

## 2 光波混合による高出力青緑色半導体レーザーの横モード制御

西岡研究室 金子 和弘

### 1. 背景と目的

半導体レーザーから得られる最大光出力は、主に導波路の幅に依存している[1,2]。そのため、ブロードエリア型半導体レーザーは高出力を実現できるレーザーであり、例えば数 W の青色半導体レーザーが主なメーカーから販売されている。

高速軸方向ではほぼ基本モードで発振する。低速軸方向では導波路の大きさが高速軸の 300 倍あるため、ビーム拡がり角は  $1/300$  倍となるはずだが実際は  $1/3$  倍になる。そのため、低速軸のビーム品質は回折限界の約 100 倍低いと言える。

半導体レーザー単体での出力には制限があるため、更なる高出力化をするためにはコヒーレントビーム結合が必要である。しかし、アレイ型にして半導体レーザーの出力を束ねてもビーム品質は変わらず、集光性能が低いという問題がある[3]。

マルチ空間モードのビームをシングルモードにする方法として、ピンホールなどの空間フィルターがあるが、そのままではパワーの  $1/100$  程度しか透過しないため、実用的ではない。

そのため、本研究ではパワーの損失を抑えながらシングルモードにすることを目的として、非線形光学効果によるモード変換を行う。

非線形光学効果は基本的に強い光で現象が表れやすくパルス光で扱われることが多いが、フォトリフラクティブ効果は時間積分応答であるため、弱い連続光でも長時間の照射で発生できる点で優れている。フォトリフラクティブ効果による二光波混合では、位相制御を結晶が行ってくれるために、外的制御が必要ない。また、将来的に複数の半導体レーザービームをシングルモードにし結合する技術の最初の段階として研究した。

### 2. 二光波混合によるモード改善の原理

図 1 にモード改善の原理図を示した。マルチ空間モードビームを分割してパワーの一部を空間フィルターに通し、作られたシングル空間モードビームをマルチモードビームと二光波混合により増幅することで、高効率で空間モードを改善できる。増幅器として使用するフォトリフラクティブ結晶は鉄イオン添加ニオブ酸リチウムである。これは青緑色に感度波長帯域があり、電気光学係数も高く取り扱いも容易なため採用した。

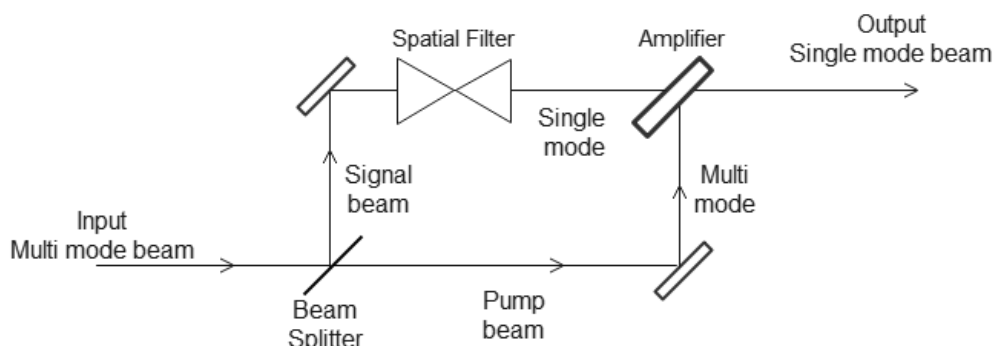


図 1. 二光波混合によるモード改善原理図

### 3. モード制御システムの構成

図 2 に外部共振器を備えたダブルパス増幅システムを用いたモード改善実験の全体図を示した。まず回折格子を用いた外部共振器で狭帯域化を行う。次にもう一つの半導体レーザーを増幅器としてダブルパス増幅を行う。最後にフォトリフラクティブ増幅を行う。

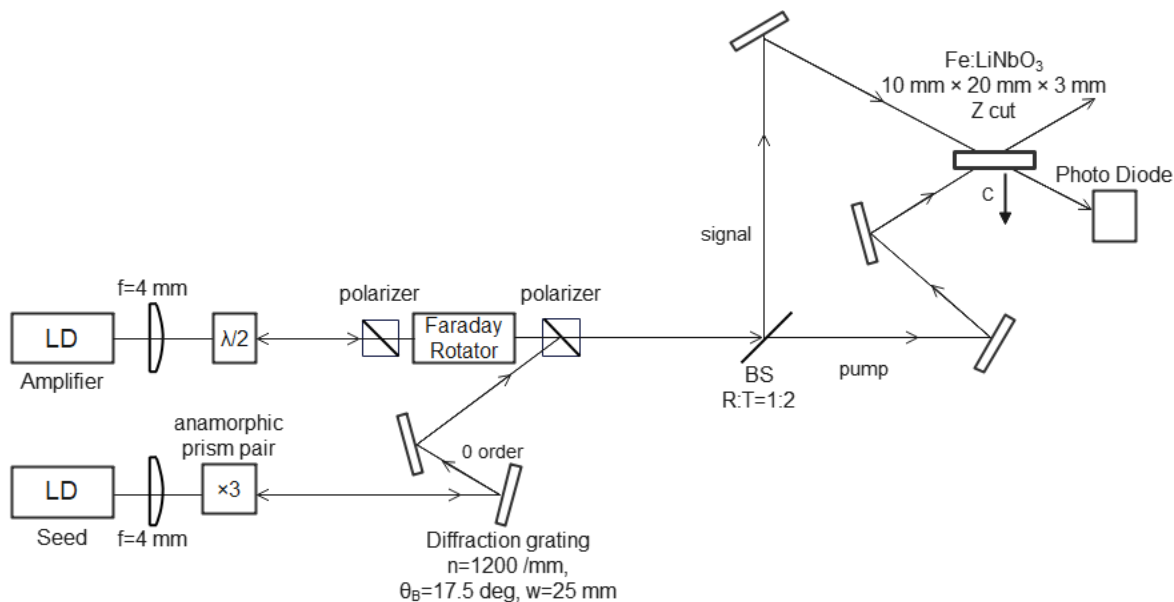


図 2. 外部共振器を備えたダブルパス増幅システムを用いたモード改善実験全体図

#### 3.1. 外部共振器によるスペクトル制御

##### 3.1.1. 二光波混合に必要なコヒーレンス長

フォトリフラクティブ効果の強さは干渉縞の本数の二乗に比例するため、結晶中に干渉縞を十分発生させる必要がある。ビームの横幅が十分に広いとき、結晶の厚さに応じた光学長のコヒーレンス長が求められる。

使用する結晶は屈折率 $n = 2.3$ 、厚さ $L = 3\text{mm}$ 、Z カットである。この結晶にブリュスター角で入射する場合、必要なコヒーレンス長は  $7.5\text{mm}$  となり、線幅は  $40\text{GHz}$  より狭くなければいけない。

##### 3.1.2. 狭帯域発振器の設計

回折格子をリトロ配置にすることで1次回折光を半導体レーザーにフィードバックさせ、反射光を出力とした。必要な分解能 $R = 17000$ であり、 $1200\text{本/mm}$ の回折格子で $14\text{mm}$ を使用する必要がある。そのため、アナモルフィックプリズムペアでビーム径を3倍に広げ $10\text{mm}$ とした。しかしリトロ配置では回折格子に $10.5\text{mm}$ しか当たらず、得られる分解能は $12600$ 、線幅は $53\text{GHz}$ となるが、実際には共振器の $Q$ 値が高ければ共振器を光が往復するため、線幅がより狭くなることを期待した。

LD への注入電流を上げながら、パワーと線幅を計測した。線幅は FSR が  $50\text{GHz}$  のエタロン干渉計で観測した。計測された半値全幅における線幅は  $17\text{GHz}$ 、コヒーレンス長は  $18\text{mm}$  となった。必要なコヒーレンス長が  $7.5\text{mm}$  であるため、十分な値であると言える。

図 3 は LD の注入電流が  $550\text{mA}$  のときの干渉縞である。 $1200\text{mA}$  まで注入電流を増やしても干渉縞は確認できたが、 $550\text{mA}$  程度から干渉縞の明暗のコントラストが低くなっている。図 4 に示した線幅特性を見ても電流を上げるに伴って線幅も広がっている。そのため、外部共振器が十分に機能する上限値は  $550\text{mA}$  であると判断した。

出力結合は約  $5\%$  と低いですが、二光波混合に必要な線幅を得ることができた。

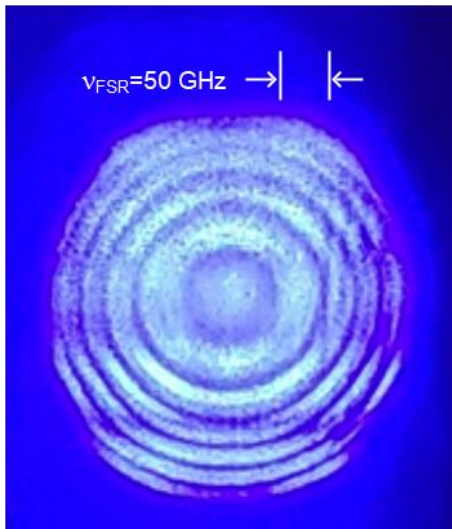


図 3. エタロン干渉計による干渉縞

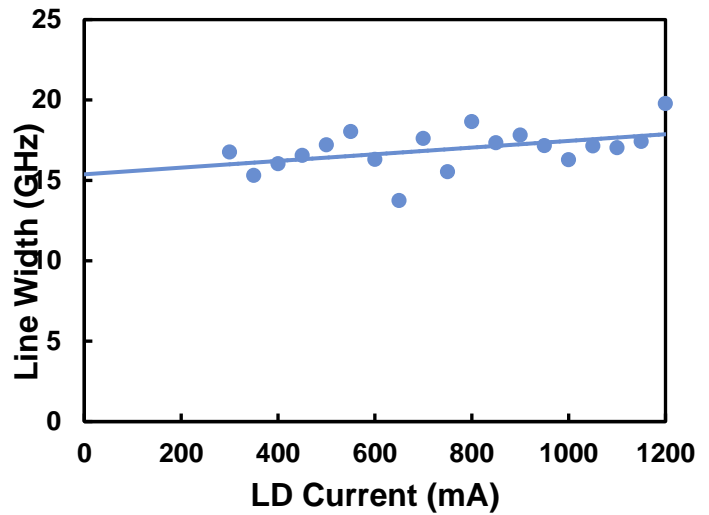


図 4. 狭帯域発振器の線幅特性

### 3.2. ダブルパス増幅器の構成

二光波混合の発生には光強度が低いため、ダブルパス増幅器を構成した。外部共振器レーザー光を半導体レーザーの導波路内に入射し増幅した。緑色半導体レーザーで同様の実験を行った。

増幅器への注入電流を上げながら増幅後のパワーと線幅を計測した。線幅は先ほどと同じエタロン干渉計で観測した。

図 5 に示すように、14.7 mW のシード光を注入し、5 mW の出力が得られた。エタロン干渉計での線幅観測では、注入光がある場合に干渉縞が微かに確認でき、その線幅は 17GHz と外部共振器レーザーと同じ線幅だったが、コントラストが非常に低く、増幅器内で発振したレーザー光が干渉縞の周囲に強く確認されたため、増幅器内に正確に光が入射できていないことがわかった。

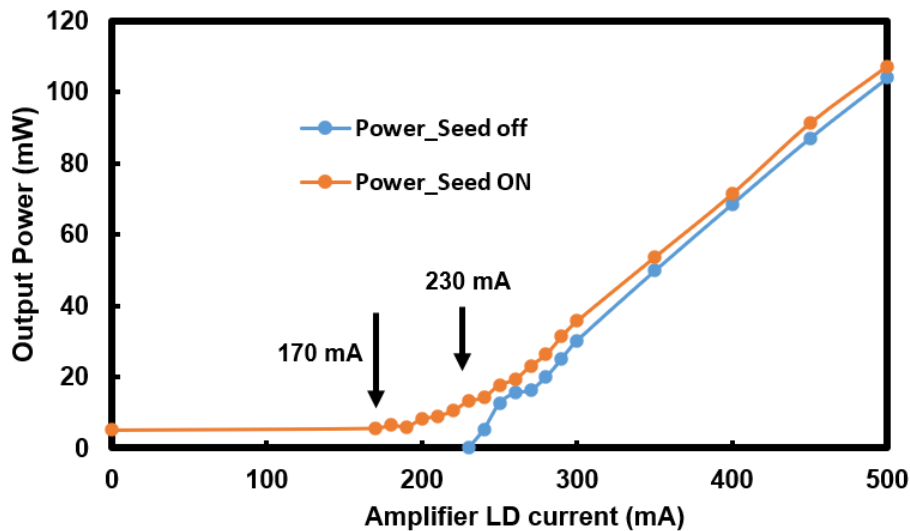


図 5. ダブルパス増幅特性

### 3.3. フォトリフラクティブ増幅器の構成

ビームスプリッターで外部共振器レーザーのビームを分割し、パワーの弱い反射光をシグナル波として二光波混合を行った。30 秒毎にシグナル波を遮り、回折したポンプ波のパワー変化を 15 分間フォトダイオードで観測した。厚さ 1 mm, Z cut および 厚さ 1 mm, X cut の結晶でも実験を行った。

図6に示すように、10分が経過するまで回折光のパワーは単調に増加しており、以降は緩やかに減少している。ポンプ波の回折光がシグナル波と同じ進行方向であることと、パワーが分オーダーで上昇していることから、二光波混合が発生できていることがわかった。

入射直前のポンプ波のパワーは17.9 mWであり、最大でも400  $\mu$ Wしか回折していないため、回折効率は2%と低い結果となった。

10分以降パワーが低下している理由としては、系の機械的安定性が駆動時間よりも悪く光強度も低いため、ビームの距離が半波長ずれてしまうことで結晶内の屈折率格子を打ち消してしまうことが原因と考えられる。

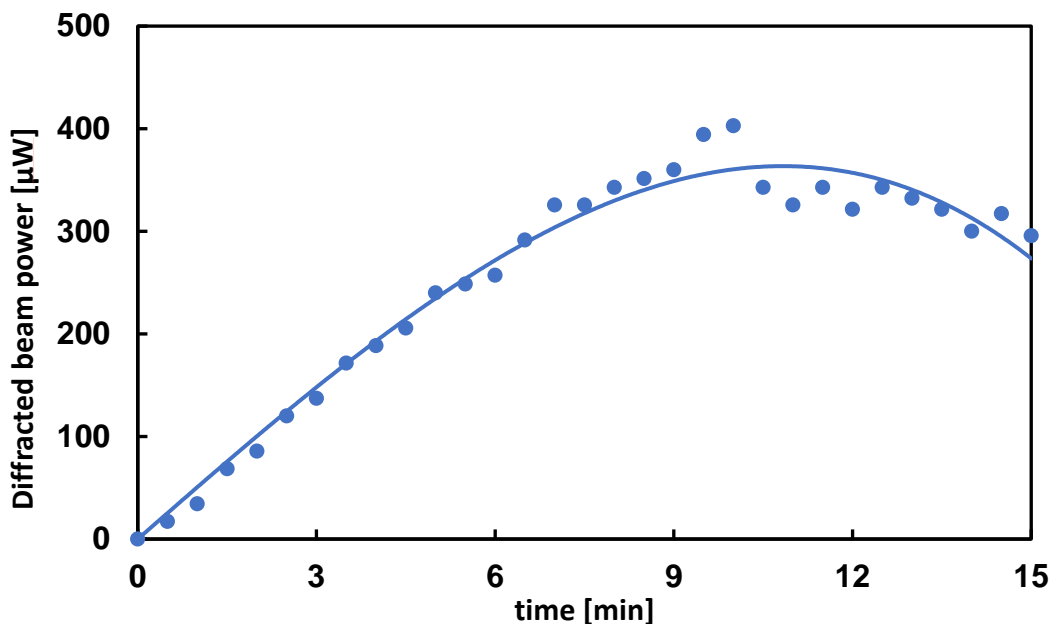


図 6. 二光波増幅出力の時間依存性

## まとめ

青緑色高出力ブロードエリア型半導体レーザーの空間モードの改善目的として、まず狭帯域発振器を設計し、さらにダブルパス増幅を試みたが増幅利得は得られなかった。次にフォトリフラクティブ増幅器を構築したが、光強度が足りず2%の回折に留まった。

今後の目標はダブルパス増幅器の改善と、ピンホールによる空間モード制御、および二光波混合による空間モード変換である。

## 参考文献

- [1] 真峯隆義, 本田和生, 米山修, 小嶋千秋, “超高 出力半導体レーザー”, レーザー研究, 16 巻, 3 号, 128-137, (1988).
- [2] 尾松孝茂, “フォトリフラクティブ位相共役鑑を用いた高出力半導体レーザーのビーム品質制御”, レーザー研究, 30 巻 4 号, 177-181, (2002).
- [3] 滝口由朗 ほか, “ブロードエリア型半導体レーザーの 横モード特性”, 光学, 37 巻 3 号, 172-177, (2008).
- [4] A. Brignon, J. P. Huignard, M. H. Garrett, and I. Mnushkina, "Spatial beam cleanup of a Nd:YAG laser operating at 1.06  $\mu$  m with two-wave mixing in Rh:BaTiO<sub>3</sub>," Appl. Opt. 36, 7788-7793 (1997)