

マルチモード高出力緑色半導体レーザーのモード制御とビーム結合

西岡研究室 校條 健太

1. はじめに

緑色レーザーはチタンサファイヤレーザー励起や、ディスプレイに用いられている。高出力、高ビーム品質の緑色レーザーの代表はNd系の固体レーザーであるが、大型で高価なものが多い。また、赤外線からの波長変換が必要であり効率が悪い。これら固体レーザーと比較して半導体レーザーは小型で安価なものも多く、直接発光のため効率が高い。青から緑色波長帯の半導体レーザー材料には、窒化ガリウムが利用されている。図1に示すように窒化ガリウムは屈折率が低く、フレネル反射率が小さい。このため、半導体活性層内部での光閉じ込めが弱く高出力化が進んでいない。図2に示したように、主なメーカーの緑色半導体レーザーの単一ストライプからの出力は最大でも1W程度にとどまっている。また、半導体レーザーは高出力化のために活性層の幅を波長の数百倍程度と大きくとる必要がある。その結果、活性層の幅方向では横マルチモードとなり、ビーム品質が悪い。そこで、我々の研究室では、固体レーザーに匹敵するような高出力かつ高ビーム品質の緑色半導体レーザー光源を、複数の半導体レーザーに外部共振器を付与しコヒーレントビーム結合することにより開発することを目指している。

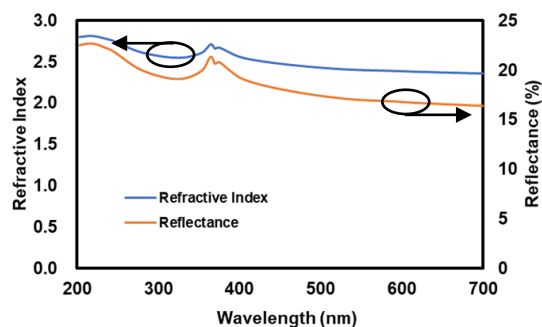


図1 窒化ガリウムの屈折率と反射率

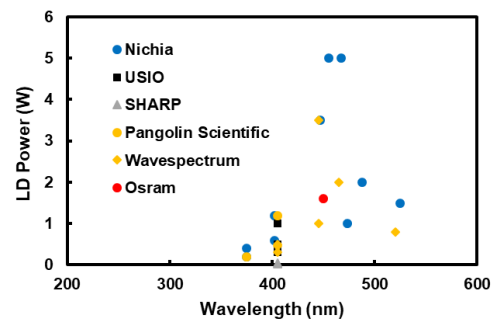


図2 各メーカーの半導体レーザー出力

2. ビーム結合の方式

レーザーをコヒーレントに結合する方法は大別して能動同期型と受動同期型の2種類がある。能動同期型は、レーザーの変調に電子回路などを用いて外部から制御を加えて結合する。精密に光を変調できることが利点だが、多数（8つ程度以上）の同時制御は困難となる。一方で、受動同期型は非線形媒質などに光を入射し、変調させることでレーザーそれぞれが相互に影響を与え結合する。電子回路などの外的要因を用いないため、高速で多数の結合に向いている。しかし、非線形光学の原理を利用する新しい手法を提案しなければならない困難がある。下の表1に結合方法をまとめた。

表1 コヒーレントビーム結合の方法

結合方法	能動型	受動型
原理	電子回路など	非線形媒質など
結合数	～8程度	8以上も可能

本研究の目的は、高出力かつ高ビーム品質の緑色半導体レーザーを開発することであるので、多段の結合が必要と考えている。そのため、8つ以上の半導体レーザーの結合ができる可能性がある受動同期型結合を利用した。受動同期型結合に用いられる光学素子として、ビームスプリッタ、偏光素子、フォトリフラクティブ結晶などが挙げられる。[1,2,3,4など]

最も基本的な結合素子はビームスプリッタを用いたものである。文献[1,2]の実験系を書き直し引用したものが下図3である。ビームスプリッタを用いた結合は原理が簡単であるが、光源の数マイナス1つのビームスプリッタが必要であり多数の結合に対しては光学系が煩雑になってしまう。本研究ではまず、最も基礎の原理実証を緑色半導体レーザーに対して行うことを初期目標とした。2つの半導体レーザーに対して1つのビームスプリッタを介してビーム結合を行った。

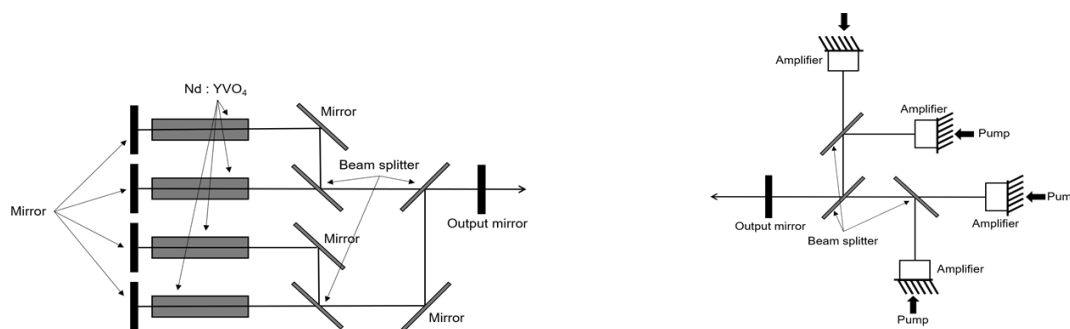


図3 ビームスプリッタを用いたビーム結合の実験系例

左が文献[1]、右が文献[2]

3. 外部共振器型結合実験の方法

ビームスプリッタを用いたビーム結合をするために、半導体レーザーに対して外部共振器を付与する必要がある。外部共振器は半導体レーザーの内部共振器損失よりも小さい共振器を外側に付与することで動作する。本研究で用いる緑色の半導体レーザーは端面の反射率が約 17% であり内部共振器の損失が大きい。出力鏡であるビームスプリッタの反射率（透過率も同じく 50%）を 50% と設計し内部共振器よりも損失の小さい外部共振器を付与することで、市販されているものに無反射コーティングなどをせずに外部共振器が付与できる。実際の外部共振器型結合実験の系を次の図 4 に示した。

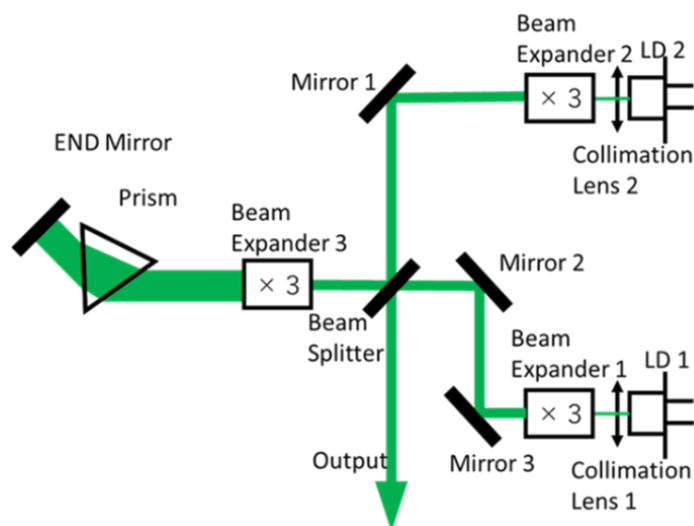


図 4 外部共振器型結合実験系

実験に使用した半導体レーザーは、中心波長 520 nm 、出力 1W 、駆動電流 1.6 A 、発振閾値電流 250 mA 、半導体活性層幅 150 μm のマルチモード緑色半導体レーザーである。半導体レーザーの駆動には、直流安定化電源と温度コントローラを用いた。外部共振器の中には波長選択用の分散プリズム（SF10 ガラス、一辺 2.5 cm）を挿入した。プリズムの分解能を大きくとるためにビームエキスパンダーを 2 段用いて元のビーム径の 9 倍となるように設計した。光線はすべて 3 インチの高さとなるようアライメントした。図 4 の LD1 の出射する光と LD2 の出射する光は外部共振器中のビームスプリッタを介してそれぞれに注入され、同一のビームとなって出射される。

4. 外部共振器型結合実験の結果

外部共振器が動作することを確認するために波長可変範囲を調べたものを図5に示した。発振閾値以下の電流 230 mA では、515 nm から 525 nm まで、電流 500 mA では、517 nm から 523 nm まで波長選択できることが分かった。

2つの半導体レーザーが結合するには、同軸のビームとなる必要がある。図6に示したものは発振閾値付近の結合後の出力 (P_{total}) と個々の出力 (PLD1、PLD2) とその数値を足し合わせたもの (PLD1+PLD2) である。 P_{total} の値が個々の出力の足し合わせよりも大きくなっているのが分かる。半導体内部の利得が飽和していない閾値付近では、相手の半導体レーザーの出力が種となった結果結合出力が増加したと考えられる。同軸ビームとなり互いに注入同期がされていると考えている。

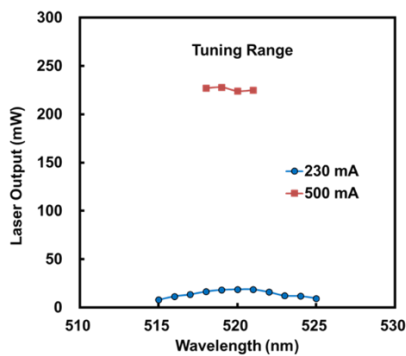


図5 波長可変範囲

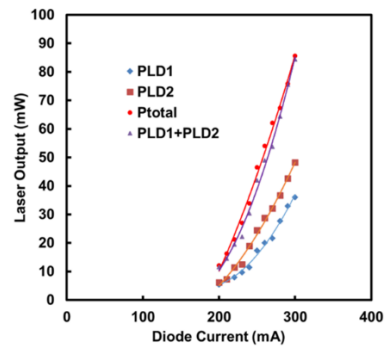


図6 発振閾値付近の結合出力

次に横モード品質をナイフエッジスキャンにより調べた。ビームスプリッタからの出力光を焦点距離 400 mm のレンズで集光したスポットをマイクロステージ上のナイフエッジで走査し透過パワーを測定し集光径を測定した。結果より集光径が回折限界の何倍になっているかを評価する因子である M 因子を計算した。それぞれの結果を図7、8に示した。

フリーランニングの時もほぼ基本モードで発振していることが分かった。フリーランニングのときと外部共振器ありの時に大きな変化はなかったが、駆動電流が 300 mA の時にはフリーランニングの時よりもビーム品質が改善した。

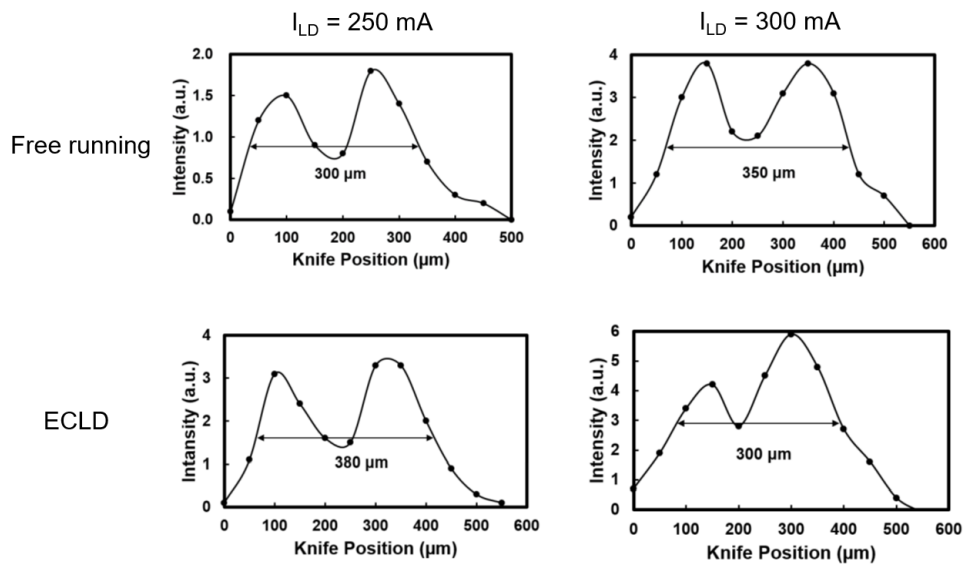


図7 ナイフエッジスキャンによるビーム形状測定結果

上：フリーランニング 下：外部共振器

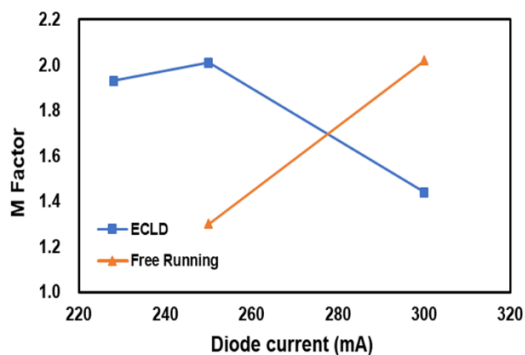


図8 フリーランニングと外部共振器の M 因子の比較

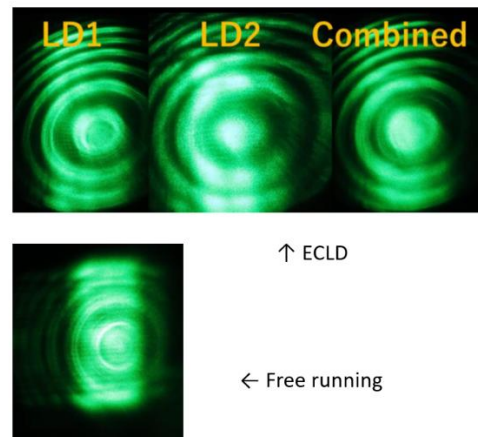


図9 エタロン (FSR=50 GHz、FWHM=1.67 GHz) のフリンジ

フリーランニング時と外部共振器動作時のスペクトルを比較するために間隔 3 mm のエアギャップエタロン (FSR=50 GHz、FWHM=1.67 GHz) でフリンジを観測した。外部共振器を付与したときには、各半導体レーザー個々と 2 つの結合後のフリンジが同じであった。フリーランニング時はコントラストが悪く見えた。外部共振器を動作したときにプリズムを介すのでスペクトルがきれいになったと予想している。

5. まとめ

高出力かつ高ビーム品質の緑色半導体レーザーをコヒーレントビーム結合により開発する最初の段階として、2つの半導体レーザーに対して共通の外部共振器を付与しビーム結合を行った。最も基本となるビームスプリッタを用いたビーム結合を実現できた。緑色半導体レーザーに対しては、外部共振器が優位に動作し波長可変もできることが分かった。また、緑色半導体レーザーは共振器内の光閉じ込めが弱く、高出力化された活性層幅が広い設計のものでもほとんど横基本モードで発振していることが分かった。今後はこの知見を活かしさらに多数の半導体レーザーを結合することを目指す。

6. 参考文献

- [1] Q. Peng, Z. Sun, Y. Chen, L. Guo, Y. Bo, X. Yang, and Z. Xu, "Efficient improvement of laser beam quality by coherent combining in an improved Michelson cavity," *Optics Letters*, **30**, 1485-1487 (2005)
- [2] D. Sabourdy, V. Kermene, A. Desfarges, M. Vampouille, and A. Barthelemy, "Coherent combining of two Nd:YAG lasers in a Vernier-Michelson-type cavity," *Applied Physics B*, **75**, 503-507 (2002)
- [3] R. Uberna, A. Bratcher, and B. G. Tiemann, "Coherent Polarization Beam Combination," *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*, **46**, 1191-1196 (2010)
- [4] Purnawirman, and P. B. Phua, "High power coherent polarization locked laser diode," *Optics Express*, **19**, 5364-5370 (2011)