

軟 X 線光電子分光による 4H-SiC(000-1)面上酸化膜の評価

Characterization of oxide films on 4H-SiC (000-1) faces studied by a soft X-ray photoelectron spectroscopy

土方泰斗¹、矢口裕之¹、吉田貞史¹、高田恭孝²、小林啓介³、野平博司⁴、服部健雄⁴

Yasuto HIJIKATA¹, Hiroyuki YAGUCHI¹, Sadafumi YOSHIDA¹, Yasutaka TAKATA²,

Keisuke KOBAYASHI³, Hiroshi NOHIRA⁴, and Takeo HATTORI⁴

¹埼玉大学、²理化学研究所放射光物性研究室、³高輝度光科学研究センター、⁴武蔵工業大学

¹Saitama University, ²Soft X-ray Spectroscopy Lab., Harima Inst., RIKEN,

³Japan Synchrotron Radiation Res. Inst., ⁴Musashi Institute of Technology

酸化膜-炭化珪素 (SiC) 半導体界面のフォトン・エネルギー1050 eV の軟 X 線励起光電子分光により、SiC (000-1)面上に作製したドライ酸化膜とウェット酸化膜の界面遷移層における化学結合状態の違いを調べた。電氣的測定によれば界面準位密度は、ウェット酸化の場合に大幅に低減されること、その量が光電子分光により求めたサブオキシドの面密度と良く対応することがわかった。これらの実験結果から、(000-1)面をウェット酸化により作製した MOS デバイスの電氣的特性が向上する理由は、主として Si^{1+} 及び Si^{3+} からなる中間酸化状態の量が減少したためであると結論づけられた。

Dry and wet oxide films formed on silicon carbide (SiC) (000-1) faces have been characterized by using 1050 eV photons' excited photoelectron spectroscopy. It was found from the electronic measurements that the amount of interface states in the case of wet oxidation is much lower than that in the case of dry oxidation. The area density of suboxide estimated from photoelectron spectroscopy is in a good correlation with the interface state densities. In conclusion, the reduction of the amount of Si^{1+} and Si^{3+} is promising candidate as the improvement in performance of MOS device.

SiC MOSFET は、従来の Si MOSFET の性能限界を上回る高出力・低損失デバイスの実現が期待されている。しかし、実デバイスの性能は、オン抵抗がその予測値より 2 桁ほど大きいなど SiC の物性値から予測される値に比べてはるかに劣っている。その原因として、酸化膜/SiC 界面における界面準位密度が高い

ために反転層におけるチャネル移動度が低いことが指摘されている。一方、SiC の酸化速度は使用する基板の面方位によって大きく異なり、酸化速度が最も大きい(000-1)面(C 面)はデバイス応用上優位とされている。しかし、C 面は酸化膜/SiC 界面構造に問題があり、その電氣的特性が他の面に比べ著しく悪かった

ため、永年デバイス応用への候補としては挙げられていなかった。ところが、最近産総研のグループがC面上に高品質エピタキシャル膜の成長に成功し[1]、さらにそれに加えて水素種を多く含む酸化プロセスを取り入れることにより、従来 $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以下であったチャネル移動度が $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を越えるに至った[2]。しかしながら、このような電気特性向上の物理的根拠が未だ解明されていない。

そこで、本研究ではフォトン・エネルギー 1050 eV の軟 X 線を励起源とした光電子分光法により、酸化膜/SiC C 面界面の化学結合状態を、ドライ酸化膜の場合とウェット酸化膜の場合を比較することにより詳しく調べた。その結果、本測定から推測された界面準位密度が、電気的特性から求まる界面準位密度と良く対応するとともに、酸化プロセスによる電気特性の変化を説明できる界面構造の違いを見出した。

試料は、n 型 4H-SiC C 面 8° オフエピタキシャル基板を 1100°C においてドライ酸化した後急冷したもの、同基板を 900°C でウェット酸化した後急冷したものを用意した。なお、ウェット酸化の場合の酸素ガスと水蒸気の流

量比は 3:1 である。また、薄い酸化膜の界面層と厚い酸化膜の界面層の構造が異なることから[3]、全ての試料は一度膜厚 10 nm 程度まで酸化し、 1.2 nm までエッチングバックした後光電子分光による界面構造の測定を行った。

図 1(a)にウェット酸化膜とドライ酸化膜の Si $2p$ 光電子スペクトルを白丸により示す。図中の細線及び太線はそれぞれスペクトル分離後の各スペクトルとその合成スペクトルを示している。(0001)Si 面の場合では、サブオキサイドとして Si^{1+} のみが観測されているのに対し[3,4]、C 面では Si^{1+} と Si^{3+} が観測された。 Si^{3+} は C 面に特有な中間酸化状態であることから、C-Si-O₃ で表される結合形態に由来していると推測される。

図 1(b)にウェット酸化膜とドライ酸化膜の C $1s$ 光電子スペクトルを白丸により示す。SiC に帰属できるスペクトルに加えて、CH_x に帰属できるスペクトルと SiC に帰属できるスペクトルの左肩の結合エネルギー 283.1 eV の近傍に未知のスペクトル(以下、 C^{1+} と呼ぶ)が現れる。 C^{1+} スペクトルは、その結合エネルギーから $\text{Si}_3\text{-C-O}$ と表される結合形態に由来する

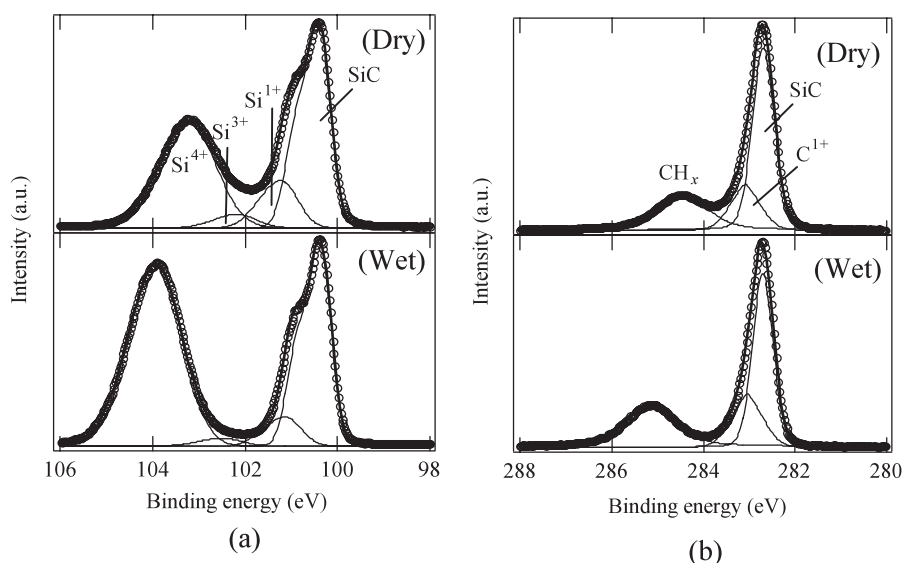


図 1 ドライ(Dry)酸化膜およびウェット(Wet)酸化膜の(a) Si $2p$ 、(b) C $1s$ 光電子スペクトル。

と考えられる。

サブオキシドの面密度 N_n は、光電子回折の影響を受けにくい光電子脱出角 $q=52^\circ$ における Si 2*p* スペクトルの解析から、次式を用いて求めることができる[5]。

$$\frac{NI}{NS} = \frac{N_n}{n_s \lambda_s \sin \theta} \quad (1)$$

ただし、NI/NS、 n_s 、 ℓ_s はそれぞれサブオキシドのスペクトル強度を SiC のスペクトル強度で規格化した値、SiC 中の Si 原子濃度 $4.80 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 、1050 eV の光子で励起された光電子の SiC 中の脱出深さ 2.0 nm を示す。ここに、 N_n は、SiC(000-1)面の Si 面密度 $N_s (=1.21 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2})$ を用いて原子層数 (ML) で表現できる。高周波 C-V 法により求めたドライ酸化膜およびウェット酸化膜の界面準位の総量 N_{it} の値を (0001)Si 面上に 1100 °C において形成したドライ酸化膜の界面準位の総量とともに表 1 に示す。この表によれば、C 面上に形成したウェット酸化膜では、界面準位密度 N_{it} が大幅に低減されることがわかる。また、Si 面ではサブオキシド Si^{3+} が観測されなかったにもかかわらず、界面準位密度 N_{it} は C 面上に形成した酸化膜の場合とほぼ同じ大きさである。すなわち、界面準位密度 N_{it} は、サブオキシド Si^{3+} の存在だけでは説明できないことがわかる。式(1)を用いて算出した各酸化膜のサブオキシドが (1) Si^{1+} のみの場合および (2) Si^{1+} と Si^{3+} からなる場合の原子層換算の量、(3) C^{1+} の原子層換算の量を表

1 に示す。この表において、3 種類の酸化膜の N_{it} の大小関係に最も近くなるのは、(2) により界面構造を規定した場合であることがわかる。したがって、C 面上にウェット酸化膜を形成して MOSFET を作製した場合、界面準位の総量が低く、かつチャネル移動度が大きくなる理由は、サブオキシド Si^{1+} と Si^{3+} の量が低減したことによると考えられる。

参考文献

- [1] K. Kojima *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L637.
- [2] K. Fukuda *et al.*: Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 2088.
- [3] Y. Hijikata *et al.*: Mater. Sci. Forum **457-460** (2004) 1341.
- [4] Y. Hijikata *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. A **23** (2005) 298.
- [5] M. Shioji *et al.*: Appl. Phys. Lett. **84** (2004) 3756.

表 1 3 種類の酸化膜の界面準位の総量 N_{it} とサブオキシド Si^{1+} 、 $\text{Si}^{1+} + \text{Si}^{3+}$ 、および C^{1+} の面密度

Process	$N_{it} [10^{13} \text{ cm}^{-2}]$	$\text{Si}^{1+} [\text{ML}]$	$\text{Si}^{1+} + \text{Si}^{3+} [\text{ML}]$	$\text{C}^{1+} [\text{ML}]$
Dry (C-face)	4.08	1.36	1.64	3.68
Wet (C-face)	0.27	0.83	1.03	2.81
Dry (Si-face)	4.20	1.71	1.71	-