

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分  
平成29年3月17日現在

多機能融合・省電力エレクトロニクスのためのSn系IV族半導体の工学基盤構築

Establishment of Fundamental Engineering of Sn-related Group-IV Semiconductor Materials for Multi-Functional and Low-Power Electronics

課題番号：26220605

財満 鎮明 (Zaima, Shigeaki)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授



研究の概要：本研究においては、省電力エレクトロニクスの実現に資するトンネル電界効果トランジスタや光電融合多機能デバイスへの応用に向けて、ゲルマニウム錫 (GeSn) や SiGeSn など、新しい Sn 系 IV 族混晶薄膜の結晶成長および電子物性制御技術を開発する。さらに、開発した薄膜・界面物性やエネルギーバンド構造の制御技術、材料・プロセス技術を統合し、トランジスタや光電子デバイスの試作に基づき、Sn 系 IV 族混晶半導体の工学基盤構築を目指す。

研究分野：工学

キーワード：結晶工学、半導体、表面・界面物性、集積回路、ゲルマニウム錫

1. 研究開始当初の背景

現代の高度情報ネットワーク社会の将来にわたる持続的発展に向けて、これを支える多様な電子情報デバイスの高性能化、多機能化、省電力化の実現が必要不可欠である。本研究では、Si に代わる新規半導体材料としての可能性を秘める GeSn 混晶に着目した。

GeSn は高 Sn 組成化や歪導入による直接遷移化、キャリア移動度向上が予測され、近年、急速に注目が集まる新規の半導体材料である。GeSn は従来の Si エレクトロニクスとも親和性の高い IV 族半導体混晶であり、集積回路への混載にも期待が持てる。本材料を用いた省電力トンネル FET や光検出器、LED、レーザダイオードなどの光電融合素子への応用が期待されている。

2. 研究の目的

新世代の省電力デバイスであるトンネル FET や光電融合多機能デバイスに向けた Sn 系 IV 族混晶の結晶成長技術とエネルギーバンド構造制御技術の開発を行う。また、混晶の基礎的な材料物性および絶縁膜や金属と混晶との界面物性の解明と制御を目指す。SiGeSn 等の多元系 IV 族混晶薄膜におけるエネルギーバンド構造、結晶歪、欠陥構造、光電物性などを包括的に解明し、デバイス実現に資する物性制御技術を構築する。さらに、トンネル FET や光電子デバイスの試作を行い、その電氣的・光学的特性の解明を進めることで、Sn 系 IV 族半導体材料による Si 系ナノエレクトロニクスの飛躍的発展を目指す。

3. 研究の方法

Sn 系 IV 族半導体材料のナノエレクトロニクス応用に向けて、以下の項目に示す研究を推進する。

(1) 結晶成長技術の構築：分子線エピタキシー (MBE)、化学気相成長 (CVD) 法等による結晶成長技術を駆使して、高 Sn 組成と低欠陥密度を両立する高品質混晶形成技術を確立する。

(2) 結晶欠陥および歪構造解明：電子デバイス応用に向けて GeSn、SiGeSn などの混晶層および各種界面の結晶欠陥および歪構造の制御技術を構築する。結晶層の局所歪構造、欠陥構造を解明する。絶縁膜・金属/半導体ナノ界面物性と各種構造やプロセス条件との相関を明確化する。

(3) 電子・光物性の解明：GeSn、GeSiSn 等のキャリア物性、光吸収特性、発光特性等の解明により、Sn 系混晶薄膜のエネルギーバンド構造を明確化しその制御技術を構築する。

(4) デバイス構築のためのプロセス技術開発：デバイス実現に資するドーピングや界面の電子物性および電気伝導特性の制御技術を構築する。

(5) デバイス試作と動作特性評価：トンネル FET や光電融合デバイスのためのプロセス技術の構築とデバイス試作、および動作検証を進める。

4. これまでの成果

(1) Sn 系混晶薄膜の結晶成長技術の構築  
MBE 法を用いた GeSn 薄膜成長における水素やアンチモン (Sb) サーファクタント添加が薄膜の平坦性や結晶性を改善する効果

を見出した。また、無害かつ危険性の低い有機金属 (MO) 原料を用いた MOCVD 法による GeSn 薄膜形成に挑戦し、Sn 組成 5.6% に達する GeSn エピタキシャル層の形成を実証した。

Ge 基板上に形成した SiGeSn エピタキシャル層について、歪の大きさだけでなく歪の方向 (圧縮/伸長歪) が結晶性に著しい影響を及ぼすことを発見し、二軸圧縮歪 SiGeSn 層において、結晶ゆらぎや表面平坦性により優れた高品質な結晶層の形成を実証した。

さらに、直接遷移化やバンドエンジニアリング拡張に期待される新規 SiSn 混晶薄膜の形成を試み、成長温度や基板格子定数の制御によって、熱平衡固溶限を大幅に超える 40% の超高 Sn 組成 SiSn 層の形成を達成した。

#### (2) 局所ひずみ構造の形成と評価技術開発

キャリア移動度向上に向けた局所歪構造として期待される GeSn/Ge 微細構造を作製した。SPRING-8 の放射光マイクロ回折法を用いて、Sn 組成 5.6% の GeSn ストレッサによって幅 25nm の Ge 細線に対する 0.9% の一軸圧縮歪の印加を実証した。また、電子顕微鏡ナノビーム電子回折法により、同構造内部の局所歪分布の可視化を達成した。

#### (3) GeSn 薄膜、界面の電子物性解明と制御

MBE および MOCVD 法を用いた Sb や P の in-situ ドーピングによる GeSn 層の形成技術を構築し、 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  を超える高電子濃度を有する n 型 GeSn エピタキシャル層 (Sn 組成 6%) の形成を達成した。

また、堆積法を用いた  $\text{GeO}_2/\text{GeSn}$  ゲートスタック形成技術を開発し、 $300^\circ\text{C}$  以下の低温プロセスで Sn 析出を抑制しながら、 $3 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$  の低界面準位密度の形成を実証した。

#### (4) IV 族混晶のエネルギーバンド構造制御

SiGeSn/Ge ヘテロ接合において価電子帯端および伝導帯端双方で 100 meV 以上の大きなオフセットを有する type-I バンドアライメントの形成を実験的に実証した。さらに SiGeSn/GeSn/SiGeSn 多層ヘテロ構造を作製し、光電子デバイスに効果的、実用的な電子・正孔の量子閉じ込め構造を実現できる可能性を示した。

SiSn 多結晶薄膜やエピタキシャル膜のエネルギーバンド構造を実験的に解明し、Sn 組成 18% の多結晶 SiSn 薄膜において直接遷移伝導帯端 ( $\Gamma$  点) が間接遷移端 (X 点) のわずか 0.22 eV 高い位置にまで低減されることを見出した。高 Sn 組成化による SiSn の光電子デバイス応用や直接遷移化の可能性を示唆するインパクトのある物性を実証できた。

#### (5) デバイス試作のためのプロセス技術

ウェハボンディングとスマートカットを用いて作製した Ge-on-Insulator (GeOI) 層において残留キャリア  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  以下、 $2000 \text{cm}^2/\text{Vs}$  以上のキャリア移動を実現した。本

GeOI を用いた Ge 細線導波路を作製し、波長  $2 \mu\text{m}$  の中赤外光での導波路を初めて確認した。さらに、TEM による評価から本 GeOI 層の高い品質性を実証し、暗電流の小さい Ge 受光器の集積にも成功した。

#### 5. 今後の計画

これまでに関与、構築してきた結晶成長技術、結晶・界面・歪・電子物性の制御技術、各種材料・プロセス技術を統合し、Sn 系 IV 族混晶トランジスタや光電子デバイスの試作を進める。その特性評価を通じて、Sn 系 IV 族混晶の省電力エレクトロニクス応用に向けた可能性と課題を明確化し、実用化のための方策を構築していく。

#### 6. これまでの発表論文等

##### 【学術論文】

1. “Near-infrared light absorption by polycrystalline SiSn alloys grown on insulating layers”, M. Kurosawa, M. Kato, T. Yamaha, N. Taoka, O. Nakatsuka, and S. Zaima, Appl. Phys. Lett. **106**, 171908 (2015).
2. “Characterization of locally strained  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{Ge}$  fine structures by synchrotron X-ray microdiffraction”, S. Ike, O. Nakatsuka, Y. Moriyama, M. Kurosawa, N. Taoka, Y. Imai, S. Kimura, T. Tezuka, and S. Zaima, Appl. Phys. Lett. **106**, 182104 (2015).
3. 【招待レビュー論文】 “Growth and applications of GeSn-related group-IV semiconductor materials”, S. Zaima, O. Nakatsuka, N. Taoka, M. Kurosawa, W. Takeuchi, and M. Sakashita, Sci. Technol. Adv. Mater. **16**, 043502 (2015).
4. “Experimental observation of type-I energy band alignment in lattice-matched  $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x\text{Sn}_y/\text{Ge}$  heterostructures”, T. Yamaha, S. Shibayama, T. Asano, K. Kato, M. Sakashita, W. Takeuchi, O. Nakatsuka, and S. Zaima, Appl. Phys. Lett. **108**, 061909 (2016).
5. “Characterization of crystallinity of  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  epitaxial layers grown using metal-organic chemical vapor deposition”, Y. Inuzuka, S. Ike, T. Asano, W. Takeuchi, O. Nakatsuka, and S. Zaima, Thin Solid Films **602**, 7 (2016).

その他、学術論文 39 編、学会発表等 141 件。

##### 【受賞】

1. 第 41 回 (2016 年秋季) 応用物理学会講演奨励賞, 高橋恒太, “水中パルスレーザアニールを用いた多結晶 GeSn への高濃度 n 型ドーピング”, 2017 年 3 月。

その他、12 件。

##### 【ウェブサイト】

<http://alice.xtal.nagoya-u.ac.jp/zaimalab/>