

「量子ドット」という言葉は大変一般的になり、今日耳にしたことがないという研究者は少ないと思います。さまざまな特徴をもつ量子ドットは、電気光学材料という側面だけを取っても非常に良質な性質をもっており、現在さまざまな応用が研究され、一部の技術は民生用化もされ始めています。代表的なところでは、生体マーカー、ディスプレイ用発光素子、レーザー、太陽電池などが挙げられます。また、研究用途では複数のメーカーがコロイド状の量子ドットを商品として扱っており、誰でも簡便に使用できる状況です。

その一方で、量子ドットは製造のノウハウをもつ一部のグループが扱う特殊な材料というイメージもあり、興味はあっても実際に使用したことはないという方が多いのではないかと思います。そこで本稿では、量子ドットを扱ったことのない光学研究者を対象に、基本的な特徴と市販品を使用する際の選び方を解説したいと思います。

## 1. 量子ドットの特徴

まず、量子ドットの特徴と製法について簡単に解説します。量子ドットは簡単にいうと「一辺 10 nm 程度以下の半導体結晶」です。結晶サイズが電子の広がりよりも小さい場合、不確定性原理から電子の運動エネルギーは増大します。これが三次元のどの方向からも起こる量子ドットは、組成にもよりますが、おおむね一辺 10 nm 以下のサイズです。発光素子としての基本的な性質には、以下の3点が挙げられます。

- ・ドットサイズによって電子の励起エネルギーが異なるので、同一の組成でもサイズによって発光波長を変えることができる
  - ・エネルギー準位が離散化しているため、単色性の高い発光が得られる
  - ・電子と正孔が空間的に閉じ込められているため、発光再結合が起りやすく発光効率が高い
- このような量子ドットは、おもにボトムアップ的手法によって作製され、その代表的な製法は2つあ

ります。1つは半導体の薄膜結晶のエピタキシャル成長を用いるもので、基板上に異種材料を成長させて格子定数のミスマッチから島状の成長を促し、同一面上に量子ドットを形成します。もう1つは化学合成によるもので、原料となる錯体と有機溶剤を一定の条件で混合することで、溶液中に浮遊する量子ドット、つまりコロイド溶液が得られます<sup>1)</sup>。

高価な装置を使用する前者に比べ、後者は比較的容易に製造できるように思えますが、実際には、細かな条件により得られるドットの大きさや状態が異なり、品質を安定させることは困難です。そのため、あくまで量子ドットを光学分野の研究のために「道具」として使用する場合は、市販のコロイド状量子ドットを使うという選択肢が有力になります。

## 2. 市販量子ドットの選び方

コロイド状量子ドットは前述の通り溶液中に浮遊しているため、瓶やチューブに入った試薬として販売されます。製造・販売しているメーカーはさまざまですが、日本国内で入手可能な例としては、Sigma-Aldrich 社<sup>\*1</sup>、NN-Labs 社<sup>\*2</sup>、Quantum Design 社<sup>\*3</sup>、Evident Technology 社<sup>\*4</sup>などが挙げられます。本稿末尾に日本国内での取り扱い業者の Web サイトの URL を記します。価格は組成にもよりますが、1 mL 程度の最小量ならばおおむね単価 5 万円以下で入手可能です。また、購入した量子ドットは冷蔵保存で半年から 1 年程度の品質が保証されています。取り扱いに関しては、製品安全データシート (SDS) を販売者から入手できるので、それに従えば問題ありません。

量子ドットの選び方ですが、まず組成に関しては光学的特性から選択します。図 1 に市販されるおもなコロイド量子ドットの組成と、そのサイズバリエーションでカバーする発光スペクトルの中心値を示しました。赤外領域では PbS<sup>\*4</sup>、可視光領域では CdSe<sup>\*1-3</sup>、紫外領域では CdS<sup>\*1,2</sup>などが対応します。図 1 の通り、特に可視から紫外光領域では環境負荷の高いカドミウム化合物のものが主流です。こ

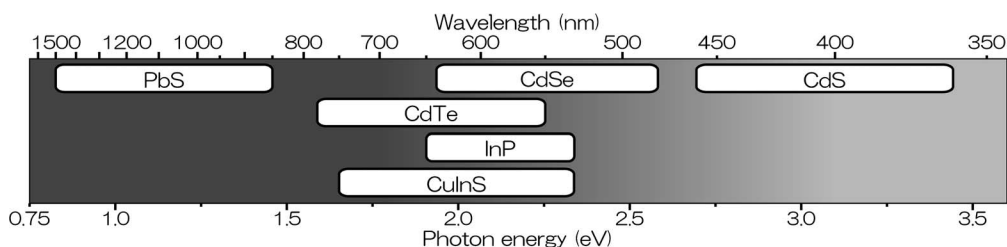


図1 市販されているコロイド量子ドットの組成と発光スペクトルの中心値.

これらの使用を避けたい方には、CuInS, InP<sup>\*2</sup>などカドミウム非含有のドットが選択肢として挙げられます。これらの中から、発光スペクトルの中心値だけでなくスペクトル幅、吸収スペクトルなどをカタログで確認して選ぶとよいでしょう。また、量子ドット本体をワイドバンドギャップ半導体の殻で覆ったコアシェルタイプの量子ドットは、より発光効率が高く、機械的、化学的にも安定になります。

次の選択基準は溶媒と表面修飾基です。こちらは実験上の取り扱い方から選択します。市販の製品の多くはトルエン溶液で、オレイン酸の表面修飾をもっています。これはコロイド状量子ドットの製法に由来するもので、ここからさらに工程を踏み、水溶液系の溶媒に置換したものも存在します<sup>\*2,3</sup>。このとき、表面修飾はカルボキシ基、アミノ基等に置換されます。また最近では、硬化性樹脂に量子ドットを分散させた製品もあります<sup>\*2</sup>。実験例として、修飾基と基板の親和性の違いを利用した、平面基板上で量子ドットを配列する手法を2件挙げます。マイカ基板と単分子膜の自己組織パターンにオレイン酸修飾の量子ドットを滴下することで、量子ドットアレイのラインアンドスペースを作製する手法が報告されています<sup>2)</sup>。一方で、石英ガラスなどの基板に電子線レジストでパターンを描画し、カルボキシ基修飾の量子ドットを滴下することで任意の領域にドットを堆積する手法が報告されています<sup>3,4)</sup>。このように積極的に修飾基を選ぶ理由がある場合はそれを基準に選ぶべきですが、特に希望のない場合でも、ピペット・チューブ等の器具や実験を行う基板

などが溶媒に適合することを確認する必要があります。

本稿では、量子ドットを扱った経験のない光学研究者を対象として、市販の量子ドットを扱うにあたっての初歩的な知識を記述しました。半導体を専門に扱われる方には物足りないだろう内容で誠に恐縮ですが、本稿で量子ドットを使うことに興味をもたれる方、材料とすることで研究の幅を広げられる方が少しでもいらっしゃいましたら幸いです。

(東京大学 野村航)

## 文 献

- 1) 川口春馬監修：ナノ粒子・マイクロ粒子の調整と応用技術（シーエムシー出版、2010）。
- 2) N. Lu, X. Chen, D. Molenda, A. Naber, H. Fuchs, D. V. Talapin, H. Weller, J. Müller, J. M. Lupton, J. Feldmann, A. L. Rogach and L. Chi: "Lateral patterning of luminescent CdSe nanocrystals by selective dewetting from self-assembled organic templates," *Nano Lett.*, **4** (2004) 885-888.
- 3) W. Nomura, T. Yatsui, T. Kawazoe, E. Runge and C. Lienau, and M. Ohtsu: "Direct observation of optical excitation transfer based on resonant optical near-field interaction," *Appl. Phys. B*, **107** (2012) 257-262.
- 4) M. Miyata and J. Takahara: "Colloidal quantum dot-based plasmon emitters with planar integration and long-range guiding," *Opt. Express*, **21** (2013) 7882-7890.

## 参考 URL

<sup>\*1</sup> <http://www.sigmaaldrich.com/japan.html/>

<sup>\*2</sup> <http://www.optosirius.co.jp/NN-Labs/>

<sup>\*3</sup> <http://www.qd-japan.com/>

<sup>\*4</sup> [http://www.oceanphotonics.com/products\\_et.html](http://www.oceanphotonics.com/products_et.html)