



บทที่ 4

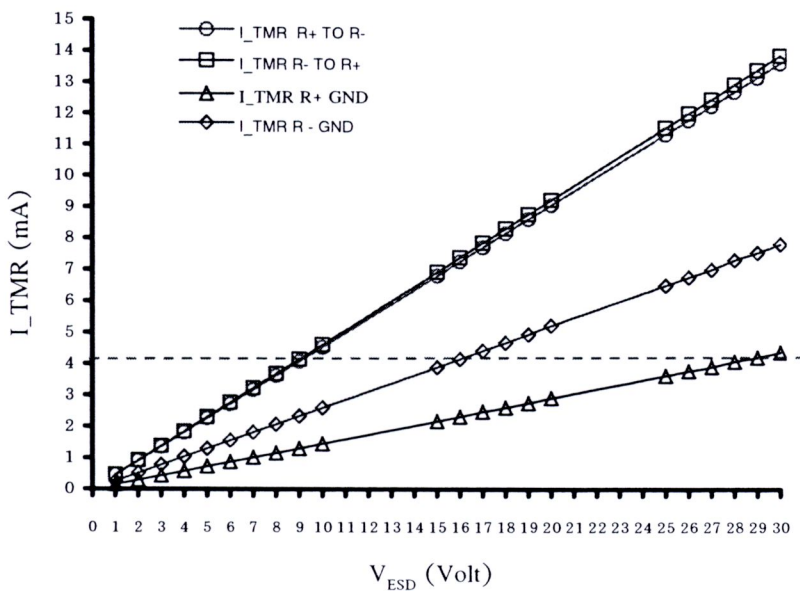
ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบผลของแรงดันการคายประจุไฟฟ้าสถิตต่อหัวอ่าน

การทดสอบผลของแรงดันการคายประจุไฟฟ้าสถิตต่อหัวอ่านนี้ ถูกใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง ในส่วนต่อไป จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการจำลอง การทดสอบจริง และในตอนท้ายจะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบจริงและการทดลอง โดยในหัวข้อนี้ จะยังไม่กล่าวถึงสาเหตุของการที่หัวบันทึกเกิดความเสียหาย และความไม่เสถียรของหัวบันทึกอันเป็นผลจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต

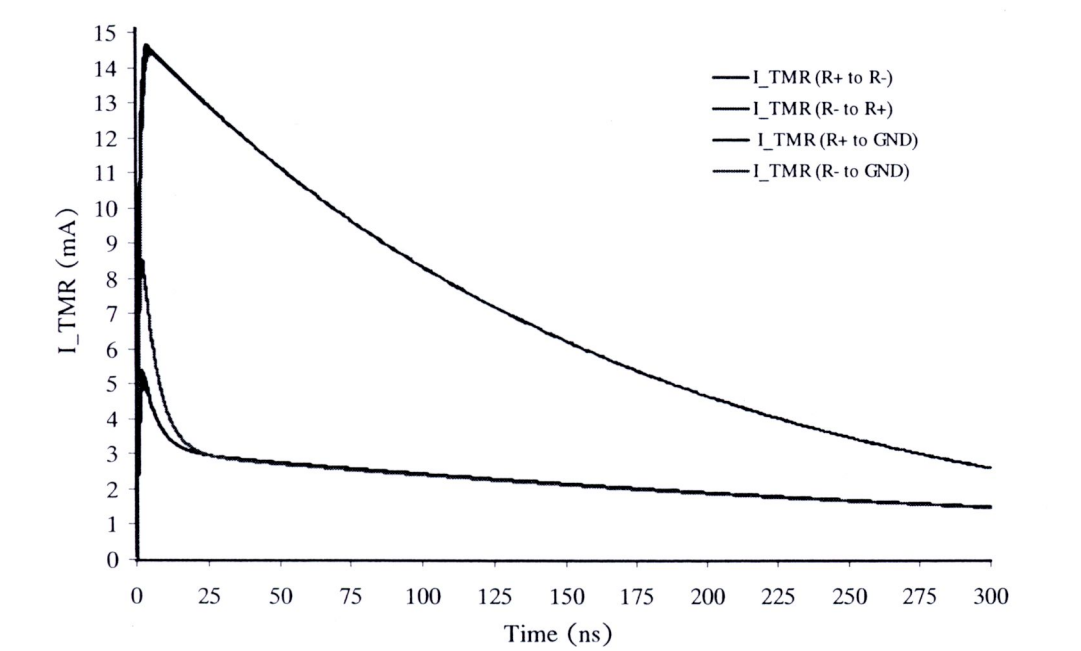
4.1.1 การทดสอบผลของแรงดันที่มีต่อหัวอ่านข้อมูลโดยอาศัยแบบจำลอง (Simulation)

การจำลองผลของการคายประจุไฟฟ้าสถิตโดยอาศัยแบบจำลองมนุษย์ต่อหัวอ่าน ที่เกิดจากการคายประจุได้ทำการศึกษาในกรณีการคายประจุที่ต่างกัน 4 กรณี คือ 1) คายประจุคร่อมระหว่างขั้ว R+ และ ขั้ว R- (R+ to R-) 2) คายประจุคร่อมระหว่างขั้ว R- และ ขั้ว R+ (R- to R+) 3) คายประจุคร่อมระหว่างขั้ว R+ และกราวด์ (R+ to Ground) และ 4) คายประจุคร่อมระหว่างขั้ว R- และกราวด์ (R- to Ground) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 กระแสที่ไหลผ่านส่วนจำลองของแผ่นฟิล์มบาง (I_{TMR}) ขนาดมากกว่า 4 mA หมายความว่า หัวบันทึกเกิดความเสียหาย เรียกระดับแรงดันการคายประจุที่ทำให้หัวบันทึกเกิดความเสียหายว่า เรียกว่าแรงดันทะลาย (Breakdown voltage)

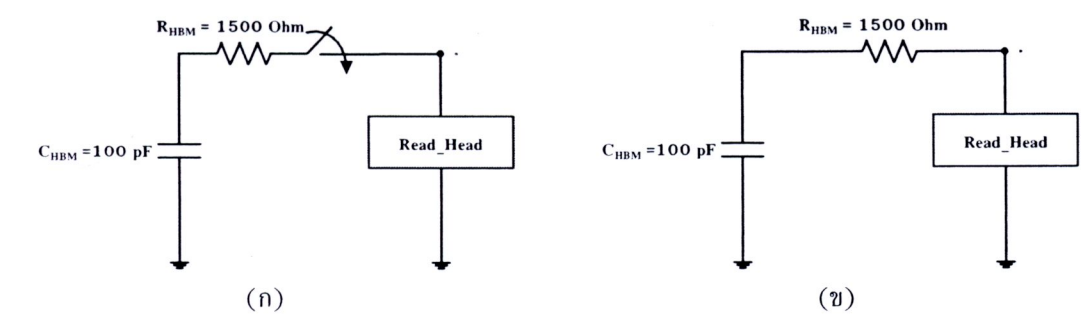


ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการคายประจุไฟฟ้าสถิต และ กระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} เส้นปะ ($I_{TMR} = 4$ mA) แสดงขนาดของกระแสที่ทำให้หัวอ่านเกิดความเสียหาย

จากภาพที่ 4.1 พบว่า ระดับแรงดันทะลาย ในกรณีที่ 3 มีขนาดสูงกว่า ระดับแรงดันทะลาย กรณีที่ 2 ประมาณสองเท่า คือประมาณ 28 โวลต์ และ 15 โวลต์ ตามลำดับ ขณะที่ ระดับแรงดันทะลาย ในกรณีที่ 1 และ 2 จะมีระดับแรงดันใกล้เคียงกัน คือประมาณ 8 โวลต์ และ จากการวัด ค่าคงที่เวลาของกระแสไหลผ่าน R_{TMR} ที่เกิดจากรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน ตามที่แสดงในภาพที่ 4.2 พบว่า ค่าคงที่เวลาในกรณีที่ 1 และ 2 มีระยะเวลา จะมีค่าไม่ต่างกัน คือ ประมาณ 178 ns และ 175 ns ตามลำดับ แต่ในกรณีที่ 3 และ 4 พบว่า ค่าคงที่เวลาการสลายประจุ มีระยะเวลาต่างกันมาก คือ ประมาณ 232 ns และ 18 ns ตามลำดับ ผลที่ได้จากทั้ง การวัดระดับแรงดันทะลาย และค่าคงที่ของเวลานั้น แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ว่า ขนาดอิมพีแดนซ์ (Impedance) รวมที่เกิดจากการคายประจุ จาก R_+ เทียบกับกราวด์ มีขนาดมากกว่า ค่าอิมพีแดนซ์ ที่ได้จากการคายประจุจากขั้ว R_- เทียบกับกราวด์ ซึ่งผลที่ได้นี้ สามารถทำการพิสูจน์ได้โดยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า



ภาพที่ 4.2 รูปสัญญาณของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} เมื่อทำการคายประจุโดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน



ภาพที่ 4.3 วงจรทดสอบการคายประจุ (ก) ก่อนทำการคายประจุ (ข) หลังจากทำการคายประจุ

เนื่องจากวงจรการทดสอบการคายประจุโดยอาศัยแบบจำลองมนุษย์เป็นวงจรแบบอนุกรม (Series Circuit) โดยที่ C_{HBM} ต่อกันกับ R_{HBM} ตามที่แสดงในภาพที่ 4.3 หากให้ ความต้านทานสมมูลของอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งในที่นี้คือหัวอ่าน TMR มีขนาดเท่ากับ R_{Read_Head} พบว่าหลังจากทำการคายประจุ หรือปิดสวิสซ์ จะมีผลทำให้ R_{HBM} ต่อกันกับ R_{Read_Head} ซึ่งสามารถประมาณ ค่าคงที่เวลาการสลายประจุได้ ตามสมการที่ 4.1

$$\tau_{HBM} = (R_{HBM} + R_{Read_Head}) \times C_{HBM} \tag{4.1}$$

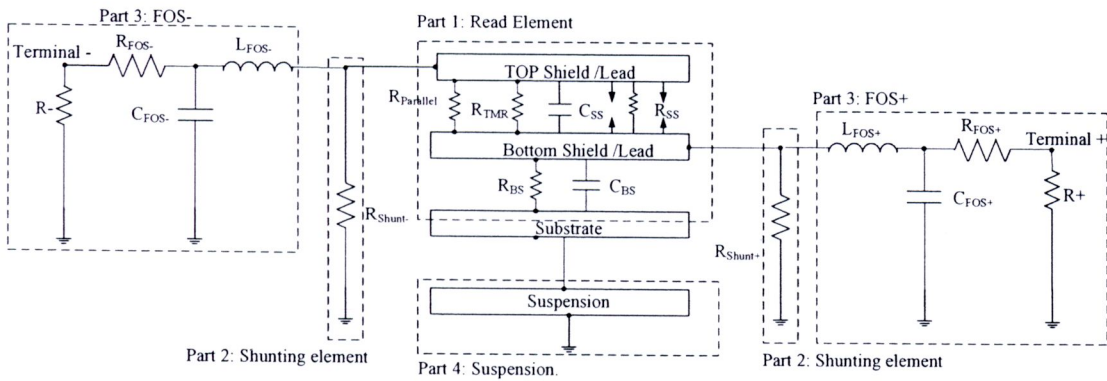
- โดยที่ τ_{HBM} คือ ค่าคงที่เวลาของการสลายประจุ
 C_{HBM} คือ ค่าการเก็บประจุของแบบจำลองมนุษย์ ขนาด 150 pF
 R_{HBM} คือ ค่าความต้านทานของแบบจำลองมนุษย์ ขนาด 1000 โอห์ม
 R_{Read_Head} คือ ค่าความต้านทานสมมูลของหัวอ่าน

เนื่องจาก ขนาดของ C_{HBM} และ R_{HBM} เป็นค่าคงที่ ดังนั้นระยะเวลาในการสลายประจุ จะแปรตามค่าของ ขนาดความต้านสมมูลย์ของหัวอ่าน จากภาพที่ 4.2 จะพบว่า ระยะเวลาในการสลายประจุ เมื่อทดสอบโดยอาศัยกรณีการคายประจุ กรณีที่ 3 จะนานกว่ากรณีที่ 4 1 และ 2 ตามลำดับ ทำให้สามารถประมาณได้ อย่างคร่าว ๆ ว่า ความต้านทานสมมูลย์ของหัวอ่าน ที่เกิดจากการคายประจุกรณีที่ 3 จะมีขนาดมากกว่า ความต้านทานสมมูลย์ ที่เกิดจากการคายประจุกรณีที่ 4 ขณะที่ กรณีที่ 1 และ 2 นั้น จะมีขนาดเท่ากัน

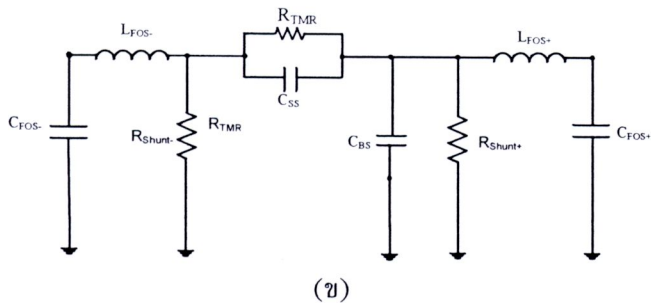
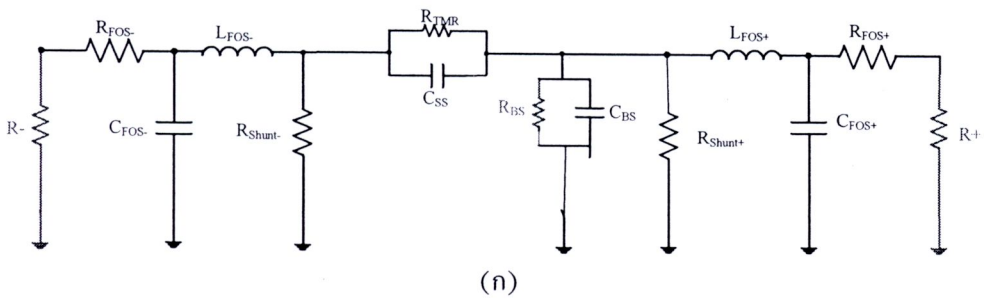
ผลดังกล่าวนี้ ชี้ให้เห็นว่าวงจรสมมูลย์ของหัวอ่าน TMR เป็นวงจรอสมมาตร กล่าวคือความต้านทานสมมูลย์ที่ได้จากการคายประจุคร่อมขั้ว R+ เทียบกับกราวด์ จะมีขนาดมากกว่าความต้านทานสมมูลย์ที่ได้จากการคายประจุคร่อมขั้ว R- เทียบกับกราวด์ อย่างไรก็ตาม การประมาณโดยอาศัยสมการที่ 4.1 นั้น เป็นการประมาณอย่างคร่าว ๆ และเนื่องจากหัวอ่าน ประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่เก็บ ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นค่าที่แปรตามความถี่ ดังนั้นในการที่จะวิเคราะห์ถึงผลของการคายประจุที่มีต่อขนาดของความต้านทานของหัวบันทึกได้อย่างถูกต้องนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลย์

แบบจำลองที่แสดงในภาพที่ 4.4 เป็นแบบจำลองที่ใช้ศึกษา ผลจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต ซึ่งสามารถจัดเรียงใหม่ในลักษณะของวงจร แบบ π ดังแสดงในภาพที่ 4.5 เนื่องจากค่าความต้านทานของ R_{BS} , $R_{Sub-Sus}$, R_+ และ R_- มีค่าความต้านทานที่สูงมาก (มากกว่า 1,000 M Ω) ดังนั้นจึงสามารถ ประมาณได้เป็นวงจรในภาพที่ 4.6 ทั้งนี้เนื่องจาก ส่วนของความต้านทานขนาน $R_{Parallel}$ มีขนาดสูงกว่าความต้านทานของ R_{TMR} มาก จึงสามารถละค่า $R_{Parallel}$ ได้

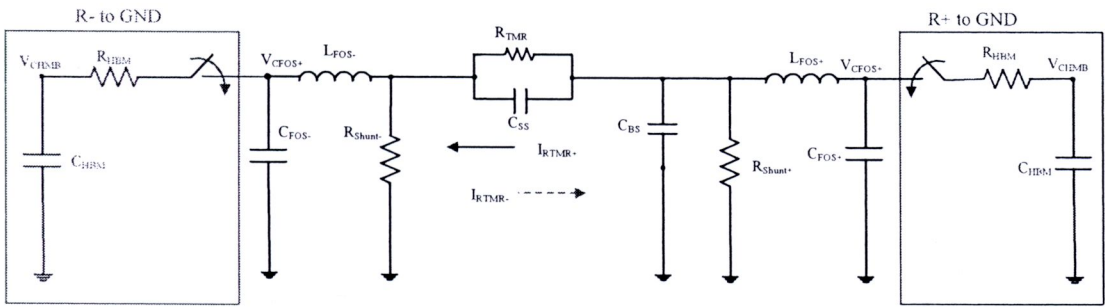
เมื่อพิจารณาแบบจำลองการคายประจุระหว่าง R+ เทียบกับกราวด์ และ R- เทียบกับกราวด์ มาพิจารณาจะได้วงจรตามภาพที่ 4.6 ซึ่งเป็นวงจรที่จะถูกนำมาใช้คำนวณค่าอิมพีแดนซ์รวมของวงจร



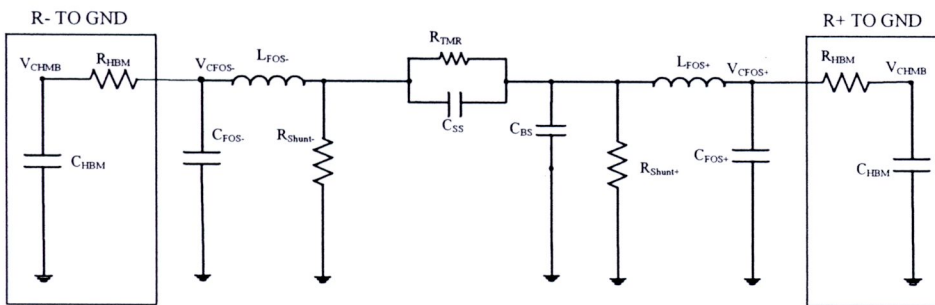
ภาพที่ 4.4 แบบจำลองของหัวอ่านของหัวบันทึก



ภาพที่ 4.5 (ก) แบบจำลองที่ถูกจัดเรียงใหม่ในลักษณะของวงจร π โดยที่ ขนาดของความต้านทานของ R_{BS} , R_+ และ R_- มีค่าความต้านทานที่สูงมาก) มากกว่า $1,000 \text{ M}\Omega$ ทำให้ค่าความต้านทานของส่วน R_{BS} , R_+ และ R_- สามารถถูกประมาณได้เป็น Open Circuit ตามที่แสดงในภาพที่ 4.4 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.6 (ก) แบบจำลองของวงจรที่ใช้คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเมื่อ คายประจุระหว่าง R+ เทียบกับกราวด์ และ R- เทียบกับกราวด์ โดยที่ I_{RTMR+} และ I_{RTMR-} แสดงทิศทางการไหลของกระแส เมื่อคายประจุระหว่าง R+ เทียบกับกราวด์ และ R- เทียบกับกราวด์ ตามลำดับ

(ข) แบบจำลองจากวงจร จากภาพ 4.6 (ก) เมื่อพิจารณาที่ t มากกว่าหรือเท่ากับ 0 วงจรนี้เป็นวงจรที่ใช้คำนวณหา Impedance ของ R_{TMR} เมื่อคายประจุระหว่าง R+(-) เทียบกับกราวด์

เนื่องจากคำนวณ ค่าอิมพีแดนซ์รวมทำได้ลำบาก ดังนั้น ดังนั้นการคำนวณแอดมิตแทนซ์ (Admittance) จะสามารถทำได้สะดวกกว่า ค่าอิมพีแดนซ์รวมของ R_{TMR} หรือ $Z_{TMR}(j\omega)$ โดยเมื่อทำการคายประจุ ระหว่าง R+ เทียบกับกราวด์ และ R- เทียบกับกราวด์ สามารถประมาณได้

$$Z_{TMR}^+(j\omega) \approx \frac{1}{G_{TMR}^+(j\omega)} \quad (4.3)$$

$$Z_{TMR}^-(j\omega) \approx \frac{1}{G_{TMR}^-(j\omega)} \quad (4.4)$$

โดยที่ $G_{TMR}^+(j\omega)$ และ $G_{TMR}^-(j\omega)$ คือค่าแอดมิตแทนซ์ (Admittance) ของหัวอ่าน เมื่อทำการคายประจุ ระหว่าง R+ และ R- เทียบกับกราวด์ ตามลำดับ

แรงดันของการคายประจุหรือ V_{ESD} ของการคายประจุทั้งสองแบบ พิจารณาให้อยู่ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) นั่นคือ

$$V_{ESD}^+(j\omega) = V_{C_{HBM}}(0) - V_{C_{FOS+}}(j\omega) \quad (4.5)$$

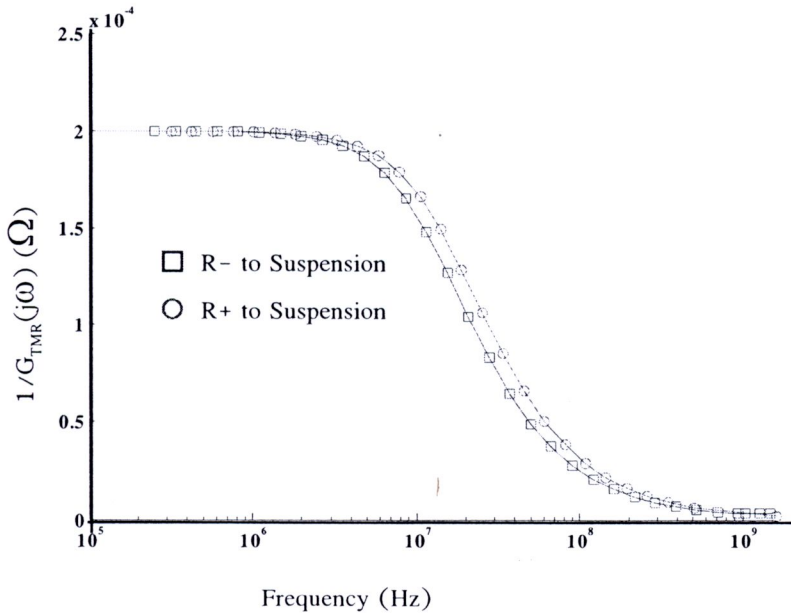
$$V_{ESD}^-(j\omega) = V_{C_{HBM}}(0) - V_{C_{FOS-}}(j\omega) \quad (4.6)$$

โดยอาศัยเทคนิคการแปลงลาปลาซ (Laplace) ร่วมกับทฤษฎีของเทอวินิน (Thevenin's theory) จะสามารถคำนวณค่า แอดมิตแตนซ์ที่เกิดจากการคายประจุ ระหว่าง R+(-) เทียบกับกราวด์ ได้ค่าตามที่แสดงในสมการที่ (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ

$$G_{TMR}^+(j\omega) = R_{shunt+} \times [(1 + j\omega R_{shunt-} C_{FOS-} + (j\omega)^2 R_{FOS-} C_{FOS-})] \quad (4.7)$$

$$G_{TMR}^-(j\omega) = R_{shunt-} \times [(j\omega R_{shunt+} C_{sub} + 1)((j\omega)^2 L_{FOS+} C_{FOS+} + 1) + (j\omega R_{shunt+} C_{FOS+})] \quad (4.8)$$

จากสมการที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า $Z_{TMR}(j\omega)$ แปรตามขนาดของ $1/G_{TMR}(j\omega)$ ดังนั้นถ้า $1/G_{TMR}^+(j\omega)$ มีขนาดมากกว่า $1/G_{TMR}^-(j\omega)$ แล้ว $Z_{TMR}^+(j\omega)$ จะมีขนาดมากกว่า $Z_{TMR}^-(j\omega)$ โดยอาศัยค่าที่ได้จากวงจร จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/G_{TMR}(j\omega)$ และ ความถี่ได้ตามภาพที่ 4.7



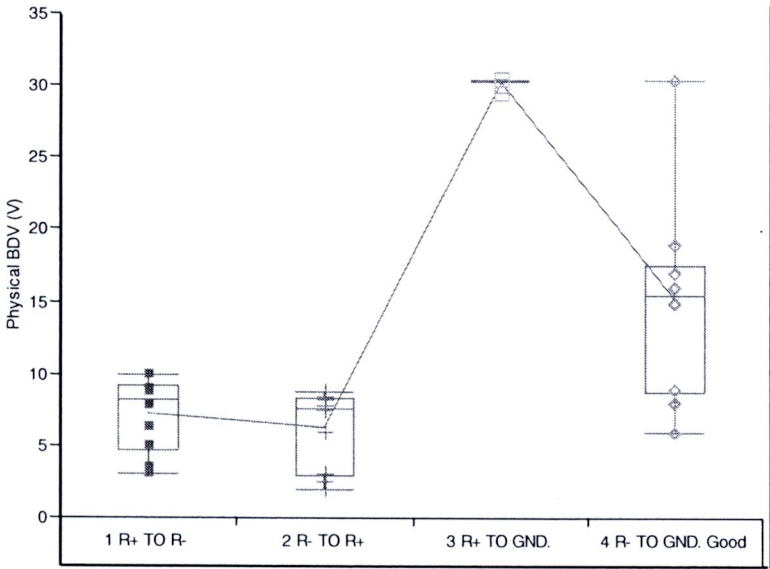
ภาพที่ 4.7 $1/G_{TMR}(j\omega)$ ที่ได้จากการคายประจุระหว่าง R+ เทียบกราวด์ และ R- เทียบกราวด์

จากภาพที่ 4.7 เมื่อพิจารณาที่ ความถี่เท่ากันจะพบว่า $1/G_{TMR}^+(j\omega)$ มีขนาดมากกว่า $1/G_{TMR}^-(j\omega)$ และในทำนองเดียวกันจะได้ว่า $Z_{TMR}^+(j\omega)$ มีขนาดมากกว่า $Z_{TMR}^-(j\omega)$ ซึ่งผลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองของหัวอ่านแบบ TMR นั้นเป็นวงจรแบบ อสมมาตร แต่จากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ ว่า ที่ความถี่สูงมากๆ คือ มากกว่า 1GHz $1/G_{TMR}^+(j\omega)$ มีแนวโน้มที่จะเท่ากับ $1/G_{TMR}^-(j\omega)$ ดังนั้น ถ้า ทำการคายประจุโดยอาศัยแบบจำลองที่มีความถี่ เช่น Machine Model หรือ Charge Device Model อาจจะ ได้ผลที่ต่างกัน

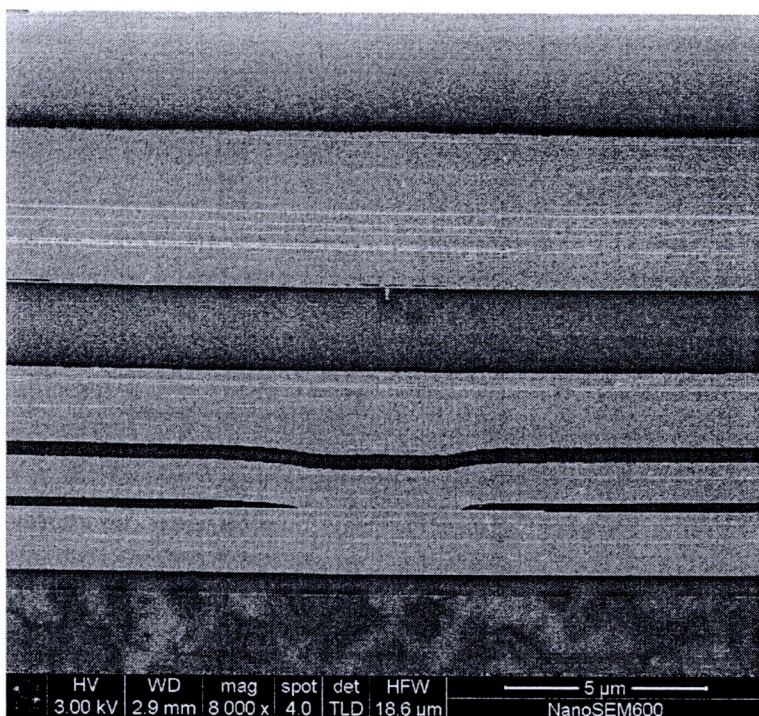
4.1.2 การวัดระดับแรงดันทะลุโดยอาศัยการทดลอง

การวัดระดับแรงดันทะลุที่เกิดจากการคายประจุทั้ง 4 กรณี ได้ทำการทดสอบ โดยใช้การทดลองจริง ซึ่งแรงดันทะลุที่ถูกวัดได้นั้น เป็นขนาดแรงดันทะลุเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบหัวบันทึก 10 ชิ้นต่อหนึ่งกรณีการคายประจุ

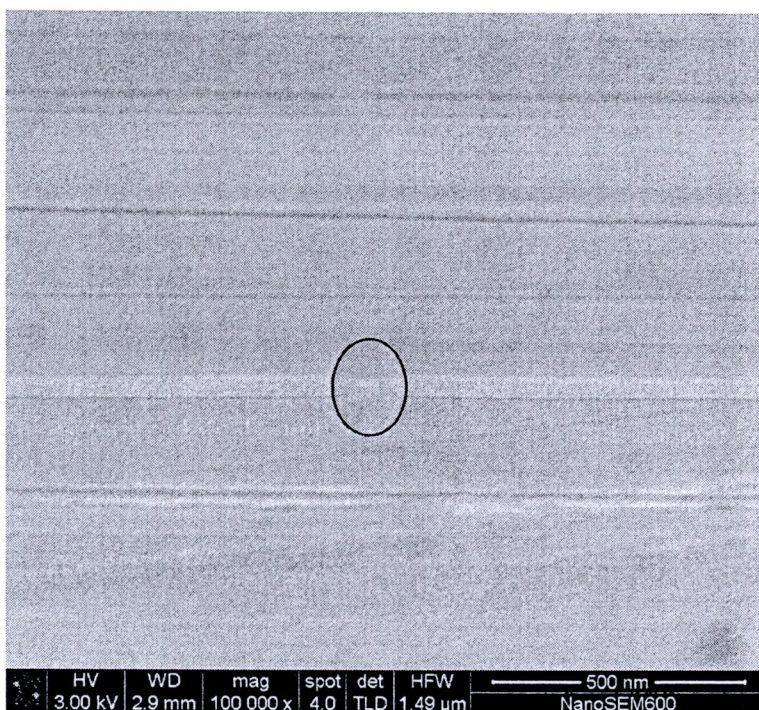
จากภาพที่ 4.8 พบว่า ระดับแรงดันทะลุ ในกรณีที่ 3 มีขนาดสูงกว่า ระดับแรงดัน ทะลุ ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ 4 คือประมาณ 30 และ 19 โวลต์ ตามลำดับ ในขณะที่ แรงดันทะลุ ที่เกิดจา กรณีสี่ที่ 1 และ 2 นั้น มีขนาดใกล้เคียงกันคือ 8 และ 9 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งความเสียหายของหัวบันทึก ที่ เกิดจากการคายประจุ โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกันนี้ สามารถตรวจสอบได้โดยอาศัยภาพ SEM ตามที่แสดงในภาพที่ 4.9-4.12



ภาพที่ 4.8 ระดับแรงดันที่ทำให้เกิดความเสียหาย จากการทดลองจริงเทียบกับการคายประจุใน 4 รูปแบบ



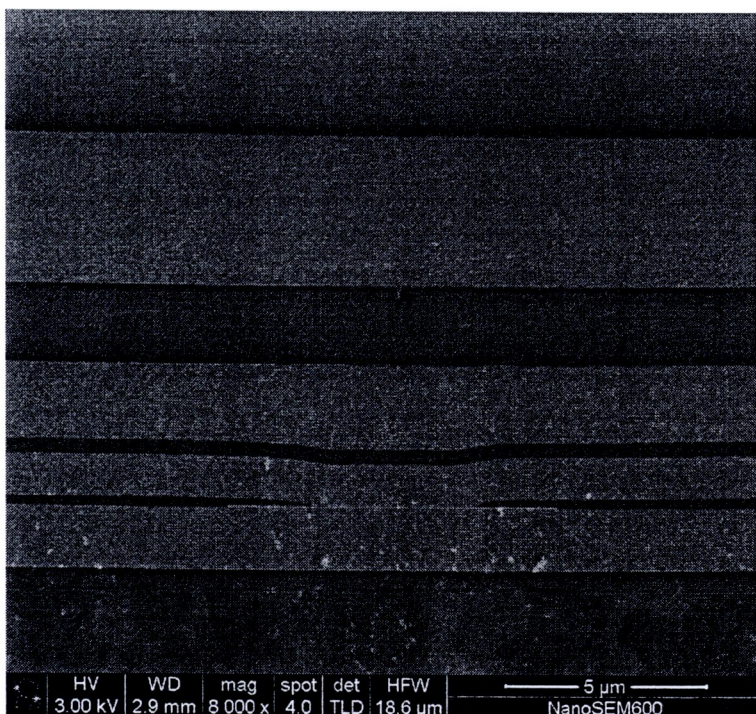
(ก)



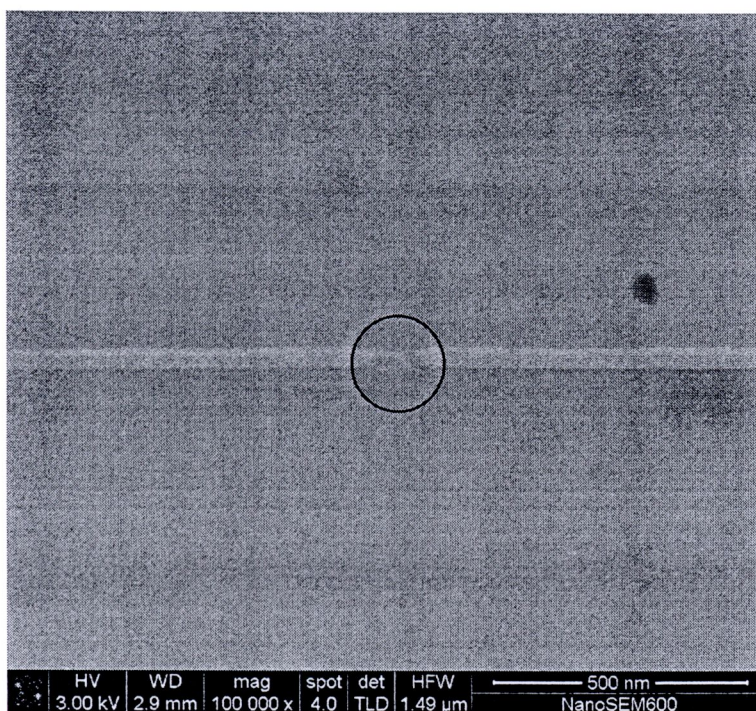
(ข)

ภาพที่ 4.9 (ก) ภาพถ่าย SEM ของหัวบันทึก ที่เกิดความเสียหายเนื่องจาก กรณีที่ 1

(ข) ภาพขยายของ ภาพ (ก) ภายในวงกลมแสดงบริเวณของหัวบันทึก

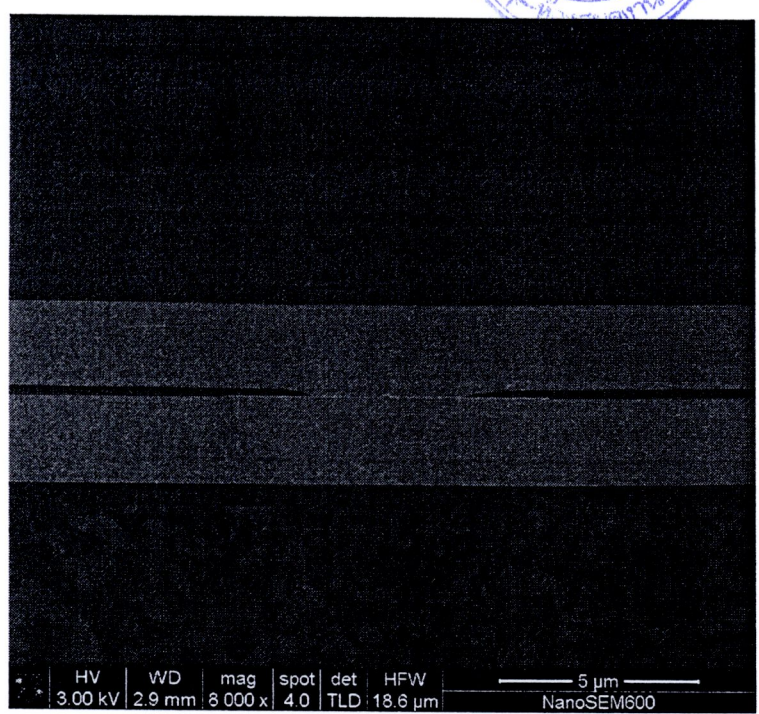


(ก)

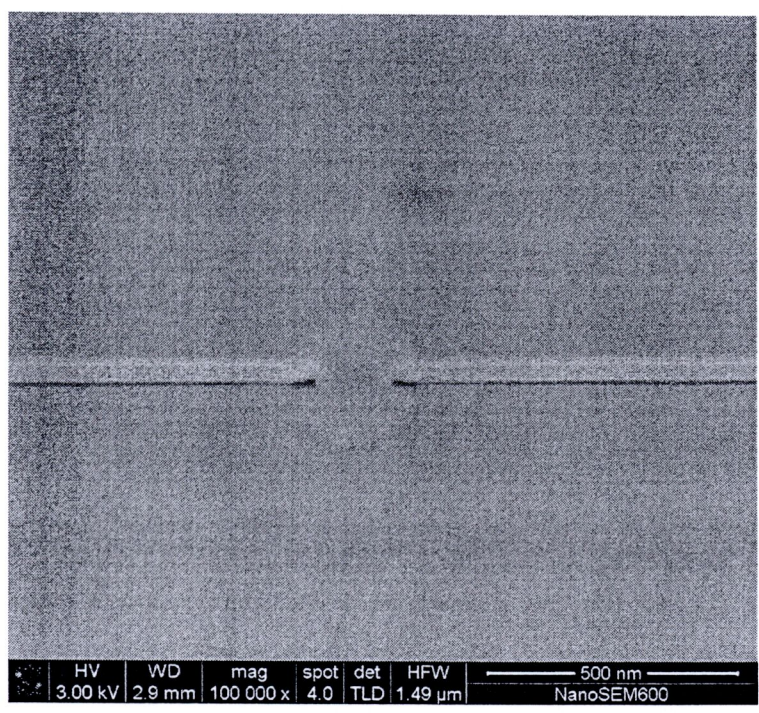


(ข)

ภาพที่ 4.10 (ก) ภาพถ่าย SEM ของหัวบันทึก ที่เกิดความเสียหาย เนื่องจากกรณีที่ 2
 (ข) ภาพขยายของ ภาพ (ก) ภายในวงกลมแสดงบริเวณของหัวบันทึก

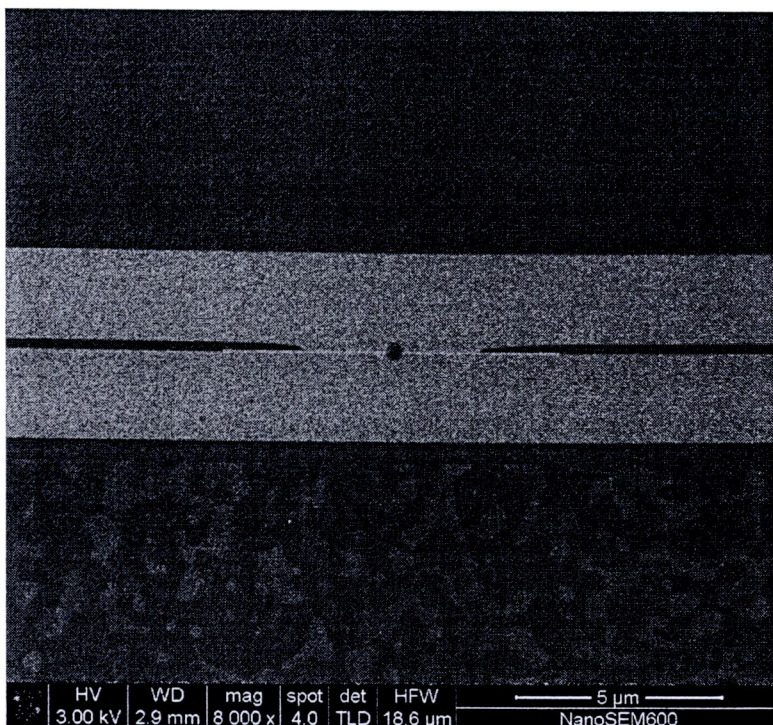


(ก)

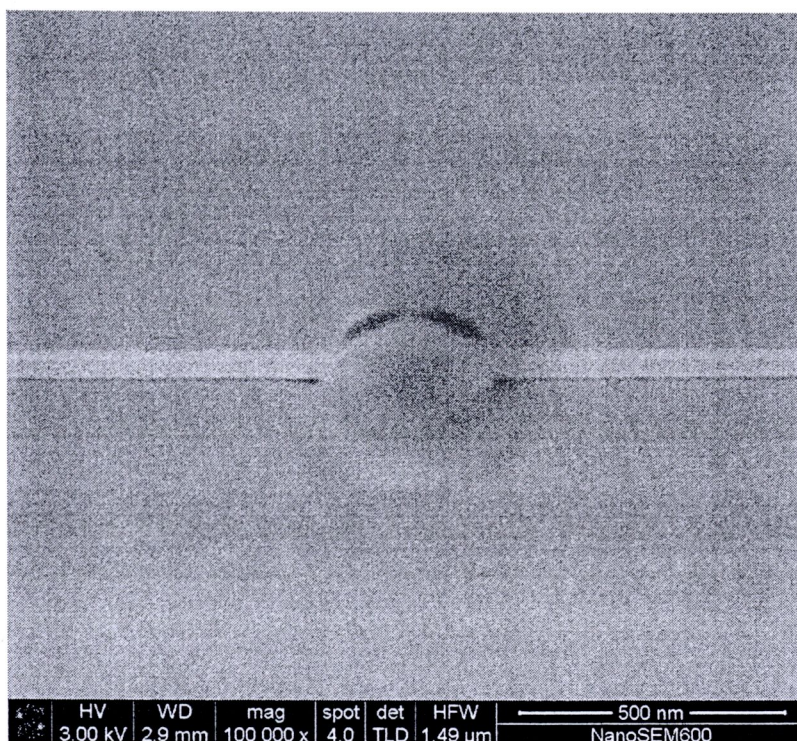


(ข)

ภาพที่ 4.11 (ก) ภาพถ่าย SEM ของหัวบันทึก ที่เกิดความเสียหาย เนื่องจากกรณีที่ 3
(ข) ภาพขยายของ ภาพ (ก)



(ก)

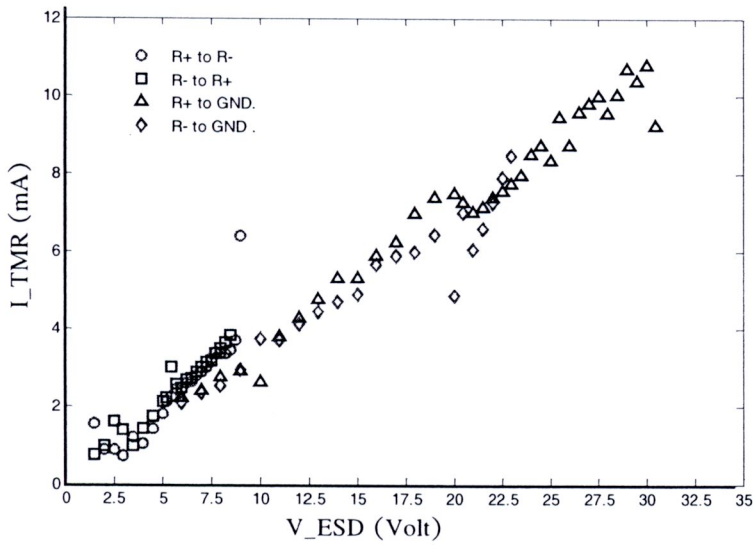


(ข)

ภาพที่ 4.12 (ก) ภาพถ่าย SEM ของหัวบันทึก ที่เกิดความเสียหาย เนื่องจากกรณีที่ 4
 (ข) ภาพขยายของ ภาพ (ก)

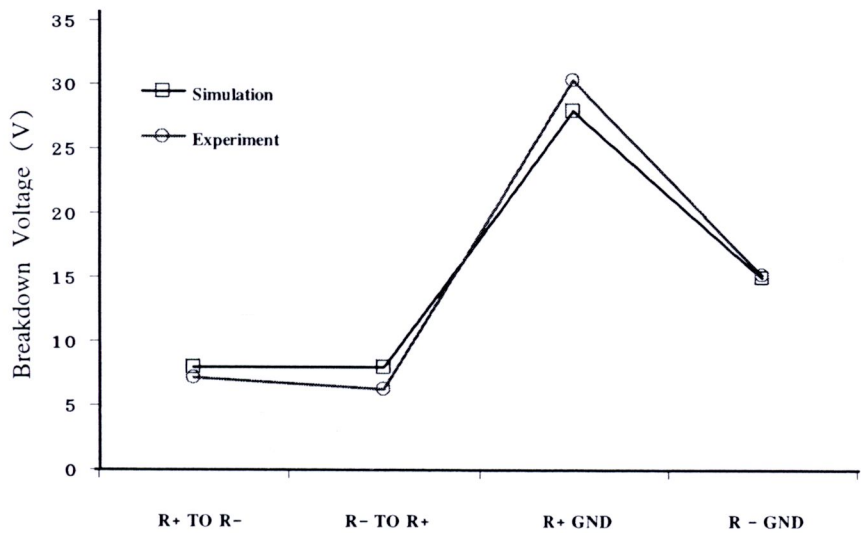
จากภาพถ่าย SEM ที่แสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า ในกรณีที่ 1 นั้น จะมีความเสียหายเกิดขึ้นที่ บริเวณหัวอ่านเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ ภาพถ่าย SEM ที่ได้จากกรณีที่ 2 นั้น ไม่ปรากฏความเสียหายที่สามารถสังเกตเห็นได้ แต่ในกรณีที่ 3 และ 4 นั้น สามารถสังเกตเห็นความเสียหายที่ บริเวณหัวอ่านได้อย่างชัดเจน

ภาพที่ 4.13 แสดงผลเฉลี่ยของการวัดกระแส ที่ไหลผ่านหัวบันทึกในระดับ HGA ซึ่งพบว่า ในกรณีที่ 1 นั้น กระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทันทีทันใด ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ แสดงถึงการทะลุแบบหนัก เป็นผลให้เกิดความเสียหายที่บริเวณหัวบันทึก ตามที่แสดงไปแล้วในภาพที่ 4.9 อย่างไรก็ตาม ผลของการวัดกระแสนี้ ไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ผลของแรงดันที่มีต่อการคายประจุจากขั้ว R- ไป R+ ได้ ทั้งนี้เนื่องจาก ไม่สามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านหัวบันทึก สำหรับการคายประจุ กรณีที่ 3 และ 4 พบว่า ที่แรงดันประมาณ 20 โวลต์ กระแสจะมีแนวโน้มลดลง และค่อยๆเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่กระแสลดลงนี้ แสดงให้เห็นถึงการเริ่มเกิดการทะลุ โดยในเบื้องต้นนี้คาดว่า อาจเป็นผลที่เกิดจาก Oxygen Vacancy ซึ่งเป็นผลจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต



ภาพที่ 4.13 ผลของการคายประจุที่มีต่อกระแสที่ไหลผ่านหัวบันทึกในระดับการผลิต HGA

ภาพที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบผลของแรงดันทะลุ ที่ได้จากจำลองและการทดลอง ซึ่งพบว่า ผลที่นั่นมีความสอดคล้องเป็นอย่างมาก แสดงว่า แบบจำลองที่ได้ถูกออกแบบนี้นั้น มีความสอดคล้องกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง และสามารถนำไปใช้เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตในรูปแบบอื่นๆได้



ภาพที่ 4.14 ระดับแรงดันที่ทำให้หัวบันทึกเกิดความเสียหายจากการจำลองเทียบกับการทดลอง ที่เกิดจากการคายประจุในแต่ละกรณี

4.2 ผลของ FOS และ การต่อขนาน ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต

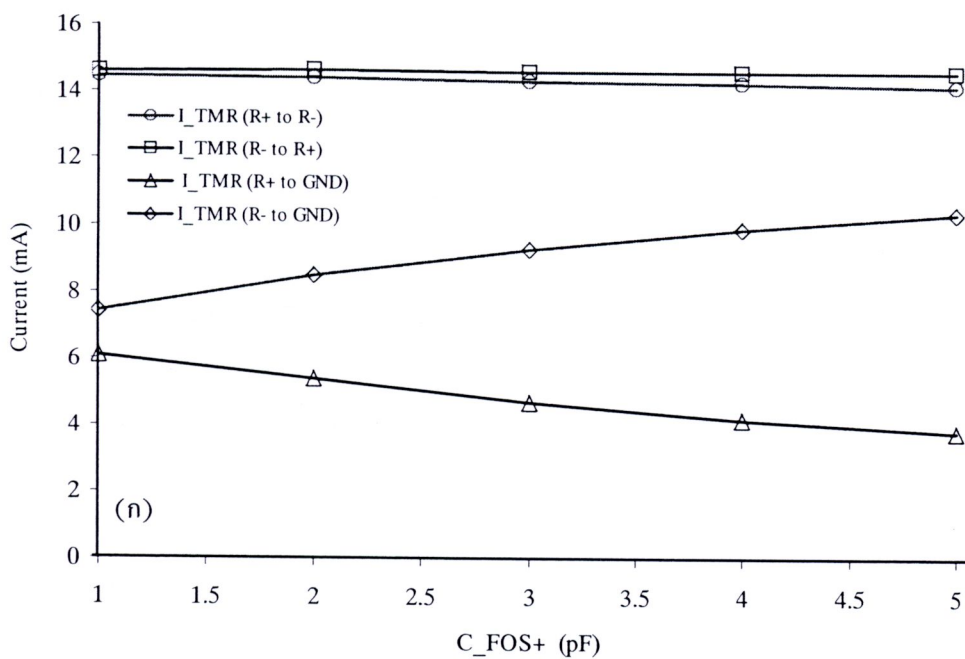
ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลของ ขนาดค่าการเก็บประจุของ C_FOS ขนาดความต้านทานของ ส่วนต่อขนาน อันได้แก่ R_{Shun+} R_{Shun-} และ $R_{Parallel}$

4.2.1 ผลของ C_FOS ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต

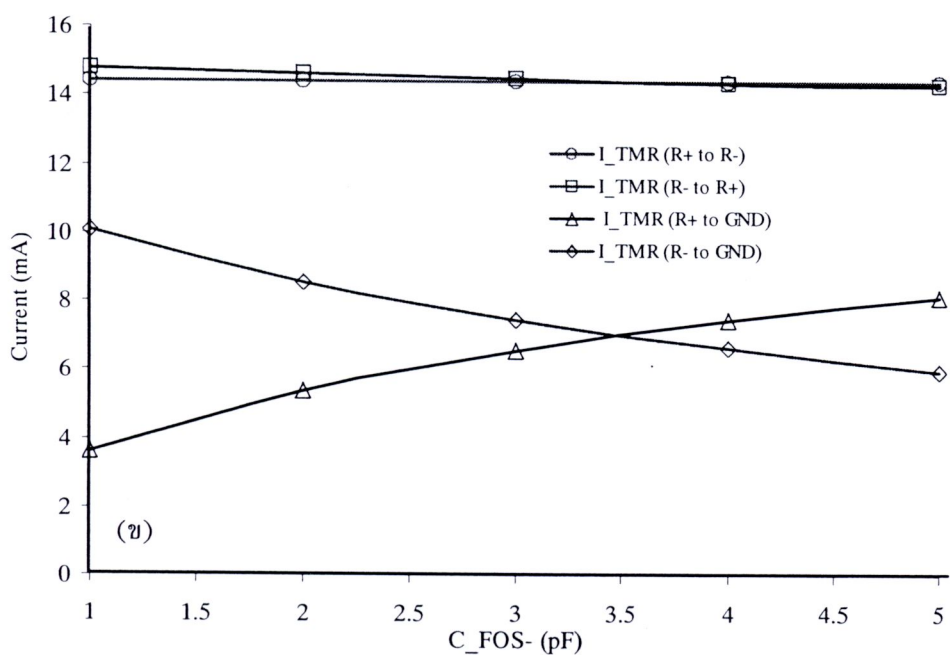
การทดสอบผลของ C_FOS นี้ เป็นผลจาก การคายประจุไฟฟ้าสถิต ที่ขนาดแรงดันการคายประจุคงที่ คือ 28 โวลต์ ซึ่งเป็นขนาดแรงดันที่ทำให้หัวบันทึก เกิดความเสียหายสำหรับทุกรูปแบบการทดสอบ จากการทดลองพบว่า ขนาดของ C_FOS ไม่มีผลต่อหัวบันทึก เมื่อทำการทดสอบโดยอาศัยการคายประจุจากขั้ว R+(-) ไปยัง R- (+) (กรณี ที่ 1 (2)) แต่จะส่งผลต่อ หัวบันทึกอย่างชัดเจนเมื่อทำการทดสอบโดยอาศัยการคายประจุ จากขั้ว R+(-) เทียบกับกราวด์ (กรณี ที่ 3 (4))

จากภาพที่ 4.15 (ก) และ (ข) พบว่า ขนาดของ C_FOS +(-) ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลทำให้ I_TMR ที่เกิดจากการคายประจุจากขั้ว R+ ไปยัง R- เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.15 (ก) พบว่า ขนาดของ C_FOS + ที่เพิ่มขึ้นนี้ มีผลทำให้ I_TMR ที่เกิดจากการคายประจุจาก กรณีที่ 3 และ 4 มีขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงแบบ เอ็กโพเนนเชียล (Exponential) ตามลำดับ ซึ่งจะตรงข้ามกับ ผลที่แสดงในภาพที่ 14(ข) กล่าวคือ ขนาดของ C_FOS - ที่เพิ่มขึ้นนี้มีผลทำให้ I_TMR ที่เกิดจาก กรณีที่ 3 และ 4 มีขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ

โดยทั่วไป ตัวเก็บประจุมีคุณสมบัติหลัก ที่สำคัญ 2 ประการคือ มีหน้าที่ในการสะสมประจุ และ ดึงกระแส ถ้าตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่มากขึ้นจะสามารถดึงกระแส และสะสมประจุได้มากขึ้น ดังนั้น เมื่อ C_FOS+(-) มีขนาดมากขึ้น จะทำให้ปริมาณประจุที่เกิดจากการคายประจุ จากขั้ว R+(-) ไปยังกราวด์ ถูกเก็บสะสมไว้ใน C_FOS+(-) เป็นจำนวนมากขึ้นทำให้เกิดกระแสไหลไปผ่าน R_{TMR} ได้น้อยลง แต่ปริมาณประจุที่เกิดจากการคายประจุจาก ขั้ว R- (+) เทียบกับกราวด์ จะไหลผ่าน R_{TMR} มากขึ้น ทำให้ I_TMR มีขนาดเพิ่มขึ้น



(ก)



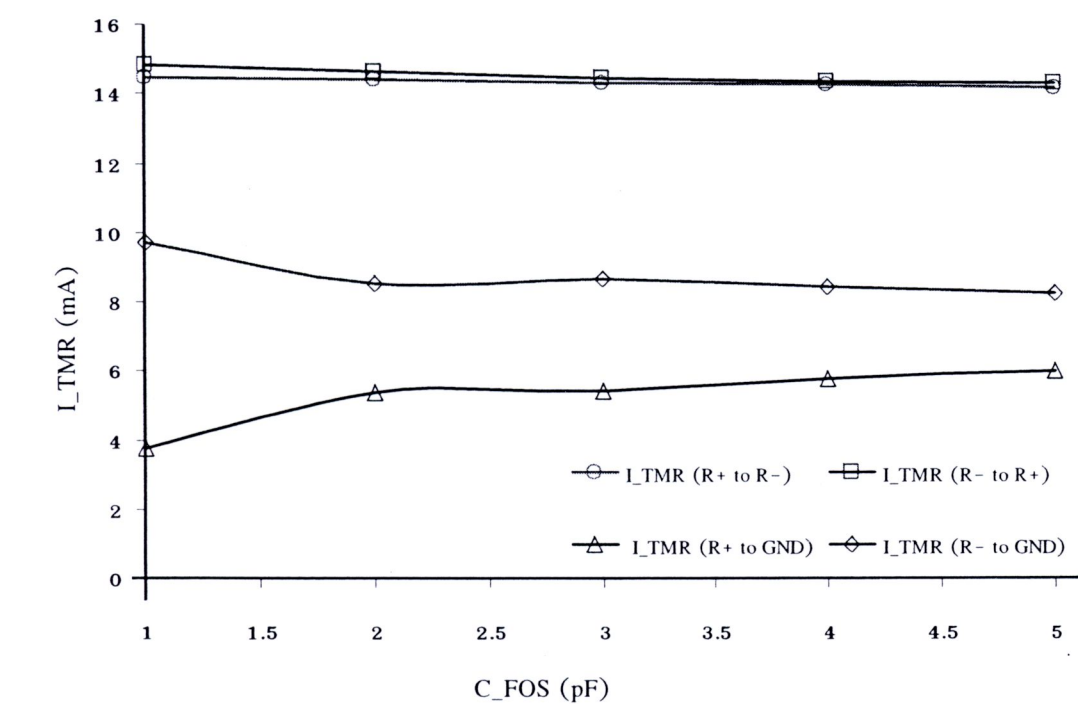
(ข)

ภาพที่ 4.15 (ก) ผลของ C_{FOS+} ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน

(ข) ผลของ C_{FOS-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 28 โวลต์โดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน

โดยปรกติแล้ว สายนำสัญญาณที่ใช้ในหัวบันทึกจะเป็นประเภทเดียวกัน ซึ่งขนาดของการเก็บประจุของสายสัญญาณที่เชื่อมต่อไปยังแต่ละขั้วจะมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นการศึกษาถึงผลของ ขนาดการเก็บประจุทั้งสองด้านเท่าๆกัน (C_FOS) อาจจะสามารถทำให้ทราบแนวทางในการควบคุมการคายประจุได้

ภาพที่ 4.16 แสดงผลของ C_FOS ที่มีต่อกระแสไหลผ่าน TMR จากการคายประจุในกรณีที่ 1 - 4 ซึ่งพบว่า เมื่อ C_FOS มีขนาดเพิ่มขึ้น ขนาดกระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 1 และ 2 จะมีขนาดค่อนข้างคงที่ แต่ในกรณีที่ 3 และ 4 นั้น พบว่าการแสไหลผ่าน TMR มีแนวโน้มที่จะคงที่ ที่ขนาดการเก็บประจุมากกว่า 5 pF แสดงว่า การออกแบบสายนำสัญญาณที่มีค่าการเก็บประจุสูง จะมีส่วนช่วยในการลดผลกระทบจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตได้



ภาพที่ 4.16 ผลของ C_FOS ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน

4.2.2 ผลของ R_{Shunt+} , R_{Shunt-} และ $R_{parallel}$ ที่มีต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต

การทดสอบผลของ R_{Shunt+} และ R_{Shunt-} เป็นผลที่ได้จากการคายประจุไฟฟ้าสถิต ที่ขนาดแรงดันการคายประจุคงที่ คือ 28 v จากภาพที่ 4.17 (ก) พบว่า R_{Shunt+} ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} เมื่อทำการคายประจุโดยอาศัยกรณีที่ 2 แต่จะส่งผลทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่เกิดการคายประจุจากขั้ว $R+$ ในกรณีที่ 1 และ 3 มีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อ R_{Shunt+} มีขนาดมากกว่า 6 k Ω กระแสดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะคงที่ ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการที่ R_{Shunt+} เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าสถิต ที่เกิดการคายประจุ จากด้าน $R+$ สามารถ ไหลไปยังส่วนอื่นได้มากขึ้น ส่วนในกรณีที่ 3 พบว่า เมื่อ R_{Shunt+} เพิ่มขึ้น ปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} มีขนาดค่อยๆลดลง และมีแนวโน้มที่จะคงที่ เมื่อ R_{Shunt+} มีขนาดมากกว่า 6 k Ω ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับ กรณีที่ 4 เมื่อ R_{Shunt+} เพิ่มขึ้น มีผลทำให้จะทำความ

ต้านทานรวมที่อยู่ฝั่งด้าน R_+ มีขนาดมากขึ้น ทำให้ปริมาณประจุ ที่เกิดจากกรณีที่ 4 ไหลผ่าน R_{TMR} ได้น้อยลง แต่จะคงที่ R_{Shunt+} มีขนาดมากกว่า $6\text{ k}\Omega$

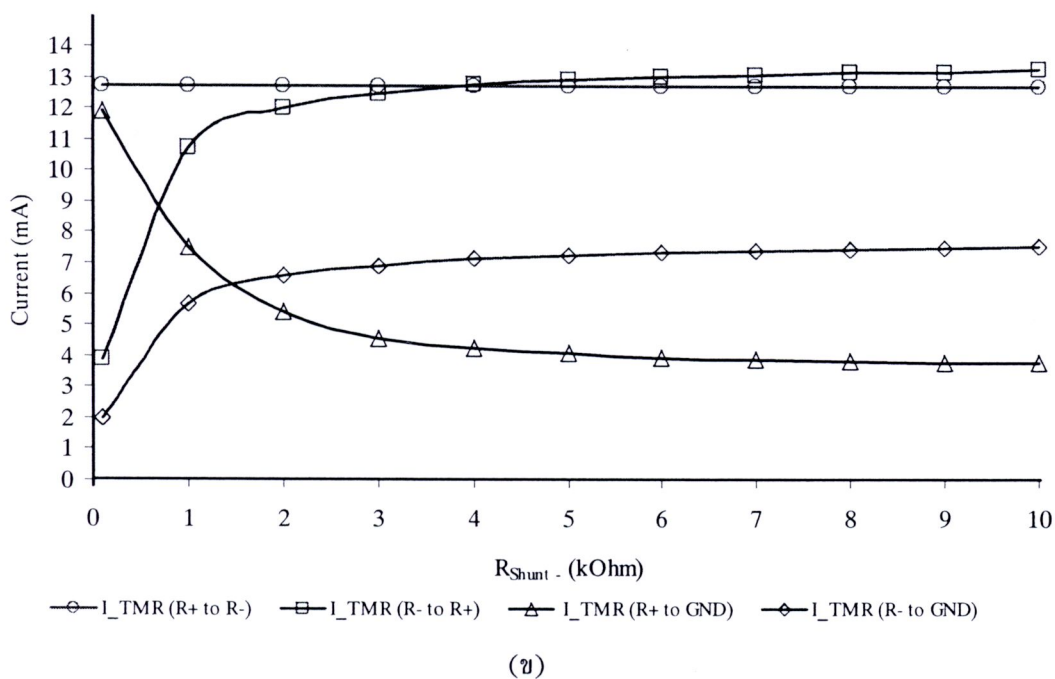
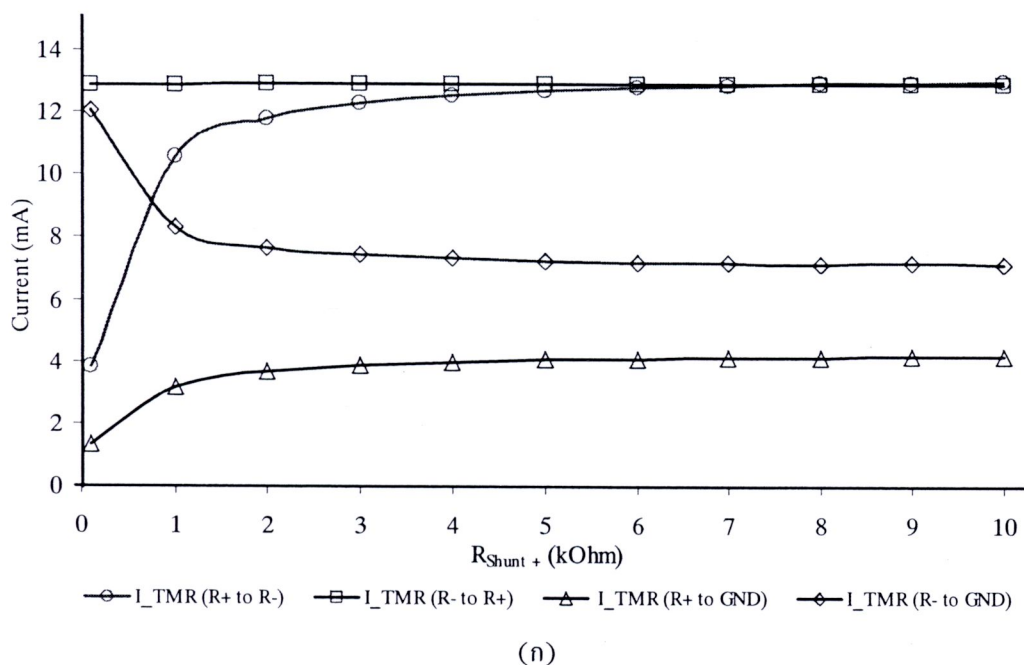
จากภาพที่ 4.17(ข) พบว่า เมื่อ R_{Shunt-} มีขนาดเพิ่มขึ้น จะมีผลที่ตรงข้ามกับกรณีของการเพิ่มขนาด R_{Shunt+} กล่าวคือ R_{Shunt-} ที่มีขนาดเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ ปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่เกิดจากการคายประจุกรณีที่ 1 มีขนาดคงที่ แต่จะมีขนาดลดลงเมื่อ ทดสอบโดย อาศัยกรณีที่ 2 และ 4 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} นี้จะมีค่าลดลง เมื่อทำการทดสอบโดยอาศัยกรณีที่ 3 ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้ สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับผลที่ได้จาก การเพิ่ม R_{Shunt+}

การเพิ่มขนาดของ R_{Shunt+} และ R_{Shunt-} สำหรับทุก ๆ กรณีนั้น มีผลทำให้ขนาดของกระแสไหลผ่าน R_{TMR} สำหรับทุก ๆ กรณี มีแนวโน้มที่จะคงที่ ที่ขนาดต้านทานของ R_{Shunt} มีขนาดมากกว่า $6\text{ k}\Omega$ ซึ่งผลดังกล่าวนี้ ชี้ให้เห็นว่า การคายประจุจะไม่ส่งผลต่อ กระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} เมื่อทำการ ต่อขนานโดยอาศัยขนาดของความต้านทานมากกว่า $6\text{ k}\Omega$

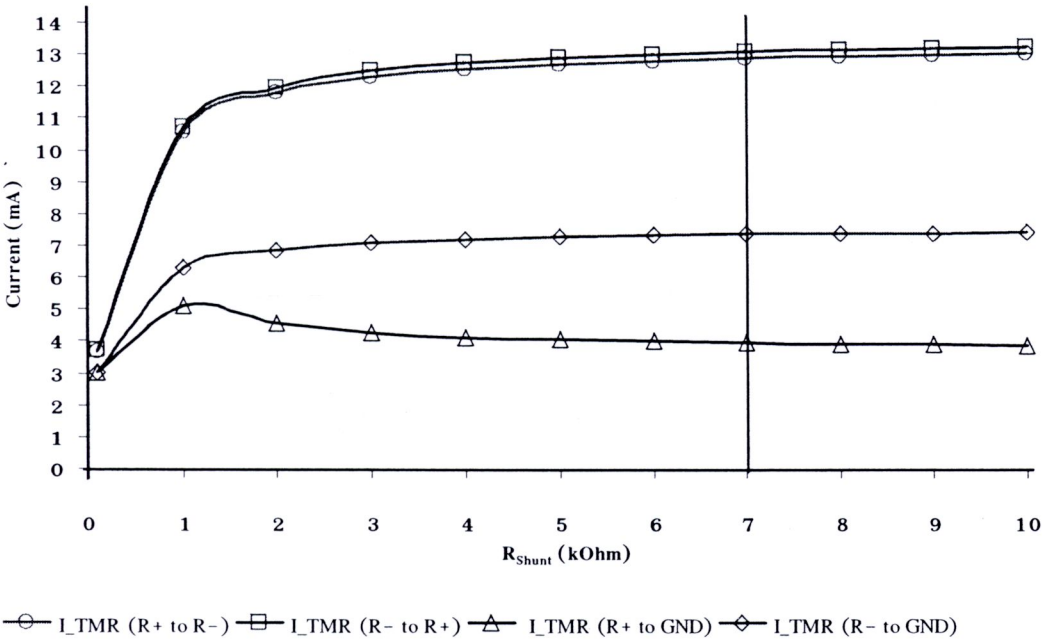
ต่อมาจะพิจารณาถึงผลของการเพิ่มขนาดของ R_{Shunt} ทั้งด้านบวกและด้านลบอย่างละเท่ากันๆ ดังที่แสดงในภาพที่ 4.18 ซึ่งพบว่า กระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่ 1-4 นั้น มีแนวโน้มที่จะคงที่ ที่ R_{Shunt} ขนาดประมาณ $7\text{ k}\Omega$ แสดงว่าการคายประจุจะไม่ส่งผลต่อหัวอ่าน ดังนั้นความต้านทานของ R_{Shunt} ขนาดประมาณ $7\text{ k}\Omega$ นี้จะสามารถลดผลจากการคายประจุได้

ภาพที่ 4.19 แสดงผลของ $R_{Paralell}$ ที่มีต่อ กระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่ 1-4 ซึ่งในทุกๆกรณี จะพบว่า กระแสไหลผ่าน TMR มีขนาดเพิ่มขึ้นตาม $R_{Paralell}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การที่ $R_{Paralell}$ มีขนาดเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความต้านทานสมมูลมีขนาดลดลง กระแสจึงสามารถไหลผ่านได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ที่ความต้านทาน $R_{Paralell}$ ขนาด $4\text{ k}\Omega$ นั้นกระแสไหลผ่าน TMR ในทุกๆกรณีเริ่มมีแนวโน้มที่จะคงที่ ซึ่งหมายความว่า ความต้านทานของ ความต้านทาน $R_{Paralell}$ ขนาดดังกล่าวสามารถลดผลจากการคายประจุได้

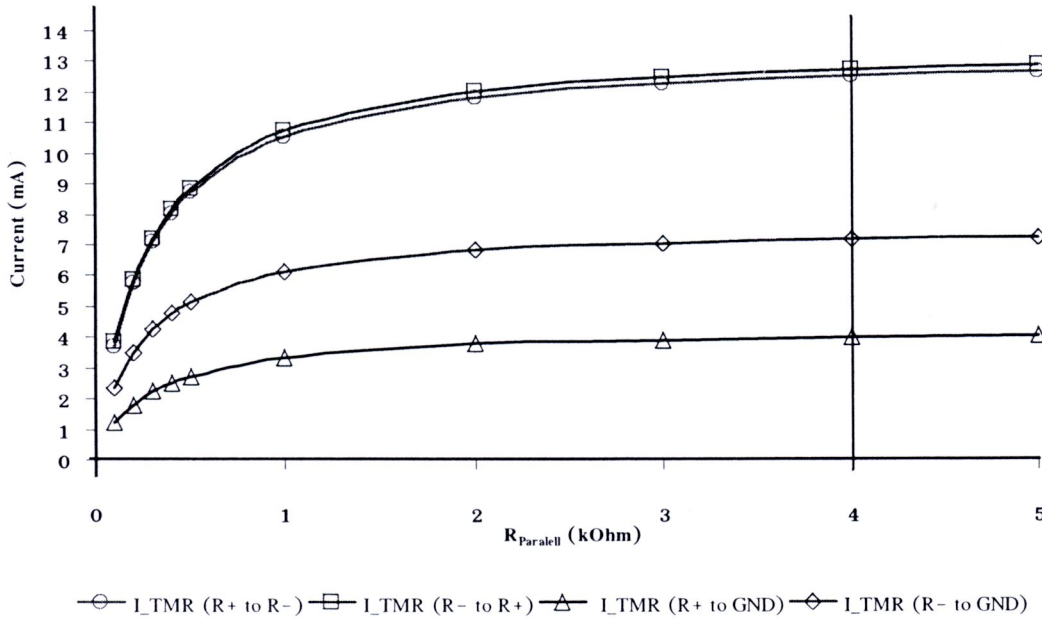




ภาพที่ 4.17 (ก) ผลของ R_{Shunt+} ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน
 (ข) ผลของ R_{Shunt-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน



ภาพที่ 4.18 ผลของ R_{Shunt} ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน



ภาพที่ 4.19 ผลของ $R_{Parallel}$ ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน

4.3 ผลของเส้นทางการคายประจุต่อหัวอ่านข้อมูล

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ถึงผลของการคายประจุที่มีต่อหัวบันทึกอย่างละเอียด ซึ่งจะใช้ทั้งแบบจำลองทางไฟฟ้า และ การจำลองโครงสร้างของแผ่นฟิล์มบาง TMR เพื่อวิเคราะห์ถึงผลของการคายประจุที่มีต่อหัวบันทึก โดยอาศัยกรณีการคายประจุที่แตกต่างกัน 4 กรณีตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากการวัดระดับแรงดันทะลาย ที่มีผลต่อหัวอ่านข้อมูล ในแต่ละกรณีการคายประจุไฟฟ้าสถิต นั้น ทำให้ทราบว่า แรงดันทะลายที่มีผลทำให้หัวอ่านข้อมูลเกิดความเสียหาย ในกรณีที่ 1 และ 2 นั้น มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันทะลายที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่ 1 นั้น จะมีขนาดมากกว่า แรงดันทะลายในกรณีที่ 2 เล็กน้อย แต่ในกรณีที่ 3 และ 4 นั้น พบว่า แรงดันทะลายในกรณีที่ 3 มีขนาดมากกว่า กรณีที่ 4 ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยอาศัย แบบจำลองไฟฟ้า ทำให้ทราบว่า การที่ระดับแรงดันทะลายที่เกิดจากกรณีการคายประจุกรณีที่ 3 มีขนาดมากกว่ากรณีที่ 4 นั้น เป็นผลที่เกิดจากการที่ อิมพีแดนซ์รวมของหัวอ่านที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่ 3 นั้น มีขนาดมากกว่า ค่าอิมพีแดนซ์รวมที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองจริง

ดังนั้นจะพบว่าการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในหัวอ่านนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยแบบจำลองไฟฟ้า ซึ่งการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยอาศัย แบบจำลองไฟฟ้านั้น สามารถทำให้ทราบว่าแต่ละส่วนประกอบของหัวอ่านข้อมูลนั้น มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งการวิเคราะห์ความเสียหายโดยอาศัยวิธีดังกล่าวนี้ ต้องอาศัยการตั้งสมมุติฐานอื่นๆเข้ามาประกอบด้วย

ตามที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 นั้นสาเหตุที่ทำให้แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR เกิดความเสียหายนั้น อาจจะเกิดจากการหลุดออกของอะตอมออกซิเจน ในขณะที่ การกระจายของโบรอน ที่กระจายเข้าไยยังชั้นฉนวนนั้น อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิด การทะลายอย่างเบา ซึ่งการที่จะพิสูจน์ความเป็นไปได้ดังกล่าวนี้ จำเป็นที่ต้อง อาศัยการวิเคราะห์โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ และ ขบวนการขนถ่ายอิเล็กตรอนในการวิเคราะห์ ซึ่งแบบจำลองโครงสร้างระดับอะตอมที่จะใช้ประกอบสมมุติฐาน ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเป็นแบบจำลองพื้นฐาน อันประกอบไปด้วย CoFeB/MgO/CoFeB เท่านั้น

ผลของเส้นทางการคายประจุที่มีต่อหัวอ่าน ที่เกิดจากการทดสอบแบบลัดวงจร หรือ กรณีการคายประจุกรณีที่ 1 และ 2 นั้น จะรายงานในหัวข้อที่ 4.3.1 ในส่วนของผลของเส้นทางการคายประจุที่มีต่อหัวอ่านข้อมูล ที่เกิดจากการทดสอบแบบเปิดวงจร หรือ กรณีการคายประจุกรณีที่ 3 และ 4 นั้น จะถูกรายงานในหัวข้อที่ 4.3.2

4.3.1 ผลของเส้นทางการคายประจุสำหรับกรณีที่ 1 และ 2 ที่มีต่อหัวอ่านข้อมูล

ผลจากแรงดันการคายประจุ ในกรณีที่ 1 และ 2 ที่ทำให้ความต้านทานของหัวบันทึกมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 20% นั้น แสดงถึงการเกิด การทะลายที่เกิดขึ้นในหัวบันทึก ดังที่แสดงในภาพที่ 4.20 (ก) ในขณะที่ ผลของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึก ก่อนที่หัวบันทึกจะเกิดการทะลาย ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.20 (ข)

จากภาพที่ 4.20 (ก) พบว่า หลังจากทำการคายประจุ ในกรณีที่ 1 ด้วยแรงดันการคายประจุขนาด 9 โวลต์ มีผลทำให้ ความต้านทานของหัวบันทึกลดลงมากกว่า 20% อย่างทันทีทันใด ซึ่งหมายความว่า การคายประจุในกรณีที่ 1 นั้น มีผลทำให้หัวบันทึกข้อมูลเกิดการทะลายแบบหนัก ที่ขนาดแรงดันทะลายประมาณ 9 โวลต์ แต่สำหรับผลของการคายประจุในกรณีที่ 2 นั้น พบว่า ที่แรงดันการคายประจุประมาณ 7.5 โวลต์ มีผลทำให้ความต้านทานของหัวบันทึกค่อยๆลดลง ซึ่งหมายความว่า การคายประจุใน

กรณีที่ 2 นั้น มีผลทำให้หวัันทิกข้อมูลเกิดการทะลายแบบเบา โดยมีขนาดของแรงดันทะลายประมาณ 7.5 โวลต์

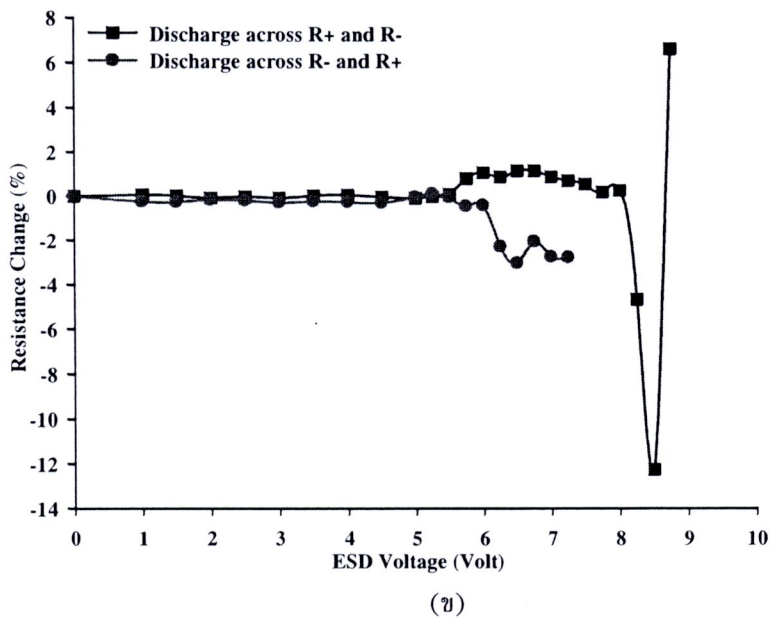
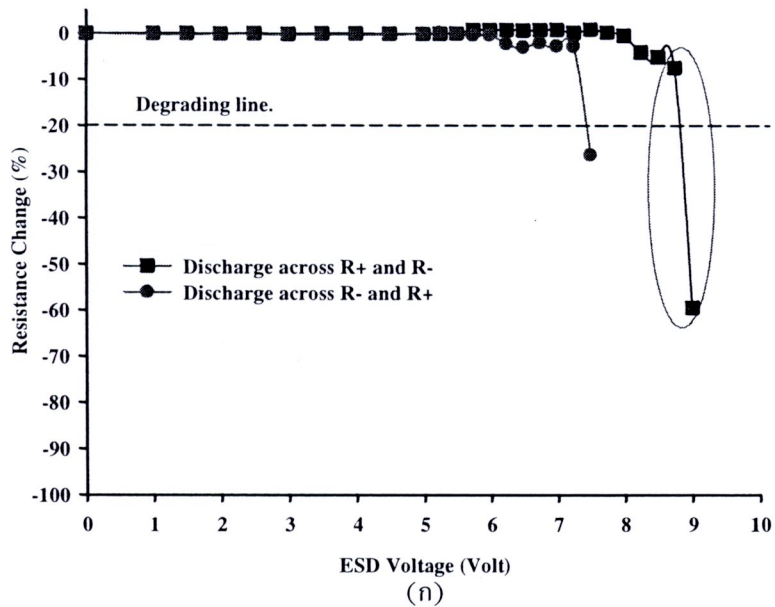
ผลการทดลองตามที่แสดงในภาพที่ 4.20 นี้ ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การคายประจุโดยอาศัยกรณีการคายประจุหรือเส้นทางของการคายประจุที่ต่างกันนั้น มีผลทำให้ประเภทของการทะลายมีความแตกต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหวัันทิกที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่ 1 และ 2 นั้น สามารถเปรียบเทียบได้ผลการทดลองตามที่แสดงในภาพที่ 4.20 (ก) และ (ข)

จากภาพที่ 4.20 (ข) แสดงให้เห็นว่าผลของแรงดันการคายประจุที่เกิด จากการคายประจุในกรณีที่ 1 มีผลทำให้ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหวัันทิก ค่อยๆเพิ่มขึ้น และลดลง ที่ช่วงแรงดันการคายประจุ ประมาณ 5.75-6.75 โวลต์ และ 6.75-8 โวลต์ หลังจากนั้น เมื่อแรงดันการคายประจุขนาดมากกว่า 8 โวลต์ กลับมีผลทำให้ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหวัันทิกลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งขนาดของแรงดันการคายประจุมีขนาดมากกว่า 8.5 โวลต์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหวัันทิก จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อแรงดันการคายประจุขนาดมากกว่า 8.75 โวลต์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหวัันทิก จะลดลงอีกครั้ง และเกิดการทะลายที่แรงดันการคายประจุประมาณ 9 โวลต์ (จากภาพที่ 4.17 (ก))

ในกรณีที่ 2 นั้น จากภาพที่ 4.20 (ข) พบว่า การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหวัันทิกนั้น จะลดลงอย่างชัดเจนที่ขนาดของแรงดันการคายประจุ ประมาณ 5.75 โวลต์ และมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งหวัันทิกเกิดการเกิดการทะลาย

จากผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 4.20 นั้น พบว่า กรณีการคายประจุกรณีที่ 1 และ 2 มีผลทำให้หวัันทิกเกิดความเสียหายแบบหนัก และ แบบเบา ตามลำดับ โดยแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการทะลายมีขนาดใกล้เคียงกันคือประมาณ 5.75 โวลต์ แต่คุณลักษณะของการทะลายที่เกิดขึ้น มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานเฉลี่ยของหวัันทิก เมื่อเริ่มเกิดความเสียหาย จะเพิ่มขึ้นในกรณีที่ 1 และ ลดลงในกรณีที่ 2 สาเหตุที่เส้นทางการคายประจุที่ต่างกัน มีผลทำให้หวัันทิกมีคุณลักษณะของการทะลายที่ต่างกัน โดยที่แรงดันทะลายแตกต่างกันไม่มากนัก สามารถวิเคราะห์ได้โดยเส้นทางถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต โดยอาศัยแบบจำลองวงจรไฟฟ้า ตามที่แสดงในภาพที่ 4.21

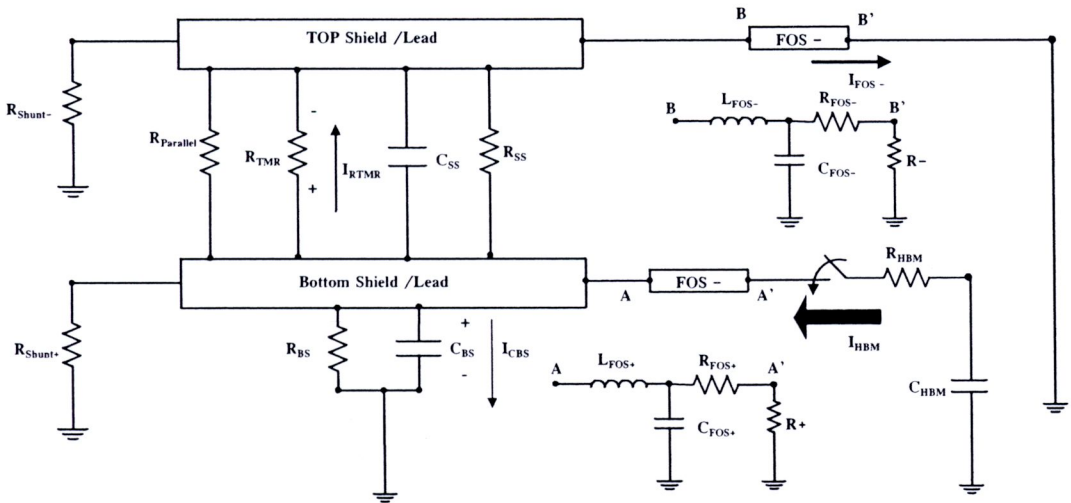
จากการวิเคราะห์ ผลของการคายประจุที่เกิดจากกรณีที่ 1 โดยอาศัยวงจรที่แสดงในภาพที่ 4.21 (ก) พบว่า เป็นลักษณะของวงจรวงปิด ซึ่งผลจากการคายประจุทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมบริเวณระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างและส่วนป้องกันด้านบนของแผ่นฟิล์มบาง TMR และ บริเวณระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างและกราวด์ โดยที่ขนาดของแรงดันตกคร่อมบริเวณแรก มีขนาดมากกว่าบริเวณที่ 2 ประมาณ 1 โวลต์ โดยที่ทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงดันตกคร่อม บริเวณแรก มีทิศทางพุ่งออกจากส่วนป้องกันด้านล่างไปยังส่วนป้องกันด้านบนของแผ่นฟิล์มบาง TMR สำหรับ ทิศทางของสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากแรงดันตกคร่อม บริเวณที่ 2 มีทิศทางพุ่งออกจากส่วนป้องกันด้านล่างไปยังกราวด์ ดังผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 4.19 ซึ่งผลจากทิศทางของสนามไฟฟ้านี้ อาจจะส่งผลให้พันธะไอออน ของออกซิเจน ในชั้นฉนวนผลึก MgO เกิดการออกจากรัน โดยถ้าพิจารณาจากโครงสร้างพื้นฐานของแผ่นฟิล์มบาง พบว่า บริเวณที่พันธะของออกซิเจนมีความเสี่ยงต่อการขาดออกจากกันมากที่สุด คือ บริเวณรอยต่อระหว่างฉนวน MgO และชั้นพิน



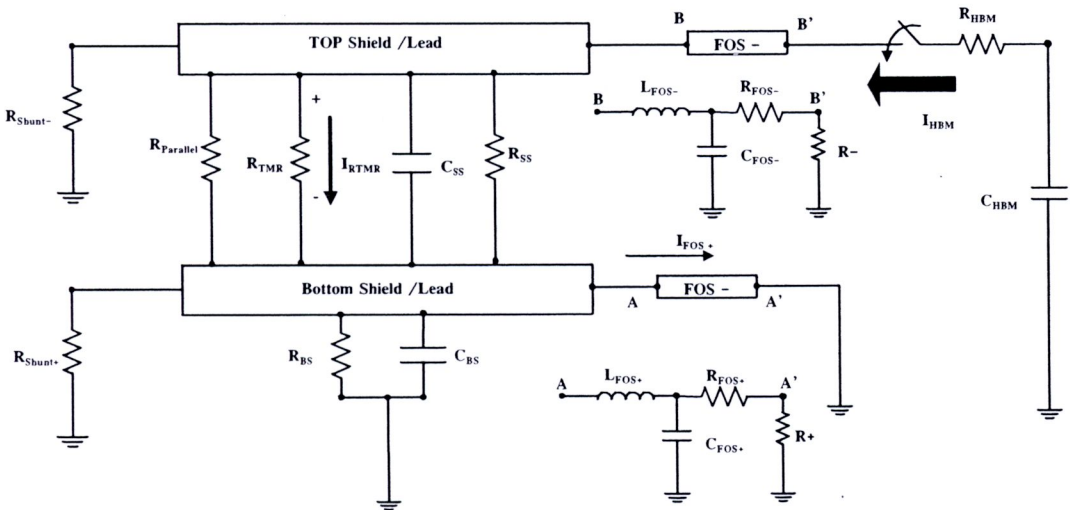
ภาพที่ 4.20 ผลเสียการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึก ในกรณีที่ 1 และ 2

(ก) เมื่อเกิดการทลาย

(ข) ก่อนเกิดการทะลาย



(ก)



(ข)

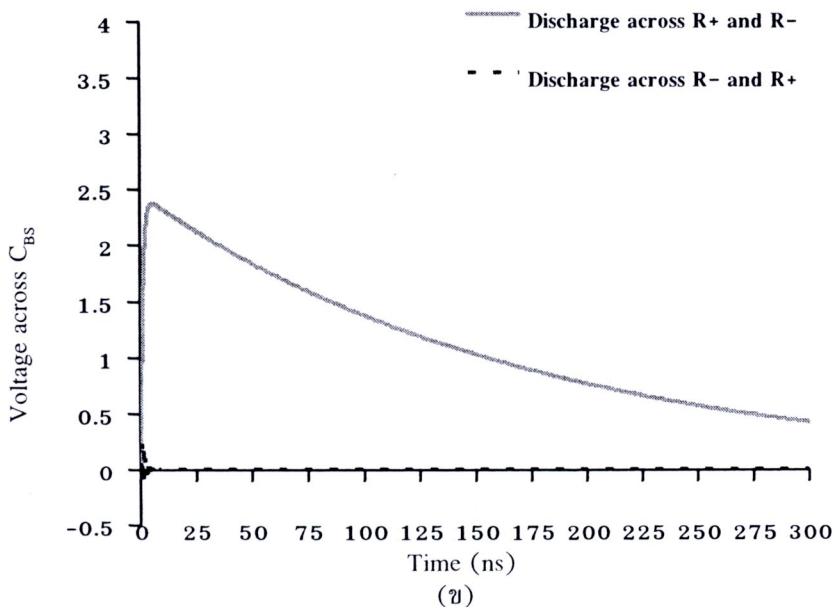
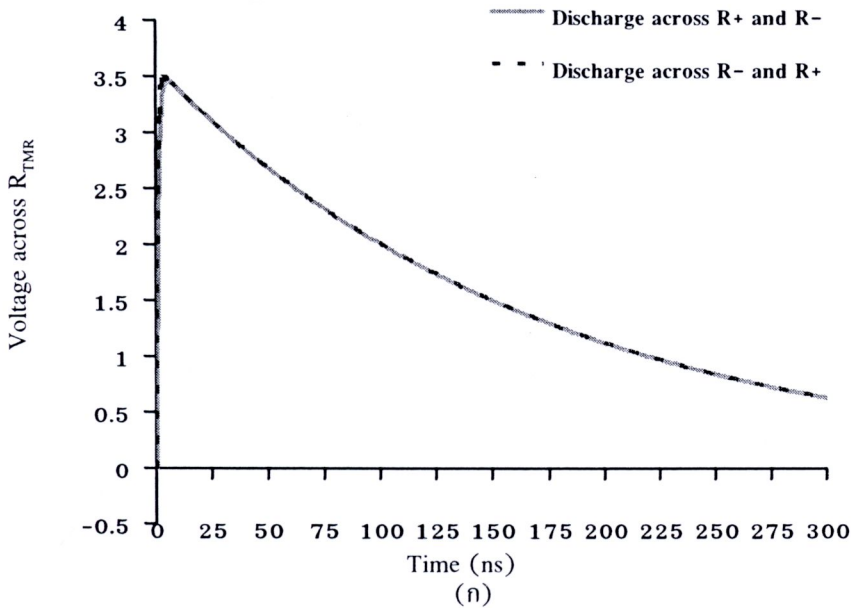
ภาพที่ 4.21 แบบจำลองไฟฟ้าสำหรับการคายประจุใน กรณีที่ 1 และ 2

(ก) แบบจำลองไฟฟ้า สำหรับกรณีที่ 1

(ข) แบบจำลองไฟฟ้า สำหรับกรณีที่ 2

ส่วนการวิเคราะห์ ผลของการคายประจุ ในกรณีที่ 2 นั้น พบว่า ผลจากการคายประจุมีผลทำให้เกิด แรงดันตกคร่อมระหว่างส่วนป้องกันด้านบนและด้านล่างเท่านั้น โดยมีทิศทางของสนามไฟฟ้า พุ่งออกจากส่วนป้องกันด้านบนไปยังส่วนป้องกันด้านล่าง แต่จะมีแรงดันตกคร่อม ระหว่างส่วนป้องกันด้านล่าง และกราวด์น้อยมาก ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากปริมาณประจุที่บริเวณส่วนป้องกันด้านล่าง จะถูกถ่ายเทผ่าน FOS+ ไปยังกราวด์ ซึ่งจากผลดังที่กล่าวมานี้ ทำให้ทราบว่า ปัจจัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อความเสียหายของหัวบันทึกหัวบันทึก เมื่อทำการทดสอบในกรณีที่ 2 นั้น อาจเกิดจากพลังงานที่ถูกสะสมอยู่ระหว่างส่วนป้องกันด้านบน และส่วนป้องกันด้านล่าง ซึ่งถ้าขนาดของพลังงานที่สะสมนี้ มีมากพออาจจะส่งผลทำให้เกิด ฟินโฮล ซึ่งทำให้

เกิด การทะลุแบบเบา ถ้าพิจารณา ถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ในแผ่นฟิล์มบาง TMR นั้น มีโอกาสเป็นไปได้ว่า ขนาดของพลังงานสะสมที่มากพอนี้ อาจจะทำให้อะตอมโบรอนหลุดเป็นอิสระและเคลื่อนที่ไปยังชั้นฉนวน MgO และเกิดเป็นพินโฮลในที่สุด ซึ่งเนื่องจาก โบรอนเป็นธาตุที่เป็นตัวนำ และที่มีน้ำหนักเบา จึงเป็นไปได้ว่า โบรอนจะกระจายตัวเคลื่อนไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่ โบรอนที่หลุดออกจากจากอิสระ จะเคลื่อนที่ เข้าไปยังรอยต่อระหว่าง ชั้นอิสระและฉนวน



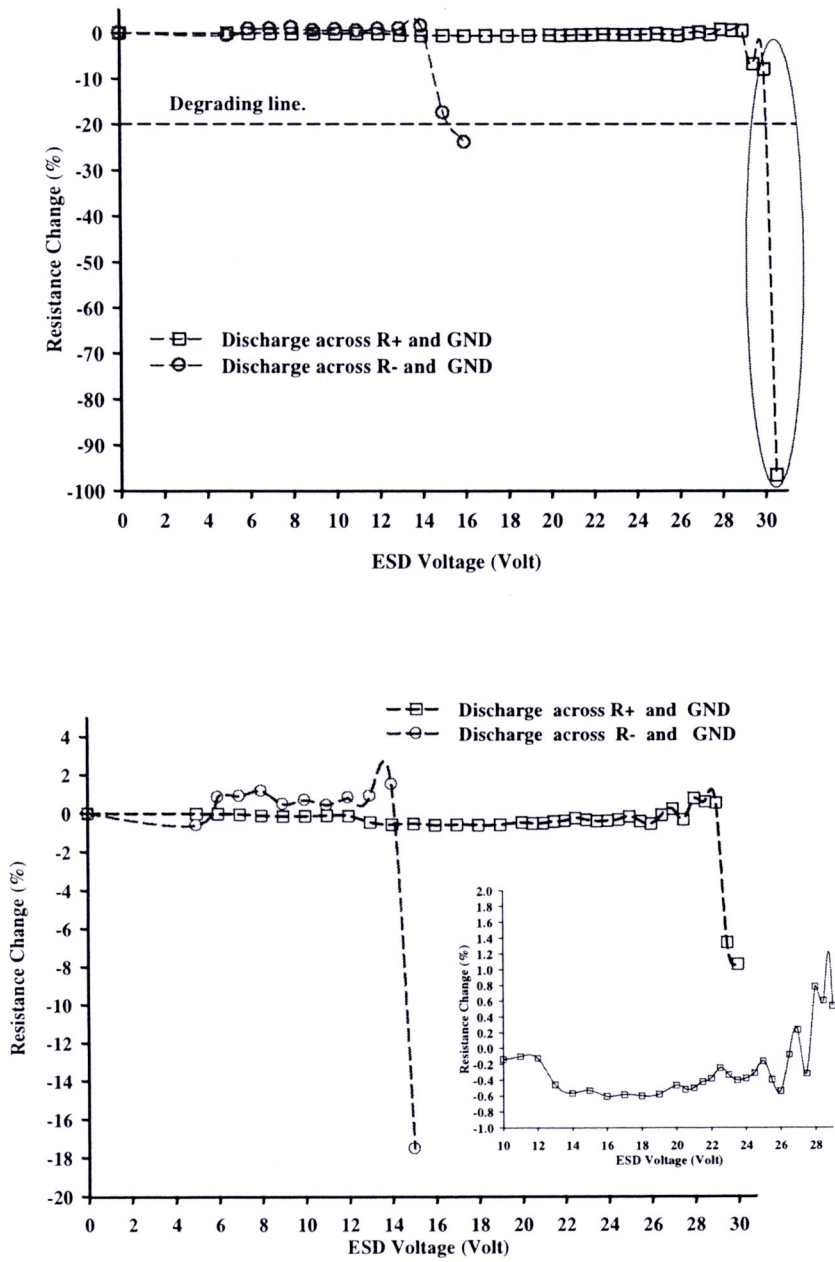
ภาพที่ 4.22 (ก) แรงดันตกคร่อม R_{TMR} ที่เกิดจากการคายประจุกรณีที่ 1 และ 2
(ข) แรงดันตกคร่อม C_{BS} ที่เกิดจากการคายประจุกรณีที่ 1 และ 2

4.3.2 ผลของเส้นทางคายประจุสำหรับกรณีที่ 3 และ 4 ที่มีต่อหัวอ่านข้อมูล

แรงดันการคายประจุ ที่เกิดจากการคายประจุกรณีที่ 3 และ 4 จะทำให้ลักษณะการทะลุของหัวบันทึกมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 1 และ 2 อย่างไรก็ตาม สาเหตุที่ทำให้หัวบันทึกเกิดความเสียหายสำหรับในกรณีที่ 3 และ 4 นั้น จะมีสาเหตุที่ต่างกัน จากภาพที่ 4.23 (ก) พบว่า หลังจากคายประจุ ในกรณีที่ 3 ด้วยแรงดันการคายประจุขนาด 30.5 โวลต์ มีผลทำให้ความต้านทานของหัวบันทึกลดลงมากกว่า 20% อย่างทันทีทันใด ซึ่งหมายความว่า การคายประจุในกรณีที่ 3 นั้น มีผลทำให้หัวบันทึกข้อมูลเกิดการทะลุแบบหนัก เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 1 โดยมีขนาดของแรงดันทะลุประมาณ 9 โวลต์ แต่ในกรณีที่ 4 นั้น พบว่า ที่แรงดันการคายประจุประมาณ 16 โวลต์ จะทำให้ความต้านทานของหัวบันทึกค่อย ๆ ลดลง นั่นคือกรณีการคายประจุกรณีที่ 4 นั้น จะมีผลทำให้หัวบันทึกเกิดการทะลุแบบเบา โดยมีขนาดของแรงดันทะลุประมาณ 16 โวลต์ เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดขึ้น ในกรณีที่ 3 และ 4 อย่างละเอียด จะสามารถทำได้โดยพิจารณาผลการทดลองตามที่แสดงในภาพที่ 4.23 (ข)

จากภาพที่ 4.23 (ข) พบว่า การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึก ในกรณีที่ 3 ค่อนข้างคงที่ ถึงแม้ว่าที่ขนาดแรงดันการคายประจุมากกว่า 13 โวลต์ จะมีผลทำให้ความต้านทานของหัวบันทึกลดลง แต่เป็นเพียงการลดลงจากเดิมไม่มาก (ประมาณ 0.1 %) แต่การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึกจะมีแนวโน้มสูงขึ้น ที่แรงดันการคายประจุขนาด 26 V แสดงว่าหัวบันทึกเริ่มเกิดการทะลุ นั่นคือ ออกซิเจนที่บริเวณชั้นฉนวน MgO เริ่มมีการหลุดออกไป โดยที่ความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญ หลังจากนั้นที่ขนาดแรงดันการคายประจุประมาณ 29 -30 โวลต์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึก มีแนวโน้มลดลง และจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ขนาดแรงดันการคายประจุ 30.5 โวลต์ ในกรณีที่ 2 นั้น เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.23(ข) จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึก เริ่มสูงขึ้นที่ ที่ขนาดแรงดันการคายประจุประมาณ 6 โวลต์ แสดงว่าผลจากความเข้มของสนามไฟฟ้าเริ่มทำให้หัวบันทึกเกิดความเสียหายที่แรงดันการคายประจุขนาด แต่เมื่อแรงดันการคายประจุมากกว่า 6 โวลต์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึกค่อนข้างคงที่ และจะเพิ่มสูงขึ้นที่ ขนาดแรงดันการคายประจุขนาด 13-14 โวลต์ แล้วเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วที่ขนาดการคายประจุประมาณ 16 โวลต์

จากผลการทดลองที่กล่าวมาแล้วนั้น พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึก จากการคายประจุกรณีที่ 3 และ 4 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายๆกัน โดยความเป็นไปได้ว่า ปัจจัยเกี่ยวกับ ความเข้มของสนามไฟฟ้า จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้หัวบันทึกเกิดความเสียหาย ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของการเกิดความเสียหายได้จาก วงจรการคายประจุ ตามที่แสดงในภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.23 ผลเฉลี่ย การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึกในกรณีที่ 3 และ 4

(ก) เมื่อเกิดการทลาย

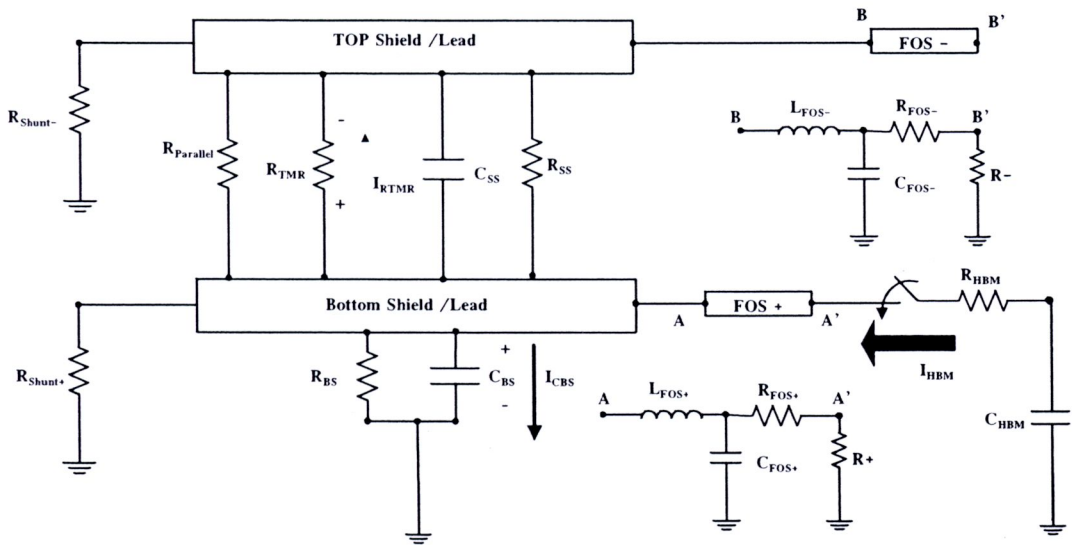
(ข) ก่อนเกิดการทลาย



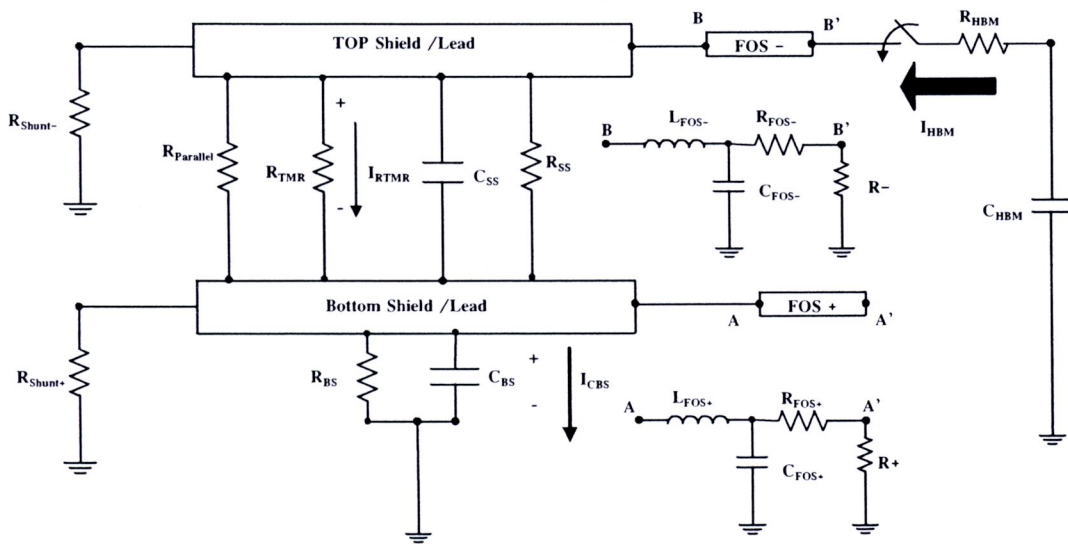
จากการวิเคราะห์ ผลของการคายประจุในกรณีที่ 3 โดยอาศัยวงจรตามที่แสดงในภาพที่ 4.24 (ก) พบว่า วงจรการคายประจุในกรณีที่ 3 นั้น จะเป็นลักษณะของวงจรเปิด ซึ่งผลจากการคายประจุ มีผลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมบริเวณระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างและกราวด์ มากกว่า แรงดันตกคร่อมบริเวณแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR ซึ่งการคายประจุในกรณีนี้ ปัจจัยเกี่ยวกับขนาดของพารามิเตอร์ของสายส่งจะมีผลเป็นอย่างมาก แรงดันตกคร่อมส่วนแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR นั้น เป็นผลที่เกิดจากการแบ่งแรงดันที่เกิดจากแรงดันตกคร่อมระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างและกราวด์ เป็นหลัก ดังนั้นการที่จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมส่วนแผ่นฟิล์มบางมีขนาดสูงพอที่จะทำให้เกิดการทะลุได้นั้น จำเป็นที่จะต้องอาศัยขนาดแรงดันของการคายประจุที่ค่อนข้างสูงมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปสัญญาณการเกิดแรงดันตกคร่อมส่วนแผ่นฟิล์มบางพบว่า แรงดันตกคร่อมแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR จะมีขนาดต่ำกว่าแรงดันตกคร่อมระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างและกราวด์ ประมาณ 10 โวลต์ โดยที่ค่าคงที่เวลาในการสลายประจุของแรงดันตกคร่อมแผ่นฟิล์มบาง TMR จะมีระยะเวลาานมาก คือ ประมาณ 225 ns แสดงว่าพลังงานที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดสูงมาก จึงเป็นไปได้ว่า ที่ขนาดแรงดันการคายประจุ 26 โวลต์นั้น อะตอมออกซิเจนบริเวณระหว่างชั้นฉนวนและชั้นบังคับ เริ่มเกิดหลุดออกโดยพลังงานความร้อนเป็นปัจจัยหลัก โดยที่แรงดันประมาณ 29-30 โวลต์ อาจจะทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนของแผ่นฟิล์มบางมีขนาดมากพอที่จะทำให้เกิดการหลอมเหลวระหว่างชั้นอิสระ ชั้นฉนวน และชั้นบังคับ ทำให้ความต้านทานลดต่ำลง และเมื่อเพิ่มระดับแรงดันการคายประจุให้สูงขึ้น จะทำให้หัวบันทึกเกิดการทะลุอย่างหนัก ตามที่แสดงผลในภาพที่ 4.23

ในส่วนของการวิเคราะห์ ผลของการคายประจุในกรณีที่ 4 พบว่า การแบ่งแรงดัน อันเป็นผลที่เกิดจากการคายประจุ ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างและส่วนป้องกันด้านบนของแผ่นฟิล์มบาง TMR โดยมีทิศทางของสนามไฟฟ้าพุ่งออกจากส่วนป้องกันด้านบนไปยังส่วนป้องกันด้านล่าง และเกิดแรงดันคร่อมระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างและกราวด์ โดยมีทิศทางของสนามไฟฟ้าพุ่งออกจากส่วนป้องกันด้านล่างไปยังกราวด์ เมื่อพิจารณาจากรูปสัญญาณของการเกิดแรงดันตกคร่อมแผ่นฟิล์มบางตามที่แสดงในภาพที่ 4.25 (ก) พบว่า ขนาดสูงสุดของแรงดันตกคร่อมแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR จะมีขนาดประมาณ 2 โวลต์ โดยมีค่าคงที่เวลาในการสลายประจุประมาณ 25 ns ซึ่งหมายความว่า ขนาดของพลังงานในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นที่แผ่นฟิล์มมีขนาดไม่มากนัก ในขณะที่แรงดันตกคร่อมระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างและกราวด์ จะมีขนาดค่อนข้างสูงมาก คือ ประมาณ 10.5 โวลต์ แสดงว่า ปัจจัยสำคัญที่ทำให้หัวบันทึกในกรณีที่ 4 เกิดความเสียหาย น่าจะเป็นผลจากความเข้มสนามไฟฟ้ามากกว่า พลังงานความร้อนในแผ่นฟิล์มบาง TMR

ความเข้มของสนามไฟฟ้า ที่กล่าวถึงนี้ คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเชื่อมโยงการเก็บประจุ (Capacitive coupling) ระหว่าง การเก็บประจุระหว่างส่วนป้องกันด้านบนและส่วนป้องกันด้านล่าง ร่วมกับการเก็บประจุระหว่างส่วนป้องกันด้านล่างไปยังกราวด์ ซึ่งทำให้เกิดการหลุดออกของอะตอมออกซิเจนที่แรงดันการคายประจุขนาด 6 โวลต์ แต่การที่ความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก คาดว่าน่าจะเกิดจากการที่อะตอมโบรอนในชั้นอิสระ เคลื่อนที่เข้ามาแทนที่อะตอมออกซิเจนที่หลุดออกไป ทำให้การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึกมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก จนกระทั่งที่แรงดันการคายประจุขนาด 15 โวลต์ การกระจายของโบรอนที่เคลื่อนที่ไปยังฉนวนอาจจะมีความมากพอที่จะทำให้เกิดการทะลุอย่างเบา โดยที่การเปลี่ยนแปลงความต้านทานมีขนาดลดลงตามที่แสดงในภาพที่ 4.23 โดยตำแหน่งที่เริ่มเกิดการกระจายของโบรอนเข้าไปยังชั้นฉนวนนั้น คาดว่า น่าจะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่าง ชั้นอิสระและชั้นฉนวน



(ก)

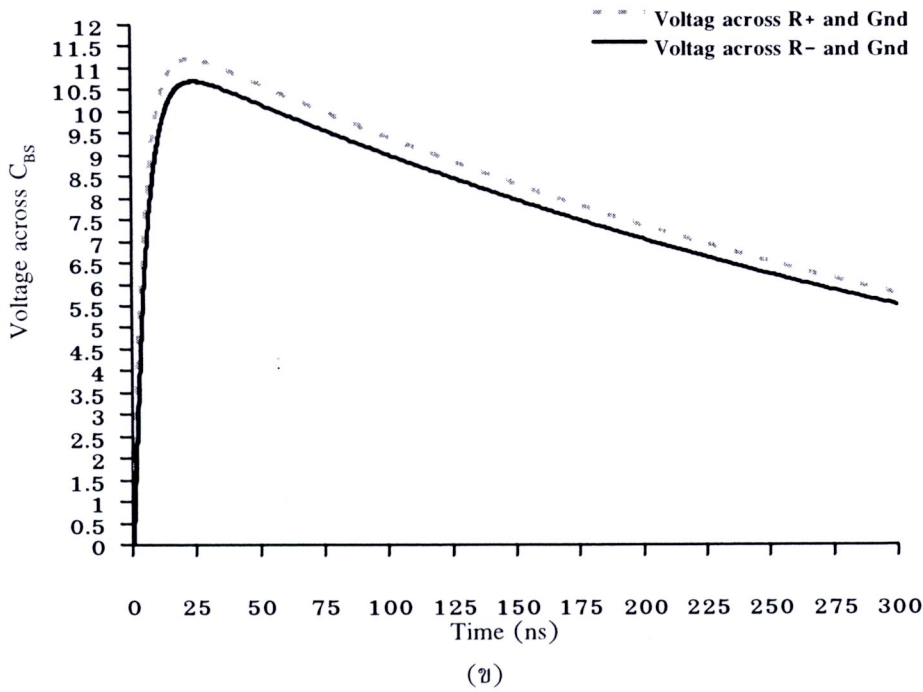
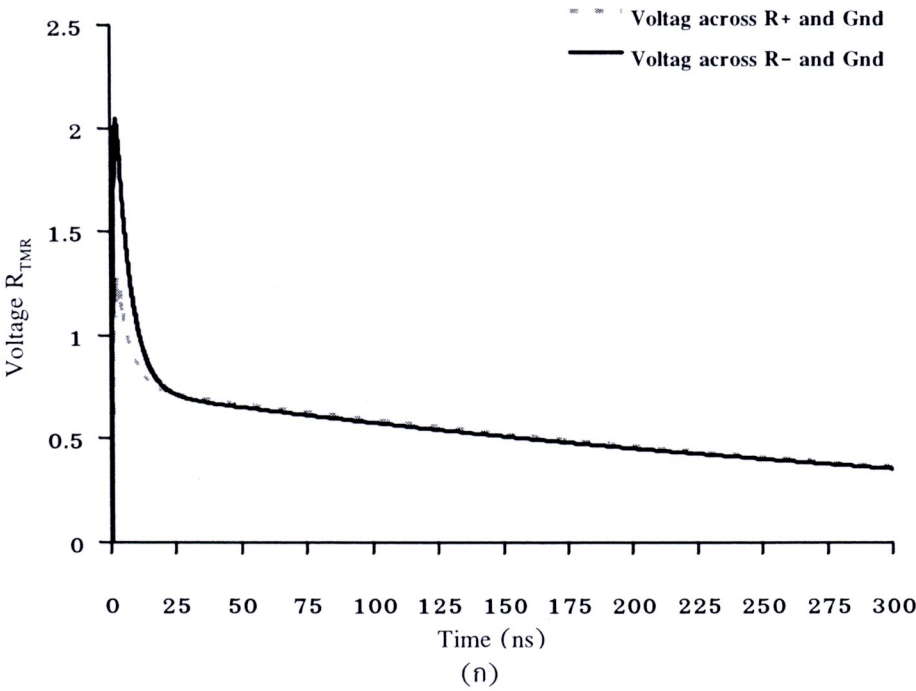


(ข)

ภาพที่ 4.24 แบบจำลองไฟฟ้าสำหรับการคายประจุใน กรณีที่ 3 และ 4

(ก) แบบจำลองไฟฟ้า สำหรับกรณีที่ 3

(ข) แบบจำลองไฟฟ้า สำหรับกรณีที่ 4

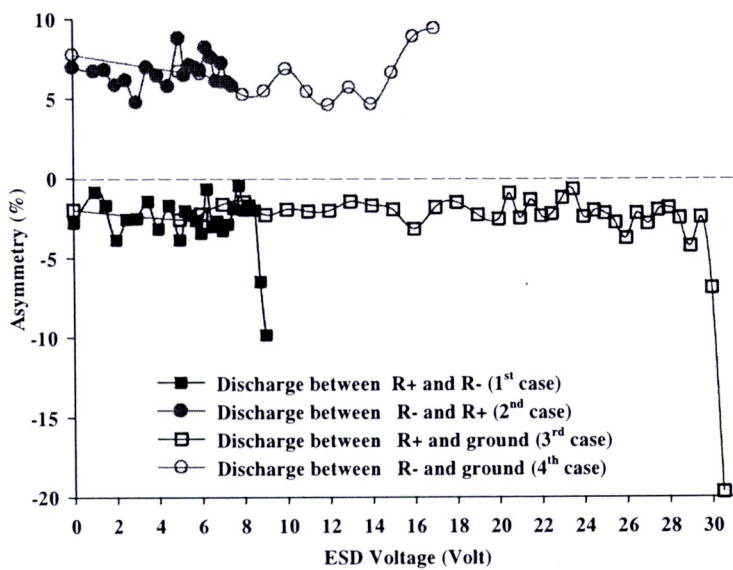


ภาพที่ 4.25 (ก) แรงดันตกคร่อม R_{TMR} ที่เกิดจากการคายประจุกรณี 3 และ 4
(ข) แรงดันตกคร่อม C_{BS} ที่เกิดจากการคายประจุกรณี 3 และ 4

4.4 ผลของการคายประจุต่อความสมมาตร

จากหัวข้อที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ผลของการคายประจุที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่แตกต่างกัน มีผลทำให้คุณลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นในหัวบันทึกมีความแตกต่างกัน โดยผลจากการคายประจุในกรณีที่ 1 และ 3 นั้น มีผลทำให้เกิดการทะลุที่บริเวณ รอยต่อระหว่างชั้นฉนวนและชั้นบังคับของแผ่นฟิล์มบาง TMR ซึ่งเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นอาจจะทำให้ทิศทางของแมกเนโตเซชันของชั้นบังคับเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลทำให้สัญญาณแรงดันขาออกด้านลบ มีขนาดมากกว่าสัญญาณขาออกด้านบวก ทำให้ ขนาดของความไม่สมมาตรที่เกิดจาก กรณีการคายประจุกรณีที่ 1 และ 3 มีขนาดความสมมาตรอยู่ในด้านลบ

สำหรับ บริเวณที่เกิดความเสียหาย ภายในแผ่นฟิล์มบาง TMR อันเป็นผลเนื่องมาจากการคายประจุในกรณีที่ 2 และ 4 นั้น คาดว่าน่าจะเกิดที่บริเวณรอยต่อระหว่าง ชั้นอิสระและชั้นฉนวนของแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหาย น่าจะเกิดจากการที่อะตอมโบรอนเคลื่อนที่เข้าไปยังชั้นฉนวนทั้งนี้เนื่องจาก อัตราส่วนของโบรอนในสารประกอบ CoFeB นั้น มีปริมาณไม่มากนัก ซึ่งสภาพความเป็นสารแม่เหล็ก ของ CoFeB นั้น เกิดจากสารประกอบ CoFe เป็นหลัก ดังนั้นการหลุดออกของอะตอมโบรอนในชั้นอิสระ อาจจะไม่ส่งผลทำให้ทิศทางแมกเนโตเซชันของชั้นอิสระเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นขนาดของสัญญาณขาออกด้านบวก จึงมีขนาดมากกว่าขนาดของสัญญาณขาออกด้านลบ จึงทำให้ขนาดของความสมมาตรของหัวบันทึก มีเครื่องหมายของความสมมาตรอยู่ในด้านบวก



ภาพที่ 4.26 ผลเฉลี่ย อสมมาตร ที่เกิดจากการคายประจุที่ต่างกัน

4.5 การวิเคราะห์ผลของการคายประจุที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานและความ
อสมมาตร โดยอาศัย ทฤษฎีการขนถ่ายอิเล็กตรอน

เนื่องจากขนาดความต้านทาน TMR เป็นผลที่เกิดจากสปินโพลาไลเซชันและสมมาตรซึ่งมี
ความสัมพันธ์โดยตรงกับการขนถ่ายสปินอิเล็กตรอน ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงต้นเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้น
ในแผ่นฟิล์ม TMR จึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับโครงสร้างอิเล็กตรอน
ของแผ่นฟิล์มบาง TMR

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการศึกษาเบื้องต้น ถึงผลของโครงสร้างแผ่นฟิล์มบาง TMR ที่สมบูรณ์
และเกิดความเสียหาย ในรูปแบบก้อน (Bulk) ที่มีต่อสมบัติการส่งผ่าน โดยที่ในหนึ่งหน่วยเซลล์ (Unit
cell) ประกอบไปด้วย ชั้นด้านขวา ที่ใช้แทนชั้นอิสระ (CoFe) จำนวน 6 โมโนเลเยอร์ (Mono layer) ย่านการ
กระเจิง ที่ใช้แทนชั้นฉนวน (MgO) จำนวน 7 โมโนเลเยอร์ (Mono layer) และ ชั้นด้านซ้าย ที่ใช้แทนชั้น
บังคับ (CoFe) จำนวน 6 โมโนเลเยอร์ (Mono layer) สำหรับโครงสร้างที่เกิดความเสียหายนั้น จะ
ทำการศึกษาถึง จะทำการศึกษาถึง โครงสร้างที่เกิดการหลุดออกของออกซิเจน ที่บริเวณรอยต่อระหว่าง ชั้น
ด้านซ้าย (ขวา) และบริเวณตรงกลาง และ โครงสร้างที่มีการกระจายของโบรอนเข้าไยยังรอยต่อระหว่าง ชั้น
ด้านซ้าย (ขวา) และบริเวณตรงกลาง ดังนั้น โครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาจึงมีด้วยกัน 5 โครงสร้าง คือ

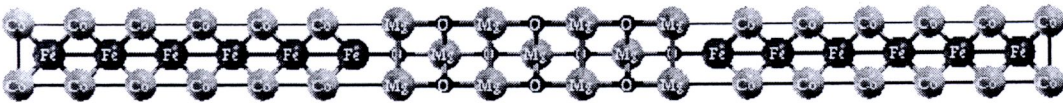
โครงสร้างที่ 1 แทน CoFe/MgO/CoFe ที่สมบูรณ์

โครงสร้างที่ 2 แทน CoFe/MgO/CoFe ที่มีการหลุดออกของออกซิเจน ที่บริเวณรอยต่อระหว่าง
อิเล็กโตรดด้านซ้าย (ชั้นบังคับ) และ ย่านกระเจิง (ชั้นฉนวน)

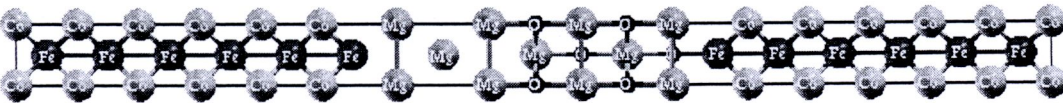
โครงสร้างที่ 3 แทน CoFe/MgO/CoFe ที่มีการหลุดออกของออกซิเจน ที่บริเวณรอยต่อระหว่าง
อิเล็กโตรดด้านขวา (ชั้นอิสระ) และ ย่านกระเจิง (ชั้นฉนวน)

โครงสร้างที่ 4 แทน CoFe/MgO/CoFe ที่โบรอนกระจายเข้าไยยังบริเวณรอยต่อระหว่าง
อิเล็กโตรดด้านซ้าย (ชั้นบังคับ) และ ย่านกระเจิง (ชั้นฉนวน)

โครงสร้างที่ 5 แทน CoFe/MgO/CoFe ที่ โบรอนกระจายเข้าไยแทรก ที่บริเวณรอยต่อระหว่าง
อิเล็กโตรดด้านขวา (ชั้นอิสระ) และ ย่านกระเจิง (ชั้นฉนวน)



(ก)

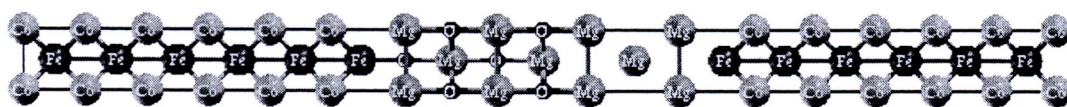


(ข)

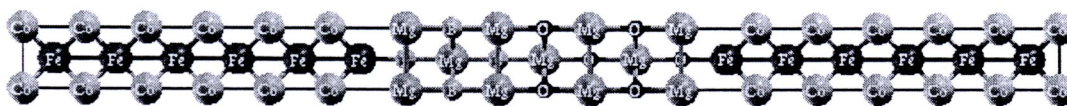
ภาพที่ 4.27 โครงสร้างของ CoFe/MgO/CoFe แบบ บัลด์ (Bulk)

(ก) โครงสร้างที่ 1

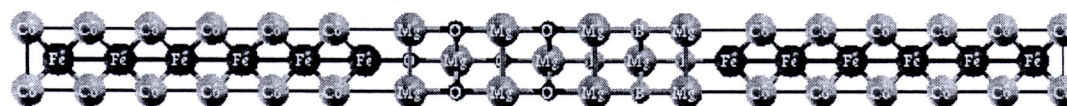
(ข) โครงสร้างที่ 2



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 4.27 โครงสร้างของ CoFe/MgO/CoFe แบบ บัลค์ (Bulk) (ต่อ)

(ค) โครงสร้างที่ 3

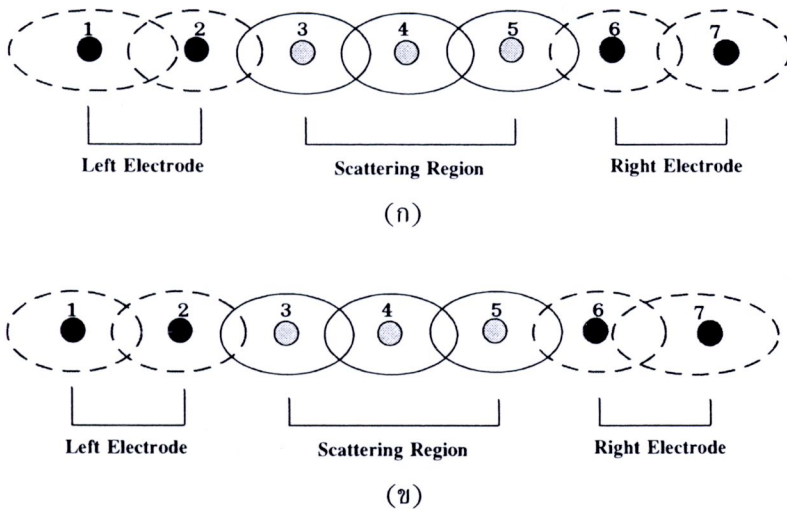
(ง) โครงสร้างที่ 4

(จ) โครงสร้างที่ 5

4.5.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ที่มีต่อขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

ในส่วนของการศึกษา ผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีต่อขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน จะทำการศึกษาดังขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่เกิดศักย์ไฟฟ้าเคมีของขั้วด้านซ้ายและด้านขวามีขนาดเท่ากัน ซึ่งหมายความว่าแรงดันไบแอสมีค่าเท่ากับศูนย์ (Zero bias) ดังนั้นขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่คำนวณได้ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของแต่ละอะตอมในแต่ละโครงสร้าง คุณสมบัติของโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอม ที่สัมพันธ์กับขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคือ ความหนาแน่นสถานะบางส่วน (Partial DOS, PDOS) หรือ PDOS นั้นเอง

PDOS เป็นปริมาณที่บอกถึง ความหนาแน่นของสถานะของแต่ละออร์บิทัลที่สนใจ ซึ่งมีความหมายครอบคลุมถึงสถานะในการซ้อนทับ (Overlap) ระหว่างออร์บิทัลของอะตอมสองตัวที่อยู่ใกล้กัน ถ้า PDOS มีค่ามาก จะมีความหมายถึงการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัลของอะตอมสองตัวที่อยู่ใกล้กัน มีขนาดมาก นั่นคือ โอกาสที่อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านอะตอมตัวนั้นๆ มีขนาดมาก หรืออีกนัยหนึ่ง PDOS ของอะตอมที่อยู่ในขั้วแต่ละด้าน เป็นการบอกถึง ความแรงของแรงคู่ควบ (Couple) ระหว่างขั้วนั้นๆ และย่านกระเจิง ที่ระดับพลังงานนั้นๆ ถ้าความแรงของแรงคู่ควบที่ระดับพลังงานนั้นๆ มีค่ามาก ย่อมมีความหมายว่า อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านย่านการกระเจิงไปยังขั้วนั้นๆ ได้ง่าย ส่งผลให้ขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีขนาดมาก



ภาพที่ 4.28 ตัวอย่างการซ้อนทับ (Overlap) ระหว่างออร์บิทัลของอะตอมสองตัวที่อยู่ใกล้กัน
 (ก) การซ้อนทับระหว่างอะตอมหมายเลข 1 และ 2 ที่อยู่ในอิเล็กโทรดด้านซ้าย
 (ข) การซ้อนทับระหว่างอะตอมหมายเลข 7 และ 8 ที่อยู่ในอิเล็กโทรดด้านขวา

ก่อนที่จะอธิบายถึงการศึกษา การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีต่อขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนั้น ยังมีอีกประเด็นที่จะต้องอธิบายเพิ่มเติม นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน จากที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเป็นการบอกถึงความแรงของแรงคู่ควบของการดึงอิเล็กตรอนผ่านย่านการกระเจิงที่ระดับพลังงานใด ๆ ซึ่งระดับพลังงานให้ขนาดสัมประสิทธิ์การกระเจิงนั้น เป็นระดับพลังงานรวมของทั้งหน่วยเซลล์ที่ประกอบไปด้วย ขั้วด้านซ้าย-ย่านการกระเจิง-ขั้วด้านขวา ดังนั้น ถ้าขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานขนาดสูงกว่าพลังงานเฟอร์มี มีขนาดมาก แสดงว่าโอกาสที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านย่านการกระเจิงไปยังขั้วด้านขวานั้นมีโอกาสมาก ทำให้โอกาสที่กระแสจะไหลจากอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวาได้ง่าย ในทางตรงข้ามถ้าขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานขนาดต่ำกว่าพลังงานเฟอร์มี มีขนาดมาก แสดงว่าอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากอิเล็กโทรดด้านขวาผ่านย่านการกระเจิงไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้ายได้มาก ทำให้โอกาสที่กระแสจะไหลจากอิเล็กโทรดด้านขวาไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้ายได้มาก จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและระดับพลังงานจะเป็นการบ่งบอกถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเช่นเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแส

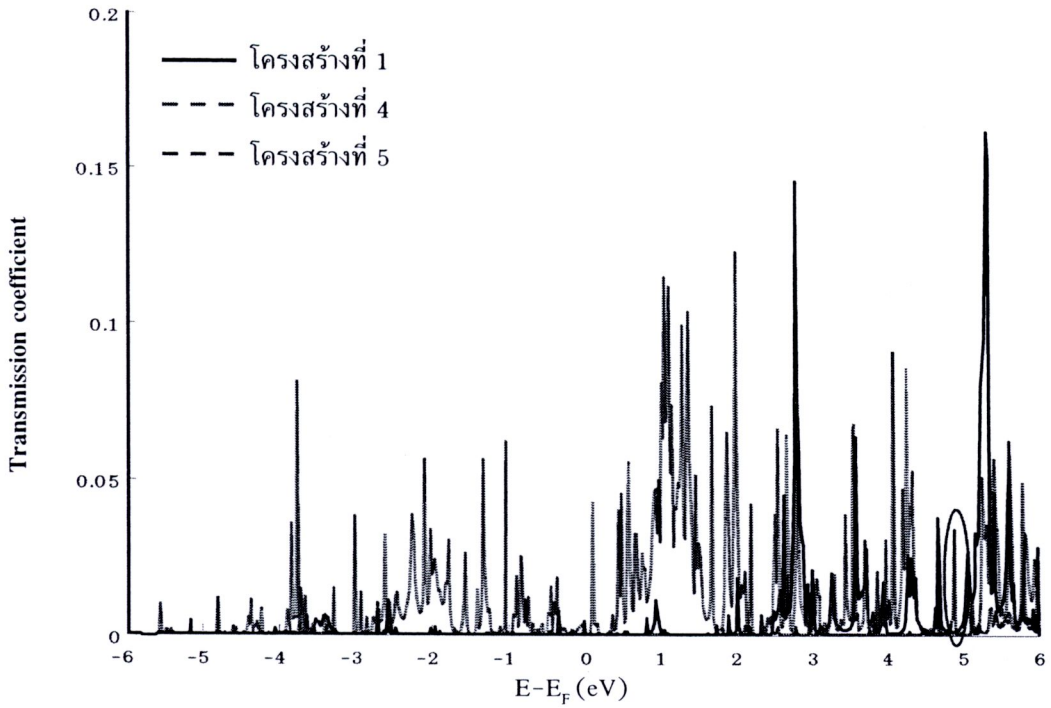
ภาพที่ 4.29 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่เกิดขึ้นที่ระดับพลังงานต่าง ๆ อันเป็นผลที่เกิดจากโครงสร้างต่าง ๆ ภาพที่ 4.29 (ก) แสดงขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานต่างที่เกิดจาก โครงสร้างที่ 1, 4 และ 5 ซึ่งพบว่าขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 นั้น มีขนาดเพิ่มสูงขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว หรือจุดพีก (Peak) แรก ที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนที่ระดับพลังงานประมาณ 2.5 และมีพีกสูงสุด ที่ระดับพลังงานประมาณ 5.5 eV ผลดังกล่าวนี้ ชี้ให้ทราบว่า โอกาสที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากอิเล็กโทรดด้านซ้ายผ่านย่านการกระเจิงหรือฉนวน MgO ไปยังอิเล็กโทรดด้านขวาได้ง่าย แสดงว่ากระแสที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 จะไหลจากอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา

ต่อมาจะทำการพิจารณาถึง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 4 จากภาพที่ 4.29 (ก) พบว่า พิกของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2 นั้น จะมีการกระจายไปในทุกระดับพลังงาน โดยพิกแรกจะเกิดขึ้นที่ระดับพลังงานประมาณ -4.2 eV และมีพิกสูงสุดสองจุดแรก ที่ระดับพลังงาน 2 และ 1 eV ผลดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้ว่า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสำหรับโครงสร้างที่ 2 นั้น โอกาสที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปได้ทั้งสองทิศทาง คือ อิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรดด้านขวา มีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ผ่านย่านกระเจิงหรือฉนวน MgO ไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้าย และ อิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรดด้านซ้าย มีโอกาสที่จะเคลื่อนที่ผ่านย่านกระเจิงหรือฉนวน MgO ไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา แต่เนื่องจาก พิกสูงสุดและจำนวนพิกของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเกิดขึ้นที่ระดับพลังงานสูงกว่าพลังงานเฟอร์มี มีจำนวนมากกว่าจำนวนพิกของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานต่ำกว่าพลังงานเฟอร์มี ดังนั้นโอกาสที่อิเล็กตรอนไหลจากอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวามีมากกว่าโอกาสที่อิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรดด้านขวาไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้าย แสดงว่าทิศทางการไหลของกระแส สำหรับโครงสร้างที่ 4 จะสามารถ ไหลจากอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวาได้มากกว่า การไหลของกระแสจากอิเล็กโทรดด้านขวาไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้าย

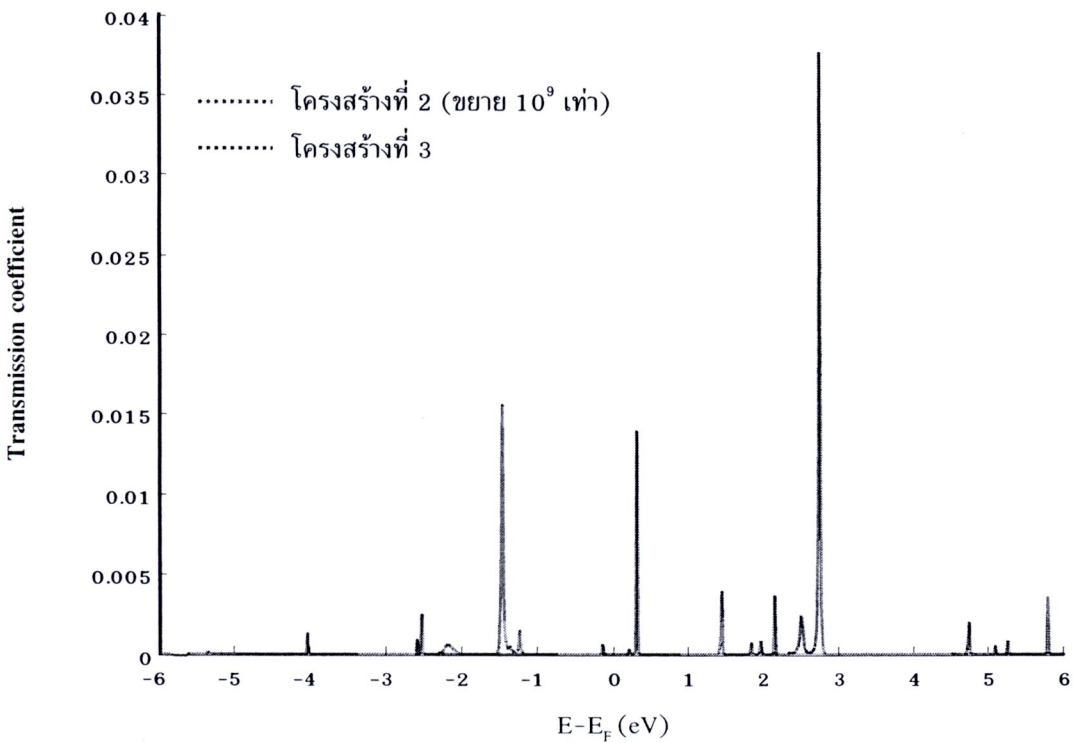
ในส่วนของ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 5 นั้น จากภาพที่ 4.29 (ก) พบว่า พิกแรกของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน (ภายในวงรีสีทึบ) นั้น จะเกิดขึ้นที่ ระดับพลังงานประมาณ 4.8 eV (ซึ่ง เป็นระดับพลังงานที่สูงกว่า ระดับพลังงานที่พบพิกแรกของทั้งโครงสร้างที่ 1 และ 4) และมีแนวโน้มที่จะกระจายไปยัง ระดับพลังงานที่สูงขึ้น ผลดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นว่า สำหรับโครงสร้างที่ 5 นั้น โอกาสที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ จากอิเล็กโทรดด้านซ้าย ผ่านย่านกระเจิงหรือฉนวน MgO ไปยังอิเล็กโทรดด้านขวาได้ง่าย นั่นคือกระแสที่เกิดจากโครงสร้างที่ 5 จะไหลจากอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา

ต่อมา จะทำการพิจารณาถึง ความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานต่าง ๆ อันเป็นผลที่เกิดจาก โครงสร้างที่มีการหลุดออกของออกซิเจน อันได้แก่โครงสร้างที่ 2 และ 3 ตามที่แสดงในภาพที่ 4.29 (ข)

จากภาพที่ 4.29 (ข) พบว่า พิกของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2 นั้น จะมีขนาดต่ำมากคือ ประมาณ 0.018×10^{-9} และมีเพียงพิกเดียวเท่านั้น คือ พิกที่เกิดขึ้นที่ระดับพลังงานประมาณ -1.5 eV ซึ่งหมายความว่า สำหรับโครงสร้างที่ 2 นั้น อิเล็กตรอนจาก อิเล็กโทรดด้านขวา จะเคลื่อนที่ไปยัง อิเล็กโทรดด้านซ้ายเท่านั้น นอกจากนี้ ที่พิกของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีเพียงเดียว และไม่มี ความกว้าง เป็นคุณลักษณะของแรงคู่ควบแบบอ่อน (Weakly Couple) [16] นั่นคือ แรงคู่ควบระหว่างอิเล็กโทรดด้านขวาและย่านการกระเจิงมีขนาดความแรงต่ำมาก ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากอิเล็กโทรดด้านขวาไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้ายได้น้อย นั่นคือกระแสที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2 นั้น จะมีขนาดต่ำ และไหลจาก อิเล็กโทรดด้านขวาไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้าย



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.29

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจาก โครงสร้างที่ 1 4 และ 5

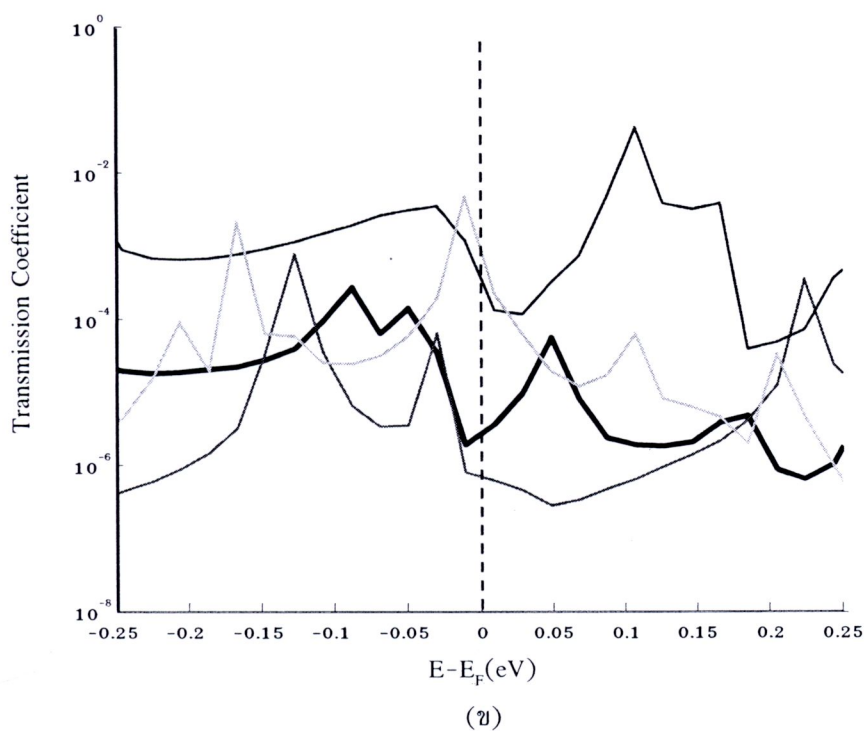
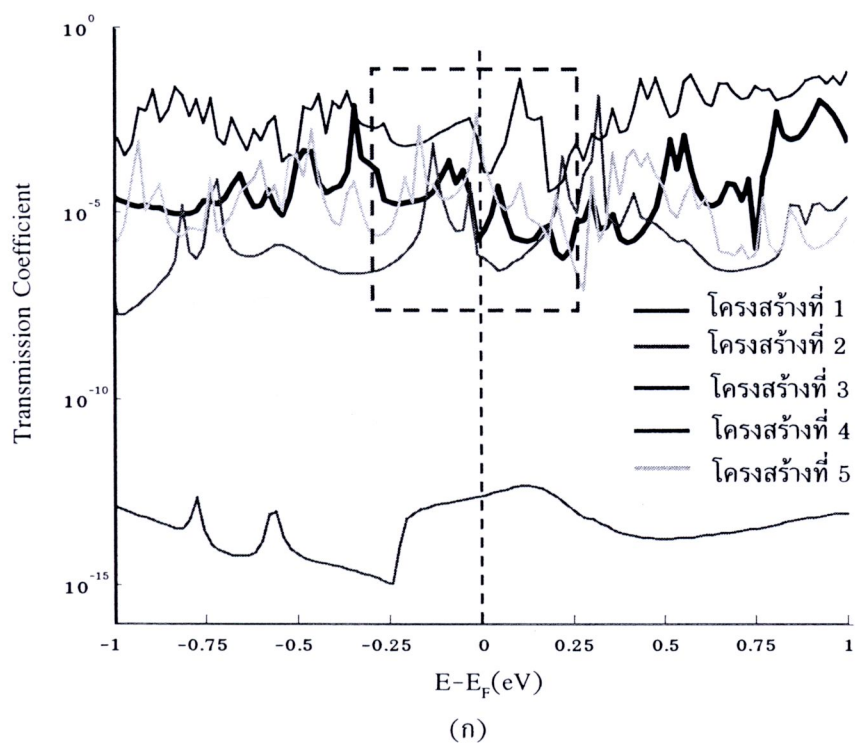
(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจาก โครงสร้างที่ 2 และ 3

สำหรับโครงสร้างสุดท้ายที่จะทำการพิจารณา คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 3 จากภาพที่ 4.29(ข) พบว่า พิกัดสูงสุดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ถูกพบที่ระดับพลังงานสูงกว่าพลังงานเฟอร์มี 2.8 eV และมีความกว้างของพีคที่แคบมาก ๆ ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงแรงคู่ควบอย่างอ่อน ดังนั้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสำหรับ โครงสร้างที่ 3 นั้น จะเคลื่อนที่ จากอิเล็กโทรดด้านซ้ายผ่านย่านกระเจิงไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา โดยที่แรงคู่ควบระหว่างอิเล็กโทรดด้านขวาและย่านกระเจิงมีขนาดต่ำมาก ๆ จึงเป็นไปได้ว่า กระแสที่เกิดจากโครงสร้างที่ 3 นั้น จะมีขนาดต่ำมาก ๆ และไหลจาก อิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา

จากที่ผ่านมาเป็นการอธิบายถึง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานที่ต่าง ๆ อันเป็นผลจากโครงสร้างที่ต่าง ๆ กัน ซึ่งจะอธิบายถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือกระแสเป็นหลัก ในส่วนต่อไปจะพิจารณา คุณสมบัติการนำ (Conductance) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ($E-E_F=0$)

ภาพที่ 4.30 (ก) แสดงสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ในลอการิทึมสเกลหรือล็อกสเกล (Logarithm scale, Log scale) ที่ระดับพลังงานในย่าน -1 ถึง 1 eV ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1-5 ซึ่งพบว่า ที่ระดับพลังงานเฟอร์มีนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2 จะมีขนาดต่ำที่สุด คือประมาณ 10^{-13} แต่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1, 3-5 นั้น จะมีขนาดอยู่ในช่วง ประมาณ 10^{-6} ถึง 10^{-4} ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้โดยอาศัย ภาพที่ 4.30 (ก) แต่จะสามารถพบการเปลี่ยนแปลงได้ในภาพที่ 4.30 (ข) ซึ่งพบว่า ที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 3 มีขนาดต่ำกว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 4 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงาน ที่ย่านพลังงาน $0-0.05$ eV พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับโครงสร้างที่ 3 และ 4 มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน สำหรับโครงสร้างที่ 5 นั้นจะมีการลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในโครงสร้างที่ 1 มีแนวโน้มสูงขึ้น ในทางตรงข้ามค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสำหรับโครงสร้างที่ 2 (พิจารณาจากภาพที่ 4.30 (ก)) มีแนวโน้มที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น

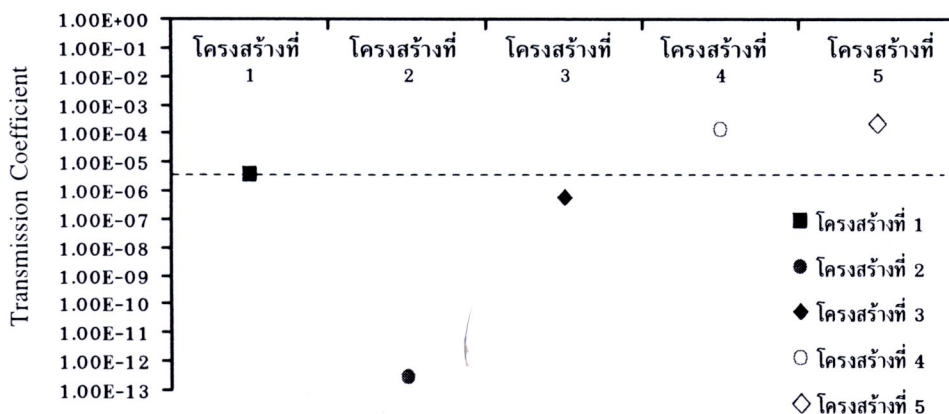
ขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานเฟอร์มี มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ ขนาดการนำไฟฟ้า และปริมาณกระแส ภาพที่ 4.31 แสดงขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 เปรียบเทียบกับ ขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2-5 ซึ่งพบว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2 และ 3 มีขนาดต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 โดยที่สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2 นั้นมีขนาดต่ำกว่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 3 ซึ่งหมายความว่า การนำและกระแสไฟฟ้า ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2 และ 3 นั้น มีขนาดต่ำกว่ากระแสและการนำไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 โดยที่การนำและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างที่ 2 มีขนาดต่ำกว่าโครงสร้างที่ 3 ทางตรงข้าม ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 4 และ 5 มีขนาดสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 โดยที่ขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 4 และ 5 นั้น มีขนาดใกล้เคียงกัน แสดงว่าการนำและกระแสไฟฟ้า ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 4 และ 5 มีขนาดสูงกว่ากระแสและการนำไฟฟ้า ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 โดยที่ การนำและกระแสไฟฟ้า ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 4 และ 5 มีขนาดใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.30

(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และพลังงานที่ระดับพลังงานใกล้ๆ พลังงานเฟอร์มี

(ข) ภาพขยายสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่อยู่ในบริเวณเส้นประ ของภาพที่ 4.22 (ก)



ภาพที่ 4.31 ขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1-5
เส้นปะ แสดงขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1

เป็นที่ทราบกันดีว่าการนำไฟฟ้าจะมีขนาดตรงข้ามกับความต้านทาน ดังนั้นจากที่อธิบายไปแล้วข้างต้นนั้น จะมีความหมายว่า ผลของการหลุดออกของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่าง สารแม่เหล็ก และฉนวน MgO (โครงสร้างที่ 2 และ 3) นั้น อาจมีผลทำให้ความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR มีขนาดสูงกว่า ความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR ที่สมบูรณ์ โดยที่ ความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR ที่เกิดการหลุดออกของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบังคับและฉนวน MgO (โครงสร้างที่ 2) มีความต้านทานสูงกว่า ความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR มีเกิดการหลุดออกของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นอิสระ และฉนวน MgO (โครงสร้างที่ 3) ในทางตรงข้าม ความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR ที่มีโบรอนกระจายเข้าไปแทรกระหว่างสารแม่เหล็กและฉนวน MgO (โครงสร้างที่ 4 และ 5) อาจมีขนาดต่ำกว่า ความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR ที่สมบูรณ์ (โครงสร้างที่ 1) โดยที่ ความต้านทาน TMR ที่เกิดจากการกระจายของโบรอนเข้าไปแทรกระหว่าง ชั้นบังคับและฉนวน MgO (โครงสร้างที่ 4) มีขนาดใกล้เคียงกับความต้านทาน TMR ที่เกิดจากการกระจายของโบรอนเข้าไปแทรกระหว่างชั้นอิสระและฉนวน MgO (โครงสร้างที่ 5)

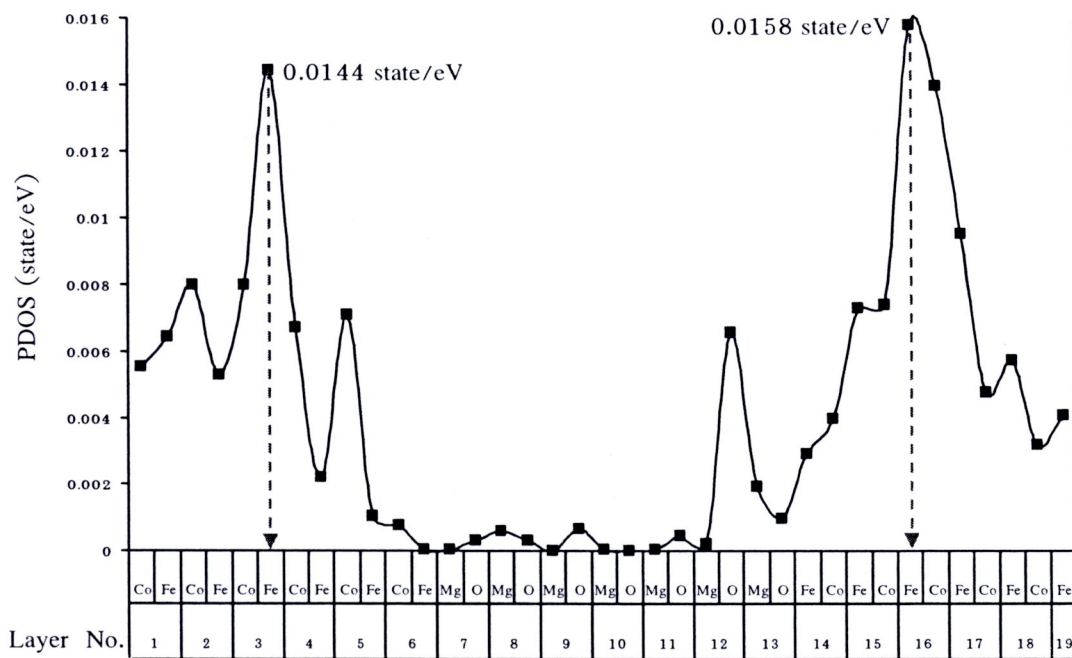
ในส่วนต่อไปจะเป็นการศึกษาถึง คุณสมบัติโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของหน่วยเซลล์ในแต่ละโครงสร้าง โดยอาศัยการคำนวณ PDOS ซึ่งจะสามารถใช้บอกถึงสาเหตุที่ทำให้สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแต่ละโครงสร้างมีขนาดต่างกัน

4.5.2 คุณสมบัติโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ของแต่ละโครงสร้าง

คุณสมบัติโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของหน่วยเซลล์ในแต่ละโครงสร้าง ถูกศึกษาโดยอาศัยการคำนวณ PDOS ของแต่ละอะตอม ที่อยู่ในแต่ละโครงสร้าง โดยอาศัยการคำนวณ PDOS ของออร์บิทัล วงนอกสุดของแต่ละอะตอม อันได้แก่ PDOS ของ Co 3d ออร์บิทัล Fe 3d ออร์บิทัล Mg 4s ออร์บิทัล O 2p ออร์บิทัล และ B 2p ออร์บิทัล

ภาพที่ 4.32 แสดง PDOS ของแต่ละอะตอมที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 ซึ่งพบว่าขนาดของ PDOS ที่เกิดจากอะตอมแต่ละอะตอม มีการกระจายอย่างสมมาตรกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเปลี่ยนแปลงขนาดของ PDOS ภายในอะตอมแต่ละด้านของอิเล็กโทรด ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายๆกัน กล่าวคือ ที่อิเล็กโทรดด้านซ้าย อะตอม Fe ของเลเยอร์ที่ 3 ซึ่งเป็นเลเยอร์ตำแหน่งตรงกลางของอิเล็กโทรดด้านซ้าย

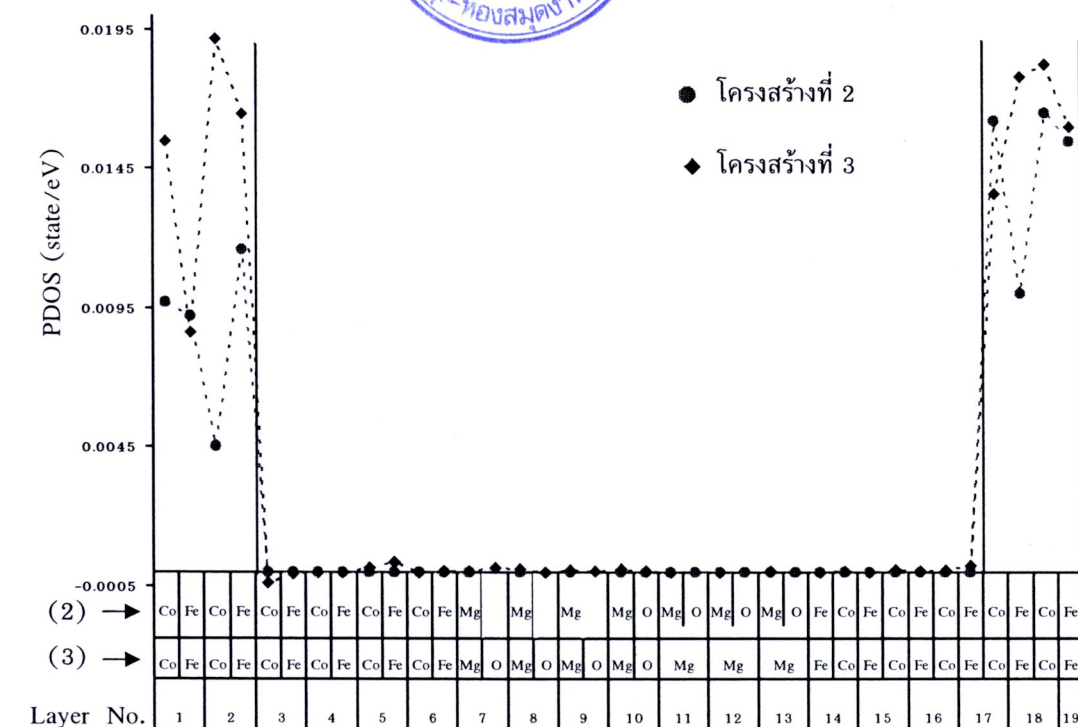
จะให้ขนาด PDOS สูงสุดคือประมาณ 0.144 state/eV สำหรับอิเล็กโตรดด้านขวานั้น พบว่า PDOS ของอะตอม Fe ที่อยู่ในเลเยอร์ที่ 16 ซึ่งเป็นตำแหน่งตรงกลางของอิเล็กโตรดด้านขวา จะให้ PDOS สูงสุดคือประมาณ 0.158 state /eV



ภาพที่ 4.32 PDOS ของแต่ละอะตอมในโครงสร้างที่ 1 โดยที่แกนอน แสดงการจัดเรียงอะตอมจากอิเล็กโตรดด้านซ้าย (เลเยอร์หมายเลข 1-6) ผ่านย่านกระเจิง (เลเยอร์หมายเลข 7-13) ไปยังอิเล็กโตรดด้านซ้าย (เลเยอร์หมายเลข 14-19) เส้นปะ แสดงอะตอมที่ให้ ขนาด PDOS สูงสุดที่เกิดขึ้นในอิเล็กโตรดด้านซ้ายและขวา

ภาพที่ 4.33 แสดง PDOS ของแต่ละอะตอมที่เกิดจากโครงสร้าง ที่เกิดการหลุดออกของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างอิเล็กโตรดด้านซ้าย (โครงสร้างที่ 2) และด้านขวา (โครงสร้างที่ 3) ซึ่งขนาดของ PDOS ของทั้งโครงสร้างที่ 2 และ 3 ที่อะตอม 4 ตัวแรก คือ Co-Fe ในเลเยอร์ที่ 1 และ 2 จะมีขนาดของ PDOS ที่สูงมากจนสามารถสังเกตพบได้อย่างชัดเจน แต่ขนาดของ PDOS ของอะตอมภายในเลเยอร์ที่ 3-16 และ อะตอม Fe ภายในเลเยอร์ที่ 17 มีขนาดต่ำมาก ๆ (~ 0) แต่จะมีขนาดเพิ่มสูงขึ้นที่ตำแหน่งอะตอม 4 ตัวสุดท้าย คือ Co ในเลเยอร์ที่ 17 อะตอม Fe-Co ในเลเยอร์ที่ 18 และอะตอม Fe ในเลเยอร์ที่ 19

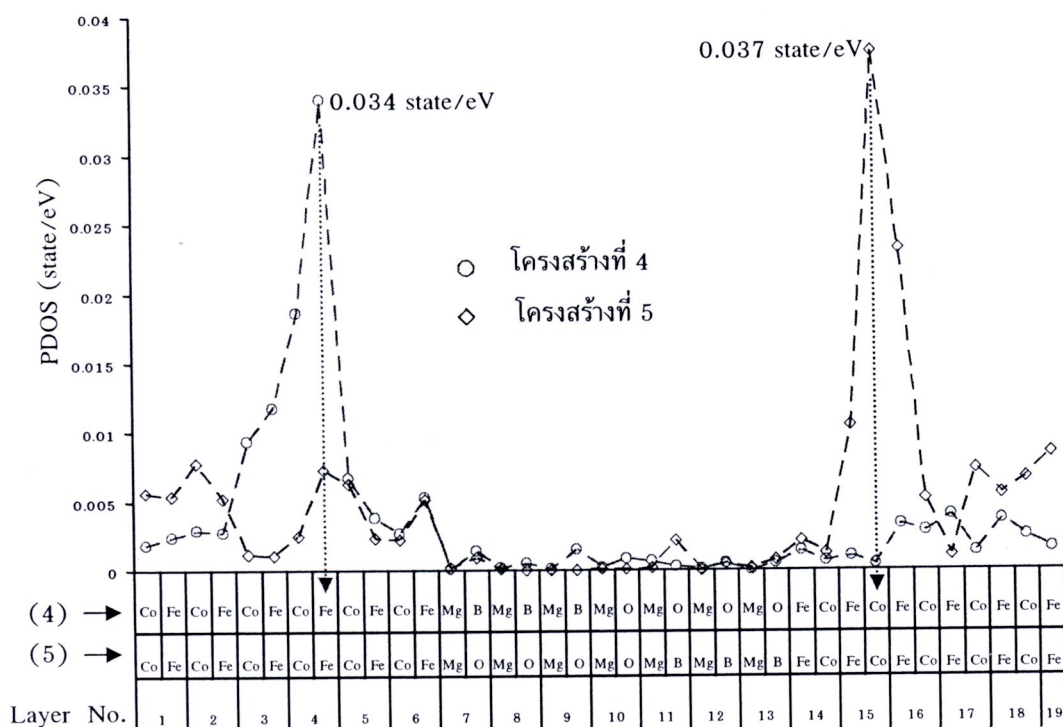
ปัจจัยสำคัญที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน คือการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัลระหว่างอะตอม ซึ่งการที่ PDOS ของ Co-Fe ในเลเยอร์ที่ 3-6 และ Fe-Co ในเลเยอร์ที่ 14-16 และ Fe ในเลเยอร์ที่ 17 มีขนาด ~ 0 นั้น ชี้ให้เห็นว่า การซ้อนทับระหว่างออร์บิทัลของของอะตอมเลเยอร์ดังกล่าวมีการซ้อนทับที่แคบมาก ส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก อิเล็กโตรดด้านขวา (ซ้าย) ไปยังอิเล็กโตรดด้านซ้าย (ขวา) สำหรับโครงสร้างที่ 2 (3) ได้ยาก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีขนาดที่ต่ำมาก หรืออาจจะกล่าวได้ว่า การหลุดออกของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่าง อิเล็กโตรดด้านซ้าย (ขวา) และย่านกระเจิง มีผลทำให้เกิดการซ้อนที่แคบมาก ทำให้ไม่มีความต่อเนื่องของสมมาตร ส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีขนาดต่ำ



ภาพที่ 4.33 PDOS ของแต่ละอะตอมในโครงสร้างที่ 2 และ 3 โดยที่ (2) และ (3) แสดงการจัดเรียงอะตอมจาก อิเล็กโตรดด้านซ้าย (เลเยอร์หมายเลข 1-6) ผ่านย่านกระเจิง (เลเยอร์หมายเลข 7-13) ไปยังอิเล็กโตรดด้านซ้าย (เลเยอร์หมายเลข 14-19) สำหรับโครงสร้างที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ภาพที่ 4.34 แสดง PDOS ของแต่ละอะตอมที่เกิดจากโครงสร้างที่ 4 และ 5 ซึ่งพบว่า PDOS ของอะตอม Fe และ Co ในเลเยอร์ที่ 4 และ 15 ของโครงสร้างที่ 4 และ 5 นั้น มีขนาด PDOS สูงที่สุด คือประมาณ 0.034 และ 0.037 state/eV ตามลำดับ แสดงว่า การซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล Fe ในเลเยอร์ที่ 4 และอะตอมใกล้เคียงในโครงสร้างที่ 4 นั้น มีย่านการซ้อนทับที่กว้างมาก ทำให้ สมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่มีขนาดสูง นอกจากนี้การที่ PDOS ที่มีขนาดสูงนั้น แสดงถึง ความแรงของแรงคู่ควบหรือความแรงในการดึงอิเล็กตรอนที่แรงมาก จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ อิเล็กตรอนสำหรับโครงสร้างที่ 4 นั้น เคลื่อนที่จากอิเล็กโทรดด้านซ้ายผ่านชั้นฉนวนไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา ในทำนองเดียวกัน สำหรับโครงสร้างที่ 5 นั้น การซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล Co ในเลเยอร์ที่ 15 และอะตอมใกล้เคียง มีย่านการซ้อนทับที่กว้างมาก ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ง่าย ทำให้สมประสิทธิ์การส่งผ่านที่มีขนาดสูง นอกจากนี้ความแรงของแรงคู่ควบระหว่าง Co ในเลเยอร์ที่ 14 และย่านกระเจิง ที่แรงมาก อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากอิเล็กโทรดด้านซ้าย ผ่านย่านกระเจิงเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา

ถึงแม้ว่า PDOS ของโบรอนจะมีค่าค่อนข้างต่ำ แต่ผลจากการแทรกเข้าของโบรอนนั้นจะมีผลต่อการซ้อนทับของอะตอมในแต่ละด้านของอิเล็กโทรด กล่าวคือ การกระจายของโบรอนเข้าไปแทรกระหว่างอิเล็กโทรดด้านซ้าย (ขวา) และย่านกระเจิง อาจมีผลทำให้ อะตอมตรงกลางของอิเล็กโทรดด้านซ้าย (ขวา) มีการซ้อนทับที่มากขึ้น อิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ง่าย นอกจากนี้การซ้อนทับที่มากขึ้น อาจแสดงให้เห็นว่า การสมมาตรที่มากขึ้น



ภาพที่ 4.34 PDOS ของแต่ละอะตอมในโครงสร้างที่ 4 และ 5 โดยที่ (4) และ (5) แสดงการจัดเรียงอะตอมจาก อิเล็กโทรดด้านซ้าย (เลเยอร์หมายเลข 1-6) ผ่านย่านกระเจิง (เลเยอร์หมายเลข 7-13) ไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้าย (เลเยอร์หมายเลข 14-19) สำหรับโครงสร้างที่ 4 และ 5 ตามลำดับ เส้นจุดแสดงตำแหน่งของอะตอมที่ให้ค่า PDOS สูงสุด

4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองการขนถ่ายอิเล็กตรอน และความเสียหายของหัวอ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต

แบบจำลองโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับศึกษา คุณสมบัติการขนถ่ายอิเล็กตรอนที่เกิดจาก โครงสร้างของแผ่นฟิล์ม TMR ปรกติ คือโครงสร้างที่ 1 และโครงสร้างของแผ่นฟิล์มบางที่เกิดความเสียหาย ที่สัมพันธ์กับความเสียหายที่เกิดจากการคายประจุ อันได้แก่โครงสร้างที่ 2-5 ในส่วนนี้ จะเป็นการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเสียหายที่เกิดจากการคายประจุโดยอาศัยกรณีการคายประจุกรณีต่าง และโครงสร้างที่เกิดความเสียหาย

จากการศึกษา ผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ที่มีต่อขนาดของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ทำให้ทราบถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน การวัดขนาดของสัมประสิทธิ์ส่งผ่านที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ซึ่งทำให้ทราบ ถึงแนวโน้มที่กระแสนี้จะมีกรไหลมากหรือน้อย รวมถึงขนาดความต้านทานที่สูงหรือต่ำกว่าโครงสร้างปรกติ การคำนวณหา PDOS ซึ่งทำให้ทราบถึงสาเหตุที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีความแตกต่างกัน ทำให้สามารถ สรุปประเด็นที่สำคัญ สำหรับเฉพาะในกรณีของ การจ่ายแรงดันไบแอสคร่อมระหว่างชั้นบังคับและชั้นอิสระนั้นได้ 4 ข้อคือ

(1) การหลุดออกของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบังคับและฉนวน MgO หรือ โครงสร้างที่ 2 นั้น มีผลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในทางตรงข้ามการ ไบแอสกระแสนี้สำหรับแผ่นฟิล์ม TMR ปรกติ กล่าวคือ อิเล็กตรอนมีโอกาสที่จะเคลื่อนที่จากชั้นอิสระไปยังชั้นบังคับ โดยที่ขนาดของความ

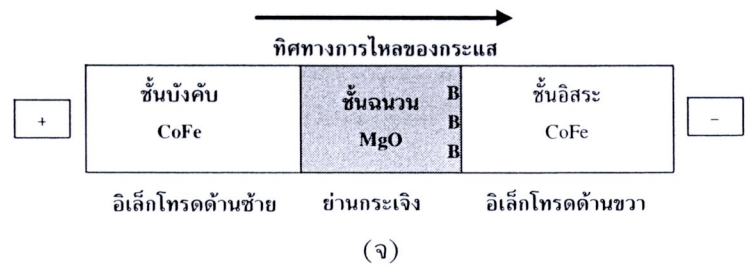
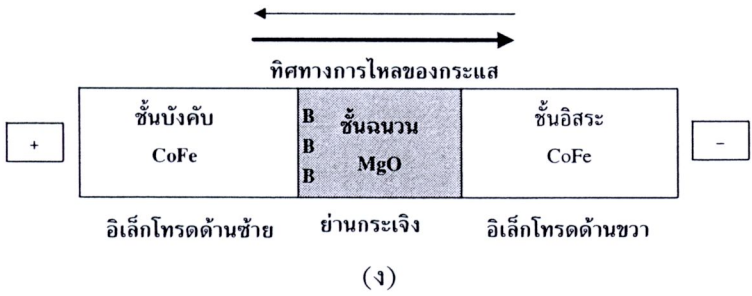
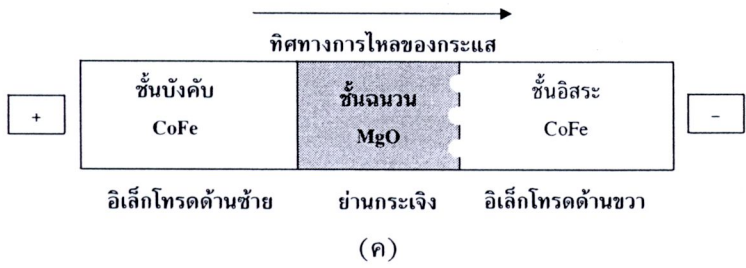
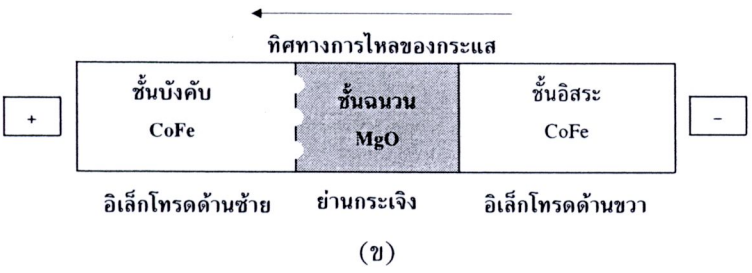
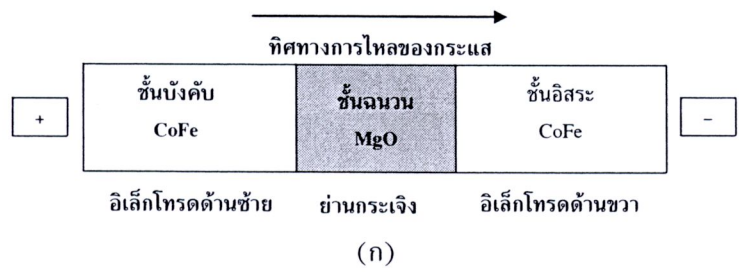
ด้านทานที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มที่จะมีขนาดสูงกว่าความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR ประกติ หรือ แผ่นฟิล์ม TMR ที่เกิดความเสียหายจากการคายประจุ

(2) การหลุดออกของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นอิสระและฉนวน MgO หรือ โครงสร้างที่ 3 นั้น มีผลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับ การไบแอสกระแสสำหรับ แผ่นฟิล์ม TMR ประกติ กล่าวคือ อิเล็กตรอนมีโอกาที่จะเคลื่อนที่จากชั้นบังคับไปยังชั้นอิสระ โดยที่ขนาดของความต้านทานที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มที่จะมีขนาดสูงกว่าความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR ประกติ หรือ แผ่นฟิล์ม TMR ที่เกิดความเสียหายจากการคายประจุ แต่มีขนาดความต้านทานที่สูงกว่ากรณี ของการหลุดออกของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบังคับและฉนวน MgO

(3) การกระจายของโบรอนเข้าไปแทรกยังบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบังคับและฉนวน MgO หรือ โครงสร้างที่ 4 นั้น มีผลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในทางตรงข้ามกับ การไบแอสกระแสสำหรับ แผ่นฟิล์ม TMR ประกติ กล่าวคือ อิเล็กตรอนมีโอกาที่จะเคลื่อนที่จากชั้นอิสระไปยังชั้นบังคับ โดยที่ขนาดของความต้านทานที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มที่จะมีขนาดต่ำกว่าความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR ประกติ หรือ แผ่นฟิล์ม TMR ก่อนเกิดความเสียหาย

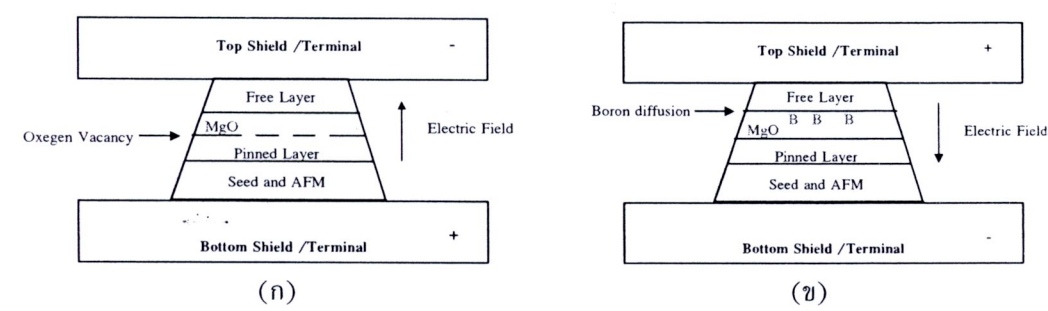
(4) การกระจายของโบรอนเข้าไปแทรกยังบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นอิสระและ ฉนวน MgO หรือ โครงสร้างที่ 5 นั้น มีผลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน การไบแอสกระแสสำหรับ แผ่นฟิล์ม TMR ประกติ กล่าวคือ อิเล็กตรอนมีโอกาที่จะเคลื่อนที่จากชั้นบังคับไปยังชั้นอิสระ โดยที่ขนาดของความต้านทานที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มที่จะมีขนาดต่ำกว่าความต้านทานของแผ่นฟิล์ม TMR ประกติ หรือ แผ่นฟิล์ม TMR ที่เกิดความเสียหายจากการคายประจุ การกระจายของโบรอนเข้าไปแทรกยังบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบังคับและฉนวน MgO

จากการวิเคราะห์ผลจากการคายประจุโดยอาศัยแบบจำลองไฟฟ้า ทำให้ทราบว่าการเกิดการคายประจุที่ 1 และ 3 หรือ การคายประจุคร่อมระหว่างขั้ว R+ และ R- และ การคายประจุระหว่างขั้ว R+ เทียบกราวด์ มีผลทำให้เกิดแรงดันคร่อมระหว่าง ชั้นอิสระและชั้นบังคับ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงทิศทางการไหลของสนามไฟฟ้า ร่วมกับพลังงานที่เกิดขึ้นที่บริเวณฐานทำให้มีความเป็นไปได้ที่ พื้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น บังคับและฉนวน MgO มีโอกาที่จะเกิดการหลุดออกของออกซิเจน มากกว่าที่เกิดการแทรกของโบรอนเข้าไปยังบริเวณรอยต่อ โดยอาศัยประเด็นสำคัญข้อที่ (1) ที่กล่าวไปแล้วข้างต้นนั้น ทำให้สามารถประมาณได้ว่า การคายประจุไปยังขั้ว R+ มีผลทำให้ ออกซิเจนของชั้นฉนวนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบังคับและชั้นฉนวน เกิดการหลุดออกจำนวนมาก ทำให้ความต้านทานมีขนาดสูงกว่าการคายประจุไปยังขั้ว R- นอกจากนี้ การที่ทิศทางการไหลของกระแสมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสไบแอส จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ขนาดไม่สมมาตร ของกรณีการคายประจุที่ 1 และ 3 มีค่าเป็น ลบ



ภาพที่ 4.35 ทิศทางการไหลของกระแสที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 ถึง 5 (ก)-(จ) ความหนาของเส้นลูกศรแสดงถึง ขนาดของกระแส

สำหรับการคายประจุเข้าไปยังขั้ว R- ทั้งกรณีการคายประจุที่ 2 และ 4 หรือ การคายประจุ
คร่อมระหว่างขั้ว R- และ R+ และ การคายประจุระหว่างขั้ว R- เทียบกราวดนั้น จากการวิเคราะห์โดยอาศัย
แบบจำลองไฟฟ้าพบว่า การคายประจุกรณีที่ 2 และ 4 นั้นมีผลทำให้เกิดแรงดันคร่อมระหว่าง ชั้นบังคับและ
ชั้นอิสระ ซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดทั้ง การหลุดของออกซิเจนและการแทรกเข้าของโบรอนเข้าไปยังบริเวณรอยต่อ
ระหว่างชั้นอิสระและฉนวน MgO จากไรก็ตามจาก งานวิจัยที่ศึกษาโดย โธมัส [45] ทำให้ทราบว่าโอกาสและ
พื้นที่ ที่อะตอมออกซิเจนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นอิสระและฉนวนนั้น มีโอกาสน้อยมากซึ่งเป็นผลที่เกิดจาก
ขบวนการ ปลุกแผ่นฟิล์มนั่นเอง ดังนั้น โอกาสที่ การแทรกของโบรอนเข้าไปยังรอยต่อระหว่างชั้นอิสระและ
ฉนวน จึงมีโอกาสมากกว่า โดยอาศัยประเด็นสำคัญข้อที่ (2) ที่กล่าวไปแล้วข้างต้นนั้น ทำให้สามารถ
ประมาณได้ว่า การคายประจุเข้าไปยังขั้ว R- มีผลทำให้เกิดการแพร่กระจายของโบรอนเข้าไปแทรกยังบริเวณ
รอยต่อระหว่างชั้นอิสระและชั้นฉนวน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ ขนาดความต้านทานที่เกิดจากการคายประจุกรณี
ที่ 2 และ 4 มีขนาดต่ำกว่าการคายประจุกรณีที่ 1 และ 3 โดยมีทิศทางการไหลของกระแส อยู่ในทิศทาง
เดียวกับกับการไบแอส จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ ขนาดไม่สมมาตร ของกรณีการคายประจุที่ 2 และ 4 มีค่า
เป็น ลบ



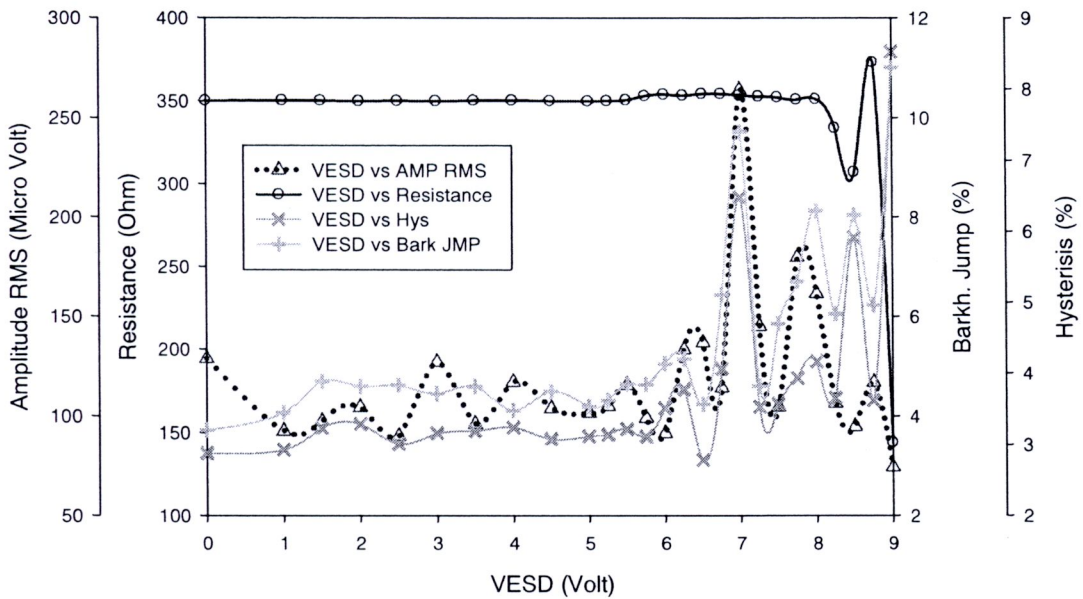
ภาพที่ 4.36 ความเสียหายที่บริเวณแผ่นฟิล์ม TMR ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจาก
(ก) การคายประจุกรณีที่ 1 และ 3
(ข) การคายประจุกรณีที่ 2 และ 4

4.6 ผลของการคายประจุต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก

การทดสอบผลของการคายประจุ โดยกรณีการคายประจุ กรณีที่ 1-4 ต่อค่าเฉลี่ยของ RMS ของ
สัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮิสทีรีซิส (Hysteresis Loop) ของเส้นโค้งทรานเฟอร์ (Transfer
Curve) และ การกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน (Barkhuasen Jump) ที่มีต่อหัวบันทึกจำนวน 10 หัว ต่อหนึ่ง
กรณีการคายประจุ ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.37-4.40 ตามลำดับ

4.6.1 ผลของการคายประจุต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ในกรณีที่ 1

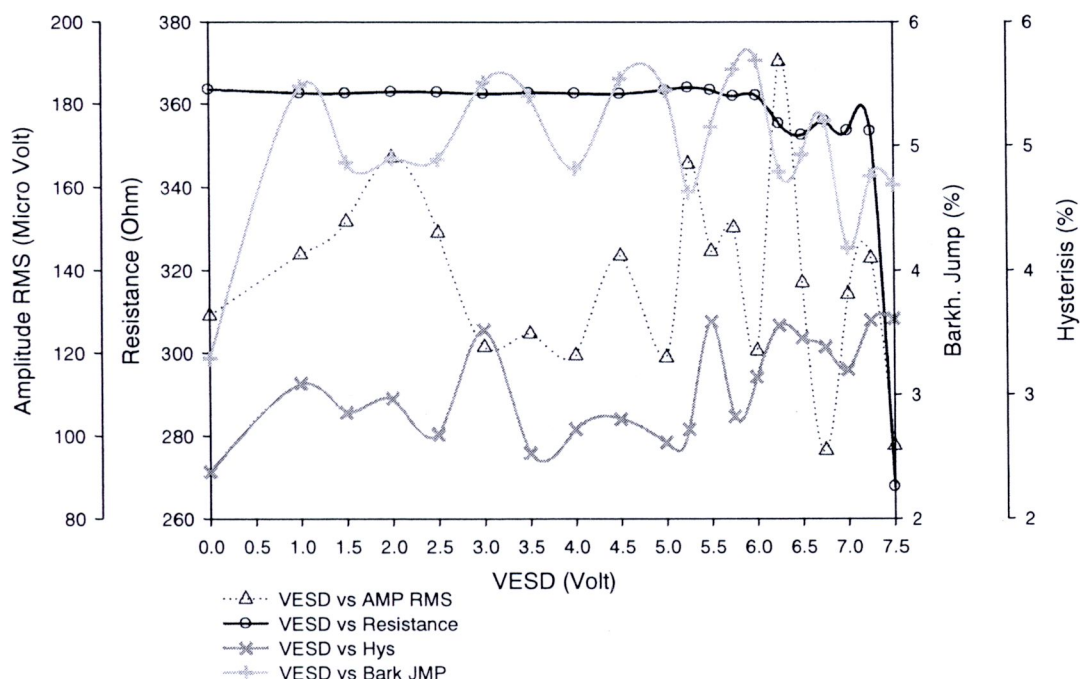
จากภาพที่ 4.37 พบว่า ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก การเกิดวงฮิสทีรีซิส และ การ
กระโดดแบบบาร์กเฮาเซน จะเริ่มมีการแกว่งที่ขนาดของการคายประจุประมาณ 7 โวลต์ ซึ่งคาดว่า เป็นผลที่
เกิดจากการทะลุที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบังคับและชั้นฉนวน ซึ่งส่งผลให้การหมุนของแมกเนโต
เซของชั้นบังคับไม่คงที่ ทำให้ขนาดของพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.37 ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮีสทีรีซิสของเส้นโค้ง ทรานเฟอร์ และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ที่เกิดจากกรณีการคายประจุ กรณีที่ 1

4.6.2 ผลของการคายประจุต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ในกรณีที่ 2

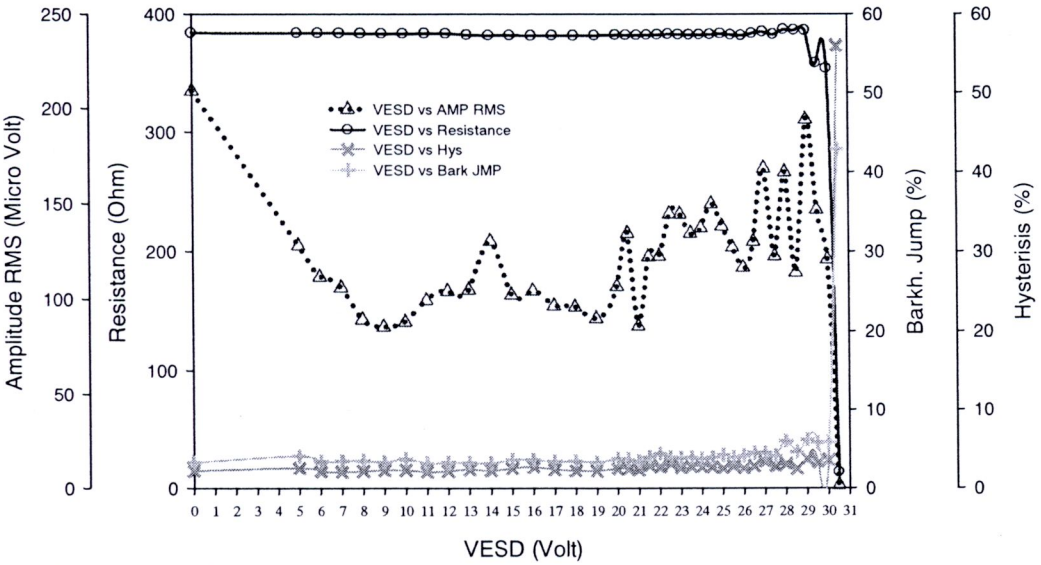
จากภาพที่ 4.38 พบว่า ผลจากการคายประจุในกรณีที่ 2 ไม่มีผลทำให้ ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก การเกิดวงฮีสทีรีซิส และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะ ซึ่งผลการทดลองนี้ ช่วยยืนยันข้อสมมุติฐานเกี่ยวกับ บริเวณและ สาเหตุของความเสียหายของหัวบันทึกลงี้ กล่าวว่ สำหรับการคายประจุในกรณีที่ 2 นั้น อาจจะเกิดความเสียหายที่บริเวณ รอยต่อระหว่างชั้น อีสระและชั้นฉนวน โดยมีการกระจายของโบรอนเป็นตัวแปรสำคัญ เช่นเดียวกันกับ กรณีของการวัดความ อสมมาตร การหลุดออกของโบรอนของชั้นอีสระ ไม่มีผลทำให้คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของชั้นอีสระเกิด การเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้น คุณสมบัติทางแม่เหล็กของหัวบันทึกในกรณีที่ 2 จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง



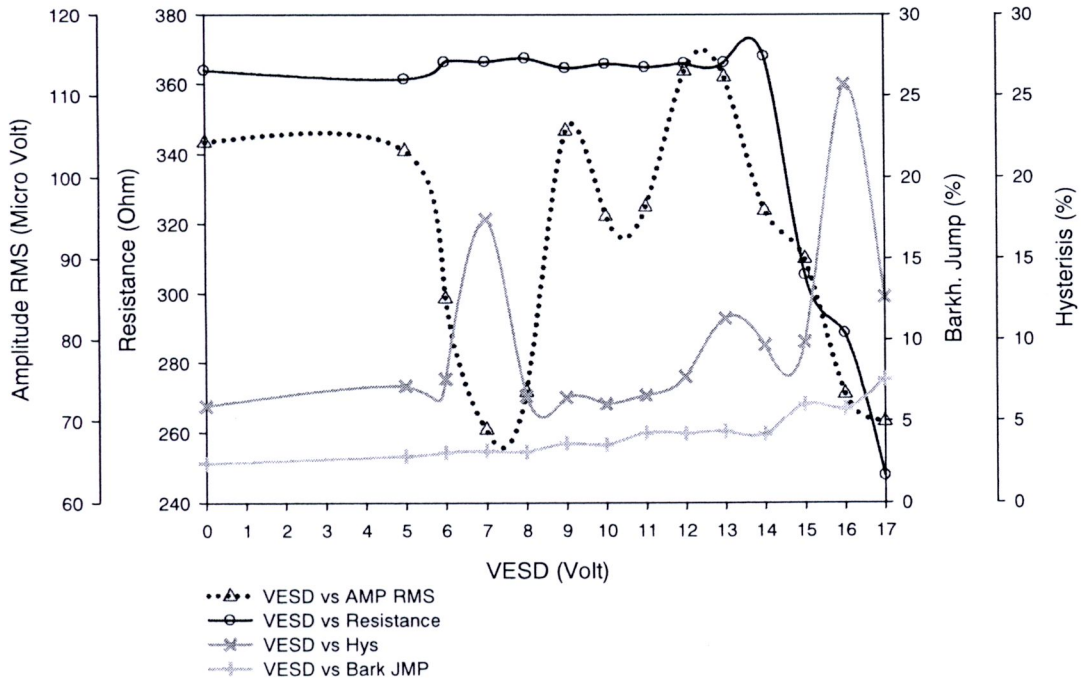
ภาพที่ 4.38 ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮิสทีรีซิสของเส้นโค้ง
ทรานเฟอร์ และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ที่เกิดจากกรณีการคายประจุ กรณีที่ 2

4.6.3 ผลของการคายประจุต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ในกรณีที่ 3

จากภาพที่ 4.39 พบว่า การเกิดวงฮิสทีรีซิส และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ในกรณีที่ 3 นั้น จะขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึก โดยที่ การเกิดวงฮิสทีรีซิส และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน เริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ขนาด แรงดันการคายประจุขนาด 28 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นค่าของแรงดันการคายประจุที่ทำให้ขนาดความต้านทานของหัวบันทึกลดลง แสดงว่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการคายประจุนี้ มีผลทำให้วงฮิสทีรีซิสเริ่มเกิดการขยายตัว ในส่วนของค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออกนั้น พบว่าเริ่มมีการแกว่งที่ขนาดแรงดันการคายประจุประมาณ 20 โวลต์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดสัญญาณรบกวนในหัวบันทึก แต่เนื่องจากการแกว่งที่อยู่ในช่วงต่ำกว่า 100 มิลลิโวลต์ จึงอาจจะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของหัวอ่านข้อมูล



ภาพที่ 4.39 ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮิสทีรีซิสของเส้นโค้งทรานเฟอร์ และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ที่เกิดจากกรณีการคายประจุ กรณีที่ 3



ภาพที่ 4.40 ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮิสทีรีซิสของเส้นโค้งทรานเฟอร์ และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ที่เกิดจากกรณีการคายประจุ กรณีที่ 4



4.6.4 ผลของการคายประจุที่มีต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่เกิดจากกรณีที่ 4

จากภาพที่ 4.40 พบว่า ที่แรงดันการคายประจุขนาด 7 โวลต์นั้น การกระโดดแบบบาร์กเฮาเซนมีขนาดลดลง แต่การเกิดวงฮีสทีรีซิสกลับมีขนาดเพิ่มขึ้น ก่อนที่จะคงที่แล้วเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง ที่แรงดันการคายประจุขนาด 16 โวลต์ ซึ่งอาจจะเป็นผลที่เกิดจากการที่ สปินอิเล็กตรอนพยายามที่ กระโดดหรือเคลื่อนที่ผ่าน บริเวณที่เกิดการหลุดออกของออกซิเจน

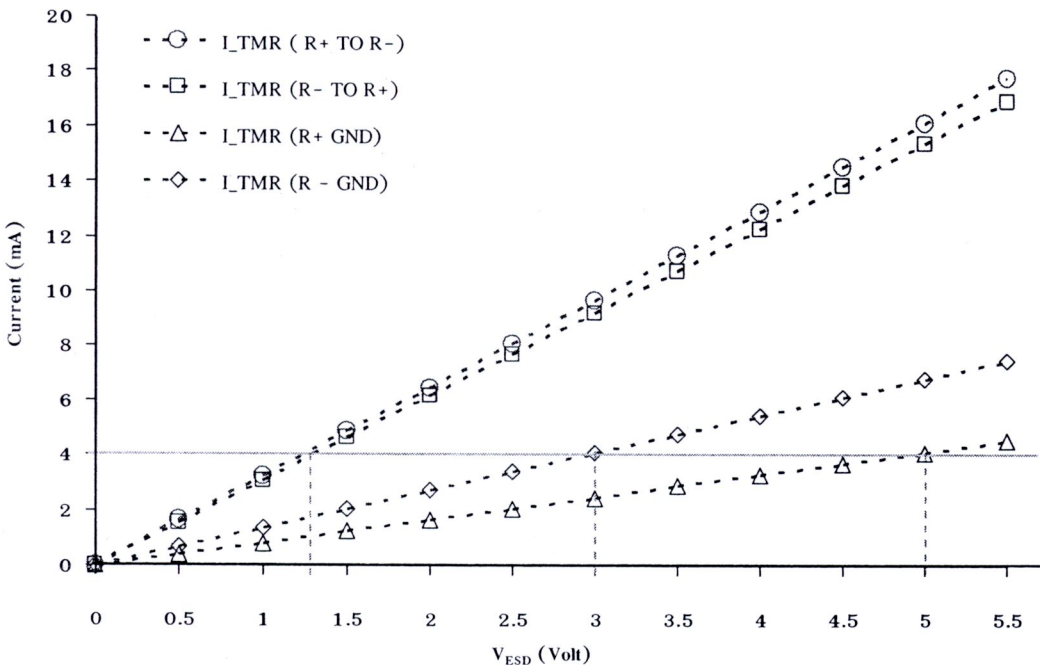
4.7 ผลของแบบจำลองจักรกลต่อหัวอ่าน

จากที่ผ่านมาเป็นการทดสอบผลของแบบจำลองมนุษย์ต่อหัวอ่านข้อมูล ตามที่กล่าวไปแล้วในเบื้องต้น ผลจากการจำลองและการทดลองมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองที่ถูกออกแบบจึงสามารถนำมาใช้ศึกษาถึงผลการคายประจุจาก แบบจำลองชนิดต่างๆได้

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของ แบบจำลองจักรกลที่เกิดจากโดยการคายประจุในกรณี ที่ 1-4 เช่นเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบผลของแบบจำลองมนุษย์

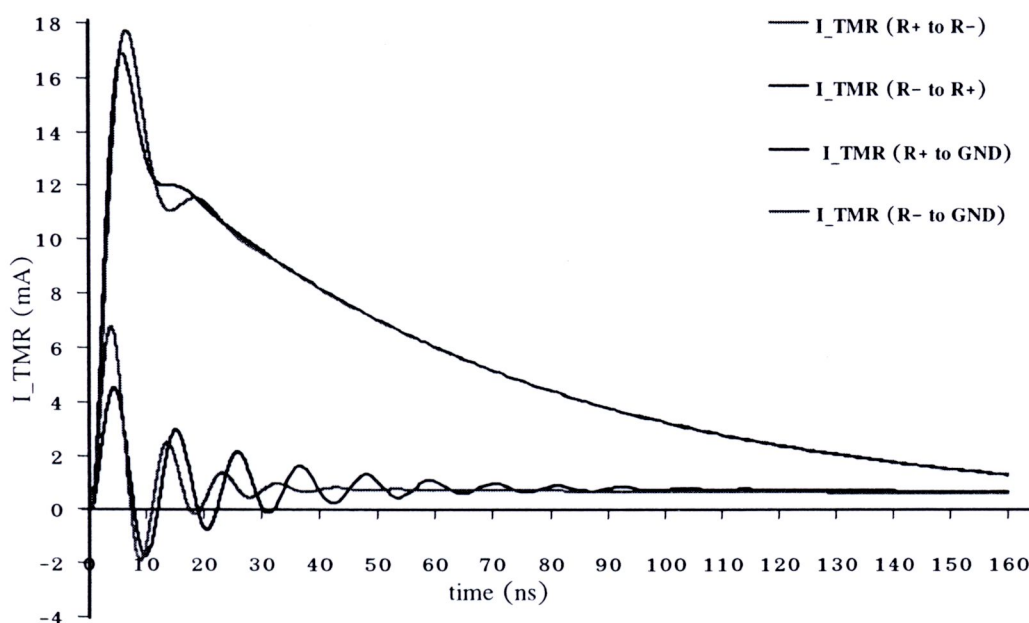
4.7.1 ผลแบบจำลองจักรกลต่อขนาดแรงดันทะลาย

ภาพที่ 4.41 ผลของการคายประจุในกรณี ที่ 1-4 ที่มีต่อ ขนาดกระแสไหลผ่าน TMR ซึ่งพบว่า ระดับแรงดันทะลาย จากการคายประจุในกรณี ที่ 4 และ 3 มีขนาดประมาณ 3 และ 5 V ตามลำดับ ขณะที่ระดับแรงดันทะลายในกรณี ที่ 1 และ 2 มีขนาดใกล้เคียงกันคือประมาณ 1.25 V ปัจจัยสำคัญที่ทำให้กรณี ที่ 4 มีขนาดสูงกว่ากรณีอื่นๆ คาดว่าเป็นผลที่เกิดจากอิมพีแดนซ์รวมจากการคายประจุในกรณี ที่ 4 มีขนาดมากกว่า กรณีอื่นๆ เช่นเดียวกันกับที่อธิบายไปแล้วในส่วนของผลจากแบบจำลองมนุษย์ที่มีต่อการคายประจุ



ภาพที่ 4.41 ผลของแรงดันการคายประจุแบบ MM ต่อขนาดของกระแสไหลผ่าน R_{TMR} (I_{TMR}) เส้นทึบ ($I_{TMR} = 4$ mA) แสดงขนาดของกระแสที่ทำให้หัวอ่านเกิดความเสียหาย

ภาพที่ 4.42 แสดงสัญญาณกระแสไหลผ่าน TMR ที่แรงดันการคายประจุจาก แบบจำลอง จักรกลขนาด 5 V ซึ่งพบว่า สัญญาณที่ได้จากกรณีที่ 1 และ 2 จะมีรูปร่างคล้ายๆซึ่งสามารถพบว่ามี การตีเคย์เกิดขึ้น โดยที่ความกว้างของสัญญาณในกรณีที่ 1 และ 2 มีขนาด 31.8 และ 35.6 ns ตามลำดับ ในทาง ตรงข้าม สัญญาณที่ได้จากกรณีที่ 3 และ 4 จะมีการส่ายหรือแดมป์ ซึ่งแสดงว่า ค่าการเหนี่ยวนำจาก แบบจำลองจักรกลมีผลต่อกรณีที่ 3 และ 4 เป็นอย่างมาก และถึงแม้ว่าขนาดของกระแสไหลผ่าน TMR จะมีค่า ต่ำ แต่ในเบื้องต้นนี้คาดว่าผลจากแบบจำลองจักรกล ในกรณีที่ 3 และ 4 อาจจะมีผลทำให้สัญญาณรบกวนใน หัวอ่านได้ง่าย ความกว้างของสัญญาณในกรณีที่ 3 และ 4 มีขนาดประมาณ 4 และ 5 ns ตามลำดับ

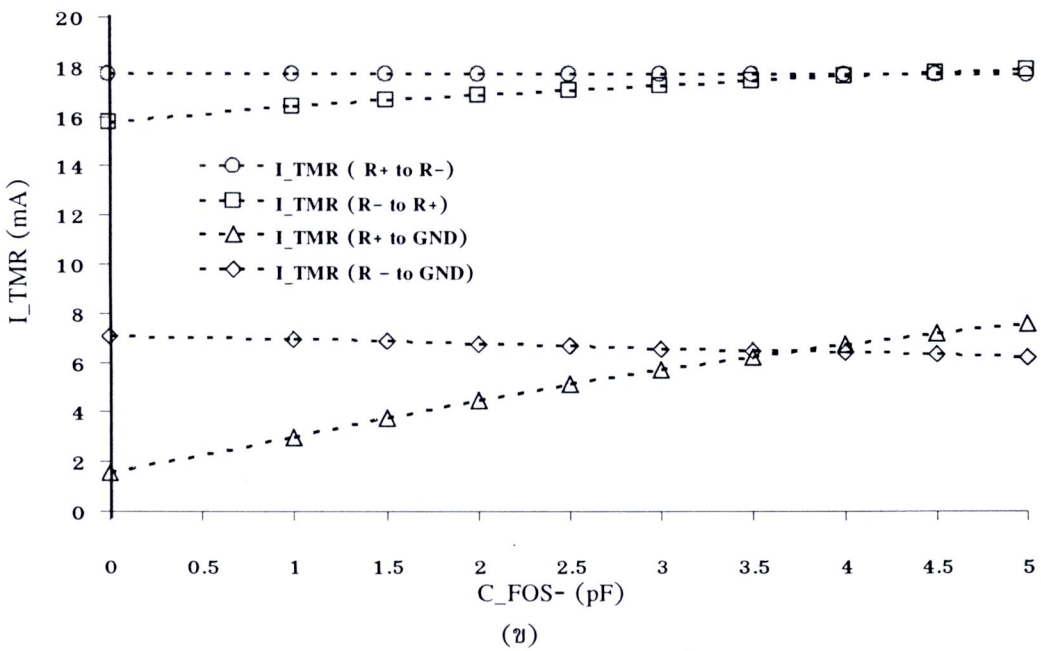
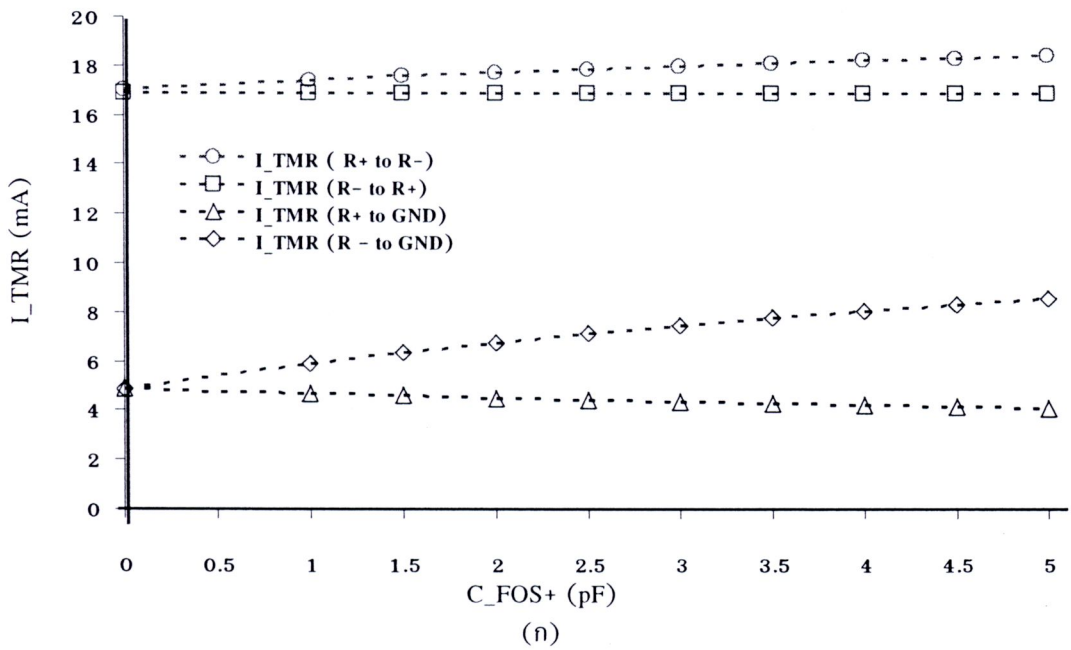


ภาพที่ 4.42 รูปสัญญาณกระแส ที่ไหลผ่าน R_{TMR} (I_{TMR}) อันเป็นผลเนื่องมาจากคายประจุแบบ MM โดยอาศัยแรงดันการคายประจุขนาด 5 โวลต์

4.7.2 ผลของ FOS การต่อขนานและ $R_{parallel}$ ที่มีต่อแบบจำลองจักรกล

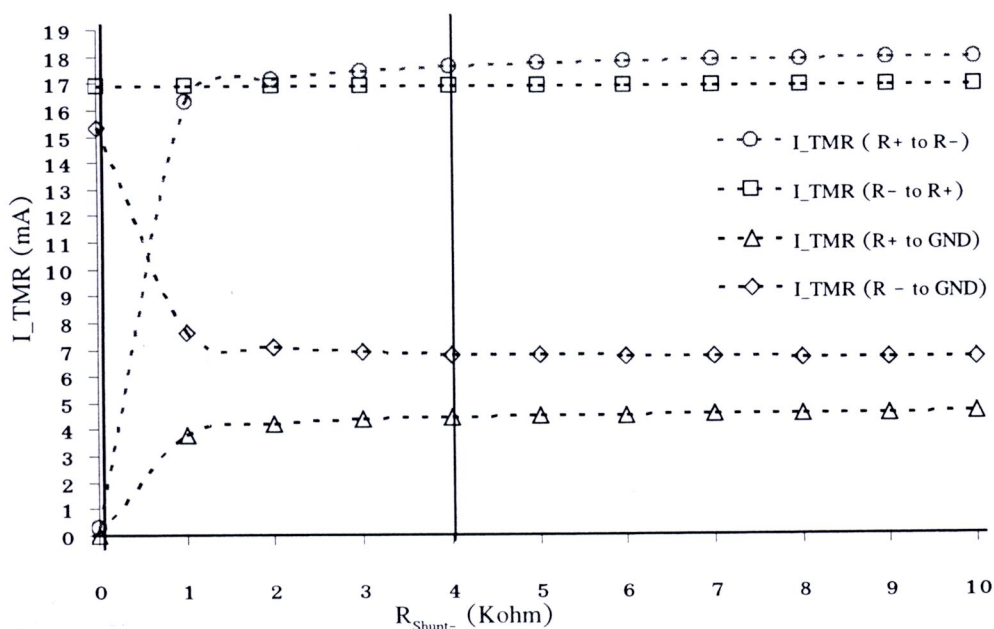
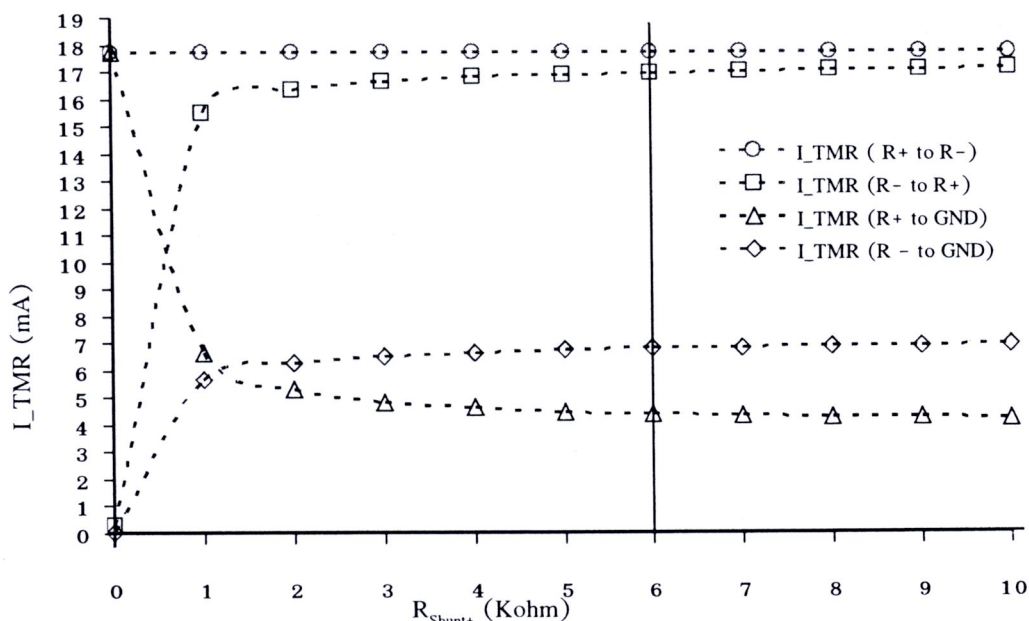
ภาพที่ 4.43 แสดงผลของ C_{FOS} ที่มีต่อกระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุ ในกรณีที่ 1-4 จากภาพที่ 4.43 (ก) พบว่า C_{FOS+} ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อกระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 1 และ 2 แต่มีผลทำให้ กระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 3 และ 4 ค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ

ภาพที่ 4.43 (ข) แสดงผลของ C_{FOS-} ที่มีต่อกระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 1-4 ซึ่ง พบว่า C_{FOS-} ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อกระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 1 และ 4 เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน TMR ในทั้ง 2 ที่กล่าวมาแล้วนั้นมีแนวโน้มที่จะคงที่ แต่จะมีผลทำให้ กระแสที่ไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 2 และ 3 มีขนาดสูงขึ้น



ภาพที่ 4.43 (ก) ผลของ C_{FOS+} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 5 โวลต์ จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน
 (ข) ผลของ C_{FOS-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 5 โวลต์ จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน

ภาพที่ 4.44 แสดงผลของ $R_{shunt+(-)}$ ที่มีต่อ กระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุ ในกรณีที่ 1- 4 จากภาพที่ 4.44 (ก) พบว่า กระแสไหลผ่าน TMR จากการคายประจุในกรณีที่ 1-4 จะเริ่ม คงที่ ที่ R_{shunt+} ขนาดประมาณ 6 โอห์ม ขณะที่ จากภาพที่ 4.44 (ข) พบว่า กระแสไหลผ่าน TMR จากการ คายประจุในกรณีที่ 1-4 จะเริ่มคงที่ R_{shunt+} ขนาดประมาณ 4 โอห์ม

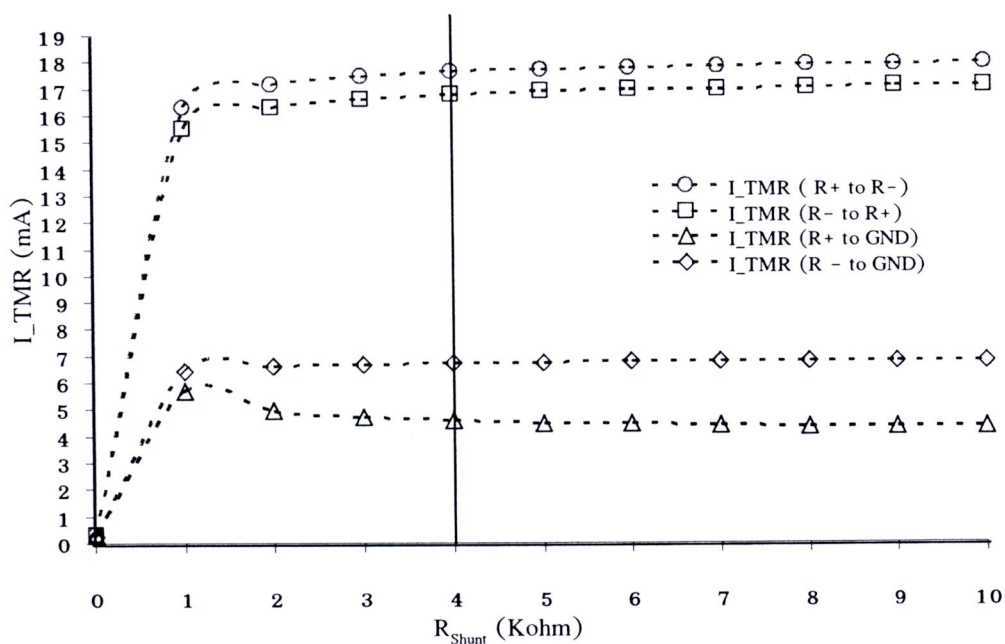


ภาพที่ 4.44 (ก) ผลของ R_{shunt+} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุ

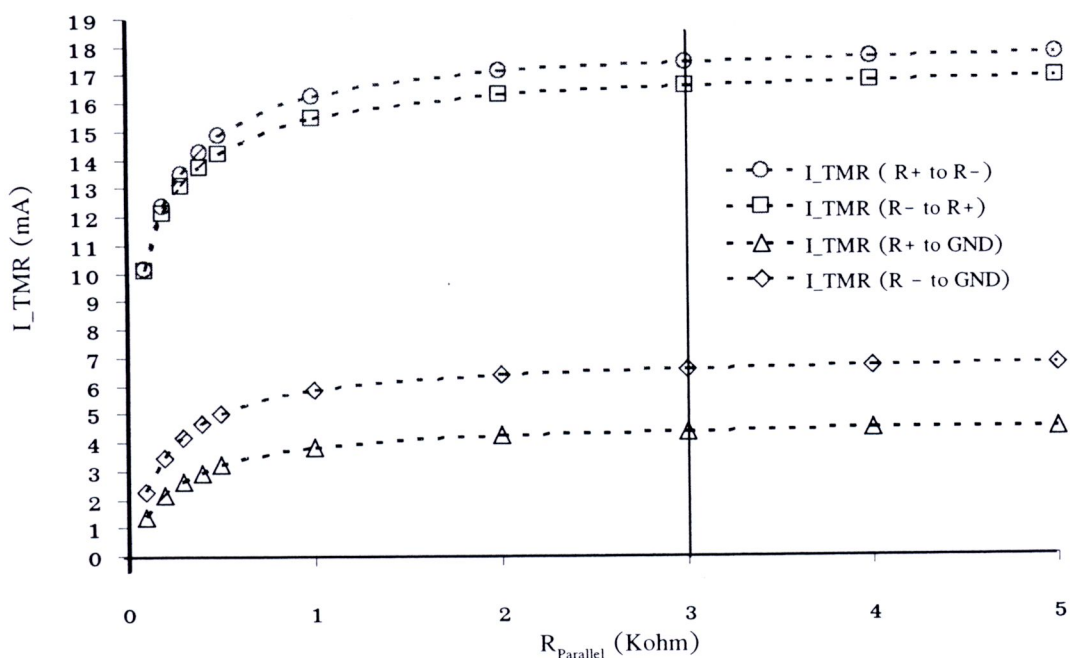
ขนาด 5 โวลต์ จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน

(ข) ผลของ R_{shunt-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด

5 โวลต์จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน



ภาพที่ 4.45 ผลของ R_{Shunt} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 5 โวลต์ จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน



ภาพที่ 4.46 ผลของ $R_{Parallel}$ ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 5 โวลต์ จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน

ภาพที่ 4.45 แสดงผลการเพิ่มขนาด R_{shunt} ทั้งด้านบวกและด้านลบอย่างละเท่ากันๆ ดังที่แสดงในภาพที่ 4.45 ซึ่งพบว่า กระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่ 1-4 นั้น มีแนวโน้มที่จะคงที่ ที่ R_{shunt} ขนาดประมาณ 4 k Ω แสดงว่าการคายประจุจะไม่ผลต่อหัวอ่าน ดังนั้นความต้านทานของ R_{shunt} ขนาดประมาณ 4 k Ω นี้จะสามารถลดผลจากการคายประจุได้

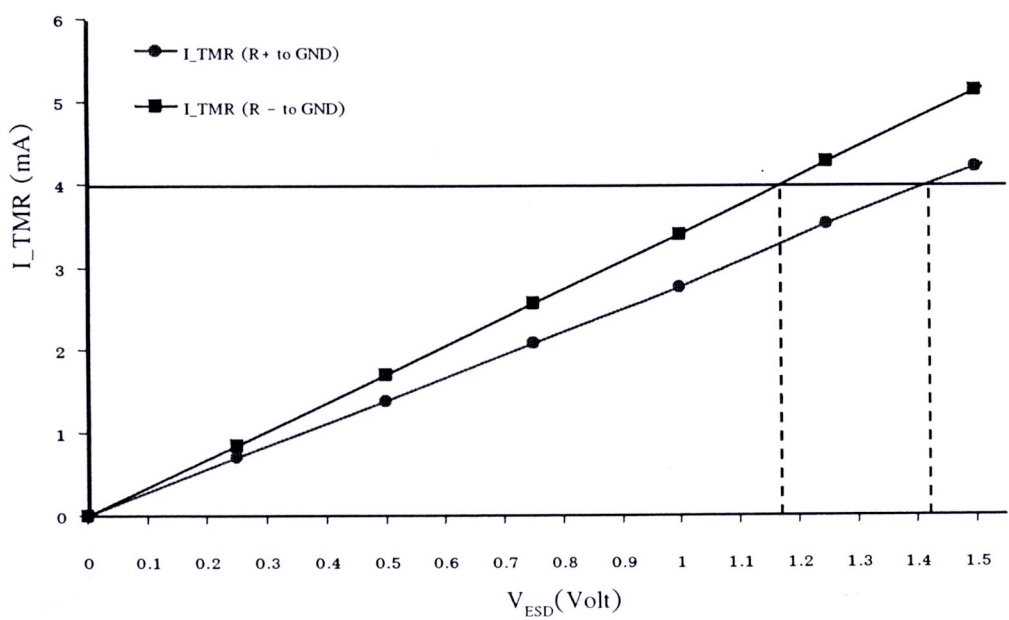
ภาพที่ 4.46 แสดงผลของ RPararell ที่มีต่อ กระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุในกรณีที่ 1-4 ซึ่งในทุกๆกรณี จะพบว่า กระแสไหลผ่าน TMR มีขนาดเพิ่มขึ้นตาม RPararell สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับกรณีการคายประจุจากแบบจำลองมนุษย์ อย่างไรก็ตามจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ที่ความต้านทาน RPararell มากกว่า 3 k Ω นั้น กระแสไหลผ่าน TMR ในทุกๆกรณีเริ่มมีแนวโน้มที่จะคงที่ ซึ่งหมายความว่า ความต้านทานของ ความต้านทาน RPararell ขนาดดังกล่าวสามารถลดผลจากการคายประจุได้

4.8 ผลของแบบจำลองประจุสะสมในอุปกรณ์ต่อหัวอ่าน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของแบบจำลองการสะสมประจุในอุปกรณ์ โดยจะทำการจำลองให้มีประจุสะสมที่ฐานของหัวอ่านข้อมูล และคายประจุโดยใช้การคายประจุกรณีที่ 3 และ 4 เท่านั้น

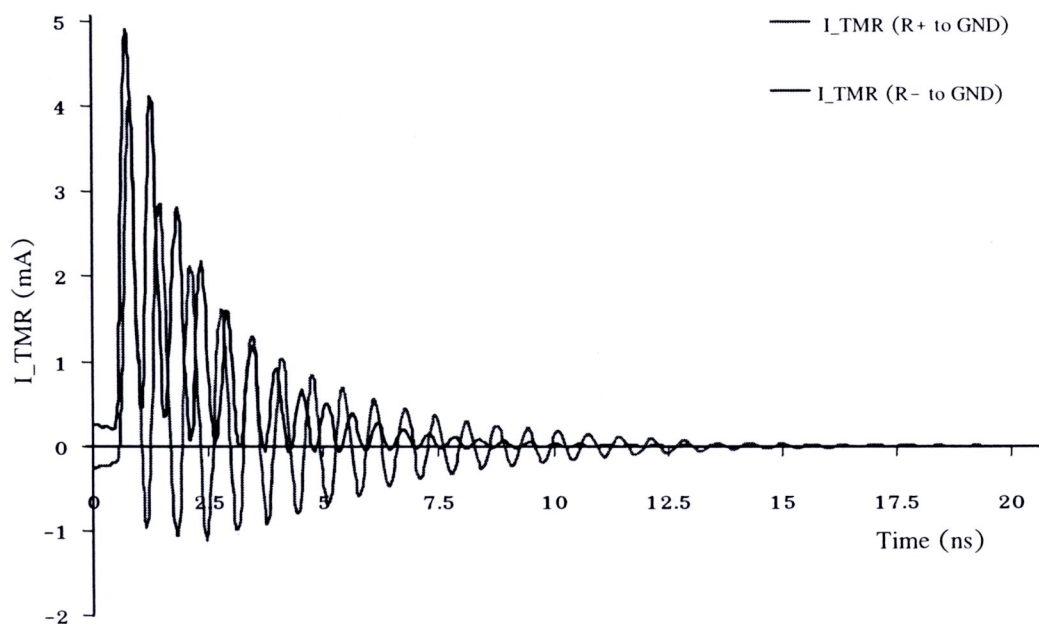
4.8.1 ผลของแบบจำลองประจุสะสมในอุปกรณ์ที่มีต่อขนาดแรงดันทะลาย

ภาพที่ 4.47 ผลของการคายประจุในกรณีที่ 1-4 ที่มีต่อ ขนาดกระแสไหลผ่าน TMR ซึ่งพบว่า ระดับแรงดันทะลาย จากการคายประจุในกรณีที่ 3 และ 4 มีขนาดประมาณ 1.42 และ 1.18 V ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าเป็ผลที่เกิดจากอิมพีแดนซ์รวมจากการคายประจุในกรณีที่ 3 มีขนาดมากกว่ากรณีที่ 4 เช่นเดียวกันกับที่อธิบายไปแล้วในส่วนของผลจากแบบจำลองมนุษย์ที่มีต่อการคายประจุ



ภาพที่ 4.47 ผลของแรงดันการคายประจุแบบ CDM ต่อ ขนาดของกระแสไหลผ่าน R_{TMR} (I_{TMR}) เส้นทึบ ($I_{TMR} = 4$ mA) แสดงขนาดของกระแสที่ทำให้หัวอ่านเกิดความเสียหาย

ภาพที่ 4.48 แสดงสัญญาณกระแสไหลผ่าน TMR ที่แรงดันการคายประจุ จากแบบจำลอง ประจุสะสมในอุปกรณ์ขนาด 1.45 V ซึ่งพบว่า สัญญาณที่ได้จากกรณีที่ 3 และ 4 จะมีรูปร่างคล้ายๆ ซึ่งเป็ย ลักษณะของสัญญาณที่มีทั้งการส่าย และการตีเคย์ ซึ่งอาจจะส่งผลของการเกิดสัญญาณรบกวนหรือ ความเสียหายแฝงในหัวอ่านได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากการที่ สัญญาณมีการส่ายนั้น ย่อมแสดงถึงการแลกเปลี่ยนพลังงาน ระหว่าง สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า จึงมีความเป็นไปได้ที่ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะไปส่งผลทำให้หัวอ่านเกิดความเสียหาย

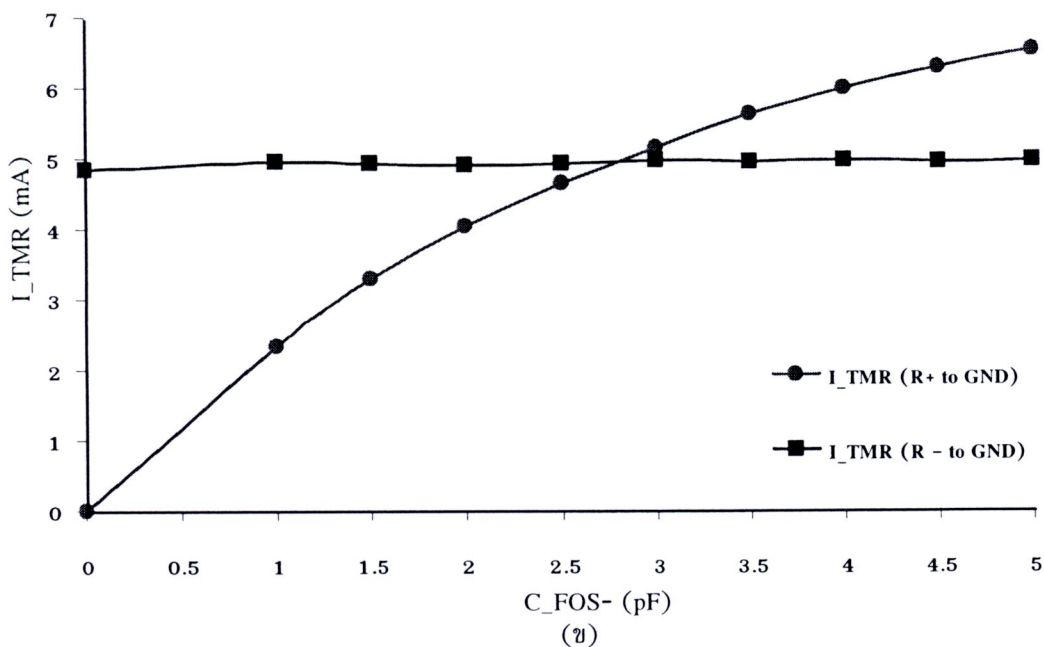
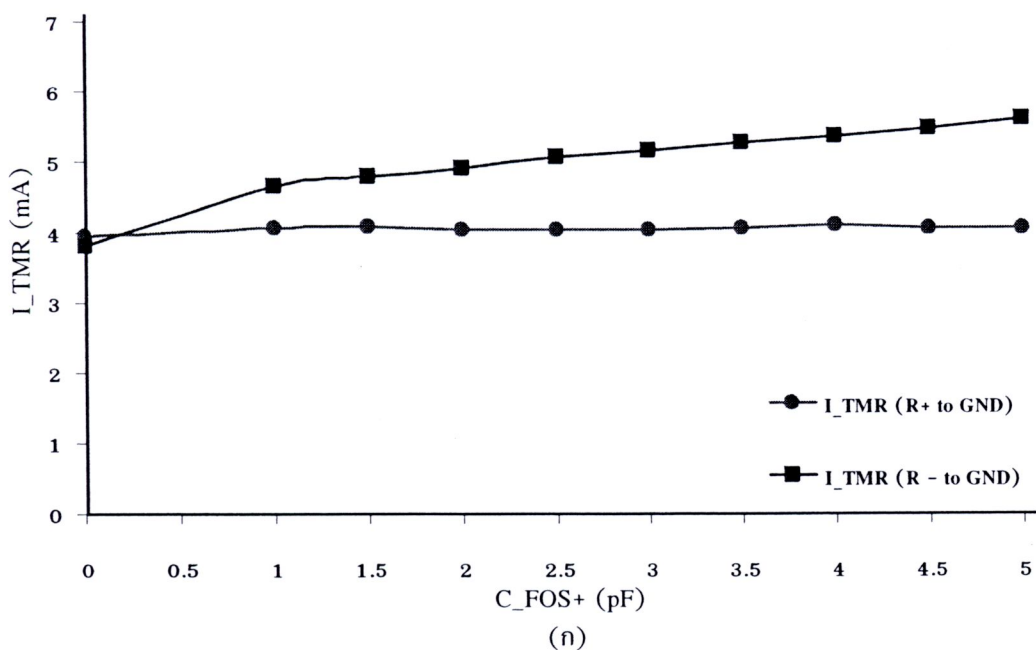


ภาพที่ 4.48 รูปสัญญาณกระแส ที่ไหลผ่าน R_{TMR} (I_{TMR}) อันเป็นผลเนื่องมาจากการคายประจุแบบ CDM โดยอาศัยแรงดันการคายประจุขนาด 1.45 โวลต์

4.8.2 ผลของ FOS การต่อขนานและ $R_{parallel}$ ที่มีต่อแบบประจุสะสมในอุปกรณ์

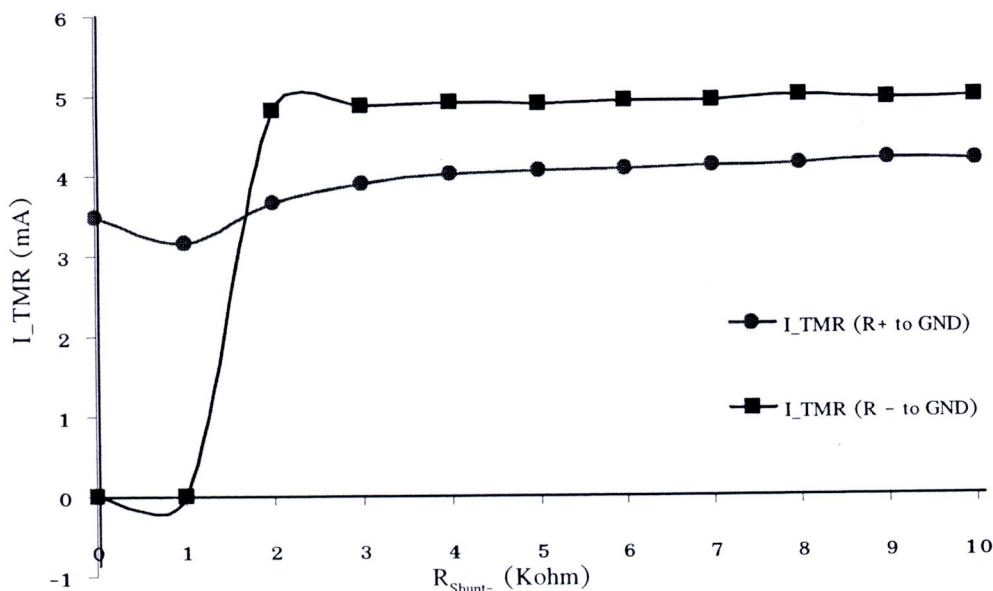
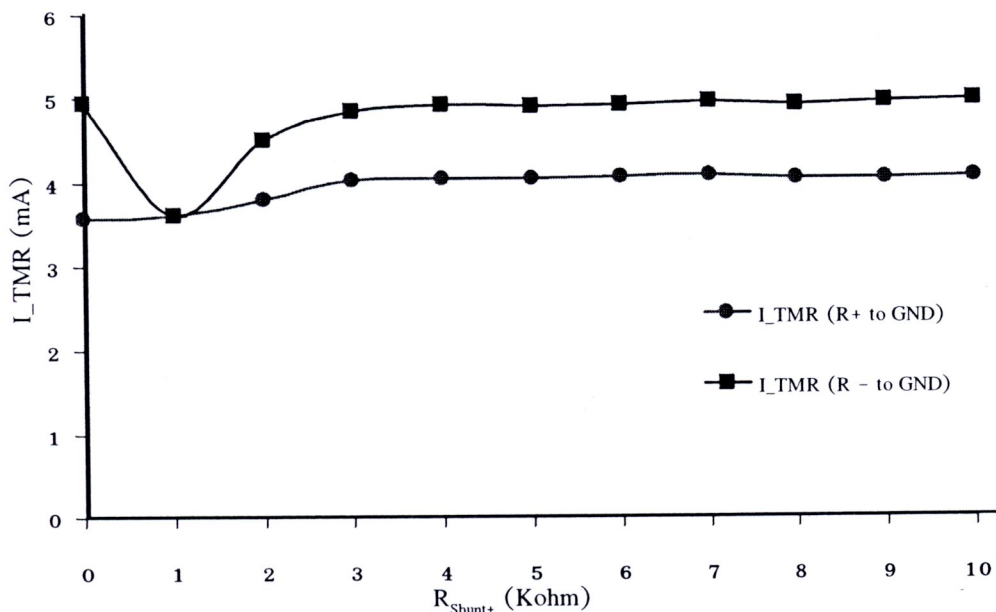
ภาพที่ 4.49 แสดงผลของ C_{FOS} ที่มีต่อกระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุ ในกรณีที่ 3-4 จากภาพที่ 4.49 (ก) พบว่า C_{FOS+} ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อกระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 3 แต่มีผลทำให้ กระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 4 ค่อยๆ เพิ่มขึ้น

ภาพที่ 4.49 (ข) แสดงผลของ C_{FOS-} ที่มีต่อกระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 3-4 ซึ่ง พบว่า C_{FOS-} ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อกระแสไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 4 แต่จะมีผลทำให้ กระแสที่ไหลผ่าน TMR ในกรณีที่ 3 มีขนาดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่า ขนาด C_{FOS-} ที่เพิ่มขึ้น ที่ผลทำให้กระแสไหลผ่าน TMR ได้มากขึ้น



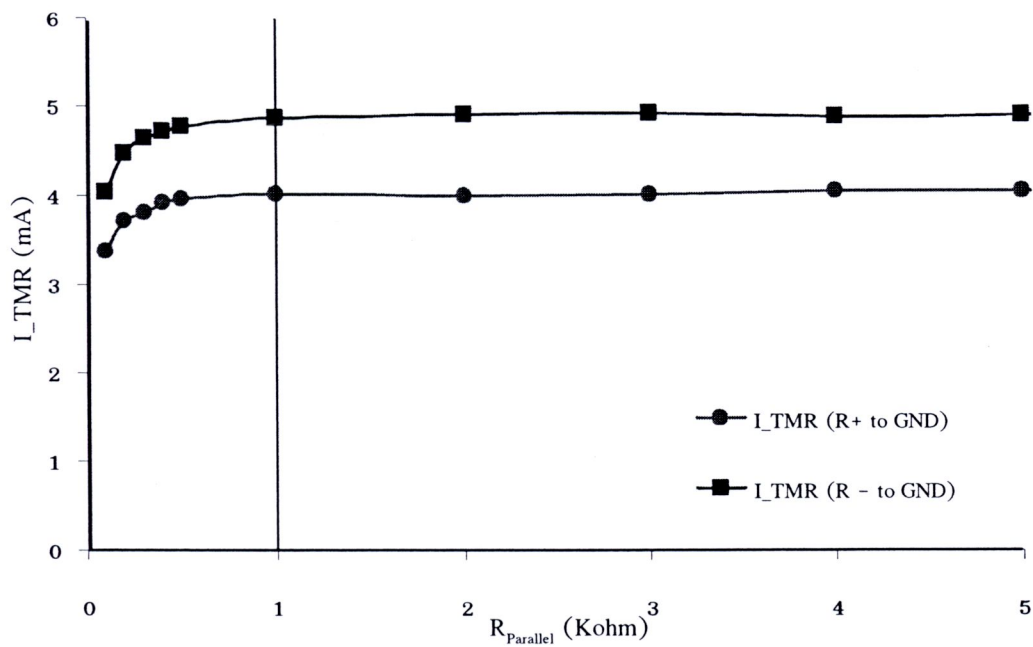
ภาพที่ 4.49 (ก) ผลของ C_{FOS+} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุ ขนาด 1.45 โวลต์ จาก CDM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน
 (ข) ผลของ C_{FOS-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคาย ประจุ ขนาด 1.45 โวลต์จาก จาก CDM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน

ภาพที่ 4.50 แสดงผลของ $R_{shunt+(-)}$ ที่มีต่อ กระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุ ในกรณีที่ 3- 4 จากภาพที่ 4.50 พบว่า กระแสไหลผ่าน TMR จากการคายประจุในกรณีที่ 3 จะมีขนาดต่ำกว่ากรณีที่ 4 ที่ทุกค่าของ $R_{shunt+(-)}$ จากภาพที่ 4.44 (ก) และ (ข) พบว่ากระแสที่ได้จากกรณีที่ 3 และ 4 จะค่อยเพิ่มขึ้นที่ ความต้านทาน $R_{shunt+(-)}$ ขนาดประมาณ 1-3 k Ω และจะคงที่ ที่ความต้านทานมากกว่า 4 k Ω



ภาพที่ 4.50 (ก) ผลของ R_{shunt+} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 1.45 โวลต์ จาก CDM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน
 (ข) ผลของ R_{shunt-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 1.45 โวลต์ จาก CDM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน

ภาพที่ 4.51 แสดงผลของ $R_{Parallel}$ ที่มีต่อ กระแสไหลผ่าน TMR ที่เกิดจากการคายประจุ
ในกรณีที่ 3 และ 4 ซึ่งพบว่า กระแสไหลผ่าน TMR ที่ความต้านทานต่ำๆมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามความ
ต้านทานที่สูงขึ้น แล้วเริ่มคงที่ ที่ขนาดความต้านทานมากกว่า 1 k Ω



ภาพที่ 4.51 ผลของ $R_{Parallel}$ ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุขนาด 1.45 โวลต์ จาก CDM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน