

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18859

研究課題名（和文）フレキシブルスピンTFTの創製

研究課題名（英文）Discovery of a flexible spin thin-film transistor

研究代表者

浜屋 宏平（Kohei, Hamaya）

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：90401281

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、新しいフレキシブルエレクトロニクス産業基盤となり得る「高性能・低消費電力フレキシブルスピン薄膜トランジスタ(TFT)実現の可能性を探索した。低温ゲートスタック作製技術を用いて、擬似単結晶GeフレキシブルTFTを実証した。フレキシブル基板上に低温形成した擬似単結晶Ge薄膜上への結晶性Co系ホイスラー合金薄膜の低温形成を実証した。これらの成果は、高性能フレキシブルスピンTFT実現への重要な指針を示すものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまでのフレキシブルエレクトロニクスの概念を覆す「結晶性半導体を用いた高性能フレキシブルエレクトロニクスシステム」のコアとなる技術を開発するための基礎検討を行い、比較的性能の高いフレキシブルスピンTFTの実現の可能性を示した。スマートフォン市場で低消費電力化に貢献したIGZOなどの次世代を担う革新的フレキシブル基盤技術の創成であると期待され、挑戦的研究として十分な意義がある。また、エレクトロニクス分野全体の学術・研究体系を大きく変革する可能性を秘めた意義深い研究でもある。

研究成果の概要（英文）：We have experimentally demonstrated a flexible thin-film transistor (TFT) with pseudo-single-crystalline Ge (PSC-Ge) films grown by a gold-induced crystallization (GIC) method. A field-effect mobility of ~ 10 cm²/Vs was obtained. For improvement of electrical properties of PSC-Ge films, we have explored the effect of Sn addition to the PSC-Ge layer. As a result, a Hall mobility of ~ 300 cm²/Vs was obtained at room temperature. This result will lead to a high-performance flexible TFT. We have also explored the growth of a ferromagnetic full-Heusler alloy, Co₂FeSi, on a (111)-oriented PSC-Ge/polyimide flexible template. Using a low-temperature molecular beam epitaxy technique, crystalline Co₂FeSi films were obtained on the flexible Ge at less than 80 °C. We believe that this project is an important step for flexible Ge-channel spin MOSFETs.

研究分野：電気電子材料

キーワード：薄膜トランジスタ フレキシブル スピン

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

目覚ましい発展を遂げてきているフレキシブルエレクトロニクス素子の最大の利点は、いつでも・どこでも・手軽に利用することができるという「ポータビリティ(可搬性)」であるが、それを「長く・安定的に」利用するためには、低消費電力化という極めて大きな課題が残っている。アモルファス酸化物半導体(IGZO など)を除くアモルファスシリコン(Si)や有機半導体材料は、キャリア移動度が低いため低消費電力化が難しいことが知られている。また、IGZOはn形薄膜トランジスタ(TFT)は作製できるが、p形TFTを実現することが難しく、フレキシブルエレクトロニクス分野にSiエレクトロニクスの主役を担っているような高性能なCMOSを実現することも困難である。つまり、いつでも・どこでも・手軽に「長時間安定的に」利用することができる「フレキシブルシステム」を実現するためには、新たなブレークスルーが必要となる。

研究代表者らは、従来から高性能が実現されている無機半導体をフレキシブル基板(プラスチックなど)の軟化温度以下で高品質に作製する技術を探索してきた結果、次世代の高速半導体材料として期待されているゲルマニウム(Ge)をフレキシブル基板上に高品質に作製することに成功してきた[1] [図1(左)]。この技術と研究代表者が約10年近く個別に検討し、すでに世界最高レベルに達してきたGeスピントロニクス技術[2]を融合することができれば、いつでも・どこでも・手軽に・長時間安定的に利用することができるフレキシブルシステムのコアデバイスとなる「高性能・低消費電力フレキシブルスピントランジスタ[図1(右)]」を実現することができるかもしれないと着想し、研究を開始した。

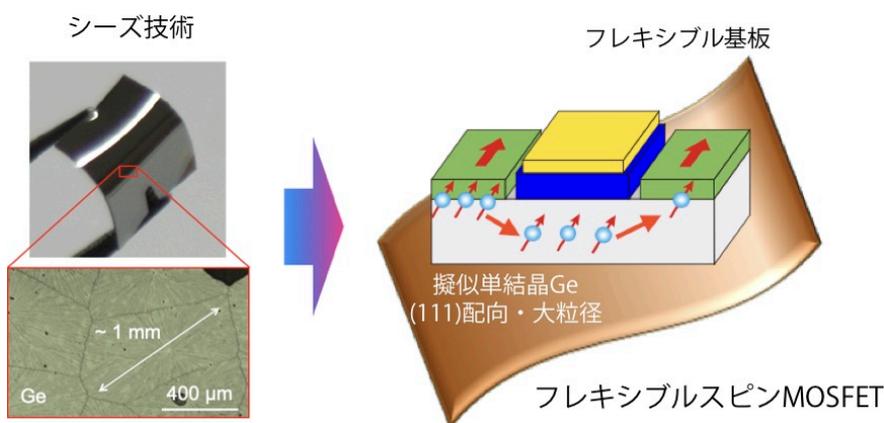


図1 本研究の目的(シーズ技術と挑戦内容の最終形態の模式図)

2. 研究の目的

本研究では、これまでのフレキシブルエレクトロニクスの概念を覆し、アモルファス半導体や有機半導体を伝導チャネルとしない結晶性無機半導体を用いた高性能フレキシブルエレクトロニクスと半導体スピントロニクス技術[2]を融合した新分野開拓の芽を創出することを目的とする。具体的には、研究代表者が最近実現している「フレキシブル基板上の高配向性結晶(擬似単結晶)ゲルマニウム(Ge)形成技術」[1]を基軸とし、10~15年後の新しいフレキシブルエレクトロニクス産業基盤となり得る「高性能・低消費電力フレキシブルスピントランジスタ実現の可能性を探る」。

3. 研究の方法

金誘起層交換成長(GIC)法[1]を用いてフレキシブル基板上に擬似単結晶 Ge 薄膜を作製し、低温ゲートスタック技術と融合することで、GeフレキシブルTFTを実証する。さらに、性能向上を目指したSn添加擬似単結晶Ge薄膜の実現を目指す。最後に、フレキシブルス

ピントランジスタ実現のための高性能強磁性電極材料として、Co系ホイスラー合金薄膜に注目し、擬似単結晶 Ge 薄膜上への規則合金化を目指す。

4. 研究成果

(1) フレキシブル TFT の実証と擬似単結晶 Ge 薄膜の電気特性について

既に実現している低温ゲートスタック作製技術[3]を用いて、擬似単結晶 Ge フレキシブル TFT を試作・実証[4]した[図 2(a)]. 電界効果移動度は $\sim 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ であり、この値は p チャンネルフレキシブル TFT としては世界最高値となった。しかし、このゲートスタック作製プロセスは最適化されておらず、今後はゲート酸化膜/擬似単結晶 Ge 界面における欠陥(クーロン散乱の要因)を低減させる手法を開発することが重要と言える。

一方、このフレキシブル基板上に作製した擬似単結晶 Ge 薄膜の移動度($\sim 200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)は、同程度のキャリア密度を考慮した際の単結晶 Ge で期待されている移動度($\sim 700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)よりもはるかに低いという課題を見出した。そこで、この擬似単結晶 Ge(111)薄膜の電気伝導特性の解明に注力した。擬似単結晶 Ge(111)薄膜の一つの粒子内にホールバー素子を加工し、4 端子及びホール電圧測定を行うことでホール移動度およびキャリア密度の温度特性を詳細に評価・解析した。その結果、キャリアの散乱機構には触媒として用いている Au による深いドナー準位の形成が関係しており、ホール移動度の低下を引き起こす主要な要因となっていることを明らかにすることができた[5]。

上記の移動度低下の問題を解決して擬似単結晶 Ge 薄膜のホール移動度を向上させるために、[Au/Sn]多層構造を用いた新しい層交換成長法からフレキシブル基板上に同様の擬似単結晶 Ge(Sn)薄膜作製を検討した[図 2(b)左]。結果として同様の品質の擬似単結晶フレキシブル Ge 薄膜が得られた。図 2(b)右にはホール移動度の温度依存性を示している。Sn 添加の効果として大幅な移動度の増大が観測され、特に、室温でのホール移動度は $\sim 300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ へと向上することがわかった。これは、フレキシブル基板上の半導体薄膜としては極めて高い値と言える。一方で、ホール移動度の温度依存性は、Sn を添加する前の薄膜の挙動と同様であり、残念ながら Au によるイオン化不純物散乱の影響を排除することができていないことも判明した。今後は、さらなる Sn 添加の効果を検討する必要があるが、現段階でも高性能なフレキシブル Ge チャンネル層を利用した高性能 TFT の実証が期待される成果を得たとと言える。

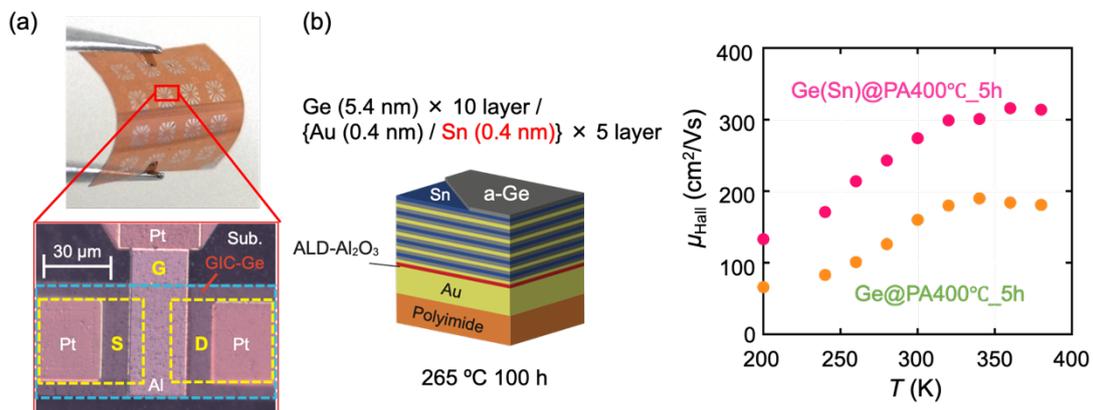


図2 (a)フレキシブル結晶Ge-TFTの写真. (b) Sn添加によるホール移動度の向上.

(2) フレキシブル基板上への結晶性 Co 系ホイスラー合金薄膜の低温形成

フレキシブル基板上に作製した擬似単結晶 Ge 薄膜上に、スピン注入源として高い性

能が期待されている Co 系ホイスラー合金「Co₂FeSi」の薄膜成長を探索した。分子線エピタキシー(MBE)法を用いて、擬似単結晶 Ge 薄膜上に結晶性の Co₂FeSi 薄膜を低温(80°C以下)合成することに成功した[6]。図 3(a)に示すように、結晶性の Co 系ホイスラー合金がフレキシブル基板により自在に曲げられる様子が確認できる。しかし、単結晶 Ge 基板上に低温合成した Co₂FeSi 薄膜と比較して磁気特性が大きく劣っていた[図 3(b), 青プロット]。

上記の性能劣化の原因が擬似単結晶 Ge 薄膜の表面凹凸に起因していると考え、擬似単結晶 Ge 薄膜と Co₂FeSi 薄膜との間に MBE-Ge 層を挿入し、Ge 薄膜の表面平坦性を改善することで品質改善を試みた。その結果、Co₂FeSi 薄膜の磁気特性は改善し[図 3(b), 赤プロット], 単結晶 Ge 基板上に低温形成した Co₂FeSi 薄膜[7]に近い磁気特性を示した。以上のことから、スピン注入源として有望な Co 系ホイスラー合金を用いた高性能フレキシブルスピン TFT 実現への重要な指針を示すことができたと言える。

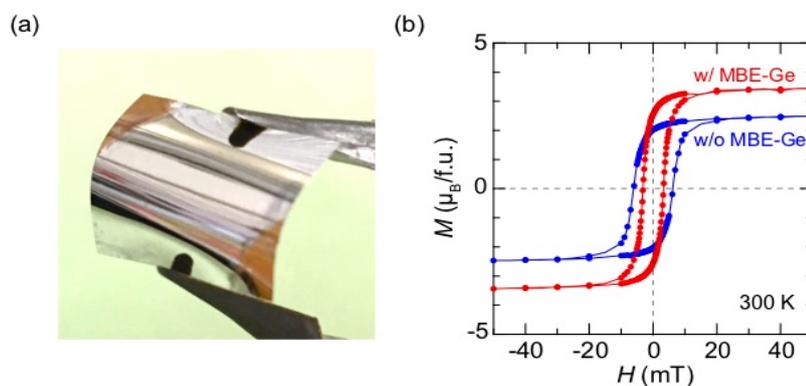


図3 (a)フレキシブル基板上に低温形成した結晶性Co系ホイスラー合金薄膜の写真と(b)室温での磁化曲線。

[引用文献]

- [1] H. Higashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 041902 (2015).
- [2] K. Hamaya *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 393001 (2018) (Topical Review).
- [3] K. Kasahara *et al.*, Appl. Phys. Lett. **107**, 142102 (2015).
- [4] H. Higashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **111**, 222105 (2017).
- [5] H. Higashi *et al.*, J. Appl. Phys. **123**, 215704 (2018).
- [6] S. Yamada *et al.*, Mat. Sci. Semicon. Proc. **112**, 104997 (2020).
- [7] Y. Fujita *et al.*, Phys. Rev. Applied **8**, 014007 (2017).

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 0件）

1. 著者名 Yamada Shinya, Higashi Hidenori, Kanashima Takeshi, Hamaya Kohei	4. 巻 112
2. 論文標題 Growth of ferromagnetic Co ₂ FeSi films on flexible Ge(111)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 104997 ~ 104997
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mssp.2020.104997	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 Higashi H., Kudo K., Yamamoto K., Yamada S., Kanashima T., Tsunoda I., Nakashima H., Hamaya K.	4. 巻 123
2. 論文標題 Electrical properties of pseudo-single-crystalline Ge films grown by Au-induced layer exchange crystallization at 250 °C	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 215704 ~ 215704
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1063/1.5031469	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4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 東英実, 笠原健司, 山本圭介, 工藤康平, 山田晋也, 金島岳, 中島寛, 浜屋宏平
2. 発表標題 金誘起層交換成長法で作製したGe薄膜を用いた薄膜トランジスタ特性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演大会、東京工業大学 大岡山キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東英実, 笠原健司, 工藤康平, 山田晋也, 金島岳, 角田功, 中島寛, 浜屋宏平
2. 発表標題 金誘起層交換成長法で作製したGe薄膜における電気伝導特性の理解
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演大会、東京工業大学 大岡山キャンパス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Higashi, K. Kudo, S. Yamada, T. Kanashima, I. Tsunoda, H. Nakashima, and K. Hamaya
2. 発表標題 Flexible thin-film transistors with crystalline germanium layers
3. 学会等名 The 9th International SiGe Technology and Device Meeting (ISTDM), Seminaris Seehotel Potsdam, Germany (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yamada, H. Higashi, T. Kanashima, and K. Hamaya
2. 発表標題 Flexible ferromagnetic Co ₂ FeSi films on flexible Ge(111)
3. 学会等名 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces(ISCSI-8), Tohoku university, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019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	山田 晋也 (Yamada Shinya) (30725049)	大阪大学・基礎工学研究科・助教 (14401)	