

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560399

研究課題名(和文) 族窒化物半導体における表面界面障壁高さの制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on surface barrier height in nitride-based semiconductors

研究代表者

徳田 博邦 (Tokuda, Hirokuni)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・特命助教

研究者番号：10625932

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：AlGaIn/GaNヘテロ接合に、Ni/Alを蒸着し真空中で熱処理すると、室温のシート電子濃度と移動度が増加する。この増加する現象を、ソース抵抗の低減に利用するために、HEMTを試作した。ソース・ゲート間距離を変えて試作し、素子のソース・ドレイン間抵抗(R<sub>ds</sub>)を真空熱処理層有り、無しで比較した。その結果、熱処理層を設けることによりR<sub>ds</sub>が減少することが分かった。ただしR<sub>ds</sub>の減少量は、熱処理無しの場合にくらべて約10%程度であり、効果は小さかった。真空熱処理層を適用して素子特性を向上させるには、今後さらにより効果的な素子構造を検討する必要があり、このことが今後の課題である。

研究成果の概要(英文)：We found that sheet electron density and electron mobility were increased in AlGaIn/GaN heterostructures deposited with Ni/Al by annealing in vacuum. By optimizing the Ni/Al thickness, we achieved a room temperature mobility of 3050 cm<sup>2</sup>/Vs, which is the highest value ever reported for AlGaIn/GaN heterostructures. To apply this technology for improving the device performance, we fabricated AlGaIn/GaN HEMTs by placing vacuum annealed Ni/Al layers alongside the source electrode. The on-resistance between source and drain (R<sub>ds</sub>) was compared for with and without vacuum annealed Ni/Al layers. The results showed that R<sub>ds</sub> was reduced for the HEMTs with vacuum annealed Ni/Al layers, however, the amount of R<sub>ds</sub> reduction was much small than that was expected. Although the newly developed vacuum annealing technology can reduce the source resistance, the effect of the reduction is limited. There remains a challenge to study HEMTs' structure to which the vacuum annealing technology is applicable.

研究分野：半導体工学

キーワード：AlGaIn/GaN heterostructure barrier height sheet electron density mobility Hall effect measurement

## 1. 研究開発当初の背景

Ga、Al、In などの III 族金属元素と窒素との化合物である GaN、AlGa<sub>N</sub>、AlInN などの半導体は III 属窒化物半導体 (以下「窒化物半導体」と記す) と呼ばれる。窒化物半導体は、Si に比べてバンドギャップが大きい、電子飽和速度が高い、また AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> や AlInN/Ga<sub>N</sub> などのヘテロ接合を形成することにより高い電子移動度が得られる、などの優れた材料特性を有しているため、高耐压、大電流、高温動作が可能なスイッチング素子や、高周波素子への応用を目指して開発が進められている。窒化物半導体の本格的な実用化を阻んでいる最大の問題は、ショットキ接合を形成した場合にはしばしば観測される大きな逆方向のリーク電流と、電界効果型トランジスタ (FET) において大きなドレイン電圧を印加した際にドレイン電流が減少する「電流コラプス」と呼ばれる不安定性が解決できていないためである。

上記リーク電流や電流コラプスが解決されない理由は、AlGa<sub>N</sub> や AlInN の半導体表面および金属/半導体界面に存在する高密度の表面・界面準位に関する理解が進んでいないためである。一般的には AlGa<sub>N</sub> 層表面には高密度の表面準位が存在するため、表面障壁高さ ( $\Phi_B$ ) はピン止めされほとんど動かないものと考えられてきた。また AlGa<sub>N</sub> 層に Ni などの金属を蒸着しショットキ接合を形成した場合には、ショットキ接合の障壁高さを電流-電圧特性から測定すると、通常の解析手法により得られる  $\Phi_B$  は見かけの障壁高さであり、表面に高密度の準位が存在するため  $\Phi_B$  は実際よりも低く観測されること、また実際の  $\Phi_B$  の温度依存性は 300°C 程度まではほとんど変化が無いことなどが最近判ってきた[1]。このように、 $\Phi_B$  は AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 界面の 2DEG 濃度を定めるなど極めて重要なパラメータであるが、「変わる」のか「変わらない」のか、それらは自然表面 (AlGa<sub>N</sub> 表面に意図的には何も付着させていない状態) とショットキ接合ではどうなるのか、などに関してほとんど判っていないのが実情である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、III 族窒素化合物半導体の表面・界面障壁高さを制御する方法を見出すこと、および制御された障壁高さと素子特性との関係を調べることである。具体的には、GaN、AlGa<sub>N</sub>、AlInN などの半導体

表面の障壁高さがどのような機構で決まり、これら障壁高さを制御するにはどうすれば良いのかを見出すことが第 1 段階である。第 2 段階では、制御された障壁高さと素子特性、特に電流の温度依存性との関係を調べることを目的とする。

本研究提案者らは、AlInN/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合結晶のシート電子濃度 ( $n_s$ ) と移動度 ( $\mu$ ) の温度依存性を調べている際に、 $n_s$  の温度依存性が真空中と空气中で測定した場合とで異なる挙動を示すことを発見し、これが表面障壁高さ ( $\Phi_B$ ) の変化によるものであることを示した[2]。この  $\Phi_B$  変化は、AlInN 表面に形成された表面酸化膜が真空中では高温 (250°C 以上) で分解し、AlInN 表面の Al、In、N、および O 原子の再配置によりもたらされるものと推定しているが、詳細はまだ不明である。一方、空气中では 500°C の高温でも  $\Phi_B$  の変化は観測されなかった。この実験で重要なことは、雰囲気と温度を変えることにより「AlInN の  $\Phi_B$  を変えることが出来る」すなわち制御できる可能性を示した点にある。

本研究では上記知見を元に、種々の窒化物半導体材料表面に種々の接合を形成し、 $\Phi_B$  の変化を調べることにより、 $\Phi_B$  がどのような機構で決まり、それを制御するにはどのような条件が必要かを明らかにする。

### <引用文献>

- [1] D. Donoval et al., J. Appl. Phys., vol. 109, 063711 (2011).
- [2] M.T. Hasan et al., Appl. Phys. Lett., vol. 99, 132102 (2011).

## 3. 研究の方法

本研究は、下記に示す研究内容を 3 年間に亘り段階を踏んで実施した。

H24 年度は、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合のシート電子濃度 ( $n_s$ )、および移動度 ( $\mu$ ) の温度依存性を測定し、窒化物半導体 (AlGa<sub>N</sub> 層) の表面障壁高さ ( $\Phi_B$ ) の変化を系統的に調べた。特に、自然表面 (表面に故意に処理を行わない) と SiN 膜、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を堆積させた表面との違い、および表面処理方法を変えて  $\Phi_B$  の変化を系統的に調べた。

H25 年度は、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合表面に Ti/Al や Ni/Al などの複合膜を堆積させた試料を熱処理すると、室温の  $n_s$ 、 $\mu$  が熱処理前に比べて大幅に増加

することを見出したので、この  $n_s$ 、 $\mu$  の増加量と堆積させる金属種との関係を重点的に調べた。また  $n_s$ 、 $\mu$  が増加する機構についても検討を行った。

H26年度は、上記  $n_s$ 、 $\mu$  の増加現象を素子特性の向上に適用するために、AlGaIn/GaN HEMT を試作し、ソース抵抗の低減に対する検討を行った。

#### 4. 研究成果

AlGaIn/GaN ヘテロ接合のシート電子濃度( $n_s$ )の温度依存性をホール効果により調べた。結果を図1に示す。試料は自然表面(表面処理なしかつ何も堆積させていない)で、(a)は真空中、(b)は空気中での結果である。

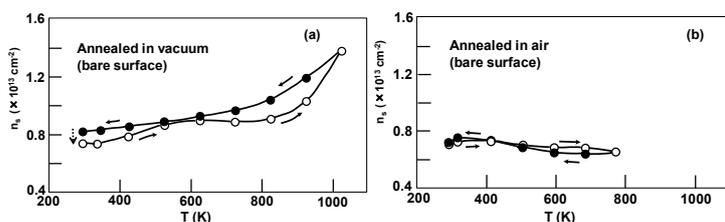


図1 AlGaIn/GaN のシート電子濃度の温度依存性。(a)は真空中、(b)は空気中で熱処理を行った結果を示す。○印は室温から温度を増加させた場合、●印は高温から室温に戻した場合の結果を示す。点線矢印は、熱処理後15時間空気中に放置した後の  $n_s$  の動きを示す。

図示する通り、真空中で温度を増加させると  $n_s$  は550K (280°C) 付近で急激に増加すること、また高温から室温に戻すと室温での  $n_s$  は熱処理前に比べて増加することが分かった。また熱処理後の試料を空気中に放置すると  $n_s$  は減少し、15時間後には熱処理前の値に戻ることが分かった。一方空気中での熱処理では、 $n_s$  は温度を増加・減少させてもほとんど変わらず、また熱処理後の  $n_s$  は熱処理前の値とほぼ同じであることが分かった。これらの結果から、以下のことが明らかになった。

- ① AlGaIn/GaN を真空中で熱処理すると、550K 付近で表面の酸化膜が脱離し、表面障壁高さ ( $\Phi_B$ ) が低下するために  $n_s$  が増加する。
- ② 真空中の熱処理では、脱離した表面の酸化膜が再度形成されることが無いため、熱処理後の  $n_s$  は熱処理前よりも高くなる。
- ③ 真空熱処理により  $n_s$  が増加した試料を空気中に放置すると、15時間程度で表面に酸化膜が形成される。このために  $\Phi_B$  が増加し、 $n_s$  が

低下する。

- ④ 一方熱処理を空気中に行うと、 $\Phi_B$  はほとんど温度依存性を持たない。このため熱処理によっても  $n_s$  はほとんど変化しない。

以上の結果より、AlGaIn 層の自由表面は、表面が酸化されているか否かによって  $\Phi_B$  が変わること、また酸化された表面は熱処理によっても安定であることが明らかになった。

また表面処理として、フッ酸、塩酸、硫化アンモニウム処理などを行った試料について、表面障壁高さの違いを系統的に調べた。その結果、 $n_s$  は硫化アンモニウム処理により大きく増加することが分かった。この増加は硫化アンモニウム処理により表面の酸化膜が除去され表面障壁高さが減少したためと考えられる。

次に、AlGaIn/GaN 表面に SiN 膜と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を堆積させた試料を作製し、図1と同様に  $n_s$  の温度依存性を調べた。その結果以下のことが分かった。

- ① □ 膜を堆積させた状態 (as-depo.) での室温の  $n_s$  は、自由表面に比べて、SiN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜では各々10、50%増加する。
- ② □ この  $n_s$  の増加は  $\Phi_B$  の低下では説明できず、膜を堆積させることにより膜中に正電荷が導入されるためと考えられる。
- ③ □ SiN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜どちらの膜についても、 $n_s$  の温度依存性は自由表面に比べて小さく、また真空中、空気中どちらの熱処理においても、熱処理後空気中に放置するとほぼ as-depo. 状態の  $n_s$  に戻る。

以上の結果より、AlGaIn 層に SiN や Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を堆積させると  $\Phi_B$  は熱処理や雰囲気によらず安定であることが分かった。

次に、AlGaIn 表面に金属を堆積させた試料を作製し、シート電子濃度( $n_s$ )と移動度( $\mu$ )の温度依存性を調べた。図2に試料の(a)断面構造と(b)平面図を示す。

図2の試料を真空中で室温から1020K (750°C)まで昇温し、1020Kから室温まで戻して  $n_s$ 、 $\mu$  の温度依存性を測定した。結果を図3に示す。図示する通り、試料を室温から昇温すると、 $n_s$  は650K(380°C)付近で急激に増加することが分かる。温度を室温まで下げても  $n_s$  は昇温前の値に比べて25倍程度高くなる。また  $\mu$  は温度上昇とともに減少し650K付近でこぶ(hump)を示す。温度を室温まで下げると昇温前の値に比べ

て約 70% (1500→2550cm<sup>2</sup>/Vs)増加した。

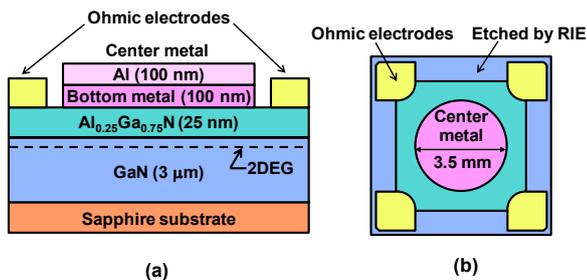


図 2 作製した試料の(a)断面図と(b)平面図。Center 金属の種類を変え、 $n_s$  と  $\mu$  の温度依存性を測定した。(M.Kuzuhara and H. Tokuda, IEEE Trans. Electron Devices, 62, 415 (2015)より転載)

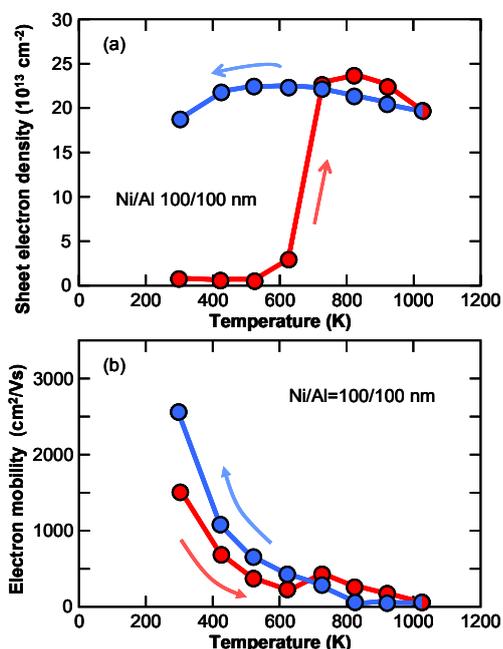


図 3 (a)シート電子濃度( $n_s$ )と(b)移動度( $\mu$ )の温度依存性。Center 金属が Ni/Al の場合の結果を示す。(M.Kuzuhara and H. Tokuda, IEEE Trans. Electron Devices, 62, 415 (2015)より転載)

一連の実験を、center 金属種や金属膜厚を変えて行った結果、以下のことが分かった。

- ①□ Center 金属が Ti/Al、Ni/Al など上層金属が Al の場合には  $n_s$ 、 $\mu$  の増加が起こるが、Ti/Au、Ni/Au など上層金属が Au の場合には増加は起こらない。このことは、Al が  $n_s$ 、 $\mu$  を増加させる上で重要な役割を果たしていることを意味する。
- ②□ 下層金属種を変えて  $\mu$  の増加量を調べたところ、真空熱処理後の  $\mu$  は、金属種の熱膨張係数と良い相関関係を示すことが分かった。つま

り下層金属が熱膨張係数が大きい Cu や Ni などの場合には熱処理後の  $\mu$  は大きくなる。熱処理後の  $\mu$  と下層金属の熱膨張係数との関係を図 4 に示す。

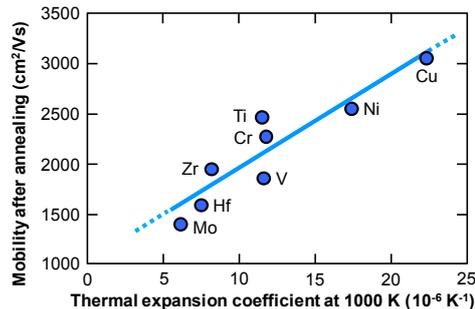


図 4 真空熱処理後の移動度と下層金属の熱膨張係数との関係。(M.Kuzuhara and H. Tokuda, IEEE Trans. Electron Devices, 62, 415 (2015)より転載)

③ 移動度は 2 層金属の膜厚にも依存する。Ni/Al、Cu/Al について膜厚を最適化することにより、熱処理後の移動度として 3000cm<sup>2</sup>/Vs 以上を得た。この値は AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 系で報告されている  $\mu$  値としては最大である。

④ 一連の実験結果を元に、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合に金属を堆積させて真空中で熱処理することにより  $n_s$  と  $\mu$  が増加する機構について検討を行った。その結果、Ni/Al を熱処理すると、金属周辺で AlGa<sub>N</sub> 層に強い引張り応力が生じていることがラマン散乱測定により分かった (図 5 参照)。

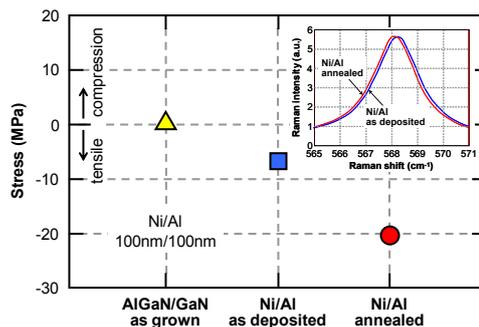


図 5 ラマン分光法により測定した AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 層の応力。自然表面 (金属を蒸着していない状態) の応力を 0 としている。Ni/Al を蒸着すると約 8MPa の引張り応力が導入され、真空熱処理により約 20MPa に増加することが分かる。(M.Kuzuhara and H. Tokuda, IEEE Trans. Electron Devices, 62, 415 (2015)より転載)

この結果より、熱処理により Ni/Al が熱膨張/収縮する結果 AlGa<sub>N</sub> 層が歪み、AlGa<sub>N</sub> 層に引張り応力が

導入され、ピエゾ分極が増加するために  $n_s$ 、 $\mu$  が増加するというモデルを提示した。

上述した  $n_s$ 、 $\mu$  が真空熱処理により増加する現象を、素子特性の向上、特にソース抵抗の低減に適用するために、AlGaIn/GaN HEMT を試作した。試作した HEMT の断面構造を図 6 に示す。サファイア基板上にアンドープ GaN 層(厚さ  $3\mu\text{m}$ )、AlGaIn バリア層(厚さ  $25\text{nm}$ 、Al 組成  $0.25$ ) を MOCVD 法で成長させたエピウエハを用いた。ソース、ドレインのオーミック電極を形成後、Ni/Al をソース電極横に蒸着し真空熱処理を行った(図中「VA 層」で示す)。その後ゲート電極(Ni/Au)を形成した。ゲート長、ゲート幅は各々  $2$ 、 $100\mu\text{m}$  である。ソース、ゲート間距離 ( $L_{sg}$ )を変えて試作し、素子のソース、ドレイン間抵抗 ( $R_{ds}$ )を真空熱処理層有り、無しで比較した。図 6 の構造で、真空熱処理層(VA 層)がある場合には、その下の  $n_s$ 、 $\mu$  が増加するため  $R_{ds}$  が無い場合に比べて減少することが期待される。

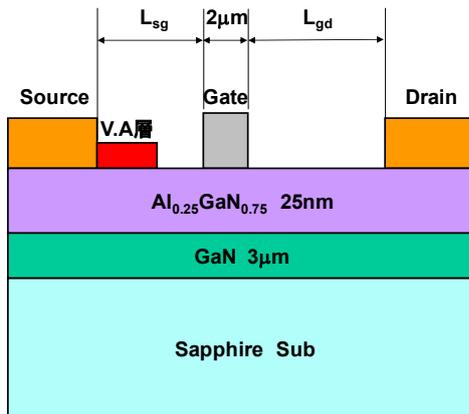


図 6 試作した AlGaIn/GaN HEMT の断面図。ソース電極横に真空熱処理層 (VA 層) を設けている。

図 7 に  $R_{ds}$  のソース、ドレイン間距離( $L_{ds}$ )依存性を示す。VA 層無しの場合に比べて VA 層を設けることにより若干ではあるが  $R_{ds}$  が減少していることが分かる。減少量は  $L_{ds}$  が長い場合( $17\mu\text{m}$  以上) では約 10% であるが、短い場合 ( $13\mu\text{m}$  以下) ではほとんど差が無かった。これは  $L_{ds}$  が短くなると VA 層長さも短くなるため VA 層の効果が出にくくなるためである。

以上より、真空熱処理層を導入することにより抵抗の低減は図れるものの、図 6 に示す HEMT の構造ではその効果は限定的であることが分かった。真空熱処理層を適用して素子特性を向上させるには、今後さら

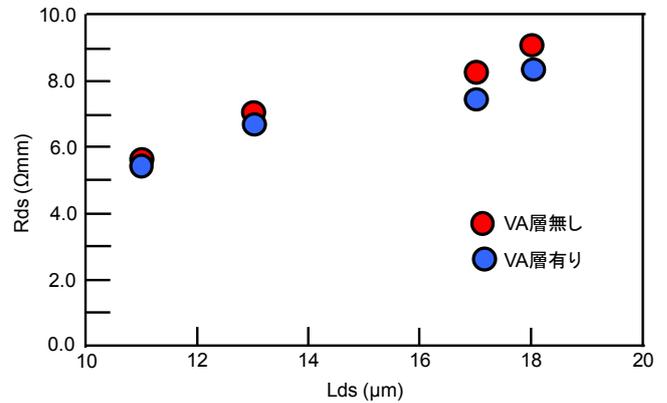


図 7 ソース・ドレイン間抵抗のゲート・ソース間距離依存性。真空熱処理層有り、無しの場合を比較して示す。

により効果的な素子構造を検討する必要がある、このことが今後の課題である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Masaaki Kuzuhara, and Hirokuni Tokuda, “Low-Loss and High-Voltage III-Nitride Transistors for Power Switching Applications,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 62, No.2 pp. 405-413, (2015).
2. H. Tokuda, T. Kojima, and M. Kuzuhara, “Over 3000  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  room temperature two-dimensional electron gas mobility by annealing Ni/Al deposited on AlGaIn/GaN heterostructures,” Applied Physics Express 7, 041001 March (2014).
3. T. Kojima, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, “Comparison of 2DEG density and mobility increase by annealing AlGaIn/ GaN heterostructures deposited with Ti/Al, Ti/Au, V/Au, and Ni/Au,” Phys. Status Solidi C vol. 10, 1405 Nov. (2013).
4. Hirokuni Tokuda, Toshikazu Kojima, and Masaaki Kuzuhara, “Role of Al and Ti for ohmic contact formation in AlGaIn/GaN heterostructures,” Appl. Phys. Lett. vol. 101, 262104 Dec. (2012).
5. Hirokuni Tokuda, Toshikazu Kojima, and Masaaki Kuzuhara, “A method to increase sheet electron density and mobility by vacuum annealing for Ti/Al deposited AlGaIn/GaN heterostructures,” Appl. Phys. Lett. vol. 101, 082111 Aug. (2012).

[学会発表] (計 5 件)

1. 川口、徳田、葛原、“熱処理により導入される AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 界面歪による 2DEG 移動度の増加、” 第 75 回応用物理学会秋季講演会、18p-A22-10 2014 年 9 月 18 日、北海道大学。
2. M. Kuzuhara, and H. Tokuda, “Challenges of GaN-based transistors for power electronics applications,” 2014 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2014), July 1, Kanazawa, Japan. (Invited). Workshop Digest pp. 19-20.
3. G. Kawaguchi, T. Kojima, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, “Enhanced 2DEG mobility by thermally induced strain between deposited metals and AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures,” ISCS 2014 May, Montpellier.
4. 徳田、小島、葛原, “AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> と金属との反応による二次元電子ガス濃度と移動度の増加、” 電情通学会技術研究報告, 8 月、2013.
5. T. Kojima, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, “Remarkable increase in 2DEG density by annealing AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures deposited with Ti/Al,” 40<sup>th</sup> Intl. Symposium on Compound Semiconductors, May, 2013.

1. 研究組織

(1) 研究代表者

徳田 博邦 (TOKUDA, Hirokuni)

福井大学大学院・工学研究科・特命助教

研究者番号 : 10625932

(2) 研究分担者

葛原 正明 (KUZUHARA, Masaaki)

福井大学大学院・工学研究科・教授

研究者番号 : 20377469