

บทที่ 2

วรรณกรรมและผลงานที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการเสนอวิธีการวิเคราะห์ความเสียหาย ที่เกิดขึ้นในหัวอ่านข้อมูลชนิดที่เอ็มอาร์ (TMR) โดยทำการวิเคราะห์ถึงความเสียหายในระดับหัวอ่านข้อมูล รวมไปถึง ความเสียหายที่เกิดขึ้นในระดับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็กชนิด TMR หรือ แผ่นฟิล์มบาง TMR ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงเนื้อหาทั้งหมดที่จะถูกกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ในบทนี้จะอธิบายถึงความรู้พื้นฐาน รวมไปถึงวรรณกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มจากการอธิบายถึง โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ การขนย้ายอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐาน ที่จะนำไปใช้สำหรับอธิบาย การเกิดปรากฏการณ์ TMR และความเสียหายที่เกิดขึ้นในแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR หลังจากนั้น จะอธิบายถึงโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล ผลของการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่มีต่อหัวอ่าน ผลของการต่อชนานที่มีต่อหัวอ่าน และท้ายสุด จะกล่าวถึง ความไม่เสถียรของการอ่านข้อมูลที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต

2.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Structure)

การอธิบายถึงคุณสมบัติของวัสดุ หรืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ในย่าน 1-1000 Angstrom จำเป็นที่จะต้องอธิบายโดยอาศัยหลักเกณฑ์ทางกลศาสตร์ควอนตัม ทั้งนี้ เนื่องจาก ความเป็นจริงที่ว่า วัสดุต่างๆ ประกอบขึ้นจากการการจับตัวของกลุ่มอะตอมโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้า ดังนั้นคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุนั้นๆ เป็นผลที่เกิดจากอัตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนภายในกลุ่มอะตอมนั้นๆ โดยปกติแล้ววิธีที่ใช้ในการศึกษาถึงคุณสมบัติของอิเล็กตรอนภายในวัสดุต่างๆ จะสามารถทำได้โดยอาศัยระเบียบการสมการพื้นฐาน (First Principle) ซึ่งเป็นหลักการที่ค่อนข้างสะดวก เนื่องจาก การคำนวณโดยอาศัยสมการพื้นฐานนั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวแปรอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่อาศัยเพียงการแก้สมการคลื่นสำหรับการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมในวัสดุนั้นๆ เท่านั้น การคำนวณโดยอาศัย สมการพื้นฐานมีได้หลายวิธี แต่ที่นิยมมากที่สุด คือ การคำนวณโดยอาศัย ฟังก์ชันความหนาแน่น (Density of State, DOS) หรือ ดอส (DOS) ซึ่งเป็นการคำนวณหา โครงสร้างระดับพลังงานและสถานะของอิเล็กตรอน หรือ ที่เรียกกันสั้น ๆ ว่า โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ ภายในวัสดุนั้นๆ

โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการอธิบายถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนภายใต้การจัดเรียงตัวกันของอะตอมในแบบต่างๆ โดยการอธิบายถึงโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุ ในโครงสร้างชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นแบบ ผลึก ก้อน ท่อนาโน หรือฟิล์มบางแม่เหล็ก สามารถทำได้โดยอาศัย โครงสร้างแถบ (Band Structure) ซึ่งโครงสร้างแถบนี้ ถูกสร้างมาจาก ทฤษฎีของบลอช (Bloch's Theorem) ดังนั้น เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับ โครงสร้างแถบ ในส่วนต่อไปจะทำการอธิบายถึง ทฤษฎีของบลอช โดยคร่าวๆ

สำหรับโครงสร้างในระดับอะตอมนั้น ของอิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่า ฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) เช่นเดียวกันกับ ทฤษฎีของบลอช ซึ่งกล่าวว่า ในระบบที่พลังงานศักย์มีลักษณะเป็นคาบ ฟังก์ชันคลื่นของระบบจะสามารถถูกเขียนให้อยู่ในรูปของ [11]

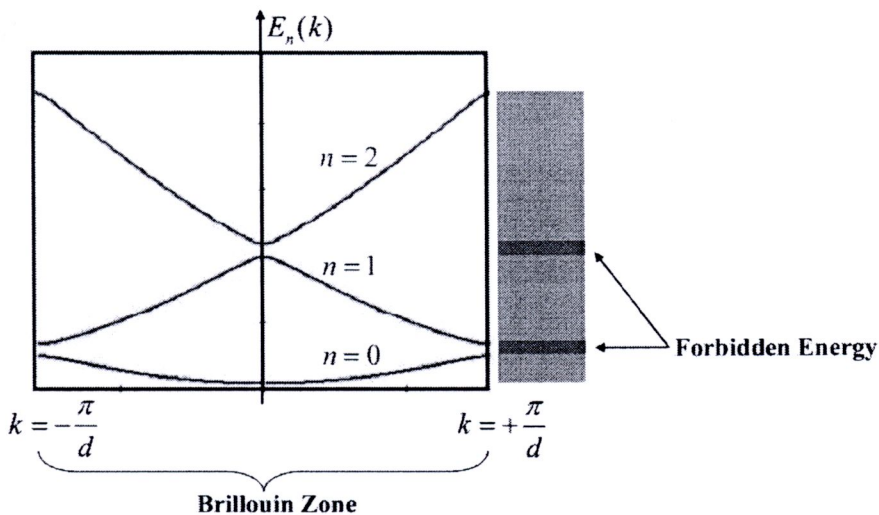
$$\psi_n(x; k) = e^{ikx} u_n(x; k) \quad (2.1)$$

โดยที่ $\psi_n(x; k)$ คือ ฟังก์ชันคลื่นของตัวแปร x ที่ขึ้นอยู่กับค่า k
 $u_n(x; k)$ คือ ฟังก์ชันคาบของตัวแปร x ที่ขึ้นอยู่กับค่า k

จากสมการที่ (2.1) จะสามารถสังเกตได้ว่า ทางด้านขวาของสมการที่ (2.1) นั้น ประกอบด้วย สอง องค์ประกอบ คือ $u_n(x; k)$ ซึ่งเป็นการบอกถึง ระดับพลังงานและการกระจายตัวของอนุภาค (ในที่นี้หมายถึง อิเล็กตรอน) ที่ถูกกำหนดโดย ดัชนี n ซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็ม และองค์ประกอบที่สองคือ e^{ikx} ซึ่งถูกกำหนด โดยดัชนี k ซึ่งเป็นตัวเลขจำนวนจริง ดัชนี k นี้ เป็นการบอกถึง โมเมนตัมเฉลี่ยของอนุภาคที่อยู่ใน ฟังก์ชันคลื่น $\psi_n(x; k)$ หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ดัชนี k เป็น ดัชนีที่ใช้บ่งบอกถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ใน ฟังก์ชันคลื่นนั้นๆ ดังนั้น พลังงานของระบบที่สนใจอยู่นั้น จะขึ้นอยู่กับ n และ k ตามสมการที่ (2.2)

$$E = E_n(k) \quad (2.2)$$

เมื่อทำการสร้างแผนภาพ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระดับพลังงาน $E_n(k)$ และ ดัชนี k จะได้ แผนภาพที่เรียกว่า โครงสร้างแถบ (Band Structure) ตามที่แสดงในภาพที่ 1



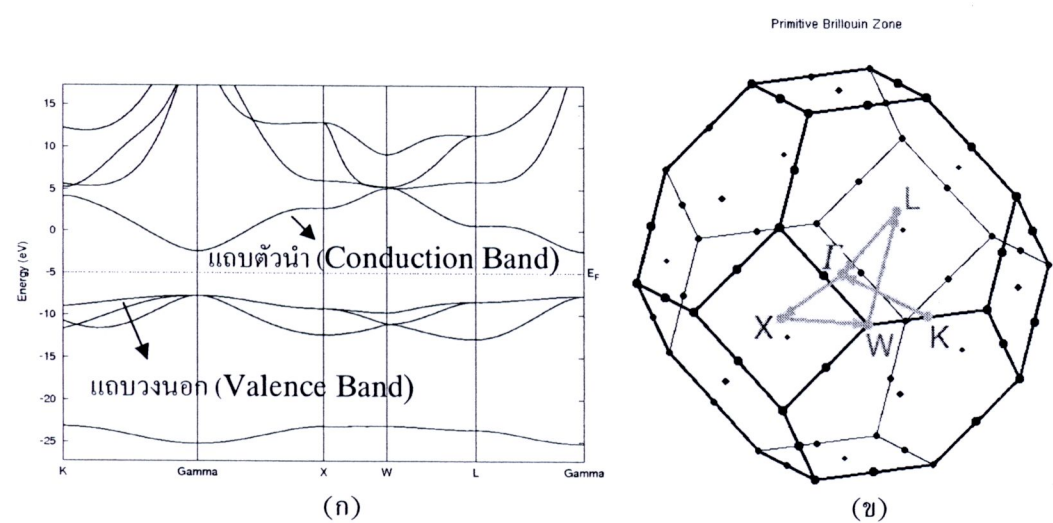
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างแถบ ของระบบ Kronig-Penney ซึ่งเป็นระบบขนาด 1 มิติ [11]

จากภาพที่ 2.1 ค่า n ในแนวแกนตั้งเป็นการบอกถึงชั้นของระดับพลังงานของที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง k ช่วงว่างของระดับพลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า พลังงาน Forbidden และเรียกช่องว่างที่เกิดขึ้นว่า ช่องว่าง พลังงาน (Energy Gap) [11] เนื่องจากระดับพลังงานที่เกิดขึ้นถูกกำหนดโดย ฟังก์ชันคาบที่ขึ้นอยู่กับค่า k นั้น ทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานและค่าดัชนี k ได้ในช่วงของ $-\frac{\pi}{d} \leq k \leq \frac{\pi}{d}$ ซึ่งจะถูก เรียกว่า ขอบเขต Brillouin (Brillouin Zone) [11] สำหรับโครงสร้างแถบในระบบ 1 มิติ ส่วนต่อไปจะเป็นการ

พิจารณาถึงโครงสร้างแถบในระบบ 3 มิติ หรือโครงสร้างแถบของผลึก (Crystal) ซึ่งโครงสร้างแถบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะหมายถึงโครงสร้างแถบในระบบ 3 มิติ เท่านั้น

การคำนวณหาระดับพลังงานสำหรับโครงสร้างแถบของผลึก ทำได้โดยอาศัยหลักการเดียวกันกับการคำนวณหาโครงสร้างแถบในระบบ 1 มิติ แต่มีความแตกต่างกันในเรื่องของ ค่าดัชนี k ซึ่งในโครงสร้างแถบของผลึกค่าดัชนี k จะถูกพิจารณาเป็น เวกเตอร์ (Vector) หรือ $\vec{k}$ ที่ชี้ไปยังทิศทางต่างๆ

ดัชนี k เป็นตัวที่ใช้กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในทำนองเดียวกัน สำหรับโครงสร้างแถบของผลึกนั้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง ที่ถูกกำหนดโดยจุดต่างๆ ในผลึก ซึ่งจุดเหล่านี้ จะกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในผลึก (ตามเงื่อนไขต่างๆ) ซึ่งจะถูกกำหนดโดยตัวแปรต่างๆ ขอบเขตทั้งหมดที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ในผลึก จะถูกเรียกว่า ขอบเขต Brillouin ที่ 1 (First Brillouin Zone) ตามตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 2.2



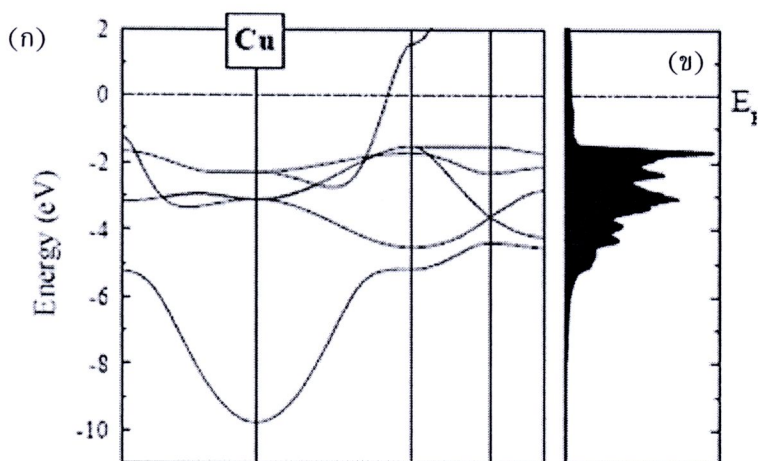
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างอิเล็กตรอนิกส์ของ สารหนู
(ก) โครงสร้างแถบของ สารหนู (Magnesium Oxide, MgO) [12]
(ข) ขอบเขต Brillouin ที่ 1 สำหรับโครงสร้างแถบ ในภาพที่ 2.2 (ก) [12]

ภาพที่ 2.2 แสดงถึงโครงสร้างแถบ และตำแหน่งที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในขอบเขต Brillouin ที่ 1 ของสารหนู โดยที่ภาพ 2.2(ก) แสดงถึง โครงสร้างแถบของสารหนู ซึ่งแถบพลังงานแต่ละแถบของสารหนู เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังจุดต่างๆ ภายใน ขอบเขต Brillouin ที่ 1 ที่ถูกกำหนดไว้ตามที่แสดงในภาพที่ 2.2 (ข) โดยที่มีขนาดระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy, E_F) ประมาณ 5 eV เมื่อพิจารณาที่จุด แกมมา จะพบว่าแถบวงนอก (Valence Band) มีระดับพลังงานประมาณ -8 eV ในขณะที่ แถบตัวนำจะถูพบที่ระดับพลังงานประมาณ 2.5 eV โดยทั่วไปแล้ว ในการวิเคราะห์หาค่าการวิเคราะห์ถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง แกมมา ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของขอบเขต Brillouin ที่ 1 ตามที่แสดงในภาพที่ 2.2 (ข)

กลุ่มของแถบภายในโครงสร้างแถบ จะถูกแบ่งออกเป็นสองชั้นใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ ชั้นด้านนอก และชั้นตัวนำ ซึ่งถูกแบ่งออกโดย ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi Energy) ซึ่งแสดงถึงระดับพลังงานต่ำที่สุดที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ ชั้นพลังงานที่มีแถบพลังงานต่ำกว่าพลังงานเฟอร์มี จะถูกเรียกว่าชั้นด้านนอก ซึ่งเป็น

ชั้นที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ และ เรียกแถบแรกที่มีระดับพลังงานต่ำกว่าพลังงานเฟอร์มีว่า แถบด้านนอก (Valence Band) และในทางตรงข้าม ชั้นพลังงานที่มีแถบพลังงานสูงกว่า พลังงานเฟอร์มี จะถูกเรียกว่า ชั้นตัวนำ (Conduction Band) ช่องว่างระหว่างแถบวงนอกและแถบตัวนำ จะถูกเรียกว่าเป็น แถบว่าง ซึ่งในกรณีของภาพที่ 2.2 นั้น เมื่อพิจารณาที่ จุดแกมมา จะพบว่าไม่มีแถบว่างค่อนข้างกว้างทั้งนี้เนื่องจากสารหนูมีคุณสมบัติเป็นฉนวนนั่นเอง

โครงสร้างแถบที่เกิดจากโครงสร้างของอะตอมที่มีความไม่ซับซ้อนมาก ดังเช่นในกรณีของโครงสร้างแถบของสารหนูตามที่แสดงในภาพที่ 2.2 นั้น จะสามารถทำให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานได้โดยง่าย แต่ในทางตรงข้ามโครงสร้างแถบที่เกิดจาก อะตอมหลายๆอะตอมมารวมตัวกัน ปรากฏเป็นแถบหลายแถบจำนวนมากซึ่งยากต่อวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัย ความหนาแน่นของสถานะ (Density of State: DOS) จึงค่อนข้างที่จะสะดวกกว่า ซึ่ง DOS เป็นการบอกถึง จำนวนสถานะที่อนุญาตนั้นๆสามารถเกิดขึ้นในในแต่ละระดับพลังงาน [11] ตามที่แสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของทองแดง

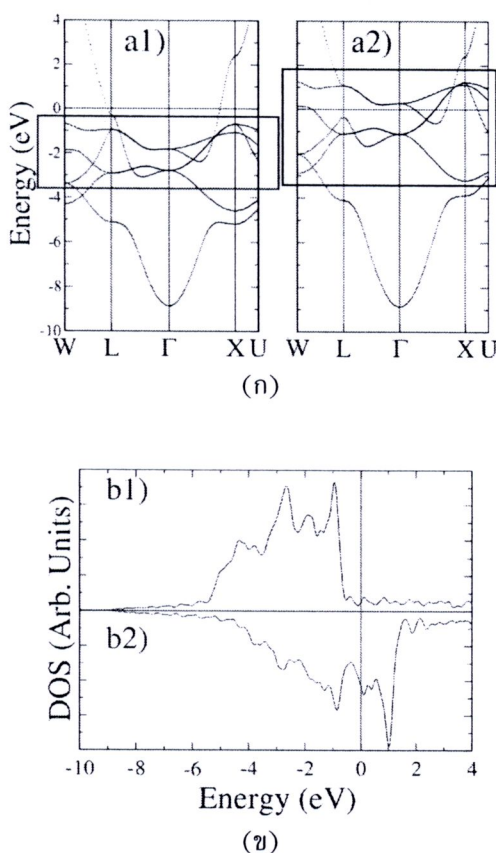
(ก) โครงสร้างแถบของทองแดง [13]

(ข) ความหนาแน่นสถานะของ ทองแดง

DOS มีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะนั้นๆ โดยที่ ถ้า DOS มีค่ามาก จะสามารถบ่งชี้ได้ว่า ที่สถานะนั้นมีโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนจำนวนมาก นอกจากนี้เครื่องหมายของ DOS ยังใช้บอกถึง สถานะการสปินของอิเล็กตรอน หรือที่เรียกย่อๆว่า สปิน โดยที่ ถ้า DOS มีค่ามากกว่าศูนย์ จะหมายถึง DOS รวมไปถึงจำนวนของสปินในทิศชี้ขึ้น และ ถ้า DOS มีค่าน้อยกว่าศูนย์ จะหมายถึง DOS รวมไปถึงจำนวนของสปินในทิศชี้ลง

โดยปรกติแล้ว DOS ของตัวนำ หรือ ฉนวนนั้น จะมีความสมมาตรกัน ซึ่งหมายความว่า จำนวนของสปินอิเล็กตรอนในทิศชี้ขึ้น มีจำนวนเท่ากับ จำนวนของสปินอิเล็กตรอนในทิศชี้ลง ดังเช่น กรณีของทองแดงที่แสดงในภาพที่ 2.3 เป็นต้น แต่ในกรณีสารแม่เหล็กนั้น จะมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ DOS ของสารแม่เหล็กในด้านบวก และ ด้านลบ จะไม่สมมาตร ซึ่งหมายความว่า จำนวนของสปินอิเล็กตรอนในทิศชี้ขึ้น มีขนาดไม่เท่ากับ จำนวนของอิเล็กตรอนสปินในทิศชี้ลง หรือที่เรียกว่า การโพลาไรซ์ของสปิน (Spin Polarization) [13]

ปัจจัยสำคัญอีกข้อหนึ่ง คือ ระดับพลังงาน และ DOS ของวัสดุแม่เหล็กจะถูกกำหนดโดย ทิศทางของความเป็นแม่เหล็กหรือ แมกเนไทเซชัน (Magnetization) ถ้า แมกเนไทเซชัน ชี้ไปในทิศขึ้น จะเป็นการบอกว่า DOS หรือ จำนวนอิเล็กตรอนสปินขึ้น มีจำนวนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนสปินลง และในทางตรงข้าม ถ้า สภาพความเป็นแม่เหล็กมีทิศทางชี้ลง เป็นการบ่งบอกว่า DOS หรือ จำนวนอิเล็กตรอนสปินลง นั้น มีจำนวนมากกว่า จำนวนอิเล็กตรอนสปินขึ้น



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างอิเล็กตรอนิกส์ของวัสดุคอปอลต์ (Cobalt)

(ก) แถบพลังงานของวัสดุคอปอลต์ ด้านซ้ายจะเป็น โครงสร้างแถบสำหรับสปินขึ้น ซึ่งนิยมเรียกว่า ย่านหลัก ส่วนด้านขวา จะเป็นโครงสร้างแถบของ สปินลง หรือที่เรียกว่า ย่านรอง จะสามารถสังเกตเห็นว่า แถบพลังงานของย่านรองมีการเลื่อนขึ้น ซึ่งพลังงานที่เลื่อนไปนี้ จะเรียกว่า ค่าคงที่การแยก (Splitting Constant) [13] ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุชนิดนั้น ๆ

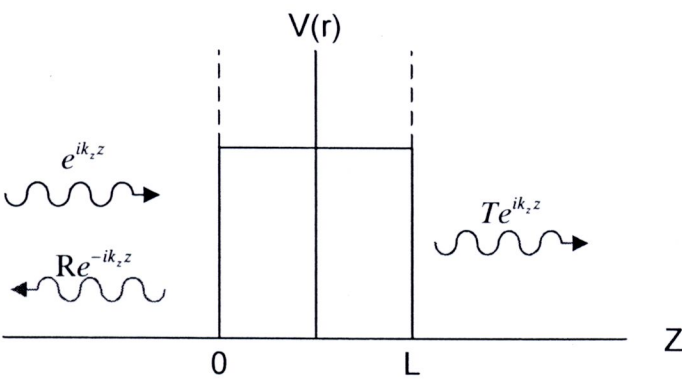
(ข) ความหนาแน่นสถานะ ของโครงสร้างแถบจากภาพ (ก)

คุณสมบัติ การสปินโพลาไรซ์ของวัสดุแม่เหล็กนี้ มีความสำคัญมาก เนื่องจาก เมื่อนำเอา สารแม่เหล็กสองชิ้น ที่มีทิศทางของแมกเนไทเซชันชี้ไปในทิศทางเดียวกัน หรือตรงข้ามกัน มาประกบเข้ากับ ฉนวน จะทำให้สปินอิเล็กตรอน ของสารแม่เหล็กที่อยู่อีกด้านหนึ่ง ไหลลอดผ่านชั้นฉนวน ไปยังสารแม่เหล็กที่อยู่ในด้านตรงข้าม ทำให้เกิดเป็นความต้านทานแม่เหล็ก ประเภทลอดผ่าน (Tunneling Magnetoresistance : TMR)

ซึ่งรายละเอียด เกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์ TMR นี้จะมีความเกี่ยวข้องกับ การขนย้ายอิเล็กตรอน (Electronics Transport) ดังนั้นก่อนที่จะอธิบายถึงการเกิดปรากฏการณ์ TMR ซึ่งจะถูกอธิบายในหัวข้อที่ 2.4 ได้นั้น จำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึง ทฤษฎีเบื้องต้นของการขนย้ายอิเล็กตรอน ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

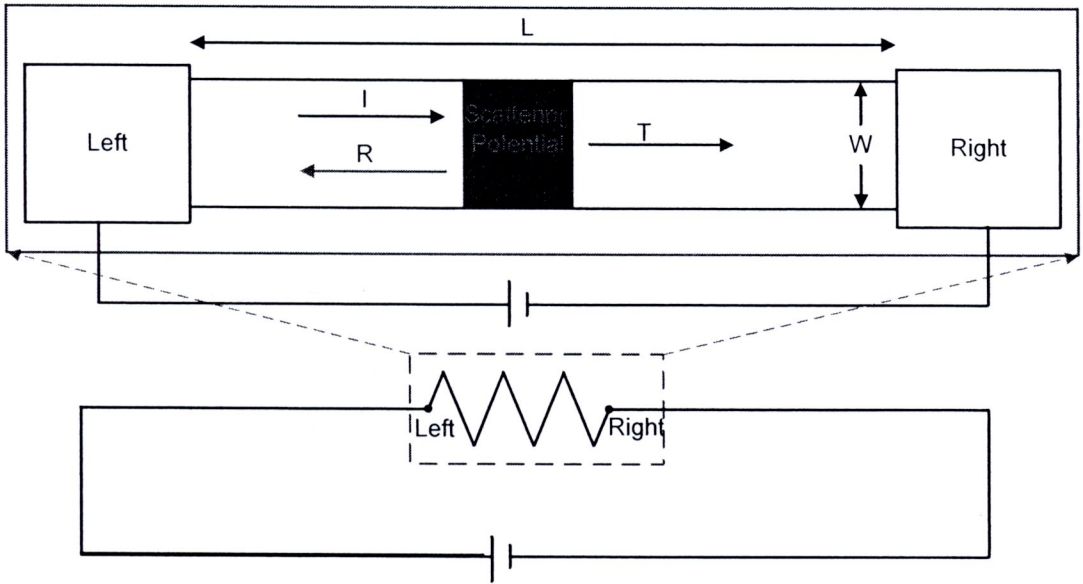
2.3 ทฤษฎีการขนย้ายอิเล็กตรอนสปีน

อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าไปในบริเวณที่มีกำแพงศักย์ (Potential wall) จะเกิดปรากฏการณ์ การกระเจิงของอิเล็กตรอน(Scattering) กล่าวคือ เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนกลุ่มหนึ่งพุ่งเข้า (Incident Electron) ไปปะทะกับบริเวณที่มีกำแพงศักย์ ($V(r)$) จะมีกลุ่มอิเล็กตรอนบางตัวสะท้อนกลับมา เรียกว่าอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (Reflection Electron) และเรียกกลุ่มอิเล็กตรอนที่สามารถผ่านไปได่ว่า อิเล็กตรอนส่งผ่าน (Transmission Electron) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับปรากฏการณ์การกระเจิงนี้ ถูกนำมาใช้อธิบายการขนย้ายอิเล็กตรอน ในอุปกรณ์ที่มีมิติต่ำกว่าย่านของ Phase Coherent (100-200 อังสตรอม)



ภาพที่ 2.5 แนวคิดพื้นฐานของการเกิด ปรากฏการณ์การกระเจิงของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนตกกระทบถูกแทน ด้วย $e^{ik_z z}$ อิเล็กตรอนส่งผ่านถูกแทนด้วย $Te^{ik_z z}$ และ อิเล็กตรอนสะท้อนกลับถูกแทนด้วย $Re^{ik_z z}$ [11]

ภาพที่ 2.6 เป็นแบบจำลองของอุปกรณ์ ที่ประกอบไปด้วย ขั้วอิเล็กโทรด (Electrode) สองขั้ว คือ ขั้วอิเล็กโทรดด้านซ้ายและ ขั้วอิเล็กโทรดด้านขวา ที่ถูกต่อเข้ากับความต้านทาน ที่มีความยาว L และ ความกว้าง w โดยที่ อิเล็กโทรดทั้งด้านซ้ายและด้านขวามีอิเล็กตรอนสะสมอยู่ เมื่อมีการจ่ายแรงดัน จะมีผลทำให้ ศักย์ทางเคมีของที่สะสมในอิเล็กโทรดด้านซ้าย (μ_L) มีขนาดสูงกว่า ศักย์ทางเคมีที่สะสมอยู่ในอิเล็กโทรดด้านขวา (μ_R) จึงมีผลให้ กลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกสะสมอยู่ในอิเล็กโทรดด้านซ้าย เคลื่อนที่เข้าไปใน ย่านการกระเจิง เมื่ออิเล็กตรอนพุ่งเข้าไปยังบริเวณที่มีศักย์การกระเจิง จะมีเพียงอิเล็กตรอนบางตัวที่มีโอกาสจะไหลผ่านไปยังอิเล็กโทรดด้านขวาได้ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และ โอกาสที่อิเล็กตรอนจะผ่านไปได้ สามารถอธิบายโดยอาศัยสูตรของ Luadder-Buttiker [14] ตามที่แสดงในสมการที่ (2.3)



ภาพที่ 2.6 ขบวนการขนย้ายอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในความต้านทาน โดยที่อิเล็กตรอนจากขั้วด้านซ้าย (Left Electrode) เคลื่อนที่ ไปยัง ขั้วด้านขวา (Right Electrode) ผ่านย่านการกระเจิง ที่มีความยาว L และ มีความกว้าง W โดยที่ขนาดของ L และ W อยู่ในย่านPhase Coherent บริเวณเข้มแสดง ศักย์การกระเจิง ซึ่งเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนตกกระทบ (I) เกิด ความน่าจะเป็นที่จะมีอิเล็กตรอน เคลื่อนที่ผ่าน (T) และ ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะถูกสะท้อนกลับ(R) ด้านล่าง ความต้านทานที่ถูกต่อเข้ากับแรงจ่ายแรงดัน

$$I_{LR} = \frac{e}{h} T (\mu_L - \mu_R) \tag{2.3}$$

โดยที่ e คือ จำนวนอิเล็กตรอน
h คือ ค่าคงที่ของพลังค์
T คือ ความน่าจะเป็นที่จะมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านไปได้

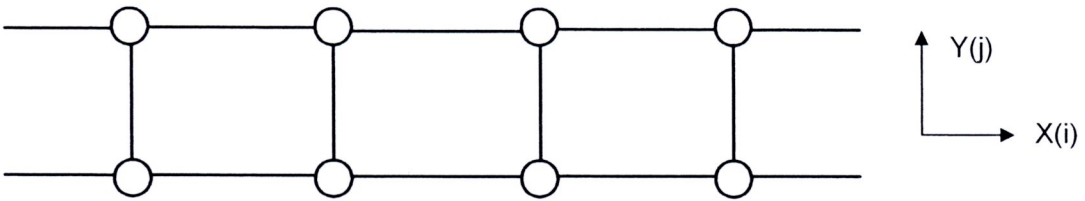
จากสมการที่ (2.3) นี้ ทำให้ได้ ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำไฟฟ้าและโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้ ตามสมการที่ (2.4)

$$G = \frac{2e^2}{h} T \tag{2.4}$$

โดยที่ G คือ สภาพการนำไฟฟ้า

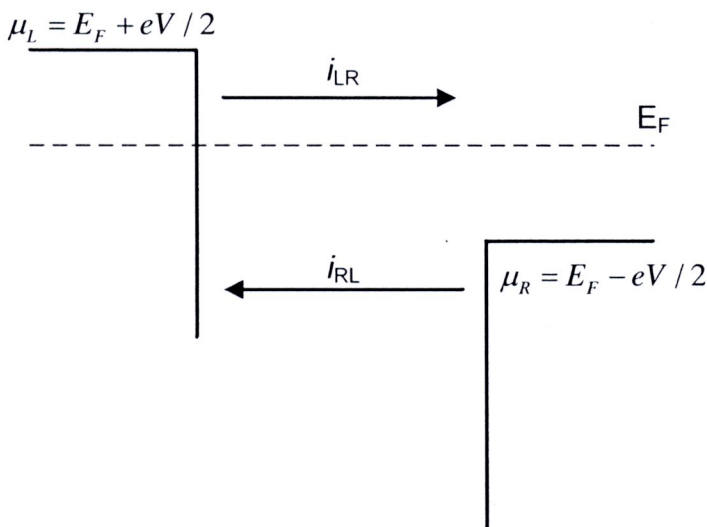
สมการที่ 2.4 นี้เป็นสภาพการนำไฟฟ้า ในโครงสร้างแบบ 1 มิติ ซึ่งถ้าพิจารณา การขนถ่ายอิเล็กตรอนสำหรับระบบโครงสร้างสองมิติ ตามที่แสดงในภาพที่ 2.7 นั้น พบว่าโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้ สามารถถูกพบได้ทั้งในแนวแกน x และ แนวแกน y ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความนำในโครงสร้างสองมิติ และความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้ จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.5)

$$G = \frac{2e^2}{h} \sum_{ij} T_{ij} \quad (2.5)$$



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของผลึกไฮโดรเจน ในระบบสองมิติ [13]

จากสมการที่ (2.3) ถึง (2.5) จะพบว่า ขนาดของกระแสรวมไปถึงสภาพการนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับโอกาสที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกโอกาสที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านไปได้ใหม่ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission Coefficient) เมื่อพิจารณาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์แล้วพบว่าขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนั้นขึ้นอยู่กับระดับชั้นพลังงาน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในเชิงระดับชั้นพลังงานได้เป็นสามารถเขียนได้ดังนี้ $T=T(E)$



ภาพที่ 2.8 การขนย้ายอิเล็กตรอนเมื่อมีการจ่ายแรงดันขนาด V โวลต์ คร่อมระหว่างอิเล็กโทรดด้านซ้ายและอิเล็กโทรดด้านขวา โดยที่ให้อิเล็กโทรดด้านซ้ายเป็นขั้วบวกและอิเล็กโทรดด้านขวาเป็นขั้วลบ [15]

ต่อมา จะทำการอธิบายถึง ขบวนการขนย้ายอิเล็กตรอนภายใต้สถานะที่มีการจ่ายแรงดันตามที่แสดงในภาพที่ 2.8 เมื่อมีการจ่ายแรงดันขนาด V โวลต์ คร่อมระหว่างอิเล็กโทรดด้านซ้ายและอิเล็กโทรดด้านขวา มีผลทำให้ ศักย์ทางเคมีของอิเล็กโทรดทางด้านซ้ายมีขนาดเพิ่มขึ้น $eV/2$ หรือ $\mu_L = E_F + eV/2$ ในทางตรงข้าม

ศักย์ทางเคมีของอิเล็กโทรดทางด้านขวาจะลง $eV/2$ หรือ $\mu_R = E_F - eV/2$ ซึ่งถ้าพิจารณาที่ระดับชั้นพลังงาน E ใดๆ แล้ว กระแสหรือ อิเล็กตรอนฟลักซ์ ที่ไหลจากอิเล็กโทรดด้านซ้าย (ขวา) ไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา (ซ้าย) สามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง อิเล็กตรอนฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ตามสูตรของ Ladduer – buttiker ได้ตามสมการที่ (2.6) และ (2.7) ตามลำดับ

$$i_{LR} = \frac{2e}{h} \left[\sum_{ij} T_{ij}(E) \right] F_L(E) \quad (2.6)$$

$$i_{RL} = \frac{2e}{h} \left[\sum_{ij} T'_{ij}(E) \right] F_R(E) \quad (2.7)$$

โดยที่ $\sum_{ij} T_{ij}(E)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวม ที่ระดับพลังงาน E ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ จาก อิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา

$\sum_{ij} T'_{ij}(E)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรวม ที่ระดับพลังงาน E ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ จาก อิเล็กโทรดด้านขวาไปยังอิเล็กโทรดด้านซ้าย

$F_{L,R}(E)$ คือ การกระจายพลังงานเฟอร์มีของอิเล็กโทรดด้านซ้ายและด้านขวา ซึ่งคำนวณได้จาก สมการ (2.8)

$$F_{L,R}(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - \mu_{L,R})/k_B T}} = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F \mp eV/2)/k_B T}} \quad (2.8)$$

โดยที่ k_B คือ ค่าคงที่ Boltzman
 T คือ อุณหภูมิ

ขนาดของฟลักซ์อิเล็กตรอนทั้งหมด ที่ระดับพลังงาน E จะมีขนาดเท่ากับ $i_{LR} - i_{RL}$

$$i(E) = \frac{2e}{h} \left[\sum_{ij} T_{ij}(E) F_L(E) - \sum_{ij} T'_{ij}(E) F_R(E) \right] \quad (2.9)$$

และสุดท้ายกระแสที่ไหลจากอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา สามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรต $i(E)$ ดังสมการที่ (2.9) และเนื่องจากระบบที่พิจารณาอยู่นี้ มีความสมมาตรกันกล่าวคือ ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ ดังนั้น $T_{ij}(E) = T'_{ij}(E)$ จากเงื่อนไขเหล่านี้ ทำให้กระแสทั้งหมดสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (2.10)

$$I = \frac{2e}{h} \int \sum_{ij} T_{ij}(E) [F_L(E) - F_R(E)] \quad (2.10)$$



จากสมการที่ (2.10) นี้ ทำให้สามารถคำนวณ และหาความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสและแรงดันของอุปกรณ์ได้ นอกจากนี้ สิ่งสำคัญที่ได้จาก สมการนี้คือ ทำให้ทราบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับพลังงานเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานและแรงดัน เขียนในเชิงคณิตศาสตร์ได้เป็น $T(E,V)$ [15-16]

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านนี้ ถือได้ว่าเป็นหัวใจหลักของการขนย้ายอิเล็กตรอน โดยที่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าต่ำ จะทำให้ได้ขนาดของกระแสที่ต่ำ และในทางตรงข้ามถ้าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าสูง จะทำให้ขนาดของกระแสที่มีค่าสูงตามไปด้วย

ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการขนย้ายอิเล็กตรอนในระดับสองมิติ ในส่วนของการคำนวณและการอธิบาย ขบวนการขนย้ายอิเล็กตรอนในระบบสามมิตินั้น สามารถอธิบายโดยอาศัยการคำนวณ วิธี NEGF (Non Equilibrium Green Function) [13,15-21] ซึ่งยังคง ใช้วิธีการคำนวณกระแสตามสูตรของ Luadder-Buttiker โดยที่ ขนาดของค่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน เมื่อคำนวณโดยอาศัยระเบียบวิธี NEGF จะมีค่าเป็น

$$T(E) = \text{Tr} [\Gamma_L G_M^\dagger \Gamma_R G_M] (E) \quad (2.11)$$

โดยที่ Tr คือ เมตริกซ์ทะแยง

Γ_L คือ แรงคู่ควบจาก อิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังบริเวณที่เกิดการกระเจิง

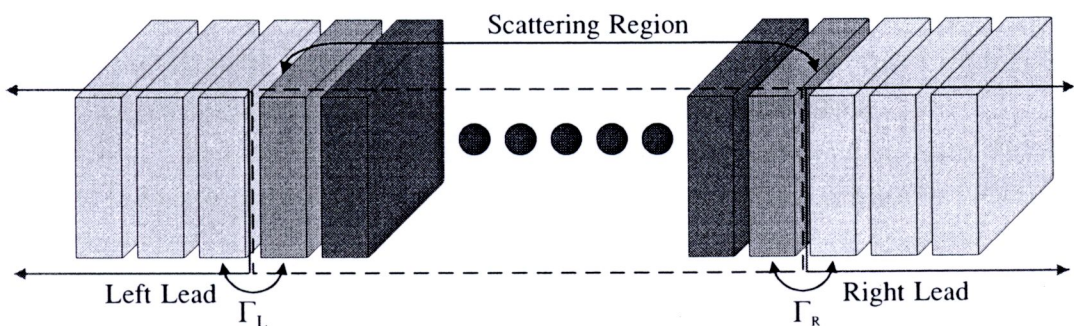
Γ_R คือ แรงคู่ควบจาก อิเล็กโทรดด้านขวาไปยังบริเวณที่เกิดการกระเจิง

G_M^R คือ กรีนฟังก์ชันพื้นผิว ของ อิเล็กโทรดด้านซ้ายที่เชื่อมอยู่กับ บริเวณที่เกิดการ

กระเจิง

G_M^R คือ กรีนฟังก์ชันพื้นผิว ของ อิเล็กโทรดด้านขวาที่เชื่อมอยู่กับ บริเวณที่เกิดการ

กระเจิง



ภาพที่ 2.9 อุปกรณ์ในระดับอะตอม (Atomistic) ที่มีย่านการกระเจิง ขั้วด้านซ้าย และขั้วด้านขวา [22]

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ทำให้ สามารถอธิบายความหมายในทางปฏิบัติ ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน เพิ่มเติมได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ที่ พลังงาน E ใดๆ จะสัมพันธ์กับ ขนาดความแรง ของแรงคู่ควบ ที่กระทำจากอิเล็กโทรดด้านซ้ายไปยังอิเล็กโทรดด้านขวา ที่ระดับพลังงาน E นั้นๆ ได้อีกด้วย

2.4 แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR

โดยปกติแล้วกระแสทางไฟฟ้า จะไม่สามารถไหลผ่านชั้นฉนวนได้ แต่ในกรณีที่ชั้นฉนวนมีความบางในระดับหน่วย อังสตรอม ($^{\circ}\text{A}$, $1^{\circ}\text{A} = 10^{-10} \text{ m}$) กระแสจะสามารถลอดผ่านชั้นฉนวนได้ โดยขบวนการขนถ่ายอิเล็กตรอนแบบทะลุ (Ballistic Transport) [23] ดังนั้นเมื่อ ชั้นฉนวนถูกประกบโดยสารแม่เหล็ก จะมีผลทำให้ กระแสที่เกิดจากขบวนการสปินโพลาไลเซชัน ไหลลอดผ่านชั้นฉนวน และเกิดเป็นความต้านทานทางแม่เหล็ก TMR โดยที่ขนาดของความต้านทานทางแม่เหล็กประเภท TMR จะขึ้นอยู่กับมุมของแมกเนโตเซชันระหว่างสารแม่เหล็กทั้งสองด้าน

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เป็นความต้านทานแม่เหล็กชนิด TMR ที่เกิดจากแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบ แมกเนติกส์ทันเนลลิงจังก์ชัน (Magnetic Tunneling Junction: MTJ) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบพื้นฐานและ นิยมใช้ในอุปกรณ์เก็บข้อมูล นอกจากนี้ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการค้นพบว่า TMR สามารถพบได้จากโครงสร้างแบบอื่น ๆ เช่น วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวกรองการสปิน (Spin Filter) [23] วัสดุประเภทกึ่งตัวนำ [14] และ วัสดุประเภทไฟฟ้าเฟอร์โร (Ferroelectric) [25]

2.4.1 แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR

แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR ได้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี 1975 โดยที่สัดส่วน TMR (TMR Ratio) ที่ถูกวัดได้มีขนาดเพียง 20% ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง [26] แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR ที่อุณหภูมิห้องได้ถูกผลิต (Fabrication) เป็นผลสำเร็จ ในปี 1995 โดย Miyazaki [27] และ Moodera [18] โดยในช่วงเวลานั้นยังคงใช้ สาร Al-O เป็นชั้นฉนวน ในปี 2001 Butter [29] ได้ทำการศึกษา โครงสร้างของแผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ผลิต MgO เป็นฉนวน โดยอาศัยการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ และทำให้ทราบว่า แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ใช้ผลิต MgO เป็นฉนวนนั้น สามารถให้ขนาดของ TMR ได้สูง 1000% [29] ซึ่งแนวคิดจากการคำนวณดังกล่าว ได้ถูกนำไปทดลองใช้ในการปลูกแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR จนกระทั่งในปี 2004 S.S.P. Parkin [30] และ Yuasa [31] ได้ผลิต แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR โดยใช้ผลิต MgO เป็นฉนวน ได้เป็นผลสำเร็จ และ ในปี 2005 [32] แผ่นฟิล์ม TMR ที่ใช้ CoFeB เป็นอิเล็กโทรด และ MgO เป็นฉนวน มีขนาดสูงถึง 230% ได้ถูกผลิตเป็นผลสำเร็จ ทำให้แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ใช้ CoFeB เป็นอิเล็กโทรด และ MgO เป็นฉนวน นั้นถูกใช้เป็นตัวตรวจจับ สำหรับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลจนถึงปัจจุบัน

ในเชิงของการประยุกต์ใช้นั้น ได้มีการทดลองใช้ แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR ที่มี Al-O เป็นฉนวน ในหัวบันทึกข้อมูลในเมื่อ 2002 [33] โดยหัวบันทึก TMR ที่สามารถใช้สำหรับ ฮาร์ดดิสก์ที่มีความจุมากกว่า 150 Gbit/inch ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกในปี 2004 [34] และ ในปี 2006 [35] แผ่นฟิล์มบาง TMR ได้ถูกใช้เป็นหัวบันทึกข้อมูล สำหรับฮาร์ดดิสก์ ในเชิงพาณิชย์ที่มีความจุขนาด 300 Gbit/inch จนกระทั่งปัจจุบันนี้ แผ่นฟิล์มบาง TMR ได้ถูกใช้เป็นอุปกรณ์หลัก ที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั่วไป และ เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ ความจุข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถเพิ่มขึ้นได้มากกว่า 1Tbit/inch [31]

โครงสร้างพื้นฐานของแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR ประกอบไปด้วย ชั้นสารแม่เหล็กประเภทเฟอร์โรแมกเนติกส์ (Ferromagnetic) สองชั้น ประกอบด้วย 1) ชั้นอิสระ (Free Layer) ที่ทิศทางของ แมกนีโตเซชัน ของชั้นอิสระนี้ จะเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็กจากภายนอก 2) ชั้นถูกบังคับ (Pin Layer) แมกนีโตเซชันของชั้นถูกบังคับ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้โดยสนามแม่เหล็กจากภายนอก และจะทำหน้าที่แสดงทิศทางอ้างอิงให้กับแผ่นฟิล์มบางทางแม่เหล็ก และ ชั้นฉนวน (Insulator) ซึ่งจะถูกขนานโดย ชั้นอิสระ และ ชั้นถูกบังคับ ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก ป้อนให้กับ แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก จะมีผลทำให้ แมกเนโตเซชัน ของชั้นอิสระหมุนทำมุมกับแมกเนโตเซชันของชั้นบังคับ เนื่องจากปริมาณของกระแสที่

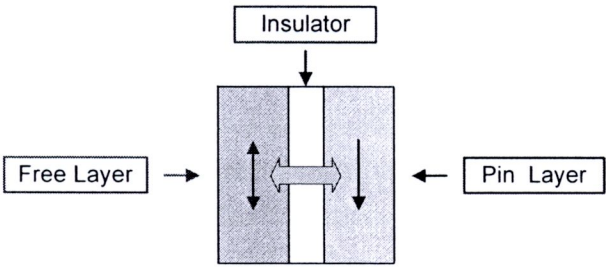
สามารถไหลผ่านชั้นฉนวนได้นั้น ขึ้นอยู่กับ ทิศทางระหว่างแมกเนโตเซชันของชั้น อีสระ และ ชั้นบังคั๊บ ในกรณี ที่ แมกเนโตเซชันของชั้นอีสระ ขนานกับ แมกเนโตเซชันของชั้นบังคั๊บ จะส่งผลให้กระแสไหลผ่านชั้นฉนวนได้มาก เรียกว่ากระแสในสภาวะขนาน (I_p) ในทางตรงข้าม ถ้า แมกเนโตเซชันของชั้นอีสระเรียงตัวอยู่ในทิศทางตรง ข้ามกับชั้นบังคั๊บ ปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านชั้นฉนวน จะมีปริมาณน้อย เรียกว่า กระแสในสภาวะตรงข้าม (I_{AP}) ดังนั้น สัดส่วน TMR จะมีค่าเป็น

$$\text{TMR Ratio} = \frac{I_p - I_{AP}}{I_{AP}} \tag{2.12}$$

ซึ่ง สามารถเขียนในรูปของความต้านทานได้เป็น

$$\text{TMR Ratio} = \frac{R_{AP} - R_p}{R_p} \tag{2.13}$$

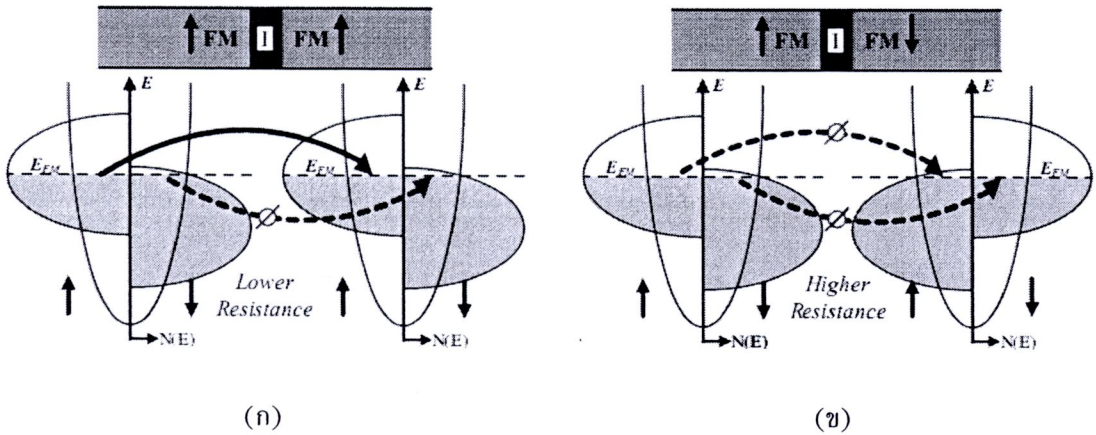
โดยที่ R_{AP} คือ ความต้านทานในสภาวะตรงข้าม
 R_p คือ ความต้านทานในสภาวะขนาน



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของแผ่นฟิล์มแม่เหล็ก TMR

การเกิดปรากฏการณ์ TMR สามารถอธิบายได้โดยอาศัย แบบจำลองของ Jullier ซึ่งได้ถูก นำเสนอไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975 Jullier [37] อาศัย DOS ในการอธิบายถึง ปริมาณของสปินหมุนขึ้น และสปิน หนูลง ที่ถูกขนย้ายจาก วัสดุแม่เหล็กฝั่งซ้าย ผ่านชั้นฉนวนไปยัง วัสดุแม่เหล็กฝั่งขวา

ข้อสมมุติฐานของ Jullier ประกอบไปด้วยข้อสมมุติฐานที่สำคัญ 2 ข้อ คือ ข้อแรก สปินจะไม่ มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางในขณะที่ลอดผ่านชั้นฉนวน และ ข้อที่สอง อิเล็กตรอนที่ลอดผ่านฉนวนจะถูกพาไปยัง ย่านที่มีสภาวะเดียวกันกับสถานะของอิเล็กตรอนตัวนั้น กล่าวคือ อิเล็กตรอนสปินขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังย่านที่สปิน ขึ้น และตรงข้าม อิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะสปินลง จะถูกพาไปยังย่านที่มีสปินลง



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง DOS และการเกิดสปินโพลาไลเซชัน เมื่อ ทิศทางของแมกเนตไดเซชันของชั้น เฟอร์โรแมกเนติกส์อยู่ใน สภาวะ ตรงข้าม (ก) และ ตรงข้าม (ข) ในที่นี้ จะเรียก เฟอร์โรแมกเนติกส์ที่อยู่ฝั่งซ้ายว่า ตัวจ่าย และเรียก เฟอร์โรแมกเนติกส์ที่อยู่ ฝั่งขวาว่า ตัวรับ [38]

จากภาพที่ 2.11(ก) TMR อยู่สภาวะขนาน เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณี อิเล็กตรอนหมุนขึ้น จะพบว่า ในด้านตัวจ่าย ขนาดของ DOS ที่ระดับพลังงานเฟอร์มี มีค่ามากนั้น คือจำนวนของสปินหมุนขึ้นมี ปริมาณมาก ในขณะที่ด้านตัวรับ ขนาดของ DOS มีค่ามากเช่นเดียวกัน ซึ่งหมายความว่า สามารถรับอิเล็กตรอน ได้มาก ดังนั้น กระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของสปินหมุนขึ้น จะมีขนาดมาก แต่เมื่อพิจารณาด้านของสปินหมุน ลง จะพบว่า ด้านตัวจ่าย DOS มีขนาดไม่มาก เช่นเดียวกับกับฝั่งรับ ดังนั้น กระแสที่เกิดจากสปินหมุนลงมีค่าน้อย กล่าวโดยสรุปได้ว่า ในสภาวะขนานนี้ กระแสจาก ตัวจ่าย จะสามารถไหลไปยังตัวรับได้มาก ดังนั้น ค่า ความต้านทานของ TMR ในสภาวะขนานจึงมีค่าต่ำ ขนาดของกระแสที่เกิดจาก TMR ในสภาวะขนาน จะสามารถ แสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.14) [39]

$$I_p \propto N_{\uparrow}^L N_{\uparrow}^R + N_{\downarrow}^L N_{\downarrow}^R \quad (2.14)$$

โดยที่ I_p คือกระแสในสภาวะขนาน

$N_{\uparrow(\downarrow)}^{L(R)}$ คือ จำนวนของสปินอิเล็กตรอน หมุนขึ้น (ลง) ของอิเล็กโตรดด้านซ้าย(ขวา)

ภาพที่ 2.11(ข) แผ่นฟิล์มบาง TMR อยู่ในสภาวะตรงข้าม ขนาดของ DOS ของสปินหมุนขึ้นของฝั่งจ่ายมีขนาดมาก แต่ ขนาดของ DOS ของสปินหมุนขึ้นของตัวรับมีขนาดน้อย คือ สามารถรับกระแสได้ น้อย ดังนั้น กระแสที่เกิดจากสปินหมุนขึ้นจึงมีค่าไม่มากนัก ในส่วนของสปินหมุน จะเห็นได้ว่า DOS ของตัวจ่าย มีค่าน้อยดังนั้น กระแสที่ไหลผ่านชั้นฉนวน จึงมีค่าน้อยถึงแม้ว่า ในด้านตัวรับ DOS ของสปินหมุนลงจะมีค่า มากก็ตาม ดังนั้น ในกรณีที่ TMR อยู่ในสภาวะตรงข้าม กระแสจะสามารถไหลจากตัวจ่ายไปยัง ตัวรับได้น้อย ส่งผลทำให้ ความต้านทานของ TMR มีค่าสูง ขนาดของกระแสที่เกิดจาก TMR ในสภาวะขนาน จะสามารถ แสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (2.15) [39]



$$I_{AP} \propto N_{\uparrow}^L N_{\downarrow}^R + N_{\downarrow}^L N_{\uparrow}^R \quad (2.15)$$

โดยที่ I_{AP} คือกระแสในสภาวะตรงข้าม

$N_{\uparrow(\downarrow)}^{L(R)}$ คือ จำนวนของสปินอิเล็กตรอน หมุนขึ้น (ลง) ของอิเล็กโตรดด้านซ้าย(ขวา)

เมื่อนำ ค่าของ I_p และ I_{AP} ไปแทนในสมการที่ 2.12 จะทำให้ได้ ขนาดของ TMR Ratio ในรูปแบบของ สปินโพลาริเซชัน [29]

$$\text{TMR Ratio} = \frac{2P_L P_R}{1 - P_L P_R} \quad (2.16)$$

โดยที่ P คือ Spin Polarization ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $P_i = \frac{N_{\uparrow}^i - N_{\downarrow}^i}{N_{\uparrow}^i + N_{\downarrow}^i}$

จากสมการ (2.12) พบว่า ถ้าต้องการออกแบบ ให้ความต้านทานของ แผ่นฟิล์มบางมี สัดส่วน TMR ที่มากขึ้นนั้น จำเป็นที่จะต้อง เลือกใช้สาร ที่มีขนาดของ P สูง ในปัจจุบันนี้ CoFeB เป็นสารที่ให้ ค่า P สูงสุดคือ 65% [30] ดังนั้น CoFeB จึงเป็นวัสดุที่ ถูกนำมาใช้ในการจัดเก็บข้อมูล และสามารถให้ค่า อัตราส่วน TMR ได้มากถึง 600 % รวมไปถึงการที่นำมาประกอบเป็นหัวอ่านข้อมูล สำหรับหัวบันทึก [36]

นอกจาก DOS แล้ว ความสมมาตรของฟังก์ชันคลื่น (Symmetry of Wave Function) ยัง เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของ แผ่นฟิล์มบาง TMR ทั้งนี้เนื่องจาก ความสมมาตรของฟังก์ชันคลื่นเป็นตัวกำหนดความเร็ว อัตราการลดลงของสปินอิเล็กตรอน [41]

โดยอาศัยหลักเกณฑ์ทางกลศาสตร์ควอนตัมที่ว่า อิเล็กตรอนมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ดังนั้นเมื่อ อิเล็กตรอน ไหลลอดเข้าไปยังบริเวณที่เป็นฉนวน ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จะลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential) หรือ ที่เรียกรวดลง หรือดีเคย์ (Decay) นั้นเอง การดีเคย์จะช้าหรือเร็วขึ้น ถูกกำหนดโดย ค่า การลวดทอน สำหรับในกรณีของ วัสดุฉนวนที่มีโครงสร้างเป็นผลึกนั้น ค่าการลวดทอนจะสัมพันธ์กับ ฟังก์ชันคลื่น และความหนาของวัสดุฉนวน ตามที่แสดงในสมการที่ (2.17) [42]

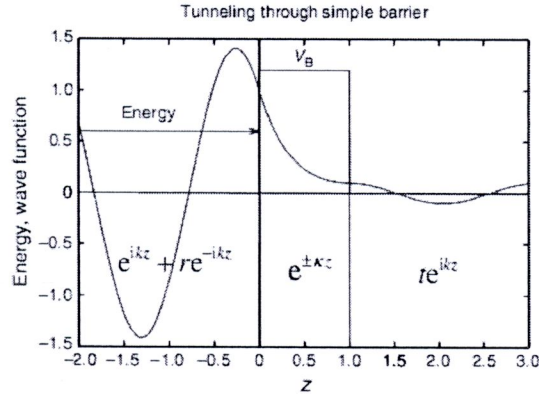
$$T \propto \exp(-2k^{\sigma}d) \quad (2.17)$$

โดยที่ T = อัตราการลวดทอนของฟังก์ชันคลื่น

k = ดัชนี k

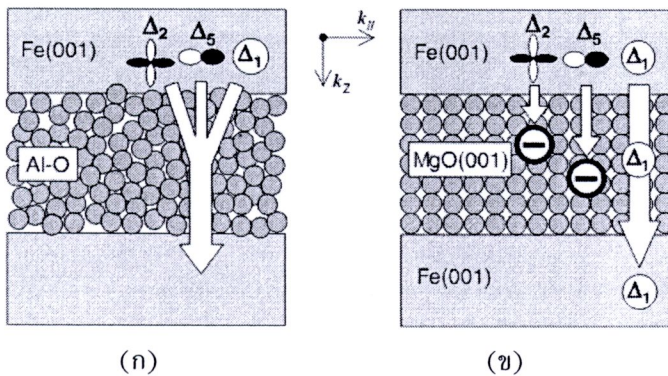
d = ความหนาของฉนวน

σ = ตัวชี้สถานะของการสปิน



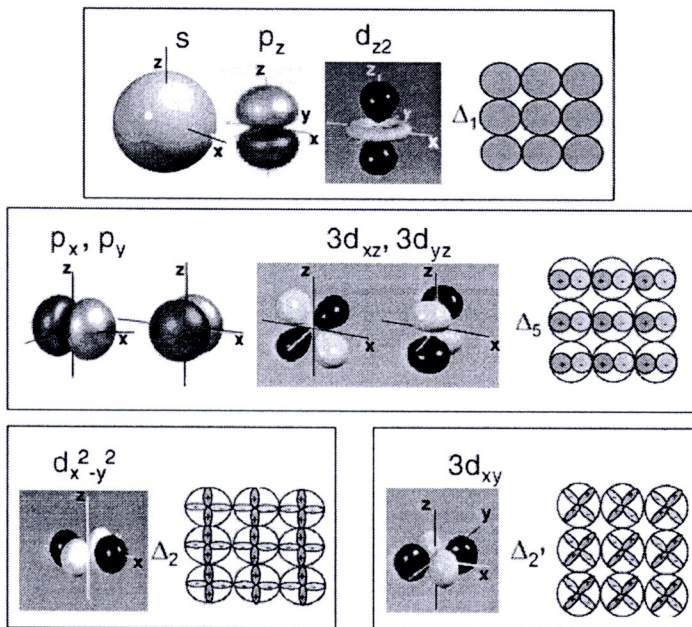
ภาพที่ 2.12 การไหลผ่านฉนวนของกลุ่มอิเล็กตรอน โดยที่ กลุ่มอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้ามายังบริเวณฉนวน (Barrier) ถูกกำหนดโดย $e^{ikz} + re^{-ikz}$ และกลุ่มอิเล็กตรอนที่ลอดผ่านไปได้ถูกกำหนดโดย te^{-ikz} โดยที่คลื่นในบริเวณฉนวนจะมีขนาดลดลงซึ่งกำหนดโดย $e^{\pm \kappa z}$ [41]

อัตราการลุดทอนของคลื่นภายในผลึกนั้น จะเป็นการบ่งบอกปริมาณของสปินอิเล็กตรอนที่ลดลง ในขณะที่สปินอิเล็กตรอนไหลเข้าไปยังสถานะอีวานสเซนซ์ (evanescence State) ของชั้นฉนวน ซึ่ง อัตราการลุดทอนนี้ ถูกกำหนดโดยความสมมาตรของฟังก์ชันคลื่น ความสมมาตรของฟังก์ชันคลื่น จะถูกพบในวัสดุที่โครงสร้างของผลึกมีความสมมาตร เช่นในกรณีของผลึก MgO เท่านั้น แต่ในวัสดุที่การจัดเรียงโครงสร้างอะตอมไม่แน่นอน เช่น AIO ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ อสัณฐาน (Amorphous) นั้น จะไม่มีค่าสมมาตรของฟังก์ชันคลื่น



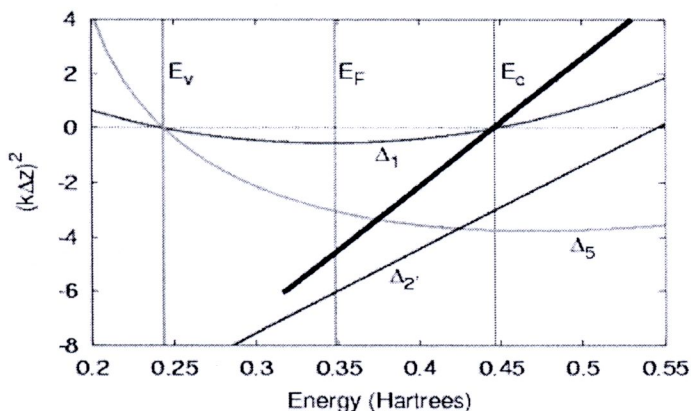
ภาพที่ 2.13 (ก) เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสมมาตรต่างๆ สำหรับ แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ใช้ Al-O เป็นฉนวน ซึ่งจะพบว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะไม่มีทิศทางที่แน่นอน [43]
(ข) เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสมมาตรต่างๆ สำหรับ แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ใช้ผลึก MgO เป็นฉนวน ซึ่งจะพบว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะไม่มีทิศทางที่แน่นอน [43]

ค่าความสมมาตรของฟังก์ชันคลื่นนั้น ถูกแบ่งออกตามความสมมาตรของ กลุ่มการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรภายในอะตอม (Atomic Orbital) โดยที่ค่าสมมาตร มี 4 ค่าด้วยกัน [42]คือ 1) Δ_1 เป็นค่าความสมมาตรที่แสดงถึง ความสมมาตรในระนาบของกลุ่มของอิเล็กตรอนที่กระจายตัวในวงโคจร s p_z และ d_{z^2} ค่าสมมาตร Δ_1 นี้จะขึ้นอยู่กับวงอิเล็กตรอน s เป็นหลัก 2) Δ_5 เป็นค่าความสมมาตรที่แสดงถึง ความสมมาตรในระนาบของกลุ่มของอิเล็กตรอนที่กระจายตัวในวงโคจร p_x p_y d_{xz} และ d_{yz} ค่าสมมาตร Δ_5 นี้ จะขึ้นอยู่กับวงอิเล็กตรอน วง d เป็นหลัก 3) Δ_2 เป็นค่าความสมมาตรที่แสดงถึง ความสมมาตรในระนาบของกลุ่มของอิเล็กตรอนที่กระจายตัวในวงโคจร $d_{x^2-y^2}$ และ 4) Δ_2' เป็นค่าความสมมาตรที่แสดงถึง ความสมมาตรในระนาบของกลุ่มของอิเล็กตรอนที่กระจายตัวในวงโคจร d_{xy}



ภาพที่ 2.14 การแบ่งประเภทของสมมาตร ตาม วงโคจรของอิเล็กตรอน [42]

การพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการลดทอนและ ความสมมาตรนั้น สามารถทำได้ โดยสมมติให้ ความสมมาตรเป็น โหนด (Node) ที่เชื่อมต่อกันภายในโครงสร้างของผลึก จากภาพที่ 2.14 จะเห็นว่า ความสมมาตร Δ_1 มีขนาดใหญ่กว่าความสมมาตร Δ_5 Δ_2 และ Δ_2' ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า ในผลึกที่มีขนาดใดขนาดหนึ่งนั้น จำนวนโหนดที่เชื่อมต่อกันระหว่างสมมาตร Δ_1 มีจำนวนน้อยกว่า จำนวนโหนดของสมมาตร Δ_5 Δ_2 และ Δ_2' ตามลำดับ ซึ่งมีผลทำให้ อัตราการลดทอนของสมมาตร Δ_1 มีปริมาณน้อยกว่า อัตราการลดทอนของสมมาตร Δ_5 Δ_2 และ Δ_2' ตามลำดับ ซึ่ง ถ้าการลดทอนมีขนาดน้อย จะมีผลทำให้ การลดลงเป็นไปอย่างช้าๆ แต่ถ้า อัตราการลดทอนมีค่ามากจะมีผลทำให้ การลดลงเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้น อาจจะสรุปความได้ว่า เมื่อสปินอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่ง เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยัง สถานะอีวานสเซนซ์ภายในฉนวนตามเส้นทาง ความสมมาตร Δ_1 จำนวนสปินอิเล็กตรอนจะค่อยๆลดลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า สปินอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ความสมมาตร Δ_5 Δ_2 และ Δ_2' ตามลำดับ ดังนั้น ถ้า สปินอิเล็กตรอนหมุนขึ้นหรือลงเคลื่อนที่ในเส้นทางสมมาตรที่ต่างกันมาก จะมีผลทำให้ค่า สปินโพลาไรซ์มากขึ้น ทำให้ค่า TMR สูงมากขึ้น

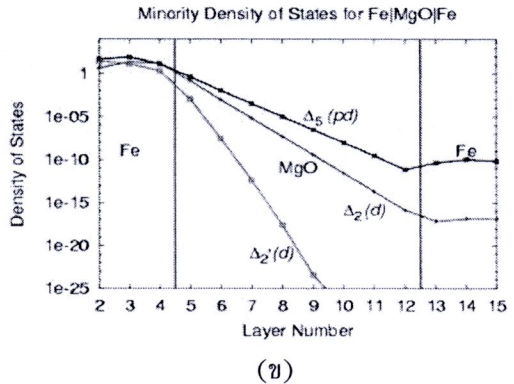
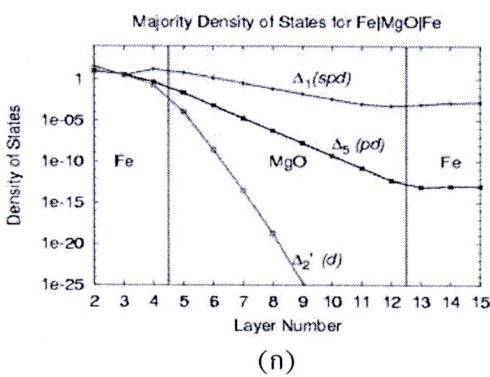


ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงาน และ $(k\Delta z)^2$ จากภาพ จะพบว่า มีเพียงเส้น $(k\Delta z)^2$ ที่เกิดจากสมมาตร Δ_1 เท่านั้น ที่มีความต่อเนื่องจากย่านวงนอกผ่านสถานะอิวานเนสเซนท์ภายในฉนวน ไปยัง ย่านตัวนำ [41]

ภาพที่ 2.15 แสดงการอัตราการลดลงของ ความสมมาตรต่างๆภายในวัสดุ MgO ซึ่งค่า $(k\Delta z)^2$ เป็นค่าที่ใช้แสดงถึง ความเป็นโมเมนตัมของ โครงสร้างแถบที่เป็นแบบ โครงสร้างแถบเชิงซ้อน (Complex Band Structure) ซึ่งขนาดของ $(k\Delta z)^2$ ที่น้อยกว่าศูนย์นั้น เป็นค่าที่ใช้บอกถึง ความแรงของการลดลง ค่า E_v แสดงถึง ระดับพลังงานที่อยู่ด้านบนสุดของแถบบ้านนอก ในขณะที่ E_c แสดงระดับพลังงานด้านล่างสุดสำหรับแถบบ้านใน ซึ่งจากภาพที่ 2.15 จะพบว่า ที่ บริเวณย่านด้านนอกนั้น จะประกอบไปด้วย ความสมมาตร Δ_1 และ ความสมมาตร Δ_5 ในขณะที่ สำหรับ แถบตัวนำนั้น จะมีเพียง ความสมมาตร Δ_1 เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สำหรับผลึก MgO นั้น ความสมมาตร Δ_1 จะกระจายผ่าน ชั้นว่างของ MgO ได้ง่ายกว่า ความสมมาตรอื่นๆ

โดยปกติแล้ว เมื่อทำการ ปลุกสารแม่เหล็กเข้ากับฉนวน ความสมมาตรของสปินอิเล็กตรอน ที่ลอดผ่านเข้าไปในฉนวนนั้น จะไม่มีการเปลี่ยนความสมมาตร โดยที่ ความสมมาตรของสปินอิเล็กตรอนนี้ จะมีความต่อเนื่อง กับความสมมาตรในสถานะอิวานเนสเซนท์ภายในวัสดุฉนวน ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ ของสารแม่เหล็ก โดยที่ ในกรณีที่สปินหมุนขึ้น นั้น ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิจะมีความสมมาตร Δ_1 สูงกว่า สมมาตรค่า อื่นๆ แต่ในกรณีที่ สปินหมุนขึ้นนั้น จะไม่พบค่า ความสมมาตร Δ_1 ซึ่งความแตกต่างนี้เองที่ทำให้ ค่าอัตราส่วนของ TMR มีค่าสูงมาก

จากภาพที่ 2.16 เป็นผลที่ได้จากการคำนวณค่า DOS ของการไหลผ่าน จาก Fe ด้านหนึ่งผ่านฉนวน MgO ไปยัง สาร Fe ที่อยู่อีกด้านหนึ่ง จะพบว่า ในกรณี ของ สปินอิเล็กตรอนหมุนขึ้น ความสมมาตร Δ_1 จะมีการลดลงต่ำกว่าความสมมาตรค่าอื่น ซึ่งหมายความว่า ปริมาณสปินอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านชั้นฉนวนนั้น มีปริมาณเปลี่ยนแปลงไม่มาก แต่ในกรณีของ สปินหมุนลงนั้น จะพบว่า ไม่มีความสมมาตร Δ_1 ซึ่งหมายความว่า อิเล็กตรอนสปินลง ที่มีความสมมาตร Δ_1 จะไม่สามารถไหลลอดผ่านฉนวนไปได้ นั่นคือ สปินอิเล็กตรอนที่มีความสมมาตร Δ_1 มีคุณสมบัติเป็น ตัวกรองการสปิน กล่าวคือ ความสมมาตร ดังกล่าวนี มีเพียงสปินหมุนขึ้นเท่านั้น ที่ไหลผ่านไปได้แต่ สปินหมุนลงไม่สามารถผ่านไปได้ ซึ่ง คุณสมบัติเหล่านี้เป็นการ ยืนยันได้ว่า ในทางทฤษฎีแล้ว TMR ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ Fe-MgO-Fe จะมีค่า สัดส่วน TMR ประมาณ 1000 % [29]



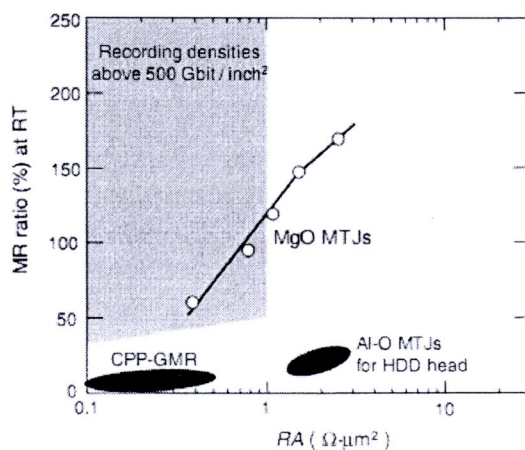
ภาพที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลง DOS ที่แต่ละชั้นของโครงสร้างของ Fe/MgO/Fe [41]

(ก) สปินอิเล็กตรอนของอิเล็กโทรดทั้งสองด้านมีทิศชี้ขึ้น

(ข) สปินอิเล็กตรอนของอิเล็กโทรดทั้งสองด้านมีทิศชี้ลง

แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่มี Fe เป็นอิเล็กโทรด ใช้ MgO เป็นชั้นฉนวน ได้ถูกสร้างเป็นผลสำเร็จในปี 2007 แต่ทั้งนี้เนื่องจาก ในการที่จะประยุกต์ใช้ แผ่นฟิล์มบาง TMR เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับสำหรับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลนั้น จะต้องเพิ่มชั้นสาร Antiferromagnetic เข้ากับชั้นบังคับ ของแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก ซึ่งความไม่เข้ากันระหว่างชั้นสารของ Antiferromagnetic และชั้นบังคับนั้น เป็นสาเหตุสำคัญที่ไม่สามารถทำให้ MTJ ยังไม่สามารถนำมาใช้ได้ทางปฏิบัติ

โครงสร้างของแผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ถูกใช้ใน อุปกรณ์เก็บข้อมูลนั้น จะประกอบไปด้วย CoFeB ประกบเข้ากับ ชั้นฉนวน MgO ซึ่งจะมีขนาดสัดส่วน TMR ที่สูงมาก ถึงแม้ว่า พื้นที่ความต้านทานจะมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม จากการที่แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR มีส่วนประกอบของชั้นฉนวนที่มีความบางมาก จึงทำให้แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็กประเภทนี้ ง่ายต่อความเสียหายอันเป็นผลที่เกิดจาก แรงดันและความพลังงานร้อนต่อการทลาย (Breakdown)



ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ความต้านทาน และ สัดส่วน TMR ที่อุณหภูมิห้อง จากภาพพบว่า แผ่นฟิล์มบาง ที่ใช้ผลึก MgO เป็นฉนวน จะสามารถนำประยุกต์ใช้ได้ ใน หัวบันทึกข้อมูลที่มีความจุมากกว่า 500 Gbit/inch² [36]



2.4.2 การทะลายนั้เกิดขึ้นในแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก

เนื่องจาก ชั้นฉนวนที่มีความบางมาก จึงทำให้ แผ่นฟิล์มบาง TMR ง่ายต่อการเกิด การทะลาย นอกจากนี้ ในแง่ของการประยุกต์ใช้ แผ่นฟิล์มบาง TMR สำหรับใช้อ่านข้อมูลนั้น จำเป็นจะต้องมี แรงดันป้อนไบแอส (Bias) ให้กับแผ่นฟิล์มบาง TMR ดังนั้นการศึกษาผลของ การทะลายในชั้นฉนวนของ แผ่นฟิล์มบาง TMR จึงเป็นปัญหาที่มีความสำคัญมาก

ประเภทของการทะลายที่พบใน แผ่นฟิล์มบาง TMR ถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ 1) การทะลายแบบหนัก (Intrinsic breakdown) และ 2) การทะลายแบบเบา (Extrinsic breakdown) โดยที่ การทะลายทั้งสองประเภทนี้ เกิดจากสาเหตุที่ต่างกัน

การทะลายแบบหนัก เป็นผลร่วมกันของ สนามไฟฟ้าและความร้อน ที่ไปกระทำต่อ ไดโอิเล็กทริก ของชั้นฉนวน ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีขนาดมากพอ จะส่งผลทำให้พันธะไอออน ของ Dipole Moment เกิดการขาดออกจากกันอย่างทันทีทันใด โดยมีพลังงานค่าหนึ่งเป็นตัวกระตุ้น การทะลายแบบหนัก สามารถอธิบายได้โดยอาศัย E-Model [44-45] ซึ่งเป็นสมการอธิบายความน่าจะเป็นของการเกิด Breakdown ($p(t)$) โดยมีนิยามตาม สมการ (2.18)

$$p(t) = A \exp\left(\frac{V(t)}{B}\right) \quad (2.18)$$

โดยที่

$V(t)$ คือ แรงดันคร่อมฉนวนความหนา (t_B) ที่เกิดจาก สนามไฟฟ้า ($E(t)$) คำนวณได้จาก $V(t) = E(t) \times t_B$

A คือ ผลของความร้อน (T) และ พลังงานกระตุ้น (E_A) ที่เกิดขึ้นใน ฉนวนพื้นที่ A_j คำนวณได้จาก

$$A = A_j \exp(-E_A/kT) \quad (K = \text{Boltzmann's Constant})$$

B คือ ผลของความร้อนที่ทำให้ อะตอมภายในฉนวนความหนา (t_B) เกิดการเคลื่อนที่ โดยคำนวณได้จาก $B = kTt_B/a|qZ|$ ($a = \text{atomic space}$, $Z = \text{number of ion}$, $q = \text{charge}$)

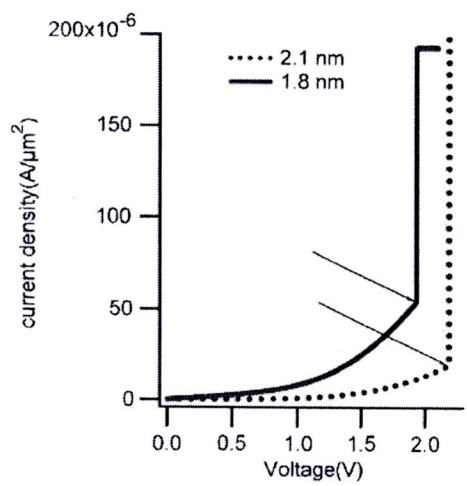
ที่ระดับแรงดัน ที่ทำให้เกิดการทะลาย หรือ แรงดันทะลาย จะแปรผันตามอัตราส่วนของ A และ B

$$V(t) \approx \left(\frac{B}{A}\right) \quad (2.19)$$

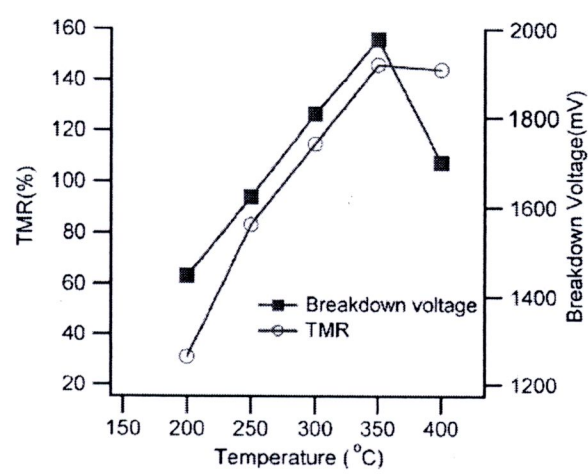
ในกรณี ที่ แรงดันที่จ่ายให้กับแผ่นฟิล์ม มีความเร็วของการเปลี่ยนแปลงแรงดันเป็น $\frac{dV}{dt}$ จะพบว่า ขนาดของแรงดันสูงสุดจะมีขนาดเป็น

$$V_{\max} \approx B \ln\left(\frac{dV/dt}{AB}\right) \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.18) จะพบว่า การเกิดการทะลายนั้น จะขึ้นอยู่กับความหนา และพื้นที่ของแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งถ้าพิจารณา ในกรณีที่แผ่นฟิล์มบางที่มีพื้นที่เท่ากัน จะพบว่า ถ้าแผ่นฟิล์มบาง มีความบางน้อย จะเกิดการทะลายได้ง่ายกว่า แผ่นฟิล์มบางที่มีความหนากว่า นอกจากนั้น จะพบว่า ระดับของแรงดันที่ทำให้เกิดการทะลายจะเพิ่มสูงขึ้น ตามอุณหภูมิที่ร้อนขึ้น กล่าวคือถ้าความร้อนของแผ่นฟิล์มบาง มีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ขนาดของแรงดันที่ทำให้เกิดการทะลายจะมีขนาดสูงกว่า กรณีที่แผ่นฟิล์มบางมีความร้อนต่ำกว่า



ภาพที่ 2.18 การเกิดการทะลายแบบหนักสำหรับแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็กที่มีความหนาต่างกัน จุดลูกศรชี้เป็นการบอกถึงแรงดันที่ทำให้เกิดการทะลาย [45]



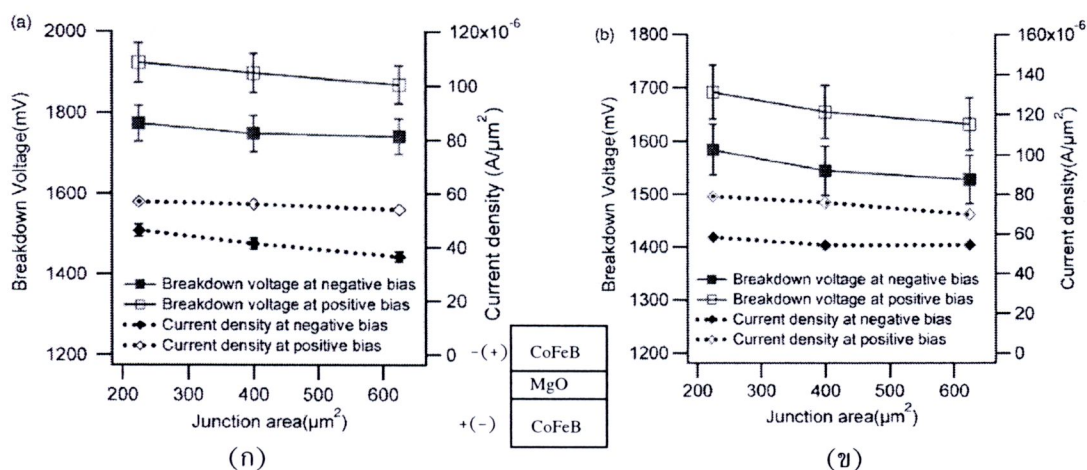
ภาพที่ 2.19 ผลของความร้อนที่มีต่อ การเกิดการทะลาย และ อัตราส่วน TMR [45]

จากภาพที่ 2.19 จะพบว่า เมื่อ อุณหภูมิของแผ่นฟิล์มบางเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ แรงดันที่ทำให้เกิดการทะลายมีค่ามีขนาดสูงขึ้น ซึ่งเป็นจริงตามสมการที่ (2.18) นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้ขนาดของสัดส่วน TMR มีค่ามากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามจะพบว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 350 °C ระดับของแรงดันทะลายมีแนวโน้มที่จะลดลง ในขณะที่ค่าสัดส่วน TMR เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการที่ระดับของแรงดันทะลายมีแนวโน้มลดลงนั้น เป็นผลที่เกิดจาก การความร้อนไปมีผลทำให้ พันธะที่อยู่ในชั้นฉนวนมีการกระจายมากขึ้น นั่นคือระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่ามากขึ้น ทำให้ขนาดของค่าตัวแปร B มีค่าลดลง

ทำให้ระดับแรงดันทะลายน้อยลง นอกจากนี้ ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 350 °C พันธะภายใน MgO เกิดการจับตัวสมมาตรมากขึ้น ทำให้ อัตราส่วน TMR ที่สูงมากขึ้น

นอกจากนี้ ผลจากการจ่ายแรงดันสลับขั้ว ยังเป็นตัวแปรสำคัญอีกประการหนึ่งที่ส่งผลต่อระดับแรงดันทะลาย ที่เกิดขึ้นในแผ่นฟิล์มบาง TMR กล่าวคือ ระดับแรงดันทะลายที่เกิดจากการจ่ายแรงดันจากอิเล็กโทรดด้านล่าง ไปยังอิเล็กโทรดด้านบน จะมีขนาดสูงกว่า ระดับแรงดันทะลายที่เกิดจากการจ่ายแรงดันจากอิเล็กโทรดด้านบน ไปยังอิเล็กโทรดด้านล่าง

จากภาพที่ 2.20 จะพบว่า พื้นที่ของแผ่นฟิล์มบาง TMR ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้ ระดับแรงดันทะลายมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยสมการที่ (2.18) แต่เมื่อพิจารณา พื้นที่ของแผ่นฟิล์มบางค่าใดค่าหนึ่ง จะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ระดับแรงดันทะลายที่เกิดจากการจ่ายแรงดันจากด้านล่างของอิเล็กโทรดไปยังด้านบนของอิเล็กโทรด มีขนาดมากกว่า แรงดันทะลายที่ได้จากการจ่ายแรงดันจาก ด้านบนของอิเล็กโทรดไปยังด้านล่างของอิเล็กโทรด ซึ่งจะเกิดขึ้นจากทั้งกรณี ที่แมกเนโตซ์เซชันของอิเล็กโทรดทั้งสอง อยู่ในสภาวะตรงข้าม และ สภาวะขนาน โดยที่ระดับแรงดันทะลายในสภาวะตรงข้าม จะมีระดับแรงดันสูงกว่าระดับแรงดันที่เกิดขึ้นในสภาวะขนาน ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการที่ ความต้านทานแม่เหล็กในสภาวะตรงข้ามมีค่าสูงกว่า ความต้านทานแม่เหล็กใน สภาวะขนาน เช่นเดียวกันกับกรณีของความหนาแน่นกระแส ซึ่งจะพบว่า ความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นในสภาวะตรงข้ามจะมี ขนาดต่ำกว่าความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นในสภาวะขนาน

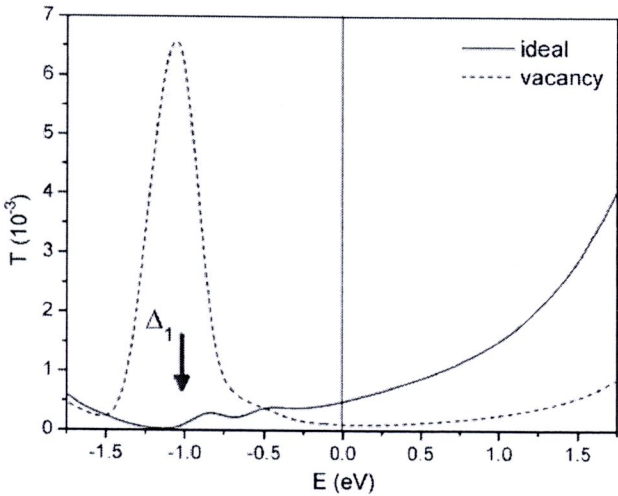


ภาพที่ 2.20 ผลของขนาดของพื้นที่ความต้านทาน ที่มีต่อการเกิดการทะลายและความหนาแน่นกระแส ที่เกิดจากการจ่ายแรงดันต่างขั้ว (ก) แผ่นฟิล์มบาง TMR อยู่ในสภาวะ ตรงข้าม (ข) แผ่นฟิล์มบาง TMR อยู่ในสภาวะขนาน [45]

ผลที่ได้จากภาพที่ 2.20 นี้ ทำให้ทราบว่า ขนาดของแรงดันทะลาย และความหนาแน่นกระแส ของแผ่นฟิล์มบาง TMR ขึ้นอยู่กับขั้วจ่ายแรงดัน กล่าวคือ แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR ที่ถูกจ่ายแรงดันจาก อิเล็กโทรดด้านล่าง ไปยังอิเล็กโทรดด้านบน จะมีขนาดแรงดันทะลายสูงกว่า แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR ที่ถูกจ่ายแรงดันจาก อิเล็กโทรดด้านบนไปยังอิเล็กโทรดด้านล่าง ซึ่งสาเหตุที่ระดับแรงดันทะลายไม่สมมาตรกันนี้ เกิดขึ้นได้จากหลายๆ สาเหตุ ข้อสมมุติฐานสำคัญประการหนึ่งที่สามารถใช้อธิบายความไม่สมมาตรของระดับแรงดันทะลายคือ การหลุดออกของอะตอมออกซิเจน (Oxygen Vacancy)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การทะลายในฉนวนนั้น เป็นผลที่เกิดจาก การที่แรงดันและความร้อนไปส่งผลทำให้ พันธะคู่ของฉนวนขาดออกอย่างทันทีทันใด ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ว่า เมื่อจ่ายแรงดันให้แก่แผ่นฟิล์มบาง จะส่งผลทำให้อะตอมของออกซีเจนหลุดออกไปจากผลึก MgO ซึ่งอาจจะทำให้ ความต้านทานแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง

ผลของ Oxygen Vacancy ที่เกิดขึ้นใน แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ประกอบไปด้วย Fe/MgO/Fe ได้ศึกษาโดยอาศัยการคำนวณ พบว่า การเกิด Oxygen Vacancy จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน มีขนาดลดลงกว่าปกติ [36] ซึ่งหมายความว่า การเกิด Oxygen Vacancy มีผลทำให้ กระแสไหลผ่านมีขนาดลดลง ส่งผลทำให้ความต้านทานสูงขึ้น และอาจจะทำให้ ต้องอาศัยระดับแรงดันทะลายที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลของ Oxygen Vacancy ที่เกิดขึ้นใน แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ประกอบไปด้วย CoFe(B)/MgO/CoFe(B) ยังไม่เคยได้รับการศึกษา นอกจากนี้ การพิสูจน์ข้อสมมุติฐานข้างต้นยังไม่เคยได้รับการพิสูจน์ ซึ่งการศึกษาผลของ Oxygen Vacancy ที่เกิดขึ้นใน แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ประกอบไปด้วย CoFe(B)/MgO/CoFe(B) นั้น จะได้รับการศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของแผ่นฟิล์มบางในอุดมคติ Fe/MgO/Fe แสดงไว้ในภาพที่ 2.21

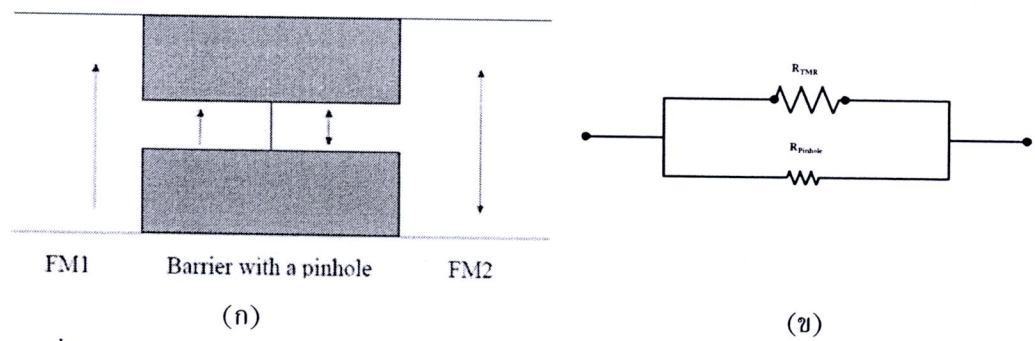


ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ของ แผ่นฟิล์มบางในอุดมคติ Fe/MgO/Fe [46]

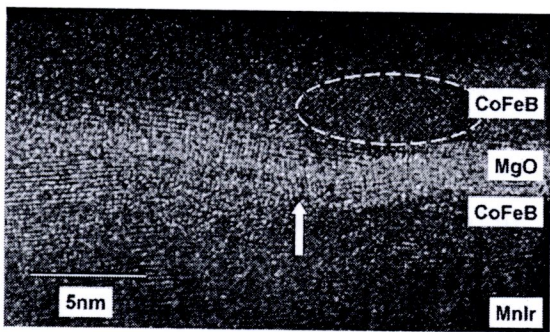
จากที่กล่าวไปแล้วในเบื้องต้นว่า ในการประยุกต์ ใช้แผ่นฟิล์มบาง TMR สำหรับการจัดเก็บข้อมูลนั้น จำเป็นที่จะต้องออกแบบให้มีพื้นที่ความต้านทานขนาดเล็กมาก และ จำเป็นที่จะต้องทำการปลูก (Growth) แผ่นฟิล์ม โดยอาศัยชั้นฉนวนที่บางมาก ๆ ดังนั้น ผลจากการปลูกแผ่นฟิล์ม อาจจะทำให้ อะตอมโลหะของฉนวนจับอยู่กับ อะตอมโลหะของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองด้าน เกิดเป็นการเชื่อมต่อทางโลหะ หรือที่เรียกว่า พินโฮล (Pinhole) ซึ่งการเกิดพินโฮลนี้ จะพบที่บริเวณรอยต่อระหว่างฉนวน และ ชั้นสารแม่เหล็กของแผ่นฟิล์ม บาง TMR ซึ่งเป็นสาเหตุของการทะลายแบบเบา (Soft Breakdown) [47–49] ดังตัวอย่างภาพถ่าย TEM ที่แสดงในภาพที่ 2.23

ผลของพินโฮลที่มีต่อ ขนาดของความต้านทานแม่เหล็ก TMR นั้น สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย โดยอาศัย วงจรขนานที่แสดงในภาพที่ 2.22(ข) ในกรณีที่ แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็กมีพินโฮลอยู่ก่อนแล้ว และเมื่อจ่ายแรงดัน ความแรงของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวน จะส่งผลให้ขนาดของพินโฮลค่อย ๆ ขยายใหญ่

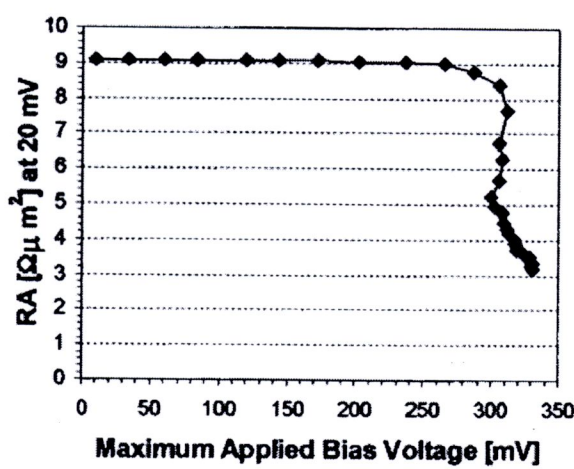
ขึ้น ตามระดับแรงดันที่สูงขึ้น การที่พินโฮลมีขนาดใหญ่ขึ้นนี้ จะส่งผลทำให้กระแสไหลผ่านพินโฮลได้มากขึ้น ทำให้ขนาดของ $R_{pinhole}$ มีขนาดค้อย าลง ทำให้ความต้านทานรวมมีขนาดค้อย าลง ดังแสดงในภาพที่ 2.24



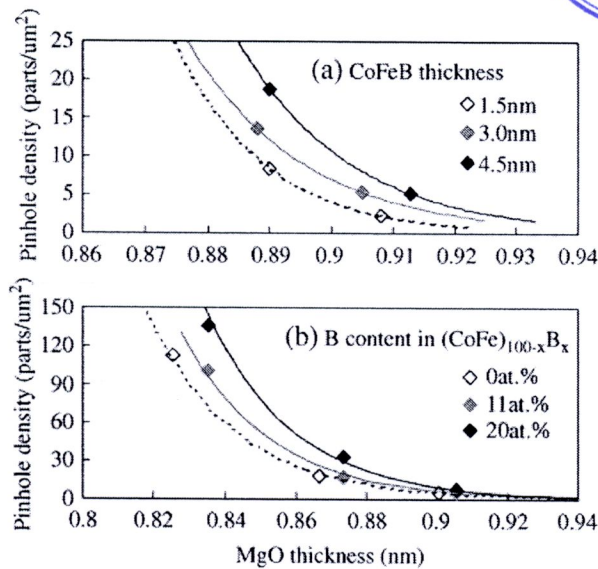
ภาพที่ 2.22 (ก) การเกิดพินโฮลภายในแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR [40] (ข) วงจรขนานที่ใช้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทาน TMR (R_{TMR}) และ ความต้านทานที่เกิดจาก พินโฮล ($R_{pinhole}$)



ภาพที่ 2.23 ภาพถ่าย TEM ของแผ่นฟิล์มบาง TMR บริเวณที่ลู่กรชี้ แสดงถึงบริเวณที่เกิดพินโฮลภายในวงกลมแสดงการจับตัวเป็นผลึกของ CoFeB [48]



ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายแรงดัน และ พื้นที่ความต้านทาน [44]



ภาพที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฉนวน MgO และ ขนาดของพินโฮล [51]

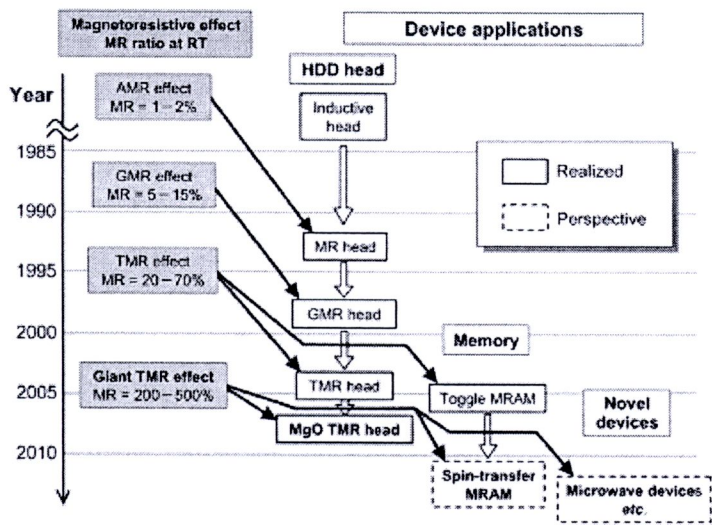
(ก) ผลของความหนาของ CoFeB ที่มีต่อขนาดของพินโฮล

(ข) สัดส่วนของ โบรอน (Boron: B) ที่มีต่อ ที่มีต่อขนาดของพินโฮล

โดยทั่วไปเชื่อว่า การเกิดพินโฮลในฉนวน จะเกิดขึ้นในชั้นการปลูกแผ่นฟิล์มเท่านั้น แต่เมื่อเร็วๆ นี้ ได้มีการค้นพบว่า การกระจายตัวของโบรอน (Boron Diffusion) เข้าไปยังผลึก MgO ของ แผ่นฟิล์มบาง MTJ ที่ประกอบด้วย CoFeB/MgO/CoFeB นั้น อาจจะสามารถทำให้เกิดพินโฮลได้ [51] โดยที่ มีขนาดความหนาของอิเล็กโทรดเป็นตัวแปรสำคัญ

จากภาพที่ 2.25 จะพบว่าการเกิดพินโฮลนั้น จะลดลงเมื่อ ความหนาของผลึก MgO เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่ระดับความหนาของผลึก MgO ค่าใดค่าหนึ่งแล้ว จะพบว่าพินโฮลจะใหญ่ขึ้น ตามความหนาของ CoFeB ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการ เมื่อ CoFeB หนาขึ้น จำนวนของโบรอน จะมากขึ้นตาม ทำให้ พื้นที่การกระจายตัวของโบรอนเข้าไปยัง ผลึก MgO มีมากขึ้น ทำให้ได้พินโฮลที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งผลของ จำนวนโบรอนที่มีต่อขนาดของพินโฮลสามารถสังเกตเห็นได้จาก ภาพที่ 2.25 (ข)

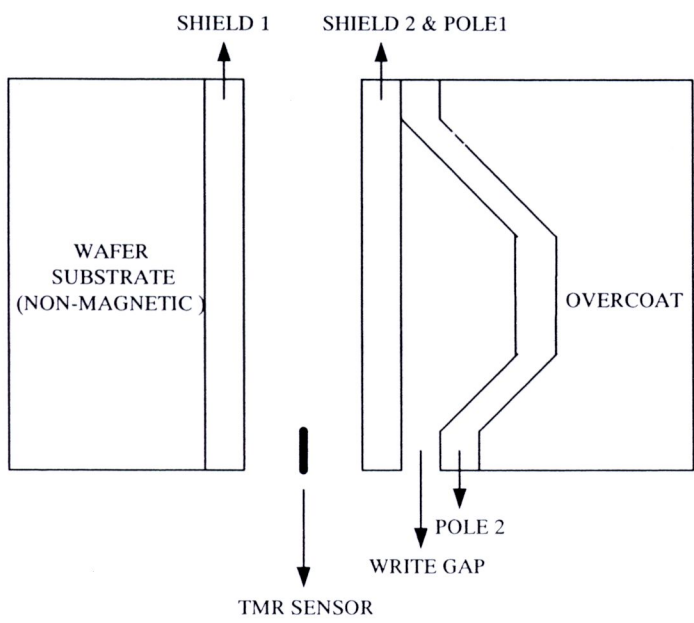
จากที่กล่าวทั้งหมดในหัวข้อนี้ จะพบว่า แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก MTJ ที่ใช้ CoFeB เป็นชั้นอิสระและชั้นบังคับ โดยใช้ผลึก MgO เป็นฉนวน จะให้ ค่าความต้านทาน TMR สูงมาก โดยที่ พื้นที่ความต้านทานมีขนาดเล็ก ทำให้แผ่นฟิล์มบาง TMR ที่มีโครงสร้างดังกล่าว เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจัดเก็บข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เป็นตัวตรวจจับ สำหรับหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



ภาพที่ 2.26 วิวัฒนาการของการค้นพบ และใช้งาน ความต้านทานแม่เหล็ก [36]

2.5 หัวอ่านข้อมูลแม่เหล็กชนิด TMR

การพัฒนาเทคโนโลยีหัวบันทึกโดยใช้แผ่นฟิล์มบางทางแม่เหล็กในการอ่านข้อมูล เป็นตัวแปรหลักที่ทำให้ฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์มีความจุของข้อมูลต่อพื้นที่ของแผ่นบันทึก (Media) สูงขึ้น แผ่นฟิล์มบางทางแม่เหล็ก ที่ใช้เป็นส่วนอ่านข้อมูลของหัวบันทึกในปัจจุบัน จะเป็นแบบที่ใช้แผ่นฟิล์มบาง TMR หัวบันทึกแบบใช้แผ่นฟิล์มบางทางแม่เหล็ก สำหรับอ่านข้อมูลนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน สามส่วนคือ ส่วนเขียนข้อมูล ส่วนอ่านข้อมูล และส่วนป้องกัน (Shields) ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 โครงสร้างของหัวบันทึก TMR

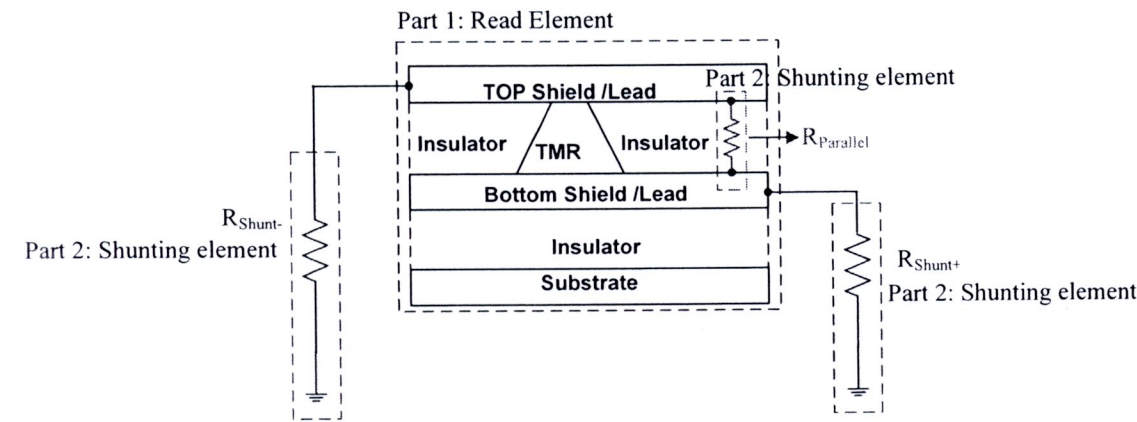
จากการที่แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก MTJ มีขนาดของสัดส่วน TMR ที่สูงมาก มีพื้นที่ความต้านทานน้อย และ อาศัยการจ่ายกระแสในแนวตั้ง ข้อดีต่าง ๆ เหล่านี้เองที่ทำให้ แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก MTJ ถูกใช้เป็นตัวตรวจจับสำหรับ หัวอ่านข้อมูล ซึ่งเรียกว่า หัวอ่านมูลชนิด TMR ซึ่งหัวอ่านข้อมูลชนิดนี้ถูกใช้ใน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่มี ความจุมากกว่า 200 Gb/inch [26]

2.5.1 ส่วนเขียนข้อมูล

ส่วนเขียนข้อมูลที่ใช้ในหัวบันทึกจะอาศัยแผ่นฟิล์มบาง ในการเขียนข้อมูลโดยมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนขดลวด (Coil) ส่วนแกนแม่เหล็ก (Core) และ ส่วนช่องว่าง (Gap) ขบวนการเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกทำได้โดยการ จ่ายกระแสให้แก่ขดลวด ทำให้เกิดความเข้มแม่เหล็ก หรือ แมกนีโตเซชัน (Magnetization) ในแกนแม่เหล็ก ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กระหว่าง ช่องว่าง สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวบังคับทิศทางของแมกนีโตเซชัน ของแผ่นบันทึกทำได้ บิท “1” และ ถ้ากลับทิศของกระแสที่จ่ายให้ขดลวด จะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่าง เปลี่ยนทิศทางทำให้ทิศทางของแมกนีโตเซชันของแผ่นบันทึก ข้อมูลกลับทิศทาง ทำให้ได้ บิท “0” [51] สำหรับหัวเขียนที่ใช้ในปัจจุบันนั้น จะเป็นแบบหัวเขียนแบบ ขั้วเดี่ยว (Single pole write head)[52]

2.5.2 ส่วนอ่านข้อมูล

ส่วนอ่านข้อมูล ทำหน้าที่อ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล ในปัจจุบันโครงสร้างของส่วนอ่านข้อมูลประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วนด้วยกันคือ 1) ส่วนหัวอ่านข้อมูล ประกอบไปด้วย ส่วนฐาน ส่วนป้องกัน และ ส่วนอ่านข้อมูลแผ่นฟิล์มบางทางแม่เหล็กประเภท TMR 2) ส่วนของการต่อขนาน (Shunting Element) ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบที่ถูกใช้สำหรับป้องกันความเสียหาย และลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในหัวอ่าน หัวอ่านข้อมูล [53]



ภาพที่ 2.28 ส่วนประกอบของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR

2.1) ส่วนหัวอ่านข้อมูล

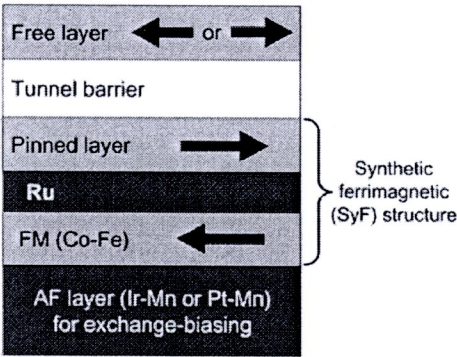
2.1.1) ส่วนฐาน (Substrate) ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่รองรับส่วนที่ใช้อ่านข้อมูล สร้าง

จาก วสตุโททาเนียมคาร์ไบด์และอลูมินัม มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า

2.1.2) ส่วนป้องกันทางไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนคั่นระหว่าง ส่วนอ่านข้อมูล และส่วนป้องกันทางแม่เหล็ก (ส่วนส่วนป้องกันด้านบน และส่วนส่วนป้องกันด้านล่าง) และคั่นระหว่างส่วน ป้องกันด้านล่างกับซับสเตรท (Substrate) ในปัจจุบันจะใช้วัสดุประเภท SiO₂ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า [44]

2.1.3) ส่วนส่วนป้องกันทางแม่เหล็ก ทำหน้าที่ป้องกันสนามแม่เหล็กรอบจาก บิตข้อมูลข้างเคียง และทำหน้าที่เป็นส่วนหัว (Terminal) เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณจากส่วนอ่านข้อมูล ไปยังสายนำ สัญญาณ [45] ซึ่งจะทำให้ขนาดของหัวอ่านมีขนาดเล็กลง สามารถอ่านจำนวนบิตได้มากขึ้น สร้างจากวัสดุ ประเภทอัลลอย (Alloy, NiFe) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวนำทางไฟฟ้า

2.1.4) ส่วนอ่านข้อมูล แผ่นฟิล์มบาง TMR โครงสร้างของแผ่นฟิล์มบาง TMR ที่ใช้ในการอ่านข้อมูล จะมีความซับซ้อนมากกว่า โครงสร้างพื้นฐานที่ประกอบไปด้วย ชั้นอิสระ ฉนวน และ ชั้น บังคับ กล่าวคือ ชั้นบังคับสำหรับแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็กประเภท TMR ที่ใช้สำหรับการอ่านข้อมูลนั้น จะใช้ แผ่นฟิล์มแม่เหล็กเฟอร์ไรสังเคราะห์ (Synthetic Ferrimagnetic : SyF) เป็นชั้นบังคับ โดยด้านล่างของ SyF จะ เป็นชั้น Aniferromagnetic ซึ่งทำหน้าที่ บังคับให้ทิศทางแมกเนโตเซชันของ SyF คงที่ ให้มากที่สุด [26] โครงสร้างของ SyF ประกอบไปด้วย ชั้นสารแม่เหล็ก ชั้นที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก (Non-magnetic ; NM) ที่ถูก ประกอบโดยชั้นสารแม่เหล็ก ตัวอย่างเช่น CoFe-Ru-CoFeB



ภาพที่ 2.29 โครงสร้างของแผ่นฟิล์มบางประเภท TMR [36]

2.2) ส่วนต่อขนาน

ส่วนต่อขนานจะประกอบไปด้วยสองส่วนด้วยกันคือ 1) ส่วนต่อขนานที่ต่อจาก ส่วนป้องกันด้านบนและด้านล่าง ไปยังกราวด์ ซึ่งจะทำหน้าที่ลดการไหลของกระแส ที่กำลังไหลเข้าสู่แผ่นฟิล์ม บางแม่เหล็กสำหรับอ่านข้อมูล และทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรองสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ [56] ขนาดของ ความต้านทานที่ถูกต้องขนานนั้น มีขนาดอยู่ในช่วง 1 kΩ – 100 kΩ [47] ขึ้นอยู่กับขนาดของความต้านทาน ของแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก 2) ส่วนต่อขนานที่ถูกต้องระหว่างส่วนป้องกันด้านบน และ ซิลด์ด้านล่าง ทำหน้าที่ลด ผลของแรงดันคร่อมแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก [58] โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 0.1kΩ – 5 kΩ [49] นอกจากนี้ส่วนต่อ ขนานที่ถูกต้องเข้าระหว่าง ส่วนป้องกันด้านบน และ ส่วนป้องกันด้านล่าง ยังมีส่วนช่วยทำให้ความต้านทาน TMR สมมูล มีขนาดสูงขึ้น ทำให้สามารถได้แรงดันขาออกที่ต้องการได้โดยไม่ต้องไปทำการลดขนาดของ

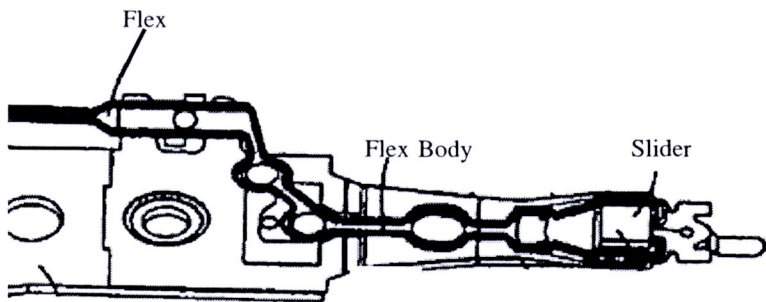
ชั้นฉนวนให้บางลง [49] ทั้งนี้เนื่องจาก การที่จะออกแบบให้แผ่นฟิล์มบาง TMR มีความต้านทานที่สูงขึ้นนั้น จำเป็นที่จะต้องลดความบางของฉนวน ซึ่งเมื่อนำมาใช้งาน อาจจะมีโอกาสเกิดความเสียหายได้ง่าย

2.6 เฮดกิมบอลแอสเซมบลี (Head Gimbal Assembly,HGA)

การเชื่อมต่อสัญญาณจากหัวบันทึกไปยังส่วนประกอบอื่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะอาศัยแผ่นนำสัญญาณแบบอ่อนตัว (Flex Cable) ที่สร้างจากแผ่นทองแดงและถูกหุ้มโดยฉนวนประเภทโพลีอิมิด (Polyimide) [49] เป็นสายนำสัญญาณ

แผ่นนำสัญญาณแบบอ่อนตัว เมื่อถูกประกอบเข้ากับแขวนรอง (Suspension) ที่สร้างจากโลหะสแตนเลส (Stainless Steel) จะถูกเรียกว่า ฟอส (Flex on Suspension, FOS) ซึ่งมีอยู่หลายประเภท สำหรับ FOS ที่ใช้ในการทดลองเป็น FOS ประเภท แทรกซ์ซัสเพนชันแอสเซมบลี (Trace Suspension Assembly, TSA) ซึ่งตลอดทั้งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียก สายนำสัญญาณอย่างอ่อนนี้ว่า FOS นอกจากนี้ เนื่องจากความต้านทานของแขวนรองมีขนาดที่ต่ำมากจึงนิยมอนุมานให้แขวนรองมีคุณสมบัติเป็น กราวด์ของระบบ ซึ่งตลอดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเรียก แขวนรองนี้ว่า กราวด์

หัวบันทึก และ ฟอส ที่ประกอบเข้าไว้ด้วยกันจะถูกเรียกว่า เฮดกิมบอลแอสเซมบลี หรือ เอชจีเอ (HGA) โดยที่สายนำสัญญาณนั้นจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับขั้วเขียน และขั้วอ่านของหัวบันทึก



ภาพที่ 2.30 ส่วนประกอบของเฮดกิมบอลแอสเซมบลี [60]

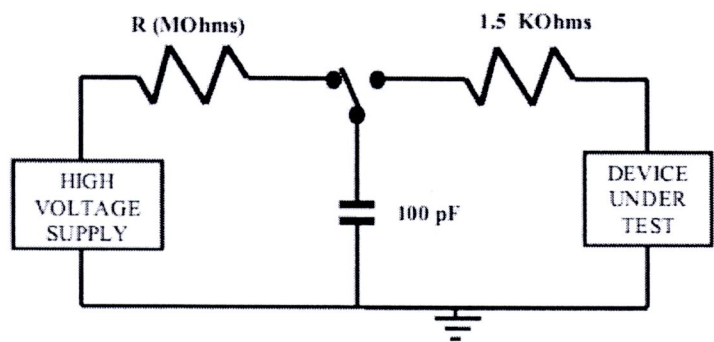
2.7 การคายประจุไฟฟ้าสถิต

การคายประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) เป็นผลที่เกิดจากการที่ประจุพื้นผิวของวัสดุที่มี ศักย์สูง ถูกถ่ายเทไปยังวัสดุที่มีศักย์ต่ำอย่างรวดเร็ว การคายประจุไฟฟ้าสถิตนี้ สามารถเกิดขึ้นได้ในหลายๆ ลักษณะ แต่โดยทั่วไปแล้ว นิยมทำการศึกษาผล จากการคายประจุไฟฟ้าสถิต โดยอาศัยแบบจำลองหลัก 3 ประเภทด้วยกันคือ (1) แบบจำลองการคายประจุไฟฟ้าสถิตจากตัวมนุษย์ (Human Body Model, HBM) (2) แบบจำลองการคายประจุไฟฟ้าสถิตจากเครื่องจักรกล (Machine Model,MM) และ (3) แบบจำลองการคายประจุ ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ทดสอบ (Charge Device Model , CDM)

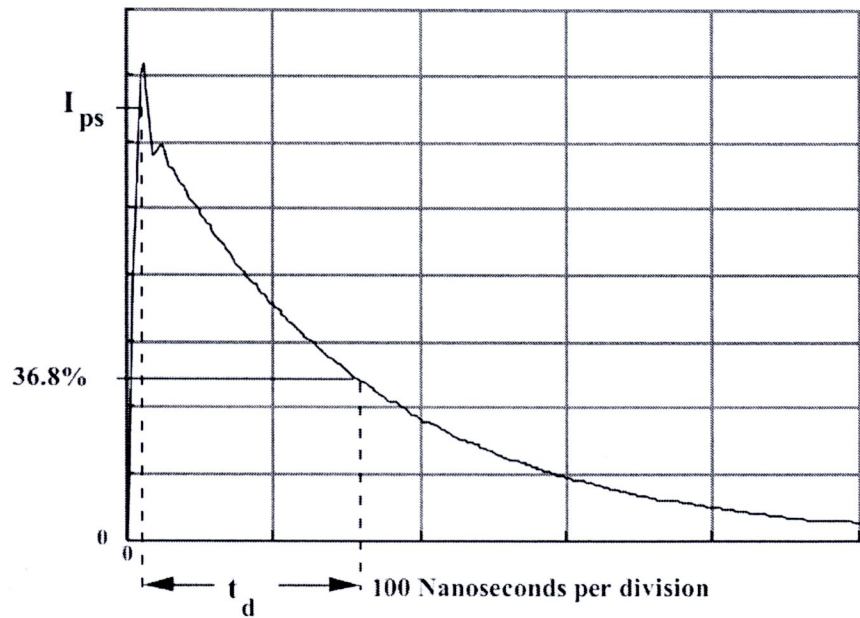
2.7.1 แบบจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิตจากตัวมนุษย์ (Human Body Model, HBM)

เป็นการจำลองรูปสัญญาณของแรงดันที่เกิดขึ้นจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตจากผู้ปฏิบัติงานไปยังอุปกรณ์ทดสอบ โดยใช้ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่ออนุกรมกับ ความต้านทาน (Resistance) โดยที่ ตัวเก็บประจุ แทนประจุที่ถูกสะสมอยู่ในตัวมนุษย์ และใช้ตัวต้านทานแทน เส้นทางในการคายประจุจากมนุษย์ไปยัง

อุปกรณ์ทดสอบ โดยทั่วไป ขนาดตัวเก็บประจุ และความต้านทาน กำหนดโดยค่ามาตรฐาน ซึ่ง ค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย ANSI/ESD STM5.1-2007 [61] และ JESD22-A114D [62] กำหนดให้ ขนาดตัวเก็บคือ 100 พิโคฟาราด และค่าความต้านทานคือ 1,500 โอห์ม ซึ่งคุณสมบัติของรูปคลื่นหลักที่เกิดจากแบบจำลองมนุษย์คือ เวลาช่วงขาขึ้นของคลื่น(t_r) (10% - 90% ของยอดคลื่น) มีค่าน้อยกว่า 10^{-9} วินาที และความยาวหางคลื่น (t_f) มีค่าประมาณ $(150 \pm 20) \times 10^{-9}$ วินาที รูปร่างของคลื่นวัดได้จากการวัดค่ากระแส (Current Probe) ซึ่งวงจรการทดสอบนั้นได้แสดงดังภาพที่ 2.31 และลักษณะรูปคลื่นที่เป็นไปตาม ANSI/ESD STM5.1-2007 ตามที่แสดงในภาพที่ 2.32



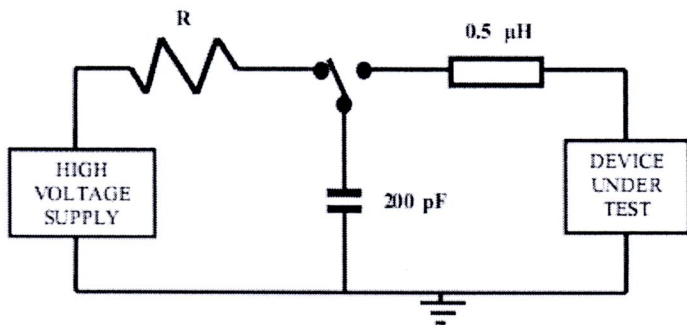
ภาพที่ 2.31 วงจรการทดสอบ HBM [63]



ภาพที่ 2.32 รูปคลื่นที่ได้จาก HBM ตาม มาตรฐาน ANSI/ESD STM5.1-2007 [61]

2.7.2 แบบจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิตในเครื่องจักรกล (Machine Model, MM)

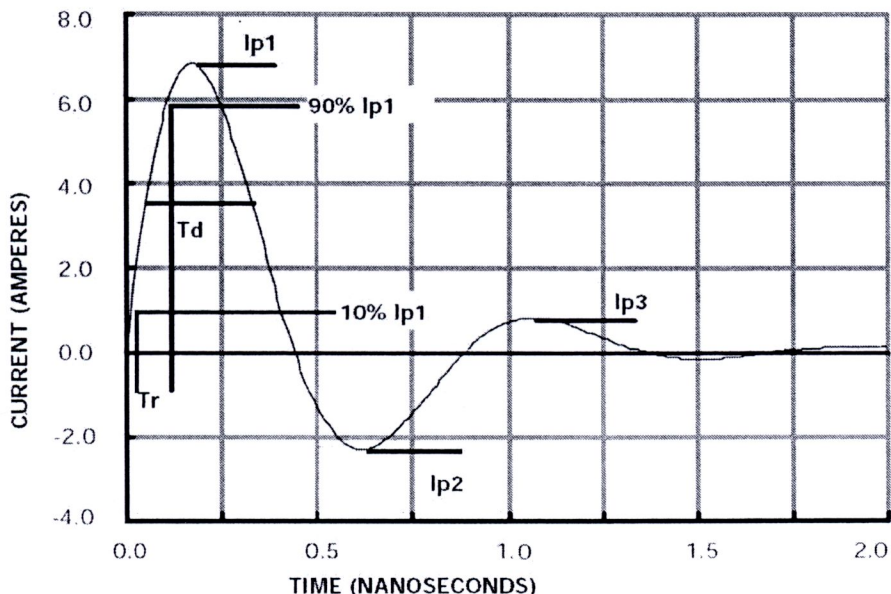
เป็นการทดสอบการคายประจุ จากเครื่องจักรกลไปยังอุปกรณ์ ทดสอบ โดยใช้ โดยใช้ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่ออนุกรมกับ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ดังภาพที่ 2.33 โดยที่ตัวเก็บประจุ แทนประจุที่ถูกสะสมอยู่ในตัวเครื่องจักรหรือเครื่องจักรอัตโนมัติ และใช้ตัวเหนี่ยวนำแทนเส้นทางการคายประจุจากเครื่องจักรไปยังอุปกรณ์ทดสอบ โดยทั่วไปค่ามาตรฐาน ขนาดตัวเก็บ และค่าความเหนี่ยวนำ กำหนดโดยค่ามาตรฐาน ซึ่ง ค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย ESD-STM 5.2-1999 [54] โดย กำหนดให้ ขนาดตัวเก็บประจุคือ 200 พิโคฟาราด และค่าความเหนี่ยวนำคือ 500 นาโนเฮนรี่



ภาพที่ 2.33 วงจรการทดสอบ MM [63]

2.7.3 แบบจำลองการเกิดไฟฟ้าสถิตในอุปกรณ์ (Charged Device Model, CDM)

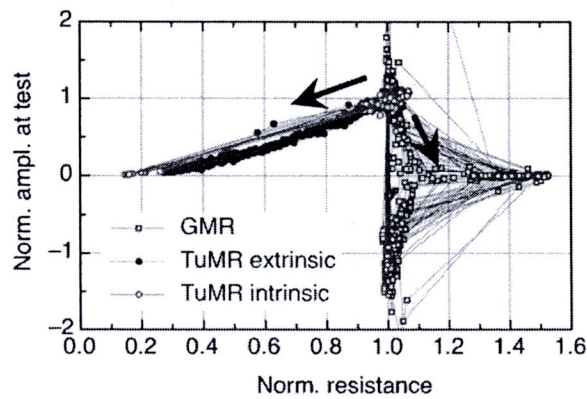
เป็นการทดสอบในกรณีที่อุปกรณ์มีประจุภายในตัวเองแล้วเกิดการคายประจุสู่ภายนอก ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากการเสียดสีระหว่างขาตัวนำและตัวถังของ IC หรือ เกิดจากขบวนการเหนี่ยวนำประจุโดยอาศัยสนามไฟฟ้า ซึ่งกระแสที่เกิดจากการคายประจุ โดย CDM นี้ จะมี ช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณที่เร็วมาก คือ น้อยกว่า 200×10^{-15} วินาที ตามที่แสดงในภาพที่ 2.34



ภาพที่ 2.34 รูปคลื่นกระแสที่ได้จากการทดสอบ ESD ในระบบการวัดขนาด 3.5 GHz [65]

2.8 ผลจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่มีต่อหัวอ่าน TMR

ผลจากการคายประจุที่มีต่อหัวบันทึกประเภท TMR นั้นยังคงไม่มีความชัดเจนในหลายๆประเด็น ซึ่งผลที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตนั้น โดยปกติแล้ว จะมีผลทำให้ความต้านทานของหัวบันทึกมีขนาดลดลง ซึ่งต่างจาก ผลจากการคายประจุที่มีต่อหัวอ่านแบบเก่า คือ การอ่านข้อมูลโดยอาศัย แผ่นฟิล์มบาง GMR ซึ่งการคายประจุจะมีผลทำให้ ความต้านทานเพิ่มขึ้น คุณลักษณะของการทะลายที่เกิดขึ้นใน หัวอ่านข้อมูล TMR จะมีลักษณะเหมือนกับการทะลายที่เกิดขึ้นในแผ่นฟิล์ม บาง TMR แต่ บางครั้งอาจจะเรียก ความเสียหายอย่างหนักว่า การทะลายแบบอินทรินซิก (Intrinsic Breakdown) และเรียกความเสียหายแบบเบาว่า การทะลายแบบเอ็กทรินซิก (Extrinsic) ดังภาพที่ 2.35

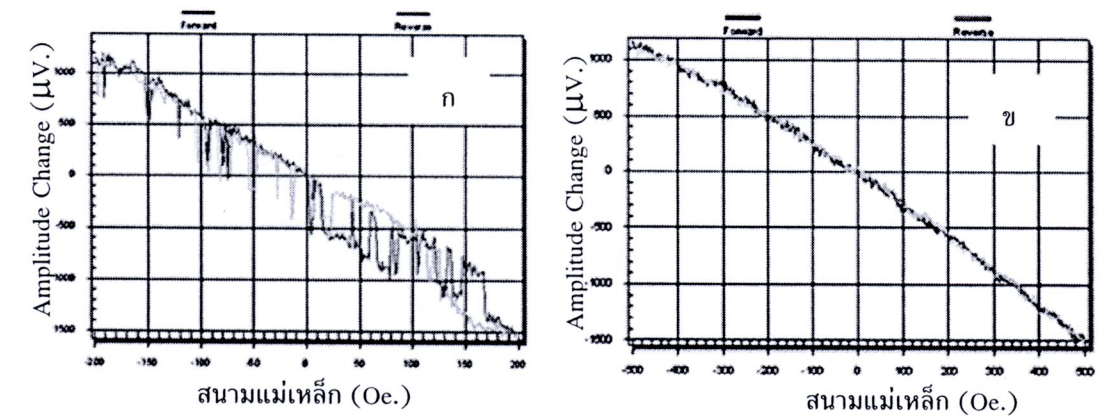


ภาพที่ 2.35 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึกชนิด TMR และ GMR ที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต [66]

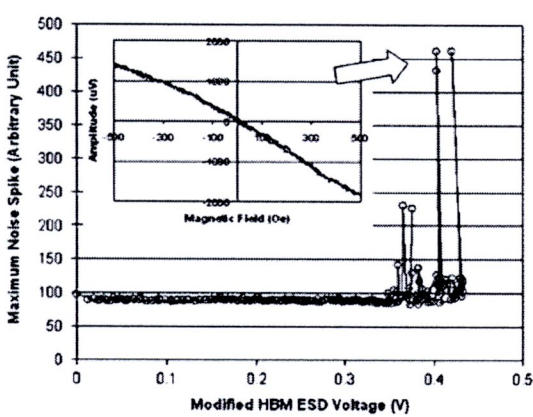
การศึกษาผลจากการคายประจุที่มีต่อหัวอ่าน TMR ก่อนหน้านี้ จะเป็นการศึกษาถึงผลของการคายประจุที่มีต่อความไม่เสถียรของการอ่านข้อมูลเป็นสำคัญ โดยในปี คศ. 2006 Feng Liu และ คณะ [57] ทำการศึกษาผลของการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่ส่งผลทำให้หัวอ่านเกิดความไม่เสถียรในการอ่านข้อมูล โดยอาศัยแบบจำลองแบบ HBM ซึ่งพบว่า ที่ระดับแรงดันการคายประจุที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ (อยู่ในช่วงไม่กี่ kHz) เส้นโค้งทรานเฟอร์จะมีการเปลี่ยนแปลง เป็นเส้นแบบเปิด (Open Loop) โดยที่ทั้งจากการจ่ายสนามแม่เหล็กไปหน้าและย้อนกลับนั้น จะสามารถเห็นได้ว่า มีการกระโดดของเส้นโค้งทรานเฟอร์ ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดสัญญาณรบกวนแบบ Random Telegraph แต่เมื่อทำการจ่ายสนามแม่เหล็กขนาด 9 kOe. ให้กับชั้นแม่เหล็กถาวรนั้น จะพบว่าเส้นโค้งทรานเฟอร์มีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบ แต่ยังคงมีความขรุขระอยู่บ้างตามที่แสดงในภาพที่ 2.36

ในส่วนของการศึกษาผลของการคายประจุที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูง (มากกว่า 100 MHz) จากภาพที่ 2.37 จะเห็นว่า ที่แรงดันประมาณ 0.35 V นั้น Maximum Noise Spike เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง และมีค่าสูงมากที่แรงดันมากกว่า 0.4 V แต่เมื่อทำการพิจารณา เส้นโค้งทรานเฟอร์กลับพบว่าเส้นโค้งทรานเฟอร์มีลักษณะที่ค่อนข้างจะปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเกิดสัญญาณรบกวน จากการคายประจุไฟฟ้าสถิตนั้น อาจจะไม่ได้เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นสารแม่เหล็ก และเมื่อทำการวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของความต้านทาน อันเนื่องมาจากการคายประจุ ตามที่แสดงในภาพที่ 2.38 พบว่าขนาดของความต้านทานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่ขนาดแรงดันมากกว่า 0.3 V และมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 7% ที่ขนาดแรงดันประมาณ 0.4 V นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ที่ขนาดแรงดันระหว่าง 0.3-0.4 V มีการแกว่งของการเปลี่ยนแปลงขนาดความต้านทาน ซึ่งผู้ท้าววิจัยเชื่อว่า เป็นผลที่เกิดจากการเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ของอ็อกไซด์ ภายในชั้นฉนวน หรือ การเริ่มเกิดพินโฮล ซึ่งในงานวิจัยของ Fang Liu ไม่ได้ให้ความชัดเจนเกี่ยวกับสาเหตุที่ทำให้ ความต้านทานของหัวอ่านเกิดการแกว่ง อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยชิ้นนี้ทำให้ทราบว่า

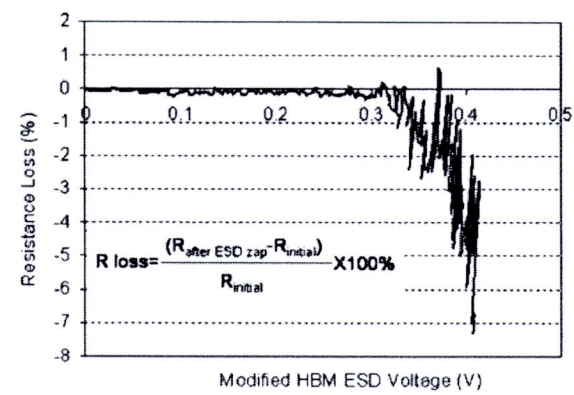
ปัจจัยสำคัญที่ทำให้หัวอ่านข้อมูลเริ่มเกิดความเสียหาย เป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในชั้นฉนวน และ ไม่มีผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสาร



ภาพที่ 2.36 เส้นโค้งทรานส์เฟอร์ของหัวบันทึกที่เกิดความเสียหายจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต [67]
(ก) ก่อนจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชั้นแม่เหล็กถาวร
(ข) หลังจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับชั้นแม่เหล็กถาวร



ภาพที่ 2.37 ผลของแรงดันจากแบบจำลอง HBM ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Maximum Noise Spike
ภาพแทรกแสดงเส้นโค้งทรานส์เฟอร์ ที่แรงดันการคายประจุประมาณ 0.4 V [67]



ภาพที่ 2.38 ผลของแรงดันจากแบบจำลอง HBM ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน [67]