

フォトニック結晶素子を用いた軸対称偏光ビーム Axially symmetric polarized beams generated by the use of photonic crystal mirrors

○井上喜彦*, 小澤祐市**, 佐藤俊一**, 佐藤尚*, 川嶋貴之*, 川上彰二郎****

○Yoshihiko Inoue*, Yuich Kozawa**, Syunichi Sato**, Takashi Sato*,
Takayuki Kawashima*, Shojiro Kawakami****

(株)フォトニックラティス*, 東北大学**, (財)仙台応用情報研究振興財団***
Photonic Lattice, Inc.*, Tohoku University**,
Sendai Foundation of Applied Information Science***

Laser beams with axially symmetric polarization(ASP) are known to have unique properties different from those of conventional laser beams with linear or circular polarization. We report about one of the simplest way for generating the ASP laser beams by adopting the photonic crystal mirror as an output coupler of the cavity.

1. はじめに

通常のレーザービームは、ビーム断面での偏光の空間分布がほぼ均一な直線偏光である。一方で近年、偏光軸が放射状のラジアル偏光もしくは同心円状のアジマスル偏光であることを特徴とした軸対称偏光ビームが着目されている¹⁾。

軸対称偏光ビームは、集光される全成分がp波もしくはs波として振舞うことから(Fig.1)高効率な加工用レーザーとして応用が期待され²⁾、また焦点付近で光軸に平行な電場成分を発生することから高解像度顕微鏡への応用も行われている³⁾。更に、光軸中心が強度ゼロとなるドーナツ状の強度分布を有することから、光ピンセット等への応用研究も盛んである⁴⁾。

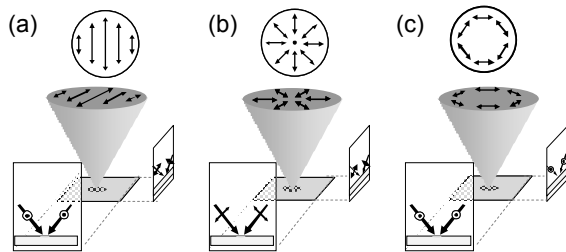


Fig.1 Schematic view of the polarization of focused beam.
(a) linear polarization (p & s)
(b) radial polarization (all-p)
(c) azimuthal polarization (all-s)

このような軸対称偏光ビームを発生させる手法には、外部素子などを用いて複数のモードのビームを合成する手法⁵⁾や、共振器内もしくは外に特殊な光学素子を挿入する手法⁶⁾などが提案されている。筆者らは、レーザー共振器を構成する出力側ミラーを、同心円状の偏光軸を有する反射型偏光子に置き換える方法を提案する。

この手法の最大の課題は、反射率をレーザー発振に適した値に調整可能で、かつレーザーによる損傷・劣化の無い高耐久性の同心円状反射型偏光子を得ることにある。

本報告では、自己クローニング型フォトニック結晶素子が上記要求に極めて好適な特性を有することを示し、これを用いた軸対称レーザーの発振実験結果を紹介する。

2. 原理

自己クローニング型フォトニック結晶は、ノコギリ歯状の断面を有する光学多層膜であり、凹凸パターンを形成した基板へのスパッタリング成膜プロセスにより作製される(Fig.2(a),(b))。この積層プロセスは、堆積とエッチングという相反する要素をバランスさせることで凹凸形状を恒久的に複製し続ける点に特徴を有することから、自己クローニング法と呼んでいる。

得られる主な機能は、光学多層膜への面内異方性の発現であり、成膜材料や凹凸周期、膜厚の組み合わせにより、偏光子や波長板として機能する。例えば、500nm周期の凹凸溝を有する石英基板上に、 Nb_2O_5 層174nmと SiO_2 層460nmとを交互に積層すると、波長1064nm近傍で凹凸溝方向(TE方向)に透過軸を有する偏光子になる。一方で同じ基板上に、 Nb_2O_5 層255nmと SiO_2 層330nmとを交互に積層すると、同波長で溝に直行する方向(TM方向)に透過軸を有する偏光子が得られる。また、これらの素子では透過しない成分はほぼ全て反射する。

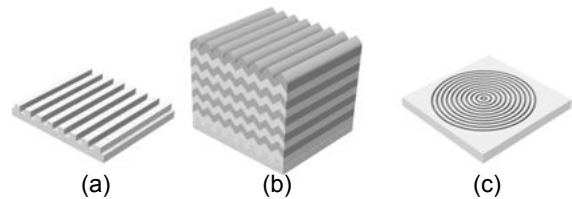


Fig.2 Schematic view of auto-cloned photonic crystals. (a)substrate, (b)after deposition, (c)substrate with circular pattern.

従って、Fig.2(c)のように同心円状の凹凸パターンの基板上にTE透過のフォトニック結晶偏光子を形成するとラジアル偏光ビーム発振ミラーが、TM透過偏光子を形成するとアジマスル偏光ビーム発振ミラーが得られると期待される。

また、いずれの偏光子も積層数により容易に透過/反射率を調整することが出来る。更にこれらの素子は全て無機材料で構成されているため、通常の光学多層膜と同等の耐久性を有する。

3. 実験結果

【フォトニック結晶素子の作製と評価】

Fig.3に試作したフォトニック結晶偏光子の外観および断面SEM写真を示す。Fig3(a)の中央の丸い領域が偏光子として機能するフォトニック結晶領域である。また、TM方向とTE方向のそれぞれに透過軸を持たせた偏光子の分光測定結果をFig.4に示す。いずれの場合も、基板ピッチは500nmと同一であり、膜厚の制御だけで透過軸方位を選択できていることがわかる。

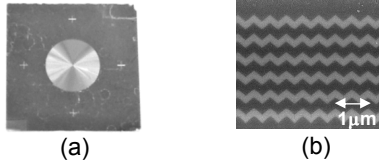


Fig.3 The overview of the circular polarizer(a) and the SEM image of the cross section(b).

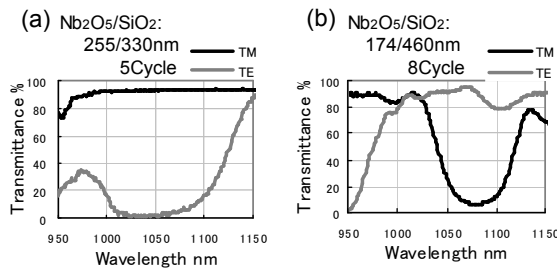


Fig.4 Measured transmission spectra of a TM_pass polarizer (a) and a TE_pass polarizer (b).

【レーザ発振実験】

次に得られた素子を、YAGレーザの共振ミラーとして配置し(Fig.5)、軸対称レーザの発振を試みた。高反射ミラーには曲率半径200mmの凹面鏡を用いた。また、YAGロッドにはc軸カットのYVO₄結晶を用いることで、ロッド自体の偏光依存性を除き、また共振器内に発振モードを制御する為の絞りを挿入した。

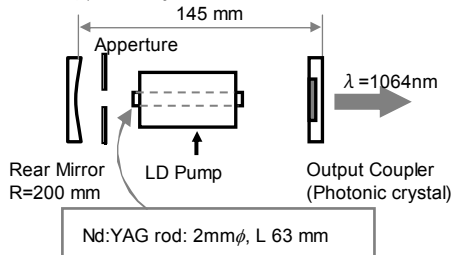


Fig.5 Schematic diagram of a laser cavity configuration.

結果はTE透過偏光子およびTM透過偏光子で、Fig.6に示すように通常の場合と同効率が発振していること確認された。

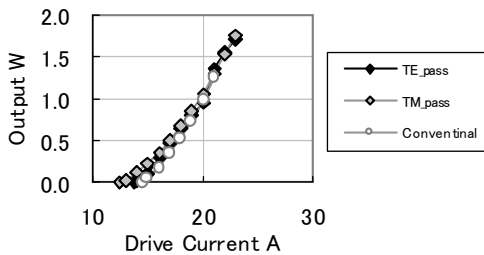


Fig.6 The output power versus the drive current of the pumping laser diodes for different mirrors.

発振したレーザビームの強度パターンを、偏光無依存の出力ミラーを用いた場合と比較してFig.7に示す。軸対称ビームに特徴的な、光軸中心部で強度が0となるドーナツ状のビームが得られている。

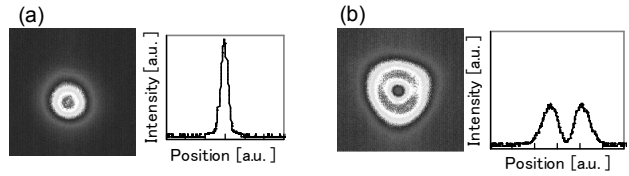


Fig.7 The beam profiles of the intensity .
(a) with a non-anisotropic mirror ,
(b) with a circular-anisotropic mirror.

次にビームの偏光分布を評価した。直線偏光子を透過後の強度プロファイルを測定した結果をFig.8に示す。図中の矢印は透過させた直線偏光子の透過方位を表す。偏光無依存の通常の場合のミラーを用いた場合は、直線偏光子の向きに関わらず一様な強度分布を示しており、ランダム偏光ビームであることがわかる。一方、TE透過偏光子を用いた場合にラジアル偏光ビームが、TM透過偏光子を用いた場合にアジマスル偏光ビームが得られていることがわかる。

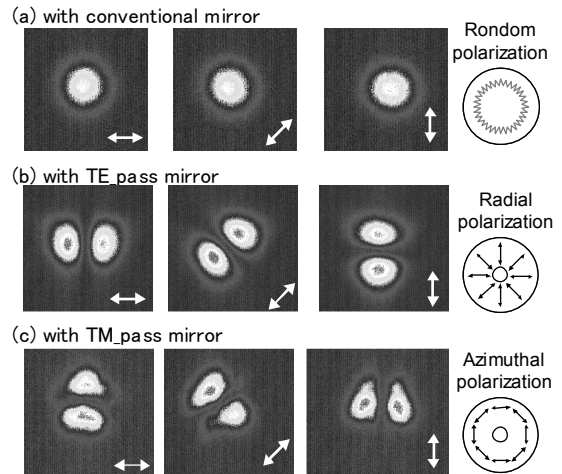


Fig.8 Beam profiles after through a linear polarizer.
(a) with a conventional mirror
(b) with a TE_pass mirror
(c) with a TM_pass mirror.

以上の通り、出力ミラーを軸対称フォトニック結晶偏光子に置き換えることにより、ラジアル偏光やアジマスル偏光の軸対称偏光ビームが発振することを確認した。

4. おわりに

軸対称の自己クローニング型フォトニック結晶偏光子を用いることで、容易且つ高効率に軸対称偏光レーザを発振させることができることを実証した。

参考文献

- 1) 小澤祐市、佐藤俊一:光学第35巻第12号(2006)p9-18
- 2) A.V.Nesterov, V.G.Niziev:J.Phys.D,32(1999) 2871-2875
- 3) N.Hayazawa, Y.Sato and S.Kawata:Appl.Phys. Lett.,85 (2004) 6239-6241
- 4) Q.Zhan:Opt. Express, 12 (2004) 3377-3382
- 5) S.C.Tidwell, G.H.Kim and W.D.Kimura: Appl. Opt., 32 (1993) 5222-5229.
- 6) K.Yonezawa, Y.Kozawa and S.Sato: Opt. Lett., 31 (2006) 2151-2153