

マルチモード青緑色半導体レーザーの不安定共振器によるモード制御

西岡研究室 吉田 知仁

1 序論

高出力な半導体レーザーは図 1(a)のような水平面の幅が広い導波路をもっている。このような半導体レーザーをブロードエリア型半導体レーザーという。ブロードリア型半導体レーザーは狭い導波路の半導体レーザーに比べて導波路内の光密度を小さくすることができるため高出力で発振させやすい。一方でこの広い導波路は図 1(b)のように斜め方向の光の往復が発生しやすく、これがマルチモード発振の要因となる。

[1]

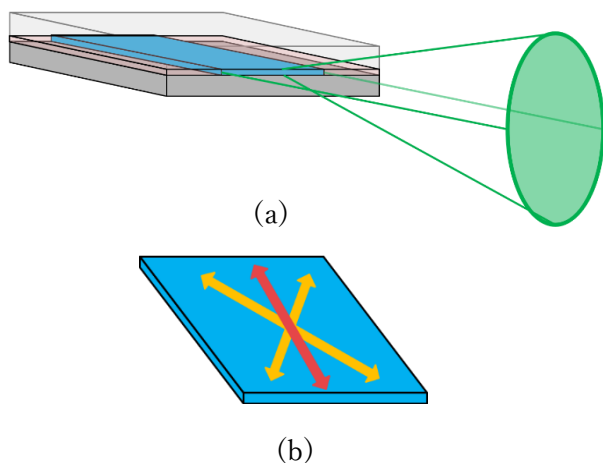


図 1 (a)ブロードエリア型半導体レーザーの構造図 青色部分が導波路で導波路の高さは $2\mu\text{m}$ 、幅 $50\sim$ 数百 μm (b)導波路中の光往復経路の模式図 赤矢印が基本 TEM00 横モード、黄色矢印が TEM10 横モードのもとになる往復

マルチモード発振すると集光性が悪化するが、不安定共振器を用いるとこれを改善できる。不安定共振器は往復回数が少なくなるので低利得レーザーでは発振が難しいが、半導体レーザーは十分に高利得であるため発振するはずである。そこで本研究では戻り光を利用し、半導体レーザーを不安定共振器に組み込んだ

光学系を用いてビームの集光性を向上させる。青緑色帯の半導体レーザー媒質である窒化ガリウムは屈折率が小さいため、戻り光の入力には適性がある。[2]

2 光共振器と横モード

2.1 安定共振器と横モード

一般的に二枚の鏡を用いた光共振器は図 2 のような光を完全に閉じ込めて増幅させる構造をもっている。光共振の構造によって光の往復パターンは異なり、これが出力されたときビーム断面に固有の模様を示す。これを横モードという。一般的な光学機器は基本横モードというビーム断面がガウス関数になっているビームに対応しているため、他のモード光が混ざっているとその分だけその分だけ制御ができなくなる。ビームを集光する際には最小スポット径よりも集光径が大きくなり集光性が悪化する。

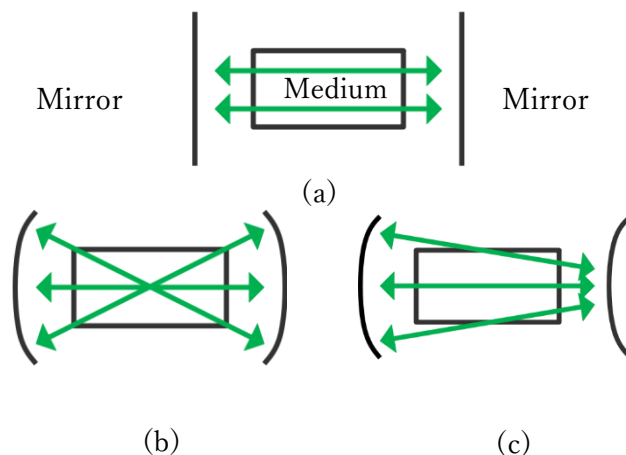


図 2 安定共振器の模式図 緑矢印は光の往復パターンを示している。(a)の往復パターンはミラーに垂直な基本横モードのみ (b)、(c)は基本横モード以外にも往復パターンがある。

2.2 不安定共振器

図のように共振器は光を閉じ込めないようにすると、光の往復は共振器外に向かう。このような共振器を不安定共振器といい、前述した完全に光を閉じ込める共振器を安定共振器という。不安定共振器は中心で往復する光の往復回数が多く、端で往復する光の往復回数が少ない。これにより共振器の端に比べて中心で往復する基本横モードの光が増幅されやすくビームの集光性が向上する。

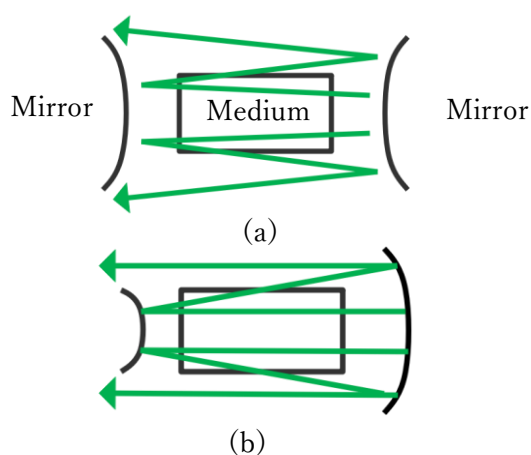


図 3 不安定共振器の模式図 緑矢印の光がレーザー媒質を往復しながら共振器の外に回折していることを示した。

3 不安定共振器による横モード制御実験

3.1 半導体レーザーの横モード制御するための不安定共振器の構成

半導体レーザーはその導波路の形状から横モードは高速軸ではシングルモード、低速軸でマルチモード発振する。横モード制御する際は低速軸のみの制御でよい凹面鏡ではなく凹面シリンドリカルミラーを用いた。以下に不安定共振器に用いた光学器具を示す。

- 青色半導体レーザー 450nm
L450P1600MM(Thorlabs)
- コリメートレンズ 焦点距離 4 mm 352610-A(Thorlabs)
- シリンドリカルミラー 1 焦点距離 100 mm

CCM254-100-P01(Thorlabs)

- シリンドリカルミラー 2 焦点距離 200 mm
CCM254-200-P01(Thorlabs)

3.2 半導体レーザーの横モード制御するための不安定共振器の原理

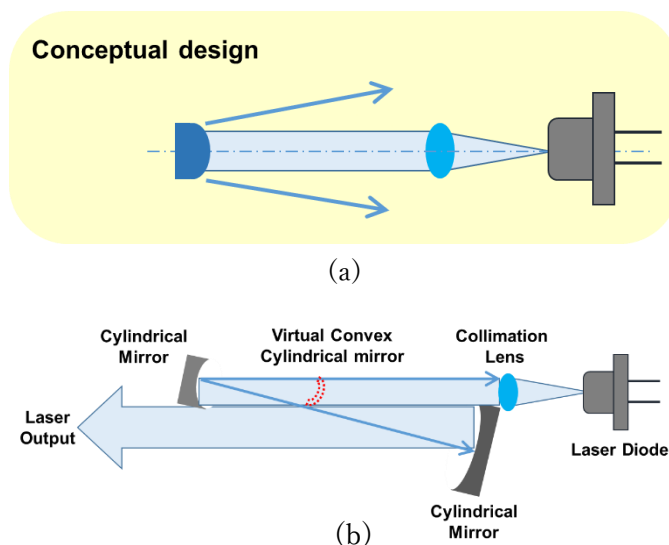


図 3 本研究で設計した不安定共振器 (a)はコンセプトデザイン (b)は(a)の改良系

本研究で設計した不安定共振器を図 3 に示した。図 4(a)のように不安定共振器を組むと凸面シリンドリカルミラーの入手性が悪いため特注になる。また不安定共振器の回折光をコリメートするために穴の開いた凹面シリンドリカルミラーを用意する必要がある。そこで図 4(b)のように凹面シリンドリカルミラーを不安定共振器のように配置して、またシリンドリカルミラーの端で反射させることで回折光を特殊な形状のミラーを使わないでコリメートすることができる。

3.3 ビーム径測定方法

ビーム径は高出力光に対応するためにナイフエッジスキャンを行う。ナイフエッジ法はビームをナイフのような鋭いもので一部を遮ってゆきその出力を測定する。この遮ったナイフの移動距離と出力を利用してビーム径を求めることができる。

ビーム径を求めるにあたって本測定ではガウシアンビーム ($f(x) = e^{-x^2}$)の強度分布における最大出力の e^{-2} となる二点の距離を径とした。これは本測定がビーム質を改善することにより、品質の基準となるガウシアンビームの径が一般的にこの値を用いて測定されるためである。図はガウス関数 $f(x) = \exp(-x^2)$ であるが、最大出力の e^{-2} となるのは $x = \pm\sqrt{2}$ となるときであるためこのときビーム径は $2\sqrt{2}$ である。

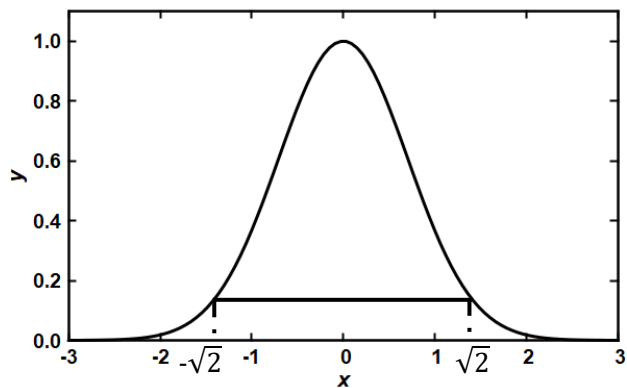


図 4 ガウス関数 $f(x) = \exp(-x^2)$
ビーム強度分布と同形

ナイフエッジスキャンではガウス関数の積分系が取れるため、測定結果は図 5 のようなデータになる。このデータから e^{-2} 径を求めるとき、ガウス積分の値を計算する。積分範囲 $[-a, a]$ のときのガウス積分の値は次式のようにになる。

$$g(a) = \int_{-a}^a f(x) dx = 2 \int_0^a e^{-x^2} dx$$

$$= \sqrt{2} \arctan a$$

これは出力の比率であるため、係数を求める。 $g(a)$ がとりうる最大の大きさ $a = \infty$ のときと $a = \sqrt{2}$ のときの比はビーム径の出力とできる。

$$\frac{g(\sqrt{2})}{g(\infty)} = 0.7798$$

より、ナイフエッジ法で求めるべき距離は全光出力の $1 - (1 - 0.7798)/2 = 89\%$ 、 $(1 - 0.7798)/2 = 11\%$ となる二点となり、これが強度分布のピーク値の e^{-2} 倍になるビーム径である。

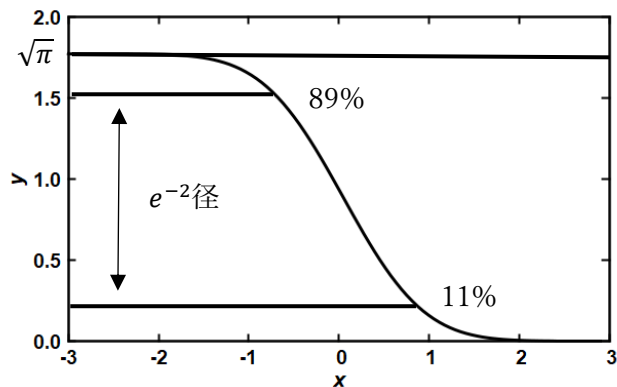


図 5 ガウス積分系 $g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} dx$

ナイフエッジスキャン結果と同形

3.4 回折限界スポット径

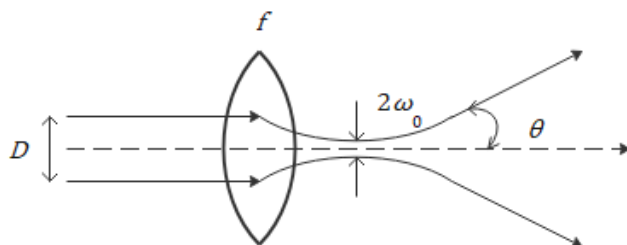


図 6 回折限界

回折限界スポット径とはガウシアンビームを集光したときの最小径のことである。ガウシアンビームではないビームを集光するとこの値より最小径が大きくなるため、集光したときの最小径が小さいほどガウシアンビームに近い理想的なビームといえる。この回折限界スポット径を $2\omega_0$ 、レンズの開口径を D 、レンズの焦点距離を f 、ビーム拡がり角を 2θ とする。このとき θ はガウシアンビームであることから次式がわかっている。

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}$$

また θ が十分に小さいことにより

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{D}{2f} \quad \text{が導出できるので}$$

回折限界スポット径 $2\omega_0$ を求める。

$$2\omega_0 = \frac{4f\lambda}{D\pi}$$

4 半導体レーザーの不安定共振器による低速軸の横モード制御実験結果

4.1 低速軸の横モード制御

駆動電流 200mA、焦点距離 $f = 480\text{mm}$ のときの不安定共振器あり、なしでナイフエッジスキャンした。

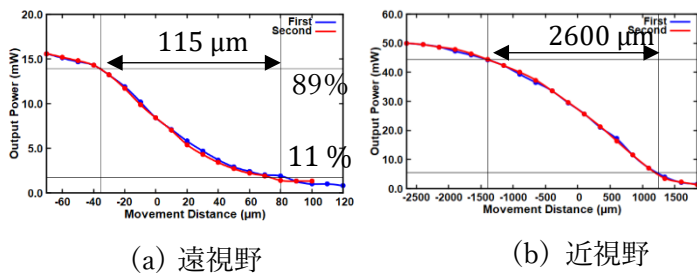


図 7 不安定共振器ありのビーム径

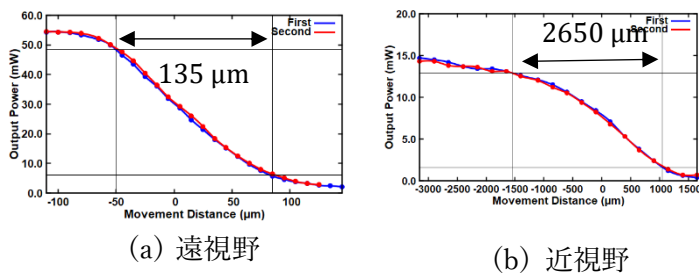


図 8 不安定共振器なしのビーム径

表 1 ビームの集光性比較

	(遠視野ビーム径)/ (回折限界スポット径)
不安定共振器あり	1.1
不安定共振器なし	1.3

図 7、8 から遠視野ビーム径 $2\omega_0$ と近視野ビーム径 D を求めて回折限界スポット径を計算した。集光性の基準として遠視野ビーム径から回折限界スポット径を割ったものを使用することにした。不安定共振器を用いると集光性が向上したことを確認できた。

4.2 出力特性

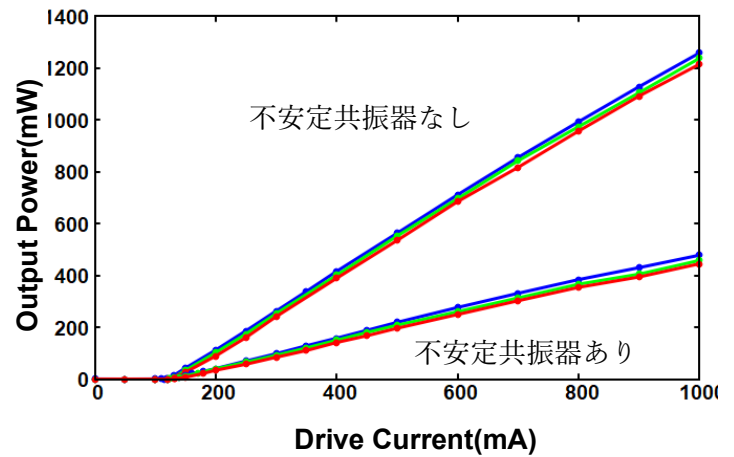


図 9 出力特性

不安定共振ありとなしでは出力がどう変化するかを調べ図 9 に示した。不安定共振器を利用した方は出力効率はかなり悪くなっている。この原因として考えられるのは戻り光である。窒化ガリウムは青緑帯で屈折率の小ささを利用して光を戻しているが、屈折率が小さいため戻り光が反対側の端子面から漏れている可能性がある。よっては戻り光の量を減らすようにミラーの曲率半径を変えれば出力改善の見込みはある。

5 結論

不安定共振器により横モード制御を行うことでブロードエリア型半導体レーザーの集光性を向上させることができた一方で、出力効率は大幅に低下した。この出力効率低下は戻り光が消滅することで発生していると考えられるので、集光性向上の最低限の量の戻り光を見つけてシリンドリカルミラーの最適な曲率半径を調べる必要がある。

参考文献

- [1] A. E. Siegman, "LASERS," University Science Books, (1986).
- [2] J. Lingrong, L. Jiaping, T. Aiqin, C. Yang, Li Zengcheng, Z. Liqun, Z. Shuming, L. Deyao, M. Ikeda and Y. Hui, "GaN-based green laser diode," *Journal of Semiconductors*, **37**, p.111001, (2016).