

令和 3 年 5 月 7 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01503

研究課題名(和文)シリコンプラットフォーム上ハイブリッド集積技術構築と接合基板上結晶成長機構の解明

研究課題名(英文)Hybrid integration technique on silicon platform and crystal growth on InP/Si bonding substrate

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンプラットフォーム上に化合物半導体レーザを集積化する技術として、「InP-シリコン基板の作製とその基板上での結晶成長、プロセス」の有効性を実証した研究である。この方法は、シリコン基板に膜厚1 μ m程度のInP薄膜を親水性直接貼付けし、このInP-シリコン基板に有機金属気相成長による化合物半導体の結晶成長を行い、デバイスプロセスを行うことによりハイブリッド集積を実現するものである。本研究において、シリコン基板上に量子井戸構造を活性層とする半導体レーザの室温発振を実現した。さらに量子ドット構造の成長を行い、異種材料接合基板とInP基板における結晶成長の比較検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコンフォトニクス技術の進展により、シリコン基板上に変調器、波長フィルタ、光検出器など、従来の個別デバイスと同等の性能を持つデバイスが集積化されている。今後さらに集積回路の機能を高めるためには光源の集積化が必要不可欠である。そのためにはフリップチップボンディングに代わる、大量生産可能で低コストな集積化技術が必要である。この集積化技術としてシリコンプラットフォーム上にInP薄膜を貼り付け、そして結晶成長、デバイス加工を行う方法により半導体レーザの室温発振を実現した意義は大きいと考えている。さらに異種材料接合基板上での結晶成長の比較検討を行ったことは学術的な意義もあると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have successfully shown the semiconductor laser diodes on silicon platform by using fabrication of thin-film InP on silicon substrate, crystal growth of semiconductor laser structure and processing. 1 μ m thickness InP film was bonded to the silicon substrate by using hydrophilic bonding and semiconductor laser structure was grown by metal organic vapor phase epitaxy and device structure was fabricated by conventional technique. We have successfully obtained the room temperature lasing of GaInAsP quantum well laser diodes on silicon substrate. We have shown the difference of crystal growth between InP/Si bonding substrate and InP substrate.

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 有機金属気相成長 集積化技術 量子井戸構造 InP

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、データセンター内の通信容量は増加の一途をたどり、それと共に消費電力量も増え続けている。この消費電力にはサーバ間を接続する電気配線に寄るものも無視できない状況である。こうした電気配線に起因する消費電力量を低減するため、従来の電気配線を光ファイバなどによる光通信線路に置き換えようとする光インターコネクション技術はサーバ間の配線だけではなく、サーバ内部のボード間、さらに究極的にはボード内のチップ上の配線をも光導波路を用いた光配線に置き換えることが目標となっている。

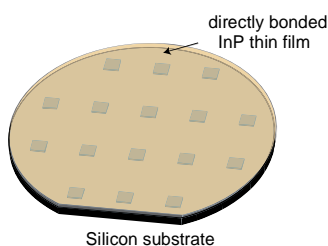
一方、これまで光通信システムにおいては、光源である半導体レーザ、外部変調器、波長フィルタ、光検出器は個々のデバイスとして、それぞれその動作に最適な材料を用いて作製され、光ファイバで相互に接続されたサブシステムとして運用されてきた。これに対して変調器や波長フィルタ、光検出器などのパッシブデバイスをシリコン基板上で作製するシリコンフォトリソグラフィの分野が急速に発展している。従来のシリコン集積回路の製造設備を利用して大面積シリコン基板上に作製されたパッシブデバイスの動作特性が報告され、さらに何種類かのデバイスを集積化したシステム実験等も行われ、既存のデバイスを置き換えることができるかどうかの検証が進んでいる。

シリコン基板上に光通信の送信サブシステムを集積化する場合、一番の課題は光源である。シリコン材料を基盤とした半導体レーザの研究もされているが、シリコンが間接遷移半導体という性質のため現時点では高効率な光源を得ることは困難な状況である。そのため光通信で一般的に使用されている InP 系の化合物半導体レーザをシリコン基板上にハイブリッド集積化する方法が有望視され、その集積方法が検討されている。このハイブリッド集積化光源が実用化されるための課題は、光源の電気-光変換の高効率化、光源とシリコン光回路との光接続、そして高密度集積化である。

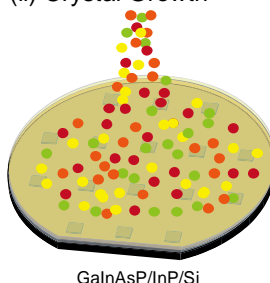
2. 研究の目的

本研究においては、シリコンプラットフォーム上へシリコン光回路と化合物半導体光源を集積化したハイブリッド集積技術構築を目的として、提案する InP-Si 基板を用いて、長波長帯 (1.5 μm) GaInAsP 系半導体レーザの高効率室温連続発振、シリコン光回路との高効率光接続の実現、さらにシリコン光回路と化合物半導体レーザ・半導体光増幅器の光送信サブシステムを試作・動作検証することを目的とし、提案する InP-Si 基板がシリコンプラットフォーム上へ化合物半導体デバイスを集積化するハイブリッド集積技術として有効であることを示す。

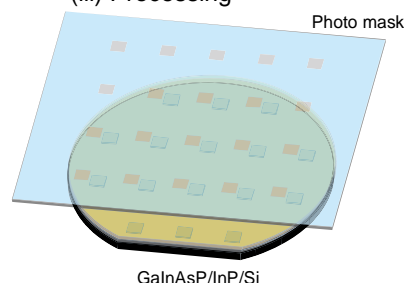
(i) Direct Wafer Bonding



(ii) Crystal Growth



(iii) Processing



提案した方法は特許申請 (下村和彦, 松本恵一, 「半導体装置、テンプレート基板、半導体装置の製造方法」, 特許出願 2012-163605, 公開番号: 特開 2014-026999) した独自の方法である。この方法は、シリコンと化合物半導体の格子定数や極性の違いによる直接成長の問題を回避し、また他のハイブリッド集積方法と比較して (1) 大面積シリコンウエハへの高密度集積が可能、(2) シリコン光回路との高精度なアライメントが可能、(3) 貼付け時の加熱・加圧による素子劣化が無い、(4) 化合物半導体基板の再利用が可能、などの特長を持った低コスト、大量生産が可能な高密度・高効率ハイブリッド集積方法である。提案手法がハイブリッド集積における課題を解決できることを実証することによって、本手法がハイブリッド集積化技術実用化のために貢献できると考えている。また異種材料を接合した場合、格子定数差や熱膨張係数差による歪エネルギー、基板方位の違いによる結晶成長機構が単一結晶と異なると考えられる。さらに Stranski-Krastanov 成長モードを用いた量子ドット成長においては、このような異種材料接合基板上の結晶成長を用いることによって新たな歪制御が考えられる。本研究においては、InP-Si 基板、InP-SiO₂/Si 基板上における量子井戸構造、量子ドット構造等の結晶成長を行い異種材料接合基板上における歪エネルギーを含んだ結晶成長における歪制御機構を解明し、また境界面における混晶領域 (遷移領域) が結晶成長に与える影響を解明する、という学術的研究も進めて行く。

3. 研究の方法

本研究課題においては、シリコン基板上高効率化合物半導体レーザの室温連続発振の実現、ま

た異種材料接合基板上における結晶成長機構を解明する研究を行った。以下、これらの項目に関して具体的な計画・方法を示す。

これまでに GaInAsP バルク構造を活性層とした長波長帯 InP 系ブロードレーザ、ストライプレーザ、リッジレーザの室温パルス発振を実現した。発振しきい値電流密度は 20 において $2\text{kA}/\text{cm}^2$ であり、ストライプレーザにおいては発振しきい値電流 150mA を実現した。室温連続発振の実現にはさらなる発振しきい値の低減が必要であり、そのために活性層に量子構造を導入した量子井戸構造、量子ドット構造を検討した。また低しきい値と横モード単一化のために埋込み再成長レーザの試作を行う。

シリコン導波路と化合物半導体の光接続としては、エバネッセント結合、回折格子を用いたグレーティング結合、端面ミラー接続が検討されているが、結合部分の長大化や高精度な加工プロセスが必要とされる。これらの問題を解決するために導波路直接結合（パッドジョイント）型の光接続を検討した。シリコン基板上に段差加工を行い、この底面に InP 膜を直接貼付し、そして半導体レーザ部分の選択成長を行う。垂直方向の導波路位置は結晶成長によってナノメートル精度での制御が可能であり、また水平方向は露光技術によって位置合わせが可能であり、高精度な位置制御が可能である。実際にこの方法の有用性を実証するために、段差シリコン基板作製、段差部分への InP 膜直接貼付けの実証、部分的な InP 膜上への半導体レーザ結晶成長を行い、シリコン細線導波路との結合効率について各種方法との比較検討を行った。

InP-Si 基板、InP-SiO₂/Si 基板上における結晶成長機構の解明を行った。量子井戸構造、量子ドット構造の成長を通して、異種材料接合基板上における歪エネルギーや結晶方位の差が結晶成長に与える影響、接合界面に存在する混晶領域（遷移領域）の組成・厚さがその上の結晶層に与える影響を X 線回折特性、光学特性を通して解明した。さらに部分的に作製された InP-Si 領域に選択成長を行うことによって結晶成長方位や成長面を詳細に検討し、特定領域へ最適なデバイス構造を選択的に成長する方法を解明した。

4. 研究成果

提案した方法により、シリコン基板上において GaInAsP 多重量子井戸構造を活性層とするレーザにおいて室温パルス発振を達成した。接合された InP/Si 基板上に有機金属気相成長法により n-InP バッファ層、活性層、p-InP クラッド層を成長した。活性層は 5 周期の量子井戸構造でありウエル層が 8nm 厚、禁制帯幅 0.83eV の GaInAsP 層、バリア層が 8nm 厚、禁制帯幅 1.03eV の GaInAsP 層であり、その両側に 100nm 厚、禁制帯幅 1.03eV の GaInAsP SCH 層である。P-InP 側に Au/Zn を、Si 基板上に Au/Al を蒸着し、へき開によりレーザ端面を得て、ファブリペロー型のレーザ素子を作製した。デバイス長は $300\mu\text{m}$ 、幅は $100\mu\text{m}$ 程度である。典型的な電流-光出力特性を図 1 に示す。20 においてしきい値電流密度 $2.85\text{kA}/\text{cm}^2$ を得た。同時に成長した InP 基板上レーザおよびバルク構造レーザとのしきい値電流密度の比較を図 2 に示す。バルク構造においては InP/Si 基板、InP 基板において同等のしきい値電流密度が得られた。一方、MQW 構造ではバルク構造よりも高いが、InP 基板上においてはしきい値電流密度が $1.36\text{kA}/\text{cm}^2$ であり、バルク構造よりも減少していることがわかる。これにより活性層組成の検討が必要であることが分かった。

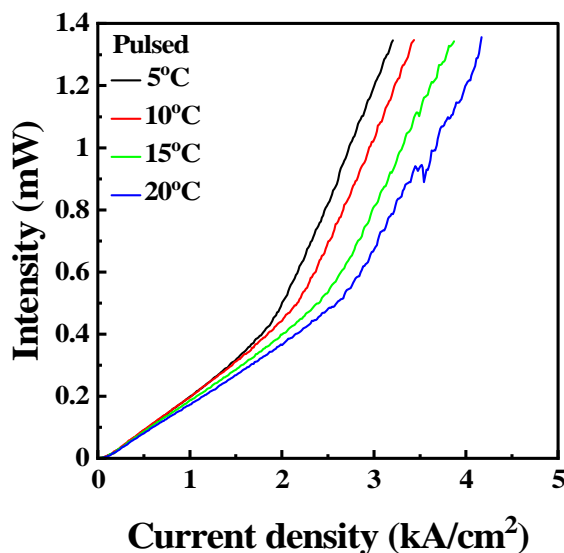


図 1：電流 光出力特性

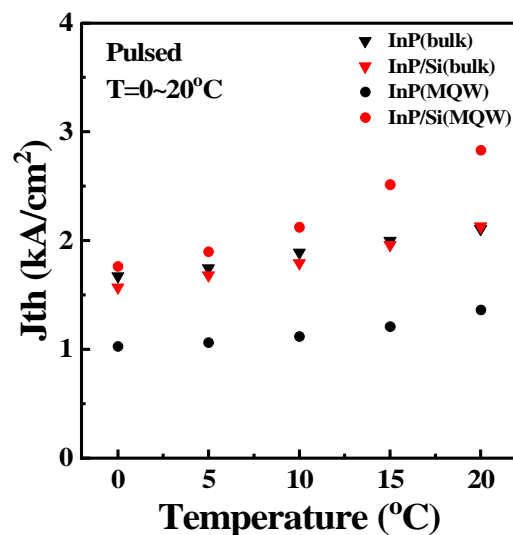


図 2：しきい値電流密度の温度特性

これは InP と Si の接合基板では結晶成長時の 650 において InP と Si の熱膨張差により活性層に歪が生じていることが考えられる。この問題を明らかにするために、ウエル層に歪量を加えた歪量子井戸レーザを作製し、歪量としきい値電流密度の比較検討を行った。InP/Si 基板上レ

ーザと InP 基板上レーザにおいては最低のしきい値電流密度が得られる歪量が異なることを実験的に示し、歪量を制御することが接合基板では必要なことを明らかにした。

シリコンプラットフォームにおける集積化デバイスにおいては、表面が酸化膜でおおわれていることが多い。そこで酸化膜がついたシリコン基板上に同様な方法で、半導体レーザを作製する技術の開発を行った。SiO₂/Si 基板に 1.5 μm 厚の InP を親水性貼り付けし、7 周期の量子井戸構造を成長した。性層は 5 周期の量子井戸構造でありウエル層が 8nm 厚、禁制帯幅 0.83eV の GaInAsP 層、バリア層が 8nm 厚、禁制帯幅 1.03eV の GaInAsP 層であり、その両側に 100nm 厚、禁制帯幅 1.03eV の GaInAsP SCH 層である。表面側から電極をとる必要があるため、10 μm 幅のハイメサ構造を形成した。図 3(a)(b)に試作した素子の断面および上面から SEM 写真を示す。

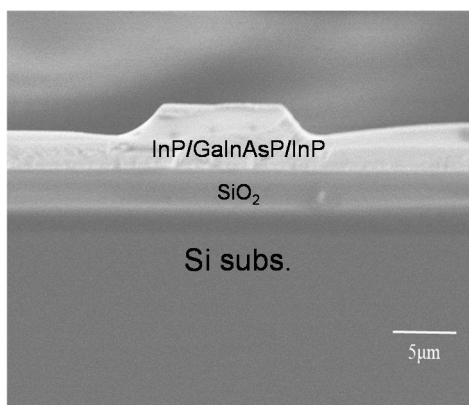
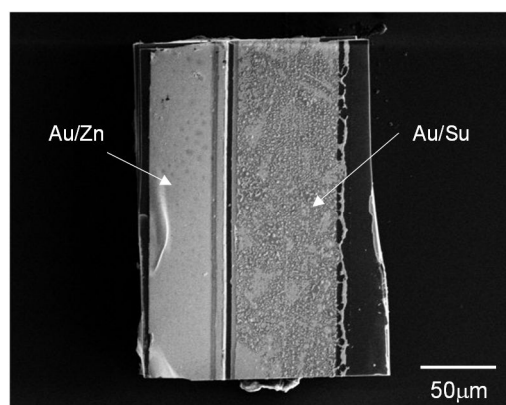


図 3 : (a) 試作した素子の断面 SEM 写真



(b) 上面からの SEM 写真

このレーザ構造の電流 - 光出力特性を図 4 に示す。InP シリコン基板上の同様な構造に比べてしきい値電流値の減少を確認した。InP 基板上と比べてしきい値電流値は高いが、これはメサ幅の違いによる。しきい値電流密度の比較を図 5 に示す。InP/SiO₂/Si 基板上レーザのしきい値電流密度は InP 基板上レーザとほぼ同等の値が得られており、メサ幅の低減によりしきい値電流値の大幅な低減が得られる見込みである。

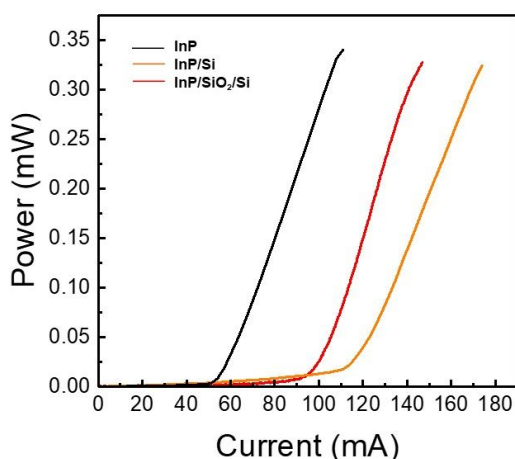


図 4 : 電流 - 光出力特性

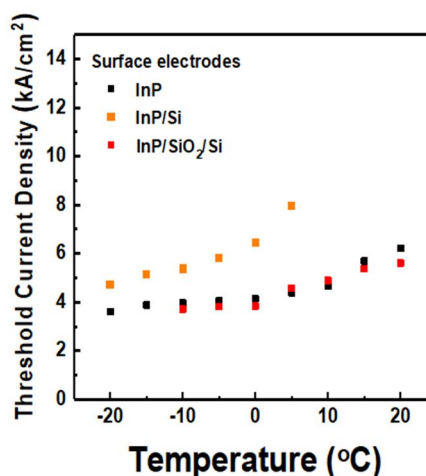


図 5 : しきい値電流密度の温度依存性

またハイメサ構造を形成後、メサ構造を有機金属気相成長により InP 層で埋め込んだ埋込ヘテロ構造レーザ (図 6) の試作を行い、この構造により室温パルス発振を確認した。従来のハイメサ構造に比べて大幅な出力強度の増加を確認しており、低しきい値、高出力レーザの実現に有効な構造であることを実証した。

さらに InP/Si 基板に Stranski-Krastonogh 成長モードによる InAs 量子ドット構造を成長し、InP 基板上の量子ドット構造との比較検討を行った。先に述べた通り、InP/Si 基板では結晶成長時に InP と Si の熱膨張差により歪制御が重要である。S-K 成長モードによる量子ドット構造成長は歪量に敏感であり、基板による差を調べることは接合基板上的結晶成長を知る上で重要と考えた。図 6 にシリコン基板上に成長した量子ドット構造を示す。S-K 成長モードで成長した InAs 量子ドットは、ダブルキャップ法を用いて、InP ファーストキャップ層、GaInAsP セカンド

キャップ層によって平坦化された量子ドット構造となり、3層構造を成長した。GaInAsP セカンドキャップ層は歪の影響を調べるために組成を変えた構造を成長し、比較検討を行った。図7は InP/Si 基板、InP 基板上に単層量子ドット、3層量子ドットを成長した基板の表面 AFM 像である。層数の違いにより、InP 基板上量子ドットと InP/Si 基板上量子ドットでは量子ドット径、量子ドット密度に差があり、その原因を考察し、異種材料接合基板上における成長機構の解明を行った。

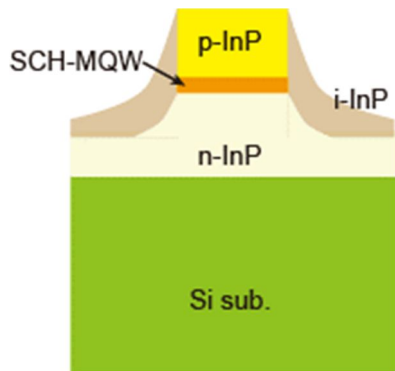


図5：埋込ヘテロ構造レーザー

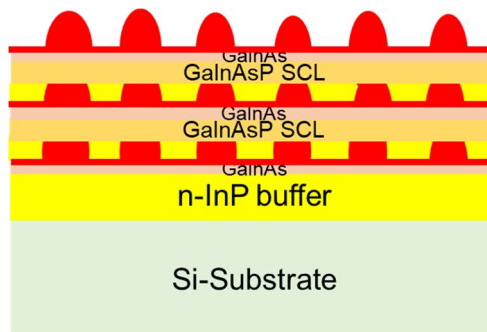


図6：ダブルキャップ法を用いた量子ドット構造

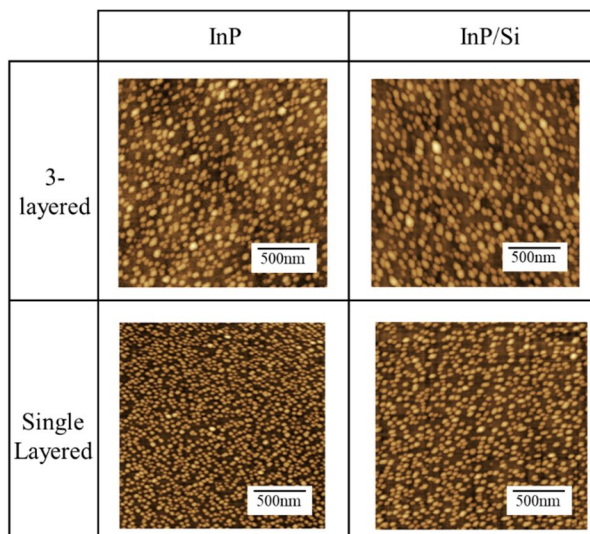


図7：InP/Si 基板、InP 基板上単層、3層量子ドットの表面 AFM 像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Sugiyama, K. Uchida, X. Han, P. Gandhi Kallarasan, M. Aikawa, N. Hayasaka, K. Shimomura	4. 巻 507
2. 論文標題 MOVPE grown GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW laser diode on directly-bonded InP/Si substrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 93-97
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcrysgro.2018.10.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 X. Han, K. Tsushima, T. Shirai, T. Ishizaki, and K. Shimomura	4. 巻 218
2. 論文標題 Characteristics of multi-quantum-well laser diodes with surface electrode structure directly bonded to InP template on SiO ₂ /Si substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica Status Solidi A	6. 最初と最後の頁 2000767 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/pssa.202000767	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計41件（うち招待講演 2件／うち国際学会 13件）

1. 発表者名 T. Ishizaki, K. Uchida, H. Sugiyama, X. Han, N. Hayasaka, M. Aikawa, M. Matsuura, K. Tsushima, T. Shirai, and K. Shimomura
2. 発表標題 Lasing characteristics of GaInAsP SCH-MQW laser diode on directly-bonded InP/Si substrate
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC/PSC 2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Shirai, X. Han, M. Matsuura, T. Ishizaki, K. Tsushima, and K. Shimomura
2. 発表標題 Template thickness dependence of GaInAsP MQW laser diode grown on directly bonded InP/Si substrate
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC/PSC 2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Tsushima, K. Uchida, X. Han, H. Sugiyama, M. Aikawa, N. Hayasaka, M. Matsuura, T. Ishizaki, T. Shirai, and K. Shimomura
2. 発表標題 Lasing characteristics of GaInAsP SCH MQW high-mesa laser on silicon substrate
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC/PSC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤元就, 韓旭, 松浦正樹, 白井琢人, 石崎隆浩, 対馬幸樹, 澁川航大, 藤原啓太, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si基板の加熱処理プロセスの依存性について
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 韓旭, 松浦正樹, 対馬幸樹, 石崎隆浩, 白井琢人, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/SiO ₂ /Si基板上表面二電極構造MQW レーザの発振特性
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白井琢人, 韓旭, 石崎隆浩, 対馬幸樹, 佐藤元就, 下村和彦
2. 発表標題 歪み緩衝層を導入したInP/Si基板上InAs量子ドット構造
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石崎隆浩, 韓旭, 松浦正樹, 対馬幸樹, 白井琢人, 藤原啓太, 佐藤元就, 渋川航大, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付InP/Si基板上GaInAsP/GaInAsP歪MQWレーザの発振特性
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 対馬幸樹, 韓旭, 石崎隆浩, 松浦正樹, 白井琢人, 渋川航大, 藤原啓太, 佐藤元就, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付InP/Si基板上GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW埋込レーザ構造の室温発振特性
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渋川航大, 対馬幸樹, 石崎隆浩, 白井琢人, 佐藤元就, 藤原啓太, 韓旭, 松浦正樹, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付InP/Si基板上選択成長GaInAsP/GaInAsP MQW構造のフォトルミネッセンス特性
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 対馬幸樹, 石崎隆浩, 韓旭, 松浦正樹, 白井琢人, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付InP/Si基板上選択成長GaInAs/InP MQW構造のフォトルミネッセンス解析
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白井琢人, 韓旭, 松浦正樹, 石崎隆浩, 対馬幸樹, 下村和彦
2. 発表標題 InP基板及び直接貼付InP/Si基板上自己形成InAs量子ドットのPL特性について
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎隆浩, 韓旭, 松浦正樹, 対馬幸樹, 白井琢人, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付InP/Si基板上GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW レーザの温度依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 韓旭, 松浦正樹, 対馬幸樹, 石崎隆浩, 白井琢人, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付InP/Si基板上表面二電極構造MQWレーザの発振特性
3. 学会等名 第80回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimomura
2. 発表標題 Hybrid integration of GaInAsP LD on silicon platform by epitaxial growth using directly bonded InP/Si substrate
3. 学会等名 SPIE Photonics Europe 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 P. Gandhi Kallarasan and K. Shimomura
2 . 発表標題 MOVPE growth of GaInAsP system on directly bonded InP/Si substrate
3 . 学会等名 EMN Vienna Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 P. Gandhi Kallarasan, N. Kamada, Y. Onuki, K. Uchida, H. Sugiyama, X. Han, N. Hayasaka, M. Aikawa, and K. Shimomura
2 . 発表標題 1.5 μm GaInAsP stripe laser comparison between InP substrate and directly bonded InP/Si substrate
3 . 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H. Sugiyama, N. Kamada, Y. Onuki, X. Han, P. Gandhi Kallarasan, M. Aikawa, N. Hayasaka, K. Uchida, and K. Shimomura
2 . 発表標題 MOVPE grown GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW laser diode on directly-bonded InP/Si substrate
3 . 学会等名 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Uchida, N. Kamada, Y. Onuki, X. Han, P. Gandhi Kallarasan, H. Sugiyama, M. Aikawa, N. Hayasaka, and K. Shimomura
2 . 発表標題 Lasing characteristics of GaInAsP/InP ridge waveguide laser diode grown on InP/Si substrate
3 . 学会等名 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名	H. Yada, N. Kamada, Y. Onuki, X. Han, P. Gandhi Kallarasan, K. Uchida, H. Sugiyama, M. Aikawa, N. Hayasaka, and K. Shimomura
2. 発表標題	Successful fabrication of GaInAsP ridge waveguide laser diode using hydrophilic bonded InP/Si substrate
3. 学会等名	The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2018) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	P. Gandhi Kallarasan, K. Uchida, H. Sugiyama, X. Han, N. Hayasaka, M. Aikawa, H. Yada and K. Shimomura
2. 発表標題	1.5 um GaInAsP high mesa laser diode on directly bonded InP/Si substrate
3. 学会等名	26th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2018) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	相川政輝, 早坂夏樹, 韓 旭, 松浦正樹, Gandhi Kallarasan Periyannayagam, 内田和希, 杉山滉一, 矢田拓夢, 下村和彦
2. 発表標題	直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAsP レーザの InP テンプレート 膜厚依存性
3. 学会等名	電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	下村和彦
2. 発表標題	直接貼付 InP/Si 基板への MOVPE 成長による GaInAsP 系半導体レーザの発振特性
3. 学会等名	電気学会 光・量子デバイス研究会, パワー光源及び応用システム研究会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 矢田拓夢, 内田和希, 杉山滉一, P. Gandhi Kallarasan, 韓旭, 相川政輝, 早坂夏樹, 下村和彦
2. 発表標題 親水性直接貼付InP/Si基板上GaInAsPレーザとInP基板上レーザの発振特性比較
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢田拓夢, 相川政輝, 早坂夏樹, P. Gandhi Kallarasan, 韓旭, 内田和希, 杉山滉一, 下村和彦
2. 発表標題 親水性直接貼付InP/Si基板のInP膜厚の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢田拓夢, 内田和希, 杉山滉一, 韓旭, 相川政輝, 早坂夏樹, 松浦正樹, 下村和彦
2. 発表標題 ダブルキャップ法を用いたInAs量子ドット構造のPL特性の比較
3. 学会等名 第79回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内田和希, 韓旭, P. Gandhi Kallarasan, 杉山滉一, 相川政輝, 早坂夏樹, 矢田拓夢, 松浦正樹, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付InP/Si基板上1.5um帯GaInAsPハイメサレーザの室温発振特性
3. 学会等名 第79回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早坂夏樹, 韓旭, P. Gandhi Kallarasan, 相川政輝, 内田和希, 杉山滉一, 松浦正樹, 矢田拓夢, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板におけるポイド占有率のアニール時間依存性 (2)
3. 学会等名 第79回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松浦正樹, 早坂夏樹, 韓旭, 相川政輝, 内田和希, 杉山滉一, 矢田拓夢, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板における InP 薄膜の表面状態の評価
3. 学会等名 第79回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 韓旭, P. Gandhi Kallarasan, 内田和希, 相川政輝, 杉山滉一, 早坂夏樹, 松浦正樹, 矢田拓夢, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAsP レーザにおける電気特性の InP テンプレート膜厚依存性
3. 学会等名 第79回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉山滉一, 内田和希, 韓旭, 矢田拓夢, P. Gandhi Kallarasan, 相川政輝, 早坂夏樹, 松浦正樹, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW レーザ構造の発振特性
3. 学会等名 第79回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石崎隆浩, 杉山滉一, 内田和希, 韓旭, 相川政輝, 早坂夏樹, 松浦正樹, 対馬幸樹, 白井琢人, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW レーザの発振特性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 対馬幸樹, 杉山滉一, 内田和希, 韓旭, 相川政輝, 早坂夏樹, 松浦正樹, 石崎隆浩, 白井琢人, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAsP/GaInAsP SCH-MQW レーザ構造のX線回折評価
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松浦正樹, 早坂夏樹, 韓旭, 相川政輝, 内田和希, 杉山滉一, 石崎隆浩, 対馬幸樹, 白井琢人, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板における発振特性のアニール時間依存性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 韓旭, 内田和希, 相川政輝, 杉山滉一, 早坂夏樹, 松浦正樹, 対馬幸樹, 石崎隆浩, 白井琢人, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板上 MQW レーザにおける発振特性の InP テンプレート膜厚依存性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白井琢人, 早坂夏樹, 相川政輝, 韓旭, 杉山滉一, 内田和希, 松浦正樹, 石崎隆浩, 対馬幸樹, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/Si 基板上 MQW レーザにおける電流電圧特性の InP 膜厚依存性について
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 韓旭, 対馬幸樹, 石崎隆浩, 白井琢人, 佐藤元就, 澁川航大, 伊藤慎吾, 阿形幸二, 小谷桃子, 下村和彦
2. 発表標題 直接貼付 InP/SiO ₂ /Si 基板上表面二電極構造 MQW レーザの発振特性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澁川航大, 対馬幸樹, 伊藤慎吾, 石崎隆浩, 阿形幸二, 白井琢人, 佐藤元就, 小谷桃子, 韓旭, 下村和彦
2. 発表標題 選択成長 MOVPE による直接貼付 InP/Si 基板上 GaInAsP/GaInAsP MQW 構造のフォトルミネッセンス特性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤元就, 韓旭, 白井琢人, 石崎隆浩, 対馬幸樹, 澁川航大, 小谷桃子, 伊藤慎吾, 阿形幸二, 下村和彦
2. 発表標題 ガスアウトチャンネルを用いた直接貼付 InP/Si 基板のポイド占有率比較
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Shirai, X. Han, T. Ishizaki, K. Tsushima, M. Matsuura, K. Shibukawa, K. Fujiwara, M. Sato, and K. Shimomura
2. 発表標題 Double capped InAs Quantum Dots with strain compensation layer grown on InP/Si substrate
3. 学会等名 25th Optoelectronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Tsushima, T. Shirai, K. Fujiwara, X. Han, M. Matsuura, M. Sato, T. Ishizaki, K. Shibukawa, and K. Shimomura
2. 発表標題 Buried heterostructure laser diodes using directly bonded InP thin film on silicon substrate
3. 学会等名 25th Optoelectronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Shibukawa, X. Han, T. Ishizaki, K. Tsushima, T. Shirai, M. Matsuura, K. Fujiwara, M. Sato, and K. Shimomura
2. 発表標題 Selective MOVPE growth of GaInAsP MQW structure on wafer bonded InP/Si and InP/SiO ₂ /Si substrate
3. 学会等名 25th Optoelectronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>上智大学 下村研究室 http://pweb.sophia.ac.jp/shimolab/ 上智大学 下村研究室 http://pweb.cc.sophia.ac.jp/shimolab/</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------