

常温接合を用いた擬似位相整合中赤外波長変換デバイスの高品質化

Improvement of quasi-phase-matching mid-infrared wavelength-conversion devices
by use of room-temperature bonding

電気電子情報通信工学専攻 高橋 勇輝
20N5100027B Yuki TAKAHASHI

1 はじめに

中赤外レーザー光源 (波長約 3 ~ 20 μm) は、分子分光をはじめとする計測や、穴あけ・切断といった加工などの幅広い分野に有用である。しかし、中赤外域で直接で動作するレーザーの種類は限られているため、二次の非線形光学効果を利用した第二高調波発生 (SHG: Second Harmonic Generation) や、光パラメトリック発振 (OPO: Optical Parametric Oscillation) といった波長変換の利用が中赤外光を発生させる上で有望な手段として検討されている。これまでに多くの実用的成功を収めてきた波長変換材料として、 LiNbO_3 や LiTaO_3 といった無機酸化物誘電体結晶が挙げられる。しかし、これらは透過域が短く、特に中赤外光で透明でないため、中赤外波長変換材料として適していない。そこで本研究では、透過域が波長約 17 μm まである化合物半導体 GaAs を用いて、高品質な中赤外波長変換デバイスの作製を行うことを目的とする。

波長変換材料としての GaAs は、波長変換において一般的に用いられる LiNbO_3 と比較して二次非線形光学定数が 5 倍以上大きく、熱伝導率も約 40 倍高いため、高出力の赤外波長変換に適している材料である。しかし GaAs は光学的に等方的な材料であるため、従来の位相整合方法である複屈折位相整合 (BPM: Birefringent Phase Matching) が利用できず、擬似位相整合 (QPM: Quasi Phase Matching) 構造の作製が必要となる。

図 1 に、SHG における非線形結晶の結晶長と変換光のパワーの関係を示す。(a) 位相整合が達成されていない場合には各点の非線形分極から発生した第二高調波の位相が揃わず、 $z = 2l_c$ ではそれらが足し合わされて出力が 0 となる。(b) 位相整合が達成されている場合は各点の非線形分極から発生した第二高調波と

位相が揃うため、第二高調波パワーは相互作用長 L の 2 乗に比例して増大する。しかし、どのような材料でもこのような位相整合が達成できるわけではない。

(c) 擬似位相整合は、材料が光学的に等方的などの理由で位相整合条件を満たすことが困難な場合に用いる方法であり、一般的には結晶をコヒーレンス長 l_c の大きさに区切り、分極を反転することで擬似位相整合を達成できる。このように周期的に分極を反転させることで媒質中の各点の非線形分極から放射される第二高調波の位相をある程度揃えることができ、第二高調波強度が相互作用長に対して単調に増加させることが可能となる。この方法により、光学的に等方的な材料である GaAs は擬似位相整合を達成できる。

GaAs を用いて QPM 構造を作製するために従来では二つの方法が開発されていた。一つ目は副格子交換エピタキシーによる方法 [1] である。しかし、この方法では入射面が μm 程度と小さいため、高出力レーザーには使用できないという問題がある。二つ目は拡散接合によるプレートの貼り合わせ [2] である。こ

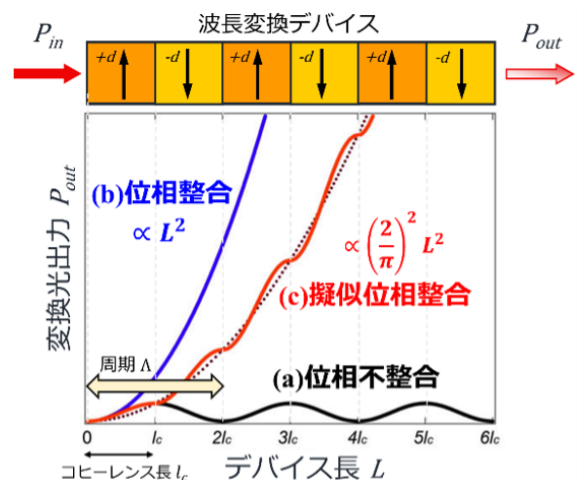


図 1 擬似位相整合

の方法では大口径化は可能だが、高温プロセスによる砒素抜けのために、結晶品質が劣化してしまうという問題がある。これらの問題を解決するため、本研究では常温接合 (RTB: Room-Temperature Bonding) を用いて大口径 QPM 構造の作製を試みている。

2 常温接合法

常温接合は Suga らにより提案された接合方法であり [3]、真空中において、原子ビームを用いて表面を活性化させ常温のまま接合を行う技術である。図 2 に常温接合のメカニズムを示す。(a) 試料の表面は大気中室温において形成される自然酸化膜や、吸着した水分子などの汚染物に覆われている。(b) 活性状態とは、接合を阻害しているこれらを取り除き、表面原子の結合手を露出させた状態である。表面を活性化するための照射ビーム源として高速原子ビーム (FAB: Fast Atom Beam) 源を用いる。加速されたアルゴン原子ビームを真空中で照射することで、試料表面を活性化させる。(c) この活性表面をそれぞれ接触させ加圧することで接合を行う。このようにして、強固で信頼性の高い結合を作り出すことができる。常温接合では、高温プロセスを用いないため、接合材料にかかる負荷が小さい、金属・酸化物・誘電体・化合物半導体など、接合に適用できる材料の選択肢が多いなどの特徴がある。本研究では、この常温接合を用いて薄い GaAs プレート を多数枚貼り合わせることで高品質な QPM 構造の作製を試みた。

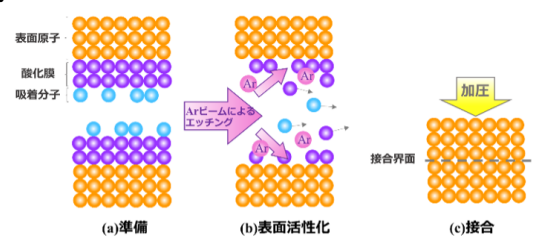


図 2 常温接合のメカニズム

3 先行研究における課題

本研究室では先行研究において、エラストマシートを用いた接合プロセスで、口径 5.5 mm × 5.0 mm、

厚さ 106 μm の GaAs プレート を 53 枚積層した全長 5.6 mm の QPM 構造を作製することに成功し、波長 10.6 μm の CO₂ レーザを用いた第二高調波発生 (SHG) で過去に作製した 9 枚積層構造に比べて 29 倍大きい変換効率を得た [4]。しかし、デバイス面内での透過率のバラつきが大きく、透過率の高い部分が限られた。積層数を増やすにつれて、接合した GaAs プレートの表面平坦性が低下し、複数箇所接合界面に空隙が発生したためと考えられた。

4 新規接合プロセスによる QPM デバイスの作製

本研究では GaAs プレート を多数枚積層して作製した QPM デバイスの高品質化を目標とした。高品質化とはデバイスの透過率を高くし、透過率場所依存性を低くすることである。

今回、レーザグレードに研磨した平坦性の高い YAG 結晶表面上に GaAs プレート を設置する方法 (図 3) を新たに検討した。

QPM デバイス作製は以下の手順で行った。図 4 に手順を示す。(a) 1 枚の GaAs プレート が設置されたステージと 1 枚の GaAs プレート を準備したロッドをチャンバーにセットし、30 分～1 時間かけて高真空 (10⁻⁵ Pa 程度) 状態にする。(b) Ar 原子ビームを照射する。(c) 上部のロッドを下げ、4 分間加圧を行うことで密着を促進させる。(d) ロッドを引き上げ、大気開放する。(e) 方位反転させた次のプレートを新たにセットする。これを繰り返すことで本研究室では初となる厚さ 84 μm のプレートを用いた 25 枚積層 QPM-GaAs (全長: 2.1 mm) の作製に成功した。

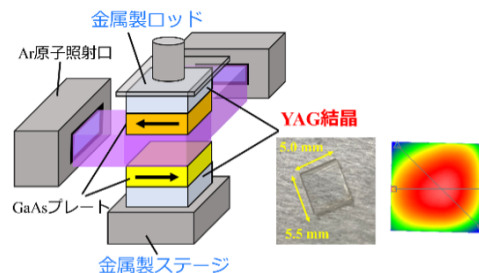


図 3 YAG を用いた接合プロセス



図4 YAGを用いた積層QPMデバイスの作製

また、同様のプロセスで厚さ 106 μm のプレートを用いた 53 枚積層 QPM デバイス (全長:5.6 mm) の作製に成功した。これは波長 10.6 μm の CO_2 レーザを用いた第二高調波発生 (SHG) のための波長変換デバイスである。

5 QPM デバイスの評価

25 枚積層 QPM デバイスの透過率を測定した。透過率は波長 1.5 μm の半導体レーザから出射されたビーム (直径 5.6 mm) をデバイス全体に入射し、透過パワーを入射パワーと比較して算出した。内部透過率は積層デバイスの透過率をプレート 1 枚の透過率で除算した値である。積層枚数を考慮して算出した接合界面あたりの損失によって品質を比較した。GaAs プレートをものままステージとロードに設置する接合プロセスで作製した 11 枚積層 QPM デバイスより

も YAG を用いた接合プロセスで作製した 25 枚積層 QPM デバイスの方が高品質となった。結果を表 1 に示す。

表 1 透過率測定結果

接合方法	枚数	内部透過率 T_{in}	損失 α
そのまま	11	53 %	2.7 %
YAG	25	64 %	0.8 %

25 枚積層 QPM デバイスの透過率場所依存性を確認するために透過率の 2D マップを作成した。測定は口径が 5.0 mm \times 5.5 mm あるうちの 4 辺から 1 mm 内側の 3.0 mm \times 3.5 mm の範囲で行い、0.2 mm ずつ入射ビームの位置を移動させた (図 5)。

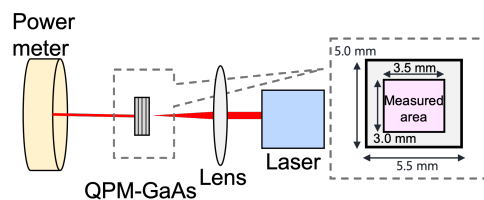


図 5 透過率場所依存性の測定系

何も用いない接合プロセスで作製した 11 枚積層 QPM デバイスと YAG を用いた接合プロセスで作製した 25 枚積層 QPM デバイスの透過率 2D マップを図 6 と図 7 に示す。25 枚積層 QPM デバイスは低透過率の場所が少なく、場所依存性が小さいという結果になった。高品質化に成功した。

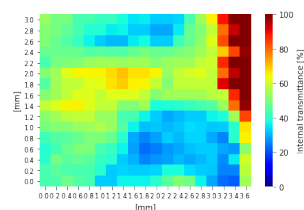


図 6 何も用いない 11 枚の透過率場所依存性

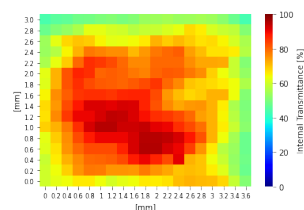


図 7 YAG を用いた 25 枚の透過率場所依存性

53 枚積層 QPM デバイスの透過率を FT-IR(フーリエ変換赤外分光光度計) を使用して測定した。53 枚積層 QPM デバイスの透過率を図 8 に示し、波長 10.6 μm における接合界面あたりの損失を表 2 に示す。界面あたりの損失はエラストマーシートを用いた接合プロセスと同程度という結果になった。

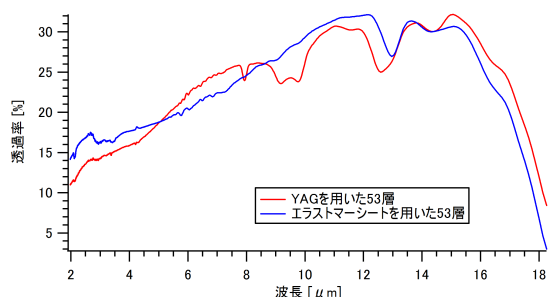


図 8 53 枚積層 QPM デバイスの透過率

表 2 透過率測定結果

接合方法	枚数	内部透過率 T_{in}	損失 α
エラストマー	53	52 %	1.2 %
YAG	53	50 %	1.3 %

53 枚積層 QPM デバイスの透過率場所依存性を確認するために、波長 10.6 μm の CO_2 レーザを用いて透過率 2D マップを作成した。透過率 2D マップの作成方法は 25 枚積層 QPM デバイスの場合と同様である。53 枚積層 QPM デバイスの透過率 2D マップを図 9 と図 10 に示す。透過率の場所依存性はエラストマーシートを用いた接合プロセスと同程度という結果になった。

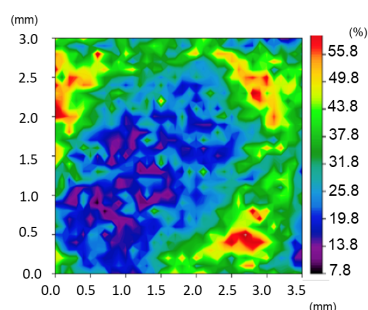


図 9 先行研究における 53 枚の透過率場所依存性 [4]

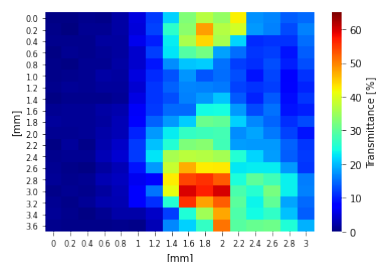


図 10 作製した 53 枚の透過率場所依存性

6 総括

常温接合法を用い、平坦性の高い YAG 結晶上にプレートを設置する接合プロセスで 25 枚積層 QPM デバイスと 53 枚積層 QPM デバイスを作製した。デバイスの透過率測定と透過率 2D マップの作成を行い、品質を評価した。作製した 25 枚 QPM デバイスは何も用いない接合プロセスで作製したデバイスよりも接合界面あたりの損失と透過率場所依存性が改善された。作製した 53 枚積層 QPM デバイスはエラストマーシートを用いた接合プロセスで作製された 53 枚積層 QPM デバイスと比較して、接合界面あたりの損失と透過率場所依存性が同程度であった。

積層数の少ない QPM デバイスでは高品質化が達成できていることから、今後は 10 枚積層構造をいくつか作製した後にそれぞれを接合するプロセスを検討する予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり、中央大学 庄司一郎教授には熱心なご指導賜りました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Koh, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, L508 (1999).
- [2] L. Gordon, *et al.*, Electron. Lett. **29**, 1942 (1993).
- [3] T. Suga, *et al.*, Acta Metall. Mater. **40**, S133 (1992).
- [4] H. Takase, *et al.*, Proc. SPIE. **10902**, 109020I (2019).