# 高速 C<sub>60</sub>イオン照射による半導体表面のポーラス構造形成

Porous structure formation in semiconductor surfaces by fast C<sub>60</sub> ion irradiation

新田紀子 <sup>A)</sup>, 土田秀次<sup>#, B)</sup>, 冨田成夫 <sup>C)</sup>, 笹公和 <sup>D)</sup>, 平田浩一 <sup>E)</sup>, 柴田裕実 <sup>F)</sup>, 斎藤勇一 <sup>G)</sup>, 鳴海一雅 <sup>G)</sup>, 千葉敦也 <sup>G)</sup>, 山田圭介 <sup>G)</sup>, 平野貴美 <sup>G)</sup> Noriko Nitta <sup>A)</sup>, Hidetsugu Tsuchida <sup>#, B)</sup>, Shigeo Tomita <sup>C)</sup>, Kimikazu Sasa <sup>D)</sup>, Koichi Hirata <sup>E)</sup>, Hiromi Shibata <sup>F)</sup>, Yuichi Saitoh <sup>G)</sup>, Kazumasa Narumi <sup>G)</sup>, Atsuya Chiba <sup>G)</sup>, Keisuke Yamada <sup>G)</sup>, Yoshimi Hirano <sup>G)</sup> <sup>A)</sup> School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology <sup>B)</sup> Quantum Science and Engineering Center, Kyoto University <sup>C)</sup> Institute of Applied Physics, University of Tsukuba <sup>D)</sup> Tandem Accelerator Complex, University of Tsukuba <sup>E)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) <sup>F)</sup> The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

<sup>G)</sup> National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

#### Abstract

The effect of cluster ion beam irradiation in GaSb surface was investigated by formation of porous structure. The formation of porous structure is dominated by self-assembly of ion beam irradiation induced point defects. The cluster ion beam has the potential to change of point defect density on cascade collision. In this study, GaSb surfaces were irradiated by  $C_{60}$  ions with energies of 540-keV and 6-MeV at two different temperatures: room temperature (RT) with no temperature control, and low temperature (103 K) with liquid-nitrogen cooler. The formed surface structures were characterized with a high-resolution scanning electron microscope. Comparison of the samples irradiated with monomer ( $C_1$ ) and cluster ( $C_{60}$ ) ion beams at the same equivalent fluence showed that the porous structure was observed only for cluster beam irradiation. This indicates that the formation of the porous structure is due to the high density of point defects induced by cascade collision from the cluster ion irradiation. The cluster ion irradiation is therefore effective for surface modifications.

Keyword: Fast C<sub>60</sub> ion irradiation, Porous surface structure formation, GaSb

### 1. はじめに

半導体材料(Ge, GaSb, InSb など)にイオンビーム を照射すると、表面にナノからサブミクロン程度の ポーラス構造が形成されることが知られている[1]。 このように形成された微細な構造は、電子・光デバ イス、例えば、LSIやフォトニック結晶などへの応 用が期待される。加えて、ポーラス構造は、吸着剤 や触媒担体への利用も可能である。ポーラス構造の 形成メカニズムは、イオンビーム照射によって引き 起こされるカスケード損傷により、試料内に多量に 導入される点欠陥(格子間原子及び原子空孔)の集 合によることが明らかになっている[2]。

本研究では、上記に示した半導体材料の中でも、 ビーム照射効果が顕著に現れる GaSb に対して、C<sub>60</sub> クラスターイオン及び C 単原子イオン照射を行なっ た。これらの照射で形成された表面構造を比較する ことで、高速クラスターの局所照射効果を調べた。 更に、クラスターイオン照射において、基板温度を 変化させた実験を行い、点欠陥挙動の温度依存にお ける表面構造の変化について調べた。

#### 2. 実験方法

実験は、C<sub>60</sub>クラスターイオンビーム照射を、高崎 研 TIARA のイオン注入加速器装置(NH40SR 日新 電機)及びタンデム加速器(9SDH-2 米 NEC)、C 単原子イオンビームを株式会社東レリサーチセンタ ーに委託しイオン注入装置(IMX-3500RS)によって 行った。C<sub>60</sub>ビームの入射エネルギーは、540 keV (C<sub>60</sub><sup>2+</sup>)と6 MeV(C<sub>60</sub><sup>+</sup>)である。C<sup>+</sup>単原子ビーム の入射エネルギーは、それらの 1/60 の 9 keV と 100 keV である。

半導体試料には、単結晶 GaSb(001)を用いた。ポー ラス構造形成に必要なビーム照射量は、過去に報告 された低速重イオン照射実験の結果をもとに(試料 表面深さ 18 nm の領域に入射イオン1 個あたり 1600 個の欠陥生成) [3]、欠陥量を TRIM code を用いて算 出した[4]。本実験では  $C_{60}$  ビームで  $10^{14} - 10^{15}$ ions/cm<sup>2</sup>の範囲とした。照射温度は、室温と液体窒素 で冷却した低温(103 K)である。照射した試料の表 面観察は、高知工科大の FE-SEM を用いて行った。

#### 3. 結果

Fig. 1 に  $C_{60}$ クラスターイオンビーム及び C 単原子 イオンビームを照射した GaSb の表面 SEM 像を示す。 単原子とクラスタービームの照射条件を同じにする ため、 $C_{60}$ の加速エネルギーは、C 単原子に比べて、 60 倍 (ビームの注入深さは同じ)、照射量は 1/60 (構 成原子数を考慮した equivalent fluence は同じ) にし

## [H27-04]

ている。注目すべき点は、今回行った照射条件において、C単原子照射では表面構造は形成されず、一方、 $C_{60}$ では、表面にポーラス構造が形成された。 $C_{60}$  照射において、入射エネルギー540 keV、照射量 9.7×10<sup>13</sup> ions/cm<sup>2</sup>の試料では、球状の構造体が表面一面に形成されている。その平均直径は約53 nmであった。照射量を3倍(9.7×10<sup>13</sup> ions/cm<sup>2</sup>)に増やした試料では、一部の構造が筒状に成長しており、その筒状の球形部分の直径は約53 nm、筒の直径は約38 nm になっている。他方、 $C_{60}$ の入射エネルギーを6 MeV 高くし照射した試料では、先の構造とは異なり、網目状の構造が形成されており、その直径は約54 nm であった。このように、ポーラス構造は、照射量と入射エネルギーによって顕著に変化することが分かる。また、クラスターと単原子イオン照射との比較

単原子 クラスター C<sup>+</sup>(9 KV) 0 5.8x10<sup>15</sup> ions/cm<sup>2</sup> 9.7x10<sup>13</sup> ions/cm<sup>2</sup> C<sup>+</sup>(9 KV) 0 C<sup>+</sup>(9 KV) 0 C<sup>+</sup>(9 KV) 0 C<sup>+</sup>(100 kV)

Figure 1. C 単原子及び C<sub>60</sub> クラスター照射による
GaSb 表面に形成した構造の SEM 像.

から、C<sub>60</sub>照射の方がC単原子照射よりもポーラス構造の形成には有利であることが明らかになった。これは、クラスターイオンビームによって生じる点欠陥が、局所的かつ高密度であることに起因していると考えられる。

Fig. 2 は、室温及び液体窒素を用いた低温下(103 K) において、C<sub>60</sub>クラスターイオンビーム照射による表 面構造を示す。入射エネルギーは 540 keV、照射量は 7.6×10<sup>14</sup> ions/cm<sup>2</sup> である。室温照射では、ナノオー ダーのポーラス構造が形成されているのに対し、室 温では、微小な表面凹凸が観察されている。これは、 低温において構造成長が抑制されていることを示し ており、点欠陥の移動が温度に依存し、低温ではそ の移動が妨げられたことによるものと考えられる。

今後の課題は、今回構造形成に至らなかった C 単 原子ビーム照射において、構造形成に至る照射量を 実験的に明らかにし、その結果から、クラスターの 集団的照射効果が単原子ビーム照射に比べて、どの 程度であるかを定量的に評価する。更に、クラスタ ーイオンビームによるポーラス構造形成において、 その構造を制御する支配因子を明らかにする。



 $7.6 \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>

Figure 2. 室温及び低温(103 K) C<sub>60</sub>クラスター照射 による GaSb 表面に形成した構造の SEM 像.

## 参考文献

- [1] D. Kleitman and H. J. Yearian, Phys. Rev. 108 (1957) 901.
- [2] N. Nitta et al., J. Appl. Phys., 92 (2002) 1799-1802.
- [3] Y. Yanagida et al., Nanomaterials, submitted.
- [4] J. P. Biersack and L. G. Haggmark, Nucl. Instrum. Methods 174 (1980) 257-269; J. Ziegler, Software and web site, http://www.SRIM.org.