

2020年9月17日

報道機関 各位

国立大学法人 電気通信大学
公立大学法人 富山県立大学

赤外光を高感度に検出するシリコン製の 受光素子を開発

1. 発表のポイント：

半導体集積回路と統合しやすいシリコンを材料に用いて、感度の高い赤外光の受光素子を作製しました。本素子の開発では、ナノ加工技術により微小な銅粒子をシリコン中に埋め込んだ構造を作り、光に対してアンテナとして振る舞う構造を形成しました。通常、アンテナは電波の受信に使われますが、アンテナの長さをナノサイズにすれば、光の領域でもアンテナとして機能します。このナノアンテナ構造で、光を効率的に吸収し、電流に変換できたことがキーとなりました。本技術は、既存の半導体集積回路と共通素材を用いるので、受光器と集積回路を高度に統合した高機能赤外線デバイスを実現するものです。また、シリコンよりもはるかに高価で環境負荷の大きい化合物半導体を使用しないので、化学分析やヘルスケアなど幅広い用途への応用を見込んでいます。この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「IoT社会実現のための革新的センシング技術開発」の結果得られたものです。

2. 発表概要：

東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程2年 安永竣（電気通信大学特別研究学生）、電気通信大学大学院情報理工学研究科 菅哲朗准教授、および富山県立大学 下山勲学長らの研究グループは、シリコンを材料に用いた、感度の高い赤外線受光器を作製しました。半導体集積回路やCMOSイメージャなどの素子では、半導体材料としてシリコンが広く用いられています。しかし、シリコン単体では材料の制約により、波長1,100ナノメートル以上の赤外光を検出することができません。そのため、赤外線検出のためには、高価で半導体集積回路との親和性の低い、化合物半導体などが利用されてきました。ただし、化合物半導体の材料はシリコンの10倍程度と非常に高価で、環境負荷も高いという問題がありました。もし、シリコンで赤外光を検出できれば、シリコン半導体加工技術を利用して受光素子と集積回路を高度に統合させ、高機能なデバイスを提供できます。これまで、シリコン上に金属ナノアンテナを形成することで、赤外検出を行っている研究は複数報告されてきましたが、感度が十分ではなく、性能の向上が求められていました。

そこで本研究グループは、シリコン上に開口150ナノメートル四方、深さ560ナノメートルの微細な穴（ナノホール）を多数掘り、その穴の底に銅を熱蒸着法で堆積させることで、シリコン中に埋め込まれた金属ナノアンテナ構造を形成しました（図1(a)）。金属構造をナノメートルサイズに微細にすれば、テレビの受信アンテナと同じように、光に対するアンテナとして機能することを利用したもの

です。この構造に赤外光を照射すると、金属ナノアンテナ構造において、光により電子が力を受けるので、表面プラズモン共鳴（注1）と呼ばれる共鳴振動が発生します。電子の共鳴振動により光が吸収され、そのエネルギーは金属ナノアンテナ内部の電子を励起するので、金属とシリコンの界面に形成されるショットキー障壁と呼ばれるエネルギーの壁を乗り越えて、電流信号として赤外光を検出可能になります。これまで、類似の赤外光検出方法は報告されていましたが、光を電流に変換する効率が低く、実用化の課題となっていました。この問題に対し、本研究では赤外光がシリコン越しにアンテナに入射するよう、素子の裏側から光照射する構成とすること、そして、金属ナノアンテナがシリコンに埋め込まれた構成とすることにより、光を電流に変換する効率が向上し、高い感度が得られることがわかりました。この構造を作るために、本成果ではMEMS (Micro Electro-Mechanical Systems)（注2）による半導体微細三次元加工技術を用いています。本成果で得られた高感度赤外受光素子は、安価で半導体集積回路との統合が可能ですので、赤外光イメージャや各種センシング用途への応用が可能です。

本成果は、2020年9月17日の独国論文誌 *Advanced Materials Interfaces* に掲載される予定です。

3. 発表内容：

近年、シリコンを材料として用いた、赤外検出素子の研究が注目されています。なかでも代表的なものは、シリコン上に表面プラズモン共鳴を生じる金属ナノアンテナ構造を形成し、赤外光を電流に変換するものです。光が金属ナノアンテナ構造に入射すると、共鳴条件が満足されれば、金属内の自由電子の共鳴振動である表面プラズモン共鳴が発生します。そのとき、入射した光エネルギーは金属ナノアンテナ構造に吸収され、金属中の自由電子の一部を励起します。一方、金属が金や銅などの貴金属の場合、金属とシリコン（N型）の界面には高さ $\phi_B = 0.6 \sim 0.8$ eV 程度のエネルギー障壁であるショットキー障壁が形成されます。この障壁高さは近赤外波長の光エネルギーに相当するので、表面プラズモン共鳴によって励起された自由電子が障壁を乗り越えて、光電流が生じます（図1(b)）。したがって、電流の変化量を測定することにより、シリコンを材料とした赤外光検出が可能となります。ただし、これまでに報告されてきた研究例は感度が不十分だったので、高感度化が必要とされていました。

本研究では、感度向上の手段として、金属ナノアンテナ構造のシリコン基板への埋め込みと、センサ基板への裏面からの光照射の両立を目指しました。埋め込み構造にすることで、アンテナ構造は周囲をシリコンに囲われます。すると、光を吸収して励起された電子が、障壁に対して効率よく飛び込みやすくなるので、励起電子を電流に変換する効率が高くなります。さらに、裏側から光を照射することで、金属ナノアンテナの中でもシリコンとの界面のすぐ近くで励起電子が発生するので、ゼロ距離で障壁に飛び込むことができます。励起電子が余分な距離を移動する必要がなくなるので、エネルギーロスがなくなり、高感度化を見込めます。

本研究グループは、これらの条件を満たすために、N型シリコン基板上に垂直なナノホールを設け、傾斜蒸着法を用いてホールの底部に銅製のナノアンテナを形成しました（図2(a), (b), (c)）。この際、ナノホールの側面にも銅の薄膜が形成され、ナノホール外部との通電が確保されます。また、銅アンテナ構造はそれ自体がN型シリコンとショットキー障壁を形成するので、入射光照射による表面プラズモン共鳴を介して、励起した電子を連続的にシリコンに注入します。実作デバイスでは、 $\phi_B = 0.65$ eV のショットキー障壁が形成されました。ナノホールの寸法をパラメータとして感度を計測した結果、開口 150 ナノメートル四方、深さ 560 ナノメートルのナノホールを 500 ナノメートル間隔で密にア

レイ配置したときに最大となりました波長 1,550 nm の近赤外光照射に対して 9.8 mAW と、これまでに報告されているシリコン製のアレイ型赤外検出素子では最高の感度が得られています（図 3）。この研究成果は、安価かつ半導体集積回路への統合が可能な赤外受光素子の実現に向けた大きな一歩となります。

4. 発表雑誌：

研究論文名：Densely Arrayed Active Antennas Embedded in Vertical Nanoholes for Backside-Illuminated Silicon-Based Broadband Infrared Photodetection

著者：安永竣（東京大学大学院情報理工学系研究科（電気通信大学特別研究学生））、高橋英俊（慶應義塾大学理工学部専任講師）、高畑智之（東京大学大学院情報理工学系研究科特任准教授）、下山勲（富山県立大学学長）、菅哲朗（電気通信大学大学院情報理工学研究科准教授）

公表雑誌：Advanced Materials Interfaces

公表日：2020 年 9 月 17 日

DOI: 10.1002/admi.202001039

5. お問い合わせ先：

（研究に関すること）

電気通信大学大学院情報理工学研究科 准教授 菅 哲朗

E-mail : tetsuokan@uec.ac.jp

URL : <http://www.ms.mi.uec.ac.jp/>

富山県立大学 学長 下山 勲

E-mail : i-shimoyama@pu-toyama.ac.jp

URL : <https://www.pu.toyama.ac.jp/>

（報道に関すること）

電気通信大学 総務企画課広報係

E-mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp

富山県立大学 教務課情報研究係

E-mail : johokenkyu@pu-toyama.ac.jp

6. 用語解説：

（注1）表面プラズモン共鳴：金属と誘電体界面に発生する、金属表面の自由電子の共鳴的振動。照射した光が、金属ナノアンテナの構造により決まる電子振動との結合条件を満たしたときに、励起される。

（注2）MEMS（Micro Electro-Mechanical Systems）：微小機械電気システムの略称。半導体加工技術を利用して、シリコンなどの半導体上に 3 次元構造を作り、電気的要素と融合して実現されたセンサなどのデバイスシステムのこと。

（注3）ショットキー障壁：金属とシリコンなどが接合したときに形成される、エネルギー障壁のこと。電流の整流機能があり、ダイオードとして振る舞う。

添付資料：

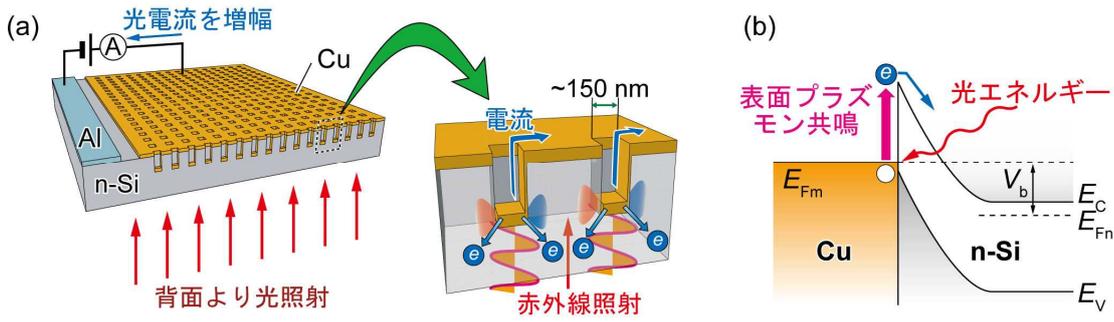


図1 シリコン製赤外受光素子、(a) デバイスの構成図、(b) 光を電流に変換するショットキー障壁のメカニズム

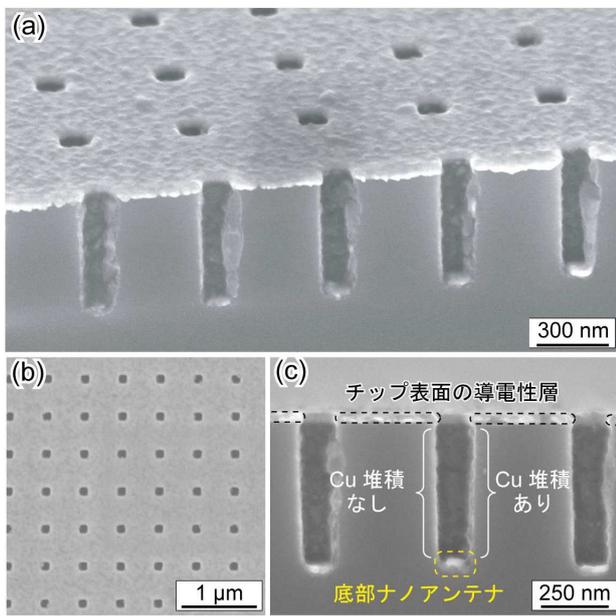


図2 製作した赤外受光素子の電子線顕微鏡図、(a) 鳥観図、(b) 上面図、(c) 断面図

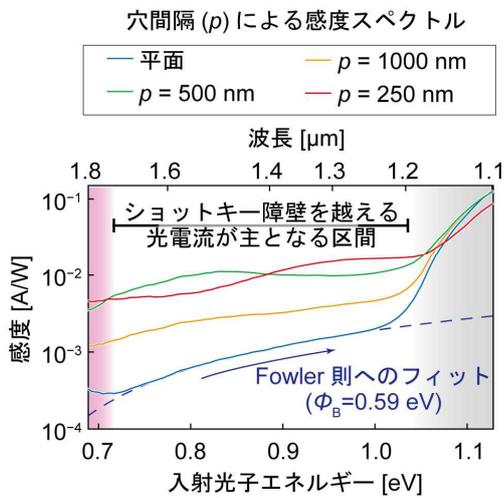


図3 赤外受光素子の入射波長に対する感度