

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14253

研究課題名(和文) 表面プラズモン金属導波路ネットワークの開発

研究課題名(英文) Development of plasmonic metal-waveguide networks

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、表面プラズモンを信号キャリアとする金属配線網の実現である。本目的に向けて、構造が単純で損失の小さな表面プラズモン金属導波路構造とその作製技術を確立した。さらに、本導波路構造を有する単一モード金属導波路の交差部へ多モード干渉計(MMI)を導入することにより、クロストークの低減された表面プラズモン金属導波路の平面交差配線を実現した。本交差構造を表面プラズモン合分波器へ展開し、1.31および1.55 μm の波長帯で動作する構造の極めて単純な合波器と分波器の可能性を実験的に示すことができた。これらの技術開発により、表面プラズモン金属配線網の基礎を確立できた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop plasmonic metal wiring networks merged with electronic ICs on a silicon substrate. Some low-loss plasmonic waveguides was designed and fabricated, and the low-loss waveguide structure was clarified by comparing their characteristics. The cross-wiring configuration of the two low-loss waveguides was designed by introducing two multimode interferometers (multimode waveguide having the same structure as the single mode waveguide except for the width) to the cross point, and its low crosstalk characteristics were experimentally confirmed. These wiring structures were expanded to plasmonic multiplexer and demultiplexer operating at 1.31- and 1.55- μm -wavelength bands, and their primitive performances were experimentally confirmed. From these results, it can be said that a primitive configuration of plasmonic metal wiring networks were developed for plasmonic integrated circuits.

研究分野：フォトンクス

キーワード：表面プラズモン 光回路 光配線 光デバイス

1. 研究開始当初の背景

表面プラズモン(金属表面の光電界と結合した電子の疎密波)を用いたデバイスは世界中の多くの研究機関で盛んに研究されているが、それらのデバイスのほとんどが単体のデバイスである。表面プラズモン導波路についても、単一の金属導波路についての報告がほとんどであり、実用上金属配線ネットワークは極めて重要であるにもかかわらず、世界的に未開拓のまま残された分野の一つであった。そこで、本研究では、2次元金属配線ネットワーク実現のために、表面プラズモン導波路の平面交差配線技術の確立、さらに当該技術を合分波器開発へ展開することに挑戦した。これらの導波路を融合することができれば、表面プラズモンをキャリアとした光速(分散の影響あり)信号の送受信が金属ネットワーク上で実現できる。

2. 研究の目的

未だ実現されていない、表面プラズモンをキャリアとして信号を送受信するための平面金属配線ネットワークの実現に挑戦する。そのため、クロストークの小さな表面プラズモン金属配線導波路の交差技術や合分波技術の開発を行なう。さらに、平面金属配線ネットワークを用いると、複数の電気信号と表面プラズモン信号が当該ネットワーク上に同時に存在できる可能性があり、表面プラズモンデバイス(交差配線金属導波路、合分波器および検出器)と MOSFET 等の電子デバイスが接続された金属配線ネットワークを作製し、その複数信号による動作を実証する。

3. 研究の方法

(1) 表面プラズモン導波路交差配線技術の確立

表面プラズモン金属配線が同一平面上で交差する点に、同一金属で形成する2つの多モード導波路からなる干渉計(MMI)を配置し、時間領域差分法(FDTD法)を用いて、配線の交差角とクロストークの関係を求め、最適な交差配線構造を電磁界解析によるシミュレーション及び実験により求める(図1)。さらに、単純な構造で低損失な表面プラズモン導波路構造を明らかにする。

(2) 表面プラズモン合分波器の開発

上記の交差配線技術を基本に、MMIによる合分波器の構造設計へ展開する。これらの設計した合分波器を含む表面プラズモンの導波構造をシリコン基板上へ作製し、動作することを実験的に確認する(図2)。

(3) 表面プラズモンネットワークの検討

表面プラズモン金属配線の平面ネットワークにより、表面プラズモン発生部、合分波器および MOSFET 等を同一シリコン基板上へ作製し(図3)、ネットワークとしての動作確認を行ない、当該ネットワークの有効性を明確にする。

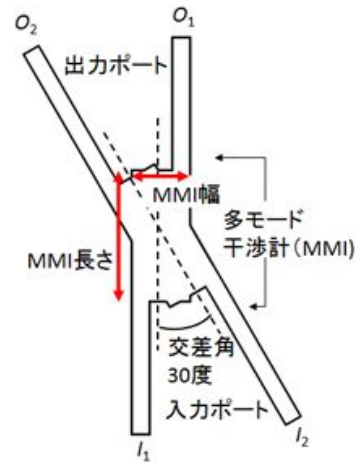


図1 検討する表面プラズモン導波路の交差配線の基本構造(交差角が30度の場合)

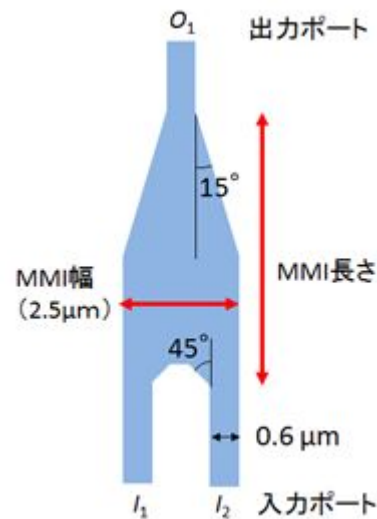


図2 検討する合分波器の例(MMI:多モード干渉計にテーパ構造を導入し、反射損失を低減している)

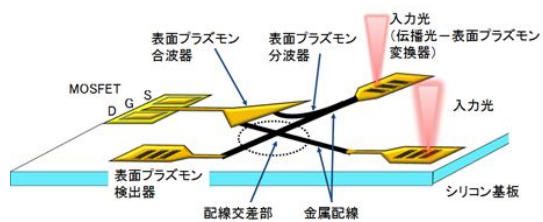


図3 検討する表面プラズモンネットワークの一例

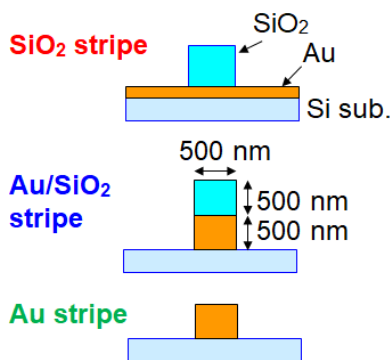
4. 研究成果

(1) 表面プラズモン導波路交差配線技術の確立

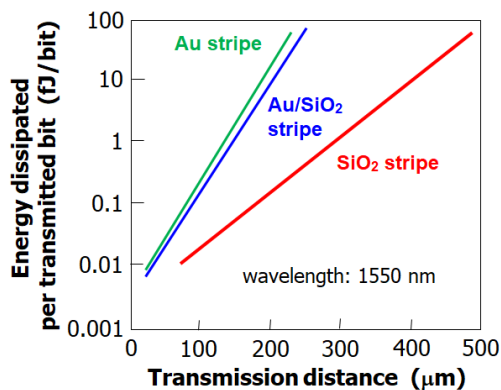
3種類の構造(Au膜上のSiO₂ストライプ形導波路、Si基板上的SiO₂/Auストライプ形導波路、およびSi基板上的Auストライプ形

導波路)を有する表面プラズモン導波路について、表面プラズモンの伝播特性を明らかにし、Au膜上のSiO₂ストライプ形導波路が最も低損失であることを求めた(図4)。さらに、同サイズの電気配線と比較し、伝播長が数百μm以下であれば、電気配線より低損失であることを明らかにした。これにより、表面プラズモン導波路デバイスの基本構造の設計及び製作技術を確立できた。

表面プラズモンの平面交差配線に関し、単一モード導波路の交差部へMMIを導入することにより、クロストークが低減できることを本研究開始前に確認していた。本技術に関し、FDTD法による詳細な設計と金属薄膜上に導波路とMMIをSiO₂膜のパターニングのみで作製したデバイスにより、数十度以下の交差角でもクロストークが10dB程度確保できることを近接場光顕微鏡による実測で確認した(図5)。



(a) 伝播特性と損失を検討した表面プラズモン導波路



(b) 3種類の導波路の伝播距離と1ビット当たりの損失(ビットエラーレートを 10^{-9} とし、デューティ比:50%、ショット雑音限界で計算、導波路の損失は電磁界解析により導出)

図4 構造が単純な表面プラズモン導波路と伝送損失のシミュレーション結果

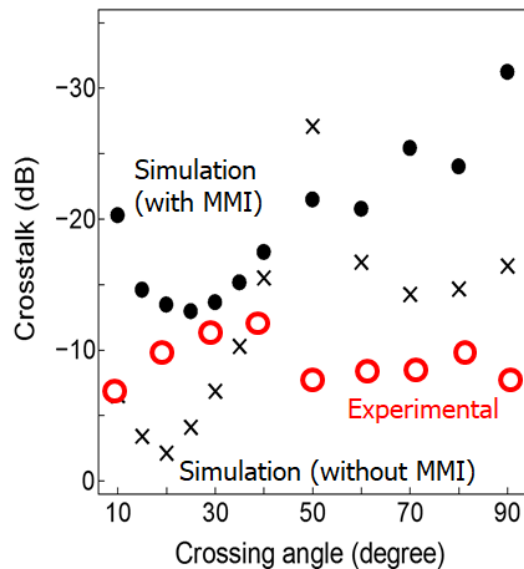
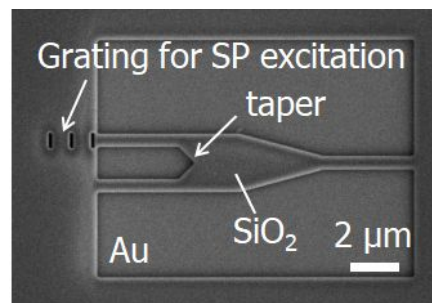


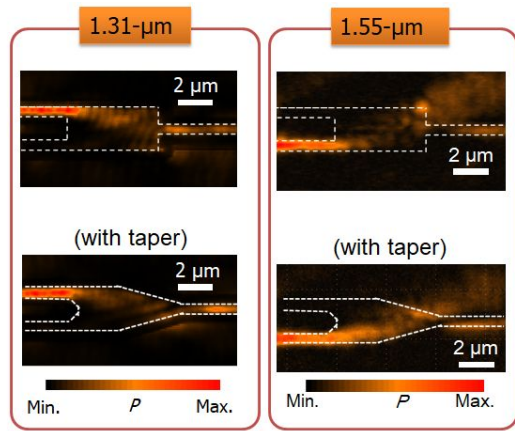
図5 図1に示した交差配線のクロストークの交差角度依存性

(2) 表面プラズモン合分波器の開発

上記項目で記載した低損失な導波路技術を基本に、金属薄膜上にSiO₂膜のパターニングのみで形成される単一モードの表面プラズモン導波路とMMIからなる1.31及び1.55μm帯の波長多重回路の合分波器を電磁界解析ツールを用いて設計した。その際、合波器には、素子内部で発生する反射低減のために、テーパ構造を導入した。分波器については、出力端子間隔を大きくできる構造やテーパ付構造を検討し、シミュレーションにより基本動作が得られることを確認した。これらの設計に基づき合分波器を作製し、近接場光顕微鏡を用いた実測により、両波長帯共に合波器の挿入損失が5dB以下、分波器の挿入損失が9dB以下と求めた。さらに、各出力端子での各波長のクロストークは数dB以下と測定された。これらは、試作段階での値であり、さらなる損失低減や波長分離が見込まれるが、1.31及び1.55μm帯の表面プラズモンの合分波の基本動作を確認することができた(図6および図7)。



(a) 作製した合波器のSEM写真(シリコン上に蒸着されたAu膜上にSiO₂膜を堆積し、SiO₂膜のみをパターニングして作製)



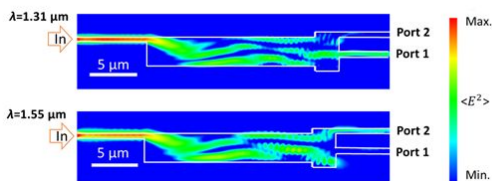
(b) 反射抑制のためのテーパの有無に対応した合波器内の表面プラズモン強度分布（走査型近接場光顕微鏡（SNOM）で測定）

図6 作製した合波器の例(a)と合波器内の表面プラズモン強度分布

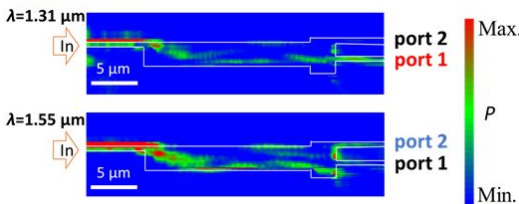


(a) 作製した分波器の SEM 写真（シリコン上に蒸着された Au 膜上に SiO₂ 膜を堆積し、SiO₂ 膜のみをパターンニングして作製）

Simulation by FDTD method



SNOM image



(b) 作製した分波器内の表面プラズモン強度分布のシミュレーション結果と SNOM による測定結果

図7 作製した分波器の例(a)と分波器内の表面プラズモン強度分布

(3) 表面プラズモンネットワークの検討

(2)の項で記述した、基本動作が実験的に確認された、1.31 および 1.55 μm 帯の表面プラズモンの波長多重システム用合分波器

をネットワークへ展開するための接続技術の検討を行った。合波器と分波器は、金属表面上にストライプ導波路状に形成された SiO₂ 導波路（(1)の項で記述）により、容易に接続できること、CMOS 互換プロセスにより合分波器と導波路を一体形成可能であることを実験的に明らかにした。これらの検討により、CMOS 互換プロセスを用いて一体成形可能なナノ/マイクロスケールの表面プラズモン回路において、合波器と分波器による波長多重ネットワーク構成の基礎を確立できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

K. Nakayama, Y. Tonooka, M. Ota, Y. Ishii, M. Fukuda, Passive Plasmonic Demultiplexers Using Multimode Interference, IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 36, pp.1979-1984, 2018. (査読有り)

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)

〔学会発表〕(計 9 件)

外岡悠汰, 井上智陽, 太田雅, 石井佑弥, 福田光男, 信号伝送速度とエネルギー損失からみたプラズモニック配線と電気配線の比較, OPE2017-90, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 宮古島市, 沖縄県, 2017年12月7日. 信学技報, vol.117, No.339, OPE2017-91, pp. 5-8, 2017.

中山昂太郎, 住村あさひ, 外岡悠汰, 太田雅, 石井佑弥, 福田光男, 表面プラズモンポラリトンを用いた合分波器および信号反転器の開発, SDM2017-16, 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 名古屋市, 愛知県, 2017年5月25日. 信学技報, vol. 117, No. 58, ED2017-22, pp. 39-44, 2017.

K. Nakayama, A. Sumimura, M. Ota, R. Watanabe, T. Furuki, Y. Ishii, M. Fukuda,

Asymmetric Bow-tied Plasmonic Demultiplexer Using Multimode Interference, P28, the 8th Int. Conf. Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META'17), Incheon, Seoul, Jul. 25-28, 2017. (査読有り)

Y. Tonooka, A. Sumimura, K. Nakayama, R. Watanabe, M. Ota, Y. Ishii, M. Fukuda, Plasmonic Signal Inverter using Multimode Interferometer, P-07-26), The 8th Int. Conf. Surface Plasmon Photonics (SPP8), Taipei, Taiwan, May 22-26, 2017. (査読有り)

M. Ota and M. Fukuda: "Multimode interference devices comprising dielectric-stripe-based-integrated plasmonic circuits, A14, EMN Optoelectronics Meeting 2017, Victoria, Canada, Apr. 17-21, 2017. (招待講演)

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

S. Okahisa, K. Nakayama, Y. Nakayama, Y. Ishii, 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)

K. Nakayama, A. Sumimura, M. Ota, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda, Plasmonic Demultiplexer Based on Multimode Interference Effects, p.213, The 14th Int. Conf. Near-Field Optics, Nanophotonics and Related Techniques (NFO-14), Hamamatsu, Japan, Sept. 4-8, 2016. (査読有り)

Y. Nakayama, S. Okahisa, Y. Ishii, M. Fukuda, Behavior of surface plasmon polaritons on multi-plasmonic waveguides, pp.283-284, 2016 Int.Conf.Optical MEMS and Nanophotonics, Singapore, Jul. 31-Aug. 4. 2016. (査読有り)

〔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