

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289103

研究課題名(和文) 表面プラズモンを用いた光・電子融合デバイス基盤技術の創製

研究課題名(英文) Development of plasmonic integrated circuits

研究代表者

福田 光男 (Fukuda, Mitsuo)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50378262

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)： ナノスケール領域で光(表面プラズモン)と電子の融合したデバイス集積のための技術開発に向け、表面プラズモンの伝播方向が制御可能な多重スリット付導波路、電気的には分離されているが表面プラズモンは伝播する導波路を実現した。さらに、MOSFETのゲート電極へ、これらの導波路を複数接続することにより、それぞれの信号でMOSFETが動作すること及び複数の表面プラズモンのビート信号でMOSFETが動作することを実験的に確認した。また、単一および多モード導波路のみからなる半加算器を作製し、その動作を実験的に確認した。本開発により、光デバイスと電子デバイスが融合した集積回路の可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)： Key components and techniques have been developed to construct plasmonic integrated circuits consisting of surface plasmon and electron devices on a silicon substrate. A metal waveguide having a trench structure was developed to obtain electrical isolation without any interruption of surface plasmon propagation. A metal waveguide with multiple slits was also developed to control the propagation direction of surface plasmon by changing the slit pitch. These waveguides were connected to the gate electrode of a MOSFET, and the multiple-signal or beat-signal operations of the MOSFET were experimentally confirmed. In addition, a half adder consisting of multiple single- and multi-mode waveguides was designed, and the performances were experimentally confirmed. These waveguides and components will be key factors for high-speed plasmonic integrated circuits merged with electronic components.

研究分野：フォトニクス

キーワード：表面プラズモン 光・電子集積回路 光回路 光デバイス 近接場光

1. 研究開始当初の背景

基盤研究((C)19560342)及び(B)22360142)により、近接場光を介した光周波数信号の伝達 (IEEE PTL, 2007及び2008)、表面プラズモンにより動作する金/シリコンショットキー型検出器 (APL, 2009)、金属ナノスリットを用いた表面プラズモン検出器と表面プラズモンを介した光周波数信号の伝送技術 (APL, 2011及び2012) }等を開発していた。さらに、表面プラズモン検出器をモノリシック集積したMOSFET (IEEE Photon. J, 2013)を開発し、シリコンに吸収されない1550nm帯の光を用いて、世界で初めて動作させた。

本研究では、これらの成果を背景に、金属配線による光信号の伝播と制御技術及びナノスケールでの電氣的分離技術を開発し、表面プラズモンデバイスとシリコン電子デバイスが高密度に集積された論理的に動作するフォトニック集積回路の基本ユニット創製を目指した。その際、集積デバイス内での信号のクロストーク防止のため、シリコンに透明な波長の光 (表面プラズモン) を使用、MOSプロセスで容易に作製できる単純な構造、伝送容量増大のための光周波数信号処理技術に重点を置いた。

2. 研究の目的

基盤研究 (C) 19560342 と基盤研究 (B)22360142で開発した表面プラズモンを用いた光・電子集積素子の要素技術を基本に、本研究ではナノスケール領域で光 (表面プラズモン) と電子の融合したデバイス集積のための技術 (金属配線による光信号制御技術と電氣的なデバイス分離技術)を開発する。さらに、光デバイスと電子デバイスがシリコン基板上にモノリシックに集積されて動作するフォトニック集積回路を創製し、論理的に動作するフォトニック集積回路の可能性を示す。

3. 研究の方法

(1)金属配線による光信号(表面プラズモン)の伝播制御技術の開発

伝搬光を表面プラズモンへ変換し、プロセスの簡単な金属配線を用いて、信号を制御する技術を開発する。そのため、表面プラズモンは常に金属表面を伝播する構造を基本に、電気信号に変換する必要のある部位でのみ、表面プラズモンを金属とシリコン界面へ導き、ショットキー障壁を介して、電気信号に変換する構造を開発する (図1)。

(2)集積回路内の電氣的な素子間分離技術 (表面プラズモンは結合)の開発

電子デバイスと表面プラズモンデバイスを結合するために金属配線を使用するが、各デバイスが電氣的に分離されていると、信号のクロストーク等が防止できる。そのため、ナノスケールで電氣的には分離されているが表面プラズモンの結合した構造 (局在表面プラズモンを利用したディスクが連な

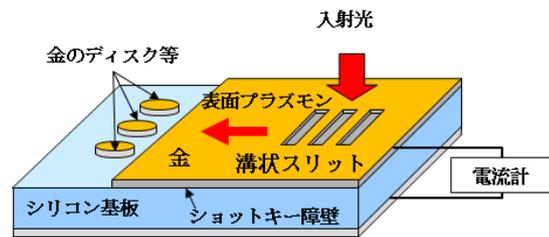


図1 金属配線による表面プラズモンの伝播制御技術の開発のために作製する表面プラズモン導波路及び検出器

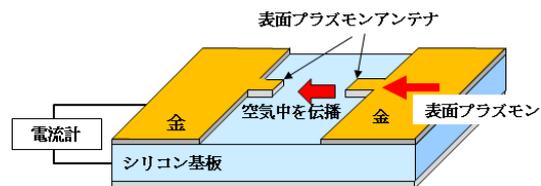


図2 電氣的に分離されたパターン上での表面プラズモン伝播検討のために作製する導波路

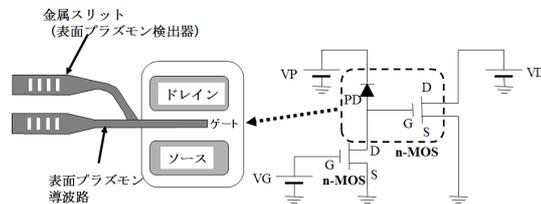


図3 表面プラズモンデバイス導波路+MOSFET集積回路 (複数の導波路をMOSFETのゲートへ接続)

った構造)等を作り付けた金属導波路の開発を行なう (図2)。

(3)表面プラズモン-電子融合集積回路の基本ユニットの開発

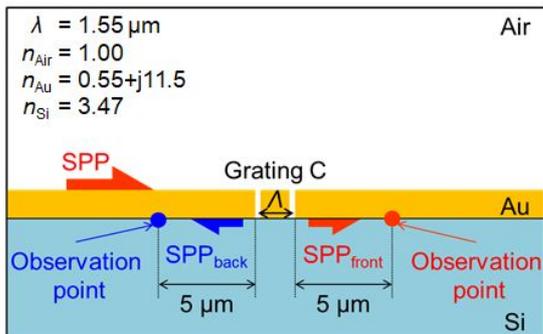
強度信号に加え、コヒーレント光 (およびそれから変換された表面プラズモン) の特徴である可干渉性を利用したフォトニクス集積回路の基本ユニットを創製し、演算回路 (例えば、2波長の入射があるときのみ、その差周波数でトランジスタが動作する等) の開発へ展開し (図3) 光と電子が融合して機能する基本ユニット (AND, NAND, OR回路等)を開発する。さらに、構造の単純な表面プラズモンを用いた論理回路の検討を行なう。

4. 研究成果

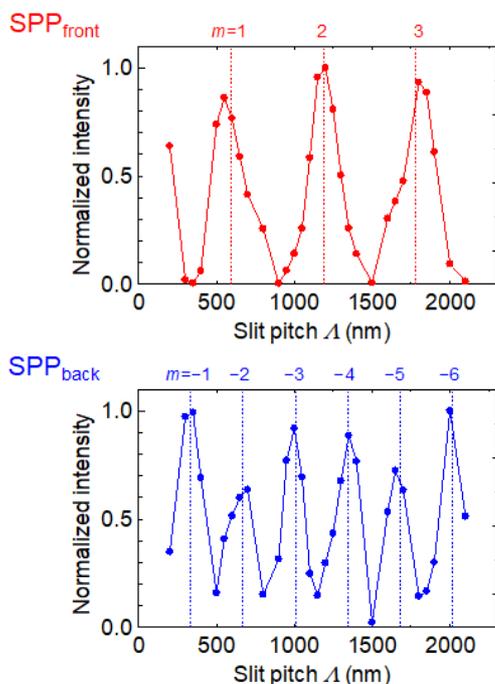
(1)金属配線による光信号(表面プラズモン)の伝播制御技術の開発

シリコン基板上へ、絶縁膜の挿入無しに、表面プラズモン導波路としての金属配線作製技術を開発した。金属導波路中に複数のスリットを導入し、当該スリットの周期を変化させることにより、金属表面を伝播してきた表面プラズモンを、効率よく金属とシリコン界面へ導き、ショットキー障壁を利用して電気信号へ変換できることを実験的に明ら

かにした。さらに、図4に示すように、当該スリットの幅や周期を制御することにより、金属とシリコン界面において表面プラズモンの伝播する方向を制御できることを、電磁界解析によるシミュレーションおよび実験で明らかにした。(主に M. Fukuhara, 他, Appl. Phys. Lett., 2014 および H. Sakai, 他, Solid-State Electron., 2016 等。)



(a) シミュレーションモデル



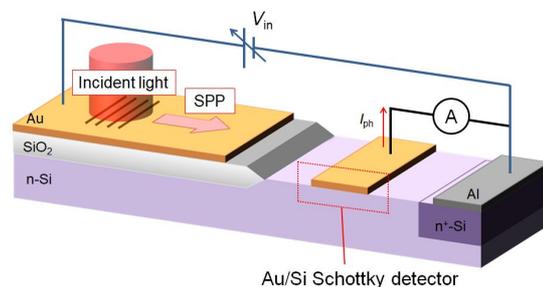
(b) 伝播方向のシミュレーション結果

図4 金属とシリコン界面において表面プラズモン (SPP) の伝播する方向 (SPP_{front} と SPP_{back}) のスリット周期依存性

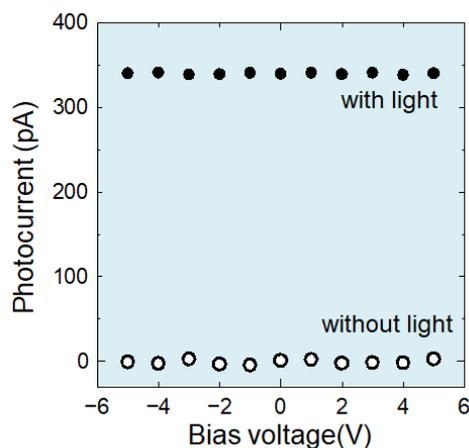
(2) 集積回路内の電気的な素子間分離技術 (表面プラズモンは結合) の開発

シリコン上に金属導波路を作製し、導波路中に数 μm の電気的な分離溝を設け、電気的には絶縁されているが表面プラズモンは伝播する導波路を作製した (図5)。さらに、電気的なバイアスが表面プラズモンの伝播に影響しないことを実験的に明らかにし、電子デバイスの金属配線を表面プラズモンの導波路として使用できる可能性を示した。(主

に M. Fukuhara, 他, J. Lightwave Technol., 2014 等。)



(a) 作製した電気的な分離溝を有する表面プラズモン導波路の概略図



(b) (a) に示した電気的に絶縁された導波路における表面プラズモン (SPP) の伝播実験結果 (印加電圧によらず SPP を発生させたときにのみ検出電極のショットキー障壁を介して電流が計測されている)

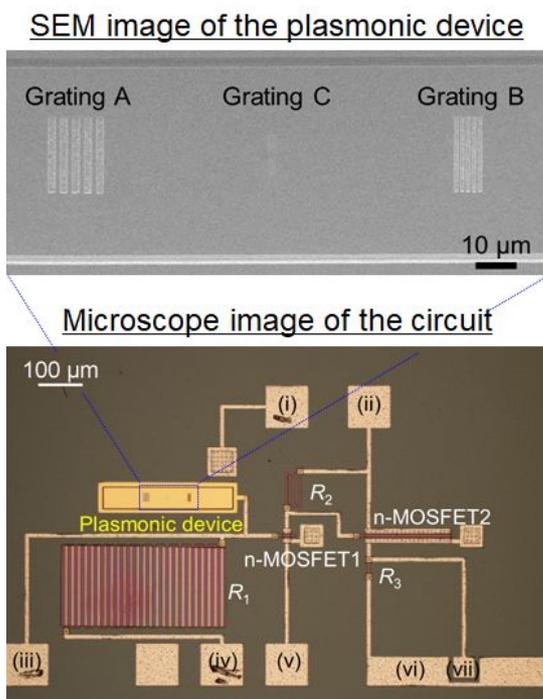
図5 電気的に分離された導波路 (a) を伝播する表面プラズモン (SPP) の実験結果 (b)

(3) 表面プラズモン-電子融合集積回路の基本ユニットの開発

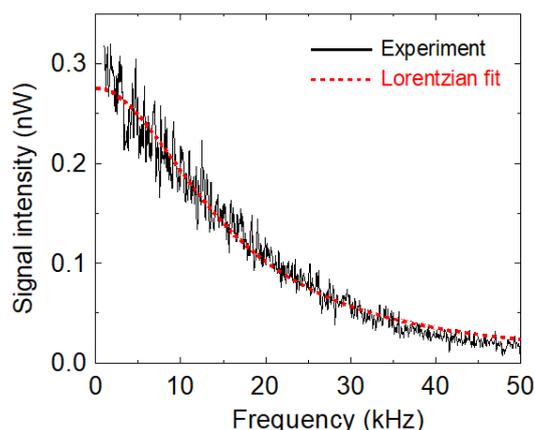
MOSFET のゲート電極に、既開発の表面プラズモン検出器を組み込み、複数の金属導波路を接続した表面プラズモン-電子デバイス融合回路を設計し作製した。複数の導波路を伝播した高コヒーレントな表面プラズモンがゲート電極で干渉し、それらのビート信号で MOSFET が動作することを確認した (図6)。さらに、強度変調された入射光に対しても、表面プラズモンを介して、MOSFET が動作可能であることを確認した。(主に T. Aihara, 他, J. Lightwave Technol., 2014 および H. Sakai, 他, Solid-State Electron., 2016 等。)

また、シリコン基板上に金属膜を作製し、その上に形成された SiO₂ 膜を単一および多モード導波路状にパターン化することにより、MOSFET 等の電子デバイスを用いない半加算器を開発し、その論理演算動作を確認した (図7)。本半加算器は干渉を用いて表面プラズモンの強度分布を空間的に制御すること

により演算をする構成であり、高速な演算が可能である。(主に M. Ota, 他, Scientific Reports, 2016 等。)



(a) 作製した 2 つの表面プラズモン導波路が接続された MOSFET (Grating A と Grating B へ異なる伝播光を入射し表面プラズモンを発生させ、Grating C でビート信号を電気信号へ変換し、MOSFET のゲート電極へ接続する構成)



(b) 2 つの導波路を別々に伝播して Grating C で合波することにより発生したビート信号で動作した MOSFET の電気出力信号 (2 つの表面プラズモンの波長を同一としたため、ビート信号のピークは 0 Hz で、遅延自己ホモダイナミクスを応用して計測)

図 6 複数の導波路を伝播した表面プラズモンがゲート電極で干渉しビート信号で MOSFET が動作することを確認したデバイス (a) と MOSFET からの電気信号出力 (b)

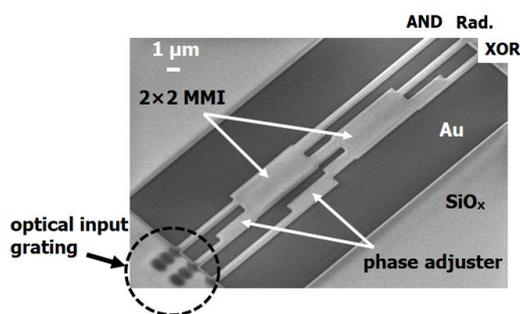


図 7 作製して論理演算動作を確認した半加算器の SEM 像 (MMI: 多モード干渉計 (多モード導波路) Rad. は干渉で不要となった (散乱モードとなった) 表面プラズモンを取出すポート)

(4) 成果のまとめ

ナノスケール領域で光 (表面プラズモン) と電子の融合したデバイス集積のための技術開発を行なった。その結果、当初の目的を達成するとともに、新たな表面プラズモン導波路のみからなる半加算器を開発し、その基本動作を実験的に確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

S. Okahisa, K. Nakayama, Y. Nakayama, Y. Ishii, M. Fukuda, Guiding Properties of 1.31- and 1.55-μm- Wavelength Surface Plasmon Polaritons on Striped Waveguides on Silicon and their Wavelength-Selective Detection, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 35, pp. 2702-2711, 2017. (査読有り)

A. Sumimura, M. Ota, K. Nakayama, M. Ito, Y. Ishii, M. Fukuda, Low-Return-Loss Plasmonic Multiplexer with Tapered Structure, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 28, pp. 2419-2422, 2016. (査読有り)

H. Sakai, S. Okahisa, Y. Nakayama, K. Nakayama, M. Fukuhara, Y. Kimura, Y. Ishii, M. Fukuda, Plasmonic and electronic device-based integrated circuits and their characteristics", Solid-State Electron., vol. 125, pp. 240-246, 2016. (査読あり)

M. Ota, A. Sumimura, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda, Plasmonic-multimode-interference-based logic circuit with simple phase adjustment, Scientific Reports, vol. 6, 24546, 2016. (査読有り)

M. Ota, M. Fukuhara, A. Sumimura, M. Ito, T. Aihara, Y. Ishii, M. Fukuda, Dielectric-loaded surface plasmon polariton crossing waveguides using multimode interference, Opt. Lett., vol.

40, pp. 2269- 2272, 2015. (査読有り)

T. Aihara, H. Sakai, A. Takeda, S. Okahisa, M. Fukuhara, M. Ota, Y. Ishii, M. Fukuda, Coherent plasmonic Interconnection in Silicon-based Electrical Circuit, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 33, pp. 2139-2145, 2014. (査読有り)

M. Fukuhara, M. Ota, A. Takeda, T. Aihara, H. Sakai, Y. Ishii, M. Fukuda, Surface- Plasmon Waveguides as Transmission Lines for Optical Signal and Electrical Bias, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 32, pp. 4490-4495, 2014. (査読有り)

M. Fukuhara, M. Ota, H. Sakai, T. Aihara, Y. Ishii, and M. Fukuda, Low-loss waveguiding and detecting structure for surface plasmon polaritons, Appl. Phys. Lett., vol. 104, 081111, 2014. (査読有り)

A. Takeda, T. Aihara, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda, Schottky-type surface plasmon detector with nano-slit grating using enhanced resonant optical transmission, J. of Appl. Phys., vol. 116, 084313, 2014. (査読有り)

その他 3 件

〔学会発表〕(計 50 件)

T. Furuki, M. Ota, Y. Ishii, M. Fukuda, Plasmonic time delay and switching using short-range surface plasmon polaritons on a bow-tied metallic waveguide, S.P1.11, European Materials Research Society 2017 Fall Meeting, Warsaw, Poland, Sept. 18-21, 2017. (査読有り)

T. Hirano, M. Ota, R. Watanabe, Y. Ishii, M. Fukuda, All-Plasmonic Halfadder using Tapered Waveguide-Based Mode Conversion and Multimode Interference, P-07-29, The 8th Int. Conf. Surface Plasmon Photonics (SPP8), Taipei, Taiwan, May 22-26, 2017. (査読あり)

M. Ota, A. Sumimura, T. Furuki, R. Watanabe, K. Nakayama, Y. Ishii, and M. Fukuda, Multimode- Interference-Based Phase Adjuster in Cascaded All-Plasmonic Logic Circuits, ThA1.1, pp. 787-788, IEEE Photonics Conference 2016 (IPC 2016), Hawaii, Oct. 2-7, 2016. (査読あり)

S. Okahisa, K. Nakayama, Y. Nakayama, Y. Ishii, and M. Fukuda, Guiding Properties of 1.31 and 1.55 μm wavelength

Surface Plasmon Polaritons and Wavelength- Selective Guiding, 11th IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC2016), Toulouse, France, Oct. 9-12, 2016. (査読有り)

A. Sumimura, K. Nakayama, M. Ota, Y. Ishii, and M. Fukuda, Surface Plasmon Multiplexer employing Multimode Interferometer, 11th IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC2016), Toulouse, France, Oct. 9-12, 2016. (査読有り)

M. Fukuda, H. Sakai, T. Mano, Y. Kimura, M. Ota, M. Fukuhara, T. Aihara, Y. Ishii, T. Ishiyama, Plasmonic and Electronic Device Integrated Circuits and Their Characteristics, 45th European Solid-State Devices Research Conf., Graz, Austria, Sept. 14-18, 2015. (査読有り)

M. Fukuhara, A. Takeda, T. Aihara, Y. Ishii, M. Fukuda, Optical Signal Transmission on Metal Plasmonic Waveguide with Electrical Bias Current, IEEE 15th Int. Conf. Nanotechnology, Rome, Italy, July 27-30, 2015. (査読有り)

T. Aihara, H. Sakai, A. Takeda, M. Fukuhara, M. Ota, Y. Kimura, Y. Ishii, M. Fukuda, Coherent signal operation of surface plasmon and electronic integrated circuit, (12B.3), 13th Int. conf., Near-Field Optics, Nanophotonics, Related Techniques, Salt Lake, USA, Aug. 31- Sep 4, 2014. (査読有り)

M. Fukuhara, T. Aihara, M. Ota, H. Sakai, Y. Kimura, Y. Ishii, M. Fukuda, Optical Signal Transmission through Plasmonic Waveguide under Applied Electrical Bias, MNA1.2, 2014 Int. Conf. Optical MEMS and Nanophotonics (OMN 2014), Glasgow, Scotland, Aug. 17-21, 2014. (査読有り)

その他 41 件

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 光信号の位相調整素子ならびにこれを利用する光信号入力ポート構造体および光論理回路

発明者: 太田雅、住村あさひ、福田光男

権利者: 豊橋技術科学大学学長

種類: 特許

番号: 特願 2015-170538

出願年月日: 2015 年 8 月 31 日

国内外の別: 国内

名称：光論理回路
発明者：福田光男、太田雅、福原誠史
権利者：豊橋技術科学大学学長
種類：特許
番号：特願 2014-188571
出願年月日：2014 年 9 月 17 日
国内外の別： 国内

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.photon.ee.tut.ac.jp/>

6．研究組織

(1)研究代表者

福田光男 (Fukuda, Mitsuo)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・
教授
研究者番号：50378262

(2) 研究分担者

石井佑弥 (Ishii, Yuya)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・
助教
研究者番号：30633440

(3) 研究分担者

石山 武 (Ishiyama, Takeshi)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・
准教授
研究者番号：40314653