

## 高エネルギー重イオン照射によるシリサイド半導体のナノ構造変化

Nanostructural changes of iron disilicide ( $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>) thin films

by high energy heavy ion irradiation

笹瀬雅人<sup>\*1</sup>

Masato SASASE

## Abstract

When the high-energy heavy ions are irradiated into materials, structural changes take place such as amorphization and phase transformation etc. We attempted to perform phase transition from  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> into metallic  $\alpha$  phase by the high-energy heavy-ion irradiation. After 180 MeV Fe<sup>11+</sup> irradiation, contrast changes corresponded to defects were observed from TEM images. These images indicate the defects along the ion pass are produced at this condition. The observed defects have an average diameter of 2 nm as a shape of column, which is amorphous.

## 要約

半導体であるベータ鉄シリサイド( $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>)に対し高エネルギー重イオンビームを照射し、高密度電子励起に伴うナノ領域の構造相転移を引き起こさせ、半導体中にナノスケールの金属相導入を試みた。XRD 測定ではイオン照射による明らかな構造変化(相転移)は観察できなかった。一方高分解能電顕観察からは、照射条件により薄膜内の構造変化が認められた。Fe<sup>11+</sup>イオン照射後の断面明視野像から、照射方向に対して平行に平均直径 2 nm 程度のアモルファス状の円柱状欠陥生成が確認できた。

## I. 緒言

シリコン高速電子素子(Si-ULSI)の高集積化・極微細化に伴い、問題となっている信号伝達の遅延を抜本的に解決する方法の一つとしてオールシリコン一体型デバイスの開発が挙げられる。これを実現するためには、既存の Si-ULSI 内に半導体相だけでなく絶縁物相、金属相の作製を可能とする手法の開発が必要である。

最近、いわゆる「環境半導体」(資源豊富でかつ毒性の少ない元素からなる化合物半導体)として注目されている鉄シリサイドは、金属的性質を持つ  $\alpha$  相(および  $\beta$  相以外)と、半導体的性質を持つ  $\beta$  相を持つため、条件により金属相と半導体相を作り分けることが可能である<sup>1-4)</sup>。さらに  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> の格子定数は Si に極めて近いために Si-ULSI や Si の受光素子 SiO<sub>2</sub> 光導波路や SiO<sub>2</sub> 絶縁膜との一体化が容易であるなどの特徴を持つため、オールシリコン一体型デバイスとして極めて有力な材料である。本研究では、このシリサイドに対し高エネルギー重イオンビームを照射することで、高密度電子励起状態を作り構造相転移を引き起こさせ、半導体中にナノスケールの金属相導入を試みた。併せて高分解能透過型電子顕微鏡を用いて高エネルギー重イオン照射によるナノ領域の微細構造観察を行い、シリサイド半導体中での高密度電子励起効果と構造相転移との相関について検討した。

## II. 実験方法

試料には、イオンビームスパッタ蒸着(IBSD)法により作製した半導体  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> 薄膜を用いた<sup>5)</sup>。Si(100)を基板とし、 $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> の膜厚はおよそ 100 nm とした。この薄膜試料に対し、原子力機構・タンデム加速器を用いて、95 MeV Ni<sup>9+</sup>、180 MeV Fe<sup>11+</sup>の各イオンを照射量  $1 \times 10^{12}$  ions/cm<sup>2</sup> で、a 軸方向に平行に室温照射した。各イオンの

<sup>\*1</sup> エネルギー開発グループ

本研究は、日本原子力研究開発機構との共同研究の一部である。

飛程は 95 MeV Ni<sup>9+</sup>イオンでおよそ 8 μm、180 MeV Fe<sup>11+</sup>イオンで 2 μm ある<sup>6)</sup>。照射後のナノ領域の構造変化については高分解能透過型電子顕微鏡(TEM: JEOL JEM3000F)により観察した。

### III. 実験結果及び考察

高エネルギー重イオン照射によりシリサイド中に構造変化が生じれば、微細構造を表す電顕像に何らかの差異が現れるものと考えられる。図-1 に 95 MeV Ni<sup>9+</sup>イオンを照射した後の明視野像を示す。照射により、矢印で示した部分に大きさ 5 ~ 10 nm 程度のカスケード欠陥が生成されたが、本照射条件では目的とした円柱状欠陥の生成は確認できなかった。

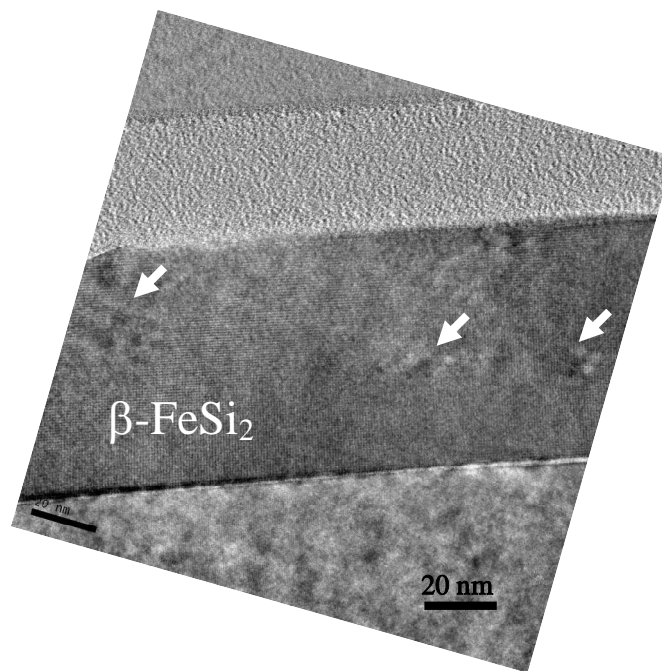


図-1 Cluster defects introduced with 95 MeV Ni<sup>9+</sup> ( $1.0 \times 10^{12}$  ions/cm<sup>2</sup>) in  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> crystal observed by cross sectional TEM image.

一方、180 MeV Fe<sup>11+</sup>イオン照射では、欠陥に起因するコントラスト変化が認められた。この結果を図-2 に示す。この電顕明視野像から、照射方向に対して平行に平均直径 2 nm 程度の円柱状欠陥が観察できた(矢印)。さらに欠陥内における非晶質化を高倍電顕明視野像から確認することができた。

固体に注入された高エネルギー重イオンは、ほとんどが電子励起過程によりそのエネルギーを失う<sup>7)</sup>。従って、電子励起によるエネルギー損失量は飛跡に沿った欠陥生成(円柱状欠陥生成)を決める重要な因子の一つである。我々は、TRIM コードを用いて本照射条件でのエネルギー損失量を計算した結果、95 MeV Ni<sup>9+</sup>イオンでは 6.5 keV/nm、180 MeV Fe<sup>11+</sup>イオンでは 12.2 keV/nm と見積もられた。照射により得られた結果と計算値から、鉄シリサイドにおいて円柱状欠陥が形成されるのに必要なエネルギー損傷量の閾値は、約 10 keV/nm と見積もることができた。なおこの値は、酸化物高温超電導体 YBCO とほぼ同等である<sup>8)</sup>。

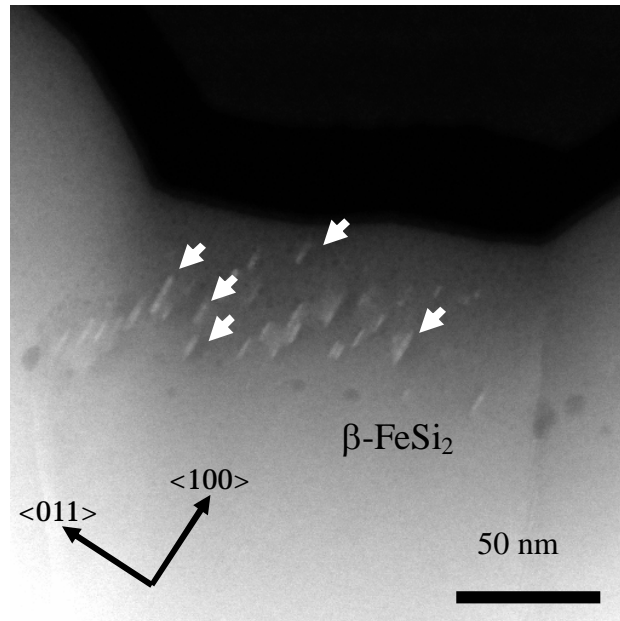


図-2 Columnar defects introduced with 240 MeV,  $\text{Fe}^{12+}$  ( $2.0 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>) in  $\beta\text{-FeSi}_2$  crystal.

#### IV. まとめ

本研究では、イオン照射により引き起こされるナノ構造変化を観察し、半導体相( $\beta\text{-FeSi}_2$ )中への金属相の導入による物性変化の可能性について検討を行った。この結果、鉄シリサイド中ではエネルギー付与量 10 keV/nm 程度以上で円柱状欠陥が生成されることを明らかにした。また、照射によるナノ領域での非晶質化が確認できた。

今後、さらに照射パラメータを変化させて円柱状欠陥のサイズの制御を試み、微細構造の詳細な観察により構造相転移の確認を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) K. Yamaguchi and K. Mizushima, Phys. Rev. Lett., **25**(2001)6006.
- 2) K. Miyake, Y. Makita, Y. Maeda and T. Suemasu(Eds.), Thin Solid Films, **381**(2001)2.
- 3) H. Lange, Phys. Stat. Sol., **B 201**(1997)3.
- 4) K. Max and M van Rossum, Properties of Metal Silicides, INSPEC-IEE, London, 1995.
- 5) M. Sasase, T. Nakanoya, H. Yamamoto and K. Hojou, Thin Solid Films, **401**(2001)73.
- 6) J. F. Ziegler, "Handbook of Stopping Cross Section for Energetic Ions in All Elements" (Pergamon Press, New York) 1980.
- 7) M. Toulemonde, S. Bouffard and F. Studer, Nucl. Instrum. Method **B91**(1994)108.
- 8) B. Hensel, B. Roas, S. Henke, R. Hopfengartner, M. Lippert, J.P. Strobel, M. Vildic, G. Saemann-Ischenko and S. Klaumunzer, Phys. Rev. **B42**(1990)4135.