

2013A1540

BL27SU

イオン注入した GaN 中の Si の局所構造解析  
Local Structure Analysis of Ion Implanted Si in GaN  
by X-ray Absorption Fine Structure

米村 卓巳, 飯原 順次, 橋本 信, 斎藤 吉広, 中村 孝夫  
Takumi Yonemura, Junji Iihara, Shin Hashimoto, Yoshihiro Saito and Takao Nakamura

住友電気工業株式会社  
Sumitomo Electric Industries, Ltd.

窒化ガリウムにイオン注入した Si は、高温アニール処理によって活性化するが、イオン注入した Mg は全く活性化しない。活性化状態は注入元素の局所構造に依存すると考えられるが、原子レベルで調査した報告はなく、そのメカニズムは未解明である。今回、我々は BL27SU にて蛍光 XAFS 法を使って、イオン注入した Si の局所構造を調査した。その結果、高温アニール処理によって Si が Ga サイトに入ることで高い活性化状態が実現することが分かった。

キーワード： GaN、イオン注入、Si、Mg、高温アニール、XAFS、蛍光法

背景と研究目的：

ワイドギャップ半導体を用いた高出力パワーデバイスは、高効率な電力変換機器などの実現に結びつき、低エネルギー社会実現の一助となることが期待されている。特に、窒化ガリウム（以下、GaN）は、広いバンドギャップと高い絶縁破壊電界等の優位な材料特性を数多く有しており、次世代パワーデバイスの材料として盛んに開発が進められている。

特に、パワートランジスタの作製では、任意の場所に選択的に導電性を付与するイオン注入法が用いられる。実際、Si や SiC では、イオン注入法を用いて n 型および p 型の伝導性制御が行われている。しかしながら、GaN において、n 型化は Si 注入によって容易に実現できるが、p 型化は注入元素である Mg が活性化しないという課題があり実現困難な状況である。このため、GaN のパワートランジスタへの応用は限定的なものとなっている。

具体的には、GaN にイオン注入した Si（以下、注入 Si）を活性化するためには、1100°C 以上の高温アニール処理が必要である<sup>[1]</sup>。しかしながら、GaN にイオン注入した Mg（以下、注入 Mg）の場合、同様の高温アニール処理を実施しても全く活性化しない。

そこで、Si と Mg を注入し、高温アニール処理を施した GaN に対して、X 線回折を用いた結晶性評価を実施した。その結果、Si 注入 GaN と Mg 注入 GaN ではアニール温度増大に伴う結晶性の推移が同じであった。つまり、高温アニール処理によって Mg 注入 GaN の結晶性は、Si 注入 GaN 中の Si が活性化している状態における結晶性と同等レベルまで回復していた。このことから、GaN 結晶としての注入損傷以外の要因が活性化に寄与していると思われる。

そこで、注入元素の局所構造と活性化の関係に着目して調査を実施した。一般的に注入直後の Si や Mg は格子間、N サイト、Ga サイトなどにランダムに存在し、歪んだ状態である。高温アニール処理によって注入元素の局所構造がどのように変化するかを明らかにすることで高い活性化状態を実現するための手掛かりが得られる可能性がある。

これまでに半導体中の微量なドーパント元素の局所構造解析が可能である X 線吸収微細構造法 (X-ray Absorption Fine Structure : 以下、XAFS) を用いて、2012A 期に高温アニール処理に伴う注入 Mg の局所構造の変化を原子レベルで解析した。その結果、高温アニール処理に伴う Mg 吸収端の低エネルギー側へのシフトを確認し、金属的な Mg 状態が混在する可能性を示唆する結果を得た<sup>[2]</sup>。

今回、高温アニール処理による活性化が実現している GaN 中の注入 Si の局所構造を XAFS 法にて解析し、GaN にイオン注入されたドーパント元素の活性化メカニズムを明らかにすることを目指した。

実験：

(a) 測定試料：

①サファイア基板の上に GaN を c 面成長させたウエハに対し 120 keV で Si をイオン注入した。Si ドーズ量は  $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  である。イオン注入後に、この Si 注入 GaN ウエハから 3 枚を切り出し、1150°C、1280°C、1400°C の 3 条件でアニール処理を施した。なお、アニール処理後の活性化率はそれぞれ、1%、33%、67%であった。

②GaN 中の Si の XAFS 測定にあたり、エネルギー校正などに用いる標準試料として  $\text{Si}_3\text{N}_4$  を準備した。また、高活性状態の Si の局所構造を把握するために、MOCVD で作製した Si 添加 GaN を準備した。

(b) 測定方法：

XAFS 測定は、SPring-8 の BL27SU にて蛍光法で実施した<sup>[3]</sup>。検出器は、これまで BL27SU で使用していたアワーズテック社製の SDD (Silicon Drift Detector) が故障中であったため、代替品として Amptek 社製の SDD を用いた。なお、初めて用いる検出器であったため、本測定に入る前に SDD の数え落とし補正の検討などの基礎的な部分から実施した。

図 1 は、今回用いた SDD における蛍光 X 線強度と入射 X 線強度の関係である。蛍光 X 線強度が 3 万 cps を超えると蛍光 X 線信号の数え落としが始まり、徐々にリニアリティが悪化することが分かる。今回は、入射 X 線のエネルギー分解能を  $E/\Delta E=5000$  に設定して、SDD と試料の距離を調整し、数え落としのない範囲で測定を行った。また、S/B をよくするために垂直偏光とし、入射角度は注入 Mg の解析条件と揃えるために  $10^\circ$  に設定した。このときの情報深さは約 50 nm となる。なお、このような検出条件の確認から実施する必要があったため、当初予定していた注入 Mg の追加評価までは十分に実施することができなかった。

測定手順としては入射 X 線のエネルギーを変えながら、SDD にて蛍光 X 線スペクトルを取得し、予め標準試料で決定しておいた最適な蛍光 X 線スペクトルの切り出し範囲を用いて、Si の蛍光 X 線成分を抽出し、Si-K 端の X 線吸収端近傍構造(XANES)のスペクトルを取得した。

図 2 は、入射 X 線エネルギーが 1850 eV のときの Si 注入 GaN、および  $\text{Si}_3\text{N}_4$  の蛍光 X 線スペクトルである。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  の Si の  $K_\alpha$  線に対応する蛍光 X 線ピーク位置を参考にして、Si 注入 GaN、および Si 添加 GaN における Si の蛍光 X 線成分を図 2 の挿入図の網かけ部分(670 ch - 710 ch)と定義した。

結果および考察：

図 3 は、注入 Si、および Si 添加 GaN 中の Si (以下、添加 Si) の XANES スペクトルである。なお、これらのスペクトルは 1860 eV の吸収係数にて規格化した。なお、1843 eV, 1846 eV, 1848 eV, 1852 eV, 1858 eV に存在するピークをそれぞれ、ピーク A, B, C, D, E と定義する。以下に、注入 Si の XANES スペクトルの大きな 2 つの特徴について述べる。

- ①：アニール 1150°C 品とアニール 1280°C 品のスペクトル形状は概ね同じである。さらに、添加 Si のスペクトル形状とは異なっている。
  - ②：アニール 1400°C 品ではピーク A の強度がピーク B の強度と同程度まで減少し、添加 Si のスペクトル形状と概ね同じになる。
- ①の結果は、アニール 1150°C 品とアニール 1280°C 品の注入 Si の局所構造が概ね同じであり、高

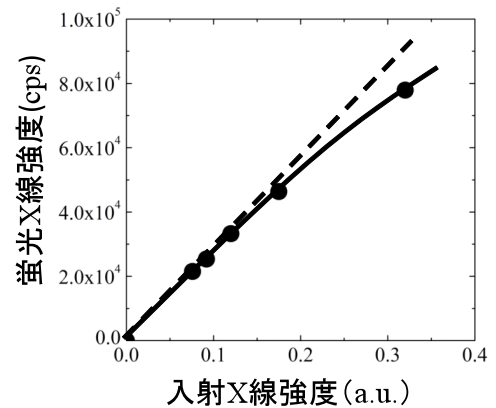


図 1. SDD による数え落としの影響

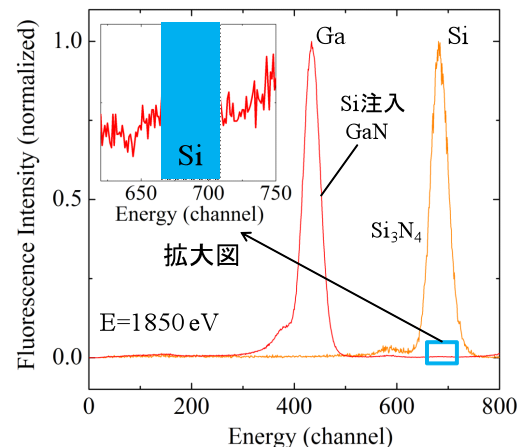


図 2. Si 添加 GaN、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  の蛍光 X 線スペクトル (E=1850 eV のとき)

い活性状態にある添加 Si の局所構造とは異なっている可能性を示唆している。②の結果は、1400°C のアニール処理によって注入 Si の局所構造が添加 Si のそれと同じになることを示唆している。アニール 1400°C 品の活性化率は他のアニール品よりも高いことから、最も添加 Si の局所構造に近いと推察される。これらの実験結果より、注入元素の局所構造と活性化の間には密接な関係があると考えられる。

次に、高い活性化状態にある Si の局所構造を明確にするために多重散乱理論を用いた FEFF9<sup>[4]</sup>による XANES シミュレーションを実施した。なお、計算に用いたパラメータは、クラスター半径が 1.0 nm、 $R_{SCF}$  (散乱ポテンシャルを自己無撞着に計算する際の範囲) が 0.4 nm、 $R_{FMS}$  (全多重散乱計算の範囲) が 0.5 nm である。また、Si のような軽元素に対して、X 線入射後の励起状態における内殻空孔の影響を補正するために経験的に用いられている等価内殻近似 ( $\Rightarrow(Z+1)$ 近似。ただし、 $Z$  は原子番号) を適用した<sup>[5]</sup>。図 3 中に破線で示したスペクトルは、Si の Ga 置換モデルでのシミュレーション結果である。シミュレーションで得られた XANES スペクトルは、高い活性化状態にある添加 Si、およびアニール 1400°C 品の注入 Si のスペクトル形状と概ね一致することが分かる。このことから、注入 Si は、注入直後のランダムな状態から、高温アニール処理によって Ga サイトに移動し安定化すると考えられる。その結果、高い活性化状態が実現すると考えられる。

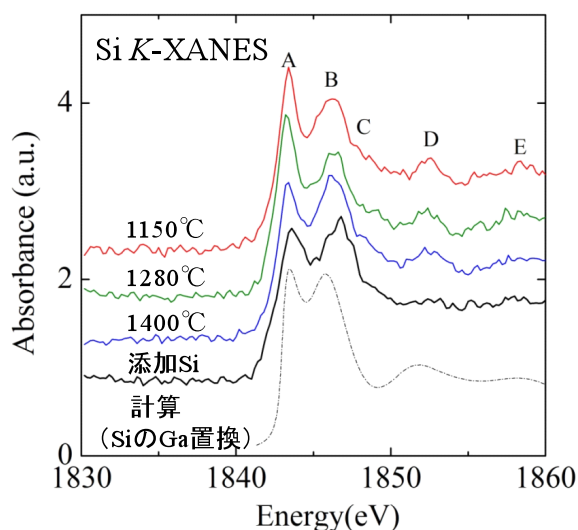


図 3. 注入 Si、添加 Si の K-XANES スペクトル(実線)とシミュレーション(破線)

#### 今後の課題：

注入 Mg は、SIMS 測定より表層と深部において局所構造が異なっている可能性が示唆された<sup>[6]</sup>。今回、測定時間の制約により深部の注入 Mg の局所構造を十分に評価できなかった。今後、追加評価を行い、注入 Si と注入 Mg の局所構造と活性化状態の関係を明らかにし、注入 Mg の活性化率の向上に結び付ける。

#### 謝辞：

本課題の実験に際し、SPring-8 の BL27SU 担当である為則様には多大なるご協力を頂きました。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。なお、本研究の一部は NEDO による支援を受けております。

#### 参考文献：

- [1] S. J. Paerton, J. C. Zolper, R. J. Shul and F. Ren: *J. Appl. Phys.* **86**, 1 (1999).
- [2] SPring-8 利用課題実験報告書 (課題番号：2012A1405) .
- [3] Y. Tamenori, M. Morita and T. Nakamura: *J. Synchrotron Rad.* **18**, 747-752 (2011).
- [4] K. Jorissen, J. J. Rehr and J. Verbeeck : *Phys. Rev. B* **81** (2010).
- [5] 太田 俊明: X線吸収分光法, p.47 (Industrial Publishing & Consulting, Inc, Tokyo, 2002).
- [6] T. Yonemura *et al.*: SPring-8/SACLA 利用研究成果集 (課題番号：2012A1405) , *in preparation*.

© JASRI

(Received: September 19, 2013; Early edition: March 3, 2014; Accepted: July 3, 2014;  
Published: July 10, 2014)