

重点(プロジェクト)課題 - 次世代電力需給基盤の構築

高性能パワー半導体SiCの開発

背景・目的

再生可能エネルギー大量導入に対応する基幹・配電系統安定化、さらには連系強化・広域運用に対応するために、電力制御装置の低損失化、高電圧化が必要である。SiC半導体技術は、小型・低損失の電力制御装置を開発できると期待されているものの、現状では、小容量素子が家電等一部の製品に採用されているにすぎない。大容量SiC素子の開発には、SiC単結晶薄膜の厚膜化や低欠陥化(高品質

化)が不可欠である。これまでに、当所が独自開発したSiC結晶成長装置を用いて、高電圧系統に利用が可能な耐電圧13kV相当の高耐圧素子に適用可能な厚膜かつ高純度のエピタキシャル(エピ)膜の作製に成功した。

本課題では、生産現場において適用可能な厚膜・低欠陥SiC単結晶の製造技術を開発することで、高電圧・大電流SiC素子の実現を目指す。

主な成果

1 高速エピ膜形成プロセスの最適化

SiC素子の大容量化を実現する厚膜かつ高品質のSiCエピ膜を生産するために、種々の欠陥を低減して*1SiCエピ膜を得る結晶成長技術について、高い成膜速度で行うためのプロセスを開発した。数10 μ m/hの高速SiCエピ膜結晶成長において、Si原料ガス(SiH₄)の分圧を下げる、または原料ガスに塩化水素を添加することで、結晶成長時に生成する積層欠陥を大幅低減できることを明らかにした(図1)。また、基板の結晶成長面の角度を調整す

ることで、エピ膜内の転位と点欠陥の低減を両立することに成功した。これらの成果により、面積1cm²(電流100 A以上に相当)のSiC素子を作製可能とするレベルまで積層欠陥密度と転位密度を減少することができ、加えて、当所が開発した格子間炭素拡散処理*2を施すことによって十分なキャリア寿命*3を実現可能(高電圧素子を作製可能)なレベルの点欠陥密度が低いSiCエピ膜を得た。

2 SiCの品質向上のための転位挙動の解明・制御

SiC素子の劣化要因を削減するために、転位制御の高度化に向けた欠陥挙動の解明と観察技術の開発を行った。当所が開発した高温熱処理による基底面転位転換法*4において、熱処理温度を高めること、ならびにAr中高温熱処理前にエピ膜表面にイオン注入を施した後に再度エピ膜を形成することによって、貫通刃状転位(TED)への転換率を向上させてエピ膜内の基底面転位密度を大幅低減できることを解明した(図2)。また、平面

フォトルミネッセンス(PL)観察によるTEDのバーガーズベクトル*5の判別、ならびに断面PL観察による厚いエピ膜内でのTEDならびに貫通せん転位(TSD)の伝播方向を可視化することに成功した(図3、4)。これらの転位観察技術は、TEDとTSDの挙動制御をより正確に行うことを可能にするため、さらなる結晶品質の向上による高性能な素子の開発が期待できる。

*1 今回対象とした欠陥は、それぞれ、SiC素子の電気特性を低下させる8H型積層欠陥を10³cm²から0.1cm²に、パイポーラ型SiC素子の動作時における通電特性劣化を引き起こす基底面転位を0.09cm²に、キャリア寿命を低下させる点欠陥(Z_{1/2}センター)を1×10¹²cm⁻³に低減した。

*2 格子間炭素拡散処理: 格子間炭素をSiCエピ膜表面から導入して、その後にSiCエピ膜深部に熱拡散させることで、炭素空孔型欠陥を消滅させる方法。

*3 平衡状態よりも過剰な電子と正孔が消滅するまでの時間を表し、高寿命にすることにより低損失通電を得ることができる。

*4 高温熱処理による基底面転位転換法: 1800-2000℃程度のAr中高温熱処理によって、SiCエピ膜内の基底面転位を通電特性の劣化要因とならないTEDに転換する方法。

*5 転位線の周りの原子の不一致の向き。

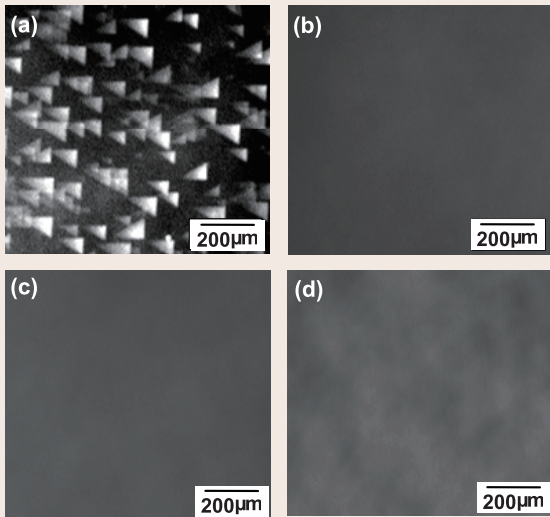


図1 SiCエピ膜のPLマッピング像

(a)成長圧力40Torr/H₂ガス流量40slm、(b)40Torr/H₂ 60slm、(c)30Torr/H₂ 40slm、(d)200Torr/H₂ 40slmに塩化水素を流量3slm添加にて得られた4H-SiCエピ膜のPL像。PL像はバンドパスフィルタ450nmを通して観察した。(a)における三角形状のコントラストはSiCエピ膜内に存在する8H型積層欠陥に対応し、(b)、(c)、(d)では8H型積層欠陥が観測されない。[slm: standard liter per minute(標準状態でのガス流量)]。

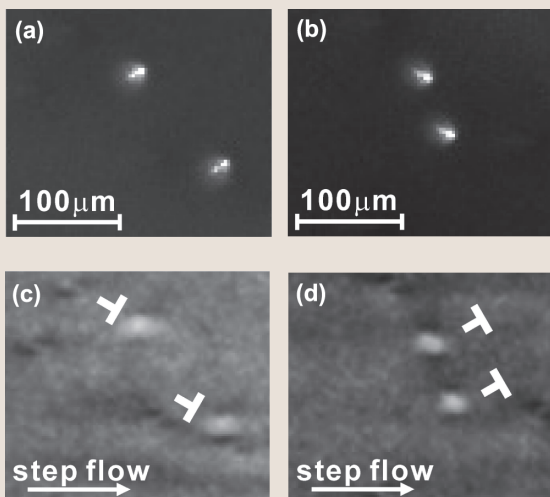


図3 2種のバーガーズベクトルを有するTEDの(a)、(b)平面PL像と、(c)、(d)それぞれに対応する放射光X線トポグラフィ像

(a)、(b)のPL像は、バンドパスフィルタ900 nmを通して観察。(c)、(d)内の「 \rightarrow 」印はTEDが形成する余剰原子面の向きを示し、放射光トポグラフィ像から判別される。(a)、(b)において、TEDが形成する余剰原子面の向きに対応してPL像が変化することが確認され、PL観察によってもエピ膜内のTED余剰原子面の向きを判別できることを示した。

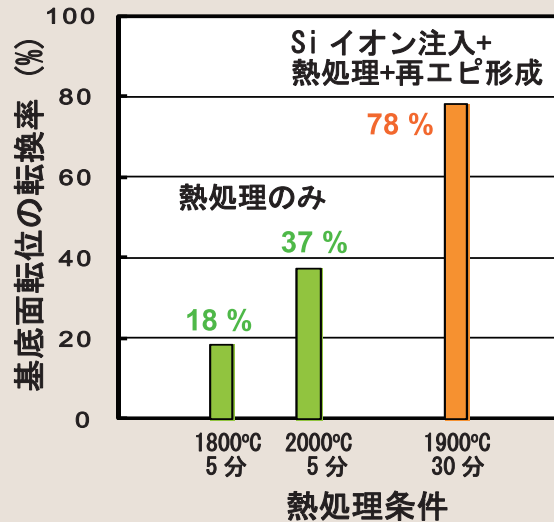


図2 Ar中高温熱処理における基底面転位の転換率

Ar中での高温熱処理による基底面転位転換法において、熱処理温度を2000°Cにまで高めることや、エピ膜表面にイオン注入を施してから高温熱処理を行った後にエピ膜を再度形成することによって、基底面転位の転換率を向上でき、エピ膜内の基底面転位密度を大幅に低減できる。

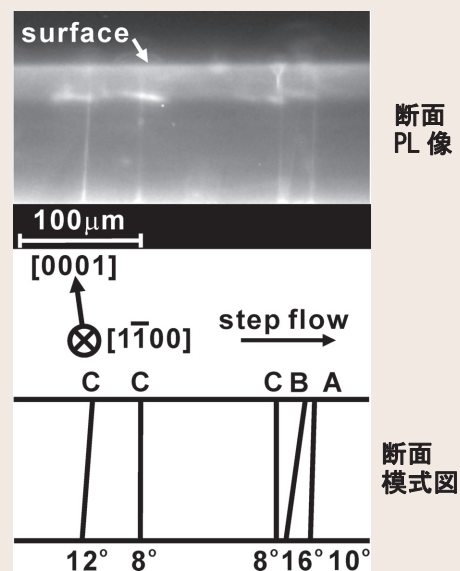


図4 4H-SiCエピ膜の断面PL像と模式図

断面模式図におけるAとBはTED、CはTSDに対応し、角度はc軸[0001]からの傾きを示す。断面PL像において、厚いエピ膜内でTEDとTSDが表面に向かって傾斜角を有しながら伝播の様子を直接観測することに成功した。