有機金属イオンビーム法によるヘテロエピタキシャル SiC ナノドットの結晶成長*

松本 貴士^{*1}・木内 正人^{*1}・杉本 敏司^{*2}・後藤 誠一^{*2}

Heteroepitaxial Growth of SiC Nano-dots by Organometallic Ion Beam

Takashi MATSUMOTO^{*1}, Masato KIUCHI^{*1}, Satoshi SUGIMOTO^{*2} and Seiichi GOTO^{*2}

^{*1}Research Institute for Innovation in Sustainable Chemistry, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Midorigaoka 1-8-31 Ikeda, 563-8577 Osaka

^{*2}Science and Technology Center for Atoms, Molecules and Ions Control, Graduate School of Engineering, Osaka University, Yamada-oka 2-1 Suita, 565-0871 Osaka

(Received November 9, 2005, Accepted March 29, 2006)

Silicon carbide (SiC) is a remarkable material for electronic and optoelectronic device applications. Using the organometallic ion beam deposition, the heteroepitaxial SiC nano-dots were fabricated on Si(100) substrate at the low-temperatures (500–800°C). The formation of the SiC nano-dots was performed by the low-energy ion beam deposition system. The single precursor of methylsilicene ion (SiCH_3^+) was generated from dimethylsilane ($\text{SiH}_2(\text{CH}_3)_2$) plasma. The ion beam was extracted at 25 keV, and mass-selected by a sector magnet. The SiCH_3^+ ions were decelerated to 100 eV in front of Si(100) substrate. The SiC nano-dots formed on Si(100) were heteroepitaxial 3C-SiC(100). The size of the SiC nano-dots was the length of 100–200 nm and the height of 10–30 nm. The SiC nano-dots formed by the organometallic ion beam deposition showed the nano-tile structure.

1. はじめに

現在の情報通信技術の目覚ましい発展は、その基盤となるエレクトロニクス産業における弛みない技術革新によって支えられており、現在も数多くの研究開発が産学官を問わず日夜進められている。シリコン半導体はエレクトロニクス産業の中核として、その発展に大きな寄与をしてきた。今後更なる半導体デバイスの発展を見据えるにあたり、シリコン半導体では実現できない次世代半導体の実現が望まれている。窒化物半導体やダイヤモンドと共に期待されている半導体材料に炭化ケイ素 (SiC) がある。SiC は広禁制帯幅半導体の一つであり、現在主流であるシリコンと比較して、禁制帯幅は約 2–3 倍、絶縁破壊電界は約 10 倍、飽和ドリフト速度は約 2 倍、熱伝導度は約 3 倍という優れた物性値を有している^{1,2)}。この特性を利用してシリコンデバイスでは実現できないパワーデバイスの研究開発が進められている^{3,4)}。また、SiC の結晶をナノサイズにして形成させることで、共鳴トンネル素子や量子発光素子への応用が期待できる。本研究では、有機金属イオンを前駆体として SiC の結晶成長を行う有機金属イオンビーム法⁵⁾により SiC ナノドットを作製し、形成された SiC ナノドットの評価を行った結果について報告する。

2. 実験方法

SiC ナノドットの作製は、極低エネルギーイオンビーム堆積装置⁶⁾を用いて行った。SiC 結晶成長の前駆体として有機

ケイ素化合物のジメチルシラン ($\text{SiH}_2(\text{CH}_3)_2$) のプラズマから生成されるメチルシリセニウムイオン (SiCH_3^+) を用いた⁷⁾。 SiCH_3^+ イオンは分子構造中に Si-C 結合を有しており、低温プロセスでも SiC 結晶成長を行うことが出来る⁵⁾。成膜室までイオンビームを効率良く輸送するために、フリーマン型イオン源から 25 keV に加速して引き出し、扇形質量分離器で質量数 43 の SiCH_3^+ イオンのみを質量分離した。イオンビームを輸送中に真空容器内の残留気体分子と衝突し荷電変換反応で発生する高速中性粒子をイオンビーム中から取り除くために静電場でイオンビームを 7° 偏向してから成膜室へと輸送した。基板の直前でイオンビームを所定のエネルギーである 100 eV へと減速し、Si(100) 基板上に堆積させた。イオンビーム照射中の基板温度は 500–800°C とした。Si(100) 基板は、真空容器内で 1000°C のフラッシュ加熱をして基板表面の自然酸化物層を除去して清浄表面としてから SiC 結晶成長を行った。基板でのイオンビームの電流密度は 0.18–0.20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、イオンビームのスポット径は直径 10 mm であった。成膜室の真空度は、成膜前は 3.9×10^{-7} Pa で、成膜中は 1.3×10^{-6} Pa であった。SiC ナノドットの成長は 3–6 時間行った。

3. 実験結果および考察

SiC 結晶成長の前駆体である SiCH_3^+ イオンが基板に照射される際のエネルギー分布を、円筒鏡型エネルギー分析器 (エネルギー分解能: 0.3 eV) を内蔵したプラズマプロセスモニター (PPM421, Balzers) で測定した。イオン源での設定電位を 100 V にした場合の SiCH_3^+ イオンのエネルギー分布は 100 ± 1 eV と、非常に単色のエネルギー分布であることが分かった⁵⁾。作製した SiC ナノドットをラマン分光により分析した。得られたラマンスpektrルの 796 cm^{-1} に立方晶系 β -SiC (3C-SiC) に起因するピークを確認した SiC ナ

* 平成17年11月10日 第46回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 産業技術総合研究所環境化学技術研究部門
(〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31)

^{*2} 大阪大学大学院工学研究科附属原子分子イオン制御理工学センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Fig. 1 The RHEED patterns of the SiC nano-dots formed on Si(100) substrate at (a) 800°C and (b) 600°C. The SiC nano-dots were heteroepitaxial 3C-SiC(100).

Fig. 2 The AFM images of the SiC nano-dots formed on Si(100) substrate at (a) 800°C and (b) 600°C.

ノドットの結晶構造は、反射高速電子線回折 (RHEED) により *in situ* で解析した。SiC ナノドットの RHEED パターンを **Fig. 1** に示す。500–800°C で成長させた SiC ナノドットはいずれも 3C-SiC(100) であり、Si(100) 基板に対してヘテロエピタキシャル成長していることが分かった。基板温度を SiC の結晶成長温度としては極めて低温である 500°C まで下げて形成させた SiC ナノドットは、多結晶化または非晶質化することなく単結晶 SiC が成長しており、有機金属イオンビーム法が SiC 低温結晶成長に有効な手法であることを示している。SiC ナノドットの表面形態は原子間力顕微鏡 (AFM) で観察した。SiC ナノドット表面の AFM イメージを **Fig. 2** に示す。Si(100) 基板上に成長した SiC ナノドットの形状は $\langle 110 \rangle$ と $\langle 1-10 \rangle$ 方位に稜線を持つタイル状をしており、一辺の長さは 100–200 nm、高さは 10–30 nm であった。成長温度を上げるに従って SiC ナノドットの成長も促進されているが、タイル形状は維持しながら成長していることが分かった。SiC ナノドットは形状・大きさ共にほぼ均一になっており、自己組織的な成長をしていると考えられる。

4. ま と め

有機ケイ素イオンの SiCH_3^+ イオンを前駆体とした有機金

属イオンビーム法により SiC ナノドットを作製した。基板温度 500–800°C の Si(100) 上に成長した SiC ナノドットはいずれも立方晶系 3C-SiC(100) であり、SiC の結晶成長温度としては極めて低温である 500°C という条件においても SiC はヘテロエピタキシャル成長していることが分かった。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・特別研究員奨励費の助成を受けた。

〔文 献〕

- 1) R. F. Davis: *Physica B*, **185** (1993) 161.
- 2) R. F. Davis: *J. Crystal Growth*, **137** (1994) 1.
- 3) Y. M. Sung, J. B. Casady, J. B. Dufrene and A. K. Agarwal: *Solid-State Electronics*, **46** (2002) 605.
- 4) A. Q. Huang and B. Zhang: *Solid-State Electronics*, **44** (2000) 325.
- 5) T. Matsumoto, K. Mimoto, M. Kiuchi, S. Sugimoto and S. Goto: *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **585** (2000) 165.
- 6) T. Matsumoto, K. Mimoto, S. Goto, M. Ohba, Y. Agawa and M. Kiuchi: *Rev. Sci. Instrum.*, **71** (2000) 1168.
- 7) A. C. Hopkinson and M. H. Lien: *J.C.S. Chem. Comm.* (1980) 107.