

氏名	かわしま たかゆき 川嶋 貴之
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻
学位論文題目	3次元フォトリック結晶の作製とデバイス応用に関する研究
指導教官	東北大学教授 川上 彰二郎
論文審査委員	主査 東北大学教授 川上 彰二郎 東北大学教授 宮城 光信 東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 内田 龍男

論文要旨

フォトリック結晶とは、屈折率の多次元周期性をもつ構造であり、その周期が光の波長と同程度の場合、光の振る舞いが固体結晶中におけるドブロイ波の振る舞いと対応させて考えることができることから、そう呼ばれる[1,2]。その特性は主に「フォトリックバンドギャップ」、「光学異方性」、「高分散性」といったものが挙げられる。こうした特性から生じる現象の中には、光の放射の完全な制御といった、従来の光学の概念では考えられなかった現象もあり、近年ではそれを光通信用デバイスに用いることにより、次世代の光通信に大きく貢献するものとして期待されている。

しかしフォトリック結晶では、屈折率の大きく異なる(屈折率比 2 程度)物質からなる、サブミクロンオーダの多次元周期構造が必要とされるため、その作製は最新の微細加工技術を用いても容易なことではなく、新しい作製技術が求められている。

こうした中、本学川上教授により「自己クローニング法」なるフォトリック結晶の作製方法が提案、実証された[3]。周期的な凹凸を表面に施した基板に、スパッタデポジッションとスパッタエッチングを同時に行う「バイアス・スパッタリング法」により膜を堆積した場合、ある条件下ではその凹凸の情報を保持したまま、堆積が進む場合がある。この現象を用いて a-Si/SiO₂ からなる多層膜を積層すると、多次元周期構造を容易に得ることができる。その概念図を図 1 に示す。本論文はこの自己クローニング法のメカニズムと、それを用いて作られるフォトリック結晶のデバイス化についてまとめたものである。

第 2 章では、フォトリック結晶の研究の歴史と現在の状況について、作製方法を中心にまとめることで、本研究で用いている自己クローニング技術が、従来提案されてきたものに比べ、工業性かつ実用性に優れたものであることを明確にした。

第 3 章では、自己クローニング現象のメカニズムの解明を行う。自己クローニング現象はバイアス・スパッタリング法の延長上にあることから、そのメカニズムはスパッタデポジッションとスパッタエッチングが基本であると考えられる。そこで本研究では、堆積とエッチングによる膜表面形状の変化をシミュレーションできるソフトウェアを用いて、その仮定の検証を行う。

シミュレーションでは、膜の表面形状を左右する素過程として、

- ・ターゲットから拡散入射する中性粒子による堆積
- ・垂直入射イオンによるスパッタエッチング

・膜物質の再付着による堆積

これら3つのモデルを採用し、これらの組み合わせで自己クローニング現象を表現できるかということについて検討した。

その方法としては、まずシミュレーションに用いるパラメータと実際の実験条件の対応を、単純な堆積実験の結果から求める。そしてそれらのパラメータを組み合わせ、多層膜の堆積をシミュレーションする。その際に堆積量とエッチング量のバランスを変化させると、ある条件下では一定の形状が保存されることがわかった。さらにそこで求められた条件を、実際の実験にフィードバックさせたところ、シミュレーション結果とよく一致した結果が得られた。それらの結果を図2に示す。こうしたことから、自己クローニング現象が堆積とエッチングのバランスの上に成り立っていることがわかる。

さらに自己クローニング現象の特長の一つである「自己修復作用」について述べる。これは基板の形状に多少の乱れが存在しても、直ちに修復され、均一な形状が得られる効果である。これは自己クローニング現象において保存される形状が、下地の形をそのまま保存しているのではなく、作製条件に依存する形状であるためである。

第4章では、自己クローニング法を用いて作成される2次元フォトニック結晶を用いて、従来にはないタイプの偏光分離素子の実現とその高性能化について検討した。2次元フォトニック結晶ではその構造から強い光学異方性をもつ。例えば特定の波長域を、片方の偏波ではストップバンド（つまり反射）、もう片方の偏波ではパスバンド（つまり透過）と設定することで、偏光分離が可能となる。図3にその概念図を示す。本研究では、この動作確認の後、さらに挿入損失の低減、消光比の向上といった光学素子としての実用性についても検討した。

具体的には

- ・素子表面における無反射処理の検討
- ・バンド構造の最適化による動作波長域の拡大
- ・作製プロセスの改良による材料の吸収損失の低減

といった検討を行った結果、波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯において、挿入損失 0.2dB 以下、消光比は 50dB 以上という、ほぼ実用可能な性能を実現した。またこのことは、自己クローニング法が実用的な光学素子作製技術であることをも意味している。

第5章ではフォトニックバンドギャップの他方向への拡大について検討を行った。フォトニックバンドギャップはフォトニック結晶の持つ特性の一つであるが、中でも3次元全方向に対して、フォトニックバンドギャップがあく場合は「3次元フルバンドギャップ」と呼ばれ、光の放射場の完全な制御が可能となることから、多くの研究者の注目を集めている。しかしその実現方法については、現在までに数例しか提案されておらず、かつどれもまだ実用的ではないのが現状である。本章ではまず、フォトニック結晶の工業的作製技術である自己クローニング法を用いて、多方向へのバンドギャップの拡大を目指す。さらに、自己クローニング法で作製した2次元周期構造にドライエッチングで穴を周期的に開けることで、3次元フルバンドギャップが実現可能な構造を提案した。その概念図を図4に示す。なお、3次元フルバンドギャップを持つ構造について検討した結果、前章までの自己クローニング法より、さらに作製可能な形状の自由度を上げる必要があることが明らかとなった。本章ではそのために、自己クローニング法に反応性ドライエッチングを組み合わせた新しい作製プロセスを提案し、その原理確認実験を行った。

第6章では本研究で得られた結果についてまとめた。

以上、本論文ではフォトニック結晶の新しい作製方法である自己クローニング法について、そのメカニズムの解明と、それを用いて作製される光素子として偏光分離素子を提案し、その実用性についてまとめた。さらに自己クローニング法による3次元フルバンドギャップ実現の可能性について、計算による検証および新しい作製プロセスの原理確認についてまとめた。

[1] J. D. Joannopoulos et al., Photonic Crystals: Princeton University Press 1995.

[2] E. Yablonovitch, J Opt. Soc. Am. B, 10, 283, 1993.

[3] S. Kawakami, Electron. Lett., 33, 1260, 1997.

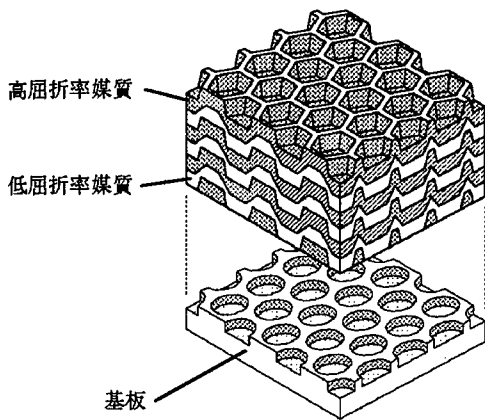


図1 自己クローニング法の概念図

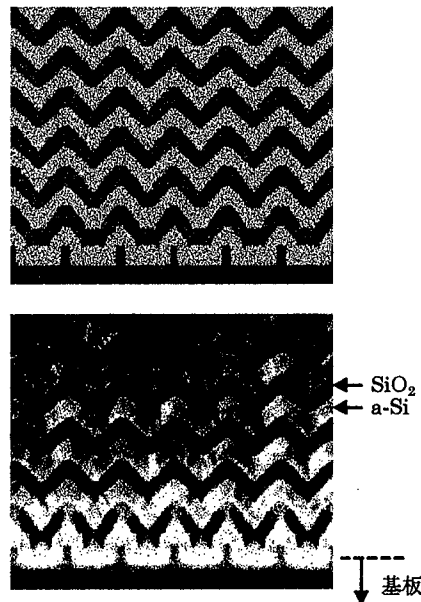


図2 自己クローニング現象をシミュレートした結果(上)と実験結果(下)との対応

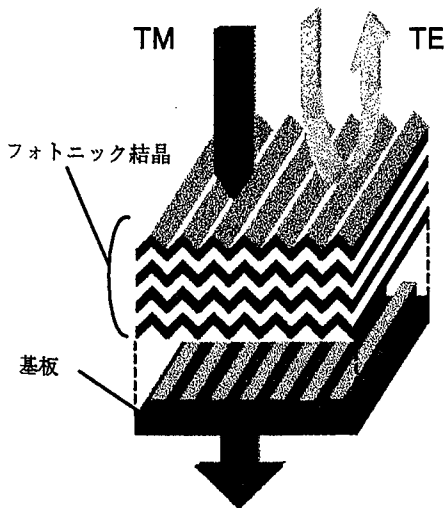


図3 本研究で実証した偏光分離素子の概念図

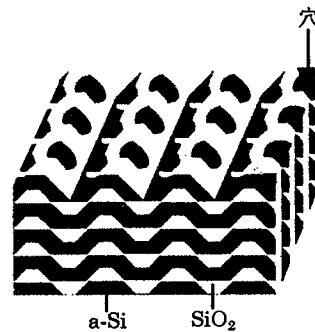


図4 自己クローニング法により作製される3次元フルバンドギャップを持つ構造の概念図

審査結果の要旨

光の波長のオーダーの周期を持つ 3 次元周期構造であるフォトニック結晶は、フォトニックバンドギャップ、大きな異方性、及び高い分散性を持つため新しい光デバイス創出の豊かな可能性を持っている。作製が困難であることから 3 次元フォトニック結晶の実験的研究は提案以来 10 年以上も足踏み状態にあったが、自己クローニング効果が発見されるに至り工業化への見通しが立ってきた。著者は、自己クローニング効果の研究の初期から研究に参加してメカニズムを解明し、フォトニック結晶及び応用デバイスの設計・作製の指針を示すとともに、それを利用した偏光分離素子を提案し、実用的にも十分な性能のものを作製した。本論文はこの研究成果についてまとめたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は緒言であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第 2 章では、フォトニック結晶に関する従来の研究の歴史と現状について述べている。

第 3 章では、任意次元フォトニック結晶の作製原理である自己クローニング効果が、バイアススパッタリングにおける中性粒子の拡散入射による堆積、垂直入射イオンによるスパッタエッチング、及び膜物質の再付着による堆積の 3 つの素過程の重畳により定量的に説明できることを実験と数値シミュレーションの比較により明らかにした。さらに、自己クローニング効果におけるスケーリング則、自己修復作用、及び周期のずれの保存が実際に成立することを実験により明らかにした。これらは、任意次元のフォトニック結晶及びその応用デバイスに設計指針を与える有用な成果である。

第 4 章では、2 次元フォトニック結晶を利用した偏光分離素子を提案し、自己クローニング法による作製、評価、及び解析を行った結果について述べている。波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯で挿入損失 0.2dB 以下、消光比 50dB 以上という高い性能を持つ素子を実現している。これは、従来に比べて極めて容易なプロセスにより超薄形偏光子を実現したもので、光ネットワーク用の超小形光サーキュレータなど各種応用分野を有することを示している。これは極めて有用な成果である。

第 5 章では、フォトニックバンドギャップが存在する方位を拡大するための構造の提案と実現方法について検討した結果について述べている。まず、膜厚が場所によって異なる構造を提案し、それを実現するための作製プロセスを開発した。さらに、全方位にフォトニックバンドギャップが存在する構造及びそれを実現する手法を提案し、反応性ドライエッチングを組合せることによりこれが可能であることを解析により示すと共に予備実験の結果を述べている。

第 6 章は結言である。

以上要するに本論文は、任意次元フォトニック結晶の作製法である自己クローニング効果のメカニズムを解明し、これを応用してすぐれた特性をもつ偏光分離素子の作製に成功し、さらに全方位にフォトニックバンドギャップが存在する構造を実現するための指針を与えたものであり、電気通信工学及び光デバイス工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。