

**GaAsSb 系バッファ層を導入した自己形成 InAs 量子ドットの  
時間分解 X 線回折測定**  
**Time-resolved X-ray diffraction measurements of self-assembled InAs  
quantum dots on GaAsSb buffer layer**

山口浩一<sup>a</sup>、海津利行<sup>b</sup>、高橋正光<sup>b</sup>、菅藤 徹<sup>a</sup>、築地伸和<sup>a</sup>、外村慎一<sup>a</sup>、水木純一郎<sup>b</sup>  
Koichi Yamaguchi<sup>a</sup>, Toshiyuki Kaizu<sup>b</sup>, Masamitsu Takahashi<sup>b</sup>, Toru Kanto<sup>a</sup>, Nobukazu Tsukiji<sup>a</sup>,  
Shinichi Tonomura<sup>a</sup>, and Jun'ichiro Mizuki<sup>b</sup>

電気通信大学<sup>a</sup>、日本原子力研究開発機構<sup>b</sup>

<sup>a</sup>The University of Electro-Communications, <sup>b</sup>JAEA

BL11XU に設置された分子線エピタキシ (MBE) 回折計を用い、GaAs(001) 面上への GaAsSb 層の形成過程のその場 X 線回折測定を行った。c-(4x4) GaAs(001) 面上へ Sb<sub>4</sub>(+As<sub>4</sub>) フラックスを照射した表面について X 線 Crystal Truncation Rod (CTR) 散乱測定を行い、GaAsSb 層の Sb 組成を評価した結果、表面 1 ~ 2 層目の Sb 組成がある一定の値になった後、Sb 供給量が多くなるにつれて、内部での Sb 原子と As 原子の置換が進行することが分かった。この GaSb/GaAsSb 層の形成過程はその後の InAs 量子ドットの高密度形成の考察において重要な知見である。

The formation process of the GaAsSb layer on the GaAs(001) surface was studied by using a surface X-ray diffractometer connected with molecular beam epitaxy (MBE), which was placed at the synchrotron radiation beamline 11XU at SPring-8. The Sb<sub>4</sub> (or Sb<sub>4</sub> and As<sub>4</sub>) -irradiated c-(4x4) GaAs(001) surfaces were analyzed by a X-ray Crystal Truncation Rod (CTR) scattering measurements. As the Sb irradiation time increased, Sb content in 1st and 2nd GaAsSb surface layers increased and then saturated. For more Sb irradiation, it was found that Sb atoms are incorporated below 3rd GaAsSb surface layer. These results will give some important information for considerations about the formation mechanism of high-density InAs quantum-dots on the Sb-irradiated GaAs surface.

**背景と研究目的**

半導体量子ドット構造は、零次元電子系の特性を持つと期待され、現在量子ドットを用いた光通信・量子情報処理デバイス、低消費電力デバイスの開発が試みられている。例えば量子ドットレーザーでは、光通信波長帯に

おける超高速通信や従来の量子井戸レーザーに比べて低閾値電流、温度無依存性での動作が実現されつつあるが、零次元電子の効果を実現し、更なる高性能化を図るためには量子ドットの精密な作製制御、特に高均一(量子準位の不均一幅 10 ~ 15 meV)・高密度(面

密度  $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$  以上) 量子ドットを良質な結晶性で形成することが重要である。量子ドットの作製方法としては、ストランスキー・クラスタノフ (SK) 成長モードを利用した自己形成法が広く用いられてきたが、量子ドットの高密度化と高均一化を同時に実現することは困難であった。そこで我々は、GaAs 層上への InAs 量子ドットの自己形成において GaAsSb 歪バッファ層を導入した手法を新たに提案し、GaAs 層上へ直接形成した場合に比べて約 3 倍の密度となる  $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$  の高密度 InAs 量子ドットの形成、さらに結晶欠陥を有するコアレスドットの抑制を実現した [1]。これらの詳細なメカニズムの理解および高密度 InAs 量子ドットの形成制御のためには、下地の GaAsSb 歪バッファ層や InAs 2 次元層の Sb 組成についての定量的な情報が不可欠である。

本研究では、c-(4x4) GaAs 層表面に形成した GaAsSb 歪バッファ層についてその場 X 線回折による Sb 組成の定量的な解析を行い、高密度 InAs 量子ドットを形成するためのテンプレートとなる GaAsSb 歪バッファ層の構造の解明を目指す。

## 実験

実験は BL11XU に設置されている分子線エピタキシ (MBE) 装置と X 線回折計が結合した MBE 回折計を用いて行った [2]。エピレディー GaAs(001) 基板に GaAs バッファ層を成長した後、c-(4x4) GaAs 表面に  $\text{Sb}_4$  分子のみを照射する方法と  $\text{Sb}_4$  分子と  $\text{As}_4$  分子を同時に照射する方法で GaAsSb 歪バッファ層をそれぞれ形成した。成長条件は基板温度  $480^\circ\text{C}$ 、Sb 圧  $1.5 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 、As 圧  $4 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 、照射時間は  $0 \sim 240$  秒である。GaAsSb 層形

成後、試料を  $300^\circ\text{C}$  にクエンチし、試料をロックイングして (00L) 方向に沿った X 線 Crystal Truncation Rod (CTR) 散乱強度分布を測定した。入射 X 線のエネルギーは  $10 \text{keV}$ 、入射角度は  $0 \sim 25^\circ$  である。

## 結果および考察

Fig.1 に (a) Sb のみ 30 秒、(b) 120 秒照射した試料および (c) Sb と As を同時に 30 秒照射した試料の X 線 CTR 散乱強度分布と電子密度分布の計算によるフィッティングの結果をそれぞれ示す。L < 2 の領域において (a)、(b) では L = 1、1.8 付近にそれぞれ極小値を持つ

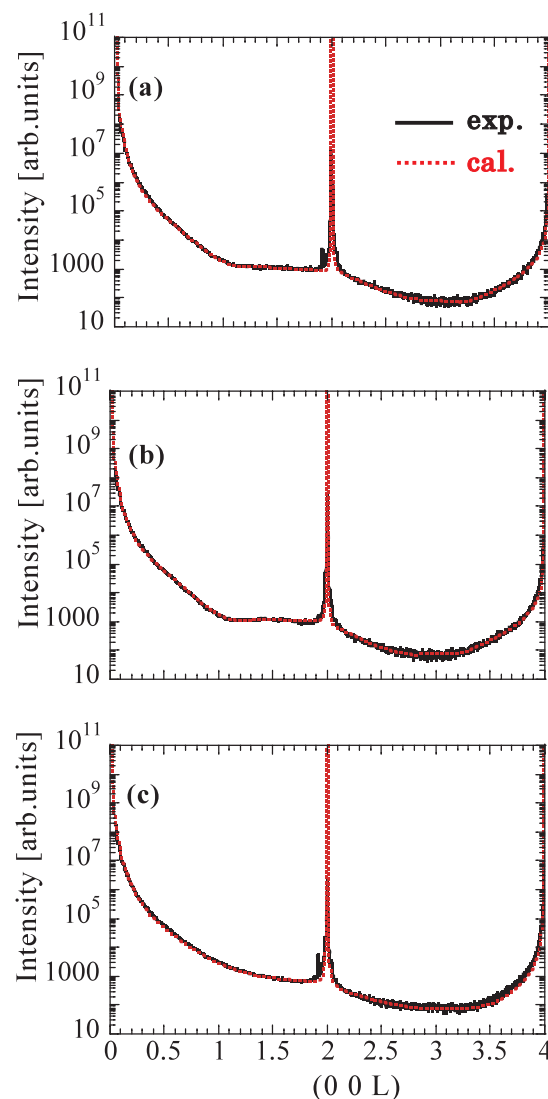


Fig. 1 CTR spectra for Sb (or Sb and As) irradiated c-(4x4) GaAs(001) surfaces (a) Sb 30s (b) Sb 120s (c) Sb and As 30s

プロファイルであるのに対し、(c)ではL=1.8付近まで単調に強度が減少するプロファイルが得られた。Fig. 2にはフィッティングに用いた構造モデルを示す。表面2層を被覆率1以下のSb層、3層目以下を1MLのGa層とSb+Asを交互に配置した構造であり、この構造モデルによる計算結果はFig. 1の実験データと非常によく一致することが分かった。このフィッティングにより評価した全試料のSb組成をTable. 1に示す。

SbとAsを同時に照射した試料はSbのみ照射した試料に比べて、4層目以下のSb組成が低くなる傾向が見られる。特に、試料(c)では6層目と8層目のSb組成が0となっており、他の試料に比べてSb組成が顕著に減少している。その他の試料では、Sb組成は表面から8層目の膜厚まで分布しており、1

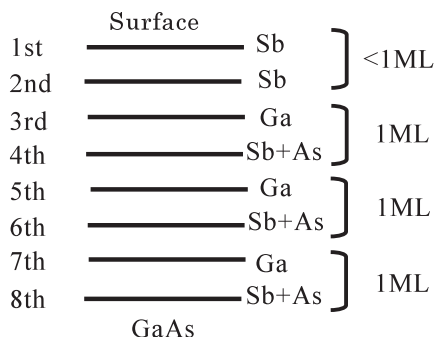


Fig. 2 Structure model

	(a) Sb30s	(b) Sb120s	(c) SbAs 30s	(d) SbAs 120s	(e) SbAs 240s
1st	0.33	0.35	0.18	0.34	0.34
2nd	0.67	0.69	0.61	0.68	0.68
4th	0.22	0.33	0.14	0.12	0.15
6th	0.15	0.15	0	0.12	0.13
8th	0.10	0.09	0	0.08	0.09

Table. 1 Sb composition

層目、2層目のSb組成はほぼ一定の値となっているが、4層目以下のSb組成は照射時間が長くなるにつれて増大することが分かった。これらの結果から、GaAsSb層の形成過程として、Sb組成がある一定の値になった後は、Sb供給量が多くなるにつれて、結晶内部でのSb原子とAs原子の置換が進行するものと考えられ。

本研究では高密度InAs量子ドットを形成するためのテンプレート構造であるGaAsSb層のSb組成を始めて定量的に示し、高密度量子ドットの形成制御において重要な知見を得ることができた。

#### 今後の課題

GaAsSb/GaAs(001)層上にさらにInAs量子ドットを形成した場合について、GaAsSb層からのSb表面偏析によるwetting層のSb組成変化を解析することが必要であり、これにより高密度InAs量子ドットの形成やコアレスドットの抑制のメカニズムの詳細を解明することができるものと期待される。

#### 参考文献

- [1] K. Yamaguchi and T. Kanto, *J. Cryst. Growth* **275** (2005) e2269.  
 [2] M. Takahashi, Y. Yoneda, H. Inoue, N. Yamamoto and J. Mizuki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (2002) 6247.

#### キーワード

・ストランスキー・クラスタノフ(SK)成長法  
 基板の持つ原子配列にそって薄膜結晶が成長する成長様式の1つで、成長初期には平坦な2次元成長が起こり、その後成長膜厚がある臨界値を超えると3次元的な島成長に変化する成長モード