

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6月10日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008～2012

課題番号：20104004

研究課題名（和文） 低次元半導体レーザーの低しきい値光学利得と高速光非線形性

研究課題名（英文） Low-threshold optical gain and high-speed optical nonlinearity in low-dimensional semiconductor lasers

研究代表者

秋山 英文（AKIYAMA HIDEFUMI）

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：40251491

研究成果の概要（和文）：

高品質量子細線レーザーを作製して、キャリア密度やキャリア温度・非平衡性を評価しつつバンド端での非線型光学利得特性を測定した。バンド端光学利得の発散的増大の抑制効果と、その原因であるキャリア間相互作用による振動子強度の再構成とブロードニング機構を解明した。半導体レーザーの利得スイッチングとスペクトル切り出しにより数 ps の短パルスの発生し、内在する高速光非線型性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We fabricated high-quality quantum-wire lasers, measured their carrier-density-dependent nonlinear optical gain, where we also characterized carrier densities, temperatures, and deviations from the thermal-equilibrium distribution. We clarified suppression effects of gain divergence at the 1D band edge and their mechanism of oscillator redistribution and broadening due to carrier-carrier interactions. We generated ps short pulses by gain switching and spectral filtering in semiconductor lasers, and investigated ultra-fast optical nonlinearities in the gain-switched lasers.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	39,800,000	11,940,000	51,740,000
2009年度	30,500,000	9,150,000	39,650,000
2010年度	28,800,000	8,640,000	37,440,000
2011年度	64,900,000	19,470,000	84,370,000
2012年度	27,900,000	8,370,000	36,270,000
総計	191,900,000	57,570,000	249,470,000

研究分野：数物性科学 / 工学

科研費の分科・細目：物理学 物性 I / 電気電子工学 電子・電気工学

キーワード：光物性・高速非線形 高性能レーザー 量子閉じ込め MBE 量子細線

1. 研究開始当初の背景

半導体レーザーの活性層を低次元化し、著しい低しきい値化など未踏の優れた特性を引き出すことに、ナノテクノロジー・光エレクトロニクス分野の大きな期待が寄せられた(1982年荒川・榊)。1985年浅田・宮本・末松らは、低次元量子構造を用いた半導体レ

ーザーの光学利得を解析し、状態密度の先鋭化と共にしきい値電流の低減などの優れた性能が実現できると予想した。1988年ヤリフは、一体バンド理論モデルに基づいて数値解析を行い、ファブリペロー型レーザーで達成可能な低しきい値電流が、量子井戸レーザーでは約 0.1mA 程度で、量子細線レーザー

では数 μA 程度に下がるであろうと予測した。しかし、これらの解析にはクーロン相互作用の効果は含まれていなかった。

1990年代以降、電子正孔間の相関効果(動的電子相関効果)を定性的に取り入れた有効モデル理論計算が行われ、低次元レーザーにおける相関効果の重要性が度々指摘された。しかし、定性的な有効モデル理論計算では、デバイス性能予測、特に定量的な予測・解析に用いることは出来なかった。

上記の問題に決着をつけるには、非線型光学利得に関する実験的な基礎データを系統的に得ること、さらにそれとの比較により、電子正孔系の多体相互作用や緩和などの動的電子相関効果を含む定量的半導体レーザー理論を作り上げる必要があった。

低次元半導体レーザーの光出力ゆらぎ、高速応答性、光非線形性など、非平衡・非定常レーザー動作について性能予測や設計を行うことは更に難しく、系統的な実験データの必要性が非常に高かった。

2. 研究の目的

多体量子物理・光エレクトロニクス研究を代表する典型系において動的電子相関効果の理解と制御を進め、その系統化した知見・技術を能動光デバイス一般に拡張し、本領域で推進する材料化学や量子情報応用などへ積極的かつ有効に応用する道を拓くことを目的とする。電子正孔間の相関効果(動的電子相関効果)が顕著に効くと予想される、低しきい値の低次元半導体レーザーをへき開再成長法により作製し、詳細に評価する。デバイス構造の立体自由度を活かし、電子系・正孔系・電子正孔系を任意の濃度かつ温度で制御し、 μA レベルの低しきい値での利得発生を目指す。そして、低しきい値で光学利得発生を達成する方法と、電子正孔間の電子相関効果の寄与を明らかにする。電流注入と光励起の併用により、定常準平衡および非平衡のレーザー発振特性と光学物性を計測し、低電流あるいは低キャリア密度領域での量子的ゆらぎの効果、高速応答性、光非線形性など、動的電子相関効果が強くかかると期待される現象・デバイス特性の機構や制限要因を探求する。

得られた系統的理解は、領域内の研究者らと協力して、光と半導体に関わる新しい光科学・物理の発展に有用な学理に引き上げる。本研究に直接対応するA04班小川らの「半導体レーザーの動的電子相関理論グループ」とは、常時強い連携を保ちつつ協力して狙いを絞り比較検討を行う。A02班野村ら、A03班金光ら、A04班鈴浦の研究とは物理や材料の面で相補的な関係がある。比較・対比を通じて普遍的理解を得る。材料化学が専門のA03班の計画・公募研究メンバーと連携し、動的

電子相関効果を活かす上で最適な新材料系を探索し、新材料光デバイス形成の道を拓く。

3. 研究の方法

MBEへき開再成長法を用いて、界面品質や構造均一性が著しく高く非常にシャープな発光線幅を有する半導体1次元量子細線および2次元量子井戸と、pn接合ダイオード・電界効果トランジスタ・光導波路・光共振器などのデバイス構造を立体的に組み合わせて、高品質かつ高度に制御された低次元半導体レーザーを構成する。具体的なターゲットとして、パイエキシトンレーザー、低しきい値トリオンレーザー、電子相関効果および光子統計性が顕著に現れると予想される少数多体電子正孔系レーザー、量子凝縮状態の前駆現象であるフェルミ端付近で利得吸収増大、光学利得のクーロン増強効果と抑制効果など、動的電子相関効果が顕著に働くことによって発振しきい値や変調特性、光子統計が強く影響を受ける効果・システムを研究する。

試料作製の効率化・迅速化を図るため、これまで研究協力者の米国ベル研究所のMBE装置においてのみ行っていたMBE成長を、日本国内でも行うことが出来るように、研究室内で旧MBE装置の整備・改造を進める。ナノ低次元構造レーザーは、活性領域体積が小さくピーク利得の絶対値が小さいため、発振を得るためには、共振器面に高反射率誘電体多層膜コートを行う必要がある。誘電体高反射多層膜形成法を導入し、レーザーの共振器端面への誘電体多層膜蒸着・反射率制御を行う。

領域内の時間分解分光チームと共同で、レーザー内部のキャリア・ダイナミクスを正確かつ定量的に評価する分光手法を開発し、動的電子相関効果の、高速現象・高速デバイス動作や非線型光学効果への寄与を抽出する。

4. 研究成果

平成20年度は、 $1.5\mu\text{m}$ 通信波長帯埋め込み型量子井戸レーザーで、しきい値電流が室温で5mA、低温100Kで0.3mAという高品質なデバイスの利得特性・スペクトルの温度依存性を計測し、電子間相互作用の効果を取り入れた光学スペクトル計算と比較する研究を行った。利得ピークから化学ポテンシャルエネルギー近傍のスペクトル形状は、実験と理論で良い一致を得たが、利得ピークから低エネルギー側のバンド端のテールの部分の形状は著しく差異があることが明らかになった。

半導体レーザーにおける電子正孔系の光学応答を研究する上では、キャリア温度の評価が重要である。そこで、ケナード・ステファノフ関係式(KS関係式)という基礎関係式を用いることでその温度評価を行う研究を進めた。まず、KS関係式の成立条件が比較的

達成されやすいと期待される n 型ドープ 2 次元量子井戸系において実験を行い、モデルに拠らずにキャリアの絶対温度がきちんと評価できることを確認した。

一方で、高速非線形現象観測のための光源・測定系の整備を進めた。とくに、ワイドギャップ半導体材料の時間分解分光を行うための電氣的同期が可能な紫外線領域のピコ秒パルス光源の開発を進めた。高速応答の 1.55 μm 帯 DFB-LD の利得スイッチング動作により、数 ps から数十 ps まで光パルスの時間幅を制御できることを確認した。その光パルスを増幅・波長変換し、最終的に繰り返し周波数 10MHz、最大平均パワー 12mW、最大ピークパワー 200W、波長 387nm の第 4 高調波光を得た。第 4 高調波光パルスも電氣的同期が容易であることを利用して、ストリークカメラにより色素溶液の蛍光寿命を行った。

平成 21 年度には、電流注入型量子細線レーザー素子と変調ドープ型量子細線レーザー素子を用いて、電子系・正孔系・電子正孔系の利得特性を、電荷中性および非中性の場合を含む任意の濃度かつ温度で調べた。電流注入型や変調ドープ型の T 型量子細線レーザーに対して、立体的な光学励起配置を工夫して、光励起を併用できるようにし、実際に、光励起により等濃度の電子正孔対を付加することで、様々な濃度の電子および正孔が注入された際の利得を計測することが出来た。その結果、T 型細線の電子及び正孔の量子閉じ込めの非対称性を反映して、電流注入時には構造に応じて電子過剰や正孔過剰のキャリア注入が起きること、そのため光励起で中性電子正孔対を励起した場合に比べて著しいスペクトルシフトとブロードニングが生ずることが解った。半導体ブロッホ方程式理論を用いて利得特性・スペクトルの計算を行い、実験との比較を行った。

マグネトロンスパッタリングによる誘電体多層膜形成および評価システムが整備された。半導体やガラス基板、半導体レーザー端面に、SiO₂/HfO₂ の減反射や高反射誘電体多層膜コートや SiO₂ 絶縁膜形成が可能になった。また、MBE 用真空チャンバー搬入、液体窒素断熱配管・気液分離器の設置・試運転が完了し、さらに真空ポンプほか各真空コンポーネントの評価・調整・更新作業が進んだ。

H22 年度には、発光および発光励起スペクトルの精密計測と KS 関係式を、非ドープ量子井戸に適用し、励起子状態とイオン化プラズマ状態の間に、キャリア温度は等しいが化学ポテンシャルがずれた非平衡状態が形成されていることを発見した。

単一の非ドープおよび変調ドープ型量子細線レーザー素子を用いて、光励起によって電子系・正孔系・電子正孔系の利得特性を調べた。KS 関係式と類似の KMS 関係式を用いて

キャリア温度を、また化学ポテンシャルおよび自然放出強度からキャリア濃度を決定することに成功した。これによって、光学利得スペクトルや強度について、電荷中性および非中性の場合を含む任意の濃度に対し同じ温度での、理論計算と実験結果を比較することが出来るようになった。

マグネトロンスパッタリングによる誘電体多層膜形成および評価システムを用いて半導体レーザー端面の高反射コーティングを進めた。平板基板上では設計どおりの高反射膜が得られたが、非平板の半導体レーザー端面においては設計どおりの膜厚が得られなかった。このため高真空下での電子ビーム蒸着をさらに進めることにした。

H23 年度には、これまでの実験データをもとに、理論との比較を行って 1 次元遮蔽クーロン相互作用と光学利得のクーロン増強効果と抑制効果の関係やそれらの特徴を明らかにすることに成功した。一層の試料開発のため MBE 装置の整備・改造を進め、ベーキングやリークチェックをした上で、材料の蒸発セルを組み入れ、薄膜の試験成長を開始した。酸化物や窒化物を材料として用いた半導体レーザーの利得特性の研究も進めた。

超高密度励起下における半導体量子井戸レーザーの非線形現象・非線形光学効果研究として、利得スイッチングの実験を代表者と分担者が共同で進めた。InGaAs 系 1030nm 帯光励起量子井戸レーザーや GaAs 系 800nm 帯の光励起量子井戸レーザーの、光励起利得スイッチによる短パルス発生を行い、高速フォトダイオードと高速オシロスコープによる評価に加え、高感度オートコリレーション測定系を立上げて、評価を進めた。実際のパラメータを用いたレート方程式による解析を行い、実験結果との比較を行った。領域内の理論チームと共同で半導体ブロッホ方程式を用いた理論解析との比較も行った。パルスの強励起下にて短波長シフトして短パルス化が増強するメカニズムを追求するため、光励起半導体量子井戸レーザーの利得スイッチング動作を行い、波長分解で発振の時間的变化をトレースした。比較のために、電流パルス励起の利得スイッチング動作についても詳細に調べた。

H24 年度には、T 型量子細線を 5 本だけ含む半導体レーザー構造試料に対して、端面への高反射率誘電体多層膜コーティングを行い、電流注入による低しきい値レーザー発振に成功した。また、本科研費で立上げを行った MBE 装置を用いて、縦型光励起を行うためのダブルコアスラブ導波路量子井戸半導体レーザー構造を開発して、発振させることに成功した。本新学術領域研究の最終年度となるので、研究成果の積極的な公表を行った。

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 41 件) 以下全て査読有

1. T. Nakamura, T. Mochizuki, C. Kim, S. Chen, M. Yoshita, and H. Akiyama, "Double-core-slab-waveguide semiconductor lasers for end optical pumping", Applied Physics Express 6, 062702 (2013)
(<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.6.062702>)
2. S. Chen, M. Yoshita, A. Ishikawa, T. Mochizuki, S. Maruyama, H. Akiyama, Y. Hayamizu, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Intrinsic radiative lifetime derived via absorption cross section of one-dimensional excitons", Scientific Reports 3, 1941 (2013).
(<http://dx.doi.org/10.1038/srep01941>)
3. T. Mochizuki, T. Ihara, M. Yoshita, S. Maruyama, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Fluorescent Radiation Thermometry at Cryogenic Temperatures Based on Detailed Balance Relation" Applied Physics Express 6, 056602 (2013),
(<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.6.056602>)
4. S. Chen, M. Yoshita, A. Sato, T. Ito, H. Akiyama, and H. Yokoyama, "Dynamics of short-pulse generation via spectral filtering from intensely excited gain-switched 1.55- μ m distributed-feedback laser diodes" Optics Express 21, 10597 (2013)
(DOI:10.1364/OE.21.010597)
5. N. Ohta, K. Arimoto, M. Shiraga, K. Ishii, M. Inada, S. Yanai, Y. Nakai, H. Akiyama, T. Mochizuki, T. Takahashi, N. Takahashi, H. Miyagawa, N. Tsurumachi, S. Nakanishi, and S. Koshiha, "Electroluminescence of GaNAs/GaAs MQWs p-i-n Junctions Grown by RF-MBE using Modulated Nitrogen Radical Beam Source" J. Cryst. Growth, DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.01.034, in press.
(DOI:10.1016/j.jcrysgro.2013.01.034)
6. S. Chen, M. Yoshita, T. Ito, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Yokoyama, "Gain-switched pulses from InGaAs ridge-quantum-well lasers limited by intrinsic dynamical gain suppression" Optics Express, 21, 7570-7576 (2013)
(DOI:10.1364/OE.21.007570)
7. R. Koda, T. Oki, S. Kono, T. Miyajima, H. Watanabe, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama, "300 W peak power picosecond optical pulse generation by blue-violet GaInN mode-locked laser diode and semiconductor optical amplifier" Appl. Phys. Express 5, 022702, (2012)
(DOI:10.1143/APEX.5.022702)
8. S. Chen, M. Okano, B. Zhang, M. Yoshita, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu, "Blue 6-ps short-pulse generation in gain-switched InGaN vertical-cavity-surface-emitting lasers via optical pumping" Appl. Phys. Lett. 101, 191108 (2012)
(DOI:10.1063/1.4766290)
9. K. Takamiya, T. Fukushima, S. Yagi, Y. Hijikata, T. Mochizuki, M. Yoshita, H. Akiyama, S. Kuboya, K. Onabe, R. Katayama, and H. Yaguchi, "Biexciton Luminescence from Individual Isoelectronic Traps in Nitrogen-Doped GaAs" Appl. Phys. Express 5, 111201, (2012)
(DOI:10.1143/APEX.5.111201)
10. K. Arimoto, M. Shiraga, H. Shirai, S. Takeda, M. Ohmori, H. Akiyama, T. Mochizuki, K. Yamaguchi, H. Miyagawa, N. Tsurumachi, S. Nakanishi, and S. Koshiha, "Electrical and Optical Properties of GaNAs/GaAs MQW p-i-n Junctions" Transactions of the Materials Research Society of Japan, 37, 193-196 (2012)
11. S. Chen, A. Sato, T. Ito, M. Yoshita, H. Akiyama, and H. Yokoyama, "Sub-5-ps optical pulse generation from a 1.55- μ m distributed-feedback laser diode with nanosecond electric pulse excitation and spectral filtering" Optics Express. 20, 24843 (2012) (DOI:10.1364/OE.20.024843)
12. K. Kamide, M. Yoshita, H. Akiyama, M. Yamaguchi, T. Ogawa, "Fano-resonance gain by dephasing electron-hole Cooper pairs in semiconductors" J. Phys. Soc. Jpn. 81, 093706 (2012).
(DOI:10.1143/JPSJ.81.093706)
13. M. Okano, Y. Kanemitsu, S. Chen, T. Mochizuki, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Observation of high Rydberg states of one-dimensional excitons in GaAs quantum wires by magneto-photoluminescence excitation spectroscopy" Phys. Rev. B 86, 085312 (2012)
(DOI:10.1103/PhysRevB.86.085312)

14. M. Yoshita, K. Kamide, H. Suzuura, and H. Akiyama, "Applicability of continuum absorption in semiconductor quantum wells to absolute absorption-strength standards" *Appl. Phys. Lett.* 101, 032108 (2012) (DOI:10.1063/1.4737900)
15. T. Tachikawa, M. Minohara, Y. Nakanishi, Y. Hikita, M. Yoshita, H. Akiyama, C. Bell, and H. Y. Hwang, "Metal-to-insulator transition in anatase TiO₂ thin films induced by growth rate modulation" *Appl. Phys. Lett.* 101, 022104 (2012) (DOI:10.1063/1.4733724)
16. S. Chen, M. Yoshita, T. Ito, T. Mochizuki, H. Akiyama, H. Yokoyama, K. Kamide, and T. Ogawa, "Analysis of gain-switching characteristics including strong gain saturation effects in low-dimensional semiconductor lasers" *Jpn. J. Appl. Phys.* 51 (2012) 098001 (<http://jjap.jsap.jp/link?JJAP/51/098001/>)
17. T. Mochizuki, M. Yoshita, S. Maruyama, C. Kim, K. Fukuda, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, "Waveguide two-point differential-excitation method for quantitative absorption measurements of nanostructures" *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 106601 (2012) (<http://jjap.jsap.jp/link?JJAP/51/106601/>)
18. M. Yoshita, T. Okada, H. Akiyama, M. Okano, T. Ihara, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Quantitative absorption spectra of quantum wires measured by analysis of attenuated internal emissions" *Appl. Phys. Lett.* 100, 112101 (2012) (DOI:10.1063/1.3693401)
19. T. Oki, R. Koda, S. Kono, T. Miyajima, H. Watanabe, M. Kuramoto, and H. Yokoyama, "Direct generation of 20 W peak power picosecond optical pulses from an external-cavity mode-locked GaInN laser diode incorporating a flared waveguide" *Appl. Phys. Lett.* 99, 111105, (2011) (DOI:10.1063/1.3640499)
20. Y. Kozawa, T. Hibi, A. Sato, H. Horanai, M. Kurihara, N. Hashimoto, H. Yokoyama, T. Nemoto, and S. Sato, "Lateral resolution enhancement of laser scanning microscopy by a higher-order radially polarized mode beam" *Opt. Express*, 19, 15947-15954, (2011)
21. T. Miyajima, S. Kono, H. Watanabe, T. Oki, R. Koda, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama "Saturable absorbing dynamics of GaInN multiquantum well structures" *Appl. Phys. Lett.* 98, 171904 (2011). (DOI:10.1063/1.3583456)
22. 秋山英文, 吉田正裕, "T型 GaAs 量子細線の光学応答と動的相関効果" *固体物理* 46, 747-756 (2011)
23. M. Okano, P. Huai, M. Yoshita, S. Inada, H. Akiyama, K. Kamide, K. Asano, and T. Ogawa "Robust carrier-induced suppression of peak gain inherent to quantum-wire lasers" *J. Phys. Soc. Jpn.*, 80, 114716 (2011). (DOI:10.1143/JPSJ.80.114716)
24. K. Goshima, A. Kittaka, K. Fujii, M. Shiraga, N. Tsurumachi, S. Nakanishi, H. Akiyama, S. Koshiba and H. Itoh, "Investigation of the confinement potential within GaNAs/GaAs multiple quantum wells" *Physica Status Solidi C* 8, 414-416 (2011) (DOI:10.1002/pssc.201000587)
25. T. Higuchi, Y. Hotta, Y. Hikita, S. Maruyama, Y. Hayamizu, H. Akiyama, H. Wadati, D. G. Hawthorn, T. Z. Regier, R. I. R. Blyth, G. A. Sawatzky, and H. Y. Hwang, "LaV04:Eu Phosphor films with enhanced Eu solubility" *Appl. Phys. Lett.* 98, 071902 (2011) (DOI:10.1063/1.3554749)
26. M. Shiraga, Y. Nakai, T. Hirashima, A. Kittaka, M. Ebisu, N. Takahashi, T. Noda, M. Ohmori, H. Akiyama, N. Tsurumachi, S. Nakanishi, H. Miyagawa, H. Itoh, and S. Koshiba, "Effects of Mg doping on Optical and Electrical Properties of GaNAs Multiple Quantum Wells" *Phys. Status Solidi C* 8, 420-422 (2011) (DOI 10.1002/pssc.201000595)
27. M. Okano, M. Yoshita, H. Akiyama, P. Huai, T. Ogawa, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Coulomb-modulated gain spectra in current-injection T-shaped quantum-wire lasers" *Phys. Status Solidi C* 8, 20-23 (2011)
28. S. Kono, T. Oki, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama "Intensity autocorrelation measurement of 400 nm picosecond optical pulses from a GaInN mode-locked semiconductor laser diode using surface second harmonic generation of β -BaB₂O₄ crystal," *Appl. Phys. Express* 3, 122701, (2010) (DOI:10.1143/APEX.3.122701)
29. H. Watanabe, M. Kuramoto, S. Kono, M. Ikeda, and H. Yokoyama "Blue-violet bow-tie self-pulsating laser diode with a peak power of 20 W and a pulse energy

- of 310 pJ” Appl. Phys. Express 3, 122103, (2010) (DOI:10.1143/APEX.3.122103)
30. S. Tashiro, Y. Takemoto, H. Yamatsu, T. Miura, G. Fujita, T. Iwamura, D. Ueda, H. Uchiyama, K. Yun, M. Kuramoto, T. Miyajima, M. Ikeda, and H. Yokoyama “Volumetric optical recording using a 400 nm all-semiconductor picosecond laser” Appl. Phys. Express 3, 102501, (2010) (DOI:10.1143/APEX.3.102501)
31. R. Koda, T. Oki, T. Miyajima, H. Watanabe, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama “100 W peak-power 1 GHz repetition picoseconds optical pulse generation using blue-violet GaInN diode laser mode-locked oscillator and optical amplifier” Appl. Phys. Lett., 97, 021101, (2010) (DOI:10.1063/1.3462942)
32. H. Watanabe, T. Miyajima, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama, “10-W peak-power picosecond optical pulse generation from a triple section blue-violet self-pulsating laser diode” Appl. Phys. Express 3, 052701, (2010) (DOI:10.1143/APEX.3.052701)
33. T. Oki, K. Saito, H. Watanabe, T. Miyajima, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama “Passive and hybrid mode-locking of an external-cavity GaInN laser diode incorporating a strong saturable absorber” Appl. Phys. Express 3, 032104, (2010). (DOI:10.1143/APEX.3.032104)
34. M. Kuramoto, T. Oki, T. Sugahara, S. Kono, M. Ikeda, and H. Yokoyama “Enormously high-peak-power optical pulse generation from a single-transverse-mode GaInN blue-violet laser diode” Appl. Phys. Lett. 96, 051102, (2010) (DOI:10.1063/1.3299261)
35. Sato, S. Kono, K. Saito, K. Sato, and H. Yokoyama “A high-peak-power UV picosecond-pulse light source based on a gain-switched 1.55 μ m laser diode and its application to time-resolved spectroscopy of blue-violet materials” Opt. Express 18, 2522-2527, (2010)
36. K. Saito, H. Watanabe, T. Miyajima, M. Ikeda, and H. Yokoyama “Mode locking of an external-cavity bisection GaInN blue-violet laser diode producing 3 ps duration optical pulses” Appl. Phys. Lett. 96, 031112, (2010) (DOI:10.1063/1.3292025)
37. T. Fukushima, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, M. Okano, M. Yoshita, H. Akiyama, S. Kuboya, R. Katayama, and K. Onabe, “Photoluminescence from single isoelectronic traps in nitrogen delta-doped GaAs grown on GaAs (111)A” Physica E 42, 2529-2531 (2010)
38. T. Miyajima, H. Watanabe, M. Ikeda, and H. Yokoyama “Picosecond optical pulse generation from self-pulsating bisectional GaN-based blue-violet laser diodes” Appl. Phys. Lett. 94, 161103, (2009) (DOI:10.1063/1.3106055)
39. T. Oki, S. Kono, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama “Generation of over 10-W peak-power picosecond pulses by a gain-switched AlGaInN-based self-pulsating laser diode” Appl. Phys. Express 2, 032101, (2009) (DOI:10.1143/APEX.2.032101)
40. M. Yoshita, M. Kuramoto, M. Ikeda, and H. Yokoyama “Mode locking of a GaInN semiconductor laser with an internal saturable absorber,” Appl. Phys. Lett. 94 061104, (2009) (DOI:10.1063/1.3079403)
41. T. Ihara, S. Maruyama, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, “Thermal-equilibrium relation between the optical emission and absorption spectra of a doped semiconductor quantum well” Phys. Rev. B 80, 033307 (2009)

[学会発表] (計 89 件)

1. H. Hirori, K. Shinokita, K. Uchida, K. Tanaka, T. Mochizuki, H. Akiyama, K. W. West, L. N. Pfeiffer: “Nonlinear Interactions of GaAs/AlGaAs Multi-Quantum Wells with Intense THz Pulses” International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology (OTST) 2013, 2013 年 4 月 1-5 日, Kyoto Terrsa Japan,

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

横山 弘之 (YOKOYAMA HIROYUKI)
 東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授
 研究者番号: 60344727