

機関番号：82108

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760241

研究課題名(和文) 窒化物半導体超低損失パワー素子の研究

研究課題名(英文) Research on nitride based semiconductor power devices

研究代表者

色川 芳宏 (IROKAWA YOSHIHIRO)

独立行政法人物質・材料研究機構・半導体材料センター・主任研究員

研究者番号：90394832

研究成果の概要(和文)：超低損失パワー素子の実現および付随する半導体物理の体系化を目標に、窒化物半導体材料・素子の作製・評価を行った。得た知見をまとめる。①光容量分光法を用いて材料接合界面に存在する欠陥と素子特性との相関を求めた。素子の異常動作と接合界面に特有の欠陥準位に相関があることが明らかになった。②雰囲気中に存在する水素が素子特性の変化に及ぼす影響を調べた。金属/半導体界面の状態が大きな役割を果たすことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Nitride-based materials and devices were fabricated and characterized in order to realize power devices with low loss and structure the associated semiconductor physics. The obtained results are described as follows. First, the correlation between defects in the AlGaIn/GaN hetero-interfaces and device performances was characterized using deep level optical spectroscopy. As a result, malfunction of devices was found to relate to particular defect levels in the AlGaIn/GaN hetero-interfaces. Second, influence of hydrogen on the device performances was characterized. As a result, property of the metal/semiconductor interfaces was found to play a critical role in device performances.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：化合物半導体

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料

キーワード：電気・電子材料、窒化物半導体

1. 研究開始当初の背景

近年、世界的に環境問題が深刻度を増しており、クリーンな環境を実現するためには、例えばエネルギーの使用効率を高めることは必要不可欠となっている。今回研究対象に取り上げたパワーデバイスはハイブリッド車や電気自動車などの基幹部品の一つであ

り、デバイスの損失を抑えることはエネルギーの使用効率を高める観点から見て重要である。本研究は、窒化物半導体材料を用いて低損失なパワーデバイスを実現することおよびそれに付随するデバイス物理を体系化することを目指したものである。

2. 研究の目的

本研究で取り上げる窒化物半導体材料は、①バンドギャップが大きいために、材料物性的に低損失デバイスに適している、②ヘテロ接合を比較的容易に形成できるので、デバイスの特性を飛躍的に高められる可能性がある、などの長所を持つ。本研究においては、ヘテロ接合を用いた窒化物半導体パワーデバイスを実現すること及びその実現のための問題点を明確にすることである。

3. 研究の方法

本研究は超低損失パワー素子を実現するために、窒化物半導体ヘテロ接合構造を利用した半導体材料の内部電界制御を体系化することを目的の一つにしている。ヘテロ接合構造を利用した半導体デバイスを作製するにあたって、最も重要な点の一つは、良質なヘテロ接合界面を形成することである。ヘテロ接合界面においては、異種材料を連続的に成長するために、欠陥が導入されやすく、これらの欠陥がヘテロ接合界面の電子輸送特性を劣化させることを防止することがデバイス特性向上の鍵となっている。ところが、半導体材料ヘテロ接合構造における界面欠陥を評価する手法はこれまで報告されておらず、例えばフォトルミネッセンス法を適用して、結晶表面近傍の欠陥情報を一括して評価する以外に方法はない。そのために、ヘテロ接合構造におけるヘテロ接合界面の電子特性を評価する手法を確立することが、良質なヘテロ接合界面を作製するための第一歩となる。そこで、AlGaIn/GaN ヘテロ構造を成長後に、ショットキーダイオード構造を作製して、光容量分光法を適用することによって界面欠陥情報を抽出する試みを行った。

また、窒化物半導体デバイスの信頼性の観点から、デバイス雰囲気中に存在する水素が素子特性の変化に及ぼす影響を調べた。デバイス構造としてはパワーデバイスとして用いられるMOS構造を形成して、電気化学的評価法によって、雰囲気中の水素とデバイスが相互作用する様子を解析した。なお絶縁膜としてはMOSFETにおいて頻繁に使用されるSiO₂とSiN_xを用いた。

4. 研究成果

光容量分光法を用いてAlGaIn/GaNヘテロ構造を持つショットキーダイオードにおいて、ショットキー電極に印加する電圧を制御することによって、ヘテロ接合界面近傍に存在する欠陥を選択的に検出可能であることが明らかになった。得られた結果を、図1に示す。図1より、AlGaIn/GaNヘテロ構造に対するスペクトルとGaN単膜に対する結果と比較することで、AlGaIn/GaNヘテロ接合界面に特有の欠陥準位(G1, G2)が存在することを確

認した。

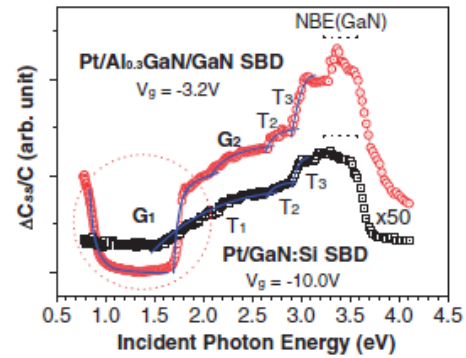


図1. AlGaIn/GaNヘテロ構造ダイオードとGaNダイオードに対する光容量分光スペクトル。

この手法で界面欠陥情報を得ることができると確認したので、結果を結晶成長条件へフィードバックすることで良質なヘテロ接合界面の作製が可能となることが期待される。フォトルミネッセンス法などの従来法では界面近傍のみの情報を選択的に抽出することができなかったため、今回確立した手法は有用と思われる。

次に、光容量分光法を用いてAlGaIn/GaNヘテロ接合界面に存在する欠陥とデバイス特性との相関を求めた。スイッチング特性が異なる2種類のデバイスにおけるAlGaIn/GaNヘテロ接合界面の光容量分光スペクトルを求めた。得られた結果を図2に示す。sample2の方がsample1に比べて、コラプスと呼ばれるスイッチング特性の劣化度が大きいことを、実験的に確認済みである。

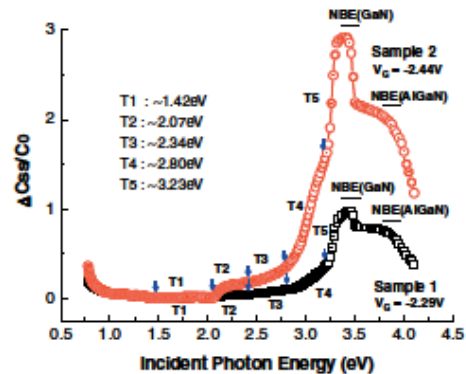


図2. スwitching特性が異なる2種類のデバイスにおけるAlGaIn/GaNヘテロ接合界面の光容量分光スペクトル。

コラプスは現在問題になっているスイッチング素子の異常動作であるが、図2より、各エネルギー準位におけるピーク形状が異なっており、コラプスと光容量分光法によって

検出された AlGaIn/GaN ヘテロ接合界面の特有の欠陥準位との間に相関があることが明らかになった。これらの欠陥準位は、窒化物半導体材料（特に界面近傍に存在する）内の Ga 空孔と C 混入に起因すると予想される。今後は今回確立した光容量分光法のヘテロ接合デバイスへの適用によって、高特性を持つヘテロ接合界面が実現できることが期待できる。

MOS 構造デバイスにおいて、雰囲気ガス中の水素がデバイス動作時に及ぼす影響を調べた結果を図 3 に示す。

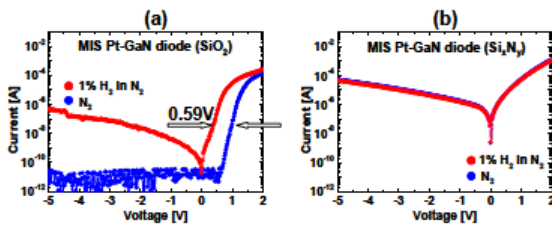


図 3. MOS 構造デバイスにおける電流－電圧特性の雰囲気依存性。(a)は電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入したデバイス、(b)は電極金属／半導体界面に SiN_x を挿入したデバイスを示す。

図 3(a)より、電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入したデバイスは水素導入後に電流－電圧特性が大きく変化しており、この変化は電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入していない通常のデバイスの約 2 倍程度大きい。一方、図 3(b)より、電極金属／半導体界面に SiN_x を挿入したデバイスは水素導入後に電流－電圧特性はほとんど変化していない。図 3 に示した結果によって、デバイスと水素が相互作用する際に、電極金属／半導体界面の状態が大きな役割を果たすことが明らかになった。具体的には、電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入した場合は相互作用が強くなる結果、素子の特性変化が大きくなり、反対に SiN_x を挿入した場合は素子の特性変化が消失する。

図 3 における電子輸送機構を解析するために、図 3 の結果を図 4 に示すように書き直す。

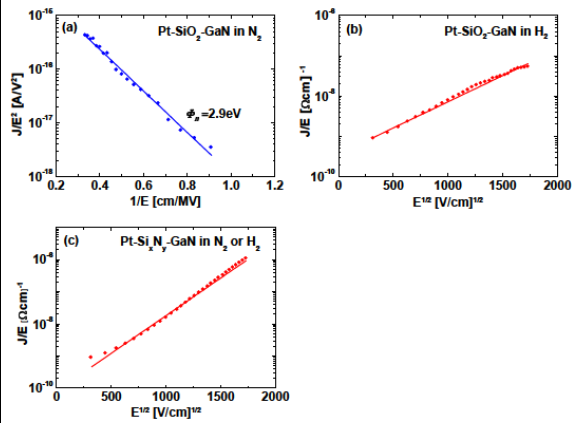


図 4. 図 3 における電子輸送機構を解析するために図 3 の結果を再プロットしたグラフ。(a)は窒素雰囲気中における電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入したデバイス、(b)は水素雰囲気中における電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入したデバイス、(c)は窒素または水素雰囲気中における電極金属／半導体界面に SiN_x を挿入したデバイスの結果を示す。

図 4(a)は窒素雰囲気中における電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入したデバイスの結果を示している。グラフは直線に乗っており、この結果から電子輸送機構は Fowler-Nordheim モデルで説明できる。図 4(b)は水素雰囲気中における電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入したデバイスの結果を示している。グラフは直線に乗っており、この結果から電子輸送機構は Pool-Frenkel モデルで説明できる。図 4(c)は窒素もしくは水素雰囲気中における電極金属／半導体界面に SiN_x を挿入したデバイスの結果を示している。グラフは直線に乗っており、この結果から電子輸送機構は Pool-Frenkel モデルで説明できる。図 5 に図 3 で用いた MOS 構造デバイスに対するインピーダンス測定の結果を示す。

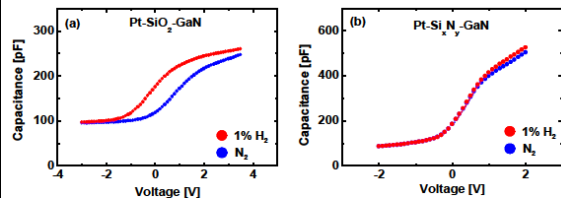


図 5. 図 3 で用いた MOS 構造デバイスに対するインピーダンス測定の結果。(a)は電極金属／半導体界面に SiO₂ を挿入したデバイス、(b)は電極金属／半導体界面に SiN_x を挿入したデバイスを示す。

図 5(a)より、電極金属／半導体界面に SiO₂

を挿入したデバイスについては、水素導入後にスペクトルが大きく変化していることがわかる。一方、図 5(b)より、電極金属/半導体界面に SiN_x を挿入したデバイスについては、水素導入後にスペクトルがほとんど変化していないことがわかる。電極金属/半導体界面に SiO_2 を挿入したデバイスについては、図 3(a)に示したように、水素導入後に電流-電圧特性が大きく変化しており、図 5(a)の結果より、水素導入後に電極金属/半導体界面に水素起因の電気 2 重層が形成されていることが示唆される。ところが、電極金属/半導体界面に SiN_x を挿入したデバイスについては、図 3(b)に示したように、水素導入後においても電流-電圧特性はほとんど変化せず、図 5(b)の結果とあわせると、水素導入後に電極金属/半導体界面に水素起因の電気 2 重層が形成されていないことが示唆される。今回実験に用いた絶縁膜はいずれも MOS 構造の形成にしばしば用いられている。この現象の具体的なメカニズムは不明であるが、MOS 型の素子を実用化する上では、信頼性の観点から雰囲気ガスとデバイスとの相互作用に関する知見を得ることは重要であり、今後の研究が期待される。

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 5 件)

- ① Y. Irokawa, Hydrogen Sensors Using Nitride-Based Semiconductor Diodes: The Role of Metal/Semiconductor Interfaces, *Sensors*, 査読有 **11** (2011) 674-695.
- ② Y. Irokawa, Hydrogen-induced change in the electrical properties of metal-insulator-semiconductor Pt-GaN diodes, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 査読有 **108** (2011) 094501.
- ③ Y. Nakano, Y. Irokawa, Y. Sumida, S.

Yagi, and H. Kawai, Photo-capacitance spectroscopy investigation of deep-level defects in AlGaIn/GaN hetero-structures with different current collapses, *Phys. Status Solidi RRL*, 査読有 **4** (2010) 374-376.

- ④ Y. Irokawa, N. Matsuki, M. Sumiya, Y. Sakuma, T. Sekiguchi, T. Chikyo, Y. Sumida, and Y. Nakano, Low-frequency capacitance-voltage study of hydrogen interaction with Pt-AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes, *Phys. Status Solidi RRL*, 査読有 **3** (2009) 266-268.
- ⑤ N. Matsuki, Y. Irokawa, T. Matsui, M. Kondo, and M. Sumiya, Photovoltaic Action in Polyaniline/n-GaN Schottky Diodes, *APPLIED PHYSICS EXPRESS*, 査読有 **2** (2009) 092201.

[学会発表] (計 1 件)

- ① Y. Nakano, Band Gap States in AlGaIn/GaN Hetero-Interface Probed by Deep-Level Optical Spectroscopy, 8th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics, 2009 年 8 月 26 日, 長野

6. 研究組織

(1) 研究代表者

色川 芳宏 (IROKAWA YOSHIHIRO)
独立行政法人物質・材料研究機構・半導体材料センター・主任研究員
研究者番号：90394832

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

中野 由崇 (NAKANO YOSHITAKA)
中部大学・総合工学研究所・准教授
研究者番号：60394722