

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360142

研究課題名(和文) 表面プラズモンを用いたナノスケール光・電子融合素子要素技術の研究

研究課題名(英文) Development of key technologies for nano-scale surface plasmon-electron devices 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) 13,200,000円、(間接経費) 3,960,000円

研究成果の概要(和文)：情報化社会の発展に向けて、光・電子集積デバイスの集積度にブレークスルーをもたらすべく、表面プラズモン集積回路のための要素技術を開発した。その結果、ウィスパーリングギャラリーモード変調器、局在型表面プラズモン共鳴を用いた光検出器、ナノスリットを用いた光表面プラズモン変換器(検出器)、表面プラズモン検出器が集積されたMOSFET集積回路を開発することができた。さらに、表面プラズモンの伝播特性を明らかにし、強度信号は減衰するものの、可干渉性はほぼ一定に保たれることを明らかにした。これらの開発された技術は、今後、表面プラズモン集積回路の要素技術として重要であると思われる。

研究成果の概要(英文)：Some key technologies for surface plasmon-device integrated circuits have been researched and developed to break through the integration density of OEICs, and then to support and enhance the present information society. As results, a whispering gallery mode modulator, an optical detector using localized surface plasmon resonance on the Schottky junction, a light wave-surface plasmon convertor using nano slits, a surface plasmon detector integrated MOSFET circuits were developed in this study. In addition, transmission properties of surface plasmon along the surface of metal film have been also examined, and it was clarified that the coherency of surface plasmon was kept constant during propagation of surface plasmon, although the intensity decreased due to ohmic loss. These developed techniques will be very important to develop some surface plasmon integrated circuits in future.

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：表面プラズモン 近接場光 光・電子融合素子 光デバイス

1. 研究開始当初の背景

科学研究費補助金(基盤研究(C)課題番号: 19560342)により、平成19年度と20年度に微小誘電体(溶融シリカ球)と金属(銀)の混合膜を半導体レーザの端面に作製し、金属誘電体混合膜を介してレーザ光(伝播光)を近接場光へ変換することに成功するとともに、当該混合膜を介して、光の強度変調信号及び周波数変調信号の伝達を実現していた。さらに、金属誘電体混合膜を介した周波数多重信号の伝達及び検波にも成功していた。このような新規な技術を基盤として、シリコン集積素子(LSIやIC)のような高密度実装が実現されていない光電子集積回路(OEIC)にブレークスルーをもたらし、膨大な情報量の処理が必要となる高度情報通信社会構築のためのキーテクノロジーを開発するために、本研究を開始した。

2. 研究の目的

科学研究費補助金(基盤研究(C)課題番号: 19560342)で確立した新規構造の金属誘電体混合膜の基本技術を発展させ、光と電子が融合した高密度実装デバイスを実現するための新規構造を有する表面プラズモン及び近接場光デバイスを開発する。

3. 研究の方法

(1) ウィスパリングギャラリモード(WGM)変調器の開発

図1に示す系を作製し、2つの異なる角度から、誘電体微小球に、レーザ光を照射し、球内部にWGMを励起できることを確認する。さらに、本系を用いて、波長の僅かに異なる2つの光を異なる角度から球に入射することにより、微小球中に2つの波長のWGMが発生することを確認するとともに、2つの波長(周波数)の差周波数のビート信号が発生することを確認する。また、周波数多重変調された光を球へ導入し、光ヘテロダイン検波により、WGMを介して周波数多重信号が伝達されることを確認する。

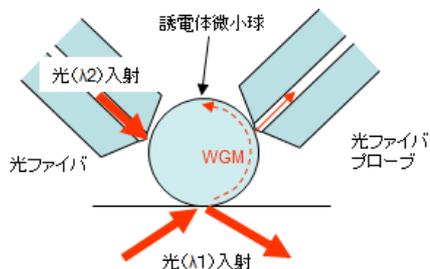


図1 誘電体微小球によるウィスパリングギャラリモード(WGM)を用いた微小変調器の断面図

(2) 表面プラズモン(及び近接場光)増強効果を用いた光周波数検出器の開発

図2に示す構造のショットキー型ダイオードを作製し、表面プラズモン(入力光)の検出

感度の最大化のためのデバイス構造を明らかにする。そのために、シリコン上に数十nm厚の金薄膜を形成することによりショットキーダイオードを作製する。さらに、表面プラズモン励起用の金ナノロッド等の構造を金薄膜上へ作りつけ、レーザ光を照射して表面プラズモンを励起し、ショットキー接合に流れる光電流の増加量と金属膜圧の相関を明らかにする。

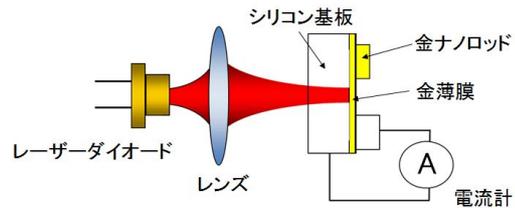


図2 金ナノロッドを塗布したショットキー型ダイオードと実験系の概略図

(3) ナノスリットによる表面プラズモン(光)検出器の開発

図3に示す構造のナノスリットを有するショットキー型ダイオードを作製し、ナノスリット部で伝播光が表面プラズモンへ変換されることを確認する。このとき、最も効率良く入射光が表面プラズモンへ変換されるスリット構造を明らかにする。さらに本構造の素子が表面プラズモン(光)検出器として動作することを確認する。

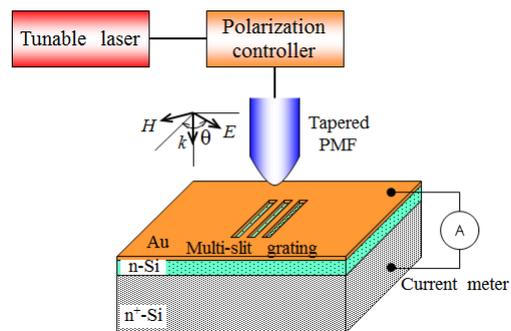


図3 表面プラズモン変換器(検出器)の概要と実験系

(4) 表面プラズモン伝播特性の解明

図4に示す試料を作製し、伝播光を表面プラズモンへ変換し、その伝播特性(減衰特性および可干渉性の変化)を実験的に求め、シミュレーションの結果と比較検討する。ここで、伝播光を表面プラズモンへ変換するナノスリットは項目(3)で開発した表面プラズモン変換器構造基本構造として用い、表面プラズモンを散乱するための回折格子を新たに設計・開発する。

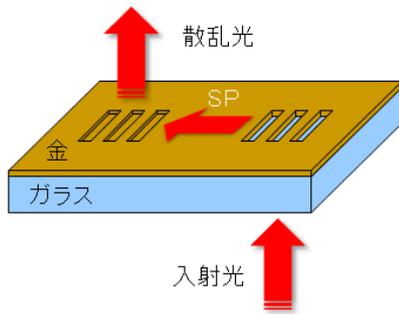


図4 表面プラズモン (SP) の金表面の伝播特性測定のための試料

(5) 表面プラズモン検出器を搭載した MOSFET 集積回路の開発  
 図3に示した表面プラズモン検出器をゲート電極へ組込んだ MOSFET 集積回路を設計・作製し、動作特性を測定するとともに、表面プラズモン(光)と電子デバイスの集積化技術の検討を行ない、その可能性を示す。作製するデバイスの等価回路を図5に示す。

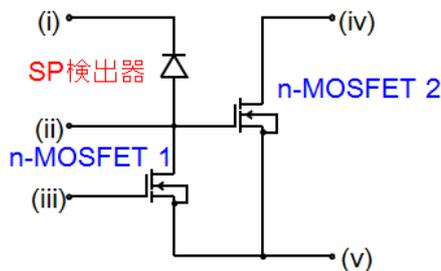


図5 表面プラズモン (SP) 検出器を組込んだ MOSFET 集積回路の等価回路、( ) から( ) は電気の入出力端子を示す。

#### 4. 研究成果

(1) ウィスパリングギャラリーモード(WGM)変調器の開発  
 図1に示したように、2つの異なる角度から、直径 $10\mu\text{m}$ の誘電体微小球に、レーザー光を照射し、球内部にWGMを励起した。さらに、波長の僅かに異なる2つの光を異なる角度から球体に入射することにより、微小球中に2つの波長のWGMが発生することを確認し、光ヘテロダイン検波を行い、2つの波長(周波数)の差周波数のビート信号を確認した。さらに、周波数多重変調された光を球へ導入し、光ヘテロダイン検波により、WGMを介して多重信号が伝達されることを確認した(図6)。

(2) 表面プラズモン(及び近接場光)増強効果を用いた光周波数検出器の開発  
 図2に示したように、金属薄膜を Si 基板上へ形成し、さらに当該金薄膜上に 1300-1550nm 帯に局在型の表面プラズモン共鳴ピークを有する金ナノロッドを塗布したショットキーダイオード型の光検出器を作製した。本検出器に 1300 ~ 1550 nm の光を入射し、金ナ

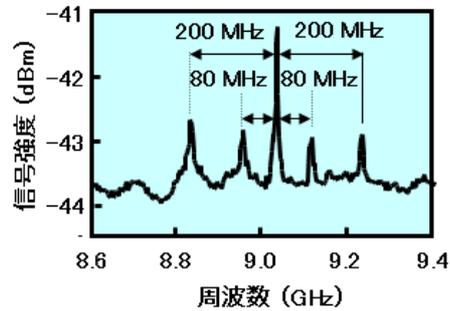
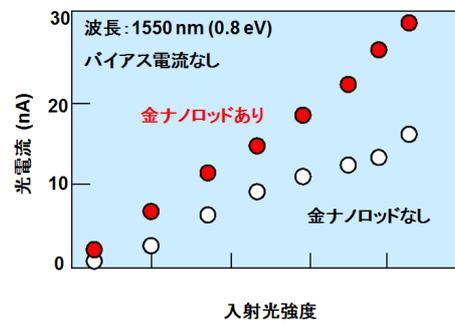


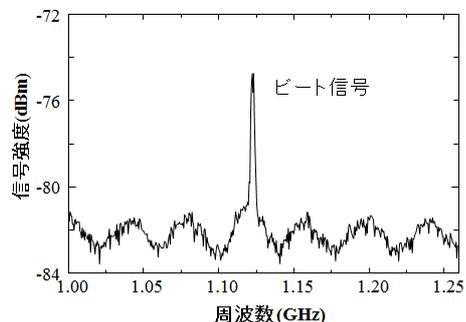
図6 ウィスパリングギャラリーモード(WGM)を介した周波数多重信号(80および200 MHz)の検出結果

ノロッドの無い場合に比べて、金ナノロッドのある場合には、検出される光誘起電流が2倍程度になることを確認できた(図7)。これにより、局在型表面プラズモン共鳴を応用した光検出器の



基本構造を作製できた。  
 図7 金ナノロッドに励起された局在型表面プラズモンによる光検出効率の向上

(3) ナノスリットによる表面プラズモン(光)検出器の開発  
 図3に示したAu/Siショットキー型の光検出器(表面プラズモン検出器)の構造(スリットの周期、幅、厚さおよびスリット数)の最適化を行い、検出感度(あるいは伝播光から表面プラズモンへの変換効率)を向上した。さらに、波長のわずかに異なる2つのレーザー光をナノスリットへ入射し、ビート周波数信号も本構造の検出器で検出できることを実験的に確認した。ビート信号の検出例を図8に示



す。  
 図8 表面プラズモンを介して観察した2波長の光のビート信号スペクトル

(4) 表面プラズモン伝播特性の解明  
 表面プラズモン導波路である金薄膜の作製条件の最適化を行ない、図4に示した構造の試料を作製した。その結果、石英上の金薄膜において、表面プラズモンの伝播距離を300  $\mu\text{m}$ 以上とすることができた。また、表面プラズモン伝播の性質を検討し、伝播距離が長くなるにしたがって強度は指数関数的に減少するが、可干渉性は一定に保たれることを理論的・実験的に明らかにした(図9)。

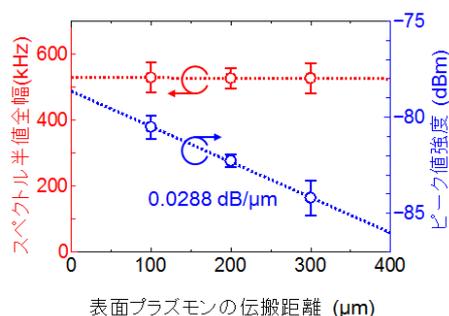


図9 表面プラズモンの伝播特性、伝播距離に対する可干渉性(スペクトル半値全幅)と信号ピーク値強度の変化

(5) 表面プラズモン検出器を搭載したMOSFET集積回路の開発

図5に示した等価回路に基づいて、CADおよびFDTD法(時間領域差分法)を用いて集積回路を設計し、作製した。図10に示すように表面プラズモン検出器がゲート電極に作り付けられた集積回路を世界で初めて作製した。表面プラズモン検出器へレーザー光を入射し、光電流がMOSFETで14,000倍に増幅されることを確認した。さらに、強度変調されたレーザー光を入射し、交流信号に対しても、本集積回路が動作することを確認した。

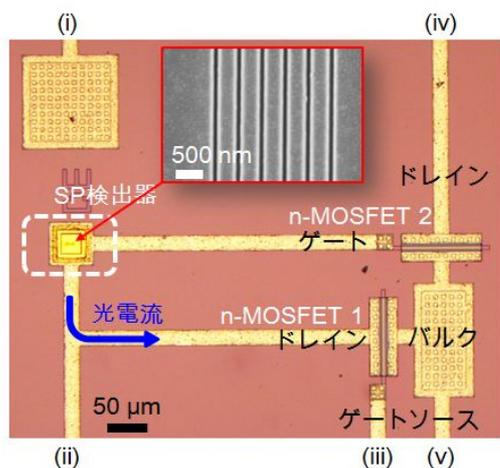


図10 作製した表面プラズモン検出器とMOSFET(2個)の集積回路、MOSFET1はMOSFET2を動作させるために、抵抗的に使用されている

## 5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計14件)

M. Fukuda, T. Aihara, K. Yamaguchi, Y. Ling, K. Miyaji and M. Tohyama, Light detection enhanced by surface Plasmon resonance in metal film, Appl. Phys. Lett., 査読有, vol. 96, 153107, 2010.

K. Yamaguchi, M. Fujii, and M. Fukuda, A structure for coupling whispering gallery mode with surface plasmons, J. of Nonlinear Optical Physics and Materials, 査読有, vol. 19, pp. 811 ~ 817, 2010.

T. Aihara, K. Nakagawa, M. Fukuhara, Y. L. Yu, K. Yamaguchi, and M. Fukuda, Optical frequency signal detection through surface Plasmon polaritons, Appl. Phys. Lett., 査読有, vol. 99, 043111, 2011.

T. Aihara and M. Fukuda, Transmission properties of surface-plasmon-polariton coherence, Appl. Phys. Lett., 査読有, vol. 100, 213115, 2012.

Y. Ishii, Ryohei Kaminose, and M. Fukuda, Optical waveguiding in an electrospun polymer nanofiber, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, vol. 433, 012006, 2013.

T. Aihara, M. Fukuhara, A. Takeda, B. Lim, M. Futagawa, Y. Ishii, K. Sawada, and M. Fukuda, Monolithic Integration of Surface Plasmon Detector and Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors, IEEE Photonics Journal, 査読有, vol. 5, 6800609, 2013.

その他8件

(学会発表)(計46件)

T. Aihara, K. Nakagawa, M. Fukuhara, Y. Yu, K. Yamaguchi, and M. Fukuda, Surface Plasmon Polariton-Enhanced Schottky-Type Photodetector, IEEE Int. Conf. on Optical MEMS & Nanophotonics 2011(OMN 2011), Istanbul, Turkey, August 8-11, 2011.

Y. Ling Yu, M. Fukuhara, T. Aihara, M. Fukuda, K. Yamaguchi, Beat Signal Transmission Through Whispering-Gallery- Mode Resonator, IEEE Int. Conf. on Optical MEMS & Nanophotonics 2011(OMN 2011), Istanbul, Turkey, August 8-11, 2011.

A. Utsumi, N. Shibayama, M. Fukuda, "Development of a Thin Transparent Protective Film for Surface Plasmon Resonance Sensor," The IUMRS International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2012), BEXCO, Busan, Korea,

August 26-31-, 2012, IUMRS-ICA 2012 Abstracts (USB Memory) MoP-211.

M. Fukuhara, T. Aihara, Y. Ishii, M. Fukuda, Optical-Frequency Signal Transmission via Localized Surface Plasmons, IEEE Photonics Conference 2012, Burlingame, California, September 23-27, 2012.

M. Fukuhara, T. Aihara, Y. Ishii, M. Fukuda, Optical-Frequency Signal Transmission via Localized Surface Plasmons, IEEE Photonics Conference 2012, Burlingame, California, September 23-27, 2012.

M. Fukuda, T. Aihara, M. Fukuhara, A. Takeda, Y. Ishii, and 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.

その他 40件

〔図書〕(計2件)

福田光男(分担執筆、第2編、第1章総説、12ページ)株式会社エヌ・ティー・エス、プラズモニクス - 光・電子デバイス開発最前線、2011.

福田光男(分担執筆、Part 1, Chapter 1, 15ページ), Springer, Materials and Reliability Handbook for Semiconductor Optical and Electron Devices, 2012.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: ショットキー型光検出器  
発明者: 福田光男、山口堅三  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特開 2011 - 171519  
出願年月日: 22年2月18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

山口堅三 (YAMAGUCHI, Kenzo)  
香川大学・香川大学工学部 材料創造工学

科・助教

研究者番号: 00501826

### (3) 研究分担者

内海 敦志 (UTSUMI, Astushi)  
舞鶴工業高等専門学校・電気情報工学科・講師  
研究者番号: 30402663

### (4) 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

### (4) 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