

空間スペクトル拡散多重を用いたホログラフィック記録と ホログラムの転写技術に関する研究

学位論文内容の要旨

ホログラフィック記録は、多重化による高い記録密度、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の光記録方式である。近年、半導体レーザー光源、空間光変調器や撮像素子等の入出力デバイスの性能向上に加え、大きな屈折率変調量と高い感度を持つ記録材料や信号処理などの要素技術が整ってきたことからホログラフィック記録の研究開発が加速してきた。現在までに 500 Gbit/inch² 以上の高記録密度と 1 Gbps 以上の高速転送速度が実証されている。

このような近年の高密度化においては、上記の周辺技術の進展のみならず、コリニア方式やポトリック方式に代表される多重方式の改良が大きな役割を果たしてきた。ただし、現在の高い記録密度でさえ、三次元記録の物理的な密度限界である L/λ^3 (L :媒体厚さ, λ :波長) には遠く及ばず、まだその潜在能力が発揮されているとは言い難い。将来のホログラフィック記録の高密度化のためには、多重方式の更なる改良が重要課題の一つである。

また、現状のホログラフィック記録では応用先がライトワンスに限られており、書換え型や再生専用メモリ (ROM) への応用が難しいことも大きな課題である。最も有望な書換え型媒質であるフォトトリフラクティブ (PR) 材料では、再生光照射時にホログラムの揮発が起るため、非破壊再生が必須の研究課題である。特に、ホログラムの転写を用いた光学リフレッシュ技術は定着処理を必要としない非破壊再生手法として注目されるが、系の複雑化やノイズによる信号劣化等の問題があり、これらを解決する必要がある。一方、ROM 複製システムに関しては、従来の転写光学系の光利用効率が極めて低いために、たとえ高出力レーザーを用いて転写しても実用的な複製速度を達成できないことが問題となっており、光利用効率改善による複製の高速化が強く望まれている。

本論文では、ホログラフィック記録の高密度化に向けた多重方式、PR ホログラムの非破壊再生を実現するコンパクトな転写光学系、およびホログラフィック ROM の複製を高効率化する新たな転写光学系を提案した。まず、新たな多重記録方式である空間スペクトル拡散多重を提案した。本方式は、信号光自身の空間位相変調のみを用いてホログラムを多重化するため、従来の角度、位相、シフト多重方式等と併用可能であり、それにより記録密度を向上させることが可能となる。本論文では、ホログラフィック記録の新たな自由度である信号光自身の位相変調を用いた多重記録の諸特性(クロストークと記録密度、多重記録スケジュール、光学系-媒体間の位置ずれ耐性)について、解析的および実験的見地から詳細に議論した。次に、新たな書換え型ホログラムの非破壊再生手法として、従来複数の PR 結晶を必要としていた位相共役転写システムを大幅に小型化・簡素化する 1 結晶配置光学系を提案し、光学配置の設計指針、非破壊再生性能およびノイズ低減効果について述べた。さら

に、新たにホログラフィック ROM の複製法として、コピーホログラムの回折効率を大幅に増強するコヒーレント一括転写法、および転写速度を改善する PR 増幅システムを提案し、それぞれ一括転写によるホログラム増強効果、光増幅による転写速度の改善効果を実証した。

以下に各章の要旨を示す。第 2 章はホログラフィック記録、第 3 章は PR 材料の基本特性、第 4 章と第 5 章は空間スペクトル拡散多重、第 6 章と第 7 章はホログラム転写技術を中心に議論した。

第 2 章では、ホログラフィック記録の基本動作原理、従来提案されている多重方式について概説した。また、記録密度や転送速度等の主な性能指標について説明した。

第 3 章では、PR 効果とその応用について述べた。まず、PR 媒質中における光波の伝搬を記述する結合波動方程式と、Kukhtarev らのモデルによる PR ホログラムの時間応答の式について述べた。また、特に記録媒質として PR ホログラムを用いる上で重要となる非破壊再生技術について解説した。

第 4 章では、信号光の空間位相変調・復調のみでホログラムを多重化する新方式、空間スペクトル拡散多重を提案した。まず、本方式の基本動作である拡散記録と逆拡散再生の原理を説明し、多重記録再生実験により動作を実証した。次に、主要なノイズ要因となるページ間クロストーク、および達成可能な記録密度の数値的な評価を行い、本方式を他の多重化手法と組み合わせて用いることで高密度記録が実現できることを示した。さらに、実用上重要な再生時の光学系位置ずれ耐性(シフトマージン)を実験と解析から評価し、記録密度とシフトマージンの間にトレードオフの関係があることを示した。

第 5 章では、部分コヒーレント多重における記録スケジュールの最適化について議論した。ここで部分コヒーレント多重とは、空間スペクトル拡散多重のように記録参照光がすでに記録されているホログラムによって回折される多重記録システムである。まず、部分コヒーレント多重では PR 媒質中での自己回折によるホログラム強調効果のために、従来のスケジュール理論を用いても多重ホログラムの回折効率、すなわち再生信号強度を均一化できないという問題点を初めて提起した。また、その解決策として、部分コヒーレント多重のための新たなスケジュール漸化式と、それを解くための反復補正計算法を提案し、数値計算によりその有効性を示した。

第 6 章では、ホログラム転写技術の応用の一つである位相共役転写法を用いて、PR ホログラムを非破壊再生する光学リフレッシュ技術について議論した。ここでは、位相共役転写の機能を一つの PR 結晶内に実現する光学系(1 結晶配置)を新たに提案し、コンパクトな光学系による非破壊再生の実現可能性、および再生時の光学ノイズ低減効果を結合波動解析と BaTiO₃ 結晶を用いた原理実験から明らかにした。

第 7 章では、ホログラフィック ROM の複製を高効率化するための新たなホログラム転写手法を提案した。まず、多重記録されたマスターホログラムの同時転写によりコピーホログラムの回折効率を改善するコヒーレント一括転写法を提案し、コヒーレント転写後に得られる回折効率増強効果とその限界を理論および実験により実証した。次に、PR 増幅器を用いたホログラフィック ROM 媒体の高速複製光学系を新たに提案した。多重記録されたマスターホログラムから得られる弱い回折信号光を PR 光波混合を用いて増幅し、それをコピー媒体に転写することにより複製速度を大幅に高速化できることを数値解析と実験により実証した。

第 8 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 末 岡 和 久
副 査 准教授 岡 本 淳

学 位 論 文 題 名

空間スペクトル拡散多重を用いたホログラフィック記録と ホログラムの転写技術に関する研究

ホログラフィック記録は、多重記録による高い記録密度と2次元データの並列記録再生による高速転送速度を併せ持つ次世代の光記録である。近年、ホログラフィック記録の研究開発は目覚ましい進展を遂げ、すでに 500 Gbit/inch^2 以上の高密度記録が実証されている。このような近年の高密度化においては、多重方式の改良が大きな役割を果たしてきた。しかし、未だ3次元記録の原理的な密度限界には遠く及ばない状況にあり、将来のホログラフィック記録の高密度化のためには多重方式の更なる改良が不可欠である。また、現状の実用研究は追記型が中心であり、書換え型や再生専用メモリ (ROM) に関しては未だ課題が山積している。

代表的な書換え型材料であるフォトリフラクティブ (PR) 材料は、再生時にホログラムの揮発が起こるため、非破壊再生が必須の研究課題である。特に、ホログラムの転写を用いた光学リフレッシュ技術は、ランダムアクセスメモリへ応用可能な定着不要の非破壊再生法として注目されるが、系の複雑化や光学ノイズなどが課題となっている。

一方、ROM の複製技術に関しては、多重ホログラムを一括転写した場合の記録特性、特に転写後の回折効率が転写前の回折効率よりも高くなることについて十分に議論されていない。また、従来の転写光学系は、多重ホログラムの小さな回折効率に起因して光利用効率が低下するために複製速度を高速化できないという根本的な制約があり、この転写速度問題を打破する新規技術の開拓が強く望まれている。

このような状況において、当該論文では、ホログラフィック記録の高密度化に向けた多重方式、ホログラムの非破壊再生を実現する転写手法、および、ROM の複製を大幅に高効率化する転写手法を新たに提案している。

第1章では、研究の背景と目的について述べている。

第2章では、ホログラフィック記録の基本構成や記録再生原理等について概説している。

第3章では、PR 媒質中における光波の伝搬を記述する結合方程式および PR ホログラムの時間応答式から、PR 媒質の記録特性や光増幅特性を簡潔に説明している。

第4章では、信号光の空間位相変調を用いた新たな多重方式である空間スペクトル拡散多重を提

案し、記録密度および位置ずれ許容量を評価している。解析結果から、位相変調用のディフューザの拡散角を大きくした場合、開口数 0.8 以上の高開口数レンズを用いたホログラフィック記録と同程度の記録密度が得られており、これは信号光の位相変調を用いた多重化により実効的な開口数を大きくできることを示している。この結果は、将来の高密度化にとって有用な知見である。

第 5 章では、空間スペクトル拡散多重の記録スケジュールについて議論している。特に PR 媒質における多重記録では、特有のホログラム強調効果に由来する時定数誤差のために、従来の理論を用いても多重ホログラムの回折効率を均一化できないことを指摘している。また、その問題の解決のために修正された記録スケジュール理論を新たに提案し、均一な回折効率を得るための最適記録スケジュールを導いている。

第 6 章では、書換え型ホログラフィックメモリの実現に向けた新たな 1 結晶配置の位相共役転写光学系を提案している。2 つのホログラフィックメモリと位相共役器を 1 つの PR 結晶内に形成することにより、コンパクトな光学系でホログラムの非破壊再生が実現できることを実証している。

第 7 章では、ホログラフィック ROM 複製の高効率化を目的として、コヒーレント一括転写による回折効率の改善手法、および、PR 光増幅を用いた転写速度の高速化手法を新たに提案している。ここでは、コヒーレント転写を用いることにより、転写後の平均回折効率が通常の多重記録直後の平均回折効率の M 倍まで改善されるという重要な法則が見出されている (M は多重数)。また、PR 光増幅を用いた高速転写法を用いることにより、既存の PR 材料を用いた場合でも 10 倍～1000 倍の高速化が達成できること、転写速度の改善量が唯一の無次元パラメータで決まることなどの重要な解析結果が示されている。得られた結果は、ホログラフィック ROM 複製の高効率化に大きく寄与する研究成果である。

第 8 章では、当該研究の総括を行っている。

これを要するに、著者は、ホログラフィック記録の更なる高密度化を可能にする新規多重方式、および、書換え型・ROM 型ホログラフィックメモリを大幅に高性能化する新たな転写技術を提案している。これらの研究から、著者はホログラフィック記録の将来技術に関する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(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。