

氏名(本籍・生年月日) 渡邊 幸宗 (愛知県 昭和43年10月31日)  
学位の種類 博士(工学)  
学位記番号 甲第604号  
学位授与の日付 平成26年3月20日  
学位授与の要件 信州大学学位規程 第5条第1項該当  
学位論文題目 高品位3C-SiCエピタキシャル膜形成に向けたSi基板  
炭化機構に関する研究  
論文審査委員 主査 教授 上村 喜一 准教授 太子 敏則  
教授 佐藤 敏郎  
教授 橋本 佳男  
教授 安井 寛治 (長岡技術科学大学)

## 論文内容の要旨

ワイドバンドギャップ半導体材料であるSiCは、熱的・化学的に安定な材料であり、高耐圧・高耐熱素子を形成できる素材として古くから研究されてきた。SiCはSi-C原子単位層の繰り返し周期の異なる多数の結晶構造が存在する。中でも主に研究対象になっているのは、立方晶構造(Cubic)の3C-SiC、六方晶構造(Hexagonal)の4H-, 6H-SiCである。特に、4H-SiCは昇華法による単結晶基板が市販されており、高耐圧素子応用の研究および開発が盛んに進められている。

本研究では3C-SiCに注目し研究を行った。3C-SiCは4H-SiCに比べバンドギャップが狭く高耐圧用途には若干不利であるが、500~600V程度の素子耐圧が必要な商用電源領域においては十分な耐圧が望める。また、電子移動度や飽和ドリフト速度が大きい、移動度に異方性がなくデバイス設計に有利などの特徴を有している。特にMOSFETにおける絶縁膜/SiC界面特性が良好であり、単体素子のみではなくIC化も期待される。また、結晶化温度が比較的低温、Si基板にヘテロエピタキシャル成長が可能であることから大口径ウエハの実現も可能である。しかし、Siと3C-SiCでは20%もの格子定数差があり、高品位な3C-SiCエピタキシャル層の形成は非常に困難である。SiCのヘテロエピタキシャル成長では、Si基板からのSiの昇華を抑え、安定にエピタキシャル成長ができるようにSi基板表面を炭化(SiC化)処理し、バッファ層を形成する。この炭化処理法の開発により安定してSiC膜の形成が可能となったが、このバッファ層はエピタキシャル層の結晶品質への影響も大きい。

本研究では特にこのバッファ層に着目し、高品位3C-SiCエピタキシャル膜形成に向けたSi基板炭化機構の解明を目的に研究を進めた。エピタキシャル膜の

高品位化には高真空領域でのプロセスが有効であり、プロセス圧力が $10^{-3}$  Pa～ $10^{-2}$  Paオーダーの分子流領域での実験を行った。炭化ガスには $C_2H_4$ , neo- $C_5H_{12}$ ,  $C_3H_8$ といった炭化水素ガスを用いたが、炭化機構の解析では $C_2H_4$ ガスを用いた、プロセス温度 $1000^\circ C$ での実験結果を中心に検討を進めた。

炭化機構の検討では、炭化後の試料の評価・観察結果から理論的解析を進めた。炭化膜とSi基板の界面には逆ピラミッド状のピットが形成される。これは表面に形成した炭化膜にピンホールなどの欠陥部分がありここを通じてSiが昇華するためである。顕微鏡の観察で、このピットの密度、体積を見積もり定量化した。また炭化膜の膜厚をエリプソメーターにて測定した。炭化膜の膜厚のプロセス圧力依存、時間依存および、ピット密度、体積から見積もったSiの昇華量の関係を解析し炭化機構について検討した。

炭化機構は形成条件により大きく変化することがわかった。炭化膜は2つのステップにより形成される。初期の段階は炭化膜でSi表面がおおわれるまでの段階で、実験を行った範囲で低圧条件ではエピタキシャル成長により膜形成すること、高圧条件では拡散機構により膜形成することがわかった。また初期段階で形成される炭化膜の膜厚はプロセス圧力に対し逆比例の関係があることがわかった。第2段階では、低圧条件で初期段階に形成された炭化膜は成長しない。一方、高圧条件では炭素がSiC膜の結晶粒界を拡散し基板のSiと反応することで膜成長することがわかった。成長レートはプロセス圧力が高くなるに従い線形に速くなり、ある圧力で成長レートは飽和する。この飽和するまでのプロセス圧力と成長レートの関係は、SiC膜への炭素の取込み量に関係しヘンリーの法則で説明できる。また成長レートが飽和するのはSiC膜への炭素の取込み量が飽和したためと考えられる。第2段階で膜成長する境界圧力条件はヘンリーの関係式から炭素の取込み量が0になる点であり、 $p_0 = 1.2 \times 10^{-2}$  Paであった。またこの圧力では表面の炭素の出入りが平衡状態にある点であり、Hertz-Knudsenの式  $p_0 / (2 \pi m k T)^{1/2}$  より炭化源分子の流れは  $2.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  と見積られた。以上のように炭化機構は圧力条件により変化する表面での炭素濃度により決定されることを示した。またその変化点の圧力を実験結果と理論的な検討より示した。昇温レートを変えた実験、炭化ガスにneo- $C_5H_{12}$ を用いた実験によって表面での炭素濃度が変化するが、炭化機構（炭化レート）の圧力依存の傾向は矛盾なく説明できることを確認した。

炭化機構が異なる2つの炭化膜について、その上に形成するSiCエピタキシャル膜の結晶性へ与える影響をについて検証した。その結果、エピタキシャル機構により形成された炭化膜をバッファ層とすることで上部のエピタキシャル膜の結晶品質も良くなることが確認された。以上のように炭化膜形成機構に関する知見から、3C-SiCエピタキシャル膜の高品質化の実現へ向けた有用な結果が得られた。