

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02620

研究課題名（和文）GeSn赤外センシングプラットフォームの創出

研究課題名（英文）Development of GeSn-based NIR sensing devices

研究代表者

細井 卓治（Hosoi, Takuji）

関西学院大学・工学部・准教授

研究者番号：90452466

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：ゲルマニウム-スズ（GeSn）混晶半導体を用いた赤外センシングプラットフォーム実現のため、レーザー結晶化による高品質GeSn単結晶形成を検討した。石英基板上でアモルファスGeSn層をワイヤ状に加工し、SiO₂層でキャップした後、細長い楕円状に整形したレーザー光を走査して、ワイヤの端から端までmmオーダーで結晶化することに成功し、優れた結晶性および光学特性を有することを確認した。また、一度レーザー走査によりGeSnワイヤ全体を結晶化した後、再度逆方向にレーザーを走査してワイヤ中央部でレーザー照射を終了することで、高Sn濃度GeSn領域をワイヤ中央部に設けた横型ダブルヘテロ構造の作製に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GeSnは集積回路や赤外光学素子として優れた物性を持つと予想される一方で、高品質なGeSn単結晶が困難である。本研究では、高品質GeSn単結晶の横方向液相成長をレーザー走査で行うGeSnレーザー結晶化技術をさらに発展させ、光吸収キャップ層を用いることによるGeSnパターン依存性の解消、レーザー走査の工夫によりGeSnダブルヘテロ構造の作製、などを実現した。また、石英基板に限らずSi基板上でもGeSnレーザー結晶化が可能であることも見出した。

研究成果の概要（英文）：To develop an infrared sensing platform using germanium-tin (GeSn) semiconductor, we investigated the lateral growth of high-quality GeSn single crystals by laser crystallization. After processing an amorphous GeSn layer into a wire shape on a quartz substrate and capping it with a SiO₂ layer, we successfully formed the mm-long single-crystalline GeSn wires from end to end by scanning a laser beam. PL and Raman analysis revealed that the formed GeSn wire has excellent crystallinity. In addition, a horizontal double heterostructure with a high Sn concentration GeSn region in the center of the wire was fabricated by scanning the laser twice; Once the entire GeSn wire was crystallized by 1st laser scanning, and 2nd scan was done in the opposite direction and was terminated at the center of the wire.

研究分野：半導体工学

キーワード：GeSn 赤外線 結晶化 レーザー

1. 研究開始当初の背景

近赤外線はリモコン、生体認証、監視カメラなどで利用されており、自動車の自動運転の鍵となる LiDAR でも利用が検討されている。また、中赤外線は化学物質の特定に利用されており、将来的に環境計測への応用が期待される。このように赤外線センシングの需要は今後増大すると考えられ、ICT 技術との融合、すなわち CMOS 集積回路との混載が期待される。そこで注目されている材料にゲルマニウムスズ (GeSn) 混晶がある。Ge は間接遷移型半導体であるが、引張歪みの印加や Sn 添加により、直接遷移型へとエネルギーバンド構造が変調することが知られており、そのバンドギャップ変調幅は近赤外から中赤外の波長域に対応する。また、Ge は Si と比較して電子移動度は約 3 倍、正孔移動度は約 4 倍高く、歪み印加や Sn 添加によってさらに移動度が向上することも知られている。このように、GeSn は赤外発光/受光素子および Si に替わる CMOS 材料として有望視されているが、Ge 中の Sn 固溶限が 1% と極めて低く、また Sn の格子定数が Ge よりも 15% 大きいために、高品質かつ高 Sn 組成の GeSn 単結晶の形成は極めて難しい。これまで報告されている GeSn 単結晶は、Si あるいは Ge 層上での MBE や CVD によるエピタキシャル成長によるものがほとんどで、低温成長により 10% 以上の Sn 組成が実現されている一方で、格子定数差が大きいために直接遷移化を阻害する圧縮歪みが導入され、結晶欠陥の発生が避けがたい。それにも関わらず GeSn トランジスタで Ge を凌ぐチャネル移動度や、GeSn マイクロディスク構造の光励起によるレーザー発振が報告されており、GeSn の持つ高いポテンシャルの一端は示されているものの、期待されるほどの光学特性・電気特性は実証されていない。

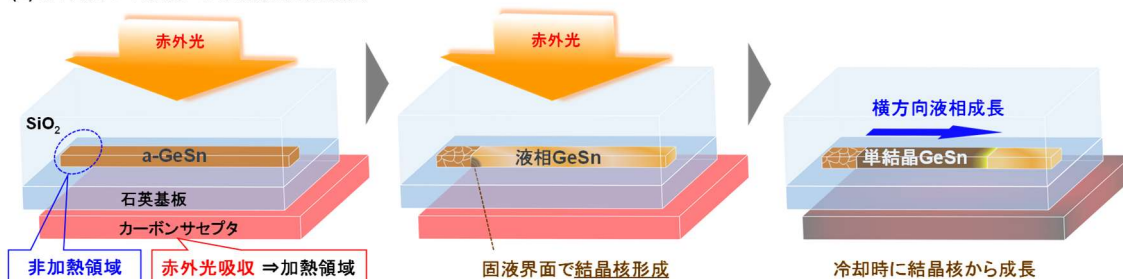
2. 研究の目的

本研究では、GeSn による発光/受光素子と CMOS 回路を集積した赤外センシングプラットフォームの創出を目指し、透明基板上での GeSn 単結晶液相成長技術を、結晶欠陥・不純物を極限まで低減した高品質 GeSn の形成や、面内方向に Sn 組成傾斜を設けた GeSn 横型ダブルヘテロ構造の作製に取り組んだ。

3. 研究の方法

研究代表者らは、石英基板上のアモルファス GeSn 層を局所溶融する GeSn 核形成制御横方向液相成長を提案し、単結晶 GeSn 層を実現している (図 1)。GeSn 層全体を溶融した場合、ランダム核形成が起こり多結晶になってしまうが、局所的に溶融することにより、固相/液相界面に形成される結晶核から横方向に結晶成長を促し、Sn 組成 2~3%、引張歪み 0.6% が印加された GeSn 単結晶が形成できる。また、数十 μm 幅に整形したレーザーを照射し、照射領域のみ GeSn が溶融する条件でレーザーを GeSn ワイヤの端から端まで走査することで単結晶 GeSn の形成にも成功している (図 1(b))。本研究では、本手法が様々な GeSn パターンに対して適用可能かどうか、さらに Si 基板上でも実現可能かどうか検討すると共に、GeSn 結晶の高品質化や GeSn 横型ダブルヘテロ構造の形成を検討した。

(a) 赤外線ランプ加熱による横方向液相成長



(b) レーザー結晶化

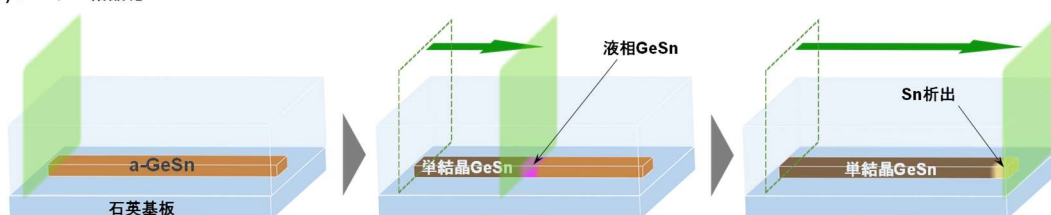


図 1 (a) 赤外線ランプ加熱、(b) レーザー走査による GeSn 横方向液相結晶化の模式図。

4. 研究成果

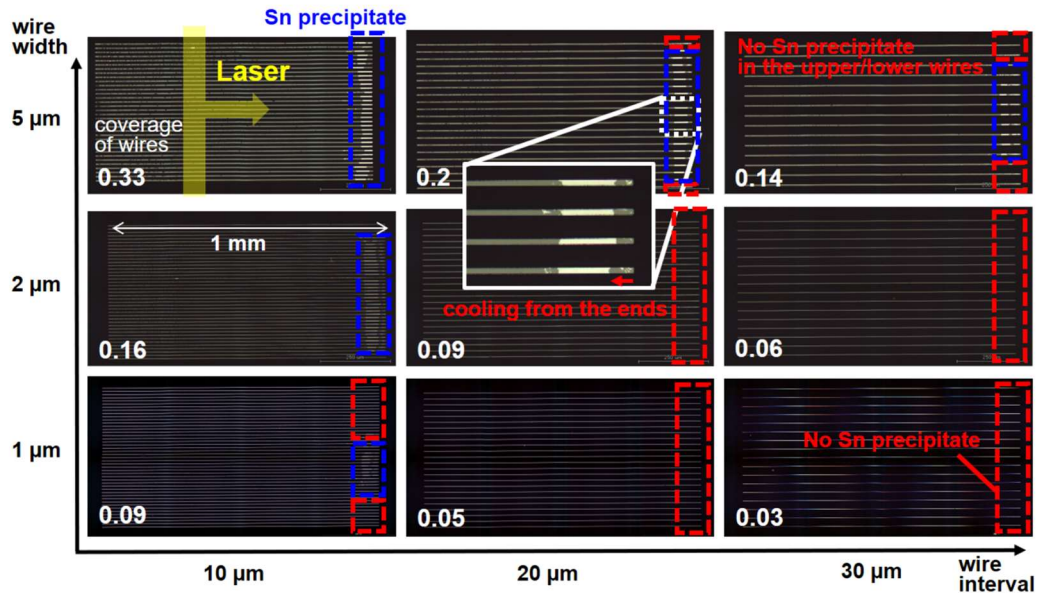
(1) レーザー結晶化における GeSn パターン依存性

以前の研究ではフォトダイオードをアレイ状に配列することを考えていたため、GeSn ワイヤを密に配置したパターンで結晶化に成功していた。一方で、GeSn ワイヤ幅を細くしたり、ワイヤ間隔を広げた場合には、図 2(a)に示すように結晶化が起こらないことが明らかとなった。これは GeSn ワイヤがレーザー光を吸収して発熱しているためであり、レーザー照射領域における GeSn ワイヤの光吸収が不十分で熔融温度に達しなかったと考えられる。そこでこの解決策として、SiO₂ キャップ層の上に厚さ 200 nm の poly-Si 層を形成し、光吸収層（熱源）として利用することを考えた。その結果、図 2(b)に示すように GeSn ワイヤのパターンに関係なく GeSn 単結晶を成長させることに成功した。

(2) Si 基板上での GeSn 液相結晶化の検討

Si 基板上で GeSn 液相結晶化を行う場合、Si 基板が赤外線を吸収するため、赤外線ランプ加熱は GeSn 全体が熔融してしまうため適用できない。そこでレーザー結晶化を実施したところ、石英基板上では単結晶 GeSn が形成できた条件で全く GeSn 熔融が見られなかった。この原因は Si の熱伝導率 (160 W/mK) が SiO₂ よりも 100 倍位以上高いことから Si 基板への放熱であると考え、Si 基板上での GeSn レーザー結晶化が可能かどうかを熱シミュレーションにより検討した。

(a) Si キャップ層 (光吸収層) なし



(b) Si キャップ層 (光吸収層) あり

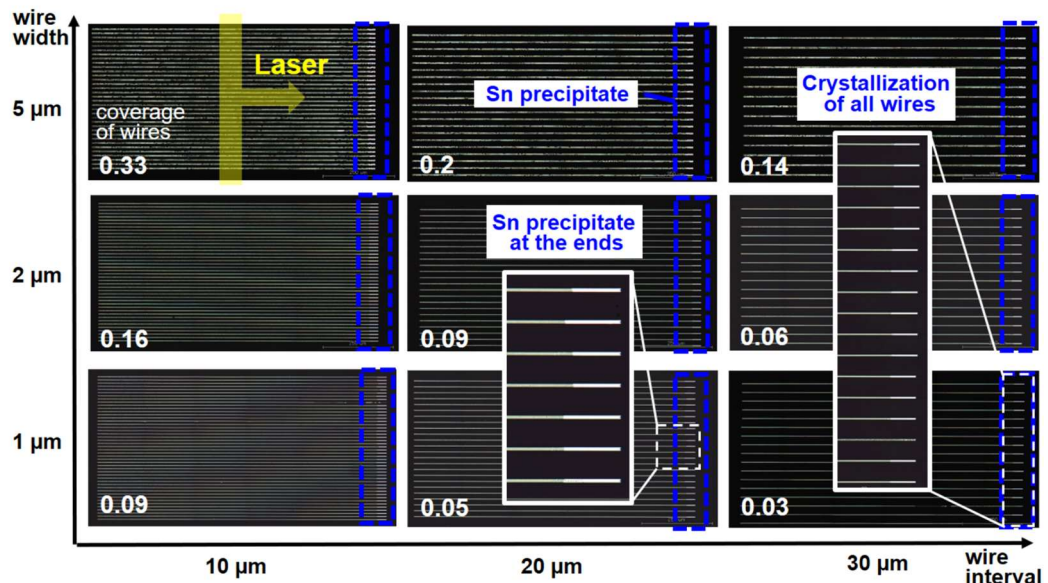


図 2 (a) Si キャップ層なし、(b) Si キャップ層ありの場合でのレーザー結晶化の GeSn パターン依存性.

その結果、Si 基板と光吸収層との間に厚さ 10 μm の SiO_2 層を挿入したとしても、Si 基板への放熱により GeSn は熔融困難であるが、Si 基板を 400 $^\circ\text{C}$ に加熱してレーザー照射すれば GeSn を熔融しつつ、Si 基板表面の温度も 500 $^\circ\text{C}$ 以下に抑制できることがわかり、バックエンドプロセスに適用可能であることがわかった。

(3) GeSn 横型ダブルヘテロパターンの形成

低濃度 GeSn 層で中央にある高濃度 GeSn 層を挟んだ構造を作るため、レーザー光を 2 回走査することを検討した。図 3 に示すように、1 回目のレーザー走査で単結晶 GeSn 層を形成した後、Sn 析出側から 2 回目のレーザー走査を行い、中央でレーザーを OFF した。その結果、中央付近に Sn 析出は確認でき、想定構造を作ることができた。一方で、中央の高濃度 GeSn 領域内でも Sn の分布があることや、2 回の熔融を経た右側の低濃度 GeSn 層の結晶化が 1 回熔融しただけの左側よりも劣ることがフォトルミネッセンス測定より明らかとなった。この改善のためには、レーザー寸法やキャップ層材料などの検討が必要と考えられる。

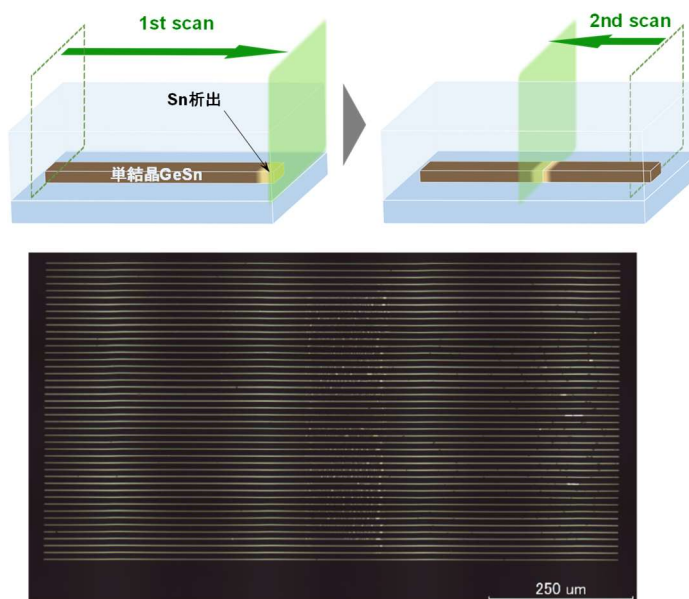


図 3 二度のレーザー走査により作製した GeSn ダブルヘテロ構造.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shimura Takayoshi, Yamaguchi Ryoga, Tabuchi Naoto, Kondoh Masato, Kuniyoshi Mizuki, Hosoi Takuji, Kobayashi Takuma, Watanabe Heiji	4. 巻 62
2. 論文標題 Controllability of luminescence wavelength from GeSn wires fabricated by laser-induced local liquid phase crystallization on quartz substrates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1083 ~ SC1083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acb9a2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shimura Takayoshi, Tanaka Shogo, Hosoi Takuji, Watanabe Heiji	4. 巻 -
2. 論文標題 Fabrication and Luminescence Characterization of Ge Wires with Uniaxial Tensile Strains Applied using Internal Stresses in Deposited Metal Thin Films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11664-023-10309-w	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Shimura, H. Oka, T. Hosoi, Y. Imai, S. Kimura, and H. Watanabe
2. 発表標題 Fabrication of Tensile-strained Single-crystalline GeSn Wires on Amorphous Quartz Substrates by Local Liquid-phase Crystallization
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Shimura, R. Yamaguchi, N. Tabuchi, M. Kondo, M. Kuniyoshi, T. Hosoi, T. Kobayashi, H. Watanabe
2. 発表標題 Controllability of Luminescence Wavelength from GeSn Wires Fabricated by Laser Zone Melting on Quartz Substrates
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Shimura, S. Tanaka, H. Watanabe, T. Hosoi
2. 発表標題 Fabrication and Luminescence Characterization of Uniaxial Tensile-strained Ge Wires using Internal Stress in Metal Thin Films
3. 学会等名 The 19th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP19) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田淵 直人, 山口 凌雅, 近藤 雅斗, 國吉 望月, 細井 卓治, 小林 拓真, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 光吸収層を有する石英基板上GeSn細線のレーザー溶融結晶化
3. 学会等名 電子デバイス界面テクノロジー研究会 - 材料・プロセス・デバイス特性の物理 - (第27回研究会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田淵 直人, 國吉 望月, 細井 卓治, 小林 拓真, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 石英基板上GeSn細線のレーザー溶融結晶化における光吸収層の検討
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 志村 考功, 細井 卓治, 小林 拓真, 渡部 平司
2. 発表標題 局所液相成長法によって作製した単結晶GeSn細線の受光・発光特性
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 國吉 望月, 田淵 直人, 細井 卓治, 志村 考功, 渡部 平司
2. 発表標題 レーザー溶融結晶化による石英基板上単結晶GeSn作製技術の高度化
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021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
研究協力者	志村 考功 (Shimura Takayoshi) (90252600)	大阪大学・大学院工学研究科・准教授 (14401)	
研究協力者	渡部 平司 (Watanabe Heiji) (90379115)	大阪大学・大学院工学研究科・教授 (14401)	
研究協力者	國吉 望月 (Kuniyoshi Mizuki) (40897443)	大阪大学・大学院工学研究科・招聘研究員 (14401)	

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
---------	---------