

平成21年6月12日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560037

研究課題名（和文） 2次元半導体レーザと光ファイバの光結合系の設計・製作

研究課題名（英文） Design and fabrication of optical coupling system between 2-D laser diodes and optical fibers

研究代表者

福嶋 文浩（FUKUSHIMA TAKEHIRO）

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：2次元半導体レーザは、従来のストライプ構造の半導体レーザに比べて多彩な発振モードを示す。本研究では、2次元半導体レーザから出力される複数のビームをそれぞれ光ファイバに結合させるための光結合系を設計した。最適な光学部品を用いることにより、マルチモード光ファイバで21.6%、シングルモード光ファイバで9.6%の結合効率が得られることを数値計算により明らかにした。さらに、市販の光学部品を用いて光結合系の試作を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2080,000

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：2次元半導体レーザ、光ファイバ、光結合系

## 1. 研究開始当初の背景

半導体レーザは、小型、堅牢、低消費電力という他のレーザには見られない様々な利点を有している。そのため、高密度記録光ディスク装置や高速光ファイバ通信、さらに、光計測装置の光源に応用されており、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づけられている。

従来の半導体レーザには、狭い導波路に光を閉じ込める1次元的なレーザ共振器が用いられている。このような半導体レーザは、安定なビームを1方向に出力するという大きな利点を持つが、ビームの向きを制

御することは不可能である。しかし、レーザ共振器の形を2次元に拡張すれば、従来の半導体レーザには見られない多彩な発振モードが現れる。これらの発振モードを自由自在に制御できれば、ビームの制御機能を備えた多機能な半導体レーザが実現できる。これまでにディスク形、六角形、楕円形など様々な形状を持つ半導体レーザが実際に製作され、レーザ共振器の形と発振モードの関係が調べられている。

このような背景のもと、我々は、2つの曲面ミラーと2つの側面ミラーでレーザ共振器が構成される擬似スタジアム型の2次

元半導体レーザ（図1）について研究を行って来た。その結果、共振器のパラメータを調節することにより、出力ビームのスイッチ機能を有する半導体レーザや複数のビームを出力するマルチビームレーザが実現できることを理論と実験の両面から明らかにした。ビームのスイッチ機能や光の分波機能は、光システムにおける基本的な機能であり、様々な応用が期待できる。例えば、光ファイバ計測では、複数の光ファイバセンサを用いた分布計測や多点同時計測が行われる。2次元半導体レーザから出力される複数のビームは、一つの共振器モードから生じた光であるため波長や位相がそろっている。したがって、個々の出力ビームを効率良く光ファイバに結合させることができれば、同じ条件で多点同時計測を行うことが可能である。また、ストライプ構造の半導体レーザから出力されるビームを複数のビームスプリッタで分岐する方法に比べて構成が簡単になるという利点がある。

しかしながら、2次元半導体レーザと光ファイバの光結合系については、これまで殆ど検討が行われていない。2次元半導体レーザの応用を考える上で、このような光結合系を検討することが不可欠である。

## 2. 研究の目的

擬似スタジアム型2次元半導体レーザの発振モードは、共振器のパラメータに大きく依存する。共振器長、共振器幅、そして曲面ミラーの曲率半径を適切な値に設計するとレーザの端面ミラーから複数のビームが放射状に出力される特殊な発振モードが現れる。まず、本研究では、このような発振モードを室温連続動作において観測する。次に、レーザから出力される個々のビームを屈折率分布型レンズを用いて光ファイバへ結合させるための光結合系を設計する。具体的には、個々の出力ビームに対する光ファイバへの結合効率、最適なレンズの配置位置、レンズの位置ずれに対するトレランスを数値計算により明らかにする。さらに、光結合系の試作を行い、結合効率を評価する。

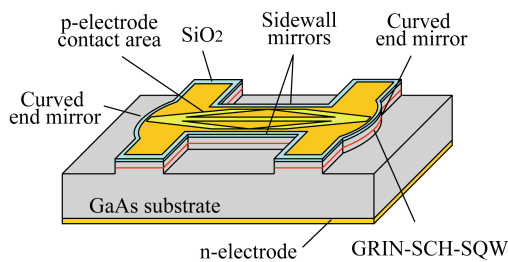


図1 擬似スタジアム型の2次元半導体レーザ

## 3. 研究の方法

### (1) 2次元半導体レーザの特性評価

半導体ドライエッチング技術を用いて製作した擬似スタジアム型2次元半導体レーザを AuSn でメタライズした AlN ヒートシンクに取り付け、レーザの発振特性を室温連続動作において評価する。具体的には、光出力-電流特性、遠視野像、発振スペクトルを測定する。

### (2) 光結合系の設計

図2に光結合系の模式図を示す。光結合系は、擬似スタジアム型2次元半導体レーザ、9つの屈折率分布型レンズ、9本の光ファイバで構成される。レンズと光ファイバの水平方向の配置角度は、2次元半導体レーザから出力されるビームの向きに合わせる。一方、垂直方向については、レーザから出力されたビームと半導体レーザの基板で反射したビームが干渉して基板から傾いた方向に指向性の強いビームが形成される。この現象は、ロイドのミラー干渉と呼ばれている。今回の設計では、1次の干渉光が光ファイバに結合するようにレンズと光ファイバを基板から傾けて配置する。

本研究では、マルチモード光ファイバとシングルモード光ファイバの2種類の光結合系を設計する。まず、マルチモード光ファイバの光結合系については、光線追跡法を用いて結合効率を計算する。具体的には、半導体レーザの近視野像と遠視野像を拡張 Fox-Li モード計算法と Huygens 積分を用いて計算する。次に、近視野像と遠視野像を細かいセグメントに分割して、近視野像の各セグメントから遠視野像の全てのセグメントに伝搬する光線に対して光線追跡を行うことにより、屈折率分布型レンズを通過して光ファイバに結合する光線の数を計算する。結合効率は、全ての光線の数と光ファイバに結合した光線の数の比率で見積もる。ただし、各光線には、近視野像と遠視野像の光強度の積を重みづけする。

一方、シングルモード光ファイバの光結

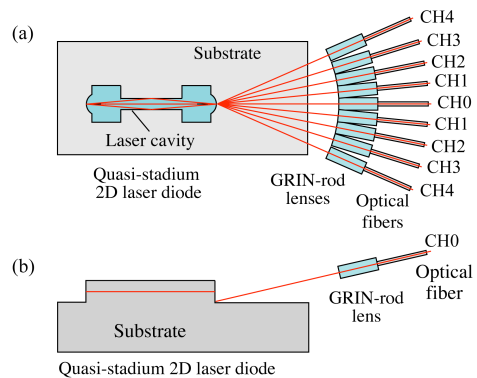


図2 擬似スタジアム型2次元半導体レーザと光ファイバの光結合系 (a)上から見た図、(b)断面図

合系については波動光学的なシミュレーションを行う。具体的には、Huygens 積分を用いてレーザから出力されたビームが屈折率分布型レンズの入射端に到達したときの電界分布を計算する。次に、シングルモード光ファイバの導波モードをガウシアンビームで近似するとともに、像変換の公式を用いて屈折率分布型レンズの入射端における電界分布を計算する。これら2つの電界分布に対して重ね合わせ積分を行い、結合効率を求める。

### (3) 市販の光ファイバコリメータを用いた結合効率の評価

屈折率分布型レンズに光ファイバを接続した市販の光ファイバコリメータを微動ステージに取り付け、半導体レーザの出力端面を中心に活性層に平行な方向と垂直な方向にそれぞれ回転させて光ファイバコリメータの配置角度と結合効率の関係を測定する。

### (4) 光結合系の試作

まず、AlN ヒートシンクにマウントした半導体レーザを PbSn 半田でステムに取り付ける。次に、光ファイバの先端にスリーブを介して屈折率分布型レンズを接着する。このようなレンズ付き光ファイバを9本用意する。さらに、V溝加工を施したレンズホルダーに光ファイバを接着し、光ファイバアレイを作製する。最後に、半導体レーザと光ファイバアレイをそれぞれ  $xyz$  の3軸ステージと  $xyz\theta\phi$  の5軸のステージに取り付け、光ファイバに結合する光パワーが最大になるように半導体レーザと光ファイバアレイの位置合わせを行う。半導体レーザの片側端面から出力される光に対して測定を行った光出力-電流特性のスロープ効率と各光ファイバの出力光に対して測定を行った光出力-電流特性のスロープ効率を比較することにより、結合効率を評価する。

## 4. 研究成果

### (1) 2次元半導体レーザの特性評価

共振器長  $700\mu\text{m}$ 、共振器幅  $60\mu\text{m}$ 、曲面ミラーの曲率半径  $60\mu\text{m}$  の GaAs/AlGaAs GRIN-SCH-SQW (屈折率分布型分離閉じ込め単一量子井戸) 構造の擬似スタジアム型2次元半導体レーザに対して、温度  $25^\circ\text{C}$  の連続動作で発振特性を評価したところ、 $233\text{mA}$  のしきい値電流を示した。また、 $40\text{mW}$  の光出力まで連続動作が得られることを確認した。図3に光出力  $20\text{mW}$  における遠視野像の観測例を示す。活性層に平行な方向に指向性の強い9つのビームが出力されることを明らかにした。光出力  $40\text{mW}$  の高出力動作では、遠視野像に乱れが見られたが、 $30\text{mW}$  以下の光出力では、計算で得られた共振器モードに対応する遠視野像が観測

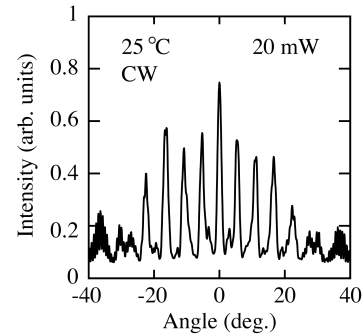


図3 擬似スタジアム型2次元半導体レーザの水平方向の遠視野像

された。また、発振スペクトルの測定では、光出力の増加とともに、発振波長が短波長側へシフトする現象が見られた。拡張 Fox-Li モード計算法に基づく数値計算を行うことにより、この波長シフトの原因がレーザ共振器内部における空間的なホールバーニングや発熱による屈折率変化であることを示唆した。

### (2) 光結合系の設計

まず、マルチモード光ファイバを用いた光結合系について述べる。設計には、共振器長  $700\mu\text{m}$ 、共振器幅  $60\mu\text{m}$ 、曲面ミラーの曲率半径  $60\mu\text{m}$  の擬似スタジアム型2次元半導体レーザを仮定した。ロイドのミラー干渉によって垂直方向に一つのビームが形成されるように活性層の高さを  $1.5\mu\text{m}$ 、垂直方向のビームスポット径を  $1.5\mu\text{m}$  に設定した。また、光の波長は、共振器モードの回折損失が最も低くなる  $847.6\text{nm}$  に設定した。屈折率分布型レンズについては、レンズピッチ  $0.2885$ 、直径  $2.0\text{mm}$  の SLS (Selfoc Lens Standard) タイプを仮定した。さらに、光ファイバについては、NA  $0.2$ 、コア径  $80\mu\text{m}$  のステップインデックス型マルチモード光ファイバを仮定した。レンズの水平方向の配置角度は、遠視野像の計算結果に基づき、 $0^\circ$ 、 $\pm 5.6^\circ$ 、 $\pm 11.2^\circ$ 、 $\pm 17.2^\circ$ 、 $\pm 23.8^\circ$  に設定し、垂直方向の配置角度は、ロイドのミラー干渉の1次の干渉光の向きに合わせて、 $8.12^\circ$  とした。また、レーザ端面からレンズまでの距離は、レンズ間の干渉が起こらないように  $21\text{mm}$  とした。

結合効率は、図2に示したチャンネル0で  $3.4\%$ 、チャンネル1で  $3.2\%$ 、チャンネル2で  $2.7\%$ 、チャンネル3で  $2.0\%$ 、チャンネル4で  $1.2\%$  となり、9本の光ファイバに対するトータルの結合効率は、 $21.6\%$  と見積もられた。図4はレンズの配置角度と結合効率の関係を水平方向と垂直方向に対して計算した結果を示している。水平方向については、レンズの配置角度が出力ビームの向きに一致した時に結合効率が極大値を示す

ことが分かる。一方、垂直方向については、レンズの配置角度がロイドのミラー干渉の1次の干渉ビームの向きに一致した時に最大値を示すことが分かる。図4からレンズの角度ずれに対するトレランスは比較的大きいことが分かる。次に、レンズピッチに対する結合効率の変化を計算したところ、0.268 から 0.290 までの広い範囲で、ほぼ一定の値が得られた。コア径の大きいマルチモード光ファイバを用いる場合は、レンズピッチに対するトレランスが大きくなることが明らかになった。

次に、シングルモード光ファイバを用いた光結合系について述べる。擬似スタジアム型2次元半導体レーザについては、マルチモード光ファイバの設計と同じものを仮定した。次に、屈折率分布型レンズについては、レンズピッチ 0.270、直径 2.0 mm のSLS タイプを仮定した。さらに、光ファイバについては、コア径 5.3  $\mu\text{m}$  のシングルモード光ファイバを仮定した。レンズの配置角度ならびにレーザ端面とレンズ間の距離は、マルチモード光ファイバの設計と同じ値を用いた。結合効率は、チャンネル0で1.6%、チャンネル1で1.5%、チャンネル2で1.3%、チャンネル3で0.8%、チャンネル4で0.4%となり、9本の光ファイバに対するトータルの結合効率は、9.6%と見積もられた。図5はレンズの配置角度と結合効率の関係を示している。結合効率のレンズ配置角度依存性については、図4に示した

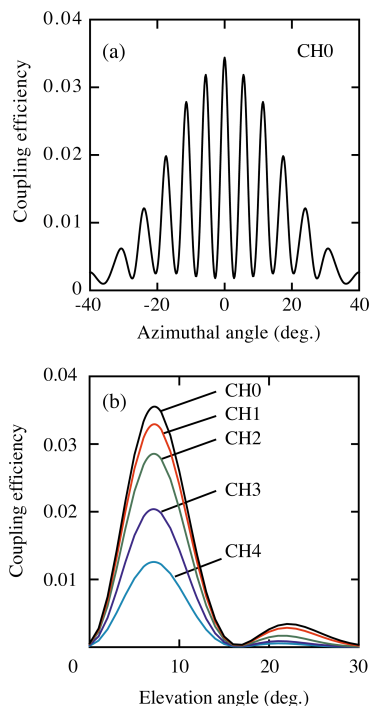


図4 レンズの配置角度と結合効率の関係 (マルチモード光ファイバ) (a)水平方向、(b)垂直方向

マルチモード光ファイバの計算結果と同様の傾向を示した。次に、レンズピッチに対する結合効率の変化を計算したところ、結合効率が半分に低下するレンズピッチの幅は 0.004 であり、レンズピッチに対するトレランスが極めて小さいことが明らかになった。コア径の小さいシングルモード光ファイバを用いる場合は、マルチモード光ファイバを用いる場合に比べて、結合効率が半分に以下に低下し、レンズピッチのトレランスが小さくなることが示された。

### (3) 市販の光ファイバコリメータを用いた結合効率の評価

市販の光ファイバコリメータ (日本板硝子株式会社: C-OPCL-5G-010/PCFC) を用いて、レンズの配置角度と結合効率の関係を評価した結果を図6に示す。まず、水平方向については、複数のピークが観測され、計算結果に対応する結果が得られた。しかし、結合効率の値は、図4に示した計算結果に比べて、約一桁小さい値を示した。一方、垂直方向については、1次の干渉ビームに対応するピークのみならず2次の干渉ビームに対応するピークが観測された。結合効率が低くなった主な原因は、高次の干渉ビームが現れたことであると考えられる。そこで、高次の干渉ビームが生じた原因を明らかにするために、市販の半導体レーザと GaAs 基板を用いて、ロイドのミラー干渉によって形成されるビームの形状を詳細に調べた。その結果、基板に対する活性層の高さが高くなるにしたがって、基板表面

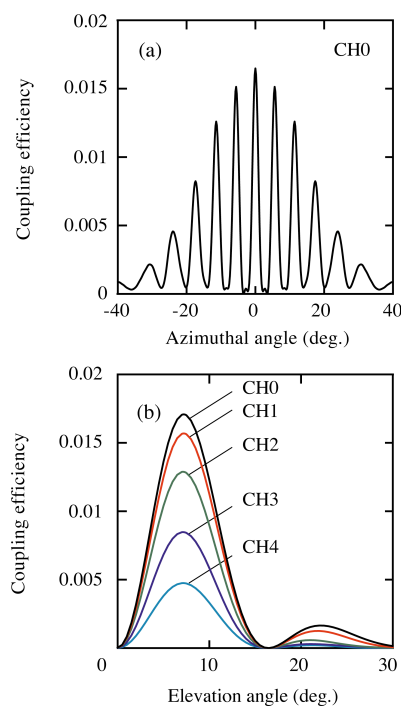


図5 レンズの配置角度と結合効率の関係 (シングルモード光ファイバ) (a)水平方向、(b)垂直方向

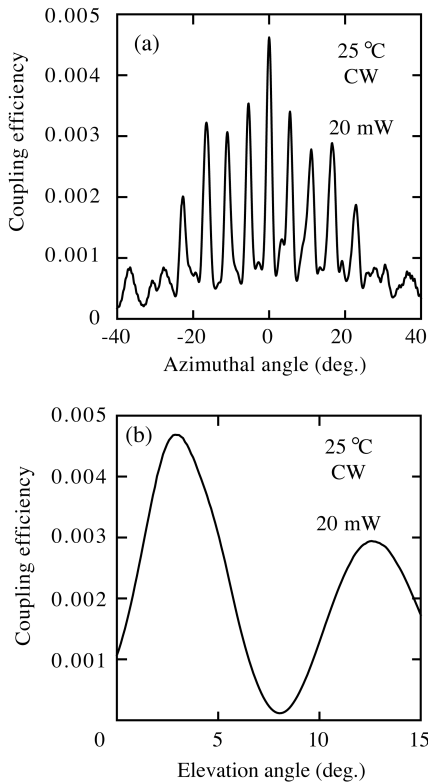


図6 市販の光ファイバコリメータを使用してレンズの配置角度と結合効率の関係を測定した結果 (a)水平方向、(b)垂直方向

に対する1次の干渉ビームの放射角度が小さくなり、高次の干渉ビームの強度が強くなることが明らかになった。実験に使用した2次元半導体レーザーの活性層の高さは、約 $2.8\ \mu\text{m}$ であり、計算で仮定した $1.5\ \mu\text{m}$ より大きな値であった。2次元半導体レーザーの垂直方向の構造が最適化されていないことが結合効率を下げている主な原因であると考えられる。

#### (4) 光結合系の試作

光結合系の試作には、レンズピッチ $0.25$ 、直径 $2.0\ \text{mm}$ のSLW (Selfoc Lens Wide) タイプの屈折率分布型レンズならびにNA $0.2$ 、コア径 $80\ \mu\text{m}$ のステップインデックス型マルチモード光ファイバを使用した。また、半導体レーザーとレンズ間の距離は $21\ \text{mm}$ に設定した。図7に試作した光結合系の写真を示す。今回の試作では、屈折率分布型レンズとスリーブの接着強度が不十分であったため、アライメントを行う工程で、4本の光ファイバで故障が起きた。光の結合が得られた5本の光ファイバで結合効率を評価したところ、チャンネル0で $0.56\%$ 、チャンネル1で $0.40\%$ 、チャンネル3で $0.14\%$ 、チャンネル4で $0.21\%$ の値が得られた。

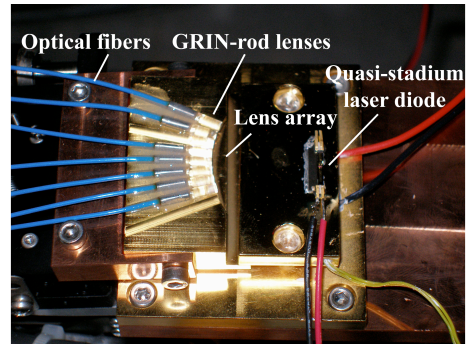


図7 試作を行った光結合系の写真

(5) 研究成果のインパクトと今後の展望  
擬似スタジアム型2次元半導体レーザーの発振特性は、光の分波という応用の観点のみならず、発振モードの共振器形状依存性という物理的な観点から見ても大変興味深い。このような特殊な形状の2次元半導体レーザーに対して発振特性を評価した点は、インパクトが大きいと考えている。次に、2次元半導体レーザーと光ファイバの光結合系の設計については、我々の知る限り実施例はなく、新しい結果である。また、ロイドのミラー干渉を用いて垂直方向のビーム整形を行う点は、従来の光結合系には見られない独創的な点である。次に、光結合系の評価と試作については、実験に使用した半導体レーザーの垂直方向の構造が最適化されていないために、設計値に比べて低い結合効率を示した。また、製作方法が洗練されていないため、9本の光ファイバのうち4本の光ファイバで故障が起きるといった問題が生じた。光結合系の試作・評価については、課題が残されている。

今回の設計では、マルチモード光ファイバの光結合系で $21.6\%$ 、シングルモード光ファイバの光結合系で $9.6\%$ の結合効率となり、大きな過剰損失が生じた。過剰損失が増大した主な原因は、レンズ間の干渉を防ぐために、レーザーとレンズ間の距離を大きく取ったことにある。出力ビームの間隔を拡げることができれば、レンズを半導体レーザーに近づけることが可能になり、結合効率の改善が期待できる。我々は、2次元半導体レーザーの共振器内部にエアギャップを設けることで、出力ビームの向きが制御できることを報告している。今後の課題として、光の取り出し方法を工夫することにより、結合効率の改善を図ることが挙げられる。さらに、設計どおりの結合効率を得られるように、半導体レーザーの垂直方向の素子構造を最適化するとともに製作技術の向上を目指す必要がある。

## 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 4 件)

- ① T. Fukushima, Beam profile tailoring of laser diodes using Lloyd's mirror interference, IEICE, Vol. E92-C, 2009, 査読有, accepted for publication.
- ② 福島丈浩, 2次元スタジアム型半導体レーザの発振特性 (解説)、光学、査読有、37巻、2008、pp.166-171
- ③ T. Fukushima, S. Shinohara and T. Harayama, Light beam output from diamond-shaped total-internal reflection modes by using intracavity air gaps, Optics Express, 査読有, Vol. 25, 2007, pp.17392-17400.
- ④ T. Fukushima, T. Tanaka and T. Harayama, High-quality lowest-loss-mode lasing in GaAs quasi-stadium laser diode having unstable resonators, Optics Letters, 査読有, Vol. 32, 2007, pp. 3397-3399.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 福島丈浩, 不安定共振器擬似スタジアム型半導体レーザとマルチモード光ファイバの光結合の改善、第56回応用物理学関係連合講演会、2009年4月2日、筑波大学.
- ② 福島丈浩, 不安定共振器擬似スタジアム型半導体レーザとマルチモード光ファイバの光結合系の試作、第56回応用物理学関係連合講演会、2009年4月2日、筑波大学.
- ③ 福島丈浩, ロイドのミラー干渉を用いた半導体レーザのビーム整形、電子情報通信学会 2009年総合大会、2009年3月19日、愛媛大学.
- ④ 半田義幸、2次元半導体レーザと光ファイバの結合効率におけるレンズタイプ依存性、第10回IEEE広島支部学生シンポジウム、2008年11月22日、23日、広島産業会館.
- ⑤ 中田直樹、2次元半導体レーザとマルチモード光ファイバの光結合系における光ファイバの種類と結合効率の関係、平成20年度電気・情報関連学会中国支部第59回連合大会、2008年10月25日、鳥取大学.
- ⑥ 福島丈浩, 2次元半導体レーザと単一モード光ファイバの光結合系の解析I、電子情報通信学会2008年ソサイエティ大会、2008年9月17日、明治大学.
- ⑦ 宮原邦浩、2次元半導体レーザと単一モード光ファイバの光結合系の解

析II、電子情報通信学会2008年ソサイエティ大会、2008年9月17日、明治大学.

- ⑧ T. Fukushima, Design of an Optical Coupling System between a Confocal Quasi-Stadium Laser Diode and Multimode Optical Fibers, International Conference on Laser, Lightwave and Microwave Conference 2008, 2008年4月24日、パシフィコ横浜
- ⑨ T. Fukushima, Optical coupling system between an unstable quasi-stadium laser diode and multimode optical fibers, International Conference on Laser, Lightwave and Microwave Conference 2008, 2008年4月24日、パシフィコ横浜
- ⑩ 福島丈浩, 擬似スタジアム型半導体レーザとマルチモード光ファイバの光結合系の設計I、第55回応用物理学関係連合講演会、2008年3月30日、日本大学.
- ⑪ 半田義幸、擬似スタジアム型半導体レーザとマルチモード光ファイバの光結合系の設計II、第55回応用物理学関係連合講演会、2008年3月30日、日本大学.
- ⑫ 西田秀明、擬似スタジアム型ビームスイッチング半導体レーザの遠視野像、第9回IEEE広島支部学生シンポジウム、2007年11月24日、鳥取大学
- ⑬ 中田直樹、擬似スタジアム型2次元共振器の光線解析、第9回IEEE広島支部学生シンポジウム、2007年11月24日、鳥取大学

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

福島 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