

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารอินทรีย์ชนิดเปลี่ยนความต้านทาน

ไฟฟ้าภายใต้สนามแม่เหล็ก

Organic Electronic Devices Based on Magnetoresistance

กรกช อ่อนละออ ทศวิทยากรณ์ ทิววงศ์

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับแมกนีโตริซิสเตนซ์สารอินทรีย์ (Organic magnetoresistance, OMAR) หรือสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกค้นพบเมื่อไม่นานมานี้และยังไม่เป็นที่แน่ชัดถึงสาเหตุของกลไกที่ทำให้เกิดพฤติกรรมดังกล่าว โดยในบทความนี้จะทบทวนถึงบทความวิจัยที่มีมาก่อนหน้าจากหลาย ๆ กลุ่มวิจัย โดยวัสดุ OMAR สามารถเปลี่ยนค่าความต้านทาน (ลดลง) ได้มากถึง 10% ที่สนามแม่เหล็กเพียง 10 mT ที่อุณหภูมิห้อง โดยกลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในสารอินทรีย์จะถูกระบุและอธิบายโดยใช้ทฤษฎีของวัสดุประเภทไม่ใช่แม่เหล็ก (Non-magnetic materials) เป็นพื้นฐาน โดยอุปกรณ์ที่ใช้วัสดุ OMAR ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นใหม่ที่จะช่วยพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางด้านนาโนและไมโครให้มีต้นทุนที่ต่ำลง เช่น จอแสดงผล (Organic light emitting diode, OLED) ที่โค้งงอได้และอุปกรณ์ประเภททรานซิสเตอร์บนฐานรองรับพลาสติก

Abstract

This paper presents the scientific study of the recently discovered organic magnetoresistance (OMAR) whose underlying mechanism is currently not known with certainty, which briefly reviewed the major finding of prior works that were done by other groups. They found that the resistance of OMAR devices can be decreased up to 10% at 10 mT magnetic fields at room temperature. In addition, the mechanisms of OMAR were discussed by theoretical of nonmagnetic materials. OMAR devices have recently attracted considerable attention as an emerging technology that will allow the development of micro/nano electronic devices, potentially, at a very low cost such as flexible organic light-emitting diodes, flexible organic field-effect transistors.

Keywords : Organic, Magnetoresistance, OMAR, สารอินทรีย์, แม่เหล็ก

1. บทนำ

วัสดุแมกนีโตริซิสเตนซ์สารอินทรีย์ (OMAR) ได้มี เรื่องที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากสารอินทรีย์ การรายงานครั้งแรกในปี 2003 [1] ซึ่งถือได้ว่าเป็นหนึ่งใน ในยุคปัจจุบัน หลังจากนั้นเป็นต้นมาได้มีงานวิจัยหลายชิ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

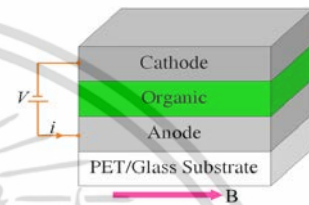
ที่กล่าวถึงการทดลองและทฤษฎีของวัสดุ OMAR [2] เนื่องจากมีค่าความแตกต่างของสมบัติทางไฟฟ้าสูงในขณะที่ใช้สนามแม่เหล็กต่ำและที่สำคัญสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้อง [1] จากที่ผ่านมาพบว่า การเปลี่ยนความต้านทานภายใต้สนามแม่เหล็ก (Magnetoresistance, MR) ของสารอินทรีย์เกิดขึ้นในสารประเภทโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq_3) รวมถึงคอนจูเกตพอลิเมอร์ เช่น poly(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl) (PFO) เป็นต้น [3] สำหรับในกลไกของวัสดุ OMAR จะอยู่บนพื้นฐานความสัมพันธ์ของการสปินของอนุภาคที่อยู่ในลักษณะกึ่งอนุภาค (Quasi-particles) เช่น โพลารอน (Polarons) และ เอ็กซิตอน (Excitons) ภายในเนื้อสาร ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะเกิดการสปินเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก [1] จึงมีโอกาที่เป็นไปได้ในการพัฒนาไปสู่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากสารอินทรีย์ในอนาคต เช่น เซนเซอร์ [4] และหน่วยความจำ [5] นอกจากนี้วัสดุ OMAR ไม่จำเป็นต้องใช้ขั้วไฟฟ้าประเภทเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) เหมือนกับวัสดุประเภท Giant magnetoresistance หรือ GMR ดังนั้นอุปกรณ์จากวัสดุ OMAR จึงมีความยืดหยุ่นในการเลือกฐานรองรับมาสร้างเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ในต้นทุนที่ต่ำกว่าวัสดุ MR อื่น ๆ เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำไม่สูงมาก [6] เช่น บนฐานรองรับพลาสติกที่โค้งงอได้ รวมถึงบนฐานรองรับที่โปร่งใส จึงอาจทำให้อุปกรณ์ประเภท MR ในปัจจุบันสามารถที่จะพัฒนาออกไปได้ไกลขึ้น เช่น หน่วยความจำ Magnetic random access memory (MRAM) ที่ใช้วัสดุ GMR ที่มีฟิล์มโลหะประกบด้วยฟิล์มแม่เหล็กทั้งด้านบนและล่างจากเดิมที่หัวอ่านและบันทึกข้อมูลเป็นแถบแม่เหล็ก อาจมีหัวอ่านและบันทึกข้อมูลเป็นแบบออปติคัลรวมอยู่ด้วยหากเปลี่ยนเป็นวัสดุ OMAR บนฐานรองรับที่โปร่งใส และการประยุกต์ใช้กับหน้าจอแสดงผลแบบสัมผัส [7]

บทความนี้นำเสนอหลักการวิเคราะห์สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เพื่อศึกษาว่ามีคุณสมบัติเป็นวัสดุ OMAR หรือไม่ โดยจะนำเสนอจากการใช้โครงสร้างอย่างง่าย ซึ่งคือการทดสอบโดยใช้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบชั้นเดียวที่อยู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างสองขั้วไฟฟ้า ตลอดจนอธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ OMAR

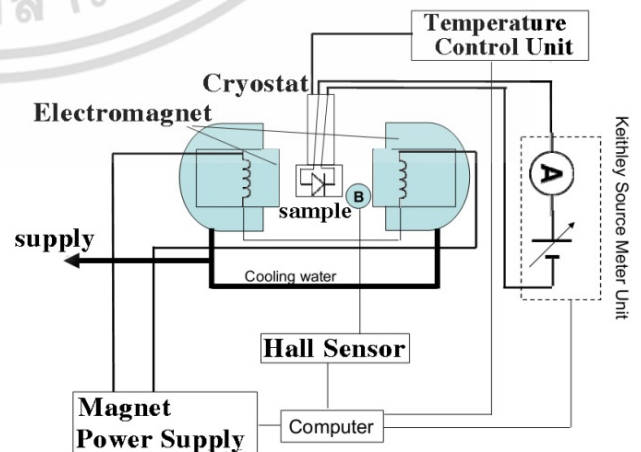
2. โครงสร้างและระบบการทดลอง

ในการทดสอบวัสดุ OMAR จะใช้การเตรียมชิ้นงานอย่างง่าย หรือที่เรียกว่าโครงสร้างแบบ โลหะ/ฉนวน/โลหะ (metal/insulator/metal, MIM) แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานสำหรับทดสอบวัสดุ OMAR

โดยปกติหากปัจจัยอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ แต่เมื่อวัสดุ OMAR อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กค่าความต้านทานจะสามารถเปลี่ยนแปลงไปถึงแม้ความหนาจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงก็ตาม [5] โดยชิ้นงานที่เตรียมเสร็จจะถูกวางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งข้อดีของวัสดุ OMAR คือไม่ต้องคำนึงถึงทิศทางและมุมระหว่างระนาบของฟิล์มกับสนามแม่เหล็ก [7,9] ทำให้ง่ายต่อการทดสอบและการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยแผนภาพระบบทดสอบวัสดุ OMAR แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบตรวจสอบวัสดุ OMAR [8]

ชิ้นงานที่เตรียมเสร็จจะถูกติดอยู่ที่ปลายของอุปกรณ์รักษาาระดับอุณหภูมิต่ำให้คงที่ (Cryostat) ที่อยู่ระหว่างขั้วของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีที่ต้องการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ (สำหรับบทความนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะการตรวจสอบวัสดุ OMAR ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากสามารถจัดเตรียมระบบได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ) สำหรับหลักการตรวจวัดจะทำการวัดค่าความต้านทานของตัวชิ้นงานที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ เพื่อศึกษาว่าสนามแม่เหล็กมีผลต่อสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่นำมาศึกษาหรือไม่

โดยที่ความเข้มสนามแม่เหล็กจะถูกวัดโดยตัวรับรู้ฮอลล์ (Hall sensor) และอัตราส่วนของค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้สนามแม่เหล็กจะถูกอธิบายด้วยค่าของ $\Delta R/R$ ซึ่งจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยค่าอัตราส่วนของสมบัติทางไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{\Delta R}{R} \equiv \frac{R(B) - R(0)}{R(0)} = \frac{\frac{V}{I(B)} - \frac{V}{I(0)}}{\frac{V}{I(0)}} \approx -\frac{\Delta I}{I} \times 100\% \quad (1)$$

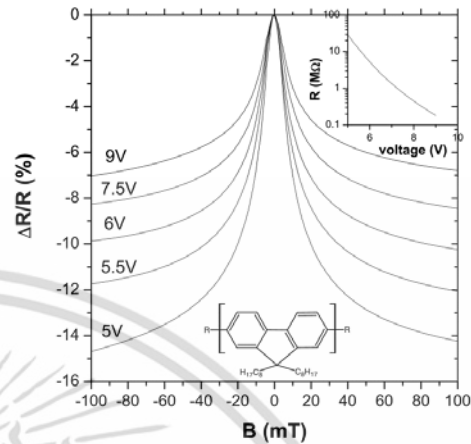
เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานผ่านอุปกรณ์, $R(0)$ คือ ความต้านทานขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก และ $R(B)$ คือ ความต้านทานขณะมีสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถพิจารณาได้โดยง่ายจากกฎของโอห์ม $V=IR$

3. OMAR ในวัสดุพอลิเมอร์

ในปี ค.ศ. 2004 T. L. Francis และคณะ [5] ได้ศึกษาสมบัติ MR ของวัสดุพอลิเมอร์ PFO พบว่าผลของ MR ในวัสดุพอลิเมอร์มีค่าที่สูงมาก โดยค่าความต้านทานสามารถเปลี่ยนแปลงไป $\Delta R/R=10\%$ ที่สนามแม่เหล็ก 10 mT ในอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 3

โดยปกติแล้ววัสดุสารกึ่งตัวนำเมื่อนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งได้แก่ ค่าความต้านทานที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นในการทดลองของ T. L. Francis และคณะจึงได้ใช้ PEDOT บนขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (ITO) เป็นขั้วบวก ในขณะที่ใช้ Ca ด้านบนเป็นขั้วลบ เพื่อเป็นการลดค่าความ

ต้านทานของรอยสัมผัส หากพิจารณาจากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อ $R(B)$ มีค่าลดลงจะส่งผลให้ค่า $\Delta R/R$ มีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้น



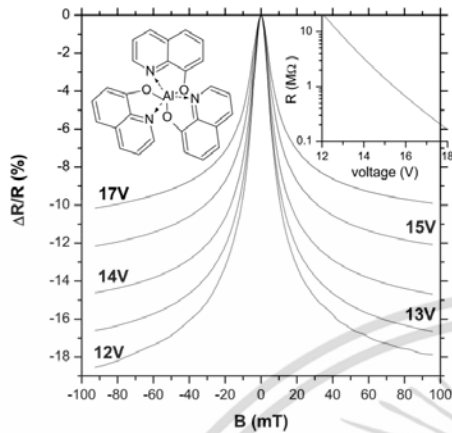
รูปที่ 3 ความต้านทานของอุปกรณ์ที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้าง ITO/PEDOT/PFO/Ca ที่แรงดันต่างๆ (ภาพเล็ก: ความต้านทานของอุปกรณ์เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก) [8]

จากการทดสอบของ Francis [5] ถึงสมบัติความเป็นวัสดุ OMAR ในรูปที่ 3 เห็นได้ว่าถึงแม้แรงดันไฟฟ้าจะคงที่ แต่เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลให้ค่า $\Delta R/R$ ลดลงอย่างมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์เพิ่มขึ้นนั่นเอง และจากพฤติกรรมของ OMAR จึงทำให้มองเห็นถึงความเป็นไปได้ของการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พลังงานต่ำโดยการใช่วัสดุ OMAR เช่น อุปกรณ์ที่สามารถทำงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ อาจะทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้าเพียง 5 โวลต์ เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก

4. OMAR ในวัสดุประเภทโมเลกุลขนาดเล็ก

ได้มีการพบการแสดงผลคุณสมบัติของ MR ในวัสดุพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงสารกึ่งตัวนำประเภทโมเลกุลขนาดเล็กในโครงสร้างแบบพายคอนจูเกต (π -conjugated) โดย Ö. Mermer และคณะ [3] แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าสูงประมาณ 10% ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีค่า 10 mT จึงให้ผลที่สอดคล้องกับวัสดุพอลิเมอร์ PFO ในหัวข้อที่ผ่านมา และเช่นเดียวกันสำหรับการทดสอบใน Alq₃ พบว่าการลดลงของค่าความ

ด้านทานมีค่าที่ไม่ขึ้นกับมุมระหว่างระนาบของฟิล์มบาง และสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4 ความต้านทานของอุปกรณ์ที่อุณหภูมิห้อง โครงสร้าง ITO/PEDOT/Alq₃/Ca ที่แรงดันต่างๆ (ภาพเล็ก: ความต้านทานของอุปกรณ์เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก) [8]

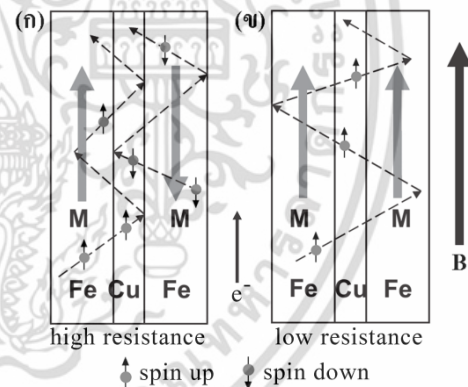
สำหรับผลกระทบที่เกิดจากค่าความต้านทานที่บริเวณ ขั้วไฟฟ้าซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถแสดงสมบัติของ OMAR ออกมาหรือแสดงออกมาได้ไม่ชัดเจน สามารถ พิจารณาได้จากระดับพลังงาน (Work function) ที่มีความ เหมาะสมกันระหว่างสารกึ่งตัวนำและขั้วโลหะ

5. กลไกการเกิด OMAR

โดยส่วนใหญ่กลไกที่ทำให้เกิดวัสดุประเภท MR มักจะ อาศัยคุณสมบัติจากวัสดุประเภทเฟอร์โรแมกเนติก หรือ แม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic material) ถึงแม้ว่าการเกิด MR ในวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะยังไม่เป็นที่แน่ ชัด แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาจากหลายๆ กลุ่มวิจัยสามารถ ที่จะอธิบายพฤติกรรมเหล่านี้ได้โดยอ้างอิงกลไกที่เกิด MR ในวัสดุประเภทที่เป็นแม่เหล็ก (Magnetic) และ ประเภทที่ไม่ใช่แม่เหล็ก (Non-magnetic) ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้อง อธิบายถึงปรากฏการณ์ MR ในวัสดุทั้งสองประเภทเพื่อให้ เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่ออยู่ภายใต้ สนามแม่เหล็ก แต่วัสดุ OMAR เป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่ ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ดังนั้นกลไกที่สามารถ นำมาใช้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดขึ้น จึงควรจะเป็นกลไกที่เกิดกับประเภทที่ไม่ใช่แม่เหล็ก

5.1. การเกิด MR ในวัสดุแม่เหล็ก

สำหรับสิ่งที่แตกต่างกันระหว่างการเกิดปรากฏการณ์ MR ในวัสดุประเภทแม่เหล็กกับสารอินทรีย์ก็คือมุม ระหว่างระนาบของฟิล์มกับสนามแม่เหล็ก ในวัสดุประเภท แม่เหล็กนั้นความต้านทานทางไฟฟ้าจะแตกต่างกันไปเมื่อ มุมระหว่างทิศทางการไหลของกระแสกับสนามแม่เหล็ก เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลมาจากการสปินของอิเล็กตรอน โดยปกติการสปินจะมาจากการเคลื่อนที่ของประจุ โดยการ สปินของอิเล็กตรอนจะมีอยู่สองทิศทาง เรียกว่า สปินขึ้น (Spin up) และ สปินลง (Spin down) ซึ่งในโลหะทั่วไปการ สปินจะเป็นแบบสุ่มทำให้กระแสสุทธิที่ แต่สำหรับวัสดุ ประเภทแม่เหล็กเฟอร์โรเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสปินไปในทิศ เดียวกัน จึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้น สำหรับ ตัวอย่างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้คุณสมบัติของวัสดุ แม่เหล็กเฟอร์โรและการสปินของอิเล็กตรอนได้แก่ GMR



รูปที่ 5 อุปกรณ์ประเภท GMR ชั้นตัวนำที่ไม่ใช่แม่เหล็ก (Cu) ถูกประกบด้วยชั้นที่เป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (Fe) ถูกสารสีเทา (M) แสดงทิศของสนามแม่เหล็ก (Magnetization) ภายในวัสดุเฟอร์โร และเส้นประแสดงถึงระยะการ เคลื่อนที่อิสระของอิเล็กตรอน [9]

GMR ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการทำงานของหัวอ่าน และเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ โดยโครงสร้างอย่างง่ายแสดง ดังรูปที่ 5 ซึ่งทิศทางสปินของอิเล็กตรอนในชั้น แม่เหล็กเฟอร์โรทั้งสองด้านสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วย สนามแม่เหล็กภายนอก หากให้กระแสไหลผ่านอุปกรณ์ อิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปจะมีทั้งสปินขึ้นและสปินลงใน

ปริมาณเท่า ๆ กัน แต่เนื่องจากว่ามีชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรประกอบอยู่ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ดังนั้นอิเล็กตรอนในชั้นที่ไม่ใช่แม่เหล็กจึงถูกกระเจิง โดยการกระเจิงของอิเล็กตรอนนี้เองที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของอุปกรณ์อย่างชัดเจนเมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากเมื่อชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรทั้งสองมีทิศสนามแม่เหล็กไปในทิศเดียวกัน ดังรูปที่ 5(ข) จะทำให้อิเล็กตรอนที่มีทิศสปินเพียงทิศเดียวเท่านั้นถูกกระเจิงมากที่สุด (เส้นทางอิสระเฉลี่ยสูง) แต่เมื่อชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรทั้งสองมีทิศสนามแม่เหล็กตรงข้ามกันจะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ไม่ใช่แม่เหล็กมีทั้งสปินขึ้นและสปินลงถูกกระเจิงในปริมาณเท่า ๆ กัน ดังรูปที่ 5(ก) (เส้นทางอิสระเฉลี่ยต่ำ) ทำให้ความต้านทานของอิเล็กตรอนในการเคลื่อนที่ผ่านชั้นที่ไม่ใช่แม่เหล็กสูงกว่าในกรณีแรก ซึ่ง A. Fert และ P. Grünberg ได้รับรางวัลโนเบลในสาขาวิชาฟิสิกส์สำหรับการค้นพบคุณสมบัติ GMR ในปี ค.ศ. 2007

จากหลาย ๆ งานวิจัยทำให้ทราบว่าความแตกต่างของ $\Delta R/R$ ยังมีค่าไม่สูงมากเนื่องจากทั้งสามชั้นในโครงสร้างของ GMR ล้วนเป็นโลหะทั้งสิ้น สำหรับอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจคือ Tunneling magnetoresistance (TMR) โดยโครงสร้างของ TMR จะแตกต่างจาก GMR เพียงตำแหน่งเดียว คือ จะแทนที่ตัวนำที่ไม่ใช่แม่เหล็กชั้นกลางด้วยฉนวนที่มีความบางในระดับนาโนเมตร [9] ทำให้กระแสสามารถเดินทางแบบทะลุผ่านได้ (Tunnelling) ดังนั้นกระแสจะไหลแบบตั้งฉากกับระนาบ คือ จะไหลผ่านชั้นทั้งสาม ซึ่งในปัจจุบันสามารถที่จะสร้างอุปกรณ์ประเภท TMR ที่สามารถแสดงค่า MR ได้สูงถึง 200% ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเหมาะที่จะนำมาพัฒนาในอุตสาหกรรมประเภทหน่วยความจำ เช่น MRAM [10]

5.2. การเกิด MR ในวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก

สำหรับในวัสดุที่ไม่ใช่แม่เหล็ก กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนความต้านทานทางไฟฟ้ามีดังนี้ (1) Classical MR, (2) Hopping MR, (3) Electron-Electron interaction และ (4) Weak localization (WL) [3,5] สำหรับในกลไกที่ 1-3 นั้น จะทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อย

ขณะที่พฤติกรรมของ OMAR ความต้านทานจะลดลงอย่างมาก โดยแต่ละกลไกสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. **Classical MR** ความต้านทานที่เปลี่ยนไปสามารถประมาณได้จาก $\mu^2 B^2$ เมื่อ μ คือความคล่องตัวของพาหะ และ B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก เมื่อทดลองใช้ค่าโดยทั่วไป $\mu=10^{-8} \text{ m}^2/\text{Vs}$ [8] และหากพิจารณาที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก 10 mT จะทำให้สามารถประมาณค่า $\Delta R/R$ ได้เป็น 10^{-20} ซึ่งค่าที่ได้นี้มีค่าน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับวัสดุ OMAR ที่มีค่า $\Delta R/R$ มากถึง 10% ที่สนามแม่เหล็กค่าเดียวกัน ดังนั้น Classical MR จึงไม่สามารถใช้ในการอธิบายถึงพฤติกรรมของ OMAR ได้

2. **Hopping MR** สนามแม่เหล็กจะทำให้ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนหดสั้นลง ทำให้การซ้อนทับกันระหว่างอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มีค่าน้อยลง ส่งผลให้ความต้านทานของตัวอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น

3. **Electron-Electron interaction** เนื่องจากพาหะส่วนมากมักเกิดปฏิสัมพันธ์กันเองเมื่อมีการแพร่อย่างช้า ๆ ซึ่งภายใต้สนามแม่เหล็กปฏิสัมพันธ์ระหว่าง อิเล็กตรอน-อิเล็กตรอน จะมีการเปลี่ยนแปลงและส่งผลให้ความต้านทานลดลง แต่จะเกิดเฉพาะในกรณีที่พลังงานความร้อน ($k_B T$) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับพลังงานของซีแมน (Zeeman energy, ΔE) ตามสมการ

$$\Delta E = g\mu_B B \quad (2)$$

เมื่อ g คือค่าคงที่ (สำหรับสารอินทรีย์ $g=2$), μ_B คือ Bohr magneton จากสมการที่ 2 หากพิจารณาที่สนามแม่เหล็ก 10 mT จะได้ว่า ΔE ประมาณ $1 \mu\text{eV}$ ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำ สารอินทรีย์มีค่าพลังงานของซีแมนน้อยกว่าค่าพลังงานจากความร้อนมาก ดังนั้นหลักการนี้จึงไม่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ของ OMAR ได้

4. **Weak localization (WL)** ในทางทฤษฎีของ WL สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการคู่ควบสปิน-ออร์บิต (Spin-orbit coupling) การคู่ควบนี้มีผลต่อค่าโมเมนต์แม่เหล็ก เช่น การคู่ควบนี้ทำให้ค่าโมเมนต์แม่เหล็กของสารอินทรีย์คงเหลือแต่โมเมนต์เชิงสปิน และโมเมนต์เชิงสปินนี้จะถูกเปลี่ยนทิศโดยสนามแม่เหล็กทำให้มีผลโดยตรงต่อค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ สำหรับกลไกของ WL เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางควอนตัม ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีจากการศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของพาหะในโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยมีพื้นฐานมาจากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอนเนื่องจากเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันทางควอนตัม (Constructive quantum interference) เมื่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก การแทรกสอดจะถูกทำลายจากการหน่วงเฟส หากเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบมีระยะเกินกว่าความยาวอาพันธ์ของอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระไม่มีการกระเจิงกลับ ส่งผลให้ความต้านทานลดลง

จากพฤติกรรมการเปลี่ยนค่าความต้านทานของอุปกรณ์จึงได้มีการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุ OMAR ในด้านต่าง ๆ จากงานวิจัยที่หลากหลาย [2-6] ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะสำคัญของความเป็นไปได้ในการนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการศึกษาแมกนีโตริซิสแดนซ์สารอินทรีย์ (OMAR) โดยพฤติกรรมของวัสดุประเภทนี้แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์สามารถทำให้อุปกรณ์ลดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กจากกลไกของ WL โดยระบบทดสอบที่นำเสนอขึ้นสามารถจัดเตรียมได้โดยง่ายอีกทั้งยังสามารถพัฒนาไปสู่การทดสอบในด้านอื่น ๆ เช่น อิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ และ โฟโตเคอเรนซ์สเปกโตรสโคปี ภายใต้สนามแม่เหล็ก

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Kalinowski, M. Cocchi, D. Virgili, P. Di Marco and V. Fattori, "Magnetic field effects on emission and current in Alq₃-based electroluminescent diodes," Chem. Phys. Lett., Vol. 380. pp. 710-715, 2003.
- [2] Z. G. Yu, "Spin-Orbit Coupling, Spin Relaxation, and Spin Diffusion in Organic Solids," Physical

Review Letters, Vol. 106, pp. 106602(1-4), 2011.

- [3] Ö. Mermer, G. Veeraraghavan, T. L. Francis, Y. Sheng, D. T. Nguyen, M. Wohlgenannt, A. Köhler, M. K. Al-Suti and M. S. Khan, "Large magnetoresistance in nonmagnetic π -conjugated semiconductor thin film devices," Phys. Rev. B, Vol. 72, pp. 205202(1-12), 2005.
- [4] S. Majumdar, H. S. Majumdar, D. Tobjörk and R. Österbacka, "Towards printed magnetic sensors based on organic diodes," Phys. Status Solidi A, Vol. 206, pp. 2198-2201, 2009.
- [5] T. L. Francis, Ö. Mermer, G. Veeraraghavan and M. Wohlgenannt, "Large magnetoresistance at room temperature in semiconducting polymer sandwich devices," New J. Phys., Vol. 6, pp. 185-193, 2004.
- [6] H. Kang, C. H. Park, J. Lim, C. Lee, W. Kang and C. S. Yoon, "Power law behavior of magnetoresistance in tris(8-hydroxyquinolino) aluminum based organic light-emitting diodes," Organic Electronics Vol. 13, pp. 1012-1017, 2012.
- [7] <http://www.iop.org/EJ/mmedia/1367-2630/6/1/185>
- [8] Y. Sheng, "A study of magnetoresistance in organic semiconductors with varying strengths of hyperfine and spin-orbit coupling," Dissertation, University of Iowa, 2008.
- [9] S. Liu Q. Huang, Y. Li and W. Zhen, "Experimental research on hysteresis effects in GMR sensors for analog measurement applications," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 182, pp. 72-81, 2012.
- [10] S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice and B. Hughes, "Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers," Nature Materials, Vol. 3, pp. 862-867, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้