

常温接合を用いた高品質擬似位相整合

中赤外波長変換デバイスの開発

Development of high quality 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 谷本 里香

19N5100024B Rika TANIMOTO

1. はじめに

中赤外レーザ光源(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、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は、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 といった無機酸化物誘電体結晶が挙げられる。しかしながら、これらの材料は透明となる波長領域が短く、特に中赤外光で透明でないため、中赤外波長変換材料には適していない。そこで本研究では、波長約 17 μm まで透過域がある化合物半導体 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 倍程度高いため、高出力の赤外波長変換に適している材料であるといえる。しかし GaAs は光学的に等方的な材料であるため、従来の位相整合手段である複屈折位相整合(BPM: Birefringent Phase Matching)が利用できず、以下に示す擬似位相整合(QPM: Quasi Phase Matching)構造の作製が必要となる。

図 1.1 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、材料が等方的などの理由で位相整合条件を満たすことが難しい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させることができる。このように周期的に分極を反転させると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するようにできる。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することができる。

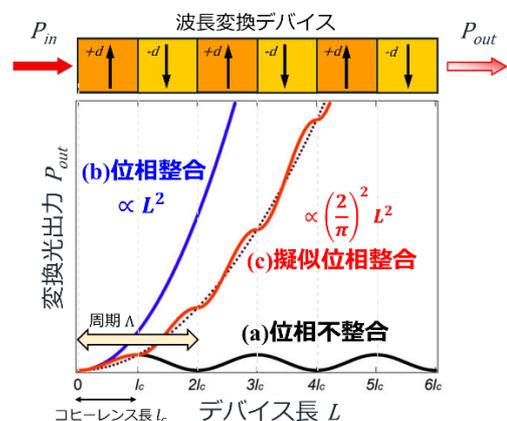


図 1.1 擬似位相整合

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。しかしながらこの方法では、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。この方法では、大口径化は可能であるが、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に、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画期的な接合法である[3]。常温接合は固相接合の一種で、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 2.1 に常温接合のメカニズムを示す。(a)通常、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のことである。接合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高真空中で照射することにより、結晶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。

常温接合には、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

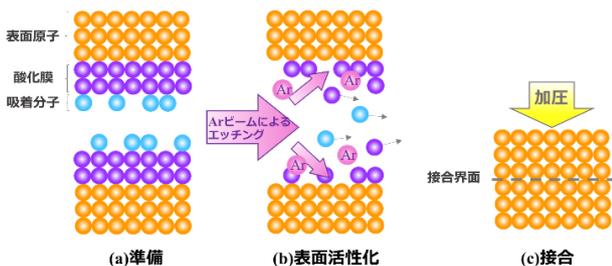


図 2.1 常温接合のメカニズム

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 構造の作製を試みる。

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口径 $5.5\text{ mm} \times 5.0\text{ mm}$ 、厚さ $106\ \mu\text{m}$ の(111)面プレートを 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 $10.6\ \mu\text{m}$ の CO_2 レーザを用いた第二高調波発生で、過去作製した 9 枚積層構造に比べ 29 倍大きい変換効率を得た[4]。しかしながら、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。これは、積層枚数を増やすにつれて貼り合わせた GaAs プレートの表面平坦性が悪化し、複数箇所で接合界面に空隙が発生したためと考えられる。

本研究では新たに、光パラメトリック発振により約 $5\ \mu\text{m}$ の中赤外光を発生させるためのデバイスの作製を行う。厚さ $84\ \mu\text{m}$ の(110)面プレートを多数枚積層し、かつ高品質化を目指す。高品質化とは、デバイス全体の透過率を高くし、かつデバイス内での透過率場所依存性を低くすることである。

4. 新規接合プロセスを用いた表面平坦性の改善

まず、2 枚積層時の表面平坦性改善を図った。その結果、表面平坦性劣化の主な原因が、常温接合装置内でプレートを設置する金属製ステージ及びロッドの平坦性が悪いことにありと特定し、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を新たに考案した(図 4.1)。従来プロセスで 2 枚接合した際の表面高低差は $3\ \mu\text{m}$ 程度であった(図 4.2(a))のに対し、新規接合プロセスでは $0.5\ \mu\text{m}$ となり(図 4.2(b))、平坦性の改善を確認できた。

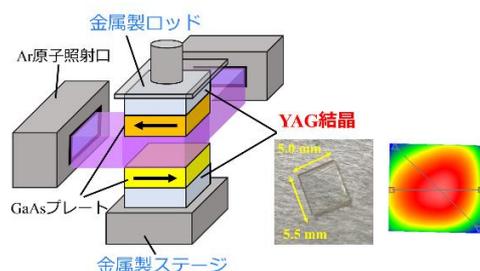


図 4.1 新規接合プロセスの模式図

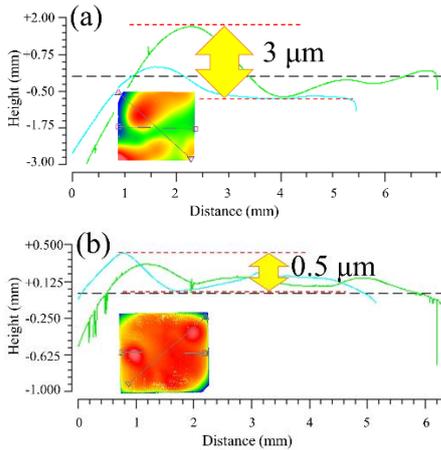


図 4.2 (a)改善前(b)改善後の表面平坦性

5. 新規接合プロセスを用いた QPM-GaAs の作製

QPM デバイス作製は以下の手順で行う。まず、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(図 5.1(a))、30 分~1 時間かけて高真空 (10^{-5} Pa 程度)状態にする。そして、Ar 原子ビームを 10 分間照射する(図 5.1(b))。その後上部のロッドを下げ、約 100 N の加圧を 4 分間かけ続けるこ

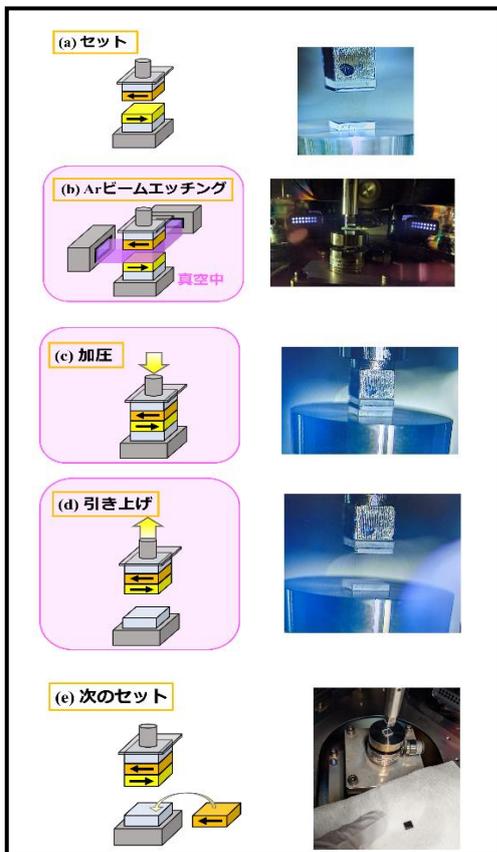


図 5.1 新規 25 枚積層 QPM デバイスの作製手順

とで密着を促進させる(図 5.1(c))。その後ロッドを引き上げ(図 5.1(d))、真空開放する。そして方位回転させた次のプレートを新たにセットする(図 5.1(e))。これを繰り返すことで、本研究室では初の、厚さ $84 \mu\text{m}$ のプレートを用いた 25 枚積層構造 QPM-GaAs(全長: 2.1mm)の作製に成功した(図 5.2)。その後さらにプレートのズレとゴミの混入を防ぐ工夫を試み、2 回目となる 25 枚積層構造 QPM-GaAs の作製にも成功した(図 5.3)。

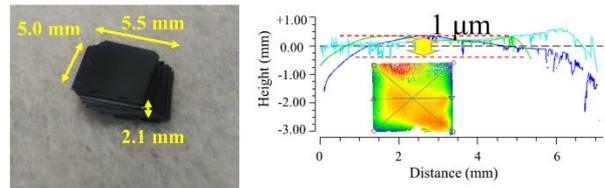


図 5.2 作製した 25 枚積層 QPM-GaAs(1 回目)

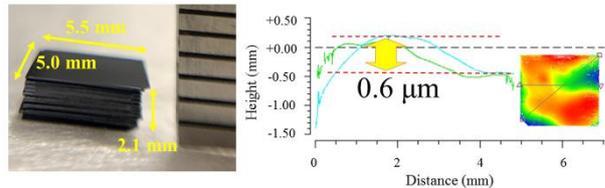


図 5.3 作製した 25 枚積層 QPM-GaAs(2 回目)

6. 透過率測定実験

作製したデバイスの品質評価をするために、透過率測定を行った。

デバイス全体の透過率測定

まず、デバイス全体の透過率測定を行った。透過率は、波長 $1.5 \mu\text{m}$ 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、この時の透過パワーを入射パワーと比較することによって計算された。

測定結果を表 6.1 に示す。内部透過率は、積層デバイスの透過率の値を 1 枚プレートの透過率で除算した値であり、接合界面に空隙が多いほど低下すると考えられる。この値は積層枚数を考慮していないため、デバイス長を考慮して算出した損失係数によって品質を比較すると、改善前プロセスを用いて作製した 11 枚積層構造よりも、新規プロセスを用いた方が高品質になったことが分かる。また、1 回目よりも 2 回目の方が高品質となった。

表 6.1 透過率測定結果

接合方法	枚数	デバイス長 $L[\text{mm}]$	内部透過率 $T_{in}[\%]$	損失係数 $\alpha[\text{cm}^{-1}]$
改善前	11 枚	0.92	53	6.9
新規 1 回目	25 枚	2.1	43	4.0
新規 2 回目	25 枚	2.1	64	2.1

透過率場所依存性の測定

次に、作製した 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 マッピングを作成した。透過率は、波長 $1.5 \mu\text{m}$ の半導体レーザから出射されたビーム(直径 5.6 mm)を入射端面の位置で集光(直径 1.0 mm)した後デバイスに入射し、この時の透過パワーを入射パワーと比較することによって計算された。また、測定範囲は口径が $5.0 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ あるうちの 4 辺から 1 mm 内側の $3.0 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ の範囲であり、 0.2 mm ずつ入射ビームの位置を移動させた(図 6.1)。

測定結果の 2D マップを図 6.2 に示す。全ての中で、(c)新規プロセス 2 回目が最も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。これにより、高品質化に成功したと考えられる。

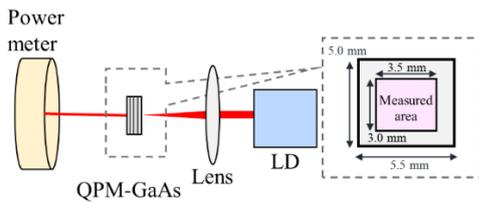


図 6.1 透過率場所依存性の測定系

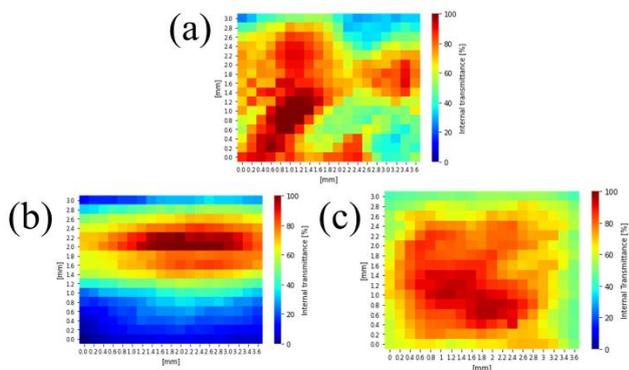


図 6.2 (a)改善前 11 枚(b)新規 1 回目 25 枚 (c)新規 2 回目 25 枚の透過率場所依存性

7. 総括

常温接合法を用いた GaAs プレートの貼り合わせにより中赤外波長変換デバイスを作製した。ステージとロードに平坦性の高い YAG 結晶を設置するプロセスの改善を行った結果、25 枚積層構造 QPM-GaAs の作製に 2 回成功した。その後、品質評価のためにデバイス全体の透過率測定と透過率場所依存性測定を行った。プレートのズレとゴミの混入を防ぐ工夫を行った 2 回目に作製された QPM-GaAs は、改善前プロセスで作製したデバイスよりも内部透過率、損失係数共に改善された。また、透過率場所依存性も改善され、高品質化に成功した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、中央大学庄司一郎教授には、終始熱心なご指導、ご鞭撻賜りました。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).

研究業績

[1] 谷本里香, 高橋勇輝, 庄司一郎, “常温接合を用いた GaAs プレート多数枚積層擬似位相整合中赤外波長変換デバイスの高品質化,” 第 67 回応用物理学会春季学術講演会, 2020 年 3 月 (12p-B508-15).
 [2] Rika Tanimoto, Yuki Takahashi, and Ichiro Shoji, “Fabrication of a quasi-phase-matching stack of multiple GaAs plates with lower scattering loss at the bonded interfaces by use of room-temperature bonding,” Europhoton 2020, September 2020, virtual conference (Th-A1).
 [3] 高橋勇輝, 谷本里香, 庄司一郎, “常温接合を用いた GaAs プレート多数枚積層擬似位相整合中赤外波長変換デバイスの高品質化 II,” 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 2020 年 9 月, オンライン開催 (8p-Z16-2).