

平成 22 年 4 月 13 日現在

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の InP 系メンブレン光・電子デバイス

研究課題名（英文） InP-based membrane optical and electrical devices for Si LSI wide band global wiring

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

研究代表者の専門分野：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：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. 研究計画の概要

Si 系 LSI の CMOS 微細化による高速化は、グローバル配線層の信号遅延の影響による性能限界を顕著にしつつあり、その解決策として光回路の導入を検討する。グローバル配線のための光回路としては超低消費電力動作が必要であり、それを達成するデバイス構成として薄膜 InP 系材料を低屈折率で挟みこんだメンブレン構造を利用し、光デバイス、電子デバイス、チップ間伝送用テラヘルツデバイスを実現する。

具体的に光デバイスでは、メンブレン化により活性層への光閉じ込めを向上し、DFB 構造による高結合により 0.1mA 以下のしきい値動作で高速動作を目指す。また、フォトディテクタ、メンブレン導波路についても実現する。

電子デバイスとしては、n-MOS トランジスタ駆動能力の限界打破できる可能性を併せ持つ素子としての絶縁ゲート型ホットエレクトロントランジスタを形成し、さらにメンブレン電子デバイス化を行う。また変調時に必要な高耐圧高速素子として InP 系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) をメンブレン電子デバイスとして形成する。

LSI チップ間で短距離大容量の無線伝送を行うため、共鳴トンネルダイオードと微細アンテナを半導体基板上に集積したテラヘルツ帯の発振素子を作製し、室温において 1THz 以上の基本波発振、および、チップ間伝送に必要な不可欠な水平方向放射や光信号をテラヘルツ信号に変換するために必要な発振素子とその集積構造の確立を目指す。また、発

振線幅や雑音特性などの発振スペクトル特性を明らかにする。

また、これらのデバイスの集積化技術を検討し、光信号からテラヘルツ信号へのシームレスな信号変換技術を提案・実現する。

2. 研究の進捗状況

LSI で使用される 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た。また、直接貼り付け技術を利用し、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。また、メンブレンレーザの電流注入動作実現のため、半絶縁基板上に 400nm の薄膜半導体層を形成し、横方向に PN 構造を形成することによってしきい値 11mA、外部量子効率 33%の室温連続発振レーザ動作を実現した。その構造を利用したフォトディテクタによって 7GHz の小信号帯域を確認し、10Gbps でのアイ開口を確認した。

絶縁ゲート型ホットエレクトロントランジスタは、遮断周波数 2THz 以上を理論的に明らかにし、実験的にはチャネル幅 15nm、チャネル長 60nm の素子において 1.1A/mm、0.53S/mm の電流駆動能力を得た。InP 系 HBT では、遮断周波数 468GHz を確認した。さらにシリコン基板上に HBT をメンブレン化して形成し、静特性を測定した。

テラヘルツデバイスについては、極薄バリアと傾斜エミッタにより電子走行時間を短縮した共鳴トンネルダイオード (RTD) を用いて、単体の室温電子デバイスとしては最高周波数の 951GHz 基本波発振を達成した。ま

た、メンブレン型水平放射素子の作製プロセスを確立し、405GHz で出力 60 マイクロ W の単峰水平放射を得るとともに、線幅や雑音の測定に必要な RTD の発振出力の準光学的高調波ヘテロダイン検出に成功した。

また、光生成キャリアによる光信号からテラヘルツ信号への変換を可能とする半導体素子を提案し、その基礎実験において、光信号の反転信号がテラヘルツ信号として出力されることを確認した。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

(理由)

研究開始から 3 年を迎えた段階で、世界初となる SOI 基板上 DFB レーザ、400nm の薄膜横注入によるレーザ動作、当時国内最速となる遮断周波数 468GHz、単体電子デバイスとしては世界最高発振周波数となる 951GHz、水平放射の実現や、光-テラヘルツ変換素子の提案などメンブレン回路を実現するための要素技術を確認しつつある。今後 2 年間で、集積技術への力を入れていけば、最終ターゲットへ到達できる可能性は十分ある。

4. 今後の研究の推進方策

光デバイスにおいては、薄膜化技術を向上させ、実際のメンブレン DFB レーザにおいてしきい値電流 0.1mA を実現する。BCB 塗布後の平坦化、薄膜のストレス緩和技術を検討していく必要がある。また、>40Gbps の高速変調を実現するためメンブレン電界吸収型変調器や MSM ディテクタを検討する。

メンブレン化をおこなった HBT の高速性実証には微細化が必要であり、電子ビーム露光により微細化を行いメンブレン電子デバイスでのマイクロ波特性を行う。また絶縁ケート型ホットエレクトロントランジスタではゲート絶縁膜の薄膜化・高誘電率化を行うことで、更なる高駆動能力化を行うと共に、メンブレン電子デバイス化を行う。

テラヘルツデバイスに関しては、共鳴トンネルダイオードの微小面積化やエミッタなどの層構造最適化により、1THz 以上の室温基本波発振を目指す。水平放射については、高い伝送容量を得るためのアンテナの指向性と構造、および、光信号からテラヘルツ信号への変換に適した発振素子構造を理論と実験により明らかにする。また、発振線幅のバイアスおよび出力依存性を詳細に測定し、スペクトル特性を明らかにする。

これらの技術を結合するための集積貼り付け技術を検討する。具体的には、単体デバイスをブロックレベルで貼り付ける、一体で III-V 族側に形成し貼り付ける方法の 2 通りを検討し、デバイスを試作する。

5. 代表的な研究成果

(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 45 件)

- ① 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.*, vol. 49, no. 4, 040205 (2010)
- ② 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.* vol. 49, no. 2, 020211 (2010).
- ③ 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. Elec. Lett.*, vol. 21, no. 5, pp.283-285, (2009)
- ④ H. Saito, Y. Miyamoto, and K. Furuya, "Improvement in Gate Insulation in InP Hot Electron Transistors for High Transconductance and High Voltage Gain," *Applied Physics Express*, vol. 2, no. 3, 034501 (2009)
- ⑤ M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto, "Resonant Tunneling Diodes for Sub-Terahertz and Terahertz Oscillators," (Invited), *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 47, no.6, pp.4375-4384 (2008).

[学会発表] (計 227 件)

- ① 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 2009.

[図書] (計 1 件)

- ① 浅田雅洋, 「テラヘルツ技術総覧」第 3 章 3.5 節, 廣本宣久監修, NGT, 2007 年.

[産業財産権]

○出願状況 (計 5 件)

- ① 浅田雅洋, 関口亮太, 尾内敏彦, 内田恒二 「レーザ素子」特願 2007-331275, 出願日 2007 年 12 月 25 日.

○取得状況 (計 1 件)

- ① 宮本恭彦, 前田寛, 竹内克彦 「ホットエレクトロントランジスタ、及びその製造方法」日本国特許第 4354192 2009 年 8 月 7 日.

[その他]