

S イオン注入 n 型 SiC 層の Hall 効果測定による S ドナーの評価

Electrical properties of sulfur donors characterized by Hall effect measurements of sulfur-implanted n-type SiC

京大工¹, [○](B4) 松岡 大雅¹, 金子 光顕¹, 木本 恒暢¹

Dept. of Electronic Sci. and Eng., Kyoto Univ.¹

[○]T. Matsuoka¹, M. Kaneko¹, and T. Kimoto¹

E-mail: matsuoka@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

【背景と目的】 SiC 相補型 JFET(CJFET)[1]は、300°C以上の高温環境で動作する集積回路として有望視されている。論理回路設計にあたり、論理閾値電圧はノイズマージンを決定する重要な特性であるが、一般に温度変化に伴い、論理閾値電圧のシフトが生じる。CJFET における論理閾値電圧のシフトは n-JFET と p-JFET のドレイン電流が一致しなくなることに起因する。これは、温度上昇時に、n-JFET ではドナー(N, P)のイオン化エネルギーが小さいため、キャリア密度の変化が小さい一方で、p-JFET ではアクセプタ(AI)のイオン化エネルギーが大きく、キャリア密度が大きく増加するために生じる。そこで、論理閾値電圧の温度変化を抑制するために、よりイオン化エネルギーの大きいドナー(深いドナー)を用いることを提案する。硫黄(S)がドナーとして深い準位を形成することが報告されている[2]が、Hall 効果測定による詳細な検討は行われていない。そこで、本研究では、S をドーピングした SiC の Hall 効果測定を行い、電気的性質を評価したので報告する。

【実験】 n 型 4H-SiC 基板上に p 型エピ層を 12 μm 成長させた試料に S イオンを注入した(注入エネルギー: 10–600 keV, 総注入量: $2.73 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)。活性化アニール処理を 1750°C、20 分の条件で行った。その際、熱拡散が起きているかを調べるためにアニール前後の試料に対して SIMS 分析を行った。クローバー形構造の試料を作製し、ホール効果測定を 180-900 K の温度範囲で行った。

【結果】 S イオンを注入した試料における活性化アニール前後の SIMS 分析結果を図 1 に示す。活性化アニールによる熱拡散はほとんど起こらなかった。N, P と同様にイオン注入条件のみで注入領域を決定できるため、デバイス設計における利点と言える。ホール効果測定によって得られたキャリア密度のアレニウスプロットを図 2 に示す。ホール効果係数は負の値が得られ、S がドナーとして働いていることを確認した。先行研究[2]によると、S はダブルドナーとして働き、4 つのドナー準位を有することが示唆されている。4H-SiC 内のドーパントが、イオン化エネルギーの異なる格子サイト(h, k-site)に入ることを考慮した場合におけるダブルドナーの電荷中性条件式[3]は(1)式と導かれる。

$$n + N_a = N_{dk} \frac{(2-f_2)(1-f_1)}{f_1 f_2 - f_1 + 1} + N_{dh} \frac{(2-f_4)(1-f_3)}{f_3 f_4 - f_3 + 1}, f_i = \frac{1}{1 + g_i N_C \exp\left(\frac{-\Delta E_{di}}{kT}\right)/n}, g_i = \begin{cases} 2 & (i = 1, 3) \\ \frac{1}{2} & (i = 2, 4) \end{cases} \quad (1)$$

Hall 効果測定により得られたキャリア密度に対して(1)式をフィッティングした結果を図 2 に曲線で示す。測定で得られた電子密度の温度依存性を(1)式により再現できる。フィッティング結果から S ドナーのドナー準位は、伝導帯端から約 350 meV 下に一準位、約 500 meV 下付近に三準位存在すると見積もられた。また、得られたドナー密度($\sim 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)は、図 1 に示した S 密度($5.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)より大きく、S がダブルドナーとして働いていることを示唆している。比較のため、同じドナー密度を有する N ドープ SiC におけるキャリア密度も図 2 に示す。S ドープ SiC は N ドープの場合と違い、温度上昇時のキャリア密度変化が大きいことが分かる。この結果は、S が深いドナーであり、CJFET に用いることで、温度上昇に伴う論理閾値電圧の変化を抑制し得ることを示唆している。

[1] M. Kaneko *et al.*, *IEEE EDL* **39**, 723 (2018). [2] S. A. Reshanov and G. Pensl *et al.*, *J. Appl. Phys.* **99**, 123717 (2006).

[3] C.H. Champness, *Proc. Phys. Soc. B* **69**, 1335 (1956).

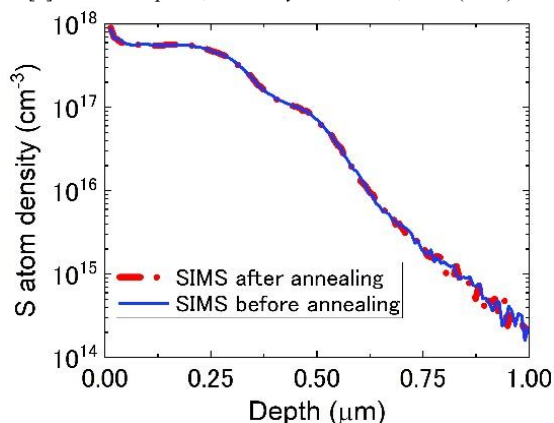


Fig 1. Depth profiles of implanted Sulfur density before and after activation annealing measured by SIMS.

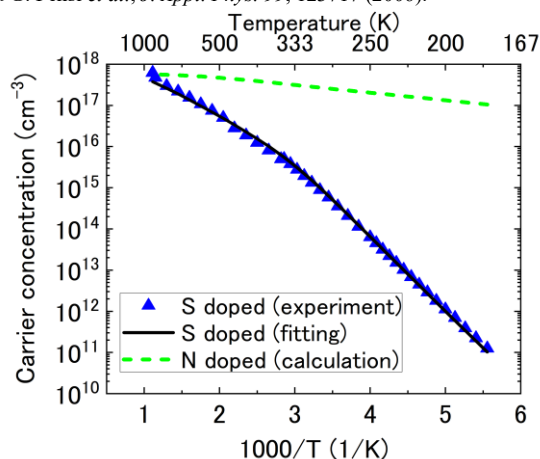


Fig 2. Arrhenius plots of the free carrier (electron) concentration in S-doped