

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04243

研究課題名（和文）InP基板上 - 族半導体によるサブバンド間遷移光デバイスの新展開

研究課題名（英文）Novel development of inter-subband transition optical devices using II-VI compound semiconductors on InP substrates

研究代表者

野村 一郎 (NOMURA, ICHIROU)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：00266074

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ZnCdSe/BeZnTe超格子及びMgSe/ZnCdSe超格子におけるサブバンド間遷移波長について調べた。理論計算によりどちらも光通信波長の1.5μm帯に制御できることが示された。また、ZnCdSe/BeZnTe超格子をコア層、MgZnCdSeをクラッド層とした導波路について光導波解析を行った結果、十分な光閉じ込めが得られデバイスへの応用が可能であることが示された。一方、ZnCdSe/MgZnCdSeヘテロ接合における電圧電流特性について調べ、低抵抗の優れたキャリア注入の手法を見出した。更に、MgSe/ZnCdSe共鳴トンネルダイオードの作製に初めて成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ZnCdSe/BeZnTe超格子やMgSe/ZnCdSe超格子は可視光だけでなく光通信波長帯への応用の可能性も見出され、当該超格子材料の新たな特長が示された。また、ヘテロ接合でのキャリア注入特性が明らかになり、低抵抗化に向けた手法が提案される等、ヘテロ接合での電気特性解析に重要な進展が得られた。これらは学術的に意義のある成果であると言える。

研究成果の概要（英文）：Inter-subband transition (ISBT) wavelength in ZnCdSe/BeZnTe and MgSe/ZnCdSe superlattices (SLs) was investigated. From theoretical calculations, it was shown that the ISBT wavelength can be controlled in the optical fiber communication wavelength, i.e., 1.5 μm range. In addition, optical waveguide structures consisting of a ZnCdSe/BeZnTe SL core and MgZnCdSe cladding layers were analyzed. As a result, it was shown that optical confinement factors sufficient for device applications were obtained. On the other hand, an ideal carrier injection method with low resistivity in devices was found by investigating electrical characteristics of the ZnCdSe/MgZnCdSe hetero-junction. Furthermore, fabrication of novel MgSe/ZnCdSe resonant tunnel diodes succeeded.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：サブバンド間遷移 - 族半導体 InP基板 超格子 光通信波長帯 伝導帯バンド不連続 ヘテロ障壁 共鳴トンネルダイオード

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

- 族半導体は、紫外から可視、赤外と幅広い波長域に対応する光デバイス材料として注目されている。実際、1990年代には青色半導体レーザに向け国内外で盛んに研究開発が行われ、室温での連続動作など、実用化の一手前まで到達した。ところがその後、十分な素子寿命が得られず、実用化には至らなかった。しかし、- 族半導体には未だ明かされていない新物性や可能性が多く残されており、それらの探索は学術的に、また産業応用においても重要な課題である。その中で我々は、1994年から、従来- 族半導体の作製に使用されていたGaAs基板をInPに替えて新たな材料を開拓し、黄色～緑色域の発光デバイスの開発を行ってきた。例えば、InP基板に格子整合するBeZnSeTe混晶やZnCdSe/BeZnTe超格子は優れた発光特性を示し、特にZnCdSe/BeZnTe超格子は各層厚を変えるだけで青から赤の可視光全域に加え波長700nm以上の近赤外の広い範囲で発光波長を制御できるという特長を有している。更に、Beを含むことで結晶の格子強度が増し、また素子寿命問題の原因である活性層での結晶の格子不整合(結晶歪)が解決され、素子寿命の改善に効果があると考えられる。我々はこれまで、これら材料を用いた発光デバイスを作製し、黄色～緑色発光や5000時間以上の長寿命動作を達成した。

一方、上記研究開発を進める内当該材料のもう一つの特長を見出した。それは、大きいバンド不連続(ヘテロ障壁)を有することである。例えば、ZnCdSe/BeZnTeヘテロ接合では、伝導帯において1.8eV以上のバンド不連続があると予測される。格子整合系の半導体ヘテロ接合においてこれだけの大きなバンド不連続を有する材料は他になく、これを積極的に利用することでこれまでにない新物性の発現や新しいデバイス展開が得られるのではないかと期待される。例えば、光通信波長帯サブバンド間遷移光デバイスが挙げられる。具体的には量子カスケードレーザや光変調器、光検出器等が考えられる。これまで、サブバンド間遷移を用いたデバイスとしては量子カスケードレーザ等、多くが報告されてきた。しかし、光通信波長帯で実用化された例はない。それは、光通信波長の1.5 μ m帯でサブバンド間遷移を実現させるには2eV程度の大きいバンド不連続を有する良質なヘテロ材料が必要であるが、その様な材料が数少ないためである。その中で我々が開発したInP基板上- 族半導体超格子はその有力な候補と言える。もし、光通信波長帯のサブバンド間遷移デバイスが実現されれば、その特長である超高速応答を利用したこれまでにない高性能、大容量光通信デバイス/システムの構築に寄与すると期待される。また、当該材料、デバイス開発を進める過程で材料特有の新現象や物性パラメータが明らかになり、学術的に貴重な成果も得られるのではないかと考え本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、InP基板上- 族半導体によるサブバンド間遷移光デバイスの新展開を目指し、材料、デバイスの基礎開発を行うことを目的とする。特に、光通信波長1.5 μ m帯に対応するサブバンド間遷移基礎物性の解明、及び1.5 μ m帯光デバイスに向けた基礎検討を行う。

3. 研究の方法

超格子におけるサブバンド間遷移の波長制御性等の諸特性を調べる。特に、1.5 μ m帯への制御性に注目する。材料として、ZnCdSe/BeZnTe超格子及びMgSe/ZnCdSe超格子を取り上げる。また、サブバンド間遷移の評価及びデバイス応用に向けて、超格子をコア層とした光導波路構造について検討する。更に、デバイスでのキャリア注入構造の最適化のため、ヘテロ接合における電子の透過特性及び電気特性について調べる。一方、当該材料の特長である大きいバンド不連続の応用として他の可能性についても検討する。

4. 研究成果

超格子におけるサブバンド間遷移の波長制御性について検討した。図1にZnCdSe/BeZnTe超格子のエネルギーバンド図を示した。図中のサブバンド間遷移における遷移エネルギーから遷移波長を計算により求めた。図2(a)に、ZnCdSe/BeZnTe超格子におけるサブバンド間遷移波長のBeZnTe層厚依存性を示した。ここで、パラメータはZnCdSe層厚とした。層厚の単位はML(分子層厚、1MLは約0.29nm)としている。図2(a)より、BeZnTe層厚を1～10ML、ZnCdSe層厚を5～10MLの間で変化させることで約1.1～3.2 μ mの間で遷移波長を変えられることが予測さ

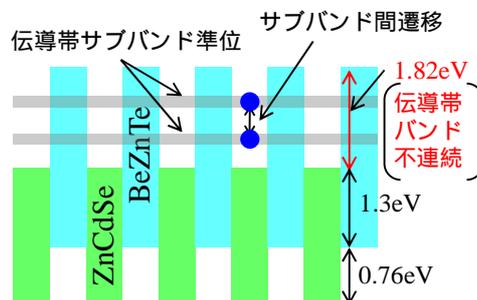


図1 ZnCdSe/BeZnTe 超格子のエネルギーバンド図。

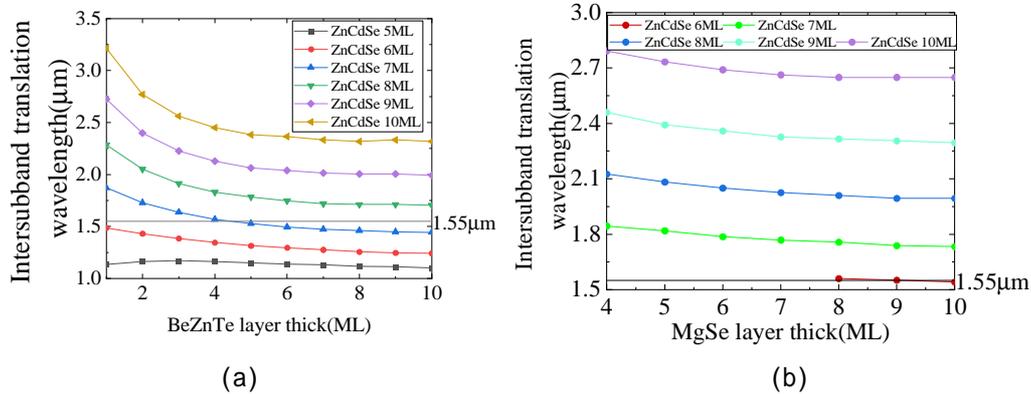


図2 (a)ZnCdSe/BeZnTe 超格子におけるサブバンド間遷移波長の BeZnTe 層厚依存性 (理論値)、(b)MgSe/BeZnTe 超格子におけるサブバンド間遷移波長の MgSe 層厚依存性 (理論値)。

れた。また、ZnCdSe 層厚を 7ML とし、BeZnTe 層厚を 4~10ML に設定することで遷移波長を 1.5 μm 帯近傍に制御できることが示された。これは作製上も問題のない構造であり、ZnCdSe/BeZnTe 超格子サブバンド間遷移の光通信波長帯への応用の可能性が示された。

次に、MgSe/ZnCdSe 超格子におけるサブバンド間遷移波長について調べた。図 2(b)に、MgSe/BeZnTe 超格子におけるサブバンド間遷移波長の MgSe 層厚依存性を示した。ここで、パラメータは ZnCdSe 層厚とした。図 2(b)より、MgSe 層厚を 4~10ML、ZnCdSe 層厚を 6~10ML で変化させることで約 1.5~2.8 μm の間で遷移波長を変えられることが予測された。また、ZnCdSe 層厚を 6ML とし、BeZnTe 層厚を 8~10ML に設定することで遷移波長を 1.5 μm 帯近傍に制御できることが示された。しかし、上記層厚はサブバンド間遷移が得られる限界の構造であり、作製上許容される膜厚制御の誤差が非常に小さいことが問題になると懸念される。例えば、上記の各層厚から 1ML でも薄くなると (例えば、MgSe 層厚が 7ML 以下になってしまう等) と第二準位のサブバンドが消滅しサブバンド間遷移が得られなくなる。また、ZnCdSe 層厚のが 1ML 薄く 5ML 以下になった場合でもサブバンド間遷移が得られなくなり、逆に 1ML 厚くなると遷移波長が 1.7 μm 以上となってしまふ。即ち、遷移波長が 1.5 μm 帯に限ると MgSe/ZnCdSe 超格子は ZnCdSe/BeZnTe 超格子に比べ実現性に問題があることが示された。これは、MgSe/ZnCdSe 超格子の伝導帯バンド不連続が 1.2eV であり、ZnCdSe/BeZnTe 超格子のバンド不連続の 1.82eV より小さいためである。従って、ZnCdSe/BeZnTe 超格子以外で 1.5 μm 帯サブバンド間遷移を得るにはバンド不連続が 1.2eV 以上の超格子材料が必要であることが分かった。

続いて、サブバンド間遷移による光吸収特性の評価やデバイス応用に向け ZnCdSe/BeZnTe 超格子を用いた光導波路構造について検討した。ZnCdSe/BeZnTe 超格子をコア層、MgZnCdSe をクラッド層とした光導波路を想定し、波長 1.5 μm における光導波特性の理論解析を行った。図 3(a)にコア層での光閉じ込め係数のコア層厚依存性を示した。図より、コア層厚を 200nm から 1000nm に増やすことで光閉じ込め係数が約 20%から 95%程度まで増加することが示された。一方、図 3(b)には、光導波路構造内に光を閉じ込めるために必要なクラッド層厚を示した。図 3(a)と同様にコア層厚依存性を示した。これより、クラッド層厚を作製上現実的な 1000nm 以下にする場合、

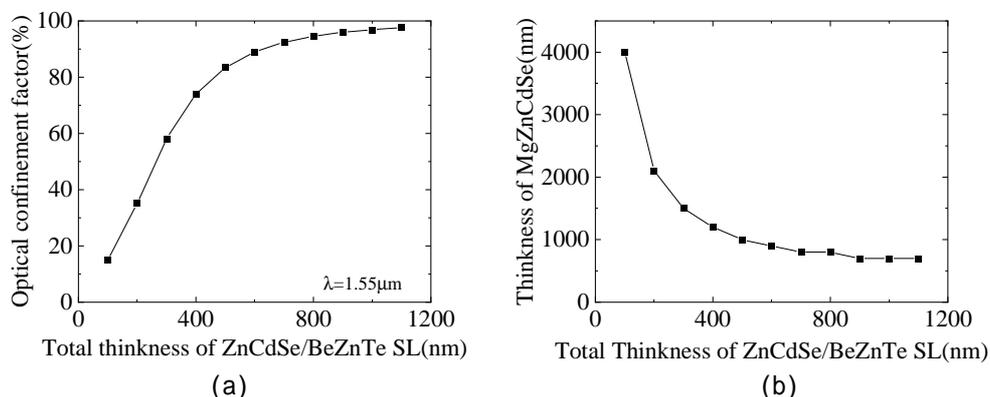


図3 (a)ZnCdSe/BeZnTe 超格子をコア層とした光導波路のコア層での光閉じ込め係数のコア層厚依存性 (理論値)、(b)光導波路構造内に光を閉じ込めるために必要な MgZnCdSe クラッド層厚 (理論値)。

コア層厚を 500nm 以上にする必要があることが分かった。その場合、図 3(a)より光閉じ込め係数は 80%以上であることが示され、導波光とサブバンド間遷移で十分な相互作用が得られると予測された。

次に、デバイスへのキャリア注入構造について検討するため、ヘテロ接合での電子の透過特性及び電気特性について調べた。まず、図 4 に示した素子を分子線エピタキシー (MBE) 法を用いて作製した。素子は、InP 基板上に n 形 ZnCdSe バッファ層、n 形 MgZnCdSe 層、n 形 ZnCdSe コンタクト層を積層した構造とした。この素子の表面と基板側に電極を施し、電圧電流特性を測定することで ZnCdSe 層と MgZnCdSe 層とのヘテロ接合における電子の透過特性及び電気特性を評価した。素子の室温での電圧電流特性を図 5 に示した (赤線)。これより、立ち上がり電圧が 2~3V 付近のショットキー性が見られた。これは、ZnCdSe/MgZnCdSe ヘテロ接合におけるヘテロ障壁により電子の移動が妨げられ、そのヘテロ障壁を透過するために高い電圧 (2~3V) を印加しなければならないことを示している。この現象は素子の高抵抗化の原因になるため低減する必要がある。そこで、このヘテロ接合における電圧電流特性の理論解析を行い、印加電圧低減に向けた検討を進めた。

ここでは、ヘテロ障壁の高さ (ΔE_c) をパラメータとして電子の透過特性を考慮した電圧電流特性を理論計算により求めた。得られた結果を図 5 に示した (黒線)。 ΔE_c は 0.365eV ~ 0.759eV とした。理論値と先の実験値の比較により、 $\Delta E_c=0.759\text{eV}$ の場合の理論値が実験値と良く一致しており、実験で使用した素子の ΔE_c が約 0.759eV であることが予測された。また、理論値が実験値を良く再現していることから、理論計算に用いた電子の透過特性や電圧電流特性の計算モデルが妥当であることが示された。一方、 $\Delta E_c=0.365\text{eV}$ の場合の特性ではショットキー性がほぼないオーミックな特性であり、非常に低抵抗になることが見出された。これは ΔE_c をある程度下げることでショットキー性の問題を解決できることを示している。今回の場合は、実験値と一致した $\Delta E_c=0.759\text{eV}$ を約半分の $\Delta E_c=0.365\text{eV}$ にすることで大幅な改善が得られることが分かった。そのための具体的な対策としては、例えば、実験で用いた ZnCdSe 層と MgZnCdSe 層の間に ΔE_c が半分になる中間層 (例えば、 ΔE_c が半分になるような組成とした MgZnCdSe 層) を挿入することでオーミック性に近い低抵抗な素子が得られることが予測される。これは今後のデバイス設計において非常に有効な技術になると期待される。

上記に加え、当該材料の特長である大きいバンド不連続の応用として、二重障壁を用いた共鳴トンネルダイオード (RTD) について検討した。高性能な RTD を実現させるには大きいヘテロ障壁を持つ高品質な材料が必要であるが、本研究で開発している III-V 族半導体の特長が非常に良く適合していると考えられる。ここでは、MgSe/ZnCdSe ヘテロ接合を用いた RTD について検討した。図 6 に MBE 法を用いて作製した RTD 素子の構造を示した。InP 基板上に n 形 ZnCdSe エミッター層とコレクター層、及び MgSe 二重障壁層で挟んだ ZnCdSe 井戸層からなる構造とした。透過電子顕微鏡観察により、MgSe 障壁層の厚さは 1.8nm、ZnCdSe 井戸層の厚さは 0.7nm であることが分かった。この素子の室温での電圧電流特性を図 7 に示した (赤線)。これより、電圧 1.7V 付近で電圧の増加と共に電流が減少する微分負性抵抗が明瞭に見られ、共鳴トンネル効果が得られたことが示された。RTD の性能として、微分負性抵抗が現れる前のピーク電流密度 (J_p) とその後電流が極小となるバレー電流密度 (J_v) から得られるピークバレー比 (PVR、即ち J_p/J_v) が重要な指標とされており、どちらも大きい方が高性能とされている。今回の測定では、 $J_p=8.15\text{kA/cm}^2$ 、 $\text{PVR}=2.03$ が得られた。これらのデータは他の材料系の RTD と比べて遜色がなく、今回作製した素子は構造の最適化がされていないにも関わらずこの様な高い特性が得られたことから、当該材料が RTD 材料として非常に有望であると考えられる。今後、素子構造の最適化によりより高い性能が得られると期待される。

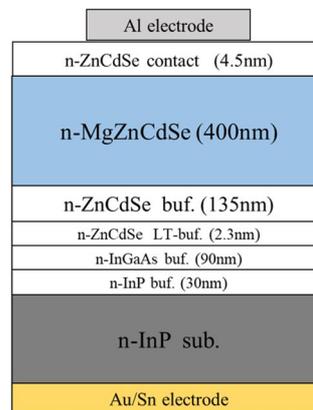


図 4 ZnCdSe/MgZnCdSe ヘテロ接合素子の構造。

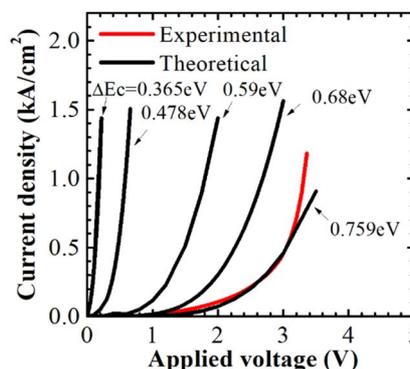


図 5 ZnCdSe/MgZnCdSe ヘテロ接合素子の室温での電圧電流特性 (赤線は実験値、黒線は理論値)。

続いて、RTDの電圧電流特性を二重障壁における電子の透過特性を基に理論解析を行った。計算結果を実験値と共に図7に示した(青線)。理論値と実験値の比較により、微分負性抵抗が得られる電圧領域が近く、理論値が実験値を良く再現していると考えられる。これより、実験値での微分負性抵抗が共鳴トンネル効果に依るものであることが理論的にも示された。次に、RTD特性のMgSe障壁層厚及びZnCdSe井戸層厚依存性について検討した。図8(a)には J_p 及びPVRの障壁層厚依存性、図8(b)には J_p 及びPVRの井戸層厚依存性の理論解析結果を示した。ここで、障壁層厚依存性では井戸層厚を2ML、井戸層厚依存性では障壁層厚を2MLとした。先ず、図8(a)より、障壁層厚を減少させることにより J_p が増加することが示された。これは障壁層厚が薄くなることで電子の透過確率が増し透過電流が増加するためである。因みに、障壁層厚が2MLの場合は約 $J_p=550\text{kA/cm}^2$ が得られると予測された。一方、障壁層厚を減少させるとPVRも減少することが示された。これは障壁層厚を減少させると電流の極小値においても電子の透過率が増え、そのため J_v が増加するためだと推測される。以上より、障壁層厚を減少させると J_p は増加するもののPVRも減少するため、最適な障壁層厚は求められる性能、即ち J_p またはPVRのどちらを優先するのかが決める必要があることが分かった。

また、図8(b)では、井戸層厚を減少させることで J_p が増加することが示された。これは井戸層厚が薄くなることで井戸内の量子準位が高くなり、その分共鳴トンネルを起こすための印加電圧を上げる必要があるが、そのためにエミッター層とコレクター層間の電位差が大きくなるために電流が増加するものと考えられる。一方、井戸層厚を減少させるとPVRも減少することが示された。これは井戸層厚を減少させると共鳴トンネルを起こすための印加電圧が高くなるが、そのためコレクター側の障壁を超える電子が増えるため J_v が増加することが原因であると推察される。因みに、図8(b)より、井戸層厚が7MLの場合に22以上のPVRが得られると予測された。この様に、井戸層厚を減少させると J_p は増加するもののPVRが減少し、これは障壁層厚依存性と同様な傾向となった。以上より、求められる性能(J_p 、PVR)により障壁層厚や井戸層厚を選択する必要があることが分かった。今後、以上の理論解析を基に素子構造の最適化を進めることで高性能MgSe/ZnCdSe RTDが実現されると期待される。

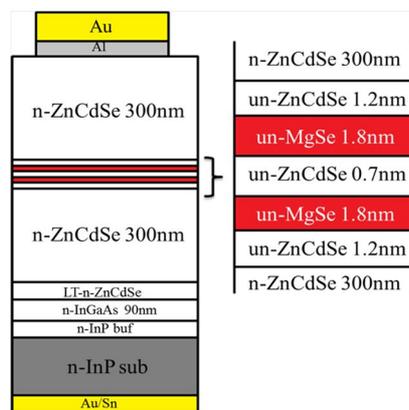


図6 MgSe/ZnCdSe RTD 素子の構造。

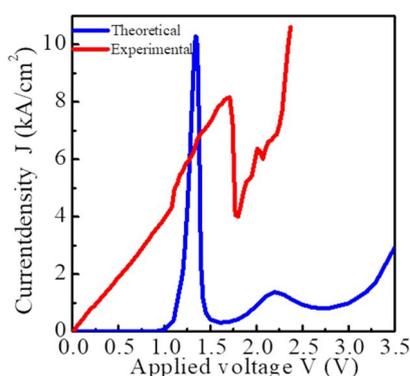
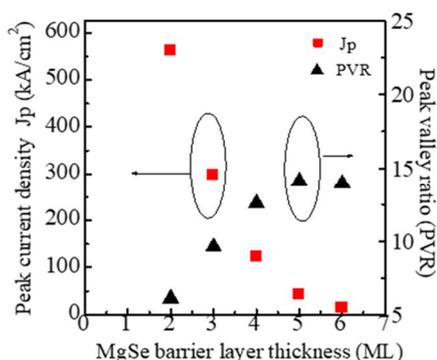
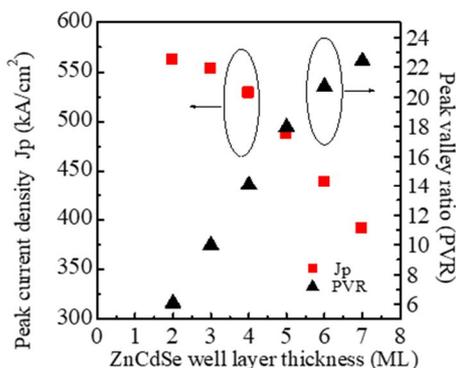


図7 MgSe/ZnCdSe RTDの室温での電圧電流特性(赤線は実験値、青線は理論値)。



(a)



(b)

図8 (a)MgSe/ZnCdSe RTDにおけるピーク電流(J_p)及びピークバレー比(PVR)のMgSe障壁層厚依存性(理論値)、(b) J_p 及びPVRのZnCdSe井戸層厚依存性(理論値)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kenta Ishii, Ryosuke Amagasu, and Ichirou Nomura	4. 巻 512
2. 論文標題 Investigation of the n-side structures of II-VI compound semiconductor optical devices on InP substrates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 96-99
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcrysgro.2019.02.014	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 米国シン、野村一郎
2. 発表標題 InP基板上 - 族半導体レーザ構造におけるp側ヘテロ接合の基礎検討
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林穂貴、前田慶治、野村一郎
2. 発表標題 InP基板上 - 族半導体光デバイスにおけるp側正孔伝導特性の理論解析
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田慶治、酒井琢己、野村一郎
2. 発表標題 InP基板上MgSe/ZnCdSe共鳴トンネルダイオードの特性解析
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hodaka Kobayashi, Keiji Maeda, and Ichirou Nomura
2. 発表標題 Theoretical analysis of current-voltage characteristics in II-VI compound semiconductor hetero-junctions on InP substrates
3. 学会等名 The 19th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiji Maeda, Takumi Sakai, and Ichirou Nomura
2. 発表標題 Electrical characteristic analysis of MgSe/ZnCdSe resonant tunneling diodes on InP substrates
3. 学会等名 The 19th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 章燕瀛嬌、前田慶治、野村一郎
2. 発表標題 MgSe/ZnCdSe共鳴トンネルダイオード特性の理論解析と素子構造依存性の検討
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 Takumi Sakai and Ichirou Nomura
2. 発表標題 MgSe/ZnCdSe II-VI compound semiconductor resonant tunneling diodes on InP substrates,
3. 学会等名 20th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hodaka Kobayashi, Yudai Momose, Takumi Sakai, and Ichirou Nomura
2. 発表標題 Investigation of the conduction band discontinuity of the MgSe/ZnCdSe hetero-structure on InP substrates using the n-i-n diode
3. 学会等名 20th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kennta Ishii, Ryosuke Amagasu, Hodaka Kobayashi, and Ichirou Nomura
2. 発表標題 Investigation of the n-side structures of II-VI compound semiconductor optical devices on InP substrates
3. 学会等名 20th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林穂貴、石井健太、前田慶治、野村一郎
2. 発表標題 InP基板上 - 族半導体光デバイスにおけるn側構造の電気特性解析
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田慶治、石井健太、小林穂貴、野村一郎
2. 発表標題 InP基板上ZnCdSe/MgZnCdSe/MgZnSeTe黄色レーザダイオード構造の検討
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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