

# แม่เหล็กกระดับนาโนและการประยุกต์ใช้เป็นตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก

## Nanomagnetism and Its Application as Magnetic Recording

ชัยศักดิ์ อิสโร\*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Chaisak Issro\*

Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันวัสดุแม่เหล็กกระดับนาโนได้มีการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ในตัวบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่เนื่องจากขนาดของเกรนมีผลกระทบต่อการเกิดปรากฏการณ์ซุปเปอร์พาราแมgnитิกของวัสดุ ส่งผลให้บินมีพฤติกรรมไม่เสถียรต่อความร้อน ดังนั้นขนาดเกรนของวัสดุในตัวบันทึกไม่สามารถทำให้มีขนาดเล็กลงได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาหาแนวทางเพื่อคิดค้นเทคนิคใหม่ๆ ในการพัฒนาการเพิ่มความหนาแน่น เทคนิคที่ได้มีการศึกษาและพัฒนาในปัจจุบัน ได้แก่ เทคนิคการบันทึกในแนวตั้ง ซึ่งอาศัยหลักการเรียงตัวของแมgnน์ไดเซ็นของตัวบันทึกให้มีทิศตั้งฉากกับระนาบของดิสก์ ขณะเดียวกันการนำเทคโนโลยีการสร้างรูปแบบของบิตในระดับนาโนมีหลากหลายวิธีได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก โดยการสร้างรูปแบบของบิตให้มีขนาดเล็ก มีรูปแบบสม่ำเสมอ และความหนาแน่นสูง วิธีการกัดเซาะด้วยเทคนิคแบบกัดเซาะ (lithography) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสร้างรูปแบบของบิตให้มีขนาดได้เล็กกว่า 100 นาโนเมตร (nm) ค่อนข้างมาก นอกเหนือไปนี้ในบทความยังได้รวมรวมข้อมูลและแนวคิดอื่นๆ ที่น่าจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อเทคโนโลยีการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต

**คำสำคัญ:** แม่เหล็กกระดับนาโน 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.

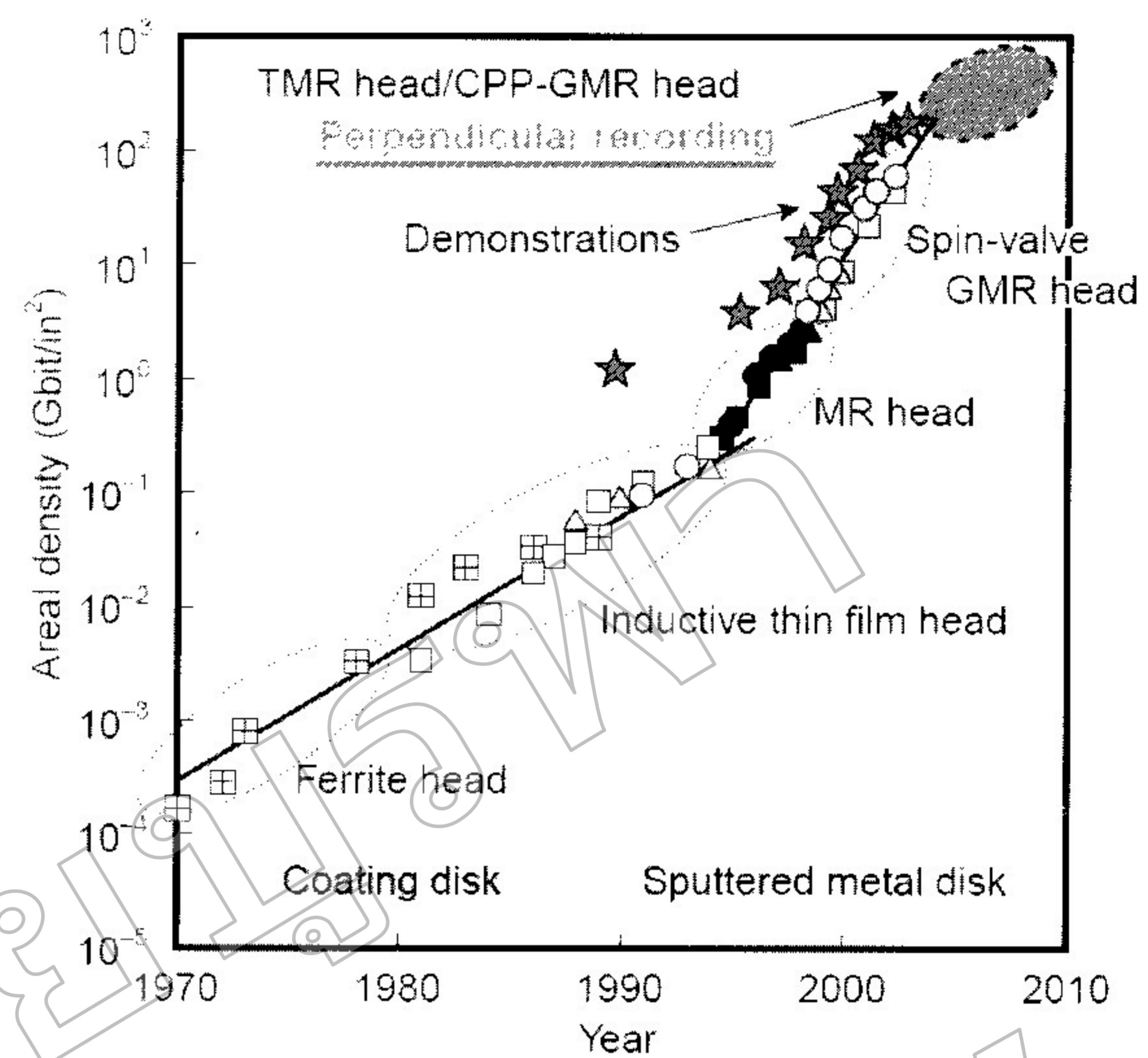
**Keywords :** nanomagnetism, magnetic recording

\*E-mail: ichaisak@yahoo.com

## 1. บทนำ

นาโนเทคโนโลยี เป็นหัวข้องานวิจัยในปัจจุบันที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยีอาจจะมีการศึกษามากมายในหลาย ๆ ด้าน แต่หนึ่งในนั้นอันได้แก่ การศึกษานาโนเทคโนโลยีของวัสดุแม่เหล็กเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเทคโนโลยีของการบันทึกข้อมูล ปัจจุบันตัวบันทึกชุดแม่เหล็กได้มีบทบาทสำคัญต่อวงการอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก ทั้งการนำไปใช้เป็นตัวเก็บข้อมูลเสียง ภาพ และตัวบันทึกข้อมูลของคอมพิวเตอร์ หรือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) รวมไปถึงการนำเทคโนโลยีของวัสดุแม่เหล็กไปพัฒนาในการผลิตหน่วยความจำชั่วคราวหรือหน่วยความจำเข้าถึงได้แบบสุ่มในเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีชื่อเรียกว่า magnetic random access memory (MRAM) ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถเก็บข้อมูลอยู่ได้เมื่อไฟฟ้าดับ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้มีการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีมาก่อนหน้านี้ ไม่น้อยกว่า 50 ปี แต่ไม่มีการกล่าวถึงเช่นการผลิตเซนเซอร์ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รวมทั้งการผลิตฟิล์มบางแม่เหล็กที่มีความหนาในระดับนาโนเมตร สำหรับพัฒนาการของตัวบันทึกชุดแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ พบว่า ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1956 เป็นต้นมา ได้มีการพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากการที่บริษัทไอบีเอ็มได้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวแรกขึ้นมาชื่อ RAMAC (Thomson & Best, 2000) ซึ่งมีความจุรวมที่ 5 เมกะไบต์ (Mb) ความหนาแน่น 2 กิโลไบต์ต่อตารางนิ้ว ( $\text{kb/in}^2$ ) หลังจากนั้นได้มีการผลิตและพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาโดยตลอด ซึ่งคาดว่าในอีก 5-10 ปีข้างหน้านี้ น่าจะมีการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความหนาแน่นได้สูงกว่า 600 จิกะไบต์ต่อตารางนิ้ว ( $\text{Gb/in}^2$ ) ออกสู่ตลาดได้

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกับการผลิตและพัฒนาการของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [ภาพที่ 1] แสดงให้เห็นว่าในแต่ละปีความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่า (ปัจจุบันเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 40) และพบว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะใช้เวลาสั้นกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนของทรานซิสเตอร์ในหนึ่งวงจรรวม (an integrated circuit) ตามกฎของ Moore (Moore's law) ที่สังเกตว่าทุกๆ สิบแปดเดือนจำนวนทรานซิสเตอร์ในหนึ่งวงจรรวม จะสามารถเพิ่มขึ้นได้เป็นจำนวนสองเท่า



ภาพที่ 1 แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กับเวลา (Kaitsu et al., 2006)

เมื่อเราพิจารณาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความหนาแน่นมากกว่า 70 จิกะไบต์ต่อตารางนิ้ว พบว่าขนาดของหนึ่งบิทในตัวบันทึกชุดแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีขนาดเข้าสู่นาโนสเกล หรือเข้าสู่สภาวะที่เรียกว่า นาโนเทคโนโลยี (คำจำกัดความของนาโนเทคโนโลยีจะพิจารณาจากสิ่งที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร) บิทเป็นบริเวณที่ประกอบไปด้วย เกรนหลายๆ เกรนของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ทิศทางของแมgnition ได้เช่นเดียวกัน เป็นตัวกำหนดค่าตัวเลขให้เป็น 0 หรือ 1 สำหรับใช้ในการอ่านและการบันทึกข้อมูล แต่อย่างไรก็ตามการลดขนาดเกรนของวัสดุแม่เหล็กในตัวบันทึกให้เล็กลง ย่อมก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ชูปเปอร์พาราแมกнетิก (superparamagnetic) ขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวเนี้ย เมื่อเกิดในวัสดุแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) ที่มีเกรนขนาดเล็ก ทำให้วัสดุแม่เหล็กเกิดพฤติกรรม คล้ายกับวัสดุแม่เหล็กชนิดพาราแมกเนติก (paramagnetic) แม้ว่าวัสดุจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคิรี (Curie temperature) ก็ตาม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศของโมเมนต์แม่เหล็กของอนุภาคของสารแม่เหล็กได้ง่าย และเป็นเหตุให้อิทธิพลของพลังงานความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิสามารถที่จะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลของตัวบันทึกในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ ดังนั้นการทราบขนาดอนุภาคของวัสดุแม่เหล็กที่ยังคงสภาพความเป็นแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติก จึงมีความจำเป็น

ต่อการพัฒนาการเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และในปัจจุบัน เนื่องจากการบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบแนวอน (longitudinal recording) ทำให้เกิดข้อจำกัดในการเพิ่มความหนาแน่นเมื่อวัสดุเกิดสภาพชูปเปอร์พาราแมกเนติก ทำให้นักวิจัยมีแนวความคิดที่จะเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้แนวทางใหม่ นั้นคือ พัฒนาการบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง (perpendicular recording) ซึ่งจะสามารถลดขนาดของบิตให้มีขนาดเล็กลงได้ แต่อย่างไรก็ตามขนาดของหัวอ่านและหัวบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องมีขนาดเล็กลงด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวได้มีการนำหัวชนิด giant magnetoresistance (GMR) (Schuhl & Lacour, 2005) มาใช้แทนหัวอ่านแบบเดิม ซึ่งหลักการทำงานของหัว GMR นั้น ใช้การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานทางไฟฟ้ากับสถานะสปินที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง อันประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางของโลหะแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกและโลหะที่ไม่เป็นแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกในการอธิบายการทำงานของหัว GMR นั้นใช้สถานะสปิน ซึ่งเป็นสมบัติเชิงควบคุมตั้มของอิเล็กตรอนผลงานการคิดค้นดังกล่าวนี้ ทำให้ Peter Gruenberg และ Albert Fert ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2007 ที่ผ่านมา

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาในข้างต้น การผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้มีความหนาแน่นได้สูงถึง 600 จิกะไบต์ต่อตารางนิวตัน ขนาดของบิตจะอยู่ที่ประมาณ 15 นาโนเมตร ปัจจุบันโลหะผสมชนิดที่มีโครงสร้างแบบ L1<sub>0</sub> เช่น เหล็ก-แพลตินัม (FePt), โคบออล-แพลตินัม (CoPt) และ เหล็ก-แพลลาเดียม (FePd) เป็นที่สนใจในอุตสาหกรรมของการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากโลหะผสมเหล่านี้ มีขนาดเกรนที่เล็กกว่า 10 นาโนเมตร และยังคงสภาพแม่เหล็กชนิดเฟอร์โรแมกเนติกอยู่ โดยเฉพาะเหล็ก-แพลตินัม มีขนาดเกรนประมาณ 2-3 นาโนเมตร ที่จะเกิดปรากฏการณ์ของชูปเปอร์พาราแมกเนติกขึ้น ซึ่งในบทความนี้ จะได้กล่าวถึงรายละเอียดพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในหัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก เช่น ผลกระทบอุณหภูมิต่อสภาพเสถียรของหัวบันทึกขนาดเกรนที่ทำให้สูญเสียสภาพความเป็นแม่เหล็ก หรือเข้าสู่สภาพที่เรียกว่าชูปเปอร์พาราแมกเนติก รวมทั้งนาโนเทคโนโลยีของการสร้างรูปแบบบิต และแนวทางการพัฒนาหัวบันทึกชนิดแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต

## 2. ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

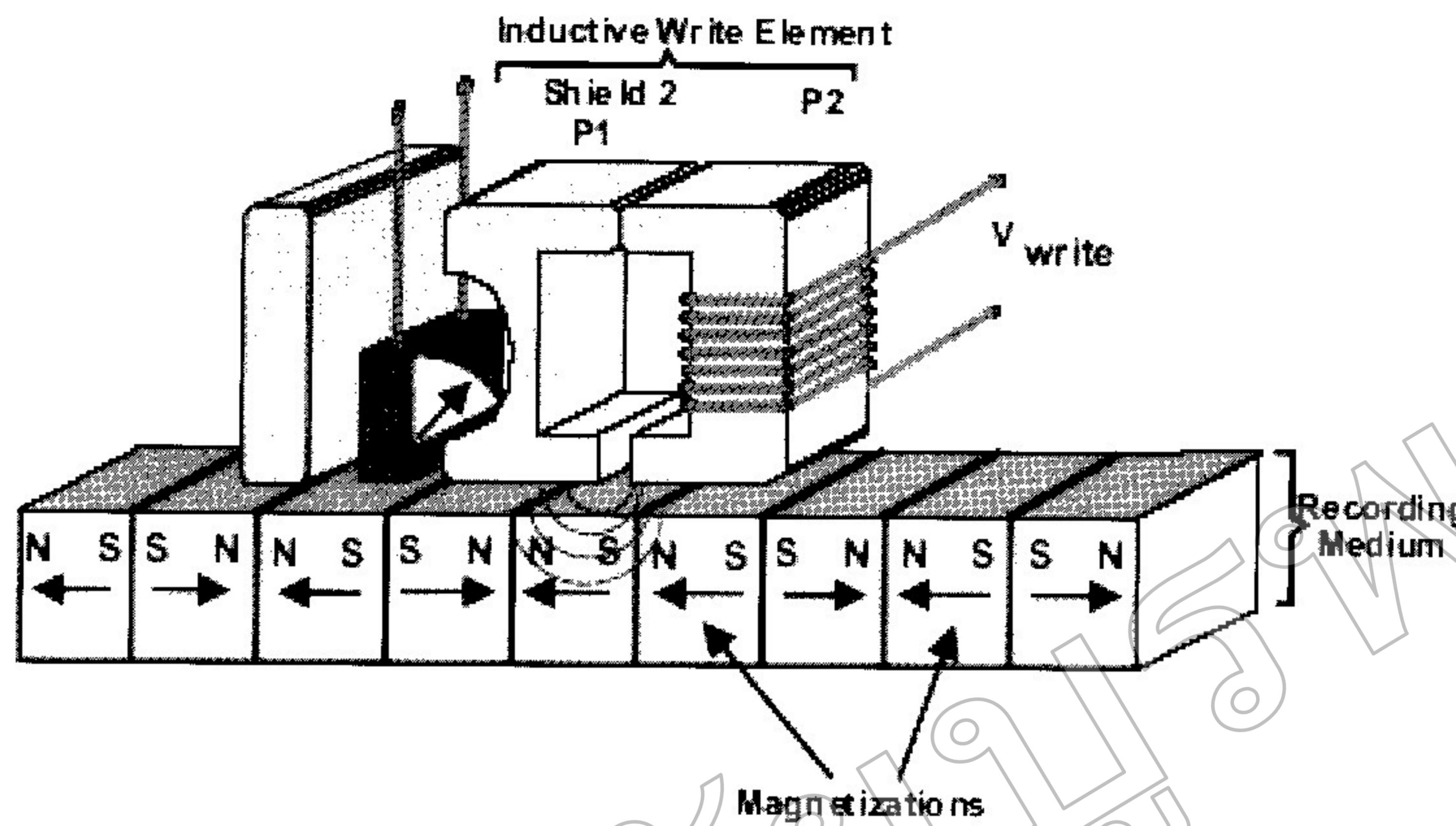
ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบด้วยส่วนต่างๆ หลายส่วน เช่น ส่วนของ ตัวบันทึก, หัวอ่าน-หัวบันทึก, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิก และอุปกรณ์อื่นๆ เป็นต้น ในส่วนของตัวบันทึกนั้น จะประกอบไปด้วยชั้นของฟิล์มบางของวัสดุแบบหลายชั้น ซึ่งชั้นหลักที่สำคัญได้แก่ ชั้นแผ่นรองรับ (underlayer) ชั้นแม่เหล็ก และชั้นป้องกันการชูดขีด สมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นจะมีส่วนสำคัญในการกระบวนการทำงานของตัวบันทึก แต่ในส่วนของชั้นแม่เหล็ก จัดได้ว่าเป็นชั้นที่มีส่วนสำคัญในการที่จะเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึก ขณะที่การผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของการบันทึกข้อมูลแบบแนวอนฟิล์มของตัวบันทึกในปัจจุบันจะเป็นแบบชนิดหลายชั้น ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วัสดุรองรับที่ทำมาจากโลหะผสมนิเกล-ฟอสฟอรัส (NiP) หรือแก้วและเคลือบด้วยฟิล์มของโลหะผสมอลูมิเนียม (Yihong, 2003) ด้วยการแผ่นรองรับจะประกอบด้วยชั้นของฟิล์มบางของวัสดุ ที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของฟิล์มแม่เหล็ก ซึ่งในยุคเริ่มต้นตัวบันทึกจะเป็นฟิล์มที่เคลือบด้วยชั้นแม่เหล็กเพียงอย่างเดียว ต่อมาการผลิตได้พัฒนาฟิล์มแบบหลายชั้นมาด้วย เช่น มีการเพิ่มชั้นฟิล์มแอนติเฟอร์โรแมกนิติก เพื่อทำให้ข้อมูลที่บันทึกในฮาร์ดดิสก์มีความเสถียรต่อความร้อนและการเรียงตัวของผลึกในชั้นฟิล์มแม่เหล็กดีขึ้น รวมทั้งชั้นด้านบนของฟิล์มแม่เหล็กที่ใช้ป้องกันการสัมผัสถกับหัวอ่านมีสมบัติที่ลื่น เช่นฟิล์มของวัสดุโพลิเมอร์ เป็นต้น ขณะที่เทคนิคการบันทึกแบบแนวตั้งของตัวบันทึกที่อยู่ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาในปัจจุบันนั้น ก็ยังคงใช้ตัวบันทึกที่ประกอบด้วยฟิล์มแบบหลายชั้น เช่นเดียวกัน

### 2.1. ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กแบบแนวอน

หลักการทำงานของเทคนิคการบันทึกข้อมูลแบบแนวอนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น อาศัยรูปแบบของการเรียงตัวของแมgniteเช่นในแต่ละบิตของตัวบันทึกให้อยู่ในระนาบขนานกับระนาบของดิสก์ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยการเปลี่ยนแปลงทิศของแมgniteเช่นที่เกิดขึ้นจะมีได้ด้วยกันสองรูปแบบคือ แมgniteเช่นที่เรียกว่า "ในทิศทางเดียวกันและทิศทางตรงกันข้ามกับระนาบของดิสก์" ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแมgniteเช่นจะเป็นไปตามทิศทางของการเคลื่อนที่ของหัวบันทึก โดยหัวบันทึกของเทคนิคดังกล่าวจะใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่แหล่งผ่านขาด ในหัวบันทึก และมีขั้วแม่เหล็กเป็นแบบชนิดสองขั้วมีช่องว่างสำหรับให้ พลักช์แม่เหล็กผ่าน ซึ่งสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นแบบขอบโถ้ง (fringing field) กระทำกับแมgniteเช่นของตัวบันทึกในระบบหัวอ่านและหัวบันทึกจะแยกออกจากกันและจะเคลื่อนที่

อยู่เหนือพิวของตัวบันทึก แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการเพิ่มความหนาแน่นในตัวบันทึกชนิดนี้ เนื่องจากเมื่อลดขนาดของเกรนของวัสดุแม่เหล็กลงแล้ว แต่แมgniteชั้นของเกรนในตัวบันทึก

ยังคงเรียงตัวอยู่ในแนวอน ทำให้แต่ละบีทยังคงใช้พื้นที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการเรียงตัวของเกรนเพื่อให้มีแมgniteชั้นในแนวตั้ง

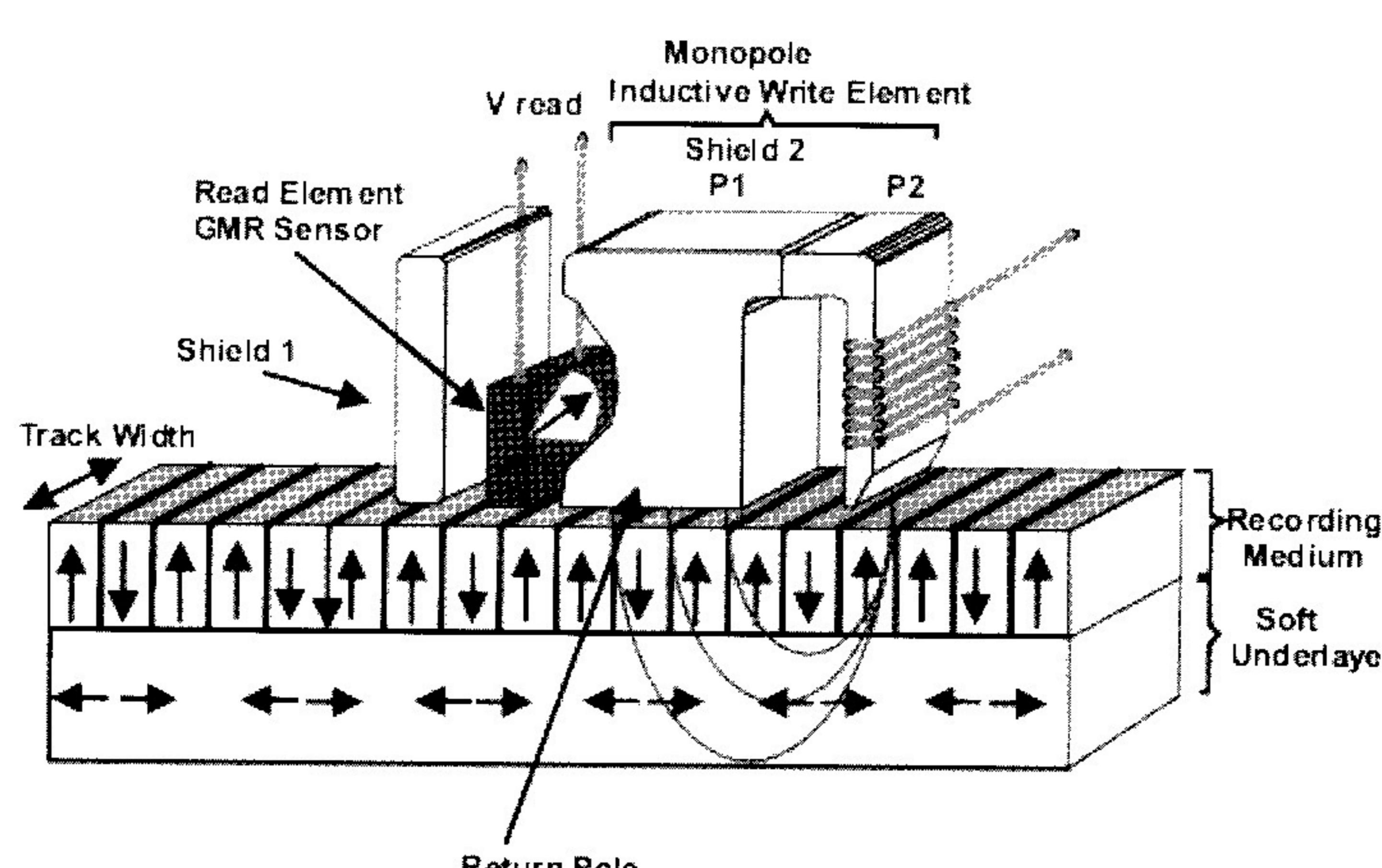


ภาพที่ 2 รูปแบบของการบันทึกแบบแนวอนในอาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Moser et al., 2002)

## 2.2. ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

ในการเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กจำเป็นต้องลดขนาดของบีทให้เล็กลง และทำให้บีทมีการอัดกันแน่นมากยิ่งขึ้น ซึ่งเกรนของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในตัวบันทึกจะเป็นต้องมีขนาดเล็กลง การบันทึกแบบแนวตั้งจึงเป็นเทคโนโลยีวิธีหนึ่งที่สามารถพัฒนาในการเพิ่มความหนาแน่นของอาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้โดยอาศัยหลักการให้แมgniteชั้นของตัวบันทึกเรียงอยู่ในแนวตั้งจำกัดบนของดิสก์ในทิศขึ้นหรือทิศลง รูปแบบการบันทึกแบบแนวตั้งนั้นจะมีด้วยกัน 2 แบบ แบบที่หนึ่งสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 3 ซึ่งหัวบันทึกจะเป็นแบบข้าวเดียวและมีชั้นของแม่เหล็กอย่างอ่อน (soft magnetic under layer) ทำหน้าที่คล้ายข้าวแม่เหล็กอิกข้าวหนึ่งสำหรับใช้ในการบันทึก แบบที่สองมีความแตกต่างจากชนิดที่หนึ่ง ในส่วนของชั้นของตัวบันทึกจะไม่มีชั้นแม่เหล็กอย่างอ่อนและใช้หัวบันทึกแบบเดียวกับการบันทึก

แบบแนวอน ส่วนชนิดของหัวอ่านจะเป็นแบบ GMR และที่สำคัญวัสดุที่ใช้เป็นตัวบันทึกแบบแนวตั้งควรมีค่าคงที่เอนนิโซโทรปี (anisotropy constant) โดยประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับแบบแนวอน (Terris & Thomson, 2005) ปัจจุบันได้มีรายงานการวิจัยว่าการผลิตตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กโดยใช้เทคนิคการบันทึกแบบแนวตั้ง จากวัสดุแม่เหล็กชนิด โคบล-โครเมียม-แพลตินัม (CoCrPt) ร่วมกับออกไซด์ของซิลิกอน ( $\text{SiO}_2$ ) สามารถผลิตตัวบันทึกให้มีขนาดความหนาแน่นที่ประมาณ 200 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้ว (Kaitsu et al., 2006) จึงคาดว่าในอนาคต (ค.ศ 2011) เทคโนโลยีการผลิตอาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้เทคนิคการบันทึกแบบแนวตั้งจะสามารถผลิตออกสู่ตลาดได้ และสามารถเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกในอาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ถึงเทราไบท์ต่อตารางนิ้ว (เทราเท่ากับ  $10^{12}$ )



ภาพที่ 3 รูปแบบของการบันทึกแบบแนวตั้งในอาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่พัฒนาโดยบริษัทตากาชิ (Moser et al., 2002)

### 3. นาโนเทคโนโลยีในตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก

การประยุกต์นาโนเทคโนโลยีเพื่อใช้กับตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กนั้น มีผลต่อการพัฒนาเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมการผลิต ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการลดขนาดของเกรนของวัสดุแม่เหล็กในตัวบันทึกข้อมูลสามารถเพิ่มความหนาแน่นของเกรนต่อพื้นที่ ทำให้ขนาดของบิทมีขนาดลดลง ในปัจจุบันเกรนของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ผลิตตัวบันทึกจะมีขนาดประมาณ 7 นาโนเมตร ซึ่งเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ค่อนข้างมาก แต่การลดขนาดของเกรน เพื่อให้มีจำนวนเกรนที่เพียงพอในแต่ละบิท ย่อมต้องคำนึงถึง อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio, SNR) ซึ่งโดยปกติในแต่ละบิทควรมีจำนวนเกรนอย่างน้อย หลายร้อยเกรน จึงจะทำให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณ รบกวนเพียงพอในการอ่านข้อมูล ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีที่มี ส่วนเกี่ยวข้องกับการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้แก่ การลดขนาด ของเกรนและขนาดของบิทของตัวบันทึกข้อมูล การลดขนาดของ หัวบันทึกและหัวอ่านข้อมูลให้มีขนาดใกล้เคียงหรือเล็กกว่าขนาด ของบิท รวมไปถึงการลดระยะของหัวบันทึกและหัวอ่านให้ห่าง จากผิวของตัวบันทึกที่ระยะห่างน้อยที่สุด ซึ่งล้วนเป็นเทคโนโลยี ระดับนานาใน ในส่วนของเทคโนโลยีระดับนานาที่นำมาใช้พัฒนา ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กนั้น ได้มีการศึกษานำเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาช่วย ในการเตรียมรูปแบบของการสร้างบิทให้มีขนาดเล็กระดับนาโนขึ้น วิธีที่น่าสนใจคือ การใช้การสร้างรูปแบบด้วยการกัดเซาะ แต่ ปัญหาบางอย่างที่จะเกิดขึ้นขณะที่วัสดุที่ใช้ผลิตตัวบันทึกมีขนาด เกรนเล็กลง นั้นคือพัฒนาความร้อนสามารถมีผลต่อสภาวะ เสถียรทางแม่เหล็กของวัสดุ ซึ่งทำให้เกิดสภาพที่เป็นชุบเปอร์ พาราแมgnิติกในวัสดุแม่เหล็กของตัวบันทึกได้

#### 3.1. ความร้อนต่อสถานะเสถียรของบิทในตัวบันทึก

การลดขนาดของเกรนเป็นหนึ่งของกุญแจสำคัญในการ พัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก รวมทั้ง การลดความหนาของฟิล์มให้มีขนาดลดลง เมื่อเทียบกับตัวบันทึก ที่ผ่านมา สิ่งที่กล่าวมานี้ได้แสดงถึงการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งช่วยลดต้นทุน ในการผลิต จะเห็นได้จากขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน มี ขนาดเล็กลง เมื่อเทียบกับในอดีต และผลการลดขนาดดังกล่าว จะทำให้ปริมาตรของเกรนมีขนาดลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ ทำให้ความสามารถในการเก็บข้อมูลของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก ลดลงไป การพัฒนาตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กนั้น จึงจำเป็นต้อง พิจารณาค่าพลังงานเอนนิโซทรอปี  $K_u V$  ( $K_u$  คือค่าคงที่ของเอนนิโซทรอปี และ  $V$  คือปริมาตรของเกรน) ของวัสดุแม่เหล็กที่ใช้

เนื่องจากพลังงานเอนนิโซทรอปีทำให้แมgniteเซชันมีสภาพคงอยู่ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ถ้าพลังงานเอนนิโซทรอปีมีค่าสูง นั้นแสดงว่าต้องใช้พลังงานในการเปลี่ยนทิศของแมgniteเซชัน จากทิศทางหนึ่งไปยังทิศตรงกันข้ามสูงด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การลด ปริมาตรของเกรนจะทำให้ค่าพลังงาน  $K_u V$  ลดลง (กรณีค่า  $K_u$  คงที่) การลดลงดังกล่าวทำให้พลังงานที่ใช้เปลี่ยนทิศของแมgnite- เซชันมีค่าน้อยลง ดังนั้นพลังงานความร้อน  $K_B T$  ( $K_B$  คือค่าคงที่ ของโบลซ์มานน์ (Boltzmann constant) และ  $T$  คืออุณหภูมิ สัมบูรณ์) ที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งปกติจะทำงาน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 300 เคลวิน ทำให้พลังงาน ความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลต่อความเสถียรของบิท โดยปกติการที่จะ ให้บิทมีความเสถียรในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ราว 10 ปีนั้น สัดส่วน ของ  $K_u V / K_B T$  ต้องมีค่ามากกว่า 60 ดังนั้น เมื่อมีการลดขนาด ปริมาตรของเกรนลง จึงจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุที่มีค่า  $K_u$  สูงขึ้น แต่การที่ใช้วัสดุที่มีค่า  $K_u$  สูงก็จำเป็นต้องใช้สนานแม่เหล็กที่สูงขึ้น ในการบันทึกข้อมูลด้วยปัจจุบันหัวบันทึกที่สามารถให้สนานแม่เหล็ก สูงสุดประมาณ  $1.19 \times 10^6$  แอมเปียร์ต่อเมตร (A/m) (Terris & Thomson, 2005) และสามารถใช้ในการบันทึกข้อมูลกับวัสดุ แม่เหล็กที่มีเกรนเล็กสุดประมาณ 7-8 นาโนเมตร เท่านั้น ซึ่ง ปัจจุบันมีรายวัสดุที่มีค่า  $K_u$  ที่สูง หมายความว่าการนำไปใช้ผลิต ตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กในแนวตั้งเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงได้มีการศึกษาเพื่อสร้างรูปแบบของบิทใหม่ ขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรขึ้นด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิค การกัดเซาะ ซึ่งสามารถสร้างรูปแบบบิทให้มีขนาดเล็กและมี ความสม่ำเสมอ รวมทั้งเทคนิคอื่นๆ ที่นำมาใช้สร้างรูปแบบเพื่อ เพิ่มขนาดความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

#### 3.2. เทคนิคการเตรียมรูปแบบระดับนาโน

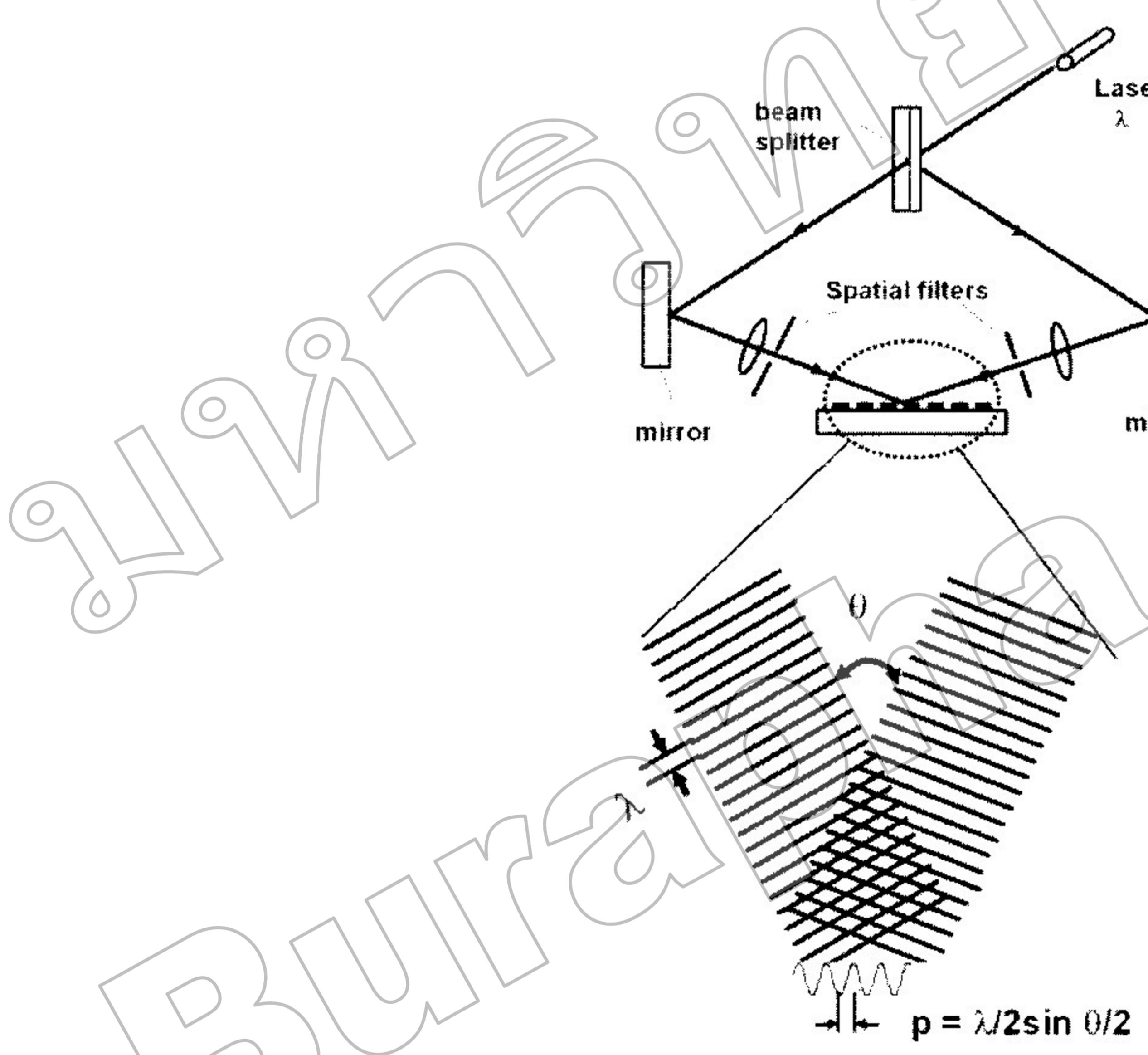
การเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีในการสร้างรูปแบบที่มีความละเอียด ในระดับนาโนของตัวบันทึก การสร้างรูปแบบโดยใช้เทคนิคการ กัดเซาะเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น สามารถสร้างได้จากอิเล็กตรอน รังสีเอกซ์ และจากแสงเลเซอร์ ซึ่งเทคนิคการกัดเซาะสามารถกำหนดขอบเขตของความละเอียด ของรูปแบบได้จากความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ของแหล่งกำเนิดที่ใช้ ขนาด ของรูปแบบจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $\lambda/2NA$  เมื่อ  $NA$  คือ จำนวนตัวเลขของช่องเปิดในระบบแสง อย่างเช่นแสงอุลต์ร้า ไวโอลেต (UV) มีความยาวคลื่น 157 นาโนเมตร และมีตัวเลข ช่องเปิดของเลนส์ที่สูง แต่แสงอุลต์ร้าไวโอลেตจะสามารถสร้าง รูปแบบที่มีขอบเขตต่ำกว่า 100 นาโนเมตร ได้เพียงเล็กน้อย สำหรับ

รังสีเอกซ์ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 0.2-10 นาโนเมตร จะสามารถกัดเซาะรูปแบบที่มีขนาดเล็กลงได้ค่อนข้างมาก การกัดเซาะรูปแบบอาจจะกระทำโดยตรงบนแผ่นฟิล์มแม่เหล็กที่เคลือบบนวัตถุรองรับหรือใช้ฉากที่มีรูปแบบกัน เพื่อให้ได้รูปแบบมีขนาดต่างๆ ตามต้องการ การใช้การแทรกสอดของแสงในการกัดเซาะเป็นเทคนิคนึงที่เหมาะสมสำหรับการสร้างรูปแบบที่เป็นระเบียนในบริเวณกว้าง โดยใช้แสงสองแหล่งที่มีความถี่เดียวกันและมีเฟสต่างกันคงที่ตลอดเวลาหรือเรียกแสงอาพันธ์ (light coherent) เมื่อเกิดการแทรกสอดขึ้นแสงทั้งสองจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง (standing wave) ที่สามารถกัดเซาะรูปแบบบนชั้นงานได้ เทคนิคนี้สามารถสร้างรูปแบบได้เล็กขนาดประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสง และน้อยสุดที่มีการศึกษาคือประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นแสง (Sbiaa & Piramanayagam, 2007) ภาพที่ 4(a-b) แสดงหลักการทำงานของการแทรกสอดของแสงที่ใช้ในการกัดเซาะและแสดงรูปแบบของบิทที่มีขนาดประมาณ  $12 \times 12$  ตารางนาโนเมตร ซึ่งขนาดรูปแบบดังกล่าวสามารถทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความ

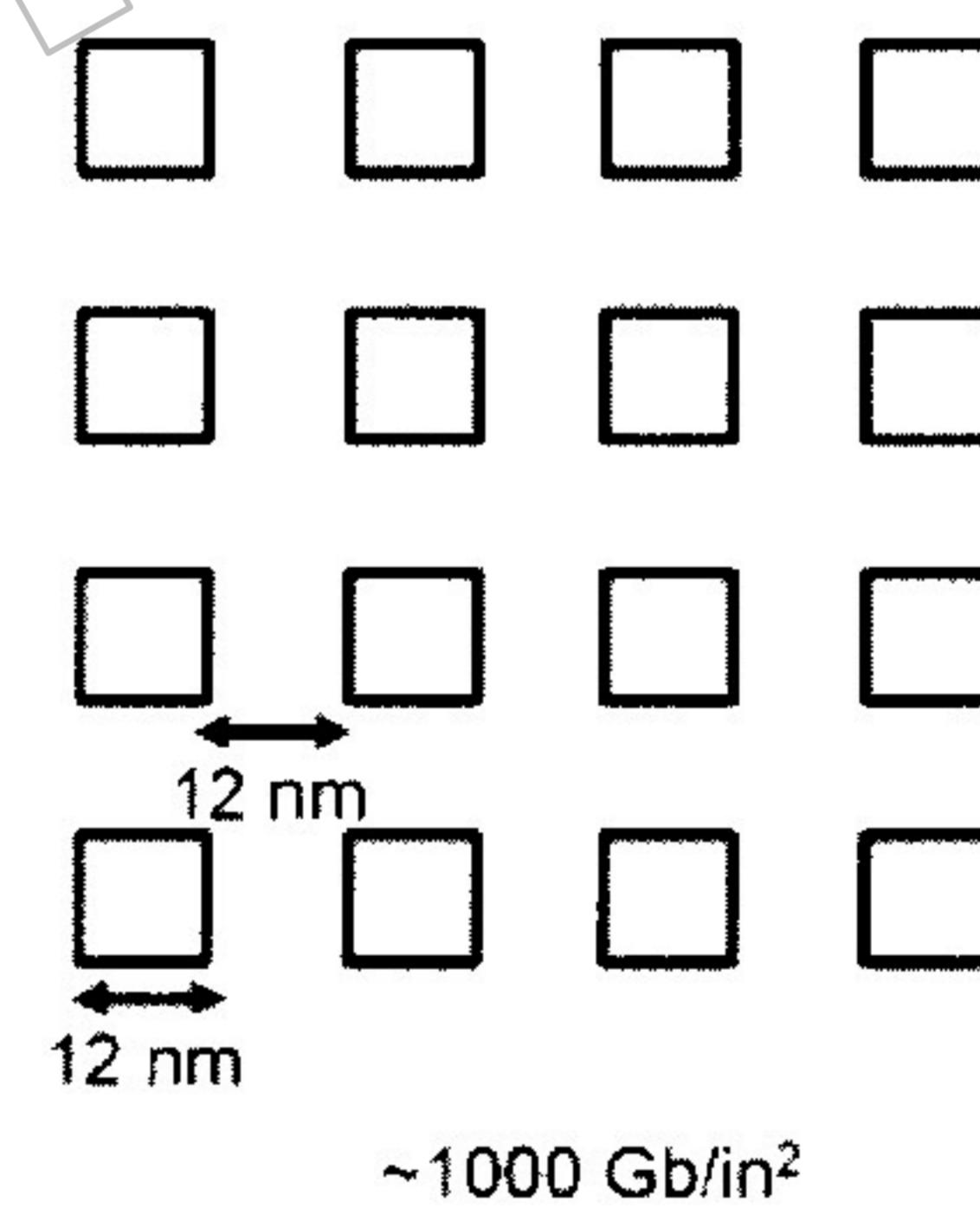
หนาแน่นได้ถึง 1,000 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้ว นอกจากนี้ในระบบการกัดเซาะยังสามารถใช้ประจุหรือไอออนแทนคลื่นแสง เราสามารถที่จะคำนวณหาความยาวคลื่นของอนุภาคนั้นได้ จากหลักการตามความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นเดอ布รอย (de Broglie wavelength)

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

โดย  $h$  คือค่าคงที่ของ แพลนค์ (Planck constant),  $E$  คือพลังงาน และ  $m$  คือมวลของอนุภาค เช่น อิเล็กตรอน หรือ โปรตอน เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) จะมีความยาวคลื่นประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  นาโนเมตร นอกจากนี้ รูปแบบของการกัดเซาะที่ได้ ก็ยังขึ้นกับส่วนประกอบอื่นๆ เช่น อุปกรณ์ของระบบการกัดเซาะและความหนาของฟิล์มชั้นงานที่ใช้ แต่เทคนิคที่กล่าวมายังคงอยู่ในกระบวนการศึกษาและวิจัยในปัจจุบัน



(a)



(b)

**ภาพที่ 4(a-b)** การกัดเซาะแบบใช้การแทรกสอดของสองคลื่นแสงที่เป็นคลื่นอาพันธ์และรูปแบบบิทขนาด  $12 \times 12$  ตารางนาโนเมตร ที่มีความหนาแน่น 1,000 จิกะไบท์ต่อตารางนิ้ว (Sbiaa & Piramanayagam, 2007)

**4. อนาคตของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก**  
เนื่องจากเทคโนโลยีในปัจจุบันมีข้อจำกัดในการเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขณะที่การลดขนาดของเกรนเพื่อให้บิทมีขนาดเล็กลงนั้นยังต้องศึกษาและพัฒนาต่อไปแต่ปัญหาคือเมื่อเกรนมีขนาดลดลงจนทำให้เกิดสภาวะของชูปเบอร์พาราเมกนิติก ทำให้จำเป็นต้องศึกษาหาแนวทางการเพิ่มความหนาแน่นของ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในปัจจุบันได้นำเทคนิคการบันทึกข้อมูลในแนวตั้งเข้ามาทดแทนแบบแนวนอน ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกได้สูงขึ้นประมาณสองถึงสามเท่า แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสภาวะของการเกิดชูปเบอร์พาราเมกนิติกยังคงมีอยู่ จึงจำเป็นต้องศึกษาหาวิธีการอื่นๆ มาช่วยพัฒนาเทคโนโลยีของ การเพิ่มความหนาแน่นของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เทคนิคการกัดเซาะ

สามารถสร้างรูปแบบระดับนาโนของบิทขึ้นมาได้ แต่เทคนิคดังกล่าวยังคงเป็นเทคโนโลยีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการผลิต นอกจากนี้ยังมีแนวทางอื่น เช่น การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของวัสดุแม่เหล็กด้วยวิธีทางเคมี การศึกษาในปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์วัสดุแม่เหล็กในกลุ่มโลหะผสม เหล็กแพลตินัม และ โคบอลต์แพลตินัม ที่มีโครงสร้างแบบ L1<sub>0</sub> ขึ้น ซึ่งคาดว่าวัสดุแม่เหล็กดังกล่าวจะเป็นวัสดุตัวเลือกหนึ่งในอนาคต เนื่องจากมีค่า  $K_u$  ค่อนข้างสูง ( $\sim 1 \times 10^7$  จูลต่อลูกบาศก์เมตร ( $J/m^3$ ) (Thiele et al., 1998) และขนาดอนุภาคนาโนของวัสดุดังกล่าวที่เตรียมได้ในปัจจุบัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 นาโนเมตร เท่านั้น

ในเชิงตลาดอุตสาหกรรมยาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้น นอกจากจะพิจารณาศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นของตัวยาร์ดดิสก์ไดรฟ์แล้ว ยังจำเป็นต้องศึกษาถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น อัตราเร็วของหัวบันทึก และหัวอ่านข้อมูลประกอบไปด้วยพร้อมๆ กัน เนื่องจากอัตราเร็วในการเปลี่ยนทิศแมgnite ตัวบันทึกของเกรนของวัสดุแม่เหล็ก มีค่าจำกัดประมาณ 10 นาโนวินาที (Spaldin et.al., 2003) ทำให้อัตราเร็วในการอ่านหรือบันทึกข้อมูลจึงถูกจำกัด ซึ่งแมgnite ตัวบันทึกในตัวบันทึกจะใช้เวลาไม่กี่นาโนวินาทีในการเปลี่ยนทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก และที่ผ่านมา มีก้าวสำคัญนักพิสิกส์ของสถาบันวิจัยซินโครตรอนแห่งสแตนฟอร์ด (Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL)) ได้วิจัยและศึกษาอัตราเร็วของการเปลี่ยนทิศแมgnite ตัวบันทึกของเกรนพบว่ามีค่าอยู่ที่ประมาณ 2 พิโคลินาที ภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 10 เทสลา (Tesla) (Tudosa et al., 2004) ถ้าอัตราเร็วในการเปลี่ยนทิศขึ้น-ลงของแมgnite ตัวบันทึก มีค่าอยู่ในปริมาณดังกล่าวแล้ว อนาคตก็ยังคงเปิดกว้างให้นักวิจัยได้ศึกษาและพัฒนาหัวบันทึก-หัวอ่านในยาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้อีก

## 5. สรุป

นาโนเทคโนโลยีของวัสดุแม่เหล็กมีผลเกี่ยวข้องต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตยาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาเกือบครึ่งศตวรรษ ปัจจุบันได้มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้มากขึ้น เพื่อพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก แต่เนื่องจากเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลมีขอบเขตจำกัดจากหลายปัจจัย ทั้งผลของความร้อน ต่อการทำลายสภาพความเป็นแม่เหล็กและเงื่อนไขการเกิดชุบเปอร์พาราแมgnิติก การนำเทคโนโลยีการบันทึกแบบแนวตั้งมาใช้อาจจะช่วยยืดระยะเวลาที่จะแก้ปัญหาการเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกของยาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันลงได้ แต่อนาคตอาจต้องมีการคิดค้นวิธีการอื่นๆ เข้ามาช่วยในการพัฒนาต่อไป

การนำเทคนิคการบันทึกแบบแนวตั้งมาใช้นั้น อาศัยหลักการของ การเรียงตัวของแมgnite ตัวบันทึกในแต่ละบิทให้มีการเรียงตัวในแนวตั้งจากกับระนาบผิวของดิสก์ ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มจำนวนบิทได้มากขึ้น เนื่องจากเกรนของวัสดุแม่เหล็กจะเรียงตัวอยู่ในแนวตั้ง แต่การลดขนาดของบิทจำเป็นต้องลดขนาดของเกรนให้เล็กลง สิ่งที่ต้องพึงระวังนั้นคือค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณ รบกวนต้องมากเพียงพอ ในการนี้ที่มีจำนวนเกรนต่อบิทน้อยเกินไป จะทำให้สัญญาณรบกวนอยู่ในปริมาณที่สูง จากที่ได้กล่าวในหัวข้อ ข้างต้นการลดขนาดของเกรนต้องคำนึงถึงพลังงานเอนนิโซโทรีป ของวัสดุแม่เหล็กที่นำมาผลิตเป็นตัวบันทึกข้อมูล เนื่องจากถ้าวัสดุมีค่าคงที่เอนนิโซโทรีปที่สูงจะสามารถลดขนาดของเกรนให้เล็กลงได้ โดยทั่วไปการที่จะให้ตัวบันทึกข้อมูลในยาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถใช้งานได้นานจะเป็นต้องมีค่าอัตราส่วนของ  $K_u V/k_B T$  สูงขึ้นด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างรูปแบบระดับนาโนด้วยเทคนิคต่างๆ มีส่วนช่วยในการสร้างบิทให้มีขนาดเล็ก เช่น เทคนิคการกัดเซาะ แต่ปัญหาในการสร้างบิทของวัสดุแม่เหล็ก ให้มีขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร ในพื้นที่ดิสก์ขนาดใหญ่ ยังมีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการสร้างรูปแบบโดยการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนของวัสดุแม่เหล็กด้วยวิธีเคมีแล้วนำไปกระจายลงบนดิสก์ วิธีการนี้จะสะดวกและมีต้นทุนค่อนข้างต่ำ รวมทั้งวิธีการอื่นๆ ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนแม่เหล็กในระดับนาโนเพื่อใช้ประโยชน์ในตัวบันทึกชนิดแม่เหล็ก ของยาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังต้องอาศัยเวลาในการวิจัย เนื่องด้วยเงื่อนไขสมบัติทางกายภาพของวัสดุ การปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของตัวบันทึกชนิดแม่เหล็กในยาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในปัจจุบัน 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, S.N. (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.