

常温接合を用いたウォークオフ紫外光発生波長変換デバイスの作製

Fabrication of Walk-off Compensating Ultraviolet Wavelength-conversion Devices Using Room-Temperature Bonding

電気電子情報通信工学専攻 島田学朋
16N5100031E Takatomo SHIMADA

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、その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、 β -BaB₂O₄ (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あわせ、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あ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。^[1,2]

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)^[3]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。

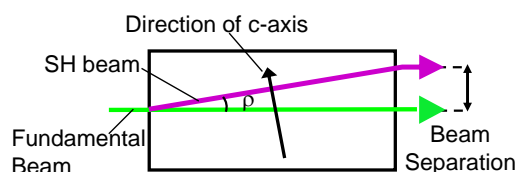


Fig. 1. ウォークオフ概念図

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 ξ とウォークオフ角 ρ 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、本研究で扱う 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 ρ 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。

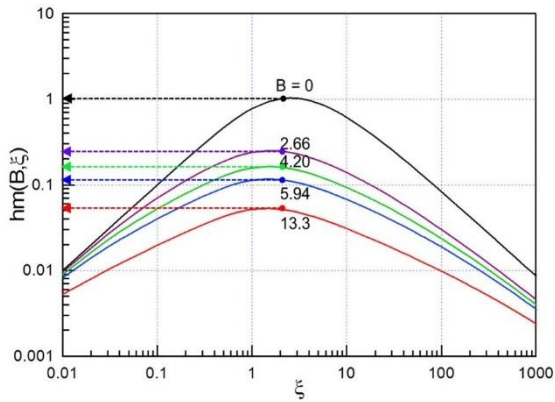


Fig.2. Boyd-Kleinman factor

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#1(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る。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#1 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。

そこで今回は、 0.4 mm が 11 枚と両端に 0.2 mm のプレートを用いて全長 5 mm の RTB-BBO#2,#3(Fig.3 (c))を作製する。この構造は $L=0.2\text{ mm}$ から $B=2.66$, $hm(B, \xi)=0.252$ となり、バルク結晶の 4.8 倍、RTB-BBO#1 の 1.5 倍の変換効率が期待される。

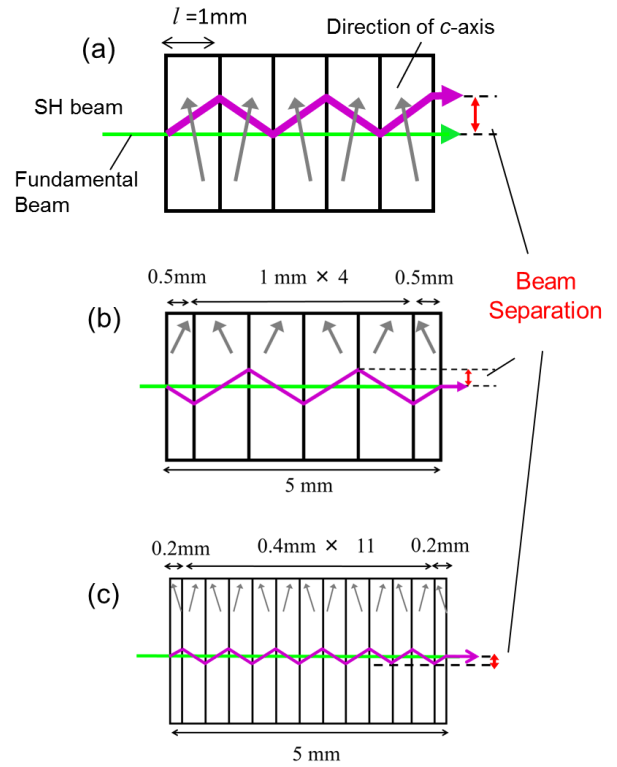


Fig.3.(a)従来構造(b)新規構造 RTB-BBO#1(c)RTB-BBO#2,3

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、東京大学の須賀教授らが材料分野において先駆的に研究を行っており、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、 $2 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ 程度の真空中において、光軸に対して 180° 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のまま、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 1.2 kV 、電流 15 mA 、照射時間 30 min 、試料間距離 12 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。今回、常温接合を用いて作製した RTB-BBO#2,#3 を Fig.6 に示す。

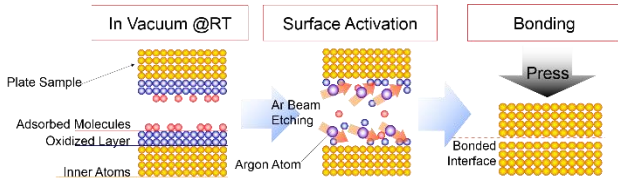


Fig. 4. 常温接合プロセス

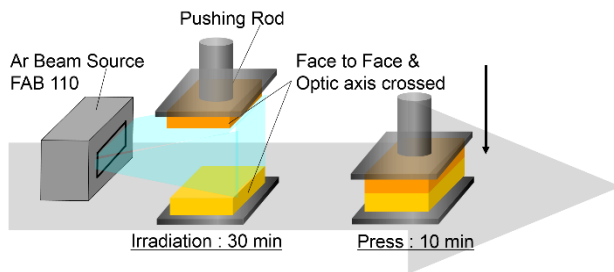


Fig. 5. 常温接合を用いた RTB-BBO 作製プロセス

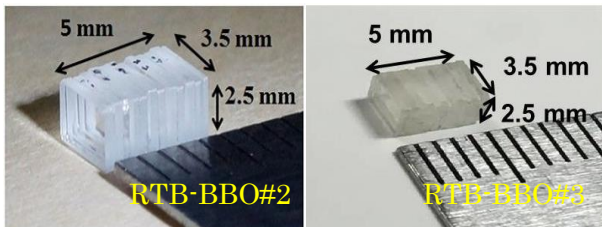


Fig. 6. 作製した RTB-BBO

4. RTB-BBO の波長変換特性

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 RTB-BBO#1, 今回作製した RTB-BBO#2,#3 の 4 種類のサンプルにおいて測定を行い、波長変換特性に関して比較した結果を Fig.7 に示す。Fig.7 より、紫外光の最大出力はバルク結晶の 1.12 mW に対し、RTB-BBO#1 では 2 倍近くの 2.05 mW が得られている。一方、今回作製した RTB-BBO#2,#3 では 0.32 mW, 0.61 mW とバルクよりも下回る結果となった。現在、切り出す BBO プレートの厚さを薄くしたことで、切り出し精度の低下が問題となっている。そのため、変換効率低下を招いた要因として BBO プレートの位相整合角からのずれ・光軸の向きが影響していると考えられる。この 2 つの要因に関して以下で記述する。

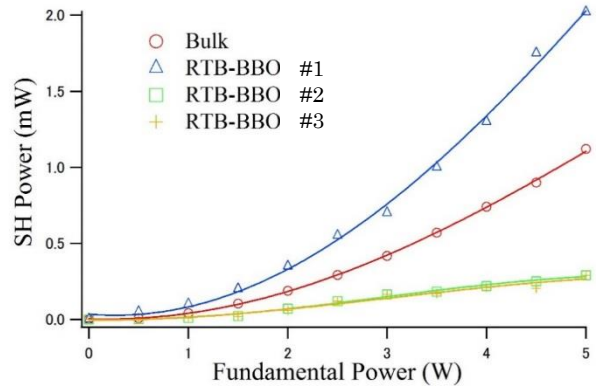


Fig. 7. RTB-BBO 波長変換特性

5. 位相整合角からのずれ

Fig.8 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#2 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。

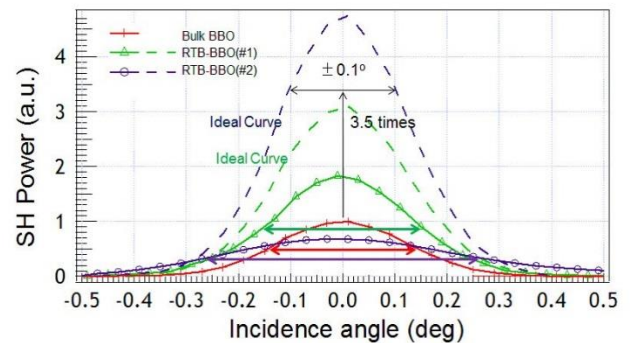
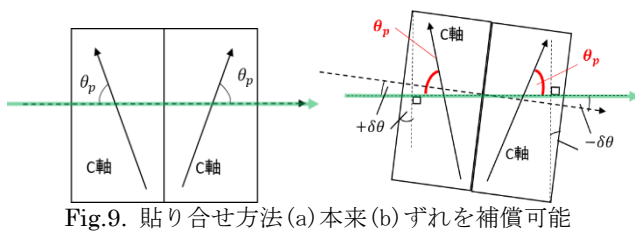


Fig. 8. 角度許容幅曲線

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、ワ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 θ_p で切り出された BBO プレートを 180° 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.9(a))。そこで、位相整合角からのずれの一方を $+\delta\theta$ とおき、もう一方が $-\delta\theta$ 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 $\delta\theta$ 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.9(b)). しかしながら、Fig.10 のように変換効率が上がるもの(c)と上がらないもの(b)の 2 通りの角度依存性を示した。



6. 光軸の向き

位相整合角からのずれがない理想的な 2 枚のプレートを接合した場合の光軸の関係性について示す。組み合わせは Fig.10 のように 4 種類あるウォークオフ補償構造である組み合わせは(c)であり、バルク結晶とみなせる組み合わせの(a)と比べ角度許容幅が約 2 倍になっていることが分かる。

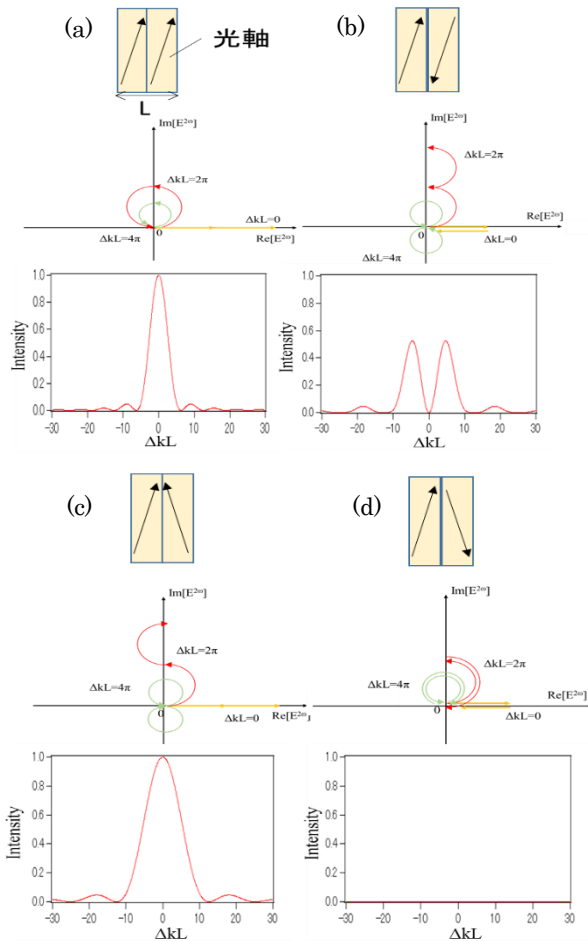


Fig.10. 光軸の組み合わせによる変換効率の変化

本研究では Fig.10(c)の光軸(C 軸)の向きを基準に RTB-BBO の作製に取り組んできた。Fig.10(b)は 2 枚目のプレートの光軸が本来とは反平行である。そこで、バルク結晶を用いて Fig.10 の 4 通りの光軸の向きで角度依存測定を行ったところ、Fig.10(b)と同様の角度依存性が確認された。そのため、これまでに作製した RTB-BBO には光軸の向きが本来とは反平行のプレートが混入しており、第 2 高調波の位相が逆転することでピークが打ち消され、変換効率が低下していたことが明らかとなった。

7. 総括

本研究では、常温接合を用いたウォークオフ補償構造の作製法を確立することを目的として、個々のプレート厚を薄くし枚数を増やしたウォークオフ補償波長変換デバイス RTB-BBO#2,#3 を作製した。第 2 高調波発生実験では、変換効率がバルク結晶を下回った。変換効率低下の要因として BBO プレートの位相整合角からのずれ・光軸の向きが大きく影響していることが明らかとなった。今後は、プレートの切り出し精度を向上させると共に、高い変換効率を見込めるプレートのみを厳選し接合することで、高い変換効率を得る。さらにプレートを薄くし接合枚数を増やすことで、バルク結晶と比較して一桁近く大きな変換効率を得ることが期待できる。

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深く感謝致します。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).