

多数キャリア密度の温度依存性を用いた 新しい評価方法による SiC 中のドナー評価

松浦秀治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

半導体中のドーパント密度とエネルギー準位の評価
の必要性

2 . ホール効果測定による結果の一般的な評価方法

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

3 . 新しい評価方法の提案

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

4 . 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

5 . まとめ

1 . はじめに

新しい半導体の成長

- 族半導体（発光デバイスを目指して）

SiC、ダイヤモンド（高温動作・高電力用デバイスを目指して）

電子デバイスとして利用するには、 pn 制御が必要

最適なドーパント（ドナー、アクセプタ）

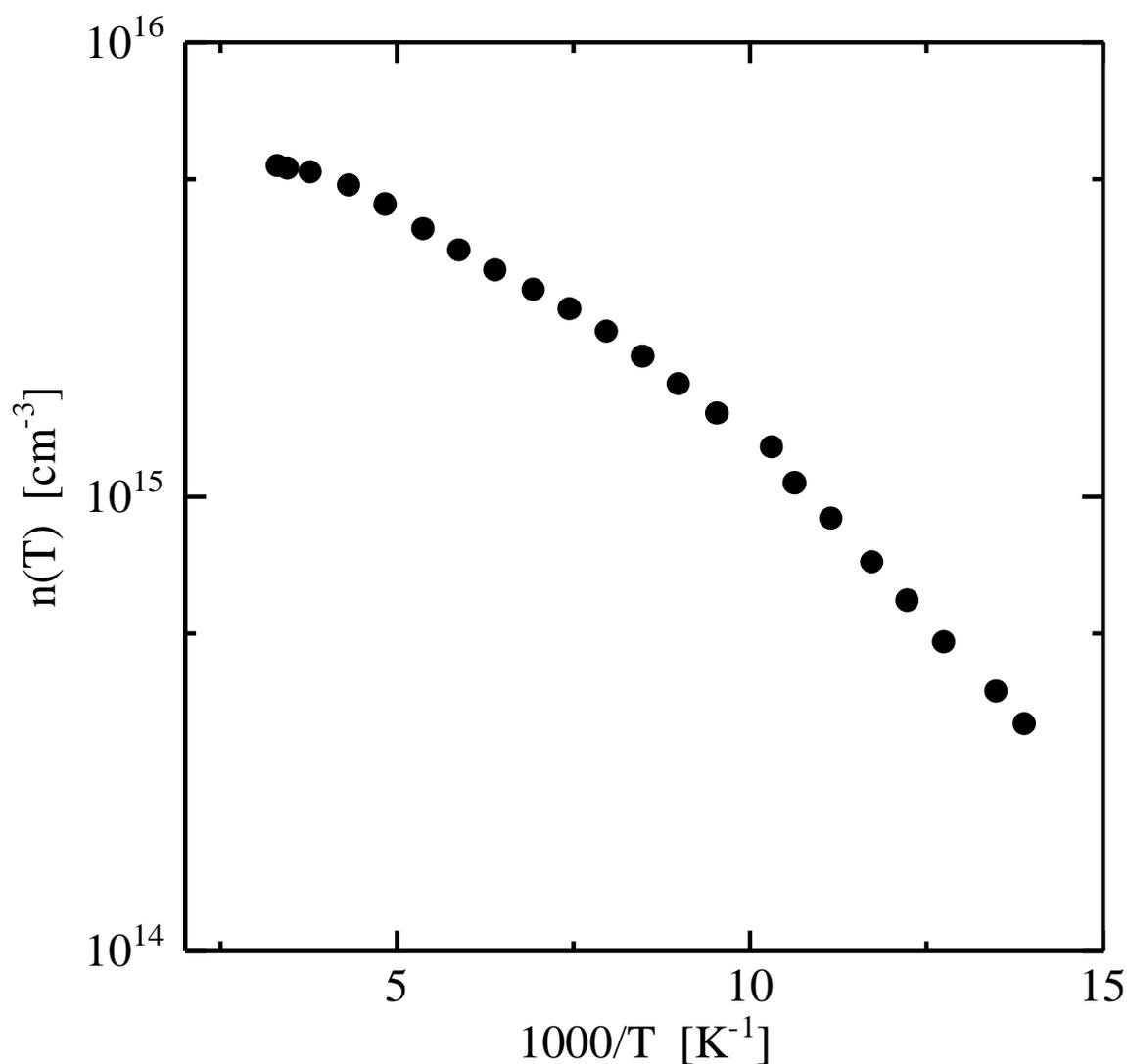
- ドーパしたドーパントのほとんどがドナーまたはアクセプタとしてはたらく
- イオン化エネルギー（エネルギー準位）が小さい

半導体中のドーパントの密度とエネルギー準位を正確に評価できる方法の開発

窒素をドーピングした 4H SiC

- 窒素をドーピングすると、六方晶と立方晶に入り、二種類のドナー準位が形成される。
- p 型の上に成長させるため、アクセプタが混入する。

ホール効果測定からのデータ



このデータから、ドナー密度 N_D とドナー準位 E_D を評価するには？

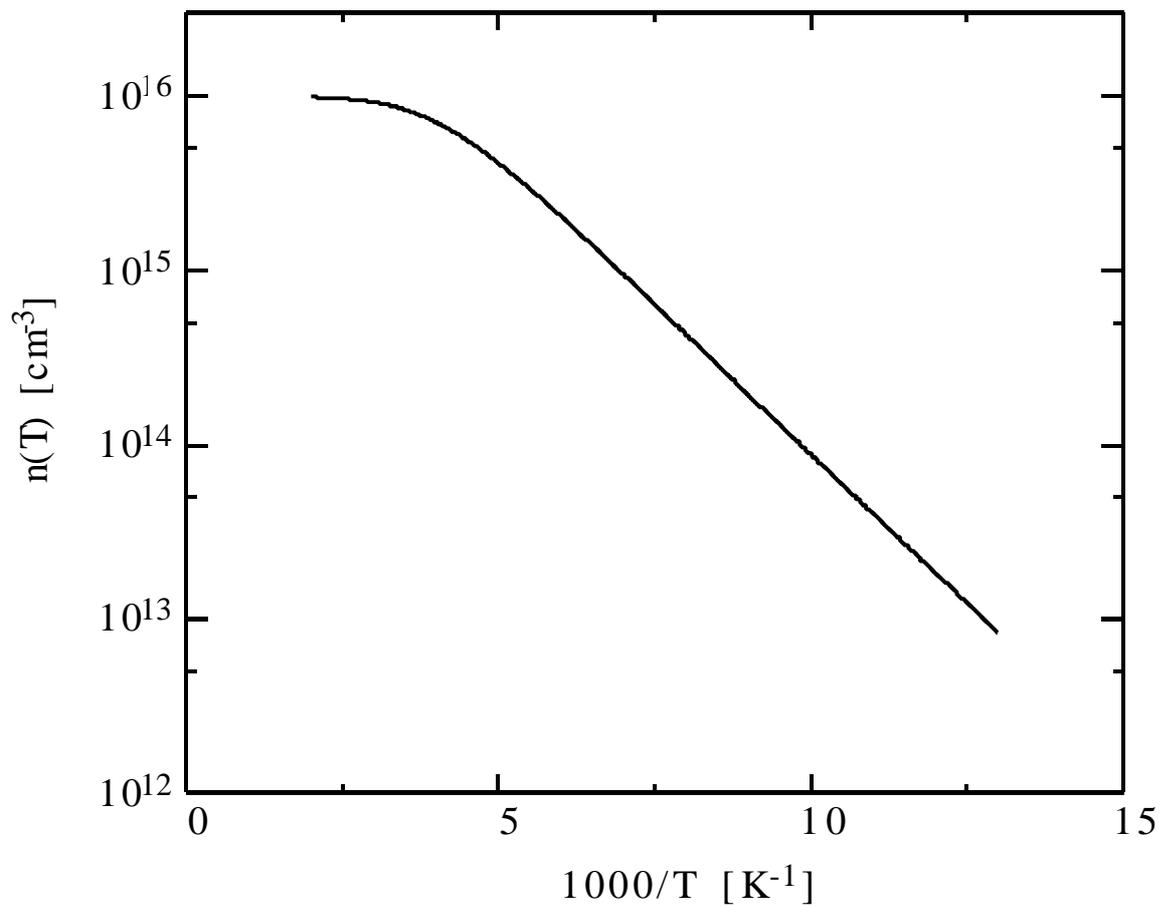
2. ホール効果測定による結果の一般的な評価方法

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 $N_D=1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

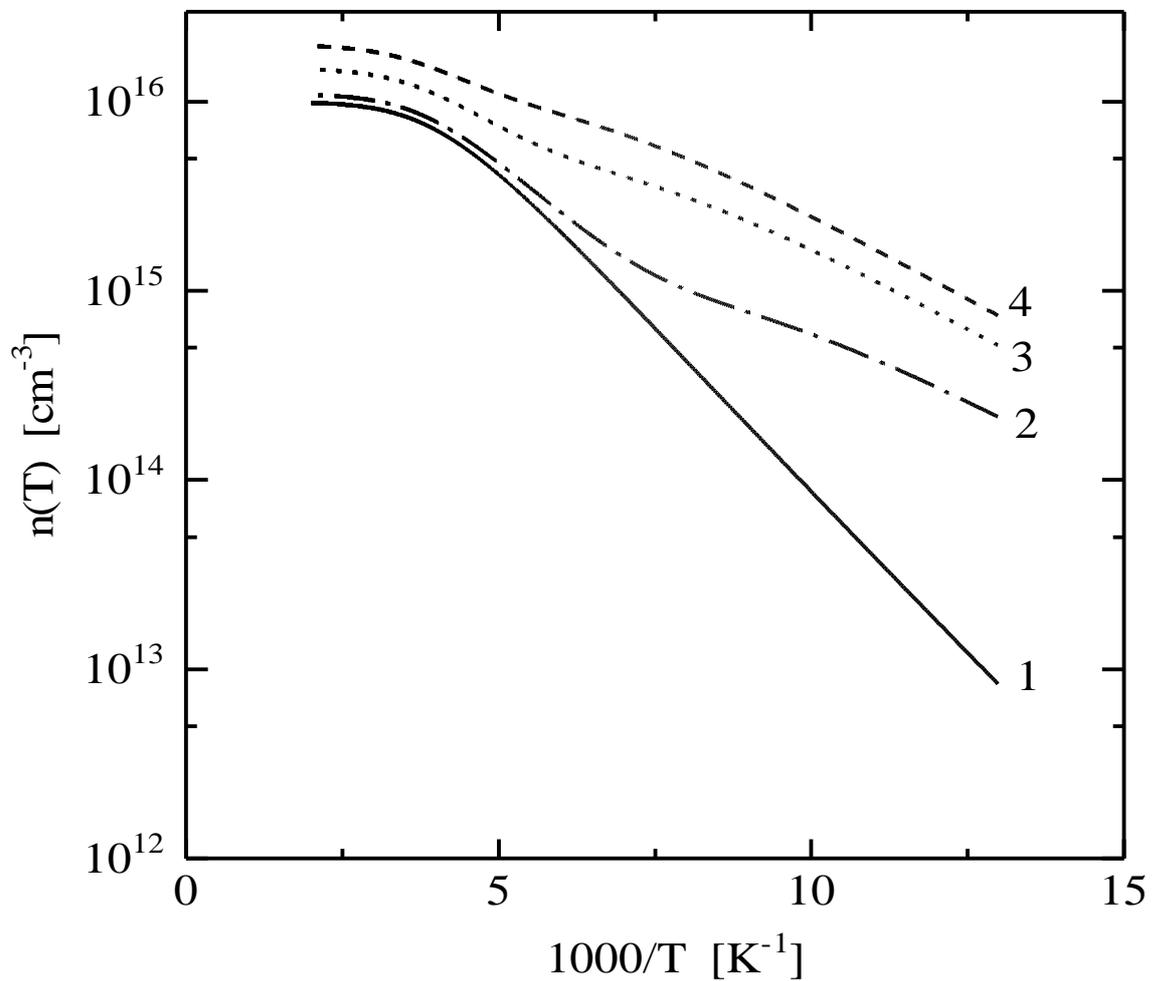
傾きから $E_D=127 \text{ meV} \leftarrow n(T) \propto \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{2kT}\right)$

2種類のドナーが存在する場合

$$E_{D1}=124 \text{ meV}, N_{D1}=1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

No.	E_{D2} [meV]	N_{D2} [$\times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$]
1	64	0
2		0.1
3		0.5
4		1

シミュレーション結果



飽和値？

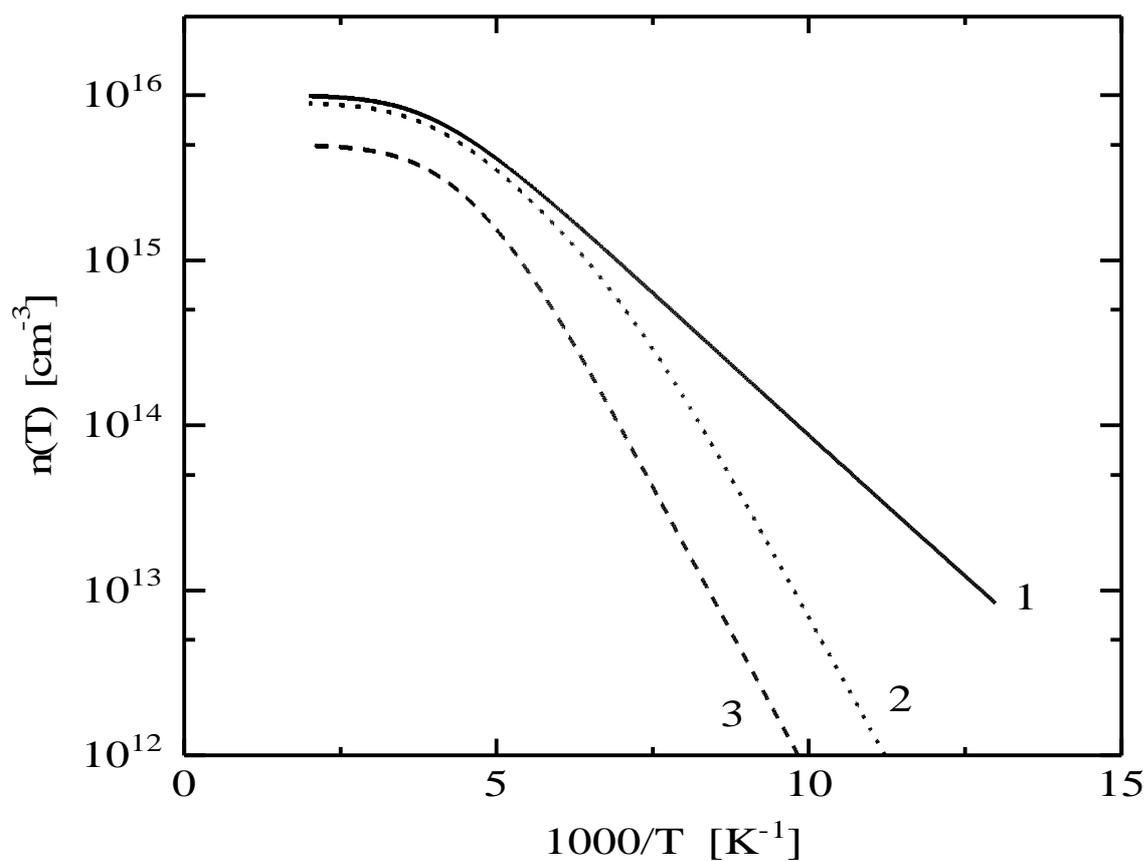
傾き？

アクセプタが混在する場合

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

No.	N_A [$\times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$]
1	0
2	0.1
3	0.5

シミュレーション結果



評価結果

No.	E_D [meV]	N_D [$\times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$]
1	127	1
2	251	0.89
3	255	0.49

ΔE_D と N_D を間違っって評価

b. カーブ・フィッティング

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

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

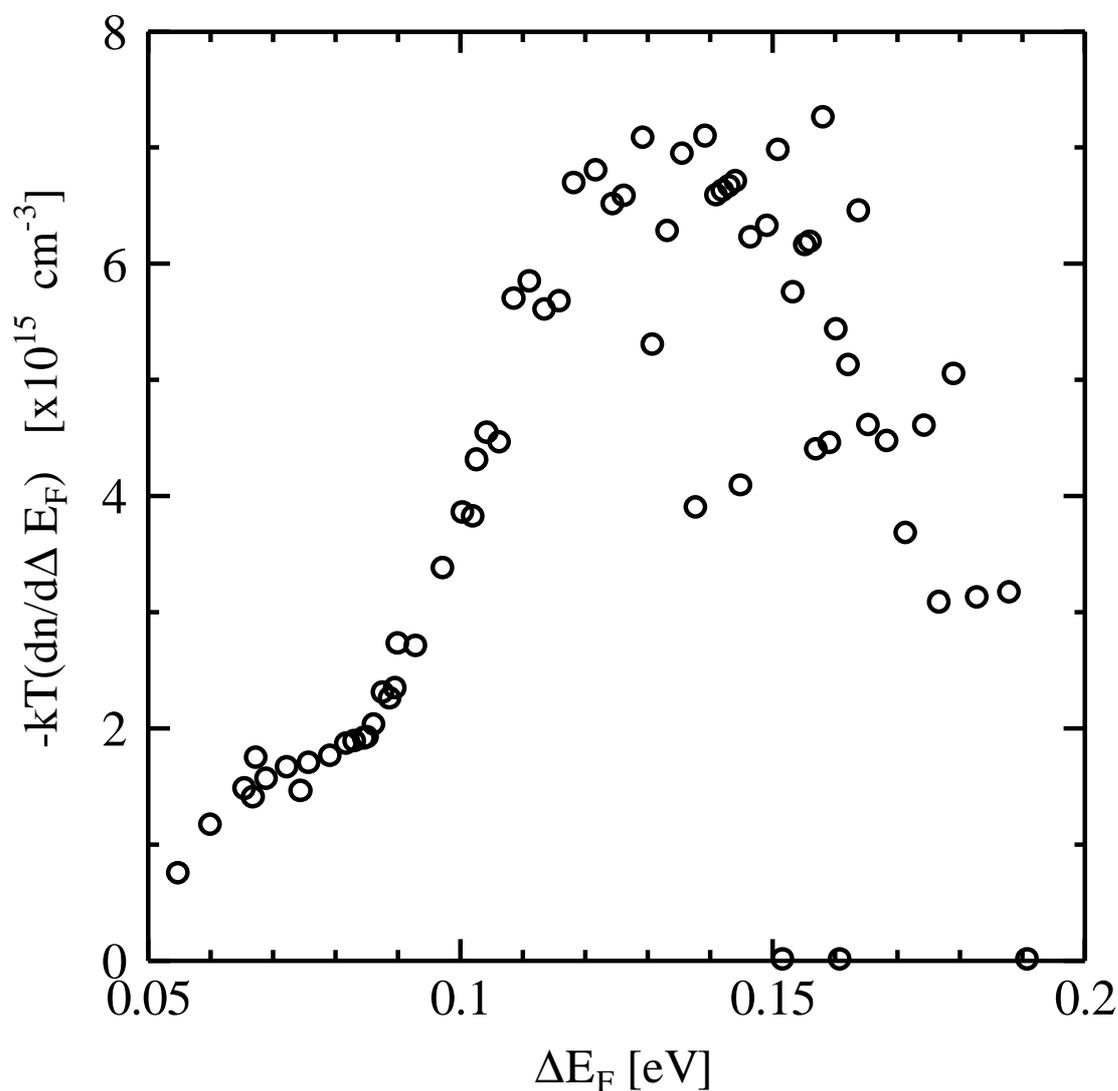
上式から、 n 種類のドナー (N_{Di} , E_{Di}) と N_A を求める。

- 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。

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

3 . 新しい評価方法の提案

- A. データを微分しない
- B. ドーパントを1つ1つ高精度で決定する。

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

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

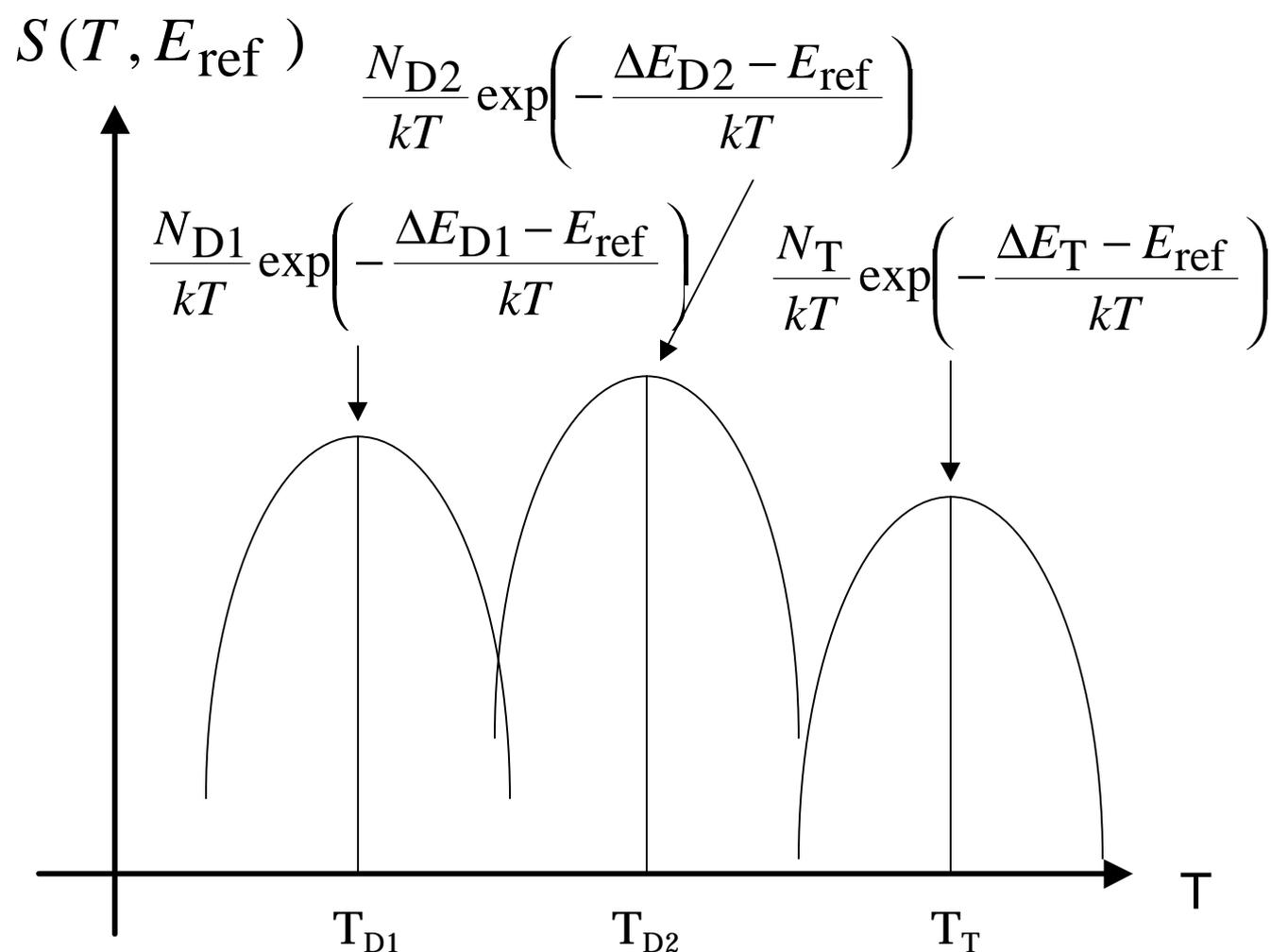
が含まれる。

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

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

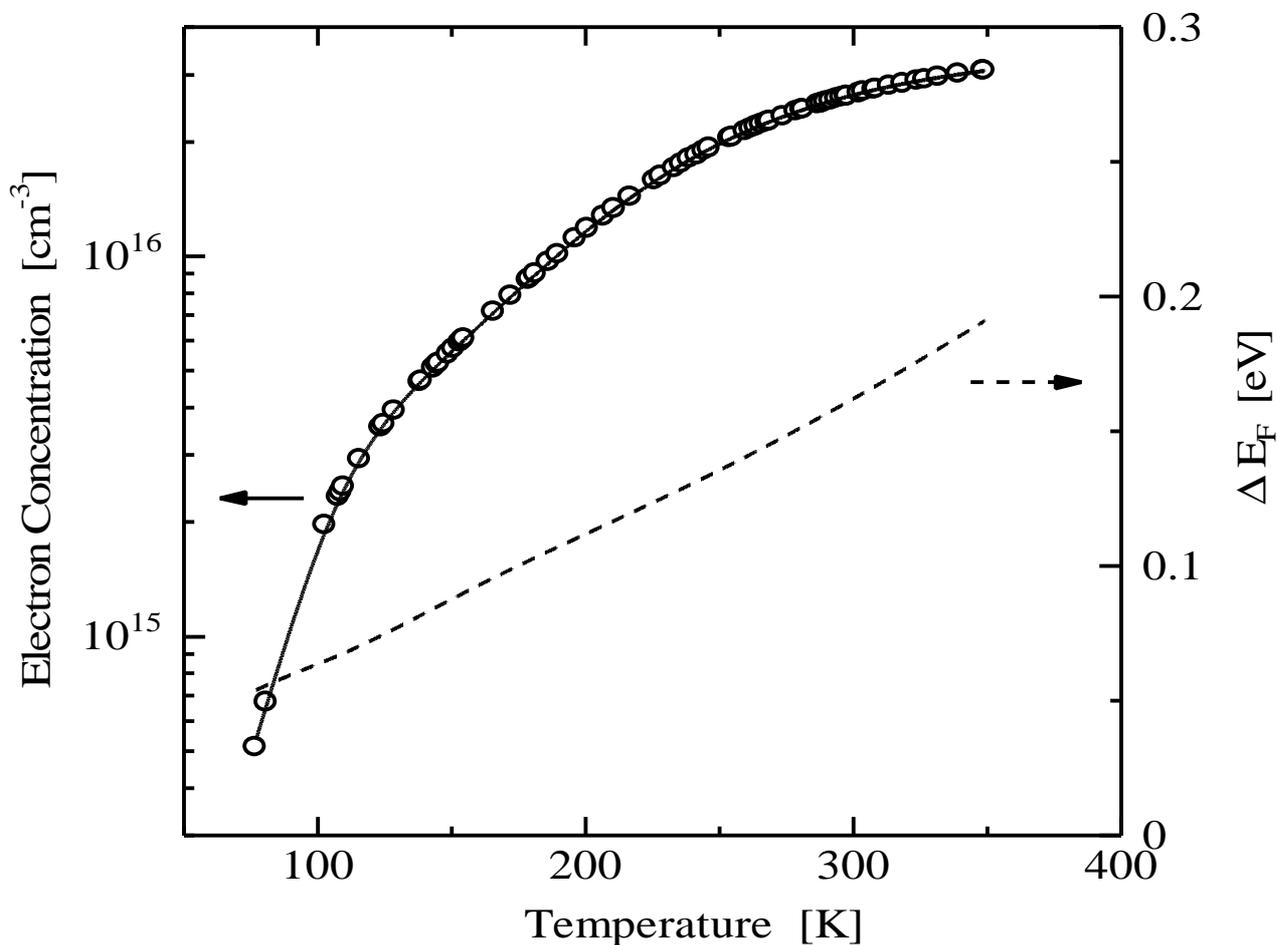


$$\Delta E_{D1} = kT_{D1} + E_{\text{ref}} \quad N_{D1} = S(T_{D1})kT_{D1} / \exp(-1)$$

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

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

4 . 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

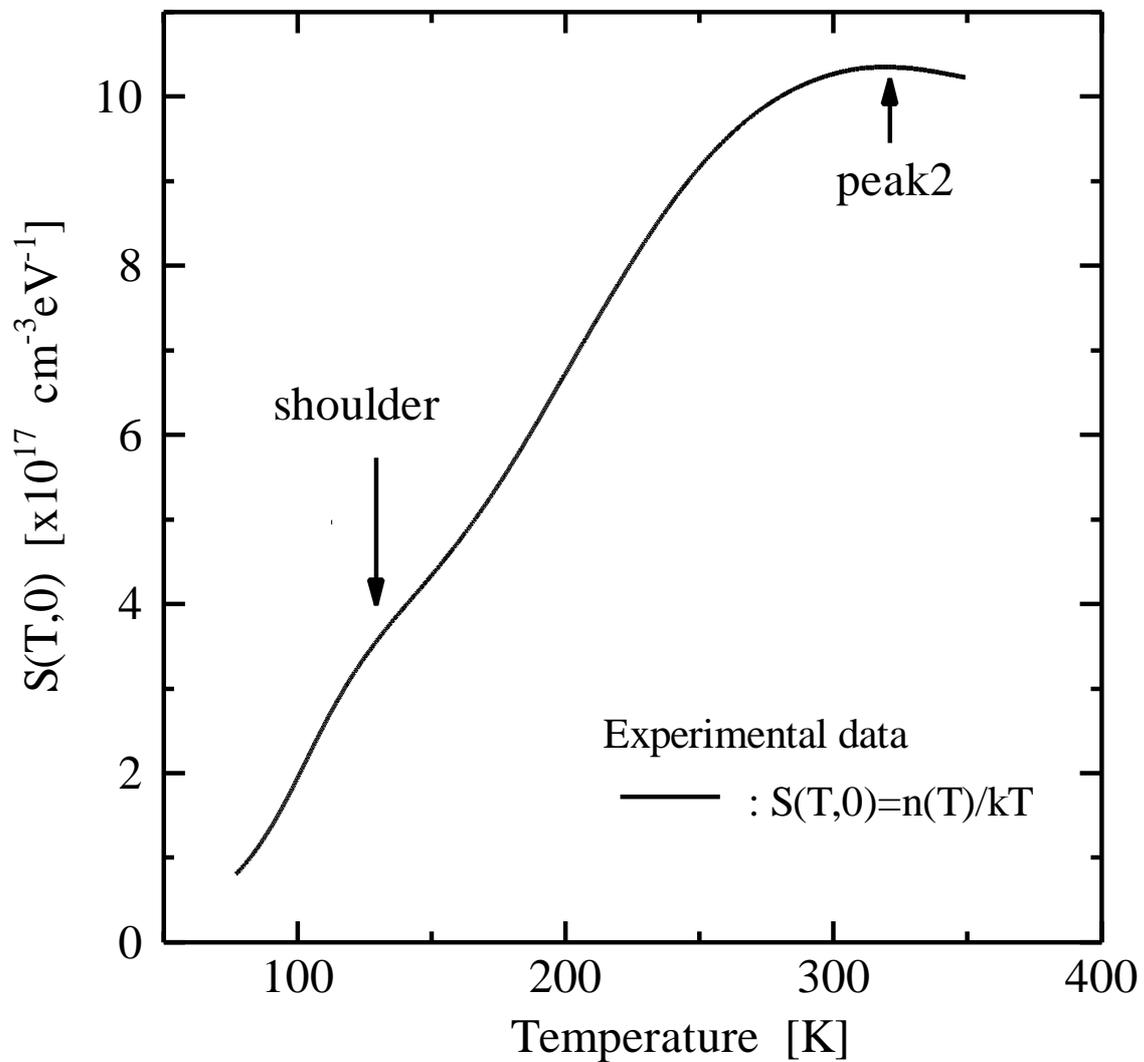
破線： ΔE_F

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

$$N_C(T) = 2.71 \times 10^{15} T^{3/2} \text{ cm}^{-3}$$

だいたい 0.05 eV から 0.2 eV までの E_D が評価できる。

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



ピークが1つ

ショルダーが1つ



2種類のドナー準位が存在

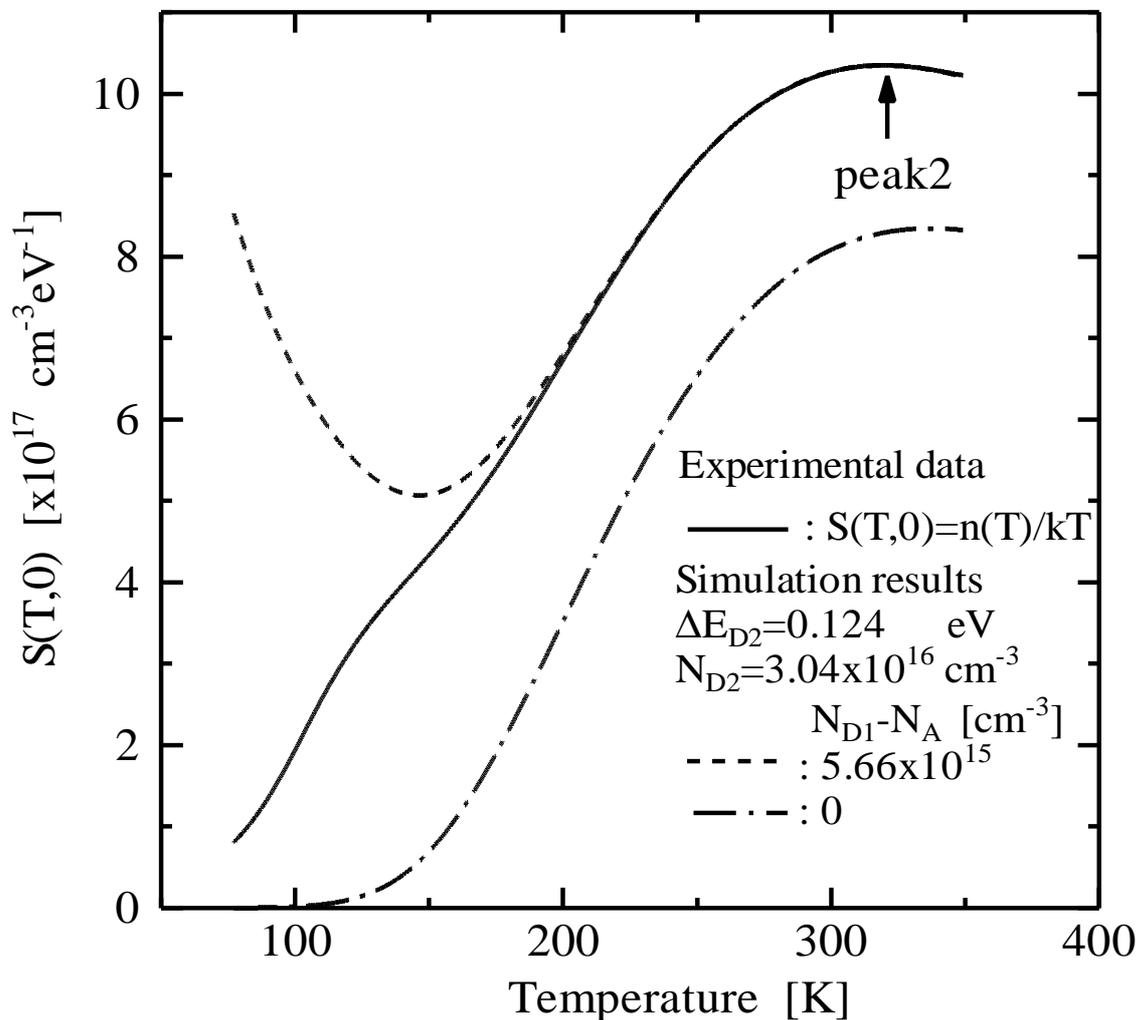
peak2

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



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

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

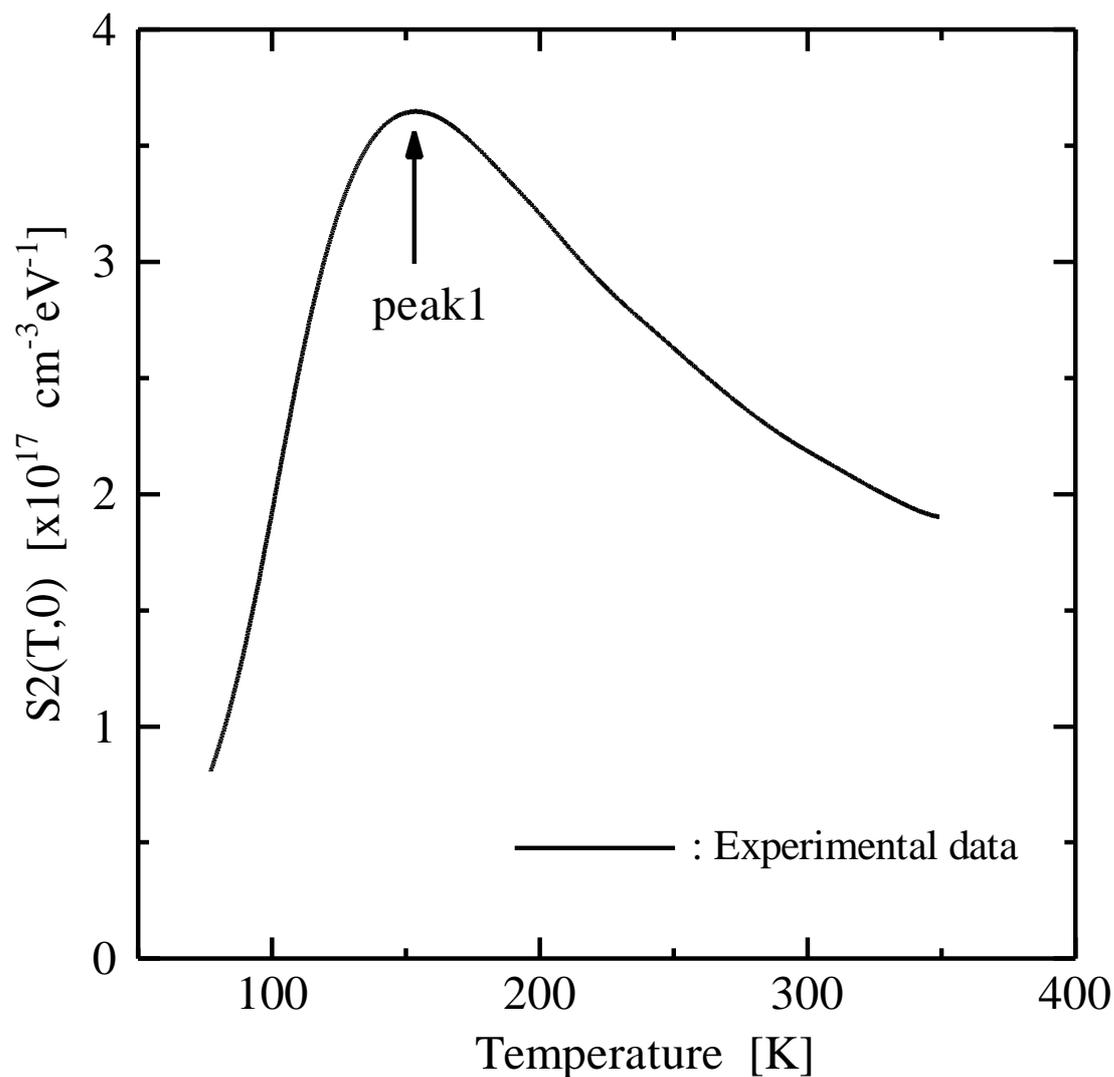


実線と破線との差：浅いドナーの寄与を一定と考えているから。

実線と一点鎖線との差：浅いドナーとアクセプタの分

深いドナーの影響を取り除いた関数

$$S_2(T, E_{\text{ref}}) \equiv S(T, E_{\text{ref}}) - \frac{N_{\text{D}2}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{D}2} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) F_{\text{D}}(\Delta E_{\text{D}2})$$



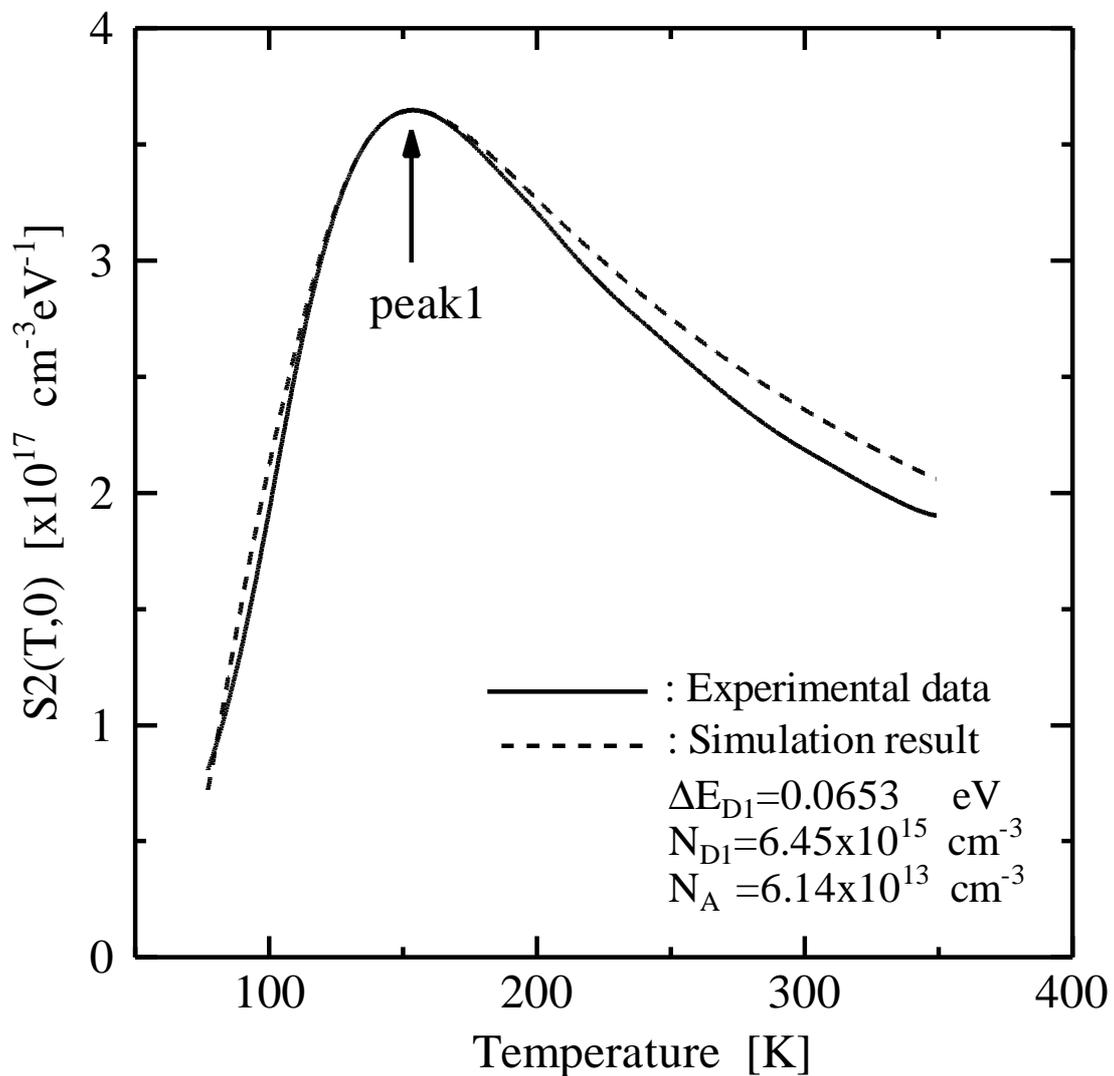
peak1

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



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

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



良く一致していることから、他にドナーが存在しない。

得られた結果

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

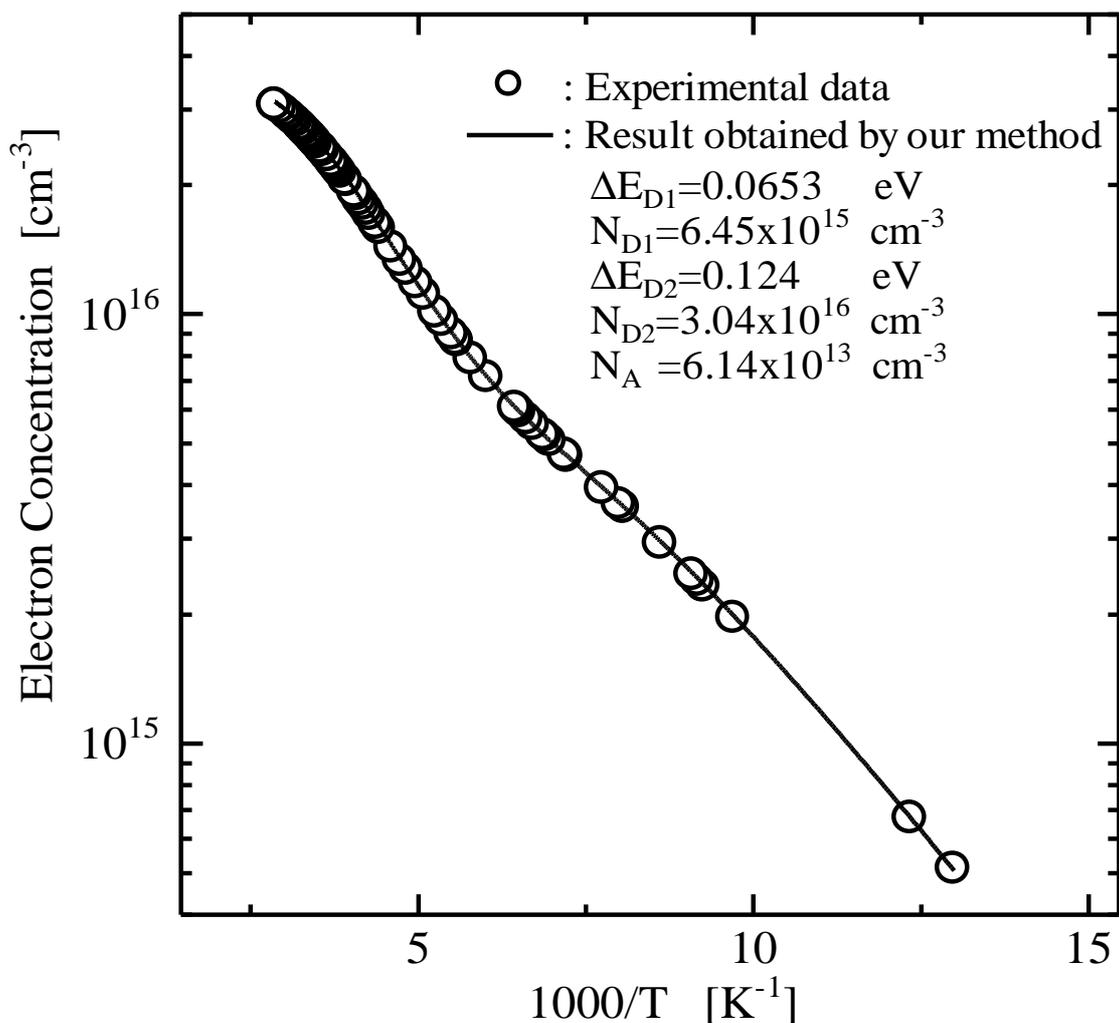
$$\Delta E_{D2} = 0.124 \text{ eV}, \quad N_{D2} = 3.04 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

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

から $n(T)$ を計算する。

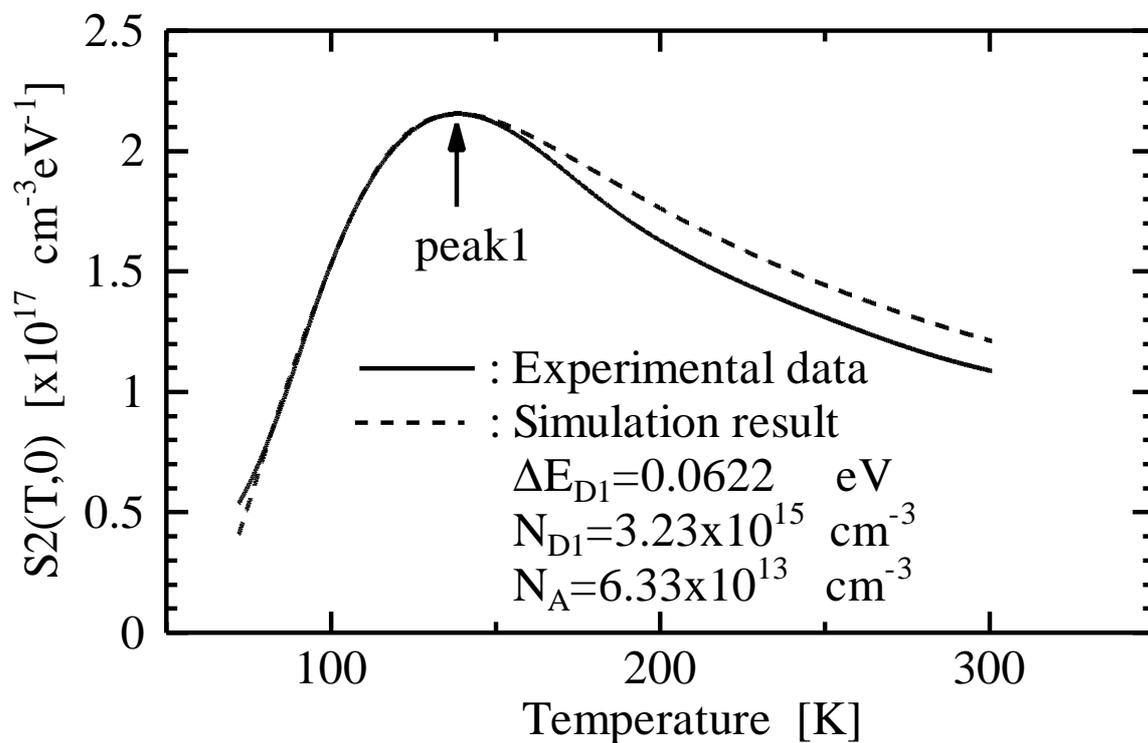
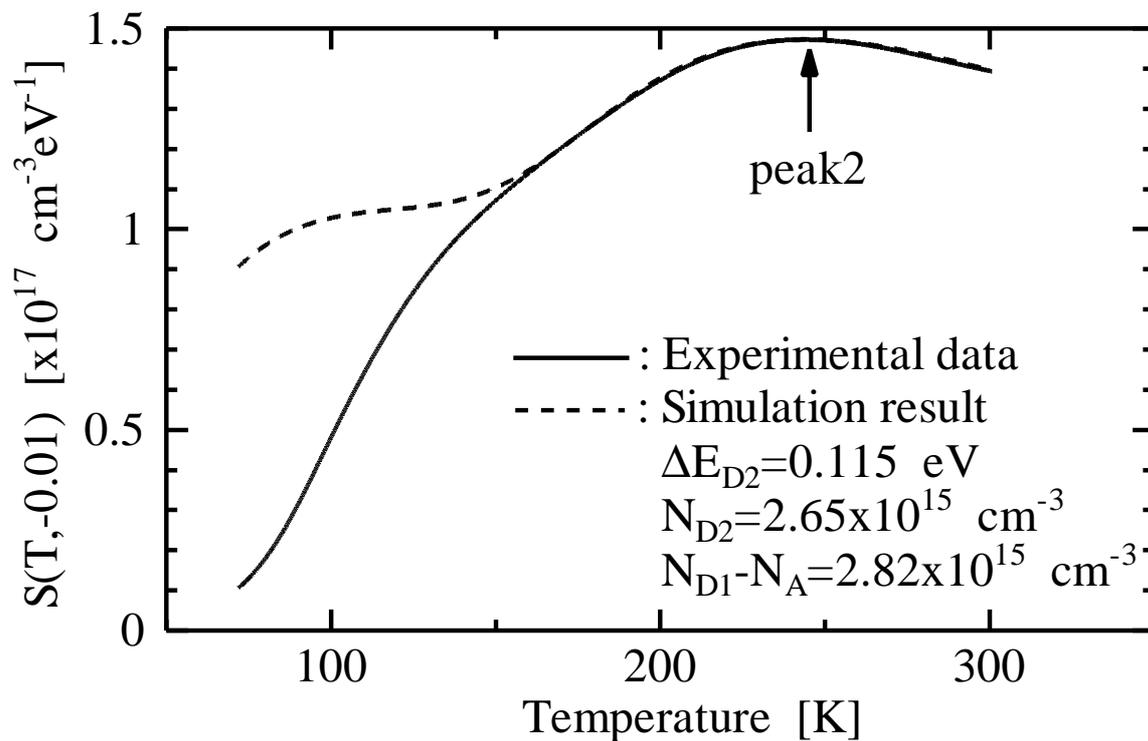
$$n(T) = N_C(T) \exp\left(-\frac{\Delta E_F}{kT}\right)$$

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



非常に良い一致をしている。

他の窒素をドープした 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}

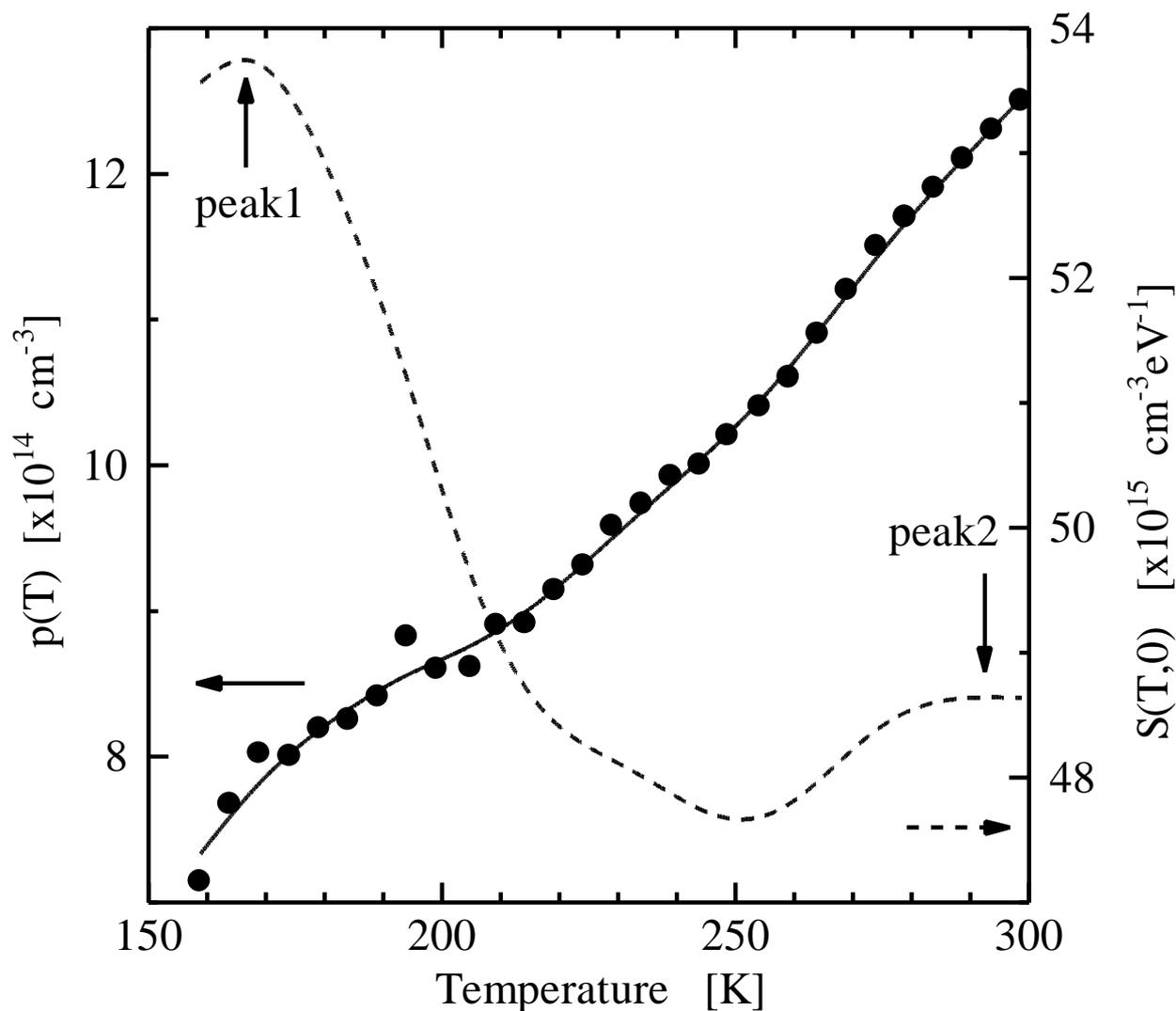
報告されているドナー準位 (IR、PL 等)

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}

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。
- C. 上記のほかに、放射線（陽子線・電子線）を照射して、形成された Si 中のトラップを高精度で評価できるようになった。

Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) 6034.

謝辞

データ解析の一部を手伝っていただいた松浦研究室の卒業研究生の黒田雅世さんと平野善信君に感謝します。