

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^{1)*}、鏡原聡¹⁾、伊藤裕司¹⁾、大島武²⁾、伊藤久義²⁾

¹⁾大阪電気通信大学、²⁾原子力機構 (JAEA)

要旨: 0.5 MeV以上のエネルギーの電子線照射ではAl-doped SiC結晶中の格子位置のすべての原子(C, Al, Si)が変位するが、0.2 MeVの電子線照射ではCだけしか変位できないことを利用し、電子線照射前後のAl-doped 4H-SiCエピ膜中の正孔密度の温度依存性から、Alアクセプタ($E_V + 0.2$ eV)の密度(N_{Al})と起源不詳の欠陥($E_V + 0.35$ eV)の密度(N_{Defect})の変化の電子線エネルギー依存性を調べた。0.5 MeV以上のエネルギーの電子線照射では N_{Al} と N_{Defect} のどちらも減少したが、0.2 MeVの電子線照射では N_{Al} が減少し、 N_{Defect} が増加した。つまり、Cの変位が、 N_{Al} の減少と N_{Defect} の増加の両方に関係あると考えられる。これらの結果と深い欠陥がAlに関連していることを考慮すると、深い欠陥はAlとCの空格子点と関係があると推測できる。

1. はじめに

Al-doped 4H-SiC エピ膜の正孔密度の温度依存性 $p(T)$ から、浅いアクセプタ ($E_V + 0.2$ eV) と深い欠陥 ($E_V + 0.35$ eV) が観測された[1]。さらに、浅いアクセプタ密度 (N_{Al}) と深い欠陥密度 (N_{Defect}) との比 (N_{Defect} / N_{Al}) は0.6であった[1]。

4.6 MeV の電子線を $2.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 照射した場合、 $p(T)$ が激減することがわかった[2]。この原因は、 N_{Al} が照射前より約10分の1に減少し、 N_{Defect} も少し減少したからであった[2]。浅いアクセプタはAlアクセプタと考えられるので、電子線照射による N_{Al} の減少は、SiサイトのAlとCとの結合の切断が原因であると推測できる。この切断は、電子線照射による(1) Alの変位または(2) Cの変位が原因であると考えられる。

ここでは、照射する電子線のエネルギーを変化させ、変位させる原子を選択する。各エネルギーでの電子線照射前後の $p(T)$ を測定し、各々の密度の変化を求めることにより、Al-doped 4H-SiC 中で電子線照射により起こる現象について検討する。

2. 実験

n-type 4H-SiC 基板に成長させた、膜厚 $10 \mu\text{m}$ の Al-doped 4H-SiC エピ膜を 1 cm 角にカットし、表面の4隅にオーミック電極(Ti/Al)を真空蒸着した。磁束密度 1.4 T 、測定温度範囲 120 K から 600 K で、van der Pauw 法を用いてホール効果測定を行い、 $p(T)$ を求めた。その後、0.2 MeV の電子線 (照射量: $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$)、0.5 MeV の電子線 (照射量: $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ または $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$)、または 1.0 MeV の電子線 (照射量: $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) を試料に照射後、再びホール効果測定を行った。

3. 実験結果及び考察

図1に各エネルギーでの電子線照射前後の $p(T)$ を示す。○印は電子線照射前、△印は0.2 MeVの電子線照射 (照射量: $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) 後、×印は0.5 MeVの電子線照射 (照射量: $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) 後、◇印は4.6 MeVの電子線照射 (照射量: $2.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) 後の $p(T)$ を示す。

0.5 MeV または 1.0 MeV の電子線照射 (照射量: $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) 後は、半導体が高抵抗化したため $p(T)$ を測定できな

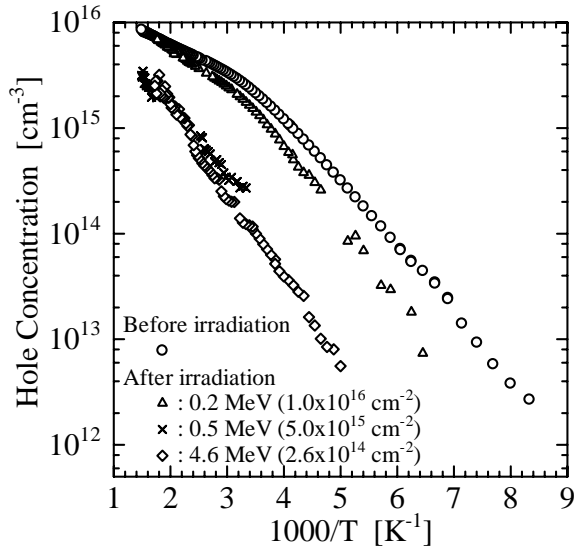


図1 電子線照射前後の正孔密度の変化

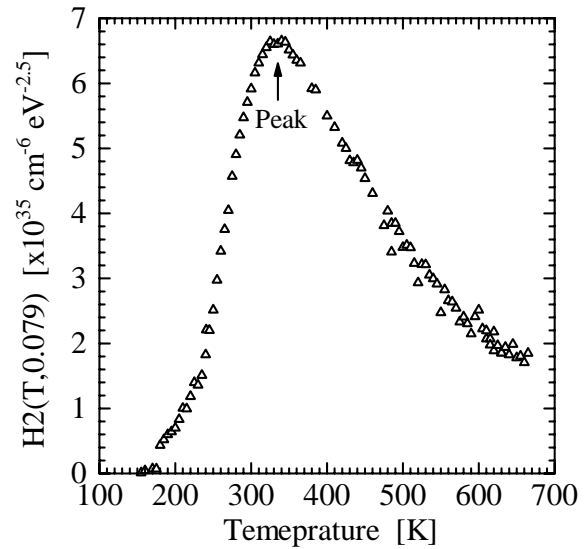


図3 $H_2(T, E_{ref})$

かった。

0.2 MeV の電子線照射では、照射量が多いにもかかわらず、 $p(T)$ の減少は最も少なかった。このことから、照射エネルギーにより、アクセプタ密度の減少の仕方が異なると考えられる。

図1の $p(T)$ から精度良くアクセプタ密度または欠陥密度を評価するために、FCCS (Free Carrier Concentration Spectroscopy) を用いた[1-5]。FCCS 信号は

$$H(T, E_{ref}) \equiv \frac{p(T)^2}{(kT)^{5/2}} \exp\left(\frac{E_{ref}}{kT}\right) \quad (1)$$

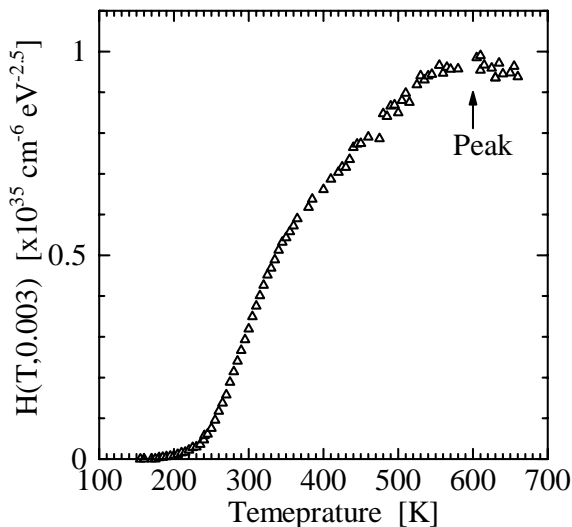


図2 0.2 MeV 電子線照射後の正孔密度を用いた FCCS 信号

で定義され、これはアクセプタまたは欠陥のエネルギー準位に対応する温度でピークになる評価関数である。 E_{ref} は、ピークを測定範囲内に移動させるパラメータである。

図2に0.2 MeVの電子線照射後の $p(T)$ を用いた FCCS 信号を示す。ピーク温度 (602 K) とピーク値 ($9.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-6} \text{ eV}^{-2.5}$) から、深い欠陥のエネルギー準位 (ΔE_{Defect}) が 363 meV であり、 N_{Defect} が $5.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ であると求められた。ここで、エネルギー準位は価電子帯の上端 (E_V) からのエネルギーである。

文献[1-5]に示してある方法を用いて、図2で求めた深い欠陥の影響を取り除いた FCCS 信号を図3に示す。ピーク温度 (334 K) とピーク値 ($6.7 \times 10^{35} \text{ cm}^{-6} \text{ eV}^{-2.5}$) から、浅いアクセプタのエネルギー準位 (ΔE_{Al}) が 217 meV であり、 N_{Al} が $4.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ であると求められた。

同様に、これ以外の p-type 4H-SiC のエネルギー準位と密度を求めた。図4の○印は、Al 添加量の異なる、電子線未照射の 4H-SiC エピ膜の結果を示す[1]。この結果から、 N_{Defect} / N_{Al} が 0.6 であることがわかる。このことより、深い欠陥は Al と関係していると考えられる。

△印と▲印は、0.2 MeV の電子線照射

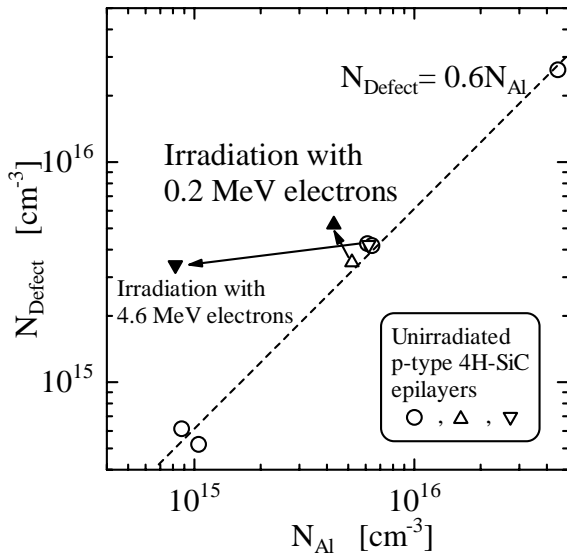


図4 N_{Al} と N_{Defect} との関係

前後の N_{Al} と N_{Defect} との関係を示す。電子線照射により、 N_{Al} は減少しているが、 N_{Defect} は増加していることがわかった。さらに、 N_{Al} の減少量と N_{Defect} の増加量はほぼ等しかった。

▽印と▼印は 4.6 MeV の電子線照射前後の N_{Al} と N_{Defect} との関係を示す。この場合、 N_{Al} は約 10 分の 1 に減少したが、一方 N_{Defect} は微減であった。

以上のように、電子線の照射エネルギーで N_{Al} と N_{Defect} の変化が異なる。そこで、SiC 結晶中の格子点原子を変位できる電子の最小エネルギー (E_{min}) を図 5 に示す [6-8]。図中の E_d は SiC 結晶での閾値変位エネルギーを意味する。0.2 MeV の電子線照射では C だけを変位でき、0.5 MeV 以上の電子線照射ではすべての格子点原子 (C、Al、Si) が変位する。このことより、0.2 MeV の電子線での N_{Al} の減少と N_{Defect} の増加は、C が格子点から変位した結果であると考えられる。

B-doped SiC では、浅いエネルギー準位は B アクセプタであり、深いエネルギー準位は B と C サイトの空格子点 (V_C) との複合欠陥 ($B_{Si}-V_C$) であると報告されている [9-10]。

以上の考察から、Si サイトの Al と結合している C が 0.2 MeV の電子線で弾き飛

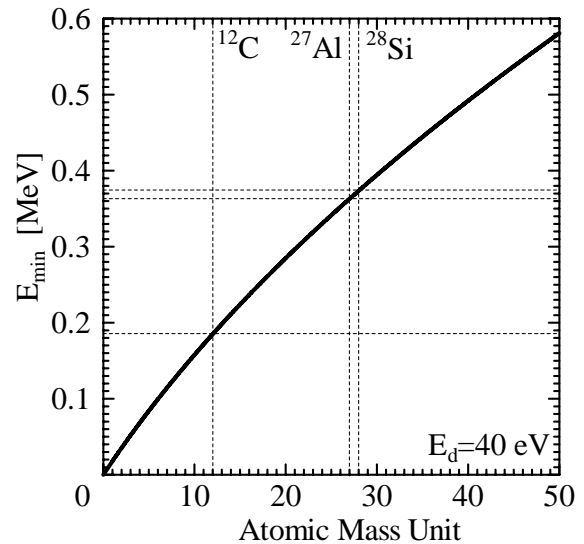


図5 SiC 結晶中の原子に変位を起こす最小の電子線エネルギー

ばされ、Al がアクセプタとして働かなくなったのと同じように、Al と V_C との複合欠陥 ($Al_{Si}-V_C$) が形成されたと推測できる。したがって、深い欠陥は $Al_{Si}-V_C$ の可能性がある。

しかし V_C が SiC 中を移動できないと、照射量に対して N_{Al} および N_{Defect} の変化量が大きすぎることになる。つまり、膜厚 10 μm の試料に $1.0 \times 10^{16} cm^{-2}$ の電子線を照射した場合、各電子が一回だけ C と衝突すると考えると $1.0 \times 10^{19} cm^{-3}$ の C が変位する。一方、電子線未照射の N_{Al} は約 $1.0 \times 10^{16} cm^{-3}$ であるから、Al と結合している C 密度は全 C 密度の約 1.0×10^{-6} である。このことから、この照射線量で変位する、Al と結合している C は $1.0 \times 10^{13} cm^{-3}$ となり、実験から求めた N_{Al} の減少量よりかなり低いこととなる。

このため、C の変位により N_{Al} が減少し、 N_{Defect} が増加することは分かったが、深い欠陥の起源および詳細なメカニズムについては更なる検討が必要である。

4. まとめ

異なるエネルギーでの電子線照射前後の Al-doped 4H-SiC の正孔密度の温度依存性を測定し、電子線照射前後の浅い Al アクセプタ密度と深い欠陥密度の変

化を求めた。深い欠陥はAlと関係があることと、格子点のCの変位によりAlアクセプタ密度が減少し、深い欠陥密度が増加することがわかった。

5. 謝辞

本研究の一部は文部科学省の学術フロンティア推進事業の補助で行った。

参考文献

- [1] H. Matsuura, M. Komeda, S. Kagamihara, H. Iwata, R. Ishihara, T. Hatakeyama, T. Watanabe, K. Kojima, T. Shinohe, K. Arai, "Dependence of Acceptor Levels and Hole Mobility on Acceptor Density and Temperature in Al-Doped p-Type 4H-SiC Epilayers", *J. Appl. Phys.* **96** (2004) pp.2708-2715.
- [2] H. Matsuura, K. Aso, S. Kagamihara, H. Iwata, T. Ishida, K. Nishikawa, "Decrease in Al Acceptor Density in Al-Doped 4H-SiC by Irradiation with 4.6 MeV Electrons", *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) pp.4981-4983.
- [3] H. Matsuura, K. Sonoi, "A Simple Graphic Method for evaluating Densities and Energy Levels of Impurities in Semiconductor from Temperature Dependence of Majority-Carrier Concentration", *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) pp.L555-L557.
- [4] S. Kagamihara, H. Matsuura, T. Hatakeyama, T. Watanabe, M. Kushibe, T. Shinohe, K. Arai, "Parameters Required to Simulate Electric Characteristics of SiC Devices for n-Type 4H-SiC", *J. Appl. Phys.* **96** (2004) pp.5601-5606.
- [5] H. Matsuura, H. Nagasawa, K. Yagi, T. Kawahara, "Determination of Densities and energy Levels of Donors in Free-Standing Undoped 3C-SiC Epilayers with Thicknesses of 80 μm ", *J. Appl. Phys.* **96** (2004) pp.7346-7351.
- [6] J. W. Corbett, "Electron Radiation Damage in Semiconductors and Metals", ed. F. Seitz and D. Turnbull (Academic, New York, 1996), p 6.
- [7] H. Inui, H. Mori, H. Fujita, "Electron-irradiation-induced crystalline to amorphous transition in α -SiC single crystals", *Philos. Mag.* **B61** (1990) pp.107-124.
- [8] A. A. Rempel, W. Sprengel, K. Blaurock, K. J. Reichle, J. Major, H.-E. Schaefer, "Identification of Lattice Vacancies on the Two Sublattices of SiC", *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) pp.185501 1-4.
- [9] A. Gali, P. Deák, R. P. Devaty, W. J. Choyke, "Boron-vacancy complex in SiC", *Phys. Rev.* **B89** (1999) pp. 10620-10623.
- [10] I. V. Ilyin, E. N. Mokhov, P. G. Baranov, "EPR of Deep Al and Deep B in Heavily Al-doped as Grown 4H-SiC", *Mater. Sci. Forum* **353-356** (2001) pp.521-524.