

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06364

研究課題名(和文) 光ガルバノ効果を利用した半導体量子構造光AND素子の研究

研究課題名(英文) Optical AND operation in semiconductor quantum structure

研究代表者

川津 琢也 (KAWAZU, Takuya)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主任研究員

研究者番号：00444076

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、レーザー照射方法や高指数面基板上の量子ドットにより、半導体量子構造に形成された2次元電子チャネルの空間的な対称性を低下させ、面内光起電流を生じさせることを試みた。特に、波長の異なる2種類のレーザーを照射した時にだけ、面内光起電流が生成されるような素子(光AND素子)の作製を目指した。その結果、(1)変調ドープn-AlGaAs/GaAsヘテロ接合のゲート光照射と(2)異方的量子ドット埋め込み素子において、光AND演算動作の実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波長の異なる2種類のレーザーを照射した時にのみ面内光起電流を生じさせるような光ガルバノ効果(2波長励起光ガルバノ効果)に関する研究は、他では例がなく、極めて独創的なものである。特に、光照射方法や異方的な量子ドットにより、空間的な対称性の低下を生じさせ、光ガルバノ効果を引き起こす試みは、本研究独特の手法であり、学術的意義は大きい。また、本研究で得られた結果は、光スイッチング素子や光論理素子(光AND素子)への応用が可能で、その社会的な貢献も期待できる。

研究成果の概要(英文)： We demonstrated that the lateral photocurrent is generated only when both the light A and B simultaneously illuminate the field-effect transistors (FETs) in the following cases (1) and (2); the FETs act as optical AND elements.

(1) An n-AlGaAs/GaAs heterojunction FET is irradiated with (A) a laser beam with the energy above the Schottky-barrier which uniformly illuminates the gate region and/or (B) a laser beam with the energy above the GaAs bandgap which locally illuminates the ungated region.

(2) An n-AlGaAs/GaAs heterojunction FET embedded with anisotropic InGaAs quantum dots is irradiated with (A) a laser beam with the energy above GaAs and/or (B) a laser beam with the energy exciting the anisotropic InGaAs QDs.

研究分野：半導体物理

キーワード：半導体 光起電流 電界効果トランジスター 量子ドット

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

強誘電体や圧電物質などの反転対称性を持たない結晶に光を照射した際、面内光起電流が生じる現象は、光ガルバノ効果と呼ばれ、1970年代初頭に活発な研究が行われた。最近、この光ガルバノ効果が、新たな材料で再び注目を集めつつある。たとえば、偏光したテラヘルツ光をグラフェン単層シートの端に垂直入射すると、面内光起電流が偏光方向にしたがって生じることが観測されている(J.Karch et al., Phys. Rev. Lett., 2011)。また、同様の例として、AlGaIn/GaNヘテロ構造に、偏光した赤外光レーザーを照射すると、面内光起電流が生成されることが示されている(X.Peng et al., Phys. Rev. B, 2011)。一般に、光ガルバノ効果は、空間的に反転対称性が崩れた系に、光照射を行うことによって引き起こされる。しかし、グラフェンやAlGaIn/GaNヘテロ構造の例では、入射光の偏光が、空間的な対称性を低下させることにより、面内光起電流を生じさせている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、光ガルバノ効果を利用した半導体量子構造光 AND 素子を作製し、その面内光起電流の発生機構を解明することである。レーザー照射方法や高指数面基板上的量子ドットにより、半導体量子構造に形成された2次元電子チャネルの空間的な対称性を低下させ、光ガルバノ効果による面内光起電流を生じさせることを試みる。この時、波長の異なる2種類のレーザーを照射した時にだけ、面内光起電流が生成されるような素子(光 AND 素子)の作製を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) ゲート照射による光 AND 動作の実証

本研究では、レーザー照射方法を工夫することにより、ヘテロ接合電界効果トランジスタに異方性を引き起こし、面内光起電流を生じさせることを試みる。特に、2つのレーザー光が照射されたときにのみ電流が生ずるような光 AND 演算動作を行うことを示す。

実験に用いたのは、GaAs(100)基板上に分子線エピタキシー装置を用いて作製した、変調ドーピング n-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合である(図1)。試料構造は、基板から、450nm厚 GaAs バッファ、260nm厚超格子バッファ(10nm AlGaAs/3nm GaAs)、820nm厚 GaAs 層、10nm厚 AlGaAs スペーサー層、80nm厚 Si ドープ AlGaAs 層、15nm厚 GaAs キャップ層からなっている。

試料は、図2に示すホールバーの形状にプロセスした。光電流の測定は、ドレイン(D)とソース(S)間に電流計を接続し、室温で行った。

光照射には、波長 808nm と 940nm の2種類のレーザーを用いた。波長 808nm のレーザーは、対物レンズで半径約 25 $\mu$ m のスポットに絞り、強度 2  $\mu$ W でドレイン端子の端(図2, 1)に局所的に照射した。用いた顕微鏡システムは、同時に表面を観察することが可能で、レーザーの正確な照射位置をモニターすることが出来る。一方、波長 940nm のレーザーは、1.2  $\text{mW}/\text{mm}^2$  の強度で金属ゲートに一樣に照射した。

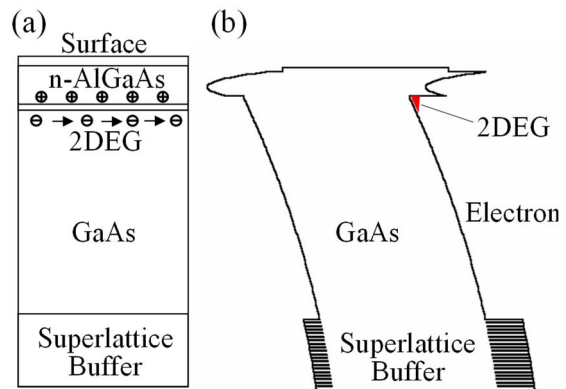


図1(a)試料構造模式図、(b)バンド図

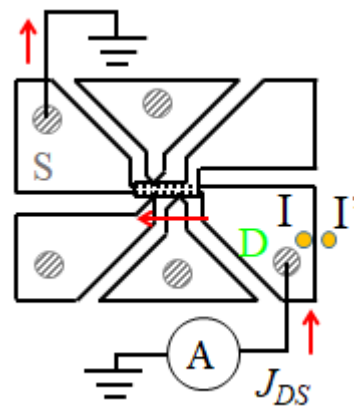


図2 ホールバー試料

#### (2) 異方的量子ドット埋め込み素子の光 AND 演算動作の実証

本研究では、異方的な量子ドットを埋め込んだヘテロ接合素子にレーザーを照射し、面内光起電流の生成を試みた。特に、2つのレーザー光が照射されたときにのみ電流が生ずるような光 AND 演算動作を行うことを示す。

実験に用いたのは、微傾斜 GaAs(111)B 基板上に、分子線エピタキシー装置を用いて作製した InGaAs ドット埋め込み変調ドーピング n-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合である(図3)。基板には[-10-1]方向に 8.5° 傾いた 微傾斜 GaAs(111)B 基板を使用した。試料構造は、780nm の GaAs バッファおよび 10 周期の GaAs/AlGaAs 超格子バッファを成長し、50nm の GaAs を積層後、InGaAs ドットを形成した。その後、3nm の GaAs、120nm の AlGaAs バリアを積層し、最後に GaAs でキャップした。また、ヘテロ界面から 20nm と 60nm の位置の AlGaAs 層に Si の ドープを施した。InGaAs ドット

トの作製は、In 組成約 0.3、ドット作製温度 520 °C、InGaAs 積層数 3 nm の条件で行なった。

まず、初めに、量子ドットの光学異方性を調べるために、フォトルミネッセンス(PL)の測定を行った。試料はヘリウム循環型クライオスタットを用いて 11K に冷却し、励起光源に Nd:YAG レーザー (532 nm) を使用した。PL スペクトルの検出には、1.7 μm まで感度のある InGaAs フォトダイオードアレイを用いた。偏光度の測定の際、検出する偏光方向を固定し、試料からの蛍光を 1/2 波長板を用いて回転させた。これは、フォトダイオードアレイの偏光異方性の影響を避けるためである。

次に、InGaAs 量子ドットを埋め込んだヘテロ接合素子にレーザーを照射し、面内光起電流の生成を試みた。光電流の測定は、試料の約 3mm 間隔の 2 点に電流計を接続し室温で行った。光照射には、波長 670nm、808nm、940nm、1064nm のうち 2 種類のレーザーを用いた。2 つのレーザー光は、二股分岐ファイバーを用いて顕微鏡に接続し、対物レンズで半径約 25μm のスポットに絞って照射した。

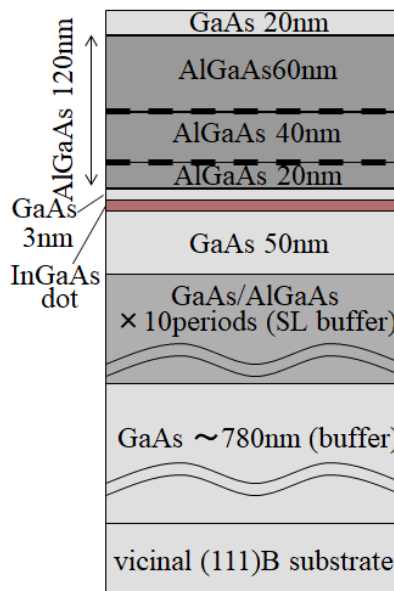


図 3 ドット埋め込み変調ドーパヘテロ構造

#### 4. 研究成果

##### (1) ゲート照射による光 AND 演算動作の実証

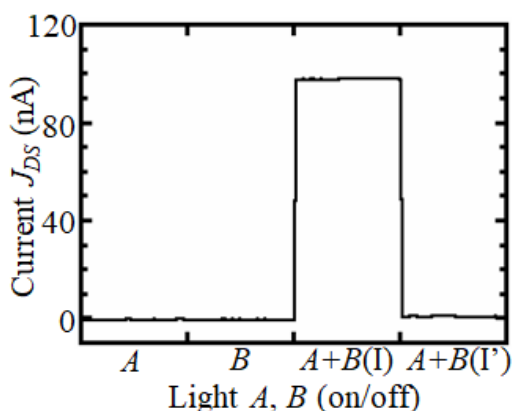


図 4 ドレイン ソース間の光電流  $J_{DS}$

AND 演算動作を行うことがわかる。

n-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合電界効果トランジスタの金属ゲートに、波長 940nm のレーザーを一様に照射すると、ゲートからチャンネルへ電子が遷移する(図 5(a))。しかし、そのような左右対称な電子遷移( $R_G$ )は、面内光起電流を引き起こさない。一方、試料のゲートのない領域に波長 808nm のレーザーを照射すると、GaAs 中に電子-正孔対が励起される(図 5(b))。生成した正孔は超格子界面に蓄積し拡散するが、面内光起電流には寄与しない。ところが、2 つのレーザーを同時に照射すると、ゲート近傍まで拡散してきた正孔のクーロン引力のために、ゲートからチャンネルへの電子遷移( $R_G$ )が左右非対称となり、面内光起電流( $J_{DS}$ )が引き起こされる(図 5(c))。得られたドレイン-ソース電流 ( $J_{DS}$ )は、計算モデルと比較し、光 AND 演算動作のメカニズムを明らかにした。

図 4 は、波長 808nm の局所照射レーザー (A)、波長 940nm の一様照射レーザー (B(I))、およびそれら両方(A+B(I))のレーザーを照射した時のドレイン-ソース間の光電流  $J_{DS}$  を示している。波長 940nm のレーザーによるゲート一様照射(A)や波長 808nm のレーザーによるドレイン端子局所照射(B(I))では、面内光起電流を引き起こすことは出来ないが、それら 2 つを同時に照射すると約 100nA の面内光電流が生ずる(A+B(I))、すなわち、光

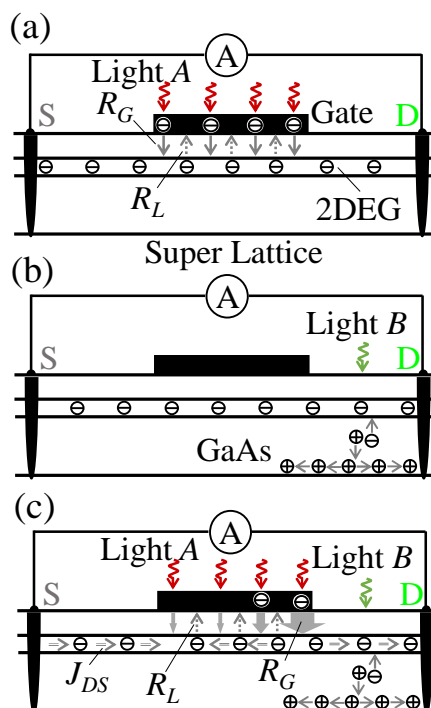


図 5 光演算の動作モデルの模式図

## (2) 異方的量子ドット埋め込み素子の光 AND 演算動作の実証

微傾斜 GaAs(111)B 基板に作製した InGaAs 量子ドットの光学異方性

図 6 は、 $[-1\ 0\ -1]$  方向に  $8.5^\circ$  傾いた微傾斜 GaAs(111)B 基板に、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.3$ ) を 3nm 堆積させることにより作製した量子ドット列の AFM 像である。InGaAs 量子ドット列は、 $[1-10]$  方向に方向に配列しており、長さ約 50nm ( $\parallel [-110]$ )、幅約 40nm ( $\perp [-110]$ )、高さ約 5nm であった。

図 7(a) は、GaAs に埋め込んだ InGaAs 量子ドット列の試料の PL 測定結果で、実線と点線は  $[1-10]$  方向とそれに垂直な方向の偏光に対する PL スペクトルを示している。1.36eV と 1.53eV のピークは、それぞれ InGaAs 量子ドット列と GaAs バッファからの発光である。InGaAs 量子ドット列の異方的な形状に起因して、 $[-101]$  偏光の PL 強度が、垂直方向の偏光に比べて強くなっていることがわかる。また、GaAs バッファからの PL に偏光異方性が観測されないことから、測定装置由来の異方性はないことが確認できる。

図 7(b) は、PL ピーク強度を偏光方向に対して測定した結果である。この図から、偏光度を求めると 16.9%

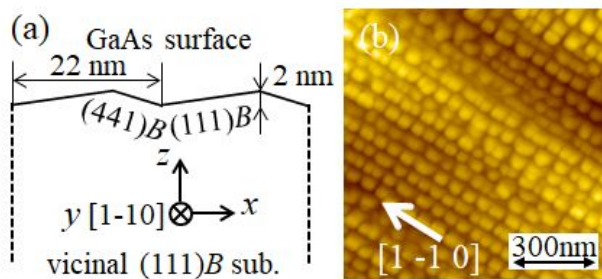


図 6 微傾斜 GaAs のステップ構造 (a) と InGaAs 量子ドット列の AFM 像 (b)

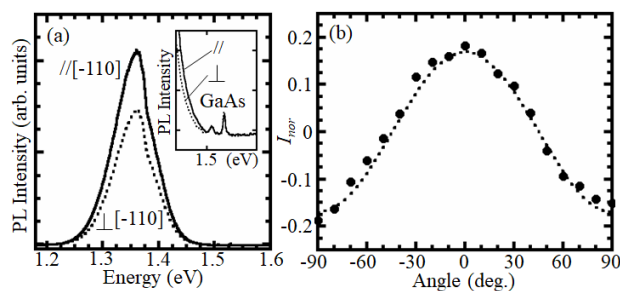


図 7 PL スペクトル (a) とピーク強度の偏光方向依存性 (b)

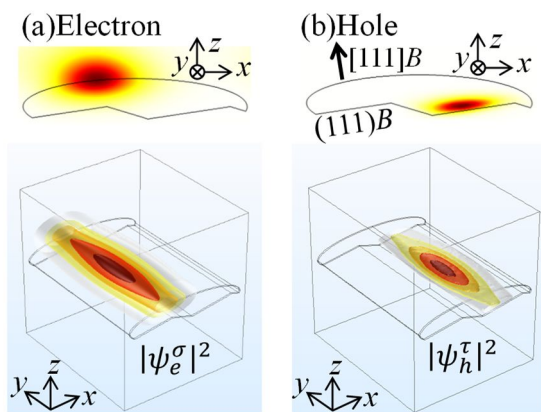


図 8 電子 (a) と正孔 (b) の波動関数

となり、高い異方性を示すことがわかった。

PL の偏光異方性の要因を明らかにするために、量子ドットに閉じ込められた電子と正孔の波動関数を有限要素法により理論的に検討した。理論計算では、(1)ステップ構造、(2)ピエゾ効果を含む歪、(3)隣接する量子ドットの 3 つの影響を考慮にいれて、 $6 \times 6$  Luttinger-Kohn ハミルトニアンから電子と正孔の固有状態を計算した (図 8)。得られた波動関数を用いて偏光異方性を求めた結果、それぞれの偏光度への影響は小さいが、(1)~(3)の効果すべてを加えると、実験結果を説明できることがわかった。

InGaAs 量子ドットを埋め込んだヘテロ接合素子の AND 演算動作

図 9 は、InGaAs 量子ドット埋め込みヘテロ接合素子に、波長 808nm のレーザー、940nm のレーザー、およびそれら両方のレーザーを照射した時の光起電流  $J$  を示している。波長 808nm のレーザーまたは波長 940nm のレーザーの照射だけでは、電流を引き起こすことは出来ないが、それら 2 つを同時に照射すると約 500nA の面内光起電流が生ずる、すなわち、光 AND 演算動作を行うことがわかる。

図 10 は、波長 670nm、808nm、940nm、1064nm のうち 2 種類を選んで素子に照射し、光起電流  $J$  を調べた結果である。図から、(a)808nm と 940nm、(b)808nm と 1064nm、(c)670nm と 940nm、(d)670nm と 1064nm の波長の組み合わせの場合

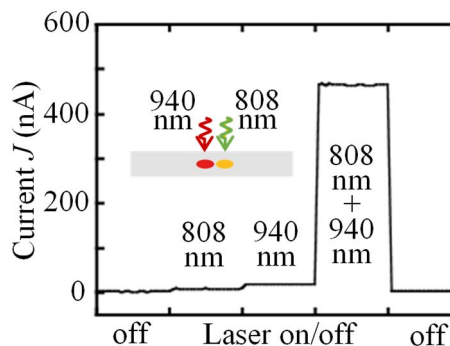


図 9 光起電流測定結果

合、光 AND 演算動作を行うことがわかる。一方、(e)670nm と 808nm、(f)940nm と 1064nm の波長の組み合わせでは、両方の光を照射しても、光起電流は生じなかった。

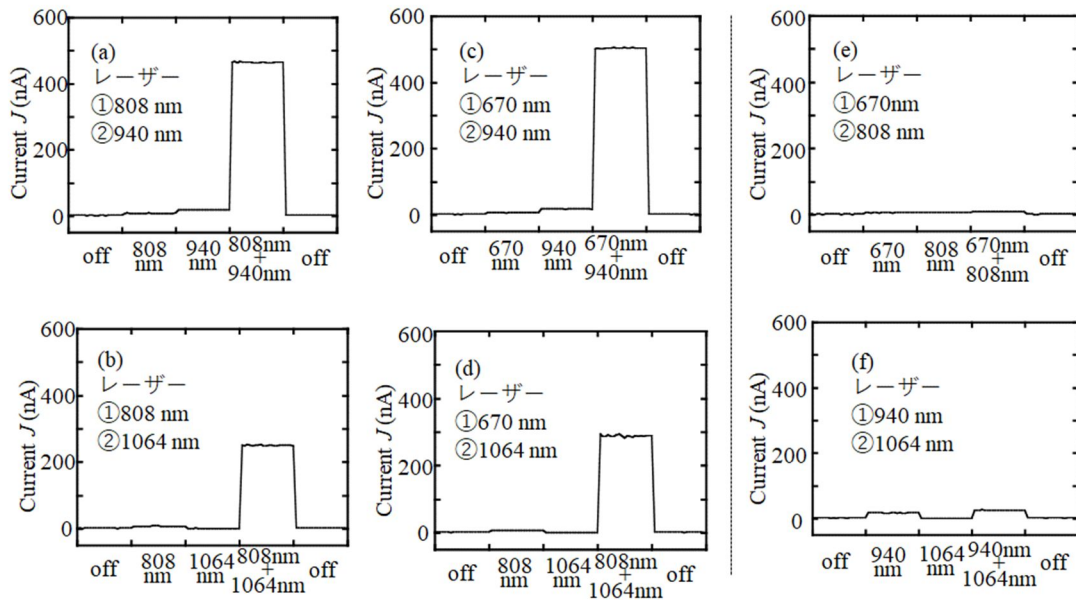


図 10 2 波長の組み合わせに対する光起電流の測定結果

光起電流の応答がレーザー波長の組み合わせで異なる理由を調べるために、室温で量子ドットの PL を測定した。図 11 に PL スペクトルを示す。また、矢印で光起電流測定に用いたレーザー波長も示している。図 10、図 11 の比較から、光 AND 演算動作を行うためには、一つのレーザーは GaAs より高いエネルギーの波長を、もう一つは、InGaAs ドットを励起するような波長を選ぶ必要があることが分かる。

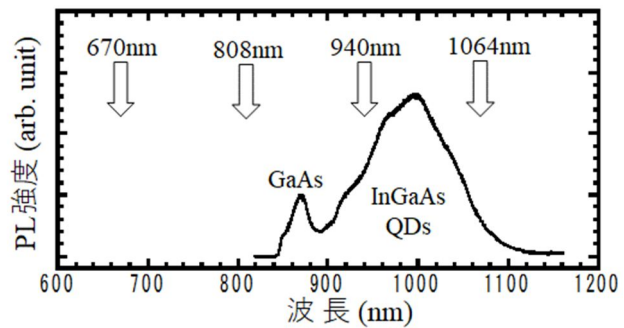


図 11 PL スペクトル

量子ドットが埋め込まれた n-AlGaAs/GaAs ヘテロ接合素子に、波長 808nm のレーザーを照射すると、GaAs で励起された正孔がドットに緩和する(図 12)。

正孔は電子と結合し蛍光を発するが、近傍にある 2 次元電子チャンネルには作用しない。一方、波長 940nm のレーザー光のエネルギーは、量子ドットのエネルギーにほぼ一致している。しかし、量子ドットの伝導帯と価電子帯がすでに電子によって占められているため、波長 940nm のレーザー照射は素子に影響を与えない。ところが、波長 808nm と 940nm の 2 つのレーザーを同時に照射すると、波長 808nm のレーザーにより励起された正孔が量子ドットに緩和し、波長 940nm のレーザー光と量子ドットの相互作用が可能となる。その結果、量子ドットの伝導帯と価電子帯の間で、レーザー強度の平方根に反比例した周期の電子遷移が引き起こされる (V.Galitskii et al., JETP, 1970)。この際、量子ドットの異方性に起因した電気双極子モーメントが誘起され、その双極子との相互作用によりドット近傍の 2 次元電子チャンネルに面内光電流が生ずる。

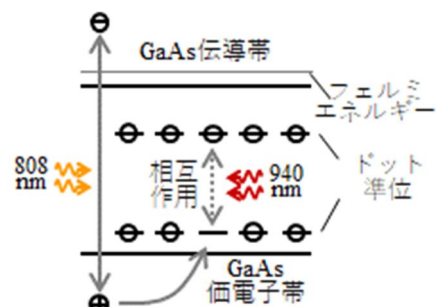


図 12 光起電流発生機構

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Kawazu Takuya, Noda Takeshi, Sakuma Yoshiki	4. 巻 58
2. 論文標題 Temperature dependence of Schottky photocurrent for local gate edge illumination in n-AlGaAs/GaAs/AlGaAs double-heterojunction field-effect transistor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11B05 ~ S11B05
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab0c76	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 Takuya Kawazu, Takeshi Noda, and Yoshiki Sakuma	4. 巻 112
2. 論文標題 Optical AND operation in n-AlGaAs/GaAs heterojunction field effect transistor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 072101-1, -4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5010845	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 Takuya Kawazu	4. 巻 2019
2. 論文標題 Valence band mixing in GaAs/AlGaAs quantum wells adjacent to self-assembled InAlAs antidots	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 5349291-1,-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2019/5349291	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 Kawazu Takuya	4. 巻 122
2. 論文標題 Optical anisotropy of InGaAs quantum dot arrays aligned along multiaatomic steps on vicinal GaAs(111)B	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 204304-1 ~ -13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4996058	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5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 川津 琢也、野田 武司、佐久間 芳樹
2. 発表標題 微傾斜GaAs(111)B 基板上に作製したInGaAs量子細線列の光学異方性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会(2018年春季)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya Kawazu, Takeshi Noda, and Yoshiki Sakuma
2. 発表標題 Temperature Dependence of Schottky Photocurrent for Local Gate Edge Illumination in n-AlGaAs/GaAs/AlGaAs Double-Heterojunction Field-Effect Transistor
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川津 琢也, 野田 武司, 佐久間 芳樹
2. 発表標題 局所光照射によるn-AlGaAs/GaAsヘテロ接合電界効果トランジスタのショットキー光電流増強効果
3. 学会等名 第66回応用物理学春季学術講演会(2019年春季)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川津 琢也, 野田 武司, 佐久間 芳樹
2. 発表標題 n-AlGaAs/GaAsヘテロ接合電界効果トランジスタのショットキーゲート端照射による光電流生成
3. 学会等名 第78回応用物理学(2017年春季)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川津 琢也, 野田 武司, 佐久間 芳樹
2. 発表標題 n-AlGaAs/GaAsヘテロ接合電界効果トランジスタにおける光AND演算動作
3. 学会等名 第65回応用物理学(2018年春季)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

NIMSの研究者情報データベース「SAMURAI」 <a href="http://samurai.nims.go.jp/">http://samurai.nims.go.jp/</a>
--

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
連携研究者	野田 武司  (Noda Takeshi)  (90251462)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・エネルギー・環境材料研究拠点・主幹研究員    (82108)	
連携研究者	大森 雅人  (Ohmori Masato)  (70454444)	大分大学・理工学部・准教授    (17501)	