

SiCパワー半導体のプロセス評価技術

筑波事業所 兼 技術開発センター 中津 和弘 / 電子事業部 兼 営業本部大阪営業所 古田 倫明

1 はじめに

今日、世界的に省エネルギー・新エネルギーの開発機運が高まり、電力消費量の削減も大きな課題となってきた。中でもパワー半導体は、家電、コンピュータ、自動車、鉄道などあらゆる機器に幅広く利用されており、効率的な電気エネルギーの制御を行う上で重要な役割を果たしている。しかし、これまでのパワー半導体はSi（シリコン）を用いたデバイス製品が中心であったが、Siの物性で決まる理論的な性能限界に近づいており、今後、大幅な性能向上を期待することは難しい。

SiCパワー半導体はSiパワー半導体に比べて電力損失を70～90%削減できると予想され、さらに1kV以上の高耐圧性能を有することから各種産業用として期待が高まっている。

2 SiCパワー半導体の製造プロセスと評価技術

SiCパワー半導体の製造技術は①材料技術（基板、エピ）、②プロセス技術（イオン注入、ゲート形成、電極形成、パッシベーションなど）および③実装技術に大別できる。その内容はSiパワー半導体の製造技術と類似した点も多い反面、エピ技術、拡散（アニール）技術、酸化技術などでは従来のSiパワー半導体での技術を活用することが出来ないため、製造技術の最適化が求められている。

SiCパワー半導体の製造プロセスの最適化を実現するための評価技術は、従来のSiパワー半導体で用いられた手法に加え、SiCならではの結晶性や欠陥の評価および酸化膜や金属膜とSiCとの接合界面における構造解析などが重要とされる。表1にSiCパワー半導体評価で用いられる主な分析手法を示す。特に結晶性や欠陥の評価をミクロまたはマクロの観察視野で行う透過電子顕微鏡や分光分析によ

る解析が特徴として挙げられる。

当社では各種分析手法の特徴を活かしながら、SiCパワー半導体のプロセス評価技術の向上に努めている。今回、従来のSiを用いたプロセスと異なり、且つ今後の製造プロセスの重要な鍵となる①イオン注入技術（注入→アニール）および②ゲート形成技術（酸化）についての評価事例を紹介する。

3 SiCパワー半導体の評価事例

3.1 イオン注入および高温アニール処理による二次欠陥の評価

SiCパワー半導体におけるイオン注入プロセスでは①高ドーズによるアモルファ

ス化防止のための高温注入、②残留欠陥解消のための高温アニールが必要とされる。ここではイオン注入後のアニール処理温度と二次欠陥の形成状況との関係性を評価した事例を紹介する。試料はn-SiCエピ膜/n+ SiC基板（〈11-20〉に4° offした基板を使用）にp型ドーパントであるAlをドーズ量： 5×10^{14} atoms/cm²、エネルギー：300keVにて高温注入（基板温度：500℃）した後、1,600℃および1,750℃でそれぞれ高温アニール処理したものである。なお、高温アニール処理は、SiC表面のグラファイト化を防止するために約20nmの酸化膜（SiO₂）を成膜した後に実施した。

表1 SiCパワー半導体評価で用いられる主な分析手法

製造プロセス技術	主な技術課題	評価項目	主な分析手法
基板技術	結晶欠陥の低減 低抵抗化	結晶欠陥	SEM, (S)TEM, CL, PL
		歪み・応力	RAMAN, XRD, X線トポグラフ
		結晶性	(S)TEM, 電子線回折
エピ技術	均一性の確保 スループット向上	膜厚	SEM, (S)TEM
		ドーパント濃度	SIMS
		基板界面	(S)TEM
イオン注入技術	残留欠陥解消 表面荒れの低減	注入分布	SIMS
		残留欠陥	SEM, (S)TEM
		結晶性	(S)TEM, RAMAN, ESR
ゲート形成技術	界面準位密度低減 酸化膜の信頼性向上	界面不純物	SIMS
		界面状態	(S)TEM, EELS, XPS
		界面欠陥	ESR
電極形成技術	低抵抗化 プロセスの低温化	組成変化	AES, XPS
		表面汚染・状態	AES, XPS, TOF-SIMS
		表面形状	SEM, AFM
		断面形状	SEM, (S)TEM

SEM：走査電子顕微鏡 (S)TEM：(走査型)透過電子顕微鏡 CL：カソードルミネセンス
PL：フォトルミネセンス RAMAN：ラマン分光 XRD：X線回折 SIMS：二次イオン質量分析
EELS：電子エネルギー損失分光法 XPS：X線光電子分光 ESR：電子スピン共鳴
AES：オーージェ電子分光 TOF-SIMS：飛行時間型二次イオン質量分析 AFM：原子間力顕微鏡

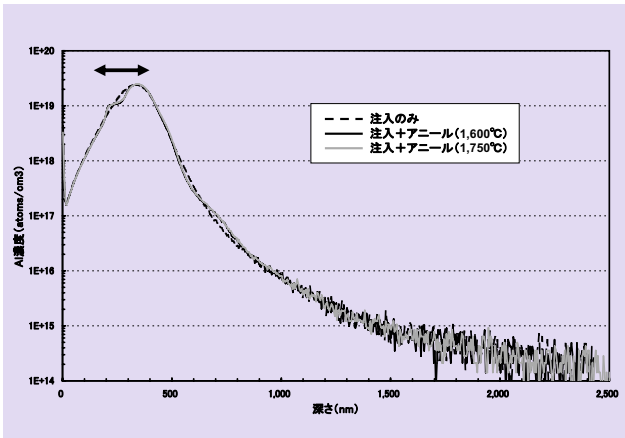


図1(a) SIMSによるSiC中のAl濃度分布

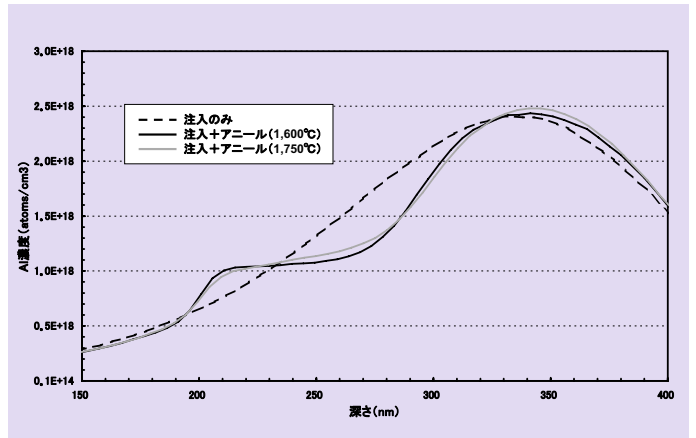


図1(b) SIMSによるSiC中のAl濃度分布 [図1(a)矢印領域の拡大]

図1(a)に二次イオン質量分析(SIMS)によって得られたイオン注入およびアニール処理後のAlの深さ方向濃度分布を示す。SiC中ではドーパントの拡散係数が小さいため、アニール処理による分布の変化はSi中の場合と比較して小さい。SiC中のp型ドーパントの拡散係数はBよりもAlの方が約2桁小さく、またm軸方向よりもc軸方向の方がさらに小さいことから¹⁾、水準間でのAl濃度分布の変化はわずかとなったが、図1(b)中に示す拡大図より、注入のみと比較して1,750°Cよりも1,600°Cの方の濃度変化が大きいことが確認された。

次に走査型透過電子顕微鏡(STEM)を用いて断面観察した結果(暗視野像)を図2に示す。イオン注入のみではほとんど欠陥構造は認められないが、アニール処理によって顕著な欠陥構造(二次欠

陥)が認められた。Alの深さ方向濃度分布と比較して欠陥構造は濃度のピーク付近(→)を中心に形成されていることが判る。また、画像解析結果(表2)からこの欠陥構造はアニール処理温度の変化(1,600°C→1,750°C)に伴い、凝集が起きていると推察される。

さらに、この欠陥部について<11-20>方向よりHAADF(高角度散乱暗視野)-STEMによる高倍率観察を実施した。HAADF-STEMは、TEMの干渉像よりも像解釈が容易であり、特に当社所有の装置(球面収差補正機能を装備)は、0.1nm以下の分解能を有しているため、原子配列の観察が容易である。図3に示した欠陥部の高倍率観察においても4H-SiCの積層構造(○印はSi原子)を有していることが分かった。また、欠陥の分布状況は(0001)面に対して50~55°の角度で

発生していることから、アニール処理によって発生した欠陥構造(二次欠陥)はドーパント(Al)が特定の面において格子間原子となり点欠陥等の結晶の歪みが発生したものであると考えられる²⁾。

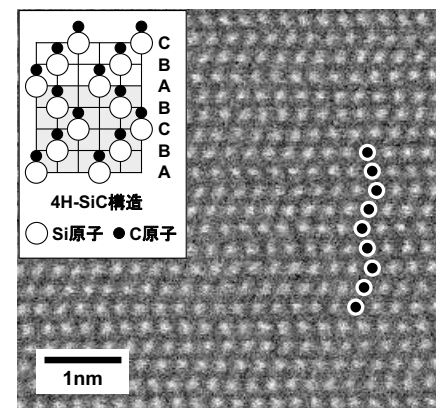


図3 HAADF-STEMによる欠陥部の断面観察結果(○:Si原子を示す)

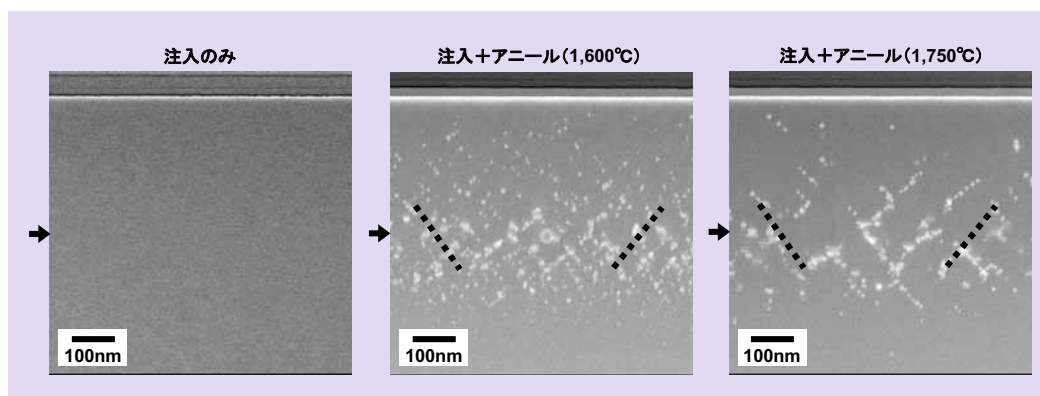


図2 明視野STEMによる断面観察結果

表2 暗視野STEM像の画像解析による欠陥領域の面積比

アニール処理温度	欠陥領域の面積比
1,600°C	7.1%
1,750°C	5.3%

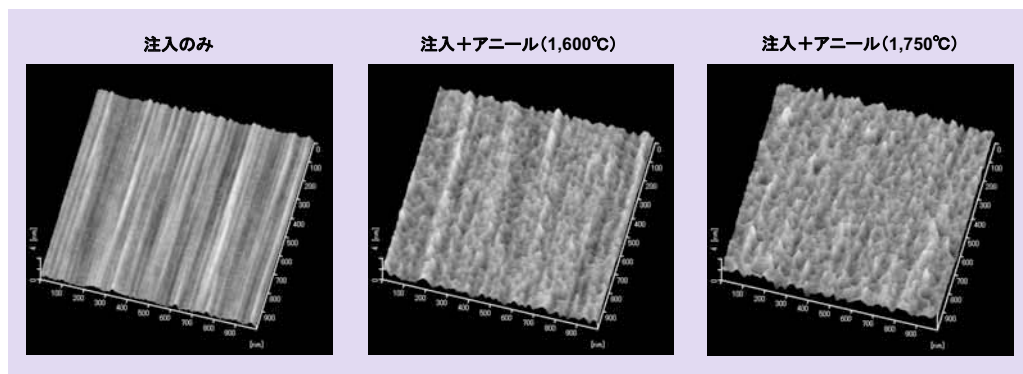


図4 AFMによるSiC表面形状の観察結果

表3 SiC表面のAFM観察結果

試料	Rms (nm)
注入のみ	0.25
注入+アニール(1,600°C)	0.31
注入+アニール(1,750°C)	0.38

※ Rms : 二乗平均粗さ

実際の製造プロセスにおいて、アニール条件の最適化には残留欠陥に加え、表面荒れの制御も重要である。図4および表3にアニール前後の表面形状を原子間力顕微鏡 (AFM) で観察した結果を示す。なお、アニール後の試料は表面酸化膜 (約20nm) を除去した後に AFM 観察を実施した。注入のみではステップバンチング (結晶成長中にステップ列が合体して束になり巨大化したもの) の形成が確認され、アニール処理によって表面荒れが起きていることが判る。表面荒れの程度は、アニール温度の変化 (1,600°C → 1,750°C) に伴い、大きくなっており、温度上昇によって SiC 表面からの Si 原子の放出が起きているものと推察される³⁾。

この他にプロセス条件の最適化には、注入されたドーパントの活性化向上も重要である。ラマン分光 (RAMAN) は結晶多形の評価に加え、キャリア濃度を評価することも可能である。昨年、当社に導入されたイメージング RAMAN は高い空間分解能 (350nm) で、且つ新しい光学系による高速マッピングが可能である。今後は本特徴を活かし、パターン形成されたデバイスにおけるキャリア濃度の面内均一性の評価にも取り組んでいく予定である。

今回の評価事例は二種類のアニール条件についてのみの実施であったため、欠陥構造 (二次欠陥) とアニール条件との相関について十分な議論はできないが、様々なプロセス条件の試料を分析することによって、最適化のための指標が求められるものと考えられる。

3.2 MOSFET ゲート酸化膜の評価

SiC-MOSFET (金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ) を実現するためには、高チャネル移動度の達成が不可欠であり、最適なゲート酸化膜形成方法の研究が進められている。ゲート酸化膜形成方法の違いはチャネル移動度や酸化膜信頼性に大きな影響を与える。シリコン面に対しては酸素 (O₂) を使用したドライ酸化や一

酸化窒素 (NO) または一酸化二窒素 (N₂O) を使った酸窒化、カーボン面に対しては O₂ と水素 (H₂) の燃焼によるウェット酸化など結晶方位面に応じた様々な酸化方法が提唱されている⁴⁾。ここでは製法が異なる二種類のゲート酸化膜について酸化膜の膜質および界面構造に関する評価事例を紹介する。

試料は n-SiC エピ膜 / n+ SiC 基板

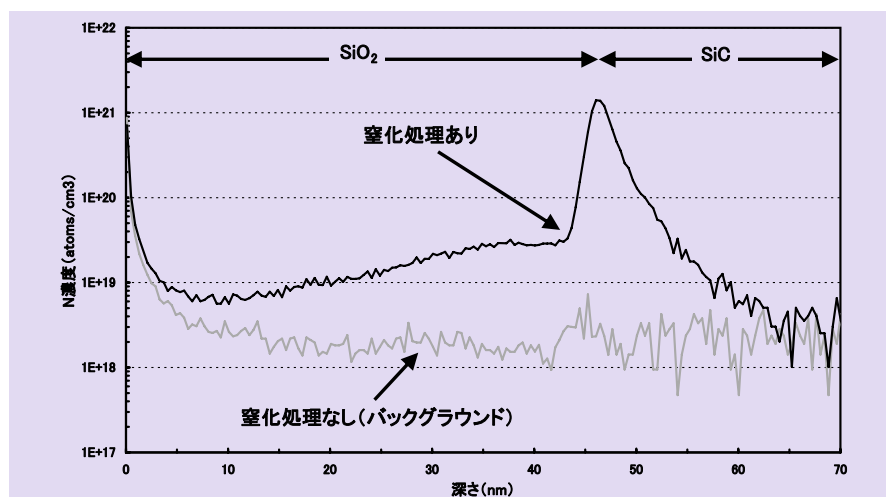


図5 SIMSによるN濃度分布比較

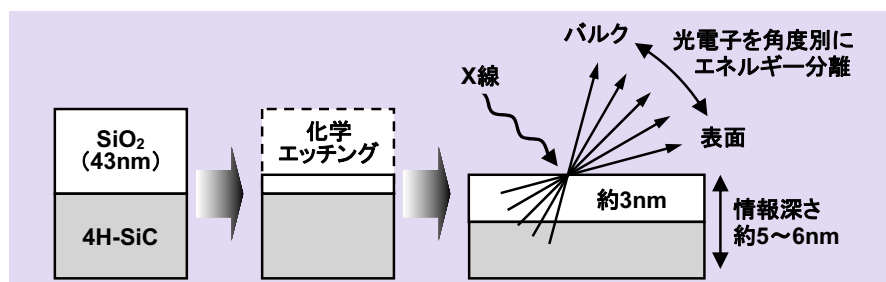
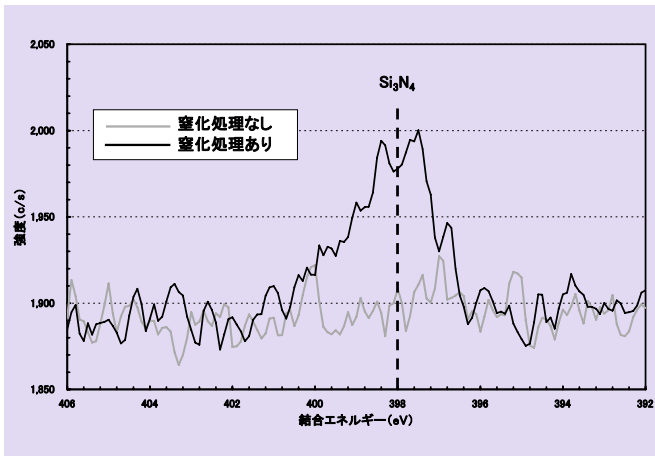
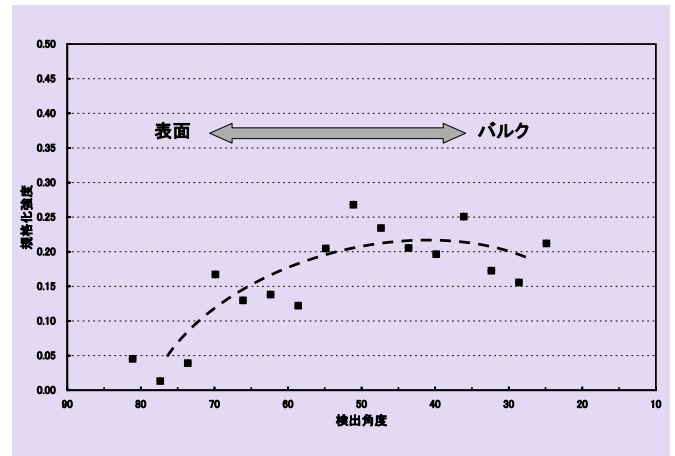


図6 化学エッチング処理後の同時角度分解XPS測定

図7 N_{1s}のナロースペクトル図8 N_{1s}の検出強度と検出角度との関係

($\langle 11-20 \rangle$ に 4° off した基板を使用) 上に酸化膜 (43nm) を形成したものとチャンネル移動度の改善として窒化処理を施した酸化膜 (43nm) を形成したものである。窒化処理を施した酸化膜中および SiC 界面での窒素 (N) 濃度を評価するため、SIMS 分析を行った。試料構造が SiO₂/SiC 系であるため、マトリックス効果 (母材の違いによる感度変化) が現れるが、SiO₂ 系および SiC 系それぞれの感度係数を用い、さらに界面における感度補正を実施した。図 5 に示す測定結果から窒化処理によって SiO₂/SiC 界面付近で N の偏析が確認された。一般に SiO₂/SiC 界面における N は界面付近の欠陥を N 終端させることにより、界面欠陥の低減に寄与しているものとされる⁵⁾。

これら界面付近の窒化状態を評価するため、X 線光電子分析 (XPS) を実施した。光電子の情報深さが約 5 ~ 6nm であるため、界面付近の評価ができるように酸化膜が約 3nm になるまで化学エッチング処理を実施した後に測定を行った。さらに図 6 に示すように窒化状態を深さ方向に評価するため、同時角度分解 XPS 測定を実施した。同時角度分解 XPS は X 線照射によって発生した光電子を脱出角度別に検出器 (エネルギー分光器) へ取り込むことが可能であり、非破壊による試料表面の状態解析を深さ方向に行うことができる。図 7 に N_{1s} のナロースペクトルおよび図 8 に N_{1s} の検出強度と検出角度

との関係を示す。図 8 から SiO₂/SiC 界面付近ではシリコン窒化物 (Si₃N₄) を形成しており、図 7 から Si₃N₄ は SiO₂/SiC 界面付近で最大濃度になっている状況が推察される。

今回の評価事例に用いた O₂ 酸化および窒化処理を行った酸化膜では、SIMS 分析による N 濃度分布の他、同時角度分解 XPS による深さ方向への界面状態の知見が得られた。このようにゲート酸化膜の高精度な界面制御技術に対しては、適切な表面分析手法を用いることで正確な情報を得ることができる。今後はさらに SiO₂/SiC 界面に存在するとされる遷移層の解明のため、STEM-EELS (EDX) による nm レベルの組成解析や電子スピン共鳴 (ESR) を応用した電子移動性評価にも取り組んでいく予定である。

4 おわりに

世界的に電力削減や環境負荷低減が求められる中、電力デバイス、特に SiC パワー半導体への期待が高まり、製品化に向けた技術開発もますます活発化してきている。一方で SiC ならではの技術課題も多く残されているのも事実であり、当社は、特徴ある評価技術力を高めながら、これら技術課題の解決に貢献していきたいと考えている。

文献

- 1) S. I. Soloviev et al.: "Aluminum and Boron Diffusion into (1-100) Face SiC Substrates", Mater. Sci. Forum 389-393 (2002) 557
- 2) T. Kimoto, S. Nakazawa, K. Fujihira, T. Hirano, S. Nakamura, Y. Chen, K. Hashimoto, and H. Marsunami, Mat. Sci. Forum, 389 (2002) 165
- 3) Yuusuke Hayashi, Ryu Hasunuma and Kikuo Yamabe, Generation and Growth of Atomic-scale Roughness at Surface and Interface of Silicon Dioxide Thermally Grown on Atomically Flat Si Surface, Key Eng. Mat. Vol. 470 (2011) 110-116
- 4) J. Rozen, S. Dhar, S. T. Pantelides, L. C. Feldman, S. Wang, J. R. Williams, and V. V. Afanas'ev, Appl. Phys. Lett. Vol. 91 (2007), 153503
- 5) 特願 2010-217756号 「炭化珪素半導体の製造方法及び電子デバイスの製造方法」



中津 和弘
(なかつ かずひろ)
筑波事業所 兼 技術開発センター



古田 倫明
(ふるた ともあき)
電子事業部 兼 営業本部 大阪営業所