แม่แหล็กระดับนาโนและการประยุกต์ใช้เป็นตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก

Nanomagnetism and Its Application as Magnetic Recording

ชัยศักดิ์ อิสโร*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Chaisak Issro*

Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวัสดุแม่เหล็กระดับนาโนได้มีการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ในตัวบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่เนื่องจากขนาดของเกรนมีผลกระทบต่อการเกิดปรากฏการณ์ซุปเปอร์พาราแมกนิติกของวัสดุ ส่งผลให้บิทมีพฤติกรรมไม่เสถียรต่อความร้อน ดังนั้นขนาดเกรนของวัสดุในตัวบันทึกไม่สามารถทำให้มีขนาดเล็กลงได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาหาแนวทางเพื่อคิดค้นเทคนิคใหม่ๆ ในการพัฒนาการเพิ่มความหนาแน่น เทคนิคที่ได้มีการศึกษาและพัฒนาในปัจจุบัน ได้แก่ เทคนิคการบันทึกในแนวตั้ง ซึ่งอาศัยหลักการการเรียงตัวของแมกนิไตเซชันของตัวบันทึกให้มีทิศตั้งฉากกับระนาบของดิสก์ ขณะเดียวกันการนำเทคโนโลยีการสร้างรูปแบบของบิทในระดับนาโนมีหลากหลายวิธีได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กโดยการสร้างรูปแบบของบิทให้มีขนาดเล็ก มีรูปแบบสม่ำเสมอ และความหนาแน่นสูง วิธีการกัดเซาะด้วยเทคนิคแบบกัดเซาะ (lithography) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสร้างรูปแบบของบิทให้มีขนาดได้เล็กต่ำกว่า 100 นาโนเมตร (nm) ค่อนข้างมาก นอกจากนี้ในบทความยังได้รวบรวมข้อมูลและแนวคิดอื่นๆ ที่น่าจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อเทคโนโลยีการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต

คำสำคัญ : แม่เหล็กระดับนาโน ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก

Abstract

Currently, nanomagnetism has been investigated and applied for using as a magnetic recording of hard disk drive. However, the small of grain sizes leads to the superparamagnetism phenomenon, the instability of bit due to the thermal activation. Therefore increasing in the density of the magnetic recording is needed to be conducted by specific techniques such as the perpendicular recording. This technique is based on the perpendicular orientation of the magnetization to the disk surface. In addition, the technology in nanoscale has become an important to employ an increase of magnetic recording density by fabricating a pattern in a very small bit, regular and high density. The technological lithography is one of other techniques that is currently interested due to the pattern of bits can be made smaller than 100 nanometer. Furthermore, other details on future hard disk drive technologies are reviewed in this article.

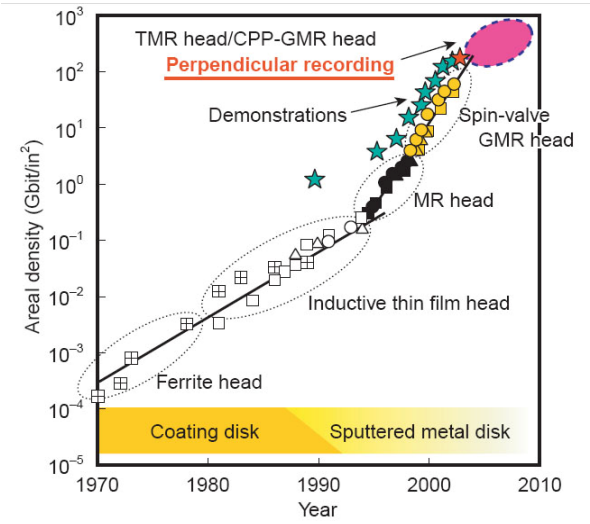
Keywords : nanomagnetism, magnetic recording

*E-mail: ichaisak@yahoo.com

1. บทนำ

นาโนเทคโนโลยี เป็นหัวข้องานวิจัยในปัจจุบันที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยีอาจจะมีการศึกษามากมายในหลายๆ ด้าน แต่หนึ่งในนั้นอันได้แก่ การศึกษานาโนเทคโนโลยีของวัสดุแม่เหล็กเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเทคโนโลยีของการบันทึกข้อมูล ปัจจุบันตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กได้มีบทบาทสำคัญต่อวงการอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก ทั้งการนำไปใช้เป็นตัวเก็บข้อมูลเสียง ภาพ และตัวบันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ หรือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) รวมไปถึงการนำเทคโนโลยีของวัสดุแม่เหล็กไปพัฒนาในการผลิตหน่วยความจำชั่วคราวหรือหน่วยความจำเข้าถึงได้แบบสุ่มในเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีชื่อเรียกว่า magnetic random access memory (MRAM) ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถเก็บข้อมูลอยู่ได้เมื่อไฟฟ้าดับ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้มีการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีมาก่อนหน้านี้ ไม่น้อยกว่า 50 ปี แต่ไม่มีการกล่าวถึงเช่นการผลิตเซนเซอร์ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รวมทั้งการผลิตฟิล์มบางแม่เหล็กที่มีความหนาในระดับนาโนเมตร สำหรับพัฒนาการของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ พบว่า ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1956 เป็นต้นมา ได้มีการพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากการที่บริษัทไอบีเอ็มได้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟตัวแรกขึ้นมาชื่อ RAMAC (Thomson & Best, 2000) ซึ่งมีความจุรวมที่ 5 เมกกะไบต์ (Mb) ความหนาแน่น 2 กิโลไบต์ต่อตารางนิ้ว (kb/in^2) หลังจากนั้นได้มีการผลิตและพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาโดยตลอด ซึ่งคาดว่าในอีก 5-10 ปีข้างหน้านี้ น่าจะมีการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟที่มีความหนาแน่นได้สูงกว่า 600 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้ว (Gb/in^2) ออกสู่ตลาดได้

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกับปีการผลิตและพัฒนาการของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [ภาพที่ 1] แสดงให้เห็นว่าในแต่ละปีความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่า (ปัจจุบันเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ40) และพบว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้เวลาสั้นกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนของทรานซิสเตอร์ในหนึ่งวงจรรวม (an integrated circuit) ตามกฎของ Moore (Moore's law) ที่สังเกตว่าทุกๆ สิบแปดเดือน จำนวนทรานซิสเตอร์ในหนึ่งวงจรรวม จะสามารถเพิ่มขึ้นได้เป็นจำนวนสองเท่า



ภาพที่ 1 แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กับเวลา (Kaitsu *et al*., 2006)

เมื่อเราพิจารณาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความหนาแน่นมากกว่า 70 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้ว พบว่าขนาดของหนึ่งบิทในตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีขนาดเข้าสู่นาโนสเกล หรือเข้าสู่สภาวะที่เรียกว่า นาโนเทคโนโลยี (คำจำกัดความของนาโนเทคโนโลยีจะพิจารณาจากสิ่งที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร) บิทเป็นบริเวณที่ประกอบไปด้วย เกรนหลายๆ เกรน ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ทิศทางของแมกนิไตเซชัน (magnetization) เป็นตัวกำหนดค่าตัวเลขให้เป็น 0 หรือ 1 สำหรับใช้ในการอ่านและการบันทึกข้อมูล แต่อย่างไรก็ตามการลดขนาดแกรนของวัสดุแม่เหล็กในตัวบันทึกให้เล็กลง ย่อมก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ซุปเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic) ขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ เมื่อเกิดในวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) ที่มีเกรนขนาดเล็ก ทำให้วัสดุแม่เหล็กเกิดพฤติกรรม คล้ายกับวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติก (paramagnetic) แม้ว่าวัสดุจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ก็ตาม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศของโมเมนต์แม่เหล็กของอนุภาคของสารแม่เหล็กได้ง่าย และเป็นเหตุให้อิทธิพลของพลังงานความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิสามารถที่จะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลของตัวบันทึกในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ ดังนั้นการทราบขนาดอนุภาคของวัสดุแม่เหล็กที่ยังคงสภาพความเป็นแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก จึงมีความจำเป็น

ต่อการพัฒนาการเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่ในปัจจุบัน เนื่องจากการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบแนวนอน (longitudinal recording) ทำให้เกิดข้อจำกัดในการเพิ่มความหนาแน่นเมื่อวัสดุเกิดสภาวะซุปเปอร์พาราแมกเนติก ทำให้นักวิจัยมีแนวความคิดที่จะเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้แนวทางใหม่ นั่นคือ พัฒนาการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (perpendicular recording) ซึ่งจะสามารถลดขนาดของบิทให้มีขนาดเล็กลงได้ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของหัวอ่านและหัวบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องมีขนาดเล็กลงด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวได้มีการนำหัวชนิด giant magnetoresistance (GMR) (Schuhl & Lacour, 2005) มาใช้แทนหัวอ่านแบบเดิม ซึ่งหลักการทำงานของหัว GMR นั้น ใช้การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานทางไฟฟ้ากับสถานะสปินที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง อันประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางของโลหะแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกและโลหะที่ไม่เป็นแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ในการอธิบายการทำงานของหัว GMR นั้นใช้สถานะสปิน ซึ่งเป็นสมบัติเชิงควอนตัมของอิเล็กตรอน ผลงานการคิดค้นดังกล่าวนี้ทำให้ Peter Gruenberg และ Albert Fert ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2007 ที่ผ่านมา

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาในข้างต้น การผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟให้มีความหนาแน่นได้สูงถึง 600 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้วนั้น ขนาดของบิทจะอยู่ที่ประมาณ 15 นาโนเมตร ปัจจุบันโลหะผสมชนิดที่มีโครงสร้างแบบ $L1_0$ เช่น เหล็ก-แพลตินัม (FePt), โคบอล-แพลตินัม (CoPt) และ เหล็ก-แพลลาเดียม (FePd) เป็นที่สนใจในอุตสาหกรรมของการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากโลหะผสมเหล่านี้ มีขนาดเกรนที่เล็กกว่า 10 นาโนเมตร และยังคงสภาพแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกอยู่ โดยเฉพาะเหล็ก-แพลตินัม มีขนาดเกรนประมาณ 2-3 นาโนเมตร ที่จะเกิดปรากฏการณ์ของซุปเปอร์พาราแมกเนติกขึ้น ซึ่งในบทความนี้ จะได้กล่าวถึงรายละเอียดพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก เช่น ผลของอุณหภูมิต่อสภาวะเสถียรของตัวบันทึก ขนาดแกรนที่ทำให้สูญเสียสภาพความเป็นแม่เหล็ก หรือเข้าสู่สภาวะที่เรียกว่าซุปเปอร์พาราแมกเนติก รวมทั้งนาโนเทคโนโลยีของการสร้างรูปแบบบิท และแนวทางการพัฒนาตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต

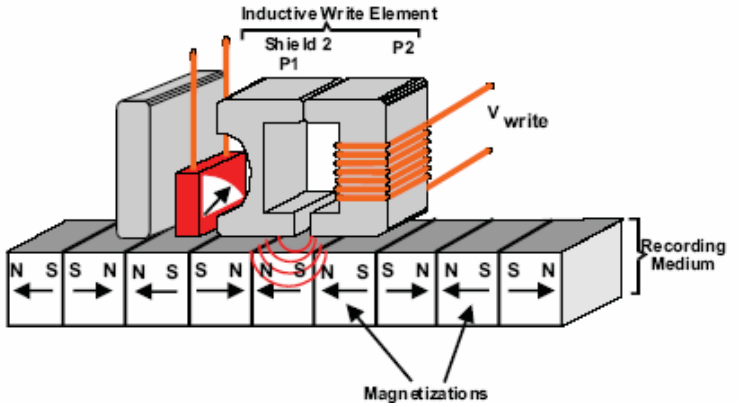
2. ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบด้วยส่วนต่างๆ หลายส่วน เช่น ส่วนของ ตัวบันทึก, หัวอ่าน-หัวบันทึก, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกและอุปกรณ์อื่นๆ เป็นต้น ในส่วนของตัวบันทึกนั้น จะประกอบไปด้วยชั้นของฟิล์มบางของวัสดุแบบหลายชั้น ซึ่งชั้นหลักที่สำคัญได้แก่ ชั้นแผ่นรองรับ (underlayer) ชั้นแม่เหล็ก และชั้นป้องกันการขูดขีด สมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นจะมีส่วนสำคัญในการกระบวนการทำงานของตัวบันทึก แต่ในส่วนของชั้นแม่เหล็กจัดได้ว่าเป็นชั้นที่มีส่วนสำคัญในการที่จะเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึก ขณะที่การผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของการบันทึกข้อมูลแบบแนวนอนฟิล์มของตัวบันทึกในปัจจุบันจะเป็นแบบชนิดหลายชั้น ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วัสดุรองรับที่ทำมาจากโลหะผสมนิเกล-ฟอสฟอรัส (NiP) หรือแก้วและเคลือบด้วยฟิล์มของโลหะผสมอลูมิเนียม (Yihong, 2003) ถัดจากแผ่นรองรับจะประกอบด้วยชั้นของฟิล์มบางของวัสดุ ที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของฟิล์มแม่เหล็ก ซึ่งในยุคเริ่มต้นตัวบันทึกจะเป็นฟิล์มที่เคลือบด้วยชั้นแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ต่อมาการผลิตได้พัฒนานำฟิล์มแบบหลายชั้นมาทดแทน เช่น มีการเพิ่มชั้นฟิล์มแอนติเฟอร์โรแมกนิติก เพื่อทำให้ข้อมูลที่บันทึกในฮาร์ดดิสก์มีความเสถียรต่อความร้อนและการเรียงตัวของผลึกในชั้นฟิล์มแม่เหล็กดีขึ้น รวมทั้งชั้นด้านบนของฟิล์มแม่เหล็กที่ใช้ป้องกันการสัมผัสกับหัวอ่านมีสมบัติที่ลื่น เช่นฟิล์มของวัสดุพอลิเมอร์ เป็นต้น ขณะที่เทคนิคการบันทึกแบบแนวตั้งของตัวบันทึกที่อยู่ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาในปัจจุบันนั้น ก็ยังคงใช้ตัวบันทึกที่ประกอบด้วยฟิล์มแบบหลายชั้นเช่นเดียวกัน

2.1. ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กแบบแนวนอน

หลักการทั่วไปของเทคนิคการบันทึกข้อมูลแบบแนวนอนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น อาศัยรูปแบบของการเรียงตัวของแมกนิไตเซชันในแต่ละบิทของตัวบันทึกให้อยู่ในระนาบขนานกับระนาบของดิสก์ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยการเปลี่ยนแปลงทิศของแมกนิไตเซชันที่เกิดขึ้นจะมีได้ด้วยกันสองรูปแบบคือ แมกนิไตเซชันที่เรียงตัวอยู่ในทิศทางเดียวกันและทิศทางตรงกันข้ามกับระนาบของดิสก์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแมกนิไตเซชันจะเป็นไปตามทิศทางของการเคลื่อนที่ของหัวบันทึก โดยหัวบันทึกของเทคนิคดังกล่าวนี้ใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดในหัวบันทึก และมีขั้วแม่เหล็กเป็นแบบชนิดสองขั้วมีช่องว่างสำหรับให้ ฟลักซ์แม่เหล็กผ่าน ซึ่งสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแบบขอบโค้ง (fringing field) กระทำกับแมกนิไตเซชันของตัวบันทึก ในระบบนี้หัวอ่านและหัวบันทึกจะแยกออกจากกันและจะเคลื่อนที่

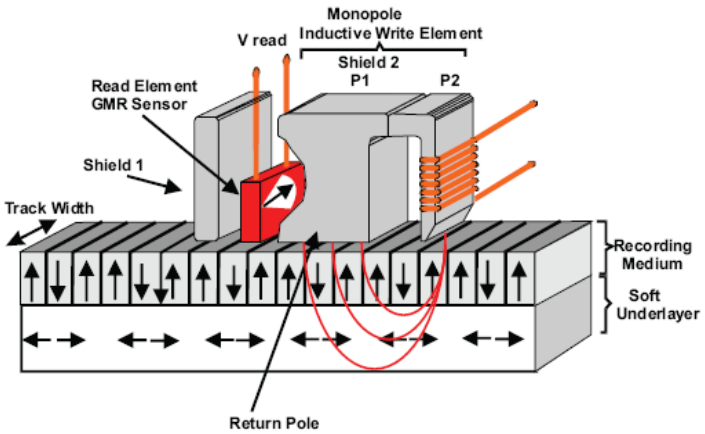
อยู่เหนือผิวของตัวบันทึก แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการเพิ่มความหนาแน่นในตัวบันทึกชนิดนี้ เนื่องจากเมื่อลดขนาดของเกรนของวัสดุแม่เหล็กลงแล้ว แต่แมกนิไตเซชันของเกรนในแต่ละบิทยังคงเรียงตัวอยู่ในแนวนอน ทำให้แต่ละบิทยังคงใช้พื้นที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการเรียงตัวของเกรนเพื่อให้มีแมกนิไตเซชันในแนวตั้ง



ภาพที่ 2 รูปแบบของการบันทึกแบบแนวนอนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Moser *et al.*, 2002)

2.2. ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

ในการเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กจำเป็นต้องลดขนาดของบิทให้เล็กลง และทำให้บิทมีการอัดกันแน่นมากยิ่งขึ้น ซึ่งเกรนของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในตัวบันทึกจำเป็นต้องมีขนาดเล็กลง การบันทึกแบบแนวตั้งจึงเป็นเทคโนโลยีวิธีหนึ่งที่สามารถพัฒนาในการเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ โดยอาศัยหลักการให้แมกนิไตเซชันของตัวบันทึกเรียงอยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบของดิสก์ในทิศขึ้นหรือทิศลง รูปแบบการบันทึกแบบแนวตั้งนั้นจะมีด้วยกัน 2 แบบ แบบที่หนึ่งสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 3 ซึ่งหัวบันทึกจะเป็นแบบขั้วเดียวและมีชั้นของแม่เหล็กอย่างอ่อน (soft magnetic under layer) ทำหน้าที่คล้ายขั้วแม่เหล็กอีกขั้วหนึ่งสำหรับใช้ในการบันทึก แบบที่สองมีความแตกต่างจากชนิดที่หนึ่ง ในส่วนของชั้นของตัวบันทึกจะไม่มีชั้นแม่เหล็กอย่างอ่อนและใช้หัวบันทึกแบบเดียวกับการบันทึกแบบแนวนอน ส่วนชนิดของหัวอ่านจะเป็นแบบ GMR และที่สำคัญวัสดุที่ใช้เป็นตัวบันทึกแบบแนวตั้งควรมีค่าคงที่เอนนิโซโทรปี (anisotropy constant) โดยประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับแบบแนวนอน (Terris & Thomson, 2005) ปัจจุบันได้มีรายงานการวิจัยว่าการผลิตตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กโดยใช้เทคนิคการบันทึกแบบแนวตั้ง จากวัสดุแม่เหล็กชนิด โคบอล-โครเมียม-แพลตินัม (CoCrPt) ร่วมกับออกไซด์ของซิลิกอน (SiO_2) สามารถผลิตตัวบันทึกให้มีขนาดความหนาแน่นที่ประมาณ 200 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้ว (Kaitsu *et al.*, 2006) จึงคาดว่าในอนาคต (ค.ศ 2011) เทคโนโลยีการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้เทคนิคการบันทึกแบบแนวตั้งจะสามารถผลิตออกสู่ตลาดได้ และสามารถเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ถึงเทราไบท์ต่อตารางนิ้ว (เทราเท่ากับ 10^{12})



ภาพที่ 3 รูปแบบของการบันทึกแบบแนวตั้งในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่พัฒนาโดยบริษัทอิตาชิ (Moser *et al.*, 2002)

3. นาโนเทคโนโลยีในตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก

การประยุกต์นาโนเทคโนโลยีเพื่อใช้กับตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กนั้น มีผลต่อการพัฒนาเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการลดขนาดของเกรนของวัสดุแม่เหล็กในตัวบันทึกข้อมูลสามารถเพิ่มความหนาแน่นของเกรนต่อพื้นที่ ทำให้ขนาดของบิทมีขนาดลดลง ในปัจจุบันเกรนของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ผลิตตัวบันทึกจะมีขนาดประมาณ 7 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ค่อนข้างมาก แต่การลดขนาดของเกรนเพื่อให้มีจำนวนเกรนที่เพียงพอในแต่ละบิท ย่อมต้องคำนึงถึงอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio, SNR) ซึ่งโดยปกติในแต่ละบิทควรมีจำนวนเกรนอย่างน้อยหลายร้อยเกรนจึงจะทำให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพียงพอในการอ่านข้อมูล ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้แก่ การลดขนาดของเกรนและขนาดของบิทของตัวบันทึกข้อมูล การลดขนาดของหัวบันทึกและหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดใกล้เคียงหรือเล็กกว่าขนาดของบิท รวมไปถึงการลดระยะของหัวบันทึกและหัวอ่านให้ห่างจากผิวของตัวบันทึกที่ระยะห่างน้อยที่สุด ซึ่งล้วนเป็นเทคโนโลยีระดับนาโน ในส่วนของเทคโนโลยีระดับนาโนที่นำมาใช้พัฒนาตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กนั้น ได้มีการศึกษานำเทคนิคต่างๆ เข้ามาช่วยในการเตรียมรูปแบบของการสร้างบิทให้มีขนาดเล็กระดับนาโนขึ้น วิธีที่น่าสนใจคือ การใช้การสร้างรูปแบบด้วยการกัดเซาะ แต่ปัญหาบางอย่างที่จะเกิดขึ้นขณะที่วัสดุที่ใช้ผลิตตัวบันทึกมีขนาดเกรนเล็กลง นั้นคือพลังงานความร้อนสามารถมีผลต่อสภาวะเสถียรทางแม่เหล็กของวัสดุ ซึ่งทำให้เกิดสภาพที่เป็นซุปเปอร์พาราแมกนิติกในวัสดุแม่เหล็กของตัวบันทึกได้

3.1. ความร้อนต่อสถานะเสถียรของบิทในตัวบันทึก

การลดขนาดของเกรนเป็นหนึ่งของกุญแจสำคัญในการพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก รวมทั้งการลดความหนาของฟิล์มให้มีขนาดลดลงเมื่อเทียบกับตัวบันทึกที่ผ่านมา สิ่งที่กล่าวมานี้ได้แสดงถึงการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งช่วยลดต้นทุนในการผลิต จะเห็นได้จากขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับในอดีต แต่ผลการลดขนาดดังกล่าวจะทำให้ปริมาตรของเกรนมีขนาดลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการเก็บข้อมูลของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กลดลงไป การพัฒนาตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กนั้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าพลังงานเอนนิโซทรอปี $K_u V$ (K_u คือค่าคงที่ของเอนนิโซทรอปีและ V คือปริมาตรของเกรน) ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้เนื่องจากพลังงานเอนนิโซทรอปีทำให้แมกนิไตเซชันมีสภาพคงอยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ถ้าพลังงานเอนนิโซทรอปีมีค่าสูงนั้นแสดงว่าต้องใช้พลังงานในการเปลี่ยนทิศของแมกนิไตเซชันจากทิศทางหนึ่งไปยังทิศตรงกันข้ามสูงด้วย แต่อย่างไรก็ตามการลดปริมาตรของเกรนจะทำให้ค่าพลังงาน $K_u V$ ลดลง (กรณีที่ค่า K_u คงที่) การลดลงดังกล่าวทำให้พลังงานที่ใช้เปลี่ยนทิศของแมกนิไตเซชันมีค่าน้อยลง ดังนั้นพลังงานความร้อน $k_B T$ (k_B คือค่าคงที่ของโบลซ์มานน์ (Boltzmann constant) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์) ที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งปกติขณะทำงานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 300 เคลวิน ทำให้พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลต่อความเสถียรของบิท โดยปกติการที่จะให้บิทมีความเสถียรในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ราว 10 ปีนั้น สัดส่วนของ $K_u V/k_B T$ ต้องมีค่ามากกว่า 60 ดังนั้น เมื่อมีการลดขนาดปริมาตรของเกรนลง จึงจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่มีค่า K_u สูงขึ้น แต่การที่ใช้วัสดุที่มีค่า K_u สูงก็จำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็กที่สูงขึ้นในการบันทึกข้อมูลด้วยปัจจุบันหัวบันทึกที่สามารถให้สนามแม่เหล็กสูงสุดประมาณ 1.19×10^6 แอมแปร์ต่อเมตร (A/m) (Terris & Thomson, 2005) และสามารถใช้ในการบันทึกข้อมูลกับวัสดุแม่เหล็กที่มีเกรนเล็กสุดประมาณ 7-8 นาโนเมตร เท่านั้น ซึ่งปัจจุบันมีหลายวัสดุที่มีค่า K_u ที่สูง เหมาะต่อการนำไปใช้ผลิตตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กในแนวตั้งเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงได้มีการศึกษาเพื่อสร้างรูปแบบของบิทให้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรขึ้นด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคการกัดเซาะ ซึ่งสามารถสร้างรูปแบบบิทให้มีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอ รวมทั้งเทคนิคอื่นๆ ที่นำมาใช้สร้างรูปแบบเพื่อเพิ่มขนาดความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

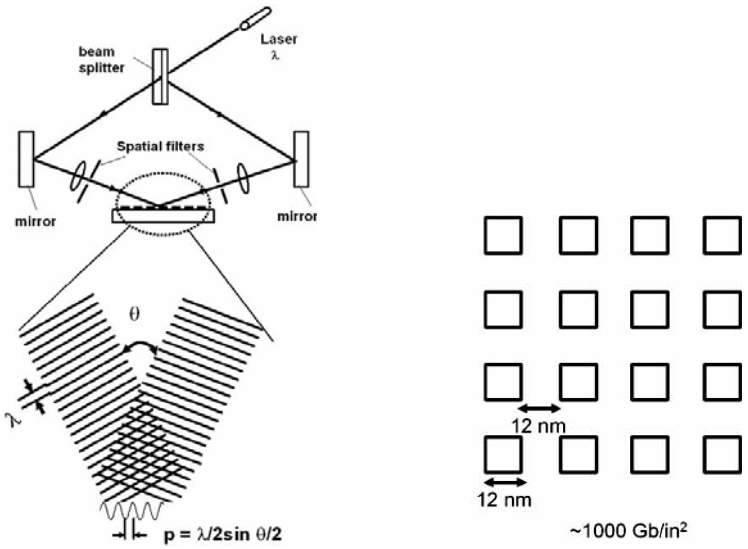
3.2. เทคนิคการเตรียมรูปแบบระดับนาโน

การเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีในการสร้างรูปแบบที่มีความละเอียดในระดับนาโนของตัวบันทึก การสร้างรูปแบบโดยใช้เทคนิคการกัดเซาะเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น สามารถสร้างได้จากอิเล็กตรอน รังสีเอกซ์ และจากแสงเลเซอร์ ซึ่งเทคนิคการกัดเซาะสามารถกำหนดขอบเขตของความละเอียดของรูปแบบได้จากความยาวคลื่น (λ) ของแหล่งกำหนดที่ใช้ ขนาดของรูปแบบจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ $\lambda/2NA$ เมื่อ NA คือจำนวนตัวเลขของช่องเปิดในระบบแสง อย่างเช่นแสงอุลตร้าไวโอเลต (UV) มีความยาวคลื่น 157 นาโนเมตร และมีตัวเลขช่องเปิดของเลนส์ที่สูง แต่แสงอุลตร้าไวโอเลตจะสามารถสร้างรูปแบบที่มีขอบเขตต่ำกว่า 100 นาโนเมตร ได้เพียงเล็กน้อย สำหรับ

รังสีเอกซ์ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 0.2-10 นาโนเมตร จะสามารถกัดเซาะรูปแบบที่มีขนาดเล็กลงได้ค่อนข้างมาก การกัดเซาะรูปแบบอาจจะกระทำโดยตรงบนแผ่นฟิล์มแม่เหล็กที่เคลือบบนวัตถุรองรับหรือใช้ฉากที่มีรูปแบบกั้น เพื่อให้ได้รูปแบบมีขนาดต่างๆ ตามต้องการ การใช้การแทรกสอดของแสงในการกัดเซาะเป็นเทคนิคหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการสร้างรูปแบบที่เป็นระเบียบในบริเวณกว้าง โดยใช้แสงสองแหล่งที่มีความถี่เดียวกันและมีเฟสต่างกันคงที่ตลอดเวลาหรือเรียกแสงอาพันธ์ (light coherent) เมื่อเกิดการแทรกสอดขึ้นแสงทั้งสองจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง (standing wave) ที่สามารถกัดเซาะรูปแบบบนชิ้นงานได้ เทคนิคนี้สามารถสร้างรูปแบบได้เล็กขนาดประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสง และน้อยสุดที่มีการศึกษาคือประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นแสง (Sbiaa & Piramanayagam, 2007) ภาพที่ 4(a-b) แสดงหลักการทำงานของการแทรกสอดของแสงที่ใช้ในการกัดเซาะและแสดงรูปแบบของบิทที่มีขนาดประมาณ 12 x 12 ตารางนาโนเมตร ซึ่งขนาดรูปแบบดังกล่าวสามารถทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความหนาแน่นได้ถึง 1,000 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้ว นอกจากนี้ในระบบการกัดเซาะยังสามารถใช้ประจุหรือไอออนแทนคลื่นแสง เราสามารถที่จะคำนวณหาความยาวคลื่นของอนุภาคนั้นได้ จากหลักการตามความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นเดอบรอย (de Broglie wavelength)

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

โดย h คือค่าคงที่ของ แพลงค์ (Planck constant), E คือพลังงาน และ m คือมวลของอนุภาค เช่น อิเล็กตรอน หรือ โปรตอน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ลำอิเลคตรอนที่มีพลังงาน 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) จะมีความยาวคลื่นประมาณ $4x10^{-3}$ นาโนเมตร นอกจากนี้รูปแบบของการกัดเซาะที่ได้ ก็ยังขึ้นกับส่วนประกอบอื่นๆ เช่น อุปกรณ์ของระบบการกัดเซาะและความหนาของฟิล์มชิ้นงานที่ใช้ แต่เทคนิคที่กล่าวมายังคงอยู่ในกระบวนการศึกษาและวิจัยในปัจจุบัน



(a) **(b)**

ภาพที่4(a-b) การกัดเซาะแบบใช้การแทรกสอดของสองคลื่นแสงที่เป็นคลื่นอาพันธ์และรูปแบบบิทขนาด 12x12 ตารางนาโนเมตร ที่มีความหนาแน่น 1,000 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้ว (Sbiaa & Piramanayagam, 2007)

4. อนาคตของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก

เนื่องจากเทคโนโลยีในปัจจุบันมีข้อจำกัดในการเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขณะที่การลดขนาดของเกรนเพื่อให้บิทมีขนาดเล็กลงนั้นยังต้องศึกษาและพัฒนาต่อไปแต่ปัญหาก็คือเมื่อเกรนมีขนาดลดลงจนทำให้เกิดสภาวะของซุปเปอร์พาราแมกนิติกทำให้จำเป็นต้องศึกษาหาแนวทางการเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในปัจจุบันได้นำเทคนิคการบันทึกข้อมูลในแนวตั้งเข้ามาทดแทนแบบแนวนอน ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกได้สูงขึ้นประมาณสองถึงสี่เท่า แต่อย่างไรก็ตามเงื่อนไขสภาวะของการเกิดซุปเปอร์พาราแมกนิติกยังคงมีอยู่ จึงจำเป็นต้องศึกษาหาวิธีการอื่นๆ มาช่วยพัฒนาเทคโนโลยีของการเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เทคนิคการกัดเซาะ

สามารถสร้างรูปแบบระดับนาโนของบิทขึ้นมาได้ แต่เทคนิคดังกล่าวยังคงเป็นเทคโนโลยีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการผลิต นอกจากนี้ยังมีแนวทางอื่น เช่น การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของวัสดุแม่เหล็กด้วยวิธีทางเคมี การศึกษาในปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กในกลุ่มโลหะผสม เหล็กแพลตินัม และ โคบอลแพลตินัม ที่มีโครงสร้างแบบ $L1_0$ ขึ้น ซึ่งคาดว่าวัสดุแม่เหล็กดังกล่าวจะเป็นวัสดุตัวเลือกหนึ่งในอนาคต เนื่องจากมีค่า K_u ค่อนข้างสูง (~$1x10^7$ จูลต่อลูกบาศ์กเมตร (J/m^3)) (Thiele *et al*., 1998) และขนาดอนุภาคของวัสดุดังกล่าวที่เตรียมได้ในปัจจุบันมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กประมาณ 4 นาโนเมตร เท่านั้น

ในเชิงตลาดอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น นอกจากจะพิจารณาศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แล้ว ยังจำเป็นต้องศึกษาถึงปัจจัยอื่นๆ เช่นอัตราเร็วของหัวบันทึกและหัวอ่านข้อมูลประกอบไปด้วยพร้อมๆ กัน เนื่องจากอัตราเร็วในการเปลี่ยนทิศแมกนิไตซันของเกรนของวัสดุแม่เหล็ก มีค่าจำกัดประมาณ 10 นาโนวินาที (Spaldin at.al., 2003) ทำให้อัตราเร็วในการอ่านหรือบันทึกข้อมูลจึงถูกจำกัด ซึ่งแมกนิไตเซชันของบิทในตัวบันทึกจะใช้เวลาไม่กี่นาโนวินาที ในการเปลี่ยนทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก และที่ผ่านมามีกลุ่มนักฟิสิกส์ของสถาบันวิจัยซินโครตรอนแห่งสแตนฟอร์ด (Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL)) ได้วิจัยและศึกษาอัตราเร็วของการเปลี่ยนทิศแมกนิไตเซชันของเกรนพบว่ามีค่าอยู่ที่ประมาณ 2 พิโควินาที ภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 10 เทสลา (Tesla) (Tudosa *et al*., 2004) ถ้าอัตราเร็วในการเปลี่ยนทิศขึ้น-ลงของแมกนิไตเซชันมีค่าอยู่ในปริมาณดังกล่าวนี้แล้ว อนาคตก็ยังคงเปิดกว้างให้นักวิจัยได้ศึกษาและพัฒนาหัวบันทึก-หัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้อีก

5. สรุป

นาโนเทคโนโลยีของวัสดุแม่เหล็กมีผลเกี่ยวข้องต่อการพัฒนา อุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาเกือบครึ่งศตวรรษ ปัจจุบันได้มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้มากขึ้น เพื่อพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก แต่เนื่องจากเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลมีขอบเขตจำกัดจากหลายปัจจัย ทั้งผลของความร้อนต่อการทำลายสภาพความเป็นแม่เหล็กและเงื่อนไขการเกิดซุปเปอร์พาราแมกนิติก การนำเทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวตั้งมาใช้อาจจะช่วยยืดระยะเวลาที่จะแก้ปัญหาการเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันลงไปได้ แต่อนาคตอาจต้องมีการคิดค้นวิธีการอื่นๆ เข้ามาช่วยในการพัฒนาต่อไป การนำเทคนิคการบันทึกแบบแนวตั้งมาใช้นั้น อาศัยหลักการของการเรียงตัวของแมกนิไตเซชันในแต่ละบิทให้มีการเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับระนาบผิวของดิสก์ ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มจำนวนบิทได้มากขึ้น เนื่องจากเกรนของวัสดุแม่เหล็กจะเรียงตัวอยู่ในแนวดิ่ง แต่การลดขนาดของบิทจำเป็นต้องลดขนาดของเกรนให้เล็กลง สิ่งที่ต้องพึ่งระวังนั้นคือค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต้องมากเพียงพอ ในกรณีที่มีจำนวนเกรนต่อบิทน้อยเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนอยู่ในปริมาณที่สูง จากที่ได้กล่าวในหัวข้อข้างต้นการลดขนาดของเกรนต้องคำนึงถึงพลังงานเอนนิโซโทรปีของวัสดุแม่เหล็กที่นำมาผลิตเป็นตัวบันทึกข้อมูล เนื่องจากถ้าวัสดุมีค่าคงที่เอนนิโซโทรปีที่สูงจะสามารถลดขนาดของเกรนให้เล็กลงได้ โดยทั่วไปการที่จะให้ตัวบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถใช้งานได้นานจำเป็นต้องมีค่าอัตราส่วนของ K_uV/k_BT สูงขึ้นด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างรูปแบบระดับนาโนด้วยเทคนิคต่างๆ มีส่วนช่วยในการสร้างบิทให้มีขนาดเล็ก เช่น เทคนิคการกัดเซาะ แต่ปัญหาในการสร้างบิทของวัสดุแม่เหล็กให้มีขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร ในพื้นที่ดิสก์ขนาดใหญ่ ยังมีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการสร้างรูปแบบโดยการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนของวัสดุแม่เหล็กด้วยวิธีเคมีแล้วนำไปกระจายลงบนดิสก์ วิธีการนี้จะสะดวกและมีต้นทุนค่อนข้างต่ำ รวมทั้งวิธีการอื่นๆ ในการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กในระดับนาโนเพื่อใช้ประโยชน์ในตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังต้องอาศัยเวลาในการวิจัย เนื่องด้วยเงื่อนไขสมบัติทางกายภาพของวัสดุ การปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

Kaitsu, I., Inamura, R., Toda, J., and Morita, T. (2006). Ultra high density perpendicular magnetic recording technologies. *FUJITSU Scientific & Technical Journal, 42*,122-130.

Moser, A., Takano, K., Margulies, D. T., Albrecht, M., Sonabe,Y., Ikeda, Y., Sun, S., and Fullerton E. E. (2002). *Magnetic recording: advancing into the future. 35,* R157-R167.

Sbiaa, R., and Piramanayagam, SN. (2007). Patterned media towards nano-bit magnetic recording: fabrication and challenges. *Recent patents on nanotechnology, 1*, 29-40.

Schuhl, A., and Lacour, D. (2005). Spin dependent transport: GMR & TMR. C. R. Physique, 6, 945-955.

Spaldin N., Magnetic materials (Fundamentals and device application). (2003). Cambridge: Cambridge University Press.

Terris, BD., and Thomson, T. (2005). Nanofabrication and self-assembled magnetic structures as data storage media. *Journal of Physics D: Applied Physics, 38*, R199-R222.

Thiele, J. -U., Folks, L., Toney, M. F., and Weller, D. K. (1998). Perpendicular magnetic anisotropy and magnetic domain structure in sputtered epitaxial FePt (001) $L1_0$ films. *Journal of Applied Physics, 84*, 5686-5692.

Thompson, D. A., and Best, J. S. (2000). The future of magnetic data storage technology. *IBM Journal of Research and Development, 44*, 311-322.

Tudosa, I., Stamm, C., Kashuba, A. B., Siegmann, H. C., Stoehr, J., Ju, G., Lu, B. and Weller D. (2004).*The ultimate speed of magnetic switching in granular recording media. Nature, 428*, 831-833.

Yihong, W. (2003). Nano Spintronics for Data Storage, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. California: American Scientific Publishers.