

## フォトリフラクティブ結晶における ホログラム多重記録再生および選択的消去に関する研究

### 学位論文内容の要旨

近年、高速・大容量の次世代メモリとして体積多重ホログラフィックメモリの研究が盛んに行われている。体積多重ホログラフィックメモリは、三次元的記録領域に由来する大容量性と、二次元一括記録再生方式に由来する高速性から次世代を担うメモリとなる可能性を秘めている。ホログラフィックメモリにおいて二次元データはホログラムとして媒質内に記録され、多重記録を行うことにより記録密度を向上することが可能である。角度多重、波長多重、電界多重、位相コード多重等、様々な多重方式が提案され盛んに研究が行われているが、複雑な光学系や高価な波長可変レーザを必要とするなどそれぞれに解決すべき問題点も多く、より簡易な多重記録法の実現が望まれている。一方、ホログラムの記録媒質としては、フォトリフラクティブ結晶が有力である。数  $\text{W}/\text{cm}^2$  程度の光波でホログラムの記録再生を行うことができ、また、他のホログラム媒質と異なり記録ホログラムを消去することが可能である。 $\text{LiNbO}_3$  結晶、 $\text{LiTaO}_3$  結晶、BSO 結晶、 $\text{BaTiO}_3$  結晶等がフォトリフラクティブ結晶として知られており、特に  $\text{BaTiO}_3$  結晶は電気光学係数が大きく高い回折効率や強い非線形効果を得ることが可能である。これらフォトリフラクティブ結晶中に記録されたホログラムは、熱処理あるいはインコヒーレント光の照射により結晶内の全てのホログラムを一括消去することができるが、ホログラフィックメモリへの応用を考えた場合、多重ホログラム中の任意の一枚のみを選択的に消去する技術も必要不可欠である。

そこで本論文では、簡易な光学系によるクロストークの小さなホログラムの多重記録法である球面参照光シフト多重記録およびスペックル多重記録、さらに、フォトリフラクティブ結晶中の多重ホログラムの選択的消去法について検討を行った。まず、球面参照光シフト多重記録方式において、クロストークの小さなホログラムの多重記録に求められる条件を解析および実験により求めた。また、フォトリフラクティブ結晶中にホログラムを多重記録する際、最初に記録されたホログラムがその後の書き込みにより徐々に消去されてしまうという問題があり、この消去を考慮に入れ多重記録後にすべてのホログラムの回折効率を一定にする必要があるが、球面参照光シフト多重に適した計画記録方式についても検討した。次に、より低クロストークなホログラムの多重記録法として、スペックル多重記録方式について検討した。通常はすりガラスやマルチモードファイバ等のランダム位相媒質を機械的に移動あるいは回転させることにより互いに相関の低いランダム波面を生成し多重記録再生時の参照光として用いているが、本論文ではこれら外部光学系の機械的動作に拠らないより簡易かつ小型な光学

系によるホログラム多重記録の実現を目的とし、フォトリフラクティブ・ビームファニング現象により生成されるランダム波面を参照光としたホログラム多重記録法を新たに提案した。これは、ホログラム記録媒質であるフォトリフラクティブ結晶自身がビームファニング現象により発生するランダム波面をホログラム多重記録時の参照波として用いるものであり、一切の電子的制御を介さない光による多重記録再生の制御を実現する可能性を秘めている。さらに、フォトリフラクティブ結晶中の多重ホログラムにおいて、任意のホログラム内の任意部位のみを選択的に消去する手法についても検討した。ビームスプリッタとミラーのみにより構成される2重マッハツェンダー干渉光学系を利用し、フォトリフラクティブ結晶中にスペックル多重記録されたホログラムを簡易な光学系により選択的に消去および更新する手法を新たに提案した。この技術は書き換え型ホログラフィックメモリの実現のみならず光学的2次元画像演算への応用も可能であり、ホログラフィックデータの全光学的暗号化手法への展開についても言及した。

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結晶に空間的に一様でない光波が入射した場合に、フォトリフラクティブ効果を介して結晶の屈折率が変化する過程について説明した。

第3章では、球面参照光シフト多重記録法について、クロストークの小さなホログラムの多重記録に最適な記録位置のシフト量を解析および実験により求め、さらに、球面参照光シフト多重を行う際の計画記録方式についても検討した。まず、読み出し光の角度変位に対するホログラムの回折特性について解析し、その結果を用い多重記録時の記録位置のシフト量を計算した。次に、実験によりこれを測定した。さらに新たな計画記録方式として露光時間計画記録方式を提案し、従来の計画記録方式と比較し記録ホログラムの回折効率が格段に向上することを数値解析により示した。

第4章では、より低クロストークなホログラム多重記録法であるスペックル多重記録法について検討した。フォトリフラクティブ結晶として  $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$  結晶、ランダム位相媒質としてすりガラスを用いた実験および理論解析を行い、本方式により低クロストークなホログラムを多重記録できることを示した。また、さらに簡易かつ小型な光学系によるスペックル多重記録の実現を目的として、ホログラム記録媒質中で発生するフォトリフラクティブ・ビームファニング現象により生成されるランダム波面を参照光としたホログラムの多重記録法を新たに提案した。 $\text{BaTiO}_3$  結晶と  $\text{Ar}^+$  レーザを用いてホログラム多重記録の実験を行い、本手法が実現可能であることを示した。また、多重度の向上およびホログラム間クロストーク低減を目的とし理論解析を行った。フォトリフラクティブ結晶中での光波の振る舞いおよびビームファニング現象を詳細に解析し、低クロストークかつ高画質なホログラムを多重記録するために入射光線に求められる諸条件を明らかにした。

第5章では、フォトリフラクティブ結晶中の多重ホログラムを選択的に消去する方法について検討した。まず、ビームスプリッタとミラーで構成される2重マッハツェンダー干渉光学系により、空間的に互いに  $\pi$  だけ位相の異なる2つの干渉縞を形成できることを説明し、これを用いた多重ホログラムの選択的消去手法を新たに提案した。実験により  $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$  結晶中の多重ホログラムのうち、任意の一枚の任意部位のみを選択的に消去できることを示した。さらにこの光学系が入力画像の NOT 演算や XOR 演算等の2次元画像演算へ応用できることを示し、これを用いてホログラフィックメモリ中の記録ホログラムを純光学的に暗号化

する手法を提案した。

第6章では、本研究で得られた成果の総括を行った。

# 学位論文審査の要旨

|     |     |         |
|-----|-----|---------|
| 主 査 | 教 授 | 三 島 瑛 人 |
| 副 査 | 教 授 | 小 柴 正 則 |
| 副 査 | 教 授 | 山 本 強   |
| 副 査 | 助教授 | 岡 本 淳   |

## 学 位 論 文 題 名

### フォトリフラクティブ結晶における

### ホログラム多重記録再生および選択的消去に関する研究

近年の情報通信技術や計算機技術の進展に伴い取り扱われる情報量は増大の一途を辿っており、体積多重ホログラフィックメモリは、その三次元的記録領域に由来する大容量性と、二次元一括記録再生方式に由来する高速性から次世代を担う光メモリとして盛んに研究されている。ホログラフィックメモリでは記録密度増大のために2次元データを媒質の同一個所に多重記録することが可能である。これまでに角度多重、波長多重、電界多重、位相コード多重等、様々な多重記録方式が提案され盛んに研究が行われているが、現在の段階ではそれぞれに問題を有しており、実用段階には到達していない。一方、リライタブルなホログラフィックメモリの記録媒質としては、フォトリフラクティブ結晶が有力である。この結晶では照射光強度パターンに応じ結晶内の電荷が移動し、これによって形成される空間電界が電気光学効果を介して結晶の屈折率を変化させる。2次元データを有する物体光と参照光を同時に結晶に入射することでこの干渉縞が位相ホログラムとして結晶内に記録される。これまでに様々な結晶においてフォトリフラクティブ効果が観測されているが、特に  $\text{LiNbO}_3$  結晶は最もホログラムの保持時間が長いことで知られ、また、 $\text{BaTiO}_3$  結晶は電気光学係数が大きく高い回折効率及び強い非線形効果を得ることが可能である。

ホログラフィックメモリはその実現に向け多種多様な観点から研究が行われているが、より実用的かつ高性能なホログラフィックメモリシステムを構築するために、更に簡易かつ小型な光学系によるクロストークの小さなホログラム多重記録の実現が望まれている。また、ホログラフィックメモリの性能が向上し多重度が増大するに従って、フォトリフラクティブ結晶中のホログラムを一括消去するのみではなく、多重ホログラム中の任意の一枚のみを選択的に消去する技術も実用上重要である。

本論文では、このような現況にあるフォトリフラクティブ結晶中でのホログラムの多

重記録及び多重ホログラムの選択的消去について、光学系の簡易化・低クロストーク化等の観点から様々な検討を行っている。

第1章では研究の背景、目的及び構成について述べている。

第2章では、フォトリフラクティブ結晶に2光波が入射した場合、フォトリフラクティブ効果を介して干渉パターンに応じた屈折率変化が現れる過程について説明している。

第3章では、従来の多重記録方式と比較して簡易な機構によるホログラムの多重記録が実現可能な球面参照光シフト多重記録法について、低クロストークなホログラムの多重記録に最適な記録位置のシフト量を解析及び実験により求めている。更に新たな計画記録方式として露光時間計画記録方式を提案し、従来の計画記録方式と比較し出力発生効率が格段に向上することを数値解析により明らかにしている。

第4章では、より低クロストークなホログラム多重記録法であるスペックル多重記録法について検討している。実験及び理論解析により、ランダム波面を利用して低クロストークなホログラムを多重記録できることを示している。また、より簡易かつ小型な光学系によるスペックル多重記録の実現を目的として、ホログラム記録媒質中で発生するフォトリフラクティブ・ビームファニング現象により生成されるランダム波面を参照光としたホログラムの多重記録法を新たに提案している。 $\text{BaTiO}_3$ 結晶と $\text{Ar}^+$ レーザを用いてホログラム多重記録の実験を行い、本手法が実現可能であることを示している。また、理論解析により低クロストークかつ高画質なホログラムを多重記録するために入射光線に求められる諸条件を明らかにしている。

第5章では、フォトリフラクティブ結晶中の多重ホログラムをビームスプリッタとミラーで構成される2重マッハツェンダー干渉光学系により選択的に消去する方法を新たに提案している。実験により $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 結晶中の多重ホログラムのうち、任意の一枚の任意部位のみを選択的に消去することに成功している。また、この光学系が入力画像のNOT演算やXOR演算等の2次元画像演算へ応用できることを示し、これを用いてホログラフィックメモリ中の記録ホログラムを純光学的に暗号化する手法を提案している。

第6章では本研究で得られた成果の総括を行っている。

これを要するに、著者は、フォトリフラクティブ結晶におけるホログラムの多重記録手法及び多重ホログラムの選択的消去手法を新たに提案し、ホログラフィックメモリにおける光学系の簡易化・低クロストーク化に関し有益な知見を得ており、光情報通信工学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(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。