

学 位 論 文 題 名

フトリフラクティブ効果による位相シフトを用いた
多重ホログラムの選択的消去に関する研究

学位論文内容の要旨

近年, 情報処理技術および情報通信技術の急速な発達により取り扱われるデータ容量が非常に大きくなってきている。これに伴い, 大容量かつ高速アクセスが可能な記録装置が求められてきており, 次世代光記録方式としてホログラフィックメモリが注目されてきている。ホログラフィックメモリは記録媒質内の3次元の領域にホログラムを多重記録することによる高記録密度, および2次元データの一括記録再生による高速転送速度といった特長を有しており, 現在では 500Gbit/inch^2 以上の高記録密度, 1Gbps 以上の高速転送速度がそれぞれ実証されている。しかし, フォトポリマーなどを用いたライトワンス型のホログラフィックメモリの研究が中心に進められており, リライタブル型のホログラフィックメモリに関しては多くの課題が残されている。

リライタブル型ホログラフィックメモリの記録媒質としてはフトリフラクティブ結晶が有力であり, 全光学的にホログラムの記録・消去を行うことが可能である。フトリフラクティブ媒質では空間光強度分布に応じて電荷が移動することで, 空間電界が形成され, 電気光学効果を介し屈折率変化を生じさせる。ホログラフィックメモリでは2次元データを有する物体光と参照光の干渉縞を位相ホログラムとして記録する。記録後にインコヒーレント光を照射して電荷を拡散させ, 容易に一括消去することが可能である。しかし, 同一空間に多数のホログラムを多重記録する大容量ホログラフィックメモリにおいて, 特定のホログラムを消去するために全てのホログラムを一括消去する方式は効率が悪く, ホログラムを選択的に消去する技術が求められている。

ホログラムの選択的消去は, 消去するホログラムの干渉縞に対し π 変位した干渉縞をホログラムに上書きすることで実現できる。この入射光波は多重ホログラム全体に照射されるため消去対象外のホログラムにも照射されることとなるため, 消去対象外のホログラムもわずかに消去される。記録媒質中に入射する物体光と参照光による干渉縞の位相は2光波の相対的位相によって決定されるため, 記録時の物体光あるいは参照光の位相を π 変位させることにより干渉縞の位相を π 変位させることが可能である。これまでに提案されている選択的消去手法として, 液晶位相変調器により参照光の位相を π 変位させる手法がある。本手法では記録されているホログラムを消去に先だって読み出し, 空間光変調器を用い消去時の物体光として記録媒質に再入射させる必要があるため, 消去時のアクセス速度の低下を招くことになる。さらに液晶位相変調器の電圧誤差により位相変調量に誤差が生じ易いといった問題がある。また記録媒体のリムーバブル化を想定し, 他の光学系で選択的消去するためには, 記録されたホログラムの位相を観測し, 正確に π ずれた干渉縞が生成されるように光波の位相や入射光の光路長を調整する必要があるという問題がある。

そこで本論文では, これらの問題を解決する手法としてフトリフラクティブ効果における位相

シフトを用いた選択的消去手法を提案する。本手法では2つのフォトリフラクティブ結晶を用いるが、一方はデータの保持・読み出しを目的とするメインメモリであり、もう一方は選択的消去に必要な π 位相のずれた物体光を発生させるサブメモリである。記録時には同一情報を持つホログラムを両方の結晶に記録する。フォトリフラクティブ結晶内に記録されたホログラムからの回折光は、元の物体光に対し同一の空間情報を持ち、拡散のみで動作するフォトリフラクティブ結晶ではc軸の方向に応じて正確に0か π の位相差を持つ。本手法では全光学的に生成されるこの回折光を利用することでメインメモリに記録されたホログラムを選択的に消去する。これにより消去に先立ってホログラムを読み出すといった手順が不要となる。またリムーバブル化した場合にも選択的消去することが可能となる。

次に、より簡易かつ効率的にホログラムの更新を行うことができる光学系を提案する。前述のフォトリフラクティブ位相シフトを用いた選択的消去手法は両方の結晶に同一のホログラムを記録する手法であるため、メインメモリにおけるホログラムの更新の際には、サブメモリに記録されたホログラムも選択的に消去しておく必要がある。これは別の選択的消去手法を用意する必要があることを意味し、ホログラムの更新を複雑化させることになる。そこで記録時にメインメモリにのみホログラムの記録を行い、選択的消去時には消去したいホログラムから π 位相のずれた再生光を発生させ、その位相共役光をメインメモリにフィードバックすることで選択的消去を実現する。本論文では位相共役器としてフォトリフラクティブ媒質における4光波混合を用いた光学系と2重位相共役鏡を用いた光学系の2つの手法を提案する。

以下に各章の要旨を示す。

第2章では、フォトリフラクティブ効果について説明し、フォトリフラクティブ媒質内に2光波が入射したときに、これらにより形成される干渉縞と屈折率格子の間に $\pi/2$ の位相差が生じることを示した。また、フォトリフラクティブ効果による空間電界の時間応答に関する式と光波の相互作用を表す結合波動方程式を導いた。

第3章では、これまでに提案された選択的消去手法の問題点について述べ、フォトリフラクティブ効果による位相シフトを利用した多重ホログラムの新たな選択的消去手法を提案した。ホログラムの多重度を変化させた場合に選択的消去完了後の消去対象外の多重ホログラムの劣化がどの程度変化するかについて解析を行う。また結晶の光起電力効果などの影響により回折光の位相シフト量に変位を生じる可能性があるため、この位相シフト量の変位の影響について解析を行った。最後に、 BaTiO_3 結晶と LiNbO_3 結晶を用い多重記録したホログラムを選択的に消去する実験をそれぞれ行い、結果を考察した。

第4章では、位相共役光を用いた選択的消去手法について提案した。次に本手法の基礎動作を確認する解析を行い、位相共役光を用いることによりホログラムが効率的に消去できることを示した。また実験を行い、解析結果との比較を行った上で、実際に位相共役光によりホログラムを選択的に消去することが可能であることを実験から示した。最後に、本手法において消去対象外の多重ホログラムへの消去効果を低減するために、結晶の結合係数に対する入射光強度比の最適化を行った。

最後に第5章で、本論文の結論を述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 三 島 瑛 人
副 査 教 授 高 橋 庸 夫
副 査 准教授 岡 本 淳

学 位 論 文 題 名

フォトリフラクティブ効果による位相シフトを用いた 多重ホログラムの選択的消去に関する研究

ホログラフィックメモリは、記録媒質内の3次元の領域にホログラムを多重記録することによる高い記録密度と二次元データページの並列記録再生による高速転送速度を併せ持つ、次世代光メモリである。近年、半導体レーザ光源、空間光変調器、撮像素子等の入出力デバイスの性能が大きく向上したことに加え、大きな屈折率変化量と高い記録感度を持つライトワンス用のフォトポリマー材料の開発や、2次元データに対する信号処理技術が大きく進展してきたことに伴い、ホログラフィック記録の研究開発が加速してきた。しかし、ホログラフィックメモリの研究はフォトポリマーなどを用いたライトワンス型の研究が中心に進められておりリライタブル型のホログラフィックメモリに関しては多くの課題が残されている。有望なリライタブル型媒質であるフォトリフラクティブ媒質では全光学的にホログラムの記録・消去を行うことが可能であるが、消去方式に関する研究が遅れており、実用化への障害となっている。

消去方式としてはインコヒーレント光を照射することにより媒質内に記録されたすべてのホログラムを一括に消去する手法と、特定のホログラムに対するコヒーレント光を照射することにより1枚のホログラムだけを選択的に消去する手法がある。ホログラフィックメモリでは大容量化のために多重記録を行っているため、特定のホログラムを消去するためにすべてのホログラムを一括消去する方式は効率が悪く、ホログラムを選択的に消去する技術の確立が大容量リライタブルホログラフィックメモリの実用化に向けて必要不可欠である。

ホログラムの選択的消去は、消去するホログラムの干渉縞に対し位相が π 変位した干渉縞を上書きすることで実現できる。これまでに提案されてきた選択的消去手法として、液晶位相変調器やピエゾミラーを用いた手法や読み出し光とホログラムからの回折光(自己回折光)との干渉を用いた方法などがある。しかし液晶位相変調器やピエゾミラーを用いた手法では、位相変調量の誤差が生じたり、消去時に予め消去するホログラムを読み出ししておく必要があり、消去時のアクセス速度の低下を招くといった問題がある。またリムーバブル化が困難であるという問題も挙げられる。これに対し自己回折光を用いた選択的消去ではリムーバブル化が可能であるという利点を有しているが、多重度の大きなホログラフィックメモリへの応用が困難であるという問題を抱えている。本論文ではこれらの問題を打破するためフォトリフラクティブ効果で生ずる位相シフトを利用した選択的消去手法を新たに提案している。

本論文の2章では、本論文で提案する新たな選択的消去手法において最も重要な役割を担うフォトリフラクティブ効果について説明を行っている。フォトリフラクティブ効果により屈折率が局所的に変化する過程について説明し、その時間応答に関する式を導出している。またフォトリフラクティブ効果により回折光に π の位相差が発生する原理について説明を行っている。

3章では、フォトリフラクティブ効果による位相シフトを用いた選択的消去手法を新たに提案している。本手法ではフォトリフラクティブ効果により全光学的に生成される π の位相差を有する回折光を利用することでメインメモリに記録されたホログラムを選択的に消去することができ、消去に先立ってホログラムを読み出すといった従来法に見られる問題が生じない高速な消去を実現している。また、選択的消去時に生ずる消去対象外のホログラムの減衰が、ホログラムの多重数によってどのように変化するかについての解析を行った上で、本方式の動作確認実験を行っている。これらの解析・実験により、従来手法に対する本手法の優位性とその実現の可能性が示されている。

4章では3章で提案した手法を改良し、位相共役光を用いることによって、より効率的なデータの更新ができ、かつリムーバブル化にも対応した選択的消去手法を提案している。位相共役光の強度の最適化によって、消去対象外のホログラムの減衰を大幅に抑制できることを示している。また、選択的消去を行った場合の消去対象外のホログラムの減衰について、複数の異なる多重度に対して解析を行い、位相共役光を発生させるデバイスとして相互励起型位相共役鏡を用いることによって選択的消去の性能をさらに高められる可能性を示した。

これを要するに、著者は、リライタブルホログラフィックメモリの実用化に向け、新たな選択的消去手法を提案し、消去対象外のホログラムにおける減衰の抑制などデータの消去更新技術に関する多くの有益な知見を得ており、光エレクトロニクスの分野に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。