

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560341

研究課題名（和文） MIS / GaN - FET に於ける MIS 構造の物性研究

研究課題名（英文） Study of the interface at MIS/GaN-FET

研究代表者

城川 潤二郎（KIKAWA JUNJIRO）

立命館大学・総合理工学研究機構・教授

研究者番号：70469196

研究成果の概要（和文）：

SiN/GaN の MIS 構造に於いて、SiN の成膜方法、プロセスによって SiN/GaN 界面の準位がどのように変化するかを研究した。SiN のストイキオメトリーを変化させることにより、固定電荷の量が増減し、更に、アニール処理によっても変化する。これは、SiN と GaN の界面に於ける N 原子密度差によって発生する結晶欠陥によるものと考え、界面 dipole モデルで解釈が可能であることを提案した。

研究成果の概要（英文）：

We studied an interface between SiN and GaN. We observed changes of fixed charges at the interface by stoichiometric variation of SiN and anneal treatments. The origin of this phenomenon might be point defects related to a difference of N atom surface density between SiN and GaN. We proposed the dipole model in order to explain it.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：電子デバイス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：GaN, MIS-FET, SiN, interface, trap, inversion layer, KFM, CV

## 1. 研究開始当初の背景

GaN 系の電子デバイスは、その高い電子移動度や高絶縁耐圧等の物性的に有利な特質から、研究開発が世界中で繰り広げられている。その多くは、AlGaN/GaN-HEMT 構造を利用しており、大電流デバイスとしては有利である反面、D モード FET としての動作に限られてしまう。一方、電子機器設計のシステム側からは、電源投入時の安全や設計の自由度を上げる意味等から、E モード FET に対する要求が強い。そこで、E モード動作が可能となる MIS/GaN-FET の研究が始まっている。その高性能化の為の課題は、ゲート直下の MIS 構造に関する分野である。更に、GaN には Si と

違い、チャンネル反転層の形成機構の課題が残る。GaN はワイドバンドギャップ半導体であるため、空乏層からの少数キャリア発生は極めて少なく、反転層の形成は困難なはずである。しかし、実際には反転層が形成され電流が流れる。これは、チャンネルの近傍にある n 型 GaN 層から電子の供給を受けるためであるとされている。しかし、電子の供給源、そのパス、供給の動的解析等を含む機構は、今後の研究課題であると言える。

## 2. 研究の目的

MIS/GaN-FET の研究は緒についたばかりで、解決すべき課題は膨大であるが、GaN 系電子

デバイスの実用化には、DモードFETばかりではなくEモードFETも必要であり、特に家電や自動車等のコンシューマ製品にはEモードFETが主流であることを考えると、MIS/GaN-FETの開発が急がれる。現在、殆どのSi半導体デバイスはSi/MOS-FETから作られているが、そのMOS構造を作るSiO<sub>2</sub>膜の形成から評価に至る膨大な研究の結果、Si/MOS-FETが初めて実用化された歴史的事実を考えると、MIS/GaN-FETの実用化には、MIS構造の解明が極めて重要であると言える。本研究は、チャンネル反転層形成機構を含む、MIS構造界面の電子的な物性の解明を目的とする。

### 3. 研究の方法

MIS構造の基本となる絶縁膜と、チャンネルのプロセスを評価し、最適化を図る。絶縁膜の材料として、初めにSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>とその複合を検討し、その他の高誘電率膜も検討する。評価パラメータとしては、界面準位密度、ショットキー接合の特性、及び、XPS測定等である。更にMIS構造を劈開して得られる断面のKFM測定を行い、電位分布から深い準位の空間的分布を議論する。

それらの結果を踏まえて、MIS界面のモデル化を行い、統一的な解釈を試みる。

### 4. 研究成果

図1に、SiNを成膜後、600°Cで10分アニールしたサンプルのCVカーブに於ける周波数分散の典型的な例を示す。フラットバンドで電圧(VFB)は、負のバイアス側へ大きくシフトし、-16V近辺から始まるバイアスに依存しない、一定の容量を示すledgeと呼ぶ領域が存在し、それは測定周波数が下がるにつれて狭くなり、直流的な測定であるQSCVでは略、観察されない。このように、SiN/GaN界面の特徴として、大きなVFBシフトとledgeの存在が挙げられる

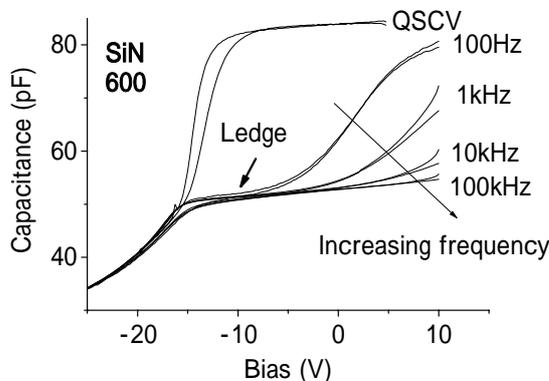


図1 CVカーブの周波数分散

これらの課題とSiNを形成するプロセスの関係についてCV測定法を用いて解析し、モデル化を試みた。

#### (1) 準位の存在する位置

CV測定では、全ての準位がヒステリシスやフラットバンドシフトに関わるため、それらの準位の空間的な位置を特定することはプロセスを考える上で重要である。そこで、SiNを形成する前にGaN表面を処理した時と、しない場合との比較を試みた。表面処理としては、酸、アルカリによるウェット処理とN<sub>2</sub>プラズマによるドライ処理を行った。次に、SiN形成プロセスでN<sub>2</sub>流量を変えて、SiNのストイキオメトリーを意識的に変えた膜を成膜して、前処理との結果と比較し、界面準位とバルク準位の切り分けを行った。その結果、SiNのバルク準位も、VFBシフトに関係しており、その量は界面準位と同程度存在することが分かった。

成膜方法としてECRとCVDをCV測定で比較した。CVDでは、ECRと違い明確なledgeは見えず、1MHzの高い周波数に於いても蓄積容量に達していた。CVDの中でもSiH<sub>4</sub>系とTEOS系では、周波数分散に違いが見られた。これらは、プロセス中の水素が準位を補償しているものと推測される。

DLTS法でこれらのサンプルを測定すると、GaNバルクで報告されている準位とは明らかに違い、CVカーブでledgeに相当すると思われる準位が全てに観察され、約 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 程度の量であった。

#### (2) VFBシフトの起源

SiNの形成前のN<sub>2</sub>ドライ処理、及びSiNのストイキオメトリー変化サンプルから、フラットバンドは、N<sub>2</sub> richに於いて正の方向へシフトすることが分かった。SiNの準位の起源としてSiのdangling bond stateであることが知られているが、それだけではなく、N空孔とSiの格子間原子との対による双極子を考える必要を示唆している。

SiN膜のSi/N比を意識的に変えて成膜した膜の複合膜を作り、CV測定を行った。Si rich SiN膜とN rich SiN膜を組み合わせた場合、どちらの膜がゲート側に来るかで、フラットバンドシフト電圧が異なってくる。これは、界面を形成する膜のSi/N比が異なるため、表面に存在するN原子密度の違いによって欠陥密度に違いが生じ、その結果、電荷の符号が変化する事を仮定すれば説明が可能である。

#### (3) Dipoleモデル

界面に欠陥を原因として電荷が存在する

と、それらの電荷はdipoleを形成し、VFBに影響する。この様子を図2に示す。SiNが成膜された時は、界面の電荷はランダムに存在する。従って、全体としては弱いmomentを持つ。しかし、アニール処理が施されると、熱エネルギーを得た電荷は互いにクーロン力の方方向に引き合い、再整列をして全体のmomentが大きくなる事が考えられる。

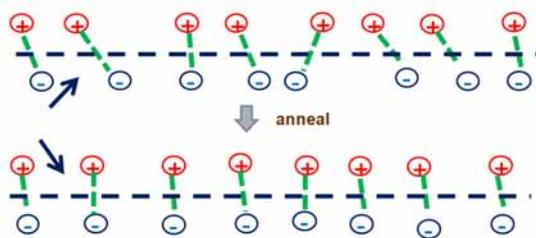


図2 SiN/GaN界面に於けるdipole

#### (4) KFMによる観察

KFMを用い、MIS構造のplan viewを測定した。測定サンプルは、アニール前後のサンプルとした。その結果、アニールを施したサンプルでは、SiN表面に正の帯電が観察された。これを図3に示す。

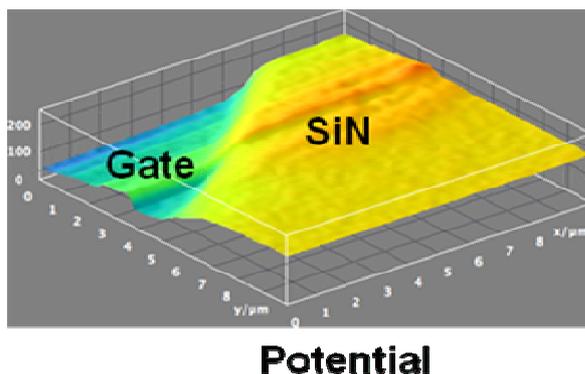


図3 KFMによるSiN表面電位

この結果は、CV測定で観察されたVFBシフトとの関連を傍証するもので、SiNのバルク準位によるものと考えられる。このような電荷は電気的測定では数多く報告されているが、実際にKFMで観察されたのは初めてである。又、この電荷は照射をしても有意の差は認められなかった。

#### (5) その場成長SiN

より良い性質を示すSiNの探索として、MOCVDでGaN膜を成長後、SiNをその場成長(in situ SiN)したサンプルを評価した。このSiNの厚さは1~2モノレイヤー程度であるため、成長終了後、改めてSiNをECRで50nm堆積した。CV測定でVFBシフト量を測定した結果、in situ SiNのあるサンプルの方が無いサンプル

よりも小さかった。これをdipoleモデルで解釈すれば、このシフト量は、GaN/SiN界面に存在する結晶欠陥の作るdipole密度に比例する。そして、そのdipole密度は、GaN/SiN界面で向かい合う、SiNとGaNのN原子面密度差に依存する。in situ SiNとECR SiNの違いは結晶性にあり、in situ SiNはアモルファスより結晶に近いとされている。従って、この2つのサンプルの違いは、夫々のSiNの界面に於けるN原子面密度の差であるという事が出来る。又、CVカーブの周波数分散も、in situ SiNのあるサンプルの方が無いサンプルより小さい。この周波数帯域で応答する準位は界面にあり、界面準位密度が低い事を意味しており、in situ SiNの有用性が示されている。

#### (6) 結論

絶縁物としてSiNを用いたMIS-FETを考えると、CVカーブには、VFBのシフトや強いピンニングと周波数分散を示す準位が存在する。これらの準位の起源として、SiN/GaN界面に於けるN原子面密度の差が考えられ、それによって引き起こされた結晶欠陥がdipoleを形成するモデルを提案した。このモデルは、SiNをアニール処理下サンプルの挙動を説明することが可能である。更に、SiNの成膜方法によるストイキオメトリの違いによる影響をも説明が可能である。最後に、in situ SiNの有用性を議論した。

#### 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2件)

- ① J. Kikawa, M. Kaneko, H. Otake, T. Fujishima, K. Chikamatsu, A. Yamaguchi, and Y. Nanishi, "Study of the flat band voltage shift of metal/insulator/n-GaN capacitors by annealing, Phys. Status Solidi B **246**(2010) 1649-1652査読あり
- ② J. Kikawa, Y. Horiuchi, E. Shibata, M. Kaneko, H. Otake, T. Fujishima, K. Chikamatsu, A. Yamaguchi and Y. Nanishi, "Detailed investigation of GaN metal-insulator-semiconductor structures by capacitance-voltage and deep level transient spectroscopy methods", Material research society symposium proceedings, **1108**(2009)157-161査読あり

[学会発表] (計5件)

- ① J. Kikawa, M. Kaneko, H. Otake, T. Fujishima, K. Chikamatsu, A. Yamaguchi and Y. Nanishi, “Study of the flat band voltage shift in Metal/Insulator/n-GaN capacitors by annealing” 2009 E-MRS Fall meeting (2009年9月17日) Warsaw, Poland
- ② 城川潤二郎・堀内佑樹, 柴田英次, 金子昌充、大嶽浩隆, 藤寫辰也, 近松健太郎, 山口敦司, 名西徳之, “Metal/SiN/GaN構造のアニールによるフラットバンドシフトの検討” 秋季 第70回 応用物理学会 学術講演会(2009年9月10日) 富山大学、富山
- ③ 城川潤二郎・堀内佑樹, 柴田英次, 金子昌充、大嶽浩隆, 藤寫辰也, 近松健太郎, 山口敦司, 名西徳之, “CV測定によるGaN-MIS構造に於けるSiN成膜条件の検討” 春季第56回応用物理学会学術講演会(2009年4月1日) つくば大学、茨城
- ④ 城川潤二郎, 堀内佑樹, 柴田英次, 金子昌充, 大嶽浩隆, 藤寫辰也, 近松健太郎, 山口敦司, 名西徳之, “GaN MIS構造のCV特性検討2” 第69回秋季 応用物理学会学術講演会(2008年9月2日) 愛知県中部大学、春日井市
- ⑤ J. Kikawa, Y. Horiuchi, E. Shibata, M. Kaneko, H. Otake, T. Fujishima, K. Chikamatsu, A. Yamaguchi and Y. Nanishi, “Detailed investigation of GaN metal-insulator-semiconductor structures by capacitance-voltage and deep level transient spectroscopy methods” 2008 Materials Research Society Fall meeting(2008年12月2日) Boston, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

城川 潤二郎 (Kikawa Junjiro )  
立命館大学 総合理工学研究機構 教授  
研究者番号 : 70469196

### (2) 研究分担者

金子 昌充 (Kaneko Masamitsu)  
立命館大学 総合理工学研究機構 研究員  
研究者番号 : 70374709