



# 大電流高信頼性パワーデバイスを実現する 高品質SiCエピタキシャル基板EpiEra

High-Quality SiC Epitaxial Wafer “EpiEra” Realizing High-Reliability Large-Current Power Devices

伊東 洋典\*  
Hironori Itoh

榎 蘭 太郎  
Taro Enokizono

宮瀬 貴也  
Takaya Miyase

堀 勉  
Tsutomu Hori

和田 圭司  
Keiji Wada

古米 正樹  
Masaki Furumai

SiCパワーデバイスはSiに代わる次世代デバイスとして市場拡大が進んでおり、大電流かつ高信頼性が要求される車載用などの用途においては、SiCエピタキシャル層の高品質化が特に重要である。SiC基板に含まれるBPD（Basal Plane Dislocation: 基底面転位）はバイポーラデバイスにおける順方向通電動作時に積層欠陥拡張を引き起こし、デバイス信頼性の致命的な劣化原因となるが、近年、再結合促進層と呼ばれる高窒素濃度のエピタキシャル層の導入による積層欠陥抑制技術が提案されている。本稿では、PL（Photoluminescence: フォトルミネッセンス）イメージング測定法による受光フィルターの検討を通して、再結合促進層中のBPD評価手法を新たに確立するとともに、BPDの極めて少ない再結合促進層を備えた6インチSiCエピタキシャル基板を新規開発した成果について報告する。加えてドリフト層のBPD品質、表面欠陥品質との両立も確認しており、開発したエピタキシャル基板は大面積素子における安定したデバイス特性を実現するものである。

Silicon carbide (SiC) power devices are promising next-generation devices and their market is growing globally year by year. The quality of SiC epitaxial wafers is particularly important to secure the reliability of large-current power devices used for automotive applications. Basal plane dislocation (BPD) in the SiC epitaxial wafers causes stacking fault expansion, which leads to the fatal degradation of SiC bipolar devices. To suppress the stacking fault expansion, the introduction of highly nitrogen-doped layer called a “recombination-enhancing layer” has been proposed. In this study, we have established a method to evaluate BPD in the recombination-enhancing layer by investigating the receiving filter using photoluminescence imaging, and successfully obtained a 150 mm SiC epitaxial wafer with extremely low BPD density. We also confirmed that BPD and surface defects in the drift layer were simultaneously suppressed, demonstrating the new epitaxial wafer has stable characteristics for large chip devices.

キーワード：SiC、パワーデバイス、エピタキシャル成長、BPD、再結合促進層

## 1. 緒 言

SiCパワーデバイスは、Siに代わる高効率な次世代のパワーデバイスの1つとして市場拡大が急速に進んでいる。車載用などの大電流用途においては、デバイスのチップサイズの面積化も求められており、デバイス歩留りを大きく左右するSiCエピタキシャル層の高品質化が特に重要となる。当社では優れた面内均一性と低欠陥品質を実現したSiCエピタキシャル基板（製品名EpiEra）の量産を2017年より開始している<sup>(1)</sup>。一般に、SiC基板にはBPD（基底面転位）、TED（Threading Edge Dislocation: 貫通刃状転位）、TSD（Threading Screw Dislocation: 貫通らせん転位）、およびこれらの混合転位が数百 $\text{cm}^{-2}$ ～数千 $\text{cm}^{-2}$ の密度で存在する。特にBPDについてはバイポーラデバイスにおける順方向通電動作における少数キャリアの再結合過程において、BPDからショックレー型積層欠陥の拡張を引き起こし、致命的なデバイス信頼性劣化の原因となることが知られている<sup>(2)</sup>。したがって、エピタキシャル成長において基板に含まれるBPDをデバイスに対して無害とされる

TEDに転位転換させるプロセス技術<sup>(3),(4)</sup>が不可欠となっている。また、従来はエピタキシャル成長層内でBPDをTEDに転換していれば問題ないと考えられてきたが、特に大電流条件下においては基板中のBPD自体が上記積層欠陥拡張

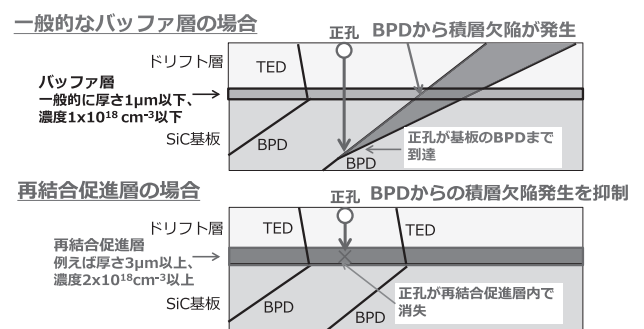


図1 SiCエピタキシャル基板における再結合促進層の役割（一般的なバッファ層との比較）

の原因となり得ることが新たに報告されており<sup>(5)</sup>、対策として再結合促進層と呼ばれる高濃度の不純物窒素をドーパしたエピ層を導入することによって、基板のBPDからの積層欠陥発生を防止する技術が提案されている<sup>(6),(7)</sup>。

図1に示すように、いわゆる通常のバッファ層（一般的に厚さ1μm以下、不純物濃度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以下）では、高電流のデバイス動作時にドリフト層中の正孔が基板のBPDまで到達して積層欠陥拡張を引き起こすのに対し、より高濃度の不純物窒素をドーパさせ、膜厚も厚くした再結合促進層（例えば厚さ3μm以上、不純物濃度 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上）の場合には、再結合促進層内で正孔を消失させる役割を果たすことで基板のBPDからの積層欠陥拡張を防止することが可能となる。

このような再結合促進層の導入において特に重要な点として、再結合促進層内では、基板のBPDがTEDに転換されることでBPDが十分に少ない状態になっていることが保証されなければならない、という点が挙げられる。先行研究においては放射光X線トポグラフィ法による再結合促進層中のBPD評価について報告されているが<sup>(6)</sup>、SiCエピタキシャル基板の製造プロセスにおける評価方法としては、より簡便かつ非破壊にて可能な別のBPD評価手法が求められる。

本稿ではPL（フォトルミネッセンス）イメージング測定法による再結合促進層中のBPD評価手法および、再結合促進層中のBPD低減開発によって実現した高品質な6インチSiCエピタキシャル基板について報告する。

## 2. SiCエピタキシャル成長および評価

SiCのエピタキシャル成長は、6インチ基板が複数枚同時に成長できるホットウォール型のCVD装置を用いて実施した。基板には6インチの4°オフSi面4H-SiC基板を使用した。原料ガスにはモノシランおよびプロパン、キャリアガスには水素、ドーパントには窒素を用いている。

SiCエピタキシャル成長層の膜厚および不純物濃度は、それぞれFTIR（フーリエ変換赤外分光光度計）による光学干渉解析から膜厚を、CV（容量電圧）測定による空乏層解析から不純物濃度を求めた。またエピタキシャル成長層の表面欠陥は、ステージ機構を有する共焦点顕微鏡により観察およびカウントを行った。基板から伝搬したBPDについては、室温でのPLイメージング測定による発光観察を行い評価した。PLイメージング測定の光源にはHg-Xe UVランプを使用し、励起フィルターとして313nmのバンドパスフィルターを用いた。受光フィルターには、 $>750 \text{nm}$ のロングパスフィルターまたは改善版フィルターを用いた。改善版フィルターは、高濃度窒素ドーパ層中のBPD検出に最適化されたフィルターである。

## 3. BPDからTEDへの転換位置について

本検討において、SiCエピタキシャル成長におけるBPDからTEDへの転換位置については、大きく2つのケースが存在することを確認している（図2）。1つは再結合促進層とドリフト層との界面においてBPDからTEDに転換する場合であり、もう1つは基板と再結合促進層との界面においてBPDからTEDに転換する場合である。どちらの場合でもドリフト層中のBPDは十分に少ない状態になるが、再結合促進層中のBPDについては多い場合と少ない場合があり得るため、ドリフト層中のBPD評価だけでは再結合促進層中のBPDが少ないことを保証することはできない。

エピタキシャル基板の断面模式図				
BPDの転換位置	再結合促進層とドリフト層との界面		基板と再結合促進層との界面	
	ドリフト層 → 再結合促進層 → SiC基板 →			
エピタキシャル層	再結合促進層	ドリフト層	再結合促進層	ドリフト層
BPDの有無	あり	なし	なし	なし

図2 SiCエピタキシャル成長において想定されるBPDからTEDへの転換位置

## 4. 再結合促進層中のBPD検出

従来、PLイメージング測定によるSiCエピタキシャル層中のBPD評価対象はドリフト層の部分のみに限定されてきた<sup>(8)</sup>。これは一般にドリフト層よりも高窒素濃度となるバッファ層や再結合促進層においては、BPD以外のバックグラウンド部分からのPL発光が強くなってしまい、BPD検出が困難となることが原因である。しかしながら、図2に示したように、再結合促進層中のBPDが少ないことを保証するためには、再結合促進層中に存在するBPDを検出して評価することが不可欠であるため、PLイメージング測定における受光フィルターの検討を行った。

再結合促進層中のBPDの検出例を図3および図4に示す。再結合促進層は厚さ8μm、濃度 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ であり、ドリフト層は厚さ10μm、濃度 $8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ である。図3にはエピ層内でBPDの転換が起きていないケースを示している。PLイメージング像の比較のため、受光フィルターとして $>750 \text{nm}$ のロングパスフィルターを用いた場合と改善版フィルターを用いた場合の比較を載せている。 $>750 \text{nm}$ のロングパスフィルターを用いた場合にはドリフト層中のBPDのみが白いコントラストの直線として検出されており、再結合促進層中のBPDは全く検出できていない。一方、

改善版フィルターを用いた場合にはドリフト層中のBPDに加えて、再結合促進層中のBPDも黒いコントラストの直線として明瞭に検出できていることがわかる。改善版フィルターを用いることで、従来のPLイメージング法では困難と考えられていた、再結合促進層のような高濃度層中のBPD検出が可能となることが確かめられた。また、**図4**には別の例として再結合促進層とドリフト層との界面においてBPDからTEDへの転換が起きているケースを示している。**図3**と同様に改善版フィルターを用いた場合にのみ、PLイメージング像にて再結合促進層中のBPDが検出できていることがわかる。

エピタキシャル基板の断面模式図	PLイメージング像の比較		
	> 750nm フィルター使用	改善版 フィルター使用	
<b>BPD 検出能力</b>	ドリフト層	○	○
	再結合促進層	×	○

**図3** 再結合促進層中のBPD検出事例（エピタキシャル層内でBPD転換していないケース）

エピタキシャル基板の断面模式図	PLイメージング像の比較		
	> 750nm フィルター使用	改善版 フィルター使用	
<b>BPD 検出能力</b>	ドリフト層	○	○
	再結合促進層	×	○

**図4** 再結合促進層中のBPD検出事例（再結合促進層とドリフト層との界面でBPD転換しているケース）

## 5. 再結合促進層中のBPD低減

再結合促進層中のBPD評価手法をもとに、再結合促進層中のBPD低減に取り組んだ。BPD低減条件の検討のために厚さ8µm、濃度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の再結合促進層のみを成長したサンプルにてBPD密度の比較を行った。**図5**にはBPD密度の低減前と低減後のBPDカウントマップ（2.6mm角セル）を示している。BPD検出には改善版フィルターを使

用した。再結合促進層のエピ成長条件改善前ではウエハ前面にて多数のBPDが検出され、BPD密度は $70 \text{ cm}^{-2}$ であった。再結合促進層のエピ成長条件の最適化を進めた結果、**図5**の右側マップに示すように、ウエハ面内のBPD密度を $0.03 \text{ cm}^{-2}$ まで大幅に低減することに成功した。

エピタキシャル基板の断面模式図	エピ成長条件A	エピ成長条件B
	BPD低減前	BPD低減後
<b>BPD密度 (cm<sup>-2</sup>)</b>	70	0.03

**図5** 再結合促進層中のBPD低減検討結果（BPD検出に改善版フィルター使用）

## 6. ドリフト層の評価結果

**図6**には最適化した再結合促進層の上にドリフト層までを成長したサンプルのBPDと表面欠陥の評価結果を示している。ドリフト層のBPDのみを検出するため、 $>750 \text{ nm}$ のロングパスフィルターを使用した。ドリフト層のBPD密度は $0.01 \text{ cm}^{-2}$ 、表面欠陥（ダウンフォール+三角欠陥）密度は $0.04 \text{ cm}^{-2}$ であり、再結合促進層のBPD品質とドリフト層の欠陥品質が両立できることを確認した。

エピタキシャル基板の断面模式図	BPDマップ	表面欠陥マップ
	ダウンフォール+三角欠陥	
<b>密度 (cm<sup>-2</sup>)</b>	0.01	0.04

**図6** 再結合促進層上ドリフト層のBPDおよび表面欠陥の評価結果（BPD検出に $>750 \text{ nm}$ ロングパスフィルター使用）

## 7. 結 言

PLイメージング法による再結合促進層中のBPD評価手法の検討および、再結合促進層を有する高品質な6インチSiCエピタキシャル基板の開発を行った。最適な受光フィルターを用いることによって従来PLイメージング法では困

難であった再結合促進層中のBPDを明瞭に検出可能となった。エピ成長条件を最適化することによって再結合促進層のBPDを実質的にBPDフリーと呼べる $0.03\text{cm}^2$ まで低減することに成功した。ドリフト層のBPD品質、表面欠陥品質とも両立しており、大電流用途での高い信頼性が求められる車載用デバイスなどに最適な製品と考えている。当社のEpiEraは膜厚および不純物濃度についても6インチウエハ面内で高い均一性を既に見出し(9)、大面積SiCデバイス素子における安定した特性に貢献するものである。

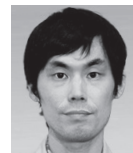
・EpiEraは住友電気工業(株)の登録商標です。

#### 参 考 文 献

- (1) 和田圭司, 寺尾岳見, 宮瀬貴也, 堀勉, 土井秀之, 古米正樹, 「低欠陥6インチSiCエピタキシャル基板 “EpiEra”」, SEIテクニカルレビュー 第193号, 53-57 (2018)
- (2) S. Ha and M. Skowronski, Nucleation sites of recombination-enhanced stacking fault formation in silicon carbide p-i-n diodes, Journal of Applied Physics 96, 393 (2004)
- (3) H. Song and T. S. Sudarshan, Basal plane dislocation conversion near the epilayer/substrate interface in epitaxial growth of  $4^\circ$  off-axis 4H-SiC, Journal of Crystal Growth 371, 94-101 (2013)
- (4) T. Tanaka, N. Kawabata, Y. Mitani, N. Tomita, M. Tarutani, T. Kuroiwa, Y. Toyoda, M. Imaizumi, H. Sumitani, and S. Yamakawa, Demonstration of High Quality 4H-SiC Epitaxial Growth with Extremely Low Basal Plane Dislocation Density, Materials Science Forum 778-780, 91-94 (2014)
- (5) K. Konishi, S. Yamamoto, S. Nakata, Y. Nakamura, Y. Nakanishi, T. Tanaka, Y. Mitani, N. Tomita, Y. Toyoda, and S. Yamakawa, Stacking fault expansion from basal plane dislocations converted into threading edge dislocations in 4H-SiC epilayers under high current stress, Journal of Applied Physics 114, 014504 (2013)
- (6) T. Tawara, T. Miyazawa, M. Ryo, M. Miyazato, T. Fujimoto, K. Takenaka, S. Matsunaga, M. Miyajima, A. Otsuki, Y. Yonezawa, T. Kato, H. Okumura, T. Kimoto, and H. Tsuchida, Suppression of the Forward Degradation in 4H-SiC PiN Diodes by Employing a Recombination-Enhanced Buffer Layer, Materials Science Forum 897, 419-422 (2017)
- (7) 俵武志, 呂民雅, 宮里真樹, 「SiC-MOSFETのバイポーラ劣化抑制のためのバッファ層技術」, 富士電機技報 vol. 90 no.4 (2017)
- (8) C. Kawahara, J. Suda, and T. Kimoto, Identification of dislocations in 4H-SiC epitaxial layers and substrates using photoluminescence imaging, Japanese Journal of Applied Physics 53, 020304 (2014)
- (9) K. Wada, T. Miyase, H. Itoh, T. Hori, H. Doi, and M. Furumai, Extensive 99% Killer Defect Free 4H-SiC Epitaxial Layer toward High Current Large Chip Devices, Materials Science Forum 963, 105-108 (2019)

#### 執 筆 者

伊東 洋典\* : パワーデバイス開発部  
博士 (理学)



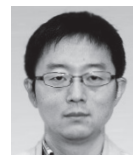
榎 田 太 郎 : パワーデバイス開発部



宮瀬 貴也 : パワーデバイス開発部



堀 勉 : パワーデバイス開発部 グループ長



和田 圭司 : パワーデバイス開発部 グループ長



古米 正樹 : パワーデバイス開発部 部長



\*主執筆者