

# 常温接合を用いたウォークオフ補償 $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 紫外波長変換デバイスの高効率化 Highly efficient walk-off compensating $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ultraviolet wavelength-conversion devices developed with room-temperature bonding

電気電子情報通信工学専攻 鈴木大貴  
20N5100025F Daiki SUZUKI

## 1. はじめに

レーザは現在、光ディスクへの情報の書き込み・読み出しといった身近なものから加工・医療・計測などの幅広い分野で応用されており、高性能化と動作波長域の拡大が求められている、しかし高性能な動作特性が得られるレーザ材料には限りがあり、直接レーザ発振によって得られる波長領域も限定される。そのため任意の波長のレーザ光を得るためには、非線形光学効果を用いてレーザ光の波長を変換する必要がある。

発振波長 200~300 nm の深紫外レーザは、フォトリソグラフィや半導体の微細加工・欠陥検査、精密計測用などの光源として、需要が高まっている。深紫外光発生用の波長変換材料には、 $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (BBO) が一般的に広く利用されている。この BBO 結晶に緑色光を入射すると、半分の波長である紫外光が発生する。このような現象を第 2 高調波発生という。しかしながら、BBO には大きな複屈折性があるため、Fig.1 に示すような、結晶中を伝播するにつれて入射したレーザ光と波長変換により発生したビームが分離するウォークオフと呼ばれる現象が顕著に生じ、変換効率が低下する問題があった。

そこで任意の厚さの波長変換材料同士を反転させて貼り合わせ、ウォークオフを補償するような構造にすることで効率の低下を抑制することが可能となる。従来、この材料同士の貼り合わせはオプティカルコンタクトによって行われていたため接合強度が弱く取り扱いが困難であったが、常温接合を用いることで材料同士のより強固な接合が実現された。<sup>[1,2]</sup>

そこで本研究では、深紫外コヒーレント光の発生が可能な波長変換材料である BBO を用いて、常温接合 (RTB: Room-Temperature Bonding) <sup>[3]</sup>によるウォークオフ補償構造波長変換デバイス (RTB-BBO) を提

案し、作製および評価を行う。この手法は、これまでにない高効率の深紫外波長変換デバイスを実現することを目指すものであり、精密加工・計測や医療、学術研究用の実用的な光源として広く利用されることが期待される。

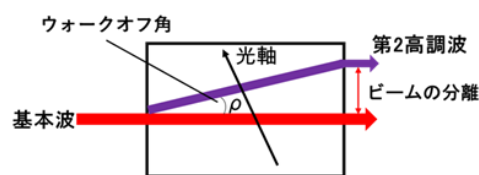


Fig. 1. ウォークオフ概念図

## 2. ウォークオフ補償構造と波長変換効率

ウォークオフが変換効率にどの程度影響するか見積もる。第 2 高調波のパワーは次式で表せる。

$$P_{2\omega} \propto hm(B, \xi)L$$

第 2 高調波のパワーは、デバイス長  $L$  とコンフォーカル長からなる  $\xi$  とウォークオフ角  $\rho$  に依存するパラメータ  $B$  を変数とする  $hm(B, \xi)$  の値によって決定される。具体例として、BBO における 532 nm → 266 nm の波長変換の場合を考える。  $L=5$  mm のバルク結晶において、ウォークオフ角  $\rho$  は 4.84° なので、  $B=13.3$  となる。これを Fig.2 に当てはめると  $hm(B, \xi) = 0.053$  となり、変換効率はウォークオフがない場合の  $B=0$  と比較して 5% にまで低下してしまう。このように、ウォークオフの影響は変換効率を大きく低下させる直接的な原因となっている。

そこで、ウォークオフを補償し変換効率を改善するために、Fig.3(a) に示されるような、同じ長さの波長変換材料を周期的に交互に反転して貼り合わせる構造が考案されている。このような構造では、光軸に対して 180° 反転して貼り合わせを行うことで、1 枚目のプレートで離れた変換光が 2 枚目のプレートでは元に戻るため、ウォークオフによるビームの分離が小さくなり、変換効率の低下を抑制することが可能となる。補償構造では  $B$  の値を改善することができるため、従来構造においてはビームの分離は実

質プレート 1 枚分と考えることができる。そのため、 $L=1\text{ mm}$  として計算すると  $B=5.94$ ,  $hm(B, \xi)=0.117$  となり、バルク結晶の 2.2 倍の変換効率を得ることが可能となる。

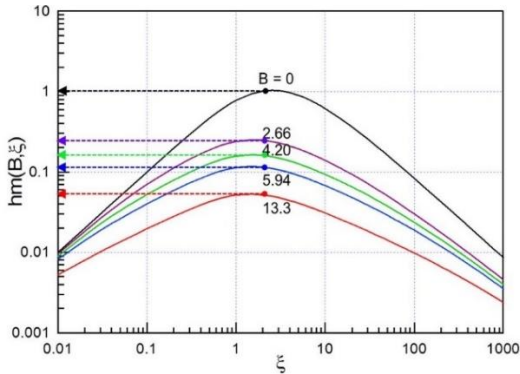


Fig.2. Boyd-Kleinman factor

従来構造は Fig.3(a)のように全て同じ厚さのプレートから構成されていたが、我々が考案した新規構造 RTB-BBO(Fig.3(b))のように、入射端と出射端に厚さが半分のプレートを付加することで、ビームの分離を一気に半減することが可能となる。これにより、全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ることができ。つまり、 $L=0.5\text{ mm}$  と考えられるので  $B=4.20$ ,  $hm(B, \xi)=0.164$  となり、バルク結晶の 3.1 倍、従来構造の 1.4 倍の変換効率を得ることが可能となる。過去に当研究室では、新規構造 RTB-BBO を作製し、バルク結晶や従来構造に比べ、変換効率が約 2 倍高くビーム形状も円形に近づくことを実証した[4]。各プレートを薄くすればビームの分離をさらに低減させ、より高効率化が期待できる。

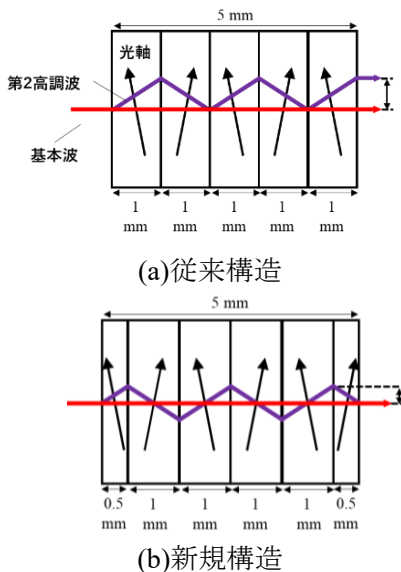


Fig. 3. ウォークオフ補償構造

### 3. 常温接合法を用いた RTB-BBO デバイスの作製

常温接合法は、表面活性化接合(SAB:Surface-Activated bonding)とも呼ばれている。これまで主に材料分野において、誘電体材料や金属、化合物半導体などの様々な材料における高品質な接合が実現している[5]。常温接合プロセスとしては、 $1 \times 10^{-4}\text{ Pa}$  程度の真空中において、光軸に対して  $180^\circ$  反転させたプレートを向かい合わせてセットし、試料表面に Ar ビームを照射しエッチングを行う。これにより表面の酸化膜や吸着分子を取り除き、試料表面を活性化させる。そして活性化した面を維持した状態で、2 枚の試料を密着させることによって原子レベルの接合が達成される(Fig. 4,5)。なお、接合条件は加速電圧 1.4 kV、電流 15 mA、照射時間 30 min、試料間距離 40 mm とした。この常温接合法は任意の材料で接合が可能、また常温プロセスであるため加熱による品質劣化がないなどの利点によって、ウォークオフ補償構造の作製に極めて適した手法であると考えられる。

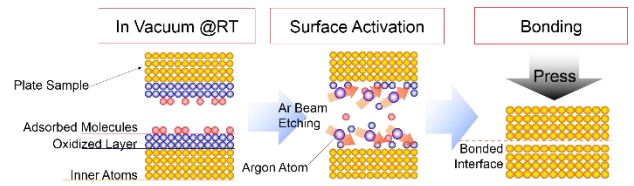


Fig. 4. 常温接合プロセス

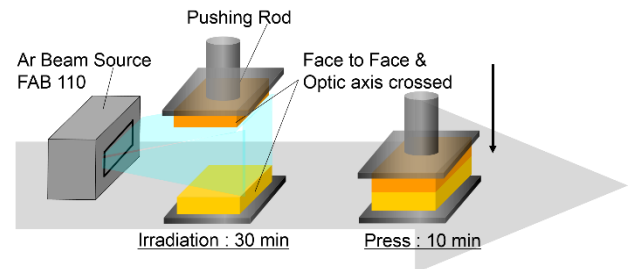


Fig.5. 常温接合を用いた RTB-BBO 作製プロセス

### 4. RTB-BBO の波長変換特性

過去に常温接合を用いて作製したデバイスの変換効率を比較するため、532 nm のグリーンレーザ (Coherent, Verdi-V10) を基本波とした 266 nm の紫外光への第 2 高調波発生実験を行った。長さ 5 mm のバルク結晶と従来構造 RTB-BBO, 新規構造 RTB-BBO の波長変換特性に関して比較した結果を Fig.6 に示す。Fig.7 より、紫外光の最大出力はバルク結晶の 1.20 mW に対し、従来構造では 1.40 mW が得られ、新

規構造では 2 倍近くの 2.17 mW が得られている。

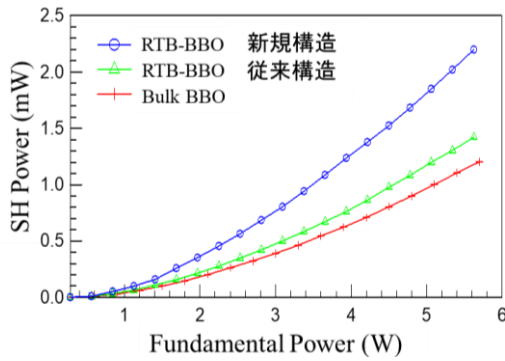


Fig.6. RTB-BBO 波長変換特性

## 5. 位相整合角からのずれ

Fig.7 は角度許容幅を測定した結果であり、切り出し精度が $\pm 0.1^\circ$ 以内ならばバルク結晶に比べ RTB-BBO は 3.5 倍の変換効率を得られることが分かる。破線は位相整合角からのずれがない場合の理論曲線である。

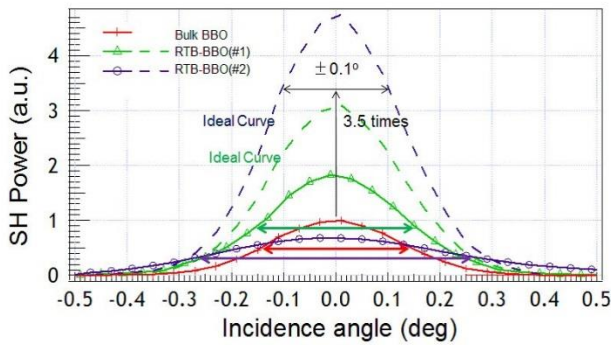


Fig.7. 角度許容幅曲線

位相整合角からのずれはバルク結晶を用いた場合には入射角を微調整することで対処できるが、ウォークオフ補償構造の場合は各プレートで切り出し角の誤差が異なれば、貼り合わせた際に調整が不可能である。そして、補償構造では必然的に多数枚のプレートを必要とするため、各プレートの波長変換光が最大となる位相整合角からのばらつきが積み重なり、結果として変換効率の低下に影響していると考えられる。

そこで、位相整合角からのずれがある場合でも高い変換効率を得ることができる作製方法を検討した。本研究では位相整合角 $\theta_p$ で切り出された BBO プレートを  $180^\circ$ 反転させて接合することで高い変換効率の実現を図ってきた(Fig. 8(a))。そこで、位相整合角からのずれの一方を $+\theta$ とおき、もう一方が $-\theta$ ずれ

ている BBO プレートを反転させて貼り合わせ、作製デバイスを垂直入射から $\theta$ だけ回転させることで位相整合角からのずれを補償可能な方法を考案した(Fig.8(b))。

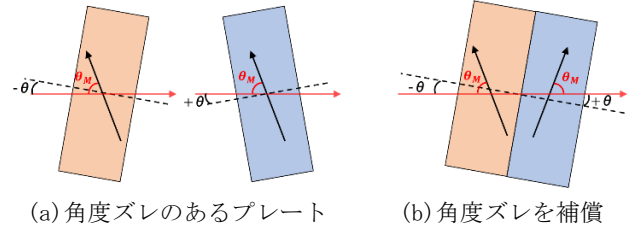


Fig.8 角度ずれを補償する組み合わせ

## 7. ウォークオフ補償構造 RTB-BBO の作製

### 7.1 角度ずれが小さいプレートの RTB-BBO

角度ずれの小さいプレートを用意するために、まず購入したバルク結晶の端面と位相整合角との角度ずれを計測した。計測した角度より、垂直入射で位相整合が達成されるよう端面の研磨を行い、バルク結晶から厚さ 1 mm のプレートを切り出した。このプロセスで用意したプレートには、角度ずれが  $0.1^\circ$ 未満のものが 4 枚だけであり、非常に効率が悪いと考えられる。

角度ずれが  $0.1^\circ$ 未満のプレートを用いて、ウォークオフ補償構造となるよう、RTB-BBO を作製した。Fig.10 に作製した RTB-BBO の第 2 高調波パワーの角度依存性を示す。Fig.9 より、ピークは 1 つであったが、変換効率が著しく低下していた。

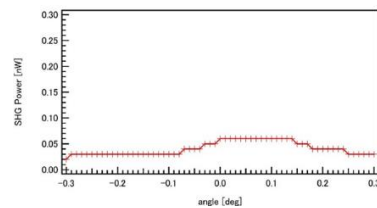


Fig.9 角度ずれの小さいプレートの RTB-BBO

### 7.2 角度ずれを補償する組み合わせの RTB-BBO

Fig.8 のように角度ずれがあっても、それを補償する組み合わせでプレートの接合を行い RTB-BBO を作製した。作製した RTB-BBO の第 2 高調波パワーの角度依存性を Fig.10 に示す。Fig.10 より、角度依存性のピークが 2 つあり、変換効率は向上しなかった。

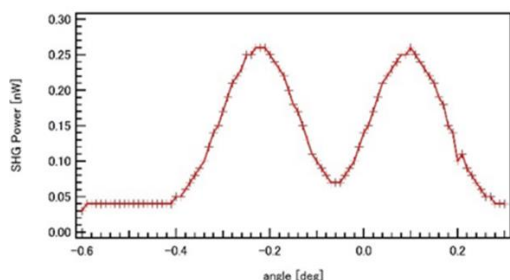


Fig.10 角度ずれを補償する組み合わせの RTB-BBO

### 7.3 角度ずれを補償する組み合わせの改善

Fig.8 の角度ずれを補償する組み合わせには、接合面での角度ずれを考慮しておらず、平行度の高いプレートでなければ、光軸が 180°対称とならないので、新たに角度ずれを補償する組み合わせを考案した(Fig.11). Fig.11 のように、プレートの端面の角度ずれを計測し、接合した際、接合面での角度ずれを補償する組み合わせであれば、ウォークオフ補償構造を達成できると考えられる。

この組み合わせでプレートを接合し、作製した RTB-BBO の第 2 高調波パワーの角度依存性を計測した(Fig.12). Fig.12 より、変換効率は向上せず角度ずれのピークが 2 つ確認された。また Fig.11 の RTB-BBO と比較し、2 つのピークが 0.3 °から 0.2 °に、ずれを小さくできた。

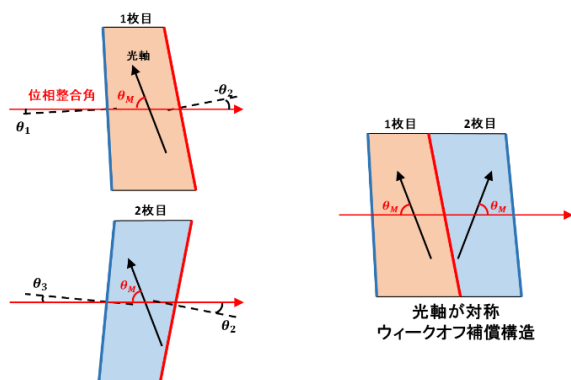


Fig.11 新たな角度ずれ補償の組み合わせ

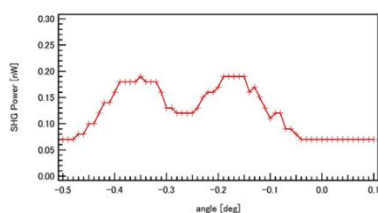


Fig.12 新たな角度ずれを補償する RTB-BBO

### 7.4 他大学から作製を依頼された RTB-BBO

中国南開大学から波長 606 nm を 303 nm に変換するための RTB-BBO の作製依頼があり、本研究室に 4.0 mm×4.0 mm×2.1 mm の BBO が数十個届いた。

これらの BBO は、中国南開大学が購入する際に、予め面方位と位相整合角との角度ずれが±0.2 °~0.4 °程度になるよう指定されていた。

本研究室では波長 606 nm のレーザ光を出力する機材がなかったため、これらの BBO の角度ずれの評価を行えず、そのまま接合した。

BBO を 4 枚接合して作製した RTB-BBO を中国南開大学へ送ったところ「場所依存性はあるが、バルク結晶と比較して変換効率が 2.6 倍に向上した」と報告を受けた。

## 8. 総括

本研究では、角度ずれの小さいプレートを用意するために、新たなプレート切り出しのプロセスを行ったが、要した期間に対し、角度ずれの小さいプレートの枚数が少ないため、効率が悪いと考えられる。また、接合条件が最適ではないため、接合が安定して成功せず、作製できる RTB-BBO の数に限りがあり、その品質にも影響を与えている。

今後は角度ずれが 0.1 °未満となるようにプレートを発注し、接合条件の最適化を行った上で、RTB-BBO の作製を行い、変換効率の向上を目指す。

## 謝辞

本研究に取り組むにあたり、庄司一郎教授より多大なる御指導と御助言を戴いたことを心より感謝致します。また共に研究を進めてまいりました研究室の皆様には多くのご協力を頂き、心より感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1]. J.-J. Zondy, *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B 20, 1675 (2003).
- [2]. J. Friebe, *et al.*, Opt. Comm. 261, 300 (2006).
- [3]. T. Suga, *et al.*, Acta Metall. Mater. 40, S133 (1992).
- [4]. K. Hara, *et al.*, Appl.Phys.Express 5052201(2012).
- [5]. T.R. Chung, *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. 121, 203 (1997).