

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18984

研究課題名（和文）超広角透過型プラズモンによる高感度近赤外シリコンイメージセンサの開発

研究課題名（英文）Development of high-sensitive silicon image sensor in near-infrared region by plasmonic transmission with large angle

研究代表者

小野 篤史（Ono, Atsushi）

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：20435639

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）：本研究は、自動運転技術や通信技術、生体計測技術など、昨今重要視されている近赤外イメージセンサの分野において、シリコンイメージセンサの近赤外感度を大幅に向上する技術革新をもたらすことに挑戦する研究である。本研究期間内の達成目標として、波長940nmにおけるシリコン吸収効率を可視光域と同等の50%以上となるよう劇的な感度向上を目指す。裏面照射型イメージセンサを考慮して解析し、プラズモニック回折によるシリコン層で光を閉じ込めるような機構を新たに考案した。これにより波長940nmにおいて吸収効率53.3%が得られることを解析的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、表面プラズモン共鳴よりもわずかに短波長側の回折条件にて構造設計することにより、90度近い大きな回折角度と50%近い高い回折効率のプラズモニック回折が起きることを明らかにしたものであり、準表面プラズモン共鳴という新たな概念を提唱した。

本概念をシリコンイメージセンサの近赤外感度向上技術に応用することにより、TOFセンサなどの低照度化、低消費電力化、高解像度化、高速化など現行に対して革新的技術をもたらすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：This research challenges to bring the technological innovation that is significant improvement of silicon image sensors in near-infrared region, which is recently attracted in automatic driving technology, communication technology, and bioinstrumentation technology. As one of the goal in this research project, we aim to dramatically improve the sensitivity so that the silicon absorption efficiency at 940 nm is more than 50%, which is equivalent to that in the visible range. By considering a back-illuminated silicon image sensor, we proposed photon confinement in a silicon absorption layer by plasmonic diffraction. We clarified by the simulation that the absorption efficiency is achieved to be 53.3% at a wavelength of 940 nm.

研究分野：応用光学

キーワード：表面プラズモン イメージセンサ 回折格子 近赤外

1. 研究開始当初の背景

フォトダイオードや CMOS イメージセンサにおいて、近年近赤外領域の利用が活発になってきている。近赤外光は人間の眼が検知できないため、近赤外 LED を照明しての車載用ドライバーモニタリングや、Time of Flight を用いた距離計測によるセーフティセンシング、病室監視、ジェスチャ入力など様々な用途に利用されている。さらに、近年の急進している AI 技術との融合によりさらなる高度化が期待され、その要素技術となる高感度センサの開発が与える当該分野への寄与は計り知れない。しかし、可視光から近赤外光領域に向けて、シリコンでの吸収係数が急速に低下する。このため、近赤外光を検知するためには、厚いシリコン層のセンサが必要となる。ジェスチャ入力によく用いられる波長 850nm では、50%の光が吸収されるためには、シリコン厚さ 12 μm が必要である。また、車載用によく用いられると想定されている波長 940nm では、24 μm のシリコン厚さが必要となる。現状の可視光用のイメージセンサのセンサ厚が 3 μm 程度であること、監視用途のイメージセンサの画素サイズが 3 μm 程度であることを考えると、画素間のクロストークの要因、トレンチの難加工性、空乏化のための駆動電圧という観点でこれらのシリコン厚さは大きく、シリコン吸収層を厚くすることなく、近赤外光吸収効率をいかに向上させるかが課題である。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者らが提唱した「準表面プラズモン共鳴」という新たな概念を導入し、これにより近赤外領域に対するシリコンイメージセンサの大幅な感度向上を実証することを目的とする。研究代表者らは表面プラズモン共鳴による局在増強場を利用するというアプローチではなく、共鳴条件からわずかに外すことにより、90 度近い大きな回折角度と増強場の恩恵による高い光回折効率を実現し、これをイメージセンサの感度向上に応用することを考えた。本研究は、プラズモニクスが有する潜在性を活かし、センサ分野との融合を図るものであり、近赤外領域におけるシリコン吸収率の低さに起因する低感度を打破することを目的とする。

3. 研究の方法

申請者らが提唱する準表面プラズモン共鳴を実証するため、シリコン基板上への金属回折格子作製技術を確立し、可視近赤外分光反射特性を計測した。作製手法として、周期、線幅など多様なパラメータを試作可能な電子線リソグラフィ法を適用した。プラズモニック回折を示す金属回折格子をシリコンセンサ上に実装し、近赤外感度向上を実証した。スペクトル感度計測のための分光照射光学系を構築した。

プラズモニック回折による近赤外光吸収効率が最大化する構造をシミュレーションにより探索した。プラズモニック回折格子の形状に対する検討だけでなく、シリコンセンサ画素を加味した系全体でのシリコン吸収効率が最大化するような構造をシミュレーションにより調べた。金属種類として可視近赤外光領域で吸収損失の低い銀を適用した。

図 1 は電子線リソグラフィ法による銀回折格子作製プロセスを示す。シリコン基板をピラニア洗浄後、電子線レジストをスピコートにより成膜した。プリバーク後、電子線照射によりライン&スペースを描画した。現像後、真空蒸着法により銀を成膜し、リフトオフすることにより銀回折格子を作製した。

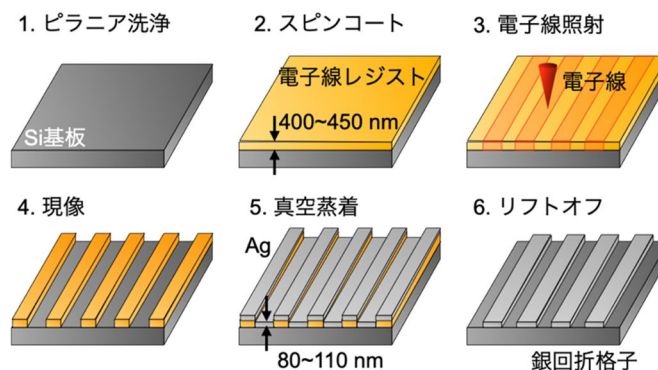


図 1. 銀回折格子作製プロセス

図 2 は分光照射光学系を示す。キセノンランプを白色光源として用いた。分光器にて波長掃引し、偏光子にて TM, TE 偏光照射した。対物レンズにて試料表面に集光し、I-V 特性をソースメジャーユニットを用いて計測した。試料への集光を確認するため、ビームスプリッタを介して CCD 観察する光学系とした。

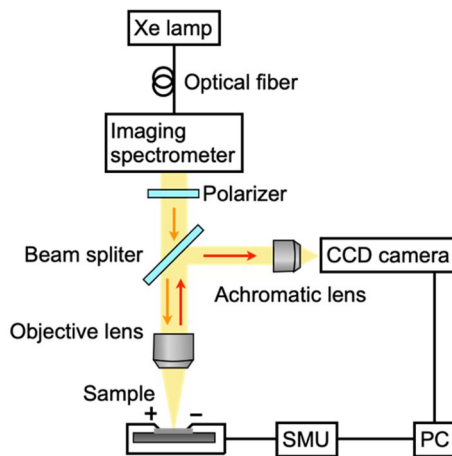


図 2 . スペクトル感度計測のための分光照射光学系

図 3 はプラズモニック回折によるシリコンイメージセンサの近赤外光吸収効率最大化に向けたシミュレーションモデルの概略図を示す。裏面照射型のシリコンイメージセンサを想定し、シリコン厚さ $3\mu\text{m}$ とその下に配線層を考慮した SiO_2 層および銅配線を設置した。センサ画素サイズは $6.5\mu\text{m}$ とした。画素間分離のトレンチとして近赤外反射率の高い銀トレンチを適用した。2次元解析モデルにて画素内シリコン吸収率を解析した。

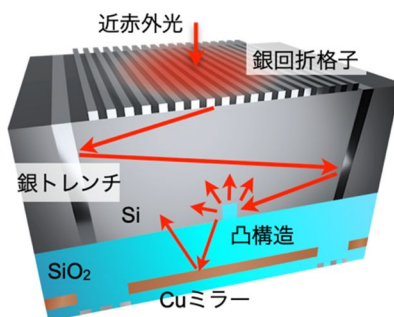


図 3 . プラズモニック回折による光閉じ込め概略図

4 . 研究成果

図 4 は、電子線リソグラフィ法による銀回折格子作製結果を示す。波長 940nm に対して、2次回折にてプラズモニック回折を示す条件として周期 525nm とした。 $100\mu\text{m}$ 角にて銀回折格子が作製されていることを実証した。

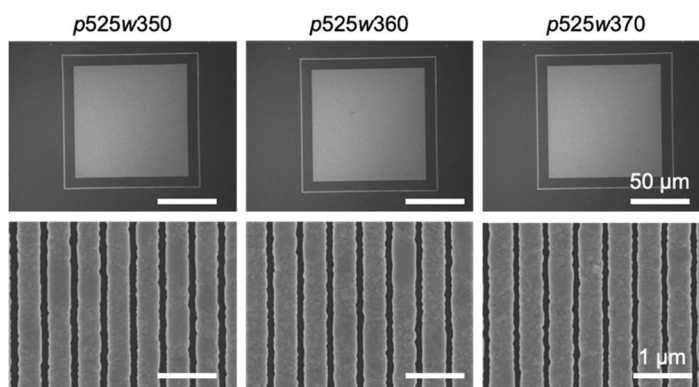


図 4 . 銀回折格子作製結果

Si フォトダイオード上に銀回折格子を作製し、波長 940nm の光照射に対する I-V 特性より、ダイオード特性が得られることを示した。また、銀回折格子を付与していない Si フォトダイオードと比較して、TM 偏光照射時に光電流量が増大する一方、TE 偏光照射時には減少していることを示し、表面プラズモンが励起されていることを明らかにした。分光照射計測により、波長 955nm にて最小反射率を示し、感度向上比では波長 950nm にて 1.34 倍感度が向上することを実証した。これは準表面プラズモン共鳴励起にてプラズモニック回折に起因した感度向上を示唆している。

図5は図3にて示したプラズモニック回折による光閉じ込め構造のシミュレーション解析結果として、電場強度分布およびシリコン深さに対する積算吸収率を示す。電場強度分布より、上方からの入射光に対してシリコン吸収画素内にて光が高密度に閉じ込められている様子が示されている。シリコン吸収層内の細かく周期的な強度の強弱分布は、縦方向および横方向において多重反射に伴う干渉場を示しており、定在波が生じていることがわかる。この定在波の干渉分布から計算したところ、約80度で回折した光の干渉であることがわかった。従って、上方から垂直入射した光が銀回折格子によりシリコン吸収層内に80度の角度にて回折し、銀トレンチによる反射の繰り返しから横方向の干渉定在波が観測され、シリコン底面からの反射により縦方向の干渉定在波が観測された。定在波に乱れが生じている理由は、シリコン底面の中央に設けられたSiO₂凸構造によるものであり、これが光閉じ込め効果の向上に寄与している。シリコン底面から漏れ出た光の一部は銅配線層にて反射され、シリコン層内の吸収に寄与している。これらの光閉じ込め効果の結果、シリコン厚さ3μmにて光吸収効率53.3%を示し、銀回折格子がない場合と比較して8.2倍と大幅な吸収効率の向上を示した。本構造が作製されれば、可視光赤色波長域と同等の近赤外感度が得られることとなり、TOFセンサをはじめとした近赤外センサの技術革新につながることを期待される。

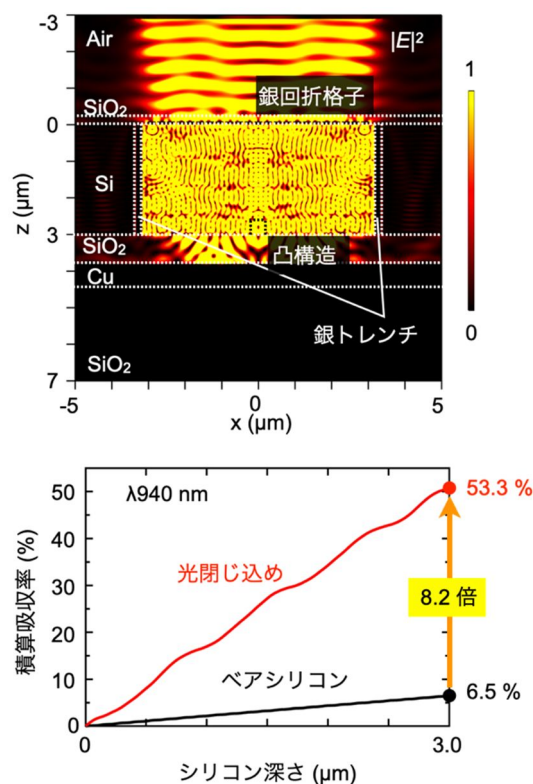


図5．電場強度分布およびシリコン深さに対する積算吸収率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshinaga Takahito, Hashimoto Kazuma, Teranishi Nobukazu, Ono Atsushi	4. 巻 30
2. 論文標題 Photon confinement in a silicon cavity of an image sensor by plasmonic diffraction for near-infrared absorption enhancement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 35516 ~ 35516
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.472401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 吉永崇仁, 橋本和磨, 寺西信一, 小野篤史
2. 発表標題 プラズモニック回折格子を用いたシリコンイメージセンサの近赤外吸収効率の向上
3. 学会等名 レーザー学会中部支部2022年度若手研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahito Yoshinaga, Kazuma Hashimoto, Nobukazu Teranishi, and Atsushi Ono Takahito Yoshinaga, Kazuma Hashimoto, Nobukazu Teranishi, and Atsushi Ono
2. 発表標題 Photon Confinement by Plasmonic Diffraction for Near-Infrared Sensitivity Improvement of Silicon Image Sensor
3. 学会等名 Optics & Photonics Taiwan International Conference (OPTIC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahito Yoshinaga, Kazuma Hashimoto, Nobukazu Teranishi, and Atsushi Ono
2. 発表標題 Near-Infrared Sensitivity Enhancement of Silicon Image Sensor by Photon Confinement with Plasmonic Diffraction
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉永崇仁, 橋本和磨, 寺西信一, 小野篤史
2. 発表標題 プラズモニック回折構造によるシリコンイメージセンサの近赤外感度向上
3. 学会等名 光学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野篤史
2. 発表標題 金属ナノ構造作製技術とプラズモニックセンシングへの応用
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsushi Ono, Takahito Yoshinaga, Kazuma Hashimoto, and Nobukazu Teranishi
2. 発表標題 Near-infrared sensitivity enhancement of silicon image sensor with wide incident angle
3. 学会等名 2023 International Image Sensor Workshop (IISW2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsushi Ono, Takahito Yoshinaga, Kazuma Hashimoto, and Nobukazu Teranishi
2. 発表標題 Quasi-resonance of surface plasmons for near-infrared sensitivity improvement of silicon image sensor
3. 学会等名 META2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野篤史
2. 発表標題 表面プラズモンを利用したシリコンイメージセンサの近赤外感度向上技術
3. 学会等名 次世代画像入力ビジョンシステム部会定例会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔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