

(様式第4号)

**実施課題名** SiO<sub>2</sub>/Si 基板上に形成した Ge-core/Si ナノドットの構造の解析  
**English** Structural analysis of Ge-core/Si nanodots on SiO<sub>2</sub>/Si substrate

**著者氏名** 香野 淳, 田尻恭之  
**English** Atsushi Kohno, Takayuki Tajiri

**著者所属** 福岡大学  
**English** Fukuoka University

## 1. 概要

ナノメートルサイズの粒子（ナノドット）で顕在化する電子準位の離散化、単電子トンネル、保持、発光等をより高度に制御することを目指して、ナノドットの構造と物性の研究を行っている。本実験課題では、SiO<sub>2</sub>/Si 基板上に形成された Ge-core/Si ナノドットの構造を非破壊で解析することを目的として、X線反射率解析、X線反射小角散乱の測定を行った。X線反射率にドットの平均サイズに対応する振動が観測された。また、ドットサイズの違いを反映した反射小角散乱パターンが得られた。シミュレーションを用いてナノドットの平均構造と分布を定量解析するための基礎データが得られた。

### (English)

Nanometer-sized particles (nano-dots) show attractive characteristics such as discrete electronic states in the dot, single electron tunneling and charging, and peculiar luminescence. For control of these unique characteristics we have studied the relation between the structure and properties of the multilayered nano-dots. In this experimental research proposal we carried out the measurements of x-ray reflectivity and grazing-incidence small-angle x-ray scattering (GIXAXS) for the Ge-core/Si nanodots formed on SiO<sub>2</sub>/Si substrates to analyze the structure of the nanodot without destruction of the samples. The fringe appeared in the x-ray reflectivity and its period correlated to the average size of the dot. Furthermore, the GISAXS pattern depended on the dot size. We obtained the basic data for the quantitative analysis of the average size and distribution of the dots by using simulation.

## 2. 背景と研究目的：

絶縁体で覆われたナノメートルサイズの粒子では、量子閉じ込め効果による（粒子のサイズに依存した）離散電子準位の形成、離散準位による発光、クーロンブロッケイドによる単電子トンネル、電子保持によるメモリー効果などナノサイズ特有の現象が観測される。著者を含むグループでは、シリコンナノドット（シリコン量子ドット）の形成、フォトルミネッセンス、ナノドットの電子注入、保持特性とそのメモリーデバイス応用の研究を行ってきており、現在これら諸物性の高度な制御を目指して、ナノドットの多層化による閉じ込め構造の変化と発光特性を中心とする物性との相関に関する研究を行っている。ナノドットをヘテロ多層構造とすることによりバンドオフセットをもつコアシェル構造ナノドットが形成できれば、ドット中で

の電子・ホールの閉じ込め状態や発光などを制御できる可能性がある。また、ナノドットをシリコン系材料で構成できれば半導体デバイスへの融合の点で有望である。これらの観点から、本研究ではGeをSiで覆ったGe-core/Siナノドットをターゲットとして構造と物性の研究を行っている。本実験課題では、SiO<sub>2</sub>/Si基板上に形成したGe-core/Siナノドットの構造解析を目的として、X線反射率およびX線反射小角散乱の測定を行った。これらの手法を用いるとサンプルを破壊することなく測定ができるため、構造解析と物性測定とを同一試料で行うことができ、それらの相関を研究する上で有利である。

## 3. 実験内容：

ビームラインBL-15に設置された反射率測定計、小角散乱測定計を利用して、斜入射条件に

光学系をセットし、X線反射率、X線反射小角散乱の測定を行った。サンプルは反射率測定用のゴニオ上に置き、高さ調整、あおり調整などを行った。検出器は、反射率測定の場合はシンチレーションディテクターを、反射小角散乱測定の場合はイメージングプレートを用いた。カメラ長は1.8mとし、X線エネルギーは8KeVに調整した。測定はすべて室温で行い、反射小角散乱の測定ではできる限りバックグラウンドを低減するため、真空ビームパスを用いた。

測定試料は、SiO<sub>2</sub>薄膜(~3.6nm)/Si基板上に形成したGe-core/Siナノドットであり、ドットサイズの異なるものとドットを形成していない基板のみを測定した。

#### 4. 結果、および、考察：

Ge-core/Si dot を形成した試料および dot を形成していないSiO<sub>2</sub>/Si基板のX線反射率測定の結果を Fig. 1 に示す。横軸は視斜角 $\alpha$ である。dot を形成していない試料については、強度がスムーズに減少しており、表面がフラットであることが確かめられた。一方、Ge-core/Si の試料の反射率には振動が見られる。この振動の周期から見積もられる膜厚は約 7.4nm である。ナノドット形成直後に原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて表面の局所観察を行った結果、平均高さ約 15nm の半球状のドットが  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  形成されていることが示唆されている。これを層とみなして換算した膜厚は約 7.1nm であり、X線反射率から見積もられる結果とよい一致を示すことがわかった。

Fig.2 に Ge-core/Si dot の GISAXS の測定結果の一例を示す。Fig.2(a)と(b)とでは主にドットサイズと分布が異なっていると考えられ、パターンの違いはそれを反映したものと考えられる。

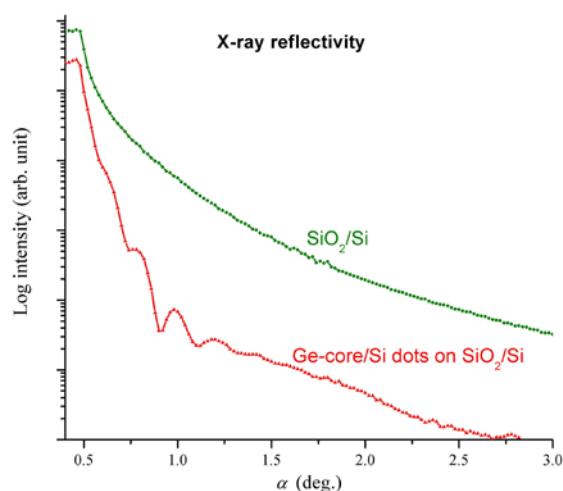


Fig. 1 SiO<sub>2</sub>/Si と SiO<sub>2</sub>/Si に形成した Ge-core/Si nanodot の X線反射率。

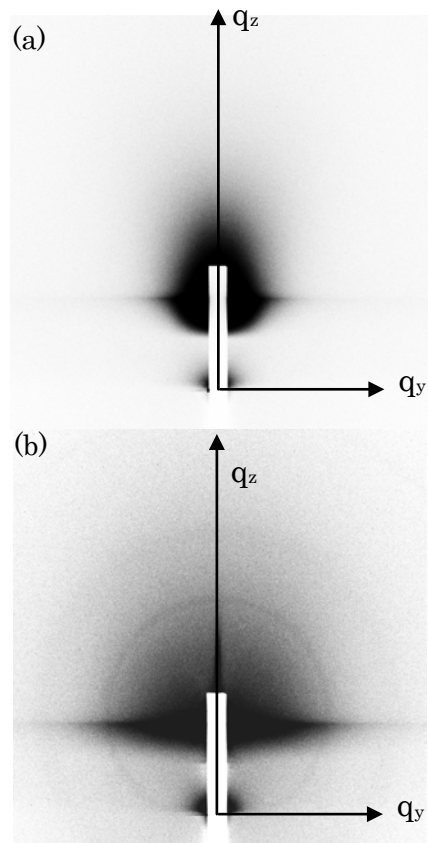


Fig. 2 Ge-core/Si nanodot の GISAXS.

#### 5. 今後の課題：

GISAXS の結果は、ナノドットの形状、大きさ、分布を反映している。定量的な解析のためには、DWBA (Distorted Wave Born Approximation) によるシミュレーションとの比較による解析が必要である。また、より詳細な解析のためには、バックグラウンドについての検討が必要である。

#### 6. 論文発表状況・特許状況

なし。発表に向けて解析を進めている。

#### 7. 参考文献

- [1] K. Shiba, K. Nakagawa, M. Ikeda, A. Kohno, S. Miyazaki, and M. Hirose, Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) L1279.  
 [2] A. Kohno, H. Murakami, M. Ikeda, S. Miyazaki, and M. Hirose, Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) L721.

#### 8. キーワード

・ナノドットおよび量子ドット  
 ナノメートルサイズの粒子。特に 3 次元閉じ込め構造とした場合、量子力学的効果により電子準位が離散化される。3 次元閉じ込め構造は 0 次元系と考えることができるため、ドットと表現される。電子準位の離散化、サイズ量子効果などが顕著に表れる場合、量子ドットと呼ばれる。