

プロジェクト名：SiC パワーデバイスのパワーエレクトロニクス回路への応用

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

SiC パワーデバイスの中心的存在である MOSFET の実用化には、SiC/酸化膜界面におけるキャリア捕獲準位密度の低減化と酸化膜長期信頼性の向上が重要課題である。SiC の酸化メカニズムを明らかにすることはその有力な手がかりと成り得るが、SiC の酸化メカニズムは Si のそれと比べ良くわかっていない。我々は以前の報告において、酸化中に酸化膜に放出した Si および C 原子が酸化界面反応を抑制するという考えに基づく酸化モデル、“Si および C 原子放出モデル”を提案し、このモデルが全膜厚領域における酸化膜成長速度データを、Si 面と C 面のいずれに対しても良く再現できることを示した[1]。ところでこの計算では、SiC 基板側への界面原子放出は考慮していなかったが、原子放出の原動力は界面近傍の応力であるため、実際は基板側へも放出していると考えられる。また、そのような基板側への原子放出によってできた層が、MOS 界面特性の低下に起因していることを示唆する実験データが得られている[2]。以上のことから、本報告では、基板側へ放出された原子の拡散を計算し、その濃度プロファイルを求めてみた。

2 計算方法

Fig. 1は、今回提案された計算モデルの概念図を示す。ここで、 t, ζ, x, X , および k_s はそれぞれ、酸化時間、酸化に消費されたSiC層とSiO₂膜厚の比(0.44)、酸化界面からの距離（位置 $x=0$ は酸化と共にSiC層側へと移動する）、酸化膜厚および偏析係数 (SiO₂中の溶解度(C^0)/SiC中の溶解度(C^1))を示す。SiおよびC格子間原子に対する C^1 は報告されていないため、Siに対するSi原子の溶解度の値をSiCの C^1_{Si} とし、さらに $C^1_C = C^1_{Si}$ とした。 C^0 の値は、参考文献 [1]から引用した。SiおよびC格子間原子に対する拡散方程式は以下のように表される [3],

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \alpha \frac{dX}{dt} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 C および D はそれぞれ、濃度および拡散係数を示す。式(1)の右項は、酸化に伴い酸化界面が移動していることを示している。関係式 $D = D^{SD} (N/C^1)$ と文献に記載されている自己拡散係数(D^{SD})の値[4]を引用することにより、拡散係数 D の値を求めた。なお、 N は4H-SiCの分子密度を示し、 $4.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ である。この系における境界条件は以下の2式のように書ける：

$$C(\infty, t) = 0, \quad (2-1)$$

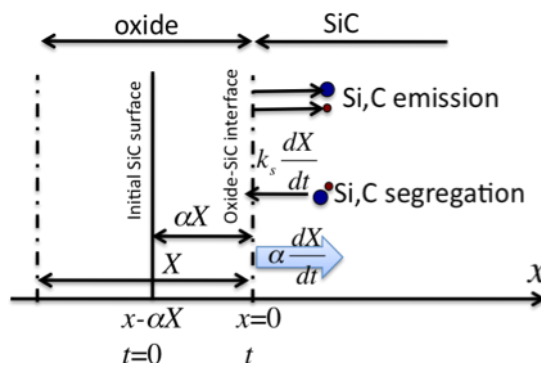


Fig. 1. Schema of calculation model.

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = k_s \frac{dX}{dt} C(0,t) - vN\alpha \frac{dX}{dt}, \quad (2-2)$$

ここで、 γ は当該格子間原子の放出確率を示す。式(2-2)の第1項および第2項はそれぞれ、SiCからSiO₂への偏析、格子間原子のSiC層への放出を意味する。ここで、Siに対するSi原子放出確率の上限である0.275[5]を γ_{Si} および γ_C の値として仮定する。酸化速度 dX/dt の値は、我々の過去の実験データ[6]を参照した。式(1)-(2)はPDE solver [7]を用いて数値計算により解いた。

3 実験結果と考察

Fig. 2.は、1100°Cのドライ酸化中にSiC基板へ放出された(a)Si格子間原子および(b)C格子間原子の濃度プロファイルを示している。図を見ると、格子間原子はどの場合でも補誤差関数状に分布し、Si面では1 nm程度、C面では0.25 nm程度の深さまで分布し、拡散距離は酸化膜厚にあまり依存しないことがわかる。拡散距離の大きさと、それが酸化膜厚にあまり依存しない事実は、分光エリプソメトリにより得られた実験結果[2,8]と一致している。

Fig. 3.は、酸化膜成長速度 dX/dt を一定とした場合と測定値とした場合に対し、酸化膜厚=2,10,40 nm時点でSi格子間原子の濃度プロファイルを示している。図より、 dX/dt 一定の場合は濃度プロファイルに全く変化が見られず、また、 dX/dt が減少するほどSi原子の拡散距離が大きくなることがわかった。すなわち、僅か2 nmの酸化膜成長で格子間原子の拡散距離は既に飽和しており、その飽和した拡散距離は酸化膜成長速度のみで決まることがわかった。

参考文献

- [1] Y. Hijikata *et al.*, Appl. Phys. Express vol. 2 (2009), a.n. 021203
- [2] H. Hashimoto *et al.*, Appl. Surf. Sci. vol. 255 (2009), p. 8648
- [3] T. Kato and Y. Nishi: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 3 (1964), p. 377
- [4] K. Rüschemschmidt *et al.*: J. Appl. Phys. Vol. 96 (2004), p. 1458
- [5] S. T. Dunham and J. D. Plummer: J. Appl. Phys. Vol. 59 (1986), p. 2541
- [6] T. Yamamoto *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 47 (2008), p. 7803
- [7] Information on <http://www.pdesolutions.com/>
- [8] H. Seki *et al.*, Mater. Sci. Forum vols. 615-617 (2009), p. 505

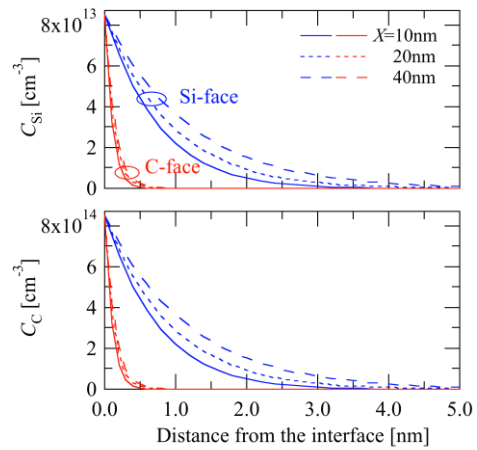


Fig. 2. Concentration profiles of (a) Si interstitials and (b) C interstitials in SiC substrate at X=10, 20, 40 nm for Si- and C-face.

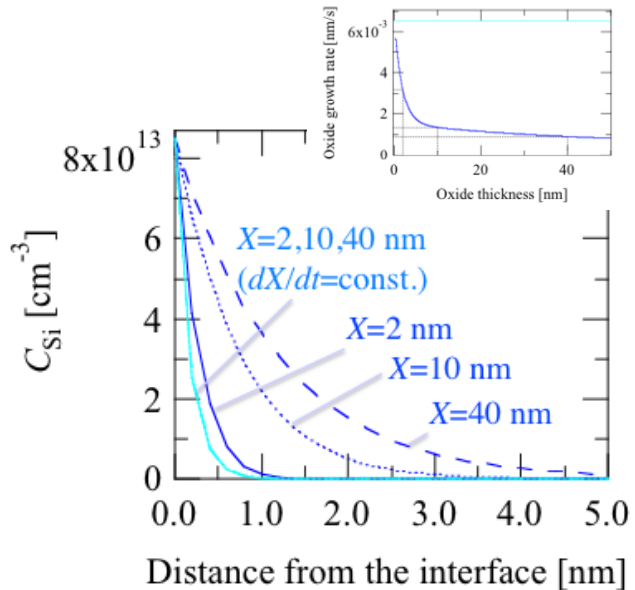


Fig. 3. Concentration profiles of Si interstitials in SiC substrate at X=2, 10, 40 nm in the cases $dX/dt=const.$ and measured values of dX/dt . The inset shows oxide growth rate as a function of oxide thickness.