سنتز و کاربرد نقاط کوانتومی در سلول‌های خورشیدی

حمیده صیقل کار[۱]، مسعود صلواتی نیاسری[۲]، نوشین میر[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد شیمی معدنی، دانشگاه کاشان
hseyghalkar@yahoo.com

۲- استاد شیمی معدنی، دانشگاه کاشان
salavati@kashanu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری شیمی معدنی، دانشگاه کاشان
mir.n۶۳@gmail.com

چکیده:
نقاط کوانتومی[۱] نانوبلورهای نیمه‌رسانای صفربعدی هستند که قطر فیزیکی آن‌ها کمتر از شعاع بوهر اکسایتون[۲] است. این مواد نسبت به نانوذرات توده‌ای رفتار متفاوتی نشان می‌دهند و دارای ویژگی‌های اپتوالکترونیکی جالب و قابل توجهی هستند. فرآیند سنتزی نقاط کوانتومی نقش اساسی در کیفیت آن‌ها داشته و باعث بهبود خواص محصولات می‌گردد. در انقلابی که برای تولید سلول‌های خورشیدی ارزان‌قیمت با بازده‌ی بالا آغاز شده است نقاط کوانتومی نقش پیشتازی دارند. برای افزایش بازده سلول‌های خورشیدی حاوی نقاط کوانتومی سه ساختار قابل استفاده است که از انواع نقاط کوانتومی نیمه‌هادی تشکیل شده‌اند.

کلمات کلیدی: نقاط کوانتومی، مواد نیمه‌رسانا، سلول‌های خورشیدی.

۱. مقدمه

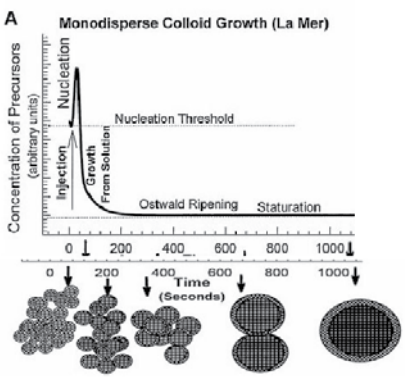
ظهور تولیدات نانوساختاری مرز جدیدی را در علم مواد به وجود آورده است. به علت اندازه‌ی این ذرات و چگونگی کارآیی این مواد قوانین کوانتومی مورد اهمیت قرار می‌گیرد. هنگامی‌که اندازه یا ابعاد یک ماده به‌طور پیوسته از ابعاد بزرگ به ابعاد خیلی کوچک تغییر کند، در وهله‌ی اول ویژگی‌ها تغییر نمی‌کنند سپس تغییرات کوچک شروع شده تا این‌که در نهایت وقتی اندازه به زیر ۱۰۰ نانومترمی‌رسد تغییرات شگرفی در ویژگی‌ها رخ می‌دهد. به این دسته از مواد که اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر دارند نانومواد می‌گویند. اگر در این مواد تنها در یک بعد به مقیاس نانو کاهش یابد در حالی‌که دو بعد دیگر همچنان بزرگ باقی بماند، به ساختاری می‌رسیم که به چاه‌کوانتومی معروف است.اگر دو بعد به مقیاس نانو کاهش یابد و بعد دیگر همچنان بزرگ باقی بماند، ساختار حاصل سیم کوانتومی است. در انتهای فرآیند کوچک کردن اندازه که هر سه بعد به مقیاس زیر نانومتر می‌رسد، نقطه‌ی کوانتومی حاصل می‌شود و به عبارت دیگر می‌توان نقاط کوانتومی را نانوساختارهای صفربعدی نامید.

نقاط کوانتومی را می‌توان بر مبنای مواد فلزی (نظیر نیکل، کبالت، پلاتین، طلا) و مواد نیمه‌رسانا همچون سلنید کادمیم (CdSe) ، تلورید کادمیم (CdTe) و سولفید کادمیم (CdS) دسته‌بندی کرد. دامنه‌ی معمول اندازه‌ی این مواد ۲ تا ۲۰ نانومتراست اما بر طبق بعضی مقالات اندازه‌ی آن‌ها زیر ۱۰ نانومتر ارائه شده است.

ساختارهای نقاط کوانتومی برای کاربردهای متفاوتی در فناوری‌های متنوع به کار می‌روند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها که اخیراً توجه محققان را به خود جلب کرده کاربرد در سلول‌های خورشیدی نانوساختار است که موجب کاهش هزینه‌ی ساخت این سلول‌ها از یک سو و افزایش بازده تبدیل آن‌ها از سوی دیگر گردیده است [۱و۲].

۲. روش‌های سنتز نقاط کوانتومی

خواص الکترونیکی و نوری نانوبلورهای فلزی و نیمه‌رسانا وابستگی زیادی به اندازه‌ی آن‌ها دارد بنابراین باید از روش‌های خاصی برای سنتز نقاط کوانتومی نیمه‌رسانا استفاده نمود.



شکل ۱. مدل La Mer برای مراحل رشد نانوبلورها [۹]

۲-۱. روش کلوییدی

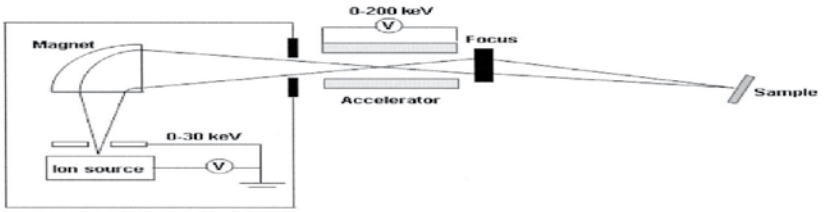
اصول سنتز کلوییدی نانوکریستال‌های نیمه‌رسانا بر اساس مطالعات مور و دینگار[۳] بیان شده است که نشان داده‌اند یک هسته‌زایی کلاستری[۴] کوتاه به طور موقت انجام می‌گردد و سپس به طور کنترل شده‌ای به آرامی رشد روی هسته‌های حاضر ادامه پیدا می‌کند و در نتیجه کلوییدهای تک‌پاشنده[۵] مطابق شکل (۱) ایجاد می‌شود [۳]. در عمل واکنشگرها مطابق شکل (۲) به تندی به ظرف حامل حلال داغ کوئوردینه شده اضافه می‌شوند و سپس غلظت تا آستانه‌ی هسته‌زایی بالا می‌رود این هنگامی قابل انجام است که دما نیز به اندازه‌ی کافی بالا باشد تا تخریب واکنشگرها و تشکیل یک محلول فوق اشباع از گونه‌ها ایجاد شود.

۲-۲. رشد هم‌بافته

روش دیگر برای سنتز نقاط کوانتومی از طریق رشد هم‌بافته‌ی کلاسترها بر روی یک سطح است. متغیرهای متفاوتی دراین روش وجود دارد که باعث به وجود آمدن شاخه‌های متفاوتی می‌شود.آنچه ضروری است این است که فیلم متبلور (یا فیلمی در محدوده‌ی بلوری با اندازه ذراتی به ابعاد اتم) را در یک فاز بخار یا مایع روی بعضی سطح‌ها متراکم کنیم. این روش دامنه‌ی وسیعی از نقاط‌کوانتومی را در برمی‌گیرد و از طریق آن می‌توان با تنظیم شرایط مورد نظر نظم خوبی را در ذرات به دست آورد.

۲-۳- کاشت یونی

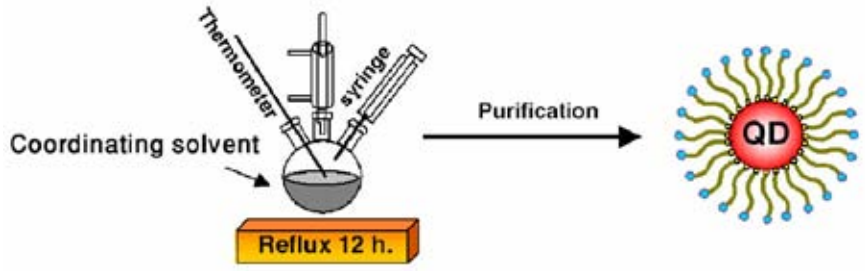
روش دیگری برای تهیه‌ی منظم نقاط کوانتومی وجود دارد که نقاط کوانتومی مرکب[۶] را تهیه می‌کند، نقاط کوانتومی مرکب به طور معمول با استفاده از انرژی‌های بالا (چند کیلوولت) به‌وسیله‌ی کاشت یونی در یک جامد تهیه می‌شوند (شکل (۳)). کاشت یونی نسبت به روش‌های دیگر تهیه نقاط‌کوانتومی مرکب ترجیح داده می‌شود زیرا امکان کنترل برش عمودی یون‌های کاشته شده وجود دارد و بنابراین می‌توان اندازه‌ی نقاط کوانتومی و فاصله‌ی فضایی بین آن‌ها را کنترل کرد.



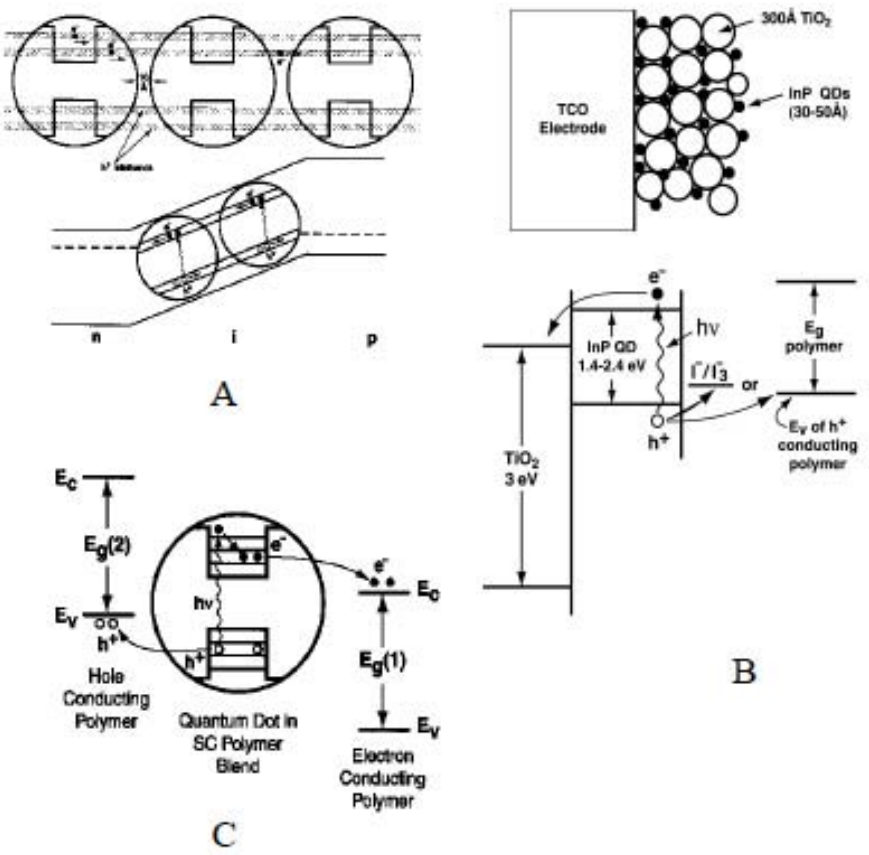
شکل ۳. طرحی از دستگاه فرآیند کاشت یونی برای تهیه‌ی نقاط کوانتومی [۱۱]

۳. کاربرد نقاط کوانتومی در سلول‌های خورشیدی

به دلیل افزایش نیاز بشر به منابع انرژی پاک، صنعت تولید سلول‌های خورشیدی با سرعت بسیاری در حال گسترش است. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی متعارف توانایی لازم برای تبدیل تمام انرژی فوتون‌های جذب شده به الکترون‌ها و حفره‌های آزاد و در نهایت تولید الکتریسیته را



شکل ۲. دستگاه ترکیبی برای تهیه‌ی نانوبلورها [۱۰]



شکل ۴. ساختارهایی برای سلول‌های خورشیدی حاوی نقاط کوانتومی. (A) یک آرایه نقطه کوانتومی که به عنوان الکترود نوری برای فرآیند فوتوالکتروشیمیایی استفاده شده است (B) نقاط کوانتومی استفاده شده برای حساس‌سازی یک فیلم نانوبلوری TiO_2 (C) نقاط کوانتومی پراکنده شده در یک پلیمر نیمه‌هادی [۱۲].

ندارند. از سوی دیگر، به علت قیمت بالای مواد خام نیمه‌هادی و نیز فرآیندهایی که برای تبدیل مواد خام به سلول‌های کاربردی نیاز است هزینه‌ی تولید این سلول‌ها بسیار بالا است. در انقلابی که برای تولید سلول‌های خورشیدی ارزان‌قیمت با بازده‌ی بالا آغاز شده است نقاط کوانتومی نقش پیشتازی دارند. انواع مختلف نقاط کوانتومی که به منظور تطبیق یافتن و جذب نور طیف خورشید طراحی شده‌اند را می‌توان در یک سلول خورشیدی گردآوری نمود.

نقاط کوانتومی با استفاده از اندازه منحصربه‌فردشان از قابلیت‌های مهمی برای برقراری تعامل نوری با منبع نور برخوردار هستند. در سیلیکون‌ها، یک فوتون نوری، یک الکترون از مدار اتمی‌اش رها می‌سازد. در اواخر دهه ۹۰ میلادی آرتور نوزیک از محققان ارشد آزمایشگاه ملی منابع تجدیدپذیر انرژی در کلورادوی آمریکا بر این فرض بود که نقاط کوانتومی مواد خاص نیمه‌هادی‌ها می‌توانند به هنگام برخورد با فوتون‌های دارای سطح انرژی بالا دو یا تعداد بیشتری الکترون آزاد کنند. این فرآیند را در پایانه‌های فوق‌بنفش و آبی طیف رنگی نیز مشاهده می‌کنیم .

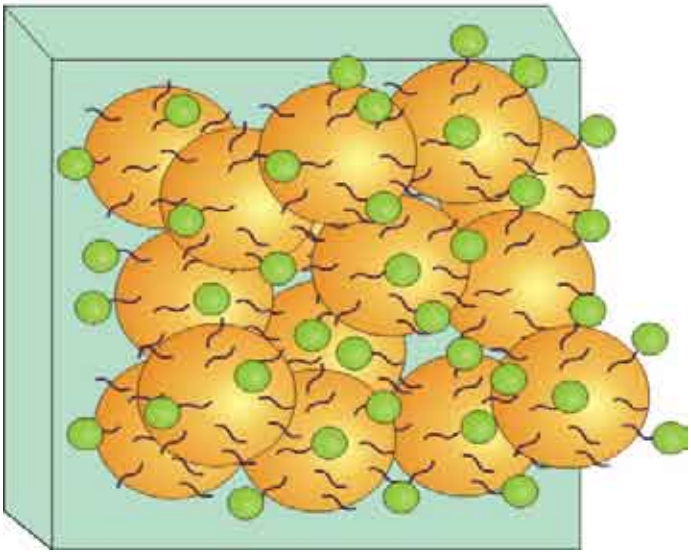
در سال ۲۰۰۴ ویکتور کلیموف از آزمایشگاه ملی لوس‌آلاموس در نیومکزیکو نخستین اثبات تجربی را ارائه کرد که نشان داد نظریه نوزیک حقیقت دارد. سال بعد از آن وی نشان داد که نقاط کوانتومی به ازای هر فوتون می‌توانند به هنگام قرار گرفتن در معرض نور ماوراءبنفش فوق‌العاده، انرژی یک تا هفت الکترون تولید کنند. تیم تحقیقاتی نوزیک خیلی زود تأثیر شکل گرفته در نقاط کوانتومی را که از سایر نیمه‌هادی‌ها همچون سولفید سرب نشات گرفته بودند، ثابت کرد[۱۲].

۴- ساختار سلول‌های خورشیدی ساخته شده از نقاط کوانتومی

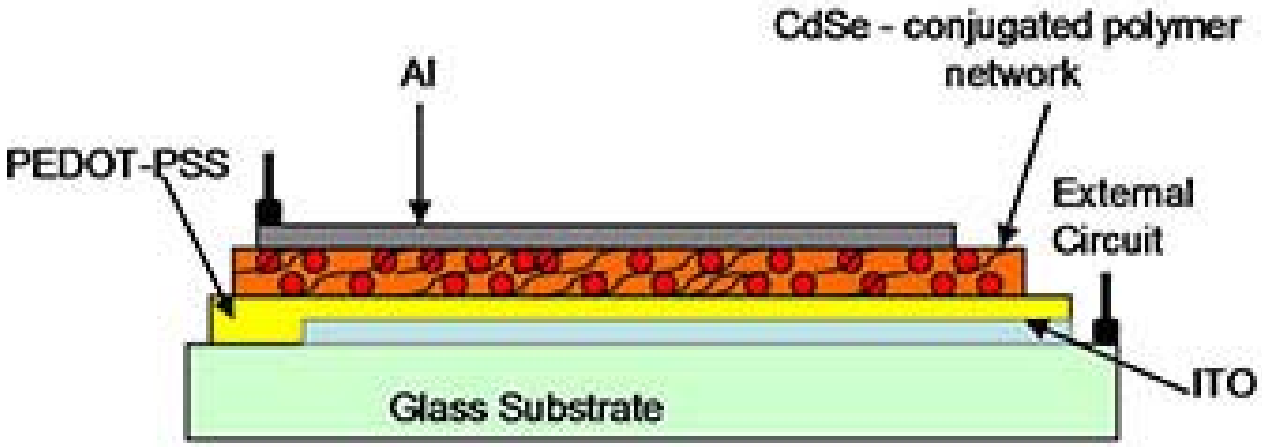
دو مسیر اصلی برای افزایش بازده (فوتوولتاژ افزایش‌یافته یا فوتوجریان افزایش یافته) در سه ساختار متفاوت سلول‌های خورشیدی حاوی نقاط کوانتومی قابل حصول است. این ساختارها که در شکل (۴) نشان داده شده‌اند در زیر به تفصیل آمده‌اند.

۴-۱-فوتوالکترودهای حاوی آرایه‌های نقاط کوانتومی

در این ساختار، نقاط کوانتومی به صورت آرایه‌های سه‌بعدی آرایش یافته‌اند به‌طوری‌که در بین نقاط کوانتومی فضاهای کوچکی قرار دارد که باعث کوپلاژ الکتریکی قوی شده و فاصله باند کوچکی برای انتقال الکترون در یک بازه‌ی بزرگ شکل می‌گیرد (شکل ۴A را ببینید). این سیستم یک ساختار سه‌بعدی است که مشابه یک ابرشبکه‌ی یک‌بعدی عمل می‌کند و با عث تولید فوتوپتانسیل بالاتری می‌گردد.



شکل ۵. سلول خورشیدی حاوی TiO_2 حساس شده با نقاط کوانتومی CdSe.



شکل ۶. سلول خورشیدی دارای نقاط کوانتومی پراکنده در پلیمر نیمه‌هادی.

۴-۲- سلول‌های خورشیدی حاوی TiO_2 حساس‌شده با نقاط کوانتومی

این ساختار یک نمونه تغییریافته از سلول‌های فوتوولتایی است که از نانوبلورهای TiO_2 حساس شده با مولکول‌های رنگ ساخته شده‌اند. در سلول‌های حساس‌شده با نقاط کوانتومی، نقاط کوانتومی جایگزین مولکول‌های رنگ شده‌اند. یک قابلیت بالقوه‌ی این سلول‌ها بازده کوانتومی بالای آن‌ها است که به دلیل یونیزاسیون فشرده (اثر اوژه معکوس) است (شکل‌های ۴B و ۵).

۴-۳- نقاط کوانتومی پراکنده شده در ماتریکس پلیمری نیمه‌هادی

اخیراً اثرات فوتوولتایی در ساختارهای حاوی نقاط کوانتومی جفت شده با پلیمرهای نیمه‌هادی آلی گزارش شده‌اند. تمام ساختارهای سلول‌های فوتوولتایی حاوی این دو گونه در صورتی که از طریق فرایند اوژه معکوس زوج‌های الکترون–حفره‌ی چندتایی تولید کنند بازده بالایی دارند. این مطلب همچنین برای تمام سیستم‌های حاوی نقاط کوانتومی شرح داده شده در بالا صدق می‌کند. این فرایند در تمام سلول‌های خورشیدی حاوی نقاط کوانتومی مهم‌ترین سازوکار برای رسیدن به بازده تبدیل خیلی بالا است (شکل‌های ۴C و ۶) [۱۳].

۵. نتیجه‌گیری

نسبت سطح به حجم با کوچک شدن ذره زیاد می‌شود و اتم‌ها یا مولکول‌های سطحی به هر حال از نظر ویژگی با بخش‌های درونی فرق دارند، بنابراین در بسیاری از جوانب متفاوت رفتار می‌کنند و خواص جدید و جالبی را نشان می‌دهند. نقاط‌کوانتومی دارای اندازه‌ای بین ۲تا۲۰ نانومتر بوده و دارای خواص و ویژگی‌های جدیدی هستند که ناشی از اندازه‌ی کوچک آن‌هاست. برای تهیه‌ی نقاط کوانتومی روش‌های متنوعی وجود داشته که هر یک اندازه و توزیع خاصی را به ذرات می‌دهد. در فقدان سوخت‌های فسیلی، یکی از منابع مهم تولید انرژی الکتریکی، تابش خورشید است. مشکل اصلی مولدهای کنونی انرژی خورشیدی، هزینه‌ی بالا و کارآیی کم آنهاست. بازدهی سلول‌های خورشیدی به‌وسیله‌ی طیف جذبی آنها که جزو خواص ذاتی نیمه‌رساناهای توده‌ای است تعیین می‌شود. با طراحی نقاط کوانتومی که بیشتر همپوشانی را در طیف جذبی با طیف نور خورشید داشته باشند، می‌توان بازدهی مولدهای انرژی خورشیدی را تا بیش از ۹۰ درصد افزایش داد. البته این آزمایشات هنوز به تولید ماده‌ای مناسب برای استفاده تجاری منجر نشده است اما پیشنهاد می‌شود که نقاط کوانتومی روزی می‌توانند اثرگذاری تبدیل نورخورشید به الکتریسیته را تقویت کنند. زمانی که بتوان نقاط کوانتومی را با استفاده از واکنش‌های شیمیایی ساده تولید کرد، پس می‌توان سلول‌های خورشیدی را نیز با هزینه‌ای بسیار کمتر تولید نمود [۱۲].

پی‌نوشت:

1. Quantum dots
2. Exciton Bohr radius
3. Solar cells
4. Lighte mitting diodes
5. Monodisperse
6. Mur and Dinegar
7. Cluster Nucleation
8. Atomic Force Microscope
9. Quantum dot composite

مراجع:

1. W. Wang, C. Chen, K.H. Lin, Y. Fang, C.M. Lieber, Nanosensors A1, 0264623, (2007).
2. P. Kluson, M. Drobek, H. Bartkova, I. Budil, Welcome in the Nanoworld. Chem. Listy, 101 (2007) 262.
3. C.B. Murray, D.J. North, M.G, Bawendi, J. Am. Chem. Soc., 115, (1993) , 8706.
4. RM. Penner, ACC Chem SOC, 200033, 78.
5. M.A. Hines, P. Guyot-Sionnest, J. Phys. Chem. B 102, (1998) , 3655.
6. A.A. Guzelian, U. Banin, A.V. Kadavanich, X. Peng, A.P. Alivisatos, Appl. Phys. Lett. 69, (1996) , 1432.
7. S.P. Withrow, C.W. White, A. Meldrum, J.D. Budai, D.M. Hembree, J. C. Barbour, J. Appl. Phys. 86, (1999) 396.
8. S. Facsko, H. Kurz, T. Dekorsy, Phys. Rev. B 63, (2002) , 165329.
9. P. Mulvaney, L.M. Liz-Marzh, M. Giersig, T. Ung, J. Mater. Chem.; 10 (2000) 1259.
10. Z.Y. Gu, L. Zou, Z. Fang; W.H. Zhu; X.H. Zhong, Nanotech., 19, (2008) 7.
11. Z.A. Peng, X.G. Peng, J. Am. Chem. Soc., 123, (2001) , 183.
12. http://www.tafahomnews.com/Sections-req-viewarticle-artid-1831-page-1.html
13. A.J. Nozik, presented at the NCPV Program Review Meeting Lakewood, Colorado, 590. (2001).