

## 審査の結果の要旨

論文提出者 市村 功

光ディスクメモリーは 1982 年のコンパクトディスクの実用化以来、主にデジタル情報の大容量記録媒体として飛躍的に普及発展してきた。現在までの光ディスクの技術開発の主要な関心事は、如何に光のスポットを微小化して記録密度を上げるかにある。ところが光の回折理論によれば、スポット径は、光源の波長を、対物レンズの開口数で除した値で与えられる。よって、その対策は波長の短い光を、開口数の大きな対物レンズで集光することに尽きる。このため、短波長化、高開口数化を目指し熾烈な開発競争が展開されている。本論文は、この開発動向に沿って申請者が行った高密度光ディスク装置の研究成果をまとめたものである。

対物レンズの開口数は屈折率に光束の開き角（半角）の正弦を掛けた値に等しいから、空气中で使用する場合は 1 が最大値であり、これを超えることは原理的に不可能である。この限界を超えるため、生物顕微鏡などでは、屈折率の高い液体中で物体を観測する液浸レンズが使われている。しかし、対物レンズと記録媒体が高速で相対運動する光ディスク装置では液浸法を採ることは難しい。ところで、屈折率が 1 より大きな媒質中では開口数を 1 以上にすることが可能である。このような光波は空气中を通常の意味で伝播することはできないが、指数関数的に減衰するエバネセント波として媒質の表面から空气中に浸みだしている。従って、対物レンズと記録媒体を数十ナノメートルのオーダーの間隔で密着させると、大きくエネルギーを失うことなく高開口数の光波を伝えることができる。これは近接場光学の一種で、この方式のレンズを固体浸レンズ(Solid Immersion Lens 略して SIL)とよぶ。本論文では波長 405nm の青色半導体レーザを光源とし、開口数 1.5 の SIL を用い、約 40 ギガビット毎平方インチの記録密度でデジタルデータの記録再生を実証した。これは現行 DVD 装置の 3.4 ギガビット毎平方インチと比べ 12 倍程度の高密度化を達成したことになる。

本論文は 9 章からなる。

第 1 章は序であり、研究の背景、近接場光記録の歴史と現状、および、本論文の構成が述べられている。

第 2 章「Solid Immersion Lens の光ディスクへの応用」では、本論文で扱われる SIL 方式の近接場光記録について、その原理を紹介し、実施例に基づき SIL 光学ヘッドの構成、性能、制御方法などを概観し、次章以降に詳述される研究内容の概略が紹介されている。特に SIL 方式は本来開口数が 1 以上の近接場光記録を目指す方式であるが、開口数が 1 未満であっても従来型の高開口数対物レンズとして有効であることが示されている。

第 3 章「Vector 回折理論」では、近接場光記録における記録媒体上での結像特性および再生信号の評価のための数値シミュレーションを行っている。高開口数の結像では光波をスカラーで扱う従来の回折理論では精度が足りず、ベクトル的な扱いが不可欠となる。本論文では光波を 2 つの偏光成分を持つ平面波に展開し、各平面波の伝播を計算し合成する方法を採用している。この

方法により、対物レンズと多層構造を持つ記録媒体、およびその間の空気ギャップ層を含む光学系全体の結像特性を評価することに成功している。結果は、記録媒体上の点像分布関数および変調伝達関数(MTF)として表現される。この方法でギャップ層の厚さが結像特性に及ぼす影響を評価し、許容ギャップ量が波長の 1/10 すなわち 50nm 程度であることが導かれた。この結果は、近接場光記録が磁気記録と同様に密封型とせざるを得ないことを示唆するものである。また、ギャップ量の変動についてもナノメートル以下の制御が必要であることを示している。一方、開口数が 1 以下の場合はこのような厳しい制約はなく、従来の方式が適用できることを示している。続く 3 章では、開口数 1 未満の対物レンズを用いたリムーバル型光ディスクの高密度化について述べられている。

第 4 章は「開口数 0.83 の Solid Immersion Lens による光磁気記録」と題し、開口数が 1 未満であるが 1 に近い高開口数の対物レンズを用いた高密度記録について実験例を報告している。具体的には、Nd:YAG レーザの第 2 高調波 (波長 532nm) を光源とし、開口数 0.83 の SIL 構成の対物レンズを用い、高密度 ROM ディスクの再生、および、光磁気記録を試みている。光磁気記録では 4.3 ギガビット毎平方インチの記録密度を達成している。開口数が 1 未満であるため、対物レンズを記録媒体に密着させる必要がなく、着脱可能であるという光ディスクの特長を活かすことができる。本研究により、開口数が 1 未満であっても SIL 対物レンズが高密度化に有効であることが実証された。

第 5 章「高開口数 2 群レンズによる薄型光透過保護膜を介した光記録」では、前章に述べられた実証実験を発展させ、開口数 1 未満の対物レンズを用い、リムーバル光ディスク装置を試作した結果が述べられている。記録媒体は相変化型で、記録層(GeSbTe)を誘電体層ではさみ、下に光の反射層、上に厚さ 0.1mm の保護膜をつけた構造を採用し、開口数 0.85 の 2 群対物レンズと波長 640nm の半導体レーザを用い、6.1 ギガビット毎平方インチの記録密度を達成している。これは、120mm 径の光ディスクで 8 ギガバイトの記録容量に相当する。また、2 群レンズのレンズ間距離制御、自動焦点制御など制御系の最適化についても述べられている。

第 6 章「InGaN 半導体レーザを用いた高密度光記録」では、前章の成果を基に、記録密度をさらに上げるため、最近実用化された波長 405nm の InGaN 青色半導体レーザを導入し、記録光源の短波長化をはかっている。光源の短波長化、光学系の高開口数化にともない、幾何学的なパラメータの許容幅が狭くなるため、アクチュエータを設計し直し、これに対処している。また、相変化記録媒体の最適化を行っている。最終的に開口数 0.85 の 2 群対物レンズと青色半導体レーザとの組み合わせにより、16.5 ギガビット毎平方インチの記録密度を達成し、120mm 径で 22 ギガバイトの記録容量を持つ相変化型光ディスク装置を完成させた。また、大容量化と併せ、転送レートの高速化にも取り組み、40 メガビット毎秒の速度を達成している。

第 7 章「Solid Immersion Lens による近接場光記録」では、開口数が 1 を超える近接場光記録再生について述べられている。近接場記録では、ヘッドとディスクを 50nm 程度の間隔に保ち、ナノメートル以下の精度で制御しなくてはならない。これを実現するため、空気力学的な浮上スライダーではなく、電磁アクチュエータを搭載してダイナミックに制御する方式を試みている。すなわち SIL の収束光透過部に突起加工を施し、その周辺部、光の通らない部分に電極を設けることにより対向する記録媒体との間に生じる静電容量を検出し、これを誤差信号として間隔の制御を行っている。この方法により、開口数 1.36 の SIL と波長 657nm の赤色半導体レーザの組み

合わせにより、20 ギガビット毎平方インチ相当の記録密度を実証している。

第8章は「InGaN 半導体レーザを用いた近接場光記録」と題し、SILの開口数を1.5に上げるとともに、405nmの青色半導体レーザを光源に採用し、さらに高密度化を進めた結果が述べられている。相変化型光記録媒体をこの系に合わせて設計するとともに、各 부품の軽量化や制御系の最適化を行った結果、最終的に40ギガビット毎平方インチの記録密度を達成している。

第9章「結び」では、本論文の成果のまとめと、今後の展望が述べられている。

以上を要するに、本論文は、Solid Immersion Lensを応用し、対物レンズの高開口数化をはかり、さらに光源の短波長化により、大容量光ディスクの開発を目指したものである。その主要な成果は次の2つにまとめられる。開口数0.85のSILは2群対物レンズと位置づけられ、この方式に基づくリムーバル光ディスクは容量22ギガバイトの相変化型光記録再生装置として実用化の段階にある。一方、開口数1.5のSILを用いた光ディスクの研究では、40ギガビット毎平方インチの近接場光記録を達成し、次世代光ディスクとして近接場光学の可能性を実証した点で大きな意味をもつ。本研究は、光学系から相変化型記録媒体や制御系に至る光ディスク装置全体にかかわる設計、評価において多くの新しい成果を挙げ、光記録の分野に多大の貢献を成し遂げている。

よって、本論文は物理工学に対し寄与するところ大であり、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。