

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24年5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：特別推進研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19002009

研究課題名（和文） Si系LSI内広帯域配線層の為にInP系メンブレン光・電子デバイス

研究課題名（英文） InP-based membrane-type optical and electronic devices for broad band intra-chip/inter-chip interconnection in Si-LSI circuits

研究代表 荒井 滋久 (ARAI SHIGEHISA)

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：30151137

研究成果の概要（和文）：将来の集積回路の高速化および高機能化のボトルネックとなると考えられる金属配線での遅延および電力消費を低減するために、LSIチップ上ならびにLSIチップ間を広帯域・低消費電力で信号伝送するためのInP系メンブレン光・電子デバイスの研究を行った。低消費電力光デバイスとして独自に考案したメンブレン半導体レーザおよび光検出器の電流駆動動作を実現すると共に、チップ間高速信号伝送に向けたテラヘルツ素子を実現することに成功した。

研究成果の概要（英文）：We investigated InP-based membrane-type optical and electronic devices for broad band and low-power consumption optical interconnection in Si-LSI circuits since the RC delay time and the power consumption in metal wires will be bottleneck of high-speed operation and high functionality of LSIs in future. As the results, we successfully demonstrated current-injection-type membrane semiconductor lasers as well as photodetectors as low-power consumption optical devices, and also terahertz devices for inter-chip high-speed interconnection.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	131,800,000	39,540,000	171,340,000
2008年度	153,500,000	46,050,000	199,550,000
2009年度	49,600,000	14,880,000	64,480,000
2010年度	53,800,000	16,140,000	69,940,000
2011年度	49,600,000	14,880,000	64,480,000
総計	438,300,000	131,490,000	569,790,000

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：インターコネクション・グローバル配線・半導体レーザ・トランジスタ・テラヘルツ・InP・光電融合

1. 研究開始当初の背景

2000年代始めから、従来はGaAsやInP等のIII-V属半導体材料を用いた発光・受光素子や誘電体材料を用いた低損失光導波路素子を、Si-CMOS集積回路の技術を転用して、大きなSi基板上に一括形成しようという「シ

リコンフォトニクス」の研究が活発化し、2007年からは米国国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA）が、将来の集積回路に光技術を導入する研究プログラムEPIC（The electronic and photonic integrated circuits）を開始し、米国の

コンピュータ関連の大企業および多くの大学が参画している。一方、欧州ではベルギーのIMECを中心として、集積回路の微細化による高性能化の研究（More Moore）だけでなく、種々の技術との融合による新機能化や超小型システムの研究（More than Moore）が多くの企業と大学の連携で進められていた。

一方われわれは、光ファイバ通信用半導体レーザである分布帰還形（DFB）レーザの回折格子をレーザの光増幅を行う活性領域に深く形成することにより、従来のDFBレーザの10%程度の低電流動作を2000年に達成し、さらに低電流動作を行うためには、半導体レーザを構成する半導体層全体の厚みを150-200 nm程度に薄膜（メンブレン）化した半導体薄膜構造の重要性を提案した。この構造では、高い屈折率差による強力な光閉じ込め効果のためにレーザ光モードの電磁界を従来構造の3倍程度まで高めることができ、高い光学利得が得られるだけでなく、同時に回折格子の強度を3倍程度に増大できるため、従来の半導体レーザに比べて1桁~2桁低い電流で動作可能であることを2000年に提案し、2006年には光励起条件下で極低しきい値動作0.34 mW（電流換算値24 μ A）を達成した。その後、多くの研究機関からフォトニック結晶構造を用いるレーザの光励起条件下での極低しきい値動作が報告された。

しかし、集積回路内の高速電気信号を光信号で置き換えるためには、電流注入による高効率・高速動作の半導体レーザあるいは電気信号による高速光変調器が必須であり、われわれは半導体薄膜（メンブレン）構造半導体レーザの電流注入動作化を元に将来の集積回路用広帯域光配線を構成するための基本的デバイスの研究を開始した。

2. 研究の目的

シリコンLSI内のクロック周波数は、2017年以降には40 GHzを超えていくことがITRSで予想され、従来のCR型配線ではその遅延が許されなくなる。シリコンLSI内のメタル配線層を光配線で置き換えることが限界打破の一方法であるが、このとき必須となるLSI内光配線の為の微細InP系メンブレンレーザ・光検出器等の光デバイス、さらに同じ作製技術を活用拡張したサブテラヘルツ~テラヘルツ領域で動作するInP系メンブレン電子デバイスからなる、シリコン上のメンブレン光電子デバイスの形成技術及び高性能化を確立することを本研究の目的として行った。

3. 研究の方法

本研究計画書に示した研究組織とその担当研究分野の模式図を図1に示す。

光デバイスを荒井滋久・西山伸彦、電子デ

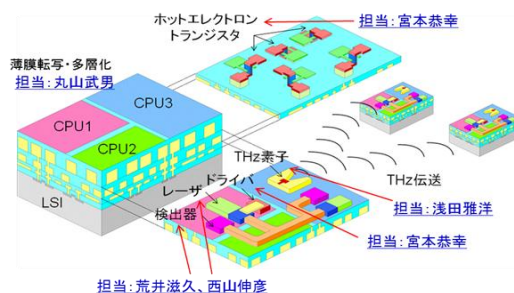


図1. 研究分担者とその担当研究分野

バイスを宮本恭幸、テラヘルツデバイスを浅田雅洋、そしてシリコンもしくはSOI基板との統合のための薄膜転写、多層化部分を丸山武男がそれぞれ分担する計画で開始した。

(1) メンブレン光デバイス

研究代表者の荒井および連携研究者の西山によって行われる光デバイスの部分では、シリコンもしくはSOI基板上メンブレン構造による強光閉じ込め効果による極低しきい値半導体レーザを実現することを本研究計画の最重要課題として行った。電流を積層構造の縦方向に注入する従来型半導体レーザとは全く異なり、横方向に注入する横方向電流注入（LCI: Lateral-Current-Injection）構造を最終的には150-200 nmの半導体薄膜（メンブレン）構造化するデバイスの設計および実現を目的として行った。さらに、この薄膜（メンブレン）光回路に整合する光検出器と受動光回路素子の研究を行った。

(2) 高速電子デバイス

電子デバイスについては、連携研究者の宮本により光素子などの駆動用メンブレン電子デバイスとしてのヘテロ接合バイポーラトランジスタを、電子ビーム露光による微細なエミッタ構造により高電流密度動作および高速動作を目指した研究を行った。また、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの高性能化について各遅延成分などの理論的検討を行い、高性能化への指標を示した。

高速論理デバイスとして考えている絶縁ゲートホットエレクトロントランジスタについては、狭メサ化による電流制御性の向上を行うと共に、高誘電率ゲート絶縁膜の高性能化をはかり、電流駆動能力向上を試みた。

(3) テラヘルツデバイス

テラヘルツ発振素子については、連携研究者の浅田により高周波化・高出力化および、チップ間信号伝送のための水平放射構造の実現に向けた研究を行った。高周波化・高出力化に関しては、これまでに得ら

れた素子構造最適化に関する知見をもとに、1THz 基本波発振のために必要な共鳴トンネル素子と微細アンテナの構造を詳細な理論解析により求め、これに基づいてメンブレン構造を持つ素子作製を行う。

水平放射構造に関しては、微細アンテナの基本構造について、さらに詳細な電磁界解析により指向性やインピーダンス整合等の面で構造設計を行うとともに、作製プロセスを確立する。

また、受信素子として光デバイスや高周波電子デバイスとの集積に適した InP 系ショットキーバリアダイオードと平面微細アンテナの集積構造を作製し、共鳴トンネル素子の発振出力のヘテロダイン受信を行う。また、光によるチップ内信号をテラヘルツ波によるチップ間伝送に変換するための一方法として、光キャリア生成を利用した光信号—テラヘルツ信号変換器の研究を行った。

(4) 薄膜転写・多層化技術

以上に挙げた各デバイス技術実現において共通のプラットフォームとしての貼り付けおよび薄膜化に関しては、研究分担者である丸山が期間途中で組織移動したため、連携研究者の西山が担当した。特にベンゾシクロブテン(BCB)による貼り付けと表面活性化接合法による貼り付けの2つの柱で研究を行った。

4. 研究成果

上記の研究方法で示した各項に分けて、本研究で得られた成果と今後の展望について簡潔にまとめる。

(1) メンブレン光デバイス

① SOI 基板上電流注入型 DFB レーザ

SOI 基板と InP 基板の直接貼り付け技術において、窒素プラズマによる表面活性化技術により 1 MPa を超える貼り付け強度を実現し、この技術を利用して SOI 基板上の電流注入型 DFB レーザを世界で初めて実現した。本結果が掲載された IEEE Photonics Technology Letters (Vol. 21, No. 5, pp. 283–285, Mar. 2009) では、冊子の表紙を本結果が飾るなど学

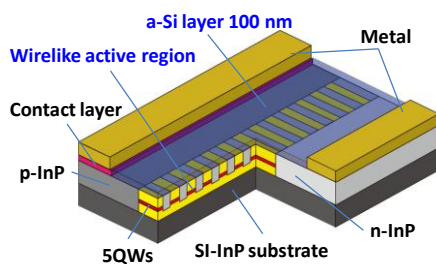


図2. 半絶縁性 InP 基板上横方向電流注入 DFB レーザの構造

術的なインパクトは大きい。

② 横方向電流注入構造 DFB レーザ

横方向電流注入 (LCI) 構造レーザの基本構造を確立する目的で、まず、BCB や異種基板との貼り付けを必要としない方法で LCI 構造レーザを図2に示すように半絶縁性 InP 基板上に作製した。

しきい値電流は室温連続動作下で 11 mA、微分量子効率 26% が得られたが、同様の作製法で試作したファブリ・ペロー共振器レーザの外部微分量子効率の共振器長依存性を評価した結果、注入電流がレーザの活性領域で有効に発光に寄与する割合である内部量子効率は約 40% しかなく、GaInAsP/InP 系材料で得られる値 (70-90%) の約半分しかないことが明らかとなった。この原因を理論・実験から探索した結果、横方向から注入されるキャリアのうち活性層より禁制帯幅の大きな GaInAsP 光閉じ込め (OCL) 層に注入されるキャリアが上部表面で非発光再結合している可能性が明らかとなり、これを低減するために図3に示すように活性層と OCL 層を交互に分布させたファブリ・ペロー共振器レーザを作製した結果、その内部量子効率は図4に示すように 70% と大きく向上し、従来型の半導体レーザと遜色ない値を得ることに成功した。

これらの知見を元に、図5に示すような半導体メンブレン構造 DFB レーザを試作し、現在までにしきい値電流 3.8 mA を得ることに成功している。アモルファスシリコン表面回折格子の深さ不足お

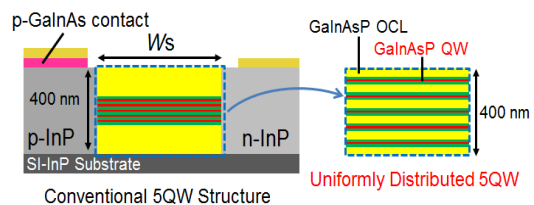


図3. 量子井戸活性層を分布させた横方向電流注入レーザの構造

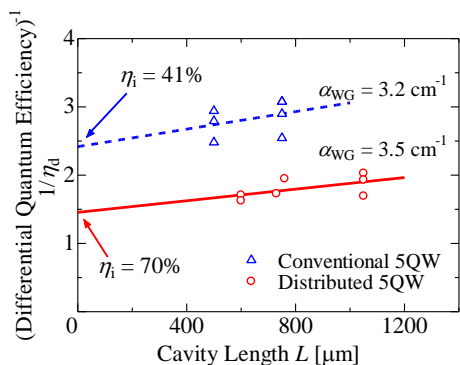


図4. 横方向電流注入レーザの外部微分量子効率の共振器長依存性

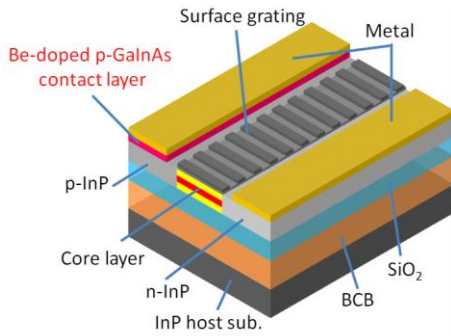


図5. 横方向電流注入構造薄膜DFBレーザの構造

よびブラッグ波長不整合のため、理論的に期待される極低電流動作には到達していないが、本研究の最難関課題と考えられた「半導体薄膜構造への高効率の横方向電流注入の実現」はほぼ達成できたと考えられる。今後、半導体薄膜（メンブレン）構造の優位性が最も発揮される半導体層厚 150-200 nm を用いて、高い屈折率結合係数を有する回折格子を有するDFB共振器を実現することにより、極低しきい値電流動作および高光出力効率化による低消費電力・高速動作化が期待できる。

また、この横方向電流注入構造と同様構造の高速光検出器を試作し、光吸収領域のストライプ幅を $0.85 \mu\text{m}$ と狭くすることにより、逆バイアス 2V 印加時に 10 Gbs の光信号に対して良好なアイパターンを観測した。

③ 受動光回路素子

光デバイス間を低損失に繋ぐ導波路および種々の波長選択機能を有する光フィルタの温度無依存化を目指して、BCB埋め込みスロット型シリコン細線導波路を実現し、伝搬損失 8.8dB/cm というスロット型導波路の中では低損失な値を実現した。これを利用したフィルタによって従来のシリコン細線導波路より2桁低い温度依存性である -0.6pm/K のピーク波長シフトを実現した。

(2) 高速電子デバイス

メンブレン電子デバイスの中で駆動デバイスと考えているヘテロ接合バイポーラトランジスタにおいては電子ビーム露光法により微細エミッタ構造を持つデバイスを作製し、図6に示す遮断周波数 510GHz という測定結果を得た。

高速論理デバイスとして考えられ絶縁ゲートホットエレクトロントランジスタについては、狭メサ化による電流制御性の向上を行うと共に、高誘電率ゲート絶縁膜の高性能化をはかり、チャンネル幅 15nm チャンネル長 60nm の素子において、 1.1A/mm

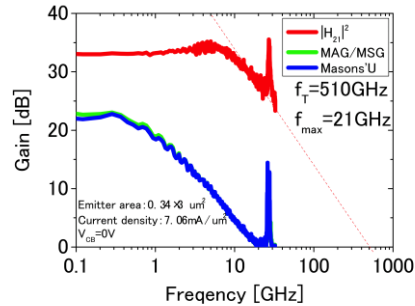


図6. 試作したメンブレンHBTの周波数特性

(7MA/cm^2 に相当)、 0.53S/mm の電流駆動能力を達成した。

(3) テラヘルツデバイス

共鳴トンネルダイオードと平面微細アンテナを集積したテラヘルツ発振素子について、チップ間信号伝送に必要な水平放射を行うため、図7に示す共鳴トンネルダイオードと共振器・導波路・テーパ型スロットアンテナを集積した発振回路を考案・実現した。この構造に必要な導波路とアンテナ下部の基板をメンブレン化する作製プロセスを確立し、 405GHz において $60 \mu\text{W}$ の出力を有する単峰水平放射特性を達成した。

素子の高周波化については、共鳴トンネル構造に隣接するコレクタスペーサー層容量の低減、コレクタ走行時間増加の原因となるバレー間散乱の抑圧のための極薄バリア層と傾斜エミッタ構造を用いて、単体の室温電子デバイスでは最高周波数の 1.04THz の基本波発振を達成した。

また、共鳴トンネルダイオードを用いる発振回路と受信回路を構成し、 542GHz のサブテラヘルツ波を用いて 3Gbps の無線伝送実験に成功した。(Electronics Letters, Vol. 48, No. 10, May 2012 の Highlight として紹介された。)

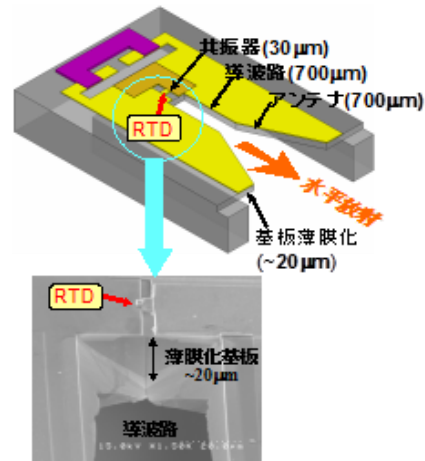


図7. 試作した水平放射型テラヘルツ発振回路

さらに、チップ内で使用される光信号から、チップ間伝送で使用されるテラヘルツ信号へとシームレスに変換する方法として、半導体に光照射した際に生成される光励起キャリアによるテラヘルツ波の吸収を用いる光-テラヘルツ変換素子の可能性を実証した。

(4) 薄膜転写・多層化技術

光デバイスおよび電子デバイスを共通のプラットフォームに載せるための技術として、ベンジシクロブテン (BCB) を介した貼り付け法と表面活性化接合法による Si 基板への直接貼り付けの研究を行い、以下の成果を得た。

① BCB を介した貼り付け法

Si 基板上に GaInAsP/InP ウェーハ (直径 2 インチ) を全面貼り付けするプロセスを開発し、BCB の熱処理条件の適正化により、0.8 MPa 以上の貼り付け強度を得た。さらに、BCB 中に埋め込んだ厚さ 150 nm、幅 410 nm の GaInAsP 細線光導波路において、細線幅揺らぎ (3σ) を 1.9 nm に低減し、III-V 属細線導波路の中で最小の伝搬損失 4dB/cm を得ることに成功した。

② 表面活性化接合による Si への直接貼り付け法

SOI 基板上に光導波路部分の両側に幅 6 μm の溝構造を形成することにより、直接貼り付け後の熱膨張係数の違いによる剥離の無い GaInAsP/InP ウェーハの直接貼り付けに成功し、GaInAsP/Si ハイブリッド構造光デバイス実現のための基礎技術を確立した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 89 件、うち招待論文 7 件)

- ① M. Futami, T. Shindo, T. Koguchi, K. Shinno, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, “GaInAsP/InP Membrane Lasers for Optical Interconnects,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読有, vol. 24, no. 11, pp. 888–890 (2012).
- ② K. Ishigaki, M. Shiraishi, S. Suzuki, M. Asada, N. Nishiyama, and S. Arai, “Direct intensity modulation and wireless data transmission characteristics of terahertz-oscillating resonant tunneling diodes,” *Electron. Lett.*, 査読有, vol. 48, no. 10, pp. 582–583 (2012).
- ③ S. Arai, N. Nishiyama, T. Maruyama, and T. Okumura, “GaInAsP/InP Membrane Lasers for Optical Interconnects,” [Invited] *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 査読有, vol. 17, no. 5, pp.

1381–1389 (2011).

- ④ T. Shindo, T. Okumura, H. Ito, T. Koguchi, D. Takahashi, Y. Atsumi, J. Kang, R. Osabe, T. Amemiya, N. Nishiyama, and S. Arai, “Lateral Current Injection Distributed Feedback Laser with Surface Grating Structure,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 査読有, vol. 17, no. 5, pp. 1175–1182 (2011).
 - ⑤ S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama, and H. Yokoyama, “Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature,” *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, vol. 97, no. 24, pp. 242102–1–242102–3 (2010).
 - ⑥ T. Okumura, H. Ito, D. Kondo, N. Nishiyama, S. Arai, “Continuous Wave Operation of Thin Film Lateral Current Injection Lasers Grown on Semi-insulating InP,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 49, no. 4, 040205 (2010).
 - ⑦ M. Shiraishi, S. Suzuki, A. Teranishi, M. Asada, “Fundamental Oscillation of up to 915 GHz in Small-Area InGaAs/AlAs Resonant Tunneling Diodes with Planar Slot Antennas,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 49, no. 2, 020211 (2010).
 - ⑧ T. Okumura, T. Maruyama, H. Yonezawa, N. Nishiyama, S. Arai, “Injection-Type GaInAsP-InP-Si Distributed-Feedback Laser Directly Bonded on Silicon-on-Insulator Substrate,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読有, vol. 21, no. 5, pp. 283–285, (2009).
 - ⑨ H. Saito, Y. Miyamoto, and K. Furuya, “Improvement in Gate Insulation in InP Hot Electron Transistors for High Transconductance and High Voltage Gain,” *Appl. Phys. Express*, 査読有, vol. 2, no. 3, 034501 (2009).
 - ⑩ M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto, “Resonant Tunneling Diodes for Sub-Terahertz and Terahertz Oscillators,” [Invited], *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol. 47, no. 6, pp. 4375–4384 (2008).
- [学会発表] (計 439 件、うち招待講演 39 件)
- ① N. Nishiyama and S. Arai, “Membrane InP-based Lasers and Related Devices for On-chip Interconnects,” [Invited], 2011 IEEE Photonics Conference (IPC-2011), Arlington, USA, WA3, 12 Oct., 2011.
 - ② S. Arai, N. Nishiyama, and T. Okumura,

“Lateral Current Injection GaInAsP/InP Laser for Membrane Based Photonic Circuits,” [Invited], SPIE Photonics West Conference 2011, San Francisco, CA, USA, 7953-06, 24 Jan., 2011.

- ③ S. Arai, N. Nishiyama, and T. Okumura, “Membrane DFB lasers on SOI,” [Invited], Asia Communications and Photonics Conf. and Exhibition 2010 (ACP2010), Shanghai, China, ThF1, 9 Dec., 2010.
- ④ S. Arai and N. Nishiyama, “Membrane-Type Photonic Devices for Optical Circuits on SOI,” [Invited], 2010 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), Tokyo, Japan, D-6-1, 24 Sep., 2010.
- ⑤ 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, 13 May, 2009.

[図書] (計2件)

浅田雅洋、テラヘルツ波新産業、シーエムシー出版、(分担) 2011年、280ページ

[産業財産権]

○出願状況 (計7件)

名称：活性層分離型位相シフトDFBレーザ
発明者：西山伸彦、荒井滋久、他
権利者：東工大/NTT
種類：特許
番号：特願 2011-050062
出願年月日：2011/03/08
国内外の別：国内

名称：共鳴トンネルダイオードおよびテラヘルツ発振器
発明者：杉山弘樹、横山春喜、浅田雅洋、鈴木左文
権利者：東工大/NTT
種類：特許
番号：特願 2009-268458
出願年月日：2009/11/26
国内外の別：国内

名称：光集積素子
発明者：西山伸彦、荒井滋久、李承勳、上岡裕之、大橋弘美、須郷満
権利者：東工大/NTT
種類：特許
番号：特願 2009-215167
出願年月日：2009/09/17

国内外の別：国内

名称：バイポーラトランジスタの製造方法
発明者：山幡章司、栗島賢二、宮本恭幸、山下浩明

権利者：NTT
種類：特許
番号：特願 2009-017616
出願年月日：2009/1/29
国内外の別：国内

○取得状況 (計1件)

名称：ホットエレクトロントランジスタ、及びその製造方法

発明者：宮本恭幸、前田寛、竹内克彦
権利者：東京工業大学
種類：特許
番号：特許第 4354192 号
取得年月日：2009/08/08
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

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

http://www.pe.titech.ac.jp/AsadaLab/Asada_Lab.html

<http://www.pe.titech.ac.jp/Furuya-MiyamotoLab/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒井 滋久 (ARAI SHIGEHISA)
東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス
研究センター・教授
研究者番号：30151137

(2) 研究分担者

丸山 武男 (MARUYAMA TAKEO)
金沢大学・電子情報学系・准教授
研究者番号：60345379

(3) 連携研究者

浅田 雅洋 (ASADA MASAHIRO)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・
教授
研究者番号：30167887

宮本 恭幸 (MIYAMOTO YASUYUKI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教
授
研究者番号：40209953

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