

修士学位論文要約（平成29年 3月）

# Ge 量子ドットの積層構造の形成に関する研究

青山 拓磨

指導教員：鷲尾 勝由， 研究指導教員：川島 知之

## Formation of Stacked Structure of Ge Quantum Dots

Takuma AOYAMA

Supervisor: Katsuyoshi WASHIO, Research Advisor: Tomoyuki KAWASHIMA

Formation of carbon (C)-mediated Ge quantum dots (QDs) on Si(100) and a stacked structure were investigated. The Ge deposition conditions were investigated to form small and dense Ge QDs. As a result, the smallest and the densest Ge QDs were formed on a Si substrate with a Ge thickness of 2 nm, a growth rate of 0.8 nm/min, and a growth temperature of 450°C. The mean diameter and the density of QDs were 12.6 nm and  $2.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , respectively. Investigations on the Si spacer deposition on Ge QDs revealed that the smallest surface roughness can be obtained at a Si thickness of 10 nm. In term of Ge QDs formation on the Si spacer, introduction of C on Si spacer surface was found effective to form Ge QDs. QDs were not formed without C mediation on the spacer surface.

### 1. はじめに

これまでの情報化社会の発展には、Si 大規模集積回路(LSI)の性能向上が大きく貢献してきた。しかし、微細化による性能向上は限界を迎えつつあり、微細化に頼らない Si LSI の高性能化技術の開発が急務である。LSI の高機能・高性能化の手法のひとつに、Si ベースの光デバイスを混載する Si フォトニクス技術が提唱されており<sup>[1]</sup>、その発光あるいは受光素子として Ge 量子ドット(QD)が注目されている<sup>[2]</sup>。Ge QD には、QD 内へのキャリアの閉じ込めによる発光効率の向上や発光波長分散の抑制、高温での安定動作が期待できる<sup>[3]</sup>。所望の波長に対する高効率発光・受光を得るためには、有効 Bohr 半径 (24.3 nm) より小さい、直径 10 nm 程度の QD の形成とその積層化が必要である。本研究では、炭素(C)媒介を用いた Si(100)基板上に形成する Ge QD の小サイズ・高密度化と、積層化に向けた Si スペース層上の Ge QD 形成について検討した。

### 2. Ge 量子ドット形成条件の最適化

試料の作製には固体ソース分子線エビタキシー法を用いた。Si(100)基板上に、基板温度 200°Cにおいて C を 0.25ML 堆積し、C-Si 反応のための炉内熱処理を 750°Cで 10 分間行なった。その後、450 – 550°Cで 1 – 3nm 厚相当の Ge を堆積速度(GR) 0.8~2.2nm/min で堆積した。図 1 に 450°Cと 550°Cで Ge を堆積した場合の QD 粒径と密度の GR 依存性を示した。ここで Ge 堆積量 ( $d_{\text{Ge}}$ ) は 3 nm 厚

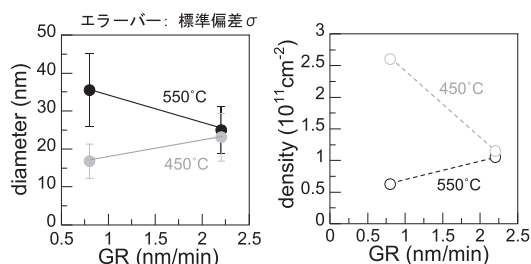


図 1 QD の粒径 (左) と密度 (右) の Ge 堆積速度依存性

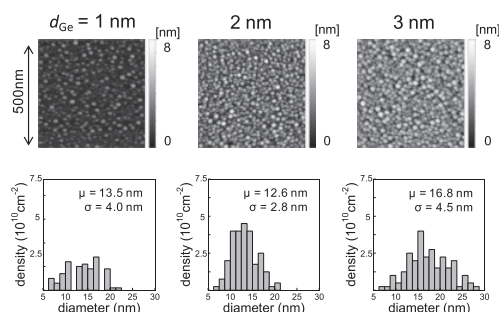


図 2 AFM 像と粒径ヒストグラム

相当である。堆積条件 450°C、0.8nm/min の組み合わせによって、最も小サイズかつ高密度な QD が形成された。次に、同堆積条件下における  $d_{\text{Ge}}$  の QD 成長への影響を検討した。図 2 に異なる  $d_{\text{Ge}}$  に対する原子間力顕微鏡 (AFM) 像と粒径ヒストグラムを示した。2 nm までは  $d_{\text{Ge}}$  の増加に伴い QD 密度が増加したのに対して、3 nm ではさらなる密

度の増加は見られず、粒径が増大したのみであった。これらの結果から、Ge QD 形成の最適条件は基板温度 450℃、堆積速度 0.8 nm/min、Ge 堆積量 2 nm であり、この条件下で平均粒径 12.6 nm、密度  $2.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  の QD が得られる。

### 3. Ge 量子ドット上 Si スペーサ層の形成

Ge QD の積層には Si スペーサ層が必要であるため、Ge QD 上の Si スペーサ層形成条件について検討した。前述の最適化した Ge QD 形成条件によって Ge QD を形成した後、450℃で 0–20 nm 厚の Si を堆積した。そのときの AFM 像とラインプロファイルを図 3 に示す。10 nm 厚の Si 堆積により、表面粗さの RMS 値は 1.3 nm から 1.1 nm まで低減したが、20 nm 厚の堆積で RMS は 1.7 nm に増大した。ラマン散乱分光法を用いて Ge の歪量を調べたところ (図 4)、Si 堆積による圧縮歪が 10 nm 厚から Ge に印加されはじめ、その後、Si 厚の増加とともに Ge の歪量も増加した。この結果から、10 nm 厚未満では、Si が Ge ドット間の隙間を優先的に埋めるように成長し、10 nm 厚以上では、高さ方向へ優先して成長したことが考えられる。Si の堆積温度を 450–700℃の間で変化させ、その影響についても検討したが、成長温度の上昇に伴い表面粗さは増大した。これらの結果から Si スペーサの堆積条件を厚さ 10 nm、基板温度 450℃と決定した。

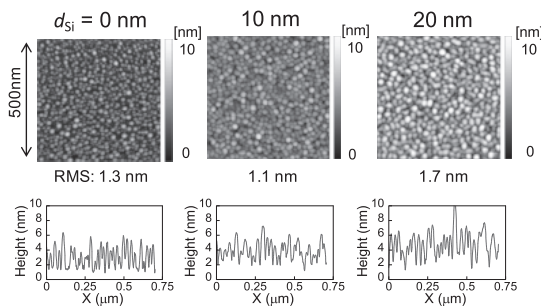


図3 スペーサ層堆積後のAFM像とラインプロファイル

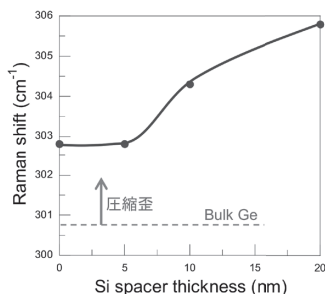


図4 Ge-Ge 振動モードのラマンシフトの Si 堆積量依存性

### 4. Si スペーサ層上 Ge 量子ドットの形成

第 2 QD 層形成に向けて、Si スペーサ層上の Ge QD 形成条件を検討した。Ge QD 上に 10 nm 厚の Si スペーサ層を 450℃で堆積した後、2 nm 厚相当の Ge を同温度で連続的に堆積した。その結果、2 層目の Ge は QD を形成せず、膜状に成長することが断面透過電子顕微鏡像の解析から明らかになった。そこで、スペーサ層と 2 層目 Ge の界面に C を媒介させた。その結果、0.1 ML の C 媒介により孤立した QD が形成され、C 堆積量の増加に伴い QD サイズは小さくなった。図 5 に、C 堆積量 0.25 ML における 2 層目 Ge QD の AFM 像とラインプロファイルを示した。平均粒径 21.0 nm、密度  $7.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  の Ge QD が 2 層目においても得られた。

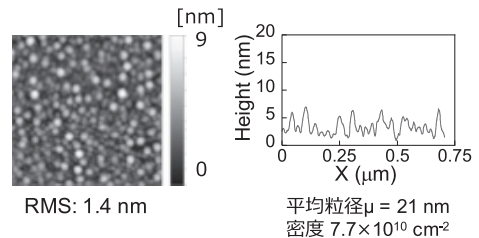


図5 C 堆積量 0.25 ML における AFM 像とラインプロファイル

### 5. まとめ

Ge QD 光学素子の実現に向けて、C 媒介による Ge QD の小サイズ化とその積層化について検討した。Si(100)基板では、基板温度 450℃、堆積速度 0.8 nm/min、Ge 堆積量 2 nm の条件下で、平均粒径 12.6 nm、密度  $2.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  の QD が得られた。Si スペーサ層の膜厚と堆積温度は、表面粗さと Ge の歪み印可の点から、10 nm 厚と 450℃が最適であることを見出した。Si スペーサ層上における QD 形成では、スペーサ層上での C 媒介が有効であることを見出し、0.25 ML の C 媒介により、平均粒径 21.0 nm、密度  $7.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  の Ge QD を第 2 層目として形成できることを見出した。

### 文献

- 1) 金光義彦 他, “シリコンフォトニクス”, オーム社, (2007) 12.
- 2) J. Liu, et al., Opt. Express, 15 (2007) 11272.
- 3) 舛本泰章, “量子ドットの基礎と応用”, 裳華房, (2014) 63.