

窒素添加 4H SiC のドナー準位の評価

- ホール効果測定を用いた新しい評価方法 -

松浦秀治¹⁾、黒田雅世¹⁾、平野善信¹⁾、
木本恒暢²⁾、松波弘之²⁾

1) 大阪電気通信大学工学部電子工学科
2) 京都大学大学院工学研究科電子物性工学専攻

1 . はじめに

ホール効果測定結果の一般的な評価方法の問題点

- a. $\ln n(T) - 1/T$ の飽和値と傾き
- b. カーブ・フィッティング

2 . 新しい評価方法の提案

$$S(T, E_{\text{ref}}) = \frac{n(T)}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$

3 . 窒素をドーブした 4H SiC のドナー密度と ドナー準位の評価

4 . まとめ

1 . はじめに

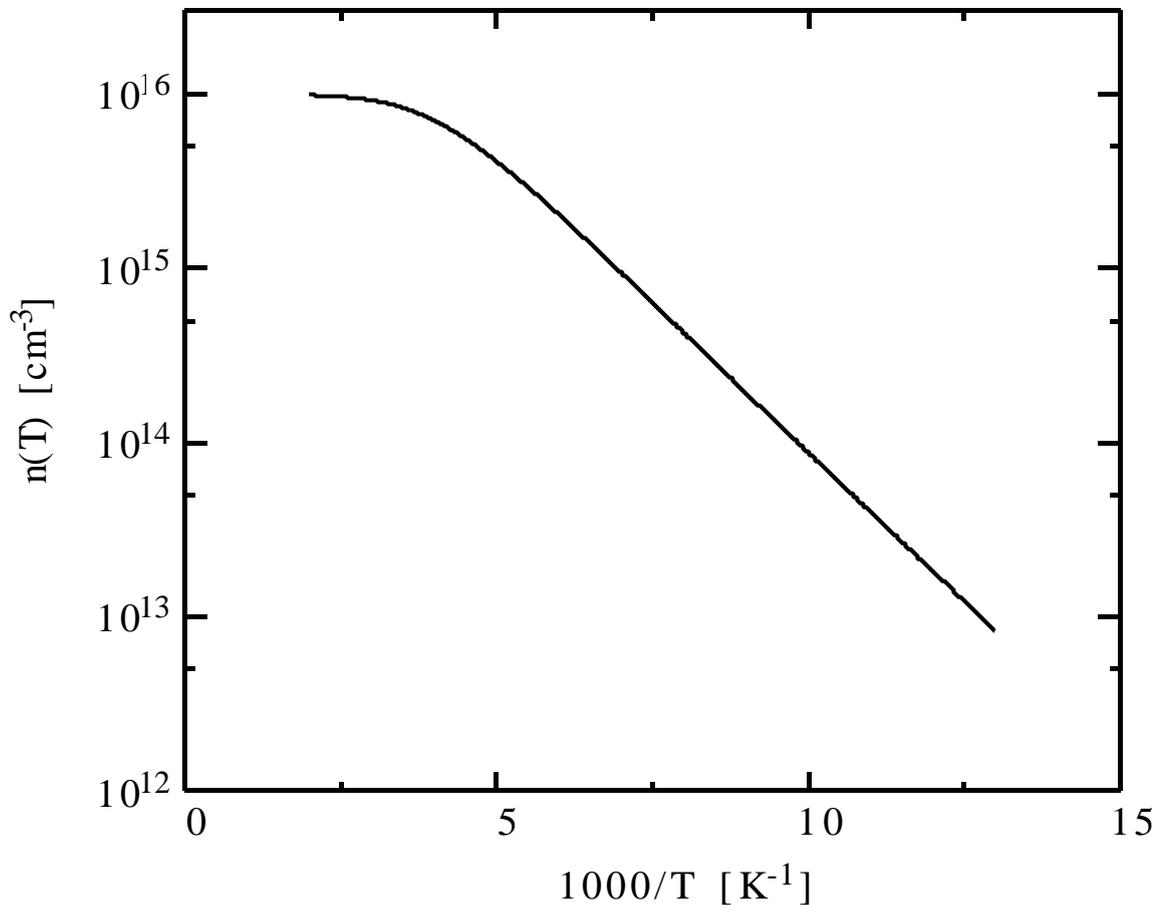
ホール効果測定結果の一般的な評価方法

a. $\ln n(T) - 1/T$ による評価

一種類のドナーだけの場合

($E_D=124 \text{ meV}$, $N_D=1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

シミュレーション結果



飽和値から $N_D=1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

傾きから $E_D=127 \text{ meV} \leftarrow n(T) \propto \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right)$

ドナー : $E_{D1}=124 \text{ meV}$ 、 $N_{D1}=1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

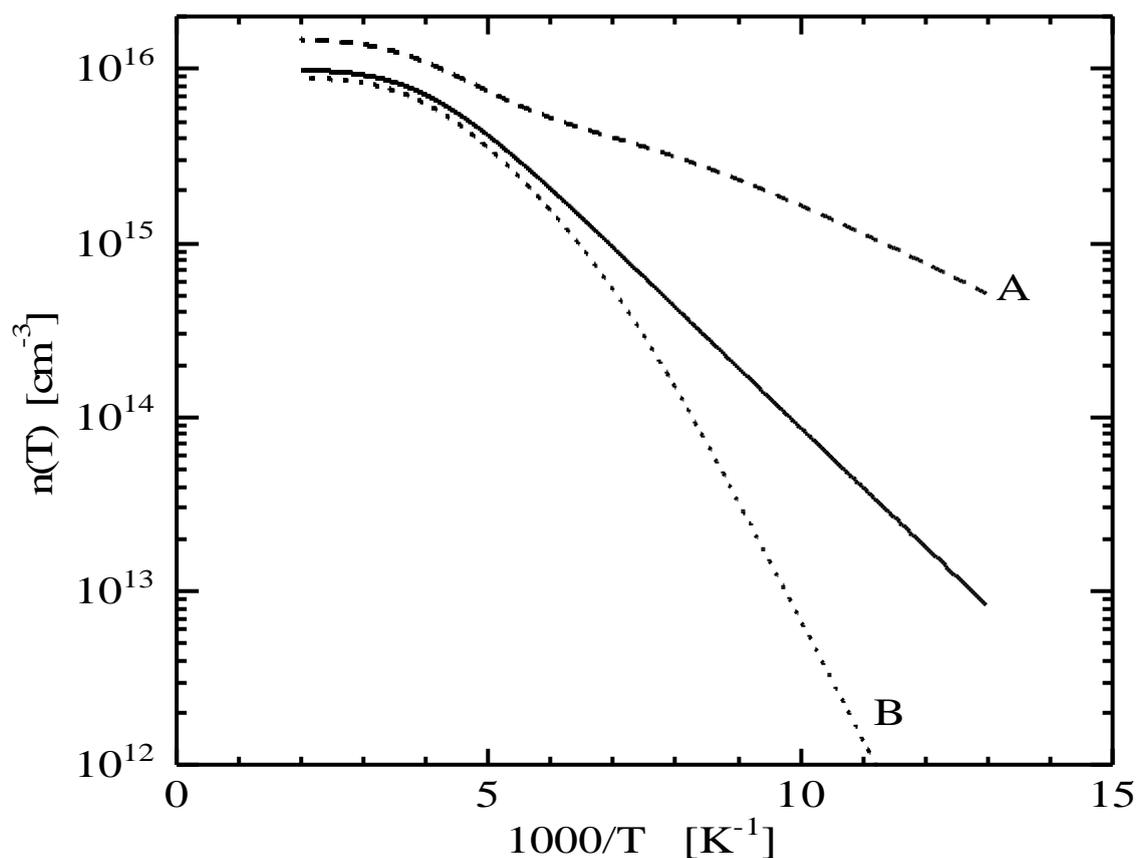
A もう一つドナーが存在する場合

$$E_{D2}=64 \text{ meV}、N_{D2}=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

B アクセプタが混在する場合

$$N_A=1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

シミュレーション結果



評価結果

No.	E_D [meV]	N_D [$\times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$]
A	54	1.48
B	251	0.89

ΔE_D と N_D を間違っって評価

b. カーブ・フィッティング

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

$$n(T) = \sum_{i=1}^n N_{Di} [1 - f_D(\Delta E_{Di})] - N_A \quad (2)$$

上式から、 n 種類のドナー (N_{Di} , E_{Di}) と N_A を求める。

- 問題点： 1 . カーブ・フィッティングをする前に、ドナーの種類数を仮定しなければならない。
- 2 . $(2n+1)$ 個のパラメータを、同時に決定しなければならない。



得られた結果の信頼性が問題

2 . 新しい評価方法の提案

各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を定義する。

$$\text{定義式 } S(T, E_{\text{ref}}) \equiv \frac{n(T)}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$

電気的中性条件から、n 型半導体の電子密度：

$$\begin{aligned}
 n(T) = & \sum_{i=1}^n N_{D_i} [1 - f_D(\Delta E_{D_i})] && \text{n 種類のドナー} \\
 & - \sum_{i=1}^m N_{TE_i} f_D(\Delta E_{TE_i}) && \text{m 種類の電子トラップ} \\
 & - \sum_{i=1}^k N_{A_i} f_A(\Delta E_{A_i}) && \text{k 種類のアクセプタ} \\
 & + \sum_{i=1}^l N_{TH_i} [1 - f_A(\Delta E_{TH_i})] && \text{l 種類の正孔トラップ} \\
 & + p(T) && \text{正孔密度}
 \end{aligned}$$

定義式 $S(T)$

$$S(T, E_{\text{ref}}) \equiv \frac{n(T)}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$

展開した式

$$\begin{aligned} S(T, E_{\text{ref}}) = & \sum_{i=1}^n \frac{N_{\text{Di}}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{Di}} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) F_{\text{D}}(\Delta E_{\text{Di}}) \\ & + \sum_{i=1}^m \frac{N_{\text{TE}i}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{TE}i} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) F_{\text{D}}(\Delta E_{\text{TE}i}) \\ & + \sum_{i=1}^k \frac{N_{\text{Ai}}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{Ai}} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) F_{\text{A}}(\Delta E_{\text{Ai}}) \\ & + \sum_{i=1}^l \frac{N_{\text{TH}i}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{TH}i} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) F_{\text{A}}(\Delta E_{\text{TH}i}) \\ & - \left(\sum_{i=1}^m N_{\text{TE}i} + \sum_{i=1}^k N_{\text{Ai}} \right) \frac{1}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right) \\ & + \frac{p(T)}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right) \end{aligned}$$

右辺 4 項目までは、関数

$$\frac{N_i}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_i - E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$

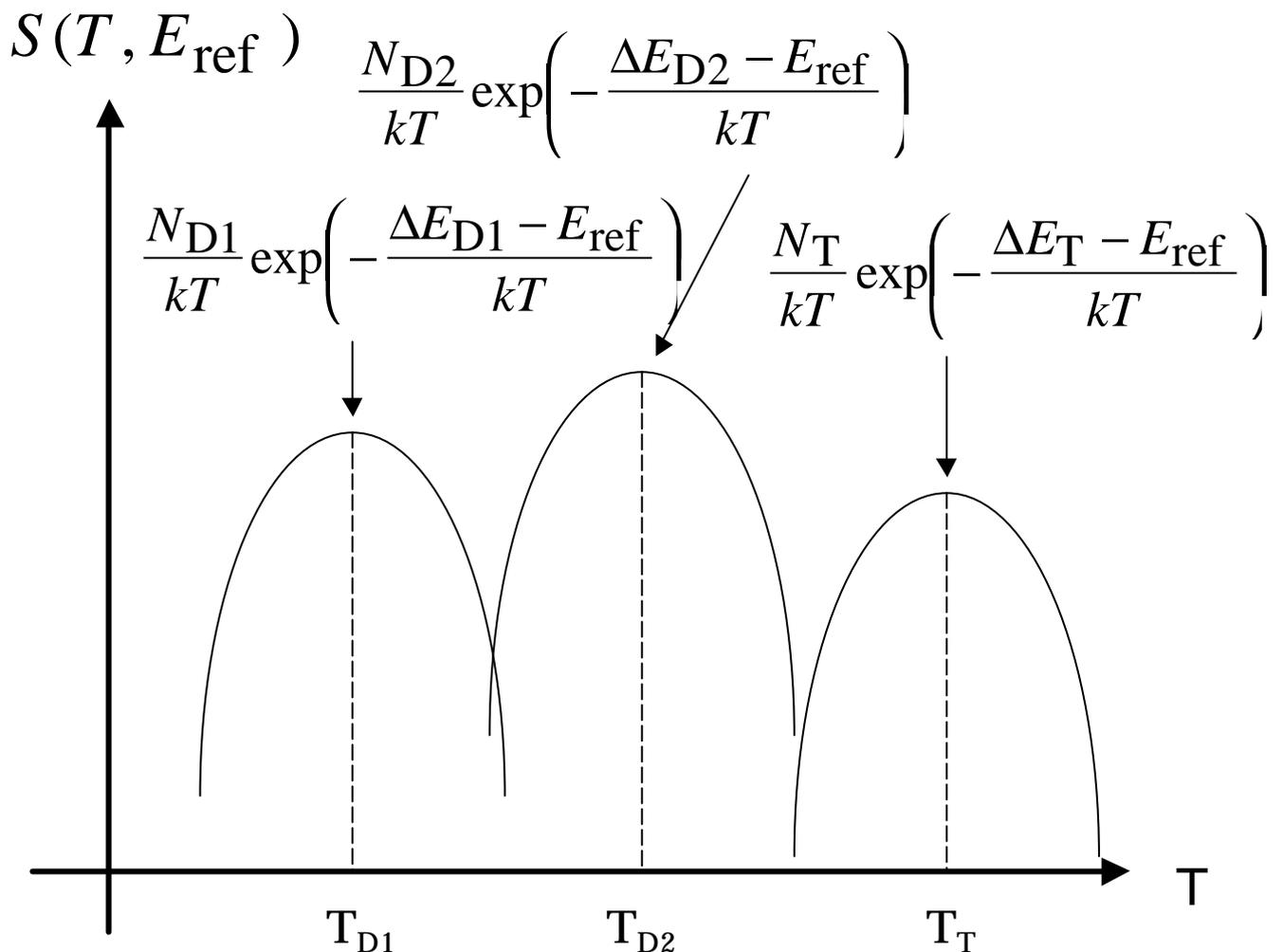
が含まれる。

$\frac{N_i}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_i - E_{\text{ref}}}{kT}\right)$ は、温度 $T_{\text{peak}} = \frac{\Delta E_i - E_{\text{ref}}}{k}$ で

ピーク値 $\frac{N_i}{kT_{\text{peak}}} \exp(-1)$ になる。

例えば、2種類のドナーと1種類のトラップの場合

($\Delta E_{D1} < \Delta E_{D2} < \Delta E_T$)

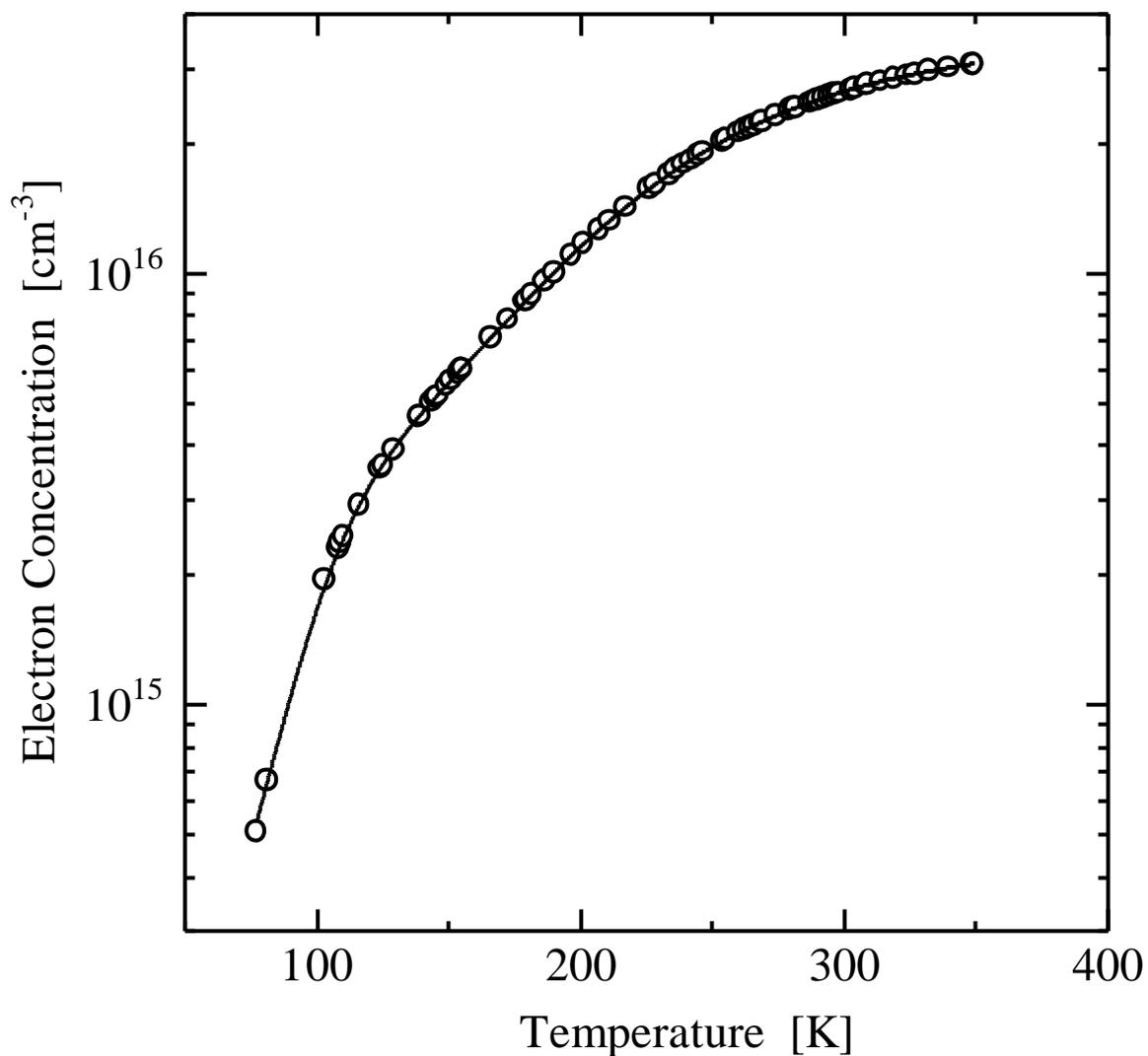


$$\Delta E_{D1} = kT_{D1} + E_{\text{ref}} \quad N_{D1} = S(T_{D1})kT_{D1} / \exp(-1)$$

$$\Delta E_{D2} = kT_{D2} + E_{\text{ref}} \quad N_{D2} = S(T_{D2})kT_{D2} / \exp(-1)$$

$$\Delta E_T = kT_T + E_{\text{ref}} \quad N_T = S(T_T)kT_T / \exp(-1)$$

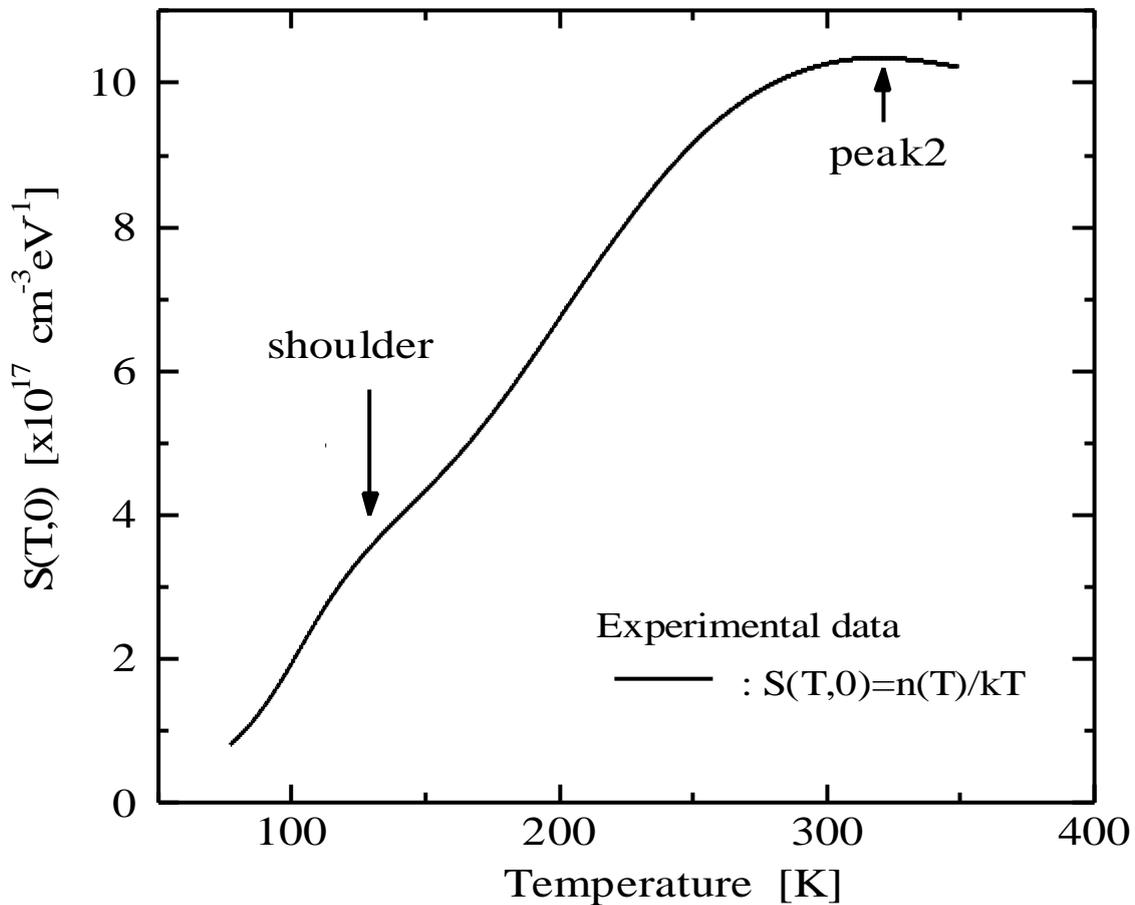
3 . 窒素をドーブした 4H SiC のホール効果測定から ドナー密度とドナー準位の評価



丸印：実験データ

実線：spline 関数を用いて、実験データを補間

$$S(T, E_{\text{ref}}) \equiv \frac{n(T)}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$



ピークが1つ → 2種類のドナー準位が存在
 ショルダーが1つ

peak2

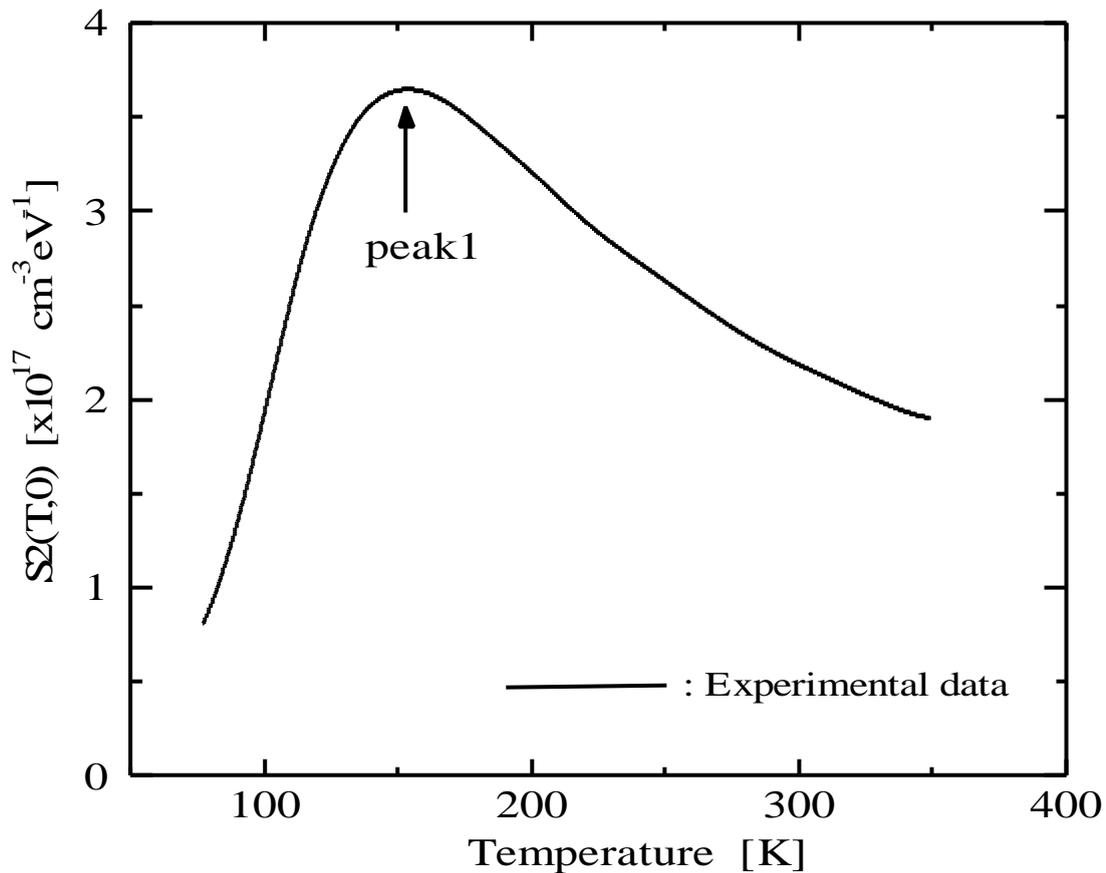
$$T_{\text{peak2}} = 319 \text{ K}, \quad S(T_{\text{peak2}}, 0) = 1.04 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$$



$$\Delta E_{D2} = 124 \text{ meV}, \quad N_{D2} = 3.04 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3},$$

深いドナーの影響を取り除いた関数

$$S2(T, E_{\text{ref}}) \equiv S(T, E_{\text{ref}}) - \frac{N_{D2}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{D2} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) F_D(\Delta E_{D2})$$



peak1

$$T_{\text{peak1}} = 154 \text{ K}, \quad S2(T_{\text{peak1}}, 0) = 3.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$$



$$\Delta E_{D1} = 65.3 \text{ meV}, \quad N_{D1} = 6.45 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_A = 6.14 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

得られた結果

$$\Delta E_{D1} = 65.3 \text{ meV}, N_{D1} = 6.45 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

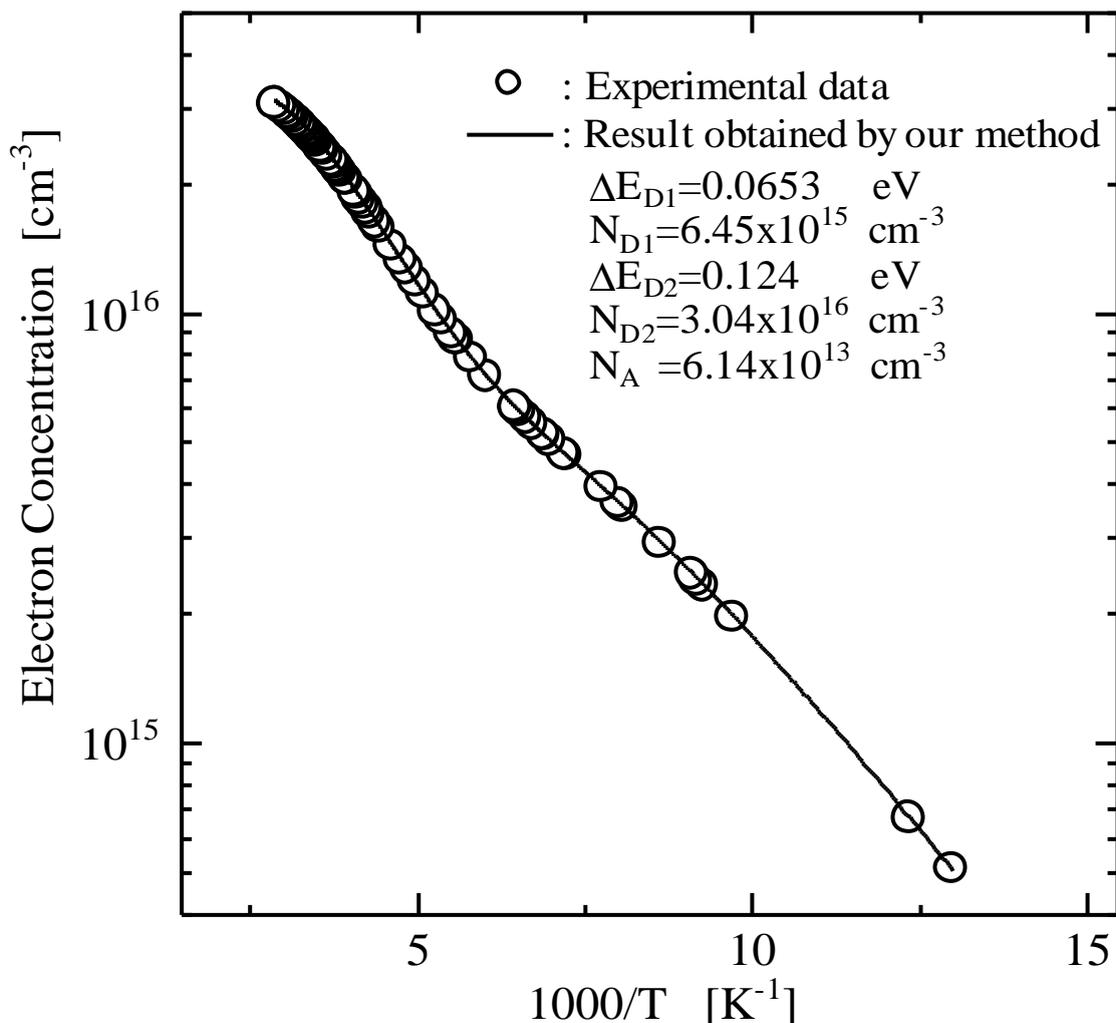
$$\Delta E_{D2} = 124 \text{ meV}, N_{D2} = 3.04 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_A = 6.14 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

から $n(T)$ を計算する。

$$n(T) = N_C(T) \exp\left(-\frac{\Delta E_F}{kT}\right)$$

$$n(T) = \sum_{i=1}^2 N_{Di} [1 - f_D(\Delta E_{Di})] - N_A$$



非常に良い一致をしている。

E_{D1} [meV]	65.3
N_{D1} [cm^{-3}]	6.45×10^{15}
E_{D2} [meV]	124
N_{D2} [cm^{-3}]	3.04×10^{16}
N_A [cm^{-3}]	6.14×10^{13}

報告されているドナー準位 (IR、PL 等)

hexagonal-like site 45 meV ~ 66 meV

cubic-like sites 92 meV ~ 124 meV

5 . まとめ

- A. ホール効果測定から求められる多数キャリア密度の温度依存性から、高精度でドーパントおよびトラップを評価できる方法を提案した。
- B. 窒素をドーブした 4H SiC から、二種類のドナー準位とアクセプタ密度が精度良く評価できた。

E_{D1} [meV]	65.3
N_{D1} [cm^{-3}]	6.45×10^{15}
E_{D2} [meV]	124
N_{D2} [cm^{-3}]	3.04×10^{16}
N_A [cm^{-3}]	6.14×10^{13}

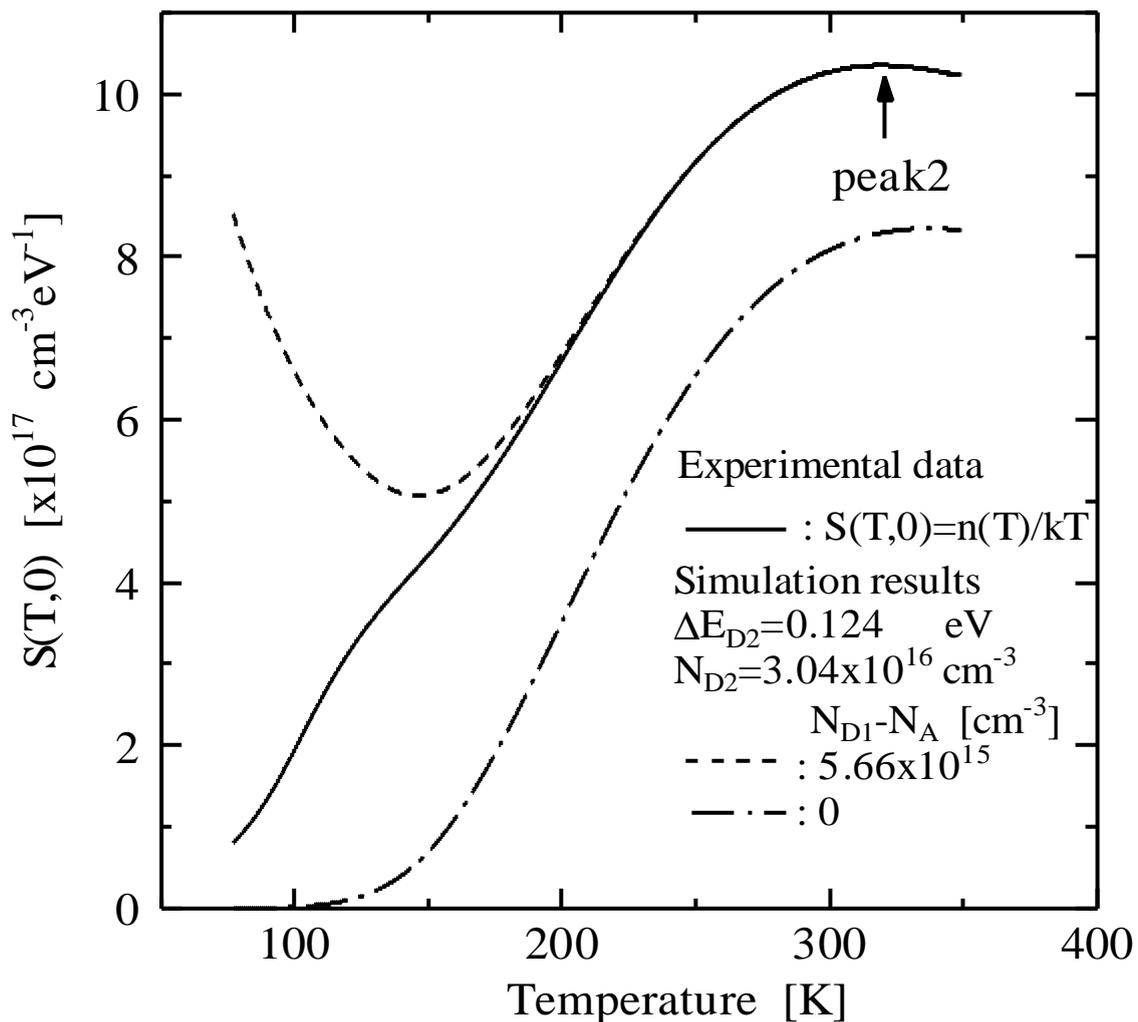
peak2

$$T_{\text{peak2}} = 319 \text{ K}, \quad S(T_{\text{peak2}}, 0) = 1.04 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$$



$$\Delta E_{D2} = 0.124 \text{ eV}, \quad N_{D2} = 3.04 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3},$$

$$N_{D1} - N_A = 5.66 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$



実線と破線との差：浅いドナーの寄与を一定と考えているから。

実線と一点鎖線との差：浅いドナーとアクセプタの分

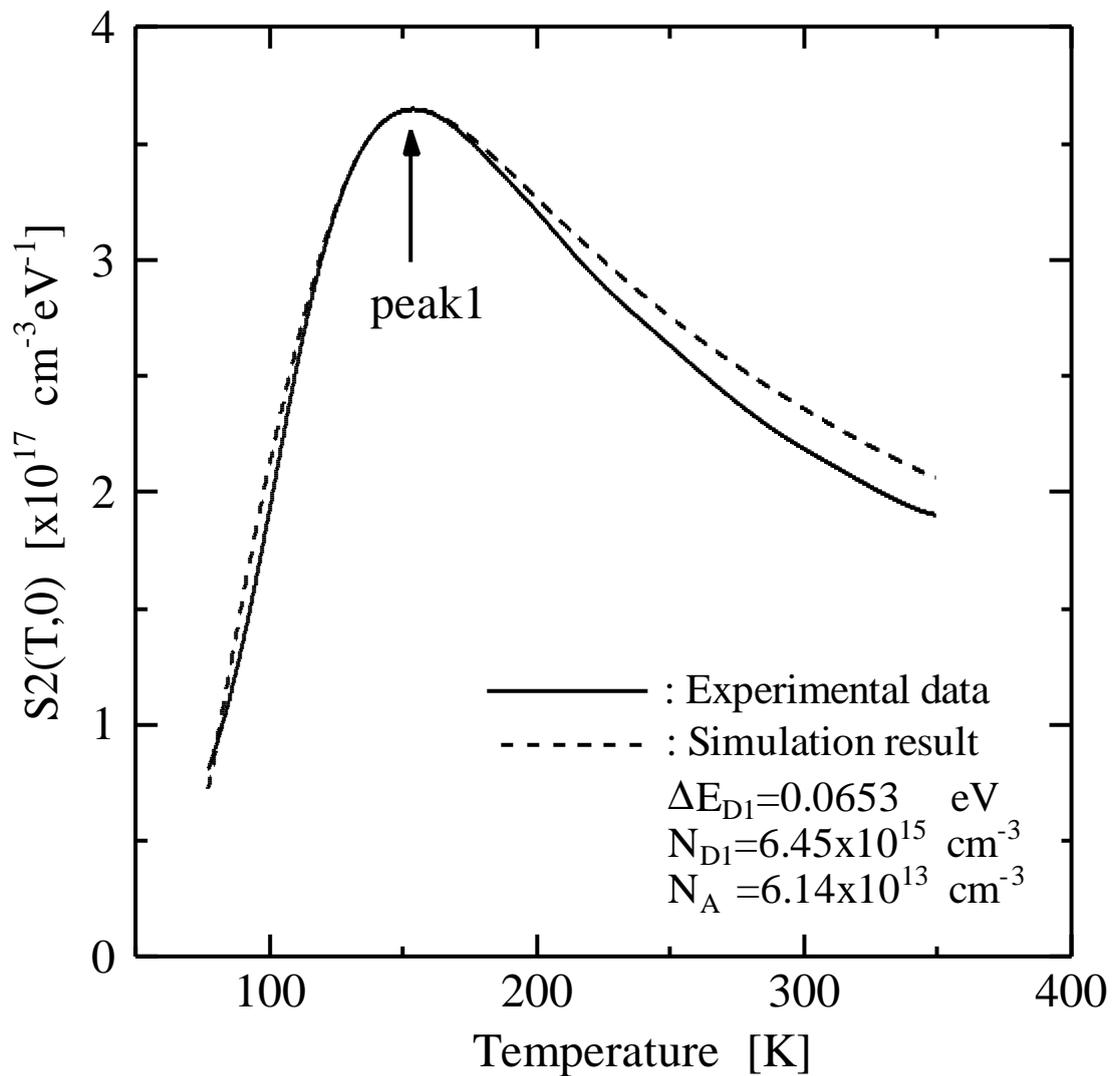
peak1

$$T_{\text{peak1}} = 154 \text{ K}, \quad S2(T_{\text{peak1}}, 0) = 3.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$$



$$\Delta E_{D1} = 0.0653 \text{ eV}, \quad N_{D1} = 6.45 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_A = 6.14 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

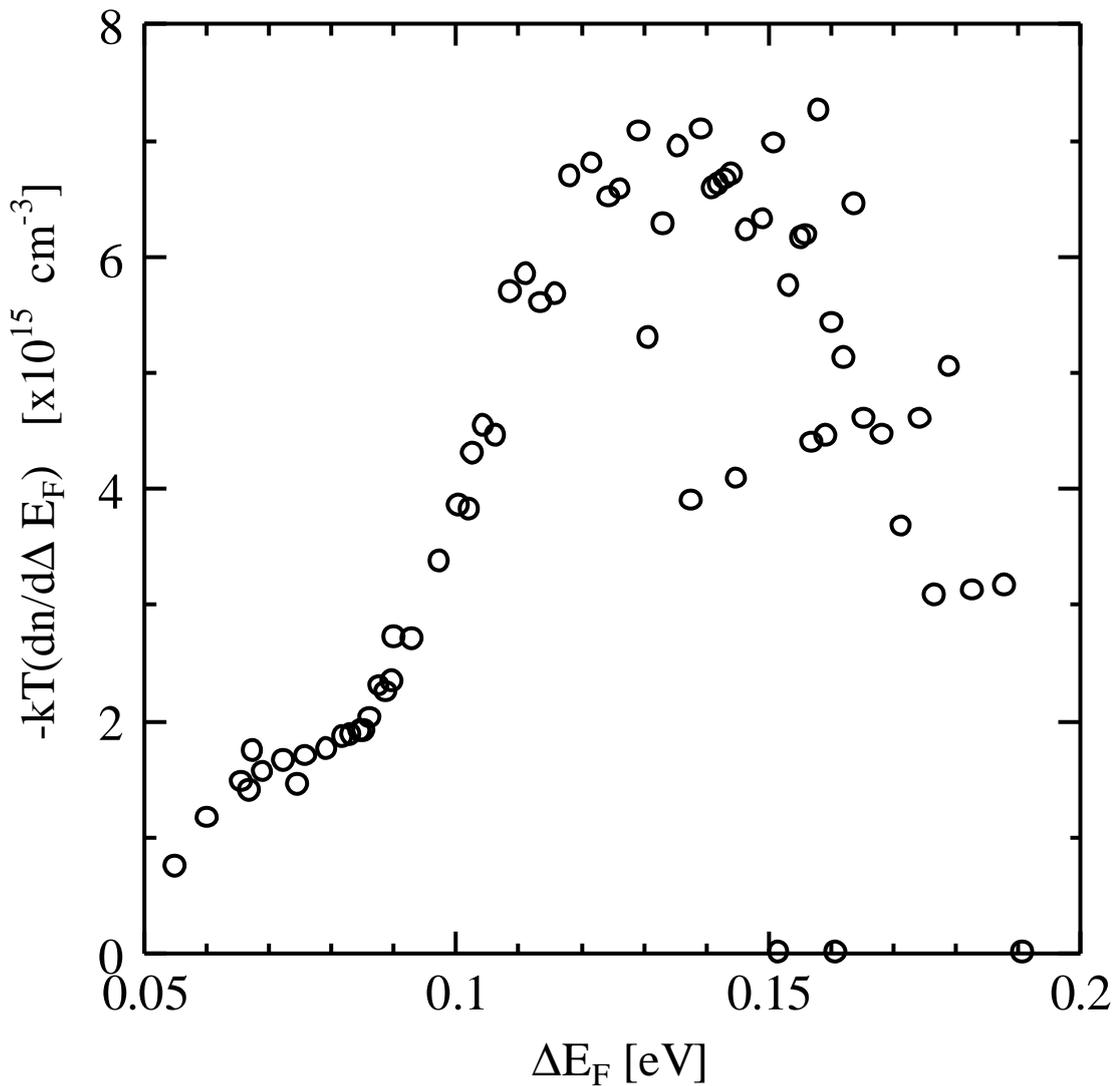


良く一致していることから、他にドナーが存在しない。

c. Hoffmann の方法

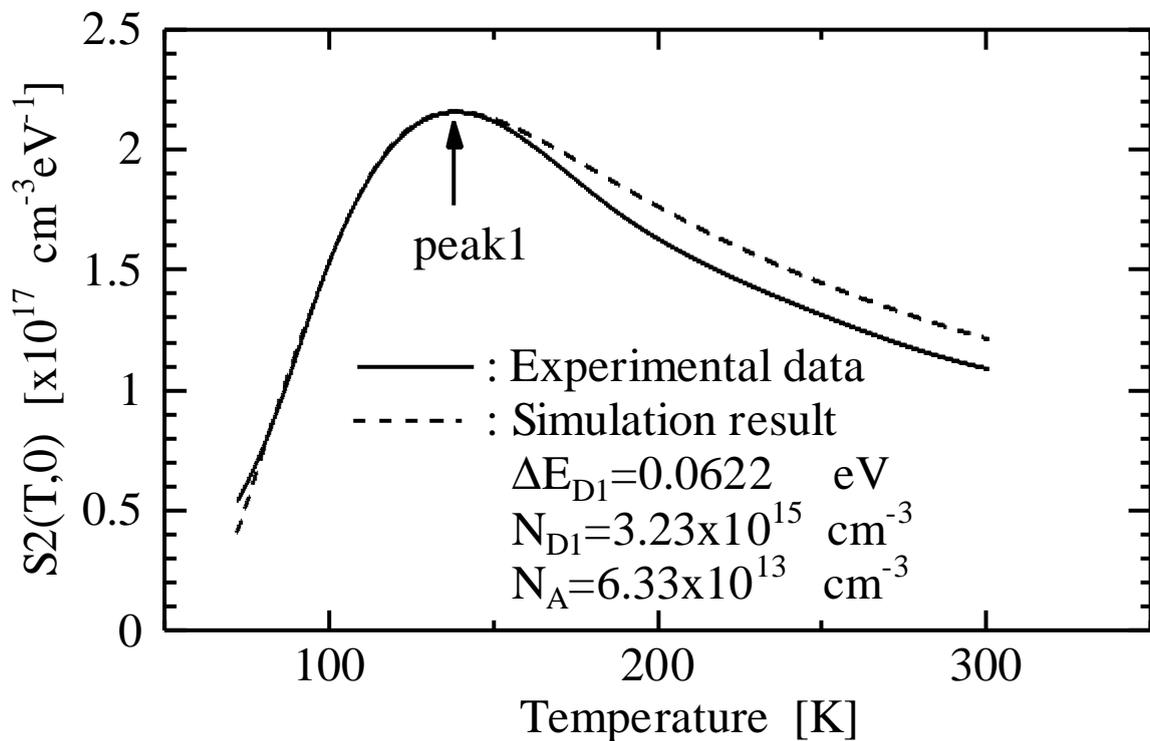
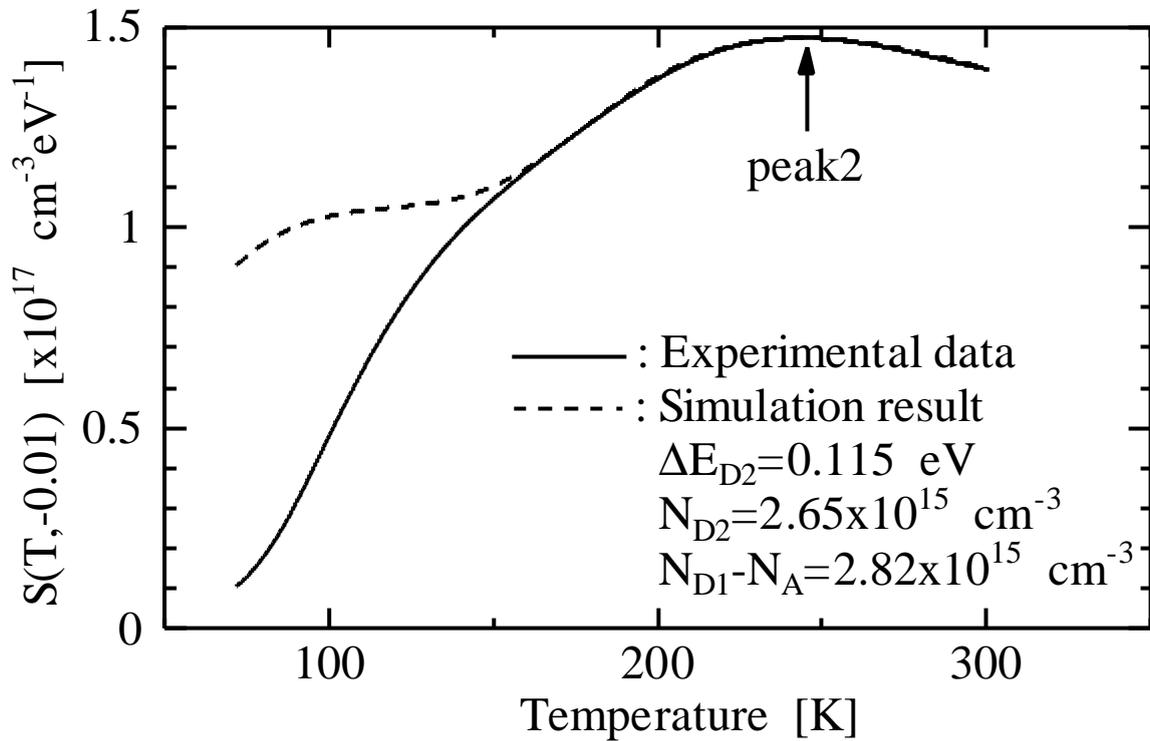
各エネルギー準位に対応してピークが現れる関数を定義する。

$$-kT \frac{dn(T)}{d\Delta E_F} \text{ と } \Delta E_F \text{ のグラフを描く}$$



微分しているため、ピークを決めにくい

窒素をドープした 4H SiC



	試料 1	試料 2
E_{D1} [eV]	0.0653	0.0622
N_{D1} [cm^{-3}]	6.45×10^{15}	3.23×10^{15}
E_{D2} [eV]	0.124	0.115
N_{D2} [cm^{-3}]	3.04×10^{16}	2.65×10^{15}
N_A [cm^{-3}]	6.14×10^{13}	6.33×10^{13}

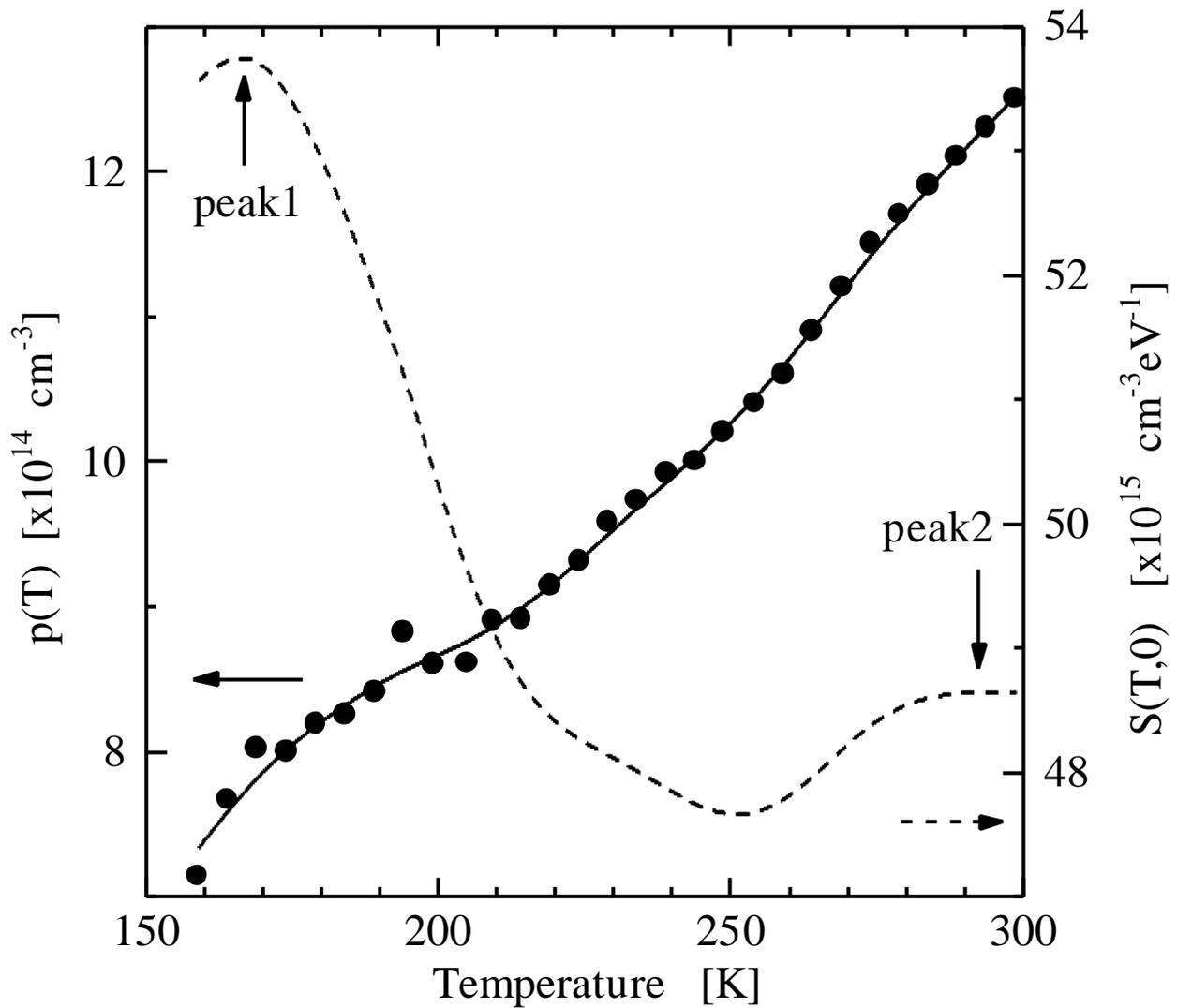
報告されているドナー準位 (IR、PL 等)

hexagonal-like site 45 meV ~ 66 meV

cubic-like sites 92 meV ~ 124 meV

10 MeV の陽子線を $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 照射したときに形成された、p 型 Si 中のトラップ評価

(アクセプタ密度 : $2.19 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)



	E_T [eV]	N_T [cm^{-3}]
peak1	0.0949	4.75×10^{14}
peak2	0.191	5.87×10^{14}