

機関番号：12601

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008~2010

課題番号：20360135

研究課題名 (和文) 低しきい値量子細線レーザーの作製とその発振特性の物理

研究課題名 (英文) Fabrication of low-threshold quantum-wire lasers
and study on their lasing properties and physics

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)：

MBE へき開再成長 T 型 GaAs 量子細線の利点を生かして、量子細線レーザーの低しきい値発振を行い、そしてそれらのデバイスが示すレーザー発振特性と光学物性・光学応答を定量計測し、量子細線レーザーの利点や性能が上記の最初の理論予測どおりなのかどうかを検証した。15-20 周期の量子細線を活性層に用いた垂直配置 p-n 接合を有する電流注入量子細線レーザー、その p 型と n 型を逆に配置した転置型電流注入量子細線レーザー、平行配置 p-n 接合を有する電流注入量子細線レーザーなど、非ドーブおよび n 型変調ドーブ単一量子細線レーザーなど各種のデバイスに対して、電流注入と光励起により非中性及び中性の電子正孔分布を形成し、利得スペクトルやピーク利得の定量評価を行い、半導体ブロッホ方程式理論をもとに、定量的理論計算を行い比較を行った。全体的なスペクトル形状に関して定量的な良い一致が得られた一方、低エネルギーテイルの部分の不一致が明らかになった。

研究成果の概要 (英文)：

We studied high-quality T-shaped GaAs quantum-wire lasers by cleaved-edge overgrowth in molecular-beam-epitaxy, demonstrate their low-threshold lasing, and investigated lasing and basic optical properties quantitatively, to examine advantages and performances predicted by seminal theoretical proposals. We fabricated current-injection 15-period quantum-wire lasers with a vertical p-n junction geometry, an inverted current-injection 15-period quantum-wire lasers with an inverted p-n junction geometry, current-injection 20-period quantum-wire lasers with a parallel p-n junction geometry, undoped and n-type-modulation-doped single quantum-wire lasers, and other laser devices. We made current injection and optical pumping to the sample devices, generated charge-neutral and charge-imbalanced electron-hole carriers, and measured their lasing properties, gain spectra, and peak gain quantitatively. We compared the experimental results with quantitative calculations on the basis of semiconductor Bloch equations, and obtained good agreements in peak gain values and overall gain spectra except for the low energy tail structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2009 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2010 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：薄膜・量子構造、量子細線、レーザー、MBE、へき開再成長

1. 研究開始当初の背景

1982年荒川・榊、1985年浅田・宮本・末松らは、量子細線を半導体レーザーの活性層に用いた量子細線レーザーを提案・解析し、低次元化に伴う状態密度の先鋭化のため、しきい値電流の低減、微分利得の向上、温度変化に対する安定性の増加など優れた性能が実現できると予想した。これらをもとに1988年ヤリフは、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は、量子井戸レーザーでは約0.1mA程度（実験的にもその程度）だが、量子細線レーザーでは約2-3 μ A程度であろうと数値予測した。一方、実験で実現されている量子細線レーザーのしきい値電流の報告は、1989年のベルコアのカポンらの最初のV溝型GaAs量子細線レーザーで50mA、1994年の米国IBMのティワリらのV溝型InGaAs量子細線レーザーで0.19mA、1994年米国ベル研のヴェグシャイダー・ファイファーらのT型GaAs量子細線レーザーで0.4-0.7mA、2005年の東工大の八木・荒井らのEBリソグラフィドライエッチング再成長1.5 μ m波長帯InGaAsP量子細線レーザーで1-2mAである。依然として技術的な問題からくる制限が大きいため、量子細線レーザーの実験の最低しきい値はまだ0.2mA程度で、量子細線レーザーの理論予測値2-3 μ Aには遠く、量子井戸レーザーの限界値0.1mAを下回ることが出来ていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、量子細線レーザーを用いて初めて達成される0.1mA以下のしきい値を実現するための道筋を示す。へき開再成長T型量子細線の利点を活かして研究用高品質試料を作製し、それらのデバイスが示すレーザー発振特性と光学物性を計測し、量子細線レーザーの利点や性能が上記の最初の理論予測どおりなのかどうかを検証することを目的とする。それにより初めて、提案された効果や機構が理解解明し、低次元ナノ構造レーザー研究・開発の学術的基礎を築く。

3. 研究の方法

高品質T型量子細線を用いて電流注入レーザーと変調ドープレーザーを作製し、電流注入と光励起の両方の励起方法を用いて、詳細な物理計測を行って、キャリア注入過程と形成された非中性電子・正孔系の分布や光学利得スペクトルを調べ、一次元非中性電子・正孔系の光学利得の特徴を明らかにしようと試みた。

また、静的遮蔽ハートリーフォック(SHF)近似を用いた光学スペクトルの理論計算を行い、それとの比較を通して、一次元系の光

学利得におけるクーロン相互作用の影響に対する普遍的な知見を得ることを試みた。

4. 研究成果

各々2種類の電流注入型レーザー試料(試料A, B)と光励起実験用レーザー試料(試料C, D)を劈開再成長法と成長中断アニール法

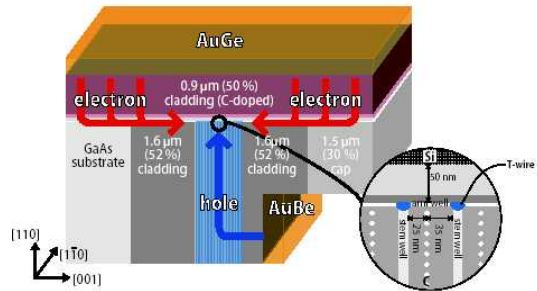


図1 p型ステム井戸とn型アーム井戸からなる電流注入T型量子細線レーザー試料構造(試料A)。

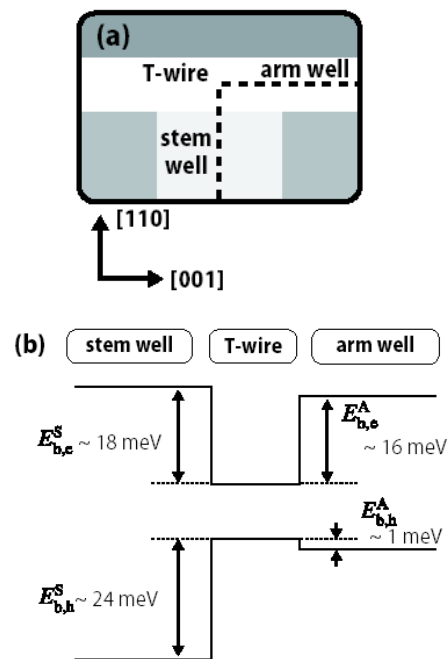


図2 (a) T型量子細線周辺の断面図。(b) (a)の点線に沿ったエネルギーバンド図

を用いて作製した。

図1に示したp型(001)量子井戸(ステム井戸)とn型(110)量子井戸(アーム井戸)からなる電流注入T型量子細線レーザー(試料A)においてはステム井戸から正孔が、アーム井戸から電子が細線へと注入される。

T型量子細線においては図2に示すように、細線における電子と正孔の閉じ込めエネルギーが大きく異なる。そこで、キャリア注入やキャリア分布の影響を調べるために試料A

に対してドーピング構造を入れ替えた試料 B を作製した。また、電流注入ではキャリア密度を定量的に評価することは困難であるため、キャリア密度差が明らかな n 型変調ドープ (試料 D, $n_e = 4 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$) と非ドープ (試料 C) の単一量子細線レーザーを作製し比較を行った。測定としては主に電流注入及び光励起増幅自然放出光 (ASE) 測定を行った。得られたスペクトルに対して Cassidy の方法を用いて利得スペクトルを導出し、光学利得に関する系統的な研究を行った。また、SHF 理論計算との比較から一次元非中性電子・正孔系

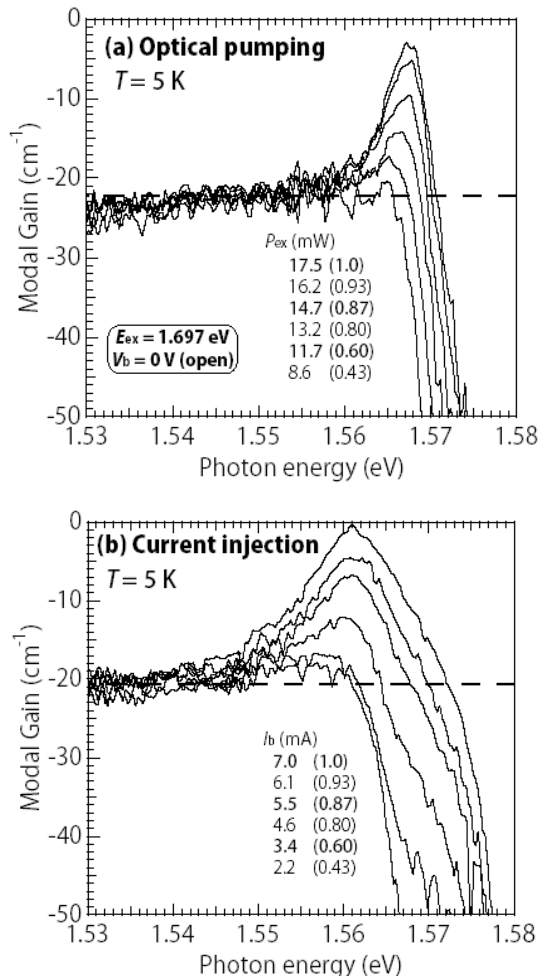


図3 試料 A の (a) 光励起 ASE 実験及び (b) 電流注入 ASE 実験における利得スペクトル (5 K)。励起強度・電流の横に示したのは自然放出光強度を規格化した値。

の光学利得へのクーロン相互作用の影響を考察した。

試料 A においては、電流注入 T 型量子細線レーザーの最高温度である 110 K 及び最広温度範囲 5 - 110 K でのレーザー発振が達成された。一方で、外部微分量子効率 α_m は 1% 未満の低い値であった。顕微 ASE イメージ測定から、この原因はステム井戸から注入される正孔がアーム井戸にまで広く分布してしまっていることだとわかった。そして、細線部に正

孔過剰の非中性電子・正孔系が形成されていることが明らかになった。

図 3 に試料 A の 5 K での (a) 光励起 ASE 実験及び (b) 電流注入 ASE 実験から得られた利得スペクトルを示す。導波路と垂直方向に出てくる自然放出光強度が等しいもの同士を示した。(a) においては電子と正孔の密度が

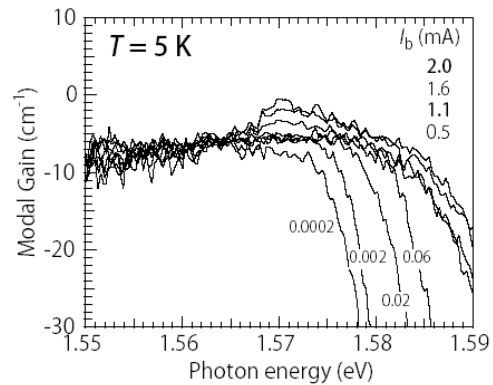


図4 試料 B での電流注入実験における利得スペクトル (5 K)。

等しく増加していくのに伴い、比較的シャープな利得ピークが増大する様子が観測された。(b) においては正孔が少し過剰な状態で電子と正孔のキャリア密度が増加していくのに伴い、低エネルギー側に裾を持った利得ピークが生じた後に、ブロードな利得ピークが増大していく様子が観測された。電流注入時の利得ピークは光励起時に比べ約 6.5 meV 低エネルギー側に現れたが、これは正孔が過剰に注入されていることによってバンドギャップ縮小効果 (BGR) が大きくなっているためだと考えられる。ピーク形状に関して、電流注入時の高エネルギー側の裾の広がり、電子と正孔のフェルミ波数が異なることを反映していると考えられる。また、電流注入時の低エネルギー側の裾の広がり、過剰注入された正孔によって多体効果の影響が大きくなったことを示唆している。

一方、n 型ステム井戸と p 型アーム井戸からなる電流注入 T 型量子細線レーザー (試料 B) の利得測定実験では、ステム井戸から注入

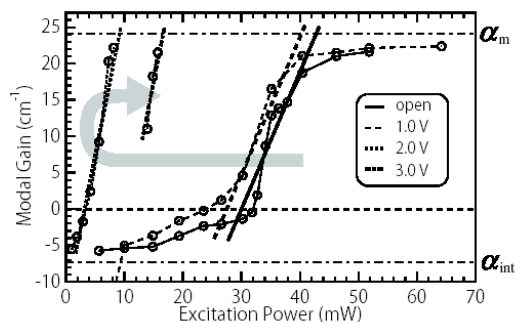


図5 試料 B の各バイアス電圧印加下における光励起実験から得られた利得ピーク値の光励起強度依存性 (5K)。

される電子の閉じ込めが強いため、電子が非常に過剰な非中性電子・正孔系が形成されて

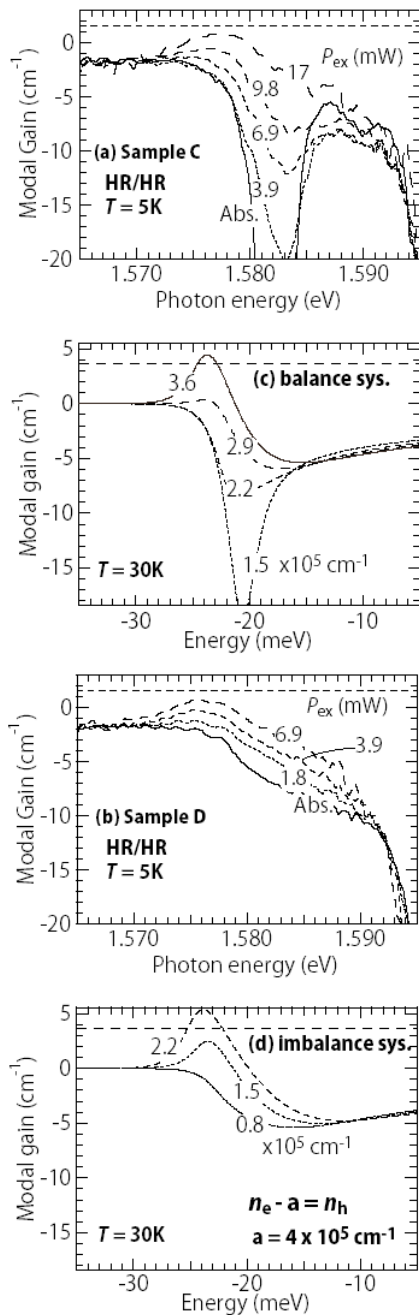


図6 (a) 非ドープ(試料C)及び(b)n型変調ドープ単一量子細線レーザー(試料D)の利得スペクトルの光励起強度依存性。SHF計算による(c)中性及び(d)非中性電子・正孔系における利得スペクトルのキャリア密度依存性。

いることを示す結果を得た。

図4に5Kでの試料Bにおける電流注入実験から得られた利得スペクトルを示す。低電流領域($I_b = 0.2 - 500 \mu A$)では、電流の増加に伴って吸収端がブルーシフトしていくものの利得がほとんど生じなかった。さらに電流を上げていくと $I_b = 1.1 \text{ mA}$ で利得ピーク現れ、 2.0 mA で利得が飽和することがわかった。低電流領域において、吸収端のブルーシ

フトは多数キャリアのフェルミエネルギーの増加を反映し、利得が発生していないことは少数キャリアの正孔がほとんど注入されていないことを反映している。また、 $I_b = 1.1 \text{ mA}$ における利得ピークの出現は少数キャリアである正孔が状態を占有し始めたことを、 2.0 mA での利得の飽和は正孔密度がそれ以上増加しなくなったことを示している。

試料Aと試料Bにおける利得スペクトルの電流依存性は、細線における閉じ込めエネルギーの違いから理解された。正孔過剰である試料Aにおいては利得が生じ始めるまでは吸収端のシフトが殆ど起こらないが、これは細線における正孔の閉じ込めエネルギーが 1 meV と小さいことを反映している。一方、電子の閉じ込めエネルギーは約 16 meV なので、電子は単独でも約 $1.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ の密度まで細線に注入できる。そのため、試料Bでは電気的非中性が試料Aよりも強い。順バイアスを増しても細線部はn型領域内に位置し、正孔密度があまり高密度にならないため、利得が飽和すると考えられる。

電子が過剰に注入される試料Bにおいて、バイアス電圧を変化させることで電子密度を系統的に変化させ、光励起ASE実験によって光学利得に有利な条件を探った。

図5に5Kでの各バイアス電圧印加下における利得ピーク値の光励起強度依存性を示す。中性系を形成する両電極間を開放した状態($V_b = \text{open}$)と $V_b = 1 \text{ V}$ が非常に似た依存性を示した。電子が少し過剰に注入されていると考えられる 2 V は 1 V に比べて $1/4$ 以下の閾値励起強度を示した。 3 V においては強いバイアス電圧による電荷分離の影響が大きくなるため、閾値が増加することが明らかになった。また、アーム井戸とドーピング層のセットバック長が異なる試料B*においてもバイアス電圧を印加して光励起実験を行ったところ、非ドープ試料の $1/5$ 程度である約 1 mW という低閾値での発振が観測された。温度依存性の実験などから、利得は電子が少し注入された条件での荷電励起状態に由来するものであることが示唆された。

試料C, Dに対して光励起ASE実験を行い、電子過剰の非中性電子・正孔系における利得特性をより定量的に調べた。

図6(a)、(b)に試料C, Dにおける利得スペクトルの光励起強度依存性をそれぞれ示す。(a)の試料Cでは弱励起で 1.582 eV に強い励起吸収が観測され、励起強度の増加に伴って徐々に吸収ピークが小さくなっていき、その低エネルギー側に利得ピークが現れ増大した。(b)の試料Dにおいては弱励起の状態($P_{ex} = 1.8 \text{ mW}$)で既に利得が生じており、比較的ブロード且つ対称な形状を持った利得ピークが増大した。(a)と(b)の発振閾値を比

較すると試料Dは試料Cの約半分の値を示し、電子過剰の非中性電子・正孔系においては確かに閾値が減少することが明らかになった。

実験結果をSHF計算結果と比較した。計算された中性及び非中性電子・正孔系における利得スペクトルを図6(c), (d)にそれぞれ示す。(a)と(c)を比較すると、吸収の低エネルギー側の裾から利得が生じること、利得ピークが低エネルギー側に裾を持つ非対称な形状であることがよく再現された。(b)と(d)に関しても、利得ピークが比較的対称な形状を持つことがよく再現された。また、非中性電子・正孔系において閾値が減少することも再現できた。

さらに、SHF計算によって様々な条件下における一次元電子・正孔系の光学利得スペクトルを計算し、光学利得へのクーロン相互作用の影響を明らかにした。一次元系においてはバンド端で利得の抑制が起こり、各キャリアのフェルミ波数に対応する遷移エネルギー(中性電子・正孔系におけるフェルミ端)において利得と吸収の増強が起こることが明らかになった。接触型クーロンポテンシャルを基にした考察から、クーロン増強因子の概形は状態密度の形状と電子正孔間クーロン相互作用の短距離部分の強さで理解することができ、バンド端での利得の抑制は一次元系特有の現象であることが明らかになった。

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19件)

① Masahiro Yoshita, Takayuki Okada, Hidefumi Akiyama, Makoto Okano, Toshiyuki Ihara, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, "Quantitative absorption spectra of quantum wires measured by analysis of attenuated internal emissions" Appl. Phys. Lett. (accepted for publication, 2012. 2. 23) 査読有

② 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 549, No. 11 747-756 (2011). 査読有

③ 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). 査読有

④ Masahiro Shiraga, Yuko Nakai, Tomohiko

Hirashima, Akinobu Kittaka, Mari Ebisu, Naoshi Takahashi, Takeshi Noda, Masato Ohmori, Hidefumi Akiyama, Noriaki Tsurumachi, Shunsuke Nakanishi, Hayato Miyagawa, Hiroshi Itoh, and Shyun Koshiba, "Effects of Mg doping on Optical and Electrical Properties of GaNAs Multiple Quantum Wells", Phys. Status Solidi C 8, 420-422 (2011). 査読有

⑤ 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). 査読有

⑥ Yu Wang, Hidehiro Kubota, Nobuyuki Yamada, Tsutomu Irie, and Hidefumi Akiyama, "Quantum Yields and Quantitative Spectra of Firefly Bioluminescence with Various Bivalent Metal Ions", Photochemistry and Photobiology 87, 846-852 (2011). 査読有

⑦ Keishiro Goshima, Akinobu Kittaka, Kensuke Fujii, Masahiro Shiraga, Noriaki Tsurumachi, Shunsuke Nakanishi, Hidefumi Akiyama, Shyun Koshiba and Hiroshi Itoh, "Investigation of the confinement potential within GaNAs/GaAs multiple quantum wells", Physica Status Solidi C 8, 414-416 (2011). 査読有

⑧ 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). 査読有

⑨ 秋山英文, 安東頼子, 王瑜, "ホテルの発光の効率と色変化機構一定量計測による新事実—" 現代化学 473, 21-25 (2010). 査読有

⑩ 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, Issue 10, 2529-2531 (2010). 査読有

⑪ Yoriko Ando and Hidefumi Akiyama, "pH-Dependent Fluorescence Spectra,

Lifetimes, and Quantum Yields of Firefly-Luciferin Aqueous Solutions Studied by Selective-Excitation Fluorescence Spectroscopy”, Jpn. J. Appl. Phys. 49, 117002, (2010). 査読有

⑫ Toshiyuki Ihara, Shun Maruyama, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, “Thermal-equilibrium relation between the optical emission and absorption spectra of a doped semiconductor quantum well”, Phys. Rev. B 80, 033307 (2009). 査読有

⑬ Makoto Okano, Shu-man Liu, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West “Current injection T-shaped quantum wire lasers with perpendicular doping layers operating at 100K”, Physica E 40, Issue 6, 1947-1949 (2008). 査読有

⑭ Y. Endo, Y. Hijikata, H. Yaguchi, S. Yoshida, M. Yoshita, H. Akiyama, F. Nakajima, R. Katayama and K. Onabe, “Twin photoluminescence peaks from single isoelectronic traps in nitrogen δ -doped GaAs”, Physica E 40, Issue 6, 2110-2112 (2008). 査読有

⑮ Satoshi Inada, Masahiro Yoshita, Makoto Okano, Toshiyuki Ihara, Hidefumi Akiyama, and Liming Zhang, “Measurements of Cavity-Length-Dependent Internal Differential Quantum Efficiency and Internal Optical Loss in Laser Diodes”, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 2288-2290 (2008). 査読有

⑯ Kensuke Fujii, Daisuke Nakase, Noriaki Tsurumachi, Hayato Miyagawa, Hiroshi Itoh, Shunsuke Nakanishi, Hidefumi Akiyama, and Shyun Koshiha, “Optimization of Well Width and N Content for Optical Properties of GaNAs/GaAs Multiple Quantum Well Grown by RF-Molecular Beam Epitaxy”, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 2991-2993 (2008). 査読有

⑰ Toshiyuki Ihara, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Optical detection of electron-depletion region surrounding metal electrodes on a dilute two-dimensional electron gas system”, Jpn. J. Appl. Phys. 47, 4496-4498 (2008). 査読有

⑱ Masahiro Yoshita, Makoto Okano, Toshiyuki Ihara, Hidefumi Akiyama, Ping Huai, Tetsuo Ogawa, Loren N. Pfeiffer, and Ken W. West, “Carrier-Density-Dependent Increase and Suppression of Optical Gain in T-shaped Quantum-Wire Lasers”, Physica Status Solidi (C) 5, 2841-2843 (2008). 査読有

⑲ Shun Maruyama, Toshiyuki Ihara, Hirotake Itoh, Masahiro Yoshita, Hidefumi Akiyama, Loren N. Pfeiffer and Ken W. West, “Micro-photoluminescence excitation spectroscopy on asymmetric absorption line shapes of weakly localized excitons in a quantum well”, Solid State Communications, 147, 114-117 (2008). 査読有

[学会発表] (計 6 5 件)

① Hidefumi Akiyama, “Optical spectroscopy of lasers and field-effect-type optical devices based on high-quality T-shaped GaAs quantum wires”, 4th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium”, Osaka University, Japan, 2008/9/29-10/1 (Invited).

② 秋山英文 “単一量子細線のレーザー特性” 日本学術振興会「光電相互変換」第125委員会研究会(京都テルサ, 2008/10/3)(招待講演)

(以上の他に、63 件)

[その他]

ホームページ等

<http://aki.issp.u-tokyo.ac.jp/>

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

吉田 正裕 (YOSHITA MASAHIRO)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号：30292759

(所属変更のため、平成20年9月16日に研究分担者・吉田正裕は、連携研究者へ変更した。)