

ความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่และสปินทรอนิกส์

Giant Magnetoresistance and Spintronics

กฤษกร ปาसानไ¹

Krisakron Pasanai¹

Received: 15 May 2013; Accepted: 20 August 2013

บทคัดย่อ

ความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นในรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีสมบัติทางด้านแม่เหล็กและฉนวนแม่เหล็ก เช่น รอยต่อระหว่างวัสดุเฟอร์โรแมกเนตและโลหะปกติ เป็นต้น มีสมบัติในการกั้นกระแสสปินของอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อได้ ด้วยเหตุนี้การเพิ่มของค่าความต้านทานดังกล่าวจึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในงานวิจัยในปัจจุบันเป็นอย่างมาก โดยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใส่พลังงานศักย์ที่มีผลทำให้สปินเปลี่ยนและไม่เปลี่ยนทิศทาง ณ บริเวณรอยต่อ หรือการเพิ่มจำนวนชั้นของวัสดุในรอยต่อ เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้ค่าความต้านทานทางด้านแม่เหล็ก คือ การควบคุมการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของอิเล็กตรอนที่มีสปินต่างกันเพื่อสร้างสถานะทางควอนตัมเพื่อใช้ในงานด้านการเก็บข้อมูลในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์โดยเรียกศาสตร์แบบนี้ว่า สปินทรอนิกส์ กล่าวคือ เป็นการศึกษาการควบคุมและการสะสมของสปินในระบบสถานะของแข็ง นอกจากนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานทางด้านแม่เหล็กยังเกี่ยวข้องกับวัสดุชนิดที่นำมาใช้ในรอยต่อ เช่น สมบัติของวัสดุในรอยต่อ ผลของการคู่ควบของสปินและวงโคจรของอนุภาคนำไฟฟ้าในวัสดุ เป็นต้น

คำสำคัญ: ความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ สปินทรอนิกส์ วัสดุแม่เหล็ก

Abstract

Giant magnetoresistance (GMR) occurs in a magnetic tunnel junction between magnetic and nonmagnetic materials, such as a ferromagnet/normal metal interface. This resistance can block the spin current across the junctions. Thus, this topic is an interesting and timely research project. An increase of this resistance embeds the spin-flip and non-spin-flip potentials at the interfaces, and increasing the number of material layers in the junctions. The application of this resistance is used to control electrons across the junction to produce quantum states to store information in computer devices. This field is called spintronics, and concerned with the study of control and manipulation of spin degrees of freedom in solid state systems. Moreover, there are other requisites that affect the GMR as well, such as material property and spin orbit coupling of conduction particles in the junctions.

Keywords: Giant magnetoresistance, spintronics, magnetic materials

บทนำ

ในยุคปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์เข้ามามีส่วนสำคัญในชีวิตประจำวันค่อนข้างมาก กล่าวคือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่พบเห็นหรือใช้สำหรับการดำเนินชีวิตล้วนแล้วแต่เกี่ยวข้องกับการประมวลผล การเก็บข้อมูล การแปรสัญญาณ เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้มีพื้นฐานมาจากคอมพิวเตอร์เหมือนกัน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าวิวัฒนาการทางด้านคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์การสื่อสารที่เกี่ยวข้องกับคอมพิวเตอร์ได้มีขนาดที่เล็กลงแต่กลับมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 1 เช่น

ประมวลผลได้แม่นยำขึ้น ทำงานและตอบสนองได้เร็วขึ้น บรรจุข้อมูลได้มากขึ้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามจากการทำนายของศาสตราจารย์ กอร์ดอน มัวร์ ที่ระบุว่าจำนวนทรานซิสเตอร์บนแผงวงจรจะเพิ่มเป็นจำนวนเท่าตัวในทุกๆ สองปีตั้งแต่ปี 1975 ในรูปที่ 2 ซึ่งกฎนี้ได้รับการพิสูจน์และยืนยันจากอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์หลายๆ ชนิด เช่น หน่วยประมวลผล RAM เป็นต้น จากการพิจารณาจากกฎนี้จะพบว่า ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์จะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นแต่การเพิ่มจำนวนทรานซิสเตอร์ดังกล่าวย่อมเกิดข้อจำกัดหรือผลเสียเกี่ยวกับ

¹ อาจารย์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Lecturer, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham, 44150 Thailand

อุปกรณ์ ซึ่งผลดังกล่าวเกิดเนื่องจากความร้อนของการกระจายตัวของกระแสประจุและผลของขนาดทางควอนตัมในอุปกรณ์ขนาดเล็ก เป็นต้น ซึ่งแน่นอนว่าย่อมส่งผลในระยะยาวต่อการประมวลผลและการเก็บข้อมูลของอุปกรณ์

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยต่างๆ ในด้านนี้จึงมุ่งเน้นหาวิธีการใหม่ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถลดข้อจำกัดและผลเสียดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น สปิน-อิเล็กทรอนิกส์ หรือ สปินทรอนิกส์ (Spintronics)¹⁻³ ถือเป็นอุปกรณ์ใหม่ที่นักวิจัยพยายามสร้างเพื่อตอบโจทย์ดังกล่าว ซึ่งหลักการทำงานและการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ จะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป



Figure 1 (a) Shows evolution of computers and devices, and (b) a decrease of device size but higher efficiency about information (ที่มา: <http://www.thaigoodview.com>)

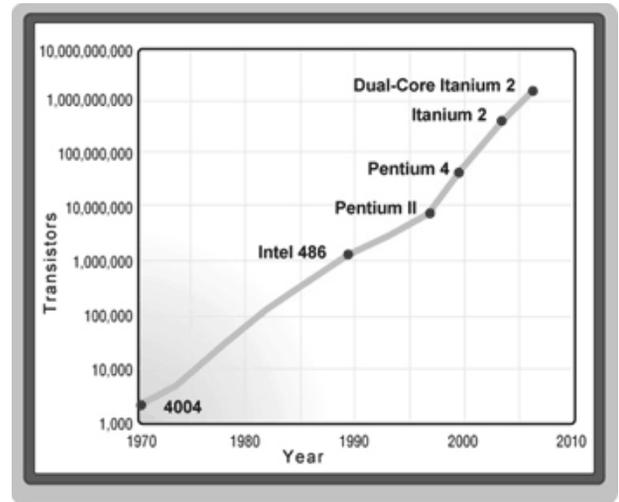


Figure 2 Shows an increase of the number of transistors as a function of year within Moore's law (ที่มา: <http://www.metaverseroadmap.org>)

ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ในรอยต่อระหว่างวัสดุและจุดกำเนิดสปินทรอนิกส์
 ในปี ค.ศ. 2007 รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ได้มอบให้กับนักวิทยาศาสตร์ 2 ท่านคือ ศาสตราจารย์ ปีเตอร์ กรีนเบิร์ก (Prof. Peter Grunberg)⁴ และศาสตราจารย์ อัลเบิร์ต เฟิร์ต (Prof. Albert Fert)⁵ ที่มาจากต่างห้องปฏิบัติการแต่มีความสนใจในเรื่องราวทางฟิสิกส์อย่างเดียวกัน คือ การค้นพบค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ที่เกิดในรอยต่อระหว่างวัสดุเหล็กและโครเมียมในปี ค.ศ.1989 โดยเรียกความต้านทานดังกล่าวว่า Giant Magnetoresistance: GMR ดังแสดงในรูปที่ 3 หลังจากนั้นมึ่งงานวิจัยอีกหลายงานที่ยืนยันการเกิดค่าความต้านทานดังกล่าว⁶⁻¹³ การค้นพบนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของวิทยาการทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ที่ว่าด้วยเรื่องของการประยุกต์ใช้ในการเพิ่มสมรรถนะการเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์คอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า สปินทรอนิกส์ ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการควบคุมสปินของพาหะในรอยต่อต่อไป

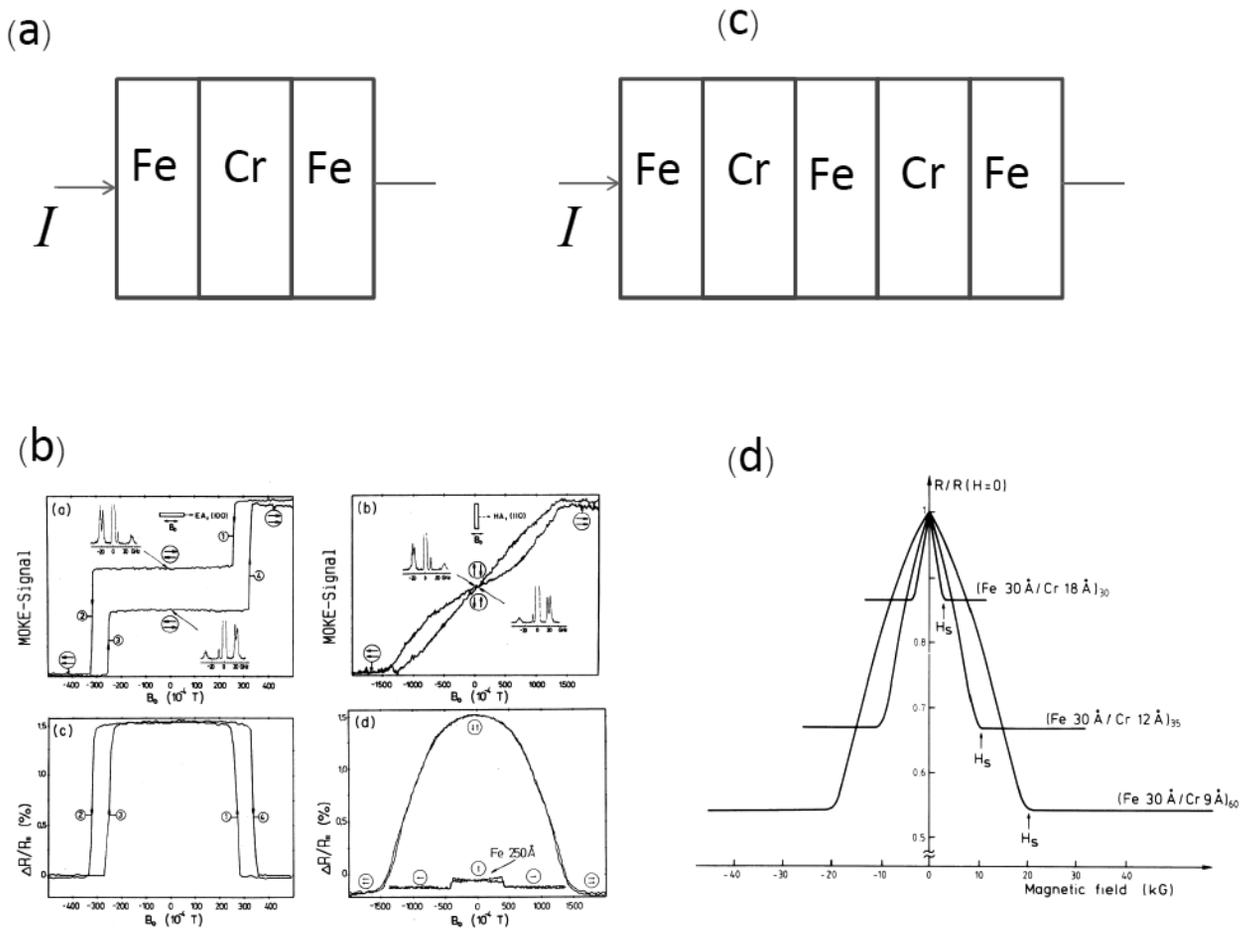


Figure 3 The magnetoresistance in Fe/Cr/Fe structures was found by Prof. Peter Grunberg and Prof. Albert Fert⁴⁻⁵ when (a) – (b) shows the structure of Fe/Cr/Fe double junction system and the result of Giant magnetoresistance measured by Prof. Peter Grunberg, respectively. Figures (c) – (d) are for Fe/Cr/Fe multilayers and the results of Giant magnetoresistance measured by Prof. Albert Fert, respectively.

การอธิบายปรากฏการณ์การเกิดค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ในรอยต่อระหว่าง เหล็ก/โครเมียม/เหล็ก สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4 เมื่อลูกศรแสดงทิศทางของแมกเนโตเซชันในวัสดุเหล็กทั้งสองฝั่ง ส่วนโครเมียมเป็นวัสดุโลหะที่ไม่มีสมบัติทางด้านแม่เหล็กดังนั้นจึงไม่ปรากฏค่าแมกเนโตเซชัน อย่างไรก็ตาม ความหนาของโครเมียมมีผลต่อลักษณะการเรียงตัวแบบขนานและสวนขนาน¹⁴⁻¹⁵ ดังรูป จากรูปถ้าอิเล็กตรอนที่มีสปินชี้ขึ้นเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวาของ

รอยต่อ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านรอยต่อจะเคลื่อนที่ค่อนข้างง่ายหรืออาจสามารถข้ามรอยตอดังกล่าวได้เลยโดยไม่มี การกระเจิงกลับ ในทางกลับกันอิเล็กตรอนตัวนี้จะผ่านรอยต่อในรูปที่4(b) ได้ค่อนข้างยากหรืออาจจะกระเจิงกลับหมดและไม่สามารถผ่านได้เลย ซึ่งการเคลื่อนที่ที่ผ่านได้ยากหรือง่ายในรอยตอดังกล่าวเกิดเนื่องจากค่าความต้านทานที่เป็นผลจากความ เป็นแม่เหล็กของวัสดุในรอยต่อ

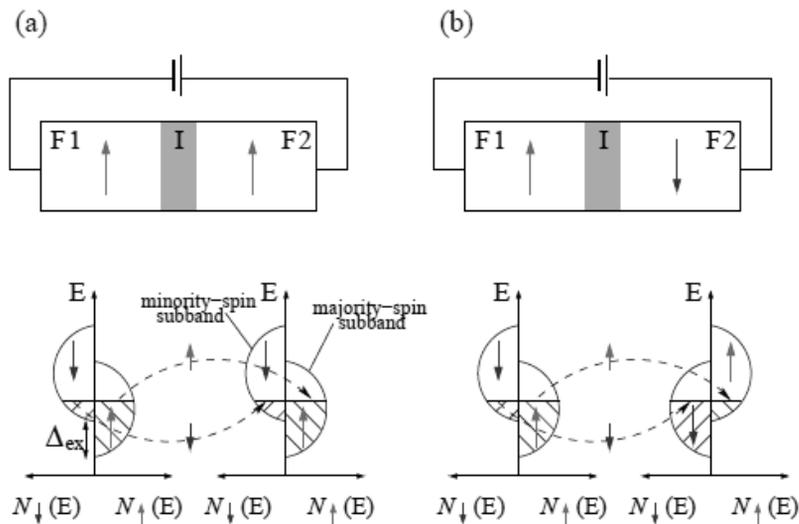


Figure 4 Shows the magnetization directions in Fe/I/Fe structure when (a) is for parallel configuration, but (b) is for anti-parallel alignment. In the second row, the density of states of electron of minority-spin subband $N_{\downarrow}(E)$ and majority-spin subband $N_{\uparrow}(E)$ in ferromagnetic material are shown for parallel and anti-parallel alignments, corresponding to figures (a) and (b) in the first row, respectively.

การอธิบายที่ซับซ้อนกว่านี้สามารถพิจารณาได้จากปริมาณทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า ความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอน (Density of states of electron: $N_{\sigma}(E)$)¹⁶⁻¹⁸ ในวัสดุเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4 แถวที่สองด้วย กล่าวคือในกรณีที่ความหนาแน่นสถานะของอิเล็กตรอนมีค่ามากตั้งเกิดในโครงสร้างแบบขนาน การเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางของสปินในทิศเดียวกับแมกเนไตเซชันของโครงสร้างนี้ย่อมเกิดได้ง่ายกว่าในอีกโครงสร้างหนึ่ง อย่างไรก็ตามผู้อ่านสามารถคาดเดาได้ว่าการเพิ่มจำนวนชั้นของเหล็กและโครเมียมสามารถเพิ่มค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กในรอยต่อนี้ได้ (ศาสตราจารย์ ปีเตอร์กรีนแบร์ก ทำการทดลองโดยใช้ระบบสองรอยต่อ ส่วนศาสตราจารย์ อัลเบิร์ตเฟิร์ตใช้ระบบ 60 รอยต่อ ด้วยเหตุนี้ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กในรอยต่อของทั้งสองการทดลองจึงต่างกันค่อนข้างมาก ดังแสดงในภาพที่ 3 (b) และ 3(d) ตามลำดับ)

ในการคำนวณค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กเนื่องจากการทะลุผ่านของอิเล็กตรอนในรอยต่อ (Tunneling magnetoresistance: TMR) สามารถพิจารณาได้จากรูปแบบของสมการต่อไปนี้¹⁹⁻²⁰

$$TMR = \frac{R_{\sigma\sigma} - R_{\sigma\bar{\sigma}}}{R_{\sigma\sigma}} \dots\dots\dots (1)$$

หรือ

$$TMR = \frac{G_{\sigma\sigma} - G_{\sigma\bar{\sigma}}}{G_{\sigma\sigma}} \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ $R_{\sigma\bar{\sigma}}$ และ $R_{\sigma\sigma}$ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าในโครงสร้างแบบสวนขนานและขนาน ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามสามารถพิจารณาในนิยามของค่าความนำไฟฟ้าได้เช่นกัน เมื่อ $G_{\sigma\bar{\sigma}}$ และ $G_{\sigma\sigma}$ คือ ค่าความนำไฟฟ้าในโครงสร้างแบบสวนขนานและขนาน ตามลำดับ (ความนำไฟฟ้าคือส่วนกลับของความต้านทานทางไฟฟ้า $G = \frac{1}{R}$) จากสมการ (1) – (2) จะเห็นว่า การเพิ่มค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กสามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าความต้านทานในโครงสร้างแบบสวนขนาน ในทางตรงกันข้ามโดยการเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าในโครงสร้างแบบขนาน ซึ่งในประเด็นที่สองนี้ผู้เขียนได้ทำการศึกษาและวิจัยในเชิงทฤษฎีพบว่า วิธีการหนึ่งในการเพิ่มค่าความนำคือการให้ทั้งพลังงานศักย์ที่ทำให้การกระเจิงของสปินเปลี่ยนทิศทางและไม่เปลี่ยนทิศทางเข้าไปที่รอยต่อระหว่างวัสดุโดยให้ค่าความแรงของพลังงานศักย์ทั้งสองชนิดนี้มีขนาดประมาณเท่ากัน²¹⁻²⁴ ดังแสดงในรูปที่ 5 ที่สำคัญในทางการทดลองสามารถทำได้จริงโดยการฝังไอออนที่มีสมบัติทางด้านแม่เหล็ก ณ บริเวณรอยต่อ²⁵⁻²⁸ สำหรับพลังงานศักย์ที่ไม่ทำให้สปินของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางโดยปกติจะเกิดขึ้นอยู่แล้วเมื่อมีการต่อกันของวัสดุต่างชนิดกัน

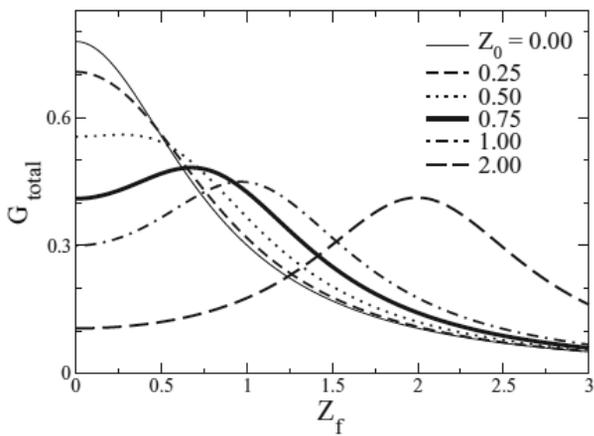


Figure 5 Plots of total conductance spectra G_{total} as a function of spin-flip scattering Z_f with various values of non-spin-flip scattering Z_0 in the junction between ferromagnet/normal metal interfaces. Each peak refers to a maximum value of the conductance, corresponding to the condition of $Z_f \approx Z_0$ ²⁴

นอกจากนี้ ในงานวิจัยของผู้เขียนเมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้ศึกษา รอยต่อแบบสองรอยต่อระหว่างวัสดุเฟอร์โรแมกเนตและโลหะ ปกติพบว่า เพียงแค่ใส่เฉพาะพลังงานศักย์ที่ไม่ทำให้การกระ

เจิงสปินเปลี่ยนทิศทาง ณ บริเวณรอยต่อ สามารถเพิ่มค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กได้เช่นเดียวกัน โดยค่าความต้านทานดังกล่าวมีค่ามากเมื่อขนาดของพลังงานศักย์ที่รอยต่อทั้งสองข้างมีค่าต่างกันไม่มากดังรูปที่ 6(a) ซึ่งเป็นที่น่าประหลาดใจมากเมื่อค่าความนำไฟฟ้าในรอยต่อแบบนี้จะถูกกดเสมอเมื่อมีการให้พลังงานศักย์ชนิดที่ทำให้สปินเปลี่ยนทิศทางเข้ามาที่บริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 6(b) ²⁹

กล่าวโดยสรุป ณ ตอนนี คือ ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กในรอยต่อระหว่างวัสดุเฟอร์โรแมกเนตและโลหะปกติสามารถเพิ่มและลดได้โดยกระบวนการที่ได้อธิบายข้างต้นคือการใส่พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงบางอย่าง ณ ที่รอยต่อระหว่างวัสดุเฟอร์โรแมกเนตแบบหนึ่งถึงสองรอยต่อ หรือการเพิ่มจำนวนชั้นของวัสดุเฟอร์โรแมกเนตและโลหะแบบปกติในรอยต่อ อย่างไรก็ตามผู้อ่านจะสังเกตเห็นว่าการเพิ่มจำนวนชั้นในรอยต่อจะทำให้ระบบมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ การควบคุมตัวแปรต่าง ๆ จะทำได้ค่อนข้างยากทั้งในเชิงทฤษฎีและการสร้างอุปกรณ์จริง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยส่วนใหญ่ในระยะหลังจึงมุ่งเน้นที่การเพิ่มค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กโดยพยายามหลีกเลี่ยงการเพิ่มจำนวนชั้นของวัสดุเฟอร์โรแมกเนตและโลหะในรอยต่อ

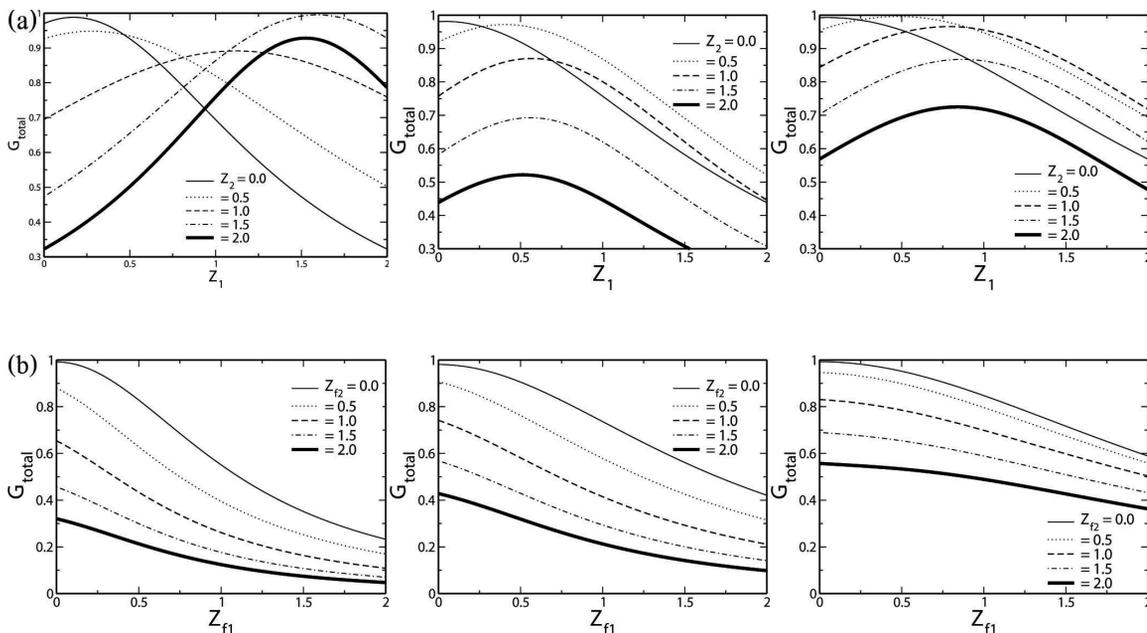


Figure 6 Plots of total conductance spectra as a function of (row a) non-spin-flip scattering Z_1 at the first interface with various non-spin-flip scattering Z_2 at the second interface and (row b) spin-flip scattering Z_{f1} at the first interface with various spin-flip scattering Z_{f2} at the second interface in the junction between metal/ferromagnet/metal double junction system. ²⁹

การประยุกต์ใช้การเก็บข้อมูลในอุปกรณ์สปินทรอนิกส์

คำถามที่เกิดขึ้นคือ ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กมีความเกี่ยวข้องอย่างไรกับการเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ทางด้านสปินทรอนิกส์? การอธิบายนี้สามารถพิจารณาได้จากความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์เบื้องต้นเกี่ยวกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ พาหะนำไฟฟ้าชนิดนี้มีสมบัติที่สำคัญที่ถือเป็นสมบัติภายในได้แก่ ประจุ (Charge) และลักษณะการหมุนควงหรือที่เรียกว่า สปิน (Spin) ซึ่งปริมาณหลังนี้เกิดจากการพยายามอธิบายการมีอยู่ของสถานะทางด้านควอนตัมของอิเล็กตรอนในโครงสร้างผลึกโดยใช้เลขควอนตัม 4 ตัว เพื่อระบุสถานะต่างๆตามกฎทางควอนตัมฟิสิกส์ ซึ่งอิเล็กตรอนในโครงสร้างผลึกชนิดเดียวกันจะไม่สามารถมีเลขควอนตัมทั้ง 4 ตัวนี้เหมือนกันได้³⁰⁻³²โดยปกติการเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ในอดีตที่ผ่านมาจะใช้การมีและไม่มีประจุของอิเล็กตรอนสร้างสถานะทางด้านควอนตัมเพื่อใช้ระบุข้อมูลต่างๆ เช่น การเก็บข้อมูลด้วยเลขฐานที่ประกอบด้วยเลข 0 และ 1 ซึ่งการประกอบกันของเลขสองชนิดนี้สามารถแทนข้อมูลต่างๆได้ครบถ้วน โดยในที่นี้เลข 0 หมายถึงการไม่มีประจุแต่เลข 1 หมายถึงการมีประจุ³³⁻³⁵ อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ถูกรวบรวมด้วยวิธีการนี้จะมีข้อจำกัดที่เป็นไปตามกฎของ มัวร์ (Moore's law) ทั้งนี้เนื่องจากการสะสมของประจุตัวเอง³⁶⁻³⁷ ดังได้อธิบายในตอนต้น

จากการอธิบายในข้างต้น พบว่า ทั้งประจุและสปินของอิเล็กตรอนย่อมถูกสะสมในวงจรหรือในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งสิ้น เพียงแต่ในช่วงเวลาที่ผ่านมานุชصرวิจัยวิธีการควบคุมประจุของอิเล็กตรอนในวงจรค่อนข้างดีแต่

ยังไม่รู้วิธีการควบคุมสปินของอิเล็กตรอน (ความหมายของการควบคุมหมายถึงรวมถึง การเปิด-ปิด เส้นทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน) จนกระทั่งมีการค้นพบค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ในรอยต่อระหว่างวัสดุตั้งกล่าวในตอนต้นรูปแบบของการควบคุมอิเล็กตรอนโดยการควบคุมในส่วนของสปินจึงเป็นเรื่องที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในการทดลอง กล่าวคือ การเปิด - ปิด เส้นทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีสปินต่างกัน (เลขควอนตัมตัวอื่นอาจเหมือนหรือต่างกันก็ได้) สามารถทำได้โดยการสร้างโครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีสมบัติทางด้านแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 3 - 4 ด้วยเหตุนี้การสร้างสถานะทางควอนตัมเพื่อเก็บข้อมูลยังคงเป็นการประกอบด้วยตัวเลขฐาน เช่น เลข 0 และ 1 ดังเดิมเพียงแต่เลข 0 และ 1 ในที่นี้อาจหมายถึงอิเล็กตรอนสปินชี้ขึ้นและชี้ลงตามลำดับ ซึ่งมีข้อดีที่ตามมาคือ เก็บข้อมูลได้มากขึ้นและการตอบสนองในการทำงานที่เร็วขึ้นของอุปกรณ์³⁸

อย่างไรก็ตามปัญหาหลักของการควบคุมการเคลื่อนที่ของสปินข้ามรอยต่อที่ต่างจากการควบคุมประจุ คือ กฎการอนุรักษ์ที่ใช้ไม่ได้ในการควบคุมสปินเนื่องจากการมีอันตรกิริยาแบบแปลกๆในวัสดุที่มีสมบัติเด่นทางด้านสปิน เช่น อันตรกิริยาระหว่างวงโคจรของอิเล็กตรอนและสปินของอิเล็กตรอนตัวตั้งกล่าว (Spin-orbit coupling) ในวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำแบบเฟอร์โรแมกเนต (Ferromagnetic semiconductor) เป็นต้น ซึ่งการที่สปินไม่อนุรักษ์ทำให้สมบัติบางอย่างทางด้านฟิสิกส์ยากต่อการทำนาย ด้วยเหตุนี้งานวิจัยส่วนหนึ่งทางด้านนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของการคู่ควบนี้ เพื่อทำนายและอธิบายกระแสสปินข้ามรอยต่อ³⁹⁻⁴¹

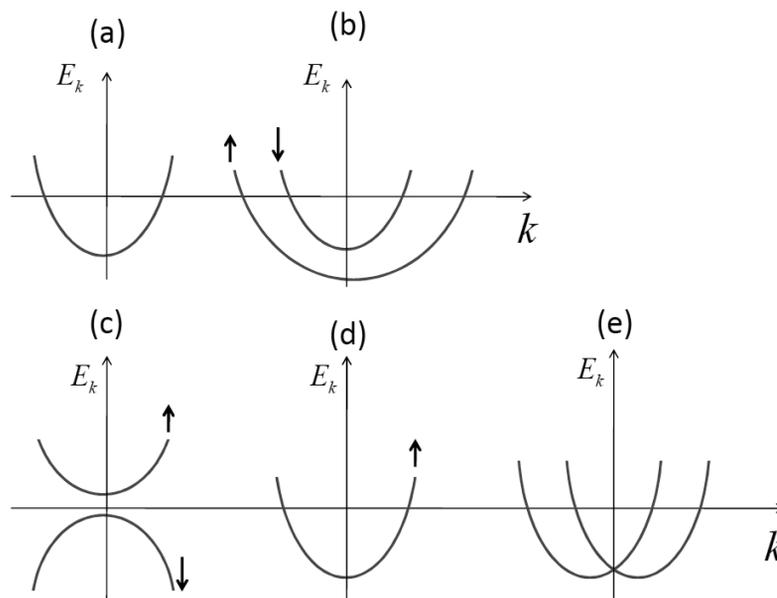


Figure 7 Illustrates the energy dispersion relation or E_k and k relation of electron in some materials where (a) normal metal (b) ferromagnet (c) Ferromagnetic semimetal (d) Semimetal and (e) ferromagnetic semiconductor with Rashba spin orbit coupling⁴²⁻⁴⁵

7. A. E. Berkowitz, J. R. Mitchell, M. J. Carey, A. P. Young, S. Zhang, F. E. Spada, F. T. Parker, A. Hutten, G. Thomas, Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys, *Phys. Rev. Lett.* 1992; 68: 3745 - 3748.
8. J. Q. Xiao, J. S. Jiang, C. L. Chien, Giant magnetoresistance in nonmultilayer magnetic systems, *Phys. Rev. Lett.* 1992; 68: 3749 - 3752.
9. J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, R. Meservey, Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions, *Phys. Rev. Lett.* 1995; 74: 3273 - 3276.
10. R. C. Roundy, Z. V. Vardeny, M. E. Raikh, Organic magnetoresistance near saturation: Mesoscopic effects in small devices, *Phys. Rev. B* 2013; 88: 075207.
11. A. Useinov, Y. Saeed, N. Singh, N. Useinov, U. SchwingenschlÄogel, Impact of lattice strain on the tunnel magnetoresistance in Fe/insulator/Fe and Fe/insulator/La SrMnO magnetic tunnel junctions, *Phys. Rev. B* 2013; 88: 060405.
12. K. Wang, T. L. A. Tran, P. Brinks, J. G. M. Sanderink, T. Bolhuis, W. G. van der Wiel, M. P. de Jong, Tunneling anisotropic magnetoresistance in Co/AlO/Al tunnel junctions with fcc Co (111) electrodes, *Phys. Rev. B* 2013; 88: 054407.
13. H. Takatsu, J. J. Ishikawa, S. Yonezawa, H. Yoshino, T. Shishidou, T. Oguchi, K. Murata, Y. Maeno, Extremely Large Magnetoresistance in the Nonmagnetic Metal PdCoO, *Phys. Rev. Lett.* 2013; 111: 056601.
14. P. GrÄunberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky, H. Sowers, Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayers, *Phys. Rev. Lett.* 1986; 57: 2442 - 2445.
15. L. L. Hinchey, D. L. Mills, Magnetic properties of superlattices formed from ferromagnetic and antiferromagnetic materials, *Phys. Rev. B* 1986; 33: 3329 - 3343.
16. N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, Cengage Learning 1 edition (1 edition) (1976).
17. E. L. Wolf, Principle of electron tunneling spectroscopy (Oxford University Press: New York) ;1989.
18. P. M. Michael, Condensed Matter Physics (Wiley-Interscience) ; 2000.
19. H. Kontani, General formula for the magnetoresistance on the basis of Fermi liquid theory, *Phys. Rev. B* 2001; 64: 054413.
20. H. X. Tang, R. K. Kawakami, D. D. Awschalom, M. L. Roukes, Giant Planar Hall Effect in Epitaxial (Ga,Mn) As Devices, *Phys. Rev. Lett.* 2003; 90: 107201.
21. A. T. Filip, B. H. Hoving, F. J. Jedema, B. J. van Wees, B. Dutta, S. Borghs, Experimental search for the electrical spin injection in a semiconductor, *Phys. Rev. B* 2000; 62: 9996 - 9999.
22. E. I. Rashba, Theory of electrical spin injection: Tunnel contacts as a solution of the conductivity mismatch problem, *Phys. Rev. B* 2000; 62: R16267 - R16270.
23. A. Fert, H. Jaffres, Conditions for efficient spin injection from a ferromagnetic metal into a semiconductor, *Phys. Rev. B* 2001; 64: 184420.
24. K. Pasanai, P. Pairor, Spin-flip scattering and dimensional effect on transport of charge and spin across metal/ferromagnet material interfaces, *Phys. Rev. B* 2011; 84: 224432.
25. F. Guinea, Spin-flip scattering in magnetic junctions, *Phys. Rev. B* 1998; 58: 9212 - 9216.
26. P. Lyu, D. Y. Xing, J. Dong, Tunneling magnetoresistance in mixed-valence manganite tunnel junctions, *Phys. Rev. B* 1998; 58: 54 - 57.
27. R. Jansen, J. S. Moodera, Magnetoresistance in doped magnetic tunnel junctions: Effect of spin scattering and impurity-assisted transport, *Phys. Rev. B* 2000; 61: 9047 - 9050.
28. A. Vedyayev, D. Bagrets, A. Bagrets, B. Dieny, Resonant spin-dependent tunneling in spin-valve junctions in the presence of paramagnetic impurities, *Phys. Rev. B* 2001; 63: 064429.
29. K. Pasanai, Theory of transport of charge and spin across metal/ferromagnet/metal material interfaces [manuscript for publication]
30. David J. Griffiths, Introduction to Quantum Mechanics (2nd Edition), Pearson Prentice Hall; 2nd edition (April 10, 2004)

31. Nouredine Zettili, *Quantum Mechanics: Concepts and Applications*, Wiley; 2 edition; February 24, 2009.
32. R. Shankar, *Principles of Quantum Mechanics*, 2nd Edition, Plenum Press; 2nd edition; September 1, 1994.
33. Mark M. Wilde, *Quantum Information Theory*, Cambridge University Press; 1 edition; June 10, 2013.
34. Michael A. Nelsen and Isaac L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*, Cambridge University Press; 10th Anniversary Edition; January 31, 2011.
35. Jonathan A. Jones and Dr Dieter Jaksch, *Quantum Information, Computation and Communication*, Cambridge University Press; 1 edition; August 27, 2012.
36. Amnon Yariv, *Quantum Electronics*, Wiley; 3 edition (January 17, 1989)
37. Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory (11th Edition)*, Prentice Hall; 11 edition; April 30, 2012.
38. Supriyo Bandyopadhyay and Marc Cahay, *Introduction to Spintronics*, CRC Press; 1 edition; March 20, 2008.
39. P. Gentile, M. Cuoco, A. Romano, C. Noce, D. Manske, P. M. R. Brydon, Spin-Orbital Coupling in a Triplet Superconductor-Ferromagnet Junction, *Phys. Rev. Lett.* 2013; 111: 097003.
40. O. Krupin, G. Bihlmayer, K. Starke, S. Gorovikov, J. E. Prieto, K. Döbrich, S. Blügel, G. Kaindl, Rashba effect at magnetic metal surfaces, *Phys. Rev. B* 2005; 71: 201403.
41. O. Rader, A. Varykhalov, J. Sanchez-Barriga, D. Marchenko, A. Rybkin, A. M. Shikin, Is There a Rashba Effect in Graphene on 3d Ferromagnets?, *Phys. Rev. Lett.* 2009; 102: 057602.
42. Claudia Felser and Gerhard H Fecher, *Spintronics: From Materials to Devices*, Springer; 2013 edition; April 12.
43. Giulia C. Lombardi and Ginevra E. Bianchi, *Spintronics: Materials, Applications, and Devices*, Nova Science Pub Inc; July 31, 2009.
44. Neil W. Ashcroft and N. David Mermin, *Solid State Physics*, Cengage Learning; 1 edition; January 2, 1976.
45. Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, Wiley; 8 edition; November 11, 2004.