

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05044

研究課題名(和文) 近赤外光励起THz波送受信素子向け低温成長GaAs系混晶半導体の欠陥の評価と制御

研究課題名(英文) Evaluation and control of defects in LTG GaAs-related alloy semiconductors for photoconductive antenna of THz wave excited by near infra-red light

研究代表者

上田 修 (Ueda, Osamu)

明治大学・研究・知財戦略機構(生田)・客員教授

研究者番号：50418076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000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InGaAs, GaAsBi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、熱処理後、無添加InGaAsでは、As凝集体が薄膜/基板界面に形成されるが、Be添加InGaAsでは、As凝集体は薄膜中や転位線上にも形成されなかった。また、GaAsBiでは、熱処理後のBiの表面偏析およびBi-richな凝集体の形成を明らかにした。光吸収評価からGaAsBiは、電子物性があまり良好ではなく、新奇GaAsBi系材料の開発が必須と示唆された。界面顕微光応答法により、InGaAs、GaAsBiの電気的特性の2次元評価を実現できた。

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InGaAs, GaAsBi薄膜を高温での熱処理後に形成されるAs凝集体などの欠陥の形成と挙動および電気的・光学的特性への影響について初めて明らかにした。また、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GaAsBi系材料の創製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 MBE-grown (LTG) InGaAs and GaAsBi alloy semiconductors which are used for photo-conductivity antenna (PCA). First, we found that in undoped InGaAs As precipitates are generated at epi-sub interface after annealing. As for Be-doped InGaAs, As precipitates were found neither in the film nor in the dislocation line. Further, in undoped GaAsBi, surface segregation of Bi and formation of Bi-rich precipitates were found. From optical absorption experiment, GaAsBi does not have better electronic property than that of InGaAs, suggesting that development of novel GaAsBi-related materials are essential for fabricating excellent properties of the PCA devices. Finally, we have achieved 2D characterization of electrical properties of InGaAs and GaAsBi thin films.

研究分野：結晶工学

キーワード：テラヘルツ波 光伝導 アンテナ 混晶半導体 InGaAs GaAsBi 欠陥 透過電子顕微鏡

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) テラヘルツ (THz) 波発生検出用光伝導アンテナの原理とその社会実装への期待

THz-時間領域分光法 (TDS) は THz 帯の吸収ピークをみるだけで物質の決定や基礎物性の測定ができる点で、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候補技術として注目を集めている。この THz-TDS に用いられる代表的な THz 波送受信素子が光伝導アンテナ (PCA) で、そのギャップ部で光励起されたキャリアによる電流の時間変化 (発生側) と、入射 THz 波を駆動力として光励起キャリアが移動することで生じる光電流 (検出側) を利用したデバイスである。発生素子側の電流の時間変化や直流バイアス、検出側の暗電流抑制が鍵となるため、その材料には短キャリア寿命、高抵抗、高移動度が要求される。

(2) これまでの光伝導アンテナ開発研究と今後の課題

従来 THz-TDS システムには、 $0.8\ \mu\text{m}$ 帯に波長を有する Ti:sapphire レーザを光源とし、300 以下で成長した低温成長 GaAs を用いた PCA が用いられてきた。この光源を、より小型で低価格な $1.5\ \mu\text{m}$ 帯ファイバーレーザに置き換えられれば、THz-TDS システム全体の省スペース化・低コスト化を実現できる。従って、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯に禁制帯幅を有する PCA 用の半導体材料を見出すことが必須課題となる。そこで、これまで PCA 用の新しい半導体材料として禁制帯幅が $1.5\ \mu\text{m}$ 帯に位置する InGaAs や GaAsSb、GaInAs などの Narrow bandgap 半導体を PCA に適用するための研究が、大阪大、米・Michigan 大、英・Leeds 大等のグループらにより行われてきた。

2. 研究の目的

InGaAs, GaAsBi などの混晶半導体は、THz-TDS システムの省スペース化・低コスト化を実現できる THz-TDS 用 PCA の材料として大きな期待が寄せられている。しかし、PCA の高性能化のための高抵抗と短キャリア寿命を同時に得るための、最適デバイス設計がなされていない。そこで、本研究では、その中心的役割を担う、低温分子線エピタキシャル (MBE) 成長した上記混晶半導体中の微細構造・欠陥を評価し、それらの電気的・光学的特性を調べる。また、それらの PCA 特性への影響について明らかにする。さらに、PCA の高性能化のために最も有効な微細構造・欠陥を抽出し、それらの形成・制御手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 低温 MBE 成長 InGaAs 薄膜中の微細構造および欠陥の評価

まず、これまで PCA 開発研究がなされている低温 MBE 成長 InGaAs 薄膜について、種々の条件 (240 以下の成長温度) で作製された膜中の微細構造 (柱状層など) や欠陥について透過電子顕微鏡 (TEM) により系統的に調べる。また、 200 以下で成長した膜中の非晶質層を熱処理すると、固相成長することを見出しているため、これらの現象も結晶学的に解明していく。さらに、平行して、これらの薄膜中の一連の欠陥の光学的・電気的特性の評価も行う。

(2) 低温 MBE 成長 GaAsBi 薄膜中の微細構造および欠陥の評価

ここでは、(1) において得られた知見に基づいて、GaAsBi 薄膜中の微細構造および欠陥の評価を行うとともに、固相成長の実験も試みる。また、光学的・電気的特性の評価も進める。

(3) 微細構造および欠陥の PCA 特性に与える影響の評価と最適設計化

(1) および (2) の研究により得られた知見に基づいて、個々の微細構造や欠陥を選択的に形成・制御する手法を確立する。これらの手法により、特定の微細構造・欠陥のみを形成し、それらを含む膜の PCA 特性を評価・比較し、PCA の高性能化に向けた材料の最適設計化を図る。

4. 研究成果

(1) InGaAs および GaAsBi の低温 MBE 成長薄膜の微細構造および欠陥の評価

上田および富永は、InGaAs および GaAsBi の低温 MBE 成長薄膜の微細構造および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。

無添加 InGaAs 薄膜の微細構造および欠陥の評価

まず、無添加 InGaAs 低温 MBE 成長薄膜 (成長温度 240) を熱処理 (550 , 1h) した試料を TEM および走査 TEM (STEM) 観察を行った。図 1 は、無添加 InGaAs 薄膜の熱処理後の (110) 断面 STEM 像である。薄膜中に、直径 $7\text{-}15\ \text{nm}$ の As 凝集体 () が観察された。また、As 凝集体は InGaAs 薄膜/InP 基板界面近傍に局在しており、界面から遠ざかるにつれて、減少傾向にあることを明らかにした。As 凝集体が、InGaAs 薄膜/InP 基板界面近傍に優先的に形成される理由としては、i) InGaAs 薄膜/InP 基板界面に存在する弾性歪場により、上層部より界面への As 凝集体の形成に不可欠な点欠陥の拡散が促進されるため、ii) InP 基板領域が i) における点欠陥の拡散障壁として働くため、iii) 界面近傍では、As 凝集体の生成核と思われる何らかの残留不純物が高密度に存在するため、と考えられる。

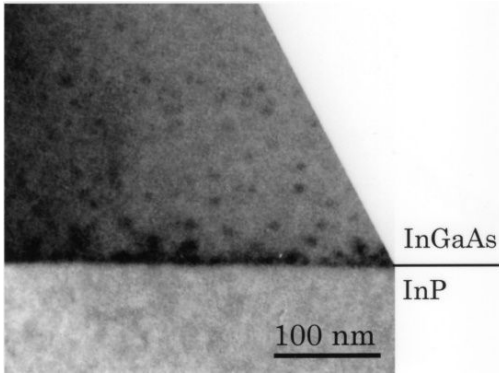


図 1 無添加 InGaAs 結晶の熱処理後の断面 STEM 像

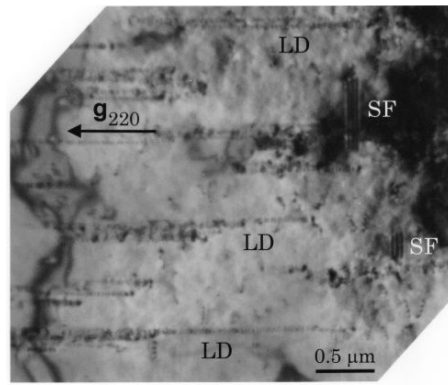


図 2 無添加 InGaAs 結晶の平面 TEM 像

無添加 InGaAs 薄膜中の表面欠陥の評価

で述べた無添加 InGaAs 薄膜の熱処理後の表面近傍の平面 TEM 像を図 2 に示す。[110]方向に沿って、線状欠陥 (図 2 中に LD で示す) が多数形成されている。また、{111}面上に形成された積層欠陥 (図 2 中に SF で示す) も形成されている。Weak-Beam 暗視野法を含めた詳細な解析により、これらの線状欠陥は、強い弾性歪場を伴った欠陥の集合体であることが判明した。また、STEM/EDX 分析により、線状欠陥の領域では、As 濃度が著しく低下していることを明らかにした。これらの結果から、線状欠陥の形成機構として以下のように考えられる: a) 高温での熱処理中に As 圧の印加不足により InGaAs 薄膜表面から As 原子が [110] 方向に沿って溝状に蒸発したために In-Ga からなる液滴が生じる、b) 液滴部分に InGaAs 薄膜の一部が溶け出す、c) In-, Ga-rich な混晶が再成長する、d) 再成長層周辺に、再成長層と元の InGaAs 層との間の格子不整合により、転位や強い弾性歪場が形成される。この現象は、表面に GaAs キャップ層を成長することにより抑制された。

Be を添加した InGaAs 薄膜の微細構造および欠陥の評価

Be を添加した格子整合 InGaAs 薄膜 (成長温度 250 °C) の熱処理 (550 °C, 1h) 後の (110) 断面 TEM 像を図 3 に示す。この結果から、InGaAs 薄膜中および InGaAs 薄膜/InP 基板界面には、転位および As 凝集体は形成されていないことを明らかにした。一方、GaAs パルク結晶中では、転位線上に As 凝集体が形成されることが知られている (、)。そこで、意図的に格子不整合とした InGaAs 薄膜 ($X_{In}=0.44$, 成長温度 200 °C) の熱処理 (550 °C, 1h) 後の断面 TEM 像を図 4 に示す。特に、転位線上への As 凝集体の形成は見られなかった。これらの結果から、Be を添加した InGaAs 薄膜中では、As 凝集体は薄膜中でも転位線上でも形成されないことを明らかにした。この理由としては、以下のようなことが考えられる。

- 1) As 凝集体の形成には As_{Ga} アンチサイト欠陥および Ga 空孔が必要となるが (、)、それらが、Be を添加した薄膜中には少ないこと
 - 2) $Be_{Ga}-As_{Ga}$ のような点欠陥の複合体が As 凝集体の形成を阻害すること
- しかし、STM による解析から、Be を添加した InGaAs 薄膜中では、 As_{Ga} 濃度が無添加 InGaAs 薄膜中より低く、また $Be_{Ga}-As_{Ga}$ 複合体は見出されていない ()。従って、上記理由の 1) において、 As_{Ga} 濃度が低いためと考えられる。

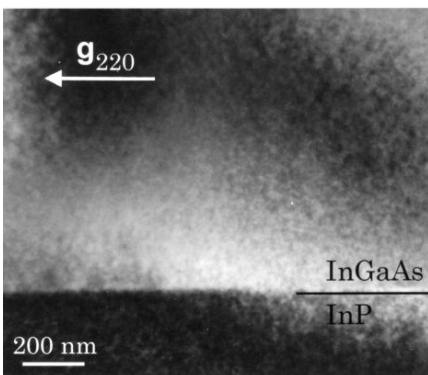


図 3 Be を添加した格子整合 InGaAs 薄膜の (110) 断面 TEM 像

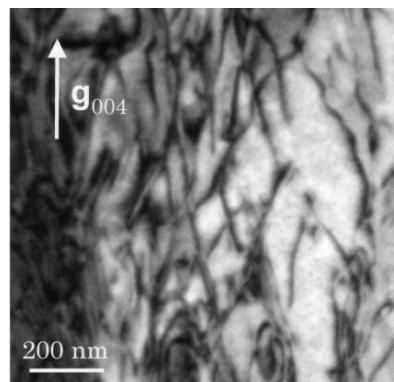


図 4 Be を添加した格子不整合 InGaAs 薄膜の (110) 断面 TEM 像

GaAsBi 薄膜の微細構造および欠陥評価

本研究では、新奇材料として GaAsBi を取り上げた。その成長と構造・物性評価を行った結果に関しては、(2)で述べる。ここでは、GaAsBi 薄膜の微細構造および欠陥の評価結果について述べる。低温 MBE 成長した GaAsBi 薄膜(成長温度 250 °C)の熱処理(600 °C、20 min)後の断面 STEM 像を図 5 に示す。最上層は、GaAs キャップ層である。界面付近には、5-7 nm 径の微小凝集体が、また、薄膜中には、比較的大きな凝集体が多数形成されている。後者の凝集体は、5-20 nm 径で、大きなものはいくつかの低指数面に囲まれている。また、後者の凝集体は、STEM/EDX 分析の結果、主として Bi が検出され、Bi-rich な結晶もしくは、Bi そのものの可能性が示唆された。

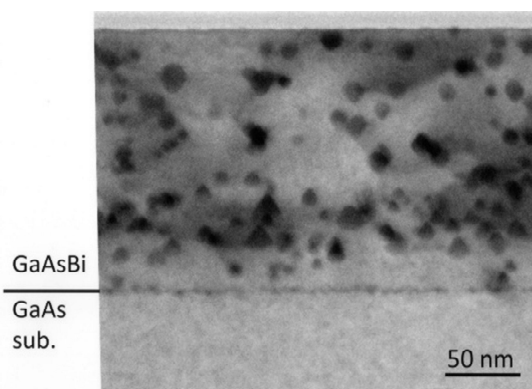


図 5 GaAsBi 薄膜の(110)断面 STEM 像

(2) InGaAs および GaAsBi の低温 MBE 成長および光学特性評価

分担者の富永は、上記欠陥評価に使用した InGaAs および GaAsBi の 250 °C 以下の低温 MBE 成長を研究期間中に進めた。InGaAs は InP(001)基板上に Be を添加したものとしていないもの、GaAsBi は GaAs(001)基板上に不純物を添加していないものをそれぞれ成長した。

基板温度を 200-250 °C とした場合には、単結晶 InGaAs 薄膜が成長することを X 線回折 (XRD) 測定ならびに TEM 観察結果から確認した。結晶欠陥の導入のため、In 組成は 44-57%の範囲とした。成長した試料はそれぞれ 400-600 °C の範囲で、水素雰囲気中で 1 時間熱処理した。Be を添加した InGaAs と無添加の InGaAs の熱処理後の As 凝集体の形成の詳細は、前述の通りである。

次に、基板温度を 180 °C とした場合には、InP(001)基板上にアモルファス InGaAs が堆積することを XRD 測定と TEM 観察結果から明らかにした。また、この試料を 400-600 °C の範囲で、水素雰囲気中で熱処理したところ、アモルファスが結晶化することも明らかになった。XRD 逆格子マッピングと熱処理時間を 30 分から 6 時間に变化させた試料の TEM 観察結果から、InGaAs の結晶化は InP 基板の面内方向の格子定数に一致して基板側から起きていること、つまり固相エピタキシャル (SPE) 成長が起きていることを初めて明らかにした。この SPE 層の内部には、双晶が多数形成されていることも確認でき、InGaAs を InP 基板上に堆積する直前の InP 基板の平坦性に起因していると現時点では推測している。更に、この InGaAs の SPE 成長を基に、イオン注入によって表面付近を一部アモルファスとした単結晶 InGaAs 上の InGaAs 層の熱処理による再結晶化も行った。InP 基板の結果と同様に、この場合も双晶が形成されていることを TEM 観察結果から確認した。結晶欠陥の一つである双晶は、InGaAs の場合、このようなアモルファスからの熱処理による結晶化によって形成できることが本研究によって示された。

基板温度を 180 °C と 250 °C として GaAsBi の成長と堆積も実現した。GaAsBi 薄膜内の Bi 原子の均一な取り込みを、MBE 成長条件の As 分子線量を制御することでこれらを達成した。基板温度 180 °C ではアモルファス GaAsBi が、250 °C では単結晶 GaAsBi がそれぞれ得られ、Bi 原子が均一に取り込まれていることを XRD 法とラザフォード後方散乱法 (RBS) により確認した。これらの試料に対し、600 °C で、水素雰囲気中で 1 時間熱処理を行ったところ、XRD と RBS から、熱処理によって Bi 原子の表面偏析が引き起こされることを確認した。分担者 (富永) や他のグループの過去の結果から、350-400 °C で成長した GaAsBi は約 800 °C まで熱的に安定であることが明らかにされている。低温成長 GaAsBi 中には Ga 空孔などの点欠陥が多数存在し、それを介した Bi 原子の拡散が熱処理により促進されると現時点では推測している。今後は、熱的安定性を保ったまま、As 凝集体の形成も両立する結晶性を有した GaAsBi の MBE 成長条件を見出すことが求められる。これはアモルファス GaAsBi の場合も同じで、上述の InP 基板上への InGaAs の SPE 成長に倣い、GaAs 基板上への GaAsBi の SPE 成長を試みたが、RBS 測定の結果から GaAsBi は SPE 成長せず、Bi 原子が試料表面に偏析することを確認した。現時点では、SPE 成長した GaAsBi を用いて PCA を製作することは困難と考えられる。

最後に、低温成長 InGaAs や低温成長 GaAsBi に取り込まれている結晶欠陥の種類を明らかにするため、それぞれの試料のバンド端の揺らぎを、光吸収測定を用いて行った。同じ In 組成の InGaAs の場合、200 °C で成長したものの方が、220 °C で成長したものよりもバンドギャップが小さい傾向が示された。このことから、200 °C で成長した InGaAs のバンド端に、ポテンシャル揺らぎもしくはバンドテイルが存在していることが推測される。一方、低温成長 GaAsBi の場合は、単結晶 GaAsBi であっても、多結晶 InGaAs よりもバンド端の揺らぎやポテンシャル揺らぎが大きいことが明らかになった。これは、まず(1)で述べたように、Bi 凝集体の形成によるものが考えられ、また、低温成長 GaAs のバンドギャップ内に形成される欠陥準位に関する理論計算結果と比較すると、低温成長 GaAsBi の場合は格子間に位置する As 原子が存在している可能性を示唆していることがわかった。今後の光伝導アンテナの製作に向けては、こうしたバンド端の影響や従来の低温成長 GaAs では見られなかった結晶欠陥 (特に点欠陥) を考慮する必要がある。

(3) 界面顕微光応答法による InGaAs 層の 2 次元評価

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光を集光して照射し、光電流を測定する。近年は可視光レーザを用いてワイドバンドギャップ半導体材料を評価してきた。本検討ではこの手法を(In)GaAs 層の評価に応用するため近赤外光を光源に用いて、その妥当性を実証する実験を行った。

GaAs 基板上に MOCVD 法を用いて GaAs、及び InGaAs 層を結晶成長し、その上に WSiN ショットキー電極、及び AuGe/Ni オーミック電極を形成した。図 6 はショットキー電極界面に光子エネルギーを連続的に変化させた単色光を照射したときの光電流である。光電流の平方根が光子エネルギーに比例することがわかり、その外挿値から電極界面の基本的な物理量であるショットキー障壁高さ、0.67 eV を決定できることが分かった。

つぎに、図 7(a) に示す金属顕微鏡像の中央部に位置する 260 μm 角の WSiN/InGaAs ショットキーダイオードに対して、波長 1.3 μm の近赤外レーザ光を用いて界面顕微光応答測定を行った。図 7(b) の光電流像で、均一な電流分布を電極面内で得ることができた。我々の通常の温度で MOCVD 成長した InGaAs 層、及び WSiN 電極形成プロセスは良好な均一性を示すことを実証した。この結果は本研究の主題である低温成長 InGaAs 層にも適応できる見通しを得た。

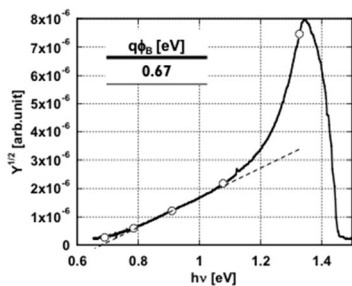


図 6, WSiN/InGaAs 電極の光電流スペクトル。

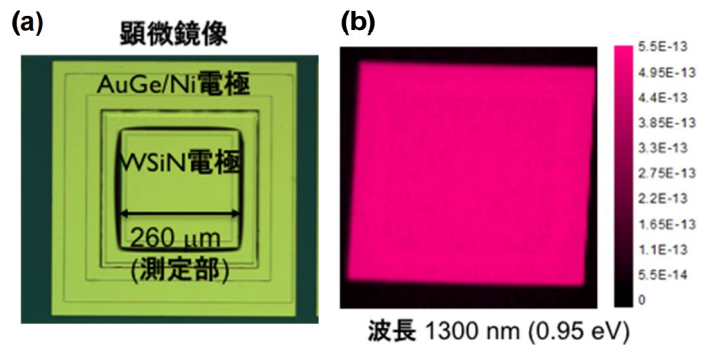


図 7, WSiN/InGaAs 電極の(a)金属顕微鏡像、及び(b)光電流像。

(4) まとめと今後の展開

本研究では、PCA の高性能化のための高抵抗と短キャリア寿命を同時に得るための、最適デバイス設計に向けて、その中心的役割を担う、低温 MBE 成長した上記混晶半導体中の微細構造・欠陥を評価し、それらの電気的・光学特性を調べた結果、以下の成果が得られた。まず、無添加低温 MBE 成長 InGaAs 薄膜では、熱処理後 As 凝集体が薄膜/基板界面近傍に局在して形成された。一方、PCA 用 Be 添加 InGaAs 薄膜では、熱処理後の薄膜中や薄膜/基板界面、さらには意図的に導入した転位線上にも形成されなかった。また、新奇材料である低温 MBE 成長 GaAsBi 薄膜では、XRD 法・RBS 法により、熱処理後に、Bi が何らかの表面偏析を起こしていること、TEM 観察により、Bi-rich な凝集体が形成されていることを明らかにした。さらに、光吸収評価により、現状の GaAsBi は、結晶品質の低い InGaAs よりも電子構造物性があまり良好ではなく、今後の PCA 開発に向けての課題となった。また、界面顕微光応答法を InGaAs、GaAsBi 薄膜を用いた PCA 用デバイス・構造の電気的特性の 2 次元評価法として確立できた。

本研究で得られた成果を踏まえて、今後は以下の項目について引き続き研究を進めて行く。

- ・ GaAsBi の特性向上に向けた、一層の点欠陥・界面制御と最適化
- ・ 新奇 GaAsBi 系薄膜の微細構造・欠陥の評価、物性評価、デバイスの最適設計化。
- ・ 界面顕微光応答法の GaAsBi 系混晶薄膜の 2 次元電気的評価への適用

< 引用文献 >

- M. Melloch, N. Otsuka, J. M. Woodall, A. C. Warren, and J. L. Freeouf, Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 1531.
- J. P. Ibbetson, J. S. Speck, A. C. Gossard, and U. K. Mishra, Appl. Phys. Lett. 62 (1993) 2209.
- A. G. Cullis, P. D. Augustus, and D. J. Stirland, J. Appl. Phys. 51 (1980) 2556.
- B. -T. Lee, R. Gronsky, and E. D. Bourret, J. Cryst. Growth 96 (1989) 333.
- D. E. Bliss, W. Walukiewicz, J. W. Ager III, E. E. Haller, and K. T. Chan, J. Appl. Phys. 71 (1992) 1699.
- D. E. Bliss, W. Walukiewicz, and E. E. Haller, J. Electron. Mat. 22 (1993) 1401.
- B. Grandidier, H. Chen, R. M. Feenstra, D. T. McInturff, P. W. Juodawlkis, and S. E. Ralph, Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 1439.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoriko Tominaga, Shingo Hirose, Kentaro Hirayama, Hitoshi Morioka, Noriaki, Ikenaga, and Osamu Ueda	4. 巻 544
2. 論文標題 Crystalline quality of low-temperature-grown InxGa1-xAs coherently grown on InP(001) substrate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 125703-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2020.125703	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 -
2. 論文標題 Mapping of Metal/Semiconductor and Semiconductor/Semiconductor Interfaces Using Scanning Internal Photoemission Microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (IC SJ)	6. 最初と最後の頁 169-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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, Kashiwagi Yukiyasu, Shigemune Tasuku, Koizumi Atsushi, Kojima Takanori, Saitoh Masashi, Hasegawa Takahiro, Chigane Masaya, Fujiwara Yasufumi	4. 巻 57
2. 論文標題 Effect of surface treatment of printed Ag Schottky contacts on n-GaN epitaxial layers using Ag nanoink: Two dimensional characterization by scanning internal photoemission microscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 07MA01-1 ~ -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/JJAP.57.07MA01	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shiojima Kenji, Hashizume Takanori, Sato Masaru, Takeyama Mayumi B.	4. 巻 58
2. 論文標題 Mapping of a Ni/SiN x /n-SiC structure using scanning internal photoemission microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBC02-1 ~ -6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/1347-4065/aafd99	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shiojima Kenji, Hashizume Takanori, Horikiri Fumimasa, Tanaka Takeshi, Mishma Tomoyoshi	4. 巻 255
2. 論文標題 Mapping of n-GaN Schottky Contacts With Wavy Surface Morphology Using Scanning Internal Photoemission Microscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1700480 ~ 1700480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201700480	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 Terano Akihisa, Imadate Hiroyoshi, Shiojima Kenji	4. 巻 70
2. 論文標題 Mapping etching induced damages on GaN surfaces using scanning internal photoemission microscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 92 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2016.10.027	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 Murase Shingo, Mishima Tomoyoshi, Nakamura Tohru, Shiojima Kenji	4. 巻 70
2. 論文標題 Mapping of ion-implanted n-SiC schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 86 ~ 91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2016.10.055	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 Oshima Takayoshi, Hashiguchi Akihiro, Moribayashi Tomoya, Koshi Kimiyoshi, Sasaki Kohei, Kuramata Akito, Ueda Osamu, Oishi Toshiyuki, Kasu Makoto	4. 巻 56
2. 論文標題 Electrical properties of Schottky barrier diodes fabricated on (001) -Ga ₂ O ₃ substrates with crystal defects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 086501 ~ 086501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.086501	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 上田修	4. 巻 44
2. 論文標題 -Ga203結晶中の欠陥のTEMによる評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 05-1 ~ 05-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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42件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 堀田行紘, 平山賢太郎, 富永依里子, 池永訓昭, 上田修
2. 発表標題 固相成長したInGaAsの結晶性評価
3. 学会等名 第11回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀田行紘, 富永依里子, 行宗詳規, 藤原亮, 石川史太郎
2. 発表標題 低温成長GaAs _{1-x} Bixの成長条件
3. 学会等名 第38回電子材料シンポジウム (EMS38th)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高垣佑斗, 堀田行紘, 富永依里子, 行宗詳規, 藤原亮, 石川史太郎
2. 発表標題 低温成長GaAs _{1-x} Bixの結晶性評価
3. 学会等名 第38回電子材料シンポジウム (EMS38th)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤野翔太郎, 堀田行紘, 高垣佑斗, 富永依里子
2. 発表標題 低温成長GaAs _{1-x} Bi _x のBiの偏析に対するラザフォード後方散乱法の適用
3. 学会等名 第38回電子材料シンポジウム (EMS38th)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林亮輔, 釣崎俊介, 富永依里子
2. 発表標題 局在準位の解明に向けた低温成長 In _x Ga _{1-x} Asの光学的評価
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会中国四国支部 若手半導体研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高垣佑斗, 堀田行紘, 富永依里子, 行宗詳規, 藤原亮, 石川史太郎
2. 発表標題 MBE成長条件が低温成長GaAs _{1-x} Bi _x のBi偏析に与える影響
3. 学会等名 2019年度 第4回半導体エレクトロニクス部門委員会 第1回講演会・見学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富永依里子, 堀田行紘, 高垣佑斗, 行宗詳規, 藤原亮, 石川史太郎
2. 発表標題 低温成長GaAs _{1-x} Bi _x の分子線エピタキシャル成長条件
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 横手竜希、堀田行紘、高垣佑斗、林亮輔、富永依里子、行宗詳規、藤原亮、石川史太郎
2. 発表標題 低温成長GaAs _{1-x} Bixの結晶学的・光学的両特性
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 Kenji Shiojima
2. 発表標題 Mapping of Metal/Semiconductor and Semiconductor/Semiconductor Interfaces Using Scanning Internal Photoemission Microscopy
3. 学会等名 2019 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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金属/半導体、半導体/半導体界面の2次元評価
3. 学会等名 電子情報通信学会電子部品・材料研究会 (CPM) (招待講演)
4. 発表年 2019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欠陥、劣化過程の2次元解析
3. 学会等名 応用物理学会結晶工学分科会第24回結晶工学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Osamu Ueda, Akito Kuramata, Hirotaka Yamaguchi, and Makoto Kasu
2. 発表標題 Current Status of Characterization of Defects in EFG-grown α -Ga ₂ O ₃ Single Crystals
3. 学会等名 18th Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP XVIII) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Osamu Ueda, Akito Kuramata, Hirotaka Yamaguchi, and Makoto Kasu
2. 発表標題 Structural evaluation of α -Ga ₂ O ₃ single crystals by TEM and related techniques
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Tokuda, Shun Itoh, Kazuya Tamura, Joji Ito, Takahide Yagi, Kenji Shiojima
2. 発表標題 Hole traps produced in MOVPE-grown n-GaN by hydrogen implantation
3. 学会等名 18th Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP XVIII)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoriko Tominaga
2. 発表標題 Growth Temperature Dependence of Crystallinity of Low-Temperature-Grown In _x Ga _{1-x} As Towards Fabrication of Photoconductivity Antennas on the Basis of Defect Engineering
3. 学会等名 Materials Research Society 2018 Spring Meeting (MRS 2018 Spring) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukihiro Horita, Kentaro Hirayama, Yoriko Tominaga, Hitoshi Morioka, Noriaki Ikenaga, and Osamu Ueda
2. 発表標題 Solid-phase epitaxial growth of In _x Ga _{1-x} As on InP substrate
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials 2018 (SSDM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Shiojima, Takanori Hashizume, Masaru Sato, and Mayumi B. Takeyama
2. 発表標題 Mapping of Ni/SiNx/n-SiC Structure Using Scanning Internal Photoemission Microscopy
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials 2018 (SSDM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Shiojima, Hitoshi Kambara, Tokiyashi Matsuda, and Takashi Shinohe
2. 発表標題 Mapping of interfacial reaction of a-Ga ₂ O ₃ Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy
3. 学会等名 4th E-MRS & MRS-J Bilateral Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Shiojima
2. 発表標題 Mapping of metal/semiconductor and semiconductor/semiconductor interfaces using scanning internal photoemission microscopy
3. 学会等名 4th E-MRS & MRS-J Bilateral Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Shiojima, Masataka Maeda, and Tomoyoshi Mishima
2. 発表標題 Scanning internal photoemission microscopy measurements of n-GaN Schottky contacts under applying voltage
3. 学会等名 IWN 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenji Shiojima, Tetsuya Suemitsu, Takuya Ozaki, and Seiji Samukawa
2. 発表標題 Mapping of neutral-beam etching induced damages on GaN surfaces using scanning internal photoemission microscopy
3. 学会等名 IWN 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富永依里子
2. 発表標題 テラヘルツ波発生検出用光伝導アンテナの開発に向けた低温成長GaAs系混晶半導体の結晶性評価
3. 学会等名 日本学術振興会 第161委員会 第105回研究会「2025年結晶産業の未来 ~光デバイス編~」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀田 行紘、平山 賢太郎、富永 依里子、森岡 仁、池永 訓昭、上田 修
2. 発表標題 InxGa1-xAsの固相エピタキシャル成長
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林 亮輔、釣崎 竣介、富永 依里子
2. 発表標題 局在準位の評価に向けた低温成長InxGa1-xAsの光学的・電氣的兩特性
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塩島 謙次、末光 哲也、尾崎 卓哉、寒川 誠二
2. 発表標題 中性粒子ビームエッチングによりGaN表面に導入された損傷の界面顕微光応答法による2次元評価
3. 学会等名 応用物理学会秋季學術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田 昌嵩、塩島 謙次、栗原 香
2. 発表標題 界面顕微光応答法によるファセット成長n-GaNショットキー接触の2次元評価
3. 学会等名 応用物理学会秋季學術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塩島 謙次、前田 昌嵩、三島 友義
2. 発表標題 n-GaNショットキー接触の電圧印加界面顕微光応答測定
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田 陵、堀切 文正、成田 好伸、吉田 丈洋、三島 友義、塩島謙次
2. 発表標題 界面顕微光応答法による電気化学エッチングしたNi/n-GaNショットキーの2次元評価
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎谷 聡士、佐々木 公平、倉又 朗人、小林 拓実、干川 圭吾、上田 修、嘉数 誠
2. 発表標題 シンクロトロンX線トポグラフィーによる垂直ブリッジマン成長 -Ga ₂ O ₃ 単結晶の欠陥の観察
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Osamu Ueda
2. 発表標題 Nano-Level Analytical and Evaluation Techniques Essential to the Development of ULSI and Nano-devices
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EMNANO-2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Osamu Ueda
2. 発表標題 Gradual Degradation in III V and GaN Related Optical Devices
3. 学会等名 17th Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP-17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoriko Tominaga, Shingo Hirose, Kentaro Hirayama, and Yutaka Kadoya
2. 発表標題 In content dependence on crystalline quality of low-temperature-grown In _x Ga _{1-x} As on InP substrate
3. 学会等名 Emerging Technologies 2017 (ETCMOS2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Tsurisaki, Y. Tominaga, M. Deura, and Y. Kadoya
2. 発表標題 Localized Levels of Low-Temperature-Grown In _x Ga _{1-x} As on InP Substrates
3. 学会等名 Materials Research Society 2017 Fall Meeting (MRS 2017 Fall) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 釣埜峻介、富永依里子、出浦桃子、角屋豊
2. 発表標題 ホール効果を用いた低温成長In _x Ga _{1-x} Asの局在準位の評価
3. 学会等名 第36回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平山賢太郎、富永依里子、角屋豊、森岡仁、池永訓昭、上田修
2. 発表標題 固相成長させたIn _x Ga _{1-x} As内の欠陥の評価
3. 学会等名 第36回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富永依里子、廣瀬伸悟、角屋豊、森岡仁、池永訓昭、上田修
2. 発表標題 InP基板上低温成長InxGa1-xAsの結晶性
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富永依里子、角屋豊
2. 発表標題 InP基板上低温成長InxGa1-xAsの結晶性評価
3. 学会等名 第9回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Shiojima, N. Ichikawa, and M. Kato
2. 発表標題 Development of dual-focus scanning internal photoemission microscopy for mapping of both top and rear surfaces of 3C-SiC layers
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2017 (CSW2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Shiojima, T. Hashizume, F. Horikiri, T. Tanaka, and T. Mishima
2. 発表標題 Mapping of n-GaN Schottky contacts with wavy surface morphology using scanning internal photoemission microscopy
3. 学会等名 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Shiojima, S. Murase, Y. Watamura, T. Suemitsu
2. 発表標題 In-Situ Mappinh of Dehradation of AlGa _N /Ga _N MIS-HEMTs Using Video-Mode Scanning Internal Photoemission Microscopy
3. 学会等名 International conference on Solid State Devices and Materials 2017 (SSDM2017) (国際学会)
4. 発表年 2017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金属/半導体、半導体/半導体界面の2次元評価
3. 学会等名 応用物理学会結晶工学分科会第147回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前田昌高、三島友義、塩島謙次
2. 発表標題 n-GaNショットキー接触の電圧印加界面顕微光応答測定
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 二川清、上田修、山本秀和	4. 発行年 2019年
2. 出版社 株式会社日科技連出版社	5. 総ページ数 218
3. 書名 半導体デバイスの不良・故障解析技術	

1. 著者名 J. Murota, C. Claeys, H. Iwai, M. Tao, S. Deleonibus, A. Mai, K. Shiojima	4. 発行年 2019年
2. 出版社 The Electrochemical Society	5. 総ページ数 233
3. 書名 Semiconductor Process Integration 11	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>福井大学大学院工学研究科 電気・電子工学専攻電子物性講座半導体表面界面（塩島）研究室のホームページ http://fuee.u-fukui.ac.jp/~shiojima/integrated.html 広島大学先端物質科学研究科量子物質科学専攻量子光学物性研究室（富永）のホームページ http://home.hiroshima-u.ac.jp/hikari/</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
研究分担者	富永 依里子 (Tominaga Yoriko) (40634936)	広島大学・先端物質科学研究科・講師 (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)	
連携研究者	池永 訓昭 (Ikenaga Noriaki) (30512371)	金沢工業大学・工学部・准教授 (33302)	