

**GaAsSb/GaAs 歪バッファ層上への高密度 InAs 量子ドットの
MBE 成長とその時間分解 X 線回折測定**

**MBE growth of high-density InAs quantum-dots on GaAsSb/GaAs
buffer layers and its time-resolved X-ray diffraction measurements**

山口浩一^a、海津利行^b、菅藤 徹^a、吉田剛之^a、太田雅彦^a、高橋正光^b、水木純一郎^b
Koichi Yamaguchi^a, Toshiyuki Kaizu^b, Toru Kanto^a, Takayuki Yoshida^a, Masahiko Ohta^a,
Masamitsu Takahashi^b, and Jun'ichiro Mizuki^b

^a電気通信大学、^b日本原子力研究開発機構

^aThe University of Electro-Communications, ^bJAEA

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 Ga(As)Sb 層の形成過程のその場 X 線回折測定を行った。GaAs(001)面上への Sb₄ フラックスの照射により、反射高速電子線回折(RHEED)パターンは GaAs-c(4×4)から(1×3)パターンへと変化し、このときの表面構造を X 線 Crystal Truncation Rod (CTR)散乱法により時間分解解析を行った結果、1 分子層(ML)の GaSb 表面層の形成後、さらに表面第 2 層目が GaAsSb 化されることが分った。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 Ga(As)Sb 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. During the Sb₄ irradiation on the GaAs(001) surface, the reflection high-energy electron-beam diffraction (RHEED) pattern changed from the GaAs-c-(4x4) pattern to the (1x3) one. The time-depending surface-layer structures were analyzed by a X-ray Crystal Truncation Rod (CTR) scattering method. As the results, it was found that the GaSb surface layer was formed at the initial Sb irradiation, and then the GaAsSb layer was additionally formed under the 1st GaSb surface layer. These results will give some important information for considerations about the formation mechanism of high-density InAs quantum-dots.

背景と研究目的

ストランスキー・クラスタノフ(SK)成長法により GaAs 層上に自己形成した InAs 量子ドット構造は、零次元電子系の特性を利用した次世代の光通信・量子情報処理デバイス、低

消費電力デバイスなどへの応用が期待されており、その実現には量子ドットの高密度化(面密度 $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 以上)および高均一化(エネルギー不均一幅 20 meV 以下)が重要な課題である。最近、低成長速度・低 As 圧の条件にお

いて高均一な InAs 量子ドット(不均一幅約 18 meV)の自己形成が実現されているが、この成長条件ではマイグレーションの促進効果のためにドット密度は約 $3 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 程度に低下する[1]。そこで GaAs 層表面を自己形成的に改質した GaAsSb 2次元層を導入する新たな手法を提案し、約 $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ の高密度 InAs 量子ドットの自己形成を実現した[2]。本手法では、高密度形成における近接した量子ドット同士の合体(コアレスセンス)の抑制効果が観察され、高密度化だけでなく結晶性と均一性の向上も期待される。しかし、この GaAsSb 層の構造(膜厚や Sb 組成)や InAs 量子ドットの高密度化およびコアレスセンス抑制効果の詳細なメカニズムについてはまだ十分理解されていない。また、この場合の不均一幅は 30 meV 程度であり、上述のメカニズムの解明と GaAsSb 層構造の最適化により、今後の更なる高密度化・高均一化が期待される。本研究では、GaAs 層表面に形成した GaAsSb 2次元成長層についてのその場 X線回折による構造解析を行い、GaAsSb 層の形成制御法の確立を目指した。

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[3]。熱処理により表面酸化膜を除去した半絶縁性 GaAs(001) 基板の上に、GaAs バッファ層(200 nm)を成長した後、Sb₄分子を基板温度 480°C、Sb 圧 1.5×10^{-5} Pa の条件で 0~120 秒照射し、As 原子と Sb 原子の交換反応により GaAsSb 層を形成した。Fig.1 は Sb の照射前後における[1-10]方向から入射した反射高速電子線回折(RHEED)パ

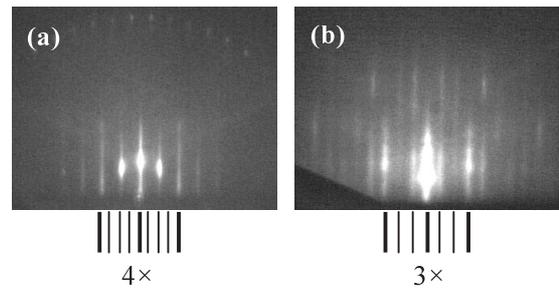


Fig.1 RHEED pattern obtained along [1-10] azimuth (before Sb irradiation (a) and after Sb irradiation for 60 sec (b)).

ターンである。Sb 照射前には 4×のストリークパターンが観察されるが、Sb を照射すると次第に 3×のストリークパターンへと変化していく様子が分る。そこで Sb 照射時間に対する表面構造を解析するために、試料をロックイングして(00L)方向に沿った Crystal Truncation Rod (CTR)散乱強度分布を測定した。入射 X線の波長は 0.50 Åである。

結果および考察

Fig.2 は(00L)方向に沿った CTR 散乱強度分布の Sb 照射時間依存性である。Sb 照射 15 秒では凹形の強度分布であるが、Sb 照射 30 秒以上では $L=1\sim 2$ の間で極大値が現れ、さらに $L=1.8$ 付近の強度が次第に低下する傾向が見られた。そこで GaAs(001)面上に様々な GaAsSb 層構造が形成された場合についての(00L)方向に沿った CTR 散乱強度分布を計算し、実験結果との比較検討を行った。その結果、Fig.3 に示すように、Sb 照射 15 秒では表面に 1 分子層(ML)厚の GaSb 層が形成された場合に近い強度分布を示し、Sb 照射 30 秒以上では GaSb(1ML)/GaAsSb(1ML)/GaAs の 2 層構造の場合と近い強度分布を示していることが分った。

また Fig.2 で観察されたように、Sb 照射時間が 30 秒以上では強度分布はほとんど変化

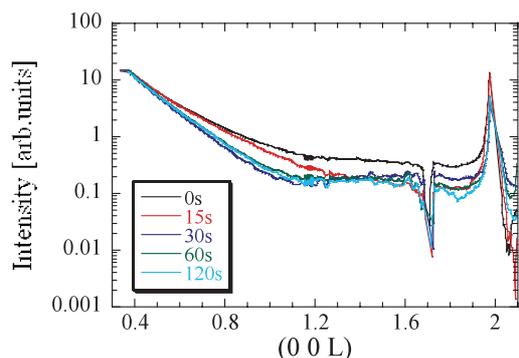


Fig.2 CTR spectra for GaAsSb/GaAs(001) as a function of Sb irradiation time.

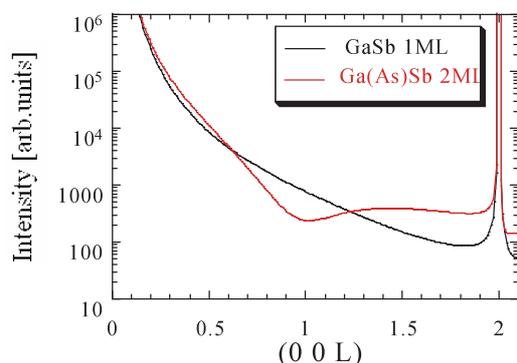


Fig.3 Calculated CTR profiles for GaAsSb/GaAs(001) structures.

していないことから、この GaAsSb の 2 層構造が形成された後では As-Sb 交換反応はほとんど進行せず、比較的安定に保たれることが分った。このように GaAs(001)面への Sb₄ 照射による GaAsSb 層の形成過程が初めて明らかになった。この Sb 照射中の CTR 散乱強度のその場観察法は、GaAsSb/GaAs 層の精密な形成制御において有効な手法になるものと考えられる。

今後の課題

本研究で明らかになった GaAsSb/GaAs (001)表面層上に InAs の SK 成長を行った場合のその場 X 線回折実験を進め、まずは wetting 層の改質構造を詳細に調べる必要がある。この wetting 層構造と高密度ドットの

形成とは密接な関係があるものと考えられ、特に GaAsSb 層からの表面偏析 Sb 原子の挙動を調べる必要がある。さらに高密度ドットの形成段階において転位の発生を伴うコアレスの抑制効果についても解明が望まれる。これらの成長メカニズムの理解を基に精密に制御された GaAsSb/GaAs(001)層構造および InAs 成長条件の最適化を進めることにより、高密度でかつ高均一な InAs 量子ドットの自己形成法の確立が期待される。

参考文献

- [1] K. Yamaguchi, K. Yujyobo, and T. Kaizu, Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) L1245.
- [2] K. Yamaguchi and T. Kanto, J. Cryst. Growth **275** (2005) e2269.
- [3] 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。