

相変化の超解像技術と超解像近接場光ディスク

富永淳二

1980年代にスタートした光ディスク産業は現在、国内総生産高で約2兆円を生み出すビッグ・ビジネスとなった。1枚のディスクに蓄積される情報量も飛躍的に増大し、650 MBから現在では5 GB、さらに青色レーザーが搭載されれば20 GBを超える容量を利用できる。ハイビジョン放送を録画するにはだいたい25から30 GBあれば十分であるといわれているが、これまでの状況から推察しても、これで終わりとは考えられそうにない。他方、ハードディスクも急速に蓄積容量を上げ、光ディスクに猛追してきている。このように、情報蓄積メディアの高密度化は留まるところを知らない。しかしながら、どちらも最近その限界に近づいてきた。光ディスクにおいては回折限界が記録容量を決定する大きな要因となる。現在の光ディスク(DVD)の最小ピット長は $0.40\ \mu\text{m}$ であり、ブルーレーザー対応のDVDが近い将来商品化されても、最短ピット長は $0.20\ \mu\text{m}$ 止まりである。単純に考えればもっと短波長のレーザーを利用し、レンズ開口数(NA)を上げれば、さらなる高密度化は達成可能であるが、今のところ405 nmの半導体レーザーを凌ぐ、より短波長の固体レーザーは開発されておらず、また、吸収によってプラスチックあるいはガラスレンズが使用できなくなることから、現実的な選択ではない。

しかしながら、光学原理に端を発する光の回折現象を克服して、さらなる高密度記録に挑戦する研究・開発も長年にわたって行われてきている。たとえば、光磁気記録(magneto-optical recording: MO)においては、磁気超解像(magnetic super resolution: MSR)や磁気拡大再生(magnetic amplifying MO system: MAMMOS)、最近で

は磁壁移動検出(domain wall displacement detection: DWDD)が開発され、すでに商品化されている技術も存在する。しかし、これらは記録できる光ディスクではあるが、CDやDVDドライブとの互換性に欠ける。また、光ディスク市場は、書き換え型というより、むしろDVDやCDといったあらかじめピットがディスク全面に刻み込まれた光ディスクを望んでおり(書き換え型ディスク市場は全光ディスク生産額の10%に満たない)、われわれが $0.2\ \mu\text{m}$ 以下の微小ピットを刻み込んだ最新型の光ディスクを入手できたとしても、現在のところ安価に読み出せる魔法の技術が確立していない。ここで解説する光超解像法と呼ばれる技術は、こうした状況を克服するための一手法である。

1. 光超解像技術

光超解像法は、ピット間隔より小さなサイズのピンホールをピット上に配置し、集光レーザー・スポット内部に存在する複数の微小ピットの中から、1つのピットのみを反射光を拾い上げる方法である(図1)。ソニーの安田らは、この方法を初めて提案し、相変化薄膜(GeSbTe)をマスク層に用いて原理検証に成功した¹⁾。その後、有機色素膜を用いた実験、あるいはあらかじめピットを形成するのではなく、相変化型書き換え光ディスク内に新たに相変化マスク層を導入し、書き換え型の超解像実験が試みられた。安田らは、波長532 nmのSHGレーザーを用い、通常解像限界250 nmピット以下の200 nmにおいても50 dB程度の信号再生に成功した。この実験で特筆すべき点は、マスク層に用いる相変化膜の溶融状態と結晶状態の屈折率の差と、マスク層と反射膜層(Dy反射膜)間の誘電体層の膜厚を適当に選び、読み出しレーザー出力を上げることでマスク層を溶融し、溶融状態部分からのディスク反射率を

工業技術院産業技術融合領域研究所次世代光基盤研究グループ
(〒305-8562 つくば市東 1-1-4)
E-mail: tominaga@nair.go.jp

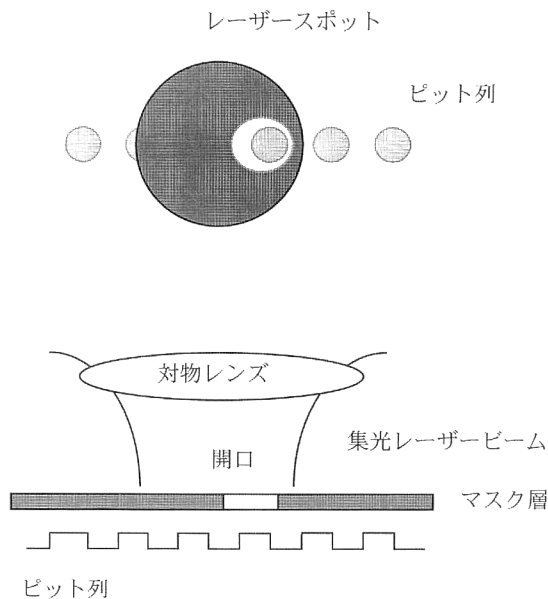


図1 光超解像法の原理。マスク層に形成された光学的な開口から、スポット内の1個のピットのみを読み出す。

ほとんど0%に抑えたことである(図2)。この結果に示すように、レーザースポット後方側に熱伝導の遅れによって発生する溶融領域が、スポット内部に存在する2つのピットの一方をマスクすることで、解像限界以下のマークを読み出すことができた。最近では、日本ビクターの上野らが、サーモクロミック有機膜をマスク層として利用し、記録膜にはAg-In-Sb-Te相変化記録膜を用いて、書き換え型の光超解像ディスクの発表を行っている²⁾。上野らの実験では、安田らが用いたレーザースポットの後方にマスクをかけるのに対して、後方が開口となるように設計されている。実験では635 nmのレーザーとNA 0.6を組み合わせ、理論解像度約250 nmに対して、120 nmまで解像度を上げることに成功した。また、ラディアル特性として、0.55 μmのland & groove基板を用いた実験で、クロストーク、クロスイレズともかなりの低減が可能であることを示している。さらに特筆すべき点は、高密度記録マークが超解像層の効果によって円形ではなく、磁界変調方式のMOにおいてみられるような三日月型をしていることである。

このように光超解像法は、ROM、RAMに限定されず、微小マークを読み出す手段として有効であるが、実用化の問題点として、再生マスク層の繰り返し安定性や再生層で発生する熱伝導による記録マークの読み出し消去問題などが複雑に絡み合い、なかなか実用化のめどが立っていない。

最近になって、新たな超解像の提案がTDKの菊川らによりなされた³⁾。根本原理は不明とされているが、従来光

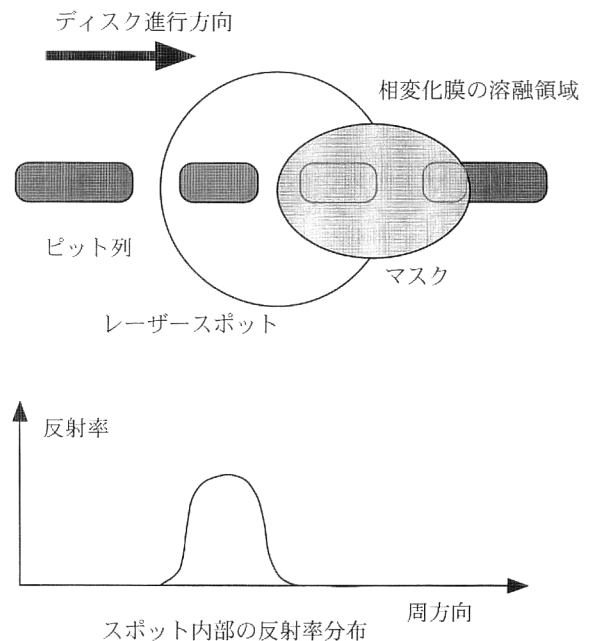


図2 安田らが行った相変化膜の溶融状態を利用してスポット後端部をマスクする、光超解像読み出し。

ディスクの反射層として広く利用されてきたAlなどの高反射率層をSiあるいはGe、Sb、Wなどの半導体などの材料に変更するだけで、マスク層を利用せずともかなり大きな超解像効果が現れることを見いだした。この結果は従来の超解像効果そのものの原理の再考を迫るものとして、今後注目しなければならない技術である。

光超解像法は上記のような研究がなされてきたわけであるが、あるサイズのレーザースポット内部に存在する微小なピット、あるいはマークのサイズが小さくなるにつれて、戻り光のコントラスト比は減少する。つまり、読み出しマーク・サイズが小さくなると信号強度は急速に減少していく。これまでの実験がそうであるように、現在のDVD光学系を用いた場合には、ほとんど100 nm手前で信号は検出できなくなる。したがって、何らかの手法で微小マーク領域の信号強度を増強できなければ、100 GBを超える超高密度光ディスクシステムを完成することは不可能である。これを打破する一手法として登場したのが、近接場光の利用である。

2. 近接場光と光記録

超解像近接場構造光ディスクについて述べる前に、近接場光と光記録の関係について少し述べておく。近接場光を用いた光記録は90年代前半から、いくつか基礎実験が行われるようになった。これまで提案されている近接場光記録方式の中で、代表的なものはソリッド・イマージョン・レンズ(solid immersion lens: SIL)を用いて実行NAを

1以上に上げる方式である⁴⁾。しかし、レンズに用いる材料の屈折率にNAは大きく依存するため、せいぜい実行NAが1.5~2.0止まりである。また、レンズ系のため、回折限界から逃れることができない。ファイバー・プローブ、あるいは平面開口による近接場記録も提案され、近接場光による解像度を向上できることが確認されているが、SILも含めて媒体とヘッド間的高速空間制御を避けて通れず、データ転送速度や光ディスクの最大の利点であるリムーバビリティを生かせない^{5,6)}。また、ピットがあらかじめ刻み込まれたROM媒体ではヘッドクラッシュを起こしかねず、不向きである。

このように、近接場光による超解像特性を生かし、高速転送レートを確保するためには、光超解像法と近接場超解像法を上手に組み合わせることが必要となる。これを実現したものが超解像近接場構造(スーパーレンズ)「super-resolution near-field structure: super-RENS」である⁷⁾。

3. 近接場超解像構造

3.1 透過型開口によるスーパーレンズ・ディスク

スーパーレンズの基礎となる技術は、安田らによる光超解像法にある。光ディスクによる光超解像法を一度でも試みた経験のある研究者ならすぐに気づくことであるが、多層膜内部の光干渉効果を利用して媒体を設計すると、マスク層と記録層、あるいは反射膜層との間に挿入される誘電体層の膜厚は、大体80nmから160nmぐらいとなる。この膜厚は、マスクによって隠される部分と開口を通して現れる微小マークの反射率差を最大にできる値であり、再生信号を高いSNRで得るには最適な構造である。これまで行われてきた光超解像実験は、こうしたファーフールドの光学原理に沿って行われてきた。一方、近接場光学の立場で考えれば、開口と記録膜層との間隔が狭いほど、その効果が大きくなるはずである。スーパーレンズの開発以前は、筆者を含め誰一人として、この実験を試みたことはなかった。1994~1996年当時、光ディスク開発に携わっていた研究者のほとんどが、近接場光記録に懐疑的であり、近接場プローブ記録以外に近接場光記録方式は存在しないと考えていた感がある。

ところが、改めて光超解像法を近接場光学の立場から再考すれば、この手法が近接場光で高速、しかも広面積にわたって記録・再生できる技術となりうることは明らかである。なぜなら、記録膜と開口との空間は誘電体で満たされており、開口が記録膜に接触することは起こり得ない。また、現行のDVD技術では12cm径の光ディスク上にスパッタリング法で、容易にしかも均一に中間層をナノメート

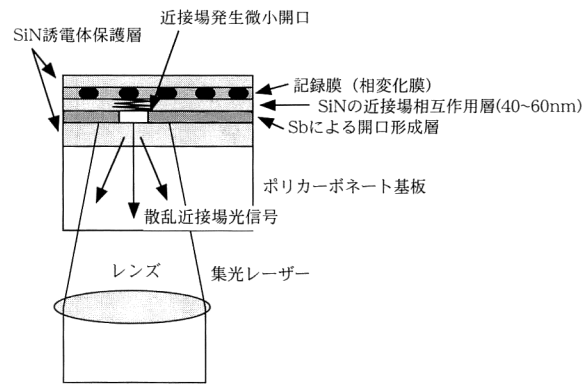


図3 近接場超解像構造(スーパーレンズ)のディスク構成。

ルオーダーの誤差内で成膜できる。光超解像法に近接場光記録を組み込み、微小マークからの信号をある程度の信号強度で取り出すために必要なのは、最適なマスク層と余分な戻り光を抑えてノイズを低減する工夫である。DVD-RAMなどで使用されている相変化膜は、一般にスパッタリング法で成膜されているが、成膜時はアモルファス状態となる。これは、ポリカーボネート・ディスク基板を用いるDVDでは、基板の軟化点が130℃近辺にあるために、加熱できないことに起因する。DVD-RAMなどでは、書き換え可能な媒体とするために、レーザーによって記録膜全体をいったん結晶化して出荷している。しかし、初期化過程は、相変化膜の結晶状態に非常に敏感で、結晶粒の大きさがノイズ・レベルが大きく異なる。また、書き換え回数にも大きな影響を与えかねない。しかし、筆者はAg-In-Sb-Te系材料の研究を通じて、Sbがある膜厚以上で、室温下において結晶状態を取りうることを学んでいた⁸⁾。さらに、反射膜からの戻り光が近接場信号を相対的に下げてしまうことを考慮して、あえて反射膜を削除することにした。最初のスーパーレンズはこうして完成した。構造を図3に示す。後でわかったことであるが、Sbの膜特性は、成膜時のアルゴンガス圧力に対する窒素分圧に非常に敏感で、わずかな量の不純ガスが混入してもアモルファス膜になってしまう。最近のSbを用いたスーパーレンズの特性を図4に示すが、波長635nm、NA0.6の光学系でも、60nm程度の信号を微かに検出できる。CNRは実用的には40dB以上が必要ではあるが、100nmのマーク長で25dBを超えている。

3.2 光散乱体を用いたスーパーレンズ

Sb薄膜を用いる透過型開口型スーパーレンズは、開口プローブを用いる近接場光特性と非常に一致した特性を示すことから、次にわれわれは、光散乱体をスーパーレンズに組み込むことを考えた。近接場顕微鏡において最近、AFMなどの短針プローブに外部からレーザーを当て、先

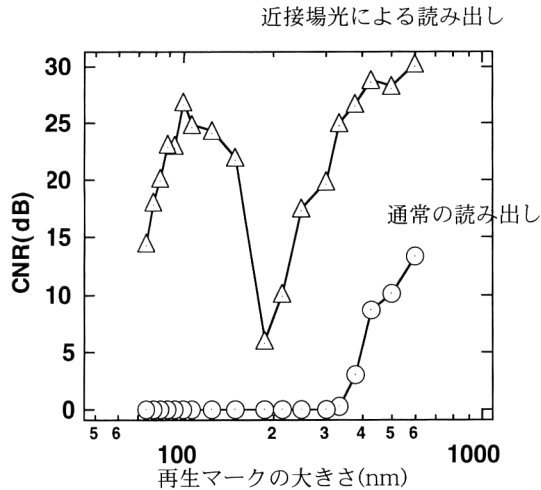


図4 アンチモン薄膜の光学非線形特性を用いた近接場光による読み出し. 100 nm マークでも 25 dB 程度の信号が読み出せる (レーザー波長: 635 nm, NA: 0.6 による実験).

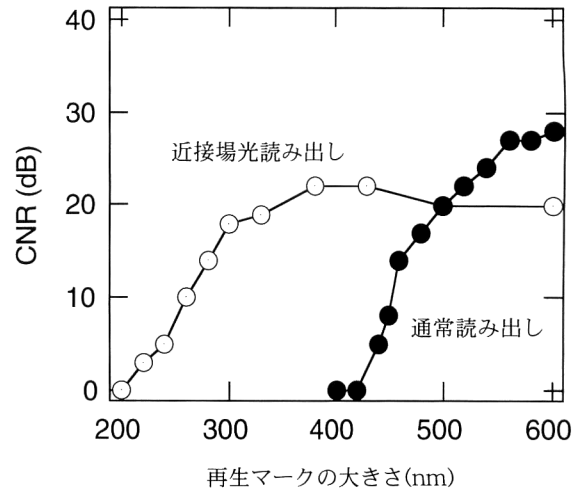


図6 光変調方式による MO ディスクの酸化銀薄膜による超解像効果 (レーザー波長: 780 nm, NA: 0.53, 読み出しレーザーパワーは 4.4 mW).

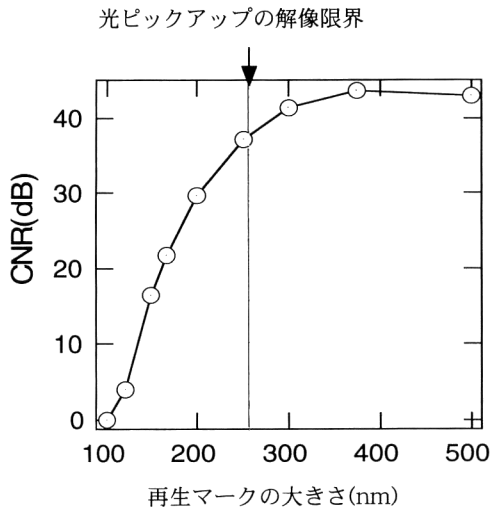


図5 酸化銀を用いた光散乱型スーパーレンズディスクからの信号特性 (レーザー波長, NA は図4 と同じ).

端部に表面プラズモンを励起し, これによって近接場光を発生させる試みがなされている⁹⁾. この方式の最大のメリットは開口を開ける必要がなく, また AFM などの原子レベルで尖ったプローブが利用できることから, 解像度を上げるには非常に好都合な方式である. 筆者らは, こうした光散乱体をスーパーレンズに組み込む方法を考案した. 表面プラズモンを励起するのは, 銀あるいは金などの貴金属がよいとされるが, これらは Sb のような大きな光学非線形効果を示さない. 筆者は 90 年代前半に, 酸化銀を用いた「ナノ・エクスプロージョン」と呼ばれる手法により, 無機材料による CD-R を研究した経緯から, 酸化銀の熱分解により銀粒子を発生できることを見いだしていた¹⁰⁾. 当時は, 酸化銀の分解圧力と発熱反応により, 基板表面をナノメートルサイズの爆発球によって, 熱変形させ, 基板上

にピットを形成することを試みていた. 通常, 解放系において酸化銀薄膜は, 160°C 前後で熱分解し, 銀と酸素に分離する. これは不可逆反応である. 無機型の CD-R もこの不可逆反応を利用したものである. しかし, 誘電体薄膜でサンドイッチされたような, 非解放系の化学反応の文献はどこにも見当たらない. スーパーレンズのような多層膜内でナノ・エクスプロージョンを発生する場合は, 高压反応となるため, 分解温度が上昇するとともに, 酸素に対して解放空間が存在しないことから, 可逆反応となることが化学平衡理論から明白である. つまり, 酸化銀薄膜を Sb 薄膜の代わりに利用すれば, スーパーレンズ内部に可逆的な光散乱体を形成できるはずである. また, 表面プラズモンの励起によって, 微小信号の強度をいっそう増幅できる可能性を含んでいる. 再生信号特性を図5に示すが, Sb を用いた透過型スーパーレンズより, 読み出し再生時のレーザーパワーが低く, また, ノイズレベルも低く安定なことから, 最近では光散乱型スーパーレンズの方に, 研究の重点が移っている¹¹⁾.

3.3 近接場光による光磁気信号の増強

光磁気膜による磁気超解像について少しばかり触れたが, 近接場光でも MO 膜上に記録された磁気記録マークを偏光差を利用して観察することができることが知られている. スーパーレンズが近接場光によって記録再生できるならば, スーパーレンズを用いても, 回折限界を超えた微小マークの読み出しが可能なのである. われわれは最近, 光変調方式の MO ディスク内に酸化銀薄膜をスーパーレンズ構造で配置し, 超解像特性の有無を確認したところ, 図6に示す通り, 再生パワーの増加とともに超解像再生が可能であることを確認した. この事実によって, スー

パーレンズは単にピット、あるいは屈折率差による反射率変化の検出ばかりでなく、偏光特性も検出可能であることがわかってきた。

4. スーパーレンズの今後

スーパーレンズは上述した通り、近接場顕微鏡が有する読み出し特性とほぼ同等の特性をもっている。しかしながら、その読み出し速度はm/sのオーダーで、近接場顕微鏡より100万倍高速で操作可能であり、また、操作領域もcmオーダーに及ぶ。この特性は、これまで微細領域に限定されてきた近接場光を、光記録を含めた幅広い応用に展開できる突破口となりうる。われわれは現在、生体試料観測のためのスーパーレンズ応用、ナノサイズの高速度加工等の検討も始めている。将来、近接場光を利用したデバイスが現れることを信じて、今後も研究活動を展開していく。

本解説の作成にあたって、融合研の阿刀田伸史・研究主幹、中野隆志・主任研究官、Dorothea Buechel研究員、またシャープ(株)基盤技術研究所の藤寛博士に感謝したい。また、スーパーレンズのMO応用では、金朱鎬博士の貴重なデータをお借りした。

文 献

- 1) Y. Kasami, K. Yasuda, M. Ono, A. Fukumoto and M. Kaneko: Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 423-428.
- 2) M. Hatakeyama, T. Ando, K. Tsujita, K. Oishi and I. Ueno: Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 752-755.
- 3) 菊川 隆, 加藤達也, 新開 浩, 宇都宮肇: 第47回応用物理学関係連合講演会予稿集 No.3 (2000) 28p-R-2.
- 4) I. Ichimura, S. Hayashi and G. S. Kino: Appl. Opt., **36** (1997) 4339-4348.
- 5) E. Betzig, J. K. Trautman, T. D. Harris, J. S. Weiner and R. L. Kostelak: Science, **251** (1991) 1468-1470.
- 6) F. Issiki, K. Ito, K. Etoh and S. Hosaka: Appl. Phys. Lett., **76** (2000) 804-806.
- 7) J. Tominaga, T. Nakano and N. Atoda: Appl. Phys. Lett., **73** (1998) 2078-2080.
- 8) J. Tominaga, T. Kikukawa, M. Takahashi, T. Kato and T. Aoi: Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) 3598-3601.
- 9) M. Yamaguchi, Y. Sasaki, H. Sasaki, T. Konada, Y. Horikawa, A. Ebina, T. Umezawa and T. Horiguchi: J. Microsc., **194** (1999) 552-557.
- 10) S. Haratani, J. Tominaga, H. Dohi and S. Takayama: J. Appl. Phys., **76** (1994) 1297-1300.
- 11) H. Fuji, J. Tominaga, L. Men, T. Nakano, H. Katayama and N. Atoda: Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 980-981.

(2000年6月8日受理)