

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 30 日現在

機関番号：13904

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630147

研究課題名(和文)電流による表面プラズモン変調器の創製

研究課題名(英文)Development of surface plasmon modulator using current

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：表面プラズモンを用いた光・電子融合デバイスの実現に向け、表面プラズモン導波路及び変調器の開発を行なった。変調器構造の開発を通して、低損失で任意の点で表面プラズモンを光電流へ変換できる構造を開発した。表面プラズモン周波数の電流による変調については、周波数の変化傾向が見えつつあるが、未だ測定誤差が大きく、確証に至っていない(測定系の低雑音化などを継続検討中である)。これらの研究を通して、電気バイアスされた金属配線を表面プラズモン導波路として用いることが可能であることを示し、表面プラズモンで動作する電界効果トランジスタを実現する際の、導波路開発に寄与した。

研究成果の概要(英文)：The surface plasmon waveguides and modulators have been developed for the application to opto-electronic integrated circuits operated with surface plasmons. Some surface plasmon waveguides, such as a low-loss waveguide with a photo-detection mechanism, have been developed in this study. A feasibility of current modulation of surface plasmons is still vague because the noise and long-term mechanical stability in the measurement system is not so high. Based on the results obtained in this study, it was confirmed that the metal wires used for electric bias in electronic devices are simultaneously applicable to the waveguide of surface plasmons in integrated circuits.

研究分野：表面プラズモンデバイスを中心としたフォトニクス

キーワード：表面プラズモン 導波路 光回路 光変調

1. 研究開始当初の背景

今後益々増大する情報量の処理に対応するためのシステムのキーデバイスの一つに光電子集積回路(OEIC)がある。しかし、OEICは、伝播する光を用いているため、光デバイスのサイズが大きいため、集積度を上げることができず、その集積度は電子デバイス集積回路と比較して、数桁小さな状況であった。これらの背景の下に、各所で高密度集積を可能とする表面プラズモン(光と結合した金属表面の電子の疎密波)を用いた光・電子融合素子の開発が盛んに行われるようになってきている。しかし、それらの表面プラズモンデバイスは従来の光デバイスの伝播光を表面プラズモンに置き換えたに過ぎず、デバイスの縮小化は難しい状況であった。

そこで本研究では、光・電子融合素子へ導入可能なマイクロスケールの表面プラズモン導波路付き周波数変調器の開発を目指し、その可能性について実験・検討した。

2. 研究の目的

表面プラズモンの電流による周波数変調技術(金属導波路を介した電流による光の変調)を創製し、光の変調器等を用いずに、表面プラズモンの周波数を電気的に変調できるデバイスを開発する。さらに、本技術を用いた変調器の最適な構造を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は平成25年度と26年度の2年間で、以下の3点について実施した。

(1) 電気的変調構造を作りつけた表面プラズモン導波路の設計と作製

作製するデバイス構造の概念を図1に示す。石英基板またはガラス基板上に金の薄膜を形成し、当該薄膜上の一部にナノスリットを作製する。本スリットを用いて入射光(狭スペクトル発振線幅のレーザー光)を表面プラズモンへ変換し、金属表面を表面プラズモンとして伝播できる構造を作製する。また、表面プラズモンを伝播光に再変換し、周波数変調されているか否かを計測するための溝状のスリットを金表面に作り付ける。さらに、当該金属薄膜は電流路としても用いる必要があるため、金属薄膜両端を直流または交流電源に接続できる構造とする。ここで、当該金属薄膜中の電流密度が表面プラズモンへ及ぼす影響を検討するために、電流密度を高くする観点からも金属薄膜の構造を検討する。

(2) 高感度な光ヘテロダイン検出系のセットアップ

本系のセットアップが本研究の成否の鍵である。図2に光ヘテロダイン検出系の概念図を示す。光源には狭スペクトル線幅(500

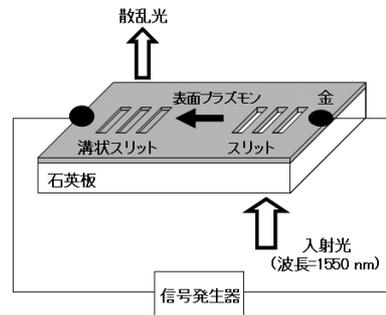


図1 作製するデバイス構造の概念図

kHz程度以下)のレーザー光源を用いて、わずかな周波数シフトも光源のスペクトル幅に埋もれてしまうことなく、検出できる構成とする。また、検出できる光の強度は非常に微弱であることが予測され、ヘテロダイン検波後にスペクトルの裾の領域も観察できるように、光ファイバ増幅器(20 dB以上)の使用が必要になる。図2に概念図として示した系は、光ファイバ増幅器で増幅された信号光をファイバカプラで局発光と結合した後、光検出器で電気信号へ変換し、RFスペクトラムアナライザで信号光と局発光の差周波数にピークを持つビートスペクトルとして観察する構成となっている。本検出系のセットアップは、表面プラズモンから変換した伝播光の光ヘテロダイン検波実験結果を見ながら雑音等を減少させて最適化する。その際、金属薄膜に電流を流すために用いる電源は直流電源または低い周波数の交流電源とし、CR時定数等の影響を受けずに金属中を電流が流れる条件とする。

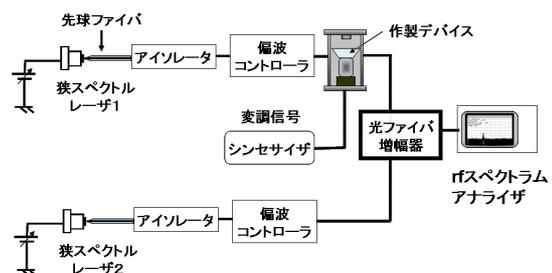


図2 光ヘテロダイン検波系のブロック図

(3) 電気バイアスのある金属導波路上における表面プラズモンのコヒーレンシーの検討

上述した測定系と作製したデバイスを用いて、電流が流れている金属導波路の表面プラズモンの伝播特性をコヒーレンシーの側面から検討する。そのため、光ヘテロダイン法を用いて、表面プラズモンのビートスペクトルを観測し、その形状と電流(あるいは電圧)の相関について検討する。

4. 研究成果

本研究の成果を以下に示す。また、これらの研究成果は次項に示す発表論文等で積極的に公表した。

(1) 電気バイアスによる表面プラズモン周波数変調器の基本構造設計と作製

図1に示した構造を基本に、波長1550 nm帯の光を前提として、入射光-表面プラズモン変換のためのスリットおよび表面プラズモンを散乱するための溝状スリットの構造を変換効率が最大となるように、金属膜厚、スリット幅、スリットピッチ、スリット数を設計した。さらに、電圧を印加するための電極（プローブを接触するための電極）を作り付け、外部光を入射して表面プラズモンへ変換するスリットアレイと表面プラズモンを散乱して受講するための金属溝アレイ間へ電圧印加が可能な図3に示すデバイスを作製した。

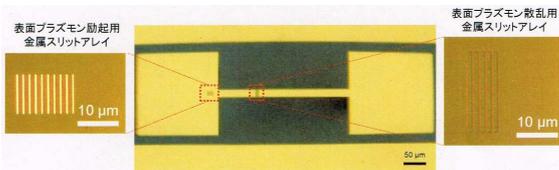


図3 作製したデバイス

(2) 高感度な光ヘテロダイン検出系のセットアップ

図2に示した構成を基本に、除振台の上に、光学系を組み立てた。組み上げた測定系のデバイスをセットする部分の基本構造を図4に示す。本測定には、数μmの精度での光の入射あるいは散乱光のファイバへの結合等が必要になるため、測定系の空間的安定性を確保する必要があった。そのため、光学系の固定および配線さらには空調に至るまで検討しつつ、組み上げた。

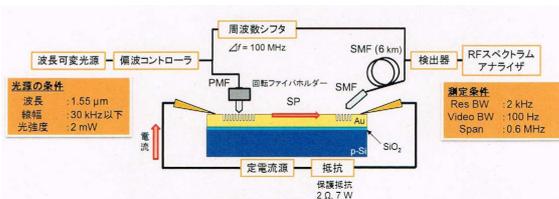


図4 組み上げた測定系の測定デバイス部分の配置図

(3) 電気バイアスのある金属導波路上における表面プラズモンのコヒーレンシーの検討

図5に、電気的バイアスをせずに、図4の測定系を用いて測定した表面プラズモンのビートスペクトル（厳密には、伝播光から変換された表面プラズモンを、電流を流さずに金表面に沿って伝播させ、さらにスリット溝で散乱して伝播光へ変換し、光ファイバで取込

んで、光ヘテロダイン法により測定したスペクトル)を示す。光源にはスペクトル線幅の極めて狭い(数十kHz以下)ものを用いた。図5より分かるように、ビートスペクトルの中心周波数は100 MHzであり、極めて狭いスペクトル線幅で実験ができていることが分かる。

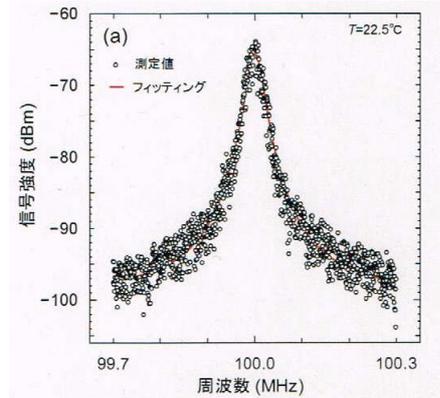


図5 光ヘテロダイン法により測定したビートスペクトル

本ビートスペクトルの測定を、表面プラズモン導波路に電流を流しながら行ない、その変化を測定した。その結果、電流密度で数MA/cm²ではピーク周波数および半値全幅とも変化しない(変化がエラーバー内)ことが分かった。(当初の提案モデルでは、電子流によりビートスペクトルのピーク周波数がわずかに変化することが推測された。実験でもその傾向が観察されている可能性があったが、電流量を大きくすると導波路形状が変形してしまい、高電流密度で測定することができず、厳密な確認には至っていない。そのため、測定系の改良による測定データの変動の縮小と導波路の大電流化について検討中である。)

一方、通常の電子デバイスの動作条件下では、表面プラズモンのコヒーレンシーはほとんど変化しないことが明らかになった。これは、電子デバイスの金属配線を表面プラズモン導波路として用いることが可能であることを示しており、表面プラズモンを用いた電子デバイスの高密度なインターコネクションに使用できることが分かった。そこで、電子デバイスの配線を表面プラズモンへ利用した幾つかの導波路構造について提案した。その一例を図6に示す。図6は電圧がバイアスされた金属表面を伝播した表面プラズモンの一部が、任意の位置に設けたスリットにより金属/半導体界面へ導かれ、その界面に形成されているショットキー障壁により光電流へ変換される導波路の例である。

これらの結果より、本研究の当初の目標は、その可能性の確認ができつつあるものの未だ達成されていない(継続確認中)が、電子デバイスの金属配線を表面プラズモンデバ

イスとして用いることができることを明らかにし、新規な光・電子融合デバイス開発の基礎を築くことができた。

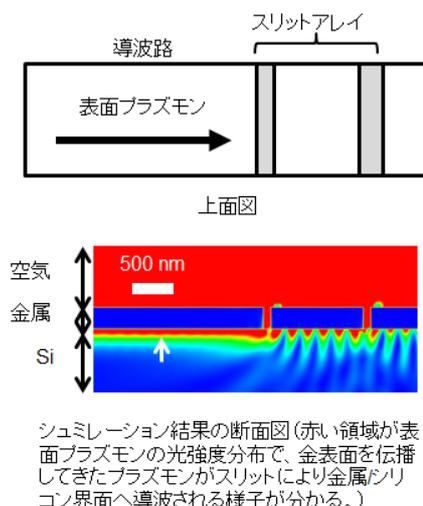


図6 検出機能の付加された表面プラズモン導波路

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件)

- (1) M. Fukuhara, M. Ota, H. Sakai, T. Aihara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Low-loss waveguiding and detecting structure for surface plasmon polaritons", *Applied Physics Letters*, 査読有, vol. 104, 081111, 2014.
- (2) A. Takeda, T. Aihara, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Schottky-type surface plasmon detector with nano-slit grating using enhanced resonant optical transmission", *Journal of Applied Physics*, 査読有, 116, 084313, 2014.
- (3) 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 Journal of Lightwave Technology*, 査読有, 32, pp. 3888-3893, 2014.
- (4) T. Aihara, A. Takeda, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Metal-oxide-semiconductor field-effect transistors operated by surface plasmon polaritons", *Proc. SPIE*, 査読有, vol. 8923, pp. 89234F-1-89234F-6, 2013.
- (5) A. Takeda, T. Aihara, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Sensitivity improvement of Schottky-type plasmonic detector", *Proc. SPIE*, 査読有, vol. 8923, pp. 89234G-1-89234G-6, 2013.

[学会発表](計 18件)

- (1) 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 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN 2014), University of Strathlyde, Glasgow, Scotland, August 17-21, 2014.
- (2) H. Sakai, T. Aihara, M. Fukuhara, M. Ota, Y. Kimura, Y. Ishii, M. Fukuda: "Integration of Plasmonic Device with Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors" (WA-P41), 2014 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN 2014), University of Strathlyde, Glasgow, Scotland, August 17-21, 2014.
- (3) 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 International conference of Near-Field Optics, Nanophotonics, Related Techniques, Salt Lake, USA, Aug 31- Sep 4, 2014.
- (4) M. Ota, M. Fukuhara, H. Sakai, Y. Kimura, T. Aihara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Surface plasmon polariton diffraction structure to combine a low-loss waveguide and a Schottky-type detector" (P2.92), 13th International conference of Near-Field Optics, Nanophotonics, Related Techniques, Salt Lake, USA, Aug 31- Sep 4, 2014.
- (5) Y. Kimura, T. Aihara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Directional excitation of surface plasmons using a plasmonic crystal" (77), 2014 Fourth International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2014), Taipei, Taiwan, November 19 - 21, 2014.
- (6) 武田 愛弓, 相原 卓磨, 福原 誠史, 石井 佑弥, 福田 光男: "ナノスリットを有するショットキー型表面プラズモン検出器の感度向上", 2014年 電気学会 マイクロマシン・センサシステム研究会, 東京大学 生産技術研究所, 東京都, 2014年5月27日~28日, MSS-144-009.
- (7) 太田 雅, 福原 誠史, 酒井 宏基, 相原 卓磨, 石井 佑弥, 福田 光男: "検出器構造を有する低損失表面プラズモン導波路", 2014年 電気学会 マイクロマシン・センサシステム研究会, 東京都, 2014年5月27日~28日, MSS-144-009.

ム研究会, 東京大学 生産技術研究所, 東京都, 2014年5月27日~28日, MSS-144-010.

(8) 酒井 宏基, 相原 卓磨, 武田 愛弓, 福原 誠史, 太田 雅, 木村 優, 石井 佑弥, 福田 光男: "導波路を伝搬した表面プラズモン信号によるMOSFETの直流および交流動作", 電子情報通信学会(電子デバイス研究会), 名古屋大学, 名古屋市, 2014年5月28日~29日, Vol. 114, 56, pp. 51-54.

(9) 福原 誠史, 太田 雅, 相原 卓磨, 酒井 宏基, 木村 優, 武田愛弓, 石井 佑弥, 福田 光男: "表面プラズモン導波路の電気的分離と光信号伝達の検討", 電子情報通信学会(ソサイエティ大会), 徳島大学, 徳島市, 2014年9月23日~26日, エレクトロニクス講演論文集 1, C-3-12, p.109.

(10) 太田雅, 福原誠史, 住村あさひ, 伊藤基, 相原卓磨, 石井佑弥, 福田光男: "多モード干渉を利用した表面プラズモンポラリトン交差導波路"(12a-A10-11), 2015年 第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 神奈川県, 2015年3月11-14日.

(11) 酒井宏基, 岡久真也, 相原卓磨, 福原誠史, 石井佑弥, 福田光男: "表面プラズモンを介した光ビート信号による電子回路の動作"(13a-A12-1), 2015年 第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 神奈川県, 2015年3月11-14日.

(12) M. Fukuda, T. Aihara, M. Fukuhara, A. Takeda, Y. Ishii, T. Ishiyama: "Devices and materials for nano-scale optical frequency signal transmission using surface plasmon", E-MRS 2013 Spring Meeting, Congress Center - Strasbourg, France, 27-31 May 2013.

(13) A. Takeda, T. Aihara, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda: "OPTIMAL DESIGN OF PHOTODETECTOR WITH MULTI-SLIT GRATING", IEEE Optical MEMS & Nanophotonics Conference 2013, Kanazawa, Japan, August 18-22, 2013.

(14) A. Takeda, T. Aihara, M. Fukuhara, Y. Ishii, and M. Fukuda: "POLARIZATION-INDEPENDENT PHOTODETECTOR WITH RING-TYPE GRATING", IEEE Optical MEMS & Nanophotonics Conference 2013, Kanazawa, Japan, August 18-22, 2013.

(15) T. Aihara, A. Takeda, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Plasmonic Signal Amplification by Monolithically Integrated Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors", IEEE Photonics Conference 2013, Bellevue, Washington, 8-12 September, 2013.

(16) T. Aihara, A. Takeda, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Metal-oxide-semiconductor field-effect transistors operated by surface plasmon polaritons" SPIE Micro+nano Materials, Devices, and Applications 2013, RMIT University, Melbourne, Australia, 8-11 December 2013.

(17) A. Takeda, T. Aihara, M. Fukuhara, Y. Ishii, M. Fukuda: "Sensitivity improvement of Schottky-type plasmonic detector" SPIE Micro+nano Materials, Devices, and Applications 2013, RMIT University, Melbourne, Australia, 8-11 December 2013.

(18) 相原 卓磨, 武田 愛弓, 福原 誠史, 石井 佑弥, 福田 光男: "表面プラズモン検出器-MOSFET集積回路における静的および動的な特性", 電子情報通信学会(レーザ・量子エレクトロニクス研究会), 同志社大学, 烏丸キャンパス, 2014年1月23日, pp.303-306.

【図書】(計 0件)

【産業財産権】
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

【その他】
ホームページ等
<http://www.photon.eee.tut.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 光男
豊橋技術科学大学・工学部・教授
研究者番号: 50378262