

平成 29 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：2014～2016

課題番号：26286044

研究課題名(和文) 超高移動度一軸歪みゲルマニウム・チャンネルデバイスの開発

研究課題名(英文) Developments of high mobility uniaxially strained Germanium channel devices

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) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：次世代の低消費電力、かつ高速の半導体電子デバイスに向けて、シリコンに替わる高性能材料として、ゲルマニウム(Ge)に注目し、特に高速化を可能とすべく、Geに結晶歪みを導入する技術を開発した。特に、歪みを面内で非対称にすることで最も高速化が可能であるため、選択的イオン注入法を開発し、結晶欠陥の局所的導入によって歪み状態を任意に制御すること、それによりGeに一軸性の歪みを導入することに成功した。さらに、絶縁膜上へ歪みGe膜を貼り合わせる技術を開発し、次世代高速Geデバイスへ向けて非常に有望な技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：Toward next-generation low-power-consumption and high performance semiconductor electronic devices, we focused on germanium (Ge) as a superior material alternative to silicon and developed a technique to induce crystal strain into Ge. Particularly anisotropic strain states are expected to bring the highest mobility in Ge, we developed selective ion-implantation method and succeeded in arbitral controlling of strain states by local introduction of crystal defects. As a result, we created uniaxially strained Ge by this method. Moreover, we fabricated strained Ge on insulator (GOI) substrates, which is very promising for next-generation high-mobility Ge devices.

研究分野：半導体工学

キーワード：ゲルマニウム 結晶歪み イオン注入 一軸性歪み 結晶欠陥

### 1. 研究開始当初の背景

今日の高度情報化社会を支える基幹技術である、半導体集積回路(LSI)技術、すなわちシリコン(Si)テクノロジーは、今後の社会の発展においても、その継続的発展が不可欠であることに議論の余地はない。これまで、素子サイズの縮小化によってLSIは飛躍的発展を遂げてきたものの、近年、LSIの基本素子であるSi-MOSFET(電界効果型トランジスタ)の微細化において解決困難な問題が顕在化し、微細化によらない性能向上が必須となっている。

### 2. 研究の目的

上記の問題を打破すべく、Siテクノロジーの次世代の技術革新に向け、Siと同じ族半導体であるゲルマニウム(Ge)を導入し、Siプラットフォーム上への革新的電子デバイス実現を目指す。微細化によらずに現行のLSIを飛躍的に高性能化する技術として、LSI中の各トランジスタの電流経路である、チャネルの超高速(高移動度)化を目指す。そのために、高品質結晶成長技術と、独自に開発したイオン注入法を駆使することにより、非対称性結晶歪みを導入した、「一軸歪みゲルマニウム(Ge)チャネル」をSi基板上へ形成し、現行のSiチャネルを凌駕する高移動度を目指す。さらに、微細Ge集積回路実現のために、究極的には、絶縁膜上Ge基板が求められており、本研究では、作製した一軸歪みGe層を、絶縁膜上に貼り合わせる技術確立することで、「一軸歪みGe-on-Insulator(GOI)デバイス」を創出することを目的とする。

### 3. 研究の方法

最終的な目標に向けて、下記4点について研究を推進した。

(1)一軸歪みGe膜の形成に向けて、まずはSi基板上へ、高Ge組成の歪み緩和SiGeバッファ層の形成を、各種結晶成長手法を用いて行う。

(2)選択的イオン注入法によって、一軸性の非対称な歪みを有するGe膜を実現し、詳細な評価によって歪み導入メカニズムを解明する。

(3)Ge-on-Insulator(GOI)形成手法、プロセスの開発を行う。

(4)一軸歪みGOI-MOSFETデバイスに向けて重要となるゲート絶縁膜として、Geエピ成長膜上の原子層堆積法(ALD)による高品質 $Al_2O_3$ 膜形成プロセスを開発する。

### 4. 研究成果

(1)一軸歪みGe膜の形成に向けて、まずはSi基板上へ、高Ge組成の歪み緩和SiGeバッファ層の形成を試みた。これまでに、Si上のGe膜の形成に有効であることが分かっている、2段階成長法をSiGe成長に適用した。具体的には、 $300^{\circ}C \sim 400^{\circ}C$ の低温で40-60nmのSiGe層(Ge組成70-80%)を成長した後、

その上に $500^{\circ}C \sim 800^{\circ}C$ の高温で500-1000nmのSiGe層(同Ge組成)を成長した。成長後の構造を透過型電子顕微鏡(TEM)で断面観察したところ、予想外に欠陥が膜全体に広がっていることが分かった。これは、Ge組成100%の場合と比較し欠陥発生機構が大きく変わることを示す興味深い結果と言える。

以上のように、低温成長と高温成長を組み合わせた2段階成長法を試みたが、Geバッファ層形成に比べて欠陥低減が難しいことが分かったため、まずは、一般的な傾斜組成法により高Ge組成SiGeバッファ層を作製した。このSiGeバッファ層を利用し、選択イオン注入、Geの成長と進め、イオン注入の有り無しによって緩和の違いが生じること、つまりイオン注入による局所的欠陥注入が効果を持つことが示された。

(2)作製したSiGe緩和バッファ層上に、選択的イオン注入を行った。パターンとしては、イオン注入領域と非注入領域を周期的にストライプ状に並べた。その後、Ge膜を成長した。成長後の構造の歪み状態を、X線回折逆格子空間マッピング法によって評価した。X線の入射方向をストライプパターンに平行、および垂直に変えることで、方向に依存した歪み状態を詳細に評価した結果、両方向ともGeの歪み緩和が見られ、一軸性の歪み状態とならなかった。これは、SiGe層に欠陥が多く含まれるため、それらが転位発生源となり、イオン注入による効果を上回ってしまったことによると考えている。

なお、これと並行して、Ge基板へ同様に選択イオン注入し、その上に高Ge組成のSiGeバッファを形成したところ(図1)、SiGe膜には一軸性の歪みが導入されていることが、X線評価により示された。

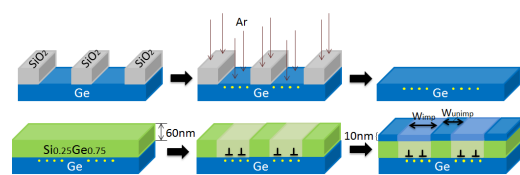


図1 一軸歪みGe作製方法

続いて、この一軸性歪みを有するSiGe上へ、さらに歪みGe層を成長し、評価を進めた。まずラマン分光マッピング測定によって、面内歪み分布を評価した結果、トップGe層の結晶の歪み分布に対応して、明瞭なコントラストが確認でき、Ge膜の結晶歪みが面内で顕著に変化していることが示された(図2)。

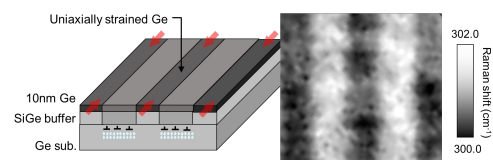


図2 一軸歪みGe層のラマンマッピング

すなわち、選択的イオン注入によって表面歪み Ge 膜内での歪み状態の任意制御が可能となったと言える。

さらに、Ge 基板と SiGe バッファー層界面の転位構造を平面 TEM により観察した結果、イオン注入のない領域において、転位が一方向（[-110]方向）のみに伸びていることが確認できた（図3）。結晶の歪みは転位と垂直方向に緩和するので、SiGe 結晶が[110]方向にのみ緩和していることを示しており、一軸性歪みを有していることを意味する。実際に X 線回折の詳細な評価によって、歪み緩和率が2方向で40%異なることが分かった。

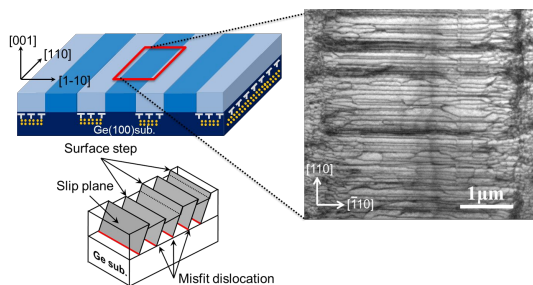


図3 平面 TEM による転位観察

さらに表面形状を AFM によって測定した結果、転位構造と同様に、表面ステップが一方向のみに発生していることが分かり、一軸性歪みの形成メカニズムを明確化する結果であると言える。

さらに、選択的イオン注入を様々なパターン線幅で行い、その上に一軸歪み Ge 膜を形成することで、歪み状態のパターン幅依存性を調べた。線幅を数 μm 程度に小さくしていくことで、イオン注入領域と非注入領域のラマンシフトの差が小さくなっていくことが確認され、両領域の歪み状態が互いに影響し、歪みの一軸性が強くなることが明らかとなった。液浸ラマン分光法や放射光 XPS 解析によってもこれは確認された。

(3) 一軸歪み GOI 作製プロセスとして重要となるいくつかの要素技術を確立した。まず GOI の薄膜化のために、SiGe エッチングストップ層を導入する手法を開発し、条件の最適化によって 50nm と薄膜かつ面内均一な GOI 形成に成功した（図4）。また、一軸歪み導入

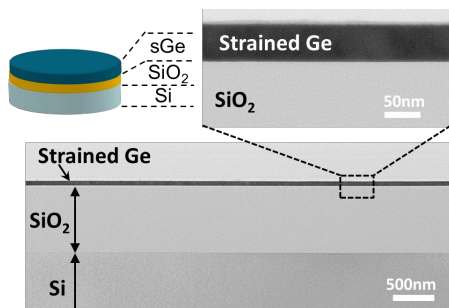


図4 歪み GOI 構造の断面 TEM 像

後に貼り合わせを行う新手法を検討した。そのために、SiGe 層成長後に、SiGe の上から Si/SiGe ヘテロ界面に欠陥を導入する方法を新たに試みた。ラマン分光法によって詳細に評価した結果、本手法においても歪み分布制御が可能であることが分かった。さらに、貼り合わせを行う前に、SiGe および Ge をパターンニングすることで、Si のエッチング溶液を直接 Si/SiGe 界面に注入することを可能とし、Si 基板を切り離す手法に成功した。これにより、Si 基板を全て研磨エッチングする工程を省略でき、さらに一軸性歪み SiGe のプロセスと融合することが可能となった。

(4) 一軸歪み GOI-MOSFET デバイスに向けて、最重要となるゲート絶縁膜形成について、原子層堆積法 (ALD) による高品質 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜形成を検討した。特に、MBE チャンバーを改造することで、エピタキシャル成長後、ALD 装置に基板を直接真空中搬送し、そのまま ALD を行った。その結果、界面が完全に清浄な状態で Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を堆積することが可能となり、成長膜厚の正確な制御、電気特性の向上が確認された。これにより、高移動度化へ向けた最適プロセスが示されたと言える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計29件)

以下全て査読有

“Light emission enhancement from Ge quantum dots with phosphorous -doped neighboring confinement structures” K. Sawano, T. Nakama, K. Mizutani, N. Harada, X. Xu, T. Maruizumi, Journal of Crystal Growth 2017, published on-line DOI: 10.1016/j.jcrysgr.2017.03.008

“Highly n-doped germanium -on-insulator microdisks with circular Bragg gratings” Xuejun Xu, Hideaki Hashimoto, Kentarou Sawano, and Takuya Maruizumi, Optics Express 25, 6550-6560 (2017) DOI: 10.1364/OE.25.006550

“Pattern-dependent anisotropic stress evaluation in SiGe epitaxially grown on a Si substrate with selective Ar<sup>+</sup> ion implantation using oil-immersion Raman spectroscopy” Shotaro Yamamoto, Daisuke Kosemura, Kazuma Takeuchi, Seiya Ishihara, Kentarou Sawano, Hiroshi Nohira and Atsushi Ogura, Japanese Journal of Applied Physics 56, 051301 (2017) DOI: /10.7567/JJAP.56.051301

“Thermal stability of compressively strained Si/relaxed Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub> hetero structures formed on Ar ion implanted Si

(100) substrates" You Arisawa, Yusuke Hoshi, Kentarou Sawano, Junji Yamanaka, Keisuke Arimoto, Chiaya Yamamoto, Noritaka Usami, Materials Science in Semiconductor Processing, in press  
DOI: 10.1016/j.mssp.2016.11.024

"TEM Observation of Si<sub>0.99</sub>Co<sub>0.01</sub> Thin Films with Arsenic-Ion-, Boron-Ion-, and Silicon-Ion-Implantation Followed by Rapid Thermal Annealing" Junji Yamanaka, Shigenori Inoue, Keisuke Arimoto, Kiyokazu Nakagawa, Kentarou Sawano, Yasuhiro Shiraki, Atsushi Moriya, Yasuhiro Inokuchi, Yasuo Kunii, Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 5, 15-25 (2017)  
DOI: 10.4236/msce.2017.51003

"Hole mobility in strained Si/SiGe/vicinal Si(110) grown by gas source MBE" Keisuke Arimoto, Sosuke Yagi, Junji Yamanaka, Kosuke O. Hara, Kentarou Sawano, Noritaka Usami, Kiyokazu Nakagawa Journal of Crystal Growth 468, 625-629 (2017)  
DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2016.12.076

"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 613, 24-28 (2016).  
DOI:10.1016/j.tsf.2015.11.020

"Straining of Group IV Semiconductor Materials for Bandgap and Mobility Engineering", Kentarou Sawano, Xuejun Xu, Shiori Konoshima, Nayuta Shitara, Takeshi Ohno, and Takuya Maruizumi, ECS transaction 75, 191-197 (2016)  
DOI: 10.1149/07504.0191ecst

"Anisotropic Strain Introduction into Si/Ge Hetero Structures" Kentarou Sawano, Shiori Konoshima, Junji Yamanaka, Keisuke Arimoto, and Kiyokazu Nakagawa, ECS transaction 75, 563-569 (2016)  
DOI:10.1149/07508.0563ecst

"Enhanced light emission from germanium microdisks on silicon by surface passivation through thermal oxidation" Xuejun Xu, Hideaki Hashimoto, Kentarou Sawano, Hiroshi Nohira, and Takuya Maruizumi, Applied Physics Express 9, 052101-1-4 (2016)  
DOI: 10.7567/APEX.9.052101

"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, 031302 (2016).

DOI: 10.7567/JJAP.55.031302

"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, 031304-1-5 (2016).

DOI: 10.7567/JJAP.55.031304

"Ultralarge transient optical gain from tensile-strained, n-doped germanium on silicon by spin-on dopant diffusion" Xuejun Xu, Xiaoxin Wang, Keisuke Nishida, Koki Takabayashi, Kentarou Sawano, Yasuhiro Shiraki, Haofeng Li, Jifeng Liu, and Takuya Maruizumi, Applied Physics Express 8, 092101 (2015)

DOI: 10.7567/APEX.8.092101

"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, 132101 (2015)

DOI: 10.1063/1.4931939

"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, 76-79 (2014)

DOI: 10.1016/j.tsf.2013.10.074

"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, 758-761 (2014)

DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2014.02.014

"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**, 086601 (2014)

DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.086601

"Highly n-doped, tensile-strained Ge grown on Si by molecular beam epitaxy" Keisuke Nishida, Xuejun Xu, Kentarou Sawano, Takuya Maruizumi, Yasuhiro Shiraki, Thin Solid Films 557, 66-69 (2014)

[学会発表](計 29件)

Kentarou Sawano “Anisotropic strain engineering of Si/Ge heterostructures” Invited, 2016 Global Research Efforts on Energy and Nanomaterials (GREEN 2016) Taipei, Taiwan, Dec. 24 (2016).

Kentarou Sawano, “Straining of Group IV Semiconductor Materials for Bandgap and Mobility Engineering” Invited, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRIME 2016), Honolulu, USA, Oct. 2-7 (2016).

Kentarou Sawano, “Anisotropic Strain Introduction into Si/Ge Hetero Structures” Invited, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRIME 2016), Honolulu, USA, Oct. 2-7 (2016).

H. Hashimoto, X. Xu, K. Sawano, T. Maruizumi, “Enhanced Light Emission from N-Doped Ge Microdisks by Thermal Oxidation”, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRIME 2016), Honolulu, USA, Oct. 2-7 (2016).

K. Sawano, K. Mizutani, K. Watanabe, X. Xu, T. Maruizumi, “Light Emission Enhancement from Ge Quantum Dots with Phosphorous  $\delta$ -Doping”, 19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2016), Montpellier (France) (Sep 4-9, 2016)

M. Kato, T. Murakami, K. Arimoto, J. Yamanaka, K. Nakagawa, K. Sawano, “Fabrication of high-quality strain relaxed SiGe(110) films by controlling defects via ion implantation”, 19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2016), Montpellier (France) (Sep 4-9, 2016)

H. Hashimoto, X. Xu, K. Sawano, T. Maruizumi, “Highly N-doped Ge Microdisks with Circular Bragg Gratings on Ge-on-Insulator”, 19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE 2016), Montpellier (France) (Sep 4-9, 2016)

Y. Arisawa, K. Sawano and N. Usami, “Study on ion implantation conditions in fabricating compressively strained Si/relaxed Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub> heterostructures using the defect control by ion implantation technique”, The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya Congress Center

(Aichi) (Aug 7-12, 2016)

K. Sawano, K. Watanabe, K. Mizutani, X. Xu, T. Maruizumi, “Influences of Phosphorous  $\delta$ -Doping at Ge Quantum Dots / Si Interface on Photoluminescence Properties and Dot Formation”, The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya Congress Center (Aichi) (Aug 7-12, 2016)

Shiori Konoshima, Eisuke Yonekura, Kentarou Sawano, “Fabrication of uniaxially strained Ge by selective ion implantation technique”, The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya Congress Center (Aichi) (Aug 7-12, 2016)

K. Arimoto, S. Yagi, J. Yamanaka, K. Nakagawa, N. Usami, K. Sawano, Hole Mobility in Strained Si/SiGe/Vicinal Si(110) Grown by Gas Source MBE, The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya Congress Center (Aichi) (Aug 7-12, 2016)

Kentarou Sawano, “Strained Ge-on-Insulator Substrates toward Optoelectronic Integrated Circuits” (Invited), The International Conference on Small Science (ICSS 2016), Prague, Czech Republic (June 25-29, 2016)

Michihiro Yamada, Yuichi Fujita, Shinya Yamada, Kentarou Sawano, Kohei Hamaya, “Control of Electrical Properties in Heusler-Alloy/Ge Schottky Tunnel Contacts formed by Phosphorous  $\delta$ -Doping with Si-Layer Insertion”, International SiGe Technology and Device Meeting 2016 (ISTDM2016), Nagoya Univ. (Aichi) (June 7-11, 2016)

You Arisawa, Yusuke Hoshi, Kentarou Sawano, Junji Yamanaka, Keisuke Arimoto, Chiaya Yamamoto, Noritaka Usami, “Thermal Stability of Compressively Strained Si/Relaxed Si<sub>1-x</sub>C<sub>x</sub> Heterostructures Formed on Ar Ion Implanted Si (100) Substrates”, International SiGe Technology and Device Meeting 2016 (ISTDM2016), Nagoya Univ. (Aichi) (June 7-11, 2016)

Yuuki Yajima, Yuta Ariyama, Kentarou Sawano, “Formation of Strained Ge-on-Insulator (GOI) Substrates using SiGe Etching Stop Layers”, International SiGe Technology and Device Meeting 2016 (ISTDM2016), Nagoya Univ. (Aichi) (June 7-11, 2016)

Kentarou Sawano, “Strained Germanium based Nano-Structures toward High Performance Optoelectronic Integrated Circuits” (Invited), International Symposium for Advanced Materials Research

2015 (ISAMR 2015), Sun Moon Lake, Taiwan  
(August 16-20, 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)

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)

## 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

### (2)連携研究者

有元 圭介 (ARIMOTO, Keisuke)

山梨大学・医学工学総合研究部・准教授

研究者番号 : 30345699