

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 8 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420288

研究課題名(和文)半導体量子構造における光ガルバノ効果の解明

研究課題名(英文)Photogalvanic effects 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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ゲート局所照射と異方的な量子ドットの埋込みの2つの手法を用いて、面内光電流を高電子移動度トランジスタに発生させることを試みた。

トランジスタのゲートの非対称な位置にレーザー光を照射すると、電流の循環が生じ、面内光電流が発生することを示した。特に、ゲート端を照射した時、電流は最大となり、その値は $9\mu\text{A}/\text{mW}$ に達した。また、異方的な量子ドットを埋め込んだトランジスタを作製し光電流を調べた。その結果、端面照射により $75\text{nA}/\text{mW}$ の面内光電流が発生することを示した。

本研究では、量子構造の作製評価も目的の1つであり、InGaAs量子細線やGaSb量子ドットの光学特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This work demonstrated the generation of lateral photocurrents in selectively doped n-AlGaAs/GaAs heterojunction samples by using two novel methods of (1) the local illumination of the metal gate and (2) the embedding of anisotropic quantum dots (QDs).

We observed the lateral current induced in an n-AlGaAs/GaAs heterojunction channel of Hall bar geometry, when an asymmetric position of the Schottky metal gate is locally irradiated by a near infrared laser beam. The magnitude of the lateral current is almost linearly dependent on the beam position, the current reaching its maximum for the beam at the edge of the Schottky gate. We also fabricated a selectively doped n-AlGaAs/GaAs heterojunction sample with embedded anisotropic QDs and investigated lateral photocurrents. We found that the lateral currents flow when the sample edge is locally irradiated by a near infrared laser beam.

In addition, we grew several kinds of semiconductor nanostructures and clarify their optical properties.

研究分野：物性物理

キーワード：電子デバイス 量子構造 赤外材料・素子

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、直流電流が生じる現象は、光起電効果あるい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、光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、光電流が生じることが示されている(X. Y. Peng et al., Phys. Rev. B, 2011)。一般に、グラフェンやAlGaIn/GaNヘテロ構造などの均一な材料において、電流を生じさせるためには、電場や温度勾配を印加する必要がある。一方、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。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、光電流を生じさせている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、新しい手法を用いて、半導体ヘテロ接合素子に光ガルバノ効果を引き起こし、光電流を発生させることである。本研究では、(1)レーザー照射方法と(2)異方的なInGaAs量子ドット構造の埋め込みの2つの手法を用いる。(1)や(2)は、半導体ヘテロ接合素子に、空間的な対称性の低下を引き起こし、光電流を生じさせると考えられる。もし、光ガルバノ効果により大きな光電流を取り出すことができれば、外部電力を必要としない高精度な光検出器や強度計、位置制御センサーが実現できると期待される。

また、光ガルバノ効果を引き起こす新材料の探索を目的とし、量子構造(InGaAs量子細線、GaSbタイプ量子ドット)の形成とその物性評価を行った。

3. 研究の方法

(1) ゲート照射による面内電流生成

本研究では、高電子移動度トランジスタのゲート金属に、局所的にレーザーを照射することにより、面内光電流の生成を試みた。実

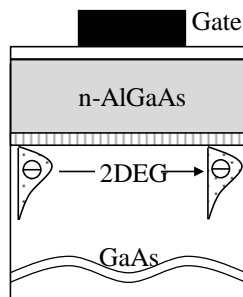


図1 変調ドープn-AlGaAs/GaAsヘテロ接合。

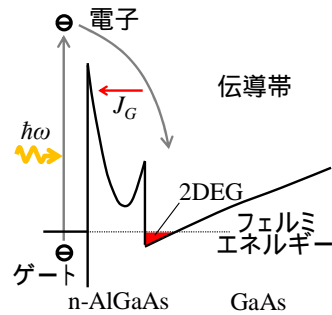


図2 変調ドープヘテロ接合のバンド図

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、変調ドープn-AlGaAs/GaAsヘテロ接合である(図1)。この試料に、ショットキーバリアより大きなエネルギーを持つレーザー光を、金属ゲートに照射すると、ゲートから2次元チャネルへ電子が遷移する(図2)。試料は、図3に示すホールバーの形状にプロセスした。

光照射には、波長808nm、強度1.4mWの半導体レーザーを用い、室温で試料に垂直に照射した。レーザーは、顕微鏡システムで半径約25μmに集光した。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。

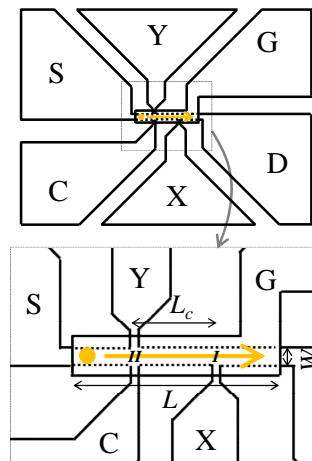


図3 プロセスしたホールバー形状。

(2) 異方的ドット埋め込み素子の光電流

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、面内光電流の生成を試みた。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プn-AlGaAs/GaAsヘテロ接合である(図4)。

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

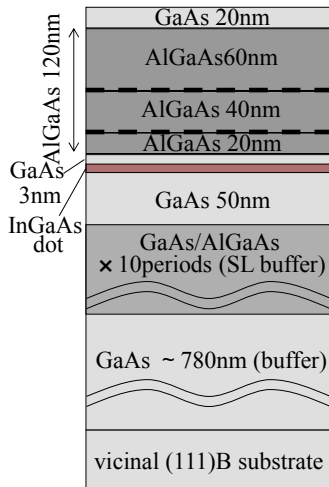


図4 ドット埋め込み変調ドーパヘテロ接合。

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。

光照射には、波長 808nm のレーザーを使用した。顕微鏡でレーザーをスポット半径約 0.025mm に集光し、強度約 2mW で光照射を行なった。電流測定は、試料に 750 Ω の抵抗を接続し、その両端の電圧を室温で計測した。また、試料の電極は [-101] 方向と垂直方向になるように配置した(図 5)。

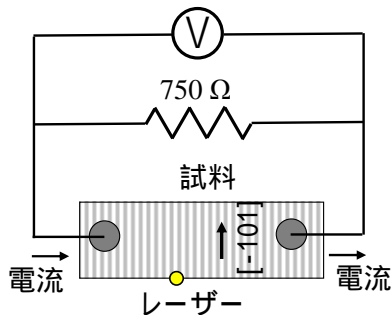


図5 光電流測定方法。

4. 研究成果

(1) ゲート光照射による面内電流生成

光電流は、ソース端子(S)からドレイン端子(D)への電流を、800 Ω の抵抗を介して測定した。また、C と X の端子についても同時に電圧の測定を行った(図 6(a))。図 6(b)は、レーザースポットの位置 x_l に対する SD 電流 J_{SD} を示している。レーザーがゲートの左半分 ($x_l < 0$) に照射されている時、SD 電流 J_{SD} は正、すなわち、S から D に流れ、右半分に照射 ($x_l > 0$) されている時は D から S へ向かう逆方向の電流 ($J_{SD} < 0$) が生じることがわかった。面内電流 J_{SD} は、レーザー位置 x_l に対して線形に変化し、ゲートの端で最大値(約 0.56 μA)を示した。

ゲート金属にショットキ障壁よりも高いエネルギーを持つ光を局所的に照射すると、電子が金属ゲートから 2次元チャンネルに遷

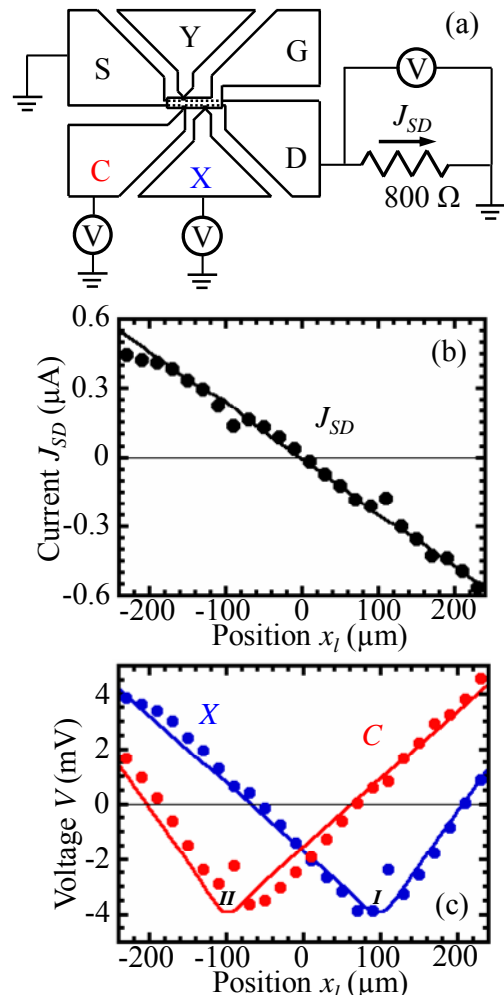


図6 (a)測定の様式図。(b)SD電流 J_{SD} および(c)C、X端子の電位。

移し、チャンネルからゲートへの電流が生ずる(図 7 J_G)。一方、電子のゲートから 2次元チャンネルへの遷移は、ゲート電位を上昇させ、リーク電流を引き起こす(図 7 J_L)。この時、非対称な位置に光を照射すると、電流の非対称な循環が生じ、試料の 2次元チャンネルに電流(図 7 J_{SD})が発生する。

光電流 J_{SD} (図 6 (b)) および同時に測定した C、X 端子の電位 (図 6 (c)) は、連続方程式に基づくモデルと比較し (図 6 (b)(c) 実線)、チャンネルに誘起される電流生成のメカニズムを明らかにした。

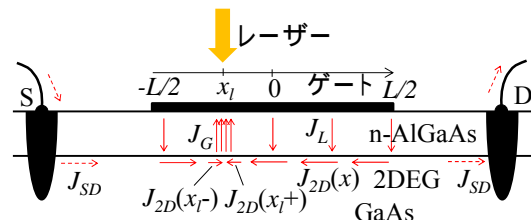


図7 面内電流の発生機構の様式図。

さらに、我々は、さまざまな手法で光照射を行い、面内電流が大きくなる条件を調べた。その結果、ゲート電極の端にレーザーを照射した時、最大となり、その値は約 9000nA/mW に達した(図 8)。

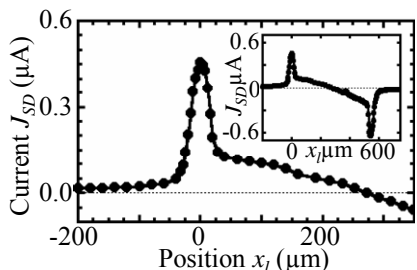


図8 SD電流 J_{SD} 。 $x_l=0$ はゲートの端を示している。

(2) 異方的ドット埋め込み素子の光電流

微傾斜 GaAs(111)B 基板上的 GaAs バッファには、高さ約 2nm、周期約 20nm の多段原子ステップが[-101]方向に形成される(図 9(a))。その上に、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、InGaAs ドットを作製した。図 9(b)にその AFM 像を示す。多段原子ステップ上の InGaAs ドットは、高さ約 4nm、面内サイズ約 50nm で形成され、ステップに沿って配列することがわかる。

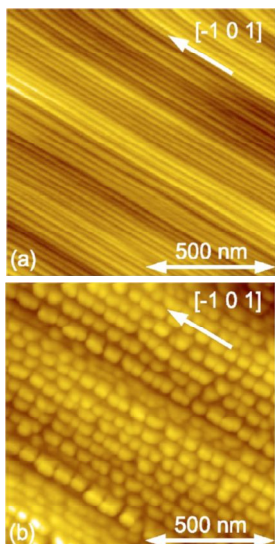


図9 微傾斜GaAs(111)B基板上的GaAs多段原子ステップ(a)とInGaAsドット列(b)。

図 10 に、試料の端付近にレーザーを照射して測定した光電流の照射位置依存性を示す。 $x=0$ は試料の端とレーザーの中心が一致する点、 $x<0$ は試料の外側、 $x>0$ は試料の内側を表している(図 5 参照)。レーザー(スポット半径 25 μm)が試料に当たっていない $x < -25 \mu\text{m}$ の時、光電流は生じていない。このことから、レーザーの迷光による光電流は存在しないことが確認できる。一方、試料の内側($x > 25 \mu\text{m}$)にレーザーを照射した場合には、異方的な量子ドットの影響により、約 30 nA の電流が生じている。注目すべきは、レーザーが試料の端($x = 25 \mu\text{m}$)に照射された時、光電流が非常に大きくなっている点である。試料の内側に照射した場合に比べて約 5 倍の光電流(~ 150 nA)が発生している。試料端の照射では、レーザーの半分しか試料に当たっていないことから、これは、実質、約 10 倍の光電流の増加に相当する。

この振る舞いを説明するために、実験とポルツマン方程式に基づく理論との比較を行った。その結果、異方的な InGaAs ドットとレーザー光の相互作用を考慮することにより、実験結果をうまく説明できることがわかった(図 10 実線)。

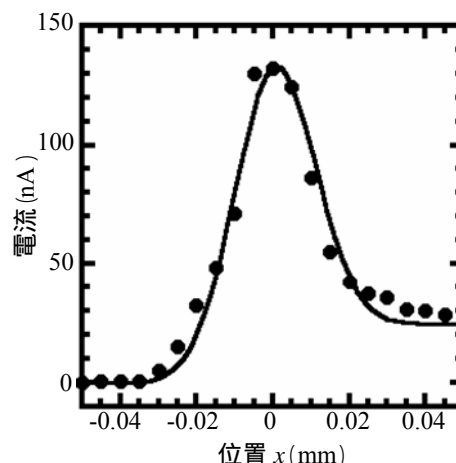


図10 レーザー照射位置に対する面内光電流。

(3) 量子構造の形成と物性評価

光ガルバノ効果を引き起こす新材料として有望と考えられる 微傾斜 GaAs(111)B 基板上的 InGaAs 量子細線 と GaAs 基板上的 GaSb タイプ 量子ドット について、物性評価を行った。前者は、大きな光学異方性を示すと予想されることから、系の対称性の低下に起因する光ガルバノ効果の新材料になりうると期待される。また、後者は、電子と正孔が空間的に分離されていることから、光励起された電子-正孔対の再結合時間が長く、キャリアの取り出し効率、すなわち、光電流の増大が期待される。

InGaAs 量子細線の光学異方性

図 11 は、微傾斜 GaAs(111)B 基板の上に、In 組成約 0.11、InGaAs 積層数 3 nm の条件で作製した InGaAs 細線の AFM 像である。微傾斜 GaAs(111)B 基板上的 GaAs 多段原子ステップバッファ(図 9(a))と同様、 [1-10]方向に細線が形成されていることがわかる。InGaAs 細線の高さは約 2 nm、周期は約 22 nm であった。

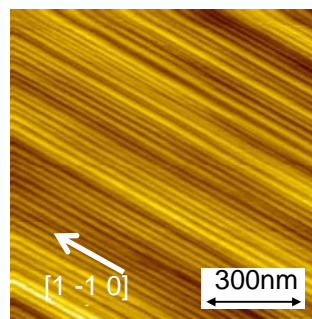


図11 微傾斜GaAs(111)B基板上的InGaAs量子細線。

図 12 は、量子細線方向([1-10]方向)とそれに垂直な方向の偏光に対するフォトルミネッセンス(PL)の測定結果である。InGaAs 量子細線からの発光は、1.477eV に観測されている。量子細線の異方性を反映して、細線に平行な偏光方向の PL は、垂直な方向に比べて、大きくなっていることがわかる。一方、1.503 eV に観測されている GaAs の PL ピーク強度は、偏光方向に依存していない。このことから、測定システムによる見かけ上の偏光依存性は存在していないことが確認できる。偏光方向に対する InGaAs 量子細線の PL 強度依存性を調べた結果、約 9.4% の高い偏光異方性を示すことがわかった。

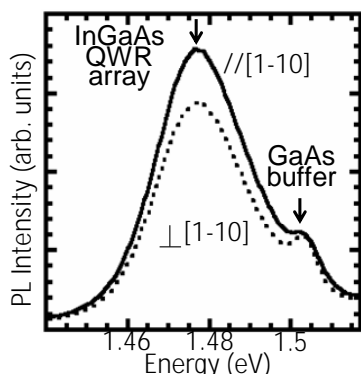


図 12 InGaAs量子細線のPL偏光異方性。

InGaAs 量子細線の高い光学的異方性の要因を明らかにするために、細線に閉じ込められた電子と正孔の波動関数を、Luttinger 有効ハミルトニアンを用いて、有限要素法により理論的に計算した(図 13)。その結果、(1)ステップ構造、(2) piezo電界を含むひずみの効果 および (3) 2つのファセットに対する層厚差 の3つが高い偏光異方性を説明する上で重要であることがわかった。

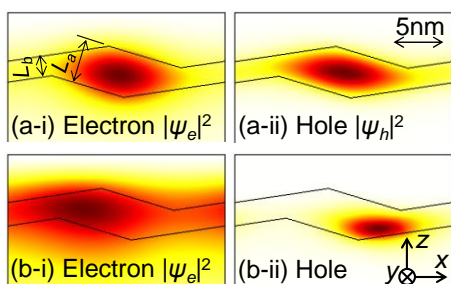


図 13 InGaAs量子細線の電子と正孔の波動関数。(a)ひずみなし、(b)piezo効果を含むひずみを考慮。

GaSb 量子ドットの作製と光学特性

GaSb 量子ドットの最適な作製条件を見つけるため、さまざまな Sb 分子線圧で、GaAs 基板上にドットを作製し、その密度を調べた。図 14 に、Sb 分子線圧を $1.2 \sim 3.6 \times 10^{-7}$ Torr で変化させた時の試料表面の AFM 像を示す。ここで、Ga 堆積速度は 0.13 ML/s に固定している。低い Sb フラックスの条件 (1.2×10^{-7} Torr) で作製した試料では、ドット形成は確認されなかった。一方、

2.0×10^{-7} Torr 以上の条件では、Sb 分子線圧が大きくなるにつれて、ドット密度は、始めは増加するが、その後、減少することがわかった。このようなV族のドット密度への大きな影響は、InAs ドットなどの As 系量子ドットでは見られず、GaSb ドット特有の現象である。また、Sb 圧の最適化 (2.7×10^{-7} Torr) により、非常に高密度なドット (約 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) が得られることが判明した。

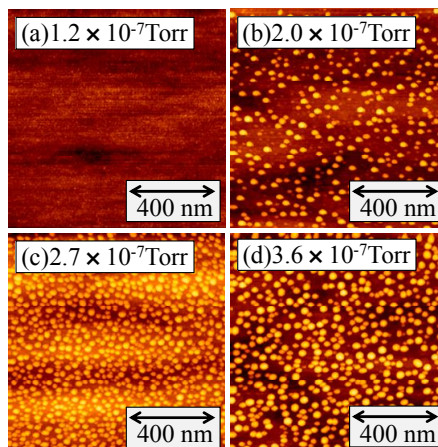


図 14 GaAs基板上のGaSbドットのSb圧依存性。

GaAs 上に GaSb 量子ドットを作製する場合、通常、濡れ層(WL)と呼ばれる2次元層が形成される。このような2次元層の存在は、電子-正孔対の緩和過程に大きな影響を与える。光ガルバノ素子において、電子-正孔対の緩和過程は、光電流生成効率を決める重要な要素となる。そこで、液滴エピタキシー法を用いて、WLのあるGaSbドットとないドットを作製することを試みた。その結果、アニール温度により、WLの有無を調整できることが判明した(図 15)。また、PLのレーザー強度依存性を詳細に調べることによって、WLの有無による電子-正孔対の緩和過程の違いを明らかにした。

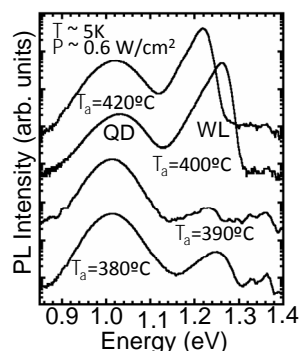


図 15 GaSbドット(WLあり,なし)のPLスペクトル。

また、GaSb 量子ドットの光学的性質を明らかにするために、電子と正孔の波動関数を、有効ハミルトニアンを用いて、有限要素法により理論的に計算した(図 16)。その結果、ドットの密度や配置によって、発光強度が大きく影響を受けることがわかった。これは、電子がドットの外に追い出される GaSb タイプ 量子ドット独特の現象であり、InAs ドットなどのタイプ I 量子ドットでは見られない。

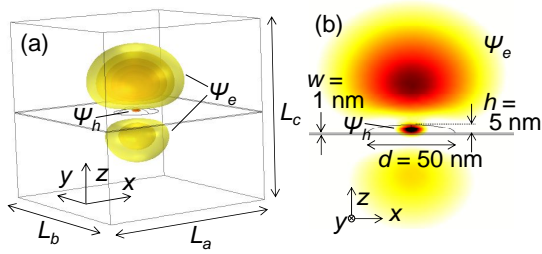


図15 GaSbドットにおける電子 ψ_e と正孔 ψ_h の波動関数。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

T. Kawazu, T. Noda, and Y. Sakuma, "Photoinduced current in n-AlGaAs/GaAs heterojunction field-effect transistor driven by local illumination in edge regions of Schottky metal gate", Japanese Journal of Applied Physics **56**, 04CG04, (2017). 査読有

T. Kawazu, T. Noda, Y. Sakuma, and H. Sakaki, "Effects of Ga deposition rate and Sb flux on morphology of GaSb quantum dots formed on GaAs", Physica Status Solidi (c), **14**, 1600109 (2017). 査読有

T. Kawazu, "Optical anisotropy of InGaAs quantum wire arrays on vicinal (111)B GaAs", Journal of Applied Physics, **120**, 134309, (2016). 査読有

T. Kawazu, T. Noda, Y. Sakuma, and H. Sakaki, "Excitation power dependence of photoluminescence spectra of GaSb type-II quantum dots in GaAs grown by droplet epitaxy", AIP Advances, **6**, 045312, (2016). 査読有

T. Kawazu, "Electric states in laterally and vertically arrayed type-II quantum dots", Japanese Journal of Applied Physics **54**, 04DJ01, (2015). 査読有

T. Kawazu, T. Noda, T. Mano, Y. Sakuma, and H. Sakaki, "Growth and optical properties of GaSb/GaAs type-II quantum dots with and without wetting layer", Japanese Journal of Applied Physics **54**, 04DH01, (2015). 査読有

T. Kawazu, T. Noda, Y. Sakuma, and H. Sakaki, "Lateral current generation in n-AlGaAs/GaAs heterojunction channels by Schottky barrier gate illumination", Applied Physics Letters, **106**, 022103, (2015). 査読有

〔学会発表〕(計9件)

T. Kawazu, T. Noda, and Y. Sakuma "Photo-induced Current in n-AlGaAs/GaAs Heterojunction Field-effect Transistor Driven by Local Illumination at Edge Regions of Schottky Metal Gate", Extended Abstracts of "2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)", N-3-03, Tsukuba, Japan, September 26-29, 2016.

川津 琢也, 野田 武司, 佐久間 芳樹, "Ga堆積速度およびSb分子線圧のGaSb量子ドット形成への影響", 第77回応用物理学会秋季学術講演(2016年秋季)講演予稿集, 15a-P11-3, 新潟県新潟市朱鷺メッセ, 2016/9/13-16

T. Kawazu, T. Noda, Y. Sakuma, and H. Sakaki, "Effects of Ga deposition rate and antimony flux on morphology of GaSb quantum dots formed on GaAs", "The 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2016)", MoP-ISCS-004, Toyama, Japan, June 26-30, 2016.

川津 琢也, 野田 武司, 佐久間 芳樹, 榊 裕之, "微傾斜GaAs(111)B基板上に作製したGaSbタイプナノロッドの光学異方性", 第63回応用物理学会(2016年春季)講演予稿集, 20p-P16-5, 東京都目黒区東京工業大学, 2016/3/16-22

川津 琢也, 野田 武司, 佐久間 芳樹, 榊 裕之, "ショットキバリアゲート照射によるn-AlGaAs/GaAs(001)ヘテロ接合チャネルの面内電流生成", 第76回応用物理学会秋季学術講演会(2015年秋季), 講演予稿集, 14p-PB2-19, 愛知県名古屋市名古屋国際会議場, 2015/9/13-16

川津 琢也, 野田 武司, 佐久間 芳樹, 榊 裕之, "GaSb/GaAs量子ドットの光学異方性における後熱処理の効果", 第62回応用物理学会(2015年春季)講演予稿集, 13a-P15-6, 神奈川県平塚市東海大学, 2015/3/11-15

T. Kawazu, T. Noda, T. Mano, Y. Sakuma, and H. Sakaki, "Growth and Optical Properties of GaSb/GaAs type-II Quantum Dots with and without Wetting Layer", Extended Abstracts of "2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2014)", PS-8-2, Tsukuba, Japan, September 8-11, 2014.

T. Kawazu, "Electric states in laterally and vertically arrayed Type-II Quantum Dots", Extended Abstracts of "2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2014)", PS-9-12, Tsukuba, Japan, September 8-11, 2014.

川津 琢也, 野田 武司, 間野 高明, 佐久間 芳樹, 榊 裕之, "高指数面GaAs基板上のGaSbおよびAlSb量子ドットの成長", 第75回応用物理学会(2014年秋季)講演予稿集, 19a-PB5-4, 北海道札幌市北海道大学, 2014/9/17-20

〔その他〕

ホームページ <http://samurai.nims.go.jp/>

6. 研究組織

(1) 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

・機能性材料拠点・主任研究員

研究者番号: 00444076

(2) 連携研究者

大森 雅人 (Ohmori, Masato)

名古屋大学・産学協同研究部門・特任講師

研究者番号: 70454444

秋山 芳広 (Akiyama, Yoshihiro)

豊田工業大学・工学研究科・研究員

研究者番号: 60469773