

ハイブリッド・超解像記録技術

東京農工大学 佐藤勝昭

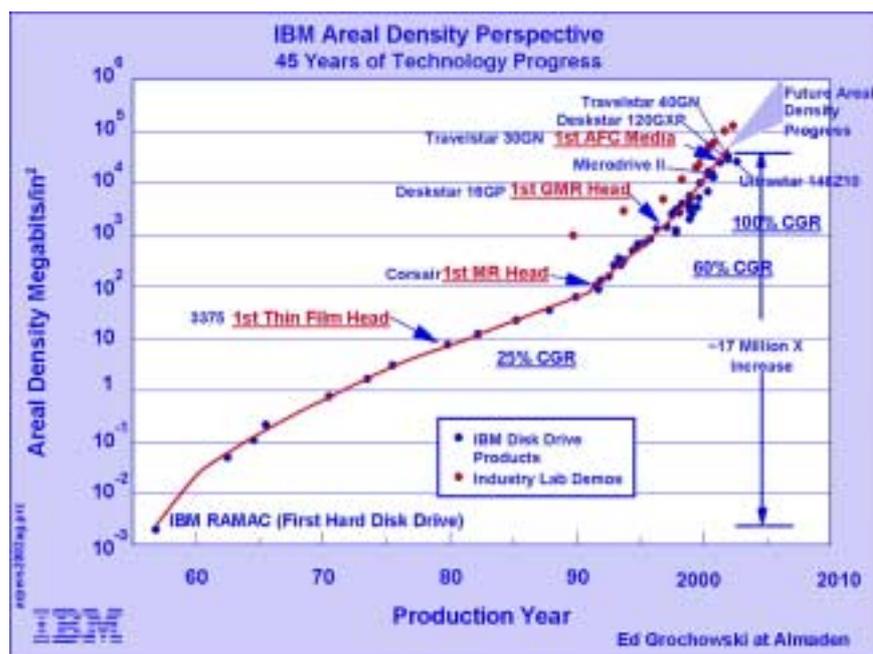
1. はじめに

大容量高密度ストレージ技術として常に光メモリと比較されるのが磁気記録(ハードディスク)である。ハードディスクには、過去に何度となく記録密度の限界が指摘されたが、そのたびに新しい技術が出現して、その限界を超えてしまうという歴史が繰り返されてきた。数年前まで、長手記録の記録密度の超常磁性限界が 40Gbits/in² 付近にあるのでこのあたりが限界とされていたが、層構造を改善して安定化した媒体の採用によりこの限界を軽く突破し、2002 年 5 月の Intermag 時点で各社(実験室レベルであるが)100Gbits/in² を超える面記録密度を達成している。最近の報告によれば、新しい媒体を用いた実験室レベルでの面内記録の線記録密度は、500kfcfci(fcfi=flux change per inch)を遙かに超え 800kfcfci に達する勢いとなっている。線密度 800kfcfci は面記録密度に換算すると、記録マークのアスペクト比 1:2 として、320Gbits/in² に相当する。再生ヘッドの感度向上やヘッド媒体間距離の縮小といった技術的課題を克服すれば 2003 年度中に 300Gbits/in² が達成されるのではないかと期待されている。

それでは、磁気記録密度はこの延長でどこまでも増大するのであろうか。1Tb/in² を超えるには、マークサイズは 25nm×25nm にまで縮小しなければならず、熱的安定性を保証するには大きな保磁力をもたせなければならないが、それでは、ヘッドによる記録が困難になる。これを解決する方法として提案されているのが、熱アシスト記録、または、ハイブリッド記録と呼ばれる技術である。これは、MO ディスクと同じように磁気記録の際にレーザによる加熱を使って保磁力を下げたて記録する。記録の際、光を狭い領域に集中させる技術として、近接場技術が使われようとしている。一方、再生において GMR ヘッドを使う方法には限界があるので、光磁気媒体の特性を利用して GMR ヘッド再生に熱アシストする方法、磁気誘起超解像技術と磁区拡大、または、磁壁移動を援用して信号の増幅を図る磁気光学再生、さらには、近接場光ヘッドを用いた近接場光再生などが検討されている。

2. なぜハイブリッド記録か

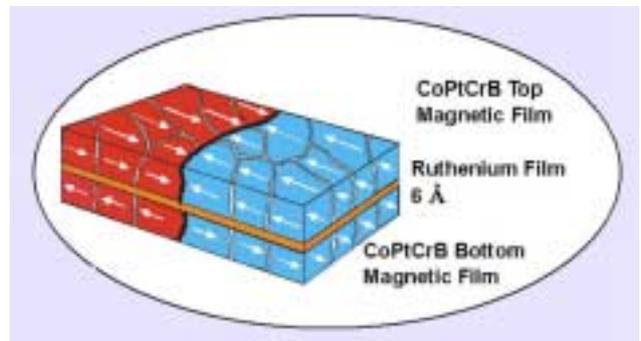
図 1 は IBM のホームページに紹介されている面記録密度の変遷である¹⁾。よく言われているように、ハードディスクの記録密度は、1992 年に MR ヘッドの導入によりそれまでの年率 25%の増加率(10 年で 10 倍)から年率 60%(10 年で 100 倍)の増加率に転じ、1997 年からは、GMR ヘッドの登場によって年率 100%(10 年で 1000 倍)の増加率となっている。超常磁性限界は、40Gbits/in² とされていたが、AFC 媒体の登場で、これをクリアし、実験室レベルの面記録密度は 2002 年時点ですでに 130Gbits/in² に達し、2004 年には 300Gbits/in² に達すると見込まれる。



現在使われているハードディスク媒体は CoCrPtB など CoCr 系の多結晶媒体である。強磁性の CoCr 合金の結晶粒が偏析した Cr 粒に囲まれ、互いに分離した膜構造になっている。磁気ヘッドによって記録された直後は、磁化が記録磁界の方向に向いているが、微粒子のサイズが小さくその異方性磁気エネルギー KuV (Ku は単位体積あたりの磁気異方性エネルギー、 V は粒子の体積) が小さくなると、磁化が熱揺らぎ kT によってランダムに配向しようとして減磁し、記録された情報が保持されないという現象が起きる。これを超常磁性限界と呼んでいる。

ハードディスクの寿命の範囲でデータが安定であるための最低条件は、 $\eta=KuV/kT>6$ とされている。面記録密度 D とすると、粒径 d は $D^{-1/2}$ に比例するが、記録される粒子の体積 V はほぼ d^3 に比例するので V は D の増大とともに $D^{-3/2}$ に比例して減少する。この減少を補うだけ、磁気異方性 Ku を増大できれば、超常磁性限界を伸ばすことができる。単磁区の微粒子を仮定し、磁化反転が磁化回転によるすると、保磁力 H_c は $H_c=2Ku/M_s$ と書かれるから $D^{3/2}$ 以上の伸びで保磁力を増大すれば救済できるはずである²。

AFC 媒体(antiferromagnetically coupled media)というのは、図 2 に示すように Ru の超薄膜を介して反強磁性的に結合させた媒体のことで、交換結合によって見掛けの V を増大させて、安定化を図るものである。富士通では SF(synthetic ferromagnet)媒体と称する強磁性結合媒体を用いて超常磁性限界の延伸を図っている。しかし、このような方法によって超常磁性限界の到来を多少遅らせることはできても、せいぜい 500Gbits/in² 迄であろうと考えられている。

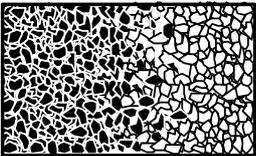
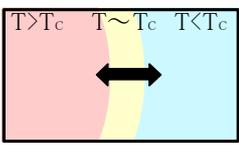


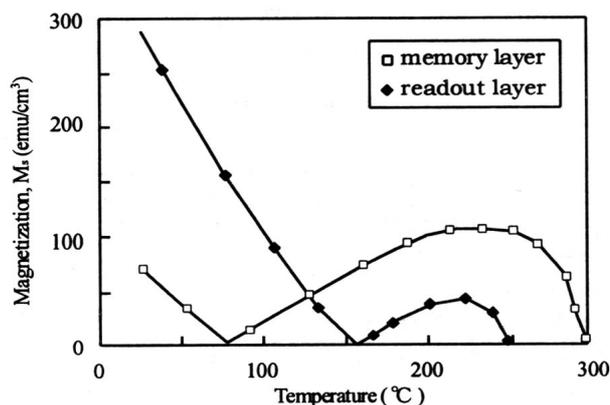
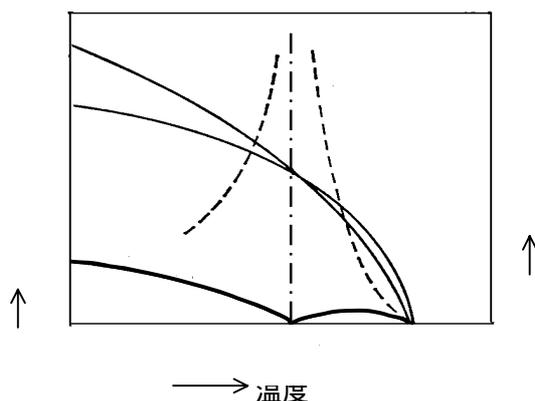
保磁力を大きくすれば安定性が向上することは確実であるが、ヘッドでの記録能力の問題を提起する。ヘッドの飽和磁束密度には限界があるし、ヘッドの寸法の縮小にも限界がある。現行の磁気ヘッドは理論限界の 1/2 程度のところにまで到達しており、改善の余地はほとんど残されていない。

3. 熱磁気記録媒体

保磁力の大きな媒体にどのようにして記録するのかという課題への 1 つの回答が熱磁気記録である。この目的に、MO ディスク技術として確立した熱磁気記録技術が利用可能である。熱磁気記録に用いられる媒体としては、表 1 に掲げられるように、従来から HDD に用いられてきた CoCr 系のグラニューラー媒体を利用する方法と、MO 媒体として使われてきたアモルファス希土類遷移金属合金媒体を用いる方法が考えられる。また、短波長 MO 材料として検討された Pt/Co 多層膜媒体を用いることも検討されている。いずれにせよ、室温付近で大きな H_c を示し、温度上昇とともに通常の磁気ヘッ

Table 1 HDD 媒体と MO 媒体

	HDD 媒体- CoCr 系	MO 媒体- TbFeCo
膜構造	微結晶 磁気的に分離された結晶粒	アモルファス 連続結合
異方性	$\sim 2 \times 10^6$ erg/cm ³ 長手または垂直	$> 5 \times 10^6$ erg/cm ³ 垂直
磁壁形成	結晶粒界	T_c の等温線の位置
熱安定性	結晶粒に依存	適切に
適切な 記録方法	磁気記録 	熱磁気記録 



ドで記録できる程度に H_c が減少する媒体が望ましい。

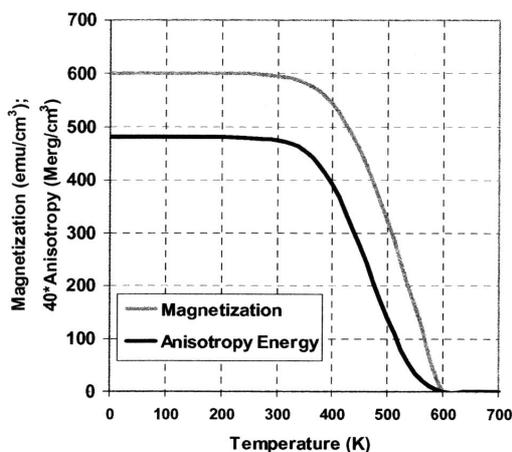
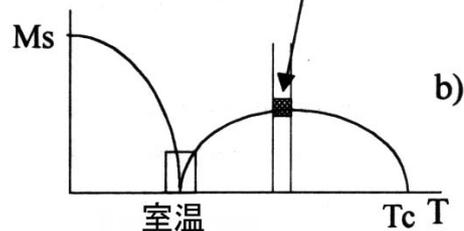
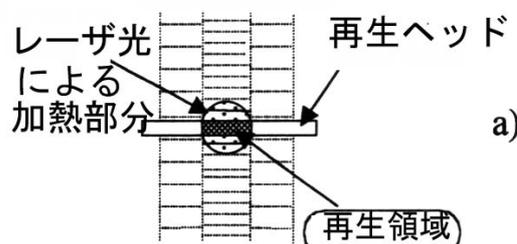
現行 MO 媒体である TbFeCo 系の場合、補償温度が室温付近に来るよう膜組成が制御されているため、図 3 に示すように、室温付近での M_s が小さく、従って、 H_c が大きいので、超常磁性効果に対して有効である。

しかし、GMR ヘッドを用いた磁気読み出しにおいては不利である。一つの解決法が、記録層と再生層の分離である。図 4 のように、再生層の補償温度を記録層より高温側にシフトさせることにより、磁気ヘッドで再生するのに十分な磁化を得ることができる³。もう一つの解決法が、再生の際にも熱アシストを行って、加熱された部分を補償温度からずらし M_s を強めて読み出す方法である。図 5 は、その原理を示す図である⁴。再生トラックが複数のトラックにまたがっていても、加熱された部分のみヘッドに磁束を届けることができるので、微小領域の選択にも好都合である。

一方、粒子状媒体である CoCr 系媒体における磁気異方性は図 6 の太線のような温度変化をする。室温からの温度上昇とともに H_c は急激に低下するので、ナノ秒程度の短時間加熱することによって、弱い磁界でも磁化反転できるくらいまで一時的に H_c を低下させることができる。これにより、高保磁力媒体に記録することが可能になる。この媒体の磁化が超常磁性により失われる様子は、先に述べた η と時間の指数関数となるので、加熱はできるだけ短時間に、かつ局所的になされなければならない⁵。従って、媒体の設計に当たっては、結晶粒の配向制御による K_u の制御、キュリー温度の制御とともに、熱的な設計が重要性をもっている。

1Tbits/in² の面記録密度は、アスペクト比 1:1 のとき、25nm×25nm に相当するが、線速 25m/s ならばビット時間は 1ns となる。従

読み出しトラック



って、非常に短時間に加熱・冷却できる必要がある。

4. Far-field 記録

日立のグループは、図 7 のような Far field の MO テスターでストロボ光式磁界変動記録(LS-MFM)によって、微細磁区を記録し、GMR ヘッドで再生する実験を行った^{6,7}。磁性層を記録層(MO 媒体と同様の膜)と再生層(補償温度を高温側にずらせた膜)の 2 層とし、さらに SiN 保護層を 10nm, 5nm の 2 層に分け、その間に 40nm の Al ヒートシンク層を設けることで冷却速度を向上し、Al 層がないときにはうまくかけなかった 100nm のマークを良好に記録するのに成功している。(表 2)

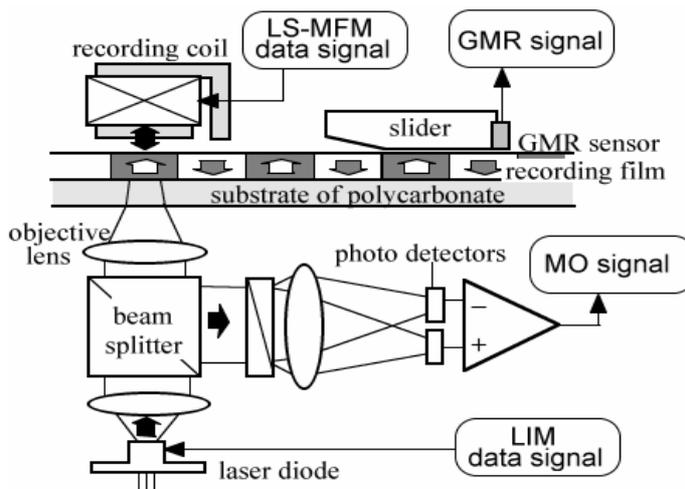


Table 2. 磁界変動法(MFM)で記録した磁区の MFM 像

	従来型媒体(緩冷)	ヒートシンク付き媒体(急冷)
800nm		
400nm		
200nm		
100nm		

Table 3. 遠視野記録と近接場記録

	Far Field(遠視野)記録	Near Field (近接場)記録	
		SIL (固体浸漬レンズ)	微小開口
ヘッド			
スポット径	λ/NA	半球: $\lambda/(n \cdot NA)$	Aperture diameter: $a = 10 \sim 100nm$
	$\geq 1\mu m$	超半球: $\lambda/(n^2 \cdot NA)$	

5. SIL および微小開口を用いた近接場記録

はじめに述べたように 1Tbits/in² におよぶ高密度記録においては bit サイズは 25nm 平方となり、記

録時のスポットサイズを 50nm 以下に縮小する必要がある。通常の far-field recording の場合、100nm を切るような磁気記録は非常に困難であるから、この解決のために表 3 に掲げるように、ハイブリッドヘッドに SIL を用いて回折限界を伸ばす方法(図 8)⁸、および、金属マスクに微小な開口を設けて開口からの近接場を利用する方法⁹が提案され実験されている。

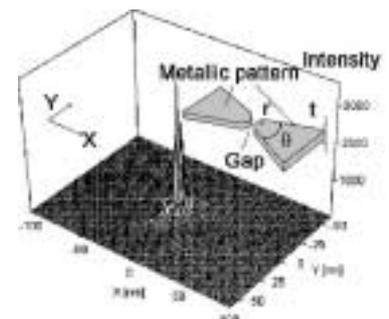
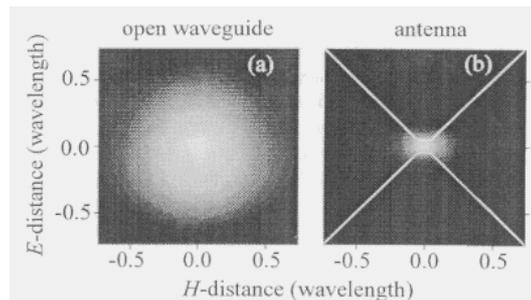
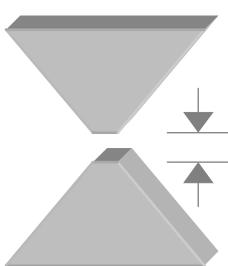
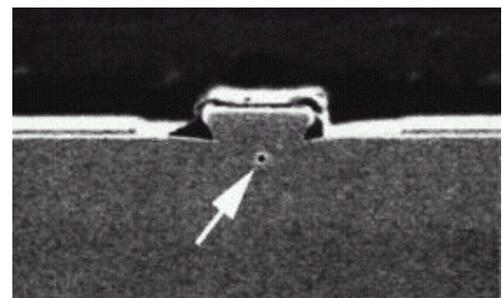
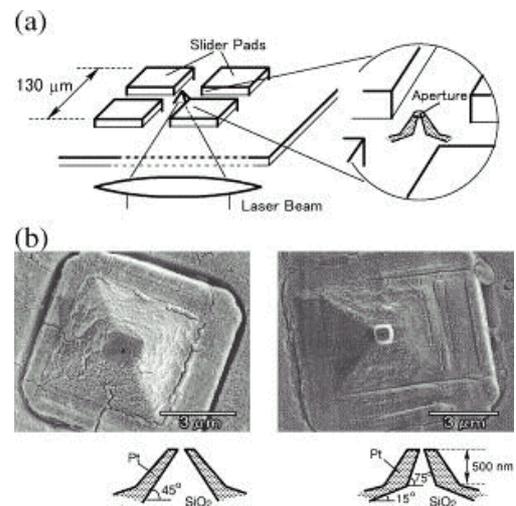
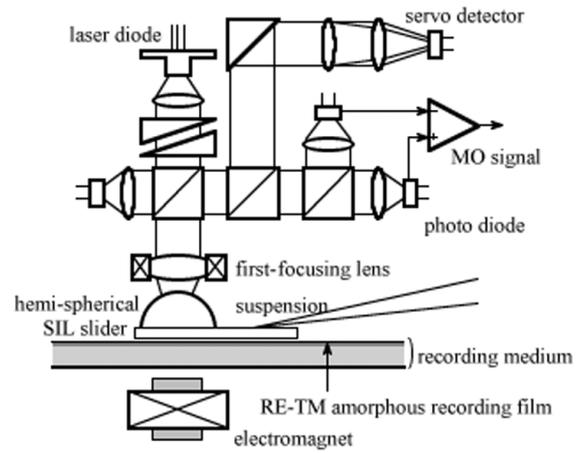
半球型 SIL を用いればスポットサイズをレンズ光学系の屈折率分の 1 に、超半球では屈折率の二乗分の 1 に縮小できる。SIL の近傍にはエバネセント場が存在するが、伝搬光も存在するので厳密な意味では近接場記録ではない。解像度を上げるにはスライダと媒体の距離を 100nm 以下にする必要があり、リムーバブルにすることはむずかしいと考えられる。光導波路にレンズを作り込むことも考えられている。いずれにせよ、回折限界ぎりぎりを使うということで、スポット径を 100nm 以下にするのはかなり難しいと考えられる。

微小開口を利用して小さなスポットを作る試みが行われている。金属で光学素子を覆い、その金属に波長よりかなり小さな開口を設ける方法により微小光スポットが得られる。微細孔は金属を FIB 加工することによって得られる(図 9)¹⁰。半導体レーザ自体に金属マスクをつけ微細開口を開ける試み(図 10)も行われている¹¹。

6. 光アンテナ

上述の方法により得られる光のスポットではエネルギー密度を大きくできないという問題点がある。これを解決し強いエネルギーの微小な光スポットを得る方法が、Grober らによって提唱されたボウタイ(蝶ネクタイ)型アンテナによる電磁場の集中である¹²。Grober らは、マイクロ波周波数に対しこの形のアンテナの中心部に電界の集中が起きることを検証し、光の周波数に対しても使用できると提案した。

Matsumoto らは、電磁界計算を行い、ボウタイアンテナのギャップ程度の領域に光強度が集中していることを明らかに



している^{13,8}。

7. 微小ビットの再生

記録された微小磁区の読み出しについては、GMR ヘッドを使うというのが一般的であるが、1Tbits/in²の面記録密度に対応するために25nmの磁極を作るのは非常に困難であるし、微小磁区からの洩れ磁界は非常に小さいので感度よく検出できるのかという問題がある。

MO ディスクにおいては、超解像技術¹⁴(MSR)に加え、磁区拡大再生技術¹⁵(MAMMOS)、磁壁移動検出技術¹⁶(DWDD)などを適用して微小ビットの磁気情報を、高 SN 比で磁気光学再生する技術が確立している。実際、MSR 技術は、GIGAMO(3.5";1.3GB, 2.3GB)¹⁷、iD-Photo(2", 730MB)¹⁸として製品化されており、DWDD についても新規格のハンディビデオ用 MO(2", 3GB)として商品化されつつある¹⁹。紙面の都合で、これらの詳細を紹介する余裕はないので、伊藤による解説を参照されたい²⁰。MAMMOS および DWDD は記録層から再生層に熱磁気転写する際に磁壁が移動させて、光スポットのサイズの磁区を得ている。再生時に熱アシストをすることにより磁区が拡大しておれば磁束も大きいので GMR ヘッドによる再生にも応用できると考えられる。

8. おわりに

この小文では、ハードディスクの超常磁性限界を突破し面記録密度 1Tbits/in²をめざす技術として注目されるハイブリッド磁気記録(熱アシスト磁気記録)を中心に最近の動きを解説した。光を援用することで 1Tbits/in² という超高密度磁気記録に実現の可能性が見えてきた点がポイントである。ハイブリッド記録技術は日本発の技術でありながら、HAMR(heat-assisted magnetic recording)プロジェクトとして米国に先を越されてしまった。我が国でも遅まきながら 2002 年度からこの技術を含む「大容量光ストレージ技術の開発事業」が経済産業省の支援により推進されることとなった。ぜひ、一步先を行く技術として地平を拓いて欲しいと願っている。この解説を書くに当たり、資料提供を頂いた日立製作所の助田裕史主任研究員に感謝する。

¹ IBM Web site (Nov. 10, 2002Browse)(<http://www.storage.ibm.com/hdd/technolo/grochows/grocho01.htm>)

² T.W. McDaniel and W.A. Challener: *Proc. MORIS2002*, Trans Magn. Soc. Jpn. **2** (2002) 316.

³ H.Nemoto, H. Saga, H. Sukeda and M. Takahashi: *Proc. MORIS1999*, J. Magn. Soc. Jpn. **23**, Suppl. S1 (1999) 229.

⁴ H. Katayama, S. Sawamura, Y. Ogimoto, J. Nakajima, K. Kojima and K. Ohta: *Proc. MORIS1999*, J. Magn. Soc. Jpn. **23**, Suppl. S1 (1999) 233.

⁵ J.J.M. Ruigrok: *Proc. MORIS2000*, J. Magn. Soc. Jpn. **25** (2001) 313

⁶ H. Saga, H. Nemoto, H. Sukeda, and M. Takahashi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) 1839

⁷ H.Nemoto and H. Saga: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 6379.

⁸ H. Sukeda, H. Saga, H. Nemoto, Y. Itou, C. Haginoya, T. Matsumoto: *IEEE Trans. Magn.* **37** (2001) 1234.

⁹ T.E. Schlesinger, T. Rausch, A. Itagi, J. Zhu, J.A. Bain, D.D. Stancil: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (2002) 1821.

¹⁰ F. Isshiki, K. Ito, K. Etoh, S. Hosaka: *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 804.

¹¹ A. Partovi, D. Peale, M. Wuttig, C. A. Murray, G. Zydzik, L. Hopkins, K. Baldwin, W. S. Hobson, J. Wynn, J. Lopata, L. Dhar, R. Chichester, and J. H-J Yeh: *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999) 1515.

¹² R.D. Grober, R.J. Schoelkopf, D.E. Prober: *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997) 1354.

¹³ T. Matsumoto, T. Shimano and S. Hosaka, *Technical Digest of 6th Int. Conf. Near Field Optics and Related Techniques, the Netherlands, Aug. 27-31, 2000*, p55

¹⁴ A. Fukumoto, S. Yoshimura, T. Udagawa, K. Aratani, M. Ohta and M. Kaneko: *Proc. Data Storage Topical Mtg. TuB4, Colorado Springs, 1991.*

¹⁵ H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, and N. Ohta: *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 4257.

¹⁶ T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: *Proc. MORIS1997*, J. Magn. Soc. Jpn. **22**, Suppl.S2 (1997) 47.

¹⁷ M. Moribe, M. Maeda, H. Nakayama, M. Yoshida, and K. Shono: *Digest ISOM'01, Th-I-01, Taipei, 2001.*

¹⁸ 市浦秀一, 伊藤和夫: *日本応用磁気学会誌* **25** (2001) 1410.

¹⁹ M. Birukawa, Y. Hino, K. Nishikiori, K. Uchida, T. Shiratori, T. Hiroki, Y. Miyaoka and Y. Hozumi: *Proc. MORIS2002*, Trans. Magn. Soc. Jpn. **2** (2002) 273.

