

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760271

研究課題名(和文)アモルファス/結晶ハイブリッド型シリコン光集積回路

研究課題名(英文)Amorphous/Crystalline Hybrid Silicon Photonic Integrated Circuits

研究代表者

丸山 武男 (Maruyama, Takeo)

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：60345379

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：次世代ネットワーク用超高速・小型光集積回路用に波長850nm帯のシリコン光集積回路を提案する。この波長帯を用いることで、結晶シリコンを光検出器として用いることが可能となり、LSIとの集積も容易になる。そして光導波路に高屈折率材料を用いることで、光回路の小型化が実現できる。そこで、CMOS標準プロセスを用いてアバランシェ光検出器を作製した。この素子は受光面積を縮小させることでpn接合での容量を低減させることができ高速化が期待できる。最大帯域として9GHzを得た。またCF4ドライエッチング技術を用いたTa2O5をコアとするマルチモード光導波路を作製し、導波路損失1dB/cmを得た。

研究成果の概要(英文)：We propose the 0.8 μm range silicon photonic integrated circuits for a next generation network and a compact photonic receiver. In optical interconnection, 0.8 μm wavelength region vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) and Si photodiodes (PDs) are used for realizing low cost systems. Si avalanche PDs (APDs) was fabricated by the complementary metal-oxide-semiconductor process are expected for optical interconnection applications due to easy integration with trans-impedance amplifiers (TIA) and the following electronic circuits.

The bandwidth of APDs was increased with decreasing the detection area and decreasing the electrode PAD size because of decreased depletion capacitance at pn junctions and the PAD capacitance. The maximum bandwidth of 9 GHz was obtained. We fabricated multi-mode Ta2O5 waveguides by a CF4 reactive ion etching process. The propagation loss of 1 dB/cm was obtained at 830nm,

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光集積回路 光検出器 光導波路 シリコンフォトニクス

1. 研究開始当初の背景

インターネットにおけるコンテンツ大容量化に伴い、大容量データ通信の需要が急速に高まっている。そのため、アクセス系ネットワーク環境にも更なる高速化・大容量化が求められている。例えば 100Gbps(ビット毎秒)の伝送を確保するためには、波長多重光通信(WDM)技術を用いて、10Gbps×10 波長で達成できる。そしてこの要求に対し、超高速光トランシーバ用の光集積回路の実現が急務となっていた。

そこで、当時開発が進められていた 10Gbit イーサネット用光トランシーバでは、動作速度 10GHz 超を必要とするため、高移動度材料である化合物半導体が用いられていた。もしシリコン基板上にこれら高速動作光デバイスが実現すれば、更なる小型化、低コスト化が可能となる。その理由は、シリコンと SiO₂ との高屈折率差による光導波路の小型化、CMOS 技術の転用による低コスト化が可能なためである。これらはシリコンフォトンクスという分野を確立し、現在研究が盛んに行われている。そしてシリコンを光導波路としているため、シリコンに対して透明波長である波長 1.5μm 帯が用いられている。さらにこの波長帯に対応し、高速動作を満足させるため、化合物半導体による光デバイスをシリコン基板上に構成する必要がある。しかし既存の CMOS 標準プロセスに貼付プロセスは無く、CMOS プロセスとの融合には課題があった。

そこで申請者はこの課題を解決するために、シリコンを光導波路ではなく、光検出器として活用する波長 850nm 帯の光集積回路を提案することで、CMOS プロセスを用いた光集積回路が実現できると着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、CMOS 標準プロセスを用いて光導波路および光検出器を集積し、LSI グローバル配線用に適したデバイスの実現を目的としている。そのために次の 2 点の実現を目指した。

- (1) CMOS 標準プロセスによる動作速度 10GHz 超での高速光デバイスの実現
- (2) 波長 850nm 帯における小型・低損失光導波路の実現

3. 研究の方法

これまで VDEC を介した CMOS 標準プロセスを用いて、帯域周波数 3.4GHz の光検出器を実現している。この素子は高速動作に向けて、遅延に依存する基板深部での発生キャリアを pnp 構造の拡散電位で阻止する構造を有している。この構造で解析すると、帯域 20GHz 超での動作が期待できる。また、基板表面のキャリアのみが素子電流となるため低感度となるが、アバランシェ効果を用いることでキャリアを増倍させ高利得を達成で

きる。

現状の帯域制限は電極パッド容量 (C=0.51pF)に起因していることを明らかにしており、パッドサイズを再設計し、素子を試作する。

また、光導波路に関してはアモルファスシリコン薄膜を光露光とウェットエッチングを用いて、幅 10μm のマルチモード光導波路を作製し、波長 830nm の伝搬光に対して導波路損失 15dB/cm を得ている。これはこの波長帯においてアモルファスシリコンを用いた光導波路として初めての報告である。波長 1.5μm 帯では導波路損失 1~3dB/cm のアモルファスシリコン光導波路が実現しているため、この波長帯でも作製条件の改善により同程度の損失を目指す。

4. 研究成果

本研究では、CMOS 標準プロセスならびに互換プロセスを用いて、超高速シリコン光検出器およびシリコン基板上低損失光導波路の実現を目指し、下記の結果を得た。

- (1) CMOS 標準プロセスを用いてアバランシェ光検出器を作製した。電極間隔を 1μm としたところ、最大で 9GHz での帯域を得た。図 1 に帯域の受光部面積依存性を示す。受光部面積が狭くなるほど、広帯域な特性が得られた。これは帯域幅が静電容量で制限されているためである。ま

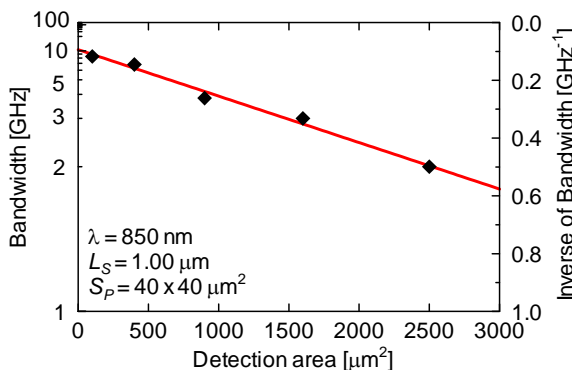


図 1 帯域の受光面積依存性

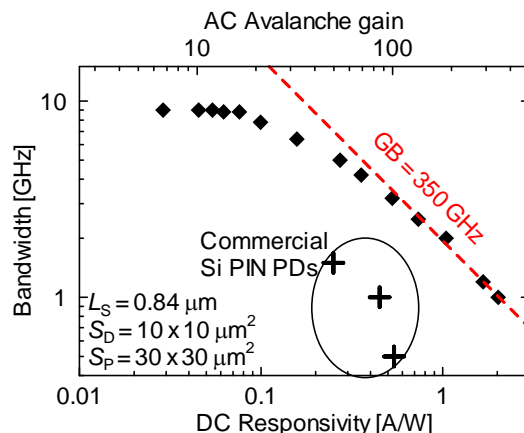


図 2 利得-帯域積

た、図 2 に示すように利得-帯域積は 350 GHz が得られ、高利得かつ高速な光検出器であることがわかった。

- (2) アモルファスシリコンを用いた光導波路を考えていたが、導波路損失の低減が困難であったため、コア層をシリコン基板上に堆積可能な Ta₂O₅ に変更した。この材料は屈折率が 2 程度と比較的高く、また可視光においても透明であるため、シリコン基板上小型光回路として有望である。光露光とウェットエッチングを用いて、幅 10μm のマルチモード光導波路を作製し、波長 830nm の伝搬光に対して導波路損失を測定したところ、1dB/cm を得た(図 3)。

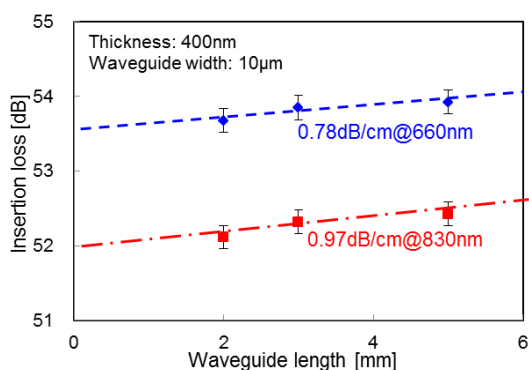


図 3 Ta₂O₅ 光導波路損失測定

本研究において、動作速度 10GHz に迫る帯域の光検出器を実現した。また低損失光導波路も達成した。以上より、Si-APD と Ta₂O₅ 光導波路を組み合わせることで、10GHz 帯光集積回路の実現が期待できる。

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 4 件)

- H. Morino, T. Maruyama, and K. Iiyama: "Reduction of Wavelength Dependence of Coupling Characteristics using Si Optical Waveguide Curved Directional Coupler," J. Lightwave Technol., vol. 32, no. 12, pp. 2188-2192, Jun. 2014. (査読有)
10.1109/JLT.2014.2321660
- G. Li, T. Maruyama, and K. Iiyama "Low-propagation-loss Ta₂O₅ Optical Waveguides on Silica Substrate," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 53, no. 4S, pp. 04EG12(4 pages), Mar. 2014. (査読有)
10.7567/JJAP.53.04EG12
- K. Maekita, T. Maruyama, K. Iiyama, and T. Suzuki, "GHz Response of Metamorphic

InAlAs Metal-semiconductor-metal Photodetector on GaAs Substrate," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 53, no. 2S, pp. 02BC16(5 pages), Feb. 2014. (査読有)

10.7567/JJAP.53.02BC16

- G. Li, Y. Hashimoto, T. Maruyama, and K. Iiyama, "High-efficiency Optical Coupling to Planar Photodiode using Metal Reflector loaded Waveguide Grating Coupler," Opt. Quantum Electron., vol. 45, no. 7, pp. 657-663, Jul. 2013. (査読有)
10.1007/s11082-013-9674-4

[学会発表](計 42 件)

- 李根, 前北和晃, 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS 互換プロセスによる SOI 横型 PIN 光検出器の高速応答特性」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2014-1, 2014 年 5 月 22 日, 福井.
- 木村洋介, 五十嵐彬宏, Nguyen Van Tu, Nor Azlinah, 丸山武男, 飯山宏一: 「FMCW 光距離センサの距離測定精度の検討」, 2014 年電子情報通信学会総合大会, C-3-28, 2014 年 3 月 20 日, 新潟.
- 刑部僚一, 霜鳥敏之, 菱木拓哉, 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS-APD の青色波長帯における高感度・高速動作」, 2014 年電子情報通信学会総合大会, C-4-12, 2014 年 3 月 19 日, 新潟.
- 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS 標準プロセスを用いた光デバイスの現状」, 2014 年電子情報通信学会総合大会, C-4-6, 2014 年 3 月 19 日, 新潟.
- 李根, 前北和晃, 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS 互換プロセスを用いた薄膜 PIN 型 Si 光検出器の sub-10GHz 応答」, 第 61 回応用物理学関係連合講演会, 18a-F9-2, 2013 年 3 月 18 日, 神奈川.
- 佐々木仁, 前北和晃, 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS 互換プロセスを用いた PIN 型薄膜 Si 光検出器の sub-10 GHz 応答」, 平成 25 年度応用物理学学会北陸・信越支部学術講演会, 23a-D-5, 2013 年 11 月 23 日, 金沢.
- T. Maruyama, H. Morino and K. Iiyama: Reduction of Wavelength Dependence of Coupling Characteristics using Si/SiO₂ Optical Waveguide Bending Directional Coupler, The 3rd International Symposium on Photonic and Electronics Convergence (ISPEC2013), F-4, Nov. 20, 2013, Tokyo, Japan.
- 森野久康, 丸山武男, 飯山宏一: 「Si/SiO₂ 曲線方向性結合器を用いた結合特性の波長依存性低減」, 電子情報通信学会レー

- ザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2013-63, 2013年10月24日, 門司.
9. 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS フォトニクス--CMOS 互換プロセスと CMOS 標準プロセスの違い--」, 電子情報通信学会シリコンフォトニクス研究会, SIPH2013-22, 2013年10月18日, 東京.
 10. G. Li, Y. Zhao, T. Maruyama, and K. Iiyama: Ta2O5 optical waveguide on silica substrate fabricated by CF4 reactive ion etching, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2013), PS-7-20, Sep. 26, 2013, Fukuoka, Japan.
 11. 刑部僚一, 霜鳥敏之, 菱木拓哉, 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS-APD の青色波長帯における高感度・高速動作」, 平成 25 年度電気関係学会北陸支部連合大会, D-7, 2013年9月21日, 金沢.
 12. 木村洋介, 丸山武男, 飯山宏一: 「FMCW センシングシステムによる微小変位測定の検討」, 平成 25 年度電気関係学会北陸支部連合大会, D-6, 2013年9月21日, 金沢.
 13. 飯山宏一, 丸山武男: 「標準 CMOS プロセスによる高感度・高速光検出器の開発」, 平成 25 年度電気関係学会北陸支部連合大会, D-I, 2013年9月21日, 金沢.
 14. 李根, 趙越, 丸山武男, 飯山宏一: 「CF4 ドライエッチングによる五酸化タンタル (Ta2O5) 光導波路の作製」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 19a-P2-6, 2013年9月19日, 京都.
 15. 高橋良平, 丸山武男, 飯山宏一: 「面発光レーザ構造実現に向けた有機層 /SiO2 基板貼付け」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 17p-P4-8, 2013年9月17日, 京都.
 16. 前北和晃, 丸山武男, 飯山宏一, 鈴木寿一: 「GaAs 基板上メタモルフィック InAlAs による MSM 型光検出器の GHz 応答」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 16a-A8-5, 2013年9月16日, 京都.
 17. H. Morino, T. Maruyama, and K. Iiyama: Reduction of Wavelength Dependence of Coupling Characteristics using Si/SiO2 Optical Waveguide Bending Directional Coupler, 18th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2013), WL4-4, Jul. 3, 2013, Kyoto, Japan.
 18. K. Maekita, T. Maruyama, and K. Iiyama: GHz Response of MSM InGaAs Photodetector on Si Substrate by BCB Bonding, 18th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2013), TuPM-2, Jul. 2, 2013, Kyoto, Japan.
 19. T. Shimotori, K. Maekita, R. Gyobu, T. Maruyama, and K. Iiyama: Optimizing interdigital electrode spacing of CMOS APD for 10 Gb/s application, 18th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2013), MM1-3, Jul. 1, 2013, Kyoto, Japan.
 20. 前北和晃, 丸山武男, 飯山宏一: 「GaAs 基板上メタモルフィック InAlAs による MSM 型光検出器の GHz 応答」, レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2013-20, 2013年6月21日, 東京.
 21. H. Miyakawa, T. Hiratani, T. Maruyama, and K. Iiyama: Fabrication and Characterization of Amorphous Polyethylene Terephthalate Optical Waveguide, 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2013), P1-12, Jun. 18, 2013, Ishikawa, Japan."
 22. K. Maekita, T. Maruyama, K. Iiyama, and T. Suzuki: Metamorphic InAlAs MSM Photodetector on GaAs Substrate, 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2013), P1-37, Jun. 18, 2013, Ishikawa, Japan.
 23. 霜鳥敏之, 刑部僚一, 丸山武男, 飯山宏一: 「標準 CMOS プロセスで作製したアバランシェ光検出器の高速応答特性」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2013-16, 2013年5月17日, 金沢.
 24. 前北和晃, 丸山武男, 飯山宏一: 「BCB 貼付け法による Si 基板上 MSM 型 InGaAs 光検出器の GHz 応答」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2013-15, 2013年5月17日, 金沢.
 25. 森野久康, 丸山武男, 飯山宏一: 「Si/SiO2 曲線方向性結合器を用いた結合特性の波長依存性低減」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 27p-PA2-13, 2013年3月27日, 神奈川.
 26. T. Shimotori, K. Maekita, T. Maruyama, and K. Iiyama: High-speed Si CMOS APD fabricated by standard CMOS process for 10 Gb/s application, 2nd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2012), P-11, Dec. 4, 2012, Tokyo, Japan."
 27. 木村洋介, 吉本大祐, 丸山武男, 飯山宏一: 「FMCW センシングシステムにおける測距精度に関する検討」, 平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 16p-D-9, 2012年11月16日, 富山.

28. 宮川治誉, 丸山武男, 飯山宏一: 「ドライエッチングによる非結晶性 PET 光導波路の作製」, 平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 16p-D-7, 2012 年 11 月 16 日, 富山.
29. 寺澤佳大, 北村広美, 丸山武男, 飯山宏一: 「Nd 錯体を添加した非結晶性 PET 光導波路」, 平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 16p-D-4, 2012 年 11 月 16 日, 富山.
30. 霜鳥敏之, 前北和晃, 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS プロセスを用いて作製した Si APD の 7GHz 応答」, 平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 16p-D-1, 2012 年 11 月 16 日, 富山.
31. T. Maruyama, S. Ebuchi, M. Matsumoto, and K. Iiyama: PZT Optical Waveguide on Silicon Substrate, 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2012), PS-7-25, Sep. 26, 2012, Kyoto, Japan.
32. 松本真輝, 丸山武男, 飯山宏一: 「Si 基板上 PZT 光導波路の作製と伝搬特性」, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12p-C5-7, 2012 年 9 月 12 日, 愛媛.
33. 森野久康, 丸山武男, 飯山宏一: 「スロット導波路による Si 吸収波長帯での伝搬解析」, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12a-PA3-9, 2012 年 9 月 12 日, 愛媛.
34. M. Matsumoto, S. Ebuchi, T. Maruyama, and K. Iiyama: Ferroelectric Properties of PZT and PLZT Films on Si Substrate with ITO Buffer Layer, IEEE 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP 2012), ThE4, Aug. 30, 2012, San Diego, USA.
35. H. Morino, T. Maruyama, and K. Iiyama: Propagation of Lossy Wave in Si Slot Waveguide, IEEE 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP 2012), ThE1, Aug. 30, 2012, San Diego, USA.
36. K. Maekita, T. Shimotori, T. Maruyama, and K. Iiyama: GHz response of Si photodiodes fabricated with 0.35-um BiCMOS technology, IEEE 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP 2012), ThP10, Aug. 30, 2012, San Diego, USA.
37. G. Li, Y. Hashimoto, S. Ebuchi, T. Maruyama, and K. Iiyama: High-efficiency Optical Coupling to Planar Photodiode using Metal Reflector loaded Waveguide Grating Coupler, 12th International Conference Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD 2012), TuB4, Aug. 28, 2012, Shanghai, China.
38. T. Shimotori, K. Maekita, T. Maruyama, and K. Iiyama: Characterization of APDs Fabricated by 0.18 um CMOS Process in Blue Wavelength Region, 17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2012), 5D1-3, Jul. 5, 2012, Busan, Korea."
39. 前北和晃, 霜鳥敏之, 丸山武男, 飯山宏一: 「0.35um BiCMOS プロセスで作製した Si フォトダイオードの GHz 応答」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2012-17, 2012 年 6 月 22 日, 東京.
40. 霜鳥敏之, 前北和晃, 丸山武男, 飯山宏一: 「CMOS プロセスで作製した正孔注入方式 APD の青色波長帯における特性評価」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE-2012-10, 2012 年 5 月 25 日, 福井.
41. 李根, 江淵真伍, 橋本康典, 丸山武男, 飯山宏一: 「垂直入射型 Si 光検出器と光導波路の集積化に向けた導波路型回折格子結合器の解析」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, LQE2012-2, 2012 年 5 月 25 日, 福井.
42. S. Ebuchi, M. Matsumoto, T. Maruyama, and K. Iiyama: Ferroelectric Properties of PZT Film on Si Substrate with ITO Buffer Layer, 2012 Material Research Society (MRS) Spring Meeting, M-5.4, Apr. 11, 2012, San Francisco, USA.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: スロット導波路及び光集積回路
 発明者: 丸山武男、飯山宏一、森野久康
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 2013-037996
 出願年月日: 2013 年 02 月 27 日
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:
 発明者:
 権利者:
 種類:
 番号:
 取得年月日:
 国内外の別:

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

丸山武男 (MARUYAMA TAKEO)
金沢大学・理工研究域・電子情報学系
准教授

研究者番号：60345379

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：