



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยี : เทคนิคการวิเคราะห์หาความสม่ำเสมอ
ของสารเจือจากกระบวนการสร้างบนแผ่นซิลิคอน
Technology Transfer Project : Analysis Technique for
the Doping Uniformity of Fabrication Process on Silicon

นายวิระ เพ็งจันทร์

RC H
๑841 ค
2556

เลขที่.....
เลขทะเบียน 137776
วัน เดือน ปี 24 ก.ค. 2559

12697898
.b.....
.i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยี : เทคนิคการวิเคราะห์หาความสม่ำเสมอของสารเจือ
จากกระบวนการสร้างบนแผ่นซิลิคอน

แหล่งเงิน เงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ นายวีระ เพ็งจันทร์

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการในการวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้นในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ไดโอด เพื่อนำไปวิเคราะห์ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน ด้วยการศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของกระแสรั่วไหลกับความบกพร่องของซิลิคอนในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น ในขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอดที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆกันใช้เทคโนโลยีการผลิตซีมอสแบบมาตรฐาน ขั้นตอนการยิงฝังประจุที่อาจทำให้เกิดความบกพร่องในซิลิคอนขึ้น ดังนั้นเงื่อนไขของการยิงฝังประจุจะถูกใช้ในการศึกษา จากนั้นจึงทำการวัดคุณลักษณะกระแสแรงดัน และค่าความประจุไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น ทั้งแรงดันไบอัสตรงและแรงดันย้อนกลับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 27°C ถึง 100°C หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้น ตลอดจนผลรวมของกระแสรั่วไหลที่มีผลต่อการสูญเสียพลังงานของอุปกรณ์ไดโอด ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่และการก่อเกิดพาหะ ตลอดจนค่าระดับพลังงานกระตุ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ถึงความบกพร่องทั้งที่มีลักษณะสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพี-เอ็น ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน ซึ่งจะเป็ประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย

คำสำคัญ : รอยต่อพี-เอ็น กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด กระแสรั่วไหล ความบกพร่องของซิลิคอน ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ ค่าพลังงานกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Research Title: Technology Transfer Project : Analysis Technique for the Doping Uniformity of Fabrication Process on Silicon wafer

Researcher: Mr. Weera Pengchan

Faculty: Engineering **Department:** Electronics Engineering

ABSTRACT

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

Keywords : p-n junctions, fabrication, leakage current, defects, silicon crystals, generation and recombination lifetime, activation energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน เงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับคำปรึกษาที่มีประโยชน์และแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้ด้วย

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความบกพร่องในโครงสร้างผลึก.....	4
2.1.1 โครงสร้างของสารของแข็ง.....	4
2.1.1.1 ออสถูเนียน หรือ อะมอร์ฟัส (amorphous).....	4
2.1.1.2 ผลึก (Crystalline).....	4
2.1.2 โครงสร้างผลึก.....	5
2.1.2.1 ยูนิตเซลล์ หรือหน่วยเซลล์ (Unit cell).....	5
2.1.2.2 ยูนิตเซลล์ 3 มิติ.....	6
2.1.3 โครงสร้างผลึกเพชร.....	7
2.1.4 พันธะอะตอม.....	8
2.1.4.1 พันธะไอออนิก.....	8
2.1.4.2 พันธะโควาเลนต์.....	8
2.1.4.3 พันธะโลหะ.....	9
2.1.4.4 พันธะ Van Der Waals.....	10
2.1.5 ความไม่สมบูรณ์และสิ่งแปลกปลอมในของแข็ง.....	10
2.1.5.1 ความไม่สมบูรณ์ในของแข็ง.....	10
2.1.5.2 สิ่งแปลกปลอมในของแข็ง.....	11
2.2 รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)	12
2.2.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุล.....	13
2.2.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias)	15
2.2.3 รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias)	16

เอกสารนี้เป็นที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 3.1 การออกแบบการทดลอง..... 18
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยี่สิบห้าแห่งที่หนึ่งถึงหนึ่งร้อยห้า และห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด.....	19
3.3 เครื่องมือและวิธีการวัดข้อมูล.....	23
3.4 วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง.....	24
3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสด้วยองค์ประกอบของกระแส.....	24
3.4.2 การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นด้วยสมการอาร์เรเนียส.....	26
3.4.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนช่วงชีวิตก่อนเกิดและช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่.....	27
ที่สัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น	
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	33
4.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานภายในรอยต่อพีเอ็น.....	33
4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสในไดโอด.....	36
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของค่าเก็บความจุไฟฟ้าในไดโอด.....	39
4.4 การวิเคราะห์ความกว้างชั้นปลอดพาหะ.....	40
4.5 การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดในไดโอด.....	43
4.6 การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรเนียส.....	45
4.7 กระแสรั่วไหลและการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	53
บรรณานุกรม.....	54
ภาคผนวก ก การถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้จากงานวิจัยและพัฒนาสู่ภาคอุตสาหกรรม.....	56
ภาคผนวก ข บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	59
ข้อมูลประวัตินักวิจัย.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ไดโอด.....	24
3.2 ข้อมูลของอุณหภูมิและความหนาแน่นกระแส.....	27
4.1 รูปแบบเรขาคณิตของไดโอด.....	34
4.2 กระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์ซีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร.....	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างภายในของสารของแข็งโดยพิจารณาความเป็นระเบียบ..... 5 ในการจัดเรียงอะตอม (ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (poly crystalline) และ (ค) ผลึกรูปเดี่ยว (single crystalline)	5
2.2 ลักษณะรูปแบบของผลึก ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของยูนิตเซลล์จำนวนมากมาย..... 6 (ก) ลักษณะของแลททิซ (ข) หนึ่งยูนิตเซลล์ของแลททิซ (ค) การเรียงตัวของยูนิตเซลล์ เพื่อประกอบเป็นผลึกหรือแลททิซที่สมบูรณ์ (ง) ลักษณะของยูนิตเซลล์อีกรูปแบบหนึ่ง	6
2.3 ลักษณะของแลททิซแบบ 3 มิติ (ก) แบบ Simple Cubic Cell..... 7 (ข) ยูนิตเซลล์ของแลททิซแบบ Simple Cubic Cell ที่ถูกต้อง (ค) แบบ Body Centered Cubic (ง) แบบ Face Centered Cubic	7
2.4 (ก) หนึ่งยูนิตเซลล์ของโครงสร้างเพชร และ (ข) ภาพขยายส่วนมุมของ..... 8 ยูนิตเซลล์ ซึ่งเป็นการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมหนึ่งกับ 4 อะตอมข้างเคียง	8
2.5 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของไฮโดรเจน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลไฮโดรเจน..... 9	9
2.6 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในผลึกซิลิคอน..... 9	9
2.7 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) ความบกพร่องแบบช่องว่าง และ(ข) ความบกพร่องแบบแทรกตัว..... 11	11
2.8 ความบกพร่องแบบแนวเส้นในสองมิติ..... 11	11
2.9 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) สิ่งแปลกปลอมแบบแทนที่ และ (ข) สิ่งแปลกปลอมแบบแทรกตัว..... 12	12
2.10 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด..... 12	12
2.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น..... 14	14
2.12 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น..... 15	15
2.13 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง..... 15	15
2.14 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A 16	16
2.15 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ..... 17	17
2.16 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A 17	17
3.1 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$ 18	18
3.2 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$ 18	18
3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส..... 19	19
3.4 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด..... 22	22
3.5 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ..... 23	23
3.6 ตู้พร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์..... 23	23
3.7 แผนผังการวัดคุณสมบัติไดโอด..... 24	24
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_A)$ และ $1/kT$ 27	27
3.9 กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอนของฟ้าผ่าส่วนเกิน..... 28	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งผู้ถือลิขสิทธิ์ก่อนนำเอกสารไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.1 รอยต่อพี-เอ็นในโครงสร้างซีมอส.....	33
4.2 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$	34
4.3 กราฟความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$	35
4.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าเก็บความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$	35
4.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าเก็บความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$	36
4.6 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลในรอยต่อของไดโอด.....	36
4.7 กราฟความหนาแน่นกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน.....	38
4.8 กราฟความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน.....	40
4.9 ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปของไดโอดรอยต่อ $n^+ - P_{sub}$	41
4.10 ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปของไดโอดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$	41
4.11 ความกว้างชั้นปลอดพาหะพื้นที่กับค่าไบอัสย้อนกลับของไดโอดรอยต่อที่แตกต่างกัน.....	42
4.12 ความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอด ที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$	44
4.13 ความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอด ที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$	44
4.14 ความสัมพันธ์ของช่วงชีวิตการก่อเกิดและความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอด ที่มีรอยต่อแตกต่างกัน.....	45
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ..... ซึ่งมีเงื่อนไขการให้แรงดันที่แตกต่างกัน.....	46
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับพลังงานกระตุ้นและค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ.....	46
4.17 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1.....	48
4.18 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2.....	48
4.19 ความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง..... ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ.....	50
4.20 ความสัมพันธ์ของค่าการสูญเสียพลังงานต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พัฒนาการของเทคโนโลยีการรวมชั้นโลหะ-อ็อกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (CMOS) ในสมัยใหม่ มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของชิพ และลดต้นทุนการผลิต เทคโนโลยีนี้ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตไมโครชิพเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจจับได้อีกด้วย คุณลักษณะอันเป็นเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ชนิดนี้คือการรวมตัวตรวจจับหลายๆชนิดเข้าด้วยกันและยังมีการใช้พลังงานระดับต่ำด้วย จากเหตุผลของต้นทุนการผลิตอุปกรณ์เหล่านี้ เทคโนโลยีซีมอสระดับซับไมครอน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เทคโนโลยีนี้การเจอสารด้วยระดับความเข้มข้นสูงลงบนแผ่นฐานรองเป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อให้สามารถควบคุมปรากฏการณ์ช่องแคบ (short channel effect) และกระแสรั่วไหลระดับต่ำ (low leakage current) รวมถึงถึงการป้องกันปรากฏการณ์ Latch-up ที่จะเกิดขึ้นอีกด้วย ความเข้มข้นของบ่อแยกชนิดเอ็นหรือชนิดพีถูกเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณการเจือสารด้วยการฝังประจุ กระบวนการนี้นำไปสู่การทำลายแผ่นฐานรอง ซึ่งถูกคาดหวังว่าจะกำจัดได้ภายหลังการแอนนีลลิ่ง (annealing) วิธีการบำบัดด้วยความร้อนในเวลาสั้นๆ และที่อุณหภูมิต่ำให้แก่ความลึกรอยต่อภายหลังการฝังประจุเป็นสิ่งจำเป็น แต่อาจจะไม่เพียงพอที่จะกำจัดจุดบกพร่อง (Defect) ที่เกิดจากการฝังประจุได้ จุดบกพร่องเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสรั่วไหลในแต่ละส่วนของรอยต่อพี-เอ็นได้

จุดบกพร่องอาจพบในแผ่นซิลิคอน อันเกิดขึ้นเนื่องจากเทคนิคการปลูกผลึกซิลิคอน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการรั่วไหลของรอยต่อและผลผลิตรวมของอุปกรณ์ ทั้งกระแสรั่วไหลและผลผลิตรวมของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่นซิลิคอน เช่น แผ่นซิลิคอนแบบ Czochralski (Cz) หรือแบบ Epitaxial (Epi) แผ่นซิลิคอนแบบ Epitaxial จะมีกระแสรั่วไหลต่ำกว่าและได้ผลผลิตรวมของอุปกรณ์มากกว่าแบบ Czochralski แต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายต่อชิปแล้วพบว่าแบบ Epitaxial จะใช้มากกว่า ด้วยเหตุนี้จึงเป็นข้อจำกัดของการใช้แผ่นซิลิคอนแบบ Epitaxial ในการสร้างวงจรมิโครโปรเซสเซอร์ ขณะที่แผ่นซิลิคอนแบบ Czochralski ถูกใช้อย่างแพร่หลายในวงจรมหาความจำต่างๆ

กระแสรั่วไหลในรอยต่อพี-เอ็น เป็นพารามิเตอร์หลักที่สำคัญอันหนึ่งในเทคโนโลยีซับไมครอน ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ กระแสรั่วไหลนี้มีความสัมพันธ์อย่างมากกับจุดบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในซิลิคอน ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นจากกระบวนการสร้างและ/หรือการปลูกผลึกซิลิคอน ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญในการจำกัดกระแสรั่วไหลโดยการควบคุมจุดบกพร่องเหล่านี้ทั้งก่อนและหลังกระบวนการสร้างให้มีขนาดที่เล็กลงและมีปริมาณความหนาแน่นลดลงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณาในเทคโนโลยีอนาคต

ในทางกลับกัน การศึกษาถึงจุดบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในซิลิคอน ทำได้โดยการวิเคราะห์จากกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น โดยการใช้เทคนิคไดโอดที่มีโครงสร้างเหมาะสม สามารถใช้ศึกษาพารามิเตอร์ของฐานรองที่เกี่ยวข้อง โดยการพิจารณากระแสรั่วไหล ซึ่งเทคนิคที่รู้จักกันแพร่หลายคือ Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS)

Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เพื่อการศึกษาจุดบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้า (หรือ charge carrier traps) ในสารกึ่งตัวนำ เครื่อง DLTS จะกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของจุดบกพร่องและวัดค่าความหนาแน่นของจุดบกพร่องที่มีอยู่ในวัสดุ บางส่วนของพารามิเตอร์จะถูกพิจารณาเพื่อใช้ระบุลักษณะและวิเคราะห์จุดบกพร่องเหล่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เทคนิค DLTS ได้นำเสนอครั้งแรกโดย David Vern Lang จาก Bell Telephone Laboratories ในปี 1974 และเขาได้สิทธิบัตรในสหรัฐอเมริกาในปี 1975 เครื่อง DLTS ใช้ศึกษาจุดบกพร่องที่ปรากฏอยู่ในบริเวณชั้นปลดพาหะ (depletion region) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปนิยมใช้ไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น เทคนิคของ DLTS มีความไวมากกว่าเทคนิคการวิเคราะห์สารกึ่งตัวนำแบบอื่นๆ ตัวอย่างเช่น เครื่อง DLTS สามารถตรวจจับสิ่งปนเปื้อน (impurities) และจุดบกพร่องที่มีความหนาแน่นจำนวน 1 ใน 10^{12} ของอะตอมในแผ่นซิลิคอน ด้วยคุณลักษณะเด่นนี้รวมถึงการออกแบบเทคนิคที่เรียบง่าย ทำให้เครื่อง DLTS เป็นที่นิยมมากในห้องปฏิบัติการวิจัยและโรงงานผลิตวัสดุสารกึ่งตัวนำ

ผู้วิจัยนำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการวิเคราะห์จุดบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ โดยมีลักษณะของผลการวิเคราะห์คล้ายกับเทคนิค DLTS แต่ใช้เพียงเครื่องมือวัดพื้นฐานในการวัดคุณสมบัติของไดโอด และการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของจุดบกพร่องที่ปรากฏในแผ่นซิลิคอนได้ เทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์ที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ผลวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้ ที่สำคัญสามารถใช้ทดแทนเครื่อง DLTS ที่มีราคาสูงหลักล้านบาทได้ จากการศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์ดังกล่าว ผู้วิจัยคาดหวังว่าการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยหรือประเทศอื่นที่มีขีดจำกัดในการซื้อเครื่องจักรที่มีราคาสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำงานวิจัยมาประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะด้านการวิเคราะห์หาความสม่ำเสมอของสารเจือภายหลังจากระบวนการสร้างบนแผ่นซิลิคอน ตลอดจนถ่ายทอดองค์ความรู้จากงานวิจัยแก่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นศูนย์กลางของงานวิจัยและพัฒนาด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังเป็นโรงงานผลิตวงจรรวมแห่งแรกของประเทศไทย

สำหรับประเทศไทย อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ได้รับการพัฒนาตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 7 กล่าวคือ เป็นการนำมามาตรการต่างๆ ทั้งด้านการเงินและการคลัง ด้านการเสริมสร้างขีดความสามารถทางเทคโนโลยีของอุตสาหกรรม และการนำระบบมาตรฐานอุตสาหกรรมมาใช้เพื่อพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งในอุตสาหกรรมนี้มีการแข่งขันสูงมาก ประเทศไทยจำเป็นต้องเพิ่มขีดความสามารถ และยกระดับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากเดิมที่เป็นเพียงผู้รับจ้างประกอบชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมระดับปลายน้ำ ไปสู่ผู้ผลิตวงจรรวมซึ่งเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำที่มีมูลค่าสูง

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ จึงมีโครงการจัดตั้งศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งต่อมาได้เปลี่ยนชื่อเป็น ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center: TMEC) เพื่อเป็นศูนย์กลางของงานวิจัยและพัฒนาด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังเป็นโรงงานผลิตวงจรรวมแห่งแรกของประเทศไทย โดยเน้นตอบสนองความต้องการในการผลิตวงจรรวมต้นแบบ การฝึกอบรมสำหรับสถาบันการศึกษาและ ภาคอุตสาหกรรม ซึ่งตรงตามจุดประสงค์หลักที่ต้องการพัฒนาบุคลากรที่มีความรู้ด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ให้เป็นแหล่งความรู้ และเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ให้เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสำคัญของประเทศต่อไป สืบเนื่องถึงวันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2538 คณะรัฐมนตรีจึงมีมติให้จัดตั้ง ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center: TMEC) โดยมีเป้าหมายเพื่อติดตั้งสายการผลิตและดำเนินการผลิตวงจรรวมเพื่อประยุกต์ใช้งานเฉพาะด้าน (Application-Specific Integrated Circuit: ASIC) ระดับ 0.5 ไมครอน อีกทั้งยังมีเป้าหมายในการสร้างบุคลากรและปูพื้นฐานด้านเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนเพื่อสนับสนุนการยกระดับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยให้ทัดเทียมระดับสากล และเป็นรากฐานในการพัฒนาสู่นวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ๆ ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทนใด ๆ ในนามของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ไม่ว่ากรรมใดๆ ที่สื่อนี้ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์หาความสม่ำเสมอของสารเจือภายหลังจากกระบวนการสร้างบนแผ่นซิลิคอน
2. เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้จากงานวิจัยและพัฒนาสู่ภาคอุตสาหกรรม
3. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการสู่สังคม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นงานวิจัยที่วิเคราะห์ผลเชิงคณิตศาสตร์และไม่มีการเปรียบเทียบผลที่ได้กับเครื่องจักรมาตรฐานด้วยเงื่อนไขด้านการเงินและเวลา แต่โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การประยุกต์ใช้ผลงานวิจัยเพื่อการทดลองใช้จริง และก่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ภายในประเทศ
2. กระบวนการสร้างอุปกรณ์: ใช้มาตรฐานกระบวนการสร้างแบบซีมอส 0.8 ไมโครเมตร ที่พัฒนาขึ้นโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
3. สถานที่: กระบวนการสร้างและการวัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ ทำที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา
4. ระยะเวลา: เริ่ม 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- ศึกษาและออกแบบต้นแบบลวดลายอุปกรณ์ เพื่อจัดทำกระจกมาสก์ต้นแบบ
- ทำการสร้างอุปกรณ์ด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐานของซีมอส
- นำอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า
- วิเคราะห์ผลจากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์
- สรุปผลการวิเคราะห์
- รายงานผลและถ่ายทอดเทคนิคการวัดวิเคราะห์แก่หน่วยงาน (TMEC)
- จัดทำรายงานสรุปโครงการแก่คณะฯ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

ภายหลังจบโครงการวิจัย สิ่งที่จะคาดว่าจะได้มีดังนี้

- มีเทคนิคการวิเคราะห์หาความสม่ำเสมอของสารเจือจากกระบวนการสร้างบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งวิจัยและพัฒนาในประเทศ สามารถใช้ทดแทนเครื่องมือวิเคราะห์ราคาแพงจากต่างประเทศ
- มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้จากงานวิจัยและพัฒนา สู่ภาคอุตสาหกรรม
- เผยแพร่ผลงานในรูปแบบบทความหรือนำเสนอในการประชุมวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความบกพร่องในโครงสร้างผลึก (Defect in Crystals)

2.1.1 โครงสร้างของสารของแข็ง

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

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

2.1.1.1 อสัณฐาน หรือ อะมอร์ฟัส (amorphous)

อสัณฐาน หรือ อะมอร์ฟัส หมายถึงลักษณะโครงสร้างของสารของแข็ง ซึ่งมีการจัดเรียงของอะตอมเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน อะตอมต่างๆจะเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายไร้รูปแบบ และไม่มีตำแหน่งที่อยู่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) ทำให้วัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่แน่นอน เปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อม ซึ่งไม่สามารถจะควบคุมได้ จึงไม่เหมาะสมหรือไม่สามารถที่จะนำไปใช้เป็นตัวนำสำหรับสร้างเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้

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

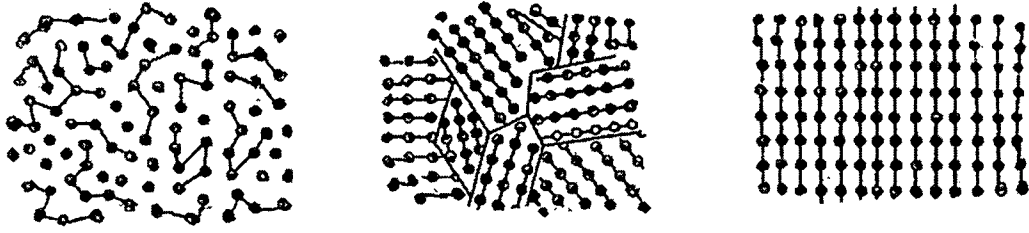
2.1.1.2 ผลึก (Crystalline)

ผลึก หมายถึงสารของแข็งที่มีลักษณะโครงสร้างภายใน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นไปอย่างมีระเบียบ มีรูปแบบที่แน่นอน โดยอะตอมต่างๆจะมีตำแหน่งที่อยู่แน่นอน ในทางปฏิบัติจะหาผลึกที่สมบูรณ์ร้อยเปอร์เซ็นต์ได้ยาก เพราะอย่างไรก็ตาม มักจะเกิดความบกพร่อง (defect) หรือจุดตำหนิบ้างไม่มากนัก ทำให้ความเป็นระเบียบของอะตอมสูญเสียไป ความบกพร่องมีหลายลักษณะและมีสาเหตุการเกิดที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างภายในของสารของแข็งโดยพิจารณาความเป็นระเบียบในการจัดเรียงอะตอม (ก) อะมอร์ฟัส (ข) ผลึกหลายรูป (poly crystalline) และ (ค) ผลึกรูปเดียว (single crystalline)

ดังนั้นจึงแบ่งวัสดุสารของแข็งที่เป็นผลึกออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) ผลึกไม่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีความบกพร่องเป็นจำนวนมาก หรือมีลักษณะของผลึกแต่ไม่ต่อเนื่อง หรือมีความเป็นระเบียบน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข) วัสดุดังกล่าวนิยมเรียกกันว่า ผลึกโพลีคริสตัล (Poly Crystalline) หรือผลึกหลายรูป

ข) ผลึกที่สมบูรณ์ หมายถึง สารของแข็งที่มีความบกพร่อง หรือตำหนิมีจำนวนน้อย อะตอมส่วนใหญ่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีรูปแบบที่แน่นอนเหมือนกันทั้งหมด ผลึกชนิดนี้นิยมเรียกกันว่า ผลึกรูปเดียว (Single Crystalline) ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ค)

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ส่วนมากที่ใช้งานกันในปัจจุบัน สร้างมาจากผลึกรูปเดียวของซิลิคอน และอาจมีบ้างที่ใช้ผลึกหลายรูป เพื่อการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของสิ่งประดิษฐ์ เช่น การนำเอาผลึกหลายรูปของซิลิคอน หรือเรียกง่ายๆว่าโพลีซิลิคอน สร้างเป็นส่วนเกต (gate) ของทรานซิสเตอร์ประเภท MOS Transistor เป็นต้น

2.1.2 โครงสร้างผลึก

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

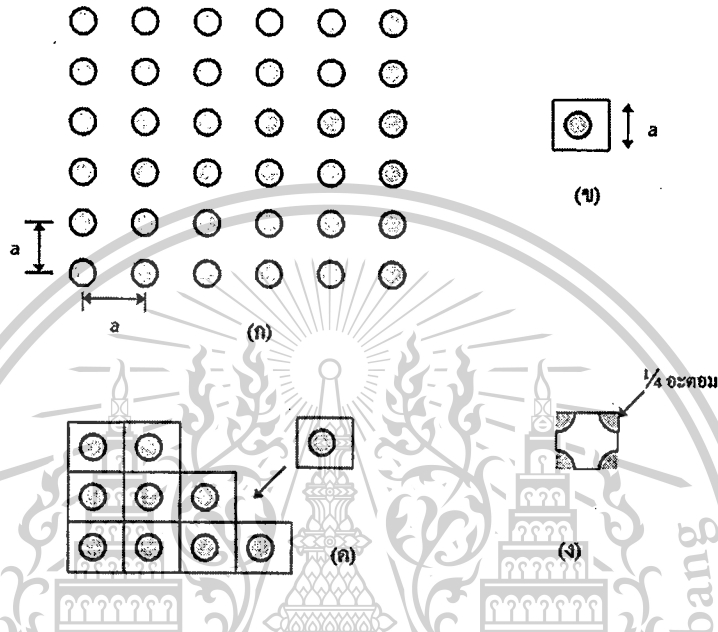
2.1.2.1 ยูนิทเซลล์ หรือหน่วยเซลล์ (Unit cell)

คำว่า ยูนิทเซลล์ หรือ หน่วยเซลล์ หมายถึงส่วนที่เล็กๆหรือส่วนที่เล็กที่สุดของผลึกที่มีความสมบูรณ์ และสามารถแสดงรูปแบบของผลึกได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผลึกสารของแข็งจึงถูกพิจารณาได้ว่าเป็นการซ้ำกันของหน่วยเซลล์เล็กๆเหล่านี้ จำนวนมากมายมาเรียงต่อกันอย่างต่อเนื่อง รูปที่ 2.2(ก) ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เป็นรูปแสดงการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ และต่อเนื่องในลักษณะ 2 มิติ ภาพลักษณะนี้ถูกเรียกว่า แลตทิซของผลึก (crystal lattice) วงกลมแสดงแกนของอะตอม ซึ่งแต่ละอะตอมจะอยู่ห่างจากกันเป็นระยะ a หรือก็คือ ระยะห่างระหว่างอะตอม (atomic spacing) หรือบางครั้งนิยมเรียกว่า ค่าคงตัวของแลตทิซ (lattice constant) เพื่อที่จะอธิบายคุณสมบัติแลตทิซเหล่านี้ อาจใช้หน่วยเซลล์ของแลตทิซนี้ มาแสดงแทนแลตทิซทั้งหมด ซึ่งในที่นี้ ลักษณะของยูนิตเซลล์ แสดงดังในรูปที่ 2.2(ข) และ 2.2(ง)



รูปที่ 2.2 ลักษณะรูปแบบของผลึก ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของยูนิตเซลล์ จำนวนมากมาย

- (ก) ลักษณะของแลตทิซ (ข) หนึ่งยูนิตเซลล์ของแลตทิซ
(ค) การเรียงตัวของยูนิตเซลล์ เพื่อประกอบเป็นผลึกหรือแลตทิซที่สมบูรณ์
(ง) ลักษณะของยูนิตเซลล์อีกรูปแบบหนึ่ง

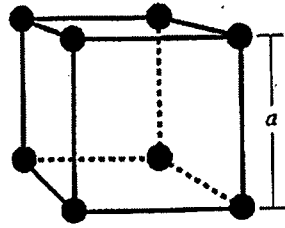
2.1.2.2 ยูนิตเซลล์ 3 มิติ

ในทางปฏิบัติ ผลึกสารกึ่งตัวนำ จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ 3 มิติ ดังนั้นเพื่อความเข้าใจที่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องอธิบายลักษณะของยูนิตเซลล์ในลักษณะ 3 มิติ (3D unit cells) จากลักษณะของผลึกที่มีรูปแบบของแลตทิซ เมื่อเขียนเป็นรูป 3 มิติ จะได้ดังในรูปที่ 2.3(ก) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของผลึกแบบนี้ เรียกว่า เซลล์ลูกบาศก์พื้นฐาน (Simple Cubic Cell) โดยมีอะตอมอยู่ที่มุมทุกมุมของรูปลูกบาศก์ ยูนิตเซลล์ของแลตทิซนี้ในลักษณะ 3 มิติ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.3(ข) ซึ่งจะเห็นว่าภายในกรอบหรือขอบเขตของลูกบาศก์นี้ที่มุมทุกมุม จะมีเพียง $1/8$ ของอะตอมเท่านั้นที่บรรจุอยู่ภายในกรอบของยูนิตเซลล์นี้

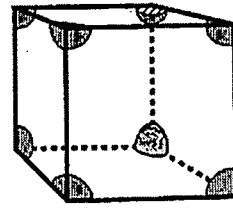
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

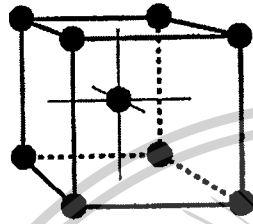
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



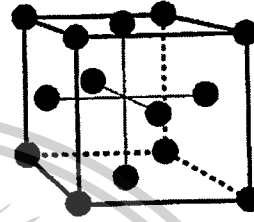
(ก) Simple Cubic Cell



(ข) Pedantically correct simple cubic



(ค) Body Centered Cubic



(ง) Face Centered Cubic

รูปที่ 2.3 ลักษณะของแลททิซแบบ 3 มิติ (ก) แบบ Simple Cubic Cell

(ข) ยูนิตเซลล์ของแลททิซแบบ Simple Cubic Cell ที่ถูกต้อง

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

ดังนั้น หนึ่งยูนิตเซลล์ ประกอบด้วยจำนวนอะตอมเท่ากับ $1/8 \times 8 = 1$ อะตอม และเมื่อนำ ยูนิตเซลล์เหล่านี้มาเรียงกันอย่างต่อเนื่อง และเป็นระเบียบ กระจายออกไปทุกทิศทุกทาง จะทำให้ได้ โครงสร้างของแลททิซ มีลักษณะเป็นผลึกแบบ เซลล์ลูกบาศก์พื้นฐาน ดังในรูปที่ 2.3(ก)

นอกจากนี้แล้วยังมีโครงสร้างของผลึกรูปแบบอื่นๆ อีกหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ค) และ 2.3(ง) คือ โครงสร้างแบบ Body Centered Cubic และแบบ Face Centered Cubic ตามลำดับ ซึ่ง โครงสร้างแบบ Body Centered Cubic หนึ่งยูนิตเซลล์ จะประกอบด้วยเนื้ออะตอม 2 อะตอมและกรณี แบบ Face Centered Cubic จะต้องใช้เนื้ออะตอมถึง 4 อะตอม เป็นต้น

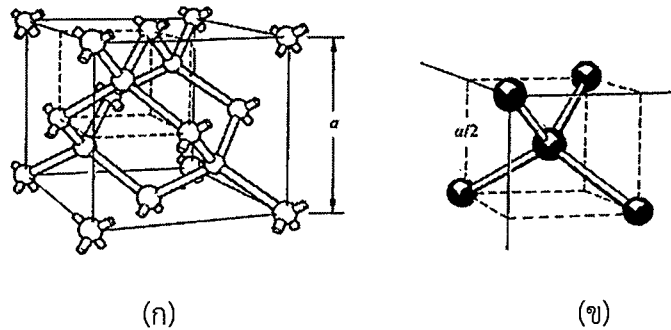
2.1.3 โครงสร้างผลึกเพชร

ลักษณะโครงสร้างผลึก หรือแลททิซของวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว เช่น ซิลิคอน หรือเยอรมาเนียม ในลักษณะ 3 มิติ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.4(ก) ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้ถูกเรียกว่า โครงสร้างผลึกเพชร (Diamond structure) ลักษณะของยูนิตเซลล์ จะพบว่า มีอะตอมอยู่ที่จุดมุมของกล่องลูกบาศก์ทุกมุม นอกจากนี้ตรงกลางของด้านทุกด้านก็จะมีอะตอมอยู่เช่นกัน และภายในกล่องลูกบาศก์นี้จะมีอะตอมอยู่ภายในอีก 4 อะตอม ดังในรูปที่ 2.4(ก) แต่ละอะตอมจะเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข) ซึ่งผลึกสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่จะประกอบด้วยยูนิตเซลล์เล็กๆเหล่านี้จำนวนมากมายเรียงกันอย่างเป็นระเบียบออกไปในทุกๆด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 (ก) หนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างเพชร และ (ข) ภาพขยายส่วนมุมของหน่วยเซลล์ ซึ่งเป็นการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมหนึ่งกับ 4 อะตอมข้างเคียง

2.1.4 พันธะอะตอม

การก่อตัวเป็นของแข็ง เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอะตอมและใช้พลังงานรวมน้อยที่สุดจะขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอม ชนิดของพันธะ ถ้าพันธะระหว่างอะตอมไม่แข็งแรงพอ ก็ไม่สามารถรวมกันก่อตัวเป็นของแข็งขึ้นมาได้ ซึ่งอาจแบ่งรูปแบบพันธะอะตอมเป็น 4 แบบคือ

2.1.4.1 พันธะไอออนิก

ธาตุในหมู่ 1 ของตารางธาตุ มีแนวโน้มที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจึงกลายเป็นประจุบวก ขณะที่ธาตุหมู่ 4 มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนและตัวมันจะกลายเป็นประจุลบ ประจุที่ตรงกันข้ามจะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน และทำให้เกิดพันธะที่เรียกว่า พันธะไอออนิก ถ้าไอออนมีความใกล้เคียงกันมาก จะเกิดแรงผลักรันและทำให้เกิดการจัดระยะที่สมดุลเกิดขึ้นระหว่างสองไอออนในผลึก ไอออนประจุลบมีแนวโน้มที่จะถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุบวก และไอออนประจุบวกมีแนวโน้มที่จะถูกล้อมรอบด้วยไอออนประจุลบ ดังนั้นโครงข่ายซ้ำๆกันเป็นเครือข่ายของอะตอมเหล่านี้ จะสร้างเป็นแลตทิซขึ้นมา ตัวอย่างของพันธะไอออนิก ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

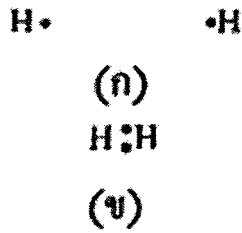
2.1.4.2 พันธะโควาเลนต์

แรงปฏิกิริยาระหว่างอะตอมมีแนวโน้มที่จะก่อตัวทำให้พลังงานวาเลนซ์ให้เข้ามาอยู่ใกล้กัน เรียกว่าพันธะโควาเลนต์ ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน ไฮโดรเจนมีอิเล็กตรอนหนึ่งตัวและต้องการอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัว เพื่อให้พลังงานวงนอกสุดเต็ม ในรูปที่ 2.5(ก) แสดงถึงอะตอมของไฮโดรเจนขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาแก่กัน และรูปที่ 2.5(ข) แสดงโมเลกุลไฮโดรเจนภายหลังที่ยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งพันธะโควาเลนต์เป็นพันธะที่ทำให้อิเล็กตรอนระหว่างอะตอมสามารถใช้ร่วมกันได้ เพื่อที่จะให้ระดับพลังงานวาเลนซ์ของอะตอมแต่ละอะตอมมีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.5 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของไฮโดรเจน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลไฮโดรเจน

อะตอมของธาตุหมู่ 4 ของตารางธาตุ เช่น ซิลิคอน และเยอรมาเนียม มีแนวโน้มที่จะสร้างพันธะโควาเลนต์ขึ้น แต่ละธาตุเหล่านี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนสี่ตัว และต้องการอิเล็กตรอนอีกสี่ตัว เพื่อให้พลังงานวาเลนซ์เต็ม ถ้าอะตอมซิลิคอนมีอะตอมใกล้เคียงสี่ตัว แต่ละอะตอมข้างเคียงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ใช้ร่วมกันอยู่อีกสี่ตัว ดังนั้นอะตอมจะมีผลเหมือนกับว่ามีอิเล็กตรอนอยู่แปดตัวที่ระดับพลังงานวงนอกสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) ซึ่งแสดงถึงอะตอมซิลิคอนพร้อมกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนสี่ตัว ขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาแก่กัน และรูปที่ 2.6(ข) แสดงถึงพันธะในซิลิคอนที่เกิดพันธะโควาเลนต์แล้ว ซึ่งอะตอมตรงกลางมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนใช้ร่วมกันอยู่แปดตัว



รูปที่ 2.6 (ก) วาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอน และ (ข) พันธะโควาเลนต์ในผลึกซิลิคอน

2.1.4.3 พันธะโลหะ

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

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มีอยู่ภายใต้การนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.4.4 พันธะ Van Der Waals

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

2.1.5 ความไม่สมบูรณ์และสิ่งแปลกปลอมในของแข็ง

ในความเป็นจริง แลททิซจะไม่มีสมบูรณ์ทั้งหมด แต่จะมีความไม่สมบูรณ์หรือความบกพร่องอยู่ ความไม่สมบูรณ์มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร และในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความบกพร่องและสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้

2.1.5.1 ความไม่สมบูรณ์ในของแข็ง

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

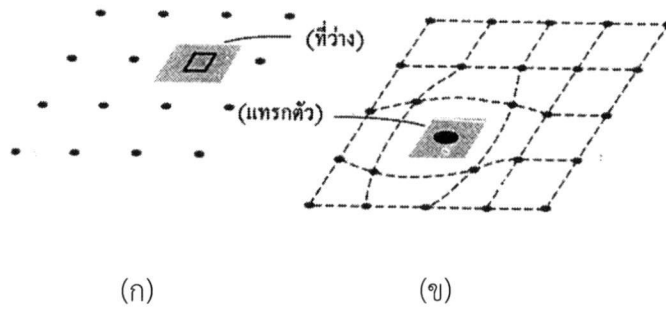
ความไม่สมบูรณ์อีกชนิดหนึ่งเรียกว่า ความบกพร่องแบบจุด (point defect) มีหลายรูปแบบที่ต้องพิจารณา ผลึกในความจริงนั้น อะตอมอาจจะหายไปจากตำแหน่งในแลททิซ ความบกพร่องนี้เรียกว่า ที่ว่าง (vacancy) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ก) อีกกรณีหนึ่งอะตอมอาจจะวางตัวที่ตำแหน่งระหว่างตำแหน่งความบกพร่องที่เรียกว่า การแทรกตัว (interstitial) ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข) ในกรณีความบกพร่องแบบที่ว่าง และความบกพร่องแบบแทรกตัว ไม่เพียงแต่จะทำให้โครงสร้างเสียหาย พันธะเคมีจะถูกทำลายด้วย และมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร ช่องว่างและการแทรกตัวอาจแสดงปฏิกริยาต่อกันระหว่างความบกพร่องทั้งสอง และทำให้เกิดผลที่แตกต่างไปจากความบกพร่องแบบช่องว่างและความบกพร่องแบบแทรกตัว เป็นที่รู้จักกันว่าความบกพร่อง Frenkel

ความบกพร่องจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับอะตอมหรือตำแหน่งของอะตอม ในระหว่างการก่อตัวของผลึกรูปเดี่ยว จะทำให้เกิดความบกพร่องขึ้นจำนวนมาก ความบกพร่องตามแนวเส้นจะปรากฏเมื่อแถวของอะตอมเรียงตัวผิดพลาดจากตำแหน่งที่ควรจะอยู่ในแลททิซ ความบกพร่องนี้เรียกว่า ความบกพร่องแบบแนวเส้น (line defect) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เช่นเดียวกับความบกพร่องแบบจุด ความบกพร่องแบบแนวเส้นจะทำลายทั้งโครงสร้างปกติของแลททิซและพันธะอะตอมในผลึก ความบกพร่องนี้จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) ความบกพร่องแบบช่องว่าง และ (ข) ความบกพร่องแบบแทรกตัว



รูปที่ 2.8 ความบกพร่องแบบแนวเส้นในสองมิติ

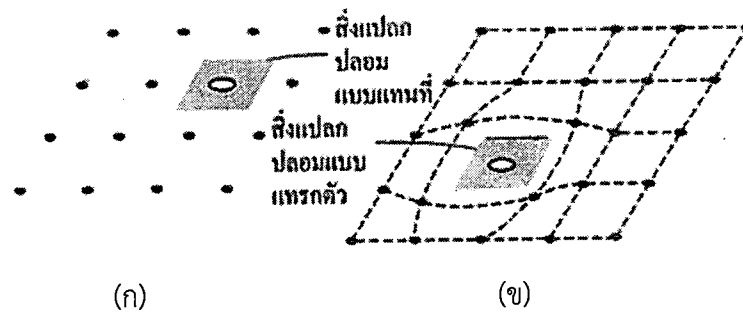
2.1.5.2 สิ่งแปลกปลอมในของแข็ง

อะตอมต่างชนิดหรืออะตอมแปลกปลอม อาจจะเข้ามาอยู่ในโครงสร้างผลึกได้ อะตอมแปลกปลอม อาจจะไปอยู่ตรงตำแหน่งในแลตทิซพอดี ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่า อะตอมแปลกปลอมแทนที่ (substitutional impurities) และอะตอมแปลกปลอมอาจจะอยู่ระหว่างตำแหน่งปกติของแลตทิซก็ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกว่า อะตอมแปลกปลอมแทรกตัว (interstitial impurities) ทั้งสองกรณีคือ ความบกพร่องของแลตทิซ แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 อะตอมแปลกปลอมบางอย่าง เช่น อะตอมออกซิเจนในซิลิคอนที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ แต่อะตอมทองหรือฟอสฟอรัสในซิลิคอน จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างรุนแรงแก่สารซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

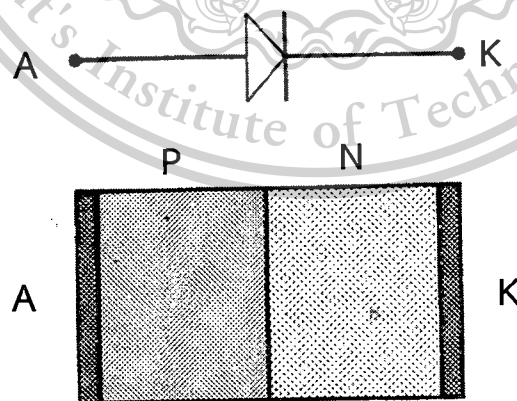


รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกรูปเดี่ยว (ก) สิ่งแปลกปลอมแบบแทนที่ และ (ข) สิ่งแปลกปลอมแบบแทรกตัว

การควบคุมปริมาณจำนวนอะตอมแปลกปลอมที่ทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไปในทางที่ต้องการได้ เทคนิคที่จะนำอะตอมแปลกปลอมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เพื่อเปลี่ยนความนำไฟฟ้าเรียกว่าการโด๊ป (doping) มีวิธีต่างๆไปของการโด๊ปอยู่สองวิธี คือ กระบวนการแพร่สารเจือ (diffusion) และกระบวนการฝังประจุไอออน (ion implantation)

2.2 รอยต่อพี-เอ็น (P-N Junction)

โครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็นถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ และไดโอด ซึ่งในการสร้างโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น มักนิยมใช้วิธีการแพร่สารเจือชนิดเอ็นหรือชนิดพี เข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และในส่วนนี้จะกล่าวคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้แก่ ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุล ในสภาวะที่รับการไบอัสตรง และในสภาวะที่รับการไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.10 โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุล

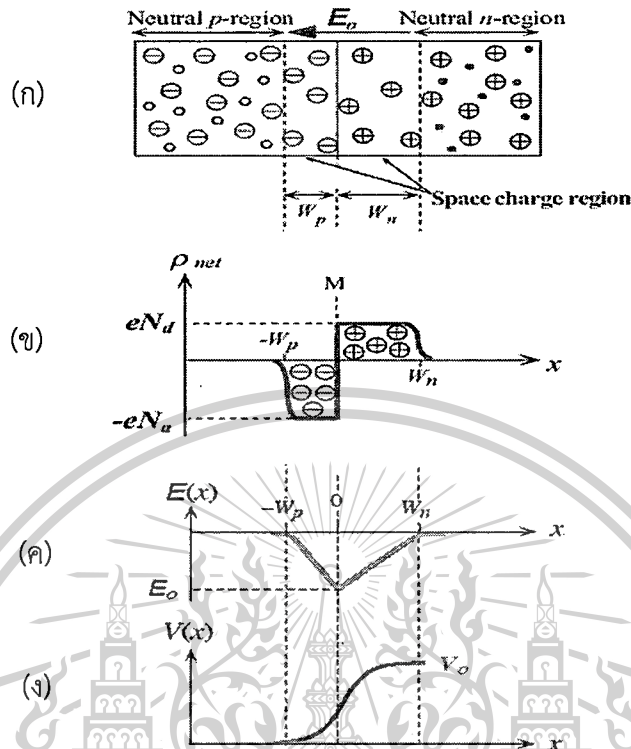
เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น เนื่องจากความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุพาหะจากทางด้านที่มีความหนาแน่นของประจุพาหะมากกว่าไปยังด้านที่มีความหนาแน่นของประจุพาหะน้อยกว่า กล่าวคือ โฮลทางด้านพีในบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปในด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นในบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปทางด้านพี การแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อพี-เอ็น และสิ่งที่ได้ตามมาคือจะมีการรวมตัว (recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอน ผลจากการรวมตัวของประจุพาหะทั้งสอง จะทำให้อะตอมของสารเจือบริเวณใกล้ๆกับรอยต่อพี-เอ็นกลายเป็นไอออน (ion) คืออะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านเอ็น จะสูญเสียอิเล็กตรอน อะตอมนี้จึงแสดงตัวเป็นไอออนบวก และอะตอมของสารเจือชนิดพีทางด้านพี จะสูญเสียโฮลไป จึงทำให้อะตอมนี้แสดงตัวเป็นไอออนลบ เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าขึ้น ณ บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) สนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นอัตราการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะทั้งสองชนิดจะค่อยๆลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในมีปริมาณมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้ประจุพาหะทั้งสองชนิดแพร่ข้ามรอยต่อได้ การแพร่จึงหยุดลง และอยู่ในภาวะสงบนิ่ง ซึ่งเรียกว่ารอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล (equilibrium)

นอกจากนี้ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้บริเวณภายในรอยต่อนี้ไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิด คงมีแต่อะตอมของสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็น ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาพไอออนลบและไอออนบวก บริเวณดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “บริเวณปลดพาหะ” (depletion region) ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ข) การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น แสดงในรูปที่ 2.11(ค) ซึ่งค่า E_0 เป็นค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด และสนามไฟฟ้าที่มีอยู่บริเวณนี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นด้วย จึงดูคล้ายกับว่าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุลนี้มีแรงดันไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เองที่เป็นกำแพงศักย์ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ แสดงในรูปที่ 2.11(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.11 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

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

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

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

และในภาวะสมดุลย์ ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

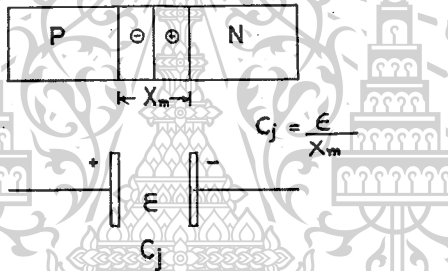
$$X_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0 (N_A N_D)}{q N_A N_D}} \tag{2.2}$$

โดยที่ X_0 คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุลย์
 ε คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ
 V_0 คือ แรงดันไฟฟ้าภายใน (โวลท์)

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

$$C_j = \sqrt{\frac{\varepsilon q N_A N_D}{2(N_A + N_D)V_0}} \tag{2.3}$$

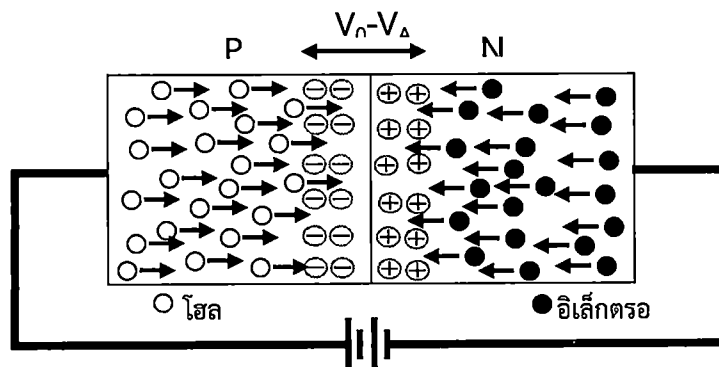
โดย C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (F/cm^2)



รูปที่ 2.12 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

2.2.2. รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward Bias)

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง ซึ่งหมายถึงทางด้านพีมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

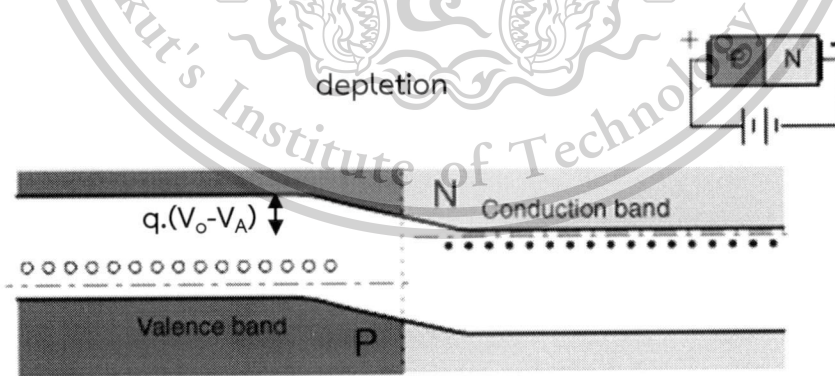
$$I = I_o(e^{qV_A/KT} - 1) \tag{2.4}$$

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

โดยที่

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

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่ยอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของด้านพีและเอ็นจะไม่เท่ากัน และกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ และเป็นผลให้มีกระแสไหลในวงจรได้



รูปที่ 2.14 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

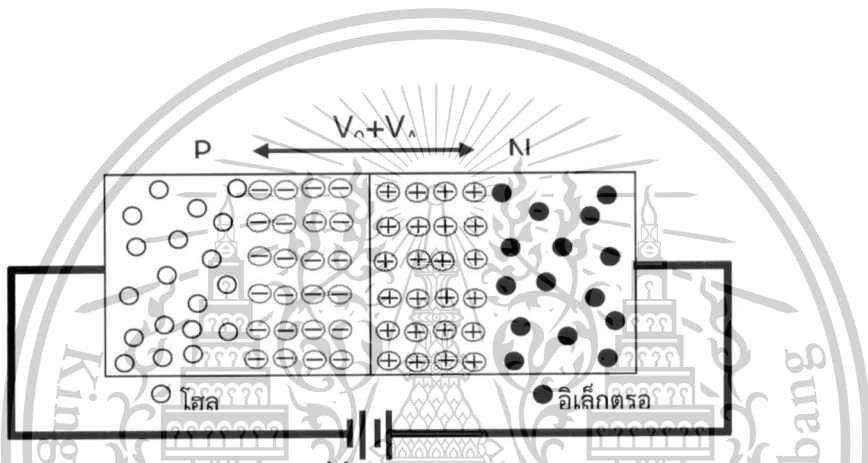
2.2.3. รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse Bias)

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.15 กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นเอกสารถูกเชื่อมเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อพี-เอ็น มีค่า V_A โวลต์แล้วจะพบว่าแรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายใน ซึ่งปรากฏที่บริเวณรอยต่อ (V_0) ดังนั้นจะทำให้

ให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และโฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้ รอยต่อพี-เอ็นในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวน ไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ อย่างไรก็ตามพบว่าในขณะที่โฮลทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านพี ซึ่งมีจำนวนน้อยสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงปรากฏมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับกระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในขณะรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งอาจพิจารณาได้จากสมการที่ (2.4) เมื่อแทนค่าของ V_A ด้วย $-V_A$

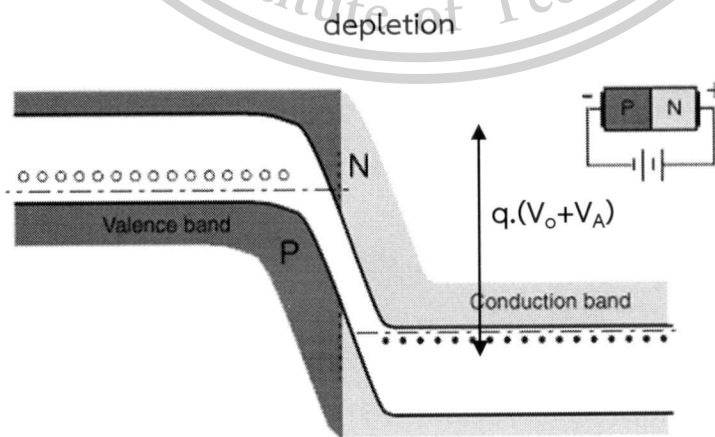
ดังนั้นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

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



รูปที่ 2.15 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ลักษณะของแถบพลังงาน แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งพบว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

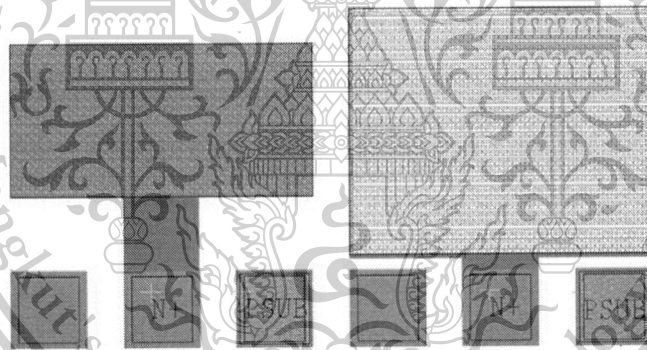
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ซึ่งเป็นการวิจัยและพัฒนา ที่มุ่งศึกษา ปรับปรุง และพัฒนา เทคนิคการวัดและวิเคราะห์ผลเพื่อใช้อธิบายถึงปรากฏการณ์หรือจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นเพื่อให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุวัตถุประสงค์ จึงได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 การออกแบบการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอดในการศึกษา โดยโครงสร้างพื้นฐานของไดโอดที่ใช้ในการศึกษา เมื่อแบ่งตามชนิดของรูปทรงเรขาคณิต มี 2 โครงสร้าง ได้แก่

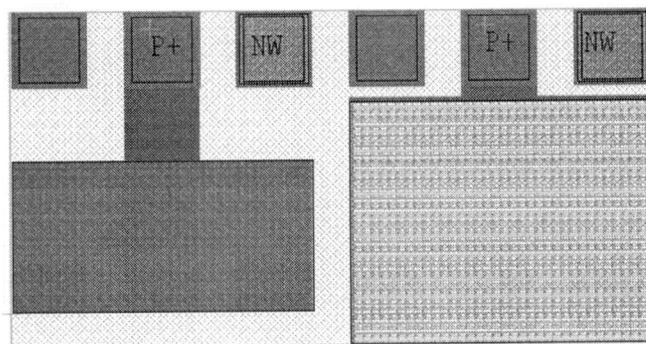
- ไดโอดพื้นที่กว้าง (Large Area Diode) มีรูปทรงเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยม โดยออกแบบให้มีพื้นที่ขนาด กว้าง 200 μm ยาว 400 μm ความยาวเส้นรอบรูป 1,200 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) และรูปที่ 3.2(ก)
- ไดโอดรูปคดเคี้ยว (Meander Diode) มีรูปทรงเป็นพื้นที่คดเคี้ยว โดยออกแบบให้มีพื้นที่ขนาด กว้าง 2 μm ยาว 400 μm จำนวน 100 แถบ ความยาวเส้นรอบรูป 80,400 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข) และรูปที่ 3.2(ข)



(ก) ไดโอดพื้นที่กว้าง

(ข) ไดโอดรูปคดเคี้ยว

รูปที่ 3.1 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{\text{sub}}$

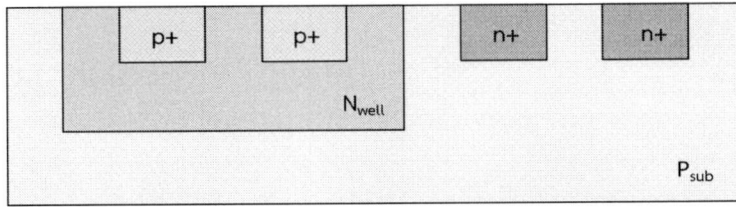


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ก) ไดโอดพื้นที่กว้าง (ข) ไดโอดรูปคดเคี้ยว ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.2 รูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{\text{well}}$
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอส

ดังนั้นโครงสร้างของไดโอดที่ใช้ในการศึกษา เมื่อแบ่งตามชนิดของรอยต่อพี-เอ็น มี 2 ชนิด ได้แก่

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

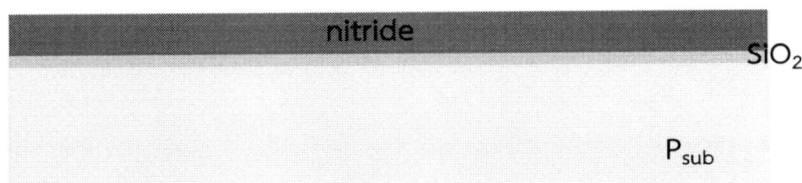
3.2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด

ไดโอดที่ใช้ในการศึกษา จะถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทซีมอสขนาด 0.8 ไมโครเมตร ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.4

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



- 2) สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ หนา 150 nm บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

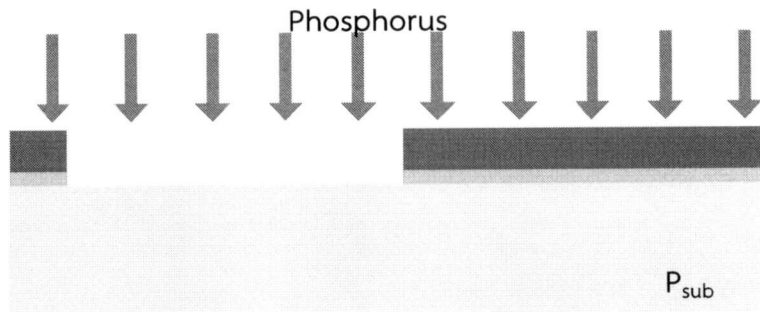


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

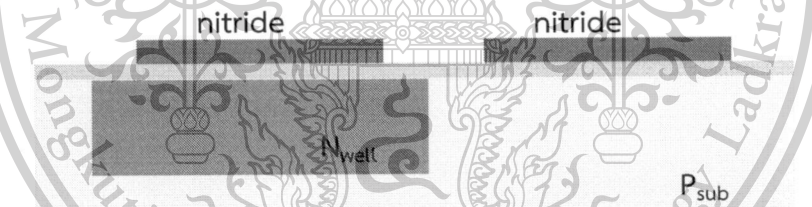
- 3) เปิดช่องซิลิคอนไนไตรด์ เพื่อสร้างบริเวณบ่อแยกชนิดเอ็น (N_{well}) จากนั้นทำการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส ด้วยพลังงาน 140 keV ปริมาณสารเจือ 3.6×10^{12} ions/cm²



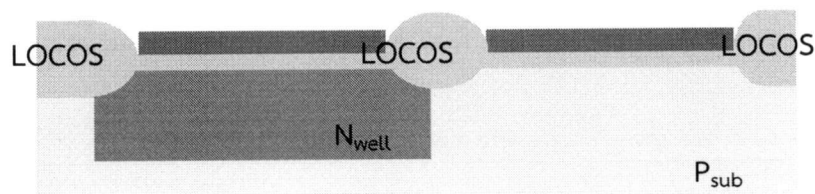
- 4) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ พร้อมขับไล่ออกไซด์ฟอสฟอรัส (Phosphorus Drive-in)



- 5) สร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์หนา 150 nm เพื่อเป็นพื้นที่สร้างอุปกรณ์ (Active area)



- 6) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา (Field Oxide) หนา 650 nm

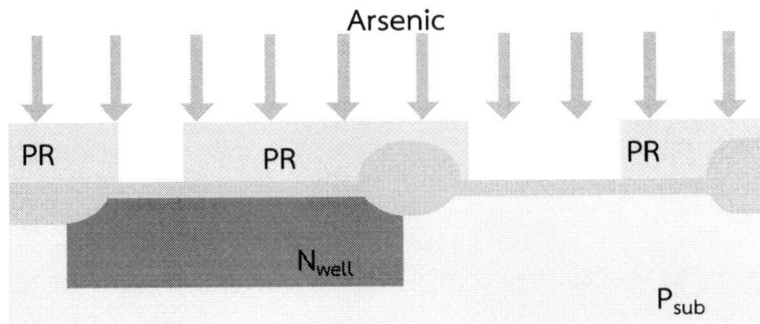


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

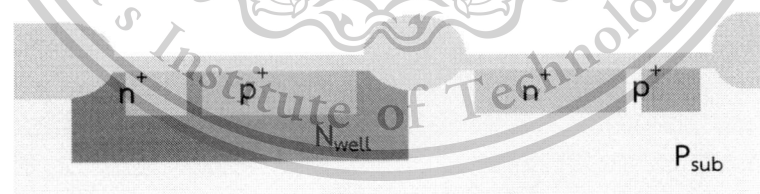
- 7) สกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ออก ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง (Photo Resist) เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างขั้ว n^+ หลังจากนั้นทำการยิงฝังประจุอาซีนิก ด้วยพลังงาน 50 keV ปริมาณสารเจือ $5 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$



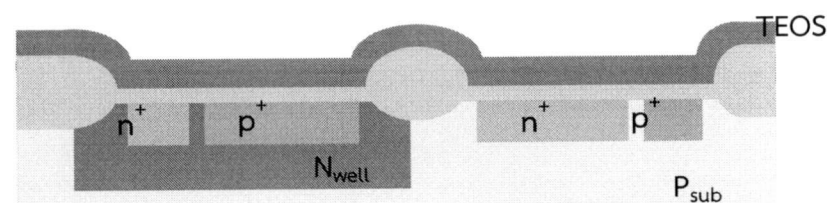
- 8) ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง (Photo Resist) เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างขั้ว p^+ หลังจากนั้นทำการยิงฝังประจุโบรอน ด้วยพลังงาน 40 keV ปริมาณสารเจือ $3 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$



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



- 10) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด TEOS เพื่อเป็นฉนวนป้องกันอุปกรณ์

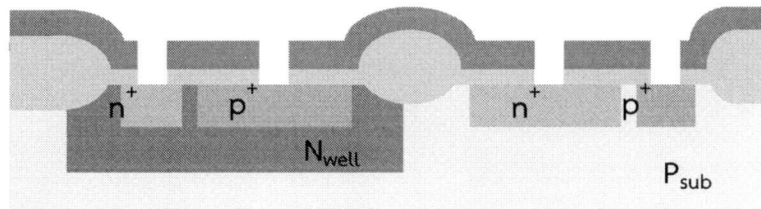


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

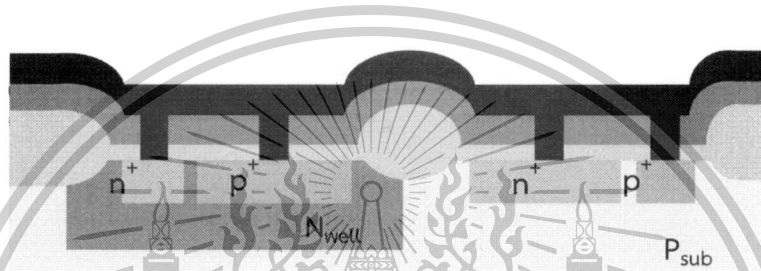
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- 11) ทำการสร้างลวดลายน้ำยาไวแสง (Photo Resist) เพื่อกำหนดบริเวณที่จะสร้างช่องสำหรับ ขั้วโลหะ (contact-spacer)



- 12) ทำการสร้างชั้นโลหะ Ti/TiN และ AlCuSi ด้วยกระบวนการสเปตเตอร์ริง



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



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอด

ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการสร้างอุปกรณ์ 2 ครั้ง ซึ่งในกระบวนการสร้างครั้งที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงแผ่นฐานรองซิลิคอน ชนิดพี ระบาย (100) เป็นพิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ และทำการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส ด้วยพลังงาน 140 keV ปริมาณสารเจือ $7e12 \text{ ions/cm}^2$ เพื่อสร้างบริเวณบ่อแยกชนิดเอ็น (N_{well})

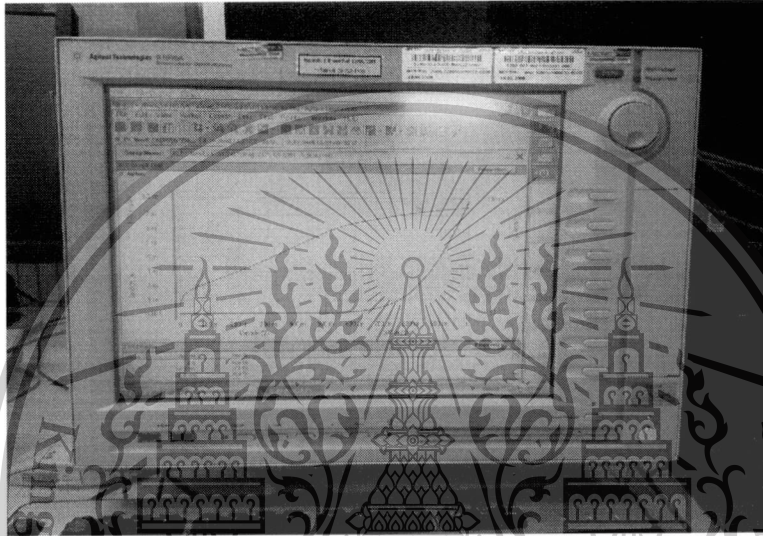
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

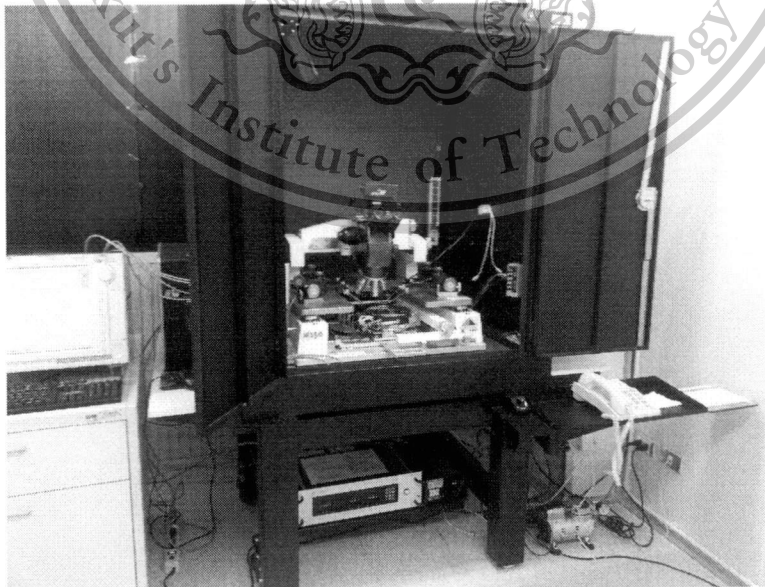
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 เครื่องมือและวิธีการวัดข้อมูล

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



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.6 ตู้พร้อมแทนวัดคุณสมบัติอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับสูง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

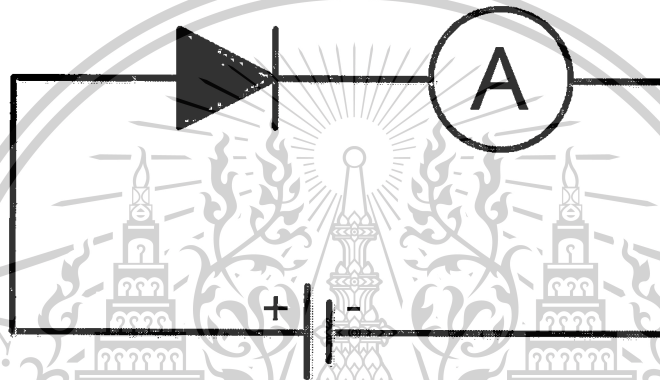
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

คุณลักษณะค่าเก็บความจุไฟฟ้า-แรงดัน ถูกกระทำกับไดโอดแบบเดียวกันด้วยความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตที่อุณหภูมิ $27^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ ความกว้างชั้นปลอดพาหะของพื้นที่ในแผ่นฐานรอง สามารถคำนวณหาค่าจากคุณลักษณะค่าเก็บความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V)

ซึ่งแผนผังการวัดคุณสมบัติอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนผังการวัดคุณสมบัติไดโอด

3.4 วิธีวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

3.4.1 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นกระแสด้วยองค์ประกอบของกระแส

ในหาค่าความหนาแน่นกระแส (Current Density) ทำได้ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรวมที่ได้จากอุปกรณ์ไดโอดตามหัวข้อ 3.1 ที่ผ่านมา ซึ่งข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ไดโอดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ไดโอด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

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

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

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

โดยที่ $I_{A(LA)}$ เป็นกระแสด้านพื้นที่ของไดโอดพื้นที่กว้าง (A)
 $I_{P(LA)}$ เป็นกระแสด้านเส้นรอบรูปของไดโอดพื้นที่กว้าง (A)
 $I_{A(ME)}$ เป็นกระแสด้านพื้นที่ของไดโอดรูปคดเคี้ยว (A)
 $I_{P(ME)}$ เป็นกระแสด้านเส้นรอบรูปของไดโอดรูปคดเคี้ยว (A)

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

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

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่าความหนาแน่นกระแสต้านเส้นรอบรูปของไดโอด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.5) และสมการที่ (3.6)

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

ค่าความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่ของไดโอด สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.5) และสมการที่ (3.7)

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

3.4.2 การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้นด้วยสมการอาร์เรเนียส

สมการอาร์เรเนียส ถูกคิดค้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนชื่อ สวานเต ออกัส อาร์เรเนียส (Svante August Arrhenius) ซึ่งมีรูปแบบสมการอย่างง่ายแต่สามารถใช้คำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เป็นสมการที่สัมพันธ์กับความจริงที่ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้นตามไปด้วย

สมการอาร์เรเนียส เป็นความสัมพันธ์ของค่าคงที่ของปฏิกิริยาเคมี (k) ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ($T - \text{kevin}$) และพลังงานกระตุ้น ($E_a - eV$) ดังแสดงในสมการที่ (3.9)

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

โดยที่ A เป็นค่าแฟกเตอร์ความถี่ ซึ่งมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างพอสมควรสำหรับแต่ละปฏิกิริยา
 R เป็นค่าค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol.K) หรือค่าคงที่ของโบลต์ซมานน์ ($8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)

โดยทั่วไปสมการอาร์เรเนียส มักถูกเขียนให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ ดังนี้

$$\ln(k) = \ln(Ae^{\frac{-E_a}{RT}}) \quad (3.10)$$

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

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

$$\text{โดยที่} \quad y = \ln(k)$$

$$m = -E_a$$

$$x = 1/RT$$

$$b = \ln(A)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 1/RT สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

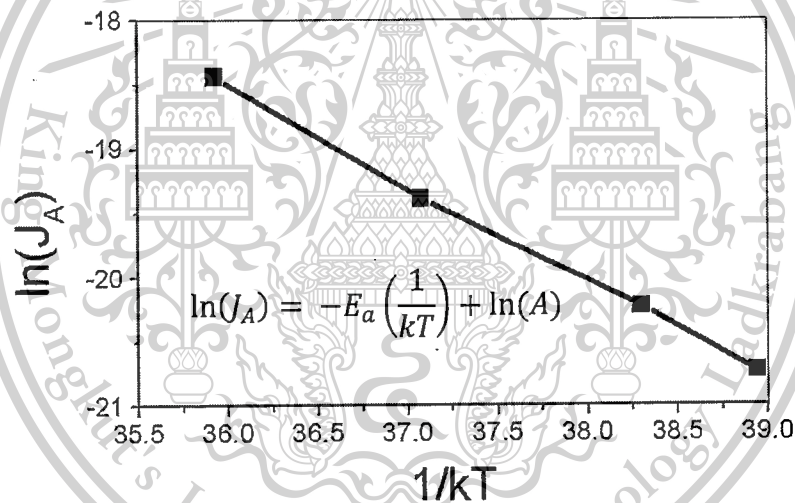
ค่าพลังงานกระตุ้น ($E_a - eV$) สามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟ (m) ซึ่งการคำนวณที่ถูกต้องควรมีอุณหภูมิ (แกน Y) แตกต่างกัน 3 ค่า และมีช่วงอุณหภูมิอย่างน้อย 5°C

ตัวอย่างการหาค่าพลังงานกระตุ้นด้วยสมการอาร์เรเนียส ซึ่งได้จากผลการทดลองดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของอุณหภูมิและความหนาแน่นกระแส

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

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



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

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.8 พบว่าความชันของเส้นกราฟมีค่า 0.6 ซึ่งหมายถึงว่าค่าพลังงานกระตุ้นจากการคำนวณด้วยสมการอาร์เรเนียส มีค่า 0.6 eV

3.4.3 การวิเคราะห์อัตราส่วนช่วงชีวิตก่อนเกิดและช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ที่สัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น

ช่วงชีวิตพาหะแบ่งเป็นสองประเภทคือ ช่วงชีวิตการก่อเกิด (generation lifetimes - τ_g) เป็นช่วงเวลาที่พาหะเกิดขึ้นเนื่องจากพลังงานความร้อน และช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ (recombination lifetimes τ_r) ถูกใช้เมื่อมีพาหะส่วนเกินเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำและเป็นช่วงเวลาที่การรวมตัวใหม่ของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

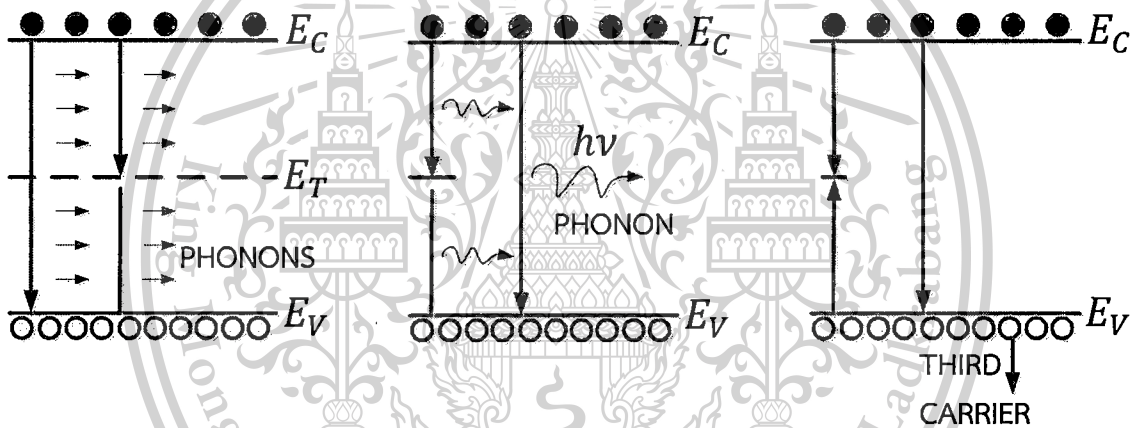
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

พาหะเกิดขึ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างได้จากช่วงการฉีดพาหะระดับสูง (high-level injection) และระดับต่ำ (low-level)

พาหะส่วนเกินหมายถึง ความเข้มข้นของโฮลและอิเล็กตรอนที่เกินจากความเข้มข้นในภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งพาหะส่วนเกินเหล่านี้จะอยู่ในสถานะไม่สมดุล ดังนั้นจึงเกิดความพยายามรวมตัวใหม่เพื่อให้สารกึ่งตัวนำอยู่ในภาวะสมดุลอีกครั้ง

ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่เป็นช่วงเวลาเฉลี่ยที่เกิดคูโฮล-อิเล็กตรอน (electron-hole pair - ehp) ของพาหะส่วนเกิน โดยทั่วไปถ้าในช่วงการฉีดพาหะระดับต่ำจะหมายถึงช่วงชีวิตพาหะส่วนน้อยเมื่อพาหะส่วนน้อยมีความโดดเด่นในกระบวนการรวมตัวใหม่ ซึ่งความเข้มข้นพาหะส่วนน้อยมีจำนวนน้อยกว่าพาหะส่วนมาก แต่ในกรณีของการฉีดพาหะระดับสูง จะไม่มีช่วงชีวิตพาหะส่วนน้อย เนื่องจากเป็นการรวมกันจากช่วงชีวิตของพาหะส่วนมากและพาหะส่วนน้อย

รูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นถึงกลไกพื้นฐานของการเกิดคูโฮล-อิเล็กตรอนของพาหะส่วนเกิน ซึ่งเมื่อคูโฮล-อิเล็กตรอนเกิดการรวมตัวกัน จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาด้วยกลไกทางกายภาพอย่างใดอย่างหนึ่ง



(ก) แบบ multiphonon (ข) แบบ radiative (ค) แบบ Auger

รูปที่ 3.9 กลไกการเกิดคูโฮล-อิเล็กตรอนของพาหะส่วนเกิน

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

ช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ของ SRH สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.12)

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{po}(n_o+n_1+\Delta n)+\tau_{no}(p_o+p_1+\Delta p)}{p_o+n_o+\Delta n} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โดยที่
$$\tau_{po} = \frac{1}{\sigma_p v_p N_T} \quad (3.13)$$

$$\tau_{no} = \frac{1}{\sigma_n v_n N_T} \quad (3.14)$$

$$p = p_o + \Delta p \quad (3.15)$$

$$n = n_o + \Delta n \quad (3.16)$$

$$n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \quad (3.17)$$

$$p_1 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_T}{kT}\right) \quad (3.18)$$

ซึ่ง σ_p, σ_n ค่า capture cross-section ของโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ

v_p, v_n ค่า thermal velocity ของโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ

N_T ค่าความเข้มข้นที่ศูนย์กลาง G-R

p_o, n_o ความเข้มข้นของโฮลและอิเล็กตรอน ณ ภาวะสมดุล ตามลำดับ

p, n ผลรวมความเข้มข้นของโฮลและอิเล็กตรอน ตามลำดับ

n_i ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})

E_T ระดับพลังงานศูนย์กลาง G-R หรือพลังงานกระตุ้น (eV)

E_i ระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (eV)

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

T อุณหภูมิองศาสมบูรณ์ (K)

โดยทั่วไปในซิลิคอนฐานรองชนิดพีพบเสมอว่า $n_o \ll p_o$ และ $n_1 \ll p_o, p_1 \ll p_o$ ทำให้สมการ (3.12) เปลี่ยนรูปได้เป็น

$$\tau_{SRH} \approx \frac{\tau_{po}}{\left(1 + \frac{p_o}{\Delta n}\right) + \tau_{no}} \quad (3.19)$$

ในกรณีที่พลังงานคูโฮล-อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกผ่านในรูปของโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข) กลไกการรวมตัวใหม่แบบนี้เรียกว่า การรวมตัวใหม่แบบ radiative โดยขั้นตอนการรวมตัวใหม่เกิดขึ้นมีทั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแถบความนำตรงไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์ หรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังศูนย์กลางการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะก่อนไปยังโฮลในแถบวาเลนซ์

สำหรับช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่แบบ radiative สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.20)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\tau_{rad} \approx \frac{1}{B(p_0 + \Delta n)} \quad (3.20)$$

โดยที่ B เป็นค่าสัมประสิทธิ์การรวมตัวใหม่แบบ radiative สำหรับซิลิคอน $B \approx 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s}$

กลไกการรวมตัวแบบที่สาม ถูกแสดงในรูปที่ 3.9 (ค) โดยขั้นตอนการรวมตัวใหม่เกิดขึ้นมีทั้ง อิเล็กตรอนจากแถบความนำหรือโฮลในแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังศูนย์กลางการก่อเกิด-การรวมตัวใหม่ของ พาทะ เรียกการรวมตัวใหม่แบบนี้ว่า การรวมตัวใหม่แบบ Auger

สำหรับช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่แบบ Auger สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.21)

$$\tau_{Auger} \approx \frac{1}{C_p(p_0^2 + 2p_0\Delta n + \Delta n^2) + C_n(n_0^2 + 2n_0\Delta n + \Delta n^2)} \quad (3.21)$$

โดยที่ C_p, C_n เป็นค่าสัมประสิทธิ์การรวมตัวใหม่แบบ Auger

จากสมการที่ (3.19), (3.20) และสมการที่ (3.21) ซึ่งใช้อธิบายทั้งการฉีดพาหะในระดับต่ำ และระดับสูง โดยเงื่อนไขการฉีดพาหะในระดับต่ำ (ll) เกิดเมื่อความเข้มข้นพาหะส่วนเกินมีน้อยมากเมื่อ เทียบกับความเข้มข้นพาหะส่วนมากในภาวะสมดุลย์ ($\Delta n \ll p_0$) และการฉีดพาหะในระดับสูง (hl) เกิดเมื่อความเข้มข้นพาหะส่วนเกินมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับความเข้มข้นพาหะส่วนมากในภาวะสมดุลย์ ($\Delta n \gg p_0$)

สำหรับช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ของการฉีดพาหะในระดับต่ำ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.22) ถึงสมการที่ (3.24)

$$\tau_{SRH}(ll) \approx \tau_{no} \quad (3.22)$$

$$\tau_{rad}(ll) \approx \frac{1}{Bp_0} \quad (3.23)$$

$$\tau_{Auger}(ll) \approx \frac{1}{C_p p_0^2} \quad (3.24)$$

และการฉีดพาหะในระดับสูง สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.25) ถึงสมการที่ (3.27)

$$\tau_{SRH}(hl) \approx \tau_{no} + \tau_{po} \quad (3.25)$$

$$\tau_{rad}(hl) \approx \frac{1}{B\Delta n} \quad (3.26)$$

$$\tau_{Auger}(hl) \approx \frac{1}{(C_p + C_n)\Delta n^2} \quad (3.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สำหรับช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ทุกระดับการฉีดพาดหะ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.28)

$$\tau_r = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}}} \quad (3.28)$$

ในแต่ละกระบวนการรวมตัวใหม่ที่แสดงผ่านมาจะเกิดกระบวนการก่อเกิด เกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ แต่คุณลักษณะที่สำคัญของการก่อเกิดแบบ SRH คือมีการกระตุ้นของพลังงานความร้อน แต่กระบวนการรวมตัวใหม่จะไม่มี โดยกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและพลังงานกระตุ้น ซึ่งสามารถพบได้จากการคำนวณอัตราการก่อเกิดแบบ SRH อัตราการก่อเกิดคูโฮล-อิลีกตรอนด้วยความร้อน แสดงได้ดังสมการ (3.29)

$$G = \frac{n_i^2 - pn}{\tau_{po}(n+n_1) + \tau_{no}(p+p_1)} \quad (3.29)$$

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

ในกรณีของอุปรณ์ที่ได้แรงดันย้อนกลับ ($pn < n_i^2$, $pn \approx 0$) จะมีอัตราการก่อเกิดแสดงได้ดังสมการที่ (3.30)

$$G \approx \frac{n_i^2}{\tau_{po}n_1 + \tau_{no}p_1} \quad (3.30)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่เป็น

$$G = \frac{n_i}{\tau_g} \quad (3.31)$$

โดย τ_g เป็นช่วงชีวิตก่อเกิด จากสมการที่ (3.17), (3.18) และสมการที่ (3.30) ทำให้ได้นิยามของช่วงชีวิตก่อเกิด ดังสมการที่ (3.31)

$$\tau_g = \tau_{po} \exp\left[\frac{E_T - E_i}{kT}\right] + \tau_{no} \exp\left[\frac{E_i - E_T}{kT}\right] \quad (3.32)$$

ค่าของอัตราส่วนของ τ_g/τ_r สำหรับการฉีดพาดหะในระดับต่ำ [33] สามารถแสดงดังสมการที่ (3.33)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

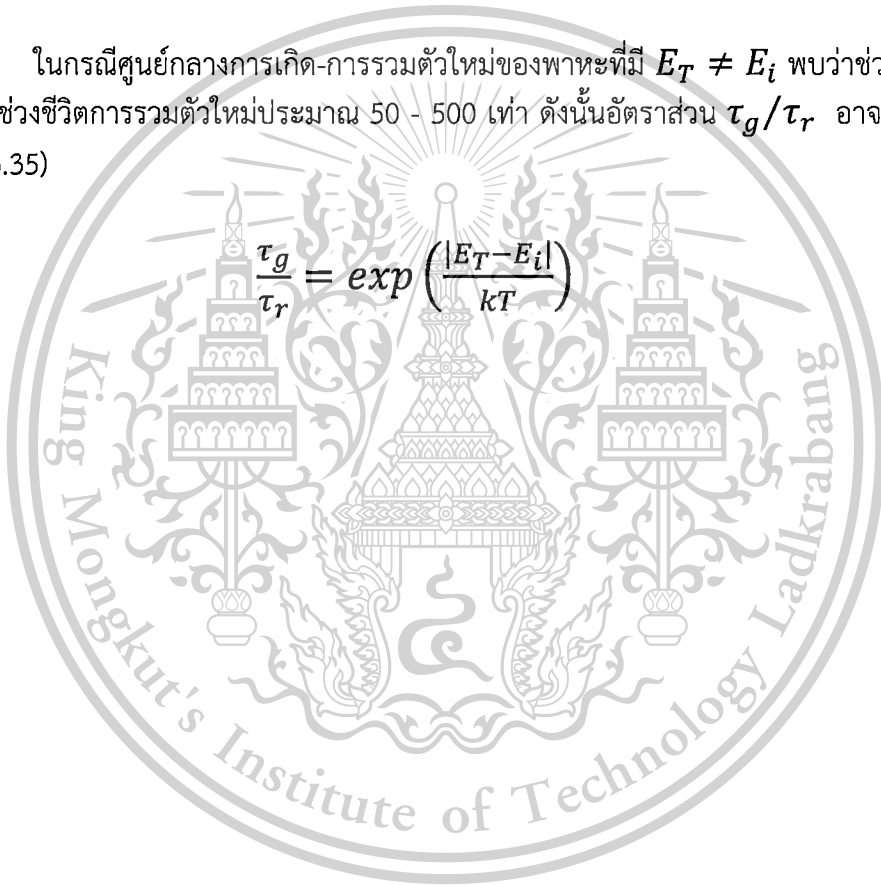
$$\frac{\tau_g}{\tau_r} = 2 \sqrt{\frac{\tau_{po}}{\tau_{no}}} \cosh \left[\left(\frac{E_T - E_i}{kT} \right) + 0.5 \ln \left(\frac{\tau_{po}}{\tau_{no}} \right) \right] \quad (3.33)$$

จากสมการที่ (3.13) และสมการที่ (3.14) พบว่า $\tau_{po}/\tau_{no} = \sigma_n/\sigma_p$ เมื่อค่า thermal velocity ของโฮลและอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากัน โดยทั่วไปอัตราส่วน σ_n/σ_p มีค่าระหว่าง 0.01 -100 ซึ่งอัตราส่วน σ_n/σ_p ที่ปรากฏอยู่ในสมการ (3.33) มีผลน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (3.33) สามารถเขียนเป็นรูปอย่างง่ายดังสมการที่ (3.34)

$$\frac{\tau_g}{\tau_r} \approx 2 \cosh \left(\frac{E_T - E_i}{kT} \right) \quad (3.34)$$

ในกรณีศูนย์กลางการเกิด-การรวมตัวใหม่ของพาหะที่มี $E_T \neq E_i$ พบว่าช่วงชีวิตก่อนเกิดมีค่ามากกว่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ประมาณ 50 - 500 เท่า ดังนั้นอัตราส่วน τ_g/τ_r อาจประมาณได้ดังสมการที่ (3.35)

$$\frac{\tau_g}{\tau_r} = \exp \left(\frac{|E_T - E_i|}{kT} \right) \quad (3.35)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

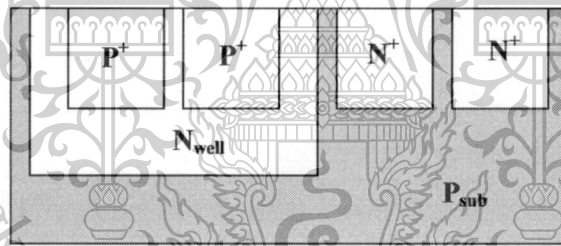
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานภายในรอยต่อพีเอ็น

พัฒนาการของเทคโนโลยีการรวมชั้นโลหะ-อ็อกไซด์-สารกึ่งตัวนำ (CMOS) ในสมัยใหม่ มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของชิพ และลดต้นทุนการผลิต เทคโนโลยีนี้ไม่เพียงแต่ใช้ในการผลิตไมโครชิพเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจจับได้อีกด้วย คุณสมบัติอันเป็นเอกลักษณ์ของอุปกรณ์ชนิดนี้คือการรวมตัวตรวจจับหลายๆชนิดเข้าด้วยกันและยังมีการใช้พลังงานต่ำ ด้วยเหตุผลของต้นทุนการผลิตอุปกรณ์เหล่านี้ เทคโนโลยีซีมอส 0.8 ไมครอน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม เทคโนโลยีนี้การเจือสารด้วยระดับความเข้มข้นสูงลงบนแผ่นฐานรองเป็นสิ่งที่ต้องการ เพื่อให้สามารถควบคุมปรากฏการณ์ช่องแคบ (short channel effect) และกระแสรั่วไหลระดับต่ำ ความเข้มข้นของบ่อแยกชนิดเอ็นหรือชนิดพีถูกเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณการเจือสารด้วยการฝังประจุ กระบวนการนี้นำไปสู่การทำลายแผ่นฐานรอง ซึ่งถูกคาดหวังว่าจะกำจัดได้ภายหลังการแอนนิลลิ่ง (annealing) วิธีการบำบัดด้วยความร้อนในเวลาสั้นๆ และที่อุณหภูมิต่ำ ให้แก่ความถี่รอยต่อภายหลังการฝังประจุเป็นสิ่งจำเป็น แต่อาจจะไม่เพียงพอที่จะกำจัดจุดบกพร่องที่เกิดจากการฝังประจุได้ จุดบกพร่องเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสรั่วไหลในแต่ละส่วนของรอยต่อพี-เอ็นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รอยต่อพี-เอ็นในโครงสร้างซีมอส

กระแสรั่วไหลในรอยต่อพี-เอ็นเป็นพารามิเตอร์หลักอันหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ กระแสรั่วไหลนี้มีความสัมพันธ์กับจุดบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในซิลิคอน จุดบกพร่องหาได้จากช่วงชีวิตการก่อเกิด (τ_g) ดังนั้นทางหนึ่งในการศึกษาจุดบกพร่อง สามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ช่วงชีวิตการก่อเกิด โดยทั่วไปแล้วช่วงชีวิตการก่อเกิดสามารถคำนวณได้จากกระแสการก่อเกิด

ในการศึกษาครั้งนี้ ไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นเป็นชั้นต้นๆ ซึ่งใช้เทคโนโลยีซีมอส 0.8 ไมครอน ถูกสร้างบนแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดพี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร พิกัดความต้านทาน 5 โอห์ม-เซนติเมตร บ่อแยกชนิดเอ็นได้จากการฝังประจุฟอสฟอรัส 4×10^{12} อีออน/ตารางเซนติเมตร ด้วยพลังงาน 140 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ บริเวณ n^+ ถูกฝังประจุอาซีนิก 5×10^{15} อีออน/ตารางเซนติเมตร ด้วยพลังงาน 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และฝังประจุโบรอน 3×10^{15} อีออน/ตารางเซนติเมตร ด้วยพลังงาน 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับบริเวณ p^+ และสุดท้ายรอยต่อจะถูกเชื่อมต่อกับชั้นโลหะอลูมิเนียม

เพื่อใช้ในการศึกษาขององค์ประกอบของกระแสรั่วไหล ไดโอดพื้นที่ (A) และไดโอดเส้นรอบรูป (P) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษามาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแบบต่างๆ จะถูกสร้างบนแผ่นเวเฟอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

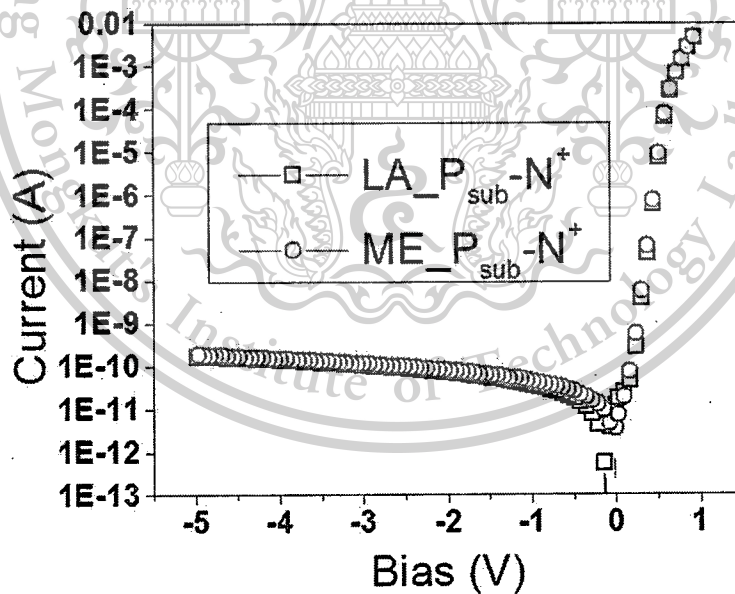
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 รูปแบบเรขาคณิตของไดโอด

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

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

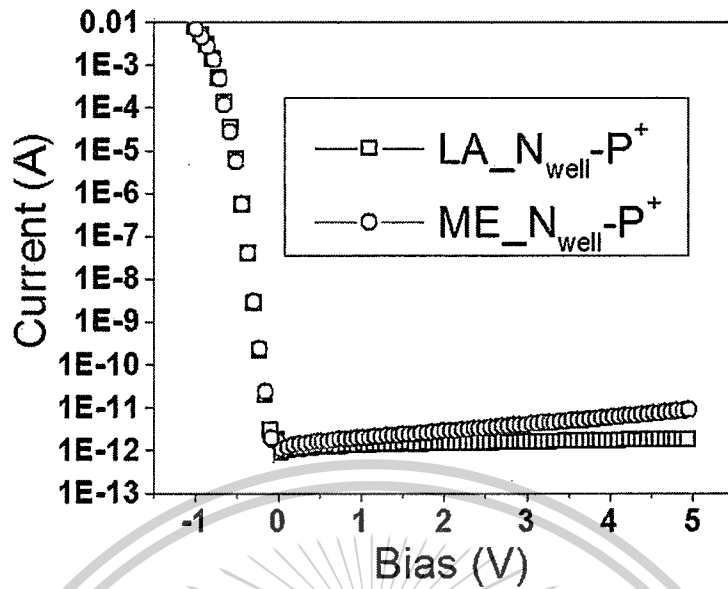
คุณลักษณะค่าเก็บความจุไฟฟ้า-แรงดัน ถูกกระทำกับไดโอดแบบเดียวกันด้วยความถี่ 100 กิโลเฮิรต์ ที่อุณหภูมิ 27°C ความกว้างชั้นปลอดพาหะของพื้นที่ในแผ่นฐานรอง สามารถคำนวณค่าจากคุณลักษณะค่าเก็บความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

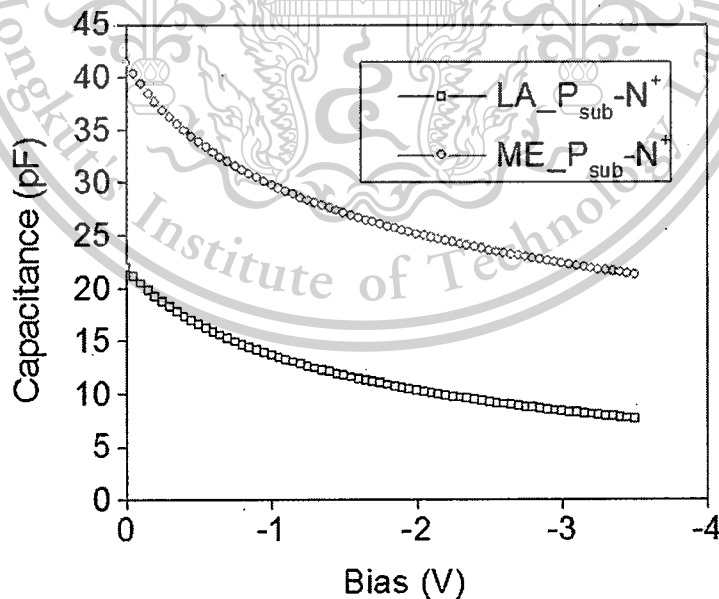
This material is reserved for educational use only; not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

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

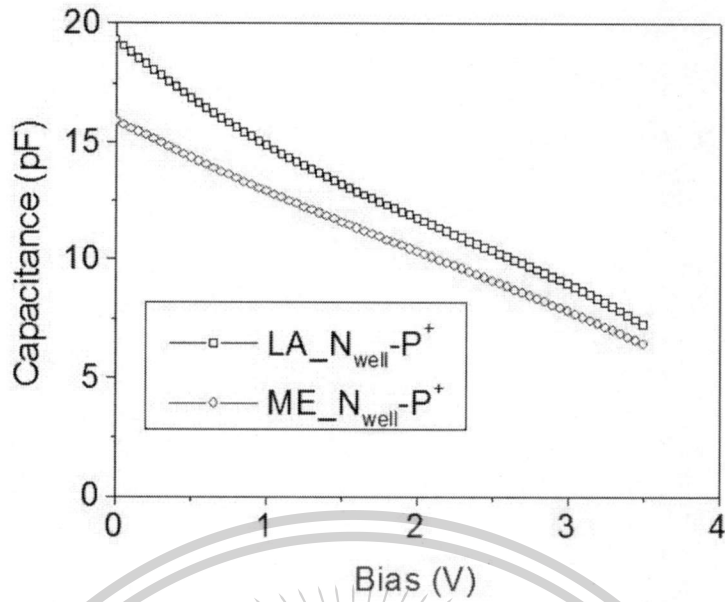


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าเก็บความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

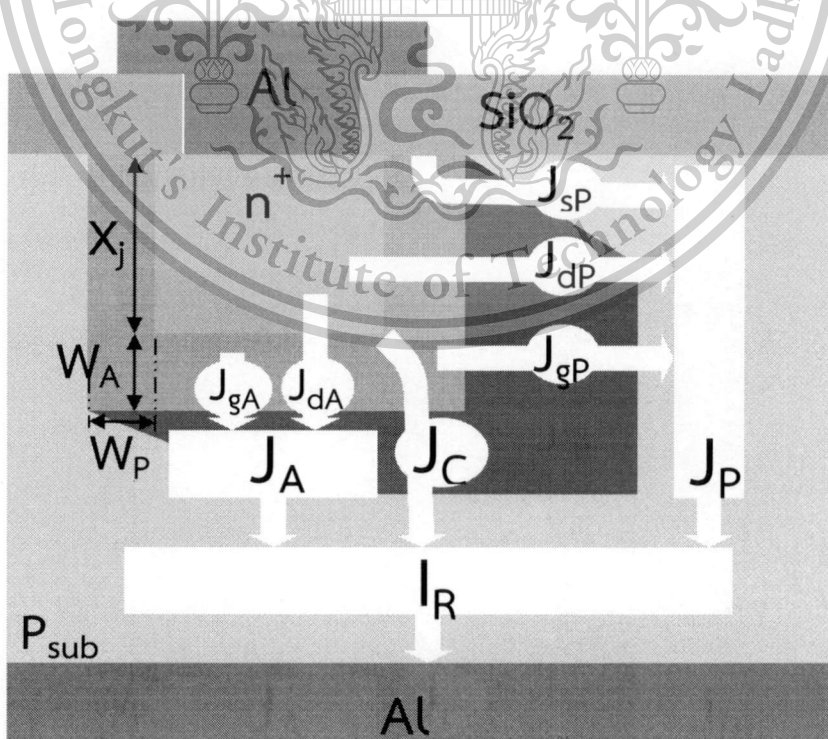
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของค่าเก็บความจุไฟฟ้าและแรงดันของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$

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

4.2 การวิเคราะห์หองค์ประกอบของกระแสในไดโอด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลในรอยต่อของไดโอด
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในการวิเคราะห์กระแสรั่วไหล (leakage current) ที่ไหลผ่านรอยต่อของไดโอดภายใต้เงื่อนไขการไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.6

จากรูปพบว่าองค์ประกอบรวมของกระแสรั่วไหลเกิดจากจากลักษณะการกระจายตัวทางกายภาพของกระแสในแต่ละส่วนที่แตกต่างกัน เช่น กระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ (I_A) กระแสรั่วไหลด้านเส้นรอบรูป (I_P) กระแสรั่วไหลที่มุม (I_C) และกระแสรั่วไหลแฝง (I_{par}) ซึ่งนิยามผลรวมของกระแสรั่วไหล (I_R) สามารถเขียนในรูปสมการที่ (4.1)

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

แต่จากการวิเคราะห์พบว่า $I_A + I_P \gg I_C + I_{par}$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนในรูปสมการที่ (4.1) ใหม่เป็นสมการที่ (4.2)

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

หรือ

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

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

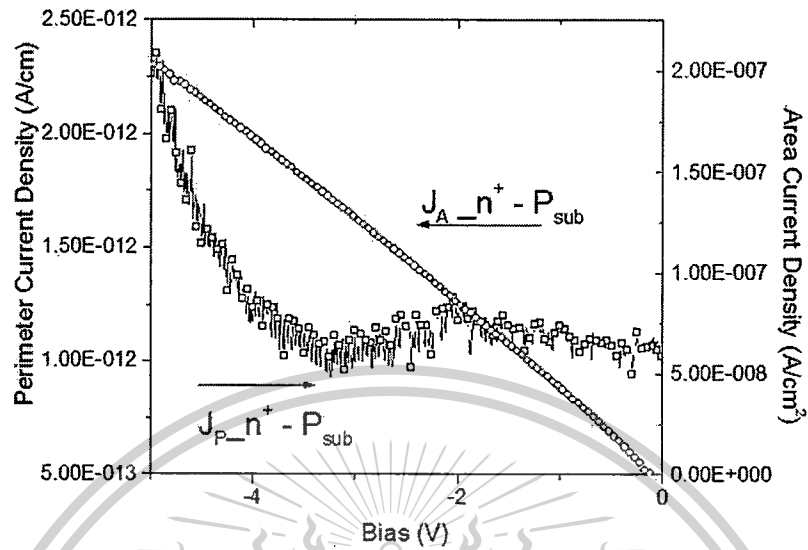
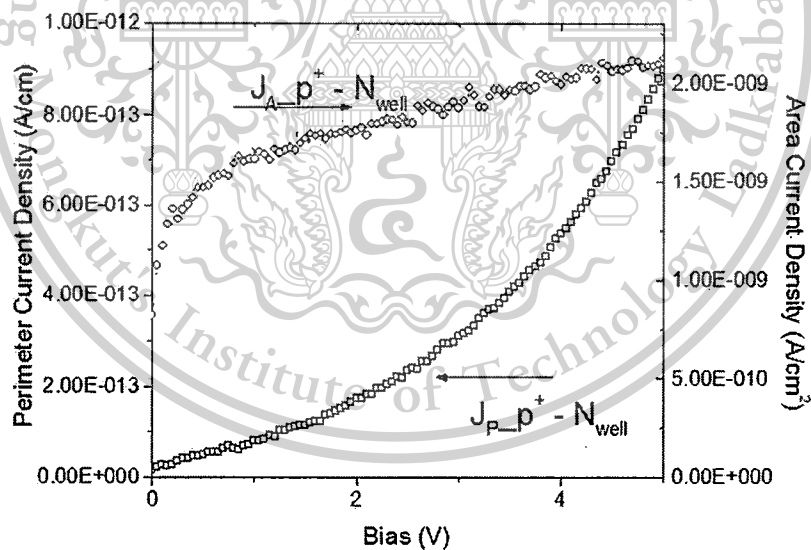
$$J_A = J_{gA} + J_{dA} \quad (4.4)$$

และ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบวงของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน

(ก) ไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$ (ข) ไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$

รูปที่ 4.7 กราฟความหนาแน่นกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของค่าเก็บความจุไฟฟ้าในไดโอด

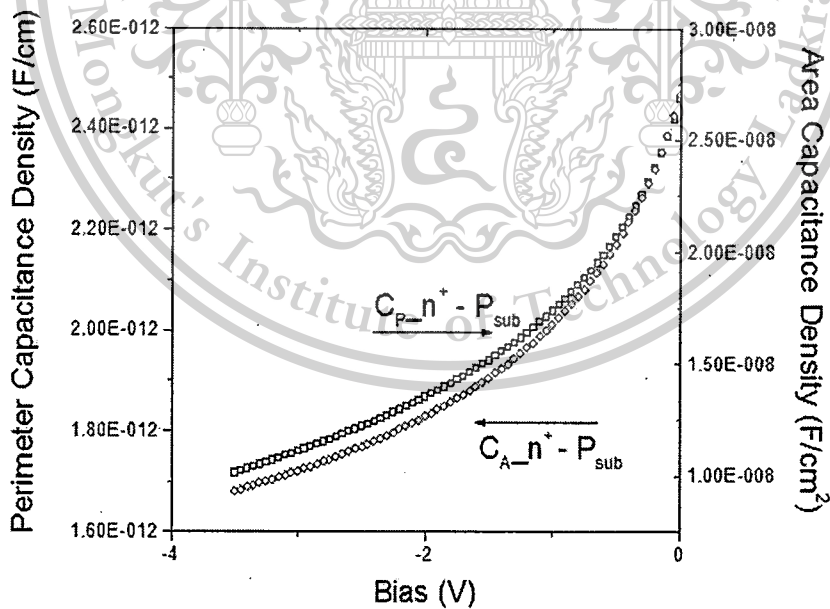
ในการวิเคราะห์ลักษณะเดียวกันกับองค์ประกอบของกระแส และการสมมุติว่าผลรวมค่าเก็บความจุไฟฟ้ารอยต่อ C_j เป็นการรวมแบบเชิงเส้นขององค์ประกอบของค่าเก็บความจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้

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

โดย C_A (F/cm²) เป็นความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ ซึ่งเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ของไดโอด (A), C_P (F/cm) เป็นความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบรูป ซึ่งเป็นสัดส่วนกับเส้นรอบรูปของไดโอด (P)

โดยทั่วไป ผลรวมค่าเก็บความจุไฟฟ้ารอยต่อ (C_j) ถูกวัดค่าการตอบสนองของรอยต่อที่มีต่อสัญญาณแรงดันขนาดเล็กที่คร่อมบนแรงดันไฟตรง ความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ (C_A) และความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าเส้นด้านรอบรูป (C_P) สามารถสมมุติว่าเป็นการรวมแบบเชิงเส้นขององค์ประกอบทางเรขาคณิตที่แตกต่างกัน ดังแสดงในสมการที่ (4.6)

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบวงของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน

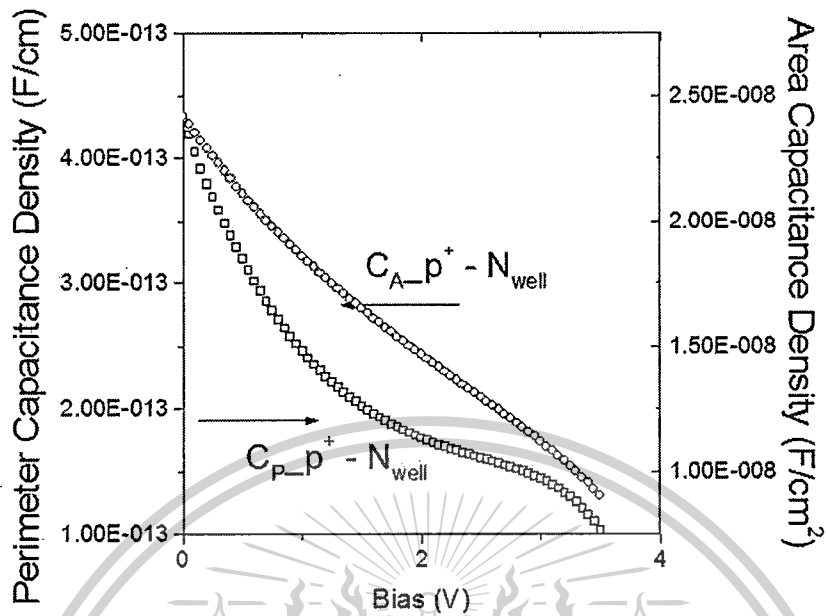


(ก) ไดโอดรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



(ข) ไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$

รูปที่ 4.8 กราฟความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นต่างชนิดกัน

4.4 การวิเคราะห์ความกว้างชั้นปลอดพาหะ

โดยการพิจารณาสมการที่ (4.7) ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ สามารถหาได้จากความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ (C_A)

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

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

และในกรณีความหนาแน่นค่าเก็บความจุไฟฟ้าด้านเส้นรอบรูป (C_P)

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

ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปกับแรงดันย้อนกลับของไดโอดรอยต่อ $p^+ - P_{sub}$ ถูกแสดงดังรูปที่ 4.9 จากรูปความสัมพันธ์พบว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้าน

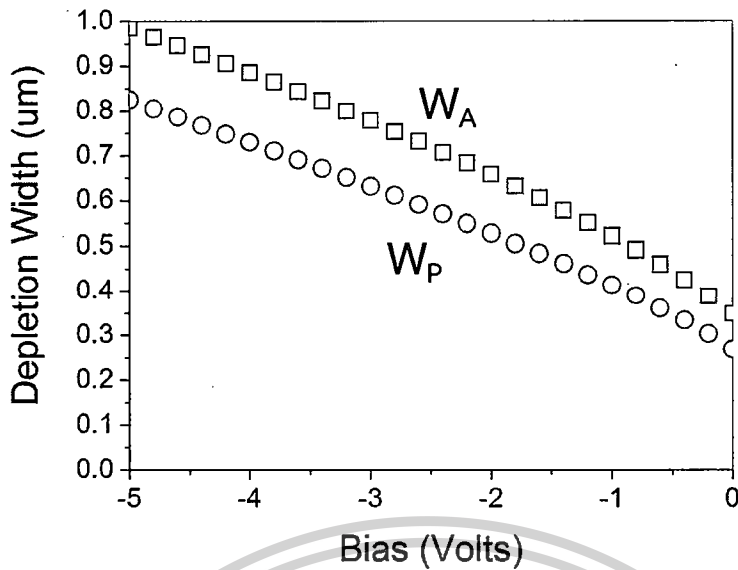
พื้นที่ มีค่ามากกว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป ประมาณ 1.2 เท่าที่แรงดัน 5 โวลต์ และมีค่า 1.3 เท่าที่แรงดัน 0 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

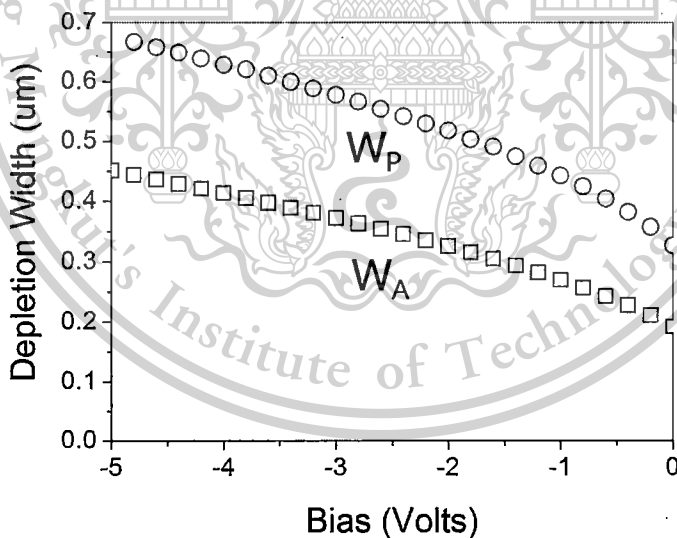
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



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

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่และด้านเส้นรอบรูปกับแรงดันย้อนกลับของไดโอดรอยต่อ $p^+ - N_{well}$ ถูกแสดงดังรูปที่ 4.10 จากรูปความสัมพันธ์พบว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ มีค่าน้อยกว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป ประมาณ 1.5 เท่าที่แรงดัน 5 โวลต์ และมีค่า 1.7 เท่าที่แรงดัน 0 โวลต์



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

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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

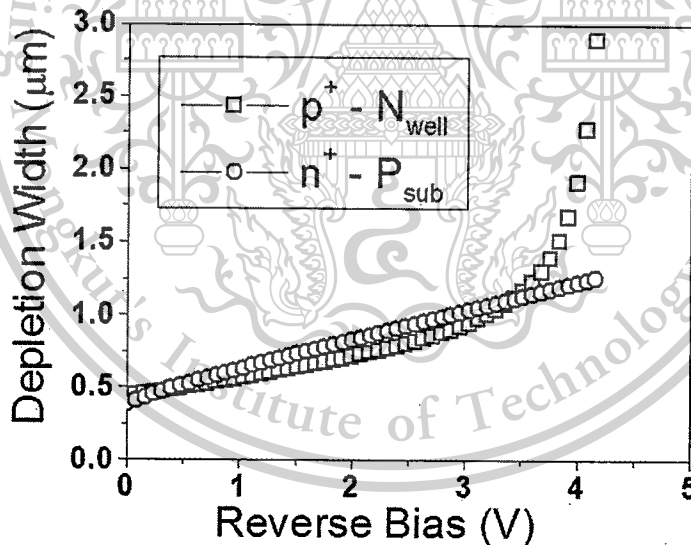
(ประมาณ 10^{15} cm^{-3}) จึงเป็นผลให้ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดรอยต่อ $n^+ - P_{\text{sub}}$ มีค่ามากกว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดรอยต่อ $p^+ - N_{\text{well}}$ ซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ (4.9)

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

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

สำหรับรูปที่ 4.10 พบว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ มีค่าน้อยกว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูป เนื่องจากพื้นที่ที่รอรอยต่อส่วน p^+ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือของโบรอนที่เกิดจากกระบวนการยิงฝังประจุแบบ Voltage Threshold Adjust (VTA) จึงเป็นผลให้ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านเส้นรอบรูปกว้างกว่าด้านพื้นที่

จากสมการ (4.7) ความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ (W_A) สามารถคำนวณหาจากค่าเก็บความจุไฟฟ้าด้านพื้นที่ (C_A) รูปที่ 4.11 แสดงถึงเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่กับค่าไบอัสย้อนกลับที่มีการเจือสารแตกต่างกันของไดโอดที่มีรอยต่อ $n^+ - P_{\text{sub}}$ เปรียบเทียบกับไดโอดที่มีรอยต่อ $p^+ - N_{\text{well}}$



รูปที่ 4.11 ความกว้างชั้นปลอดพาหะพื้นที่กับค่าไบอัสย้อนกลับของไดโอดรอยต่อที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ เพิ่มขึ้นตามค่าไบอัสย้อนกลับ จากค่าความชันของเส้นกราฟ พบว่าการเจือสารที่รอยต่อ $n^+ - P_{\text{sub}}$ มีความสม่ำเสมอ แต่การเจือสารที่รอยต่อ $p^+ - N_{\text{well}}$ มีลักษณะเป็นเส้นสูงชัน เพิ่มขึ้นไม่สม่ำเสมอ สาเหตุเนื่องจากการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วนบ่อแยก N_{well} ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของเส้นกราฟจึงแสดงถึงการเปลี่ยนแปลง

ลักษณะการกระจายของการเจือสารฟอสฟอรัสในบ่อแยก (ซึ่งหมายถึง จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึก)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5 การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดในไดโอด (Generation Lifetimes)

ปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันว่ากระแสรั่วไหลของรอยต่อพี-เอ็น เป็นหนึ่งในหลักพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.2 กระแสรั่วไหลประกอบด้วยกระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ กระแสรั่วไหลด้านเส้นรอบรูป และกระแสรั่วไหลที่มุม ซึ่งกระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ ประกอบกระแสการก่อเกิดและกระแสการแพร่ ดังแสดงในสมการที่ (4.4) โดยผลรวมของกระแสรั่วไหลนี้ มีความสัมพันธ์กับจุดบกพร่องที่มีผลทางไฟฟ้าในซิลิคอนซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นเหล่านี้ส่งผลให้เกิดการลดลงของค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด (τ_g) และค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ (τ_r) ซึ่งเป็นสาเหตุให้กระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดและค่าการรวมตัวใหม่เนื่องจากจุดบกพร่องสามารถวิเคราะห์จากคุณสมบัติในเนื้อสารซิลิคอนโดยการศึกษาจากกระแสรั่วไหลด้านพื้นที่ ซึ่งภายใต้เงื่อนไขการไบอัสย้อนกลับ ความหนาแน่นกระแสการก่อเกิดด้านพื้นที่มีค่าเป็น

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

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

ดังนั้นสมการที่ (4.4) สามารถเปลี่ยนรูปใหม่เป็น

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

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

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

ดังแสดงในสมการที่ (4.12) พบว่าช่วงชีวิตการก่อเกิดขึ้นอยู่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะพื้นที่และความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ ดังนั้นวิธีการหาค่า τ_g จะถูกนำเสนอ ดังต่อไปนี้

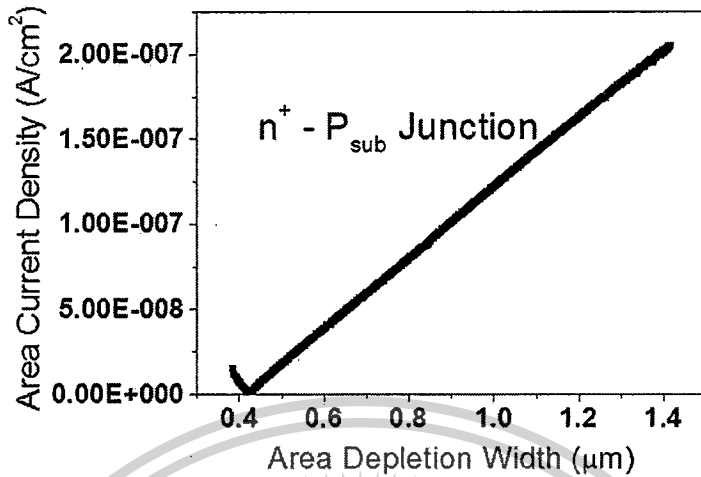
ความหนาแน่นกระแสพื้นที่ สามารถคำนวณจากสมการที่ (4.11) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่ และความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ โดยจุดตัดแกนที่ $W_A = 0$ จะแสดงค่าของ J_{dA} ขณะที่ความชันแสดงค่าของ (qn_i/τ_g) ดังแสดงในสมการที่ (4.13)

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

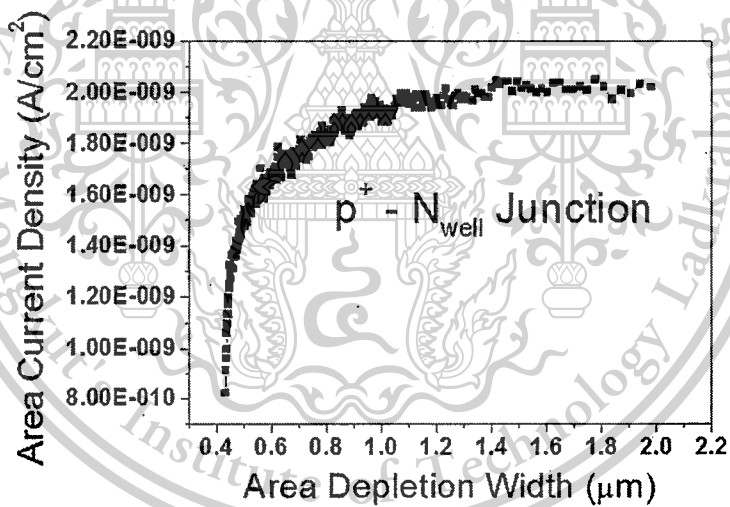
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายบริการลูกค้า

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $n^+ - P_{sub}$

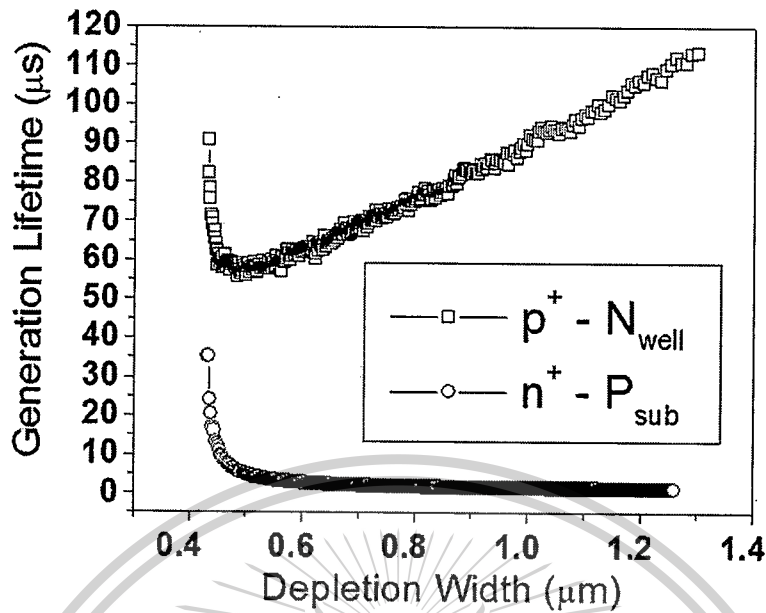


รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดที่มีรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าช่วงชีวิตการก่อเกิด มีค่าคงที่ตลอดช่วงของความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์กับแผ่นฐานรองซิลิคอนที่เจือสารอย่างสม่ำเสมอ แต่ในกรณีของรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด มีค่าไม่คงที่ สาเหตุเนื่องจากแผ่นฐานรองซิลิคอนได้ผ่านกระบวนการยิงฝังประจุสารเจือฟอสฟอรัสที่บริเวณบ่อแยกชนิดเอ็น (n-well) เพื่อสร้างอุปกรณ์มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี ดังนั้นบริเวณนี้จึงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้น

ช่วงชีวิตการก่อเกิด สามารถหาได้จากสมการที่ (4.12) เส้นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ของช่วงชีวิตการก่อเกิดและความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของช่วงชีวิตการก่อเกิดและความกว้างชั้นปลอดพาหะด้านพื้นที่ของไดโอดที่มีรอยต่อแตกต่างกัน

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

ช่วงชีวิตการก่อเกิดสามารถวิเคราะห์ได้จากคุณลักษณะของกระแส - แรงดัน และค่าความจุไฟฟ้า - แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น สารเจือฟอสฟอรัสของกระบวนการยึงฝึงประจุเพื่อสร้างบ่อแยกสามารถเหนี่ยวนำจุดบกพร่องให้เกิดขึ้น จุดบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้เป็นสาเหตุให้ช่วงชีวิตการก่อเกิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดค่าของกระแสการก่อเกิด ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.12) สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่า กระแสรั่วไหลของรอยต่อพี-เอ็นสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือของฐานรองด้วยกระบวนการยึงฝึงประจุสารเจือ

4.6 การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรเนียส

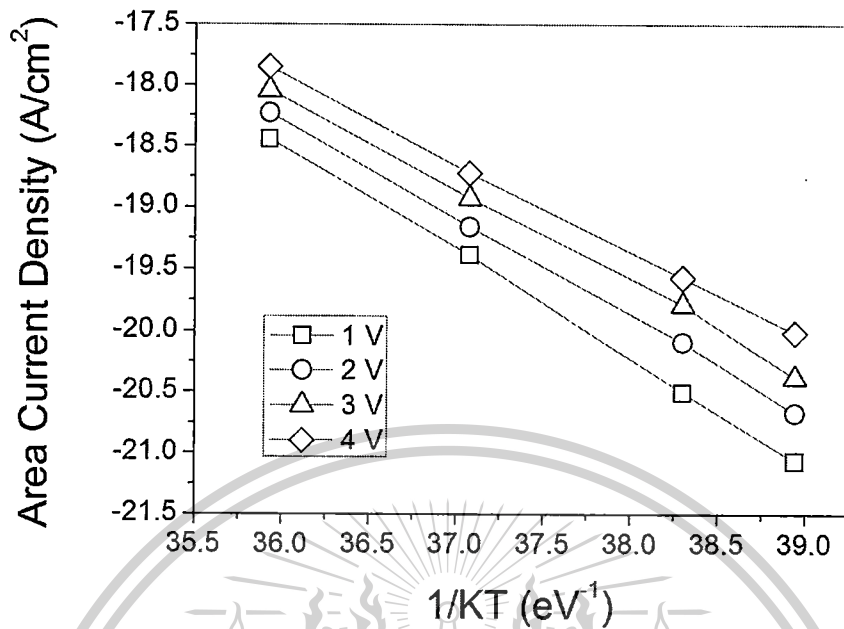
กระบวนการยึงฝึงประจุสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างบ่อแยกสามารถเหนี่ยวนำจุดบกพร่องให้เกิดขึ้น โดยจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้นสามารถวิเคราะห์ถึงคุณลักษณะว่าเป็นจุดบกพร่องประเภทใดได้ด้วยระดับพลังงานจุดบกพร่อง (Defect Energy Level) ซึ่งเป็นระดับพลังงานเฉพาะของจุดบกพร่องแต่ละประเภท

พลังงานจุดบกพร่องหรือพลังงานกระตุ้น สามารถวิเคราะห์หาได้ด้วยเทคนิคของการพล็อตเส้นกราฟจากสมการอาร์เรเนียส จากสมการที่ (3.10) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสด้านพื้นที่กับอุณหภูมิ ซึ่งมีเงื่อนไขการให้แรงดันที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

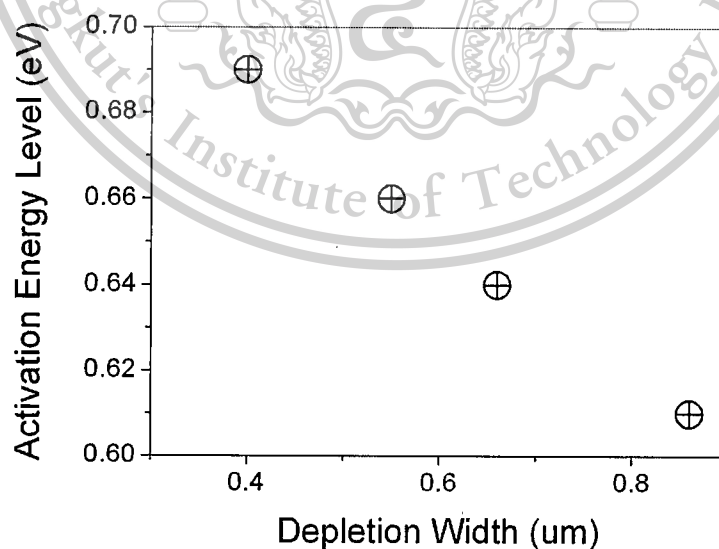
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสต้านพื้นที่กับอุณหภูมิ ซึ่งมีเงื่อนไขการให้แรงดันที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าความชันเส้นกราฟของแต่ละแรงดันหมายถึงระดับพลังงานกระตุ้นที่เกิดขึ้นในแผ่นซิลิคอน จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับพลังงานกระตุ้นและค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับพลังงานกระตุ้นและค่าความกว้างชั้นปลอดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากรูปที่ 4.16 พบว่ามีระดับพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกันกระจายอยู่ในชั้นรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งอาจหมายถึงว่ามีจุดบกพร่องหลายประเภทที่เกิดขึ้นในกระบวนการสร้าง และน่าจะเป็นผลจากกระบวนการยิงฝังประจุสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างบ่อแยกที่เกิดขึ้น

4.7 กระแสรั่วไหลและการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์

การวิจัยครั้งนี้ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอดในการศึกษา โดยโครงสร้างพื้นฐานของไดโอดที่ใช้ในการศึกษา มีรูปทรงเรขาคณิตของไดโอดรอยต่อชนิด $p^+ - N_{well}$ แสดงดังรูปที่ 3.2 และทำการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์ซีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร แบบเป็น 2 กระบวนการผลิต ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 กระบวนการสร้างมาตรฐานอุปกรณ์ซีมอสทรานซิสเตอร์ขนาด 0.8 ไมโครเมตร

Fabrication 1	Fabrication 2
Lot : PI 5qP802 Wafer ID: D12	Lot : PI10P8001A Wafer ID: D17
#Start wafer : P type <100> 5 ohm-cm	#Start wafer : P type <100> 5 ohm-cm
#PHOTOSTEP: N WELL N WELL implant : Phos 3.6 E12 cm ⁻² 140 keV N WELL Drive in : 1050 °C 180 min N ₂ 1000 °C 80 min Wet O ₂	#PHOTOSTEP: N WELL N WELL implant : Phos 7 E12 cm ⁻² 140 keV N WELL Drive in : 1050 °C 180 min N ₂ 1000 °C 80 min Wet O ₂
#VTA implant: BF ₂ 1 E12 cm ⁻² 70 keV	#VTA implant: BF ₂ 1 E12 cm ⁻² 70 keV
#PHOTOSTEP: NPLUS N+ implant < As 5E15 cm ⁻² 100 keV>	PHOTOSTEP:NPLUS N+ Implant: As 5E15 cm ⁻² @ 100 keV
#PHOTOSTEP: PPLUS P+ implant<BF ₂ 3E15 cm ⁻² 70keV>	#PHOTOSTEP: PPLUS P+ implant<BF ₂ 3E15 cm ⁻² 70keV>
#SD Anneal: 900 °C 40 min	#SD Anneal: 900 °C 40 min

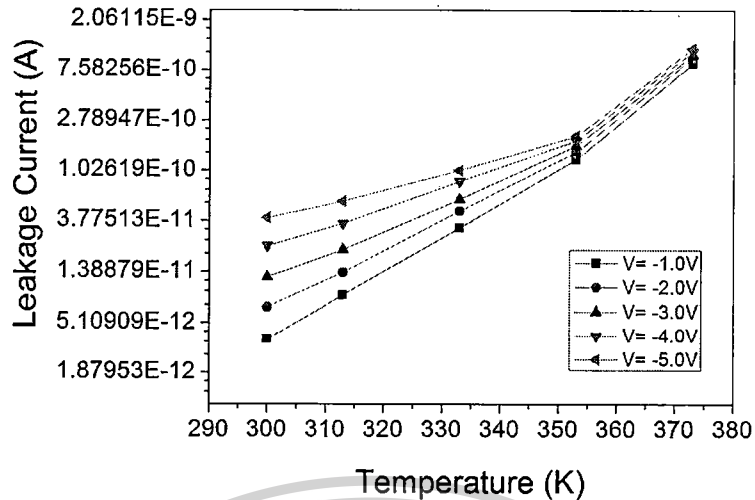
ข้อแตกต่างระหว่างทั้ง 2 กระบวนการผลิต ได้แก่ ปริมาณสารเจือ (dose) ของฟอสฟอรัสในกระบวนการยิงฝังประจุ ซึ่งกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีปริมาณสารเจือ $3.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ และกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีปริมาณสารเจือ $7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

ภายหลังกระบวนการสร้าง ไดโอดที่ใช้ในการศึกษาจะถูกวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้านแรงดันย้อนกลับเพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ไดโอดตั้งแต่ 300 K ถึง 373 K จากการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง สามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ

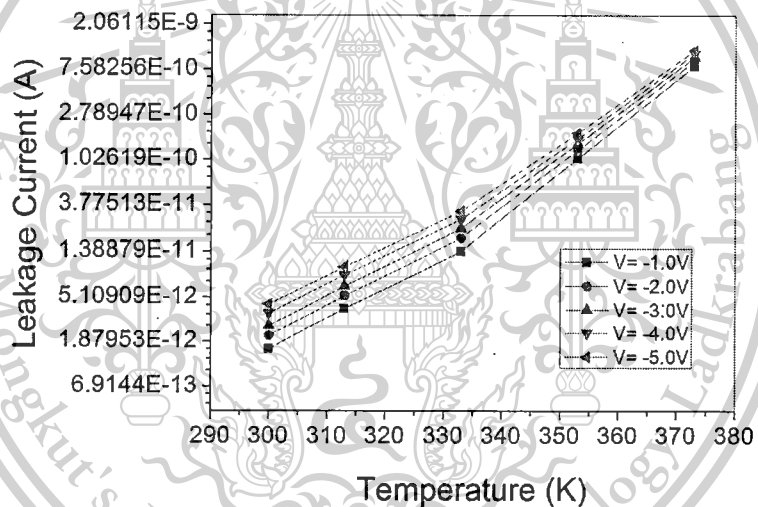
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของกระแสรั่วไหลและอุณหภูมิของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 พบว่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

จากแนวโน้มของข้อมูลข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า

กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่ากระแสรั่วไหลเกิดขึ้นต่างกัน เนื่องจากกระบวนการในการผลิตมีความแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ เส้นกราฟมีสองความชันในแต่ละเส้น ทั้ง 2 กระบวนการผลิต เนื่องจากในความชันช่วงแรกหรือในช่วงที่อุณหภูมิไม่สูงมาก กระแสรั่วไหลที่ได้จะขึ้นกับกระแสที่เกิดในฐานรอง (bulk generation current) ซึ่งสามารถควบคุมด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับ ส่วนความชันช่วงหลังหรือช่วงที่มีอุณหภูมิสูง กระแสรั่วไหลที่ได้จะขึ้นอยู่กับกระแสการแพร่ (diffusion current) ซึ่งไม่สามารถควบคุมด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับ แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยสังเกตได้ว่ากระแสการแพร่จะแสดงผลชัดเจนที่อุณหภูมิ 353 K ขึ้นไป

จากข้อมูลยังพบว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีกระแสการแพร่ที่มากกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ตั้งแต่อุณหภูมิ 333 K ขึ้นไป เนื่องจากว่าในกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีขั้นตอนของการให้ปริมาณสารเจือ (dose) ของฟอสฟอรัสในกระบวนการยิงฝังประจุเข้มข้นน้อยกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ซึ่งมีผลให้กระแสการแพร่ในกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 จะแสดงผลชัดเจนกว่า ดังสมการของช็อคเลย์ (Shockley equation) ที่แสดงในสมการที่ (4.14) และสมการที่ (4.15) ตามลำดับ

$$J = J_{so} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (4.14)$$

$$J_{so} = \left[\left(\frac{qD_h}{L_h N_D} \right) + \left(\frac{qD_e}{L_e N_A} \right) \right] n_i^2 \quad (4.15)$$

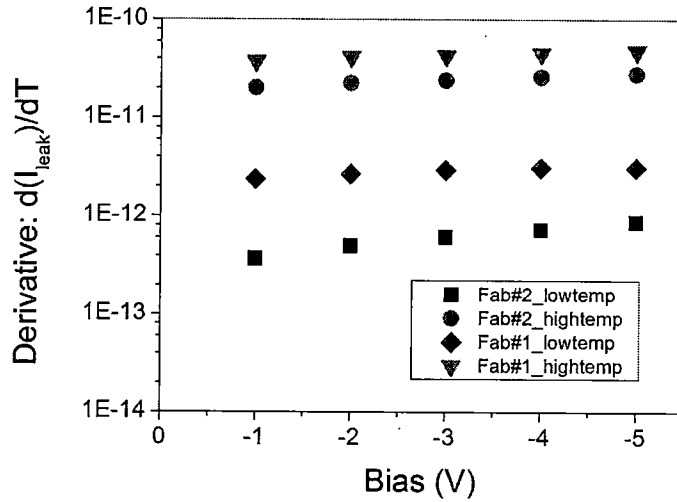
J	ความเข้มข้นกระแสรวม (A/cm^2)
J_{so}	ความเข้มข้นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (A/cm^2)
D_h, D_e	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ (cm^2/sec)
L_h, L_e	ระยะการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ (cm)
N_D, N_A	ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับ ($atom/cm^3$)
n_i	ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์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

จากนั้นหาความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ หรือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงาน (Power Loss Coefficient) ของทั้ง 2 กระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

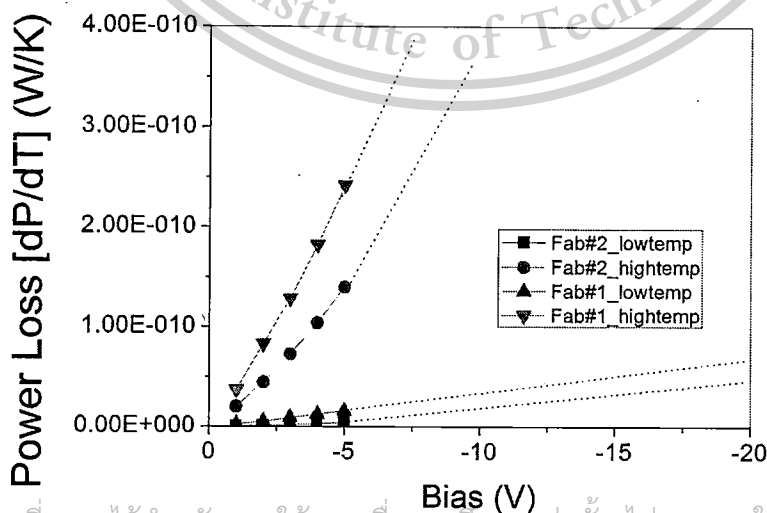


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.19 พบว่า กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมากกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ตลอดช่วงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ทั้งช่วงอุณหภูมิต่ำและสูง โดยทั้ง 2 กระบวนการผลิตมีแนวโน้มคล้ายกัน

จากข้อมูลข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีการสูญเสียพลังงานที่รอยต่อพี-เอ็นมากกว่าในกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของอะตอมฟอสฟอรัสที่ได้จากกระบวนการยิงฝังประจุตั้งที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จากข้อมูลในรูป 4.19 สามารถนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการสูญเสียพลังงานที่รอยต่อพี-เอ็นต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ โดยมีเส้นคาดคะเนแนวโน้มของการสูญเสียพลังงานที่รอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูป 4.20 ความสัมพันธ์ของค่าการสูญเสียพลังงานต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ นำเสนอวิธีการวิเคราะห์เพื่อหาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้นในรอยต่อพี-เอ็นของอุปกรณ์ไดโอด เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน โดยการศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของกระแสรั่วไหลกับความบกพร่องของซิลิคอนในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น

ผลการทดลองแสดงถึงคุณสมบัติพื้นฐานของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ได้แก่ การวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานภายในรอยต่อพีเอ็น การวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแส และค่าเก็บความจุไฟฟ้าในไดโอด การวิเคราะห์ความกว้างชั้นปลอดพาหะ การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิดในไดโอด การวิเคราะห์ค่าพลังงานกระตุ้นด้วยเทคนิคสมการอาร์เรเนี่ยส และในหัวข้อสุดท้าย เป็นการประยุกต์ใช้งานในด้านการวิเคราะห์องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลด้านการสูญเสียพลังงานในรอยต่อพีเอ็น ซึ่งจะกล่าวถึงกระแสรั่วไหลและการสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์

ในขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ไดโอดที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างกัน 2 แบบคือ Large Area Diode และ Meander Diode โดยออกแบบให้มีขนาดพื้นที่เท่ากันทั้ง 2 แบบ เพื่อให้สอดคล้องและง่ายต่อการคำนวณหาพารามิเตอร์อื่นๆ สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไดโอดใช้เทคโนโลยีการผลิตซีมอสแบบมาตรฐานขนาด 0.8 ไมโครเมตร ที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยขั้นตอนการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสเพื่อสร้างบ่อแยกชนิดเอ็นอาจทำให้เกิดความบกพร่องในซิลิคอนขึ้นได้ ถึงแม้ว่าขั้นตอนของกระบวนการสร้างอุปกรณ์ โดยเฉพาะกระบวนการแอนนีสลิ่ง (Annealing) ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญเพื่อซ่อมแซมและจัดเรียงตัวโครงสร้างของผลึกที่เสียหายจากกระบวนการยิงฝังประจุให้กลับอยู่ในสภาพที่ปกติเหมือนเดิม อาจทำได้ไม่สมบูรณ์หรือมีเงื่อนไขของกระบวนการแอนนีสลิ่งที่ไม่เหมาะสม จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความบกพร่องในโครงสร้างผลึกเกิดขึ้น ดังนั้นการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่ทำให้เกิดความบกพร่องจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขในการศึกษาและจากคุณลักษณะของกระแสรั่วไหลในรอยต่อพี-เอ็น จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้น เพื่อแสดงถึงความบกพร่องที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกซิลิคอน

ภายหลังจากกระบวนการสร้างทำการวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดัน และค่าเก็บประจุไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยให้ทั้งแรงดันไบอัสตรงและแรงดันย้อนกลับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 27°C - 100°C ในตู้มีดพร้อมแทนวัดคุณสมบัติอุปกรณ์ จากนั้นนำข้อมูลที่ไดจากการวัดมาทำการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของกระแสรั่วไหล ค่าช่วงชีวิตการก่อเกิด ค่าช่วงชีวิตการรวมตัวใหม่ และค่าพลังงานกระตุ้นในรอยต่อพี-เอ็น ตลอดจนการเปรียบเทียบผลของกระบวนการผลิตที่มีผลต่อผลรวมของกระแสรั่วไหลและด้านการสูญเสียพลังงานของอุปกรณ์ไดโอด

จากแนวโน้มของข้อมูลพบว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีค่ากระแสรั่วไหลเกิดขึ้นต่างกัน กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วไหลต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมากกว่า กระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ตลอดช่วงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ทั้งช่วงอุณหภูมิต่ำและสูง โดยทั้ง 2 กระบวนการผลิตมีแนวโน้มคล้ายกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารจากข้อมูลสามารถอธิบายได้ว่า กระบวนการผลิตครั้งที่ 1 มีการสูญเสียพลังงานที่รอยต่อพี-เอ็นการคำนวณมากกว่าในกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของอะตอม

ฟอสฟอรัสที่ได้จากกระบวนการยึงฝิ่งประจุ ซึ่งในกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีความบกพร่องในโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกันและมีลักษณะสม่ำเสมอมากกว่า เป็นผลเนื่องจากกระบวนการยึงฝิ่งประจุฟอสฟอรัสมีเงื่อนไขที่เหมาะสมกับกระบวนการแอนนีลลิ่งซึ่งช่วยจัดเรียงตัวโครงสร้างของผลึกที่เสียหายจากกระบวนการยึงฝิ่งประจุให้กลับอยู่ในสภาพที่ปกติเหมือนเดิมได้ดีกว่าเงื่อนไขของกระบวนการผลิตครั้งที่ 1 และเนื่องจากปริมาณสารเจือฟอสฟอรัสของกระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีความเข้มข้นมากกว่า จึงส่งผลให้ความกว้างชั้นปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นแคบลง และกระแสก่อกำเนิดจึงลดลงด้วย ทำให้กระบวนการผลิตครั้งที่ 2 มีกระแสรั่วไหลรวมในรอยต่อพี-เอ็นน้อยกว่ากระบวนการผลิตครั้งที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ประการคือ

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์หาความสม่ำเสมอของสารเจือภายหลังจากระบวนการสร้างบนแผ่นซิลิคอน
2. เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้จากงานวิจัยและพัฒนาสู่ภาคอุตสาหกรรม
3. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการสู่สังคม

ซึ่งผลดำเนินงานหรือผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย สรุปได้ดังนี้

1. โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างและพัฒนาเครื่องมือในการวิเคราะห์ความบกพร่องของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อพี-เอ็น โดยต้องการลดค่าใช้จ่ายจากเครื่องมือราคาแพงจากต่างประเทศ ทั้งสามารถทำได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว เพียงใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและตู้มีดพร้อมแท่นวัดคุณสมบัติอุปกรณ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานของห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำเพียงชุดเดียว ดังที่ได้นำเสนอในรายงานฉบับนี้
2. โครงการวิจัยนี้ได้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้จากงานวิจัยและพัฒนาสู่ภาคอุตสาหกรรม โดยผู้วิจัยได้ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีและเทคนิคการวิเคราะห์ให้แก่บุคลากรของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center: TMEC) ซึ่งผู้รับการถ่ายทอดคือ ดร.จิรวัฒน์ ปราบเขต ตำแหน่งนักวิจัยของศูนย์ฯ ดังภาคผนวก ก
3. โครงการวิจัยนี้ มีการเผยแพร่ผลงานวิชาการสู่สังคม โดยมีการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุม World Congress on Industrial Materials – Applications, Products, and Technologies (WCIM2013) ณ เมืองปักกิ่ง ประเทศจีน เมื่อวันที่ 1-2 เมษายน 2556 และบทความได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Advanced Materials Research ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล Scopus ดังภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บรรณานุกรม

- A. Czerwinski, E. Simoen, C. Claeys, K. Klima, D. Tomaszewski, J. Gibki, and J. Katcki. "Optimized diode analysis of electrical silicon substrate properties." **J. Electrochem. Soc.**, Vol.145(6), pp.2107-2112, 1998.
- B, Yu, H, Wang, A, Joshi, Q, Xiang, E, Ibok, and M.R. Lin. "15nm gate length planar CMOS transistor." **IEDM Tech. Digest.** pp.937-939, 2001.
- C. Claeys, A. Poyai, E. Simoen, A. Czerwinski, and J. Katcki. "p-n junction diagnostics to determine surface and bulk generation/recombination properties of silicon substrate." **J. Electrochem. Soc.**, Vol.146(3), pp.1151-1157, 1999.
- C. Claeys, E. Simoen, A. Poyai, and A. Czerwinski, "Electrical Quality Assessment of Epitaxial Wafers Based on p-n Junction Diagnostics." **J. Electrochem. Soc.**, Vol. 146(9), pp.3429-3434, 1999.
- D.V. Lang. "Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors." **J. Appl. Phys.**, Vol. 45 (1974) 3023.
- D.V. Lang. "Method for Measuring Traps in Semiconductors." US Patent 3,859,595. 1975.
- Dennard R.H.et al. "Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions." **IEEE J. Solid-State Circ.** Vol.9., pp.256, 1974.
- Dewitt G. O. **Modern MOS Technology: Process, Devices, and Design.** The United States of America. McGraw-Hill, Inc. 1984.
- H. Kubota, H. Nagano, J. Sugamoto, H. Matsushita, M. Momose, S. Nitta, S. Samata, and N. Tsuchiya. "Use of diode diagnostics for silicon wafer quality characterization: Effect of COP on pn junction leakage." In: **Proc. Of High Purity Silicon VI**, Eds C.L. Claeys, P. Rai-Choudhury, M. Watanabe, P. Stallhofer, and H.J. Dawson, PV2000-17, **The Electrochem, Soc.**, Pennington, NJ. Pp. 634-645, 2000.
- H. Ryssel and I. Ruge. "Ion Implantation." John Wiley & Sons, New York, 1986.
- H.C.H. Wang, C.C. Wang, C.S. Chang, T. Wang, P.B. Griffin, and C.H. Diaz. "Interface induced uphill diffusion of boron: an effective approach for ultrashallow junction." **IEEE Electron Device Lett.**, Vol. 22(2), pp. 65-67, 2001.
- I.H. Nam, J.S. Sim, S.I. Hong, B.G. Park, J.D. Lee, S.W. Lee, M.S. Kang, Y.W. Kim, K.P. Suh, and W.S. Lee. "Ultrathin gate oxide grown on nitrogen-implanted silicon for deep submicron CMOS transistors." **IEEE Trans. Electron Devices**, Vol.48(12), pp.2310-2316, 2001.
- J.W. Slotboom, M.J.J. Theunissen, and A.J.R. DeKock. "Impact of silicon substrates on leakage current." **IEEE Electron Device Lett.**, Vol. EDL-4(11), pp. 403-406, 1983.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- K.K. Bourdelle, Y. Chen, R.A. Ashton, L.M. Rubin, A. Agarwal, and W.A. Morris. "Evaluation of high doses, high energy boron implantation into Cz substrates for epi-replacement in CMOS technology." *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 48(9), pp. 2043-2049, 2001.
- Mauro Zambuto. **Semiconductor Devices**. International Edition. Singapore. McGraw-Hill, Inc. 1989.
- Moore G.E. "Cramming more Components onto Integrated Circuits." *Electronics*, 38 (8) (April 19, 1965); reproduced in *Proc. IEEE*, 86, 82 (1998).
- R. Winkler. "On the influence of the interstitial oxygen on DRAM device yield and reliability." In: *Proc. Of High Purity Silicon VI*, Eds C.L. Claeys, P. Rai-Choudhury, M. Watanabe, P. Stallhofer, and H.J. Dawson, PV2000-17, **The Electrochem, Soc.**, Pennington, NJ. pp. 634-645, 2000.
- Rebert R Schller. "Moore's Law : Past, Present, and Future." *IEEE Spectrum*, June 1997, Vol 34 No 6 pp.53-59.
- S.M. Sze., **Physics of Semiconductor Devices**. Wiley, New York. 1981.
- Schroder D.K. **Semiconductor Materials and Device Characterization**. John Wiley & Sons, New York, 1990.
- Schroder, D.K. "The concept of generation lifetime in semiconductors." *IEEE Trans. Electro. Dev.* ED-29:1336-1338 (1982).
- Semiconductor Industry Association (SIA), "The National Technology Roadmap for Semiconductor", San Jose, CA, 2001, [Online]. Available : <http://public.itrs.net/>
- Semiconductor Industry Association. "The International Technology Roadmap for Semiconductors." 2009 Edition.
- Shockley, W. and Read, W.T. "Statistics of the recombination of holes and electrons." *Phys. Rev.*, 87:835-842 (1952); Hall, R.N., Electron-hole recombination in germanium. *Phys. Rev.*, 87:387 (1952).
- W. Scot Ruska. **Microelectronics Processing : An Introduction to the Manufacture of Integrated Circuits**. International Edition. Singapore. McGraw-Hill, Inc. 1988.
- W.C. O'Mara, R.B. Herring, and L.P. Hunt., **Handbook of semiconductor silicon technology**. Noyes Publications, New Jersey, 1990.
- W.R. Runyan and K.E. Bean. **Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology**. The United States of America. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1990.
- Wolf. S. and Tauber. R.N. **Silicon Processing for The VLSI Era, Volume 1 : Process Technology**. The United States of America. Lattice Press. 1986.
- Y. Tamai, M.M. Oka, A. Nakada and T. Ohmi. "influence of substrate dopant concentration on electrical properties and residual defects in pn junction formed by low-temperature post-implantation annealing." *J. Appl. Phys.*, Vol. 87(7), pp. 3488-3496, 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

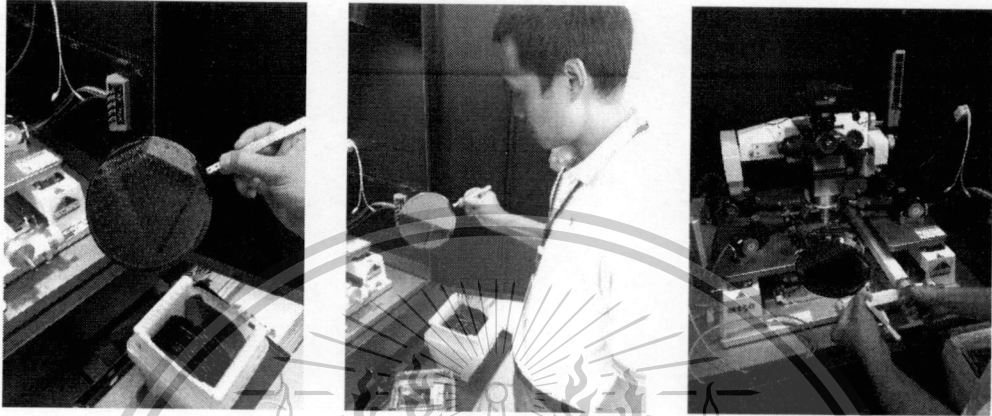
ผู้ถ่ายทอดเทคโนโลยี : ดร.วีระ เพ็งจันทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ KMITL

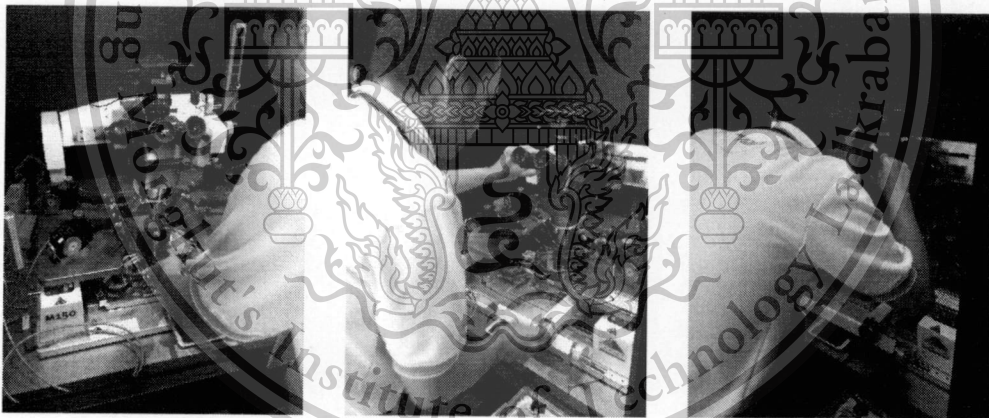
ผู้รับการถ่ายทอด : ดร.จิรวุฒิ ปราบเขต

ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ NECTEC

- แผ่นซิลิคอนภายหลังที่ถูกสร้างอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว และนำมาทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า



- การวางแผ่นซิลิคอนบนแท่นฐานรองของเครื่องวัดและการปรับเครื่องม้วัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หนังสือรับรองการใช้ประโยชน์ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์จากหน่วยงานภายนอก
ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ข้าพเจ้าดร.อัมพร โพธิ์โย.....

ตำแหน่ง.....ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....

ชื่อหน่วยงาน.....ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....

สถานที่ตั้ง.....51/4 หมู่ที่ 1 ถนนสุวินทวงศ์ ตำบลวังตะเคียน

อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000.....

เบอร์ติดต่อ.....038857100.....

ขอรับรองว่าจะนำผลงานวิจัย เรื่อง...โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยี : เทคนิคการวิเคราะห์หาความสม่ำเสมอ
ของสารเจือจากกระบวนการสร้างบนแผ่นซิลิคอน (Technology Transfer Project : Analysis
Technique for the Doping Uniformity of Fabrication Process on Silicon wafer).....

ซึ่งเป็นผลงานของนายวีระ เพ็งจันทร์.....

สังกัดสาขา.....วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์..... คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มาใช้ประโยชน์ในหน่วยงานของข้าพเจ้า
ทางด้านต่อไปนี้

(✓) การใช้ประโยชน์เชิงวิชาการ โดยนำผลงานวิจัยไปทดลองใช้งานจริงในหน่วยงาน
โดยเริ่มนำมาใช้ประโยชน์ ตั้งแต่วันที่1..... เดือนตุลาคม..... พ.ศ.2555.....

ถึงวันที่30..... เดือนกันยายน..... พ.ศ.2556.....

ทั้งนี้ ผลจากการที่หน่วยงานได้นำผลงานวิจัยดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ จะสรุปอีกครั้งภายหลัง
เสร็จสิ้นโครงการ

ข้าพเจ้าขอลงนามในหนังสือรับรองการนำไปใช้ประโยชน์ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ของ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อเป็นหลักฐานการนำ
ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ มาใช้ประโยชน์ดังกล่าว

ลงลายมือชื่อ 

(.....ดร.อัมพร โพธิ์โย.....)

ตำแหน่ง ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

วันที่26...../.....มิถุนายน...../.....2556.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Advanced Materials Research ในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล Scopus และนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุม World Congress on Industrial Materials - Applications, Products, and Technologies (WCIM2013) ณ เมืองปักกิ่ง ประเทศจีน เมื่อวันที่ 1-2 เมษายน 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Power loss Analysis based on Leakage Current in PN junctions

Weera Pengchan^{1, a}, Toempong Phetchakul¹ and Amporn Poyai²

¹Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Center,

Chachoengsao, Thailand

^aemailkpweera@kmitl.ac.th

Keywords: Power loss, Leakage current, PN junctions, Defects, Fabrication

Abstract. This paper is proposed to analyze the power loss from leakage current in p-n junctions in case of non-uniform defects. The different geometry p-n junctions have been fabricated by a standard 0.8 micron CMOS technology. The diode fabricated by the ion implantation process with two different condition. The reverse current and voltage (I-V) characteristics at varied temperature of p-n junctions have been measured. The power loss coefficient can be extracted from the leakage current versus temperature. Form the derivative of leakage current with temperature, the power loss with prediction trend curve can be obtained.

Introduction

The development of modern complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) technology is aiming to increase performance per chip and reduce cost [1]. In this technology a high substrate doping concentration is required in order to control the short-channel effects and lowering leakage current. The p-well or n-well concentration is increased by an increasing ion implantation dose [2]. An annealing process is needed to maintain the junction depth after ion implantation, which may not sufficient to remove the implantation-induced defects [3]. These defects can be a source of the leakage current in each of p-n junction [4,5].

This research is implemented to estimate the power loss and working temperature with prediction reverse bias of diode devices. Based on the measurement of the diode's characteristics, the exact estimation of power loss considering the leakage current is introduced. The varied temperature are used to calculate the power loss coefficient. Then, the prediction trend of power loss and reverse bias can be obtained.

Experimental

For this study, shallow p-n junction diodes compatible with 0.8 micron CMOS technology was fabricated on 150 mm 5 Ω -cm p-type silicon substrate. For fabrication 1, The N-well region was obtained by 140 keV, 3.6×10^{12} ions/cm² Phosphorus implantation and 140 keV, 7×10^{12} ions/cm² Phosphorus implantation for fabrication 2. Then, the p⁺ region was obtained by 70 keV, 3×10^{15} ions/cm² BF₂ implantation for both process. Finally, the junction was contacted by aluminum metallization.

Table 1 Description of the diode geometry

Diode Type	Area (cm ²)	Perimeter (cm)
Square (SQ) (p ⁺ - N _{well})	8×10^{-4}	0.12
Meander (ME) (p ⁺ - N _{well})	8×10^{-4}	4.04

The current-voltage (I-V) characteristics of the different geometry diodes were measured on wafer with bias step of 0.01 V, at reverse voltage, in range of 0 to -5 V, whereby the bias was applied to the N-well and the current was measured at the top p-type. The temperature (T) were controlled at 300 K - 373 K, in dark shield box.

Results and discussion

The analysis method to obtain the power loss coefficient from the leakage reverse current in p^+-N_{well} junctions can be summarized as follows. The relationship between leakage current and varied temperature of fabrication 1 and fabrication 2 are plotted in Fig.1 and Fig.2, respectively.

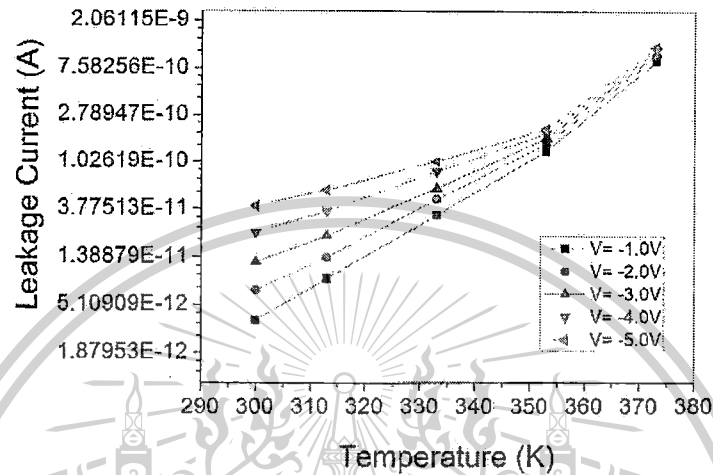


Figure 1. Relationship between leakage current and varied temperature of fabrication 1

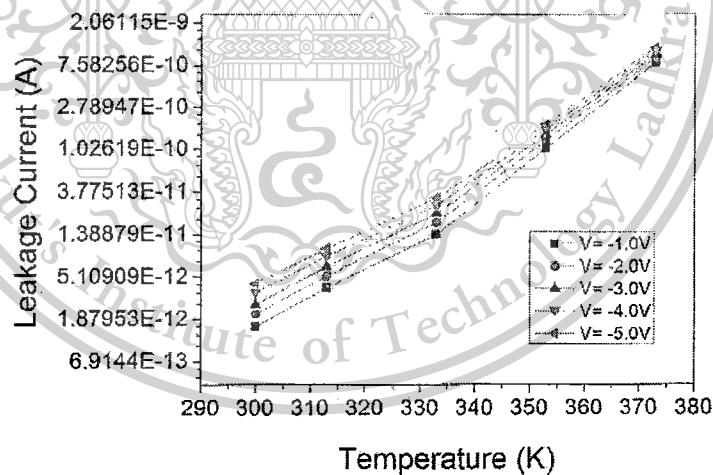


Figure 2. Relationship between leakage current and varied temperature of fabrication 2

From Fig.1 and Fig.2, It found that

In case that the reverse bias was increased, the leakage current will increase through the temperature was increased, Both fabrications have same trend. While the leakage current in case of fabrication 1 are more than fabrication 2. And the plots have two positive slope in each curve, Both fabrications have same trend.

This can be implied that the power loss were formed in these cases. This may relate to the phosphorus doping from ion implantation process.

The difference of the leakage current in case of fabrication 1 and 2 cause from the different process as shown in table 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Both fabrication, The plots have two positive slope in each curve because the leakage current of slope in low temperature range depends on the bulk generation current which can control by the reverse bias. For slope in high temperature range depends on the diffusion current which can not control by the reverse bias. It depends on the temperature that can be dominated at high temperature.

From data found that the diffusion current from the fabrication 1 are more than the fabrication 2 at high temperature range. Because the fabrication 2 has the processing of ion- implantation which the phosphorus's dose are more than the fabrication 1. The diffusion current are dominated by Shockley equation according to the relationship in eq.(1) and eq.(2), respectively [6].

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

$$J_{so} = \left[\left(\frac{q D_h}{L_h N_D} \right) + \left(\frac{q D_e}{L_e N_A} \right) \right] n_i^2 \quad (2)$$

where J total current density (A/cm²)

reverse saturation current density (A/cm²)

D_h, D_e diffusion coefficient of hole and electron, respectively (cm²/sec)

L_h, L_e diffusion length of hole and electron, respectively (cm)

doping concentration of n-type and p-type, respectively (atom/cm³)

intrinsic carrier concentration (cm⁻³)

k Boltzmann's constant (8.62x10⁻⁵ eV/K)

T absolute temperature (K)

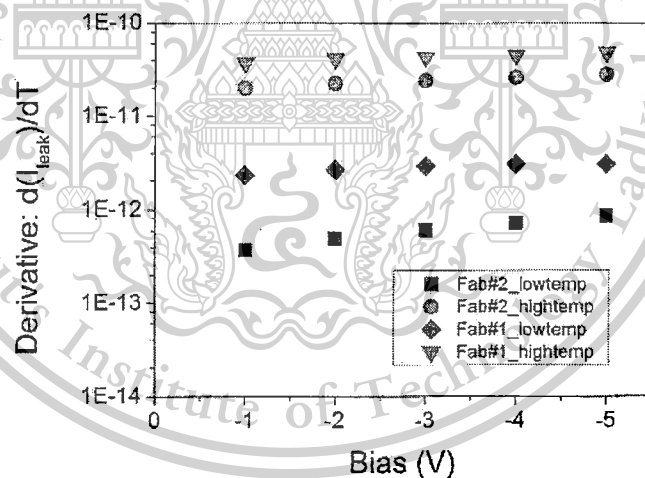


Figure 3. Derivative of the leakage current with varied temperature and bias

Thus, the derivative of the leakage current with varied temperature and reverse bias or the power loss coefficient for fabrication is shown in fig.3.

As shown in fig.3, The fabrication 1 has the derivative of the leakage current with varied temperature more than the fabrication 2 through the reverse bias was increased. It will increase in linear trend for both of low and high temperature. This can be implied that the fabrication 1 has the power loss in PN junctions more than the fabrication 2. This may relate to the phosphorus doping from ion implantation process. The plot of the power loss in PN junction with the extrapolate trend for the fabrication is clearly indicated as shown in Fig.4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

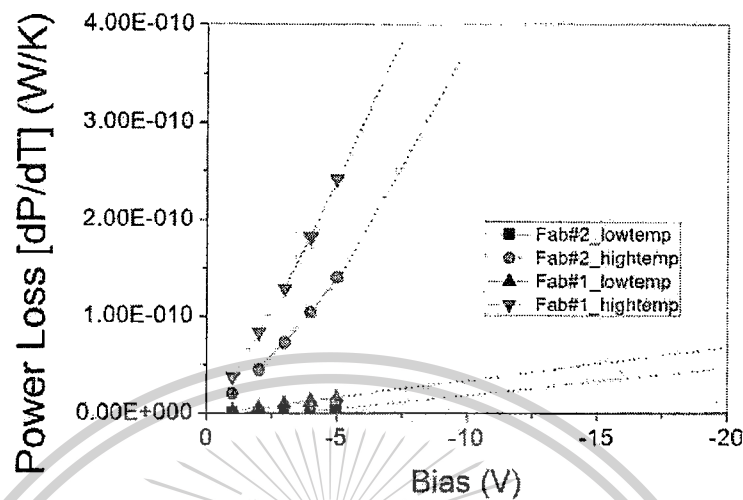


Figure 4. Relation between the power loss with temperature and the prediction bias

Summary

This paper has been proposed to analyze the power loss from leakage current in p-n junctions. This will be an useful tool for analyzing the power loss in the p-n junctions. It shows that the leakage current from reverse characteristics of p-n junction diode can be analyzed power loss which is induced by the ion implantation process. The technique is especially useful for failure analysis and optimization of critical steps in semiconductor processing.

References

- [1] Wolf, S. and Tauber, R.N. Silicon Processing for The VLSI Era, Volume 1: Process Technology. The United States of America. Lattice Press. 1986.
- [2] H. Ryssel and I. Ruge, "Ion Implantation", John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [3] Y. Tamai, M.M. Oka, A. Nakada and T. Ohmi, "influence of substrate dopant concentration on electrical properties and residual defects in pn junction formed by low-temperature post-implantation annealing" J. Appl. Phys., Vol. 87(7), pp. 3488-3496, 2000.
- [4] W. Pengchan, T. Phetchkul and A. Poyai, "Implantation-induced Defects Analysis Based on Activation Energy Diagnostics", Proceeding of the IEEE 12th International Symposium on Integrated Circuits 2009, pp. 518-521, 2009.
- [5] W. Pengchan, T. Phetchkul and A. Poyai, "Improved extraction of the local carrier generation lifetime from forward diode characteristics", Advanced Materials Research., Vol.378-379(2012), pp. 593-596.
- [6] S.O. Kasap. The pn Junction: The Shockley Model. [Online]. Available : <http://materials.usask.ca>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข้อมูลประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายวีระ เพ็งจันทร์
ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ด.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2556
วศ.ม.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2541
วท.บ.	วัสดุศาสตร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2533

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ 1) CMOS Fabrication Technology / Application
2) TCAD Process Simulation for Microelectronics
3) Integrated Circuits Failure / Defects Analysis

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

- ชื่อบทความ "Power loss Analysis based on Leakage Current in PN junctions" Advanced Materials Research. Vol. 739 (2013) pp 90-93.
- ชื่อบทความ "Improved extraction of the local carrier generation lifetime from forward diode characteristics" International Conference on Applied Materials and Electronics Engineering (AMEE 2012), 18-19 January 2012, Hong Kong, China.
- ชื่อบทความ "The Generation and Recombination Lifetime based on Forward Diode Characteristics Diagnostics" International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2011), 26 June -1 July 2011, Singapore.
- ชื่อบทความ "Non-uniform Defects Assessment by I-V and C-V characteristics of p-n junction" International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS-2011), 17-22 July 2011, Nelson, New Zealand.
- ชื่อบทความ "The Defects Analysis in CMOS Fabrication By Arrhenius Activation Energy Technique" the IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEM2011), 20-23 February 2011, Kaohsiung, Taiwan.
- ชื่อบทความ "Diagnostics of Ion Implantation with 0.8 micron CMOS Technology based on TCAD Simulation" Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE) 23-26 March 2010, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- ชื่อบทความ “The Defect Generated in PN Junction Analysis by the Arrhenius Activation Energy Techique” Annual National Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE) 23-26 March 2010, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.

- ชื่อบทความ “Optimization of Geometry of LOCOS Isolation in Sub micrometer CMOS by TCAD Tools” International Annual Symposium on Computational Science and Engineering (ANSCSE) 23-26 March 2010, Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.

- ชื่อบทความ “Activation Energy Diagnostics of Implantation-induced Defects” International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2009), 28 June-3 July 2009, Singapore.

- ชื่อบทความ “Implantation-induced Defects Analysis Based on Activation Energy Diagnostics” International Symposium on Integrated Circuits (ISIC-2009), 14-16 December 2009, Singapore.

- ชื่อบทความ “Study of defect generated in PN Junction for 0.8 μm CMOS Fabrication” International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI - CON 2008), 14-17 May 2008, Kabi, Thailand.

- ชื่อบทความ “The Leakage Current of Doping Silicon effects on the Generation Lifetime Profile” International Conference on Materials Processing for Properties and Performance (MP3-2008), 5-7 November 2008, Singapore.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.