

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19360030  
 研究課題名(和文) ブロードエリア半導体レーザにおけるフィラメンテーションの解明と制御  
 研究課題名(英文) Characteristics of Dynamic Filamentations and Control in Broad-Area Semiconductor Lasers  
 研究代表者  
 大坪 順次 (OHTSUBO JUNJI)  
 静岡大学・工学部・教授  
 研究者番号：00176942

研究成果の概要(和文)：数十 $\mu\text{m}$ 幅の広い活性層を持つブロードエリア半導体レーザは、高出力レーザとして期待されているが、通常の狭活性層幅のレーザとは異なり、レーザ発振においてフィラメントと呼ばれる光強度の時間、空間に微細な不規則振動が見られる。このフィラメントにより、レーザ発振の質は著しく劣化する。本研究においては、このフィラメント構造の理論的解析を行い、これを外部戻り光、あるいは光同期注入の方法により抑制する研究を理論と実験の両面から行った。

研究成果の概要(英文)：Broad-area semiconductor laser is a promising device as a high power coherent light source, however it is an unstable laser and its beam quality is rather poor compared with ordinary semiconductor lasers. The laser usually oscillated at spatially and longitudinally multi-modes due to unstable and fast filament phenomena. In this research, we clarify the filamentation phenomena in broad-area semiconductor lasers by introducing the rate equations which describe the laser dynamics. The control of beam quality of broad-area semiconductor lasers is also conducted by the methods of optical feedback and optical injection in the lasers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：量子光学

科研費の分科・細目：660

キーワード：半導体レーザ、フィラメント、レーザ不安定、レーザ制御、レーザカオス

## 1. 研究開始当初の背景

半導体レーザは、電気から光への変換効率に優れ、また小型で光パワー当たりのコストを低く抑えられるため、高輝度レーザとして期待されている。高出力を得るために、半導体レーザの発光部である活性層を通常のレーザの数十倍に広くするブロードエリアレーザが開発されている。実際の高輝度レーザとしては、このようなレーザをアレイ構造として、さらにアレイを積み重ねるスタック構造にすることによって、キロワット級以上の半導体レーザスタックが作られる。

その基本素子となるブロードエリア半導体は、研究を始めた当初はまだ1W程度の出力であったものが、現在では単体のレーザ素子として10Wクラスのものまで作られるようになった。しかし、これまでのこの分野の研究課題は、いかにしてレーザを高出力化するかというのが主たる課題であったため、得られるレーザビームの品質についてはほとんど議論されてこなかった。

実際の応用の立場からすると、ブロードエリア半導体レーザでは、活性層幅が広いことによって引き起こされる光出力の高速不規則振動であるフィラメント構造によって、ビーム品質は著しく劣化し、レーザビームの均一性が失われ高輝度ビームとして集光する場合に問題が起こる。このフィラメントを抑制することは、高品質のレーザビームを得る上で必須であるが、フィラメントが発生するメカニズム自体もあまり研究がされていない。このため、ブロードエリア半導体レーザにおけるフィラメントの発生メカニズムの解明とその抑制は急務の研究課題である。

## 2. 研究の目的

本研究においては、いまだ明らかにされていないブロードエリア半導体レーザにおけるフィラメント発振のメカニズムについて、理論的な検討によりそれを明らかにすることを一つの目的としている。このため、他の構造の半導体レーザにおいて発生する不規則振動との比較検討を行う。

また、フィラメント発振の解明と並行して、フィラメント発振に起因するマクロな時間スケールでのビーム品質（平均光強度で見たときのビームプロファイル）の改善、レーザの干渉性を向上させ高輝度ビームをえるための単一縦モード化などを実現する方法について、理論と実験により模索する。

主たるレーザ制御の方法としては、すでに作られたレーザに対し、戻り光効果や外部光注入により安定化を行う方法について検討

する。一方、デバイス設計として考えたときに、従来の量子井戸構造ではなく、量子ドット構造を活性層に作り込むことによって、活性層において発光する場所を量子ドットにより局所化させることによって、レーザの安定化が期待できる。本研究では、デバイスそのものを作る研究課題ではないが、設計としてレーザの不安定性を緩和するために、活性層に量子ドット構造を作り込むことによって得られる効果について理論的な検討を行う。

## 3. 研究の方法

2の目的において述べたように、本研究の課題は大きく分けて3つある。(1)一つ目はブロードエリア半導体レーザにおけるフィラメント構造発生の理論的解析と、他の半導体レーザの不安定ダイナミクスとの比較である。本課題において、レーザの発振の空間構造を表現することができるモデルとなるレート方程式を導入し、これを使ったシミュレーションにより、フィラメント発振の解析を行う。これと並行して、フィラメント発振のメカニズムを明らかにする。

(2)二つ目は、ブロードエリア半導体レーザにおいて、外部構造によるフィラメント抑制と高品質ビームを得る方法についての提案である。この課題においては、戻り光によりレーザ発振を安定化する方法について検討する。半導体レーザにおける戻り光効果においては、通常戻り光雑音として知られているカオス振動が発生するが、条件によってはカオスが制御され、レーザの安定化が期待できる。本課題において、戻り光効果の理論的検討と実験による安定化について検討する。また、外部からのレーザ安定化の方法として、外部レーザからの光注入の方法についても検討する。ブロードエリア半導体レーザは、他の半導体レーザとは異なり、高速振動するフィラメント発振があるため、いわゆる同期光注入によるレーザの安定化は期待できないため、この場合も光注入によるカオス安定化の方法を用いる。この方法についても、理論と実験の両面からの検討を行う。

(3)三つ目は、レーザ活性層に量子ドット構造を作ることによって、レーザビームの品質を向上させる方法の理論的検討である。我々のグループではレーザデバイスの作製はできないため、理論的検討により量子ドット構造を含む場合の新しいレーザ発振レート方程式を導入し、レーザ安定化のデバイス提案に向けて研究を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) フィラメントダイナミクス

従来の狭ストライプ幅の半導体レーザにおけるレート方程式に、活性層が広い効果を空間項として考慮した新しいレート方程式を提案し、これを用いて数値解析を行った。光の電場については、活性層幅が光の波長に比べかなり大きいことによるレーザ強震機内での光の回折効果を考慮した。また、キャリア密度については、やはり活性層幅が広いことによって発生するキャリア拡散の効果を導入した。

その結果、光については活性層内部での回折による自己収束効果が効いていることがわかった。また、キャリアについては、フィラメントが局所的に発生することによるホールバーニング効果が発生し、そのことにより光の発生場所がピコ秒の程度で揺らぐことがフィラメント発生の理由であることが推測された。これらのシミュレーションで得られた結果は、他研究グループによる高速フィラメント発振観測の実験結果とも良く一致していた。

##### (2) フィラメント抑制とビーム品質の向上

(1)で導入したモデル式に、戻り光効果と外部光注入効果を考慮した理論式を導入し、戻り光と外部光注入による効果のシミュレーションを行った。この結果、戻り光効果を使った場合、短い外部共振器(1cm程度)を使い、大きい戻り光量(振幅で5%程度)としたときに、フィラメントによる不規則振動を周期的振動にできることが判明した。また、このとき、時間平均されたビームプロファイルも単独発振に比べ高次空間モードが抑えられ、ビーム改善ができることが判明した。実験では、高速現象を解析できる装置の限界があったため、時間平均ビームプロファイルとレーザ発振の平均光スペクトルを主に解析した。この結果、理論とは完全一致はできなかったが、高次空間モードの抑制、ビームプロファイルの改善、縦モードの単一化などが実現できた。

また、光注入においても、理論的検討の結果、強光注入(レーザ発振光強度と同レベル以上)によって不規則フィラメントを周期的な振動に抑制できることが分かった。この場合も、実験を行った。この結果、縦モードの抑制は実現できたが、外部光注入する波長可変レーザの出力が十分でなかったため、理論で観測されたレベルの安定化までは至らなかった。今後は、より高出力が得られる外部光注入ができる波長可変レーザを使った実験が望まれる。

##### (3) 量子ドット構造の検討

量子ドット半導体レーザは、レーザ発振の

安定化が期待されるため、有望視されている次世代レーザであるが、まだ商品化はほとんどされておらず、またその理論的取扱についても研究は始まったばかりである。本課題においては、まず従来の狭ストライプ幅の半導体レーザに対して、量子井戸層から量子ドットへのキャリアの捕獲率を表現する項を導入し、電場、キャリア、捕獲率からなる3変数のレーザ発振レート方程式を提案した。これを用いて通常の半導体レーザの発振モデルについて解析した結果、これまで言われてきた低しきい値化、レーザ発振の安定化が実際にモデル化できた。これらの結果は、現在他の実験室レベルで報告されている狭ストライプ量子ドット半導体レーザの特性と良く一致していることも判明した。しかし、本課題で提案したキャリアの捕獲率を、ブロードエリア半導体レーザのような空間構造を持つレート方程式として繰り込むためには、もう一工夫必要であることがわかった。そのため、このキャリアの捕獲率をどう空間構造へ繰り込むか、あるいはブロードエリア半導体レーザにおいては、他の理論的展開を導入する方が良いのかの検討事項が、今後の課題として残された。

以上の結果について、下記のように計18件の学術論文と46件の国内、国外学会発表として成果報告を行った。学会発表の中には、2件の国際会議における招待講演も含まれている。また、成果としては、2008年に出版された単著書籍である[図書]②Semiconductor Laser: Stability, Instability and Chaos, 2nd Editionも含まれる。この書籍は、第1版が2005年に出版されたものであるが、好評につき大幅なページ数改訂した増補版として出版されたものである。本研究での成果の一部もいち早くこの中に含まれており、この分野における現在数少ない研究図書として評価されている。

#### 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18件)

① Dynamics of Broad-Area Semiconductor Lasers with Short Optical Feedback (Tomokazu Tachikawa, Satoshi Takimoto, Rui Shogenji and Junji Ohtsubo) IEEE J. Quantum Electron. 査読有, Vol.46, No.2, pp.140-149 (2010).

② Observation of Multi-Path Interference in Broad-Area Semiconductor Lasers with Optical Feedback (Tomokazu Tachikawa, Rui Shogenji, and Junji Ohtsubo) Opt. Rev. 査読有, Vol.16, No.5, pp. 553-559 (2009).

③ Control of Spatio-Temporal Dynamics of Broad-Area Semiconductor Lasers by Strong Optical Injection (Satoshi Takimoto, Tomokazu Tachikawa, Rui Shogenji, and Junji Ohtsubo) IEEE Photon. Technol. Lett. 査読有, Vol.21, No.15, pp. 1051-1053 (2009).

④ Numerical Study of Doppler Dynamics in Self-Mixing Semiconductor Lasers (Junji Ohtsubo, Hiroki Kumagami, Rui Shogenji) IEEE Photon. Technol. Lett. 査読有, Vol.21, No.11, pp.742-744 (2009).

⑤ 戻り光量子ドット VCSEL におけるダイナミクス (高林巨樹、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2009 査読無, pp.402-403 (2009).

⑥ 戻り光面発光半導体レーザにおけるカオス同期特性 (富田慎也、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2009 査読無, pp.404-405 (2009).

⑦ ブロードエリア半導体レーザにおける光注入特性 (瀧本覚司、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2009 査読無, pp.410-411 (2009).

⑧ 半導体レーザにおける戻り光ダイナミクスと自己混合ドップラダイナミクス (大坪順次、生源寺類) 2009年度第6回電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス (LQE) 研究会技術報告 査読無, Vol.109 No.331, pp.1-6 (2009).

⑨ 戻り光量子ドットレーザにおけるダイナミクス (高林巨樹、大坪順次、生源寺類) 2009年度第6回電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス (LQE) 研究会技術報告 査読無, Vol.109 No.331, pp.7-10 (2009).

⑩ Chaotic Dynamics in Semiconductor Lasers Subjected to Polarization-Rotated Optical Feedback (Yasutoshi Takeuchi, Rui Shogenji, and Junji Ohtsubo) Appl. Phys. Lett. 査読有, Vol.93, No.18, pp. 181105-1-3 (2008).

⑪ 直交戻り光半導体レーザにおけるTE-TMモードカオスダイナミクス (竹内康敏、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 査読無, pp.334-335 (2008).

⑫ 戻り光ブロードエリア半導体レーザにおける高速周期振動 (立川友和、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 査読無, pp.336-337 (2008).

⑬ 光注入ブロードエリア半導体レーザにおける高速パターンダイナミクス (瀧本覚司、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 査読無, pp.338-339 (2008).

⑭ 面発光半導体レーザにおける光注入ダイナミクス (伊藤正彦、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 査読無, pp.340-341 (2008).

⑮ 面発光半導体レーザの戻り光特性 (青山拓、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 査読無, pp.342-343 (2008).

⑯ 高帯域半導体レーザの発生と同期 (砂子修一、大坪順次、生源寺類) 信学技報 査読無, vol. 107, no. 184, NLP2007-43, pp. 39-43 (2007.8).

⑰ ブロードエリア半導体レーザの時空間ダイナミクス (三ツ井英男、大坪順次、生源寺類) 信学技報 査読無, vol. 107, no. 184, NLP2007-53, pp. 1-5 (2007.8).

⑱ Nonlinear Dynamics in Semiconductor Lasers and VCSELs (Junji Ohtsubo) CLEO Europe 2007 査読無 (Munich, Germany, 2007.6) CB-2101.

[学会発表] (計 46 件)

① 光注入ブロードエリア半導体レーザにおけるビームプロファイル (瀧本覚司、生源寺類、大坪順次) 第 57 回応用物理関係連合講演会 (2010.3).

② 短外部共振器戻り光ブロードエリア半導体レーザにおける戻り光ダイナミクス (武田昂、生源寺類、大坪順次) 第57回応用物理関係連合講演会 (2010.3).

③ 面発光半導体レーザの利得モデルと光注入ダイナミクス (高山誠史、生源寺類、大坪順次) 第 57 回応用物理関係連合講演会 (2010.3).

④ 直交偏光戻り光半導体レーザにおけるダイナミクス (木村啓三、生源寺類、大坪順次) 第57回応用物理関係連合講演会 (2010.3)

⑤ 半導体レーザにおける戻り光カオスと自己混合ドップラダイナミクス (大坪順次、生源寺類) 2009年度第6回電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス (LQE) 研究会 (2009.12).

⑥ 戻り光量子ドットレーザにおけるダイナミクス (高林巨樹、生源寺類、大坪順次) 2009年度第6回電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス (LQE) 研究会 (2009.12).

⑦ 戻り光量子ドット VCSELにおけるダイナミクス (高林巨樹、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2009 (2009.11).

⑧ 戻り光面発光半導体レーザにおけるカオス同期特性 (富田慎也、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2009 (2009.11).

⑨ ブロードエリア半導体レーザにおける光注入特性 (瀧本覚司、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2009 (2009.11).

⑩ Spatio-Temporal Dynamics in Broad-Area Semiconductor Lasers (Satoshi Takimoto, Rui Shogenji, Junji Ohtsubo) 6th Korean-Japanese Students Workshop (2009.10).

⑪ Dynamics in Vertical-Cavity Surface-Emitting Semiconductor Lasers with Optical Feedback (Hiroshi Aoyama, Rui Shogenji, Junji Ohtsubo)

6th Korean-Japanese Students Workshop (2009.10).

⑫ 戻り光面発光半導体レーザーにおけるカオス同期ダイナミクス (富田慎也、生源寺類、大坪順次) 第 70 回応用物理学会学術講演会 (2009.9).

⑬ 面発光半導体レーザーにおける戻り光ダイナミクス (青山拓、生源寺類、大坪順次) 第 70 回応用物理学会学術講演会 (2009.9).

⑭ 戻り光量子ドットレーザーにおけるダイナミクス (高林巨樹、生源寺類、大坪順次) 第 70 回応用物理学会学術講演会 (2009.9).

⑮ Semiconductor Laser Chaos: Past, Present, and Future, *Invited* (Junji Ohtsubo) CHAOS 2009 (CATS Workshop) (Crete, Greece, 2009.6).

⑯ Dynamics and Chaos Synchronization of TE-TM Orthogonal Optical Feedback in Semiconductor Lasers (Junji Ohtsubo, Yasutoshi Takeuchi, Rui Shogenji) CHAOS 2009 (CATS Workshop) (Crete, Greece, 2009.6).

⑰ 戻り光量子ドットレーザーにおけるカオスダイナミクス (高林巨樹、生源寺類、大坪順次) 第 56 回応用物理関係連合講演会 30p-P5-13 (2009.3.30).

⑱ 戻り光面発光半導体レーザーにおける偏光を考慮したカオス同期 (富田慎也、生源寺類、大坪順次) 第 56 回応用物理関係連合講演会 30p-P5-14 (2009.3.30).

⑲ 光注入ブロードエリア半導体レーザーにおけるカオスダイナミクス (瀧本覚司、大坪順次、生源寺類) レーザー学会学術講演会 第 29 回年次大会 (2009.1.11).

⑳ 短い外部共振器ブロードエリア半導体レーザーにおけるパワーダイナミクス (立川友和、生源寺類、大坪順次) レーザー学会学術講演会 第 29 回年次大会 (2009.1.11).

㉑ 面発光半導体レーザーにおける光注入ダイナミクス (伊藤正彦、生源寺類、大坪順次) レーザー学会学術講演会 第 29 回年次大会 (2009.1.11).

㉒ 戻り光面発光半導体レーザーのダイナミクス特性 (青山拓、生源寺類、大坪順次) レーザー学会学術講演会 第 29 回年次大会 (2009.1.11).

㉓ 直交戻り光半導体レーザーにおける TE-TM モードカオスダイナミクス (竹内康敏、生源寺類、大坪順次) レーザー学会学術講演会 第 29 回年次大会 (2009.1.11).

㉔ レート方程式を用いた自己混合半導体レーザードブラーダイナミクス解析 (熊谷広樹、生源寺類、大坪順次) レーザー学会学術講演会 第 29 回年次大会 (2009.1.11).

㉕ 直交戻り光半導体レーザーにおける TE-TM モードカオスダイナミクス (竹内康敏、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 (2008.11).

㉖ 面発光半導体レーザーの戻り光特性 (青山拓、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 (2008.11).

㉗ 面発光半導体レーザーにおける光注入ダイナミクス (伊藤正彦、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 (2008.11).

㉘ 戻り光ブロードエリア半導体レーザーにおける高速周期振動 (立川友和、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 (2008.11).

㉙ 光注入ブロードエリア半導体レーザーにおける高速パターンダイナミクス (瀧本覚司、生源寺類、大坪順次) Optics & Photonics Japan 2008 (2008.11).

㉚ 自己混合半導体レーザーにおける LDV 数値解析 (熊谷広樹、生源寺類、大坪順次) 平成 20 年度計測自動制御学会中部支部静岡地区計測制御研究発表会 (2008.12.20).

㉛ Fast Periodic Oscillations in Broad-Area Semiconductor Lasers with Short Optical Feedback (Tomokazu Tachikawa, Rui Shogenji, and Junji Ohtsubo) Dynamic Days 5 Pacific Rim (Nara, Japan, 2008,9,9-12).

㉜ TE-TM Mode Dynamics in Semiconductor Lasers Subjected to Polarization-Rotated Optical Feedback (Yasutoshi Takeuchi, Rui Shogenji, and Junji Ohtsubo) Dynamic Days 5 Pacific Rim (Nara, Japan, 2008,9,9-12).

㉝ 帯域拡大された半導体レーザーにおけるカオス同期領域 (砂子修一、生源寺類、大坪順次) 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008.3).

㉞ 直交戻り光半導体レーザーによるカオス同期 (竹内康敏、生源寺類、大坪順次) 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008.3).

㉟ 面発光半導体レーザーにおける直交光注入同期特性 (伊藤正彦、生源寺類、大坪順次) 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008.3).

㊱ 垂直共振器型面発光レーザーにおける戻り光特性 (青山拓、生源寺類、大坪順次) 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008.3).

㊲ 数値解析による光注入ブロードエリア半導体レーザービームプロファイルの改善 (瀧本覚司、三ツ井英男、生源寺類、大坪順次) 第 55 回応用物理学関係連合講演会 (2008.3).

㊳ 高帯域半導体レーザーカオスキャリアの発生と同期 (砂子修一、生源寺類、大坪順次) 第 28 回レーザー学会年次大会 (2008.1).

㊴ ブロードエリア半導体レーザーにおける光注入ダイナミクス (三ツ井英男、生源寺類、大坪順次) 第 28 回レーザー学会年次大会 (2008.1).

㊵ 直交戻り光半導体レーザーにおける TE-TM モードカオスダイナミクス (竹内康敏、生源寺類、大坪順次) 第 67 回応用物理学会学術講演会 (2007.9).

㊶ ブロードエリア半導体レーザーにおける光注入特性の数値解析 (三ツ井英男、大坪順次、

生源寺類) 第 67 回応用物理学会学術講演会 (2007.9).

②面発光半導体レーザにおける光注入同期特性のバイアス電流依存特性 (伊藤正彦、生源寺類、大坪順次) 第 67 回応用物理学会学術講演会 (2007.9).

③戻り光ブロードエリア半導体レーザにおける高周波周期振動の数値解析 (立川友和、生源寺類、大坪順次) 第 67 回応用物理学会学術講演会 (2007.9).

④高帯域半導体レーザカオスの発生とカオス同期 (砂子修一、大坪順次、生源寺類) 電子情報通信学会 非線形問題研究会 (NLP) (2007.8)

⑤ブロードエリア半導体レーザの時空間ダイナミクス (三ツ井英男、大坪順次、生源寺類) 電子情報通信学会 非線形問題研究会 (NLP) (2007.8)

⑥Nonlinear Dynamics in Semiconductor Lasers and VCSELs, *Invited* (Junji Ohtsubo) CLEO Europe 2007 (Munich, Germany, 2007.6)

[図書] (計 3 件)

①フォトニクス情報処理入門 (大坪順次) コロナ社 (2009.9) 213 頁.

② Semiconductor Lasers: Stability, Instability and Chaos; 2nd Edition (Junji Ohtsubo) Springer-Verlag, Berlin (2008) 476 pages.

③ Chaos Control in Semiconductor Lasers *in Handbook of Chaos Control* (Junji Ohtsubo) Eds. Eckehard Schöll and Heinz Georg Schuster, Wiley-VCH, London (2007) pp.475-499 .

[その他]

ホームページ等

<http://www.sys.eng.shizuoka.ac.jp/~ohtsubo1/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

大坪 順次 (OTSUBO JUNJI)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：00176942

### (2)研究分担者

生源寺 類 (SHOGENJI RUI)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：90432195