

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月23日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560043

研究課題名（和文）ロイドのミラー干渉を利用した半導体レーザーのビーム整形に関する研究

研究課題名（英文）Study on beam shaping of laser diodes using Lloyd's mirror interference

研究代表者

福嶋 文浩（TAKEHIRO FUKUSHIMA）

岡山県立大学・情報工学部・准教授

研究者番号：00264911

研究成果の概要（和文）：発振波長やビーム拡がり角が異なる3種類の半導体レーザーに対して、研究代表者が提案する新しいビーム整形方法を適用し、真円ビームを得るための条件を明らかにした。また、半導体レーザーの発振特性がビーム形状に与える影響を調べた。さらに、整形したビームの品質因子を測定し、高品質なビームが得られることを示した。最後にビーム整形方法の一つの応用例として、半導体レーザーと光ファイバの結合系を提案し、結合効率を見積もった。

研究成果の概要（英文）：We applied our beam shaping method to three kinds of laser diodes which have different lasing wavelength and different beam divergence angle. Elliptical beams emitted from the laser diodes were successfully transformed to nearly circular beams using a single substrate mirror. The dependence of the beam shape on the lasing characteristics was investigated numerically. Moreover beam quality factor of the tailored beam was observed and found to be as good as 1.24. We proposed an optical coupling system between a laser diode and an optical fiber based on the beam shaping method and estimated the coupling efficiency.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1800,000	540,000	2340,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：半導体レーザー，ビーム整形，ロイドのミラー干渉，ビーム品質，遠視野像

1. 研究開始当初の背景

半導体レーザーは、小型、堅牢、低消費電力という他のレーザーには見られない数々の利点を有している。そのため、高速光ファイバ通信や高密度記録光ディスク装置の光源などに応用されており、今日の高度情報化社会を支える重要な光デバイスに位置付けられ

ている。

半導体レーザーのほとんどの応用分野において、真円のビームが要求されるが、一般的な半導体レーザーは、活性層に垂直な方向と平行な方向で光の閉じ込め方法が異なるため、楕円のビームを出力する。そのため、半導体レーザーの出力ビームを真円に整形する方法

が検討されている。ビーム整形方法は、大きく2つに分類できる。一つは、半導体レーザーの導波路構造を最適化することにより、レーザーから直接真円に近いビームを取り出す方法である。具体的には、活性層に垂直な方向の光閉じ込めを小さくして垂直方向のビーム拡がり角を小さくする方法やストライプ幅を狭めることにより、水平方向のビーム拡がり角を大きくする方法が取られている。しかし、これらの方法は、しきい値電流が増加したり、端面の光学損傷レベルが低下するなど、レーザーの特性が劣化するという問題点がある。もう一つの方法は、半導体レーザーの外部でビーム整形を行なう方法である。アナモルフィックプリズムペアを用いる方法や2つの円柱レンズを組み合わせて用いる方法などが提案されている。しかし、これらの方法は、システムが大型になるという点と高価な光学部品が必要になるという点が問題になる。

このような背景のもと、我々は、1枚の半導体基板を用いた簡単かつコンパクトなビーム整形方法を提案するとともに市販の半導体レーザーを用いて楕円の出力ビームを真円に整形できることを実証してきた。

2. 研究の目的

本研究では、次の4点を主な目的とした。

- (1) 発振波長やビーム拡がり角が異なる3種類の半導体レーザーに対して、我々が提案するビーム整形方法を適用し、真円ビームを得るための条件を明らかにする。
- (2) 半導体レーザーの発振波長の変化や縦モードの多モード化がビーム形状に与える影響を調査する。
- (3) ビームの品質因子を測定することにより、整形されたビームの品質を定量的に評価する。
- (4) 本ビーム整形方法を応用した半導体レーザーと光ファイバの光結合系を提案するとともに、結合効率を見積もる。

3. 研究の方法

(1) 真円ビームを得るための条件の調査

まず、発振波長とビーム拡がり角が異なる3種類のレーザーを準備した。一つは、640 nm帯のレーザーディスプレイ用赤色半導体レーザーであり、ビーム拡がり角は、垂直方向が 15.6° 、水平方向が 7.1° である。もう一つは、808 nm帯の光励起用高出力半導体レーザーであり、ビーム拡がり角は、垂直方向が 15.4° 、水平方向が 7.4° である。最後は、780 nm帯のレーザープリンタ用半導体レーザーであり、ビーム拡がり角は、垂直方向が 24.7° 、水平方向が 8.0° である。

次に、図1に示すように半導体レーザーの活性層の下に表面を鏡面に研磨したGaAsの基

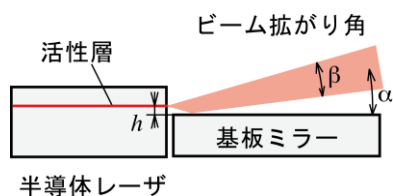


図1 ビーム整形方法の説明図

板ミラーを設置する。すると、半導体レーザーの活性層から直接伝搬したビームと基板ミラーの表面で反射したビームがお互いに干渉して、一方向に指向性の強いビームが形成される。このとき形成されるビームの形状は、半導体レーザーの垂直方向のビーム拡がり角や基板ミラーの表面から活性層までの高さ h に依存する。そこで、3種類のレーザーに対して、活性層の高さを変化させて遠視野像の測定を行い、真円ビームが得られる条件を調べた。

次に、実験結果を検証するために、数値計算を行なった。まず、半導体レーザーの近視野像をガウシアンビームで近似して、Huygens積分を用いて整形ビームの遠視野像を計算した。ここで、基板ミラーによる反射の効果は、活性層の虚像を半導体レーザーの基板の内部に設け、この虚像から伝搬するビームを計算に取り入れることにより表した。

(2) レーザーの発振特性がビーム整形に与える影響の調査

半導体レーザーは、温度や注入電流の変化に伴って、発振波長が数 nm 程度変化する。また、レーザーによっては、複数の波長で発振する縦多モード発振が見られる。そこで、半導体レーザーの発振波長が 5 nm 変化したときに整形されたビームパターンがどのように変化するか数値計算により調べた。さらに、波長 640 nm の縦単一モード発振の場合と中心波長 640 nm、縦モード間隔 0.3 nm の 11 個の縦モードが同時に発振した場合のビームパターンを比較した。

(3) 整形されたビームの品質評価

半導体レーザーの応用分野では、ビームが真円であると同時に、高いビーム品質が要求される。ビーム品質を定量的に表す指標としてビーム品質因子がしばしば用いられる。ビーム品質因子は、回折限界ビームであるガウシアンビームからの品質の低下を表した因子であり、ガウシアンビームでは、最小値 1 をとり、ビーム品質が低下するにしたがって大きな値を示す。

まず、最初に数値計算によって、活性層に垂直な方向のビーム品質因子を求めた。具体的には、半導体レーザーの近視野像をガウシアンビームで近似し、Huygens積分を用いて遠視野像を求め、ビームの拡がり角 Q を計算した。次に、1次の干渉ビームに対して、逆伝搬を計算し、ビームウエストにおけるビーム

直径 d_0 を求めた。最後に、ビーム品質因子 M^2 を次式で見積もった。

$$M^2 = \frac{\rho}{4l} d_0 Q \quad (1)$$

ただし、 λ はレーザー光の波長である。

次に、実験により、整形されたビームの品質因子を測定した。具体的には、半導体レーザーの前に鏡面の半導体基板を設置し、真円に近いビームが得られるように基板の高さを調整した。このようにして整形したビームをレンズで集光して、 M^2 評価システム (Melles Griot 13SKP703-M2) を用いてビーム形状の観測と M^2 の測定を行なった。

(4) 半導体レーザーと光ファイバの結合系の提案

本ビーム整形方法の一つの応用例として、図 2 に示した単一の屈折率分布型レンズを用いた半導体レーザーと光ファイバの結合系を提案するとともに、計算により結合効率を見積もった。結合効率は、次の手順で計算した。まず、半導体レーザーの出力ビームの光分布を Huygens 積分で計算し、屈折率分布型レンズ入射端面における電界分布を求めた。次に、光ファイバのモードフィールドをガウシアン分布で近似して、像変換の公式を用いて屈折率分布型レンズの入射端面における電界分布を求めた。最後に、半導体レーザーの電界分布と光ファイバのモードフィールドの重ね合わせ積分を行なうことで、結合効率を求めた。

更に実験により、図 3 に示した光結合系の結合効率を評価した。ここでは、入手が容易な半導体レーザー用のコリメートレンズと集光レンズを用いた。半導体レーザーの出力パワー、ビーム整形後の光パワー、コリメートレンズ通過後の光パワー、光ファイバに結合した光パワーをそれぞれ測定し、結合効率を求めるとともに、損失の原因について考察を行なった。

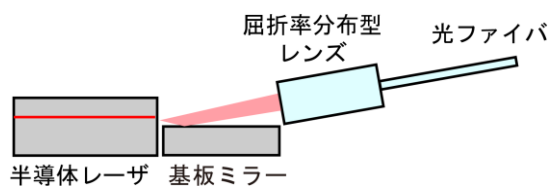


図 2 提案を行なった半導体レーザーと光ファイバの結合系

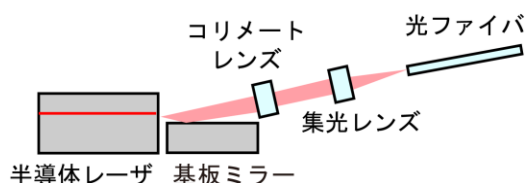


図 3 実験を行なった半導体レーザーと光ファイバの結合系

4. 研究成果

(1) 真円ビームを得るための条件の調査

本研究では、3種類の半導体レーザーに対してビーム整形を行い、真円ビームを得るための条件を明らかにした。ここでは、紙面の制限から、640 nm 帯の赤色半導体レーザーの実験結果についてのみ述べる。

図 4 に実験に使用した赤色半導体レーザーの遠視野像を測定した結果を示す。活性層に垂直な方向のビーム拡がり角は 15.6° 、平行な方向のビーム拡がり角は、 7.1° であり、ビームアスペクト比 2.2 の楕円ビームが出力された。図 5 は、半導体レーザーの活性層の下部に表面を鏡面研磨した GaAs 基板を設置し、基板表面から活性層までの高さ h を変化させて垂直方向の遠視野像を測定した結果を示している。(a) から (d) の順番に h が減少している。図 5 (a) から、活性層の高さが高い時には、1 次の干渉ビームのみならず、複数の高次の干渉ビームが観測されることがわかる。また、1 次の干渉ビームの拡がり角が 1.7° と小さな値を示している。この状態から、 h を小さくすると、図 5 (b), (c) に示すように 1 次の干渉ビームの拡がり角が大きくなり、高次の干渉ビームの数が減少する。さらに、 h を小さくすると、やがて図 5 (d) に示すようにほぼ単峰性のビームを得ることができる。

図 6 は、図 5 に示した実験結果に対応する計算結果を示している。実験で観測された遠視野像の振る舞いがうまく再現できていることがわかる。ただし、 h が小さくなると実験で観測された遠視野像のピークの高さが理論値に比べて低くなっていることがわかる。

図 7 (a) は、活性層の高さと 1 次の干渉ビームのビーム拡がり角の関係を表したグラフを示している。この図から、活性層の高さを低くするとビーム拡がり角が増加することがわかる。図 7 (b) は、 h を $0.9 \mu\text{m}$ に設定したときの垂直方向の遠視野像を表している。ビーム拡がり角は 7.0° であり、水平方向のビーム拡がり角 7.1° とほぼ等しい値となり、真円のビームが得られることが示された。今回、発振波長が 808 nm の光励起用半導体レーザーや垂直方向のビーム拡がり角が 24.7° と大きいレーザープリンタ用半導体レーザーに対しても同様の測定と計算を行い、真円のビームが得られる条件を求めた。

(2) レーザの発振特性がビーム整形に与える影響の調査

半導体レーザーの発振波長の変化や発振モードの多モード化が整形したビームに与える影響を数値計算により調べた結果について述べる。

まず、計算に用いたパラメータについて説明を行なう。レーザー端面におけるビームス

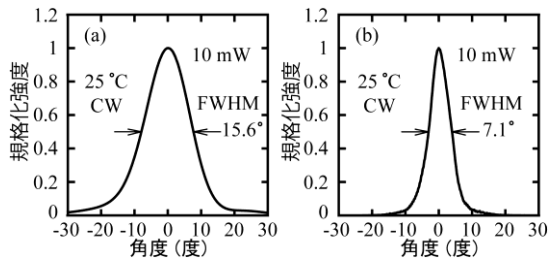


図4 半導体レーザの遠視野像
(a) 垂直方向, (b) 水平方向

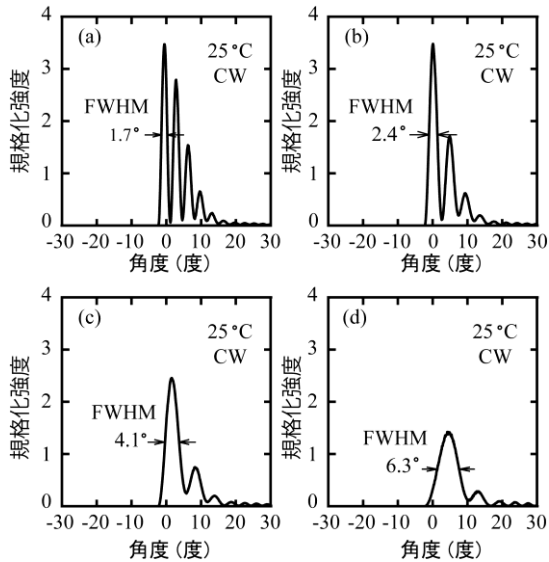


図5 整形されたビームの垂直方向の遠視野像 (実験結果) (a)から(d)の順に活性層の高さを低く設定している

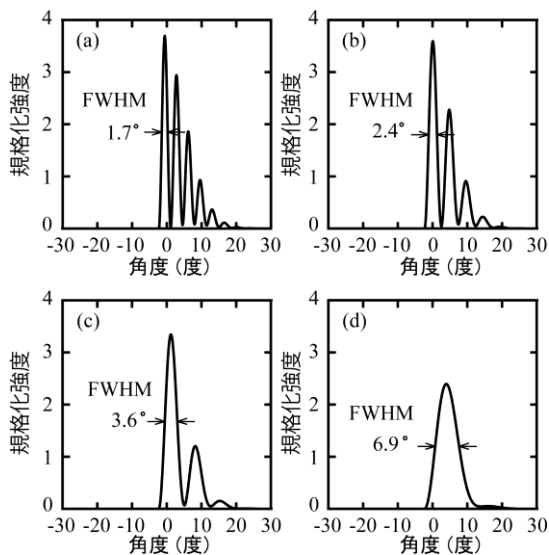


図6 整形されたビームの垂直方向の遠視野像 (計算結果) (a) $h=5.4 \mu\text{m}$, (b) $h=3.8 \mu\text{m}$, (c) $h=2.5 \mu\text{m}$, (d) $h=1.2 \mu\text{m}$

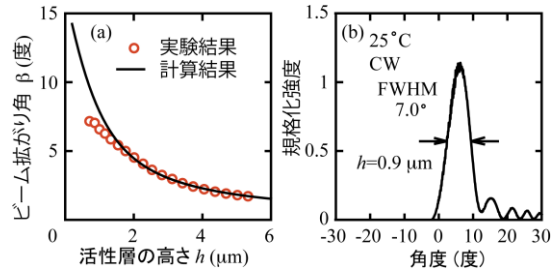


図7 (a)活性層の高さとビーム拡がり角の関係, (b)活性層の高さを最適化したときの垂直方向の遠視野像

ットサイズは、垂直方向で $0.84 \mu\text{m}$ 、水平方向で $1.76 \mu\text{m}$ に設定し、発振波長は、 640 nm とした。このとき、半導体レーザの出力ビームの拡がり角は、水平方向で 7.8° 、垂直方向で 16.2° となり、ビームアスペクト比 2.1 の楕円ビームが得られる。ここで、基板表面から活性層までの高さを $1.0 \mu\text{m}$ に設定すると、垂直方向のビーム拡がり角は、約 7.8° となり、真円のビームが得られる。

図8は、発振波長を 637 nm から 642 nm まで変化させた時の整形されたビームの角度 α と拡がり角 β を計算した結果を示している (α と β については、図1を参照)。ビームの角度とビームの拡がり角は、発振波長の増加とともに単調に増加するが、 5 nm の波長変化によるビーム角度と拡がり角の変化は、それぞれ 0.05° と 0.06° と見積もられ、十分小さい値であることが明らかになった。

次に、波長 640 nm の縦単一モード発振のとき、中心波長 640 nm 、縦モード間隔 0.3 nm 、縦モード数 11 個の縦多モード発振のときのビーム形状を計算し、比較した。なお、多モード発振のときのビームパターンは、各波長で計算したビームパターンを同じ強度でインコヒーレントに重ね合わせて求めた。その結果、ビーム角度やビーム拡がり角の違いは、 0.0002° 以下と更に小さいことが明らかになった。

以上の計算結果から、通常の動作で想定される発振波長の変化や多モード化であれば、整形されたビームの形状はほとんど影響を

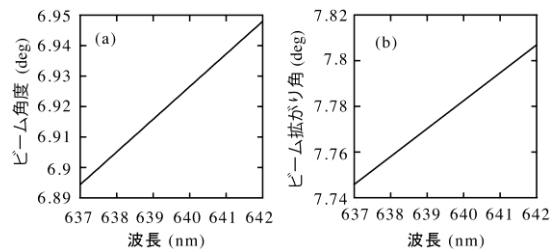


図8 発振波長とビーム形状の関係 (a) ビーム角度と波長の関係, (b) ビーム拡がり角と波長の関係

受けず、ビームの真円度もほぼ1に保たれることが示された。

(3) 整形されたビームの品質評価

図9は、遠視野像の強度分布を2次元的に表した計算結果を示している。なお、計算において、半導体レーザーのパラメータは、図8の計算と同じ値を用いた。活性層の高さ h が $4.8 \mu\text{m}$ と大きい場合は、垂直方向に高次の干渉ビームが現れ、1次の干渉ビームの垂直方向の拡がり角は小さい。この状態から、 h を小さくすると、高次の干渉ビームの数が減少し、1次の干渉ビームの拡がり角が次第に大きくなる。 h を $1.2 \mu\text{m}$ まで小さくすると真円に近いビームが得られている。そこで、 $h=1.2 \mu\text{m}$ の条件において、垂直方向のビーム品質因子を計算した。

垂直方向のビームの拡がり角 θ は、 0.182 ラジアン、ビームウエストにおけるビーム直径 d_0 は $4.85 \mu\text{m}$ と見積もられた。(1)式より、垂直方向のビーム品質因子 M^2 は、 1.08 と見積もられた。理想的なガウシアンビーム ($M^2=1.00$) に比べるとわずかに劣化が見られるが、高いビーム品質が得られることが数値計算で示された。

次に、実験により、ビーム形状の観測とビーム品質因子の測定を行なった。実験には、発振波長 640 nm 帯の赤色半導体レーザーを使用した。垂直方向と水平方向のビーム拡がり角は 15.3° と 9.8° であり、ビームアスペクト比は、 1.6 と見積もられた。次に、表面を鏡面に研磨した GaAs 基板をステージに取り付け、図1のように半導体レーザーの活性層の下に配置し、ビームアスペクト比が1になるように基板の高さを調整した。図10は、整形されたビームをレンズで集光してビーム形状を観測した結果を示している。ほぼ真円の単峰性ビームが得られている。次に、レンズで集光した光をビーム品質因子の測定システム (Melles Griot, 13SKP703-M2) に導入して、活性層に垂直な方向のビーム品質因子を測定した。図11は、伝搬距離とビーム幅の関係を示している。ビームウエストにおけるビーム幅 d_0 とビーム拡がり角からビーム品質因子 M^2 は、 1.24 と見

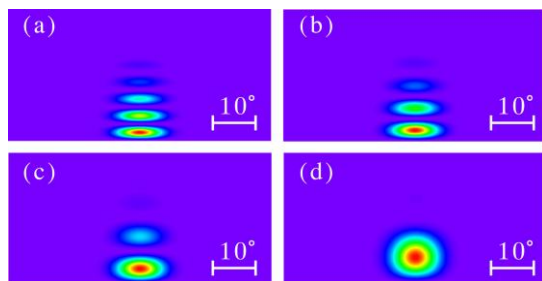


図9 整形されたビームの遠視野像
(a) $h = 4.8 \mu\text{m}$, (b) $h = 3.6 \mu\text{m}$, (c) $h = 2.4 \mu\text{m}$,
(d) $h = 1.2 \mu\text{m}$

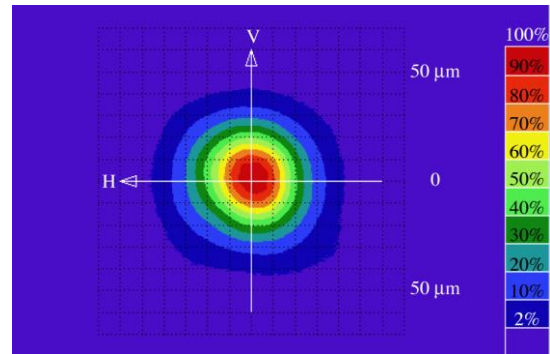


図10 整形されたビームの光強度プロフィール

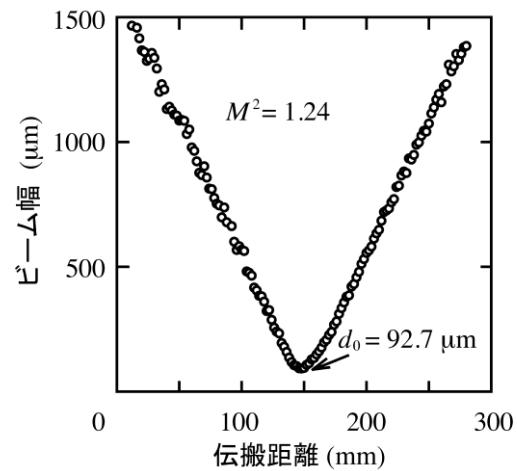


図11 ビーム幅と伝搬距離の関係

積もられた。数値計算で見積もった値に比べるとやや大きい、比較的良好な値が得られた。

(4) 半導体レーザーと光ファイバの結合系の提案

図2に示すように基板ミラーで整形を行なった真円ビームを一つの屈折率分布型レンズを用いて光ファイバへ結合させる光結合系を提案するとともに、数値計算により、結合効率を見積もった。計算において、半導体レーザーの発振波長は、 640 nm とし、レーザー端面における垂直方向と水平方向のビームスポットサイズは、 $0.84 \mu\text{m}$ と $1.76 \mu\text{m}$ とした。屈折率分布型レンズについては直径 2 mm の SLW (Selfoc Lens Wide)タイプを仮定した。また、光ファイバについては、モードフィールド径 $4 \mu\text{m}$ の単一モード光ファイバを仮定した。

レーザーとレンズ間の距離を変化させて結合効率を計算し、実際に配置可能で結合効率ができるだけ高くとれるようにレーザーとレンズ間の距離を 1.0 mm に設定した。次に、レンズピッチに対する最適化を行い 0.428 という値を得た。レンズの配置角度を最適化することにより、整形後のビームが光ファイバに結合する割合が約 95% と見積もられた。

次に、図3に示した光結合系を構成して、結合効率を評価した。実験には、波長640 nm帯の赤色半導体レーザー（活性層に垂直な方向と平行な方向のビーム拡がり角は、 15.6° と 9.7° ）を使用し、半導体基板には、鏡面に研磨したGaAs基板を使用した。また、コリメートレンズと集光レンズには、焦点距離14.5 mm, N.A. 0.276のレンズを使用した。さらに、光ファイバには、コア径 $62.5\mu\text{m}$ のグレーデッドインデックス型マルチモード光ファイバを使用した。光ファイバに結合できた光パワーは、半導体レーザーの光出力の33%であり、大きな損失が生じた。

損失の原因を調べたところ、最も大きな損失は、ビーム整形によるパワーの低下であり、約46%を占める。ここで、基板ミラーの反射率を100%と仮定した数値計算では、ビーム整形によるパワーの低下は、約6%と見積もられたので、残りの40%の損失は、半導体レーザーと基板ミラーの隙間による損失や基板ミラーでの光の吸収による損失であると推測される。次に大きな損失は、14.5%の光ファイバの結合損失である。これは、光ファイバ端面に無反射コートが施されていないことやレンズ系のパラメータが十分に最適化されていないことが主な原因であると考えられる。6.5%の残りの損失は、コリメートレンズにおける損失と考えられる。

以上の結果より、結合効率を高めるには、ドライエッチング技術を用いて半導体レーザーと基板ミラーをモノリシックに製作するとともにレンズ系を最適化する必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

- ① T. Fukushima, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda, Quality factor of circular laser diode beam tailored by optical interference, *Opt. Rev.*, Vol. 19, pp. 328-331, 2012. 査読有
- ② T. Fukushima, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda, Laser diode beam shaping by optical interference, *Opt. Rev.*, Vol. 18, pp. 287-292, 2011. 査読有

〔学会発表〕（計10件）

- ① 福嶋丈浩, 干渉を利用した半導体レーザーと光ファイバの結合系の評価, 第60回応用物理学学会春季学術講演会, 2013年3月27日, 神奈川工科大学
- ② 福嶋丈浩, ロイドのミラー干渉を利用した半導体レーザーと光ファイバの結合系, 第73回応用物理学学会学術講演会, 2013年9月12日, 愛媛大学
- ③ 福嶋丈浩, Lloydのミラー干渉で整形さ

れたLDビームの品質因子測定, 第59回応用物理学関係連合講演会, 2012年3月18日, 早稲田大学

- ④ 福嶋丈浩, ロイドのミラー干渉で整形された半導体レーザービームの特性, レーザー学会第423回研究会報告, 2011年12月26日, 大阪府立大学中之島サテライト
- ⑤ 葛原優, 干渉を利用した半導体レーザービーム整形の発振特性依存性, 第13回IEEE広島支部学生シンポジウム, 2011年11月12日, 13日, 広島大学
- ⑥ 福嶋丈浩, ロイドのミラー干渉を利用したLDビーム整形の発振特性依存性, 2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011年9月16日, 北海道大学
- ⑦ T. Fukushima, Quality factor of laser diode beam tailored by Lloyd's mirror interference, CLEO Pacific Rim 2011, 2011年8月29日, オーストラリア, シドニー
- ⑧ 福嶋丈浩, 干渉を利用した高アスペクト比楕円ビームLDのパターン整形, 第58回応用物理学関係連合講演会, 2011年3月24日, 神奈川工科大学（震災のため講演会は中止になったが発表は成立した。）
- ⑨ T. Fukushima, Tailoring the beam profile of an 808-nm pump laser diode using Lloyd's mirror interference, *Frontiers in Optics 2010*, 2010年11月26日, アメリカ合衆国, ロチェスター
- ⑩ 福嶋丈浩, ロイドのミラー干渉を用いた808nm励起用半導体レーザーのビーム整形, 第71回応用物理学学会学術講演会, 2010年9月14日, 長崎大学文教キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福嶋 丈浩 (FUKUSHIMA TAKEHIRO)
岡山県立大学・情報工学部・准教授
研究者番号：00264911

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし