

近接場光による超高密度光記録

渡 辺 修

Extremely High-Density Optical Recording Using the Optical Near Field

Osamu WATANABE

Extremely high-density optical recording over 1 Tbit/in² using the optical near field is reviewed from the viewpoint of future technology. We introduce the optical near-field recording demonstrated by a super resolution technology, an optical fiber probe and a planar aperture probe. The planar aperture probe could be one of the most promising optical heads. In addition to the device technology, we discuss organic materials for the optical near-field memory and describe the possibility of an azopolymer showing the deformation induced by the optical near field.

Key words: optical near field, high-density optical recording, optical fiber probe, planar aperture probe, azopolymer

テープ、フロッピー、ハードディスク、CD、DVD、光磁気記録 (MO)、半導体メモリー等、多くの記録媒体がこれまで開発されわれわれの生活を豊かにしてきた。情報技術の高度化に伴い、文字情報から音声情報さらには映像情報へと媒体に記録する情報も大容量化し、それに答える形で高密度化を目指して現在も技術開発は続いている。青紫色レーザーを利用した光ディスクの開発が昨今新聞を賑わしているが、デジタル放送時代を睨んで、20~100 GB 程度の情報記録が予測されるからである。今後も電子医療への応用、仮想空間でのデジタルコンテンツといった新しい情報の利用方法も期待され、さらに記録の大容量、高密度化への要請は続くものと思われる。

図1に、光産業技術振興協会等の資料[†]を参考にして作成した光記録の今後のトレンド予想図を示した。2010~2015年には1 Tbit/in²の記録密度が必要になると予想される。本報告では、1 Tbit/in²の記録密度を達成できる有力な手段のひとつとして近接場光記録に焦点を当て、情報記録方法の中での位置づけ、光ヘッドの開発等の現在まで

の研究状況と、さらに筆者らが開発中のアゾポリマーの紹介を含め記録材料の視点からの解説を行う。

1. 光記録の利点

民生用記録媒体として現在最も普及しているのはパソコンとともに発展したハードディスク、音楽用CDで広がった光ディスク、デジタルカメラとともに用途が広がった半導体メモリーであろう。大容量に保存しておくという点では、前者2つが現在のところ双璧である。ハードディスク、光(磁気)ディスクともにその特徴を把握しておくことは、将来の高密度化を考えるうえでも重要である。

ハードディスクは基本的に固定型の記録システムであり、記録再生装置と媒体部分が一体化したものである。一方、光ディスクは記録再生装置と媒体は別物で、媒体を移動させることができるリムーバブルな記録媒体であり、安定に保存できるといった特徴を有する。また、データの書き換え型、追記型、再生専用型といったように用途に応じた使い分けがなされているとともに、媒体の互換性を考え規

豊田中央研究所 (〒480-1192 愛知県長久手町) E-mail: e0909@mosk.tytlabs.co.jp

[†](財)光産業技術振興協会 HP 光テクノロジーロードマップ, <http://www.oitda.or.jp/index-html>

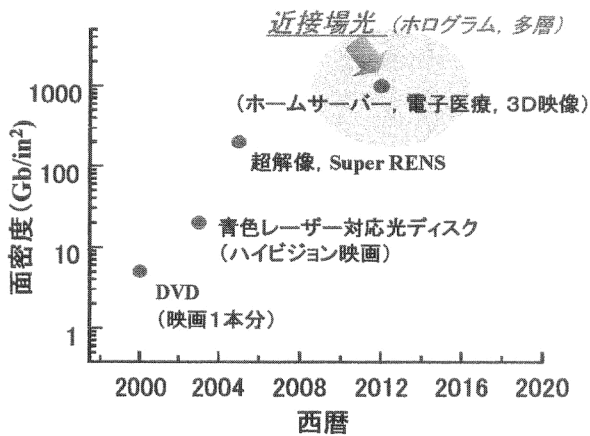


図1 光記録密度の高度化予想図。

格が統一されていることも大きな特徴である。リムーバブルリテーターの特徴と合わせて、読み取り専用型を用いた映画、プログラムなどのコンテンツ配布用、安価な追記型によるデータのバックアップ、ライブラリー化といった具合の使い分けに有利である。

記録速度の点では、現行ハードディスクのほうが高速に記録でき、データの移動、リアルタイム記録といった点で特徴を発揮できる。最近では、光ディスクもかなり高速化してきているが、まだ置き換わるにはいたっていない。また、記憶容量といった点では、ハードディスクは固定型であるので枚数を増やすことにより全容量を増加させることが可能となるが、光ディスクの場合、1枚の容量は規格で決まってしまう、容量以上の記録を考える場合は、ディスクの入れ換えが必要となる。一方、光記録では記録容量当たりの単価と比較すると、光ディスクのほうがハードディスクより安価にできる特徴がある。

以上のような特徴から、ハードディスクは一次的な大容量媒体としての使用が好ましく、光ディスクは二次的な記録媒体としてバックアップ情報、あるいはコンテンツの配布等への使用が好ましいと考えられる。一言でいえば、リムーバブルであるという特徴と読み取り専用型、追記型での書き換えができないという特徴を生かし、安価な記録媒体としてハードディスクと棲み分けがなされているといえよう。光記録の高密度化を考えるときに、この特徴をそのまま生かす方向で考えるのか、そうでないのかで、開発の方向も大きく変わってくると思われる。

2. 光記録の高密度化

これらの光記録の高密度化に対する現在までのアプロー

チは、光源の短波長化による記録ビットの微細化である。現在、次世代DVDとして青紫色レーザーを用いた光ディスクが開発されているが、さらに高密度化を考えると、紫外さらには真空紫外といった短波長化が必要となる。しかし、これらの波長域ではレンズ等も特殊な材料が、また安価なレーザー光源も必要となり、かなりの困難が予想される。そこで、現行の可視域でのレーザー光源を利用した高密度化が期待されている。同じ波長で高密度化を行おうとしても、光の回折限界があるため単純にレンズで絞るだけでは高密度化は限界にきている。しかし、近接場光を使うことによりこの問題を打破できる¹⁾。記録ビットの微細化が可能となるので、近年、近接場光の利用が着目されてきている。

限界を超える手段として、固体浸レンズ(SIL)を使った超解像²⁻⁴⁾、材料の非線形応答を利用したスーパーレンズ⁵⁾、磁区拡大再生に代表される磁気超解像等⁶⁾が提案されている。これらの技術は、近接場光の利用も含め現在の光ディスクの技術をうまく利用したもので、100 Gbit/in²クラスまでの記録が期待できる。しかし、さらに1 Tbit/in²の超高密度を考えると、ビットサイズは単純に考えても25 nm以下が必要であり、これらの技術だけでは困難である。この領域でのビット形成には微小開口を利用した近接場光記録が必要になると考えられる。

以後、微小開口を利用した近接場光記録を中心に高密度化を概観していく。なお、高密度化の方法として、ホログラム[†]、二光子吸収を利用した多層記録⁷⁻⁹⁾も有力な方法であり、それぞれ長所、課題を有している(詳細は誌面の都合で割愛)。近接場光記録が、これに対して優位性を確保できるかどうかは今後の鍵を握る。また、光記録の高密度化についてはよくまとめられた文献¹⁰⁻¹²⁾があるのでそちらも参考にさせていただきたい。

3. 微小開口による近接場光記録

3.1 ファイバークローブを用いた近接場光記録

近接場光顕微鏡(SNOM: scanning near-field optical microscope)のファイバークローブを用いた記録を簡単に図2に示した。ファイバークローブを記録層に近づけ、その先端にパルスの近接場光を発生させ記録を行い、その後ファイバークローブを走査して記録の読み出しを行う。

ファイバークローブによる近接場光で行った光記録の嚆矢として、Betzigらによる光磁気記録があげられる¹³⁾。Co/Pt多層膜を用いて60 nmの領域を再現性よく記録で

[†] オプトウェア社 HP, <http://www.optware.co.jp/ja/main.html>

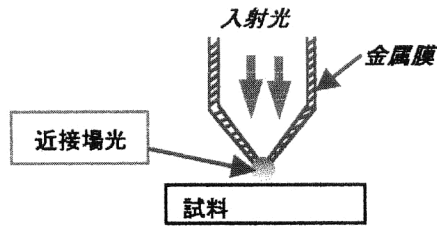


図2 光ファイバプローブによる記録。

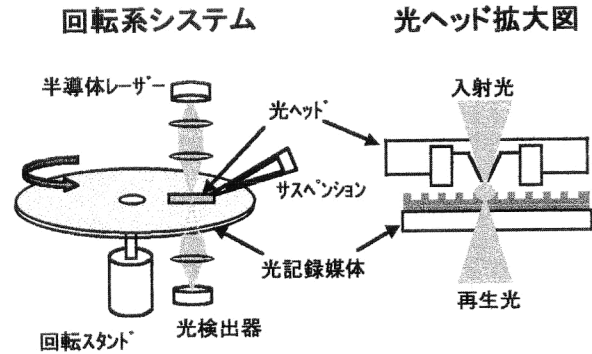


図3 平面型微小開口メモリのモデル構成。

き、また光学的に読み出すことにも成功した。国内でも、保坂らが、相変化材料である $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ を記録層として 80 nm 程度のビット記録を 500 μs の光照射で達成している¹⁴⁾。反射 SNOM 像の測定から、10 MHz 程度までの再生速度が可能なが推定されている。しかし、記録は近接場光を吸収した効果ではなく先端の金属部分の加熱によることが解析されており、光記録としての課題を示した。

ファイバプローブは光ファイバーを加熱延伸することにより先端を先鋭化する方法が当初利用されたが、光の利用効率が 10^{-4} ~ 10^{-5} と低かった。そこで、フッ酸によりエッチングする手法を応用して、先端部分にテーパをつけることにより利用効率を上げたプローブが提案され、SNOM を中心に応用が広まりつつある¹⁵⁾。このとき、先端の角度を制御することにより利用効率を大幅に増大させることができるようになった。微小開口の光学設計は今後も重要な役割を担うと考えられる。

一方、Martin らは、微小開口をもたない散乱型のプローブと光の集光スポットを組み合わせたシステムでの再生実験の結果から、理論的には 100 Tbit/in² で 100 Mbp の再生が可能であることを示した¹⁶⁾。このようにプローブを用いて微小な記録が実証され、 S/N の観点からも計算上は高速での記録、再生が可能であることが示されたが、実用上ファイバプローブ高速移動を想定した場合、プローブの破壊、移動速度の確保等のいくつかの困難が予想される。そこで、光記録の観点からは平面型のプローブの研究が最近盛んになってきている。

3.2 近接場光記録の課題

ここで、近接場光記録の実用化を目指した場合の克服すべき課題についてまとめる。第1は、近接場光記録では光源の部分、すなわち光ヘッド部分と記録層が相互作用を行うために必ず近づく必要があることである。光ヘッド部分と記録層の間の距離をどのように制御するのか、表面のごみをどのように排除あるいは無視できるようにするのかといった技術的問題に加えて、ハードディスクに近い形態でリムーバビリティが失われることにより光記録としての利便性が確保できるかといった問題である。

第2は、近接場光の強度が弱いことである。強度が弱いと十分に記録ができない、再生する場合に S/N が十分にとれないといった問題が発生する。前述したように、ファイバプローブで飛躍的に光の利用効率が增大しているが、1 Tbit/in² 以上 (ビットサイズ 25 nm 以下) では、さらに光量は低下するため改善が必要になると予測される。

第3は、記録容量が増えればそれにつれて記録・再生の速度も高速化を要求されることである。したがって、第2の問題とも関連するが、1bit あたりの記録・再生光量も同時に少なくなることが予想される。第4に、記録ビットが小さくなったとき、どのようにトラッキングをとるのか、光ヘッドと光源の位置合わせをどうするのかという問題である。第3の問題とあわせて、データの信頼性をどうやって確保するのかという問題ともつながってくる。

第1の問題は近接場光記録に本質的な問題で、ハードディスクと競合していくのか、他に特徴を生かしていくのか今後も応用先を睨んで考えていく必要がある。前述のスーパーレンズは高密度化に限界があるものの、近接場光を利用しながらリムーバビリティを確保するすぐれた提案である。今後、またこのような新しい提案が望まれるが、いずれにしろ、他の課題ともあわせて技術的な検討により他の手段に対する優位性を確保していくことが重要である。

3.3 平面型微小開口

3章1節で述べたように、平面型の微小開口は、ファイバプローブに比較して実用的な技術と思われる。以後、平面型の微小開口プローブのこれまでの研究を紹介し、課題解決への進捗状況を概観する。平面型微小開口を用いた光記録の概念図を図3に示した。ディスクを高速で回転させながら平面型微小開口を表面上で滑らせ (フライングヘッド)、記録・再生を行うシステムである。ヘッド-記録層間の距離は高速回転により空力学的に制御されるが、静電容量等で距離をモニターしながらの方法も少しずつ取り入れられている。平面型微小開口を中心とした技術解説は文

献¹⁷⁾にまとめられているので、そちらも参考にさせていただきたい。

平面型の微小開口を作製する手段として、集光イオンビームにより直接開口をあける方法¹⁸⁾、シリコン結晶の異方性エッチングを利用してピラミッド状の先端に開口部をあける方法が試みられている。Minhらは、後者の方法を応用し、1 Tbit/in²以上の近接場光記録に十分対応可能な最小10 nmの微小開口が作製できることを実証した¹⁹⁾。

さらに、これらの平面型プローブを用いて、実際にラインスペースを書き込んだディスクを回転させ、微小開口先端から散乱された信号の変化を読み取ることに多くの研究機関が成功しており、高速再生の可能性が膨らみつつある^{18,20,21)}。

八井らは、ガラス基板上のシリコン層を異方性エッチングによりピラミッド状に加工して、これを利用したスライダと一体になったプローブを作製した。このスライダを記録層上でプローブ-記録層間の距離が一定になるように滑空させ、記録ならびに再生を実証した。実際にディスクを回転させ、記録かつ再生を行った意義は大きい²²⁾。ただし、記録には200 mWのレーザーを用いており、光量が課題であることがわかる。

光源からのレーザー光を開口中心部にどのように合わせるかといった課題に対して、光ファイバプローブで光を導光し、集積型の平面プローブでの高速信号を再生する試みがなされている²³⁾。また、微小開口付きのソリッドイマージョンミラーを利用して、開口位置での光量を集光増加する方法も提案されている²⁴⁾。後藤は、垂直型共振型表面発光レーザー (VCSEL) の出射面に微小開口を形成させ光の利用効率を上げる提案をしている²⁵⁾。この微小開口をアレイ化し、かつヘッドを面内でわずかに傾けることにより、同時にアレイすべてから信号を取り出せることも提案し、高速な信号転送速度が得られるだけでなく同時にトラッキングへも応用できることを示した。実際にVCSELとの組み合わせを目指し微小開口アレイを作製する研究が活発化しており^{26,27)}、さらにSNOMのセンサーとしてVCSELに光検出器を組み合わせて、帰還回路により変調をかけ微弱光を読み取ることも提案されている²⁸⁾。また、記録ビットのトラッキングをとる課題に対してもSILとシリコンウェッジプローブの組み合わせでの可能性が提案されている²⁹⁾。

以上、近接場光記録の課題解決へ向けて、平面型プローブを基本として多くの研究グループが技術的に着実な成果を上げている。

4. 記録用材料

ヘッド側の研究が盛んに行われてきたが、記録層の材料はGe₂Sb₂Te₅に代表される相変化材料、TbFeCo系合金に代表される光磁気記録用材料が大部分であった。最近、酸化鉄を利用した追記型での近接場光記録³⁰⁾といった具合に新しい材料も試みられているが、全般にはまだ少ないようである。微弱光量での記録を考えると、高感度な材料の開発といった点でのアプローチも重要になってくると思われる。微弱な光でも反応するフォトンモードでの記録が可能であり、かつ分子設計により材料の多様性が期待できる有機材料もその候補として可能性がある³¹⁾と期待できる。最後に、有機材料を用いた近接場光記録への応用を目指した研究例を紹介する。

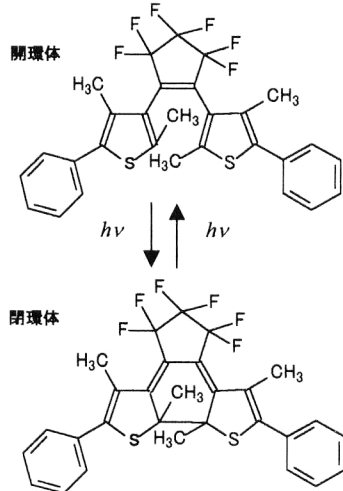
4.1 有機記録用材料

有機記録材料は、CD-Rに用いられているような光を吸収して無輻射による熱が発生し、色素のアブレーションを起こすようなものが実用化されている。今後もR-媒体用の材料を考えると、有機材料は有力な候補となりうる。有機材料のもうひとつの記録法として、光吸収により分子構造が可逆的に変化すること(光異性化)を利用したフォトンモード記録があげられる。構造変化により光学特性が変化することを利用するもので、照射により構造変化を起こす一群の材料をフォトクロミック材料とよぶ。代表的な化合物として、図4にジアリールエテンとアゾベンゼンを示した。これら化合物は光異性化だけでなく他にも面白い特徴があり、近接場光記録への応用だけでなく、ホログラム記録、多層記録への多様な応用もできる。

ジアリールエテンは入江らにより開発された³¹⁾フォトクロミック材料で、開環体と閉環体(図4)で吸収スペクトルが大きく異なり、またそれまでの材料では達成できなかった繰り返し特性にすぐれる材料である。実用的観点から重要な特性をもち、最も活発に研究が行われているフォトクロミック材料のひとつである³²⁾。辻岡らは、この材料をマスク層に用いて超解像により近接光記録への応用を示した³³⁾。

フォトンモード記録ではフォトン1つにより1つの分子が励起される反応であるので、低エネルギーでの記録が可能である一方で、記録層を再生光が通過する間ほんのわずかであっても徐々に記録層が反応し、記録が破壊されてしまう問題が生じる。すなわち、非破壊再生が大きな課題となる。十分弱いパワーで再生したり、別の反応プロセスを導入して閾値特性をもたせるなど、これを回避する手段もいくつか提案されている。光異性化反応に伴うイオン化ポテンシャルの変化による光電流効率の変化で再生する

ジアリールエテン



アゾベンゼン

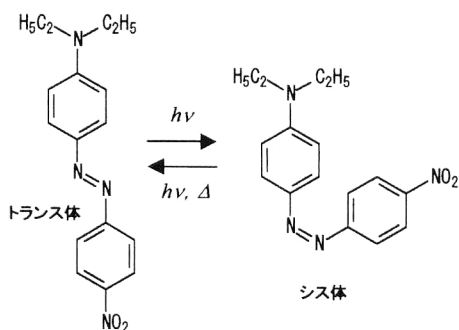


図4 代表的なフォトクロミック材料。

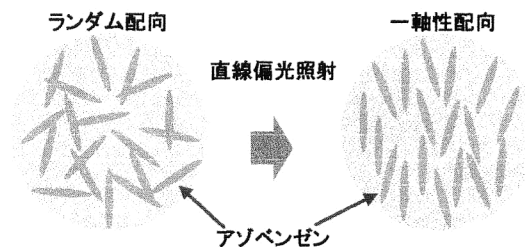
方法が提案され、近接場光記録への応用の可能性が示された³⁴⁾。

4.2 アゾポリマーの利用

一方、ポリマー系記録材料として多くの研究機関が研究しているのが、アゾベンゼン誘導体（アゾ色素）をポリマーに導入したいわゆるアゾポリマーである³⁵⁾。アゾ色素は光照射によりトランス-シス異性化反応を起こし（図4）、比較的安定なシス状態が可能であれば、その2つの状態間でのフォトクロミック材料としても扱われる。アゾベンゼン誘導体は合成が比較的容易で多様な構造が可能であり、さらに共重合等によって主鎖骨格を組み合わせることも可能で、多様な特性が期待できる。アゾポリマーに液晶性分子（メソゲン）を導入、あるいはアゾベンゼン誘導体そのものがメソゲンとなる材料、いわゆる液晶アゾポリマーの研究がとりわけ盛んである³⁶⁾。液晶性を導入することにより、アゾ色素の配向変化が液晶相全体の変化を誘起するので、より大きな光学的特性の変化の誘起が可能となる。

アゾポリマーで特徴ある光応答特性として、偏光照射に

光誘起配向



表面レリーフグレーティング形成

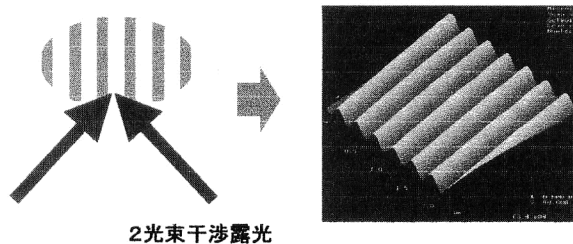


図5 アゾポリマーの特徴ある性質。

よってトランス状態の分子が照射方向に直交する方向に配向する光誘起配向（図5）がある。アゾ色素の吸収異方性による選択的吸収と、熱的にシスからトランスへ戻りやすいことによるアゾ色素の分布の再配置によって誘起される。さらに、カナダのグループが見いだした³⁷⁾ 光照射部分と未照射部分との間でアゾポリマー自身が変形を起こす現象、具体的には二光束干渉露光による表面レリーフグレーティングの形成（図5）もホログラム応用等への興味深い現象である。近年、研究が活発化してきている³⁸⁾。変形の生じる力についてはいくつかメカニズムが提案されている段階であるが、光照射中に前述のトランス-シス光異性化の繰り返し反応によりポリマーが可塑化されることにより引き起こされると考えられる。

筆者らは、近接場光記録へこのアゾポリマーを応用することを試みた。最初に微小化が実際に可能かどうかについての検証を行った。小さな、特に50 nm以下の近接場を再現性よく作り出すことは現状では困難であり、筆者らは微小球を用いてこれを近接場の光源として利用することにより光記録実験を試みた。図6(上)に示したように、フィルム化したアゾポリマーの上に微小球を展開する。次に、光照射を行ってから微小球を取り除き、その表面を原始間力顕微鏡（AFM）で観察した。図6(下)は100 nmと19 nmの微小球を使ったときの電顕像とAFM像である。100 nmのときは比較的観測も行いやすく、微小球の大きさに応じて凹みができているのがわかる。さらに、19 nmでも微小球サイズに応じた凹み構造ができているのがわかる。アゾ

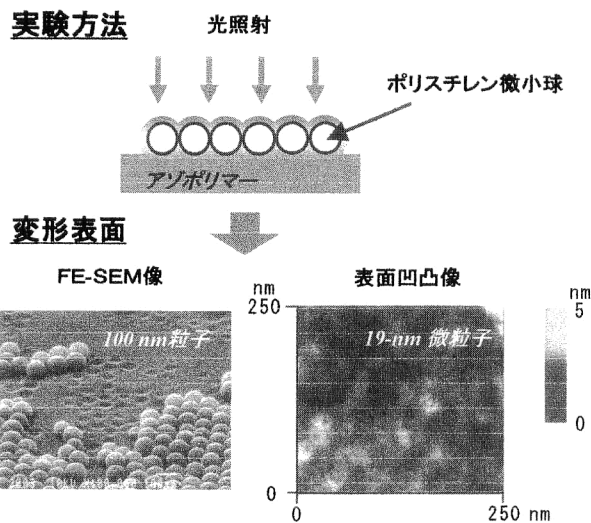


図6 アゾポリマーの微小球による光変形.

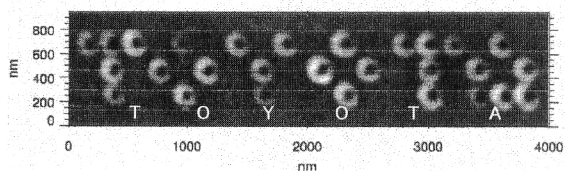


図7 アゾポリマーのファイバープローブによる高速記録.

ポリマーを用いても、十分に小さいマークサイズ (25 nm 以下) の変形を光により誘起することができることが示された³⁹⁻⁴¹⁾.

次に、高速に記録できるかどうかの検討を SNOM でのファイバープローブを利用して行った。図2に示したように、プローブをアゾポリマーの表面に近づけていき、数ナノメートルに近づいたところで固定し、パルス光を照射して AFM で表面形状を観察した。図7は、約 100 ns のパルスでマークを順番に書き込んでいった後の表面の凹凸像である。再現性よく記録ができていることがわかる。ただし、この場合はプローブ先端での光パワーはかなり高くなっていると推定され、当然表面の温度も上昇していると推定される。したがって、単なるフォトンモードというより、ヒートモードとのハイブリッド効果による変形ということが可能。実際、従来のヒートモードだけに比べるとかなり低パワーで記録ができている。以上、アゾポリマーの変形でも高速に記録ができることが実証された⁴²⁾。

得られた変形構造を近接場光顕微鏡の反射集光系を用いて観察した。図8はその結果である。表面凹凸に沿った形で光学像も観測されている。凹みはある程度以上 (10 nm 以上) 深くないと、光学像はうまく観測できなかつた。エッジ効果による反射光量の増加といった問題もあり、純粋

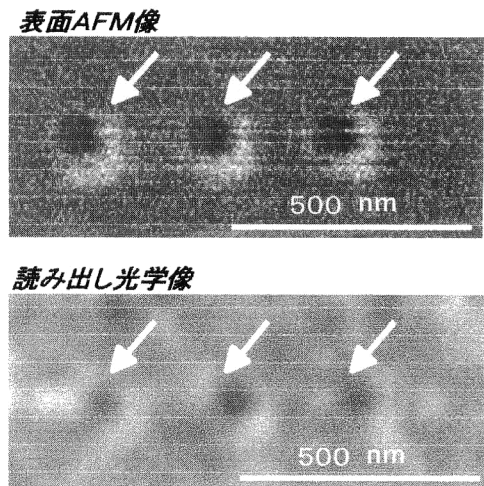


図8 マークの AFM 像と SNOM 像.

に光学再生とはいえないが、マークを光で検出できることが示された。

以上、アゾポリマーの近接場光記録への可能性に対する筆者らの検討結果を述べた。まだ実用的には不十分であるが、この光変形の特性を生かした近接場光記録への応用を期待したい。

近接場光記録に関して、筆者の知る限り現状を概観した。1 Tbit/in² 以上の記録を目指した場合、ホログラム、多層記録といったライバルはあるものの、現在の DVD、ハードディスクの技術を援用することが可能で、リムーバビリティの問題等もあるが、周辺技術の成熟により応用が現実化する可能性が高い技術と考えている。特に日本での研究活動は活発で、今後成果を積み重ねることにより実用化が実現することを期待したい。

文 献

- 1) M. Ohtsu and H. Hori: *Near-Field Nano-Optics* (Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999).
- 2) S. M. Mansfield and G. S. Kino: "Solid immersion microscope," *Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990) 2615-2616.
- 3) B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar, W. R. Studenmund and G. S. Kino: "Near-field optical data storage using a solid immersion lens," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 141-143.
- 4) I. Ichimura, K. Kishino, K. Osato, K. Yamamoto, Y. Kuroda and K. Saito: "Near-field phase-change optical recording of 1.36 numerical aperture," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 962-967.
- 5) J. Tominaga, T. Nakano and N. Atoda: "An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film," *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 2078-2080.
- 6) 伊藤彰義: "100 Gbits/in² を越える超高密度光磁気記録への挑戦", *オプトロニクス*, **19** (2000) 126-134.
- 7) S. Kawata and Y. Kawata: "Three-dimensional optical data

- storage using photochromic materials," *Chem. Rev.*, **100** (2000) 1777-1788.
- 8) 川田善正: "フェムト秒レーザーを用いた3次元光メモリー", *オプトロニクス*, **20** (2001) 138-142.
 - 9) W. Denk, J. H. Stricker and W. W. Webb: "2-Photon laser scanning fluorescence microscopy," *Science*, **248** (1990) 73-76.
 - 10) 後藤顕也: "光メモリーの発展と将来展望", *応用物理*, **68** (1999) 1171-1177.
 - 11) 河田 聡編著: "ここまでの光記録技術 (工業調査会, 2001).
 - 12) (財)光産業技術振興協会: "光技術動向調査報告書 (2001).
 - 13) E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe, E. M. Gyogy, P. L. Finn, M. H. Kryder and C. -H. Chang: "Near-field magneto-optics and high density data storage," *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 142-144.
 - 14) S. Hosaka, T. Shintani, M. Miyamoto, A. Kikukawa, A. Hirotsune, M. Terao, M. Yoshida, K. Fujita and S. Kämmer: "Phase change recording using a scanning near-field optical microscope," *J. Appl. Phys.*, **79** (1996) 8082-8086.
 - 15) T. Saiki, S. Mononobe and M. Ohtsu: "Tailoring a high-transmission fiber probe for photon scanning tunneling microscope," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 2612-2614.
 - 16) Y. Martin, S. Rishton and H. K. Wickramasinghe: "Optical data storage read out at 256 Gbits/in²," *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 1-3.
 - 17) 高橋淳一: "超高密度近接場光メモリにおける光ピックアップ・スライダ", *光技術コンタクト*, **38** (2000) 663-675.
 - 18) H. Yoshikawa, Y. Andoh, M. Yamamoto, K. Fukuzawa, T. Tamamura and T. Ohkubo: "7.5-MHz data transfer rate with a planar aperture mounted upon a near-field optical slider," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 67-69.
 - 19) P. N. Minh, T. Ono, S. Tanaka, K. Goto and M. Esashi: "Near-field recording with high optical throughput aperture array," *Sens. Actuators A*, **95** (2002) 168-174.
 - 20) M. B. Lee, M. Kourogi, T. Yatsui, K. Tsutsui, N. Atoda and M. Ohtsu: "Silicon planar-apertured probe array for high-density near-field optical storage," *Appl. Opt.*, **38** (1999) 3566-3571.
 - 21) F. Issiki, K. Ito, K. Etoh and S. Hosaka: "1.5 Mbit/s direct readout of line-and-space patterns using a scanning near-field optical microscopy probe slider with air-bearing control," *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000) 804-806.
 - 22) T. Yatsui, M. Kourogi, K. Tsutsui, M. Ohtsu and J. Takahashi: "High-density-speed optical near-field recording-reading with a pyramidal silicon probe on a contact slider," *Opt. Lett.*, **25** (2000) 1279-1281.
 - 23) 加藤健二, 市原 進, 大海 学, 前田英孝, 新輪 隆, 中島邦雄, 大久保俊文, 板生 清: "光ファイバを用いて水平導光した小型近視野光ヘッドモジュールによる高速信号再生", 第49回応用物理学関係連合講演会予稿集, 28p-R-12 (2002) p. 1014.
 - 24) K. Ueyanagi and T. Tomono: "Proposal of a near-field optical head using a new solid immersion mirror," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 888-891.
 - 25) K. Goto: "Proposal of ultrahigh density optical disk system using a vertical cavity surface emitting laser array," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 2274-2278.
 - 26) Y. -J. Kim, K. Kurihara, K. Suzuki, M. Nomura, S. Mitsugi, M. Chiba and K. Goto: "Fabrication of micro-pyramidal probe array with aperture for near-field optical memory application," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 1538-1541.
 - 27) P. N. Minh, T. Ono, S. Tanaka, K. Goto and M. Esashi: "Near-field recording with high optical throughput aperture array," *Sens. Actuators A*, **95** (2002) 168-174.
 - 28) C. Gorecki, S. Khalfallah, H. Kawakatsu and Y. Arakawa: "New SNOM sensor using optical feedback in a VCSEL-based compound-cavity," *Sens. Actuators A*, **87** (2001) 113-123.
 - 29) 逸見一隆, 八井 崇, 興梠元伸, 高橋淳一, 大津元一: "超高密度・超高速近接場光記録再生用シリコンウェッジプローブの開発", 第49回応用物理学関係連合講演会予稿集, 28p-R-13 (2002) p. 1015.
 - 30) H. Yoshikawa, Y. Andoh, C. Baubet, A. Furuya, T. Tanabe and M. Yamamoto: "Near-field signal detection using sub-wavelength sized planar aperture slider on oxide ferrite media," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) 1827-1830.
 - 31) M. Irie and M. Mohri: "Thermally irreversible photochromic systems-Reversible photocyclization of diarylethene derivatives," *J. Org. Chem.*, **53** (1988) 803-808.
 - 32) M. Irie: "Diarylethenes for memories and switches," *Chem. Rev.*, **100** (2000) 1685-1716.
 - 33) T. Tsujioka, M. Kume, Y. Horikawa and A. Ishikawa: "Super-resolution disk with a photochromic mask layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 526-529.
 - 34) T. Tsujioka, Y. Hamada, K. Shibata, A. Taniguchi and T. Fuyuki: "Nondestructive readout of photochromic optical memory using photocurrent detection," *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2001) 2282-2284.
 - 35) J. A. Delaire and K. Nakatani: "Linear and nonlinear optical properties of photochromic molecules and materials," *Chem. Rev.*, **100** (2000) 1817-1845.
 - 36) T. Ikeda and A. Kanazawa: "Photochemical modulation of alignment in liquid crystals," *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **73** (2000) 1715-1733.
 - 37) E. Batalla, A. L. Natansohn and P. L. Rochon: "Optically induced surface gratings on azoaromatic polymer films," *Appl. Phys. Lett.*, **66** (1995) 136-138.
 - 38) 福田隆史: "光による表面レリーフ形成", *O plus E*, **24** (2002) 287-293.
 - 39) Y. Kawata, C. Egami, O. Nakamura, O. Sugihara, N. Okamoto, M. Tsuchimori and O. Watanabe: "Non-optically probing near-field microscopy," *Opt. Commun.*, **161** (1999) 6-12.
 - 40) O. Watanabe, T. Ikawa, M. Hasegawa, M. Tsuchimori, Y. Kawata, C. Egami, O. Sugihara and N. Okamoto: "Transcription of near-field induced by photo-irradiation on a film of azo-containing urethane-urea copolymer," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **345** (2000) 305-310.
 - 41) T. Ikawa, T. Mitsuoka, M. Hasegawa, M. Tsuchimori, O. Watanabe, Y. Kawata, C. Egami, O. Sugihara and N. Okamoto: "Optical near field induced change in viscoelasticity on an azobenzene-containing polymer surface," *J. Phys. Chem. B*, **104** (2000) 9055-9058.
 - 42) T. Ikawa, C. -D. Keum, H. Takagi, M. Tsuchimori, O. Watanabe, W. Mori, M. Harada, M. Tawata and H. Shimoyama: "Near field optical recording on azopolymer using a sub-microsecond pulse," *IEICE Trans.C*, **E85-C** (2002) 1287-1290.

(2002年6月6日受理)