

ผลกระทบและการหาค่าความหนาแน่นประจุที่ดักจับในออกไซด์และประจุดักจับที่อินเทอร์เฟซของการเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่มในมอสเฟตที่ถูกฉายรังสีโดยระเบียบวิธีซับเทรชโฮลด์

Effect and Determination of Oxide Trapped Charge and Interface Trapped Charge Density of Threshold Voltage Shift in Irradiated MOSFET by Subthreshold Methodology

อนุชา เรืองพานิช¹, รังสรรค์ เมืองเหลือ^{2,*} และ โยธิน วงศ์ประเสริฐ²

¹ศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) คลองหนึ่ง
คลองหลวง ปทุมธานี 12120

²ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

Anucha Ruangphanit¹, Rangson Muanghlua^{2,*} and Yothin Wongprasert²

¹Thai MicroElectronics Center (TMEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Khlong
Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani, 12120, Thailand

²Department of Electronics Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Lat Krabang, Lat Krabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding Author E-mail: rangson.mu@kmitl.ac.th

Received: Jan 16, 2023; Revised: Nov 07, 2023; Accepted: Nov 10, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอผลกระทบและหาค่าความหนาแน่นของประจุที่ถูกดักจับในออกไซด์และประจุฝังติดกับอินเทอร์เฟซของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟต ที่ถูกฉายด้วยรังสีแกมมาโดยระเบียบวิธีซับเทรชโฮลด์ที่ขนาดอุปกรณ์ที่ออกแบบ โดยใช้อัตราส่วนของความกว้างต่อความยาวของช่องทางเดินกระแส (W/L) คือ $20\ \mu\text{m}/20\ \mu\text{m}$ โดยค่าแรงดันแรงดันขีดเริ่มหาโดยวิธีการอนุมาณเชิงเส้น การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มทั้งหมดเกิดจากประจุที่ถูกดักจับในออกไซด์และความหนาแน่นของประจุในอินเทอร์เฟซ การหาค่าความหนาแน่นของประจุที่ฝังติดอยู่กับอินเทอร์เฟซใช้ระเบียบวิธีซับเทรชโฮลด์ การฉายรังสีใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาด้วย ^{60}Co ที่ปริมาณสูงสุดที่ $10\ \text{kGy}$ ผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มอยู่ที่ประมาณ $-24\ \text{mV/kGy}$ สำหรับเอ็นมอสและมีความประมาณ $-27\ \text{mV/kGy}$ สำหรับพีมอส การเปลี่ยนแปลงของซับเทรชโฮลด์สวิตช์มีความประมาณ $1.2\ \text{mV/dec.kGy}$ สำหรับเอ็นมอสและมีความประมาณ $0.9\ \text{mV/dec.kGy}$ สำหรับพีมอส ความหนาแน่นของประจุที่ดักจับในออกไซด์ (N_{OT}) และความหนาแน่นของประจุในส่วนอินเทอร์เฟซ (N_{IT}) นั้นพบว่าเพิ่มขึ้นทั้งในเอ็นมอสและพีมอส อัตราส่วนระหว่าง $\Delta N_{OT}/\Delta N_{IT}$ มีค่าประมาณ 2.2 เท่าสำหรับเอ็นมอสและมีความประมาณ 2.8 เท่า สำหรับพีมอส เนื่องจากโครงสร้างของเอ็นมอสที่มีช่องทางเดินกระแสเป็นแบบช่องพื้นผิว (Surface Channel) ส่วนพีมอสมีช่องทางเดินกระแสเป็นแบบช่องฝัง (Buried Channel) สุดท้ายผลกระทบของการ

ฉายรังสีแกมมาต่อพิมอสมีมากกว่าผลกระทบการฉายรังสีแกมมาต่อเอ็นมอสเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่มและอัตราส่วนระหว่าง $\Delta N_{OT}/\Delta N_{IT}$

คำสำคัญ: เอ็นมอส, พิมอส, แรงดันขีดเริ่ม, ซับเทรชโฮลด์

Abstract

This paper presents the effects and determination of oxide and interface trapped charge density of threshold voltage shift in irradiated MOSFET by subthreshold methodology. The designed dimension, channel width per channel length (W/L) is 20 $\mu\text{m}/20 \mu\text{m}$. The threshold voltage is extracted by a linear extrapolation methodology. The over all threshold voltage shifts are caused by oxide trapped charge and interface trapped charge. The subthreshold methodology determines the interface trapped charge. The ^{60}Co gamma-ray source was used for irradiation to a total dose of 10 kGy. The results showed that the threshold voltage shift is approximately -24 mV/kGy for NMOS and -27 mV/kGy for PMOS. The subthreshold swing shift is approximately 1.2 mV/dec.kGy for NMOS and 0.9 mV/dec.kGy for PMOS. The oxide trapped charge density N_{OT} and interface trapped charge density N_{IT} are found to be increased in NMOS and PMOS respectively. The ratio of $\Delta N_{OT}/\Delta N_{IT}$ was approximately 2.2 times for NMOS and 2.8 times. Due to the structure, the channel of NMOS is a surface channel whereas the channel of PMOS is a buried channel. Finally, the effect of gamma irradiation on the PMOS was greater than the effect on NMOS observed from the change in threshold voltage and the ratio of $\Delta N_{OT}/\Delta N_{IT}$.

Keywords: NMOS, PMOS, Threshold voltage, Subthreshold

1. บทนำ

รังสีแกมมา(Gamma radiation, Gamma ray) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงสั้นและมีพลังงานสูงมากชนิดหนึ่งที่เกิดจากการสลายตัวของกัมมันตภาพรังสีของนิวเคลียสของอะตอม ปริมาณรังสีมักจะคำนวณในหน่วยของ rad ดังนั้น 1 rad คือ 100 เอิร์ก/กรัม หรืออีกนัยหนึ่งคือ 100 เอิร์กของพลังงานที่ดูดซึมโดยเนื้อเยื่อของร่างกายหนึ่งกรัม หนึ่งร้อย rad เท่ากับ 1 จูล/กิโลกรัม (J/kg) ซึ่งเท่ากับ 1 Gy ซึ่งเป็นหน่วยมาตรฐานสากลสำหรับการวัดปริมาณรังสี [1] ฉนวนของเกตออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทมอสเฟต(MOSFET) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากในวงจรรวม (IC) การฉายรังสีแกมมามีผลกระทบต่อแผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนและมีผลกระทบต่อฉนวนออกไซด์ ส่งผลกระทบบ้างให้ประจุเพิ่มมากขึ้นที่อินเทอร์เฟซ(Interface) ระหว่าง Si/SiO_2 โดยการเพิ่มประจุในชั้นออกไซด์และการเพิ่มประจุสะสมประจุที่อินเทอร์เฟซ Si/SiO_2 ซึ่งส่งผลทำให้อุปกรณ์เสื่อมสภาพและอาจล้มเหลวของการทำงาน[2-4]

เมื่อทำการฉายรังสีแกมมาบนลงมอสเฟต ประจุบวกถูกดักจับในชั้นเกตออกไซด์ที่สามารถพลิกกลับขั้วในช่องทางเดินกระแสของมอสเฟตทำให้เกิดแรงดันขีดเริ่มมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานและส่งผลกระทบต่อกระแสไฟรั่วไหลสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (ΔV_{OT}) และการสะสมความหนาแน่นประจุที่ดักจับในออกไซด์ (ΔN_{OT}) เป็นผลมาจากประจุที่ดักจับในชั้นออกไซด์ สำหรับเอ็นมอสประจุที่ติดกับอินเทอร์เฟซ (N_{IT}) เป็นประจุลบและเป็นประจุบวกสำหรับพิมอส [2] การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (ΔV_{IT}) และการสะสมความหนาแน่นของประจุที่ติดกับอินเทอร์เฟซ (ΔN_{IT}) เป็นผลมาจากประจุที่ติดอยู่ที่อินเทอร์เฟซ

สำหรับ เอ็นมอส ประจุที่ดักจับในชั้นออกไซด์ (N_{OT}) จะเป็นประจุบวก ในขณะที่ประจุที่ติดกับอินเทอร์เฟซ (N_{IT}) เป็นประจุลบ ดังนั้นประจุที่ถูกดักจับทั้งหมดจะชดเชยซึ่งกันและกัน

สำหรับพิมอสประจุที่ดักจับในชั้นออกไซด์ (N_{OT}) จะเป็นประจุบวก ในขณะที่ประจุที่ติดกับอินเทอร์เฟซ (N_{IT}) เป็นประจุลบ ดังนั้นประจุที่ถูกดักจับทั้งหมดจะเสริมกัน

ความหนาแน่นของประจุที่ติดกับอินเทอร์เฟซ Si/SiO₂ ที่มากขึ้น จะทำให้ความคล่องตัว(mobility)ของประจุพาหะมีค่าลดลง แต่จะไปเพิ่มแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟต

1.1 แรงดันขีดเริ่ม

แรงดันขีดเริ่ม(V_{TH}) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งของมอสเฟต สำหรับแรงดันขีดเริ่มถูกกำหนดให้เป็นแรงดันเกต-ซอส(V_{GS}) ทำให้เกิดชั้นกลับของประจุพาหะขึ้นที่ด้านล่างของชั้นเกต(SiO₂) แรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตที่มีมิติขนาดใหญ (กว้าง W , ยาว L) ถูกกำหนดดังสมการที่ (1)–(4)

$$V_{TH} = V_{FB} \pm 2\phi_F \pm \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}N_{SUB}|2\phi_F|}}{C_{OX}} \quad (1)$$

↑(+) สำหรับ เอ็นมอส และ ↓(-) สำหรับพีมอส

$$V_{FB} = \psi_{MS} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} \quad (2)$$

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{SUB}}{n_i} \quad (3)$$

$$Q_{OX} = (Q_{OT} + Q_{IT}) \quad (4)$$

โดยที่

ψ_{MS} คือผลต่างฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำกับโลหะ

ϕ_F คือระดับพลังงานเฟอร์มิของฐานรอง

Q_{OX} คือประจุทั้งหมดในซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และในส่วนอินเทอร์เฟซ (Si/SiO₂)

C_{OX} คือความจุไฟฟ้าเกตต่อหน่วยพื้นที่

Q_{OT} คือประจุที่ถูกดักจับในออกไซด์

Q_{IT} คือประจุที่ติดอยู่ในส่วนอินเทอร์เฟซ Si/SiO₂

การฉายรังสีจะไม่มีผลกระทบต่อ ψ_{MS} , ϕ_F และประจุดีพลีชันในฐานรองซิลิกอน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มทั้งหมดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงผลรวมของประจุที่ดักจับในชั้นออกไซด์และประจุที่ติดอยู่ในส่วนอินเทอร์เฟซ Si/SiO₂ ดังสมการที่ (5)–(7)

$$\Delta V_{TH} = \frac{\Delta Q_{OX}}{C_{OX}} = \frac{\Delta Q_{OT}}{C_{OX}} + \frac{\Delta Q_{IT}}{C_{OX}} \quad (5)$$

$$\Delta V_{TH} = \Delta V_{OT} + \Delta V_{IT} \quad (6)$$

$$\Delta V_{TH} = \frac{q\Delta N_{OT}}{C_{OX}} + \frac{q\Delta N_{IT}}{C_{OX}} \quad (7)$$

โดยที่

ΔQ_{OX} คือการเปลี่ยนแปลงของประจุ ทั้งหมดขึ้นอยู่กับการฉายรังสีแกมมา

ΔN_{OT} คือการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุในออกไซด์มีหน่วยเป็น cm⁻²

ΔN_{IT} คือการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุติดอยู่ในส่วนอินเทอร์เฟซมีหน่วยเป็น cm⁻²

1.2 ระเบียบวิธีซัพเทรซโซลด์

ด้วยเทคนิคระเบียบวิธีซัพเทรซโซลด์ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1984 [5] ที่ใช้ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าของ $I-V$ ซึ่งค่าซัพเทรซโซลด์สวิง (S) คือส่วนกลับความชันลอการิทึมของ $I_{DS}-V_{GS}$ ค่าซัพเทรซโซลด์สวิง[4],[6] ถูกกำหนดดังสมการที่ (8)–(12)

$$S = \ln(10) \frac{kT}{q} \left[1 + \frac{C_{dep}}{C_{ox}} + \frac{C_{IT}}{C_{ox}} \right] \quad (8)$$

$$\Delta S = \ln(10) \frac{kT}{q} \left(\frac{\Delta C_{IT}}{C_{ox}} \right) \quad (9)$$

$$\Delta C_{IT} = q\Delta N_{IT} \quad (10)$$

$$\Delta N_{IT} = \frac{\Delta S C_{ox}}{kT \ln(10)} \quad (11)$$

$$\Delta V_{IT} = \frac{\Delta S q}{kT \ln(10)} \quad (12)$$

โดยที่

C_{dep} คือความจุไฟฟ้าของดีพลีชัน

k คือค่าคงที่ Boltzmann

q คือประจุอิเล็กตรอน

C_{IT} คือความจุไฟฟ้าที่อินเทอร์เฟซ

ความเปลี่ยนแปลงของซัพเทรซโซลด์สวิง ΔS สามารถกำหนดได้จากลักษณะทางไฟฟ้าของ $I-V$ ก่อนการและหลังการฉายรังสี

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา มักใช้มอสทรานซิสเซอร์แบบเกตโลหะเบอร์ CD4007 (Metal Gate MOS Transistor of CD4007) [7],[8] ส่วนงานวิจัยฉบับนี้จะทำการออกแบบและสร้างมอสทรานซิสเซอร์แบบเกตโพลีซิลิกอน (Polysilicon Gate MOS Transistor) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่มในมอสเฟตที่ถูกฉายรังสีแกมมา เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในส่วนของการอุปกรณ์เซ็นเซอร์ และตลอดจนการศึกษาค่าความหนาแน่นของ

ประจุที่ถูกดักจับในออกไซด์และค่าความหนาแน่นของประจุที่ติดอยู่ในส่วนอินเทอร์เฟซที่มีผลต่อระเบียบวิธีชั้บเทรซโฮลด์

2. วิธีดูลูปกรณและวิธีการวิจัย

อุปกรณ์ประเภทมอสเฟตดังกล่าวได้รับการออกแบบและผลิตที่ศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคโนโลยีการผลิต $0.8\ \mu\text{m}$ ซิมอส [9],[10] ใช้แผ่นเวเฟอร์ซิลิคอนชนิดพี ที่พิกัดความต้านทาน $25\ \Omega\text{-cm}$. ชนิดเกทของซิมอส เป็นแบบโพลีซิลิคอนชนิดเอ็น กำหนดพารามิเตอร์กระบวนการผลิตและอุปกรณ์แสดงอยู่ในตารางที่ 1

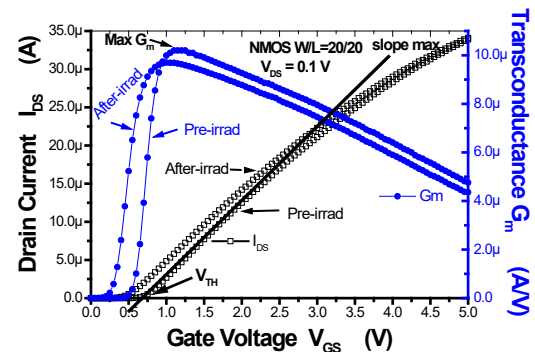
ในส่วนชุดระบบการทดสอบประกอบด้วยเครื่องวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์เซมิคอนดักเตอร์ที่มีความแม่นยำสูง Agilent B-1500A และ เครื่อง Prober Cascade Microtech M 150 โดยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง $I_{DS}-V_{GS}$ ของมอสเฟตที่มีขนาดใหญ่ ($W/L = 20\ \mu\text{m}/20\ \mu\text{m}$) จะถูกวัดในช่วงปริมาณรังสีแกมมาตั้งแต่ $1\ \text{kGy}$ ถึง $10\ \text{kGy}$ โดยแรงดันขั้วเริ่มจะถูกหาจากคุณลักษณะของ $I_{DS}-V_{GS}$ ด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงเส้น I_{DS} จะถูกวัดเป็นฟังก์ชันของแรงดันเกท (V_{GS}) ที่ใช้ขนาดแรงดัน เคน-ซอส (V_{DS}) มีค่าเท่ากับ $0.1\ \text{V}$ ที่ความชัน $I_{DS}-V_{GS}$ สูงสุด (ระดับ G_m สูงสุด) เส้นตรงที่ความชันสูงสุดตัดไปที่จุดที่ กระแส $I_{DS} = 0$ จุดดังกล่าวจะแสดงค่าของแรงดันขั้วเริ่ม ดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์กระบวนการผลิต

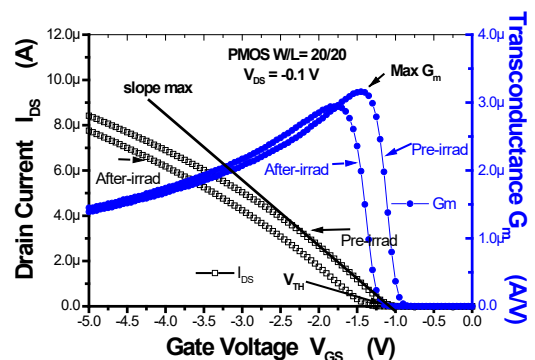
คำอธิบายพารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
P-Tub Sheet Resistance	2000	Ω/Sq
N-Well Sheet Resistance	1500	Ω/Sq
N-Well Junction Depth	3.0	μm
N+ Active Sheet Resistance	50	Ω/Sq
N+ Active Junction Depth	0.4	μm
P+ Active Sheet Resistance	90	Ω/Sq
P+ Active Junction Depth	0.35	μm
N+Poly gate sheet	30	Ω/Sq
N+Poly gate thickness	350	nm

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์กระบวนการผลิต (ต่อ)

คำอธิบายพารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
Gate oxide thickness	15	nm
Channel Width (W)	20	μm
Channel Length (L)	20	μm



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{DS}-V_{GS}$ และ ความสัมพันธ์ระหว่าง G_m-V_{GS} ของ (ก) เอ็นมอส และ (ข) พีมอส

การเปลี่ยนแปลงแรงดันขั้วเริ่ม ΔV_{TH} ของอุปกรณ์ทดสอบถูกกำหนดโดยสมการที่ (13)

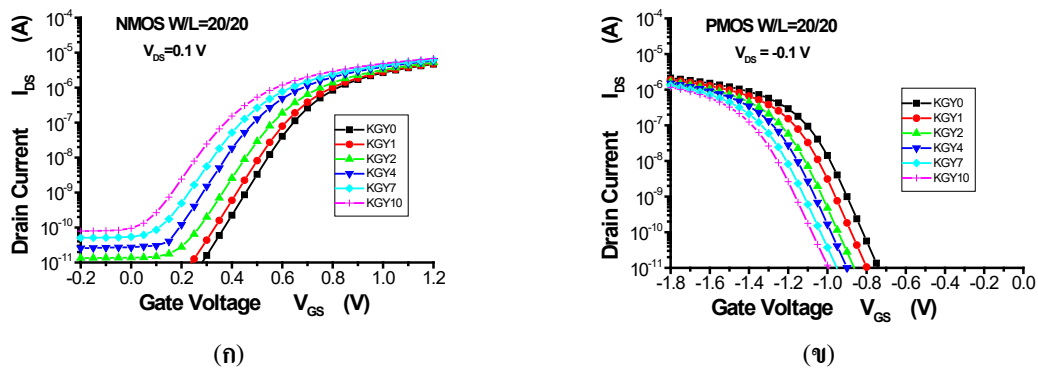
$$\Delta V_{TH} = V_{TH,after-irrad} - V_{TH,pre-irrad} \quad (13)$$

โดยที่

$V_{TH, after-irrad}$ คือแรงดันขั้วเริ่มหลังการฉายรังสี

$V_{TH, pre-irrad}$ คือแรงดันขั้วเริ่มก่อนการฉายรังสี

สำหรับการหาค่าชั้บเทรซโฮลด์สวิตจิง (S) จะใช้ความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าระหว่าง $I_{DS}-V_{GS}$ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(I_{DS})-V_{GS}$ สำหรับการหาค่าขั้วทรานซิสต์สวิง (S) ของ (ก) เอ็นมอส และ (ข) พีมอส

3. ผลการทดลอง

จากกราฟในรูปที่ 1 พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{TH} ของเอ็นมอส มีค่า 0.70 V ก่อนฉายรังสีและพบว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{TH} ของเอ็นมอสมีค่า 0.45 V หลังฉายรังสีที่มีปริมาณรังสีแกมมา 10 kGy

ในทำนองเดียวกันในกรณีของพีมอส ค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{TH} มีค่า -1.08 V ก่อนฉายรังสีและพบว่าค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{TH} มีค่า -1.35 V หลังฉายรังสีที่มีปริมาณรังสีแกมมา 10 kGy

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มได้เลื่อนไปในทางด้านลบทั้งของเอ็นมอสและพีมอสเนื่องมาจากการสะสมของประจุบวกที่ถูกดักจับในออกไซด์

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่ม ΔV_{TH} ทั้งของเอ็นมอสและพีมอสกับปริมาณการฉายรังสีทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ΔV_{TH} กับปริมาณการฉายรังสีแกมมา

เอ็นมอส(NMOS)					
Dose (kGy)	1	2	4	7	10
V_{TH} (V)	0.67	0.62	0.55	0.51	0.45
ΔV_{TH} (V)	-0.02	-0.07	-0.15	-0.19	-0.24
พีมอส(PMOS)					
Dose (kGy)	1	2	4	7	10
V_{TH} (V)	-1.14	-1.21	-1.25	-1.31	-1.35
ΔV_{TH} (V)	-0.06	-0.13	-0.17	-0.23	-0.27

การเปลี่ยนแปลงของขั้วทรานซิสต์สวิง (S) คำนวณจากลอการิทึมการถดถอยเชิงเส้นของกระแสเดรน (I_{DS}) ในระดับช่วงระหว่าง 10^{-7} A ถึง ระดับ 10^{-9} A

สำหรับเอ็นมอสการเปลี่ยนแปลงของขั้วทรานซิสต์สวิง (S) ถูกคำนวณพบว่า มีค่าเป็น 95 mV/dec และเพิ่มขึ้นเป็น 98, 100, 102, 104 และ 107 mV/dec

ในทำนองเดียวกันสำหรับพีมอสขั้วทรานซิสต์สวิง (S) ถูกคำนวณเป็น 102 mV/dec และเพิ่มขึ้นเป็น 104, 106, 108, 109 และ 111 mV/dec. ที่ปริมาณการฉายรังสีขนาด 1 kGy, 2 kGy, 4 kGy, 7 kGy และ 10 kGy ตามลำดับ

การฉายรังสีจะทำให้เกิดการเพิ่มความจุไฟฟ้าที่สถานะอินเทอร์เฟซ (C_{IT}) หรือเป็นการเพิ่มขึ้นของประจุที่อินเทอร์เฟซ (N_{IT}) ประจุเพิ่มขึ้นที่ติดอยู่ในส่วนอินเทอร์เฟซจะไปลดความเร็วการทำงานของมอสเฟต และทำให้ค่าขั้วทรานซิสต์สวิง (S) เพิ่มขึ้น ค่าขั้วทรานซิสต์สวิงกับปริมาณการฉายรังสีของมอสทั้งสองชนิดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลง S กับปริมาณการฉายรังสี

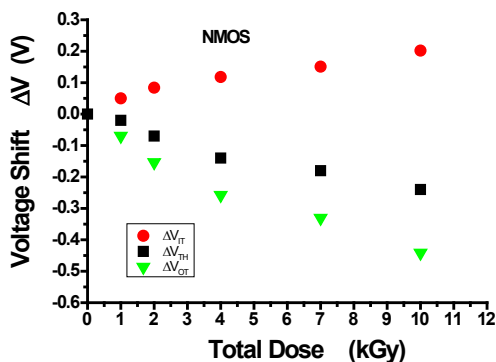
เอ็นมอส(NMOS)					
Dose (kGy)	1	2	4	7	10
S (mV/dec)	98	100	102	104	107
ΔS (mV/dec)	3	5	7	9	12
พีมอส(PMOS)					
Dose (kGy)	1	2	4	7	10
S (mV/dec)	104	106	108	109	111
ΔS (mV/dec)	2	4	6	7	9

ดังสมการที่ (11)–(12) คำนวณ ΔN_{IT} และ ΔV_{IT} และ ใช้สมการที่ (6) คำนวณหา ΔV_{OT} ดังรูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่มทั้งหมด ΔV_{TH} แรงดันไฟฟ้าที่

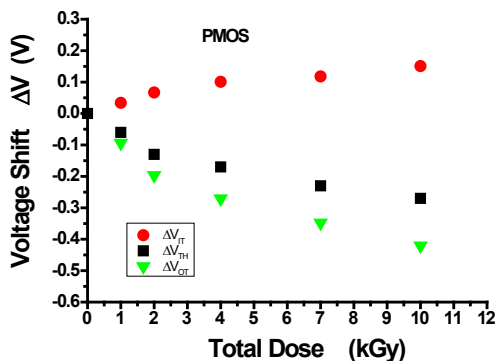
เปลี่ยนแปลงเนื่องจากประจุที่ถูกดักจับในออกไซด์ ΔV_{OT} และแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเนื่องจากประจุที่ติดกับอินเทอร์เฟซ ΔV_{IT} เทียบกับปริมาณการฉายรังสี

เมื่อพิจารณา ΔV_{TH} ดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันขีดเริ่ม ΔV_{TH} มีค่าเท่ากับ -0.24 V สำหรับเอ็นมอสและพบว่า ΔV_{TH} มีค่าเท่ากับ -0.27 V สำหรับพีมอสที่ปริมาณการฉายรังสีทั้งหมด 10 kGy

ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ΔV_{OT} เนื่องจากประจุที่ถูกดักจับในออกไซด์ถูกเลื่อนไปทางซ้าย (เป็นลบมากกว่า) ทั้งของเอ็นมอสและพีมอส แต่การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ΔV_{IT} เนื่องจากประจุที่ติดอยู่กับอินเทอร์เฟซถูกเลื่อนไปทางขวา (บวกมากขึ้น) ทั้งของเอ็นมอสและพีมอส แม้ว่าประจุที่ติดอยู่ที่อินเทอร์เฟซจะส่งผลต่อแรงดันขีดเริ่มให้เลื่อนไปทางขวา แต่ผลกระทบของประจุที่ถูกดักจับในออกไซด์นั้นมีอิทธิพลต่อแรงดันขีดเริ่มมากกว่า จึงทำให้ภาพรวมการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มเลื่อนไปทางซ้าย



(ก)



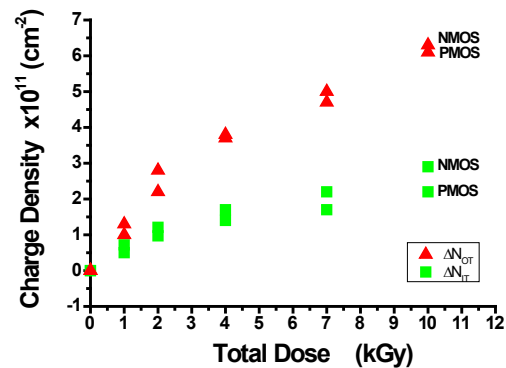
(ข)

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของ ΔV_{IT} , ΔV_{OT} และ ΔV_{TH} เทียบกับปริมาณการฉายรังสีของ (ก) เอ็นมอส และ (ข) พีมอส

โดยจะใช้สมการที่ (5)–(10) คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุที่ติดอยู่ที่อินเทอร์เฟซ ΔN_{IT} และการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุที่ถูกดักจับในออกไซด์ ΔN_{OT} ดังรูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ ΔN_{OT} และ ΔN_{IT} เทียบกับปริมาณการฉายรังสีทั้งหมดทั้งของ เอ็นมอสและพีมอส

สำหรับเอ็นมอส ΔV_{OT} และ ΔV_{IT} มีค่าเป็น -0.44 V และ 0.20 V ตามลำดับ ค่า ΔN_{OT} คำนวณได้มีค่าเท่ากับ $6.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ และ ค่า ΔN_{IT} คำนวณได้มีค่าเท่ากับ $2.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ N_{OT} เป็นประจุบวก ในขณะที่ N_{IT} เป็นประจุลบ ดังนั้นประจุทั้งสองจะชดเชยซึ่งกันและกัน

สำหรับพีมอส ΔV_{OT} และ ΔV_{IT} มีค่าเป็น -0.42 V และ 0.15 V ตามลำดับ ค่า ΔN_{OT} คำนวณได้เท่ากับ $6.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ และ ค่า ΔN_{IT} คำนวณได้มีค่าเท่ากับ $2.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ N_{OT} เป็นประจุบวก และ N_{IT} ก็เป็นประจุบวกเช่นกัน ดังนั้นประจุทั้งสองจะเสริมกัน



รูปที่ 4 ค่า ΔN_{OT} และ ΔN_{IT} เทียบกับปริมาณการฉายรังสีของเอ็นมอสและพีมอส

4. สรุป

ผลของการฉายรังสีแกมมาให้กับมอสเฟตจะส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แรงดันขีดเริ่ม ชับเทรช โวลต์สวิตจ การส่งผ่านสัญญาณของอุปกรณ์ และการเคลื่อนที่ของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแส

ความหนาแน่นของประจุที่ถูกดักจับในในออกไซด์ (N_{OT}) และความหนาแน่นของประจุที่ติดที่อินเทอร์เฟซ (N_{IT}) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟต ที่ถูกฉายรังสีแกมมา ส่วนการตรวจตรวจสอบและวิเคราะห์กระทำโดยระเบียบวิธีชันเทรชโวลต์สวิตจ อุปกรณ์มอสเฟตจะถูกฉายรังสีแกมมาปริมาณรวมสูงสุด 10 kGy

การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (ΔV_{IT}) ที่เกิดจากประจุติดที่อินเทอร์เฟซ คำนวณจากเปลี่ยนแปลงระดับทรานซิสต์สวิง (ΔS) จากการทดลองพบว่าในกรณีของเอ็นมอสการเปลี่ยนแปลงแรงดันขั้วเริ่ม ΔV_{TH} มีค่าประมาณ -0.24 V และพบว่าอัตราส่วนของ $\Delta N_{OT}/\Delta N_{IT}$ อยู่ที่ประมาณ 2.2 เท่า สำหรับพีมอสการเปลี่ยนแปลงแรงดันขั้วเริ่ม ΔV_{TH} มีค่าประมาณ -0.27 V และพบว่า อัตราส่วนของ $\Delta N_{OT}/\Delta N_{IT}$ อยู่ที่ประมาณ 2.8 เท่า เนื่องมาจากโครงสร้างของเอ็นมอสมีช่องทางเดินกระแสเป็นแบบช่องพื้นผิว (Surface Channel) และส่วนของพีมอสมีช่องทางเดินกระแสเป็นแบบช่องฝัง (Buried Channel)

สุดท้ายจากการทดลองพบว่าผลของการฉายรังสีแกมมาด้วย ^{60}Co นั้นส่งผลกระทบต่อพีมอสมากกว่าผลกระทบต่อเอ็นมอส ซึ่งจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันขั้วเริ่มและอัตราส่วนของ $\Delta N_{OT}/\Delta N_{IT}$

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งประเทศไทยอนุมัติให้เข้าถึงการฉายรังสีและเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สัญญาเลขที่ 2556-02-01063)

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Shapiro, "The Absorbed Dose—A Measure of Energy Imparted to a Medium," in *Radiation Protection :A Guide for Scientists and Physicians*, 4th Ed., Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 2002, ch.2, sec.11, pp. 60–63.
- [2] J. R .Schwank, M. R .Schaneyfelt, D. M .Fleetwood, J. A .Felix, P. E. Dodd, P. Paillet and V. Ferlet-Cavrois, "Radiation Effect in MOS Oxides," *IEEE Transactions on nuclear science*, vol .55, no. 4, pp. 1833–1853, 2008, doi: 10.1109/TNS.2008.2001040 .
- [3] J. McWhorter and P. S. Winokur, "Simple Technique for Separating the Effects of Interface Traps and Trapped Oxide Charge in MOS Transistors," *Applied Physics Letters*, vol. 48, no. 2, pp. 133–135, 1986, doi: 10.1063/1.96974.
- [4] K. Roy, S. Mukhopadhyay and H. Mahmoodi-Meimand, "Leakage Current Mechanisms and Leakage Reduction Techniques in Deep-Submicrometer CMOS Circuits," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 2, pp. 305–327, 2003, doi: 10.1109/JPROC.2002.808156
- [5] P. S. Winokur, J. R. Schwank, P. J. McWhorter, P. V. Dressendorfer and D. C. Turpin, "Correlating the Radiation Response of MOS Capacitors and Transistors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 31, no. 6, pp. 1453–1460, 1984, doi: 10.1109/TNS.1984.4333529.
- [6] S. M. Sze and K. K. Ng, "MOSFETs," in *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006, ch. 6, sec. 2, pp. 297–320.
- [7] H. Jafari, S. A. H. Feghhi and S. Boorboor, "The effect of interface trapped charge on threshold voltage shift estimation for gamma irradiated MOS device," *Radiation Measurements*, vol. 73, pp. 69–77, 2015, doi: 10.1016/j.radmeas.2014.12.008.
- [8] S. Boorboor, S. A. H. Feghhi and H. Jafari, "Investigation of Threshold Voltage Shift in Gamma Irradiated N-Channel and P-Channel MOS Transistors of CD4007," *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, vol. 11, no. 5, pp. 191–195, 2017
- [9] Y. Taur and T. H .Ning, "MOS Capacitors," in *Fundamentals of Modern VLSI Devices*, 2nd ed., Cambridge, UK: University Press, 1998, ch. 2, sec. 3, pp. 103–108.
- [10] P. R. Gray and R. G. Meyer, "Bipolar, MOS, and BiCMOS Integrated-Circuit Technology," in *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc., 1993, ch. 2, sec. 8, pp. 127–131.