

4.5 電気的特性評価

SiCを電子デバイスとして利用するためには、pn制御ができなければならない。そのため、SiC中のドーパントに関する研究が精力的に行われている。

不純物を添加したウェハやエピ膜、または不純物をイオン注入した層のホール効果測定から得られる多数キャリア密度の温度依存性 [電子密度 $n(T)$ または正孔密度 $p(T)$] を用いて、通常はcurve-fitting法からドーパントの密度と準位を評価している。

$n(T)$

(1) FCCS法

従来のcurve fitting法では、

$$n(T) = N_C(T) \exp\left(-\frac{\Delta E_F}{kT}\right) \quad \text{または} \quad p(T) = N_V(T) \exp\left(-\frac{\Delta E_F}{kT}\right) \quad (1)$$

および、

$$n(T) = \sum_i N_{Di} [1 - f_{FD}(\Delta E_{Di})] - N_{comp} \quad \text{または} \quad p(T) = \sum_i N_{Ai} f_{FD}(\Delta E_{Ai}) - N_{comp} \quad (2)$$

A_i

を用いて⁽¹⁾、パラメータ $[(N_{Di}, \Delta E_{Di})$ の組と N_{comp} 、または $(N_{Ai}, \Delta E_{Ai})$ の組と $N_{comp}]$ を変化させながらシミュレーションした $n(T)$ または $p(T)$ が、実験値ともっともよく一致するパラメータを探す。ここで、 N_{Di} と ΔE_{Di} は i 番目のドナーの密度と準位 (伝導帯 E_C からのエネルギー)、 N_{Ai} と ΔE_{Ai} は i 番目のアクセプタの密度と準位 (価電子帯 E_V からのエネルギー)、 N_{comp} は補償密度である。また、フェルミーディラック分布関数 (電子の占有確率) は、

$$f_{FD}(\Delta E_{Di}) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g_D} \exp\left(\frac{\Delta E_F - \Delta E_{Di}}{kT}\right)} \quad (3)$$

または

$$f_{FD}(\Delta E_{Ai}) = \frac{1}{1 + g_A \exp\left(\frac{\Delta E_F - \Delta E_{Ai}}{kT}\right)} \quad (3)'$$

A_i

であり⁽¹⁾、 ΔE_F はドナーの場合 E_C 、アクセプタの場合 E_V からのフェルミ準位である。

この方法での問題点は、事前に仮定するドーパントの種類により見積もる値が異なることである。また、同時に多くの密度と準位を決定するのを避けるため、4H-SiCの場合は2種類のドナー密度を等しいと、または6H-SiCの場合は2種類のドナー密度を1対2と、それぞれ仮定することが多い。

次に水素モデルから考えると、SiC中のアクセプタ準位 (ΔE_A) は150meV以上の深い準位なることが予測される⁽²⁾⁽³⁾。アクセプタが高密度の場合、フェルミ準位 (ΔE_F) が価電子帯 (E_V) と ΔE_A との間にあるため、アクセプタの励起状態の影響を無視できなくなる。ところがフェルミーディラック分布関数 $f_{FD}(\Delta E_A)$ は、 E_V と ΔE_A との2準位

間の遷移だけを考えている。したがって、p型SiCのアクセプタを評価するためには、励起単位を含めた新しい分布関数が必要となる。

$n(T)$

これに対して、ドーパントに関する仮定を用いずに、 $n(T)$ または $p(T)$ から半導体中に含まれる複数のドーパントの密度と準位を評価するために、Free Carrier Concentration Spectroscopy (FCCS) 法を提案・開発した⁽⁴⁻⁶⁾。FCCS法の評価関数は、

$$H(H, E_{ref}) \equiv \frac{n(T)^2}{(kT)^{5/2}} \exp\left(\frac{E_{ref}}{kT}\right) \quad \text{または} \quad H(H, E_{ref}) \equiv \frac{p(T)^2}{(kT)^{5/2}} \exp\left(\frac{E_{ref}}{kT}\right) \quad (4)$$

で定義され、ドーパントのエネルギー準位に対応する温度でピークになる関数である。ただし、 E_{ref} は測定温度範囲内にピークを移動させるパラメータである。

(2) n型SiC中のドナー評価

Si基板上に成長させたn型3C-SiC薄膜の $n(T)$ を図4.24(a)に示す。(4)式から得ら

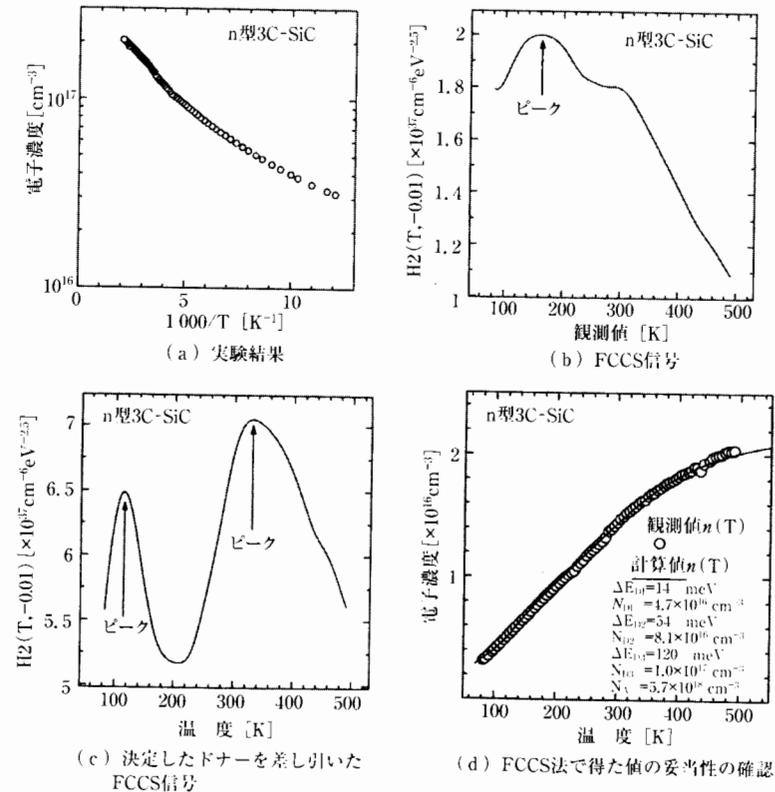


図4.24 n型3C-SiCの電子密度の温度依存性を用いたFCCS法での解析

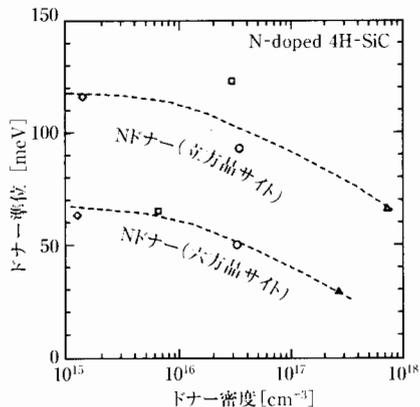


図4.25 4H-SiCにおけるドナー準位のドナー密度依存性(同一試料中の2種類のドナーは同記号で示す)

れる FCCS 信号を図4.24(b)に示す。一つのピークと一つのショルダーがあることにより、少なくとも2種類のドナーが存在することがわかる。このピークより、ドナー密度は $8.1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ およびドナー準位は 54meV と評価できた。次に、このドナーを取り除いた FCCS 信号を図4.24(c)に示す。二つのピークが現れたことにより、さらに2種類のドナーを評価することができる。低温側のピークからドナーの密度と準位は $4.7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ と 14meV 、高温側のピークからドナーの密度と準位は $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ と 120meV と評価できた。さらに N_{comp} は $5.7 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ とわかった。FCCS法から得られた値の妥当性を調べるために、これらの値を用いてシミュレーションした $n(T)$ と実験値とを比較した結果を、図4.24(d)に示す。両者が非常によく一致していることから、FCCS法から得られた値の妥当性が確認できた。

窒素が添加された4H-SiC中と6H-SiC中のドナーをFCCS法で評価した結果、六方晶サイトに入った浅い窒素ドナー準位と、立方晶サイトに入った深い窒素ドナー準位の2種類のドナーを評価できたが、その他のドナー準位は検出できなかった。窒素添加4H-SiCエピ膜に含まれる2種類のドナー準位のドナー密度依存性を図4.25に示す。

(3) p型SiC中のアクセプタ評価

Alを低濃度添加した4H-SiCエピ膜中のアクセプタをFCCS法で評価した結果、 200meV 付近にAlによるアクセプタ準位と 350meV 付近に、もう一つのアクセプタが検出できた。一方、6H-SiCエピ膜中では、 180meV 付近にAlによるアクセプタ準位が検出できた。

高濃度のAlを添加またはイオン注入したp型SiCの ΔE_F は、 E_V とアクセプタの基底準位 ($\Delta E_1 = \Delta E_A$) の間にあるため、アクセプタの励起準位 (ΔE_r ; $r > 2$) を考慮しなければならない。報告されている励起状態を考慮した分布関数は、

$$f_{\text{conv}}(\Delta E_A) = \frac{1}{1 + g_A \left[\exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_F}{kT}\right) + \sum_{r=2} g_r \exp\left(\frac{\Delta E_r - \Delta E_F}{kT}\right) \right]} \quad (5)$$

である^{(2),(7)}。(5)式から、励起状態は正孔トラップ的な働きをすることがわかる。

一方、励起状態が正孔トラップ的かつ浅いアクセプタ的に働くと考えた分布関数として、

$$f(\Delta E_A) = \frac{1}{1 + g_A \exp\left(-\frac{\bar{E}_{\text{cx}}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_F}{kT}\right) + \sum_{r=2} g_r \exp\left(\frac{\Delta E_r - \Delta E_F}{kT}\right) \right]} \quad (6)$$

を提案した^{(8),(9)}。ここで \bar{E}_{cx} は、アクセプタの基底準位から見たアクセプタの基底状態と励起状態に存在する正孔の平均エネルギーであり、

$$\bar{E}_{\text{cx}} \equiv \frac{\sum_{r=2} (\Delta E_A - \Delta E_r) g_r \exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_r}{kT}\right)}{1 + \sum_{r=2} g_r \exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_r}{kT}\right)} \quad (7)$$

で表される^{(8)~(10)}。

3種類の分布関数から見積もったp型4H-SiC中のアクセプタの密度と準位を、表4.1に示す。SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)から評価した膜中のAl濃度は約 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ である。したがって、最適なアクセプタ密度が得られた分布関数は、提案している $f(\Delta E_A)$ である。

理論から導かれるFCCS信号は、

$$H(T, E_{\text{ref}}) = \frac{N_A}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_A - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I(\Delta E_A) - \frac{N_{\text{comp}} N_A}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}} - \Delta E_F}{kT}\right) \quad (8)$$

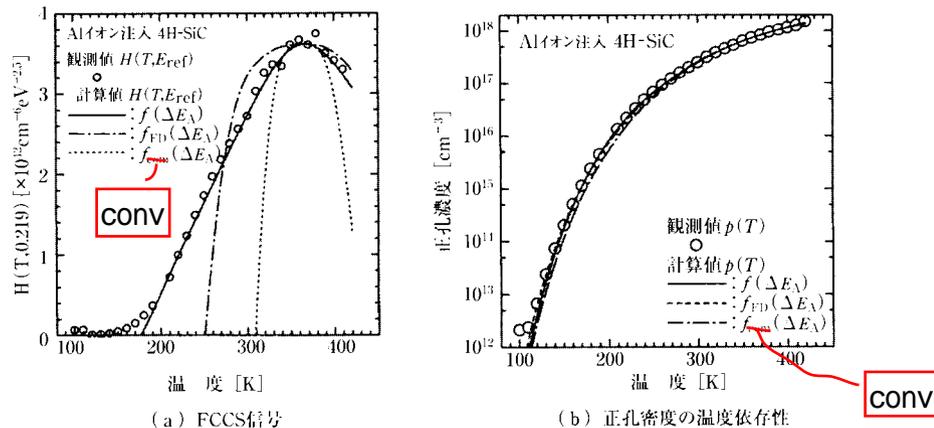
であり^{(8),(9)}、式中の関数 $I(\Delta E_A)$ は、

$$I(\Delta E_A) = N_{V0} \exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_F}{kT}\right) F(\Delta E_A) \quad (9)$$

である。実験値 $p(T)$ から求めた ΔE_F と、 $F(\Delta E_A)$ として、それぞれの分布関数および表4.1の値を用いてシミュレーションしたFCCS関数を図4.26(a)に示す。丸印で示す実験結果とよく一致するのは、提案している $f(\Delta E_A)$ である。他方、各分布関数と表4.

表4.1 高濃度のAlを含む4H-SiC中のアクセプタ評価の分布関数の依存性

	$N_A [\text{cm}^{-3}]$	$\Delta E_A [\text{meV}]$	$N_D [\text{cm}^{-3}]$
$f(\Delta E_A)$	5.5×10^{18}	177	7.4×10^{16}
$f_{\text{FD}}(\Delta E_A)$	5.5×10^{19}	162	1.3×10^{18}
$f_{\text{conv}}(\Delta E_A)$	6.0×10^{20}	176	1.4×10^{19}



(a) FACS信号 (b) 正孔密度の温度依存性

図4.26 高濃度のAlをイオン注入したp型4H-SiCの評価

1の値を用いてシミュレーションした $p(T)$ を図4.26(b)に示す。この場合、すべての分布関数によるが実験結果とよく一致しているため、 $p(T)$ を用いたcurve-fitting法からは分布関数の評価ができない。

図4.27に、p型4H-SiC中のアクセプタ準位のアクセプタ密度依存性を示す。低濃度では2種類のアクセプタが存在する。一方、高濃度になるとアクセプタ準位が1種類だけ検出され、アクセプタ評価には励起状態を考慮した分布関数が必要となる。

表4.2には、Al添加6H-SiCの $p(T)$ から評価された N_A の分布関数の依存性と容量-電圧(C-V)特性から見積もった $N_A - N_D$ を示す。低濃度の場合、 $f(\Delta E_A)$ でも、 $f_{FD}(\Delta E_A)$ でも、C-Vからの値に近い値が得られる。しかし高濃度の場合、提案している $f(\Delta E_A)$

が最適である。

このように、提案している励起状態と平均アクセプタ準位を考慮した分布関数 $f(\Delta E_A)$ は、 N_A に関係なく、有効である。

■ Q&A

◆ ホール散乱係数(γ_H)の値に関して
ホール電圧から多数キャリア密度を見積もる場合、通常は $\gamma_H = 1$ と仮定している。n型SiCの場合は、ホール効果測定から得られるドナー密度とSIMSによる窒素濃度とがほぼ等しいため、 $\gamma_H = 1$ が妥当と考

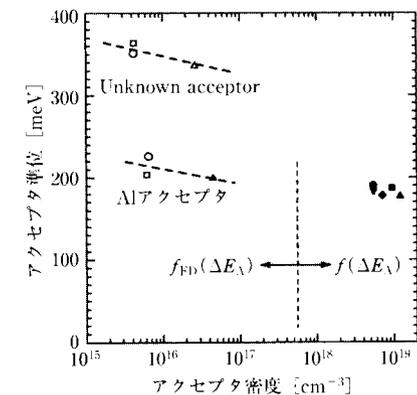


図4.27 4H-SiCにおけるアクセプタ準位のアクセプタ密度依存性(同一試料中の2種類のアクセプタは同記号で示す)

表4.2 Al添加6H-SiC中のアクセプタ評価の分布関数の依存性

	低Alドープ・エピ層		高Alドープ・ウェハ	
	$f(\Delta E_A)$	$f_{FD}(\Delta E_A)$	$f(\Delta E_A)$	$f_{FD}(\Delta E_A)$
ΔE_A [meV]	210	181	188	180
N_A [cm^{-3}]	4.0×10^{15}	7.0×10^{15}	2.3×10^{16}	2.5×10^{16}
N_D [cm^{-3}]	5.0×10^{15}	2.7×10^{15}	4.4×10^{16}	7.3×10^{17}
$N_A - N_D$ [cm^{-3}] from C-V	6.0×10^{15}		4.2×10^{16}	

えられている。ところがp型SiCの場合、SIMSによるAl濃度よりホール効果測定で得られたアクセプタ密度(Al濃度のうち格子点に入った濃度)のほうが高くなる。このため、本節では γ_H に温度依存を持たせず、励起状態を考慮した分布関数を導入した。一方、 γ_H に温度依存性を考えて、フェルミーディラック分布関数で評価することも試みられている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。アクセプタが高濃度の場合が問題であるため、今後は励起状態を考慮しながら γ_H の値について検討していく必要がある。

◆ FCCS法を用いるためのソフトウェアに関して

現在、測定した多数キャリア密度の温度依存性のデータを用いて解析できるWindows用ソフトウェアがウェブサイト(<http://www.osakac.ac.jp/labs/matsuura/>)から無料でダウンロードできる。

引用文献

- (1) S. M. Sze : "Physics of Semiconductor Devices" 2nd edn. (Wiley, 1981).
- (2) B. Sapoval and C. Hermann : "Physics of Semiconductors" (Springer-Verlag, 1993).
- (3) P. Y. Yu and M. Cardona : "Fundamentals of Semiconductors" 2nd edn. (Springer, 1999).
- (4) H. Matsuura and K. Sonoi : Jpn. J. Appl. Phys., 35 (1996) L555.
- (5) H. Matsuura, Y. Masuda, Y. Chen and S. Nishino : Jpn. J. Appl. Phys., 39 (2000) 5069.
- (6) H. Matsuura, K. Morita, K. Nishikawa, T. Mizukoshi, M. Segawa and W. Susaki : Jpn. J. Appl. Phys., 41 (2002) 496.
- (7) R. A. Smith : "Semiconductors" 2nd edn. (Cambridge University Press, 1978).
- (8) H. Matsuura : Materials Science Forum, 389-393 (2002) 679.
- (9) H. Matsuura : New. J. Phys., 4, (2002) 12.1 (<http://www.njp.org/>).
- (10) K. F. Brennan : "The Physics of Semiconductors" (Cambridge University Press, 1999).
- (11) N. Schulze, J. Gajowski, K. Semmelroth, M. Laube and G. Pensl : Materials Science Forum, 353-356 (2001) 45.
- (12) N. Schulze : "Near-Thermal-Equilibrium Growth of 4H-, 6H-, and 15R-Silicon Carbide Single Crystals" (Shaker Verlag, 2001).

オーム社/雑誌局

ISBN4-274-94885-4

C3050 ¥4800E



9784274948855



1923050048008

定価(本体4800円【税別】)

SiC素子の 基礎と応用



Power
Electronics

SiC素子の基礎と応用

荒井和雄・吉田貞史共編



SiC素子の 基礎と応用

荒井和雄・吉田貞史 共編



Power
Electronics

