

論文の内容の要旨

論文題目 ロッド挿入法によるアクティブフォトニック結晶

氏名 高畑 智之

1. 序論

本論文では、光情報処理回路のための、ロッド挿入法によるアクティブフォトニック結晶 (PC) を提案し、この手法により高消光比かつ広波長域のスイッチを実現する。PCとは、光の波長と同程度の繰り返し周期を持つ誘電体の周期構造であり、フォトニックバンドギャップ (PBG), すなわち、ある波長の光を伝搬しないという特徴を持つ。PCによって、光を波長以下の体積に閉じ込めたり、特定の方向に伝搬させたりということが可能になる。PCの中でも、2次元 (2D) スラブ型のPCが平面光情報処理回路の基盤技術として注目されている。情報処理回路の実現には、特性の固定されたパッシブな素子だけでなく、外部からの入力によって特性を変化させることのできるアクティブな素子が必要である。この観点から、ロッド挿入法による可変特性PCが提案されてきた。これは、PCスラブの空孔に外部から機械的に高屈折率のロッドを挿入することで、2Dスラブ型のPCのフォトニックバンド構造を大きく変化させ、光透過率を制御するものである。しかしながら、直径数百nmの空孔に直径数百nmのロッドを挿入するというこの素子の構成は、製造においても動作においても困難が多く、実現には至らなかった。本論文では、「ロッドを動かす」という従来の構成とは全く逆の構成、すなわち「スラブを動かす」ことによる空孔へのロッドの挿入を提案する。スラブの駆動にはMEMS (microelectromechanical systems) 技術を用いる。この手法を用いることで高消光比かつ広波長範囲の光スイッチ素子を実現することができることを、理論および実験の双方から示す。

2. ロッド挿入法の理論と設計

本論文で提案する素子の概要をFig. 1に示す。この素子は可撓性PCスラブと、基板に固定されたロッド列という2つの要素からなる。PCスラブは両端を基板に固定された固定梁である。このスラブは基板との間に電圧を印加すると、静電気力によって基板方向に撓む。ロッド列は2層構造になっており、上部はシリコンで、下部は酸化シリコンでできている。初期状態では、PCスラブとシリコンロッドが同じ高さにある(Fig. 2(a))。すなわち、空孔にシリコンロッドが挿入されている。このとき、空孔はほとんどシリコンで満たされており、PBGを持たないため光は透過する。スラブに電圧を印加して撓ませた状態では、スラブと酸化シリコンロッドが同じ高さにある (Fig. 2(b))。すなわち、空孔に酸化シリコンロッドが挿入されている。この構造はPBGを持ち、光は遮断される。印加電圧によってスラブの撓み量が決まり、それに応じて光透過率が変化するため、この素子は電圧値によって透過率を制御することができる光スイッチとして働く。

素子の光透過・遮断特性を検討するために、フォトニックバンド図を3次元平面波法によって計算した。空孔の半径とシリコンロッドの半径を変化させつつバンド図を計算した。シリコンロッドが挿入されたPCスラブと酸化シリコンロッドが挿入されたPCスラブのフォトニックバンド図をFig. 3に示す。計算に用いたパラメータは、構造のピッチを a としたとき、空孔の半径が $0.45a$ 、シリコンロッドの半径が $0.35a$ 、酸化シリコンロッドの半径が $0.25a$ 、スラブの厚さが $0.40a$ である。酸化シリコンが挿入されたPCスラブはピッチ a で正規化した周波数 (a / λ) が 0.36 から 0.50 の範囲でPBGを持つことが分かる。ピッチ a が 720 nmのとき、光通信で用いられている光の波長 1550 nmは正規化周波数 0.46 に対応する。この光はPBGの中にあり遮断される。一方で、シリコンロッドが挿入されたPCスラブはPBGを持たないため、光は透過する。素子の設計においては、上記のフォトニックバンド図に加えて、製造時の制約条件と固定梁としてのPCスラブの機械的強度も考慮した。設計したパラメータをFig. 4およびTable 1に示す。

設計したPCスラブの透過率を3次元FDTD法によって計算した (Fig. 5)。光の波長が 1550 nmのとき、シリコンロッドが挿入された状態と酸化シリコンロッドが挿入された状態の消光比は 25 dBである。また、消光比が 20 dBを超える波長の範囲は 1450 から 1850 nmに渡っており、この光スイッチは波長範囲 400 nmの光に対して使用可能である。これは従来の平面導波路型光スイッチの波長範囲が 0.01 から 10 nmであることと比べると、大きな改善であると言える。

素子の機械的な特性、すなわち印加電圧と撓み量の関係および共振周波数について、有限要素法を用いて解析した。PCスラブの長さが 10 μm のとき、電圧 35 Vにおいて撓み量 100 nmが得られることが予想される。また、共振周波数は 10 MHzであった。ただし、共振周波数の計算において空気の影響は考慮されていないため、空気中での共振周波数は低下する。

3. 製作手法

素子の製作方法は3つのステップからなる(Fig. 6). (1) エッチングマスクの形成, (2) シリコンの垂直エッチング, (3) スラブのリリースである. この製作手法の特徴は, PCの空孔とシリコンロッドを1度のエッチングで形成するシングルマスクプロセスを採用することで, 製作時の位置合わせを不要としたことである. PCスラブの最小幅およびスラブとシリコンロッドの空隙はともに70 nm程度で設計されており, 現在の製造技術の限界に近い.

エッチングマスクの形成には電子描画を用いた. 100 nm以下の線幅で均一な幅の円を描くことは難しいが, 描画パターンを工夫することで70 nmの線幅を実現した. シリコンの垂直エッチングにはICP-RIEのBoschプロセスを用いた. エッチングに用いる2種類のガス (SF_6 と C_4F_8) の比率や基板温度を調整することで, 幅70 nm, 深さ290 nmを垂直にエッチングした. 最後に, スラブをリリースするために酸化シリコンを100 nm等方性エッチングした. このプロセスには, 2つの難しい点がある. 1つ目は, スラブのみを基板からリリースしてシリコンロッドは基板に残すという制約があることであり, 2つ目は, スラブが基板に接着しないようにエッチングする必要があることである. 基板を40°Cに加熱しつつフッ化水素酸の蒸気に晒すことで, エッチング反応下での酸化シリコン表面の水の量を調節し, エッチレートを25 nm/minに低下させて酸化シリコンをエッチングした.

製作したデバイスの電子顕微鏡写真をFig. 7に示す. スラブの最小幅とスラブ-シリコンロッド間の空隙はそれぞれ70 nmと80 nmであった. スラブとシリコンロッドの高さが同じであることから, 基板へ接着することなくリリースできていることが分かる. 空孔の半径とシリコンロッドの半径はそれぞれ325 nmと245 nmであった. 製作誤差は5 nmであり, 良好な結果が得られた.

4. 実験

製作した光スイッチの透過特性を計測した. 実験に用いたセットアップをFig. 8に示す. 光源には波長1550 nmの半導体レーザを使用した. 光源から出た光は光ファイバを通り, 集光レンズによってウエハ上のシリコン導波路に入射する. シリコン導波路から出た光は出射側の集光レンズによって光ファイバに結合され, パワーメータで計測する. 入射側でシリコン導波路に入らなかった光が直接出射側のファイバを経由してパワーメータに入射しないように, シリコン導波路は2箇所を90°曲げた.

スラブに直流電圧を印加しつつ透過光のパワーを計測した (Fig. 9(a)). 実験の結果, 印加電圧30 Vにおいて最大の消光比15 dBを得た. また, 電圧がさらに上昇すると, 透過率も再び上昇するという現象が見られた. その理由を考察するため, スラブが撓んだ際の透過率の変化をFDTD法によって計算した (Fig. 9(b)). スラブの最大撓み量は70, 100, 140 nmであるとした. また, シリコン基板と酸化シリコン層を除外したモデルでも計算した. この結果, スラブと酸化シリコン層が近接するときに透過率が上昇することがわかった. シリコンロッドを伝搬する光の割合が多くなることに起因すると考えられる.

5. 結論

ロッド挿入法によってPCの特性を変化させることが可能であることを, 理論的な解析手法と試作・実験の両方の側面から示した. ロッドではなくスラブを駆動するという新しい構造を提案した. この手法の特徴は以下の3つである. (1) シングルマスクプロセスで製作するため位置合わせが不要であること. (2) 動作時にも位置合わせが不要であること. (3) AFMなどのほかの装置を必要としないワンチップデバイスであること. この手法を用いた光スイッチの特性は, 消光比15 dB, スイッチ可能な波長範囲400 nm, 動作周波数10 MHz, 可動部のサイズ $2 \times 10 \times 1 \mu\text{m}^3$ である. 可変特性PCとしては, 従来の手法に比べて消光比が高く波長範囲が広い. MEMS 光スイッチとしては動作速度が速くサイズが小さい. また, シリコン平面光導波路の標準的なプロセスで製作可能なことも大きな特徴である.

本論文で提案した素子はスラブを駆動することでフォトリソグラフィの空孔にロッドを挿入してアクティブ化した最初の素子である. 光の波長サイズの構造からなるphotonic素子に機械的要素を組み込むことの有用性を示すと同時に, MEMS素子を極限まで小さくしたNEMS (nano-electro-mechanical systems)素子によってphotonic素子の制御が可能であることを示した.