

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560042

研究課題名(和文) ウォークオフ補償周期構造を持つ高効率深紫外波長変換デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of highly efficient deep-UV wavelength-conversion devices with walk-off compensating structures

研究代表者

庄司 一郎 (Shoji, Ichiro)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：90272385

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：精密加工や精密計測において需要が高まっている深紫外レーザを、新構造を持つ高効率波長変換デバイスを提案し、新手法を用いて作製することにより実現した。

紫外波長変換結晶BBOは、入射レーザ光と波長変換光が結晶内で分離し変換効率が大幅に低減するウォークオフ効果が生じる。本研究ではウォークオフ効果を補償する新構造を考案し、常温接合法を用いて作製した。その結果、通常結晶に比べ2倍程度の深紫外光出力を得ることに成功した。今後、デバイス構造を改良することで、通常結晶より1桁大きい紫外光出力の発生が可能になると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have realized a deep-UV laser, which is attractive for high-precision machining and measurement applications, by fabricating a newly-structured highly efficient wavelength-conversion device using a new method.

One of popular UV-generating nonlinear-optical crystals, BBO, suffers from the walk-off effect which separates the generated UV beam from the input laser beam, drastically decreasing the conversion efficiency. We proposed a new structure which compensates for the walk-off effect, and fabricated the device using the room-temperature-bonding technique. We have then obtained twice the UV power of that from a bulk crystal. It is expected that one-order higher UV power can be obtained from the device with improved structures.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：紫外レーザ 波長変換 ウォークオフ 常温接合 BBO

1. 研究開始当初の背景

発振波長 200~300 nm の深紫外レーザは、ディスクマスタリングや電子回路基板作製、半導体非破壊検査など、微細加工や精密計測用の光源として需要が高まっている。深紫外領域で加工に適用できる出力を持ち、かつ、扱いやすいレーザ光源として現在最も有望なのは、半導体レーザ励起固体レーザをベースとした波長変換レーザである。深紫外光を発生できる波長変換材料は限られており、その中で β -BaB₂O₄ (BBO) は最大級の非線形光学定数を有する代表的材料である。ところが、BBO では入射したレーザ光に対して波長変換により発生したビームが分離していくウォークオフと呼ばれる現象が顕著に生じるため、変換効率が著しく低下する。

ウォークオフを補償するために、同じ厚さのプレートを結晶軸の向きを互いに反転させて貼り合わせた構造が提案された。しかしながら、従来のウォークオフ補償構造は単純な周期構造であるうえ、貼り合わせにはオプティカルコンタクトが用いられていたため、接合強度が弱く実用化に至っていなかった。

一方、我々は常温接合を用いたレーザおよび波長変換デバイスの開発に取り組んできた。常温接合は、真空中で材料表面にアルゴンビームを照射し酸化膜・吸着原子を除去して表面原子を活性化させ、それらの表面同士を接触させると、常温のもとで原子レベルの強固な接合が実現する技術である。ウォークオフ補償構造ではサブ mm 厚のプレートを 10~20 個程度貼り合わせるだけで、変換効率を 1 桁程度増大させることが可能となる。したがって、常温接合は真に実用的なウォークオフ補償周期構造を作製するのに極めて適した手法であると確信するに至った。

さらに、従来の周期構造はすべて同じ厚さのプレートから構成されていたが、入射端と出射端のみ他の半分の厚さのプレートを用いると、ビームの分離を一気に半分に低減し、すべてのプレート厚さが半分である場合と同等の補償効果を得られることに気づいた。

2. 研究の目的

本研究は以下の 3 点を目的として行った。

(1) 厚さ 1 mm の BBO プレートを 4 個貼り合わせた従来タイプのウォークオフ補償構造を作製し、長さ 4 mm のバルク結晶にくらべ、紫外光発生効率を 2.5 倍となり、理論値と一致することを確認する。

(2) 上記構造の両端にそれぞれ厚さ 0.5 mm のプレートを貼り合わせた新規補償構造を作製し、長さ 5 mm のバルク結晶に対し 3.4 倍の変換効率となることを実証する。

(3) ビームの分離を低減し、変換効率をさらに向上させるために、厚さ 0.4 mm のプレート 24 個と、両端にそれぞれ厚さ 0.2 mm のプレートを貼り合わせた長さ 10 mm の補償構造を作製し、長さ 10 mm のバルク結晶の 9 倍の変換効率を達成する。

3. 研究の方法

(1) 従来型周期構造の作製と評価

まず、1 mm 厚のプレート 4 個から構成される周期構造を作製する。結晶メーカーから、精度 $\pm 0.2^\circ$ の位相整合角で切り出した長さ 6 mm の BBO 結晶を複数個購入し、緑色レーザ(波長 532 nm)を用いて第 2 高調波(紫外光)パワーの入射角依存性を精密に測定し、すべての結晶についてそれぞれ位相整合角が垂直入射から何度ずれているかをチェックする。その測定結果をもとに、各結晶から厚さ 1 mm のプレートを 3 個ずつ、 $\pm 0.05^\circ$ 以下の精度で切り出す。常温接合によりプレート同士を確実に接合するためには、表面粗さを Ra で 1 nm 以下にすることが必要であり、切り出しと同時に研磨も行う。

加工・研磨したプレートは、常温接合を用いて以下の手順により貼り合わせる。常温接合装置内に、貼り合わせるプレート 2 個を、互いに裏返しになるように対向して上下に設置する。2 x 10⁻⁵ Pa の高真空中で 2 個のプレート表面にアルゴン原子ビームを照射し表面を活性化させた後、コンピュータに取り付けた上側のプレートを下ろして下側のプレートと接触させ、一定時間経過後引き上げ、接合を完了する(図 1)。下側に新たにプレートを設置し、上記プロセスを繰り返すことにより、周期構造を作製する。

作製したデバイスの光学的評価として、まず、常温接合によるプレート接合界面に散乱損失がないかどうかを、透過スペクトルおよびデバイス内での多重反射干渉をバルク結晶と比較することにより確認する。次に、緑色レーザ(波長 532 nm, 連続波発振, 出力 10 W, 単一縦横モード)を用いた波長変換実験を行う。ウォークオフ補償周期構造デバイスに対してレーザ光を垂直入射し、発生する第 2 高調波(紫外光)パワーの入射パワー依存性を測定する。長さ 4 mm のバルク結晶に対しても同様な測定を行ない、変換効率を比較する。また、発生した紫外光の横モードを、スリットを用いてビームプロファイルを測定することにより求め、ウォークオフ補償構造によりビーム品質も改善されているか確認する。

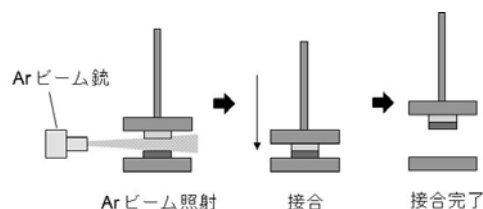


図 1 常温接合プロセス

(2) 新規補償構造の作製と評価

さらに、長さ 6 mm の結晶 1 個から、同様の方法で厚さ 0.5 mm のプレートを 4 個切り出し、研磨を行い、そのうちの 2 個を上記で作製した 4 mm の周期構造の両端に接合する。

作製した新規ウォークオフ補償構造デバイスに対して波長変換実験を行ない、10 W 入射時に理論的に見積もられる 30 mW の紫外光出力が得られるかを確認する。

(3) 新規補償構造の高効率化の検討

次に、厚さ 0.4 mm のプレート 24 個と、両端にそれぞれ厚さ 0.2 mm のプレートを貼り合わせた長さ 10 mm の新規補償構造の作製と評価を行う。はじめに、プレート 12 個を接合した長さ約 5 mm の構造を作製し、光学評価を行い、最初に作製したデバイスにくらべ、ビームの分離が小さい分、効率がさらに 1.6 倍向上することを確認する。そして、最終的に長さ 10 mm のデバイスを作製し、入射パワー 10 W に対し、紫外光出力 100 mW が得られることを目指す。

4. 研究成果

(1) 従来型ウォークオフ補償周期構造および新規ウォークオフ補償構造の作製と評価

まず、従来型の周期構造として、長さ 6 mm のバルク結晶から位相整合角度精度 $\pm 0.1^\circ$ で切り出した厚さ 1 mm のプレート 5 個を貼り合わせた、全長 5 mm のデバイスを作製した。アルゴンビームの加速電圧 1.5 kV、電流 15 mA で約 600 秒照射した後、1 kg/cm² 程度の荷重をかけてプレート同士の接合を行った。また、同様の手法で、厚さ 1 mm のプレート 4 個と、両端に厚さ 0.5 mm のプレートを貼り合わせた全長 5 mm の新規構造を作製することに成功した。新規ウォークオフ補償構造の写真を図 2 に、模式図を図 3 に示す。結晶 c 軸の向きが互いに反転し、かつ、入射端面に厚さ半分のプレートを付加することによって、入射基本波と紫外第 2 高調波と

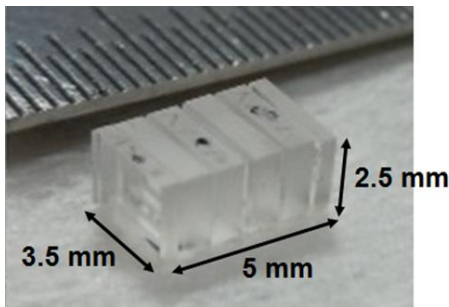


図 2 新規ウォークオフ補償構造

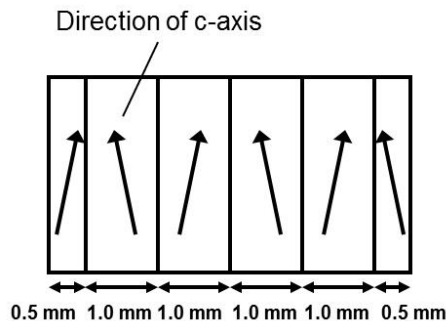


図 3 新規構造の模式図

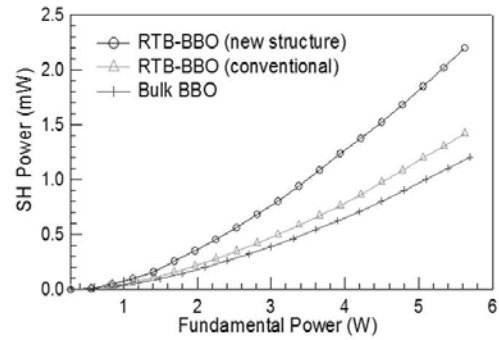


図 4 全長 5 mm のバルク結晶、従来構造、新規構造に対する紫外光出力の基本波パワー依存性

のビーム分離が従来構造のほぼ半分となると見積もられる。

常温接合により作製したデバイスに対し、cw 緑色レーザを入射したところ、接合界面での散乱はわずかに見られるものの無視できるレベルであり、高品質に接合できていることを確認できた。従来構造、新規構造、そして、比較のために全長 5 mm のバルク結晶を用い、cw 緑色レーザを基本波光源とした深紫外第 2 高調波発生実験を行った。結果を図 4 に示す。新規構造はバルクの 1.8 倍、従来構造の 1.6 倍の出力を示し、新規構造のウォークオフ補償効果が高いことを実証できた。

(2) 新規補償構造のさらなる高効率化の検討

新規補償構造において、各プレートの厚さをより薄く、かつ、接合個数を増やして全長を長くすれば、さらに紫外光発生の効率を高くすることが可能となる。そこで、厚さ 0.4 mm のプレート 11 個と、両端に厚さ 0.2 mm のプレートを貼り合わせた全長 5 mm のウォークオフ補償デバイスの作製を試みた。

これまではプレート同士を貼り合わせるたびに、常温接合装置を大気開放して新たに接合するプレートを設置していたため、装置の真空引き多くの時間を要した。そこで、図 5 のように、多数個のプレートを移動ステージ上に配列し、接合を行うたびに順次次のプレートを供給できる機構を新たに開発した。これによりデバイス作製プロセスの効率を大幅に向上することが可能となった。

この機構を用いて上記構造を作製し、まず、

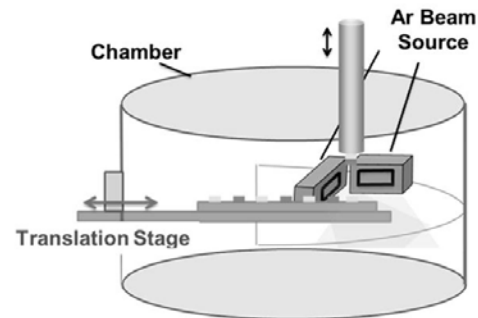


図 5 多数個プレート連続供給機構

発生する深紫外光のビーム形状を観察した。結果を図6に示す。バルク結晶では顕著なウォークオフ効果により、扁平なビーム形状となるのに対し、最初に作製した新規構造(RTB-BBO(#1))ではウォークオフ補償効果により改善されていることがわかる。そして、今回作製した新規構造(RTB-BBO(#2))ではビーム形状がほぼ真円となり、ウォークオフ補償効果が向上したことが明らかとなった。

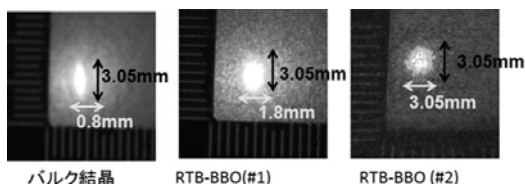


図6 バルク結晶, 1 mm 厚プレート4個と0.5 mm 厚プレート2個からなる新規構造(RTB-BBO(#1)), 0.4 mm 厚プレート11個と0.2 mm 厚プレート2個からなる新規構造(RTB-BBO(#2))それぞれ発生した深紫外ビーム形状

しかしながら、深紫外光出力はバルク結晶を下回る結果となった。第2高調波パワーの入射角依存性を測定したところ、RTB-BBO(#2)ではバルク結晶およびRTB-BBO(#1)よりも角度許容幅が大きくなっていった。これは、各プレートの厚さが薄くなったことで、加工精度が悪化し、位相整合角からのばらつきが大きくなったためと考えられる。したがって、プレート切り出し時の加工精度を向上させれば、さらなる高効率化を図れると考えられる。

以上より、今後本研究を進展させることにより、小型・高効率・高出力の真に実用的な深紫外レーザーを実現することが可能であり、精密加工・計測やバイオ・医療分野等への応用が期待される。

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7件)

- ① 庄司一郎, “低温接合技術による高機能レーザーおよび波長変換デバイスの開発,” オプトロニクス, Vol. 32, 78-82 (2013), 査読無.
- ② 庄司一郎, 原健二郎, 松本真之介, 恩田友美, 長島亘, “新構造と高品質接合法による深紫外波長変換レーザーの高効率化,” レーザ加工学会誌, Vol. 19, 230-232 (2012), 査読有.
- ③ Kenjiro Hara, Shinnosuke Matsumoto, Tomomi Onda, Wataru Nagashima, and Ichiro Shoji, “Efficient Ultraviolet Second-Harmonic Generation from a Walk-Off-Compensating b-BaB₂O₄ Device

with a New Structure Fabricated by Room-Temperature Bonding,” Appl. Phys. Express Vol. 5, 052201-1-052201-3 (2012), 査読有.

[学会発表] (計32件)

- ① Tomomi Onda, Matsumoto Shinnosuke, and Ichiro Shoji, “A New Walk-Off Compensating BBO Device with Thinner-Plate-Stacked Structure Fabricated by Room-Temperature Bonding,” Nonlinear Optics 2013, 25年7月23日, ハワイ(米国).
- ② Tomomi Onda, Kenjiro Hara, Shinnosuke Matsumoto, Wataru Nagashima, and Ichiro Shoji, “Fabrication of a New Structured Highly Efficient Wavelength-Conversion Device by Use of the Room-Temperature-Bonding Technique,” 3rd IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration 2012, 24年5月17日, 東大(文京区).
- ③ 原健二郎, 高柳幸之介, 松本真之介, 庄司一郎, “常温接合を用いた新規ウォークオフ補償構造 BBO 波長変換素子の作製,” 第72回応用物理学会学術講演会, 23年9月1日, 山形大(山形市).

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

名称: 擬似位相整合波長変換デバイスの製造方法

発明者: 庄司一郎, 川路宗矩, 井村健

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許第5036610号

取得年月日: 24年7月13日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

庄司 一郎 (SHOJI ICHIRO)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 90272385

(2) 研究協力者

田中 光弘 (TANAKA MITSUHIRO)

光学技研(株)

原 健二郎 (HARA KENJIRO)

中央大学・理工学研究科・修士課程

(H23)

松本 真之介 (MATSUMOTO SHINOSUKE)

中央大学・理工学研究科・修士課程

(H23~H24)

恩田 友美 (ONDA TOMOMI)

中央大学・理工学研究科・修士課程

(H24~H25)