

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860017

研究課題名（和文） 化合物半導体/シリコンハイブリッドフォトニック結晶レーザの開発

研究課題名（英文） Compound semiconductor/silicon hybrid photonic crystal lasers

研究代表者

田辺 克明 (TANABE KATSUAKI)

東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構・特任助教

研究者番号：60548650

研究成果の概要（和文）：次世代の低消費電力・高速演算・通信のための光電子集積回路の実現への布石となる、シリコン基板上の電流注入型・通信波長帯量子ドットレーザの作製に世界で初めて成功した。さらに、電磁気解析により、化合物半導体量子ドット層とシリコンとの接合に用いた金属薄膜層は、界面強度および導電性を高めるだけでなく、レーザ共振器からのシリコン基板側への光の漏れを抑制する効果も有することが分かった。

研究成果の概要（英文）：We have demonstrated the world's first electrically pumped telecommunication-band quantum dot laser on a silicon substrate as a basis of photonic integrated circuits for next-generation low-power-consumption, high-speed computation and communication. We have also revealed the function of the metal thin film mediating the compound semiconductor quantum dot layer and the silicon substrate not only to enhance interfacial mechanical stability and electrical conductivity but also to suppress optical leakage from the laser cavity into the silicon substrate through electromagnetic calculations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	940,000	282,000	1,222,000
2010年度	950,000	285,000	1,235,000
年度			
年度			
年度			
総計	1890,000	567,000	2,457,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：量子ドット、半導体レーザ、シリコンフォトニクス、ウェハ貼り合わせ

## 1. 研究開始当初の背景

シリコン LSI の微細化・高集積化を行ったいわゆる CMOS 作製技術は、今日の急速な情報化社会の発展を支えてきた要素の一つである。同時にシリコン LSI はその高集積化に伴い、発熱、信号遅延・狭帯域といったボトルネックを抱えている。電気信号に代わって光信号を用いる光配線技術が、これらボトルネック解消の切り札と期待される。光電子

集積回路用光源には、低消費電力、高速変調、温度動作安定性が求められ、量子ドット (QD) レーザは、量子井戸レーザと比べ、QD 内の離散的な状態密度の利用によりそれらの条件に優れることから、光電子集積回路用発光素子として有望視されている。

シリコン (Si) が発光効率の低い間接遷移材料であるにも関わらず、Si そのものを用いて発光素子を開発する努力が続けられてい

る一方で、発光効率の高い直接遷移材料の III-V 族化合物半導体を用いた Si とのハイブリッド型光電子集積回路用光源の開発が長足の進歩を遂げている。しかし、これまで Si 上 III-V QD レーザは、分子線エピタキシー (MBE) により Si 基板上に直接ヘテロエピタキシャル成長された事例はあるものの、 $1.0 \mu\text{m}$  での発振にとどまっていた。

## 2. 研究の目的

我々は、格子定数の違いにより MBE などの気相蒸着法による形成が困難な低欠陥密度の異種半導体のヘテロ接合をウェハ融着法により形成する技術の検討を行い、QD 光デバイスと Si 基板/導波路集積化技術の開発に取り組んでいる。本研究課題においては、ウェハ融着技術を用いることにより、世界初の Si 基板上電流注入型  $1.3 \mu\text{m}$  QD レーザの作製に成功した。

## 3. 研究の方法

### GaAs/Si ウェハ融着

InAs/GaAs 量子ドットレーザ構造と Si 基板とのウェハ融着において、融着界面を通して垂直方向の電流注入を実現するためには、低抵抗な GaAs/Si 融着界面を得ることが重要である。そこで、まず GaAs と Si の基板同士を用い、低抵抗 GaAs/Si 界面を得るためのウェハ融着の検討を行った。この試験には、ウェハ融着界面近傍のドーパ濃度が高いほど界面抵抗が低くなりやすいという過去の知見から、ドーパ濃度  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  程度の p 型(001)GaAs および Si 基板を用いた。ウェハ融着前に、GaAs/Si 直接融着用の試料については、両基板について HF 水溶液により自然酸化膜を除去した。一方、金属薄膜を介した融着用の試料については、 $100 \text{nm}$  厚の AuGeNi 合金 (80:10:10%) を両基板の研磨面に蒸着した。大気中、 $300\text{-}500^\circ\text{C}$  下において 3 時間ウェハ融着を行った。このようにして融着した GaAs/Si 界面の電流-電圧 (I-V) 特性の測定を行った。

### 金属/半導体/金属構造における伝播ロス

上記のような金属薄膜を介した高導電性 GaAs/Si 融着をレーザ応用に用いることは、レーザ共振器において、金属による光の吸収による導波路のロスという観点で不安がある。その金属薄膜の存在によるロスの効果を調べるために、我々のレーザ共振器にあたる AlGaAs/GaAs/AlGaAs スラブ導波路について二次元有限差分時間領域法 (FDTD) 計算を行った。

### Si 基板上 InAs/GaAs QD レーザ

Sb をサーファクタントとして用いた有機金属化学的気相成長法 (MOCVD) により、GaAs (001)基板上に、 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  エッチング停止層と、それに続き、一層あたりの面密

度  $4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$  の自己組織化 InAs QD 層 5 層を含む  $350 \text{nm}$  厚の GaAs コア層と  $1.4 \mu\text{m}$  厚  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  上下クラッド層から成る InAs/GaAs QD レーザ構造を成長した。図 1 (挿入図)に成長した InAs QD の原子間力顕微鏡 (AFM) 像を示す。凝集がなく、均一なサイズで、高密度な InAs QD が得られている。図 1 に成長した InAs QD の室温フォトルミネッセンス (PL) スペクトルを示す。QD の基底準位の遷移による  $1.30 \mu\text{m}$  での発光ピークが見られている。半値全幅は  $30 \text{meV}$  であった。

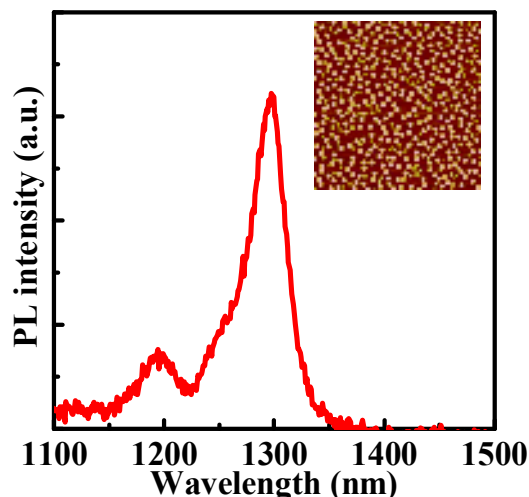


図 1 MOCVD により成長した InAs QD の室温 PL スペクトルと (挿入図)  $1 \times 1 \mu\text{m}$  AFM 像

## 4. 研究成果

### GaAs/Si ウェハ融着

図 2 に融着した GaAs/Si 試料の界面の I-V 特性を示す。なお電圧は GaAs 基板側からの印加を正值としている。GaAs/Si 直接融着の試料では、全融着温度について、曲がりの見られる、ダイオード的な I-V 特性が得られた。導電率の融着温度依存性は単調な傾向を示していないが、これは、高温における GaAs/Si 間の共有結合の形成と熱膨張率の相違による歪みとの競合によるものと考えられる。また、高温での界面の熱酸化膜形成も導電性に影響を及ぼしていると思われる。このような GaAs/Si 直接融着の場合と対照的に、金属薄膜を介した GaAs/Si 融着の試料については、直線的な、オーミックな I-V 曲線が得られている。Au-Ge 合金の  $280^\circ\text{C}$  という低い共晶融点を活用することで、このような AuGeNi 合金薄膜を介した融着では、直接融着の場合と比較して界面の機械的強度および導電率が向上していると考えられる。これらの結果から、本研究の Si 基板上レーザ作製には、AuGeNi 合金薄膜を介したウェハ融着を採用することとした。

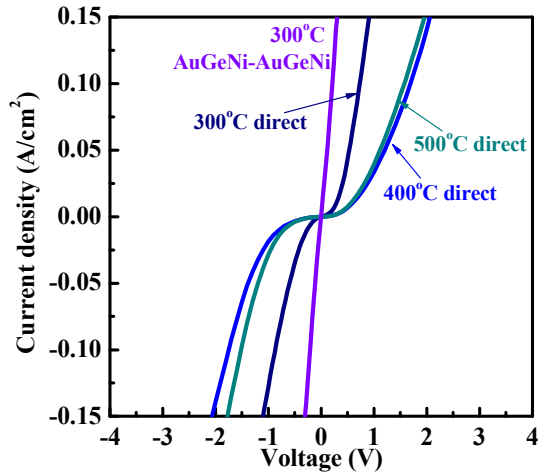
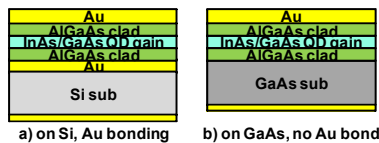


図2 融着した GaAs/Si 試料の界面の I-V 特性。電圧は GaAs 基板側からの印加を正值としている。

### 金属/半導体/金属構造における伝播ロス

導波路の基底 TE モードについての伝播ロスの計算結果を表 1 に示す。500 nm 以下の比較的薄いクラッドで低 Al 組成 (Al/Ga < 0.4/0.6) の場合には、Au 融着層は我々の InAs QD の基底準位の遷移での飽和ゲイン (20 cm<sup>-1</sup> 程度) に対して大きいロスをもたらすことが分かる。しかしながら、Au 融着層は、基板側への光の漏れを抑制するバリアの役割も果たし、金属融着層なしの GaAs 基板上的同じレーザ構造の場合と比較してロスを低減することが分かった。このバリアの効果は、GaAs/Si 界面の高導電化に加え、我々の金属薄膜を用いるウェハ融着のレーザ応用への利点の一つである。これらの FDTD 計算結果に基づき、ロスを最低限にするのに十分な 1.4 μm 厚の Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As クラッドを作製するレーザの構造に採用した。



	clads 0 thick	clads 500nm	clads 1.4 m
a) Au bond, Al <sub>0.4</sub> Ga <sub>0.6</sub> As clads	415 cm <sup>-1</sup>	1.9 cm <sup>-1</sup>	< 0.1 cm <sup>-1</sup>
a) Au bond, Al <sub>0.6</sub> Ga <sub>0.2</sub> As clads	415 cm <sup>-1</sup>	0.44 cm <sup>-1</sup>	< 0.1 cm <sup>-1</sup>
b) no Au, Al <sub>0.4</sub> Ga <sub>0.6</sub> As clads	no mode	173 cm <sup>-1</sup>	0.23 cm <sup>-1</sup>

表 1 FDTD 計算によるレーザ共振器中の伝播ロス

### Si 基板上 InAs/GaAs QD レーザ

上記の検討に基づき、金属薄膜を介した 300 °C でのウェハ融着と GaAs 基板の選択的溶解により、成長した InAs/GaAs QD レーザ

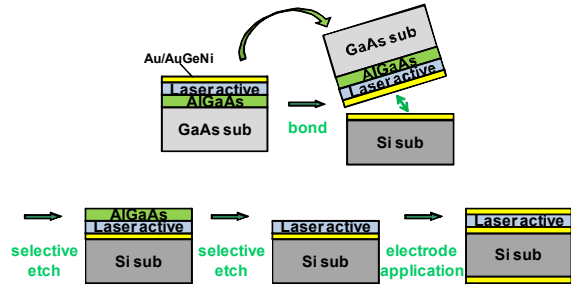


図 3 Si 基板上 InAs/GaAs QD レーザの作製プロセスのフロー図

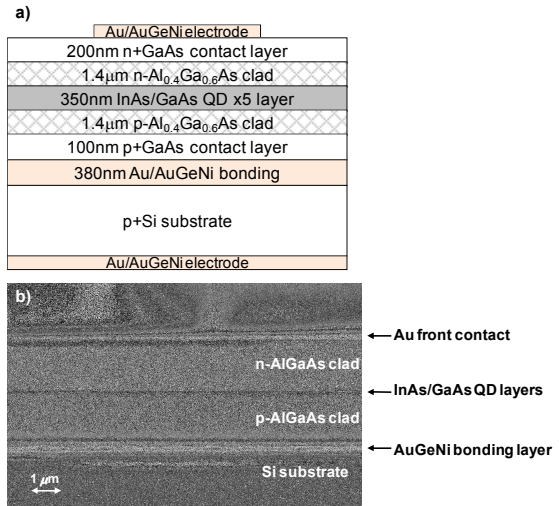


図 4 作製した Si 基板上 InAs/GaAs QD レーザの (a) 断面模式図および (b) 断面 SEM 像

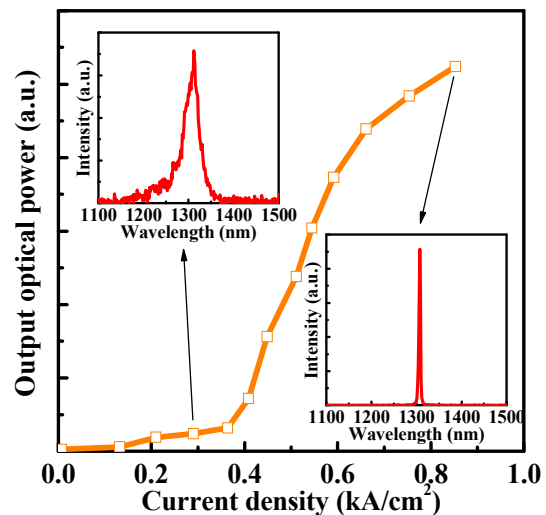


図 5 作製した Si 基板上 InAs/GaAs QD レーザの室温における光-電流特性および (挿入図) 電流値 290 A/cm<sup>2</sup> (発振閾値以下) および 830 A/cm<sup>2</sup> (発振閾値以上) における発光スペクトル

構造を高ドーパ p 型 Si (001) 基板上に転写した (図 3)。その後、InAs/GaAs QD レーザ構造の上面および Si 基板の底面に AuGeNi/Au 電極を形成し、ブロードエリアファブリケーション・ペロレーザを作製した (図 4)。作製した Si 基板上 QD レーザの室温におけるパルス駆動下での光-電流特性を図 5 に示す。発振閾値電流密度は  $360 \text{ A/cm}^2$  であった。自発発光にあたる電流密度  $290 \text{ A/cm}^2$  での発光スペクトル、および、誘導放出にあたる電流密度  $830 \text{ A/cm}^2$  での発光スペクトルをそれぞれ図 5 の挿入図に示す。InAs QD の基底準位の遷移による  $1.31 \mu\text{m}$  での室温発振が見られた。この発振波長は Si 基板上に直接成長した QD レーザの報告事例での  $1.02 \mu\text{m}$  と比較して顕著に長く、光通信用途に適している。また、本研究のデバイスでは、高導電性 GaAs/Si ヘテロ接合によって垂直方向のキャリア注入を実現しており、水平方向の注入の場合と比べ、キャリアの水平方向への広がりや抑制や簡素な作製工程といった利点がある。

本研究では一度のウェハ融着で何百ものレーザを同時に作製しており、既往のピック・アンド・プレース法に対し、ウェハ融着により、大規模、低コストな集積化が可能になると期待できる。さらに本研究では InAs/GaAs QD を GaAs 基板上に MOCVD により成長しており、InP 基板や MBE と比較して、実用化の観点で大規模、低コスト、高スループットといった利点を有する。なお、本研究で作製した構造の金属融着層に窓を設けることで、直下の導波路へのエバネッセント結合が可能となり、いわゆる「ハイブリッド Si レーザ」の作製が可能である。また本研究で実証したウェハ融着と薄膜転写による金属/半導体/金属の薄膜構造の作製法は、サブ波長サイズのプラズモンニックレーザにも適用可能である。

#### 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 4 件)

- ① K. Tanabe, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Novel III-V/Si hybrid laser structures with current injection across conductive wafer-bonded heterointerfaces: A proposal and analysis", *IEICE Electron. Express* **8** (8), 596, 2011 (査読有)
- ② K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Fabrication of electrically pumped InAs/GaAs quantum dot lasers on Si substrates by Au-mediated wafer bonding", *Phys. Stat. Sol. C* **8** (2), 319, 2011 (査読有)

- ③ K. Tanabe, M. Nomura, D. Guimard, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Design, fabrication and optical characterization of GaAs photonic crystal nanocavity lasers with InAs quantum dots gain wafer-bonded onto Si substrates", *Physica E* **42** (10), 2560, 2010 (査読有)
- ④ K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Electrically pumped 1.3  $\mu\text{m}$  room-temperature InAs/GaAs quantum dot lasers on Si substrates by metal-mediated wafer bonding and layer transfer", *Opt. Express* **18** (10), 10604, 2010 (査読有)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 田辺克明, 岩本敏, 荒川泰彦, "接合界面に金属ストライプを用いた III-V/Si ハイブリッドレーザの提案と設計", 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 26p-KB-11, 厚木, 2011 年 3 月 26 日
- ② 田辺克明, D. Guimard, D. Bordel, 岩本敏, 荒川泰彦, "ウェハ融着による Si 基板上 1.3 $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子ドットレーザ", 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE) 8 月研究会, 34, 千歳, 2010 年 8 月 27 日 (信学技報 **110** (181), 153-156, 2010)
- ③ K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Fabrication of Electrically Pumped InAs/GaAs Quantum Dot Lasers on Si Substrates by Au-Mediated Wafer Bonding", *37th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS)*, Takamatsu, WeE3-1, June 2, 2010
- ④ K. Tanabe, D. Guimard, D. Bordel, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Room temperature operation of 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot lasers wafer-bonded onto Si substrates", *6th International Conference on Quantum Dots (QD 2010)*, Nottingham, UK, P-28, Apr. 30, 2010
- ⑤ 田辺克明, D. Guimard, D. Bordel, 岩本敏, 荒川泰彦, "ウェハ融着による Si 基板上の電流注入型 InAs/GaAs 量子ドットレーザ", 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 17p-P3-12, 平塚, 2010 年 3 月 17 日
- ⑥ K. Tanabe, M. Nomura, D. Guimard, S. Iwamoto and Y. Arakawa, "Photonic crystal nanocavity lasers with InAs quantum dots bonded onto silicon substrates", *8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim)*, Shanghai, China, MH2-4, Aug. 31, 2009

⑦ K. Tanabe, M. Nomura, D. Guimard, S. Iwamoto and Y. Arakawa, “Fabrication and optical characterization of photonic crystal nanocavities with InAs quantum dots bonded on silicon substrates”, *14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-14)*, Kobe, Tu-mP35, July 21, 2009

〔図書〕 (計 1 件)

① 田辺克明, 荒川泰彦, “シリコン上 1.3 $\mu$ m 量子ドットレーザー – 光 LSI 融合システム構築に向けて –” (invited), *光アライアンス*, 2 月号 (*Optical Alliance* **22** (2), 43-46, 2011), 日本工業出版, 2011

〔その他〕

報道 (計 4 件)

① 「東京大学、Si 基板上に作製した量子ドットレーザーの室温発振に成功」

OPTRONICS 2010 年 7 月号 NEWS

FLASH

② 「レーザー シリコン上で発光 東大が微小構造開発 LSI 省電力に道」 日本経済新聞 2010 年 5 月 31 日付 11 面

③ 「量子ドットレーザー シリコン上で実用性能 東大 LSI 内光配線向け」 日刊工業新聞 2010 年 5 月 31 日付 22 面

④ 「LSI 消費電力 100 分の 1 東大がレーザー素子」 日経産業新聞 2010 年 5 月 31 日付 12 面

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田辺 克明 (TANABE KATSUAKI)

東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス  
研究機構・特任助教

研究者番号：6 0 5 4 8 6 5 0