

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390075

研究課題名(和文) 強励起利得スイッチング半導体レーザーからの極短パルス光発生とその発生機構解明

研究課題名(英文) Study on optical short-pulse generation from intensely excited gain-switched semiconductor lasers

研究代表者

吉田 正裕 (YOSHITA, MASAHIRO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・太陽光発電研究センター・主任研究員

研究者番号：30292759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：強励起利得スイッチング動作による半導体レーザーからの光パルスレーザー発振実験を系統的に実施した。光励起GaAsバルクレーザーにおいて、光励起強度を上げていくと、パルス幅が徐々に短くなるとともに短波長側にスペクトルが広がる様子が観測された。短波長領域ではパルス幅1 ps以下の超短光パルスが発生していることを確認した。強励起状態で観測される特異な超短光パルス発生メカニズムを利得活性層中での光励起キャリアのバンド内分布と緩和過程を考慮した現象論的なキャリアダイナミクスモデルを基に考察した。

研究成果の概要(英文)：Lasing performance of gain-switched semiconductor lasers under intense excitation was systematically studied. At low photo-excitation, optical pulses were generated in accordance with a conventional rate-equation analysis in a gain-switched GaAs bulk laser. However, as the photo-excitation intensity increased, the pulse width of the generated optical pulses became shorter and simultaneously spectrally broadened toward shorter-wavelength region, which was not explained by the conventional rate-equation analysis. It was also confirmed that the pulse width at the shorter-wavelength region of the optical pulses was shorter than 1 ps. The generation mechanisms of the observed unique optical pulses under intense excitation were discussed with a phenomenological carrier-dynamics model taking into account transient energy distributions and intra-band relaxations of the photo-excited carriers in the active gain region.

研究分野：工学

キーワード：半導体レーザー 利得スイッチング動作 超短パルス 光エレクトロニクス 光学非線形効果 光源技術

1. 研究開始当初の背景

種々のレーザーの中でも、半導体レーザーは発振波長選択の多様性やそのコンパクト性などを利点として、現在、超高速・高容量情報伝送や高密度記録における主要素子として広く利用されている。しかし、現状まだ半導体材料が潜在的に有する性能・特性を十分に活用しているとは言えない。これを極限まで引き出し、活用することでより高性能・高機能化が期待できる。

半導体レーザー駆動方法の1つである“利得スイッチング法”は、外部より利得媒質中に直接電子正孔を注入・励起し、光パルスを発生させる方法である。駆動方法が簡単、パルス繰り返し周波数可変などの特長があり、半導体極限性能を活かして更なる超短光パルス発生が実現できれば、高機能光源として超高速光通信や多光子顕微鏡への応用が期待できる。

近年、半導体レーザーの定常駆動最大定格を大きく超える限界的な強励起駆動領域で利得スイッチング動作を行うことで、時間幅数ピコ秒の光パルス発生が報告されており[1]、レート方程式を用いた解析により、その光パルス発生機構が調べられている[1-3]。また、瞬時周波数シフト(チャープ)現象の解析なども行われている[4]。

一方で、強励起下における半導体や半導体レーザーからの光放出・光放射現象に関して、半導体中での分極ダイナミクスを考慮しないレート方程式近似では説明の付かない巨大光パルス発生や超高速コヒーレント現象などが多数報告されてきており[5-9]、そこには半導体中でのコヒーレントな巨大分極形成とそれによる超放射・超蛍光現象が関与していると議論されている。これらの現象は、強励起された半導体中の非平衡・非正常高密度電子正孔状態と密接に関係しており、学術的にも興味を持たれている。半導体レーザーの強励起利得スイッチング動作では、注入された高密度電子正孔による光学利得が光パルス発生に寄与しており、同様の物理現象がそこに関与していると考えられる。強励起利得スイッチング動作による超短光パルス発生を目指す上で、その関係性を解明していくことも重要である。

2. 研究の目的

本研究では、強励起利得スイッチング動作による半導体レーザーからの極限短光パルス発生の実現とその短光パルス発生機構の解明を目的とする。

半導体レーザーへの強励起利得スイッチング動作では、半導体利得媒質中での高密度電子正孔系の瞬時形成とそれに誘起される光学非線形性効果により、通常のレート方程式解析では説明できない異常短光パルスの発生が期待される。本研究では、半導体利得領域への高密度電子正孔注入として、電流注

入法だけでなく、直接且つ瞬時に高密度キャリア注入可能な光励起による方法も合わせて行い、強励起利得スイッチング動作における高強度光子集団形成機構の解明を試みる。得られた知見を基に極限性能半導体レーザーの実現を目指す。

3. 研究の方法

(1) 強励起利得スイッチング動作

強励起利得スイッチング動作による半導体レーザーからの極限短光パルス発生実験として、電流注入法と光励起法の2つの方法を試みる。励起に超短光パルスを使用する光強励起では、半導体活性領域への直接キャリア励起が可能であるため、発生する光パルスの特性測定・評価を精緻かつ系統的に行うことができる。

(2) 強励起利得スイッチング半導体レーザー 光励起半導体レーザー

光励起による利得スイッチング動作実験として、光励起半導体レーザーを作製した。分子線エピタキシー法(MBE法)によりGaAs基板上に利得導波型GaAsバルクレーザー及び3周期GaAs量子井戸レーザー構造を形成し、フォトリソグラフィプロセスによりリッジ型レーザーデバイス構造を作製した。

電流注入半導体レーザー

電流注入型半導体レーザーとして、多電極(マルチセクション)半導体レーザーデバイス(以下、LD)を設計・作製した。GaAs系レーザー構造基板をMBE結晶成長し、フォトリソグラフィプロセスにてLD構造を作製した。

(3) 光導波路一様光励起レーザー発振

超短光パルスを使用した光強励起によるレーザー発振実験を行った。励起光をストライプ状に集光し、半導体レーザー共振器上部より活性領域を一様光励起した。

光強励起用光源には、自発発ファイバーレーザー光源(パルス幅300 fs)及びモードロックTiSaレーザー(パルス幅2 ps)を使用した。半導体レーザー共振器端面からのレーザー発振光を対物レンズで集光し、ストリークカメラ(時間分解能2 ps)、又は、高速フォトダイオード(時間分解能~10 ps)とサンプリングオシロスコープを組み合わせた検出系を用いて、光波形観察、パルス幅評価を行った。パルス幅数ps以下の光パルスについては、自己相関測定によりそのパルス幅評価を行った。

(4) 光導波路同軸光励起レーザー発振

光励起をレーザー共振器導波路端面側より行う同軸光励起法により利得スイッチング動作実験を行った。励起光源、光パルス検出は(2)と同じものを使用した。

(5)電流注入レーザー発振

高周波パルスジェネレータと高周波パワーアンプを組み合わせ、最小パルス幅 1ns、最大パルスピーク電圧約 40Vまで可変可能な電圧パルスを LD に印加し、直接駆動による利得スイッチング動作を行った。LD 端面からのレーザー発振光は(3)と同じ検出系を使用して評価した。

4. 研究成果

(1)光励起利得スイッチングレーザー発振

GaAs 量子井戸レーザー及びバルクレーザーについて、共振器上部からの一様光励起レーザー発振実験を行った。

量子井戸、バルクレーザー共に、弱励起下では、通常のレート方程式に従うようなレーザー発振が観測された[3]。しかし、励起強度を上げるに従い、光パルス幅が短くなるとともに、短波長側へのスペクトル広がり観測された。利得導波型バルクレーザーについて、この光パルスの短波長成分を抽出し、自己相関測定によりパルス幅を評価した。測定温度 5K、励起光強度 90mW(10MHz 繰り返し)において、パルス幅 670 fs、平均強度 50 uW、ピーク強度 7.5 W の光パルス発生を確認した[10]。測定温度や励起光パルス幅を変えた実験を行ったところ、同様な光励起強度依存性を示す光パルス発生が観測された。この結果は強励起下における短波長側にスペクトル広がりを伴う特異な光パルス発生が普遍的な現象であることを示している。

通常のレート方程式解析ではパルス幅が共振器光子寿命(本研究では、 ~ 3.4 ps)に制限される。しかし、光強励起による利得スイッチング動作下では、1ps を切るサブピコ秒光パルス発生が観測され[10]、これは通常のレート方程式からは予測することができない。この短パルス発生にはレート方程式解析では考慮されていない光共振器内部での励起(利得発生)のエネルギー的または空間的局在性や光パルス伝搬なども大きく関係していると考えられる。

(2)光導波路同軸光励起レーザー発振

(1)で実施した共振器上部からの一様光励起実験との比較として、光励起をレーザー共振器導波路端面側より行う同軸光励起法による利得スイッチング動作実験を試みた。利得スイッチング動作により、励起光強度にはほとんど依存せず、共振器周回時間にほぼ等しい時間間隔を持つ短光パルス列発生が観測された。各光パルスのパルス幅と立下り時間はそれぞれ 5.5 ps、2.6 ps と評価された(図1)。観測された光パルス立下り時間は光共振器寿命時間より短く、この結果は集中数型レート方程式では説明できないユニークな結果である。共振器周回時間に対応する光パルス列の発生は、光パルスが導波路内部を伝搬していることを示唆している。共振器内部での光伝搬を考慮した伝搬型レート

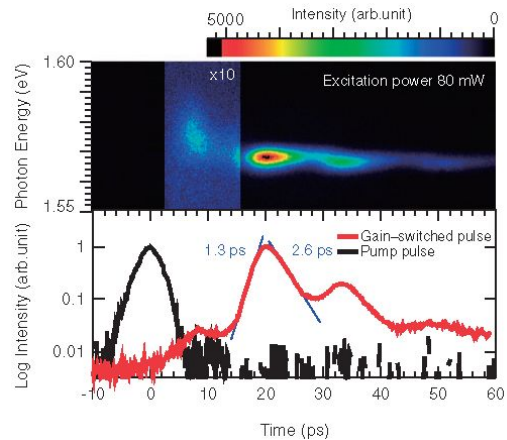


図1. 光導波路同軸光励起による光パルス発生. 波長分解ストリーク像(上図)と波長積分時間波形(下図)(文献[11]より引用)

方程式を構築し、それをを用いた解析を行った。得られた実験結果は成果として Appl. Phys. Express 誌にて発表した[11]。

(3)電流注入型半導体レーザーへの強励起利得スイッチングレーザー発振実験

2電極LD試料の一方の電極(利得領域)に順バイアス電流(電圧)パルスを、他方の電極(吸収領域)に逆バイアス電圧を印加しそのレーザー発振を観察した。吸収領域に逆バイアス電圧を印加しない場合には通常の利得スイッチング動作によるレーザー発振が観測された。印加する逆バイアス電圧を増加させていくと、光パルス幅が数 ps から数十 ps の多重光パルス発振状態へと変化した。この特異な多重光パルス発振は、逆バイアス電圧に強く依存することがわかった。本研究期間内に、特異なパルス発振を観測するところまで達成することができた。このような特異な発振現象の背景にある物理機構を解明するために、今後、順バイアス電流(電圧)パルス強度、パルス幅、逆バイアス電圧振幅を変えた詳細実験を実施して行く必要がある。

(4)超短光パルス発生機構についての考察

成果(1)で述べたように、強光励起利得スイッチング動作では、パルス幅がレーザー共振器寿命より短いなど通常の利得スイッチング動作理論では説明できないレーザー発振が観測された。このような光パルス発生機構として、強励起により広帯域にエネルギー分布した高密度キャリアによる大きな初期光学利得形成と、それに続く光パルス形成による利得の消費とキャリア間散乱による緩和過程を考慮したバンド内キャリアダイナミクスモデルを考えた。このモデルに基づいた光パルス発生の数値計算シミュレーションを行ったところ、観測された光パルスダイナミクスの励起強度依存性をよく説明する結果が得られた(投稿論文作成中)。

(5)本研究のまとめ

半導体レーザーを強励起利得スイッチング動作することで、パルス幅が1 ps 以下となる超短光パルス発生が実現可能であることがわかった。観測された短パルス発生メカニズムを現象論的なキャリアダイナミクスモデルにはあるが考察した。詳細な物理メカニズムの解明に向けて、今後更なる学術的研究が必要である。

応用展開として、電流注入型半導体レーザーへの強励起利得スイッチング動作による短パルス発生は非常に有望な技術であると考えられる。その実現に向けては、強励起電流注入のための低コストパルスジェネレーターの試作・開発も今後合わせて進めて行く必要がある。

<引用文献>

[1] S. Chen et al. Opt. Express, 20, 24843 (2012). [2] S. Chen et al. Jpn. J. Appl. Phys. 51, 098001 (2012). [3] T. Ito et al. Appl. Phys. Lett. 103, 082117 (2013). [4] S. Chen et al. Opt. Express 21, 10597 (2013). [5] S. Kono et al. Appl. Phys. Lett. 93, 131113 (2008). [6] P.P. Vasil'ev Rep. Prog. Phys. 72, 076501 (2009). [7] V. F. Oille et al. Opt. Express 20, 7035 (2012). [8] M. Xia et al. Opt. Express 20, 8755 (2012). [9] G. Timothy Noe II et al. Nat. Phys. 8, 219 (2012). [10] T. Ito et al. (投稿論文作成中). [11] H. Nakamae et al. Appl. Phys. Express 7, 62701 (2014).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4件)

Shao-Qian Chen, Takashi Ito, Akifumi Asahara, Hidekazu Nakamae, Takahiro Nakamura, Masahiro Yoshita, Changsu Kim, Baoping Zhang, Hiroyuki Yokoyama, Tohru Suemoto, and Hidefumi Akiyama, Transient gain analysis of gain-switched semiconductor lasers during pulse lasing, Applied Optics, 査読有, 54, 2015 10438-10442.

DOI: 10.1364/AO.54.010438

Hidekazu Nakamae, Takahiro Nakamura, Takashi Ito, Toshimitsu Mochizuki, Changsu Kim, Shaoqiang Chen, Masahiro Yoshita, and Hidefumi Akiyama, Gain switching of a double-core-waveguide semiconductor laser via traveling-wave optical pumping, Appl. Phys. Express, 査読有, 7, 2014 62701

DOI: 10.7567/APEX.7.062701

Toshimitsu Mochizuki, Changsu Kim, Masahiro Yoshita, Takahiro Nakamura,

Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, Mode Imaging and Loss Evaluation of Semiconductor Waveguides, Review of Scientific Instruments, 査読有, 85, 2014 53109

DOI: 10.1063/1.4879335

Akifumi Asahara, Shaoqiang Chen, Takashi Ito, Masahiro Yoshita, Wenjie Liu, Baoping Zhang, Tohru Suemoto, and Hidefumi Akiyama, Direct generation of 2-ps blue pulses from gain-switched InGaN VCSEL assessed by up-conversion technique, Scientific Reports, 査読有, 4, 2014 6401

DOI: 10.1038/srep06401

[学会発表](計 14件)

伊藤隆, 中前秀一, 狭間優治, 中村考宏, 金昌秀, 小林洋平, 吉田正裕, 秋山英文, 利得スイッチ半導体レーザーの短パルス発生限界, レーザー学会第37回年次大会 2017年1月7日~9日 徳島大学常三島キャンパス(徳島県徳島市)(招待講演)

中村考宏, 伊藤隆, 中前秀一, 金昌秀, 狭間優治, 吉田正裕, 大里啓孝, 秋山英文, Peter Vasil'ev, マルチセクション半導体レーザーにおける利得と吸収の非線形競合による短パルス光発生, 日本物理学会, 2016年03月19日~2016年03月22日 日東北学院大学泉キャンパス(仙台市泉区)

中前秀一, 伊藤隆, 中村考宏, 狭間優治, 金昌秀, 吉田正裕, 秋山英文, 小林洋平, 横山弘之, 利得スイッチ半導体レーザーパルスのファイバーアンプによる増幅, 日本物理学会, 2016年03月19日~2016年03月22日 日東北学院大学泉キャンパス(仙台市泉区)

中前秀一, 伊藤隆, 中村考宏, 狭間優治, 金昌秀, 吉田正裕, 秋山英文, 小林洋平, 横山弘之, 利得スイッチ半導体レーザーをシード光に用いた強励起での時間分解分光, 日本物理学会, 2015年09月16日~2015年09月19日 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市)

伊藤隆, 中前秀一, 中村考宏, 狭間優治, 金昌秀, 小林洋平, 吉田正裕, 秋山英文, 利得スイッチ半導体レーザーにおけるフェムト秒パルス発生メカニズム, 日本物理学会, 2015年09月16日~2015年09月19日 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市)

中村考宏, 伊藤隆, 中前秀一, 金昌秀, 狭間優治, 吉田正裕, 大里啓孝, 秋山英文, Peter Vasil'ev, マルチセクション半導体レーザーの作製評価と光短パルス発生, 日本物理学会,

2015年09月16日～2015年09月19日、関西大学千里山キャンパス（大阪府吹田市）

伊藤隆、中前秀一、中村考宏、挟間優治、金昌秀、小林洋平、吉田正裕、秋山英文、利得スイッチ半導体レーザーによるフェムト秒パルス発生と評価、応用物理学会 2015年09月13日～2015年09月16日名古屋国際会議場（名古屋市熱田区）

伊藤隆、中前秀一、陳少強、中村考宏、金昌秀、望月敏光、小林洋平、吉田正裕、秋山英文、利得スイッチ半導体レーザーのサブピコ秒パルス発生における共振器効果、日本物理学会 2015年春季大会、2015年03月21日～2015年03月24日、早稲田大学 早稲田キャンパス（東京都、新宿区）

中村考宏、望月敏光、金昌秀、陳少強、吉田正裕、秋山英文、リッジ型導波路ダブルコア半導体レーザー、日本物理学会 2014年秋季大会、2014年09月07日～2014年09月10日、中部大学 春日井キャンパス（愛知県、春日井市）

伊藤隆、中前秀一、陳少強、吉田正裕、望月敏光、金昌秀、小林洋平、秋山英文、利得スイッチ GaAs バルクレーザーの高密度領域における光インパルス応答特性、日本物理学会 2014年秋季大会 2014年09月07日～2014年09月10日、中部大学 春日井キャンパス（愛知県、春日井市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 正裕 (YOSHITA, Masahiro)
産業技術総合研究所・太陽光発電研究センター・主任研究員
研究者番号：30292759

(2) 連携研究者

秋山 英文 (AKIYAMA, Hidefumi)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：40251491

(3) 研究協力者

陳少強 (CHEN, Shaoqiang)
華東師範大学（中国）・教授

伊藤隆 (ITO, Takashi)
東京大学・物性研究所・博士研究員

中村孝宏 (NAKAMURA, Takahiro)
東京大学・物性研究所・学生（博士課程）

中前秀一 (NAKAMAE, Hidekazu)
東京大学・物性研究所・学生（博士課程）