

令和 4 年 6 月 25 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02175

研究課題名(和文) 光暗号通信へ向けたゲルマニウム円偏光LEDの創製

研究課題名(英文) Creation of Germanium Circular-polarized LED toward Optical Encrypted Communication

研究代表者

澤野 憲太郎 (Sawano, Kentarou)

東京都市大学・理工学部・教授

研究者番号：90409376

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)：光暗号通信のためのGe円偏光発生LED(スピンLED)の実現に向けて、Ge(111)膜をSi(111)基板上に高品質形成した。そして、貼り合わせ手法によってGe-on-Insulator構造を形成し、表面パッシベーション膜を形成することで非常に大きな発光強度増大を得ることができた。メサ構造の縦型Ge(111)pin LEDデバイスをin-situドーピングによって形成し、非常に強い室温EL発光を得ることに成功した。LEDの電極として、単結晶の強磁性体を高品質成長し、強磁性体からスピン注入することで、端面EL発光が得られ、円偏光を実証する道筋が大きく開けた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により完成した高効率Ge LEDの実現により、シリコンフォトリソグラフィ分野において、Si上の発光デバイスの集積化が可能となり、光配線実現へ向けて非常に大きな貢献となる。これにより、半導体チップの劇的な消費電力低減化が期待される。また、円偏光LEDが実現すれば、次世代の量子暗号技術や偏光多重通信、さらに分子認識技術、不揮発性光メモリなどの応用範囲が広がり、産業界に与える影響力が大きい。

研究成果の概要(英文)：Toward realization of Germanium circular-polarized LED for optical encrypted communication, Ge(111) high quality films were grown on Si(111) substrates. By means of wafer transfer technique, Ge-on-Insulator (GOI) substrates were fabricated. By depositing surface passivation films, we obtained large light emission enhancements. Mesa vertical type Ge(111) pin LEDs were fabricated by using in-situ doping, and very strong room temperature EL was successfully obtained. A single crystal high quality ferromagnetic films were grown as electrodes of the LED and the strong EL emission was obtained from the side edge, opening a route to realization of circular polarized light emission.

研究分野：半導体工学

キーワード：ゲルマニウム LED スピントロニクス 円偏光

1. 研究開始当初の背景

近年、シリコンフォトリソグラフィ分野に大きな注目が集まっており、シリコンプラットフォーム上の光集積回路が実現しつつある。光デバイスを、シリコン半導体チップ上に載せることができれば、チップ上のプロセッサやメモリと融合、一体化でき、その応用範囲は飛躍的に広がる。しかしながらその中では、光受光器、変調器、導波路などの光学素子が Si 上に集積されるものの、未だ光源が確立されておらず大きな課題となっている。Si 基板上にモノリシック(一体)に形成可能な発光構造として、Si ナノ構造があるが、発光エネルギーが Si のバンドギャップ以上となってしまう、発光した光が Si 導波路で再び吸収されてしまうという問題がある。つまり、Si 上に、Si よりも低エネルギーで発光する材料を形成する必要がある。

光による情報伝達機能の可能性を最大限活用するためには、光の偏光を制御して利用することが考えられ、そのために「円偏光」が期待されている。円偏光は次世代の量子暗号技術や偏光多重通信、さらに分子認識技術、不揮発性光メモリなど広範囲に応用できる可能性を秘めている。円偏光を LED チップから発生させる、いわゆるスピン LED の実現のためには、磁性材料から、スピン偏極した電子を半導体中に高効率で注入し、さらにスピンの失われる前に効率よく光を取り出さなければならず、一般にこれは非常に困難であった。特に Si 系材料では、スピン LED の報告は皆無である。

2. 研究の目的

円偏光発生可能な発光素子が Si 基板上に実現すれば、一つの Si チップ上で情報演算処理と、その情報を光配線によって伝達、円偏光発生によるチップ外部への円偏光光信号送信を同時に行うことが可能となり、光通信、Si-OEIC 分野へ革新を起こす技術となる。本研究では、材料としてゲルマニウム(Ge)に注目し、「高スピン偏極強磁性体電極を有する円偏光発生 Ge LED」(図 1) を実現することを目的とする。Ge は Si と同じ IV 族半導体であり、その材料的性質が似ていることから、Si 基板上に集積可能、成熟した Si プロセスが適用可能、Si 上に結晶成長可能、という多くの優れたメリットがある。さらに Ge はそのバンドギャップエネルギーが通信波長帯領域にあり、光通信応用に最適な材料である。歪み導入による高効率 Ge 発光デバイスと、Ge 上高品質強磁性体電極によるスピン注入技術を開発し、Si チップ上の円偏光発生 LED (スピン LED) 実現を目指す。

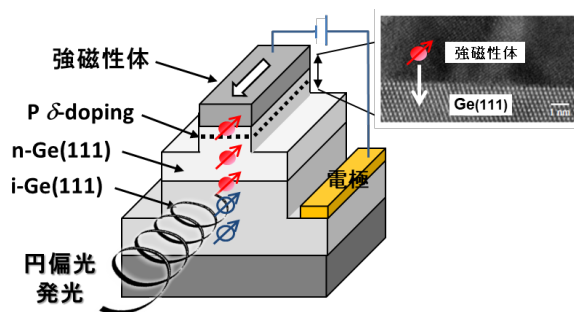


図 1 強磁性体電極を有する円偏光発生 Ge LED 構造

3. 研究の方法

これまで、一般に Ge 材料について研究が進んでいるのは、全て Ge(100) 面方位であるが、本研究においては、強磁性体を Ge 上に結晶成長させるために、面方位は(111)である必要がある。すなわち、Ge(111)膜を Si(111)基板上に形成する必要がある。Si 基板上 Ge(111)構造について、最適な成長方法を見出し、Ge-on-Si(111)の高品質成長を達成する。さらに、無欠陥 Ge 膜を実現するために、基板貼り合わせ技術を用いて、Ge-on-Insulator(GOI)基板を作製する。

成長した Ge-on-Si(111)を利用して、Ge LED 発光デバイス構造を作製し、強磁性体電極からの室温電流注入発光の観測を目指す。LED 素子構造の最適化を行い、EL 発光強度の増大化を図る。特に、Ge 活性層の pn 接合の形成に重点を置き、ドーピング制御技術の高度化を図る。LED 構造最適化後に、電極として強磁性体を形成し、スピン偏極した電子の注入と、それによる円偏光発生を目指す。

また、歪み・バンド制御、量子閉じ込め構造を活性領域に導入することを目的とし、歪み SiGe ヘテロ構造を作製する。各 Ge 組成の SiGe 混晶層を Ge-on-Si 上に作製し、その構造評価、電気特性評価、光学特性評価を進める。特に歪みを維持し、結晶性を保持する必要があり、各歪み、面方位における臨界膜厚を詳細に調べる。また、欠陥発生を抑制するために、新たにパターンニング法を試みる。

4. 研究成果

(1) GOI 形成と表面パッシベーション

Ge スピン LED 実現のために、Ge 膜からの発光効率を向上させる必要がある。そのために、アモルファス Si (a-Si) を用いた GOI の表面不活性化 (パッシベーション) を試みた。近年、Si 太陽電池では、その高い変換効率を得るために水素化アモルファス Si (a-Si:H) 膜の形成が必須技術となっており、今回はそれと完全に同様な、プラズマ CVD による膜形成を行った。特に p 型の a-Si:H 層を堆積させた場合、堆積前と比較して 2 倍以上の発光強度増大が得られた (図 2)。もとの Ge-on-Si と比較して、GOI 化とパッシベーション膜形成によって、全体で約 15 倍の発光強度増大を得ることに成功した。一方、n 型 a-Si:H 膜を堆積させた場合では発光強度が減少し、伝導タイプの制御が重要であることを示している。バンド構造計算より、Ge 表面がバンドベンディングを起こす、いわゆる電界効果によって、表面での非発光再結合が大きく抑制され、発光強度増大につながったものと結論付けられた。これらの結果より、アモルファス Si による表面パッシベーションが Ge 発光素子において重要であることが示された。

(2) Ge-on-Si (111) LED 作製と室温 EL 発光

高効率 Ge (111) EL 発光デバイス (LED) の実現に向けて、まずプロセス、構造最適化の目的で、Si (100) 基板上的 Ge 構造 (Ge-on-Si (100)) において、メサ構造の縦型ダイオードを作製した。ドーピング濃度、膜厚の最適化、EL デバイスメサ構造、電極構造の最適化によって、室温での発光効率を大幅に向上させることに成功した。さらに、成長後の熱処理によって、さらに発光強度を 3 倍近く向上できることを示した。これが歪み率と結晶性向上によるものであることを明らかにした。

この結晶成長パラメータ (ドーピング濃度、膜厚、成長温度) 等をベースとして、Ge-on-Si (111) の pin 構造の作製、さらに縦型ダイオード構造を作製して評価した結果、Ge-on-Si (100) よりやや強度が劣るものの、室温における強い EL 発光を得ることに世界で初めて成功した (図 3)。Ge スピン LED 実現への道が大きく開けたと言える。

(3) 高品質歪み SiGe/Ge-on-Si の形成とパターニング法による欠陥抑制

さらに将来的に SiGe/Ge ヘテロ構造を形成し、量子閉じ込め、歪みによるスピン制御を進めるために、Ge-on-Si 上の歪み SiGe 膜形成について検討を進めた。Ge 基板上と比較し、Ge-on-Si の上に歪み SiGe 膜を形成すると、膜へのクラックが発生しやすく、いわゆる歪みを維持した状態で成長可能な臨界膜厚が著しく減少してしまうことが明らかとなった。また、(111) 面では (100) 面と比較して、臨界膜厚が小さくなってしまったことも示した。

これらの問題を解決するために、今回

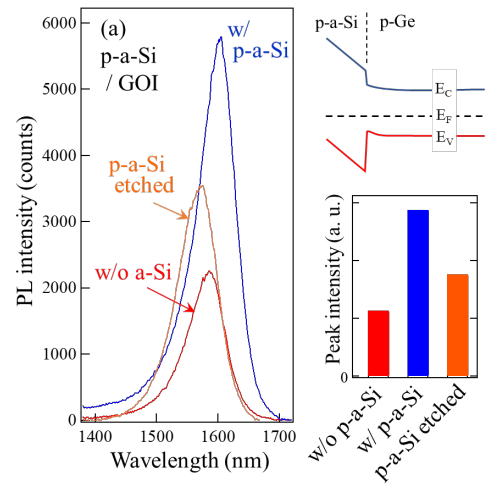


図2 アモルファス Si 表面パッシベーション膜形成による GOI からの発光強度増大

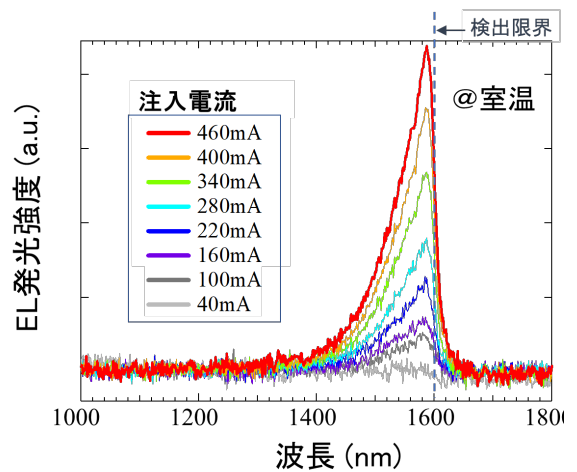


図3 Ge (111) スピン LED 構造から得られた室温 EL スペクトル

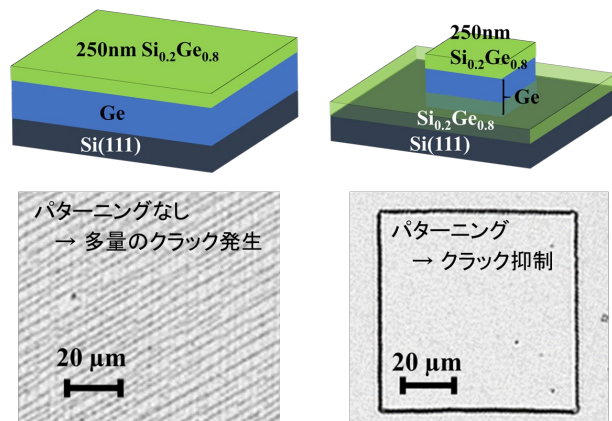


図4 パターニングによる、歪み SiGe 層内クラック発生の抑制

パターニング法を初めて提案し、開発を進めた。その結果、メサパターン上に形成された SiGe 膜には欠陥の導入が大幅に抑制されることが明らかになった (図 4)。さらに、欠陥導入メカニズムが、面内で点状に分散して存在することを見出し、メサ構造を数百 μm にまで大きくしても欠陥抑制に効果があることを示した。歪み SiGe 層の臨界膜厚として、パターン無しの場合に比較し、パターニングを施すことによって 3 倍を超えることを示した (図 5)。以上、パターニング Ge-on-Si 基板を利用することで、より大きな歪みを有し、歪み安定性が高く、高品質な SiGe 膜が形成可能となり、本研究で第一目標としている Ge-on-Si LED の次のステップとして、量子ヘテロ構造を活性層に有する量子閉じ込め LED 構造につながる。

(4) まとめと将来展望

光暗号通信のための Ge 円偏光発生 LED (スピ
ン LED) の実現に向けて、Ge(111) 膜を Si(111) 基板上に高品質形成した。そして、貼り合わせ手法によって Ge-on-Insulator 構造を形成し、表面パシベーション膜を形成することで非常に大きな発光強度増大を得ることができた。メサ構造の縦型 Ge(111) pin LED デバイスを in-situ ドーピングによって形成し、非常に強い室温 EL 発光を得ることに成功した。LED の電極として、単結晶の強磁性体を高品質成長し、強磁性体からスピン注入することで、端面 EL 発光が得られ、円偏光を実証する道筋が大きく開けた。また、新たにパターニング法を開発することによって、臨界膜厚を大きく超える歪み SiGe 層を形成することに成功し、歪みによるバンドエンジニアリングを可能とする量子閉じ込めスピン LED の実現につながり、スピン制御可能なスピン LED の実現も期待できる。

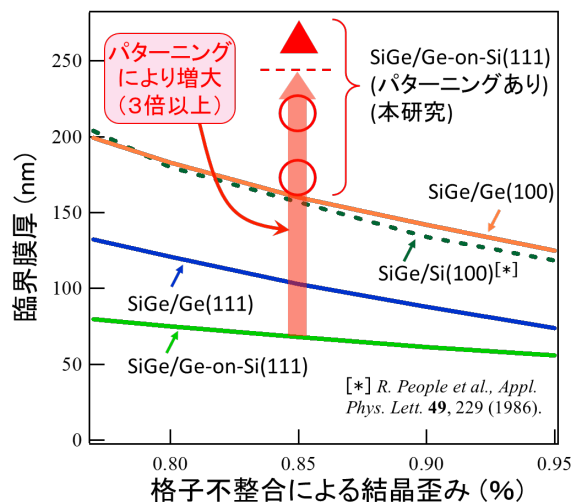


図 5 歪み SiGe 膜の臨界膜厚の歪み依存性。パターニングによって臨界膜厚が 3 倍以上増大した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Kudo, M. Yamada, S. Honda, Y. Wagatsuma, S. Yamada, K. Sawano, and K. Hamaya	4. 巻 118
2. 論文標題 Room-temperature two-terminal magnetoresistance ratio reaching 0.1% in semiconductor-based lateral devices with L21-ordered Co2MnSi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 162404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0045233	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 M. Yamada, Y. Shiratsuchi, H. Kambe, K. Kudo, S. Yamada, K. Sawano, R. Nakatani and K. Hamaya	4. 巻 129
2. 論文標題 Effect of Fe atomic layers at the ferromagnet-semiconductor interface on temperature-dependent spin transport in semiconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 183901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0048321	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 Keisuke Arimoto, Taisuke Fujisawa, Daichi Namiuchi, Atsushi Onogawa, Yuichi Sano, Daisuke Izumi, Junji Yamanaka, Kosuke O. Hara, Kentarou Sawano, Kiyokazu Nakagawa	4. 巻 571
2. 論文標題 Dependences of the hole mobility in the strained Si pMOSFET and gated Hall bars formed on SiGe/Si(110) on the channel direction and the strained Si thickness	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 126246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2021.126246	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 A. Yamada, M. Yamada, M. Honda, S. Yamada, K. Sawano, and K. Hamaya	4. 巻 119
2. 論文標題 Magnetoresistance ratio of more than 1% at room temperature in germanium vertical spin-valve devices with Co2FeSi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 192404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0061504	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 Sawano Kentarou, Youya Wagatsuma, Alam Md. M, Omata Kaisei, Niikura Kenta, Shibata Shougo, Hoshi Yusuke, Yamada Michihiro, Hamaya Kohei	4. 巻 98
2. 論文標題 (Invited) Strain Engineering of Si/Ge Heterostructures on Ge-on-Si Platform	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 267 ~ 276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09805.0267ecst	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 Wagatsuma Youya, Alam Md Mahfuz, Okada Kazuya, Hoshi Yusuke, Yamada Michihiro, Hamaya Kohei, Sawano Kentarou	4. 巻 117
2. 論文標題 Crack formation in strained SiGe grown on Ge-on-Si (111) and its suppression by patterning substrates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 105153 ~ 105153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2020.105153	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 Hollmann Arne, Struck Tom, Langrock Veit, Schmidbauer Andreas, Schauer Floyd, Leonhardt Tim, Sawano Kentarou, Riemann Helge, Abrosimov Nikolay V., Bougeard Dominique, Schreiber Lars R.	4. 巻 13
2. 論文標題 Large, Tunable Valley Splitting and Single-Spin Relaxation Mechanisms in a Si/SixGe1-x Quantum Dot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 034068-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.13.034068	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 該当する

1. 著者名 Naito T., Yamada M., Yamada S., Sawano K., Hamaya K.	4. 巻 13
2. 論文標題 Suppression of Donor-Driven Spin Relaxation in Strained Si0.1Ge0.9	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 054025-1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.13.054025	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 Youya Wagatsuma, Alam Md. M, Okada Kazuya, Hoshi Yusuke, Yamada Michihiro, Hamaya Kohei, Sawano Kentarou	4. 巻 98
2. 論文標題 Increased Critical Thickness for Strained SiGe on Ge-on-Si(111)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 499 ~ 503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09805.0499ecst	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 Yamada Kodai, Hoshi Yusuke, Sawano Kentarou	4. 巻 98
2. 論文標題 Strong Room-Temperature Electroluminescence from Ge-on-Si by Precise in-situ Doping Control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 513 ~ 518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09805.0513ecst	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 Arimoto Keisuke, Yamanaka Junji, Hara Kosuke O, Sawano Kentarou, Usami Noritaka, Nakagawa Kiyokazu	4. 巻 98
2. 論文標題 (Invited) Engineering Strain, Defects, and Electronic Properties of (110)-Oriented Strained Si	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 277 ~ 290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09805.0277ecst	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 Taniguchi Tatsuhiko, Ishibe Takafumi, Hosoda Ryoya, Wagatsuma Youya, Alam Md. Mahfuz, Sawano Kentarou, Uenuma Mutsunori, Uraoka Yukiharu, Yamashita Yuichiro, Mori Nobuya, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 117
2. 論文標題 Thermoelectric Si _{1-x} Ge _x and Ge epitaxial films on Si(001) with controlled composition and strain for group IV element-based thermoelectric generators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 141602 ~ 141602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0023820	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 Hayashida Shunya, Saitoh Risa, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Sawano Kentarou, Hoshi Yusuke	4. 巻 2
2. 論文標題 Reduced Inhomogeneous Broadening in Hexagonal Boron Nitride-Encapsulated MoTe2 Monolayers by Thermal Treatment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2739 ~ 2744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00452	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 Struck Tom, Hollmann Arne, Schauer Floyd, Fedorets Olexiy, Schmidbauer Andreas, Sawano Kentarou, Riemann Helge, Abrosimov Nikolay V., Cywi?ski ?ukasz, Bougeard Dominique, Schreiber Lars R.	4. 巻 6
2. 論文標題 Low-frequency spin qubit energy splitting noise in highly purified 28Si/SiGe	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41534-020-0276-2	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 該当する

1. 著者名 Wagatsuma Youya, Alam Md. Mahfuz, Okada Kazuya, Yamada Michihiro, Hamaya Kohei, Sawano Kentarou	4. 巻 14
2. 論文標題 A drastic increase in critical thickness for strained SiGe by growth on mesa-patterned Ge-on-Si	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 025502 ~ 025502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abd4c5	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 Yamada Kodai, Wagatsuma Youya, Okada Kazuya, Hoshi Yusuke, Sawano Kentarou	4. 巻 14
2. 論文標題 Enhanced electroluminescence from Ge-on-Si by precise in-situ doping and post-annealing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 045504 ~ 045504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abf0df	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 Alam Md. Mahfuz, Wagatsuma Youya, Okada Kazuya, Hoshi Yusuke, Yamada Michihiro, Hamaya Kohei, Sawano Kentarou	4. 巻 12
2. 論文標題 Critical thickness of strained Si _{1-x} Ge _x on Ge(111) and Ge-on-Si(111)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 081005 ~ 081005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab2db8	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 Sakane Shunya, Ishibe Takafumi, Hinakawa Takahiro, Naruse Nobuyasu, Mera Yutaka, Mahfuz Alam Md., Sawano Kentarou, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 115
2. 論文標題 High thermoelectric performance in high crystallinity epitaxial Si films containing silicide nanodots with low thermal conductivity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 182104 ~ 182104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5126910	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 Okamoto Noboru, Yanagisawa Ryoto, Anufriev Roman, Mahfuz Alam Md., Sawano Kentarou, Kurosawa Masashi, Nomura Masahiro	4. 巻 115
2. 論文標題 Semiballistic thermal conduction in polycrystalline SiGe nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 253101 ~ 253101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5130659	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 Sakane Shunya, Ishibe Takafumi, Taniguchi Tatsuhiro, Hinakawa Takahiro, Hosoda Ryoya, Mizuta Kosei, Alam Md. Mahfuz, Sawano Kentarou, Nakamura Yoshiaki	4. 巻 59
2. 論文標題 Nanostructural effect on thermoelectric properties in Si films containing iron silicide nanodots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SFFB01 ~ SFFB01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab5b58	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 Arimoto Keisuke, Utsuyama Naoto, Mitsui Shohei, Satoh Kei, Yamada Takane, Yamanaka Junji, Hara Kosuke O., Sawano Kentarou, Nakagawa Kiyokazu	4. 巻 59
2. 論文標題 Hole mobility enhancement observed in (110)-oriented strained Si	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGK06 ~ SGGK06
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab6591	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 Namiuchi Daichi, Onogawa Atsushi, Fujisawa Taisuke, Sano Yuichi, Izumi Daisuke, Yamanaka Junji, Hara Kosuke O., Sawano Kentarou, Nakagawa Kiyokazu, Arimoto Keisuke	4. 巻 113
2. 論文標題 Hole mobility in Strained Si/Relaxed SiGe/Si(110) hetero structures studied by gated Hall measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 105052 ~ 105052
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2020.105052	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 Niiikura Kenta, Yamahata Natsuki, Hoshi Yusuke, Takamura Tsukasa, Saito Kimihiko, Konagai Makoto, Sawano Kentarou	4. 巻 115
2. 論文標題 Enhanced photoluminescence from strained Ge-on-Insulator surface-passivated with hydrogenated amorphous Si	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 105104 ~ 105104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2020.105104	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 K. Yamamoto, K. Nakae, H. Akamine, D. Wang, H. Nakashima, Md M. Alam, K. Sawano, Z. Xue, M. Zhang, and Z. Di	4. 巻 93
2. 論文標題 Conduction Type Control of Ge-on-Insulator : Combination of Smart-Cut™ and Defect Elimination	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 73-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

〔学会発表〕 計38件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Kentarou Sawano, Youya Wagatsuma, Md. Mahfuz Alam, Kaisei Omata, Kenta Niikura, Shougo Shibata, Yusuke Hoshi, Michihiro Yamada and Kohei Hamaya
2. 発表標題 Strain engineering of Si/Ge heterostructures on Ge-on-Si platform
3. 学会等名 PRIME 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Youya Wagatsuma, Md. Mahfuz Alam, Kazuya Okada, Yusuke Hoshi, Michihiro Yamada, Kohei Hamaya and Kentarou Sawano
2. 発表標題 Increased critical thickness for strained SiGe on Ge-on-Si(111)
3. 学会等名 PRIME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kodai Yamada, Yusuke Hoshi and Kentarou Sawano
2. 発表標題 Strong room-temperature electroluminescence from Ge-on-Si by precise in-situ doping control
3. 学会等名 PRIME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Arimoto, J. Yamanaka, K. O. Hara, K. Sawano, N. Usami and K. Nakagawa
2. 発表標題 Engineering Strain, Defects and Electronic Properties of (110)-Oriented Strained Si
3. 学会等名 PRIME 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Nohira, Eriko Shigesawa and Kentarou Sawano
2. 発表標題 Formation and Evaluation of Al ₂ O ₃ Layer by Direct ALD on Epitaxial SiGe
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Hayashida, R. Saito, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Sawano, Y. Hoshi
2. 発表標題 Crystal quality degradation in MoTe ₂ monolayers by a thermal annealing and its suppression by hexagonal boron nitride encapsulation
3. 学会等名 PRiME 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miyake Takuma, Rikito Osako, Xuejun Xu, Kentarou Sawano, Takuya Maruizumi, Takehiko Tawara and Hideki Gotoh
2. 発表標題 Silicon Microdisk Resonators in the Mid-Infrared for On-Chip Gas Sensing
3. 学会等名 SSDM 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田 航大、星 裕介、澤野 憲太郎
2. 発表標題 In-situドーピング制御によるGe-on-Siからの室温EL発光
3. 学会等名 第68回 応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口 達彦、石部 貴史、我妻 勇哉、澤野 憲太郎、山下 雄一郎、中村 芳明
2. 発表標題 歪・組成制御エピタキシャルSiGe薄膜の熱電特性
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

1. 発表者名 三宅 拓磨、徐 学俊、澤野 憲太郎、丸泉 琢也、依 毅彦、後藤 秀樹
2. 発表標題 高Q値中赤外Siマイクロディスク共振器
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

1. 発表者名 井上 貴裕、我妻 勇哉、山田 航大、澤野 憲太郎
2. 発表標題 歪みGeマイクロブリッジ構造の発光特性に及ぼす一軸歪み方向の影響
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

1. 発表者名 林田 隼弥、野上田 聖、渡邊 賢司、谷口 尚、澤野 憲太郎、星 裕介
2. 発表標題 ニテルル化モリブデンのhBN封止構造における熱安定性
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

1. 発表者名 我妻 勇哉、Md. Mahfuz Alam、岡田 和也、山田 道洋、浜屋 宏平、澤野 憲太郎
2. 発表標題 Ge基板に替わりGe-on-Siを用いることによる歪みSiGeへのクラック発生抑制
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

1. 発表者名 杉浦 由和、我妻 勇哉、山田 航大、星 祐介、山田 道洋、浜屋 宏平、澤野 憲太郎
2. 発表標題 歪みGe-on-Si(111)ダイオード構造からの室温EL発光
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

1. 発表者名 山田 航大、星 裕介、澤野 憲太郎
2. 発表標題 In-situドーピング制御によるGe-on-Siからの室温EL発光
3. 学会等名 第81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 野上田 聖、林田 隼弥、澤野 憲太郎、星 裕介
2. 発表標題 イオン注入と熱処理による金属相MoTe ₂ の形成
3. 学会等名 第81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 細田 凌矢、水田 光星、石部 貴史、Md. Mahfuz Alam、澤野 憲太郎、中村 芳明
2. 発表標題 熱電出力因子増大に向けたエピタキシャルCoSi ₂ ナノドット含有SiGe薄膜の開発
3. 学会等名 第81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 林田 隼弥、渡邊 賢司、谷口 尚、澤野 憲太郎、星 裕介
2. 発表標題 熱処理によるhBN/単層MoTe ₂ ヘテロ構造の界面不純物除去
3. 学会等名 第81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 我妻 勇哉、Md. Mahfuz Alam、岡田 和也、星 裕介、山田 道洋、浜屋 宏平、澤野 憲太郎
2. 発表標題 選択成長を用いたGe-on-Si(111)基板上への高品質な歪みSiGe層の作製
3. 学会等名 第81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 藤澤 泰輔、各川 敦史、浪内 大地、佐野 雄一、泉 大輔、山中 淳二、原 康祐、澤野 憲太郎、中川 清和、有元 圭介
2. 発表標題 歪みSi/緩和SiGe/Si(110)ヘテロ構造p-MOSFETにおける正孔移動度のチャネル方向依存性
3. 学会等名 第81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 Md. Mahfuz Alam, Kazuya Okada, Yuya Wagatsuma, Yusuke Hoshi, Michihiro Yamada, Kohei Hamaya and Kentarou Sawano
2. 発表標題 Strain states and critical thickness of Si _{1-x} Ge _x epitaxial layers on Ge-on-Si(111)
3. 学会等名 ISTDM / ICSI 2019 Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Md. Mahfuz Alam and Kentarou Sawano
2. 発表標題 Si/Ge Heterostructures with Various Surface Orientations
3. 学会等名 EMN Epitaxy 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunya Hayashida, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kentarou Sawano, and Yusuke Hoshi
2. 発表標題 Thermal stability of mechanically-exfoliated monolayer and few layer MoTe ₂
3. 学会等名 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Wagatsuma, Md. Mahfuz Alam, Kazuya Okada, Yusuke Hoshi, Michihiro Yamada, Kohei Hamaya, Kentarou Sawano
2. 発表標題 Surface Morphology Evolution of Strained Si _{1-x} Ge _x Grown on Relaxed Ge(111)
3. 学会等名 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Niikura, Yuta Kumazawa, Natsuki Yamahata, Yusuke Hoshi, Tsukasa Takamura, Kimihiko Saito, Makoto Konagai, Kentarou Sawano
2. 発表標題 Enhanced Photoluminescence from Strained Ge-on-Insulator Surface-Passivated with Hydrogenated Amorphous Si
3. 学会等名 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Hoshi, Shunya Hayashida, Kentarou Sawano
2. 発表標題 Optical Interferences in Monolayer Tungsten Disulfide and Tungsten Diselenide Encapsulated by Hexagonal Boron nitride
3. 学会等名 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunya Hayashida, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kentarou Sawano, and Yusuke Hoshi
2. 発表標題 Effect of thermal annealing at a low temperature on exciton dynamics in semiconducting MoTe2 crystals
3. 学会等名 SSDM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浪内 大地、澤野 憲太郎、各川 敦史、佐野 雄一、泉 大輔、有元 圭介、山中 淳二、原 康祐、中川 清和
2. 発表標題 歪みSi/緩和SiGe/Si(110)ヘテロ構造の反転キャリアのHall移動度評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤澤 泰輔、各川 敦史、浪内 大地、斎藤 慎吾、佐野 雄一、泉 大輔、山中 淳二、原 康祐、澤野 憲太郎、中川 清和、有元 圭介
2. 発表標題 歪みSi/緩和SiGe/Si(110)ヘテロ構造p-MOSFETにおける電界効果移動度の歪みSi膜厚依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 我妻 勇哉、Md. Mahfuz Alam、岡田 和也、星 裕介、山田 道洋、浜屋 宏平、澤野 憲太郎
2. 発表標題 Ge-on-Si(111) 及びGe(111) 基板上の歪みSi _{1-x} Ge _x の臨界膜厚
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林田 隼弥、渡邊 賢司、谷口 尚、増淵 覚、守谷 頼、町田 友樹、澤野 憲太郎、星 裕介
2. 発表標題 hBN/1L-WSe ₂ /hBN構造の光取り出し効率の改善
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大迫 力人、徐 学俊、忠永 修、澤野 憲太郎、丸泉 琢也、俵 毅彦、後藤 秀樹
2. 発表標題 サブ波長格子構造を有するSi中赤外導波路
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井 大介、下田 麻由、伊藤 匠、星 裕介、藤間 卓也、澤野 憲太郎
2. 発表標題 ナノ多孔層ガラス基板を利用したGeナノドットの作製
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 航大、熊澤 裕太、丸泉 琢也、澤野 憲太郎
2. 発表標題 pドープGe-on-Si における拡散ストップ層挿入の効果
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水口 俊希、大島 修一郎、澤野 憲太郎
2. 発表標題 In-situ ドープによる Ge-on-Si(111)の n 型伝導制御
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 我妻 勇哉、Md. Mahfuz Alam、岡田 和也、星 裕介、山田 道洋、浜屋 宏平、澤野 憲太郎
2. 発表標題 Ge-on-Si基板のパターニングによる歪みSiGe層中クラック発生の抑制
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

1. 発表者名 林田 隼弥、齋藤 梨沙、渡邊 賢司、谷口 尚、澤野 憲太郎、星 裕介
2. 発表標題 単層MoTe2のhBN封止構造における熱処理による光学特性への影響
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

1. 発表者名 柴田 翔吾、石川 亮佑、星 裕介、澤野 憲太郎
2. 発表標題 G01基板作製における貼り合わせ後熱処理の影響
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〕

<p>東京都市大学総合研究所ナノエレクトロニクス研究センターHP https://www.ar1.tcu.ac.jp/research/nano.html</p>

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	徐 学俊 (Xu Xuejun) (80593334)	日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・フロンティア機能物性研究部・主任研究員 (92704)	

6. 研究組織（つづき）

	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	浜屋 宏平 (Hamaya Kohei) (90401281)	大阪大学・基礎工学研究科・教授 (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