

研究成果報告書

研 究 題 目		IoT 社会を支える省エネルギー光通信用新規半導体レーザの開発	実 施 年 度 2020年度
代 表 研 究 者	所 属	広島大学 大学院先進理工系科学研究科	
	氏 名	富永 依里子	印

1. 研究の目的・背景

光通信網の通信容量を飛躍的に増大させ、光通信網のフレキシブルな管理を可能とする方法として波長分割多重 (WDM) 通信方式がある。WDM 通信では、光ファイバーに波長の異なる複数のレーザ光を通すことで通信容量を大きくしているため、混線を防ぐにはレーザ動作の温度安定化が不可欠である。WDM 通信は、既に大陸間や基地局間の光通信に用いられており、現在のインターネットを支えている極めて重要な技術である。一般ユーザの端末や大型計算機内部まで WDM 通信による超高速大容量通信が実現できれば、既に到来している IoT 社会で期待されているユーザの手元における高度なマルチメディア環境を構築することができる。現在の WDM 通信では、半導体レーザをペルチェ冷却素子上に搭載し、この素子に常に電流を流して温度を一定に制御している。これにより、レーザのしきい値電流の温度変化も避けている。一般家庭のパソコンの光通信用モデムにペルチェ冷却素子などの温度制御装置を装備することは、消費電力や価格、占有スペースの点で問題となる。WDM 通信方式を加入者端末まで広げるには、温度変化に対して動作特性が変動しない半導体レーザの開発が必須である。

総務省によると、世界のトラフィックは 2018 年から 2021 年にかけてだけでも 2 倍に増加すると見積もられている[令和元年度 情報通信白書 第 2 節]。科学技術振興機構低炭素社会戦略センターの予測では、2030 年には世界のトラフィックは現在の 30 倍以上、2050 年には 4,000 倍に達するとあり、省エネルギー対策が全く取られない場合、情報関連だけで 2030 年には年間 42 PWh、2050 年には 5,000 PWh と現在の世界の消費電力の約 24PWh を大きく上回ると記されている[情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1) -IT 機器の消費電力の現状と将来予測一、平成 31 年 3 月]。このように、情報通信技術がもたらす利便性の向上と低消費電力化は、現状トレードオフの関係にあり、利便性の追求をしながらも消費電力を低減させる光通信用半導体デバイスや通信システムを実現することが必須となっている。

本研究は、新規半導体材料の量子構造を一から実現することで、IoT 社会における低消費電力光通信用半導体レーザを開発するというものである。半導体レーザの発振波長を決める最も基本的な物性定数である禁制帯幅が温度無依存化するという大きな特徴を有するビスマス (Bi) 系 III-V 族半金属半導体混晶を用い、状態密度が離散化することによりしきい値電流が温度に依存しにくいという特徴を有する量子ドットレーザを実現することで、発振波長としきい値電流の両方が温度に依存しにくい、動作特性が周囲温度に依存しない光通信用半導体レーザを実現することが本研究の最終目的である。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

本助成期間内には、分子線エピタキシー（MBE）法を用い、GaAs(001) 基板上的の Stranski-Krastanov 成長モードを利用した $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 積層量子ドットの実現を目指した。 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドット実現の前例はない。結論から述べると、 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 積層量子構造の製作には成功した。一方、 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドットの成長を完全に実現したとは言い難く、この点が新しい課題となった。以下、その詳細を述べる。

試料は、半絶縁性 GaAs(001) 基板上に厚さ 300 nm の GaAs バッファ層を成長し、その上に積層量子ドットの形成を誘起させるための InAs 量子ドットを成長し、GaAs をスペーサー層としたその上に 9 層の $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 量子ドットを積層した構造とした。最表面の量子ドットの形状の原子間力顕微鏡（AFM）観察用に $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドット層で成長を終えた試料と、ホトルミネセンス（PL）を用いた光学特性測定用に厚さ 50 nm の GaAs キャップ層で終えた試料を 2 種類製作した。MBE 成長条件の詳細はここでは割愛するが、2 試料とも同一とした。成長した試料表面の AFM 観察においては、直径が約 50 nm、高さが約 1 nm の小さな突起物が確認できた。本助成期間前に成長した単層の $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドットの場合と比較して、突起物のサイズと密度が小さいことがわかった。また、この $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{GaAs}$ 積層量子ドット試料の断面透過電子顕微鏡（TEM）観察においては、小さな核やドットのような小さな構造物が多数確認できた。この構造物を試料表面側から基板側に向かって横切るように、TEM 装置付属のエネルギー分散型 X 線分析(EDX)を用いて Ga、As、In、Bi の四元素の分布を測定した。 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 構造物と GaAs スペーサー層の切替わりに伴い、III 族元素の Ga と In の EDX 強度プロファイルは、その極大値と極小値のピーク位置が完全に一致して強度変化を示した。また、As の EDX 強度に着目して $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 構造物と GaAs スペーサー層を比較すると、 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 構造物においてわずかに As の EDX 強度が小さかった。このことから、 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 構造物に Bi が取り込まれている可能性が考えられる。しかし、更に Bi に着目すると、Ga、In、As の EDX 強度の極大値と極小値のピーク位置よりも、Bi の EDX 強度のピーク強度位置は試料表面側に位置しており、 InAsBi 構造物は完全に混晶化した $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ になっているのではなく、Bi が内部で表面偏析した InAs 構造物になっていることが判明した。更に EDX マッピングの結果から、GaAs スペーサー層の成長時には Bi 分子線を照射しなかったにも関わらず、GaAs スペーサー層内に Bi が存在していることが明らかになった。これは、Bi 原子が InAs 構造物（量子ドット）内で表面偏析しているだけでなく、GaAs スペーサー層にまで拡散したことを示している。PL 測定においては、TEM 観察から得た構造物（量子ドット）の直径と高さを基に量子準位の計算を行い、 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドットの量子準位を考慮した実効的なバンドギャップに相当する波長 1540 nm にピークを有するスペクトルを 10-100K の低温で確認した。この温度範囲において、ピーク波長と PL 積分強度は温度変化に対して一定であった。上述の通り、大きくは Bi 原子が表面偏析の傾向を示した InAs 量子ドット部内に Bi が取り込まれているとすると、この波長 1540 nm の PL は $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドット由来の可能性があり、温度無依存の傾向を確認する段階まで到達した。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

申請時は、液体窒素や GaAs 基板、MBE 成長用の高純度金属などに助成金の多くを使わせていただく予定であったが、他の研究経費でそちらを補うことができたため、本助成金は、よりインパクトの高い研究成果を得ることに注力して使用した。設備備品費としては主に、MBE 成長中の量子ドット形成の確認のための表面観察用カメラのアップグレードに使用した。また、助成金のほとんどを、 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドットが形成されているかどうか、世界で初めて $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 半導体混晶から成る量子ドットが形成できているかどうかを確認するための走査透過型電子顕微鏡観察の外部委託に使用するよう方針を変更した。確実な $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドット形成の実証には至らなかったが、これにより、Bi 原子が量子ドット部で表面偏析の傾向を示すことが初めて明らかになり、Stranski-Krastanov 成長モード以外の成長方法を考案しなければならないという次の方針を得ることができた。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究によって、量子ドット内で InAsBi を混晶化することが現時点では困難であることが判明した。特許出願の都合上ここでは詳細は割愛するが、その解決策として考え出した新しい結晶成長方法で実現することを目指している。この方法を用いて、 $\text{InAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 量子ドットを世界に先駆けて実現する。また、この新たに成長した量子ドットから発光（ホトルミネセンス：PL）を得て、発光波長と発光強度がどちらも温度に依存しにくいことを初めて実証し、動作特性が温度に依存しない半導体レーザの実現可能性を示すことも次の課題である。

今回の助成とは別に、代表研究者は共同研究者と共に InP 系材料に Bi を取り込む研究も進めている[1,2]。GaAs 基板上の InAs 系材料と InP 基板上の InP 系材料という代表的な III-V 族化合物半導体全体から Bi 系 III-V 族半導体を用いた光通信用半導体レーザの開発にアプローチし、有望な結果から実用化の目途を付けたいと考えている。

[1] 赤羽浩一、松本敦、梅沢俊匡、富永依里子、山本直克、「InP(311)B 基板上における Bi 系化合物半導体の成長」、18a-Z24-5、第 68 回応用物理学会春季学術講演会、2021 年 3 月、オンライン開催。

[2] Kouichi Akahane, Atsushi Matsumoto, Toshimasa Umezawa, Yoriko Tominaga, and Naokatsu Yamamoto, “Growth of InPBi on InP(311)B substrate by molecular beam epitaxy”, MoA1-09:45, Compound Semiconductor Week (CSW) 2021, May 2021, Online.

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

- 1) 横手竜希、藤野翔太郎、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、「成長時の Bi 照射が InAs 量子ドットの形状に与える影響」、講演番号 6、日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会 2020 年度 第 4 回半導体エレクトロニクス部門委員会 第 3 回研究会、2021 年 1 月、オンライン開催.
- 2) 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、「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」、第 82 回応用物理学会秋季学術講演会、2021 年 9 月 名城大学現地・オンライン ハイブリット開催（投稿中）.
- 3) 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、「InAs 系量子ドットにおける Bi 原子の表面偏析」、第 82 回応用物理学会秋季学術講演会、2021 年 9 月 名城大学現地・オンライン ハイブリット開催（投稿中）.