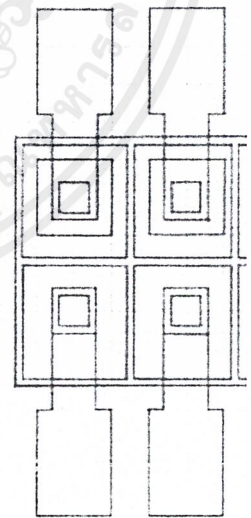
รูปที่ 3.22 แสดงโครงสร้าง E1.1 และ E1.2



รูปที่ 3.23 แสดงโครงสร้าง E2.1 และ E2.2

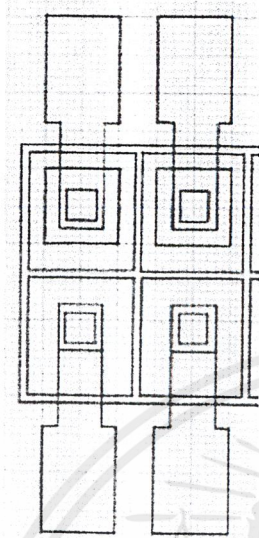


รูปที่ 3.24 แสดงโครงสร้าง E3.1 และ E3.2

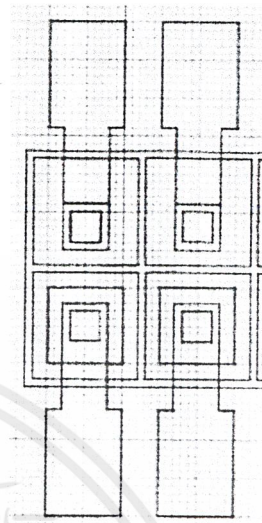


รูปที่ 3.25 แสดงโครงสร้าง E4.1 และ E4.2

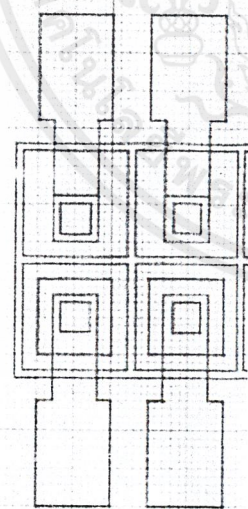
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



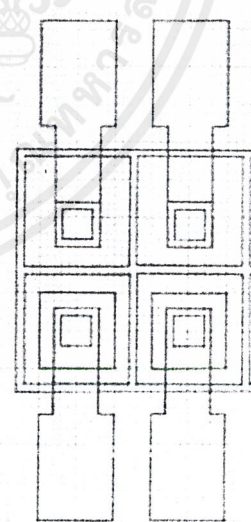
รูปที่ 3.26 แสดง โครงสร้าง E5.1 และ E5.2



รูปที่ 3.27 แสดง โครงสร้าง F1.1 และ F1.2

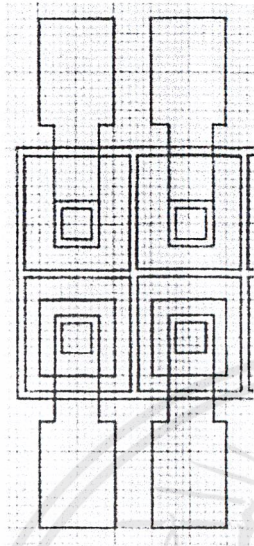


รูปที่ 3.28 แสดง โครงสร้าง F2.1 และ F2.2

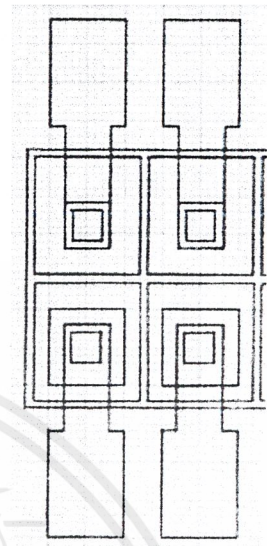


รูปที่ 3.29 แสดง โครงสร้าง F3.1 และ F4.2

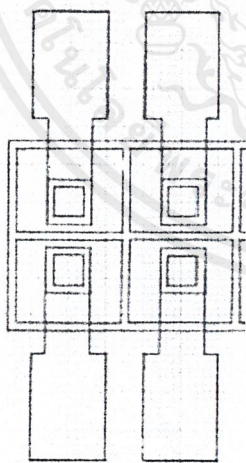
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



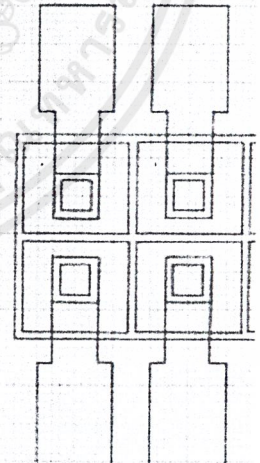
รูปที่ 3.30 แสดงโครงสร้าง F4.1 และ F4.2



รูปที่ 3.31 แสดงโครงสร้าง F5.1 และ F5.2

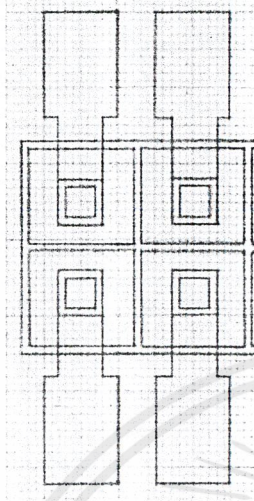


รูปที่ 3.32 แสดงโครงสร้าง G1.1 และ G1.2

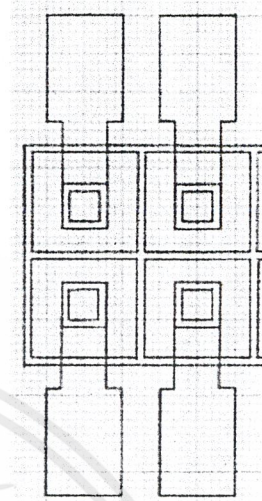


รูปที่ 3.34 แสดงโครงสร้าง G2.1 และ G2.2

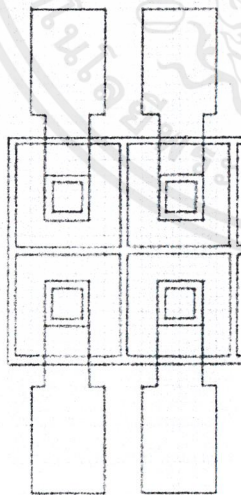
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



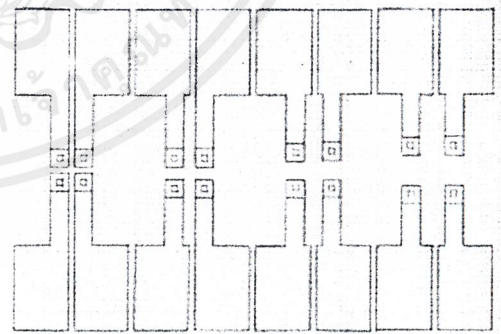
รูปที่ 3.35 แสดงโครงสร้าง G3.1 และ G3.2



รูปที่ 3.36 แสดงโครงสร้าง G4.1 และ G4.2

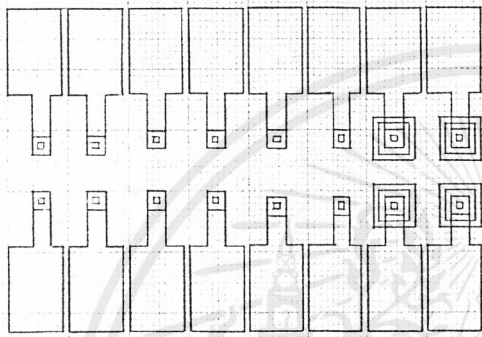


รูปที่ 3.37 แสดงโครงสร้าง G5.1 และ G5.2

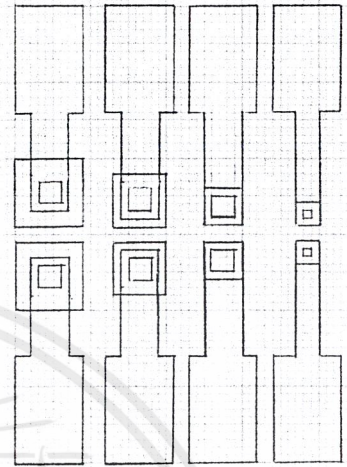


รูปที่ 3.38 แสดงโครงสร้าง H1

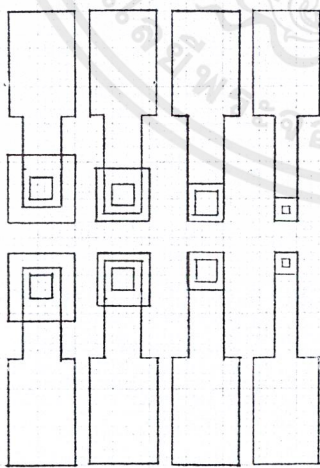
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



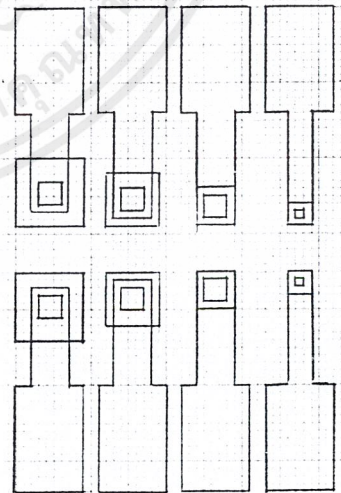
รูปที่ 3.39 แสดง โครงสร้าง H2



รูปที่ 3.40 แสดง โครงสร้าง I1

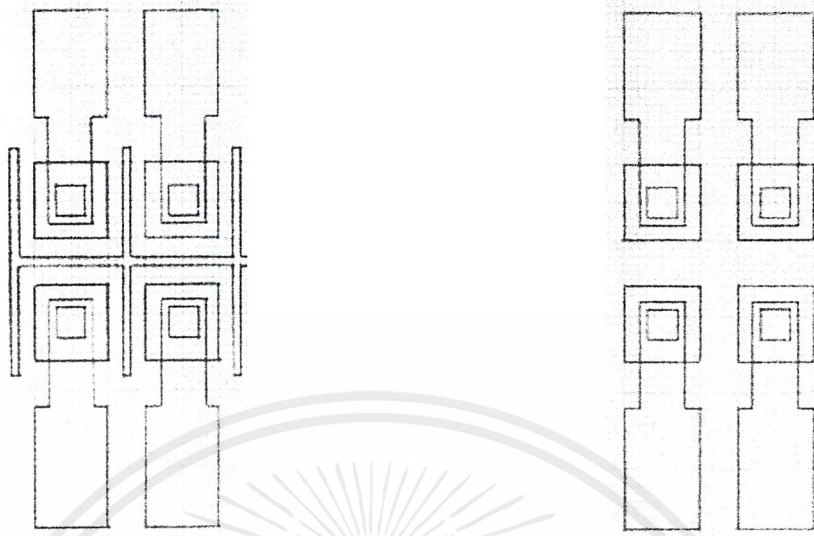


รูปที่ 3.41 แสดง โครงสร้าง I2



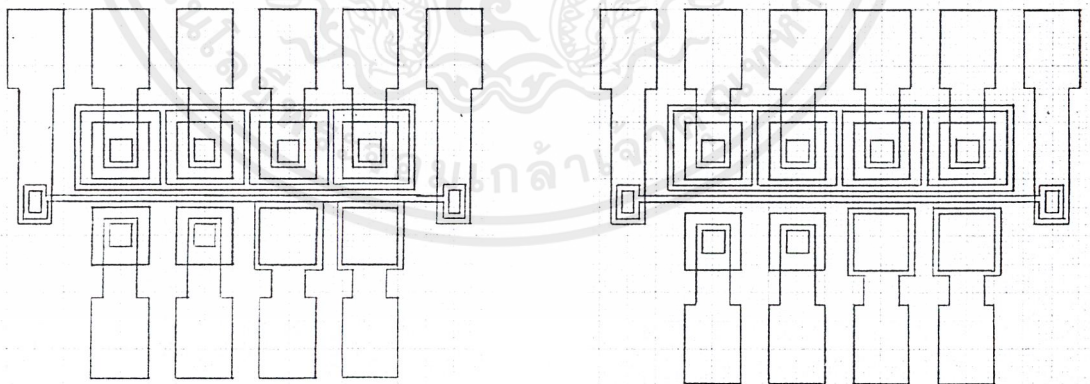
รูปที่ 3.42 แสดง โครงสร้าง I3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 แสดงโครงสร้าง J1.1 และ J1.2

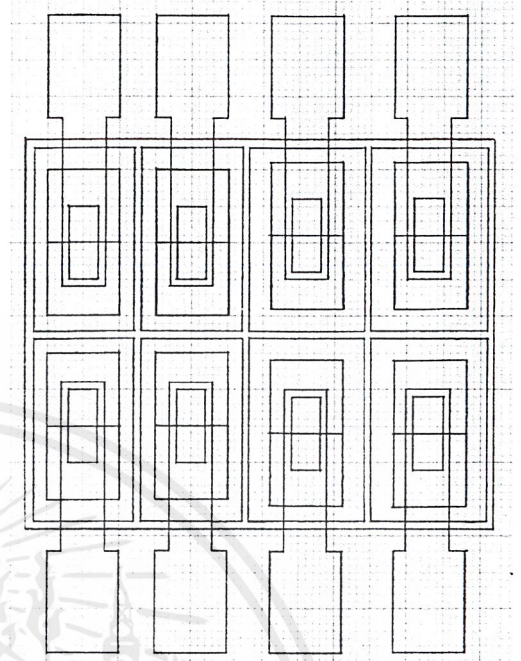
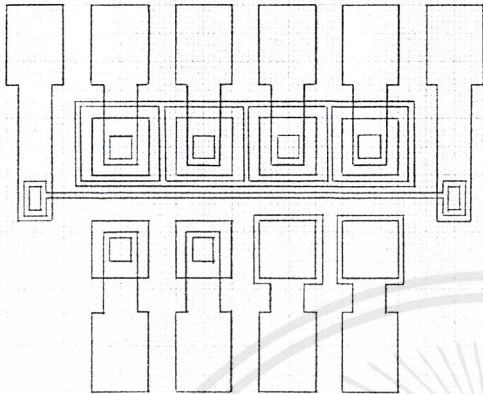
รูปที่ 3.44 แสดงโครงสร้าง J2.1 และ J2.2



รูปที่ 3.45 แสดงโครงสร้าง K1.1 และ K1.2

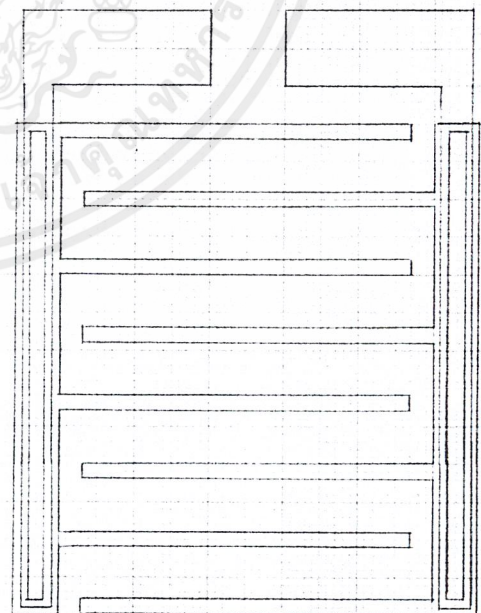
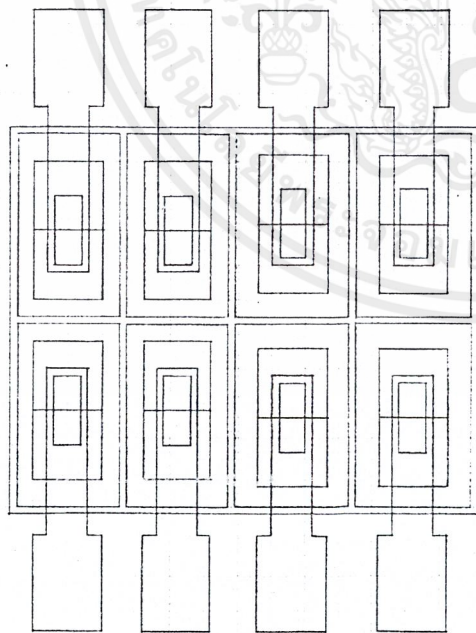
รูปที่ 3.46 แสดงโครงสร้าง K2.1 และ K2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.47 แสดงโครงสร้าง K3.1 และ K3.2

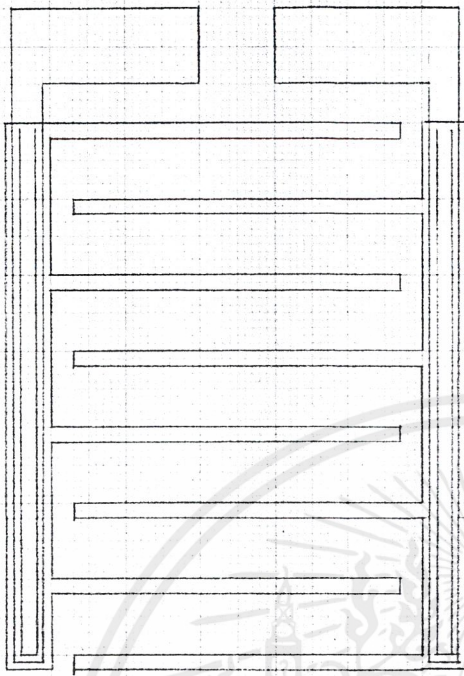
รูปที่ 3.48 แสดงโครงสร้าง L1



รูปที่ 3.49 แสดงโครงสร้าง L2

รูปที่ 3.50 แสดงโครงสร้าง M1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.51 แสดง โครงสร้าง M2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ขบวนการสร้าง

#### 4.1 การเตรียมแผ่นฐานรองพื้นฐาน

สำหรับการทดลองครั้งนี้เริ่มต้นจากการเตรียมแผ่นซิลิกอนระนาบ (111) สภาพด้านทาน 120-150 โอห์ม-เซนติเมตร

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionization water)
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรด  $\text{HNO}_3$  10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

การ Slice etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

#### 4.2 ขบวนการออกซิเดชัน

ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี และยังใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น

การสร้างชั้น  $\text{SiO}_2$  บนแผ่นผลึกซิลิกอน ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

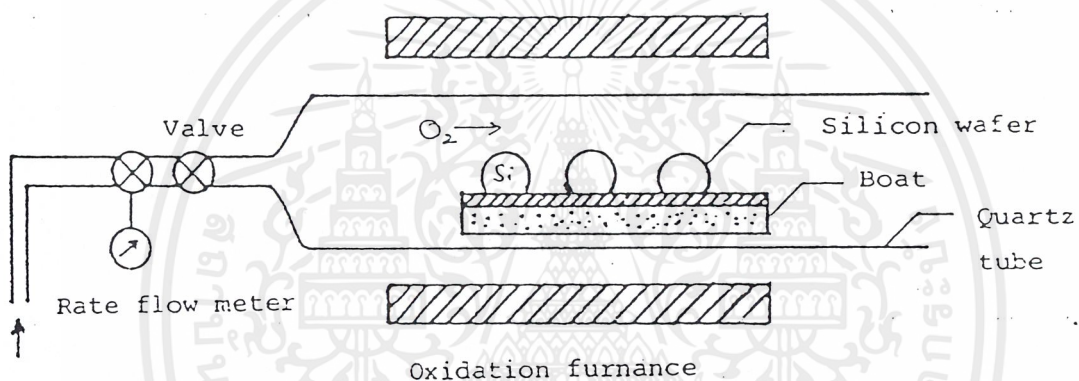
- 1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)
- 2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

#### 4.2.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของซิลิกอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนแห้ง ที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมของซิลิกอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งมีสมการเคมีดังนี้



สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกซิเดชันแบบนี้ แสดงดังรูปที่ 4.1

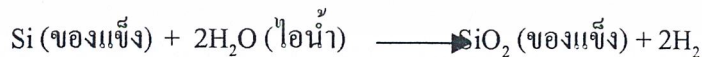


รูปที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในขบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง

ความหนาของชั้น SiO<sub>2</sub> จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในเตา และช่วงเวลาของการปล่อยให้เกิดปฏิกิริยา

#### 4.2.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งมีปฏิกิริยาทางเคมีแสดงได้โดยสมการ



ปฏิกิริยาการออกซิเดชันแบบชื้นนี้จะเกิดได้รวดเร็วกว่าแบบแห้ง กล่าวคือที่อุณหภูมิและเวลาเท่าๆกัน จะได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่หนากว่า โดยในการทดลองครั้งนี้จะทำการสร้างชั้นออกไซด์โดยใช้วิธี Dry:Wet:Dry = 3:1:2 ชั่วโมง

- Dry Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1200 cc/min ที่อุณหภูมิ 1150 °C
- Wet Oxidation ด้วย O<sub>2</sub> 1000 cc/min ที่อุณหภูมิ 1150 °C

ตารางที่ 4.1 แสดงสีของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ

ความหนา ( $^{\circ}\text{A}$ )	สี
500	น้ำตาลอ่อน
700	น้ำตาล
1000	ม่วงเข้มถึงแดงม่วง
1200	ฟ้า
1500	น้ำเงินอ่อนถึงเทาน้ำเงิน
1700	น้ำเงินถึงเหลือง-เขียวอ่อน
2000	ทองถึงเหลือง
2200	ทองค่อนข้างเหลืองแกมส้ม
2500	ส้มถึงเขียวอ่อน
2700	แดงม่วง
3000	น้ำเงินถึงม่วงน้ำเงิน
3100	น้ำเงิน
3200	น้ำเงินถึงน้ำเงินเขียว
3400	เขียวอ่อน
3500	เขียวถึงเหลืองเขียว
3600	เหลืองเขียว
3700	เขียวเหลือง
3900	เหลือง
4100	ส้มอ่อน
4200	ชมพูอ่อน
4400	ม่วงแดง
4600	แดงม่วง
4700	ม่วง
4800	น้ำเงินม่วง
4900	น้ำเงิน
5000	น้ำเงินเขียว
5200	เขียว
5400	เหลืองเขียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5600	เขียวเหลือง
5700	เหลืองถึงเทาอ่อน
5800	ส้มอ่อนหรือเหลืองถึงชมพู
6000	ชมพูอ่อน
6300	ม่วงแดง
6800	คล้ายเทา
7200	น้ำเงินเขียวถึงเขียว
7700	เหลืองอ่อน
8000	ส้ม
8200	ชมพู
8500	แดงม่วงอ่อน
8600	ม่วง
8700	น้ำเงินม่วง
8900	น้ำเงิน
9200	น้ำเงินเขียว
9500	เหลืองเขียว
9700	เหลืองถึงเหลืองอ่อน
9900	ส้ม
1.00 $\mu\text{m}$	ชมพูอ่อน
1.02 $\mu\text{m}$	ม่วงแดง
1.05 $\mu\text{m}$	แดงม่วง
1.06 $\mu\text{m}$	ม่วง
1.07 $\mu\text{m}$	น้ำเงินม่วง
1.10 $\mu\text{m}$	เขียว

#### 4.3 ขบวนการเปิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้า (Photolithography)

ภายหลังจากผ่านขบวนการออกซิเดชันจะเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เคลือบผิวซิลิกอนทั้งหมดเพื่อป้องกันไม่ให้อะตอมสารใดเข้าไปถึงซิลิกอนได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเปิดช่องออกไซด์นี้ออกเรียกขบวนการนี้ว่า Photolithography หรือ Photo-etching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการดังกล่าวนี้จะต้องเคลือบผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยน้ำยาที่ไวต่อแสง (Photo-resist) โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า สปินเนอร์ (Spinner) โดยสารไวต่อแสงที่ใช้จะ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1 สารไวแสงแบบลบ (Negative Photo Resist) สารไวต่อแสงชนิดนี้ เมื่อถูกแสงจะเกาะติดกับผิวของแผ่นผลึกแน่น ไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง (Developer)

2 สารไวแสงแบบบวก (Positive Photo Resist) จะมีคุณสมบัติตรงข้ามกับแบบที่ 1 กล่าวคือ เมื่อถูกแสงจะมีคุณสมบัติละลายความเหนียว และหลุดออกจากผิวแผ่นผลึกได้โดยง่าย เมื่อล้างด้วยน้ำยา Developer

สำหรับขบวนการ Photo-etching มีดังนี้ คือ

- อบแผ่น ไล่ความชื้นที่  $120^{\circ}\text{C}$
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) แล้ว spin ที่ 5000 rpm
- อบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  30 นาที (Prebake)
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
  - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
  - จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
  - จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
  - เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$
- อบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  10 นาที (Postbake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  30 นาที

การใช้สารละลายเคมีสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide Etching)

- จุ่มในสารละลาย Buffer
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

### กระบวนการลอกฟิล์ม

สารไวแสงที่ถูกแสงและยังคงค้างอยู่บนแผ่นฟลิกซิกอนสามารถลอกทิ้งได้ โดยนำไปต้มในกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) รายละเอียดแสดงได้ดังนี้

- ต้มใน  $H_2SO_4$  แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มใน  $H_2SO_4$  แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

### การทำความสะอาดผิวหน้า

เพื่อขจัดคราบไขมันจากน้ำยาไวแสงที่ตกค้างอยู่ มีรายละเอียดดังนี้

- ต้มใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

### การ Slice Etching

- จุ่มสารละลาย HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

เมื่อทำการเปิดช่องออกไซด์แล้ว ต่อไปก็เป็นขั้นตอนการแพร่สารเจือ

## 4.4 ขบวนการแพร่สารเจือ (Diffusion)

### 4.4.1 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วน $P^+$

โดยมีแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือ คือ แผ่นของแข็ง BN ทำการ activate เพื่อให้ได้โบรอนไตรออกไซด์ก่อน โดยการนำ BN ไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 700 CC/นาที่ ที่อุณหภูมิ 980°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการ deposition ที่อุณหภูมิ 980 °C นาน 30 นาที จากนั้นลอกชั้น Boron glass โดยการจุ่มใน HF

### 4.4.2 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วน $N^+$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือ คือ แผ่นของแข็ง  $\text{SiP}_2\text{O}_7$  (PH1000) ส่วนรายละเอียดอื่นมีดังนี้

- นำแผ่นซิลิกอนวางสลับกับแผ่น PH 1000 ในเตาแพร่สารที่มีอุณหภูมิ  $970\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีก๊าซไนโตรเจนไหลผ่านในอัตรา 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เรียกวิธีนี้ว่า phosphorous depositica

- นำแผ่นซิลิกอนเข้าไปในเตาแพร่สารที่มีอุณหภูมิ  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศของไนโตรเจน เรียกว่า phosphorous drive-in

#### 4.4.3 การแพร่อะตอมทองคำบริสุทธิ์เพื่อสร้างส่วน i

การแพร่อะตอมของทองคำจะกระทำที่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอน เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการแพร่ทองคำสูง การควบคุมค่า Solid Solubility จึงต้องควบคุมด้วยอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องทำการแพร่ (Diffuse) ที่อุณหภูมิไม่สูงนัก และเนื่องจากอะตอมของทองคำจะเกาะเกี่ยวกับอะตอมซิลิกอนโดยการแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม ไม่ได้เข้าไปอยู่ในโคเวเลนต์ ดังนั้นภายหลังจากการแพร่จึงต้องมีการ Quenching ซึ่งก็คือ การดึงแผ่นผลึกซิลิกอนที่เคลือบด้านหลังด้วยทองคำออกมาอย่างรวดเร็ว มิฉะนั้นแล้วอะตอมของทองคำจะเข้าไปแทรกตัวกับอะตอมของซิลิกอนได้น้อย กล่าวคือ จะยังคงอยู่ที่ด้านหลังของแผ่นผลึก

สำหรับขั้นตอนในการแพร่ทองคำมีดังนี้

- กัดออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึกออกโดยใช้น้ำยา buffer
- เคลือบทองคำบริสุทธิ์ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยอุปกรณ์เคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Evaporator) ที่บรรยากาศ  $3 \times 10^{-6}$  มม.ของปรอท (Torr)
- นำแผ่นผลึกใส่ในเตาแพร่สารที่มีอุณหภูมิ  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

#### 4.4.4 ขบวนการสร้างขั้วโลหะ (Metallization)

- เปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส
- เคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียม โดยใช้อุปกรณ์ vacuum evaporate ที่ความดัน  $2 \times 10^{-6}$
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ)
- อบฟิล์มที่  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  20 นาที (prebake)
- Alignment expose
- Develop ฟิล์มโดย
- AZ Develop แก้วที่หนึ่ง 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- AZ Develop แก้วที่หนึ่ง 30 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าด้วยไนโตรเจน

- อบฟิล์มที่ 85 °C 20 นาที (Postbake)

การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Aluminium etching)

- จุ่มในสารละลาย Aluminium etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง 1 นาที
- เป่าด้วยไนโตรเจน

กระบวนการ Sintering

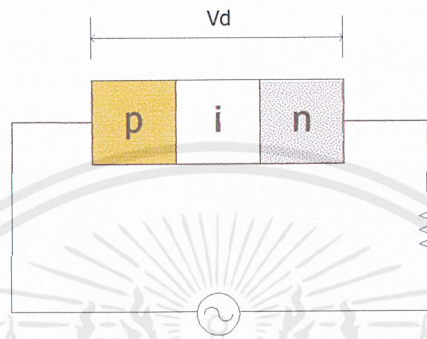
ทำการ Sintering เพื่อให้ได้ส่วนสัมผัสที่เป็นโอห์มิก โดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจน มีรายละเอียดดังนี้

- Dry N<sub>2</sub> 1000 cc/min 12 นาที

## บทที่ 5

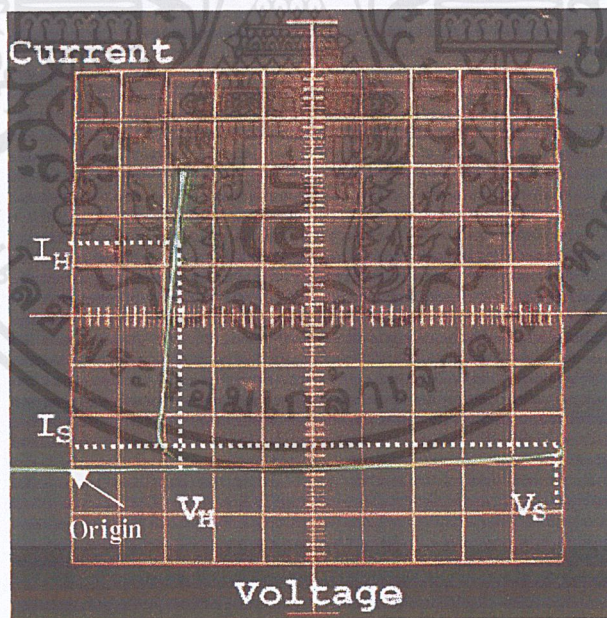
### ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

#### 5.1 การทดลองวัดคุณสมบัติ I-V ของ PIN ไดโอด



รูปที่ 5.1 แสดงการวัดคุณสมบัติ I-V ของ PIN ไดโอด

พารามิเตอร์ที่เราต้องการวัดจาก PIN ไดโอดมี 4 ค่า คือ  $I_S$ ,  $I_H$ ,  $V_S$ ,  $V_H$

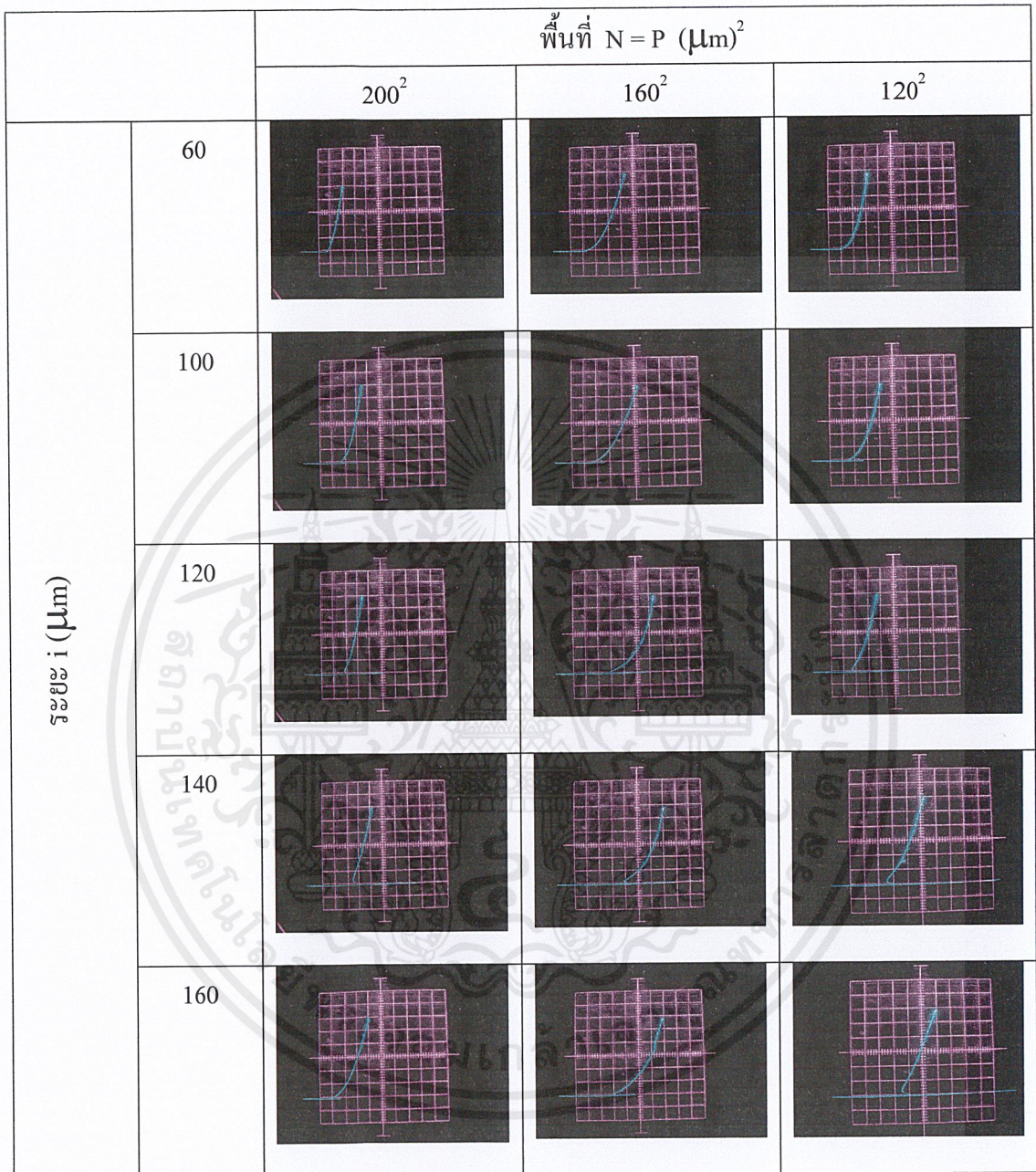


รูปที่ 5.2 แสดงค่า  $I_S$ ,  $I_H$ ,  $V_S$ ,  $V_H$

##### 5.1.1 ศึกษาผลของระยะ $i$ ที่มีต่อ $I_S$ , $I_H$ , $V_S$ , $V_H$

เราจะทำการเปรียบเทียบโดย ให้พื้นที่  $n =$  พื้นที่  $P = 120^2, 160^2, 200^2$  ( $\mu\text{m}$ )<sup>2</sup> และทำการเปลี่ยนแปลงค่าของระยะ  $i$  เป็น 60, 100, 120, 140, 160  $\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

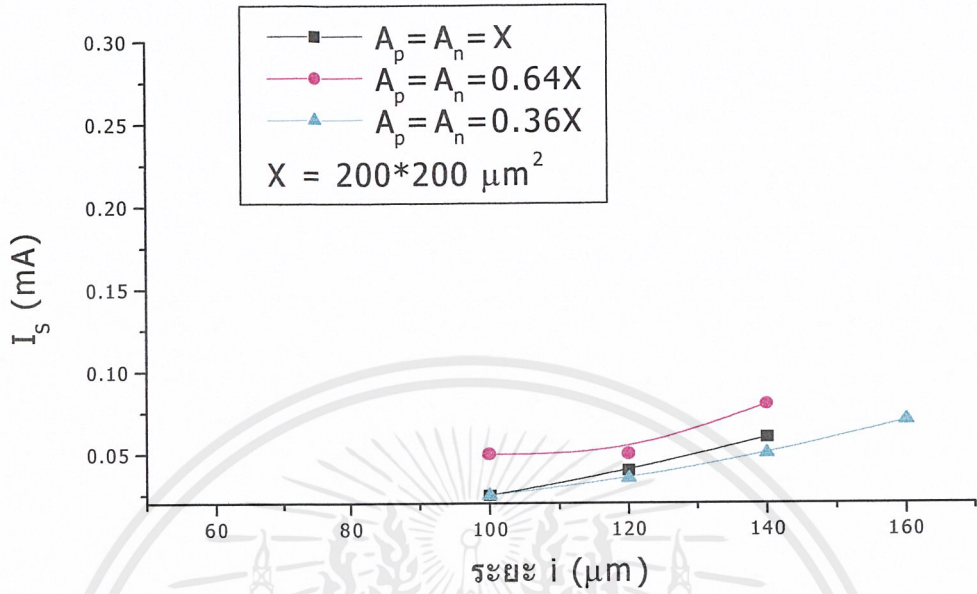


รูปที่ 5.3 แสดง I-V Characteristics ของ PIN ไดโอด

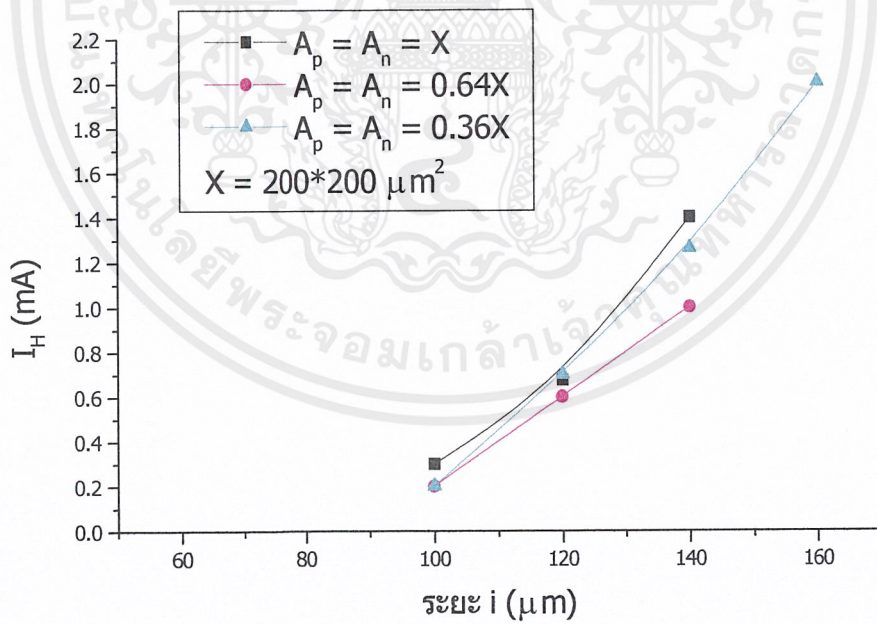
สเกล V : 1 mA/DIV , H : 2 V/DIV

current bias = 6 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

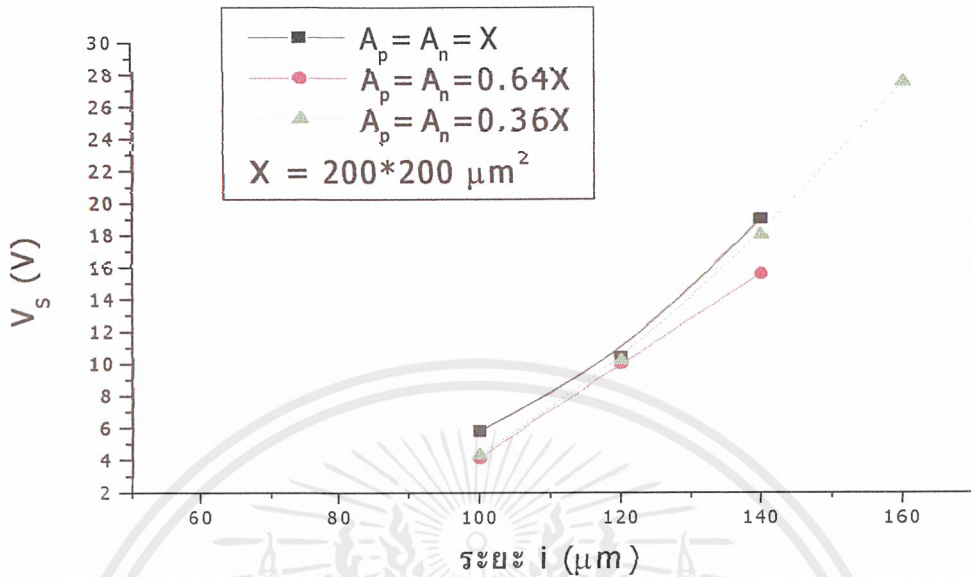


รูปที่ 5.4 แสดงค่า  $I_s$  ที่ระยะ  $i$  ต่างๆกัน โดยพื้นที่  $P =$  พื้นที่  $N$

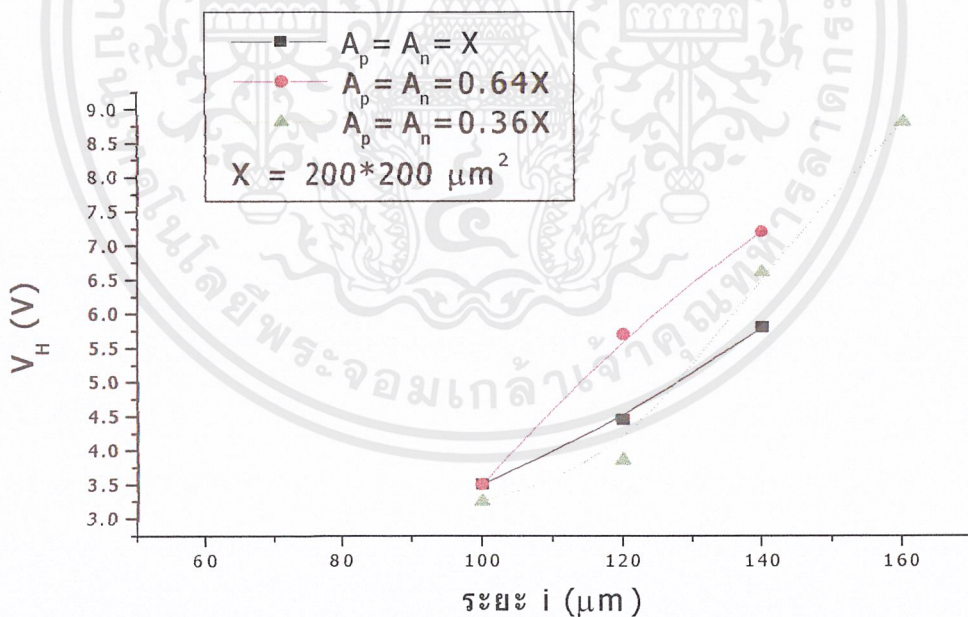


รูปที่ 5.5 แสดงค่า  $I_H$  ที่ระยะ  $i$  ต่างๆกัน โดยพื้นที่  $P =$  พื้นที่  $N$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงค่า  $V_S$  ที่ระยะ  $i$  ต่างๆกัน โดยพื้นที่ P = พื้นที่ N



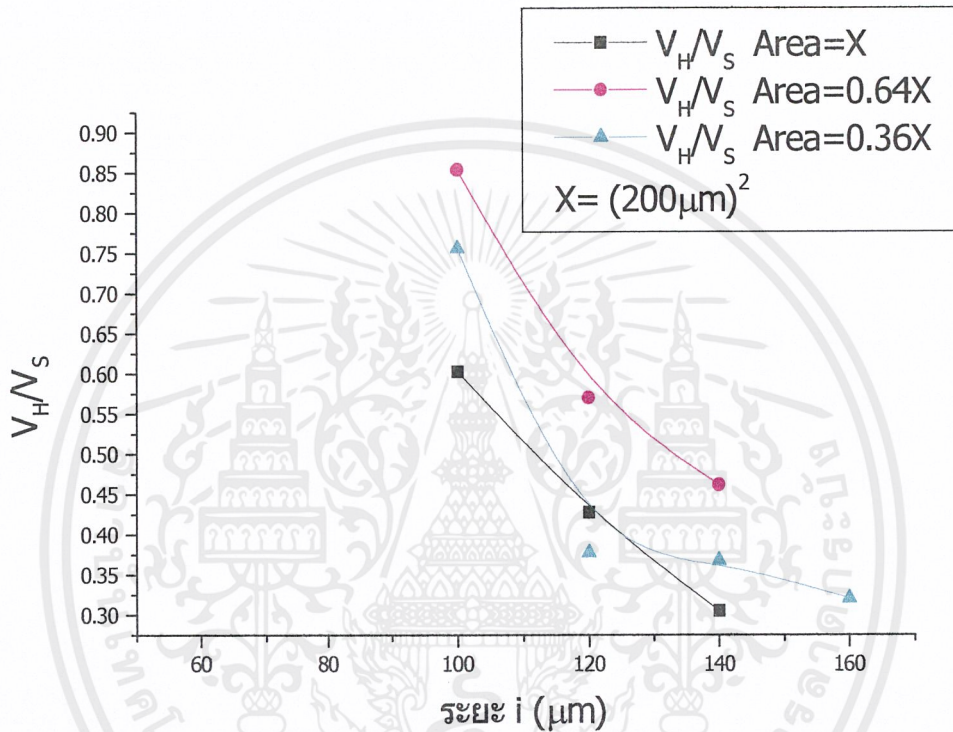
รูปที่ 5.7 แสดงค่า  $V_H$  ที่ระยะ  $i$  ต่างๆกัน โดยพื้นที่ P = พื้นที่ N

จากการสังเกตกราฟ รูปที่ 5.4 ถึง 5.7 จะสังเกตเห็นได้ว่า กราฟรูปที่ 5.4 ซึ่งเป็นกราฟของ  $I_S$  เทียบกับ ระยะ  $i$  ค่าของ  $I_S$  เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมาก แทบจะคงที่แม้จะเปลี่ยนพื้นที่ของ P กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N ไปพร้อมกันด้วยก็ตาม ส่วน  $V_S$ ,  $V_H$  และ  $I_H$  เมื่อระยะ  $i$  เพิ่มมากขึ้น ค่าต่างๆเหล่านี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน แต่หากเราสนใจเพียงค่า  $V_S$  เราจะสามารถสรุปได้ว่า

$$V_S = f(i)$$

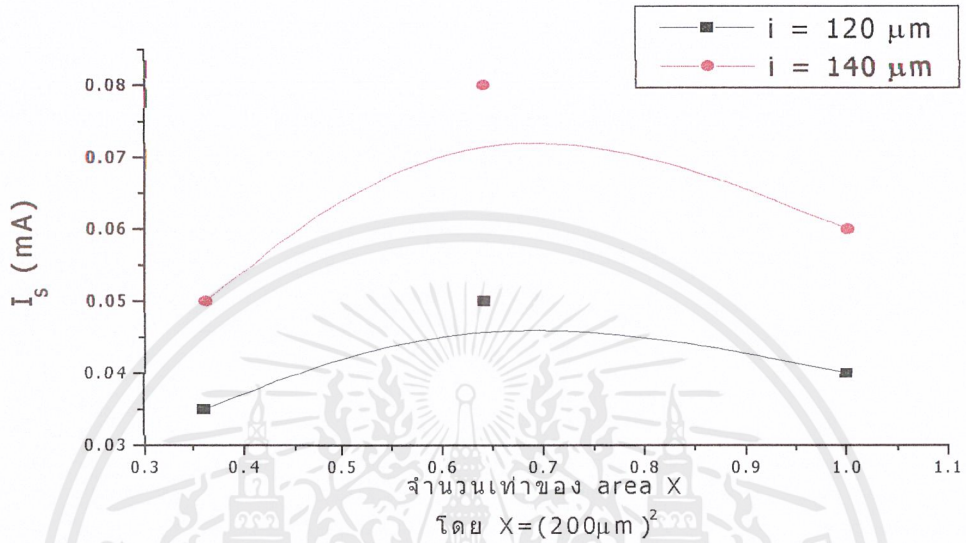


รูปที่ 5.8 แสดงค่า  $V_H/V_S$  ที่พื้นที่ P และ N ต่างๆ โดยเปลี่ยนค่าระยะ  $i$

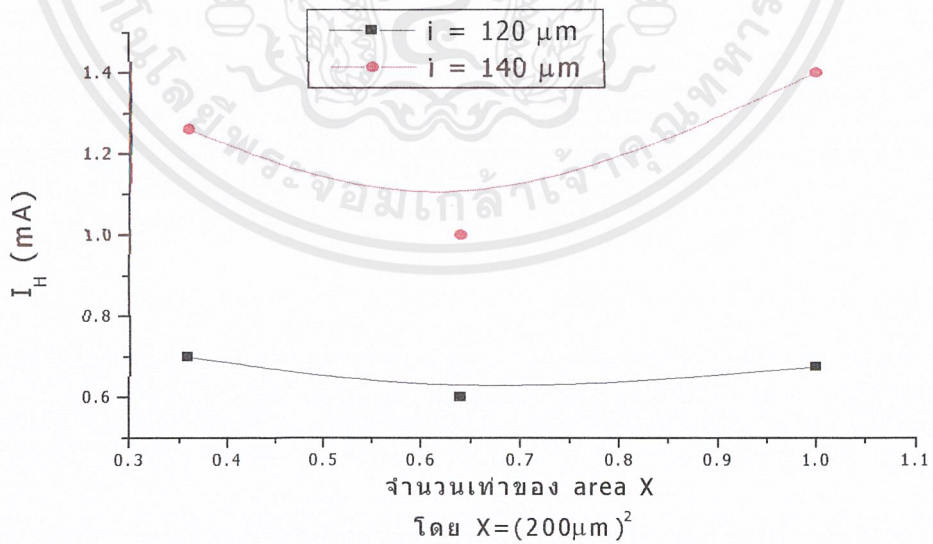
จากกราฟรูปที่ 5.8 สามารถสรุปได้ว่า ที่พื้นที่ P และ N เท่าๆกัน อัตราส่วน  $V_H/V_S$  จะมีค่าลดลงเมื่อระยะ  $i$  มีค่ามากขึ้น

### 5.1.2 ศึกษาผลของขนาด (พื้นที่) ของส่วน P และ ส่วน N ที่มีต่อ $I_s$ , $I_H$ , $V_s$ , $V_H$

#### 5.1.2.1 เมื่อพื้นที่ของ N และ P มีค่าเท่ากัน

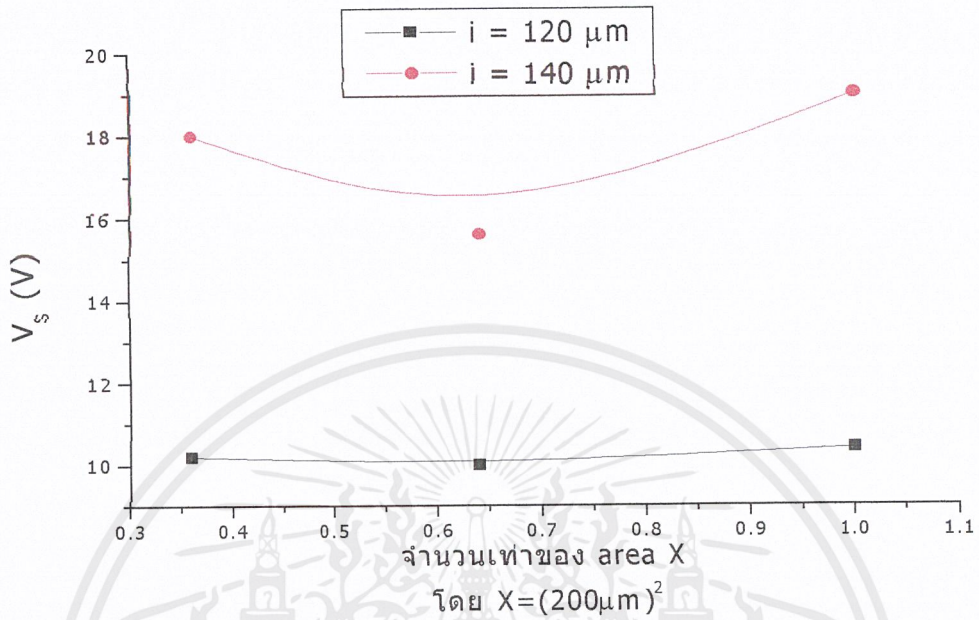


รูปที่ 5.9 แสดงค่า  $I_s$  ที่ระยะ  $i$  และพื้นที่ P และ N เท่ากันค่าต่างๆ

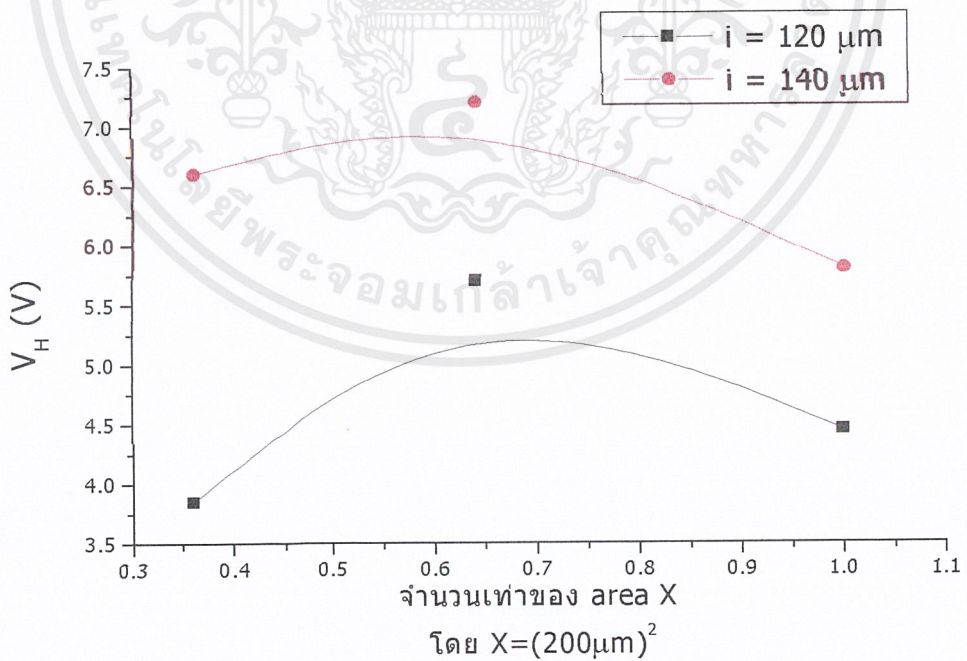


รูปที่ 5.10 แสดงค่า  $I_H$  ที่ระยะ  $i$  และพื้นที่ P และ N เท่ากันค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

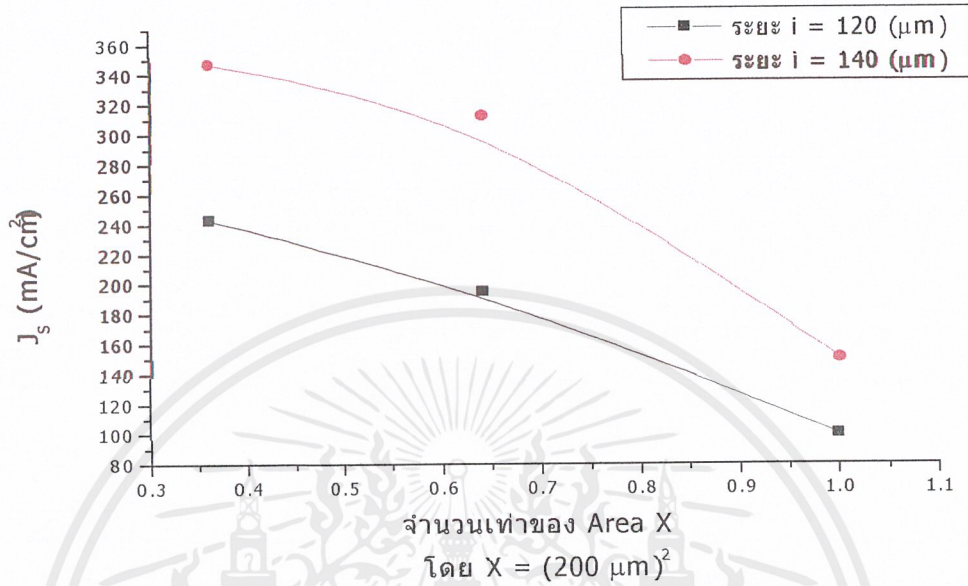


รูปที่ 5.11 แสดงค่า  $V_s$  ที่ระยะ  $i$  และพื้นที่ P และ N เท่ากันค่าต่างๆ



รูปที่ 5.12 แสดงค่า  $V_H$  ที่ระยะ  $i$  และพื้นที่ P และ N เท่ากันค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



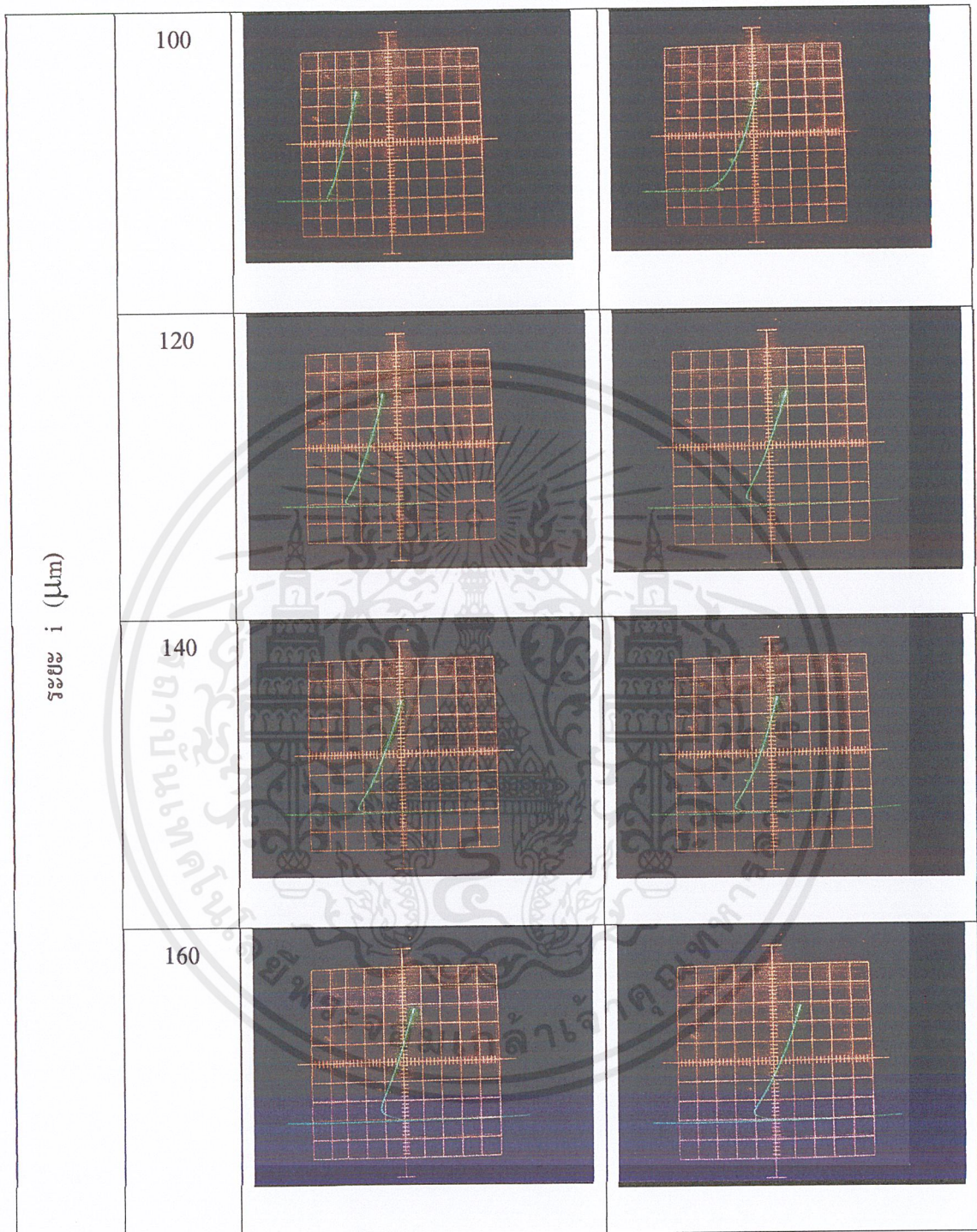
รูปที่ 5.13 แสดงค่า  $J_s$  เทียบกับพื้นที่ โดยที่ระยะ  $i = 120, 140 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 5.9 ถึง 5.12 ไม่สามารถสรุปได้ เพราะเราได้ออกแบบไว้เพียงแค่ 3 ค่า แต่จากรูปที่ 5.13 เราสามารถสรุปได้ว่า ค่า  $J_s$  จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของพื้นที่ P และ N โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อพื้นที่ P และ N มีค่าเพิ่มขึ้น

#### 5.1.2.1 เมื่อพื้นที่ของ N ไม่เท่ากับ P

		เมื่อพื้นที่ $N = 200^2 (\mu\text{m})^2$ และพื้นที่ $P = 120^2 (\mu\text{m})^2$	เมื่อพื้นที่ $P = 200^2 (\mu\text{m})^2$ และพื้นที่ $N = 120^2 (\mu\text{m})^2$
ระยะ $i (\mu\text{m})$	60		

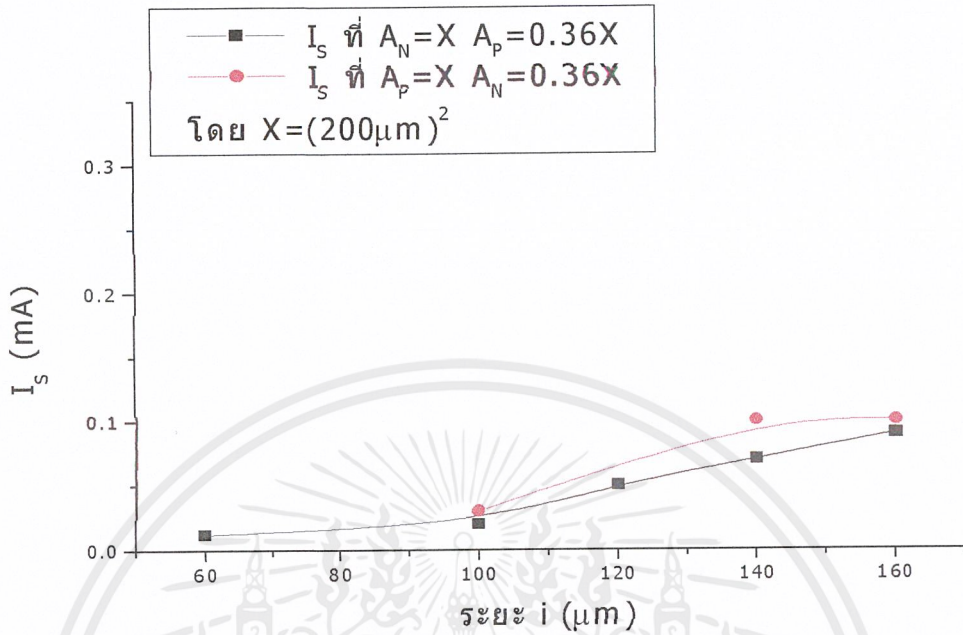
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



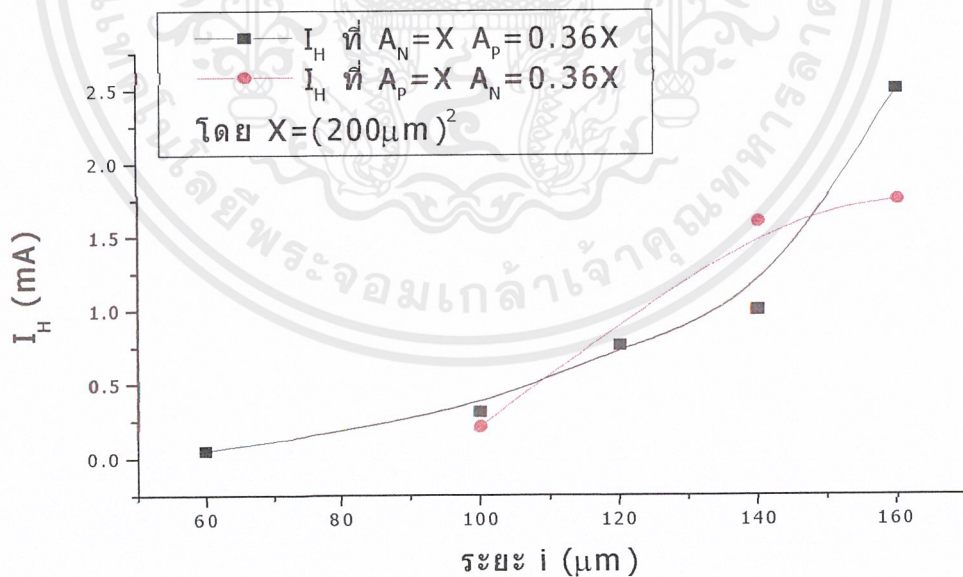
รูปที่ 5.14 แสดง I-V characteristics ของ PIN ไดโอดที่มีระยะ  $i$  ต่างๆกัน โดยให้ fix พื้นที่ P หรือ N =  $(200\mu\text{m})^2$  แล้วเปลี่ยนพื้นที่ของอีกส่วนเป็น  $(120\mu\text{m})^2$

V : 1 mA/DIV H : 2 V/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

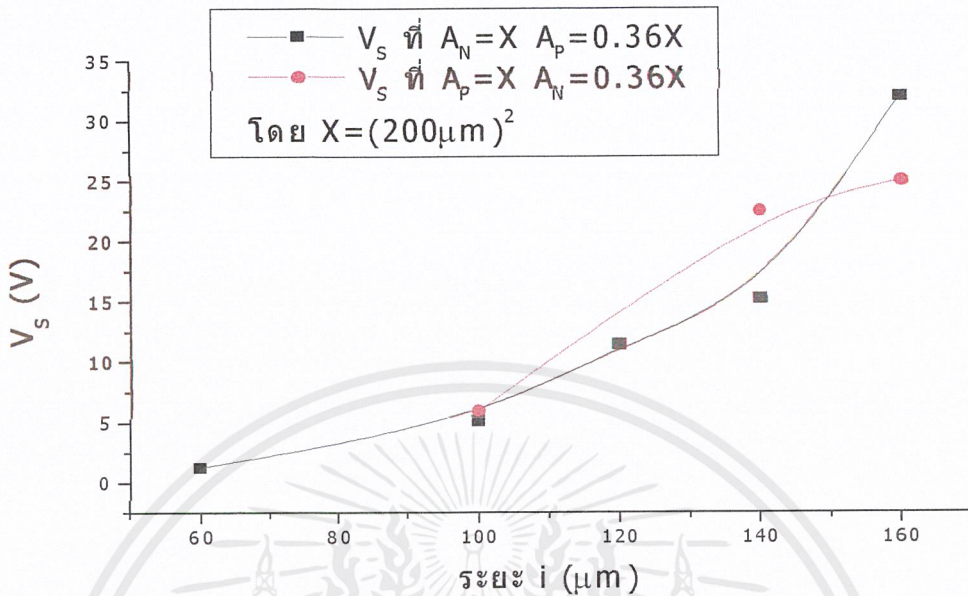


รูปที่ 5.15 แสดงค่า  $I_s$  ที่เกิดจากการเปลี่ยนระยะ  $i$  โดย fixed ค่าพื้นที่  $N$  หรือ  $P$  ไว้  $= (200 \mu\text{m})^2$

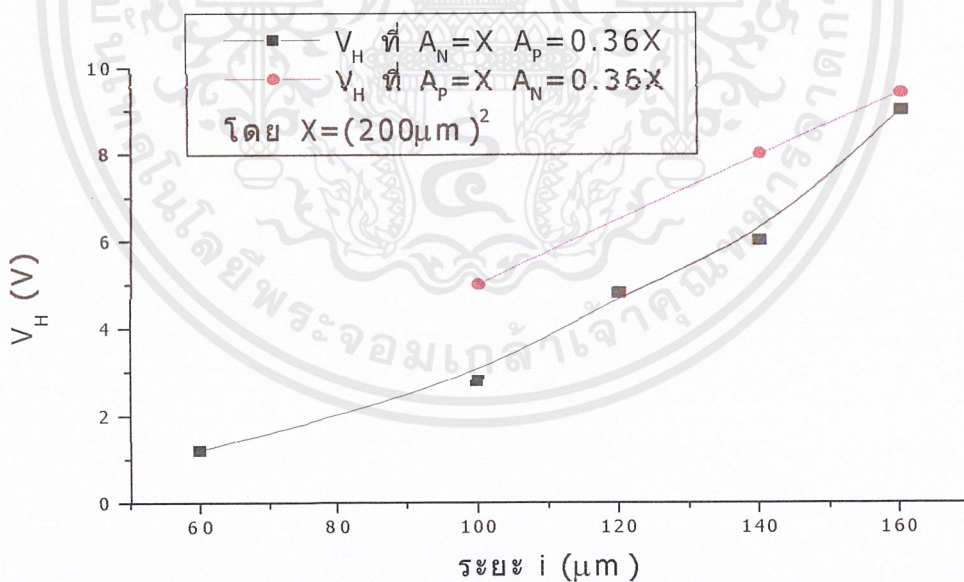


รูปที่ 5.16 แสดงค่า  $I_H$  ที่เกิดจากการเปลี่ยนระยะ  $i$  โดย fixed ค่าพื้นที่  $N$  หรือ  $P$  ไว้  $= (200 \mu\text{m})^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 แสดงค่า  $V_S$  ที่เกิดจากการเปลี่ยนระยะ  $i$  โดย fixed ค่าพื้นที่  $N$  หรือ  $P$  ไว้  $= (200\mu\text{m})^2$

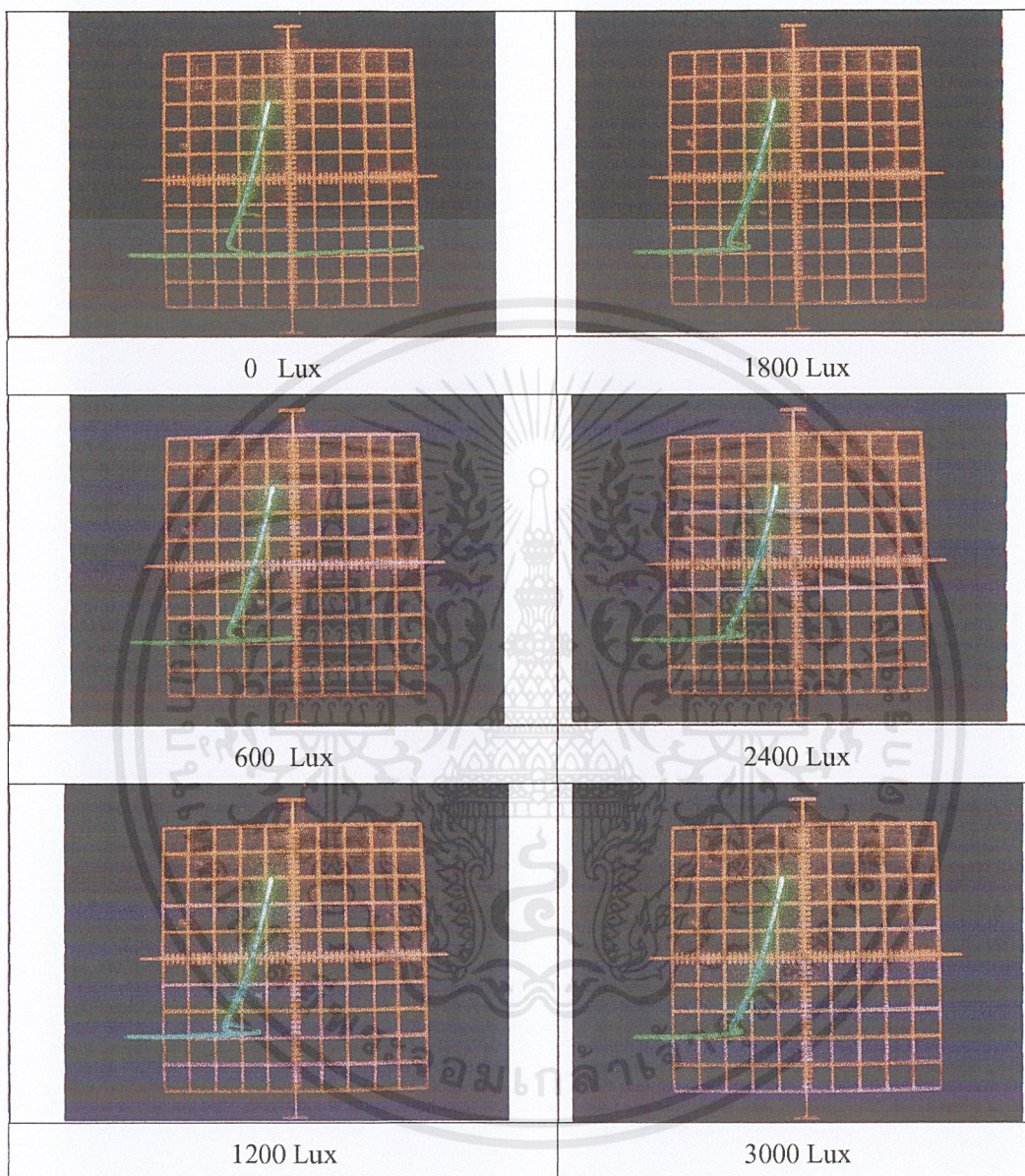


รูปที่ 5.18 แสดงค่า  $V_H$  ที่เกิดจากการเปลี่ยนระยะ  $i$  โดย fixed ค่าพื้นที่  $N$  หรือ  $P$  ไว้  $= (200\mu\text{m})^2$

จากกราฟ 5.15 ถึง 5.18 สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนขนาดของพื้นที่  $N$  ลดลงมีผลต่อ  $V_H$  มากกว่าการเปลี่ยนขนาดของพื้นที่  $P$  ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติ $I_s$ , $I_H$ , $V_s$ , $V_H$ ของ PIN ไดโอด

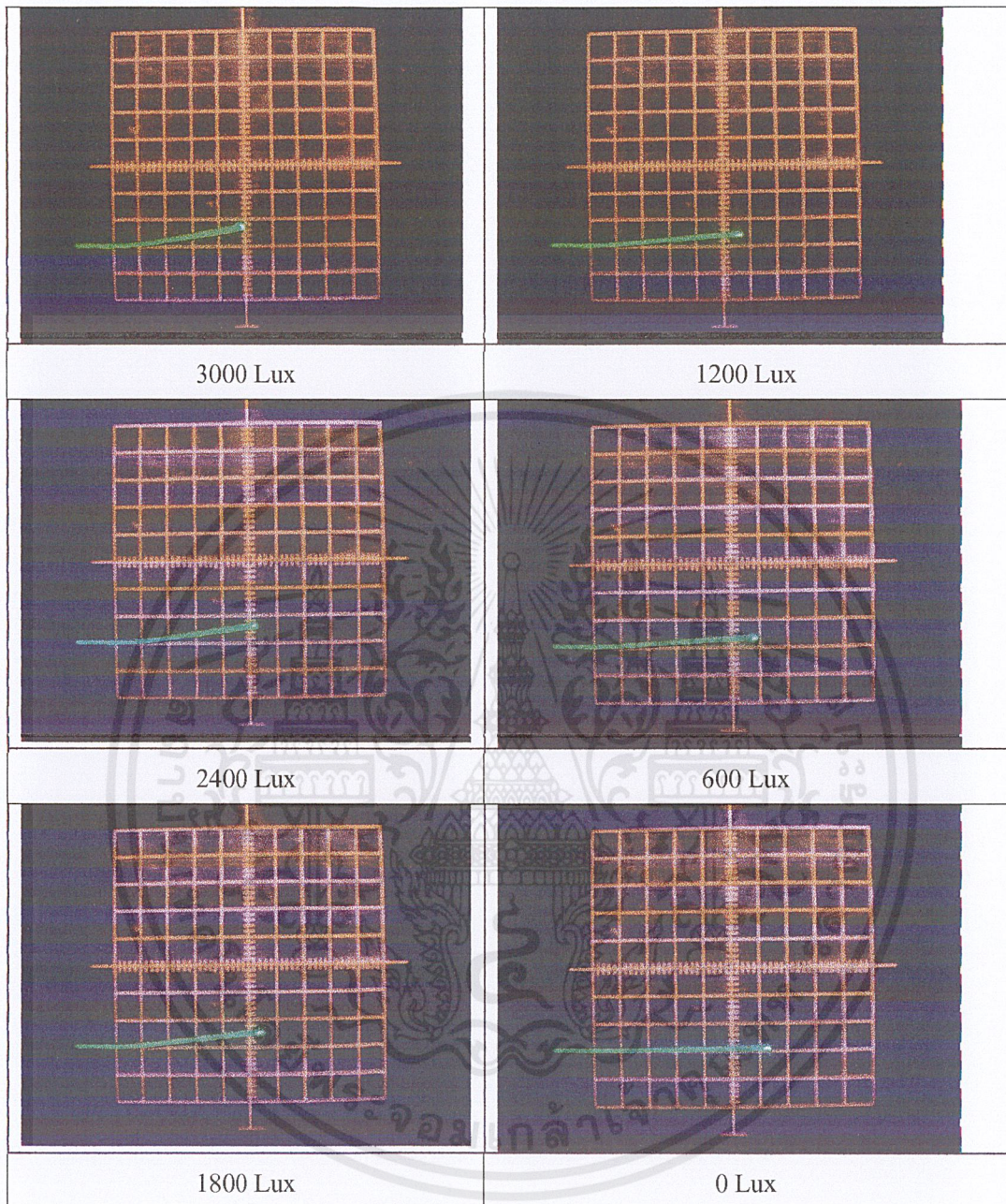


รูปที่ 5.19 I-V Characteristic ของ PIN ไดโอดเมื่อได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ (วัดขณะ on )

(โดยให้พื้นที่  $N = P = (200\mu\text{m})^2$  ระยะ  $i = 140\mu\text{m}$ )

V : 1 mA /DIV H : 2 V/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

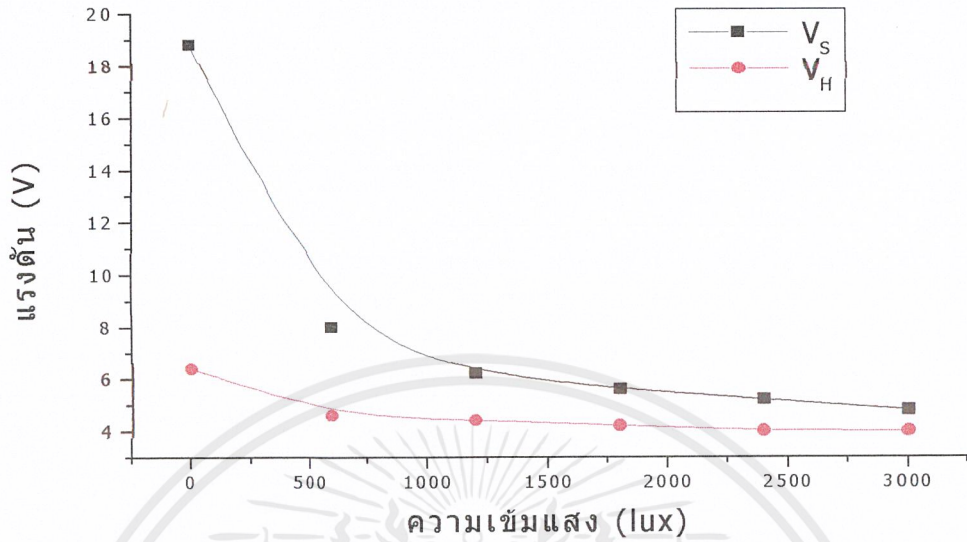


รูปที่ 5.20 I-V Characteristic ของ PIN ไดโอดเมื่อได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ (วัดขณะ off)

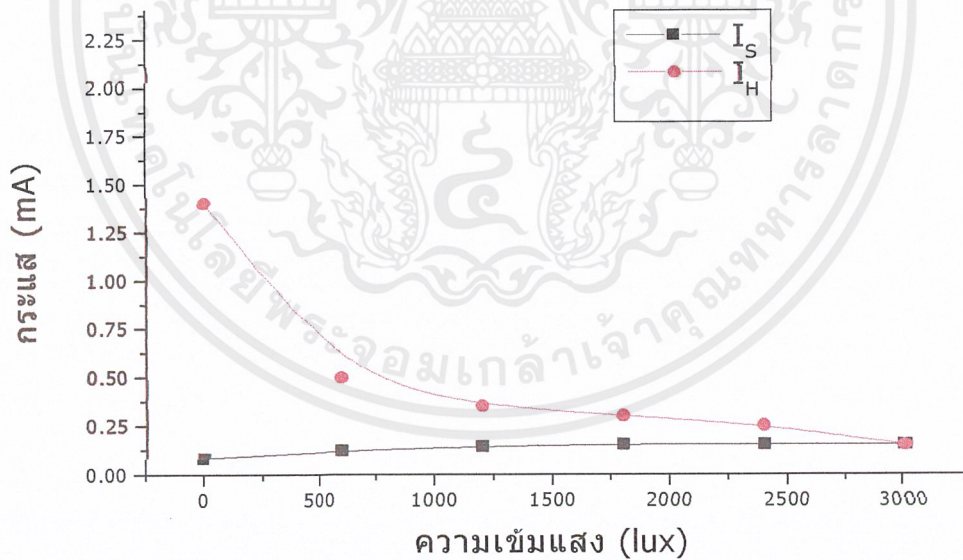
(โดยให้พื้นที่  $N = P = (200\mu\text{m})^2$  ระยะ  $i = 140\mu\text{m}$ )

V : 0.5 mA /DIV    H : 1 V/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อ  $V_S$ ,  $V_H$



รูปที่ 5.22 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อ  $I_S$ ,  $I_H$

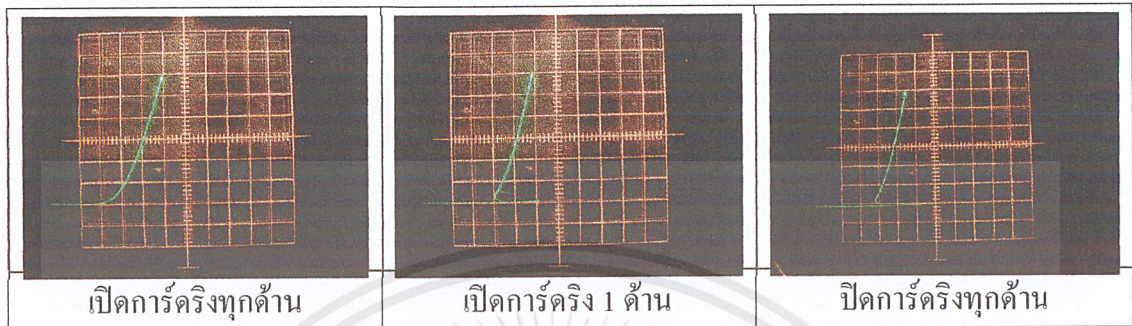
จากรูปที่ 5.21 และ 5.22 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น จะทำให้  $I_H$ ,  $V_S$ ,  $V_H$  มีค่าลดลง แต่  $I_S$  มีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่า

$$V_S = f(\text{ความเข้มแสง})$$

$$I_S = \text{ค่อนข้างคงที่}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 5.1.4 การศึกษาผลของการ์ดริงที่มีต่อคุณสมบัติ $I_s$ , $I_H$ , $V_s$ , $V_H$ ของ PIN ไดโอด



รูปที่ 5.23 แสดงผลของการ์ดริง

(ใช้ พื้นที่  $N = P = 200^2 (\mu\text{m})^2$  ที่ระยะ  $i = 120 \mu\text{m}$ )

$V : 1 \text{ mA/DIV}$     $H : 2 \text{ V/DIV}$

จากรูปที่ 5.23 สามารถสรุปได้ว่าในขณะที่ไม่มีการ์ดริง อาจมีกระแสรั่วที่พื้นผิวอันเกิดเนื่องมาจากสิ่งแปลกปลอมที่มาเกาะติดที่พื้นผิวของแผ่นผลึกซิลิกอน ในบางครั้งอาจมีผลกระทบทำให้ PIN ไดโอดไม่สามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซ์ซึ่งได้ เนื่องจากมีกระแสรั่วมาก ส่วนการมีการ์ดริง จะช่วยป้องกันกระแสรั่วที่พื้นผิวได้ โดยจะบังคับให้กระแสไหลในเนื้อสาร (bulk current) เท่านั้น เราอาจกล่าวได้ว่า  $V_s = f(GU)$

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ในส่วนของการศึกษาระยะ  $i$  ที่มีผลต่อพารามิเตอร์ทั้งสี่ คือ  $I_s$ ,  $I_H$ ,  $V_s$ ,  $V_H$  จะเห็นว่าค่าของ  $I_s$  เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมาก เทียบจะคงที่แม้จะเปลี่ยนพื้นที่ของ  $P$  กับ  $N$  ไปพร้อมกันด้วยก็ตาม ส่วน  $V_s$ ,  $V_H$  และ  $I_H$  เมื่อระยะ  $i$  เพิ่มมากขึ้น ค่าต่างๆเหล่านี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน แต่หากเราสนใจเพียงค่า  $V_s$  เราจะสามารถสรุปได้ว่า แรงดันสวิทซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะ  $i$  หรือก็คือ

$$V_s = f(i)$$

ในส่วนของการศึกษาผลของขนาด (พื้นที่) ของส่วน  $P$  และ ส่วน  $N$  ที่มีต่อ  $I_s$ ,  $I_H$ ,  $V_s$ ,  $V_H$  เมื่อพื้นที่ของ  $N$  และ  $P$  มีค่าเท่ากัน ไม่สามารถสรุปได้ เพราะว่าการทดลองนี้ได้ออกแบบพื้นที่  $P$  และ พื้นที่  $N$  ไว้เพียงแค่ 3 ค่า คือ  $(120 \mu\text{m})^2$ ,  $(160 \mu\text{m})^2$  และ  $(200 \mu\text{m})^2$  แต่ค่า  $V_s$  จะเปลี่ยนแปลงตามค่าของพื้นที่  $P$  และ  $N$  โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อพื้นที่  $P$  และ  $N$  มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการศึกษาผลของขนาด (พื้นที่) ของส่วน  $P$  และ ส่วน  $N$  ที่มีต่อ  $I_s$ ,  $I_H$ ,  $V_s$ ,  $V_H$  เมื่อพื้นที่ของ  $N$  ไม่เท่ากับพื้นที่ของ  $P$  สามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนขนาดของพื้นที่  $N$  ลดลงมีผลต่อ  $V_H$  มากกว่าการเปลี่ยนขนาดของพื้นที่  $P$  ลดลง

การศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อพารามิเตอร์ทั้งสี่ คือ  $I_s$ ,  $I_H$ ,  $V_s$ ,  $V_H$  สามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น จะทำให้  $I_H$ ,  $V_s$ ,  $V_H$  มีค่าลดลง แต่  $I_s$  มีค่าค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เพราะฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่า แรงดันสวิทซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเข้มแสง ส่วนกระแสสวิทซ์ซึ่งมีค่าค่อนข้างคงที่ หรือ

$$V_s = f(\text{ความเข้มแสง})$$

$$I_s = \text{ค่อนข้างคงที่}$$

การศึกษาผลของการ์ดริงที่มีต่อพารามิเตอร์ทั้งสี่ คือ  $I_s$ ,  $I_H$ ,  $V_s$ ,  $V_H$  สามารถสรุปได้ว่าในขณะที่ไม่มีการ์ดริง อาจมีกระแสรั่วที่พื้นผิวอันเกิดเนื่องมาจากสิ่งแปลกปลอมที่มาเกาะติดที่พื้นผิวของแผ่นผลึกซิลิกอน ในบางครั้งอาจมีผลกระทบทำให้ PIN ไดโอดไม่สามารถแสดงคุณสมบัติสวิทซ์ซึ่งได้ เนื่องจากมีกระแสรั่วมาก ส่วนการมีการ์ดริง จะช่วยป้องกันกระแสรั่วที่พื้นผิวได้ โดยจะบังคับให้กระแสไหลในเนื้อสาร (bulk current) เท่านั้น เราอาจกล่าวได้ว่า แรงดันสวิทซ์ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามการ์ดริง หรือ

$$V_s = f(GU)$$

เพราะฉะนั้นจากการทดลองทั้งหมด เราสามารถสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_s \propto (i, A_p, A_N, \text{ความเข้มแสง}, GU)$$

$i$  คือ ระยะของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค

$V_s$  คือ แรงดันสวิทช์ซิ่ง

$A_p$  คือ พื้นที่ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$A_N$  คือ พื้นที่ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$GU$  คือ การ์ดริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- 1 รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช : “ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ” พิมพ์ครั้งที่ 7 พ.ศ. 2540
- 2 รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช : “ อิเลคทรอนิคส์สารกึ่งตัวนำ ” พิมพ์ครั้งที่ 7 พ.ศ. 2538
- 3 จินคาร์คณ์ สุพัตตเวช: “วิทยานิพนธ์ ศึกษาโครงสร้างของซีลิกอนพลานาร์ไดโอดแบบ IG p+-i-n+ Planar Diodes with Injection Gate”
- 4 Ben G. Streetman : “ Solid State Electronic Devices “ , 1995 , pp 149-154
- 5 Kanaan Kano : “ Semiconductor Devices ” , 1998
- 6 John Allison : “ Electronic Engineering Semiconductors And Devices ” , 1990 , pp 184-190



## กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำ และคำปรึกษา ขอขอบคุณรุ่นพี่ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการทำงาน ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ และให้คำแนะนำ ตลอดจนขอพระคุณบิดามารดาที่คอยให้กำลังใจตลอดมา และสุดท้ายขอขอบคุณทุกท่านที่ช่วยให้โครงการชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้