

博士（工 学） 小 柳 幸次郎

学 位 論 文 題 名

周期構造媒質における位相整合特性を用いた  
光波制御に関する研究

学位論文内容の要旨

近年インターネットトラフィックの爆発的増大に対処するため、通信容量は拡大の一途をたどっている。このためには、一本の光ファイバに複数の異なる波長を同時に伝送する波長分割多重(WDM)通信システムの導入が重要となる。また、電気信号に変換することなく光のまま可能な限りシンプルに信号処理を行うフォトニックネットワークが、21世紀の中心的ネットワークとして注目される。これらを実現するには、光デバイスや光材料技術に飛躍的な進歩が求められる。そこで、入力光の振幅・位相を電界で変える電気光学効果、周波数変換を引き起こす非線形光学効果、屈折率が自律的に変化するフォトリラクティブ効果などを利用する光機能デバイスが期待される。また、周期構造型のデバイスが頻繁に利用され、重要な役目を果たしている。例えば、光波を分波するための回折格子、光波面を干渉縞として記録するホログラム、光波を実時間で偏向させる超音波偏向器などすべて周期構造を利用している。

本論文は、周期構造媒質における光波制御について考えている。ここでは、非線形光学係数の周期構造と屈折率の周期構造を取り上げた。この周期構造を得るための媒質としては、一つは、周波数変換のための分極反転構造媒質（ここではLiNbO<sub>3</sub>結晶）であり、もう一つは、ホログラムを記録するためのフォトリラクティブ媒質（ここではBaTiO<sub>3</sub>結晶）である。これらの周期構造媒質を用いた光波制御・変換を効率よく行うためには、各光波の波動ベクトルと周期構造の波数ベクトル間において位相整合（擬似位相整合 Quasi-Phase-Matching:QPM）を満たす必要がある。従って、周期構造におけるQPM条件を制御することにより光波を制御できる。

以下に本論文の概要を示す。

第1章では、本論文の背景、目的及び構成について述べている。

第2章では、非線形光学効果・電気光学効果・フォトリラクティブ効果を用いた光波制御の基本的な説明をしている。また、位相整合と分極反転の概念について説明している。周波数変換において、フレネル・キルヒホップの回折理論を非線形媒質中に拡張したHellwarthの理論（本論文の基礎理論）より、出力を求めている。

第3章では、分極反転の各ドメインの厚さを考慮した周期構造媒質におけるQPMの概念を明かにし、第2高調波発生(Second-Harmonic-Generation:SHG)におけるQPMの微調整法としてベクトル的（2次元的）位相整合法を提案している。入射角度を変化させてQPMをとるベクトル的方法は、

従来の基本波の波長を変化させる方法と比較して、QPMの微調整が容易であることが示された。

第4章では、QPMの波長選択性を用いたアップコンバータ赤外分波器を提案している。この分波器は、周期の異なる分極反転構造媒質の重ね合わせよりなる。そして、変換効率、角度分散、チャネル幅、通過帯域幅などの基本特性を理論的に検討している。分波できる最小のチャネル幅は、媒質の大きさと分散および入射角度に依存することが示された。

第5章では、先ず、QPM-SHGを用いた光強度変調器を考えている。従来の周期構造媒質の屈折率を変化させるため外部電界を印加するのとは異なり、ここでは、外部に付加した偏向器に外部電界を印加し、QPM-SHG素子への入射角を変化させてQPM条件を満足させるものである。従って、偏向器に印加する変調電界により第2高調波の出力は変調される。これは、変調に必要な電界の大きさが小さくてすむ。次に、角度分散素子（回折格子）を用いて波長帯域を拡大することにより、群速度不整合により生じる第2高調波のパレス波形広がりを抑えることができることが示された。

第6章では、周期と厚さの異なる分極反転構造媒質よりなる複合素子を用いた電気光学ビーム偏向器を提案し、理論的に検討している。適切な値の電界を印加することにより、容易にマルチ位相レベルでブレーザ化された回折光学素子を作ることができる。その結果、高い回折効率をもつデジタル電気光学偏向器が得られることが分かった。

第7章では、フォトリラクティブ直交偏波4光波混合による電気光学波長分波器を考えている。この方法は、印加電界を異常光線の屈折率だけに影響を及ぼす方向に設定するため、常光線によりすでに作られている屈折率格子が印加電界により乱されることはない。そのため、原理的には、ポッケルス効果で決まる高速応答の可能性が示された。

第8章では、周期分極反転構造媒質を複数のブロックに分け、各ブロックに別々の電界を印加し、その電界の組み合わせにより非線形光学係数の周期構造媒質に屈折率の周期性をもたせる。これにより多重波長変換が容易に可能であることが示された。また、差周波数変換により変換される多重信号光波長を、励起光波長と印加電界により高速に切り替えることが可能である。この素子の最大の特長は、印加電界により波長変換特性を可変にできることである。

第9章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

# 学位論文審査の要旨

主査教授 三島瑛人  
副査教授 北島秀夫  
副査教授 小柴正則

## 学位論文題名

### 周期構造媒質における位相整合特性を用いた 光波制御に関する研究

近年、インターネット利用の普及に伴い通信容量が爆発的に増大している。そのため、一本の光ファイバに複数の異なる波長を同時に伝送させる波長分割多重(WDM)通信システムが導入されつつある。また、電気信号に変換することなく光信号のまま可能な限りシンプルに信号処理を行うフォトニックネットワーク化が進められている。これらを実現するためには、入力光の振幅・位相を電界で変える電気光学効果、周波数変換を行う非線形光学効果、屈折率が自律的に変化するフォトリラクティブ効果などを利用する光機能デバイスの実現と発展が期待される。また、同時に、光波を分波するための回折格子、光波面を干渉縞として記録するホログラム、光波を実時間で偏向させる超音波偏向器など周期構造型のデバイスの更なる高機能化が期待されている。

本研究は、これらのデバイスに利用されている周期構造媒質における光波制御について述べている。周期構造媒質としては、周波数変換のための分極反転構造媒質(ここではLiNbO<sub>3</sub>結晶)における非線形光学係数の周期構造、およびホログラムを記録するためのフォトリラクティブ媒質(ここではBaTiO<sub>3</sub>結晶)における屈折率の周期構造を取り上げている。これらの周期構造媒質を用いた光波制御・周波数変換を効率よく行うためには、各光波の波動ベクトルと周期構造の波数ベクトル間において位相整合条件(あるいは、擬似位相整合条件 Quasi-Phase-Matching:QPM)を満たす必要がある。従って、周期構造におけるQPM条件を制御することにより光波を制御できる。

以下に本研究の概要を示す。

第1章では、本研究の背景、目的及び論文の構成について述べている。

第2章では、非線形光学効果・電気光学効果・フォトリラクティブ効果を用いた光波制御の基本的な説明をしている。また、位相整合と分極反転の概念について説明している。さらに、本研究の基礎理論として、Hellwarthによって始められた回折理論に基づく出力の計算法を説明している。

第3章では、分極反転の各ドメインの厚さを考慮した周期構造媒質におけるQPM条件の概念を明かにし、第2高調波発生(Second-Harmonic-Generation:SHG)におけるQPM条件の微調整法としてベクトル的(2次元的)位相整合法を提案している。入射角度を変化させてQPM条件を満足させる

ベクトル的方法は、基本波の波長を変化させる従来の方法と比較して、微調整が容易であることが示されている。

第4章では、周期の異なる分極反転構造媒質の重ね合わせよりなるアップコンバータ赤外分波器を提案している。この分波器は、QPM条件の利用により波長選択性がある。この分波器の、変換効率、角度分散、チャネル幅、通過帯域幅などの基本特性を検討している。分波できる最小のチャネル幅は、媒質の大きさと分散および入射角度に依存することが示されている。

第5章では、先ず、QPM-SHGを用いた光強度変調器を検討している。従来のように外部電界を印加して周期構造媒質の屈折率を変化させるのとは異なり、外部に付加した偏向器に外部電界を印加し、QPM-SHG素子への入射角を変化させてQPM条件を満足させるものである。従って、偏向器に印加する変調電界により第2高調波の出力は変調される。次に、角度分散素子（回折格子）を外部に付加して波長帯域を拡大することにより、群速度不整合により生じる第2高調波のパルス波形広がりを抑えることができる事が示されている。

第6章では、周期と厚さの異なる分極反転構造媒質よりなる複合素子を用いた電気光学ビーム偏向器を提案し、検討している。適切な値の電界を印加することにより、容易にマルチ位相レベルでブレーザ化された回折素子を作ることができる。その結果、高い回折効率をもつデジタル電気光学偏向器が得られることが示されている。

第7章では、フォトリラクティブ直交偏波4光波混合による電気光学波長分波器を考えている。この方式は、印加電界を異常光線の屈折率だけに影響を及ぼす方向に印加するため、常光線によりすでに作られている屈折率格子が電界により乱されることはない。そのため、原理的には、ポックルス効果で決まる高速応答が期待できることが示されている。

第8章では、周期分極反転構造媒質を複数のブロックに分け、非線形光学係数の周期構造媒質に屈折率の周期性をもたせた多重波長変換素子を考えている。各ブロックに別々の電界を印加し、その電界の組み合わせにより、多重波長の一括変換が容易に可能であることが示されている。さらに、差周波数変換を用いた場合には、波長変換特性可変の高速切り替え素子として動作させることができることが示されている。

第9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、周期構造媒質を用いた数種の光通信用デバイスに位相整合条件を利用した光波制御を行うことを提案し、理論的に検討している。調整の簡易化、高速化、高効率化など光通信用デバイスの高機能化のための有用な新知見が得られており、光情報通信工学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。