

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：33924

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18866

研究課題名（和文）レーザー照射で作製する省エネ電源用GaNスーパー接合パワーデバイス技術の確立

研究課題名（英文）Development of laser-irradiated acceptor activation technology of GaN super junction power devices for high-efficiency power systems

研究代表者

岩田 直高（Iwata, Naotaka）

豊田工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40708939

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：MgとSiを共ドーピングしたGaNへのArFエキシマレーザー照射により、アクセプタを活性化させる技術を開発した。まず、MgドーピングGaN/SiドーピングGaN構造ウエハを用いてレーザー照射を行い、縦型pnダイオードの評価によりMgの活性化を明らかにした。次に、照射強度とアクセプタ活性化の関係を詳細に調べ、2mJ/cm²程度の狭い強度範囲で良好な活性化が得られること、より高い強度では活性化の抑制と表面酸化の発生を観察した。この結果を用いて、Mg/Si共ドーピングGaNを用いて照射を行い、フォトルミネッセンスとダイオード特性を調べたところ、アクセプタの発光強度増加と濃度増加が得られ、Mgの活性化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有機金属気相成長法によるGaNは、ドーピングしたMgが水素と結合してアクセプタとして働かず、この活性化には熱処理が必要である。パルスレーザー照射は熱処理と異なり短時間の処理であるため、アクセプタの拡散を防ぐとともに照射する部分だけに活性化処理が施せる。この手法をMg/Si共ドーピングGaNに対して適用検討することで、照射部分にp型領域を形成し、照射しない部分のn型領域と縦方向に繰り返し並べたスーパー接合構造の実現を目指す。スーパー接合デバイスは、他のパワーデバイスとは異なり、オン抵抗と耐圧特性のトレードオフを大幅に改善するので、高効率な電力制御が可能となり、省エネルギー社会の実現に大きく寄与する。

研究成果の概要（英文）：We have developed a technique to activate acceptors by irradiating GaN co-doped with Mg and Si with an ArF excimer laser. Unlike heat treatment, laser irradiation can be activated only on the irradiated part. First, laser irradiation was performed using a Mg-doped GaN/Si-doped GaN structure wafer, and the activation of Mg was clarified by evaluating a vertical pn diode. Next, the relationship between irradiation intensity and acceptor activation was investigated in detail, and it was found that good activation can be obtained in a narrow intensity range of about 2 mJ/cm², and at higher intensities activation was found to be suppressed and surface oxidation occurred. Based on these results, irradiation was performed using Mg/Si co-doped GaN, and photoluminescence and diode characteristics were investigated. As a result, increases in the emission intensity and concentration of the acceptor were obtained, and the activation of Mg was realized.

研究分野：GaNを用いたパワーデバイスの研究開発

キーワード：GaN 有機金属気相成長法 Mgアクセプタ Siドナー 活性化 ArFエキシマレーザー スーパー接合パワーデバイス

1. 研究開始当初の背景

有機金属化学気層成長(MOCVD)法によるMgドープGaN層は、Mgが水素と結合してアクセプタとして活性化されないことが知られている。この活性化には900℃程度での熱処理が必要であるが、正孔のイオン化率は1%程度と低いうえに、アクセプタの活性化も再現性に乏しく、さらにはMgが偏析するなど問題がある。様々な検討を進める中で、通常の熱処理炉を用いた熱平衡的なアニール処理に対して、レーザー照射によるアクセプタ不純物の活性化が極めて短時間(10ns程度)での処理であるため、Mgの拡散を防ぐとともに非熱平衡的な処理が施せると着想するに至った。そして検討を重ねて、ArFエキシマレーザーを用いたMgアクセプタの活性化に初めて成功した¹⁾。図1に示すように、ArFエキシマレーザーからの深紫外パルス光は、可動ステージ上のGaN試料に照射され、任意の領域が処理できる。同時に、試料表面での散乱光および内部からの発光は分光器で観測される。このように開発した手法は、試料のレーザー照射処理とその場観測が可能である。図2に、レーザー光が照射された部分(中央部)とされていない部分(その両側)の原子間力顕微鏡像(右図)とケルビンフォース顕微鏡像(左図)を示す²⁾。原子間力顕微鏡像ではレーザー照射のあるなしで構造的な差異(段差)は認められないが、ケルビンフォース顕微鏡像ではレーザーが照射された中央部の電位が高く、この領域でMgアクセプタが活性化したことを示す。したがって、レーザー照射のあるなしで活性化の局所制御が可能である。

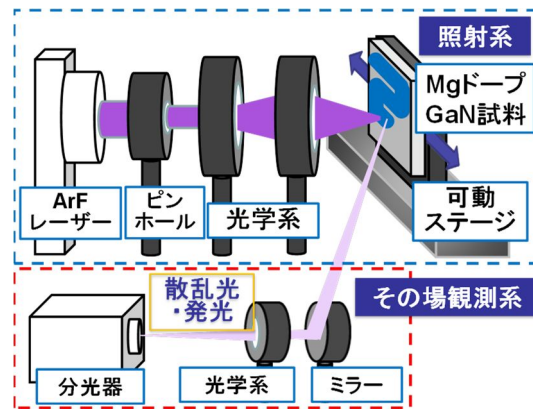


図1 ArFレーザー照射とその場観測系

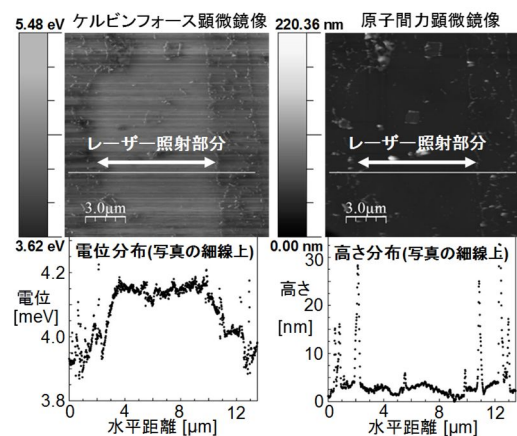


図2 試料表面の電位(左図)と構造(右図)²⁾

2. 研究の目的

本研究の目的は、縦型のGaNスーパー接合構造を実現する技術の構築である。それに向け、ArFエキシマレーザー短パルス光をMgドープGaNに照射し、結晶性を評価しながらアクセプタを活性化させる新しく開発した手法を、半導体プロセス技術として確立するとともに、MgとSiを一緒にドープ(共ドープ)したGaN層に対してp型領域を形成したい場所へこの技術を適用することにより、良好な結晶性のp型層とn型層を縦に並べたスーパー接合構造を実現する技術を開発する。

この研究により実現する低損失高耐圧GaNトランジスタのドリフト層形成技術を用いて、電力制御用パワーデバイスとして現在広く用いられているSiの絶縁ゲートバイポーラトランジスタをGaNスーパー接合トランジスタと置き換えることにより、電気エネルギーの有効利用、ひいては持続可能な社会の実現に貢献する。

3. 研究の方法

アクセプタとドナーを共ドープした新規なウエハを用いてスーパー接合を形成する手順を図3に示す。ウエハは、オーミック電

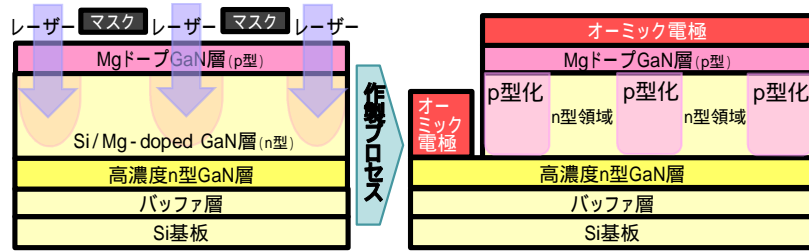


図3 共ドープウエハにマスクを設けてレーザー照射する様子(左図)とこの技術を用いたスーパー接合素子の構造(右図)

極への低接触抵抗接続のためのp型およびn型Ga₂Nコンタクト層を有し、その間にMgとSiを共ドープしたGa₂N層を挟み込んだ構造である^{*})。その共ドープGa₂N層は、縦型スーパー接合デバイスのドリフト層となり、一緒にドープするMgとSiそれぞれの不純物濃度と層の厚さの3つが重要なパラメータである。ドープしたMgは水素で不活性化されているため、正孔はほとんど発生しない。一方Siドナーの活性化率は高いため、活性化処理前の共ドープGa₂Nドリフト層は、Siドープ濃度に近いn型となる。そして図3(左図)に示すように、この層に対して上方からのマスクを用いたレーザー照射による局所的な活性化を施し、縦型のpn層の繰り返し構造を形成する。図3(右図)に完成したスーパー接合デバイス構造を示す。高耐压特性を示すスーパー接合構造を得るためには、逆バイアス印加でpn接合が同時に消滅する必要がある。これには、一様なn型層の所望の部分にp型に転換したうえで、n型層と同じ濃度のp型層を実現するMgドープ濃度を、レーザー照射処理による活性化率から算出する。

本研究では、3段階の検討を行った。まず、MgドープGa₂N/SiドープGa₂N構造ウエハを用いてレーザー照射を行い、縦型構造のpnダイオード評価によりMgの活性化を検討した。次に、厚いMgドープGa₂N層を有するウエハを用いて、照射強度とアクセプタ活性化の関係を詳細に調べた。最後にMg/Si共ドープGa₂Nを用いた検討を行った。

^{*} 申請時にはp型コンタクト層の形成を目論んでいたが、コロナ禍で結晶成長の検討が順調に行えず、この層の無い構造で検討した。ただし、縦型pnダイオードを検討するウエハ(図4参照)ではこれを含めることができた。

4. 研究成果

最初の検討の目的は、Mgアクセプタの高い活性化とその結果を用いた縦型pnダイオードを作製評価することであり、複数の活性化の手法を検討した。ウエハは、MOCVD法で形成し、サファイア基板の上にGa₂Nバッファ層、その上に2層のSiドープ層(n⁺型層、n型層)、2層のMgドープ層(p⁺型層、p型層)で構成されている。ドーピング濃度はそれぞれ、Siが 1×10^{18} 、 1×10^{16} 、Mgが 2×10^{20} 、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。ドープしたMgは、Hとの結合により不活性となりGa₂N層の抵抗値は高い。Mgアクセプタの活性化処理にはArFエキシマレーザーを用いたレーザー照射に加えて縦型の熱処理炉(縦型炉)とフラッシュランプ炉を用いた熱処理を試みた。

図4に作製した縦型pnダイオードの構造

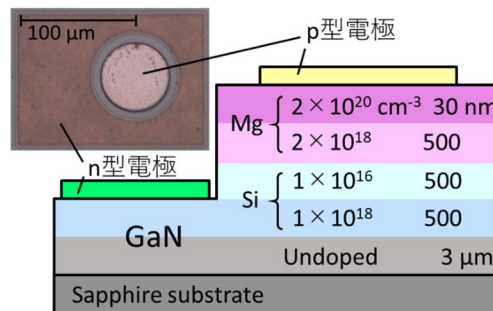


図4 縦型 pn ダイオード構造と素子外観

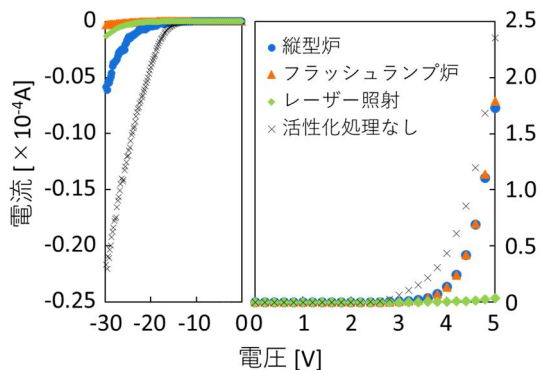


図5 ダイオードI-V特性

を示す。p型領域は丸型で、電極の直径は63 μm である。初めにアクセプタ活性化処理を行った。熱処理の条件は、縦型炉とフラッシュランプ炉で800 $^{\circ}\text{C}$ 、10分間、 N_2 雰囲気下である。レーザー照射処理の条件は、波長193nm、強度0.13mJ、周波数150Hz、パルス幅5nsである。比較のために活性化処理を行っていない(非活性化)素子も同時に作製した。エッチング時のマスクの役割を果たすSiN膜と SiO_2 膜を、原子層堆積(ALD)法を用いて成膜した。次に誘導結合型プラズマエッチングにより表面から1000nm、GaN層を除去した。プラズマ生成用RF電力/イオンエネルギー制御用RF電力は120W/15W、 Cl_2 と BCl_3 の流量はともに20sccmである。続いて、電子ビーム蒸着法を用いてn型層上にAu(100nm)/Ti(30nm)/Al(80nm)/Ti(20nm)電極を、p型層上にAu(20nm)/Ni(20nm)電極を形成した。オーム性接触獲得のために700 $^{\circ}\text{C}$ 、2.5分間の熱処理を N_2 雰囲気下で行った。最後に、半導体表面にSiN膜を3nm、ALD法を用いて成膜した。

作製したダイオードの電流電圧(I-V)測定の結果を図5に示す。活性化処理をした素子は非活性化素子(図中x)と比べ立ち上がり電圧が高く、リーク電流が低い。一方、非活性化素子はショットキーダイオードに近い特性を示した。したがって、活性化素子ではpn接合が形成されたと推察した。続いて-30Vから5Vの範囲で容量電圧(C-V)測定を行った。活性化素子では-20V以上の逆方向バイアスで容量の変化が確認できた。Mgアクセプタが活性化し形成されたp型層が、逆方向バイアスの印加で空乏化したと考えられる。 $1/C^2$ と印加電圧Vの傾きから正孔濃度を $2 \sim 4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ と見積もった。

次に行った検討の目的は、MgドープGaNに照射するレーザー光強度と活性化で生じる正孔濃度の関係を明らかにすることである。MOCVD法によるエピタキシャルウエハは、Si基板、バッファ層、GaN層、MgドープGaNで構成される。MgドープGaN層は、厚さ690nm、Mgドープ濃度は $1.7 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ である。成長後(As grown)の正孔濃度は $0.27 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ であった。活性化はArFエキシマレーザー(193nm、150Hz、6nsパルス)を用いて、強度 $1.6 \text{J/cm}^2 \sim 2.6 \text{J/cm}^2$ で行った。照射されたレーザー光のサイズは $400 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ であり、図1で示したように、ピンホール、合成石英ガラス、凹、凸レンズを通して試料面へ集光される。試料への均一な照射のため、 $200 \mu\text{m}$ 重ねて、1mm/sでスキャンした。

活性化の評価は、ホール効果測定により行った。図6に、正孔濃度のレーザー光強度依存性を示す³⁾。レーザー光強度による外観や構造の変化、原子放出数の関係も併せて示す。強度の上昇に伴い正孔濃度は上昇した。2.0と 2.1J/cm^2 では、良好な表面状態であり、正孔濃度は $1.4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、活性化率は27%である。この値は熱処理と同等である。このレーザー強度は、原子を放出せず結晶内部に影響を与えられる「材料改質領域」であると考えられる。更なる強度の増加で正孔濃度は低下し、 2.6J/cm^2 で測定不可となった。表面は照射痕が現れ、損傷した。僅かに損傷した 2.3J/cm^2 における透過型電子顕微鏡像から表面のアモルファス化を、エネルギー分散型X線分析から界面の酸化を観察した³⁾。

最後に、MgとSiを共ドープしたGaNを用いてレーザー照射による活性化を検討した。ウエハはMOCVD法で形成し、サファイア基板、バッファ層、 $2 \mu\text{m}$ 厚のSiドープGaN、

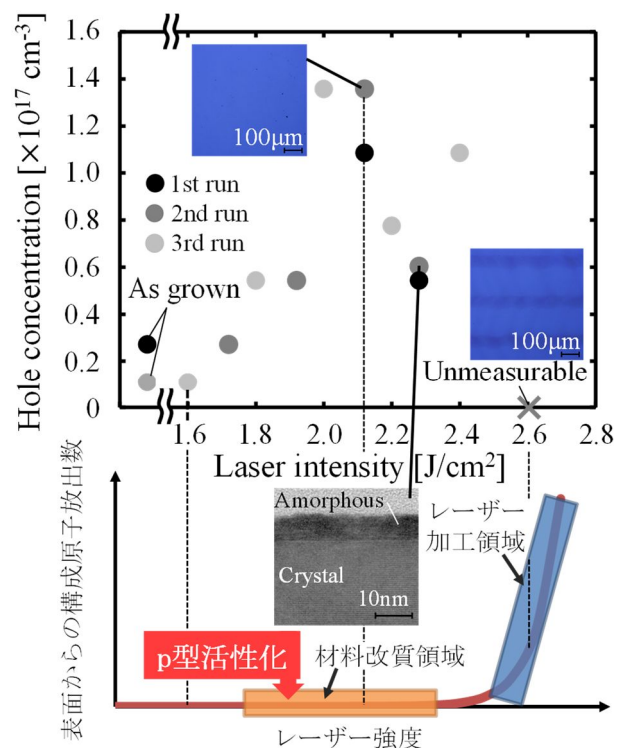


図6 正孔濃度と表面状態のレーザー強度依存性³⁾

1 μm 厚のMgとSi共ドープGaNで構成される。Mg濃度は $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、Siの濃度は $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ で共ドープ層からSiドープ層の下端まで一様である。成長後(As grown)での電子濃度は、ホール効果測定より $2.3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ である。活性化のレーザー強度は、最適化した 2.0J/cm^2 である³⁾。活性化を評価するためにフォトルミネッセンス(PL)とダイオードの接合容量を調べた。ダイオードは、反応性イオンエッチングにより1 μm のメサ構造を形成し、エッチングした面にはオーミック電極、メサ上にはショットキー電極を形成した。

図7(a)に、ArFエキシマレーザー励起光(10mW/cm^2)を用いたPLの発光スペクトルを示す。レーザー照射試料において、GaNのバンドギャップより長波長側で強度が増加した。伝導帯-アクセプタ間の発光と考えられる。次に、ダイオードのC-V測定を行った。図7(b)に $1/C^2$ -V特性を示す。線形領域の傾きから得られた

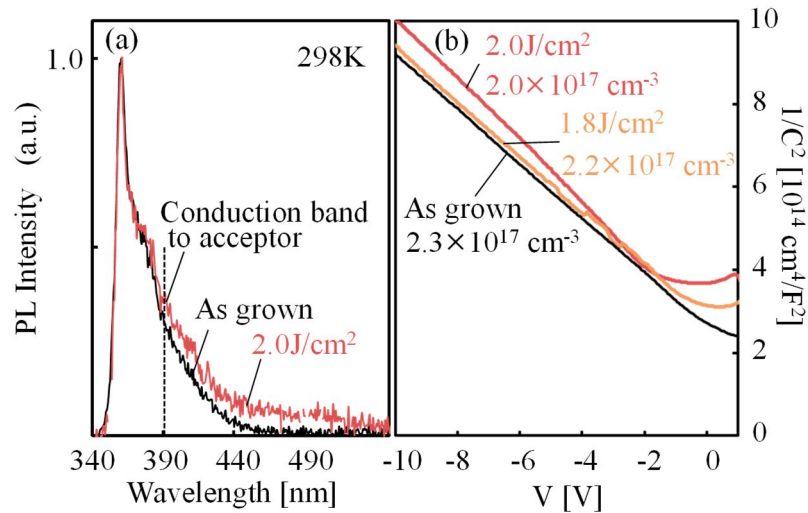


図7 (a)PLスペクトル (b)ダイオードの $1/C^2$ -V特性⁴⁾

正味のドナー濃度は、As grown試料で $2.3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、レーザー照射試料で $2.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ であった。これは活性化したMgアクセプタが電子を補償したと推察される。Mg濃度を増加させることでp型反転が期待できる。

以上、所期の目的である、縦型のGaNスーパー接合構造を実現する技術の構築を行った。すなわち、ArFエキシマレーザー短パルス光をMgドープGaNに照射し、結晶性を評価しながらアクセプタを活性化させる手法を、半導体プロセス技術として確立するとともに、MgとSiを共ドープしたGaN層に対してp型領域を形成したい場所へこの技術を適用することにより、良好な結晶性のp型層とn型層を縦に並べたスーパー接合構造を実現する技術を開発した。

参考文献

- 1) 松本, 黒瀬, 下野, 岩田, 山田, 神谷, 青柳, 「MgドープGaNのレーザー誘起による活性化とその局所制御」, 第78回秋季応用物理学学会学術講演会, 5p-A301-8, 2017年9月5日.
- 2) N. Kurose, K. Matsumoto, F. Yamada, T. M. Roffi, I. Kamiya, N. Iwata, and Y. Aoyagi, "Laser-induced local activation of Mg-doped GaN with a high lateral resolution for high power vertical devices," AIP Advances, **8**, 015329 (2018).
- 3) R. Kamiya, T. Ichinose, Y. Zhang, N. Kurose, I. Kamiya, Y. Aoyagi, and N. Iwata, ISPlasma2021, on line, 10p-14.
- 4) R. Kamiya, Y. Yonetani, Y. Zhang, I. Kamiya, N. Kurose, Y. Aoyagi, and N. Iwata, ISPlasma 2022, on line, 08pC080.

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 0件）

1. 著者名 Kawata Soichiro, Zhang Yuwei, Iwata Naotaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Breakdown voltage enhancement of p-GaN/AlGaN/GaN diode by controlling Mg acceptors for compensating residual Si donors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac7630	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 Zhang Yuwei, Kawata Soichiro, Iwata Naotaka	4. 巻 61
2. 論文標題 Low turn-on voltage rectifier using p-GaN gate AlGaN/GaN high electron mobility transistor for energy harvesting applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA1013-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac1b74	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 Iwata Naotaka, Kondo Takaaki	4. 巻 60
2. 論文標題 High-selectivity dry etching for p-type GaN gate formation of normally-off operation high-electron-mobility transistor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SAAD01-1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abb759	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13件（うち招待講演 1件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Ryuji Kamiya, Yukari Yonetani, Yuwei Zhang, Itaru Kamiya, Noriko Kurose, Yoshinobu Aoyagi, and Naotaka Iwata
2. 発表標題 Conduction change of Mg and Si co-doped GaN layer by ArF laser irradiation
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Soichiro Kawata, Satoshi Fukutani, Yuwei Zhang, and Naotaka Iwata
2. 発表標題 High breakdown voltage of p-GaN/AlGaIn/GaN diode with controlled Mg acceptor charges
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuwei Zhang, Soichiro Kawata, and Naotaka Iwata
2. 発表標題 Low turn-on voltage rectifier using p-GaN gate AlGaIn/GaN high electron mobility transistor for energy harvesting applications
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 川田 宗一郎, ジャン ユーウェイ, 岩田直高
2. 発表標題 MgドープGaN層の厚さを変えて電荷濃度を制御したp型GaN/AlGaIn/GaNダイオードの耐圧特性
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 Yuwei Zhang and Naotaka Iwata
2. 発表標題 Two-step mesa p-GaN gated anode diode for low-power rectification applications
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuwei Zhang and Naotaka Iwata
2. 発表標題 P-GaN gate AlGaN/GaN high electron mobility transistor with nearly-zero threshold voltage for power rectification applications
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryuji Kamiya, Takahito Ichinose, Yuwei Zhang, Noriko Kurose, Itaru Kamiya, Yoshinobu Aoyagi, and Naotaka Iwata
2. 発表標題 Controlled activation of Mg dopant by laser irradiation for p-GaN formation
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Soichiro Kawata, Hinano Kondo, Yuwei Zhang, and Naotaka Iwata
2. 発表標題 P-GaN gated AlGaN/GaN diode for rectification applications
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 畔柳壮、近藤孝明、安野聡、小金澤智之、岩田直高
2. 発表標題 p型GaN上に形成したAu/Ni電極の熱処理による低接触抵抗化
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 安野聡、畔柳壮、小金澤智之、岩田直高
2. 発表標題 Au/Ni/p-GaNオーミックコンタクトの熱処理温度依存性とバンドアライメント評価
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第6回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yasuno, Tomoyuki Koganezawa, So Kuroyanagi, Naotaka Iwata
2. 発表標題 Characterization of Au/Ni ohmic contact on p-GaN using hard X-ray photoelectron spectroscopy and 2D-X-ray diffraction
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 So Kuroyanagi, Satoshi Yasuno, Takaaki Kondo, Tomoyuki Koganezawa, Naotaka Iwata
2. 発表標題 Formation of ohmic contact to p-type GaN by heat treatment of Au/Ni electrode
3. 学会等名 12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Noriko Kurose, Naotaka Iwata, and Itaru Kamiya
2. 発表標題 Laser-induced local activation of Mg-doped GaN and AlGaN for high power vertical devices
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

豊田工業大学HOME 研究・産学連携 研究室紹介 電子デバイス
<https://www.toyota-ti.ac.jp/research/laboratory/post-17.html>

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