

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760029  
 研究課題名（和文） フォトニックエレメントを用いた光波制御の研究  
 研究課題名（英文） Light control using photonic elements  
 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）：

光の波長以下のサイズの構造体であるフォトニックエレメントの研究を行った。数種類の構造の機能を数値計算によって確認した。シリコンのような高屈折率材料を用いた、ブラッググレーティング構造においては、特異な光の局在状態が存在することを見出し、数値計算、実験の両面から確認した。スロット導波路という構造を作製し、円柱状フォトニックエレメントを用いることで高効率にモード変換を行う構造を試作した。また、ZnO光導波路の非線形光学効果についての研究も行った。

## 研究成果の概要（英文）：

We studied about sub-micron photonic element. The characteristics of wavelength filter and spot size converter of photonic element was verified by numerical analysis. We found the unusual optical mode in the Bragg-grating filter of Si photonic-wire waveguide. We fabricated the spot size converter for the low loss connection between the Si wire and the Si slot waveguide. We also studied about ZnO photonic wire waveguide.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

## 研究分野：応用工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用工学・量子工学

キーワード：シリコンフォトニクス、フォトニックエレメント、ZnO

## 1. 研究開始当初の背景

光波の制御(光共振器や光導波路によって光の局在状態或いは流れを制御すること)においては、フォトニック結晶と呼ばれる構造が近年盛んに研究されている。フォトニック結晶とは、光の波長サイズでの誘電率(屈折率)の多次元周期構造である。フォトニック結晶による光波の制御は一般的に、フォトニックバンド・ギャップと呼ばれる光の伝搬が許されない波長帯(光の禁制帯)を形成するようにフォトニック結晶の構造(格子間隔や格子原子のサイズ)を設計し、そのフォトニック結晶中に点欠陥や線状欠陥を導入し、光の局在モードや導波モードを形成することによって行っている。つまり、光に対する絶縁体(フォトニックバンド・ギャップ)の中に、光の通り道となる導波路や、微小光共振器を埋め込むことによって実現するものである。現在フォトニック結晶においては、様々な光デバイスや光回路への応用が研究されている。

## 2. 研究の目的

これに対して、本提案のフォトニックエレメントによる光波の制御は、フォトニック結晶とは全く逆の発想から生まれたもので、フォトニック結晶とは構造も光制御のメカニズムも異なる。本提案は、光の良導体である自由空間や透明媒質の中に、微小な光学エレメントを複数配置することによって、光波の伝搬を制御しようというものである。本提案のフォトニックエレメントは、屈折率の規則正しい周期構造を前提とするフォトニック結晶に比べて、構造の自由度が大きく、光波制御の方法にも幅を持たせることができ、幅広いデバイスに適用できるものと考えている。フォトニック結晶では、作成が難しい素子をフォトニックエレメントを用いることで実現し最終的には高密度な光集積回路へと結びつけていきたい。本研究の目的は、光の波長と同程度かそれ以下のサイズの誘電体或いは金属からなる3次元構造体(以下フォトニックエレメントと呼ぶ)が、自由空間中に複数配置された場合の光の協調散乱現象を解明し、それを用いた新しい光波制御デバイスを提案することにある。

## 3. 研究の方法

本研究は、計算機を用いた電磁界解析を用いてフォトニックエレメントによる光波の制御をシミュレーションによって明らかにするとともに、Si及びZnO等の誘電体材料を微細加工技術を用いて各種のフォトニックエレメントを実際に作製し、その特性を測定することでシミュレーションの結果と比較して研究を行った。具体的には数値解析手法としてはFDTD法、有限要素法、平面波展開法等を用いた。構造作製においては、電子線リソグラフィ、RIEドライエッチング等の半導体微細加工技術を用いた。

## 4. 研究成果

高い屈折率差を持つSi/SiO<sub>2</sub>導波路構造においては、その強い光閉じ込め効果により、非常に特殊な光導波特性を示す。Siを用いて(1) Si細線構造による研究  
フォトニックエレメントを作製するにあたり、本研究の第一段階としては、非常に一般的な導波路デバイスであるブラッググレーティング構造に関して、数値計算及び実測において研究を行った。試作したSi細線ブラッググレーティングの模式図及び電子顕微鏡増を図1に示す。

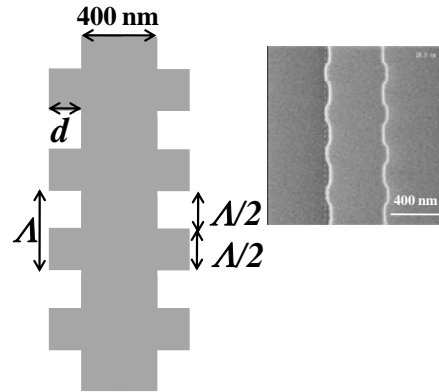


図1 Si細線ブラッググレーティング構造の模式図と電子顕微鏡写真

導波路型ブラッググレーティング構造は、導波路幅の広い領域(等価屈折率の高い領域)、狭い領域(等価屈折率の低い領域)を交互に繰り返すことで、誘電体多層膜と同じ様に特定の波長のみ反射させる機能を持つ。反射波長は主に突き出し(notch)の周期に依存する。図2に反射波長のnotch周期依存性を示す。数値計算結果は、実験結果を良く再現し、一般に光通信において用いられるS、L、Cバンドと非常に広い波長領域で制御可能な事を確認した。

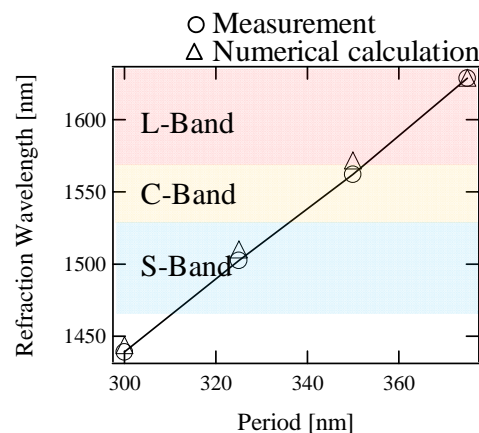


図2 反射波長の notch 周期依存性

さらに notch の大きさを変化させた場合、通常 notch を大きくしていった場合、反射波長幅は、単調に広がっていくのみのはずであるが、Si 細線のような高屈折率差構造においては、notch 50 nm 以上で反射波長幅が減少に転じ 120 nm 程度において一旦光の反射がなくなる特殊な光の局在状態が存在することを、実験及び数値計算の両面から明らかになった。図 3 に測定結果の反射波長端及び数値計算結果を示す。灰色の領域が反射波長幅に対応している。

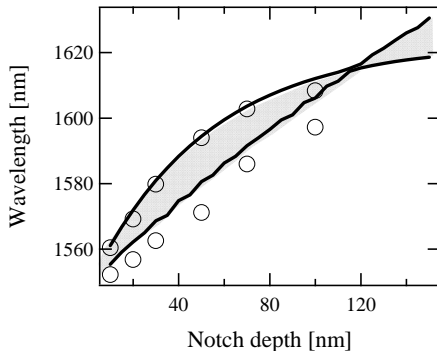
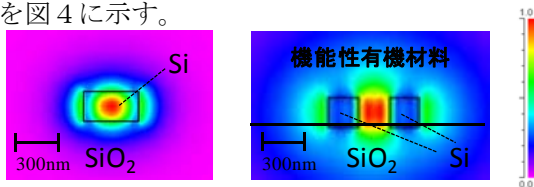


図 3 反射波長幅の notch 幅依存性

(2) Si フォトニックエレメントを用いたスポットサイズ変換の研究

非常に細い (~150 nm) Si 細線導波路を二本並列に並べたスロット導波路構造は、二本の Si 細線の間が光が閉じ込められて導波することから Si 細線光導波路系に異なる機能を持つデバイスを集積させることができると考えられている。一般的な Si 細線光導波路をスロット導波路の基本モードの電界成分を図 4 に示す。



Si 細線光導波路 Si 細線スロット導波路  
図 4 導波路断面の固有モードにおける電界分布

図 4 からわかるように両者のモード間には大きなギャップがあり、損失なく接続するためには、スポットサイズ変換器を要する。本研究では、非常に小さな円柱状のフォトニックエレメントでスポットサイズ変換を行うことを目的として研究を行った。図 5 に試作したフォトニックエレメントの電子顕微鏡写真及び、FDTD 法による計算結果を示す。本研究により 90%程度の結合効率が得られる事を確認した。

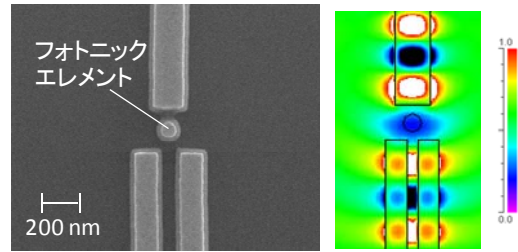


図 5 フォトニックエレメントを用いたスポットサイズ変換器

(3) ZnO 光導波路の研究

発光材料を用いてフォトニックエレメントを実現するために ZnO をコアとした光導波路の研究を行った。レーザー-MBE 法を用いてサファイア基板上に成膜した厚さ 500 nm ~ 1 μm の ZnO 薄膜の可視光領域での屈折率をプリズムカプラ法で測定しバルク ZnO とほぼ同じ屈折率を持つ良質な単結晶 ZnO 薄膜が得られていることを確認した。次にこのパラメータを用いた有限要素法による電磁界の数値解析シミュレーションにより本構造がシングルモードとなり構造分散を制御できることを確認した。このようにして設計した ZnO 導波路は、正常分散を示し自己位相変調によるスペクトル広がりが見られることが数値計算により明らかになった。実際に作製した ZnO 光導波路の電子顕微鏡写真を図 6 に示す。さらにフェムト秒パルスレーザーを用いた測定では、図 7 に示すようにわずか 2 mm 程度のデバイスサイズで明瞭な自己位相変調の効果が確認された。

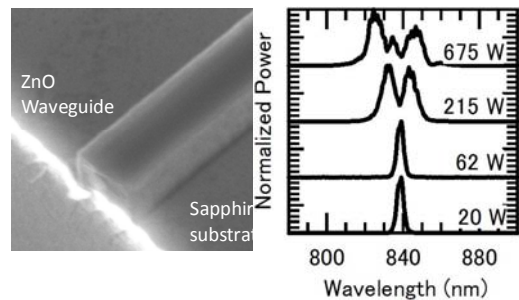


図 6 ZnO 光導波路 図 7 ZnO の自己位相変調効果

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 2 件)

1. T. Kita and H. Yamada, Experimental and numerical analysis study of 1-D photonic crystal in Si photonic-wire waveguides, Proceedings of SPIE, 査読無し, 7601, (2010), 76011E
2. E.Y. Morales Teraoka, T. Kita, A.

Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Ohtera and H. Yamada, ZnO channel waveguides for nonlinear optical applications, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有り, 49, (2010), 04DG15

[学会発表] (計 13 件)

1. T. Kita and H. Yamada, Experimental and numerical analysis study of 1-D photonic crystal in Si photonic-wire waveguides, SPIE Photonic WEST, 2010 年 1 月 27 日, San Francisco
2. H. Yamada and T. Kita, Last challenges toward practical use of Si photonic integrated circuits, 2nd Int. Conf. on Silicon Photonics, 2010 年 1 月 22 日, MIT, Boston
3. M. T. Nguyen, T. Kita, Y. Ohtera, H. Yamada, Analysis of thermo-optic switch with Si photonic wire waveguide, 第 12 回シリコンフォトニクス研究会, 2009 年 11 月 18 日, 東大 本郷
4. 鈴木 健、グエン マイン タイ、阿部 政浩、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、シリコン細線光導波路による波長可変レーザ用リング共振器型フィルタの解析, 第 12 回シリコンフォトニクス研究会, 2009 年 11 月 18 日, 東大 本郷
5. 阿部 政浩、宮村 悟史、中村 幸治、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、SOI 導波路基板上への LD チップ実装方法に関する検討, 信学会 光エレクトロニクス研究会 (OPE), 2009 年 11 月 13 日, 機械振興会館
6. 外間 洋平、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、シリコン細線光導波路の曲がり損失の数値解析, 信学会 光エレクトロニクス研究会 (OPE), 2009 年 11 月 13 日, 機械振興会館
7. Y. Morales, T. Kita, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, Y. Ohtera and H. Yamada, ZnO channel waveguides for nonlinear optic applications, SSDM2009, 2009 年 10 月 9 日, 仙台国際ホテル
8. モラレス 芳男、北 智洋、塚崎 敦、川崎 雅司、大寺 康夫、山田 博仁、チャネル型 ZnO 光導波路の作製と評価, 2009 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009 年 9 月 11 日, 富山大学
9. 阿部 政浩、宮村 悟史、中村 幸治、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、Si 細線光導波路と半導体レーザとの低損失結合構造に関する検討, 2009 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009 年 9 月 10 日, 富山大学
10. 外間 洋平、小谷 恭子、八重樫 浩樹、北 智洋、大寺 康夫、山田 博仁、Si 細線光導波路の曲げ損失の理論解析, 2009 年春

季第 56 回応用物理学関係連合講演会、2009 年 4 月 1 日、筑波大学

11. H. Yamada and T. Kita, SOI Photonic Integration, 1st Int. Conf. on Silicon Photonics, 2009 年 1 月 23 日, 東大 本郷
12. モラレス 芳男、北 智洋、塚崎 敦、川崎 雅司、大寺 康夫、山田 博仁、ZnO 非線形光学効果光導波路, 信学会 光エレクトロニクス研究会 (OPE), 2008 年 12 月 19 日, 機械振興会館
13. モラレス 芳男、北 智洋、山田 博仁、ZnO 光導波路の導波特性解析, 2008 年秋季第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008 年 9 月 5 日, 中部大学

#### 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

##### (2) 研究分担者

なし ( )

##### (3) 連携研究者

なし ( )