

学位論文題名

位相変調技術によるホログラフィックメモリの高性能化に関する研究

学位論文内容の要旨

ホログラフィックメモリは、ホログラムを同一箇所にも多重記録することによる高い記録密度と、二次元に配列された数百万ビットのデータからなるページデータを一括に記録再生することによる高い転送速度を併せ持つ次世代光ストレージ技術である。ホログラフィックメモリに関する研究は、初めて提案されてからの約 50 年の間に入出力デバイスの技術の発展や記録媒質の進歩等によって製品化を視野に入れる段階まで着実に進んできている。

ホログラフィックメモリは、理論上、数十 TB/disc の高記録密度と数十 Gbps の高転送速度を同時に達成できるという魅力的な特長を有しているが、現状では数百 GB/disc の記録密度と 1Gbps 程度の転送速度を達成するに留まっている。ホログラフィックメモリの記録密度を向上させる技術は幾つか考案されているが、現在までのところ多重記録方式に関する検討がほとんどを占めており、信号の変調技術に関する検討は十分であるとは言い難い。特に位相変調型ホログラフィックメモリは、従来広く研究されてきた強度変調型ホログラフィックメモリに対して、記録媒質のダイナミックレンジを有効利用できる点やエネルギー利用効率が高い点で優位性があるが、詳細な記録特性に関する検討や位相変調信号を強度検出器で撮像するための位相検出手法に関する検討が十分ではない。これに加えて、ホログラフィックメモリの記録再生においては、従来の光ストレージ技術とは異なり、信号光とは別の参照光とよばれる光波が必要であるため、光学系が複雑化してしまうという問題がある。その対策として、一光束記録方式であるコリニアホログラフィという技術が開発されているが、同方式では光学系の開口領域を信号光と参照光のために空間的に分割して用いる必要があるため、記録密度や転送速度が低下してしまうという問題があった。

本論文では、ホログラフィックメモリの高性能化を目的として、ページデータの高符号化率を達成するための変調方式であるハイブリッド変調方式、位相変調信号を強度変調信号へと変換するためのフォトリフレクティブ時間差分位相検出法、参照光が不要なホログラム記録光学系である自己参照型ホログラフィについて研究した。まず、新たな信号変調方式としてハイブリッド変調方式を提案した。同方式における変調符号の構成法を示すと共に、数値シミュレーションによる特性評価を行い、最適な位相変調信号の多値数と強度変調符号の組み合わせを明らかにした。次に、フォトリフレクティブ光波混合を基礎とした位相変調信号検出法としてフォトリフレクティブ時間差分位相検出法を提案し、解析および実験から、本手法を用いた位相検出における時間的および空間的な動作性能を明らかにした。さらに、参照光を不要とするホログラム記録光学系として自己参照型ホログラフィを提案し、その動作原理を示した。本方式において、記録した位相変調信号が、特別な位相検出法を用いることなく、強度変調信号として読み出されることを明らかにした。本手法の原理を用いることで、光位相強度変換器や新たな情報セキュリティシステムとしての応用が可能であることを示した。

以下に各章の要旨を示す。

第 2 章では、ホログラフィックメモリについて、光ストレージ技術における位置づけや、記録密度

および転送速度に関する理論式、各要素デバイス等についての概要を述べた。

第3章では、後述する第5章で重要となるフォトリフラクティブ効果について、同効果の発現過程と光波間のエネルギー移動について概説した。

第4章では、ホログラフィックメモリの高記録密度化および高転送速度化を達成することを目的とした新たな変調符号方式としてハイブリッド変調方式を提案した。まず、ホログラフィックメモリの記録密度を考察し、記録密度が2次元ページデータの符号化率に大きく関係していることを示した。次に、ハイブリッド変調方式の基礎となる多値位相変調信号と強度変調符号のそれぞれの特長を述べ、ハイブリッド変調方式によって、記録面でのホログラムのサイズの拡大を抑制しながらも高い符号化率を維持できることを明らかにした。最後に数値シミュレーションを行い、その結果、ハイブリッド変調方式を適用することで多値位相変調信号と強度変調符号をそれぞれ独立に用いる場合よりも約2倍の記録密度を達成できることを示した。

第5章では、位相変調信号を光強度検出器で読み取るための手法として、フォトリフラクティブ時間差分位相検出法を提案した。本方式では、フォトリフラクティブ2光波混合の出力光強度の時間変化を観測することで、その前後に入射した位相変調信号の互いの位相差を空間並列的に測定することができる。まず、本手法の原理について説明し、数値解析と実験によって動作確認を行った。その結果、本手法を用いることによって、ホログラフィックメモリにおける高速かつ空間並列的な位相検出が可能となることを明らかにした。

第6章では、参照光が不要なホログラム記録光学系として、自己参照型ホログラフィを提案した。自己参照型ホログラフィは、記録する光波と読み出しに用いる光波の間の位相差によって生じる読み出し光のピクセル間のエネルギー移動によって、記録したデータの読み出しを行うことができる。自己参照型ホログラフィの基本となるピクセル内のエネルギー移動について理論式を導出した後、解析と実験の両面から、本手法によって参照光を全く用いないホログラフィックメモリの実現が可能になることを明らかにした。さらに、本手法を用いることで、超高速な位相検出技術や情報セキュリティ技術への応用も可能であることを示した。

第7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	准教授	岡 本	淳
副 査	教 授	富 田	章 久
副 査	教 授	本 久	順 一

学 位 論 文 題 名

位相変調技術によるホログラフィックメモリの高性能化に関する研究

ホログラフィックメモリは、ホログラムを同一箇所にも多重記録することによる高い記録密度と、二次元に配列された数百万ビットのデータからなるページデータを一括に記録再生することによる高い転送速度を併せ持つ次世代光ストレージ技術である。ホログラフィックメモリに関する研究は、近年の光入出力デバイスの発展や記録媒質の進歩等によって製品化を視野に入れる段階まで着実に進んできている。

ホログラフィックメモリは、理論上、数十 TB/disc の高記録密度と数十 Gbps の高転送速度を同時に達成できるという魅力的な特長を有しているが、現状では数百 GB/disc の記録密度と 1Gbps 程度の転送速度を達成するに留まっている。ホログラフィックメモリの記録密度を向上させる技術は幾つか考案されているが、現在までのところ多重記録方式に関する検討がほとんどを占めており、信号の変調技術に関する検討は十分であるとは言い難い。特に位相変調型ホログラフィックメモリは、従来広く研究されてきた強度変調型ホログラフィックメモリに対して、記録媒質のダイナミックレンジを有効利用できる点やエネルギー利用効率が高い点で優位性があるが、記録特性に関する検討や位相変調信号を強度検出器で撮像するための位相検出手法に関する考察が十分ではない。

一方、ホログラフィックメモリの記録再生においては、従来の光ストレージ技術とは異なり、信号光とは別の参照光とよばれる光波が必要であるため、光学系が複雑化してしまうという問題もある。その対策として、一光束記録方式であるコリニアホログラフィという技術が開発されているが、同方式では光学系の開口領域を信号光と参照光のために空間的に分割して用いるため、記録密度や転送速度が低下してしまう。

このような状況に際し、本論文では、ホログラフィックメモリの高性能化を目的として、記録密度の向上を可能とする変調方式、多値信号の検出が可能で位置ずれに対する高い耐性を持つ位相変調信号検出法、および、参照光の不要なホログラム記録光学系をそれぞれ新規に提案している。

第 1 章では、当該研究の背景について述べている。

第 2 章では、ホログラフィックメモリについて、光ストレージ技術における位置づけや、記録密度および転送速度に関する理論式、ならびに、メモリを構成する要素デバイス等についての概要を説明している。

第 3 章では、第 5 章で述べる位相検出手法の基盤技術であるフォトリフラクティブ効果について、同効果の発現過程と光波間のエネルギー移動について概説している。

第 4 章では、ホログラフィックメモリの記録密度を向上させる目的で、多値位相変調信号を信号

光として適用することを検討している。著者は、多値位相変調信号を単独で使用することは、ホログラフィックメモリの再生過程において深刻なエラーの増大を引き起こすことを示し、この問題の解決策として、多値位相変調信号を強度変調符号と組み合わせることでエラーの低減を実現するための新たな信号変調方式を提案している。ハイブリッド変調方式と名付けられた本手法を用いることによって、ホログラフィックメモリの再生時に生じるエラーを大幅に低減することが可能であることが示されている。具体的には、多値位相変調信号を単独で用いるよりもハイブリッド変調方式を用いた方が2倍以上の記録密度の増大が可能であり、本手法がホログラフィックメモリの記録密度の向上に有用であることが分かる。

第5章では、位相変調信号を光強度検出器で読み取るための手法として、フォトリフラクティブ時間差分位相検出法を提案している。結合波動理論に基づく数値解析と実験による動作確認を行い、ホログラフィックメモリへの応用に向けたパラメータの最適化等について論じている。本手法を用いることで位相変調信号を用いたホログラフィックメモリの位相検出が従来手法に比べて簡易かつ高性能に実現できると期待できる。

第6章では、参照光が不要なホログラム記録光学系として、自己参照型ホログラフィを提案している。自己参照型ホログラフィの基本となるピクセル内のエネルギー移動について理論式を導出した後、解析と実験の両面から、本手法によって参照光を全く用いないホログラフィックメモリの実現が可能になることを明らかにしている。さらに最後には、本手法のホログラフィックメモリ以外の応用例も示されており、超高速な位相検出技術や情報セキュリティ技術への応用も可能であるとしている。これらの成果はホログラフィックメモリの容量や速度の向上だけでなく、ホログラフィを用いた光技術の発展に大きく寄与するものであると考えられる。

第7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、ホログラフィックメモリの高性能化を可能にする信号変調方式、位相検出方式、および、参照光の不要なホログラム記録光学系を提案し、光記録の発展に向けた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。