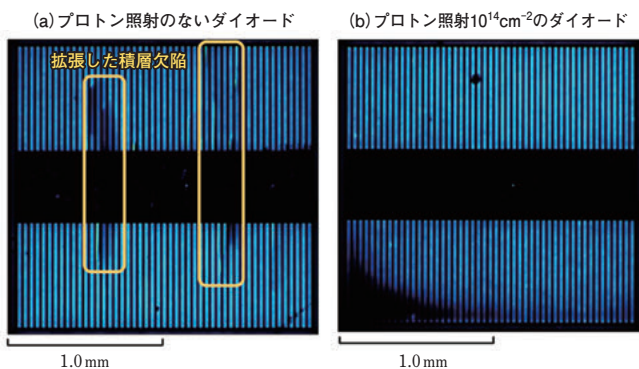


プロトン照射によるSiCパワー半導体の順方向通電劣化抑制技術

Suppression of Forward Degradation in SiC Power Semiconductor by Proton Beam Irradiation

● 坂根 仁* 原田 俊太** 加藤 正史***
Hitoshi SAKANE Shunta HARADA Masashi KATO



負荷試験の後のPiNダイオードの電極窓から観察されたEL像
EL images of PiN diodes after the electrical stress

1 はじめに

シリコンカーバイド(SiC)は、バンドギャップが広いことから耐熱性に優れており、搭載装置の小型化につながるパワー半導体材料として注目度が高い。近年普及が進んでいるが、その一方で、高品質のSiCウエハでも結晶中には多数の転位という欠陥が存在しており、それらの転位がデバイスの製造歩留まりおよび信頼性を低減させるという問題を抱えている。転位のうち、特に基底面転位は順方向通電時の電流注入により積層欠陥となって拡張し、デバイスの電気特性を劣化させることが広く知られており、この解決が産業応用上の課題となっている。

転位の拡張を抑制する技術の一つとして、SiC結晶中に欠陥を導入することでキャリア寿命を意図的に低減させ、基底面転位に流れるキャリアを抑制し、積層欠陥の拡張を抑えるという方法があるが、キャリアを基底面転位に完全に到達させないようにするのは難しい⁽¹⁾。一方、本報におけるプロトン照射技術は、不純物の固着により基底面転位の積層欠陥への拡張を抑制しつつ、アニーリングにより欠陥の発生を抑制し、キャリア寿命を極力低減させないということを可能としている。これにより長いキャリア寿命が高性能化につながるデバイス、たとえばバイポーラトランジスタにおいて、高いデバイス性能を保ちつつ積層欠陥による信頼性の低減を回避することができる。

2 転位欠陥拡張抑制のイメージ

一般的に半導体のみならず結晶材料中の転位は、点欠陥などの不純物と相互に作用することが知られている。その相互作用により転位の電気伝導が変化することや、不純物と転位が固着し、転位が動かなくなることが複数の半導体結晶材料

で報告されている。したがってSiCにおいても、転位との相互作用が強い不純物を導入して転位に固着させることで、転位の動きを制御できると考えた。本技術開発では、図1に示すようにSiC結晶中に導入した水素もしくは点欠陥といった不純物を基底面転位と相互作用させ、転位の動きを不活化させることを想定している。注入物として、SiCの電気伝導にほとんど影響を与えない水素を選択した。また、不純物導入後に熱処理を施すことで、不必要な欠陥の発生を抑制し、転位不活化後のSiCの結晶品質を保つ。本技術は、SiCのデバイス特性を安定させつつ、デバイスの信頼性確保につなげることができる。

3 転位欠陥の抑制効果観測

SiCにプロトン照射を施すことで、積層欠陥の拡張にどのような影響を与えているかを観察した。観察には、放射光トポグラフィによる欠陥の観察技術を用いた⁽²⁾。トポグラフィ画像は、SiCに放射光を照射して、回折した放射光の強度を原子核乾板で記録するもので、非破壊で転位などの結晶欠陥、貫通転位およびエピタキシャル(エピ)層の欠陥などを検出することができる。さらに、UV照射によりSiCエピ層にキャリア再結合エネルギーを付与しながら、積層欠陥拡張を観察する技術を活用し、プロトン照射の拡張運動への影響を時系列に沿って詳細に観察した。

図2に、UV光を120時間照射する前後の積層欠陥の比較を示す。 $1 \times 10^{11} / \text{cm}^{-2}$ (e, f)のプロトン照射を施すと概略図(g)のように、UV照射前に存在していた水平方向に向かって存在していた基底面転位から、図の下方向に向かって部分転位が発生し、その双方の間に形成される積層欠陥が発生していることが分かる。 $1 \times 10^{12} / \text{cm}^{-2}$ (c, d), $1 \times 10^{13} / \text{cm}^{-2}$ (a, b)のプロトン照射ではUV120hの照射後にも関わらず、まったく拡張が見られない。通電状態や不純物濃度によって異なると思われるが、閾値以上のプロトン照射を施すことで抑制効果が発現することが分かる⁽³⁾。

4 プロトン照射プロセスの最適化

プロトン照射には、現在シリコンパワー半導体への照射サービスに使用しているサイクロトロンもしくは静電加速器を用いる。このような加速器を用いることで、エピ層表面から数 μm から数十 μm 程度の深さに存在するエピ層の基板界面付近に水素および点欠陥といった不純物を導入することができる。この界面付近は基底面転位から積層欠陥への変換が生じやすい領域に相当し、抑制効果を十分に発揮できる。

PiNダイオード製造における従来のイオン注入プロセスは、電極取り付け後にプロトン照射を施すが、電極へのダメージが無視できない。そこで図3に示すように、基板側およびエピ

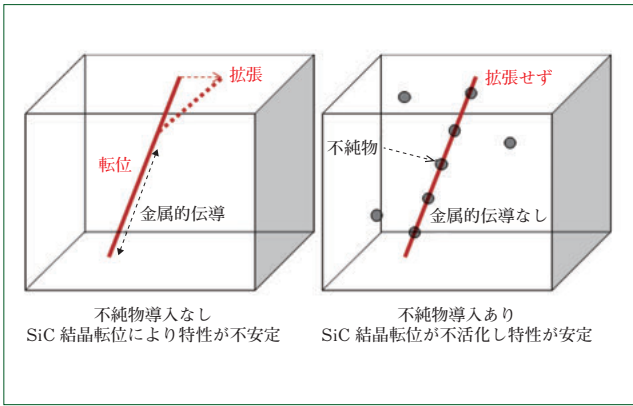


図1 不純物注入によるSiC結晶の不活性化イメージ
Image of inactivation of SiC crystals by impurity implantation

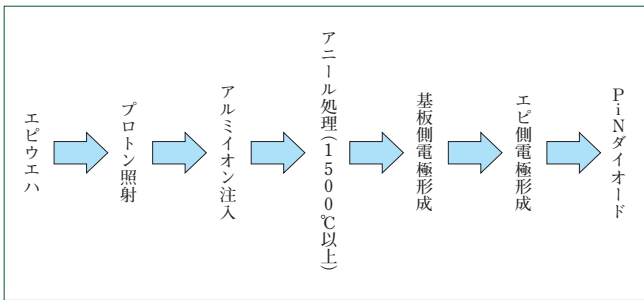


図3 PiNダイオード製造プロセス
Processes for PiN diode with proton irradiation

側への電極形成前にプロトン照射を行うことにした。プロトン照射後、P層形成を目的として注入されたAl(アルミ)を活性化すべく1500℃以上の高温アニールを施すが、転位欠陥に固着した不純物は残留することを想定している。その後、電極形成を行うことで、高性能な電極コンタクトが維持できる。

5 プロトン照射 PiN ダイオードへの電流注入評価⁴⁾

水素導入したPiNダイオードに対して温度上昇を抑えつつ試験の負荷を高めることを目的として、実際の通電負荷と同程度と考えられる200 A/cm²以上のパルス電流による通電試験を実施することにした。試験では、ダイオードの温度上昇を抑えながら212.5 A/cm²の負荷で10パルス/秒、2時間の通電を行った。

プロトン照射を新たに導入したプロセスで作製したPiNダイオードに対して、長時間の電流負荷試験を実施した後のエレクトロルミネッセンス(EL)像を観測した。ELは、エピ面に形成したストライプ状の窓を有する電極を通して観測されるが、積層欠陥はEL像において暗部となることから、積層欠陥の拡張の有無が判定できる。

冒頭の図は、負荷試験後の「プロトン照射なし」および「プロトン照射あり(10¹⁴cm⁻²)」のPiNダイオードのEL像である。図中の暗部が基底面転位が拡張した積層欠陥に相当しており、プロトン照射なしでは積層欠陥が拡張し、プロトン照射ありでは拡張が抑制されていることが分かる。また、プロトン照射をさらに増やしても積層欠陥の拡張が抑制されることも確認できた。プロトン照射が積層欠陥の拡張を抑制し

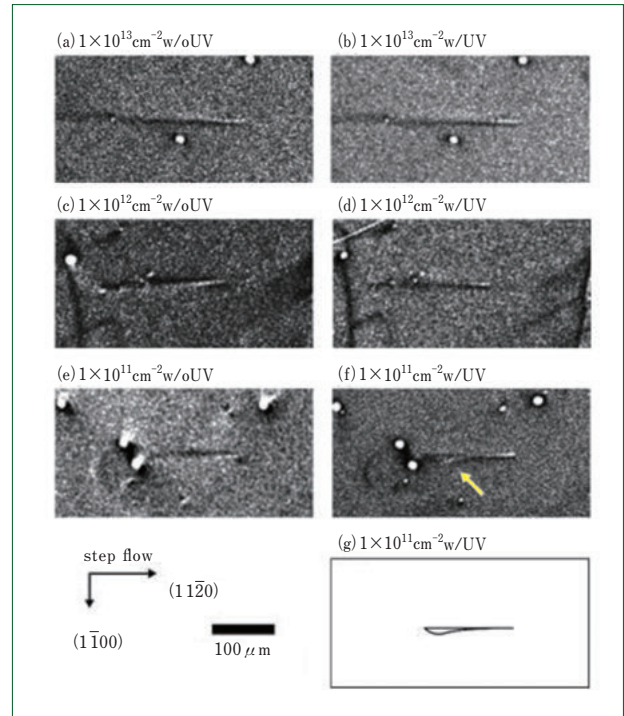


図2 プロトン照射(照射量10¹¹~10¹³cm⁻²)後のSiCの積層欠陥拡張のトポグラフィ画像
(a), (c), (e)はUV照射前, (b), (d), (f)はUV照射後, (g)は(f)の拡張イメージ図
(a)-(f) X-ray topography images of specimens with proton irradiation fluence ranging from 10¹¹ to 10¹³cm⁻² before (a,c,e) and after UV(b,d,f). (g) is illustration of (f).

ており、順方向通電時における劣化を解決する技術となり得ることが明らかとなった。

6 おわりに

- (1) SiCパワー半導体の実用化の障害となっていた通電劣化に対して、その要因となる基底面転位の積層欠陥への拡張を抑制するプロトン照射技術を新たに提案することができた。
- (2) プロトン照射後に、高温のアニーリングにより欠陥の発生を抑制し、キャリア寿命を極力低減させないことを可能とした。このことにより、長いキャリア寿命が高性能化につながるデバイス、たとえばバイポーラトランジスタにおいて高いデバイス性能を保ちつつ、積層欠陥による信頼性の低減を回避することに成功した。
- (3) 本技術に対する国内外のパワー半導体デバイスメーカー、ウエハメーカーの関心度は高く、産業応用に向けた試験がメーカー主導で開始されつつある。

(参考文献)

- (1) T. Mii et al., Mater. Sci. Semicond. Process. 153, 107126 (2023).
- (2) S. Harada et al., Sci. Rep. 12, 13542 (2022).
- (3) S. Harada et al., Appl. Phys. Express, 16, 021001 (2023).
- (4) M. Kato et al., Sci. Rep. 12, 18790 (2022).