

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760043

研究課題名（和文）高非線形光導波路を用いた広帯域光発生の研究

研究課題名（英文）Broad wavelength light generation using by high optical nonlinear waveguides

研究代表者 北 智洋 (KITA TOMOHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40466537

研究成果の概要（和文）：可視光領域で透明で高い光学非線形性を持つ ZnO 及び TiO₂ を用いて作製した導波路における非線形光学効果について研究を行った。チャンネル導波路構造においては、強い光閉じ込めによる自己位相変調効果の増強を確認した。モード間位相整合を用いることで ZnO 二次高調波発生を高効率に実現できる事を示した。TiO₂ フォトニック結晶導波路においては、チャンネル構造の 21 倍に及ぶ非線形光学効果の増強が期待できる事を示した。

研究成果の概要（英文）：We studied about the high optical nonlinear waveguides fabricated by ZnO and TiO₂ thin films to broaden wavelength range of propagation light. We observed the enhancement of self-phase modulation in channel waveguides due to strong light confinement.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：ZnO, TiO₂, 光導波路, 自己位相変調, 二次高調波発生, フォトニック結晶導波路

1. 研究開始当初の背景

非線形光学効果により発生する SC 光は、その高輝度、超広帯域という特性が医療応用や周波数標準等の分野で有用であり、広く研究が進められている。本研究では OCT:Optical Coherence Tomography などへの応用を想定し 800 nm を中心波長とした広帯域光を対象としている。従来の SC 光は、数十 cm から数 m のフォトニック結晶ファイバー中に高出力レーザーからのパルス光を導波させることで得られるため、小型化、低消費電力化は困難であった。本研究では導波路の材料と構造を工夫する事で高い非線形性を有する導波路デバイスの実現可能性を検証した。

2. 研究の目的

本研究では、高輝度、高帯域光を数 mm 角

程度の基板上で且つ従来よりも低い入射光強度で実現するために非線形性の高い材料をコアとした光導波路を開発し、その効果を実証することを目的としている。本研究では、サファイア又はシリカ基板上に成膜された高い屈折率と非線形性を有する ZnO 及び TiO₂ 薄膜を電子線リソグラフィ、ドライエッチングといった半導体微細加工技術を用いて、サブミクロンから数 μm 程度の幅を持つチャンネル型光導波路に加工する。チャンネル型導波路中において、光がコア内に強く閉じ込められ高強度の導波光がコア材料の非線形光学効果を発現させる。二次の非線形光学効果である二次高調波発生、三次の非線形光学効果である自己位相変調効果に注目して、これらのデバイスによる広帯域光発生の効果を検証した。

3. 研究の方法

(1) ZnO チャネル導波路を用いた SPM の高効率化

初年度の研究においてチャンネル型ZnO光導波路における自己位相変調効果を増強させるための構造最適化を行った。電磁界解析の結果、幅700 nm、高さ500 nmの導波路構造において最も導波路中の光強度が強くなることを確認し、微細加工技術を用いて作製した。チタン・サファイヤレーザーを用いた実験により自己位相変調効果を観測し、非線形光学効果の増強を検証した。

(2) ZnO 導波路における二次高調波の発生手法の検討

本研究で用いるZnO薄膜の二次非線形光学定数 $\chi^{(2)}$ を測定するためのメーカープリンジ法測定系を構築した。サファイヤ上にPLD法で成膜したZnO薄膜の $\chi^{(2)}$ を測定し、バルクZnOと同程度の $\chi^{(2)}$ を持つ事を確認した。ZnO薄膜の持つ高い $\chi^{(2)}$ を利用して高効率な二次高調波発生を行うためには、基本波と二次高調波との位相整合をとる必要がある。本研究項目では、モード間位相整合法に注目して研究を行った。

(3) TiO₂ チャネル導波路における分散制御と非線形光学定数 γ

ZnO以上に高い屈折率と非線形光学定数を持つTiO₂チャネル導波路を用いることで更なる伝搬光の広帯域化手法について検討を行った。

(4) TiO₂ フォトニック結晶導波路におけるスローライト効果を利用した自己位相変調効果の増強

フォトニック結晶導波路において発現するスローライトの効果を利用する事で、非線形光学定数のさらなる増強を試みた。電磁界解析手法を用いて増強効果についての検証を行い、TiO₂フォトニック結晶導波路作製のためのプロセス最適化を行った。プロセス最適化の結果、検討した構造が十分に作製可能であることを確認した。

4. 研究成果

(1) ZnO チャネル導波路を用いた SPM の高効率化

図1に様々な断面構造を持つZnOチャネル導波路における非線形光学定数の計算結果と測定結果を示す。幅700 nm、高さ500 nmの構造において最も非線形光学定数 γ が大きくなる事が、数値解析、実験結果の両面から示された。 γ の最大値は、 $22.5 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ であり、従来用いられてきた高非線形ファイバーの2000倍に達した。この γ の増強効果は、ZnOが元来持つ高い光学非線形性とチャネル

導波路の強い光閉じ込めによって実現されていることを明らかにした。

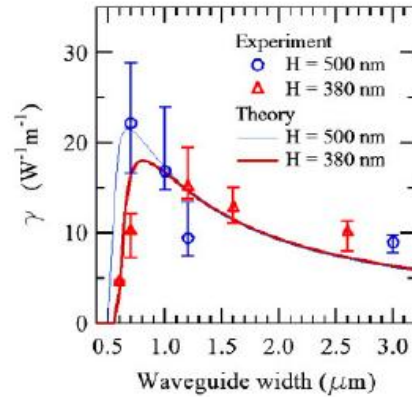


図1 ZnO チャネル導波路における非線形光学定数 γ

(2) ZnO 導波路における二次高調波の発生手法の検討

ZnOが高い二次の光学非線形性 $\chi^{(2)}$ を持つことは以前から知られていたが、有効な位相整合手法が存在しないために二次高調波発生材料としての注意は払われてこなかった。本研究では、チャネル導波路におけるモード間位相整合を利用した二次高調波発生デバイスの可能性を検証した。図2に高さ $1 \mu\text{m}$ のZnOチャネル導波路における様々なモードの位相屈折率 n_{eff} の計算結果を示す。高さ $1 \mu\text{m}$ 、幅 800 nm の構造において基本波の TM_{00} モードと二次高調波の TM_{02} モードの n_{eff} が一致する。すなわち位相整合が達成されることが確認できた。本構造の規格化変換効率は $31.2 \text{ \%W}^{-1}\text{m}^{-2}$ となり、LiNbO₃を用いた疑似位相整合デバイスと比較しても遜色のない値となった。一般にモード間位相整合の規格化変換効率は、1%程度しかないモード間の重なり積分に比例するため、疑似位相整合と比べると極端に小さくなる。本研究では、チャンネル型導波路構造を用いることで導波光の密度を増加させる、この短所を補うことができることを示した。

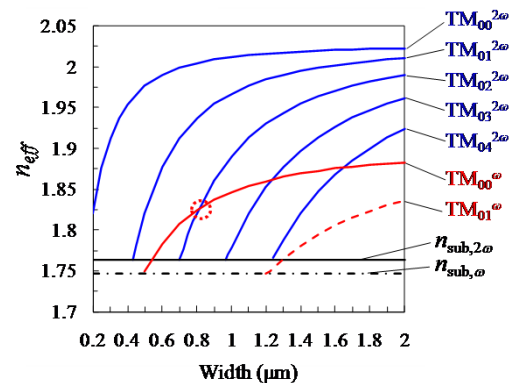


図2 ZnO チャネル導波路における位相屈折率の構造依存性

(3) TiO₂ チャンネル導波路における分散制御と非線形光学定数 γ

ルチル TiO₂ は、ZnO の約 2 倍の非線形屈折率と約 2.9 という高い屈折率を持つため可視光領域における非線形光学デバイス用の材料として高いポテンシャルを有する。正常分散を示す TiO₂ チャンネル導波路(高さ 300 nm、幅 300 nm、長さ 2 mm)に様々なピーク強度 P_0 のパルス光を入射した際の導波光のスペクトル広がりシミュレーション結果を図 3 に示す。

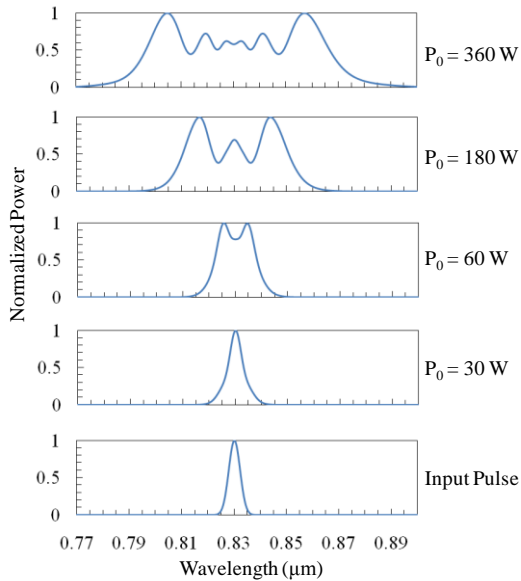
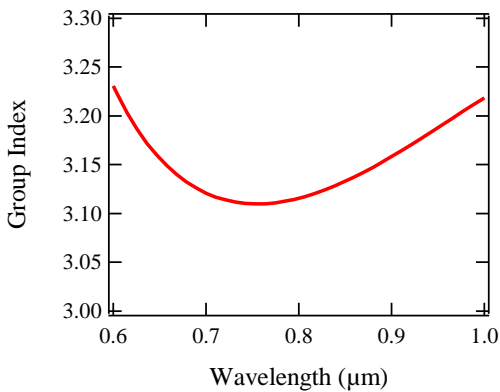


図 3 TiO₂ チャンネル導波路におけるスペクトル広がり

半導体モードロックレーザーでも出力可能な 360 W の入射光ピークパワーにおいて波長半値幅 70 nm のスペクトル広がりが発生する事を明らかにした。本構造の非線形光学定数 γ は、 $87.5 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ であり ZnO チャンネル導波路の 4 倍近い事から、TiO₂ 導波路が高非線形デバイスとして高いポテンシャルを有する事を示した。

図 4 TiO₂ チャンネル導波路における群屈折率の



波長依存性
さらに TiO₂ チャンネル導波路の大きな構造分

散を利用する事で、導波路の分散制御を試みた。図 4 にシリカ基板上に作製した高さ 590 nm、幅 300 nm の TiO₂ チャンネル導波路の群屈折率の波長依存性の計算結果を示す。800 nm 付近で異常分散となることが明らかになり、本デバイスによるスーパーコンティニューム光発生の可能性を示した。

(4) TiO₂ フォトニック結晶導波路におけるスローライト効果を利用した自己位相変調効果の増強

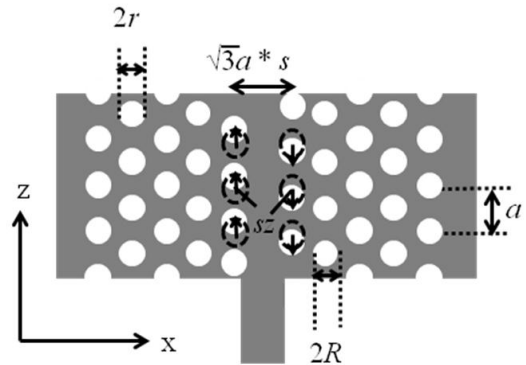


図 5 TiO₂ フォトニック結晶導波路の構造模式図

表 1 導波路パラメータ

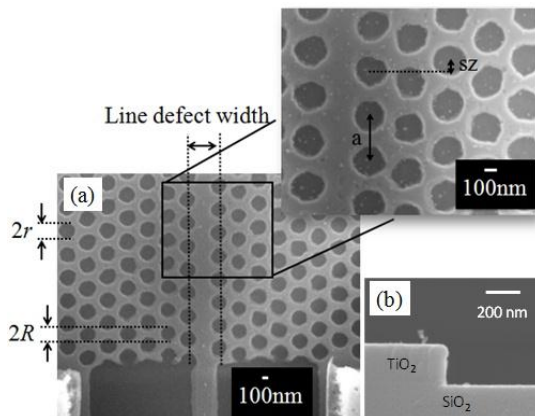
格子間隔 $a[\text{nm}]$	空孔半径 r/a	スラブ厚 h/a
312	0.35	0.8
1 列目空孔シフト sz/a	2 列目空孔半径 R/r	導波路幅 s
0.22	0.95	0.65

フォトニック結晶導波路中では、群屈折率が極端に大きくなるスローライト効果によって光が圧縮されるために、非線形光学効果が劇的に増大する。このようなスローライト効果を利用した構造を実現するには高い屈折率、大きい上下クラッドとの屈折率差が必要である。そのため、高い屈折率を持ち基板を選ばない TiO₂ は高非線形デバイスの実現に有望な材料であり実効的な非線形光学定数をさらに増強できる可能性がある。本研究では、大きな群屈折率と広い波長導波帯域を併せ持つ TiO₂ フォトニック結晶導波路を設計した。図 5 に設計した広帯域・高群屈折率 TiO₂ フォトニック結晶導波路の構造模式図を示す。本構造では、導波路に最も近い格子点を左右非対称にする事で、広帯域化を実現している。表 1 に中心波長 800 nm において群屈折率 20、導波波長帯域 7 nm を持つフォトニック結晶導波路

の構造パラメータを示す。構造パラメータの最適化によってTiO₂フォトニック結晶導波路における実効的な非線形光学定数は、1900 W⁻¹m⁻¹となり、チャネル型TiO₂導波路と比較しても21倍という非常に大きな非線形性を持つ事が明らかになった。最後に高非線形TiO₂導波路を作製するために電子線リソグラフィ及び反応性イオンドライエッチング技術のプロセス条件に関して検討を行った。図6(a)に作製したフォトニック結晶導波路の電子顕微鏡写真を示す。直径約200 nmの空孔によってフォトニック結晶導波路が作製できている事が確認できる。図6(b)にエッチング部分の断面写真を示す。反応性イオンエッチングの条件最適化により高い垂直性を有する導波路構造の作製が可能になった。

図6 TiO₂フォトニック結晶導波路の電子顕微鏡写真

5. 主な発表論文等



(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

1. Tomohiro Kita, Koji Uchijima, and Hirohito Yamada
"Anomalous localization modes in Bragg-grating based on high index-difference waveguide"
Proceedings of SPIE Photonic WEST (査読あり) 8629 巻 47_1-6 (2013)
2. Koji Uchijima, Tomohiro Kita, and Hirohito Yamada
"Nonlinear optical photonic crystal waveguide with TiO₂ material"
Proceedings of SPIE Photonic WEST (査読あり) 8626 巻 48_1-6 (2013)
3. Yuta Taira, Tomohiro Kita, Edgar Yoshio Morales Teraoka, and Hirohito Yamada
"Analysis of Phase Matching Conditions for Generating Second Harmonic in ZnO Channel Waveguides"
Japanese Journal of Applied Physics (査読あり) 51 巻 04DG04-1-4 (2012)
4. Edgar Yoshio Morales Teraoka, Tomohiro Kita, Daniel H. Broaddus, Atsushi Tsukazaki, Masashi Kawasaki, Alexander L. Gaeta, and Hirohito Yamada
"Analysis of the Nonlinear Optical Parameter of ZnO Channel Waveguides"
Japanese Journal of Applied Physics (査読あり) 50 巻 04DG01-1-4 (2011)

[学会発表] (計6件)

1. Tomohiro Kita, Koji Uchijima, and Hirohito Yamada
"Anomalous localization modes in Bragg-grating based on high index-difference waveguide"
SPIE Photonics West, 2013年2月6日、San Francisco, 米国
DOI: 10.1117/12.2003724
2. Koji Uchijima, Tomohiro Kita, and Hirohito Yamada
"Nonlinear optical photonic crystal waveguide with TiO₂ material"
SPIE Photonics West, 2013年2月5日、San Francisco, 米国
DOI: 10.1117/12.2002005
3. Koji Uchijima, Tomohiro Kita, and Hirohito Yamada
"TiO₂ photonic crystal waveguide for nonlinear optical applications"
電気関係学会東北支部連合大会 2012年8月31日、秋田県立大学
4. Yuta Taira, Tomohiro Kita, Edgar Yoshio Morales Teraoka and Hirohito Yamada
"Modal phase matching in ZnO channel waveguide for highly efficient second harmonic generation"
SSDM 2011年9月29日、愛知県産業労働センター
5. 平 裕太, 北 智洋, モラレス寺岡 エドガル芳男, 山田 博仁
"チャネル型 ZnO 第二次高調波発生光導波路の検討"
第72回応用物理学会学術講演会 2011年9月1日、山形大学
6. Tomohiro Kita, E-Y Morales Teraoka, Yoshitomo Okawachi, Atsushi Tsukazaki, Masashi Kawasaki, Alexander Gata, Hirohito Yamada
"Third and Second-order Nonlinear Optical Effects in ZnO Channel Waveguides"
CLEO 2011年5月2日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北 智洋 (KITA TOMOHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40466537