

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21246003

研究課題名（和文）革新的ゲルマニウム光電子融合素子の実証とそのシミュレーション技術開発

研究課題名（英文） Demonstration of innovative Germanium optoelectronic devices and developments of simulation technologies

研究代表者

白木 靖寛（SHIRAKI YASUHIRO）

東京都市大学・総合研究所・教授

研究者番号：00206286

研究成果の概要（和文）：次世代 LSI（大規模集積回路）の高速・低消費電力化のための革新的デバイスとして、Si 基板上 Ge 光電子融合デバイスの実現へ向けた基盤技術を、シミュレーション技術開発とともに確立した。従来とは異なる新規な歪み Ge チャンネル形成、絶縁層上歪み Ge（Ge-on-Insulator）基板作製に成功し、また、量子ドットを有する、フォトニック結晶やマイクロディスク等の微小共振器構造を組み込んだ電流注入発光デバイスを作製し、室温における強い電流注入発光、導波路とのカップリングに成功した。

研究成果の概要（英文）：We established essential technologies for realization of Ge optoelectronic devices on the Si platform, which are promising innovative devices with high performances and low power consumption toward next-generation LSI (Large Scale Integration), along with simulation technologies. We succeeded in formation of novel strained Ge channel structures and strained Ge-on-Insulator, room-temperature strong electroluminescence from photonic crystal and microdisk macrocavities with Ge quantum dots and their coupling with optical waveguide.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
2010 年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2011 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2012 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
総計	31,400,000	9,420,000	40,820,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード：ゲルマニウム・量子ドット・フォトニック結晶・シミュレーション・歪み・微小共振器・導波路

1. 研究開始当初の背景

高度情報通信社会の継続的発展に向け、シリコン（Si）LSI の超微細化と新規アーキテクチャデバイスの開発が、学界・産業界一丸となり進められている。現行の LSI 開発では、素子寸法の超微細化に伴う、ゲート絶縁膜リ

ーク、移動度低下などの問題が生じており、微細化によらずに性能向上を達成する技術の確立が不可欠となっている。一方、近年 LSI へ光配線を導入すべく、シリコンフォトニクスが徐々に注目を集め始めている。これまで Si 発光源の開発は非常に困難であり、発光デバイスのほとんど全てが化合物半導体によ

るものであったが、これらを現行のシリコンテクノロジー (Si LSI) に導入するのは難しい。つまり、光配線実現に向けて Si 系材料による発光源の開発が切望されている。

我々は、シリコンテクノロジーに導入可能な、Si 系材料である SiGe または Ge にいち早く注目し、それまでに多くの顕著な成果を上げてきた。特に高速電子デバイス開発として、電子、正孔ともに世界最高移動度を達成している。また、光デバイス開発に関しては、光の閉じ込めにより発光強度を増大させる、フォトニック結晶微小共振器構造と、Ge 自己形成量子ドット発光体とを組み合わせることで、通信波長帯において室温で、極めてシャープ、かつ高効率なフォトルミネセンスを得ることに成功している。

2. 研究の目的

本研究では以上の成果をベースとして、Ge に焦点を絞り、新規 Ge 高速電子デバイスと発光デバイスをさらに実用化に向けて発展させ、次世代 LSI (大規模集積回路) の高速・低消費電力化のための革新的デバイスとして、Si プラットフォーム上 Ge 光電子融合デバイスの実現に向けた基盤技術を確立することを目的とした。

具体的には、Si/Ge ヘテロ構造をベースとし、従来とは異なる新規な歪み Ge チャンネル超高速電子デバイス、Ge 量子ドットを有するフォトニック結晶およびマイクロディスク微小共振器 EL 発光デバイスの開発を進めた。さらにこれらデバイス開発を「量子ナノデバイスシミュレーション」技術と有機的に連携させ、デバイス開発を加速させるとともに、Ge 先端デバイスにおける新規シミュレーション技術の開発を目指した。

3. 研究の方法

電子デバイス、光デバイスの開発を並行して進め、両者に対し、シミュレーション技術開発と連携させながら進める。両デバイス開発は、総合研究所に現有の、分子線エピタキシー装置 (MBE)、電子線描画装置、イオン注入装置その他のプロセス装置を駆使し、高品質 Ge 結晶成長、デバイス構造作製を中心に進める。

電子デバイスに関しては高速かつ低消費電力化が期待できる高誘電率絶縁膜を用いた Ge チャンネル構造をまず研究期間前半に開発し、その後、キャリア移動度高速化を目指し、全く新規な一軸歪み Ge チャンネルデバイス構造を開発する。

また、光デバイスに関しては、Ge 量子ドットをベースとし、フォトニック結晶、マイクロディスクなどの微小共振器構造と組み合

わせた p-i-n 構造の作製技術開発を研究期間前半に進め、その後、電流注入により発光するエレクトロルミネッセンス (EL) 発光デバイスを開発する。さらに、光配線に向けた光導波路と EL 発光素子との結合を実現する。また、光・電子融合デバイスの設計・開発環境をこれら実験研究に先行して、順次構築する。

4. 研究成果

(1) 電子デバイス開発

高速歪み Ge チャンネル MOSFET 実現に重要となる表面近傍構造の最適化を進めた。特に高誘電率ゲート絶縁膜特性に与える Si キャップ層の効果を調べた。X 線光電子分光法 (XPS) によって、Si 層を 2nm 以上挿入することで、歪み Ge 層の酸化を抑制でき、良質なゲート界面が形成されることが分かった。さらに Si 層により Ge チャンネルの歪み安定性が向上することが分かり、高速デバイス化へ向けて大きく前進することができた。

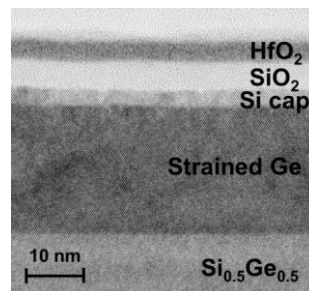


図1 歪み Ge ゲート積層構造

歪み Ge デバイス開発として、ソースドレイン (SD) コンタクトの極浅化かつ低抵抗化を目指し、不純物のデルタドーピングによる SD 形成技術を開発した。不純物の表面偏析現象を系統的に調べることで、基板面方位、結晶成長温度に強く依存した偏析現象を解明し、数 nm という非常に急峻な Sb 不純物原子のドーピングに成功した。これにより、通常オーミック接触を得るのが非常に困難である n 型 Ge への、非常に良好なオーミック接触を得ることに成功し、極浅 SD 実現へ大きな前進となった。さらに、Ge へ Si を添加することにより偏析を抑制し、より高濃度なドーピング密度を達成した。

また、チャンネル構造の開発として、より量産化に適したガスソース MBE による低温成長を実現し、結晶性の高い歪み Ge チャンネル形成に成功し、よりデバイス特性に近いドリフト移動度として、Si デバイスをはるかに超え、半導体の正孔移動度としては最高値となる、 $3120\text{cm}^2/\text{Vs}$ という超高移動度を得た。また、デバイス動作において重要なチャンネル以外

の伝導である平行伝導の詳細な解析も進めた。

さらに低消費電力デバイス化へ重要となり、次世代 GeCMOS において究極的に求められる基板として、GOI (Ge-on-Insulator) の開発を進めた。2 段階成長法の最適化による高

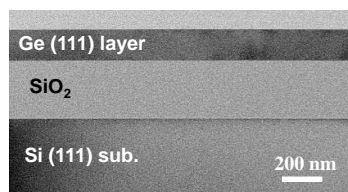


図2 作製した歪み Ge-on-Insulator 構造

品質 Ge 膜エピタキシャル成長と、CMP による表面超平坦化に基づく張り合わせ技術を駆使することにより、欠陥密度の低い膜厚 200nm 以下の GOI 基板の作製に成功した。

また並行して、更なる移動度向上を可能とする、一軸歪みデバイス実現へ向けて、「選択的イオン注入法」を開発した。基板面内で選択的にイオン注入による欠陥を導入することで、歪み緩和を局部的に生じさせ、その結果非対称な一軸性歪みを誘起する手法である。注入領域の幅を系統的に変化させることで、一軸性を高め、より高移動度化を図る指針を得た。さらに、表面構造を詳細に評価することにより、異方的な転位の発生が歪み状態の起源であることを明らかにし、熱的に安定かつ均一な一軸性歪みを導入できていることが示された。最終的には、一軸歪み Ge チャンネル形成に向け、これまでよりも Ge 組成を大きく向上させた、Ge 組成 80%に近い SiGe 一軸歪みバッファ層を実現した。これは一軸歪み Ge チャンネルデバイスの実現を可能とする非常に有用な基板となる。

(2) 光デバイス開発

これまでに室温発光を達成している、Ge 量子ドット微小共振器構造をベースに、電流注入型 EL デバイス構造の開発を進め、p-i-n 接合を有するマイクロディスク (MD)、フォトニック結晶構造作製プロセスを確立した。特に、EB リソグラフィーの合わせマークとして、熱安定性を考慮して HfO_2 膜を採用するなどのプロセス最適化を進めた。また、Ge ドットフォトニック結晶 EL 素子において、n 型 p 型の高ドーピング領域をフォトニック結晶スラブ領域に形成し、光を閉じ込める欠陥領域は真性領域とした。構造最適化により、良好なダイオード特性、注入効率を得た。その結果、電流注入による共振 EL 発光を得ることに成功した。注入電流 $50 \mu\text{A}$ 以上で鋭いピークが見られ、欠陥のない領域と比較して、40 倍の

発光強度増大が得られた。注入電流 1mA では、Q 値 800 を超える共振ピークが得られた。

さらに、Si 集積回路における光配線実現へ向けて、EL 発光構造と導波路を結合させるべ

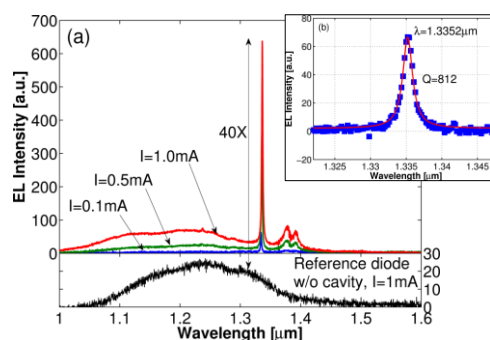
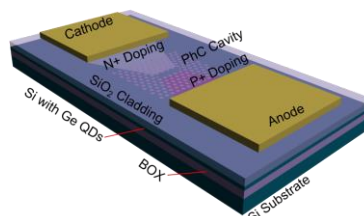


図3 フォトニック結晶 EL 発光デバイスと発光スペクトル

く、マイクロリング共振器と導波路を近づけた構造を作製し、さらに導波路にグレーティングカップラーを形成することで、EL 発光を上方向に検出する構造を作製した。その結果、Q 値 3000 を超える共振ピークを得ることに成功し、発光共振器から導波路を通じた光検出を実証した。これは、Si プラットフォーム上の光配線実現に向けた画期的な成果と言える。

また、発光の直接遷移化が期待できる、引っ張り歪み Ge 膜を Si 上に成長させ、マイクロディスク共振器構造を作製した。特に n 型のドーピング条件も最適化させた。その結果、直接遷移による鋭い共振発光が得られ、Q 値として 400 を得た。今後の構造最適化により、さらに発光効率を向上させることが期待出される。

光配線実現に向けて、受光デバイスの形成

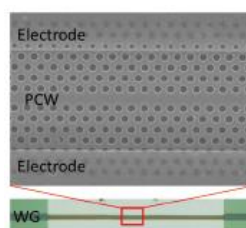


図4 Ge ドット PC フォトディテクター

も行った。活性層に Ge 量子ドットを有するフォトニック結晶線欠陥導波路 (PCW : Photonic Crystal linear defect Waveguide) を作製し、Si 系フォトディテクターを作製した。ここで PCW を用いる理由は、導波路中での低群速度効果を利用し、活性層での光の吸収効率を上昇させるためである。この試料について光学特性を評価し、通信波長領域 (1.3~1.6 μm 付近) に対して広帯域に応答感度を持つことを観測できた。

(3) シミュレーション開発

電子デバイス設計として、ドリフト拡散モデルとモンテカルロ法に基づいたシミュレータを別個に立ち上げ、Ge チャネルデバイスへと適用した。また、密度傾斜法を組み込んだデバイスシミュレータを開発し、歪みチャネルデバイスでの移動度計算を行い、実験結果と比較をすることで、構造最適化を進めた。ほぼ理想通りのデバイス特性が得られ、散乱要因などの特定化に有効となった。また、第一原理計算により不純物元素の偏析現象について詳細に調べ、微細デバイスでの低抵抗コンタクト形成に重要な知見を得た。

さらに、光デバイス設計として、FDTD 法計算により、新規ダブルヘテロ接合型フォトニック結晶共振器のバンド構造の解析によって、実験結果を再現するとともに、さらに 10 万を超える高 Q 値が得られる構造を見出し、デバイス設計にさらなる高性能化へ向けた指針を与えた。さらに、1 次元フォトニック結晶 (1D-PhC) 微小共振器構造の横方向での放射特性を抑え、さらなる高 Q 値を実現するために、2 次元 PhC 導波路 (WG) 中に組み込んだ構造について、FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いて、その共振特性の解析評価を進め、より Q 値を高める構造を見出した。

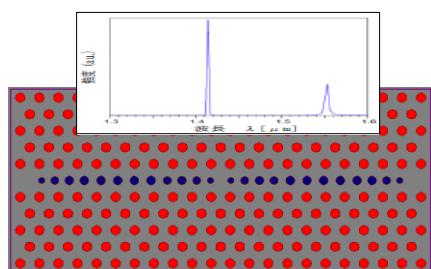


図5 テーパ構造1D-PhC共振器を2D-PhC WG中に埋め込んだ構造のモデルと得られたスペクトル

以上、電子デバイス、光デバイス、シミュレーション技術開発を相互に連携させ、光電子融合集積回路の実現へ向けて非常に有用な技術を確立したものと見える。

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 5 8 件) (全て査読有り)

① “Formation of Tensilely Strained Germanium- on- Insulator”

Yusuke Hoshi, Kentarou Sawano, Kohei Hamaya, Masanobu Miyao, and Yasuhiro Shiraki

Applied Physics Express 5, 015701 (2012). DOI: 10.1143/APEX.5.015701

② “Upper limit of two-dimensional hole gas mobility in strained Ge/SiGe Heterostructures”

T. Tanaka, Y. Hoshi, K. Sawano, N. Usami, Y. Shiraki, and K. M. Itoh

Appl. Phys. Lett. 100, 222102 (2012). DOI: 10.1063/1.4723690

③ “Acceptor-Like States in SiGe Alloy Related to Point Defects Induced by Si⁺ Ion Implantation”

Motoki Satoh, Keisuke Arimoto, Junji Yamanaka, Kiyokazu Nakagawa, Kentarou Sawano, and Yasuhiro Shiraki

Jpn. J. Appl. Phys. 51, 105801 (2012). DOI: 10.1143/JJAP.51.105801

④ “Silicon-based current-injected light emitting diodes with Ge self-assembled quantum dots embedded in photonic crystal nanocavities” ,

Xuejun Xu, Toshiki Tsuboi, Taichi Chiba, Noritaka Usami, Takuya Maruizumi, and Yasuhiro Shiraki,

Optics Express, 20(13): 14714-14721 (2012) DOI: 10.1364/OE.20.014714

⑤ “Silicon-based light emitting devices based on Ge self-assembled quantum dots embedded in optical cavity” ,

Xuejun Xu, Sho Nurusawa, Taichi Chiba, Toshiki Tsuboi, Jinsong Xia, Noritaka Usami, Takuya Maruizumi, and Yasuhiro Shiraki,

IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 18(6): 1830-1838 (2012) DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2206802

⑥ “Room temperature electroluminescence from Ge quantum dots embedded in photonic crystal microcavities” ,

Toshiki Tsuboi, Xuejun Xu, Jinsong Xia,

Noritaka Usami, Takuya Maruizumi, and Yasuhiro Shiraki,

Applied Physics Express, 5: 052101-1 – 052101-3 (2012) DOI: 10.1143/APEX.5.052101

⑦ “High-quality-factor light-emitting diodes with modified photonic crystal nanocavities including Ge self-assembled quantum dots on silicon-on-insulator substrates” ,

Xuejun Xu, Taichi Chiba, Tatsuya Nakama, Takuya Maruizumi, and Yasuhiro Shiraki,

Applied Physics Express, 5: 102101-1 – 102101-3 (2012) DOI: 10.1143/APEX.5.102101

⑧ “Line width dependence of anisotropic strain state in SiGe films induced by selective ion implantation”

Y. Hoshi, K. Sawano, A. Yamada, S. Nagakura, N. Usami, K. Arimoto, K. Nakagawa, and Y. Shiraki

Applied Physics Express 4, 095701 (2011).

⑨ “Formation of Uniaxially Strained SiGe by Selective Ion Implantation Technique”

Kentarou Sawano, Yusuke Hoshi, Atsunori Yamada, Yoshiyasu Hiraoka, Noritaka Usami, Keisuke Arimoto, Kiyokazu Nakagawa, and Yasuhiro Shiraki

Thin Solid Films 518, 2454 (2010).

⑩ “Ultrashallow Ohmic contacts for n-type Ge by Sb δ -doping”

K. Sawano, Y. Hoshi, K. Kasahara, K. Yamane, K. Hamaya, M. Miyao, and Y. Shiraki
Appl. Phys. Lett. 97, 162108 (2010).

⑪ “Room-temperature electroluminescence from Si microdisks with Ge quantum dots”

J. Xia, Y. Takeda, N. Usami, T. Maruizumi, and Y. Shiraki

Optics Express 18, 13945~13950 (2010)

⑫ “Ion dose, energy, and species dependencies of strain relaxation of SiGe buffer layers fabricated by ion implantation technique”

Y. Hoshi, K. Sawano, A. Yamada, N. Usami, K. Arimoto, K. Nakagawa, and Y. Shiraki
J. Appl. Phys. 107, 103509 (2010).

⑬ “Local Control of Strain in SiGe by Ion Implantation Technique”

K. Sawano, Y. Hoshi, Y. Hiraoka, N. Usami, K. Nakagawa, Y. Shiraki

Journal of Crystal Growth 311, 806-808 (2009).

⑭ “Strain dependence of hole effective mass and scattering mechanism in strained Ge channel structures”

K. Sawano, K. Toyama, R. Masutomi, T. Okamoto, N. Usami, K. Arimoto, K. Nakagawa, and Y. Shiraki

Appl. Phys. Lett. 95, 122109 (2009).

[学会発表] (計68件) (内招待講演8件)

① K. Sawano

“On the origin of the uniaxial strain induced in Si/Ge heterostructures with selective ion implantation technique”

The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, 2012/9/26, Nara, Japan

② Yasuhiro Shiraki

“Electroluminescence from microcavities of photonic crystals, microdisks and rings including Ge dots formed on SOI substrates” Invited

221st ECS Meeting, 2012/5/6-10, Seattle, Washington, USA

③ Xuejun Xu

“Room-temperature photonic crystal nanocavity light emitting diodes based on Ge self-assembled quantum dots”

2012 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2012/12/10-12, San Francisco, USA

④ Kentarou Sawano

“Ion Implantation for Strain Engineering of Si-based Semiconductor” Invited

BIT’s 1st Annual World Congress of Nano-S&T 2011, 2011/10/26, Dalian, China

⑤ Hiroshi Nohira,

“XPS Study on Chemical Bonding States of high-kappa/high-k Gate Stacks for Advanced CMOS” Invited

220th Meeting of The Electrochemical Society, 2011/10/11, Boston, USA

⑥ T. Maruizumi

“Surface segregation behavior of Sb, B, and As dopant atoms on Ge(111) surface”

E-MRS 2011 Spring & Bilateral Meeting, 2011/5/10, Nice, France

⑦ T. Maruizumi,
“Surface segregation behavior of Sb, B, Ga, and As dopant atoms on Ge(100) and Ge(111) surface examined with a first-principles method”

7th International Conference on Si Epitaxy and Heterostructures, 2011/8/30, Leuven, Belgium

⑧ T. Maruizumi

“Stable position of B₁₂ Cluster Near Si(001) Surface and Its STM images”

218th Meeting of The Electrochemical Society, 2010/10/12, Las Vegas, USA

⑨ Y. Shiraki

“Material aspects and characterization of Si/Ge hetero-structures on nano-scale for electronic and optical device applications” Invited

1st International Workshop on Si based nano-electronics and -photonics (SiNEP-09) 2009/09/22, Vigo, Spain

⑩ J. Xia

“Current-injected Si microdisk with Ge self-assembled quantum dots” Invited

2nd Photonics and OptoElectronics Meetings (POEM 2009) 2009/8/10, Wuhan, China

⑪ J. Xia

“Si-Based Light Emitting Devices Based on Ge Self-Assembled Quantum Dots” Invited

2009 International Symposium on Crystal Science and Technologies, 2009/12/04, Kofu, Yamanashi

⑫ Kentarou Sawano

“CMP for high mobility strained Si/Ge Channels” Invited

2009 MRS (Materials Research Society) Spring Meeting, Symposium E : Science and Technology of Chemical Mechanical Planarization (CMP), 2009/4/16, San Francisco, USA

[図書] (計2件)

著書

① Y. Shiraki and N. Usami

“Silicon germanium (SiGe) nanostructures” Woodhead Publishing,

2011年、全627ページ

内、K. Sawano 分担執筆 (pp147-170)

② 丸泉琢也、夏金松、他

エヌティーエス社「量子ドット - エレクトロニクス最前線」(分担執筆) pp275-284, 2011

[その他]

ホームページ等

<http://www.arl.tcu.ac.jp/sns.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白木 靖寛 (SHIRAKI YASUHIRO)

東京都市大学・総合研究所・教授

研究者番号：00206286

(2) 研究分担者

丸泉 琢也 (MARUIZUMI TAKUYA)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：00398893

野平 博司 (NOHIRA HIROSHI)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：30241110

澤野 憲太郎 (SAWANO KENTAROU)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：90409376

瀬戸 謙修 (SETO KENSHU)

東京都市大学・工学部・講師

研究者番号：10420241

徐 学俊 (XU XUEJUN)

東京都市大学・総合研究所・研究員

研究者番号：80593334

夏 金松 (XIA JINSONG)

東京都市大学・総合研究所・助手

研究者番号：00434184

(3) 連携研究者

中川 清和 (NAKAGAWA KITOKAZU)

山梨大学・医学工学総合研究部・教授

研究者番号：40324181

松井 敏明 (MATSUI TOSHIAKI)

独立行政法人情報通信研究機構・

専攻研究員

研究者番号：20358922

宮田 典幸 (MIYATA NORIYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・

エレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号：40358130

宇佐美 徳隆 (USAMI NORITAKA)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：20262107