

平成 22 年 6 月 7 日現在

研究種目：学術創成研究費  
研究期間：2005-2009  
課題番号：17GS0205  
研究課題名（和文） シリコン CMOS フォトニクスに関する研究  
研究課題名（英文） Silicon CMOS Photonics  
研究代表者  
和田 一実 (WADA KAZUMI)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：30376511

研究成果の概要（和文）：本研究では、光素子材料の CMOS 互換化路線を走る現在のシリコンフォトニクスとは質的に異なる、光素子の体系を徹底的にスリム化した新世代シリコンフォトニクスの構築を目指した。その結果、具体的な機能統合化素子を概念設計しそのプロトタイプ化に成功し、さらにその基本構造を光計算に適用し現在のコンピュータ性能を遙かに凌ぐ 2 ビット加算を実証し、所期の目的を達成した。

研究成果の概要（英文）：The current Si photonics aims to reduce the *material* diversity of photonic devices for electronic-photonic integration. In contrast the present research focuses reducing the *device* diversity in Si photonics in terms of unifying fundamental functions of photonic devices. Based on the design and prototype of a function-unified device and application of the fundamental device to an optical computing architecture, we have demonstrated orders-magnitude higher performances than conventional 2-bit adders. This has suggested our new approach has a significant impact not only on a new generation of Si photonics but also future computation.

交付決定額  
(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
17 年度	88,500,000	26,550,000	115,050,000
18 年度	89,300,000	26,790,000	116,090,000
19 年度	74,800,000	22,440,000	97,240,000
20 年度	30,800,000	9,240,000	40,040,000
21 年度	43,800,000	13,140,000	56,940,000
総計	327,200,000	98,160,000	425,360,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：フォトニクス、シリコン、CMOS、新原理素子、ナノ集積

## 科学研究費補助金研究成果報告書

## 1. 研究開始当初の背景

シリコン集積回路(LSI)はCMOS技術とともに発展し、光通信ネットワークとともに現在のIT(Internet Technology)社会・経済の基盤となった。しかし、配線の高密度化によってその性能が飽和し始めている。新たな突破口としてIntel、IBMなど米国企業は産学連携によりLSIチップ上での電子・光集積化を進めている。光は抵抗も容量もない理想的な信号伝達媒体であるばかりでなく、CMOS技術に用いられるSi、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiO}_2$ などの材料系は光通信波長帯(1.3および1.5ミクロン)に対し透明でかつ高い屈折率を持つため光回路の小型化に適すなどの様々な特徴を兼ね備えている。国内でもH17-18年度は重要な成果が相次いだ。ナノフォトダイオード<sup>\*</sup>(NEC)、光トランジスタ<sup>\*</sup>(日立)をなどは世界的にも高い評価を受けている。また、NEDO/SELETEでは、報告者がINTEL社と共同で進めた光クロックを大型プロジェクトとして昨年度に開始した。しかし、国内外を問わずシリコンフォトリソグラフィの研究アプローチは光素子材料のCMOS互換化にとどまっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductors)材料・プロセス技術により多様な光素子機能を統合する「機能統合化素子」を実現する。具体的には機能統合化素子の概念設計および製作を進め、基本動作の確認を行った。機能統合化素子を要素とする電子・光集積回路(Electronics Photonics Integrated Circuits, EPIC)をプロトタイプ化する。以上により、EPICの基盤となるシリコンCMOSフォトリソグラフィを構築することを目的とした。

## 3. 研究の方法

素子集積化の代表例であるLSIはトランジスタと配線のみからなる極限にまで簡素化された技術体系である。これに対し、光通信発光(III-V)、導光( $\text{SiO}_2$ )と受光(III-V)の他に、変調( $\text{LiNbO}_3$ )、フィルター( $\text{SiO}_2$ )、スイッチ(MEMS)、増光(III-V)、など多くの素子機能を必要とする複雑な体系である。しかも、独自に発展したこれらの光素子はCMOS技術に互換性を持たぬ材料からなるものが多い。このため、現状のEPIC研究は光素子材料のCMOS互換化により体系のスリム化を図ることが一般的である。本研究は、これとは質的に異なり、素子機能を統合化し光の技術体系をスリム化する抜本的なアプローチである。今後、EPICの大規模化が進むにつれて光素子の多様性が問題化し、LSIのような人類共通の資産として我々の生活に大きな貢献を出

来ずに終わる可能性を絶つことを本研究の使命とした。

本研究では、各種光機能の統合する概念の提案・検証を進める。これにより、いわばトランジスタに相当する機能統合化素子の試作・実証を行う。また、単なる素子にとどまらず、ゴールをEPICのプロトタイプ化におく、社会・経済の基盤を革新する高いポテンシャルを有するものである。

研究は東京大学において、機能統合の提案・検証、およびGe素子の設計・実現を進める。さらに、研究協力者として日本電信電話およびマサチューセッツ工科大学が加わり、それぞれ機能統合素子の試作および屈折率変調原理の検証を進める。さらに、学術振興会(JSPS)第145委員会の関連研究者からなるタスクフォースにより産学連携に向けた取り組みを進めた。

## 4. 研究成果

## 4.1 機能統合化素子の提案と実証

電気集積回路がトランジスタとインターコネクタ(金属配線)からなる単純化された系であるのに比して、光素子を集積化するためには発光、変調、分波、および光検出の機能とインターコネクタ(導波路)の集積化が、これまでの研究の主流である「光通信のチップ上搭載」路線では常道である。本研究では、この内、発光、変調、分波の三機能を統合する素子を提案し、光素子の種類を低減することを目指した。具体的には、Siと同じIV族元素であるGeによるリング共振器を用いたパーセル効果による発光促進、および僅かなSiを含むSiGe混晶によるフランツ・ケルディッシュ効果を用いた屈折率の電気光学変調、およびフィルターの原理実証を行った。これにより五種類必要であった素子種を三種類に低減することができ、電気集積回路の二種類に近い体系にスリム化できることを示した。

以上により、本研究は「シリコンCMOSフォトリソグラフィ」の本来目指すべき、将来、電子・光回路の大規模集積化時に世界が直面する最大の問題となる光素子の多様性を低減する光機能の統合化に関し、その素子原理の提案から素子動作の実証に初めて成功した。

## 4.2 SiGe高品質エピ技術の開発

産学連携には大型のSi基板にGeエピ結晶を選択成長し、CMOSラインに供給できる装置が必要であり、超高真空気相成長(UHV-CVD)装置を導入した。Si上のGeを820°Cでの高温熱処理により貫通転位のない試料を製作できることを明らかにした。しかし、高温熱処理はCMOSプロセスでは導入が困難

であった。本研究では成長後に高温熱処理を不要とする成長技術を開発することに成功した。この知見の持つ産業界に対するインパクトはきわめて大きい。

以上の成果は最近我が国が開始した、シリコンフォトニクス関連の研究開発に関する国家プロジェクトにおいて進める電子・光集積回路の製作実証にたいしても大きな貢献となると確信する。

#### 4.3 EPICのプロトタイプ製作と評価

本成果の光計算への適用を旨とし、機能統合素子の基本構造を用い光加算機をプロトタイプ化し、光による二ビット加算に成功した。この結果は通常の CMOS 回路による電気による二ビット加算機に比較すると約 100 倍高速であり、光計算の可能性を切り開くものと位置づけられる。

#### 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 7 件)

1. S. Jongthammanurak, J.-F. Liu, K. Wada, D.D. Cannon, D.T. Danielson, D. Pan, J. Michel, L.C. Kimerling, "Large electro-optic effect in tensile strained Ge-on-Si films", Appl. Phys. Lett. 89, 161115-1-3, 2006.
2. 和田一実、ライオネル C. キマリング, 「高度情報化社会と Si フォトニクスの将来展望」応用物理 76, 141, 2007.
3. Peng Huei Lim, Y. Kobayashi, S Takita, Y Ishikawa, K. Wada "Enhanced photoluminescence from germanium-based ring resonators", Appl. Phys. Lett., 93. 041103 1-3, 2008
4. K. Wada, "A New Approach of Electronics and Photonics Convergence on Si CMOS Platform: How to Reduce Device Diversity of Photonics for Integration" Hindawi Publishing Corporation Advances in Optical Technologies Volume 2008, Article ID 807457 7pages doi:10.1155/2008/807457
5. K. Wada, S B. Park, and Yasuhiko Ishikawa "Si Photonics and Fiber to the Home" IEEE, 97-7, July 2009.
6. Peng Huei Lim, S .B. Park, Yasuhiko Ishikawa, and K. Wada "Enhanced direct bandgap emission in germanium by micromechanical strain engineering" OPTICS EXPRESS, 17-8, 16358, 2009
7. S.B. Park, Tai Tsuchizawa, Toshifumi Watanabe, Hiroyuki Shinojima, Hidetaka Nishi, Koji Yamada, Yasuhiko Ishikawa, K. Wada, and Seiichi Itabashi "Monolithic Integration and Synchronous Operation of Germanium Photodetectors and Silicon Variable Optical Attenuators" OPTICS EXPRESS, 18-8, 8412, 2010

[学会発表] (計 6 件)

1. S.B. Park, Yasuhiko, Ishikawa, K. Wada "Responsivity of Vertical p-i-n Photodiode of Selectively Grown Ge on Silicon-on-Insulator (SOI) Platform" 2007 4<sup>th</sup> International Conference on Group IV Photonics (GFP2007)
2. K. Wada, S. Takita, S.B. Park, R. Ichikawa, Y. Ishikawa "Characteristics of Ge and SiGe pin Photodiodes Without Postgrowth Annealing" The Electro Chemical Society, 2008, Honolulu, Hawaii
3. S.B. Park, Shinya Takita, Yasuhiko Ishikawa, Jiro Osaka, K. Wada "Low dark current Ge photodiodes on Si with intrinsic Si-layer insertion" 2008 5<sup>th</sup> International Conference on Group IV Photonics (GFP2008) 2008 9/16-29 Sorrento, Italy
4. Peng Huei lim, Yosuke Kobayashi, Shinya Takita, Yasuhiko Ishikawa and Kazumi. Wada "Enhanced Photoluminescence from Germanium Based Ring Resonators" 2008 5<sup>th</sup> International Conference on Group IV Photonics (GFP2008) 2008 9/16-29 Sorrento, Italy.
5. Yasuhiko Ishikawa, Sugbong Park, Jiro Osaka "Fabrication and Responsivity Spectra of p-Ge/i-Si/n-Si Near Infrared Photodiodes" 2008 5<sup>th</sup> International Conference on Group IV photonics (GFP2008)
6. K. Wada "The Challenge of Silicon Photonics for On-chip Integration" ECOC2009

[図書] (計 1 件)

1. K. Wada, J.F. Liu, S. Jongthammanurak, D.D. Cannon, D.T. Danielson, D.H. Ahn, S. Akiyama, M. Popovic, D.R Lim, K.K. Lee, H.-C Luan, Y. Ishikawa, J. Michel, H.A. Haus, and L.C. Kimerling, "Si Microphotonics for optical interconnection," in Optical Interconnects, The Silicon Approach, eds L. Pavesi, G. Guillot (Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2006), pp. 291-310.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 11 件)  
名称: 「光検出器」

発明者：和田一実、石川靖彦  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：特願 2006-322861  
出願年月日：2006/11/30  
国内外の別：国内

名称：シリコン太陽電池  
発明者：和田一実、市川竜三  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：PCT/JP2009/051804 (特願 2008-024227)  
出願年月日：2009/02/03 (2008/02/04)  
国内外の別：国内

名称：Ge 素子製作方法  
発明者：和田 一実, 大坂 次郎, 石川 靖彦,  
L. C. Kimerling  
権利者：東京大学, MIT  
種類：特許  
番号：米国にて出願中  
出願年月日：2009/9/22  
国内外の別：海外

名称：ゲルマニウム受光器およびその製造方法  
発明者：和田 一実 , 石川 靖彦, 板橋 聖一,  
土澤 泰, 山田 浩治, 渡辺 俊文  
権利者：東京大学、NTT  
種類：番号： 2010047588  
出願年月日：2010/3/4  
国内外の別：国内

名称：光検出器の製造方法  
発明者：和田 一実 , 石川 靖彦, 山田 浩治,  
土澤 泰, 渡辺 俊文, パク ソンボン, 板橋  
聖一  
権利者：東京大学、NTT  
種類：特許  
番号：2010047582  
出願年月日：2010/3/4  
国内外の別：国内

名称：光導波路共振器の製造方法及び共振器回  
路の製造方法  
発明者：和田一実、滝田真也、山添正裕  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：2010025891  
出願年月日：2010/2/8  
国内外の別：国内

名称：「光半導体素子および光変調器」

発明者：和田一実、尾崎太亮  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：特開 2006-301379  
出願年月日：2005/4/21  
国内外の別：国内

名称：発光素子  
発明者：和田一実、林世云、小林洋介、林秉輝  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：特願 2009-076498  
出願年月日：2007/09/18  
国内外の別：国内

名称：導波路共振器型光バッファ  
発明者：和田一実、林秉輝、デスモンドロドニー  
リム チョン ション  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：特願 2009-063673  
出願年月日：2007/09/04  
国内外の別：国内

名称：光半導体素子、光電変換素子及び光変調素  
子  
発明者：和田一実、石川靖彦、Sungbong Park  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：特願 2010-034226  
出願年月日：2008/07/28  
国内外の別：国内

名称：「光増幅器」  
発明者：和田一実、林世云  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：特願 2008-520153  
出願年月日：2007/4/11  
国内外の別：国内

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.microphotonics.material.t.u-tokyo.ac.jp/LabHP/Microphotonics-U-Tokyo.html>

Youtube  
[http://www.youtube.com/watch?v=I79Y71x5rcQ&feature=channel\\_page](http://www.youtube.com/watch?v=I79Y71x5rcQ&feature=channel_page)

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
和田 一実 (WADA KAZUMI)  
東京大学大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：30376511