

非毒性量子ドットによる SWIR光検出器とイメージセンサの実現

サリー・コール・ジョンソン

スペインの研究者らは、重金属を含む量子ドットの有益な特性を維持する非毒性量子ドットを開発し、それを使用して高性能なSWIR光検出器とイメージセンサを実現した。

現時点において、短波赤外 (short-wave infrared : SWIR) 領域に感度を持つ量子ドットを、大衆市場分野向けの主要な実現技術に転換するには、根本的な障害が存在する。量子ドットには、鉛、カドミウム、水銀など、電気・電子機器における有害物質の使用を制限する欧州連合 (EU) の規制である RoHS (Restriction of Hazardous Substances) 指令の対象となる重金属が含まれている場合が多いためだ。

民生エレクトロニクス市場で事業を運営する OEM (Original Equipment Manufacturer) は、そうした有害物質を排除した量子ドット技術を求めているため、スペインの光科学研究所 (The Institute of Photonic Sciences : ICFO)

の機能的光電子ナノ材料を専門とするゲラシモス・コンスタタトス教授 (Gerasimos Konstantatos) 率いる研究者チームは、室温で機能する非毒性量子ドット (図1) の開発に乗り出した。

「赤外領域における量子ドットに関するこれまでのほぼすべての取り組みが、鉛、カドミウム、または水銀に基づいているが、学術機関においてそうした物質を使用することが、エレクトロニクス業界によるこの技術の採用を阻む、大きな障害になり得るということ、認識することが重要である」と、コンスタタトス氏は述べた。「われわれは、非毒性の量子ドットの研究と開発を目指すべきだ。最終的には、われわれが研究室で開発している技術

が、市場と社会に影響を与えることを望んでいるのだから」(コンスタタトス氏)。

研究のセレンディピティ

同チームは、AgBiS₂ (銀とビスマスと硫黄からなる鉱物) ナノ結晶に基づく非毒性太陽電池を開発するプロジェクトに取り組んでいた。より多くの太陽光を取得するためにこの材料のバンドギャップを減少させることが目的だったが、それが好奇心をそそる思いがけない発見につながった。

同チームの方法は、重金属を含む量子ドットの有益な特性を維持しつつ、サイズ調整可能でホスフィンフリーのテルル化銀量子ドットを合成するもので、SWIRコロイド量子ドット技術を量産市場に導入するための道を開く。

研究者らは、太陽光発電デバイスの性能を向上させるために、スペクトル範囲が拡大するように AgBiTe₂ (テルル化銀ビスマス) ナノ結晶を合成する方法を探究する過程で、テルル化銀 (Ag₂Te) という副産物を得た。

「AgBiTe₂ を作製する可能性を調べていたが、ナノ結晶のサイズとともに変化する、良好な励起子ピークのような吸収スペクトルを示す溶液が得られ、それは、量子ドットの形成を指し示すものだった。そこでこれらの量子ドットを解析したところ、鉛フリーのオプトエレクトロニクス、特に光検出器の有望な候補になり得ることに、すぐに気づいた」と、コンスタタトス氏は説明した。

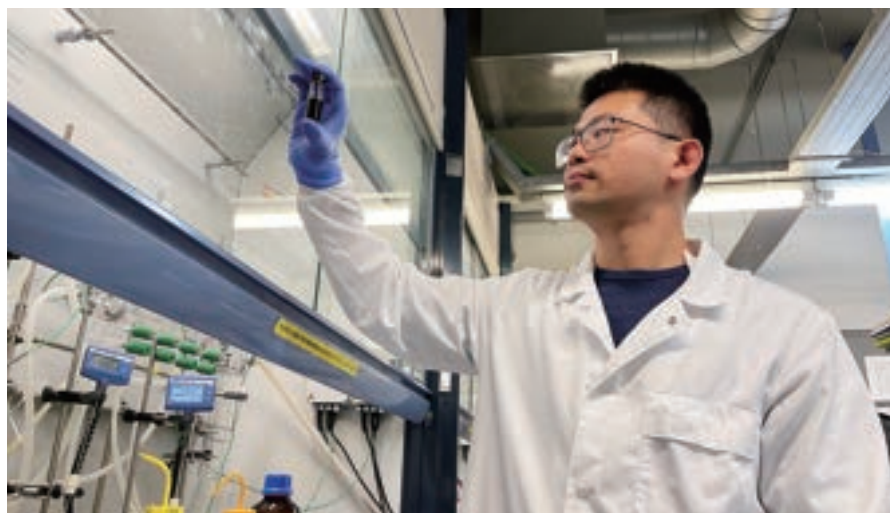


図1 チームが開発した非毒性量子ドットのサンプルを手を持つICFOの研究者ヨンジェ・ワン氏 (Yongje Wang)。写真提供:ICFO

SWIR光検出器(図2)とイメージセンサに対するその可能性に気づいた同チームは、ホスフィンフリーのテルル化銀を合成するための新しいプロセスの実現と制御に、研究目的を転換した。ホスフィン、光検出に関連する量子ドットの光電子特性に有害な影響を与える可能性があるためである。

新しい合成方法は、テルル前駆体や銀前駆体など、さまざまなホスフィンフリー錯体を使用するもので、これによって同チームは、広い範囲のスペクトルにわたって適切に制御された粒度分布と励起子ピークを持つ量子ドットを得ることに成功した。作製と特性評価を行ったところ、合成された量子ドットは、1500nmを超える明確な励起子ピークを持つ、素晴らしい光学特性を示した。

そこで、このホスフィンフリー量子ドットを使用して、ITO(酸化インジウムスズ)コーティングされたガラス基板上に簡単な実験室規模の光検出器を作製し、デバイスの特性評価と特性測定を行った。

最初に作製したフォトダイオードはSWIR光の検出性能が低かったため、再設計を行ってバッファ層を追加することにした。この調整により、光検出器の性能が向上し、350nm~1600nmのスペクトル範囲、118dBを超える線形ダイナミックレンジ、110kHzを超える-3dB帯域幅、約1012 Jonesの室温検出率を備える、SWIRフォトダイオードが得られた。

この過程における最大の課題は、適切に機能するダイオードを形成するために、量子ドットスタックをどのように積層するかを考案することだった。スタックを実験室のガラス基板からCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor: 相補型金属酸化膜半導体)

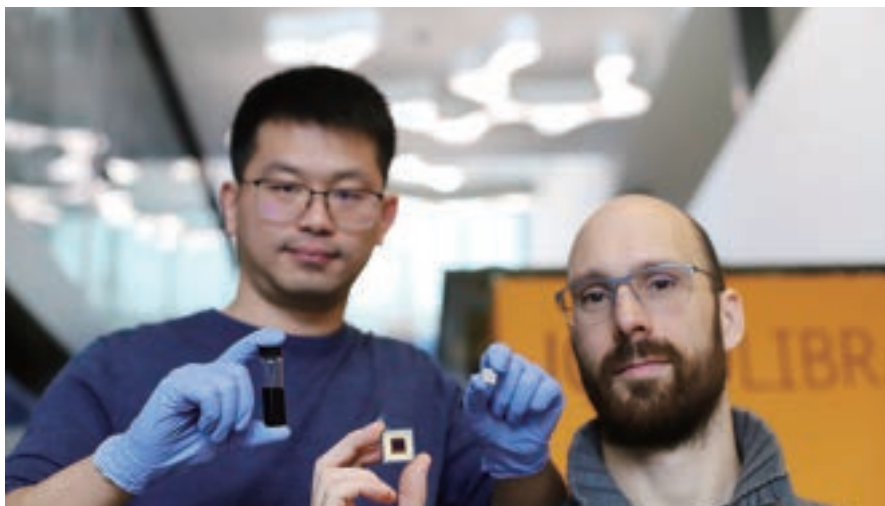


図2 非毒性量子ドットのサンプルとチームが開発した光検出器を手に持つ、ヨンジェ・ワン氏(左)とジュリアン・シュライヤー氏(Julian Schreier、右)。写真提供:ICFO

焦点面アレイ(Focal Plane Array: FPA)に集積する作業も、開発と最適化にいくらかの時間を要した。

Qurv社との連携

重金属を含まない量子ドットに基づく光検出器の開発に成功した後、研究者らはさらに一歩進んで、ICFOのスピンオフ企業であるQurv社と手を組み、概念実証としてSWIRイメージセンサを構築することによって、その可能性を実証した。

同チームは、この新しいフォトダイオードをCMOSベースの読み出し集積回路(Read Out Integrated Circuit: ROIC)FPAに組み込み、概念実証となる非毒性で室温動作のSWIR量子ドットに基づくイメージセンサを、初めて実装した。対象物体の画像を複数枚撮影することによって、SWIR領域におけるその動作の確認を行い、SWIR光下でのシリコンウエハの透過率の画像化と、可視光領域において不透明なペットボトルの中身の可視化に成功した。

「民生エレクトロニクス向けの低コストの技術でSWIRにアクセスできるようになれば、このスペクトル範囲の

可能性が幅広い分野に対して解き放たれる。例えば、自動車業界向けのビジョンシステムを改良して、悪天候下での視界と運転を改善することができる。約1.35~1.40 μ mのSWIR帯域は、昼夜ともに背景光のない、目に安全な領域であり、自動車、拡張現実、仮想現実の分野を対象とした、長距離の光検出と測距(LiDAR)や3次元イメージングをさらに可能にする」と、ゲラシモス・コンスタントス氏は述べている。

同チームが知る限り、納得のいく性能を備えた、溶液処理された非毒性SWIRフォトダイオードを実現して、CMOS ROICに集積したのは、彼らが初めてである。「われわれの結果は、Ag₂TE量子ドットが、低コストで高性能なSWIR光検出器アプリケーションに対する有望なRoHS準拠材料であるという事実を、さらに裏付けるものである」と、コンスタントス氏は述べた。

同チームは現在、「検出器の量子効率の増加による性能の改善に取り組んでおり、環境と温度に対するレジリエンスをさらに評価して改良するつもりだ」と、コンスタントス氏は付け加えた。