

氏 名	なか むら しゅん いち 中 村 俊 一
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2198 号
学位授与の日付	平 成 14 年 11 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 電 子 物 性 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Control of Step Structures on Silicon Carbide Surfaces in Epitaxial Growth toward Electronic Devices (電子デバイス応用へ向けたシリコンカーバイドのエピタキシャル成長における表面ステップ構造制御)
論文調査委員	(主 査) 教 授 松 波 弘 之 教 授 野 田 進 教 授 藤 田 静 雄

論 文 内 容 の 要 旨

電気エネルギーの制御に有用なパワー半導体シリコンに物性上の性能限界が見え、ワイドギャップ半導体シリコンカーバイド (SiC) が大きく注目されている。本論文は、化学気相堆積 (CVD) 法を用いて、SiC のエピタキシャル成長における諸現象の理解を深め、高品質結晶作製の基本指針を確立して、SiC 電子デバイスへの展開に資することを目的とした研究結果をまとめたもので、6 章からなる。

第 1 章は序論であり、SiC のパワーデバイス用材料としての優位性の根拠を示すとともに、その現状について論じている。

第 2 章では、立方晶 SiC (3C-SiC) のエピタキシャル成長について論じている。六方晶 SiC (α -SiC) (0001) 面基板上への 3C-SiC 成長においては、結晶学的理由により双晶の発生が不可避とされてきた。本研究では、双晶発生を抑制できる可能性を提案し、そのために表面ステップ構造と成長モードの制御が重要な課題であることを指摘している。

第 3 章では、横型コールドウォール化学気相堆積法 (CVD) を用いた α -SiC の高速成長について論じている。成長初期プロセスを改良して、これまでの約 2 倍の $6\mu\text{m}/\text{h}$ という高速成長においても表面モフォロジーを悪化させないことに成功している。常圧における成長速度は、原料ガスであるモノシラン (SiH_4) の重合により、この $6\mu\text{m}/\text{h}$ 程度で飽和することを明らかにしている。さらに、成長圧力を下げることで、80Torr で $12\mu\text{m}/\text{h}$ という高速成長を実現している。成長速度の成長圧力依存性から、SiC のホモエピタキシャル成長における律速過程は、ステップ端での Si 種と吸着水素の競合にあることを示唆している。この競合と気相中での SiH_4 の重合を考慮したモデルにより、成長速度を半定量的に説明することに成功している。

第 4 章では、 α -SiC (0001) 表面のステップ構造制御について論じている。 α -SiC (0001) 面を 1300°C で HCl/H_2 ガスエッチングすることにより、SiC 表面に原子レベルのステップを形成し、これを原子間力顕微鏡 (AFM) により観察している。基板が適切に研磨され、表面ダメージが少ない場合には、SiC 表面に原子レベルで均一なステップ構造が形成できることを見いだしている。こうして均一なステップ構造が形成された基板上に、CVD でホモエピタキシャル成長を行っている。初期成長プロセスを適切に制御することで、6H-SiC (0001) 0.2° オフ面 (ほぼオフなし) においても、デバイス作製に応用可能なかなり広い成長条件においてホモエピタキシャル成長が可能であることを見いだしている。 α -SiC (0001) 面への 3C-SiC 混入の有無は、成長モードがステップフロー成長 (ホモエピタキシャル成長) か 2 次元核発生 (3C-SiC 成長) かの違いであると考えられており、その境界はこれまで、オフ角にして 0.5° 以上の領域にあると考えられていた。本研究では、AFM で詳細に観察を行った結果、6H-SiC (0001) 面上では、3C-SiC の 2 次元核発生は、オフ角が 0.004° 程度と非常に小さくても事実上起こらないことを明らかにしている。

第 5 章では、SiC の電氣的諸物性の評価と電子デバイスへの展望について論じている。パワーデバイスを設計する上で最も重要な材料定数の一つである絶縁破壊電界について、現在最も有望視されている 4H-SiC にも、既に報告されている 6H-SiC と同様に、その複雑な結晶構造に起因して絶縁破壊電界に大きな異方性があることを実験的に示している。4H-SiC

<11-20>方向の絶縁破壊電界は 4H-SiC<0001>方向の約75%であることをはじめて明らかにしている。ついで、4H-SiC の電子トラップを、Deep Level Transient Fourier Spectroscopy (DLTFS) 法という高精度測定法により測定している。最も多く見られる Z_1 センターと呼ばれる電子トラップは、エピタキシャル成長における C/Si 比の増大とともに減少し、ついには測定限界以下にまで低減することに成功している。また、エピタキシャル成長により、急峻な接合界面を持つ多重 pn 接合構造を形成している。これは、電子デバイスの特性を飛躍的に向上させる超接合構造の基本となるものであり、この多重 pn 接合構造を用いたダイオードでは、既存構造のものに比べて約 2 桁の特性向上を実現している。

第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

電気エネルギーの制御に使われるパワー半導体シリコンに物性上の性能限界が見え、ワイドギャップ半導体シリコンカーバイド (SiC) が大きく注目されている。本論文は、化学気相堆積 (CVD) 法を用いた SiC のエピタキシャル成長における諸現象の理解を深め、高品質結晶作製の基本指針を確立して、パワーデバイスの展開に資するための研究結果をまとめたもので、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 初期成長プロセスを詳細に検討し改良することで、常圧では、これまでの約 2 倍となる $6\sim 7\mu\text{m/h}$ の高い成長速度でも、表面モフォロジーを劣化させないことに成功した。さらに、圧力を下げ、80Torr で $12\mu\text{m/h}$ の高速成長を実現した。
2. 成長速度の成長圧力依存性から、SiC のエピタキシャル成長の律速過程を、表面ステップ端での Si 種と吸着水素の競合にあると考え、この競合と気相中での原料ガスの重合を考慮して、成長速度の変化の様子を半定量的に説明することに成功した。
3. オフ角の小さな SiC(0001) 面上において、 1300°C での HCl/H_2 ガスエッチングによって、原子レベルで均一なステップ構造の形成に成功し、高品質のエピタキシャル成長を実現した。6H-SiC(0001) 面上では、オフ角が 0.004° 程度と非常に小さくなくても、結晶品質を損なう 2 次元核発生が起こらないことを見いだした。
4. エピタキシャル成長層の電氣的諸物性の評価として、4H-SiC の絶縁破壊電界の異方性をはじめて明らかにした。また、4H-SiC の少数キャリア寿命に関連する深い準位 (電子トラップ) の成長条件依存性を詳細に検討し、原料ガスの C/Si 比を増大させて、測定限界以下にまで低減した。さらに、急峻な界面をもつ多重 pn 接合構造を試作し、既存構造に比較して性能を約 2 桁改善した。

以上要するに、本論文は、CVD 法を用いる SiC のエピタキシャル成長において、表面ステップ構造を制御して高品質結晶作製の基本指針を確立し、SiC パワーデバイスのための基礎物性を明らかにしたもので、得られた成果は学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成14年10月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。