

ผลกระทบของการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติ ของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

Effect of Direct X-Ray Radiation on P-N Junction Diode Characteristics

สุรดา เอื้อมานะพงษ์ อิศระ ศรีธนชัย สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อัมพร โพธิ์ไย

ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาลักษณะสมบัติของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นซึ่งนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ หลังจากได้รับการฉายรังสีเอกซ์แบบโดยตรง โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน, ความจุไฟฟ้า-แรงดัน, ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ, อายุการเกิดพาหะ และ ระดับพลังงานกระตุ้นของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ ไดโอดถูกฉายรังสีด้วยพลังงาน 40, 55 และ 70 keV เป็นเวลา 5, 55 และ 205 วินาทีตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ากระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV มีค่าลดลง ในขณะที่กระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีด้วยพลังงาน 40 และ 55 keV มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เป็นประเด็นที่น่าสนใจจึงทำการศึกษาไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV เพิ่มเติม และพบว่าการฉายรังสีเอกซ์พลังงาน 70 keV มีผลทำให้อายุการเกิดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นและจำนวนจุดบกพร่องในรอยต่อพี-เอ็นลดลง

คำสำคัญ : รอยต่อพี-เอ็น, รังสีเอกซ์, ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้า-แรงดัน, อายุการเกิดพาหะ, ระดับพลังงานกระตุ้น

Abstract

This article presents the characteristics of a p-n junction diode which was used as an x-ray detector. In this experiment, reports of analyzing current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V) characteristics, generation carrier lifetime and activation energy of the p-n junction diodes before and after x-ray irradiation have been presented. Diodes were irradiated with energy of 40, 55 and 70 keV all for 5, 55 and 205 seconds. The results showed that leakage current of diodes irradiated with energy 70 keV was reduced, while leakage currents of diodes irradiated with energy 40 and 55 keV were increased which is quite an interesting issue. Therefore, the diode, irradiated with energy 70 keV, has been carried out in detail and found that the energy of irradiated 70 keV gives results of higher generation carrier lifetime and lower number of defects at pn junction of the device.

Keywords : p-n junction, x-ray, I-V and C-V characteristics, generation carrier lifetime, activation energy

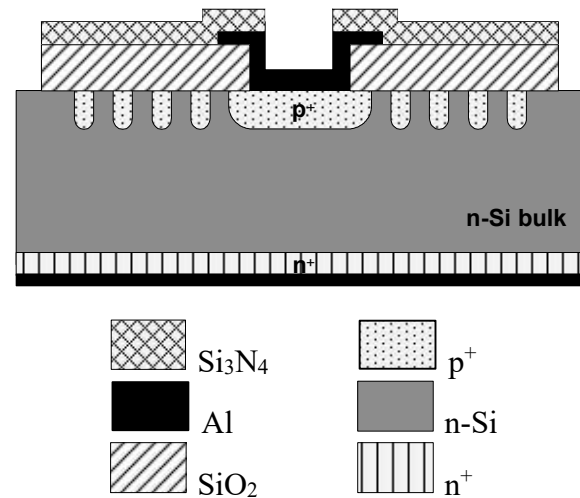
1. บทนำ

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอ็กซเรย์มีความจำเป็นอย่างมากในด้านการแพทย์เพื่อวินิจฉัยสิ่งที่ผิดปกติภายในที่ตาไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งถือว่ารังสีเอ็กซเรย์มีประโยชน์มาก แต่ในขณะที่เดียวกันรังสีเอ็กซเรย์ก็มีโทษมหันต์หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไปกว่าค่าที่ร่างกายมนุษย์สามารถรับได้ ดังนั้นการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซเรย์ชนิดซิลิคอนนั้นจึงมีความสำคัญ ที่จะช่วยให้ร่างกายได้รับปริมาณรังสีเอ็กซเรย์น้อยที่สุด ในขณะที่ต้องได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัยโรคมามากที่สุด รายงานฉบับนี้จึงเสนอการศึกษาผลกระทบของรังสีเอ็กซเรย์ต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซเรย์ โดยจะวิเคราะห์ถึงลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดัน และความจุไฟฟ้ากับแรงดัน เป็นต้น ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซเรย์ เพื่อนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพของไดโอดให้ดียิ่งขึ้น

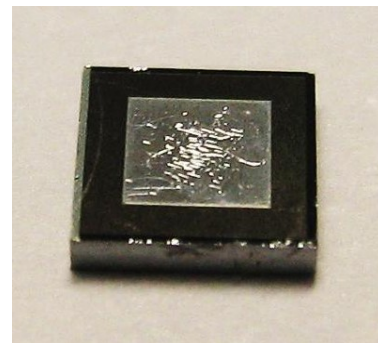
2. กระบวนการสร้างไดโอด

ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีระนาบ <111> สภาพต้านทานแผ่น 134-140 $\Omega\cdot\text{cm}$ และมีความหนา 300 μm เริ่มด้วยการยิงฝังประจุ (ion implantation) ฟอสฟอรัสที่ด้านหลังแผ่นผลึกด้วยพลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือเท่ากับ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ เพื่อสร้างรอยต่อสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) [1] จากนั้นทำการเปิดช่องบริเวณรับรังสี (active area) ขนาด 2 mm^2 และการ์ดริง (guard ring) ขนาด 10 μm ด้วยกระบวนการลิโธกราฟี (lithography) และทำการยิงฝังประจุโบรอนที่ด้านหน้าของแผ่นผลึกด้วยพลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือเท่ากับ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ เช่นกันเพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็นต่อมาทำการอบ (anneal) ที่อุณหภูมิ 1050 °C เป็นเวลา 600 นาที จากนั้นทำการสร้างขั้วโลหะอะลูมิเนียมทั้งด้านหน้าและด้านหลังตามด้วยการอบที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 30 นาที และสร้างชั้นกันความชื้น (passivation layer) ที่ด้านหน้าของแผ่นผลึก สุดท้ายทำการตัดแยกชิปและนำไปทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า โครงสร้างของไดโอด

รอยต่อพี-เอ็นและไดโอดที่ถูกสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วแสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1: โครงสร้างของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 2: ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

3. การทดลอง

นำไดโอดทั้งหมดที่ทำการสร้างมาทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V characteristics), ความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V characteristics) ด้วยเครื่อง HP4156B ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซเรย์ โดยขั้นตอนการฉายรังสีเอ็กซเรย์นั้น ทำการแบ่งไดโอดออกเป็น 3 กลุ่ม แสดงดังตารางที่ 1 ไดโอดแต่ละกลุ่มถูกฉายรังสีเอ็กซเรย์ด้วยพลังงาน 40, 55, และ 70 keV เป็นเวลา 5, 55, และ 205 วินาทีตามลำดับ

ตารางที่ 1 การแบ่งกลุ่มไดโอดที่ใช้ในการทดลอง

	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3
พลังงานรังสีเอ็กซ์	40 keV	55 keV	70 keV
เวลาการฉายรังสีเอ็กซ์	5 วินาที	5 วินาที	5 วินาที
	55 วินาที	55 วินาที	55 วินาที
	205 วินาที	205 วินาที	205 วินาที

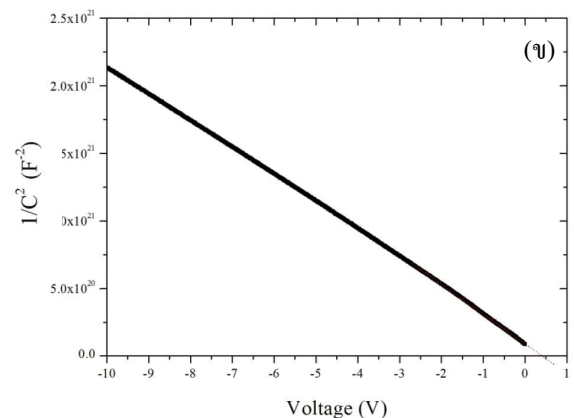
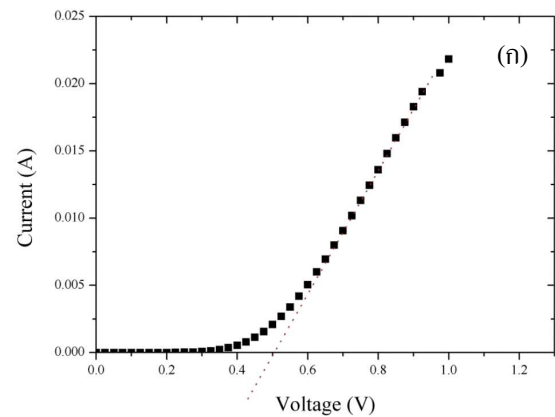
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังทำการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็นเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต้องมีการทดสอบสมบัติของรอยต่อสัมผัสพี-เอ็น โดยรอยต่อสัมผัสพี-เอ็นนี้มีแรงดันภายใน (build-in voltage) อยู่ในช่วงประมาณ 0.4-0.7 V [2] วิธีการทดสอบสามารถทำได้ 2 วิธีคือ ทำการคำนวณหาจากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และความจุไฟฟ้า-แรงดัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่ารอยต่อพี-เอ็นของไดโอดที่ได้ทำการสร้างขึ้นนั้นมีค่าแรงดันภายในเท่ากับ 0.5 V จึงสรุปได้ว่าเป็นรอยต่อพี-เอ็น โดย

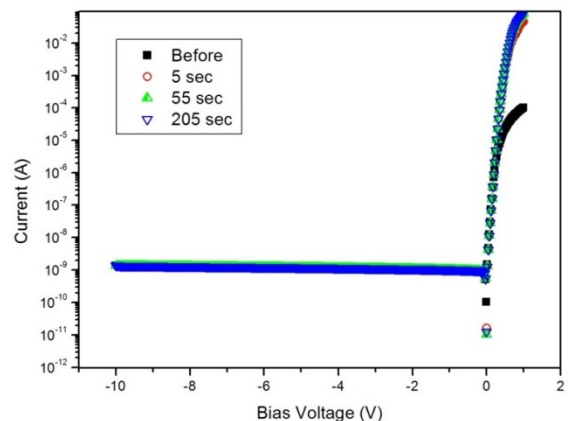
เมื่อไดโอดถูกทดสอบลักษณะสมบัติไฟฟ้าก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์แล้ว ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่วัดได้ในการฉายรังสีทุกๆ พลังงานแสดงดังรูปที่ 4 มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (1) [1-3]

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{kT} \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

เมื่อ I คือ กระแสสุทธิ, I_0 คือ กระแสอิ่มตัว, V คือ แรงดันไบอัส, R_s คือ ความต้านทานอนุกรมรวม, k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์, q คือ ประจุอิเล็กตรอน และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์



รูปที่ 3: การทดสอบสมบัติของรอยต่อสัมผัสพี-เอ็นจาก (ก) ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และ (ข) ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน



รูปที่ 4: ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์

จากผลการทดลองในกรณีขณะให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ กระแสอิ่มตัว (I_0) จะประกอบด้วยกระแสที่เกิดจากการแพร่ (diffusion current, I_D) และกระแสที่เกิดใน

บริเวณหลอดพาหะ (generation current, I_g) ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$I_0 = I_d + I_g \quad (2)$$

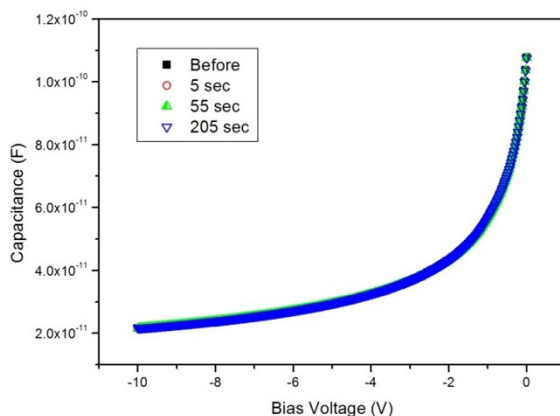
$$I_0 = I_d + Aq n_i W / \tau_g \quad (3)$$

เมื่อ A คือขนาดพื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็น, n_i คือความเข้มข้นพาหะอินทรินซิก, W คือความกว้างบริเวณหลอดพาหะ และ τ_g คืออายุการเกิดพาหะ

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าไม่มีความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในทุกๆพลังงานการฉายรังสี ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4) [3]

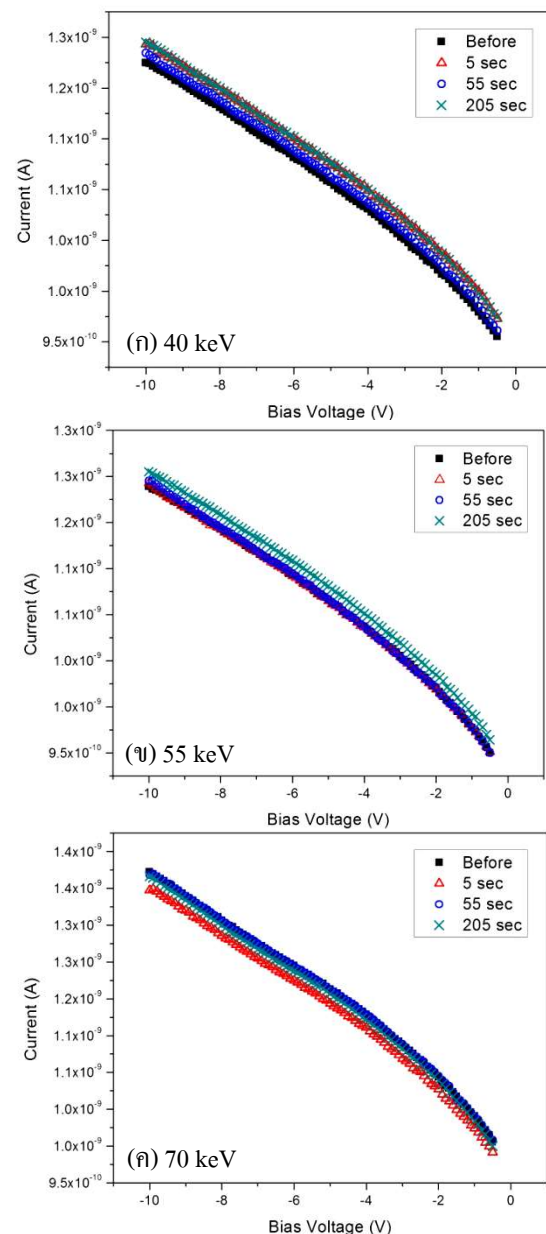
$$C = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon N_D}{(V_{bi} \pm V_A)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

เมื่อ C คือความจุไฟฟ้า, A คือพื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็น, ϵ คือค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ, N_D คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้, V_{bi} คือศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยต่อ และ V_A คือแรงดันไบอัส



รูปที่ 5: ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์

พบว่ากระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 40 และ 50 keV มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนมากนัก ขณะที่กระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการฉายรังสีเอ็กซ์จะเห็นได้จากรูปที่ 6 ดังนั้นการฉายรังสีเอ็กซ์ไปยังไดโอดรอยต่อพี-เอ็น จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจว่ารังสีเอ็กซ์ส่งผลกระทบต่ออย่างไรกับไดโอด และอาจจะเป็นแนวทางในการริเริ่มใช้ประโยชน์ของรังสีเอ็กซ์มากยิ่งขึ้น จึงควรทำการศึกษาและวิเคราะห์ต่อไป

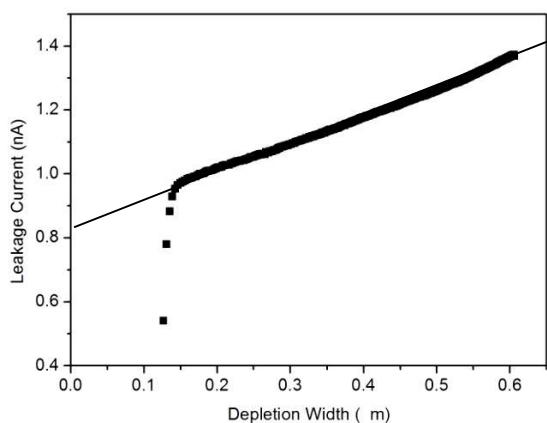


รูปที่ 6: กระแสรั่วไหลของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์

จากที่ได้กล่าวในข้างต้นว่ากระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV มีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากรังสีเอ็กซ์ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างภายในแผ่นผลึก จึงได้ทำการวิเคราะห์เชิงลึกในบริเวณรอยต่อพี-เอ็น โดยจะพิจารณาอายุการเกิดพาหะ (generation carrier lifetime, τ_g) และระดับพลังงานกระตุ้น (activation energy, E_a)

อายุการเกิดพาหะซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5) โดยเปลี่ยนรูปสมการมาจากสมการที่ (3) หรือหาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะซึ่งแสดงในรูปที่ 7 [4]

$$\tau_g = Aq n_i W / (I_0 - I_d) \quad (5)$$



รูปที่ 7: ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

ตารางที่ 2 แสดงค่ากระแสที่เกิดจากการแพร่และอายุการเกิดพาหะโดยเฉลี่ยของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังฉายรังสีเอ็กซ์ จะเห็นว่าอายุการเกิดพาหะหลังฉายรังสีแล้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการฉายรังสีมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการอธิบายได้ว่าหลังการฉายรังสีเอ็กซ์กระแสรั่วไหลมีค่าลดลง

ตารางที่ 2 กระแสที่เกิดจากการแพร่และอายุการเกิดพาหะโดยเฉลี่ยด้วยพลังงานรังสีเอ็กซ์ 70 keV ที่เวลาต่างๆ

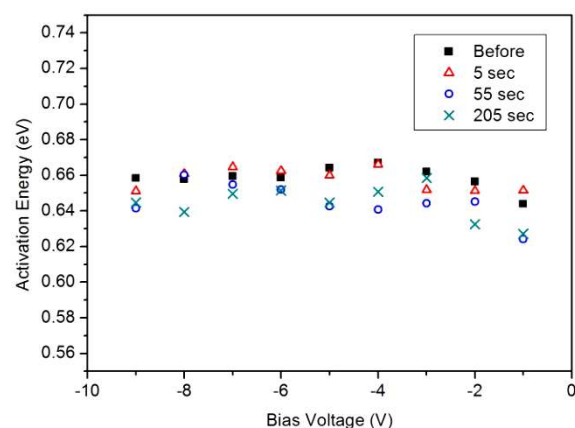
เวลาการฉายรังสีเอ็กซ์ (sec)	$I_d (x10^{-10} A)$	$\tau_g (x10^{-6} sec)$
ก่อนฉายรังสีเอ็กซ์	8.43	2.62
5	8.27	2.62
55	8.43	2.62
205	8.35	2.63

ระดับพลังงานกระตุ้นสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของกระแสรั่วได้ โดยวิเคราะห์จากกระแสที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ [5-7] ซึ่งกระแสที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะนั้นมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังสมการที่ (6) ดังนี้

$$I_g = [(QWAT^{1.7+\xi})/\tau_r] \exp(-E_T/kT) \quad (6)$$

เมื่อ Q คือค่าคงที่, และ ξ คือค่าที่น้อยมาก (<1) ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิในบริเวณปลอดพาหะ, τ_r คืออายุการรวมตัวของพาหะ, และ E_T คือระดับพลังงานกระตุ้น

ระดับพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้แสดงในรูปที่ 8 จะเห็นว่าระดับพลังงานกระตุ้นหลังการฉายรังสีเอ็กซ์มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นรังสีเอ็กซ์อาจมีผลกระทบโดยทำให้จุดบกพร่องเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีเป็นผลให้กระแสรั่วไหลลดลง



รูปที่ 8: ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานกระตุ้น-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV ที่เวลาต่างๆกัน

5. สรุป

ไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นนี้มีแรงดันขั้วเริ่มเท่ากับ 0.5 V และมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่แสดงให้เห็นว่าเป็นโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ไปยังไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นด้วยพลังงานต่างๆพบว่ากระแสรั่วไหลที่วัดได้นั้นที่พลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ 40 และ 55 keV มีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่ชัดเจน ขณะที่กระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV กลับมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกระแสรั่วไหลที่ระยะเวลาในการฉายรังสีเอ็กซ์ต่าง ๆ นั้น ยังไม่เห็นความแตกต่างมากนัก ค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดที่วัดได้พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์พลังงาน 70 keV มีอาการเกิดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น และจากผลของระดับพลังงานกระตุ้น พบว่าหลังจากถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV มีแนวโน้มต่ำลง ดังนั้นการที่ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นมีกระแสรั่วไหลลดลงหลังจากถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV นี้เกิดจากการลดจำนวนจุดบกพร่องในโครงสร้างลงนั่นเอง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ภายใต้รหัสโครงการเลขที่ TGIST 01-52-066 ขอขอบคุณอาจารย์และนักวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำหรับความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.M. Sze, "Physics of semiconductor devices", John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [2] Gerold W. Neudeck, "The pn junction diode", 2nd Modular series on solid state devices, Eds Gerold W. Neudeck and Robert F. Pierret, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

- [3] สมเกียรติ สุกเดช. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง.2545
- [4] Rujanapich, P.; Poyai, A.; Srithanachai, I.; Pengpad, P.; Hruanan, C.; Sophitpan, S.; Titiroongruang, W., "Generation lifetime analysis of p-n junction x-ray detector" ECTI-CON pp. 780-783, Issue 19-21 May 2010
- [5] A. Czerwinski, E. Simoen, A. Poyai, and C. Claeys, "Activation energy analysis as a tool for extraction and investigation of p -n junction leakage current components," J. Appl. Phys., Vol. 94(2), pp. 1218-1221, 2003
- [6] A. Poyai, E. Simoen, C. Claeys, A. Czerwinski and E. Gaubas, "Improved extraction of the activation energy of the leakage current in silicon p-n junction" Appl. Phys. Lett., Vol. 78, Issue 14, id. 1997 (2001).
- [7] Amporn Poyai, "Defect assessment in advanced semiconductor materials and devices", Ph.D., Dep. Elec. Eng., Univ. KU Leuven, Leuven, Belgium, November 2002.