

# 常温接合を用いたGaAsプレート積層構造

## 赤外波長変換デバイスの開発

### Development of GaAs Plate-stacked-structured Infrared Wavelength-conversion Devices by Use of Room-temperature Bonding

電気電子情報通信工学専攻 高瀬 大幹

17N5100023H Hiroki TAKASE

#### 1. はじめに

近年の工業分野において非接触かつ材料の硬度を問わず加工が可能なレーザーは幅広く活躍している。その中で、CO<sub>2</sub> レーザは最高 50 kW とレーザーの中でも最高クラスの高出力動作が可能である。その上、発振波長が 10 μm 帯と金属・非金属問わず吸収性が良い波長帯のため、加工用途のレーザーとして、現在もお幅広く用いられている。しかしながら、この発振波長 10 μm 帯という特徴は、比較的長い波長のため、集光径を小さくすることができない。したがって、レーザーを用いた加工において精度に限界がある。もし、CO<sub>2</sub> レーザの高出力な特徴を維持したまま波長を短くできれば格段に微細な加工が可能となるとともに、加工可能な材料の拡大も期待される。

そこで、本研究では CO<sub>2</sub> レーザの発振波長 10.6 μm から第二高調波発生(SHG)により、5.3 μm に波長変換することでレーザー加工の微細化を可能にする高効率高出力波長変換デバイスの作製を行うことを目的としている。

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<sub>3</sub> と比較して 2 次非線形光学定数が 5 倍以上大きく、波長 17 μm 程度まで透明であり、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 は光学的に等方性の材料であるため擬似位相整合(QPM: Quasi Phase Matching)構造の作製が必要となる。

#### 2. 擬似位相整合

擬似位相整合は、全ての材料において位相整合を達成することができる強力な手法である。QPM は、位相不整合量を非線形光学定数または屈折率の空間的な変調構造を利用して保障するものである。以下、SHGを例に具体的に説明する。通常材料では波長分散があり基本波の速度と第二高調波の速度は一致しないため、結晶内の合成した第二高調波パワー( $P_{out}$ )は伝播距離に対して増減を繰り返し振動する周期関数となる(図2.1 Non PM)。もし、基本波の速度とSH波の速度が一致するような条件( $\Delta k = 0$ ) が成立した時、位相整合が達成されたという(図2.1: Perfect Phase Matching)。この時、非線形分極波から発生した第二高調波が位相を揃えて足し合わされるため、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。位相整合を達成するためには、複屈折性をもつ異方性結晶に限られるとともに、波長に制約がある。そこで、本来打ち消しあう点でコヒーレンス長 $l_c$  (周期関数の極大点と極小点との間隔)ごとに非線形光学定数 $d$ の符号を反転し、位相を反転させ第二高調波パワーを次第に増加(図2.1: first-order QPM)させる方法がQPM構造である。

GaAsを用いてQPM 構造を作製するために、従来では、2種類の方法が開発されていた。一つ目は、結晶成長による方法[1]である。しかしながら、この方法では、入射端面が数百μmオーダーと小さいため、高出力レーザーには使用できないという

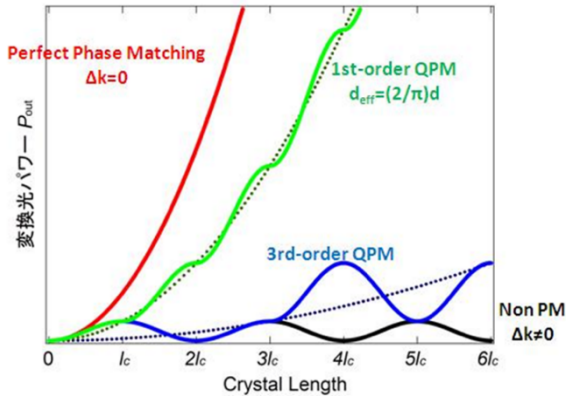


図 2.1 デバイス長と第二高調波パワーの関係

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ヒ素抜けのために結晶品質が劣化してしまう問題がある。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 高効率高出力波長変換デバイスの作製を試みた。

### 3. 常温接合法

常温接合(RTB: Room-temperature bonding)は、Sugaらにより提案された画期的な接合方法である[3]。常温接合は、真空中において、原子ビームを用いて表面を活性化させ接合を行う技術である(図 3.1)。

通常、ウェハ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(図 3.1(a))。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(図 3.1(b))。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真空中で照射することにより、結晶表面を活性化させる。真空中で行うのは、接合中の酸化膜の再吸着を防ぐためである。この活性表面をそれぞれ接触させることで、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(図 3.1(c))

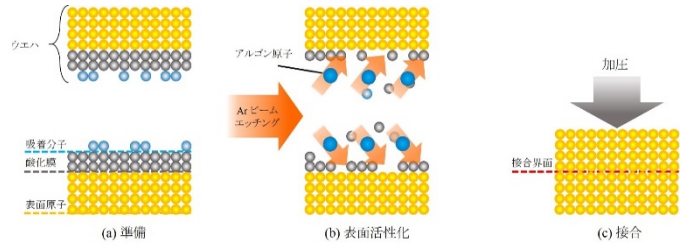


図 3.1 常温接合のメカニズム

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択肢が多いなどの特徴がある。この常温接合を用いることで高品質な QPM 構造を作製する。

### 4. 常温接合による QPM-GaAs の作製

過去に本研究室では面方位(111)の厚さ 50 μm の GaAs プレートを用いて最大で 12 枚積層構造 QPM-GaAs の作製に成功していた[4]。また、常温接合装置内に移動ステージを導入し真空状態を維持したまま一度に 10 枚積層構造を作製する技術を確立し、面方位(111)の厚さ 106 μm の GaAs プレートを用いて 30 枚積層構造 QPM-GaAs の作製に成功していた[5]。しかし、接合プロセス中に異物が混入し透過率が大幅に減少したため、第二高調波の検出には至っていない。異物の混入を減少させる方法として移動ステージと GaAs プレート間にエラストマー粘着シートを挿入するプロセスの改良を行ない、GaAs プレート 1 枚そのものと同程度の透過率を有する 9 枚積層構造 QPM-GaAs の作製に成功していた。

今回、さらなる多数枚の接合を目指すために従来の手順に加え新たにプロセスの改良を行なった。従来の接合プロセスでは移動ステージ上のエラストマー粘着シートに対し目測で GaAs プレートを配置していたため、移動ステージ上の GaAs プレートの位置は均一ではなかった。そのため、接合時に Ar 原子ビーム照射源からの距離はプレート毎に異なっていた。また、接合の際に上部のロットと移動ステージ上の GaAs プレートの位置合わ

せは CCD カメラで撮影された映像をモニターで確認しながら行なっている. そのため, 移動ステージ上の GaAs プレートがずれが位置合わせの困難さを引き起こし, 位置合わせに費やす時間を有するため接合作業の効率低下に繋がっていた. この問題を解決するためにアライメントシートと題した紙を移動ステージとエラストマー粘着シートとの間に挿入した(図 4.1).

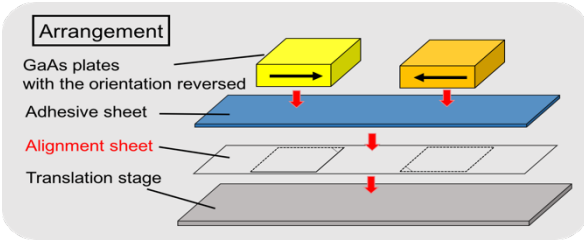


図 4.1 新しいプロセスでの移動ステージの模式図

実際の接合は以下の手順で行う. まず, 図 4.1 で準備した移動ステージと 1 枚の GaAs プレートを準備したロットをチャンバーにセットし, 高真空( $\sim 10^{-5}$  Pa) 状態にする. そして, Ar 原子ビームを 10 分間照射する(図 4.2(a)). その後, 上部のロッドをおろし, 186.96 N の加圧を 4 分間かけ続けることで密着を促進させる(図 3.2(b)). その後, ロッドを引き上げ(図 4.2(c)), 次のプレートをロッドの真

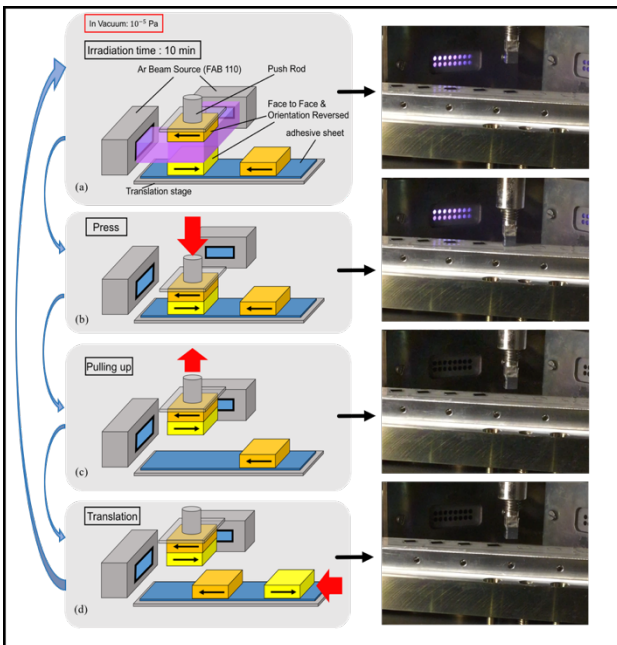


図 4.2 接合プロセス

下に移動させるため, 移動ステージを動かす(図 4.2(d)). これを繰り返すことで, 一度の真空引きで 10 枚の積層構造 QPM-GaAs を作製する. そして, 作製した QPM-GaAs をロットにセットし図 4.1 のプロセスを繰り返す.

この新たに改良されたプロセスを用いて本研究室では過去最大となる 53 枚積層構造 QPM-GaAs (全長: 5.6 mm)の作製に成功した(図 4.3).

## 5. 作製した 53 枚積層構造 QPM-GaAs の評価 透過率測定

作製した 53 枚積層構造 QPM-GaAs の接合面の表面プロファイルを図 5.1(a)に, 波長 10.6  $\mu\text{m}$  に対する透過率の 2D マップを図 5.1(b)に示す. これらを比べると, 表面プロファイル上で凸となっている赤い領域の部分で透過率が大幅に低下していることがわかる. これは, 接合プロセス中に微少の異物が混入してしまった可能性が高い. このことから, 異物の混入を防ぐ対策がエラストマー粘着シートだけでは十分でないことがわかった. それに対し, 表面プロファイル上で平坦性が維持されている緑の領域の部分では, GaAs プレート一枚と比べ, わずかに低下するが同程度の透過率を有する部分も観測された. しかしながら, 透過率の場所依存性を有するため, 大口径のプレートを使用するメリットがなくなってしまう. 今後の異物の混入を防ぐさらなるプロセスの改良に期待したい.

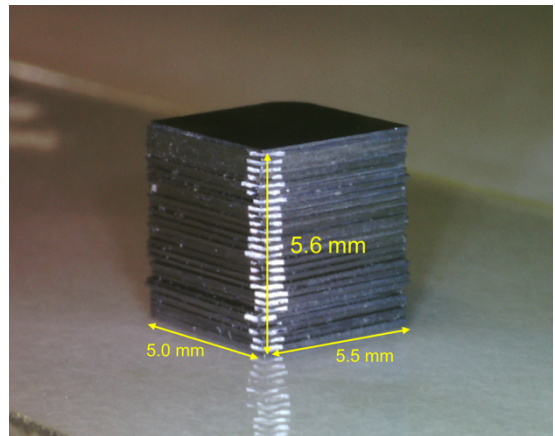


図 4.3 作製した 53 枚積層構造 QPM-GaAs

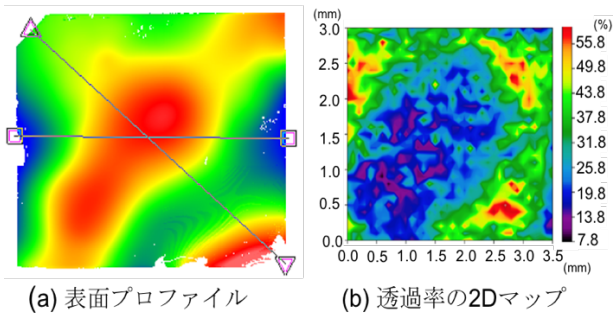


図 5.1 表面プロファイルと透過率

### 第二高調波発生実験

作製した 53 枚積層構造 QPM-GaAs で第二高調波発生実験を行った。透過率の良い部分で測定をし、基本波パワーに対する第二高調波パワー(SH パワー)をプロットしたグラフを図 5.2 に示す。実線は 2 次関数によるフィッティングカーブを表す。SH パワーは、基本波のパワーに対して 2 乗依存性を明瞭に示している。このことから、第二高調波であることを確認できた。また、改良前プロセスで作製した 9 枚積層構造 QPM-GaAs よりも 29 倍の効率を得ることができた。9 枚から 53 枚に積層枚数が増えると理論値では 35 倍となるはずだが、わずかに低い値となった。これは、透過率が 1 枚のものとは比べるとわずかに低い影響が現れたものであると考えられる。しかしながら、散乱損失を抑えつつ、より多数枚の GaAs プレートに接合することができれば、高効率で高出力な波長変換デバイスを作製できる可能性があることを示せたのではないかと考える。

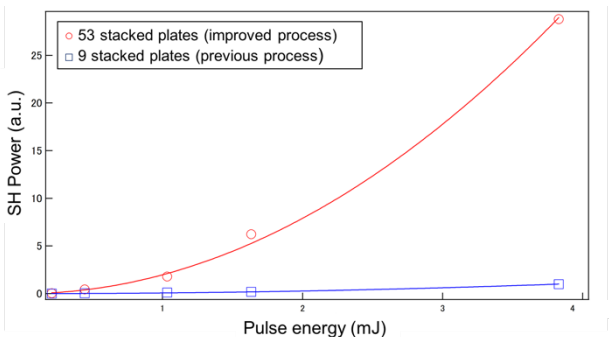


図 5.2 基本波に対する第二高調波パワー

### 6. 総括

常温接合法を使用し、結晶方位を反転させた GaAs プレート同士の貼り合わせを行った。GaAs プレートを正確に移動ステージに並べるプロセスの改良を行なった結果、先行研究よりも 23 枚多い 53 枚積層構造 QPM-GaAs(全長: 5.6 mm)の作製に成功した。作製した 53 枚積層構造 QPM-GaAs 用いて第二高調波発生実験を行い、先行研究で作製した 9 枚積層構造 QPM-GaAs と比べ 29 倍の効率を得ることに成功した。

### 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、卒業研究以来、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] M. Kawaji, *et al.*, in *Advanced Solid-State Photonics 2009*, TuB24
- [5] T. Kubota, *et al.*, Opt. Mater. Express **7**, 932-938 (2017).

### 研究業績

- [1] 高瀬大幹, 新裕貴, 窪田輝充, 庄司一郎, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月, 福岡国際会議場 (6a-A402-2).
- [2] Hiroki Atarashi, Hiroki Takase, and Ichiro Shoji, *Advanced Solid State Lasers*, October 2017, Nagoya (JM5A.4).
- [3] 高瀬大幹, 加賀翼, 新裕貴, 庄司一郎, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 2018 年 9 月, 名古屋国際会議場 (19a-431B-10).
- [4] Hiroki Takase, Hiroki Atarashi, Tsubasa Kaga, and Ichiro Shoji, *SPIE Photonics West*, February 2019, San Francisco (10902-17).