

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วย
สปินทอร์ค

วิทยานิพนธ์

ของ

รัฐพงษ์ รางเงิน

พูน ปณฺทิต สีเว

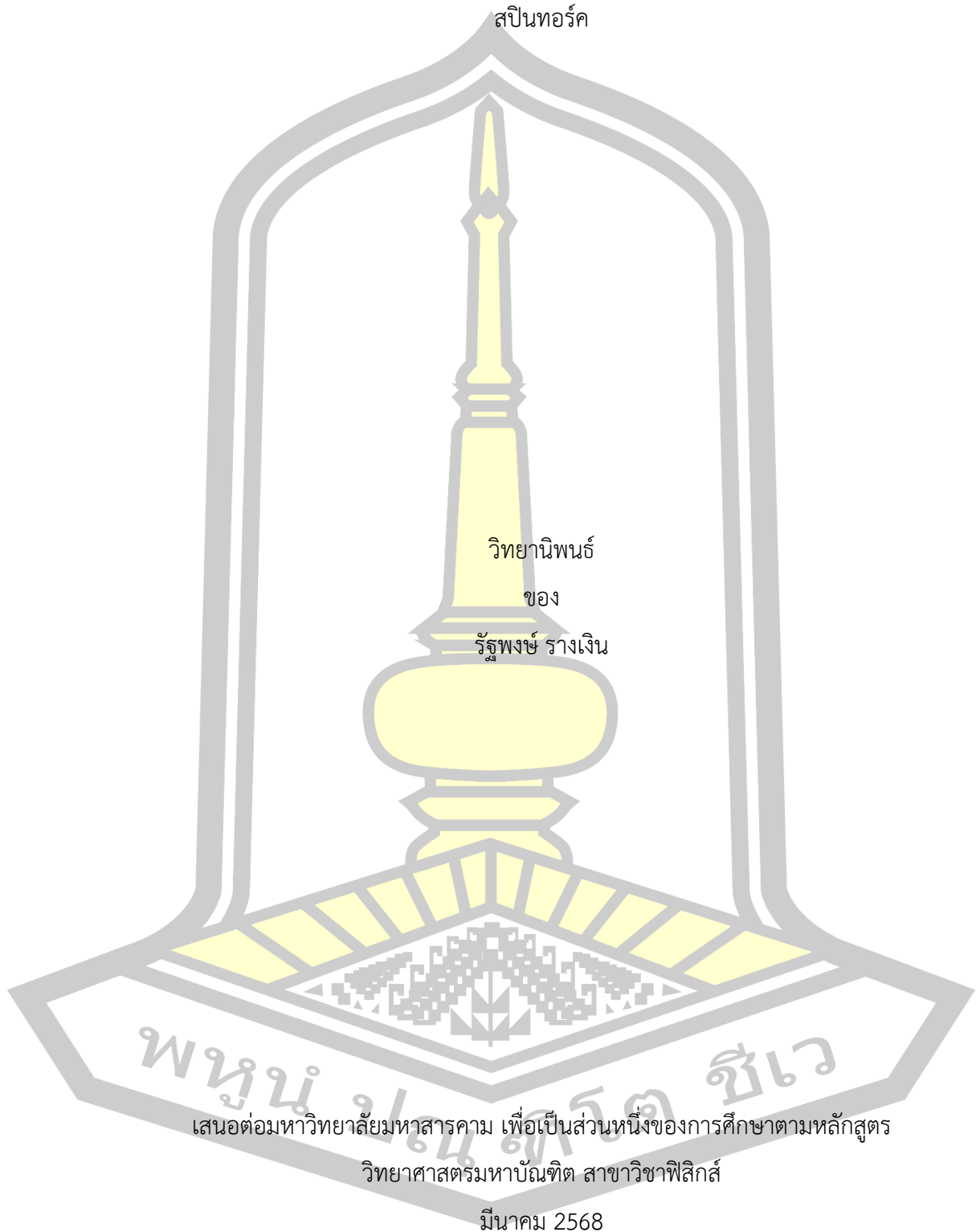
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มีนาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

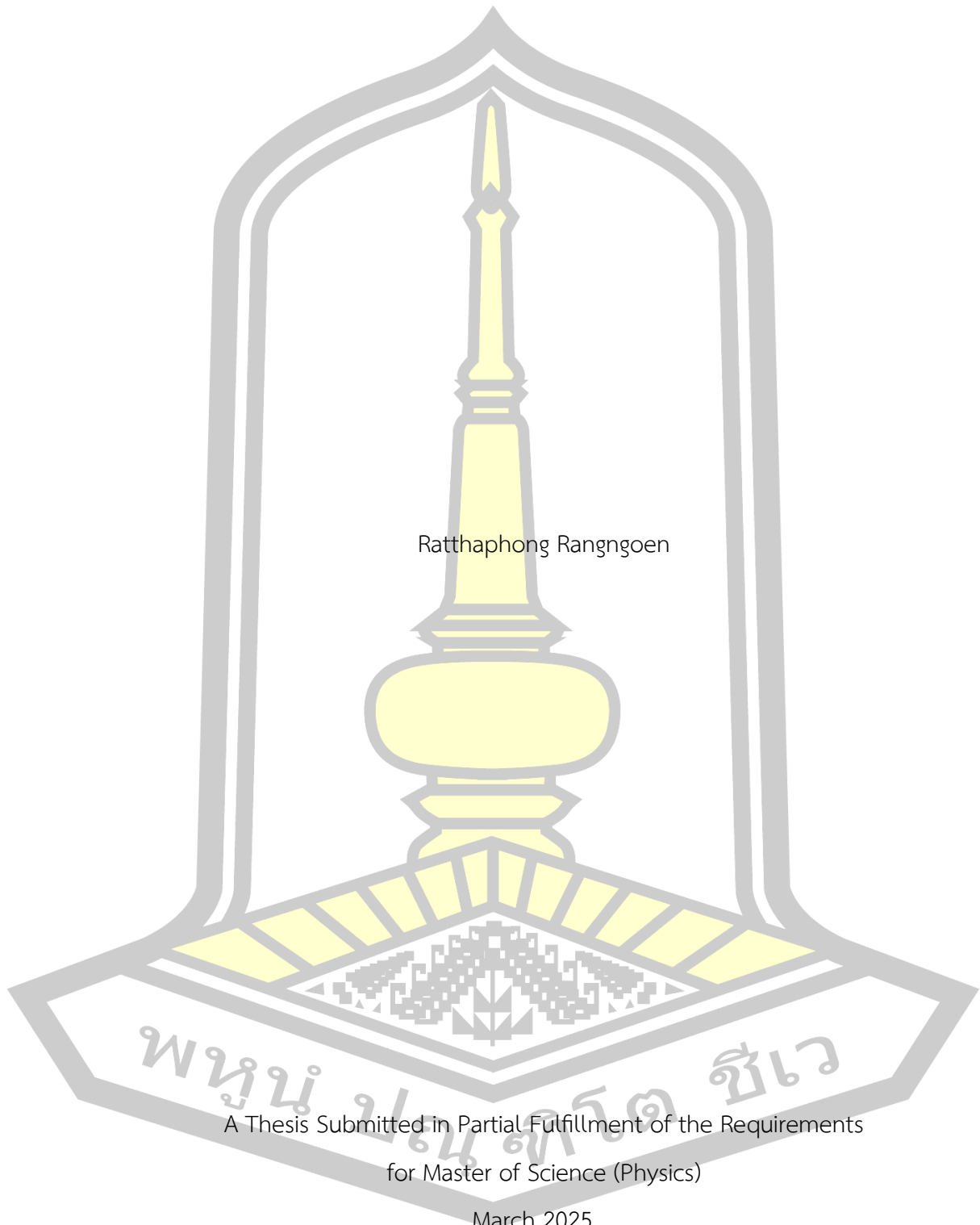
การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วย
สปินทอร์ค



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มีนาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Investigation of Factors on The Performance of Spin Torque Nano-Oscillator

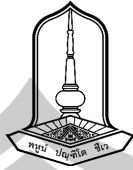


Ratthaphong Ranggoen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (Physics)

March 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ นายรัฐพงษ์ รางเงิน แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อาคม แก้วระวัง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ดร.พรณวดี จุรีมาศ)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รศ. ดร.เจษฎา จุรีมาศ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ประธาน ศรีวิไล)

กรรมการ

(รศ. ดร.อรวรรณ ฤทธิเดช)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ศ. ดร.ไพโรจน์ ประมวล)

(ผศ. ดร.พลเดช เขาวรัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค		
ผู้วิจัย	รัฐพงษ์ รางเงิน		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.พรณวดี จุรีมาศ รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา จุรีมาศ		
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2568

บทคัดย่อ

เครื่องกำเนิดสัญญาณระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค (spin-torque nano-oscillator หรือ STNO) เป็นอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ที่สามารถสร้างสัญญาณความถี่สูงในย่านไมโครเวฟโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค (spin-transfer torque หรือ STT) ซึ่งมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่อาศัยคลื่นไมโครเวฟช่วย และระบบคอมพิวเตอร์ที่เลียนแบบระบบประสาทของมนุษย์ เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเชิงทฤษฎีโครงสร้างรอยต่อทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก (magnetic tunnel junction หรือ MTJ-STNO) โดยใช้แบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและมุมสัมพัทธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระต่อประสิทธิภาพของ MTJ-STNO

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อป้อนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อมุมสัมพัทธ์ ทำให้แมกนีไทเซชันเคลื่อนที่วนรอบด้วยมุมคงที่ (steady-precessional state) และสามารถสร้างสัญญาณความถี่ที่หลากหลาย (6.74 GHz ถึง 22.56 GHz) และมีเสถียรภาพสูง (แอมพลิจูดสูงและความกว้างของสัญญาณแคบ < 0.35 GHz) ขณะที่กำลังไฟฟ้าของ MTJ-STNO มีค่าอยู่ที่ระดับไมโครวัตต์และแปรผันตามความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้าง ซึ่งส่งผลดีต่อการส่งผ่านข้อมูลและการประมวลผลของอุปกรณ์ นอกจากนี้ การนำแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมและแบบจำลองการสะสมสปินมาช่วยทำให้สามารถพัฒนา STNO ที่มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานในเทคโนโลยีการสื่อสารและการบันทึกข้อมูลในอนาคต

คำสำคัญ : เครื่องกำเนิดสัญญาณระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค, ปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค, โครงสร้างรอยต่อทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก

TITLE Investigation of Factors on The Performance of Spin Torque Nano-Oscillator

AUTHOR Ratthaphong Rangngoen

ADVISORS Associate Professor Phanwadee Chureemart, Ph.D.
Associate Professor Jessada Chureemart, Ph.D.

DEGREE Master of Science **MAJOR** Physics

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2025

ABSTRACT

The spin-torque nano-oscillator (STNO) is a spintronic device that can generate high-frequency signals in the microwave by the magnetization dynamics, which is driven by the spin-transfer torque (STT) phenomenon in a tri-layer magnetic structure. It has high potential applications in wireless communication, microwave-assisted magnetic recording, and neuromorphic computing.

This research aims to study theoretically the STNO using a nano-pillar magnetic tunnel junction (MTJ-STNO) using atomistic model combination with spin accumulation model to study the effects of current density and relative angle between the magnetization in the pinned layer and free layer. affecting the STNO performance

The results show that optimum current density of relative angle can achieve steady-precessional state of magnetization. The MTJ-STNO can generate a wide range of frequency signals (6.74 GHz to 22.56 GHz) and helps the generated stable signals (high amplitude and linewidth less than 0.35 GHz). Meanwhile, the power consumption of MTJ-STNO is at the microwatt level and varies with the current density. In addition, the utilizing of atomistic model and spin accumulation model enables the development of smaller and more efficient STNO, which will support future applications in communication and magnetic data storage technologies.

Keywords: spin-torque nano-oscillator (STNO), spin-transfer torque (STT), magnetic tunnel junction (MTJ)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จจุลวงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. พรรณวดี จุริมาศและรศ.ดร. เจษฎา จุริมาศ ที่ให้ความรู้เชิงหลักการและทฤษฎีทางด้านฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงแนะนำวิธีการวิจัยและหลักการการเขียนรายงาน วิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้อง ครบถ้วนสมบูรณ์ อีกทั้งยังคอยกระตุ้นให้ข้าพเจ้ามีความมุ่งมั่น ให้อิสระในการทำงาน มอบโอกาสอันมีคุณค่านับไม่ถ้วน สร้างแรงบันดาลใจ คอยอบรมสั่งสอนด้วยขันติและเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อาคม แก้วระวัง รศ.ดร. อรวรรณ ฤทธิเดชและผศ.ดร. ประธาน ศรีวิไล ที่ให้เกียรติมาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ช่วยให้คำแนะนำและเสนอแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้มอบทุนการศึกษาในระดับปริญญาโทและมอบโอกาสในการฝึกประสบการณ์การทำงานในภาคอุตสาหกรรม

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ช่วยอำนวยความสะดวกสนับสนุนทุน สร้างสภาพแวดล้อมและส่งเสริมกิจกรรมที่เอื้อต่อการเรียนรู้และการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ และน้อง ๆ ในหน่วยวิจัย MINT RU นางสาวรุ่งตะวัน คำทวี (พี่ซุ) นางสาวชนิษฐา ยวนแม (พี่น้ำ) นายธนพล สิ้นเครือสอน (พี่มัน) นายวสันต์ พันทะศรี (พี่วสันต์) นายรัฐพล ภูมาตนา (พี่ติว) นางสาวอินธอร สุทธิรักษา (น้องฝ้าย) และนางสาววิริญญา ชมภูราช (น้องยุ้ย) ที่คอยให้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและมอบกำลังใจที่ดี ทำให้การทำวิจัยและใช้ชีวิตของข้าพเจ้าเป็นไปอย่างราบรื่นตลอดมา

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณพ่อ แม่ ครอบครัวและนางสาวมาดาวิน ชูธรรม ที่มอบความเข้าใจและให้การสนับสนุนทุกอย่างก้าวของชีวิตข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

พูน ปณ ทัต ชีเว

รัฐพงษ์ รางเงิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขอบเขตการศึกษา	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 การค้นพบและวิวัฒนาการของเครื่องกำเนิดสัญญาณขนาดระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปิน ทอร์ค (spin-torque nano-oscillator หรือ STNO)	8
2.2 การออกแบบเครื่องกำเนิดสัญญาณ STNO	22
2.3 แบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมและสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz- Gilbert equation หรือ LLG) กับการศึกษาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ STNO	28
2.4 แบบจำลองการสะสมสปิน (Spin accumulation model)	33
2.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ STNO (STNO performance analysis)	36

บทที่ 3 การออกแบบโครงสร้างและการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชัน พฤติกรรมการส่งผ่าน สปีนของโครงสร้าง STNO ด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการ สะสมสปีน.....	39
3.1 การออกแบบและการสร้างโครงสร้างของ CoFeB/MgO STNO ด้วยแบบจำลองแม่เหล็ก ระดับอะตอม.....	41
3.2 การศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันและพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนภายในโครงสร้าง STNO ด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมและแบบจำลองการสะสมสปีน	44
3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ STNO.....	50
บทที่ 4 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อคุณสมบัติของสัญญาณและอัตรา การใช้พลังงาน ของ CoFeB/MgO STNO.....	51
4.1 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระ	52
4.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อคุณสมบัติสัญญาณของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน ในชั้นอิสระ.....	54
บทที่ 5 ผลของมุมสัมพัทธ์เริ่มต้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้นพินและชั้นอิสระต่อคุณสมบัติของ สัญญาณและกำลังไฟฟ้าของ CoFeB/MgO STNO	59
5.1 ผลของมุมสัมพัทธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระต่อความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดและคุณสมบัติของสัญญาณ.....	60
5.2 ผลของมุมสัมพัทธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระต่อกำลังไฟฟ้า.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา.....	67
6.1 สรุปผลการศึกษา.....	67
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
บรรณานุกรม	69
ประวัติผู้เขียน.....	78

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับคุณสมบัติทางแม่เหล็กและการส่งผ่านของสปินของ CoFeB ทั้งบริเวณบ็ลค์ (Bulk) และรอยต่อ (interface) และคุณสมบัติของ MgO [62][32].....	43
ตารางที่ 4.1 แสดงพิกัดเริ่มต้นและสุดท้ายของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ MTJ-STNO	57



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ STNO ในอุปกรณ์ต่าง ๆ (ก) เรทเตอร์สัญญาณไวไฟ [10] (ข) ชิพของระบบคอมพิวเตอร์ที่ทำงานเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ [11] (ค) การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่อาศัยคลื่นไมโครเวฟช่วย [2].....	2
รูปที่ 1.2 ลักษณะโครงสร้างหลักของ STNO ที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุเพอร์โรแมกเนติกสองชั้น (ชั้นพิน (PL) และชั้นอิสระ (FL) ที่ถูกคั่นด้วยชั้นสเปเซอร์ (SP).....	3
รูปที่ 1.3 แสดงกระบวนการเกิดของปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค.....	4
รูปที่ 2.1 (ก) แสดงความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนจากนิวเคลียสของออร์บิทัล 3d และ 4s ของสแกนเดียม (Sc) [34] และ (ข) การจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัล 3d และ 4s ของโลหะทรานซิชัน [35].....	9
รูปที่ 2.2 (ก) แสดงโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น FM1/NM/FM2 และการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน (ข) แสดงการเกิดปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คที่อธิบายด้วยงานวิจัยของ J. Slonczewski [1] 9	9
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน (ก) แมกนีไทเซชันเกิดการกลับทิศทาง (magnetization switching) (ข) แมกนีไทเซชันจะเกิดการรักษาสภาพการสั่น (sustained oscillation) ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น.....	11
รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของสนามสลอนของฟลักทอร์ค τ_S และสนามคล้ายทอร์ค τ_{FL}	12
รูปที่ 2.5 แสดงประเภทของ STNO ที่แบ่งประเภทตามการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันในชั้นอ้างอิง RL หรือชั้นพิน PL และชั้นอิสระ FL (ก) แบบขนาน (All in plane หรือ AIP STNO) (ข) แบบตั้งฉากทั้งหมด (All out-of plane หรือ AOP-STNO) (ค) แบบตั้งฉาก (Orthogonal หรือ O-STNO) และ (ง) แบบเอียง (tilted หรือ T-STNO) [28][40][41][42].....	13
รูปที่ 2.6 (ก) แสดงโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น Co/Cu แบบ point contact (ข) กราฟแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V (V) และสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อความต้านทาน dV/dI และ (ค) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (microwave absorption) และสนามแม่เหล็กภายนอกที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นพ้องของสปินหรือ ESR [29].....	14
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นของ STNO และวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในงานวิจัยเชิงทดลองและทฤษฎีของ S. I. Kiselev และคณะ [10]..	15

รูปที่ 2.8 (ก) แสดงสถานะที่แมกนีไทเซชันเกิดการเรียงตัวแบบขนาน (P) สถานะที่แมกนีไทเซชันสองสถานะ (P/AP) สถานะที่แมกนีไทเซชันเกิดการเรียงตัวแบบทิศตรงข้ามกัน (anti-parallel orientation หรือ AP) สถานะการเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนีไทเซชันที่แอมพลิจูดขนาดเล็ก (S) และสถานะการเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนีไทเซชันที่แอมพลิจูดขนาดใหญ่ (L) ภายในโครงสร้าง AIP-STNO ที่ประกอบไปด้วยชั้น Cu(80 nm)/Co(40 nm)/Cu(10 nm)/ Co (3 nm)/Cu (2 nm)/Pt (30 nm) (ข) ผลของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายนอกต่อความถี่และกำลังขาออกของสัญญาณ..... 16

รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น AOP-STNO ที่ $(\text{Co/Pd})_5$ คือชั้นอ้างอิง และ $\text{Co}/(\text{Pd/Co})_4$ คือชั้นอิสระในงานวิจัยเชิงทดลองและทฤษฎีของ ของ C. H. Sim และคณะ [25] 17

รูปที่ 2.10 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายนอกต่อความถี่ และความหนาแน่นของกำลัง (power spectral density หรือ PSD) ของสัญญาณความถี่ที่ ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ (ข) และสนามแม่เหล็กภายนอกไม่เป็นศูนย์ (ค)..... 18

รูปที่ 2.11 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ต่อความถี่ (f) ของ STNO ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30-60 nm และ (ข) สเปกตรัมของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันของ STNO มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 nm..... 19

รูปที่ 2.12 (ก) แสดงโครงสร้างและลักษณะการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันใน T-STNO ในงานวิจัยของ Zhou และคณะ [26][27] (ข) ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J ต่อความถี่และผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระ (φ) ต่อสปินทอร์ค (normalized spin torque หรือ τ^*) (ค) ตำแหน่งการเคลื่อนที่วนรอบของแมกนีไทเซชันที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน..... 20

รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่ ชั้นพินและชั้นอิสระเป็น (ก) วัสดุเดียวกัน (homogeneous) และ (ข) วัสดุแตกต่างกัน (heterogeneous) (ค) และ (ง) แสดงผลของมุมของแมกนีไทเซชันในชั้นพิน (β) และชั้นอิสระ (θ) ในช่วง $0^\circ - 90^\circ$ ในโครงสร้าง homogeneous และ heterogeneous ตามลำดับ 21

รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณ STNO ซึ่งประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น AFM/PL/NM/RL/SP/FL 22

รูปที่ 2.15 แสดงปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนที่บริเวณระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็ก AFM และ PL ซึ่งเป็นวัสดุ FM 23

รูปที่ 2.16 แสดงกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน..... 24

รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นในหัวอ่านข้อมูล (ก) [49] และ STT-MRAM (ข) [50]25

รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นและแมกนีไทเซชันของ STNO.....26

รูปที่ 2.19 แสดงกระบวนการการเกิดปรากฏการณ์สปินทอร์คของเครื่องกำเนิดสัญญาณ STNO.....27

รูปที่ 2.20 แสดงขนาด (length scale) และช่วงเวลา (time scale) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์ของวัสดุแม่เหล็ก [51][52]28

รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ (S_i) ภายใต้สนามแม่เหล็กประสิทธิผลและสนามสปินทอร์ค (ก) การเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์วนรอบสนาม (ข) การเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์เข้าหาทิศทางของสนาม31

รูปที่ 2.22 แสดงองค์ประกอบของการสะสมสปินที่กระทำต่อสปินโมเมนต์ (S_i) ในระบบพิกัดพื้นฐาน (rotated basis coordinate system หรือ $\hat{b}_1 \hat{b}_2 \hat{b}_3$) ภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก35

รูปที่ 2.23 แสดงองค์ประกอบของสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและฟังก์ชันการกระจายตัวแบบมอฟแพต37

รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า j_e และมุมสัมพันธ์ θ ของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน พฤติกรรมการส่งผ่านสปินและประสิทธิภาพของ STNO ด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน.....42

รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของ MTJ-STNO ของ CoFeB/MgO ที่ประกอบด้วยบริเวณบัลค์ โดยที่ชั้นพิน แมกนีไทเซชันจะตั้งฉากกับระนาบของชั้นวัสดุและชั้นอิสระแมกนีไทเซชันเอียงทำมุม θ กับระนาบของชั้นวัสดุ42

รูปที่ 3.3 แสดงผลของสนามแอนไอโซโทรปีพลิกของแกนเดี่ยวที่กระทำต่อสปินโมเมนต์.....46

รูปที่ 3.4 แสดงปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินโมเมนต์ S_i และ S_j ซึ่งเป็นสปินโมเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน (nearest neighbor list).....46

รูปที่ 3.5 แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันและทิศทางของสนามของพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กภายในวัสดุ.....47

รูปที่ 3.6 แสดงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อสปินโมเมนต์ภายในวัสดุแม่เหล็ก.....48

รูปที่ 3.7 แสดงการเกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก.....48

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของ MTJ-STNO ของ CoFeB/MgO ที่ประกอบด้วยบริเวณบัลค์ (bulk) ของ CoFeB และบริเวณรอยต่อ (interface) ของ CoFeB/MgO โดยที่ชั้นพิน แมกนีไทเซชันจะตั้งฉากกับระนาบของชั้นวัสดุ และชั้นอิสระแมกนีไทเซชันเอียงทำมุม θ กับระนาบของชั้นวัสดุ.....51

รูปที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของทอร์กที่กระทำต่อสปิน \hat{S}_i เนื่องจากผลของสนาม $\vec{B}_{\text{eff},i}$ และ $\vec{B}_{\text{ST},i}$ 52

รูปที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในแนวแกน x y และ z (M_x M_y และ M_z) ที่สภาวะไม่ผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (non-switching state) (ก) สภาวะการสั่นวนรอบแบบคงที่ (steady-precessional state) (ข) และสภาวะผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (switching state) (ค).....53

รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่ได้จากการวิเคราะห์การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและฟังก์ชันการกระจายตัวมอฟเฟต55

รูปที่ 4.5 แสดงแนวโน้มผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 50 – 60 MA/cm² ต่อความถี่หลักของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน55

รูปที่ 4.6 แสดงพิกัดทรงกลมที่ใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงมุมของแมกนีไทเซชัน [85]57

รูปที่ 4.7 (ก) แสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (j_e) ต่อความกว้างของสัญญาณ (Γ) และแอมพลิจูด (A) ของสัญญาณการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ STNO (ข) แสดงมุมสุดท้าย (θ_f) และมุมที่เปลี่ยนแปลงไป ($\Delta\theta$) เมื่อป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ 5 ns.....57

รูปที่ 5.1 แสดงการปรับเปลี่ยนมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระในช่วง 5°-70° ในโครงสร้างของ MTJ-STNO เพื่อวิเคราะห์หาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุด เพื่อให้ MTJ-STNO สร้างความถี่ได้หลากหลายในขณะที่มีความกว้างสัญญาณแคบและแอมพลิจูดสูง60

รูปที่ 5.2 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นในช่วง 5°-70° ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุด (เส้นทึบ-จุดวงกลม) และความถี่หลัก (เส้นทึบ-จุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด) (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นในช่วง 5°-70° ต่อสนามอะเดียบาติกสปินทอร์ค (เส้นประ) และสนามนอนอะเดียบาติกสปินทอร์ค (เส้นทึบ) ที่เวลา 10 ps.....62

รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นในช่วง 5°-70° ต่อแอมพลิจูด (เส้นทึบ-จุดวงกลม) และความกว้างของสัญญาณ (เส้นทึบ-จุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด)64

รูปที่ 5.4 แสดงการแบ่งไมโครเซลล์เพื่อใช้คำนวณการสะสมสปิน กระแสสปินและความต้านทานในโครงสร้าง MTJ-STNO เมื่อ n คือจำนวนไมโครเซลล์ที่ต่อกันเป็นอนุกรม65

รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นในช่วง 5°-70° ต่อความต้านทาน(เส้นทึบ-จุดวงกลม) และกำลังไฟฟ้า (เส้นประ-จุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด)66

บทที่ 1

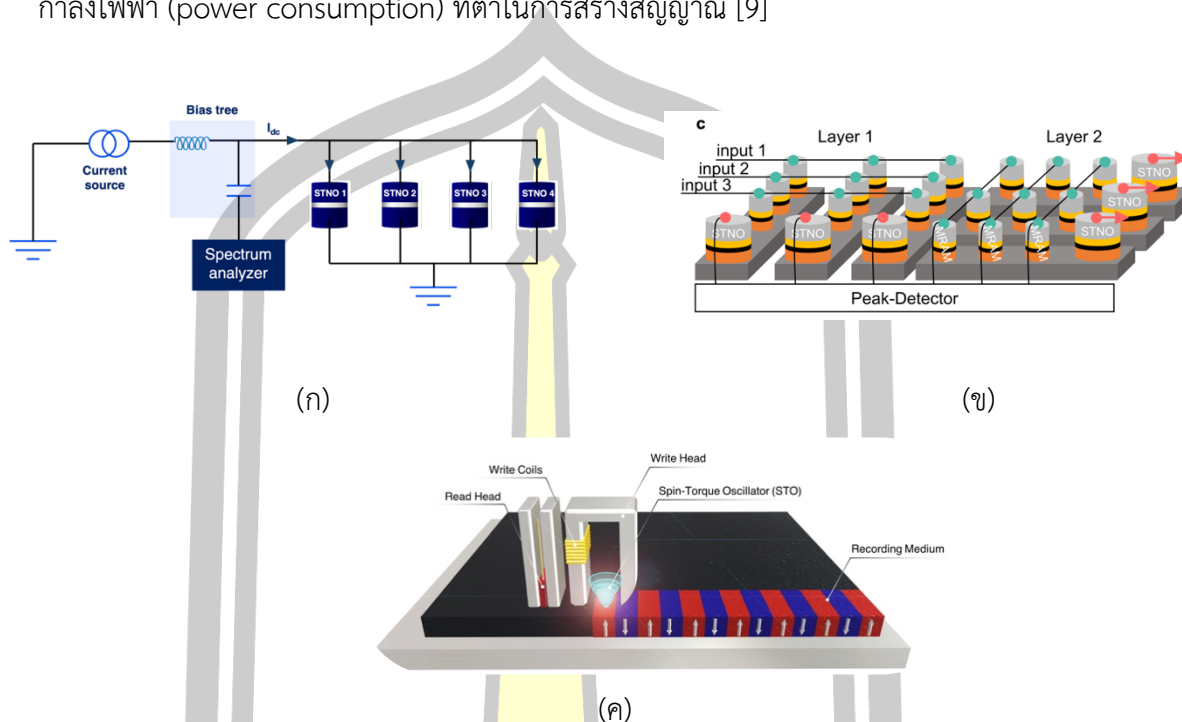
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เครื่องกำเนิดสัญญาณระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค (spin-torque nano-oscillator หรือ STNO) เป็นอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ (spintronics) ขนาดระดับนาโนที่หน้าที่สำคัญในการเป็นแหล่งกำเนิดและรับสัญญาณในย่านไมโครเวฟ (microwave source) ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 30 เมกะเฮิร์ต ถึง 300 จิกะเฮิร์ต โดยความถี่ดังกล่าวมีต้นกำเนิดมาจากการทำให้สปิน (spin) หรือแมกนีไทเซชัน (magnetization) เกิดการสั่นหรือการหมุนรอบทิศทางของสนามที่มากระทำภายในวัสดุแม่เหล็กเอง โดยอาศัยปรากฏการณ์การส่งผ่านสปิน (spin-transfer torque หรือ STT) [1] ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของกระแสสปิน (spin current) ผ่านโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น (trilayer-magnetic structure) เป็นกลไกหลัก

โดย STNO เป็นอุปกรณ์ที่ถูกคาดหวังว่าจะเป็นหนึ่งในเครื่องกำเนิดสัญญาณที่จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้านโดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลข้อมูลของระบบคอมพิวเตอร์ การบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กและเทคโนโลยีการสื่อสาร ดังรูปที่ 1.1 ในอีกไม่กี่ทศวรรษข้างหน้า เช่น การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่อาศัยคลื่นไมโครเวฟช่วย (microwave assisted magnetic recording หรือ MAMR) [2] เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย (wireless communication technology) เซนเซอร์แม่เหล็ก (magnetic sensor) ตัวตรวจจับสัญญาณ (signal detector) ระบบคอมพิวเตอร์ที่เลียนแบบระบบประสาทของมนุษย์ (neuromorphic computing) และเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง (internet of things หรือ IoT) [3][4] เป็นต้น โดยคุณสมบัติอันโดดเด่นที่ส่งเสริมให้ STNO กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญของอุปกรณ์เหล่านี้ประกอบไปด้วยหลายประการ คือ ขนาดของ STNO มีขนาดเล็กกว่าเครื่องกำเนิดสัญญาณแบบดั้งเดิม (conventional oscillator) ถึง 50 เท่า [5] รวมไปถึงมีความสามารถในการสร้างสัญญาณได้หลากหลายความถี่ในช่วง GHz โดยอาศัยปรับเปลี่ยนขนาดของกระแสไฟฟ้าหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้างของ STNO ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้ส่งผลดีต่อความสามารถในการลดขนาดและจำนวนของของเครื่องกำเนิดสัญญาณในแผงวงจรของอุปกรณ์และสามารถประยุกต์ใช้ในหลากหลายอุปกรณ์ที่มีช่วงความถี่ในการทำงานที่แตกต่างกัน ขณะเดียวกันก็ยังคงความรวดเร็วในการสร้างสัญญาณที่มีความเสถียรในช่วงเวลาที่สั้นมาก (น้อยกว่า 1 นาโนวินาที) [6] และ สัญญาณที่เกิดขึ้นจาก STNO มีความกว้างของสัญญาณ (linewidth) ที่แคบในระดับกิโลเฮิร์ต [7] และปล่อยสัญญาณด้วยกำลังไฟฟ้าขาออก (output power) ในระดับไมโครวัตต์ [8] ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมี

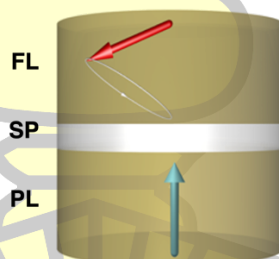
ความคมชัดและมีการส่งผ่านข้อมูลมีความเสถียร นอกจากนี้ STNO ใช้มีปริมาณการใช้พลังงานหรือกำลังไฟฟ้า (power consumption) ที่ต่ำในการสร้างสัญญาณ [9]



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ STNO ในอุปกรณ์ต่าง ๆ (ก) เรทเตอร์สัญญาณไวไฟ [10] (ข) ชิปของระบบคอมพิวเตอร์ที่ทำงานเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ [11] (ค) การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่อาศัยคลื่นไมโครเวฟช่วย [2]

โดยทั่วไปโครงสร้างหลักของ STNO จะมีลักษณะเป็นโครงสร้างฟิล์มบางของวัสดุสามชั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ โครงสร้างสปินวาล์ว (spin valve) และโครงสร้างรอยต่อทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก (magnetic tunnel junction หรือ MTJ) โดยทั้งโครงสร้างทั้งสองแบบนี้จะประกอบไปด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material หรือ FM) สองชั้น ได้แก่ ชั้นวัสดุ FM ที่แมกนีไทเซชัน (ผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมต่อปริมาตรหนึ่งหน่วย) ถูกทำให้มีทิศทางการที่และเปลี่ยนแปลงได้ยากด้วยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกหรืออาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias) [12] เราเรียกชั้นนี้ว่า ชั้นพิน (pinned layer หรือ PL) ขณะที่ชั้นวัสดุ FM อีกชั้นจะมีความแตกต่างออกไปอย่างสิ้นเชิงและที่สำคัญเป็นชั้นนี้เองที่เป็นชั้นที่ทำให้กำเนิดความถี่ของ STNO เนื่องจากแมกนีไทเซชันของชั้นนี้จะสามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายตามแรงหรือสนามที่มากกระทำเรียกชั้นนี้ว่า ชั้นอิสระ (free layer หรือ FL) ซึ่งทั้งสองชั้นดังกล่าวจะถูกคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็กหรือชั้นสเปซเซอร์ (spacer หรือ SP) ดังรูปที่ 1.2 ที่ทำหน้าที่ป้องกันอันตรกิริยาเชิงแม่เหล็กระหว่างชั้น PL และ FL โดยประเภท

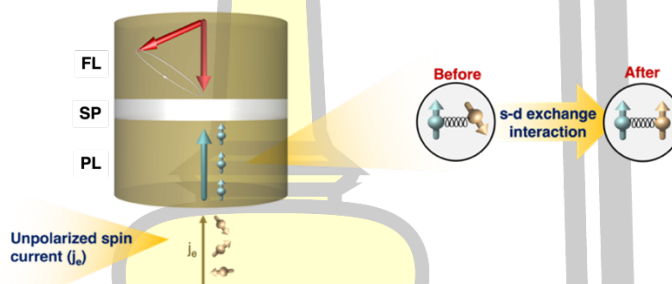
วัสดุของชั้นดังกล่าวเป็นเกณฑ์พื้นฐานที่ใช้บ่งบอกถึงความแตกต่างระหว่างโครงสร้างสปีนวาล์วและ MTJ เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อกลไกหรือพฤติกรรมเคลื่อนที่ของกระแสสปินและความต้านทานเชิงแม่เหล็ก (magnetoresistance หรือ MR) ที่เกิดขึ้นในแต่ละโครงสร้างมีความแตกต่างกัน [13] โดยในกรณีของโครงสร้างสปีนวาล์ว ชั้น SP จะเป็นวัสดุที่มีความเป็นโลหะ (metallic material) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าแถบพลังงานการนำ (conduction band) และแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence band) ของวัสดุประเภทนี้ซ้อนทับกัน ทำให้กระแสสปินสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังชั้น FL ได้เป็นอย่างดีและความต้านทานเชิงแม่เหล็กของโครงสร้างนี้จะขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนิไทเซชันระหว่างชั้น PL และ FL เป็นปัจจัยหลัก เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลต่อการกระเจิงสปิน (spin scattering) ภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว เรียกความต้านทาน MR นี้ว่าความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance หรือ GMR) [14] ขณะที่วัสดุของชั้น SP ในโครงสร้าง MTJ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน (insulating material) และมีความเป็นแม่เหล็กเล็กน้อย ซึ่งส่งผลให้กระแสสปินสามารถทะลุผ่านไปได้บางส่วนโดยปริยาย ตามหลักการของปรากฏการณ์การลอดอุโมงค์ทางควอนตัม (quantum tunnelling effect) ทำให้ออกเหนือจากทิศทางของแมกนิไทเซชันระหว่างชั้น PL และ FL แล้วความต้านทานเชิงแม่เหล็กของโครงสร้างนี้ยังขึ้นอยู่กับความหนาและความสูงกำแพงศักย์ของชั้น SP ด้วย เรียกความต้านทาน MR นี้ว่าความต้านทานทะลุเชิงแม่เหล็ก (tunneling magnetoresistance หรือ TMR) [15]



รูปที่ 1.2 ลักษณะโครงสร้างหลักของ STNO ที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกสองชั้น (ชั้นพิน (PL) และชั้นอิสระ (FL) ที่ถูกคั่นด้วยชั้นสเปสเซอร์ (SP))

อย่างไรก็ตาม การออกแบบให้ STNO สามารถสร้างสัญญาณที่มีความถี่ใด ๆ ของทั้งสองโครงสร้างดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค เพื่อที่จะทำให้แมกนิไทเซชันเกิดการสั่นภายในชั้นอิสระ ซึ่งสามารถการป้อนกระแสไฟฟ้าหรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density หรือ j_c) เข้าสู่โครงสร้างของ STNO ดังรูปที่ 1.3 จะเห็นได้ว่า กระแสอิเล็กตรอนอิสระก่อนจะเข้าสู่ชั้น PL มีทิศทางของสปินแบบสุ่มไม่เป็นระเบียบ หรือกระแสสปินที่ยังไม่โพลาไรซ์ (unpolarized spin current) เมื่อกระแสนี้เคลื่อนที่เข้าสู่ชั้น PL ที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมก

เนติกและมีแมกนีไทเซชันที่แข็งแกร่งแล้วแล้ว จะทำให้เกิดทอร์คที่กระทำต่อกันระหว่างกระแสสปินที่ยังไม่โพลารไรซ์กับแมกนีไทเซชันเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ที่เรียกว่า ปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d (s-d exchange interaction) ซึ่งเป็นผลจากการที่แถบพลังงานของออร์บิทัล 3d และ 4s ของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกซ้อนทับกัน ส่งผลให้สปินของกระแสดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปตามแมกนีไทเซชันในชั้น PL เรียกกระแสสปินนี้ว่า กระแสสปินโพลารไรซ์ (polarized spin current) จากนั้นกระแสสปินโพลารไรซ์จะเคลื่อนที่ผ่านชั้น SP เข้าสู่ชั้น FL พร้อมทั้งเกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d อีกครั้ง และเมื่อกระแสสปินมีความหนาแน่นมากพอ จะให้ทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าที่เหมาะสมทำให้เกิดการหักล้างระหว่าง STT และทอร์คที่เกิดจากความหน่วงธรรมชาติ (intrinsic Gilbert damping) ส่งผลให้แมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเกิดการกวัดแกว่งด้วยความถี่และมุมคงที่ค่าหนึ่ง โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความถี่ของ STNO จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็กที่นำมาใช้ในโครงสร้าง STNO ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความร้อน และลักษณะการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันในวัสดุแม่เหล็ก [16] [17] เป็นต้น



รูปที่ 1.3 แสดงกระบวนการเกิดของปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค

จากคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้ STNO ในเทคโนโลยีด้านการสื่อสารและประมวลผลข้อมูล ทำให้ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ STNO อย่างกว้างขวางทั้งในเชิงทดลอง [18] [19] และเชิงทฤษฎี [17] [20] [21] โดยช่วงแรกของการพัฒนาเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค STNO นับตั้งแต่การค้นพบ STT ในเชิงทฤษฎีของ Slonzewski และ Berger [1][28] และค้นพบการสั่นของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุจากการทดลอง [22][23] STNO มักถูกออกแบบให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและชั้นพินแบบขนาน (All in plane หรือ AIP STNO) แบบตั้งฉากทั้งหมด (All out-of plane หรือ AOP-STNO) และแบบตั้งฉาก (Orthogonal หรือ O-STNO) ซึ่งมีข้อจำกัดหลายประการ เนื่องจากจำเป็นที่จะต้องป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกที่สูง (~ 1 T) เพื่อรักษาความเสถียรของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน [29][24] นอกจากนี้ความถี่ที่เกิดขึ้นที่สนามจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างดังกล่าวไม่มีความหลากหลาย [23][25][3] ต่อมาจึงได้มีการเสนอแนวคิดเพื่อพัฒนา STNO ให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันแบบเอียง (tilted หรือ T-STNO) ทำให้สามารถสร้างความถี่ได้หลากหลายมากขึ้นโดยไม่ต้อง

อาศัยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกช่วย (zero field operation) [26][27] แต่อย่างไรก็ตาม T-STNO ยังคงมีกำลังไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากต้องป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูง ($\sim 10^{11}$ A/m²) ในการสร้างความถี่ นอกจากนี้โครงสร้างของ STNO ทั้งหมดที่กล่าวมา มักจะใช้โครงสร้างแม่เหล็กหลายชั้น (magnetic multilayer structure) ที่ประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มบางของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุที่มีความเป็นโลหะ (FM/NM) หรือโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น FM/NM/FM ที่มีชั้นสเปสเซอร์เป็นโลหะ เช่น Co/Cu/Co หรือ Co/Cu/CoNi ฯลฯ ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ (Giant magnetoresistance หรือ GMR) ซึ่งมักจะมีกำลังขาออกของสัญญาณต่ำ (sub-nW) [28] เกินไปที่จะนำมาใช้งานกับอุปกรณ์จริง

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาให้ STNO มีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเอียง (tilted หรือ T-STNO) เนื่องจาก ธรรมเนียมกันโทเซชันทำมุมเอียงกับระนาบชั้นอิสระ FL หรือ PL จะมีประสิทธิภาพในการสร้างสัญญาณย่านไมโครเวฟและสามารถรักษากำลังในการส่งสัญญาณสูงที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการจัดเรียงของแมกนีโทเซชันแบบอื่น ๆ [16] [28] โดย STNO ที่นิยมศึกษาในเชิงทดลองมักจะเป็นโครงสร้าง MTJ ที่มีชั้นวัสดุเป็น CoFeB/MgO/CoFeB เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าว MgO สามารถเพิ่มกำลังในการส่งสัญญาณในระดับไมโครวัตต์ เนื่องจากทำให้เกิดความต้านทานเชิงแม่เหล็กหรือความต้านทานเชิงพื้นที่ (resistance area หรือ RA) ที่สูงมาก มีความเสถียรทางความร้อนสูง [8] และโครงสร้าง MTJ ดังกล่าวจะปล่อยสัญญาณความถี่อยู่ในช่วง 0.25 ถึง 7 GHz [29] [30] [31] ซึ่งเหมาะกับการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางด้านสื่อสารแบบไร้สายเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการศึกษาเชิงทฤษฎีมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อวิเคราะห์สมบัติของ STNO เนื่องจากทำให้มีความเข้าใจต่อปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กและสามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ได้หลากหลาย โดยการศึกษาเชิงทฤษฎีจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางแม่เหล็กที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินใน STNO ได้อย่างถูกต้องและครบถ้วน ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางที่ดีในการศึกษาเชิงทดลอง แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยทางด้านทฤษฎีส่วนใหญ่มักจะใช้แบบจำลองแม่เหล็กระดับจุลภาค (micromagnetic model) ร่วมกับสมการ Landau-Lifshitz-Gilbert-Slonczewski (LLGS) [16] [20] [21] ซึ่งมีข้อจำกัดในการอธิบายการผสมกันของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มได้อย่างครอบคลุม อีกทั้งมีความยุ่งยากสำหรับการอธิบายผลของความร้อนที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ เนื่องจากการศึกษาการเคลื่อนที่ของแมกนีโทเซชันที่อุณหภูมิใดๆ จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่อุณหภูมินั้นๆ เพื่อจะใช้เป็นตัวแปรขาเข้าของแบบจำลอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการทะลุผ่านของกระแสสปินในโครงสร้าง MTJ จะถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ายังมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งระนาบของวัสดุ ซึ่งในความเป็นจริงกระแสสปินดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีโทเซชันของชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก และที่สำคัญคือ การอธิบาย STT ด้วย LLGS ในโมเดลดังกล่าวมักจะมีค่า

แรงบิดสูงเกินไป [32] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการวิเคราะห์ความถี่หรือคุณสมบัติอื่น ๆ ของสัญญาณที่เกิดจากพลวัตของแมกนีไทเซชันที่มีความคลาดเคลื่อน

ดังนั้น เพื่อพัฒนาแบบจำลองของ STNO ให้มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาและสร้างแบบจำลอง CoFeB/MgO/CoFeB MTJ-STNO รวมไปถึงศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของ STNO (ความถี่ แอมพลิจูด ความกว้างสัญญาณ ความต้านทานเชิง กำลังไฟฟ้า) ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density หรือ j_c) และมุมสัมพัทธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันชั้นพินและชั้นอิสระ (relative angle หรือ θ) โดยอาศัยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอม (atomistic modelling of magnetic materials) ร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน (spin accumulation model) แทนที่แบบจำลองแม่เหล็กระดับจุลภาค เนื่องจากสามารถคิดผลของรอยต่อที่เกิดระหว่างชั้น CoFeB และ MgO [33] ได้ อีกทั้งการใช้แบบจำลองการสะสมสปินจะทำให้การพิจารณาการทะลุผ่านของกระแสสปินใน MTJ มีค่าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นวัสดุอนแมกเนติกและมุมของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก [32] ทำให้แบบจำลองมีความสมจริงมากขึ้นและเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาคุณสมบัติของ STNO ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อพัฒนาและสร้างแบบจำลอง CoFeB/MgO MTJ-STNO โดยใช้แบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน

1.2.2. เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของ STNO

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของ STNO

1.3.2 ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสและพิจารณาหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการทำงานของ STNO

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถพัฒนาและสร้างแบบจำลอง CoFeB/MgO MTJ-STNO ที่มีความเสมือนจริงและสามารถจำลองพฤติกรรมของ STNO ได้อย่างแม่นยำ

1.4.2 มีความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับกลไกและผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ STNO

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

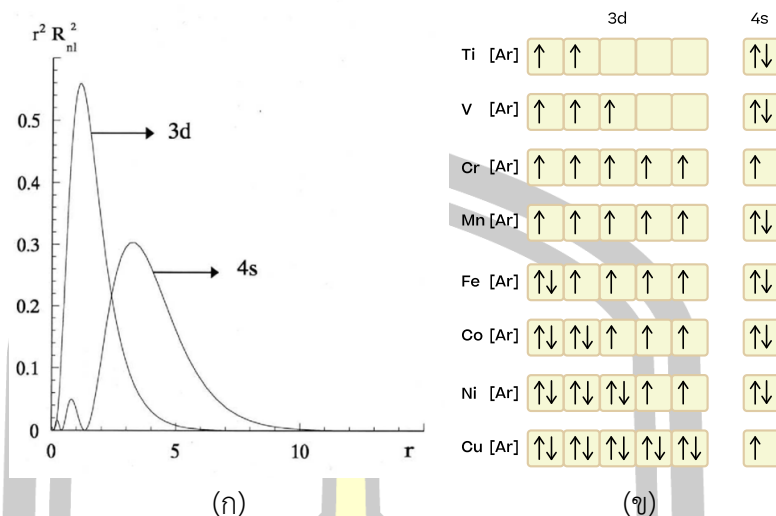
เครื่องกำเนิดสัญญาณขนาดระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค หรือ STNO เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างความถี่สูงในย่านไมโครเวฟโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งมีบทบาทที่สำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีที่ต้องอาศัยสัญญาณความถี่สูงและการประมวลผลข้อมูลขั้นสูงต่าง ๆ อุปกรณ์ เช่น เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่อาศัยคลื่นไมโครเวฟช่วย (microwave assisted magnetic recording หรือ MAMR) ตัวกระจายสัญญาณไวไฟ (Wi-Fi) หัวอ่านข้อมูลหรือเซนเซอร์แม่เหล็ก (magnetic sensor) ระบบคอมพิวเตอร์ที่เลียนแบบระบบประสาทของมนุษย์ (neuromorphic computing) รวมไปถึงองค์ประกอบและหลักการดำเนินงานที่สำคัญของ STNO

เพื่อให้เข้าใจถึงรายละเอียดและความสำคัญของอุปกรณ์ดังกล่าว บทนี้จะอธิบายการค้นพบปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค (spin-transfer torque) ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อ “การเกิดพลวัตของแมกนีไทเซชัน” ในการทำงานของ STNO ปรากฏการณ์ดังกล่าวถูกค้นพบโดย J. Slonczewski [1] เมื่อปี ค.ศ. 1998 จากนั้นจะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการดำเนินงานของ STNO ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น (magnetic multilayer structure) ที่มีคุณสมบัติและหน้าที่แตกต่างกันออกไป โดยโครงสร้างหลักของ STNO จะเป็นโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น (tri-layer structure) ซึ่งสามารถแบ่งเป็นสองประเภท ได้แก่ โครงสร้างรอยต่อทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก (magnetic tunnel junction หรือ MTJ) และโครงสร้างสปินวาล์ว (spin valve) โดยโครงสร้างทั้งสองนี้ จะส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ ความต้านทานเชิงแม่เหล็ก (magnetoresistance) รวมไปถึงปรากฏการณ์การส่งผ่านสปิน (spin transport) ที่แตกต่างกัน ทำให้ส่งผลต่อการใช้พลังงานของโครงสร้างและเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้กำเนิดสัญญาณในงานวิจัยของยุคปัจจุบัน และหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงการอธิบายพลวัตของสปินโดยอาศัยสมการแลนเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation หรือ LLG) ในแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมและพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินโดยอาศัยแบบจำลองการสะสมสปิน รวมไปถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ STNO จากการพิจารณาคุณสมบัติของสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันและกำลังไฟฟ้าของ STNO จากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเชิงแม่เหล็กภายในโครงสร้าง

2.1 การค้นพบและวิวัฒนาการของเครื่องกำเนิดสัญญาณขนาดระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค (spin-torque nano-oscillator หรือ STNO)

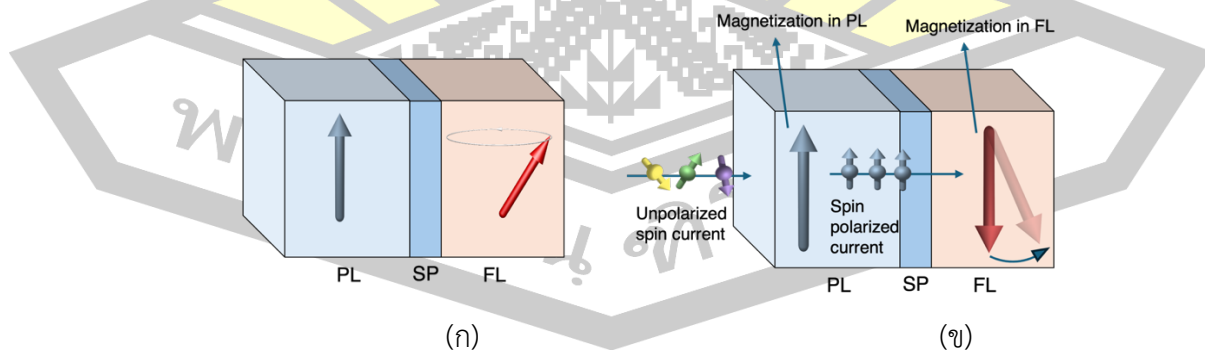
STNO เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการให้กำเนิดสัญญาณความถี่สูงในย่านไมโครเวฟ (300 MHz – 300 GHz) [27] โดยอาศัยการสร้างความถี่จากพลวัตหรือการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน (magnetization dynamics) ผ่านปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค (spin-transfer torque หรือ STT) ด้วยการป้อนกระแสแฉีกเล็กตรอนหรือกระแสสปิน (spin current) เข้าสู่โครงสร้างของ STNO ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกนำเสนอทางทฤษฎีครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1996 โดย J. Slonczewski และ L. Berger [1][23] โดยงานวิจัยของ J. Slonczewski ได้อธิบายปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คจากการศึกษาเชิงทฤษฎีขั้นสูงภายใต้เงื่อนไขการป้อนกระแสแฉีกเล็กตรอนในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของฟิล์ม (current perpendicular to the plane หรือ CPP) เข้าสู่โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material หรือ FM) สองชั้นที่ถูกคั่นด้วยชั้นสเปซเซอร์ (spacer layer หรือ SP) ที่เป็นวัสดุโลหะที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก (non-magnetic material หรือ NM) ซึ่งวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเป็นวัสดุแม่เหล็กที่อยู่ในกลุ่มธาตุโลหะทรานซิชัน (transition metals) เนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันระหว่างออร์บิทัล 3d และ 4s ดังรูปที่ 2.1 (ก) [34] เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) เป็นต้น โดยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กเนื่องจากจำนวนสปิน (spin) ระหว่างสปินขึ้น (spin up) และสปินลง (spin down) ในออร์บิทัล 3d ของอะตอมในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีจำนวนไม่เท่ากันหรือการบรรจุไม่เต็มของออร์บิทัล (half-filled 3d-orbitals) ดังรูปที่ 2.1 (ข) [35] ทำให้ผลรวมเวกเตอร์ระหว่างสปินขึ้นและสปินลงหรือโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ของอะตอมและ ส่งผลให้ผลรวมเวกเตอร์โมเมนต์แม่เหล็กของทุกอะตอมในวัสดุหรือแมกนีไทเซชัน (magnetization) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

สำหรับโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น (trilayer magnetic structure) FM1/NM/FM2 ที่พิจารณาในงานวิจัยของ J. Slonczewski จะมีความสมมาตรของโครงสร้าง (symmetric layered system) เช่น ความหนาโดยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก FM1 คือ ชั้นพิน (pinned layer หรือ PL) ซึ่งเป็นชั้นที่แมกนีไทเซชันถูกทำให้มีทิศทางคงที่และ FM2 คือ ชั้นอิสระ (free layer หรือ FL) ซึ่งเป็นชั้นที่แมกนีไทเซชันเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังรูปที่ 2.2 (ก)



รูปที่ 2.1 (ก) แสดงความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนจากนิวเคลียสของออร์บิทัล 3d และ 4s ของ สแกนเดียม (Sc) [34] และ (ข) การจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัล 3d และ 4s ของโลหะทรานซิชัน [35]

เมื่อทำการป้อนกระแสอิเล็กตรอนเข้าสู่ชั้นเฟอร์โรแมกเนติก FM1 แล้วจะทำให้เกิดการ แลกเปลี่ยนโมเมนต์เชิงมุมของสปินระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก FM1 และสปินของกระแสอิเล็กตรอน ทำให้สปินในกระแสอิเล็กตรอนดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนทิศทางไปตาม ทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก FM1 เรียกกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดการเปลี่ยน ทิศทางของสปินนี้ว่า กระแสสปินโพลาไรซ์ (spin polarized current) และกระแสสปินนี้จะเคลื่อนที่ ทะลุผ่านชั้นฉนวนเข้าสู่ชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก FM2 ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนโมเมนต์เชิงมุมของ สปินระหว่างแมกนีไทเซชันภายในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก FM2 เช่นเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุ เฟอร์โรแมกเนติก FM1 เมื่อความหนาแน่นของดังรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.2 (ก) แสดงโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น FM1/NM/FM2 และการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน (ข) แสดงการเกิดปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์กที่อธิบายด้วยงานวิจัยของ J. Slonczewski [1]

ปริมาณทางฟิสิกส์ที่ทำให้แมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเกิดการเคลื่อนที่เรียกว่า สปินทอร์ค (spin torque หรือ τ_{STT}) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสปินของกระแสอิเล็กตรอนที่ถูกป้อนเข้าสู่โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่มีความสมมาตรเชิงโครงสร้างนี้ว่า อะเดียบาติกสปินทอร์ค (adiabatic torque field) หรืออีกชื่อหนึ่งคือ สลอนซอฟสกีทอร์ค (Slonczewski torque หรือ τ_S) แสดงได้ดังสมการที่ (2.1) [1][36][37]

$$\tau_S = -\frac{1}{\mu_s} \frac{\gamma \hbar j_e a^3}{\sqrt{2} e \mu_B \lambda_J} \left[\frac{1 - \cos \xi \cdot e^\xi}{\xi} \right] \hat{M} \times (\hat{M} \times \hat{I}_s) \quad (2.1)$$

$$\text{โดย } \xi = \frac{t_F}{2\lambda_J}$$

เมื่อ γ คือ ค่าคงที่อัตราส่วนไจโรแมกเนติกของสปินเดี่ยว (gyromagnetic ratio) $\gamma = 1.76 \times 10^{11}$

$$\text{T}^{-1}\text{s}^{-1}$$

\hbar คือ ค่าคงที่ของพลังค์แบบลดค่า (reduced Planck constant) $\hbar = 6.582 \times 10^{-16} \text{eVs}$ หรือ $1.0546 \times 10^{-34} \text{Js}$

j_e คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้างของวัสดุ

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน (electron charge) $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$

μ_s คือ ค่าโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุ

μ_B คือ ค่าบอร์แมกนีตรอน (Bohr magnetron) $\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{JT}^{-1}$

a คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมในโครงสร้างผลึก (lattice constant)

$\lambda_J = \sqrt{2\hbar D_o / J}$ เป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็นเมตร

D_o คือ ค่าคงที่การแพร่ของกระแสสปิน

t_F คือ ความหนาของชั้นอิสระ

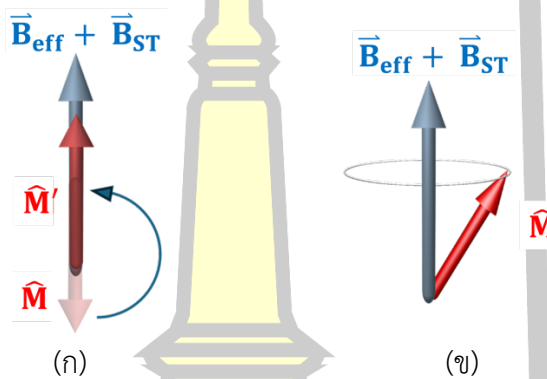
J คือ ค่าปริพันธ์แลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสปินของอิเล็กตรอนตัวนำและแมกนีไทเซชัน

\hat{M} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

\hat{I}_s คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของกระแสสปิน ซึ่งมีทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันในชั้นพิน

โดยปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คในงานวิจัยของ J. Slonczewski ซึ่งการศึกษาการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นโดยแมกนีไทเซชันมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม (anti-parallel) ในสภาวะเริ่มต้น ผลการศึกษาพบว่า แมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของโครงสร้างดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ในสองลักษณะ คือ กรณีแรก แมกนีไทเซชันเกิดการกลับทิศทาง (magnetization switching) เข้าหาทิศทางของสนามประสิทธิผล (effective field หรือ \vec{B}_{eff}) และสนามสปินทอร์ค (spin torque field หรือ \vec{B}_{ST}) เนื่องจากในกรณีที่สลอนซอฟสกีทอร์ค

τ_S มีทิศทางตรงกันข้ามกับทอร์กที่เกิดจากค่าความหน่วงธรรมชาติของวัสดุแม่เหล็ก (Gilbert damping torque หรือ τ_G) เกิดความไม่สมดุลระหว่างทอร์กทั้งสอง ($\tau_S \neq \tau_G$) ดังรูปที่ 2.3 (ก) ขณะที่อีกกรณีคือ แมกนีไทเซชันจะเกิดการรักษาสภาพการสั่น (sustained oscillation) หรือแมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนแบบวนรอบทิศทางของสนาม $\vec{B}_{\text{eff}} + \vec{B}_{\text{ST}}$ (precessional motion) ด้วยความถี่คงที่ในย่านไมโครเวฟ (microwave range) เนื่องจากเกิดความสมดุลระหว่างทอร์ก τ_S และ τ_G ($\tau_S \approx \tau_G$) ดังรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งการเคลื่อนที่ของทั้งสองกรณีนี้จะขึ้นอยู่กับค่าการปรับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของโครงสร้างวัสดุ เช่น คุณสมบัติเชิงแม่เหล็กและการส่งผ่านของวัสดุ ความหนาของแต่ละชั้นของวัสดุ รูปร่างของโครงสร้าง ฯลฯ



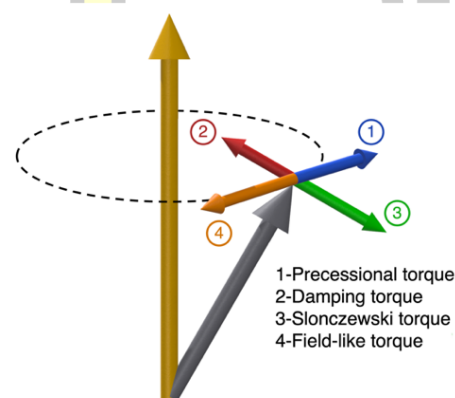
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน (ก) แมกนีไทเซชันเกิดการกลับทิศทาง (magnetization switching) (ข) แมกนีไทเซชันจะเกิดการรักษาสภาพการสั่น (sustained oscillation) ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้น

แต่อย่างไรก็ตามในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นที่มีความไม่สมมาตร (asymmetric layered system) เช่น กรณีที่ความหนาของชั้นพินและชั้นอิสระไม่เท่ากัน คุณสมบัติเชิงแม่เหล็กและการส่งผ่านของวัสดุแตกต่างกัน รวมไปถึงความไม่สมบูรณ์แบบที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ เป็นต้น จะทำให้เกิดสนามสปินทอร์กที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า สนามคล้ายทอร์ก (field-like torque) หรือนอนอะเดียบัตติกทอร์ก (non-adiabatic spin torque หรือ τ_{FL}) ซึ่งเป็นทอร์กที่ทำให้แมกนีไทเซชันเคลื่อนที่วนรอบสนาม $\vec{B}_{\text{eff}} + \vec{B}_{\text{ST}}$ แสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$\tau_{FL} = -\frac{\gamma\hbar}{2eM_s V} \beta_s \hat{M} \times \hat{I}_s \quad (2.2)$$

เมื่อ β_s คือค่าคงที่บ่งบอกความแรงของสปินทอร์ก τ_{FL} เทียบกับ τ_S ซึ่งทอร์กประเภทนี้จะส่งผลให้แมกนีไทเซชันเคลื่อนที่ออกจากระนาบการเคลื่อนที่เดิมที่เกิดขึ้นจาก τ_S กล่าวคือ สปินทอร์ก

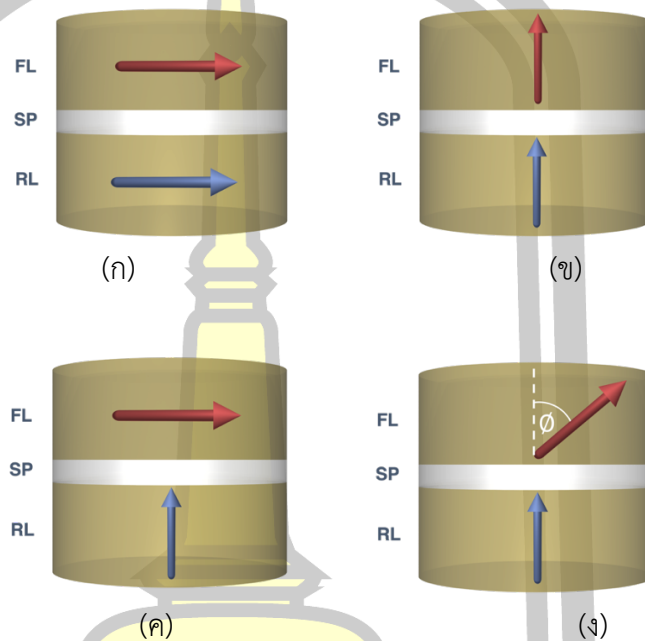
τ_{FL} นี้มีบทบาททำให้การเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนีไทเซชันเกิดการเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ และส่งผลต่อความถี่ของ STNO โดยทิศทางของสปินทอร์คดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 [36] โดยทั้งในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นที่มีสเปเซอร์เป็นวัสดุโลหะที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กหรือโครงสร้างสปีนวาล์วและโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นที่มีสเปเซอร์เป็นวัสดุประเภทฉนวนหรือโครงสร้างรอยต่อทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก MTJ สปินทอร์ค τ_{FL} จะมีค่าน้อยกว่าสปินทอร์ค τ_S [38][39] เช่น งานวิจัยของ M. A. Zimmer และคณะ เมื่อปี ค.ศ. 2004 ได้แสดงให้เห็นว่าความแรงของสปินทอร์ค τ_S มีค่ามากกว่า τ_{FL} ประมาณ 5.3 เท่า ในโครงสร้างสปีนวาล์ว Co/Cu/Co ที่อุณหภูมิ 4.2 K



รูปที่ 2.4 แสดงทิศทางของสนามสตรอนซอฟสกีทอร์ค τ_S และสนามคล้ายทอร์ค τ_{FL}

การค้นพบปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คซึ่งเป็นกลไกหลักในการทำงานของ STNO ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นในการศึกษาเชิงทฤษฎี เมื่อปี ค.ศ. 1996 โดย J. Slonczewski [1] และ L. Berger [23] และนำมาซึ่งการค้นพบการสร้างสัญญาณความถี่ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระในการศึกษาเชิงทดลอง [23][29] ทำให้ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของ STNO ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงทดลองอย่างกว้างขวาง โดยคุณสมบัติที่ถูกพัฒนาของ STNO ดังกล่าว มีหลายประการ โดยคุณสมบัติที่สำคัญประกอบไปด้วยขนาดของ STNO (size of STNO) ขนาดของกระแสที่ใช้กำเนิดสัญญาณ (threshold current) เวลาที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ (initial time) ความถี่ (frequency) ความกว้างของสัญญาณ (linewidth) กำลังขาออกของสัญญาณ (output power) และกำลังไฟฟ้า (power consumption) เป็นต้น เพื่อให้อุปกรณ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการแบ่งประเภทของ STNO ในปัจจุบันมีเกณฑ์หลากหลาย เช่น ลักษณะเชิงสถาปัตยกรรมของ STNO ประเภทของโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น ปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดสัญญาณ ลักษณะการเคลื่อนที่ของกลุ่มสปิน ลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน ฯลฯ สำหรับการแบ่งประเภทของ STNO ตามลักษณะการ

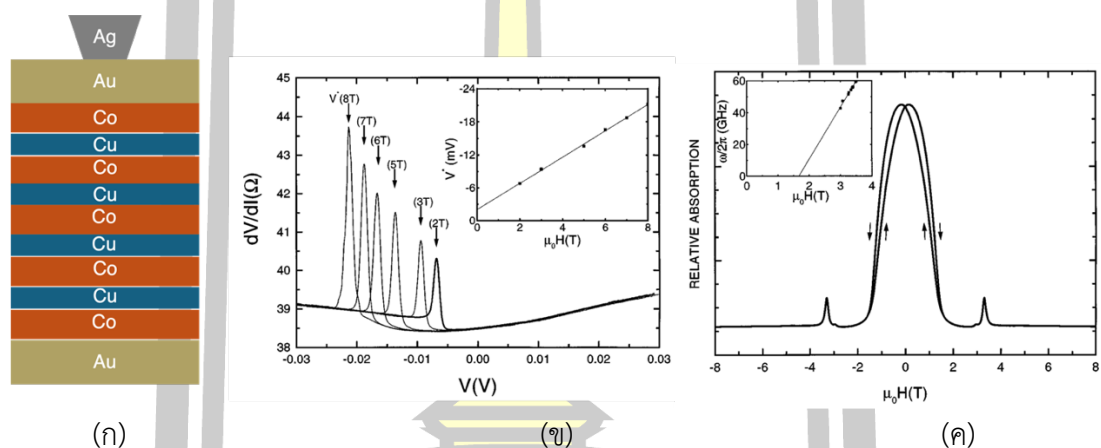
จัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก [28][40][41][42] ได้แก่ แบบขนาน (All in plane หรือ AIP STNO) แบบตั้งฉากทั้งหมด (All out-of plane หรือ AOP-STNO) แบบตั้งฉาก (Orthogonal หรือ O-STNO) และ แบบเอียง (tilted หรือ T-STNO) ดังรูปที่ 2.5(ก) ถึง (ง) ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 แสดงประเภทของ STNO ที่แบ่งประเภทตามการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันในชั้นอ้างอิง RL หรือชั้นพิน PL และชั้นอิสระ FL (ก) แบบขนาน (All in plane หรือ AIP STNO) (ข) แบบตั้งฉากทั้งหมด (All out-of plane หรือ AOP-STNO) (ค) แบบตั้งฉาก (Orthogonal หรือ O-STNO) และ (ง) แบบเอียง (tilted หรือ T-STNO) [28][40][41][42]

ในช่วงแรกของการศึกษาเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค STNO ทั้งในการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลอง โดยส่วนใหญ่อุปกรณ์ดังกล่าวมักจะเป็นโครงสร้างสปีนวาล์วที่ประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มบางของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุที่มีความเป็นโลหะ (FM/NM) หลายชั้นหรือโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น FM/NM/FM ที่มีชั้นสเปสเซอร์เป็นโลหะ เช่น Co/Cu/Co, Co/Cu/CoNi ฯลฯ และถูกออกแบบให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและชั้นพินมีมุมที่ขนานกัน (0° หรือ 180°) หรือ AIP-STNO ดังรูปที่ 2.5 (ก) โดยในปี ค.ศ. 1998 M. Tsoi และคณะได้ทำการศึกษาเชิงทดลองเพื่อทำความเข้าใจและพิสูจน์ทฤษฎีของปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้า (current-induced excitation) โดย J. Slonczewski เมื่อปี ค.ศ. 1996 เป็นครั้งแรก [11][29] โดยอาศัยโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น

Co/Cu ที่ เป็นโครงสร้างแบบ point contact ซึ่งจำลองได้ดังรูปที่ 2.6 (ก) โดยชั้นของ Co/Cu มีจำนวน 20-50 ชั้น โดยชั้นฟิล์มบางของวัสดุ Co มีความหนาอยู่ที่ 1.5 nm ขณะที่ชั้นฟิล์มบางของวัสดุ Cu มีความหนาอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 2.2 nm ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันโดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเนื่องจากปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance หรือ GMR) [43] และวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันดังกล่าวด้วยเครื่องวัดการสั่นพ้องของสปิน (electron spin resonance หรือ ESR)

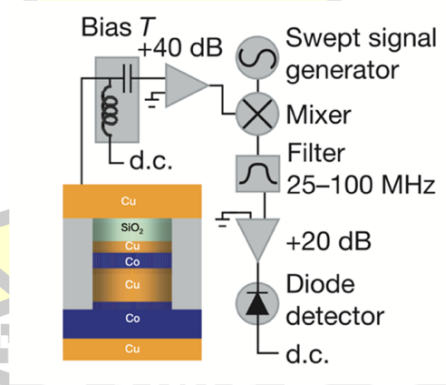


รูปที่ 2.6 (ก) แสดงโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น Co/Cu แบบ point contact (ข) กราฟแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V (V) และสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อความต้านทาน dV/dI และ (ค) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ (microwave absorption) และสนามแม่เหล็กภายนอกที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นพ้องของสปินหรือ ESR [29]

จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการไบอัสแรงดัน (bias voltage) และป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (applied magnetic field หรือ H) ให้แก่โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น Co/Cu กราฟแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V (V) และความต้านทาน dV/dI ดังรูปที่ 2.6 (ข) ได้แสดงให้เห็นว่าความต้านทานแปรผันตามแรงดัน V ในช่วง -5 ถึง -30 mV และสนามแม่เหล็กภายนอก H ในช่วง 2 ถึง 8 T โดยความต้านทานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่สนามแม่เหล็กภายนอก H ประมาณ 1.5 T ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น โดยความถี่ของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันทั้งโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 40 – 60 GHz ดังรูปที่ [2.6] (ค) จากการศึกษาทำให้สามารถยืนยันการเกิดปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คได้เป็นอย่างดี เนื่องจากที่ค่าแรงดันเท่ากับ 0 V หรือไม่มี

การไหลของกระแสอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นค่าความต้านทานจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

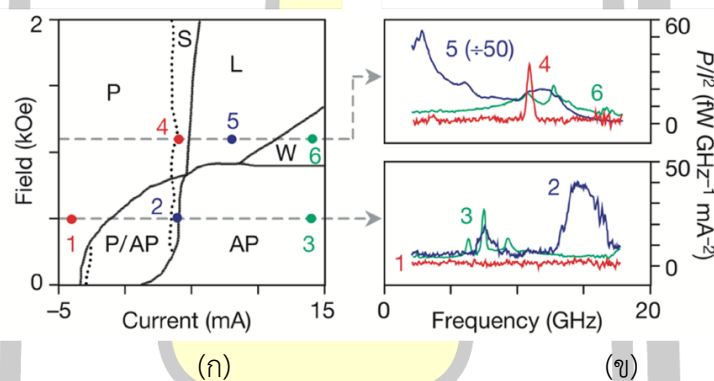
ต่อมาในปี ค.ศ. 2003 S. I. Kiselev และคณะ [10][11] ได้ทำการศึกษาสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันเนื่องจากปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คที่ค้นพบโดย J. Slonczewski จากการทดลองที่อุณหภูมิห้องด้วยวิธีการวัดทางไฟฟ้าโดยตรง (direct electrical measurement) เป็นครั้งแรกของ STNO เดี่ยว (individual nanomagnet) ที่มีโครงสร้างเป็นโครงสร้างแม่เหล็กหลายชั้น (magnetic multilayer structure) เป็นรูปร่างเป็นเสาขนาดระดับนาโน (nano-pillar) ที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงรี ขนาด $130 \text{ nm} \times 70 \text{ nm}$ ที่ประกอบไปด้วยชั้น Cu(80 nm)/Co(40 nm)/Cu(10 nm)/ Co (3 nm)/Cu (2 nm)/ Pt (30 nm) ดังรูปที่ 2.7 (ตัวเลขที่อยู่ในวงเล็บคือความหนาของชั้นวัสดุแต่ละชั้น) โดยมี Cu ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด (electrode) ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่โครงสร้างของ STNO นอกจากนี้ชั้นวัสดุดังกล่าวยังทำหน้าที่เป็นชั้นสเปซเซอร์ที่ทำหน้าที่ป้องกันอันตรกิริยาทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร Co โดยแมกนีไทเซชันของทั้งชั้นพินและชั้นอิสระจะมีทิศทางไปในทางเดียวกันและขนานไปกับระนาบของชั้นวัสดุ ซึ่งโครงสร้างของ STNO ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวนี้ว่า all in-plane STNO (AIP-STNO) ขณะที่ซิลิกอนออกไซด์ มีหน้าที่ป้องกันสนามแม่เหล็กรบกวนที่เกิดจากชั้นวัสดุแม่เหล็กหรือจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กอื่น ๆ มารบกวนสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในอิสระ



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นของ STNO และวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในงานวิจัยเชิงทดลองและทฤษฎีของ S. I. Kiselev และคณะ [10]

สำหรับการวัดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างดังกล่าวจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเชิงแม่เหล็กภายในโครงสร้าง โดยอาศัยวงจรไฟฟ้า heterodyne mixer circuit ดังรูปที่ 2.7 และเพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันขึ้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิต (static magnetic field หรือ H) ในช่วง $0 - 2 \text{ kOe}$ ($0 - 0.2 \text{ T}$) เอียงทำ

มุมเล็กน้อยประมาณ 9 องศา กับแกนง่ายเพื่อให้แมกนีไทเซชันเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนง่ายของชั้นอิสระซึ่งอยู่แนวเดียวกับระนาบของชั้นวัสดุ และป้อนกระแสไฟฟ้า (electrical current หรือ I) เข้าสู่โครงสร้างของ STNO ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ พบว่า ผลของขนาดกระแสไฟฟ้า I และสนามแม่เหล็กภายนอก H สามารถทำให้เกิดการกระตุ้นเชิงแม่เหล็ก (magnetic excitation) ในหลายสถานะ ได้แก่ สถานะที่แมกนีไทเซชันเกิดการเรียงตัวแบบขนาน (parallel orientation หรือ P) สถานะที่แมกนีไทเซชันมีสองสถานะ (parallel/antiparallel bistability หรือ P/AP) สถานะที่แมกนีไทเซชันเกิดการเรียงตัวแบบทิศตรงข้ามกัน (anti-parallel orientation หรือ AP) สถานะการเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนีไทเซชันที่แอมพลิจูดขนาดเล็ก (small-amplitude precessional หรือ S) และสถานะการเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนีไทเซชันที่แอมพลิจูดขนาดใหญ่ (large-amplitude precessional หรือ L) ดังรูปที่ 2.8 (ก)

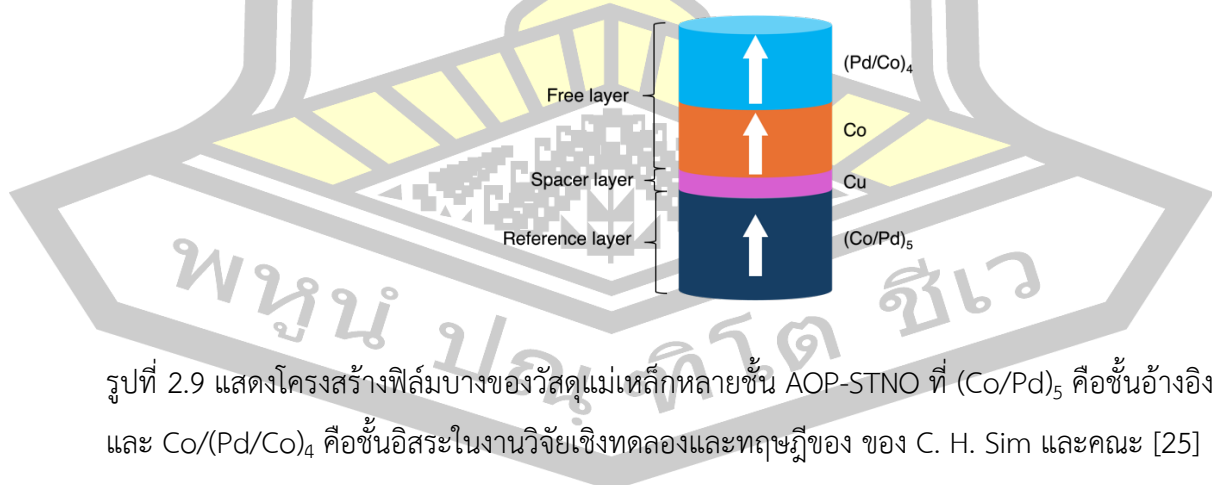


รูปที่ 2.8 (ก) แสดงสถานะที่แมกนีไทเซชันเกิดการเรียงตัวแบบขนาน (P) สถานะที่แมกนีไทเซชันสองสถานะ (P/AP) สถานะที่แมกนีไทเซชันเกิดการเรียงตัวแบบทิศตรงข้ามกัน (anti-parallel orientation หรือ AP) สถานะการเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนีไทเซชันที่แอมพลิจูดขนาดเล็ก (S) และสถานะการเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนีไทเซชันที่แอมพลิจูดขนาดใหญ่ (L) ภายในโครงสร้าง AIP-STNO ที่ประกอบไปด้วยชั้น Cu(80 nm)/Co(40 nm)/Cu(10 nm)/ Co (3 nm)/Cu (2 nm)/Pt (30 nm) (ข) ผลของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายนอกต่อความถี่และกำลังขาออกของสัญญาณ

โดยที่สถานะการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายนอกที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้างของ STNO โดยประเด็นสำคัญที่น่าสนใจคือ เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าจากชั้นพินไปชั้นอิสระ (กระแสอิเล็กตรอนไหลจากชั้นอิสระไปยังชั้นพิน) แต่ไม่ได้ทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก ดังรูปที่ 2.8 (ก) จะไม่สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบวนรอบของ

แมกนีไทเซชันทั้งแบบ S และ L เนื่องจากกระแสสปินที่ผ่านจากชั้นอิสระไปชั้นพินไม่คงที่ เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้นพินเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางตลอดเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้า งานวิจัยจากคณะของ M. Tsoi และ S. I. Kiselev ได้แสดงให้เห็นว่า การทำให้เกิดสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันจำเป็นต้องอาศัยการส่งผ่านสปินทอร์คด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างแม่เหล็กและต้องอาศัยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก โดย STNO ประเภทนี้มักจะต้องอาศัยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (~ 1 T) [10][11][18] [44][24][14][45][46] เพื่อให้แมกนีไทเซชันออกจากระนาบของชั้นวัสดุ สามารถสร้างและรักษาความเสถียรของสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันทำให้ AIP-STNO ไม่เหมาะสมที่จะถูกนำไปใช้กับอุปกรณ์จริง

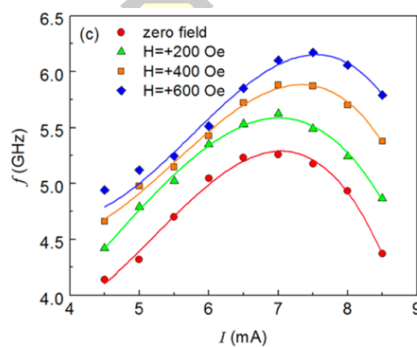
ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาให้ STNO ใช้สนามแม่เหล็กภายนอกลดลง (low-field operation) โดยพัฒนา STNO ที่มีลักษณะการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันที่ตั้งฉากกับระนาบของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกทุกชั้นหรือ AOP-STNO แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (ข) และ STNO ที่มีแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระตั้งฉากกันหรือ O-STNO แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (ค) ในงานวิจัยของ C. H. Sim และคณะ [25] ในปี ค.ศ. 2012 ได้ทำการศึกษาเชิงทฤษฎีและการทดลองเพื่อศึกษาผลของขนาดกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายนอกต่อความสามารถในการปรับเปลี่ยนความถี่ (frequency tunability) และศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ AOP-STNO ต่อโหมดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันหรือโหมดของคลื่นสปิน (spin wave mode) โดยใช้โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กหลายชั้นแบบทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 nm และประกอบไปด้วย Au/Pd (3)/[Co (0.3 nm)/Pd (0.8 nm)] \times 5/Co (0.6 nm)/Cu (2 nm)/Co (3 nm)/ [Pd (0.8 nm)/Co (0.5nm)] \times 4/Au เมื่อเลขในวงเล็บคือความหนาของแต่ละชั้น โดย (Co/Pd)₅ คือชั้นอ้างอิงและ Co/(Pd/Co)₄ คือชั้นอิสระ ดังรูปที่ 2.9



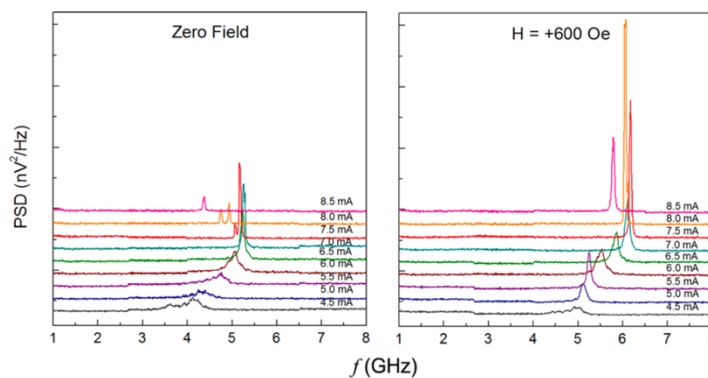
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น AOP-STNO ที่ (Co/Pd)₅ คือชั้นอ้างอิงและ Co/(Pd/Co)₄ คือชั้นอิสระในงานวิจัยเชิงทดลองและทฤษฎีของ ของ C. H. Sim และคณะ [25]

ผลการศึกษาพบว่า เมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของชั้นวัสดุ จะทำให้แมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่ด้วยความถี่อยู่ในช่วง 4.0 ถึง 6.5

GHz ดังรูปที่ 2.10 (ก) โดยความถี่ที่เกิดขึ้นของ AOP-STNO มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้าง (non-linear frequency behavior) และความถี่แปรผันโดยตรงต่อสนามแม่เหล็กภายนอกที่ขนาดกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งเช่นเดียวกันกับ AIP-STNO แต่อย่างไรก็ตามความถี่ดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ที่สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าต่ำ (low field) หรือสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ (zero field) เช่นกราฟเส้นจุดกลมดังรูปที่ 2.10 (ก) และ 2.10 (ข) ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจาก AIP-STNO ดังรูปที่ 2.6 (ข) เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของกำลัง (power spectral density หรือ PSD) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเข้มของสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้น พบว่า เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกค่า PSD จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันมีเสถียรภาพมากขึ้น (steady oscillation) ดังรูปที่ 2.6 (ค)



(ก)



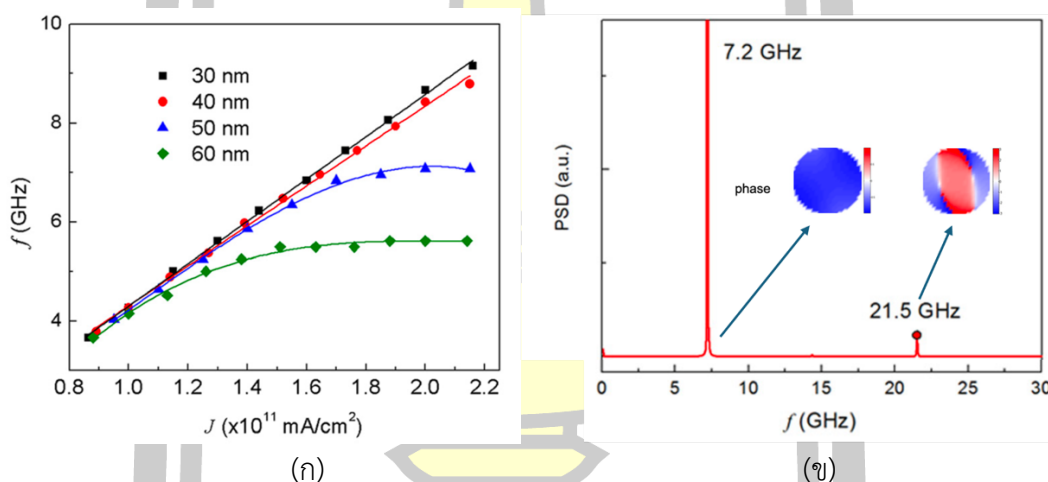
(ข)

(ค)

รูปที่ 2.10 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายนอกต่อความถี่ และความหนาแน่นของกำลัง (power spectral density หรือ PSD) ของสัญญาณความถี่ที่ค่าสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ (ข) และสนามแม่เหล็กภายนอกไม่เป็นศูนย์ (ค)

นอกจากนี้ในงานวิจัยดังกล่าวยังได้ทำการศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (30 – 60 nm) ของ STNO ต่อความถี่และโหมดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน ดังรูปที่

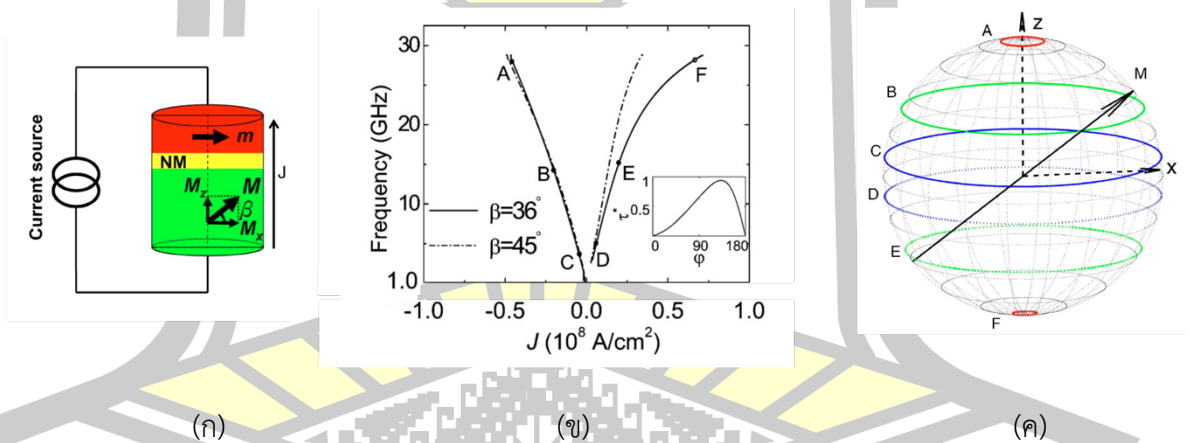
2.11 โดยใช้แบบจำลองแม่เหล็กระดับจุลภาค (micromagnetic simulation) จากการศึกษ พบว่า ที่ช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ $J = 0.8 - 2.2 \text{ mA/cm}^2$ STNO ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 40 nm ความถี่ (f) จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) (linear frequency) มีความถี่อยู่ในช่วงประมาณ $f = 3.0 - 10.0 \text{ GHz}$ ขณะที่ STNO ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 40 nm ความถี่จะมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีความถี่อยู่ในช่วงประมาณ $f = 3.0 - 7.0 \text{ GHz}$ ดังรูปที่ 2.11 (ก) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงจะทำให้ช่วงในการสร้างสัญญาณความถี่ได้กว้างขึ้น โดยสาเหตุที่ทำให้แนวโน้มของความถี่ที่แตกต่างกันเกิดขึ้นเนื่องจากที่เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 40 nm แมกนิโทเซชันในแต่ละบริเวณของ STNO เกิดการเคลื่อนที่แบบไม่พร้อมเพรียงกัน (incoherent oscillation) ทำให้มีเฟสของการเคลื่อนที่หลายเฟส (higher-order spin-wave mode) ดังรูปที่ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.11 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ต่อความถี่ (f) ของ STNO ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30-60 nm และ (ข) สเปกตรัมของการเคลื่อนที่ของแมกนิโทเซชันของ STNO มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 nm

แต่อย่างไรก็ตามช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นใน AOP-STNO ยังอยู่ในช่วงที่แคบ กำลังขาออกของสัญญาณต่ำและมีกำลังไฟฟ้าสูงและที่สำคัญ STNO ทุกประเภทที่กล่าวมา ยังคงต้องทำการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกเพื่อให้แมกนิโทเซชันเอียงออกจากทิศทางเดิมและรักษาความเสถียรของการเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนิโทเซชัน เพื่อให้อุปกรณ์สามารถสร้างความถี่ได้หลากหลายขึ้น โดยไม่ต้องป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกช่วยจึงได้มีการพัฒนาให้ STNO มีมุมของแมกนิโทเซชันเอียงในชั้นอ้างอิงหรือชั้นอิสระหรือ T-STNO โดยปี ค.ศ. 2008 และ ค.ศ. 2009 Zhou และคณะ [26][27] ได้ใช้แบบจำลองแม่เหล็กระดับจุลภาคและสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต-สลอนซอวสกี (Landau–Lifshitz–Gilbert–Slonczewski equation หรือ LLGS) เพื่ออธิบายผลของสปินทอร์คต่อ

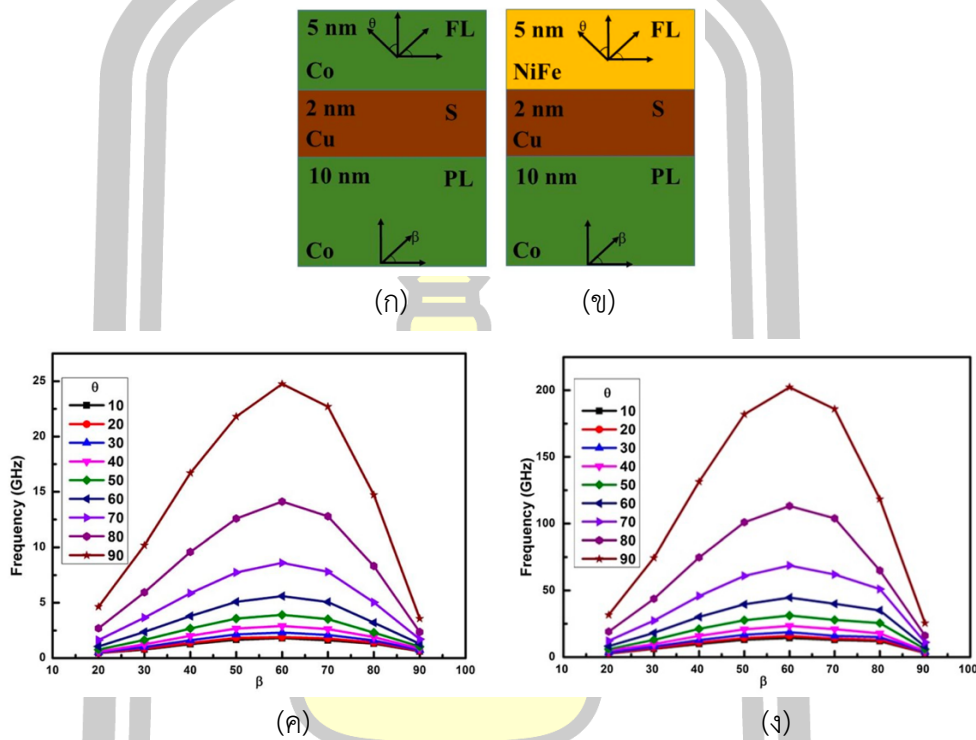
การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางบวก (ชั้นพินไปชั้นอิสระ) และลบ (ชั้นอิสระไปชั้นพิน) ในโครงสร้างของ T-STNO รูปร่างทรงรีที่มีพื้นที่หน้าตัด $130 \times 70 \text{ nm}^2$ โดยชั้นพินเป็นโพลาริเซชันแบบเอียง (tilted polarizer) ที่มีแมกนีไทเซชัน (M) เริ่มต้นทำมุมเอียง $\beta = 36^\circ$ และ 45° ในระนาบ xz โดยมุมดังกล่าวอ้างอิงมาจากทิศทางแกนง่ายของ FePt [47] จากการทดลอง มีความหนาอยู่ที่ 20 nm ขณะที่ชั้นอิสระที่มีทิศทางของแมกนีไทเซชัน (m) ขนานกับระนาบของชั้นวัสดุ มีความหนาอยู่ที่ 3 nm โดยมีชั้นวัสดุนอนแมกเนติก Cu คั่นระหว่างชั้นวัสดุทั้งสอง ดังรูปที่ 2.12 งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าโพลาริเซชันแบบเอียง สามารถสร้างสัญญาณความถี่อยู่ในช่วงหลากหลายกว่าที่สนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับศูนย์และอุณหภูมิเท่ากับ 0 เคลวิน เมื่อเทียบกับ AIP-STNO AOP-STNO และ O-STNO โดยมีความถี่อยู่ในช่วง 1.0 ถึง 30.0 GHz ดังรูปที่ 2.12 (ข) และแปรผันตรงมุมของการเคลื่อนที่แบบวนรอบ 2.12 (ค) ซึ่งกรณีที่ป้อนกระแสไฟฟ้าไหลจากชั้นอิสระไปยังชั้นพิน ($J < 0$) หรือกระแสสปีนเคลื่อนที่จากชั้นพินไปยังชั้นอิสระ ไม่มีความแตกต่างระหว่างช่วง J ที่ใช้ในการสร้างความถี่ ขณะที่กรณีป้อนกระแสไฟฟ้าไหลจากชั้นพินไปยังชั้นอิสระ ($J > 0$) หรือกระแสสปีนเคลื่อนที่จากชั้นอิสระไปยังชั้นพิน ช่วงกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างความถี่ที่มุม $\beta = 36^\circ$ อยู่ที่ $10 - 100 \text{ MA/cm}^2$ และมุม $\beta = 45^\circ$ อยู่ที่ $10 - 250 \text{ MA/cm}^2$



รูปที่ 2.12 (ก) แสดงโครงสร้างและลักษณะการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันใน T-STNO ในงานวิจัยของ Zhou และคณะ [26][27] (ข) ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J ต่อความถี่และผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระ (φ) ต่อสปีนทอร์ค (normalized spin torque หรือ τ^*) (ค) ตำแหน่งการเคลื่อนที่วนรอบของแมกนีไทเซชันที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2019 H. Bhoomeswaran และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาเชิงทฤษฎีเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและศึกษาผลของการปรับมุมของแมกนีไทเซชันในชั้นพิน (β) และชั้นอิสระ (θ) ในช่วง $0^\circ - 90^\circ$ ต่อความถี่ในโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่ชั้นพินและชั้นอิสระ

เป็นวัสดุเดียวกัน (homogeneous) เป็น Co และโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่ชั้นพินและชั้นอิสระเป็น Co และ NiFe ตามลำดับ (heterogeneous) ดังรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยโครงสร้าง homogeneous สามารถสร้างสัญญาณความถี่ในช่วงไม่เกิน 24.75 GHz ขณะที่ โครงสร้าง heterogeneous สามารถสร้างสัญญาณความถี่ได้สูงถึง 202.3 GHz ดังรูปที่ 2.13 (ค) และ (ง) ที่มุม $\theta = 90^\circ$ และ $\beta = 60^\circ$



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่ชั้นพินและชั้นอิสระเป็น (ก) วัสดุเดียวกัน (homogeneous) และ (ข) วัสดุแตกต่างกัน (heterogeneous) (ค) และ (ง) แสดงผลของมุมของแมกนีไทเซชันในชั้นพิน (β) และชั้นอิสระ (θ) ในช่วง $0^\circ - 90^\circ$ ในโครงสร้าง homogeneous และ heterogeneous ตามลำดับ

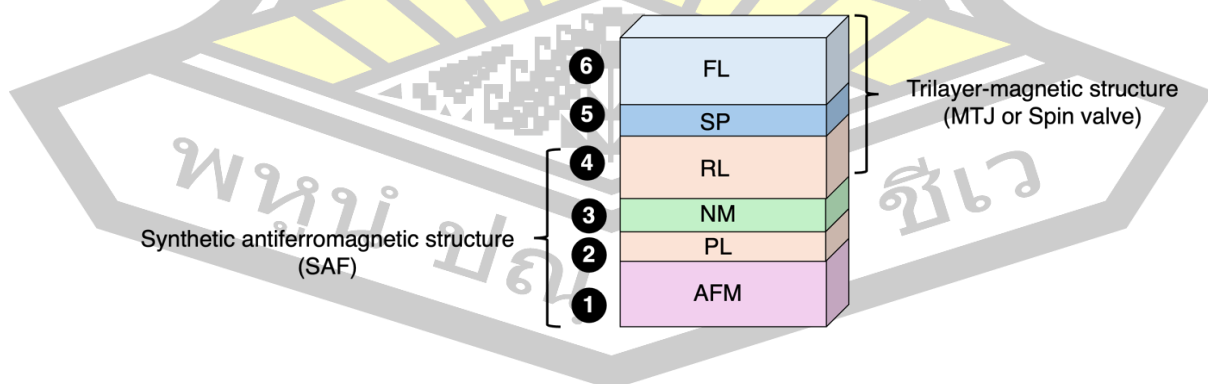
จากหัวข้อการค้นพบและวิวัฒนาการของเครื่องกำเนิดสัญญาณขนาดระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค ของการพัฒนาเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค STNO ในช่วงแรกมักถูกออกแบบให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและชั้นพินแบบขนาน (AIP-STNO) แบบตั้งฉากทั้งหมด (AOP-STNO) และแบบตั้งฉาก (O-STNO) ซึ่งมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกที่สูง (~ 1 T) เพื่อรักษาความเสถียรของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน ช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแคบ ต่อมาจึงได้มีการเสนอแนวคิดเพื่อพัฒนา STNO ให้มีลักษณะการจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันแบบเอียง (T-STNO) ทำให้สามารถ

สร้างควมถี่ได้หลากหลายมากขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกช่วย (zero field operation) แต่อย่างไรก็ตาม T-STNO ยังคงมีกำลังไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากต้องป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูง ($\sim 10^{11}$ A/m²) ในการสร้างควมถี่ นอกจากนี้โครงสร้างของ STNO ทั้งหมดที่กล่าวมา มักจะใช้โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น FM/NM/FM ที่มีชั้นสเปซเซอร์เป็นโลหะ) มีกำลังขาออกของสัญญาณต่ำ (sub-nW)

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้มีการพัฒนาให้โครงสร้าง MTJ ที่มีชั้นวัสดุเป็น CoFeB/MgO/CoFeB STNO มีลักษณะการจัดเรียงตัวแบบเอียง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการสร้างสัญญาณย่านไมโครเวฟที่หลากหลายและสามารถรักษากำลังในการส่งสัญญาณสูงที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการจัดเรียงของแมกนีไทเซชันแบบอื่น ๆ โดย STNO ที่นิยมศึกษาในเชิงทดลองมักจะเป็น เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าว MgO สามารถเพิ่มกำลังในการส่งสัญญาณในระดับไมโครวัตต์ และมีความเสถียรทางความร้อนสูง

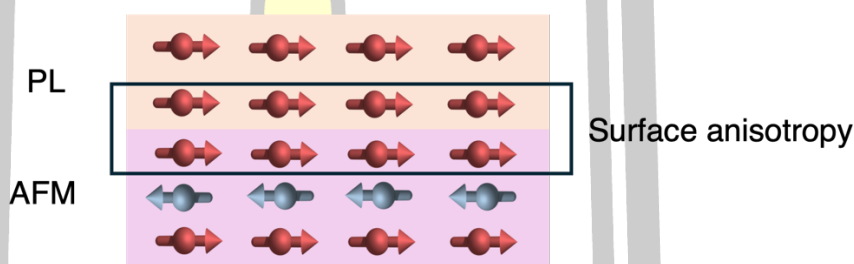
2.2 การออกแบบเครื่องกำเนิดสัญญาณ STNO

โครงสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณขนาดระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค จะประกอบไปด้วยโครงสร้างฟิล์มบางของวัสดุหลายชั้น AFM/PL/NM/RL/SP/FL ได้แก่ ชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (anti-ferromagnetic material หรือ AFM) ชั้นพิน (pinned layer หรือ PL) ชั้นวัสดุนอนแมกเนติก (non-magnetic หรือ NM) ชั้นอ้างอิง (reference layer หรือ RL) ชั้นสเปซเซอร์ (spacer layer หรือ SP) และชั้นอิสระ (free layer หรือ FL) โดยที่ชั้นพิน ชั้นอ้างอิงและชั้นอิสระ จะเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material หรือ FM) ขณะที่ชั้นวัสดุนอนแมกเนติกและชั้นสเปซเซอร์ จะใช้วัสดุที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งเป็นได้ทั้งวัสดุโลหะที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กหรือวัสดุที่มีความเป็นฉนวน แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณ STNO ซึ่งประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กหลายชั้น AFM/PL/NM/RL/SP/FL

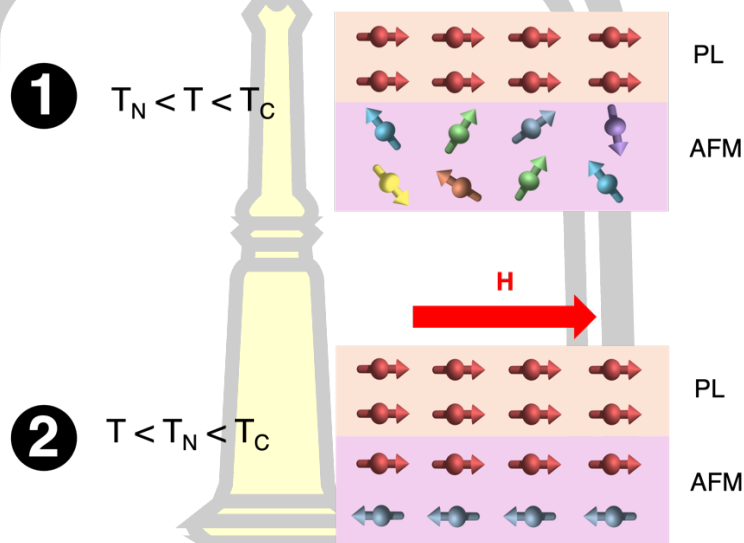
โครงสร้างฟิล์มบางสี่ชั้นแรก AFM/PL/NM/RL (ลำดับที่ 1 - 4) ถูกเรียกว่า โครงสร้างแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรสังเคราะห์ (synthetic antiferromagnetic structure หรือ SAF) ซึ่งทำหน้าที่เป็นทิศอ้างอิงให้กับแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและมีส่วนช่วยลดปัญหาของสนามแม่เหล็กรบกวน (stray field) ที่เกิดจากชั้นพินต่อแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ [47] โดยในโครงสร้างแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรสังเคราะห์นี้ ชั้นแรกจะเป็นชั้นของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติก AFM ที่ทำหน้าที่ในการเหนี่ยวนำและรักษาทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก เนื่องจากวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะมีพลังงานแอนไอโซโทรปีที่สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก โดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias) ที่เกิดจากพลังงานแอนไอโซโทรปีพื้นผิว (surface anisotropy) หรือปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนที่บริเวณระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็ก AFM และ PL [12] ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนที่บริเวณระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็ก AFM และ PL ซึ่งเป็นวัสดุ FM

การที่จะทำให้แมกนีไทเซชันหรือโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุดังกล่าวเกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างกัน จำเป็นต้องลดพลังงานภายในของวัสดุแม่เหล็กทั้งสองโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานหลักที่ทำให้เกิดสภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ อย่างพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปิน (exchange interaction energy) และพลังงานแอนไอโซโทรปี (anisotropy energy) ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการทำให้พลังงานความร้อนและป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกให้แก่ชั้นวัสดุ AFM และ PL ในขนาดและเวลาที่เหมาะสม [48] โดยขั้นตอนที่ 1 ของกระบวนการนี้สามารถทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุดังกล่าวในช่วง $T_N < T < T_C$ ดังรูปที่ 2.16 (บน) โดย T_N คือ อุณหภูมิเนล (Néel temperature) เป็นอุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้วัสดุแม่เหล็กเปลี่ยนสภาพจากแอนติเฟอร์โรแมกเนติกไปเป็นพาราแมกเนติก ขณะที่ T_C คือ อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) เป็นอุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้วัสดุแม่เหล็กเปลี่ยนสภาพจากเฟอร์โรแมกเนติกไปเป็นพาราแมกเนติก เนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิวิกฤตดังกล่าวจะทำให้เกิดสูญเสียพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กระหว่างอะตอม ที่ช่วงอุณหภูมิ $T_N < T < T_C$ นี้เป็น

ช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเนลแต่ยังคงต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ในสภาวะดังกล่าว โมเมนต์แม่เหล็กในชั้นวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่มีอุณหภูมิสูงกว่า T_N จะสูญเสียคุณสมบัติแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรและเข้าสู่สภาวะพาราแมกเนติก ซึ่งทำให้โมเมนต์แม่เหล็กในชั้นวัสดุนี้มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม แต่อย่างไรก็ตาม โมเมนต์แม่เหล็กภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร จะยังคงจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากผลของพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินและพลังงานแอนไอโซโทรปี

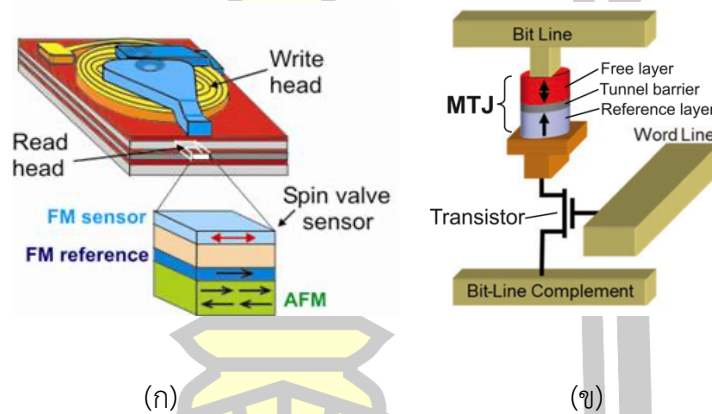


รูปที่ 2.16 แสดงกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน

ในขั้นตอนที่ 2 จะทำการลดอุณหภูมิลงมาในช่วง $T < T_N < T_C$ พร้อมทั้งทำการการบิดอนสนามแม่เหล็กภายนอก H ในทิศทางที่สอดคล้องกับแนวแกนง่ายของชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก เพื่อให้โมเมนต์แม่เหล็กในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กดังกล่าวอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเนลและคูรี ทำให้ที่สถานการณ์นี้ โมเมนต์แม่เหล็กภายในชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจากสภาวะเดิมที่มีทิศทางแบบสุ่มหรือไม่เป็นระเบียบจะกลับไปมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ดังรูปที่ 2.16 (ล่าง) ทำให้เกิดพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กของชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก FM ของชั้นพินกับชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก AFM ซึ่งมีพลังงานแอนไอโซโทรปีสูง ที่บริเวณรอยต่อของทั้งสองวัสดุนี้ ซึ่งนั่นหมายความว่า หลังจากที่เกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนที่บริเวณรอยต่อของ AFM/PL แล้ว การที่จะเพิ่มพลังงานจากสนามแม่เหล็กภายนอก พลังงานความร้อนหรือพลังงานอื่น ๆ เพื่อให้แมกนิไทเซชันภายในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางหรือทำให้กลายเป็นวัสดุแม่เหล็กพาราแมกเนติก (ผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กหรือแมกนิไทเซชันเป็นศูนย์) จำเป็นต้องใช้สนามที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับระหว่างก่อนและหลังเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน [48]

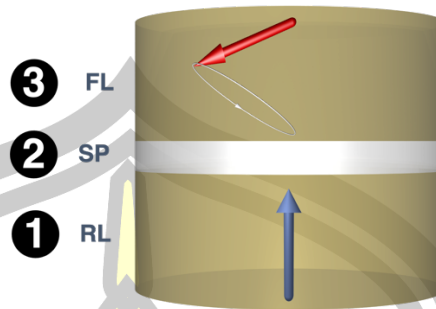
โดยชั้นที่ถัดจาก AFM/PL คือชั้นวัสดุอนแมกเนติก NM โดยถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อช่วยทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน Rudermann–Kittel–Kasuya–Yosida (RKKY) ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนทางอ้อม (indirect exchange interaction) ระหว่างชั้น PL และชั้น RL [47] เพื่อทำให้เกิดการลดสนามแม่เหล็กหักล้างระหว่าง PL และชั้น FL ซึ่งส่งผลต่อสัญญาณที่เกิดขึ้นของ STNO

ขณะที่สามชั้นสุดท้าย RL/SP/FL (ลำดับที่ 4 - 6) ดังรูปที่ 2.14 คือ โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น (trilayer magnetic structure) ที่ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณของ STNO ที่ประกอบไปด้วยฟิล์มบางของชั้น RL และ FL ซึ่งเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นสเปสเซอร์ SP หนึ่งชั้น ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักเช่นเดียวกันกับอุปกรณ์อย่าง หัวอ่านข้อมูล (read head) ของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กอย่างฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [49] และหน่วยการเข้าถึงข้อมูลแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค (STT-magnetic random access memory หรือ STT-MRAM) [50] ที่อยู่ในอุปกรณ์ประมวลผลทางคอมพิวเตอร์ทั่วไป ฯลฯ ดังรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นในหัวอ่านข้อมูล (ก) [49] และ STT-MRAM (ข) [50]

โดยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก FM สองชั้นดังกล่าวมีคุณสมบัติของการจัดเรียงตัวหรือการเคลื่อนที่ของโมเมนต์แม่เหล็กรวมต่อปริมาตรของวัสดุหรือที่เรียกว่า แมกนิไทเซชัน (magnetization) ที่แตกต่างกัน โดยชั้น RL (ชั้นที่ 1 ดังรูปที่ 2.18) จะถูกทำให้มีทิศทางของแมกนิไทเซชันคงที่เนื่องจากปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน RKKY ทำให้แมกนิไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากเมื่อมีสนามภายนอกมากระทำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิงสัญญาณที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างและชั้น FL (ชั้นที่ 3 ดังรูปที่ 2.18) จะมีแมกนิไทเซชันที่พร้อมจะเกิดเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อมีแรงหรือสนามภายนอกมากระทำ ทำให้ชั้นนี้มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการตรวจจับ [6] และสร้างสัญญาณ [2][10] ของ STNO



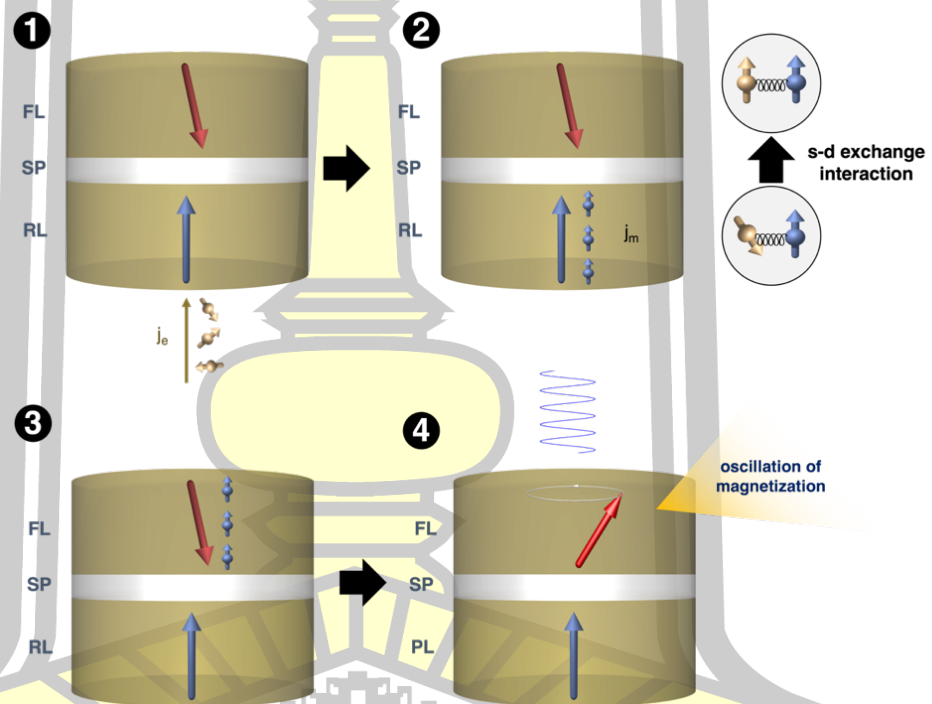
รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นและแมกนิโทเซชันของ STNO

ขณะที่ชั้น SP (ชั้นที่ 3 ดังรูปที่ 2.18) ที่คั่นระหว่างชั้น PL และ FL จะทำหน้าที่ในการป้องกันอันตรกิริยาทางแม่เหล็กระหว่างชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก สำหรับวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นชั้น SP แบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ กรณีที่โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่มีชั้น SP เป็นวัสดุนอนแมกเนติก NM เช่น ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) เป็นต้น เราจะเรียกโครงสร้างนี้ว่า สปินวาล์ว (spin valve) ขณะที่โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่มีชั้น SP เป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวน (insulator หรือ IS) ถูกเรียกว่า โครงสร้างรอยต่อทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก (magnetic tunnel junction หรือ MTJ) เช่น อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (AlO_2) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น ซึ่งความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าว ย่อมส่งผลต่อพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือการส่งผ่านสปินจากชั้น RL ไปยังชั้น FL รวมถึงความต้านทานเชิงแม่เหล็ก (magnetoresistance หรือ MR) ที่เกิดขึ้นโครงสร้างของ STNO โดยการทำงานของออสซิลเลเตอร์ประเภทนี้ จำเป็นต้องป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านโมเมนตัมเชิงมุมของสปิน (spin angular momentum) [1] หรือปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คจากชั้น RL ไปสู่ชั้น FL โดยกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวมีลำดับ ดังนี้

- 1) เมื่อทำการป้อนกระแสอิเล็กตรอนที่ประกอบไปด้วยสปินที่มีทิศทางแบบสุ่มหรือกระแสสปินที่ยังไม่โพลาไรซ์ (unpolarized spin current หรือ j_e) เข้าสู่ชั้น RL (ชั้นตอนที่ 1 ดังรูปที่ 2.19) จะทำให้สปินที่ถูกป้อนเข้ามาและแมกนิโทเซชันภายในชั้น RL เกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d (s-d exchange interaction) และทำให้เกิดทอร์คระหว่างกันขึ้น ซึ่งเกิดจากการบรรจุไม่เต็มในออร์บิทัล 3d (half-filled orbital) และ

แถบพลังงานของออร์บิทัล 3d และ 4s ของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกซ้อนทับกัน ทำให้สปินที่ถูกป้อนเข้ามาดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามทิศของแมกนีไทเซชันในชั้น PL เรียกกระแสที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระแสสปินโพลารไรซ์ (spin polarized current หรือ j_m) (ขั้นตอนที่ 2 ดังรูปที่ 2.19)

- 2) จากนั้นกระแสสปินโพลารไรซ์ j_m ดังกล่าวจะเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้น SP และผ่านไปยังชั้น FL (ขั้นตอนที่ 3 ดังรูปที่ 2.19) จะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d ขึ้นอีกครั้ง และเมื่อกระแสสปินโพลารไรซ์ที่มีค่าเหมาะสมจะทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น FL เกิดการกวัดแกว่ง และทำให้เกิดสัญญาณขึ้น (ขั้นตอนที่ 4 ดังรูปที่ 2.19)

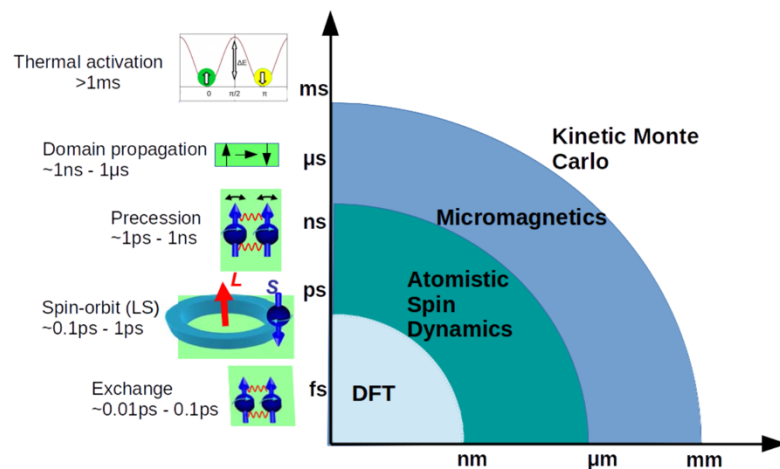


รูปที่ 2.19 แสดงกระบวนการการเกิดปรากฏการณ์สปินทอร์คของเครื่องกำเนิดสัญญาณ STNO

โดยการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นในชั้นอิสระของ STNO นอกเหนือจากจะเกิดขึ้นจากการป้อนกระแสไฟฟ้า ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของปริมาณดังกล่าว เช่น สนามแม่เหล็กภายนอก อุณหภูมิ คุณสมบัติทางแม่เหล็กและการนำไฟฟ้าของวัสดุ เป็นต้น ซึ่งการพิจารณาผลของปัจจัยต่างๆ ต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันสามารถทำได้โดยการอาศัยสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation) หรือสมการ LLG ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.3 แบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมและสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation หรือ LLG) กับการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ STNO

การศึกษาคุณสมบัติและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุแม่เหล็กเพื่อพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์จริงในปัจจุบัน จำเป็นที่จะต้องอาศัยทั้งการวิจัยเชิงทดลอง (experiment study) และการศึกษาเชิงทฤษฎี (theoretical study) สำหรับการวิจัยเชิงทฤษฎีนั้นมีบทบาทที่สำคัญอย่างมากในการช่วยบอกแนวทางการศึกษาและลดงบประมาณในการวิจัยเชิงทดลองรวมถึงอธิบายพฤติกรรมบางอย่างที่การวิจัยเชิงทดลองไม่สามารถอธิบายได้ ซึ่งปัจจุบันในการศึกษาปรากฏการณ์ในวัสดุแม่เหล็กในเชิงทฤษฎีมักจะอาศัยแบบจำลองทางฟิสิกส์อยู่สามประเภทหลัก โดยแบ่งตามขนาด (length scale) และช่วงเวลา (time scale) [51][52] ที่ใช้ในการพิจารณา ได้แก่ การคำนวณแบบ ab-initio (ab-initio calculation) แบบจำลองสปินในระดับอะตอม (atomistic spin models) และแบบจำลองแม่เหล็กระดับจุลภาค (micromagnetic model) ทั้งนี้เนื่องจากในแต่ละระดับขนาดของวัสดุและช่วงเวลาที่แตกต่างกันจะส่งผลต่ออันตรกิริยาทางแม่เหล็กที่แตกต่างกันด้วย ดังภาพที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงขนาด (length scale) และช่วงเวลา (time scale) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์ของวัสดุแม่เหล็ก [51][52]

สำหรับแบบจำลองที่อาศัยการคำนวณแบบ ab-initio มีประโยชน์อย่างมากในการทำนายคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กในระดับหลักหรืออะตอม จากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนตามหลักการของกลศาสตร์ควอนตัมโดยอาศัยฟังก์ชันทฤษฎีความหนาแน่น (Density Functional Theory หรือ DFT) เช่น ค่าปริพันธ์ของปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนของสปินที่อยู่ใกล้กัน (exchange interactions) ความหนาแน่นสถานะของสปินขึ้นและสปินลง (density of state of spin-up and spin-down)

และขนาดของโมเมนต์แม่เหล็ก (magnitude of magnetic moment) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองประเภทนี้ยังมีข้อจำกัดในการพิจารณาข้อบกพร่องของโครงสร้างวัสดุ ขณะเดียวกันมีความยุ่งยากอย่างมากในการพิจารณาคูสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่อุณหภูมิมากกว่า 0 K ใช้เวลาในการคำนวณรวมถึงใช้หน่วยประมวลผลข้อมูลอย่างมหาศาลและที่สำคัญไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการศึกษาการทำงานของอุปกรณ์จริงได้

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติและพฤติกรรมภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจึงนิยมใช้แบบจำลองแม่เหล็กระดับจุลภาค (ระดับไมโครเมตรถึงมิลลิเมตร) เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพิจารณาปรากฏการณ์อย่างการเคลื่อนที่ของกำแพงโดเมน (domain wall motion) พลวัตของแมกนีไทเซชัน (magnetization dynamics) และสปินออร์บิตทอร์ก (spin-orbit torque หรือ SOT) เป็นต้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งในอุปกรณ์ทางแม่เหล็ก เช่น หน่วยการเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก (magnetic-random access memory หรือ MRAM) ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drives หรือ HDDs) รวมไปถึง STNO เป็นต้น โดยอาศัยสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation หรือ LLG) ตามสมการความต่อเนื่อง (continuum equations) [53] ที่สมมติให้แมกนีไทเซชันมีขนาดคงที่และสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุทำให้แบบจำลองประเภทนี้ใช้เวลาและทรัพยากรในการคำนวณลดลงอย่างมหาศาลเมื่อเทียบเคียงกับการคำนวณแบบ ab-initio แต่อย่างไรก็ดีในอนาคตแผนวงจรในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต้องอาศัยปรากฏการณ์ทางแม่เหล็ก มีแนวโน้มที่จะถูกพัฒนาให้เล็กลงอย่างชัดเจน เพื่อทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน ประหยัดเวลาและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ทำให้การศึกษาเชิงทฤษฎีด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอนุภาคไม่เพียงพออีกต่อไป เนื่องจากไม่สามารถพิจารณาพฤติกรรมทางแม่เหล็กในหลายประการ

ดังนั้น จากปัญหาการคำนวณที่ล่าช้าของการคำนวณแบบ ab-initio และข้อจำกัดบางอย่างของแบบจำลองแม่เหล็กระดับจุลภาค เราสามารถแก้ไขได้ด้วยการอาศัยแบบจำลองสปินในระดับอะตอมหรือแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอม (atomistic modelling of magnetic material) ซึ่งสามารถศึกษาพฤติกรรมทางแม่เหล็กและพฤติกรรมการส่งผ่านสปินโดยพิจารณาจากขนาดและทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่มีขนาดตั้งแต่นาโนเมตรถึงไมโครเมตร โดยสามารถพิจารณาพลวัตของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาพิโกวินาทีถึงนาโนวินาทีและปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในระดับอะตอมโดยอาศัยพารามิเตอร์จากการคำนวณแบบ ab-initio และการทดลอง โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวยกตัวอย่างเช่น (1) การพิจารณาผลของความร้อนที่มีต่อพลวัตของแมกนีไทเซชัน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาการทำงานของอุปกรณ์เชิงแม่เหล็กในสภาวะทำงานจริงตั้งแต่อุณหภูมิห้องขึ้นไป (2) การพิจารณาปรากฏการณ์ที่การจัดเรียงตัวแลตทิซย่อย (sub-lattice) ที่มีแมกนีไทเซชันสลับทิศทางกันของวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (anti-ferromagnetic) และวัสดุเฟอร์ริแมกเนติก (ferrimagnetic) โดยทั้งสองนี้มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อ

การเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias) และอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ความถี่ระดับเทระเฮิรตซ์ (THz spintronics) (3) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการผสมกันที่บริเวณรอยระหว่างอะตอมของวัสดุที่ต่างกัน โครงสร้างแม่เหล็กหลายชั้นรวมไปถึงปรากฏการณ์การสะสมสปิน (spin accumulation) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างที่พบใน หัวอ่าน (reader) MRAM รวมไปถึง STNO ด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ STNO ที่มีองค์ประกอบ สำคัญเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก โดยอาศัยแบบจำลองที่เรียกว่า แบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอม (atomistic modelling of magnetic materials)

จากหัวข้อที่ 2.1 ทำให้เราทราบว่าการทำงานของ STNO จำเป็นต้องอาศัยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างเพื่อทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเกิดการสั่นด้วยความถี่ค่าหนึ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันดังกล่าวมีได้เพียงขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้างเท่านั้น แต่ยังมีอีกหลายปัจจัย เช่น การจัดเรียงตัวของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระและชั้นพิน อุณหภูมิ การผสมกันของอะตอมที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น รวมไปถึงประเภทของวัสดุที่นำมาใช้เป็นโครงสร้างของ STNO เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของสัญญาณอย่าง ความถี่หลัก (dominant frequency หรือ f_D) ความกว้างของสัญญาณ (linewidth หรือ Γ) แอมพลิจูด (amplitude หรือ A) ฯลฯ รวมไปถึงคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งอย่างกำลังไฟฟ้าของ STNO ดังนั้น การศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งสามารถทำได้โดยการอาศัยสมการที่เรียกว่า สมการแลนเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation หรือ LLG) หรือสมการ LLG ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันหรือสปินโมเมนต์ของอะตอมภายในระบบเนื่องจากผลของแรงบิด (torque) ที่เกิดจากสนาม (field) ต่าง ๆ [54] สำหรับในงานวิจัยนี้สนามที่พิจารณาได้แก่ สนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective field หรือ $\vec{B}_{eff,i}$) และสนามสปินทอร์ค (spin torque field หรือ $\vec{B}_{STT,i}$) ดังสมการที่ (2.3) จะเห็นได้ว่าแรงบิดที่เกิดจากสนามนั้นจะทำให้สปินโมเมนต์เคลื่อนที่เคลื่อนที่วนรอบสนาม (precessional motion) ดังรูปที่ 2.21 (ก) และแรงบิดดังกล่าวยังส่งผลให้สปินเคลื่อนที่เข้าหาทิศของสนาม (damping motion) เนื่องจากผลของความหน่วงของกิลเบิร์ต (Gilbert's damping constant หรือ α) ดังรูปที่ 2.21 (ข) ดังเทอมที่ 1 และ 2 ทางด้านขวามือของสมการที่ (2.3) ตามลำดับ

$$\frac{d\hat{S}_i}{dt} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} [\hat{S}_i \times (\vec{B}_{\text{eff},i} + \vec{B}_{\text{ST},i})] - \frac{\gamma\alpha}{(1+\alpha^2)} [\hat{S}_i \times [\hat{S}_i \times (\vec{B}_{\text{eff},i} + \vec{B}_{\text{ST},i})]] \quad (2.3)$$

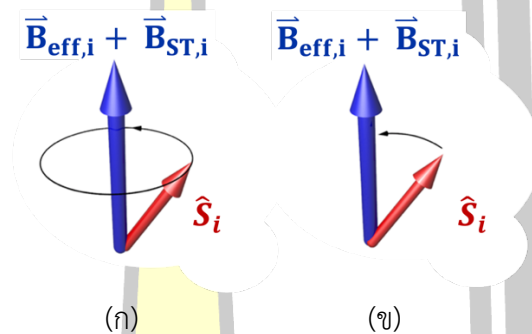
เมื่อ \hat{S}_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปินโมเมนต์ของแต่ละอะตอม

$\vec{B}_{\text{eff},i}$ คือ สนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective field) มีหน่วยเป็น เทสลา (T)

$\vec{B}_{\text{ST},i}$ คือ สนามสปินทอร์ค (spin torque field) มีหน่วยเป็น เทสลา (T)

γ คือ ค่าคงที่อัตราส่วนไจโรแมกเนติกของสปินเดี่ยว (gyromagnetic ratio)

α คือ ค่าคงที่ความหน่วงของกิลเบิร์ต (Gilbert damping constant)



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ (\hat{S}_i) ภายใต้สนามแม่เหล็กประสิทธิผลและสนามสปินทอร์ค (ก) การเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์วนรอบสนาม (ข) การเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์เข้าหาทิศทางของสนาม

โดยสนามประสิทธิผลที่สามารถคำนวณได้จาก $\vec{B}_{\text{eff},i} = -\frac{1}{\mu_s} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \hat{S}_i}$ เมื่อ μ_s คือขนาดของสปินโมเมนต์มีหน่วยเป็นจูลต่อเทสลา (J/T) และ \mathcal{H} คือฮามิลโทเนียนของสปิน (Heisenberg spin Hamiltonian \mathcal{H}) มีหน่วยเป็นจูล (J) ซึ่งบ่งบอกถึงพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โดยสนามประสิทธิผลพื้นฐานที่พิจารณาในแบบจำลองอะตอมของงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย สนามแอนไอโซโทรปีผลึก (crystalline anisotropy field หรือ $\vec{B}_{\text{ani},i}$) สนามที่เกิดจากพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินที่อยู่ใกล้กัน (exchange interaction field หรือ $\vec{B}_{\text{exc},i}$) สนามการลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก (demagnetizing field หรือ $\vec{B}_{\text{dip},i}$) สนามแม่เหล็กภายนอก (applied magnetic field หรือ $\vec{B}_{\text{app},i}$) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\vec{B}_{\text{eff},i} = \vec{B}_{\text{ani},i} + \vec{B}_{\text{exc},i} + \vec{B}_{\text{dip},i} + \vec{B}_{\text{app},i} \quad (2.4)$$

$$\vec{B}_{\text{eff},i} = \frac{2K_u}{\mu_s} \sum_i (\hat{S}_i \cdot \hat{e}) \hat{e} + \sum_{i \neq j} \frac{J_{ij} \hat{S}_j}{\mu_s} + \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{l \neq k} \left[\frac{3(\mu_l \cdot \hat{r}_{kl}) \hat{r}_{kl} - \mu_l}{|r_{kl}|^3} \right] + \vec{B}_{\text{app},i}$$

จากสมการที่ (2.4) เทอมแรกคือ สนามแอนไอโซโทรปีพลิก $\vec{B}_{\text{ani},i} = \frac{2K_u}{\mu_s} \sum_i (\hat{S}_i \cdot \hat{e}) \hat{e}$ เมื่อ K_u คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปีแกนเดียว (uniaxial anisotropy constant) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานแอนไอโซโทรปีต่อปริมาตรและทิศของแกนง่ายที่แทนด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{e} (unit vector of easy axis) ที่ขึ้นอยู่กับประเภทผลึกของวัสดุ โดยสนาม $\vec{B}_{\text{ani},i}$ เป็นสนามที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กของสปินและโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่รอบนิวเคลียส เรียกอันตรกิริยานี้ว่า อันตรกิริยาระหว่างสปินกับออร์บิต (spin-orbit coupling) ซึ่งในสถานะที่ไม่มีแรงหรือสนามภายนอกมากกระทำต่อสนามประเภทนี้จะทำให้แมกนีไทเซชันเรียงตัวไปตามทิศแกนง่าย

ขณะที่เทอมที่สองคือ สนามที่เกิดจากพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินโมเมนต์ที่อยู่ใกล้เคียงกัน [55] (nearest neighbor list) $\vec{B}_{\text{exc},i} = \sum_{i \neq j} \frac{J_{ij} \hat{S}_j}{\mu_s}$ ซึ่งเป็นปฏิสัมพันธ์โดยตรง (direct exchange interaction) ระหว่างสปิน \hat{S}_j และ \hat{S}_i โดยขึ้นอยู่กับมุมระหว่างสปิน \hat{S}_j และ \hat{S}_i กับ J_{ij} คือค่าปฏิสัมพันธ์การแลกเปลี่ยนที่เกิดขึ้นระหว่างสปินดังกล่าว มีหน่วยเป็น J/link โดยสนาม $\vec{B}_{\text{exc},i}$ จะส่งผลให้พฤติกรรมของสปินโมเมนต์ของอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันเรียงตัวขนานกัน (parallel) และตรงข้ามกัน (anti-parallel) เนื่องจากการซ้อนทับกันของฟังก์ชันคลื่นของสปินที่อยู่ใกล้เคียงกันตามกฎของฮุนด์ (Hund's rule) และหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli's exclusion principle) ซึ่งการจัดเรียงของสปินสามารถอธิบายได้ด้วยค่า J_{ij} ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระยะห่างระหว่างอะตอม (intra-atomic distance หรือ a) และรัศมีของออร์บิทัล 3d (the radius of 3d-orbital หรือ r) กรณีที่ a มีค่าน้อยมากจะทำให้เกิดแรงผลักรังคูลอมบ์ (coulomb repulsion) ระหว่างอะตอมมากขึ้น ส่งผลให้สปินโมเมนต์ของอะตอมจัดเรียงตัวตรงข้ามกันเพื่อลดแรงผลักรังคูลอมบ์ตามหลักการกีดกันของเพาลี ทำให้ค่า J_{ij} ติดลบ ซึ่งลักษณะการจัดเรียงแบบนี้จะเกิดขึ้นในวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก เช่น โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เป็นต้น ขณะที่กรณี a มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้สปินโมเมนต์ของอะตอมจัดเรียงตัวขนานกันตามกฎของฮุนด์ ทำให้ค่า J_{ij} มีค่าเป็นบวก เช่น โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) เป็นต้น

ขณะที่สนามการลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก $\vec{B}_{\text{dip},i} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{l \neq k} \left[\frac{3(\mu_l \cdot \hat{r}_{kl}) \hat{r}_{kl} - \mu_l}{|r_{kl}|^3} \right]$ เป็นสนามที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์แม่เหล็กทุก ๆ ตัวภายในวัสดุแม่เหล็กและมีทิศตรงข้ามกับทิศทางของผลรวมของสปินโมเมนต์ทุก ๆ ตัวในวัสดุ ซึ่งทำให้การคำนวณสนามประเภทนี้ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน หากใช้แบบจำลองระดับอะตอม ดังนั้นการคำนวณสนามดังกล่าวจะใช้การคำนวณระดับจุลภาคเข้าร่วมด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดยแบ่งวัสดุแม่เหล็กให้เป็นเซลล์ k เล็ก ๆ หลายเซลล์ เมื่อสมมติให้แมกนีไทเซชันในแต่ละเซลล์มีความสม่ำเสมอ และเทอมสุดท้ายคือ สนามแม่เหล็กภายนอก $\vec{B}_{\text{app},i}$ เป็นสนามภายนอกที่เข้าใจกันดีว่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในขดลวด

หรือการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า โดย $\vec{B}_{app,i}$ จะส่งผลทำให้เกิดพลังงานซีมาน (Zeeman energy) $\mathcal{H}_{Zeeman} = -\mu_s \sum_i \vec{S}_i \cdot \vec{B}_{app}$ ซึ่งเป็นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและโมเมนต์แม่เหล็กภายในธาตุหรือวัสดุ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่ามากพอที่จะเอาชนะหรือรบกวนปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่หมุนรอบตัวเองและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบวงโคจร ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์ซีมานแบบสนามแม่เหล็กเข้ม (strong field Zeeman effect) ส่งผลให้ระดับพลังงานเกิดการแยกกัน (splitting) และโมเมนต์แม่เหล็กมีทิศทางเรียงไปตามทิศของสนาม $\vec{B}_{app,i}$

2.4 แบบจำลองการสะสมสปิน (Spin accumulation model)

MTJ-STNO เป็นอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ที่ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรต์สองชั้นที่ถูกคั่นด้วยชั้นสเปเซอร์ (spacer) ที่เป็นวัสดุอนแมกเนติก (non-magnetic material หรือ NM) โดยชั้นวัสดุแม่เหล็กดังกล่าวประกอบไปด้วย ชั้นพิน PL ซึ่งเป็นชั้นวัสดุเฟอร์ไรต์อนแมกเนติกที่แมกนีไทเซชันไม่สามารถเปลี่ยนทิศทางได้ เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน กับวัสดุแอนติเฟอร์ไรต์อนแมกเนติก ขณะที่วัสดุเฟอร์ไรต์อนแมกเนติกอีกชั้นหนึ่งคือ ชั้นอิสระ FL ซึ่งเป็นชั้นที่แมกนีไทเซชันสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ซึ่งชั้นนี้เองที่เป็นชั้นที่ทำให้กำเนิดสัญญาณเนื่องจากการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ โดยในการใช้งาน MTJ-STNO จำเป็นต้องอาศัยปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค (spin-transfer torque หรือ STT) จากชั้น PL สู่อัน FL ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างของอุปกรณ์ เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ซึ่งประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนอิสระที่สปินมีทิศทางแบบสุ่ม (unpolarized spin current) เข้าสู่ชั้นเฟอร์ไรต์อนแมกเนติกจะทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d (s-d exchange interaction) ระหว่างการสะสมสปินกับสปินโมเมนต์ ซึ่งภายในชั้น PL สปินของอิเล็กตรอนอิสระจะถูกทำให้มีทิศทางหันไปตามทิศของสปินโมเมนต์ภายใน ซึ่งเรียกว่า กระแสสปินโพลาไรซ์ (spin polarized current) และกระแสสปินนี้จะถูกส่งผ่านชั้นสเปเซอร์ไปยังชั้น FL เป็นผลที่ทำให้สปินโมเมนต์ในชั้นนี้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น

โดยปริมาณที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ภายในชั้นและสปินของอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d นี้ เรียกว่า สนามสปินทอร์ค (spin torque field หรือ B_{ST}) ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสถานะของสปินขึ้นและสปินลงหรือการสะสมสปิน (spin accumulation หรือ \vec{m}) และค่าคงที่ของปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d ระหว่างการสะสมสปินและสปินโมเมนต์ภายในวัสดุเฟอร์ไรต์อนแมกเนติก (s-d exchange constant between spin accumulation and spin moment หรือ J_{sd}) ดังสมการที่ (2.5)

$$\vec{B}_{ST,i} = J_{sd} \vec{m} \quad (2.5)$$

จากที่กล่าวไปข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสำหรับ MTJ-STNO จำเป็นที่จะคิดผลที่เกิดขึ้นจากสนามสปินทอร์คด้วย เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ ดังนั้น จากสมการที่ (2.3) สามารถปรับเปลี่ยนได้เป็น

$$\frac{\partial \hat{S}_i}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} [\hat{S}_i \times (\bar{B}_{\text{eff},i} + J_{sd} \bar{m})] - \frac{\gamma\alpha}{(1+\alpha^2)} [\hat{S}_i \times (\hat{S}_i \times (\bar{B}_{\text{eff},i} + J_{sd} \bar{m}))] \quad (2.6)$$

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าทิศทาง z (ตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้าง) ทำให้สามารถคำนวณการสะสมสปินได้จากสมการที่ (2.7)

$$\frac{\partial \bar{m}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{J}_m}{\partial z} - \left(\frac{J_{sd}}{\hbar}\right) \bar{m} \times \hat{S}_i - \left(\frac{J_{sd}}{\hbar}\right) \frac{\ell_L}{\ell_{\perp}} \hat{S}_i \times (\bar{m} \times \hat{S}_i) - \frac{\bar{m} - \bar{m}_{\infty}}{\tau_{sf}} \quad (2.7)$$

เมื่อ \hbar คือ ค่าคงที่ของพลังค์ลดรูป (reduced Planck constant)

ℓ_L คือ ระยะการหมุนวนของสปินแบบลามอร์ (Lamor spin precession length)

ℓ_{\perp} คือ ระยะสปินโคฮีเรนซ์ (spin coherence length)

\bar{m}_{∞} คือ การสะสมสปินที่สภาวะสมดุลสามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่างจำนวนของสปินขึ้นและสปินลง

τ_{sf} คือ ระยะการคลายตัวหรือการกลับทิศทางของสปิน

\bar{J}_m คือ กระแสสปิน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเกรเดียนของการสะสมสปินตั้งสมการที่ (2.8)

$$\bar{J}_m = \beta j_e \hat{S}_i - 2D_0 \left[\frac{\partial \bar{m}}{\partial z} - \beta \beta' S (\hat{S}_i \cdot \frac{\partial \bar{m}}{\partial z}) \right] \quad (2.8)$$

เมื่อ β คือ ค่าสปินโพลาไรเซชันของสภาพการนำไฟฟ้า (spin polarization for conductivity)

β' คือ ค่าสปินโพลาไรเซชันของค่าคงที่การแพร่ (spin polarization for diffusion)

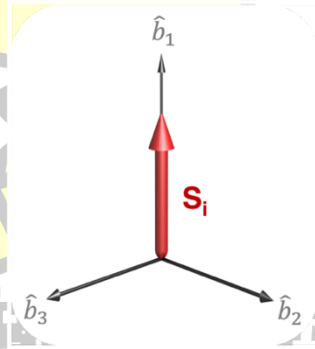
D_0 คือ ค่าคงที่การแพร่ (diffusion constant)

ภายใต้สมมติฐานที่ว่า การเปลี่ยนแปลงเพื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวของการสะสมสปินนั้นเกิดขึ้นในระดับพิโกวินาทีซึ่งเร็วกว่ามากเมื่อเทียบกับแมกนิโทเซชัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือทิศทางของแมกนิโทเซชันไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะนี้ ดังนั้น จากสมการที่ (2.7) และ (2.8) จะสามารถคำนวณของการสะสมสปินที่เกิดขึ้นได้ตั้งสมการ

$$\begin{aligned}
\vec{m}_{\parallel}(z) &= [m_{\parallel}(\infty) + [m_{\parallel}(0) - m_{\parallel}(\infty)]e^{-z/\lambda_{sd}}] \hat{b}_1 \\
\vec{m}_{\perp,2}(z) &= 2e^{-k_1 z} [u \cos(k_2 z) - v \sin(k_2 z)] \hat{b}_2 \\
\vec{m}_{\perp,3}(z) &= 2e^{-k_1 z} [u \sin(k_2 z) + v \cos(k_2 z)] \hat{b}_3,
\end{aligned} \tag{2.9}$$

$$\text{โดย } (k_1 \pm ik_2) = \sqrt{\lambda_{trans}^{-2} \pm i\lambda_J^{-2}}$$

เมื่อ \vec{m}_{\parallel} และ \vec{m}_{\perp} คือองค์ประกอบของการสะสมสปินในแนวขนานและแนวตั้งฉากกับสปินโมเมนต์ ในระบบพิกัดพื้นฐาน (rotated basis coordinate system หรือ $\hat{b}_1 \hat{b}_2 \hat{b}_3$) ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งถูกแปลงมาจากระบบพิกัดฉาก (cartesian system หรือ $\hat{e}_x \hat{e}_y \hat{e}_z$) ด้วยวิธีการแปลงเมตริกซ์ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาขนาดและทิศทางของการสะสมสปินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่ง เมื่อ λ_{sd} คือ ระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length) ขณะที่ $\lambda_J = \sqrt{2\hbar D_0/J_{sd}}$ และ $\lambda_{trans} = \sqrt{\lambda_{\phi}^{-2} + \lambda_{sf}^{-2}}$ ซึ่ง λ_{ϕ} และ λ_{sf} คือระยะสปินดีเฟสซิง (spin dephasing length) และระยะการกลับทิศทางของสปิน (spin flip length) ตามลำดับ สามารถคำนวณได้จาก $\lambda_{\phi} = \sqrt{2\hbar D_0 \ell_{\perp}/(J_{sd} \ell_L)}$ และ $\lambda_{sf} = \sqrt{2D_0 \tau_{sf}}$ ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ $\vec{m}_{\parallel}(0)$ u และ v สามารถคำนวณได้โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต ที่กำหนดให้กระแสปินมีความต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ



รูปที่ 2.22 แสดงองค์ประกอบของการสะสมสปินที่กระทำต่อสปินโมเมนต์ (S_i) ในระบบพิกัดพื้นฐาน (rotated basis coordinate system หรือ $\hat{b}_1 \hat{b}_2 \hat{b}_3$) ภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก

องค์ประกอบของการสะสมสปินที่มีบทบาทสำคัญคือ \vec{m}_{\perp} เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อการกำเนิดสปินทอร์ค τ_{ST} ที่ประกอบไปด้วย อะเดียบาติกทอร์ค (adiabatic torque หรือ τ_{AST}) และนอนอะเดียบาติกทอร์ค (non-adiabatic torque หรือ τ_{NAST}) ดังสมการที่ (2.10) โดยทอร์คทั้งสององค์ประกอบนี้สามารถพิจารณาได้จากกฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม เนื่องจากสปินทอร์คที่กระทำต่อ

สปินโมเมนต์จะแปรผันโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงการสะสมสปิน $\tau_{ST} = \tau_{AST} + \tau_{NAST} \sim \frac{dm}{dt} \equiv -\frac{dM}{dt}$

$$\begin{aligned}\tau_{AST} &= -\frac{2D_0 a^3 \hbar}{\lambda_J^2 \lambda_{\text{trans}}^2 e \mu_B} (\lambda_J^2 m_{\perp,2} + \lambda_{\text{trans}}^2 m_{\perp,3}) \hat{\mathbf{b}}_2 \\ \tau_{NAST} &= \frac{2D_0 a^3 \hbar}{\lambda_J^2 \lambda_{\text{trans}}^2 e \mu_B} (\lambda_{\text{trans}}^2 m_{\perp,2} + \lambda_J^2 m_{\perp,3}) \hat{\mathbf{b}}_3\end{aligned}\quad (2.10)$$

โดย τ_{AST} มีบทบาทในการทำให้เกิดการต่อต้านหรือส่งเสริมการเคลื่อนที่แบบหมุนวงที่เกิดจากสนามประสิทธิผลดังที่ปรากฏในสมการที่ (2) ขณะที่ τ_{NAST} เป็นทอร์คที่มีต้นกำเนิดมาจากปฏิสัมพันธ์แบบอ่อน (weak coupling) ระหว่างสปินโมเมนต์ภายในวัสดุกับกระแสสปิน โดยทอร์คชนิดนี้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสปินเอกเช่นเดียวกันกับ τ_{AST} แต่ τ_{NAST} จะทำให้สปินเกิดการเคลื่อนที่วนรอบสนามประสิทธิผล ซึ่งองค์ประกอบทั้งสองนี้มีส่วนสำคัญอย่างมากในการควบคุมการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ และสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ 3 กรณี ในกรณีแรกเมื่อทิศทางของ τ_{AST} มีตรงกันข้ามกับทอร์คที่เกิดจากความหน่วงธรรมชาติจะทำให้สปินโมเมนต์เคลื่อนที่หนีออกจากทิศของสนามประสิทธิผล และหากมีขนาดที่มากพอก็จะทำให้เกิดการกลับทิศทางของสปินโมเมนต์ขึ้น (switching state) ในทางตรงกันข้ามหาก τ_{AST} มีทิศทางเดียวกันกับทอร์คที่เกิดจากความหน่วงธรรมชาติจะทำให้สปินโมเมนต์เคลื่อนที่เข้าหาสนามประสิทธิผล (non-switching state) และกรณีสุดท้ายคือ เมื่อ τ_{AST} เกิดการหักล้างกันพอดีกับทอร์คที่เกิดจากความหน่วงธรรมชาติ ทำให้สปินโมเมนต์ไม่เคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากสนามประสิทธิผล เป็นผลทำให้สปินโมเมนต์เกิดการเคลื่อนที่แบบกวัดแกว่งที่สภาวะสมดุล (steady-state precessional oscillation) เนื่องจากผลของ τ_{NAST} ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพของ MTJ-STNO โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับคุณสมบัติของสัญญาณ (signal properties) และการใช้พลังงาน (power consumption) ของอุปกรณ์ ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ MTJ-STNO จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ STNO (STNO performance analysis)

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเข้าสู่โครงสร้างของ STNO จะทำให้เกิดสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันอย่างต่อเนื่องขึ้น ซึ่ง STNO ที่มีประสิทธิภาพสูงนั้น จำเป็นที่จะต้องมีความสามารถในการให้กำเนิดย่านความถี่ที่หลากหลาย สัญญาณมีแอมพลิจูดหรือมุมการเคลื่อนที่รอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่คงที่สม่ำเสมอ มีความกว้างสัญญาณในระดับที่แคบมากหรือมีสัญญาณความถี่อื่นปะปนในระดับที่น้อยมาก เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์มีความสามารถในการสร้างสัญญาณที่เสถียรเพียงพอต่อการใช้งาน ยิ่งไปกว่านั้น STNO ที่ดียังต้องใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าให้น้อยที่สุดในการสร้างสัญญาณ เพื่อลดความร้อนที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์และลดการใช้พลังงานของ

อุปกรณ์ ดังนั้น ในส่วนนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ STNO สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของคุณภาพสัญญาณที่เกิดจากพลวัตของแมกนีไทเซชันจะอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและฟังก์ชันการกระจายตัวแบบมอฟเฟต ดังสมการที่ (2.11)

$$M(f; A, f_D, \sigma, \beta) = A \left[\left(\frac{f - f_D}{\sigma} \right)^2 + 1 \right]^{-\beta} \quad (2.11)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูด (Amplitude) ของความถี่หลัก

f คือความถี่ทั้งหมดที่เกิดขึ้นของสัญญาณ

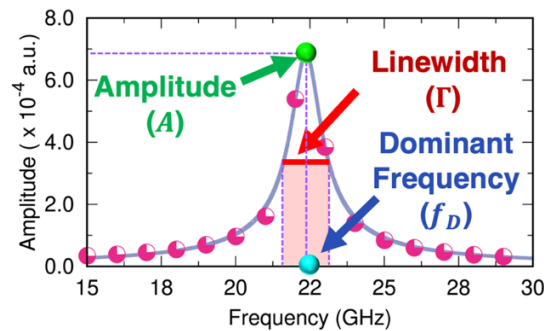
f_D คือความถี่หลักที่เกิดขึ้นของ STNO

σ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่ (standard deviation)

β คือสัมประสิทธิ์ที่กำหนดรูปร่างของสเปกตรัม

โดยที่ ความกว้างของสัญญาณ (linewidth หรือ Γ) สามารถคำนวณได้จาก $\Gamma =$

$$2\sigma\sqrt{2^{1/\beta} - 1}$$



รูปที่ 2.23 แสดงองค์ประกอบของสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและฟังก์ชันการกระจายตัวแบบมอฟเฟต

นอกจากนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นสถานะของสปินขึ้นและสปินลง ทำให้เมื่อทำการการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างของ STNO จะทำให้ความหนาแน่นสถานะของสปินดังกล่าวรวมไปถึงกระแสสปินมีขนาดและทิศทางทางเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับ STNO ที่มีทิศทางของสปินเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความต้านทานในแต่ละตำแหน่งและเวลาของโครงสร้างมีค่าไม่เท่ากัน โดยเฉพาะที่ตำแหน่งบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุอนแมกเนติก ซึ่งความต้านทานดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญอย่างมากที่จะนำไปสู่การคำนวณกำลังไฟฟ้า (power

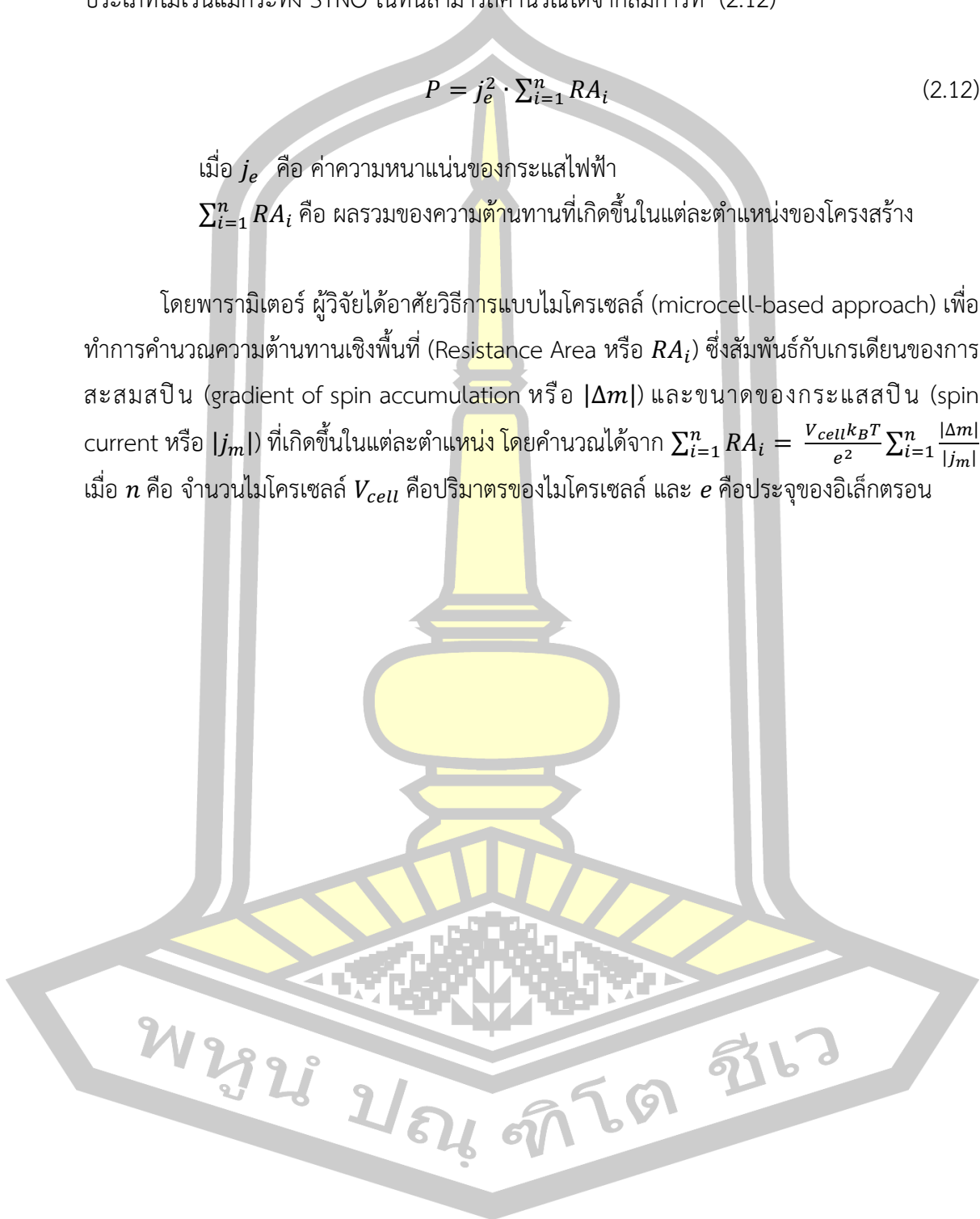
consumption หรือ P) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญยิ่งในส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภทไม่ว่าแม้แต่กระทั่ง STNO ในที่นี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.12)

$$P = j_e^2 \cdot \sum_{i=1}^n RA_i \quad (2.12)$$

เมื่อ j_e คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

$\sum_{i=1}^n RA_i$ คือ ผลรวมของความต้านทานที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของโครงสร้าง

โดยพารามิเตอร์ ผู้วิจัยได้อาศัยวิธีการแบบไมโครเซลล์ (microcell-based approach) เพื่อทำการคำนวณความต้านทานเชิงพื้นที่ (Resistance Area หรือ RA_i) ซึ่งสัมพันธ์กับเกรเดียนของการสะสมสปิน (gradient of spin accumulation หรือ $|\Delta m|$) และขนาดของกระแสสปิน (spin current หรือ $|j_m|$) ที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง โดยคำนวณได้จาก $\sum_{i=1}^n RA_i = \frac{V_{cell} k_B T}{e^2} \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta m|}{|j_m|}$ เมื่อ n คือ จำนวนไมโครเซลล์ V_{cell} คือ ปริมาตรของไมโครเซลล์ และ e คือ ประจุของอิเล็กตรอน



บทที่ 3

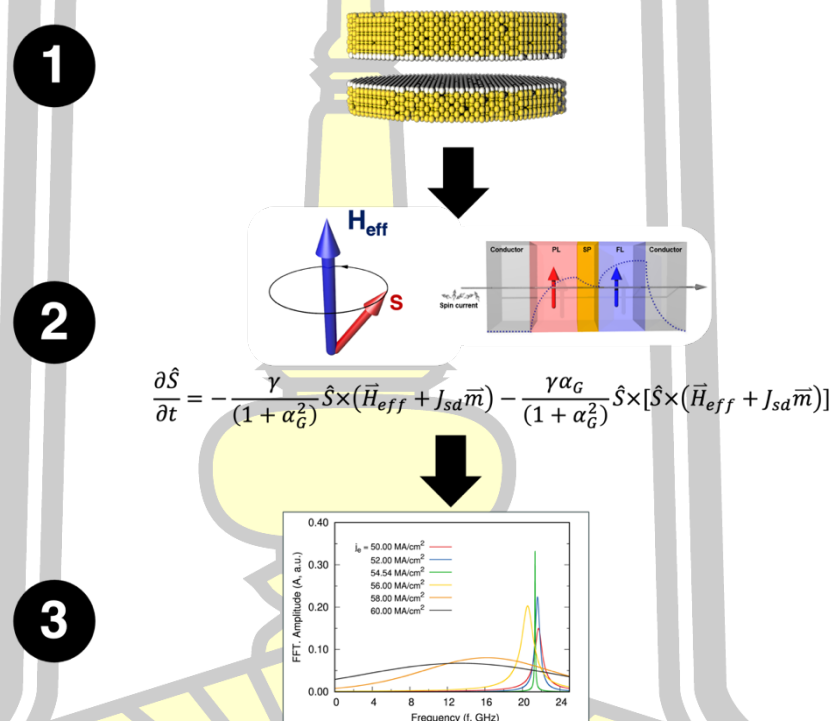
การออกแบบโครงสร้างและการศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชัน พฤติกรรมการส่งผ่าน สปินของโครงสร้าง STNO ด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลอง การสะสมสปิน

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทฤษฎี (theoretical study) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมของวัสดุแม่เหล็ก (atomistic model) ร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน (spin accumulation model) ในการอธิบายและศึกษาปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดสัญญาณระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ก (spin-torque nano-oscillator หรือ STNO) ที่เกิดจากผลของปัจจัยต่าง ๆ อันได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density หรือ j_e) และมุมสัมพัทธ์ (relative angle หรือ ϕ) ของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพิน (pinned layer หรือ PL) และชั้นอิสระ (free layer หรือ FL) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยขั้นตอนการศึกษาทั้งหมด 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างโครงสร้างของ STNO ที่เป็นโครงสร้างรอยต่อทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก (magnetic tunnel junction หรือ MTJ) ที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกโคบอลต์ไอร์รอนโบรอน (cobalt iron boron หรือ CoFeB) สองชั้นที่ถูกคั่นด้วยชั้นวัสดุฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide หรือ MgO) ด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอม ซึ่งสามารถพิจารณาคุณสมบัติทางแม่เหล็กและการจัดเรียงตัวของอะตอมที่บริเวณรอยต่อ CoFeB/MgO ซึ่งสำคัญต่อโครงสร้างและการทำงานของ STNO ที่มีขนาดเล็กกว่า 20 nm เพื่อให้สอดคล้องกับแนวโน้มในการพัฒนาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยความจำเชิงแม่เหล็ก การประมวลผล และการสื่อสารให้มีขนาดเล็กลง

ขั้นตอนที่ 2 จากนั้นจะทำการศึกษาพลวัตหรือการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน (magnetization dynamics) และพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน (spin transport behavior) ที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างดังกล่าว โดยอาศัยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ คุณสมบัติการส่งผ่านสปิน การสะสมสปิน กระแสสปินและความต้านทานเชิงแม่เหล็กที่เกิดจากการทะลุผ่าน (tunnel magnetoresistances หรือ TMR) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สภาวะไม่สมดุลของสปิน (non-equilibrium) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ CoFeB และ MgO ซึ่งส่งผลสำคัญต่อกำลังไฟฟ้า (power consumption) และกำลังขาออกของสัญญาณ (output power) ใน STNO

ขั้นตอนที่ 3 ในขั้นตอนสุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของสัญญาณต่าง ๆ ประกอบไปด้วย ความถี่หลัก (dominant frequency หรือ f_D), ความกว้างของสัญญาณ (linewidth หรือ Γ) และแอมพลิจูด (amplitude หรือ A) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (fast Fourier transform หรือ FFT) และฟังก์ชันการกระจายตัวแบบมอฟฟัต (Moffat distribution) และวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าโดยอาศัยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงการสะสมสปินต่อตำแหน่ง (gradient of spin accumulation หรือ ∇m) เนื่องจากการไหลของกระแสสปิน (spin current หรือ j_m) ภายในโครงสร้างของ STNO ซึ่งขั้นตอนในการศึกษาทั้งหมดในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า j_e และมุมสัมพันธ์ ϕ ของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน พฤติกรรมการส่งผ่านสปินและประสิทธิภาพของ STNO ด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปิน

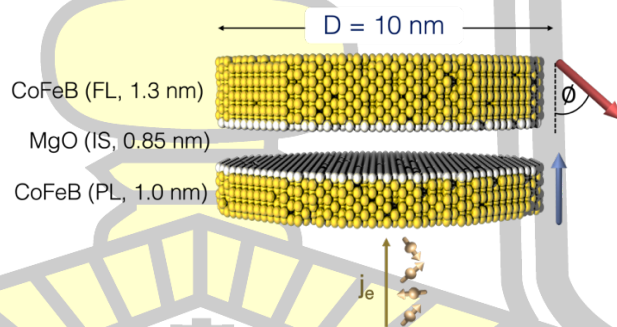
3.1 การออกแบบและการสร้างโครงสร้างของ CoFeB/MgO STNO ด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอม

เครื่องกำเนิดสัญญาณระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค STNO เป็นอุปกรณ์ขนาดระดับนาโนที่ทำหน้าที่ในการสร้างหรือรับสัญญาณโดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งมักจะเป็นโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้น โดย STNO ถือเป็นหนึ่งในกลุ่มประกอบสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสาร การบันทึกข้อมูลและการประมวลผลในอนาคต เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ 1) Compact size - STNO มีขนาดเล็กในระดับนาโนและมีความเข้ากันได้กับเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์โลหะออกไซด์ (complementary metal-oxide-semiconductor หรือ CMOS) [56] ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในแผงวงจรรวม (integrated circuit) ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ 2) High tunability – สามารถในการสร้างสัญญาณความถี่ที่หลากหลาย (high tunability) ด้วยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้างโดยไม่ต้องอาศัยสนามแม่เหล็กภายนอก (zero field operation) [57] 3) Non-linear frequency - ความถี่ที่ปรับใน STNO จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง (non-linear frequency) ซึ่งสอดคล้องกับการทำงานและมีประโยชน์ต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังที่กล่าวไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์การสื่อสารแบบไร้สาย 4) Low power consumption และ high output power – คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่ทำให้ STNO มีโอกาสที่จะกลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการประมวลผลและการสื่อสาร คือ STNO มีกำลังไฟฟ้า (power consumption) ที่ต่ำ เนื่องจากใช้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าที่ต่ำในการสร้างสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน ขณะเดียวกัน STNO ก็มีกำลังขาออกของสัญญาณที่สูง (high output power) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่อาศัยปรากฏการณ์การทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก ทำให้สัญญาณที่ออกจาก STNO มีความเสถียรมากขึ้น [58][59]

เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติที่ดีดังกล่าว การออกแบบเครื่องกำเนิดสัญญาณระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค STNO จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างทั้งคุณสมบัติของวัสดุ ขนาดและรูปร่างของ STNO อุณหภูมิของสภาพแวดล้อม กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้าง ฯลฯ โดยยึดตามคุณสมบัติการทำงานที่เหมาะสมซึ่งแตกต่างกันในแต่ละอุปกรณ์ เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการส่งผ่านกระแสสปิน พฤติกรรมและความเสถียรของการเคลื่อนที่ของโมเมนต์แม่เหล็ก ความต้านทานเชิงแม่เหล็ก และพลังงานที่ใช้ในโครงสร้างของ STNO ฯลฯ โดยการออกแบบ STNO ในช่วงแรกหลังการค้นพบปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ค [1] จะใช้โครงสร้างสปินวาล์ว (spin valve) ซึ่งประกอบด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกสองชั้นที่ถูกคั่นด้วยชั้นวัสดุนอนแมกเนติกที่มีความเป็นโลหะ และแมกนีไทเซชันมีทิศทางขนานไปกับระนาบของวัสดุทั้งสองชั้น (all in-plane STNO) แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กภายนอกร่วมกับการป้อนกระแสไฟฟ้า

เข้าสู่โครงสร้าง เพื่อให้แมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่และรักษาความเสถียรของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน [24] นอกจากนี้ยังมีกำลังขาออกของสัญญาณที่ต่ำ (ระดับพิโกวัตต์) ซึ่งไม่เหมาะกับการนำไปใช้งาน ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ปัจจุบันโครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่มีชั้นสเปเซอร์เป็นวัสดุฉนวนที่มีความเป็นฉนวน (insulator) ซึ่งโครงสร้างนี้คือ โครงสร้างรอยต่อทะลุผ่านเชิงแม่เหล็กหรือ MTJ จึงถูกนำมาใช้เนื่องจากทำให้ STNO มีกำลังขาออกที่สูงในระดับไมโครวัตต์ [60]

โครงสร้างวัสดุของ STNO ในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้าง MTJ ที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเฟอร์โรหรือวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material หรือ FM) สองชั้นที่เป็นชั้น PL และ FL โดยมีชั้นสเปเซอร์ (spacer หรือ SP) ที่วัสดุมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและมีความเป็นแม่เหล็กเล็กน้อย คั่นระหว่างวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก PL และ FL ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวถูกสร้างขึ้นด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมที่อาศัยข้อมูลจากงานวิจัยเชิงทฤษฎีและทดลองมากมาย เพื่อให้การออกแบบโครงสร้าง STNO มีความสมจริงใกล้เคียงกับการทดลองและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโครงสร้างดังกล่าวถูกออกแบบให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (nanopillar) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 nm ที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกโคบอลต์ไอร์รอนโบรอน (cobalt iron boron หรือ CoFeB) สองชั้นที่ถูกคั่นด้วยชั้นวัสดุฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide หรือ MgO) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของ MTJ-STNO ของ CoFeB/MgO ที่ประกอบด้วยบริเวณบัลค์ โดยที่ชั้นพิน แมกนีไทเซชันจะตั้งฉากกับระนาบของชั้นวัสดุและชั้นอิสระแมกนีไทเซชันเอียงทำมุม θ กับระนาบของชั้นวัสดุ

เนื่องจากเกิดการไฮบริดไดเซชัน (hybridization) ชั้นระหว่างออร์บิทัล 3d และ 2p ของ Fe และ O ตามลำดับ [61] ระหว่างวัสดุ CoFeB และ MgO ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบชั้นวัสดุของโครงสร้าง MTJ ที่ประกอบจะประกอบไปด้วย CoFeB (bulk PL /0.85 nm)/CoFeB (interface PL/ 0.15 nm)/MgO (SP /0.85 nm)/ CoFeB (interface FL /0.15 nm)/CoFeB (bulk FL/ 1.15 nm)

เมื่อตัวเลขในวงเล็บคือความหนาของชั้นวัสดุ โดยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางแม่เหล็ก และการส่งผ่านของสปินของแต่ละวัสดุอ้างอิงมาจากการศึกษาเชิงทดลองและทฤษฎี [62] [32] โดยพารามิเตอร์หลักที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กจะประกอบไปด้วย ค่าปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน (exchange interaction หรือ J_{ij}) ระหว่างสปินภายในวัสดุแม่เหล็ก ค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของแกนเดี่ยว (uniaxial anisotropy constant หรือ K_u) โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment หรือ μ_s) ขณะที่พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการส่งผ่านสปินจะประกอบไปด้วย ค่าสปินโพลาริเซชันของสภาพการนำไฟฟ้า (spin polarization for the conductivity หรือ β) ค่าสปินโพลาริเซชันของค่าคงที่การแพร่ (spin polarization for the conductivity หรือ β') ระยะการแพร่ของการสปิน (spin-diffusion length หรือ λ_{sd}) ค่าปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d (s-d exchange interaction หรือ J_{sd}) ระหว่างสปินภายในวัสดุแม่เหล็กกับสปินของอิเล็กตรอนอิสระ และค่าคงที่การสะสมสปินภายในวัสดุที่สภาวะสมดุล (equilibrium spin accumulation หรือ m_∞) แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

พารามิเตอร์ (หน่วย)	CoFeB (bulk)	CoFeB (interface)	MgO
J_{ij} (J/link)	7.735×10^{-21}	1.547×10^{-20}	-
K_u (J/atom)	0	1.35×10^{-22}	-
α	0.003	0.11	-
μ_s (μ_B)	1.6	1.6	-
β	0.56	0.56	0.11
β'	0.72	0.72	0.14
λ_{sd} (nm)	12	12	100
J_{sd} (eV)	0.1	0.1	0.01
m_∞ (MC/m ³)	261.50	261.50	-

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางแม่เหล็กและการส่งผ่านของสปินของ CoFeB ทั้งบริเวณบัลก์ (Bulk) และรอยต่อ (interface) และคุณสมบัติของ MgO [62][32]

จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่บริเวณรอยต่อของ CoFeB/MgO อย่างค่า J_{ij} α และ K_u ที่บริเวณนี้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นบัลก์ของ CoFeB [63] เนื่องมาเกิดการไฮบริดไดเซชัน (hybridization) ขึ้นระหว่างออร์บิทัล 3d และ 2p ของ Fe และ O ตามลำดับ ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระดับอะตอมและส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนทิศทางของสปินหรือแมกนีไท

เซชันเมื่อความหนาของ CoFeB มีค่าน้อยกว่า 1.3 nm [63] นอกจากนี้ยังส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมพลวัตของแมกนีไทเซชัน การเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสสปิน j_m และการลดลงของคุณสมบัติการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กอีกด้วย [64][65] ขณะที่ชั้นสเปสเซอร์ ความหนาของ MgO จะถูกออกแบบให้มีความหนาอยู่ที่ประมาณ 0.85 nm เพราะจะส่งผลให้พลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งส่งผลดีต่อการส่งผ่านสปิน [66] ขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ CoFeB ในงานวิจัยนี้ในชั้นพินจะถูกทำให้อยู่ในทิศ +z ขณะที่แมกนีไทเซชันในชั้นอิสระจะถูกทำให้มีทิศเอียงทำมุม θ กับแกน -z ซึ่งการที่แมกนีไทเซชันทำมุมเอียงนั้นส่งผลให้สามารถเพิ่มความสามารถในสร้างสัญญาณไมโครเวฟพร้อมทั้งรักษากำลังในการส่งสัญญาณที่สนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์ได้ [28]

หลังจากที่ทำการออกแบบโครงสร้าง CoFeB/MgO STNO แล้วเพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพของ STNO ในหัวข้อถัดไปผู้วิจัยจะกล่าวถึงการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันโดยอาศัยสมการแลนดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation) และวิเคราะห์คุณสมบัติของสัญญาณด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (fast Fourier transform) จากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เกิดขึ้น รวมไปถึงวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์นี้โดยอาศัยแบบจำลองการสะสมสปิน (spin accumulation model)

3.2 การศึกษาพลวัตของแมกนีไทเซชันและพฤติกรรมการณ์การส่งผ่านสปินภายในโครงสร้าง STNO ด้วยแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมและแบบจำลองการสะสมสปิน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและมุมสัมพัทธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้นพินและชั้นอิสระต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันและประสิทธิภาพการทำงานของ STNO ที่อุณหภูมิ 0 K โดยการทำงานของ STNO ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นวัสดุแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก CoFeB สองชั้นที่มีคุณสมบัติเป็นชั้นพิน (แมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่ได้ยาก) และชั้นอิสระ (แมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อมีแรงหรือสนามภายนอกมากระทำ) โดยทั้งสองชั้นถูกคั่นด้วยชั้นสเปสเซอร์ MgO ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน จำเป็นที่จะต้องป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างของ STNO เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านสปินเทอร์คจากชั้นพินทะลุผ่านชั้นสเปสเซอร์ไปยังชั้นอิสระและสัญญาณที่มาจากเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระ สำหรับแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันจะเกิดการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ (spin moment หรือ S_i) ของแต่ละอะตอมในชั้นวัสดุซึ่งเกิดจากผลของสนามมากระทำ โดยในสถานะที่ยังไม่ได้ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้าง MTJ สนามที่ส่งผลต่อสภาพการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกของงานวิจัยนี้จะถูกเรียกว่า สนามประสิทธิผล

(effective field หรือ $\vec{B}_{\text{eff},i}$) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเกรเดียนท์ของฮามิลโตเนียนประสิทธิผลของสปินต่อเวกเตอร์ของสปินโมเมนต์ ดังสมการที่ 3.1

$$\begin{aligned}\vec{B}_{\text{eff},i} &= -\nabla \mathcal{H}_{\text{eff},i} \\ \vec{B}_{\text{eff},i} &= -\frac{1}{|\mu_s|} \frac{\partial \mathcal{H}_{\text{eff},i}}{\partial \hat{S}_i}\end{aligned}\quad (3.1)$$

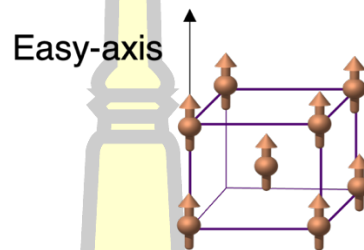
เมื่อ μ_s คือ โมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ของวัสดุซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเท่าของมีค่าเป็นจำนวนเท่าของบอร์แมกนีตรอน (Bohr magnetron $\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{ J T}^{-1}$) โดยในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกปริมาณดังกล่าวเกิดจากการบรรจุไม่เต็มของสปิน (half-orbital) ในออร์บิทัล 3d [67] ขณะที่ $\mathcal{H}_{\text{eff},i}$ คือ ฮามิลโตเนียนประสิทธิผลของสปิน (effective spin Hamiltonian) หรือพลังงานที่ส่งผลต่อสภาพการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ ซึ่งฮามิลโตเนียนสปิน $\mathcal{H}_{\text{eff},i}$ ของสนามประสิทธิผลในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกเดี่ยว (magnetocrystalline anisotropy energy หรือ $\mathcal{H}_{\text{ani},i}$) พลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินที่อยู่ใกล้กัน (exchange interaction energy หรือ $\mathcal{H}_{\text{exc},i}$) พลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก (demagnetizing energy หรือ $\mathcal{H}_{\text{dip},i}$) และพลังงานซีมานน์ที่เกิดจากแม่เหล็กภายนอก (Zeemann energy หรือ $\mathcal{H}_{\text{app},i}$) ดังสมการที่ 3.2

$$\mathcal{H}_{\text{eff},i} = \mathcal{H}_{\text{ani}} + \mathcal{H}_{\text{exc},i} + \mathcal{H}_{\text{dip},i} + \mathcal{H}_{\text{app},i} \quad (3.2)$$

โดยเทอมแรกของทางด้านขวาของสมการที่ 3.2 พลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกเดี่ยว $\mathcal{H}_{\text{ani},i}$ เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างพลังงานของอันตรกิริยาสปินออร์บิต (spin-orbit coupling หรือ SOC) และพลังงานของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างผลึก (crystal electric field) ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของไอออนหรืออะตอมในแลตทิซ [68] ซึ่งทำให้สปินของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่หันไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าของโครงสร้างผลึก เรียกทิศทางนี้ว่า ทิศทางของแนวแกนง่าย (easy axis หรือ \hat{e}) สำหรับแบบจำลองแม่เหล็กอะตอมพลังงานและสนามของแอนไอโซโทรปีผลึกเดี่ยวของวัสดุแม่เหล็ก จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าคงที่แอนไอโซโทรปีแกนเดี่ยว K_u ซึ่งมีหน่วยเป็นจูลต่อปริมาตร (J/m^3) และมุมที่เกิดขึ้นระหว่างเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปิน \hat{S}_i กับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแนวแกนง่าย \hat{e} ดังสมการที่ 3.3

$$\mathcal{H}_{\text{ani},i} = -K_u \sum_i (\hat{S}_i \cdot \hat{e})^2 \quad (3.3)$$

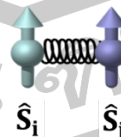
เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิเป็น 0 K หรือไม่มีสนามภายนอกมากกระทำภายนอก สนามที่เกิดจากพลังงาน $\mathcal{H}_{ani,i}$ จะทำให้สปินโมเมนต์ภายในวัสดุหันไปตามทิศแกนง่ายของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทิศแกนง่ายของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก CoFeB ที่มีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) และรอยต่อที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบ body centered cubic (bcc) [69] จะมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของวัสดุ (perpendicular magnetic anisotropy หรือ PMA) เนื่องจากสปินโมเมนต์ภายในบัลล์ถูกเหนี่ยวนำจากสนามแอนไอโซโทรปีที่ตั้งฉากกับระนาบของวัสดุที่เกิดจากการเกิดไฮบริดไคเซชันระหว่าง Fe และ O ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงผลของสนามแอนไอโซโทรปีผลึกของแกนเดี่ยวที่กระทำต่อสปินโมเมนต์

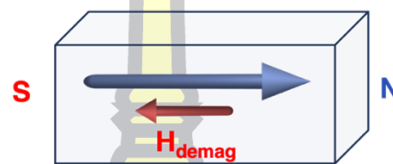
นอกเหนือจากพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกเดี่ยว $\mathcal{H}_{ani,i}$ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกแล้วยังเกิดพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนโดยตรง (direct exchange interaction) $\mathcal{H}_{exc,i}$ ระหว่างสปินโมเมนต์ \hat{S}_i และ \hat{S}_j ซึ่งเป็นสปินโมเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน (nearest neighbor list) ดังรูปที่ 3.4 โดยพลังงานและสนามประเพณีจะมีค่าขึ้นอยู่กับมุมระหว่างสปินโมเมนต์ที่อยู่ใกล้กันและค่าปริพันธ์การแลกเปลี่ยน (exchange integral หรือ J_{ij}) ซึ่งพิจารณาได้จากแรงผลักรวม (Coulomb repulsion) และการซ้อนทับกันของออร์บิทัล (orbital overlap) [70] ระหว่างสปินโมเมนต์ดังกล่าว ซึ่งในแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.4)

$$\mathcal{H}_{exc,i} = - \sum_{i \neq j} J_{ij} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.4 แสดงปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปินโมเมนต์ \hat{S}_i และ \hat{S}_j ซึ่งเป็นสปินโมเมนต์ที่อยู่ใกล้กัน (nearest neighbor list)

ซึ่งทั้งพลังงานแอนไอโซโทรปีผลึกเดี่ยว $\mathcal{H}_{ani,i}$ และพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนโดยตรง $\mathcal{H}_{exc,i}$ ทำให้สปินโมเมนต์หรือภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมีทิศทางเดียวกัน หรือสามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือเกิดแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร ซึ่งแมกนีไทเซชันคือผลรวมของสปินโมเมนต์ของอะตอมทั้งหมดต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยของวัสดุ โดยการเกิดขึ้นของแมกนีไทเซชันนี้จะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) ภายในวัสดุแม่เหล็ก ซึ่งการเกิดขึ้นของขั้วเหล่านี้ทำให้เกิดสนามหนึ่งที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของแมกนีไทเซชัน เรียกสนามนี้ว่า สนามของพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันและทิศทางของสนามของพลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กภายในวัสดุ

พลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็ก เป็นพลังงานที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของระหว่างสปินโมเมนต์แม่เหล็กเช่นเดียวกับ $\mathcal{H}_{dip,i}$ แต่พลังงานนี้จะเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างสปินโมเมนต์ทุก ๆ อะตอมในวัสดุ ดังสมการที่ 3.5

$$\mathcal{H}_{dip,l} = - \sum_{j \neq i} \left[\frac{3(\vec{\mu}_l \cdot \vec{r}_{lk})(\vec{\mu}_k \cdot \vec{r}_{lk}) - \vec{\mu}_l \cdot \vec{\mu}_k}{|\vec{r}_{lk}|^3} \right] \quad (3.5)$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าซึมซาบได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ

$\vec{\mu}_l$ คือ โมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์ที่ตำแหน่ง l

$\vec{\mu}_k$ คือ โมเมนต์แม่เหล็กของเซลล์ที่ตำแหน่ง k

\vec{r}_{lk} และ \vec{r}_{kl} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยและเวกเตอร์ระหว่างเซลล์ตำแหน่งที่ l และ k

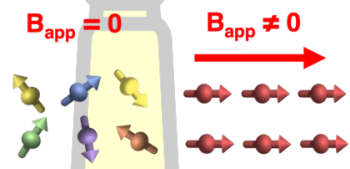
$|\vec{r}_{lk}|$ คือ ระยะห่างระหว่างเซลล์ตำแหน่งที่ l และ k

โดยพลังงานทั้งสามที่ได้กล่าวไปนั้นเป็นพลังงานพื้นฐานที่เกิดขึ้นจากคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและลักษณะการจัดเรียงตัวของสปินโมเมนต์ของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกหรือวัสดุแม่เหล็กประเภทอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้เครื่องกำเนิดสัญญาณระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์กทำงานได้ จำเป็นต้องให้สนามภายนอกป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก (external magnetic field หรือ $\vec{B}_{app,i}$) เพื่อควบคุมทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพินมีทิศทางคงที่ซึ่งสำคัญต่อการ

อ้างอิงสัญญาณของ STNO ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานซีมาน (Zeeman energy หรือ $\mathcal{H}_{Zeeman,i}$) ดังสมการที่ 3.6

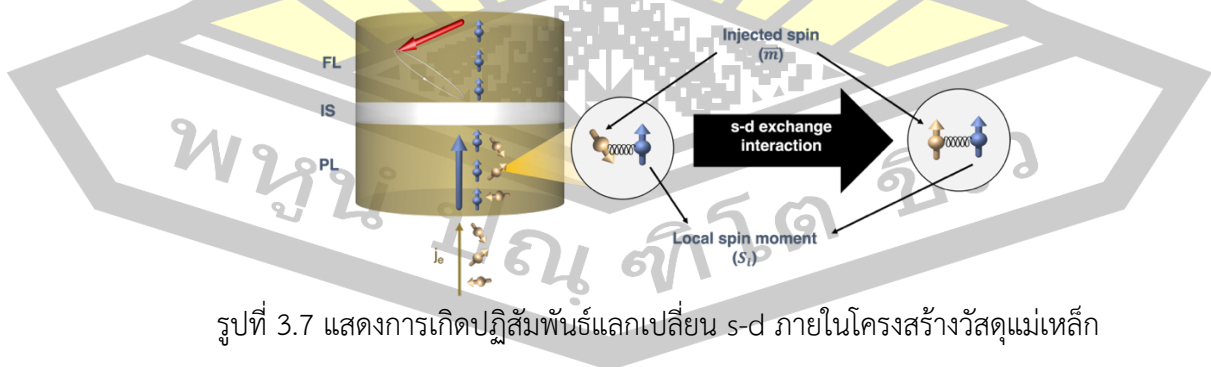
$$\mathcal{H}_{Zeeman,i} = -\mu_s \sum_i \hat{S}_i \cdot \vec{B}_{app,i} \tag{3.6}$$

สนามดังกล่าวจะส่งผลทำให้เกิดพลังงานที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กภายนอกและโมเมนต์แม่เหล็กภายในธาตุหรือวัสดุ เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากพอที่จะเอาชนะหรือรบกวนปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่หมุนรอบตัวเองและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนรอบวงโคจร ส่งผลให้ระดับพลังงานเกิดการแยกกัน (splitting) และโมเมนต์แม่เหล็กมีทิศทางเรียงไปตามทิศของสนาม $\vec{B}_{app,i}$ [71] ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงผลของสนามแม่เหล็กภายนอกต่อสปินโมเมนต์ภายในวัสดุแม่เหล็ก

นอกจากนี้เพื่อทำให้แมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่ในชั้นอิสระของ STNO งานวิจัยนี้จะทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างของ STNO ที่ไหลจากชั้นอิสระไปยังชั้นพิน กล่าวคือกระแสอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากชั้นพินไปยังชั้นอิสระ ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d (s-d exchange interaction) ระหว่างสปินของกระแสอิเล็กตรอนและสปินที่อยู่ภายในวัสดุแม่เหล็กเอง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการเกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d ภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

โดยพลังงานที่เกิดขึ้นของปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.7

$$\mathcal{H}_{sd} = -J_{sd}\vec{m} \cdot \hat{S}_i \quad (3.7)$$

เมื่อ \vec{m} การสะสมสปินของกระแสอิเล็กตรอนตัวนำ (spin accumulation of conduction electrons) [72] และ J_{sd} คือ ค่าคงที่ของปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d ระหว่างการสะสมสปินและสปินโมเมนต์ภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (s-d exchange constant between spin accumulation and spin moment) โดย \vec{m} ประกอบไปด้วยองค์ประกอบในแนวตั้งฉาก (\vec{m}_\perp) และองค์ประกอบในแนวขนาน (\vec{m}_\parallel) กับแกนนิไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กในระบบพิกัดฐาน (basis coordinate) [72] ดังสมการที่ 3.8

$$\begin{aligned} \vec{m}_\parallel(z) &= [m_\parallel(\infty) + [m_\parallel(0) - m_\parallel(\infty)]e^{-z/\lambda_{sd}}]\hat{b}_1 \\ \vec{m}_{\perp,2}(z) &= 2e^{-k_1 z} [u\cos(k_2 z) - v\sin(k_2 z)]\hat{b}_2 \\ \vec{m}_{\perp,3}(z) &= 2e^{-k_1 z} [u\sin(k_2 z) + v\cos(k_2 z)]\hat{b}_3 \end{aligned} \quad (3.8)$$

โดยพลังงาน \mathcal{H}_{sd} จะทำให้แกนนิไทเซชันภายในชั้นอิสระเกิดการเคลื่อนที่วนรอบสนาม (\vec{B}_i) ที่เกิดขึ้นจากสนามประสิทธิผล $\vec{B}_{\text{eff},i}$ และสนามสปินทอร์ก (spin torque field หรือ $\vec{B}_{\text{ST},i}$) ซึ่งสำหรับแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของแกนนิไทเซชันจะเกิดการเคลื่อนที่ของสปินโมเมนต์ต่อเวลา ($\frac{\partial \hat{S}_i}{\partial t}$) ของแต่ละอะตอมในชั้นวัสดุซึ่งเกิดจากผลของสนาม \vec{B}_i จากสมการแลนเดา-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต หรือสมการ LLG ดังสมการที่ 3.9

$$\frac{\partial \hat{S}_i}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} [(\hat{S}_i \times \vec{B}_i) + \alpha[\hat{S}_i \times (\hat{S}_i \times \vec{B}_i)]] \quad (3.9)$$

โดยสนาม \vec{B}_i ประกอบไปด้วยสนามประสิทธิผล $\vec{B}_{\text{eff},i}$ และสนามสปินทอร์ก $\vec{B}_{\text{ST},i}$ ดังสมการที่ (3.10)

$$\vec{B}_i = \vec{B}_{\text{eff},i} + \vec{B}_{\text{ST},i} \quad (3.10)$$

$$\vec{B}_{\text{eff},i} = \sum_{j \neq i} \frac{J_{ij}\hat{S}_j}{\mu_s} + \frac{2K_u}{\mu_s} (\hat{S}_i \cdot \hat{e})\hat{e} + \frac{\mu_0\mu_s}{4\pi a^3} \sum_{j \neq i} \left[\frac{3(\vec{\mu}_j \cdot \vec{r}_{ij})\vec{r}_{ij} - \mu_j}{|\vec{r}_{ij}|^3} \right] + B_{\text{app},i}$$

$$\vec{B}_{\text{ST},i} = J_{sd}\vec{m}$$

จากสมการที่ (3.9) จะเห็นได้ว่าสนาม \vec{B}_i ทำให้สปินโมเมนต์เกิดการเคลื่อนที่วนรอบและเคลื่อนที่เข้าหาสนาม B_i ดังพจน์ที่ 1 และ 2 ทางด้านขวาของสมการ

3.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ STNO

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเข้าสู่โครงสร้างของ STNO จะทำให้เกิดสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันอย่างต่อเนื่องขึ้น สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของคุณภาพสัญญาณที่เกิดจากพลวัตของแมกนีไทเซชันจะอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและฟังก์ชันการกระจายตัวมอฟฟแปต ดังสมการที่ 3.11

$$M(f; A, f_0, \sigma, \beta) = A \left[\left(\frac{f - f_D}{\sigma} \right)^2 + 1 \right]^\beta \quad (3.11)$$

นอกจากนี้เป็นที่ทราบกันดีว่าภายในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นสถานะของสปินขึ้นและสปินลง ทำให้เมื่อทำการการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้างของ STNO จะทำให้ความหนาแน่นสถานะของสปินดังกล่าวรวมไปถึงกระแสสปินมีขนาดและทิศทางทางเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับ STNO ที่มีทิศทางของสปินเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความต้านทานในแต่ละตำแหน่งและเวลาของโครงสร้างมีค่าไม่เท่ากัน โดยเฉพาะที่ตำแหน่งบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและวัสดุอนแมกเนติก ซึ่งความต้านทานดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญอย่างมากที่จะนำไปสู่การคำนวณกำลังไฟฟ้า (power consumption หรือ P) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญยิ่งในส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกประเภทไม่ว่าแม้กระทั่ง STNO ในที่นี้สามารถคำนวณได้จากความต้านทานเชิงพื้นที่ (Resistance Area หรือ RA_i) ซึ่งสัมพันธ์กับเกรเดียนของการสะสมสปิน (gradient of spin accumulation หรือ $|\Delta m|$) และขนาดของกระแสสปิน (spin current หรือ $|j_m|$) ที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.12

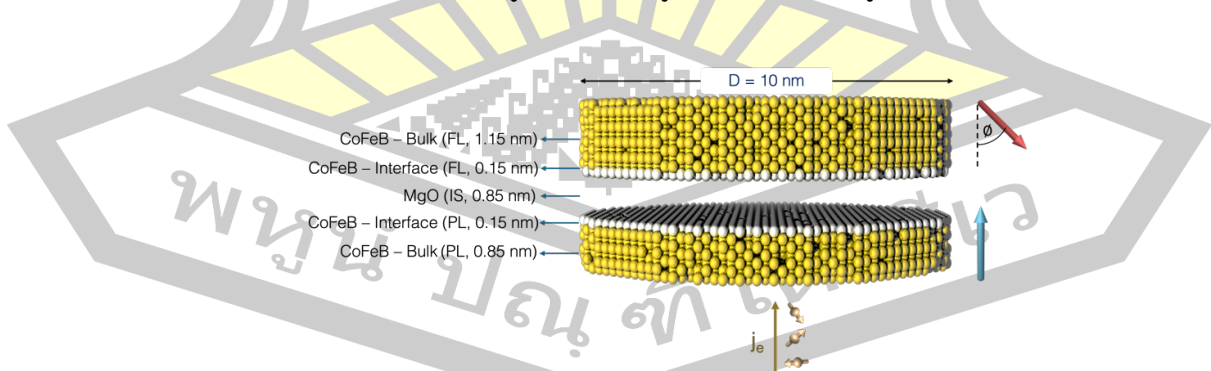
$$P = j_e^2 \cdot \frac{V_{cell} k_B T}{e^2} \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta m|}{|j_m|} \quad (3.12)$$

พหุ ประถม โท ชีวะ

บทที่ 4

ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อคุณสมบัติของสัญญาณและอัตราการใช้พลังงานของ CoFeB/MgO STNO

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันเป็นอย่างดีว่าการสร้างสัญญาณความถี่จากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของอุปกรณ์ STNO จำเป็นต้องป้อนกระแสไฟฟ้าหรือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density หรือ j_e) เพื่อทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์โดยอ้อม (indirect exchange interaction) อย่างปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์ก (spin-transfer torque หรือ STT) และทำให้เกิดสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระ โดยการป้อนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า j_e ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ความถี่ ความเสถียรของสัญญาณและกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีส่วนสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของ STNO ดังนั้น ในส่วนนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันคุณสมบัติของสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระอันได้แก่ ความถี่หลัก (dominant frequency หรือ f_D) ความกว้างของสัญญาณ (linewidth หรือ Γ) แอมพลิจูด (amplitude หรือ A) รวมไปถึงความต้านทานเชิงพื้นที่ (resistance area หรือ RA) และกำลังไฟฟ้า (power consumption หรือ P) โดยในงานวิจัยนี้จะทำการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า j_e ในช่วง 50 – 60 MA/cm² เข้าสู่โครงสร้าง CoFeB/MgO MTJ-STNO โดยโครงสร้างดังกล่าวมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกหรือเสาขนาดระดับนาโน (nano-pillar) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 10 nm และมีคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กแตกต่างกันที่บริเวณบัลค์และบริเวณรอยต่อ โดยชั้นพินมีแมกนีไทเซชันทิศทางการที่ในแนว +z และชั้นอิสระแมกนีไทเซชันจะเอียงทำมุมสัมพัทธ์เริ่มต้นกับทิศทางของสนามแอนไอโซโทรปีซึ่งอยู่ในแนว -z อยู่ที่ $\theta = 20^\circ$ ดังรูปที่ 4.1



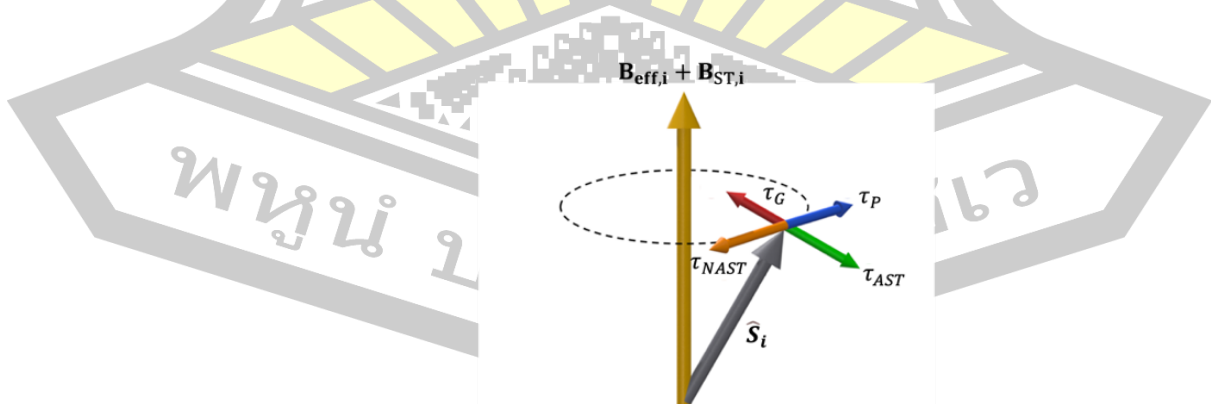
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของ MTJ-STNO ของ CoFeB/MgO ที่ประกอบด้วยบริเวณบัลค์ (bulk) ของ CoFeB และบริเวณรอยต่อ (interface) ของ CoFeB/MgO โดยที่ชั้นพิน แมกนีไทเซชันจะตั้งฉากกับระนาบของชั้นวัสดุ และชั้นอิสระแมกนีไทเซชันเอียงทำมุม θ กับระนาบของชั้นวัสดุ

4.1 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระ

เมื่อมีการป้อนกระแสอิเล็กทรอนิกส์เข้าสู่โครงสร้างของ MTJ-STNO ที่อุณหภูมิ 0 K กระแสอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบไปด้วยสปินที่มีทิศทางแบบสุ่มเปลี่ยนทิศทางไปตามสปิน (\hat{S}_i) ในชั้นพิน หรือเรียกว่ากระแสสปินโพลาไรซ์เนื่องจากปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d [73] โดยกระแสดังกล่าวทะลุผ่านชั้นฉนวนตามปรากฏการณ์ทะลุผ่านเชิงควอนตัมเข้าสู่ชั้นอิสระและเกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d อีกครั้งกับแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระทำให้แมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นดังรูปที่ 4.3 เนื่องจากผลระหว่างสนามปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d ($\vec{B}_{ST,i}$) และสนามแม่เหล็กประสิทธิผล ($\vec{B}_{eff,i}$) ที่กระทำต่อสปิน โดยสนาม $\vec{B}_{ST,i}$ จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงการสะสมสปินเนื่องจากการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โครงสร้าง ขณะที่ $\vec{B}_{eff,i}$ ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานแอนไอโซโทรปีพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยนระหว่างสปิน พลังงานลดสภาพความเป็นแม่เหล็กและพลังงานของสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งในงานวิจัยนี้การเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยสมการ LLG ดังสมการที่ 4.1

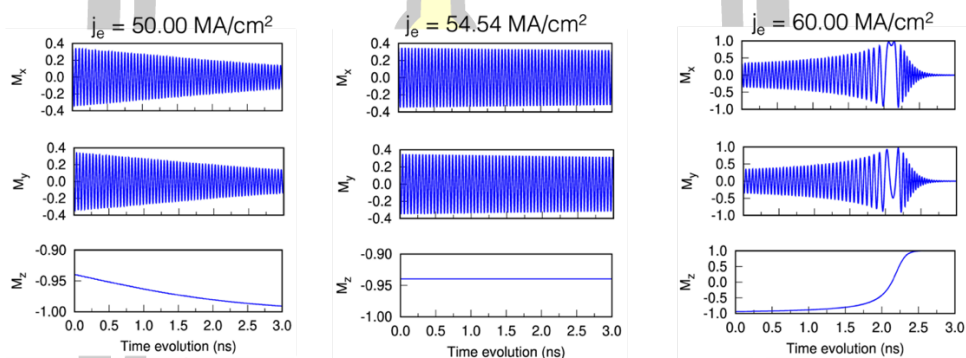
$$\frac{\partial \hat{S}_i}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)} \left[(\hat{S}_i \times (\vec{B}_{eff,i} + \vec{B}_{ST,i})) + \alpha \hat{S}_i \times [\hat{S}_i \times (\vec{B}_{eff,i} + \vec{B}_{ST,i})] \right] \quad (4.1)$$

โดยสนาม $\vec{B}_{eff,i}$ ที่กระทำต่อสปิน \hat{S}_i ทำให้เกิดทอร์กที่ทำให้สปิน \hat{S}_i เคลื่อนที่วนรอบ (τ_P) และทอร์กที่ทำให้สปิน \hat{S}_i เคลื่อนที่เข้าหาทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (τ_G) ขณะเดียวกัน สนาม $\vec{B}_{ST,i}$ ที่กระทำต่อสปิน \hat{S}_i ก็ทำให้เกิดผลเช่นเดียวกันกับสนาม $\vec{B}_{eff,i}$ เรียกว่าสปินทอร์ก (τ_{ST}) ซึ่งประกอบไปด้วยของอะเดียติกสปินทอร์ก (τ_{AST}) หรือทอร์กที่คล้าย τ_G (damping-like torque หรือ τ_{DL}) และนอนอะเดียติกสปินทอร์ก (τ_{NAST}) หรือทอร์กที่คล้าย τ_P (precessional-like torque หรือ τ_{PL}) ซึ่งทิศทางของทอร์กดังกล่าวสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของทอร์กที่กระทำต่อสปิน \hat{S}_i เนื่องจากผลของสนาม $\vec{B}_{eff,i}$ และ $\vec{B}_{ST,i}$

โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระจะลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้าง MTJ-STNO เนื่องจากปริมาณดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อขนาดของกระแสสปินที่เกิดขึ้นในวัสดุและสปินทอร์คที่กระทำต่อแมกนีไทเซชัน [37] โดยที่ค่า $j_e = 54.00 \text{ MA/cm}^2$ ดังรูปที่ 4.3 (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันจะมีแอมพลิจูดที่ลดลง กล่าวคือแมกนีไทเซชันมีแนวโน้มเคลื่อนที่เข้าหาทิศทางของสนามแอนไอโซโทรปีของวัสดุที่มีทิศทาง $-z$ ซึ่งในกรณีนี้แสดงให้เห็นว่าทิศทางของ τ_{AST} ที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับทอร์ค τ_G และ τ_{AST} มีขนาดที่น้อยกว่า τ_G [41] ซึ่งเป็นสถานะที่เรียกว่าสถานะไม่ผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (non-switching state)



(ก) non-switching state

$$(\tau_{AST} < \tau_G)$$

(ข) steady-precessional state

$$(\tau_{AST} \approx \tau_G)$$

(ค) switching state

$$(\tau_{AST} > \tau_G)$$

รูปที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในแนวแกน x y และ z (M_x M_y และ M_z) ที่สถานะไม่ผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (non-switching state) (ก) สถานะการสั่นรอบแบบคงที่ (steady-precessional state) (ข) และสถานะผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (switching state) (ค)

ขณะที่ค่า $j_e = 60.00 \text{ MA/cm}^2$ ดังรูปที่ 4.3 (ค) จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันจะมีแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก τ_{AST} ขนาดมากกว่า τ_G ส่งผลให้ τ_{AST} สามารถดึงแมกนีไทเซชันออกจากทิศทางของสนาม $\vec{B}_{eff,i}$ ซึ่งเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่ามากพอจะทำให้แมกนีไทเซชันเกิดการผันกลับทิศทาง เรียกสถานะนี้ว่าสถานะผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน (switching state) โดยที่สถานะนี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับหน่วยเข้าถึงข้อมูลแบบสุ่มที่อาศัยปรากฏการณ์ STT (STT-MRAM) และหน่วยบันทึกความจำเชิง

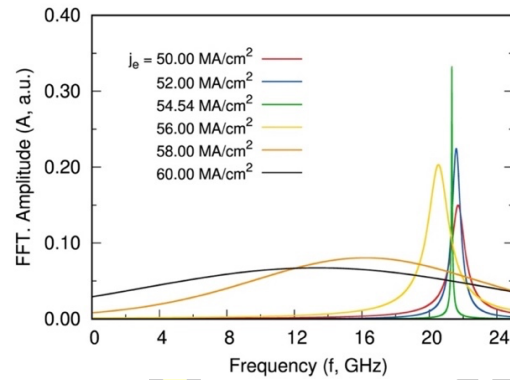
แม่เหล็กอื่น ๆ แต่ไม่สามารถใช้ได้กับ STNO เนื่องจากสัญญาณที่ดีสำหรับ STNO นั้นในเบื้องต้นจำเป็นต้องสามารถรักษาแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันให้คงที่มากที่สุด กล่าวคือ สปีทอร์ค τ_{AST} จะต้องหักล้างกันกับ τ_C กันมากที่สุด เรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะการสั่นวนรอบแบบคงที่ (steady-precessional state) ดังรูปที่ 4.3 (ข) โดยขนาดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสภาวะนี้อยู่ที่ $j_e = 54.54 \text{ MA/cm}^2$ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแมกนีไทเซชัน M_z จะเห็นได้ว่าแมกนีไทเซชันจะสามารถรักษาแอมพลิจูดหรือมุมของการเคลื่อนที่วนรอบทิศทางของสนาม $\vec{B}_{eff,i}$ และ $\vec{B}_{ST,i}$ นอกจากนั้นเวลาที่แมกนีไทเซชันเริ่มมีมุมการเคลื่อนที่คงที่ยังใช้เวลาเริ่มต้นที่น้อยกว่าระดับนาโน (sub-ns) เมื่อเปรียบกับงานวิจัยเชิงทฤษฎีอื่น ๆ ที่ใช้เวลาเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 2.0 – 20.0 ns [74][75][76][77] แสดงให้เห็นว่าการป้อนกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับมุมเริ่มต้นของแมกนีไทเซชันช่วยสร้างสัญญาณที่เสถียรโดยทันทีและช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการสร้างสัญญาณได้เป็นอย่างดี

4.2 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อคุณสมบัติสัญญาณของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระ

การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระทำให้เกิดสัญญาณความถี่ที่สามารถนำไปใช้งานได้กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสาร การบันทึกข้อมูลและการประมวลผลข้อมูล โดยความถี่ที่เกิดขึ้นในการทดลองสามารถวัดได้หลายวิธี โดยวิธีที่ได้รับความนิยมคือการวัดความต้านทานเชิงแม่เหล็กจากปรากฏการณ์ GMR และ TMR [28][3] ขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์หาความถี่ได้โดยตรงจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่ได้จากแบบจำลองระดับอะตอมและแบบจำลองการสะสมสปิน ดังเช่นรูปที่ 4.2 โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว และฟังก์ชันการกระจายตัวมอฟเฟต ดังสมการที่ 4.2

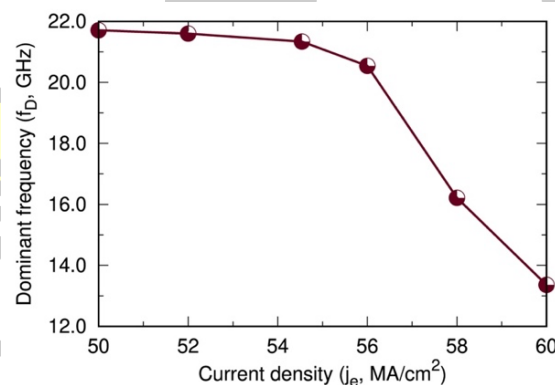
$$M(f; A, f_0, \sigma, \beta) = A \left[\left(\frac{f - f_D}{\sigma} \right)^2 + 1 \right]^{-\beta} \quad (4.2)$$

เพื่อวิเคราะห์และแสดงให้เห็นถึงความสำคัญว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันดังที่ได้กล่าวไปนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพของ MTJ-STNO ในงานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ค่าความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ ด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมที่เกิดจากสัญญาณการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน ดังรูปที่ 4.4 เพื่อวิเคราะห์ความถี่หลัก (f_D) ความกว้างของสัญญาณ (Γ) และแอมพลิจูดของความถี่หลัก (A) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์ให้กำเนิดสัญญาณทุกประเภทรวมถึง STNO



รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่ได้จากการวิเคราะห์การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและฟังก์ชันการกระจายตัวมอฟแพต

จากการศึกษาพบว่า ความถี่ของการเคลื่อนที่ที่อยู่ในย่านจิกะเฮิร์ต (GHz) ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้กับ MTJ-STNO สูงขึ้นจะส่งผลให้มีจำนวนสปินจากอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d กับสปินโมเมนต์ภายในวัสดุรวมไปถึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการสะสมสปินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดสปินทอร์ค τ_{AST} และ τ_{NAST} มีขนาดเพียงพอที่จะดึงแมกนีไทเซชันออกจากทิศทางเริ่มต้นและมีมุมในการหมุนรอบแกน z ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 4.3 เป็นผลให้ความถี่หลักของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากกราฟดังกล่าว จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงจะส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อความหนาแน่นกระแส (tunability หรือ $\frac{df_D}{dj_e}$) แตกต่างกันดังรูปที่ 4.5



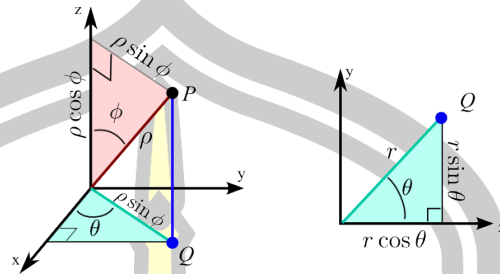
รูปที่ 4.5 แสดงแนวโน้มผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 50 – 60 MA/cm² ต่อความถี่หลักของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน

โดยในช่วงแรกที่ป้อนกระแสไฟฟ้าในช่วง $j_e = 50-56$ MA/cm² ค่าความถี่หลักที่เกิดขึ้นจะมีค่าค่อยๆ ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยมีค่าความถี่หลักอยู่ในช่วง 20-22

GHz และนั่นคือสาเหตุที่ส่งผลให้ค่า $\frac{df_D}{dj_e}$ มีค่าประมาณ $-0.19 \text{ GHz}/(\text{MA}/\text{cm}^2)$ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากมุมของแมกนีไทเซชันในชั้น FL เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับมุมเริ่มต้น ขณะที่เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าในช่วง $j_e = 56-60 \text{ MA}/\text{cm}^2$ จะทำให้ค่าความถี่หลักมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $12 - 20 \text{ GHz}$ ซึ่งค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับช่วง j_e แรก และในช่วงค่า $j_e = 56 - 60 \text{ MA}/\text{cm}^2$ มีค่า $\frac{df_D}{dj_e}$ ที่สูงกว่าเกือบ 10 เท่า ($-1.796 \text{ GHz}/(\text{MA}/\text{cm}^2)$) นอกจากค่าความถี่หลักแล้วค่า A และ Γ ยังเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญเช่นเดียวกับความถี่หลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับความกว้างของสัญญาณ ที่ในงานวิจัยมากมายทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลอง มีความพยายามอย่างมากในการพัฒนาพารามิเตอร์นี้ให้ดีขึ้น เนื่องจากทั้งสองพารามิเตอร์ดังกล่าวจะบ่งบอกถึงถึงความโดดเด่นของความถี่หลักและการกระจายตัวของความถี่ที่เกิดขึ้น โดยสัญญาณที่มีคุณภาพดีนั้นจำเป็นต้องมีค่า A สูง และ Γ ที่แคบมาก [9] เนื่องจากสามารถแสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นมีความถี่อื่น ๆ บนอยู่น้อยมากและเป็นผลดีต่อส่งผ่านสัญญาณภายในหรือระหว่างอุปกรณ์เอง โดยการคำนวณหา A สูง และ Γ โดยละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4

จากการวิเคราะห์สัญญาณการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ MTJ-STNO ต่อความกว้างของสัญญาณและแอมพลิจูด (แสดงดังรูปที่ 4.4) พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้างมีค่ามากขึ้นในช่วง $j_e = 50.00 - 54.54 \text{ MA}/\text{cm}^2$ จะส่งผลให้แอมพลิจูด A (เส้นทึบ-จุดขาวกลมตัด) มีค่าสูงขึ้นและความกว้างของสัญญาณ Γ (เส้นประ-จุดวงกลม) มีแนวโน้มแคบลง ขณะที่ในช่วง $j_e > 54.54 \text{ MA}/\text{cm}^2$ ค่าแอมพลิจูดและความกว้างของสัญญาณ มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้น ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงที่ $j_e < 54.54 \text{ MA}/\text{cm}^2$ แมกนีไทเซชันจะเคลื่อนที่ด้วยมุมที่มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.3 (ก) และ 4.7 (ข) เนื่องจากสนามทอร์คที่เกิดจากความหน่วงของสนามประสิทธิผลมีค่ามากกว่าสนามทอร์คอะเดียบาติกสปินทอร์ค และช่วง $j_e > 54.54 \text{ MA}/\text{cm}^2$ การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันจะมีขนาดมุมที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.3 (ค) และ 4.7 (ข) เนื่องจากสนามทอร์คที่เกิดจากความหน่วงของสนามประสิทธิผลมีค่าน้อยกว่าสนามทอร์คอะเดียบาติกสปินทอร์ค จากความไม่สมดุลระหว่างสนามทอร์คดังกล่าวส่งผลให้สนามนอนอะเดียบาติกสปินทอร์คที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อความถี่ที่เกิดขึ้นใน MTJ-STNO เกิดความถี่ที่ไม่คงที่เช่นเดียวกัน ทำให้เกิดความถี่รบกวนขึ้นเพราะความไม่เสถียรของสปินทอร์ค ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $j_e = 50 \text{ MA}/\text{cm}^2$ และ $60 \text{ MA}/\text{cm}^2$ ดังรูปที่ 4.4 ขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $j_e = 54.54 \text{ MA}/\text{cm}^2$ แมกนีไทเซชันจะเคลื่อนที่ด้วยมุมที่คงที่มากที่สุด เมื่อเทียบกับที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอื่น ดังรูปที่ 4.7 (ข) ซึ่งเกิดจากความสมดุลระหว่างสนามทอร์คที่เกิดจากความหน่วงของสนามประสิทธิผลและสนามทอร์คอะเดียบาติกสปินทอร์ค ส่งผลให้ค่าความกว้างของสัญญาณมีค่าน้อยที่สุด ($\sim 0.07 \text{ GHz}$) และแอมพลิจูดมีค่าสูงที่สุด ณ $j_e = 54.54 \text{ MA}/\text{cm}^2$ โดยเราจะเรียกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านี้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (optimal

current density) โดยการคำนวณมุมของแมกนีไทเซชันที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกคำนวณในพิกัดทรงกลม (spherical coordinate) ดังรูปที่ 4.6

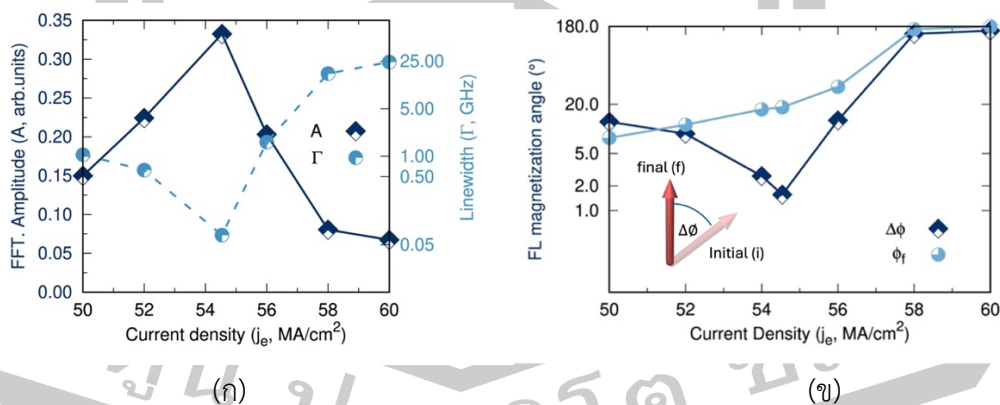


รูปที่ 4.6 แสดงพิกัดทรงกลมที่ใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงมุมของแมกนีไทเซชัน [85]

โดย ϕ และ θ คำนวณได้จาก $\phi = \cos^{-1}\left(\frac{\hat{M}_z}{M}\right)$ และ $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{M}_y}{\hat{M}_x}\right)$ เมื่อ \hat{M}_x , \hat{M}_y และ \hat{M}_z คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระในแนวแกน x y และ z ขณะที่ M คือขนาดของแมกนีไทเซชันซึ่งคำนวณได้จาก $M = \sqrt{\hat{M}_x^2 + \hat{M}_y^2 + \hat{M}_z^2}$ โดยพิกัดเริ่มต้นที่เวลา 0 ns และพิกัดสุดท้ายที่เวลา 5 ns ที่ $j_e = 54.54 \text{ MA/cm}^2$ แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

เวลา (ns)	\hat{M}_x	\hat{M}_y	\hat{M}_z	M	ϕ (องศา)	$\Delta\phi$ (องศา)
0	0.3420	0.000	-0.9397	1	20.00	-
5	-0.2966	0.1099	-0.9486	1	18.44	1.56

ตารางที่ 4.1 แสดงพิกัดเริ่มต้นและสุดท้ายของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ MTJ-STNO



รูปที่ 4.7 (ก) แสดงความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (j_e) ต่อความกว้างของสัญญาณ (Γ) และแอมพลิจูด (A) ของสัญญาณการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ STNO (ข) แสดงมุมสุดท้าย (ϕ_f) และมุมที่เปลี่ยนแปลงไป ($\Delta\phi$) เมื่อป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ 5 ns

ในบทนี้ได้แสดงให้เห็นว่า การป้อนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า j_e ที่มีขนาดแตกต่างกัน ($j_e = 50 - 60 \text{ MA/cm}^2$) เข้าสู่โครงสร้าง MTJ-STNO ที่มีแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเอียงทำมุมเริ่มต้น $\theta = 20^\circ$ ส่งผลให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันรอบทิศทางของสนาม $\vec{B}_{\text{eff},i}$ และ $\vec{B}_{\text{ST},i}$ ภายในชั้นอิสระมีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.3 เนื่องจากขนาดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและทิศทางของสปินที่ถูกป้อนเข้ามาส่งผลโดยตรงต่อขนาดและทิศทางของสปินทอร์ค โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของอะเดียติกสปินทอร์ค τ_{AST} ที่กระทำต่อทอร์คที่เกิดจากความหน่วงธรรมชาติ τ_G ซึ่งรูปแบบหรือสภาวะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เกิดจากผลของทอร์คดังกล่าวในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสามสภาวะ ได้แก่ สภาวะไม่ผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ($\tau_{AST} < \tau_G$) ที่ $j_e < 54.54 \text{ MA/cm}^2$ สภาวะการสั่นวนรอบแบบคงที่ ($\tau_{AST} \approx \tau_G$) ที่ $j_e = 54.54 \text{ MA/cm}^2$ และสภาวะผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ($\tau_{AST} > \tau_G$) ที่ $j_e > 54.54 \text{ MA/cm}^2$ ดังรูปที่ 4.3 (ก) - (ค) ตามลำดับ โดยความถี่ที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MTJ-STNO อยู่ในช่วง 12 - 22 GHz ซึ่งอยู่ในย่านไมโครเวฟ ดังรูปที่ 4.5 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความกว้างของสัญญาณ Γ และแอมพลิจูด A พบว่า ที่สภาวะการสั่นวนรอบแบบคงที่ (มุม θ ของแมกนีไทเซชันมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ดังรูปที่ 4.7(ข)) ซึ่งเป็นสภาวะที่แอมพลิจูดของการหมุนมีความเสถียรมากที่สุด จะมีความกว้างของสัญญาณ Γ ที่แคบและแอมพลิจูด A สูงที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.7(ก) และที่สำคัญสัญญาณที่เสถียรนี้เกิดขึ้นในเวลาที่น้อยกว่าระดับนาโนวินาที ซึ่งเป็นผลดีต่อการทำงานของ STNO เรียกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสภาวะนี้ว่า optimal current density (j_o) แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาในส่วนนี้ได้แสดงให้เห็นถึงจุดอ่อนของ STNO เช่นกัน เนื่องจากมีข้อจำกัดในการสร้างสัญญาณความถี่ที่มีความกว้างของสัญญาณ Γ ที่แคบและแอมพลิจูด A สูงที่สุด เพียงค่าเดียว ซึ่งไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริง ดังนั้น ในบทถัดไปผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดของมุมแมกนีไทเซชันที่หลากหลายขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการทำให้ STNO สร้างสัญญาณได้หลากหลายย่านความถี่และมีสัญญาณที่มีคุณภาพต่อไป

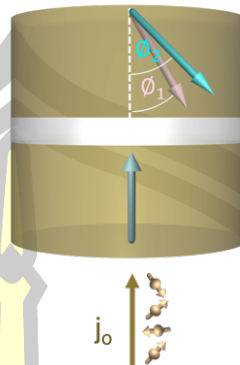
บทที่ 5

ผลของมุมสัมพัทธ์เริ่มต้นระหว่างแมกนีไทเซชันของชั้นพินและชั้นอิสระต่อคุณสมบัติของสัญญาณและกำลังไฟฟ้าของ CoFeB/MgO STNO

จากผลการศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพของ MTJ-STNO ทำให้เราทราบว่า การปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ทำให้การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันมีลักษณะแตกต่างกันตามไปด้วย และส่งผลโดยตรงต่อความถี่หลัก แอมพลิจูด ความกว้างของสัญญาณ ความต้านทานเชิงพื้นที่ และกำลังไฟฟ้าของ MTJ-STNO ที่สำคัญการศึกษาดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าการปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้สัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันมีความถี่หลักและแอมพลิจูดที่สูง รวมไปถึงความกว้างของสัญญาณที่แคบ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลดีอย่างยิ่งต่อ MTJ-STNO เนื่องจากทำให้การประมวลผลและส่งผ่านข้อมูลในอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์มีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมาเดียวกันนี้กลับแสดงให้เห็นข้อบกพร่องประการหนึ่งของ MTJ-STNO เนื่องจาก MTJ-STNO สามารถสร้างสัญญาณที่มีคุณภาพสูงที่สุด (ความกว้างของสัญญาณแคบและแอมพลิจูดสูง) ได้เพียงความถี่เดียว ซึ่งไม่ตอบสนองต่อการใช้งานใน STNO จริงที่ต้องการให้อุปกรณ์สร้างสัญญาณสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้หลากหลายในขณะเดียวกันก็ต้องมีความเสถียรและกำลังของสัญญาณที่ดี เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การศึกษาในส่วนที่จะกล่าวต่อไปนี้จะได้นำเสนอวิธีการเพื่อปรับปรุงให้ MTJ-STNO มีความสามารถในการสร้างสัญญาณที่เสถียร กำลังสัญญาณดี และที่สำคัญสามารถสร้างความถี่ได้หลากหลาย โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนทิศทางหรือมุมของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ MTJ-STNO ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยจะเรียกมุมดังกล่าวว่า มุมสัมพัทธ์เริ่มต้นของแมกนีไทเซชัน (initial relative angle หรือ θ_i) เนื่องจากชั้นดังกล่าวแมกนีไทเซชันสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางได้ง่ายและที่สำคัญจากการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้แสดงใน ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปได้ส่งผลให้มุมของแมกนีไทเซชันเปลี่ยนไปและความถี่ของการเคลื่อนที่เปลี่ยนไปด้วย เพียงแต่ความถี่ที่เปลี่ยนไปในหลาย ๆ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ไม่มีความเสถียรและกำลังสัญญาณที่ดีพอ

$$\phi = 5^\circ - 70^\circ$$



รูปที่ 5.1 แสดงการปรับเปลี่ยนมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระในช่วง $5^\circ-70^\circ$ ในโครงสร้างของ MTJ-STNO เพื่อวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุด เพื่อให้ MTJ-STNO สร้างความถี่ได้หลากหลายในขณะที่มีความกว้างสัญญาณแคบและแอมพลิจูดสูง

สำหรับการศึกษาผลของมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันต่อประสิทธิภาพการทำงานของ MTJ-STNO ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งปัจจัยที่จะศึกษาออกเป็นสองส่วนหลัก โดยปัจจัยส่วนแรกจะเป็นการศึกษาประสิทธิภาพเชิงคุณสมบัติของสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วย ผลของมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุด (j_0) ที่เหมาะสมกับแต่ละมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชัน ความถี่หลัก (f_0) ของพลวัตของสปินทั้งหมดหรือพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า j_0 ใดๆ แอมพลิจูด (A) ที่บ่งบอกถึงความเข้มของสัญญาณที่เกิดจากพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระ และความกว้างของสัญญาณ (Γ) ซึ่งเป็นปริมาณพื้นฐานที่ใช้วัดการถูกรบกวนของความถี่หลักของพลวัตของแมกนีไทเซชัน ขณะที่ประสิทธิภาพการทำงานของ MTJ-STNO ที่ผู้วิจัยศึกษาในส่วนที่สองคือ ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ที่ประกอบไปด้วยความต้านทานเชิงพื้นที่ (RA) และกำลังไฟฟ้า (P) ซึ่งจะใช้บ่งบอกกำลังไฟฟ้าของ MTJ-STNO ขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้า

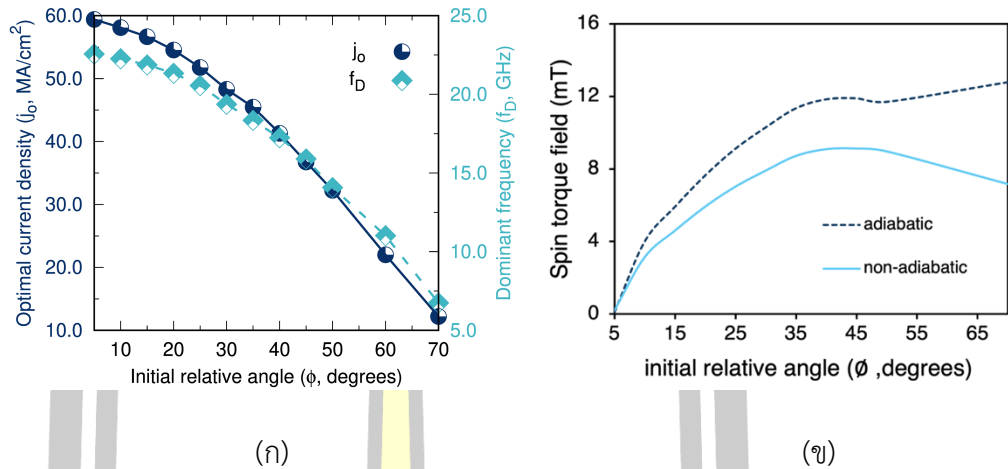
5.1 ผลของมุมสัมพัทธ์ ระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดและคุณสมบัติของสัญญาณ

ในการศึกษาส่วนนี้ ในลำดับแรกผู้วิจัยได้ทำการจำลองและสร้างโครงสร้าง MTJ-STNO ในแบบจำลองแม่เหล็กในระดับอะตอมประกอบโดยโครงสร้างดังกล่าวประกอบไปด้วยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก CoFeB เป็นชั้นพินและชั้นอิสระ ขณะที่วัสดุอนแมกเนติกคือวัสดุ MgO เป็นชั้นฉนวนซึ่ง MTJ-STNO จะมีรูปทรง จำนวนชั้น ความหนาแต่ละชั้น รวมไปถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กและคุณสมบัติของการส่งผ่านเช่นเดียวกันกับโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพของ MTJ-STNO ในบทที่ผ่านมา (รายละเอียดการจำลองโครงสร้าง MTJ-STNO กล่าว

ไว้ใบบที่ 3) แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการศึกษาผลของมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชัน θ ต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดังกล่าว ผู้วิจัยไม่ได้กำหนดค่า $\theta = 20^\circ$ ไว้เพียงค่าเดียวดังเช่นการศึกษาที่ผ่านมา แต่ผู้วิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนมุมสัมพัทธ์เริ่มต้นของแมกนีไทเซชัน θ_i ในชั้นอิสระให้อยู่ในช่วง $\theta = 5^\circ - 70^\circ$ เพื่อทำให้เกิดทอร์กกระหว่างการสะสมสปินและสปินรวมไปถึงเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกลับทิศของแมกนีไทเซชัน (magnetization switching) ในชั้นอิสระ นอกจากนี้การปรับค่ามุม θ ในช่วงที่หลากหลายขึ้นนี้จะช่วยให้ MTJ-STNO สามารถสร้างสัญญาณความถี่ที่มีความเสถียรได้หลากหลายย่านความถี่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากต่อเสถียรภาพของการเคลื่อนที่แบบวนรอบของแมกนีไทเซชันขณะที่แมกนีไทเซชันในชั้นพินจะอยู่ในทิศแกน +z ตามเดิม ดังรูปที่ 5.1

หลังจากที่ทำการจำลองโครงสร้าง MTJ-STNO แล้วในลำดับถัดมาผู้วิจัยได้ทำการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า j_e เข้าสู่โครงสร้างดังกล่าวโดยทำการป้อนที่ชั้นพิน PL เพื่อให้กระแสอิเล็กตรอนหรือกระแสสปินส่งผ่านสปินทอร์คจากชั้นพินไปยังชั้นอิสระตามแบบจำลองการสะสมสปิน ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Landau-Lifshitz-Gilbert (รายละเอียดแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมและแบบจำลองการสะสมสปิน กล่าวไว้ในบทที่ 2) ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของสัญญาณดังที่กล่าวไป ผู้วิจัยจึงได้นำเทคนิคการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว มาทำการวิเคราะห์ความถี่จากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในช่วง 0 – 5 ns เพื่อหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุด j_0 ของแต่ละมุม θ (กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4) โดยจะพิจารณาจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้แอมพลิจูดและความกว้างของสัญญาณที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระมีค่าที่สูงที่สุดและแคบที่สุด ตามลำดับ ในลำดับสุดท้ายผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ความต้านทานและกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินและกระแสสปินภายในโครงสร้าง MTJ-STNO

จากการศึกษาผลของมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดและความถี่หลัก พบว่า มุมสัมพัทธ์ θ ส่งผลกระทบต่อปริมาณทั้งสองอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อมุมสัมพัทธ์ θ มีความกว้างมากขึ้นในช่วง $5^\circ - 70^\circ$ จะส่งผลให้ทั้งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า j_0 (เส้นทึบ-จุดวงกลม) และความถี่ f_0 (เส้นประ-จุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด) มีแนวโน้มที่ลดลงแบบไม่เชิงเส้น (non-linear behavior) ดังรูปที่ 5.2 (ก) โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า j_0 ลดลงจากค่าประมาณ 59.40 MA/cm^2 ถึง 12.20 MA/cm^2 ขณะที่ความถี่หลัก f_0 (เส้นทึบ-จุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด) ลดลงจาก 22.56 GHz ถึง 6.74 GHz



รูปที่ 5.2 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมพันธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นในช่วง 5°-70° ต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุด (เส้นทึบ-จุดวงกลม) และความถี่หลัก (เส้นทึบ-จุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด) (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมพันธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นในช่วง 5°-70° ต่อสนามอะเดียบาติกสปินทอร์ค (เส้นประ) และสนามนอนอะเดียบาติกสปินทอร์ค (เส้นทึบ) ที่เวลา 10 ps

โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดผลเช่นนี้ เกิดขึ้นจากเมื่อทำการป้อนกระแสสปินที่ยังไม่โพลาไรซ์ j_e ซึ่งเป็นกระแสอิเล็กตรอนที่มีทิศทางของสปินแบบสุ่ม เข้าสู่โครงสร้างของ MTJ-STNO จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การส่งผ่านสปินทอร์คจาก ชั้นพินไปยังชั้นอิสระ โดยอาศัยกระแสสปินโพลาไรซ์ j_m ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยสปินที่มีทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันในชั้นพิน (ทิศทาง +z) ดังรูปที่ 5.1 เกิดพลังงานปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน s-d กับสปินโมเมนต์ S_i ภายในชั้นอิสระเกิดการเปลี่ยนแปลงการสะสมสปินของอิเล็กตรอนตัวนำ m ภายในชั้น FL ซึ่งทำให้แมกนีไทเซชันเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นเนื่องจากเกิดสนามสปินทอร์คอย่างสนามอะเดียบาติกสปินทอร์ค (τ_{AST}) และสนามนอนอะเดียบาติกสปินทอร์ค (τ_{NAST}) มากกระทำแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 (ข) ซึ่งสนาม τ_{AST} และ τ_G ในแบบจำลองการสะสมสปินสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1

$$\begin{aligned}\tau_{AST} &= -\frac{2D_0a^3\hbar}{\lambda_j^2\lambda_{trans}^2e\mu_B}(\lambda_j^2m_{L,2} + \lambda_{trans}^2m_{L,3})\hat{b}_2 \\ \tau_{NAST} &= \frac{2D_0a^3\hbar}{\lambda_j^2\lambda_{trans}^2e\mu_B}(\lambda_{trans}^2m_{L,2} + \lambda_j^2m_{L,3})\hat{b}_3\end{aligned}\quad (5.1)$$

เมื่อ D_0 คือ ค่าคงที่การแพร่ของสปิน (diffusion constant) หน่วย m²/s

a^3 คือ ปริมาตรของไมโครเซลล์ (microcell volume) หน่วย m³

\hbar คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant) มีค่าเป็น 1.0546×10^{-34} Js

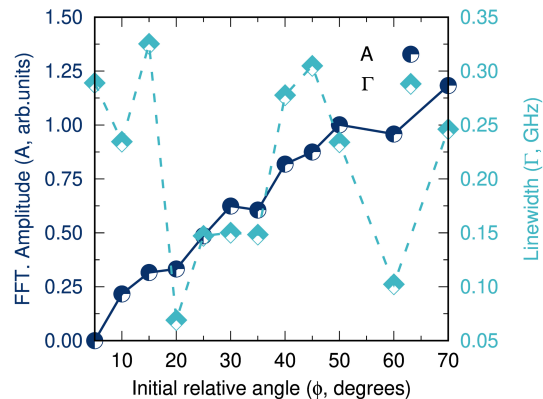
e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอนเดี่ยว (electron charge) มีค่าเป็น $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
 μ_B คือ ค่าคงที่บอร์แมกนีตอน (Bohr magneton) มีค่าเป็น $9.274 \times 10^{-24} \text{ JT}^{-1}$
 λ_J และ λ_{trans} คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาแพร่ ระยะดีเฟสซึ่งและการ
 กลับทิศทางของสปิน มีหน่วยเป็น m

$m_{\perp,2}$ และ $m_{\perp,3}$ คือ องค์ประกอบของการสะสมสปินในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแมก
 นิไทเซชัน มีหน่วยเป็น C/m^3 ในระบบพิกัดฐาน $\hat{\mathbf{b}}_2$ และ $\hat{\mathbf{b}}_3$ (basis coordinate)

จากรูปที่ 5.2 (ข) สนามสปินทอร์ค τ_{AST} (เส้นประ) และ τ_{NAST} (เส้นทึบ) จะเปลี่ยนแปลง
 ตามมุมเริ่มต้นของแมกนิไทเซชัน θ ในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดย τ_{AST} มีขนาดมากกว่า τ_{NAST}
 ซึ่ง τ_{AST} จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความถี่และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เมื่อพิจารณาจากฮา
 มิลโตเนียนสปินของพลังงานดังกล่าว $\mathcal{H} = -J_{sd} \mathbf{m} \cdot \hat{\mathbf{S}}_i$ แสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้ เมื่อมุมสัมพัทธ์
 θ มีค่ามากขึ้น (มุมระหว่าง $\hat{\mathbf{S}}_i$ และ \mathbf{m} แคบลง) จะส่งผลให้พลังงานที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างกันมี
 ค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่จะใช้ในการสร้างและรักษาความถี่หลัก f_0 ของพลวัต
 ของสปินภายในชั้นอิสระมีค่าลดลง ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของมุมดังกล่าวยังส่งผลให้ขนาดของสปิน
 ทอร์ค τ_{AST} ที่กระทำกับสปินโมเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 5.2 (ข)

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสปินทอร์ค τ_{NAST} จะเห็นได้ว่าในช่วงมุมสัมพัทธ์ θ ที่น้อยกว่า
 ประมาณ 45° สปินทอร์ค τ_{NAST} จะเพิ่มขึ้นตามมุมสัมพัทธ์ θ ในขณะเดียวกันในกรณีที่อยู่ในช่วงมุม
 สัมพัทธ์ θ ที่มากกว่า 45° สปินทอร์ค τ_{NAST} จะลดลงตามมุมสัมพัทธ์ θ ซึ่งแสดงให้เห็นเห็นว่าสปิน
 ทอร์ค τ_{NAST} ส่งผลต่อความถี่ของแมกนิไทเซชันในช่วงมุมสัมพัทธ์นี้ สามารถพิสูจน์ได้จากอัตราการ
 เปลี่ยนแปลงความถี่ต่อมุมสัมพัทธ์ $(\frac{df_D}{d\theta})$ ในช่วง $\theta < 45^\circ$ จะมีอัตราการลดลงอยู่ที่ 0.518
 GHz/degrees ขณะที่ในช่วง $\theta > 45^\circ$ มีอัตราการลดลงอยู่ที่ 0.989 GHz/degrees

เมื่อพิจารณาผลของมุมสัมพัทธ์ของแมกนิไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้น แอมพลิจูด และความ
 กว้างของสัญญาณ ดังรูปที่ 5.3 พบว่า แอมพลิจูด A (เส้นทึบ-จุดวงกลม) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความ
 กว้างของมุมสัมพัทธ์ θ ซึ่งจากการศึกษานี้จะเห็นจุดที่น่าสนใจคือที่ มุมสัมพัทธ์ $\theta = 5^\circ$ แอมพลิจูดที่
 เกิดขึ้นจะมีค่าในระดับที่ต่ำมาก (เข้าใกล้ศูนย์) ผลที่เกิดขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่ามุมสัมพัทธ์แมกนิไทเซชัน
 ที่เหมาะสมนั้นควรมีค่ามากกว่า 5 องศาขึ้นไป ขณะที่ความกว้างของสัญญาณ Γ (เส้นทึบ-จุดสี่เหลี่ยม
 ข้าวหลามตัด) มีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็
 ตามความกว้างสัญญาณ Γ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า j_0 มีค่าต่ำกว่า 0.35 GHz และมีค่าความ
 กว้างสัญญาณต่ำสุดที่ 0.069 GHz ณ มุมสัมพัทธ์ $\theta = 20^\circ$



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมพันธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นในช่วง 5° - 70° ต่อต่อแอมพลิจูด (เส้นทึบ-จุดวงกลม) และความกว้างของสัญญาณ (เส้นทึบ-จุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด)

5.2 ผลของมุมสัมพันธ์ระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระต่อกำลังไฟฟ้า

นอกเหนือจากคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของสัญญาณแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งที่เราพิจารณาอย่างยิ่งคือ กำลังไฟฟ้าของ STNO เพราะสามารถบ่งบอกได้ถึงการประหยัดพลังงานและความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ เนื่องจากความร้อนสามารถส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน [78] และพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงคุณภาพของสัญญาณดังที่กล่าวมาได้ อีกทั้งในความเป็นจริงนั้นการใช้งาน STNO ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำเป็นที่จะต้องถูกนำมาต่อกันหลาย ๆ ตัวเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น [11] ดังนั้น การหลีกเลี่ยงให้ STNO ตัวเดียวเกิดความร้อนและพลังงานมากเกินไปจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทำให้ในส่วนนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการคำนวณกำลังไฟฟ้า (P) ดังสมการที่ 5.2

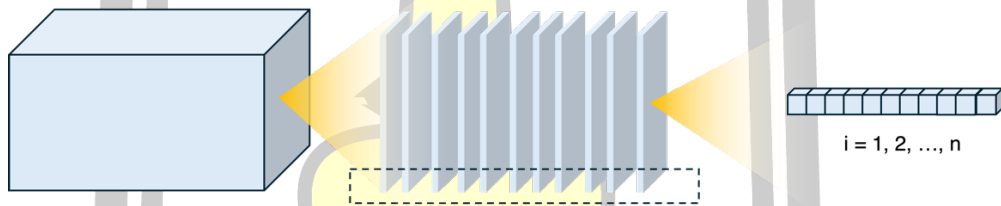
$$P = I^2 R \quad (5.2)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้าง STNO มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A) ซึ่งคำนวณได้จาก $I = j_e / A$ โดย j_e คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการรักษาสัญญาณให้คงที่ของแต่ละมุม มีหน่วยเป็น A/m^2 และ A คือพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้าง MTJ-STNO ซึ่งในที่นี้สามารถคำนวณได้จากพื้นที่วงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 nm ขณะที่ R คือความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของ STNO มีหน่วยเป็น Ω ซึ่งในโครงสร้าง MTJ จะเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ความต้านทานทะลุผ่านเชิงแม่เหล็ก (tunneling magnetoresistance หรือ TMR) ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระรวมไปถึงความหนาของชั้นฉนวน [73] โดยขั้นตอนแรก ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณความต้านทานที่เกิดขึ้นในโครงสร้างนี้จากความต้านทานเชิงพื้นที่ (RA) ที่ได้จากการแบ่ง

โครงสร้าง MTJ แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงการสะสมสปิน (Δm) และ กระแสสปิน (j_m) [79] ดังสมการที่ 5.3

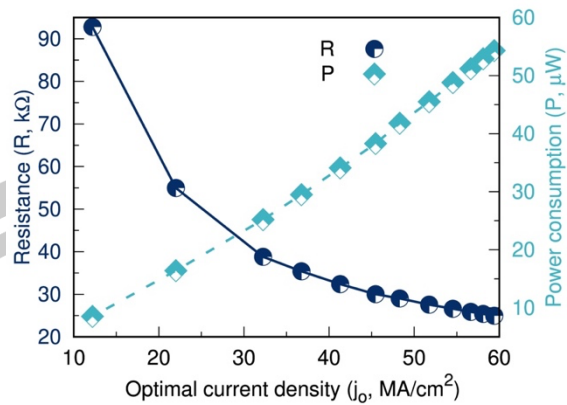
$$RA = \frac{V_{cell} k_B T}{e^2} \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta m_i|}{|j_m|} \quad (5.3)$$

- เมื่อ $|\Delta m|$ คือ ขนาดของการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินต่อตำแหน่ง มีหน่วยเป็น C/m^3
 $|j_m|$ คือ ขนาดของความหนาแน่นของกระแสสปินที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ MTJ-STNO คำนวณได้จาก $|j_m| = \sqrt{j_{m,x}^2 + j_{m,y}^2 + j_{m,z}^2}$ มีหน่วยเป็น A/m^2
 V_{cell} คือ ปริมาตรของไมโครเซลล์ที่ใช้ในการพิจารณาค่าการสะสมสปิน มีหน่วยเป็น m^3
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้าง MTJ-STNO
 $k_B T$ คือ ค่าความกว้างของระดับพลังงานย่อยของวัสดุ มีหน่วยเป็น eV



รูปที่ 5.4 แสดงการแบ่งไมโครเซลล์เพื่อใช้คำนวณการสะสมสปิน กระแสสปินและความต้านทานในโครงสร้าง MTJ-STNO เมื่อ n คือจำนวนไมโครเซลล์ที่ต่อกันเป็นอนุกรม

เมื่อทำการวิเคราะห์และคำนวณพลังงานหรือกำลังที่ใช้ในโครงสร้าง MTJ-STNO พบว่า เมื่อป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นที่อุณหภูมิ 0 K (มัมส์พัทธ์ 0 ลดลง) เพื่อรักษาสภาพการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันให้อยู่ในสถานะที่แมกนีไทเซชันเคลื่อนที่วนรอบด้วยมุมคงที่ พบว่า ความต้านทาน R ที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MTJ-STNO มีค่าลดลงแบบไม่เชิงเส้นอย่างรวดเร็วจาก 20.0 ถึง 95.0 $k\Omega$ ตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า $j_0 = 10.0 - 60.0 \text{ MA/cm}^2$ ดังกราฟเส้นทึบจุดวงกลม ดังรูปที่ 5.5 ขณะที่กำลังไฟฟ้า P จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 10.0 ถึง 60.0 μW ดังกราฟเส้นประจุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเริ่มต้นในช่วง 5° - 70° ต่อความต้านทาน(เส้นทึบ-จุดวงกลม) และกำลังไฟฟ้า (เส้นประ-จุดสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด)

ดังนั้น การศึกษาในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนทิศทางหรือมุมของแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระของ MTJ-STNO ($\theta = 5^\circ - 70^\circ$) ดังรูปที่ 5.1 ส่งผลให้อุปกรณ์สามารถสร้างสัญญาณความถี่ได้หลากหลายขึ้น (6.74 GHz ถึง 22.56 GHz) ดังรูปที่ 5.2 (ก) โดยที่ยังสามารถสร้างสัญญาณได้อย่างรวดเร็ว (< 1 ns) และรักษาสัญญาณที่มีความเสถียร (แอมพลิจูดสูงและความกว้างของสัญญาณแคบ ดังรูปที่ 5.3) ด้วยการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับมุมของแมกนีไทเซชัน นอกจากนี้เมื่อทำการคำนวณกำลังไฟฟ้าของ STNO เดี่ยว โดยอาศัยแบบจำลองการสะสมสปิน ที่อุณหภูมิ 0 K อยู่ที่ระดับ μW ดังรูปที่ 5.5

พหุ ประ โท ชี เว

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษา

6.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมร่วมกับแบบจำลองการสะสมสปินเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density หรือ j_e) และมุมสัมพัทธ์แมกนีไทเซชันของชั้นอิสระ (relative angle หรือ θ) ต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันและพฤติกรรมการส่งผ่านสปินภายในการออกแบบเครื่องกำเนิดสัญญาณระดับนาโนที่ขับเคลื่อนด้วยสปินทอร์ค ในที่นี้ STNO ถูกสร้างขึ้นจากโครงสร้างรอยต่อทะเลผ่านเชิงแม่เหล็กรูปร่างทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 nm ที่ประกอบไปด้วยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก CoFeB สองชั้นที่ถูกคั่นด้วยวัสดุฉนวน MgO เรียกว่า MTJ-STNO นอกจากนี้เรายังได้ศึกษาประสิทธิภาพของ MTJ-STNO โดยพิจารณาจากความถี่หลัก (Dominant frequency หรือ f_D) ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน ความกว้างของสัญญาณ (Linewidth หรือ Γ) แอมพลิจูด (Amplitude หรือ A) และกำลังไฟฟ้า (power consumption หรือ P) ที่อุณหภูมิ 0 K

ผลการศึกษาพบว่า การบิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า j_e ที่มีขนาดแตกต่างกัน เข้าสู่โครงสร้าง MTJ-STNO ที่มีแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระเอียงทำมุมเริ่มต้น θ ส่งผลให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันรอบทิศทางของสนาม $\vec{B}_{\text{eff},i}$ และ $\vec{B}_{\text{ST},i}$ ภายในชั้นอิสระมีความแตกต่างกัน เนื่องจากขนาดของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและทิศทางของสปินที่ถูกบิดเข้ามาส่งผลโดยตรงต่อขนาดและทิศทางของสปินทอร์ค โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของอะเดียบาติกสปินทอร์ค τ_{AST} ที่กระทำต่อทอร์คที่เกิดจากความหน่วงธรรมชาติ τ_G ซึ่งรูปแบบหรือสภาวะการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เกิดจากผลของทอร์คดังกล่าวในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสามสภาวะ ได้แก่ สภาวะไม่ผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ($\tau_{\text{AST}} < \tau_G$) สภาวะการสั่นวนรอบแบบคงที่ ($\tau_{\text{AST}} \approx \tau_G$) และสภาวะผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ($\tau_{\text{AST}} > \tau_G$) โดยที่สภาวะการสั่นวนรอบแบบคงที่ เป็นสภาวะที่แอมพลิจูดของการหมุนมีความเสถียรมากที่สุด จะมีความกว้างของสัญญาณ Γ ที่แคบและแอมพลิจูด A สูงที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น ๆ และเกิดขึ้นในเวลาที่น้อยกว่าระดับนาโนวินาที ซึ่งเป็นผลดีต่อการทำงานของ STNO เรียกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสภาวะนี้ว่า optimal current density (j_o)

เมื่อทำการศึกษาผลของมุมสัมพัทธ์แมกนีไทเซชันของชั้นอิสระ ต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน พบว่า มุมสัมพัทธ์ของแมกนีไทเซชันอยู่ในช่วง $5^\circ - 70^\circ$ ความถี่หลักของการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันมีแนวโน้มลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear behavior) จาก 22.56 GHz ถึง 6.74 GHz ขณะเดียวกัน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด j_o ก็ลดลงจาก 59.40 MA/cm² ถึง 12.20

MA/cm² แสดงให้เห็นว่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยให้ MTJ-STNO สามารถสร้างสัญญาณได้ในช่วงความถี่ที่หลากหลายมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความกว้างของสัญญาณ กลับไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน และขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม แต่มีค่าต่ำสุดที่ 0.069 GHz เมื่อมุมสัมผัสอยู่ที่ 20° ซึ่งเป็นจุดที่ให้สัญญาณคุณภาพดีที่สุด นอกจากนี้ ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ A มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่ามุมสัมผัสของแมกนีไทเซชัน โดยที่มุมสัมผัสต่ำสุดที่ 5° ทำให้เกิดสัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่ำมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามุมสัมผัสที่ต่ำเกินไปอาจทำให้การเกิดสัญญาณของ MTJ-STNO ไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น การเลือกมุมสัมผัสที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อคุณภาพของสัญญาณที่สร้างขึ้น

เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้า พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโครงสร้างของ MTJ-STNO กำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ค่าความต้านทานของโครงสร้างจะลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่โครงสร้างและการสะสมสปีนภายในโครงสร้าง MTJ-STNO นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมุมสัมผัสเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกมุมสัมผัสที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของอุปกรณ์ได้ ดังนั้น จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการป้อนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับมุมสัมผัสระหว่างแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้าง MTJ-STNO ส่งผลดีต่อคุณสมบัติสัญญาณอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับความกว้างของสัญญาณที่แคบลงอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งการนำแบบจำลองแม่เหล็กระดับอะตอมและแบบจำลองการสะสมสปีนมาใช้เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันและพฤติกรรมการส่งผ่านสปีน จะเป็นการเปิดประตูบานใหม่ในการพัฒนา MTJ-STNO ให้มีขนาดเล็กและประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย การประมวลผลข้อมูล และการบันทึกข้อมูลในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ควรพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงขึ้น เช่น อุณหภูมิห้อง (300 K) ต่อการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชัน พฤติกรรมการส่งผ่านสปีนและประสิทธิภาพของ MTJ-STNO

6.2.2 ควรศึกษาวัสดุอื่น ๆ นอกเหนือจาก CoFeB/MgO เช่น Heusler alloys หรือวัสดุแม่เหล็กที่อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ MTJ-STNO รวมไปถึงพัฒนา STNO ให้มีความสามารถในการสร้างสัญญาณความถี่ในระดับเทระเฮิรต์ ความกว้างสัญญาณในระดับกิโลเฮิรต์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีในอนาคต

บรรณานุกรม

- [1] J. C. Slonczewski, "Current-driven excitation of magnetic multilayers," *J Magn Magn Mater*, vol. 159, no. 1–2, 1996, doi: 10.1016/0304-8853(96)00062-5.
- [2] T. Taniguchi and H. Kubota, "Spin torque oscillator for microwave assisted magnetization reversal," *Jpn J Appl Phys*, vol. 57, no. 5, 2018, doi: 10.7567/JJAP.57.053001.
- [3] N. Locatelli, V. Cros, and J. Grollier, "Spin-torque building blocks," *Nat Mater*, vol. 13, no. 1, 2014, doi: 10.1038/nmat3823.
- [4] B. Dieny *et al.*, "Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronics industry," 2020. doi: 10.1038/s41928-020-0461-5.
- [5] P. Villard *et al.*, "A GHz spintronic-based RF oscillator," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010. doi: 10.1109/JSSC.2009.2034432.
- [6] D. Tonini, K. Wu, R. Saha, and J. P. Wang, "Magnetic field detection using spin-torque nano-oscillator combined with magnetic flux concentrator," *AIP Adv*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.1063/9.0000597.
- [7] S. Tsunegi, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, and H. Kubota, "Microwave emission power exceeding 10 μ W in spin torque vortex oscillator," *Appl Phys Lett*, vol. 109, no. 25, 2016, doi: 10.1063/1.4972305.
- [8] E. Grimaldi *et al.*, "Response to noise of a vortex based spin transfer nano-oscillator," *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 89, no. 10, 2014, doi: 10.1103/PhysRevB.89.104404.
- [9] B. Cai *et al.*, "Unconventional computing based on magnetic tunnel junction," *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 129, no. 4, 2023, doi: 10.1007/s00339-022-06365-4.

- [10] R. Sharma *et al.*, “Electrically connected spin-torque oscillators array for 2.4 GHz WiFi band transmission and energy harvesting,” *Nat Commun*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-23181-1.
- [11] T. Böhnert *et al.*, “Weighted spin torque nano-oscillator system for neuromorphic computing,” *Communications Engineering*, vol. 2, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s44172-023-00117-9.
- [12] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, “New magnetic anisotropy,” *Physical Review*, vol. 105, no. 3, 1957, doi: 10.1103/PhysRev.105.904.
- [13] Allegro Microsystems, “From Hall-Effect to TMR: A Guide to Magnetic Sensor Technologies, Application Note AN117,” [Online]. Available: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an117-from-hall-effect-to-tmr.pdf>. Accessed: Feb. 17, 2025.
- [14] M. N. Baibich *et al.*, “Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices,” *Phys Rev Lett*, vol. 61, no. 21, 1988, doi: 10.1103/PhysRevLett.61.2472.
- [15] M. Julliere, “Tunneling between ferromagnetic films,” *Phys Lett A*, vol. 54, no. 3, 1975, doi: 10.1016/0375-9601(75)90174-7.
- [16] H. Bhoomeswaran, I. Gowthaman, and P. Sabareesan, “Frequency and power enhanced Magneto Resistance-based Tilted Polarizer Spin Torque Nano-Oscillator,” *Appl Phys A Mater Sci Process*, vol. 125, no. 8, 2019, doi: 10.1007/s00339-019-2808-1.
- [17] H. Q. Cui, L. Cai, L. Ni, P. Wei, C. W. Feng, and X. K. Yang, “Thermal Stability Study of Tilted-Polarizer Spin Torque Nano-oscillator,” *J Supercond Nov Magn*, vol. 29, no. 11, 2016, doi: 10.1007/s10948-016-3624-x.
- [18] W. Skowronski, J. Checinski, S. Zietek, K. Yakushiji, and S. Yuasa, “Microwave magnetic field modulation of spin torque oscillator based on perpendicular magnetic tunnel junctions,” *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-55220-9.

- [19] W. Zhu *et al.*, “Magnetization precession and damping in Co₂FeSi Heusler alloy thin films,” *J Magn Magn Mater*, vol. 479, 2019, doi: 10.1016/j.jmmm.2019.01.087.
- [20] Y. Kurokawa, K. Yamada, T. Taniguchi, S. Horiike, T. Tanaka, and H. Yuasa, “Ultra-wide-band millimeter-wave generator using spin torque oscillator with strong interlayer exchange couplings,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-15014-y.
- [21] R. Arun, R. Gopal, V. K. Chandrasekar, and M. Lakshmanan, “Frequency enhancement and power tunability in tilted polarizer spin-torque nano-oscillator,” *J Appl Phys*, vol. 127, no. 15, 2020, doi: 10.1063/1.5143195.
- [22] M. Tsoi *et al.*, “Excitation of a magnetic multilayer by an electric current,” *Phys Rev Lett*, vol. 80, no. 19, 1998, doi: 10.1103/PhysRevLett.80.4281.
- [23] S. I. Kiselev *et al.*, “Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current,” *Nature*, vol. 425, no. 6956, 2003, doi: 10.1038/nature01967.
- [24] W. H. Rippard, M. R. Pufall, and T. J. Silva, “Quantitative studies of spin-momentum-transfer-induced excitations in Co/Cu multilayer films using point-contact spectroscopy,” *Appl Phys Lett*, vol. 82, no. 8, 2003, doi: 10.1063/1.1556168.
- [25] C. H. Sim, M. Moneck, T. Liew, and J. G. Zhu, “Frequency-tunable perpendicular spin torque oscillator,” in *Journal of Applied Physics*, 2012. doi: 10.1063/1.3677375.
- [26] Y. Zhou, C. L. Zha, S. Bonetti, J. Persson, and J. Åkerman, “Microwave generation of tilted-polarizer spin torque oscillator,” *J Appl Phys*, vol. 105, no. 7, 2009, doi: 10.1063/1.3068429.
- [27] NASA, “Microwaves,” NASA Science.[Online].Available: https://science.nasa.gov/ems/06_microwaves/. Accessed: Oct. 18, 2024

- [28] T. Chen *et al.*, “Spin-Torque and Spin-Hall Nano-Oscillators,” 2016. doi: 10.1109/JPROC.2016.2554518.
- [29] R. Sharma, N. Sisodia, J. Akerman, and P. K. Muduli, “Enhanced Modulation Bandwidth of a Magnetic Tunnel Junction-Based Spin Torque Nano-Oscillator under Strong Current Modulation,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 42, no. 12, 2021, doi: 10.1109/LED.2021.3122241.
- [30] L. Zeng *et al.*, “Modulation and demodulation of digital frequency shift keying system based on spin torque nano oscillator with voltage controlled magnetic anisotropy effect,” in *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2019. doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702646.
- [31] R. N. S. Rajapakse, Z. M. Zeng, and H. W. Jiang, “High-Frequency Microwave Emission of a Trilayer Magnetic Tunnel Junction in the Absence of External Magnetic Bias Field,” *Phys Rev Appl*, vol. 14, no. 1, 2020, doi: 10.1103/PhysRevApplied.14.014040.
- [32] S. Sampan-A-Pai *et al.*, “Magnetization dynamics at finite temperature in CoFeB–MgO based MTJs,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-29597-7.
- [33] C. Park, J. G. Zhu, M. T. Moneck, Y. Peng, and D. E. Laughlin, “Annealing effects on structural and transport properties of rf-sputtered CoFeBMgOCoFeB magnetic tunnel junctions,” *J Appl Phys*, vol. 99, no. 8, 2006, doi: 10.1063/1.2165141.
- [34] L. G. Vanquickenborne, “Transition metals and the Aufbau principle,” *J Chem Educ*, vol. 71, no. 6, 1994, doi: 10.1021/ed071p469.
- [35] Evulpo, “Transition metals: electron configuration and oxidation number,” [Online]. Available: <https://evulpo.com/en/uk/dashboard/lesson/uk-c-ks5-15transition-metals-01transition-metals>. Accessed: Oct. 18, 2024.

- [36] M. A. Zimmler *et al.*, “Current-induced effective magnetic fields in Co/Cu/Co nanopillars,” *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 70, no. 18, 2004, doi: 10.1103/PhysRevB.70.184438.
- [37] S. Zhang, P. M. Levy, and A. Fert, “Mechanisms of spin-polarized current-driven magnetization switching,” *Phys Rev Lett*, vol. 88, no. 23, 2002, doi: 10.1103/PhysRevLett.88.236601.
- [38] H. Kubota *et al.*, “Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions,” *Nat Phys*, vol. 4, no. 1, 2008, doi: 10.1038/nphys784.
- [39] Z. Zeng, G. Finocchio, and H. Jiang, “Spin transfer nano-oscillators,” *Nanoscale*, vol. 5, no. 6, 2013, doi: 10.1039/c2nr33407k.
- [40] S. Jiang *et al.*, “Spin-torque nano-oscillators and their applications,” *Appl Phys Rev*, vol. 11, no. 041309, Dec. 2024.
- [41] X. Zheng and Y. Zhou, “Theory and applications of spin torque nano-oscillator: A brief review,” 2015. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.232.147.
- [42] M. R. Pufall, W. H. Rippard, and T. J. Silva, “Materials dependence of the spin-momentum transfer efficiency and critical current in ferromagnetic metal/Cu multilayers,” *Appl Phys Lett*, vol. 83, no. 2, 2003, doi: 10.1063/1.1590432.
- [43] J. A. Katine, F. J. Albert, R. A. Buhrman, E. B. Myers, and D. C. Ralph, “Current-driven magnetization reversal and spin-wave excitations in Co/Cu/Co pillars,” *Phys Rev Lett*, vol. 84, no. 14, 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.84.3149.
- [44] W. H. Rippard, M. R. Pufall, S. Kaka, S. E. Russek, and T. J. Silva, “Direct-Current Induced Dynamics in Co₉₀Fe₁₀/Ni₈₀Fe₂₀ Point Contacts,” *Phys Rev Lett*, vol. 92, no. 2, 2004.
- [45] I. N. Krivorotov, N. C. Emley, J. C. Sankey, S. I. Kiselev, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, “Time-domain measurements of nanomagnet dynamics

- driven by spin-transfer torques,” *Science (1979)*, vol. 307, no. 5707, 2005, doi: 10.1126/science.1105722.
- [46] C. L. Zha, B. Ma, Z. Z. Zhang, T. R. Gao, F. X. Gan, and Q. Y. Jin, “L10 FePt films deposited on pyramid-type Si substrate for perpendicular magnetic recording media,” *Appl Phys Lett*, vol. 89, no. 2, 2006, doi: 10.1063/1.2221389.
- [47] R. A. Duine, K. J. Lee, S. S. P. Parkin, and M. D. Stiles, “Synthetic antiferromagnetic spintronics,” 2018. doi: 10.1038/s41567-018-0050-y.
- [48] R. Khamtawi, W. Daeng-Am, P. Chureemart, R. W. Chantrell, and J. Chureemart, “Exchange bias model including setting process: Investigation of antiferromagnetic alignment fraction due to thermal activation,” *J Appl Phys*, vol. 133, no. 2, 2023, doi: 10.1063/5.0136278.
- [49] W. Stohr, “Magnetic exchange interactions,” *Stanford Synchrotron RadiationLightsource*. [Online]. Available: <https://www.ssrslac.stanford.edu/stohr/magneticexchange.htm>. Accessed: Oct. 18, 2024.
- [50] S. Yuasa, K. Hono, G. Hu, and D. C. Worledge, “Materials for spin-transfer-torque magnetoresistive random-access memory,” *MRS Bull*, vol. 43, no. 5, 2018, doi: 10.1557/mrs.2018.93.
- [51] A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and T. Rasing, “Ultrafast optical manipulation of magnetic order,” *Rev Mod Phys*, vol. 82, no. 3, 2010, doi: 10.1103/RevModPhys.82.2731.
- [52] Joseph Barker, “Atomistic Models of Magnetic Systems with Combined Ferromagnetic and Antiferromagnetic Order,” University of York, 2013.
- [53] S. C. Westmoreland *et al.*, “Multiscale model approaches to the design of advanced permanent magnets,” *Scr Mater*, vol. 148, 2018, doi: 10.1016/j.scriptamat.2018.01.019.
- [54] R. F. L. Evans, W. J. Fan, P. Chureemart, T. A. Ostler, M. O. A. Ellis, and R. W. Chantrell, “Atomistic spin model simulations of magnetic nanomaterials,” 2014. doi: 10.1088/0953-8984/26/10/103202.

- [55] U. Larsen, "The Origin of Exchange Interactions," *Am J Phys*, vol. 40, no. 1, 1972, doi: 10.1119/1.1986454.
- [56] Intel Thailand, "Processors," [Online]. Available: <https://www.thailand.intel.com/content/www/th/th/support/articles/00025368/processors.html>. Accessed: Oct. 18, 2024.
- [57] W. Skowronski, T. Stobiecki, J. Wrona, G. Reiss, and S. Van Dijken, "Zero-field spin torque oscillator based on magnetic tunnel junctions with a tilted CoFeB free layer," *Applied Physics Express*, vol. 5, no. 6, 2012, doi: 10.1143/APEX.5.063005.
- [58] A. Dussaux *et al.*, "Large microwave generation from current-driven magnetic vortex oscillators in magnetic tunnel junctions," *Nat Commun*, vol. 1, no. 1, 2010, doi: 10.1038/ncomms1006.
- [59] J. D. Costa *et al.*, "High power and low critical current density spin transfer torque nano-oscillators using MgO barriers with intermediate thickness," *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-07762-z.
- [60] S. Tsunegi *et al.*, "High emission power and Q factor in spin torque vortex oscillator consisting of FeB free layer," *Applied Physics Express*, vol. 7, no. 6, 2014, doi: 10.7567/APEX.7.063009.
- [61] R. Shimabukuro, K. Nakamura, T. Akiyama, and T. Ito, "Electric field effects on magnetocrystalline anisotropy in ferromagnetic Fe monolayers," *Physica E Low Dimens Syst Nanostruct*, vol. 42, no. 4, 2010, doi: 10.1016/j.physe.2009.11.110.
- [62] H. Sato, P. Chureemart, F. Matsukura, R. W. Chantrell, H. Ohno, and R. F. L. Evans, "Temperature-dependent properties of CoFeB/MgO thin films: Experiments versus simulations," *Phys Rev B*, vol. 98, no. 21, 2018, doi: 10.1103/PhysRevB.98.214428.
- [63] S. Ikeda *et al.*, "A perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junction," *Nat Mater*, vol. 9, no. 9, 2010, doi: 10.1038/nmat2804.

- [64] H. Zhao, "SPIN TRANSFER TORQUE INDUCED SWITCHING IN MAGNETIC TUNNEL JUNCTION FOR STT-RAM APPLICATION," *UMN Thesis*, no. December, 2013.
- [65] Phanwadee Chureemart, "MODELS OF SPIN TORQUE USING SELF-CONSISTENT SOLUTIONS OF THE MAGNETISATION AND SPIN ACCUMULATION," University of York, 2013.
- [66] J. M. Teixeira, J. Ventura, J. P. Araujo, J. B. Sousa, P. Wisniowski, and P. P. Freitas, "Tunneling processes in thin MgO magnetic junctions," *Appl Phys Lett*, vol. 96, no. 26, 2010, doi: 10.1063/1.3458701.
- [67] E. C. Stoner, "Ferromagnetism," *Reports on Progress in Physics*, vol. 11, no. 1, 1947, doi: 10.1088/0034-4885/11/1/304.
- [68] Y. Miura and J. Okabayashi, "Understanding magnetocrystalline anisotropy based on orbital and quadrupole moments," 2022. doi: 10.1088/1361-648X/ac943f.
- [69] J. D. Burton, S. S. Jaswal, E. Y. Tsybal, O. N. Mryasov, and O. G. Heinonen, "Atomic and electronic structure of the CoFeB/MgO interface from first principles," *Appl Phys Lett*, vol. 89, no. 14, 2006, doi: 10.1063/1.2360189.
- [70] A. J. Freeman and R. E. Watson, "Theory of direct exchange in ferromagnetism," *Physical Review*, vol. 124, no. 5, 1961, doi: 10.1103/PhysRev.124.1439.
- [71] Zielinski et al, "Magnetic Properties and the Zeeman Effect," LibreTexts. [Online]. Available: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Book%3A_Quantum_States_of_Atoms_and_Molecules_%28Zielinski_et_al%29/08%3A_The_Hydrogen_Atom/8.04%3A_Magnetic_Properties_and_the_Zeeman_Effect. Accessed: Feb. 17, 2025.
- [72] N. Saenphum, J. Chureemart, R. W. Chantrell, and P. Chureemart, "Model of spin transport in noncollinear magnetic systems: Effect of diffuse

- interfaces,” *J Magn Magn Mater*, vol. 484, 2019, doi: 10.1016/j.jmmm.2019.04.010.
- [73] J. G. Simmons, “Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film,” *J Appl Phys*, vol. 34, no. 6, 1963, doi: 10.1063/1.1702682.
- [74] T. Zeng, Y. Zhou, J. Åkerman, P. T. Lai, and P. W. T. Pong, “Linear phase tuning of spin torque oscillators using in-plane microwave fields,” *IEEE Trans Magn*, vol. 50, no. 1, 2014, doi: 10.1109/TMAG.2013.2276665.
- [75] M. G. A. Park, S. H. C. Baek, B. G. Park, and S. H. Lee, “Frequency control of a spin-torque oscillator using magnetostrictive anisotropy,” *Appl Phys Lett*, vol. 108, no. 2, 2016, doi: 10.1063/1.4939743.
- [76] X. Liang, L. Shen, X. Xing, and Y. Zhou, “Elongated skyrmion as spin torque nano-oscillator and magnonic waveguide,” *Commun Phys*, vol. 5, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s42005-022-01093-w.
- [77] H. Bhoomeeswaran and P. Sabareesan, “Tuning of Microwave Frequency and Power Enhancement Using Spin Torque Nano-Oscillator with Tilted Polarizer,” *IEEE Trans Magn*, vol. 54, no. 4, 2018, doi: 10.1109/TMAG.2017.2766149.
- [78] R. Li et al., “Temperature effect on a weighted vortex spin-torque nano-oscillator for neuromorphic computing,” *Sci Rep*, vol. 46, no. 7, May 2024.
- [79] N. Saenphum, R. Khamtawi, J. Chureemart, R. W. Chantrell, and P. Chureemart, “Temperature dependence of spin transport behavior in Heusler alloy CPP-GMR,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, Oct. 2024.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย รัฐพงษ์ รางเงิน
วันเกิด	14 กันยายน พ.ศ. 2541
สถานที่เกิด	ตำบลนาคำ อำเภอศรีเมืองใหม่ จังหวัดอุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	399 หมู่ที่ 1 ตำบลท่าขอนยาง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 44150
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา พ.ศ. 2559 โรงเรียนศรีเมืองวิทยาคาร จังหวัดอุบลราชธานี ระดับอุดมศึกษา พ.ศ. 2565 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาฟิสิกส์ เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง (GPAX : 4.00) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ. 2568 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ทุนวิจัยจากบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด เพื่อศึกษาในระดับปริญญาโท

พูน ปรณ ทิโต ชีเว

