

การศึกษาเชิงทฤษฎีการส่งผ่านของอิเล็กตรอนในระบบรอยต่อระหว่าง
โลหะกับเฟอร์โรแมกเนต

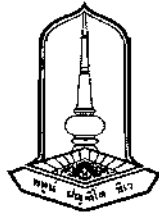
กิตติศักดิ์ ภาระพันธ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์
เมษายน 2557
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

THEORETICAL STUDY OF ELECTRON TUNNELING ACROSS
METAL/FERROMAGNET JUNCTION

KITTISAK PHARAPHAN

PRESENTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENTS FOR
THE BACHELOR OF SCIENCE DEGREE IN PHYSICS
AT MAHASARAKHAM UNIVERSITY
ALL RIGHTS RESERVED BY MAHASARAKHAM UNIVERSITY



คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ของ นาย กิตติศักดิ์ ภาระพันธ์
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

ศุภชัย ฤทธิ์เจริญวัตถุ
(อาจารย์ ดร. ศุภชัย ฤทธิ์เจริญวัตถุ)

ประธานกรรมการ

ประธม ศรีวิไล
(อาจารย์ ดร. ประธม ศรีวิไล)

กรรมการ

กฤษกร ปาสาโน
(อาจารย์ ดร. กฤษกร ปาสาโน)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา

ปวีณา เหลากุล
(อาจารย์ ดร. ปวีณา เหลากุล)
ประธานหลักสูตรสาขาฟิสิกส์

นิติศักดิ์ ปาสาจะ
(อาจารย์ ดร. นิติศักดิ์ ปาสาจะ)
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์
วันที่ เดือน เมษายน พ.ศ. 2557

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ อาจารย์ ดร. กฤษกร ปาสาใน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ทฤษฎีสสารควบแน่นทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ สุดท้ายนี้ ผู้ทำโครงการขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้ทำโครงการเสมอมา

นายกิตติศักดิ์ ภาระพันธ์

ชื่อเรื่อง	การศึกษาเชิงทฤษฎีการส่งผ่านของอิเล็กตรอนในระบบรอยต่อระหว่างโลหะกับเฟอร์โรแมกเนต		
ผู้ทำโครงการ	นาย กิตติศักดิ์ ภาระพันธ์		
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. กฤษกร ปาสาโน		
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2557

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีการส่งผ่านของอิเล็กตรอนในรอยต่อระหว่างวัสดุโลหะและเฟอร์โรแมกเนต โดยใช้การประมาณด้วยแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ และพิจารณาให้พลังงานศักย์ ณ บริเวณรอยต่อเป็นแบบฟังก์ชันเตลดา กล่าวคือ กำหนดให้มีพลังงานศักย์เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณรอยต่อเท่านั้น โดยที่พลังงานศักย์ดังกล่าวประกอบไปด้วย พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ (Z_0) และพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ (Z_f) โดยพลังงานศักย์ชนิดแรกไม่มีผลทำให้สปีนของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทาง แต่พลังงานศักย์ชนิดที่สองจะมีผลทำให้สปีนของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางได้ นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาผลของมวลยังผลอิเล็กตรอนในวัสดุแต่ละชนิด ทั้งนี้เนื่องจากมวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ซึ่งผลดังกล่าวทำให้เกิดการสะสมประจุ ณ รอยต่อ โดยจะแสดงพฤติกรรมคล้ายกับกำแพงศักย์

จากการคำนวณโดยกำหนดให้มวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุทั้งสองเท่ากัน และพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับเป็นศูนย์ พบว่า ความน่าจะเป็นของการส่งผ่านจะลดลงเมื่อพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติเพิ่มขึ้น และความน่าจะเป็นของการสะท้อนกลับจะมีพฤติกรรมตรงกันข้าม ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาให้พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติเป็นศูนย์ จะได้ว่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปีนเหมือนกับอิเล็กตรอนตกกระทบจะมีค่าลดลง เมื่อพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันมีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟที่บริเวณอิเล็กตรอนมีพลังงาน $eV = 2E_F$ ซึ่งสอดคล้องกับพลังงาน ณ จุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง อีกทั้งพลังงานศักย์ดังกล่าวยังสามารถทำให้เกิดการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปีนตรงข้ามกับอิเล็กตรอนตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความน่าจะเป็นของการส่งผ่านสามารถลดลงและเพิ่มขึ้นได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ (Z_f) ณ บริเวณรอยต่อ โดยค่าความน่าจะเป็นของการส่งผ่านดังกล่าวจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $Z_0 = Z_f$ ในทำนองเดียวกันค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านจะลดลงในสภาวะที่ไม่มีพลังงานศักย์ทั้งสองชนิด เมื่อมวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุเฟอร์โรแมกเนตมากกว่าวัสดุโลหะ

TITLE Theoretical study of electron tunneling
 across metal/ferromagnet junction

AUTHOR Mr. Kittisak Pharaphan

DEGREE Bachelor Of Science **MAJOR** Physics

ADVISOR Dr. Kriskron Pasanai

UNIVERSITY Mahasarakham University DATE 2014

ABSTRACT

We theoretically study the electron tunneling across a metal/ferromagnet interface using the free electron approximation model. In addition, the two kinds of potentials, normal and spin-flip potentials, were modeled by a delta potential, and inserted at the interface. The first kind of potentials does not affects the direction of electron spin, but the second can affect the direction of electron spin. Because an electron effective mass in each material is different, we also consider the effect of the electron effective mass. This effect was due to spin accumulation that behaves as a potential barrier.

In the calculation, we found that the total transmission probability decreases with increasing the normal scattering, when the spin-flip scattering at the interface vanishes, and the electron effective masses in the materials are equal. In contrast, the reflection probability behaves conversely. When the normal scattering disappeared and spin-flip scattering was taken into account in the calculation, the total transmission probability of the same spin direction with the injected electron was suppressed. Particularly, there was a change of the slope of both transmission and reflection probabilities, corresponding to the bottom of the minority band of the ferromagnet $eV = 2E_{ex}$. For the effect of spin-flip scattering, this kind of scattering can increase the total transmission probability of electrons with an opposite spin direction of injected electrons. However, the total transmission probability can either enhance or diminish when both kinds of scattering occur at the interface. The maximum value of transmission occurs when these kinds of scatterings are set to be equal, $Z_0 = Z_f$. Finally, the total transmission probability can be suppressed when the electron effective mass in the ferromagnet is larger than that in the metal.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญภาพประกอบ	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	4
1.4 สถานที่ทำโครงการ	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
บทที่ 2 แบบจำลองและการคำนวณ	5
2.1 แอิมัลโทเนียนของระบบ	5
2.2 ฟังก์ชันคลื่นในแต่ละบริเวณ	11
2.3 เงื่อนไขขอบเขต	13
2.4 ความน่าจะเป็นของการส่งผ่านและการสะท้อนกลับ	16
บทที่ 3 ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล	19
3.1 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ	19
3.2 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ	25
3.3 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติและแบบสปีนพลิกกลับ	33
3.4 ผลของมวลยังผลของอิเล็กตรอน	40
บทที่ 4 สรุปผลการคำนวณ	44
4.1 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ	44
4.2 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ	45
4.3 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติและแบบสปีนพลิกกลับ	45
4.4 ผลของมวลยังผลของอิเล็กตรอน	46
เอกสารอ้างอิง	47
ประวัติย่อผู้เขียน	49

สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1.1	โครงสร้างของ เพอร์โรแมกเนต/โครเมียม/เพอร์โรแมกเนต ที่มีทิศทางของแมกเนโตเซชันแบบตรงข้าม ซึ่งทำให้เกิดการค้นพบความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ โดย ปีเตอร์ กรุนเบิร์ก	1
ภาพประกอบ 1.2	(a) – (b) เส้นโค้งแบบฮิสเทอรีซิสของวัสดุความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ (c) – (d) ความต้านทานของวัสดุความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่แบบสองรอยต่อ	2
ภาพประกอบ 1.3	ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กที่พบในรอยต่อ เพอร์โรแมกเนต/โครเมียมแบบ 60 รอยต่อ โดย อัลเบิร์ต เฟรท	2
ภาพประกอบ 2.1	แถบพลังงานของวัสดุโลหะและวัสดุเพอร์โรแมกเนตที่มีมวลยังผลของอิเล็กตรอน m_{μ}^* (ฝั่งซ้าย) และ m_{ν}^* (ฝั่งขวา) โดยมี E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ E_{ex} คือ พลังงานแลกเปลี่ยน (Exchange energy) ของเพอร์โรแมกเนต และเส้นโค้งพร้อมหัวลูกศรที่ชี้ไปฝั่งซ้ายและขวาแทนแถบพลังงาน ซึ่งใช้พิจารณากระบวนการกระเจิงของระบบ โดยที่ $r_{\uparrow}$, $r_{\downarrow}$, $t_{\uparrow}$ และ $t_{\downarrow}$ คือ แอมพลิจูดคลื่นอิเล็กตรอนสะท้อนกลับและส่งผ่านสปินขึ้นและสปินลงตามลำดับ ซึ่งรอยต่อของระบบนี้จะใช้การประมาณด้วยฟังก์ชันเดลตา $\delta(x)$ กล่าวคือ มีค่าเฉพาะ ณ ที่รอยต่อเท่านั้น	5
ภาพประกอบ 2.2	ตัวอย่างทิศทางของแมกเนโตเซชันทำมุม θ กับแกน x เมื่อ m คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่กำหนดทิศทางของแมกเนโตเซชันในระบบ 2 มิติ	7
ภาพประกอบ 2.3	แถบพลังงานของอิเล็กตรอนในโลหะ โดยที่ E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ $\uparrow$, $\downarrow$ คือ ทิศทางสปินอิเล็กตรอนตกกระทบที่มีทิศขึ้นและลง $r_{\uparrow}, r_{\downarrow}$ คือ แอมพลิจูดคลื่นสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและลง ตามลำดับ และเส้นโค้งแทนแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้	8
ภาพประกอบ 2.4	แถบพลังงานของเพอร์โรแมกเนต โดยเส้นโค้งที่อยู่ด้านนอกแทนแถบพลังงานของอิเล็กตรอนสปินขึ้น ซึ่งเป็นแถบพลังงานหลัก และเส้นโค้งที่อยู่ด้านในแทนแถบพลังงานของอิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นแถบพลังงานรอง โดยที่ $t_{\uparrow}$ และ $t_{\downarrow}$ คือ แอมพลิจูดคลื่นอิเล็กตรอนส่งผ่านสปินขึ้นและสปินลงตามลำดับ	10

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3.1	แถบพลังงานของเฟอร์โรแมกเนต ซึ่งประกอบไปด้วยแถบพลังงานหลักที่มีทิศทางแมกเนโตเซชันของอิเล็กตรอนขึ้น และแถบพลังงานรองที่มีทิศทางแมกเนโตเซชันของอิเล็กตรอนขึ้น โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดต่ำสุดของแถบพลังงานทั้งสองมีค่าเท่ากับ $2E_x$	20
ภาพประกอบ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น	20
ภาพประกอบ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น	21
ภาพประกอบ 3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินลง	22
ภาพประกอบ 3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินลง	23
ภาพประกอบ 3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและลง	24

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น และชี้ลง	25
ภาพประกอบ 3.8	แถบพลังงานของเฟอร์โรแมกเนตที่แสดงจุดเปลี่ยนความชันของค่าความ น่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางเดียวกับอิเล็กตรอนตก กระทบ	26
ภาพประกอบ 3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานที่ค่า Z_f ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของ อิเล็กตรอนสปินชี้ขึ้น	27
ภาพประกอบ 3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ ณ ที่ระดับ พลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอน สปินชี้ขึ้น	28
ภาพประกอบ 3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานที่ค่า Z_f ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของ อิเล็กตรอนสปินชี้ลง	29

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ ณ ที่ระดับ พลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอน สปินขึ้น	30
ภาพประกอบ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานที่ค่า Z_f ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของ อิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น	31
ภาพประกอบ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ ณ ที่ระดับ พลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอน สปินขึ้นและขึ้น	32
ภาพประกอบ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = E_{\alpha}$ พร้อมแสดงการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินขึ้นที่มีค่ามาก ที่สุดเมื่อ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น	33
ภาพประกอบ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 2E_{\alpha}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น	34

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

ภาพประกอบ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 3E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น	35
ภาพประกอบ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น	36
ภาพประกอบ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 2E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น	37
ภาพประกอบ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 3E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น	37
ภาพประกอบ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น	38

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

หน้า

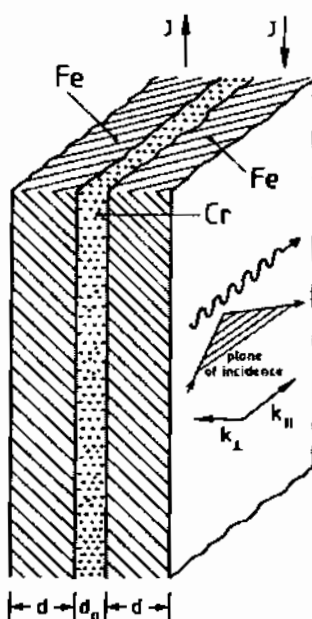
ภาพประกอบ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 2E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น	39
ภาพประกอบ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 3E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น	39
ภาพประกอบ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงาน เมื่อ $Z_0 = 0$ และ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอน สปินขึ้น	41
ภาพประกอบ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงาน เมื่อ $Z_0 = 0$ และ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอน สปินขึ้น	42
ภาพประกอบ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ พลังงาน เมื่อ $Z_0 = 0$ และ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอน สปินขึ้นและขึ้น	43

บทที่ 1

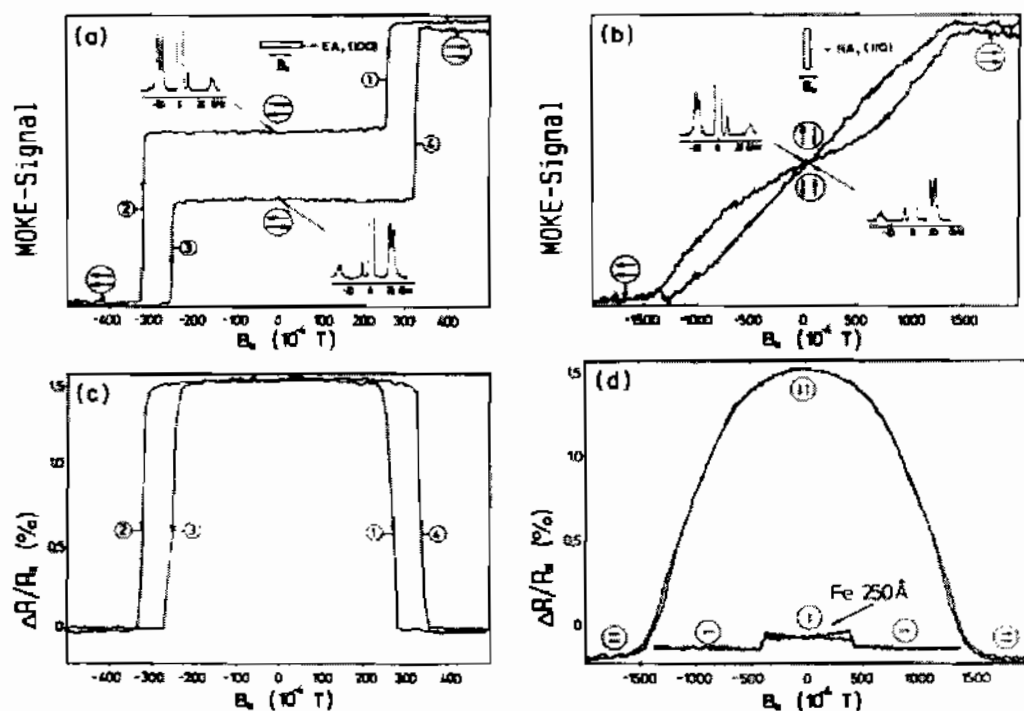
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

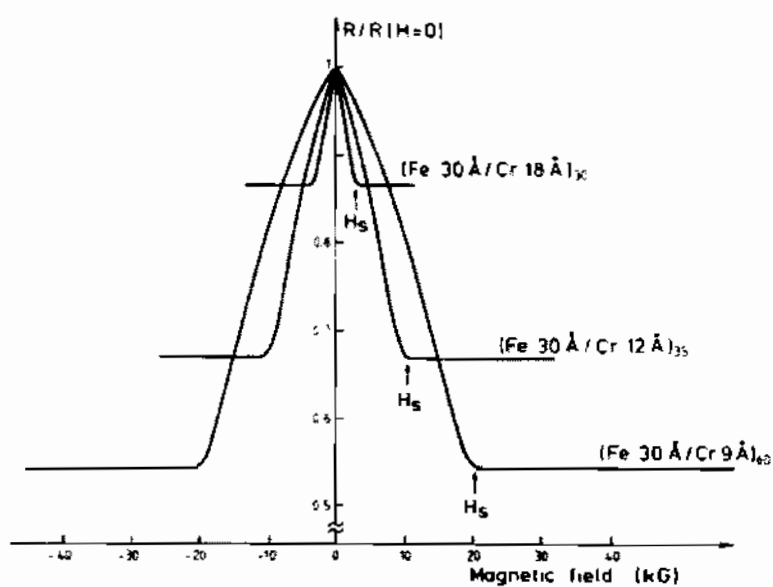
การศึกษาทางด้านทฤษฎีการส่งผ่าน (Tunneling theory) มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในการส่งผ่านระหว่างรอยต่อของวัสดุ ซึ่งมีทั้งระบบหนึ่งรอยต่อและมากกว่าหนึ่งรอยต่อ ทฤษฎีดังกล่าวได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะการศึกษาอุปกรณ์ทางด้านสปินทรอนิกส์ (Spintronics) ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมทิศทางของกระแสสปินแทนการควบคุมการไหลของประจุอิเล็กตรอน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง หลังจากมีการค้นพบความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ (Giant magnetoresistance ; GMR) ในปี ค.ศ. 2007 โดย ปีเตอร์ กรุนเบิร์ก¹ และอัลเบิร์ต เฟอร์ท²



ภาพประกอบ 1.1 โครงสร้างของ เฟอโรแมกเนต/โครเมียม/เฟอโรแมกเนต ที่มีทิศทางของแมกเนไทเซชันแบบตรงข้ามกัน ซึ่งทำให้เกิดการค้นพบความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่โดย ปีเตอร์ กรุนเบิร์ก¹



ภาพประกอบ 1.2 (a) - (b) เส้นโค้งแบบฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างแบบ เฟอร์โรแมกเนต/โครเมียม/เฟอร์โรแมกเนต (c) - (d) ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ในรอยต่อแบบ เฟอร์โรแมกเนต/โครเมียม/เฟอร์โรแมกเนต¹



ภาพประกอบ 1.3 ค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กที่พบในรอยต่อ เฟอร์โรแมกเนต/โครเมียม แบบ 60 รอยต่อ โดย อัลเบิร์ต เฟรท²

ความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ เกิดจากการนำวัสดุโลหะและวัสดุเฟอร์โรแมกเนตมาต่อประบกกัน ให้มีลักษณะเป็นชั้น (Layers) โดยมีวัสดุโลหะอยู่ตรงกลาง จากนั้น ควบคุมการไหลของกระแสสปิน (Spin current) ด้วยสนามแม่เหล็กจากภายนอก เพื่อเปลี่ยนทิศทางแมกเนไทเซชัน (Magnetization) ของวัสดุเฟอร์โรแมกเนต เมื่อทิศทางของแมกเนไทเซชันชี้ตรงข้ามกัน จะมีผลทำให้เกิดค่าความต้านทานมากที่สุดดังแสดงในภาพประกอบ 1.2(b) และ 1.2(d) การค้นพบดังกล่าวได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล หรือฮาร์ดไดรฟ์ (Hard drive) โดยมีการใช้อุปกรณ์ความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่นี้ผลิตเป็นหัวอ่านและเขียนข้อมูลลงบนจานแม่เหล็กที่อยู่ภายในอุปกรณ์ดังกล่าว

หลังจากนั้น ได้มีการศึกษาเพื่อเพิ่มค่าความต้านทาน ณ บริเวณรอยต่อ³ โดยการเพิ่มผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ (Spin-flip scattering) เข้าไปที่บริเวณรอยต่อของระบบ นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาผลของมิติต่อค่าความนำไฟฟ้าในระบบรอยต่อโลหะกับเฟอร์โรแมกเนต ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่า ผลของพลังงานศักย์ดังกล่าวจะเพิ่มค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กมากขึ้น และสามารถทำได้จริงในเชิงปฏิบัติ นั่นคือ จะมีการฝังไอออนที่มีสมบัติทางด้านแม่เหล็กลงไปยังบริเวณรอยต่อ ซึ่งผลการคำนวณจากการศึกษาข้างต้นยังได้แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าจะเด่นชัดที่สุดในกรณีหนึ่งมิติ อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณนี้ไม่สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าค่าความนำไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนตกกระหอบสปินขึ้นหรือสปินลง นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในของวัสดุเฟอร์โรแมกเนตเพิ่มเติม พบว่า ประกอบไปด้วย แถบพลังงานหลัก (Majority band) และแถบพลังงานรอง (Minority band) ซึ่งแยกระหว่างอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง จึงเป็นผลทำให้อิเล็กตรอนสามารถส่งผ่านได้ทั้งสองกรณี ดังนั้น การอธิบายความสัมพันธ์เกี่ยวกับกระแสสปินจะต้องพิจารณาเป็น กรณีอิเล็กตรอนตกกระหอบสปินขึ้นและสปินลง ด้วยเหตุนี้ โครงการนี้จึงสนใจศึกษาผลของตัวแปรดังกล่าวเพิ่มเติม ซึ่งประกอบด้วย พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ (Normal scattering: Z_0) และพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ (Spin-flip scattering: Z_f) รวมไปถึงผลของอัตราส่วนมวลยังผลของอิเล็กตรอน (Electron effective mass ratio: η) ต่อความสัมพันธ์ของการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่มีสปินตรงกันข้าม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาแบบจำลองการส่งผ่านของอิเล็กตรอนในรอยต่อ ระหว่างวัสดุโลหะปกติและวัสดุเฟอร์โรแมกเนต

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรในรอยต่อ ที่มีผลต่อการส่งผ่านของอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ อันประกอบไปด้วย พลังงานศักย์ ณ ที่รอยต่อ ซึ่งมีอยู่สองชนิด คือ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติและพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนฟลิปกลับ รวมถึงผลของมวลยังผลของอิเล็กตรอนที่มีต่อค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่าน

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ทำการศึกษาและคำนวณผลของตัวแปร ในระบบหนึ่งรอยต่อ โดยใช้การประมาณด้วยแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron model) นอกจากนี้พลังงานศักย์ ณ บริเวณรอยต่อจะใช้การประมาณด้วยฟังก์ชันเดลตา (Delta function) กล่าวคือ จะกำหนดให้มีพลังงานศักย์เฉพาะบริเวณรอยต่อ ซึ่งจะไม่พิจารณาผลของเขตปลอดภาวะ (Depletion region) ณ รอยต่อ

1.4 สถานที่ทำโครงการ

ห้องปฏิบัติการ ฟิสิกส์ทฤษฎีสารควบแน่น ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้กระบวนการและแบบจำลอง ที่จะนำไปสู่การศึกษาวัดอื่นที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

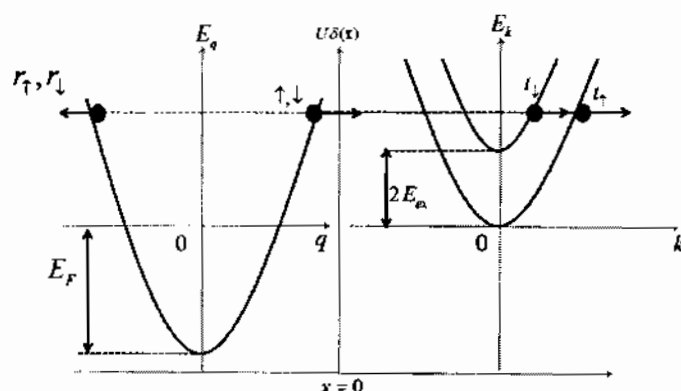
1.5.2 พบว่า เมื่อพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติเท่ากับพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนฟลิปกลับ จะทำให้ค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสูงที่สุด

บทที่ 2

แบบจำลองและการคำนวณ

ในบทนี้เป็นการศึกษาทางด้านทฤษฎีการส่งผ่านของอิเล็กตรอน ในระบบรอยต่อระหว่างวัสดุโลหะกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนต ซึ่งได้รับแนวคิดและหลักการมาจากการศึกษาเชิงทฤษฎีการส่งผ่านของระบบรอยต่อวัสดุโลหะกับโลหะ โดยทั้งสองระบบนี้มีลำดับและแนวทางการคำนวณเหมือนกัน นั่นคือ เริ่มต้นด้วยการเขียนแฮมิลโทเนียนของระบบ เพื่อใช้แก้ปัญหาค่าเจาะจง (Eigenvalues) หลังจากนั้นจึงนำค่าเจาะจงที่ได้ไปคำนวณหาฟังก์ชันคลื่น (Wave functions) แล้วนำไปเขียนเป็นฟังก์ชันคลื่นในแต่ละบริเวณ จากนั้นนำฟังก์ชันคลื่นดังกล่าวมาแทนในเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficients) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection coefficients) หลังจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ข้างต้นไปคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (Transmission probability) และการสะท้อนกลับ (Reflection probability) ของอิเล็กตรอน ตามลำดับ

2.1 แฮมิลโทเนียนของระบบ (Hamiltonian of system)



ภาพประกอบ 2.1 แบบพลังงานของวัสดุโลหะและวัสดุเฟอร์โรแมกเนตที่มีมวลยังผลของอิเล็กตรอน m_M^* (ฝั่งซ้าย) และ m_F^* (ฝั่งขวา) โดย E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ, E_{ex} คือ พลังงานแลกเปลี่ยน (Exchange energy) ของเฟอร์โรแมกเนต และเส้นโค้งพร้อมหัวลูกศรที่ชี้ไปฝั่งซ้ายและขวา คือ แบบพลังงานซึ่งใช้พิจารณากระบวนการกระเจิงของระบบ โดยที่ $\uparrow, \downarrow$ คือ ทิศทางสปินของอิเล็กตรอนตกกระทบที่มีทิศขึ้นและลง $r_\uparrow, r_\downarrow, t_\uparrow$ และ $t_\downarrow$ คือ แอมพลิจูดของคลื่นอิเล็กตรอนสะท้อนกลับและส่งผ่านแบบสปินขึ้นและสปินลง ตามลำดับ โดยที่พลังงานศักย์ ณ รอยต่อของระบบนี้ใช้การประมาณด้วยฟังก์ชันเดลตา $U\delta(x)$ กล่าวคือ มีค่าพลังงานศักย์เฉพาะ ณ ที่รอยต่อเท่านั้น

จากภาพประกอบ 2.1 แฮมิลโทเนียนของระบบรอยต่อระหว่างวัสดุโลหะและวัสดุเฟอร์โรแมกเนตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\hat{H} = \hat{p} \left[\frac{1}{2m^*(x)} \right] \hat{p} + \hat{V}(x) \quad (2.1)$$

เมื่อ $\hat{p}$ คือ ตัวดำเนินการโมเมนตัม (Momentum operator) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\hat{p} = -i\hbar \vec{\nabla} \quad (2.2)$$

โดย $\vec{\nabla} = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ และ $m^*(x)$ คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอน (Electron effective mass) ที่ขึ้นกับตำแหน่งในรอยต่อ ซึ่งเท่ากับ

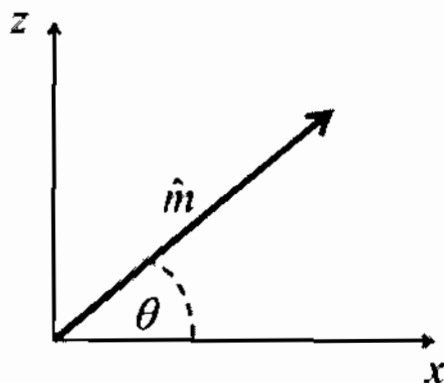
$$\frac{1}{m^*(x)} = \frac{1}{m_{M}^* \Theta(-x)} + \frac{1}{m_F^* \Theta(x)} \quad (2.3)$$

เมื่อ m_M^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุโลหะ, m_F^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุเฟอร์โรแมกเนต และ $\hat{V}(x)$ คือ พจน์ของพลังงานศักย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\hat{V}(x) = -\mu \Theta(-x) + U \delta(x) - E_{ex} \hat{m} \cdot \hat{\sigma} \Theta(x) - E_{ex} \Theta(x) \quad (2.4)$$

โดยที่ $\Theta(\pm x)$ คือ ฟังก์ชันแบบขั้นบันได (Heaviside step function), μ คือ พลังงานศักย์เคมีของโลหะ (Chemical potential), $\delta(x)$ คือ ฟังก์ชันเดลตาของดิแรก, U คือ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิง ณ รอยต่อซึ่งเท่ากับ $\begin{bmatrix} u_{\uparrow\uparrow} & u_{\uparrow\downarrow} \\ u_{\downarrow\uparrow} & u_{\downarrow\downarrow} \end{bmatrix}$ โดยเส้นทแยงมุมหลัก (Diagonal) แทนการกระเจิงแบบปกติ และเส้นทแยงมุมรอง (Off-diagonal) แทนการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ, E_{ex} คือ พลังงานแลกเปลี่ยนภายใน (Exchange energy) ของเฟอร์โรแมกเนต ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้กำหนดทิศทางของแมกเนโตเซชัน โดยจะมีค่าลดลงเมื่ออิเล็กตรอนมีทิศทางเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ, E_0 คือ พลังงานที่ใช้ในการยกแถบพลังงานของเฟอร์โรแมกเนตขึ้นไปยังจุดกำเนิด และ $\hat{m}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ชี้ทิศทางของแมกเนโตเซชันในเฟอร์โรแมกเนต ซึ่งเท่ากับ

$$\hat{m} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\hat{x} + \hat{y} + \hat{z}) \quad (2.5)$$



ภาพประกอบ 2.2 ตัวอย่างทิศทางของแมกเนโตเซชันทำมุม θ กับแกน x เมื่อ $\hat{m}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่กำหนดทิศทางของแมกเนโตเซชัน ในระบบ 2 มิติ

ทิศทางของแมกเนโตเซชันในเฟอร์โรแมกเนตจะสามารถชี้ได้ในทุกทิศทาง แต่ในโครงงานนี้จะพิจารณาให้ทิศทางของแมกเนโตเซชันชี้เฉพาะทิศขึ้นหรือลงเท่านั้น กล่าวคือ $\theta = 90$ องศา เนื่องจากทิศทางดังกล่าวให้ผลที่น่าสนใจมากกว่าการศึกษาโดยให้ทิศทางของแมกเนโตเซชันชี้ไปในทิศทางต่างๆ ทั้งนี้เพราะ $\hat{m} = \pm \hat{z}$ เป็นการพิจารณาให้สปินของอิเล็กตรอนมีทิศชี้ขึ้นและลง ซึ่งจะเกิดการส่งผ่านได้ดีที่สุด และ $\hat{\sigma}$ คือ เมทริกซ์สปินของเพาลี (Pauli spin matrices) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\hat{\sigma} = \sigma_x \hat{x} + \sigma_y \hat{y} + \sigma_z \hat{z} \quad (2.6)$$

$$\text{โดยที่ } \sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \text{ และ } \sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

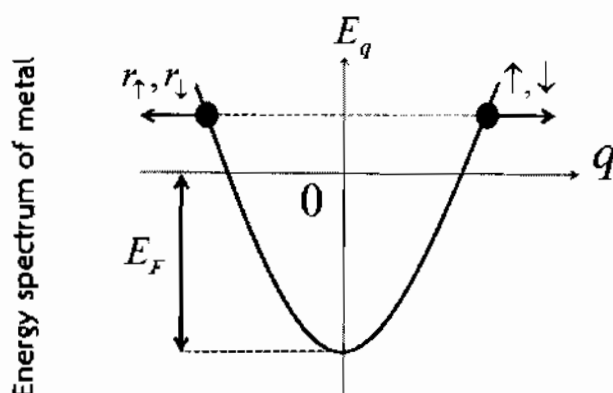
$$\text{ดังนั้น } \hat{m} \cdot \hat{\sigma} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (2.1) แฮมิลโทเนียนของระบบประกอบด้วยสองพจน์ ได้แก่ พจน์ที่หนึ่ง คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ และพจน์ที่สอง คือ พลังงานศักย์ ซึ่งจะรวมไปถึงพจน์ที่ใช้อธิบายทิศทางสปินของอิเล็กตรอนด้วย และพจน์ดังกล่าวจะใช้กำหนดทิศทางแมกเนโตเซชันของวัสดุเฟอร์โรแมกเนต ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 นอกจากนี้ในทางกลศาสตร์ควอนตัม พบว่า การแก้ปัญหาค่าเฉพาะของแฮมิลโทเนียนที่มีสองพจน์ สามารถแยกการคำนวณได้เป็นสองส่วน กล่าวคือ คำนวณในส่วนของพจน์พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน แล้วจึงคำนวณพจน์ของพลังงานศักย์

จากการแก้ปัญหาค่าเจาะจงจะได้ว่า ค่าเจาะจงของพจน์อิเล็กตรอนอิสระสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E = \frac{\hbar^2 q^2}{2m^*} + E_F \quad (2.7)$$

โดยที่ q คือ ขนาดโมเมนตัมของอิเล็กตรอนในโลหะ และ E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ซึ่งวัดจากจุดต่ำสุดของแถบพลังงานถึงจุดกำเนิด จากสมการที่ (2.7) เขียนความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน E กับโมเมนตัม q ได้ดังนี้



ภาพประกอบ 2.3 แถบพลังงานของอิเล็กตรอนในโลหะ โดยที่ E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ $\uparrow, \downarrow$ คือ ทิศทางสปินของอิเล็กตรอนตกกระทบที่มีทิศขึ้นและลง $r_\uparrow, r_\downarrow$ คือ แอมพลิจูดของคลื่นอิเล็กตรอนสะท้อนกลับสปินขึ้นและลง ตามลำดับ และเส้นโค้งแทนแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้

จากภาพประกอบ 2.3 เมื่อพิจารณาที่ขนาดโมเมนตัมเดียวกัน พบว่า อิเล็กตรอนที่มีสปินต่างกันจะมีพลังงานเท่ากัน กล่าวคือ อิเล็กตรอนสามารถส่งผ่านและสะท้อนกลับได้ทั้งแบบสปินขึ้นและสปินลง นอกจากนี้การตกกระทบและสะท้อนกลับดังกล่าวจะคิดที่ระดับพลังงานเดียวกัน นั่นคือ เป็นการกระเจิงแบบอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม ดังนั้น ฟังก์ชันคลื่นของพจน์อิเล็กตรอนอิสระดังภาพประกอบ 2.3 มีค่าเท่ากับ

$$\psi(x) = ae^{iqx} + be^{-iqx} \quad (2.8)$$

เมื่อ a และ b คือ แอมพลิจูดของคลื่นตกกระทบและสะท้อนกลับ ตามลำดับ

จากสมการแฮมิลโทเนียนของระบบ เมื่อพิจารณาพจน์ที่แสดงสมบัติทางด้านแม่เหล็กจะได้ว่า

$$\hat{H}_{Ferro} = E_{ex} \hat{m} \cdot \hat{\sigma} \quad (2.9)$$

โดยที่ E_{ex} คือ พลังงานแลกเปลี่ยนของเฟอร์โรแมกเนต ซึ่งวัดจากจุดต่ำสุดของแถบพลังงานหลัก (Majority spin band) ถึงจุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง (Minority spin band) โดยระยะห่างระหว่างแถบพลังงานทั้งสองเส้นมีค่าเท่ากับ $2E_{ex}$ ดังนั้น เมื่อแทนสมการที่ (2.5) และ (2.6) ลงในสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \hat{H}_{Ferro} &= E_{ex} \hat{\sigma}_z \\ &= E_{ex} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \\ \hat{H}_{Ferro} &= \begin{bmatrix} E_{ex} & 0 \\ 0 & -E_{ex} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.10)$$

จากการแก้ปัญหาค่าเจาะจงในสมการที่ (2.10) จะได้ว่า $E = \pm E_{ex}$ และเมื่อนำค่าที่ได้นี้ไปหาฟังก์ชันคลื่น จะได้ฟังก์ชันคลื่นที่สอดคล้องกับค่าเจาะจงดังกล่าวเป็น 2 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เมื่อ $E = +E_{ex}$ จะได้ฟังก์ชันคลื่นที่แสดงสมบัติทางด้านสปิน (Spinor part) คือ

$$\psi_{FM}^{\uparrow} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

กรณีที่ 2 เมื่อ $E = -E_{ex}$ จะได้ฟังก์ชันคลื่นที่แสดงสมบัติทางด้านสปินคือ

$$\psi_{FM}^{\downarrow} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

ฟังก์ชันคลื่นตามสมการที่ (2.11) และ (2.12) ใช้เพื่ออธิบายลักษณะของสปิน กล่าวคือ บ่งบอกทิศทางการมีสปินชี้ขึ้นหรือชี้ลงของอิเล็กตรอน โดยที่ $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ แทนฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนสปินขึ้น (Spin-up) และ $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ แทนฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนสปินลง (Spin-down) ตามแนวแกน $+z$ และ $-z$ ตามลำดับ

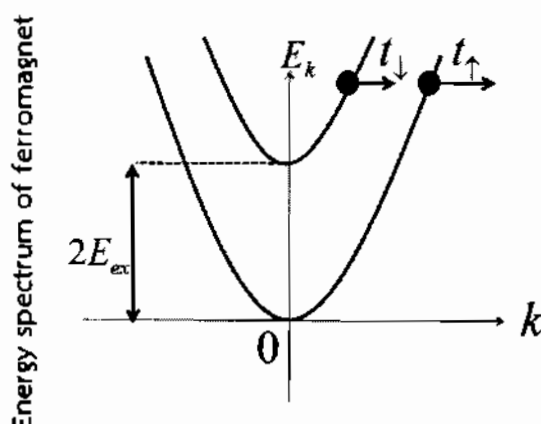
จากการคำนวณเบื้องต้นสามารถเขียนพลังงานรวมของระบบ ซึ่งเป็นผลรวมของพจน์พลังงานจลน์และพจน์ที่แสดงสมบัติทางด้านสปินได้ดังนี้

$$E = E_1 + E_2 \quad (2.13)$$

เมื่อ $E_1 = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$ และ $E_2 = \pm E_{ex}$ จะได้ว่า

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \pm E_{ex} \quad (2.14)$$

ค่าพลังงานเจาะจงดังสมการที่ (2.14) สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงาน E_k และโมเมนตัม k ได้ ดังภาพประกอบต่อไปนี้



ภาพประกอบ 2.4 แถบพลังงานของเฟอร์โรแมกเนต โดยเส้นโค้งที่อยู่ด้านนอกแทนแถบพลังงานของอิเล็กตรอนสปินขึ้น ซึ่งเป็นแถบพลังงานหลัก และเส้นโค้งที่อยู่ด้านในแทนแถบพลังงานของอิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นแถบพลังงานรอง โดยที่ t_1 และ t_2 คือ แอมพลิจูดของคลื่นอิเล็กตรอนส่งผ่านแบบสปินขึ้นและสปินลง ตามลำดับ

ในทางกลศาสตร์ควอนตัมฟังก์ชันคลื่นรวม ประกอบด้วย พจน์ที่ขึ้นอยู่กับการตำแหน่งและพจน์ที่ใช้อธิบายลักษณะของสปิน ซึ่งเป็นการนำฟังก์ชันคลื่นมาคูณกัน ดังนั้นจะได้ว่า

$$\Psi_{(x)} = \Psi_{(x)spinor} \Psi_{(x)spatial} \quad (2.15)$$

เมื่อ ψ_{spinor} คือ ฟังก์ชันคลื่นที่ใช้อธิบายลักษณะของสปิน และ $\psi_{spatial}$ คือ ฟังก์ชันคลื่นที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง ดังนั้น จากการแก้สมการโทเนียนของระบบ สามารถเขียนฟังก์ชันคลื่นได้เป็น 2 สมการดังนี้

เมื่อค่าเจาะจง $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} + E_{\alpha}$ จะได้ฟังก์ชันคลื่นเป็น

$$\psi_{(x)}^{\uparrow} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{ik_x x} \quad (2.16)$$

โดยที่

$$k_{\uparrow} = \sqrt{\frac{2m^*(E + E_{\alpha})}{\hbar^2}} \quad (2.18)$$

เมื่อค่าเจาะจง $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} - E_{\alpha}$ จะได้ฟังก์ชันคลื่นเป็น

$$\psi_{(x)}^{\downarrow} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{ik_x x} \quad (2.19)$$

โดยที่

$$k_{\downarrow} = \sqrt{\frac{2m^*(E - E_{\alpha})}{\hbar^2}} \quad (2.20)$$

2.2 ฟังก์ชันคลื่นในแต่ละบริเวณ

จากการแก้ปัญหาค่าเจาะจง โดยใช้สมการโทเนียนของระบบดังสมการที่ 2.1 พบว่า จะได้ฟังก์ชันคลื่นของวัสดุโลหะและเฟอร์โรแมกเนต ตามสมการที่ (2.8) (2.16) และ (2.19) ตามลำดับ จากสมการดังกล่าวทำให้สามารถเขียนฟังก์ชันคลื่นในแต่ละบริเวณได้ ซึ่งระบบนี้จะแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองบริเวณ ดังภาพประกอบ 2.1 เนื่องจากแถบพลังงานของเฟอร์โรแมกเนตดังภาพประกอบ 2.4 มีทั้งหมดสองเส้น ซึ่งเกิดจากการแยกของแถบพลังงาน (Energy splitting) โดยแต่ละเส้นมีทิศทาง

สปินของอิเล็กตรอนตรงข้ามกัน ดังนั้น เมื่อนำโลหะต่อเข้ากับเฟอร์โรแมกเนต จึงทำให้ฟังก์ชันคลื่นของฝั่งโลหะต้องพิจารณาทิศทางสปินของอิเล็กตรอนร่วมด้วย กล่าวคือ อิเล็กตรอนสามารถตกกระทบบนได้ทั้งสปินขึ้นและสปินลง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

กรณีอิเล็กตรอนตกกระทบบนสปินขึ้น ฟังก์ชันคลื่นสามารถเขียนได้เป็น

$$\psi_M^{(\uparrow)}(r) = \left[\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{iq_x x} + \begin{bmatrix} r_{q\uparrow} \\ 0 \end{bmatrix} e^{-iq_x x} + \begin{bmatrix} 0 \\ r_{q\downarrow} \end{bmatrix} e^{-iq_x x} \right] e^{iq_y y} \quad (2.21)$$

กรณีอิเล็กตรอนตกกระทบบนสปินลง ฟังก์ชันคลื่นสามารถเขียนได้เป็น

$$\psi_M^{(\downarrow)}(r) = \left[\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{iq_x x} + \begin{bmatrix} r_{q\uparrow} \\ 0 \end{bmatrix} e^{-iq_x x} + \begin{bmatrix} 0 \\ r_{q\downarrow} \end{bmatrix} e^{-iq_x x} \right] e^{iq_y y} \quad (2.22)$$

เมื่อ $\psi_M^{(\uparrow)}(r)$ คือ ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนตกกระทบบนสปินขึ้น, $\psi_M^{(\downarrow)}(r)$ คือ ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนตกกระทบบนสปินลง, $r_{q\uparrow}$ และ $r_{q\downarrow}$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง ตามลำดับ, q_y คือ โมเมนตัมในทิศทางขนานกับรอยต่อ และ x_y คือ เวกเตอร์บอกตำแหน่งที่อยู่ในทิศทางขนานกับรอยต่อ

จากฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนฝั่งโลหะดังสมการที่ (2.21) และ (2.22) จะเห็นว่า แต่ละสมการประกอบด้วยสามพจน์ ได้แก่ พจน์ที่หนึ่งของทั้งสองสมการ คือ คลื่นอิเล็กตรอนตกกระทบบนสปินขึ้น $\psi_M^{(\uparrow)}(r) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{iq_x x}$ และคลื่นอิเล็กตรอนตกกระทบบนสปินลง $\psi_M^{(\downarrow)}(r) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{iq_x x}$ ตามลำดับ โดยคลื่นดังกล่าวจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน $+x$ จากภาพประกอบ 2.1 จะเห็นได้ว่า ในแถบพลังงานของโลหะที่ค่าโมเมนตัมเดียวกัน สามารถพบทั้งอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง ด้วยเหตุนี้ในการคำนวณจึงต้องพิจารณาการตกกระทบบนของอิเล็กตรอนทั้งสองแบบ พจน์ที่สอง คือ คลื่นอิเล็กตรอนสะท้อนกลับสปินขึ้น $\psi_M^{(\uparrow)}(r) = \begin{bmatrix} r_{q\uparrow} \\ 0 \end{bmatrix} e^{-iq_x x}$ และพจน์ที่สาม คือ คลื่นอิเล็กตรอนสะท้อนกลับสปินลง $\psi_M^{(\downarrow)}(r) = \begin{bmatrix} r_{q\uparrow} \\ 0 \end{bmatrix} e^{-iq_x x}$ จะเห็นได้ว่า พจน์ที่สองและสามจะเหมือนกันทั้งสองสมการ นั่นคือ อิเล็กตรอนมีโอกาสสะท้อนกลับได้ทั้งอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง แม้ว่าจะเป็นการตกกระทบบนของอิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้นหรือสปินลงก็ตาม นอกจากนี้ ฟังก์ชันคลื่นของฝั่งเฟอร์โรแมกเนตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\psi_{FM}(r) = \left(t_{k\uparrow} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{ik_{\parallel}x} + t_{k\downarrow} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{-ik_{\parallel}x} \right) e^{i\vec{k}_{\perp} \cdot \vec{r}_{\perp}} \quad (2.23)$$

เมื่อ $\psi_{FM}(r)$ คือ ฟังก์ชันคลื่นในฝั่งของเฟอร์โรแมกเนต $t_{k\uparrow}$, $t_{k\downarrow}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง ตามลำดับ และ $\vec{k}_{\perp}$ คือ โมเมนตัมในทิศทางขนานกับรอยต่อ และจากสมการที่ (2.23) ฟังก์ชันคลื่นของฝั่งเฟอร์โรแมกเนตประกอบไปด้วยสองพจน์ ได้แก่ พจน์ที่หนึ่ง คือ คลื่นอิเล็กตรอนส่งผ่านสปินขึ้น $\psi_{FM}^{\uparrow}(r) = t_{k\uparrow} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{ik_{\parallel}x}$ และพจน์ที่สอง คือ คลื่นอิเล็กตรอนส่งผ่านสปินลง $\psi_{FM}^{\downarrow}(r) = t_{k\downarrow} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e^{-ik_{\parallel}x}$ ดังนั้น อิเล็กตรอนมีโอกาสส่งผ่านทั้งอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง

2.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

จากการพิจารณาสมการฟังก์ชันคลื่นรวมของวัสดุโลหะและเฟอร์โรแมกเนต ดังสมการที่ (2.21) (2.22) และ (2.23) พบว่า ปริมาณที่ต้องการคำนวณหา ประกอบไปด้วย สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปินขึ้น ($r_{q\uparrow}$), สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปินลง ($r_{q\downarrow}$), สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินขึ้น ($t_{k\uparrow}$) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินลง ($t_{k\downarrow}$) ตามลำดับ ดังนั้น การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ข้างต้น สามารถทำได้โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขตดังต่อไปนี้

- 1) ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนมีค่าต่อเนื่องที่รอยต่อ

$$\psi_M(x=0^-) = \psi(0) = \psi_{FM}(x=0^+) \quad (2.24)$$

- 2) อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First derivative) ของฟังก์ชันคลื่นไม่ต่อเนื่อง ณ ที่รอยต่อ เนื่องจากมีพลังงานศักย์เกิดขึ้น ณ รอยต่อ กล่าวคือ เมื่อนำวัสดุสองชนิดมาต่อกันจะไม่สามารถทำให้วัสดุทั้งสองรวมกันเป็นเนื้อเดียวได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น จะได้ว่า

$$\eta \frac{d\psi_{FM}(x)}{dx} \Big|_{x=0} - \frac{d\psi_M(x)}{dx} \Big|_{x=0} = 2q_F Z \psi(0) \quad (2.25)$$

เมื่อ $\eta = m_M^* / m_i^*$ เป็นอัตราส่วนมวลยังผลของอิเล็กตรอนในโลหะ (m_M^*) กับของเฟอร์โรแมกเนต (m_i^*) โดยอัตราส่วนมวลยังผลดังกล่าว จะช่วยให้การศึกษามวลยังผลของอิเล็กตรอนต่อ

ความนำจะเป็นการสะท้อนกลับและการส่งผ่านของอิเล็กตรอน ถ้า E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ และ q_F คือ โมเมนตัม ณ ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ พบว่า

$$E_F = \frac{\hbar^2 q_F^2}{2m^*} \quad (2.26)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.26) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของโมเมนตัมที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานได้ดังนี้

$$q_F = \sqrt{\frac{2m^* E_F}{\hbar^2}} \quad (2.27)$$

เมื่อ q_F คือ เลขคลื่นเฟอร์มิ (Fermi wave vector) ของโลหะ และจากสมการที่ (2.25) จะได้ว่า Z คือ ความแรงของพลังงานศักย์ (Potential strength) ณ ที่รอยต่อ โดยที่

$$Z = \frac{m^* U}{\hbar^2 q_F^2} \quad (2.28)$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณาการกระเจิงในระบบรอยต่อที่ประกอบด้วย พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติและแบบสปีนพลิกกลับ จะได้ว่า

$$Z = \begin{bmatrix} Z_0 & Z_f \\ Z_f & Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

เมื่อ Z_0 คือ ค่าพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ซึ่งกำแพงศักย์ชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุสองชนิดมาต่อกัน เนื่องจากในเชิงปฏิบัติไม่สามารถทำให้วัสดุทั้งสองต่อเป็นเนื้อเดียวกันได้ และ Z_f คือ ค่าพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ โดยพลังงานศักย์ชนิดนี้สามารถทำให้เกิดขึ้นได้จริง ด้วยการฝังไอออนที่มีสมบัติทางด้านแม่เหล็กลงไปบริเวณรอยต่อ และเนื่องจากในการคำนวณได้มีการแบ่งการตกกระทบของอิเล็กตรอนออกเป็นสปีนขึ้นและสปีนลง ดังนั้น การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จากเงื่อนไขขอบเขต จึงแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

2.3.1 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

จากเงื่อนไขขอบเขตในข้อที่ 1 นำมาหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในรูปของสมการ โดยการแทนฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนฝั่งโลหะดังสมการที่ (2.21) และฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนฝั่งเฟอร์โรแมกเนต ดังสมการที่ (2.23) ลงในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$1 + r_{\uparrow} = t_{\uparrow} \quad (2.30)$$

$$r_{\downarrow} = t_{\downarrow} \quad (2.31)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตในข้อที่ 2 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ต่างๆ ได้โดยการแทนสมการที่ (2.21) และ (2.23) ลงในสมการที่ (2.25) จะได้ว่า

$$iqr_{\uparrow} + (\eta ik_{\uparrow} - 2q_F Z_0) t_{\uparrow} - 2q_F Z_F t_{\downarrow} = iq \quad (2.32)$$

$$iqr_{\downarrow} + (\eta ik_{\downarrow} - 2q_F Z_0) t_{\downarrow} - 2q_F Z_F t_{\uparrow} = 0 \quad (2.33)$$

2.3.2 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินลง

สัมประสิทธิ์ต่างๆ ในกรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินลง สามารถหาได้จากการใช้เงื่อนไขขอบเขตข้อที่ 1 นั่นคือ แทนฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนฝั่งโลหะ ดังสมการที่ (2.22) และฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนฝั่งเฟอร์โรแมกเนต ดังสมการที่ (2.23) ลงในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$r_{\uparrow} = t_{\uparrow} \quad (2.34)$$

$$1 + r_{\downarrow} = t_{\downarrow} \quad (2.35)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตในข้อที่ 2 นำมาหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ทั้งหมดในรูปของสมการได้โดยการแทนสมการที่ (2.23) และ (2.24) ลงในสมการที่ (2.25) ซึ่งจะได้ว่า

$$iqr_{\uparrow} + (\eta ik_{\downarrow} - 2q_F Z_0) t_{\uparrow} - 2q_F Z_F t_{\downarrow} = 0 \quad (2.36)$$

$$iqr_{\downarrow} + (\eta ik_{\downarrow} - 2q_F Z_0) t_{\downarrow} - 2q_F Z_F t_{\uparrow} = iq \quad (2.37)$$

จากสมการที่ (2.34) (2.35) (2.36) และ (2.37) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ r_r , r_t รวมทั้งสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน t_r , t_t ได้ ดังนั้น เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว จะสามารถหาค่าความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับและการส่งผ่านได้ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.4 ความน่าจะเป็นการส่งผ่านและการสะท้อนกลับ (Transmission and reflection probabilities)

จากหัวข้อ 2.3.1 และ 2.3.2 ได้มีการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ รวมถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของอิเล็กตรอนทั้งสปินขึ้นและสปินลง โดยคำนวณหาจากสมการฟังก์ชันคลื่นรวมในแต่ละบริเวณ โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ เป็นตัวแปรที่นำมาใช้หาความน่าจะเป็นการส่งผ่านและการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนได้ โดยการแทนค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวในสมการความหนาแน่นกระแสของความน่าจะเป็น (Probability current density) ดังสมการต่อไปนี้⁴

$$j = \frac{-i\hbar}{2m} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) \quad (2.38)$$

จากรอยต่อของวัสดุโลหะและเฟอร์โรแมกเนต เมื่อเกิดการกระเจิงของคลื่น ณ บริเวณรอยต่อพบว่า ความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็น ประกอบไปด้วย ความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอนตกกระทบ (Probability current density of incident electrons; j_{in}), ความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (Probability current density of reflected electrons; j_r) และความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอนส่งผ่าน (Probability current density of transmission electrons; j_t) ด้วยเหตุนี้ ถ้าพิจารณาฝั่งโลหะ โดยแทนค่าฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนตกกระทบทั้งสปินขึ้นและสปินลง ในสมการที่ (2.38) จะได้ว่า

$$j_{in}^{(\uparrow)} = \frac{\hbar q}{m_M} \quad (2.39)$$

$$j_{in}^{(\downarrow)} = \frac{\hbar q}{m_M} \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.39) และ (2.40) เมื่อมีการตกกระทบของอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เป็นสปินขึ้นหรือสปินลงพบว่า จะมีความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นเท่ากัน นั่นคือ

$$j_{in}^{(\uparrow)} = j_{in}^{(\downarrow)} = \frac{\hbar q}{m_M} \quad (2.41)$$

นอกจากนี้เมื่อแทนฟังก์ชันคลื่นการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง ในสมการที่ (2.38) จะได้ว่า

$$j_{re}^{(\uparrow)} = \frac{\hbar q}{m_M^*} |r_{q\uparrow}|^2 \quad (2.42)$$

$$j_{re}^{(\downarrow)} = \frac{\hbar q}{m_M^*} |r_{q\downarrow}|^2 \quad (2.43)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาฝั่งเฟอร์โรแมกเนต โดยการแทนฟังก์ชันคลื่นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง ในสมการที่ (2.38) จะได้ว่า

$$j_{tr}^{(\uparrow)} = \frac{\hbar k}{m_F^*} |t_{k\uparrow}|^2 \quad (2.44)$$

$$j_{tr}^{(\downarrow)} = \frac{\hbar k}{m_F^*} |t_{k\downarrow}|^2 \quad (2.45)$$

จากความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นของการตกกระทบ ตามสมการที่ (2.41), (2.42) และ (2.43) สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับ (Reflection probability; R) ได้จากค่าสัมบูรณ์ของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นของการสะท้อนกลับและความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นของการตกกระทบ ดังสมการต่อไปนี้

$$R = \left| \frac{j_{reflection}}{j_{incident}} \right| \quad (2.46)$$

เมื่อใช้สมการที่ (2.46) เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับ จะได้ว่า อิเล็กตรอนตกกระทบบริเวณรอยต่อ โดยมีพลังงานศักย์ค่าหนึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนสปินขึ้นหรือสปินลงมีโอกาสสะท้อนกลับได้เท่ากัน กล่าวคือ สามารถหาได้ทั้งความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปินขึ้น $R_\uparrow$ และสปินลง $R_\downarrow$ โดยแสดงได้ดังนี้

$$R_\uparrow = |r_{q\uparrow}|^2 \quad (2.47)$$

$$R_\downarrow = |r_{q\downarrow}|^2 \quad (2.48)$$

ความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอน (Transmission probability; T) คำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าสมบูรณัความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นการส่งผ่านและความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นการตกกระทบ ดังสมการต่อไปนี้

$$T = \left| \frac{j_{\text{transmission}}}{j_{\text{incident}}} \right| \quad (2.49)$$

เมื่อแทนค่าความหนาแน่นกระแสความน่าจะเป็นจากสมการที่ (2.41) (2.44) และ (2.45) ลงในสมการที่ (2.49) จะได้ความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง ดังสมการต่อไปนี้

$$T_{\uparrow} = \frac{k_{\uparrow} m_M^*}{q m_F^*} |t_{k\uparrow}|^2 \quad (2.50)$$

$$T_{\downarrow} = \frac{k_{\downarrow} m_M^*}{q m_F^*} |t_{k\downarrow}|^2 \quad (2.51)$$

บทที่ 3

ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล

การคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับ และการส่งผ่านของอิเล็กตรอนมีปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ซึ่งเกิดขึ้นจากการนำวัสดุสองชนิดมาต่อกัน พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ ที่เกิดจากการฝังไอออนที่มีสมบัติทางด้านแม่เหล็กลงไปทีบริเวณรอยต่อ และมวลยังผลของอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนมีมวลต่างกันเมื่อเคลื่อนที่อยู่ในวัสดุต่างชนิด โดยการคำนวณจะพิจารณาให้อิเล็กตรอนตกกระทบบนรอยต่อ 3 กรณี คือ อิเล็กตรอนตกกระทบบนขึ้น อิเล็กตรอนตกกระทบบนลง และอิเล็กตรอนตกกระทบบนทั้งสปีนขึ้นและสปีนลง ในที่นี้ผลการคำนวณของแต่ละตัวแปรจะเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นต่าง ๆ ประกอบด้วย T_r , T_l , R_r และ R_l ตามลำดับ

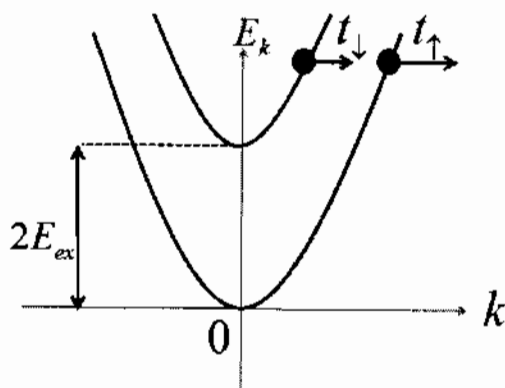
3.1 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ: Z_0

เนื่องจากวัสดุเฟอร์โรแมกเนตสามารถเกิดการส่งผ่านหรือสะท้อนกลับได้ทั้งอิเล็กตรอนสปีนขึ้นและสปีนลง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1 เพราะฉะนั้นจึงพิจารณาการตกกระทบบนของอิเล็กตรอนฝังโลหะได้เป็น 2 กรณี คือ อิเล็กตรอนตกกระทบบนขึ้นและสปีนลง ดังนั้น การศึกษาการส่งผ่านเกี่ยวกับผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ จะพิจารณาให้ Z_0 อยู่ในช่วง $0.0 \leq Z_0 \leq 2.0$ เนื่องจากวัสดุที่ดีควรมีค่าพลังงานศักย์ดังกล่าวน้อย รวมทั้งกำหนดให้อัตราส่วนมวลยังผลของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสองเท่ากัน กล่าวคือ $\eta=1$ ซึ่ง $\eta = \frac{m_M^*}{m_F^*}$ โดยที่ m_M^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนฝังโลหะ และ m_F^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนฝังเฟอร์โรแมกเนต

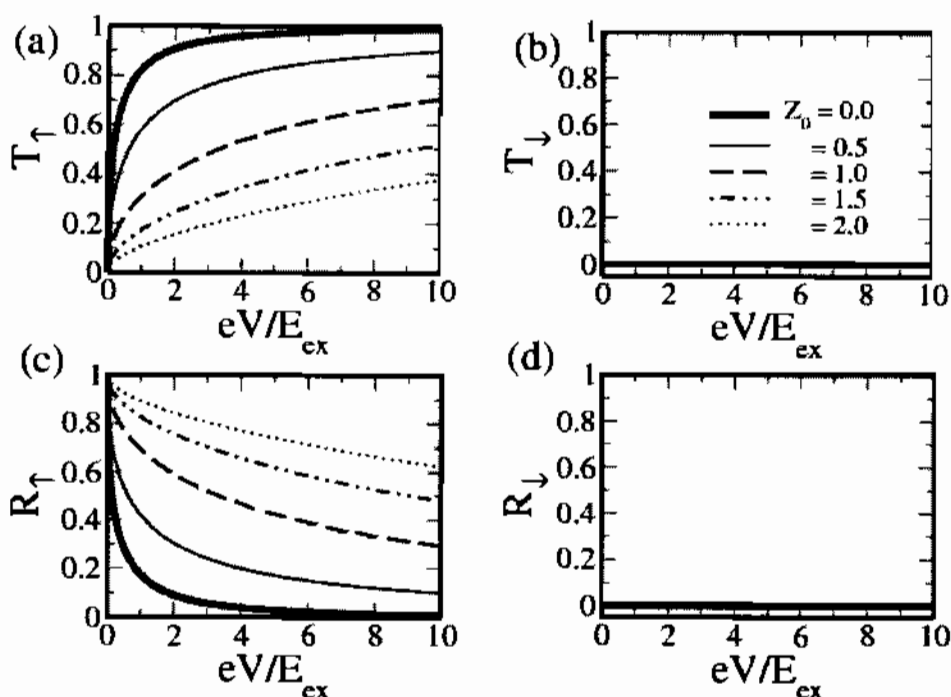
3.1.1 กรณีการตกกระทบบนของอิเล็กตรอนสปีนขึ้น

จากภาพประกอบ 3.2 จะเห็นได้ว่าการส่งผ่านและการสะท้อนกลับเกิดขึ้นเฉพาะ T_r และ R_r เท่านั้น ในทางตรงข้าม T_l และ R_l มีค่าเป็นศูนย์ กล่าวคือ อิเล็กตรอนสปีนลงไม่เกิดการส่งผ่านและการสะท้อนกลับ ทั้งนี้จากภาพประกอบ 3.2(a) และ 3.2(c) การส่งผ่านและการสะท้อนกลับดังกล่าวเริ่มต้นที่ $eV=0$ เนื่องจาก เป็นบริเวณจุดต่ำสุดของแถบพลังงานหลัก ซึ่งถูกครอบครองด้วยสถานะของอิเล็กตรอนสปีนขึ้น ดังภาพประกอบ 2.1 จึงเป็นเหตุผลให้อิเล็กตรอนสปีนขึ้นสามารถส่งผ่านรอยต่อได้ จากผลการคำนวณข้างต้น กล่าวได้ว่า พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ (Z_0) จะลดค่า

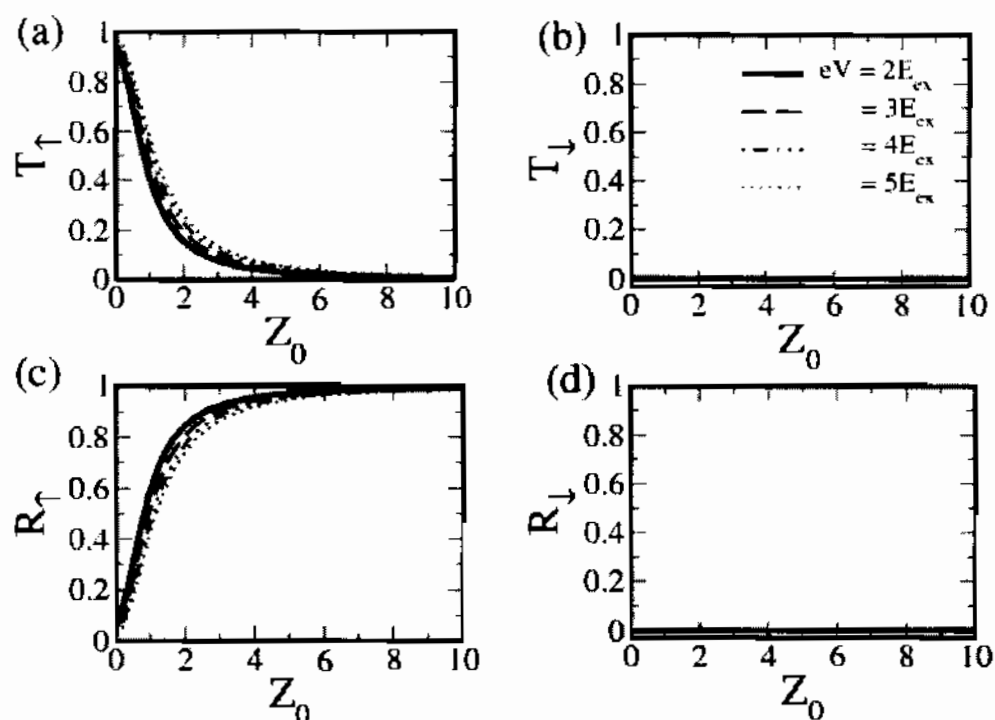
ความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางเหมือนกับอิเล็กตรอนตกกระทบ กล่าวคือ $T_{\uparrow}$ มีค่าลดลง ดังนั้น Z_0 ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางสปินของอิเล็กตรอนตกกระทบ



ภาพประกอบ 3.1 แถบพลังงานของเฟอร์โรแมกเนต ซึ่งประกอบไปด้วยแถบพลังงานหลักที่มีทิศทางแมกเนโตเซชันของอิเล็กตรอนชี้ขึ้น และแถบพลังงานรองที่มีทิศทางแมกเนโตเซชันของอิเล็กตรอนชี้ลง โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดต่ำสุดของแถบพลังงานทั้งสองมีค่าเท่ากับ $2E_{ex}$



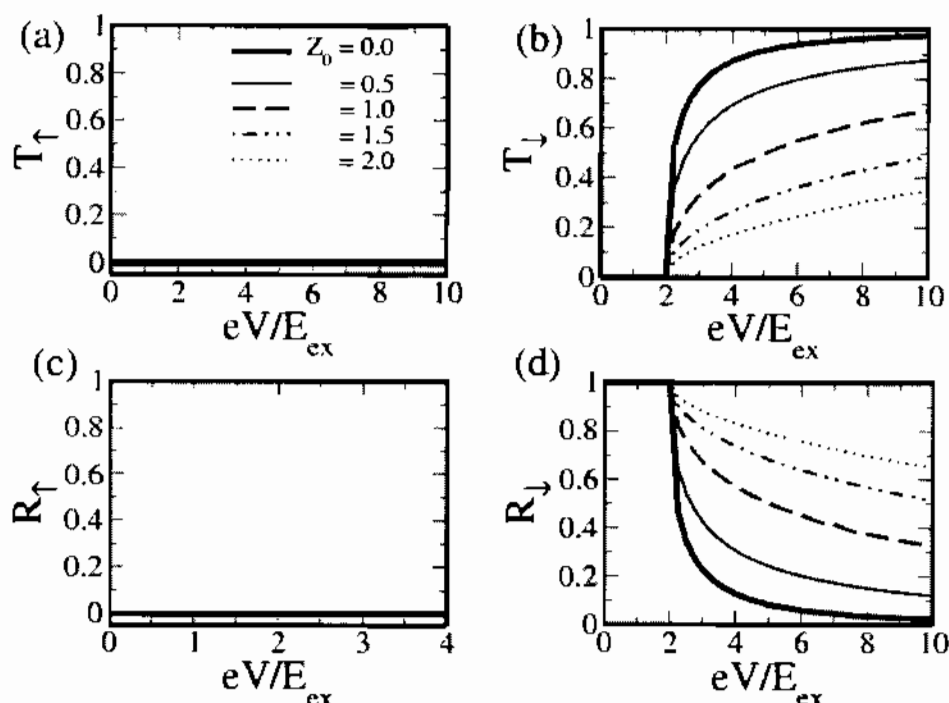
ภาพประกอบ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินชี้ขึ้น



ภาพประกอบ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

จากการลดลงของค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินขึ้น เมื่อพิจารณาให้พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 3.2 จะเห็นแนวโน้มของการลดลงไม่ชัดเจน ดังนั้น เพื่อให้เห็นเด่นชัดจึงได้มีการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านของ $T_{\uparrow}$, $T_{\downarrow}$, $R_{\uparrow}$ และ $R_{\downarrow}$ กับพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3 จะได้ว่า การลดลงของค่าความน่าจะเป็นของ $T_{\uparrow}$ เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3(a) นอกจากนี้ความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับ $R_{\uparrow}$ มีการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลสอดคล้องกับ $T_{\uparrow}$ โดยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงในลักษณะนี้พบได้ทั่วไปทางด้านฟิสิกส์หรือในงานวิศวกรรม

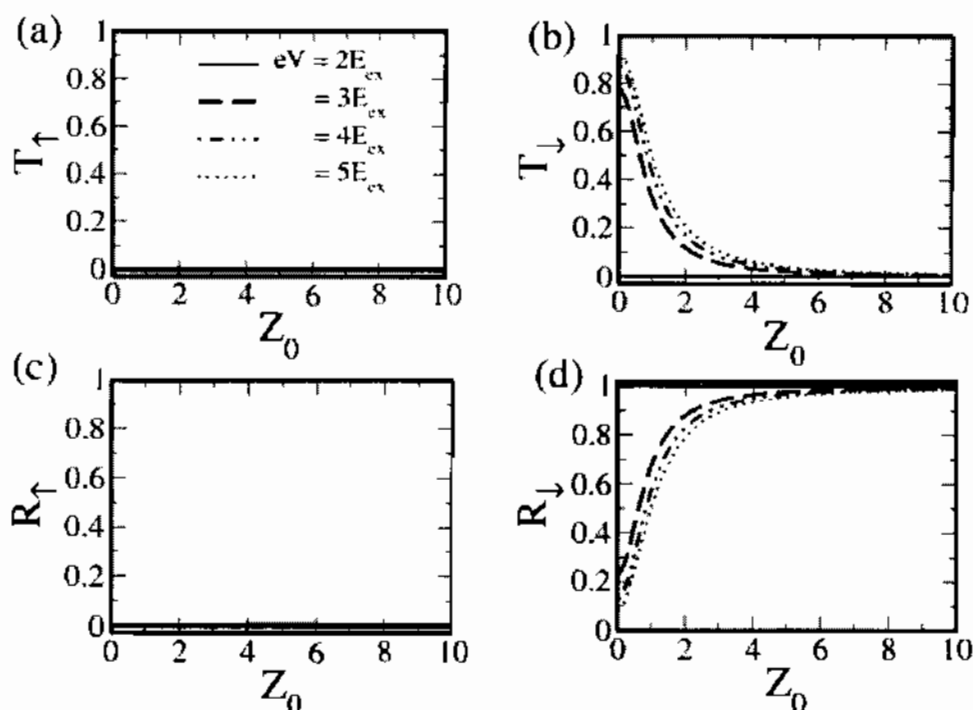
3.1.2 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินชี้ลง



ภาพประกอบ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินชี้ลง

เมื่อกำหนดให้ Z_0 มีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นว่า $T_\downarrow$ ลดน้อยลง และ $R_\downarrow$ เพิ่มมากขึ้น ดังภาพประกอบ 3.4(b) และ 3.4(d) ตามลำดับ ซึ่งผลการคำนวณข้างต้นนี้คล้ายกับภาพประกอบ 3.2 ซึ่งกรณีดังกล่าวเป็นการพิจารณาอิเล็กตรอนตกกระทบสปินชี้ขึ้น แต่ในกรณีนี้เป็นการพิจารณาอิเล็กตรอนตกกระทบสปินชี้ลง นั่นคือ Z_0 ไม่ทำให้สปินของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทาง ดังนั้น $T_\uparrow$ และ $R_\uparrow$ จึงมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นหรือลดลงดังภาพประกอบ 3.4(b) และ 3.4(d) สังเกตได้ว่าค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านและการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนเริ่มขึ้นที่บริเวณ $eV = 2E_\alpha$ ซึ่งตรงกับจุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง ดังแสดงในภาพประกอบ 2.1 ทั้งนี้วัสดุเฟอร์โรแมกเนต ประกอบด้วยแถบพลังงานหลักที่ครอบครองด้วยอิเล็กตรอนสปินขึ้น และแถบพลังงานรองที่ครอบครองด้วยอิเล็กตรอนสปินลง โดยระยะห่างระหว่างสองแถบพลังงานเท่ากับ $2E_\alpha$ ดังนั้น เมื่อพิจารณาให้อิเล็กตรอนสปินลงตกกระทบ พบว่า อิเล็กตรอนดังกล่าวไม่สามารถส่งผ่านรอยต่อไปได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำ

ให้ค่าความน่าจะเป็น $T_{\uparrow}$ และ $R_{\uparrow}$ มีค่าเป็นศูนย์ และการส่งผ่านของอิเล็กตรอนดังภาพประกอบ 3.4(b) จะเริ่มขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงาน $eV = 2E_{ex}$

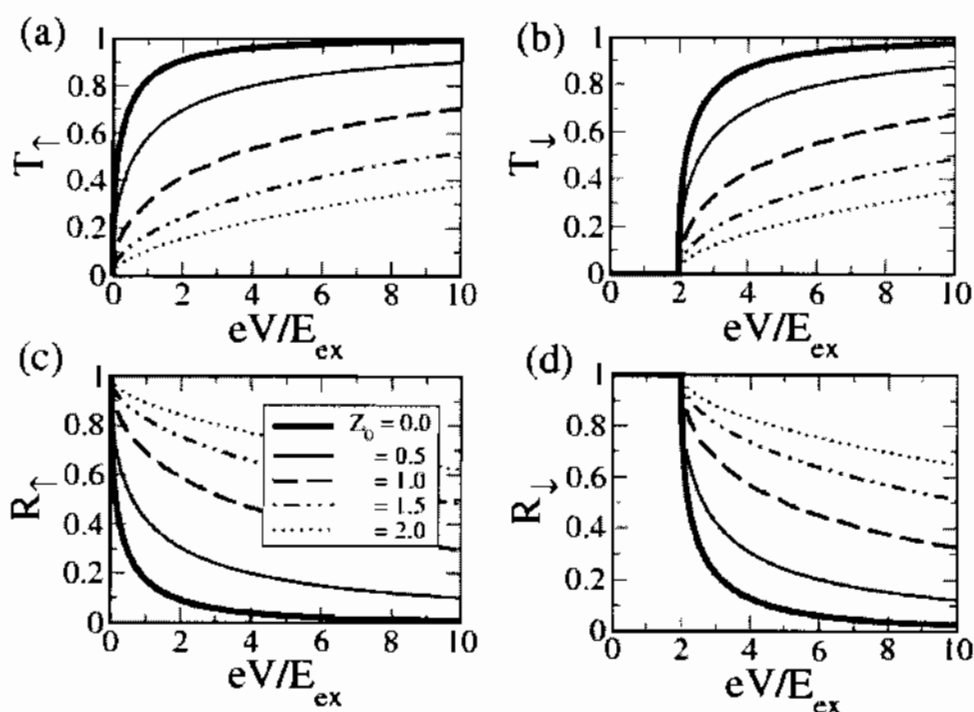


ภาพประกอบ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_r = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

จากภาพประกอบ 3.5 การลดลงหรือเพิ่มขึ้นของ $T_{\uparrow}$ และ $R_{\uparrow}$ เป็นแบบเอกซิโพเนนเชียล ซึ่งเหมือนกับกรณีของอิเล็กตรอนตกกระทบสปินขึ้น แต่เมื่อพลังงาน $eV = 2E_{ex}$ ความน่าจะเป็นดังกล่าวจะมีค่าเป็นศูนย์ จึงทำให้มองเห็นกราฟแค่สามเส้นดังภาพประกอบ 3.5(b) และ 3.5(d) เนื่องจากที่พลังงานดังกล่าวมีค่าเท่ากับพลังงาน ณ จุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง และเมื่อพิจารณาให้ Z_0 มีค่ามาก จะเห็นได้ว่า $T_{\uparrow}$ มีค่าเข้าสู่ศูนย์ ซึ่งสอดคล้องกับ $R_{\uparrow}$ ที่มีค่าเข้าสู่ 1 ซึ่งเป็นจริงตามหลักการทางฟิสิกส์ นั่นคือ วัสดุที่มีพลังงานศักย์ที่ร่อยต่อมาก ย่อมมีผลให้อิเล็กตรอนผ่านไปได้ยาก

3.1.3 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น

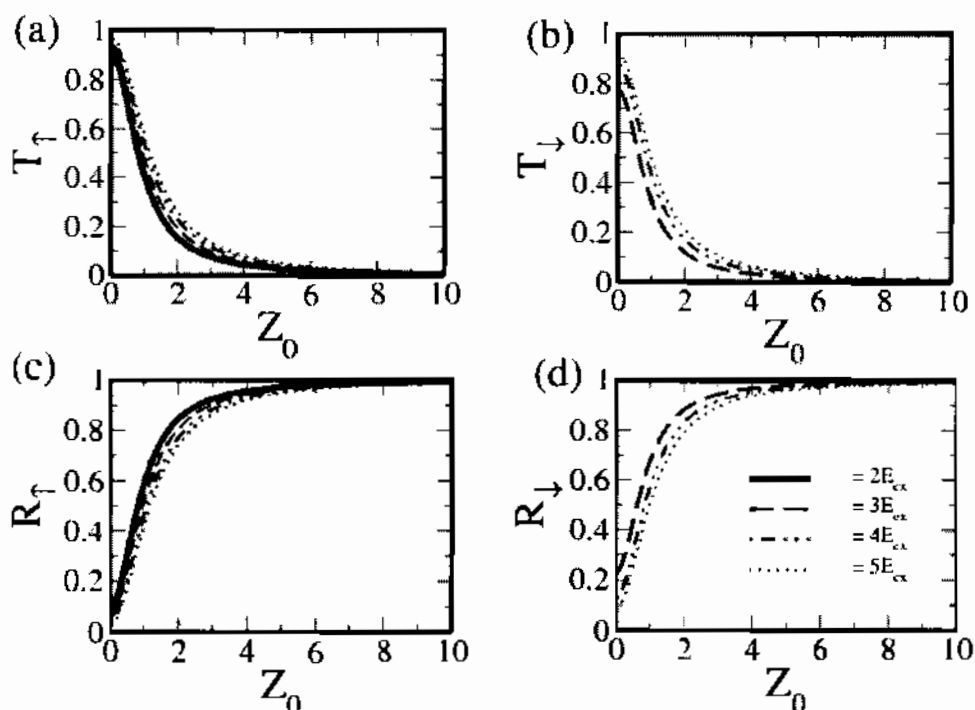
ในหัวข้อต่อไปนี้จะพิจารณาการส่งผ่านของอิเล็กตรอน โดยกำหนดให้อิเล็กตรอนตกกระทบมีสปินขึ้นและสปินลง ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับความจริงที่ไม่สามารถบอกได้ว่า อิเล็กตรอนตกกระทบจะมีสปินขึ้นหรือสปินลง ดังนั้น ผลการคำนวณที่ได้จึงเป็นเหมือนการรวมระหว่างหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ซึ่งแสดงผลการคำนวณได้ดังภาพประกอบต่อไปนี้



ภาพประกอบ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น

กรณีนี้เป็นการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง ซึ่งภาพประกอบ 3.6 และ 3.7 แสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่า การลดของ $T_\uparrow$ และ $T_\downarrow$ ที่เกิดจากผลของ Z_0 มีลักษณะเหมือนกัน นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของ $R_\uparrow$ และ $R_\downarrow$ ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่มีจุดเริ่มต้นของการส่งผ่านที่แตกต่างกัน นั่นคือ $T_\uparrow$ และ $R_\uparrow$ จะเริ่มจากจุดต่ำสุดของแถบพลังงานหลัก ในขณะที่ $T_\downarrow$ และ $R_\downarrow$ เริ่มจากจุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงาน $eV = 2E_{ex}$ ดังนั้น

การตกกระทบของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปินแตกต่างกัน มีผลให้ลักษณะการส่งผ่านหรือการสะท้อนกลับคล้ายกัน แต่พลังงานของอิเล็กตรอนที่ใช้แตกต่างกัน

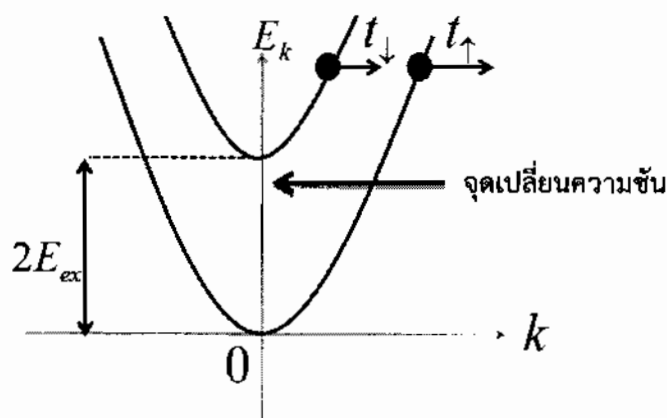


ภาพประกอบ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น

3.2 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ: Z_f

จากการพิจารณาผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ สังเกตได้ว่า ค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนจะมีค่ามากขึ้น เมื่อ Z_0 มีค่าน้อย ในทางปฏิบัติเมื่อมีการนำวัสดุโลหะต่อเข้ากับวัสดุเฟอร์โรแมกเนต จะทำให้พลังงานศักย์ดังกล่าวเกิดขึ้นได้เอง โดยไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือควบคุมความแรงของ Z_0 ได้ ดังนั้น เมื่อต้องการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านในทางทฤษฎีจึงต้องเพิ่มผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับเข้าไยร่อยต่อ โดยในทางปฏิบัติจะสามารถสร้างได้ด้วยการฝังไอออนที่มีคุณสมบัติทางด้านแม่เหล็กลงไปยัง

บริเวณรอยต่อ พบว่า ผลการคำนวณดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้จริงในผลการทดลอง และจะได้ค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านสูงสุด เมื่อ $Z_0 = Z_f$ ซึ่งสามารถแสดงได้ในผลการคำนวณดังต่อไปนี้

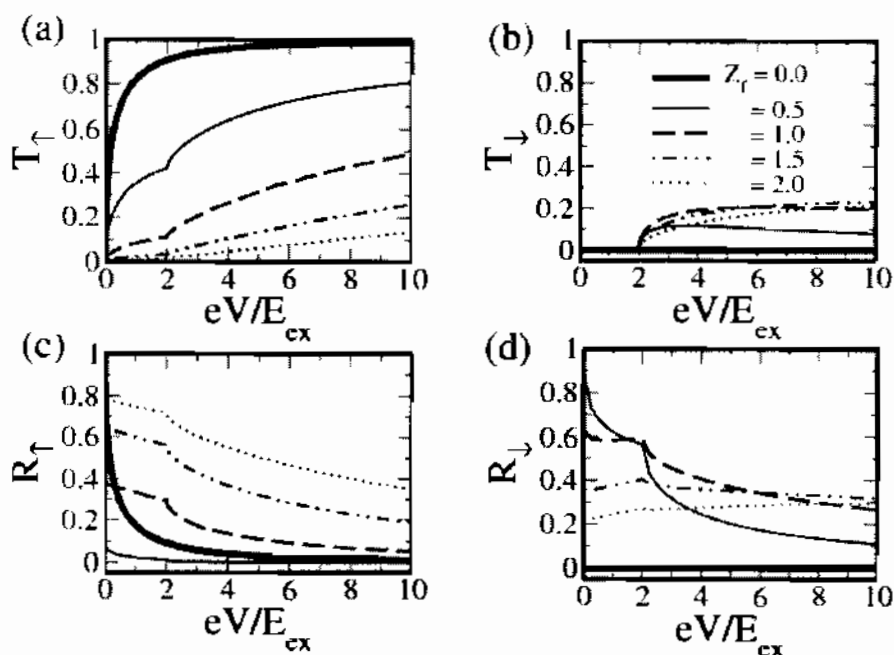


ภาพประกอบ 3.8 แถบพลังงานของเฟอร์โรแมกเนตที่แสดงจุดเปลี่ยนความชันของค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางเดียวกับอิเล็กตรอนตกกระทบ

3.2.1 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

ในหัวข้อ 3.1 ได้ทำการวิเคราะห์ผลของพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นได้เอง ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาพลังงานศักย์อีกหนึ่งชนิด นั่นคือ พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ โดยในทางปฏิบัติสามารถทำได้ด้วยการฝังไอออนที่มีคุณสมบัติทางด้านแม่เหล็กลงไปที่ยบริเวณรอยต่อ การฝังไอออนดังกล่าวจะทำให้เกิดสมบัติทางด้านฟิสิกส์ คือ การเปลี่ยนแปลงทิศทางสปินของอิเล็กตรอนตกกระทบ และทำให้เกิดการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินตรงข้าม ดังนั้น การวิเคราะห์ผลการคำนวณของปรากฏการณ์ดังกล่าว สามารถพิจารณาได้ดังภาพประกอบ 3.9

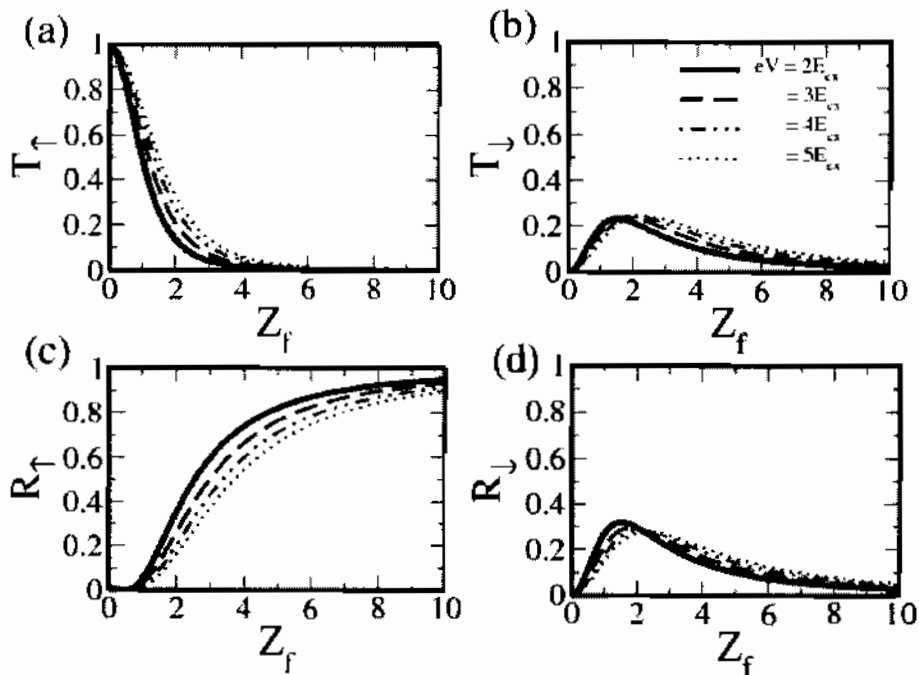
เมื่อพิจารณาการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น จะได้ว่า T_f ลดลง เมื่อ Z_f มีค่าเพิ่มขึ้นดังภาพประกอบ 3.9(a) โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความชันเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงาน $eV = 2E_{ex}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ที่พลังงาน $eV > 2E_{ex}$ ค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินขึ้นจะลดลงเร็วกว่าที่พลังงาน $eV < 2E_{ex}$ เนื่องจาก ณ ที่พลังงานต่ำกว่า $2E_{ex}$ มีโอกาสพบเฉพาะอิเล็กตรอนสปินขึ้น จึงทำให้ถูกลดค่าโดย Z_f ด้วยความแรงคงที่ แต่ที่พลังงานสูงกว่า $2E_{ex}$ มีทั้งอิเล็กตรอนสปินขึ้นและสปินลง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.8 เมื่อมีปริมาณอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นแต่ความแรงของ Z_f เท่าเดิม จึงส่งผลให้ T_f ที่ระดับพลังงาน $eV < 2E_{ex}$ ลดลงช้ากว่าที่พลังงาน $eV > 2E_{ex}$ กล่าวคือ อิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปินเหมือนกับอิเล็กตรอนตกกระทบจะผ่านไปได้มากขึ้น



ภาพประกอบ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_f ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 3.9(b) จะเห็นได้ว่า มีอิเล็กตรอนสปินลงสามารถส่งผ่านได้ กล่าวคือ เกิดการพลิกกลับของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบ ในขณะที่ Z_f จะเริ่มส่งผลกระทบต่อ $T_{\downarrow}$ ที่ระดับพลังงานเท่ากับ จุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง ดังภาพประกอบ 3.8 โดย $T_{\downarrow}$ มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อ $0 < Z_f < 1$ และลดลงเมื่อ $Z_f > 1$ ขณะที่อิเล็กตรอนมีพลังงานมาก $T_{\downarrow}$ จะเข้าสู่ค่าคงที่ ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณา $R_{\downarrow}$ จะเห็นได้ว่า มีลักษณะตรงข้ามกับ $T_{\downarrow}$ กล่าวคือ $R_{\downarrow}$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อ Z_f มีค่ามากขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงความชันที่ระดับพลังงานเท่ากัน จากภาพประกอบ 3.9(c) สังเกตได้ว่า ที่พลังงาน $eV < 2E_{ex}$ มีการเพิ่มขึ้นของ $R_{\downarrow}$ เร็วกว่าที่พลังงาน $eV > 2E_{ex}$ เนื่องจาก ที่ระดับพลังงานมากกว่า $2E_{ex}$ มีความหนาแน่นสถานะ (Density of states) ของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น จึงทำให้อิเล็กตรอนที่ตกกระทบมักเกิดการส่งผ่านมากกว่าสะท้อนกลับ และเมื่อพิจารณา $R_{\uparrow}$ จะเห็นว่า ช่วงแรกที่พลังงาน $eV < 2E_{ex}$ จะมีค่าลดลงเพียงอย่างเดียว แต่ในช่วงที่สอง เมื่อ $eV > 2E_{ex}$ พบว่า $R_{\uparrow}$ จะมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยเพิ่มขึ้นเมื่อ $0 < Z_f < 1$ และลดลงเมื่อ $Z_f > 1$ ซึ่งลักษณะดังกล่าว คล้ายกับกรณีของ $T_{\downarrow}$ นั่นคือ อิเล็กตรอนที่ตกกระทบจะเกิดการพลิกกลับเมื่อพลังงานมีค่าน้อยที่สุด เท่ากับพลังงานที่จุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง

ลักษณะการเพิ่มหรือลดค่าความน่าจะเป็นที่กล่าวมาข้างต้น เป็นผลมาจากพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ (Z_f) แต่ในภาพประกอบ 3.9(a) – 3.9(d) จะสังเกตเห็นได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟที่บริเวณ $eV = 2E_{cx}$ ซึ่งเกิดจากโครงสร้างภายในของวัสดุเฟอร์โรแมกเนต ดังภาพประกอบ 3.8 สำหรับการพิจารณาลักษณะการส่งผ่านของอิเล็กตรอน โดยเฉพาะบริเวณที่มีทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า T_f และ R_f ที่ระดับพลังงาน $eV \geq 2E_{cx}$ พบว่าความน่าจะเป็นทั้งสองจะมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเหมือนกัน แต่ลักษณะของเส้นกราฟแตกต่างกัน เพื่อให้เห็นเด่นชัดจึงพิจารณาโดยการเขียนปริมาณดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของ Z_f ดังภาพประกอบ 3.10

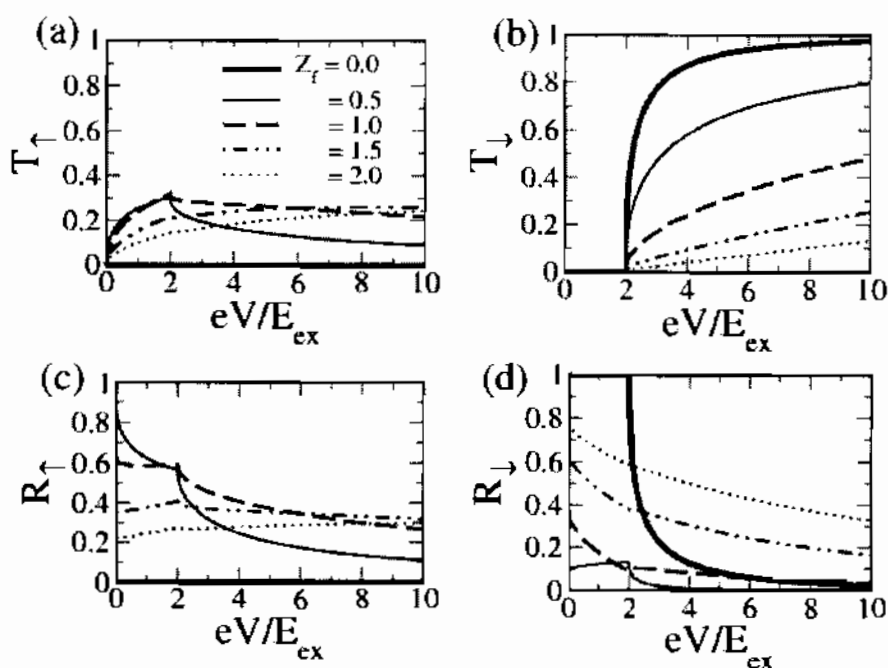


ภาพประกอบ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

จากภาพประกอบข้างต้น สังเกตได้ว่า T_f มีการลดลงแบบเอกซิโพเนนเชียล แต่เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากขึ้น พบว่า ความน่าจะเป็นของ T_f จะลดลงได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนที่มีพลังงานน้อย กล่าวคือ อิเล็กตรอนพลังงานมากจะส่งผ่านได้ดีกว่าอิเล็กตรอนพลังงานน้อย และเมื่อพิจารณา T_f จะเห็นว่า ค่าความน่าจะเป็นนี้มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $Z_f \approx 1$ ดังนั้น จึงพิจารณาได้ว่า ที่ Z_f มีค่าน้อย ($Z_f < 1$) พบว่า T_f จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อให้พลังงานมากขึ้นค่า

ความน่าจะเป็นดังกล่าว จะเพิ่มขึ้นได้ช้ากว่าที่อิเล็กตรอนมีพลังงานน้อย และที่ Z_f มีค่ามากขึ้น ($Z_f > 1$) พบว่า $T_{\downarrow}$ จะลดลง แต่ถ้าพลังงานมากขึ้นก็จะลดลงได้ช้า เนื่องจาก เมื่อ Z_f มีค่ามากขึ้น อิเล็กตรอนที่ตกกระทบจะมีการพลิกกลับของสปินได้มากขึ้น จึงทำให้ $T_{\downarrow}$ ลดลงช้า กล่าวคือ อิเล็กตรอนสปินลงสามารถส่งผ่านได้มากขึ้น ในทางตรงข้าม เมื่อพิจารณา $R_{\uparrow}$ จะเห็นว่า มีการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลโดยมีจุดเริ่มต้นที่ $Z_f \approx 1$ ในขณะเดียวกัน $R_{\downarrow}$ เพิ่มขึ้นและลดลงในลักษณะคล้ายกับ $T_{\downarrow}$ ดังภาพประกอบ 3.10(d)

3.2.2 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

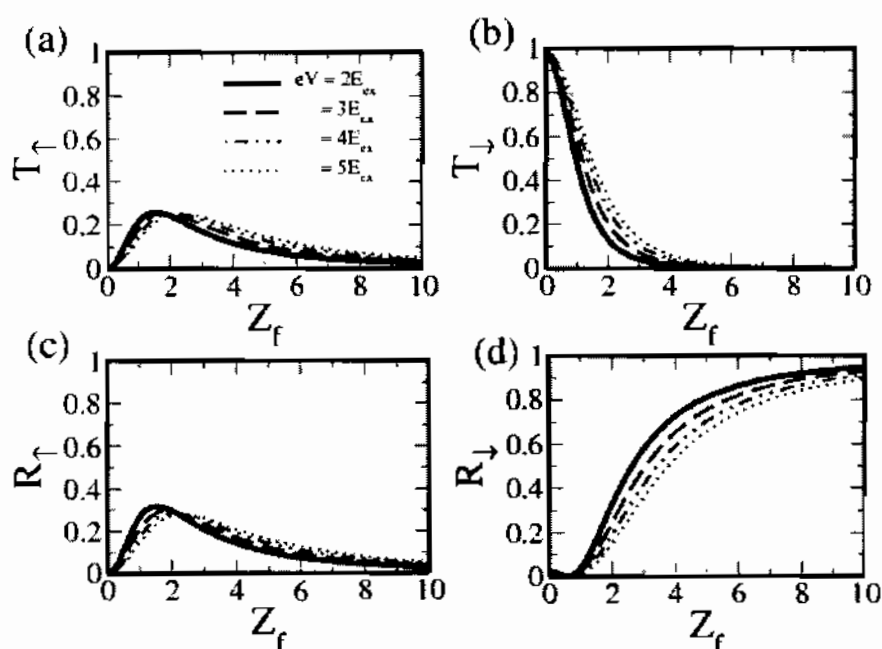


ภาพประกอบ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_f เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

เมื่อพิจารณา $T_{\uparrow}$ จะเห็นว่า ที่ระดับพลังงาน $eV < 2E_{ex}$ ค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวมีการลดลงเพียงอย่างเดียว และมีการเปลี่ยนแปลงความชันที่ระดับพลังงาน $eV = 2E_{ex}$ โดยจะลดลงเร็วที่สุดเมื่อ $Z_0 = 0.5$ ซึ่งที่ระดับพลังงาน $eV > 2E_{ex}$ ค่า $T_{\uparrow}$ จะมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงดังแสดงในภาพประกอบ 3.11(a) โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $Z_0 = 1$ ในขณะที่ $T_{\downarrow}$ มีการลดลงเพียงอย่างเดียวดังภาพประกอบ 3.11(b) ซึ่งการส่งผ่านเริ่มขึ้นที่ระดับพลังงาน $eV = 2E_{ex}$ นั่นคือ ที่พลังงานต่ำกว่า

ระดับพลังงานดังกล่าวไม่มีสถานะสำหรับอิเล็กตรอนสปินลง ในทางตรงข้าม เมื่อพิจารณา $R_{\uparrow}$ ดังภาพประกอบ 3.11(c) จะเห็นได้ว่า มีการลดลงและเปลี่ยนแปลงความชันคล้ายกับ $T_{\uparrow}$ แต่แตกต่างกันที่ลักษณะการลดลงของค่าความน่าจะเป็นทั้งสอง ซึ่งสังเกตความแตกต่างนี้ได้อย่างชัดเจนจากผลการคำนวณในหัวข้อต่อไป สำหรับ $R_{\downarrow}$ จะมีการเพิ่มขึ้นเมื่อ $eV < 2E_{ex}$ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความชันที่ระดับพลังงาน $eV = 2E_{ex}$ โดยเด่นชัดที่สุดเมื่อ $Z_0 = 0.5$ และที่พลังงานอิเล็กตรอน $eV > 2E_{ex}$ ค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวมีการเพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพประกอบ 3.11(a)

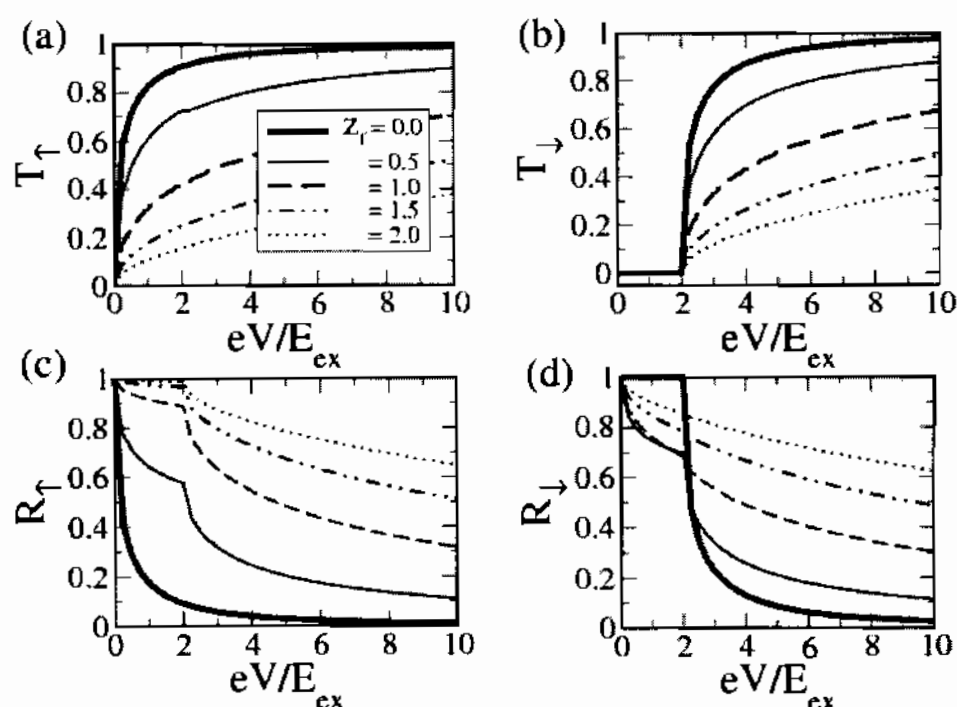
การเปลี่ยนแปลงความชันของ $T_{\uparrow}$ ที่ระดับพลังงาน $eV \geq 2E_{ex}$ ดังภาพประกอบ 3.11(a) แสดงให้เห็นว่า มีการส่งผ่านของอิเล็กตรอนได้น้อยลง เมื่อพิจารณาจากแถบพลังงานดังภาพประกอบ 3.8 สามารถกล่าวได้ว่า ที่ระดับพลังงานดังกล่าว เมื่อ Z_f มีค่าในช่วง $0 < Z_f < 1$ จะลดค่า $T_{\uparrow}$ ได้เร็วกว่าเมื่อ $Z_f > 1$ และที่อิเล็กตรอนมีพลังงานเท่ากันนี้ $R_{\uparrow}$ มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อ Z_f มีค่าน้อย จะเกิดการส่งผ่านและการสะท้อนกลับได้ดีกับอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปินตรงข้ามกับอิเล็กตรอนตกกระทบ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.11(a) และ 3.11(c) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

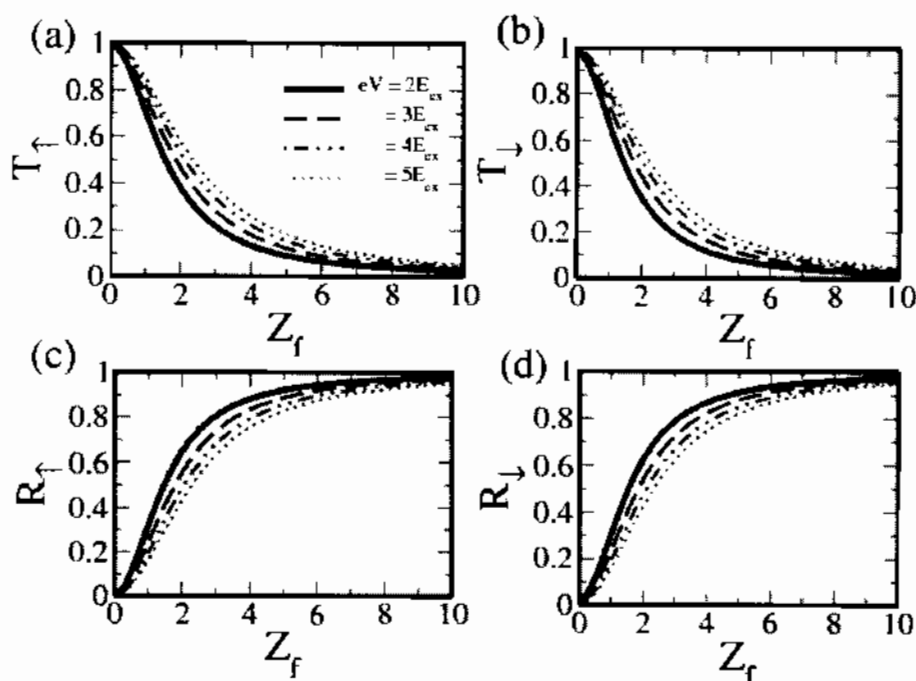
ในหัวข้อ 3.2.1 ได้มีการกล่าวถึง ผลของ Z_f ต่อการส่งผ่านและสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนตกกระทบบสปินขึ้น ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะเป็นการพิจารณาความน่าจะเป็นต่างๆ ของอิเล็กตรอนตกกระทบบที่มีสปินลง ซึ่งจะสังเกตได้ว่า มีผลการคำนวณเหมือนกัน กล่าวคือ ความน่าจะเป็นการส่งผ่านและสะท้อนกลับ จะลดลงหรือเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่ออิเล็กตรอนส่งผ่านมีสปินขึ้นในทิศทางเดียวกับอิเล็กตรอนตกกระทบบ ดังภาพประกอบ 3.12(b) และ 3.12(d) ตามลำดับ ซึ่งการลดลงจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน และเมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านและสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนที่มีสปินในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนตกกระทบบ พบว่า จะมีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเมื่อ Z_f มีค่าน้อย และลดลงในช่วงที่สองเมื่อ Z_f มีค่ามาก

3.2.3 กรณีการตกกระทบบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น



ภาพประกอบ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานที่ค่า Z_f ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น

เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 3.13 จะเห็นได้ว่า เมื่อ $Z_f > 1$ จะไม่เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความชัน แต่ T_f ยังมีค่าลดลง เมื่อ Z_f เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลของ T_L มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่แตกต่างกันที่จุดเริ่มต้น ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างภายในของวัสดุเฟอร์โรแมกเนต และในทางตรงข้าม R_f มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความชันได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ Z_f มีผลทำให้ R_f เพิ่มขึ้นได้ช้า เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงาน $eV > 2E_{ex}$ และเกิดขึ้นในทำนองเดียวกับ R_L



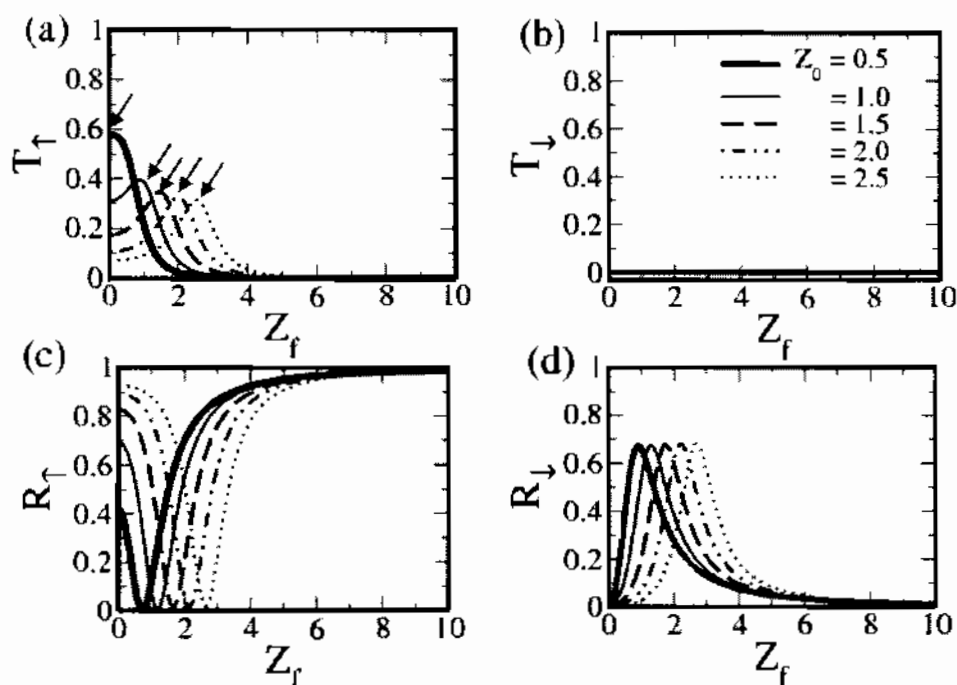
ภาพประกอบ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ ณ ที่ระดับพลังงาน (eV) ต่างๆ เมื่อ $Z_0 = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น

จากภาพประกอบ 3.14 สังเกตได้ว่า เมื่อมีอิเล็กตรอนตกกระทบทั้งสปินขึ้นและสปินลง จะไม่สามารถเห็นการส่งผ่านหรือการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นก่อนแล้วจึงลดลงได้ กล่าวคือ จะแตกต่างจากกรณีที่เคยพิจารณาการตกกระทบทิศทางสปินแต่ละแบบ แต่พบว่าค่าความน่าจะเป็นมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเอกซโพเนนเชียลเหมือนกัน ซึ่งความช้าเร็วนั้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน

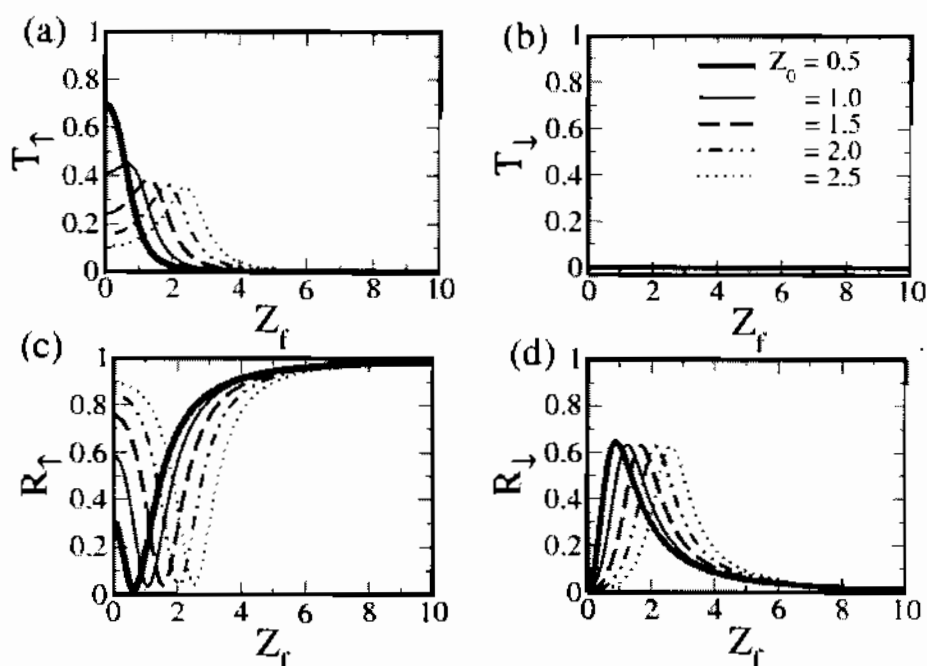
3.3 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติและแบบสปินพลิกกลับ: Z_0 , Z_f

จากการพิจารณาแบบแยกการคำนวณระหว่างผลของ Z_0 และ Z_f ทำให้เข้าใจถึงหน้าที่และการทำงานของพลังงานศักย์ทั้งสองแบบ ซึ่ง Z_0 หรือพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติเกิดขึ้นได้เองจากการนำวัสดุมาต่อกัน และ Z_f เกิดจากการฝังไอออนที่มีคุณสมบัติทางด้านแม่เหล็กลงไปทีละบริเวณรอยต่อ ดังนั้น ในวัสดุจริงจะพบพลังงานศักย์ได้ทั้งสองชนิด และความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุโลหะและเฟอร์โรแมกเนตสามารถหาได้จากผลการคำนวณดังต่อไปนี้

3.3.1 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

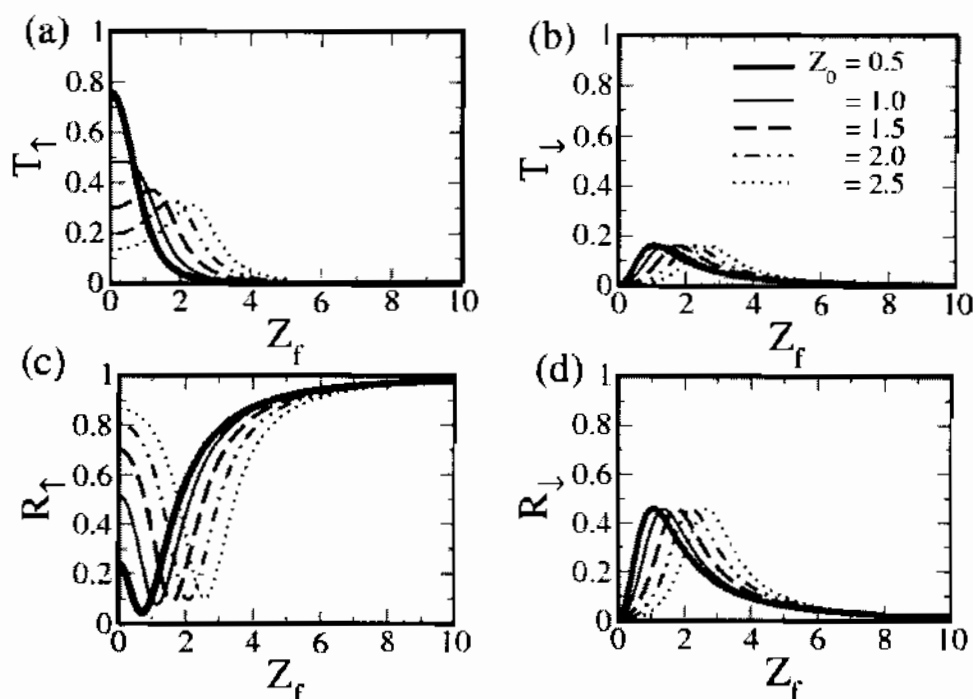


ภาพประกอบ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง เป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ เมื่อ $eV = E_{ex}$ พร้อมแสดงการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินขึ้นที่มีค่ามากที่สุดเมื่อ $Z_0 = Z_f$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น



ภาพประกอบ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความนำจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 2E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

จากภาพประกอบ 3.15 สังเกตได้ว่า เมื่อ Z_0 เพิ่มขึ้น T_f มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยมีค่ามากที่สุดเมื่อ $Z_0 = Z_f$ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับภาพประกอบ 3.16 ในขณะเดียวกัน T_d มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากอิเล็กตรอนสปินลงมีพลังงานไม่เพียงพอ นั่นคือ อิเล็กตรอนดังกล่าวต้องมีพลังงานมากกว่าจุดต่ำสุดของแถบพลังงานรองซึ่งเท่ากับ $2E_{ex}$ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา R_f จะเห็นได้ว่ามีพฤติกรรมตรงข้าม กล่าวคือ R_f มีทั้งลดลงและเพิ่มขึ้นโดยมีค่าน้อยที่สุด เมื่อ $Z_0 = Z_f$ ทั้งนี้จะเห็นว่าภาพประกอบ 3.15(c) มีค่าน้อยสุดประมาณศูนย์ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากขึ้น และเมื่อพิจารณา R_d พบว่า ทั้งภาพประกอบ 3.15(c) และ 3.16(c) มีลักษณะเหมือนกัน นั่นคือ สามารถเกิดการสะท้อนกลับได้ และการสะท้อนกลับเกิดขึ้นที่ฝั่งโลหะซึ่งมีสถานะรองรับสำหรับอิเล็กตรอนสปินลง โดยค่าดังกล่าวมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงและมีจุดสูงสุด เมื่อ $Z_0 = Z_f$ ในขณะเดียวกัน R_f ดังภาพประกอบ 3.15(c) มีค่ามากกว่าในภาพประกอบ 3.16(c) เนื่องจากพลังงานที่เพิ่มขึ้นทำให้อิเล็กตรอนส่งผ่านมากขึ้น จึงมีผลทำให้ R_d ของภาพประกอบ 3.16(c) มีค่าลดลง



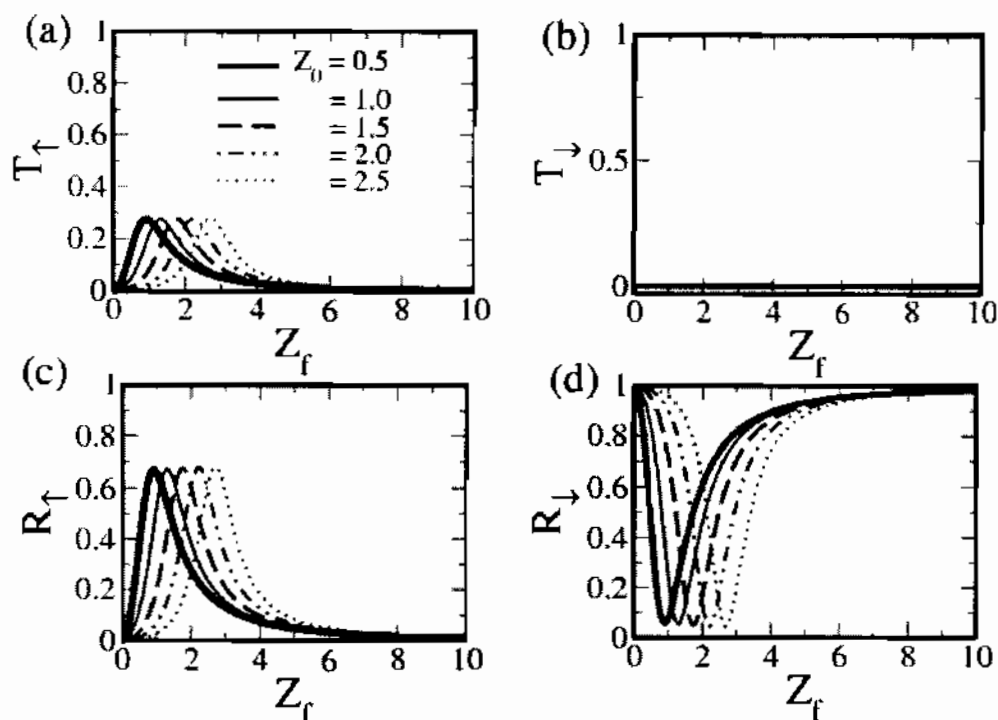
ภาพประกอบ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 3E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

จากภาพประกอบ 3.17(a) พบว่า $T_{\uparrow}$ ยังมีลักษณะเหมือนเดิม แต่มีจุดสูงสุดต่ำลงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินลงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จากภาพประกอบข้างต้นจึงชี้ให้เห็นการส่งผ่านที่เกิดจากการพลิกกลับของอิเล็กตรอนตกกระทบได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ อิเล็กตรอนตกกระทบมีพลังงาน $eV = 3E_{ex}$ ซึ่งมากกว่าจุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง จึงทำให้มีพลังงานมากเพียงพอที่จะส่งผ่านเป็นอิเล็กตรอนสปินลงได้ ดังนั้น $T_{\downarrow}$ จึงเกิดขึ้นได้ และมีลักษณะคล้ายกับ $T_{\uparrow}$ นั่นคือ ความน่าจะเป็นการส่งผ่านมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $Z_0 = Z_f$

3.3.2 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

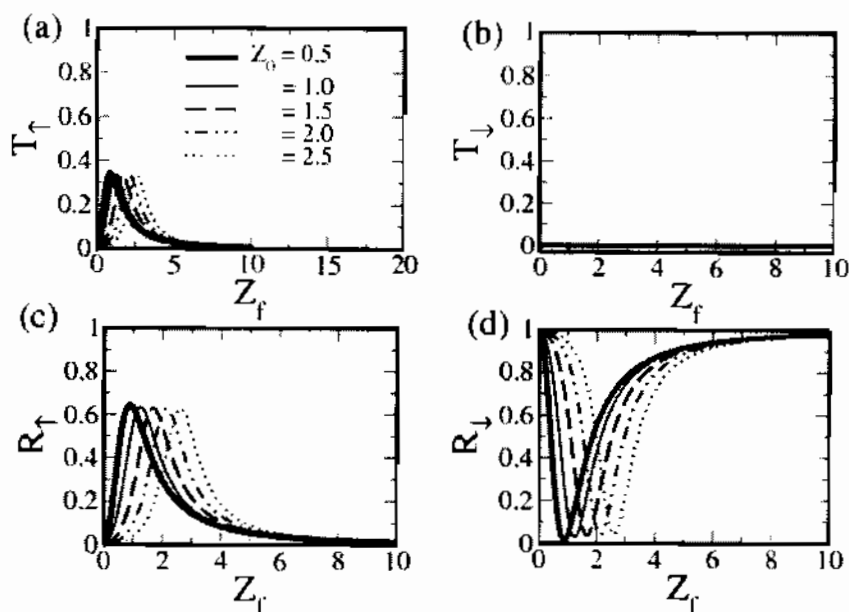
ในภาพประกอบ 3.18 เมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง $0 < eV < 2E_{ex}$ สังเกตได้ว่า ความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินลงเท่ากับศูนย์ เนื่องจาก ที่ระดับพลังงานดังกล่าว ไม่พบอิเล็กตรอนสปินลง อย่างไรก็ตาม การตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินลงสามารถเพิ่มได้ทั้งค่า

ความน่าจะเป็นการส่งผ่านและการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปินขึ้น จากภาพประกอบ 3.18(a) และ 3.18(c) พบว่า $T_{\uparrow}$ เกิดขึ้นได้น้อยและ $R_{\uparrow}$ เกิดขึ้นได้มาก เนื่องจากฝั่งโลหะมีสถานะสำหรับอิเล็กตรอนที่มีสปินทั้งสองแบบเท่ากัน แต่ฝั่งเฟอร์โรแมกเนตมีสถานะสำหรับอิเล็กตรอนสปินลงน้อยกว่าอิเล็กตรอนสปินขึ้น ทั้งนี้ความน่าจะเป็นทั้งสองจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ $Z_0 = Z_f$ โดยที่ความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปินลงจะมีลักษณะตรงกันข้าม

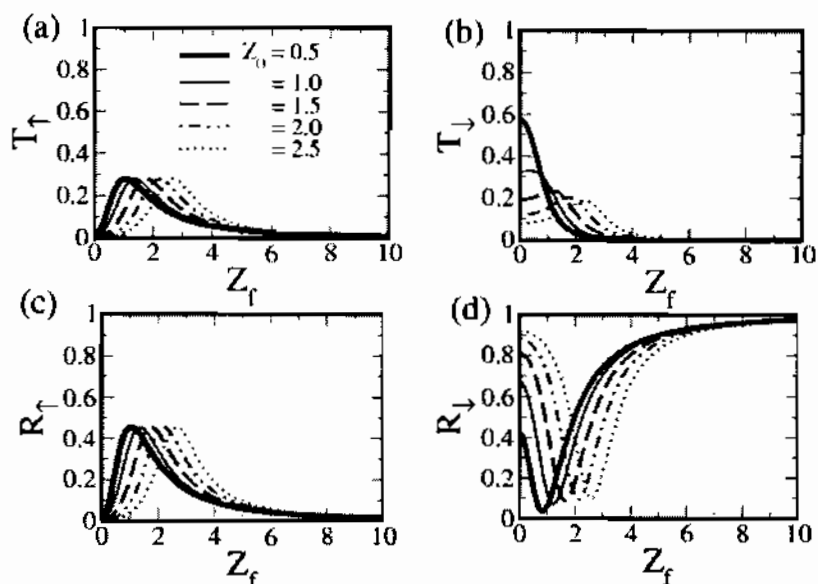


ภาพประกอบ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

ในภาพประกอบ 3.19 จะเห็นได้ว่า มีลักษณะคล้ายกับการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานเท่ากับจุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง นั่นคือ อิเล็กตรอนมีพลังงาน $eV = 2E_{ex}$ จะมีผลทำให้ $T_{\downarrow}$ เท่ากับศูนย์ นอกจากนี้พลังงานศักย์ทั้งสองชนิดจะลดค่าการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนที่มีสปินลง รวมถึงเพิ่มค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านและสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเมื่อพลังงานศักย์ทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากัน



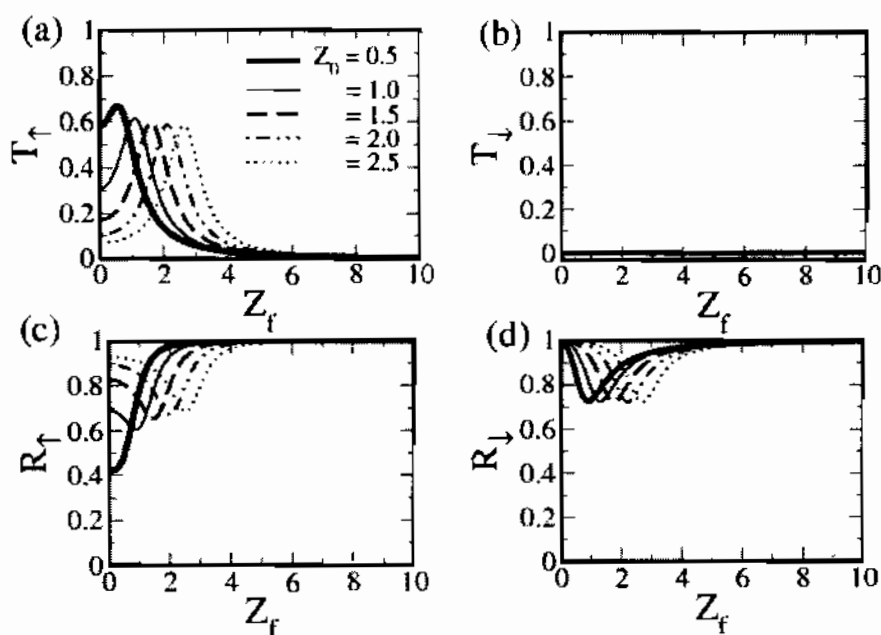
ภาพประกอบ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 2E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น



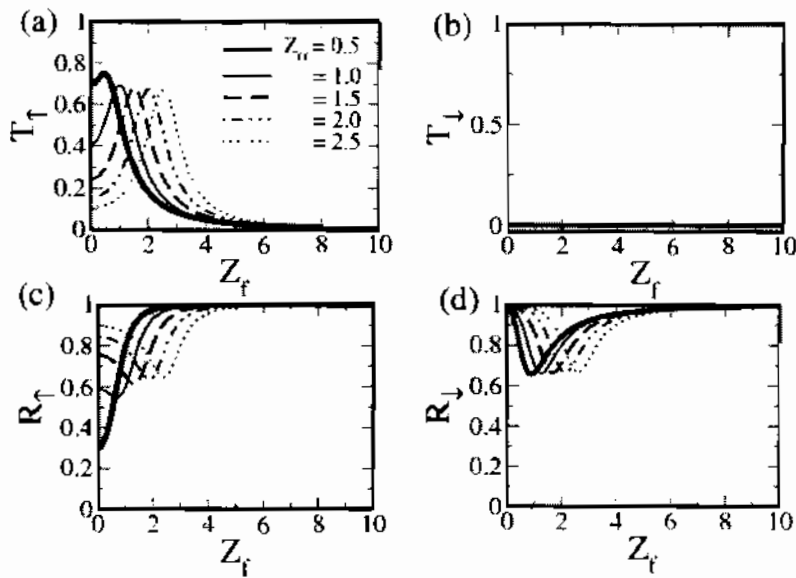
ภาพประกอบ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 3E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

จากภาพประกอบ 3.18 - 3.20 จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาให้ Z_0 เพิ่มขึ้น $T_{\uparrow}$ มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงคล้ายกับการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น แต่แตกต่างกันที่ค่าสูงสุด ซึ่งค่าดังกล่าวจะไม่แตกต่างกันมากในการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินลง และเมื่อสังเกตภาพประกอบ 3.18 และ 3.19 จะเห็นได้ว่า ไม่มีการส่งผ่านของ $T_{\downarrow}$ เนื่องจากการพิจารณาที่ระดับพลังงานไม่เกิน $2E_{ex}$ จึงทำให้ไม่พบอิเล็กตรอนสปินลง ในขณะที่ให้พลังงาน $eV = 3E_{ex}$ จะสามารถพบการส่งผ่านของอิเล็กตรอนสปินลงได้ดังภาพประกอบ 3.20 โดยความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปินเหมือนกับอิเล็กตรอนตกกระทบจะมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง และมีจุดสูงสุดต่ำลง เมื่อ Z_0 เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น ในทางตรงข้าม เมื่อพิจารณา $R_{\uparrow}$ และ $R_{\downarrow}$ สังเกตได้ว่า ผลการคำนวณจะสลับกับการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น กล่าวคือ $R_{\uparrow}$ จะเพิ่มขึ้นแล้วจึงลดลงดังภาพประกอบที่ 3.18(c), 3.19(c) และ 3.20(c) ในขณะที่ $R_{\downarrow}$ ลดลงก่อนแล้วจึงเพิ่มขึ้นดังภาพประกอบที่ 3.18(d), 3.19(d) และ 3.20(d) โดยจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของแต่ละรูปจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แม้ว่า Z_0 จะมีค่าเพิ่มขึ้น

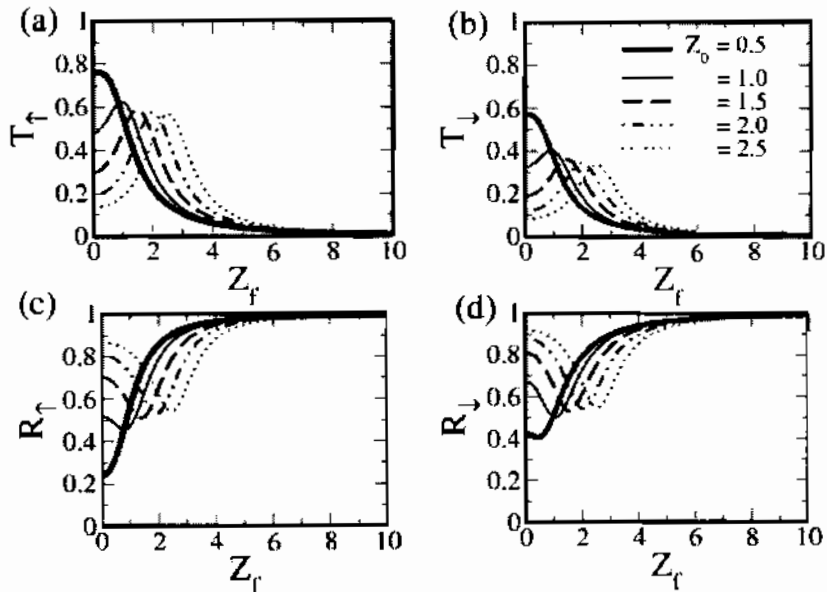
3.2.3 การตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น



ภาพประกอบ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น



ภาพประกอบ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 2E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น



ภาพประกอบ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับที่ค่า Z_0 ต่างๆ เมื่อ $eV = 3E_{ex}$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น

เมื่อพิจารณาในมุมมองของวัสดุจริง โดยพิจารณาการตกกระทบของอิเล็กตรอนทั้งสปินขึ้นและสปินลง ดังผลการคำนวณในภาพประกอบ 3.21 – 3.23 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มของ $T_\uparrow$ และ $T_\downarrow$ จะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วจึงลดลง เมื่อ Z_0 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความน่าจะเป็นทั้งสองจะมีค่าสูงสุด เมื่อ $Z_0 = Z_f$ นอกจากนี้ค่าสูงสุดดังกล่าวมีลักษณะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามการเพิ่มขึ้นของ Z_0 และเมื่อพิจารณา $R_\uparrow$ และ $R_\downarrow$ สังเกตได้ว่า มีลักษณะคล้ายกัน นั่นคือ มีการลดลงก่อนแล้วจึงเพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำสุด เมื่อ $Z_0 = Z_f$ ซึ่งจากภาพประกอบ 3.21 และ 3.22 จะเห็นได้ว่า ความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับ $R_\downarrow$ จะมีค่าน้อย กล่าวคือ ที่พลังงานของอิเล็กตรอนต่ำกว่า $2E_{ex}$ มักจะเกิดการส่งผ่านเป็น $T_\uparrow$ ทั้งหมดหรือสะท้อนกลับเป็น $R_\uparrow$ มากกว่า $R_\downarrow$ แต่เมื่อพิจารณาที่ระดับพลังงาน $eV = 3E_{ex}$ จะเห็นได้ว่ามี $T_\downarrow$ เกิดขึ้น เนื่องจากระดับพลังงานดังกล่าวมีค่ามากกว่าพลังงาน ณ จุดต่ำสุดของแถบพลังงานรอง ซึ่งเป็นสถานะที่ครอบครองโดยอิเล็กตรอนสปินลง ดังสังเกตได้จากแถบพลังงานในภาพประกอบ 3.8

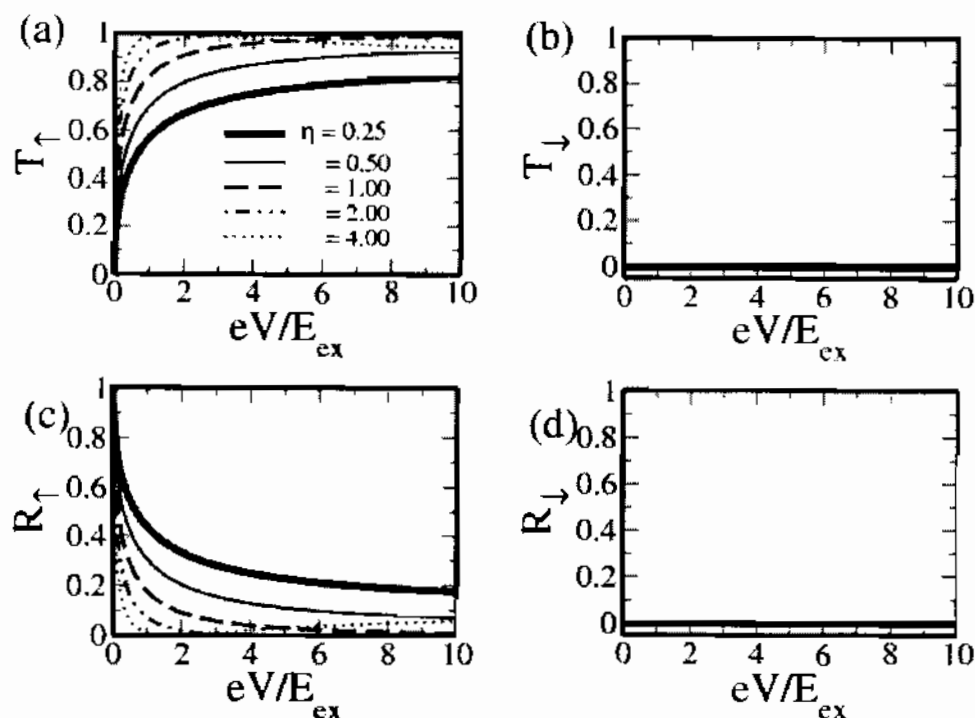
3.4 ผลของมวลยังผลของอิเล็กตรอน η

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลของพลังงานศักย์ที่บริเวณรอยต่อ โดยการกำหนดให้มวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุทั้งสองชนิดเท่ากัน เพื่อที่จะศึกษาเฉพาะผลของตัวแปรพลังงานศักย์ทั้งสอง กล่าวคือ $\eta = 1$ แต่ในวัสดุจริงมวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน ซึ่งอิเล็กตรอนที่มีมวลยังผลมากจะมีความเร็วกลุ่มน้อยหรือเคลื่อนที่ช้า และอิเล็กตรอนที่มีมวลยังผลน้อยจะมีลักษณะตรงข้าม นั่นคือ ถ้าฝั่งเฟอร์โรแมกเนตมีมวลยังผลมากย่อมเกิดการสะสมประจุขึ้น ซึ่งเปรียบเสมือนมีพลังงานศักย์ ณ รอยต่อ ดังนั้น ในหัวข้อนี้นี้จึงเป็นการศึกษาผลของมวลยังผลของอิเล็กตรอนต่อค่าความน่าจะเป็นต่างๆ ซึ่งผลการคำนวณสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

จากภาพประกอบ 3.24 เมื่อพิจารณาการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น โดยที่ η มีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนฝั่งโลหะเพิ่มขึ้นและมากกว่ามวลยังผลของอิเล็กตรอนฝั่งเฟอร์โรแมกเนต ปรากฏว่า $T_\uparrow$ เพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่า อิเล็กตรอนจะผ่านรอยต่อได้ดีกว่าเมื่อมวลยังผลของอิเล็กตรอนฝั่งเฟอร์โรแมกเนตน้อยกว่า ในทางตรงข้าม อาจกล่าวได้ว่า ยิ่งมวลยังผลของอิเล็กตรอนฝั่งเฟอร์โรแมกเนตมากขึ้น เปรียบเสมือนมีพลังงานศักย์ที่เกิดจากการสะสมของประจุเกิดขึ้นที่รอยต่อมากขึ้นตาม เมื่อพิจารณาในลักษณะของความเร็วกลุ่ม พบว่า ถ้าฝั่งเฟอร์โรแมกเนตมีมวลยังผลของอิเล็กตรอนมากกว่าฝั่งโลหะ จะทำให้อิเล็กตรอนในวัสดุเฟอร์โรแมกเนตเคลื่อนที่ช้า ดังนั้น

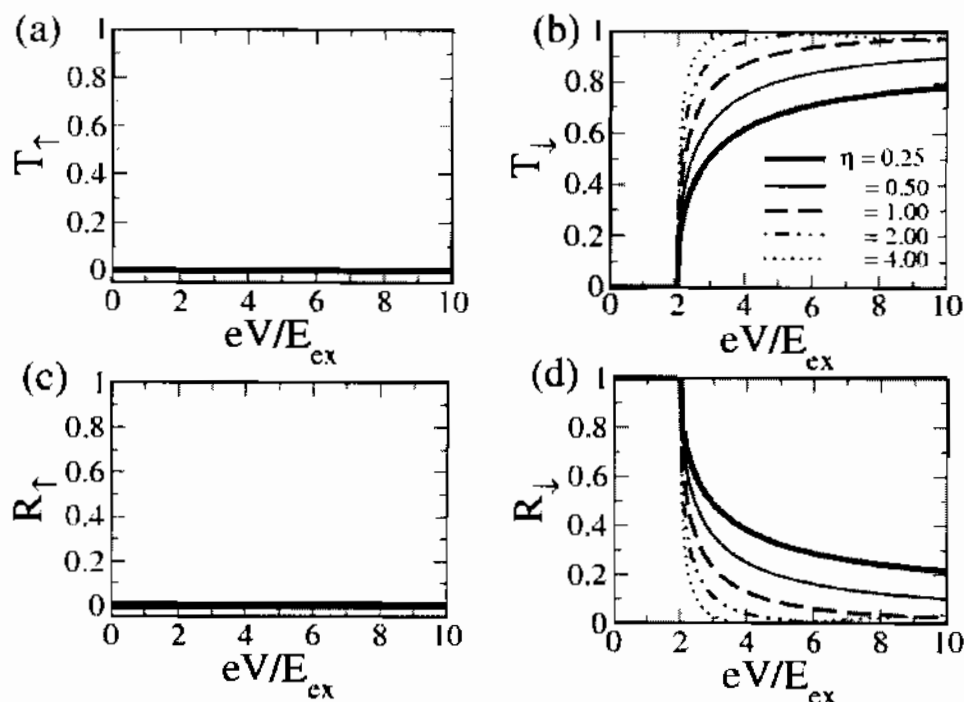
อิเล็กตรอนในวัสดุโลหะซึ่งเคลื่อนที่เร็วกว่าจะถูกผลักให้เคลื่อนที่ช้าลง จึงเกิดเป็นการสะสมของประจุบริเวณรอยต่อ



ภาพประกอบ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงาน เมื่อ $Z_0 = 0$ และ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

3.4.2 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

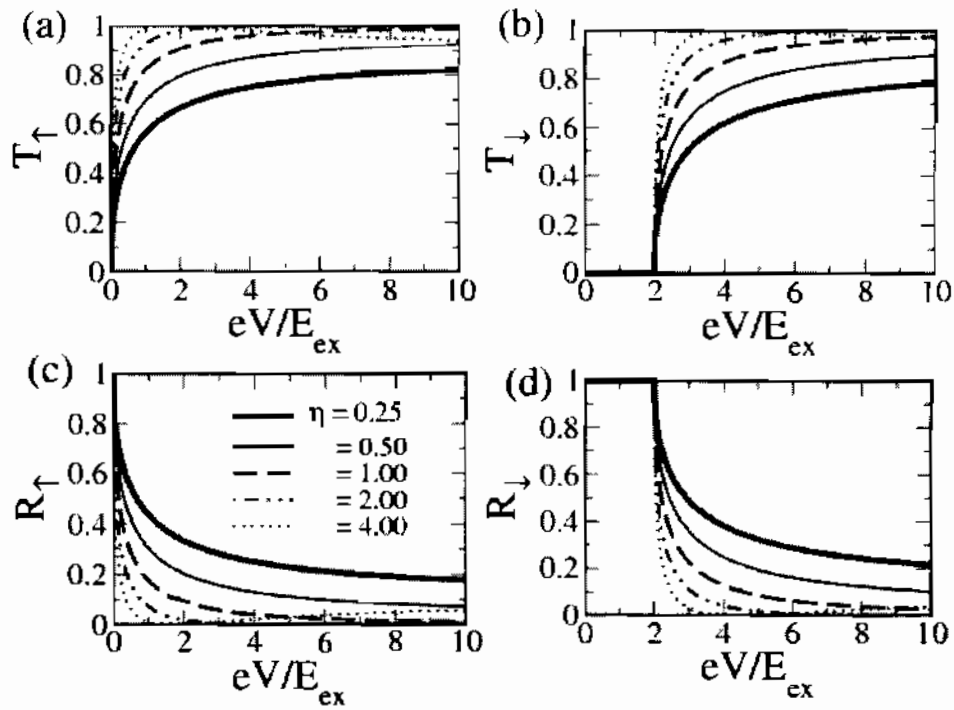
พิจารณาภาพประกอบ 3.25 สังเกตได้ว่า มีลักษณะเหมือนกับกรณีตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น โดยแตกต่างกันตรงที่จุดเริ่มต้นของการส่งผ่าน ซึ่งเกิดจากโครงสร้างภายในของวัสดุเฟอร์โรแมกเนตดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.4.1 ผลการคำนวณนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของความเร็วก่อมนั้นคือ เมื่อวัสดุเฟอร์โรแมกเนตมีมวลยังผลของอิเล็กตรอนมาก ย่อมทำให้เคลื่อนที่ช้ากว่าในฝั่งโลหะ จึงมีผลทำให้อิเล็กตรอนฝั่งโลหะเคลื่อนที่ผ่านไปได้ยากขึ้น คล้ายกับการมีกำแพงศักย์ โดยกำแพงศักย์นี้เกิดจากการสะสมประจุ ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.4.1



ภาพประกอบ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงาน เมื่อ $Z_0 = 0$ และ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้น

3.4.3 กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น

เมื่อพิจารณาวัสดุจริงดังภาพประกอบ 3.26 ซึ่งกำหนดให้ ค่าพลังงานศักย์ทั้งหมดที่บริเวณรอยต่อมีค่าเป็นศูนย์ เพื่อพิจารณาเฉพาะผลของอัตราส่วนมวลยังผลของอิเล็กตรอนเท่านั้น จะเห็นได้ว่ามวลของอิเล็กตรอนที่ต่างกันทำให้ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบ กล่าวคือ ถ้ามวลยังผลของอิเล็กตรอนฝั่งเฟอร์โรแมกเนติกมากกว่าฝั่งโลหะ จะมีผลทำให้อิเล็กตรอนส่งผ่านได้ยาก ในทางตรงข้าม ถ้ามวลยังผลของอิเล็กตรอนฝั่งเฟอร์โรแมกเนติกน้อยกว่าฝั่งโลหะ จะทำให้อิเล็กตรอนส่งผ่านรอยต่อได้ง่ายขึ้น



ภาพประกอบ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นการส่งผ่าน (a) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (b) อิเล็กตรอนสปินลง และการสะท้อนกลับ (c) อิเล็กตรอนสปินขึ้น (d) อิเล็กตรอนสปินลง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงาน เมื่อ $Z_0 = 0$ และ $Z_f = 0$ กรณีการตกกระทบของอิเล็กตรอนสปินขึ้นและขึ้น

บทที่ 4

สรุปผลการคำนวณ

โครงการนี้เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีการส่งผ่านของอิเล็กตรอนในระบบรอยต่อวัสดุโลหะปกติกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนต ซึ่งระบบดังกล่าวได้แนวคิดมาจากการศึกษาเพื่อเพิ่มค่าความนำไฟฟ้าในรอยต่อของวัสดุทั้งสอง³ โดยโครงการนี้สนใจศึกษาสมบัติทางด้านฟิสิกส์ ณ รอยต่อ ซึ่งเกิดจากพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ และพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปีนพลิกกลับ โดยเลือกศึกษาการส่งผ่านในระบบ 1 มิติ ทั้งนี้เนื่องจาก การศึกษาขั้นต้นของการส่งผ่านในระบบรอยต่อโลหะกับโลหะ พบว่า มิติของระบบไม่ส่งผลต่อการส่งผ่านของอิเล็กตรอนอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งได้พิจารณาเพิ่มเติมในส่วนของการศึกษาสปีนของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบ สะท้อนกลับ และส่งผ่าน ณ บริเวณรอยต่อ กล่าวคือ กำหนดให้มีอิเล็กตรอนตกกระทบทั้งสปีนขึ้นและสปีนลง จากนั้นคำนวณความน่าจะเป็นการส่งผ่านและการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนทั้งที่มีสปีนขึ้นและสปีนลง ซึ่งการอธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในวัสดุจะใช้การประมาณด้วยแบบจำลองอิเล็กตรอนอิสระ และประมาณพลังงานศักย์ที่บริเวณรอยต่อด้วยฟังก์ชันเดลตา กล่าวคือ ต้องการพิจารณาให้มีพลังงานศักย์เฉพาะที่บริเวณรอยต่อเท่านั้น จากการคำนวณ พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านและการสะท้อนกลับมีดังนี้

4.1 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติ: Z_0

พลังงานศักย์ดังกล่าวเกิดขึ้น เมื่อมีการนำวัสดุสองชนิดมาต่อกัน ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถทำให้วัสดุทั้งสองชนิดรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ซึ่งพลังงานศักย์ชนิดนี้ไม่มีผลให้อิเล็กตรอนตกกระทบเปลี่ยนทิศทางสปีนในขณะที่เกิดการส่งผ่าน แต่จะส่งผลให้ค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านดังกล่าวมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยอิเล็กตรอนตกกระทบที่มีสปีนขึ้นจะเกิดการส่งผ่านเริ่มต้นที่ ณ พลังงาน $eV = 2E_{\alpha}$ เมื่อ E_{α} คือ พลังงานแลกเปลี่ยนภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนต โดยที่ค่าพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานต่ำสุดที่สามารถพบอิเล็กตรอนสปีนลงได้ ทั้งนี้ความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนสปีนขึ้นและสปีนลงจะมีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับความน่าจะเป็นการส่งผ่าน กล่าวคือ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Z_0 มีค่ามากขึ้น

4.2 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ: Z_f

พลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ คือ การเปลี่ยนแปลงทิศทางสปินของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนให้ส่งผ่านกลายเป็นสปินตรงข้าม ซึ่งการศึกษาในเชิงทฤษฎีจะพิจารณาโดยใช้การกระเจิงแบบเมทริกซ์ ทั้งนี้ในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยการฝังไอออนที่มีสมบัติทางด้านแม่เหล็กลงไปยังบริเวณรอยต่อ จากการคำนวณ พบว่า ผลของพลังงานศักย์ดังกล่าวต่อค่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านและการสะท้อนกลับประกอบไปด้วย 2 กรณีดังนี้

4.2.1 ความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปินเหมือนกับอิเล็กตรอนตกกระทบบนจะมีค่าลดลง และมีการเปลี่ยนแปลงความชัน ณ บริเวณที่อิเล็กตรอนมีพลังงาน $eV = 2E_{ex}$ ซึ่งพบว่าอิเล็กตรอนสามารถส่งผ่านได้มากขึ้น ทั้งนี้ความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปินเหมือนกับอิเล็กตรอนตกกระทบบน จะมีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับความน่าจะเป็นการส่งผ่าน

4.2.2 การส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีสปินตรงข้ามกับอิเล็กตรอนตกกระทบบนเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มมากขึ้นหรือน้อยสอดคล้องกับกับปริมาณค่า Z_f ในรอยต่อ โดยที่การส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีสปินขึ้นเกิดการส่งผ่านขึ้น เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานน้อยที่สุดเท่ากับ $eV = 2E_{ex}$ และความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปินเหมือนกับอิเล็กตรอนตกกระทบบน จะมีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับความน่าจะเป็นการส่งผ่าน

4.3 ผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติและแบบสปินพลิกกลับ: Z_0, Z_f

การพิจารณาโดยการแยกคำนวณพลังงานศักย์แต่ละชนิด ไม่สามารถอธิบายในส่วนของวัสดุจริงที่มีพลังงานศักย์ทั้งสองชนิดได้ ดังนั้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานทั้งสองชนิด พบว่าความน่าจะเป็นการส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่มีทิศทางสปินเหมือนและตรงข้ามกับอิเล็กตรอนตกกระทบบนจะมีค่าทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยมีค่าสูงที่สุดเมื่อ $Z_0 = Z_f$ ดังนั้น จากการคำนวณจึงกล่าวได้ว่า การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของอิเล็กตรอน สามารถทำได้โดยการใส่ทั้งผลของพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบปกติและพลังงานศักย์ที่ทำให้เกิดการกระเจิงแบบสปินพลิกกลับ ในขณะเดียวกันกรณีของความน่าจะเป็นการสะท้อนกลับ จะมีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับความน่าจะเป็นการส่งผ่าน

4.4 ผลของมวลยังผลของอิเล็กตรอน: η

จากการพิจารณาผลของมวลยังผลของอิเล็กตรอนทำให้ทราบว่า ความแตกต่างระหว่างมวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุแต่ละชนิด ให้ความน่าจะเป็นการส่งผ่านมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะต่างกัน นั่นคือ ความน่าจะเป็นการส่งผ่านจะมากขึ้น เมื่อมวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีค่าน้อยกว่าวัสดุโลหะ ในทางตรงกันข้าม จะมีกำแพงศักย์เกิดขึ้น เมื่อมวลยังผลของอิเล็กตรอนในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมากกว่าวัสดุโลหะ เป็นผลให้ความน่าจะเป็นการส่งผ่านลดน้อยลง ซึ่งกำแพงศักย์ดังกล่าวเกิดจากการสะสมของประจุบริเวณรอยต่อ ทั้งนี้เนื่องจาก อิเล็กตรอนในฝั่งเฟอร์โรแมกเนติกที่มีมวลยังผลของอิเล็กตรอนมาก จะเคลื่อนที่ช้ากว่าอิเล็กตรอนในฝั่งโลหะที่มีมวลยังผลของอิเล็กตรอนน้อย จึงทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ช้าผลักอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เร็วกว่า ให้เคลื่อนที่ช้าลงและสะสมอยู่ที่บริเวณรอยต่อ

ต้นฉบับไม่ปรากฏข้อมูล

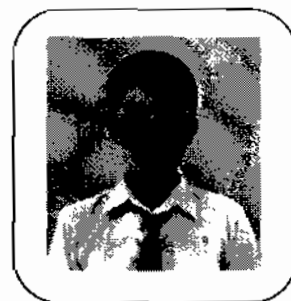
เอกสารอ้างอิง

1. Binasch G, Grunberg P, Saurenbach F, Zinn W. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. PhysRevB 1989; 39(7): 28-30.
2. Baibich MN, Broto JM, Fert A, Nguyen Van Dau F, Petroff F. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. PhysRevB 1989; 61(21): 72-5.
3. Pasanai K, Pairor P. Spin-flip scattering and dimensional effect on transport of charge and spin across metal/ferromagnet material interfaces. PhysRevB 2011; 84(224432): 1-7.
4. Zettili N. Quantum mechanics concepts and applications. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1997. p. 220-9.
5. Levi AFJ. Applied quantum mechanics. 2nd ed. London: Cambridge University Press; 2006. p. 154-160.

ต้นฉบับไม่ปรากฏข้อมูล

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ

ประวัติย่อผู้ทำโครงการ



ชื่อ นามสกุล

นาย กิตติศักดิ์ ภาระพันธ์

วัน เดือน ปีเกิด

วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2534

จังหวัด และประเทศที่เกิด

อำเภอ ยางตลาด จังหวัด กาฬสินธุ์

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเพิ่มพูนวิทยาคม

พ.ศ. 2553 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอนุสุนารี

พ.ศ. 2557 วท.บ. ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ 25 หมู่ 4 บ้านดงเค็ง ต. ดอนสมบูรณ์ อ. ยางตลาด จ. กาฬสินธุ์ 46120