

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2007-2009

課題番号：19686023

研究課題名 (和文) 高性能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 high performance long wavelength laser transistors

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)：

ヘテロバイポーラトランジスタのベース層内に量子井戸を有するレーザトランジスタの動作機構を解明するための大信号特性の解析に初めて成功し、40Gbpsの信号においても、レーザダイオードに比べ良好なアイ開口が得られることを見出した。

また、レーザトランジスタを実現するために必要なAlGaInAs量子井戸埋め込みヘテロレーザダイオード構造を利用して、自然放出光の比較より非発光再結合速度を定量化することにより再成長法の確立を行った。

研究成果の概要 (英文)：

The large signal analysis of laser transistors, which have quantum wells in the base layer of hetero bipolar transistors, has been demonstrated for the first time. The simulation indicates better eye diagram over 40Gbps can be achieved for the laser transistors compared with conventional laser diodes.

To realize the laser transistors, AlGaInAs quantum well buried hetero laser diodes were used to quantify non-radiative recombination velocity by comparison of spontaneous emission intensity toward establishment of regrowth process of AlGaInAs buried hetero structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2008年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2009年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	19,200,000	5,760,000	24,960,000

研究分野：光エレクトロニクス

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：高性能レーザ、半導体レーザ、InP、レーザトランジスタ、フォトニックネットワーク

1. 研究開始当初の背景

光デバイスの多機能化への要求は高い。多機能化の要求に対するひとつの解答として、それぞれの単機能を持つデバイス構造を同一基板上に製作する、いわゆる集積化があるが、申請者は、反対にひとつのデバイス構造自身を変更し、新たな機能を発現させる方法を選んだ。その観点から、従来の単一のp/n接合をもち、2つの電極間に電流を流し、光発振を起こすレーザダイオードから、n/p/n接合と3つの電極を持つ、レーザトランジスタへと変化させることにより発現する新機能の探索は、非常に興味深い。

この概念自体は、80年代より存在し、1984年に柴田らによってバルクGaInAsP活性層使用による0°Cでの発振を確認している。しかしながら、当時は、単純な構造しか製作できず特性を向上させることが困難であり、一時期、研究活動はなかった。近年、イリノイ大学のWalterらによって、InGaAs/GaAs系を使った0.98 μm 帯で、発振動作を確認するに至った。そこで、通常の電気トランジスタにはない、非線形性の発現など、将来可能性の一端を示したが、性能としてはまだ十分とはいえない。しかし、この結果は、論文誌の表紙を飾り、米国の雑誌に掲載されるなど、大きなインパクトを持っていた。

最も重要な点として、光通信に最適な長波長帯(1.3 μm , 1.55 μm)の波長では、上述したように低温で発振を確認した程度で、レーザトランジスタが本来有する革新的な機能は全く議論されていない。長波長帯の場合、特有の大きな共振器損失、温度特性の悪さなどが、革新的なレーザトランジスタの実現を阻んできた理由であるが、近年の結晶成長技術の進歩、また、未開拓の新しいレーザ構造を積極的に導入することにより、解決できる可能性がある。この研究過程で創出した新構造によって、革新的な性能を有するレーザトランジスタの実現が期待できる。この長波長帯で使用する半導体基板となるInP基板上のヘテロバイポーラトランジスタ(HBT)は、他の基板に比べ、高い性能を有することが知られており、これに光端子を組み合わせれば、従来のレーザダイオードを凌駕する性能と、光スイッチング/光信号再生などの多機能性を有するデバイスが期待できる。

2. 研究の目的

1.3 μm 及び、1.55 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実現するための理論解析、基礎技術を確立する。

3. 研究の方法

長波長帯レーザトランジスタを実現するため下記の2項目について詳しく検討を行った。

- (1) レーザトランジスタの動作機構を明らかにするため、従来のレーザダイオードで使用されていたレート方程式とキャリア連続の式を組み合わせレーザトランジスタの解析を可能とし、レーザダイオードとの比較を行う。
- (2) HBT構造採用に伴うベース層における光損失を十分補うことの可能なAlGaInAs量子井戸を埋め込むため、有機金属気相成長法による再成長法の確立を行う。そのための定量評価法を検討する。

4. 研究成果

(1) 動作機構の解明

図1にレーザトランジスタの構造図を示す。活性層はベース層に位置しており、その両脇は電子および光閉じ込めのためのn/p/n/pの埋め込みヘテロ構造となっている。

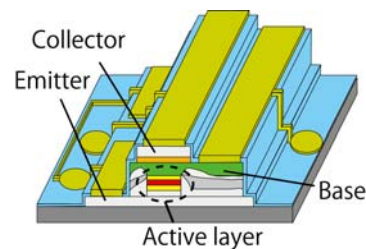


図1 長波長帯レーザトランジスタ構造図

LTとLDの動作機構の違いはコレクタの逆バイアスによるキャリア引き抜き効果である。この効果を表現するため、図2の示す計算モデルを用いた。キャリアはエミッタ側(図では左側)から注入されてベース層を拡散してゆく。ベース層の中心には量子井戸が設けられ拡散してきたキャリアの一部はここで量子井戸へ捕獲され、発光に寄与、残りはコレクタへ抜けていく。十分大きなコレクタバイアスが印加されている状態ではエミッタ電流は飽和領域となっており、本計算ではこの飽和領域を仮定している。なお、本計算ではドリフト電流の効果は考慮していない。ベース電流は量子井戸への注入電流と流出電流の差であらわすことができる。上記の考え方でキャリア捕獲・脱出効果を取り入れたレート方程式を構築した。

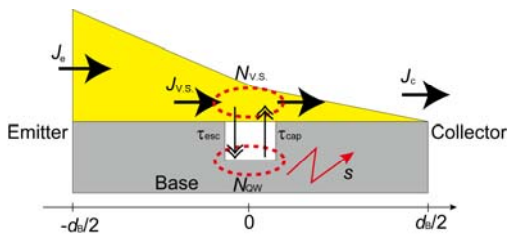


図2 ベース層における電流モデル

まず材料系としては GaInAs/InP を用いて LD と LT の特性をシミュレーションし、これらと比較した。

図3はLTとLDの小信号解析結果である。バイアス電流は10-120mAとしてある。LTにおいてはバイアス電流はベース電流で示しており、変調電流はエミッタ電流となっている。まずLDの結果について説明する。LDの応答は緩和振動による共振ピークが生じており、注入電流を増やすに従いキャリア輸送効果により生じる利得抑圧効果によりピークが抑圧されていく。この効果は、量子井戸へのキャリア供給量不足によるものと考えられる。一方でLTの応答も共振状ピークは存在するものの、高注入領域における帯域制限が少ない。また、電流利得の分だけ低感度となっている。再結合電流に対して大きなエミッタ電流により十分な量のキャリアが量子井戸へ供給される。なお、ここでの電流利得は先に述べたしきい値電流での電流利得よりも小さい。これは自然放出光（しきい値以下）における再結合レートよりも誘導放出による再結合レートが大きいため、今回の計算においては、電流利得は6.5、つまり感度としてはLDに比べ0.024倍小さくなっている。

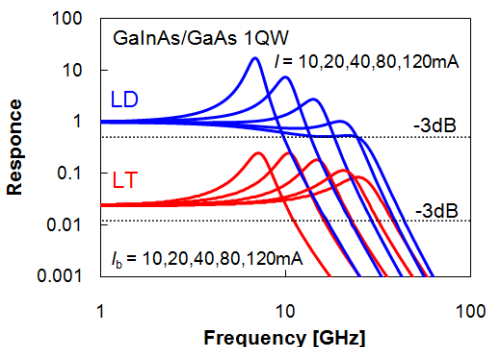


図3 小信号特性

図4は最大変調周波数の注入電流依存性である。LDの変調帯域が25GHz程度で制限されているのに対し小さなダンピング効果により、LTの最大変調周波数は伸び続ける。先

に述べたが、LTの感度はLDに比べ低くなっている。感度を向上させるためには電流利得を減少させねばならない。コレクタ側のヘテロ障壁高さや量子井戸数の変更により利得はコントロールできる。しかし電流利得を減らす事はLDの動作に近づく事と等価であり、変調感度と変調帯域のトレードオフを考慮しながら設計を行う事が求められる。

次に、注入電流に対するLTとLDの大信号応答を計算した。ステップ入力、光出力が10mWから30mW（平均出力20mW）となるよう注入電流をコントロールしている。

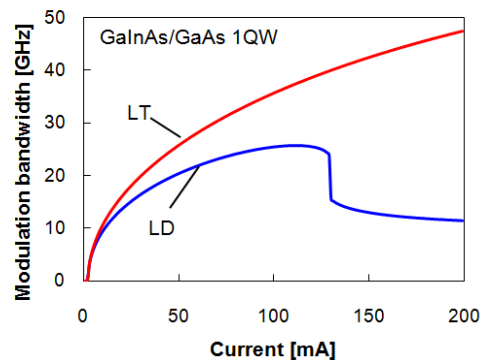


図4 帯域比較

図5はLDとLTの立ち上がり応答を示している。エミッタ電流を増加させることでベースでのキャリア分布が変化し、 $N_{v,s}$ がいくらかの遅延ののちに増加する。LTの大きな違いは $N_{v,s}$ の速い立ち上がりである。コレクタにおけるキャリア引き抜き効果によりLTの $N_{v,s}$ 立ち上がりはLDのそれに比べ明らかに早くなっている。結果的に10ps程度早い光子密度の立ち上がりが得られた。ゆえに図3に示した通り小信号解析においてLTの変調帯域が大きくなったと考えられる。緩和振動周波数については共に同じ値が得られた。

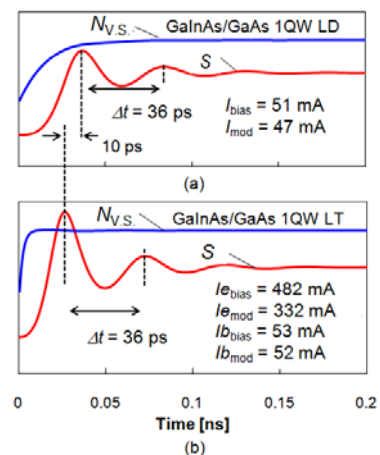


図6 立ち上がり速度の比較

次に、5QWsのAlGaInAs量子井戸におけるLD及びLTのアイパターンを図6に示す。入力40Gbpsの7段疑似ランダム信号である。光子寿命の影響を見る為に0.3の反射端面の屈折率を0.7 (HRコーティング) とすることで4.1psの光子寿命を8.7psとした結果も示している。光子寿命4.1 psについて、小信号の結果によれば十分な大きな帯域を有しているにも関わらず、良好なアイ開口は得られず強い共振によってアイパターンの劣化が生じている。この結果はLTの小さなダンピング効果がLTの変調速度を制限していると考えられる。高速動作するLDの設計の観点から言うと緩和振動周波数をのばすために短共振器化するなどして光子寿命は短くすべきであるが、LTにおいてはそれと異なる。光子寿命を長く(8.7ps)することで、共振周波数は低くなるものの、緩和振動のピークは抑制されアイパターンはよりクリアに開いた。LTの結果について、5QWsでは3QWsに比べ高い微分利得の影響によりわずかにアイパターンが良好に開いているものの、電流利得の低下と相殺しほぼ同様の結果が得られた。一方、LDについては8.7psの光子寿命において強いダンピング効果によりほぼアイパターンが開きかけていることがわかる。

上記の結果より、レーザトランジスタの動作機構を初めて明らかにし、40GbpsにおいてもLDに比べて良好なアイ開口を得ることが

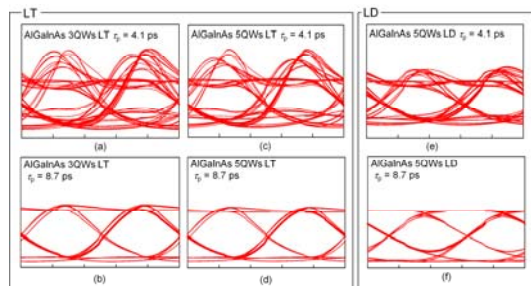


図6 40Gbpsでのアイダイアグラム

示すことを示した。

(2) AlGaInAs 埋め込みヘテロ構造作製法

AlGaInAs 量子井戸はコンダクションバンドオフセット ($\Delta E_c = 0.75 \Delta E_g$) が、P 系材料 ($\Delta E_v = 0.40 \Delta E_g$) に比べて大きいことにより、高温動作の際にも良好に電子の閉じ込めることが可能であり、高い利得を得ることができる。一方で、光ファイバ通信における光源として用いられるレーザ素子には、リッジ構造と比べ低消費電力で安定した発光特性が得られ、高速動作が可能である等の様々な優位性を持った埋め込みヘテロ構造 (BH 構造) が用いられる。よって、これらの構造を実現しようとするレーザトランジスタにも

取り入れたいと考えている。

しかしながら、Alを含む層は作製プロセス中で酸化されやすく、酸化の影響で埋め込み再成長の際の結晶成長品質が低下を招く事が原因となって、発振特性を劣化させるだけでなく、再現性、信頼性の低下も引き起こすため、AlGaInAs/InP 系材料を用いたBH レーザの実現は困難であるとされる。世界的にこれを克服する研究がされており、デバイスが実現されているもののデバイス特性の評価にとどまり再成長品質の定量的な評価は行われていない。そこで、成長リアクタ内での *in-situ* サーマルクリーニングが再成長界面品質に与える影響について、発振しきい値以下での自然放出光を用いた表面再結合レートの見積もりを通して検討を行った。

作製プロセスを以下に示す。AlGaInAs量子井戸を有する元基板に、幅に変化を持たせてそれぞれ2 μm 、3 μm 、5 μm 、7 μm 、10 μm 、20 μm 、50 μm とした7種類のメサストライプを、SiO₂マスクを用いたウェットエッチング、ドライエッチングの組み合わせによって作製した。初めに、GaInAs 層とAl を含む層(合計約450 nm)を臭素メタノールの混合溶液 (Br₂:CH₃OH = 1:1000) を用いて、n-InP の下部クラッド層まで到達するまでエッチングを行った。このエッチングは等方性エッチングであるために、メサストライプ幅はもとのSiO₂マスク から1.4 μm 程度細いものとなる。次に、CH₄/H₂ の混合ガスを用いた反応性イオンエッチング (RIE) を用いて、メサ高さを300 nm追加する。その後、3段階のウェットクリーニングプロセスに入る。まず弱い臭素メタノール混合溶液 (Br₂:CH₃OH = 1:40000) を用いて表面全体のクリーニングを行い、硫酸系エッチャント (H₂SO₄:H₂O₂:H₂O = 1:1:40) を用いてAl を含む領域のクリーニングを行う。そして濃度1% のバッファドフッ酸 (BHF) を用いて再成長直前に酸化された層を取り除いた。

続いてOMVPEリアクタ内でPH₃雰囲気として、サーマルクリーニングを行う。リアクタ内温度は250 $^{\circ}\text{C}$ 、450 $^{\circ}\text{C}$ 、650 $^{\circ}\text{C}$ の中では450 $^{\circ}\text{C}$ であった場合、レーザ特性が最も良いという結果が得られた。クリーニング時間については、(a) 15分、(b) 30分、(c) 60分とした比較を行った。電流ブロック層は100 nmのn-InP 層、200 nmのp-InP 層、200 nmのn-InP から成り、ストライプメサを埋め込むために選択的に成長される。選択成長の際のマスクとなるSiO₂ を除去後、再度OMVPE法によって2000 nmのp-InP 上部クラッド層および50 nmのp⁺-GaInAsコンタクト層を成長する。最後にTi/Au電極を蒸着し、へき開によって素子の共振器長をそれぞれ500 μm 、750 μm 、1000 μm とした。図7に断面の電子顕微

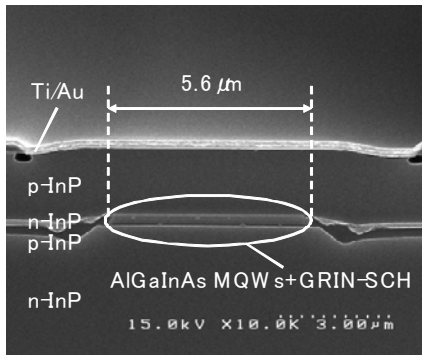


図7 再成長後断面の電子顕微鏡写真

鏡写真を示すが、見た目では良好な再成長ができていていることがわかる。

図8はサーマルクリーニング時間15分、30分、60分それぞれの場合で、ストライプ幅5.6μmの素子の電流対光出力特性、電流対電圧特性を示したグラフである。電流対電圧特性はお互いにほぼ差異はないが、電流対光出力特性に関してはクリーニング時間15分の素子で外部微分子効率(η_d)、しきい値電流(I_{th})共に他のクリーニング時間の素子より劣っていることが分かる。

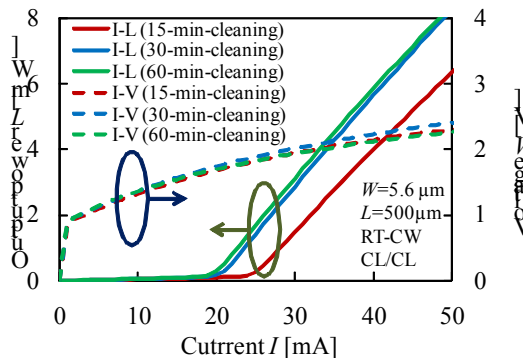


図8 AlGaInAs埋め込みレーザ共振特性

この傾向は再成長界面での非発光表面再結合によってみられたのではないかとの推測の下、我々はSで示す側壁での再結合速度を以下の関係式:

$$\frac{\eta_{\text{spon,BH}}}{\eta_{\text{spon,BH0}}} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot S \cdot \tau}{W - 2W_d}} \quad (1)$$

から評価した。ここでη_{spon,BH}は低電流注入領域での自然放出光効率で、I = 0.9 mA (≤ 0.1I_{th}) から 1.9 mA の1mA間で測定した。また、η_{spon,BH0}はストライプ幅48.6μmクリーニング時間60分のBHレーザのη_{spon,BH}で規格化に用いる。τはS=0の時のBH構造のキャリア寿命、Wはストライプ幅、W_dは“ダメージ層厚”と呼ばれる値である。しかし本報告中ではW ≫ W_dとして無視できると考えた。仮に再成長界面で欠陥や非発光再結合

中心がなかったとするならば、規格化自然放出光効率η_{spon,BH}/η_{spon,BH0} 細いストライプであっても1となるべきであり、これがS・τ値に対応する。

図9は共振器長L = 500μmでのBHレーザの規格化自然放出光効率(η_{spon,BH}/η_{spon,BH0})をストライプ幅の関数として表したグラフである。これらのデータと評価式(1)からS・τ値は最小二乗法を用いてクリーニング時間15分の場合で481nm(ただし元々劣化が大きいのでうまくフィティングを行えていない)、30分の場合で331nm、そして60分の場合で341nmと見積もられた。以上から、サーマルクリーニング時間の増加によって明確な特性改善がみられているといえる。次に、AlGaInAs/InP系材料のS・τ値とGaInAsP/InP系材料のS・τ値を、同様のクリーニングプロセス(クリーニング時間60分)を用いて作製した素子間で比較した結果を図10に示す。GaInAsP/InP系材料のS・τ値は80nmと見積もることができた。したがって、現状でのAlGaInAs/InP BH構造のS・τ値は依然としてGaInAsP/InP系材料の元と比べて約5倍高いものであり、再成長界面での表面再結合をさらに減らしていく余地が残されているといえる。

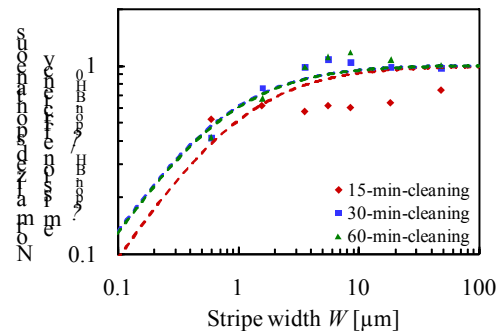


図9 規格化自然放出効率

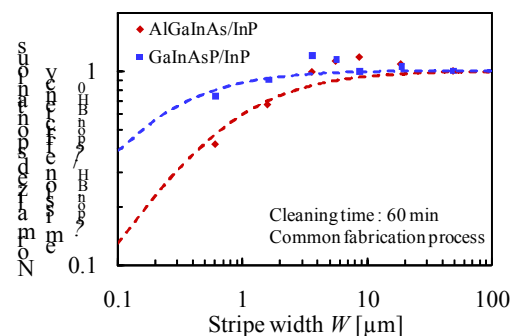


図10 GaInAsPレーザとの比較

以上の結果はサーマルクリーニングがAlGaInAs/InP BHレーザ埋め込み再成長に対して側壁での再結合速度の低減に効果的であることを示しており、さらには、S・τ値による再成長界面品質の定量的検討が

GaInAsP/InP 系材料に対してだけでなく、AlGaInAs/InP 系材料に対しても有効であることを明らかにした。

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 5 件)

- ① S. Lee, N. Tajima, T. Shindo, D. Takahashi, N. Nishiyama, and S. Arai, “High Optical-Feedback Tolerance of Distributed Reflector Lasers with Wirelike Active Regions for Isolator-Free Operation,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読あり, Vol. 21, No. 20, pp. 1529–1531, Oct. 2009.
- ② M. Shirao, Y. Numajiri, R. Yokoyama, N. Nishiyama, M. Asada, and S. Arai, “Preliminary Experiment for Direct Media Conversion to Sub-Terahertz Wave Signal from 1.55- μm Optical Signal Using Photon-generated Free Carriers,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読あり, Vol. 48, No. 9, pp. 090203-1–3, Sept. 2009.
- ③ T. Shindo, S. Lee, D. Takahashi, N. Tajima, N. Nishiyama, and S. Arai, “Low-Threshold and High-Efficiency Operation of Distributed Reflector Laser With Wirelike Active Regions,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読あり, Vol. 21, No. 19, pp. 1414–1416, Sept. 2009.
- ④ T. Okumura, M. Kurokawa, M. Shirao, D. Kondo, H. Ito, T. Maruyama, N. Nishiyama, and S. Arai, “Lateral Current Injection GaInAsP/InP Laser on Semi-insulating Substrate for Membrane-based Photonic Circuits,” *Opt. Express*, 査読あり, Vol. 17, No. 15, pp. 12564–12570, July 2009.
- ⑤ T. Okumura, T. Maruyama, H. Yonezawa, N. Nishiyama, and S. Arai, “Injection-type GaInAsP/InP/Si Distributed-feedback Laser Directly Bonded on Silicon-on-insulator Substrate,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読あり, vol. 21, no. 5, pp. 283–285, Mar. 2009.

[学会発表] (計 73 件)

代表 5 件

- ① M. Shirao, N. Nishiyama, S. Lee, and S. Arai, “Large Signal Analysis of AlGaInAs/InP Laser Transistor,” CLEO/IQEC, San Jose, CA, USA, CMY7, May.17th, 2010

- ② T. Okumura, M. Kurokawa, D. Kondo, H. Ito, N. Nishiyama, and S. Arai, “Lateral Current Injection Type GaInAsP/InP DFB Lasers on SI-InP Substrate,” *The 21st Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2009)*, Newport Beach, CA, USA, TuB2, May 12th, 2009.

- ③ N. Nishiyama, T. Maruyama and S. Arai, “III-V/SOI Heterogeneous Photonic Integrated Devices for Optical Interconnection in LSI,” [invited] *The 21st Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2009)*, Newport Beach, CA, USA, WB1-1, May 13th, 2009.

- ④ S. Lee, T. Shindo, D. Takahashi, N. Tajima, N. Nishiyama, and S. Arai, “Low-threshold and High-efficiency Operation of Distributed Reflector Laser with Wirelike Active Regions by Reduced Waveguide Loss,” *The 21st Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM 2009)*, Newport Beach, CA, USA, TuB2.4, May 12th, 2009

- ⑤ M. Shirao, R. Yokoyama, Y. Numajiri, N. Nishiyama, M. Asada, and S. Arai, “Direct Conversion to Sub-THz Signal from 1.55- μm Optical Signal Using Photon-Generated Free-Carriers,” *The 21st Annu. Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society (LEOS Annu. Meeting 2008)*, TuJ-3, Newport Beach, CA, USA, Nov. 11th, 2008.

[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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし