

論文の内容の要旨

論文題目 光ディスク再生信号解析における
定式化と計算機シミュレーションに関する研究

氏名 齊藤 公博

小型集積化および高密度化を目的とした光ディスクの理論解析において、特に信号再生の計算機シミュレーションにおける光学系の定式化とその応用について述べる。

光ディスクシステムは、回転する円盤状の媒体に、レーザー光を対物レンズによって回折限界に集光し、光スポットの焦点位置制御およびディスク上に設けられた案内溝へのトラッキング制御を行いながら、マークを記録して回折光を検出することで情報を判別するシステムである。これら記録再生や制御手法の原理は、例えば G. Bouwhuis らの“Principles of Optical Disc Systems”で詳細に述べられている。一方、近年、映像や音楽およびコンピュータ用情報記録媒体として、光ディスクシステムに益々の高密度化および小型化が要求されている。記録密度を増大させるためには、限界性能を引き出すために、対物レンズで回折限界まで絞られた記録媒体中の光の挙動を電磁場として正確に解析する必要がある。また、検出光学系の小型化において、偏光素子等を含む光学系における焦点近傍の光強度分布を正確に計算する必要があると同時に、制

御信号の検出系を含む光学系全体の特性を直感的に把握する方法も必要である。

本研究では、まず光学系の小型化を主目的とした焦点近傍における偏光検出光学系の解析手法として、1) 異方性媒質を含む光学系の光線追跡と Fraunhofer 回折の定式化と応用、次に記録媒体中の正確な光の挙動を計算する手法として、2) 3次元の屈折率構造中における電場強度分布計算のための定式化と応用について述べる。また、検出光学系および媒体構造を考慮した光学系全体の特性を直感的に把握するための、3) 有効点像分布関数 (EPSF: Effective Point Spread Function) の概念とその定式化および応用について述べる。更に、高密度化に関する今後の展開として、4) 光ディスクを用いたホログラム記録再生における記録密度解析のための定式化と原理確認実験の結果について述べる。

1) 異方性媒質を含む光学系の光線追跡と Fraunhofer 回折の定式化と応用
始めに等方性媒質の場合について、焦点近傍に限らず電磁場の伝播を厳密に記述する平面波展開表現を基に、停留位相法 (Stationary Phase Method) を適用して Kirchhoff の回折積分を導いた。またこの Kirchhoff 回折積分に再度停留位相法を適用する事で光線追跡が得られる事を示した。この手順によって、光線追跡の適用範囲を定量的に示すことができる。

次に、結晶など異方性媒体の内部と境界における平面波の解析方法をレビューした後、先に述べた手順を異方性媒体を含む光学系に適用した。その結果により、異方性媒体を含む光学系における光線追跡がポインティングベクトルの追跡になる事を証明し、適用範囲を含め、2次元フーリエ変換を用いた Fraunhofer 回折計算による結果と矛盾しない偏光光線追跡法を構成した。

この計算手法を用いて、焦点近傍に置かれた台形形状の結晶プリズム内の光伝播を解析した。光が台形プリズムの斜面へ入射した時、2つの固有偏光に分離されるが、この2つの固有偏光が内部での多重反射によって再度複数に分離することなく、且つ光磁気信号検出用の分割ディテクタ上で大きな分離幅が

とれるような c 軸の配置を見出し、実際の光磁気ディスクからの信号再生を原理確認した。

2) 3次元の屈折率構造中における電場強度分布計算のための定式化と応用
焦点近傍における電場は、対物レンズの NA が非常に高い場合であっても、焦点を中心とする参照球面上の各点の電場を係数に持つ平面波の集合として表される。従って平面波回折の計算を行えば、案内溝を持った光ディスク媒体のような屈折率構造中の電場は、これら平面波が入射する場合の重ね合わせで表現できる。

しかしながら、平面波回折計算法も複数存在し、光ディスク解析に適した方法を選択することが必要である。まず電磁波解析の各種手法を簡単に考察した後、平面波回折計算法で光ディスク解析に用いることができると思われる 5 つの方法、Rayleigh 法、表面電流法、有限要素法、座標変換法、RCW (Rigorous Coupled Wave) 法について、特に 3次元構造への適用上のポイントについてレビューし、座標変換法に関しては 3次元化における数値計算上の改良、また RCW 法の光磁気記録媒体への適用について述べた。

そして、これら 5 つの手法に基づく計算機プログラムを実際に作成し、光ディスクに近い金属グレーティングの計算モデルに適用して計算結果を比較した。本研究では、計算精度、スピードおよび記録マークのモデリングの点で優位な RCW 法を応用例に採用した。

応用として、光ディスク案内溝の凸部および凹部に記録再生を行う場合の電場強度分布を計算し、実験との比較により凸部に記録再生する優位性を明らかにした。また、SIL (Solid Immersion Lens) を用いた光磁気ディスクの近接場再生において、SIL とディスク表面との間隔が波長の 10 分の 1 程度であれば再生信号劣化は 3dB 以内に留まる事を示し、実現の可能性を示した。

3) 有効点像分布の概念とその定式化および応用

光ディスクは走査型顕微鏡であり、記録面上に集光された光の強度分布である PSF (Point Spread Function) と記録マークの反射率分布のコンボリューション

を用いて再生信号を計算することができることは良く知られている。

本研究では、分割された検出器と偏光検出光学系および光ディスクの案内溝の影響を考慮した有効点像分布関数を定義し、応用例を述べた。

光ディスク光学系をスカラーの部分コヒーレントモデルで記述し、ディスク上のマークによる回折光強度が弱い（弱回折）と仮定すると複素数の EPSF が導かれる。 応用例として、Push Pull 法（差動検出法）および DPD 信号と呼ばれるトラック位置検出信号の解析について述べた。 また、案内溝上に記録されたマークの再生特性の解析、共焦点検出、DVD/CD コンパチブル再生の基礎検討への応用を述べ、EPSF によって様々な光学系を統一的に理解することが可能であることを示した。

つぎに EPSF を偏光検出系に拡張した。 光磁気ディスクのマークは反射によって偏光の回転を引き起こすが、この場合、EPSF は Jones' vector から導かれる。 応用例として、2分割された対物レンズ入射瞳のそれぞれの領域で異なる回転角を生ずる偏光素子を用いた光磁気検出法に適用し、EPSF を用いてその特異な再生特性を明らかにした。

4) 光ディスクを用いたホログラム記録再生における記録密度解析と原理確認実験結果

高密度化に関する今後の展望として、光ディスクのホログラムメモリ化を目指した検討結果を示す。 本方式の原理を述べた後、媒体中の3次元の光波を考慮することなく、物体光と参照光を生成する光ビームの2次元断面分布のみを用いて再生像を計算する方法を示した。 この手法を用い、参照光のシフト

（平行移動）に対する再生像の強度を表すシフト選択関数が、参照光強度分布の仮想的な点像分布関数に一致することがわかった。 同時にクロストークの計算を行い、本方式の記録密度を計算した。 最後に、光ディスクに近い構成での複数ビット同時記録再生の原理確認実験結果を示した。