

修士学位論文要約（平成29年3月）

# 菱面体的配置によるサファイア基板上 Ge 薄膜成長に関する研究

河口 大和

指導教員：鷲尾 勝由， 研究指導教員：川島 知之

## Growth of Ge Thin Films in Rhombohedral Alignment on Sapphire Substrate

Yamato KAWAGUCHI

Supervisor: Katsuyoshi WASHIO, Research Advisor: Tomoyuki KAWASHIMA

This thesis addresses the epitaxial growth of the group IV semiconductors on a c-plane sapphire substrate. Monolithic integration of memories and logic devices with GaN devices, which have outstanding optical and power properties, is of great interest to fabricate novel multifunctional devices. However, the difference in the crystal structure make the epitaxial growth difficult. In this study, two-step epitaxial growth of rhombohedrally aligned Ge on Al-terminated surface of the step-terrace c-plane sapphire was investigated. As a result, we obtain the high-quality Ge thin films on the step-terrace c-plane sapphire substrate by two-step growth, with 5 nm-thick Ge buffer layer grown at 500°C, followed by 45 nm-thick Ge growth at 700°C.

### 1. はじめに

高効率発光素子やパワー素子に利用されている GaN 結晶の成長基板にはコランダム型 c 面サファイア ( $\text{Al}_2\text{O}_3(001)$ ) 基板が用いられている。ダイヤモンド構造を持つ IV 族半導体を c 面サファイア基板上にエピタキシャル成長できれば、高集積メモリやロジック回路と光学素子などの混載による LSI の高機能化が図れるが、結晶構造が異なるために薄膜のエピタキシャル成長は難しい。本研究では、格子定数と熱膨張係数がサファイアに近い Ge の薄膜成長を試みた。菱面体的配置(図1)によるc面サファイア基板上への Ge 薄膜成長を提案し、表面再構成を施した原子ステップ基板上的成長と成長温度を変化させて段階的に Ge を堆積する2段階成長法を検討した。

### 2. c 面サファイア基板上的 Ge 薄膜成長

c 面サファイア基板上的 Ge 薄膜成長には、固体ソース分子線エピタキシー (MBE) 法を用いた。成長基板には、大気中で 1000°C、1 時間の熱処理を施した原子ステップサファイア基板を用いた<sup>1)</sup>。成長温度 ( $T_G$ ) 400 - 900°C の範囲内で 50 nm 厚の Ge を成長速度 1 nm/min で堆積した。

鏡面研磨サファイア基板上に堆積した Ge 薄膜の out-of-plane 及び in-plane XRD 測定結果を図2に示す。図2(a)では、Ge(111)と  $\text{Al}_2\text{O}_3(006)$ からの回折が観測され、これは Ge[111]と  $\text{Al}_2\text{O}_3[001]$ が平行である菱面体的配置を示している。成長温度 400°C では微弱であった Ge(111)回折強度は、600°C 以上では拡散長の増大により著しく強くなった。図2(b)には、Ge[220]と  $\text{Al}_2\text{O}_3[110]$ が平行に成長した正規ドメイン

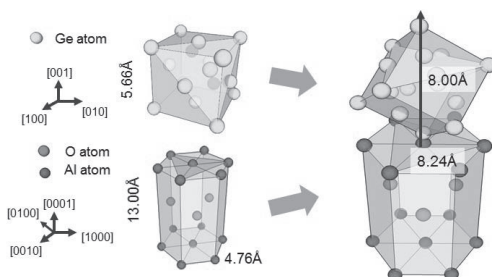


図1 菱面体的配置の概念図

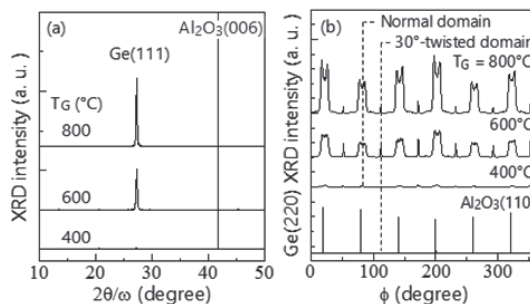


図2 鏡面研磨基板上 Ge 薄膜の XRD パターン。(a) Out-of-plane 測定, (b) in-plane 測定。

と、Ge[220] と  $\text{Al}_2\text{O}_3[100]$ が平行に成長した 30°回転ドメインの2成分がそれぞれ6回対称で現れている。正規ドメインの回折ピークは、複数成分の重畳により大きな広がりを持っており、800°C では先端がスプリットしたピーク形状となった。これはサファイアの(001)面にある O 原子が、面内の[110]軸上にわずかな垂

離を持ちながら並んでいることが原因と考えられる。

最表面原子が統一されていない鏡面研磨サファイア基板は、大気中での熱処理を施すことにより表面再構成が生じ、Al 原子層終端されると同時にステップテラス構造が形成される<sup>2)</sup>。この原子ステップ基板上に堆積した Ge 薄膜の面内配向性を図 3 に示す。Al 原子は O 原子とは異なり、c 面内の原子配列が整っているため、原子ステップ基板上に Ge を成長させると正規ドメインからの回折ピークのスプリットは抑制された。また、30° 回転ドメイン成長も抑制され、面内配向性が向上した。成長温度の上昇により Ge(220) 回折強度が増加し 800°C で最大となったが、500°C 成長の結果と比べるとピーク半値幅が広がっていたため、改善の余地が残った。

500°C と 800°C で成長した Ge 薄膜の回転対称性の膜厚依存性を図 4 に示す。5 nm 厚では、800°C の高温ではなく 500°C の低温成長の方が、半値幅が狭く回折強度も高かった。一方、50 nm 厚では、800°C の高温成長の方が高強度となったが、成長初期段階の配向性が劣っていたためか、これ以上膜厚を増加させても低温成長と同程度まで半値幅は狭くならなかった。従って、単一温度成長では高回折強度と狭小な半値幅の両立は困難と判断した。

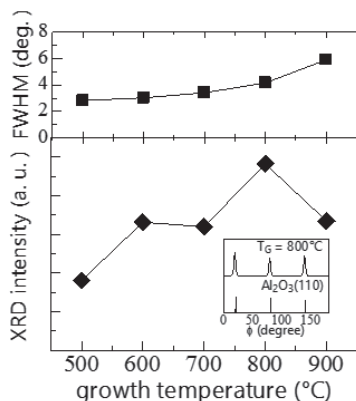


図 3 原子ステップ基板上 Ge 薄膜の成長温度と Ge(220) XRD 強度およびピーク半値幅の関係。

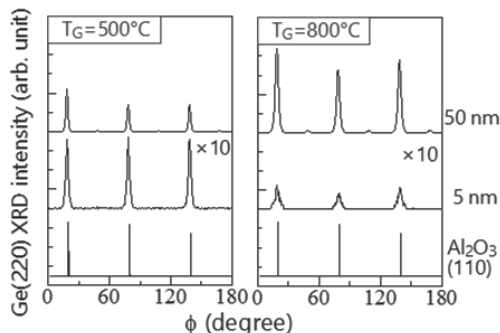


図 4 500°Cあるいは800°Cで成長した Ge 薄膜の面内対称性。

### 3. 2 段階成長法

低温で成長した高配向薄膜を初期層として、2 層目を異なる成長温度で堆積する 2 段階成長法を検討した。500°C で 5 nm 堆積後、2 層目を 400 - 800°C の範囲内で 45 nm 堆積した 2 段階成長膜の面内配向性の成長温度依存性を図 5 に示す。Ge(220)回折強度は 2 層目の成長温度が 700°C の時に最大となり、単一温度成長の最大値と比べると約 1.7 倍にまで向上した。また、成長温度の上昇により広がっていたピーク半値幅は、2 層目の堆積に 800°C まで昇温しても、500°C の低温成長に匹敵する狭い半値幅を維持した。

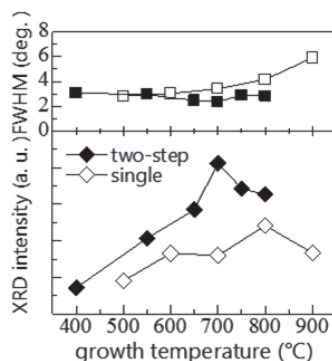


図 5 2 段階成長した原子ステップ基板上 Ge 薄膜の 2 層目成長温度と Ge(220) XRD 強度およびピーク半値幅の関係。

### 4. まとめ

GaN と IV 族半導体のモノリシック集積による多機能デバイスの実現に向け、菱面体的配置による c 面サファイア基板上的 Ge 薄膜成長に関する研究を行った。Al 原子層終端した原子ステップ基板の利用と、500°C で成長した Ge 初期層上に 700°C で 2 層目の Ge を成長させる 2 段階成長法が高品質な Ge 薄膜の形成に有効であることを見出した。

### 文献

- 1) M. Yoshimoto, T. Maeda, T. Ohnishi, H. Koinuma, O. Ishiyama, M. Shinohara, M. Kubo, R. Miura, and A. Miyamoto, Appl. Phys. Lett. **67** (1995) 2615.
- 2) C. F. Walters, K. F. M. Carty, E. A. Van Hove, Surf. Sci. **464** (2000) L732.