

研究成果報告書

所属機関	職名	氏名
北海道大学 量子集積エレクトロニクス研究センター	准教授	赤澤 正道

研究テーマ

パワーデバイス向け窒化物半導体上シリコン熱酸化膜形成技術の確立

研究報告

1. 研究の背景と目的

エネルギー問題に対処することを考えた場合、文化的な生活を持続するためには電力エネルギーの供給を止めるわけにはいかないため、これを有効利用することを考えるべきである。その有効利用のためには、電力システムにおける熱的な損失を少しでも減らすことが、全国規模で積分すると大きな省エネルギーにつながる。家電製品や電気自動車を含む、電力システムにおいてはパワーデバイスの効率を上げることで省エネルギーを実現する余地が残っている。

パワーデバイスが用いられる主な機器として、インバータが挙げられる。現状のインバータにおいて、熱損失は5%とされているが、現状用いられているシリコンデバイスを窒化ガリウムデバイスに置き換えることで、この5%の損失を0.75%にまで改善できる。[1] さらにこれにより、全発電量を9.8%削減できることがわかっている。[1] インバータに組み込まれる最も重要なデバイスが、金属-絶縁体-半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)である。

本研究においては、高効率な窒化物半導体デバイスを実現し実用化に導くため、デバイスの心臓部となる金属/絶縁体/半導体(MOS)構造の理想的な特性を実現すべく、シリコン熱酸化膜を窒化ガリウム上に制御性よく形成する技術を開発することを目的とする。

2. 研究成果および考察

試料の作製手順を図1に示す。MOPVEにより、 n^+ -GaN自立基板c面上に、Siドープn-GaNエピタキシャル層($N_D=5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)を $3 \mu\text{m}$ 成長し、その表面をHF溶液で表面処理後、EB蒸着によりSi層を9nm堆積した。次に、乾燥酸素雰囲気中 800°C において、2時間~4時間の酸化を行った。最後に、MOSダイオードとして完成するために、表面電極としてNi/Auを、裏面オーミック電極としてTi/AuをEB蒸着により形成した。X線光電子分光(XPS)用の試料は、Siの初期膜厚を3nmとして堆積し、酸素雰囲気中で 800°C まで温度が上がった時点で試料を炉から取り出して評価を行った。

XPSによる観測結果を図2に示す。図2(a)の、光電子脱出角 $\theta=90^\circ$ において得られたGa 3pおよびSi 2pスペクトルにおいては残留Si層からのSi 2pピークに対して 3.95 eV シフトした位置に主要なSi 2pピークが現れた。この主要なピークは、化学シフトの値から SiO_2 によるものと考えられる。すなわち、酸化によってストイキオメトリックな SiO_2 が生成されたことがわかった。また、図2(b)のO 1sスペクトルの観測結果において、主要ピークと損失ピークの端とのエネルギー差から、得られた SiO_2 のバンドギャップは、 8.6 eV と十分に大きいことが分かった。

MOSダイオードに対して行った容量-電圧(C-V)特性測定結果を図3に示す。9nmのSiを堆積した試料に対する酸化時間が、3時間以下の時には理想曲線に比べて容量変化が小さい。3.5時間および4時間の酸化によってC-V曲線は理想に近づいた。しかし、3時間以上の

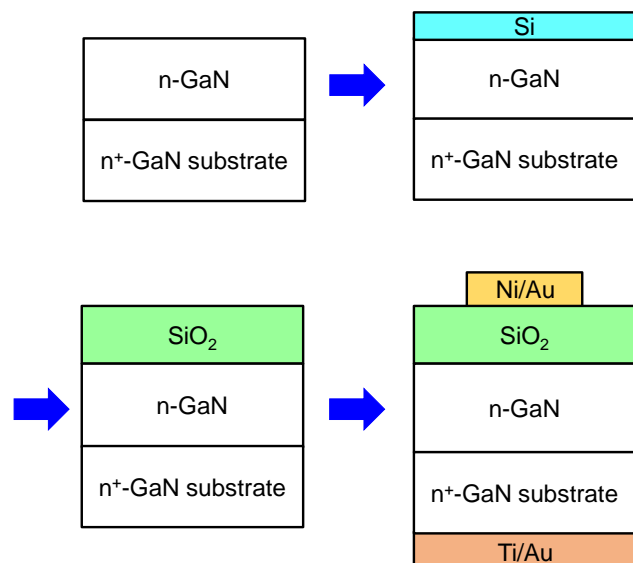


図1 試料作製工程。

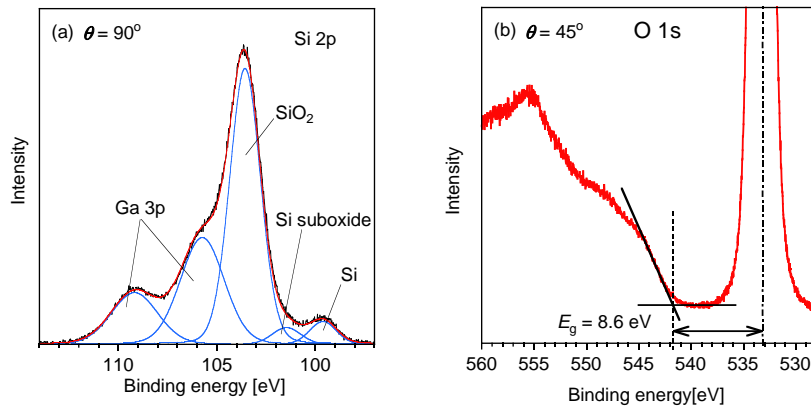


図2 XPS結果。(a) Ga3p および Si2p スペクトル。(b) O1s スペクトル。

熱酸化により、C-V曲線にコブが現れた。これは欠陥準位の発生を示唆している。評価が可能な、酸化時間が3.5時間と4時間の試料に対して、C-V曲線をもとに電子トラップ密度分布を評価した結果を図4に示す。伝導帯下端 E_C より0.7eVの位置に離散準位が検出された。これは前述のC-V曲線のコブに対応するものである。コブは理想曲線に対して正バイアス側に現れたことから、この準位はアクセプタの準位であると考えられる。文献[2]によると、 $E_C-0.7\text{eV}$ の準位は、Gaの空孔によるものと考えられる。したがって、酸化時間を長くするとGaN中にGa空孔が発生することが分かった。

一方、MOSダイオードの電流-電圧 (I-V) 特性は図5のように測定された。酸化時間が短いときには残留Siの表面の凹凸により、漏れ電流が大きくなったと考えられる。酸化時間を長くしていくと、電流の低減が見られたが、3時間より長くした場合に若干の劣化が見られた。これは、Ga空孔の発生を考慮すると、GaがSiO₂中に拡散したためである可能性が高い。

図6に、4時間酸化した試料に対する、(a)界面付近の断面透過電子顕微鏡 (TEM) 像および(b)エネルギー分散型X線分析 (EDX) 評価結果を示す。TEM像より、界面には顕著な乱れが存在しないことが見て取れる。また、界面付近にやや黒ずんだ像が見られるので、GaNの最表面が酸化されていることが推測される。実際、EDXの結果を見ると、Nが界面付近で減衰しているにもかかわらず、Gaは強度を保っており、OがSiよりもGaN側に入り込んでいることがわかった。すなわち、界面にGa酸化物の介在層が形成されていたことが分かった。このような介在層の形成が、酸化時間を長くしたときに見られた、界面の特性改善に寄与したと考えられる。

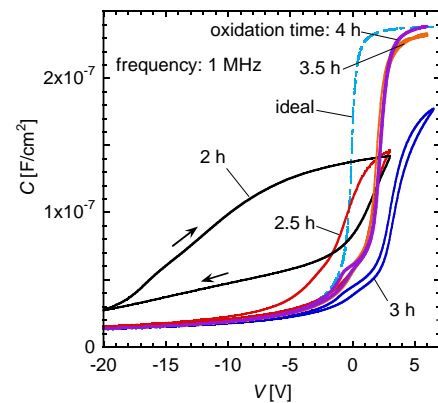


図3 各酸化時間に対するMOSダイオードのC-V特性。

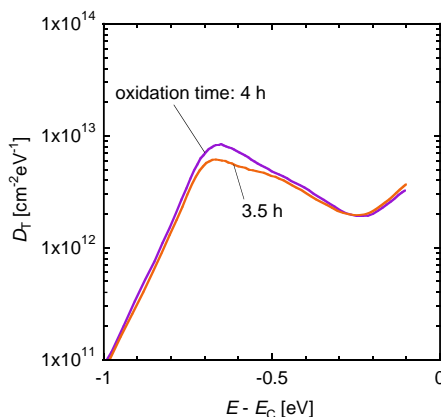


図4 電子トラップ密度分布。

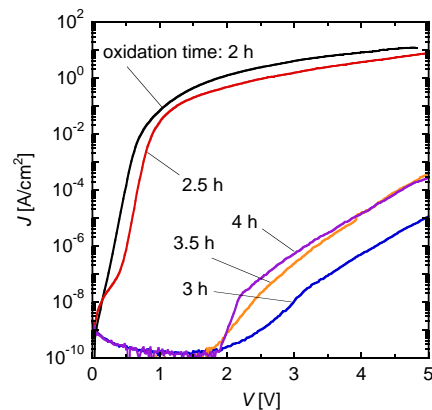


図5 各酸化時間に対するMOSダイオードのI-V特性。

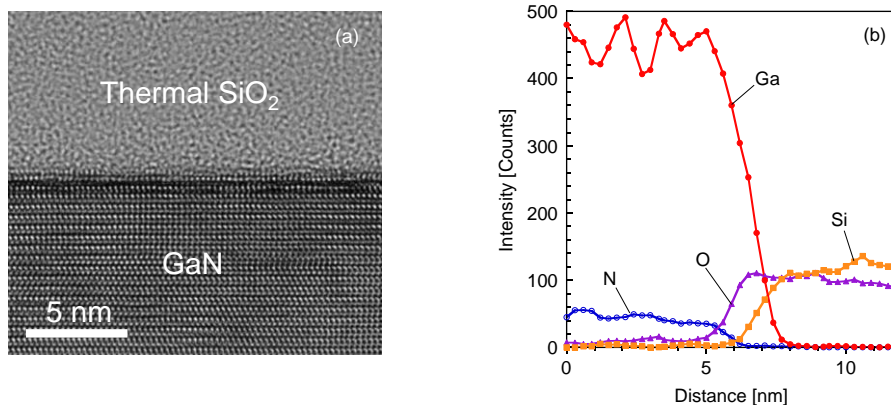


図6 4時間酸化した試料の界面付近断面に対する(a)TEM像、(b)EDX結果。

3. 将来展望

今回の研究においては優れた特性のMOS構造を得ることは出来なかったが、欠陥準位を除けば、界面準位密度分布はそれほど高くはないので、酸化膜形成中のGaの拡散を抑制できれば、良好な特性が得られると考える。具体的には以下のような方法が考えられる。

- ① 熱的により安定なN極性面にSiO₂形成を行う。
- ② あらかじめGaNのみを酸化して表面にGa酸化物層を形成してからSiO₂の形成を行う。この方法は、プラズマ化学気相堆積 (CVD) によるSiO₂とGaNの界面に対して、Ga熱拡散の抑制に有効であることが示されている。[3]

良好なMOS構造を得ることができれば、MOSFETの実現につながる。

4. 研究発表

- 1) 北脇侑弥, 赤澤正道:「シリコン熱酸化膜 / GaN 界面の形成」, 第56 回応用物理学会北海道支部・第17 回日本光学会北海道支部合同学術講演会, オンライン(2021).
- 2) M. Akazawa and Y. Kitawaki: “Formation of thermally grown SiO₂/GaN interface,” submitted to AIP Advances.

参考文献

- [1] GaNのパワーデバイスへの応用による省エネ | GaNコンソーシアム (<http://www.gan-conso.jp/report/energy-saving.html>)
- [2] J. L. Lyons, C. G. Van de Walle, npj Comput. Mater. **3**, 12 (2017).
- [3] T. Yamada, K. Watanabe, M. Nozaki, H. Yamada, T. Takahashi, M. Shimizu, A. Yoshigoe, T. Hosoi, T. Shimura, and H. Watanabe, Appl. Phys. Express **11**, 015701 (2018).