

Date of Submission:

平成 27年 1月 16日

| | | | | |
|---------------------------|---------------------------|------------|---------------------|-------|
| Department 電気・電子情報工学専攻 | Student ID Number 学籍番号 | 第 083301 号 | Supervisors 指導教員 | 福田 光男 |
| Applicant's name 氏名 | 相原 卓磨 | | | 石山 武 |

Abstract

論文内容の要旨 (博士)

| | |
|----------------------------|---|
| Title of Thesis 博士学位論文名 | シリコンチップ内表面プラズモン配線に関する研究 (Study on surface plasmon interconnections on silicon chips) |
|----------------------------|---|

(Approx. 800 words)

(要旨 1,200 字程度)

情報処理デバイスの更なる高性能化に向けて、半導体集積回路内への新規配線技術の導入が期待されている。特に、光の高速・大容量性および可干渉性を有し、ナノスケール領域に閉じ込められ、かつ金属細線を導波する表面プラズモンは、シリコンチップ内配線の新たな信号キャリアとして注目されている。そのため、表面プラズモンを信号キャリアとして利用するための導波路や検出器、発生器、変調器といったプラズモニックデバイスがこれまでに研究されてきた。しかしながら、実際に、それらプラズモニックデバイスが電子デバイスとチップ内にモノリシック集積された報告はない。また、光強度信号に対するプラズモニックデバイスの応答あるいは伝送特性に関して研究されてきたものの、伝送容量の大きなコヒーレント光信号に対する研究例は少ない。以上より、本研究では、表面プラズモンをコヒーレントキャリア波として利用したシリコンチップ内配線技術の確立を目的とした。

はじめに、電子デバイスとのモノリシック集積に適するシリコンベースの表面プラズモン検出器を実現した。本検出器は、シリコン基板とナノスケールのスリットが形成された金属薄膜のみで構成される。有限時間領域差分法に基づく電磁界解析の結果より、スリットをファブリ・ペロー型の共振器として用い、かつそのスリットを周期的に配列することで、励起する表面プラズモンの強度が高まることを明らかにした。作製した表面プラズモン検出器における光電流の偏光角依存性および入射光強度依存性を測定することにより、本検出器がシリコンに吸収されない光子エネルギー (0.8 eV) の表面プラズモンを検出していることを実証した。

次に、表面プラズモンを介したコヒーレント光信号の伝送可能性を明らかにした。作製した金薄膜導波路に表面プラズモンを励起し、表面プラズモンとして導波させた後の光のスペクトルを光ヘテロダイン法により観測した。ビートスペクトルの観測により、表面プラズモンを介した光周波数変調信号の伝送可能性を明らかにした。また、表面プラズモンは、伝送の過程で、その強度を減衰させるものの、スペクトル線幅、すなわちコヒーレンス性は一定に保たれることを明らかにした。

最後に、本研究で実現したプラズモニックデバイスを金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) とシリコンチップ上にモノリシック集積した。本集積回路において、100 μ m の距離を導波した表面プラズモンにより MOSFET で構成される電子回路が直流および交流動作することを実証した。さらに、遅延自己ホモダイン法を用いて、表面プラズモンが集積回路内のコヒーレントキャリア波として利用できることを明らかにした。

以上の結果は、表面プラズモンを信号キャリアとして利用した高速大容量の新規情報処理デバイスの実現可能性を示している。

Date of Submission:

平成 27年 1月 16日

| | | | | |
|--|---------------------------|------------|---------------------|-----------------------------------|
| Department Electrical and Electric Information Engineering | Student ID Number 学籍番号 | 第 083301 号 | Supervisors 指導教員 | Mitsuo Fukuda Takeshi Ishiyama |
| Applicant's name 氏名 | Takuma Aihara | | | |

Abstract**論文内容の要旨 (博士)**

| | |
|----------------------------|---|
| Title of Thesis 博士学位論文名 | Study on surface plasmon interconnections of silicon chips (シリコンチップ内表面プラズモン配線に関する研究) |
|----------------------------|---|

(Approx. 800 words)

(要旨 1,200 字程度)

The performance of microprocessors is limited by several problems such as signal delays and power consumption by the electrical wiring. Surface plasmon polaritons (SPPs), which are collective electron oscillations coupled to an electromagnetic field, have great potential as information carriers for use in on-chip interconnections because they propagate along the metal surface at optical frequencies, achieving nano-scale optical mode confinement beyond the diffraction limit. A wide range of plasmonic devices have been developed including emitters, waveguides, modulators and detectors. The signal response and transmission of plasmonic devices have also been studied. However, there have been no reports on the monolithic integration of plasmonic devices for use in on-chip interconnections in electrical circuits. In this study, silicon-based plasmonic devices are developed. These plasmonic devices are monolithically integrated with electrical circuits based on metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) on silicon substrates. The feasibility of an on-chip interconnection using SPPs as the coherent carrier waves is also demonstrated.

First, a novel silicon-based SPP detector is realized. The detector consists of a gold film with a nano-slit grating on a silicon substrate. It converts optical signals into electrical signals using a photocurrent. The structure of the nano-slit grating of the detector is optimized in terms of the slit depth and pitch by analytical calculations based on the finite-difference time-domain method to enhance the SPP intensity at the gold/silicon interface. The optimal structure resulted from the resonance effect of the SPP mode inside the slit, acting as a Fabry-Perot cavity and the in-phase interference of the SPP mode generated by each slit. SPP detection is verified in one of the detectors fabricated at a photon energy of 0.80 eV, which is below the bandgap energy of silicon, by observing the polarization dependence of the photocurrent. Detection of a signal with an optical frequency by the SPP detector is also demonstrated by applying the optical heterodyne method.

Next, an SPP waveguide consisting of a gold film with light/SPP couplers (coupling and decoupling gratings) on a quartz glass substrate is fabricated to confirm the coherent optical signal transmission through the SPPs. In this device, a laser beam excites the SPPs via the coupling grating and propagates along the gold surface as SPPs, before it is scattered toward free space via the decoupling grating. The beat spectrum between the light beams through the SPPs and the reference beam is observed using an optical heterodyne method. The observed beat spectrum indicates that the optical frequency-modulated signal can be transmitted through SPPs on a gold surface. As the propagation distance of the SPPs increased, the full width at half maximum values of the beat spectra were constant and the peak values of the beat spectra decreased. The retention of the coherence is also confirmed by analytical calculations based on the Drude model. From these results, the feasibility of coherent communication using SPPs as signal carriers is demonstrated.

Finally, monolithic integrated circuits composed of the developed SPP detector, waveguide and MOSFETs are fabricated on silicon substrates. Operation of the integrated plasmonic device using a laser beam with a free-space wavelength of 1550 nm is confirmed from the photoresponse of this device. In the monolithic integrated circuit, the photocurrent generated by the SPP detector drives the MOSFET-based electrical circuit after the SPPs carry the optical intensity signal propagated along the surface of the gold film. It is demonstrated that SPPs that propagate through the silicon-based circuits can be used as coherent carrier waves that carry high-capacity signals by observing the beat spectrum output from the electrical circuit.

These results indicate the feasibility of the on-chip SPP interconnections for high-speed and large-capacity data processing applications.