

ホール効果測定によるAl-doped 4H-SiC中の アクセプタ密度と準位の評価

Determination of Acceptor Densities and Acceptor Levels in
Al doped 4H-SiC Using Hall-Effect Measurements

○梶山浩一、西川和弘、上野祐貴、北川修久、水越猛夫、
立川実幸、永田 敬、西川明宏、福永展也、松浦秀治

大阪電気通信大学 工学部 電子工学科

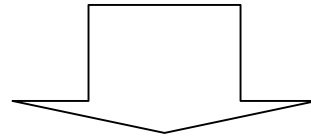
発表内容

- はじめに
- 実験方法
- 不純物密度と準位の評価方法
- 実験結果とアクセプタ密度と準位の評価
- まとめ

はじめに

Al-implanted 4H-SiC

ホール効果測定

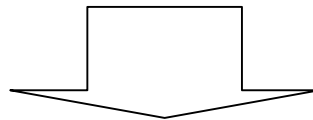


Fermi-Dirac分布関数を用いて、カーブフィッティング法で評価

アクセプタ密度 $N_A = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

2次イオン質量分析法 (SIMS)による評価

Alの密度 $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



アクセプタ密度を大きく見積もってしまう

Excited state levels

$$\Delta E_r = 13.6 \frac{m^*}{m_0 \epsilon_s^2} \cdot \frac{1}{r^2} [\text{eV}] \quad (r \geq 2)$$

p-type 4H-SiC $E_g = 3.3\text{eV}$

基底状態 - - - - - 136 meV

第1励起状態 - - - - - 34 meV

第2励起状態 - - - - - 15 meV

E_V _____

B-doped Si $E_g = 1.1\text{eV}$

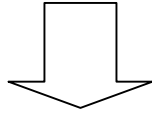
基底状態 - - - - - 45 meV

(B)

E_V _____

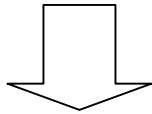
実験方法

オーミック電極(Ti/Al電極)を形成

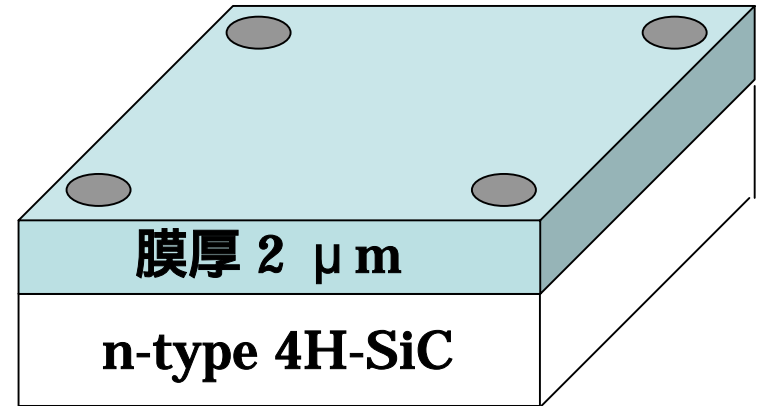


van der Pauw法によるホール効果測定

磁束密度 1.4 T
温度範囲 200 ~ 420 K



正孔密度の温度依存性 $p(T)$



室温注入
アニール温度
1443
1575

不純物密度と準位の評価方法

Hall効果測定



多数キャリア密度の温度依存性

不純物及び欠陥の密度とエネルギー準位の情報が含まれている



FCCS (Free Carrier Concentration Spectroscopy)法

複数の不純物準位の数の仮定や微分法を用いなくて、
不純物密度と準位を決定する方法

FCCS (Free Carrier Concentration Spectroscopy)法

各アクセプタ準位に対応する温度でピークをもつ関数

$$H(T, E_{\text{ref}}) \equiv \frac{p(T)^2}{(kT)^{2.5}} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$

- 電気的中性条件からp型半導体の正孔密度

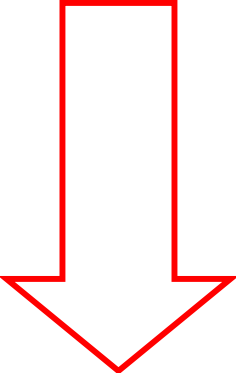
$$p(T) = \sum_{i=1}^n N_{\text{Ai}} f_{\text{A}}(\Delta E_{\text{Ai}}) - N_{\text{D}}$$

- 価電子帯の有効状態密度からp型半導体の正孔密度

$$p(T) = \left[2 \left(\frac{2\pi m_{\text{h}}}{h} \right)^{1.5} \right] (kT)^{1.5} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{F}}}{kT}\right) = N_{\text{v0}} (kT)^{1.5} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{F}}}{kT}\right)$$

展開式

$$H(T, E_{\text{ref}}) = \sum_{i=1}^n \frac{N_{Ai}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{Ai} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_A(\Delta E_{Ai}) - \frac{N_D N_{v0}}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}} - \Delta E_F}{kT}\right)$$


$$I_A(\Delta E_{Ai}) = N_{v0} \exp\left(\frac{\Delta E_{Ai} - \Delta E_F}{kT}\right) f_A(\Delta E_{Ai})$$

ピーク温度 $T_{\text{peak}} = \frac{\Delta E_{Ai} - E_{\text{ref}}}{k}$

⇒ アクセプタ準位 ΔE_{Ai}

ピーク値 $H_{\text{peak}} = \frac{N_{Ai}}{kT_{\text{peak}}} \exp(-1)$

⇒ アクセプタ密度 N_{Ai}

- ・ Fermi-Dirac分布関数（励起状態を考慮しない分布関数）

$$f_{\text{FD}}(\Delta E_{\text{A}}) = \frac{1}{1 + 4 \exp\left(\frac{\Delta E_{\text{A}} - \Delta E_{\text{F}}}{kT}\right)}$$

- ・ 提案しているアクセプタの励起状態を考慮した分布関数¹⁾

$$f(\Delta E_{\text{A}}) = \frac{1}{1 + 4 \exp\left(-\frac{\overline{E_{\text{ex}}}}{kT}\right) \cdot \left[g_1 \exp\left(\frac{\Delta E_{\text{A}} - \Delta E_{\text{F}}}{kT}\right) + \sum_{r=2} g_r \exp\left(\frac{\Delta E_r - \Delta E_{\text{F}}}{kT}\right) \right]}$$

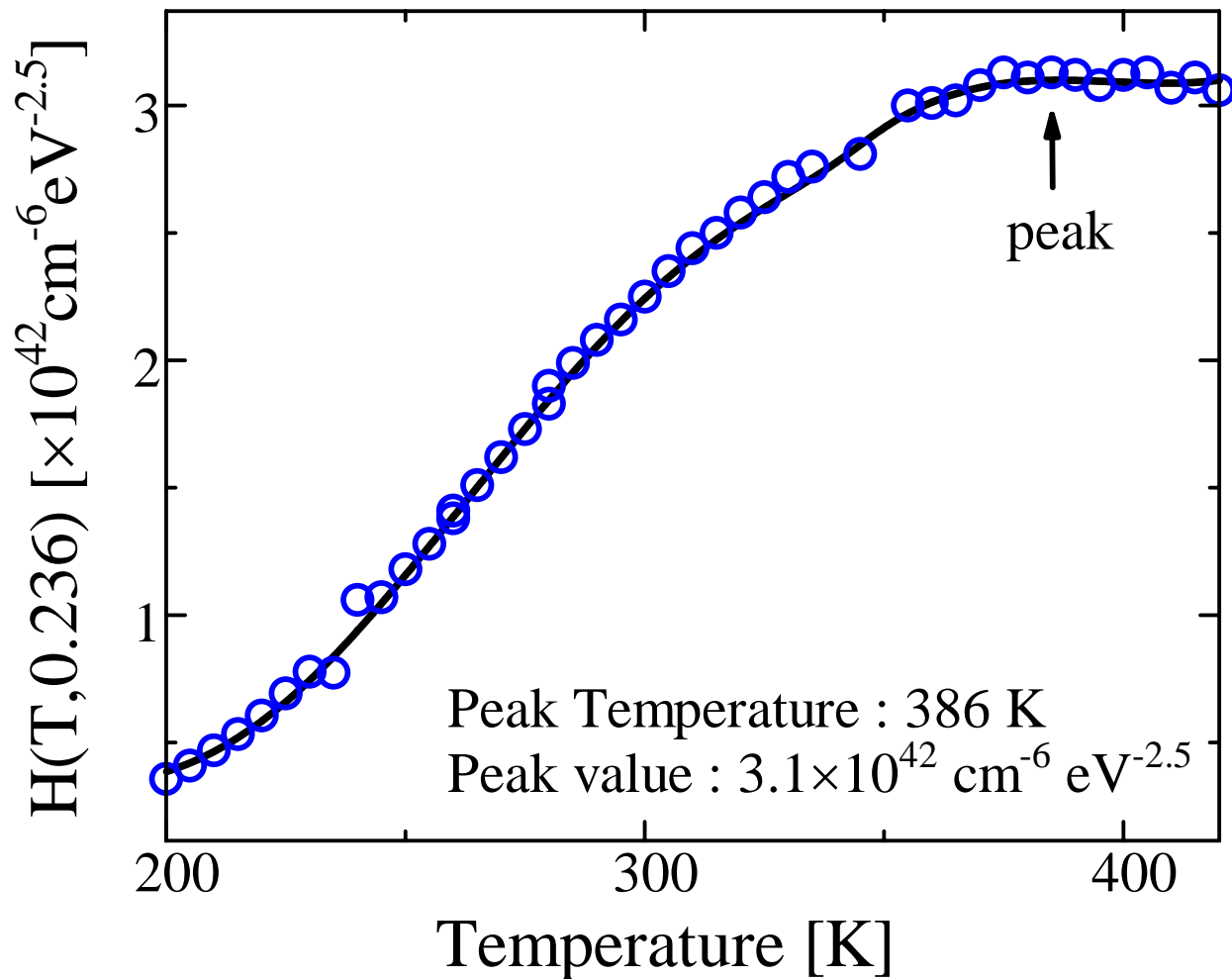
g_1 : 基底状態の縮退度

g_r : 縮退度

ΔE_r : 第 $(r-1)$ 番目の励起準位

$\overline{E_{\text{ex}}}$: 基底状態と励起状態の熱的平均エネルギー

Al-implanted 4H-SiC(室温注入、1443 アニール)のFCCS信号



$$H(T, E_{\text{ref}}) \equiv \frac{p(T)^2}{(kT)^{2.5}} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$

Al-implanted 4H-SiCにおけるアクセプタ密度・準位の比較

	ΔE_A [meV]	N_A [cm ⁻³]	N_D [cm ⁻³]
$f_{\text{FD}}(\Delta E_A)$	166	2.8×10^{19}	1.5×10^{18}
$f(\Delta E_A)$	189	4.6×10^{18}	6.8×10^{16}

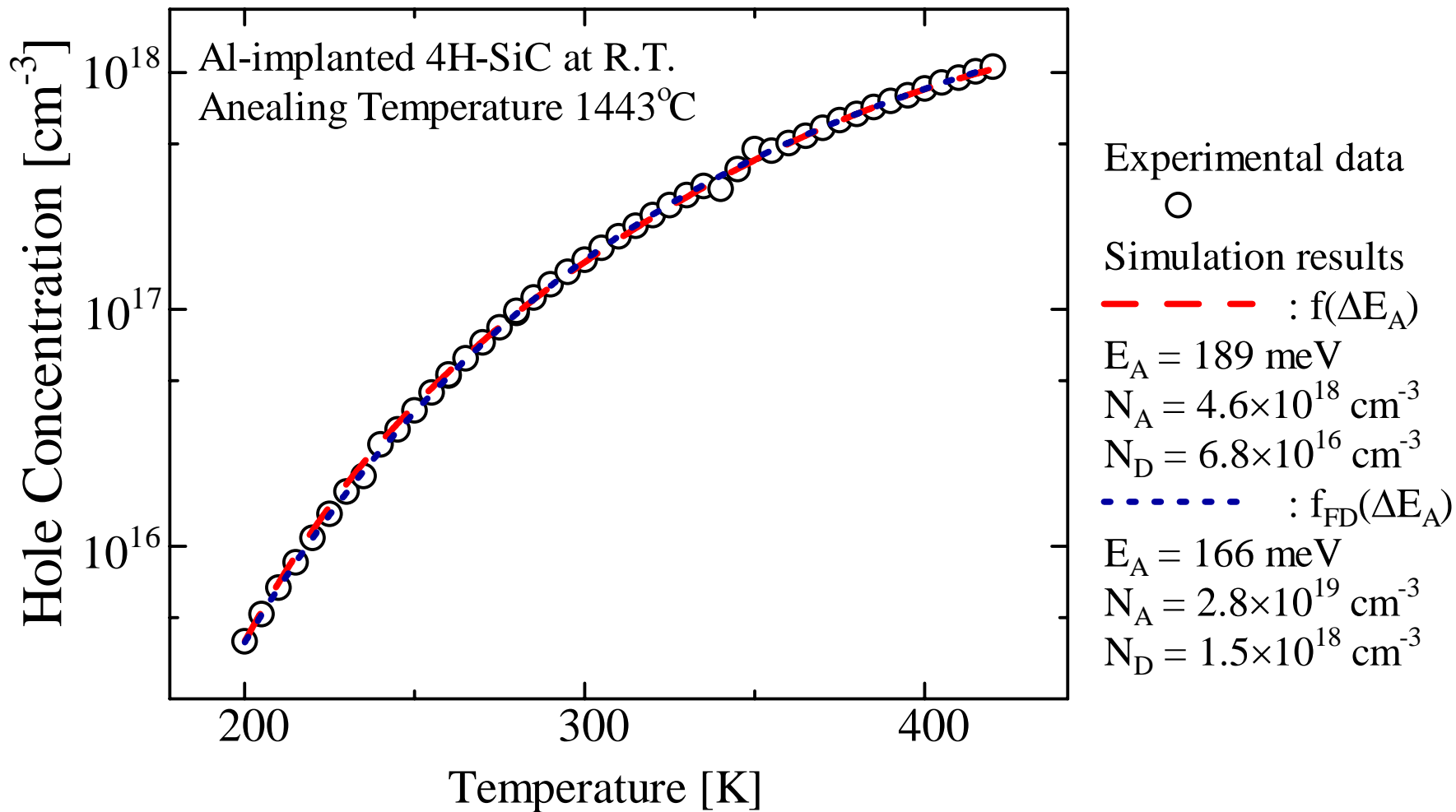
SIMS測定より求めたAlの密度は $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

フォトルミネセンス法によるAlのアクセプタ準位は $160 \sim 191 \text{ meV}^2)$



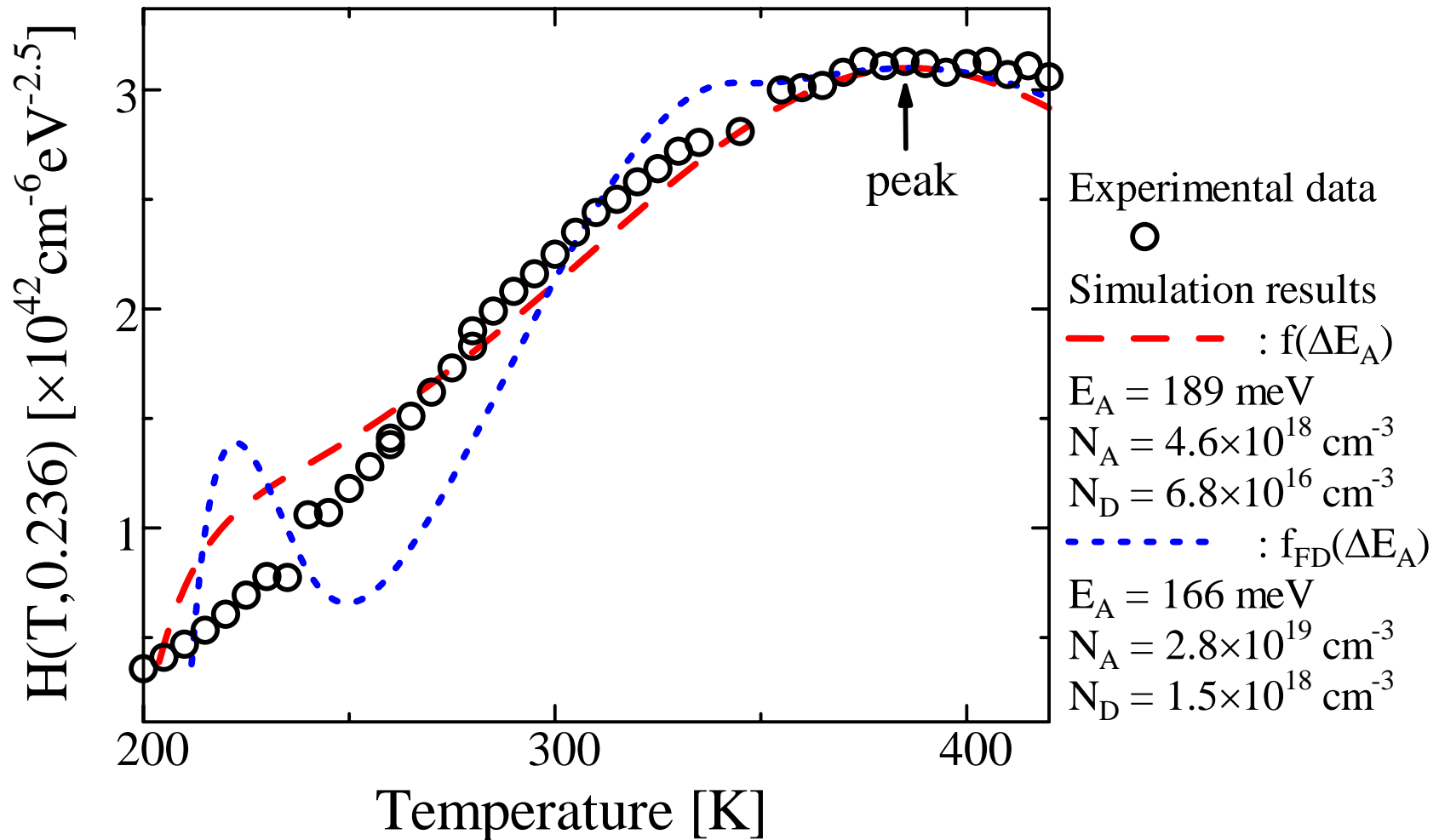
アクセプタの励起状態を考慮した分布関数を用いて求めたアクセプタ密度と準位は妥当であると考えられる

実験結果とシミュレーション結果の比較



カーブフィッティング法を用いた場合、分布関数による区別がつかない

Al-implanted 4H-SiC(室温注入、1443 アニール)のFCCS信号



励起状態を考慮した分布関数を用いた方が良い一致を示す

Al-implanted 4H-SiCにおけるアニール温度の違いによる比較

Annealing Temperature		1443	1575
Acceptor	Density[cm ⁻³]	4.6×10^{18}	6.3×10^{18}
	Energy Level[meV]	189	184
N _D	Density[cm ⁻³]	6.8×10^{16}	3.7×10^{16}

アニール温度を高くするとアクセプタとして働く割合を高められたことがわかる

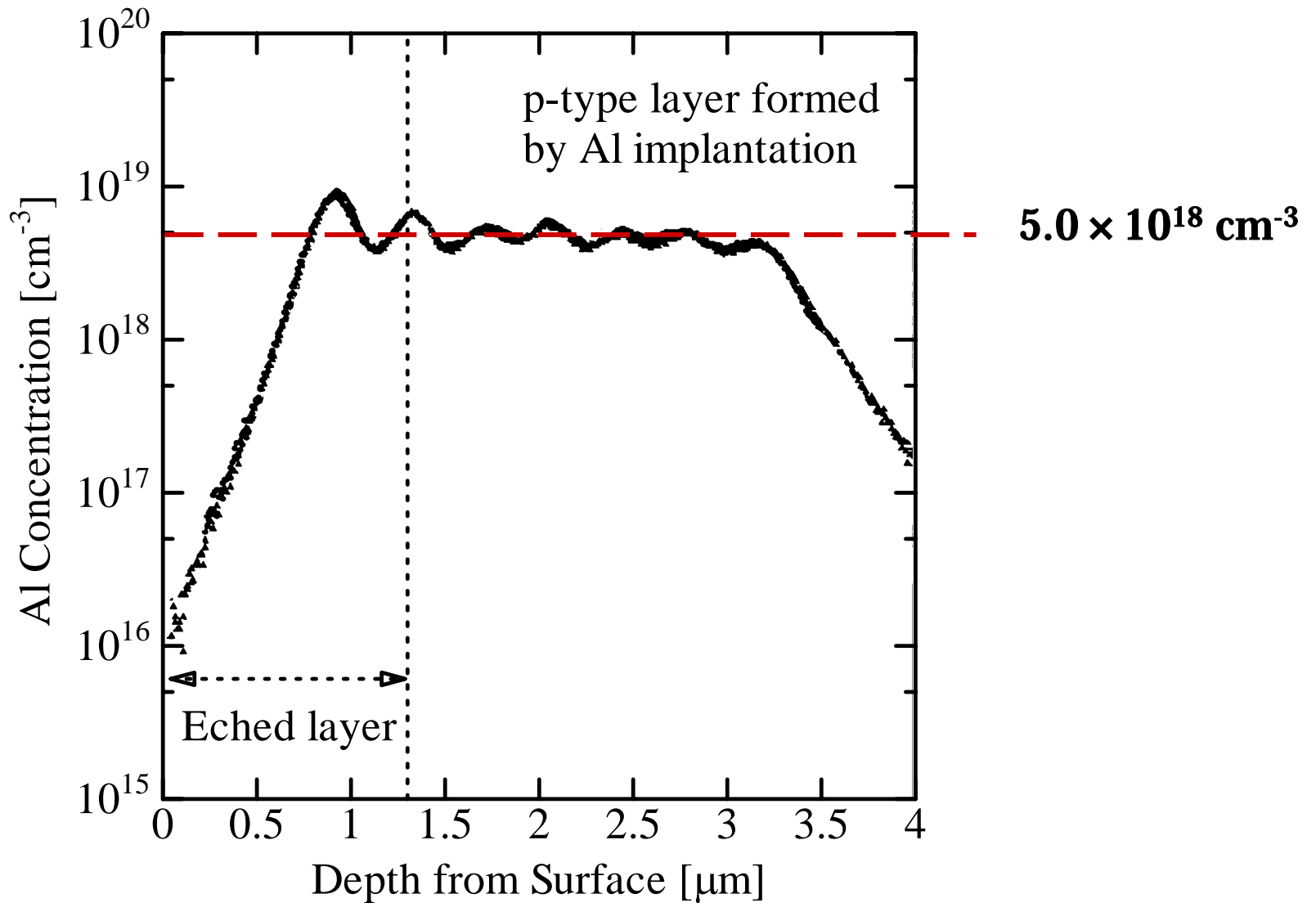
まとめ

- Al-implanted 4H-SiCにおいて、Alのアクセプタ準位は深い
ため、励起状態を考慮した分布関数を用いる必要がある
- 約185 meVと見積もることができたアクセプタ準位はAlによる
ものであると考えられる
- Alをイオン注入し、アクセプタとして働かせるためには高温
アニールが必要である

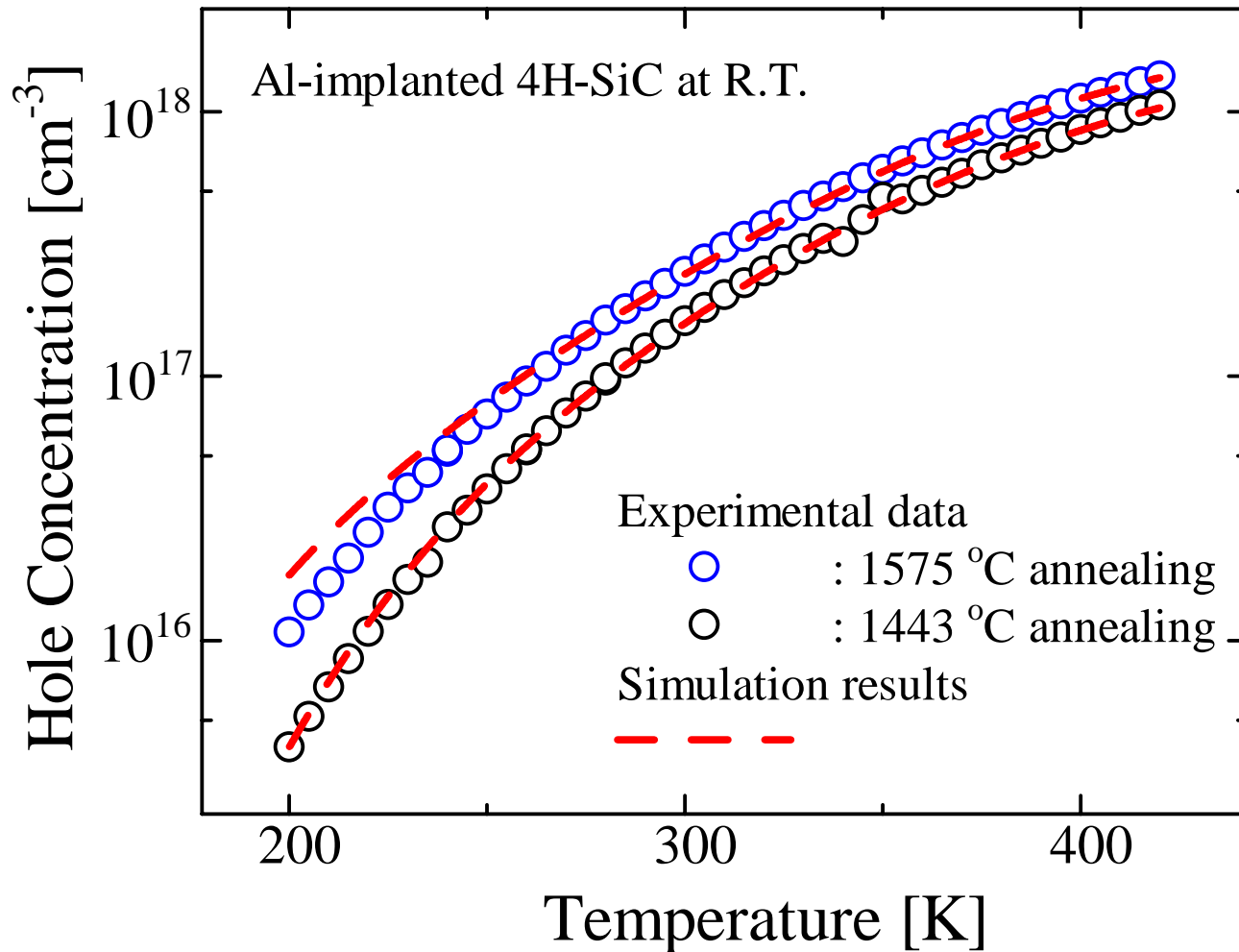
謝辞

**Al-implanted 4H-SiCの試料を提供していただいた
三菱電機(株)先端技術総合研究所の杉本博司氏お
よびイオン工学研究所の方々に深く感謝いたします。**

SIMSによる評価

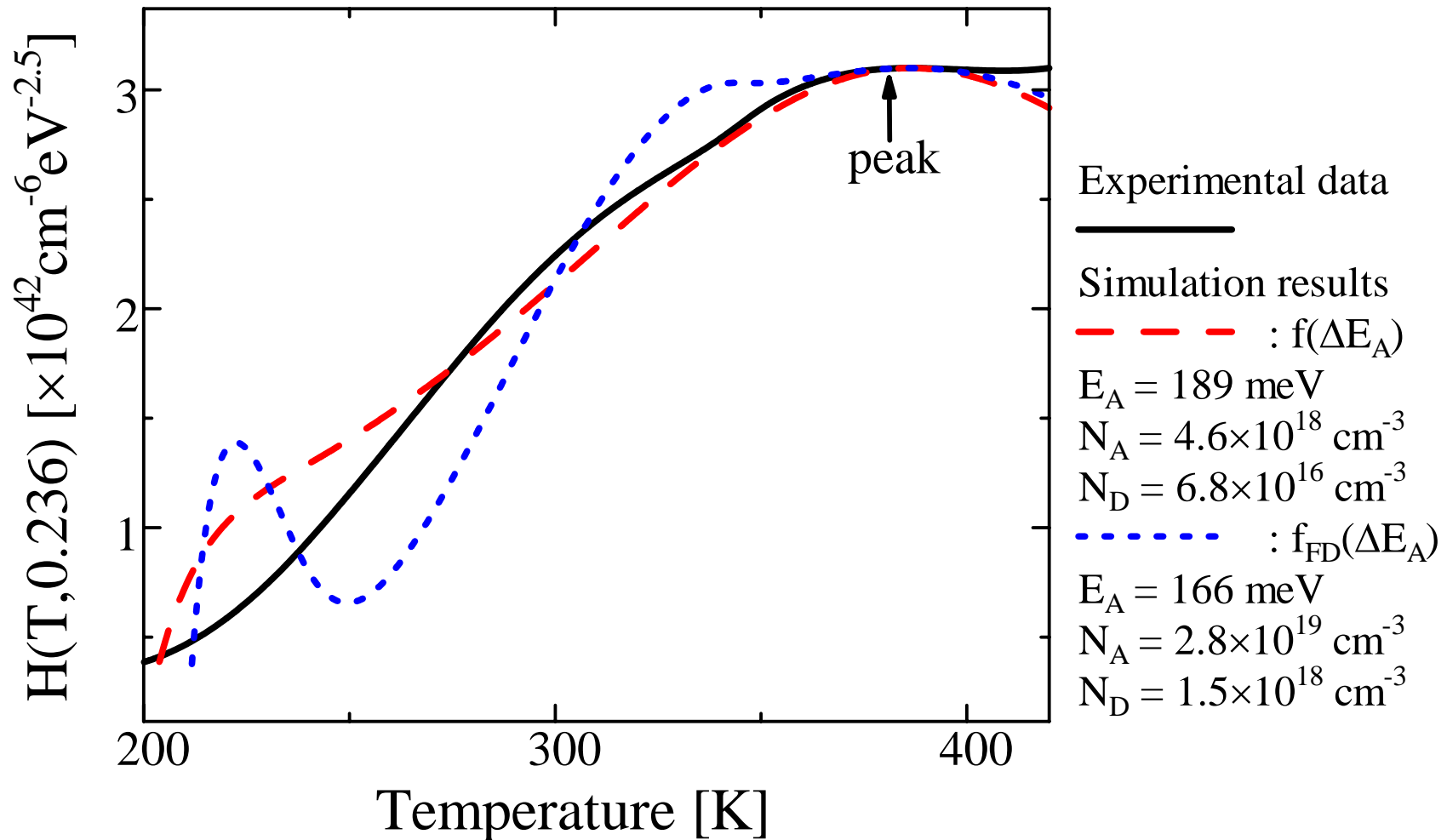


アニール温度の違いによる正孔密度の比較およびシミュレーション結果



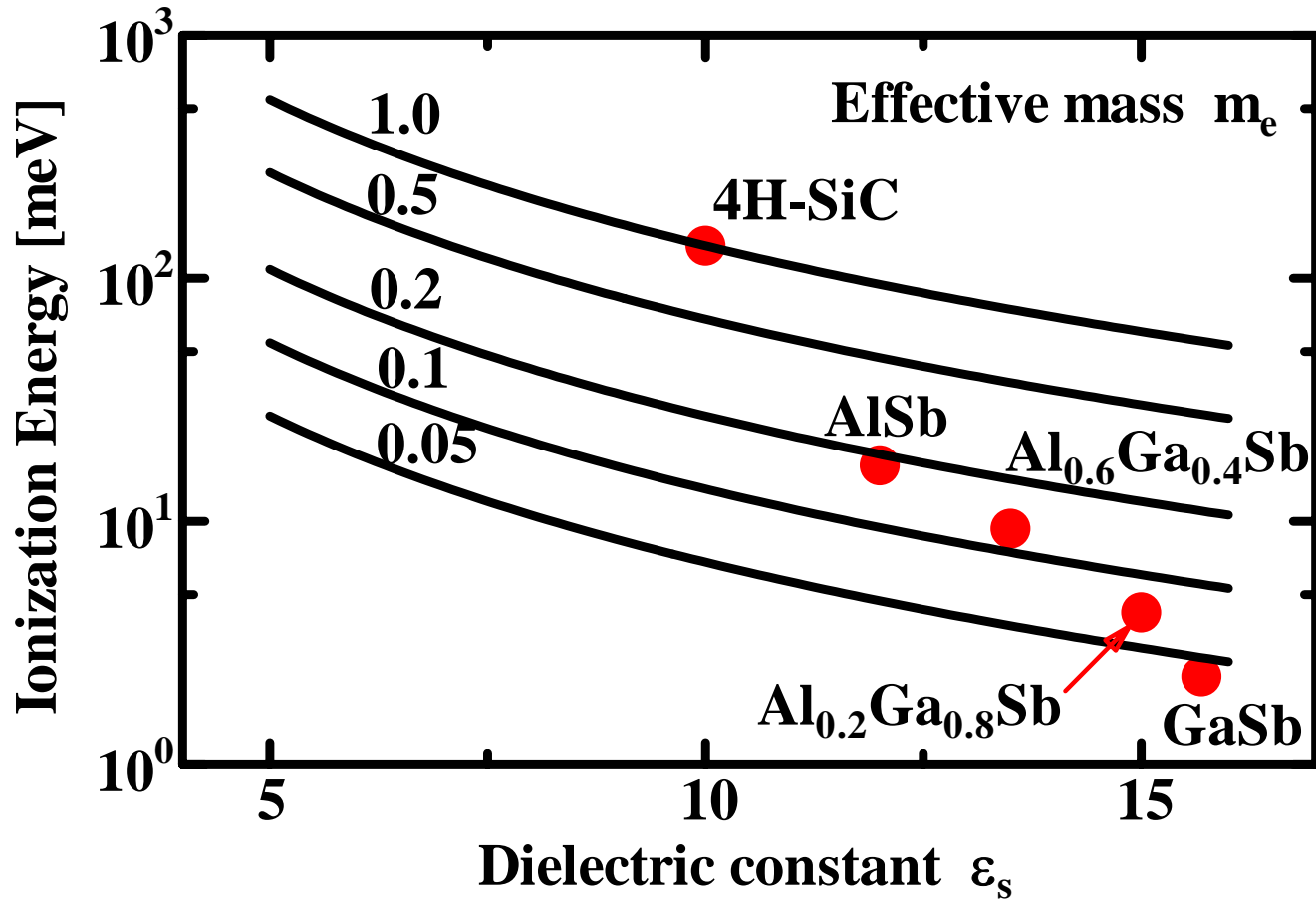
アニール温度が高温になると、正孔密度が増加していることがわかる

Al-implanted 4H-SiC(室温注入、1443 アニール)のFCCS信号



励起状態を考慮した分布関数を用いた方が良い一致を示す

Impurity ionization Energy



$$E = 13.6 \frac{m^*}{m_0 \epsilon_s^2} \quad [\text{eV}]$$

The (r-1)th excited state levels

$$E_r = 13.6 \frac{m^*}{m_0 \epsilon_s^2} \frac{1}{r^2} \quad (r \geq 2)$$

The conventional occupation probability function

$$f_{\text{CONV}}(\Delta E_A) = \frac{1}{1 + 4 \left[g_1 \exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_F}{kT}\right) + \sum_{r=2} g_r \exp\left(\frac{\Delta E_r - \Delta E_F}{kT}\right) \right]}$$

Ensemble average Ground and Excited State levels of donar

$$\overline{E_{\text{ex}}} = \frac{\sum_{r=2} (\Delta E_A - \Delta E_r) g_r \exp\left(-\frac{\Delta E_A - \Delta E_r}{kT}\right)}{g_1 + \sum_{r=2} g_r \exp\left(-\frac{\Delta E_A - \Delta E_r}{kT}\right)}, \quad g_r = r^2$$