

令和 3 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22148

研究課題名（和文）CMOS互換プラズモニクスの開拓

研究課題名（英文）Development of CMOS-compatible plasmonics

研究代表者

池田 和浩（Ikeda, Kazuhiro）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ長

研究者番号：70541738

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：シリコンフォトニクスで一般的に利用されるアルミニウム上での長距離伝搬プラズモンモードについて数値解析を行った。ウエハ構造による上下の非対称性を導入しても、薄膜の左右のエッジ界面のプラズモンモードが対称に結合した長距離伝搬モードの存在を確認した。新たに見出した上記長距離伝搬プラズモンモードとシリコン光導波路との層間接続構造を数値計算により設計した。面直方向に結合する方向性結合器を採用し、1 μ mの広ギャップを設定しても高効率（ \sim 2 dB）でアルミ薄膜上プラズモンモードからシリコン光導波路モードへ移行できることをシミュレーションにより証明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CMOS互換であるアルミニウムを用いて、シリコンフォトニクスに活用できる長距離伝搬プラズモンモードを見出した。また、これを活用するために、シリコン光導波路と低損失で接続できる光接続構造を見出した。これによって、光通信容量の急増を支えるシリコンフォトニクスデバイスの更なる高機能化・小型化に向けた新たなデバイス構造等の可能性が拓かれた。

研究成果の概要（英文）：Numerical analysis was performed for the long-range surface plasmon mode on aluminum, which is commonly used in silicon photonics. Even if the vertical asymmetry due to the wafer structure was introduced, the existence of a long-range propagation mode in which the plasmon modes at the left and right edge interfaces of the thin film were symmetrically coupled was confirmed.

An interlayer connection structure between the newly found long-range plasmon mode and the silicon waveguide was designed by numerical calculation. It was proved that it is possible to transfer from the plasmon mode on the aluminum thin film to the silicon waveguide mode with high efficiency (\sim 2 dB) even if a wide gap of 1 μ m is set by adopting a vertical directional coupler.

研究分野：シリコンフォトニクス

キーワード：プラズモニクス

1. 研究開始当初の背景

情報通信分野では通信トラフィックが年率 40%程度の堅調な増加を続けており、それを担う光デバイスの性能も飛躍的に向上している。近年は、クラウド化の進展による大規模データセンターの増加に伴って、短距離の光インターコネクとも普及が進み、小型かつ低コストで高い機能を有する光デバイスへの要求がますます高まっている。その切り札として、シリコン CMOS の製造ラインを活用して、低コストで集積度の高い光集積回路を実現する「シリコンフォトニクス」と呼ばれる技術の開発が活発に進められ、導入が開始されている。しかし、高速化の進展は非常に速く、変調レートは 25 Gbaud から 50 Gbaud、そしてさらに先が検討されている今日、これまでのシリコンフォトニクス技術だけでは、変調レートに関しては近く材料的な原理限界を迎えることが指摘されている。この問題に対して様々な次世代技術が提案される中、最近、金属中の電子振動と光が結合した波である表面プラズモンポラリトンを活用する「プラズモニクス」によって、限界を打破しうる超小型 (10 μ m 長)・超高速 (70 Gbaud) な光変調器が提案・実証された。プラズモニクスがこのような優れた特性を示す最大の要因は、これまでの光導波路とは全く異なる導波原理であるため、光の回折限界である波長サイズよりも大幅に小さい領域に光を閉じ込めることができ、これにより電極間隔を極めて小さくして変調に必要な電界強度を極大にできると共に、長さを極小にしてキャパシタンスを極小にできる点にある。

2. 研究の目的

このように、プラズモニクスは次世代技術の有力な候補ではあるが、金属を使うことから光周波数領域における吸収による伝搬損失が非常に大きいという深刻な欠点がある。上記の超高速光変調器は、表面プラズモンとして伝搬する領域を極めて短い領域に限り、その前後はシリコン光導波路とすることで、この欠点をできるだけ回避している。このように、シリコンフォトニクスプラットフォーム上の限られた部分にのみプラズモニクスを活用するのが現実的な解であると考えられる。一方で、上記の超高速変調器も含めて、プラズモニクスの研究では金属材料として主に金が用いられてきた。これは電気抵抗率が低く損失を小さくできる上、実験室レベルでは比較的良く用いられる材料であるためであるが、金は CMOS プロセスに用いられておらず、CMOS 互換性がないためシリコンフォトニクスには適用できない。そこで、本研究では金以外で同程度の低い電気抵抗率を持つアルミ・銅などの CMOS デバイスの配線層等に使用されている金属材料を活用し、光集積デバイスの標準プラットフォームであるシリコンフォトニクスに適合した「CMOS 互換プラズモニクス」の開拓を目的とする。

3. 研究の方法

本研究の CMOS 互換プラズモニクスでは、アルミ・銅などの金属材料を用いてシリコンフォトニクス上に局所的にプラズモニク回路を形成するが、これらの金属材料は CMOS の配線層 (バックエンドプロセス) として使用されており、シリコンデバイス層とは十分に隔離することでシリコンデバイスへの汚染を防いでいる。したがって、プラズモニクスを CMOS 互換とし、シリコンフォトニクスに適合させるためには、下層にあるシリコン光導波路と十分に隔離された上層のプラズモン導波路間の高効率な光結合技術が必要である。このために、本研究代表者らが提案・実証したシリコン光回路と窒化シリコン (SiN) 光回路の複層光回路と同様に、面直方向に高効率に結合する方向性結合器を用いることができる。このような構造の設計は、有限要素法を用いた数値解析で実施し、試作は応募者の所属機関が保有する 45-nm 技術ノードの CMOS プロセスを用いて行う。

4. 研究成果

(1) 実際に本研究代表者らがシリコンフォトニクスプロセスで利用しているアルミニウム上での長距離伝搬プラズモンモードについて、有限要素法による解析を行った。長距離伝搬プラズモンモードは通常の局在性の高いプラズモンモードに比べて伝搬損失が小さいことから、有用性の高い伝搬モードである。まず、作製プロセスにおける容易さを加味して幅を 500nm で固定し、厚さを変化させたアルミニウム薄膜上のプラズモンモードを解析した。良く知られているように薄膜の表裏のプラズモンモードが対称に結合した長距離伝搬モードの存在が確認できたが、ウエハ構造、すなわちシリコン基板や限られたクラッド厚さによる非対称性を導入するとこのモードが励起されないことが分かった。このことは、これまで広く知られている薄膜上の長距離伝搬プラズモンがシリコンフォトニクスでは活用が難しいことを示している。一方で、薄膜の左右のエッジ界面のプラズモンモードが対称に結合した長距離伝搬モードの

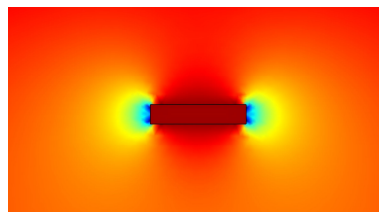


図 1 左右のエッジ界面のプラズモンモードが対象結合したモード

存在が確認できた(図1)。このモードは、ウエハ構造による上下の非対称性を導入しても、左右の対称性が保たれるため存在でき、さらに一般的に用いられる TE モードに該当するため、シリコンフォトニクスで活用できる長距離伝搬モードであることを見出した。

(2) 上記の新たに見出したシリコンフォトニクスに適合する金属薄膜上の長距離伝搬プラズモンモードを活用したデバイス(シリコン光導波路との層間接続構造)の有限差分時間領域(FDTD)シミュレーションによる設計を実施した。面直方向に結合する方向性結合器を採用し、1 μm の広ギャップを設定しても高効率(~2 dB)でアルミ薄膜上プラズモンモードからシリコン光導波路モードへ移行できることをシミュレーションにより証明した(図2)。アルミ薄膜上のプラズモンモードはモードサイズを容易に10 μm 以上に設計可能であり、汎用シングルモード光ファイバへの結合に用いることができる。シリコンフォトニクスにおいてシングルモード光ファイバと低損失・高トレランスに接続することは実装上の大きな課題となっており、本構造はその解決策となりうる。

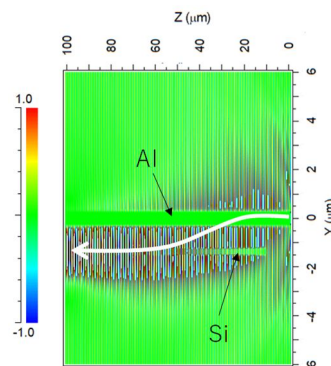


図2 シリコン/プラズモン導波路間モード結合の計算結果(電界強度分布)

(3) (1)(2)で見出したプラズモニック導波路および層間接続構造について、その特性を実際に確認するため、テスト素子を設計してフォトリソを調達し、所属機関が保有する45-nm技術ノードのCMOSプロセスを用いて試作を行った。アルミ薄膜のリソグラフィーにはKrF露光装置により実施したが、最初の試作としてこれまでのフォトレジスト・露光条件・エッチング条件で実施した結果、十分な解像度が得られずアルミ導波路がうまく形成されない結果となった。最適な露光条件を見出すことで形成可能なサイズであるため、引き続き条件出しの試作を継続し、実験的な実証を行う予定である。

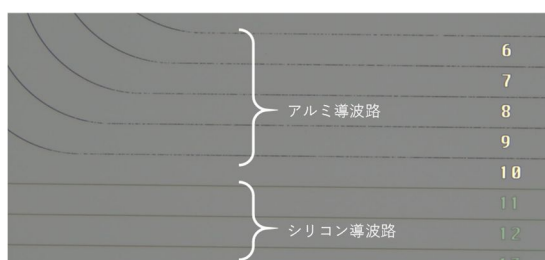


図3 試作結果。プラズモニック導波路(アルミ導波路)がうまく形成されなかった。

引き続き条件出しの試作を継続し、実験的な実証を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------