

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656444

研究課題名(和文) 広禁制帯幅半導体と電極材の界面歪制御による界面機能化

研究課題名(英文) Control of Interfacial Strain between Wide-Bandgap Semiconductor and Electrode to Improve Interfacial Electrical Conductance

研究代表者

前田 将克 (Maeda, Masakatsu)

大阪大学・接合科学研究所・助教

研究者番号：00263327

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、Ti基電極膜形成によってGa<sub>N</sub>基板との界面近傍に生じる基板のひずみが界面電気伝導度に及ぼす影響を調べ、その知見に立脚してひずみ制御により電気伝導度を向上することを目的として遂行された。Ga<sub>N</sub>基板上にTiを成膜すると、電極直下のGa<sub>N</sub>基板には圧縮ひずみが生じる。圧縮ひずみが大きいほど電気伝導度は低下する。すなわち、Ga<sub>N</sub>基板のひずみは電極/基板界面の電気伝導特性に影響する。電極直下のGa<sub>N</sub>基板のひずみを基板裏面へのTi成膜により相殺すると電気伝導度が向上する。以上の成果により、電極膜直下のGa<sub>N</sub>基板のひずみ状態制御がGa<sub>N</sub>とTi基電極界面の電気伝導度向上に有効であることが実証された。

研究成果の概要(英文)：The present study aims to clarify the effect of strain induced in the Ga<sub>N</sub> substrate on the electrical conductance of the contact interface and to demonstrate a technology to improve the conductance by controlling the strain in the Ga<sub>N</sub> substrate. Compressive strain is induced in the Ga<sub>N</sub> substrate in the vicinity of the contact electrode by formation of the Ti-based contact electrode. The interface with a larger compressive strain shows a lower conductance. Deposition of the same film as the electrode on the backside of the Ga<sub>N</sub> substrate compensates the strain and improves the conductance.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：ひずみ 窒化ガリウム 電極/基板界面 界面電気伝導特性

### 1. 研究開始当初の背景

炭化珪素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) に代表される広禁制帯幅化合物半導体は、パワーエレクトロニクスデバイスのエネルギー効率を飛躍的に高めることができる次世代材料として、世界中で活発に研究開発が進められている。その主たる課題のひとつに金属配線とのコンタクト形成技術がある。広禁制帯幅半導体が金属材料と接する界面では、ショットキー障壁が形成され、それによって金属側から半導体側へ界面を横断する電荷担体の移動が阻害される。さらに、電荷担体がこの障壁を乗り越えて移動すると、界面局所において著しいジュール発熱を生じ、エネルギー効率が低下するだけでなく、界面の信頼性も損なわれる。

これまでの研究では、ショットキー障壁の高さおよび厚さを低減するに適した相を半導体に接して形成することでコンタクト抵抗低減が図られてきた。その相は電子構造に基づいて選定されているが、予測通りの界面機能が得られることはほとんどない。これは、界面での障壁形成には界面形成に伴う各材料の電子構造変化が無視できない影響を及ぼすことを示唆している。

結晶材料の電子構造は、クローニヒとペニーによって確立された理論によって説明される。彼らは周期的ポテンシャル場を運動する電子に対するシュレーディンガー方程式の解を与えた。その解は、電子の有効質量、周期的ポテンシャルの高さ (=原子種)、そしてポテンシャルの周期 (=原子間隔) の関数として記述される。すなわち、材料の構成元素や組成を変化させずとも、原子周期が変化すれば電子構造が変化する。異種材料界面では、結晶が完全整合することは非常に稀であり、従って通常は整合性を保って界面エネルギーを低下させるためにひずみ、界面近傍の原子配列はバルク内部とは異なる状態となる。

半導体とコンタクト材の異種材料界面での弾性ひずみも、そのような原子間隔変化をもたらす主たる要因となる。これに伴う電子構造変化によってショットキー障壁が変化することは容易に推測される。しかし、この点を考慮したコンタクト材料の探索、あるいは界面でのひずみを制御することによる界面機能発現に関する研究は、現在まで全く報告されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、n型 GaN に対して良好なオーム性コンタクト特性が報告されている Ti 基電極膜を形成し、この材料の組み合わせを変えることなく、界面でのひずみ状態を変化させて、それに伴う界面機能 (電気伝導特性) の変化を明らかにする。

本研究は、二つの異なる立場から推進される計画となっている。第一は、受動的に界面ひずみを導入制御する立場である (図1)。蒸着膜形成や熱処理過程において異種材料界面

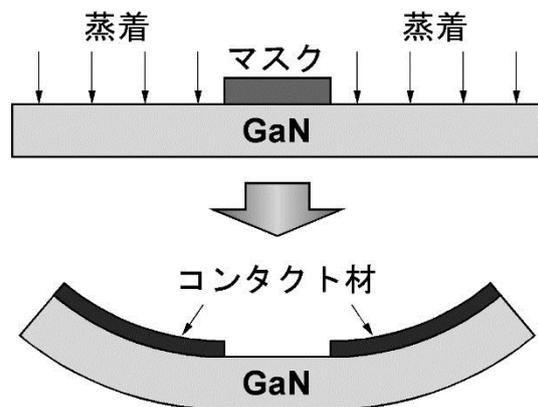


図1 熱残留応力により界面に導入されるひずみの誇張模式図。ひずみ量を制御することは可能だが、向きを反転することはできない受動的な制御法である。

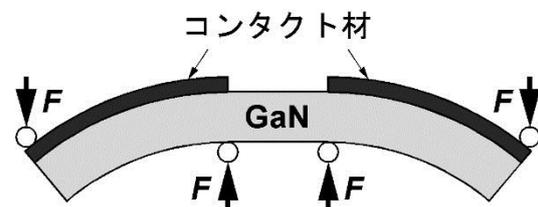


図2 四点曲げ試験法により外力を加えて界面にひずみを付与した例の誇張模式図。このように、能動的に制御すれば、熱残留応力のみでは導入困難なひずみの付与も可能となる。

を介した原子結合が形成されると、プロセス温度と室温の温度差と熱膨張率差に起因して界面ひずみが生じる。このひずみは弾性力学的に平衡状態を求めることができる。すなわち、界面ひずみの増減はプロセス温度や基板材料とコンタクト材料の断面二次モーメント (=厚さ) を変化させることで制御することが可能となる。第二は、能動的に界面ひずみを導入制御する立場である (図2)。蒸着膜形成および熱処理を経た試料に対して外力を加えて界面に一定量の弾性ひずみを導入する。この方法によれば、熱残留応力のみでは導入困難なひずみを界面に付与することが可能となる。

### 3. 研究の方法

GaN 基板には、支持基板のないフリースタンディング単結晶 GaN 基板を長さ 18.0 mm、幅 2.0 mm の短冊状に切り出して用いた。ドナー元素添加濃度、電子移動度、表面方位はそれぞれ  $4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $159 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、(0001) であり、Ga 極性面を電極形成面とした。GaN 基板の厚さを N 極性面 (電極裏面) 側から研磨することにより、断面二次モーメントを変化させて電極界面直下の GaN 基板に導入されるひずみ量を変化させた。薄膜の形成には、高周波マグネトロンスパッタ蒸着法を用いた。

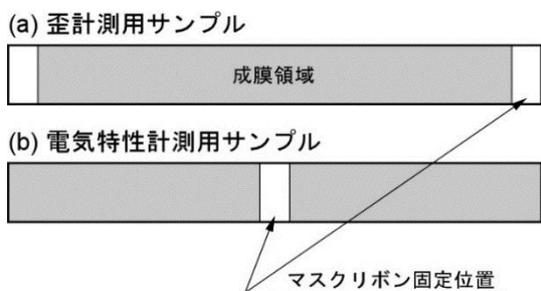


図3 試料と成膜領域の模式図. (a) ひずみ計測用試料, (b) 電気特性計測用試料.

幅 1.0 mm の高純度 Al 製マスクを用いて図 3 に示す 2 つのパターンで GaN 基板を銅製基板ホルダーに固定し, この銅製基板ホルダーを水冷することで GaN 基板を冷却しながら, Ar 8.0 Pa の雰囲気中, 高周波出力を 200 W に固定して蒸着時間を変化させることにより種々の厚さの膜を形成した.

成膜後の試料の一部は,  $6.0 \times 10^{-4}$  Pa の真空中で 773 K, 300 s の熱処理を施した. 熱処理には抵抗加熱式真空炉を用いた.

成膜により GaN 基板に導入されたひずみは以下のように計測した. すなわち, 表面粗さ計を用いて基板裏面での表面プロファイルを取得し, その曲率半径と断面二次モーメント (基板ならびに蒸着膜の厚さから導出) から電極界面直下における GaN 基板のひずみ量を算出した. 一方, 電極直下の GaN 基板のひずみ状態を任意に創出するため, ミニチュア四点曲げジグを作製し, 図 2 に示すように所定の押し込み深さに達するまで力を加え, その状態で電気伝導測定に供した. 電気伝導特性は, 273 K に冷却したエタノール中に試料を浸漬した状態で GaN 基板上に 1.0 mm 間隔で形成された 2 電極間で直流電圧-電流特性を計測した.

#### 4. 研究成果

##### (1) 受動的に導入された界面ひずみと電気伝導特性の相関

GaN 基板上に Ti を成膜すると, 基板が膜面に対して凹状に変形し, 電極膜直下の GaN 基板には圧縮ひずみが生じる. 図 4 は GaN 基板に図 3 (a) に示すパターンで Ti を成膜することによって GaN 基板の電極界面近傍に生じた圧縮ひずみを GaN 基板厚さに対してプロットしている. 基板厚さに対して電極界面直下の基板に生じる圧縮ひずみが単調に増加することがわかる. 特に, 基板厚さが 280 ~ 295  $\mu\text{m}$  の範囲では圧縮ひずみが著しく変化している. この範囲の厚さでは, わずかな厚さの差異が大ききひずみの差となって現れるため, ひずみの制御が難しいことを示している. 他方, 成膜する Ti 電極の厚さを 150 ~ 780 nm の範囲で変化させても電極界面近傍の GaN 基板のひずみはほとんど変化しない. 3 つの異なる厚さの GaN 基板上に図 3 (b) に示すパターンで

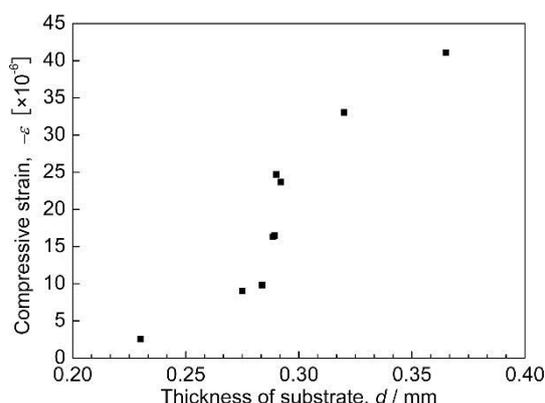


図4 GaN 基板厚さとコンタクト近傍の GaN 基板に生じた成膜による圧縮ひずみの相関.

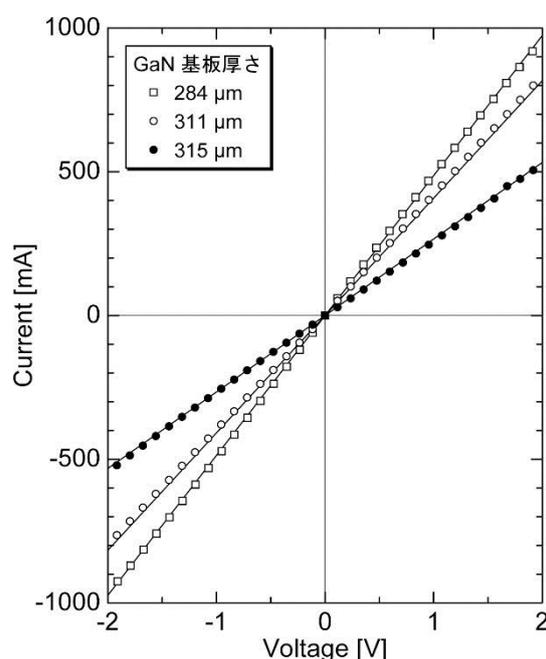


図5 基板厚さと電気伝導特性の相関.

Ti を成膜し, 電極間の電気伝導特性を計測した結果を図 5 に示す. いずれの基板厚さにおいても電流と電圧の比例関係が得られているが, その勾配は基板厚さの増加に対して単調に減少し, 基板が厚いほど電気抵抗が高くなる傾向にあることがわかる.

図 5 に示す結果は, GaN 基板上に Ti を成膜したままの状態に計測したものであり, GaN と電極の界面構造は等しいと考えられる. すなわち, Ar 雰囲気中で GaN 基板上に高周波マグネトロンスパッタ蒸着法で Ti を成膜すると, 成膜プロセスにおいて厚さ 12 nm の  $\text{Ti}_2\text{N}$  層が界面に形成されることが知られている. これは, 伝導経路となる各層の材質 (固有抵抗率), 経路長や断面積がほぼ等しいといえる. GaN 基板厚さの差異により GaN 内伝導経路断面積に差異が生じるが, 厚さ 315  $\mu\text{m}$  の GaN 基板のほうが厚さ 284  $\mu\text{m}$  の基板よりも電気

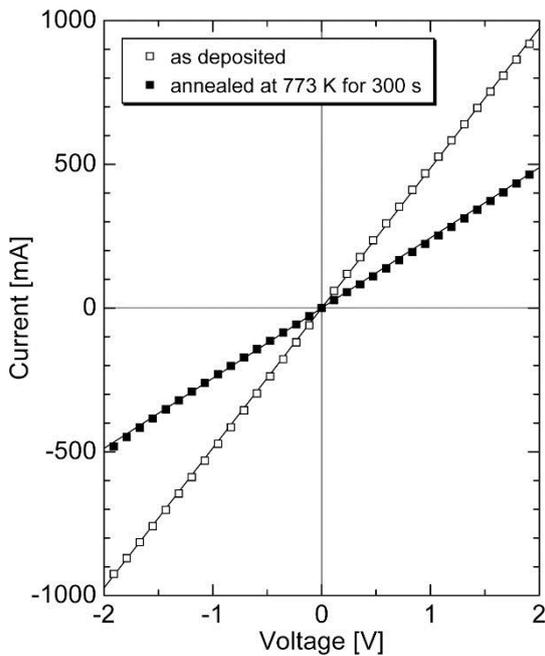


図6 電気伝導特性に対する熱処理温度の影響。

伝導度が高くなるはずであり、図5に現れた結果と逆の変化が生じるはずの条件である。従って、図5に現れた電気伝導度の変化は、GaN基板と電極の界面での電気抵抗（コンタクト抵抗）の変化に起因すると考えられる。すなわち、基板が厚いほど成膜によってGaNの電極界面近傍に大きな圧縮ひずみが生じ、禁制帯幅が広がる。これが電極界面でのショットキー障壁の高さや幅を増加させて、コンタクト抵抗が増加する。

次に、773 Kでの熱処理によりGaN基板のコンタクト界面近傍に熱残留応力・ひずみを誘起して、その電気伝導特性への影響を調べた。この熱処理条件は、成膜したままの状態における基板の変形量から求まる成膜中の基板の最高到達温度（約700 K）よりも高い値であり、より大きな圧縮ひずみをコンタクト界面近傍のGaNに導入できる。図6は、厚さがほぼ等しいGaNにTiを成膜し、その一方を773 K, 300 sで真空熱処理して、両者の電気伝導特性を比較している。図6から、熱処理によって電気伝導度が低下することがわかる。この現象も、コンタクト界面でのGaN基板の圧縮ひずみによって禁制帯幅が広がり、これに伴ってコンタクト抵抗が増加していることを支持するが、熱処理によって界面反応が進行して電極構造が変化している可能性もあるため、さらなる検討が必要である。

(2) 能動的に導入された界面ひずみと電気伝導特性の相関

前節で示したように、GaN基板上にTiを成膜すると、電極膜直下のGaN基板には圧縮ひずみが生じ、電気伝導特性が低下する。これを改善するため、ミニチュア四点曲げジグを

用いて外力を加えることにより電極側のGaN基板に引張ひずみを導入する方法を試みた。電極成膜によって生じた圧縮ひずみをほぼ相殺するまで外力を印加して電気伝導特性を計測したところ、電気伝導度が大幅に減少した。この変化は、前節において観察された電極直下のGaN基板圧縮に伴う電気伝導度変化と反対する。その原因は解明できていないが、この電気伝導度変化が試料によるばらつきが大きいことから、局所的な外力印加によって電極/GaN基板界面近傍組織が損傷した可能性があると推測される。

そこで、電極直下のGaN基板に引張ひずみを導入するための力が電極局所に加わらないようにする方法として、GaN基板裏面に電極面と同様にTiを成膜する方法を採用した。この方法では基板裏面にも成膜するため、基板に導入されたひずみを計測することが困難となるが、両面に同等の応力が作用すると考えられることから、電極直下領域のGaN基板のひずみはほぼ相殺されると考えられる。

GaN基板厚さ284  $\mu\text{m}$ の試料裏面にTiを電極面と同条件で成膜した後の電気伝導特性を、電極面のみ成膜した場合と比較して図7に示す。この図から、裏面への成膜により、電極面のみ成膜した場合に比べて電気伝導度が11%向上していることがわかる。

この結果は、GaN基板の電極面直下領域にひずみを導入することによって電極との界面における電気伝導特性を変化させることが可能であることを示唆している。特にこの領域が弾性圧縮ひずみを受けている場合、ひずみを低減することでコンタクト抵抗を効果的に低下させられることを実証した。この知見を

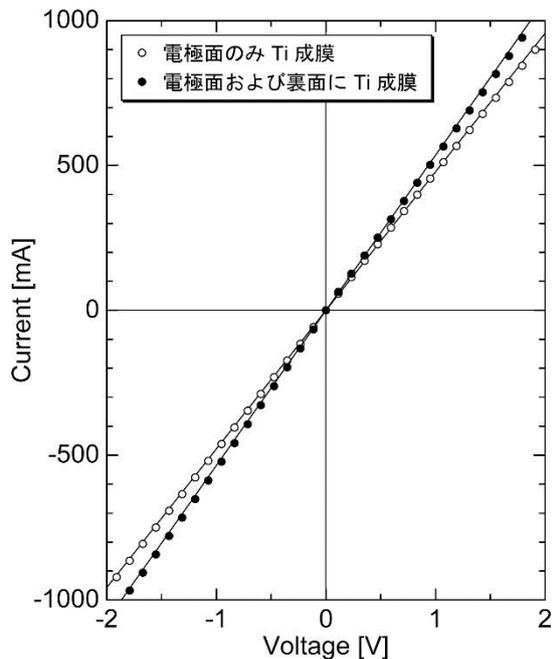


図7 GaN基板の電極面のみTiを成膜した場合と両面に成膜した場合における電気伝導特性の差異。

応用して、GaN 基板裏面に形成する膜の組成や成膜条件を調整して基板裏面側に高い圧縮応力を作用させることにより、基板電極面側に引張ひずみを導入し、一層のコンタクト抵抗低減が可能となると予測される。その一方で、GaN 基板と電極の界面近傍での損傷形成を抑制する観点から、基板電極面側に導入できる引張ひずみには上限があり、その値は電極界面構造によって定まると考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① K. Kimura, M. Maeda and Y. Takahashi: “Effect of crystal orientation on ohmic contact formation for n-type gallium nitride,” IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., in press, 査読有.
- ② K. Ideguchi, M. Maeda and Y. Takahashi: “Nucleation and growth of  $Ti_3SiC_2$  on SiC by interfacial reaction,” IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., in press, 査読有.
- ③ M. Maeda, M. Sano and Y. Takahashi: “Nickel-titanium based contact for n-type silicon carbide to combine high ohmic conductivity and mechanical properties,” IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., in press, 査読有.
- ④ Aiman b. M. H., M. Maeda and Y. Takahashi: “Electrical properties of the interface between p-GaN and contact materials,” IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., in press, 査読有.
- ⑤ Aiman b. M. H., M. Maeda and Y. Takahashi: “Interfacial nanostructure and electrical properties of  $Ti_3SiC_2$  contact on p-type gallium nitride,” Mater. Trans., Vol. 54 (2013), pp. 890-894, 査読有.
- ⑥ K. Kimura, M. Maeda and Y. Takahashi: “Effect of argon ion irradiation on ohmic contact formation on n-type gallium nitride,” Mater. Trans., Vol. 54 (2013), pp. 895-898, 査読有.
- ⑦ M. Maeda and Y. Takahashi: “Control of interfacial properties in power electronic devices,” Int. J. Nanotechnol., Vol. 10 (2013), pp. 89-99, 査読有.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

前田 将克 (MAEDA MASAKATSU)  
大阪大学・接合科学研究所・講師  
研究者番号：00263327

##### (2) 研究分担者

高橋 康夫 (TAKAHASHI YASUO)  
大阪大学・接合科学研究所・教授  
研究者番号：80144434