

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06029

研究課題名(和文) シリコンフォトニクス回路へのIII-V族量子ドットレーザ集積化に関する研究

研究課題名(英文) Integration of III-V quantum dots laser on silicon photonic circuits

研究代表者

下村 和彦 (SHIMOMURA, Kazuhiko)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90222041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：光インターコネクション技術の実用化のために、シリコン基板上にIII-V族量子ドットレーザを集積化するための研究を行った。これは我々が提案した、シリコン基板上にInP薄膜層を直接接合した基板を用いてIII-V族半導体デバイス層を結晶成長する方法、を用いている。有機金属気相成長により波長1.5 μm 帯GaInAsPダブルヘテロ構造を成長し、ファブリペローレーザを作製した。そして室温パルス発振を達成し、InP基板上レーザと同じしきい値電流密度を得ることに成功した。さらにシリコン基板上量子ドット構造の成長条件を把握し、電流注入による発光を達成した。

研究成果の概要(英文)：To realize the optical interconnection technology, we have studied the integration of III-V quantum dots laser on silicon substrate. We have applied our proposal methods, that is, crystal growth of III-V semiconductor device layers using directly bonded thin-film InP and silicon substrate. 1.5 μm wavelength GaInAsP double-heterostructure was grown by metal-organic vapor phase epitaxy, and fabricated fabry-perot laser. We have obtained room temperature pulse lasing, and the threshold current density was almost the same with the laser on InP substrate. Furthermore, we have grown the quantum dots structure on silicon substrate, and obtained the output optical power by injection current.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：シリコンフォトニクス 半導体レーザ 量子ドット 集積化技術 有機金属気相成長

1. 研究開始当初の背景

現代の情報化社会を支える根幹の一つは高速・大容量通信を可能とした光ファイバ通信システムであることは揺るぎのない事実である。そしてこの光通信技術を幹線系通信システムや LAN 通信システムだけでなく、コンピュータ装置間、ボード間の通信、さらにはチップ内の通信・配線に拡張しようという光配線（インターコネクション）技術が注目されている。これは電気配線で問題となる配線長の長距離化に伴う遅延時間の増大や、消費電力の増大を光配線に置き換えることによって解決するアプローチである。この光配線システムを構築する場合、集積回路が作製されているシリコン基板上に光源、変調器、受光器、スイッチ、波長合分波器、フィルタなどの光学素子を集積化することが望まれている。光源に関しては、シリコンレーザなどが研究されているが、当面は消費電力、光出力特性、信頼性の面から光通信システムで使用されている化合物半導体レーザが使用されると思われる。この場合、シリコン基板上にいかにして化合物半導体素子を集積化・一体化するかが課題となる。これまでにシリコン基板に化合物半導体デバイスをフリップチップボンディングや直接貼り付けなどの接合技術で集積化・一体化する技術が注目されているが、それぞれメリット・デメリットがあり、最適な方法が模索されている。この問題解決の一つのアプローチとして、シリコン基板上に InP 薄膜層を形成し、そしてこの“半導体基板”上に結晶成長を行い光デバイス、電子デバイスを集積化する方法を提案した。我々は、シリコン基板上に直接貼付技術を用いて InP 薄膜(500nm ~ 1000nm)を形成し、このシリコン-InP 薄膜上に有機金属気相成長法によって半導体結晶成長を行う方法を実証した。この方法は、土台となる基板はシリコンであるが、あたかも InP 基板と同様に結晶成長できるため、種々の InP 系デバイスを集積化することが可能となる。これまでにこの方法により土台となる基板としてシリコン基板、酸化膜付シリコン基板、そしてホウケイ酸ガラス基板上に InP 薄膜層を作製し InP,GaInAs 結晶成長を行い、通常の InP 基板上と同等の光学特性を得ることに成功している。この方法により InP 系半導体デバイスと -V 族以外の基板上の光デバイス、電子デバイスとの集積化を可能とする技術である。

2. 研究の目的

InP 薄膜と各種基板の直接貼付を行った際には、InP 薄膜と導電性基板との接触抵抗、InP と各種基板との格子不整合による InP 上に成長する結晶の光学特性、電気特性、さらには界面におけるボイドなどの懸念事項がある。これまでの研究において GaInAs/InP 量子井戸層の光学特性は InP 基板上に直接成長した結晶と同等であること、有機金属気相

成長による GaInAs/InP 量子井戸構造の選択成長も InP 基板と同等であることを示した。また直接貼付基板の昇温プロファイルによってボイドの発生率が異なることを把握し、界面におけるボイドを大幅に低減する昇温プロファイルの最適化を行った。また有機金属気相成長による選択成長と量子ドット高さを制御するダブルキャップ法を用いることによって量子ドットの発光波長を制御し、単一光源として 500nm を超える発光スペクトル幅を有し、250nm の波長範囲において出力強度が平坦であるフラットトップなスペクトル形状を持つ広帯域 LED の開発を行ってきた。これらの研究成果を基盤として、量子ドットレーザ、半導体レーザをシリコン-InP 薄膜上に構築する研究を行う。具体的には、シリコン-InP 薄膜上に結晶成長する量子ドット層、半導体レーザ層の成長条件の最適化を行い、量子ドットレーザ、半導体レーザの評価を行う。

シリコン基板上における半導体レーザ光源の開発と並行して半導体レーザをシリコン基板上のシリコンフォトニクス回路デバイスへ接続するための光結合構造の検討を行う。本研究においては、レーザとシリコン光導波路との光接続について検討し、効率的な光接続方法を確立する。

こうした研究を通して、シリコン基板上における量子ドットレーザ、多波長量子ドットレーザの可能性を示すと同時に、III-V 族半導体デバイスとシリコンフォトニクス回路との集積化技術を開発する。そしてシリコンデバイスと III-V 族半導体デバイスの集積化による新しい機能の可能性を模索し、新規応用分野を開拓することを目指す。

3. 研究の方法

シリコン基板上に InP 薄膜を直接貼付する際の洗浄方法、貼り合わせ圧力、アニール温度プロファイル等を検討し、ボイド面積・密度、光学特性、電気特性の観点から最適な直接貼り付け条件を把握した。

シリコン-InP 薄膜上に有機金属気相成長法を用いて半導体レーザ構造、量子ドットレーザ構造を成長し、デバイス特性のフィードバックを掛けながら成長条件の最適化を行った。

半導体デバイスとシリコン基板上光導波路との光接続に関して、各種光接続方法の数値解析を行い、本提案方法に適した低損失・高効率光接続構造を検討した。

4. 研究成果

シリコン基板上に膜厚 1000nm の InP 膜を直接貼り付けし、アニール温度を 200 ~ 500 で変化させた基板を作成し、それぞれの基板のボイド密度、この基板上に GaInAsP 半導体レーザ構造を成長した際の光学特性の比較、そして半導体レーザの特性比較を行った。この成果は JJAP に論文として掲載され

た。

シリコン基板上に InP 薄膜を直接貼付した基板上に有機金属気相成長法により波長 1.2 μm GaInAsP バルクレーザ構造を成長し、室温発振を達成したが、この InP/Si 基板上半導体レーザの発振歩留まりを向上させ、しきい値電流、温度特性、電気特性等の諸特性を InP 基板上半導体レーザと比較検討した。それらの成果を原著論文、国際会議、国内学会において発表を行った。特に、応用物理学会の論文誌 Japan. J. Appl. Phys. に投稿した論文は学会の Spotlight 論文に選ばれ、さらに Highlights of 2016 論文に選ばれた。これまでに 2800 を超えるダウンロード数となり、非常に反響の大きな論文となった。

また光通信波長帯である 1.5 μm 帯の半導体レーザとして、GaInAsP 組成の条件だし、半導体レーザ構造の設計を行い、InP/Si 基板上に半導体レーザ構造を結晶成長し、室温においてパルス発振を達成した。シリコン基板上に InP 薄膜を直接貼付し、この基板上に 1.5 μm 帯 GaInAsP 半導体レーザ構造を実現した。X 線回折、フォトルミネッセンスより 1.5 μm 帯 GaInAsP 組成の結晶成長条件を検討し、最適な条件を用いて、半導体レーザ構造を結晶成長し、ファブリペローレーザを作製した。図 1 (a) は作製した半導体レーザの構造図、図 1(b) はその端面 SEM 写真である。

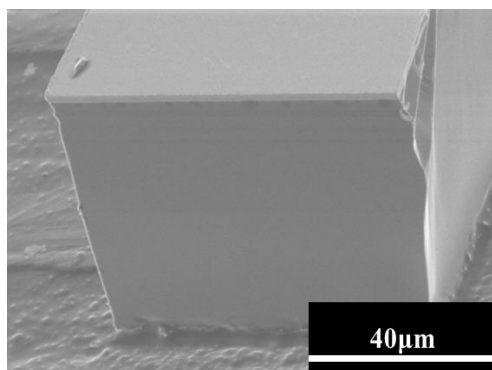
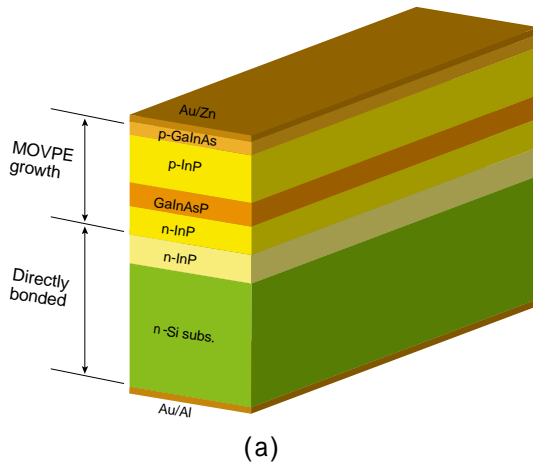


図 1: (a) 作製した GaInAsP レーザの構造図, (b) 端面 SEM 写真

へき開面は鏡面であり、レーザ発振のため

の反射端面として十分であることを確認した。図 2 は発振したレーザの電流-光出力、電圧特性である。注入電流はパルスであり、室温において発振していることを確認した。

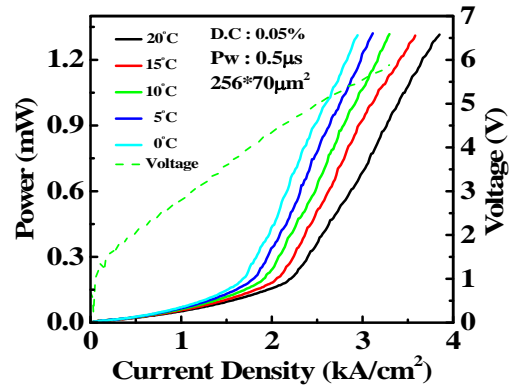


図 2: 発振レーザの電流-光出力、電圧特性

このシリコン基板上の半導体レーザと同時に成長した InP 基板上レーザの発振しきい値電流密度の比較を図 3 に示す。図よりシリコン基板上レーザのしきい値電流密度は InP 基板上レーザと同等の値を得ることができた。これにより提案した方法はシリコン基板上の光源の作製技術として有用であることを証明できた。

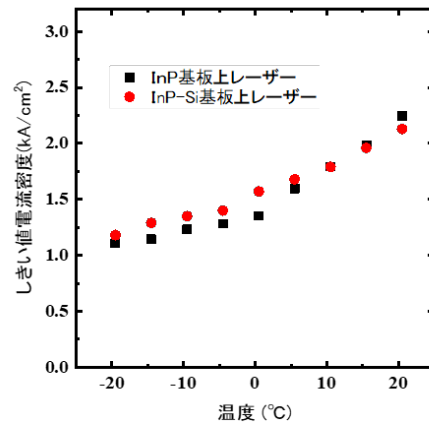


図 3: シリコン基板上と InP 基板上 GaInAsP レーザのしきい値電流密度温度依存性

これらの研究成果は、InP/Si 基板作製技術の改良を行うことによって半導体レーザの性能が向上したことが大きな要因であり、これは当初の研究計画以上の成果と考えている。

この半導体レーザを実用化するために、半導体レーザの横モード単一化によって、室温パルス発振から室温連続発振を達成することを検討した。ストライプ構造、リッジ構造、埋込み構造のレーザを検討し、しきい値電流の低減化を実現した。また InP/Si 基板上への量子ドット構造の成長条件の把握を行った。InP/Si 基板上に Stranski-Krastanov モードによる自己組織化 InAs 量子ドット構造

を成長し、電流注入による発光特性を確認した。さらに提案方法によるシリコン基板上導波路との光接続の数値計算を行い、低損失光接続方法を検討した。そしてこの光接続方法を実際に応用するための基礎実験に着手した。光閉じ込めレーザ、シリコン基板上量子ドット構造、光接続構造に関しては一部 2018 年度に行われる国際会議に投稿し受理された。今後、さらに実験を進めて論文誌へ投稿を予定している。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

M. Aikawa, Y. Onuki, N. Hayasaka, T. Nishiyama, N. Kamada, X. Han, P. Gandhi Kallarasan, K. Uchida, H. Sugiyama and K. Shimomura, "Bonding temperature dependence of GaInAsP/InP laser diode grown on hydrophilically directly bonded InP/Si substrate", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, no. 2S1, 02BB04, pp.02BB04-1-6, Feb. 2018. (査読有)

P. Gandhi Kallarasan, T. Nishiyama, N. Kamada, Y. Onuki, and K. Shimomura, "Lasing characteristics of 1.2 μm GaInAsP LD on InP/Si substrate", Physica Status Solidi A, 1700357, pp.1-7, Jan. 10, 2018. (査読有)

K. Matsumoto, J. Kishikawa, T. Nishiyama, Y. Onuki, and K. Shimomura, "Novel integration method for III-V semiconductor devices on silicon platform", Jpn. J. Appl. Phys., vol.55, no.11, pp.112201-1 - 112201-7, Nov. 2016. (査読有)

K. Matsumoto, J. Kishikawa, T. Nishiyama, T. Kanke, Y. Onuki, and K. Shimomura, "Room-temperature operation of GaInAsP lasers epitaxially grown on wafer-bonded InP/Si substrate", Applied Physics Express, vol. 9, 062701, May 2016. (査読有)

[学会発表] (計 50 件)

K. Shimomura, "Novel integration method for III-V semiconductor devices on silicon platform based on direct bonding and

MOVPE growth," 2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 17GO-08 (Invited), May 17, 2017.

K. Uchida, T. Nishiyama, N. Kamada, Y. Onuki, X. Han, Gandhi Kallarasan P., H. Sugiyama, M. Aikawa, N. Hayasaka, and K. Shimomura, "Lasing characteristics of GaInAsP stripe laser integrated on InP/Si substrate", The 22nd OptoElectronics and Communications Conference, Sands Expo and Convention Centre, Singapore, P3-123, Aug. 3, 2017.

H. Sugiyama, T. Nishiyama, N. Kamada, Y. Onuki, X. Han, Gandhi Kallarasan P., M. Aikawa, N. Hayasaka, K. Uchida, and K. Shimomura, "Low threshold current of GaInAsP laser grown on directly bonded InP/Si substrate", The 22nd OptoElectronics and Communications Conference, Sands Expo and Convention Centre, Singapore, P3-121, Aug. 3, 2017.

N. Hayasaka, T. Nishiyama, Y. Onuki, N. Kamada, X. Han, Gandhi Kallarasan P., K. Uchida, H. Sugiyama, M. Aikawa, and K. Shimomura, "Lasing characteristics of MOVPE grown 1.5 μm GaInAsP LD using directly bonded InP/Si substrate", 2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, 17SP-14, May 17, 2017.

M. Aikawa, T. Nishiyama, Y. Onuki, N. Kamada, X. Han, Gandhi Kallarasan P., K. Uchida, H. Sugiyama, N. Hayasaka, and K. Shimomura, "Bonding temperature dependence of GaInAsP/InP wafer grown on directly bonded InP/Si substrate", 2017 5th International Workshop on Low

Temperature Bonding for 3D Integration,
The University of Tokyo, Tokyo, Japan,
17SP-13, May 17, 2017.

Gandhi Kallarasan P., T. Nishiyama, N.
Kamada, Y. Onuki, and K. Shimomura, "1.5
 μ m laser diode on InP/Si substrate by
epitaxial growth using direct bonding
method", Conference on Lasers and
Electro-Optics 2017, San Jose, CA, USA,
JTU5A.108, May 16, 2017.

下村和彦, 「高機能・高集積光デバイスを
支える異種材料貼り合わせ技術」, 電子情
報通信学会 2017 年ソサイエティ大会, 東
京都市大学 世田谷キャンパス, 東京,
CI-1-3(招待講演), 平成 29 年 9 月 13 日.

下村和彦, 「シリコン基板上 InP 系半導体
デバイス集積化技術」, 2017 年電子情報通
信学会総合大会, 名城大学, 天白キャン
パス, 名古屋, C-3-20 (招待講演), 平成
29 年 3 月 24 日.

P. Gandhi Kallarasan, N. Kamada, Y. Onuki,
K. Uchida, H. Sugiyama, X. Han, N.
Hayasaka, M. Aikawa, and K. Shimomura,
"Lasing characteristics of 1.5 μ m GaInAsP
ridge laser diode on directly bonded inP/Si
substrate", 第 65 回応用物理学会春季学
術講演会, 早稲田大学 西早稲田キャン
パス, 東京, 19a-B203-4, 平成 30 年 3 月
19 日.

下村和彦, 「InP 薄膜-シリコン基板への半
導体結晶成長を用いた光デバイス集積化
技術の検討」, 第 4 回集積光デバイスと応
用技術研究会, NTT 厚木研究開発センタ,
神奈川, IPDA15-29 (招待講演), 平成 28
年 8 月 5 日.

下村和彦, 松本恵一, 「InP/Si 直接貼付
基板上への InP 系光デバイス集積化に関
する研究」, 第 23 回シリコンフォトニクス研
究会, 石川県政記念しいのき迎賓館, 金
沢, (招待講演), 平成 27 年 12 月 10 日.

〔図書〕(計 2 件)

「量子ドット材料の技術と応用展開」デイス
プレイ・照明・バイオ応用から太陽電池まで,
長谷川雅樹, 村瀬至生, 福田武司, 中村
彰一, 伊藤義文, 小俣孝久, 磯由樹, 磯
部徹彦, 森良平, 杉本泰, 藤井稔, 立間
徹, 北原洋明, 齋藤健一, 大庭英樹, 下
村和彦, 岡田至崇, 株式会社 情報機構,
第 5 章, 第 4 節「量子ドットレーザ」, pp.
176-188, 2017 年 6 月 27 日発行.

下村和彦, 「化合物半導体と異種材料との
接合技術」, O plus E, vol.38, no.2,
pp.139-147, 平成 28 年 2 月.

〔その他〕

ホームページ
<http://pweb.cc.sophia.ac.jp/shimolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下村 和彦 (SHIMOMURA, Kazuhiko)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号: 90222041