

博士（情報科学） 若山雄太

学位論文題名

体積ホログラムを用いた自由空間光インターフェクション に関する研究

(Study on free-space optical interconnection using volume holograms)

学位論文内容の要旨

光ファイバ通信網は、波長ごとにチャネルを割り当てて信号を多重伝送する波長分割多重 (WDM) 方式を採用することで、高速かつ大容量なデータ伝送を支える基盤技術として定着しているが、リッチコンテンツやデジタルアーカイブの普及などによる昨今の急速な需要拡大によって深刻な容量不足が示唆されている。この問題を解決するために WDM システムの効率化や波長チャネル数の増大ならびに新規通信方式やそれに伴うデバイスの研究が推進されている。WDM システムの効率化に関しては、これまで固定的だった波長チャネルの割り当てを動的かつ広い波長域にわたって行う、フレキシブルな WDM システムの構築が進められており、広い波長域に対応できる光ファイバや増幅器、再構成可能アドドロップ多重化装置 (ROADM) などの研究が進められている。一方、WDM 以外の通信方式として偏光分割多重 (PDM) 方式やモード分割多重 (MDM) 方式が検討されており、これらを WDM と併用した新規通信方式が提案されている。MDM は、マルチモードファイバ (MMF) のモード数が 100 を超えることや WDM および PDM との組み合わせが可能であることなどから、通信容量を飛躍的に増大させることができる技術として注目されている。近年ではシングルモードファイバを用いて伝送できる光パワーが限界に近づいていることからも、コア径の太い MMF を扱うことができる MDM は極めて重要な技術として位置づけられている。これらに加えて、光ファイバ通信網と衛星や無線機器との連携に関する研究も盛んに行われており、最近では震災に対するロバスト性から非常に注目を集めている。このように光通信システムの多様化が進むことで、異なる通信媒体に対する光接続の需要が高まり、接続する空間分布や伝搬モードおよび波長を高い自由度で設定できる光インターフェクション技術の確立が求められている。

本論文では、形状、波長またはモードの異なる光伝送媒体を光・電気変換なしに超高速かつ並列的に相互接続する技術の確立を目的として、偏波と波面分布を自動的に補償する光インターフェクション技術、極めて広い波長可変性を有する ROADM、モード多重化信号に対するデマルチプレクサ (DEMUX) に関する研究について述べる。まず、通信の多様化に向けて形状や偏光特性の異なる伝送路間の相互接続技術を確立するために、波面補償効果を有する 2 重位相共役鏡 (DPCM) と呼ばれる自己形成型体積ホログラムを用いた光インターフェクション技術を検討する。同技術によって達成可能な最大の接続効率が得られる光学的条件を明らかにすると共に、接続する導波路間の構造の違いを意識せずに、位置、角度、および偏光状態に対する調芯精度を従来の突合せ接続と比べて大幅に緩和できることを定量的に示す。次に、超広域なフレキシブル WDM システムに向けた ROADM を実現するために、体積ホログラムの波長選択性とリライタブル性を用いた広い波長可変性を有する ROADM を新規に提案し、実験と数値シミュレーションによりこれまで実現することが

難しかった広い波長可変性と高い回折効率が得られることを明らかにする。最後に、超高速・大容量な MDM システムの実現に向けて問題となっている DEMUX の大型化と複雑化を解決するために、体積ホログラムの多重記録特性と位相フィルタの効果を活用したモード DEMUX を新たに提案し、単一のホログラフィック素子を用いて複数のモードを高い信号対クロストーク雑音比 (SNR) で一挙に分離できることを実験によって示す。

以下に、各章の概要を示す。

第 1 章では、研究の背景と目的について述べる。

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、特に体積ホログラムの動作と特徴について述べる。

第 3 章では、リライタブルなホログラム記録媒質であるフォトリフラクティブ (PR) 媒質と PR 媒質中のビーム伝搬について述べる。また、DPCM の形成過程と機能について説明し、PR 効果を考慮したビーム伝搬法 (BPM) を新たに提案する。

第 4 章では、第 3 章で述べた DPCM を高速・高効率に形成するための有用な材料として Sb をドープした $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ (Tin Thiohypodiphosphate: SPS) 結晶に着目し、これを用いた DPCM の回折特性を明らかにする。また、DPCM における位相共役反射率の結晶長依存性、入射角度依存性、入射光強度依存性、しきい値特性、偏光特性を明らかにする。

第 5 章では、第 4 章で得られた結果を基に形状や偏光特性の異なる光導波路間のインターフェクション技術を実現できることを示す。この手法は DPCM を用いた接続手法を発展させた技術で、光ファイバ間においては従来の突合せ接続に比べて数十から数百倍もの調芯ずれ耐性を有し、さらに偏光に対する調整を不要にすることができる。具体的な適用例として、フォトニック結晶ファイバとレーザ間の接続を取り上げ、接続効率の偏光依存性を緩和できることを実験により示す。また、第 3 章で提案した BPM を用いて数値シミュレーションを行い、PR 媒質中の光強度分布や誘起屈折率分布の複雑な時間変化および空間変化を明らかにする。

第 6 章では、第 3 章から第 5 章で扱ってきた PR 効果の動的な性能を活用した超広域な波長可変性を有する ROADM を提案し、本デバイスが 175 nm を超える広域な波長可変幅を有することを実験により示す。また、光学系と波長チャネルのバンド幅の関係について解析的に明らかにし、高密度な WDM で用いられるバンド幅に対応できることを示す。さらに、波長に対する回折効率のばらつきを抑え、回折効率の最大値を向上するために屈折率格子の分布を最適化するアポダイゼーション手法を提案し、これを用いることで、780 nm から 1550 nm の超広域な波長可変幅を実現できることを解析的に明らかにする。

第 7 章では、第 6 章で提案した ROADM の構成を基に、体積ホログラムの位相フィルタとしての動作ならびに多重記録特性を利用したモード DEMUX を提案し、モード多重化信号を一挙に分離できることを実証する。さらに、空間フィルタを組み合わせることで 20 dB を超える高い SNR が得られることを実験と解析の両面から明らかにする。

第 8 章では、本研究の総括を述べる。

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 山本 真史

学位論文題名

体積ホログラムを用いた自由空間光インターフェクション に関する研究

(Study on free-space optical interconnection using volume holograms)

光ファイバ通信網は、高速かつ大容量なデータ伝送を支える基盤技術として定着しているが、昨今の急速な需要拡大によって深刻な容量不足が示唆されている。この問題を解決するために、信号を波長ごとに多重伝送する波長分割多重 (WDM) 方式や伝搬モードを独立したチャネルとして扱うモード分割多重 (MDM) 方式ならびにこれらを組み合わせた新規通信方式や新規デバイスの研究が推進されている。また、光通信システムの多様化が進むことで、接続する空間分布や伝搬モードおよび波長を高い自由度で設定できる光インターフェクション技術の確立が求められている。

本論文では、形状、波長またはモードの異なる光伝送媒体を光・電気変換なしに超高速かつ並列的に相互接続する技術の確立を目的とした自由空間光インターフェクションに関する研究について述べている。具体的には、偏波と波面分布を自動的に補償する光インターフェクション、極めて広い波長域において動的なルーティングを可能にする再構成可能アドドロップマルチプレクサ、モード多重化信号の分離を行うデマルチプレクサに関する研究について述べている。

第1章では、当該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装置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、リライタブルなホログラム記録媒質であるフォトリフラクティブ (PR) 媒質と PR 媒質中のビーム伝搬について述べている。また、波面補償効果を有する2重位相共役鏡 (DPCM) と呼ばれる自己形成型体積ホログラムの形成過程と機能について説明し、PR効果を考慮したビーム伝搬法 (BPM) を新たに提案している。

第4章では、第3章で述べた DPCM を高速・高効率に形成するための有用な材料として Sb をドープした $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ (Tin Thiohypodiphosphate: SPS) 結晶に着目し、これを用いた DPCM の回折特性を明らかにしている。また、DPCM における位相共役反射率の結晶長依存性、入射角度依存性、入射光強度依存性、しきい値特性、偏光特性を明らかにしている。

第5章では、通信の多様化に向けて、第4章で得られた結果を基に形状や偏光特性の異なる光導波路間のインターフェクション技術の高性能化について述べている。ここでは、DPCM を用いた接続手法を発展させることで、従来の光ファイバ間における突合せ接続に比べて数十から数百倍もの大きな調節耐性を実現でき、さらに偏光に対する調整を不要にできることを示している。具体的な適用例として、フォトニック結晶ファイバとレーザ間の自由空間インターフェクションにおいて、接続効率の偏光依存性を緩和できることを実験により示している。また、第3章で提案した BPM を用いて数値シミュレーションを行い、PR 媒質中の光強度分布や誘起屈折率分布の複雑な時間変化お

より空間変化を明らかにしている。

第6章では、超広域なフレキシブルWDMシステムに向けて、第3章から第5章で扱ってきたPR効果の動的な性能を活用した超広域な波長可変性を有する再構成可能アドドロップマルチプレクサを提案し、本デバイスが175 nmを超える広域な波長可変幅を有することを実験により示している。また、光学系と波長チャネルのバンド幅の関係について解析的に明らかにし、本デバイスが高密度なWDMで用いられるバンド幅に対応できることを示している。さらに、波長に対する回折効率のばらつきを抑え、回折効率の最大値を向上するために屈折率格子の分布を最適化するアポダイゼーション手法を提案し、これを用いることで、780 nmから1550 nmの超広域な波長可変幅を実現できることを解析的に明らかにしている。

第7章では、超高速・大容量なMDMシステムの実現に向けて問題となっているデマルチプレクサの大型化と複雑化を解決するために、第6章で提案した再構成可能アドドロップマルチプレクサの構成を基に体積ホログラムの位相フィルタとしての特性ならびに多重記録特性を利用したモードデマルチプレクサを提案し、本デバイスがモード多重化信号を一挙に分離できることを実証している。さらに、適切なモードの組み合わせを選択することで20 dBを超える高いSNRが得られることを実験と解析の両面から明らかにしている。

第8章では、本研究の総括を述べている。

これを要するに、著者は、偏波と波面分布を補償する光インターフェクション、広い波長可変域を有する再構成可能アドドロップマルチプレクサならびにモード多重化信号に対するデマルチプレクサに関する研究を行うことで、自由空間光インターフェクション技術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。