

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04910

研究課題名(和文) 新規THz波受送信素子向け低温成長Bi系混晶半導体中の欠陥の評価および制御

研究課題名(英文) Characterization and control of defects in low-temperature-grown Bi-based compound semiconductors for novel terahertz wave emitters and detectors

研究代表者

上田 修 (Ueda, Osamu)

明治大学・研究・知財戦略機構(生田)・研究推進員(客員研究員)

研究者番号：50418076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光伝導アンテナ用の低温MBE成長した(In)GaAsBi系薄膜中の微細構造・欠陥および電気的・光学的特性を調べた。その結果、まず(1)単結晶薄膜の熱処理では、As凝集体が薄膜/基板界面に、Bi-richなGaAsBiおよびBi凝集体が薄膜中に一様に、それぞれ形成される、(2)非晶質薄膜の熱処理では、GaAsBiおよびBi凝集体のみ薄膜/基板界面上に形成されることを明らかにした。また、キャリア寿命測定により、PCAに適用可能なInGaAsBiを得るための成長条件の最適化を進める体制が整った。さらに、界面顕微光応答法によりGaAsBiの光電流特性を2次元評価し、均一性を評価できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、低温MBE成長した(In)GaAsBi系の単結晶および非晶質薄膜を高温での熱処理した場合に、As、Ga-rich GaAsBiおよびBi凝集体などの欠陥が薄膜/基板界面および薄膜中に形成されることを明らかにした。また、これらの欠陥の電気的・光学的特性への影響についても明らかにした。さらに、テラヘルツ光のセンシングを用いた各種システムへの社会実装を実現するためには、そのキーデバイスとなる高性能で、小型・低コストの光伝導アンテナの開発が必須であるが、本研究により新奇(In)GaAsBi系材料の創製および光学的・電気的特性の最適化が不可欠であることを提案できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have investigated microstructures, defects, and electrical and optical properties of low-temperature (LTG) MBE-grown (In)GaAsBi related thin films which are used for photo-conductivity antenna (PCA). First, we have found that (1) in the single crystal thin films, As-precipitates are formed at the thin film/substrate interface, whereas Bi-rich GaAsBi precipitates and Bi-precipitates are formed uniformly in the entire thin film after annealing and that (2) in the case of solid-phase epitaxial growth of amorphous thin films, Bi-rich GaAsBi and Bi precipitates are formed only at the region just above the thin film/substrate interface. Next, we have established a system of optimization of growth conditions for obtaining (In)GaAsBi applicable to PCA, using carrier lifetime measurement. Furthermore, we evaluated two-dimensional photo current property of GaAsBi by scanning internal photoemission microscopy and we found very uniform optical property in the GaAsBi crystal.

研究分野：結晶評価

キーワード：Bi系混晶半導体 MBE 低温成長 結晶欠陥 THz波受送信素子 欠陥評価 TEM 凝集体

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)は、空港での保安検査や病院での生体検査、薬品工場での不純物の検出といった様々な場面で、安く、早くかつ大量にセンシングを行う技術の一つとして大きく注目されている。本分光法では、PCA用半導体に超短パルス光を照射することで生じる光伝導効果を利用しており、その動作上、当該半導体には短キャリア寿命、高抵抗、高移動度という3つの物性が要求される。従来は低温成長 GaAs が用いられ、光源には GaAs の禁制帯幅に合わせて大型で高価な 0.8 μm 帯 Ti:サファイヤレーザーが使われてきたが、ここに 1.5 μm 帯に禁制帯を有する低温成長 GaAsBi や InGaAsBi を適用して 1.5 μm 帯の小型ファイバーレーザーを光源とできる PCA を開発し、小型・低価格な実用に耐え得る THz-TDS システムを実現することが強く求められている。

2. 研究の目的

テラヘルツ (THz) 分光法において、THz 波の発生検出に用いられるのが光伝導アンテナ(PCA)である。本分光法では、PCA用半導体に超短パルス光を照射することで生じる光伝導効果を利用している。本研究では、応募者らが PCA用半導体材料として独自に着目している GaAsBi や InGaAsBi といったビスマス(Bi)系半導体半金属混晶の結晶欠陥制御を基に、光通信帯光源 (波長: 1.5 μm 帯) が利用可能な PCA を実現する。これにより THz 分光システムを大幅に小型化・低コスト化する。PCA用半導体に必須の短キャリア寿命・高抵抗・高移動度の3つの特性を同時に得るための Bi 系半導体混晶の微細構造・欠陥を体系立てて明らかにし、それらの PCA 特性への影響を評価する。「結晶内に欠陥を導入しながら (短キャリア寿命を得る)、結晶品質を劣化させ過ぎないようにする (高抵抗、高移動度を得る)」ための Bi 系半導体混晶の結晶成長条件はどこにあるのか明らかにする研究課題である。

3. 研究の方法

(1) InGaAs と GaAsBi の固相成長の差異に関する知見の獲得

- 1) InGaAs では顕著な In の偏析なく固相成長するのに対し、GaAsBi では Bi が偏析するといった差異の精緻な解明
- 2) Bi と As を非晶質層内や結晶層内で共存させつつ、熱処理により As 凝集体 (または析出物) が形成できる両原子の濃度や熱処理温度の把握

(2) 低温成長した単結晶 GaAsBi の熱処理による As 凝集体の形成メカニズムの解明

- 1) 単結晶 GaAsBi の低温 MBE 成長 (250) と 600 熱処理による Bi 組成の均一な単結晶 GaAsBi 中の As 凝集体形成の確認
- 2) 1) の Bi 組成および As 凝集体の TEM 観察結果 (直径・密度・分布) に基づいた、MBE 成長条件の最適化

(3) 熱処理による InGaAsBi 内の As 凝集体の形成方法の確立と PCA の特性への影響の解明

- 1) InGaAsBi の 250 以下での低温 MBE 成長条件の最適化
- 2) InGaAsBi 中の As 凝集体の均一形成熱処理条件の最適化
- 3) ダイポール型 PCA 作製による 1.5 μm 帯光源を用いた THz 波発生検出特性の高性能化の実証

4. 研究成果

(1) 低温 MBE 成長 (In)GaAsBi 薄膜中の微細構造および欠陥の評価

研究代表者の上田、分担者の池永および富永は、(In)GaAsBi の低温 MBE 成長薄膜の微細構造や結晶欠陥の評価を透過電子顕微鏡(TEM)および関連分析技術により行った。

- 1) 低温 MBE 成長による単結晶 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 薄膜 (成長温度 250) 中の熱処理後の欠陥の評価 () (001) GaAs 基板上に 250 で MBE 成長した $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 薄膜 ($x=0.031$) およびそれを 600 , 20 min 熱処理したものを TEM および走査 TEM (STEM) により評価した。まず、As-grown 薄膜では、特に転位、凝集体などの構造欠陥は観察されなかった。一方、熱処理後の薄膜では、以下に述べるように、3種類の凝集体が観察された。図1は、試料の(110)断面のSTEM像である。まず、図中の四角で囲った領域、すなわち、 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$ 薄膜と基板との界面領域に As 凝集体 (直径 5 nm 程度) が観察された。一方、薄膜中には、2種類の Bi 関連の凝集体が高密度で均一に形成されていることが判明した。また、高分解能 TEM 観察により、これらの凝集体は zincblende (zb) GaAsBi 凝集体および rhombohedral (rh) Bi 凝集体 () であることを明らかにした。さらに、Bi-rich な GaAsBi 凝集体は薄膜中に概ね均一に分布しているのに対し、Bi 凝集体は図2に示すように、上層部および下層部では各々、タイプ A およびタイプ B のみが形成されていることが判明した。図中、INS は最初に Bi 凝集体が形成される場所を示す。Bi 凝集体は Ga 空孔の拡散により促進された Bi 格子間原子の凝縮に起因するとされている。このことから、上層部および下層部では、それぞれ Ga 空孔の内方拡散および外方拡散により、タイプ A およびタイプ B が形成されると考えられる。このように、本成長・熱処理条件は、各種欠陥の形成に適した条件と思われる。

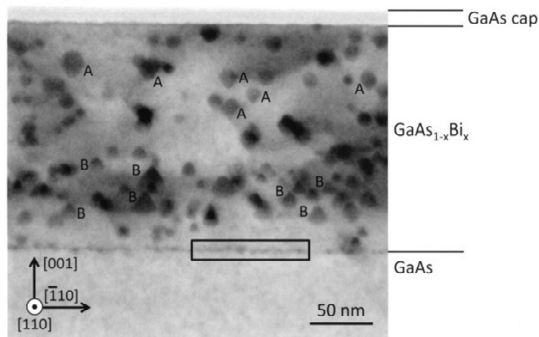


図1 低温成長 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜の熱処理後の (110)断面 STEM 像

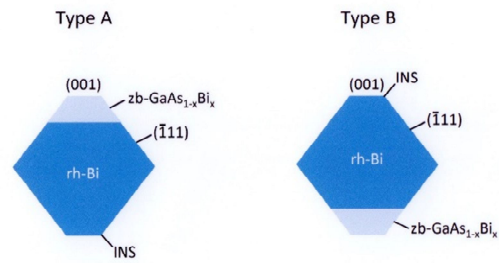


図2 (110)方向から見た2つのタイプの rh-Bi 凝集体の模式図

2) 低温 MBE により成膜された非晶質 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜の固相成長により得られる単結晶 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜中に形成される微細構造および欠陥の評価()

非晶質薄膜を用いた固相成長(solid-phase epitaxy: SPE)では、不純物、点欠陥、および欠陥クラスター(凝集体を含む)などの均一な分布を実現できると期待される。そこで、本研究においては、非晶質 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜の固相成長を行い、単結晶 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜中で形成される欠陥を TEM および STEM により評価し、1)で述べた低温成長 GaAs_{1-x}Bi_x 単結晶薄膜の熱処理による結果と比較した。実験に用いた試料は、(001)GaAs 基板上に 180 °で MBE 装置により作製した非晶質 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜(x=0.0095)およびそれを 350 °および 600 °で 1 h SPE 処理したものである。

上記、3種類の試料の TEM および STEM 評価結果について以下に述べる。まず、180 °で作製した GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜を断面の電子線回折により解析した結果、非晶質と判明した。次いで、この GaAs_{1-x}Bi_x 非晶質薄膜を 350 °で 1 h SPE 処理した GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜を断面 TEM および STEM により評価した。(110)断面の STEM 像を図3に示す。薄膜は、GaAs_{1-x}Bi_x-1 および GaAs_{1-x}Bi_x-2 の2層に分かれており、電子線回折像から、それぞれ多結晶層および単結晶層と判明した。また、epi/sub 界面の A で示す領域およびその直上の B で示す領域には、それぞれ As 凝集体(約 5 nm 径)および Bi-rich な GaAs_{1-x}Bi_x 凝集体および Bi 凝集体(タイプ B)が観察された。さらに、両層の界面領域には、T で示すリボン状の欠陥が観察された。これらの欠陥は、高分解能 TEM 観察および電子線回折により、双晶ラメラであることを明らかにした。これらの双晶ラメラは、両層の界面領域での応力緩和により形成されたものと視察された。さらに、600 °で 1 h SPE 処理した GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜の評価結果について述べる。図4は、薄膜の断面明視野像である。薄膜は上層まで単結晶化している。また、epi/sub 界面付近には As 析出物は観察されず、Bi-rich な GaAs_{1-x}Bi_x 凝集体および Bi 凝集体(タイプ B)が epi/sub 界面直上のみ観察された。以上の結果から、350 ° 1 h の SPE で見られた多結晶層は高温 SPE では下層エピ層に浸食され、全層エピ層化したと考えられる。また、As 凝集体に関しては、600 °の SPE 処理では、結晶中の As_{Ga} 濃度が極めて低いため、As 凝集体が形成されなかったと思われる。さらに、Bi-rich な GaAs_{1-x}Bi_x 凝集体および Bi 凝集体(タイプ B)は、epi/sub 界面にのみ形成されていたのは、i)Ga 空孔濃度が比較的低いこと、ii)Ga 空孔の epi/sub 界面への内方拡散が抑制されていることなどが考えられるが、詳細は不明である。以上のように、本条件では、凝集体が界面領域にのみ形成されており、凝集体の均一な形成には、今後、成膜および熱処理条件の最適化が必要と思われる。

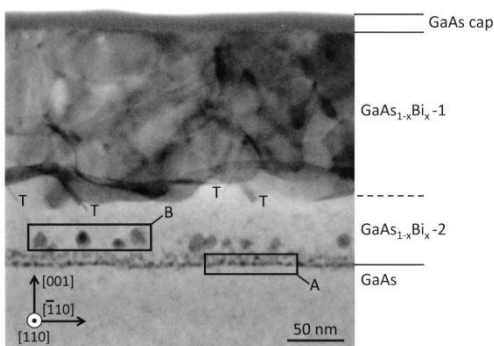


図3 非晶質 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜を 350 °, 1 h SPE 処理した薄膜の(110)断面 STEM 像

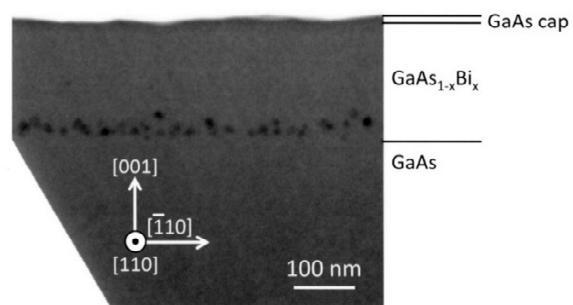


図4 非晶質 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜を 600 °, 1 h SPE 処理した薄膜の(110)断面 TEM 像

(2) (In)GaAsBi の低温 MBE 成長および結晶学的特性評価・光学特性評価

分担者の富永は、上記欠陥評価に使用した GaAsBi および InGaAsBi の 250 以下の GaAs(001) 基板上への低温 MBE 成長を研究期間中に進めた。これら希釈 Bi 系 III-V 族化合物半導体の、世界的にも珍しい 250 以下という低温成長領域の探索および成長条件の最適化に取り組んだ。まず、三元混晶の低温成長 GaAsBi に関して、270 以上での MBE 成長では提唱されているラングミュアの吸着等温式に基づく GaAsBi の成長モデル()を分担者の下で 250 以下の低温成長領域に適用した。実際に 250 で GaAsBi を MBE 成長する際のビーム等価圧力(BEP)比や、成長後の GaAsBi の X 線回折(XRD)測定やラザフォード後方散乱法(RBS)を用いた結晶性評価と Bi 組成の算出値を照らし合わせた結果、文献 で提案されているモデル式に分担者のグループ独自のパラメータを導入すると、GaAsBi の成長前に得たい Bi 組成が得られる MBE 成長条件が設定できるようになった。本研究期間において使用した 250 で成長した GaAsBi は、すべてこの成長前の設定に基づいて MBE 成長したものである。これら GaAsBi の XRD カーブにおいては、GaAs(001)基板由来の回折ピークと GaAsBi 層由来の回折ピークの間干渉フリンジも確認でき、動力学的回折理論に基づくシミュレーションフィッティングを行うと、シミュレーションカーブと実測したカーブはよく一致した。250 という GaAs 系化合物半導体の中でも低温での成長であっても、XRD 測定で確認できるレベルでは高品質な単結晶エピタキシャル GaAsBi 薄膜が GaAs(001)基板上に成長できることが明らかになった。この MBE 成長条件のまま、基板温度のみを 180 に設定すると非晶質 GaAsBi が堆積することも XRD 測定と RBS による結晶学的特性評価から判明した()。図 5 と図 6 は、これら単結晶と非晶質両 GaAsBi を 4-(1)で述べた通り熱処理した場合の RBS スペクトルである()。熱処理前はチャネリング測定とランダム測定で Bi 原子由来の信号強度に明瞭な差が表れていたにもかかわらず、熱処理後はその差がほとんどみられなくなっている(図 5)。これは、結晶格子位置に取り込まれていた Bi が熱処理によって GaAsBi 薄膜全体に拡散したことを示している。350-400 で成長した GaAsBi 薄膜の場合では 800 まで熱的に安定であることは本分担者のこれまでの研究で明らかにしている()ため、低温成長 GaAsBi では 600 での熱処理で Bi 原子の拡散がみられたことは、250 という低温成長では空孔型点欠陥が結晶格子内に多数存在し、Bi 原子が熱処理によってその点欠陥を介して拡散したことを示唆している。また図 6 からは、GaAsBi の成長温度としてよく適用される 350 で SPE 処理を行っても、単結晶 GaAsBi が成長するのではなく、Bi 原子が GaAsBi 層全体に分布した薄膜になるとどまることも見てとれる。今後は、低温成長 GaAs と同様、金属凝集体が形成された熱処理後の GaAsBi の PCA 応用に必須の基礎特性の測定が必要である。

本研究期間では、上述のラングミュアの吸着等温式による GaAsBi の成長モデルを基に、低温成長 InGaAsBi の MBE 成長条件の事前設定も可能とした。また、上述の独自のパラメータを数式内に導入したまま、GaAsBi の場合と全く同一の条件式で III 族元素と V 族元素の比率を調整するだけで GaAs(001)基板上の 250 での低温成長 InGaAsBi の MBE 成長を実現可能とした。分担者のグループとしては最高値の In と Bi 両原子の組成を得るに至った。現在、新たな研究協力者の協力の下、本研究期間で成長した低温成長 GaAsBi や低温成長 InGaAsBi のキャリア寿命の測定を開始している。現時点で低温成長 GaAs に倣い、1 ps 未満のキャリア寿命を得るための MBE 成長条件の指針を得ており、今後、キャリア寿命と成長条件のフィードバックを行うことで MBE 成長条件最適化を進める予定である。また、Matthews-Blakeslee や People-Bean の式を用いた GaAs(001), InP(001)基板上の InGaAsBi の臨界膜厚の計算から、短キャリア寿命を得るための転位密度の制御も含めた結晶欠陥制御が可能な MBE 成長条件の最適化を進めている段階にある。

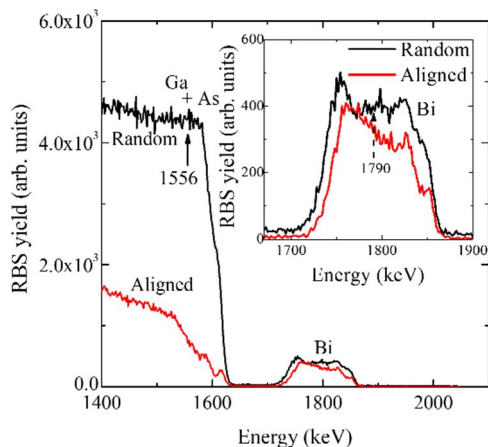


図 5 低温成長 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜を 600 で 1 h 熱処理した後の RBS スペクトル (挿入図は Bi の信号を拡大したもの)

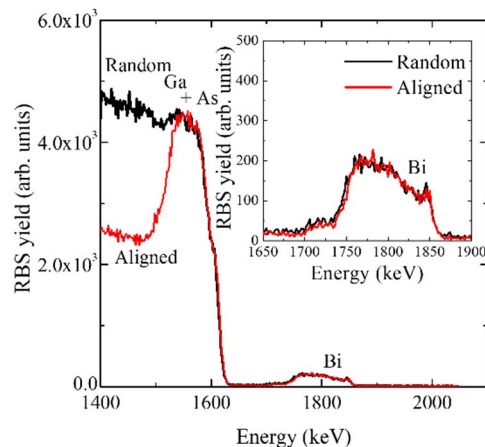


図 6 非晶質 GaAs_{1-x}Bi_x 薄膜を 350 で 1 h SPE 処理した後の RBS スペクトル (挿入図は Bi の信号を拡大したもの)

(3) 界面顕微光応答法および Photoresponse (PR) 法による GaAsBi 層の光電評価

分担者の塩島は、低温成長 GaAsBi 層の上に Au/Ni 電極を形成することにより結晶性の評価を行なった。界面顕微光応答法()は塩島らが開発した電極(金属/半導体)界面の不均一性を非破壊で評価する測定法である。電極界面に半導体側からレーザー光を集光して照射し、面内を走査しながら光電流を測定した。図7は波長 886 nm のレーザー光を用いた直径 200 μm 電極の光電流像である。光電流の電極面内の分布から、良好な GaAsBi 層の均一性が確認できた。

一方、PR 法は電極界面に分光器からの単色光を全面に照射しロックイン検出で光電流を測定し、スペクトルを得る手法である。図8に Bi 組成が 0.7 から 3.1% の試料の典型的な PR スペクトル(縦軸左が光電流の平方根、右がロックイン検出における参照信号との位相差)を示す()。光子エネルギー 1.4 eV において光電流の大きなピークがみられた。GaAsBi 層のエネルギーバンドギャップに相当するため基礎吸収起因であると考えられる。このピークの低エネルギー側にいくつかの小さなピークが観測され、位相が 180 度回転していることが判明した。通常のショットキー電極では光電流の位相が回転することはなく、本低温成長試料特有の現象である。基礎吸収とバンド中の欠陥準位を区別して評価できる可能性を示唆している。この研究成果が ADMETA Plus において評価され、ポスターアワードを受賞した()。

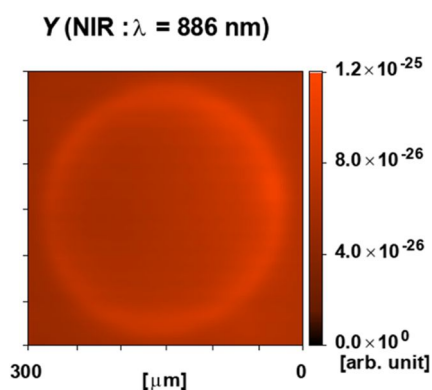


図7 低温成長 GaAsBi 層上電極の光電流像

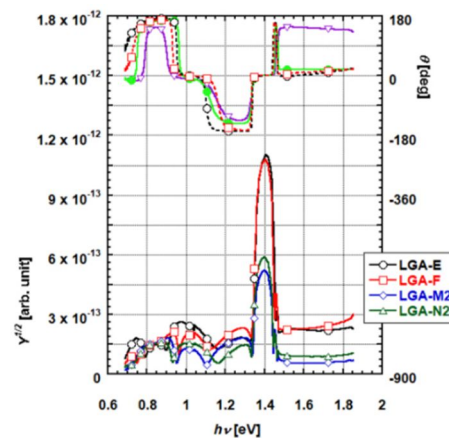


図8 典型的な PR スペクトル

(4) まとめ

上田、富永、池永は、低温 MBE 成長 GaAsBi 結晶層(基板温度 250)及び非晶質層(基板温度 180)を熱処理したものを TEM 解析した結果、1) GaAsBi 結晶層の 600 熱処理では、As 凝集体が薄膜/(001)GaAs 基板界面近傍に、また GaAsBi 及び Bi 凝集体が一様に形成される、2) 非晶質層では、350 熱処理で単結晶層とその上に多結晶層が形成され、薄膜/基板界面近傍に As 及び Bi 凝集体が形成され、600 熱処理では全層単結晶となり界面近傍に Bi 凝集体のみ形成されることを明らかにした。また、富永は、250 という低温で GaAsBi と InGaAsBi を Bi 原子の極端な偏析なく GaAs(001)基板上に成長する MBE 成長条件を見出すことに成功した。本グループとしては In と Bi の組成が最高値となる低温成長 InGaAsBi を実現できた。さらに、塩島は界面顕微光応答法による 2次元評価により GaAsBi 層の均一性を明らかにした。PR スペクトルでは本試料特有の位相が 180 度回転する現象が観測され、新規な欠陥評価法を提案できる可能性を示した。

< 引用文献 >

- O. Ueda, N. Ikenaga, Y. Horita, Y. Takagi, F. Nishiyama, M. Yukimune, F. Ishikawa, and Y. Tominaga, *J. Cryst. Growth* 601, 126945 (2023).
- M. Wu, E. Luna, J. Puustinen, M. Guina et al., *Nanotechnology* 25, 205605 (2014).
- X. Lu, D. A. Beaton, R. B. Lewis, T. Tiedje, M. B. Whitwick, *APL* 92, 192110 (2008).
- Y. Tominaga, Y. Horita, Y. Takagaki, F. Nishiyama, M. Yukimune and F. Ishikawa, *Appl. Phys. Express*, 15, 045504 (2022).
- Y. Tominaga, Y. Kinoshita, K. Oe, and M. Yoshimoto, *APL*, 93, 131915 (2008).
- K. Shiojima, *ECS Transactions*, 104, 69-82 (2021).
- 梅田皆友、今林弘毅、塩島謙次、梅西達哉、富永依里子、行宗 詳規、石川 史太郎、上田 修、第 70 応用物理学会春季学術講演会、15p-PA05-6、2023 年 3 月 15 日、上智大学。
- 今林弘毅、梅田皆友、塩島謙次、梅西達哉、富永依里子、行宗 詳規、石川 史太郎、上田 修、第 42 回電子材料シンポジウム、Fr1-12、2023 年 10 月 13 日、橿原市。
- H. Imabayashi, M. Umeda, K. Shiojima, T. Umenishi, Y. Tominaga, M. Yukimune, F. Ishikawa, O. Ueda, *ADMETA Plus* 2022, P-3, Oct. 13, 2022, Tokyo.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11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 富永 依里子	4. 巻 92
2. 論文標題 テラヘルツ波検出用光伝導アンテナ開発に向けた GaAsBi 成長	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 617 ~ 621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.92.10_617	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 Shiojima Kenji	4. 巻 112
2. 論文標題 (Invited) Characterization of Metal/GaN Schottky Contacts - Review from the Early Days	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 89 ~ 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/11201.0089ecst	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 Imabayashi Hiroki, Shiojima Kenji, Kachi Tetsu	4. 巻 162
2. 論文標題 Mapping of ultra-high-pressure annealed n-GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 107536 ~ 107536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2023.107536	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 Osamu Ueda, Noriaki Ikenaga, Yukihiko Horita, Yuto Takagaki, Fumitaka Nishiyama, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa, Yoriko Tominaga	4. 巻 601
2. 論文標題 Structural evaluation of GaAs _{1-x} Bi _x obtained by solid-phase epitaxial growth of amorphous GaAs _{1-x} Bi _x thin films deposited on (001) GaAs substrates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 126945-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2022.126945	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 Kenji Shiojima, Yuto Kawasumi, Yuto Yasui, Yukiyasu Kashiwagi, Toshiyuki Tamai	4. 巻 61
2. 論文標題 Estimation of uniformity in Schottky contacts between printed Ni electrode and n-GaN by scanning internal photoemission microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 086506-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac7bc5	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 Kenji Shiojima, Hiroki Imabayashi, Tomoyoshi Mishima	4. 巻 71
2. 論文標題 Effect of Surface Treatment in Au/Ni/ n-GaN Schottky Contacts Formed on Cleaved m-Plane Surfaces of Free-Standing n-GaN Substrates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 819~823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.819	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 Hiroki Imabayashi, Yuto Yasui, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Noboru Fukuhara, Tomoyoshi Mishima, Kenji Shiojima	4. 巻 62
2. 論文標題 Characterization of peripheries of n-GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA1012-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac8d6f	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 Kenji Shiojima, Ryo Tanaka, Shinya Takashima, Katsunori Ueno, and Masaharu Edo	4. 巻 60
2. 論文標題 Effects of surface treatment and annealing for Au/Ni/n-GaN Schottky barrier diodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 056503-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abf5ab	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 Kenji Shiojima	4. 巻 104
2. 論文標題 Two-Dimensional Characterization of Wide-Bandgap Materials and Contact Interfaces by Using Scanning Internal Photoemission Microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 69-82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/10404.0069ecst	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 Kenji Shiojima, Yuto Kawasumi, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Noboru Fukuhara, Tomoyoshi Mishima, and Takashi Shinohe	4. 巻 60
2. 論文標題 Uniformity characterization of SiC, GaN, and -Ga2O3 Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 108003-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac2917	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 Shiojima Kenji, Matsuda Ryo, Horikiri Fumimasa, Narita Yoshinobu, Fukuhara Noboru, Mishima Tomoyoshi	4. 巻 61
2. 論文標題 Mapping of contactless photoelectrochemical etched GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy?difference in electrolytes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 SC1059 ~ SC1059
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4c6e	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37件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 塩島謙次
2. 発表標題 界面顕微光応答法によるGaNショットキー電極界面の2次元評価
3. 学会等名 応用物理学会 半導体の結晶成長と加工および評価に関する産学連携委員会 第4回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 今林弘毅、梅田皆友、塩島謙次、梅西達哉、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、上田修
2. 発表標題 低温MBE成長GaAsBi層の光電評価
3. 学会等名 第42回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富永依里子
2. 発表標題 低温成長Bi系III-V族半導体の結晶欠陥制御とTHz波発生検出素子への応用 3 .
3. 学会等名 電子情報通信学会スマートインフォメディアシステム研究会6月SIS研究会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 富永依里子
2. 発表標題 THz波発生検出用光伝導アンテナに向けた低温成長Bi系III-V族半導体
3. 学会等名 日本学術振興会 テラヘルツ波科学技術と産業開拓 第182委員会 最終研究会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 富永依里子
2. 発表標題 低温成長Bi系III-V族半導体混晶のデバイス応用展開：新規THz波発生検出素子の開拓
3. 学会等名 電気化学会 第91回大会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 富永依里子、石川史太郎、池永訓昭、上田修
2. 発表標題 THz波発生検出素子応用に向けた低温成長Bi系半導体の結晶欠陥制御
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第44回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 香西優作、木村耕治、梅西達哉、齋藤聖哉、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、八方直久、林好一
2. 発表標題 蛍光X線ホログラフィーを用いた低温成長GaAsBiの結晶学的特性の解析
3. 学会等名 第42回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒川竜芳、梅西達哉、齋藤聖哉、香西優作、行宗詳規、石川史太郎、富永依里子
2. 発表標題 低温成長(In)yGa _{1-y} As _{1-x} Bi _x のバンド端ゆらぎの解析
3. 学会等名 2023年度日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会 第1回研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富永依里子
2. 発表標題 Bi系III-V族半導体混晶の低温成長が切り拓く新規デバイス応用展開ー基板界面との関係は？
3. 学会等名 表面技術協会 第148回講演大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富永依里子
2. 発表標題 Bi系III-V族半導体の低温成長による結晶欠陥制御に基づく光学・THz両デバイス
3. 学会等名 第27回2023年度福井セミナー:レーザー学会中部支部レーザー普及セミナー(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoriko Tominaga, Koji Kimura, Seiya Saito, Minato Harada, Yusaku Kozai, Fumitaro Ishikawa, Naohisa Happo, and Kouichi Hayashi
2. 発表標題 X-ray fluorescence holography of low-temperature-grown GaAs _{1-x} Bix
3. 学会等名 International conference on complex orders in condensed matter: aperiodic order, local order, electronic order, hidden order (国際学会)
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 Hiroki Imabayashi, Kenji Shiojima, and Tetsu Kachi
2. 発表標題 Mapping of Ultra-High-Pressure Annealed n-GaN Schottky Contacts Using Internal Photoemission Microscopy
3. 学会等名 9th International Symposium on Control of Semiconductor Interface (ISCSI-IX) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名	Hiroki Imabayashi, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Noboru Fukuhara, Tomoyoshi Mishima and Kenji Shiojima
2. 発表標題	Two-dimensional characterization of the edge structure of Ni/n-GaN Schottky contacts under applied voltage by scanning internal photoemission microscopy
3. 学会等名	International Conference on Solid State Devices and Materials 2022 (SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Hiroki Imabayashi, Minato Umeda, Kenji Shiojima, Tatsuya Umenishi, Yoriko Tominaga, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa, Osamu Ueda
2. 発表標題	Internal Photoemission Characterization for Low-Temperature-Grown GaAsBi Layers
3. 学会等名	Advanced Metallization Conference 2022 31st Asian Session (ADMETA Plus 2022) (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	原田南斗、梅西達哉、香西優作、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、梶川靖友
2. 発表標題	低温成長GaAs _{1-x} Bi _x のホッピング伝導機構の解析
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	齋藤聖哉、梅西達哉、原田南斗、香西優作、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、小島磨
2. 発表標題	低温成長GaAs _{1-x} Bi _x の光信号応答時間のBi組成依存性
3. 学会等名	第41回電子材料シンポジウム(EMS-41)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 上田修、池永訓昭、堀田行紘、高垣佑斗、西山文隆、行宗詳規、石川史太郎、富永依里子
2. 発表標題 (001)GaAs基板上のGaAs _{1-x} Bi _x 薄膜の構造評価(1)熱処理した低温成長GaAs _{1-x} Bi _x 薄膜中の欠陥のTEM評価
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 上田修、池永訓昭、堀田行紘、高垣佑斗、西山文隆、行宗詳規、石川史太郎、富永依里子
2. 発表標題 (001)GaAs基板上のGaAs _{1-x} Bi _x 薄膜の構造評価(2)固相成長したGaAs _{1-x} Bi _x 薄膜中の欠陥のTEM評価
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 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 新結晶成長学シンポジウム(応用物理学会中国四国支部)(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今林弘毅、塩島謙次、加地徹
2. 発表標題 界面顕微光応答法による超高压アニールn-GaNショットキー接触の二次元評価
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 今林弘毅、堀切文正、成田好伸、福原昇、三島友義、塩島謙次
2. 発表標題 電圧印加界面顕微光応答法によるNi/n-GaNショットキー接触の電極端面構造の二次元評価
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 今林弘毅、堀切文正、成田好伸、福原昇、三島友義、塩島謙次
2. 発表標題 電圧印加界面顕微光応答法によるn-GaNショットキー接触の電界集中の可視化
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子部品・電子デバイス(ED)研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塩島謙次
2. 発表標題 界面顕微光応答法による電極界面の2次元評価ーこの7年間の進歩ー
3. 学会等名 日本材料学会 2022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（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅田皆友、今林弘毅、塩島謙次、梅西達哉、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎、上田修
2. 発表標題 低温MBE成長GaAsBi層の光電評価
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 上田 修
2. 発表標題 50余年にわたるIII-V族化合物半導体発光デバイスの材料(欠陥)評価と信頼性解析のあゆみ
3. 学会等名 日本学術振興会R025委員会2021年度フォーラム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田 修
2. 発表標題 結晶欠陥評価およびデバイスへの影響
3. 学会等名 日本材料学会半導体エレクトロニクス部門セミナー(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoriko Tominaga, Fumitaro Ishikawa, and 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 Yoriko Tominaga
2. 発表標題 Molecular beam epitaxial growth of dilute bismide III-V compound semiconductors at low temperatures
3. 学会等名 Online physics colloquium at Research Center for Physics Indonesia Institute of Sciences(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Shiojima, R. Matsuda, F. Horikiri, Y. Narita, N. Fukuhara and T. Mishima
2. 発表標題 Mapping of Contactless Photoelectrochemical Etched GaN Schottky Contacts Using Scanning Internal Photoemission Microscopy -- - Difference in Electrolytes ---
3. 学会等名 International conference on Solid State Devices and Materials 2021 (SSDM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Shiojima
2. 発表標題 Two-Dimensional Characterization of Wide-Bandgap Materials and Contact Interfaces by Using Scanning Internal Photoemission Microscopy
3. 学会等名 240th Electrochemical society (ECS) Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Uchida, Yuto Kawasumi, Hiroki Imabayashi, and Kenji Shiojima
2. 発表標題 Two-dimensional characterization on Schottky contacts on AlGa _N / GaN HEMTs by scanning internal photoemission microscopy
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Yasui, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Noboru Fukuhara, Tomoyoshi Misima, Hiroki Imabayashi, and Kenji Shiojima
2. 発表標題 Characterization of peripheries of n-GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塩島謙次、川角優斗、堀切文正、福原昇、三島友義、四戸孝
2. 発表標題 界面光顕微応答法によるSiC、GaN、a-Ga ₂ O ₃ ショットキー接触の均一性の評価
3. 学会等名 2021年第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 塩島 謙次
2. 発表標題 金属/GaNショットキー電極の評価 - 黎明期からの振り返り -
3. 学会等名 応用物理学会先進パワー半導体分科会第8回個別討論会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塩島謙次、田中 亮、高島信也、上野勝典、江戸雅晴
2. 発表標題 表面処理の異なるAu/Ni/n-GaNショットキー電極の界面顕微光応答法による評価
3. 学会等名 電子情報通信学会電子部品・電子デバイス（ED）研究会、ED2021-28
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安井 悠人、堀切 文正、成田 好伸、福原 昇、三島 友義、今林 弘毅、塩島 謙次
2. 発表標題 電圧印加界面顕微光応答法によるn-GaNショットキー接触の電界の二次元評価
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Robert W. Herrick and Osamu Ueda (eds.)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier Ltd.	5. 総ページ数 318
3. 書名 Reloability of Semiconductor Lasers and Optoelectronic Devices	

〔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)	
研究分担者	塩島 謙次 (Shiojima Kenji) (70432151)	福井大学・学術研究院工学系部門・教授 (13401)	
研究分担者	池永 訓昭 (Ikenaga Noriaki) (30512371)	金沢工業大学・工学部・教授 (33302)	

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