



令和元年8月30日

新しい電子材料であるビスマス含有半導体の高品質化の指針を明確にする

1. 発表者： 吉本昌広（京都工芸繊維大学 理事・副学長（電子システム工学専攻担当教授））

2. 発表のポイント：

◆成果

赤外線領域でのレーザなどの光素子への応用が期待されるビスマス含有半導体の高品質化の指針を明確にし、米国物理学協会の雑誌 Journal Applied Physics 誌の注目論文（editor's pick）に選ばれた。

◆新規性

ビスマスなどの極端に重い元素を含む半導体材料は、重い元素を材料中に取り込むことが難しく、材料の高品質化が難しかった。本論文では、高品質化の指針を示した。

◆社会的意義／将来の展望

ビスマスなどの極端に重い元素を含む半導体材料のひとつである GaAsBi は、高品質化することで、温度変化に対して特性が安定した赤外線レーザ素子や太陽電池への応用が期待されている。

3. 発表概要：

GaAsBi は、現在、研究が盛んな highly mismatched alloys（高不整合合金）の一つである。GaAsBi 結晶をレーザや太陽電池などの光素子に応用するうえで、テイル準位と呼ばれる結晶欠陥の低減が重要である。GaAsBi レーザの駆動電流が大きすぎ実用に適さないのは、GaAsBi 中の大量のテイル準位のためと考えられている。また、GaAsBi 太陽電池はテイル準位のために十分な特性が得られていない。

京都工芸繊維大学の吉本教授らは、GaAsBi の製作温度を 360°C から 380°C にわずか 20°C 上昇するだけで、GaAsBi 中のテイル準位の形成を抑制できることを明らかにした。400°C 以上で顕著になる Bi 原子の再脱離を抑制しつつ、できるだけ高い温度で精密に温度を制御する必要があることを明らかにした。また、テイル準位の量と発光特性の関係を定量的に明らかにした。これらの成果は米国物理学協会の雑誌 Journal Applied Physics 誌の注目論文（editor's pick）に選ばれた。高品質化への指針の提示は、学術、応用の両面でインパクトがあり、今回の注目論文につながった。

4. 発表内容：

- 研究の背景・先行研究における問題点

1. 研究開始当初の背景

ビスマス含有半金属半導体合金 GaAsBi は、GaAsN、GaNP、ZnOSe などと同じく、原子サイズや電気陰性度、イオン化エネルギーなどが大きく異なる元素を含む highly mismatched alloys (高不整合合金) と呼ばれる半導体合金である。GaAsBi では高不整合合金であるが故の、その特異な電子構造を反映して、GaAsBi でレーザダイオードを製作すれば発振波長の温度無依存化が進められる。

また、Bi 組成が 10%以上の GaAsBi では、その特異な電子構造から発光効率が大幅に向上すると予測されている。GaAsBi を通信波長帯の赤外線レーザに応用すれば、発光効率が向上し、より小さな電流でレーザ発振が実現できると期待されている。

本研究グループは 2003 年頃から世界に先駆けてビスマス含有半金属半導体合金の研究に取り組んでおり、本研究グループが世界で初めて光励起 GaAsBi レーザを 2010 年に実現した。その後、本研究グループをはじめ多くのグループが電流駆動による GaAsBi レーザダイオードを実現している。また、本グループは GaAsBi レーザダイオードの発振波長の温度無依存化を実証した。一方、GaAsBi レーザでレーザ発振を得るための電流値が大きいことが問題であった。図 2 に GaAsBi レーザダイオードで発振波長とレーザ発振に要する電流値の関係を示す。GaAsBi レーザダイオードの発振に要する電流は、実用レベルと比べて 1 桁以上大きい状態であった。

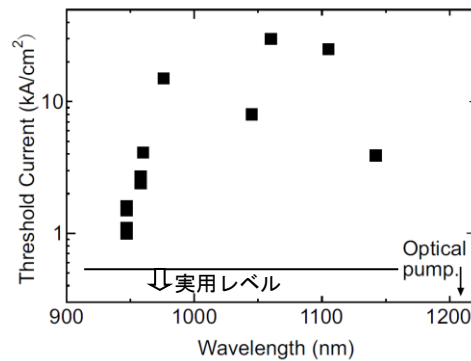


図 1: GaAsBi レーザダイオードの発振波長と発振しきい値電流の報告値。

- 研究内容（具体的な手法等詳細）

GaAsBi をレーザや太陽電池などのフォトリックデバイスに応用するうえで、テイル準位（裾準位）と呼ばれる結晶欠陥の低減が重要である。GaAsBi レーザの駆動電流が大きすぎるのは、GaAsBi 内に存在する大量のテイル準位のせいであると考えられている。フォトダイオードの光応答スペクトルの測定によるテイル準位の定量的な測定が今回の成果の鍵となった。

具体的には、ビスマス含有半金属半導体合金の製作とデバイス試作、さらに特性評価を本グループ内で一貫して進めた。

(1) ビスマス含有半金属半導体混晶の製作

超高真空装置を用いた分子線エピタキシー法により GaAsBi を製作した。ビスマス含有半金属半導体混晶の製作に関しては、2003 年頃から世界に先駆けて取り組んでおり、十分な知見と経験を有している。

(2) フォトダイオード（光検出ダイオード）の試作

平成 28 年度採択の文部科学省先端研究基盤共用促進事業（新たな共用システムの導入・運営）により整備した微細デバイス試作設備を用いてフォトダイオードを試作した。

(3) ビスマス含有半金属半導体混晶の物性評価

X 線回折測定や、透過電子顕微鏡観察、原子間力顕微鏡観察、フォトルミネセンス（photoluminescence: PL）測定などの標準的な物性測定に加えて、GaAsBi 内のテイル準位を評価するために GaAsBi フォトダイオードの光応答スペクトルの測定を進めた。

成長温度を 360°C から 380°C にわずか 20°C 上昇するだけで、GaAsBi 中のテイル準位の形成を抑制できる（図 2）。より高性能の GaAsBi 素子を実現するためにテイル準位の形成を抑制する必要があるが、そのためには、400°C 以上で顕著になる Bi 原子の再脱離を抑制しつつ、できるだけ高い温度で製作する必要があることを明らかにした。また、これまで解明されていなかったテイル準位の量と発光特性の関係を定量的に明らかにした（図 3）。

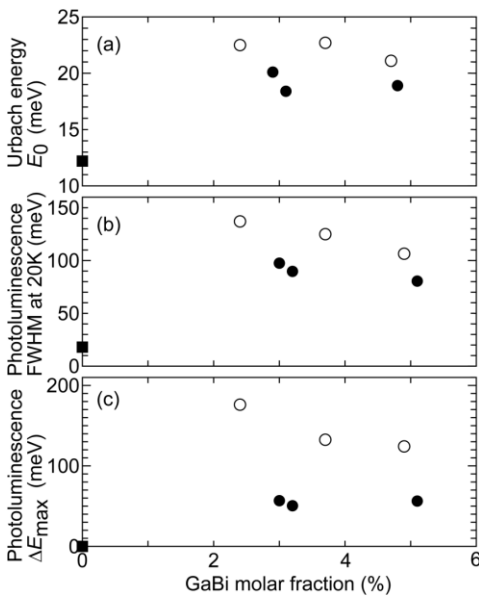


図 2：テイル準位の量と GaAsBi 組成の関係。3 つのグラフとも縦軸が大きな値であるほどテイル準位が多い。●印が 380°C ○印が 360°C で製作した GaAsBi

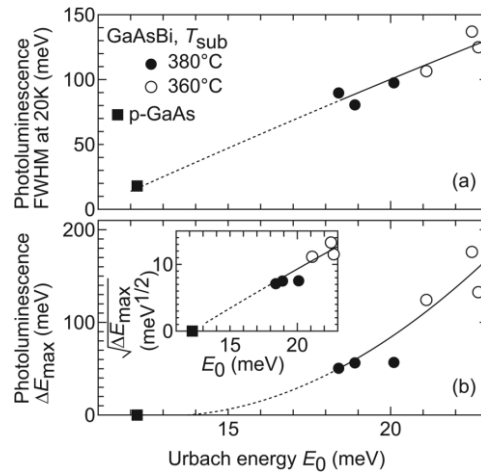


図 3 テイル準位と発光特性の関係

● 社会的意義・今後の予定 等

近年、新たな特性をもつ半導体を探索するために高不整合合金の研究が活発に行われている。本研究は、高不整合合金の一つである GaAsBi の高品質には、製作温度の精密な制御が本質的に重要であることを明らかにした点で、高不整合合金の分野における応用上、学術的な貢献が大きい。また、テイル準位の量と発光特性の関係を定量的に明らかにした点で、学術的な意味が大きい。今後、今回得られた結果をもとに、GaAsBi レーザの駆動電流の低減や GaAsBi 太陽電池の特性向上を進める予定である。

5. 発表雑誌 :

雑誌名 : 「Journal Applied Physics」 (オンライン版の場合 : 7 月 23 日

既に印刷されている場合 : 126 巻、(2019)、045702 (全 8 ページ))

論文タイトル : Impact of a small change in growth temperature on the tail states of GaAsBi

著者 : Kyohei Kakuyama(岳山恭平 : 修士学生), Sho Hasegawa(長谷川 将 : 修士学生),

Hiroyuki Nishinaka(西中浩之 : 助教), and Masahiro Yoshimoto (吉本昌広 : 教授)

DOI 番号 : 10.1063/1.5109362

アブストラクト URL :

<https://vpns.cis.kit.ac.jp/proxy/4efcaa51/https/aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5109362>

6. 注意事項 :

無し。

7. 添付資料 :

別添のとおり

<研究内容に関する問い合わせ先>

吉本 昌広 京都工芸繊維大学 教授

〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町 1

Tel: 075-724-7006 Fax: 075-724-7100 E-mail: yoshimot@kit.ac.jp