

## 青紫色半導体レーザーを用いた近接場相変化光記録

市村 功・木島公一朗・大里 潔

光ディスク再生装置においては、当初、開口数 0.45 程度の対物レンズが用いられ、発振波長 780 nm 前後の III-V 族 AlGaAs 半導体レーザーの実用化とともに商品化された。光学ピックアップの原理的な解像度は、一般に記録媒体上におけるスポットサイズによって決定され、同スポット径 (FWHM) は、光源の波長を  $\lambda$ 、対物レンズの開口数を  $NA$  とすると、おおむね  $\phi_{\text{spot}} = \lambda/2NA$  で与えられる。したがって、高密度光記録を実現するためには、光源の波長を短くする、あるいは対物レンズの開口数を大きくするといった手法が基本となる。

上記高密度化の要素のうち、光源の短波長化に関しては、1980 年代の終わりから 90 年代にかけて、非線形波長変換による第二次高調波 (SHG) レーザー<sup>1-5)</sup>の研究が盛んにおこなわれ、光ディスク媒体への記録再生が数多く報告された<sup>6-9)</sup>。これら SHG レーザーは、光学的には良好な特性を有しているものの、励起用光源、ならびに非線形素子の温度制御が必要であることや、光出力の直接変調が難しいこと、あるいは価格的な制約の大きい光ディスク装置光源としてのコストの問題等から、現在までのところ実用化されるには至っていない。

一方、注入電流を変化させることで光出力の直接変調が容易に実現される半導体レーザー光源では、その後、短波長化が可能な AlGaInP 材料に歪み多重量子井戸構造が組み合わされて、波長 635~660 nm の高出力赤色光源が実用化され、現在では、再生専用の DVD をはじめとして、記録可能な DVD-RAM や DVD-RW 等に用いられている。その後、同じ III-V 族に属する GaN 材料を用いた青紫色半導体レーザー<sup>10)</sup>、および II-VI 族の ZnSe 材料を用

いた青緑色半導体レーザー<sup>11,12)</sup>の室温連続発振が報告されると、次世代の大容量光ディスク装置用光源として短波長半導体レーザーの実用化が期待されるようになった。特に、中村らによって研究開発された InGaN 半導体レーザーは、5 mW の低出力版ながら 10,000 時間を超える寿命を確保し<sup>13)</sup>、実用化目前の段階へと至っている。

微小スポットを実現して解像度を改善するためのもうひとつの要素は対物レンズの高開口数化であり、ストレージ用途の光磁気ディスク装置においては 0.5~0.55、DVD では 0.6 へと、その値は徐々に高められてきた。しかしながら、光ディスク装置の光学ピックアップに使用されている単レンズに関しては、レンズ製作精度の点から開口数 0.65~0.7 程度が実用化の限界といわれており、これを上回る開口数は複数レンズの組み合わせや、単レンズにホログラム素子を組み合わせたハイブリッドレンズによって実現せざるを得ない。

1990 年にスタンフォード大学の Mansfield らによって提案された SIL (solid immersion lens) は略半球の形状を有し、対物レンズの出射収束光中に挿入することで、その実効開口数 ( $NA_{\text{eff}}$ ) を SIL の屈折率 ( $n$ ) 倍に増加させる働きをもつ<sup>14)</sup>。同レンズは、当初、共焦点光学顕微鏡の解像度を高める目的で SIM (solid immersion microscope) の対物レンズとして用いられ<sup>15)</sup>、その後、光ディスク装置への応用が試みられた<sup>16-19)</sup>。SIL を用いた対物レンズの実効開口数が 1 を超える場合、 $NA_{\text{eff}} > 1$  の領域に属する光線はエバネセント波となり、きわめて短い距離しか伝搬しない。前記 SIM において、SIL と被検体との距離 (エアギャップ) は光源波長の 1/10 程度に保たれる必要があるため、同光学ヘッドを光ストレージに適用した場合、装置全体は密閉構造をもつ光ハードディスクとならざるを得ない。一方、実効開口数が 1 未満である場合、

ソニー(株)ホームネットワークカンパニーギガバイトラボ(〒141-0001 東京都品川区北品川 6-7-35)  
E-mail: Isao.Ichimura@jp.sony.com

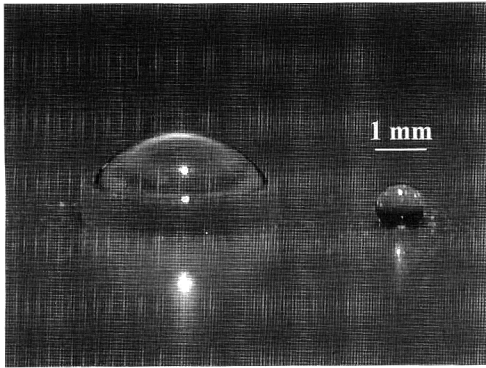


図1 実効開口数1.5のsolid immersion lensユニット。

SILと集光対物レンズは一種の2群レンズとして機能し、ギャップに関する制約は取り除かれる。この場合、2群レンズの動作距離はレンズ設計に依存し、従来通り、リムーバブル光ディスク装置の実現が可能となる<sup>20)</sup>。

筆者らは、SILを近接場光学ヘッドとして開発するかたわら<sup>21,22)</sup>、非球面2群レンズを用いることで開口数0.8~0.85の対物レンズを実現、光学ピックアップに搭載してその性能を実証した<sup>23,24)</sup>。光透過保護層(カバー層)を有するリムーバブル光ディスク装置においては、対物レンズの高開口数化に伴い、カバー層の厚さ変動およびディスク傾きに対する許容度が、開口数の4乗ならびに3乗に比例して低下する。この問題を解決するため、0.1 mmの薄型カバー層をもつ新構造光ディスクを提案、併せて、カバー層の厚さが異なる場合にも対応できる球面収差補正機構を考案した。光源に青紫色半導体レーザーを用いて達成された記録密度は16.5 Gbit/in.<sup>2</sup>に相当し、DVDサイズのディスク片面に22 GBの記録容量を実現している<sup>25-27)</sup>。

本稿では、よりいっそうのレンズ高開口数化を追求、超半球SILを用いることで実現した $NA_{eff}=1.5$ の光学ヘッドによる相変化光記録再生を解説する。ディスクとの間隔 $1/10\lambda$ での安定制御を可能とする静電容量ギャップサーボ、近接場光記録に適した記録媒体の設計手法を論じ、光源に青紫色半導体レーザーを用いて高密度化を検討した内容を記述する。

## 1. 光学ピックアップ

近接場レンズユニットの写真を図1に示す。SILの直径は1 mm、また集光レンズの有効径は約3 mmであり、以前の報告と比較して、軽量化による広帯域制御が可能となった<sup>22)</sup>。レンズユニットは一体化されて2軸電磁アクチュエーターに搭載され、光軸方向とディスク半径方向に可動な構成をなしている。

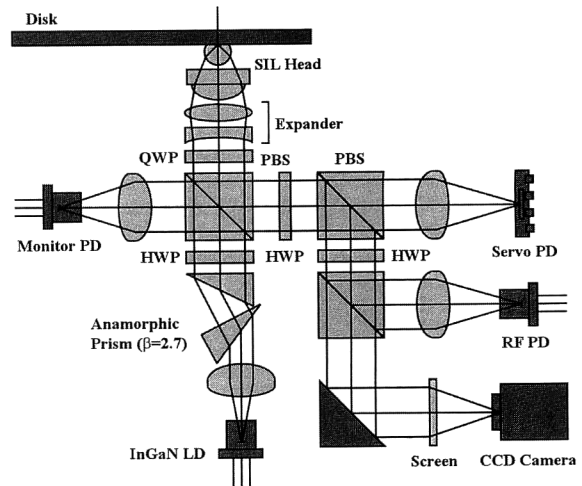


図2 光学ピックアップ構成。

近接場光記録再生実験に用いた光学ピックアップの構成を図2に示す。半導体レーザーからの出射光は、コリメーターレンズによって平行光となった後、ビーム整形用プリズム(anamorphic prism,  $\beta=2.7$ )を用いた放射角度分布の補正が施される。レーザー出力の一部は偏光ビームスプリッター(PBS)で反射、発光出力制御に用いられる。一方、ビームスプリッターを透過した光は1/4波長板で円偏光となった後、対物レンズユニットで集光、記録媒体上に照射される。ディスクからの戻り光は、トラック誤差信号を検出する4分割受光素子側と、再生信号を検出する単一受光素子側(ともに波長405 nmに最適化)とに光量分割を受け、同分割比はPBS間に配置された1/2波長板によって調整される。さらに、反射光の一部を小型のCCDカメラで観察し、ギャップ量の較正に利用した<sup>21)</sup>。なお、SILヘッド位置を変化させた場合の合焦点は、エキスパンダーレンズの間隔を変更可変とするメカニズムによって最適化される。また、光学ピックアップ全体は、高精度ステッピングモーターによってディスク半径方向に移動可能な構成となっている。

筆者らは、ディスク媒体との接触面積を可能な限り小さくし、近接条件を容易に実現するため、収束光が通過するSIL底面中央部に、ion millingの手法を用いて突起加工を施した。一方、突起周辺部には電極を付加、対向する記録媒体との間で静電容量素子を形成している。試作したSILの断面形状を図3に、また、レンズホルダーに搭載した状態で撮影された底面写真を図4に示す。底面平坦部の直径( $\phi_B$ )は約800  $\mu\text{m}$ 、突起部直径( $\phi_P$ )が40  $\mu\text{m}$ 、ギャップ0 nmにおける電極間の距離( $D$ )は1.2  $\mu\text{m}$ 程度である。なお、SIL底面上 $\pm 45^\circ$ 方向の切り欠きは、ホルダーへのレンズ接着部に対応している。超半球SILにお

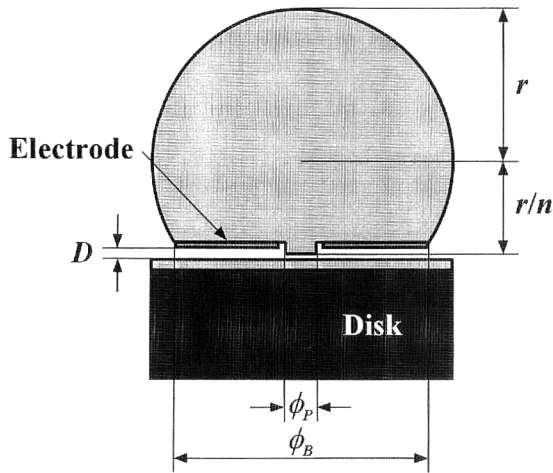


図3 超半球 SIL の断面図。

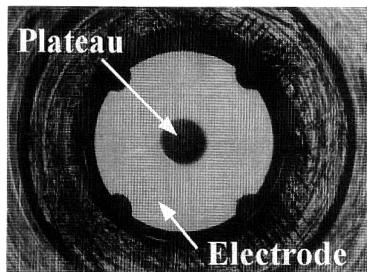


図4 レンズ底面写真 (突起部および電極部)。

いては、実効開口数が集光レンズ開口数の  $n^2$  倍となり<sup>17)</sup>、本例においては、SIL の硝材に LaSF 015 ( $n = 1.83@405 \text{ nm}$ ) を用い、また、集光レンズとして開口数 0.45 の対物レンズを使用したため、実効開口数は 1.5 となる。静電容量値  $C_{\text{gap}}$  は、誘電率を  $\epsilon$ 、電極面積を  $S$  として  $C_{\text{gap}} = \epsilon S / D$  で与えられ、外部インダクタンス  $L$  を付加し、簡単な LC 共振回路を構成することで、周波数  $f_{\text{osc}} = 1/2\pi[L(C_{\text{gap}} + C_t)]^{1/2}$  に変換している。

ここで  $C_t$  は回路の浮遊容量を表し、その値は SIL とディスクとの距離を遠ざけることで求められる。電極部の面積がおよそ  $4.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2$  であることから、付加インダクタンスを  $18 \mu\text{H}$ 、回路浮遊容量を  $10 \text{ pF}$  とした場合の発振周波数は約  $10.2 \text{ MHz}$  となる。ギャップ量の制御は、上記静電容量値を一定に保つサーボ回路 (図 5) を構成して実現した。発振出力  $f_{\text{osc}}$  は、基準発振周波数  $f_{\text{ref}}$  とともに周波数・位相弁別器に入力されて電圧出力を生成する。この誤差信号は位相補償を受けた後、電磁アクチュエータへとフィードバックされ、両周波数が等しくなるように SIL ヘッドを位置制御する。ここで実現されたギャップ制御回路は一種の PLL (phase-locked loop) として機能し、基準周波数を変化させることで、SIL とディスクとの

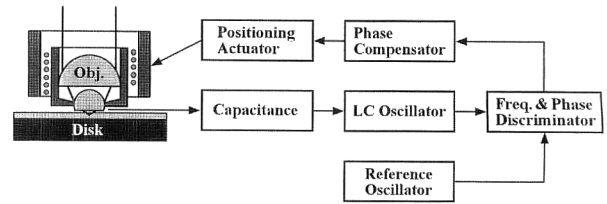


図5 静電容量ギャップ制御ブロック図。

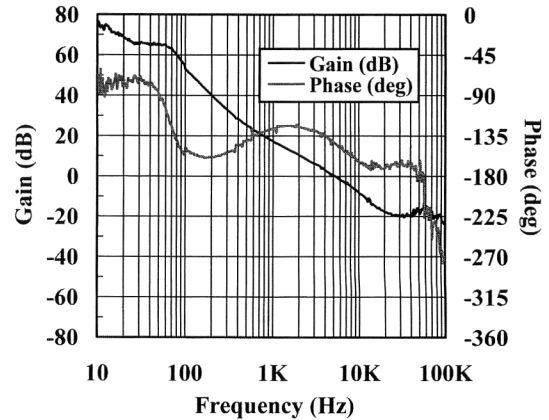


図6 ギャップ制御開ループ特性。

間隔を任意の値に保つことが可能となる。ディスク媒体に対する位置決め精度は開ループ特性から求められ、測定時のデバイス接触を防ぐため、ギャップ量を  $1 \mu\text{m}$  に設定して得られた結果を図 6 にプロットする。回転ディスクの面振れ量実測値 (回転同期成分) が  $10 \mu\text{m}$  であったことから、低域利得  $75 \text{ dB}$ 、カットオフ周波数  $5 \text{ kHz}$  より推測されるギャップ誤差は  $2 \text{ nm}$  となる。

## 2. 近接場光記録を可能とする相変化光ディスク

### 2.1 相変化記録材料のアブレーション

近接場記録媒体として相変化材料を用いる試みにおいては、媒体を  $x$ - $y$  ステージ上に搭載した静止実験系でのマーク形成と、シミュレーションによるディスク再生信号の報告がおこなわれてきた<sup>28-30)</sup>。これらの報告例においては、いずれも従来の相変化膜構成を反転させて積層した記録媒体が用いられている。相変化光ディスクにおいては、通常、記録層を比較的柔らかい誘電体膜  $\text{ZnS-SiO}_2$  層で挟み込む構造が採用されている。これは、記録層が結晶と非晶質間の相転移を繰り返す際、相変化材料が溶融して再冷却されるときに起こる膨張・収縮とその流動を吸収するための工夫であり、上記多層膜を、カバー層と金属反射膜とによって抑え、繰り返し耐久性を実現している。一方、相変化記録媒体に近接場光記録をおこなう場合、回転するディスク媒体に SIL ヘッドを近接させる必要がある上、SIL との屈折率差によるエバネセント波の伝搬率低下を防ぐた

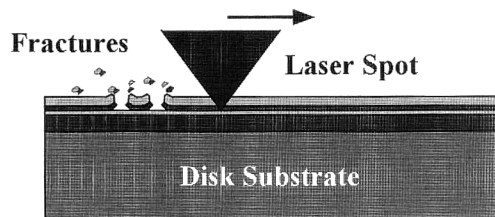


図7 相変化記録材料のアブレーション。

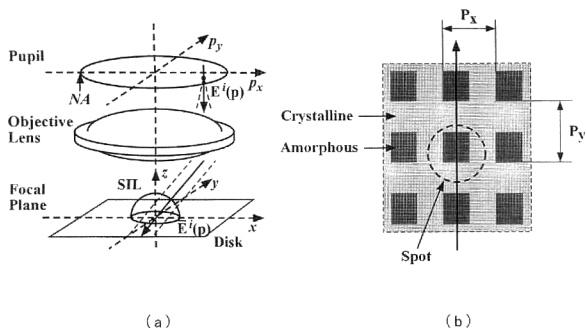


図8 (a) MTFシミュレーションにおける座標定義, (b) 誘電体多層膜の2次元回折格子。

め、カバー層を取り除いてディスク表面の平坦性を確保する構成が用いられる。

上記構成を有する相変化光ディスクを用いて信号の連続記録をおこなったところ、図7に描くような記録材料のアブレーション（記録熱による飛散現象）が生じ、媒体の破壊と、飛散した材料がSIL底面へ固着するという問題が発生した。このアブレーション現象を防ぐため、筆者らは、ディスク表面に誘電体膜からなるコーティングを付加し、材料飛散を抑える工夫を施した。平坦性を確保するため、上記誘電体膜はスパッタリングの手法により積層している。このオーバーコート層は、相変化記録膜と同様、薄膜として機能するため、その材質ならびに膜厚の最適化においては、多層膜反射を考慮した設計が必要となる。

## 2.2 MTFシミュレーションによる相変化記録膜の最適化

SIL光学系によるディスク再生信号の解析は、ベクトル回折理論を用いて報告されている<sup>31,32)</sup>。筆者らは、同様の手法を用いて再生信号の周波数特性である変調伝達関数(MTF)を求め、相変化記録媒体の設計手法を提案した<sup>21)</sup>。MTF計算をおこなう際に用いた座標系を図8(a)に示す。集光レンズ瞳上の座標 $\mathbf{p}(p_x, p_y)$ における電気ベクトルを $\mathbf{E}^i(\mathbf{p})$ と表し、座標変換を受けた焦点面上の電気ベクトルを $\mathbf{E}^o(\mathbf{p})$ とする。同電磁波は、誘電体多層膜の周期構造( $P_x, P_y$ )を有するディスク(図8(b))によって回折反射を受けるため、Fourier modal method<sup>33,34)</sup>の手法を用いて反射係数 $R_{a,b}$ ( $a, b$ は、それぞれ $x, y$ 方

表1 相変化記録媒体膜構成。

Material	Dielectric constant	Thickness (nm)
SIL	3.349	
Air	1.0	0~100
SiN	4.0	30
SiO <sub>2</sub>	2.161	60
SiN	4.0	70
ZnS-SiO <sub>2</sub>	5.523	55
GeSbTe	-4.798+12.12i (c)*	12
	5.693+11.59i (a)**	
ZnS-SiO <sub>2</sub>	5.523	16
Al-alloy	-17.39+4.20i	165
Glass	2.25	

\* Crystalline, \*\* Amorphous

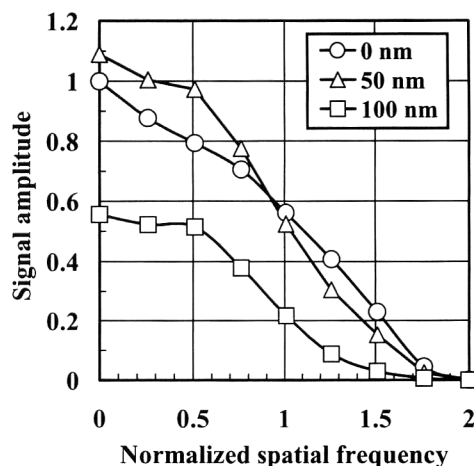


図9 誘電体オーバーコートが付加された相変化ディスク媒体でのMTF特性。

向への回折次数を表す)を計算、再びレンズ瞳上への座標変換をおこなって電気ベクトル $\mathbf{E}^o(\mathbf{p})$ を求める。瞳上のすべての点に対して上記計算を施すことでディスク再生信号が得られ、 $P_x$ を固定し $P_y$ を変化させながら再生信号強度を求めたものがMTFに相当する。なお、計算手法の詳細に関しては文献21)ならびに32)を参照されたい。

最適化された相変化ディスクの膜構成を表1に示す。本計算例においては、記録膜にGeSbTeを用いた4層構造の標準的な媒体構成に対し、SiN/SiO<sub>2</sub>/SiNの3層誘電体膜を付加している。同誘電体膜は、アブレーション現象を防止するとともに、50 nm程度のエアーギャップが存在する際、低NA成分の入射光線に対して無反射コーティングの役割を果たす。再生信号MTFの計算結果を図9にプロットするが、縦軸はギャップ0 nmでのDC信号レベルで規格化された信号変調度を、また、横軸は $NA/\lambda$ を1に規格化した空間周波数を表している。ここでの計算は、集光レンズの瞳を16×16のメッシュに分割しておこない、ギャップ量を0 nm, 50 nm, 100 nmと3通りに変化させた。計算結果は、相変化ディスク構成が50 nmのエアー

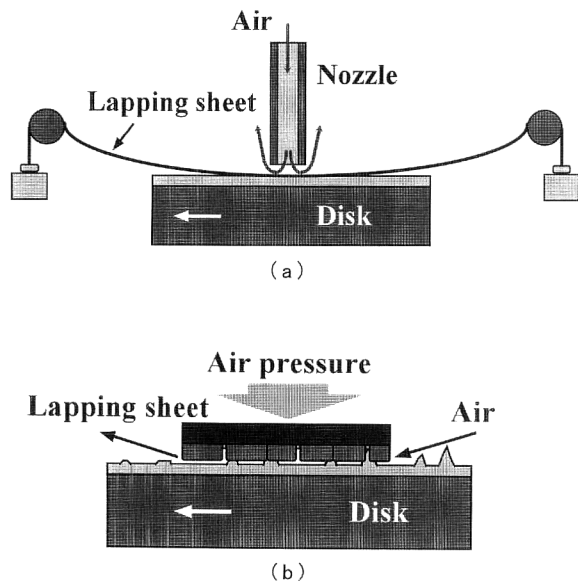


図10 (a) Flying tape polishing 実施例, (b) 拡大図.

表2 記録再生実験条件.

Modulation	(1, 7) code
Disk size ( $\phi$ )	120 mm
Bit length	80 nm
Minimum mark length	107 nm
Channel clock	40 MHz (20 Mbps)
Linear velocity	2.13 m/s
Air gap	50 nm
Peak power	1.56 mW
Bias power	0.64 mW
Cooling power	0.04 mW
Readout power	0.15 mW

ギャップに対して最適化され、高い信号コントラストと良好な周波数特性を併せもつことを示している。

### 2.3 ディスク表面の平坦化

実際の装置においては、回転するディスク媒体に SIL を近接させて信号を記録再生する。一般的に、ディスク表面には成膜時に発生した突起が存在しており、レンズ底面と記録媒体との接触を防ぐため、上記オーバーコートを実施した後、ディスク表面を平坦化し、その凸凹を減らす必要がある。筆者らは、成膜後のディスクに対し、磁気ディスク記録媒体の表面研磨にも用いられている FTP (flying tape polishing) の手法<sup>35)</sup>を適用し、平坦化を実現した。

図10にはFTPの具体的な方法を図解する。同図(a)に示す通り、ディスク上方に配置された空気ノズルから噴出する空気流を利用してラッピングシートを回転するディスクに押し当て、一定の圧力を与えて、ディスク全面にわたり表面研磨をおこなう。ディスク上に存在する突起はラッピングシートの凹部に挟まれて削り取られ、表面の平坦化が実現される(b)。グライドライトテスターによる測

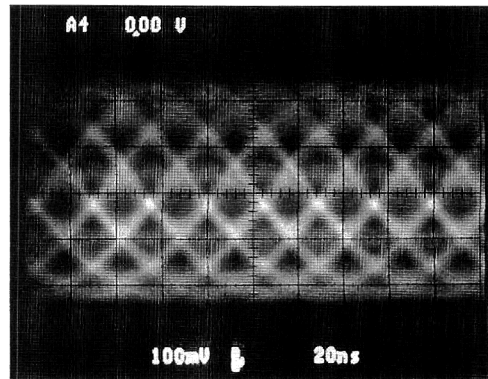


図11 ディスク再生信号アイパターン (80 nm/bit).

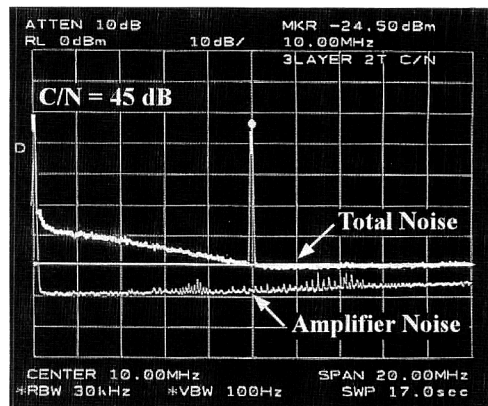


図12 2TマークのC/N比.

定では、30 nm 未満の平坦性達成が確認された。

### 3. 近接場相変化光記録

上記手法により平坦化が施された相変化記録媒体(溝構造なし)に、(1, 7)変調信号の記録再生を試みた。記録再生条件を表2にまとめている。ディスクの平坦化レベルを考慮し、実験においてはギャップ量を50 nmとした。媒体線速を2.13 m/s、チャンネルクロックを40 MHzに設定したため、転送レートはおよそ20 Mbpsに相当する。記録線密度は80 nm/bit(最短マーク107 nm)となり、従来の光記録では実現し得なかった高密度記録となる。なお、SILを取り除いた状態で測定された記録時の盤面出力換算値は1.56 mW、再生時の照射出力は0.15 mWであった。

波形等価後の再生信号アイパターンを図11に、また、最短マークである2T繰り返し信号を記録し、測定をおこなったC/N比(carrier-to-noise ratio)を図12に示す。測定帯域幅(RBW)を30 kHzにセットして得られたC/N比は45 dBであり、同記録密度の達成を実証するものである<sup>22)</sup>。

直径 1 mm の SIL と有効径 3 mm の集光レンズを用い、実効開口数 1.5 の小径近接場光学ヘッドを試作した。SIL を含めた 2 群レンズは広帯域 2 軸電磁アクチュエーターに搭載され、5 kHz の制御帯域とギャップ量 50 nm 以下の安定制御を実現した。

相変化材料のアブレーションを防ぐコーティングは、レンズ開口数 1.5 の条件下で、青紫色光源と 50 nm のギャップ量に対して最適化された。MTF シミュレーションの手法を用いて設計した 3 層コーティング、ならびに相変化ディスク層構成は、エバネセント波の伝搬を改善するとともに、信号コントラストを高める役割も果たす。

実現された記録密度は 50 Gbit/in.<sup>2</sup> に迫り、今後は、溝構造を有するディスクを用いた記録密度の実証が期待される。

## 文 献

- 1) R. L. Byer: "Diode-laser-pumped solid-state lasers," *Science*, **239** (1988) 742-747.
- 2) M. Oka and S. Kubota: "Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd:YAG lasers," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 805-807.
- 3) W. J. Kozlovsky, C. D. Nabors and R. L. Byer: "Efficient second harmonic generation of a diode-laser-pumped cw Nd:YAG laser using monolithic MgO:LiNbO<sub>3</sub> external resonant cavities," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 913-919.
- 4) M. Yamada, N. Nada, M. Saitoh and K. Watanabe: "First-order quasi-phase matched LiNbO<sub>3</sub> waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation," *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 435-436.
- 5) T. Sugita, K. Mizuuchi, Y. Kitaoka and K. Yamamoto: "31%-efficient blue second-harmonic generation in a periodically poled MgO:LiNbO<sub>3</sub> waveguide by frequency doubling of an AlGaAs laser diode," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1590-1592.
- 6) M. Oka, T. Kashiwagi and S. Kubota: "A triple-density optical disk system using a frequency-doubled Nd:YAG laser," *Proc. SPIE*, **1139** (1989) 149-154.
- 7) K. Tatsuno, M. Takahashi, K. Muraoka, H. Sugiyama, J. Nakamura, T. Andou and T. Miyai: "High storage density optical recording with a stable micro green second harmonic generation laser consisting of Nd:YVO<sub>4</sub> and KTP," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 601-604.
- 8) J. E. Hurst, Jr. and W. J. Kozlovsky: "Optical recording at 2.4 Gbit/in.<sup>2</sup> using a frequency doubled diode laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 5301-5306.
- 9) I. Ichimura, Y. Sabi, Y. Takeshita, A. Fukumoto, M. Kaneko and H. Owa: "High density magneto-optical recording with a second-harmonic generation green laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 5312-5316.
- 10) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku and Y. Sugimoto: "InGa<sub>0.5</sub>N-based multi-quantum-well-structure laser diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) L74-L76.
- 11) M. A. Haase, J. Qiu, J. M. DePuydt and H. Cheng: "Blue-green laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991) 1272-1274.
- 12) H. Okuyama, T. Miyajima, Y. Morinaga, F. Hiei, M. Ozawa and K. Akimoto: "ZnSe/ZnMgSSe blue laser diode," *Electron. Lett.*, **28** (1992) 1798-1799.
- 13) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano and T. Mukai: "Violet InGa<sub>0.5</sub>N/GaN/AlGa<sub>0.5</sub>N-based laser diodes operable at 50°C with a fundamental transverse mode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) L226-L229.
- 14) S. M. Mansfield and G. S. Kino: "Solid immersion microscope," *Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990) 2615-2616.
- 15) T. R. Corle and G. S. Kino: *Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging Systems*, 1st ed. (Academic Press, 1996) pp. 212-220.
- 16) S. M. Mansfield, W. R. Studenmund, G. S. Kino and K. Osato: "High-numerical-aperture lens system for optical storage," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 305-307.
- 17) 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.*, **65** (1994) 388-390.
- 18) I. Ichimura, K. Osato, F. Maeda, H. Owa, H. Ooki and G. S. Kino: "High density optical disk system using a solid immersion lens," *Proc. SPIE*, **2514** (1995) 176-181.
- 19) B. D. Terris, H. J. Mamin and D. Rugar: "Near-field optical data storage," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 141-143.
- 20) I. Ichimura, S. Hayashi and G. S. Kino: "High density optical recording using a solid immersion lens," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 4339-4348.
- 21) I. Ichimura, K. Kishima, 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.
- 22) K. Kishima, I. Ichimura, K. Osato, K. Yamamoto, Y. Kuroda, A. Iida and K. Saito: "Near-field phase-change recording using a GaN laser diode," *Proc. SPIE*, **4090** (in press).
- 23) K. Yamamoto, K. Osato, I. Ichimura, F. Maeda and T. Watanabe: "0.8-numerical-aperture two-element objective lens for the optical disk," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 456-459.
- 24) K. Osato, K. Yamamoto, I. Ichimura, F. Maeda, Y. Kasami and M. Yamada: "A rewritable optical disk system with over 10 GB of capacity," *Proc. SPIE*, **3401** (1998) 80-86.
- 25) I. Ichimura, F. Maeda, K. Osato, K. Yamamoto and Y. Kasami: "Optical disk recording using a GaN blue-violet laser diode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 937-942.
- 26) Y. Kasami, Y. Kuroda, K. Seo, O. Kawakubo, S. Takagawa, M. Ono and M. Yamada: "Large capacity and high-data-rate phase-change disks," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 756-761.
- 27) 市村 功, 大里 潔: "青紫色半導体レーザーを用いた高密度相変化光記録", *O plus E*, **22** (2000) 175-181.
- 28) K. Hirota, J. S. Jo and T. D. Milster: "High density phase change optical recording using a solid immersion lens," *Proc. SPIE*, **3401** (1998) 34-39.
- 29) T. D. Milster, J. S. Jo, K. Hirota, K. Shimura and Y. Zhang: "The nature of the coupling field in optical data storage using solid immersion lenses," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 1793-1794.
- 30) W.-H. Yeh and M. Mansuripur: "Evanescent coupling in magneto-optical and phase-change disk systems based on

- the solid immersion lens," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 302-315.
- 31) K. Otaki, T. Irita, T. Tokoyoda, H. Ooki and J. Saito: "Simulation of readout signals with near field SIL," *Proc. SPIE*, **3401** (1998) 87-94.
- 32) K. Saito, A. Nakaoki and M. Kaneko: "A simulation of magneto-optical signals in near-field recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 6743-6749.
- 33) L. Li: "Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, **13** (1996) 1024-1035.
- 34) L. Li: "New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 2758-2767.
- 35) M. Gherung, K. Schoettle, H. Kreissler, P. Rudolf, J. Hack and F. Anslinger: U.S. Patent No. 4514937 (1985).

(2000年6月27日受理)