

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420300

研究課題名(和文) III-V量子ドット/シリコンエバネッセントハイブリッドレーザの開発

研究課題名(英文) Development of III-V quantum dot / silicon evanescent hybrid lasers

研究代表者

田辺 克明 (Tanabe, Katsuaki)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60548650

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：半導体量子ドットを光源とする導波路エバネッセント結合型ハイブリッドシリコンレーザを実現した。本デバイスは、InAs半導体量子ドットを光ゲイン媒体とし、シリコン光導波路にレーザ光が直接的に入射されているものであり、ウェハ接合および薄膜転写技術により作製した。既存のハイブリッドシリコンレーザはいずれも量子井戸をゲイン媒体としており、今回高性能な量子ドットを採用することによって、世界最高温度動作を達成した。この成果は、特に高い温度特性が要求される高密度光集積回路の開発における重要な布石であり、次世代の高速・大容量・低消費電力演算・通信の実現に繋がるものである。

研究成果の概要(英文)：We have realized a quantum dot-gained, evanescently waveguide-coupled hybrid silicon laser. This device comprises a InAs quantum dot optical gain medium and silicon waveguides, and has been fabricated via wafer bonding and layer transfer. We have then achieved the world's highest-temperature operation by utilizing high-performance semiconductor quantum dots, while the earlier hybrid silicon lasers used quantum wells as gain media. Our result is an important step in the development of high-density photonic integrated circuits, which particularly requires high temperature stability, towards the realization of next-generation high-speed, large-volume, low-power-consumption communication and telecommunication.

研究分野：材料工学

キーワード：光集積回路 光通信 半導体レーザ シリコン ウェハ貼り合わせ 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 技術を基盤とする、シリコンの導波路を用いた光集積回路は、次世代の高速・大容量の情報・演算素子への応用に有望とされている。しかしながら、シリコンは、間接遷移半導体であるがゆえに、発光効率が非常に低く、例えば電流注入型シリコンレーザなどはいまだ実現されておらず、光源として用いるのは困難とされている。そのため、このようなシリコンを基盤とする光集積回路においても、光源には直接遷移を有する GaAs や InP といった化合物半導体を用いる必要がある。従来の水平方向の光源と導波路との結合では、光源と結合材が場所を取ってしまう、また、位置調整が難しく、光結合の損失が大きくなってしまふという問題がある。一方で、ウェハ接合法により作製可能な、エバネッセント結合を用いる垂直方向の連結の、いわゆる「ハイブリッドシリコンレーザ」構造では、高集積化が可能であり、また位置合わせが容易で光結合損失を小さくできるという利点がある[1]。そのため、将来の Si 光集積回路の構築に有望であると考えられる。

量子ドットをゲインとするレーザは、量子ドット内の離散的な状態密度のため、従来の量子井戸を使用するレーザと比較して、発振閾値電流、また、閾値の温度依存性を小さくすることが可能である。このような特性は、低消費電力を意味すると同時に、特に高密度な集積回路の駆動において問題となる熱の蓄積の抑制にもつながり、量子ドットレーザは将来の高密度光集積回路の光源として有望であると言える。しかしながら、これまでに量子ドットレーザを用いたハイブリッドレーザの報告例はない。そのため、本研究で開発する量子ドットレーザ光源と Si 導波路とのハイブリッドレーザは、これまでのものはるかに低い発振閾値電流と高い温度安定性を持つことから、大きい影響と高密度シリコン光集積回路の実現への発展をもたらすこととなる。

2. 研究の目的

現行のシリコン LSI に代わる次世代低消費電力・大容量高速演算および通信を実現する光配線技術の心臓部である光源として、シリコンチップ上に一体形成する化合物半導体レーザが有望視されている。本研究では、高密度シリコン光集積回路の基盤となる、直接遷移型発光体薄膜とシリコン光導波路とを結合したレーザ素子「III-V 量子ドット/シリコンエバネッセントハイブリッドレーザ」の開発を行う。特に、ゲイン媒質として III-V 族化合物半導体量子ドットを採用し、現行の量子井戸レーザと比較して低発振閾値電流および高温安定性という利点を持つ量子ドットレーザによる高性能な光集積回路上光源を実現する。

3. 研究の方法

本研究で用いた InAs/GaAs 量子ドットレーザ構造は、GaAs (100) 基板上に分子線エピタキシーにより成長され、一層あたりの面密度 $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ の自己組織化 InAs 量子ドット 8 層を含む GaAs コア層と p -/ n -Al_{0.4}Ga_{0.6}As クラッド層から成る。InAs 量子ドット層間の GaAs バリア層に部分的な p 型ドーピングが施されている。後述の薄膜転写工程のために、GaAs 基板と n -Al_{0.4}Ga_{0.6}As 下側クラッド層との間に 1 μm 厚の Al_{0.7}Ga_{0.3}As エッチング停止層を設けた。

本研究では、GaAs/Si 直接ウェハ接合と GaAs 基板の選択的溶解により、上記の InAs/GaAs 量子ドットレーザ構造を Si 導波路を含む silicon-on-insulator (SOI) 基板上に転写する手法を採用した。まず、HF 水溶液 (20 vol%) による自然酸化膜除去の後、InAs/GaAs 量子ドットレーザウェハと SOI 基板を (011) 端同士が平行になるように重ね合わせ、大気中で基板に垂直な方向に 0.1 MPa の圧力を与えた状態で 300°C において 3 時間放置した[2,3]。このようにして接合した後、H₃PO₄ - H₂O₂ 混合溶液 (3:7 vol.) と 50% クエン酸 - H₂O₂ 混合溶液 (4:1 vol.) の二段階の選択的エッチングにより GaAs 基板を除去した。その後、Al_{0.7}Ga_{0.3}As エッチング停止層を HF 水溶液 (20 vol%) により除去した。

SOI 基板上のレーザにおいては、絶縁性の SiO₂ 層の存在のために、III-V 薄膜中のメサ構造の上下に電極を設置し、III-V 材料内で閉じた電流経路を形成する必要がある。そのため III-V レーザ構造薄膜最下部の導電層のみを残すようなメサエッチングが要求される。InP 系レーザの場合には、InGaAs 系活性層と InP 導電層との材料の化学的なコントラストが強く、そのような選択性エッチングは比較的容易であるが、GaAs 系レーザにおいては AlGaAs クラッド (我々の場合には Al_{0.4}Ga_{0.6}As) と GaAs 導電層との選択性エッチングに難があり、それもあってか、これまでに SOI 基板上の GaAs 系レーザの報告例はなかった。

SOI 基板上に電子線リソグラフィと気相エッチングにより Si 導波路構造を作製した。その上に、上記のように InAs/GaAs 量子ドットレーザ構造を薄膜転写した後、III-V メサ、絶縁およびパッシベーション用 SiO₂ 膜、電極パターンの形成によりレーザを作製した。メサ構造の作製については、H₃PO₄ - H₂O₂ - H₂O 混合溶液 (3:3:97 vol.) と HF 水溶液 (conc.) の組み合わせにより、高ドープ p -GaAs 導電層のみを残し、III-V メサを形成した。続いて、III-V メサの上面 (n 側) および p -GaAs 導電層の上面 (p 側) に AuGeNi/Au 電極を形成し、レーザを作製した。

4. 研究成果

初めてとなる半導体量子ドットを光源と

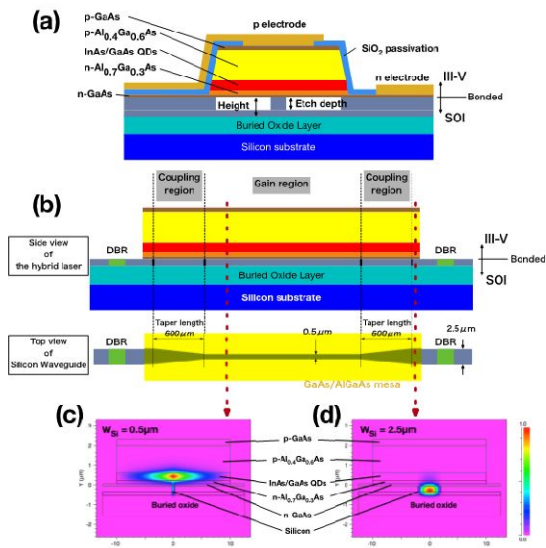


図1 作製したレーザの構造模式図および光強度分布の計算結果

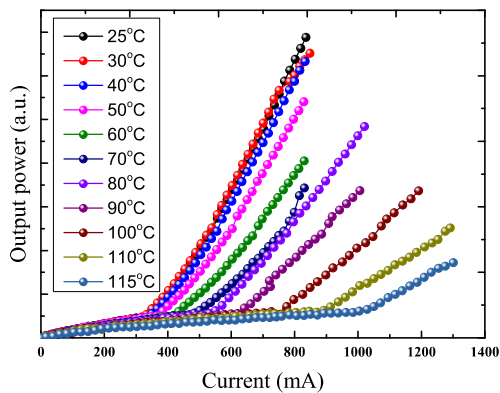


図2 作製したレーザの光-電流特性

する導波路エバネッセント結合型ハイブリッドシリコンレーザを実現した。本デバイスは、InAs 半導体量子ドットを光ゲイン媒体とし、シリコン光導波路にレーザ光が直接的に入射されているものである。量子井戸と比較して低い量子ドットの体積ゲイン密度を補いつつ高い光結合効率を得るための III-V 薄膜-シリコン導波路系の三次元的構造設計を行った。InAs 量子ドットを含む III-V 化合物半導体ダブルヘテロ構造の成長されたウェハと、シリコン光導波路アレイを作り込んだ SOI ウェハとをウェハ接合法により組み合わせることで作製した。既存のハイブリッドシリコンレーザはいずれも量子井戸をゲイン媒体としており、今回初めて高性能な量子ドットを採用することによって、115°C という世界最高温度動作を達成した。

今回作製したデバイスのより詳細な特性として、室温における閾値電流値は 334 mA であった。異なる動作温度における閾値電流値の変化より算出したレーザの特性温度 T_0

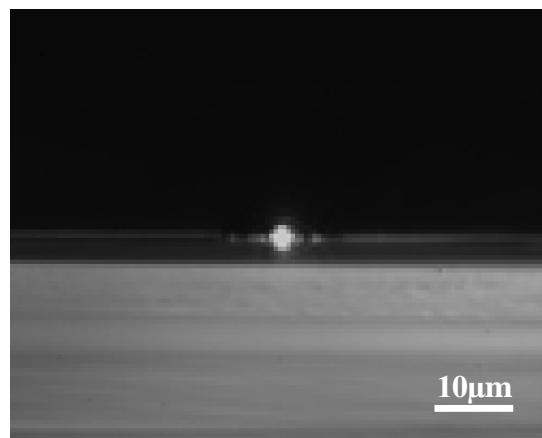
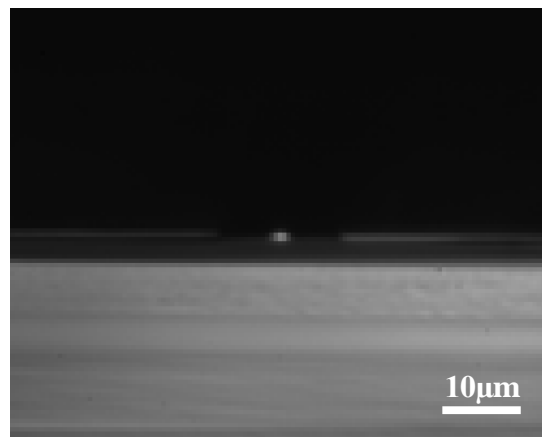
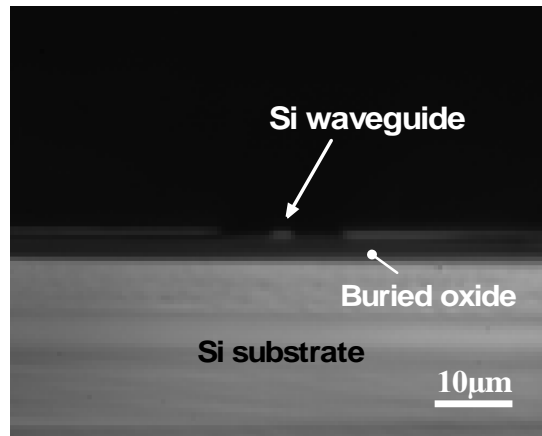


図3 (上から下の順に) 電流値 0、250、350 mA における Si 導波路端面の近視野像

は、室温近傍にて 300K、100 付近にて 60K であった。出力光のスペクトルにおいて、シリコン導波路に設けた分布帰還ブラッグ反射板 (DBR) のストップバンドにあたる 1240 ~ 1260 nm の領域に、発振閾値電流以下における自発発光スペクトルのくぼみが、また、発振閾値電流以上における発振発光スペクトルのピークが見られた。このスペクトル観測結果から、DBR 対によりレーザ共振器が形成されていること、また、レーザ光出力は InAs/GaAs 量子ドットと高効率にて結合した

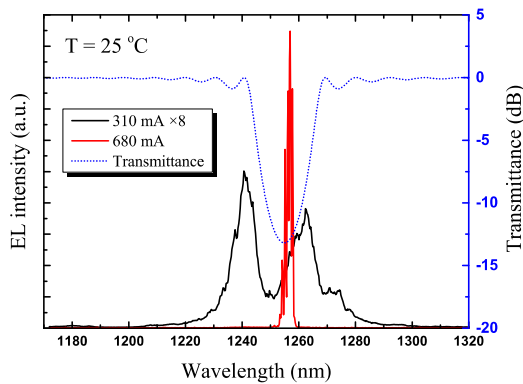


図4 自発（黒色）および発振（赤色）発光スペクトルと DBR の透過スペクトル（青色）

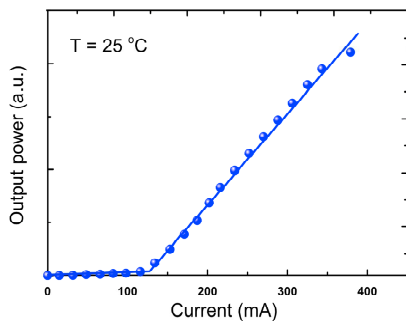


図5 III-V メサ幅 8 μm の連続発振レーザの光-電流特性

シリコン導波路から生じているということが分かる。さらに、デバイス断面の近視野像観察において、III-V 部ではなくシリコン導波路部からの明確な発光が観測されている。また、偏光フィルタを用いた発光の観察から、一般的な量子ドットレーザ同様に TE 偏光であることが確認されている。これら一連の観察結果より、本デバイスが InAs/GaAs 量子ドットゲイン媒体とシリコン導波路とのエバネッセント光結合により動作していることが確認され、効率良く光信号をオンチップ光集積回路へと送る素子として有望であることが示された。

更なるデバイスの高性能化を目指し、III-V メサ幅を 8 μm まで小さくしたところ、100 mA という低い閾値電流の連続発振を達成した。このデバイスにおける閾値電流密度は 250 A/cm^2 であり、我々の知る限りでこれまで報告されているエバネッセントレーザの中で最小値となっている。このように、本デバイスは、低消費電力で高効率な光集積回路の光源として期待される。

本成果は、特に高い温度特性が要求される高密度光集積回路の開発における重要な布石であると言える。また、並行してレーザ素子の高速変調にも取り組み、シリコンウェハ

に接合した InAs 量子ドットレーザにおいて、シリコン上量子ドットレーザとして世界最速となる 10 GHz 変調動作にも成功した。同時に、60 条件下においても 6 GHz という高い変調速度を確認している。これら一連の成果は、光・電子融合集積回路における高性能な光源をもたらすものであり、次世代の高速・大容量・低消費電力演算・通信の実現に繋がるものである。

<引用文献>

A. W. Fang, H. Park, O. Cohen, R. Jones, M. J. Paniccia, and J. E. Bowers, "Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser", *Optics Express* **14**, 9203, 2006

K. Tanabe, D. J. Aiken, M. W. Wanlass, A. Fontcuberta i Morral, and H. A. Atwater, "Direct-bonded GaAs/InGaAs tandem solar cell", *Applied Physics Letters* **89**, 102106, 2006

K. Tanabe, K. Watanabe, and Y. Arakawa, "III-V/Si hybrid photonic devices by direct fusion bonding", *Scientific Reports* **2**, 349, 2012

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)

Y. H. Jhang, K. Tanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "InAs/GaAs quantum dot lasers on silicon-on-insulator substrates by metal-stripe wafer bonding", *IEEE Photonics Technology Letters* **27**, 875, 2015

K. Tanabe, "Coupled-double-quantum-dot environmental information engines: A numerical analysis", *Journal of the Physical Society of Japan* **85**, 064003, 2016

K. Tanabe, "Plasmonic energy nanofocusing for high-efficiency laser fusion ignition", *Japanese Journal of Applied Physics* **55**, 08RG01, 2016

B. Jang, K. Tanabe, S. Kako, S. Iwamoto, T. Tsuchizawa, H. Nishi, N. Hatori, M. Noguchi, T. Nakamura, K. Takemasa, M. Sugawara, and Y. Arakawa, "A hybrid silicon evanescent quantum dot laser", *Applied Physics Express* **9**, 092102, 2016

Y. H. Jhang, R. Mochida, K. Tanabe, K. Takemasa, M. Sugawara, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Direct modulation of 1.3 μm quantum dot lasers on silicon at 60 °C", *Optics Express* **24**, 18428, 2016

6. 研究組織

(1)研究代表者

田辺 克明 (TANABE, Katsuaki)

京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60548650