

2009年5月29日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19760031
 研究課題名（和文） 光ファイバ／フォトニック結晶導波路の偏光無依存高効率光入出力結合
 研究課題名（英文） High-efficient non-polarizing grating coupler for normal incidence in the integrated photonic crystal waveguide
 研究代表者
 水谷 彰夫（MIZUTANI AKIO）
 大阪府立大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：50400700

研究成果の概要：光ファイバからフォトニック結晶導波路への結合効率 50%（従来 25%）が得られる二等辺三角形穴を同心円状に配置した新規ブレード型素子の設計を行った。また、半導体微細加工技術を用いて素子作製を試み、電子顕微鏡観察により形状が確認できたが、光学性能評価までは至らなかった。一方、1次元周期構造に入射面が溝方向に平行になるように斜め入射すると、50%の高効率な偏光無依存結合素子となることを新たに計算で確かめた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	0	1,300,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	300,000	2,600,000

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：フォトニック結晶，偏光無依存，グレーティングカップラ

1. 研究開始当初の背景

我々は、超高速光蓄積素子の実現を目指し、2次元フォトニック結晶スラブ導波路（PC導波路）を用いた超小型の対称マッハツェンダー型全光スイッチ（PC-SMZ）の研究を行っている。その実現のための課題の1つとして、本研究では、PC導波路と光ファイバとの偏光無依存型高効率光入出力結合のための研究を実施する。

PC導波路と光ファイバは、その断面積比の大きな違いから、挿入損失が問題となっている。また、PC導波路は一般に偏光依存性があり、TE偏光でのみ機能する。これに対して単一モード光ファイバ中では外力などの影響により偏光が変動するため、入力光強度の変

動を防ぐためには、偏波状態制御素子で任意の楕円偏光を直線偏光に変換して、偏波保存ファイバで入力するか、あるいは偏波ダイバーシティ構成をとる必要がある。偏波状態制御素子は、入力偏光をモニターし、直線偏光になるように波長板を回転、あるいは電気光学結晶の電圧を変えるため、ピコ秒パルス（我々の信号光パルス）に追従する高速な変換は困難である。そこで、本研究では、矩形溝を正方配列させた2次元周期グレーティングカップラを用いた偏光分離素子を用いて、偏波ダイバーシティ構成をとることで、偏光無依存化を目指す。そのための構造を提案し、実現可能性を検討する。

2. 研究の目的

光ファイバから PC 導波路への結合効率として 6dB (25%) 以上を最終的な性能目標とし、試料作製・光学評価による検証を行う。

3. 研究の方法

(1)当初は、矩形溝の結合素子を 2 次元周期化して、偏光無依存化していく予定であったが、従来構造では 25%程度と低い効率であった。そこで、まず偏光依存タイプとして、従来よりも高い効率が得られる新規構造「横方向ブレード型素子」と呼ばれる二等辺三角形穴を同心円状に配置した素子の設計を行うこととした。穴形状最適化を行い、高効率な設計を目指す。

(2)上記で設計した構造をもとに、作製プロセスを考案し、実際に素子の作製を行い、光学評価による検証を行う。

(3)「横方向ブレード型素子」の偏光無依存化について検討する。

(4)最終的に偏波ダイバーシティ構成を取る場合に有用な PC 導波路タイプのサーキュレータについて検討する。

4. 研究成果

(1)偏光依存光結合素子として三角形浅溝を並べた横方向ブレード型素子の設計を行い、光ファイバからの入力を 100%としたとき、50%の結合効率 (従来構造 25%) が得られることを電磁場解析法の 1 つ FDTD 法による計算で確かめた。図 1 に、設計結果を示す。240nm

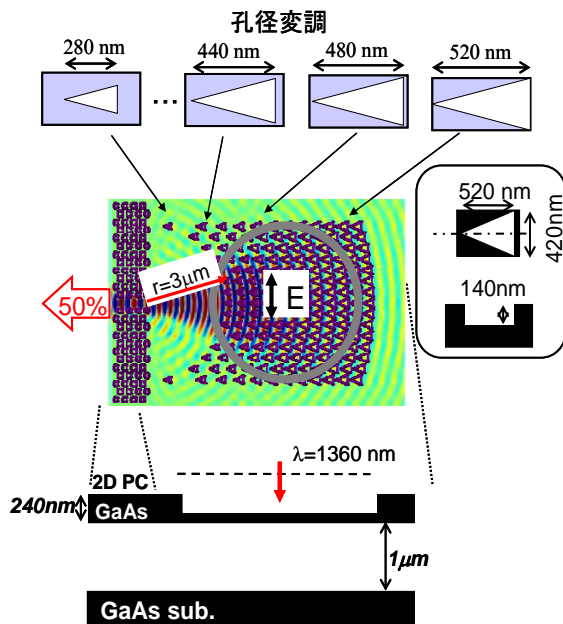


Fig. 1. Schematic of a laterally blazed grating

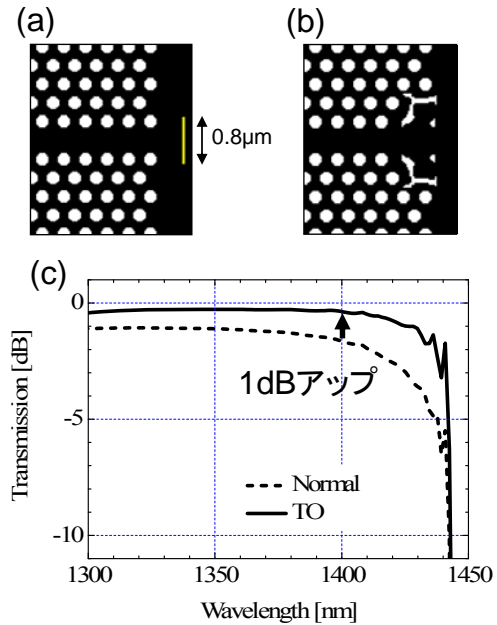


Fig. 2. Transmittance spectra of normal and TO design.

厚さ、屈折率 3.45 の GaAs コア層に深さ 140nm の二等辺三角形穴を頂点方向左向きのまま同心円状に配置した。なお、頂点方向を同心円中心向きに配置した構造の計算も行ったが、この構造では同じ結合効率が得られた。より集光するには、頂点方向を同心円中心向きに配置するほうがよいと思われるが、三角形の向きの変化によって、入射偏光に対する屈折率が変化した影響で最終的に同効率になったのではないかと推測される。三角形穴深さについては、最大効率が得られる深さを選択した。三角形高さ方向の周期は、約 $1.3 \mu\text{m}$ で結合するように調節した。図のように電場が縦向き方向の偏光をもつビーム径 $6 \mu\text{m}$ (レンズファイバからの出射を想定) の光を素子に対して垂直入射すると、二等辺三角形穴によるブレード構造により、三角形頂点方向 (左向き) へと強く結合され、さらに同心円配置により、フォトニック結晶入り口 (同心円中心と一致) へと集光するようになっている。また、孔径を場所ごとに変調することで、より高効率な結合が可能となっている。この計算例では、集光位置でのビーム径は $0.8 \mu\text{m}$ ほどであり、フォトニック結晶線欠陥導波路幅の $0.6 \mu\text{m}$ よりわずかに大きいため、散乱損失がある。この損失は、トポロジ最適化 (TO) により PC 導波路入り口形状を変化させることで低減可能である。図 2 に、PC 導波路入り口形状の最適結果を示す。(a) の通常構造を (b) の最適構造に TO により変形することで、(c) のように特に長波長側で 1dB 程度の効率向上が可能であることを計算で確かめた。全体として 55% 程度の結合が可能であるといえる。

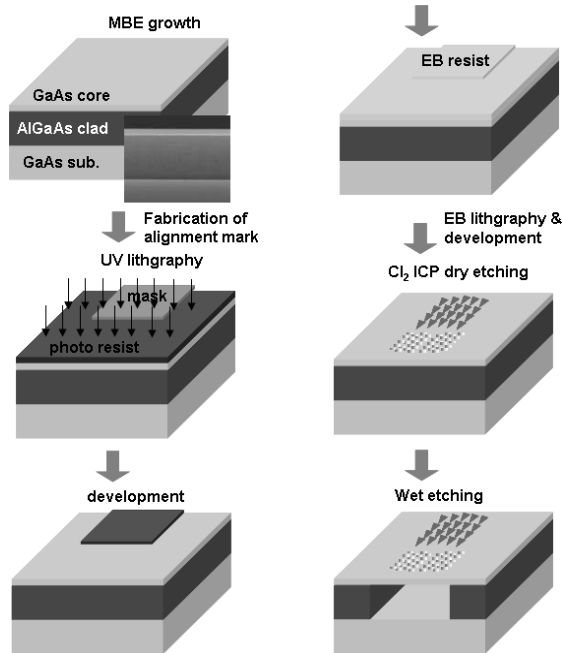


Fig. 3. Schematic diagram of fabrication process for two-level etching.

(2) 次に、想定した素子作製手順を示す。基板構造は、GaAs基板上に、AlGaAsクラッド層 $1.8\mu\text{m}$ 、その上にGaAsコア層 230nm となっている。クラッド層は図1のコア・基板間距離 $1\mu\text{m}$ に対応する。コア層に入射した光の一部は通り抜け、基板表面で反射する。この反射光を再びコア層で再結合させると効率が向上する。その際、コア・基板間距離を変えると、基板表面反射光と入射光の干渉によって結合効率が増減する。故に、 $1\mu\text{m}$ と半波長程度異なる $1.8\mu\text{m}$ のクラッド層厚さでも高効率な結合が期待できる。図3に示す素子作製手順に沿って説明する。まず、GaAsコア層に位置あわせ用マークを作製する。次にマスクアライナーを用いて二等辺三角形浅溝エリアに数 μm 角のフォトリソ凸パターンを作製する。その上に電子線レジストを塗布し、マークに合わせて、凸パターン上に三角形穴を、凸部分以外にフォトニック結晶導波路貫通穴を同時に電子線描画する。その後、ICPドライエッチングにより、2次元フォトニック結晶線欠陥導波路の貫通孔と二等辺三角形浅溝穴を同時に形成し、ウェットエッチングを経てエアブリッジ構造を作製する。同心円中心とPC導波路入り口の位置ずれは性能に大きく影響するので、両者を電子線で一括描画する方法とした。ただし、PC導波路は貫通孔、三角形部分は浅溝が必要なので、2段階の高さが得られるように、三角形浅溝エリアに数 μm 角のフォトリソ凸パターンを

作製することとする。同心円内径が $3\mu\text{m}$ なので、フォトリソパターンと電子線描画パターンの位置合わせは、 $\pm 1\mu\text{m}$ 程度必要であり、実際に位置合わせ描画を試みたが、使用した装置では基板とマスクを密着させたときに $3\mu\text{m}$ 程度の位置ずれが生じてしまうことが分かった。

(3) (2)で、使用したマスクアライナーによる位置合わせ描画は難しいことが分かったので、ここではまず、素子作製の第一段階として、二等辺三角形穴を同心円状に配置した設計構造が忠実にパターンニングできることを確かめた。設計構造を2次元汎用CADデータのDXFファイルとして保存し、描画データに変換した後、GaAs上の電子線レジストZEPに描画を行った。三角形穴描画時に、フォトニック結晶導波路も同時に描画を行った。図4に、設計構造と描画したZEPパターンの電子顕微鏡写真を示す。図より、CADデータが三角形エッジ部分においても忠実に再現できていることが分かる。この設計データは図1とは異なり、入射ビーム径 $3\mu\text{m}$ としているため、孔径が一定で孔の大きさも作製しやすい形状にしてある。また、PC入り口部分には結合しやすいようにテーパを設けた。次に、このZEPパターンを 400nm ほどICPドライエッチングし、GaAsコア層およびその下のAlGaAsクラッド層へ転写した。さらに、そのAlGaAsクラッド層をフッ酸ウェットエッチングで除去し、描画パターン付近のGaAsコア層が中に浮いている状態、いわゆるエアブリッジ化した。図5に、その

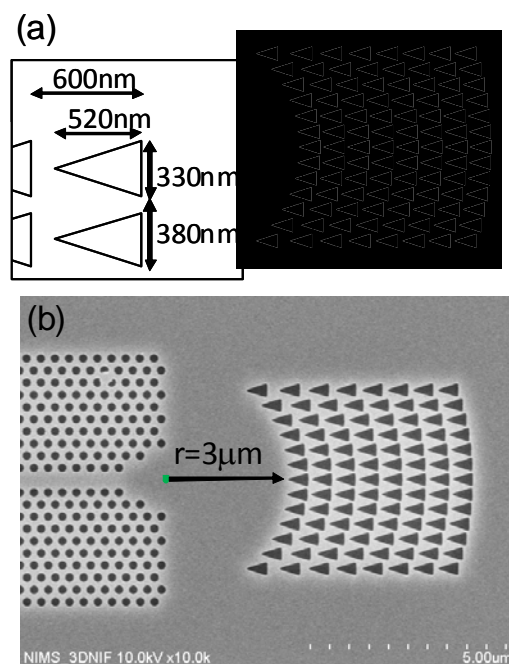


Fig.4. (a) CAD data of grating coupler and (b) SEM photograph of its ZEP pattern.

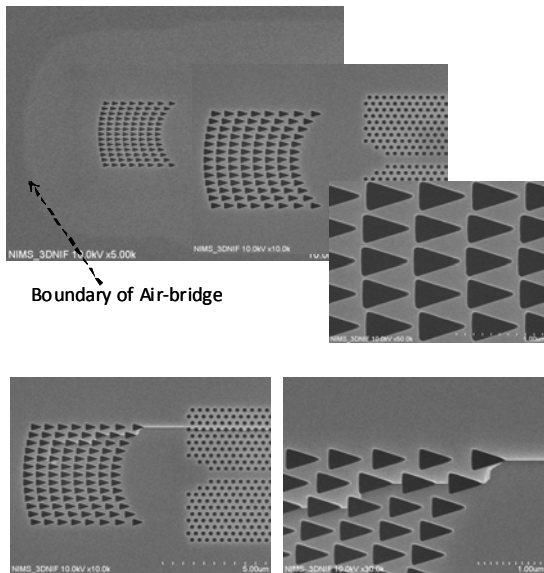


Fig.5. SEM photographs of etching pattern. The crack occurred in one sample as shown in below photographs.

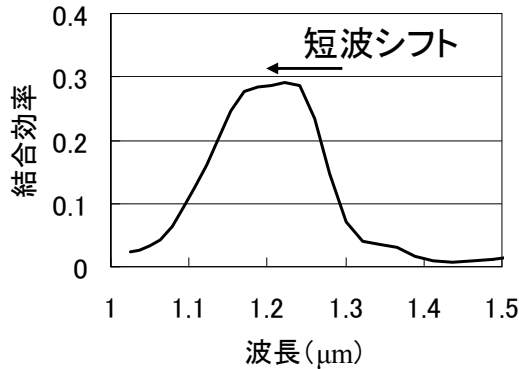


Fig.6. Transmittance spectral of a perforating grating coupler.

エッチング後の SEM 写真を示す。上から見ると色が変わっているところが、エアブリッジの境界である。三角形溝から等方的にウェットエッチングされるため、三角形溝端から等距離に境界が分布している。図より、ZEPパターンがほぼ転写できているが、サンプルによっては、下の写真のようにクラックが発生してしまった。これは、二等辺三角形穴のエッジの部分で隣の穴と近接しているためと考えられる。今後、構造の再検討が必要であることが分かった。なお貫通型素子の結合効率、計算によると図6のように30%程度となるが、貫通型にすると結合波長が1200nm付近となり、目標波長1300nmと比べて短波長側にシフトしてしまうため、格子周期（三角形高さ方向の周期）の再設計が必要である。

(4) 次に、横方向ブレード格子の偏光無依存

化の検討を行った。偏光無依存にするには、複屈折率差(直交偏光に対する構造の有効屈折率の差)を下げればよいという指針で、直角三角形を正方配列にして、回折格子の電磁場解析手法 RCWA を用いて、孔径をさまざまに変えた場合の複屈折率差を求めた。その結果、孔径を小さくすれば偏光無依存が可能であることが分かったが、そのとき P・S 偏光入射に対する結合効率を FDTD 法で求めると、30%程度と従来構造と同等の結合効率にまで落ちてしまった。

一方、1 次元周期格子にコニカルマウントと呼ばれる入射方法(入射平面が格子の溝方向)で斜め入射することで、偏光無依存な導波モード共鳴格子と呼ばれる波長フィルタが実現できることが知られている[1]ので、この構成を利用したカップラーを考える。図7(a)に示すように、コニカルマウントで1次元周期格子に斜め入射すると、P・S 両偏光とも、TE モードで結合することができ、格子深さと格子の溝と周期の比を適切に選ぶことで、P・S 偏光の結合効率を一致、つまり偏光無依存にすることができる。(b)に FDTD 計算

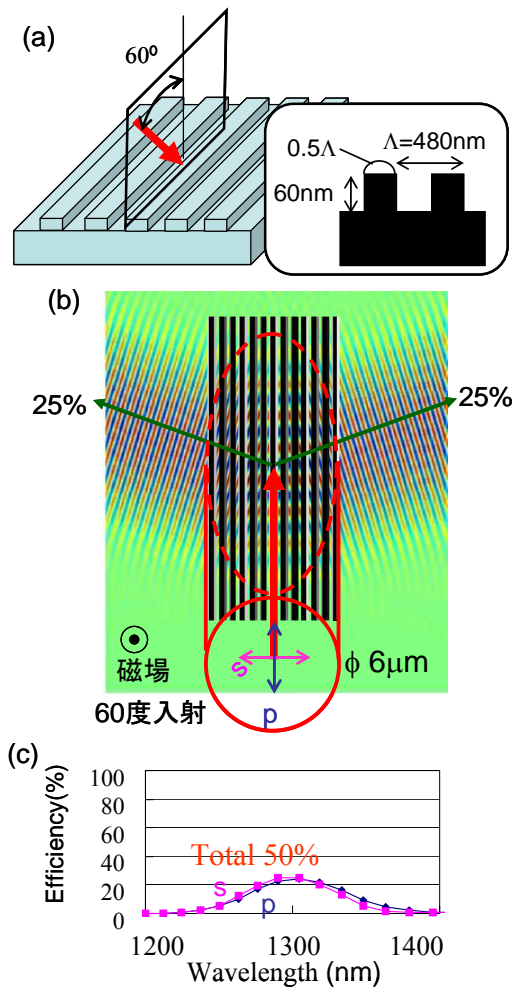


Fig.7. Conical-mount non-polarizing grating coupler.

結果による磁場分布を示す。P 偏光を入射したときでも、S 偏光を入射したときでも、右上と左上方向にそれぞれ 25%、つまり合計 50% と高効率に結合できることが分かった。(c) に示す結合効率スペクトルより、P・S が一致し、偏光無依存であることが分かる。作製が容易な 1 次元周期構造による偏光無依存化のインパクトは大きいと思われる。ただ、斜め入射にすることで導波路内のビーム径が広がってしまっているため、今後は、どのように PC 導波路へ集光するか検討や、素子の作製および光学評価による検証が必要である。

(5) 図 8 上図のような 2 つのカプラー（例えば図 7 のような偏光分離カプラー）と 2 つの

偏波ダイバーシティ構成 1

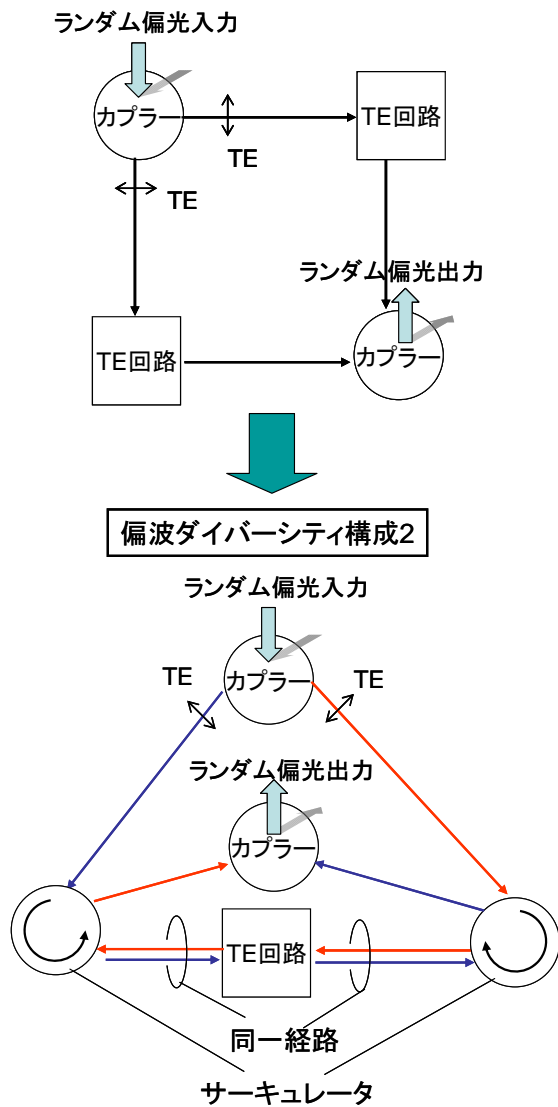


Fig. 8. Polarization diversity systems.

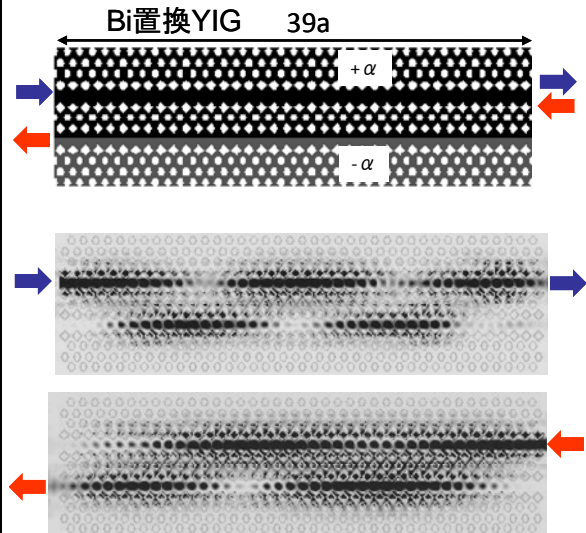


Fig. 9. FDTD simulation of a magnetic photonic crystal circulator.

TE 回路からなる偏波ダイバーシティ構成をとることで、偏光無依存化できる。ランダム偏光で垂直入射した光は、カプラーで右方向と下方向に進む TE 偏光に分割される。分割されたそれぞれの TE 偏光は、等価な TE 回路で処理が行われ、等しい光路長を通過して、右下カプラーで合成され、垂直上方にランダム偏光で出力される。入射偏光が楕円偏光の場合、2 つの分割した光に位相差が生じるが、等しい光路長を通り合成されるので、位相差は保存され、楕円偏光で出力される。このような偏波ダイバーシティ構成 1 の場合、回路規模が偏光依存素子の場合の 2 倍必要である。そこで、図 8 下図に示すような 1 つの TE 回路とサーキュレータを組み合わせた偏波ダイバーシティ構成 2 を考案した。左右対称な TE 回路にしておき、ランダム偏光で垂直入射した光を左右に分割する。右方向へ分割された光は、図の赤矢印を通過して、サーキュレータを用いて、TE 回路右から入力され、左側から出力し、今度は左のサーキュレータを通過して、図の中央にあるカプラーに誘導される。また、左方向へ分割された光は、図の青矢印の経路を通過して、最終的に図の中央にあるカプラーに誘導される。サーキュレータが 2 つ必要であるが、TE 回路が 1 つで済むので、特に TE 回路の規模が大きい場合は、小型化が期待できる。サーキュレータのような非相反素子には、磁性材料が必要であり、PC-SMZ に導入するには小型化が必要なので、PC 導波路結合器型サーキュレータの設計を行った。図 9 に PC 導波路結合器に Bi 置換 YIG を用いた設計例を示す。パラメータは河野らの計算 [2] を参考とした。彼らは FEM で計算していたが、ここでは通常の等方性 FDTD を少し書き換え誘電率テンソルを扱えるようにした異方性 FDTD を作成し、検証した。このとき、

誘電率テンソルは(1)式のようになる。非対角成分により、非相反な効果が表現できる。

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} n^2 & 0 & 0 \\ 0 & n^2 & j\alpha m \\ 0 & -j\alpha m & n^2 \end{bmatrix} \cdots (1)$$

$(n^2 = 10, \alpha = -0.368, m = 1.0)$

FDTD 計算結果によると、導波路長が格子周期の 39 倍のとき、左上ポートから入力した光が右上へ（赤矢印）、一方、右上ポートから入力した光が左下へ（青矢印）出力される動作、いわゆるサーキュレータとしての動作が可能であることが分かった。ただし、この設計では、動作帯域が狭いという欠点があるため、実用化のためには広帯域動作のための設計が必要である。

参考文献

[1] D. Lacour et al., J. Opt. Soc. Am. A 20, 1546 (2003).

[2] 河野直哉, 辻寧英、非相反性光導波路不連続問題のための有限要素法と磁性フォトニック結晶導波路を用いた光アイソレータの解析、電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス J87-C(1) pp.123-131

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)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 水谷彰夫, 菊田久雄, 池田直樹, 尾崎信彦, 渡辺慶規, 杉本喜正, 浅川潔、2次元横方向ブレード格子によるフォトニック結晶導波路への垂直入出力結合偏光依存性、第 69 回応用物理学会学術講演会、平成 20 年 9 月 2 日、中部大学
- ② 渡辺慶規, 海津泰宏, 池田直樹, 水谷彰夫, 尾崎信彦, 杉本喜正, 浅川潔、2次元フォトニック結晶導波路への光入射構造のトポロジー最適化、第 69 回応用物理学会学術講演会、平成 20 年 9 月 2 日、中部大学
- ③ 水谷彰夫, 池田直樹, 尾崎信彦, 高田賀章, 北川嘉則, 渡辺慶規, 杉本喜正, 浅川潔、横方向ブレード格子によるフォトニック結晶導波路への垂直入出力結合、第 68 回応用物理学会学術講演会、平成 19 年 9 月 6 日、北海道工業大学

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：ブレード型光結合素子

発明者：水谷 彰夫、浅川 潔

権利者：筑波大学

種類：特許

番号：特願 2007-223441

出願年月日：平成 19 年 8 月 30 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水谷 彰夫 (MIZUTANI AKIO)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50400700