

ホール効果測定からのSiC中の 不純物評価

大阪電気通信大学
松浦 秀治

招待講演

SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第13回講演会
2004年10月21日・22日
名古屋国際会議場

謝辞

試料・データ提供

4H-SiC: 国プロ「超低損失電力用素子技術開発」(荒井和雄氏)
東芝(畠山哲夫氏、四戸孝氏)

3C-SiC: HOYAアドバンストセミコンダクタテクノロジーズ(株)
(長澤弘幸氏)
京都工芸繊維大学 西野研究室(西野茂弘先生)

ホール測定

鏡原聡君、岩田裕史君初め松浦研究室の院生・卒研生

ホール効果測定から得られるデータ

1. pn判定
2. 多数キャリア密度
3. 多数キャリア移動度

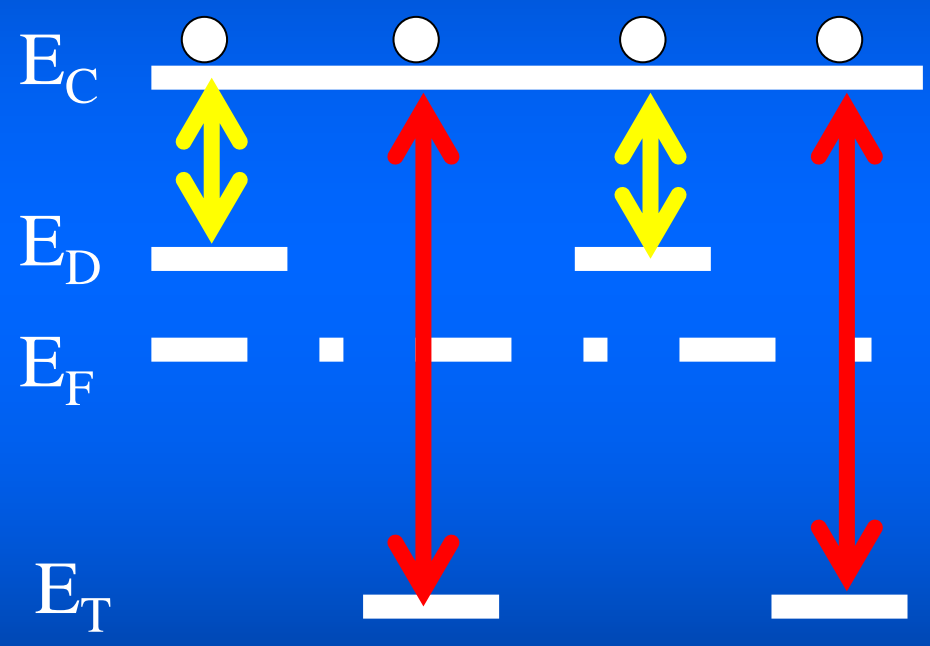
通常、室温での多数キャリア密度と移動度の測定。

多数キャリア密度の温度依存性からは何が得られるか？

多数キャリア密度

n型半導体

電子密度



浅いエネルギー準位のドナー(ドーパン)だけでなく、**深いエネルギー準位の不純物および欠陥**が電子密度に影響を及ぼす場合



電子密度の温度依存性には、ドナーだけでなく、これらの不純物および欠陥の密度とエネルギー準位の情報が含まれている。

評価できる欠陥

DLTS法等の過渡容量法

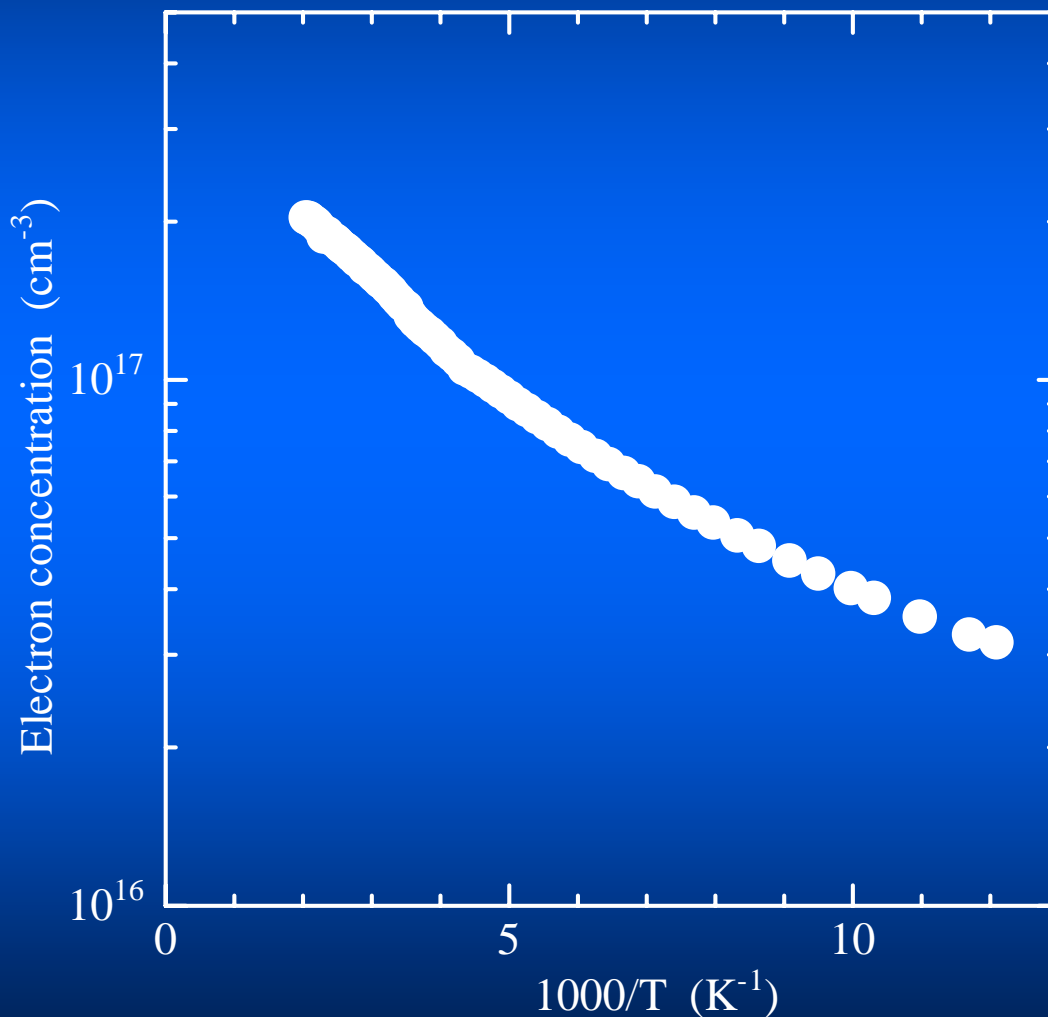
1. 多数キャリア密度に影響を与えないほど微少な密度のトラップ
2. 深いエネルギー準位のトラップ

多数キャリア密度の温度依存性

1. 多数キャリア密度に影響を与える不純物及び欠陥
2. 浅い、深いエネルギー準位の不純物及び欠陥

多数キャリア密度の温度依存性から
ドーパントの種類、各ドーパントの密度と準位の評価

Unoped n型3C-SiC



どのように評価するか？

ホール効果測定を用いた新しい評価方法

ホール効果測定結果の一般的な評価方法の問題点

1. $\ln n(T) - 1/T$ の飽和値と傾きからの評価法
2. カーブ・フィッティング法
3. Hoffmannの評価方法

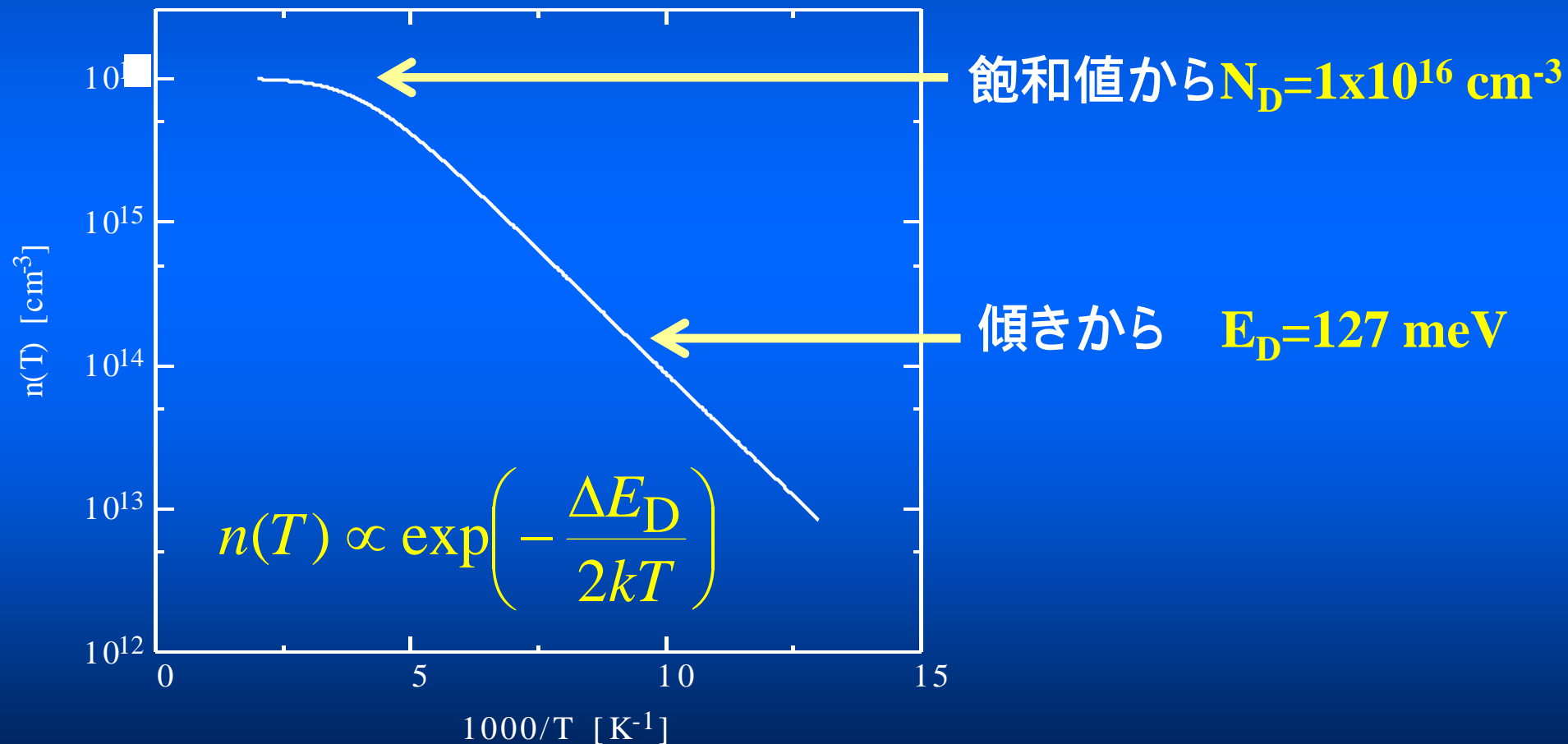
新しい評価方法の提案

$$H(T, E_{\text{ref}}) \equiv \frac{n(T)^2}{(kT)^{5/2}} \exp\left(-\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right)$$

$\ln n(T) - 1/T$ による評価

1種類のドナーだけの場合 ($E_D=124$ meV, $N_D=1 \times 10^{16}$ cm⁻³)

シミュレーション結果

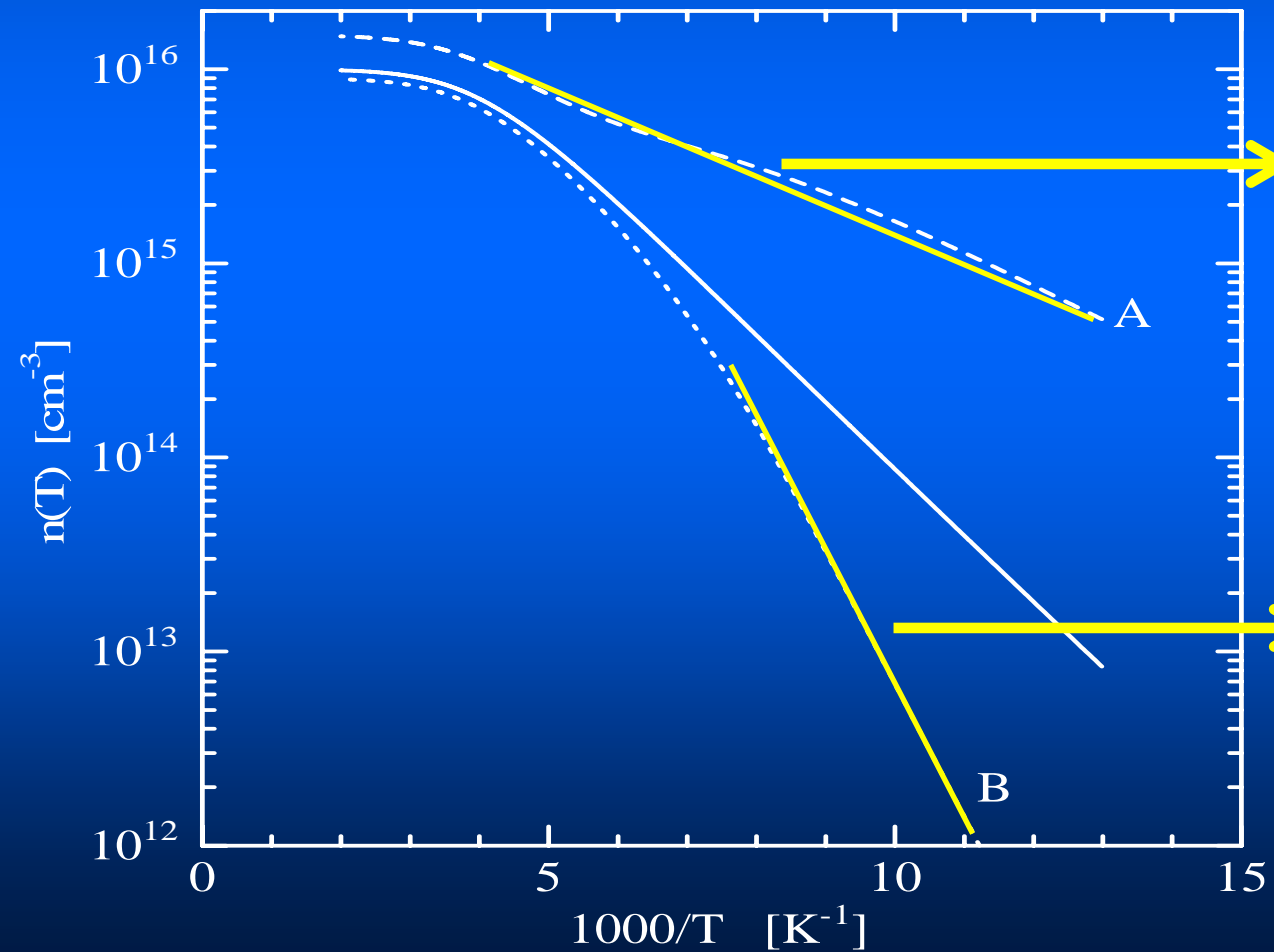


ドナー ($E_{D1}=124 \text{ meV}$, $N_{D1}=1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

A. もう1種類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



$E_D=54 \text{ meV}$
 $N_D=1.48 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$E_D=251 \text{ meV}$
 $N_D=8.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

間違っって評価

カーブ・フィッティング法

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

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

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

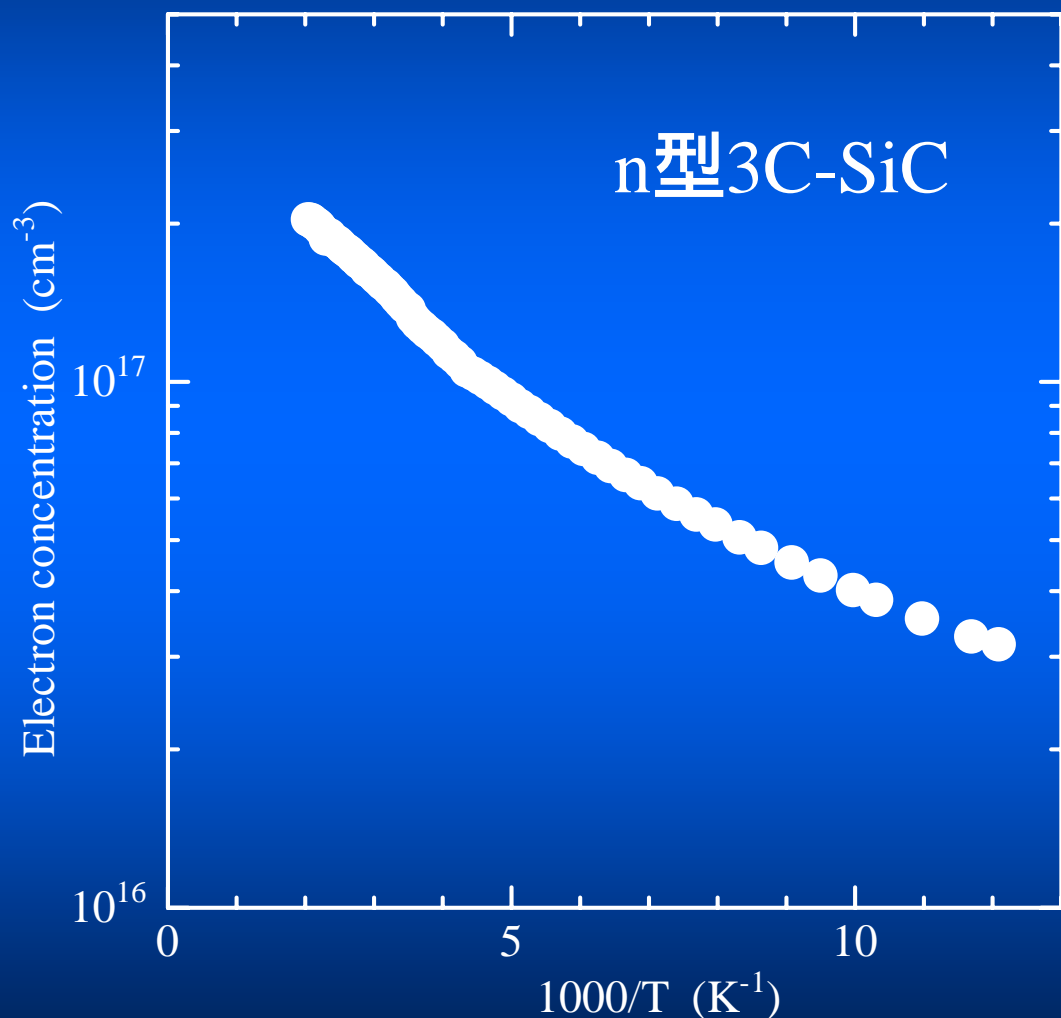
問題点:

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

多数キャリア密度の温度依存性から
ドーパントの種類、各ドーパントの密度と準位の評価



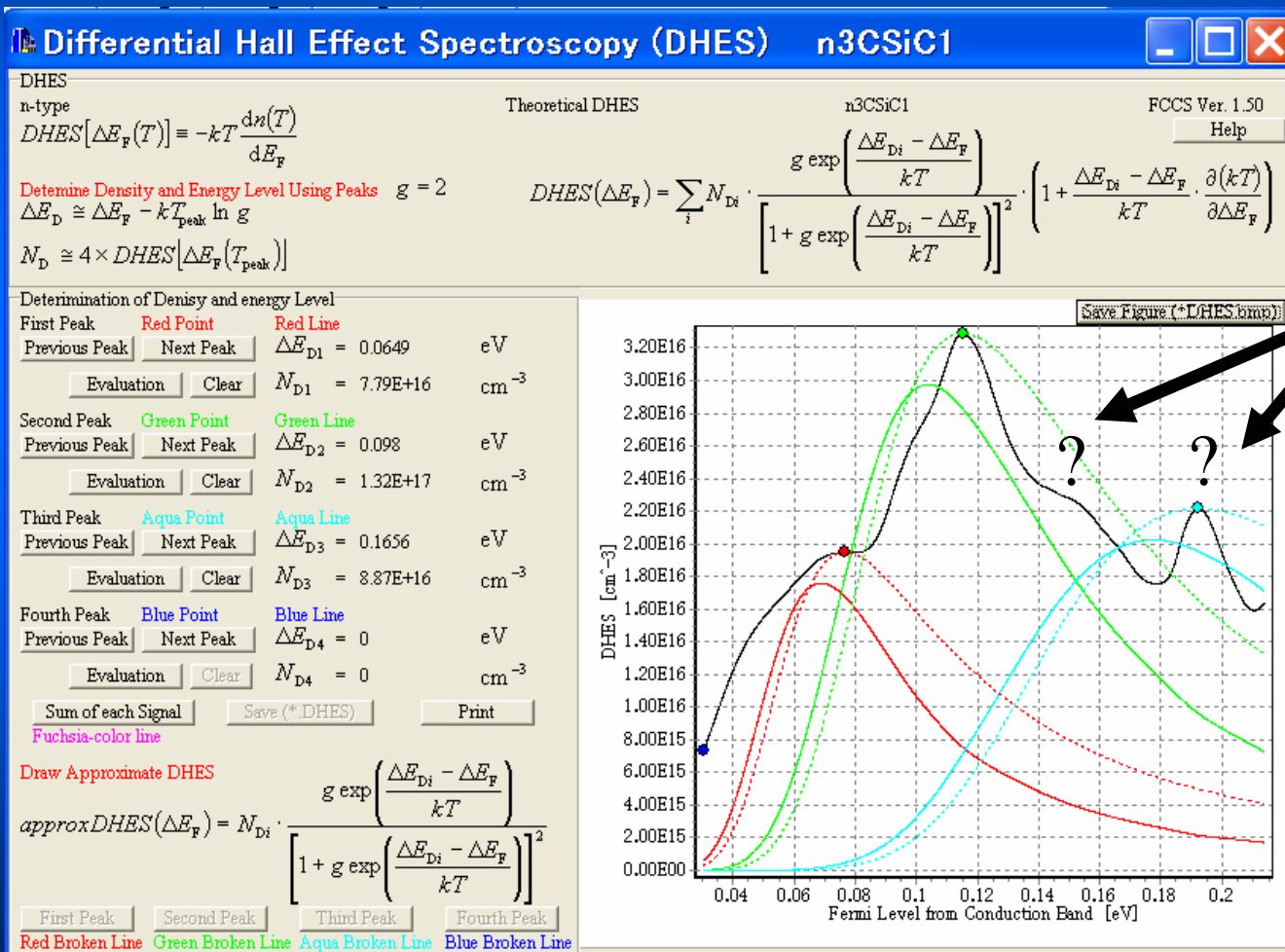
何種類のドナーが含まれているか？

仮定

各ドナーの密度と準位の
評価結果に大きく影響する。

Hoffmannの方法

$-kT \frac{dn(T)}{dE_F}$ と E_F のグラフのピークから評価する。



Spline関数で補間したデータを用いても変なピークが現れる。

実験結果を微分する → 測定誤差が増幅される

Free Carrier Concentration Spectroscopy (FCCS)

評価関数の条件

1. 不純物の種類の**仮定が不要**であること
2. 実験で得られた多数キャリア密度 $n(T)$ を**微分しない**こと
3. 各々のドーパント準位に対応した**温度でピーク**になること

評価関数の定義式

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

ピーク温度: $T_{\text{peak}i} \cong \frac{\Delta E_{\text{Di}} - E_{\text{ref}}}{k}$

ピーク値 : $H1(T_{\text{peak}i}, E_{\text{ref}}) \cong \frac{N_{\text{Di}}}{kT_{\text{peak}i}}$

FCCS法による解析

無料のWindows用アプリケーションソフトを用いて、
多数キャリア密度の温度依存性を解析

ダウンロード先 ホームページ

<http://www.osakac.ac.jp/labs/matsuura/>

Undoped 3C-SiC

成長条件

1. (100) n型Si表面に炭化バッファ層形成
2. $\text{Si}_2(\text{CH}_3)_6$ ガスを用いて、温度1350 で3C-SiCをヘテロエピタキシャル成長

測定試料

膜厚: 32 μm
(Siをエッチング除去)

サイズ: 5x5 mm^2

ホール効果測定

磁束密度: 5 kG

電流 : 1 mA

温度範囲: 85 K~500 K

Data Sheet

Measurement Name: Matsuura Laboratory Date: 2000/7/3
 Analysis Name: Matsuura Laboratory Date: 2001/3/12
 Semiconductor: 3C-SiC Conduction Type: n-type
 Sample Number: n3CSiC1 Thickness: 32 micron
 Magnetic Field: 0.5 T Current: 0.001 A
 Comment: Experimental Data

Temperature [K]	Concentration [cm^{-3}]	Reliabilitv [0<= r <=1]
82.719	3.168E16	1
85.522	3.278E16	1
91.122	3.547E16	1
97.035	3.848E16	1
100.273	4.017E16	1
105.303	4.281E16	1
110.139	4.533E16	1
115.837	4.834E16	1
120.218	5.061E16	1
125.515	5.354E16	1
130.038	5.593E16	1
135.071	5.861E16	1
140.399	6.135E16	1
145.361	6.415E16	1
150.014	6.65E16	1
155.209	6.917E16	1
159.875	7.171E16	1
165.319	7.453E16	1
170.074	7.699E16	1
175.075	7.927E16	1

Clear Data Clear All Data Sort Save (*.nT or *.pT)

Spline関数で補間

Free Carrier Concentration Spectroscopy (FCCS) Matsuura Laboratory

File Data Other Analyses Help

Carrier Concentration Fermi Level H1(T,E_ref) H2(T,E_ref) H3(T,E_ref) Simulation n3CSiC1 F:\FCCS1_0\Example\3C-SiC\n3CSiC1.nT

Experimental Date

Input Data or Load Data (*.pT or *.nT) or Change Data

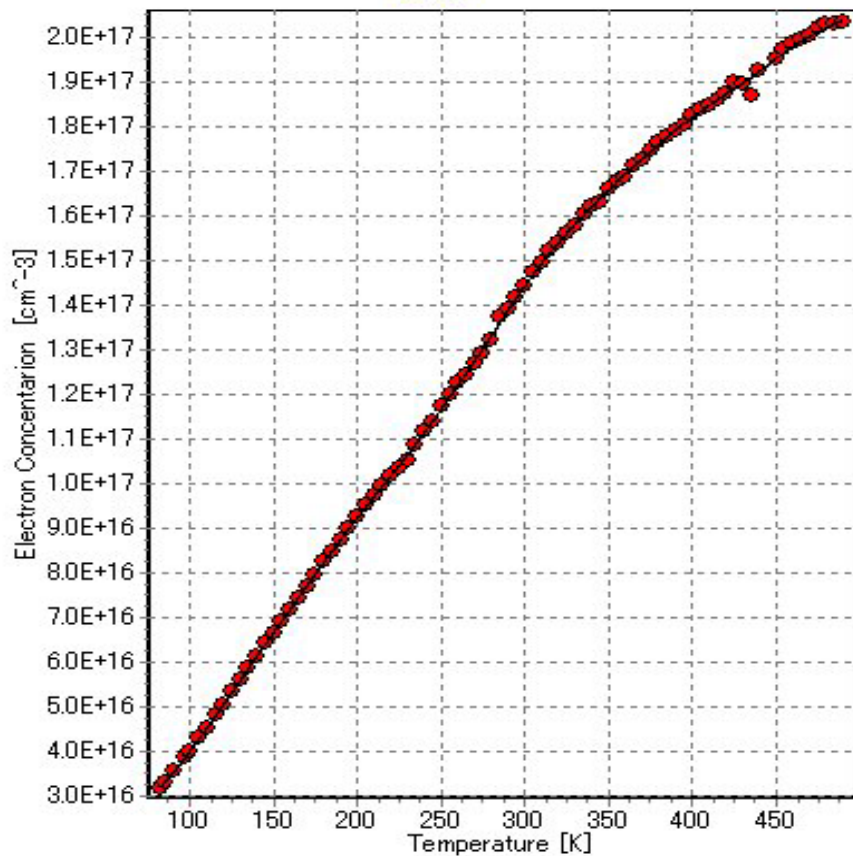
F:\FCCS1_0\Example\3C-SiC\n3CSiC1.nT

Interpolating Temperature Dependence of Free Carrier Concentration with Cubic Spline Function

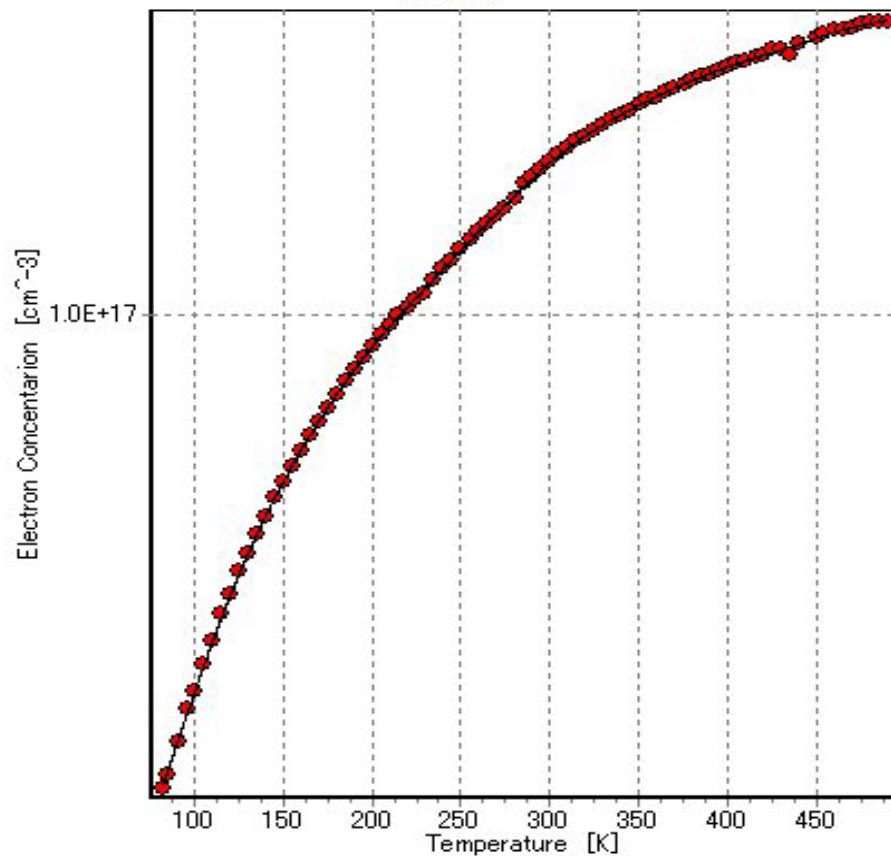
Smoothness 5000 Calculation Save(*.spl)

F:\FCCS1_0\Example\3C-SiC\n3CSiC1.spl

Linear

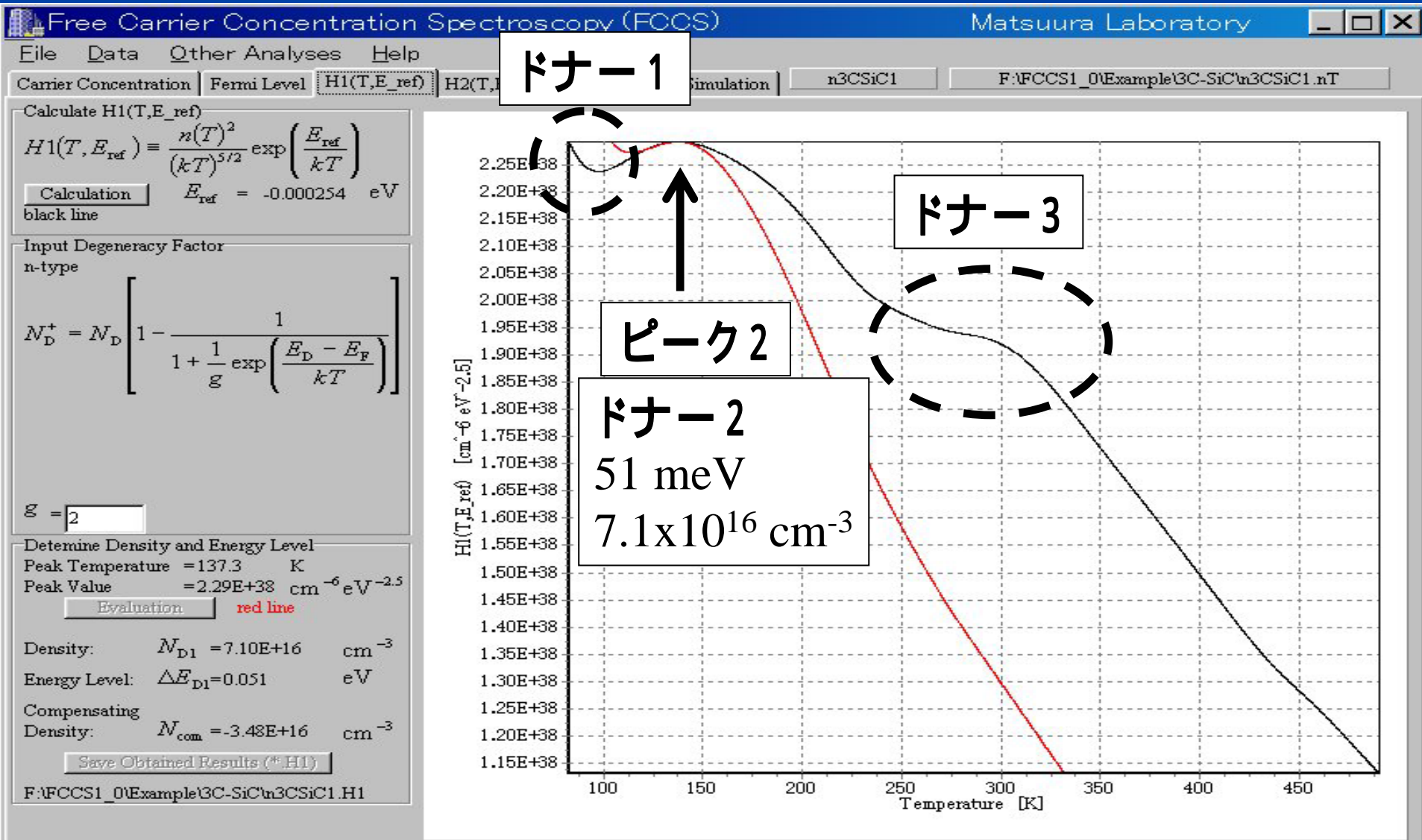


Semilog



FCCS信号

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



Theoretical expression of FCCS signal is

$$H(T, E_{\text{ref}}) = \sum_i \frac{N_{D_i}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{D_i} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_D(\Delta E_{D_i}) - \frac{N_{C0} N_A}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}} - \Delta E_F}{kT}\right)$$

FCCS signal, in which the influence of the previously determined donor species (E_{D2}, N_{D2}) is removed, is

$$H_2(T, E_{\text{ref}}) = \frac{n(T)^2}{(kT)^{5/2}} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right) - \frac{N_{D2}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{D2} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_D(\Delta E_{D2})$$

$$H2(T, E_{\text{ref}}) \equiv \frac{n(T)^2}{(kT)^{5/2}} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right) - \frac{N_{D2}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{D2} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I(\Delta E_{D2})$$

Free Carrier Concentration Spectroscopy (FCCS) Matsuura Laboratory

File Data Other Analyses Help

Carrier Concentration Fermi Level H1(T,E_ref) **H2(T,E_ref)** H3(T,E_ref) Simulation n3CSiC1 F:\FCCS1_0\Example\3C-SiC\n3CSiC1.nT

Calculate H2(T,E_ref)

$$H2(T, E_{\text{ref}}) \equiv H1(T, E_{\text{ref}}) - \frac{N_{D1}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{D1} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_1(\Delta E_{D1}) + N_{\text{com}} \frac{N_{\text{co}}}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}} - \Delta E_{\text{F}}}{kT}\right)$$

$N_{D1} = 7.10\text{E}+16 \text{ cm}^{-3}$ $\Delta E_{D1} = 0.051 \text{ eV}$
 $N_{\text{com}} = 0.00\text{E}+00 \text{ cm}^{-3}$

Calculation black line $E_{\text{ref}} = -0.007023 \text{ eV}$

Input Degeneracy Factor

n-type

$$N_D^+ = N_D \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \right]$$

$g = 2$

Determine Density and Energy Level

Peak Temperature = 98.4 K

Peak Value = $8.54\text{E}+37 \text{ cm}^{-6} \text{ eV}^{-2.5}$

Density: $N_{D2} = 3.83\text{E}+16 \text{ cm}^{-3}$

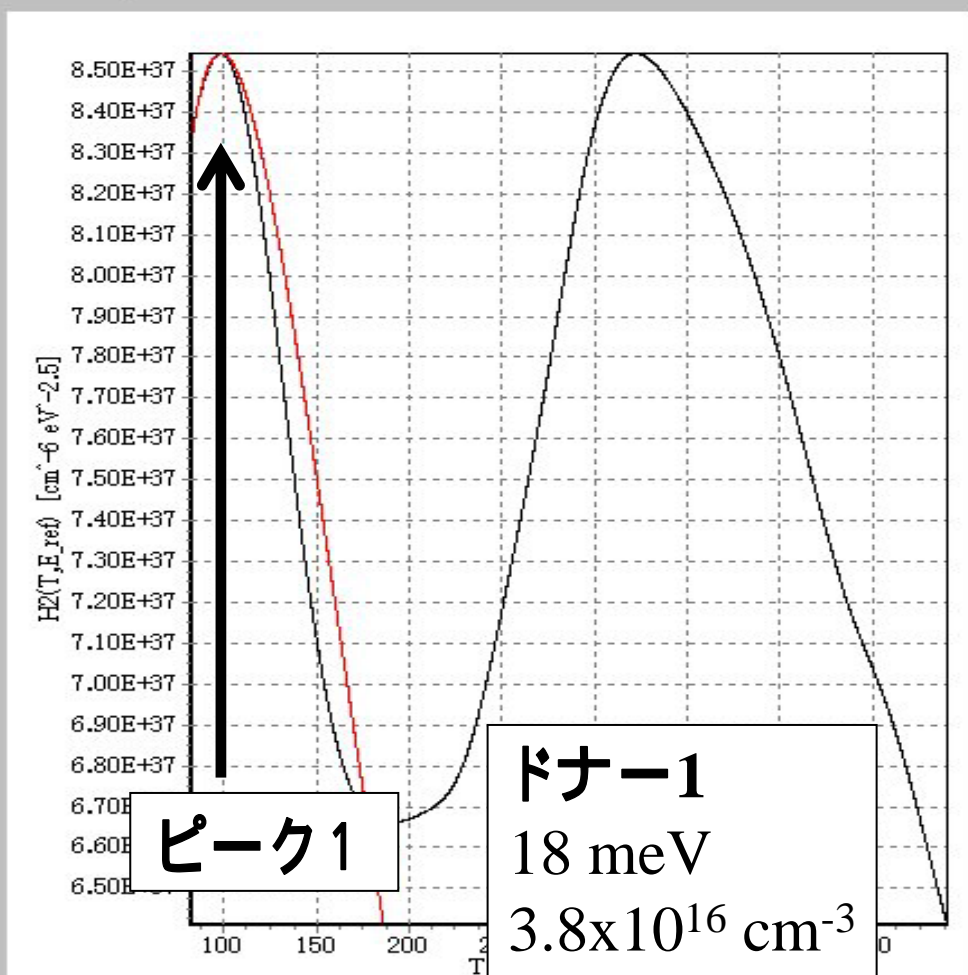
Energy Level: $\Delta E_{D2} = 0.0184 \text{ eV}$

Compensating Density: $N_{\text{com}} = -2.08\text{E}+15 \text{ cm}^{-3}$

Evaluation red line

Save Obtained Results (*H2)

F:\FCCS1_0\Example\3C-SiC\n3CSiC1.H2



Calculate H3(T,E_ref)

$$H3(T, E_{ref}) = H1(T, E_{ref}) - \sum_{i=1}^2 \frac{N_{Di}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{Di} - E_{ref}}{kT}\right) L_i(\Delta E_{Di}) + N_{com} \frac{N_{co}}{kT} \exp\left(\frac{E_{ref} - \Delta E_F}{kT}\right)$$

$N_{D1} = 7.10E+16 \text{ cm}^{-3}$ $\Delta E_{D1} = 0.051 \text{ eV}$
 $N_{D2} = 3.83E+16 \text{ cm}^{-3}$ $\Delta E_{D2} = 0.0184 \text{ eV}$
 $N_{com} = -2.08E+15 \text{ cm}^{-3}$ $E_{ref} = 0 \text{ eV}$

Calculation black line

Input Degeneracy Factor
 n-type

$$N_D^+ = N_D \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{kT}\right)} \right]$$

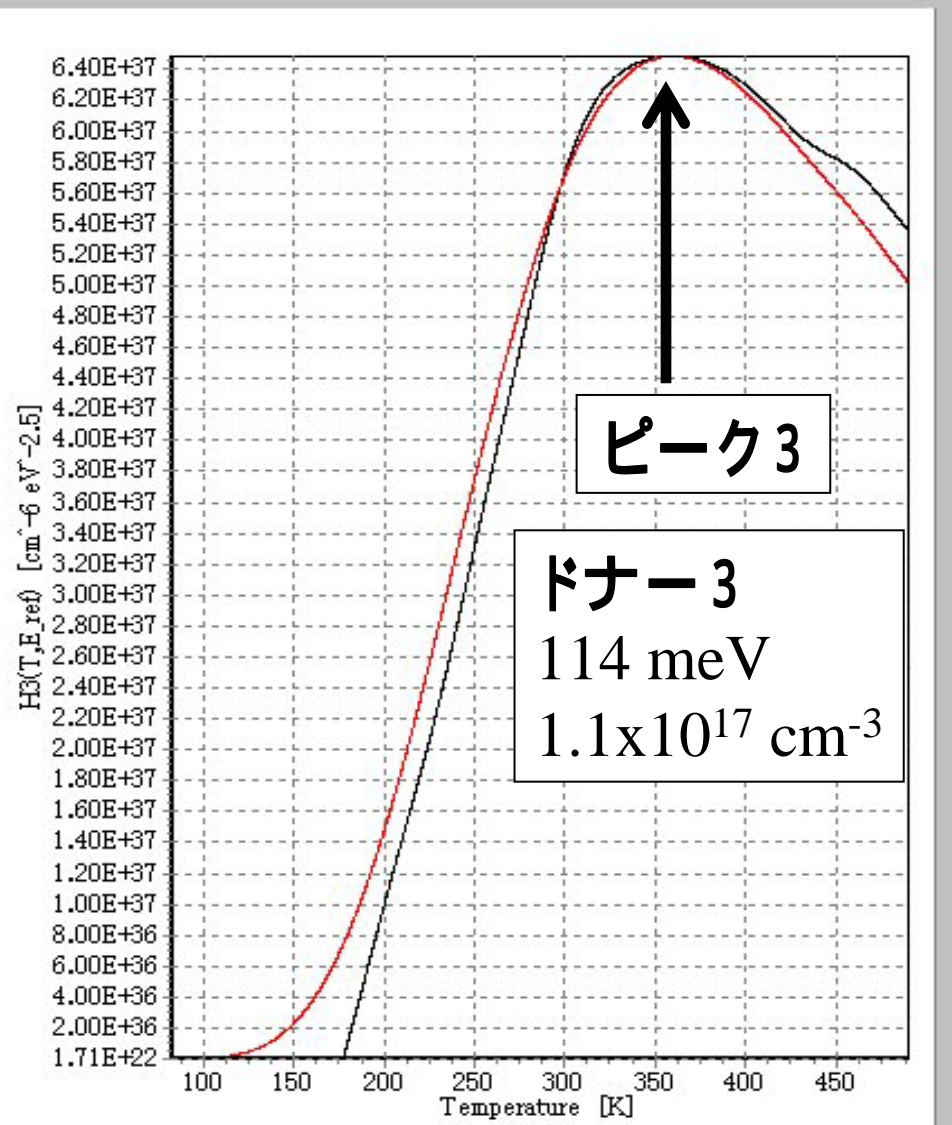
g =

Determine Density and Energy Level

Peak Temperature = 359.3 K
 Peak Value = 6.48E+37 cm⁻⁶ eV^{-2.5}

Density: $N_{D3} = 1.07E+17 \text{ cm}^{-3}$
 Energy Level: $\Delta E_{D3} = 0.1139 \text{ eV}$
 Compensating Density: $N_{com} = 0.00E+00 \text{ cm}^{-3}$

Save Obtained Results (*H3)
 F:\FCCS1_0\Example\3C-SiC\3CSiC1.H3



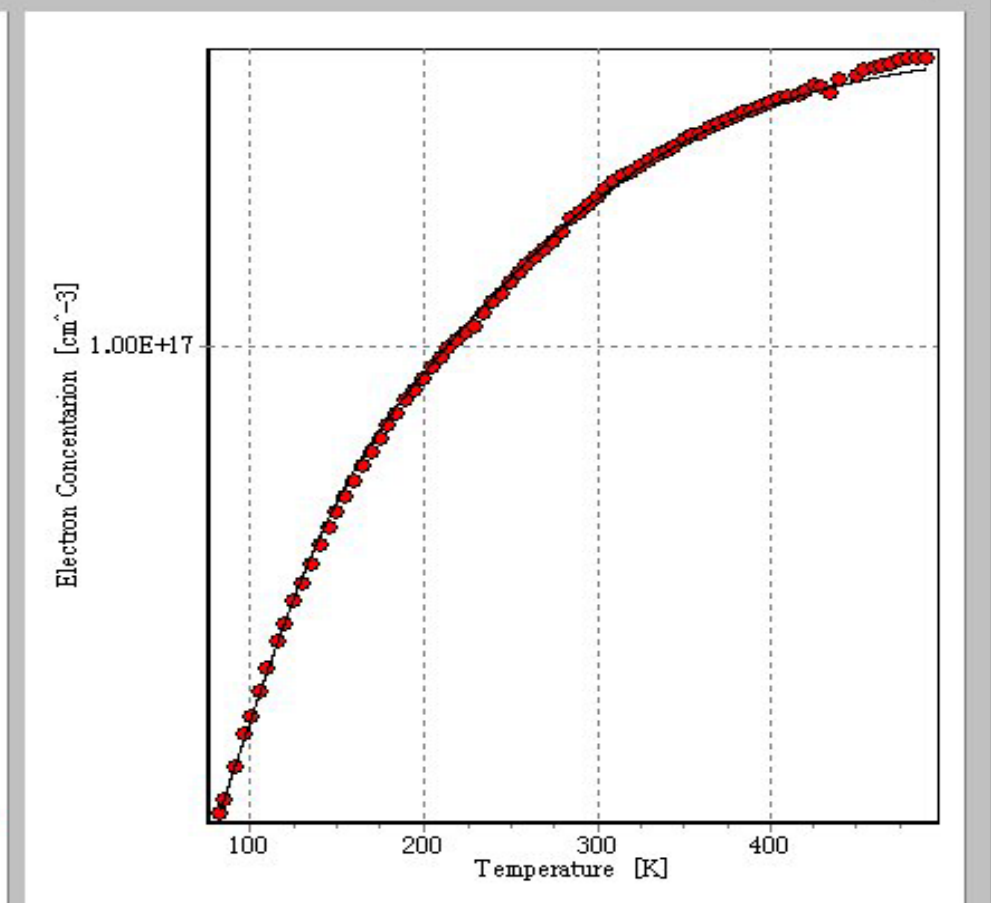
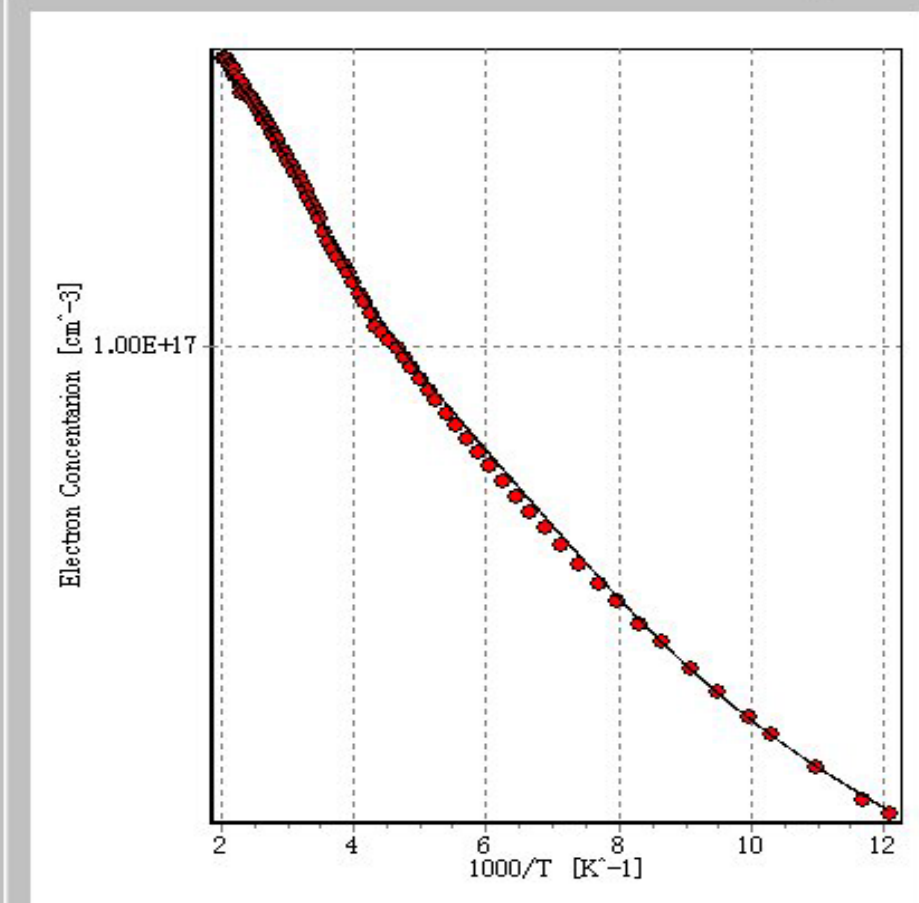
結果の妥当性

Obtained Results

<input checked="" type="checkbox"/> N_{D1}	=	7.10E+16	cm ⁻³	ΔE_{D1}	=	0.051	eV
<input checked="" type="checkbox"/> N_{D2}	=	3.83E+16	cm ⁻³	ΔE_{D2}	=	0.0184	eV
<input checked="" type="checkbox"/> N_{D3}	=	1.07E+17	cm ⁻³	ΔE_{D3}	=	0.1139	eV
<input checked="" type="checkbox"/> N_{com}	=	-2.08E+15	cm ⁻³				

See Remarks Save Results Simulation Save Simulation (*.sim) F:\FCCS1_0\Example\3C-SiC\3CSiC1.sim

Simulate Temperature Dependence of Majority-Carrier Concentration
n-type
$$n(T) = \sum_{i=1}^3 N_{Di} [1 - f(\Delta E_{Di})] - N_{com}$$



実験値と良い一致 → 得られた結果は妥当

Undoped 3C-SiC中に含まれるドナー

これまでは一種類のドナーとして評価されていた。

FCCS法からの結果

3種類のドナーが検出された

18 meV

窒素と欠陥の複合体によるドナー

51 meV

窒素によるドナー

114 meV

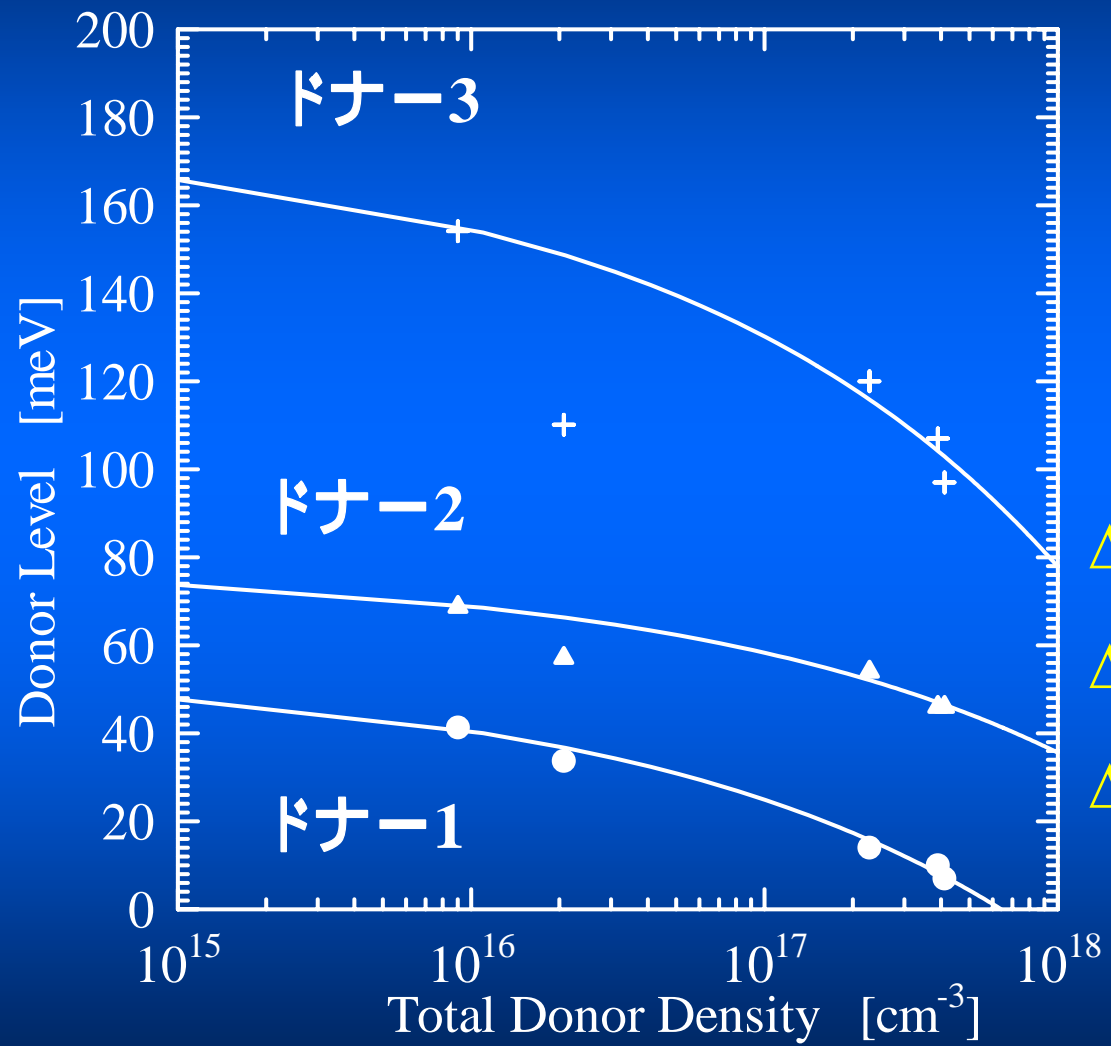
?

FCCS法の特長

1. ピークの数から、ドナーの種類がわかる
2. 各々のピークから、密度とエネルギー準位を評価できる
3. 得られた結果の妥当性を検討できる

H.Matsuura et al. Jpn. J. Appl. Phys. 39(2000)5069.

n型3C-SiCのドナー準位のドナー密度依存性

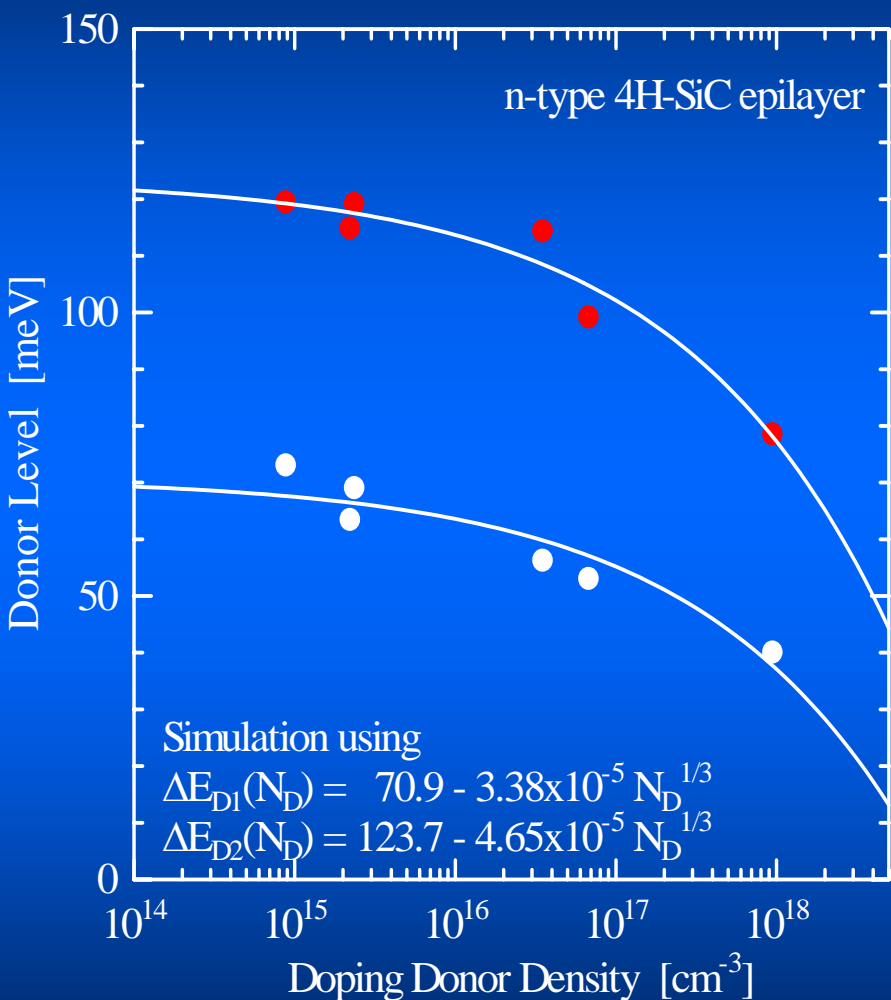


$$\Delta E_{D3} \cong 180 - 9.8 \times 10^{-5} \sqrt[3]{N_D}$$

$$\Delta E_{D2} = 71.8 - 3.38 \times 10^{-5} \sqrt[3]{N_D}$$

$$\Delta E_{D1} = 51.9 - 5.97 \times 10^{-5} \sqrt[3]{N_D}$$

n型4H-SiCのドナー準位のドナー密度依存性



ドナー密度: N_D [cm⁻³]

立方晶サイトに入った窒素ドナー
 $\Delta E_{D2} = 123.7 - 4.65 \times 10^{-5} \cdot \sqrt[3]{N_D}$

六方晶サイトに入った窒素ドナー
 $\Delta E_{D1} = 70.9 - 3.38 \times 10^{-5} \cdot \sqrt[3]{N_D}$

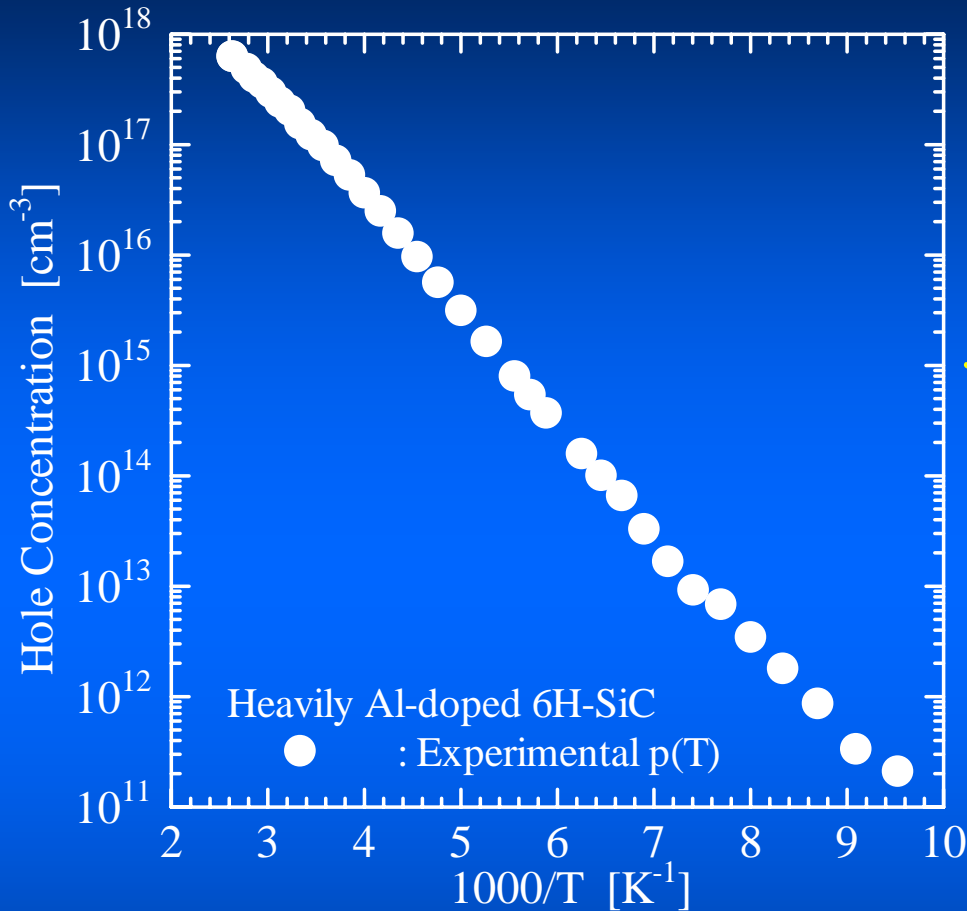
Problem in heavily doped p-type wide bandgap semiconductors

The acceptor density, which is determined by the curve-fitting method using the temperature dependence of the hole concentration, is always **much higher** than **the doping density**.



なぜだろうか？

Heavily Al-doped 6H-SiC



1. Hall-effect measurement

Fermi-Dirac (FD)
distribution function

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



Results determined by curve-fitting

$$\Delta E_A = 180 \text{ meV}$$

$$N_A = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$



$$N_A = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

2. C-V characteristics

この場合、FD分布関数は正しい分布関数だろうか？

アクセプタ準位と 励起準位

$$\Delta E_r = 13.6 \frac{1}{\varepsilon_s^2} \cdot \frac{m_h^*}{m_0} \cdot \frac{1}{r^2} \quad [\text{eV}]$$

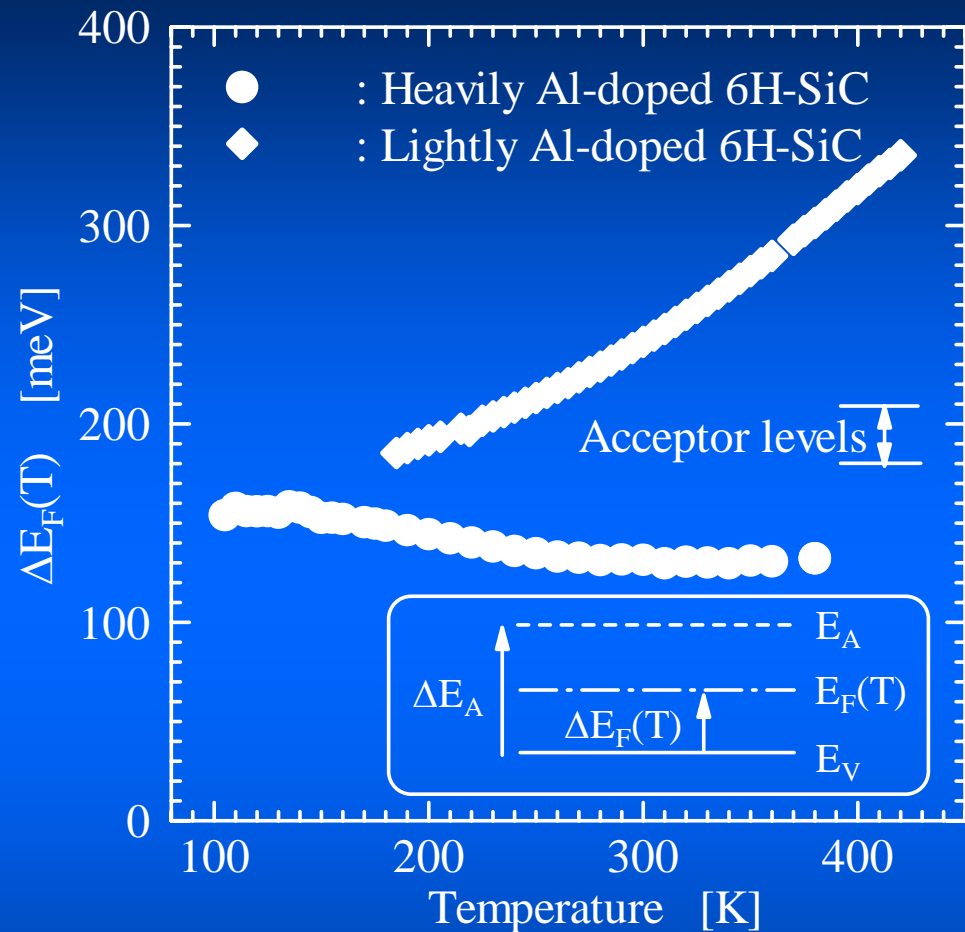
p-type wide bandgap semiconductors (GaN, SiC, diamond)

1. これらの比誘電率はSiの比誘電率より小さい、
2. これらの正孔の有効質量は電子の有効質量より重い。

Semiconductor	Acceptor level (r=1)	1 st excited state level (r=2)
SiC	146 meV	37 meV
GaN	101 meV	25 meV

アクセプタ準位は深く、励起準位もSi中のBアクセプタ準位 (45 meV)と同じぐらいの深さである。

Position of Fermi level in 6H-SiC



Heavily doped case

アクセプタ準位

フェルミ準位

1st 励起準位

2nd 励起準位

価電子帯

フェルミ準位は励起準位の近くにあるため、
励起状態に多くの正孔が存在するはず！

正孔密度に励起状態が影響を与えるはず！

深いアクセプタ準位に最適な分布関数は？

1. フェルミディラック分布関数

(励起状態の影響を考慮していない。)

$$f_{\text{FD}}(\Delta E_A) = \frac{1}{1 + \underline{g_A} \exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_F}{kT}\right)}$$

2. 提案している分布関数

(励起状態の影響を考慮している。)

$$f(\Delta E_A) = \frac{1}{1 + \underline{g_A(T)} \exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_F}{kT}\right)}$$

2種類の分布関数の違いは g_A と $g_A(T)$ の違い

Acceptor degeneracy factor

In $f_{\text{FD}}(E_A)$

$$g_A = 4$$

In $f(E_A)$

$$g_A(T) = g_A \left[1 + \sum_{r=2} g_r \exp\left(\frac{\Delta E_r - \Delta E_A}{kT}\right) \right] \exp\left(-\frac{\overline{E_{\text{ex}}(T)}}{kT}\right)$$

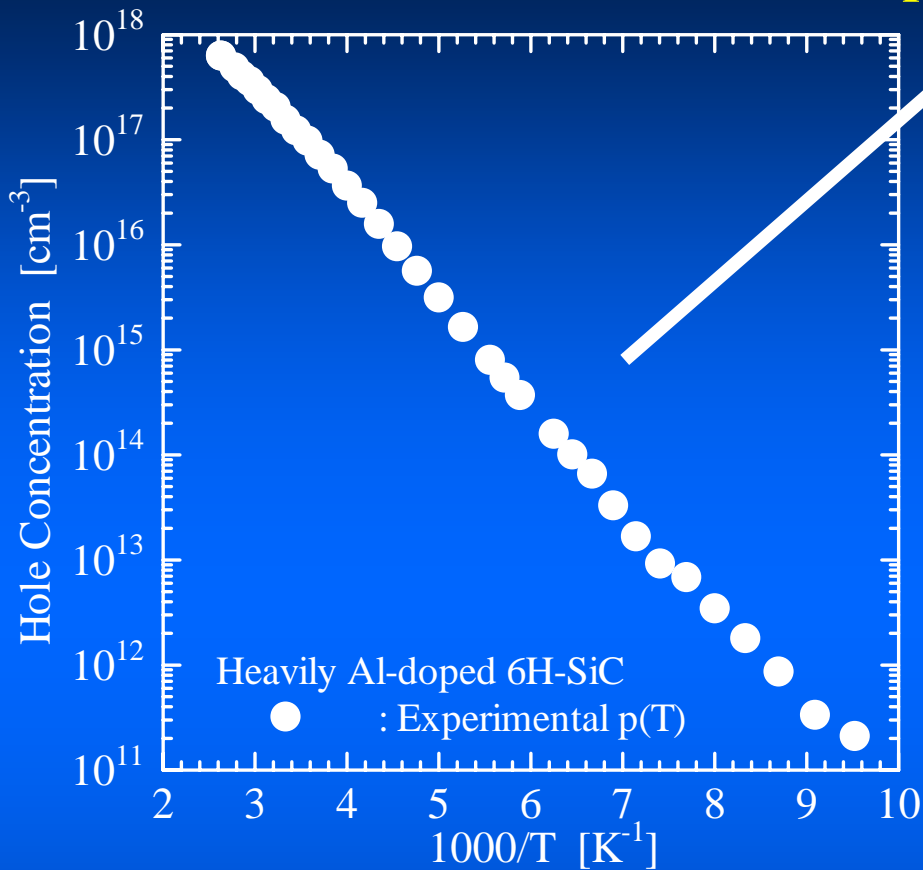
Degeneracy factors of excited states

Excited state levels

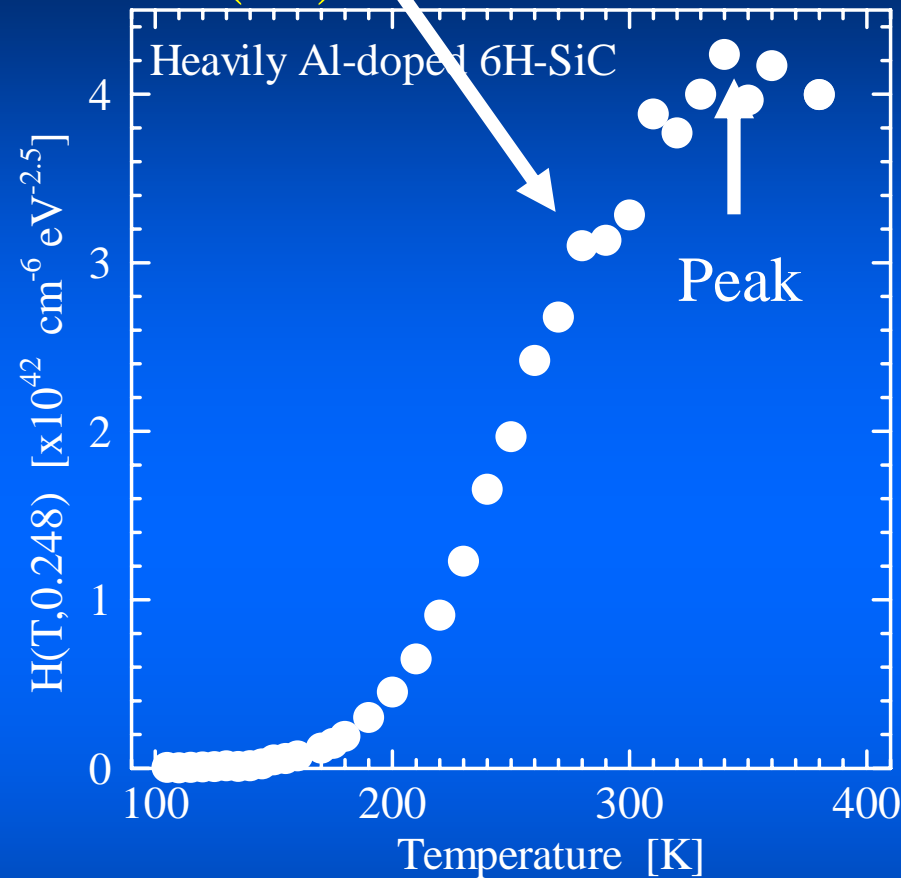
Average energy of acceptor level and excited state levels

$$\overline{E_{\text{ex}}(T)} = \frac{\sum_{r=2} (\Delta E_A - \Delta E_r) g_r \exp\left(-\frac{\Delta E_A - \Delta E_r}{kT}\right)}{1 + \sum_{r=2} g_r \exp\left(-\frac{\Delta E_A - \Delta E_r}{kT}\right)}$$

Heavily Al-doped 6H-SiC



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



From the peak,

$$N_A = 2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ and}$$

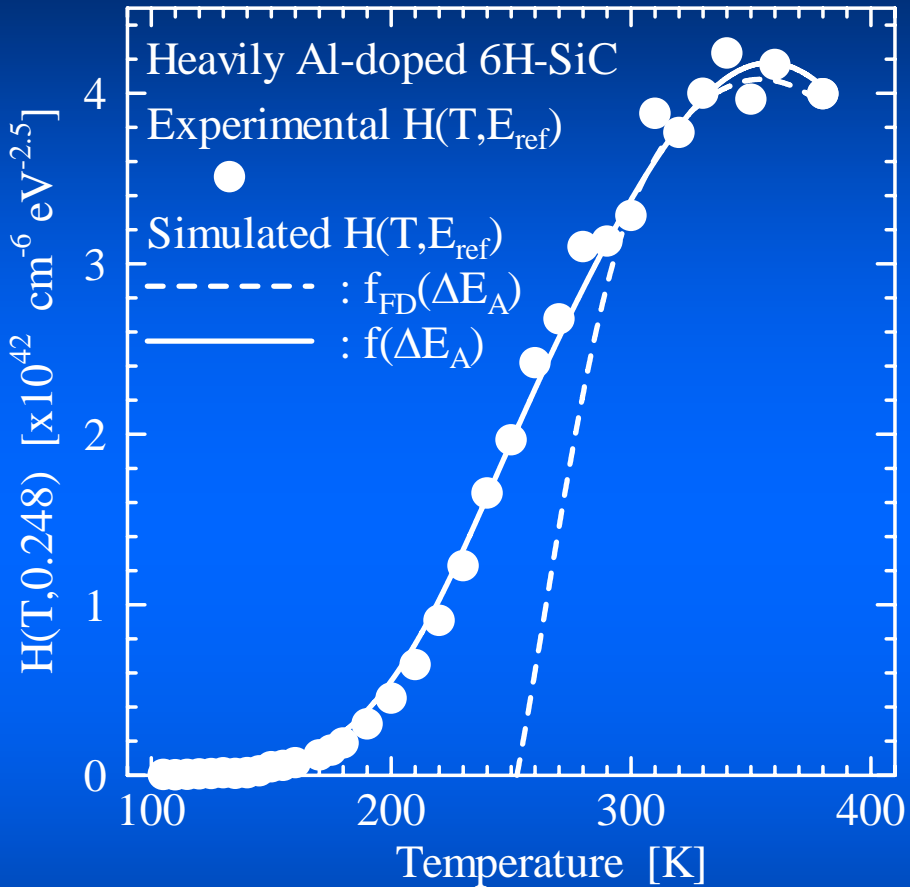
$$N_A = 3.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ and}$$

$$E_A = 180 \text{ meV for } f_{\text{FD}}(E_A)$$

$$E_A = 180 \text{ meV for } f(E_A)$$

Since the Al-doping density is $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,
the influence of excited states on $p(T)$ should be considered.

FCCS信号のシミュレーション



$$H(T, E_{\text{ref}}) = \frac{N_{\text{Al}}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{Al}} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_{\text{A}}(\Delta E_{\text{Al}}) - \frac{N_{\text{V0}} N_{\text{D}}}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}} - \Delta E_{\text{F}}}{kT}\right)$$

The $H(T, E_{\text{ref}})$ simulation for $f(\Delta E_A)$ is in better agreement with the experimental $H(T, E_{\text{ref}})$ than that for $f_{\text{FD}}(\Delta E_A)$.

	Heavily doped 6H-SiC		Lightly doped 6H-SiC	
	$f(E_A)$	$f_{FD}(E_A)$	$f(E_A)$	$f_{FD}(E_A)$
N_A [cm ⁻³]	3.2x10¹⁸	2.5x10¹⁹	4.1x10¹⁵	4.9x10¹⁵
E_A [meV]	180	180	212	199
Doping density [cm ⁻³]	4.2x10¹⁸		~6x10¹⁵	

**Only in heavily doped samples,
 $f_{FD}(E_A)$ cannot be used to analyze $p(T)$.**

なぜ励起状態を考慮した分布関数を用いると
妥当なアクセプタ密度が、正孔密度の温度依
存性から見積もれるのだろうか？

Acceptor degeneracy factor

In $f_{\text{FD}}(E_A)$

$$g_A = 4$$

In $f(E_A)$

$$g_A(T) = g_A \left[1 + \sum_{r=2} g_r \exp\left(\frac{\Delta E_r - \Delta E_A}{kT}\right) \right] \exp\left(-\frac{\overline{E_{\text{ex}}(T)}}{kT}\right)$$

Degeneracy factors of excited states

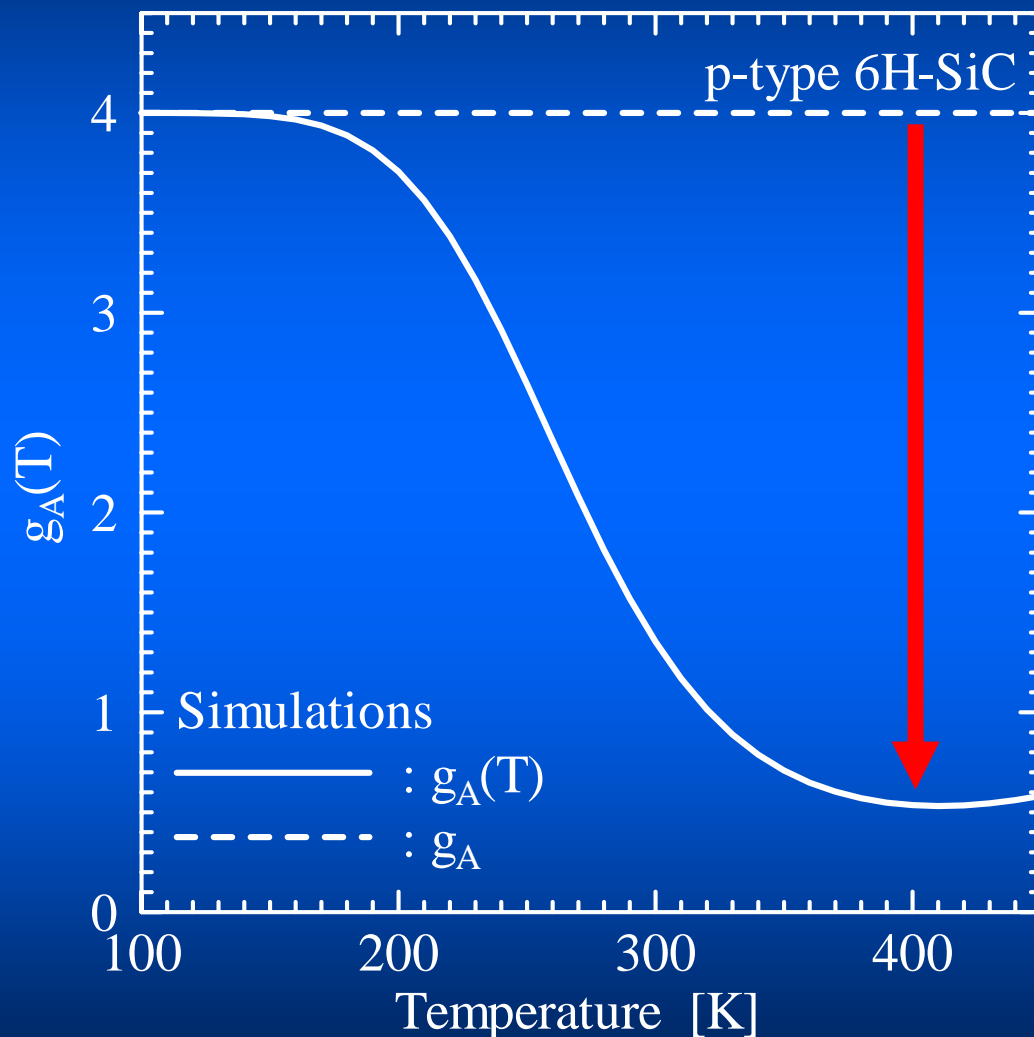
Excited state levels

Average energy of acceptor level and excited state levels

$$\overline{E_{\text{ex}}(T)} = \frac{\sum_{r=2} (\Delta E_A - \Delta E_r) g_r \exp\left(-\frac{\Delta E_A - \Delta E_r}{kT}\right)}{1 + \sum_{r=2} g_r \exp\left(-\frac{\Delta E_A - \Delta E_r}{kT}\right)}$$

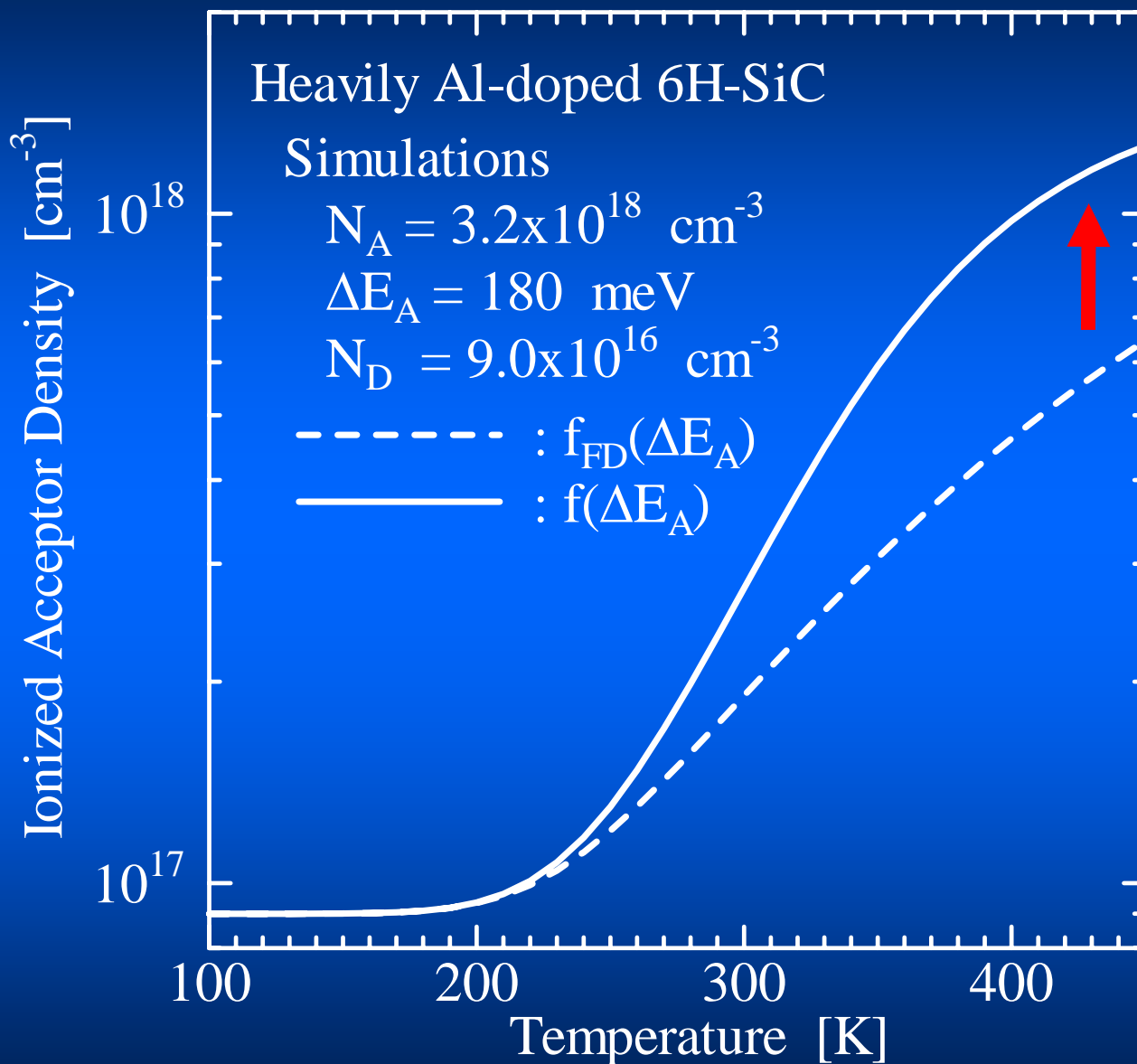
分布関数

$$f(\Delta E_A) = \frac{1}{1 + \underline{g_A(T)} \exp\left(\frac{\Delta E_A - \Delta E_F}{kT}\right)}$$



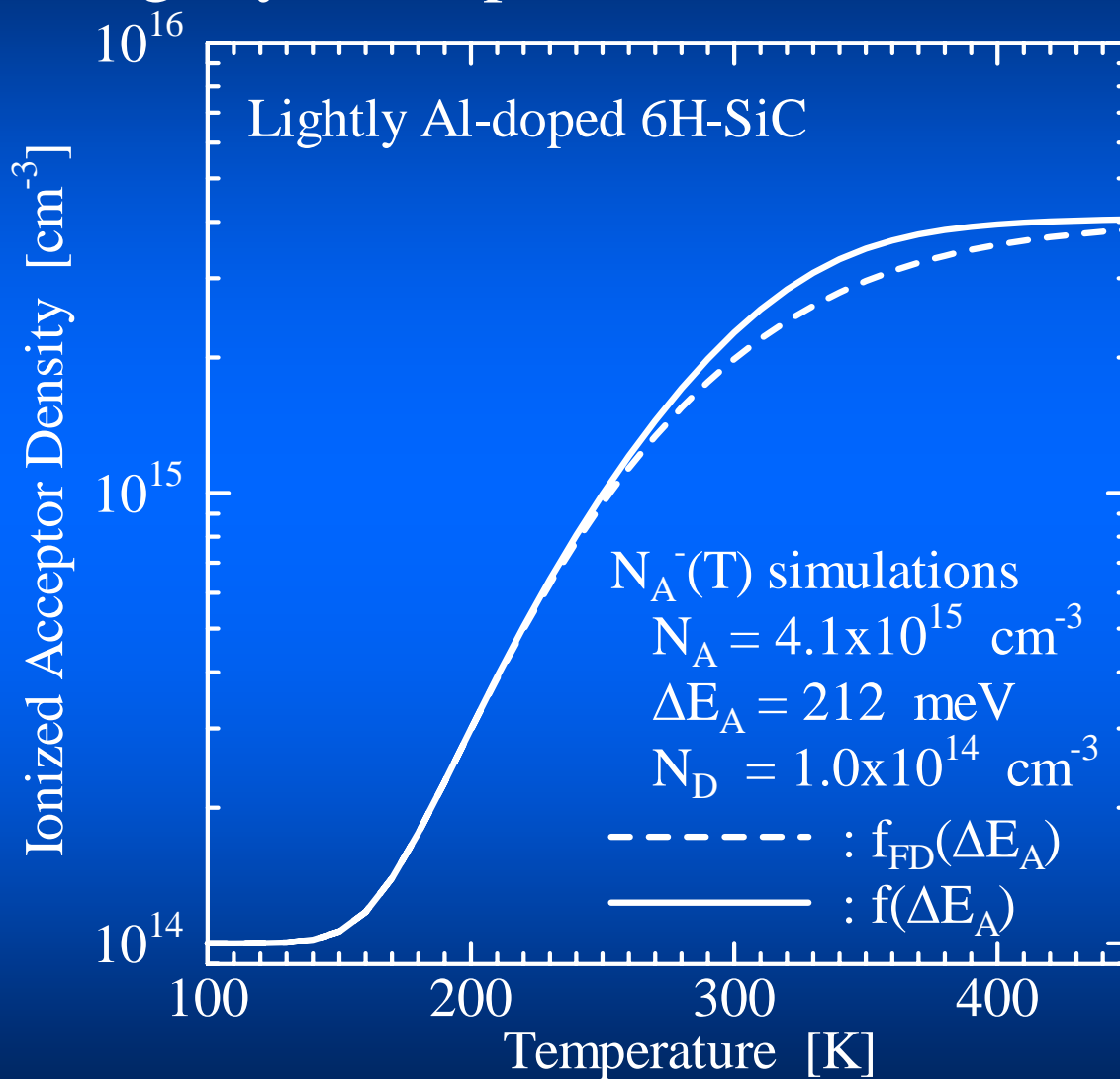
$g_A(T)$ が高温では励起状態の影響で4より小さくなる。

イオン化したアクセプタ密度の温度依存性



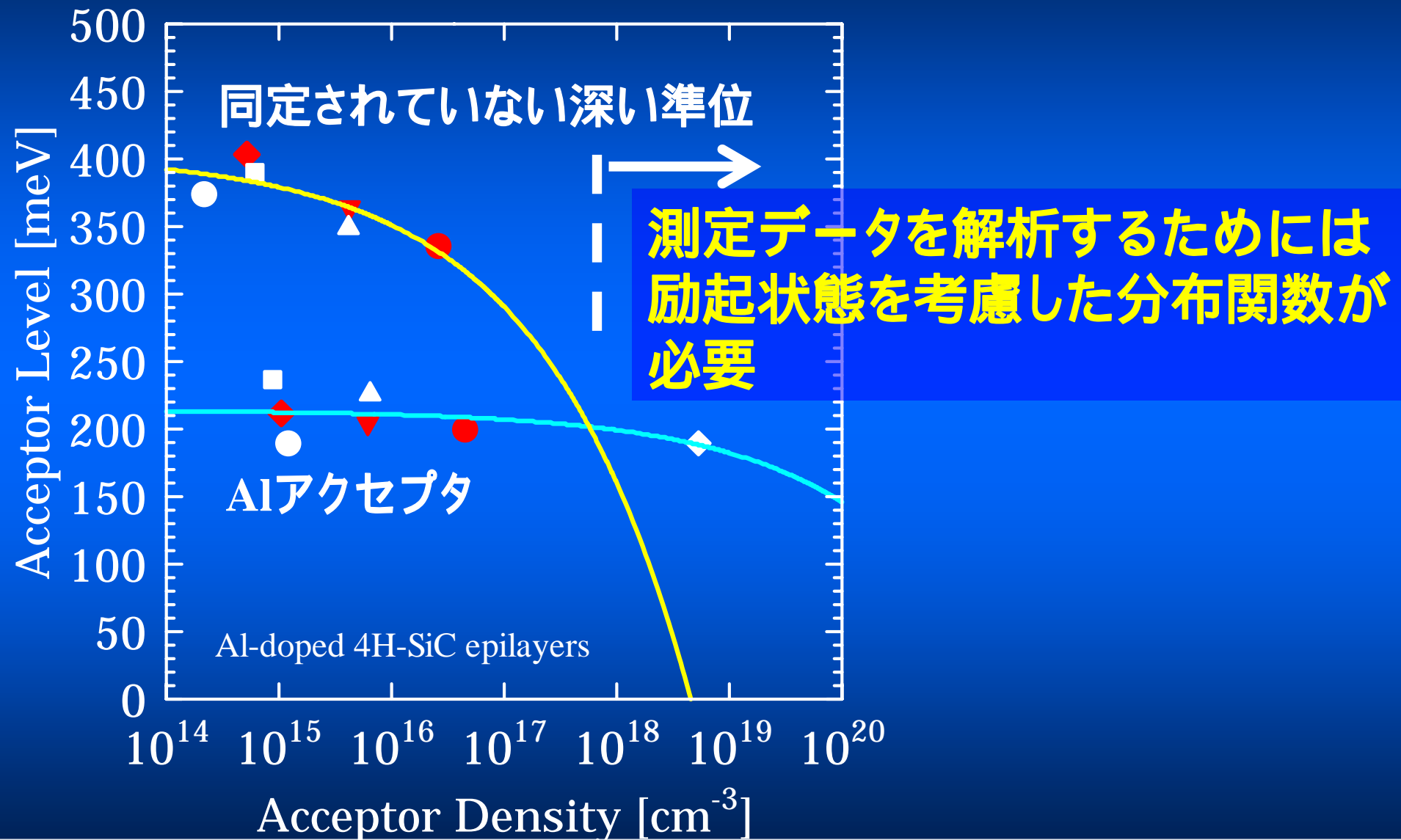
高温ではアクセプタのイオン化率が高くなる。

Lightly Al-doped 6H-SiCの場合



Lightly dopedの場合は、イオン化アクセプタ密度はほぼ同じ。

p型4H-SiC中のアクセプタ準位のアクセプタ密度依存性



ドーパント準位のドーパント密度依存性は
何に役立つのか？

デバイスシミュレーションに必要なパラメータ

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{q(N_D^+ - N_A^- + p - n)}{\epsilon_S\epsilon_0}$$

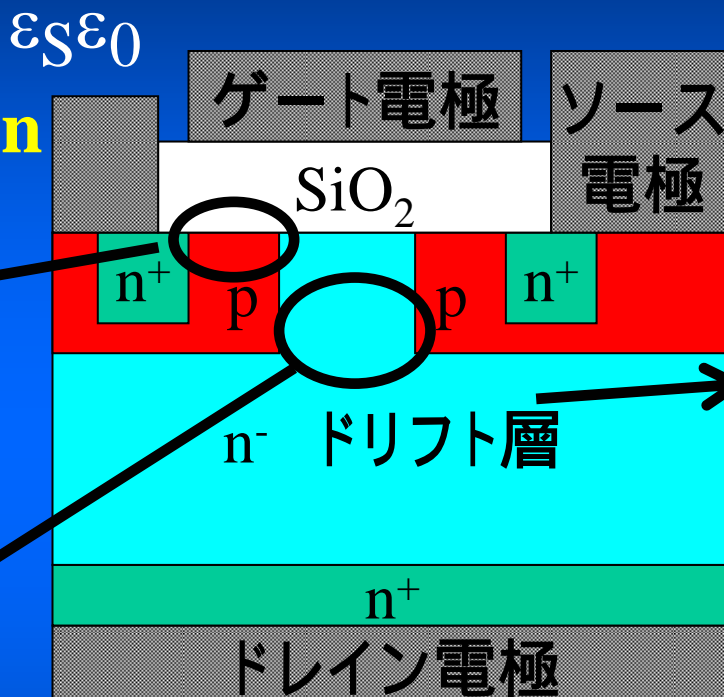
Poisson equation

MOS界面

アクセプタ準位の
アクセプタ密度依
存性

空乏層幅

1. ドナー準位のドナー密度依存性
2. アクセプタ準位のアクセプタ密度依存性



resistivity

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\mu_n n}$$

ドリフト抵抗

1. ドナー準位のドナー密度依存性
2. 電子移動度のドナー密度依存性
3. 電子移動度の温度依存性

1. ドーパント準位のドーパント密度依存性

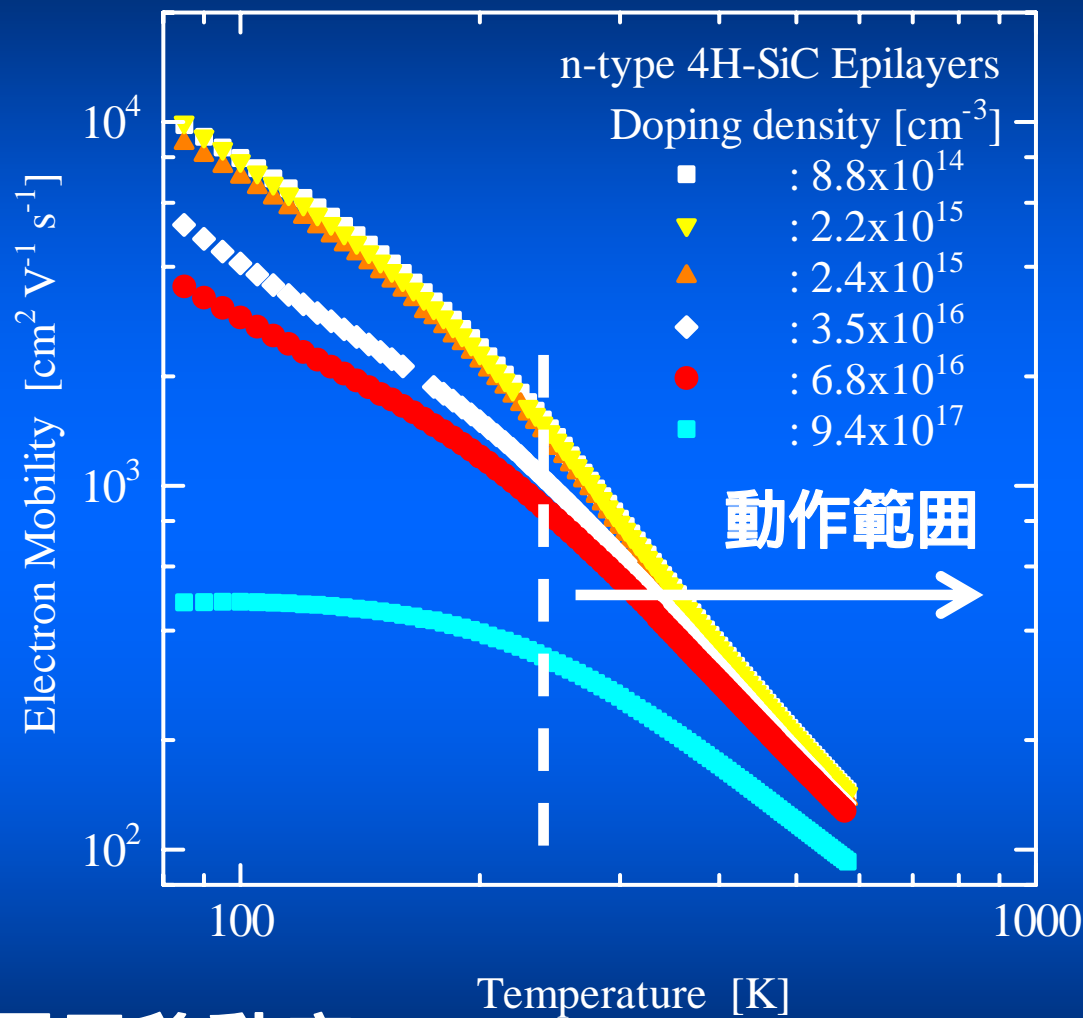
2. 移動度のドーパント密度依存性および温度依存性

ホール効果測定から多数キャリア移動度の
温度依存性の測定ができる。



多数キャリア移動度のドーパント密度及び温度
依存性の経験式の決定が可能。

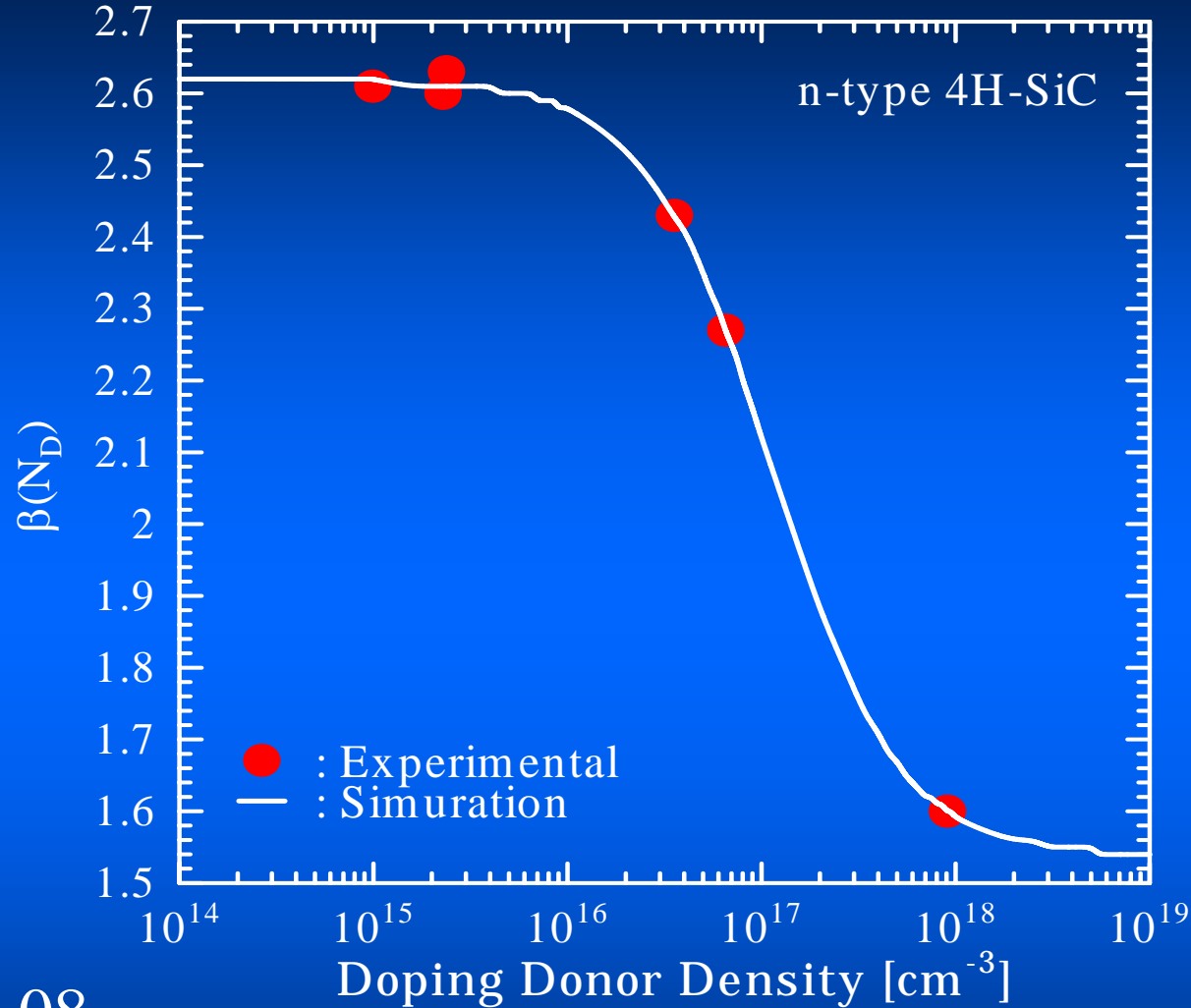
電子移動度のドナー密度依存性および温度依存性



動作温度範囲の電子移動度

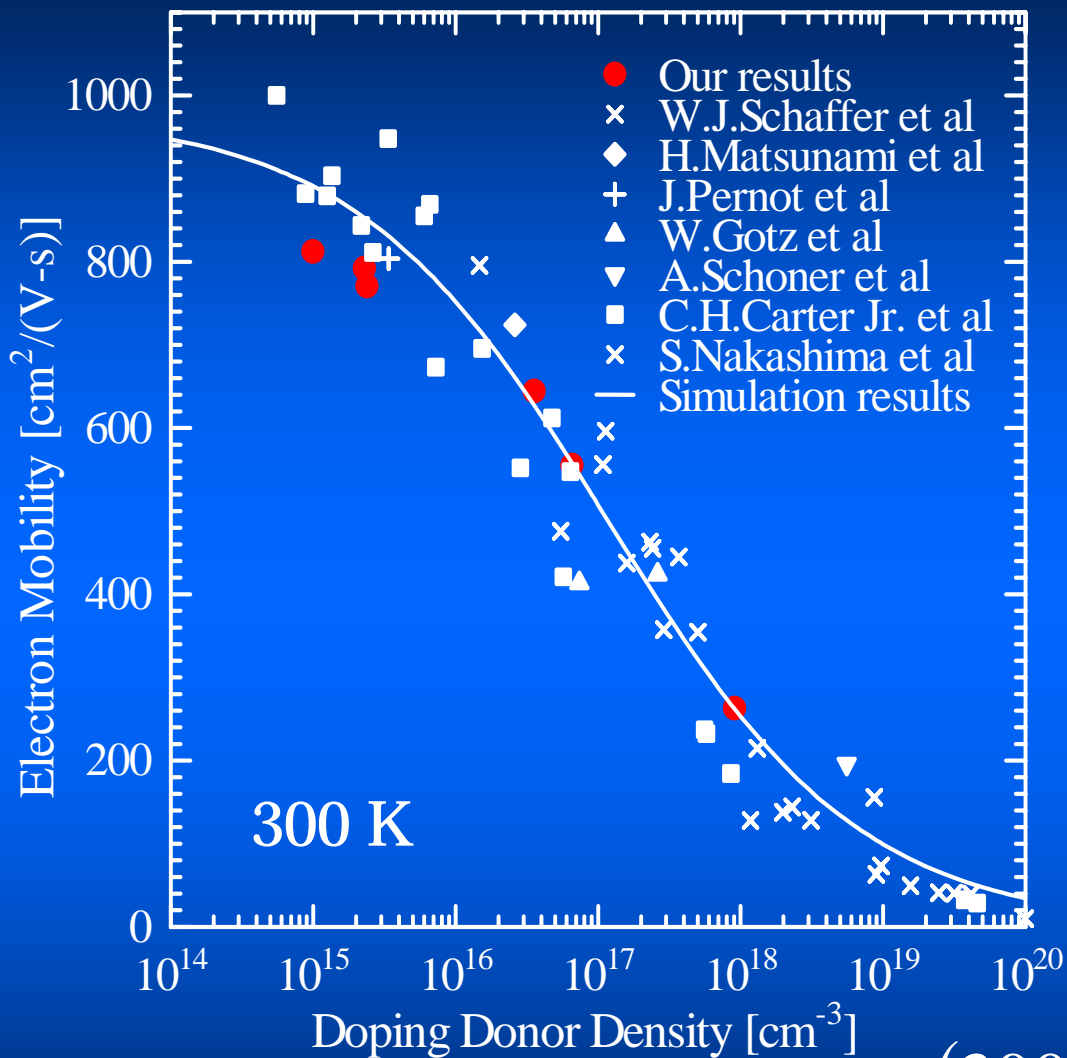
$$\mu_n(T, N_D) = \mu_n(300, N_D) \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{-\beta(N_D)}$$

温度のべき乗の ドナー密度依存性



$$\beta(N_D) = 1.54 + \frac{1.08}{1 + \left(\frac{N_D}{1.14 \times 10^{17}} \right)^{1.35}}$$

S. Kagamihara et al.
J. Appl. Phys.
96(2004)5601.



室温での電子移動度のドナー密度依存性

S. Kagamihara et al.

J. Appl. Phys.

96(2004)5601.

$$\mu_n(300, N_D) = \frac{977}{1 + \left(\frac{N_D}{1.17 \times 10^{17}} \right)^{0.49}}$$

p型4H-SiC

$$\mu_p(T, N_A) = \mu_p(300, N_A) \cdot \left(\frac{T}{300} \right)^{-\beta(N_A)}$$

$$\beta(N_A) = 2.51 + \frac{0.53}{1 + \left(\frac{N_A}{8.64 \times 10^{17}} \right)^{0.456}}$$

$$\mu_p(300, N_A) = 37.6 + \frac{68.4}{1 + \left(\frac{N_A}{2.97 \times 10^{18}} \right)^{0.356}}$$

その他の応用

多数キャリア密度に影響を与える欠陥の密度とエネルギー準位の評価

p型Siに放射線を照射した場合、

- 1 . アクセプタ密度の減少
- 2 . 空格子点 (Divacancy) 密度の増加
- 3 . Donor-like欠陥密度の増加

の評価が行えた。

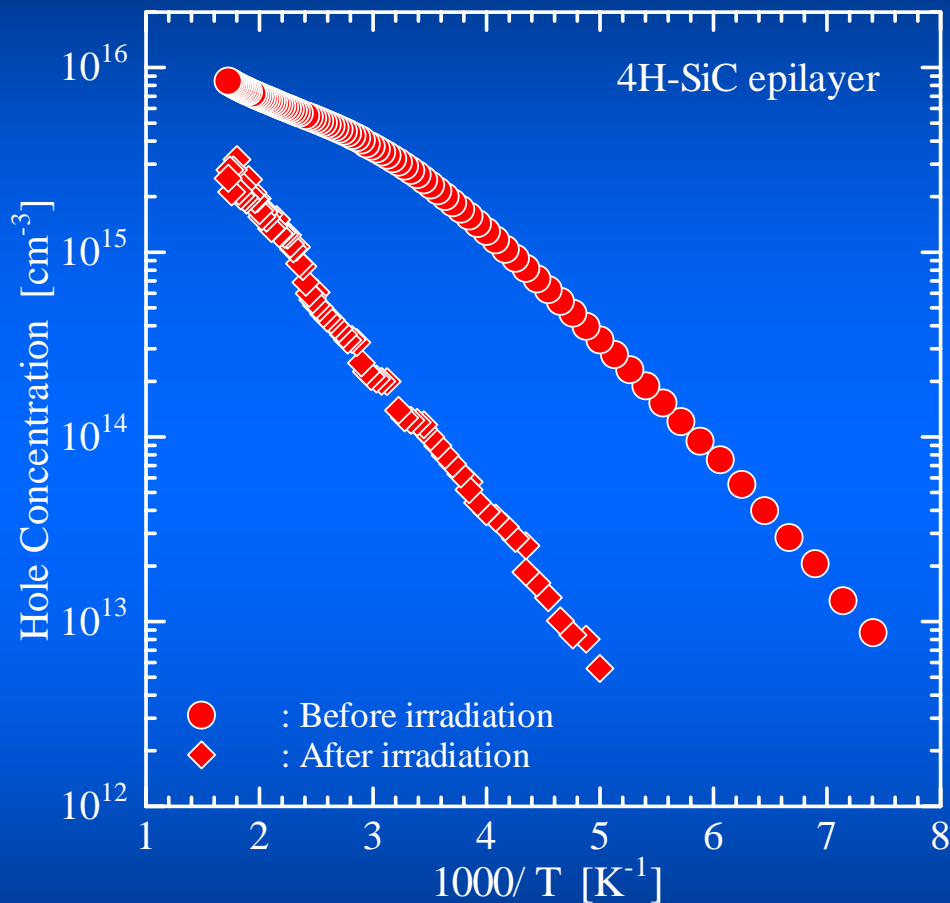
H. Matsuura et al. Jpn. J. Appl. Phys. 37(1998)6034.

H. Matsuura et al. Appl. Phys. Lett. 79(2000)2092.

H. Matsuura et al. Jpn. J. Appl. Phys. 42(2003)5187.

p型4H-SiCに電子線を照射した場合

電子線 4.6 MeV
 $2.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$



	Before irradiation	After irradiation
E_{A1} [meV]	203	206
N_{A1} [cm ⁻³]	6.2×10^{15}	8.2×10^{14}
E_{A2} [meV]	365	383
N_{A2} [cm ⁻³]	4.2×10^{15}	3.4×10^{15}
N_D [cm ⁻³]	3.4×10^{13}	7.4×10^{14}

Alアクセプタ密度が電子線照射で減少している。

まとめ

1. 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には、多数キャリア密度に影響を与える不純物及び欠陥の情報が含まれている。
2. FCCS法を用いると、これらの不純物及び欠陥の密度とエネルギー準位を評価できる。
3. 高濃度にドーパントが添加された半導体の場合 (**測定温度においてフェルミ準位がドーパント準位と許容帯端との間にある場合**)、フェルミディラック分布関数ではなく、励起状態を考慮した分布関数を用いる必要がある。