

プロジェクト名：SiC半導体の酸化界面における酸化誘因欠陥のフォトルミネッセンス評価

プロジェクト代表者：土方 泰斗（理工学研究科・准教授）

1 はじめに

本研究では、熱酸化によって SiO₂ 膜の形成が可能な唯一のワイドギャップ半導体である炭化ケイ素(SiC)半導体を取り上げ、SiCのパワーデバイス材料としての優位性（超低損失、耐高温性、小型化・高周波化が可能）を存分に活かした、パワーMOSFETの実用化を目指し研究を推進する。現在SiCパワーMOSFETは、SiO₂膜/SiC界面における高い界面準位密度によって低損失性能の低下やデバイス信頼性の低下が生じ、その実用化に歯止めが掛かっている。本研究では、酸化に誘発された界面欠陥を、蛍光（フォトルミネッセンス）分析および2次元マッピング観察によって詳細に調べ、界面準位密度の発生源を明らかにしていく。

2 研究背景

SiCはワイドバンドギャップ、高い絶縁破壊電界、熱伝導率等の物性値を有していることから、より低損失・高耐圧のパワーデバイスへの応用が期待されている。しかし、SiCのエピタキシャル層中には積層欠陥(SF)が混入しやすく[1-4]、それらはパワーデバイスの特性劣化等を引き起こすことが報告されている[5,6]。

ところで、MOSデバイスの作製や表面パッシベーション膜の形成にSiC基板の熱酸化プロセスを用いるが、熱酸化後にSiO₂膜直下のSiC層が変質してしまうことが報告されている。日吉および木本によれば[7]、熱酸化中にSiC層に放出されたC格子間原子が、as-grownエピ層に存在していたC空孔を埋め、深い準位の低密度化が図れることを報告している。また、Okojieらは高濃度ドーブ($1.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)された4H-SiCホモエピ膜を熱酸化したところ、3C構造を持つSFが誘起されたとの報告をしている[8]。これら2つの実験事実は、4H-SiC基板に熱酸化処理を行うと、前者はFrank-type SF[5]の形成/消失を、後者はShockley-type SF[6]の形成の可能性を示唆している。

そこで本研究では、熱酸化が4H-SiCエピ膜中のSFに対してどのような影響を及ぼすのかについての詳しい知見を得ることを目的として、顕微フォトルミネッセンス(PL)測定を行った。熱酸化前後の4H-SiCに対して得られたPLスペクトル、PLマッピング像を比較することで、エピ膜中のSFに対する熱酸化の影響を調べた。

3 実験方法

試料には、4H-SiC基板(Si面エピ層キャリア濃度 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、n type、[11-20] 8度 off)を用いた。熱酸化を1100°C、流量1slmの乾燥酸素雰囲気にて10時間行った。顕微PL測定を、励起波長266nm、スポット径0.7□mのQスイッチレーザーを用いて室温にて行った。また、サンプルは空間分解能0.1□mのXYZステージ上に設置し、20□mステップで強度マッピングを行った。

4 実験結果

図1は、熱酸化前(a)および後(b)の4H-SiCエピ膜から得られた発光波長425.5nmでのPL強度マッピング像である。熱酸化前から存在していた積層欠陥(as-grown SF)を中心として、 $\langle 1-100 \rangle$ にSFが拡張and/or形成していることがわかる。図2は、図1中のA点におけるPLスペクトルを示す。バンド端発光(390nm)の強度は変化しないが、425.5nmのSF起因の発光強度は増加していることからSFの拡張が確認される。

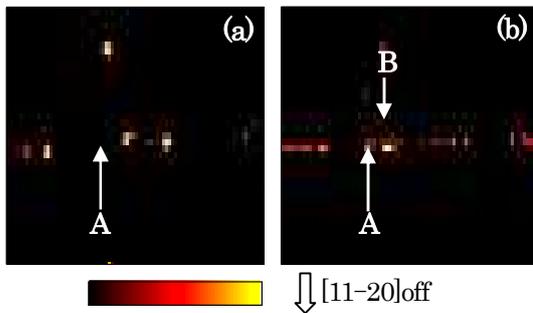


図1 PL強度マッピング像@425.5 nm
(a) 熱酸化前 (b) 熱酸化後

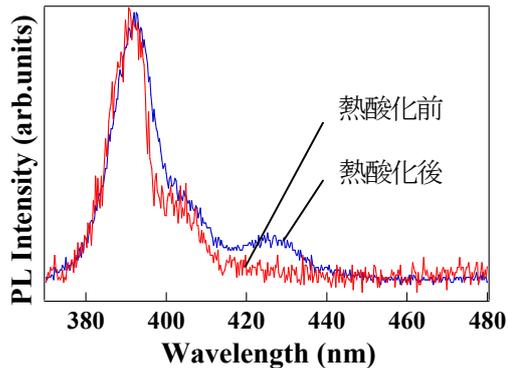


図2 熱酸化前後の PL スペクトル

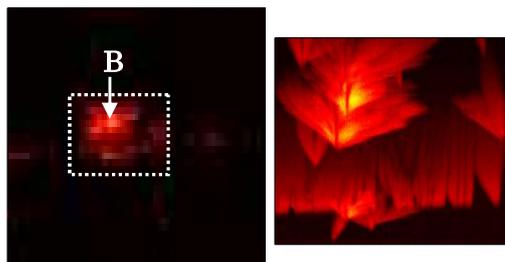


図3 レーザー照射後
PL強度マッピング像@425.5 nm

次に、図 1(b)中央の SF 付近にレーザー光を照射し、SF がどのような変化を示すのかを観察した。レーザー照射後の PL 強度マッピング像を図 3 に示す。図 1(b)と図 3 を比較すると、レーザー照射によって SF が大きく拡張形成していることが分かる。また、図 3 の挿入図(測定間隔 1 μ m)をから、主な拡張方向は $[-1-1-20]$ であるが他の方位への拡張も見て取れる。

図 4 に、レーザー照射後に再度熱酸化を行った後の PL 強度マッピング像を示す。図 3 と図 4 の比較から、レーザー照射で拡張形成された SF は熱酸化によって消失するが、エピ膜成長時から存在していた SF、及び一度目の熱酸化によって拡張形成された SF は消失しないことが分かった。前者の変化については B 点(see 図 1(b),図 3,図 4)における PL スペクトルの比較(図 5)からも確認される。

425.5 nm に近い発光波長をもつ SF として、これまでに 1SSF(~ 420 nm)、Extrinsic Frank-type SF(~ 424 nm)が報告されている。1SSF は high-intensity laser beam scanning によって誘起、拡張され、アニールによって縮小するが $[9,10]$ 、Extrinsic Frank-type SF は high-intensity laser beam scanning で拡張しないことが報告されている[2]。また、

1SSFは滑った層が ABCB 積層周期の内どの層であるかによって発光波長が異なる。従って、420 nm と 425.5 nm ではやや開きがあるが、本研究で観察された SF は 1SSF である可能性が高いと考えられる。

また、熱酸化とアニールの効果の違いを観察するため、Ar アニール前後の顕微 PL 測定も同様に行った。なお、Ar アニールは熱酸化との比較をとるため、同処理温度、同処理時間で行った。しかし、Ar アニール前後では SF がわずかに縮小、あるいは変化が無く、拡張(形成)する SF は確認されなかった。

熱酸化によって SF が拡張(形成)した理由としては以下のことが考えられる。SiC を熱酸化すると、SiC と SiO₂ では 2 倍以上の Si 原子密度差があるため、SiC/SiO₂ 界面付近の SiC 層には膨張歪みが生じる $[11]\text{\AA}$ 。SF の両端部には部分転位があり、部分転位は正常な結晶とすべりを起こした結晶との境界であることから歪みからの影響を受けやすく、容易に動くことができる。つまり、熱酸化に伴う SiC/SiO₂ 界面での歪みを部分転位がすべりを拡大する方向に動くことで緩和し、結果として SF が拡張したものと考えられる。一方、Ar アニールでは酸化膜の形成が無く、歪みを生じない。そのため、部分転位がすべりを拡大する方向に動かず SF が拡張しない、若しくは T. Miyanagi らの報告[9]にあるように、加熱

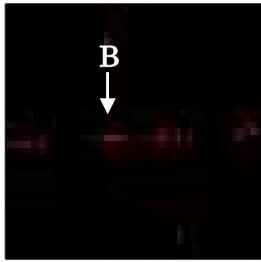


図4 PL強度マッピング像@425.5 nm
(レーザー照射+熱酸化後)

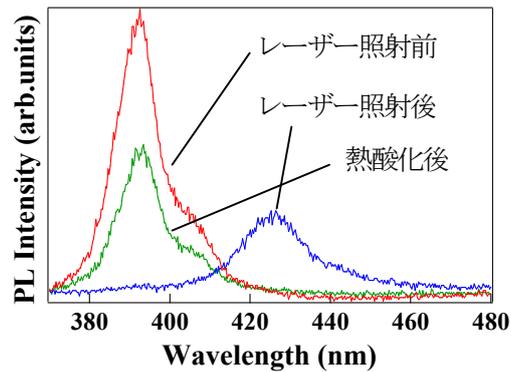


図5 レーザー照射前後、及び
熱酸化前後の PL スペクトル

によって縮小したものと思われる。また、レーザー照射後の熱酸化で SF が拡張されなかった理由として、SiC/SiO₂ 界面の歪みには SF の拡張に対して幅に上限があり、二度目の熱酸化では、一度目の熱酸化によって拡張された SF がこれ以上拡張しなかったためと考えられる。一方、レーザー照射によって拡張した SF だけが熱酸化によって縮小消失したのは、酸化後の SF 密度には固有の値があり、たとえレーザー照射で SF 密度を増加させても酸化すれば再びこの固有の密度に復帰すると考えれば説明が付く。

熱酸化が 4H - SiC エピ膜中 SF に及ぼす影響を、顕微 PL 測定によって観察した。熱酸化前後のイメージ、スペクトルを比較した結果、熱酸化後では 1SSF とされる SF(425.5 nm)が<1-100>に拡張することが分かった。また、Ar アニール前後でも同様の比較を行い、Ar アニール後では SF が拡張しないことを確認した。熱酸化による SF の拡張は、酸化中の SiC/SiO₂ 界面における歪みにより生じた可能性が示唆された。

- [1] H. Tsuchida, I. Kamata, M. Nagano, J. Crystal Growth **310**, 757 (2008).
- [2] I. Kamata, X. Zhang, and H. Tsuchida, Appl. Phys. Lett. **97**, 172107 (2010).
- [3] G. Feng, J. Suda, and T. Kimoto, Appl. Phys. Lett. **92**, 221906 (2008).
- [4] G. Feng, J. Suda, and T. Kimoto, Appl. Phys. Lett. **94**, 091910 (2009).
- [5] H. Lendenmann, F. Dahlquist, N. Johansson, R. Söderholm, P. A. Nilsson, J. P. Bergman, and P. Skytt, Mater. Sci. Forum, **353–356**, 727 (2001).
- [6] H. Fujiwara, T. Kimoto, T. Tojo, H. Matsunami, Appl. Phys. Lett. **87**, 051912 (2005).
- [7] T. Hiyoshi and T. Kimoto, Appl. Phys. Express **2**, 091101 (2009).
- [8] R. S. Okojie, M. Xiang, P. Pirouz, S. Tumakha, G. Jessen, and L. J. Brillson, Appl. Phys. Lett. **79**, 3056 (2001).
- [9] T. Miyanagi, H. Tsuchida, I. Kamata, and T. Nakamura, Appl. Phys. Lett. **89**, 062104 (2006).
- [10] N. Hoshino, M. Tajima, M. Naitoh, E. Okuno, and S. Onda, Mater. Sci. Forum. **600-603**, 349 (2009).
- [11] Y. Hijikata, H. Yaguchi, and S. Yoshida, Appl. Phys. Express **2**, 021203 (2009).