

MOCVD 法で Ge 基板上に作製した GeSn エピタキシャル膜の格子定数の精密評価

Detailed Evaluations of Lattice Parameters in GeSn Epitaxial Films Fabricated by MOCVD

須田 耕平, 徳武 寛紀, 武内 一真, 横川 凌, 日比野 祐介, 小椋 厚志
Kohei Suda, Hiroki Tokutake, Kazuma Takeuchi, Ryo Yokogawa, Yusuke Hibino, Atsushi Ogura

明治大学
Meiji University

本課題では、有機金属化学気相成長(MOCVD)法で Ge 基板上に作製した GeSn エピタキシャル膜の Sn 濃度評価を目的に、BL19B2 での X 線回折法による格子定数の精密測定を実施した。測定の結果、成膜時の基板温度が 320°C の時に Sn 濃度が飛躍的に増加することを確認した。本結果は、大量生産が可能な MOCVD 法で高 Sn 濃度 GeSn エピタキシャル膜を作製する上で重要な知見であると考えられる。

キーワード： GeSn、X 線回折法、格子定数評価

背景と研究目的：

ULSI の処理能力向上の手段としてポストスケーリング技術が注目されて久しい。ポストスケーリング技術では、これまでのように ULSI の各素子サイズの微細化のみに依存するのではなく、Si に取って代わる新しい材料を適用することで ULSI の処理能力の向上を目指す。GeSn はその移動度の高さからチャンネル材料としての使用が期待されていると共に、Ge チャンネルへ歪を印加させ移動度の更なる向上を図るストレッサとしての使用が期待されている[1][2]。更に、Sn 濃度が約 10% を超えるとバンド構造が直接型に遷移することから、光学素子としての使用も可能である[3]。このように多くの利点を持つ GeSn を、我々は有機金属気相成長(Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD)法で作製することに世界で初めて成功した[4]。我々が新規提案をしてきた tertiarybutylgermane($t\text{-C}_4\text{H}_9\text{GeH}_3$)および tetraethyl tin [$(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Sn}$]両プリカーサーは、現在主流の GeH_4 および SnH_4 に比べ爆発性や自然発火性などの点で安全性が非常に高く、量産時の安全設備投資のコスト低減にも貢献し得る。本実験では、安全性と量産性に優れる MOCVD 法でエピタキシャル成長させた GeSn 薄膜に対し、実験室系 XRD では装置分解能などの問題から困難であった格子定数の精密評価に取り組んだ。前述のように GeSn 薄膜はストレッサ等に使用され、そのデバイス特性は Sn 濃度に依存する。そのため、Sn 濃度を精密に評価することが求められるが、Ge への Sn の固溶度は 1% 程度であり、エピタキシャル成長に伴う(004)回折のシフト量は小さい。試料が薄膜であることも起因し、本実験には高分解能かつ高輝度な放射光を用いた BL19B2 が最適であると考えた。

実験：

測定試料は MOCVD 法で Ge(001)基板上にエピタキシャル成長させた GeSn 薄膜である。Sn 濃度の増加に伴う格子定数変化を精密測定し、基板温度を始めとした各種成膜条件の Sn 濃度への寄与を評価した。今回は、基板温度 320°C で作製した Sn 濃度が最も高い試料について報告する。

BL19B2 で X 線回折法による $2\theta/\theta$ 測定を実施した。なお、本実験では HUBER 社製の多軸回折計を使用した。X 線のエネルギーは 12 keV とし、X 線入射部では幅 0.5 mm、高さ 0.2 mm のスリットを使用した。GeSn 薄膜中の Sn 濃度は(004)回折プロファイルから、エピタキシャル成長の成否は(224)回折プロファイルからそれぞれ評価した。

結果および考察：

図 1(a)および(b)はそれぞれ、Ge 基板および GeSn 薄膜の(004)回折プロファイルである。GeSn

薄膜の(004)回折は、Ge 基板の(004)回折から約 0.78°低角となる約 42.06°で観測された。本試料がエピタキシャル成長している場合、GeSn 薄膜の(224)回折は χ 軸が約 54.26°、2theta が約 52.48°の条件で観測される。図 2 は、先述の条件に軸を移動後に測定した $2\theta/\theta$ 測定の結果である。GeSn 薄膜の(224)回折プロファイルが得られており、エピタキシャル成長していることが明らかになった。この GeSn 薄膜の Sn 濃度は約 5.5%であった。なお、Ge および Sn のポアソン比にはそれぞれ 0.366、0.422 を使用した[5][6]。同様にして、基板温度 340°C、360°C で作製した GeSn 薄膜の Sn 濃度を計算し、図 3 にまとめた。これより、MOCVD 法による高 Sn 濃度 GeSn 薄膜の作製には、基板温度の低温化が有効であることが示唆された。更に、基板温度が 320°C で Sn 濃度が大きく変化することも明らかになった。高 Sn 濃度 GeSn 薄膜を用いることで Ge チャネルへのより大きな歪印加が可能となり、Ge 系 MOSFET の更なる性能向上が期待できる。本結果は、大量生産が可能で安全性も高い MOCVD 法により高 Sn 濃度 GeSn 薄膜が作製可能であること、および Sn 濃度が 320°C で大きく向上することを示した重要な知見であると考えられる。

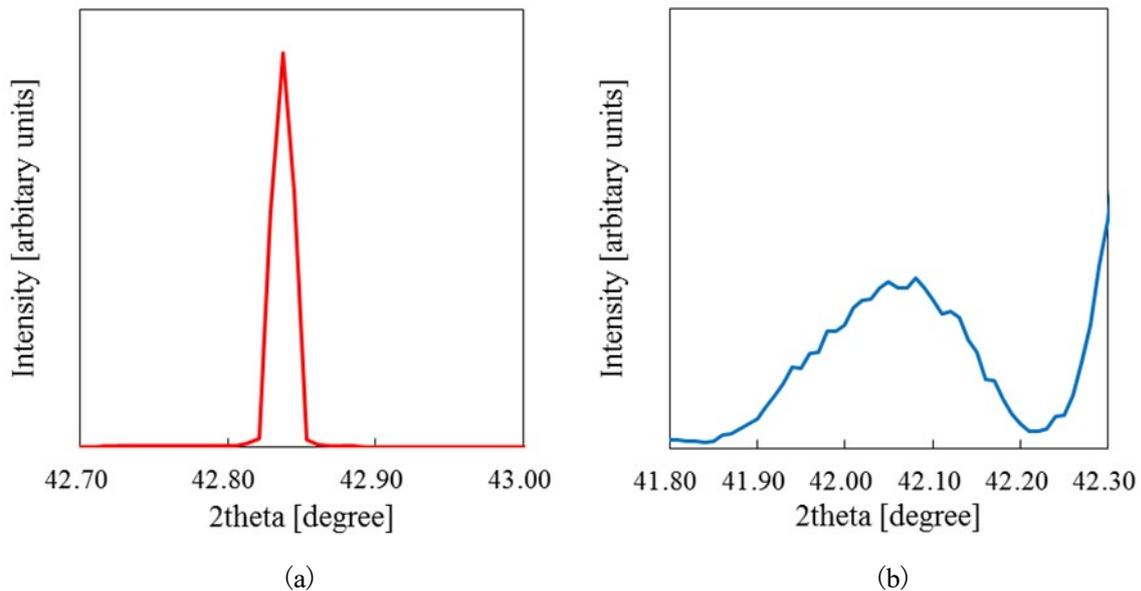


図 1. (a)Ge 基板および(b)GeSn 薄膜の(004)回折プロファイル

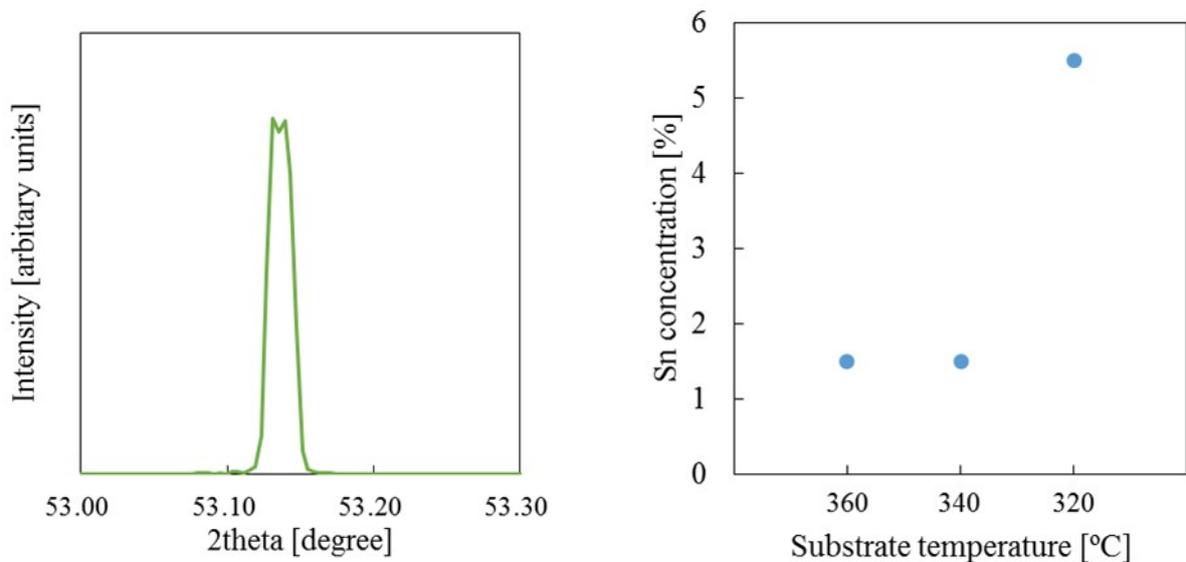


図 2. GeSn 薄膜の(224)回折プロファイル

図 3. Sn 濃度の基板温度依存性

今後の課題：

320°C よりも更に低温領域での Sn 濃度変化を評価する。基板温度を更に下げ Sn 濃度を増やしていくとエピタキシャル成長時に格子緩和を伴うことが予想される。したがって、2 次元マッピング測定にも取り組み、エピタキシャル成長の緩和についても評価したい。固溶度以上の Sn 濃度を有する GeSn 薄膜のエピタキシャル成長のメカニズムを明らかにすると共に、緩和を防ぐ成長条件を検討する。これは、GeSn 薄膜を用いた ULSI を生産する上でも重要な知見となると考える。

参考文献：

- [1] S. Gupta et al., *in IEDM Tech. Digest.*, 398 (2011).
- [2] B. Vincent et al., *Microelectron. Eng.*, **88**, 342 (2011).
- [3] V. R. D'Costa et al., *Phys. Rev. B*, **73**, 125207 (2006).
- [4] K. Suda et al., *ECS Trans.* **64** (6), 697 (2014).
- [5] W. A. Brantley, *J. Appl. Phys.* **44**, 534 (1973).
- [6] O. Madelung, *Semiconductors: Data Handbook*, 3rd ed. Springer-Verlag, 2004.