

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560401

研究課題名(和文)モノリシック集積型高感度SOIフォトダイオードの開発

研究課題名(英文)Development of monolithically integrated high-sensitive SOI photodiode

研究代表者

小野 篤史(ONO, ATSUSHI)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号：20435639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究目的は、次世代CMOSとして注目されているSOIデバイスに光検出器を同一基板上に実装することである。SOI光検出器の感度を大幅に向上させる技術を開拓するため、本研究では、受光面上に金ナノ粒子を付着した新しいSOI-PINフォトダイオードを開発した。金ナノ粒子付SOI-PINフォトダイオードをモデル化し、SOI内部の光吸収効率を計算することにより、金ナノ粒子の粒径と付着密度を最適化した。さらに感度向上メカニズムを明らかにした。期間中に、金ナノ粒子付きSOIフォトダイオードを開発し、感度特性を計測した。金ナノ粒子の付着により、可視光領域において約2倍の感度向上を実証した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is the monolithic implementation of photodiode with silicon-on-insulator (SOI) circuits. SOI-CMOS technology is one of the promising techniques for LSI to perform high speed operation.

To improve the sensitivity of SOI photodiode, we developed SOI-PIN photodiode attached with gold (Au) nano particles. The diameter and the density of Au nano particles were optimized by simulation. Furthermore, we clarified the enhancement mechanism. During this research, we fabricated SOI photodiode with Au nano particles and measured the sensitivity. It has been demonstrated that two-fold enhancement was achieved in visible wavelength region by the attachment of Au nano particles.

研究分野：応用物理

キーワード：フォトダイオード 表面プラズモン SOI 金ナノ粒子

### 1. 研究開始当初の背景

フォトダイオードと信号処理回路をモノリシックに集積したフォト IC は、省スペース化、コストダウン等の利点から、光ピックアップの受光素子や携帯電話のセンサなどに用いられている。近年の半導体集積回路の発展は目覚ましく、さらなる高集積化、低消費電力化、多機能化を実現するために SOI (絶縁膜上に形成した単結晶シリコン) 技術が注目されている。SOI は、各素子を酸化膜にて完全に分離することができ、従来のバルクシリコンと比較して各素子の集積化を大幅に向上することができる。主に厚さ数 100nm の SOI が用いられており、寄生容量が小さいため、高速化、低消費電力化を可能にする。このような SOI デバイスにフォトダイオードを組み込むことができれば、電子デバイス産業に多大なる貢献をもたらすものと考えられる。

### 2. 研究の目的

SOI 上にフォトダイオードを実装するためには、SOI フォトダイオードの光吸収効率を向上させる必要がある。吸収層が厚さ数 100nm しかなく、透過光の増大など、吸収に寄与しない光成分が支配的になるためである。本研究では、可視光領域で局在プラズモン共鳴を示す金ナノ粒子に着目し、SOI-PIN フォトダイオード上に金ナノ粒子を付着した新しい受光デバイスを開発する。

### 3. 研究の方法

金ナノ粒子を付着させるという比較的簡便な手法により、金ナノ粒子の局在プラズモン共鳴による電場増強効果、光散乱効果を利用して感度の向上を図る。

### 4. 研究成果

3 次元 FDTD 計算により、金ナノ粒子の粒子径および付着密度について最適化した。図 1 は、膜厚 100nm の SOI 層内の吸収効率を計算するための計算モデルを示す。

図 2 は、金ナノ粒子の粒径  $d$  nm を 50-200 nm 変化させ、金ナノ粒子の配列周期  $p$  nm を 200, 240, 280 nm とした場合の吸収効率増大スペクトル (金ナノ粒子の有無による SOI 層内の吸収効率比スペクトル) を示す。各周期に対して、波長 585, 636, 682 nm にピークを示す結果となった。解析の結果、これら金ナノ粒子の配列周期に対するピーク波長の関係は、SOI 層の厚さ 100 nm における導波路モードの TM<sub>0</sub> モードにおける伝搬波長に相当することが分かった。

図 3 は、金ナノ粒子の粒径および配列周期に対する、ピーク値の 2 次元プロット図を示す。粒径 100-150 nm、周期 250 nm 近傍にお

いて、金ナノ粒子の付着による比較的高い吸収効率の増大を示すことが分かった。本シミュレーションにより、膜厚 100 nm の SOI に対して、金ナノ粒子径 140 nm、粒子密度  $1.7 \times 10^9$  particles/cm<sup>2</sup> のとき、最大感度が得られることが分かった。

比較的大きな金ナノ粒子を高密度に付着させるため、金ナノコンポジット膜をシードとした金ナノ粒子チオール結合法を確立し、金ナノ粒子付 SOI フォトダイオードを作製した。図 4 は、作製した金ナノ粒子 SOI フォトダイオード上の SEM 像を示す。粒径 150 nm の金ナノ粒子を  $6.0 \times 10^8$  particles/cm<sup>2</sup> と従来技術と比較して高密度に配列されていることが分かった。

図 5(a) は、作製した SOI フォトダイオードの金ナノ粒子の有無に対する感度スペクトルを示す。実線が金ナノ粒子を付着した場合の感度スペクトルを示し、破線が金ナノ粒子付着前の感度スペクトルを示す。波長 450nm におけるピークは、厚さ 100nm の SOI における多重反射による吸収増大に起因すると考えられる。金ナノ粒子が付着していない場合は、波長 450nm において感度が高く、波長 500nm 以上では、10%未滿の低い感度スペクトルを示す。金ナノ粒子を付着すると、波長 450nm における感度が減少し、波長 500-700nm にかけて 10%近くの感度スペクトルを示す。波長 450nm においては、金ナノ粒子の付着により入射光が散乱し、垂直成分が支配的な多重反射の効率が減少するためと考えられる。一方で、波長 500-700nm にかけて、金ナノ粒子の付着により感度が増大している。これは、前述のとおり、SOI を導波路とみなした場合の TM<sub>0</sub> モードにカップリングすることにより、SOI 層内を導波し、光路長が大幅に増大することにより吸収効率が向上したためと考えられる。

図 5(b) は、金ナノ粒子の付着の有無に対する感度増大比スペクトルを示す。波長 620 nm 近傍において約 2 倍の感度向上を示し、比較的広帯域の感度が増大することを示した。

図 5(c) は、厚さ 100nm の SOI に対して、金ナノ粒子付着前と、金ナノ粒子をランダム配列した場合の SOI 層内における吸収スペクトルを示す。図 5(a) と比較的良好一致を示した。

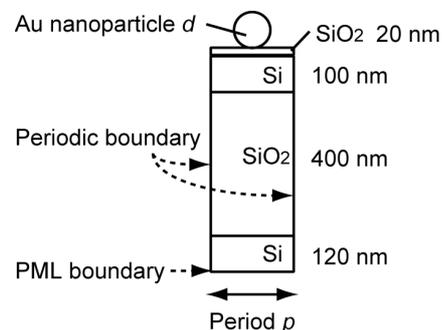


図 1 金ナノ粒子付 SOI フォトダイオードの 3 次元 FDTD 計算モデル

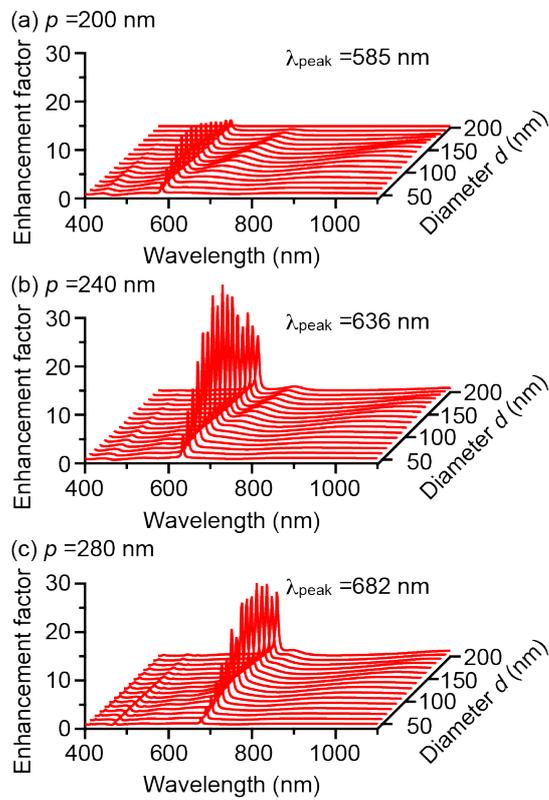


図 2 金ナノ粒子径および配列周期を変化させた場合の、SOI 層内における吸収効率増大スペクトル

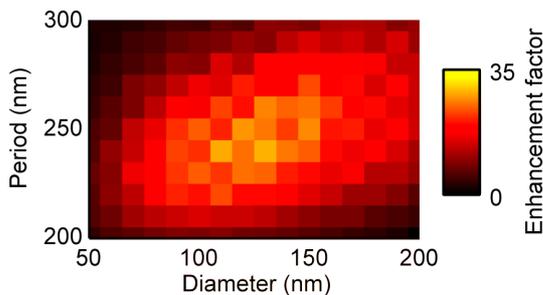


図 3 金ナノ粒子径と周期配列に対する吸収効率増大度のピークマップ

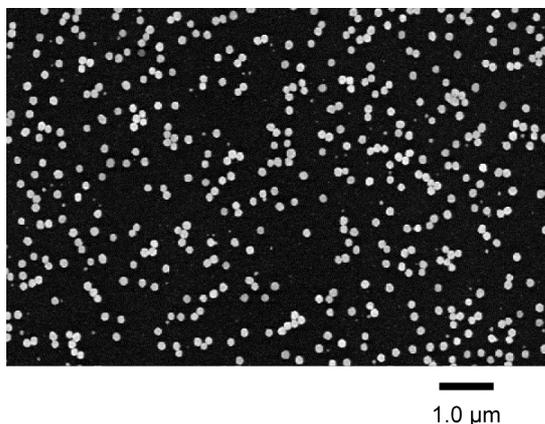


図 4 付着した金ナノ粒子の SEM 像

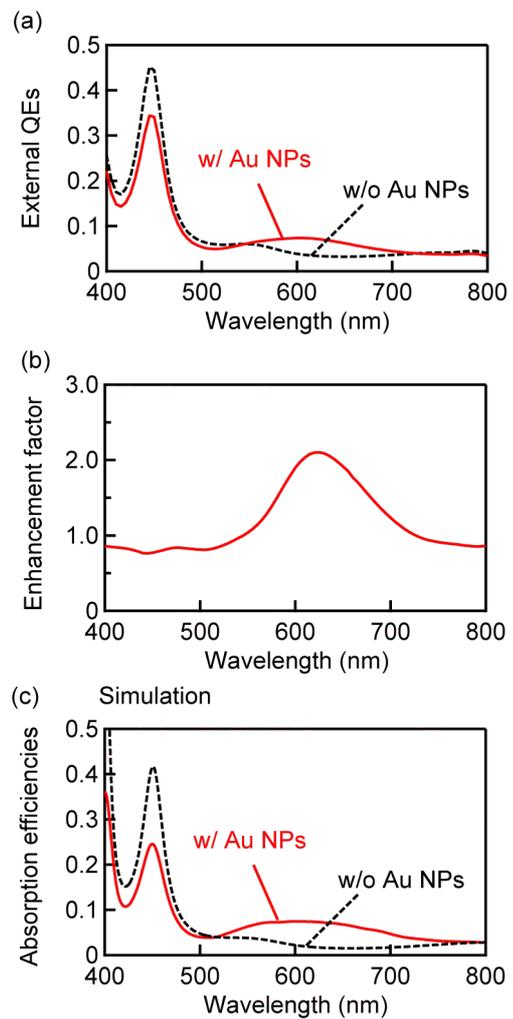


図 5 (a) 作製した SOI フォトダイオードの金ナノ粒子付着前後の外部量子効率スペクトル, (b) 金ナノ粒子の有無に対する感度増大比スペクトル, (c) 計算結果

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Atsushi Ono, Yasushi Enomoto, Yasufumi Matsumura, Hiroaki Satoh, and Hiroshi Inokawa, "Broadband absorption enhancement of thin SOI photodiode with high-density gold nano particles," Optical Materials Express, vol. 4, no. 4, pp. 725-732 (2014).

〔学会発表〕(計 5 件)

Atsushi Ono, Hiroaki Satoh, and Hiroshi Inokawa, "Plasmonics for sensor applications," 2nd Asian Image Sensors and Imaging Systems Symposium (Tokyo, Japan, 2014).

小野篤史, 榎本靖, 松村康史, 佐藤弘明, 猪川洋, 「金ナノ粒子高密度配列による高感

度 S01 フォトダイオードの開発」第 7 5 回応  
用物理学会秋季学術講演会（北海道大学，  
2014）.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：フォトダイオード及びその製造方法  
発明者：榎本靖，松村康史，猪川洋，小野篤  
史，佐藤弘明  
権利者：新日鐵化学株式会社  
種類：特許  
番号：2012-214745  
出願年月日：2012 年 9 月 27 日  
国内外の別： 国内

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

小野 篤史 (ONO, Atsushi)

静岡大学電子工学研究所・准教授

研究者番号：2 0 4 3 5 6 3 9