

高密度光記録

後藤 顕也

Integrated Microoptics Device for Optical Memory of Ultra High Density

Kenya GOTO

Various kinds of methods for higher density optical disk memory are described. A new optical disk system for very high density and very high data transfer rate using near-field optics is also mentioned.

Key words: optical disk, near-field optics, integrated optics, vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), super parallel optical head

磁気ハードディスクドライブ (HDD) のメモリー容量が年々倍増している。家庭用パソコンにも 30~40 ギガバイト (giga byte: 以後 GB で表す) 以上の容量をもつ HDD が内蔵されている。この調子でゆけば数年後には、パソコン搭載 HDD の容量が 100 GB に達するであろう。

主メモリーである磁気ディスクドライブに対して、光ディスクドライブ (ODD) は CD/DVD-R (compact disc/digital versatile disk-recording) 用の記録用と再生用に最近のパソコンには必ず搭載されている。記録容量が大きいために、最近では次第に CD 専用機から CD も DVD も再生したり記録できたりする高性能な ODD 内蔵方式に切り替わっている。現在でも片面 4.7~9.0 GB であり、数年後には、片面 40 GB の CD/DVD/次世代 DVD 互換型の ODD が実現される見通しである。このように 400 nm で発振する青紫色の GaN 半導体レーザーが搭載される次世代 DVD が市場に出回っても、記録密度は光ディスクも磁気ディスクもいまのところ最高 20 Gbit/in² から 40 Gbit/in² 程度が限界であるといわれている。そこでこの限界密度を 1 桁以上高密度、すなわち 100 Gbit/in² から 1 Tbit/in² への超高密度メモリーが必要とされることになる。技術的に実現の可能性が残されているのは、近接場光学 (near-field optics) を応用した光ディスク技術であると思われる。

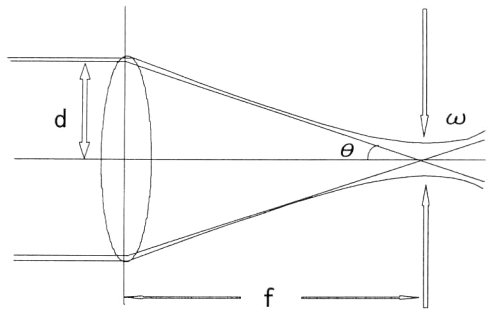
一方、ますます高速のデータ転送レートが必要とされる光ファイバー通信時代を迎えて、磁気ディスクのデータ転

送速度は 800 Mbps 程度にまで高速化されている。しかしながら、現在の光ディスクでは記録・再生光源として端面発光 LD を用いている限り、せいぜい 300 Mbps 程度までしか速くならない。今後、垂直共振器表面発光半導体レーザー (VCSEL) アレイが実用化されれば、データ転送速度として 10~60 Gbps にまで高速化できる可能性がある。本報告の最後ではその基礎技術についても述べる。

経済産業省の外郭団体である財団法人光産業技術振興協会が毎年発表している光産業の国内生産額を調べると、光ディスク関連が 2001 年度の総生産額の 3 分の 1 程度を占めていることがわかる。その内容は CD や DVD など光ディスク技術に関連している機器やディスク媒体であり、おおよそ 2.5 兆円である。

ご存知のように、この産業は半導体レーザーなしでは成立しない。レーザーだけでなく、光ヘッドも主要な構成部品である。光ディスクの特徴は従来のフロッピーディスクに比べて、記録容量が大きいことと、記録媒体の交換や携帯ができること、データが破壊されなく、機密性も高いことなどが挙げられる。ここでは CD、DVD 技術の概要と光ディスクの技術動向について述べる。

現在の光ディスク記録密度の市販品の最高は波長が 650 nm、対物レンズの開口数 (numerical aperture: NA) 0.6 の場合の DVD であり、片面が二層構造の場合で 18 GB である。前述したように、近い将来には波長が 405 nm の



$$\omega = \frac{\lambda \cdot K}{NA}$$

$$NA = \sin \theta = \frac{d}{\sqrt{f^2 + d^2}}$$

図1 レンズの開口数 (NA) とビームウェストサイズ定義。

青紫色半導体レーザーを光源に用いて、開口数が0.85の対物レンズを採用することにより、直径120 mmサイズのディスク片面で25~40 GBの記録容量が達成されることになろう。ただし、ランド/グルーブ（溝上ならびに溝間）記録技術を採用したり、25 μm程度の層間を経たディスクの片面が二層構造の方式を採用することになろう。すなわち、わずかな層間の違いを応用して、どちらかに直径が0.3 μm程度のビームウェストで焦点を合わせる自動焦点制御を行うことにより、他方の層では直径が約30 μmの太いビームとなって通過するので、層面に刻まれている直径0.38 μmのビットの影響を4桁（1/10000）以上も低くできる。このように近い将来に市場される光ディスク片面の記録容量を40~50 GB（両面で80~100 GB）にできるが、これが対物レンズを用いた非接触方式の光ディスクの記録密度の限界であろう。

1. 光ディスクシステムの基本

光ディスクシステムとは光メモリーを記録再生するための装置総称表現である。すなわち、光ディスク記録面にできる限り小さなピットを書き込み（記録し）、それを読み取る（再生する）方式である。このような光ディスク方式が光メモリー市場における生産高の大部分を形成しており、なかでもCDやDVDが、その代表である。

光メモリー装置の仲間としては市場としてまだあまり大きくないが、レーザーなどコヒーレンスのよい光波を三次元物体へ照射して、その物体からのいろいろな方向への回折光の一部をきれいな平面波（参照光波）と干渉させ、その干渉縞を光記録媒体上に記録させたものがホログラム¹⁾であり、高密度光記録としても期待できる。

ところで、CDプレーヤーは今では大量消費財の一つで

あり、国内の月間生産台数が2000万台にも達している。直径120 mmのCDディスク片面で音楽用の場合には750 MB、コンピューター用CD-ROMの場合に650 MB（ $650 \times 10^6 \times 8 \text{ bit} = 520 \times 10^7 \text{ bit} = 5.2 \text{ Gbit}$ ）の記録容量があるが、DVD-ROMの場合にはレーザーの波長を650 nmと短くし、対物レンズの開口数を0.6と大きくして、ディスク片面で4.7 GB、両面で9.4 GB、さらに片面二層構造ディスクの両面にて18 GB = $18 \times 10^9 \times 8 \text{ bit} = 144 \text{ Gbit}$ ）もの情報が記録できる。

DVD-ROMドライブの生産量は21世紀に入って、かつての1990年代のCDプレーヤーの生産量に近い伸びを示すことが期待されている。なぜならば、パソコンソフトがこれだけ普及したのもCD-ROMの普及に負うところが大きく、そのソフトが画像や動画をも取り入れているので、最近ではCD-ROM1枚に収容できないものが増えてきているからである。それに伴って、当然のことながらパソコン内蔵のHDD容量が飛躍的に増大してきている。

HDDの面記録密度は市販品で20 Gbit/in²以上に達しているが、現在、DVDはわずか3~4 Gbit/in²であり、次世代DVDでも約15 Gbit/in²程度でしかない。400 nm波長を光源とする次世代DVDには2方式がある。DVDとの互換性を保つために対物レンズと記録面との間にDVDと同じ、厚さ0.6 mmのプラスチック板があり、CDやDVDと同じようにディスクを裸のままの状態で使用できるタイプと、プラスチック板厚が100 μmのディスク保護膜であり、光ヘッドと光ディスクとの間のいわゆる作動距離もわずかであるタイプである。後者は従来の光ディスクとは異なり、ちりやほこり対策としてカートリッジの中に収めてある。次世代DVDあたりからさらに高記録密度のディスクとなると、HDDと光ディスクとの境界がほとんどなくなって、表面記録型の光ディスクとなることは必定であるように思われる。なぜなら、磁気ディスクの記録ビットサイズが100 nm以下になると室温では自然に磁化の反転が起こり、ビット記憶が維持できなくなるからである。

2. 高NA対物レンズ

光ディスク用途における本質的で光学的なポイントは、対物レンズのNAを顕微鏡のそれ並みに大きくして、レンズとレーザー波長で規定されるビームウェストサイズ（図1参照）をできるだけ小さくしてディスクの情報記録面にビット記録を行い、また、記録されたビットを高いSNで検出できることにある。したがって、レーザー光波

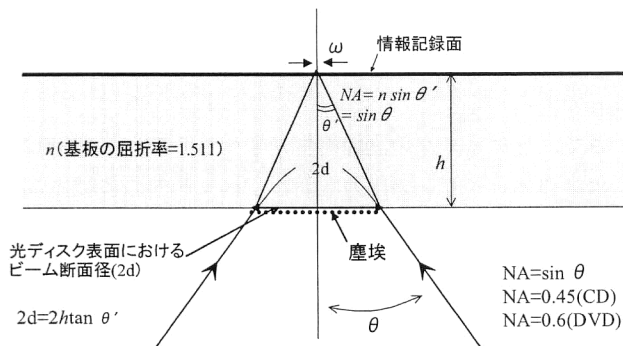


図2 光ディスク上のレーザービームと塵埃サイズの関係。

長を短くするとともに、用いる光ヘッドの対物レンズの開口数をできる限り大きくしたほうがよいことが理解できる。しかし、図2に示すように、光ディスクの特徴の一つとなっているヘッドがディスク媒体と非接触的に記録再生できるということは光ディスク面にちり、ほこり、指紋が付着していても記録・再生ができることを意味している。かなり厚いディスク基板(0.6~1.2 mm 厚さ)を通して非接触的に情報の出し入れをしている点を活用しなければ光ディスクの大きな特徴を失うことになる。具体的にCDでは1.2 mm±100 μm, DVDでは0.6 mm±10 μmのディスク基板を経由して光記録や再生を行っている。そのためにディスク表面に塵埃があってもディスク媒体面におけるレーザービームサイズが1 μm 前後に絞られていても、図2に示すようにCDディスク表面におけるビーム断面直径(2d)は約800 μm であるので、数 μm~数十 μm の塵埃がディスク表面に存在しても、通過するビーム光量にほとんど影響を与えない。このことが光ディスクを現在のように世界的に普及させた大きな理由のひとつになっている。

しかし一方では、基板厚さが厚ければ使用する対物レンズのNAの大きさに制約が加わる。なぜならば、光ビームの光軸がディスク面(法線)に対して傾くと、コマ収差が発生するからである。ディスクの厚さが厚くなるにしたがってコマ収差量がMaréchal's criterion(5章参照)よりも大きくなる傾斜角度はかなり小さくなってしまふ。そこでCDの場合、対物レンズのNAをあまり大きくできず0.45に決定した経緯がある。したがって、DVDの場合には基板厚さが薄い分だけコマ収差許容度が増えるのでその分だけ対物レンズのNAを大きくすることができるので0.6となっている。ちなみに、CD用のレーザー波長は、開発時の技術的レベルから780 nm±10 nmであり、CDが市場に現れてから14年後に市場化されたDVD用の波長は650 nm±20 nmである。まもなく市場に出る次世代DVDにおいてはディスク基板用プラスチックの透過最

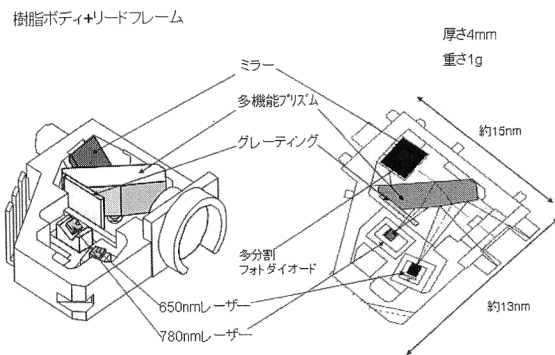


図3 二波長レーザーチップを搭載した最近の小型CD/DVD兼用ヘッド(パイオニア社提供)。

短波長の限界に近い405 nm(青紫色)の半導体レーザーを用いて、NAの大きな0.6~0.85の対物レンズが使われる。すでに述べたように、カバープラスチック厚さがDVDの場合と同じ0.6 mmの場合と、さらに厚さが6分の1(100 μm)に減じた方式とがある。後者の場合にはヘッドのフォーカス制御技術がポイントになる。前者の場合の記録密度の低下を補うために記録層間をわずか20 μm 前後にした二層構成とすることによってディスク片面40 GBを保つよう工夫をしている。

3. 光ヘッドの光学系

光ディスクのキー部品は光ヘッド²⁾であり、典型的な光ヘッドを図3に示す。その光ヘッドは①半導体レーザーからの広がった回折光の一部を光ディスク媒体表面に導き、②ディスク媒体から反射・回折されてくる光を焦点誤差検出光学系、トラッキング誤差検出光学系を通して、③フォーカスエラー信号と、④トラッキングエラー信号とを作り出すとともに、⑤デジタル情報(RF)信号を取り出すために、それぞれの光検出エレメントに導かれ、エレメントの組み合わせによって、各信号を合成する機能をもっている。これらの機能をもつ光学系を数ミリサイズにまとめるために、偏光ビーム・スプリッター、平面グレーティングレンズ、複屈折結晶、ホログラフィック光学素子、多分割フォトダイオードなどを小型高性能化し、さらに各種の工夫が凝らされている。

4. 回折限界まで光ビームを絞り込むための光学系の条件

球面レンズに図1のように波長λの光波平行ビームを入射させる。レンズの焦点距離をfとし、レンズの瞳径を2dとすると、ピーク光強度の1/e²に減衰する全幅ビームウエストサイズWは

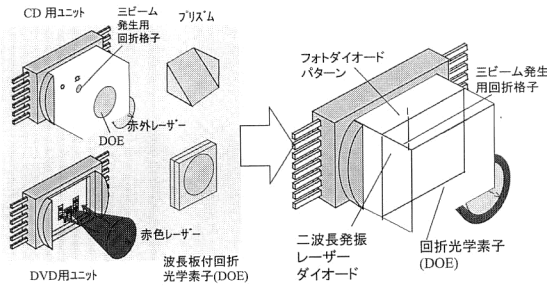


図4 四光部品を1個のユニットに集積化(松下電器提供).

$$W = \lambda \cdot k / NA \quad (1)$$

で表される。ここで、 k は入射ビームの半径方向の光強度プロファイルにかかわる定数であって、ビーム断面前面にわたって均一な強度のときは $k=0.96$ であり、ガウスビームのときは $k=1.34$ の値をとる。NA はレンズの開口数とよばれ、レンズの光軸と収束ビームとのなす角を θ とすると、

$$NA = \sin \theta \quad (2)$$

で表される。図1から $NA = \sin \theta = d / (d^2 + f^2)^{1/2}$ で与えられる。したがって、式(1)は

$$W = \lambda \cdot k / NA = \lambda \cdot k \{1 + (f/d)^2\}^{1/2} \quad (3)$$

で表される。式(3)からビームウエストサイズはどんなに大きな開口数のレンズを用いても、空気中では $\lambda \cdot k$ の値よりも小さくなることは決してないことがわかる。

5. 波面収差と Maréchal's criterion

上で述べたように半値全幅ではなく、 $1/e^2$ における全幅ビームウエストサイズ W は前提条件として光波の波面が乱れていない場合としている。波面の乱れの度合いを波面収差で表す¹⁾。

波面収差にはPV (peak to valley) 値とRMS (root mean square) 値とがある。波面収差のない、または、収差があってもきわめて小さいレーザー光を波面収差のきわめて少ないビーム・スプリッターを用いて、2つのビームに分け、一方を波面収差のほとんどゼロのミラーで反射させ、もう一方のビームを平面度の悪いミラーで反射させて両反射光を干渉させれば干渉縞ができる。干渉縞のピッチサイズを S とし、1本の縞にみられるうねりの山と谷間のサイズを ΔS で表せば、波面収差のPV値(これを以後 ω_{pv} で表す)は面の中のある一点での波面収差であり、

$$\omega_{pv} = \Delta S / S \quad (4)$$

で表される。面全体のRMS波面収差 (ω_{rms}) を求めるには面内の各点のPV値を ω_{pv1} , ω_{pv2} , ω_{pv3} , ω_{pv4} , ... とすると、

$$\omega_{rms} = \{(\omega_{pv1})^2 + (\omega_{pv2})^2 + (\omega_{pv3})^2 + \dots + (\omega_{pvn})^2\}^{1/2}$$

で表される。すなわちRMS値というのは根二乗平均値のことである¹⁻³⁾。

さて、光ディスクの記録再生光学ヘッドのレーザービームは半導体レーザーの出力端面からヘッド内の各種光学部品を経て、光ディスク基板を通して光ディスク記録面に至るまでいろいろな光学部品を通過する。その際に、レーザービーム波面はそのつど必ず乱れて劣化する。すなわち、光ビームの空間位相波面の劣化が発生する。この劣化の度合いを規定しているのが Maréchal's criterion といわれる基準である。この基準はRMS値で $\lambda/14$ 以下の値でなければビームウエストサイズは式(3)で表されるよりも大きなサイズ(スポットサイズ)となることを意味している。

6. 光磁気ディスク用光学系

光磁気ディスク用光学系はレーザー光を微小スポットに絞って磁性薄膜を密度の高い光強度を用いて加熱している。加熱の結果、磁性薄膜は熔融するが、冷める際のキュリー温度付近で印加されている磁界方向を記憶する性質を利用して磁気記録している。印加磁界のサイズよりも光スポットサイズが小さいが、それ以上にディスクが回転しているため、パルス光ビームの温度分布ならびに磁壁移動現象や重ね合せた磁性薄膜の磁気増幅効果を利用した高密度記録・再生のいろいろな方式(MAMMOS方式やDWDD方式)⁴⁾が提案されている。

7. 光ヘッドの小型集積化

光ヘッドの小型集積光学化による量産・低コスト化が進められている。超薄型の携帯用パソコンにCD-ROMドライブやDVD-ROM, CD-R, DVD-RW, DVD-Rドライブを内蔵させるために、ヘッド厚さが4mm以下で、面積も10mm角前後の超小型ヘッドが開発されている^{2,3)}。図3に一例としてパイオニア製ヘッドを示す。

8. 集積光学化光ヘッド⁵⁻⁷⁾

半導体集積回路のようにモノリシック集積化を狙った光ヘッドの研究もなされたが⁵⁻⁸⁾、現在のヘッドに比較して、性能の点で下記のような問題がある。第一に、回折限界の光学系であること、第二にグレーティングあるいはHOE (holographic optical element) を基調とする(例として松下電器製ヘッドを図4に示す)光学素子の場合に設計波長と使用波長との差がかなり厳密(10nm以下)であること、第三に、コマ収差発生を防ぐために、ビーム入射角度

にも厳しい制約が課せられるためである。第四に、半導体や誘電体光導波路内部を伝搬するガイドドウェーブの伝搬損失が光ファイバーのそれに比較して非常に大きいことが挙げられる。モノリシック光集積タイプのピックアップ⁷⁾が市場に現れるのは生産技術的にも採算が取れるようになってからであり、当面は実現しない。今後の技術革新に期待したい。

9. 超並列型二次元 VCSEL(vertial cavity surface emitting laser)アレイヘッド⁹⁻¹¹⁾

21世紀に入って、光ファイバー通信、それにブロードバンドデジタル放送ならびに高速インターネット時代を迎えて、各家庭にも通信と放送のブロードバンド時代が到来しつつある。光ファイバー通信では10~40 Gbpsの超高速ビットレート情報をリアルタイムで記録したり再生したりするメモリー装置が必要とされる時代がすぐそこまできている。そこで、1998年ごろから垂直共振器表面発光半導体レーザーの二次元アレイと一体化した高効率近接場プローブアレイによる超高速・超小型・超高密度の光記録再生用光ヘッドの研究が続けられている^{9,10)}。日本で発明されたVCSELを応用することと、近接場光プローブの高効率化がこの技術のポイントである。現在欧米で小規模生産しかされていないVCSELアレイの国内での大規模生産が開始される必要がある。

10. エバネセント波活用の超高密度光メモリー

近接場光学 (near-field optics) という分野が、近年光学研究者の関心を集めている。従来からの遠視野光学 (far-field optics) では、レンズなどの収束光学素子を用いて光波ビームをできる限り小さなスポットサイズに集光しようと試みても光波の回折のため、光ビーム断面中心パワーの $1/e^2$ に低下するビーム周辺サイズで測定して、波長サイズ程度までしか絞れない。青紫色半導体レーザー(波長400 nm)光を使用した場合でも限界記録密度が1枚のDVDサイズのディスクで40~50 GB程度であることはすでに述べたとおりである。

一方、屈折率が高い媒質から低い媒質に光波が全反射臨界角以上の角度で入射すると全反射が起こることは広く知られている。このとき反射している光波の進行方向とは直角の方向に、わずかに漏れて、急速に減衰する非伝搬波成分(エバネセント波)があることが古くからわかっている。ここでは、このエバネセント波を光記録に応用しようというものである。すなわち、回折限界を超えて光を小さく絞るには通常ファーフィールド光波を用いずにエバネ

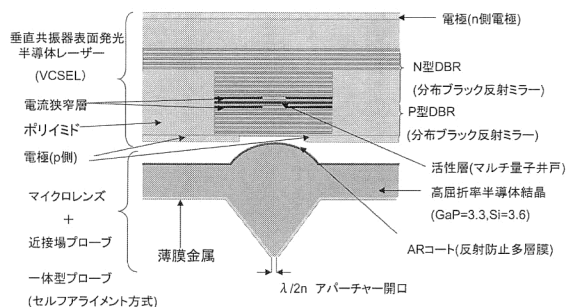
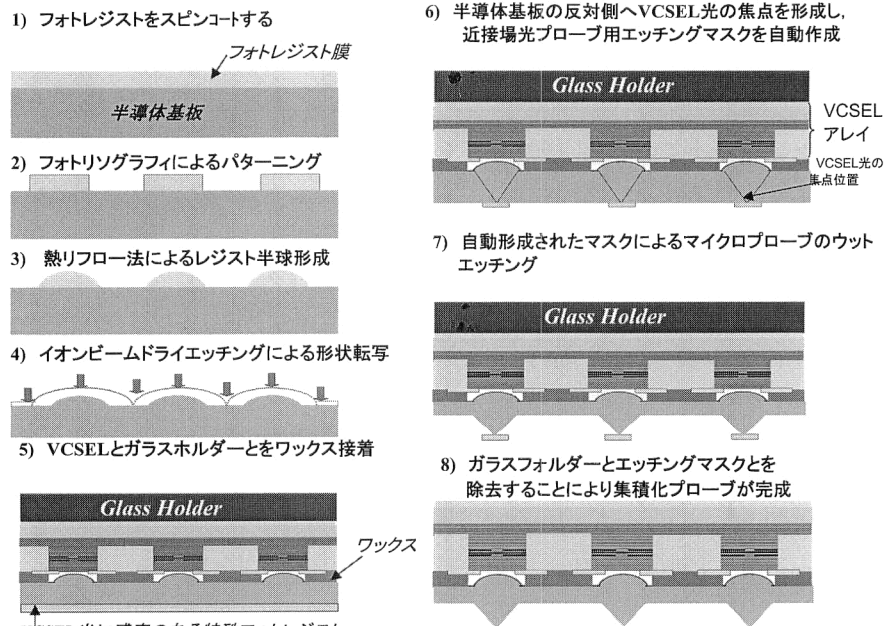


図5 二次元アレイ光デバイスの中の1素子断面拡大図。

セント波を利用しようとする試みである^{9,10)}。ところが、エバネセント波は発生後に伝搬距離に対して指数関数的に光強度が減衰するので、光波長のおおよそ $\lambda/4$ 以内の間隔に記録媒体を近づけ、かつ保たなければならないことが、エバネセント波を利用する側の応用ポイントである。そのために、ヘッドとディスク間のインターフェイスにはハードディスクの場合と同じように浮上ヘッドやコンタクトヘッドを採用する。ディスクも表面記録媒体が用いられ、光ディスクの特徴であるディスク交換可能性は失われることのほうが多い^{4,9,10)}。

一般にエバネセント波の発生効率はきわめて低い。プローブ先端開口が100 nmの場合に光ファイバー・プローブでは 10^{-5} であり、開口が10 nmの場合には 10^{-9} という低さである。筆者らはこの低い効率を1000倍以上に増大させる手段として、高屈折率半導体材料と焦点を合致させたマイクロレンズとで構成する光源一体型プローブアレイを採用した。ここではレンズの焦点位置と開口先端位置とをナノメートル精度で自動的に合致させるセルフ・アライメント技術を開発した。ここで使用するVCSELアレイの模式図を図5~7に示す。実際のマイクロレンズ直径は5~10 μm 、レンズアレイのピッチは10~25 μm である。各レーザーの出力は50~100 μW に設定する。研究当初における面アレイの数は100×100、すなわち1万個が基準であったが、用いる光ディスク直径が小さくなるにしたがって、50×50、32×32、24×24、8×8というように、全素子数は自由に変えることができる。VCSELアレイ全体のサイズは1 mm×1 mmあるいは2 mm×2 mmである。電極配線はVCSELの背中にLSI (large scale integrated circuit) のフリップ・チップ・ボンディングを行うことにより、垂直方向への接続のみとなるがLSIへの給電や信号取り出しを考えると実際のサイズは数 mmに達する。

VCSELの出力窓のところにNAの大きなマイクロレンズアレイを設置してあり、このマイクロレンズアレイの各焦点位置に高効率近接場光プローブを設置している。これ



VCSEL光に感度のある特殊フォトレジスト

図6 VCSELアレイとマイクロレンズアレイおよび近接場光プローブアレイとをセルフアライメントにて製造。

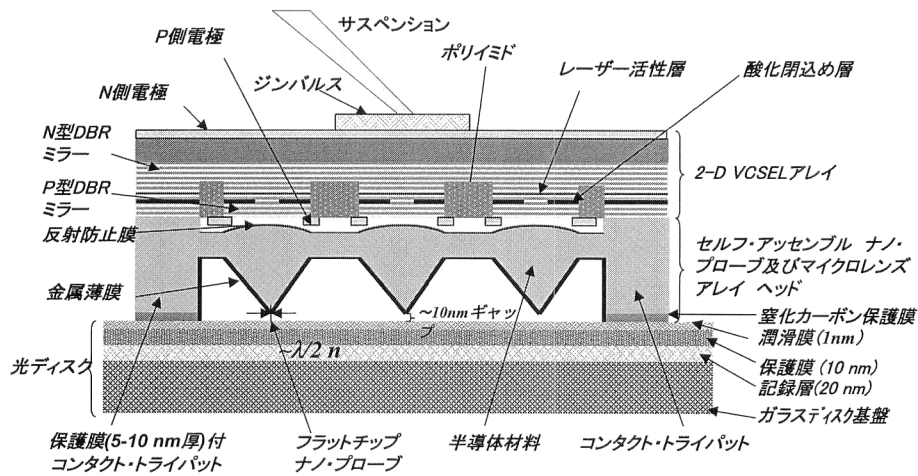


図7 3素子のみを示した二次元アレイ集積化光ヘッド。

らをいわず三次元的に光集積した光デバイス素子の1個だけの光ヘッド模式図を図5に、光ディスク媒体とともに3個だけの断面模式図を図6に示す。

11. VCSEL 二次元アレイを用いた高効率プローブ

図5を用いて、高効率近接場光プローブを説明する。これは本光ディスクヘッドのキーデバイスである。前述したように、これまで報告された近接場光を発生させるためのプローブの変換効率(スループット)がきわめて小さかったので、近接場光を利用した光ディスクはまだ実用になっていない。半導体プローブと表面プラズモン・ポラリトンを利用して、この効率を 10^4 倍ほど向上させるための研究

が行われている。なかでも本研究では空間光変調を用いた極限の情報処理としての光ディスクヘッドの基礎研究、すなわちVCSELアレイ、マイクロレンズアレイ、半導体プローブアレイ、ならびにプローブ先端に非対称的に銀膜コートした場合に発生する表面プラズモンとエバネセント波との位相整合がポイントである^{8,11)}。この研究は現在の光ディスク技術ならびに光磁気ディスク技術の記録密度とデータ転送速度(10 Gb/in²と70 Mbps)をそれぞれ約100倍にする超高密度化と超高速化(1 Tb/in²および10 Gbps)するものであり、早期実現が期待されている。

12. Super-Rens 方式超高密度光記録

相変化記録媒体の上面にわずかな距離(約 10 nm)を隔てて酸化銀を含む薄い(10~11 nm)膜を形成しておく。レンズで絞られた光ビームを照射すると、そのガウスビームの頂点パワーにて酸化銀膜が熱分解を起し、銀(Ag)の粒子が発生する。この銀粒子群の直径は照射レーザービームよりはるかに狭い 200 nm 以下であることが多い。したがって、次に照射されるレーザービームはこの小さなアパーチャーに遮られて(カットオフ周波数)通過できないが、エバネセント波のみ通過し、約 10 nm 離れた記録媒体上に 200 nm 以下の記録ビットを形成することができる。この方式は信号再生もこのアパーチャーを通して読み出すために(今のところ SNR (signal to noise ratio) があまり高く取れないようであるが)、従来からのディスクドライブやディスク基板が使えるので、将来の超高密度光記録が実現する前段階としては、非常にすぐれた方式と思われる¹²⁾。

13. 表面プラズモン波も応用する超高密度記録

表面プラズモンはエバネセント波の電界が薄い金属(銀や金)に照射されることにより励振される。表面プラズモンの電界エンハンスメント(増強)効果を利用すれば 3000 倍以上の電界を増強することができる。ところが、エバネセント波は横波である一方、表面プラズモン・ポラリトン波は縦波であるので、両者を結合させるにはまず、進行方向を合わせることで、各波長サイズを等しくさせ、位相整合をさせなければならない。これが可能になれば、表面プラズモン・ポラリトン波からエバネセント波へのエネルギーの授受が行われ、エバネセント波の効率のよい発生が期待できる。これを利用した表面記録の超高密度光記録にも応用できる。小さな開口を作る技術と、表面プラズモン・ポラリトン波とエバネセント光波との位相整合技術がポイントである。

半導体結晶異方性エッチング技術を利用したプローブアレイ技術と、傾斜銀膜技術およびイオンミリング技術を併用した非対称プローブが開発されている¹³⁾。

VCSEL の二次元アレイを応用した超小型・超並列光ヘッドを提案^{9,10)}、特許も獲得済である。この技術は、X-Y 二次元アレイの光ヘッドを回転ディスク接線方向にわずかに傾けることによって、半径方向の隣接 2 ヘッド間に接線方向の全ヘッド軌跡を配置することができる。そのため高い効率で各レーザー素子と近接場光プローブとを結合する技術開発が必要である。VCSEL 出力を効率よく光プローブ開口へ収束させるための自己アライメント技術

(図 6 参照)によるマイクロレンズアレイと高屈折率半導体プローブアレイとが開発できている⁸⁾。今後は 10×10 の並列ヘッドによる 500 GB 容量で 1 Gbps 程度の近接場光ディスク装置の実用化研究が行われる予定で、さらに、この技術を 50×50 の二次元ヘッドへ進展させ、携帯電話や各家庭の小型超高速メモリー装置へ発展できるものと期待されている。

13.1 この研究の新規性

半導体レーザーチップの出力端面に高性能反射防止膜(SiO_x+SiN_y)を ECR スパッター装置にて容易に成膜できることを実証してレンズレス光フロッピーディスクドライブの試作を行った¹⁴⁾。直径 90 mm の光フロッピーディスクの両面で 1 GB の記録容量をもつ研究が完成したが、世の中のニーズは 500 GB~1 TB であり、せっかく開発したにもかかわらず企業化できなかった。このことを踏まえ、かつこれまでの研究成果を生かして 1996 年にテラバイト光ディスクを提案し、面アレイの VCSEL と近接場光学とを応用した超高密度・超高速光ヘッドをもつ新しい光ディスクシステムの研究を開始した。日本で発明された VCSEL の二次元アレイを光記録と再生ヘッドに使用する点が独創性である。なぜならば、将来日本で VCSEL が本格的に量産化されれば 1 素子サイズが直径 3 μm 程度にできるうえ、入力電力対出力レーザーパワー比が 50% を超す効率のよい VCSEL を二次元アレイにしたうえでディスクの回転の接線方向に少し傾けるだけで、超高密度で記録・再生できるからである。例えば、100×100 アレイでも 1 mm 角以内にすべて入ってしまう。このような研究は、世界的にみて日本での研究のみである。

13.2 今後の研究の方向

VCSEL の二次元アレイにおける多数の構成素子が決して重ならないように光ディスクの回転の接線方向に少し傾けて VCSEL 二次元アレイを使用するので、アレイの構成素子の数だけ光ディスク面上に同時並列記録ができる点が特徴である⁸⁻¹⁰⁾。1 素子を 1 Mbps で変調した場合でも 100×100 アレイで 10 Gbps のデータ転送レート(記録速度)となり、20 Mbps で変調した場合には 10×10 アレイのヘッドを使用した場合でも 2 Gbps のスピードで記録・再生ができる。すなわち、高速時系列信号を低速な空間光変調信号に変換できることにある。

第二のポイントは、各 VCSEL 素子からのレーザー光を効率よくエバネセント波に変換する工夫を 100×100 の二次元近接場光プローブアレイに対して行っている点である。効率をあげるための工夫は第一に、各 VCSEL 素子に対応した直径 10 μm のマイクロレンズアレイを前述の

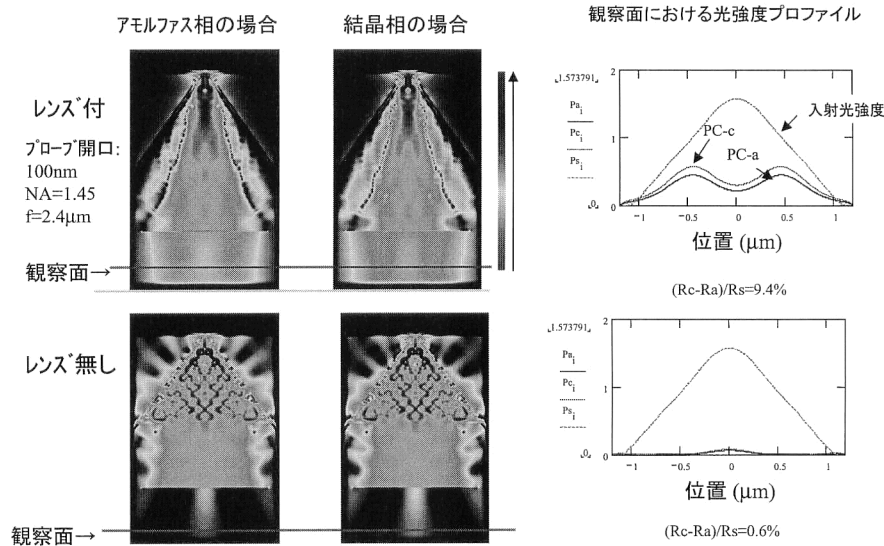


図8 マイクロレンズ集積化近接場光プローブへ光ディスクからの反射光がVCSELへ戻った場合に得られる信号検出原理(反射光量の違いによりVCSELの内部インピーダンス変化が増大して観察される)。

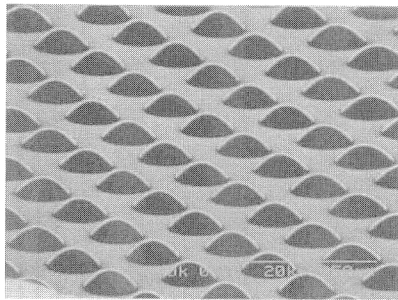


図9 半導体マイクロレンズアレイのSEM写真(各マイクロレンズの直径は10 μ mである)。

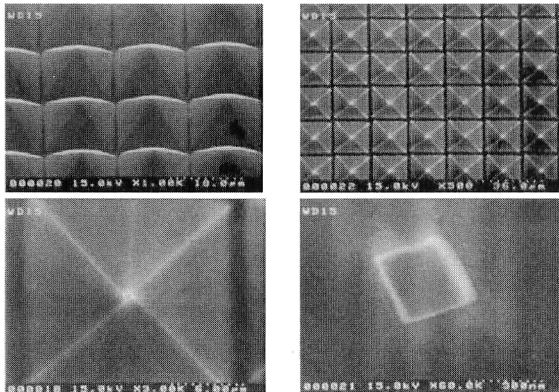


図10 半導体近接場光プローブアレイのSEM写真。
 $W = \lambda k / NA = \lambda k (f^2 + d^2)^{1/2}$ 。

近接場光プローブアレイの高屈折率半導体材料と一体化形成していることにある⁸⁾。当面、近接場光プローブの先端開口径サイズを100 nm以下としている。VCSELから射出したレーザー光ビームをマイクロレンズで収束させる位置がこの100 nm以下のサイズの開口部である。したがっ

て、一致させる精度は10 nm以下が必要である。これまでの半導体加工技術ではまったく不可能な技術であったが、これを特殊なフォトリソグラフィ技術によって精度10 nmで自動的に位置合わせができること⁸⁾を第二の技術としている。第三の技術として、二次元アレイによる近接場プローブからの出力エバネセント波を相互結合させる回折と干渉効果とを応用した微小金属粒子を効率よく励起してエバネセント波の出力増大化を計っている点である。最後の技術は、まだ構想段階であり、今後の研究の主課題の一つとなる。また、VCSELアレイ用エピ・ウェハーを自ら加工する必要がある。エピ・ウェハーとはMBE (molecular beam epitaxy) やMOCVD (metal oxide chemical vapor deposition) 等III-IV族化合物半導体基板上に、図5、図7に示したような多層のP-DBR (P型分布ブラッグ反射)、アルミニウム (Al) を多く含んだ層、レーザー活性層、N型分布ブラッグ多層反射膜を気相成長させたウェハーのことである。今日、日本国内では入手できないので米国メーカーから購入している。今後5年間以内には国産化が可能となろう。この発振波長660 nmエピ・ウェハーを図7に示してあるようにまず、RIE装置やICP装置を使って深い溝の穿孔後、水蒸気炉にて図5や図7にみられるoxide layer (酸化膜による電流の閉じこめ層) を形成する。その後この溝へ図7のようにポリイミドを流し込んで電極を付けてVCSELアレイが完成する。今後の研究は100 \times 100あるいは50 \times 50 VCSELアレイに同軸的に配置したレンズアレイ+プローブアレイをGaPやSiで試作し、実際のディスクに記録・再生実験することにある。平成13年度ま

である程度の成果が得られたにもかかわらず、実際の超パラレル平面ヘッドとして完成し、実用的な超高速情報処理とするまでには、乗り越えなければならないいくつかの基礎研究が残されている。

13.3 具体的な今後なすべき研究項目

- ① 超微小マイクロレンズアレイの表面プロセス技術完成と光学的測定技術確立
- ② マイクロレンズ焦点位置に近接場ナノ・プローブの開口位置を一致させるためのセルフ・アライメント技術(図6)の完成とそのための長波長領域で感光するフォトレジスト材料技術開発⁹⁾
- ③ 近接場ナノ・プローブの内外で発生する横波である無効エバネセント波をカットオフ周波数のない縦波の表面プラズモン・ポラリトン波へ相互変換する技術
- ④ コンタクトヘッドとして小規模アレイによる記録実験

相変化光ディスクへ図7で示す光アレイヘッドを用いて、パラレル記録後に反射した光が再び一体化したマイクロレンズアレイをもつ近接場光プローブからVCSELへ戻る光量を調べると、記録ビット(アモルファス)からの光は結晶面からの反射とは異なる現象を呈することがわかった。わずかな変化反射強度の違いが増幅され、VCSELの内部インピーダンス変化となって現れる。このVCSELの端子電圧の変化は理論的にも実験的にも確かめてある¹⁵⁾(図8)。今後は実際のディスク再生信号として検出する必要がある。図9と図10は研究で試作し、基礎実験に使用したマイクロレンズアレイと半導体近接場プローブアレイのSEM(scanning electron microscope)写真である。高密度光記録はこれからの楽しみな分野である。最後に本研究の機会を授けてくださった日本学術振興会の関係者に心から感謝する。受託プロジェクト番号(JSPS-RFTF97RBOOL)。

文 献

- 1) 後藤顕也：“第7章光情報処理”，オプトエレクトロニクス入門(オーム社，1991) pp.234-241.
- 2) 後藤顕也：“光ディスクの実装技術と将来技術動向”，エレクトロニクス実装学会誌，**2**(1999) 354-360.
- 3) 後藤顕也：“光メモリの発展と将来展望”，応用物理，**68**(1999) 1171-1177.
- 4) K. Goto: “Recent technical trends of optical memory,” IEICE Trans. Electron., **E82-C** (1999) 1446-1453.
- 5) 後藤顕也：特公昭 57-27086.
- 6) G. Hatakoshi, H. Fujima and K. Goto: “Waveguide grating lenses for optical couplers,” Appl. Opt., **23** (1984) 1749-1753.
- 7) H. Narui, M. Doi, T. Nakao, K. Sahara and O. Matsuda: “A monolithic confocal optical pick-up devices,” Proc. SPIE, **3401** (1998) 48-61.
- 8) 後藤顕也，栗原一真：“超高速光記録用マイクロレンズアレイ”，O plus E, **24** (2007) 738-743.
- 9) K. Goto: “Proposal of ultrahigh density optical system using vertical cavity surface emitting laser array,” Jpn. J. Appl. Phys., **37** Part 1 (1998) 2274-2278.
- 10) K. Goto, Y.-J. Kim, S. Mitsugi, K. Suzuki, K. Kurihara and T. Horibe: “Microoptical two-dimensional devices for the optical memory head of an ultrahigh data transfer rate and density system using a vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) array,” Jpn. J. Appl. Phys., **41** (2002) 4835-4840.
- 11) 後藤顕也，三木 聡，栗原一真，鈴木和拓，山口 徹，堀部貴之，金 泳珠：“光ディスク用半導体近接場光プローブの高効率化”，O plus E, **24** (2002) 60-71.
- 12) J. Tominaga, T. Nakano and N. Atoda: “Super-resolution structure for optical data storage by near field optics,” Proc. SPIE, **3457** (1998) 282-286.
- 13) S. Mitsugi, Y.-J. Kim and K. Goto: “Finite-difference-time-domain analysis for electro-magnetic field distribution on near-field optical recording probe head,” Opt. Rev., **8** (2001) 120-125.
- 14) Y.-J. Kim, Y. Hasegawa and K. Goto: “Development of a novel optical floppy disk drive using phase change optical medium and a quasi-near-field optical head,” Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 929-932.
- 15) S.-Y. Ye, S. Mitsugi, Y.-J. Kim and K. Goto: “Numerical simulation of readout using optical feedback in the integrated vertical cavity surface emitting laser microprobe head,” Jpn. J. Appl. Phys., **41** (2002) 1636-1637.

(2002年8月29日受理)