

IT社会を支える磁気ディスクと 光ディスク



佐藤勝昭

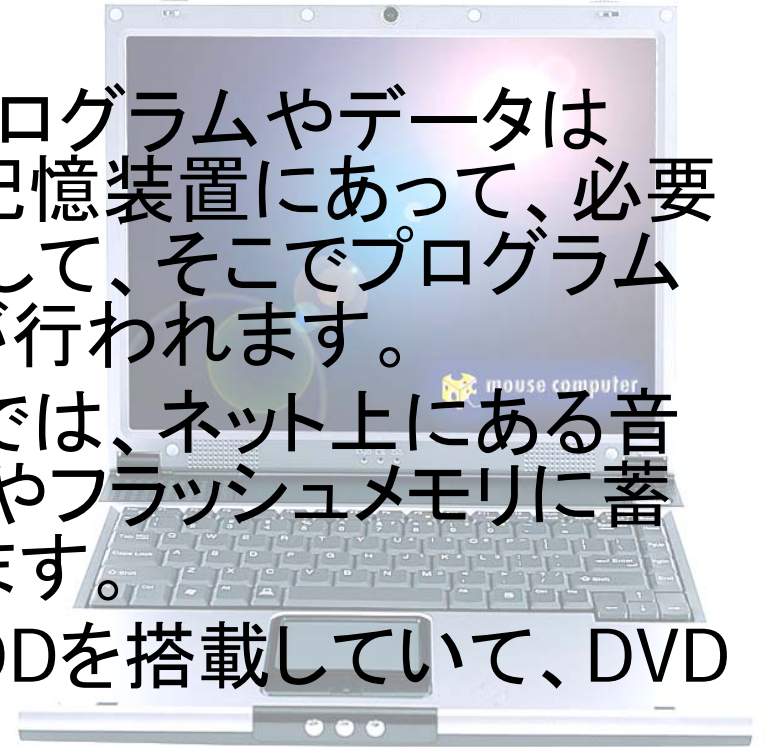
東京農工大学副学長

(兼務: 工学府電子情報工学専攻)



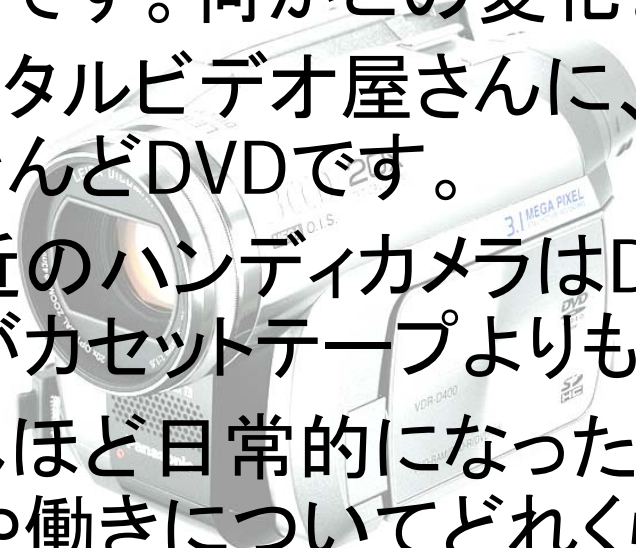
IT社会とストレージ(記憶装置)

- 現代のIT社会では膨大な量のデジタル情報が行き交っています。
- たとえばコンピュータでは、プログラムやデータはハードディスク(HDD)などの記憶装置にあって、必要に応じて半導体メモリに転送して、そこでプログラムに従って演算やデータ処理が行われます。
- i-Podのような携帯音楽端末では、ネット上にある音楽のデジタルデータをHDDやフラッシュメモリに蓄積して、必要なときに再生します。
- 最近のビデオレコーダは、HDDを搭載していて、DVDに落とすようになっていきます。



HDDやDVDについてどれくらいご存じですか？

- 平成元年頃には、1GBのHDDでも高級でした。いまでは120GBのHDDが1万円で売られています。しかもスリムです。何がこの変化をもたらしたのでしょうか。
- レンタルビデオ屋さんにも、VTRはほとんどありません。ほとんどDVDです。
- 最近のハンディカメラはDVDに録画できるタイプのものがカセットテープよりも主流だそうです。
- これほど日常的になったストレージですが、その仕組みや働きについてどれくらいご存じでしょうか？



東芝は五日、ハードディスク駆動装置(HDD)の記憶容量を増やす新技術を採用した二・五形型HDDを八月から量産すると発表した。垂直磁気記録方式と呼ばれる仕組みで記憶容量は二百ギガ(ギは十億)と業界最大水準。同様の製品は最大手の米シーゲート・テクノロジと日

2.5^{1/2}型HDD 6^{1/2}インチ
記憶容量200^ギ



立製作所のHDD子会社が出荷を始めているが、記憶容量は百六十ギガ。新製品

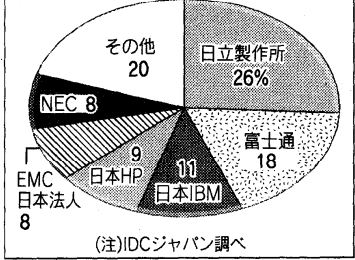
登場で業界内の記憶容量の主にノートパソコンで、東芝はテレビの磁気ディスク二枚を使用し、HDDに採用されるとみられる。東芝は二〇〇五年は九・五ギ。従来方式のHDDを使ったノートパソコンは百ギ以下が市場の中心だが、新方式の登場で一気に記憶容量が拡大する可能性がある。二・五形型は

外部記憶装置

NEC、世界首位と提携
米EMC 共同開発や販売協力

NECと米IT(情報技術)大手EMCは業務用の外部記憶装置(ストレージ)分野で提携する。NECは共同開発した機器をEMC向けにOEM(相手先ブランドによる生産)供給するほか、日本でのEMC製品の販売に協力する。成長市場のストレージ分野で世界最大手のEMCと組み、国内首位の日立製作所や二位の富士通を追う。

国内ストレージ市場のシェア (2005年度上半期)



は電子メールなど保管する情報が増えていることを背景に需要が増加している。昨年の世界市場の伸びは二ケタに達し、今後も成長が続く見通し。

NECのストレージの売上高は五百億一六百億円のもよう。調査会社IDCジャパンによると、二〇〇五年度上半期の国内シェアは八%にとどまり、二六%の日立や富士通に後れを取る。EMCとの提携により、世界規模で機器を供給し、コスト競争力を高める。昨年、米ユニシスともサーバーのOEM供給で合意しており、ハードの世界戦略に弾みをつける。

NECの矢野真社長とEMCのジョセフ・トゥッチ社長兼最高経営責任者(CEO)が五日、都

内で記者会見し、発表す

び以下の中・小型機を共同開発し、来年にも製品化する。NECが国内の工場を生産し、EMCにOEM供給する方向。ソフトの相互供給や共同開発も検討する。日本市場ではNECが情報システムを構築する際にEMC製品も売り込む。

企業向けのストレージ

レット・パックカード(H

業務用外部記憶装置

コンピュータに接続しデータを記録するための専用装置。複数台のハードディスク駆動装置(HDD)を束ねて構成

する。装置単体でデータの複写や圧縮ができる製品も多く、製品開発にはハード技術も求められる。

製品も売り込む。

企業向けのストレージ

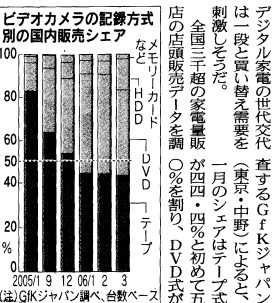
レット・パックカード(H



非テープ式ビデオカメラ主流に

国内ビデオカメラ市場で記録にDVDやハードディスク駆動装置（HDD）などを採用し「非テープ式」が主流になってきている。テープ式の販売シェア（台数ベース）は三月末（三月連続で0%を割り、編集などがしやすい非テープ式へのシフトが加速するのは確実。DVD式登場から約四年でテープ式を逆転

DVDやHDD内蔵



国内販売シェア

テープ式、1月から50%割れ
四六・五%で首位に立った三月はHDD式が一、四七%と二、四%から躍進した。各月で二機種とした。HDD式の売りのシェア二・九%は先行し日本ビクターは、フラッシュメモリーに加え、含音、ソニーのカード式など。昨年一、東芝が参入。テープ式も月別テープ式八・九%は先行し日本ビクターに対し、DVD式は三、四%だった。DVDは録画したデータの容量も増え、三月は四〇%程度を占めた。ビデオカメラは少子化の影響もあり国内出荷は年間で約百五十万台前後で伸びも鈍る。HDD式は長び込んでおり、各社は世時間録画、レコーダーへ、交代を進め市場拡大との高速度転送ができる。メ単価アップを狙う。



東芝は10日、次世代DVD・HDD・DVDが再生できる世界初の「1」型パソコン（PC）を、国内向けに5月中旬に発売すると発表した。3月末に発売した再生機に次ぐ対応商品の第2弾。ソニー他との競争の激化が本格的に見込まれる中、同社は早めに商品化し

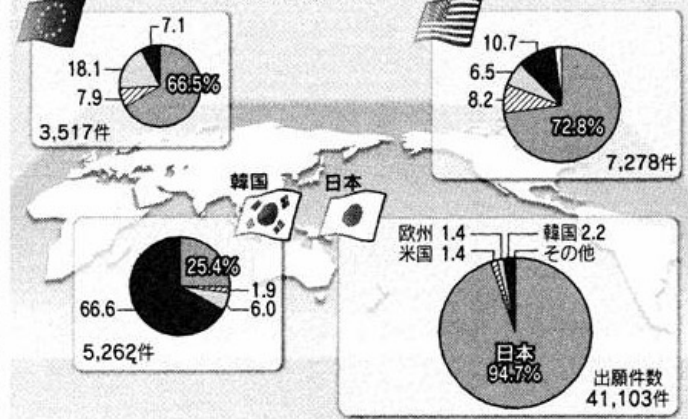
次世代DVD再生可能PC

東芝、来月中旬に発売

規格の認知度を上げた。発売する。HDD・DVDに「1」と話している。向きのソフトは今月中に「1」型パソコンシリーズの最新型「1」型から、従来のDVDやHDDの記録。一方、ソニーが再生もできるようにする。画面は17型、ハイク（HD）は、ソニーは、画面を楽しめ、型パソコン発足の初要市場想定価格は40万円前後。すでに国内外で発売する。後、欧米でも6月までに予定。【産経通信】

CD、DVD特許の各地域への出願件数

(1990-2003年)



なるほど
ビジネスMap

CD・DVD特許、日本が圧倒

の出願はサムスン電子、LG電子など韓国企業が六七%を占め、日本勢の出願は二五%。特許庁技術調査課は「韓国企業は自国への出願を重視するため、相対的に日本勢の出願比率が下がっている」と分析する。CDやDVD技術が普及するには標準化も重要になる。次世代DVDの方式はまだ規格が決まっていない。将来、日本に不利な規格に決まれば劣勢に追い込まれる。知的財産権の保護とともに、規格標準化でも日本が主導し続けることが課題になる。

この講義の内容

- 第1部：磁気記録
 - 磁気記録の歴史、磁気記録の原理
 - 磁気記録はどこまで高密度になるのか？
 - 磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)
- 第2部：光記録
 - 光ディスクの原理
 - 光記録の高密度化

磁気記録(magnetic recording)

- 磁気記録の歴史
- 磁気テープと磁気ディスク
- 記録媒体と磁気記録ヘッド
- 高密度化を支えるMR素子
- 超常磁性を克服する
- ハイブリッド磁気記録
- 固体磁気メモリ(MRAM)



磁気記録の歴史

- 1898年V.Poulsen(デンマーク): 発明: 磁性体の磁化状態を制御することによる情報記憶技術。
- 1900年磁気録音機としてパリ万国博に出品され、「最近の発明のなかで最も興味あるもの」として賞賛される。
- 1921年L.De Forest(米国)の真空管による増幅器の発明、1930年代リング型磁気ヘッドと微粉末塗布型テープの開発→磁気記録技術の実用化

磁気テープと磁気ディスク

- 磁気テープ:
 - シーケンシャルアクセス: アクセス時間遅い、転送速度遅い
 - 大容量: 大容量のコンピュータ用バックアップテープ「LTO Ultrium 2 (200GB)」(マクセル)、1/2インチデジタルビデオテープ「S-AIT(非圧縮500GB, 圧縮1300GB)」(ソニー)
 - VTR: ヘリカルスキャン(ヘッド・媒体間相対速度を増大)
- 磁気ディスク:
 - ランダムアクセス: アクセス時間短い、転送速度速い
 - ヘッドを軽量化してシーク時間減少
 - グラニューラー媒体(微粒子化)で高密度化:
 - ヘッド・媒体間隙の大幅減少
 - 垂直磁気記録でさらに高密度に



磁性の基礎

磁性体を特徴づけるもの

- 磁性体のうち、外から磁界を加えなくても、磁化(磁気分極)をもつものを、強磁性体という。
- 強磁性体を特徴づけるのは、磁気ヒステリシスと磁気相転移である。



磁性の基礎

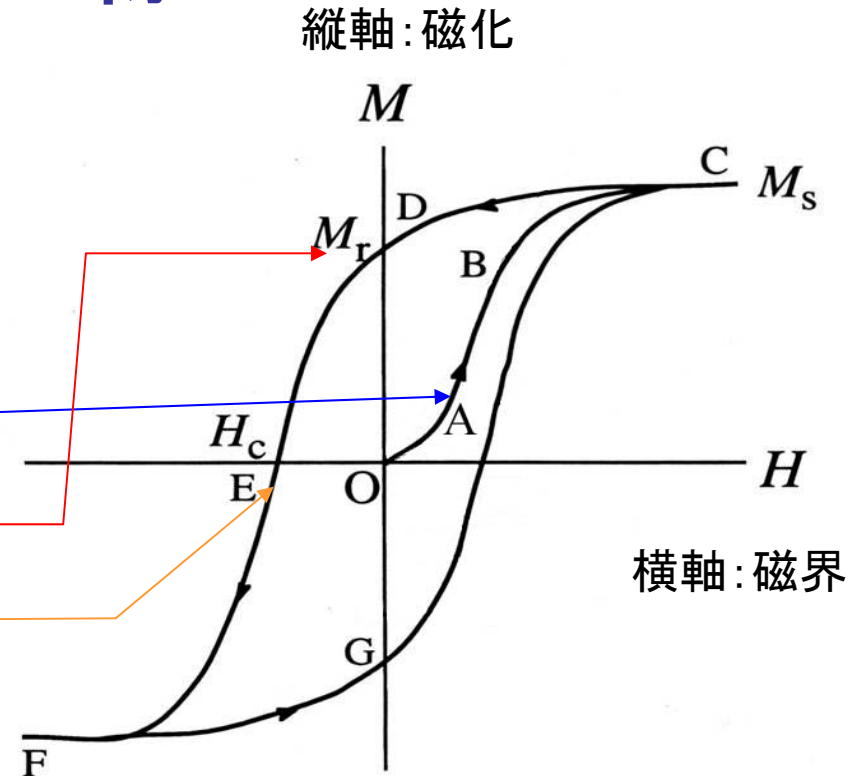
磁気ヒステリシス

- 強磁性体の磁化は、初期状態では消えているが、外から磁界を加えると磁化が現れ、ある程度大きな磁界で磁化が飽和、磁界を切っても磁化が残る。このような磁界と磁化の関係（磁化曲線）を磁気ヒステリシス曲線という。
- 保磁力が小さく、わずかな磁界で容易に磁化反転がおきるものを軟質磁性体という。

磁性の基礎

磁気ヒステリシス曲線

- 強磁性体においては、その磁化は印加磁界に比例せず、ヒステリシスを示す。
- $O \rightarrow B \rightarrow C$: **初磁化曲線**
- $C \rightarrow D$: **残留磁化**
- $D \rightarrow E$: **保磁力**
- $C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow C$:
ヒステリシスループ

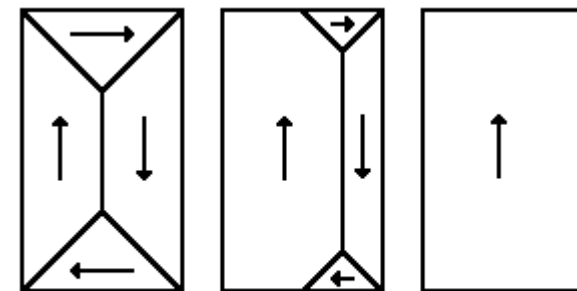
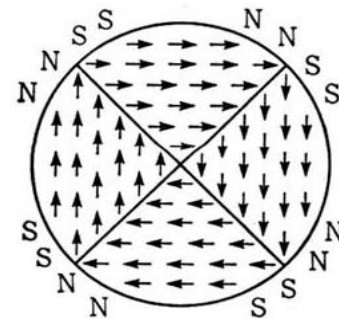
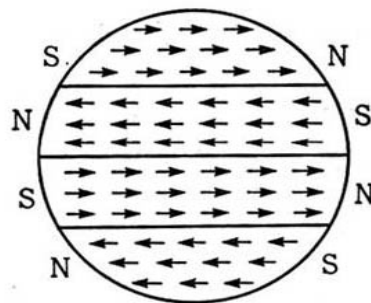


(高梨：初等磁気工学講座テキスト)

磁性の基礎

磁気ヒステリシスはなぜ生じるか？

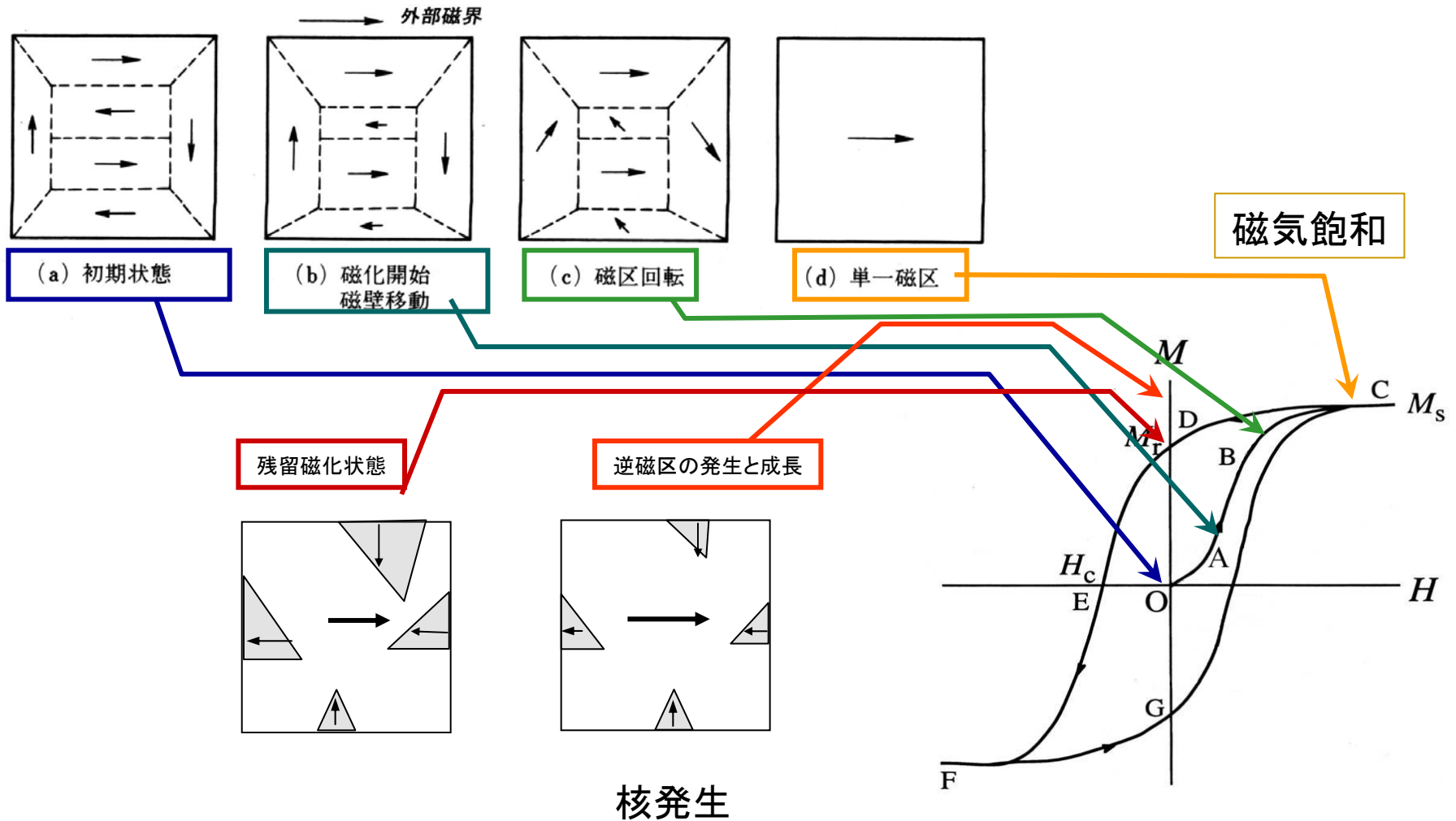
- 自発磁化が特定の方向を向くとすると、N極からS極に向かって磁力線が生じます。この磁力線は考えている試料の外を通っているだけでなく、磁性体の内部も貫いています。この磁力線を**反磁界**といいます。反磁界の向きは、磁化の向きとは反対向きなので、磁化は回転する**静磁力を受けて不安定**となります。
- 磁化の方向が逆方向の縞状の**磁区**と呼ばれる領域に分かれるならば、反磁界がうち消し合って静磁エネルギーが低下して安定するのです





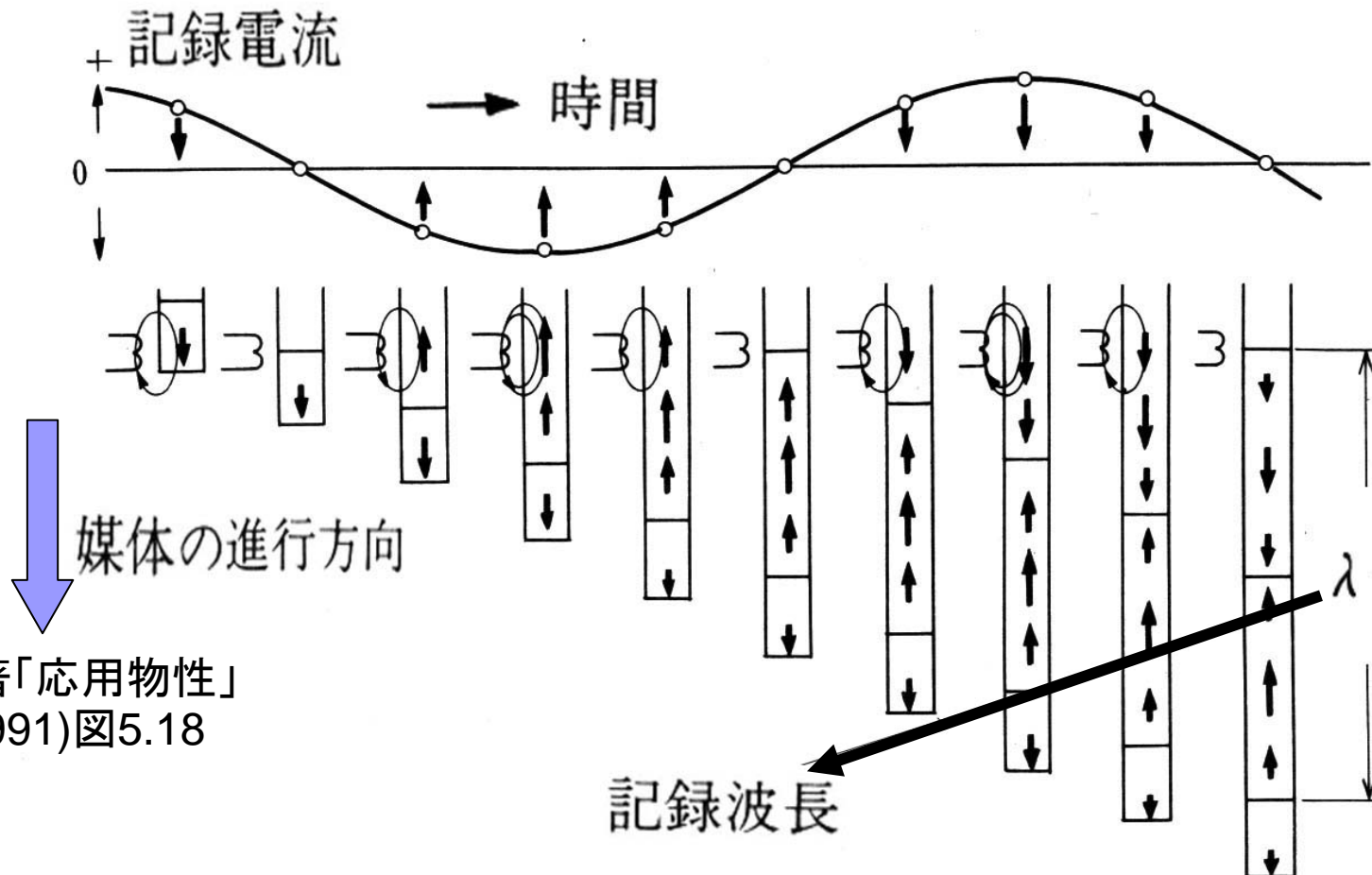
磁性の基礎

ヒステリシスと磁区



磁気記録の原理

磁気記録過程(アナログ)



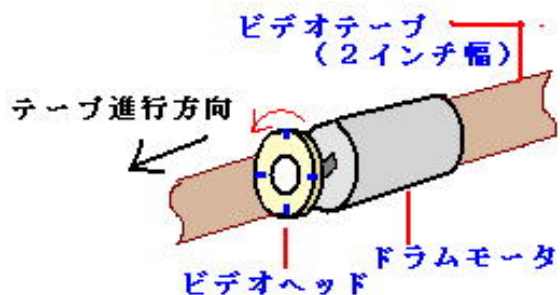
佐藤勝昭編著「応用物性」
(オーム社, 1991)図5.18

記録波長

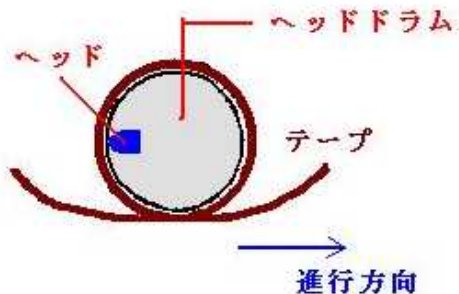
- 媒体に近接して配置した磁気ヘッドのコイルに信号電流を流し、信号に対応した強さと向きをもつ磁束を発生し、媒体に加える。
- 媒体は、ヘッドからの磁束を受けて磁化され、信号に対応する残留磁化の向きと強度をもつ磁区が形成される。
- 記録波長 λ (信号1周期に対応する媒体上の長さ)
- $\lambda = v/f$ (v :媒体と磁気ヘッドの相対速度, f :信号周波数)
- 記録減磁: 高周波信号になると、媒体が十分に動かないうちに磁界の向きが反対になり、十分に記録できなくなる現象

うんちく:VTR

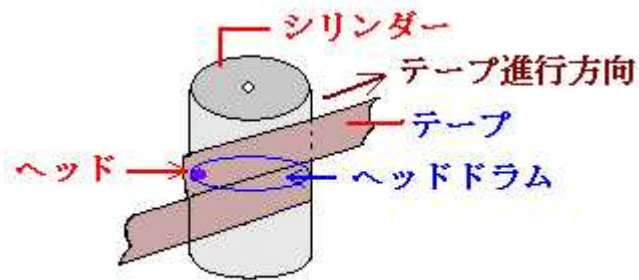
- ビデオ信号は、オーディオ信号に比べ、周波数帯域が3桁も広いので、 v が大きくなると記録波長が短くなりすぎて記録できなくなる。
- VTRではテープの相対速度を高めるため、回転ヘッドが使われた。当初は幅の広いテープを用い、テープ走行方向に垂直にヘッドが回転する方式が放送用に用いられたが、日本において、斜め走査方式が開発され、カセットテープ式のVTRが家庭用に普及した。



第1図 テープとビデオヘッドの位置関係



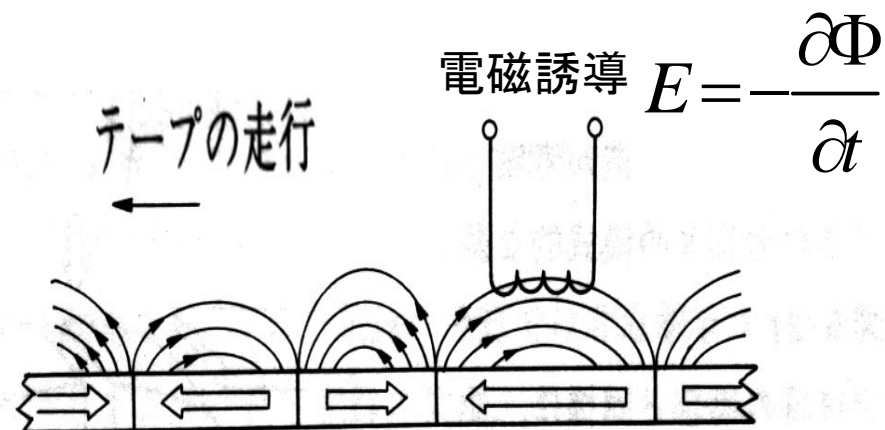
第5図 シリンダ断面図



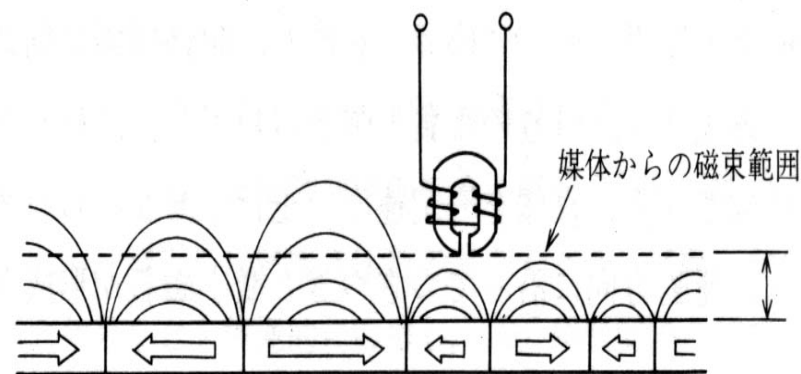
第4図 1ヘッドVTR

磁気記録の再生：誘導型ヘッド

- **電磁誘導現象**
コイルを通る磁束 Φ が変化するとき、磁束の時間微分に比例した電圧 E がコイルに発生する。
- 出力は微分波形となる
- 再生電圧は、記録波長(媒体上の信号1周期に対応する長さ)と媒体・ヘッドの相対速度の積に比例

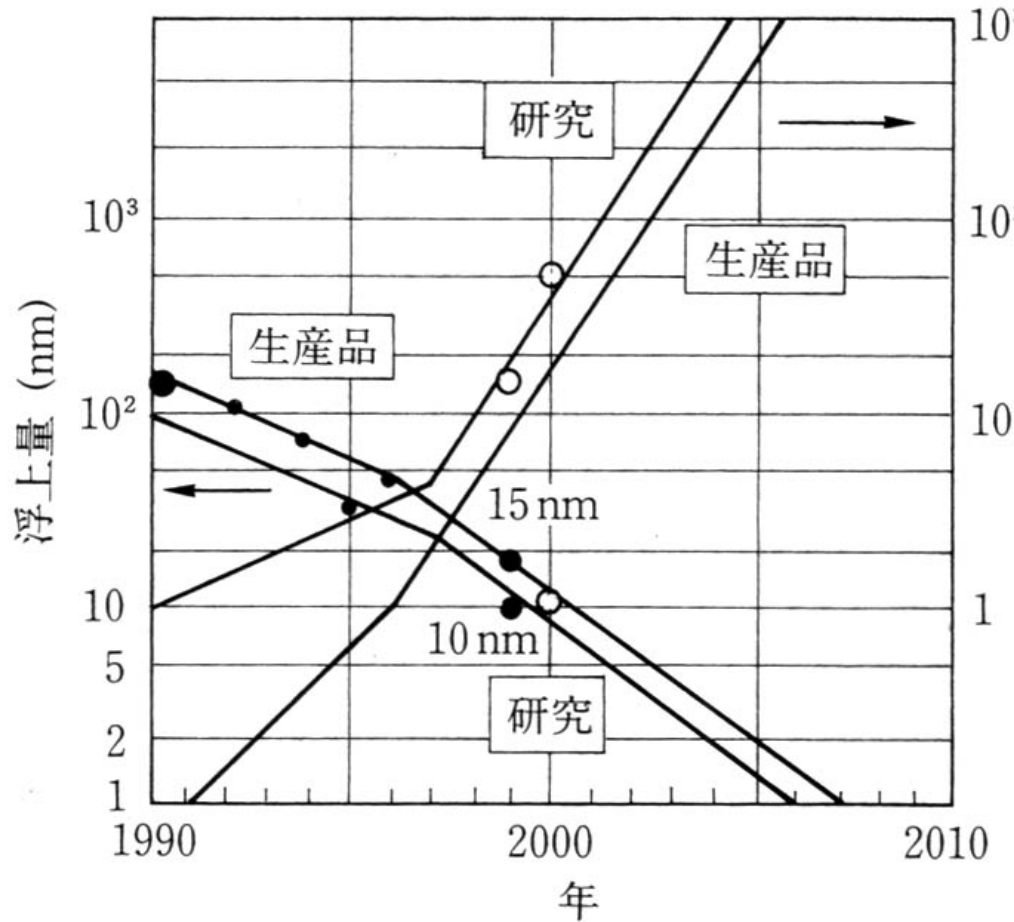


再生の原理

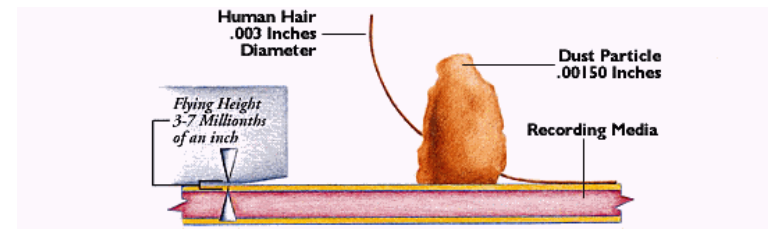


スペーシングロス

記録密度とヘッド浮上量



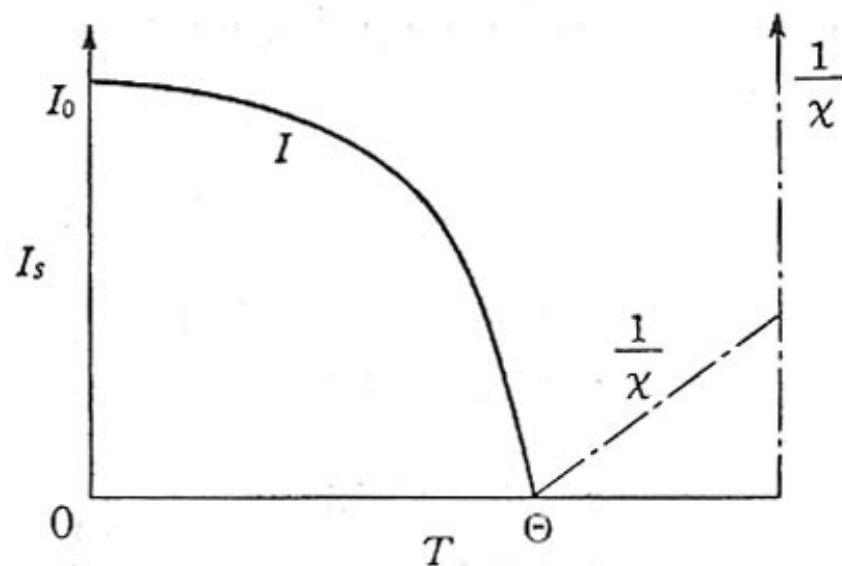
● 10³
● 10²
● 10
● 1



磁性の基礎

自発磁化の温度変化

- 強磁性体の自発磁化の大きさは温度上昇とともに減少し、キュリー温度 T_c において消滅する。
- T_c 以上では常磁性である。常磁性磁化率の逆数は温度に比例し、ゼロに外挿するとキュリー温度が求まる。



4-3 図 自発磁化の温度変化と Curie 点以上の磁化率

磁気記録媒体(1)磁気テープ

■ プラスチックベースに磁性体を堆積

■ 塗布型:

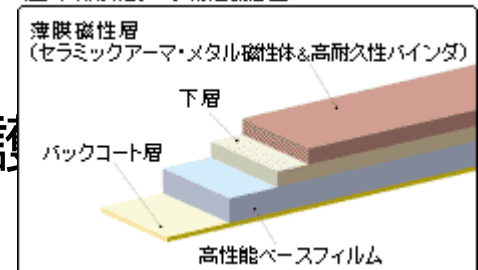
- 酸化鉄: Co被着 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$
- 2酸化クロム: CrO_2
- メタル: 磁性金属(純鉄など)微粒子

■ 蒸着型:

- コバルト蒸着;
DLC(ダイヤモンド状カーボン)で保護



(図1) 薄膜化テープ構造概念図

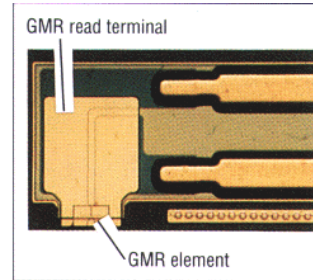
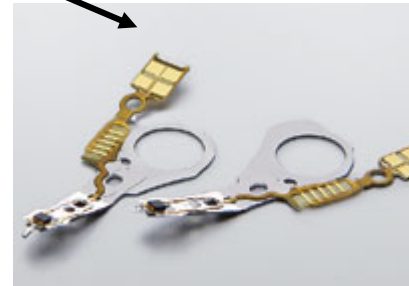
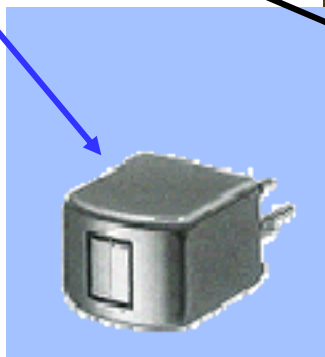
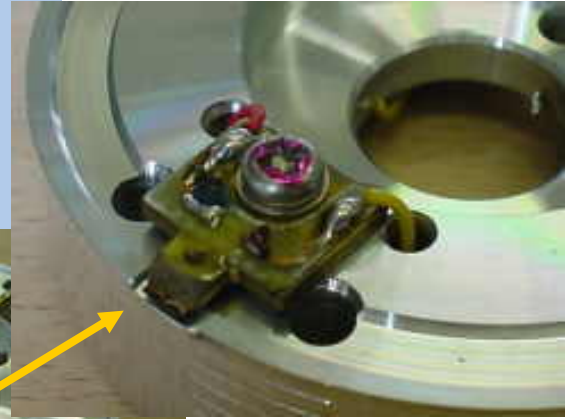
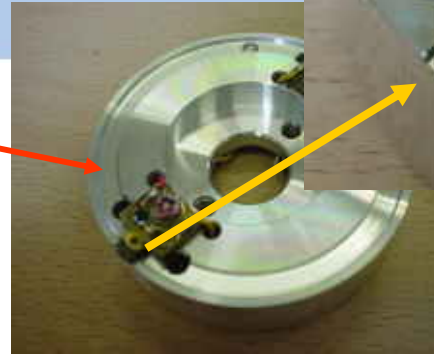
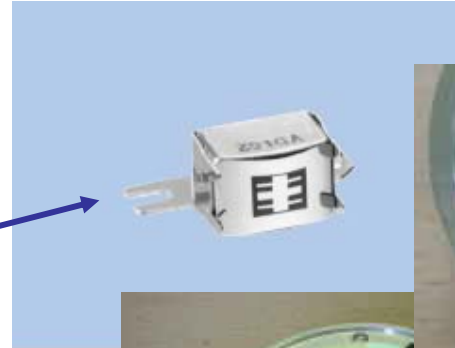
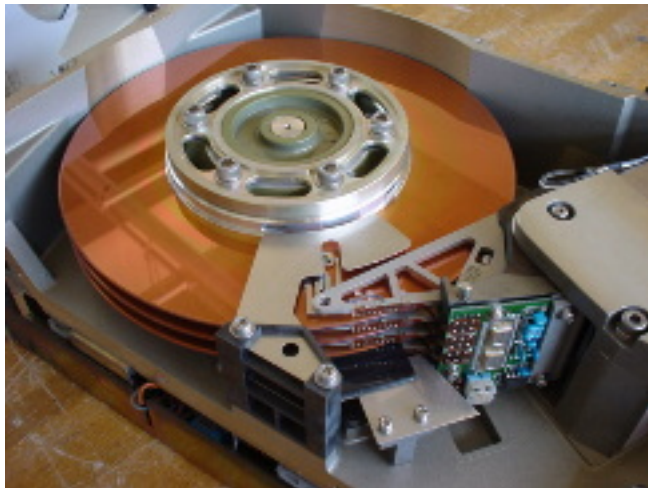


磁気記録媒体(2)ハードディスク

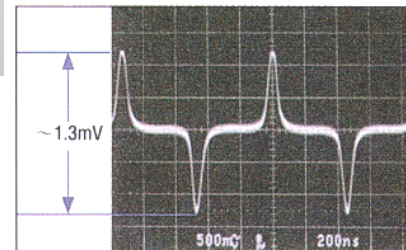
- プラッター基板材料: アルミ円盤、ガラス
- 磁気媒体材料: CoCr系材料が使われる。最近の高密度媒体は、超常磁性減磁を防ぐため、RuなどをはさんだSAF(人工反強磁性)という構造がとられる。
- 表面保護層: DLC(ダイヤモンド状カーボン)を用いる
- 潤滑剤: 磁気ヘッドとの摩擦を防ぐためライナーという潤滑剤が塗布されている

さまざまな磁気ヘッド

- オーディオカセット用
- ビデオカセット用
- ハードディスク用
- 磁気カード、紙幣用



Giant magnetoresistive read element

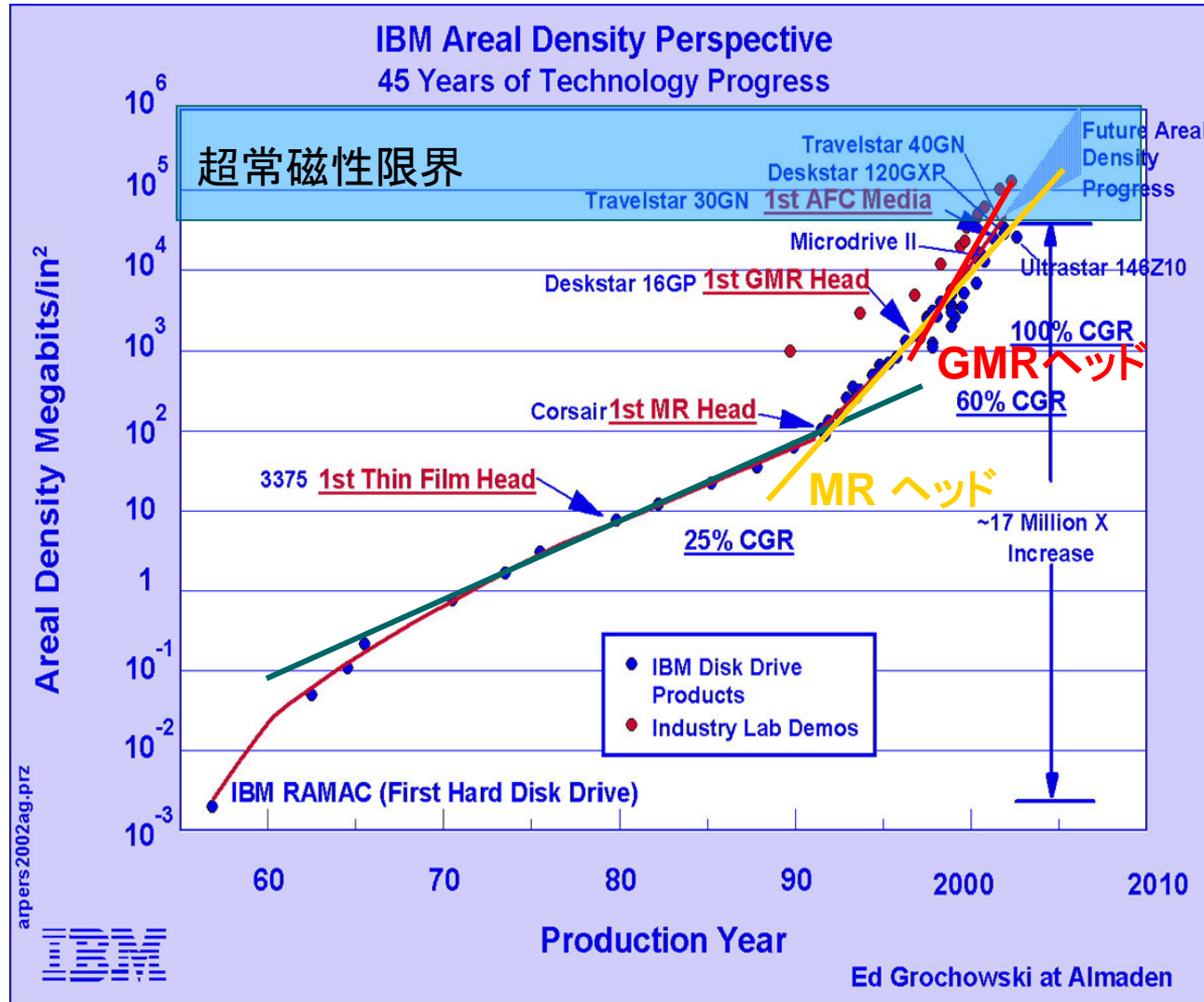


Read-back waveform

HDの記録密度の状況

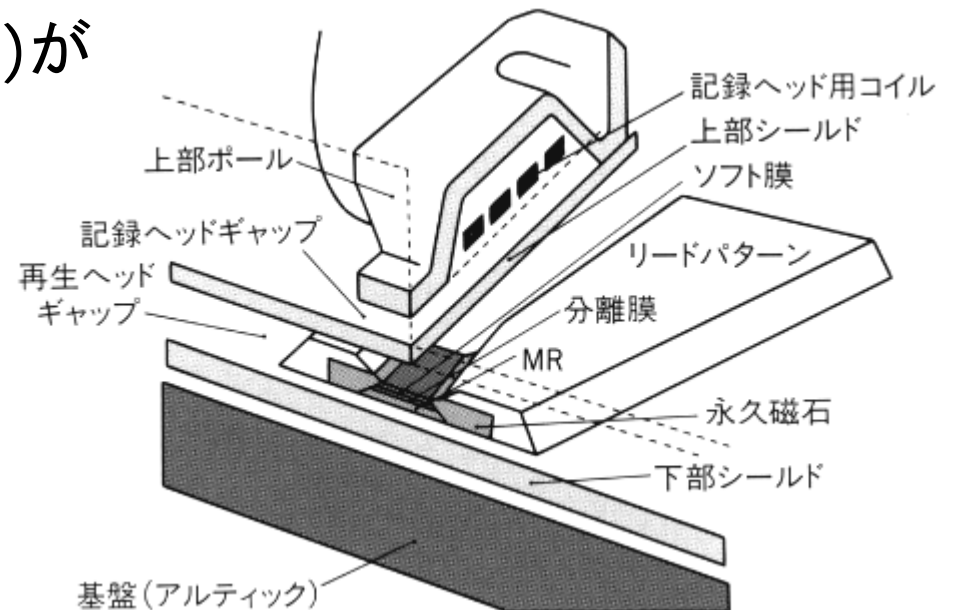
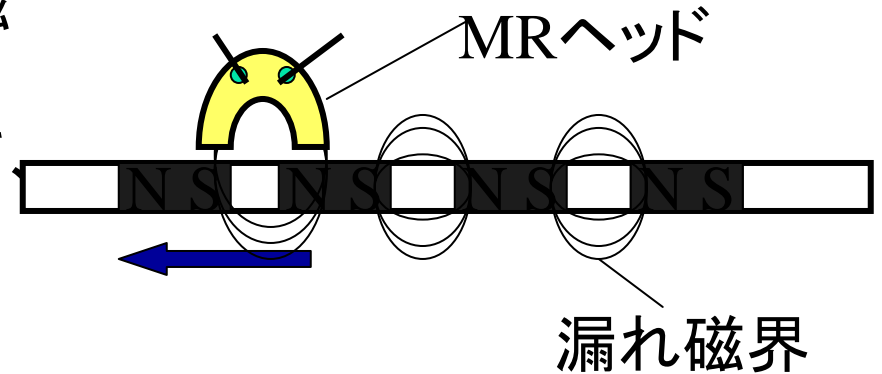
- HDの記録密度は、1992年にMRヘッドの導入によりそれまでの年率25%の増加率(10年で10倍)から年率60%(10年で100倍)の増加率に転じ、1997年からは、GMRヘッドの登場によって年率100%(10年で1000倍)の増加率となっている。

ハードディスクのトラック密度、面記録密度の変遷



高記録密度を支えるMRヘッド

- 媒体から洩れ出す磁束により磁性体の電気抵抗が変化する現象(MR:磁気抵抗効果)を用いて電圧に変えて読み出す。
- 当初AMR(異方性磁気抵抗効果)が用いられたが90年代半ばからGMR(巨大磁気抵抗効果)が用いられるようになった。



MR(磁気抵抗)ヘッド

AMR(異方性磁気抵抗効果)

- パーマロイ(Ni80Fe20)の薄膜に外部磁界を加えると、磁化がセンス電流に対して θ だけ傾き、電気抵抗が式(1)のように変化する。この変化を電圧の変化として検出する。
- この効果の $\Delta\rho/\rho$ はせいぜい2.5%程度の小さな値である。

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \cos 2\theta \quad (1)$$

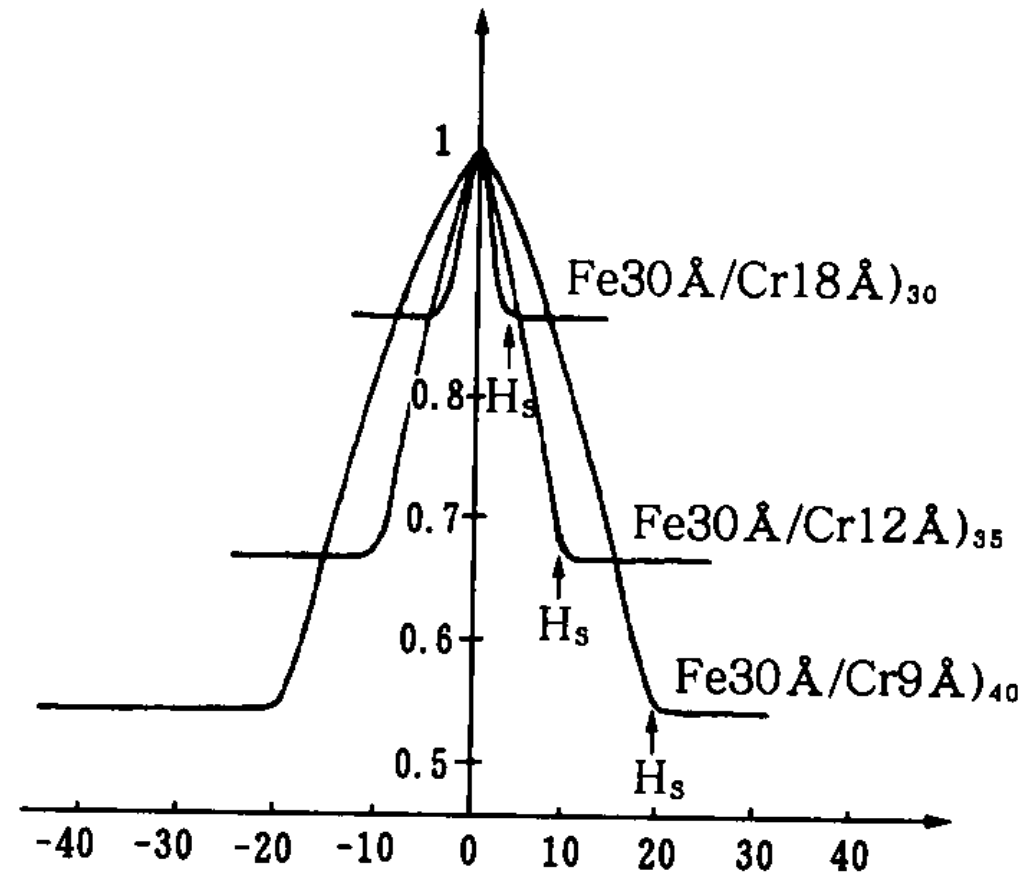
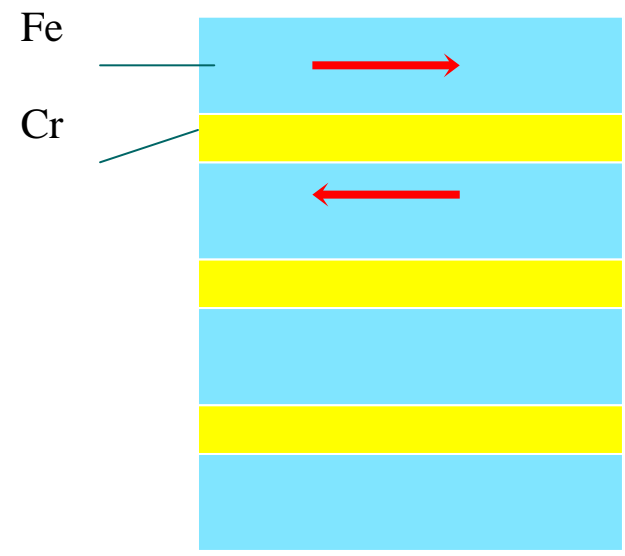


MR(磁気抵抗)ヘッド

巨大磁気抵抗効果(GMR)

- 1988年にFertらのグループおよびGrunbergらのグループは独立に金属人工格子における巨大磁気抵抗効果(GMR)を発見した。Baibichらが報告する磁化と磁気抵抗効果の対応 [i]によれば、Crの層厚を変化することによって磁気飽和の様子が変化するが、磁気飽和のしにくい試料において低温で50%におよぶ大きな磁気抵抗比 $R(H)/R(H=0)$ が見られている。室温でもこの比は16%におよぶ。この後、同様のGMRは、Co/Cuのほか多くの磁性／非磁性金属人工格子、グラニューラ薄膜などで発見された。
- [i] M.N. Baibich, J.M. Broto, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuset, A. Friederich and J. Chazelas: Phys. Rev. 62 (1988) 2472.

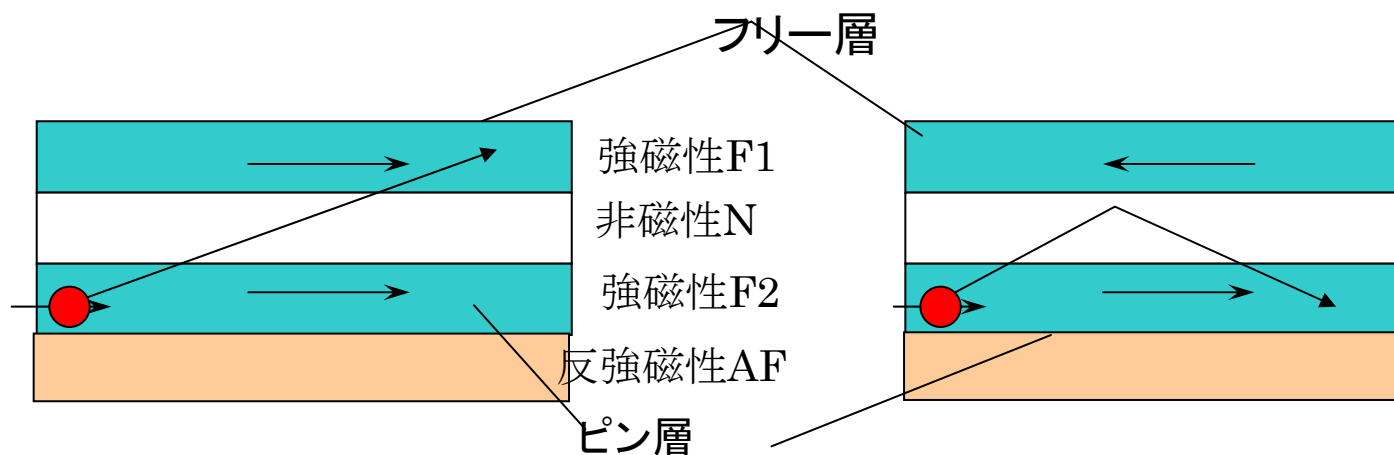
MR(磁気抵抗)ヘッド Fertらの報告するGMR



MR(磁気抵抗)ヘッド

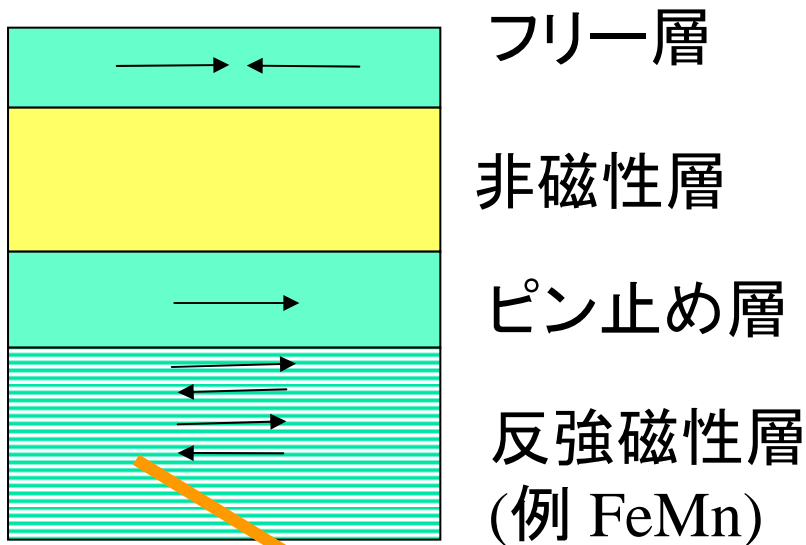
スピンバルブの原理

- IBMのParkinらは反強磁性体との交換結合によるピン止め効果を用いて、強磁性フリー層とピン止め層の磁化が平行か反平行かで電気抵抗が異なる現象を用いた高感度の磁気ヘッドを発明し、スピンバルブと名付けた。強磁性体(F1)/非磁性金属(N)/強磁性(F2)多層膜
- F1, F2平行なら抵抗小。反平行なら抵抗大。

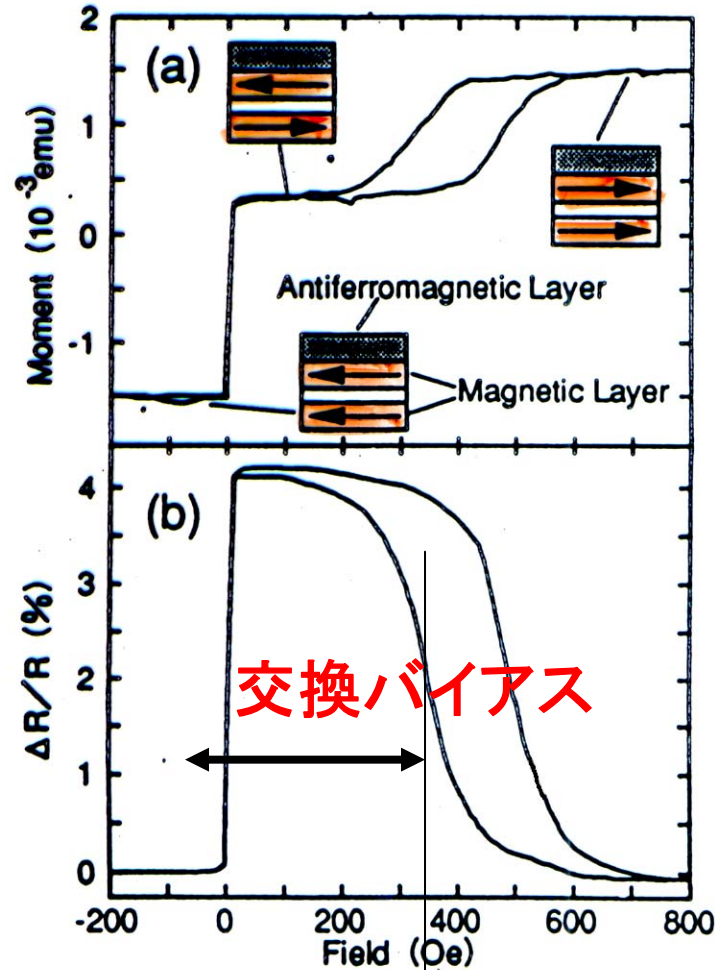


スピンバルブ

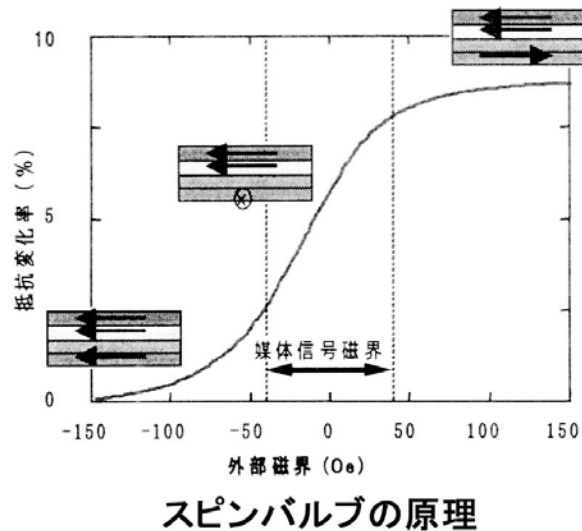
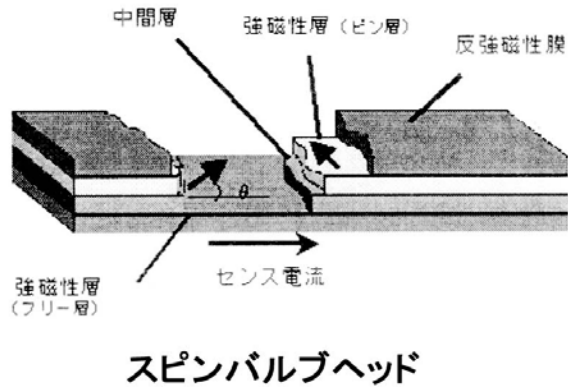
- NiFe(free)/Cu/NiFe (pinned)/AF (FeMn) の非結合型サンドイッチ構造



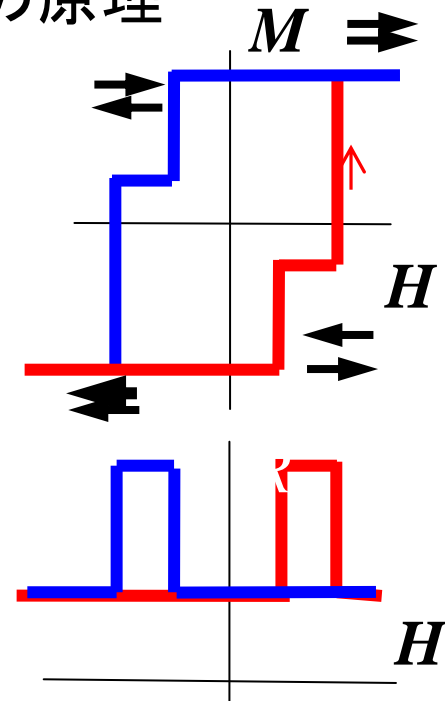
最近はSAFに置き換え



MR(磁気抵抗)ヘッド 磁化曲線とGMR



GMR(SV)ヘッドの原理



- F1とF2の保磁力が異なれば反平行スピンの時に抵抗が高くなる。

HDDはどこまで高密度になるのか？

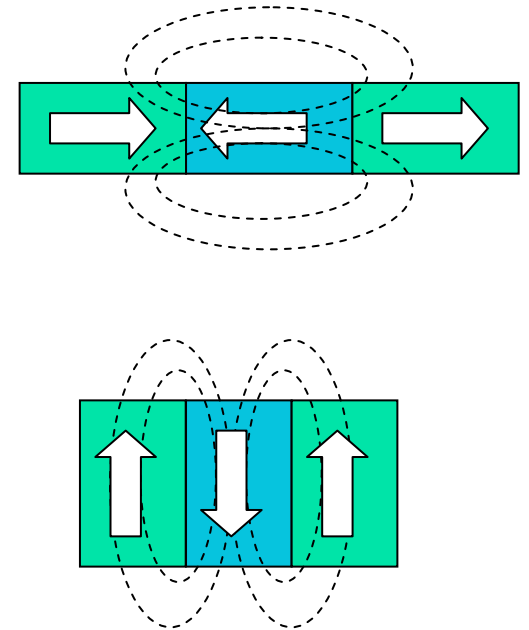
ハードディスクの記録密度に限界が

- 磁気記録の記録密度の驚異的な伸び率は再生用磁気ヘッドの進展によるところが大きい。その後も記録媒体のイノベーションにより、実験室レベルでは100Gb/in²を超えるにいたった。
- しかし、2000年を過ぎた頃からこの伸び方にブレーキがかかってきた。これは、後述するように磁性体の微細化による**超常磁性限界**が見え始めていることが原因とされる。

HDDはどこまで高密度になるのか？

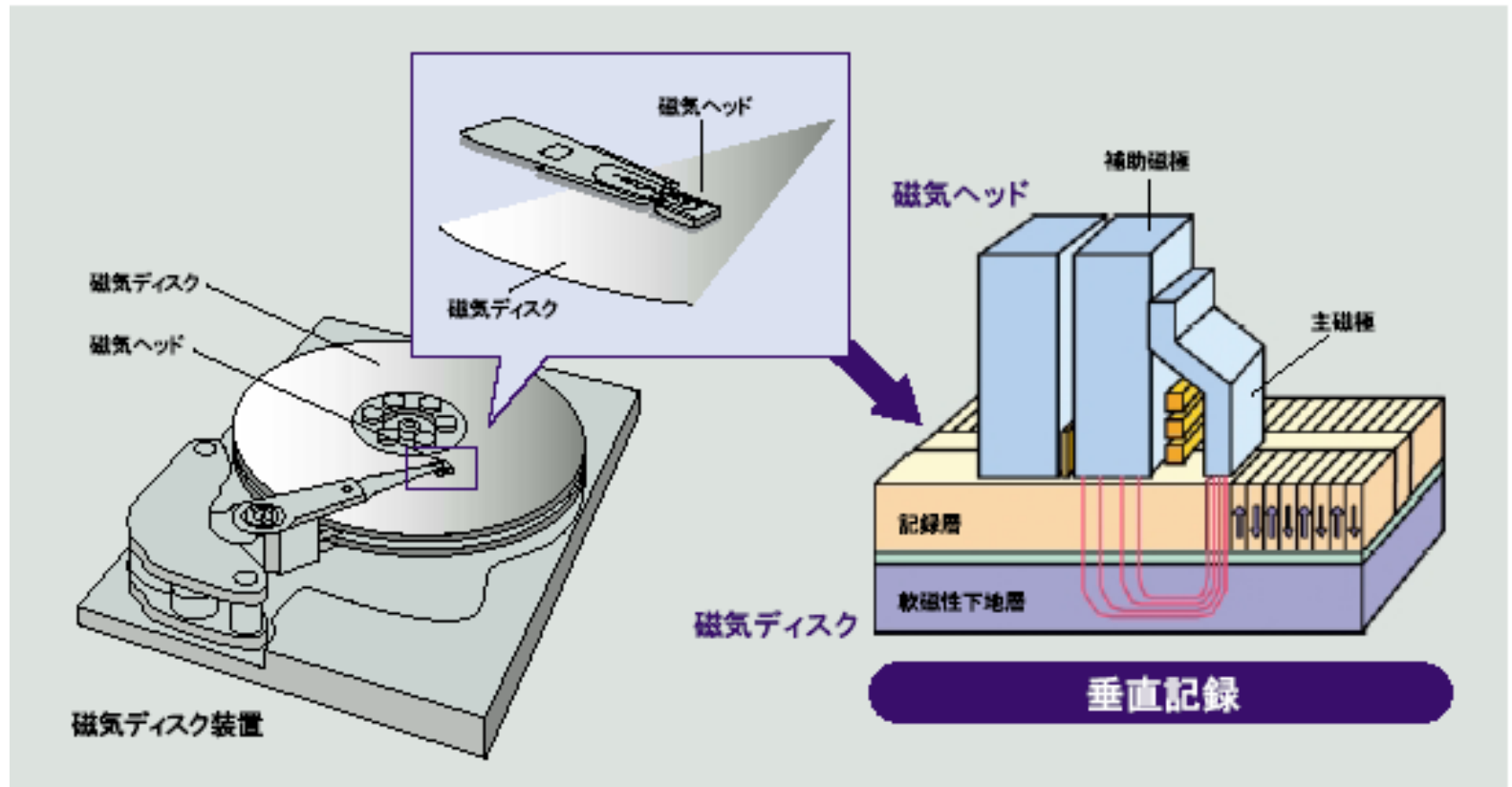
垂直磁気記録

- 従来の磁気記録は記録された磁化が媒体の面内にあるので、面内磁気記録と呼ばれる。長手記録とも呼ばれる。高密度になると、1つの磁区の磁化が隣り合う磁区の磁化を減磁するように働く。
- これに対し、垂直磁気記録では、隣り合う反平行の磁化は互いに強めあうので、記録が安定。



HDDはどこまで高密度になるのか？

垂直磁気記録媒体における記録



http://www.hqrd.hitachi.co.jp/rd/topics_pdf/hitac2002_10.pdf

HDDはどこまで高密度になるのか？

1.8型磁気ディスクで業界最大容量の80GBを実現(東芝)(2004.12.14)

- 新製品は、垂直磁気記録方式を採用することで、世界最高の面記録密度206メガビット／平方ミリメートル(133ギガビット／平方インチ)を実現し、当社従来機種に比べ記憶容量を33%向上*4しています。新製品には新しく開発された垂直記録用ヘッドとディスクを採用しており、垂直記録の性能を十分に引き出すためのヘッド・ディスク統合設計技術を開発することで、安定した高密度記録を実現しています。



TOSHIBA
東芝 1.8型ハードディスクドライブ
[MK4007GAL] (40GB:左側) [MK8007GAH] (80GB:右側)

HDDはどこまで高密度になるのか？

シーゲイト、垂直磁気記録の2.5インチ160GB HDDを出荷 (2006.1.25)

- Momentus 5400.3は業界初となる垂直磁気記録方式を採用した2.5インチHDD。同方式の採用により記録密度は132Gbit/平方インチに達し、従来の水平記録製品「Momentus 5400.2」の92Gbit/平方インチから約45%向上した。
- 回転速度は5400rpm、キャッシュ容量は8MB。容量は40/60/80/100/120/160GBの6種類が用意される。シークタイムは12.5msで、実効転送速度は44MB/sec。耐衝撃性は非動作時900G、動作時350G。騒音レベルはアイドル時23dB、パフォーマンスシーク時29dB。



HDDはどこまで高密度になるのか？

東芝、200Gバイトの2.5インチHDDを発表-面記録密度の最高記録を更新(2006.06.06)

- 日本のエレクトロニクス大手である東芝は、記録密度の点で競合各社に勝るハードディスクドライブ(HDD)を発売すると述べている。
- 東芝は2006年中に、**1平方インチ当たり178.8Gビット**の記録密度を持つプラッタを採用したノートPC向け2.5インチHDDを発売する予定だ。これが店頭に並べば、面記録密度の新記録となる可能性が高い。東芝によると、市販されているHDDの面記録密度は、現在のところ1平方インチ当たり133Gビットが最高だという。

HDDはどこまで高密度になるのか？

富士通、垂直磁気記録方式2.5インチHDDを発表 (2006.08.31)

- 富士通は米国時間8月30日、同社初の垂直磁気記録方式ハードディスクドライブ（HDD）を2006年10月に出荷すると発表した。同製品はノートPC向けの2.5インチHDDで、容量は160Gバイトとなっている。
- 同160GバイトHDDは毎分5400回転するHDDとしては最大の容量になると富士通は述べているが、Seagateと日立はいずれも、同容量の製品を出荷済みである。Seagateは、160Gバイトの2.5インチHDDを含め、ノートPC向け垂直磁気記録方式の製品を2006年1月に出荷後、4月には3.5インチHDDを出荷している。

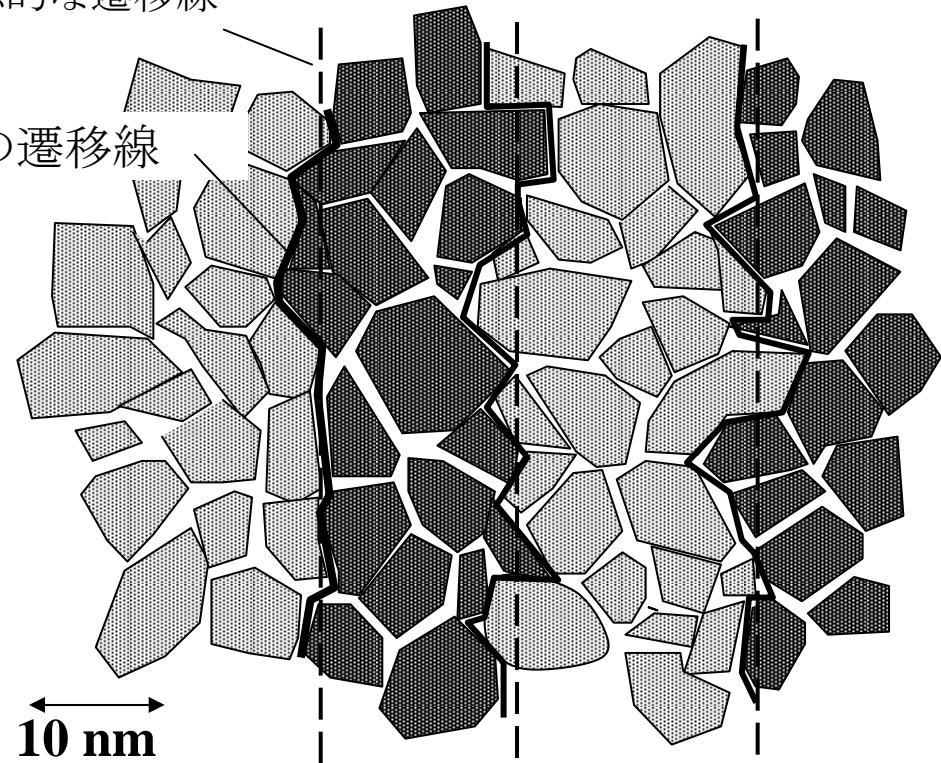
HDDはどこまで高密度になるのか？

多結晶記録媒体の記録磁区と磁壁

- 現在使われているハードディスク媒体は図に示すように直径数nmのCoCr系強磁性合金の結晶粒が、粒界に偏析したCr粒に囲まれ、互いに分離した多結晶媒体となっている。
- 微粒子のサイズが小さくなっていくと、磁気ヘッドによって記録された直後は、記録磁区内のすべての粒子の磁化が記録磁界の方向に向いているが、**時間とともに各粒の磁化がバラバラな方向に向いていき、記録された情報が保てないという現象が起きてくる。**

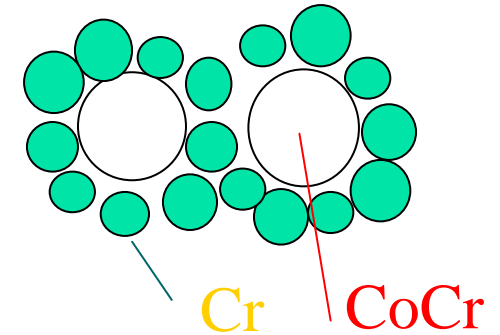
理想的な遷移線

実際の遷移線



HDDはどこまで高密度になるのか？

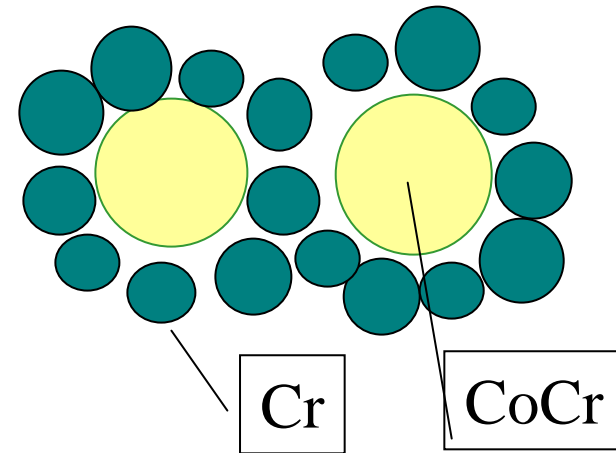
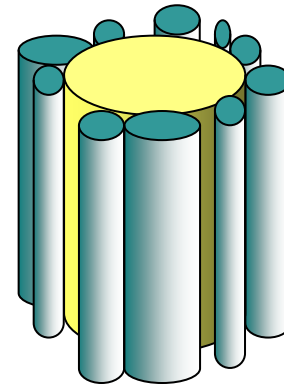
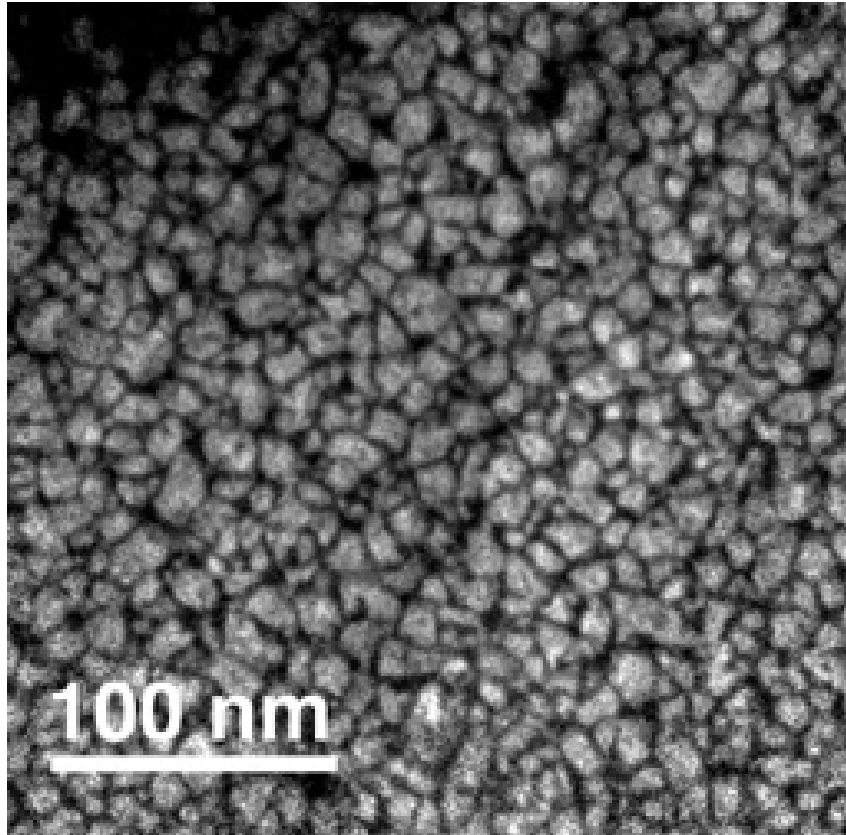
超常磁性限界



- 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するという現象が起きる。これを**超常磁性限界**と呼んでいる。

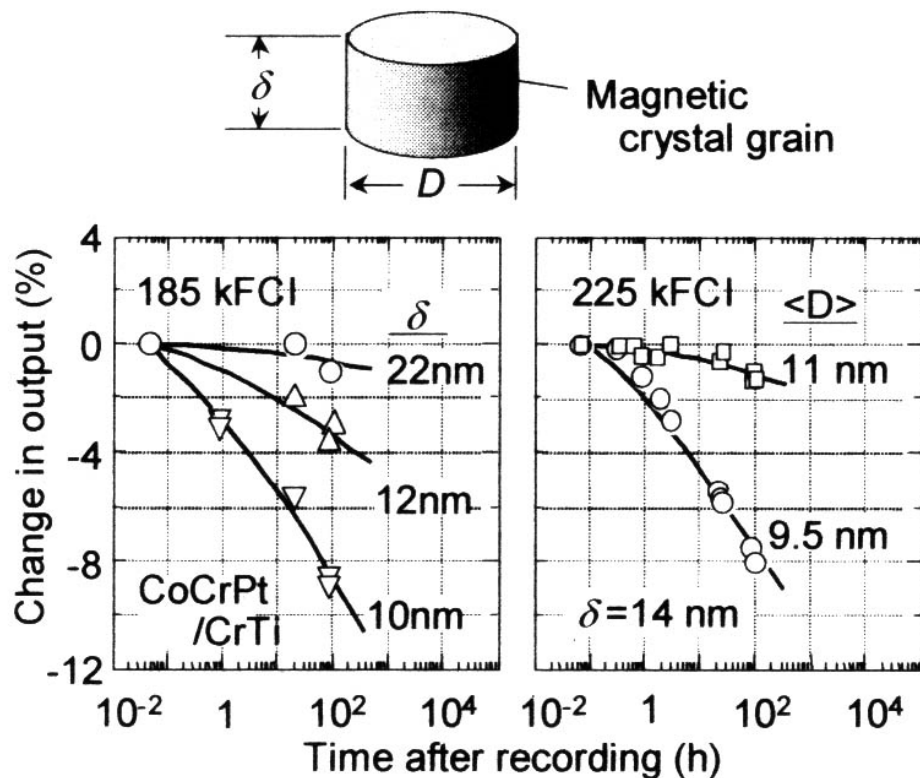
HDDはどこまで高密度になるのか？

CoCrTa媒体のCo元素面内分布



HDDはどこまで高密度になるのか？

熱揺らぎによる減磁現象



- 実際、20 Gb/in²の記録媒体では、その平均の粒径は10 nm程度となり、各結晶粒は磁氣的に独立に挙動し、記録された情報が保てない。

- 細江讓：日本応用磁気学会サマースクール27テキスト p.97(2003)

図 11 熱揺らぎによる面内磁気記録媒体の出力減衰

HDDはどこまで高密度になるのか？

熱減磁と活性化体積

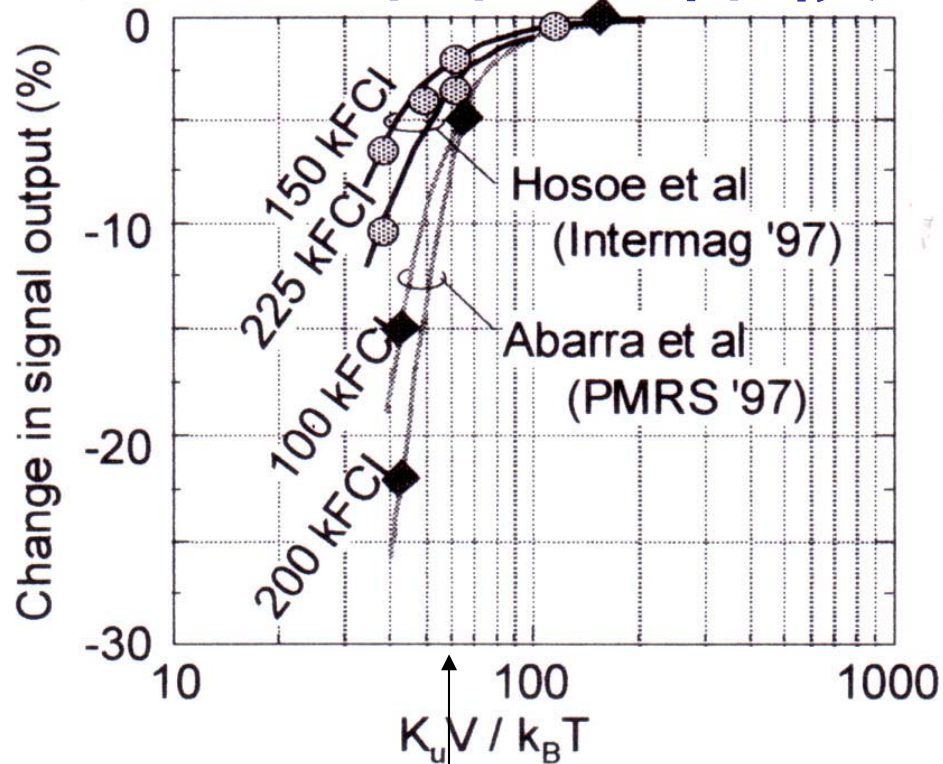


図 12 熱減磁の $K_u V / k_B T$ 依存性

$$\eta = KuV/kT = 60$$

- $\eta = KuV/kT > 60$ でないと熱減磁が心配
- 細江譲: MSJサマースクール27テキスト p.97(2003)



HDDはどこまで高密度になるのか？

熱的安定条件

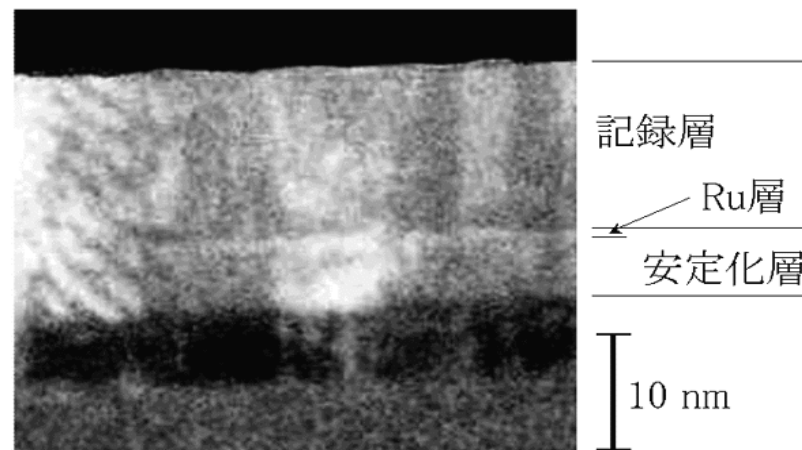
- ハードディスクの寿命の範囲でデータが安定であるための最低条件は、 $\eta = KuV/kT > 60$ とされている。
- 面記録密度 D とすると、粒径 d は $D^{-1/2}$ に比例するが、記録される粒子の体積 V はほぼ d^3 に比例するので V は D の増大とともに $D^{-3/2}$ に比例して減少する。
- この減少を補うだけ、磁気異方性 Ku を増大できれば、超常磁性限界を伸ばすことができる。単磁区の微粒子を仮定し、磁化反転が磁化回転によるとすると、保磁力 H_c は $H_c = 2Ku/M_s$ と書かれるから $D^{3/2}$ 以上の伸びで保磁力を増大すれば救済できるはずである[1]。
- しかし、 H_c が大きすぎると、通常の磁気ヘッドでは記録できなくなってしまう。これを救うのがハイブリッド記録である。

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

HDDはどこまで高密度になるのか？

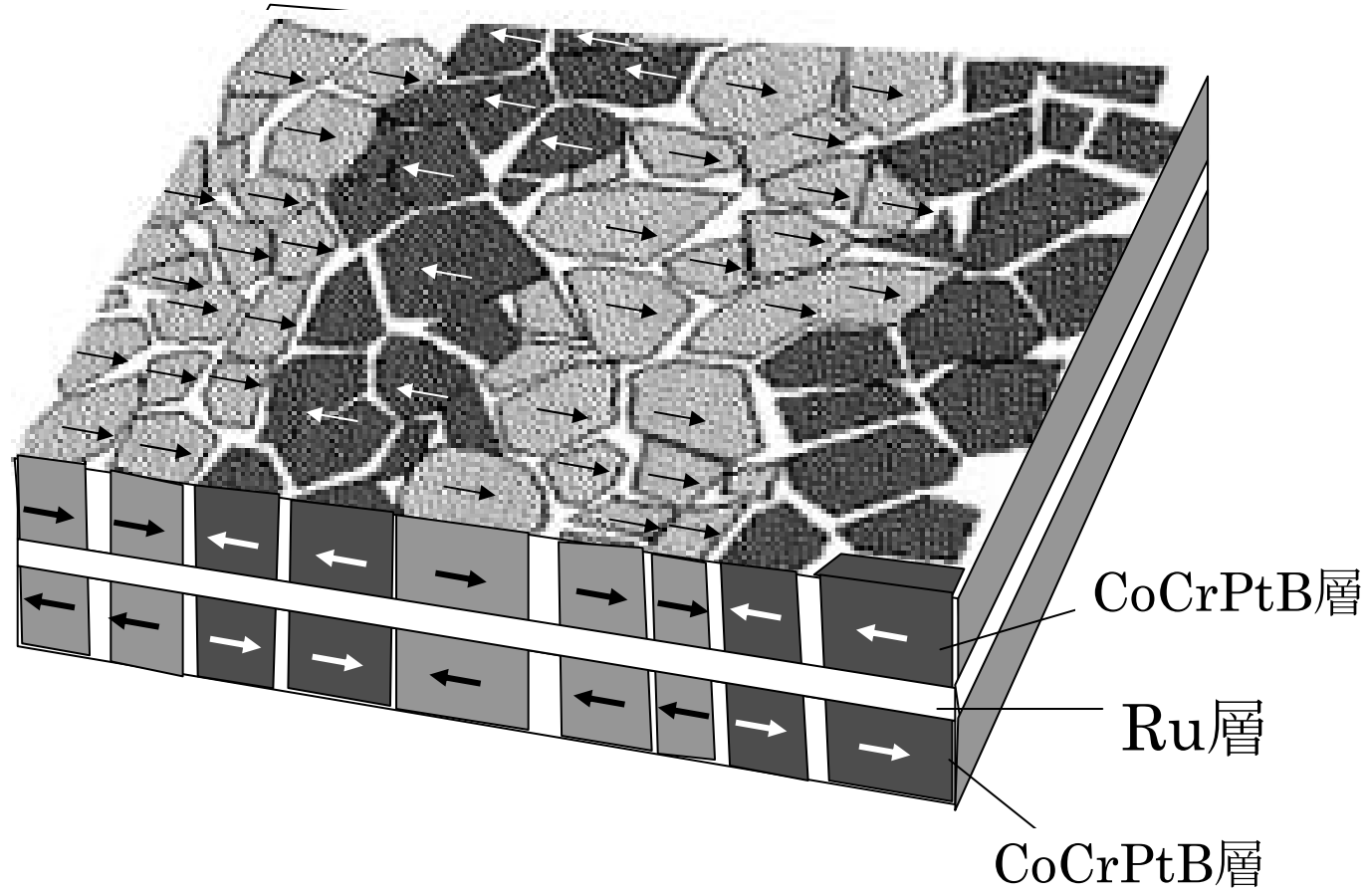
AFC(反強磁性結合)媒体

- AFC媒体(antiferromagnetically coupled media)というのは、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。



HDDはどこまで高密度になるのか？

反強磁性結合(AFC)媒体の模式図



AFC媒体、SF媒体では、交換結合で見かけのVを増大



HDDはどこまで高密度になるのか？

超常磁性限界はどこまで伸ばせられるか


- 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、磁気ヘッドで書き込めなくなってしまう。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。



HDDはどこまで高密度になるのか？

超常磁性の克服

- 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、パターンドメディアを用いた垂直磁気記録技術であるが、もう1つの回答が熱磁気記録である。
- パターンド・メディア
 - 物理的に孤立した粒子が規則的に配列
- 熱アシスト記録(光・磁気ハイブリッド記録)
 - 記録時に温度を上昇させて H_c を下げ記録。室温では H_c が増大して熱的に安定になる。

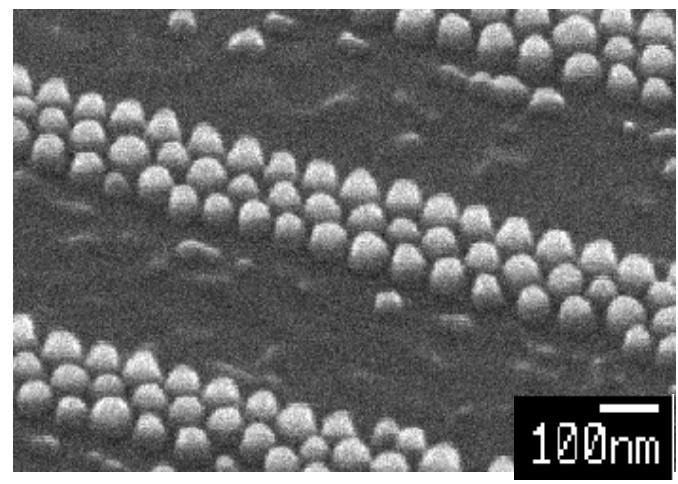


HDDはどこまで高密度になるのか？

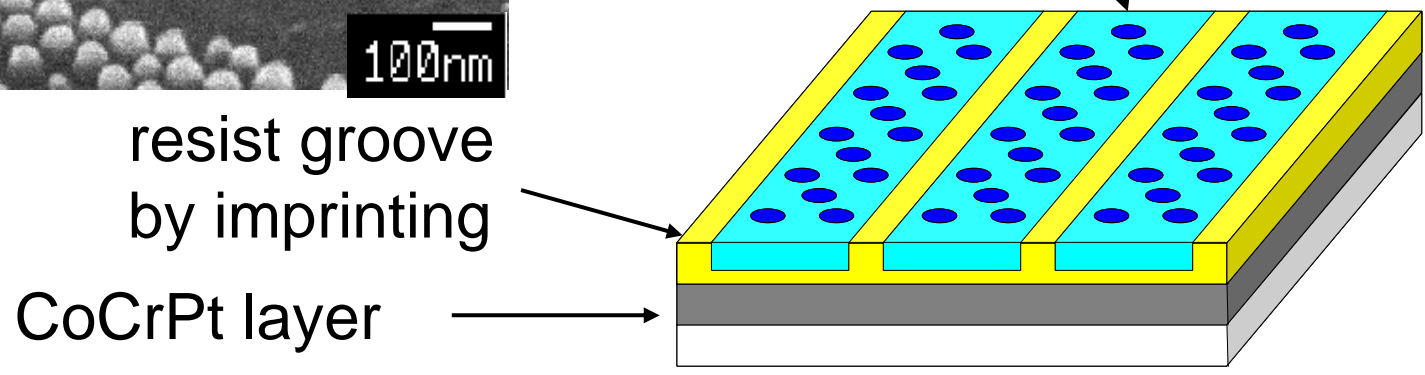
熱アシスト記録材料

- 熱磁気記録に用いられる媒体としては、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ドで記録できる程度に H_c が減少する媒体が望ましい。

HDDはどこまで高密度になるのか？ ナノインプリントと自己組織化を利用したパターンドメディア



80nm-pitch, 40nm ϕ

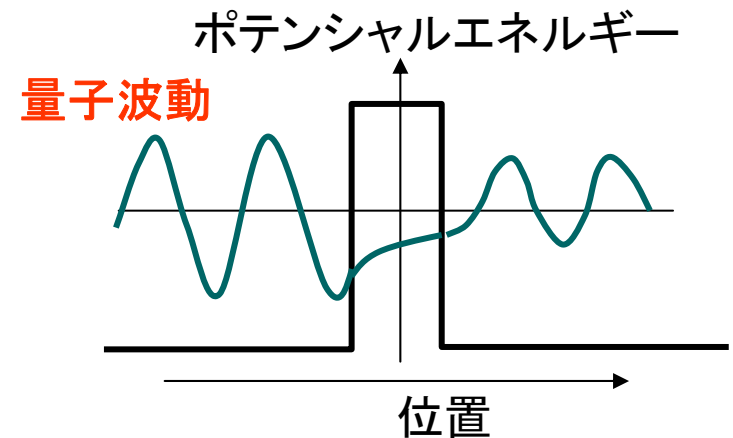
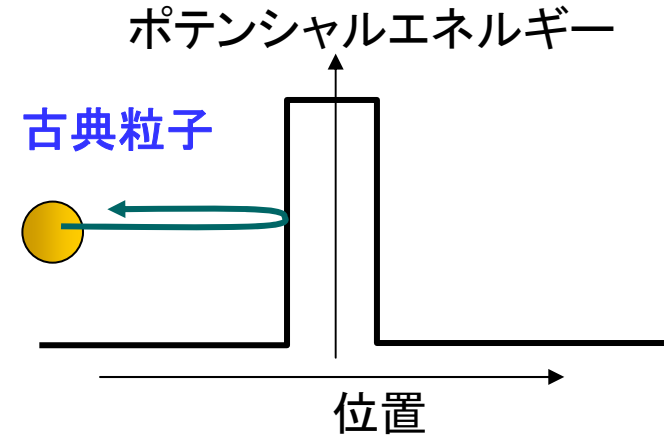


喜々津氏(東芝)のご好意による

TMRとMRAM

トンネル効果を知っていますか

- トンネル効果は、量子力学が成立する世界でのみ成立する効果です。
- 量子の波動は、ポテンシャル障壁の中では、振動せず減衰するが、境界面で振動する波動に接続します。
- この効果は、トンネルダイオード、STM(走査型トンネル顕微鏡)に利用されます。
- MTJではスピンを考慮します。



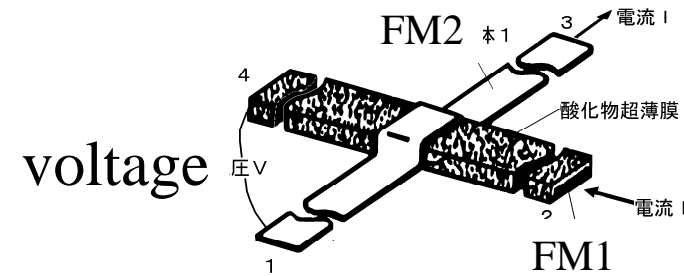
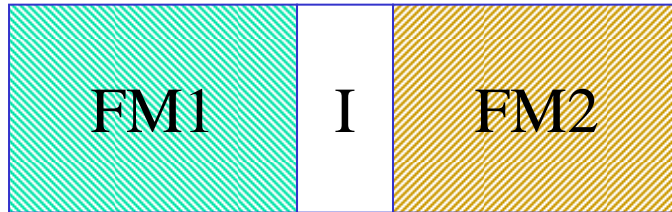
TMRとMRAM

トンネル磁気抵抗効果(TMR)

- スピン依存トンネル効果によって生じる。
- 磁気トンネル接合(MTJ)[2つの強磁性電極で極めて薄い絶縁層をサンドイッチした接合]を流れるトンネル電流は、両電極のスピンの相対角に依存する。
- GMRに比べ接合の抵抗が高いため、小電流で動作することが可能。
- MRAMに適している。

TMRとMRAM

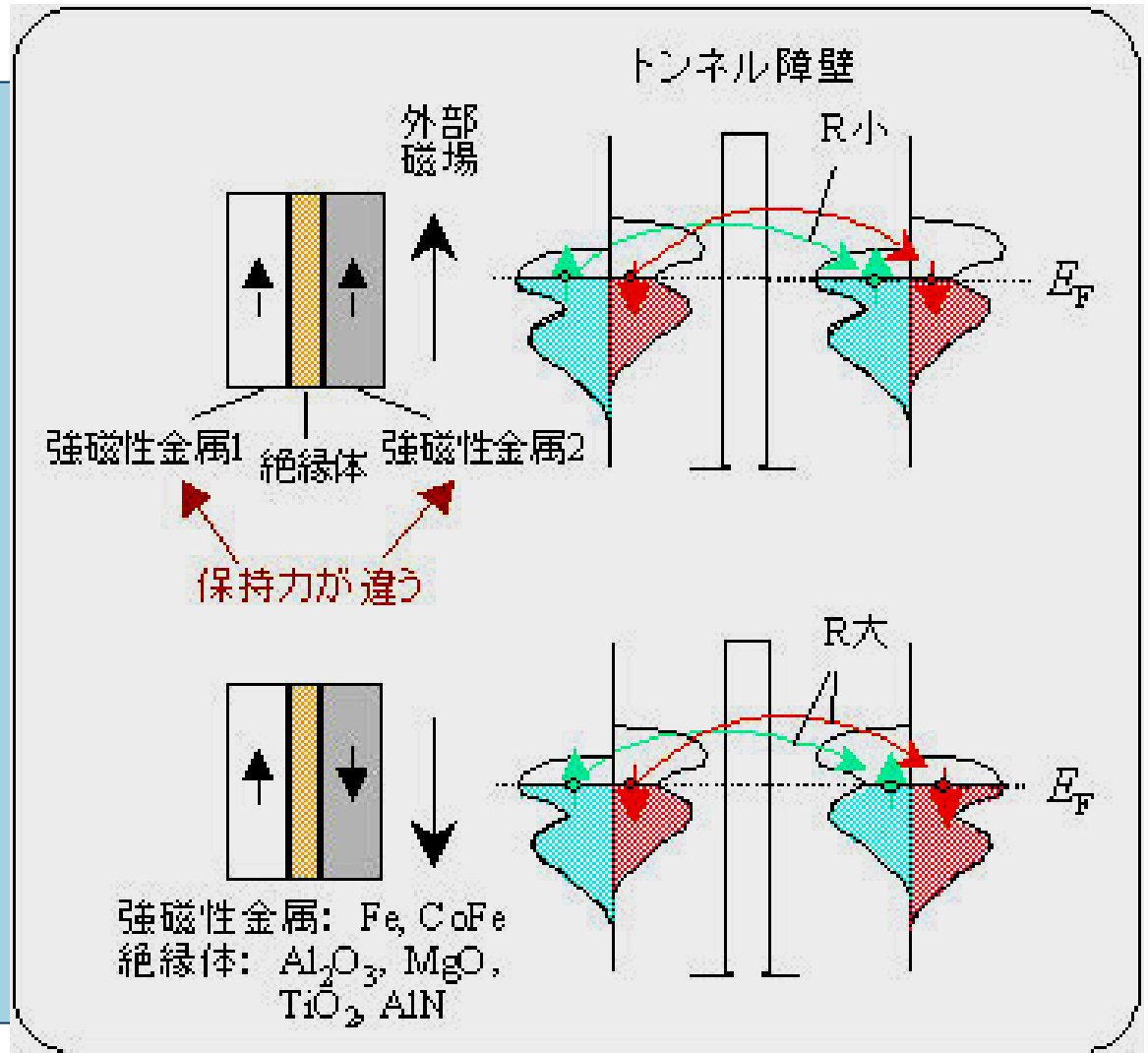
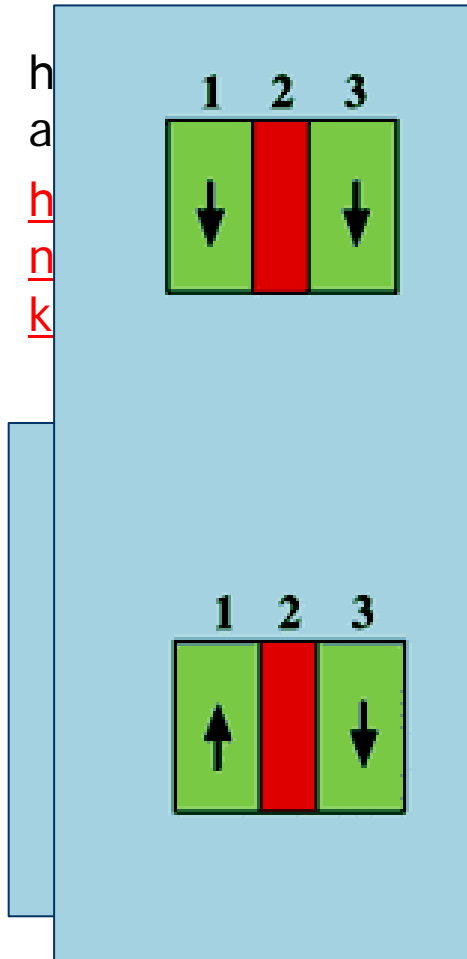
スピン依存トンネル効果とトンネル磁気抵抗効果 (TMR)



- 強磁性体/絶縁体/強磁性体構造磁気トンネル接合(MTJ)
- M. Julliere: Phys. Lett. **54A**, 225 (1975)
- S. Maekawa and V.Gafvert: IEEE Trans Magn. **MAG-18**, 707 (1982)
- Y.Suezawa and Y.Gondo: Proc. ISPMM., Sendai, 1987 (World Scientific, 1987) p.303
- J.C.Slonchevsky: Phys. Rev. **B39**, 6995 (1989)
- T. Miyazaki, N. Tezuka: JMMM **109**, 79 (1995)

トンネル磁気抵抗効果(TMR)

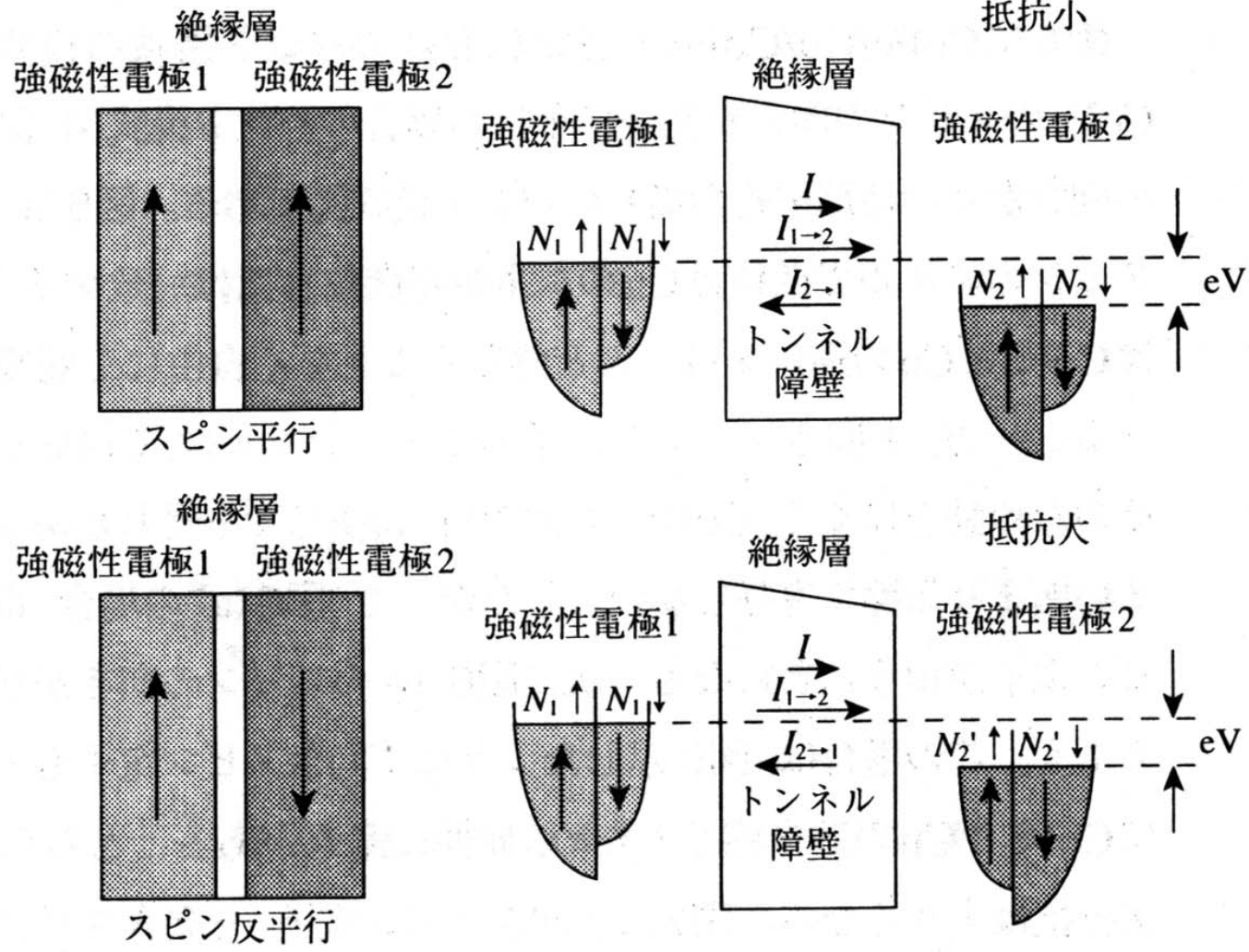
- h a
- b n k





TMRとMRAM

トンネル磁気抵抗効果(TMR)

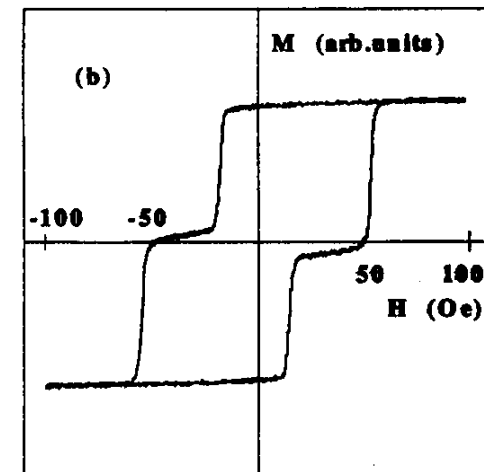
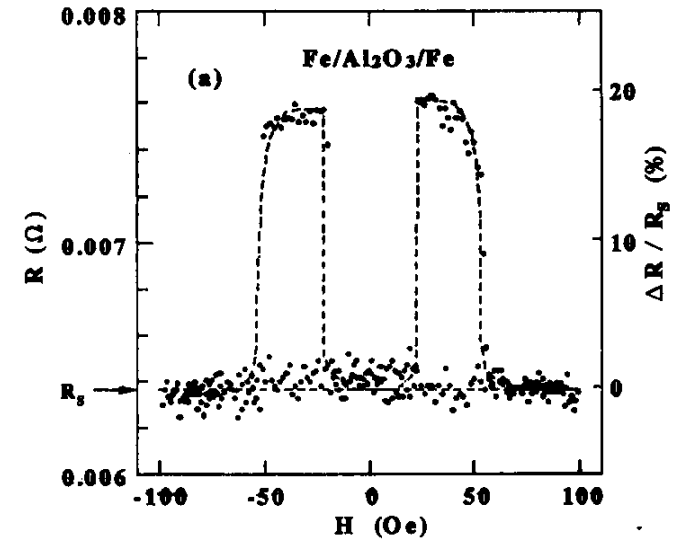


TMRデバイス

- 絶縁体の作製技術が鍵を握っている。
→最近大幅に改善

•TMR ratio as large as 45% was reported. (Parkin: Intermag 99)

•Bias dependence of TMR has been much improved by double tunnel junction. (Inomata: JJAP 36, L1380 (1997))



TMRとMRAM

絶縁層の工夫

- 湯浅(産総研)らは、磁性体/絶縁体/磁性体のトンネル接合構造において、絶縁体としてMgO結晶を用いることによってトンネルの際の波動関数の対称性が保たれることを実証し、200%に上る高いMR比を得た。

MgO絶縁層を用いたMTJ

- 産総研の湯浅らは、MTJの絶縁層として非晶質Al₂O₃に代えてMgO結晶を用いることによって波動関数の接続性が改善され巨大MRが得られるというButlerの理論予想に従いFe/MgO/Fe構造を作製した。

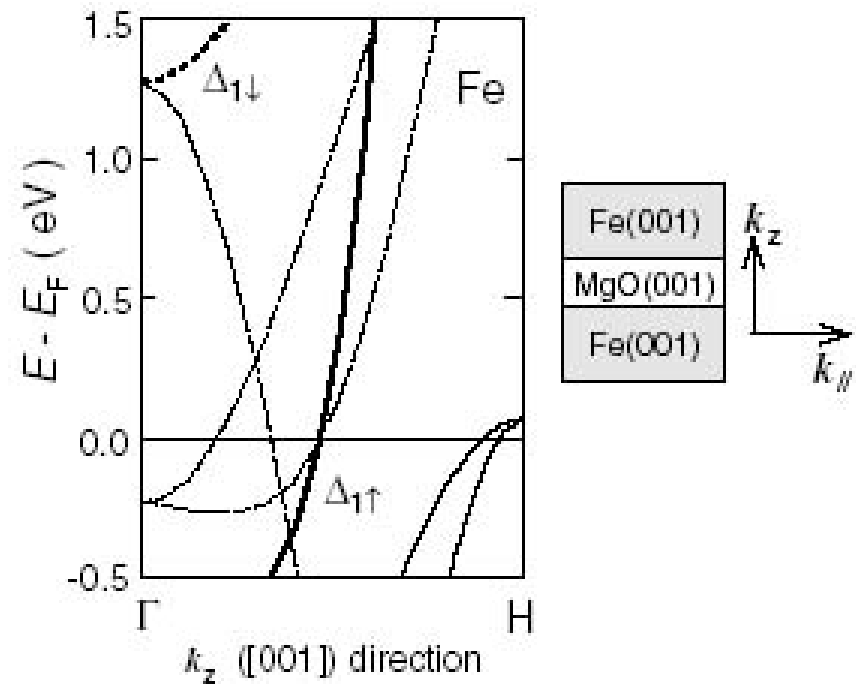


Fig. 1. Band dispersion of Fe in [001] (Γ -H) direction. Solid and dotted lines represent majority-spin and minority-spin sub-bands, respectively. The thick solid and dotted lines represent majority-spin and minority-spin Δ_1 bands, respectively.

TMRとMRAM

Fe/MgO/FeMTJに見られるGMR

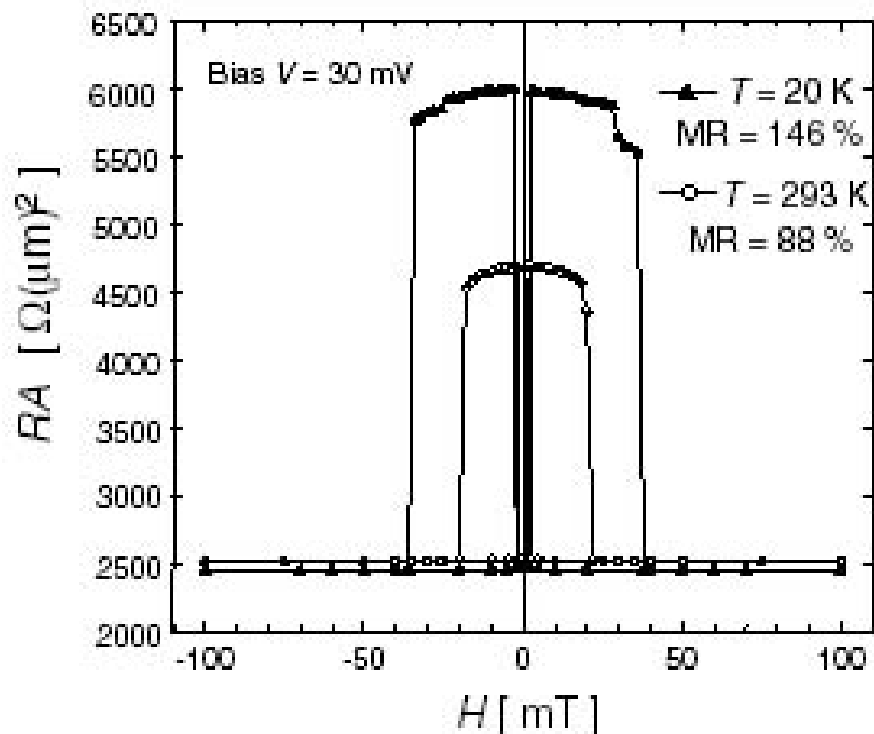


Fig. 3. Magnetoconductance curves for Fe(001)/MgO(001)(20 Å)/Fe(001) MTJ at $T = 293$ and 20 K. The MR ratios were 88% and 146%, respectively.

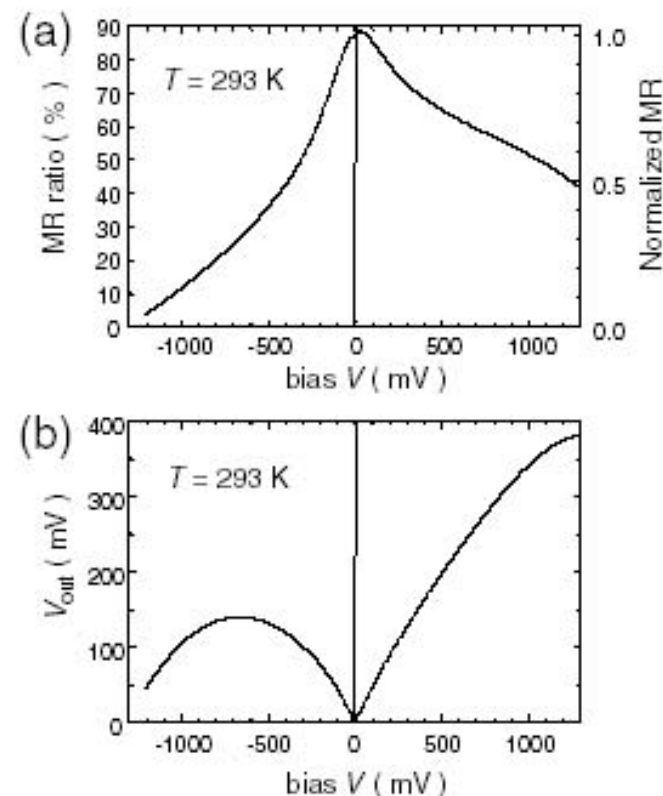
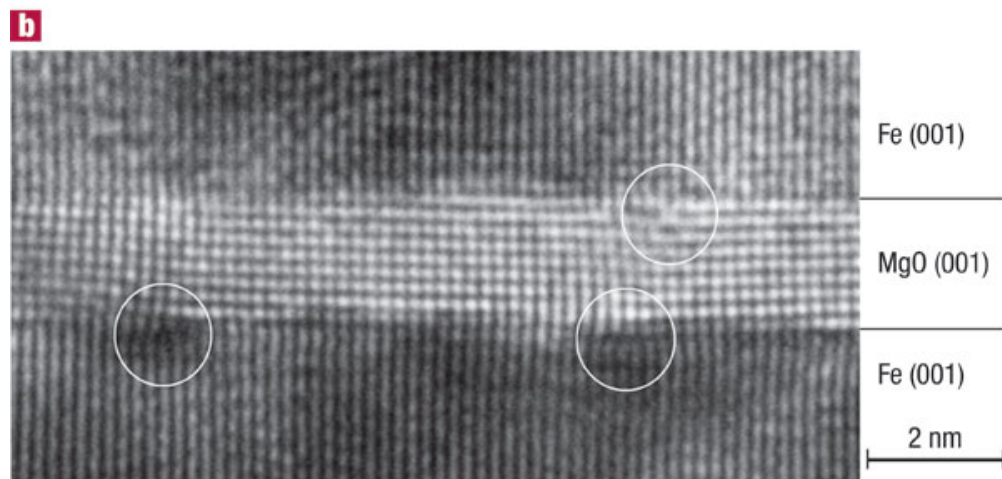
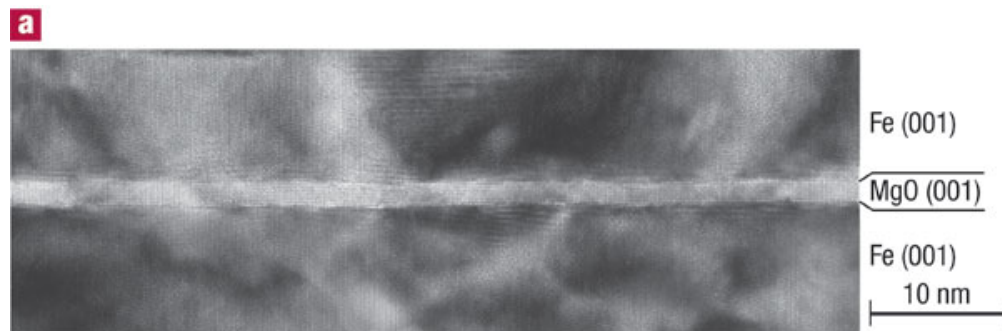


Fig. 4. (a) Bias-voltage (V) dependence of MR ratio for Fe(001)/MgO(001)(20 Å)/Fe(001) MTJ at room temperature. Direction of bias voltage is defined with respect to upper electrode. The $V_{1/2}$ (bias voltage where MR ratio reaches half the zero-bias value) was 1250 and 390 mV for positive and negative bias directions, respectively. (b) Output voltage (V_{out}) of MTJ, defined as bias $V \times (R_{up} - R_p)/R_{up}$, as a function of bias V . Maximum V_{out} was 380 mV.

TMRとMRAM

Fe/MgO/Fe構造のTEM像

- Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)がエピタキシャルに成長しており、トンネル層の乱れがほとんどない構造を得ている。また、界面でのFe酸化層も見られていない。

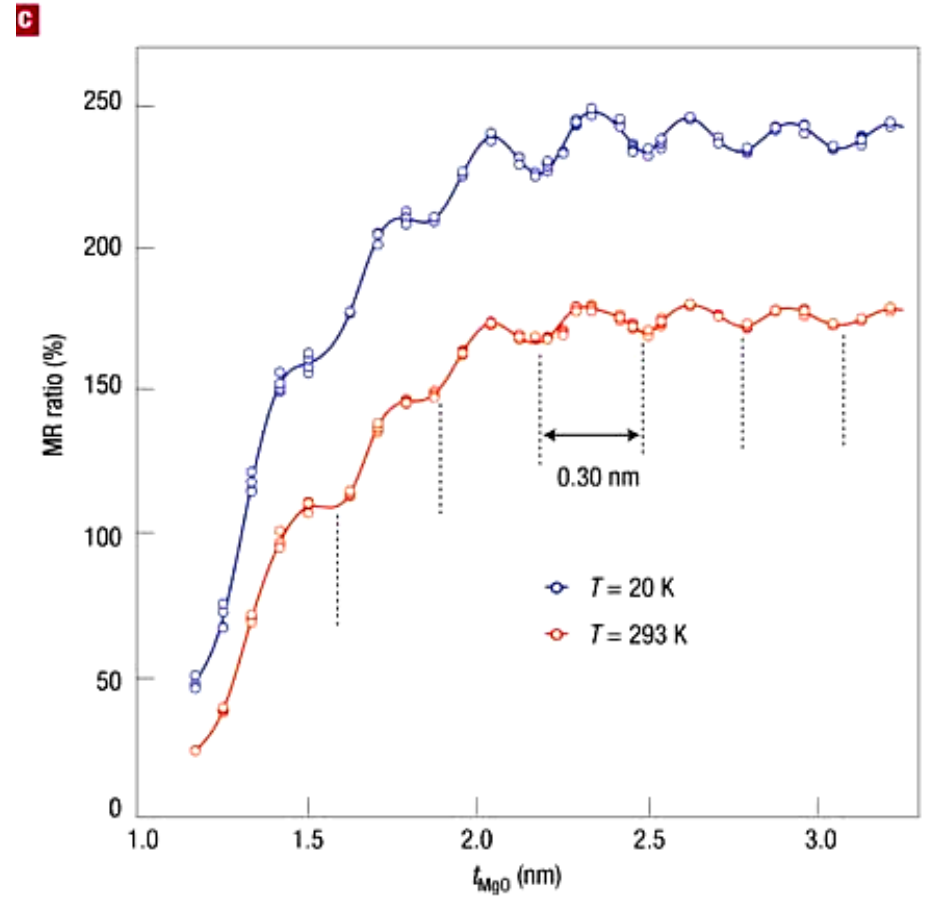
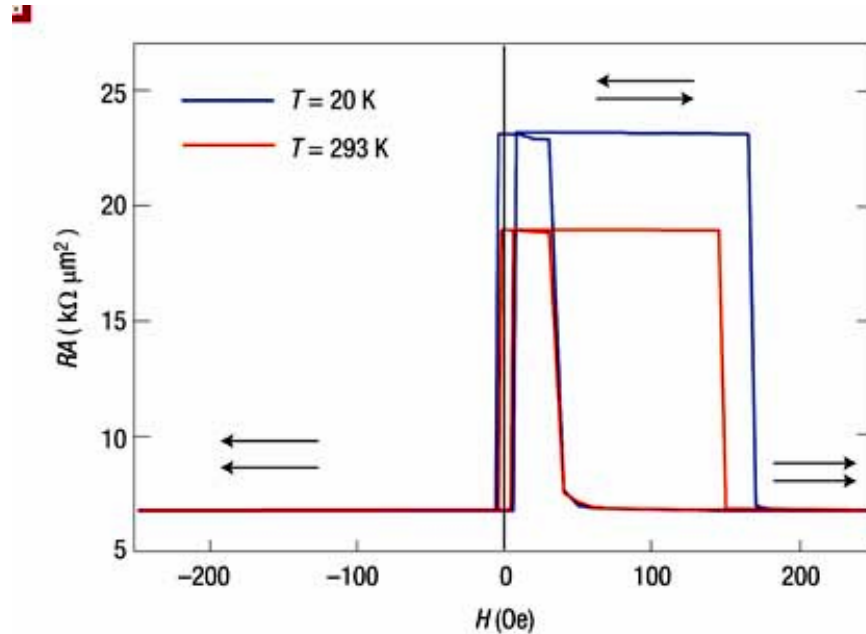


Nature Materials **3**, 868–871 (2004)



TMRとMRAM

室温で180%ものMR比



スピン偏極率の向上

- スピントンネル接合においては、強磁性このため、FeRAM(強誘電体メモリ)、OUM(カルコゲニド合金による相変化記録メモリ)とともに、SRAM(高速アクセス性)、DRAM(高集積性)、フラッシュメモリ(不揮発性)のすべての機能をカバーする「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されている。のスピン偏極率が高いほど、MR比が高くなるので、ハーフメタルが求められている。
- ハーフメタルとして、ホイスラー合金が有望視されている。東北大猪俣らは Co_2CrAl を用い、高いMR比を得ることに成功した

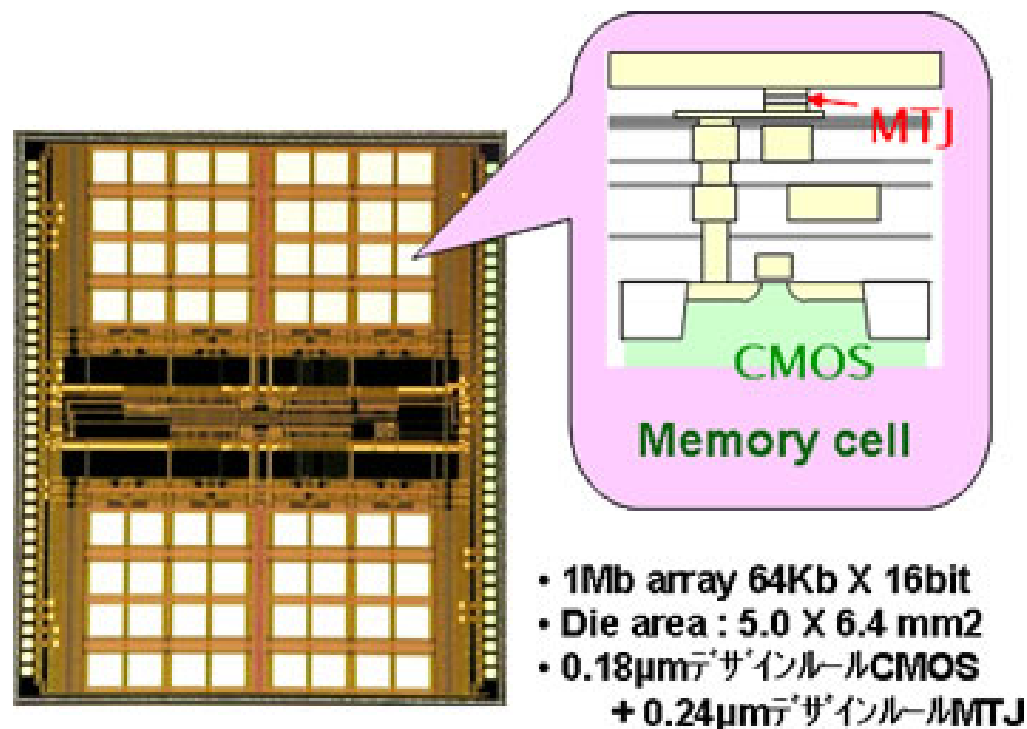
MRAM(磁気ランダムアクセスメモリ)

- 記憶素子に磁性体を用いた不揮発性メモリの一種
- MTJとCMOSが組み合わされた構造
- 直交する2つの書き込み線に電流を流し、得られた磁界が反転磁界 H_K を超えると、磁気状態を書き換えることができる。
- MRAMは、アドレスアクセスタイムが10ns台、サイクルタイムが20ns台とDRAMの5倍程度でSRAM並み高速な読み書きが可能である。また、フラッシュメモリの10分の1程度の低消費電力、高集積性が可能などの長所がある。
- このため、FeRAM(強誘電体メモリ)、OUM(カルコゲナイド合金による相変化記録メモリ)とともに、SRAM(高速アクセス性)、DRAM(高集積性)、フラッシュメモリ(不揮発性)のすべての機能をカバーする「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されている。

TAT
TMRとMRAM

MRAMにおける配線

- NECは、セルサイズ $6.5 \mu\text{m}^2$ の1Mbit MRAMを試作し、アクセス時間70ナノ秒を実現した。高速・大容量不揮発RAMとして様々な応用が期待されている。

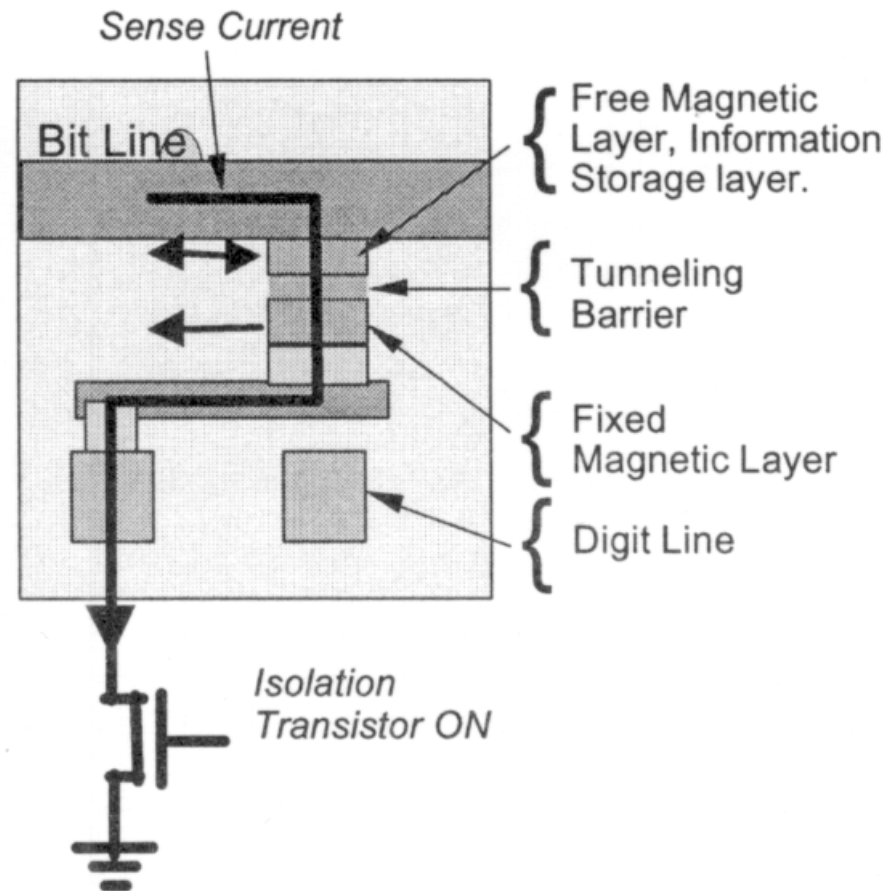


試作した1MbitMRAMチップ

TMRとMRAM

TMRを用いたMRAM

- ビット線とワード線でアクセス
- 固定層に電流の作る磁界で記録
- トンネル磁気抵抗効果で読出し
- 構造がシンプル



TMRとMRAM

MRAMの回路図

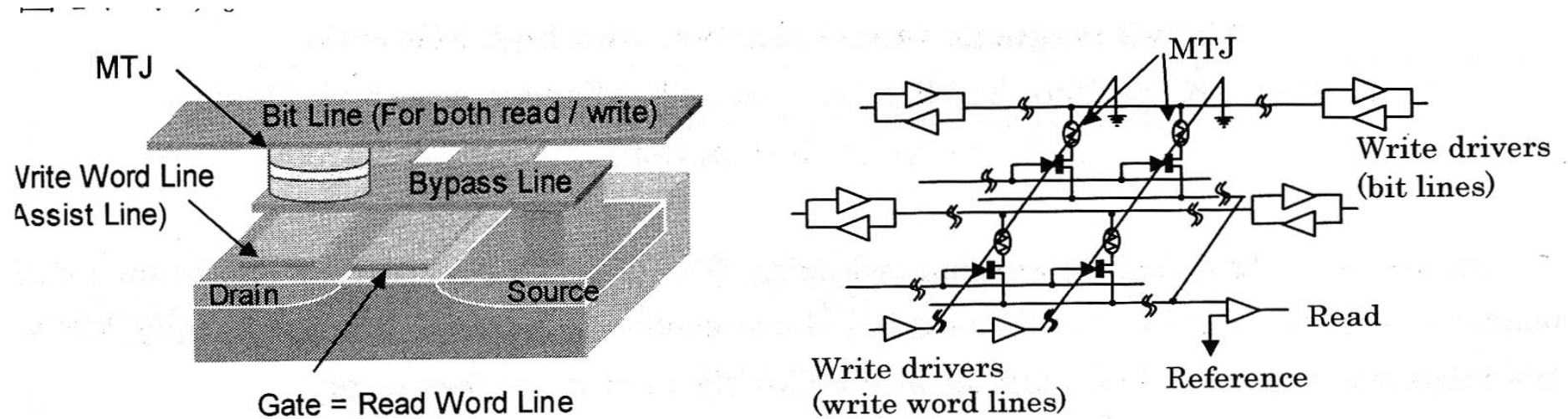


Fig. 1 Schematic of 1T1J type MRAM

- 鹿野他: 第126回日本応用磁気学会研究会資料p.3-10

MRAM と他のメモリとの比較

	SRAM	DRAM	Flash	FRAM	MRAM
読出速度	高速	中速	中速	中速	中高速
書込速度	高速	中速	低速	中速	中高速
不揮発性	なし	なし	あり	あり	あり
リフレッシュ	不要	要	不要	不要	不要
セルサイズ	大	小	小	中	小
低電圧化	可	限	不可	限	可

「MRAM」初の商用化

新型メモリー スケール プリンターなど向け

【シリコンバレー】長所を併せ持つ「次世代MRAMの高機能化が中晩人米フリースケーメモリー」として、東芝、進めば、電源を入れるとル・セミコンダクタは十ヤノ二なども開発を進即座に利用できるパソコン、新型メモリー「MRAM」(磁性記録式随時書き込み読み出しメモリー)の販売を始めたこと発表した。MRAMの商用化は初めてという。電源を切っても情報が消えず、記録速度が速いのが特長。日米の半導体各社が開発を競っており、商用化ではフリースケールが先行した。

る。ただ、記録容量が小などの課題も残っており、一た開発競争が続きそうさ。コストがかさむ。今後も本格普及に向けだ。

MRAM NEC、LSI用次世代メモリー

NECは、大規模集積の実現にメドをつけた。回路(LSI)への組み込みに適したMRAM(磁性記録式随時書き込み読み出しメモリー)を開発した。配線の構造などを工夫して、高速動作を待たされている。データは、MRAMの配線に電流を流して磁場を反転させることによって記録する仕組みだが、電流を流すと別の保存データに影響を及ぼす恐れがあるため、電流を厳密に制御している。このため、書き込み速度をあまり速くすることができなかった。

NECはほかの保存データに影響を与えない配線やLSIの立体構造を考案。これによって、書き込み速度を二倍以上に速められるメドをつけられた。書き込み電流も従来の三分の一の二、三以下になり、電力の消費を抑えられる。

実際にMRAMを組み込んだLSIを試作して技術を確認。SRAM記憶保持動作が不要な随時書き込み読み出しメモリーと同じ程度の動作速度が実現できる見込み。自動車や携帯機器での実用化が期待されている。

ソニー、高集積化へ新技術 電流値1/10、微細化可能

次世代メモリーの候補とその特徴
(○=とても優れる ○=優れる △=普通 ×=劣る)

	MRAM	フラッシュメモリー	DRAM
情報を切が	○	○	×
源を情ない	○	○	○
速もえ込込	○	△	○
書き出し	○	△	○
書き換え回数	○	△	○
読み込み時	△	△	△
書き込み電	△	△	△

ソニーは次世代メモリーの「MRAM(磁性記録式随時書き込み読み出しメモリー)」の高集積化に道を開く技術を開発した。情報を書き込む新方式を考案し、性能の重要な指標となる書き込み電流値を十分の一以下に抑えた。スイッチを入れると瞬時に使えパソコンができるなど、MRAMの実用化が期待されているが、新技術で最大の課題を克服できる見通しがついた。

MRAMは半導体では書き込む。ただ、このように加える磁界の向きを大きくしたり、素子を微細化するなどの課題を克服できる見通しがついた。MRAMは半導体では書き込む。ただ、このように加える磁界の向きを大きくしたり、素子を微細化するなどの課題を克服できる見通しがついた。

て素子が壊れるという課題があった。MRAMは電源を切っても情報が消えないという特徴も、書き込み電流値の低減、ソニーのMRAMは百ナノ秒で四百、五百ナノ秒(約は百万分の一)の電流で、従来の十分の一以下に書き込み電流を抑えれば微細化しやすくなり「熱の影響や歩留まりなどそのほかの技術課題の解決につながる可能性が高い」としている。

ソニーは素子の材料などを最適化するなどで、二、三年以内書き込み電流を半分にし、実用化に必要な技術条件を研究している。

次世代メモリー「MRAM」

高速書き換え無限 MRAM 電子を利用し、発が始めた。DRAM(読み速度はフラッシュメモリー)と異なり、磁気を利用す、異なり、電源を切っても情報、匹敵する。

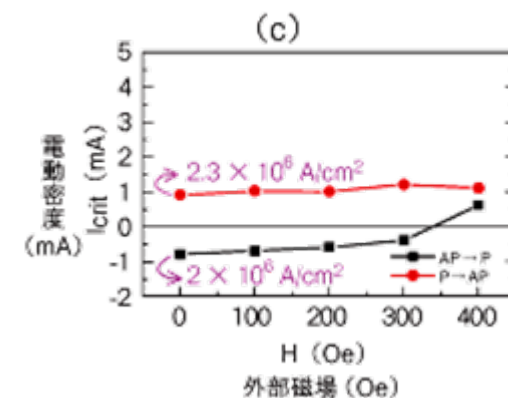
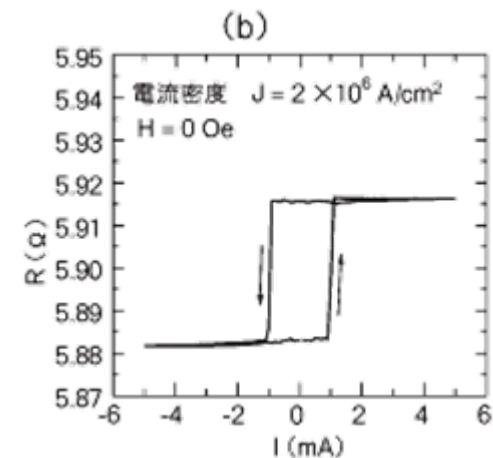
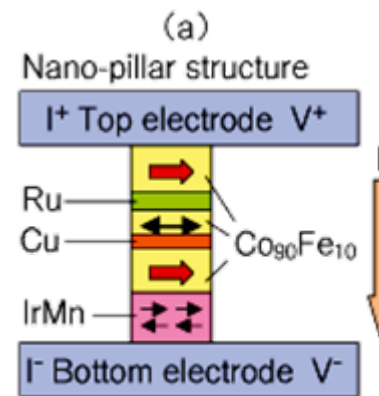
る。一九九〇年代頃から開を保持できる。データ書き込みが完了した。DRAM(読み速度はフラッシュメモリー)と異なり、磁気を利用す、異なり、電源を切っても情報、匹敵する。

電流注入磁化反転

- MRAMでは、bit線とword線に電流を流し、交点での磁界が磁性体の反転磁界を超えるとときに、記録が行われるため超高密度化困難である。
- スピン偏極電流注入によるスピントルクの発生をもちいることにより低電流密度での磁化反転が可能なことがわかってきた。
- 今のところ注入電流密度は 10^6A/cm^2 必要なので、アドレス用のトランジスタ(MOS-FET)に流せる最大電流値(0.1mA)を超えてしまうという大きな課題が残されている。

スピン注入磁化反転

- 猪俣ら(東北大)の研究グループは、
IrMn/Co₉₀Fe₁₀/Cu/Co₉₀Fe₁₀
/Ru/Co₉₀Fe₁₀素子(図1)を作成し、
動作を確認した。この素子に直接
電流を流したところ(スピン注入)、
電流の方向によって中央の
Co₉₀Fe₁₀合金層のスピンの向きが
反転し、磁化が反転することが観
測された(図2)。



光ディスクの物理学



光ディスクのポイント

- 読み出しは、レーザー光を絞ったときに回折限界で決まるスポットサイズで制限されるため、波長が短いほど高密度に記録される。
- 光ストレージには、読み出し(再生)専用のもの、1度だけ書き込み(記録)できるもの、繰り返し記録・再生できるものの3種類がある。
- 記録には、さまざまな物理現象が使われている。

光ストレージの分類

- 光ディスク
 - 再生(読み出し)専用のもの
 - CD, CD-ROM, DVD-ROM
 - 記録(書き込み)可能なもの
 - 追記型(1回だけ記録できるもの)
 - CD-R, DVD-R
 - 書換型(繰り返し消去・記録できるもの)
 - 光相変化 CD-RW, DVD-RAM, DVD-RW, DVD+RW, BD, HD-DVD
 - 光磁気: MO, GIGAMO, MD, Hi-MD, AS-MO, iD-Photo
- ホログラフィックメモリ、ホールバーニングメモリ

記録密度を決めるもの 光スポットサイズ

- レンズの開口数

- $NA = n \sin \alpha$

- $d = 0.6 \lambda / NA$

現行CD-ROM: $NA = 0.6$

CD-ROM: $\lambda = 780\text{nm} \rightarrow d = 780\text{nm}$

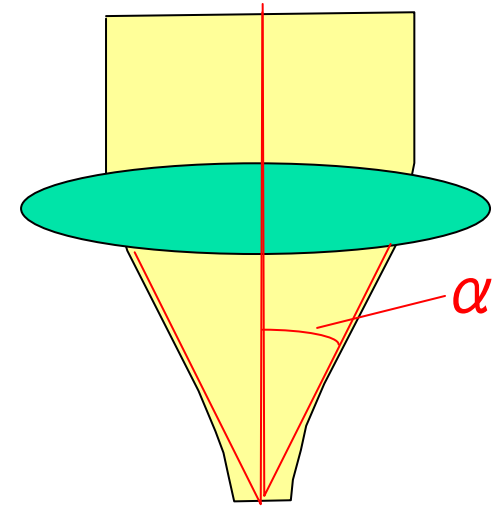
DVD: $\lambda = 650\text{nm} \rightarrow d = 650\text{nm}$

BD: $NA = 0.85$

$\lambda = 405\text{nm} \rightarrow d = 285\text{nm}$

HD-DVD: $NA = 0.6$

$\lambda = 405\text{nm} \rightarrow d = 405\text{nm}$



スポット径 d

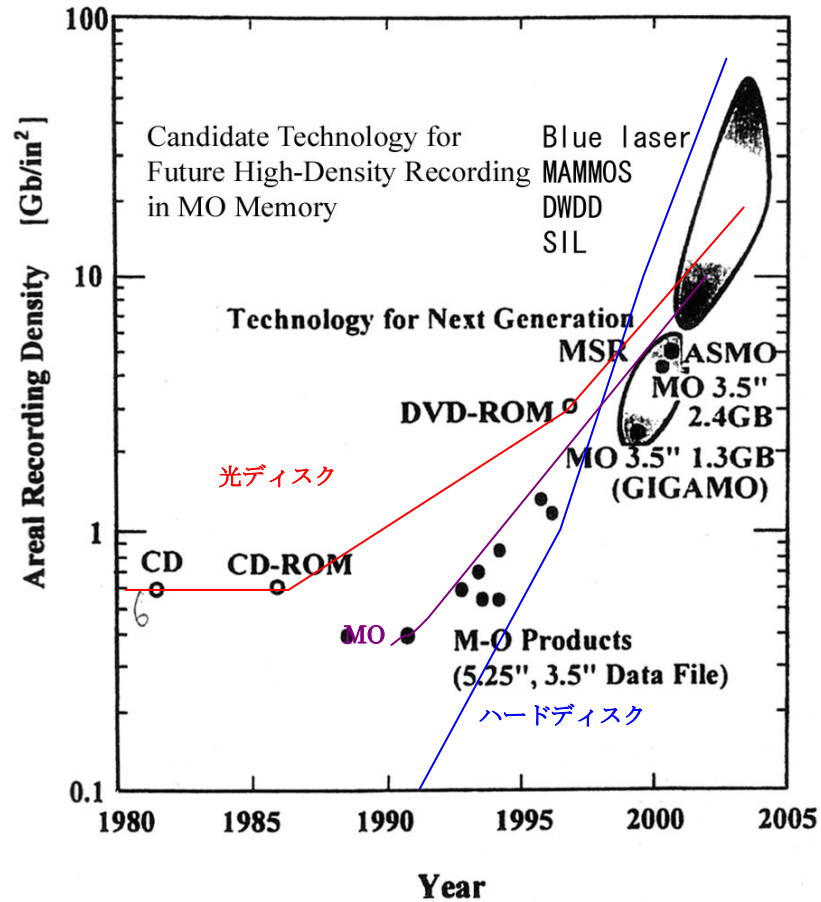
光記録に利用する物理現象

- CD-ROM, DVD-ROM:
 - ピット形成
- CD-R, DVD-R:
 - 有機色素の化学変化と基板の熱変形
- CD-RW, DVD-RAM, DVD-RW, DVD+RW, DVR:
 - アモルファスと結晶の相変化
- MO, MD, GIGAMO, AS-MO, iD-Photo:
 - 強磁性・常磁性相転移
- ホログラフィックメモリ: フォトリフラクティブ効果
- ホールバーニングメモリ: 不均一吸収帯

光ディスクの特徴

- リムーバブル
- 大容量・高密度
 - 現行10Gb/in²:ハードディスク(70Gbit/in²)に及ばない
 - 超解像、短波長、近接場を利用して100Gbit/in²をめざす
- ランダムアクセス
 - 磁気テープに比し圧倒的に有利;
カセットテープ→MD, VTR→DVD
 - ハードディスクに比べるとシーク時間が長い
- 高信頼性
 - ハードディスクに比し、ヘッドの浮上量が大きい

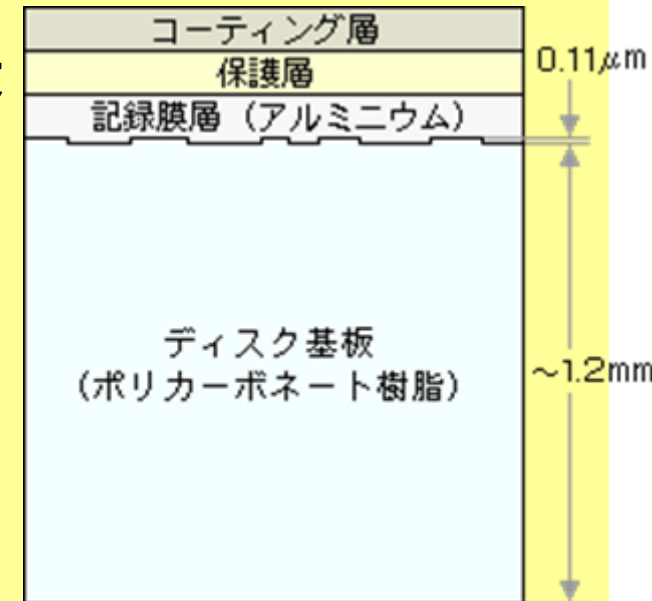
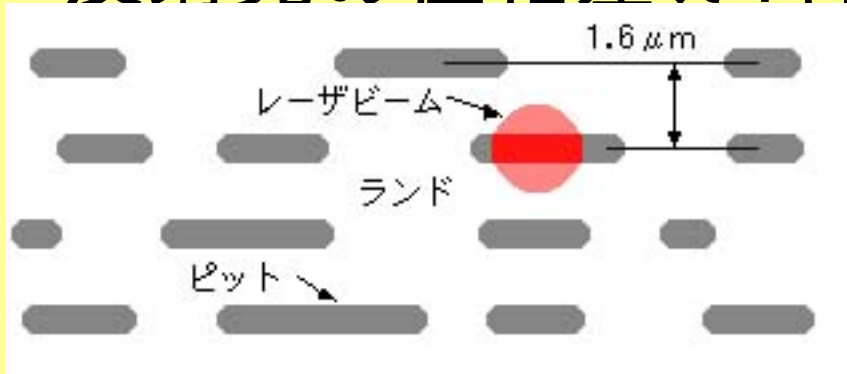
光ディスクの面記録密度の伸び



鈴木孝雄：第113回日本応用磁気学会研究会資料(2000.1) p.11に加筆

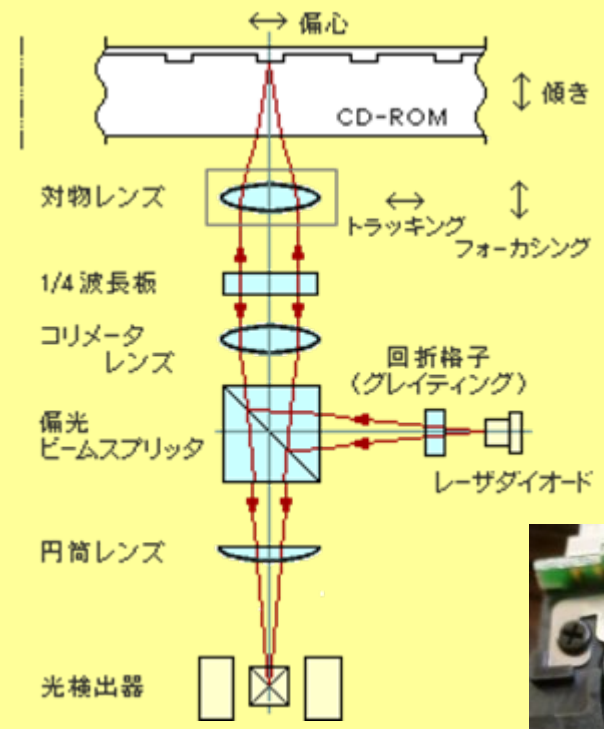
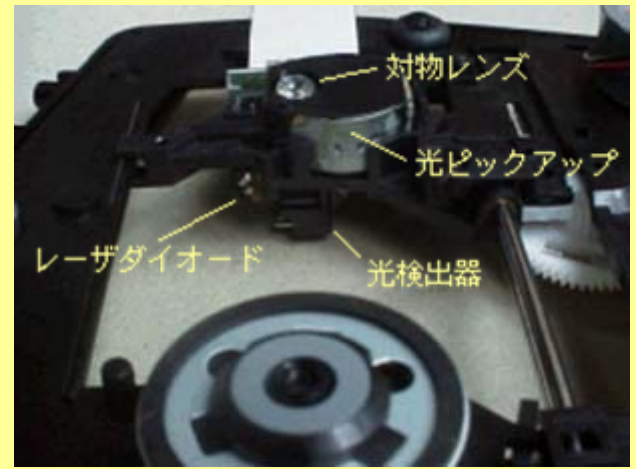
CD-ROM: 光の干渉を利用

- ポリカーボネート基板: $n=1.55$
- $\lambda = 780\text{nm} \rightarrow$ 基板中の波長 $\lambda' = 503\text{nm}$
- ピットの深さ: $110\text{nm} \sim \frac{1}{4}$ 波長
- 反射光の位相差 π : 打ち消し



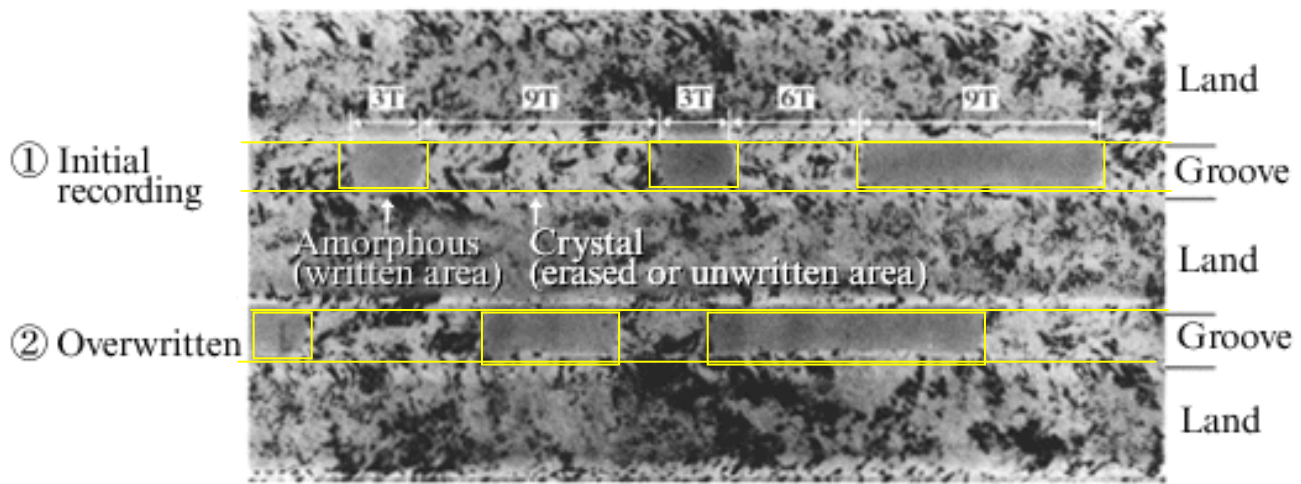
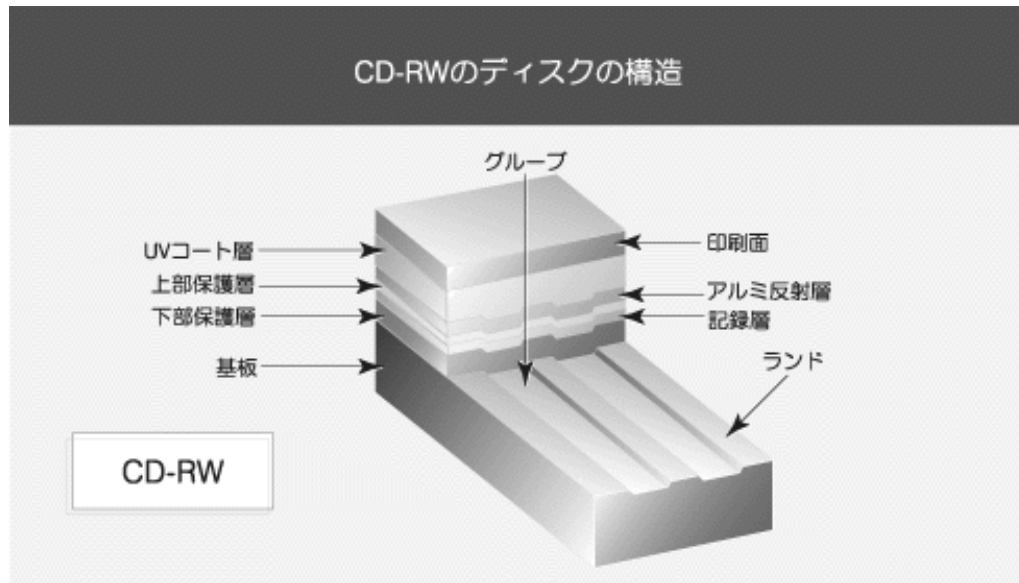
CD-ROMドライブ

- フォーカスサーボ
- トラッキングサーボ
- 光ピックアップ



CD-RW

- 光相変化ディスク
- 結晶とアモルファスの間の相変化を利用



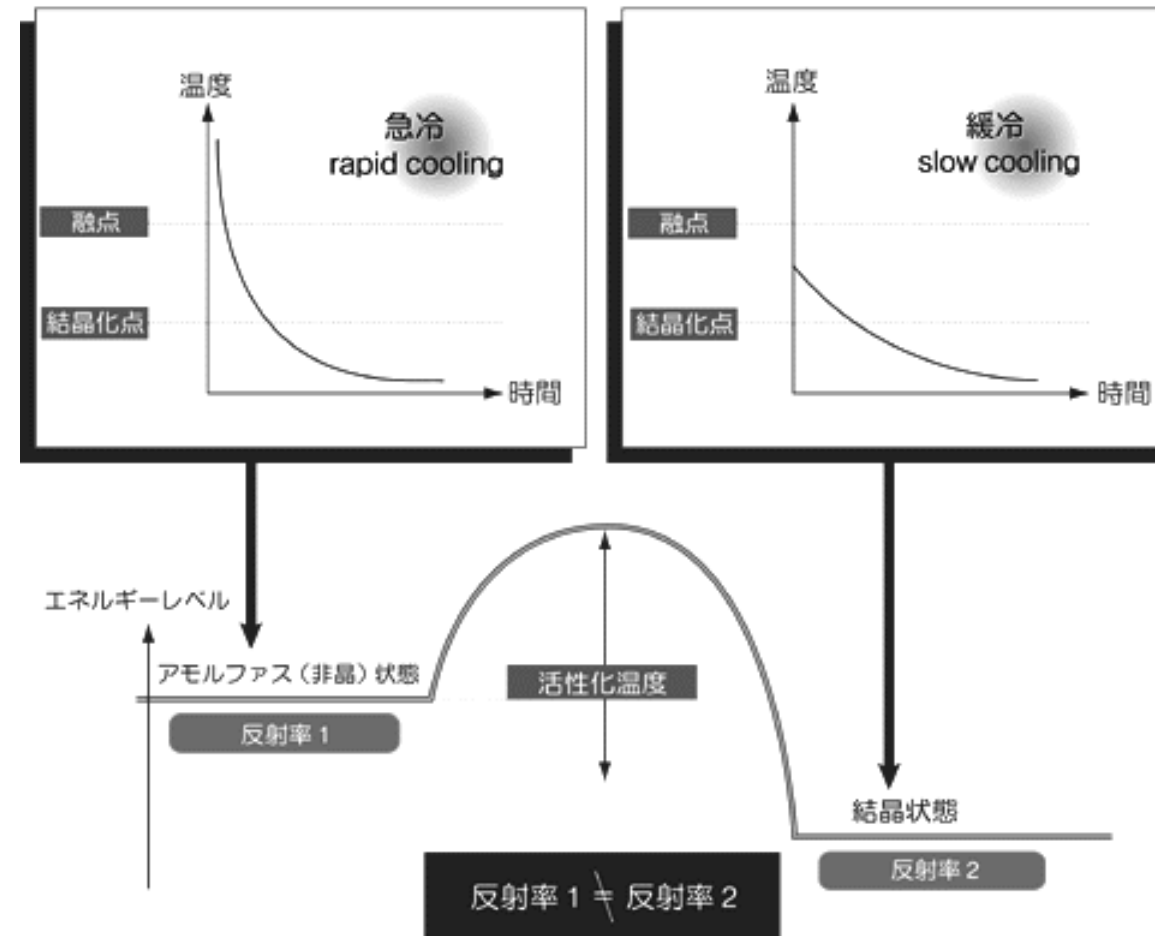
光相変化記録

- アモルファス/結晶の相変化を利用
 - 書換可能型 成膜初期状態のアモルファスを熱処理により結晶状態に初期化しておきレーザー光照射により融点 T_m (600°C)以上に加熱後急冷させアモルファスとして記録。消去は結晶化温度 T_{cr} (400°C)以下の加熱緩冷して結晶化。
 - Highレベル: T_m 以上に加熱→急冷→アモルファス
 - Lowレベル: T_{cr} 以上に加熱→緩冷→結晶化
- DVD-RAM: GeSbTe系
- DVD±RW: Ag-InSbTe系

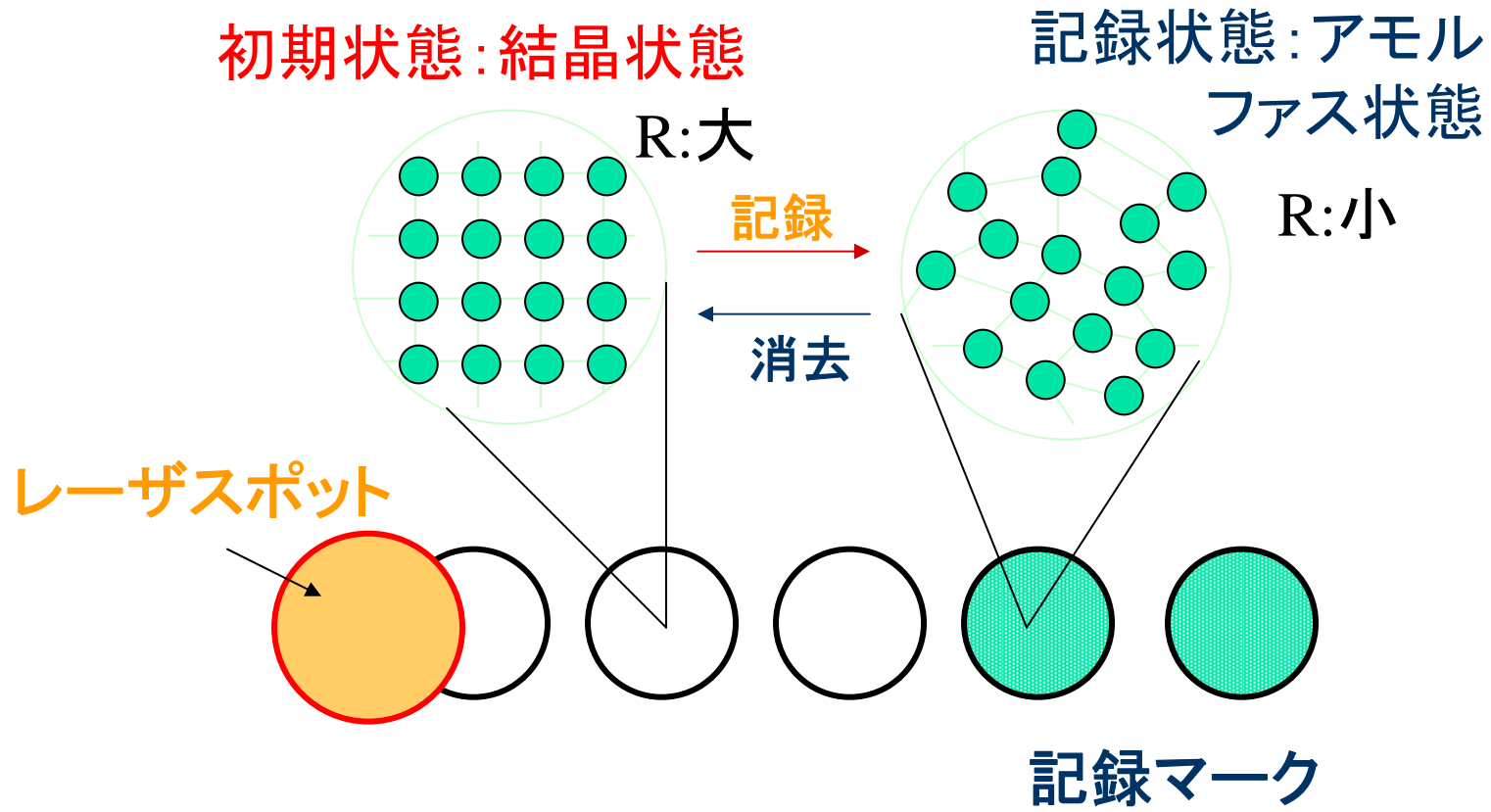
相変化ディスクの記録と消去

- 融点以上から急冷：
アモルファス
→低反射率
- 融点以下、結晶化
温度以上で徐冷：
結晶化
→高反射率

相変化記録の原理



相変化と反射率



アモルファスとはなにか

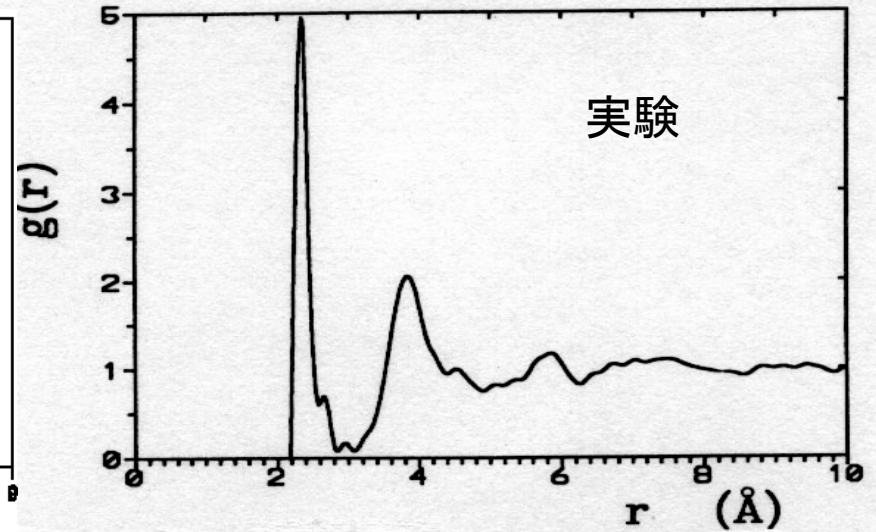
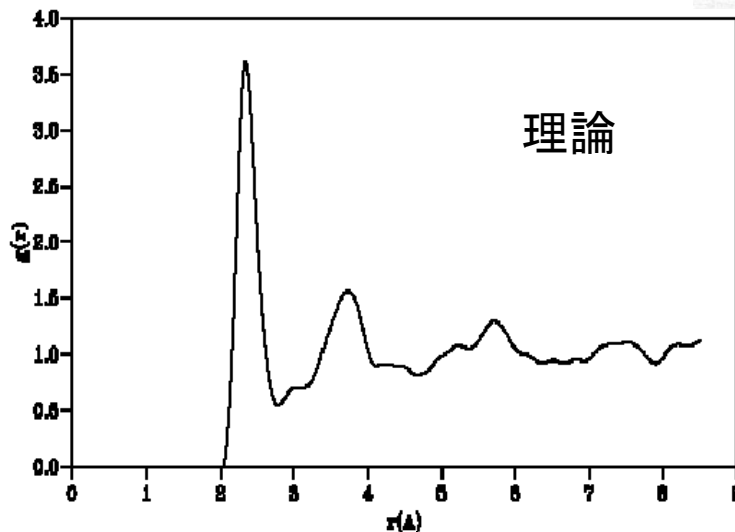
- Amorphous aは否定の接頭辞morphは形
 - 非晶質と訳される
 - 近距離秩序はあるが、結晶のような長距離秩序がない
 - 液体の原子配列が凍結した状態に近い
 - 液体の急冷により生じる準安定な状態
 - 金属合金系、カルコゲナイドガラス系、テトラヘドラル系、酸化物ガラス系などがある
 - 金属合金系の場合DRPHS (dense random packing of hard spheres)モデルで説明できる

アモルファスの特徴

- 結晶ではないので結晶粒界がなく連続
 - 大面積を均一に作れる。
 - 光の散乱が少ない
- 結晶と違って整数比でない広範な組成比が実現：特性を最適化しやすい
- 低温成膜可能なので、プラスチック基板でもOK

動径分布関数(RDF)

- $G(r)$: 1つの原子から r の位置に隣の原子を見いだす確率





CD-R: 有機色素の利用

- 有機色素を用いた光記録
- 光による熱で色素が分解
- 気体の圧力により加熱された基板が変形
- ピットとして働く

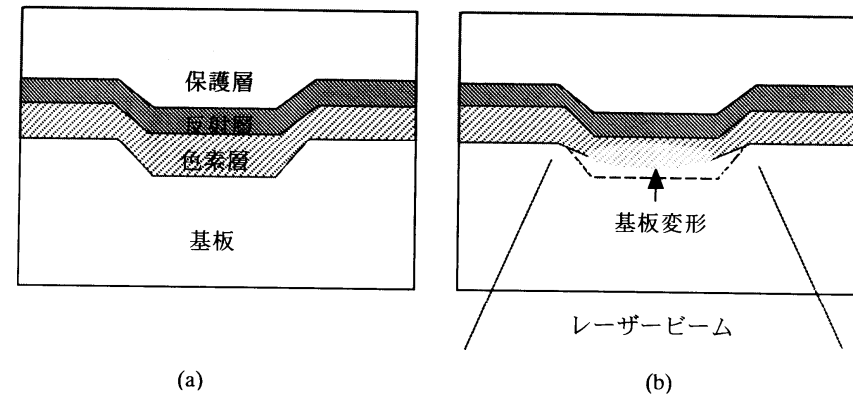
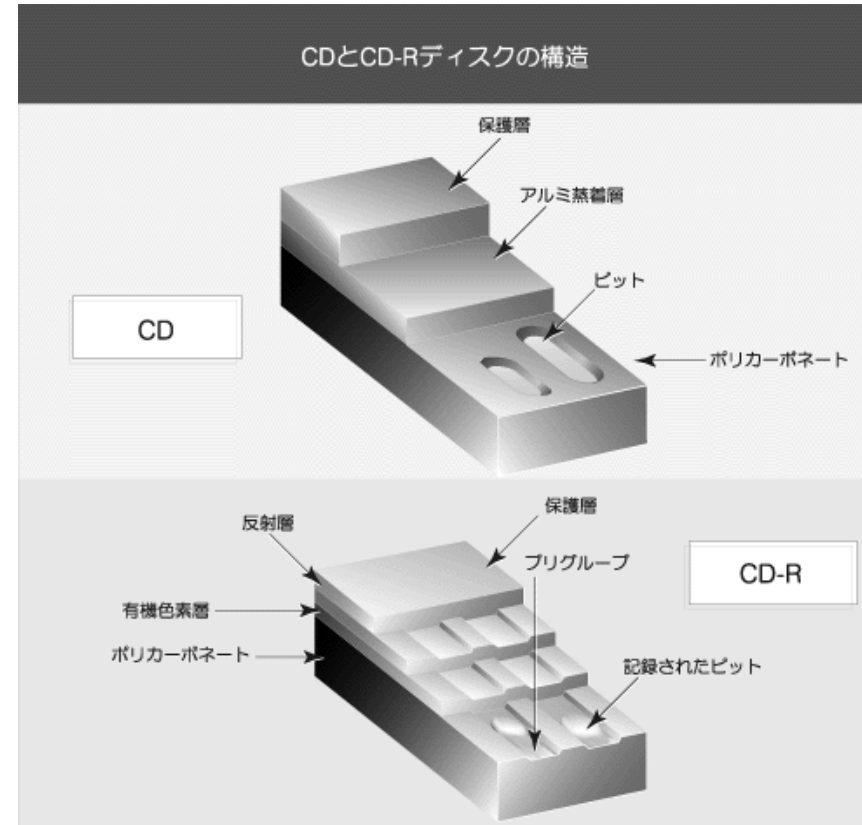


図1 未記録状態(a)、記録状態(b)を示す模式図

DVDファミリー

	DVD-ROM	DVD-R	DVD-RAM	DVD-RW	DVD+RW
容量(GB)	4.7 / 9.4 2層8.54	3.95 / 7.9	4.7 / 9.4	4.7/9.4	4.7/9.4
形状	disk	disk	cartridge	disk	disk
マーク形成 材 料	ピット形成 1層 R=45-85 2層 R=18-30	熱変形型 有機色素 R=45-85%	相変化型 GeSbTe系 R=18-30%	相変化型 AgInSbTe系 R=18-30%	相変化型 AgInSbTe系 R=18-30%
レーザ波長 レンズNA	650/635 0.6	650/635 0.6	650 0.6	638/650 0.6	650 0.65
最短マーク長	1層:0.4 2層:0.44	0.4	0.41-0.43	0.4	0.4
トラック幅	0.74	0.8 Wobbled Land pre-bit	0.74 Wobbled L/G	0.74 Wobbled Land pre-bit	0.74 HF Wobbled groove
書き換え可能 回数	—	—	10 ⁵	10 ³ -10 ⁴	10 ³ -10 ⁴

MO(光磁気)記録

- 記録: 熱磁気(キュリー温度)記録
 - 光を用いてアクセスする磁気記録
- 再生: 磁気光学効果
 - 磁化に応じた偏光の回転を電気信号に変換
- MO, MDに利用
- 互換性が高い
- 書き替え耐性高い: 1000万回以上
- ドライブが複雑(偏光光学系と磁気系が必要)
- MSR, MAMMOS, DWDDなど新現象の有効利用可能

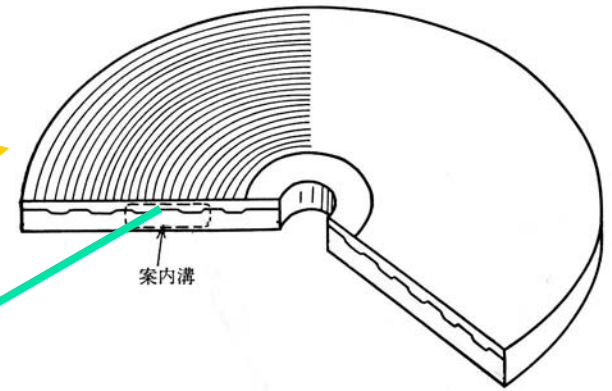
光磁気ディスク

- 記録： 熱磁気(キュリー温度)記録
- 再生： 磁気光学効果
- MO: 3.5”
128→230→650→1.3G→2.3G
- MD: 6cm audio 70 min
→Hi-MD audio 13 hr
- iD-Photo, Canon-Panasonic(5cm)

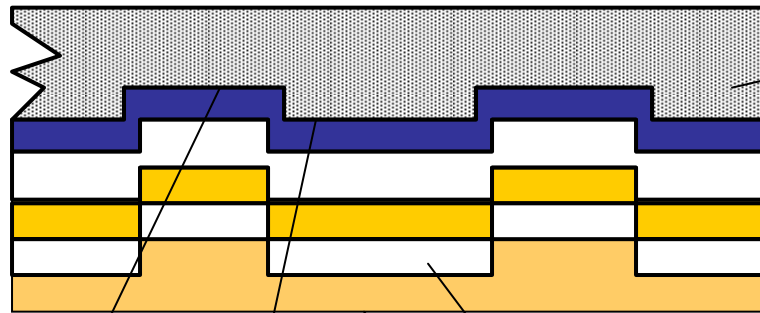
光磁気記録の歴史

- 1962 Conger, Tomlinson 光磁気メモリを提案
- 1967 Mee Fan ビームアドレス方式の光磁気記録の提案
- 1971 Argard (Honeywel) MnBi薄膜を媒体としたMOディスクを発表
- 1972 Suits(IBM) EuO薄膜を利用したMOディスクを試作
- 1973 Chaudhari(IBM) アモルファスGdCo薄膜に熱磁気記録(補償温度記録)
- 1976 Sakurai(阪大) アモルファスTbFe薄膜にキュリー温度記録
- 1980 Imamura(KDD) TbFe系薄膜を利用したMOディスクを発表
- 1981 Togami(NHK) GdCo系薄膜MOディスクにTV動画像を記録
- 1988 各社 5"MOディスク(両面650MB)発売開始
- 1889 各社 3.5"MOディスク(片面128MB)発売開始
- 1991 Aratani(Sony) MSR(磁気誘起超解像)を発表
- 1992 Sony MD(ミニディスク)を商品化
- 1997 Sanyo他 ASMO(5"片面6GB:L/G, MFM/MSR)規格発表
- 1998 Fujitsu他 GIGAMO(3.5"片面1.3GB)発売開始
- 2001 Sanyo デジカメ用iD-Photo(2", 780MB)発売
- 2002 Canon-松下 ハンディカメラ用2"3GBディスク発表
- 2004 Sony Hi-MD発表

光磁気媒体



■ MOディスクの構造



ポリカーボネート基板

窒化珪素保護膜・
(MOエンハンス
メント膜を兼ねる)

MO記録膜
(アモルファスTbFeCo)

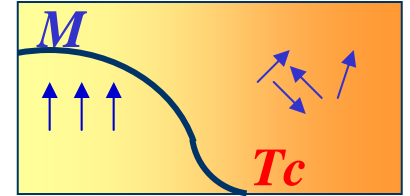
groove

land

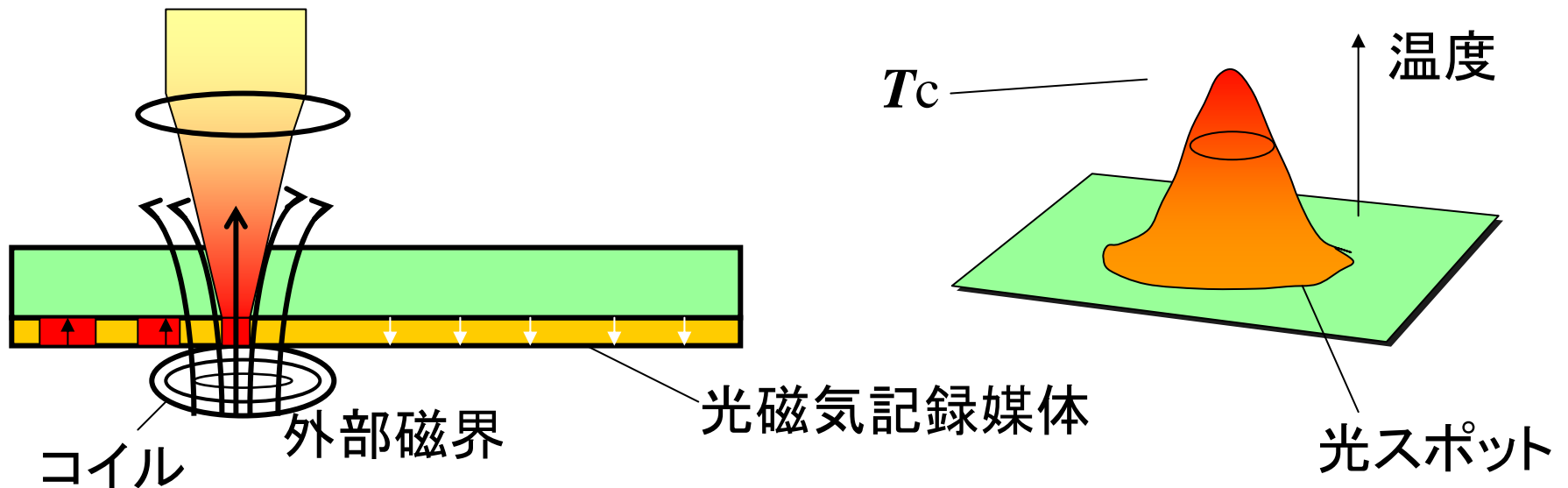
Al反射層

樹脂

光磁気記録 情報の記録(1)

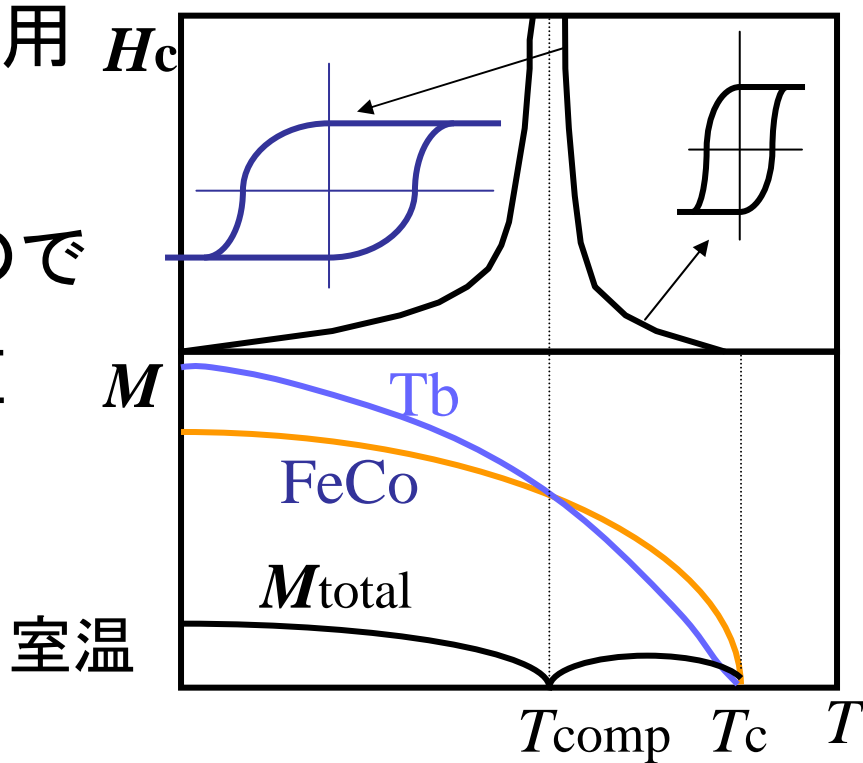
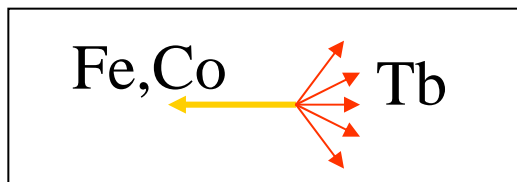


- レーザ光をレンズで集め磁性体を加熱
- キュリー温度以上になると磁化を消失
- 冷却時にコイルからの磁界を受けて記録

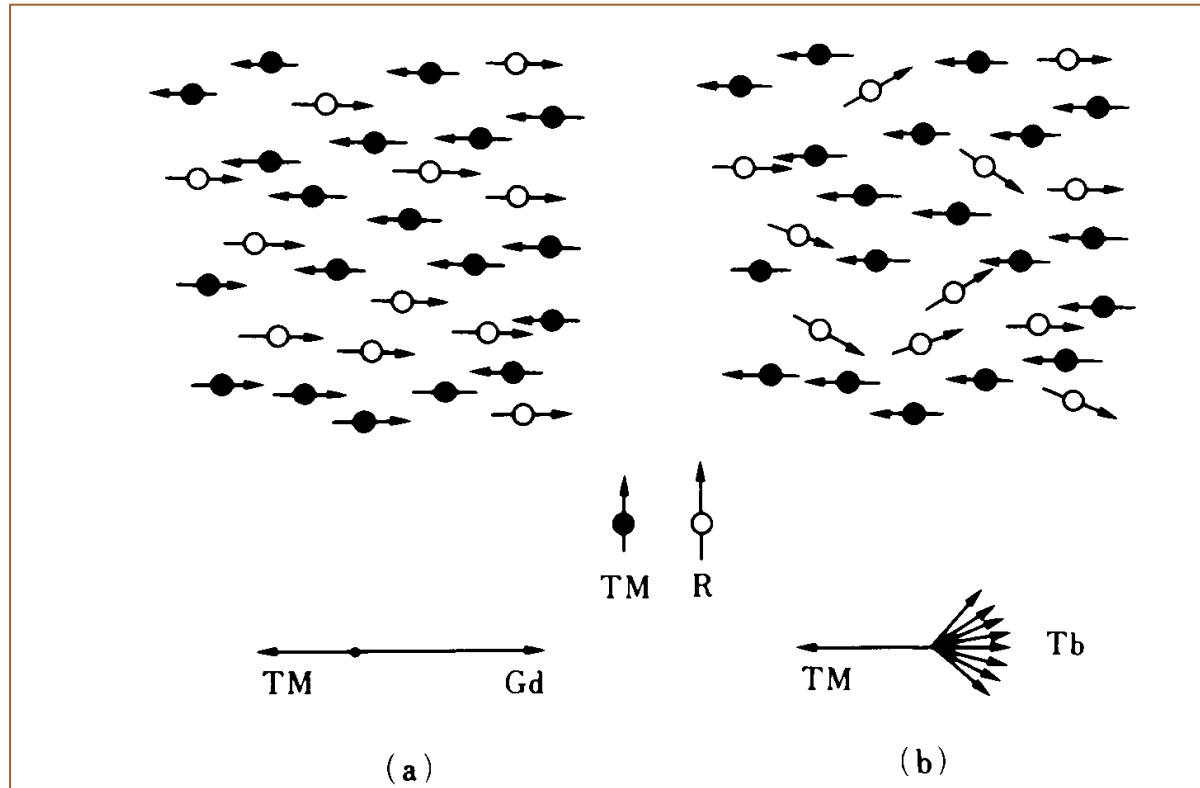


光磁気記録 情報の記録(2)

- 補償温度 (T_{comp}) の利用
- アモルファス TbFeCo は一種のフェリ磁性体なので補償温度 T_{comp} が存在
- T_{comp} で H_c 最大:
 - 記録磁区安定

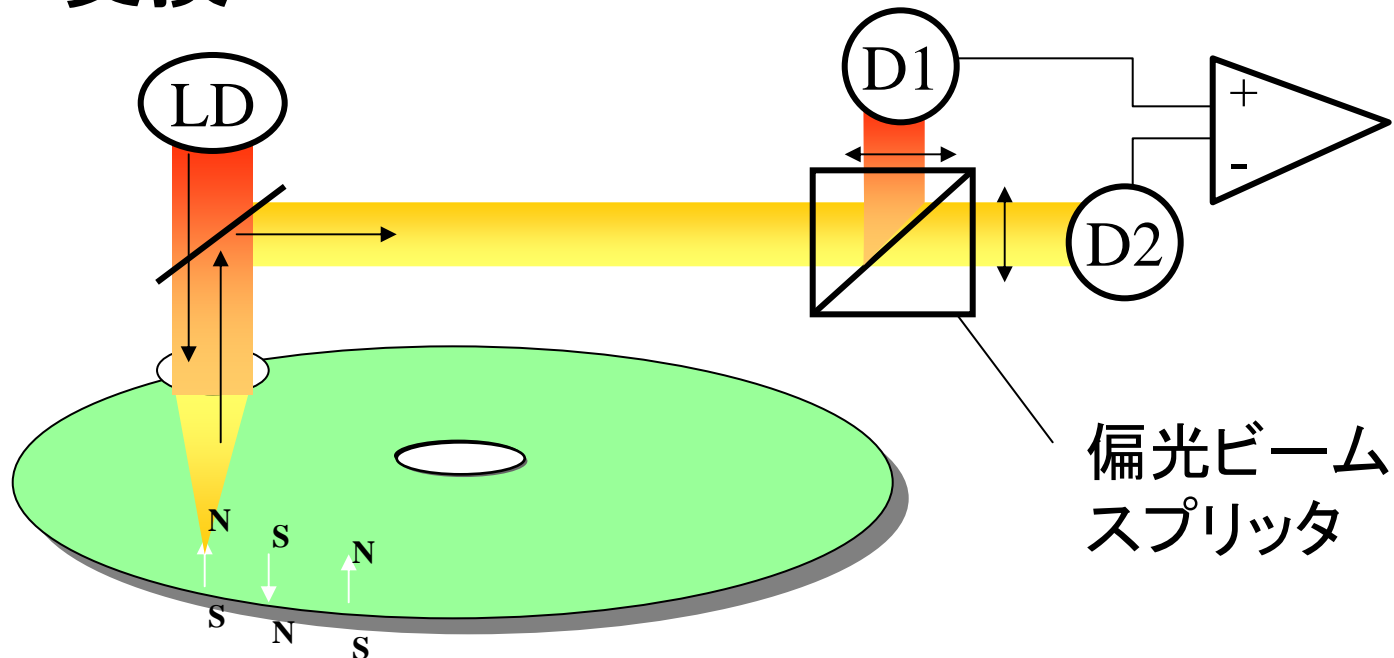


アモルファスR-TM合金



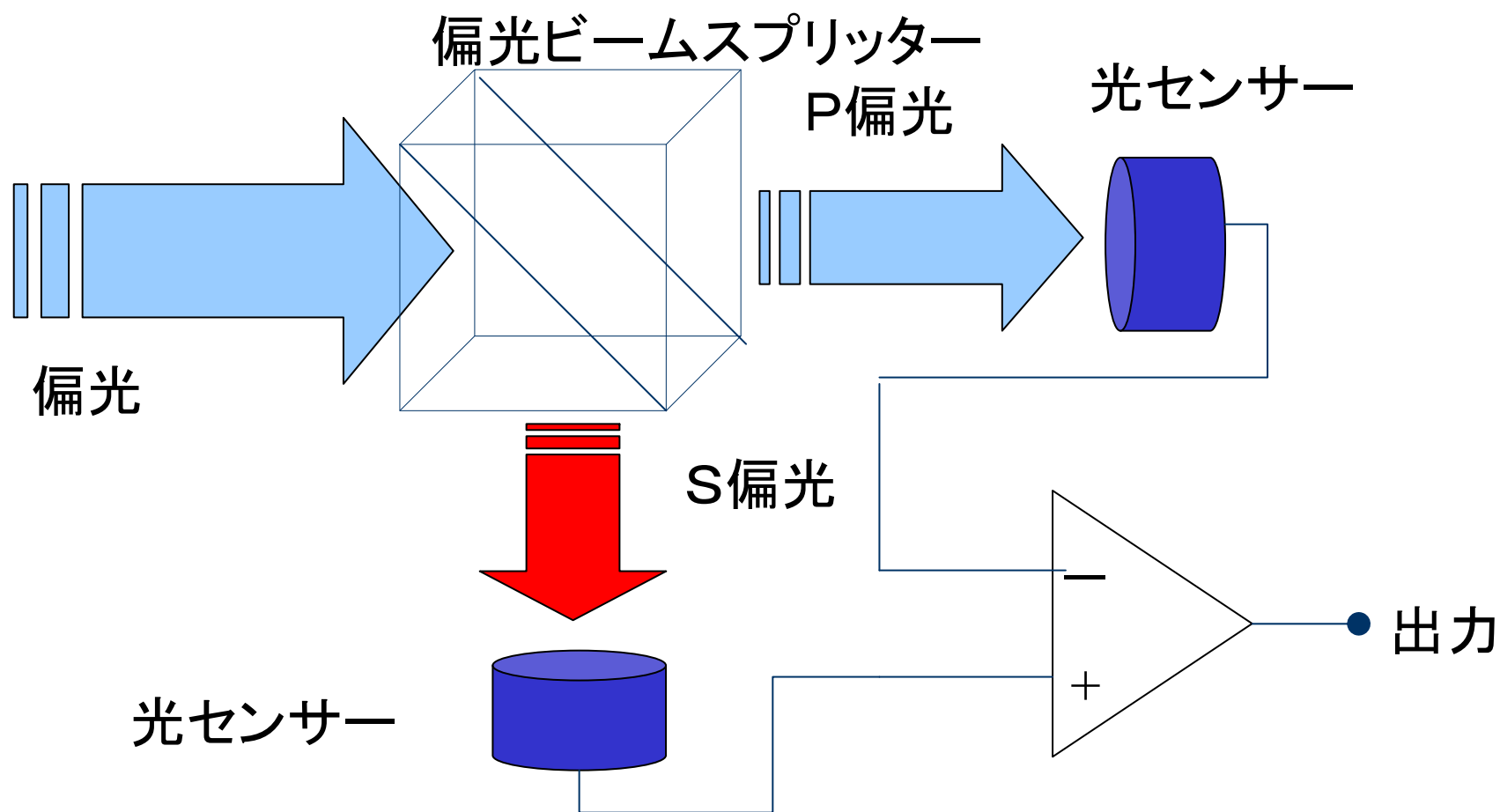
光磁気記録 情報の読み出し

- 磁化に応じた偏光の回転を検出し電気に変換



差動検出系

- 差動検出による高感度化



MOドライブ

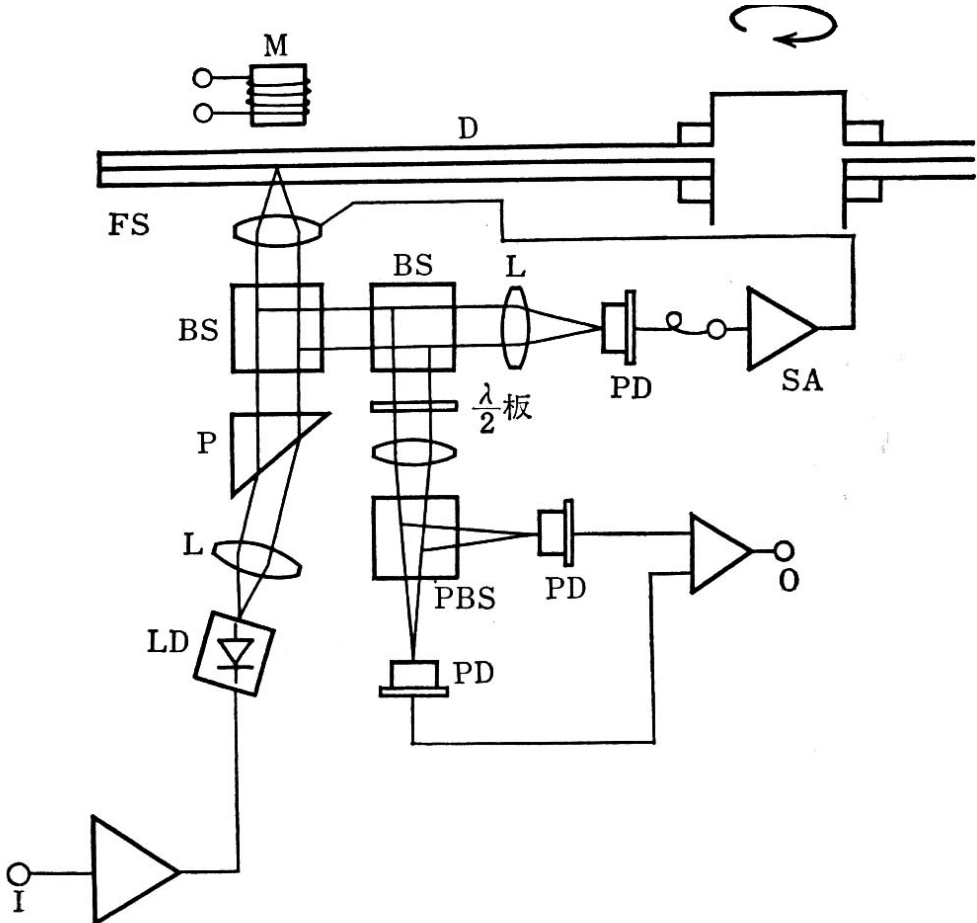
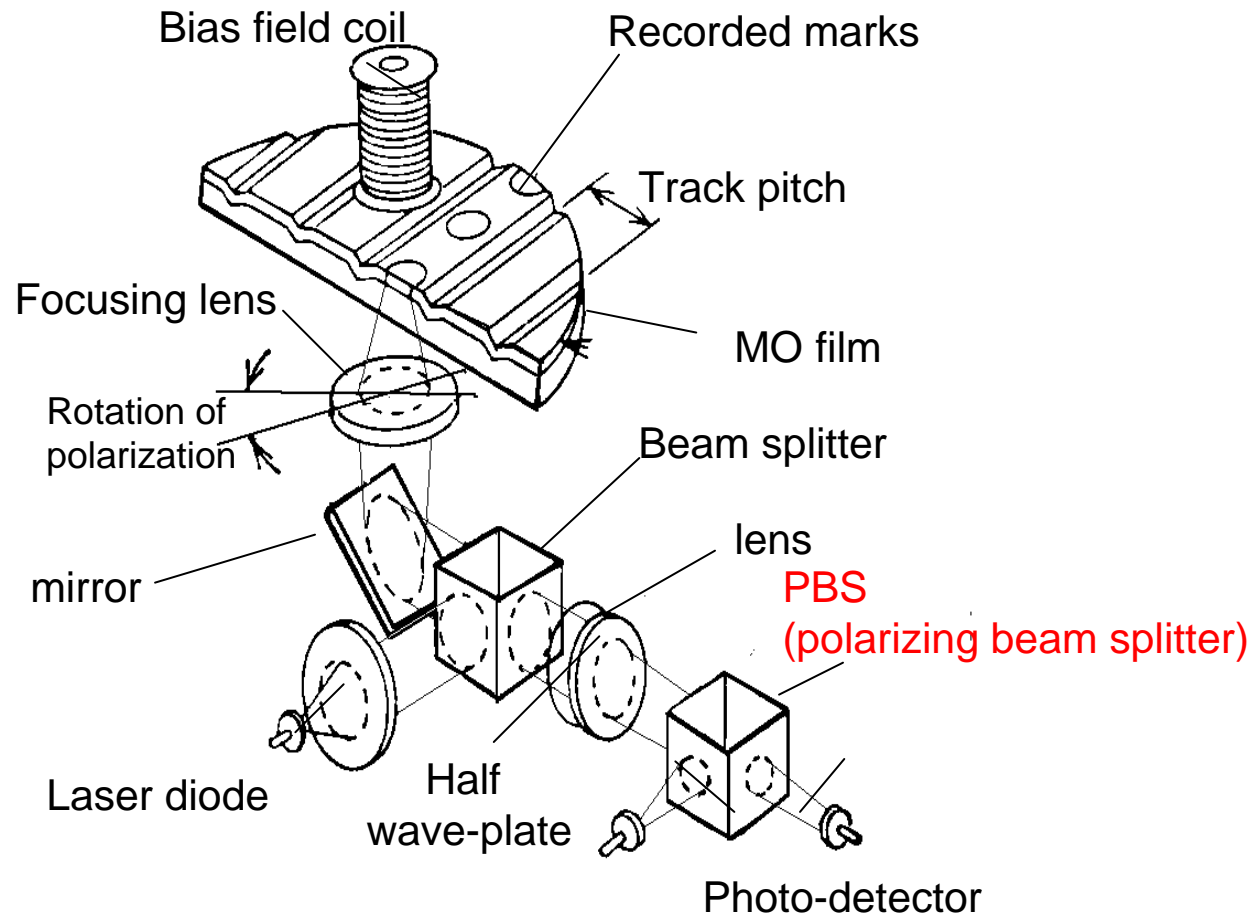


図 7.9 光磁気記録再生システムの模式図²⁰⁾

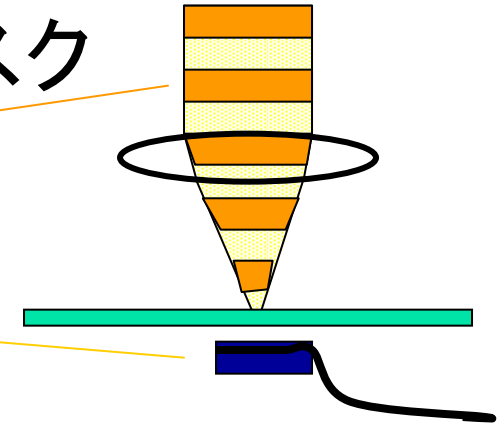
MOドライブの光ヘッド



2種類の記録方式

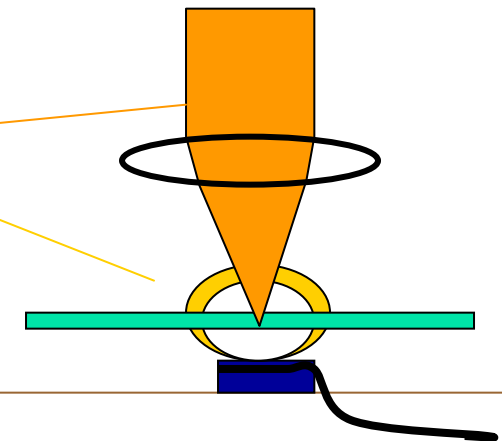
■ 光強度変調(LIM): 現行のMOディスク

- 電気信号で光を変調
- 磁界は一定
- ビット形状は長円形

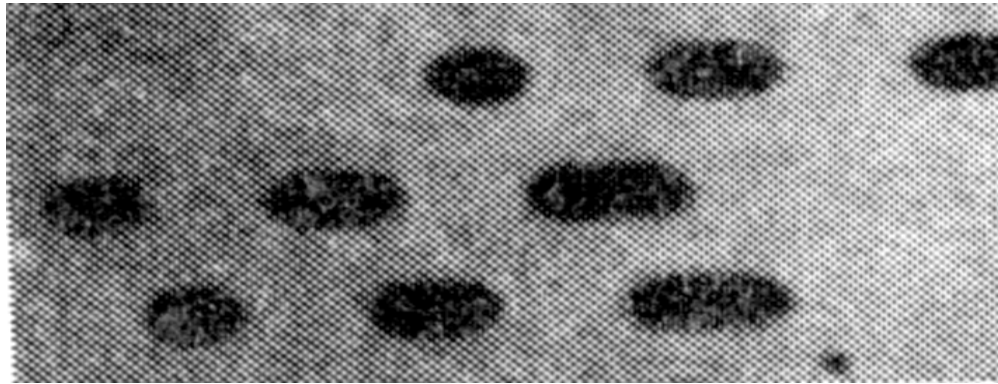


■ 磁界変調(MFM): 現行MD, iD-Photo

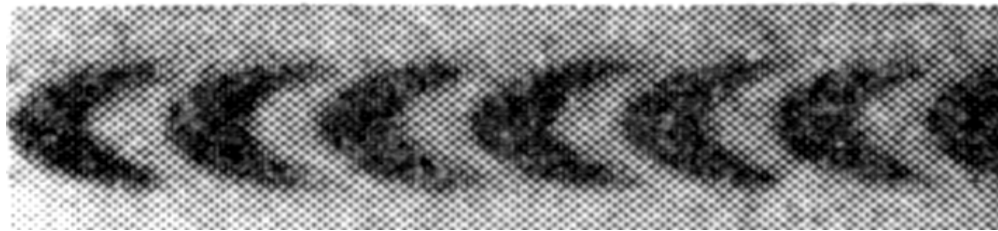
- 電気信号で磁界を変調
- 光強度は一定
- ビット形状は矢羽形



記録ビットの形状

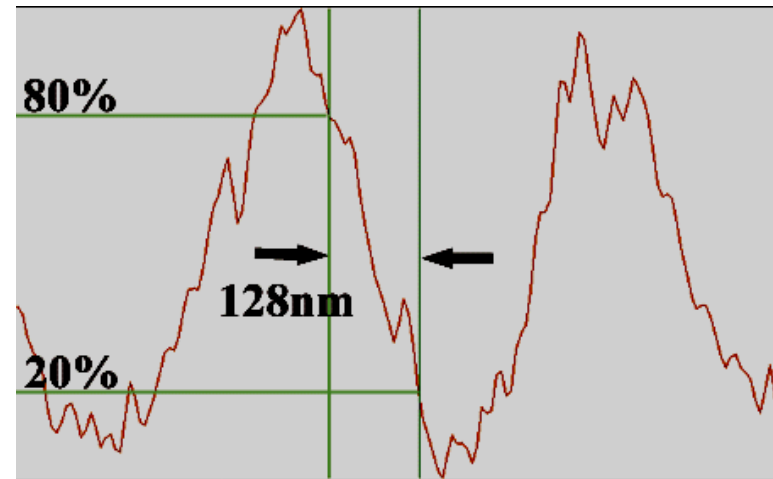
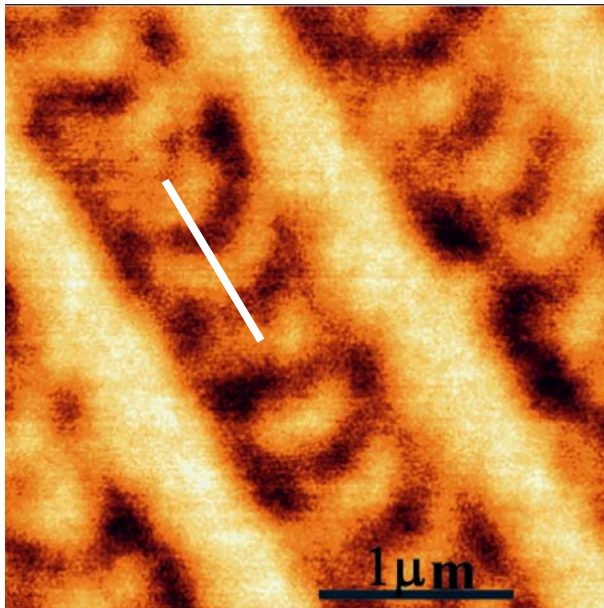


(a)



(b)

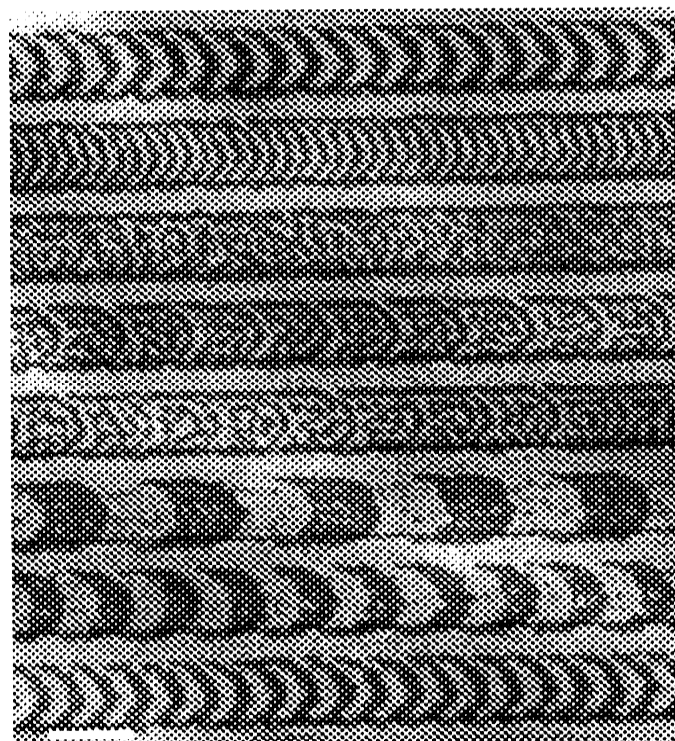
MO-SNOMで見た記録マーク



佐藤勝昭:応用物理69 [10] (2000) 1220-1221

SNOM:近接場顕微鏡

FeのL₃吸収端のXMCDを用いて 観測したMO媒体の磁区像



1 μm

mark/space

0.2/0.2

0.1/0.1

0.05/0.05

0.1/0.7

0.05/0.75

0.8/0.8

0.4/0.4

0.2/0.2

μm

SiN(70nm)/ TbFeCo(50nm)/SiN(20nm)/
Al(30nm)/SiN(20nm) MO 媒体

N. Takagi, H. Ishida, A. Yamaguchi, H. Noguchi, M. Kume, S. Tsunashima, M. Kumazawa, and P. Fischer: Digest Joint MORIS/APDSC2000, Nagoya, October 30-November 2, 2000, WeG-05, p.114.

XMCD: X線磁気円二色性

光ディスク高密度化の戦略

- 回折限界の範囲で
 - 短波長光源の使用: 青紫色レーザーの採用→BD, HD-DVD
 - 高NAレンズの採用: $NA=0.85$ (BD)
 - 多層構造を使う
- 回折限界を超えて
 - 超解像技術を使う
 - 磁気誘起超解像: GIGAMOに採用されている技術
 - MAMMOS, DWDD: 磁気超解像を強化する技術 (Hi-MDに採用)
 - 近接場を使う
 - SILの採用
 - Super-RENS
 - Bow-tie antenna

光源の短波長化による高密度化

- $\lambda=405$ nmの青紫色レーザーを光源とし $NA=0.85$ の高NAレンズを用いると $d=0.28$ μm のスポットに絞り込みが可能
- ROMの場合は、ピットの内外からの反射光の干渉でデータを読みとるので、ピット径は d の半分以下にできる。従って、トラックピッチを $d=0.28$ μm としビット長を $d/2=0.14$ μm とすると 16 Gb/in²以上の面密度が得られる。
- 高NA(2.03)のSILを用い、トラックピッチを詰める(0.16)ことで 100 Gb/in²が達成可能
- RAMの場合は、マークの直径は光スポットと同程度なので、記録密度は 8 Gb/in²程度である。

多層化による高密度化

- 相変化記録の場合、4層程度にまで多層化できるので、記録密度はこの層数倍となる。
- 光磁気記録においても多層化技術が開発されており、少なくとも波長多重2層化については20 Gb/in²程度の記録密度が実証されている[i]。

[i] 伊藤彰義:「最先端光磁気記録技術」日本応用磁気学会第128回研究会「磁気ストレージ技術の趨勢はどこに」(2003.1.30)資料集p.31

超高密度光ディスクへの展開最前線

1. 超解像
 1. MSR
 2. Super-RENS
2. 磁気機能の利用
 1. MAMMOS
 2. DWDD
3. 短波長化
4. 近接場
 1. SIL

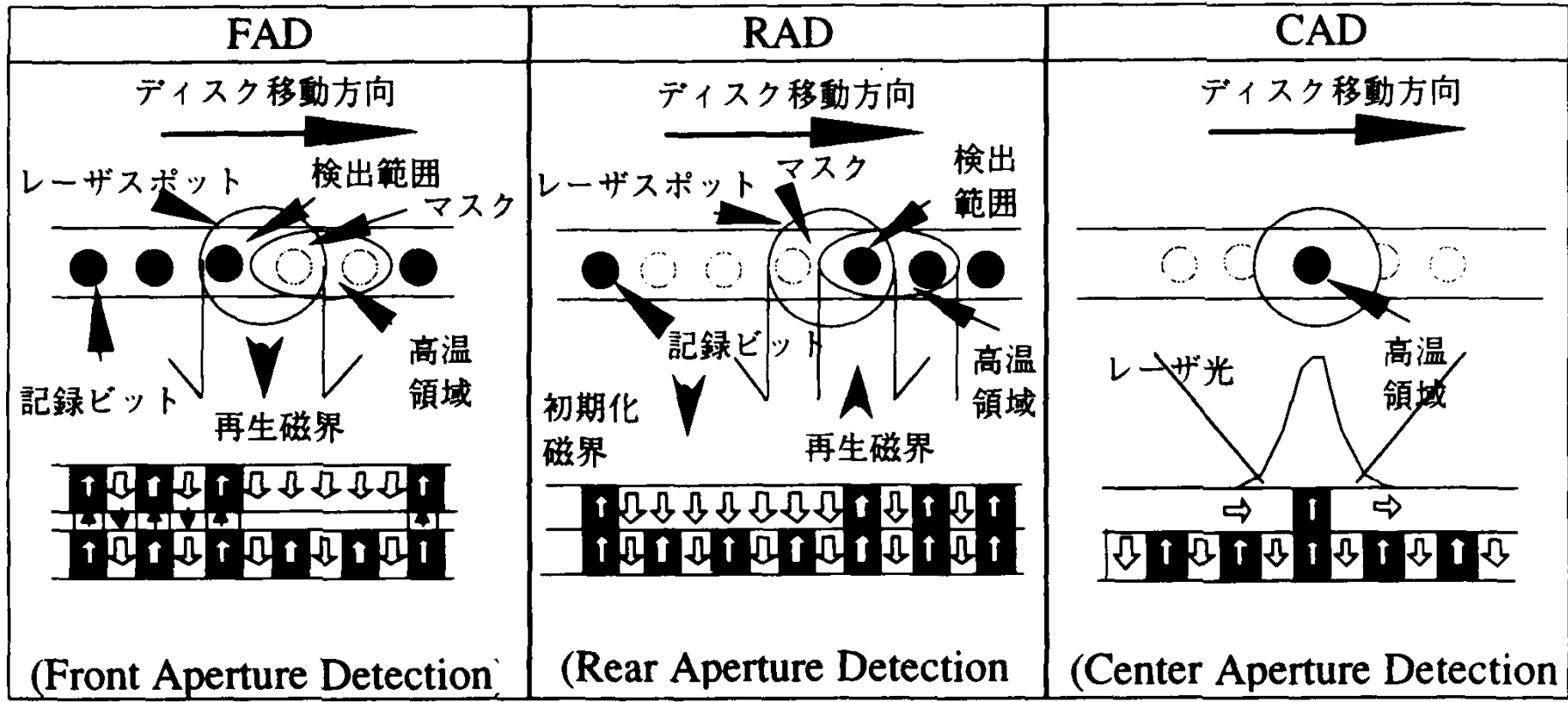
超高密度光ディスクへの展開: 超解像 磁気誘起超解像技術(MSR)

- 光磁気記録では、磁気誘起超解像(MSR)技術が実用化されており、これを採用したGIGAMOでは、 $\lambda=650$ nm(赤色レーザ)を用いて回折限界を超える直径 $0.3\mu\text{m}$ のマークを読みとっている[1]。直径3.5”のGIGAMOの記録密度は 2.5 Gb/in²程度である。
- 次世代規格であるASMOでは磁界変調記録法を採用することにより $0.235\mu\text{m}$ の小さなマークを記録することが可能で、面記録密度としては約 4.6 Gb/in²程度となる[2]。

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

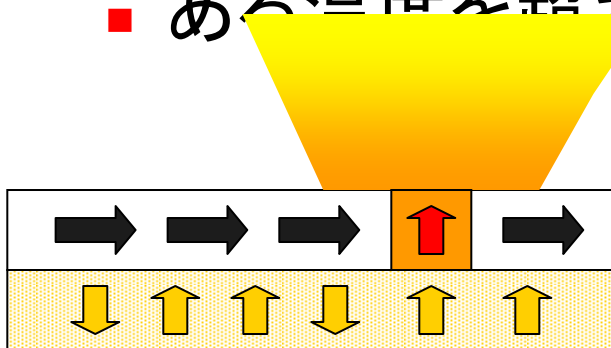
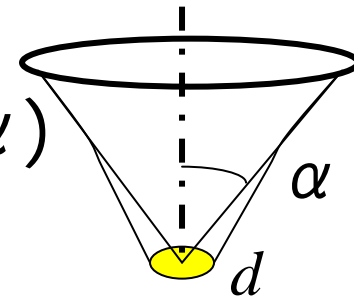
[2] S. Sumi, A. Takahashi and T. Watanabe: *J. Magn. Soc. Jpn. 23, Suppl. S1 (1999) 173*

超高密度光ディスクへの展開: 超解像 MSR方式の図解



超高密度光ディスクへの展開: 超解像 CAD-MSR

- 解像度は光の回折限界から決まる
 - $d = 0.6 \lambda / NA$ (ここに $NA = n \sin \alpha$)
 - 波長以下のビットは分解しない
- 記録層と再生層を分離
- 読み出し時のレーザの強度分布を利用
 - ある温度を超えた部分のみを再生層に転写する



超高密度光ディスクへの展開: 超解像 相変化ディスクにおける超解像技術

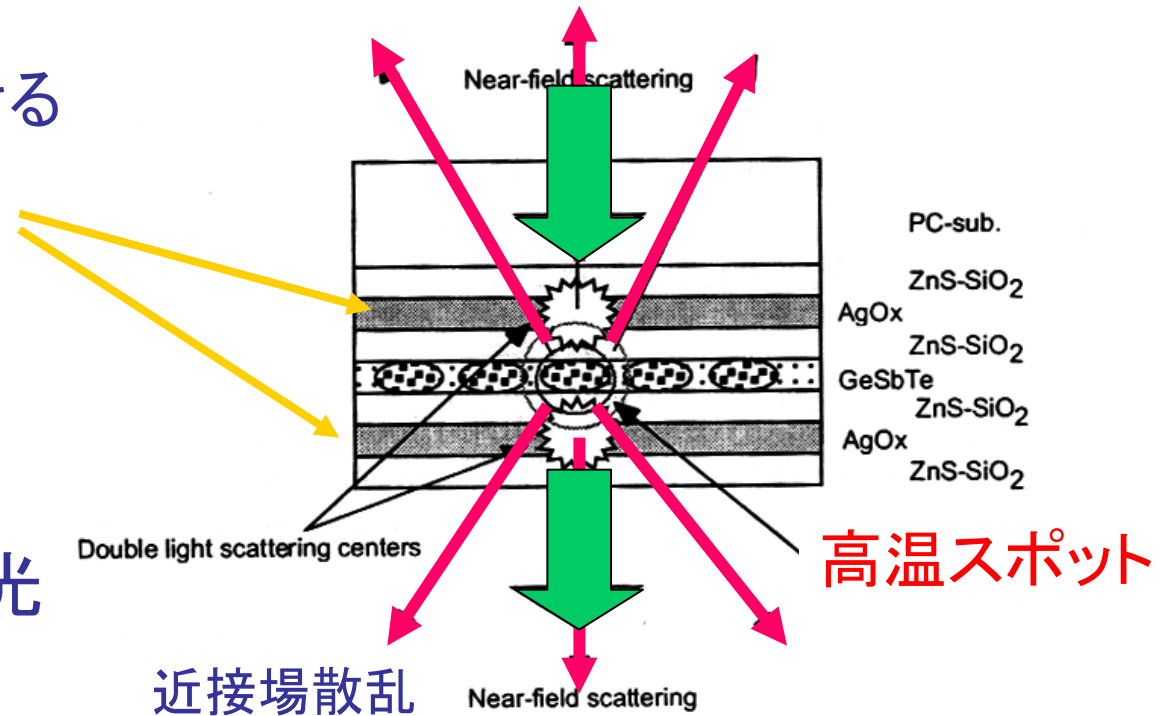
- 相変化ディスクの場合には、磁気的な転写ができないので超解像技術を適用するのが難しいが、産総研で開発されたSuper-RENS方式により、回折限界を超えて0.1 μm 径の微小マークの再生が可能になった[1]。

[1] J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato, T. Nakano and N. Atoda:
Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) 957.

超高密度光ディスクへの展開: 超解像

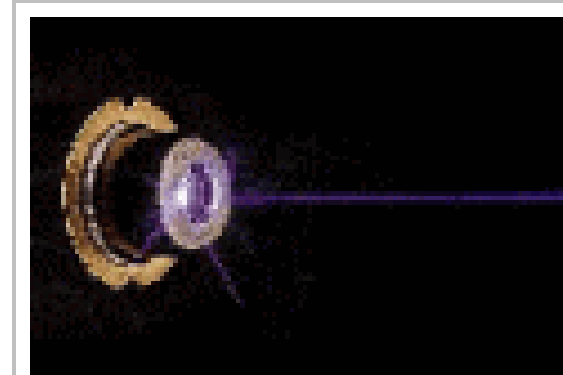
Super-RENS (super-resolution near-field system)

- Sb膜: 光吸収飽和
 - 波長より小さな窓を開ける
- AgOx膜: 分解・Ag析出
 - 散乱体→近接場
 - Agプラズモン→光増強
 - 可逆性あり。
- 相変化媒体だけでなく光磁気にも適用可能




超高密度光ディスクへの展開:短波長化 光源の短波長化

- 我が国で開発された青紫色レーザーは、最近になって複数の会社から安定供給できるようになり、これを用いた光ディスクが登場した。光ディスクの面密度は原理的に $1/\lambda^2$ で決まるので、波長が従来の650nmから405nmに変わることにより、原理的に2.6倍の高密度化が可能になる。



超高密度光ディスクへの展開: 短波長化 BDとHD-DVD

- どちらも青紫色レーザー(波長405nm)を使用
- BD=Blu-ray Disc
 - Sony-Panasonic-Philips陣営
 - NAの大きなレンズを使用(0.85)
 - 記録層が表面から0.1mmの深さにある。
- HD DVD=High Definition DVD
 - Toshiba-NEC-Sanyo陣営
 - レンズNAは従来のDVDと同じ(0.65)
 - 記録層の深さ: 表面から0.6mm



超高密度光ディスクへの展開: 短波長化

BD vs HD DVD比較表

規格	BD	HD DVD
容量(片面1層)	23.3/25/27 GB	15/20 GB (ROM/ARW)
容量(片面2層)	46.6/50/54 GB	30/40GB
転送速度	36Mbps	36Mbps
ディスク厚み 記録層	1.2mm 保護層 0.1mm 記録層1.1 μ m	1.2mm(0.6mm \times 2層) 記録層0.6 μ m
レーザー波長	405nm	405nm
レンズ開口数	0.85	0.65
トラックピッチ	0.32 μ m	0.3-0.4 μ m
トラック構造	グループ	ランド/グループ
映像圧縮方式	MPEG-2 Video	Advanced MPEG2

超高密度光ディスクへの展開: 短波長化 BD (Blu-ray)

- 松下電器産業は、次世代記録メディアのBlu-ray ディスクに対応するPCデータ用ドライブ「LF-MB121JD」と、ノンカートリッジタイプのPCデータ用2倍速Blu-rayディスク「BD-RE」「BD-R」を発表した。ドライブの発売は6月10日で価格はオープン。 <http://journal.mycom.co.jp/news/2006/04/22/009.html>



超高密度光ディスクへの展開:短波長化

HD-DVD

- 東芝は、次世代DVDのHD DVDに対応したHD DVD搭載HDDレコーダー「RD-A1」を7月14日から発売する。1テラバイト(TB)のHDDを搭載、HD DVDメディアへの録画も可能になっており、録画に対応したHD DVD対応製品が商品化されるのは世界で初めて。



超高密度光ディスクへの展開:磁気機能 磁気機能を利用した信号増大

- 光磁気記録においてさらに小さなマークを十分なSN比を以て光学的に読みとる方法として、磁区拡大再生(MAMMOS)および磁壁移動再生(DWDD)という技術が開発された。これらは、光磁気記録特有の再生技術である。

超高密度光ディスクへの展開: 磁気機能の利用

MAMMOS

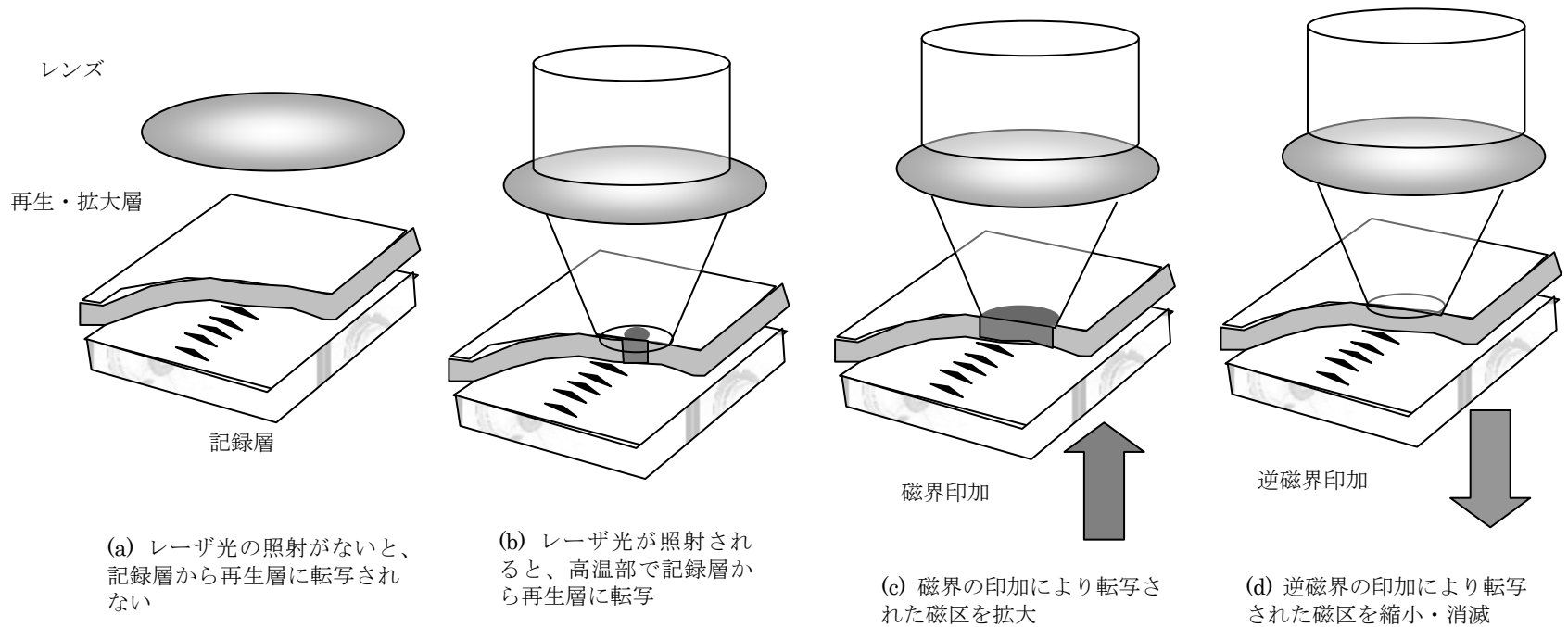
- MAMMOSでは記録層から読み出し層に転写する際に磁界によって磁区を拡大して、レーザー光の有効利用を図り信号強度を稼いでいる[1]。原理的にはこの技術を用いて100 Gb/in²の記録密度が達成できるはずで、実験室レベルで64 Gb/in²程度までは実証されているようである[2]。無磁界MAMMOSも開発されている。

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

[2] A. Itoh, N. Ohta, T. Uchiyama, A. Takahashi, M. Mieda, N. Iketani, Y. Uchihara, M. Nakata, K. Tezuka, H. Awano, S. Imai, and K. Nakagawa: *Digest MORIS/APDSC2000, Oct. 30- Nov. 2, Nagoya*, p. 90.

超高密度光ディスクへの展開: 磁気機能の利用

MAMMOS (磁区拡大 MO システム)



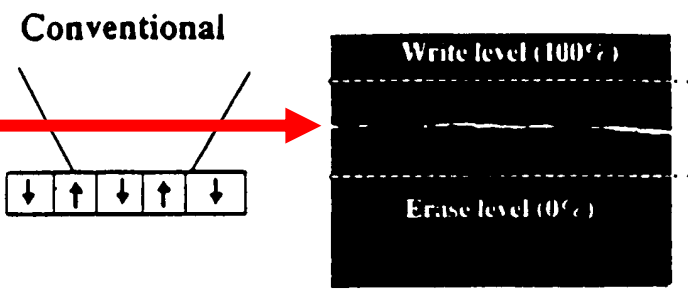
超高密度光ディスクへの展開: 磁気機能の利用

MAMMOSの効果

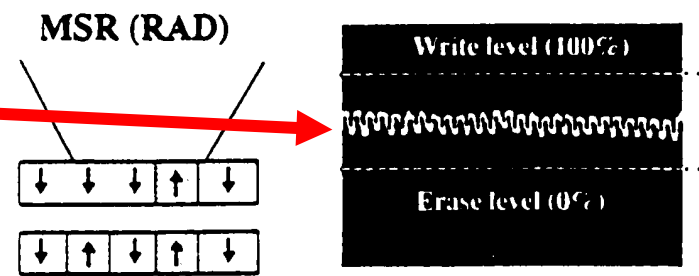
680nm, NA0.55, 2.5m/s



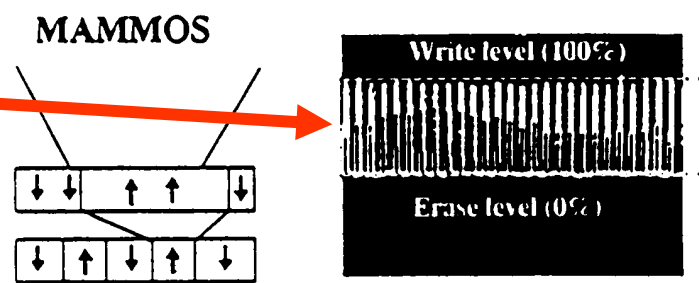
- 通常再生
 - 信号はほとんど0



- MSR再生
 - 信号振幅小



- MAMMOS再生
 - フル出力



超高密度光ディスクへの展開: 磁気機能の利用

DWDD

- DWDDも記録層から読み出し層に転写する点はMAMMOSと同じであるが、転写された磁区を読み出し層の温度勾配を利用して磁壁を移動させて拡大するので、磁界を必要としない[1]。
- ソニーは2004.1.8にDWDDを用いたHi-MD(1GB)を発売した。[2]
- また、松下が新規格のハンディビデオ用MO(2", 3GB)として商品化を検討した経過がある[3]。

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

[2] 伊藤大貴: 日経エレクトロニクス204.2.2, p.28

[3] 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

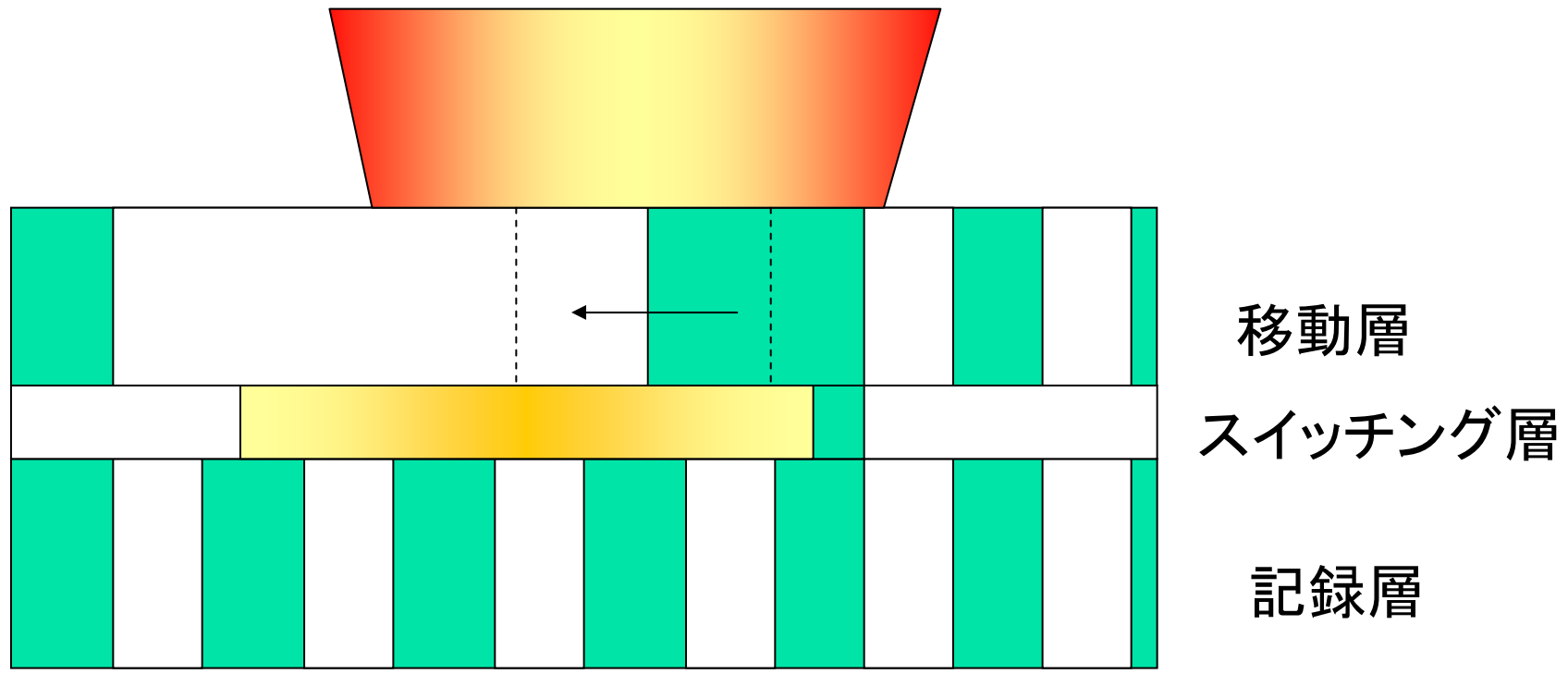
超高密度光ディスクへの展開: 磁気機能の利用 DWDD(磁壁移動検出)

- 室温状態では、「記録層」の記録マークは、中間の「スイッチング層」を介し、「移動層」に交換結合力で転写されている。
- 再生光スポットをディスクの記録トラックに照射することにより昇温し、中間の「スイッチング層」のキュリー温度以上の領域では磁化が消滅し、各層間に働いていた交換結合力が解消。
- 移動層に転写されていたマークを保持しておく力の一つである交換結合力が解消されることで、記録マークを形成する磁区の周りの磁壁が、磁壁のエネルギーが小さくなる高い温度領域に移動し、小さな記録マークが拡大される
- まるでゴムで引っばられるように、移動層に転写されている磁区の端(磁壁)が移動。磁壁移動検出方式という名称は、ここから発想されました。読み出しの時だけ、記録メディアの方が、記録層に記録された微小な記録マークを虫眼鏡で拡大するかのようふるまうので、レーザービームスポット径より高密度に記録されていても読み取ることが可能になるわけです。

超高密度光ディスクへの展開:磁気機能の利用

DWDD概念図

原理的には再生上の分解能の限界がない。



超高密度光ディスクへの展開:磁気機能の利用
DWDDディスク



超高密度光ディスクへの展開: 近接場

近接場記録

- 回折限界を超えた高密度化に欠かせないのが、近接場光学技術である。1991年、Betzigらは光ファイバーをテーパー状に細めたプローブから出る近接場光を用いて回折限界を超えた光磁気記録ができること、および、このプローブを用いて磁気光学効果による読み出しができることを明らかにし、将来の高密度記録方式として近接場光がにわかに注目を浴びることになった[1]。
- 日立中研のグループはこの方法が光磁気記録だけでなく光相変化記録にも利用できることを明らかにした[2]。しかし、このように光ファイバ・プローブを走査するやり方では、高速の転送レートを得ることができない。

[1] E. Betzig, J.K. Trautman, R. Wolfe, E.M. Gyorgy, P.L. Finn, M.H. Kryder and C.-H. Chang: Appl. Phys. Lett. **61** (1992) 1432

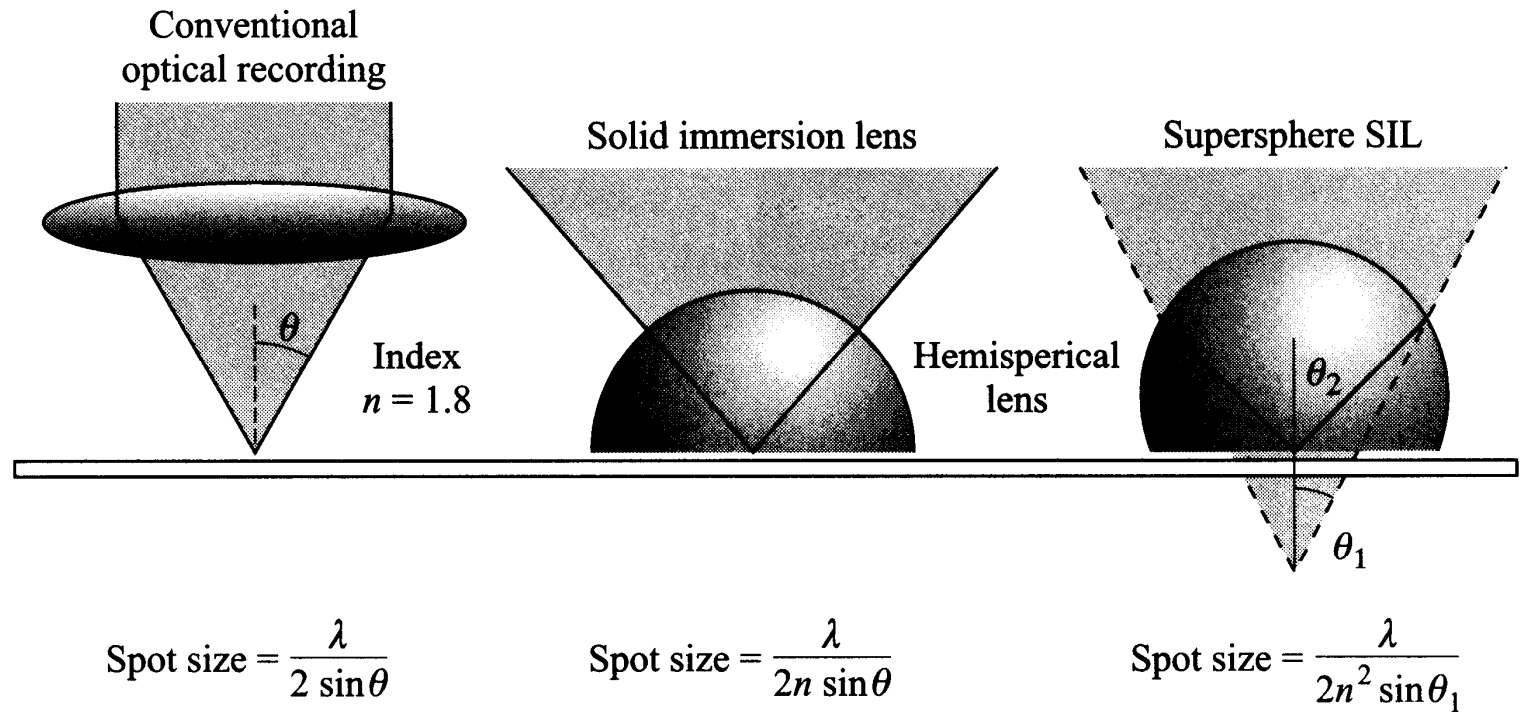
[2] S. Hosaka, T. Shintani, M. Miyamoto, A. Hirotsume, M. Terao, M. Yoshida, K. Fujita and S. Kammer: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 443.

超高密度光ディスクへの展開: 近接場

SIL (solid immersion lens)

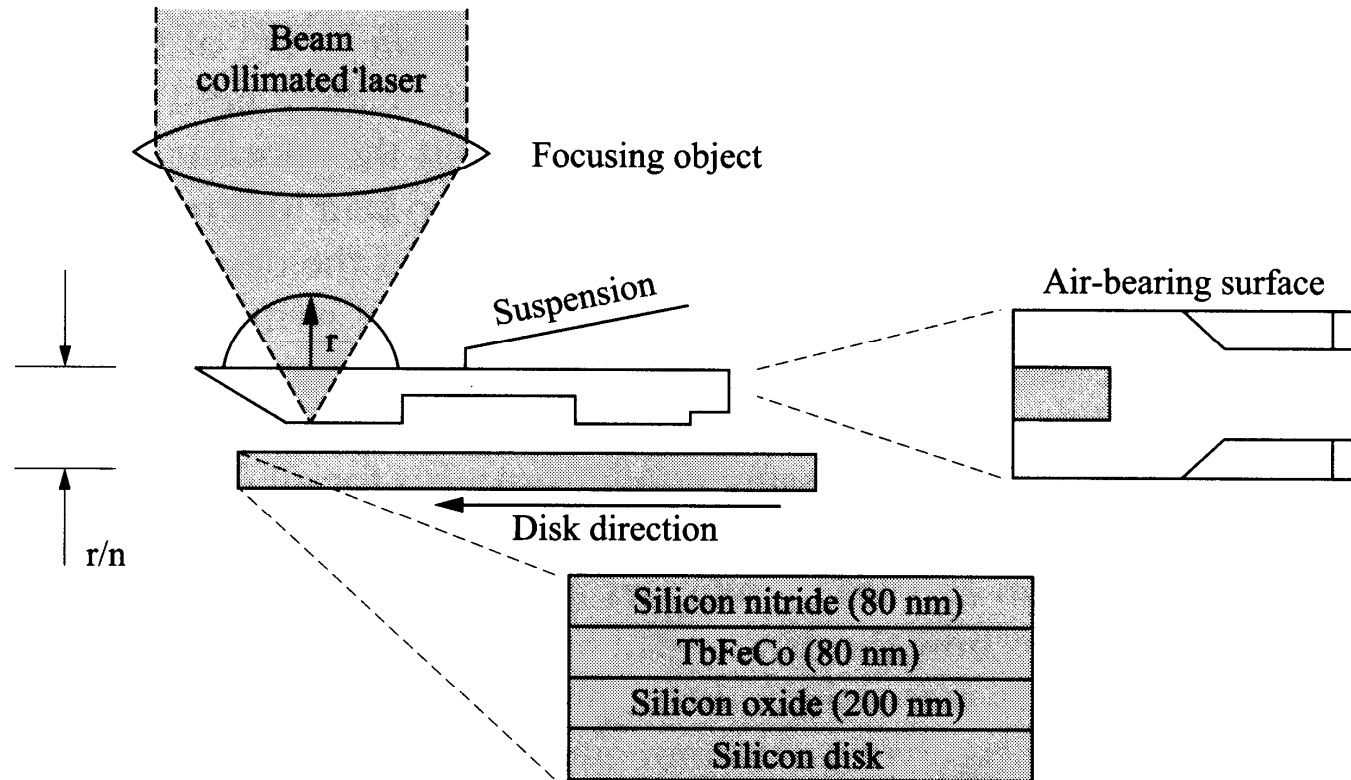
- 高速の転送レートを得ることができない問題を解決する方法として提案されたのが、SIL[1]というレンズを用いた光磁気記録である。
- Terrisらは波長780 nmのレーザー光を光源としSIL光学系を使ってTbFeCo膜に光磁気記録し、直径0.2 μm の磁区が形成されることをMFMにより確認した[2]。
- SILを磁気ディスク装置のヘッド・アセンブリ(いわゆるジンバル)に搭載して光磁気記録を行うアイデアが1994年Terrisらにより出された[3]。この方法により、面記録密度2.45 Gb/in²、データ転送速度3.3 Mbpsを達成している。
- 鈴木らはMFM(磁気力顕微鏡)を用いて、SIL記録されたマークを観測し2 Gmarks/in²を達成していると発表した[4]。
- [1] S.M. Mansfield and G. Kino: Appl. Phys. Lett. **57** (1990) 2615.
[2] B. D. Terris, H.J. Mamin and D. Rugar: Appl. Phys. Lett. **68** (1996) 141.
[3] B.D.Terris, H.J. Mamin, D. Rugar, W.R. Studenmund and G.S.Kino: Appl. Phys. Lett. **65** (1994) 388.
[4] P. Glijer, T. Suzuki, and B. Terris: J. Magn. Soc. Jpn. **20** Suppl.S1 (1996) 297.

超高密度光ディスクへの展開: 近接場 SIL (solid immersion lens)



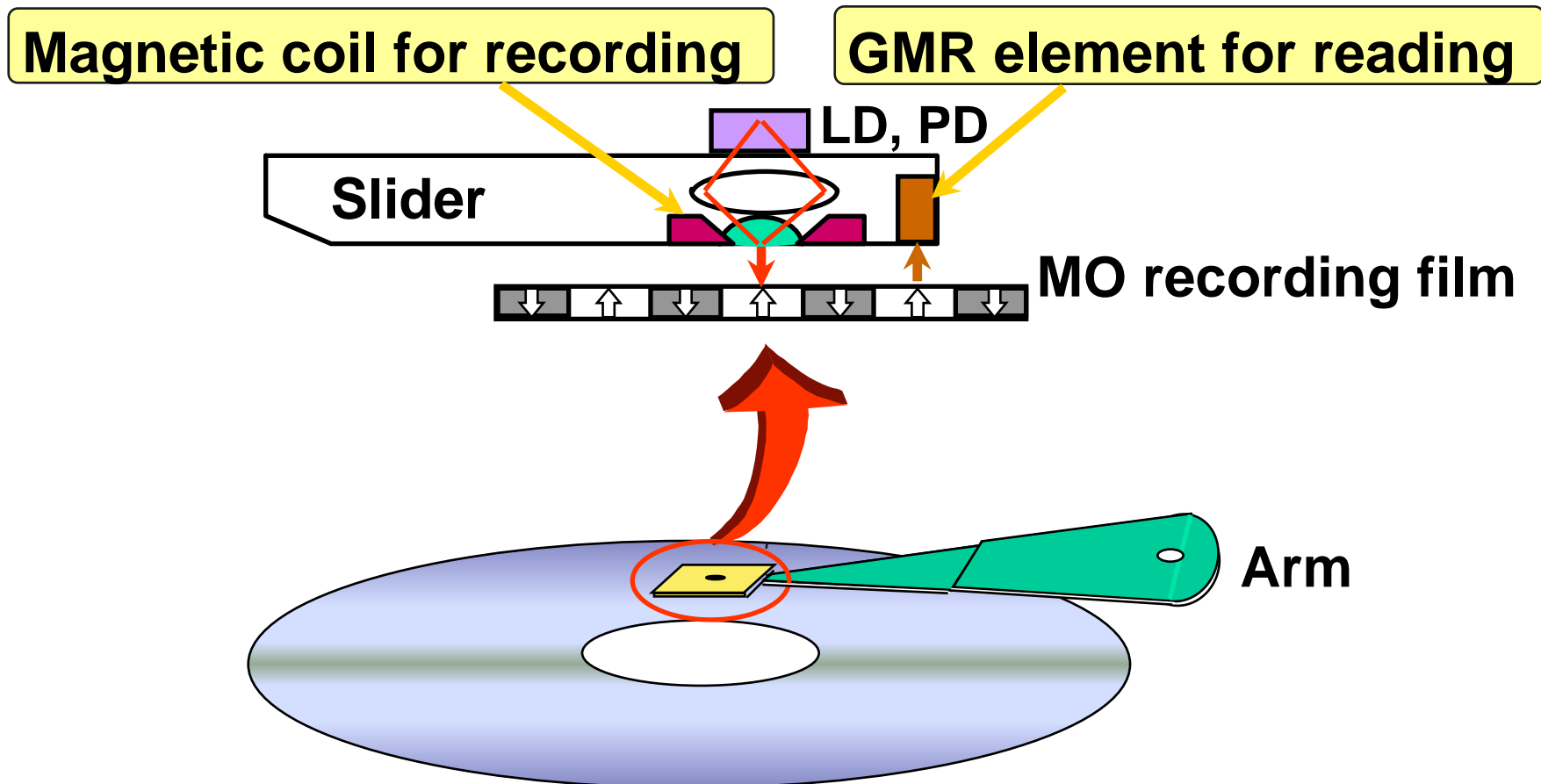
*R. Gambino and T. Suzuki: Magneto-Optical Recording
Materials (IEEE Press, 1999)*

超高密度光ディスクへの展開: 近接場 SILを用いた光記録



光記録と磁気記録の融合

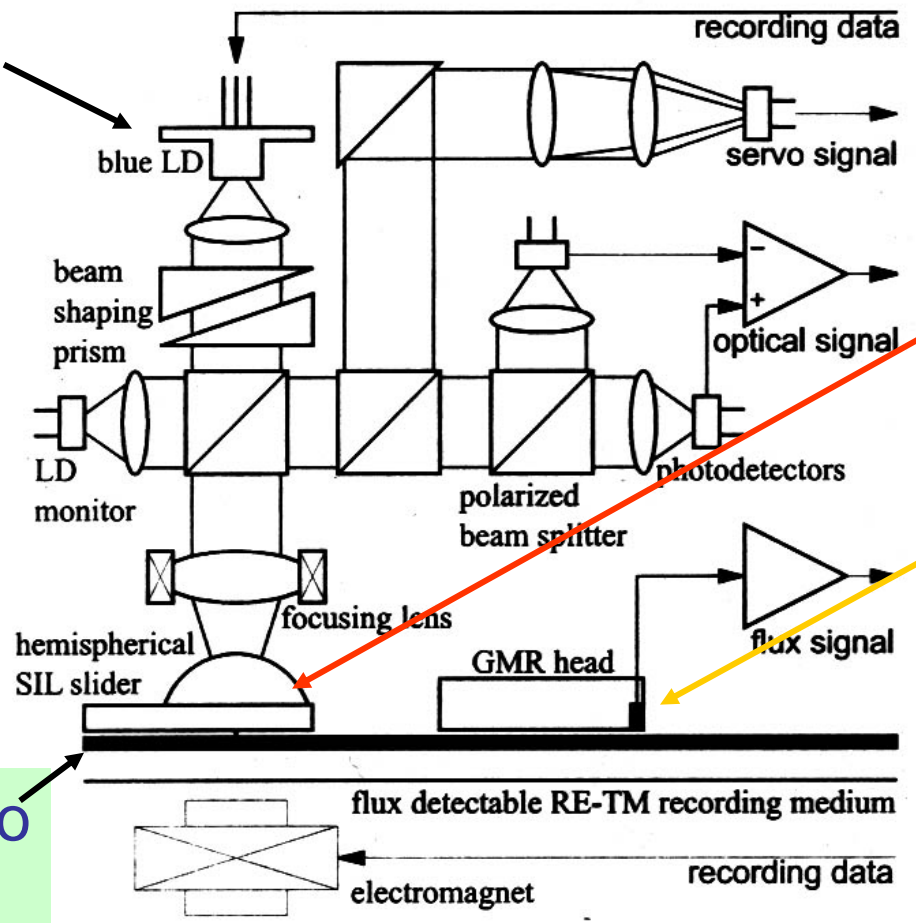
熱アシスト磁気記録 (熱磁気記録/磁束検出法)





光記録と磁気記録の融合 熱アシストハードディスク

青紫色
レーザー



記録用
光ヘッド
(SIL)

再生用
磁気ヘッド

TbFeCo
disk

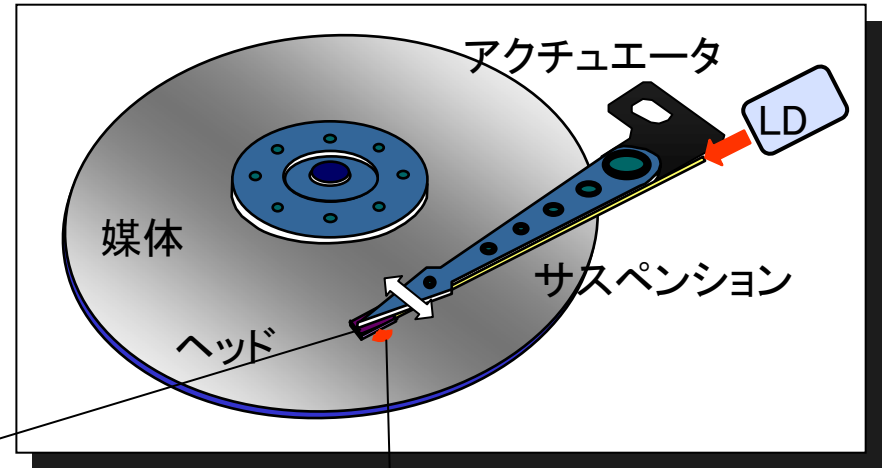
H. Saga et al. Digest MORIS/APDSC2000, TuE-05, p.92.



光記録と磁気記録の融合

ハイブリッドヘッド（記録・再生の最適な組合せ）

高効率記録 / 高S/N再生の各
ブレークスルー技術の両立により、
テラビット記録を実用化

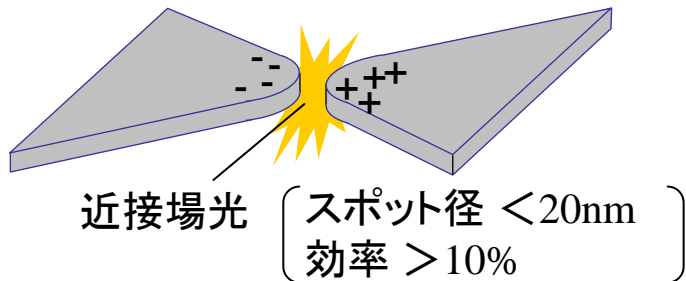


近接場光記録ヘッド

+

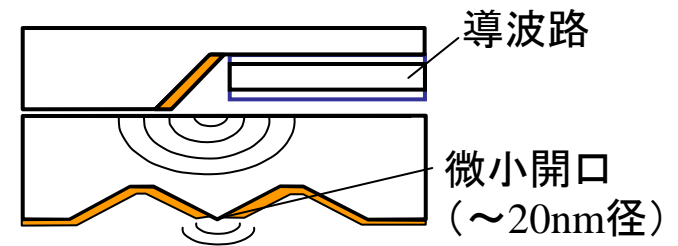
近接場光再生ヘッド

プレーナ・プラズモンヘッド（記録）



高効率 高分解能 高生産性

偏光制御ヘッドシステム（再生）



高C/N比 小型薄型化

革新的技術をめざせ:ホログラフィック・メモリ

ホログラフィとは

- ホログラフィというのは、光の波面のもつ位相の情報を干渉によって強度に変換して媒体に記録する技術である。このアイデアは Gabor が 1948 年に理論的に導いたが、光によるホログラフィが実現したのは、1960 年代にコヒーレントなレーザが開発されてからである。



Dennis Gabor

b. June 5, 1900, Budapest, Hungary

d. February 8, 1979, London, England



Dennis Gabor (left) receiving his Nobel prize in 1971

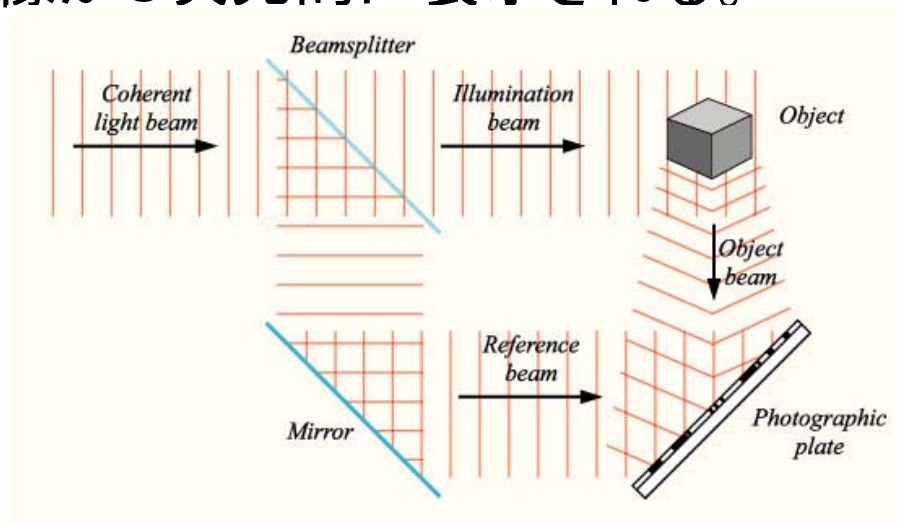
http://www.geocities.com/neveyaakov/electro_science/gabor.html



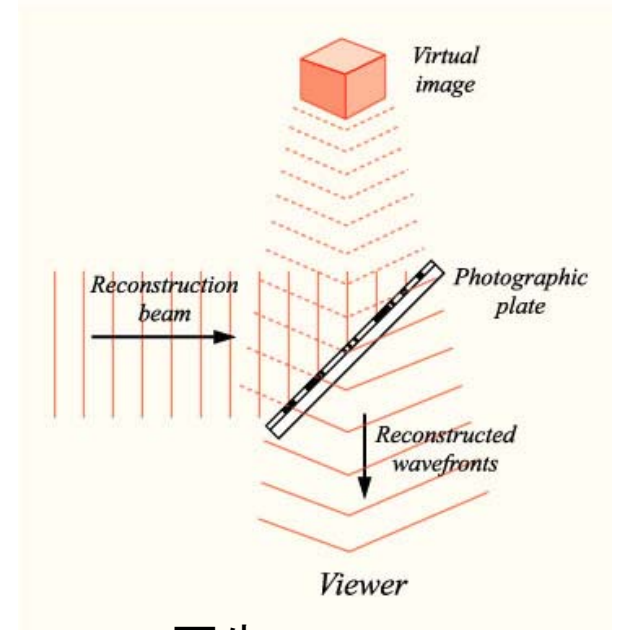
革新的技術をめざせ:ホログラフィック・メモリ

ホログラフィの原理

- 光の波面の位相情報を記録するために、物体からの光と参照光を重ね合わせてできる干渉縞を利用する。参照光は記録の対象となる物体を照らす光と同じ光源でなければならない。これは普通の写真フィルムに記録される。これらの干渉縞はフィルム上に回折格子を形成する。フィルム上の干渉縞に参照光を照らすと物体の虚像が3次元的に表示される。



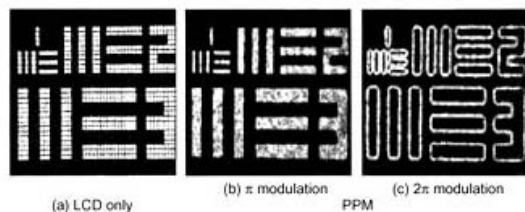
記録(ホログラムの作製)



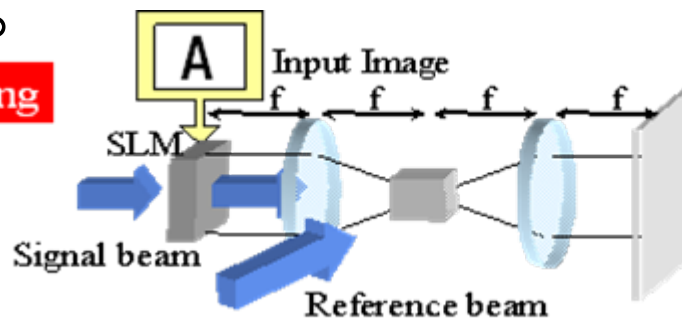
再生

ホログラフィックメモリ

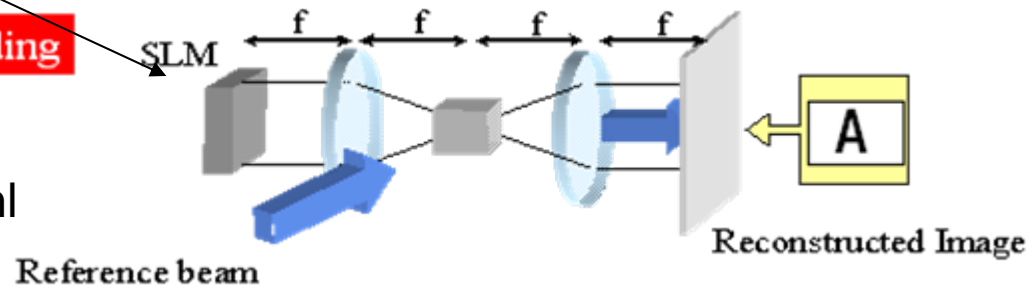
- ホログラフィを情報ストレージに用いるには、情報を空間的に表示するための「空間光変調器(SLM)」が必要である。
- SLMとしては、通常、液晶が使われるが、強誘電体の電気光学効果や磁性体の磁気光学効果を利用したSLMも開発されている。



Recording



Reading





革新的技術をめざせ:ホログラフィック・メモリ

日経エレクトロニクス2005年1月17日号

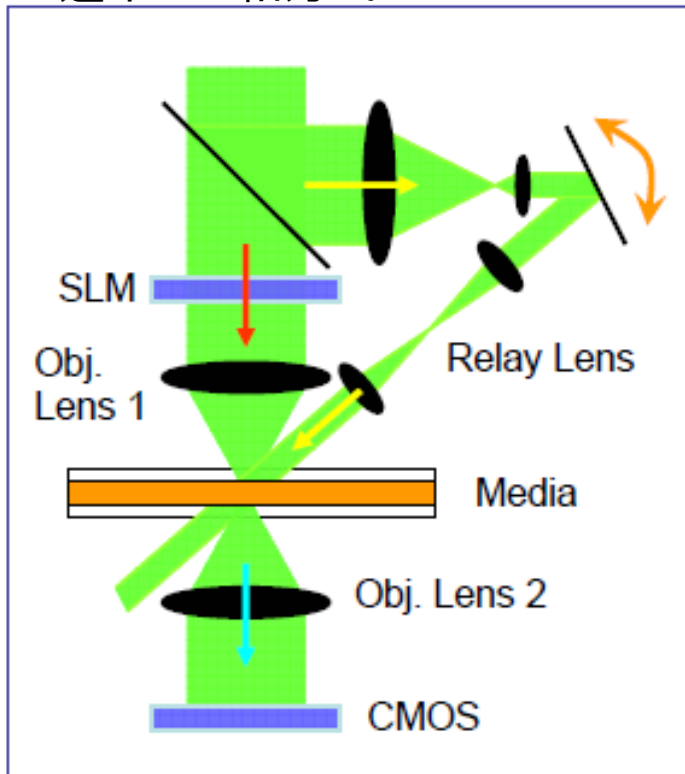
ホログラフィック媒体 2006年に200Gバイトを実現

- 「究極の光メモリ」といわれ、これまで何十年もの間、研究開発が進められてきたにもかかわらず、いまだに実用化されていないホログラフィック記録再生技術。しかし、ここにきてBlu-ray DiscやHD DVDなど次世代光ディスクの次を担う光ディスク技術として注目を集めている。火付け役の一角がオプトウエアである。
- 同社の提案する「コリニア・ホログラフィ方式」は1つの対物レンズを使って記録再生が可能で、光軸の異なる従来の「二光束干渉法」よりも光学系を簡素化できる。記録位置を調整するサーボ技術もCDやDVDの技術を流用可能である。2006年前半にまず業務用途での製品化を狙う同社は、必要な各種のマージンの確保にメドを付けた。

革新的技術をめざせ:ホログラフィック・メモリ

ホログラフィックメモリ

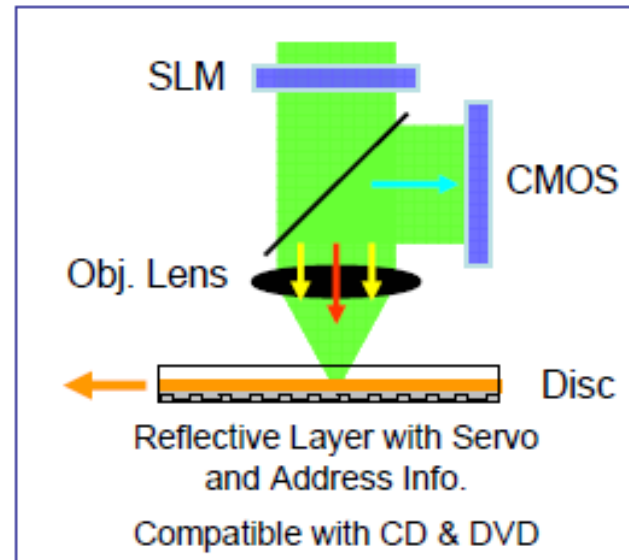
通常の2軸方式



2-Axis Holography

コリニア方式

- ← Information Beam
- ← Reference Beam
- ← Reconstruction Beam



Collinear Holography

革新的技術をめざせ:ホログラフィック・メモリ

偏光コリニアホログラフィー方式

- “偏光コリニアホログラフィー方式”は、ソフトウェア社が独自開発したもので、“参照光”と“信号光”を同軸上に配置し、1つの対物レンズでメディア上に照射する方式で、データを干渉縞による体積ホログラムとして記録する。

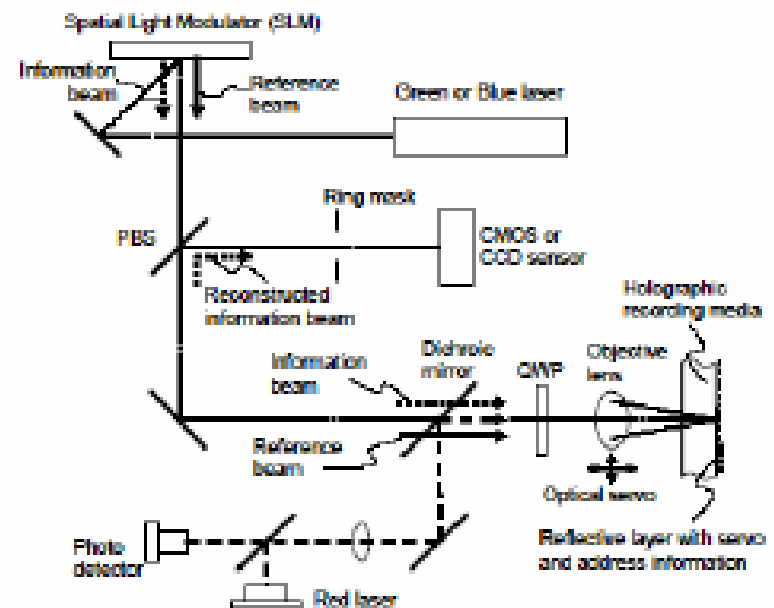


Fig.1 アドバンスド・コリニア・ホログラフィ光学系

革新的技術をめざせ:ホログラフィック・メモリ

ホログラフィック・ディスクとカード

- HVD(ホログラフィ多用途ディスク)
- HVC(ホログラフィ多用途カード)
- オプトウェア社はコリニア方式によるHVD,HVCを開発しており、HVCは2006年度中に発売するという。



おわりに

- ストレージの技術革新はめざましいものがある。
- それらは、最新の基礎科学研究によって支えられている
- 2010年頃には1Tbit/in²の面記録密度が達成されるであろう。そこには、磁気技術と光記録技術の融合が利用されるだろう。
- 全く違った概念の3Dストレージであるホログラフィック・メモリも実用段階に入りつつある。
- 遠からず身近な情報家電に搭載されるであろう。