

feature

量子ドット検出器

太陽電池接合部になる可能性をもつ コロイド量子ドットフォトトランジスタ

ジョン・ウォレス

アルミニウムドープ酸化亜鉛上の硫化鉛量子ドットのサブ単分子層は光電界効果トランジスタを形成し、そのバンドギャップからは光起電力素子への応用に適した波長可変性が得られる。

フォトダイオードや光伝導体の代わりにフォトトランジスタを使用して光を捕捉する概念は魅力的だ。例えば、光電界効果トランジスタ(光FET)のようなフォトトランジスタは、暗電流の低い光伝導検出器としての可能性を備えている。

実用性をもつ光FETの創成には4つの条件が必要になる。第一に、光電子は増感材料から電子アクセプタチャネル(EAC)へ移動しなければならない。第二に、EACを流れる二次光キャリアは往復し、光電流を発生しなければならない。第三に、増感層はすべての光を吸収し、すべてのキャリアを効率よくEACに注入できる十分な厚みが必要になる。最後に、EACの厚みは十分に薄くして、暗電流の発生を低くする必

要がある。

光FETは応用可能な素子へと進歩している。カナダのトロント大学(University of Toronto)の研究者たちは、硫化鉛(PbS)コロイド量子ドット(CQD)を増感材料にした可変波長量子ドット光FETを作製することによって、4つの目標のうち2つが達成されたと報告した⁽¹⁾。この光FETはCQDを適切に改質することでバンドギャップの波長可変を得ている。

異なるバンドギャップによる試験

このCQDは「サブ単分子層」として蒸着され、接続のない単分子層量子ドットの領域とCQDのない領域がパッチワークのように混在する。CQDパッチは相互の接触がないため、この配置

は単分子層の電気伝導率が增强されない設計となり、研究者の実験から明らかかなように、電気伝導率の增强によらないチャネルへの電子注入が集中的に起こる。

ガラス基板上の事前に形成された金電極のナノパターンには膜厚50nmのアルミニウムドープ酸化亜鉛(AZO)のEACが蒸着された(図1)。このEACは研究のために3mmの長い電極が2.5から100 μ mの異なる間隔で配置された。3種類のAZO膜が5%、10%、20%の酸素分圧下で蒸着された(蒸着時の酸素分圧が高いほど、AZO膜の電子との親和性は高くなり、電気伝導率が低くなる)。これらのCQDは0.5mg/mLの密度のオクタン中で蒸着され、接合パッドの近傍のAZOは除去され、活性領域だけがサブ単分子層で覆われた。研究者たちは走査電子顕微鏡法を使用して、CQD膜の不連続性を確認した。

量子ドットサイズの異なるCQDの4つのバッチを試作し、730、854、950および1475nmのバンドギャップが得られるようにした(図2)。同一の試料を用いて4つの異なるバンドギャップを生成する方法も試験された。すべての試料は同一の条件下、つまり225 μ W/cm²の強度と0.2Hzの変調速度をもつ627nmのレーザー光が照射され、1000V/cmの電圧を印加して測定された。

光電流はCQDのサイズが大きくなると増加したが、このことは量子ドットが大きいほど赤色光の吸収が増加することによる。しかし、いずれのCQDサイズも光電子は効果的に移動した。

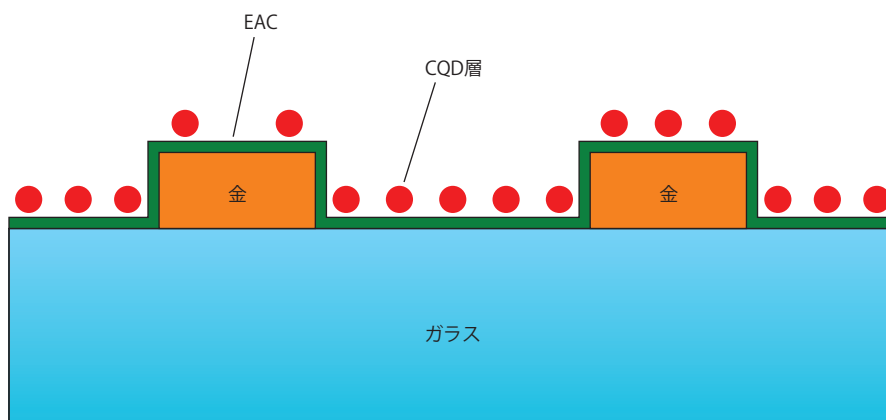


図1 波長可変コロイド量子ドット光電界効果トランジスタにはガラス上の金電極、電子アクセプタチャネル(EAC)として機能するアルミニウムドープ酸化亜鉛の層およびコロイド量子ドット(CQD)のサブ単分子層が含まれる。電極間に電圧を加えると、入射光はAZO/CQD界面における電子の解離を引き起こす。

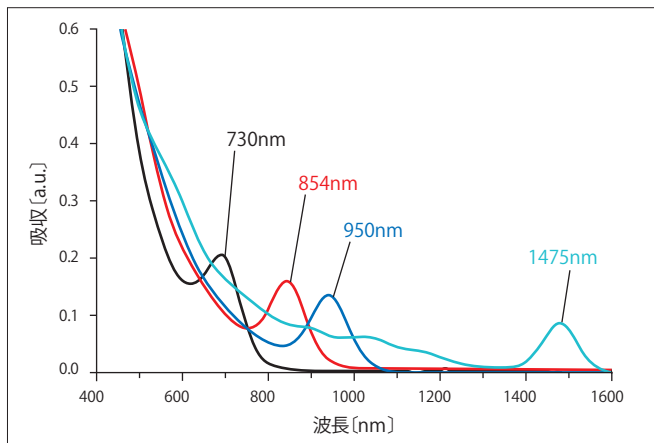


図2 4つの異なるバンドギャップをもつコロイド量子ドットを使用して、それぞれの光FET実験が行われた。この吸収スペクトルはそれらのバンドギャップを示している。

727nmのバンドギャップを生成するCQDの場合、5%の酸素過剰AZOチャネル変調時の出力電流は4.1から6.2nAの間で変化し、20%の酸素過剰チャネルでは2.05から2.25nAの間で変化した。1475nmバンドギャップの場合、5%の酸素過剰チャネル変調時の出力電流は113から122nAの間で変化し、20%の酸素過剰チャネルでは23から27nAの間で変化した。

AZO膜中の酸素過剰度が増加すると、素子の時間応答は改善され、暗電流は減少した。このことは酸素空孔準位が高いほど捕捉密度が低くなることによる。量子ドットが大きい(より長波長のバンドギャップ)ほど時間応答も改善された。これらの効果とQCDサイズおよびAZO膜の製作条件の最適化によって、光FET特性は特定の波長範囲に対して最適化される。

照射強度を変える実験では強度が高いほど外部利得は減少したが、この効果はすべてのCQDバンドギャップとAZO膜に共通であった。

研究者たちはスパッタした二酸化チタン(TiO₂)を電子アクセプタチャネル材料に配置した素子の比較試験を行った。TiO₂を用いたCQD太陽電池は良好に動作し、バンド端の位置はAZO膜の場合と同様であった。TiO₂を用いた素子は

より高速の時間応答を示したが、その外部利得はAZOを用いる光FETに比べると最大でも10分の1以下であった。

赤外光起電力接合の可能性

CQD光FETの最適な応用先の1つは光起電力素子かもしれない。多重接合太陽電池はすべての場所に2層から4層の多層構造が含まれ、それぞれが異なる波長帯に最適化されるため、非常に高い効率が得られる。このような太陽電池の設計は可視スペクトルの広い領域で動作し、可視光と赤外線を組み合わせた動作も可能になる。AZO膜を用いる光FETの外部利得は長波長ほど高いため、トロント大学の研究者たちは、この光FETが将来は高効率三重接合太陽電池の設計に使用され、約1600nmのバンドギャップが必要となる最小バンドギャップ接合の長波長でも動作すると確信している。

しかしながら、何よりもAZO膜を用いる素子のCQD増感層は、電子移動度を向上させ、すべての光子の吸収に十分な層厚を確保して、引き離された電子の多くがEAC内を往復するようにしなければならない。

参考文献

- (1) S. Ghosh et al., Appl. Phys. Lett., 99, 101102(2011).