



Title	極性反転及び誘電体複合コアを用いたAlN系光導波路型波長変換デバイスに関する研究
Author(s)	本田, 啓人
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105454
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

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 (本 田 啓 人)	
論文題名	極性反転及び誘電体複合コアを用いたAlN系光導波路型波長変換デバイスに関する研究
論文内容の要旨 AlNは波長約210 nmの遠紫外光に対して透明なウルトラワイドバンドギャップ半導体であるとともに二次の非線形光学結晶である。またサファイア基板上に薄膜成長が可能であり、発光ダイオードや半導体レーザへの応用実績から微細加工技術の知見があるため、断面積の小さな光導波路や光集積回路 (PIC) のプラットフォームとして優位性を持つ。本論文では遠紫外光源およびPIC上での量子光源応用を目指した極性反転AlNコアまたはAlNと二次の光学非線形性を持たない誘電体を組み合わせた複合コアを有する導波路型波長変換デバイスに関する研究を、全5章にまとめた。 第1章では波長変換に必要な位相整合の方法についてまとめた。次に波長変換の応用事例として、レーザ光の短波長化について述べてから生体に無害な消毒・殺菌が可能とされている波長200-230 nmの遠紫外光が注目されていることを紹介し、二次の非線形光学過程である第二高調波発生 (SHG) による遠紫外光発生について述べた。続けて波長変換の2つめの応用事例として量子光源を紹介し、SHGの逆過程にあたる縮退光パラメトリック下方変換 (OPDC) が用いられていることを述べた。またPICへの量子光源の統合が進められているものの、微細加工技術が成熟しているSiやSiN_xは二次の光学非線形性を持たないため、二次の非線形光学結晶を用いることによるPICの高性能化が期待されていることを述べた。最後にこれらの背景をもとに本研究では位相整合の中でも横型擬位相整合 (QPM) を用いた極性反転AlNまたは誘電体複合コアをもつチャネル導波路による遠紫外SHGおよびPICへ統合可能な水平配置ハイブリッド導波路の開発を目指すことを述べた。第2章では光導波路について述べ、チャネル導波路における導波モードの計算に用いた有限差分法について概説した。次に非線形光学テンソルおよび定数について説明し、非線形モード結合方程式についてまとめた。ここで導出された非線形結合係数 κ をもとに横型擬位相整合 (QPM) について説明をした。第3章では、遠紫外SHGについてまとめた。はじめにフェムト秒チタンサファイアレーザとBBO結晶を組み合わせ発生させた青色のパルスレーザを2層極性反転AlNチャネル導波路に照射し、波長230 nm帯の遠紫外SHGを確認した。次にAlN上に遠紫外光に対して透明で二次の光学非線形性を持たないHfO₂を積層したチャネル導波路の設計および作製をし、前述の青色パルスレーザを照射して遠紫外光の発生を確認した。ただしパルスレーザの筐体と消費電力は大きいので小型で高効率な遠紫外光源の励起光源として用いることはできないため、連続波 (CW) 発振の波長可変外部共振器型半導体レーザを励起光源として2層極性反転AlNチャネル導波路の光学評価を行った。その結果、波長230 nm帯の遠紫外光の発生が確認された。このとき遠紫外光強度が強くなる波長が位相整合波長の理論予測と同様に導波路幅が広がるほど短波長化した。最後に、非線形モード結合方程式に基づき伝搬損失や導波路厚さの勾配が遠紫外光強度と励起波長の関係に与える影響について考察をおこなった。第4章では、中央に配置されたAlNコアが誘電体のサイドコアによって挟み込まれた水平配置ハイブリッド導波路についてまとめた。このような基板垂直方向ではなく水平方向に配置されることによって、横型QPMを用いたOPDCに必要な高次モードの励起光を非対称方向性結合により励振可能になる。またこれにより、リング共振器との集積も容易になる。はじめに励起光源にInGaNレーザを、検出器に室温で使用可能なSiフォトディテクタを用いることを想定して、波長460 nmから波長920 nmへの縮退光パラメトリック下方変換 (OPDC) に必要な導波路構造の設計を行った。その後、縮退OPDCによって発生するスクイーズド光のスクイーディングレベルを、伝搬損失を考慮して見積もった。続けて水平配置ハイブリッド導波路による波長変換の実証として、縮退OPDCの逆過程にあたるSHGを光ファイバ通信波長帯のCW発振波長可変レーザを励起光源として行った。サイドコアにはPICで広く用いられ、AlNとの屈折率差が小さなSiN_xを採用した。デバイス作製では他の二次の非線形光学結晶への展開も視野に入れて誘電体成膜、化学機械研磨による平坦化、およびアライメント露光といった材料依存性の低い基本的な半導体微細加工技術のみを用いた。光学評価の結果、励起波長が約1570 nmのときSH光強度の顕著な増強が確認され、規格変換効率 η は約1%W⁻¹cm⁻²であった。最後に他のグループから報告されているAlNを用いた通信波長帯におけるSHGデバイスと比較すると伝搬損失は大きいものの η は同程度であったこと、サイドコアに用いたSiN_xの加工に成熟した製造技術を取り入れることによって効果的に伝搬損失を低減できる可能性があることを述べた。第5章では本研究で得られた結果と課題および展望を総括し、本研究の結論を述べた。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (本 田 啓 人)		
論文審査担当者	職 名	氏 名
	主 査 教授	片山 竜二
	副 査 教授	吉村 政志
	副 査 教授	小島 一信
	副 査 准教授	谷川 智之
	副 査 教授	森 勇介
	副 査 教授	丸山 美帆子
	副 査 教授	福田 憲二郎
	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

AlN は波長約 210 nm の遠紫外光に対して透明なウルトラワイドバンドギャップ半導体であるとともに二次の非線形光学結晶である。またサファイア基板上に薄膜成長が可能であり、発光ダイオードや半導体レーザへの応用実績から微細加工技術の知見があるため、断面積の小さな光導波路や光集積回路 (PIC) のプラットフォームとして優位性を持つ。本論文では遠紫外光源および PIC 上での量子光源応用を目指した極性反転 AlN コアまたは AlN と二次の光学非線形性を持たない誘電体を組み合わせた複合コアを有する導波路型波長変換デバイスに関する研究を、全 5 章にまとめている。

第 1 章では波長変換に必要な位相整合の方法についてまとめている。次に波長変換の応用事例として、レーザ光の短波長化について述べてから生体に無害な消毒・殺菌が可能とされている波長 200-230 nm の遠紫外光が注目されていることを紹介し、二次の非線形光学過程である第二高調波発生 (SHG) による遠紫外光発生について述べている。続けて 2 つめの波長変換の応用事例として量子光源を紹介し、SHG の逆過程にあたる縮退光パラメトリック下方変換 (OPDC) が用いられていることを述べている。また PIC への量子光源の統合が進められているものの、微細加工技術が成熟している Si や SiN_x は二次の光学非線形性を持たないため、二次の非線形光学結晶を用いた PIC の高性能化が期待されていることを示している。最後にこれらの背景をもとに本研究では位相整合の中でも横型擬似位相整合 (QPM) を用い、極性反転 AlN または誘電体複合コアをもつチャネル導波路による遠紫外 SHG 及び PIC へ統合可能な水平配置ハイブリッド導波路の開発に取り組んだことを述べている。第 2 章では光導波路について述べ、チャネル導波路における導波モードの計算に用いた有限差分法について概説している。次に非線形光学テンソル及び定数について説明し、非線形モード結合方程式についてまとめている。ここで導出された非線形結合係数 κ をもとに横型擬似位相整合 (QPM) について説明をしている。第 3 章では、遠紫外 SHG についてまとめている。はじめにフェムト秒チタンサファイアレーザと BBO 結晶を組み合わせ発生させた青色のパルスレーザを 2 層極性反転 AlN チャネル導波路に照射し、波長 230 nm 帯の遠紫外 SHG を確認している。次に AlN 上に遠紫外光に対して透明で二次の光学非線形性を持たない HfO₂ を積層したチャネル導波路の設計および作製をし、前述の青色パルスレーザを照射して遠紫外光の発生を確認している。続けてパルスレーザの筐体と消費電力は大きいと小型で高効率な遠紫外光源の励起光源として用いることはできないことを指摘し、連続波 (CW) 発振の波長可変外部共振器型半導体レーザを励起光源として 2 層極性反転 AlN チャネル導波路の光学評価を行い、その結果、波長 230 nm 帯の遠紫外光の発生が確認され、このとき遠紫外光強度が強くなる位相整合波長が理論予測と同様に導波路幅が広がるほど短波長化している。最後に、非線形モード結合方程式に基づき伝搬損失や導波路厚さの勾配が遠紫外光強度と励起波長の関係に与える影響について考察している。第 4 章では、中央に

配置された AlN コアが誘電体のサイドコアによって挟み込まれた水平配置ハイブリッド導波路についてまとめている。このような基板垂直方向ではなく水平方向に配置されることによって、横型 QPM を用いた OPDC に必要な高次モードの励起光を非対称方向性結合により励振可能になる。またこれにより、リング共振器との集積も容易になる。はじめに励起光源に InGaN レーザを、検出器に室温で使用可能な Si フォトディテクタを用いることを想定して、波長 460 nm から波長 920 nm への縮退光パラメトリック下方変換 (OPDC) に必要な導波路構造を設計している。その後、縮退 OPDC によって発生するスキーズド光のスキージングレベルを、伝搬損失を考慮して見積もっている。続けて水平配置ハイブリッド導波路による波長変換の原理実証として、光ファイバ通信波長帯の CW 発振波長可変レーザを励起光源として縮退 OPDC の逆過程にあたる SHG を実証している。このとき、サイドコアには PIC で広く用いられ AlN との屈折率差が小さな SiN_xを採用している。デバイス作製では他の二次的非線形光学結晶への展開も視野に入れて誘電体成膜、化学機械研磨による平坦化、およびアライメント露光といった材料依存性の低い基本的な半導体微細加工技術のみを用いている。光学評価の結果、励起波長が約 1570 nm のとき SH 光強度の顕著な増強が確認され、規格変換効率 η は約 $1\%W^{-1}cm^{-2}$ である。最後に他のグループから報告されている AlN を用いた通信波長帯における SHG デバイスと比較すると伝搬損失は大きいものの η は同程度であること、サイドコアに用いた SiN_xの加工に成熟した製造技術を取り入れることによって効果的に伝搬損失を低減できる可能性があることを述べている。第 5 章では本研究で得られた結果と課題、展望を総括し、本研究の結論を述べている。

以上のように本論文では、従来とは異なる横型 QPM を原理とした波長変換デバイス構造を用いることで、遠紫外帯域の未踏波長域光源、ならびに光集積回路に統合可能な量子光学プラットフォームの実装方法を提案し、それぞれ AlN を基軸とした極性反転ならびに水平配列複合導波路構造を用いて形成しそれらの基本動作を実証している。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。