

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04914

研究課題名(和文) Bi系化合物半導体量子ドットによる完全温度無依存レーザ

研究課題名(英文) Temperature independent quantum dot laser fabricated by Bismuth related compound semiconductors

研究代表者

赤羽 浩一 (Akahane, Kouichi)

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所フォトニックICT研究センター・室長

研究者番号：50359072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本課題ではGaAs系材料、InP系材料にBiを混入する技術を確認することでしきい値電流及び発振波長が温度無依存になる量子ドットレーザの実現を目指し研究を行った。InAs量子ドットをInGaAsPで埋め込む構造において、Bi照射のある試料では、温度上昇に伴うレーザ波長シフトがBi未照射のもの1/3となる結果が得られた。一方しきい値電流の増加量はBi照射により大きくなる傾向が見られ、両者の関係にはトレードオフがあることが明らかになった。より高濃度のBiをダメージ無く結晶に取り込むことにより、温度上昇による発振波長シフトとしきい値電流増加が抑えられると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では半導体量子ドットレーザの作製の際、Bi原子を照射することにより、レーザ発振波長の温度依存性を押さえることが出来ることを見出した。これは半導体レーザの発振波長の温度依存性を材料レベルで制御した結果として学術的意義は大きい。また、この技術を発展させ、半導体レーザの動作波長や動作電流を温度無依存にできれば、冷却機構を不要にでき、情報通信などで使われるレーザ装置に関する消費電力を大幅に低減できると考えられ、社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, the dilute Bismide compound semiconductors related to GaAs and InP were investigated. This result applied to fabrication of quantum dot (QD) lasers. In the InAs/InGaAsP QD lasers, the irradiation of Bi suppressed the emission wavelength shift depending on temperature. On the other hand, the dependence of threshold current was degraded with Bi irradiation. So, we think that the wavelength shifts and increase of threshold current with increasing temperature can be suppressed by optimizing growth condition for larger Bi incorporation.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：量子ドット 分子線エピタキシー ビスマス 半導体レーザ

1. 研究開始当初の背景

研究分担者(富永)が Bi 系 III-V 族半導体半金属混晶の研究に携わるようになった 12 年前は、当該混晶は低温成長が必要であるために結晶内に点欠陥や不純物が数多く取り込まれることが容易に推測され、デバイス応用が困難であると推測されていた。そのため世界的にみても、分担者が所属していた京都工芸繊維大学とカナダのプリティッシュコロンビア大学の 2 グループしか研究を行っていなかった。しかし、分担者の GaAsBi のレーザ動作と量子井戸の製作という成果を皮切りに、特に欧米のグループが一気に参入し、米・ミシガン大学、米・デラウェア大学、英・サリー大学、英・シェフィールド大学、仏・モンペリエ大学、独・ポールドリュエデ研究所、リトアニアの物理科学技術センターなど、研究者人口が急激に増加した。日本国内では愛媛大学や NTT 物性科学基礎研究所がここ数年で新たに参入していた。これに対して本研究では光ファイバ通信の主要な波長帯である 1.3 μm 、1.55 μm 帯の光デバイスに適用可能な InGaAlAs 系、InGaAsP 系材料に Bi を混入させる研究をおこなうこととした。InGaAlAs 系および InGaAsP 系材料については Bi を混入させる研究は未開拓であり、また、Bi 系半導体混晶の量子ドットを実現したという報告は全くなかった。したがって本研究提案の新規性、独創性は非常に大きいものであった。また、この材料系で Bi の高濃度添加手法が確立できた場合、光通信波長帯半導体レーザの性能は飛躍的に向上するものと考えられた。したがって社会的なインパクトも大きい研究であった。

2. 研究の目的

本研究では光通信への応用を見据え、1.55 μm の Bi 系量子ドットレーザの研究開発を主な目的とした。これを実現するため、InGaAlAsP 系化合物半導体混晶への高濃度 Bi 添加方法を確立し、量子ドット構造へ応用して半導体レーザの発振波長としきい値電流の完全温度無依存化についての検討を行うこととした。この中で独自技術を用いて InGaAlAsP 化合物半導体への Bi 原子取り込みのメカニズムの解明、Bi 系材料の光物性の解明、量子ドットの形成法の確立に関する研究開発を行うこととした。

3. 研究の方法

III-V 族化合物半導体への Bi 添加の際の結晶成長メカニズムはまだ不明な点が多い。例えば As や P を含む混晶(InGaAsP など)では As と P の供給フラックスの比によって成長した結晶の V 族原子の組成がほぼ決定されるという分かりやすい特徴があるが、Bi に関してはこれに従わないとの報告がある。したがって半導体基板表面に照射された Bi 原子は他の V 族原子である As や P などとは異なる振る舞いをしている可能性がある。その理由の一つに Bi の原子半径が基板材料となる InP の P や As などに比べて非常に大きいということが考えられる。これにより Bi 原子を含む結晶は大きく歪を受けることになるが、歪エネルギーの増大を抑えるために結晶に取り込まれにくくなっていることが考えられる。これについては歪エネルギーを低減するような手法を取り入れることにより成長メカニズムを解明できる可能性がある。本研究グループでは結晶成長の際の歪量を精密に制御する手法を有している。Bi 添加によって発生する歪に対してその歪とは逆向きの歪を母体材料に加えることにより、Bi 添加時の結晶成長メカニズムの一部を明らかにできると考えている。また、III-V 族化合物半導体においては、一口に歪といっても III 族原子由来のものか、V 族原子由来のものかで局所的に見た歪場の分布は異なるものと考えられる。本研究グループで所有する MBE 装置は III 族原子由来の歪も V 族原子由来の歪も制御可能であるため、この点を詳細に検

討することによって、高濃度 Bi を III-V 族四元混晶半導体に添加するための大きな知見が得られる。

それぞれの実験において Bi 原子の濃度は、フォトルミネッセンス等の発光測定、FTIR などによる吸収測定によって基本的な傾向を評価し、最終的な濃度は二次イオン質量分析などによって同定することを想定した。発光特性、吸収特性は測定時の試料温度を変化させることにより最終目的であった InGaAlAs、InGaAsP 材料のバンドギャップの温度無依存化がどの程度達成できるかを調べるうえで重要である。

最終的にこれらの技術を量子ドットの形成に適用し、完全温度無依存量子ドットレーザの試作を行い、温度無依存特性の評価を行う。

4. 研究成果

InP 系材料への Bi 研究の混入に関する研究では、Bi 混入のための結晶成長温度の検討、Bi 供給量の検討などを詳細に行い、最大で 2% 以上の Bi が混入された InPBi 結晶成長に成功した。この知見は実際の半導体レーザ構造作製の際の基礎パラメータとなるため、非常に重要な結果が得られたことになる。Bi 照射量子ドットレーザの作製では少量の Bi 混入の期待できる温度領域 (380°C) で量子ドットレーザを作製し、レーザ発振を確認した。作製した量子ドットレーザの発振波長の温度変化 (20°C ~ 75°C の温度領域) を評価したところ、Bi の照射を行っていない量子ドットレーザの波長変化 27nm に比べて、Bi を照射した量子ドットレーザでは 9nm の波長変化となり、発振波長の温度変化の大幅な低減に成功した (図 1)。しかしながら、この際の Bi の混入量は 1% 以下であり、波長シフト抑制の詳しいメカニズム解明は今後の課題である。

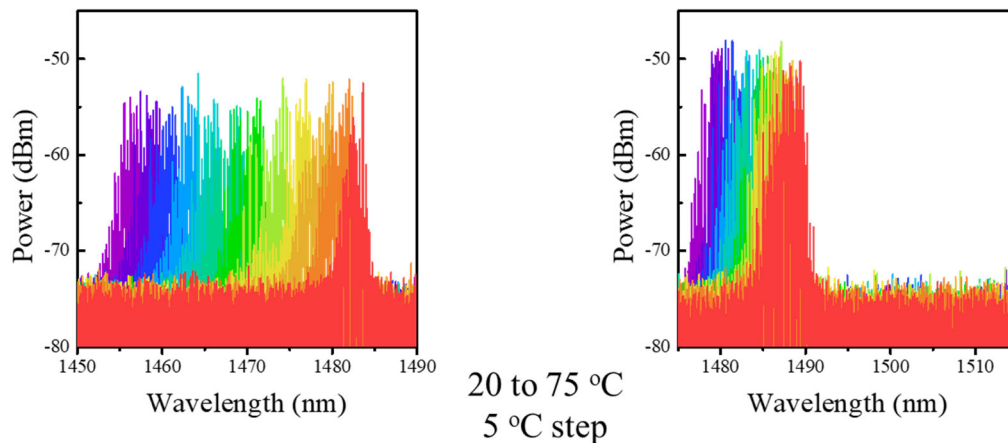


図 1 量子ドットレーザにおける発振波長の温度変化 (左)Bi なし、(右)Bi あり

GaAs 系材料における InAs 量子ドットへの Bi 混入の研究では、InAs 量子ドット形成時に Bi を照射することにより、量子ドットの形状が大きく変化する現象を確認した。これは Bi のサーファクタント効果によるものと考えられ、表面が平坦化し、量子井戸構造になっているものと考えられる。これに対して Bi を混入しつつも 3 次元的なキャリアを閉じ込める InAsBi 量子ドットを成長するための検討として、液滴エピタキシーの検討をおこなった。これにより Bi 液滴の形成に成功した。次に出発物質を Bi ドロップレットとし、これに In および As を供給することで InAsBi 量子ドット形成を試みた。Bi ドロップレットの形成では基板温度を 250°C 以下に下げることにより、Bi ドロップレットを形成することに成功した。その後の In 照射、As 照射についても検討を行い、一部 InAsBi として結晶化している傾向が見られたが、Bi が単体で結晶化している部分も残り、完全な InAsBi 結晶の形成

には至らなかった。これとは別に InAsBi 量子井戸を TEM 観察中に加熱する実験を行ったが、ここでは最初量子井戸として膜構造であったものが量子ドットのように 3 次元的なナノ構造に変化する現象が確認された。得られたナノ構造に Bi がどの程度含まれているかやウエハレベルで同じ現象が形成されるかを今後調べる予定である。

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 Satoshi Yanase, Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Naokatsu Yamamoto, Atsushi Kanno, Tomohiro Maeda, and Hideyuki Sotobayashi	4. 巻 61
2. 論文標題 Surfactant effect of Bi on InAs quantum dot laser diode	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 122001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac9e31	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 Akahane Kouichi, Matsumoto Atsushi, Umezawa Toshimasa, Tominaga Yoriko, Yamamoto Naokatsu	4. 巻 219
2. 論文標題 Growth of InPBi on InP(311)B Substrate by Molecular Beam Epitaxy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/pssa.202100411	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16件（うち招待講演 3件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 赤羽 浩一, 金木 潔良, 松本 敦, 梅沢 俊匡, 山本 直克, 前田 智弘, 外林 秀之, 富永 依里子, 菅野 敦史
2. 発表標題 InP(311)B 基板上における超低密度InAs 量子ドット形成
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, Yoriko Tominaga, Satoshi Yanase, Tomohiro Maeda, Hideyuki Sotobayashi and Atsushi Kanno
2. 発表標題 Temperature insensitivity of emission wavelength of highly-stacked quantum dot laser fabricated on InP(311)B substrate with Bi atoms irradiation
3. 学会等名 CLEO-Pacific Rim 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, and Atsushi Kanno
2. 発表標題 Growth of quantum dots and light source applications
3. 学会等名 International Conference on Solid State devices and materials 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouichi Akahane*, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, Atsushi Kanno
2. 発表標題 Highly stacked InAs quantum dots on InP/InGaAlAs distributed Bragg reflector for VCSEL
3. 学会等名 28th International Semiconductor Laser Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouichi Akahane, Kiyora Kaneki, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, Tomohiro Maeda, Hideyuki Sotobayashi, Yoriko Tominaga, Atsushi Kanno
2. 発表標題 Fabrication of ultra-low-density InAs quantum dots on InP(311)B substrates for telecom-band single-photon sources
3. 学会等名 Photonics West 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 築瀬 智史, 赤羽 浩一, 松本 敦, 梅沢 俊匡, 山本 直克, 富永 依里子, 菅野 敦史, 前田 智弘, 外林 秀之
2. 発表標題 Bi照射InP(311)B上多重積層量子ドットレーザの発振波長温度依存性
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoriko Tominaga
2. 発表標題 V/III atomic ratio during molecular beam epitaxial growth of dilute bismide III-V compound semiconductors at low temperatures
3. 学会等名 The 5th International Union of Materials Research Societies International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (IUMRS-ICYRAM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富永 依里子
2. 発表標題 様々な結晶成長 -Bi系III-V族半導体半金属混晶の分子線エピタキシャル成長から細菌を用いたGaAs系III-V族化合物半導体混晶まで-
3. 学会等名 2022年度 新結晶成長学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Yoriko Tominaga, Naokatsu Yamamoto
2. 発表標題 Growth Of InPBi On InP(311)B Substrate By Molecular Beam Epitaxy
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2021 (CSW2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoriko Tominaga, Fumitaro Ishikawa, Kouichi Akahane
2. 発表標題 Molecular beam epitaxial growth of III-V-bismide semiconductors at low temperatures toward terahertz and optical device applications
3. 学会等名 8th International Workshop Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Naokatsu Yamamoto, Yoriko Tominaga, Atsushi Kanno
2. 発表標題 Surfactant effect of Bi during InAs quantum dot growth on InP(311)B substrates by molecular beam epitaxy
3. 学会等名 21st International Conference on Molecular Beam Epitaxy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤羽 浩一、松本 敦、梅沢 俊匡、山本 直克、富永 依里子、菅野 敦史
2. 発表標題 InP(311)B基板上のInAs量子ドット成長におけるBiサーファクタント効果
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金木 潔良、赤羽 浩一、前田 智弘、外林 秀之
2. 発表標題 Bi援用相互拡散法による通信波長帯単一光子発生に向けたInAs量子ドットの低密度化
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡顕大、横手竜希、岡村祐輝、藤野翔太郎、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、林将平、赤羽浩一
2. 発表標題 InAs _{1-x} Bi _x /GaAs量子ドットの実現に向けたMBE成長条件の検討
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡村祐輝、藤野翔太郎、横手竜希、吉岡顕大、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、林将平、赤羽 浩一
2. 発表標題 InAs系量子ドットにおけるBi原子の表面偏析
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉岡 顕大、岡村 祐輝、横手 竜希、藤野 翔太郎、富永 依里子、行宗 詳規、石川 史太郎、林 将平、赤羽 浩一
2. 発表標題 動作特性が温度無依存である半導体レーザーの開発に向けたInAs _{1-x} Bix/GaAs 量子ドットのMBE成長
3. 学会等名 薄膜材料デバイス研究会 第18回研究集会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	富永 依里子 (Tominaga Yoriko) (40634936)	広島大学・先進理工系科学研究科(先)・准教授 (15401)	

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
---------	---------