

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01829

研究課題名（和文）低温成長による点欠陥密度の制御に基づくBi系 - 族半導体の発現機能の最大活用

研究課題名（英文）Effective use of characteristics of Bi-based III-V compound semiconductors by controlling point defects density inside their crystals grown at low temperatures

研究代表者

富永 依里子 (Tominaga, Yoriko)

広島大学・先進理工系科学研究科（先）・准教授

研究者番号：40634936

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究期間において、希釈Bi系III-V族半導体のMBE法を用いた低温成長条件最適化を進め、その成長モデルを検討し、低温成長であっても、単結晶エピタキシャル薄膜が得られる成長条件が存在することを明らかにした。多様な結晶性評価手法により、アンチサイト型・空孔型両点欠陥の当該半導体結晶内における存在が示唆された。これらの結果は、光通信帯光源が利用可能なテラヘルツ波発生検出用光伝導アンテナの開発につながるものである。他方、動作特性が温度に依存しない光通信用新規半導体レーザーの開発に向け、InAsBi量子ドットの作製方法の確立を進め、新たな積層InAsBi量子ドットの作製方法を見出すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2030年に実用開始が目標に設定されている第6世代移動通信システム（6G）においては、従来よりも低消費電力や低コストを実現しながら、光通信全体の更なる大容量化やサブテラヘルツ帯以上の高周波帯域に対応した様々なデバイスが求められる。本研究が対象としているBi系III-V族半導体はこうした光通信・無線通信で求められる光学・テラヘルツ両デバイスに応用できる可能性を秘めており、本研究成果はデバイス開発に向けた結晶を得る指針を見出したものと位置付けることができる。

研究成果の概要（英文）：Molecular beam epitaxial growth conditions have been optimized for low-temperature growth (LTG) of diluted Bi III-V compound semiconductors and their growth models were investigated. Various crystallinity evaluation methods have suggested the existence of both antisite and vacancy type point defects in the crystals of LTG diluted Bi III-V compound semiconductors. These results will lead to the development of photoconductive antennas for terahertz-wave emission and detection, which can be excited by a light source in the optical communication band. On the other hand, for the development of a new semiconductor laser for optical communication whose operating characteristics are independent on temperature, we have established a new fabrication method of stacked InAsBi quantum dots.

研究分野：結晶工学、応用物性、電子・電気材料工学

キーワード：Bi系III-V族半導体半金属混晶 分子線エピタキシー法 低温成長 結晶欠陥 陽電子消滅法

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

Bi 原子は原子半径が他の元素に比べて大きいことから、GaAs や InAs のような旧来の半導体結晶に取り込むと結晶の構成元素の周期配列を歪ませる。このため Bi 原子を数パーセント取り込んだだけで、GaAsBi や InAsBi のような希釈 Bi 系 III-V 族半導体は禁制帯幅が急激に小さくなる、価電子帯上端が高エネルギーシフトする、禁制帯幅の温度依存性が低減するという3つの特異な物性を発現する。また、Bi 原子の大きなスピン軌道相互作用によって Bi 系 III-V 族半導体の価電子帯頂上とスプリットオフバンド間のエネルギーが大きくなることも知られている。これらの基礎特性から当該半導体は、光通信用半導体レーザ、近赤外・中赤外光検出器、高効率太陽電池、スピントロニクスデバイス等の半導体デバイスへの新規応用が提案され、国内外で盛んに研究が進められている。しかし、Bi 原子は  $400^{\circ}\text{C}$  以下の成長温度でなければ GaAs 等の母体結晶に取り込まれないこと、ならびに成長温度を下げるほど Bi 組成 (例:  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$  の  $x$ ) が増加して禁制帯が母体結晶のものよりも小さくなることが実験的に明らかになっている。GaAs 系 III-V 族半導体の一般的な成長温度が  $600^{\circ}\text{C}$  付近であることを考えると、Bi 系 III-V 族半導体は元来低温成長が必要であると言える。これは即ち、当該半導体は結晶欠陥、特に空孔型やアンチサイト型の点欠陥が結晶内に形成されやすい材料であることを意味する。

このような半導体材料であるが、申請代表者(富永)は  $2010$  年に、 $350^{\circ}\text{C}$  で成長した GaAsBi の光励起法によるレーザ動作と発振波長の温度依存性の低減を世界で初めて実証した( )。この成果を皮切りに、 $2010$  年以降、Bi 系 III-V 族半導体の研究者人口は飛躍的に増加したが、世界的に見て当該半導体の点欠陥密度や種類、その形成機構等について実験的に明らかにした報告例はまだない。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、 $400^{\circ}\text{C}$  以下で分子線エピタキシー(MBE)法を用いて成長した GaAsBi と InAsBi の結晶内の点欠陥密度や種類に焦点を当て、低温成長と Bi 原子の存在は、Bi 系 III-V 族半導体の点欠陥形成にどのように影響しているのかを解明することを最終目的として以下の方法をもとに実験を遂行した。中でも特に、GaAs 基板上的低温成長 GaAsBi や InGaAsBi 薄膜および InAsBi 量子ドットの成長、低温成長 GaAsBi 薄膜内の点欠陥に関する測定と解析を行い、成長条件と欠陥密度や基礎特性の相関を得ることを目的とした。また、これらの成長条件や基礎特性が光通信用半導体レーザやテラヘルツ (THz) 波発生検出用素子の動作特性にどのような影響を与えるか、見通しを得ることも目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究期間中、MBE 法を用いて GaAsBi、InGaAsBi、InAsBi 量子ドット各種試料の成長を行った。基板は GaAs(001) とした。成長温度は  $250$  以下の低温成長とし、高品質結晶が求められる光通信用半導体レーザ用アプリケーションのためにはこの成長温度範囲内なるべく高温を、THz 波発生検出素子用には結晶内に適度に点欠陥が存在していることが必要であるため、この成長温度範囲内なるべく低温を適用して試料を MBE 成長した。成長後は  $350$ - $600$  の範囲で、水素雰囲気中で  $20$  分- $1$  時間熱処理を行った。成長後や熱処理後の特性評価には X 線回折 (XRD) 法、透過型電子顕微鏡 (TEM)、走査型電子顕微鏡 (SEM)、ラザフォード後方散乱法 (RBS)、光吸収測定法、電流電圧特性、電子スピン共鳴 (ESR) 法、陽電子消滅法を用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) 低温成長 GaAsBi および低温成長 InGaAsBi の MBE 成長

本研究対象とこれまでに述べた希釈 Bi 系 III-V 族化合物の中でも、 $250$  以下という低温成長領域での MBE 成長条件探索は世界的に珍しく、本研究ではまず Bi 原子が GaAsBi や InGaAsBi

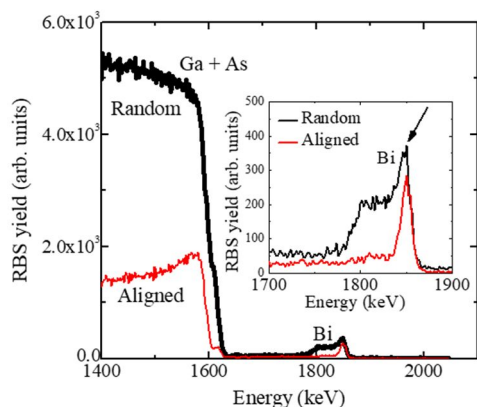


図1  $P_{\text{As}}/P_{\text{Ga}}$  を 2.1 とした時の試料の RBS スペクトル( )。挿入図は Bi 信号の拡大図。

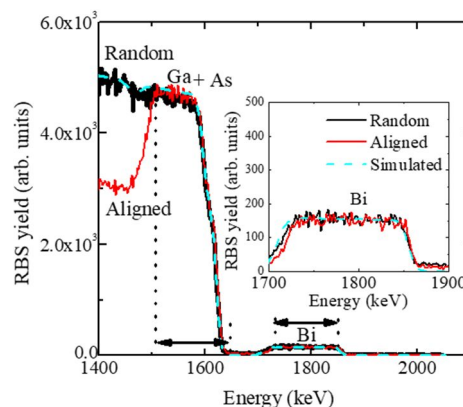


図2  $P_{\text{As}}/P_{\text{Ga}}$  を 10 とした時の試料の RBS スペクトル( )。挿入図は Bi 信号の拡大図。

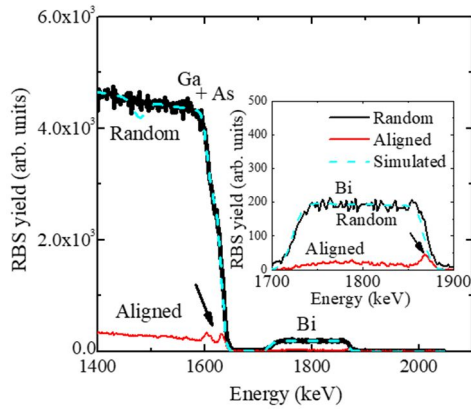


図3  $P_{As}/P_{Ga}$  を 10 とし、基板温度を 250 とした時の試料の RBS スペクトル ( ) . 挿入図は Bi 信号の拡大図.

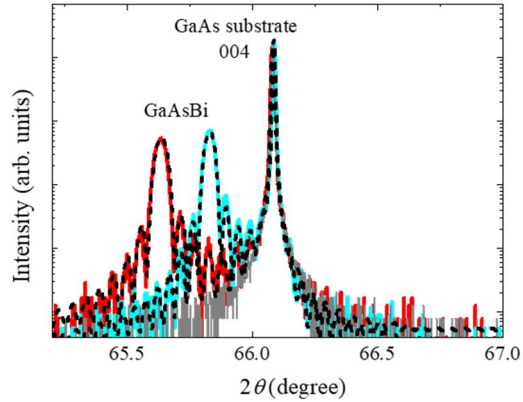


図4  $P_{As}/P_{Ga}$  を 10 とし、基板温度を 180 と 250 とした時の試料の XRD カーブ ( ) .

の結晶内に成長方向に均一に取り込まれるよう成長条件を最適化した。まず、MBE 成長時のビーム等価圧力(BEP)比に着目し、Ga と As の BEP をそれぞれ  $P_{Ga}$ ,  $P_{As}$  とおくと、 $P_{As}/P_{Ga}$  を 1.4-10 の範囲で変化させて 250 と 180 で GaAsBi の成長を試みた。図 1 に示すように、 $P_{As}/P_{Ga}$  を 1.4 や 2.1 と設定し、基板温度を 180 とした際には Bi の RBS 信号が台形状にはならず、横軸の高エネルギー側、すなわち試料の表面側に Bi 信号の急峻なピーク (図 1 挿入図矢印) がみられており、これは試料表面に向かって Bi 原子が偏析していることを示している。一方、基板温度は 180 のままで  $P_{As}/P_{Ga}$  を 10 と設定した場合には、図 2 に示すように Bi 信号が台形状になり、シミュレーションフィッティングによる曲線とよく一致している。フィッティングパラメータとして得られた Bi 組成や GaAsBi 層の膜厚は設計値と概ね一致していた。しかし、測定時に He イオンを結晶軸に沿って入射した場合 (Aligned) と結晶面に対してランダムに入射した場合 (Random) の Bi や Ga+As の RBS 信号に違いがないことから、この GaAsBi はアモルファスであることが見てとれる。このため、基板温度を 250 にして  $P_{As}/P_{Ga}$  を 10 と設定して試料を成長したところ、図 3 に示すように Aligned と Random の各測定で各元素の RBS 信号に明瞭な差が生じ、Aligned 測定の場合には各元素の RBS 信号の高エネルギー側に Surface peak と呼ばれるピーク (図 3 内矢印) も確認でき、この GaAsBi は単結晶であり、その結晶性の高さを反映した結果となった。これらの試料の XRD カーブを図 4 に示す。図 1-3 で示した RBS スペクトルの結果を裏付けるもので、アモルファス GaAsBi では回折ピークは確認できず、単結晶 GaAsBi 由来の回折ピークならびに GaAs 基板の回折カーブと GaAsBi 由来のもの間に明瞭な干渉フリンジも確認できる。250 という低温成長であっても、RBS や XRD といった結晶学的特性測定法で明らかにできる結晶性という点では、高い結晶性の GaAsBi が得られることが明らかになった ( )。更に、以上で見出した成長温度 250 と  $P_{As}/P_{Ga}=10$  を固定して Bi の BEP のみを変化させると、低温成長 GaAsBi の Bi 組成を変化させられることも確認した。こうして得た試料の光吸収測定を行い、光吸収端を算出した結果、その Bi 組成依存性は、これまでに多数報告されている 350-400 の範囲で MBE 成長された他のグループの高品質な GaAsBi のものとほぼ同じとなった。このことから、RBS と XRD 法による結晶性評価通り、Bi 原子は概ね結晶格子の V 族サイトに取り込まれており、低温成長 GaAsBi の禁制帯幅の減少に寄与していると考えられる。

そのため続いて、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 ( ) を代表者の下で 250 以下の低温成長領域に適用することを試みた。前述の 250 での GaAsBi の MBE 成長時の BEP 比や、成長後の GaAsBi の XRD 測定や RBS による Bi 組成の算出値を基に文献 ( ) で提案されているモデル式に代表者のグループ独自のパラメーターを導入すると、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ことが判明した ( )。この理論計算から得られる BEP 比と低温成長 GaAsBi 結晶内の Bi 組成の相関を示した曲線に XRD と RBS から測定した Bi 組成を重ねて同一図面にプロットすると、Bi 組成の理論計算結果と RBS による測定結果はよく一致したが、XRD 測定結果から算出した Bi 組成はそれらより大きな値となった ( )。また、結晶内の Bi 組成が増えるにつれ、その差異が小さくなった。これらは、GaAsBi 内の Bi 組成を直接測定していることになる RBS に対し、GaAs 基板と GaAsBi エピタキシャル層の結晶格子定数の差異から Bi 組成を算出している XRD という違いから生じたと考えられ、低温成長 GaAs の場合を考えると、低温成長 GaAsBi にも V 族元素のアンチサイト型欠陥が結晶内に取り込まれていることを示唆している。また、Bi 組成が増加すると、そのアンチサイト型欠陥密度は減少することも示唆している。こうした点欠陥に関する測定については (2) で後述する。

上記の通り得たラングミュアの吸着等温式に基づく低温成長 GaAsBi の成長モデル ( ) を更に低温成長 InGaAsBi に拡張し、III 族元素の In と Ga、V 族元素の As と Bi のトータルで BEP 比を設定したところ、本研究期間内に 250 で InGaAsBi 層も MBE 成長できるようになった。成長前には Matthews & Blakeslee および People & Bean の臨界膜厚の式を用いて GaAs(001) 基板上



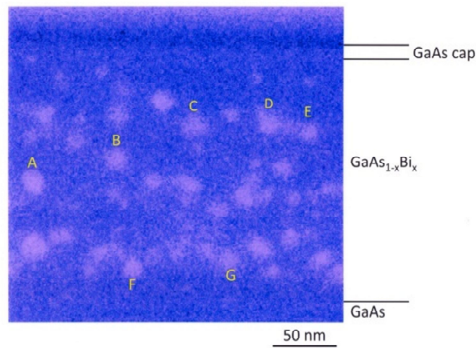


図5 600 で20分熱処理した単結晶GaAsBiの断面TEM観察時のEDSマッピング。Bi原子のM線を利用( )。

とInP(001)基板上的InGaAsBi層の臨界膜厚を算出し、どちらに成長する方がより厚い膜厚で結晶性を制御しやすいか等を検討した。本研究で開発を意図しているデバイスの一つである光通信帯光源が利用可能なTHz波発生検出用光伝導アンテナ(PCA)の製作に向けて、InとBiの組成は固定されるため、本研究の場合にはGaAsとInP基板どちらを用いても臨界膜厚の制約には大きな差がないことが判明し、今回は、より単価の安いGaAs基板を選択した。その結果、代表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進めている。低温成長GaAsに倣い、1ps未満のキャリア寿命を得るためのMBE成長条件の指針を現時点で得ており、今後、キャリア寿命とMBE成長条件のフィードバックを行うことで成長条件最適化を進める予定である。

定である。

## (2) 低温成長GaAsBi結晶内の点欠陥の解析

(1)で述べた通り、MBE成長条件を最適化する中でアンチサイト型点欠陥の取り込みが示唆されたため、続いてそれらの測定や密度の算出を試みた。まず、成長後の試料を600で熱処理したところ、断面TEM観察においてAsやBiの金属凝集体が確認できた( )。TEM装置付属のエネルギー分散型X線分光法(EDS)を用いて金属凝集体の元素分析を行った結果の一例を図5に示す。直径10nm前後のBi凝集体がGaAsBi層全体にわたって形成されていることが確認できる。As凝集体は本研究期間においては、GaAs基板とGaAsBi層の界面に形成される傾向があることがわかった( )。この結果は、低温成長GaAsを熱処理した際のAs凝集体の形成と類似しており、(1)で述べたV族元素のアンチサイト型欠陥が熱処理前の低温成長GaAsBi結晶内に存在していることを裏付けている。こうしたAs、Bi凝集体は、結晶内の空孔型点欠陥を介してV族元素がアンチサイトから熱処理によって拡散し、試料の温度が室温に戻る際に凝集すると推測できるため、低温成長GaAsBi結晶内には空孔型点欠陥も存在していると推測される。そこでアンチサイト型点欠陥に対してはESR法を、空孔型点欠陥に対しては研究分担者の協力の下、陽電子消滅法を適用し、それぞれ測定を実施した。原著論文発表前のため詳細な記述は控えるが、GaAs基板との比較等により、アンチサイト型点欠陥の密度をオーダーレベルではあるが見積もることができたり、低温成長であるにもかかわらず、陽電子が急激に消滅するような多量の空孔型点欠陥を含んだ結晶ではないように見える結果が得られたりした。点欠陥の種類の確定や密度の算出には多くの知見と試料数を必要とするため、この件に関しては本研究期間終了後も変わらず測定と解析を継続する。また、アンチサイト型点欠陥に関しても、新たな研究協力者の下、低温成長GaAsBiにおけるホッピング伝導の解析へと研究が発展した( )。

## (3) GaAs(001)基板上InAsBi量子ドットの成長

動作特性が温度に依存しない光通信用新規半導体レーザーの開発に向けて、本研究期間内にはInAsBi量子ドットのMBE成長も進めた。希釈Bi系III-V族半導体量子ドットの成長法の確立は世界的にまだ達成されていない。原著論文発表前のため割愛するが、本研究期間において、MBE法以外に、新たな積層InAsBi量子ドットの作製方法を見出すことができた。断面TEM観察とTEM装置付属のEDSによる解析を用いた元素分析結果から、本研究開始前には困難であった量子ドット内にBi原子を留めることが可能であることを確認した。

## (4) まとめ・今後の展望

本研究期間において、希釈Bi系III-V族半導体のMBE法を用いた低温成長条件最適化を進め、その成長モデルを検討し、低温成長であっても、単結晶エピタキシャル薄膜が得られる成長条件が存在することを明らかにした。更に多様な結晶性評価法を用いて研究を進めると、アンチサイト型・空孔型両点欠陥の結晶内における存在が示唆され、点欠陥の種類や密度は第一段階としては大まかに見積もることができた。しかしそのクロスチェックや再現性には試料数を増やすなど本研究期間後も時間を要する状況にある。また、世界的に未確立のInAsBi量子ドットの新しい成長法を見出すに至った。本研究期間内に得られたInAsBi量子ドットからのホトルミネセンスは測定することができなかつたため、今後は発光が確認できるような高品質なInAsBi量子ドットの成長が必要である。本研究期間内に得た成果は、光通信帯光源が利用可能なTHz波発生検出用PCAへの応用や光通信用新規半導体レーザーの開発につながるものであり、今後はこうした光学・THzデバイスの製作に早急に着手する計画である。

<引用文献>

- Y. Tominaga, K. Oe, and M. Yoshimoto, APEX 3, 062201 (2010).
- Y. Tominaga, Y. Horita, Y. Takagaki, F. Nishiyama, M. Yukimune and F. Ishikawa, Appl. Phys. Express, 15, 045504 (2022).
- X. Lu, D. A. Beaton, R. B. Lewis, T. Tiedje, and M. B. Whitwick, Appl. Phys. Lett., 92, 192110 (2008).
- 梅西 達哉、高垣 佑斗、富永 依里子、行宗 詳規、石川 史太郎、「ランゲミュアの吸着等温式に基づく低温成長  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$  の成長条件」、12p-N406-6、第 82 回応用物理学会秋季学術講演会、2021 年 9 月、オンライン開催。
- O. Ueda, N. Ikenaga, Y. Horita, Y. Takagi, F. Nishiyama, M. Yukimune, F. Ishikawa, and Y. Tominaga, J. Cryst. Growth 601, 126945 (2023).
- 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、「低温成長  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Bi}_x$  のホッピング伝導機構の解析」、21a-A105-5、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会、2022 年 9 月、東北大学川内キャンパス・オンライン。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ueda Osamu, Ikenaga Noriaki, Horita Yukihiro, Takagaki Yuto, Nishiyama Fumitaka, Yukimune Mitsuki, Ishikawa Fumitaro, Tominaga Yoriko	4. 巻 601
2. 論文標題 Structural evaluation of GaAs <sub>1-x</sub> Bix obtained by solid-phase epitaxial growth of amorphous GaAs <sub>1-x</sub> Bix thin films deposited on (0 0 1) 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 ~ 126945
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 Yoriko Tominaga, Yukihiro Horita, Yuto Takagaki, Fumitaka Nishiyama, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Crystalline quality of GaAs <sub>1-x</sub> Bix grown below 250 °C using molecular beam epitaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 045504 ~ 045504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac5ba5	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 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 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 5件/うち国際学会 6件）

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 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 <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 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 <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 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 Hiroyuki Imabayashi, Minato Umeda, Kenji Shiojima, Tatsuya Umenishi, Yoriko Tominaga, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa, and 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) (国際学会)
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 <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 薄膜の構造評価(1) 熱処理した低温成長GaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 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基板上的GaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 薄膜の構造評価(2) 固相成長したGaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> 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 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 富永依里子
2. 発表標題 化合物半導体結晶はいかに紡ぎ出されるのか - 超高真空中と細菌からと - そしてその応用展開
3. 学会等名 日本学術会議結晶学分科会、同IUCr分科会主催 公開WEBシンポジウム『基礎科学が導くSDGs達成への道 ~結晶&生命&技術革新~』(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川史太郎
2. 発表標題 MBE研究で続けてきたこと
3. 学会等名 第4回電子材料若手交流会(ISYSE) 研究会(招待講演)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 K. Minehisa, H. Hashimoto, K. Nakama, T. Tanigawa, K. Sakaguchi, M. Yukimune, and F. Ishikawa
2. 発表標題 2 inch Wafer Scale GaAs Nanowires Synthesis by Self-Catalyzed Molecular Beam Epitaxy
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 峰久恵輔, 橋本英季, 中間海音, 谷川武瑠, 行宗詳規, 石川史太郎
2. 発表標題 無加工2インチSi基板上GaInNAsナノワイヤの分子線エピタキシャル成長
3. 学会等名 第14回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 峰久 恵輔, 橋本 英季, 中間 海音, 谷川 武瑠, 行宗 詳規, 石川 史太郎
2. 発表標題 MBE法を用いた無加工2インチ Si 基板上 GaInNAs ナノワイヤ成長
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, 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 梅西達哉、高垣佑斗、富永依里子、行宗詳規、石川史太郎
2. 発表標題 ラングミュアの吸着等温式に基づく低温成長GaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> の成長条件
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 <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> /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 齋藤聖哉、梅西達哉、富永依里子
2. 発表標題 Bandgap energy dependence on Bi content in low-temperature-grown GaAs <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub>
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム (40th Electronic Materials Symposium, EMS-40)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田南斗、梅西達哉、高垣佑斗、富永依里子
2. 発表標題 Analysis of conductivity to detect antisite defects in low-temperature-grown GaAs <sub>1-x</sub> Bix
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム (40th Electronic Materials Symposium, EMS-40)
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 梅西達哉、高垣佑斗、富永依里子
2. 発表標題 ラングミュアの吸着等温式に基づくMBE低温成長条件の設定 - GaAs <sub>1-x</sub> Bix から InyGa <sub>1-y</sub> As <sub>1-x</sub> Bixへ -
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

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の開発に向けたInAs <sub>1-x</sub> 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

1. 発表者名	Yuto Torigoe, Kohei Yoshikawa, Masahiro Okujima, Syota Mori, Mitsuki Yukimune, Robert D. Richards, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題	Molecular Beam Epitaxial Growth of GaAs/GaNAsBi/GaAs Core-Multishell Nanowires
3. 学会等名	21st International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Masahiro Okujima, Kohei Yoshikawa, Yuto Torigoe, Syota Mori, Mitsuki Yukimune, Robert D. Richards, Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題	Molecular Beam Epitaxial Growth of GaNAsBi Nanowires emitting 1300nm
3. 学会等名	15th International Conference on Mid-Infrared Optoelectronic Materials and Devices (MIOMD) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yuto Torigoe, Kohei Yoshikawa, Masahiro Okujima, Syota Mori, Mitsuki Yukimune, and Fumitaro Ishikawa
2. 発表標題	GaAs related core-multishell nanowires having GaNAsBi well grown by molecular beam epitaxy
3. 学会等名	第40回電子材料シンポジウム (40th Electronic Materials Symposium, EMS-40)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	奥嶋正浩, 吉川晃平, 森翔太, 行宗詳規, 石川史太郎
2. 発表標題	分子線エピタキシー法によるGaAs/GaNAsBi/GaAs コア-マルチシェルナノワイヤの成長
3. 学会等名	日本金属学会 2021年秋季講演大会
4. 発表年	2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

広島大学 研究者総覧：富永依里子  
<https://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/profile/ja.9797704fc927298d520e17560c007669.html>  
Yoriko Tominaga personal website  
<https://sites.google.com/view/yorikotominaga-crystalg/home>  
【研究成果プレスリリース】新しい化合物半導体の低温生成領域を開拓  
<https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/70017>

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	石川 史太郎  (Ishikawa Fumitaro)  (60456994)	北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授   (10101)	
研究分担者	上殿 明良  (Uedono Akira)  (20213374)	筑波大学・数理物質系・教授   (12102)	

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