

学位論文題名

波長変換用非線形光導波路の解析法の
開発とその応用に関する研究

学位論文内容の要旨

近年の情報処理・情報通信機器の普及にともない、大量の情報を蓄積するための記録媒体として、光ディスクメモリの需要が著しく増大し、その大容量化・高密度化に対する要求が高まっている。光ディスクの記録密度の限界は、記録・再生に用いられる光のスポットサイズに依存し、根本的には光の波長により決まる。したがって、現行の近赤外半導体レーザー光よりも波長の短い、可視、さらには紫外といった領域の光を発する短波長コヒーレント光源の実用化が待望されている。

半導体レーザー自身の短波長発振については、現行の GaAs 系レーザーで既に発振波長の限界 ($\sim 0.57\mu\text{m}$) に近づいており、他の材料系 (例えば II-VI 族化合物半導体) によるデバイス開発が急がれている段階である。

一方、波長を一気に $1/2$ に変換することの可能な第 2 高調波発生 (SHG) を始めとする非線形光学効果を用いたレーザー光の波長変換に関する研究が活発に行われている。特に、光を微小な断面内に閉じ込めることにより高い光パワー密度を長距離にわたり保持することが可能な光導波路構造は、非線形光学効果の応用には最適なデバイス構造であり、高出力化の進展した近赤外域の半導体レーザーを入力光として、緑色から近紫外域のコヒーレント光が得られている。

ところで、非線形光学効果による波長変換においては、入力光 (厳密には入力光により誘起された非線形分極波) と出力光の間の位相整合を達成することが高効率化に欠かせない重要な問題である。非線形媒質の屈折率の波長依存性 (材料分散) が障害であり、特別な工夫により、これを補償する必要がある。屈折率の異方性および温度特性の利用はバルク結晶の時代より用いられている代表的な位相整合法である。しかし、材料の非線形性もまた異方性をもつために、その材料の性能を生かしきれない状況がしばしば生じてしまう。導波路の場合には、モード分散により補償する方法もあるが、通常は屈折率差が比較的小さいため、材料分散を相殺しきれない場合が少なくない。また、入力光と出力光で異なる次数のモードを用いることから変換効率は低く、波長、寸法、および温度の変化に対して敏感であるため、設計時の位相整合条件が容易に破られてしまうという数々の難点がある。

こうした難点を克服する位相整合の方法がいくつか提案されている。出力光の放射モードを位相整合させるチェレンコフ放射方式では、導波路を構成する材料の選択さえ適切であれば、自動的に長手方向の位相整合が満たされる方向に出力光が得られる。横方向の位相不整合のため変換効率がある程度犠牲となるにもかかわらず、波長、寸法などの変化に対する高い安定性により、実験的には非常に良好な結果が得られている。材料の非線形感受率を周期的に変調し、その 1 周期毎、あるいは数周期毎に巨視的に位相整合を得ようとする擬位相整合 (QPM) 方式では、構造の周期さえ適切であれば、どのように大きな分散性も補償することが可能となるため、最近、多大な関心が寄せられており、SHG や和周波発生 (SFG) などの短波長光発

生のみならず、差周波発生 (DFG) によるミリ波発生などにも応用されつつある。この原理は SHG の最初の観測のわずか翌年 1962 年に発表された非常に古いアイデアであるが、最近の材料加工技術の進展にともない、ようやく高品質な周期構造が得られ、高効率な波長変換が実現されるに至っている。これらの方式を用いて、半導体レーザーの波長変換を用いた短波長光源の研究・開発は既に、実用化を目指した段階にシフトしており、非線形光導波路に課される信頼性・再現性が一段と厳しく要求されるようになってきている。

本論文は、こうした状況のもとで、短波長光源用の非線形光導波路形波長変換素子の最適構造設計のための簡便かつ高精度な解析法の開発、ならびに高効率な波長変換を達成するためのデバイス構造の探索についての研究をまとめたものである。通常の線形光導波路に対して開発されてきた既存の各種解析的近似解法を拡張し、より適用範囲の広いものに発展させ、それらを組み合わせることにより、チャンネル形の非線形光導波路における任意の方式の波長変換を解析するための方法論を提案し、最適設計および高効率化において有用なアイデア、ならびにデータを提供している。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、および構成について述べている。

第 2 章では、チャンネル形非線形光導波路における任意の方式の波長変換を簡便に解析することが可能な手法を提案している。まず、屈折率の異方性、任意の非線形感受率分布、および任意の偏波を考慮した基本方程式を導出し、導波モードに対しては重み付け屈折率法とモード結合理論に基づく定式化、放射モードに対してはスペクトル領域法に基づく定式化を行っている。また、具体的な非線形効果として SHG および SFG を考え、本解析法に適合する形の非線形分極の表現式を導出している。

第 3 章では、第 2 章の解析手法に基づいて、長手方向に一樣な構造の非線形光導波路に対する定式化を行い、チェレンコフ放射形の位相整合による波長変換を解析している。SHG の解析では、位相整合する放射モード出力に加えて、位相整合しない導波モードの微弱な寄与も含めた詳細な計算を行い、数値解法による結果との比較から、本手法の妥当性・有効性について検討している。チェレンコフ放射のもつ広い波長許容度により可能となる SHG と SFG の同時位相整合による 3 原色光発生解析では、理論と実験による変換効率の相違点を指摘している。また、チェレンコフ放射形波長変換の高効率化の方策として、ドメイン反転層をもつ非線形光導波路を提案している。

第 4 章では、長手方向に周期的に変調された非線形感受率分布をもつ周期構造非線形光導波路に対する定式化を行い、QPM 方式の SHG を解析している。導波モードを出力とする導波形 QPM では、最適設計により非常に大きな変換効率を得られることを示すとともに、構造に対する著しい依存性を明かにしている。チェレンコフ放射形 QPM では、一樣構造の場合と比較して、変換効率の最大値および許容幅ともに増大することを示している。

第 5 章では、真円のコアをもつ非線形光ファイバにおけるチェレンコフ放射形の SHG および SFG を対象とし、定常解析を用いた最適構造の基礎的検討を行っている。

第 6 章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則
副 査 教 授 伊 藤 精 彦
副 査 教 授 三 島 瑛 人
副 査 教 授 朝 倉 利 光
副 査 助 教 授 早 田 和 弥

学 位 論 文 題 名

波長変換用非線形光導波路の解析法の 開発とその応用に関する研究

近年の情報処理・情報通信機器の普及にともない、大量の情報を蓄積するための記録媒体として、光ディスクメモリの需要が著しく増大し、その大容量化・高密度化に対する要求が高まっている。光ディスクの記録密度の限界は、記録・再生に用いられる光のスポットサイズに依存し、根本的には光の波長により決まる。このため、第2高調波発生 (SHG) を始めとする非線形光学効果を用いたレーザー光の波長変換に関する研究が活発に行われている。特に、光を微小な断面内に閉じ込めることにより高い光パワー密度を長距離にわたり保持することが可能な光導波路構造は、非線形光学効果の応用には最適なデバイス構造であり、最近、チェレンコフ放射方式や擬位相整合 (QPM) 方式などの位相整合法を用いた高効率な波長変換素子の実現されるにともない、非線形光導波路に課される信頼性・再現性が一段と厳しく要求されるようになってきている。

本論文は、こうした状況のもとで、短波長光源用の非線形光導波路形波長変換素子の最適構造設計のための簡便かつ高精度な解析法の開発、ならびに高効率な波長変換を達成するためのデバイス構造の探索についての研究をまとめたものである。

第1章では、本論文の背景、目的、および構成について述べている。

第2章では、チャンネル形非線形光導波路における任意の方式の波長変換を簡便に解析することが可能な手法を提案している。まず、屈折率の異方性、任意の非線形感受率分布、および任意の偏波を考慮した基本方程式を導出し、導波モードに対しては重み付け屈折率法とモード結合理論に基づく定式化、放射モードに対してはスペクトル領域法に基づく定式化を行っている。また、具体的な非線形効果として SHG および和周波発生 (SFG) を考え、本解析法に適合する形の非線形分極の表現式を導出している。

第3章では、第2章の解析手法に基づいて、長手方向に一様な構造の非線形光導波路に対する定式化を行い、チェレンコフ放射形の位相整合による波長変換を解析している。SHG の解析では、位相整合する放射モード出力に加えて、位相整合しない導波モードの微弱な寄与も含めた詳細な計算を行い、数値解法による結果との比較から、本手法の妥当性・有効性について

検討している。チェレンコフ放射のもつ広い波長許容度により可能となる SHG と SFG の同時位相整合による 3 原色光発生 の解析では、理論と実験による変換効率の相違点を指摘している。また、チェレンコフ放射形波長変換の高効率化の方策として、ドメイン反転層をもつ非線形光導波路を提案している。

第 4 章では、長手方向に周期的に変調された非線形感受率分布をもつ周期構造非線形光導波路に対する定式化を行い、QPM 方式の SHG を解析している。導波モードを出力とする導波形 QPM では、最適設計により非常に大きな変換効率を得られることを示すとともに、構造に対する著しい依存性を明かにしている。チェレンコフ放射形 QPM では、一様構造の場合と比較して、変換効率の最大値および許容幅ともに増大することを示している。

第 5 章では、真円のコアをもつ非線形光ファイバにおけるチェレンコフ放射形の SHG および SFG を対象とし、定常解析を用いた最適構造の基礎的検討を行っている。

第 6 章では、本研究で得られた成果の総括を行っている。

以上のように本論文は、短波長光源用の非線形光導波路形波長変換素子の最適構造設計のための簡便かつ高精度な解析法を開発するとともに、こうした波長変換素子の高効率化のための指針を与える有益な新知見を得ており、光エレクトロニクス、非線形光学の進歩に寄与するところ大である。

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。