



## نقاط کوانتومی: از ساخت تا کاربرد

- مژده طاهریان<sup>۱\*</sup>، علی اصغر صباغ الوانی<sup>۲\*</sup>، فرزانه طباطبائی حسینی<sup>۳\*</sup>، رضا سلیمی<sup>۴</sup>، شیما موسی خانی<sup>۲\*</sup>
- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۳- استادیار، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵
- ۴- کارشناس ارشد، پژوهشکده رنگ و پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

تاریخ دریافت: ۹۱/۴/۳۱ تاریخ بازبینی: ۹۱/۷/۵ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۱۹

### چکیده

در سال‌های اخیر، تولید نقاط کوانتومی به دلیل خواص ویژه نوری، شیمیایی و الکتریکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های سنتز این نانو ذرات در دو دسته: روش آلی-فلزی و روش آبی قرار می‌گیرند. از آن جایی که نقاط کوانتومی حاصل از روش آبی، حلالیت بالایی در محیط آبی دارند اغلب برای کاربردهای پزشکی از آنها استفاده می‌گردد. این نانوذرات نیمه‌رسانا با توجه به خواص منحصر بفردشان در زمینه‌های گوناگونی از قبیل سلول‌های خورشیدی، LED، حسگرهای نوری و غیره کاربرد دارند. در حال حاضر بیشترین کاربرد آنها به عنوان حسگرهای زیستی در پزشکی و در تصویربرداری سلولی می‌باشد. تمرکز اصلی در بحث حاضر، بیشتر بر روی معرفی نقاط کوانتومی، نحوه ساخت و کاربردهای آنها خواهد بود.

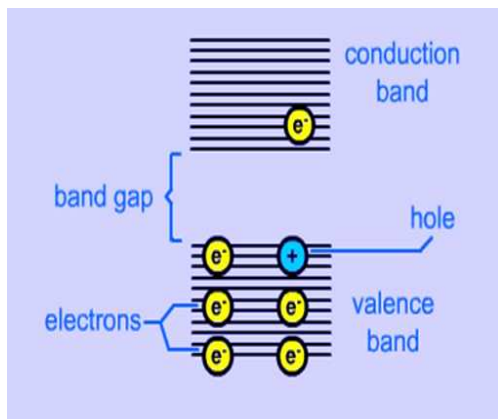
### واژه‌های کلیدی

نقاط کوانتومی، سنتز، اصلاح سطحی، حسگر زیستی.



## ۱- مقدمه

نقاط کوانتومی شامل عناصر گروه‌های II-VI، III-V، و IV-VI جدول تناوبی می‌باشند. جهت حذف تله‌های انرژی الکترون‌ها و حفره‌ها و به تبع آن بهبود خواص نوری، معمولاً از پوسته‌ای که شکاف انرژی بزرگتری نسبت به هسته دارد استفاده می‌شود. جهت تنظیم و تغییر خواص نوری نانوبلورها مانند تغییر طول موج فلوروسنس، بازدهی کوانتومی و طول عمر، می‌توان از نیمه رسانای دیگری به عنوان پوسته بر روی آن استفاده کرد. در چنین نانوبلورهای هسته/پوسته، پوسته می‌تواند به عنوان یک مانع بین هسته که از نظر نوری بسیار فعال است و محیط اطراف عمل کند و از حساسیت نانوبلور نسبت به محیط اطراف و اکسیداسیون سطح آن بکاهد. هم‌چنین پوسته می‌تواند با کاهش ترازهای معلق سطحی هسته که به عنوان تله‌های انرژی عمل می‌نمایند و انرژی را به صورت غیرتشنه‌ی تلف می‌کنند، بازدهی فلوروسنس را افزایش دهد و سبب بهبود خواص نوری گردد [۵]. اغلب قطر هسته در محدوده ۸-۲ nm و قطر پوسته بین ۴-۱ nm می‌باشد [۶].



شکل ۱- شکاف انرژی.

با توجه به این که خواص نقاط کوانتومی به شدت، وابسته به اندازه ذره آنها می‌باشد، کنترل ذرات در این محدوده بسیار حائز اهمیت است. چرا که با افزایش اندازه نانوذرات، شکاف انرژی کاهش یافته و طول موج انتشار یافته افزایش می‌یابد. در نتیجه با تغییر اندازه این نانوذرات می‌توان نشر رنگ در طول موج‌های مختلف را مشاهده کرد (شکل ۲) [۷].

مواد نانوساختار، دسته جدیدی از مواد هستند که ابعاد آنها در محدوده ۱-۱۰۰ nm است و می‌توانند به صورت خوشه‌هایی از نانوذرات با اشکال و اندازه‌های مختلف وجود داشته باشند که پتانسیل بالایی در بهبود عملکرد محصولات در بخش‌های مختلف صنعت دارند. با توجه به شکل این مواد، می‌توان آنها را به سه دسته صفربعدی، یک‌بعدی و دوبعدی تقسیم کرد [۱]. نقاط کوانتومی، خوشه‌هایی اتمی در مقیاس نانو هستند که شامل چند صد، تا چند هزار اتم از یک ماده نیمه‌هادی می‌باشند. اندازه ذره این مواد صفربعدی، در محدوده ۱-۲۰ nm بوده و با توجه به اثر تحدید کوانتومی<sup>۱</sup>، خواص فتولومینسنسی<sup>۲</sup> متفاوتی از خود نشان می‌دهند [۲،۳].

## ۲- معرفی نقاط کوانتومی

نانوبلورهای نیمه‌رسانا با ابعاد ۱-۲۰ nm، نقاط کوانتومی نامیده می‌شوند. در این نانوذرات، جریان الکتریکی توسط الکترون‌ها و حفره‌ها جا به جا می‌شود. این مواد یک نوار هدایت و ظرفیت دارند که توسط یک شکاف انرژی<sup>۳</sup> از هم جدا می‌شوند. در حقیقت شکاف انرژی، حداقل انرژی لازم برای انتقال الکترون از تراز ظرفیت به هدایت است. با انتقال این الکترون، یک حفره در تراز ظرفیت ایجاد می‌گردد که به این جفت الکترون-حفره، اگزایتون<sup>۴</sup> می‌گویند (شکل ۱) [۴]. تحدید کوانتومی منجر به بزرگ شدن شکاف انرژی با کاهش اندازه نقاط کوانتومی می‌گردد. بنابراین اگر شعاع نقاط کوانتومی به شعاع بوهر اگزایتون<sup>۵</sup> نزدیک شود (مساوی و یا کوچکتر)، حرکت الکترون‌ها و حفره‌ها به ابعاد نقاط کوانتومی محدود می‌شود که سبب افزایش انتقال انرژی اگزایتونی و مشاهده شیفت آبی در شکاف انرژی و لومینسنس خواهد شد. در واقع شعاع بوهر یک مقدار بحرانی است که وقتی شعاع نقاط کوانتومی از آن کوچکتر شود، اثر تحدید اهمیت پیدا می‌کند [۲].

<sup>1</sup> Quantum confinement effect

<sup>2</sup> Photoluminescence

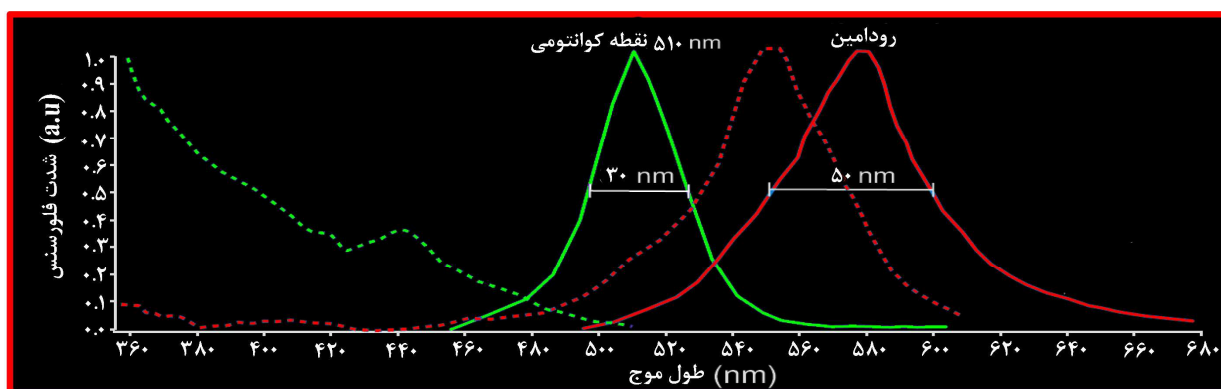
<sup>3</sup> Bandgap

<sup>4</sup> Exciton

<sup>5</sup> Excitonbohr radius



شکل ۲- تغییر رنگ نشر حاصل از تغییر اندازه ذرات نقاط کوانتومی CdSe. اندازه ذرات از سمت راست به چپ سیر نزولی دارد. رنگ آبی و قرمز به ترتیب مربوط به نقطه کوانتومی با اندازه ذره ۵ و ۲ نانومتر می‌باشد [۷].



شکل ۳- مقایسه طیف جذب (نقطه چین) و گسیل (خط)  $QD$  (سبز رنگ) و ماده رنگزای رودامین (قرمز رنگ).

امروزه تحت فرآیند دوم از روش‌های مختلفی جهت ایجاد ذرات نانو استفاده می‌شود که عبارتند از: روش‌های شیمیایی، روش حرارتی و روش مکانیکی [۹-۱۱].

سنتر کلوییدی نانوذرات نیمه‌رسانا را می‌توان به دو دسته عمده آلی-فلزی<sup>۵</sup> و آبی تقسیم نمود که معمولاً جهت تولید نقاط کوانتومی از آنها استفاده می‌شود. نانوذرات حاصله از نظر شکل، ترکیب و اندازه یکنواخت هستند. شیمی سطح آنها، هم برای بررسی خواص وابسته به اندازه‌شان و هم برای کاربردهای متفاوتشان بسیار دارای اهمیت است. به طور کلی سنتر کلوییدی نانوذرات، شامل چندین مرحله است:

- هسته‌گذاری حاصل از محلول هموزن اولیه
  - رشد هسته‌های تشکیل شده
  - جداسازی ذرات با اندازه مطلوب از مخلوط واکنش و غیره
- خودسامانی نانوذرات نیمه‌رسانا یک روش مناسب دیگر جهت تهیه ساختارهای بزرگتر و منظم می‌باشد که روشی کم هزینه و با بازدهی بالاست. این خودسامانی جهت کاربرد نانومواد در دستگاه‌های با فناوری بالا ضروری است [۱۲]. نظر به این که الکترون‌ها در چند جهت محدود می‌شوند، می‌توان رشد نقاط کوانتومی را به صورت مسطح، عمودی و خودسامانی شده در نظر گرفت. در نقاط کوانتومی مسطح و عمودی، محدود الکترواستاتیک و ساختاری به ترتیب منجر به ایجاد ذراتی با ابعاد ۱۰ و ۱۰۰ nm می‌شود. در حالی که در نقاط کوانتومی خودسامانی شده معمولاً ساختارهای هرمی با اندازه تقریبی ۵ تا ۱۰ nm وجود دارند که جهت کاربرد در لیزر بسیار مناسب می‌باشند [۱۰].

### ۳-۱- روش آلی-فلزی

در این روش نقاط کوانتومی از طریق پیرولیز<sup>۶</sup> پیش‌ماده‌های آلی-فلزی در یک حلال داغ حاصل می‌شوند. نقاط کوانتومی به دست آمده بازدهی کوانتومی نسبتاً بالا (۵۰-۱۰۰٪) و توزیع اندازه ذره تقریباً باریکی

این مواد در مقایسه با مواد رنگزای آلی مزایایی از قبیل طیف جذبی پهن، طیف نشر متقارن و بسیار باریک (۲۵-۴۰ nm)، پایداری نوری بالا<sup>۱</sup> و غیره را دارند (شکل ۳). نقاط کوانتومی ۱۰ تا ۱۰۰ برابر درخشان‌تر از مواد رنگزای آلی هستند و ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر در مقابل فتوبلیچینگ<sup>۲</sup> پایدارترند. این نانوبلورها بازدهی کوانتومی بسیار بالا (تا ۹۰٪) و همچنین طول عمر فلوروسانس طولانی دارند (بیشتر از ۱۰ نانوثانیه). در شکل ۳، طیف جذب و نشر یک نقطه کوانتومی با ماده رنگزای رودامین نشان داده شده است.

طیف وسیع جذب مربوط به نقطه کوانتومی سبب می‌گردد که در محدوده بسیار بزرگتری امکان تهییج وجود داشته باشد. همچنین باریک‌تر بودن طیف نشر آن، سبب شناسایی دقیق‌ترشان می‌شود [۴،۶،۸].

### ۲- روش‌های ساخت

به طور کلی تغییر در خواص نانوذرات ناشی از دو عامل افزایش نسبت سطح به حجم و تغییر در ساختار الکترونیکی با توجه به اثرات تحدید کوانتومی می‌باشد. از جمله مواردی که تأثیر بسزایی بر خواص نهایی نقاط کوانتومی دارد، روش سنتز آنهاست [۲].

به طور کلی فرآیند سنتز نانو ذرات به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: روش بالا به پایین<sup>۳</sup>: ایجاد ذرات در ابعاد نانومتر با ریزکردن ذرات بزرگ. روش‌هایی مانند لیتوگرافی پرتوی الکترونی و لیتوگرافی نوری روش پایین به بالا<sup>۴</sup>: سنتز کلوییدی نانوذرات در یک حلال مناسب معمولاً به عنوان روش پایین به بالا برای رسیدن به سیستم‌های نانو ساختار اتلاق می‌شود که در واقع نانو ساختارها از اتم‌ها یا مولکول‌ها ایجاد می‌شوند. با توجه به هزینه‌های بالای ایجاد ذرات نانو با استفاده از روش بالا به پایین، مشکل بودن و زمان‌بر بودن این فرآیند، معمولاً سنتز نانوذرات با استفاده از روش دوم انجام می‌شود.

<sup>5</sup> Organometallic

<sup>6</sup> Pyrolysis

<sup>1</sup> Photostability

<sup>2</sup> Photobleaching

<sup>3</sup> Top-down

<sup>4</sup> Down-top

۲-۲-۲- روش آبی<sup>۲</sup>

در این روش تولید نانوبلورها از طریق یک واکنش تبادل یونی با افزودن عامل پایدارکننده در آب انجام می‌شود [۲۰].

این روش منجر به تولید نقاط کوانتومی با حلالیت بسیار بالا، سازگاری زیستی بسیار خوب و پایداری حتی تا ۲ سال پس از سنتز خواهد شد. این روش نسبت به روش آلی-فلزی، قابلیت دوباره تولید بالاتر و هزینه پایین‌تری دارد و در آن نیازی به دماهای بالا و پیش‌ماده‌های سمی و گران نیست. با استفاده از این روش می‌توان به نانوذرات کوچکتر دست یافت [۱۷].

تاکنون نانوذرات مختلفی از گروه II-VI جدول تناوبی در حضور تیول‌های متفاوتی به عنوان پایدارکننده‌ها در محلول‌های آبی تولید شده‌اند. به عنوان مثال در اولین مرحله تولید CdTe، گاز H<sub>2</sub>Te حاصل از واکنش Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> در دمای اتاق به محفظه واکنشی شامل نمک فلز و یک پایدارکننده در pH مناسب وارد می‌شود.

در این مرحله پیش‌ماده‌های محلول در آب نانوذرات تشکیل می‌شوند که اغلب به صورت کمپلکس‌های فلز-عنصری از گروه ۶ جدول تناوبی<sup>۳</sup> تیول هستند. اعمال حرارت در مرحله بعد سبب پیشرفت واکنش شیمیایی بین فلز و عنصری از گروه ۶ جدول تناوبی می‌شود که منجر به هسته‌گذاری و سپس رشد آن می‌گردد. (شکل ۵).

دارند. نظر به این که در این روش دما بسیار بالاست (۲۰۰-۳۶۰°C) درجه بلوری شدن نقاط کوانتومی حاصله بالا می‌باشد. با توجه به سطح زیاد این نانوذرات، محلول‌های کلونیدی ناپایداری هستند و باید اصلاح سطحی صورت گیرد.

به طور کلی دو روش تعویض لیگاند و محبوس کردن نقاط کوانتومی توسط پلیمرهای آمفی‌فیلیک جهت اصلاح سطحی صورت می‌گیرد. از آن جایکه لیگاندها با سطح نقاط کوانتومی برهم‌کنش دارند، روی خواص لومینسنسی آنها اثر می‌گذارد.

در این روش معمولاً از تری‌اکتیل‌فسفین‌اکساید<sup>۱</sup> (TOPO) به عنوان لیگاند پایدارکننده استفاده می‌شود. از این رو، تک لایه‌ای از مولکول آب‌گریز TOPO، سطح نقاط کوانتومی را می‌پوشاند.

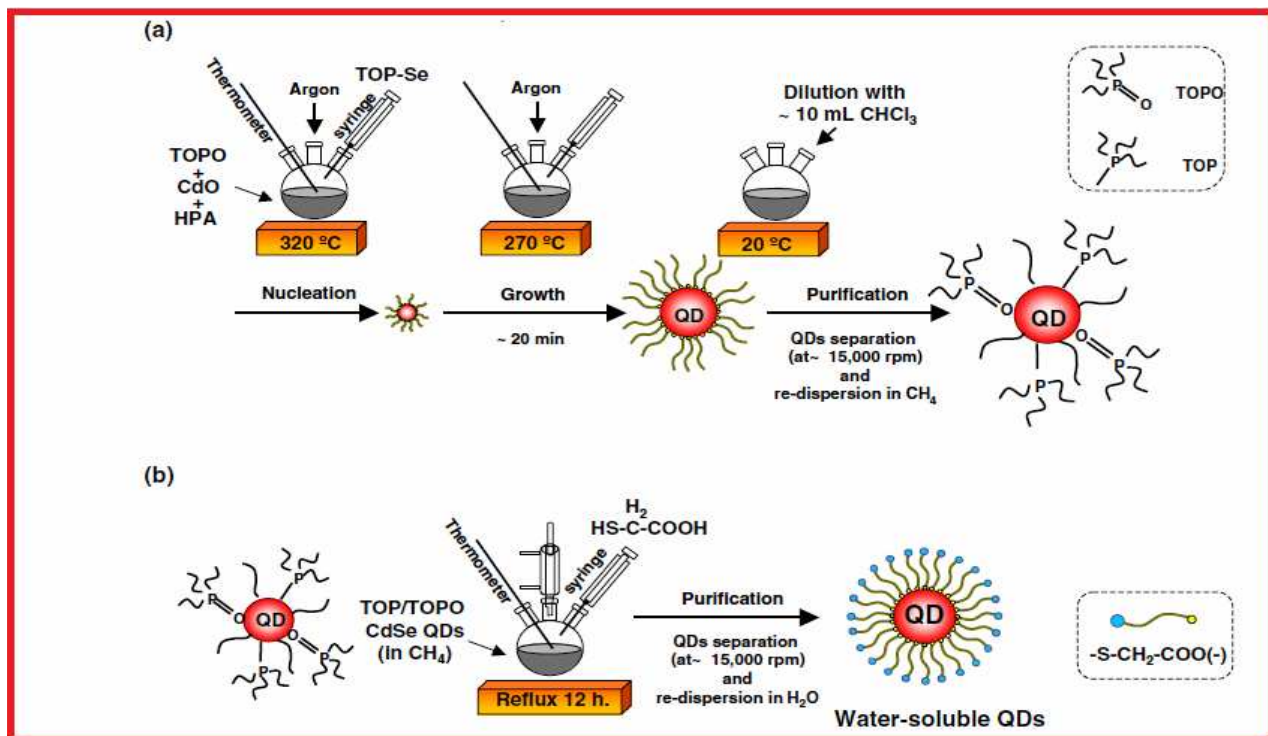
جهت حلالیت در آب باید مولکول‌های TOPO با لیگاندهای دیگری جایگزین شود. لیگاندهای مذکور باید دارای دو بخش باشد. بخشی که بتواند مستقیماً به سطح نانوبلور متصل شود مانند تیول‌ها، کربوکسیلیک اسیدها و بخش قطبی دیگری مانند هیدروکسیل‌ها که آب‌دوست هستند. از آنجایی که معمولاً تعویض لیگاند سبب کاهش خواص لومینسنسی می‌گردد و در بافرهای زیستی تجمع می‌کنند، امروزه به سمت تولید نقاط کوانتومی از روش دوم تمایل شده است [۱۵-۱۳].

در شکل ۴، نمونه‌ای از تولید و اصلاح سطح نقطه کوانتومی CdSe نشان داده شده است.

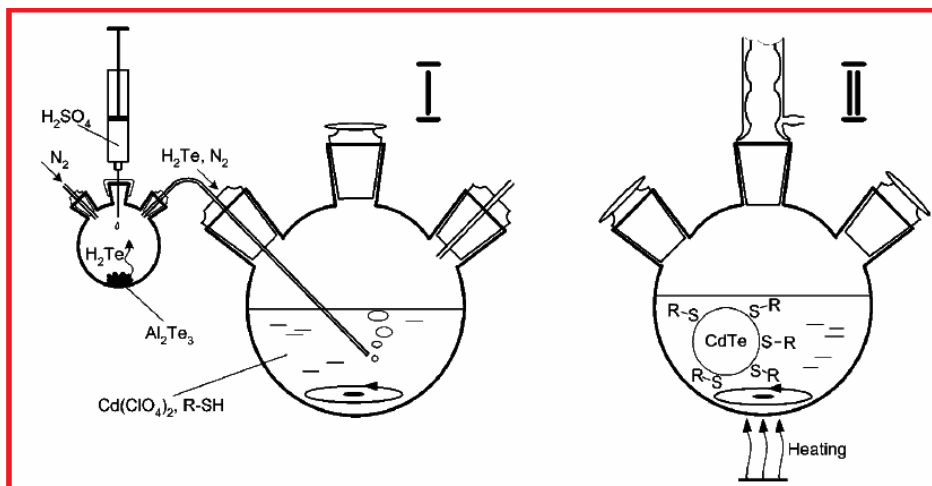
<sup>1</sup> Tri octyl phosphine oxide

<sup>2</sup> Aqueous

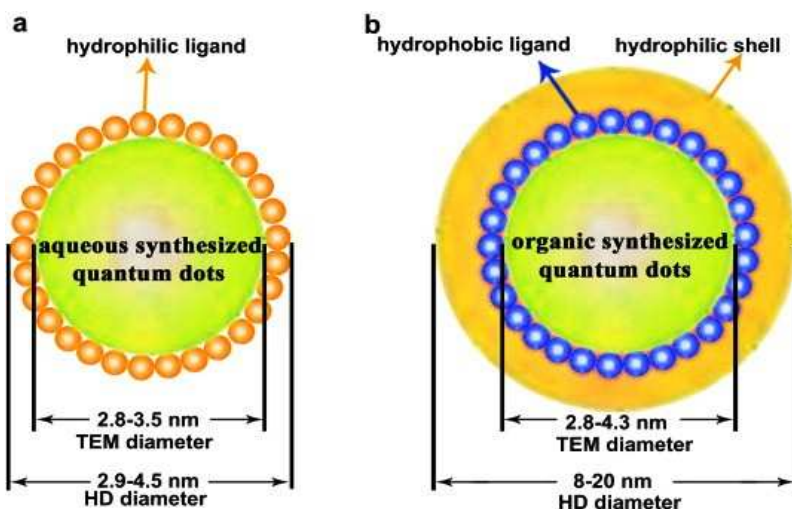
<sup>3</sup> Chalcogen



شکل ۴- (a) سنتز نقطه کوانتومی CdSe به روش آلی-فلزی، (b) اصلاح سطحی از طریق تعویض لیگاندهای تری‌اکتیل‌فسفین‌اکسید (TOPO) با تیوگلائیکولیک اسید (TGA) [۲۲]



شکل ۵- ساخت نقطه کوانتومی CdTe پایدارشده با تیول.



شکل ۶- مقایسه اندازه ذرات حاصل از دو روش (a) آبی و (b) آلی- فلزی.

- سلول‌های خورشیدی: از آنجایی که در نقاط کوانتومی امکان تهییج‌های چندگانه وجود دارد، استفاده از آنها در سلول‌های خورشیدی سبب افزایش بازدهی می‌گردد [۲۰].
- جوهرهای امنیتی: از نقاط کوانتومی در سیستم‌های رمزنگاری حفاظتی استفاده می‌شود که قابل اعمال بر روی زمینه‌های مختلف از جمله کاغذ، فلزات، سرامیک، چوب و پارچه می‌باشند.
- رنگ‌های بسیار درخشان: با توجه به نوار نشر بسیار باریک نقاط کوانتومی، استفاده از آنها به عنوان رنگدانه در رنگ، می‌تواند رنگ‌های فلوروسنتی درخشانی را ایجاد کند. این رنگ‌ها برای دیدن اشیا از فاصله دور به عنوان مثال علائم راهنمایی و رانندگی در بزرگراه‌ها و یا راه‌های خروج اضطراری به کار می‌روند.
- رنگ‌های IR: رنگ‌های فلوروسنتی IR، می‌توانند نورهای ضعیف حاصل از ستارگان و ماه را دریافت کنند، آنها را به صورت نوار باریک IR نشر کنند که البته با چشم غیرمسلح قابل دیدن نیست اما در

در واقع در روش آبی، با توجه به حضور عوامل پایدارکننده/گیراندازنده<sup>۱</sup> دیگر نیازی به اصلاح سطحی وجود ندارد و نانوذرات حاصله آب‌دوست می‌باشند. در حالی که در روش آلی- فلزی جهت رسیدن به نانوذرات آب‌دوست انجام یک مرحله مجزا لازم است لذا در این روش معمولاً ذراتی با اندازه بزرگتر حاصل می‌گردند (شکل ۶) [۱۱].

#### ۴- کاربردها

طی سال‌های گذشته، نانوبلورهای نیمه‌رسانا با توجه به خواص نوری و الکترونیکی منحصر بفردشان که ناشی از نسبت سطح به حجم بالا و اثر تحدید می‌باشد، در بسیاری از زمینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آن جایی که نقاط کوانتومی قادر به جذب در مناطق UV و مرئی و نشر در مناطق مرئی و IR هستند، در زمینه‌های زیر کاربرد دارند:

- نمایشگرها، لیزرها، وسایل الکترونیکی- نوری<sup>۲</sup>، LED [۱۹].

<sup>۱</sup> Capping agents

<sup>۲</sup> Opto-electronic devices

گیرند، یون‌های کادمیوم آزاد شده می‌توانند سبب مرگ سلول‌ها شوند. اگر چه استفاده از پوشش دیگری مانند ZnS، می‌تواند تا حدودی سمیت سلولی<sup>۴</sup> را کاهش دهد اما نمی‌تواند به طور کامل آن را حذف نماید. سمیت ذاتی نقاط کوانتومی حاوی عنصر کادمیوم، سبب محدودیت کاربرد آنها به ویژه در تصویربرداری *in vivo* می‌گردد. لذا جهت استفاده آنها در زمینه علوم زیستی از نقاط کوانتومی عاری از کادمیوم استفاده می‌شود [۲۶]. به طور کلی امروزه با توجه به سمیت عناصر سنگین مانند کادمیوم، قلع و جیوه، استفاده از آنها در تولید نقاط کوانتومی به خصوص در کاربردهای تجاری متوقف شده است [۲۷]. یکی از کاربردهای عمده نقاط کوانتومی، در حسگرهای زیستی است که اغلب با مکانیزم FRET<sup>۷</sup> عمل می‌کند. این سازوکار انتقال انرژی بین دو مولکول فلوروسنت، در صورتی که فاصله آنها کمتر از ۱۰ nm باشد را توضیح می‌دهد. فاصله بین دو کروموفور، به عوامل دیگری نظیر زاویه بین آنها، ضریب خاموشی گیرنده، بازدهی کوانتومی دهنده و میزان هم‌پوشانی طیف نشر دهنده<sup>۸</sup> و تهییج گیرنده<sup>۹</sup> بستگی دارد. در این سازوکار طول موج نشر کروموفور اولیه با طول موج تهییج کروموفور ثانویه یکسان است. بنابراین نشر کروموفور اولیه سبب تهییج کروموفور ثانویه می‌گردد. از آن جایکه طیف نشر نقاط کوانتومی بسیار باریک و متقارن است، به راحتی می‌توان منشا نشر حاصله را تشخیص داد. نقاط کوانتومی می‌توانند هم به عنوان دهنده و هم به عنوان گیرنده در این سازوکار به کار روند [۲۸]. در شکل ۷، نقطه کوانتومی به عنوان دهنده و ماده رنگزای غیرفلوروسنتی به عنوان گیرنده محسوب می‌شود.

فعالیت‌های تفحص در شب با عینک‌های مخصوص قابل رویت هستند.

- کاربردهای پزشکی: امروزه کاربرد نانوبلورها به دلیل حساسیت بسیار بالا در تصویربرداری فلوروسنسی، نشر نور بسیار درخشان، پایداری نوری، سطح ویژه بالا و همچنین مشابهت اندازه آنها با مولکول‌های زیستی مانند پروتئین‌ها، آنتی‌ژن/ آنتی‌بادی‌ها و غیره در حوزه پزشکی بسیار مورد توجه است [۱۳، ۲۱].

جهت استفاده از نقاط کوانتومی در کاربردهای پزشکی، می‌بایست پس از ساخت، به منظور سازگاری با محیط زیستی و حلالیت در محیط آبی، اصلاح سطحی صورت می‌گیرد.

سپس جهت اتصال مستقیم نقاط کوانتومی به سلول‌های هدف، اصلاح سطحی دیگری با استفاده از آنتی‌بادی‌ها، پپتیدها و مولکول‌های کوچک صورت می‌گیرد [۲۲].

نقاط کوانتومی متصل شده به پپتیدها/ لیگاندها/ آنتی‌بادی‌های مخصوص سلول‌های سرطانی جهت تشخیص و تصویربرداری از آنها بسیار کارآمد می‌باشند [۲۳].

به عنوان مثال از نقاط کوانتومی متصل به آنتی‌بادی anti-HER2 برای عکس‌برداری از سلول‌های سرطانی سینه استفاده شده است [۲۴]. نقاط کوانتومی همچنین می‌توانند به عنوان حامل‌های دارو هم عمل کنند. مولکول‌های دارو می‌توانند از طریق پیوندهای کووالانسی و الکترواستاتیکی به لیگاندهای سطح نقاط کوانتومی متصل شوند [۲۵].

از جمله ملزومات تصویربرداری سلولی، حساسیت، انتخاب‌پذیری و تصویربرداری چندگانه و هم‌زمان است. نقاط کوانتومی با توجه به باریک بودن طیف نشرشان، وابستگی رنگ نشر آنها به اندازه ذره، پایداری نوری و درخشندگی بالا بسیار در تصویربرداری سلولی *in vivo* و *in vitro*<sup>۵</sup> به کار می‌روند. با وجود مزایای قابل توجه نقاط کوانتومی، به دلیل عدم امکان دوباره تولید و پایداری کوتاه مدت آنها، تصویربرداری *in vivo* دارای محدودیت‌هایی می‌باشد [۶]. نقاط کوانتومی حاوی عنصر کادمیوم در محیط‌های زیستی از طرق مختلف می‌توانند در معرض اکسیداسیون قرار

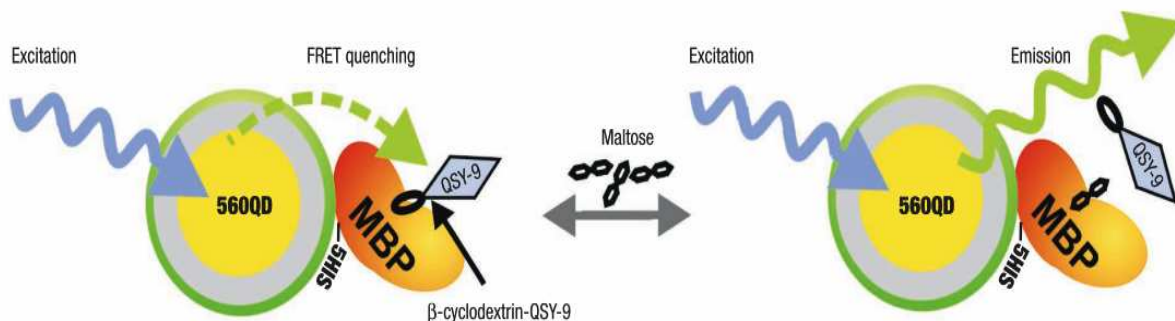
<sup>۴</sup> انجام آزمایش بر روی کل ارگان زنده  
<sup>۵</sup> انجام آزمایش بر روی سلول‌های زنده در محیط آزمایشگاهی

<sup>۶</sup> Cytotoxicity

<sup>۷</sup> Fluorescence resonance energy transfer

<sup>۸</sup> Donor

<sup>۹</sup> Acceptor



شکل ۷- دیاگرام شماتیک حسگر مالتوز بر مبنای مکانیزم FRET نقطه کوانتومی [۳۰].

کاربردهای پزشکی ترجیح داده می‌شود. طی سال‌های اخیر روند رو به رشد نقاط کوانتومی در تحقیقات زیست‌فناوری بسیار بارز بوده است. با توجه به خواص ویژه نقاط کوانتومی، استفاده از آنها در صنایع ساخت رنگ، جوهر، نمایشگرها و سلول‌های خورشیدی رو به افزایش است. همچنین کاربرد آنها به عنوان حسگرهای زیستی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

با رفع برخی از محدودیت‌ها مانند سمیت فلزات سنگین تشکیل دهنده این نانوذرات و همچنین دستیابی به روش‌هایی برای تولید در مقیاس وسیع‌تر و پایداری بالاتر، می‌توان بیش از پیش شاهد کاربردهای در تصویربرداری *in vivo* بود.

در حضور مالتوز<sup>۱</sup>، ماده رنگزا از پروتئین اتصال مالتوز جدا شده و مالتوز در جای مخصوص خود قرار می‌گیرد. بدین ترتیب در حضور این پروتئین، نشر مربوط به نقطه کوانتومی حاصل می‌گردد [۲۹].

#### ۵- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز

در نانوبلورهای نیمه‌رسانا با اندازه ذره کوچکتر و یا برابر با شعاع بوهر بالک ماده، اثر تحدید کوانتومی سبب می‌شود تا با تغییر اندازه ذرات نقاط کوانتومی، نشر نور با رنگ‌های متفاوت حاصل گردد. روش‌های ساخت متعددی برای تهیه نقاط کوانتومی ارائه شده است که در بین آنها با توجه به مباحث ذکرشده در متن، روش آبی برای

<sup>1</sup> Maltose binding protein

#### ۶- مراجع

- X. ang, T. hai, "ZnS nanostructures: From synthesis to applications", *Prog. ater. Sci.*, 56,175-287, **2011**.
- A. Kitai, "Luminescent Material and Applications", Ontario, McMaster University, **2008**.
- H. Li, "Synthesis and Characterization of Aqueous Quantum Dots for Biomedical Applications", PhD, Philadelphia, Drexel University, **2008**.
- R. E. Galian, "The use of quantum dots in organic chemistry", *Trend Anal Chem.*, 28, 3, **2009**.
- P. Reiss, M. Protie're, L. Li, "Core/shell semiconductor nanocrystals", *small*, 5, 2, 154-168, **2009**.
- Z. Jin, N. Hildebrandt, "Semiconductor quantum dots for in vitro diagnostics and cellular imaging", *Trends Biotechnol.*, 30, 7, **2012**.
- O. Khani, H. Rajabi, "Synthesis and characterizations of ultra-small ZnS and Zn<sub>(1-x)</sub>Fe<sub>x</sub>S quantum dots in aqueous media and spectroscopic study of their interactions with bovine serum albumin", *Spectrochim. Acta A*, 79, 361-369, **2011**.
- F. Pinaud, X. Michalet, "Advances in fluorescence imaging with quantum dot bio-probes", *Biomater.*, 27, 1679-1687, **2006**.
- A. B. Barron, "Introduction to nanoparticle synthesis", *Chem. Matter.*, 7, **2003**.
- J. Drbohlavova, V. Adam, "Quantum dots- characterization, preparation and usage in biological systems", *Int. J. Mol. Sci.*, 10, **2009**.
- A. Rogach, D. Talapin, "*Colloids and colloid assemblies*", Edited by Frank Caruso, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, **2004**.
- T. Hegmann, H. Qi, "Nanoparticles in liquid crystals: synthesis, self-Assembly, defect formation and potential applications", *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, 17, 3, **2007**.
- A. M. Smith, H. Duan, "Bioconjugated quantum dots for in vivo molecular and cellular imaging", *Adv. Drug. Deliver. Rev.*, 60, 1226-1240, **2008**.
- I. L. Medintz, H. Tetsuo, "Quantum dot bioconjugates for imaging, 9abeling and sensing", *Nat. Mat*, 4, **2005**.
- N. Tomczak, D. Ja 'nczewski, "Designer polymer-quantum dot architectures", *Prog. Polym. Sci.*, 34, 393-430, **2009**.
- H. Kuang, Y. Zhao, "Recent developments in analytical applications of quantum dots", *Trend. Anal. Chem.*, 30, 1620-1636, **2011**.
- A. Rahdar "Effect of 1-thioglycerol as capping agent on ZnS nanoparticles: structural and optical characterization nanoparticles: structural and optical characterization", *Sci. Eng.*, 1, **2012**. N. Gaponik, D. V. Talapin, "Thiol-Capping of CdTe nanocrystals: an alternative to organometallic synthetic routes", *Phys. Chem. B*, 106, 7177-7185, **2002**.
- T. H. Kim, K. S. Cho, "Full-colour quantum dot displays fabricated by transfer printing", *Nat. Photo.*, 5, 176-182, **2011**.
- K. W. Böer, "Cadmium sulfide enhances solar cell efficiency", *Energ. Convers. Manage*, 52, 426-430, **2011**.
- N. Dubana, "Quantum dots as a unique material for security systems", *Nanotech*, 204-211, **2012**.
- S. J. Rosenthal, "Biocompatible quantum dots for biological applications", *Chem. Biol.*, 18, 10-24, **2011**.
- L. Shao, Y. Gao, "Semiconductor quantum dots for biomedical applications", *Sensors*, 11, 11736-11751, **2011**.
- D. K. Tiwari, S. Tanaka, "Synthesis and characterization of anti-HER2 antibody conjugated CdSe/ CdZnS quantum dots for fluorescence imaging of breast cancer cells", *Sensors* 9, 9332-9354, **2009**.
- Y. Wang, "Quantum dots, lighting up the research and development of nanomedicine", *Nanomedicine*:

- Nanotechnology, Biol. Med., 7, 385-402, **2011**.
26. D. W. Piston, G. J. Kremers, "Fluorescent protein FRET: the good, the bad and the ugly", Trends Biochem. Sci., 32, **2007**.
27. J. M. Costa-Fernández, "The use of luminescent quantum dots for optical sensing", Trend Anal Chem., 25, **2006**.
28. I. L. Medintz, "Self-assembled nanoscale biosensors based on quantum dot FRET donors", Nat. Mat, 2, 630-638, **2003**.