ผลของการสร้างฟิลด์เพลตบนโฟลทติ้งฟิลด์ริงต่อค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลายของไดโอดกำลัง

EFFECT OF FIELD PLATE ON FLOATING FIELD RING TO LEAKAGE CURRENT AND BREAKDOWN VOLTAGE OF POWER DIODE

มนตรี แสนละมูล, ชาญเดช หรูอนันต์, อัมพร โพธิ์ใย
Montree Saenlamool, Charndet Hruanun, Ampom Poyai

ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
Thai Microelectronics Center (TMEC), National Electronics and Computer, Technology Center (NECTEC).

บทคัดย่อ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำชนิดไดโอดกำลังโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นได้ทำการพัฒนา และผลิตโดยใช้ฐานเทคโนโลยีการผลิตซีมอสทรานซิสเตอร์ ปัญหาในการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็น คือ ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณมุมของรอยต่อซึ่งทำให้ไดโอดเกิดการพังทลายต่อมา วิธีการแก้ปัญหาความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณมุมของรอยต่อมีหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือ การสร้างโฟลทติ้งฟิลด์ริง (FFR) แต่การสร้าง FFR พบว่าทำให้เกิดกระแสรั่วเพิ่มมากขึ้น วิธีการลดกระแสรั่วดังกล่าวคือการสร้างโลหะบนโฟลทติ้งฟิลด์ริง (ฟิลด์เพลต) จากผลการทดลองพบว่า ฟิลด์เพลตสามารถลดกระแสรั่วของไดโอดกำลังได้ และทำให้แรงดันพังทลายเพิ่มมากขึ้นคิดเป็น 61.6% และ 28.14% ตามลำดับ ดังนั้น การสร้างไดโอดกำลังจึงจำเป็นต้องสร้างโฟลทติ้งฟิลด์ริงและฟิลด์เพลตควบคู่กันไป

คำสำคัญ: ไดโอด, โฟลทติ้งฟิลด์ริง, ฟิลด์เพลต

Abstract

Power p-n junction diode is done for developed and fabricated. Diode is used CMOS technology for fabrication to fabricate. The problem of power diode is electric field crowding at the corner of junction that affects on breakdown voltage of diode. Floating Field Ring (FFR) is used to reduce this effect but leakage current is raised because of large depletion region. The purpose of this experiment is to reduce leakage current by field plate (Metal plate on FFR structure). The leakage current of diode is decreased with field plate about 61.6% but the breakdown voltage is increased about 28.14%. So the power diode fabrication should be included FFR structure and field plate in the device.

Keywords: Diode, Floating Field Ring, Field Plate

บทนำ

ไดโอด คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือประจุไฟฟ้า (อิเล็กตรอนและโฮล (Hole) ในสารกึ่งตัวนำ) ไดโอดนับว่าเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป การใช้งานไดโอด เช่น วงจรเร็กติไฟเออร์ วงจรลดความเร็วมอเตอร์ และวงจรจ่ายไฟตรง เป็นต้น ไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ถือเป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสารกึ่งตัวนำเพราะไดโอดมีรอยต่อพี-เอ็นเพียงรอยต่อเดียว รอยต่อดังกล่าวเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของประจุไฟฟ้าหรือควบคุมการทำงานของไดโอดนั้นเอง รอยต่อนี้เมื่อได้รับแรงดันย้อนกลับหรือสถานะป้องกันการไหลของประจุไฟฟ้า จะมีประจุไฟฟ้าไหลผ่านน้อยมาก เมื่อให้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้นรอยต่อจะเกิดการพังทลายแบบอะวาลานซ์ (Avalanche Breakdown) บริเวณที่เกิดการพังทลายได้เร็วที่สุดคือ มุมบริเวณรอยต่อ บริเวณมุมจะมีความหนาแน่นสนามไฟฟ้ามากที่สุด ส่งผลให้มีประจุไฟฟ้ามากที่สุดเช่นกัน เมื่อประจุไฟฟ้ามากจะทำให้รอยต่อพี-เอ็นเกิดการพังทลายขึ้นทำให้มีปริมาณประจุไฟฟ้าไหลมากขึ้นไดโอดก็ไม่สามารถที่จะควบคุมการไหลของประจุไฟฟ้าได้อีกต่อไปหรือไดโอดเกิดการพังทลายนั้นเอง

การแก้ปัญหาความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อทำได้หลายวิธี เช่น การทำให้รอยต่อเกิดมุมมากกว่า 90 องศา การสร้าง FFR และการสร้างชั้นฉนวนบริเวณรอยต่อ เป็นต้น [1] การแก้ปัญหาในบทความนี้คือ การสร้าง FFR การสร้าง FFR ดังกล่าวทำให้ไดโอดเกิดกระแสรั่วเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีบริเวณปลอดพาหะมากขึ้น เมื่อกระแสเพิ่มมากขึ้นก็ส่งผลให้รอยต่อเกิดการพังทลายได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการลดปริมาณกระแสรั่วลงมา โดยบทความนี้นำเสนอการสร้างฟิลด์เพลตบนชั้น FFR เพื่อช่วยในการเก็บประจุส่วนเกินจากโครงสร้างของไดโอด เช่น ประจุบริเวณพื้นผิวรอยต่อ ประจุในชั้นฉนวน [2] เป็นต้น เมื่อจำนวนกระแสรั่วน้อยลงส่งผลให้การเกิด Multiplication Coefficient หรือ Impact Ionize น้อยลง [3] และแรงดันพังทลายก็จะเพิ่มมากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

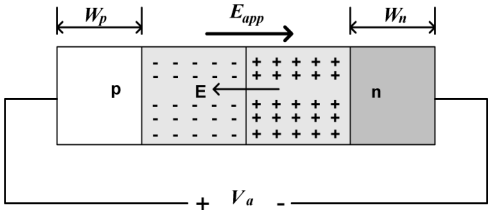
งานวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อลดปริมาณกระแสรั่วจากผลของ FFR โดยการสร้างโลหะบนส่วน FFR หรือฟิลด์เพลตในการสร้างไดโอดกำลังโครงสร้างแบบมี FFR ล้อมรอบ ซึ่งทำการออกแบบและผลิตที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินวิจัยจะอธิบายส่วนของไดโอด คุณสมบัติการเพิ่ม FFR และวิธีการสร้างไดโอดโครงสร้างอย่างง่ายของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งบริเวณด้านหนึ่งถูกโด๊ปด้วยอะตอมสารเจือผู้รับเพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเรียกว่า “แอโนด” (Anode) หรือขั้วบวก และบริเวณข้างเคียงถูกโด๊ปด้วยอะตอมสารเจือผู้ให้เพื่อสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นถูกเรียกว่า “แคโทด” (Cathode) หรือขั้วลบ รอยต่อดังกล่าวเป็นตัวกำหนดทิศทางการการไหลของกระแสเมื่อได้รับไบอัสตรงหรือ Forward Bias (ขั้วแอโนดได้รับแรงดันบวกและแคโทดได้รับแรงดันลบ) จะเกิดการไหลของพาหะข้างมากทำให้รอยต่อนำกระแสได้ สมการนำกระแสของรอยต่อ [3-4] ความหนาแน่นของกระแสจะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นสารเจือที่รอยต่อนั้นๆ ลักษณะการต่อแบบไบอัสตรงแสดงดังภาพที่ 1

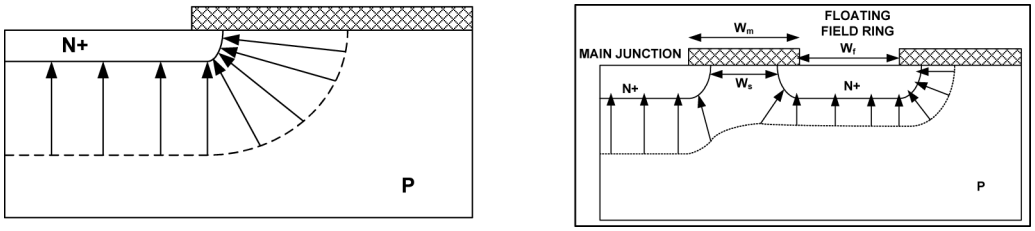
เมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับหรือ Reverse Bias (ขั้วไฟฟ้าตรงข้ามกับไบอัสตรง) จะเกิดการไหลของกระแสข้างน้อย (Minority Carries) ที่ปริมาณน้อยมากๆ ลักษณะนี้รอยต่อทำงานเป็นตัวป้องกันการไหลของกระแส และรอยต่อจะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) กว้างมากขึ้นเมื่อแรงดันเพิ่มมากขึ้น บริเวณปลอด

พาหะจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron Hole Pair) อันส่งผลให้เกิดปริมาณกระแสรั่วเพิ่มมากขึ้น [5] และบริเวณที่ความแน่นกระแสรั่วมาก คือ บริเวณมุมของรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้ามากที่สุด [6]



ภาพที่ 1 ลักษะการต่อแบบป้อนไบอัสตรงของรอยต่อพี-เอ็น

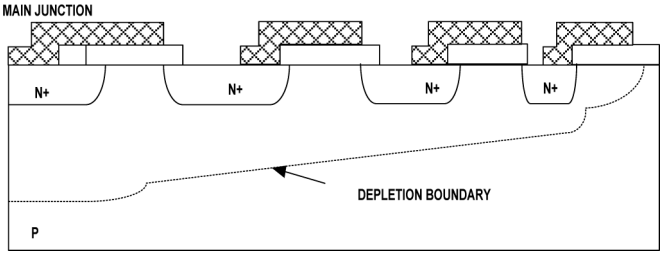
จากภาพที่ 1 กำหนดให้ V_a คือ แรงดันไบอัสตรง, + คือ โฮล, – คือ อิเล็กตรอน, W_p คือ ความกว้างบริเวณพี, W_n คือ ความกว้างบริเวณเอ็น, E คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อ และ E_{app} คือ สนามไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้า V_a เมื่อปริมาณกระแสรั่วมากถึงระดับหนึ่ง รอยต่อจะเกิดการพังทลายทำให้ไม่สามารถป้องกันกระแสได้อีกต่อไป รอยต่อพี-เอ็นที่สัมผัสกับชั้นฉนวนจะเกิดสนามไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงทำให้มีปริมาณกระแสจำนวนมากที่บริเวณนั้นและส่งผลให้เกิดการพังทลายที่เร็วขึ้น การสร้าง FFR เพื่อกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้า ทำให้ลดปริมาณพาหะที่มุมรอยต่อและกระจายออกไปยังส่วนของ FFR แสดงดังภาพที่ 2 [1] การสร้าง FFR ทำให้ไดโอดเกิดกระแสรั่วเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีบริเวณปลอดภาหะมากขึ้น การสร้างโลหะบนชั้น FFR แสดงดังภาพที่ 3 สามารถช่วยกระจายสนามไฟฟ้าบริเวณมุมรอยต่อออกไปยัง FFR การวางตำแหน่งและลักษณะของโลหะจะมีผลต่อสนามไฟฟ้านั้นๆ [6]



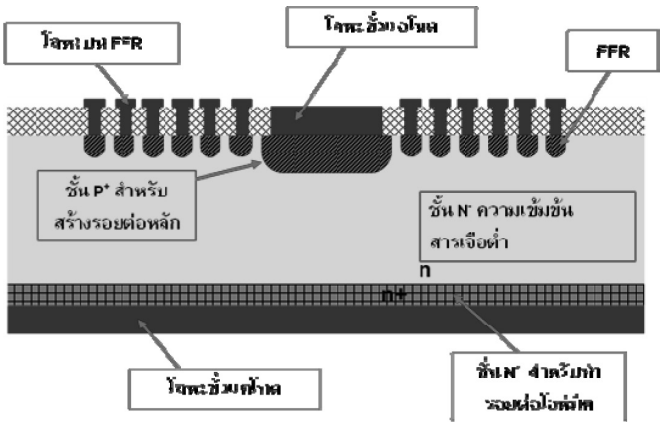
(ก) (ข)

ภาพที่ 2 ลักษณะการกระจายทิศทางของสนามไฟฟ้า (ก) ไม่มี FFR (ข) มี FFR

การสร้างอุปกรณ์ไดโอดในวัสดุซิลิคอนจะทำการเพิ่มแรงดันพังทลายของรอยต่อโดยทำการสร้าง FFR ล้อมรอบรอยต่อพี-เอ็น เริ่มจากการเตรียมแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ 111 (มีปริมาณการไหลของประจุไฟฟ้ามากกว่าระนาบ 100 [4]) ความเข้มข้นสารเจือประมาณ $6x10^{13}$ อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^{-3}) ซึ่งทำให้ฐานรองมีค่าการพังทลายมากกว่า 1 kV [1,4] จากนั้นทำการสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ (ออกไซด์) หนา 25 นาโนเมตร เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันการยิงฝังประจุจากนั้นทำการยิงฝังประจุโบรอนที่ปริมาณสารเจือ (Dose) $1x10^{16}$ ไอออนต่อตารางเซนติเมตร (cm^{-2}) ที่พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) โดยแบ่งพื้นที่ป้องกันการเจือสารด้วยน้ำยาไวแสง (Photo Resist) จากนั้นทำการยิงฝังประจุฟอสฟอรัสที่ปริมาณสารเจือ $1x10^{16}$ cm^{-2} ที่พลังงาน 80 keV เพื่อทำการสร้างรอยต่อชนิดโอห์มิก (Ohmic) ระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n^+) และโลหะอลูมินัม [3] แล้วทำการอบด้วยความร้อนสูงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (แอนนีล) ที่อุณหภูมิ 1,050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 600 นาที

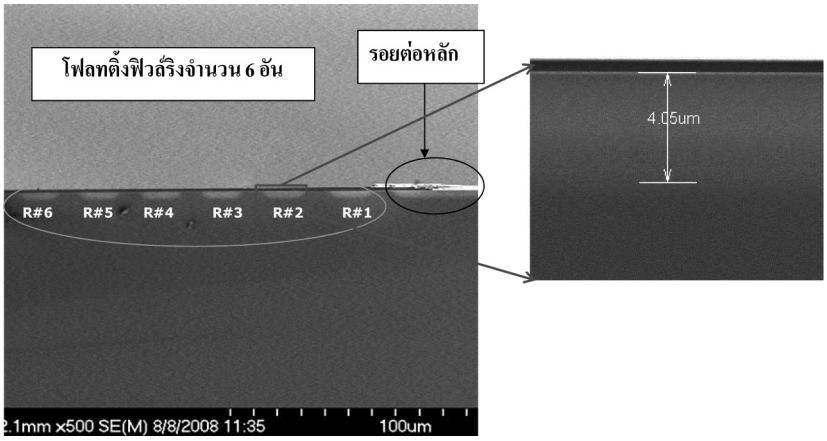


ภาพที่ 3 การสร้างฟิลด์เพลตบน FFR และการกระจายตัวของบริเวณปลอดพาหะเมื่อเพิ่มจำนวน FFR



ภาพที่ 4 แบบจำลองตัดขวางโครงสร้างไดโอดหลังการผลิตบนแผ่นซิลิคอน

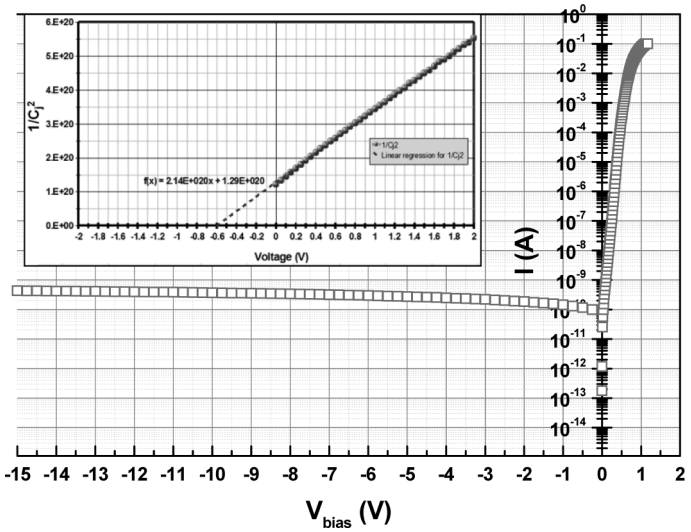
จากนั้นทำการกัดและสร้างขั้วโลหะอลูมินัม และทำชั้นป้องกันความชื้น (Passivation Layer) ด้วยชั้นออกไซด์และซิลิคอนไนไตร ตามลำดับ แล้วทำการอบด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและไฮโดรเจน (Sintering) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อปรับรอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เมื่อทำการสร้างเสร็จแล้วจะแสดงโครงสร้างดังภาพที่ 4 และ 5 จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างขึ้น โดยทำการวัดคุณสมบัติกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าด้วยเครื่อง HP4156B Semiconductor Parameter Analyzer และวัดคุณสมบัติการป้องกันกระแสด้วยเครื่อง Keithley 2410 เพื่อหาค่าแรงดันพังทลายของไดโอด



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายตัดขวางของโครงสร้างไดโอดด้วยเครื่อง FE-SEM โดยพบว่ามีค่าความลึกในการเจือสารโบรอนประมาณ 4 ไมครอน

ผลการวิจัย

การวัดคุณสมบัติการเป็นตัวควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าของไดโอดที่สร้างขึ้น ทำการวัดด้วยคุณสมบัติกระแสต่อแรงดันโดยเครื่อง HP4156B Semiconductor Parameter Analyzer แสดงดังภาพที่ 6 จากภาพพบว่า เมื่อไดโอดได้รับไบอัสตรงจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ 100mA ที่แรงดันไบอัสตรง 1V และมีค่าแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ 0.6V เมื่อได้รับแรงดันย้อนกลับจะมีค่ากระแสรั่วน้อยมาก โดยมีค่าประมาณ 0.2nA ที่แรงดันไบอัส 15V ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติความเป็นไดโอด

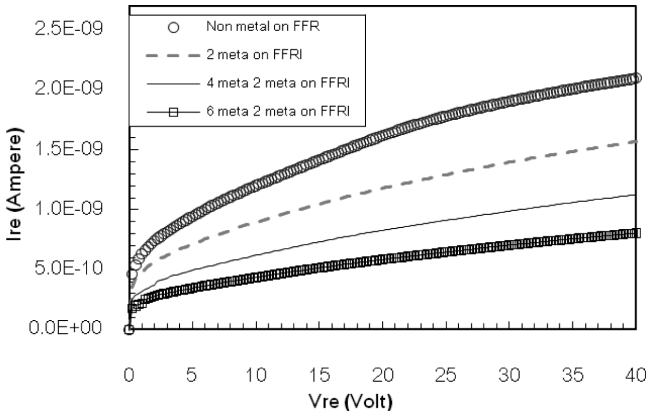


ภาพที่ 6 คุณสมบัติของไดโอดเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับและด้านบนซ้ายแสดงการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอด

โครงสร้างของไดโอดที่จะทำการศึกษาจะมี FFR จำนวนทั้งหมด 6 อัน และทำการสร้างโลหะโดยปรับเปลี่ยนจำนวนคือ 2 4 และ 6 แล้วทำการวัดค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลาย เปรียบเทียบแต่และจำนวน และทำการเปรียบเทียบกับไม่มีโลหะ ผลการทดลองวัดค่ากระแสรั่วที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40V ด้วยเครื่อง HP4156B Semiconductor Parameter Analyzer แสดงค่าดังตารางที่ 1 และกราฟกระแสต่อแรงดันแสดงดังภาพที่ 7

ตารางที่ 1 ค่ากระแสรั่วและจำนวนโลหะบน FFR ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 40V

จำนวนโลหะบน FFR (อัน)	กระแสรั่ว (A)
0	2.10E-09
2	1.57E-09
4	1.13E-09
6	8.06E-10



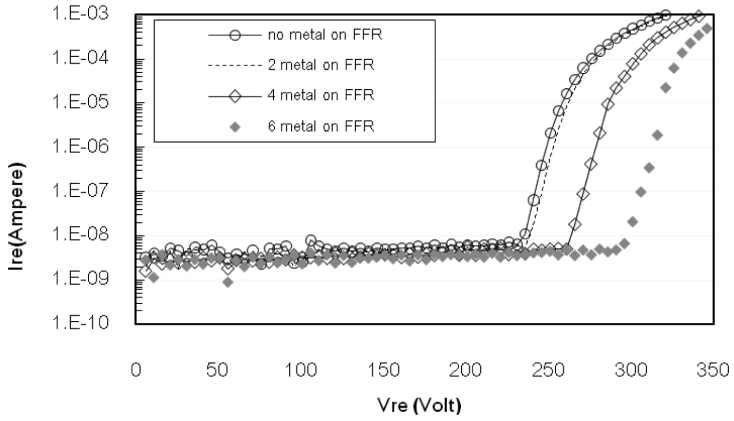
ภาพที่ 7 คุณสมบัติกระแส (Ire) ต่อแรงดัน (Vre) ของไดโอดเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

จากภาพพบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนโลหะบน FFR ทำให้กระแสรั่วลดลง เนื่องจากโลหะดังกล่าวทำหน้าที่เป็นตัวดักประจุที่รอยต่อระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน [5] ซึ่งเป็นประจุที่รวมกับกระแสการเกิด (Generation Current) ที่บริเวณปลอดพาหะแล้วทำให้เกิดเป็นกระแสรั่วรวมในที่สุด เมื่อสามารถดักประจุดังกล่าวได้จึงทำให้กระแสรั่วรวมลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนโลหะเป็น 6 อันหรือเท่ากับจำนวน FFR ทำให้กระแสรั่วลดลงมีค่า 0.8nA จาก 2nA

ผลการวัดค่าแรงดันพังทลายด้วยเครื่อง Keithley 2410 แสดงค่าดังตารางที่ 2 โดยมีค่ากระแสรั่วที่ประมาณ 2nA กราฟกระแสต่อแรงดันแสดงดังภาพที่ 8

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันพังทลายและจำนวนโลหะบน FFR ที่กระแสรั่วระดับนาโนแอมแปร์

แรงดันพังทลาย (V)	จำนวนโลหะบน FFR (อัน)
231	0
236	2
261	4
296	6



ภาพที่ 8 ผลการวัดค่ากระแสรั่ว (Ire) ต่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Vre) ด้วยเครื่อง Keithley 2410

เมื่อจำนวนโลหะบน FFR เพิ่มมากขึ้น แรงดันพังทลายจะมากขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มโลหะบน FFR ทำให้พาหะส่วนเกินบางตัวโดนจับเข้าสู่โลหะนั้นๆ กระแสรั่วลดลงทำให้การเกิด Impact Ionize ลดลง ส่งผลให้มีแรงดันพังทลายเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มโลหะบน FFR ทั้งหมดจะมีค่าแรงดันพังทลายเพิ่มขึ้นประมาณ 100V

สรุปและอภิปรายผล

การสร้างโลหะบน FFR ในไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ทำให้มีกระแสรั่วลดลงและทำให้ไดโอดมีค่าแรงดันพังทลายมากขึ้น โดยที่กระแสรั่วลดลงคิดเป็น 61.6% และแรงดันพังทลายเพิ่มขึ้นคิดเป็น 28.14% ดังนั้นในการสร้างไดโอดที่ต้องการแรงดันพังทลายที่สูงควรทำการสร้าง FFR ล้อมรอบรอยต่อพี-เอ็น โดยมีโลหะบน FFR จะช่วยทำให้เพิ่มแรงดันพังทลาย และลดปริมาณกระแสรั่วของไดโอดได้ อย่างไรก็ตามการสร้าง FFR ที่เหมาะสมจะทำให้เพิ่มแรงดันพังทลายของไดโอดได้มากขึ้น [6-8] แต่จะไม่เกินคุณสมบัติการทนแรงดันพังทลายของความเข้มข้นฐานรอง และการสร้างโลหะบน FFR ก็ต้องเหมาะสมด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] B. JAYANT BALIGA. (1995). *POWER SEMICONDUCTOR DEVICES*. United States of America: PWS Publishing company.

[2] Simo Eranen; & Chen Hongyi. (2002). *Silicon X-ray smart sensor micromodule and microsystem*. Oulu: University of Oulu.

[3] สมเกียรติ ศุภเดช. (2547). *เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์*. พิมพ์ครั้งที่ 2. ม.ป.ท.: แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[4] Sze S M. (1996). *Physics of semiconductor devices*. New York: Wiley.

[5] Jin-Young KIM; et al. (2008, May). Effect of a Guard-Ring on the Leakage Current in a Si-PIN X-ray Detector for a Single Photo Counting Sensor. *IEICE TRANSACTIONS on Electronics*. VOL.E91-C: 703-707.

[6] Adler MS; et al. (1977, February). Theory and breakdown voltage for planar devices with a single field limiting ring. *IEEE Trans Electron Dev*. 24(2): 107-13.

[7] Chun-yen chang; & C.T. Sune. (1986, January). An Analytic Approach for Optimal Field Ring Spacing of a Diode Under Punchthrough Operation. *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*. 7(1): 35-37.

[8] V. BOISSON; M. LE HELLEY; & J.P. CHANTE. (1985, April). Analytical Expression for the Potential of Guard Rings of Diodes Operating in the Punchthrough Mode. *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTON DEVICES*. 32(4): 838-840.