

Si₂(CH₃)₆を用いた3C-SiCの ドナー準位の評価 - ホール効果測定を用いた評価 -

松浦 秀治、増田 泰一*、西野 茂弘*

大阪電気通信大学

*京都工芸繊維大学

1. はじめに
 - a. 報告されている3C-SiCのドナー準位
 - b. ドナー準位がドナー密度の関数？
 - c. ドナーの評価に関する問題点
2. 新しい評価方法

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

3. 実験結果と考察
4. まとめ

1.はじめに

- 報告されている3C-SiCのドナー準位 (ΔE_D)

- a. PL (フォトルミネッセンス)

約 54 meV (窒素)

約 95 meV (燐)

約118 meV (窒素)

- b. ホール効果測定

(ドナー準位が 1種類として計算した結果)

約 15 meV $\left(\begin{array}{l} N_D > 10^{18} \text{ cm}^{-3} \\ N_A / N_D \approx 0.9 \end{array} \right)$

30 ~ 40 meV $\left(N_D \approx 10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3} \right)$

約 50 meV $\left(N_D \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3} \right)$

- ドナー準位がドナー密度の関数？

(ドナー準位が 1種類として計算した結果)

$$\Delta E_D(N_D) = \Delta E_D(0) - aN_D^{1/3}$$

$$\Delta E_D(0) \cong 48 \text{ meV}$$

$$a \cong 2.6 \times 10^{-5} \text{ meV} \cdot \text{cm}$$

1種類のドナーで近似の場合

1種類のドナー ($N_D, \Delta E_D$) アクセプタ (N_A)

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

$$n(T) = N_D \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g_D} \exp\left(\frac{\Delta E_F - \Delta E_D}{kT}\right)} \right]^{-N_A}$$

ΔE_F を消去

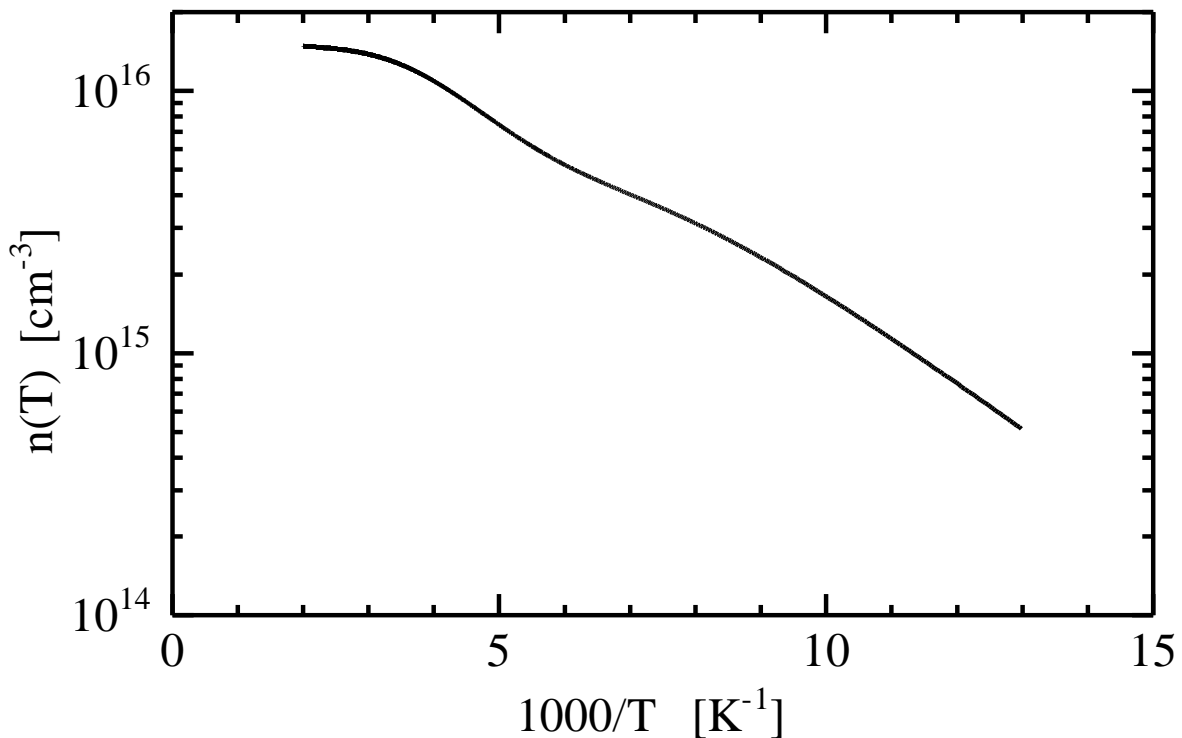
$$y \equiv \frac{g_D n(T) [n(T) + N_A]}{N_C(T) [N_D - N_A - n(T)]} = \exp\left(-\frac{\Delta E_D}{kT}\right)$$

N_D, N_A を独立に変化させて $\ln y - 1/T$ のグラフを直線にする。直線の傾きから ΔE_D を求める。

問題点

1. N_D, N_A を同時に独立に変化させなければならない。
2. 多数キャリア密度に影響を及ぼす欠陥も含めて、本当に1種類の準位だけで十分か？
3. undoped 3C-SiCで報告されてる補償比 ($N_A / N_D \approx 0.9$) は高すぎないか？

2種類のドナーで近似の場合



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

$$n(T) = N_{D1}[1 - f(\Delta E_{D1})] \\ + N_{D2}[1 - f_D(\Delta E_{D2})] \\ - N_A$$

- 5種類のパラメータを独立に変化させて、カーブフィッティング



得られた値の妥当性は？

2. 新しい評価関数

- 各ドナー準位に対応する温度でピークになる関数を定義

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

電気的中性条件から求めた電子密度

$$\begin{aligned} n(T) = & \sum_{i=1}^n N_{\text{Di}} [1 - f_{\text{D}}(\Delta E_{\text{Di}})] && n \text{種類} \text{のドナー} \\ & - \sum_{i=1}^m N_{\text{TEi}} f_{\text{D}}(\Delta E_{\text{TEi}}) && m \text{種類} \text{の電子トラップ} \\ & - \sum_{i=1}^k N_{\text{Ai}} f_{\text{A}}(\Delta E_{\text{Ai}}) && k \text{種類} \text{のアクセプタ} \\ & + \sum_{i=1}^l N_{\text{THi}} [1 - f_{\text{A}}(\Delta E_{\text{THi}})] && l \text{種類} \text{の正孔トラップ} \\ & + p(T) && \text{正孔密度} \end{aligned}$$

$$n(T) = N_{\text{C}}(T) \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{F}}}{kT}\right)$$

式の展開

$$\begin{aligned} H(T, E_{\text{ref}}) = & \sum_{i=1}^n \frac{N_{\text{Di}}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{Di}} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_{\text{D}}(\Delta E_{\text{Di}}) \\ & + \sum_{i=1}^m \frac{N_{\text{TEi}}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{TEi}} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_{\text{D}}(\Delta E_{\text{TEi}}) \\ & + \sum_{i=1}^k \frac{N_{\text{Ai}}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{Ai}} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_{\text{A}}(\Delta E_{\text{Ai}}) \\ & + \sum_{i=1}^l \frac{N_{\text{THi}}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{THi}} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_{\text{A}}(\Delta E_{\text{THi}}) \\ & - \left(\sum_{i=1}^m N_{\text{TEi}} + \sum_{i=1}^k N_{\text{Ai}} \right) \frac{N_{\text{C0}}}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}} - \Delta E_{\text{F}}}{kT}\right) \\ & + \frac{p(T)N_{\text{C0}}}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}} - \Delta E_{\text{F}}}{kT}\right) \end{aligned}$$

右辺 4項目までに、

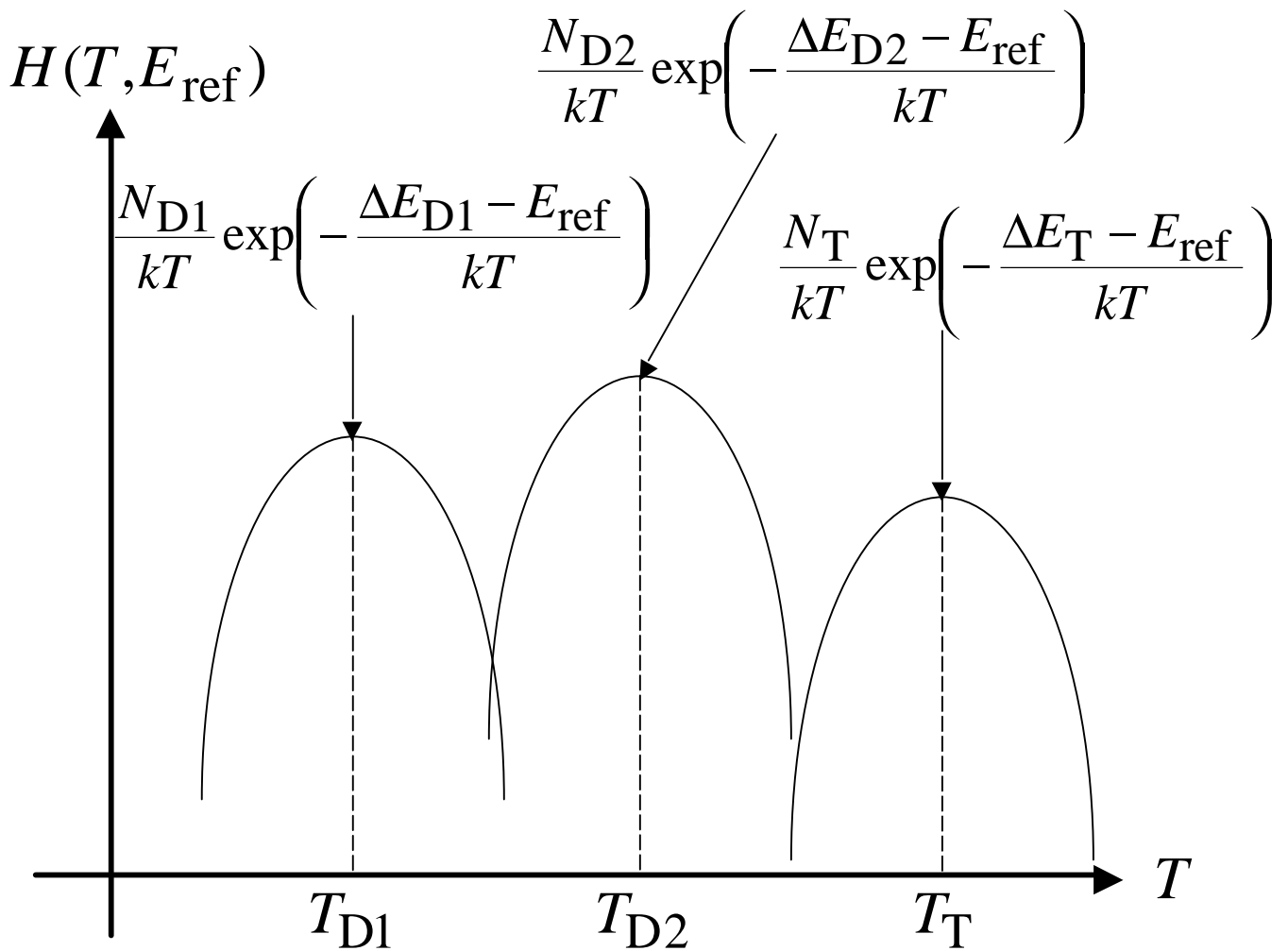
$$\text{関数 } \frac{N_i}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_i - E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$

が含まれる。

関数の特徴

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



$$\Delta E_{D1} = kT_{D1} + E_{\text{ref}}$$

$$N_{D1} = H(T_{D1}, E_{\text{ref}}) kT_{D1} / \exp(-1)$$

$$\Delta E_{D2} = kT_{D2} + E_{\text{ref}}$$

$$N_{D2} = H(T_{D2}, E_{\text{ref}}) kT_{D2} / \exp(-1)$$

$$\Delta E_T = kT_T + E_{\text{ref}}$$

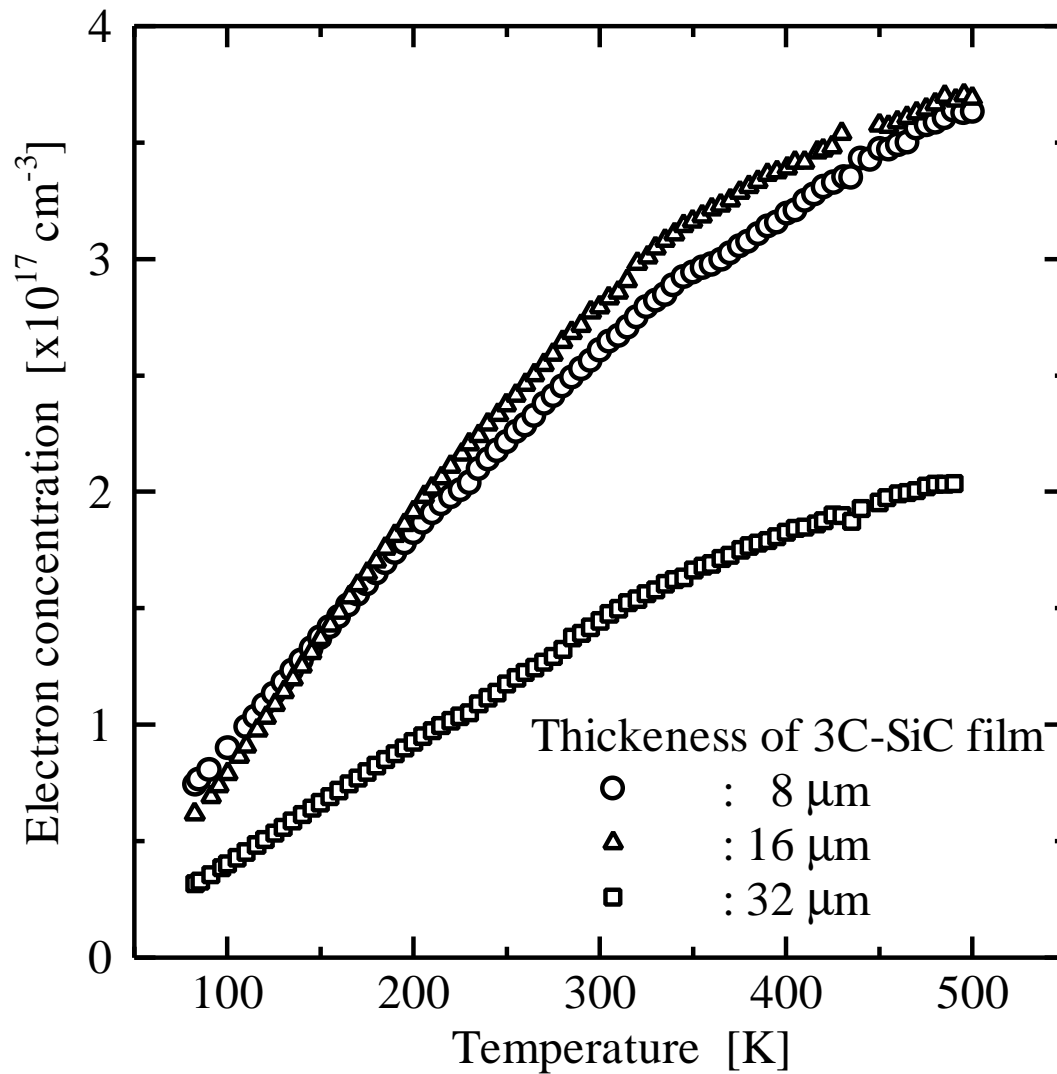
$$N_T = H(T_T, E_{\text{ref}}) kT_T / \exp(-1)$$

3C-SiCの成膜と測定方法

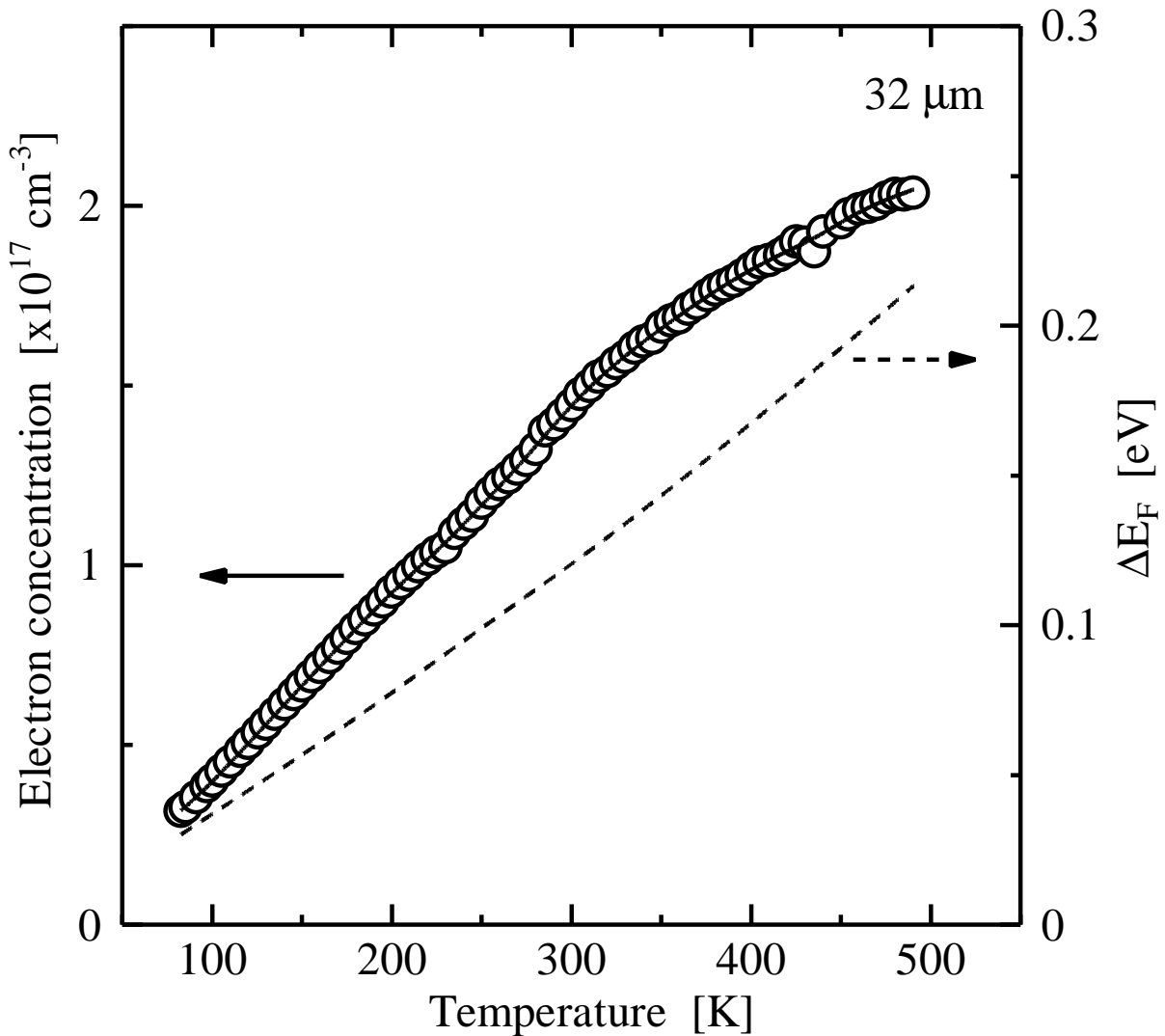
- 成膜方法 (常圧CVD法)
 - 1 .(100) n-type Si 基板
 - 2 .基板のエッチング 1175 、11 分間
HCl : 63.1 sccm、H₂ : 1.5 slm
 - 3 .バッファ層の形成 1350 、3 分間
C₃H₈ : 1 sccm、 H₂ : 1 slm
 - 4 .3C-SiCの成長 1350
Si₂(CH₃)₆ : 0.5 sccm、H₂ : 2.5 slm
成長速度 : 4.3 μ m/h
- ホール効果測定
Si基板の除去 (ケミカルエッチング)
膜厚 : 8 μ m、16 μ m、32 μ m
形状 : 5x5 mm²
磁場 : 5 kG
温度 : 85 K~500K

3. 実験結果と考察

各膜厚での電子密度の温度依存性



32 μmの場合



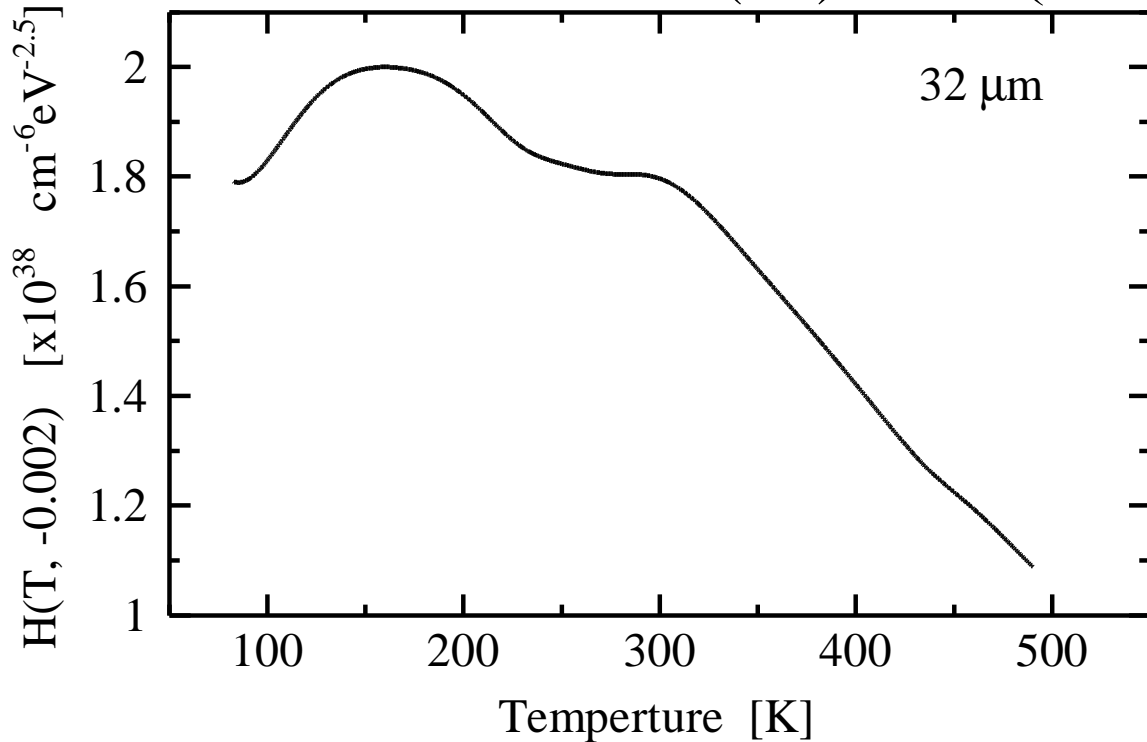
丸印：実験データ

実線：スプライン関数

破線：フェルミ準位

$$\Delta E_F = kT \ln \left[\frac{N_C(T)}{n(T)} \right], \quad N_C(T) = 3.0 \times 10^{15} T^{3/2} \text{ cm}^{-3}$$

評価関数
$$H(T, E_{\text{ref}}) = \frac{n(T)^2}{(kT)^{2.5}} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$



- 一つのピークと一つのショルダー



少なくとも2種類の準位が存在する。

一つ目のピークから評価

$$T_{\text{peak}} = 159.9 \text{ K}$$

$$H(T_{\text{peak}}, -0.002) = 2.0 \times 10^{38} \text{ cm}^{-6} \text{ eV}^{-2.5}$$



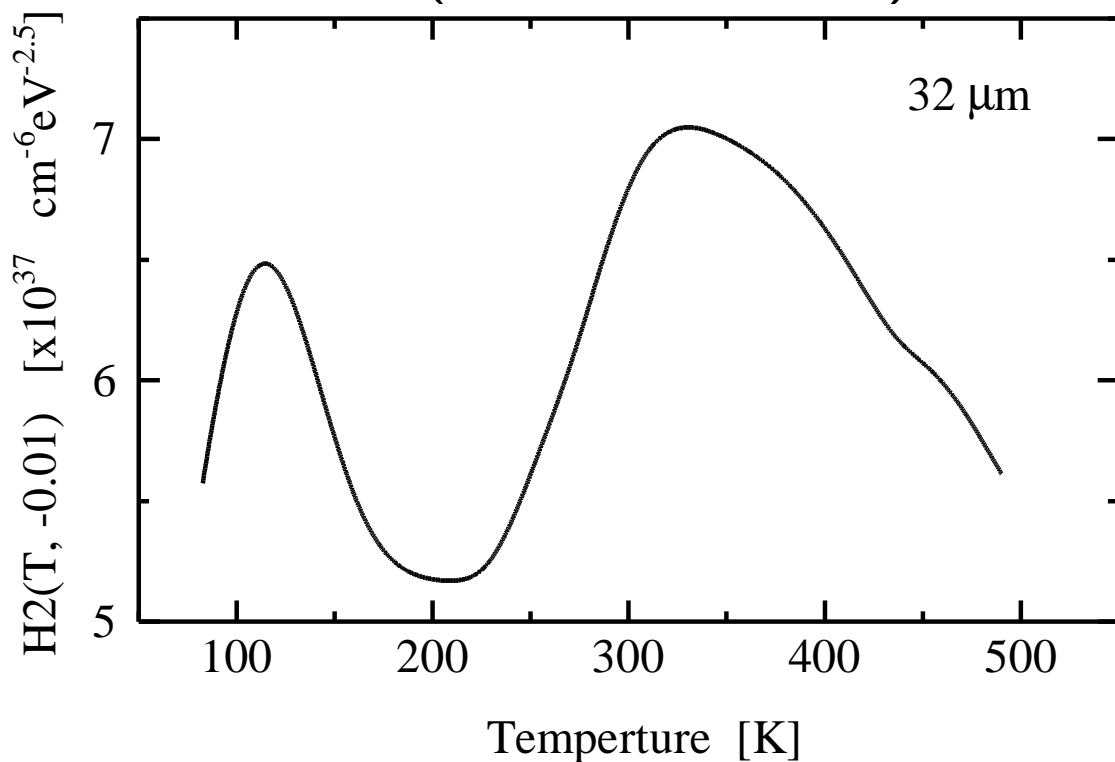
$$\Delta E_{\text{D}} = 54 \text{ meV}$$

$$N_{\text{D}} = 8.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

評価できた準位の影響を除いた評価関数

$$H2(T, E_{\text{ref}}) \equiv H(T, E_{\text{ref}})$$

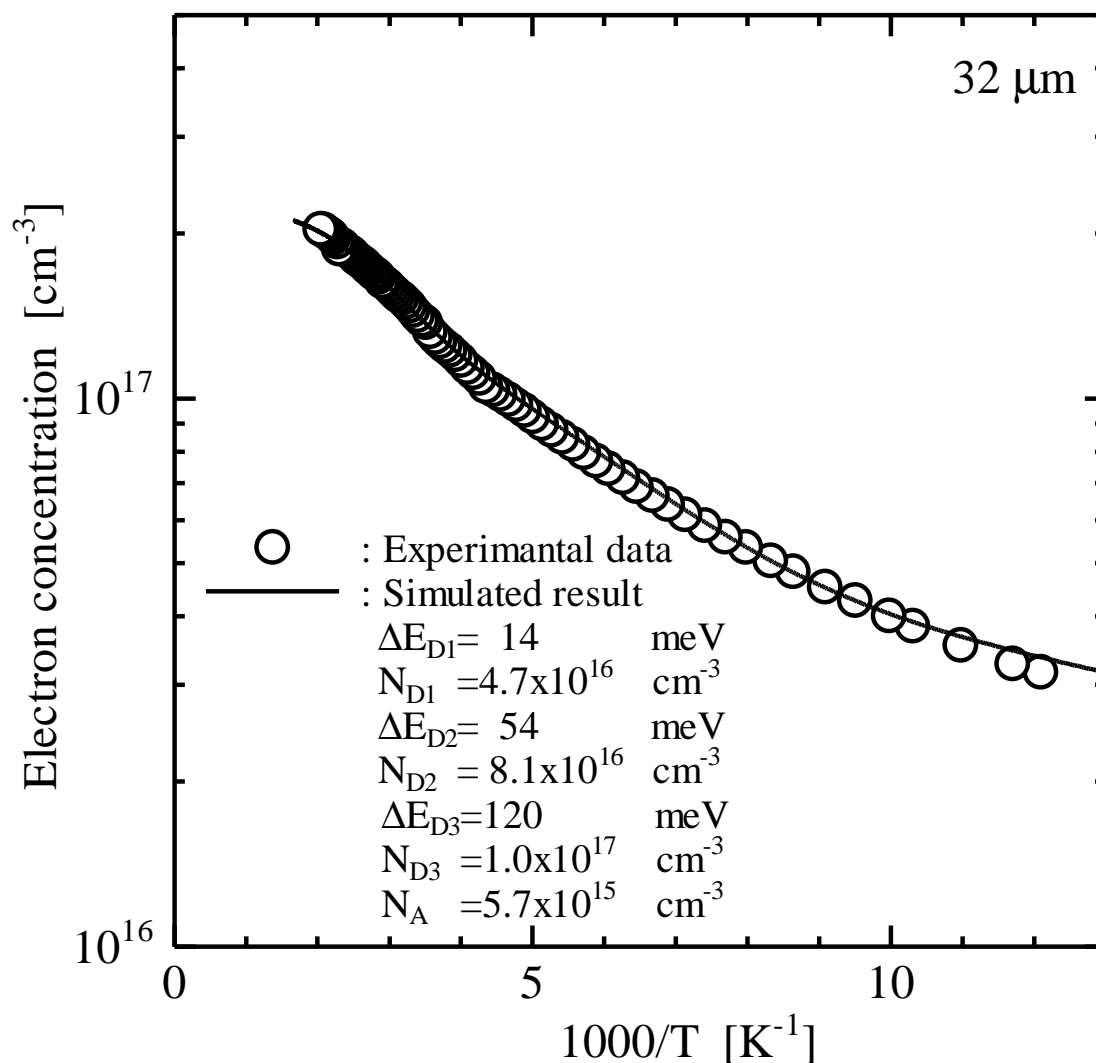
$$-\frac{N_D}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_D - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_D(\Delta E_D)$$



- さらに、2種類の準位が存在する。

	低温側	高温側
ΔE_D [meV]	14	120
N_D [cm ⁻³]	4.7×10^{16}	1.0×10^{17}

実験結果と得られた値を用いて シミュレーション結果との比較



- $H(T, E_{\text{ref}})$ で評価した値を用いてシミュレーションした $n(T)$ と実験結果とがよく一致している。



得られた3種類の密度と準位は妥当！

トナーの膜厚依存性

膜厚 [μm]	8	16	32
ΔE_{D1} [meV]	10	7	14
N_{D1} [$\times 10^{16} \text{cm}^{-3}$]	11	8.1	4.7
ΔE_{D2} [meV]	46	46	54
N_{D2} [$\times 10^{16} \text{cm}^{-3}$]	17	20	8.1
ΔE_{D3} [meV]	107	97	120
N_{D3} [$\times 10^{16} \text{cm}^{-3}$]	11	13	10
N_A [$\times 10^{16} \text{cm}^{-3}$]	1.3	0.99	0.57

- すべての膜厚で3種類の準位が存在する。



1種類の準位の仮定は妥当でない！

- トナー密度と共に、1種類のトナー準位が約50 meVから約15 meVに変化するのではない！

4.まとめ

- $\text{Si}_2(\text{CH}_3)_6$ を用いた常圧CVD法
- undoped 3C-SiCの成長
- ホール効果測定
- 多数キャリア密度 (電子密度) の温度依存性からドナー準位の評価

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

1. 3種類の準位を評価

(約10 meV、約50 meV、約110 meV)

2. 各準位の密度と膜厚との関係

a. 約10 meVの準位

膜厚の増加とともに密度が減少

b. 約50 meVの準位

膜厚32 μm の密度は、他の半分以下

c. 約110 meVの準位

膜厚依存性なし

- n型3C-SiCの場合でも、1種類のドナー近似が不適当な場合がある。