

氏 名 後 藤 顯 也

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 平成 3 年 3 月 15 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭 和 38 年 3 月

東北大学工学部電子工学科卒業

学 位 論 文 題 目 光ディスクヘッド用グレーティングレンズに
関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 小野 昭一

東北大学教授 川上彰二郎 東北大学教授 潮田 資勝

論 文 内 容 要 旨

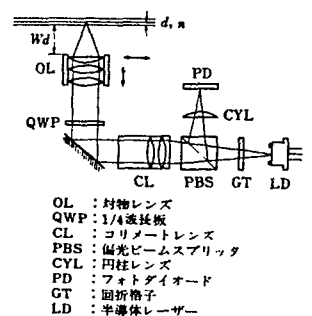
1. 緒 言

回折型レンズは第一に波長選択性があり、第二に入射光角度依存性が強く、第三に回折効率が低いなどの問題があり、X線用など特殊用途以外にはほとんど使われていない。そのために基礎特性的研究もほとんどなされていない。それにもかかわらず回折型レンズの研究に着目したのは

- ①初のレーザ応用量産機器である CD プレーヤはスペクトル幅の狭いレーザ光故に波長選択性に対応可能性がある。
- ②微小な回折限界収束スポットを得るためには使用光部品の幾何学収差を $1/100 \sim 1/30 \lambda$ と良くせねばならず、球面研磨屈折レンズは球面収差が大なので対応策として複合レンズや非球面ガラスレンズを使用するのは高価すぎる。
- ③非球面プラスチックレンズは焦点距離の温度変化係数が大のためにコリメータレンズには使えないし、光磁気ディスク用光ヘッドの再生信号の SN を悪化さす残留複屈折もある。

- ④本質的に球面収差のない回折型レンズは軽く薄く量産性に富むレプリカ作製が容易と考えられるので、回折型レンズの基礎/応用研究が必要であるとの理由からである(第 1 章)。

光学部品に対する幾何学的 RMS (Root Mean Square) 波面収差 (δw) Maréchal Criterion とは図 1 に示す半導体レーザから光ディスク基板に到るまでの間に通過する全光部品から受けるレー



(図 1) 光ディスク光学部品

ザ光の波面の乱れを $1/14\lambda$ 以下に抑えなければならない (1式) という制約である。

$$\left\{ \sum_i (\delta\omega)_i^2 \right\}^{1/2} \leq 1/14\lambda \approx 0.07\lambda \quad (1)$$

すなわち各光学部品の波面収差 $(\delta\omega)_i$ を厳しく制限しなければディスクの記録や再生ができなくなる。対物レンズの光ヘッドへの取付け角による波面劣化分を調整シロ $(\delta\omega)_{\text{ADJUST}} = 0.025\lambda$ とし、光ディスク基板の RMS 波面収差 $(\delta\omega)_{\text{DISC}}$ に規格値の 0.05λ を与えると、(1)式を満たすためには半導体レーザの窓硝子、回折格子、ビームスプリッタ、反射プリズムなどの平面研磨部品の $(\delta\omega)_i$ を $\approx 0.011 \sim 0.015\lambda$ 以内にし、対物レンズやコリメータなど球面の光学部品の波面収差 $(\delta\omega)_i$ は夫々 0.03λ 、 0.025λ に抑えなければならない (第2章)。

2. 電子ビーム描画による回折型レンズの研究

はじめに、集積化光ヘッドのキー技術である光導波路対物レンズの研究を行った (第3章)。すなわち平面光導波路から回折射出され、外部の空間の1点に焦点を結ぶように平面波-球面波の変換を行う回折型レンズは ①電子線による屈折率変調と微細加工の不完全性のために回折効率が理論の半分以下に低減した。②グレーティング部の導波路層厚の不均一性のために、RMS 波面収差が大幅に増大し光ディスクに要請される e^{-2} 幅測定で $1.7\mu\text{m}$ 以内のビームウエストにはできなかった。後年、西原らが同様の研究を精力的に行っているが本研究と同じ大きさにとどまっている。本研究では回折型の平面光導波路から出て空間に焦点を結ぶ方式の Out of Waveguide Plane 光導波路レンズの回折効率が高くなり得ることを Wave Vector と Grating Vector の Momentum 保存の考えから理論的に明らかにした。

つぎにこの研究で習得した電子線描画技術を応用し半導体レーザ波長専用的高 NA (=0.5) のオフ・アクシス型平面グレーティング対物レンズ、グレーティングコリメータレンズ、ならびに自動焦点検出光学系用グレーティング非点収差複合レンズの研究を行った結果、

- ①電子線描画技術による半導体レーザ波長対応のグレーティングレンズが初試作できた
- ②非回折光を分離する高 NA オフ・アクシス型グレーティング対物レンズを初試作できた
- ③ビームウエストサイズを e^{-2} 幅測定で $1.3\mu\text{m} \phi$ 以内に初めて収束することができた
- ④円柱レンズと凹レンズとを重畳させた CGH (Computer Generated Holography) 光学部品としての非点収差レンズをはじめて1枚の薄い複合グレーティングにて試作できた

等の成果を挙げると同時に電子線描画法では次の問題があることを明らかにした。すなわち、

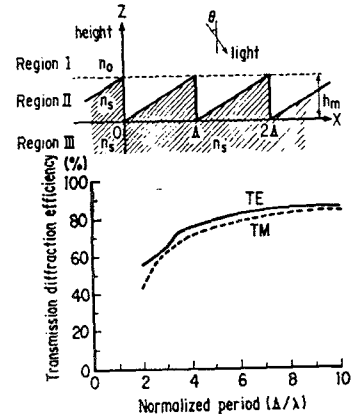
- ①ブレース化グレーティングレンズ用にドーズ量を制御描画するには数~10時間を要す、
- ②二次電子の影響で $0.2\mu\text{m}$ 以下の微細加工ができないために回折効率が低すぎる、
- ③電子線描画方式では最大 $2 \times 2\text{mm}$ の面積制約があるために実用的な $5\text{mm} \phi$ サイズを可能にするには膨大な予算を必要とする大型特殊電子線描画装置の開発が必要である (第4章)。

そこで研究をさらに進める前に回折効率と回折レンズ特性の理論的な検討を行った。

3. 平面グレーティングレンズの理論的検討

(1) 格子ピッチ Λ を変数とする透過回折効率を明らかにした

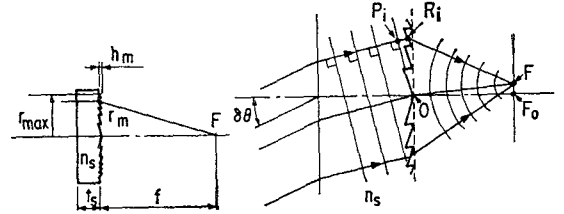
ブレース化されたレリーフ型グレーティング (図2) の格子部前後における屈折率と電界分布とを誘電率と電界の展開係数とで表し, TE波とTM波が入射した場合の各部の波動方程式を m 次透過回折波と m 次反射回折波の展開係数のマトリクスで表示し, $m = -5$ 次から $+5$ 次までについてコンピュータ数値計算で解いた。透過回折効率はグレーティングの規格化ピッチ $\Gamma (= \Lambda / \lambda)$ がレーザ波長の約5倍以上ならばTM波の透過回折効率は85%, TE波では $\sim 87\%$ であることを明らかにした (図2, 第3章)。



(図2) 透過回折効率

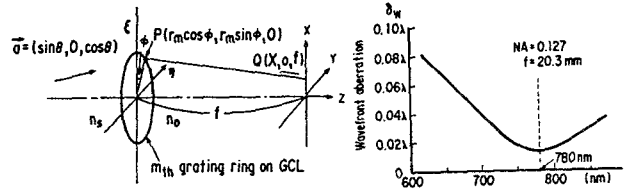
(2) グレーティングレンズの諸特性を明らかにした

入射光傾き角特性, 波長特性, 温度特性を理論的に計算しNAをパラメータに波面収差の劣化で表現 (第5章)。レンズ中心を通るビームと中心から離れたところを通るビームとの光路差OPDがレーザ波長の m 整数倍となるのが平面グレーティングレンズ (図3) である。その輪帯上の座標系 (図4) において焦点をOPDの標準偏差が最小になる点と定義した光線追跡



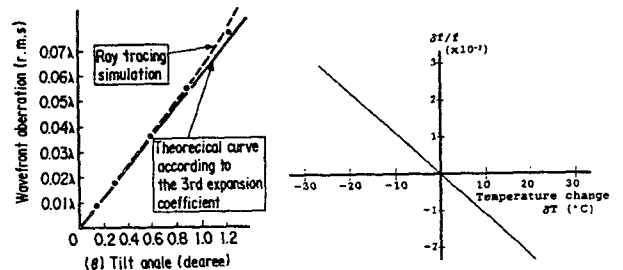
(図3) 平面グレーティングレンズ

と, コマ収差係数の近似展開とから入射光線の光軸に対する傾き角に対するRMS波面収差の劣化度 (ΔW) を求めた。NA = 0.13のコリメータレンズでは ΔW が 0.015λ 程度の斜入射許容角は $\pm 0.2^\circ$ であることが明らかになった (図5)。また設計波長を中心に $\pm 20\text{nm}$ の波長変移では ΔW がほとんど変化しないが, 設計中心波長から $\pm 50\text{nm}$ もシフトすると $0.01 \lambda / 20\text{nm}$ の率で急速に ΔW が増大する (図6)。また温度変化による焦点距離シフトは通常の屈折型プラスチックレンズに比べて数分の一と小さい (図7) ことも明らかになった。焦点距離の温度変化



(図4) GCLの座標系

(図6) 波長特性



(図5) GCL傾き角度特性

(図7) 温度特性

係数をプラスチックの線膨脹係数 α と半導体レーザーの発振波長の温度シフト係数 γ とで表わすと、 $\delta f / \delta T = f(2\alpha - \gamma)$ となり、 2α と γ が相補関係となる。線膨脹係数の大きい適当なレプリカ材料を用いれば温度による焦点距離の変化係数を実質上零にすることもできる。

4. プラスチックグレーティングコリメータレンズの試作

以上の検討を踏まえ光ヘッドを小型軽量に、かつ量産できる見通しをつけた。 $\Gamma = 5$ 、すなわちピッチが波長の約5倍以上ならば透過回折効率として最高86%程度が達成できるから、まず初めに、回折効率が高く軽量で光学系の波面収差を劣化させないグレーティングコリメータレンズ GCL (第5章) の研究を遂行した。この研究は成功し、史上初めて100kp/月の規模で量産され、CD用光ヘッドへ搭載・市場に出荷された。この研究の特徴は

- ①波長780nm \pm 10nmの半導体レーザー専用のグレーティングコリメータレンズであること
- ②回転対称性の原盤金型加工法を採用したために、高精度の精密機械加工が可能となり RMS 波面収差0.025 λ の大口径5.2mm ϕ のグレーティングレンズが実現したこと
- ③ブレード化グレーティングによる最大82%の高効率化が初めて実現できたこと
- ④原盤金型による均一な品質のプラスチックレプリカの量産に成功したこと

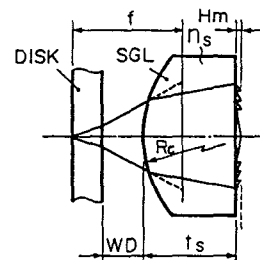
などである。ここでは原盤作製方法が研究ポイントである。検討結果グレーティング輪帯半径 r_m の位置精度さえ出ていれば r_m と r_{m+1} との間 (ピッチ) のブレード化加工精度が多少粗くても (正確な鋸歯状でなくても)、得られる回折効率に面精度があまり影響が現れない。すなわちグレーティングレンズにおいては、表面粗さが0.1 μ m程度であればブレード化形状よりも各輪帯ピッチが重要であることが明らかになった。またコリメータや対物レンズは回転対称なレンズであり、電子線描画装置を利用する方法は加工時間と加工安定性から考えて最善の方法ではない。このことから回転対称でサブミクロン切削加工のできるダイヤモンドターニングマシンによる0.05 μ m精度の旋盤方法を導入した。

5. 球面基板グレーティング対物レンズの研究と試作

再生専用光ヘッド用コリメータの NA は0.13前後であり GCL は半導体レーザーと一体になって固定光学系を形成している。装着時に一度だけ焦点調整しておけばその後の環境変化で問題を起こすことはない。しかし、①記録用 (WORM) や書替可能 (ReWritable) 用光ディスクのコリメータと対物レンズとしてはもっと高 NA にする必要がある。②対物レンズは光軸方向とラジアル方向の2軸方向に駆動され、光ディスクから反射回折された光を受ける。この駆動時に対物レンズが傾くことが多い。NA \geq 0.3程度以上の平面グレーティングレンズでは広い傾き斜角度特性を持たせることが困難である。また③回折効率も著しく劣化する。したがって再生用光ヘッドコリメータレンズ以外の用途では応用上の制約が発生する。これを克服するための研究が球面基盤グレーティングレンズ SGL (図8) (第6章) である。SGL では①高 NA でも回折効率が低下せず、②耐傾斜角特性の向上を計ることができ、③コマ収差や複屈折性が全く無いので高 NA コリメータや高 NA 対物レンズが可能である。必要な開口数を屈折による球面基板ガラスと回折によるグレーティング膜と

で折半している点がポイントである。NAが0.45の対物レンズはグレーティング膜のNAを半分の0.225で済ませられる。

NAがこの程度なら最小輪帯ピッチも3~4 μm と広くなり回折効率の低下という問題が起こらない。また球面基板を用いているために入射傾き角も平板の場合の2倍の $\pm 0.5^\circ$ まで向上している。さらに紫外線硬化樹脂成形中に圧力がかからず温度サイクルにも浴されないため金型原盤寿命が射出成形の場合より10倍も長い。SGLの唯一の課題は設計波長の $\pm 5\text{nm}$ の範囲で、かつ戻り光雑音対策上 $\pm 1\text{nm}$ 程度のスペクトル幅のレーザーを使用しなければならないという使用上の制約である。



(図8) 球面GLの概念

6. 結 論

EB描画法により導波路対物レンズと平面グレーティング諸レンズ原盤とを試作した結果、回折効率と入射角特性と波面収差とに問題があり前者を波動方程式から後二者を3次コマ収差係数と光路長標準偏差の光線追跡とから理論的に求め最適形状を策定。規格化ピッチ $\Gamma = (\Lambda/\lambda)$ が5以下では Γ にほぼ比例して効率と許容入射角とが低下する。いずれも実験データと良く合致する。そこで $\Gamma = 7$, $\text{NA} = 0.13$ のコリメータを超精密旋盤と射出成形とで試作。回折効率75~82%, RMS波面収差 0.025λ を達成でき、課題を解決し従来レンズに代替できた。

片球面ガラス基板に $\Gamma = 5$, $\text{NA} = 0.23$ のグレーティングレンズ膜をコートし高 $\text{NA} = 0.47$, 高回折効率(65~75%), 低波面収差 0.03λ で広耐入射角特性の回折応用対物レンズが試作できた。

審査結果の要旨

近年目ざましい進展を見せている光産業の支柱の一つとなっている光ディスク再生装置の実用開発においては、レーザを装着した光ヘッドの小型・軽量化と低価格化を実現するために、回折効率が高く、波面収差の少ない簡便なレンズの研究開発が強く要望されていた。

著者はこのような課題に取り組み、光導波路型レンズや平面グレーティングレンズについて詳細な検討を行うと共に、それらの短所を解決するために球面基板グレーティングレンズを提案し、その諸特性と量産可能な製作法について一連の研究を行ってきた。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は総論である。第2章では、光ディスクヘッド用光学系の具備すべき基本条件を明らかにし、そのために要求される対物レンズとコリメータに関連する波面収差と開口数について詳しい理論的検討を行っている。

第3章では、光集積回路化を目標とした光導波路型グレーティングレンズの電子ビーム描画法による試作開発を行い、その特性と現用技術による問題点について論じている。

第4章は、開口数の大きなオフアキシス平面グレーティングレンズや非点収差平面グレーティングレンズの試作と実験について述べたもので、回折効率は実用条件には達しないが、収束ビーム径については十分な結果の得られたことを定量的に記している。

第5章では、グレーティング・コリメータレンズの設計と製作法について述べており、グレーティングレンズの製作に超精密機械加工法を採用し、これにより大口径化と高回折効率化を実現し得たこと、また、ブレード形状よりも各輪帯のピッチと高さの制御が実用上重要であることなどを明らかにしている。

第6章では、以上の研究に基づいて球面基板グレーティングレンズが対物レンズとして最も優れた性能を備えていることを試作ならびに特性測定によって明確にしており、これは実用上重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、光ディスクヘッドにおいて重要な構成部品であるグレーティングレンズの高性能化の研究を行い、いくつかの重要な知見を得たものであって、電子工学ならびに光エレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。