

低地球軌道上の原子状酸素による酸化膜形成とその特徴 (3)

神戸大工¹ 日本原子力研究開発機構² 横田久美子¹、田川雅人¹、吉越章隆²、寺岡有殿²

Characteristics of the Formation of Silicon Dioxide by Atomic Oxygen in LEO (3)

Kumiko Yokota¹, Masahito Tagawa¹, Akitaka Yoshigoe², Yuden Teraoka²

¹ Department of Mechanical Engineering, Kobe University, Rokko-dai 1-1, Nada, Kobe, 657-8501

² Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Kouto 1-1-1, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

E-mail: yokota@mech.kobe-u.ac.jp

Abstract: The oxide film formed on Si(001) in a simulated low Earth orbit (LEO) space environment was analyzed by synchrotron radiation photoelectron spectroscopy (SR-PES). SR-PES results clearly indicated that the amount of suboxides at the Si/SiO₂ interface formed in a simulated LEO environment at room temperature was much lower than that formed by an ordinary high-temperature oxidation process.

Key words: atomic oxygen, oxidation, LEO, space environmental effect

1. 緒言

地上における半導体デバイス分野においては、MOS-LSI (Metal Oxide Semiconductor Large-Scale Integration: 金属酸化膜半導体高集積回路)の高集積化が押し進められており、それに伴い駆動素子の微細化・高性能化への要求がますます強くなっている。SiO₂薄膜はMOS-FET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors: 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ)の基本構成であるゲート絶縁膜として重要な役割を果たしており、電子デバイスの小型化や高集積化によって、厚さ数nmの極薄膜を形成する技術が要求されている。通常のSiO₂薄膜は酸化ガス雰囲気中でSiを約1000に熱して酸化する熱酸化により形成されるが、熱酸化は高温プロセスであるために膜厚や不純物分布の精密な制御が困難であるという問題を有している。そのため低温酸化プロセスのためのアプローチとして原子状酸素やオゾンのような高活性酸化種を用いてSiを直接酸化する技術が精力的に研究されている[1]。

一方、スペースシャトルや国際宇宙ステーションなどが飛翔する高度200～500kmの低地球軌道(Low Earth Orbit: LEO)上では高層大気の主成分である原子状酸素は8km/sで飛行する宇宙機と相対衝突エネルギー5eV、フラックスは10¹³～10¹⁶atoms/cm²/sで衝突する。これまで軌道上での原子状酸素との衝突による宇宙用材料のエロージョン抑制対策が原子状酸素に関する研究の中心であり、各種材料に対する原子状酸素の影響を評価するための材料曝露試験が軌道上において精力的に行われてきた[2, 3]。LEOにおける原子状酸素の特徴は、(1)高運動エネルギー、(2)電気的に中性、(3)高い反応活性度、(4)大照射面積等であり、半導体プロセスにおけるSiの低温酸化のための条件を極めて高いレベルで備えていると考えられる。

現在まで宇宙環境利用として微小重力を利用した新材料の創製や結晶成長などに関する研究が宇宙ステーションの与圧部を利用して予定されているが、

日本実験モジュールには宇宙ステーションで唯一の曝露部が備えられており、日本は宇宙ステーション外部の宇宙環境を積極的に利用することが可能な立場にある。この曝露部を利用して宇宙ステーション外部の宇宙環境を積極的に利用することができれば宇宙環境利用の範囲が大きく広がることになる。実際に米国では宇宙ステーションの外部曝露装置MISSIEを使った材料曝露実験・酸化実験やWSFを使った材料実験が行われている。

本研究では、LEOにおいてこれまでマイナスの環境要因であった原子状酸素をSiの低温酸化プロセス技術として積極的に有効利用するための基礎実験として、レーザーデトネーション型原子状酸素発生装置による模擬宇宙環境下でSi(001)ウエハーへ低温酸化膜形成を行なうことを試みている[2, 3]。本報では形成された酸化膜の膜質を放射光励起光電子分光(Synchrotron Radiation-Photoelectron Spectroscopy: SR-PES)を用いて分析した結果について報告する。

2. 実験装置および試料

本研究で宇宙環境を模擬するために使用した実験装置は神戸大学に現有するレーザーデトネーション型原子状酸素発生装置である[3]。実験で使用した試料はRCA洗浄後、HF溶液で表面を水素終端したSi(001)ウエハーである。試料は水素終端化後直ちに真空チャンバーに導入し酸化実験に供した。酸化膜厚の測定は原子状酸素照射装置に取り付けられた偏光解析装置を用いて、偏光パラメーターのその場観察により行った。

SR光による酸化膜質解析にはSPring-8原研軟X線ビームライン(BL23SU)に設置された表面反応分析ステーション(SUREAC2000)を用いた[4]。入射X線のエネルギーを891eVに固定して、光電子の脱出角度を通常の90度に加え、20度での測定を行なうことで、試料極表面の測定もあわせて行った。なお、原子状酸素照射後の試料は、いったん大気中に取り出し、真空デシケーターに封入した状態でSPring-8

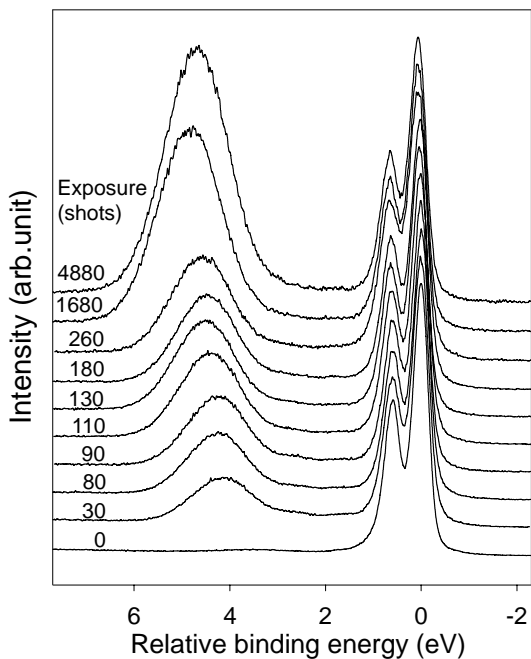


Fig.1 Si2p core level SR-PES spectra of Si(001) exposed to 5.4 eV atomic oxygen beam with different fluences.

に移送後、測定に供した。

3. 実験結果および考察

Fig.1 に室温条件下で 5.4eV の原子状酸素を照射した後の Si(001) 表面の Si2p SR-PES スペクトルを表す。横軸は Si⁰⁺ のピークエネルギーを基準とした相対エネルギーを表しており、図中の数字は原子状酸素の照射パルス数である。1 パルスあたりのフラックスは 9.24×10^{14} atoms/cm² であり、ほぼ軌道上の原子状酸素フラックスと同程度である。SR 光を励起光源としているため、Si⁰⁺ (0eV) と Si⁴⁺ (4eV) のピークが明瞭に分離されているが、原子状酸素照射開始直後から構造遷移層であるサブオキไซด์が極めて少ないこ

とがわかる。これらのスペクトルをピーク分離し、そのサブオキไซด์成分の定量分析を行った結果を Table 1 に示している。原子状酸素の照射量が増大し、酸化膜厚が増加すると (0.7-2.3 nm)、サブオキไซด์量は減少し、膜厚は 0.16-0.19nm でほとんど変化が認められない[5]。このことは宇宙環境の下では酸化の極初期からサブオキไซด์の少ない極薄酸化膜が形成可能であることを示唆しており、室温でも高性能な絶縁用酸化膜を形成できる可能性がある。

4. まとめ

LEO 環境を模擬した原子状酸素環境下で Si の低温酸化薄膜形成を行い、その膜質を SR-PES によって評価した。その結果、擬似 LEO 環境で室温酸化した酸化膜は酸化の極初期からサブオキไซด์が極めて少なく、高品質な酸化膜が形成できることが示された。

5. 謝辞

本研究を行なうにあたり実験にご協力いただいた神戸大学、十河千恵氏に謝意を表す。本研究は日本原子力研究開発機構重点ナノテクノロジー支援の下に実施されたものである。また、本研究の一部は倉田記念日立科学技術振興財団、日本学術振興会科学研究費補助金および川西記念新明和教育財団の支援を受けて行われたことを付記し感謝の意を表す。

6. 参考文献

- [1] たとえば服部健雄：真空 Vol.44 (2001) pp.695.
- [2] 横田久美子, 田川雅人, 第 20 回宇宙利用シンポジウム講演予稿集, 2004, pp.308.
- [3] Yokota K., Ohmae N., Tagawa M., High Performance Polymers, Vol.16, No.2 (2004) pp.221.
- [4] 寺岡有殿ら, 放射光, Vol.18, No.5 (2005) pp.298.
- [5] Tagawa M., Sogo C., Yokota K., Hachiue S., Yoshigoe A., Teraoka Y., Jpn. J. Appl. Phys., Vol.44, No.12 (2005) pp.8300.

Table 1 Relationship of O-atom fluence and amount of suboxides in the oxide films formed by the atomic oxygen beam with kinetic energy of 5.4 eV at room temperature

O-atom fluence ($\times 10^{18}$ atoms/cm ²)	Thickness (nm)	Atomic percentae				Thickness of transition layer (nm)
		Si ¹⁺	Si ²⁺	Si ³⁺	Si ⁴⁺	
0.02	0.7	6.1	7.7	10.0	70.2	0.17
0.10	1.1	3.0	3.3	7.9	85.8	0.16
1.55	1.9	2.0	2.8	4.3	90.9	0.17
4.51	2.3	1.9	2.4	3.9	96.1	0.19