

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：32678

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25600079

研究課題名(和文) 歪みゲルマニウム二次元正孔ガスを用いた量子ドット単正孔デバイス開発

研究課題名(英文) Quantum Dot Single Hole Device based on Strained Germanium Two Dimensional Hole Gas

## 研究代表者

澤野 憲太郎 (Sawano, Kentarou)

東京都市大学・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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：今日、半導体集積回路は素子の微細化限界を迎え、新規デバイス、特に超低消費電力デバイスの開発が必須となっている。本研究では、新規材料としてゲルマニウム(Ge)に注目し、その可能性を究明することを最大の目標に、スピン制御に向けた超低消費電力を可能とする、歪みGe単正孔デバイス実現へ向けた基盤技術を開発した。特に高品質結晶成長技術、ゲート絶縁膜形成技術を駆使して、Si基板上にGeチャネル2次元正孔ガスを形成し、トップゲーティングにより、2DHGのキャリア分布とそれによる伝導特性、スピン特性の制御、また面内局所的に空乏化させる技術を確認した。

研究成果の概要(英文)：Since semiconductor integrated circuit technology has been approaching the scaling limit of devices, novel device structures with ultralow power consumption are required. In this research, we focus on Germanium (Ge) as a novel material, and with the aim of opening possibilities of Ge we developed technologies toward strained Ge single hole devices enabling spin control with very low power consumptions. Particularly, with utilizing technologies of high quality crystal growth and formation of gate insulators, a Ge channel two-dimensional-hole-gases were created on Si substrates, and we found that the top-gating was able to control the transport and spin properties, allowing in-plane local depletion of holes, which are highly important for realization of Ge dot devices.

研究分野：半導体工学

キーワード：ゲルマニウム 量子ドット

### 1. 研究開始当初の背景

固体中のスピン制御は近年ますます注目を集めており、スピントロニクス分野、量子コンピュータへの応用に向けた研究が盛んに行われている。また、CMOSの微細化限界を打破すべく、新デバイス構造の開発も求められている。単電子デバイスはこれらの流れで大変魅力的なデバイスである。電荷の移動が極小であるため、超低消費電力デバイスとして期待できるとともに、スピン情報を制御可能で、量子コンピュータ実現へ向けても大変期待されている。一方単「正孔」デバイスの研究は少なく、特にゲルマニウム(Ge)を用いたものは皆無である。Geは電子デバイスの主役であるシリコン(Si)と比べ、電子正孔ともに移動度が2倍以上高い、という特長から、次世代のチャネルとして注目されている。特に、Ge量子ドットを形成し、ゲートバイアスにより、ドット内部の正孔数を制御可能とした単正孔デバイスが実現されれば、核スピンの相互作用が抑制された、量子コンピュータ応用に重要な、コヒーレンス寿命の長いスピンデバイスへの応用が期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、Geの可能性を究明することを最大の目標に、歪みGe単正孔デバイス実現へ向けた基盤技術の創製を目指す。高品質結晶成長技術を駆使して、Si基板上に超高移動度を有する歪みGeチャネル2次元正孔ガス(2DHG)を形成する。良質なゲート積層構造を形成し、トップゲーティングにより、2DHGのキャリア分布とそれによる伝導特性、スピン特性の制御、また面内局所的に空乏化させる技術の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

Ge量子ドット単正孔デバイスの実現に向けて、以下の項目について研究を進めた。

- (1) 歪みGeチャネル層形成のための高品質SiGeバッファ層開発
- (2) Geチャネル構造への良質なゲート形成
- (3) ゲート印加による2次元正孔ガス伝導特性制御
- (4) Geへの低抵抗コンタクト形成
- (5) ゲートによる空乏化、スピン特性評価

### 4. 研究成果

(1) まずは、Si基板上の歪みGeチャネル2次元正孔ガス(2DHG)の結晶成長技術の開発を中心的に進めた。特に、単正孔デバイスの実現のために、2DHGの正孔濃度を低くすることが重要課題である。一般に、良質なGeチャネルを形成するためには、緩和SiGeバッファ層をSi基板上に形成することが必須であるが、ノンドーピングであってもp型

となり、低正孔濃度化のために、まずSiGeバッファ層の高品質化と薄膜化を進めた。一般的な傾斜組成法では、膜厚の薄膜化は不可能であるので、今回2段階成長法という、低温成長と高温成長を組み合わせる手法を、様々なGe組成、層構造で試みた。特に特徴的な方法として、Si基板上に直接Geバッファ層を成長させ、そこからGe組成を下げてSiGe<sub>0.8</sub>バッファ層を形成する方法において、Ge膜の大幅な低転位化が達成され、正孔濃度としてこれまで報告されているものを大きく下回る値を得ることができた。これは、バッファ層の結晶性の高さを示している。

この薄膜SiGeバッファ層の上に、歪みGeチャネル層を成長させ、2次元正孔ガスを形成し、ホール測定によって電気伝導特性評価を行った。ゲート制御に向け、ドーピングは行わず、Geチャネル上のSi/SiGe表面キャップ層を20nm程度に薄くした。その結果、低温で5000cm<sup>2</sup>/Vs、室温で2000cm<sup>2</sup>/Vsに近い高移動度を得ることができた。

(2) また、量子ドット形成において最重要となるのが、トップゲートによるキャリア制御技術であり、良質なゲート構造の開発を進めた。絶縁膜材料としては、スパッタリング、および原子層堆積技術(ALD)を利用した、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜の形成を試みた。まずは歪みGe上へ直接堆積し、良質な膜が形成され、良好なCV特性を得ることができた。さらに膜厚依存性等を系統的に調べ、リーク電流も抑制可能であることが分かった。

次に、ゲートバイアスを印加しながらホール測定を行った。広い温度範囲で、ゲートによる正孔密度の大幅な変調が可能となった。正孔濃度は低温で一桁程変調でき、キャリアを空乏化することに成功した。また、正孔移動度の正孔濃度依存性(図1)から、理想的な不純物散乱とフォノン散乱、ラフネス散乱が観測された。また、ゲートバイアス掃引時に、移動度と正孔濃度の関係にヒステリシスは全く見られなかった。これらの結果は、キャップ20nmの構造において、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ゲート絶縁膜界面における界面準位、固定電荷等によ

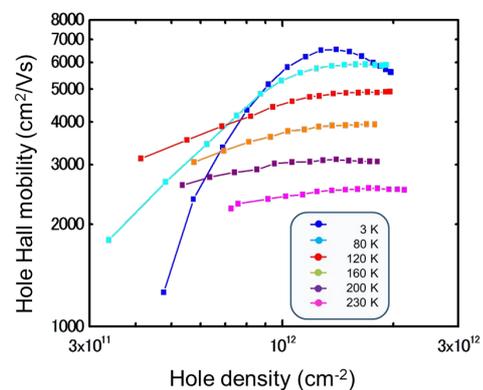


図1 歪みGeチャネルにおける正孔移動度の正孔濃度依存性

る散乱は無視できることを示している。

さらに、電界制御による歪み Ge 2 次元正孔ガスの疑似ドット形成に向けて、ゲート構造の最適化を進めた。上記の通り、歪み Ge 量子井戸層の上に、SiGe キャップ層 20 nm を形成した構造において、ゲート制御に成功しているが、よりゲート制御のしやすい、キャップ層なしの構造の検討を行った。

まず、歪み Ge 表面に、ゲート絶縁膜として、 $Al_2O_3$  膜をスパッタリング法によって作製した場合、Ge チャンネル層上にキャップ層のある構造と比較し、移動度が半分以下に減少してしまった。しかしながら、2 次元正孔ガスの形成には問題がないことが分かり、ゲート電圧によるキャリア変調も確認できた。しかしながら、キャリア濃度増加に対する移動度低下の傾きが、通常のラフネス散乱に起因するものよりも顕著に大きく、Ge チャンネルと  $Al_2O_3$  の界面には、多量の界面準位、固定電荷等によるキャリア散乱要因が存在し、特性の改善が必要であることを示す結果を得た。そこで、ゲート絶縁膜として、原子層堆積 (ALD) を用いた  $Al_2O_3$  膜を利用した結果、正孔移動度の顕著な向上が見られた。

(4) さらに、Ge デバイス構造において問題となるのが、オーミックコンタクト形成であり、極浅低抵抗コンタクトを形成するために、MBE を用いたデルタドーピング技術を利用した。デルタドーピングにおいて、不純物原子の表面偏析を抑制することが重要であり、Si または C 極薄層挿入が偏析抑制に大きな効果を持つことを明らかにした。

(5) これらの最適構造を用いて、電界制御ドット形成のために、ホールバー・チャンネル内に、キャリア制御用ゲートを形成し、ゲートバイアス印加による空乏化効果を詳細に調べた。最適なデバイス構造によって、ホールバー内の伝導度をゼロにすることができ、チャンネルの空乏化に成功した。これは、擬似的 Ge ドットが形成されていることを示唆する。

また、歪み Ge のスピン特性を調べるため、歪 Ge 2 次元正孔ガスの、低温での磁気抵抗測定を行った。2DHG は低温、低磁場領域において弱反局在による正の磁気抵抗効果を示した (図 2)。フィッティングの結果、歪 Ge

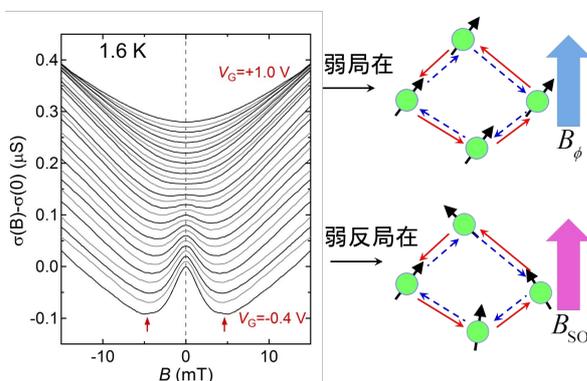


図 2 弱反局在の観測と正孔スピン軌道相互作用

中 2DHG の弱反局在はラシュバスピン軌道相互作用で説明できることが分かった。さらにゲート電圧を印加することによりラシュバスピン軌道相互作用の大きさを変調することにも成功した。これは、スピン状態をゲートバイアスによって制御可能であることをしめし、Ge スピンデバイスの有用性を示している。

以上、歪み Ge 単正孔デバイス実現へ向け、高移動度チャンネルの結晶成長、その伝導特性、スピン特性のゲート制御、空乏化等の基盤技術が確立され、これらは今後のデバイス化につながるものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 17 件)

“A low-temperature fabricated gate-stack structure for Ge- based MOSFET with ferromagnetic epitaxial Heusler- alloy / Ge electrodes”, Yuichi Fujita, Michihiro Yamada, Yuta Nagatomi, Keisuke Yamamoto, Shinya Yamada, Kentarou Sawano, Takeshi Kanashima, Hiroshi Nakashima, and Kohei Hamaya, Japanese Journal of Applied Physics 55, pp. 063001-1~4 (2016) 査読有 DOI: 10.7567/JJAP.55.063001

“Suppression of segregation of the phosphorus -doping layer in germanium by incorporation of carbon”, Michihiro Yamada, Kentarou Sawano, Masashi Uematsu, Yasuo Shimizu, Koji Inoue, Yasuyoshi Nagai, and Kohei M. Itoh, Japanese Journal of Applied Physics 55, pp. 031304-1~4 (2016). 査読有 DOI: 10.7567/JJAP.55.031304

“Compressively strained Si/Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub> heterostructures formed on Ar ion implanted Si(100) substrates”, Yusuke Hoshi, You Arisawa, Keisuke Arimoto, Junji Yamanaka, Kiyokazu Nakagawa, Kentarou Sawano, and Noritaka Usami, Japanese Journal of Applied Physics 55, pp. 031302-1~4 (2016). 査読有 DOI: 10.7567/JJAP.55.031302

“Structural and electrical properties of Ge(111) films grown on Si(111) substrates and application to Ge(111)-on-Insulator”, K. Sawano, Y. Hoshi, S. Kubo, K. Arimoto, J. Yamanaka, K. Nakagawa, K. Hamaya, M. Miyao, Y. Shiraki, Thin Solid Films, in press, published on-line, 査読有, DOI: 10.1016/j.tsf.2015.11.020

“Suppression of surface segregation of the phosphorous -doping layer by insertion of an ultra-thin silicon layer for ultra-shallow Ohmic contacts on n-type germanium”, Michihiro Yamada, Kentarou Sawano, Masashi Uematsu and Kohei M. Itoh Appl. Phys. Lett. 107, pp. 132101-1~4

(2015). 査読有 DOI: 10.1063/1.4931939  
“Uniaxially strained SiGe(111) and SiGe(100) grown on selectively ion-implanted substrates”, K. Sawano, Y. Hoshi, S. Kubo, S. Yamada, K. Nakagawa, Y. Shiraki, Journal of Crystal Growth 401, pp. 758-761 (2014). 査読有 DOI: 10.1016/j.jcrysgro. 2014.02.014

⑦ “Formation of Ge(111) on Insulator by Ge epitaxy on Si(111) and layer transfer” K. Sawano, Y. Hoshi, S. Endo, T. Nagashima, K. Arimoto, J. Yamanaka, K. Nakagawa, S. Yamada, K. Hamaya, M. Miyao and Y. Shiraki Thin Solid Films 557, pp. 76-79 (2014). 査読有 DOI: 10.1016/j.tsf.2013.10.074

“Cubic Rashba Spin-Orbit Interaction of a Two-Dimensional Hole Gas in a Strained-Ge/SiGe Quantum Well”, Rai Moriya, Kentarou Sawano, Yusuke Hoshi, Satoru Masubuchi, Yasuhiro Shiraki, Andreas Wild, Christian Neumann, Gerhard Abstreiter, Dominique Bougeard, Takaaki Koga, and Tomoki Machida, Physical Review Letters 113, pp. 086601-1 ~ 4 (2014). 査読有

“Reliable reduction of Fermi-level pinning at atomically matched metal/Ge interfaces by sulfur treatment”, K. Kasahara, S. Yamada, T. Sakurai, K. Sawano, H. Nohira, M. Miyao, and K. Hamaya, Applied Physics Letters 104, pp. 172109-1 ~ 4 (2014). 査読有 DOI: 10.1063/1.4875016

“Charge-noise-free Lateral Quantum Dot Devices with Undoped Si/SiGe Wafer” T. Obata, K. Takeda, J. Kamioka, T. Kodera, W.M. Akhtar, K. Sawano, S. Oda, Y. Shiraki, and S. Tarucha, Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference, JPS Conf. Proc. , pp. 012030-1 ~ 5 (2014). 査読有

“Room-temperature electrical creation of spin accumulation in n-Ge using highly resistive Fe<sub>3</sub>Si/n<sup>+</sup>-Ge Schottky-tunnel contacts”, Kohei Hamaya, Gotaro Takemoto, Yuzo Baba, Kenji Kasahara, Shinya Yamada, Kentarou Sawano, Masanobu Miyao, Thin Solid Films 557 (2014). 査読有 pp. 382-385 DOI: 10.1016/j.tsf.2013.08.120

“Greatly enhanced generation efficiency of pure spin currents in Ge using Heusler compound Co<sub>2</sub>FeSi electrodes”, Kenji Kasahara, Yuichi Fujita, Shinya Yamada, Kentarou Sawano, Masanobu Miyao, and Kohei Hamaya Applied Physics Express 7, pp. 033002-1 ~ 3 (2014). 査読有 DOI: 10.7567/APEX. 7. 033002

“On the origin of the uniaxial strain induced in Si/Ge heterostructures with selective ion implantation technique”, K. Sawano, Y. Hoshi, S. Nagakura, K. Arimoto,

K. Nakagawa, N. Usami, Y. Shiraki, Journal of Crystal Growth 378, pp. 251-253 (2013). 査読有 DOI: 10.1016/j.jcrysgro. 2012. 12. 100

“Formation of compressively strained SiGe/Si(110) heterostructures and their characterization”, K. Arimoto, T. Obata, H. Furukawa, J. Yamanaka, K. Nakagawa, K. Sawano and Y. Shiraki, J. Cryst. Growth, 362, pp. 282-287 (2013). 査読有 DOI: 10.1016/j.jcrysgro. 2011.12.082

“An ultra-thin buffer layer for Ge epitaxial layers on Si”, M. Kawano, S. Yamada, K. Tanikawa, K. Sawano, M. Miyao, and K. Hamaya, Appl. Phys. Lett. 102, pp. 121908-1 ~ 3 (2013). 査読有 DOI:10.1063/1.4798659

“Gas-source MBE growth of strain-relaxed Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub> on Si (100) substrates”, Keisuke Arimoto, Shoichiro Sakai, Hiroshi Furukawa, Junji Yamanaka, Kiyokazu Nakagawa, Noritaka Usami, Yusuke Hoshi, Kentarou Sawano, Yasuhiro Shiraki, Journal of Crystal Growth 378, pp. 212-217 (2013). 査読有 DOI: 10.1016/j.jcrysgro. 2012. 12. 152

“Formation of compressively strained Si/Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub>/Si(100) heterostructures using gas-source molecular beam epitaxy”, K. Arimoto, H. Furukawa, J. Yamanaka, C. Yamamoto, K. Nakagawa, N. Usami, K. Sawano, Y. Shiraki, Journal of Crystal Growth 362, pp. 276-281(2013). 査読有 DOI: 10.1016/j.jcrysgro. 2011. 12. 084

[学会発表](計 17 件)

Kentarou Sawano “Strained Germanium based Nano-Structures toward High Performance Optoelectronic Integrated Circuits” (Invited)

International Symposium for Advanced Materials Research 2015 (ISAMR 2015), Nantou, Taiwan (August 16-20, 2015)

Rai Moriya, Kentarou Sawano, Yusuke Hoshi, Satoru Masubuchi, Yasuhiro Shiraki, Takaaki Koga, and Tomoki Machida

“Cubic Rashba Spin-Orbit Interaction of a Two-Dimensional Hole Gas in a Ge/SiGe Quantum Well”

21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Sendai International Center, Miyagi (July 26-31, 2015)

Christian Neumann, Johannes Kierig, Florian Forster, Andreas Wild, J. W. Ager, E. E. Haller, Gerhard Abstreiter, Kentarou Sawano, Stefan Ludwig, and Dominique Bougeard

“Robust quantum dot devices for qubits in isotopically purified <sup>28</sup>Si”

21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Sendai International Center, Miyagi (July 26-31, 2015)

K. Sawano, T. Nagashima, H. Hashimoto, X. Xu, K. Hamaya, and T. Maruizumi  
“Fabrication of Strained Ge-on-Insulator for Ge-based Optoelectronic Devices”  
E-MRS 2015 Spring Meeting, Lille, France (May 11-15, 2015)

Y. Hoshi, K. Arimoto, K. Sawano, Y. Arisawa, K. Fujiwara, J. Yamanaka, K. Nakagawa, N. Usami

“Compressively strained Si/Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub> heterostructures formed by Ar ion implantation technique”

9th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Montreal, Canada (May 17-22, 2015)

Michihiro Yamada, Kentarou Sawano, Masashi Uematsu, and Kohei. M. Itoh

“Suppression of the segregation of delta-doped P by the insertion of Si layers in Ge”

9th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Montreal, Canada (May 17-22, 2015)

⑦ Kentarou Sawano

“Anisotropic Strain Engineering in Si/Ge Heterostructures” (Invited)

The Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG 2014), Phuket, Thailand (November 4-7, 2014)

Kentarou Sawano, Tatsuya Nakama, Xuejun Xu, Yasuhiro Shiraki, Takuya Maruizumi

“Enhancement of Photoluminescence from Si/Ge Quantum Dots by Phosphorus delta-doping”

18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Flagstaff, USA (September 7-12, 2014)

Michihiro Yamada, Kentarou Sawano and Kohei. M. Itoh

“Suppression of segregation in P delta doping for ultrashallow Ohmic contact on n-type Ge”

18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Flagstaff, USA (September 7-12, 2014)

Michihiro Yamada, Kentarou Sawano and Kohei. M. Itoh

“Formation of ultrashallow Ohmic contacts for n-type Ge by P delta-doping”

7th International Silicon-Germanium Technology and Device Meeting, 2014 ISTDM, Singapore, (June 2-4, 2014).

Eisuke Yonekura, Junji Yamanaka, Keisuke Arimoto, Kiyokazu Nakagawa, Yasuhiro Shiraki and Kentarou Sawano

“Formation of Uniaxially Strained SiGe with High Ge Concentrations by Selective Ion Implantation”

7th International Silicon-Germanium Technology and Device Meeting, 2014 ISTDM, Singapore, (June 2-4, 2014).

Tomonori Nagashima, Hironori Katsumata, Kohei Hamaya, Masanobu Miyao, Yasuhiro Shiraki, Kentarou Sawano

“Electrical properties of strained Ge(111)-on-Insulator (GOI) fabricated by Ge epitaxy on Si and layer transfer”

7th International Silicon-Germanium Technology and Device Meeting, 2014 ISTDM, Singapore, (June 2-4, 2014)

K. Sawano, “Strain engineered Si/Ge heterostructures” (Invited)

The International Conference on Small Science (ICSS 2013), Workshop on Nano/Micro Structure, Las Vegas, USA, (December 15-18, 2013)

K. Sawano, Y. Shoji, N. Funabashi, E. Yonekura, K. Nakagawa, Y. Shiraki

“Uniaxially strained Si/Ge heterostructures grown on selectively ion-implanted substrates”

17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17), Warsaw, Poland (August 11-16, 2013)

K. Sawano, Y. Hoshi, S. Endo, H. Katsumata, T. Nagashima, K. Arimoto, J. Yamanaka, K. Nakagawa, K. Hamaya, M. Miyao and Y. Shiraki

“Formation of Ge(111) on Insulator by Ge epitaxy on Si(111) and layer transfer”

The 8th Int. Conf. on Si Epitaxy and Heterostructures (ICSI-8), Kyushu University, Fukuoka, (June 2-7, 2013)

Shinya Yamada, Makoto Kawano, Kohei Tanikawa, Kentarou Sawano, Masanobu Miyao, Kohei Hamaya

“Epitaxial Ge/Metallic Silicide Grown on Si with Atomically Smooth Hetero interfaces”

The 8th Int. Conf. on Si Epitaxy and Heterostructures (ICSI-8), Kyushu University, Fukuoka, (June 2-7, 2013)

K. Sawano, Y. Shoji, E. Yonekura, K. Nakagawa, and Y. Shiraki

“Formation of Uniaxially Strained Ge by Selective Ion Implantation”

E-MRS 2013 Spring Meeting, Symposium I: Strasbourg, France (May 30, 2013)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤野 憲太郎 (SAWANO, Kentarou)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：90409376