

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04487

研究課題名（和文）GeSiSn/GeSn量子井戸を用いた高周波発振素子の開発

研究課題名（英文）Development of high-frequency devices using GeSiSn/GeSn quantum wells

研究代表者

塚本 貴広（TSUKAMOTO, TAKAHIRO）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：50640942

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、新しいSi系ヘテロ接合技術の開発として、III-V族半導体のように格子定数とバンドギャップを独立に制御可能な格子定数整合系のヘテロ接合をSi系IV族半導体で実現し、高周波発振素子への応用に向けた要素技術の開発に取り組んだ。物理堆積法であるスパッタエピタキシー法を結晶成長手法として採用することで、GeSn(Si)薄膜の高品質化が可能となり、良好なGeSiSn/Ge(Sn)量子井戸形成が可能であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、スパッタエピタキシー法をGeSn(Si)結晶成長に用いることで、高品質なGeSiSn/GeSn量子井戸が提供可能であることを明らかにした。本技術により、量子効果を用いた電子デバイスだけでなく、GeSn受光・発光素子の特性向上も期待され、GeSn(Si)系半導体デバイス分野の発展が期待される。本研究を通して、無線通信や光通信技術への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed the lattice-matched group-IV heterojunction technique like a III-V semiconductor, which can control the band-gap and lattice-constant independently. This technique can be useful for high-frequency heterojunction devices. We found that the crystallinity of the GeSn(Si) layers can be improved by using the sputter epitaxy method, and this technique can help obtain excellent GeSiSn/Ge(Sn) quantum wells.

研究分野：電子材料工学

キーワード：GeSiSn GeSn スパッタエピタキシー法 Sn拡散 Sn析出

1. 研究開始当初の背景

情報化社会の促進に伴い、ひっ迫してきた周波数資源や無線通信における大容量伝送のため、ミリ波帯 (30-300 GHz) における周波数資源の開拓が求められており、発振回路の微分負性抵抗として必要な共鳴トンネルダイオード (RTD) において、汎用性が高く安価な Si 系 族半導体での実現が求められている。これまでに、Si/SiGe-RTD 素子において、最大で 20 GHz での発振動作が報告されているが、Si と SiGe の格子定数が異なることから、低欠陥なヘテロ接合形成に限界があり、新規なヘテロ接合形成技術の開発が必要であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、新しいヘテロ接合形成技術の開発として、 IV-VI 族半導体のように格子定数とバンドギャップを独立に制御可能な格子定数整合系のヘテロ接合を Si 系 族半導体で実現し、高周波発振素子への応用に向けた要素技術の開発に取り組んだ。

3. 研究の方法

本研究では、GeSiSn/Ge(Sn)-RTD 素子の開発に向けた要素技術の開発として、物理堆積法であるスパッタエピタキシー法を採用し、GeSiSn 及び GeSn 薄膜の結晶成長技術の開発に取り組んだ。Ge に格子整合した GeSiSn 薄膜の形成技術及び評価方法や GeSn の高結晶化に取り組んだ。また、良好な GeSiSn/Ge (Sn) 量子井戸形成に向けて Sn 拡散の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 格子定数整合した GeSiSn/Ge 積層膜の積層条件と結晶性

GeSiSn/Ge ヘテロ接合形成技術の開発として、格子定数整合した GeSiSn/Ge 積層膜の形成条件と結晶性の関係についてラマン分光法により調査した (図 1)。ラマンスペクトルの半値幅による結晶性評価を行った結果、GeSiSn/Ge 積層膜の結晶性は、Ge 層と GeSiSn 層の膜厚に依存し、Ge 層と GeSiSn 層の膜厚の比に相関があることがわかった (図 2)。GeSiSn/Ge 積層膜の結晶性評価及び結晶性向上に向けた指針を見出した。

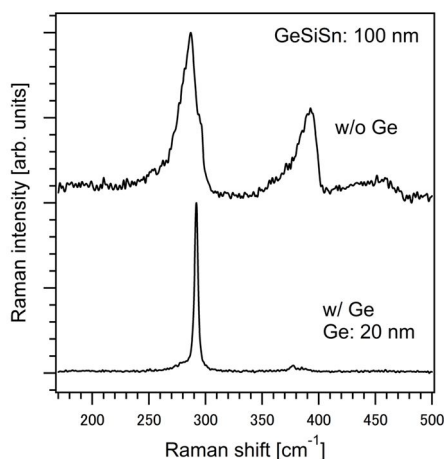


図 1 . GeSiSn 及び Ge/GeSiSn 薄膜のラマンスペクトル .

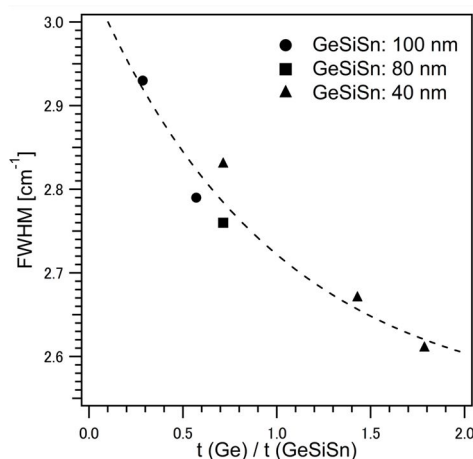


図 2 . Ge/GeSiSn 薄膜における結晶性評価 . 横軸は Ge と GeSiSn の膜厚の比 .

(2) GeSn 薄膜形成と GeSiSn/GeSn ヘテロ接合形成

GeSn は成膜温度が高いと Sn が析出してしまう。Sn 析出によるデバイス特性の劣化と GeSn の結晶性はトレードオフであり、Sn 析出を抑制しつつ、高温での成膜を達成する技術の開発が必要である。ここでは、低温バッファ層の効果を調べ、低結晶な GeSn をバッファ層とすることで Sn 析出が抑制できることを見出した (図 3)。225 °C での成膜を先に行うことで、従来 Sn 析出する 300 °C の成膜においても Sn 析出なくなり、高結晶化を達成している (図 4)。

GeSn は GeSiSn よりも Sn 析出が起こりやすいため、最適な成膜温度を明らかにする必要があり、GeSiSn/GeSn 量子井戸の設計や最適な形成条件の探索を進めた。GeSiSn/GeSn ヘテロ接合形成においては、GeSn が薄い場合は高温で成膜可能であり、GeSiSn/GeSn 量子井戸形成に適応したところ、290 °C の比較的高温にて形成可能であることが分かった。これは GeSiSn/GeSn 量子井戸の高結晶化が可能となるだけでなく、GeSiSn/GeSn-RTD 素子の上層部 p 型コンタクト層の活性化率向上 (直列抵抗の低減) に有効であり、デバイス特性向上が期待される。

Crystal growth of GeSn layers

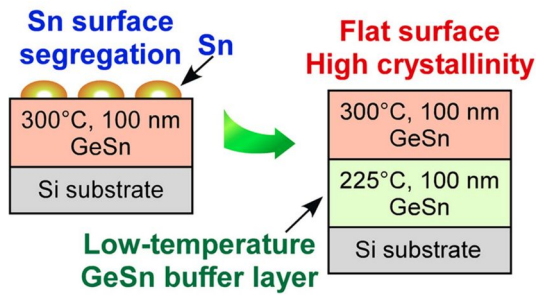


図3 . 低温バッファ層による GeSn 薄膜の高結晶化技術 .

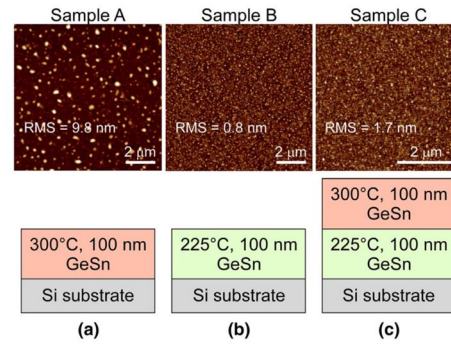


図4 . GeSn 薄膜表面の原子間力顕微鏡像 .

(3) GeSn/Ge ヘテロ接合における Sn 拡散

ここでは Sn 拡散の挙動を明らかにするために、GeSn/Ge ヘテロ接合における Sn 分布の評価を行った。GeSiSn 及び GeSn において、Sn 組成比はバンドギャップを決定し、GeSiSn/Ge(Sn) 量子井戸の量子井戸ポテンシャルを決定するため、Sn 組成比制御技術は重要である。しかし、他の研究報告によると、GeSn/Ge ヘテロ接合において、GeSn から Ge への Sn の拡散が大きく、バンドギャップや量子井戸ポテンシャルへの影響が懸念されていた。そこで、スパッタエピタキシー法を用いて作製した GeSn/Ge ヘテロ接合における Sn 拡散について評価を行った(図5)。スパッタエピタキシー法を用いることで、従来の報告よりも GeSn から Ge への Sn 拡散を 10~100 分の 1 に抑制可能であることを明らかにした(図6)。

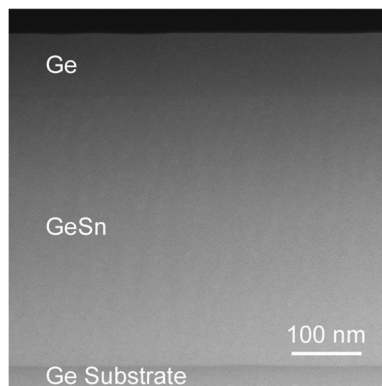


図5 . Ge/GeSn 薄膜の透過型電子顕微鏡像 .

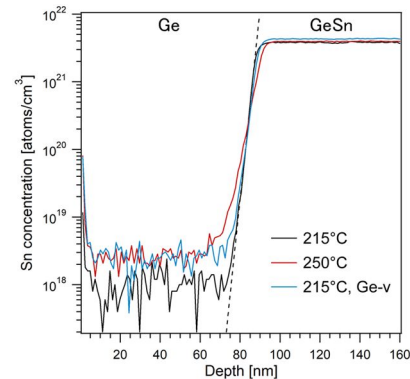


図6 . Ge/GeSn 薄膜における Sn 分布 .

(4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究で得られた成果の一つとして、GeSn 結晶成長において Sn 拡散が少ない手法(スパッタエピタキシー法)を見出した点がある。Sn の移動が少ないので、GeSiSn/GeSn 量子井戸における Sn の分布制御が正確となり、急峻なポテンシャル変調が可能となる。また、従来技術では、結晶成長において GeSn が厚くなると、Sn 組成比が徐々に増えてしまうという問題があり、デバイス特性の劣化につながっていたが、本技術を用いると、均一な Sn 組成比の GeSn 薄膜の形成が期待される。本技術により、量子効果を用いた電子デバイスだけでなく、GeSn 受光・発光素子の特性向上も期待される。

(5) 今後の展望

今後は、本研究にて開発した技術をさらに発展させ、RTD 素子への適応を行い、さらに GeSn 受光・発光素子への展開を目指す。これらを通して、GeSn(Si)系半導体デバイスの発展に貢献する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsukamoto Takahiro, Hirose Nobumitsu, Kasamatsu Akifumi, Matsui Toshiaki, Suda Yoshiyuki	4. 巻 726
2. 論文標題 Evaluation of crystallinity of lattice-matched Ge/GeSiSn heterostructure by Raman spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 138646 ~ 138646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2021.138646	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsukamoto Takahiro, Kurihara Shota, Hirose Nobumitsu, Kasamatsu Akifumi, Matsui Toshiaki, Suda Yoshiyuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Increase in Current Density at Metal/GeO ₂ /n-Ge Structure by Using Laminated Electrode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electronic Materials Letters	6. 最初と最後の頁 41 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13391-019-00185-0	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsukamoto Takahiro, Hirose Nobumitsu, Kasamatsu Akifumi, Matsui Toshiaki, Suda Yoshiyuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Effects of Low-Temperature GeSn Buffer Layers on Sn Surface Segregation During GeSn Epitaxial Growth	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electronic Materials Letters	6. 最初と最後の頁 9 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13391-019-00179-y	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takahiro Tsukamoto, Shota Kurihara, Nobumitsu Hirose, Akifumi Kasamatsu, Toshiaki Matsui, Yoshiyuki Suda
2. 発表標題 Lattice-matched GeSiSn/Ge double-barrier resonant tunneling diodes
3. 学会等名 The 17th E-MRS Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚本貴広, 広瀬信光, 笠松章史, 松井敏明, 須田良幸
2. 発表標題 スパッタエピタキシー法を用いたGe/GeSiSnヘテロ構造形成
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	須田 良幸 (SUDA YOSHIYUKI) (10226582)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授 (12605)	
研究分担者	広瀬 信光 (HIROSE NOBUMITSU) (90212175)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所企画室・エキスパート (82636)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------