

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 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360138

研究課題名（和文） 新世代光ネットワークのための長波長帯レーザトランジスタの実現

研究課題名（英文） Realization of Long-wavelength Laser Transistor for New Generation Photonic Networks

研究代表者

西山 伸彦（NISHIYAMA NOBUHIKO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80447531

研究成果の概要（和文）：

AlGaInAs 量子井戸埋め込み構造を有する長波長帯トランジスタレーザ（TL）の実現に向け、その理論解析・素子作製を行った。作製方法として埋め込みヘテロ（BH）構造形成法に関する検討を行い、世界最高水準の性能を有する AlGaInAs/InP-BH-LD 作製に成功した。この作製技術を利用し、世界で初めてとなる室温連続発振を実現した。さらにベース-コレクタ間電圧を変化させ、光出力を制御可能であることも明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Theoretical analysis and fabrication of a transistor laser (TL) using AlGaInAs quantum wells and a buried-hetero (BH) structure have been studied. First, the fabrication technology of the BH structure for AlGaInAs was studied and state-of-the-art AlGaInAs/InP-BH LDs were demonstrated. This technology enabled CW lasing operation of AlGaInAs TLs for the first time with the threshold emitter current of 38 mA. This TL showed output power control by base-collector voltage change.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			0
年度			0
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光デバイス・光回路

1. 研究開始当初の背景

光通信の家庭内、オフィス内への浸透は急速に進んでいる。これからパソコンなどの機器内、さらにはチップ間へと浸透していくことは容易に予想される。一方で長距離光通信においても、高速化の流れとともに各ノードで

の処理機能の中での光の役割が大きくなっており、光素子に対する要求も増えている。このような高機能化、高速化の状況の中で、半導体レーザダイオードはその性能的限界より、一定出力で連続点灯させるだけの光源としてしか利用することができない場面が

多くなってきた。その理由としては様々な問題が挙げられるが、陽極、陰極の2つしか持たないダイオードの構造的限界もある。電流の流れが一方向だけであることから操作自由度はあまりなく、動作速度に関してもキャリアの量子井戸への到達速度の遅さにより制限が起こる。実際、最先端の1.3 μm 帯 AlGaInAs 量子井戸レーザダイオードでもかろうじて40Gbpsのアイ開口が確認される程度で、製品化に必要なアイマスクテストに合格できるレベルではないのが現状である。これに対し我々は、キャリアを操作するもう一つの端子を導入しレーザトランジスタとしてレーザを進化させることを提案している。これにより、コレクタでキャリアを引き抜くことで、その走行途中にある量子井戸へキャリアを高速に供給することが可能になり、動作速度が向上するだけでなく、3端子での組み合わせ自由度拡大により新たな機能性が生まれ多くの発展が期待できる。しかしながら、研究開発当初では、光ファイバ通信で重要な1.3 μm 帯では室温連続発振すら行われていない状況であった。

2. 研究の目的

上記の背景より、以下を研究目的として掲げた。

「1.3 μm の長波長帯で動作する革新的な性能を有するInP基板上レーザトランジスタを世界で初めて実現するとともに、新世代光通信ネットワーク、光電融合回路への適用を目指す。」

3. 研究の方法

目的達成のため、下記の項目に従って研究を行った。

1. AlGaInAs 量子井戸埋め込み成長法の確立

1.3 μm 帯の発光波長における高い光利得と良好な温度特性を実現するため AlGaInAs 量子井戸構造を採用する必要がある。また、トランジスタレーザの構造上埋め込みヘテロ構造を採用する必要がある。これを達成するため、これまで明らかにされていない AlGaInAs 量子井戸埋め込み成長法の確立する。

2. AlGaInAs レーザトランジスタの室温連続発振動作の実現

上記の成長法を確立した上で、さらに構造、作製プロセスを最適化することにより、室温

連続発振を実現する。

3. >40Gbps を超える直接変調動作の理論的検討

従来のレーザダイオードで使用されてきたレート方程式を活用し、それにトランジスタレーザ独特の項を加えることによって拡張し、高速変調時の理論的な動作予測を行う。レーザダイオードとの比較によってトランジスタレーザの理論的な優位性を明らかにする。

4. 研究成果

前述したように、高速動作を達成するアプローチの一つとして、トランジスタレーザが研究されている。トランジスタレーザとは名前の通り、トランジスタとレーザの機能を併せ持つ素子のことで、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)に発光領域である活性層をベース領域に導入した構造となっている(図1)。通常の半導体レーザと異なり、トランジスタレーザはエミッタ、ベース、コレクタの3端子を有している。ベース-コレクタ間に逆バイアスを印可することで、ベース領域におけるキャリア寿命を減少させ、動作速度を向上させることができるという特徴がある。

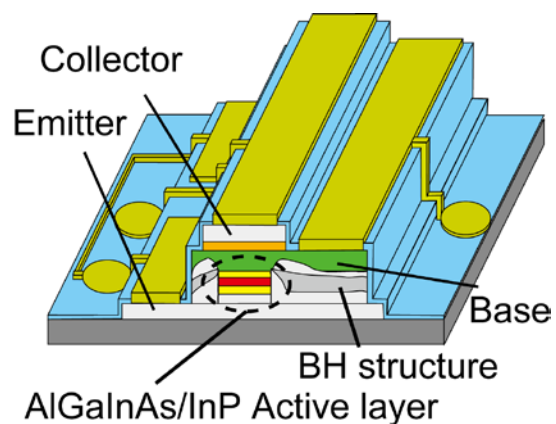


図1 トランジスタレーザ構造図

本研究ではレーザの活性層に AlGaInAs を用いている。この材料をレーザの活性層に用いることで、優れた温度特性や大きな光利得に起因する高速動作が期待できる。また素子構造には埋め込みヘテロ構造を導入している。これは活性層の両脇をnとpのInPを交互に再成長することで構成され、電流を活性層に効率よく流すことができるほか、電流ブロック層と活性層の屈折率差が生じることで、活性層への光閉じ込めが起こる。これにより低しきい値かつ高効率動作が期待でき

る。

この AlGaInAs 材料と埋め込みヘテロ構造を同時に用いることで優れた素子の実現が期待できるが、AlGaInAs 材料は空气中で酸化し、その品質が低下しやすく、高品質な埋め込みヘテロ構造の形成が困難と言われていた。そこで埋め込み再成長前にサーマルクリーニングというプロセスを導入し、AlGaInAs 材料に対する高品質な埋め込みヘテロ構造の形成を目指して研究を行った。この評価には図 2 に示す埋め込みヘテロ構造レーザを用いた。

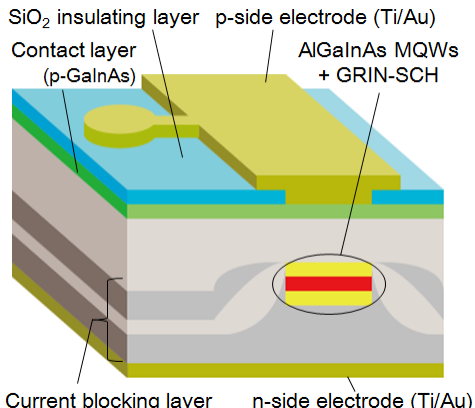


図 2 埋め込みヘテロ構造レーザ構造図

サーマルクリーニング条件に関して、その雰囲気、時間、温度の検討を行ったが、ここでは最もその効果が顕著に表れた温度をパラメータとした際の実験結果を図 3 に示す。雰囲気にはPH₃を、時間は 45 分としている。650°Cのサーマルクリーニング条件で、しきい値電流 8.1 mA、外部微分量子効率 66%という非常に良好な特性を実現した。共振器依存性から求めた内部量子効率は、76%、一層当りのしきい値電流密度 $J_{th} = 203 \text{ kA/cm}^2/\text{well}$ と、世界最高水準の性能を有する。図 4 には自然放出光効率のストライプ幅依存性の結果を示す。酸化による問題の小さなGaInAsPと比較してもストライプ幅の狭いものでも効率の低下が小さく、非常に良好な再成長界面が得られていることがわかる。

次に ICP-RIE によるメサ形成を検討した。ICP-RIE によるメサ形成で簡易な作製プロセスを実現できるほか、素子間のばらつきも小さくできると考えられる。適切なサーマルクリーニングを施して素子を作製し、その結果を以下に示す。ICP-RIE を用いても優れたレーザの作製が可能であることが明らかになった。ただしストライプ幅 1 μm 以下の狭いものでは自然放出光効率の低下が見られ、エッチングダメージが存在することも明らかとなった。これに対しては、埋め込み再成長

前の表面処理時間を増やすことで、品質の改善が確認されている。

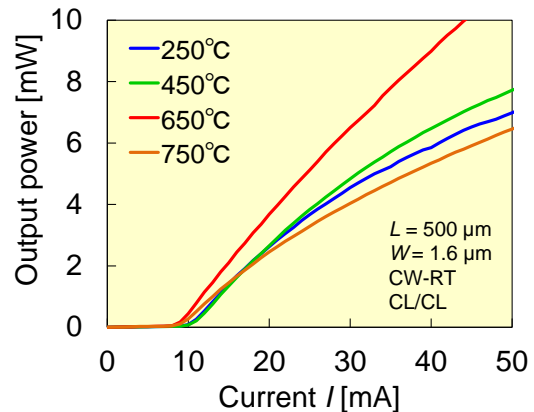


図 3 電流-光出力特性

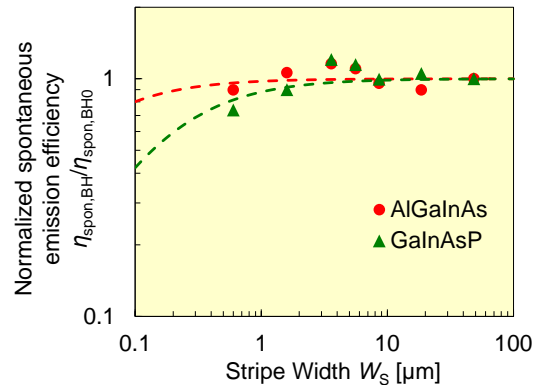


図 4 自然放出光効率

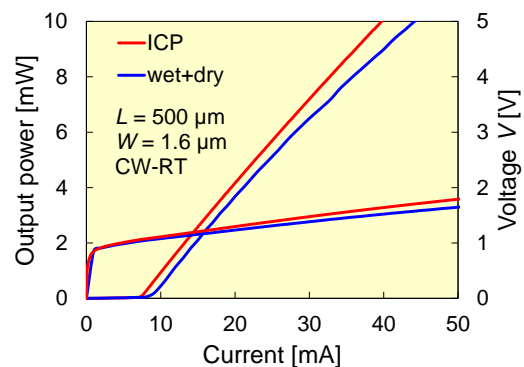


図 5 電流-光出力特性

次に、室温連続発振の実現を目指して、活性層への光閉じ込めの計算やGaInAsPベース層幅を縮小し、活性層外部での発光を抑制した新しい素子構造の検討を行った。図 6 にベース層幅の縮小をしない従来素子構造の場合と縮小した新しい素子構造の近視野像(NFP)の測定結果を示す。ベース層幅を縮小した構造では円形の活性層のみにおける発

光が確認され、従来構造で見られた活性層外部での発光が抑制されていることが示されている。これにより、高効率動作が期待できる。

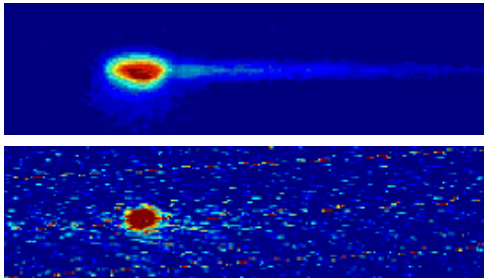


図 6 NFP(上：従来構造、下：新構造)

この構造及び前述した埋め込みヘテロ構造を用いて作製した。ベース層バンドギャップを 1.06 eV とし、膜厚を 30 nm, 100 nm, 150 nm, 200 nm と変化させ素子を 4 種類作製した。この中でも世界で初めての室温連続動作を実現した 200 nm と、トランジスタ機能である電流増幅動作を実現した 100 nm 膜厚素子の特性を示す。

まず 200 nm 素子について。図 10 にベース接地での光出力特性を示す。

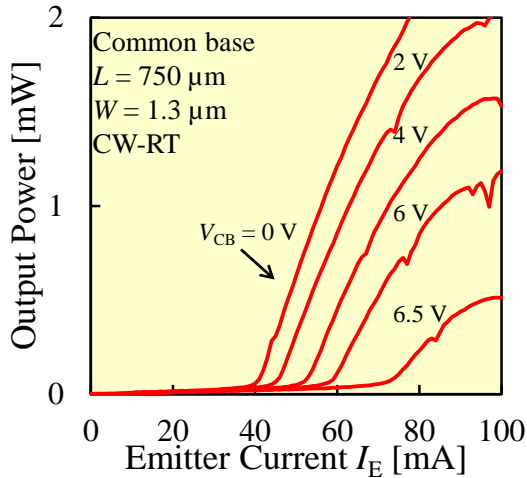


図 10 電流-光出力特性(200 nm ベース)

コレクタ-ベース電圧 $V_{CB} = 0$ V の時、しきい値電流 38 mA、外部微分量子効率 13% が室温連続下で得られた。コレクタ-ベース電圧を印可することで光出力特性の低下が確認された。これは電圧印可によるベース層中の実効的バンドギャップ減少による吸収、つまりフランチ-ケルディッシュ効果やアーリー効果によるものと考えられる。この結果から、電圧による変調動作が可能とも考えられる。

次にエミッタ接地でのトランジスタ特性の測定結果を図 11 に示す。

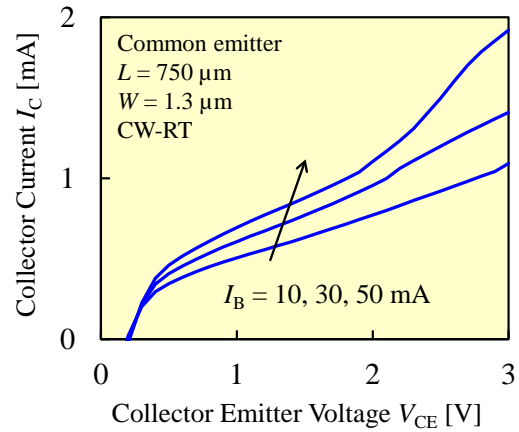


図 11 V_{CE} - I_C 特性(200 nmベース)

このグラフで、コレクタ電流をベース電流で割ることにより電流増幅率が得られる。この素子ではおよそ 0.02 と低い値の電流増幅率が得られた。この原因について考察した。図 12 に素子断面 SEM 図を示す。

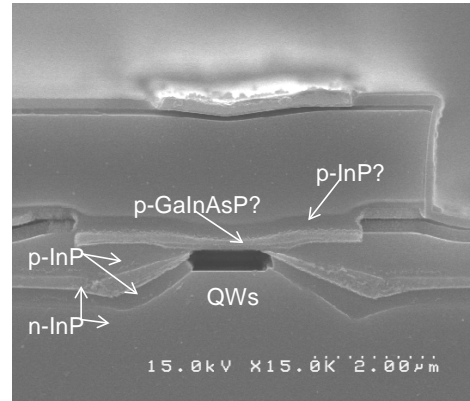


図 12 断面 SEM 図(200 nm ベース)

p-GaInAsP ベース層上に p-InP と思われる層が確認された。InP のバンドギャップ(1.34 eV)はベース層 GaInAsP のバンドギャップ(1.06 eV)よりも大きく、電子のコレクタへの引き抜き効果が得られなかったと考えられる。本来この層は、意図的にドーピングして形成したものではなく、界面における不純物拡散によって形成されたと考えられる。対策法として p-GaInAsP ベース層上に n-GaInAsP コレクタ層を導入し、ホモ接合を形成することでバンド障壁が形成されない構造を取り入れた。

上述の n-GaInAsP コレクタ層を導入し、ベース膜厚を 100 nm と薄くした際の実験結果を次に示す。図 13 はベース接地における光出力特性である。

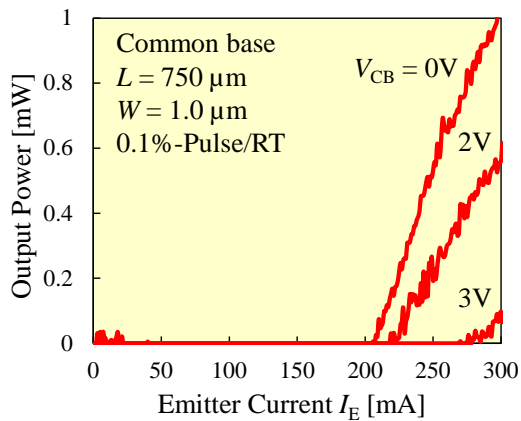


図 13 電流-光出力特性
(100 nm ベース、ベース接地)

しきい値エミッタ電流 210 mA、外部微分量子効率 1.8% のパルス発振動作が得られた。200 nm 素子と同様にコレクタ-ベース電圧を印可することで光出力の低下が確認されている。次にエミッタ接地における光出力特性を図 14 に示す。エミッタ接地ではコレクタ-エミッタ電圧を印可することで光出力特性の改善が見られた。これは電圧印可による引き抜き効果で、電子の流れる方向がベースからコレクタ方向へと移ることにより、ベース層中での再結合が減少し、活性層に十分なホールが供給されることによると考えられる。

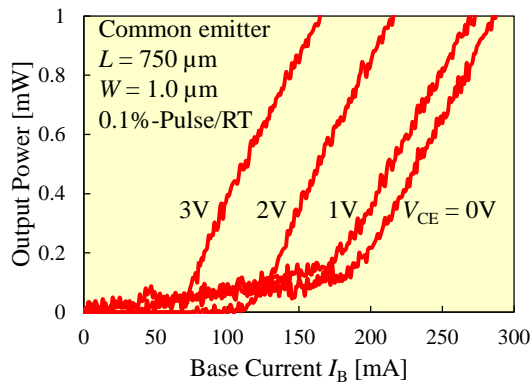


図 14 電流-光出力特性
(100 nm ベース、エミッタ接地)

図 15 にトランジスタ特性を示す。この図から電流増幅率が 5 程度であることがわかる。n-GaInAsP コレクタ層の導入とベース層膜厚の減少により、大きな電流増幅作用を実現した。ただし、この素子では電流による発熱が大きく、室温連続発振が実現できなかった。今後は電流増幅率を適切に制御する仕組みの導入とともに、内部量子効率を向上し、電流増幅と室温連続動作を両立する必要がある。

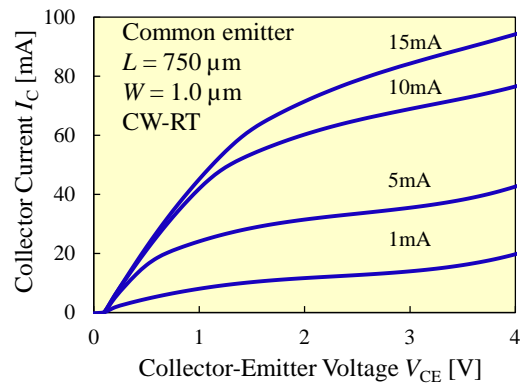


図 15 V_{CE} - I_C 特性(100 nmベース)

以上をまとめると 3 電気端子を有する AlGaInAs 量子井戸埋め込み構造を有する長波長帯トランジスタレーザ (TL) の実現に向け、その理論解析・素子作製を行った。作製方法として埋め込みヘテロ (BH) 構造形成法に関する検討を行い、世界最高水準の性能を有する AlGaInAs/InP-BH-LD 作製に成功した。この作製技術を利用し、世界で初めてとなる室温連続発振を実現した。典型的な電気トランジスタ特性も示し、さらにベース-コレクタ間電圧を変化させ、光出力を制御可能であることも明らかにした。

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] M. Shirao, N. Nishiyama, N. Sato, and S. Arai, "Theoretical analysis of the damping effect on a transistor laser," IEICE Electronics Express, 査読有, Vol. 9, No. 23, 2012, 1792-1798, DOI: 10.1587/elex.9.1792
- [2] Y. Takino, M. Shirao, N. Sato, T. Sato, N. Nishiyama, and S. Arai, "Improved regrowth interface of AlGaInAs/InP-buried-heterostructure lasers by in-situ thermal cleaning," IEEE Journal of Quantum Electronics, 査読有, Vol. 48, No. 8, 2012, 971-979, 10.1109/JQE.2012.2196410
- [3] M. Shirao, T. Sato, Y. Takino, N. Sato, N. Nishiyama, S. Arai, "Room-temperature operation of npn- AlGaInAs/InP multiple quantum well transistor laser emitting at 1.3-μm wavelength," Optics Express, 査読有, Vol. 20, 2012, 3975-3982, DOI: 10.1364/OE.20.003983
- [4] Y. Takino, M. Shirao, T. Sato, N. Nishiyama, T. Amemiya, S. Arai, "Regrowth Interface Quality Dependence on Thermal Cleaning

of AlGaInAs/InP Buried-Heterostructure Lasers,” Jpn. J. Appl. Phys, 査読有, Vol. 50, 2011, 070203-1-3, DOI: 10.1143/JJAP.50.070203

- [5] M. Shirao, T. Sato, Y. Takino, N. Sato, N. Nishiyama, S. Arai, “Room-Temperature Continuous-Wave Operation of 1.3- μ m Transistor Laser with AlGaInAs/InP Quantum Wells,” Appl. Phys. Express, 査読有, Vol. 4, 2011, 072101-1-3, DOI: 10.1364/OE.20.003983
- [6] M. Shirao, S. Lee, N. Nishiyama, S. Arai, “Large-Signal Analysis of a Transistor Laser,” *IEEE J. Quantum Electron*, 査読有, Vol. 47, 2011, 359–367, DOI:10.1109/JQE.2010.2090341

他 12 件

〔学会発表〕 (計 102 件)

- [1] M. Yukinari, N. Sato, N. Nishiyama, and S. Arai, “Spectral Characteristics Under Various Operation Conditions of 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP Transistor Laser,” *CLEO-PR&OECC/PS 2013*, July 4, 2013, Kyoto, Japan
- [2] N. Sato, M. Shirao, T. Sato, M. Yukinari, N. Nishiyama, T. Amemiya, and S. Arai. “Room-Temperature Continuous-Wave Operation of a 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP Transistor Laser,” *23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2012)*, Oct. 8, San Diego, CA, USA
- [3] T. Sato, M. Shirao, Y. Takino, N. Sato, N. Nishiyama, and S. Arai, “Room-Temperature Lasing Operation of a 1.3- μ m npn-AlGaInAs/InP Transistor Laser,” 2011 IEEE Photonics Conference (IPC-2011), Oct. 12, 2011., Arlington, USA
- [4] M. Shirao, N. Nishiyama, and S. Arai, “Numerical Analysis of Optical Gain of a 3-terminal HBT-SOA,” *IQEC/CLEO Pacific Rim 2011*, Aug. 31, 2011., Sydney, Australia
- [5] N. Sato, Y. Takino, M. Shirao, N. Nishiyama, and S. Arai, “Effect of Thermal Cleaning on Regrowth Interface Quality of AlGaInAs/InP Buried Heterostructure Lasers,” *The 38th Int. Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2011)*, May 23, 2011., Berlin, Germany
- [6] M. Shirao, T. Sato, N. Sato, N. Nishiyama, and S. Arai, “Lasing Operation of Long-Wavelength Transistor Laser Using AlGaInAs/InP Quantum Well Active Region,” *The 23rd Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials (IPRM-2011)*, May 24, 2011., Berlin, Germany

- [7] Y. Takino, M. Shirao, T. Sato, N. Nishiyama, and S. Arai, “Investigation of Regrowth Interface Quality of AlGaInAs/InP Buried Heterostructure Lasers,” *The 22nd Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2010)*, Jun. 2nd, 2010., Takamatsu, Japan
- [8] M. Shirao, N. Nishiyama, S. Lee, and S. Arai, “Large Signal Analysis of AlGaInAs/InP Laser Transistor,” *Conference on Lasers and Electro Optics/ International Quantum Electronics Conference (CLEO/IQEC) 2010*, May 17th, 2010., San Jose, CA, USA

他 94 件

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.pe.titech.ac.jp/AraiLab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 伸彦 (NISHIYAMA NOBUHIKO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：80447531