

論文の内容の要旨

論文題目 Solid Immersion Lens を応用した光ディスク記録に関する研究

氏 名 市村 功

光ディスク記録再生装置における光学ピックアップの原理的な解像度は、一般に記録媒体上の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 λ 、対物レンズの開口数をNAとすると、概ね $\phi_{spot} = \lambda/2NA$ で与えられる。従って、高密度光記録を実現するための手法としては、光源の波長を短くする、或いは対物レンズの開口数を大きくするといった手段が有効である。上記手法のうち、コンパクトディスク装置において0.45程度であった対物レンズの開口数は、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0.7程度が実用化の限界と言われており、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Stanford大学のMansfieldらによって提案されたSolid Immersion Lens(SIL:固体浸レンズ)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_{eff})をSIL材料の屈折率倍に増加させる働きを持つ。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Solid Immersion Microscope(SIM)の対物レンズとして用いられ、その後、光ディスク記録再生装置への応用が試みられた。SILを用いた対物レンズの実効開口数が1を超える場合、 $NA_{eff} > 1$ の領域に属する光線は、エバネッセント波、すなわち近接場光となり、極めて短い距離しか伝播しない。一般にSILと被検体との距離(Air Gap)は、光源波長の1/10程度に保たれる必要があるため、同レンズを光ストレージに適用した場合、装置全体は密閉構造を持つ光

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、SIL と集光対物レンズは一種の 2 群レンズとして機能し、Air Gap 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を実現することが可能となる。

筆者は、SIL を用いて実効開口数 0.83 の摺動型光学ヘッドを試作、光磁気ディスクへの記録再生を通じて、同デバイスが高開口数 2 群レンズとして光記録再生に応用可能であることを確認した。以降は、SIL を近接場光学素子として研究、その実用化を模索するかたわら、非球面 2 群レンズを用いることで開口数 0.85 の対物レンズを実現し、光学ピックアップに搭載してその性能を実証した。対物レンズの高開口数化は、高密度光記録を実現する反面、光ディスク装置において想定される各種摂動に対する許容度を極端に低下させてしまう。とりわけ、光透過保護層(カバー層)の厚み誤差によって生じる球面収差と、ディスク基板とレンズとの傾きによって生じるコマ収差が、それぞれ、レンズ開口数の 4 乗、並びに 3 乗に比例して大きくなるため、従来の光ディスク構成をそのまま用いるのは困難である。この問題を解決するため、0.1 mm の薄型カバー層を持つ新構造光ディスクを提案し、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。上記装置構成における記録媒体として、筆者は、磁界ヘッドを必要としない相変化光ディスク媒体を選択、この際、相変化多層膜は従来と逆の順序で成膜され、その下地となる金属反射膜の平坦性がディスク雑音の大小を左右することを突き止めた。反射膜として Ion Beam Sputtering (IBS) の手法により成膜した Al 合金を用いることでディスク雑音を低減することに成功、InGaN 青紫色半導体レーザによってもたらされる光源の短波長化と併せて、130 nm/bit の記録密度(面記録密度 16.5 Gbit/in.² に相当)を実証した。加えて、相変化記録媒体の高転送レート化を達成、DVD サイズの光ディスクに実現された容量 22 GB と 35 Mbps 超のデータレートは、2000 年末に放送開始が予定されている Digital HDTV 衛星放送の 2 時間録画を可能とし、次世代光ディスク記録再生装置の有力候補となっている。

より一層の高密度化を可能とする近接場光記録において、Air Gap の変動は、エバネッセント波の結合、並びに記録媒体上へ到達する電磁波のエネルギーを大きく変化させ、光学系の解像度と記録再生時の照射出力許容度を低下させる。筆者は、加工・組み立て要求精度の厳しさから、ヘッド作製が困難と思われていた超半球 SIL を用いて実効開口数 1.36 の近接場光学ヘッドを試作(図 1)、相変化光ディスク媒体への記録再生を試みた。SIL 底面中央部に Ion Milling の手法を用いて高さ 1~2 μm の突起形状を加工し、収束光線が通過する領域以外を削り落とすことで記録媒体への接触面積を減少させた。一方、回転するディスクに対して近接条件を実現するため、SIL 突起部周辺に電極を形成する手法で対向するディスク媒体との間に静電容量素子を形成、その値を一定に保つサーボ回路を構成して Air Gap 量を正確に制御する Active Height Control の手法を考案した(図 2)。距離制御を実現するため、SIL ヘッドは電磁アクチュエータ上に搭載され、光軸方向の任意の位置に移動可能な構成をなす。この方法は、SIL を浮上スライダに搭載する一般的な手法とは異なり、実現される Air Gap が、回転ディスク媒体の線速度に一切依存しない特長を持つ。上記手法により、相変化光ディスク等の線速依存性を有する記録媒体に対して最適な記録条件を実現できる。Air Gap 制御の実測値は、回転ディスク媒体に 10 μm の面振れ(上下動)が存

在する場合の残留誤差が 2 nm 程度に抑制されていることを示している。更に、記録媒体からの反射光分布を小型 CCD カメラで観察し、相変化多層膜での反射によって生じる同心円状の干渉パターン(計算値)と照合することで、Air Gap 量を正確に校正する手法を提案した。

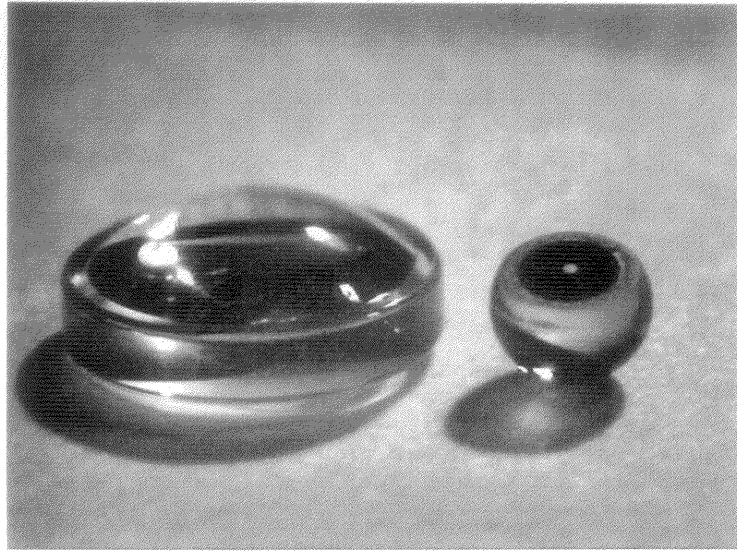


図1 実効開口数 1.36 の近接場レンズユニット

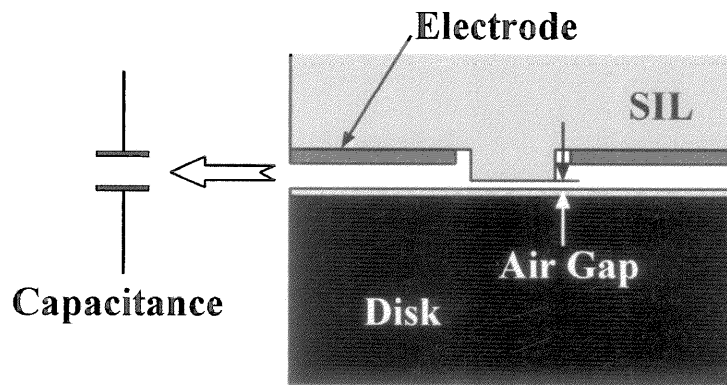


図2 SIL 底面突起加工と Active Height Control を実現する静電容量電極

試作した実験装置を用いて、光透過保護層の存在しない相変化記録媒体に記録再生を試みたところ、記録時のレーザー照射により、相変化媒体が飛散(Ablation)してしまう現象が観察された。相変化記録膜として用いたカルコゲナイド材料(GeSbTe)は、結晶相と非晶質相との間を可逆的に相転移する。この際の膨張・収縮を吸収するため、記録層は比較的柔らかい ZnS-SiO₂ 誘電体層に挟まれて使用されることが多い。上記 Ablation 現象は、この誘電体層が記録層の熱膨張で破壊されることによって生じている。筆者は、相変化多層膜の最上部に誘電体オーバーコートを施す手法を提案し、この問題を解決した。エバネッセント波の伝播と相変化記録マークのコントラストは、

Air Gap やオーバーコートまで含めた多層薄膜の構成によって左右される。筆者は、SIL によって実現される光学スポットを、照明光の偏光状態をも加味したベクトル回折理論によって解析し、多層膜の反射率、並びに透過率を計算する手法を用いて電磁波の伝播、近接場再生信号のコントラストを求めた。併せて、記録マーク再生信号に基づいた MTF シミュレーションの手法を応用して媒体層構成の最適化をおこなう手法を提案した。これらの手法により、近接場光記録を再生信号アイパターンによって実証することに初めて成功、赤色半導体レーザ光源と(1, 7)変調符号を用いて実証された記録密度 125 nm/bit でのディスク再生信号(図 3)は、実効開口数 1.36 近接場光学ヘッドの実現を裏付けるに十分なものである。

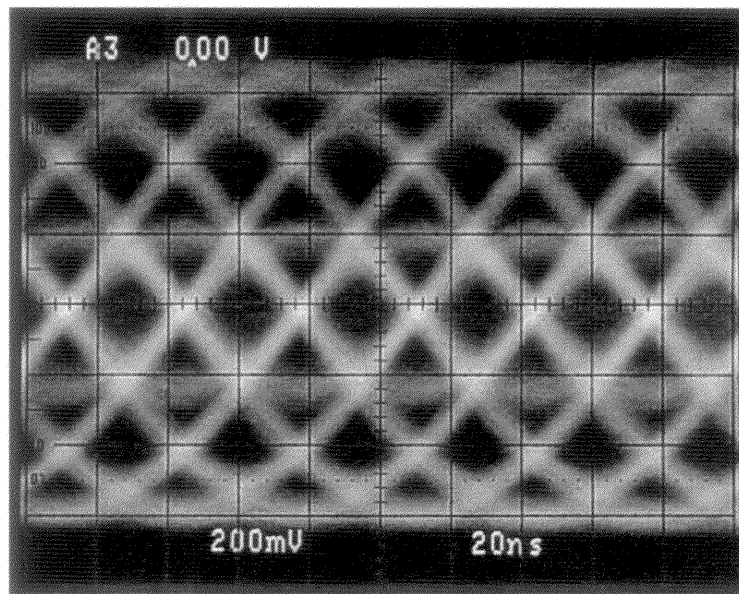


図 3 近接場光記録によって実現された再生信号アイパターン

筆者は、SIL を用いた近接場ヘッドを青紫色半導体レーザと組み合わせ、より一層の高密度化に挑戦すると共に、面記録密度を実証する試みもおこなっている。実効開口数 1.5 の近接場レンズユニットをトラック制御をも可能とする 2 軸電磁アクチュエータに搭載し、面密度を実証可能な装置構成とした。Active Height Control の広帯域化と反応性イオンエッチング(RIE)プロセスを用いた溝構造の作製、並びにディスク平坦化を通じて近接条件でのトラック制御を実現、ランド部への記録再生実験で確認された 80 nm/bit の線密度は、近接場光記録による超高密度光ストレージ実現の可能性を示唆している。

SIL 光学ヘッドは、その光利用効率の高さ、回転ディスク媒体を基本とした光メモリー記録材料との相性等、特筆すべき点が多い。現在、屈折率 1.8~1.9 のガラス材料によって実現されている SIL を半導体プロセスによって作製する研究も進んでおり、高屈折率材料を用いた超小径 SIL が実用化される日も近い。年率 60~100% の記録密度向上が続く磁気ディスク装置に近接場光記録を組み合わせる手法も提案され、今後は密閉構造の光ハードディスク装置として、テラバイトストレージの実現が期待される。