



Title	強誘電体波長変換デバイスにおける横モード制御技術の開発
Author(s)	野呂, 諒介
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98656
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 (野呂 諒介)	
論文題名	強誘電体波長変換デバイスにおける横モード制御技術の開発
<p>論文内容の要旨</p> <p>本論文は光学特性の良い強誘電体結晶を用いた導波路型波長変換デバイスの横モード制御技術の開発に関する研究をまとめたもので、全6章にて構成される。</p> <p>第1章では、まず波長変換の歴史と位相整合方法について述べた。次に近赤外から紫外光の波長変換で用いられるボレート結晶と強誘電体結晶についてそれぞれの光学的性質をまとめた。変換効率向上のための導波路構造についてアニールプロトン交換（APE）導波路とストリップ導波路についてそれぞれの特徴について述べ、ストリップ導波路で用いることができる横型擬似位相整合（横型QPM）について説明した。次に具体的な応用先としてレーザ直接描画装置の光源とスクイーズド光源を挙げた。レーザ直接描画装置の光源では高パワー連続波（CW）350 nm帯のレーザ光が望まれるが、ボレート結晶ではCWの変換効率が悪いこと、潮解性によりメンテナンスコストが高いこと、モノリシックデバイスを実現できないことといった問題に言及し、それらを解決する強誘電体導波路型波長変換デバイスでは横モード拡大が必須であることを説明した。またスクイーズド光源ではモノリシック化が進められていることに言及し、現状のSiNを用いた集積デバイスでは高スクイージングレベル達成と高速な光回路実現は難しいことを述べた。強誘電体導波路型デバイスではこれらの問題を解決できることを述べ、更に透明電極材料であるGaNと組み合わせることで高速な垂直電界印加型位相シフタも集積できることを示した。そのためには異種材料を用いた波長変換デバイスが必要なことから横型QPMを用いることを述べた。第2章では非線形光学結晶を用いた波長変換デバイス設計と解析に必要な理論についてまとめた。第3章ではレーザ直接描画装置への応用に向けたAPE導波路の横モード拡大を行った。高パワー波長変換結晶として非線形光学定数は他の強誘電体結晶に比べて少し劣るが光損傷耐性の高いMgO添加定比組成LiTaO₃（MgO:SLT）が最適であることを述べ、目標である1 Wの350 nm帯レーザ光を光損傷なく導波させるためには、励起光となる1000 nm帯レーザにおいて1/ρ²全幅約30 μm以上の横モードの大きな導波路が必要であることを述べた。作製ではMgO:SLTの-Z面にSiO₂を装荷することで電界印加中のリーク電流が抑制され、一様な周期分極反転（PP）構造が形成できた。一般的な条件よりもプロトン交換（PE）幅を大きく、PE時間とアニール時間を長くすることで1/ρ²全幅が深さ方向28 μm、幅方向43 μmの大きな横モードを持つAPE導波路を作製した。Yb:YAGレーザを励起光としてSHG実験を行い、波長変換効率は理論値の5.1%/Wに対して4.3%/Wと近い値が得られた。第4章では応用上重要なAPE導波路の横モード対称化を行った。第3章で横モード拡大に成功したが、結晶深さ方向の屈折率非対称性に起因する非対称な横モードが観察された。PE後に表面活性化接合しアニールすることでPE中に結晶に取り込まれたH⁺は接合界面を超えて拡散するため深さ方向にも対称な屈折率分布を持つ埋込APE導波路を作製することができる。PE幅、PE時間、アニール時間を最適化することで1/ρ²全幅が深さ方向30 μm、幅方向32 μmの埋込APE導波路を作製した。また、埋込APE導波路を波長変換デバイスに応用する際、上下の結晶のPP構造がずれると変換効率が下がってしまう。片方の結晶には一様なPP構造を、もう片方の結晶には位相をずらしたPP構造を形成することでこの問題を解決した。Nd:YAGレーザを励起光としてSHG実験を行い、波長変換効率は理論値の5.2%/Wに対して4.8%/Wと近い値が得られた。SH光においても1/ρ²全幅が深さ方向16 μm、幅方向19 μmの対称な横モードが得られた。第5章ではモノリシックスクイーズド光源に向けたMgO:CLN/GaN積層による横型QPM導波路の作製とスラブ導波路でのSHG実証を行った。まず、高スクイージングレベル達成には非線形光学定数の高いMgO:CLNが最適であると述べた。光速な垂直電界印加型光回路と集積するためにMgO:CLNをGaN等の窒化物半導体と積層し、横型QPMデバイスとすることが必要である。そのためにMgO:CLNとGaNの表面活性化接合が必要であるが、従来は界面に光の吸収源となるFeなどの不純物層が存在した。接合条件最適化とCMP研磨によるGaN表面平坦性向上により不純物層の無い表面活性化接合を実現した。次にGaN膜厚をエッチングにより調整しMgO:CLN薄膜を転写した後、エッチングによりチャネル導波路を形成した。導波実験を行ったが、GaN膜厚調整のときに形成されたピットにより散乱損失が大きく導波光は確認されなかった。そこでGaNの膜厚調整を化学機械研磨のみで行いスラブ導波路を作製した。導波が確認され、励起光波長784 nmのとき波長392 nmのSH光が確認された。第6章では本研究で得られた成果をまとめた後、残された課題と将来の展望を述べ、本論文の結論とした。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (野 呂 諒 介)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	片山 竜二
	副 査	教授	吉村 政志
	副 査	准教授	谷川 智之
	副 査	教授	小島 一信
	副 査	教授	森 勇介
	副 査	教授	片山 光浩
	副 査	教授	丸山 美帆子
	副 査	教授	尾崎 雅則
	副 査	教授	近藤 正彦
	副 査	教授	森 伸也
	副 査	教授	廣瀬 哲也

論文審査の結果の要旨

本論文は光学特性の良い強誘電体結晶を用いた導波路型波長変換デバイスの横モード制御技術の開発に関する研究をまとめたもので、全6章で構成される。

第1章では、まず波長変換の歴史と位相整合方法について述べている。次に近赤外から紫外光の波長変換で用いられるボレート結晶と強誘電体結晶についてそれぞれの光学的性質をまとめている。変換効率向上のための導波路構造についてアニールプロトン交換 (APE) 導波路とストリップ導波路についてそれぞれの特徴について述べ、ストリップ導波路で用いることができる横型擬位相整合 (横型 QPM) について説明している。次に具体的な応用先としてレーザ直接描画装置の光源とスクイーズド光源を挙げる。レーザ直接描画装置の光源では高パワー連続波 (CW) 350 nm 帯のレーザ光が望まれるが、ボレート結晶では CW の変換効率が悪いこと、潮解性によりメンテナンスコストが高いこと、モノリシックデバイスを実現できないことといった問題に言及し、それらを解決する強誘電体導波路型波長変換デバイスでは横モード拡大が必須であることを説明している。またスクイーズド光源ではモノリシック化が進められていることに言及し、現状の SiN を用いた集積デバイスでは高スクイージングレベル達成と高速な光回路実現は難しいことを述べている。強誘電体導波路型デバイスではこれらの問題を解決できることを述べ、更に透明電極材料である GaN と組み合わせることで高速な垂直電界印加型位相シフタも集積できることを示している。そのためには異種材料を用いた波長変換デバイスが必要なことから横型 QPM を用いることを述べている。第2章では非線形光学結晶を用いた波長変換デバイス設計と解析に必要な理論についてまとめている。第3章ではレーザ直接描画装置への応用に向けた APE 導波路の横モード拡大を行っている。高パワー波長変換結晶として非線形光学定数は他の強誘電体結晶に比べて少し劣るが光損傷耐性の高い MgO 添加定比組成 LiTaO₃ (MgO:SLT) が最適であることを述べ、目標である 1 W の 350 nm 帯レーザ光を光損傷なく導波させるためには、励起光となる 1000 nm 帯レーザにおいて $1/e^2$ 全幅約 30 μm 以上の横モードの大きな導波路が必要であることを述べている。作製では MgO:SLT の-Z面に SiO₂ を装荷することで電界印加中のリーク電流が抑制され、一様な周期分極反転 (PP) 構造を形成している。一般的な条件よりもプロトン交換 (PE) 幅を大きく、PE 時間とアニール時間を長くすることで $1/e^2$ 全幅が深さ方向 28 μm 、幅方向 43 μm の大きな横モードを持つ APE 導波路を作製した。Yb:YAG レーザを励起光として SHG 実験を行い、波長変換効率は理論値の 5.1%/W に対して 4.3%/W と近い値が得られている。第4章では応用上重要な APE 導波路の横モード対称化を行っている。第3章で横モード拡大に成功したが、結晶深さ方向の屈折率非対称性に起因する非対称な横モードが観察されている。PE 後に表面活性化接合しアニールすることで PE 中に結晶に取り込まれた H⁺ は接合界面を超えて拡散するため深さ方向にも対称な屈折率分布を持つ埋込 APE 導波路を作製することができる。PE 幅、PE 時間、アニール時間を最適化することで $1/e^2$ 全幅が深

さ方向 30 μm 、幅方向 32 μm の埋込 APE 導波路を作製している。また、埋込 APE 導波路を波長変換デバイスに応用する際、上下の結晶の PP 構造がずれると変換効率が下がってしまう。片方の結晶には一様な PP 構造を、もう片方の結晶には位相をずらした PP 構造を形成することでこの問題を解決している。Nd:YAG レーザを励起光として SHG 実験を行い、波長変換効率は理論値の 5.2%/W に対して 4.8%/W と近い値が得られている。SH 光においても $1/e^2$ 全幅が深さ方向 16 μm 、幅方向 19 μm の対称な横モードが得られている。第 5 章ではモノリシックスクイーズド光源に向けた MgO:CLN/GaN 積層による横型 QPM 導波路の作製とスラブ導波路での SHG 実証を行っている。まず、高スクイージングレベル達成には非線形光学定数の高い MgO:CLN が最適であると述べている。光速な垂直電界印加型光回路と集積するために MgO:CLN を GaN 等の窒化物半導体と積層し、横型 QPM デバイスとすることが必要である。そのために MgO:CLN と GaN の表面活性化接合が必要であるが、従来は界面に光の吸収源となる Fe などの不純物層が存在する。接合条件最適化と CMP 研磨による GaN 表面平坦性向上により不純物層の無い表面活性化接合を実現している。次に GaN 膜厚をエッチングにより調整し MgO:CLN 薄膜を転写した後、エッチングによりチャネル導波路を形成している。導波実験を行ったが、GaN 膜厚調整のときに形成されたピットにより散乱損失が大きく導波光は確認されていない。そこで GaN の膜厚調整を化学機械研磨のみで行いスラブ導波路を作製している。導波が確認され、励起光波長 784 nm のとき波長 392 nm の SH 光が確認できている。第 6 章では本研究で得られた成果をまとめた後、残された課題と将来の展望を述べ、本論文の結論としている。

以上のように本論文では、従来の不定比組成強誘電体結晶の性能を上回る高出力波長変換に適応可能な定比組成強誘電体導波路型波長変換デバイスならびに、導電性制御可能なワイドギャップ半導体と強誘電体を集積したハイブリッド型波長変換デバイスの実現に、それぞれ必要なモード制御技術を提案し、実証している。この成果は量子光学および非線形光学分野を革新する極めて高い学術的意義が認められるだけでなく、この方法論を用いることで新たな応用領域の開拓が期待されることも鑑みて、本論文は博士論文として価値あるものと認める。