

# Al-doped 4H-SiCエピ膜の正孔密度減少の 電子線照射エネルギー依存性

松浦秀治, 鏡原聡, 伊藤裕司  
大阪電気通信大学

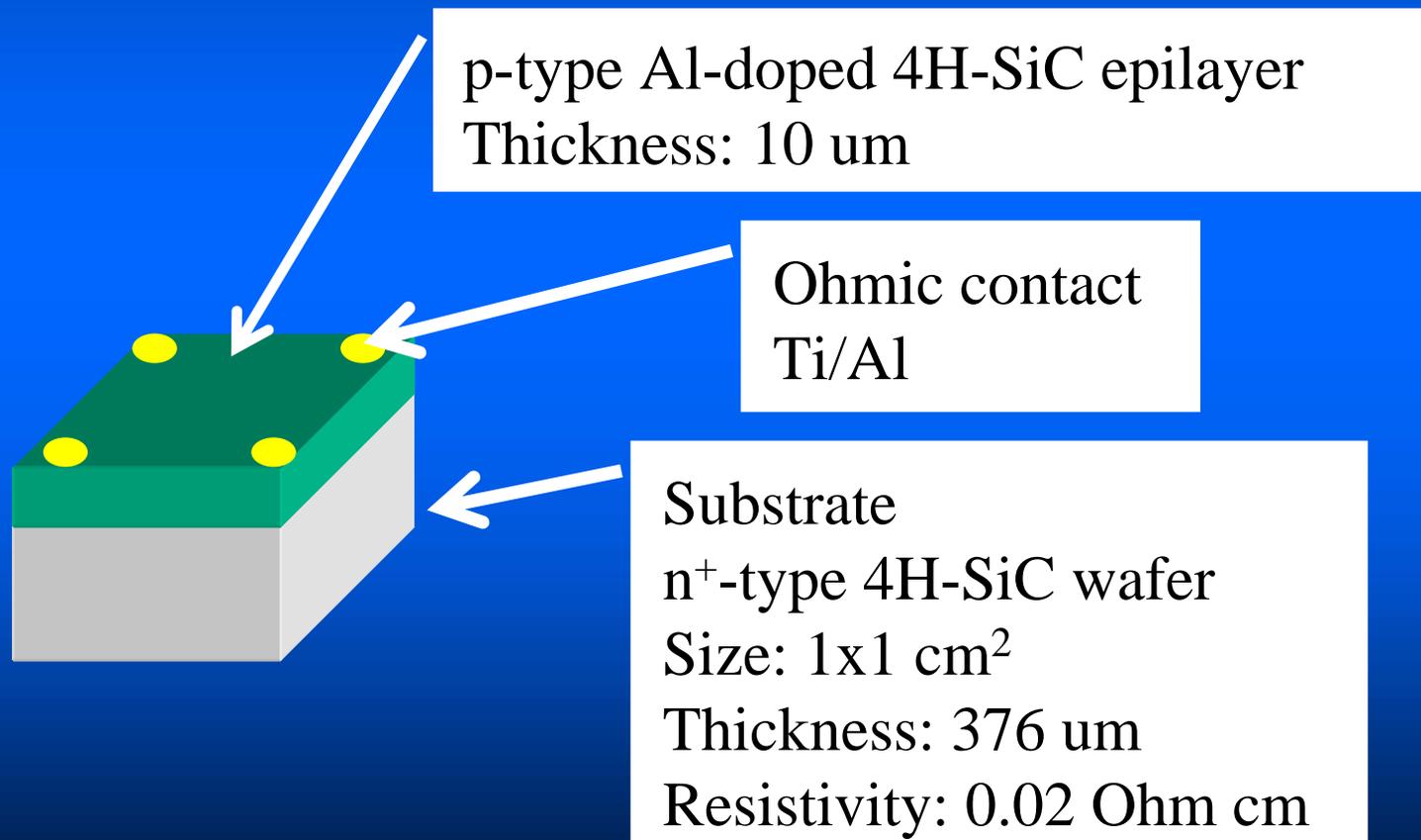
大島武, 伊藤久義  
日本原子力研究開発機構

第6回半導体の放射線照射効果研究会

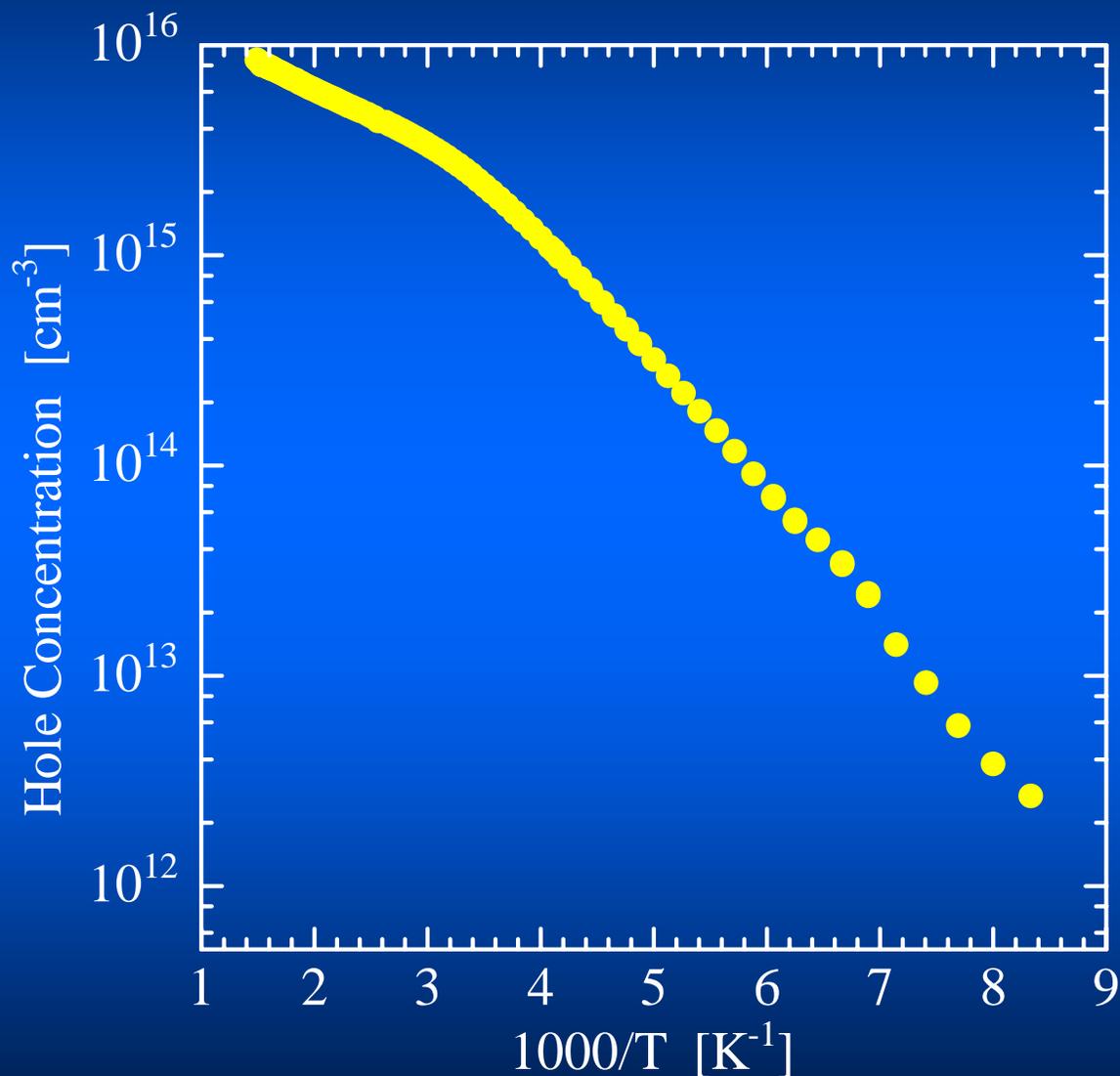
2005年12月9日、日本原子力研究開発機構、高崎量子応用研究所

## 背景

ホール効果測定から、p型SiCの正孔密度の温度依存性を測定し、これを用いてアクセプタと欠陥の評価を行ってきた。



# 正孔密度の温度依存性

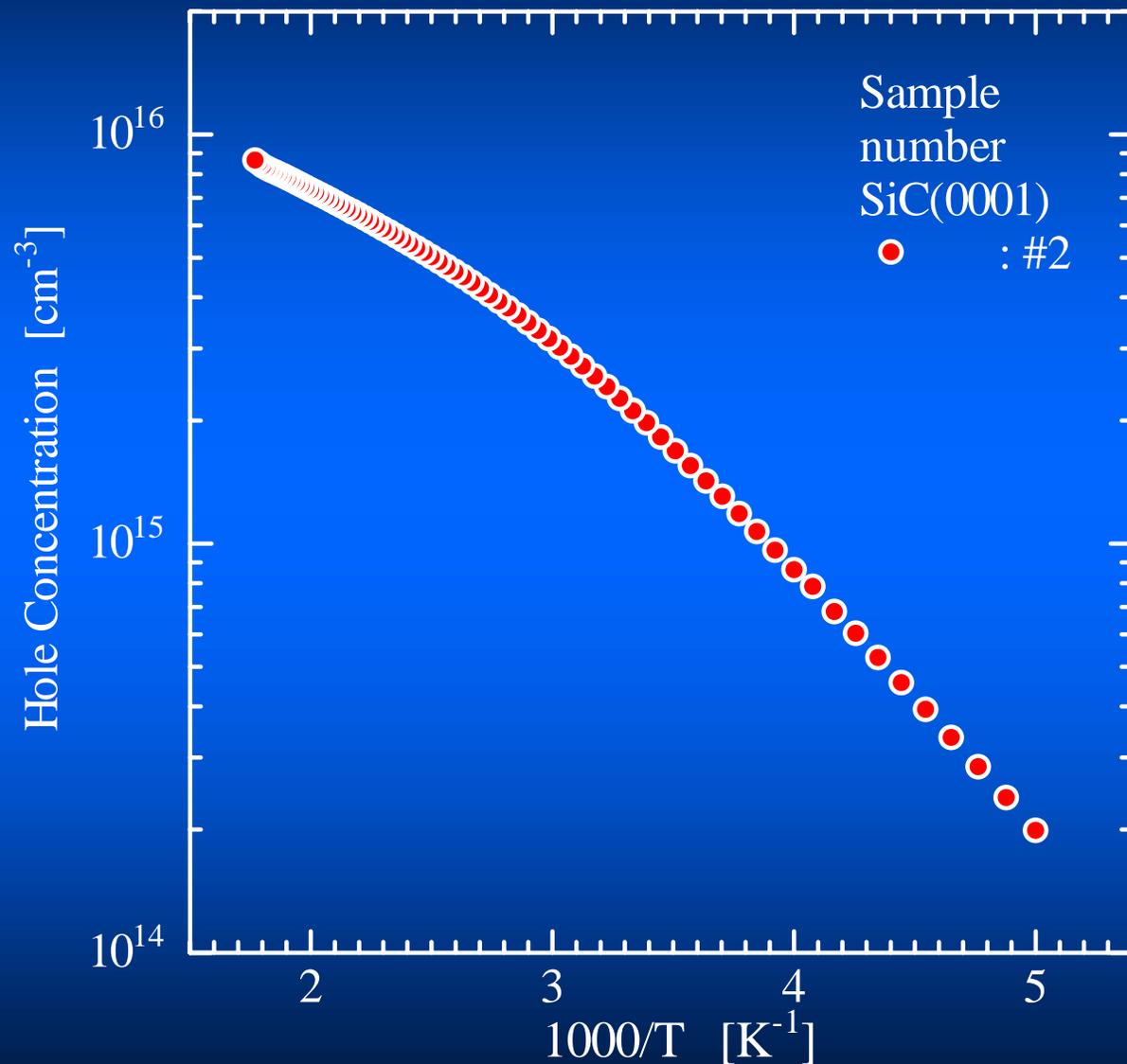


多数キャリア密度に  
影響を与える欠陥の  
評価

# 目的

1. p型SiCの耐放射線性
2. 深い欠陥準位の起源

# 正孔密度の温度依存性



Lightly Al-doped  
4H-SiC エピ膜

## Free Carrier Concentration Spectroscopy (FCCS)

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

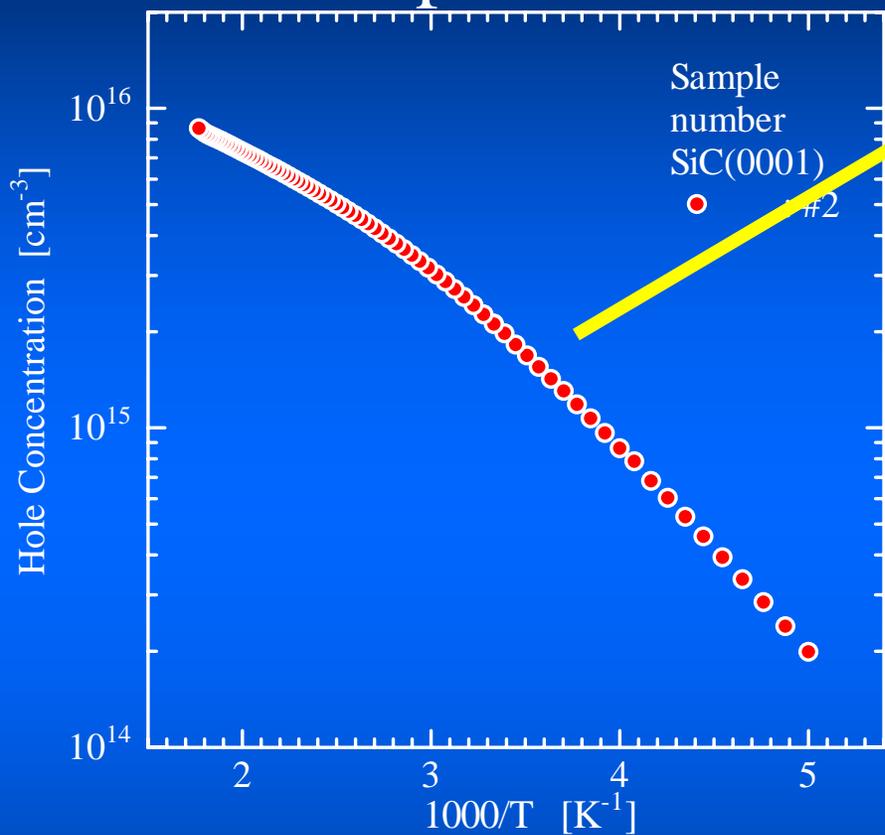
FCCS信号はアクセプタ準位や欠陥準位に対応する温度でピークを示す評価関数

$$\Delta E_i \cong kT_{\text{peak}i} + E_{\text{ref}}$$

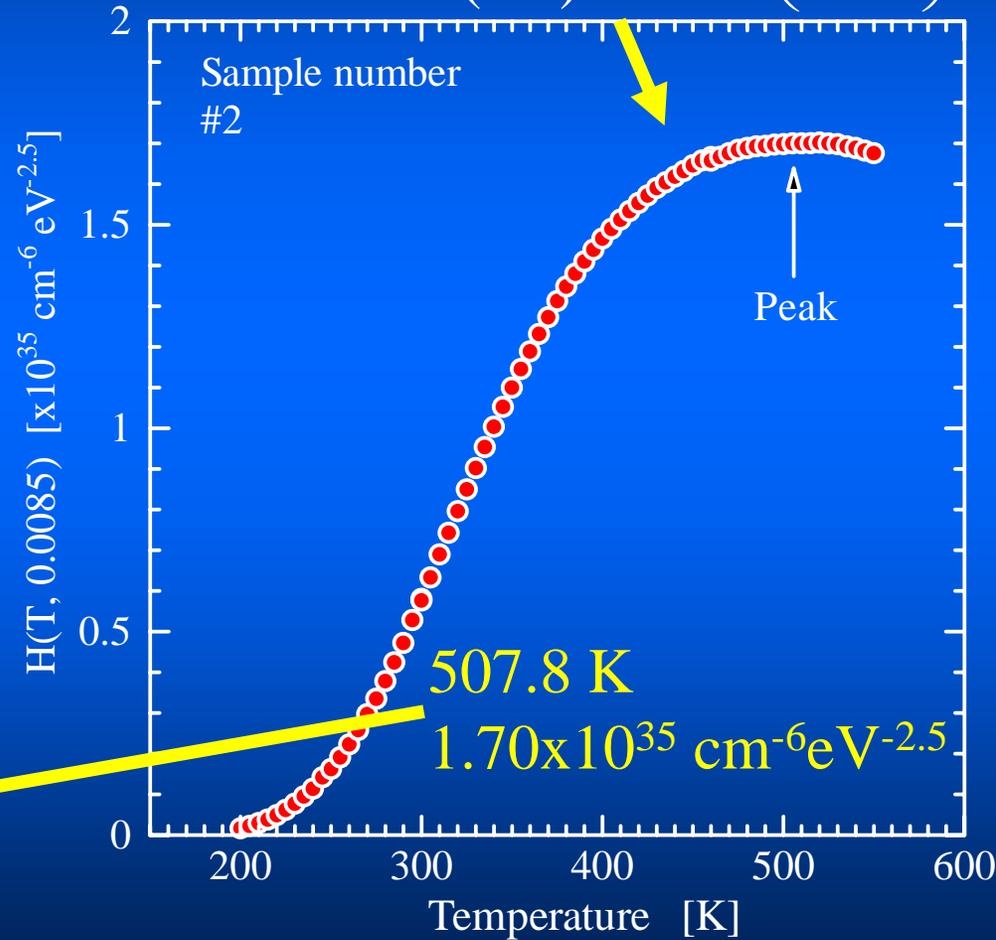
$$N_i \cong kT_{\text{peak}i} H(T_{\text{peak}i}, E_{\text{ref}}) \exp(-1)$$

FCCSで求めた密度やエネルギー準位の検証は、これらの値を用いて $p(T)$ をシミュレーションし、実験結果との一致する程度から調べることができる。

# Al-doped 4H-SiCエピ膜 (膜厚10 μm)



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



$\Delta E_{A2} = 348.7 \text{ meV}$   
 $N_{A2} = 4.15 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

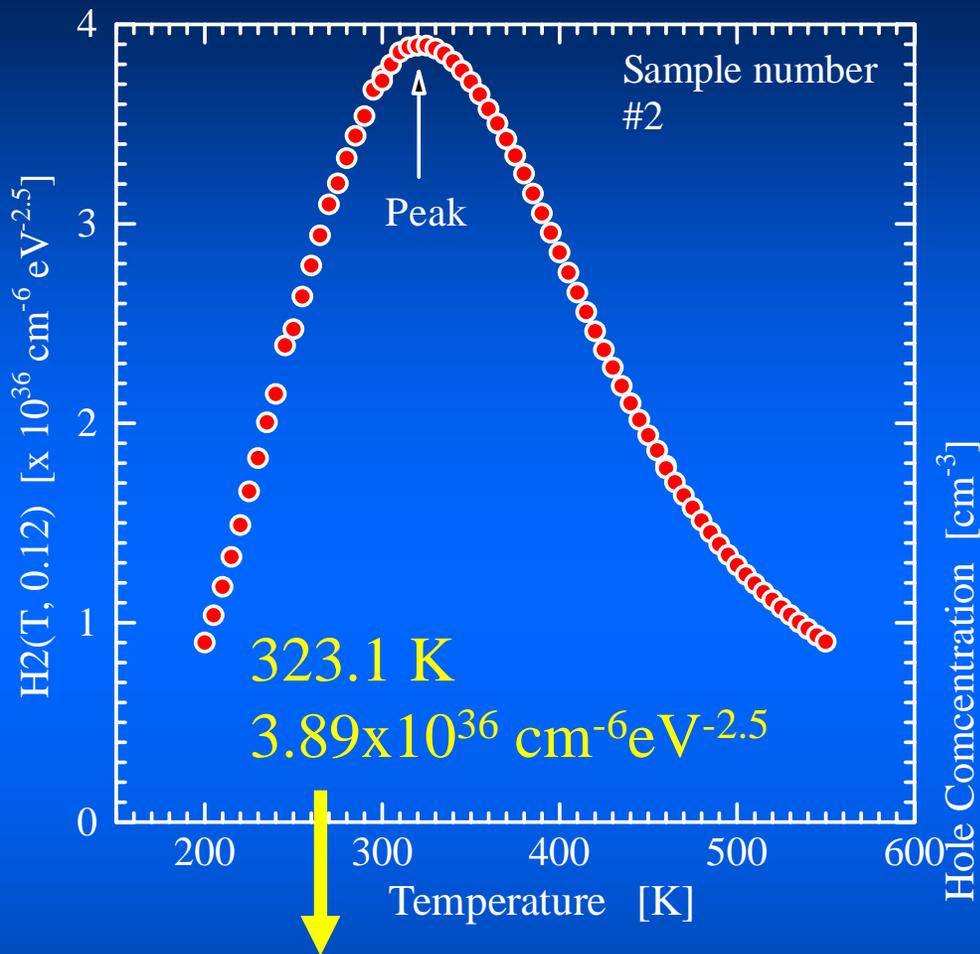
# 理論から導かれる評価関数

$$H(T, E_{\text{ref}}) = \sum_i \frac{N_{A_i}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{A_i} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_A(\Delta E_{A_i}) \\ - \frac{N_{V0} N_D}{kT} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}} - \Delta E_F}{kT}\right)$$

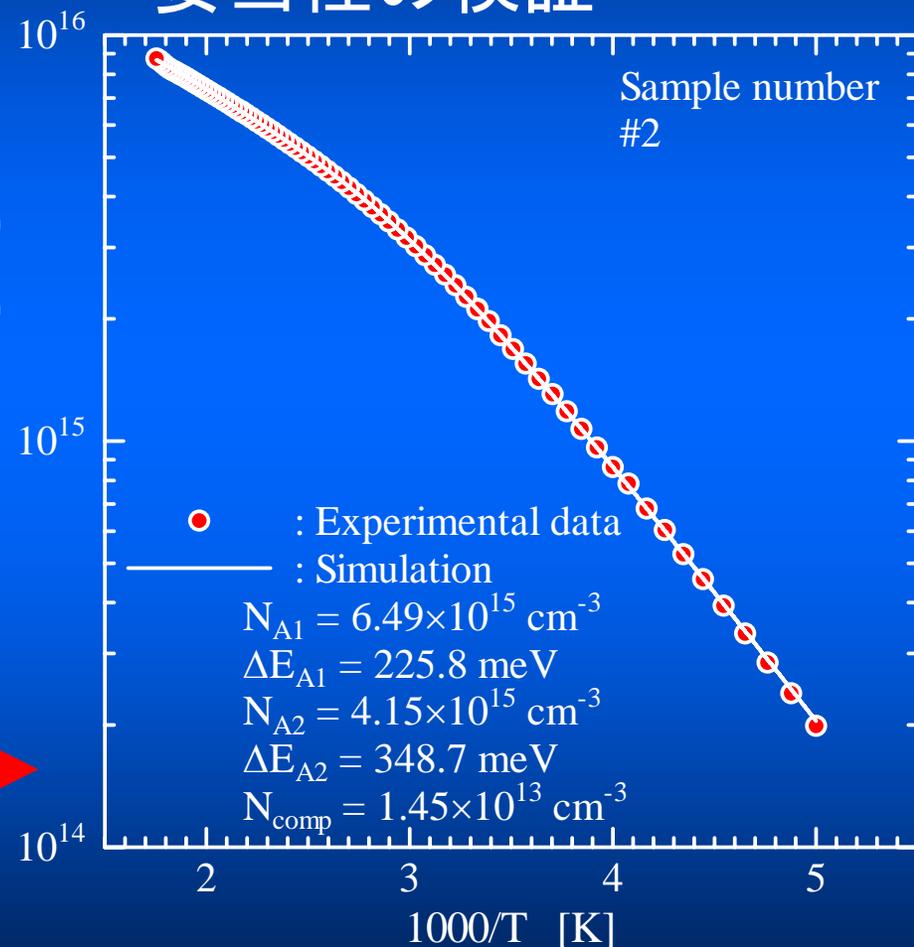
先に決定したアクセプタ ( $\Delta E_{A2}, N_{A2}$ ) の影響を取り除いた、FCCS 信号

$$H2(T, E_{\text{ref}}) = \frac{p(T)^2}{(kT)^{5/2}} \exp\left(\frac{E_{\text{ref}}}{kT}\right) \\ - \frac{N_{A2}}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_{A2} - E_{\text{ref}}}{kT}\right) I_A(\Delta E_{A2})$$

# 先ほど決定した準位の影響を除いた評価関数

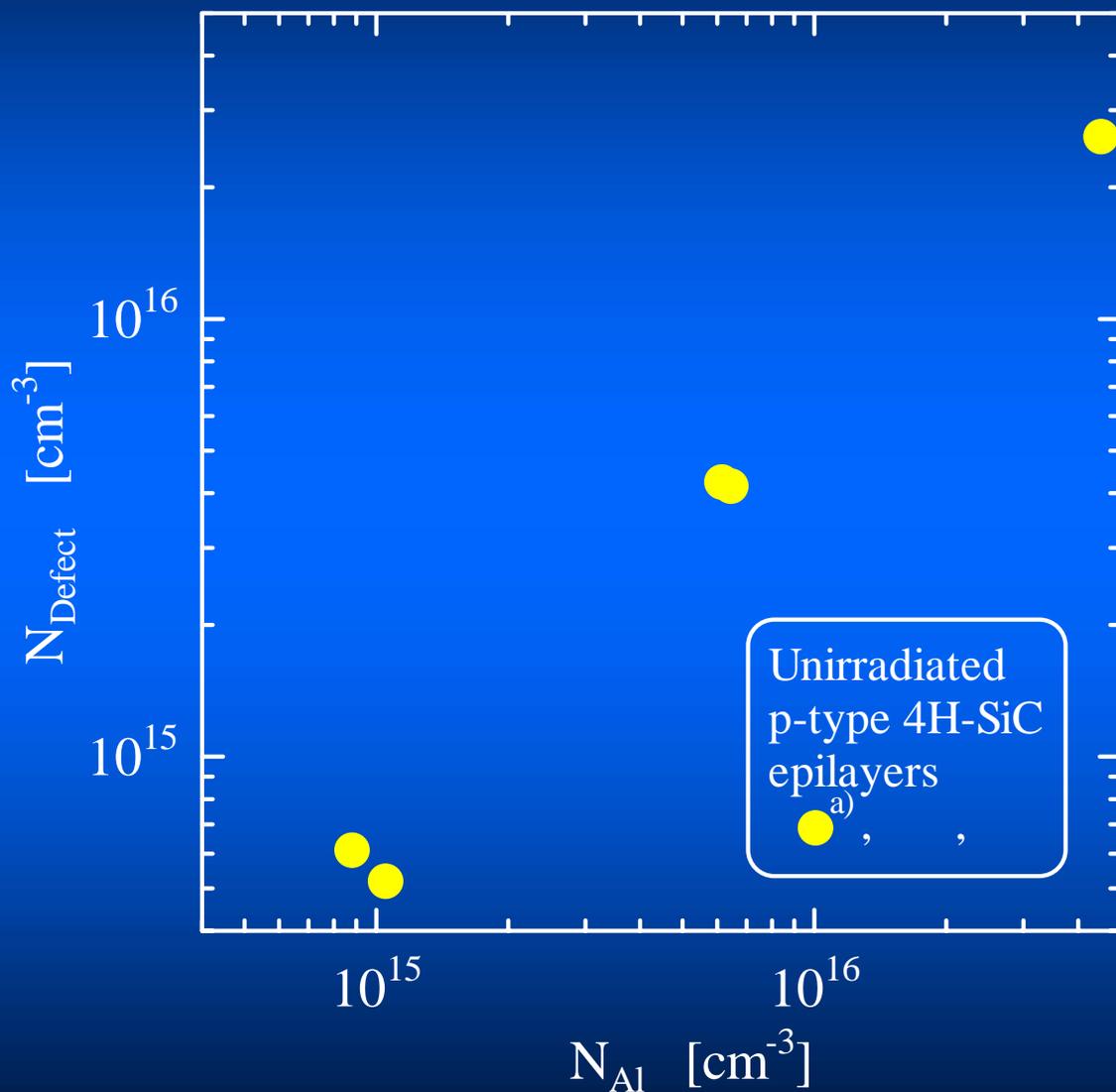


## FCCSで得た値の妥当性の検証



$$\Delta E_{A1} = 225.8\text{ meV}$$
$$N_{A1} = 6.49 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$$

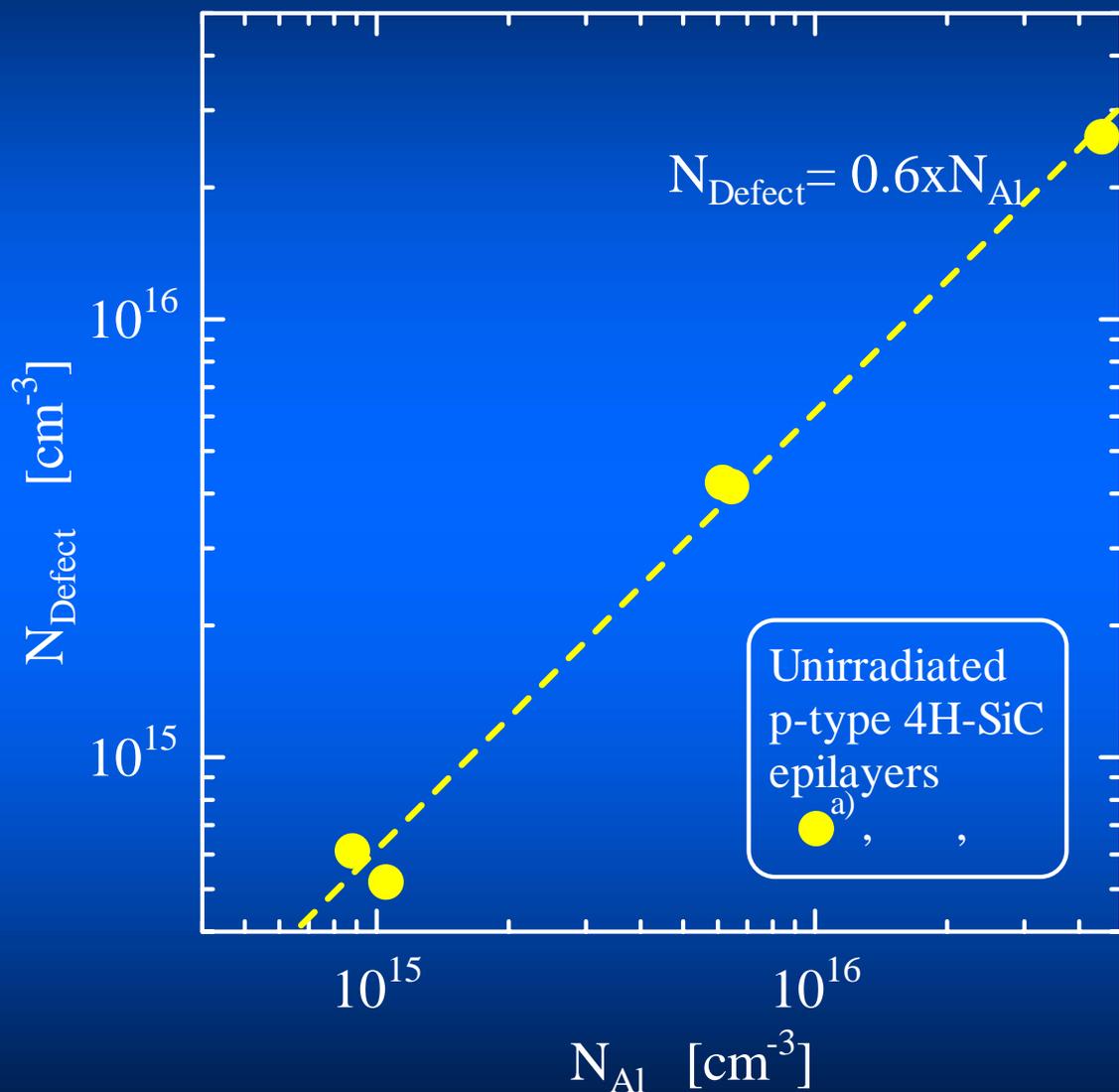
# 電子線未照射での $N_{\text{Al}}$ と $N_{\text{defect}}$ との関係



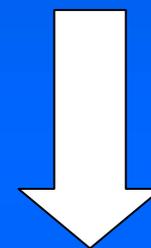
$N_{\text{Al}}$ :  
Al アクセプタ密度

$N_{\text{Defect}}$ :  
深い欠陥密度

# 電子線未照射での $N_{Al}$ と $N_{defect}$ との関係

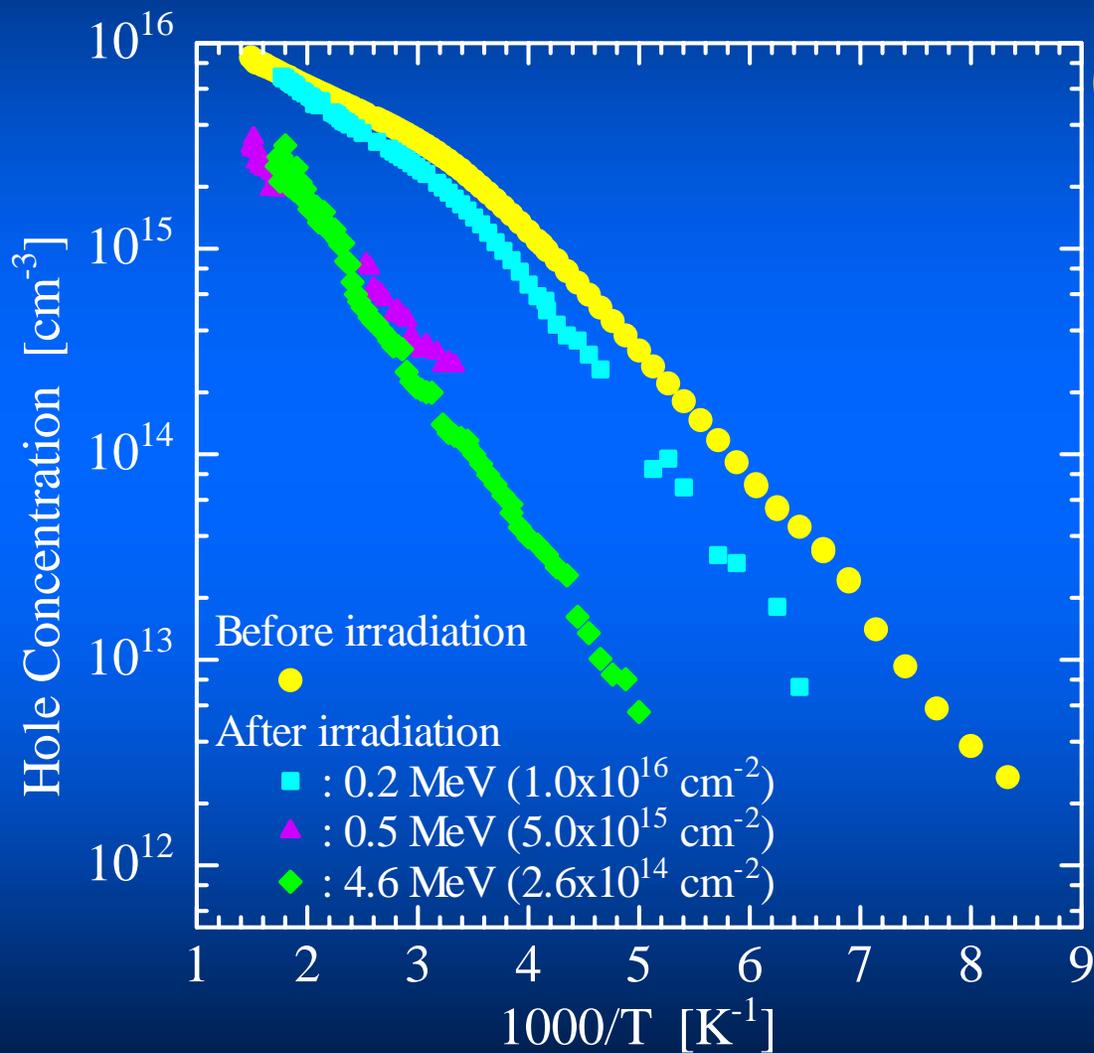


$$N_{Defect} = 0.6 \times N_{Al}$$



起源の分からない  
深い欠陥準位はAl  
と関連している。

# 異なるエネルギーでの電子線照射の影響

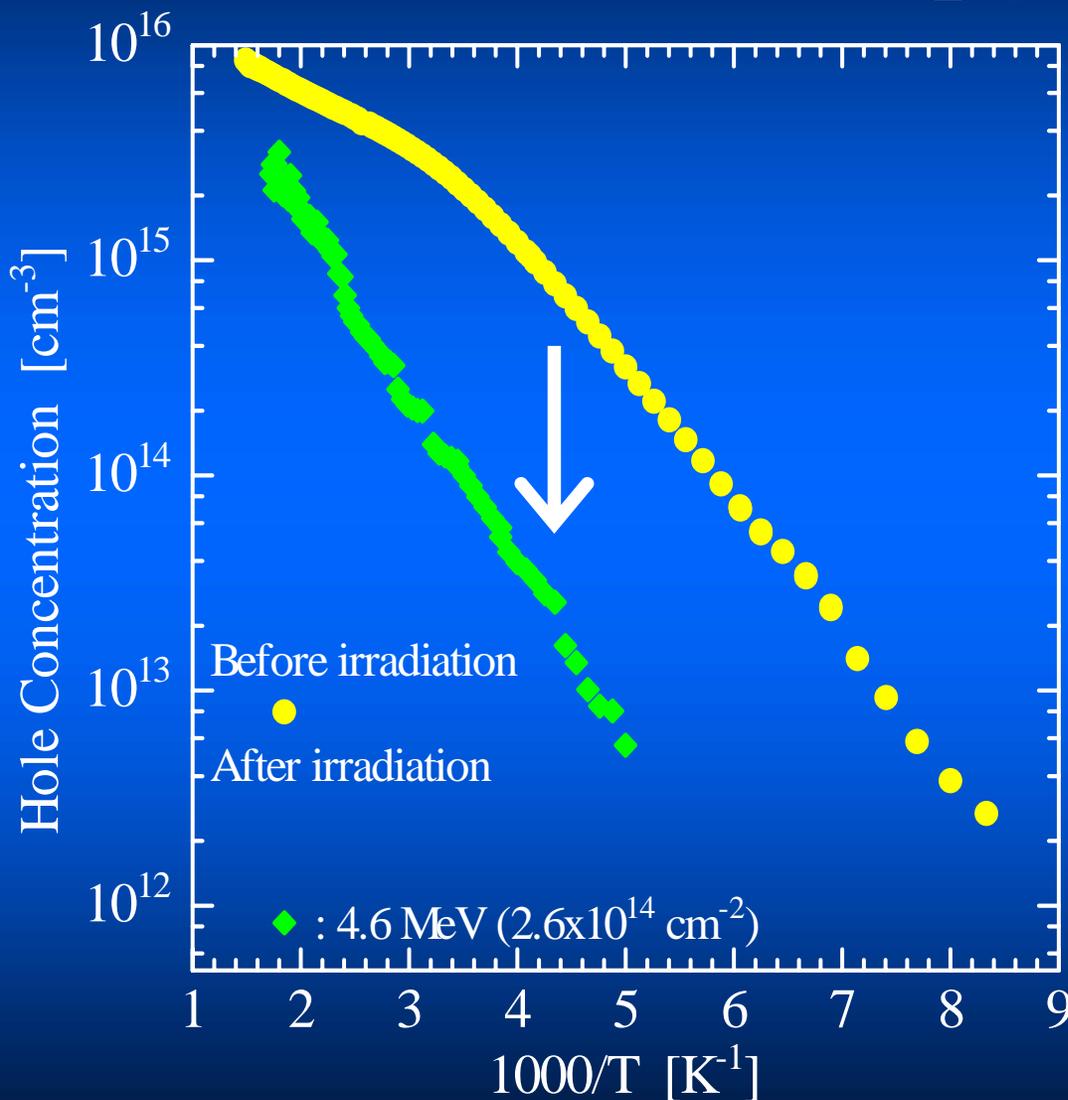


**0.5 MeV or 1 MeV** 電子線照射において、照射量  $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  では、高抵抗率化のため、ホール効果測定ができなかった。



電子線照射による  $p(T)$  の減少傾向は、電子線のエネルギー (0.2 MeV と  $>0.5 \text{ MeV}$ ) で異なる。

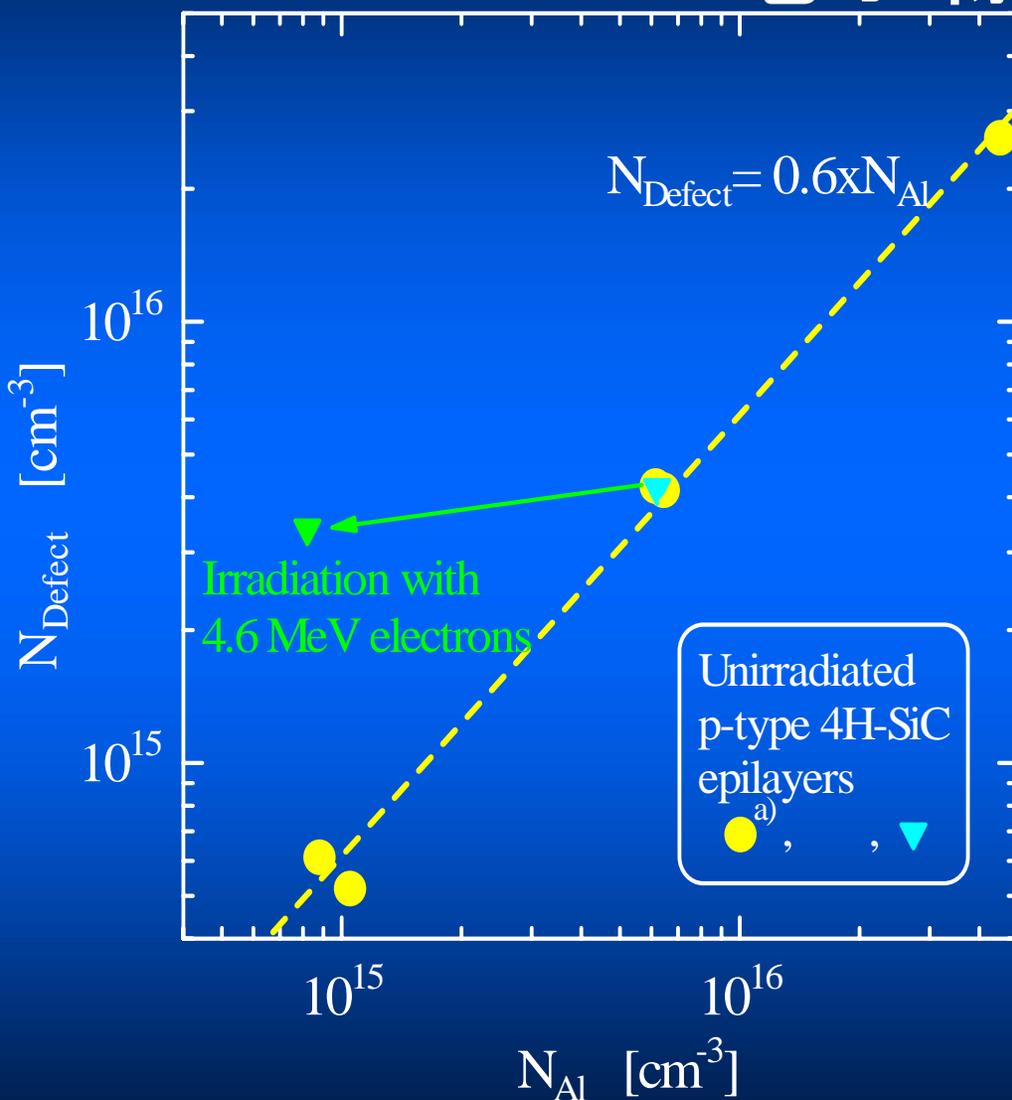
## 4.6 MeV電子線照射



4.6 MeV 電子線照射  
量 ( $2.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) は  
非常に少ないが、

p(T) の減少は大きい。

# 4.6 MeV電子線照射の場合

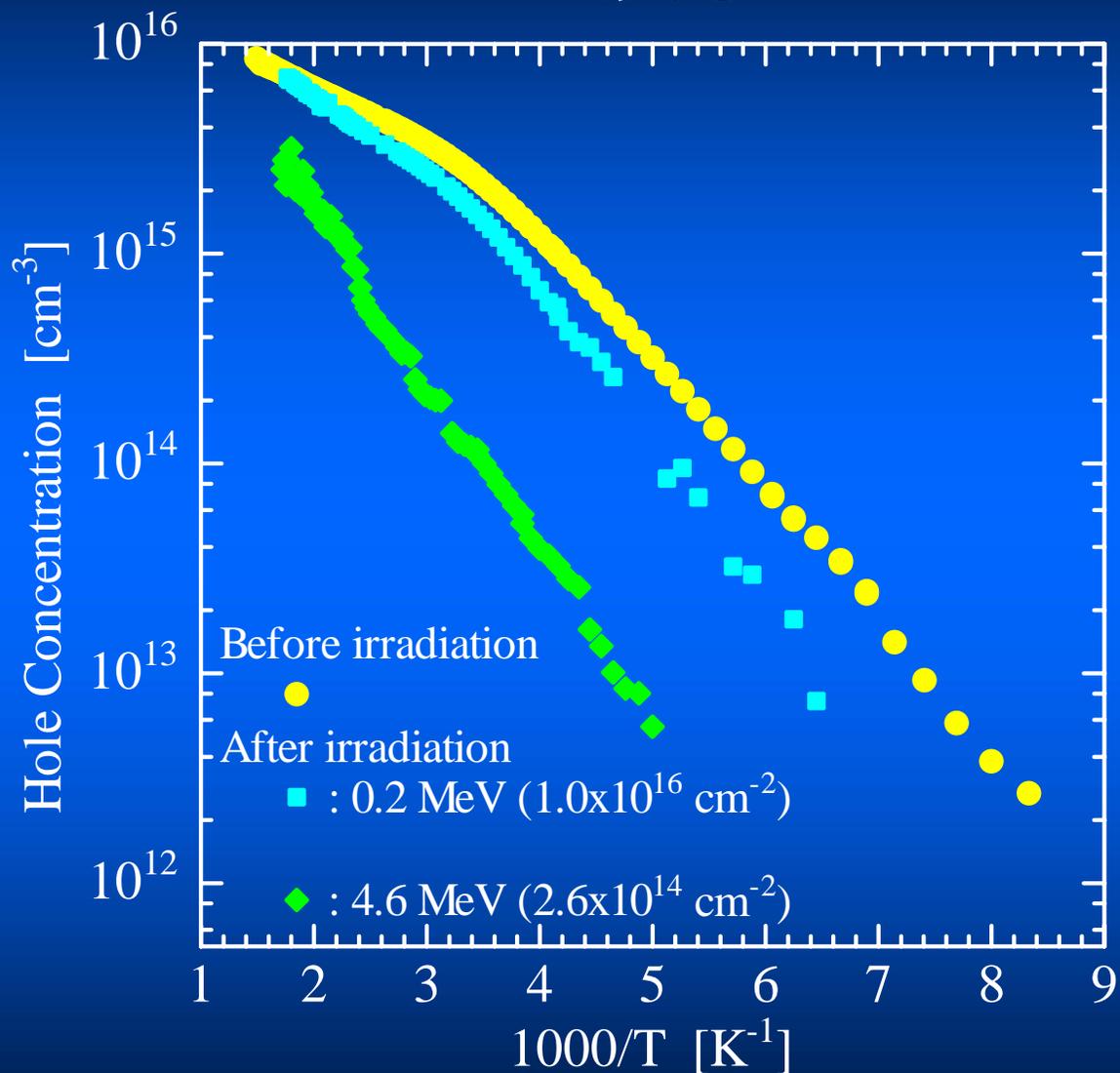


$N_{\text{Al}}$  は激減



$N_{\text{Defect}}$  は微減

# 0.2 MeV及び4.6 MeV 電子線照射



0.2 MeV電子線照射  
(1.0x10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup>)

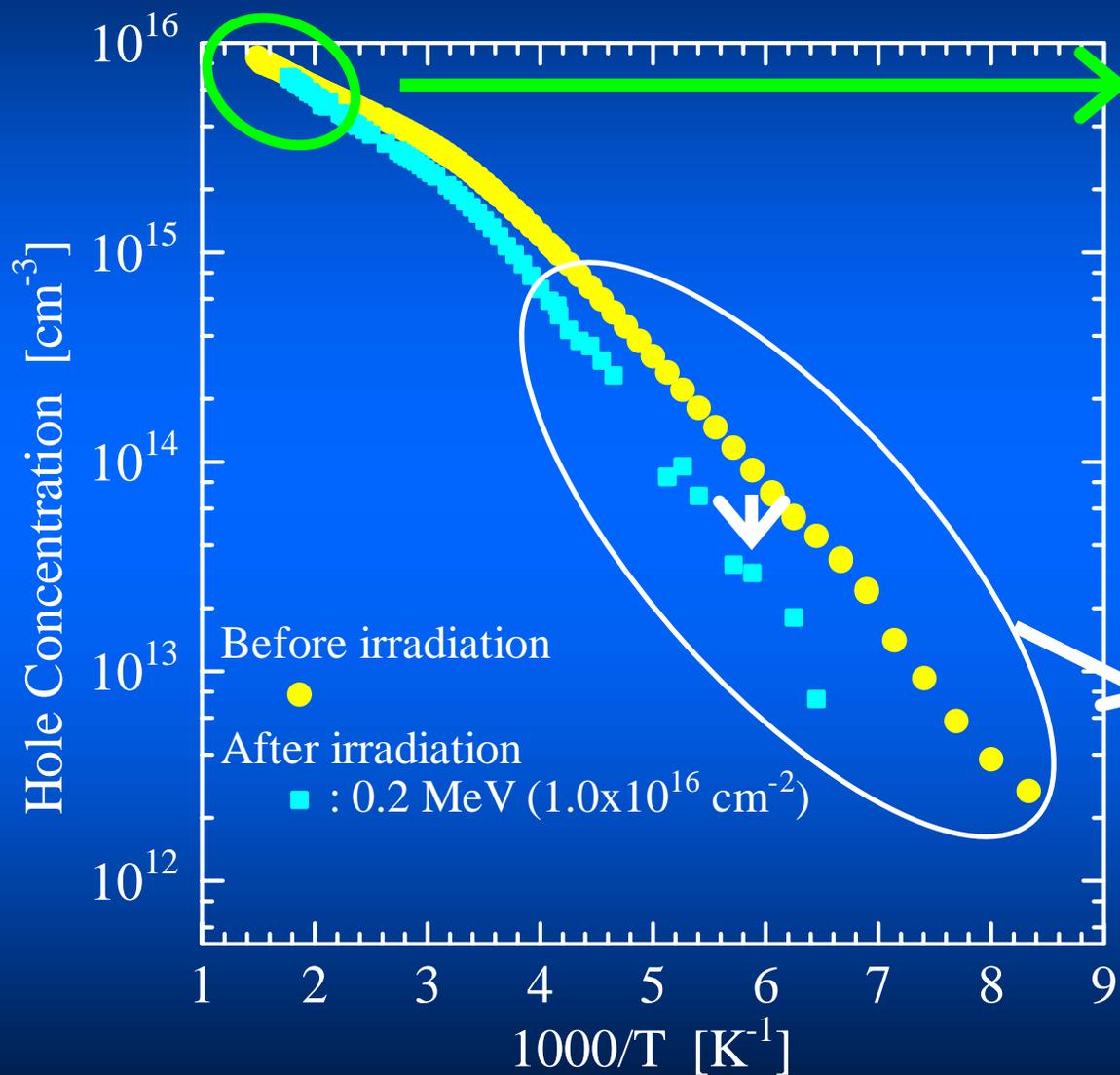


高照射線量

4.6 MeV電子線照射  
(2.6x10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup>)

0.2 MeV電子線照射ではp(T) の減少は少ない。

# 0.2 MeV電子線照射



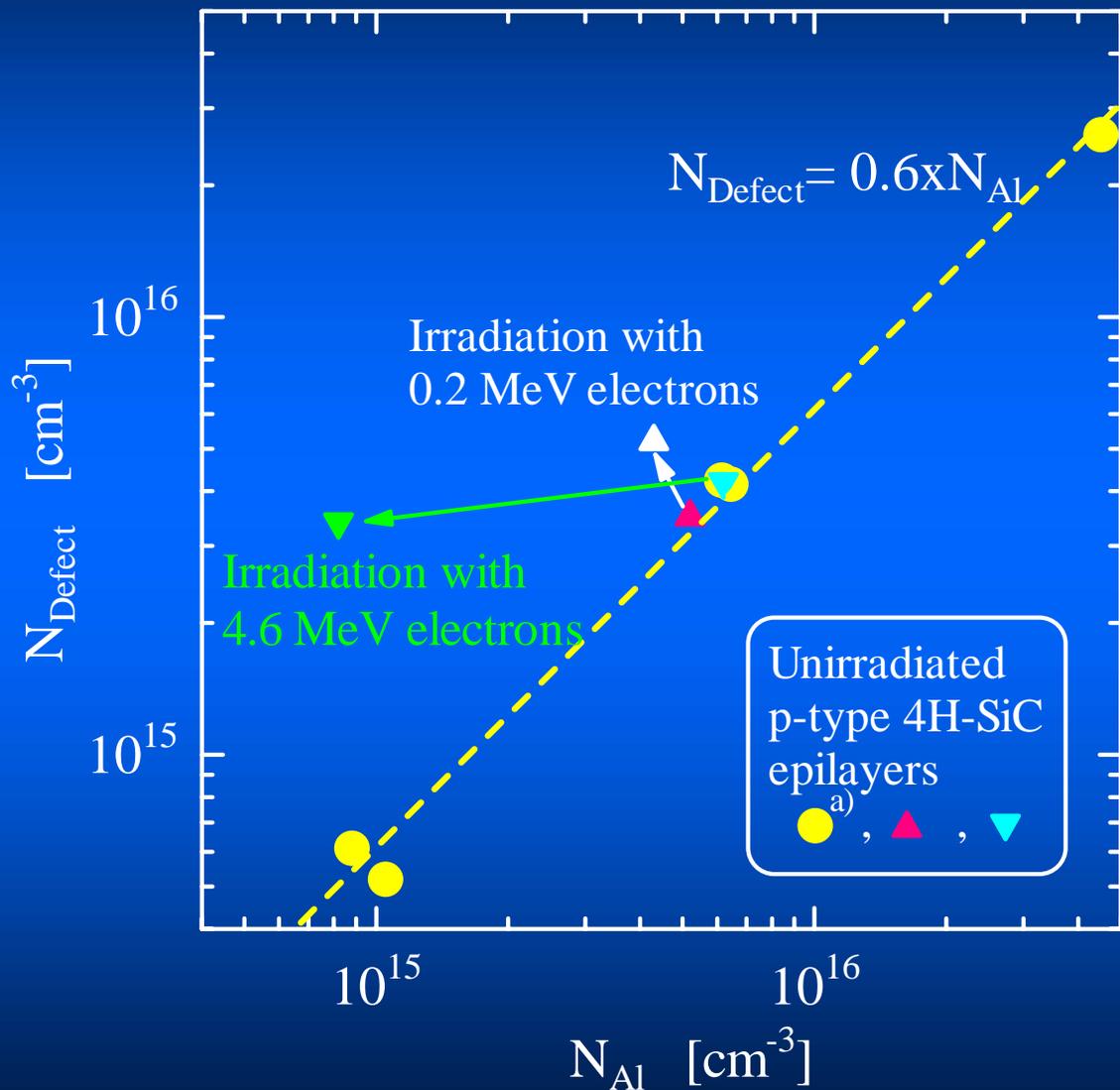
高温領域では $p(T)$ は  
変化なし。

$N_{Al}$ と $N_{Defect}$ の和は  
変化なし。

低温領域で $p(T)$ が減少。

$N_{Al}$ が減少。

# 電子線照射による $N_{Al}$ と $N_{defect}$ との関係の変化



4.6 MeV電子線照射



1.  $N_{Al}$  : 激減
2.  $N_{Defect}$  : 微減

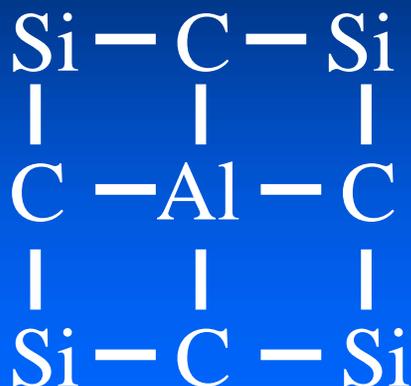
0.2 MeV電子線照射



1.  $N_{Al}$  : 減少
2.  $N_{Defect}$  : 増加

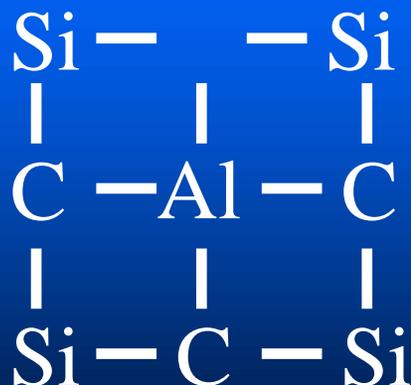
# 電子線照射による $N_{Al}$ 減少の原因

Al アクセプタ



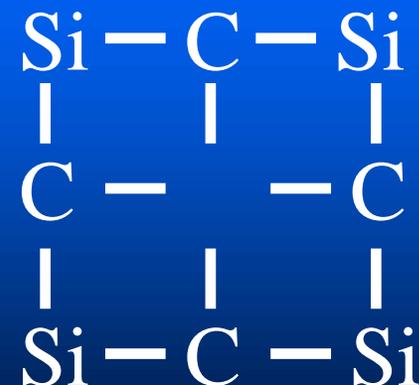
電子線照射

Cの変位

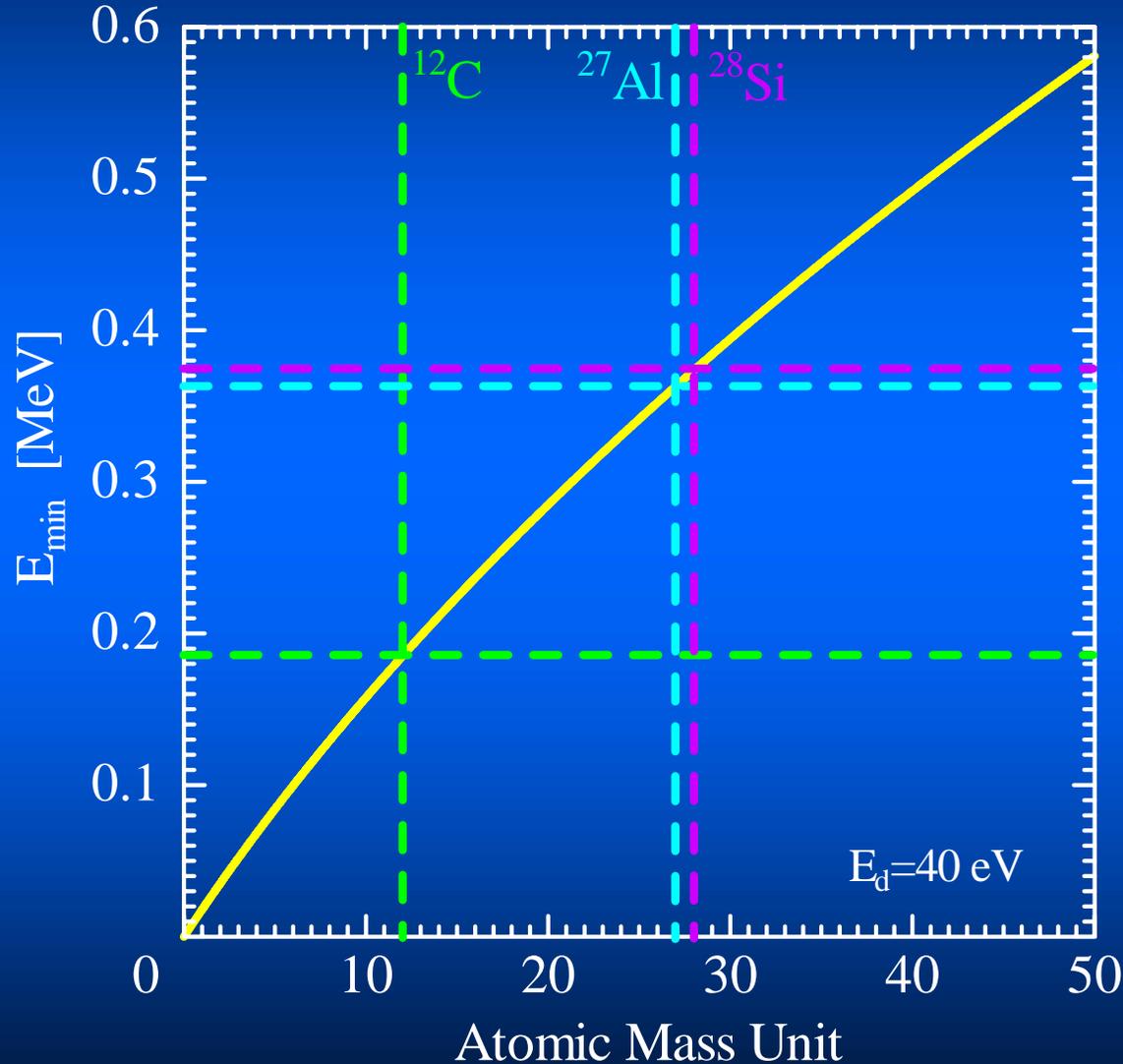


or/and

Alの変位



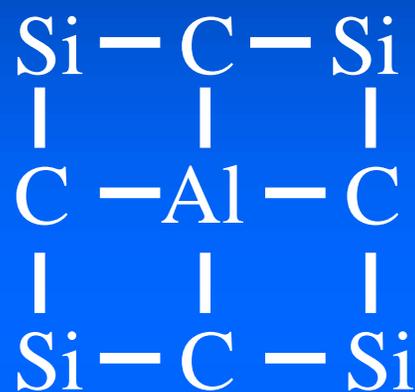
# 結晶中の格子位置の原子を変位させるのに必要な 電子の最小エネルギー



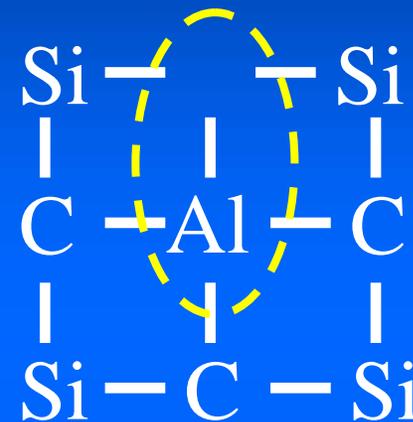
**0.19-0.36 MeV**  
の電子線照射  
ではC原子だけ  
を変位できる。

## 0.2 MeV電子線照射の場合

C vacancy が生成



C 原子だけが変位



$\text{Al}_{\text{Si}}\text{-V}_{\text{C}}$  複合欠陥  
が生成



1. Al アクセプタ密度 : 減少
2.  $\text{Al}_{\text{Si}}\text{-V}_{\text{C}}$  複合欠陥密度 : 増加

## 0.2 MeV電子線照射の実験結果

1.  $N_{\text{Al}}$  が  $5.2 \times 10^{15}$  から  $4.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  に減少。
2.  $N_{\text{Defect}}$  が  $3.5 \times 10^{15}$  から  $5.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  に増加。

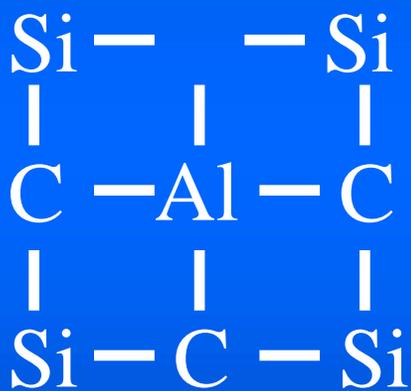


$N_{\text{Al}}$  の減少量と  $N_{\text{defect}}$  の増加量とがほぼ等しい。

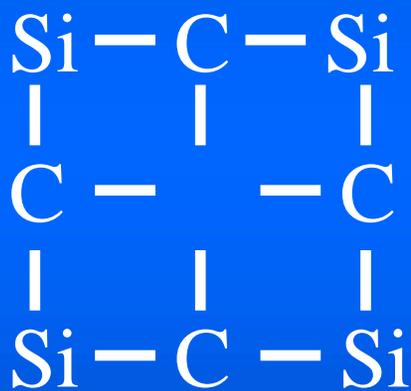


深い欠陥準位は  $\text{Al}_{\text{Si}}-\text{V}_{\text{C}}$  の可能性がある。

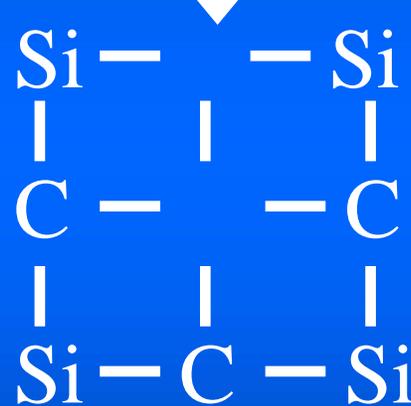
# 0.5 MeV 以上の電子線照射の場合



1.  $N_{Al}$  : 減少
2.  $N_{Defect}$  : 増加



1.  $N_{Al}$  : 減少
2.  $N_{Defect}$  : 減少



以上の考察より、 $N_{Al}$  : 激減、 $N_{Defect}$  : 変化少し

これらは実験結果と良く一致している。

深いエネルギー準位:  $Al_{Si}-V_C$



$V_C$ の形成を抑止する成長方法の確立

1. Alアクセプタ密度: 増加
2. 深い準位のアクセプタの減少



SiC中への効率的なAlドーピングが可能

# 疑問点

## 1. 照射量と密度変化との矛盾

SiC膜厚:  $10 \mu\text{m}$

照射量:  $10^{16} \text{cm}^{-2}$

各電子が一回だけC原子と衝突  
するとした場合

C原子が変位する量: 約  $10^{19} \text{cm}^{-3}$

Alと結合しているC原子密度は  
全C原子密度の約  $10^6$  分の1

Alと結合しているC原子が変位する量: 約  $10^{13} \text{cm}^{-3}$

変化しているAlアクセプタ密度も深い欠陥密度も  
 $10^{15} \text{cm}^{-3}$  台  変化量が大きすぎる

## 2. $\text{Al}_{\text{Si}}\text{-V}_{\text{C}}$ 複合欠陥密度に関して

ESRで $\text{Al}_{\text{Si}}\text{-V}_{\text{C}}$ 複合欠陥の存在は検出されている<sup>1)</sup>。

1) I.V. Ilyin, E.N. Mokhov and P. G. Baranov, “EPR of Deep Al and Deep B in Heavily Al-doped as Grown 4H-SiC”, Materials Science Forum Vol. 353-356 (2001) pp. 521-524.

Alのドーズ量が $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の4H-SiCを用いて $\text{Al}_{\text{Si}}\text{-V}_{\text{C}}$ 複合欠陥の存在を調べている。  
密度については述べていない。

# まとめ

1. 0.2 MeV電子線照射において、Alアクセプタ密度は減少したが、深い欠陥密度は増加した。
2. 0.5 MeV以上の電子線照射において、Alアクセプタ密度は激減し、深い欠陥密度は微減した。
3. 0.2 MeV 電子線照射では C 原子だけが格子位置から変位するので、Alアクセプタと結合しているC原子が変位した場合、Alアクセプタ密度が減少し、 $Al_{Si}-V_C$  複合欠陥密度が増加すると考えられ、実験結果と良く一致する。

# Appendix

# p(T)を用いてFCCSから求めた結果

	電子線照射前	0.2 MeV	4.6 MeV
$\Delta E_{Al}$ [meV]	203 (203)	217	206
$N_{Al}$ [ $\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ]	5.2 (6.2)	4.3	0.82
$\Delta E_{\text{Defect}}$ [meV]	357 (365)	363	383
$N_{\text{Defect}}$ [ $\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ]	3.5 (4.2)	5.2	3.5
$N_{\text{comp}}$ [ $\times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ]	<b>0.047 (0.037)</b>	<b>0.21</b>	<b>0.74</b>

(....) 内の数値は 4.6 MeV電子線照射前の値。

$N_{\text{comp}}$  はさらに深い欠陥密度。

さらに深い欠陥による p(T) への影響は無視できる。