

# N-doped 4H-SiC における温度依存性を考慮した 電子移動度及びドナー準位のドナー密度依存性

Donor-concentration dependence of donor levels and temperature-dependent electron mobilities in N-doped 4H-SiC

鏡原聡<sup>1\*</sup>、石田卓也<sup>1</sup>、岩田裕史<sup>1</sup>、安蘇浩一<sup>1</sup>、勝矢大輔<sup>1</sup>、安芸達也<sup>1</sup>、松浦秀治<sup>1</sup>、畠山哲夫<sup>24</sup>、渡辺貴俊<sup>24</sup>、児島一聡<sup>24</sup>、櫛部光弘<sup>24</sup>、今井聖支<sup>24</sup>、四戸孝<sup>24</sup>、鈴木誉也<sup>24</sup>、田中知行<sup>24</sup>、荒井和雄<sup>34</sup>

阪電通大<sup>1</sup>、素子協先進パワーデバイス研究所<sup>2</sup>、産総研 PERC<sup>3</sup>、超低損失電力素子技術開発研究体<sup>4</sup>

TEL: 072-824-1131 \*E-mail: m03112@isc.osakac.ac.jp

【背景・目的】 Silicon Carbide(SiC)は、現在の主流である Si に替わる、高温動作、高絶縁破壊電界、高飽和電子速度、高熱伝導度等の優れた物性を持つ次世代パワーデバイスである。SiC は広い温度範囲で利用される為、最適な設計をする際に用いられるデバイスシミュレータに必要なパラメータも、広い温度範囲のものが必要となっている。そこで、N-doped 4H-SiC における温度依存性を考慮した電子移動度及びドナー準位のドナー密度依存性について調べる。

【実験方法】 p-type 4H-SiC {0001}オフ基板の上にエピタキシャル成長させた Cree 社及び超低損失電力素子技術開発研究体製、窒素(N)ドーパド 4H-SiC 膜厚 10 μm を 3 mm 角にカットした試料の 4 隅に Ni/Ti/Al オーミック電極を形成した後、1000 度にて焼結を行った。これらの試料に対して、van der Pauw 法によるホール効果測定を、低温から昇温しながら磁束密度 1.4 T にて行い、電子密度及び電子移動度の温度依存性を得た。

【ドナー準位のドナー密度依存性】 当研究室で開発した、特定の仮定を用いずに半導体中に含まれる不純物準位・密度を多数キャリア密度の温度依存性から評価する FCCS 法(Free Carrier Concentration Spectroscopy)[1] を用いて、各試料中に含まれる不純物準位・密度を求めた。FCCS 法により評価したドナー準位のドナー密度依存性を図 1 に示す。FCCS 法から全ての試料で 2 つのドナー準位を見積もることが出来た。これらのドナー準位は、六方晶サイトと立方晶サイトに入った N によると報告されている [2]。それぞれのドナー準位のドナー密度依存性は、次式のように表される[3]。

$$\Delta E_{D_i}(N_D) \equiv \Delta E_{D_i}(0) - \alpha_{D_i} N_D^{1/3} \quad (1)$$

但し、 $i = h, k$  であり、それぞれ六方晶サイト、立方晶サイトを示している。 $\Delta E_{D_i}$  はドナー準位、 $\Delta E_{D_i}(0)$  はドナーが単独で存在した時のドナー準位、 $\alpha_{D_i}$  は定数、 $N_D$  は六方晶サイトと立方晶サイトに入った N のドナー密度の和である。FCCS 法による評価結果と (1) 式を用いて最小 2 乗法によるフィッティングを行った結果、図 1 の破線が得られた。シミュレーション結果と実験結果が良く一致しており、得られたパラメータ(表 1)は妥当であると考えられる。

【電子移動度のドナー密度及び温度依存性】 図 2 に室温(300 K)以上の温度範囲での電子移動度の温度依存性を示す。室温以上における電子移動度の温度依存性は、各ドナー密度において次式のように表すことが出来る。

$$\mu_n(T, N_D) \equiv \mu_n(300, N_D) \left( \frac{T}{300} \right)^{-\nu_n(N_D)} \quad (2)$$

但し、 $\mu_n$  は電子移動度、 $T$  は絶対温度、 $\nu_n(N_D)$  は図 2 に示した電子移動度を直線で近似した際の傾きである。

## 1. 電子移動度の温度依存性のドナー密度依存性

各試料における  $\nu_n(N_D)$  を求めたところ、図 3 に示すようなドナー密度依存性を得ることが出来た。図 3 に示

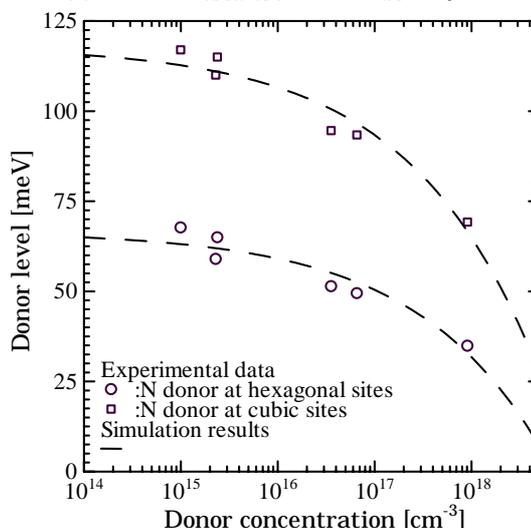


図 1 ドナー準位のドナー密度依存性

表 1 ドナー準位のドナー密度依存性を示すパラメータ

$\Delta E_{D_h}(0)$ [meV]	$\alpha_{D_h}$ [meV·cm]	$\Delta E_{D_k}(0)$ [meV]	$\alpha_{D_k}$ [meV·cm]
66.6	$3.48 \times 10^{-5}$	118	$5.31 \times 10^{-5}$

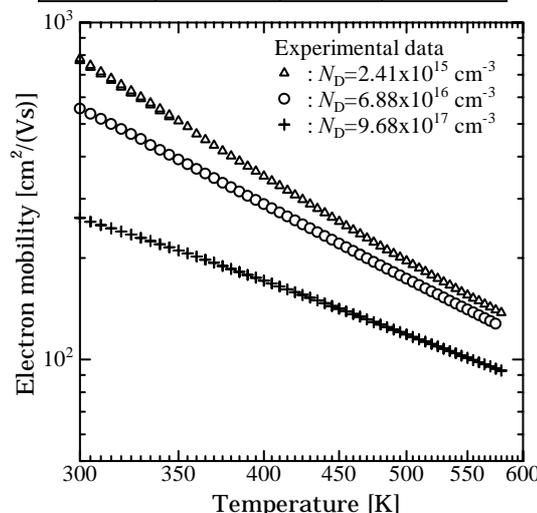


図 2 電子移動度の温度依存性

した  $v_n(N_D)$  のドナー密度依存性は、低密度側では一定値に、高密度側ではフォノン散乱の 1.5 に近づくと考えられるので、次式のように表すことが出来ると考えられる。

$$v_n(N_D) \equiv v_n^{\min} + \frac{v_n^{\max} - v_n^{\min}}{1 + (N_D/N_{v_n,ref})^{\alpha_{v_n}}} \quad (3)$$

但し、 $v_n^{\min}$ 、 $v_n^{\max}$ 、 $N_{v_n,ref}$ 、 $\alpha_{v_n}$  はフィッティングパラメータである。実験結果と (3) 式を用いて最小 2 乗法によるフィッティングを行った結果、図 3 に示す実線が得られた。求めたパラメータを表 2 に示す。

## 2. 室温における電子移動度のドナー密度依存性

ホール効果測定から求められた各試料における室温での電子移動度のドナー密度依存性を図 4 に示す。室温における電子移動度のドナー密度依存性は、次式のように表される [4]。

$$\mu_n(300, T) \equiv \mu_n^{\min} + \frac{\mu_n^{\max} - \mu_n^{\min}}{1 + (N_D/N_{ref})^{\alpha}} \quad (4)$$

但し、 $\mu_n^{\min}$ 、 $\mu_n^{\max}$ 、 $N_{ref}$ 、 $\alpha$  はフィッティングパラメータである。(4) 式を用いて最小 2 乗法によるフィッティングを行った結果、図 4 に示す波線が得られた。求めたパラメータを表 3 に示す。

(3) 式、(4) 式のシミュレーション結果と実験結果が良く一致していることから、ドナー密度依存性を考慮した電子移動度の温度依存性は (2) 式で表わせ、パラメータを最小 2 乗法から求めることが出来た。

**【結論】** ホール効果測定から求められた電子密度の温度依存性から FCCS 法により 2 つのドナー準位と密度を見積もり、ドナー準位のドナー密度依存性を評価した。

室温(300 K)以上の温度範囲における電子移動度の温度依存性は、各ドナー密度において室温での電子移動度と温度のべき乗との積で表わせることが分かった。最小 2 乗法によるフィッティングを用いて、室温における電子移動度とべき乗の係数のドナー密度依存性を求めた。

## 【参考文献】

- [1] H. Matsuura, Y. Masuda, Y. Chen and S. Nishino, J. Appl. Phys., **39** (2000) 5069.
- [2] W. Götz et al. J. Appl. Phys., **72** (1993) 3332.
- [3] G.L. Pearson and J. Bardeen, Phys. Rev., **75** (1949) 865.
- [4] D.M. Caughey and R.E. Thomas, Proc. IEEE, **55** (1967) 2192.
- [5] W.J. Schaffer, G.H. Negley, K.G. Irvine and J.W. Palmour, Mat. Res. Soc. Proc., **339** (1994) 595.
- [6] H. Matsunami and T. Kimoto, Mat. Sci. Eng., **R20** (1997) 125.
- [7] J. Pernot, S. Contreras, J. Camassel, J.L. Robert, W. Zawadzki and E. Neyret, Appl. Phys. Lett., **77** (2000) 4359.
- [8] W. Götz, A. Schöner, G. Pensl, W. Suttrop, W.J. Choyke, R. Stein and S. Leibenzeder, J. Appl. Phys., **73** (1993) 3332.
- [9] A. Schöner, S. Karlsson, T. Schmitt, N. Nordell, M. Linnarsson and K. Rottner, Mater. Sci. Eng., **B61-62** (1999) 389.
- [10] C.H. Carter, Jr., V.F. Tsvetkov, R.C. Glass, D. Henshall, M. Brady, Mater. Sci. Eng., **B61-62** (1999) 1.

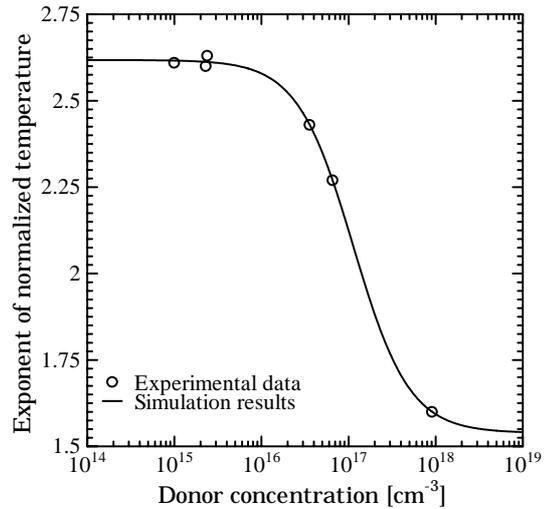


図 3 温度のべき乗の係数のドナー密度依存性

表 2 温度のべき乗のドナー密度依存性を示すパラメータ

$v_n^{\max}$	$v_n^{\min}$	$N_{v_n,ref}$ [cm <sup>-3</sup> ]	$\alpha_{v_n}$
2.618	1.539	$1.14 \times 10^{17}$	1.35

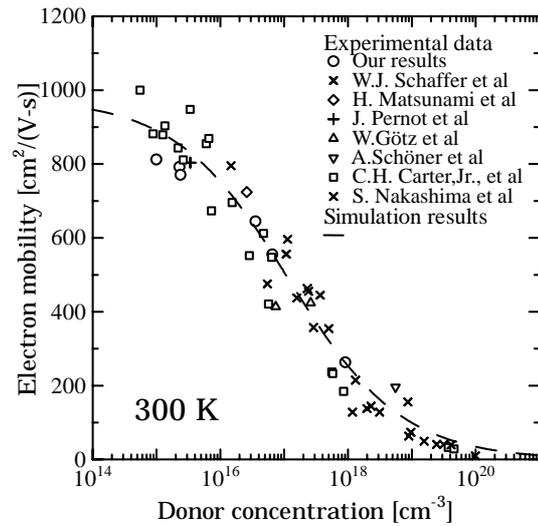


図 4 電子移動度のドナー密度依存性

表 3 室温における電子移動度のドナー密度依存性を示すパラメータ

$\mu_n^{\max}$ [cm <sup>2</sup> /(V·s)]	$\mu_n^{\min}$ [cm <sup>2</sup> /(V·s)]	$N_{ref}$ [cm <sup>-3</sup> ]	$\alpha$
977	0	$1.17 \times 10^{17}$	0.49

- [11] S. Nakashima and H. Harima, Inst. Phys. Conf. Ser., **142** (1996) 269.