

فرزانه عربپور رق‌آبادی^۱، مهرداد کوبی^{۱*}،
وحید احمدی^۲، غلامرضا عبائیان^۳

۱. گروه مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه

تربیت‌مدرس، تهران

۲. گروه مهندسی الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر،

دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران

۳. گروه پژوهشی لیزر نیم‌رسانا، پژوهشکده لیزر و اپتیک، تهران

خواص نوری نقاط کوانتومی CdS سنتز شده به روش آلی-فلزی

چکیده

در این تحقیق، از روش آلی-فلزی برای سنتز نقاط کوانتومی کادمیوم سولفاید (CdS) استفاده شد و اثر عوامل موادی و فرایندی بر اندازه، خواص نوری و ترکیب نانوبلورها در نظر گرفته شد. طولانی شدن زمان سنتز، موجب افزایش نانوبلورها از ۲ nm به ۵ nm و کاهش نوار ممنوعه از ۲/۸ به ۲/۴ eV شد. هم‌چنین، با افزایش نسبت مولی S به Cd در محلول پیش‌ماده، درصد مولی S در نانوبلورهای CdS بیش‌تر شده، ذرات بزرگ‌تری در زمان کم‌تری تشکیل شد. در حین سنتز، نانوخوشه‌هایی با اندازه مجیک ظاهر، سپس ناپدید می‌شوند. آن‌ها با افزایش نسبت مولی S به Cd در زمان‌های طولانی‌تر مشاهده می‌شوند. اندازه‌گیری ثوابت نوری نشان داد که ضریب شکست نانوبلورها با بزرگ‌تر شدن اندازه آن‌ها افزایش یافته، مستقیماً به بخش حقیقی ثابت دی‌الکتریک وابسته است.

کلمات کلیدی: نقاط کوانتومی، کادمیم سولفاید، روش آلی-فلزی، شاخص انکسار، ضریب خاموشی

۱-مقدمه

نانوبلورهای نقاط کوانتومی خواص منحصر به فرد و کاملاً متفاوتی با مواد در حالت توده دارند. نقاط کوانتومی، بلورهای نیم‌رسانا در مقیاس نانومتری با ابعاد کوچک‌تر از شعاع اکسایتون بوهر (Exciton Bohr Radius) در حالت توده، هستند [۱،۲]. خواص آن‌ها بسیار متأثر از اندازه و ترکیب نانوذرات است. این خواص، آن‌ها را گزینه مناسبی برای کاربردهای مختلف از جمله دیود نور گسیل، ادوات فتوولتائیک، لیزرها و حافظه‌های نوری ساخته است [۳-۵]. نانوبلورهای کادمیوم سولفاید (CdS) از گروه II-VI مواد نیم‌رسانا، به دلیل خواص نوری وابسته به اندازه در محدوده طیف مرئی، بسیار مورد توجه هستند [۱،۲]. امروزه نانوبلورهای CdS به روش‌های شیمیایی و فیزیکی مختلفی تولید می‌شوند. اگرچه امکان تولید انبوه به روش‌های فیزیکی وجود دارد، اما تولید نانوبلورها با توزیع اندازه باریک مشکل است. در حالی که با استفاده از روش‌های شیمیایی کلوئیدی، امکان سنتز نانوبلورها با توزیع اندازه باریک و شکل کنترل شده وجود دارد [۱]. نقاط کوانتومی کلوئیدی تهیه شده به روش شیمیایی در دو فاز آبی و آلی قابل سنتز هستند. تنها مزیت سنتز در فاز آبی، سهولت کار، هزینه کم و بی‌ضرر بودن حلال است. تولید نقاط کوانتومی در فاز آلی سبب توزیع باریک اندازه نانوبلورها می‌شود [۶]. در این تحقیق، نقاط کوانتومی CdS با استفاده از روش کلوئیدی آلی-فلزی و پیش‌ماده‌های پیشنهاد شده توسط Kolny - Olesiak و همکارانش [۷] سنتز شده، اثر عوامل موادی و فرایندی، بر اندازه و خواص نوری نانوبلورها بررسی می‌شود. این روش بر گرماکافت (Pyrolysis) پیش‌ماده آلی‌فلزی در حلال غیرکئوردینه آلی استوار است [۷]. آگاهی از کمیت ثوابت نوری نقاط کوانتومی مورد استفاده در ادوات نوری که از خواص اصلی آن‌هاست، برای بررسی نظری و تجربی رفتار نوری و الکترونوری آن‌ها الزامی است. این مشخصات برای نقاط کوانتومی سنتز شده به روش‌های شیمیایی، در گزارش‌های اندکی منعکس شده است. Hamizi و همکارانش

*Correspondent Author Email: Mehrr@Modares.ac.ir | تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۲۶ | تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۲۱

[۸] ثوابت نوری و دی‌الکتریک نقاط کوانتومی کادمیوم سلناید (CdSe) سنتز شده به روش کلونیدی را بررسی کرده، اثرات کوانتومی بر خواص نوری نانوبلورها را گزارش کرده‌اند. در خصوص CdS اطلاعاتی منتشر نشده است. در این تحقیق، ضرایب شکست (Refractive Index) و خاموشی (Extinction Coefficient) نانوبلورهای CdS با اندازه‌گیری طیف جذب و انعکاس آن‌ها بررسی و محاسبه شده، با استفاده از آن‌ها ثوابت دی‌الکتریک نانو بلورها معین می‌شوند.

۲- روش تجربی

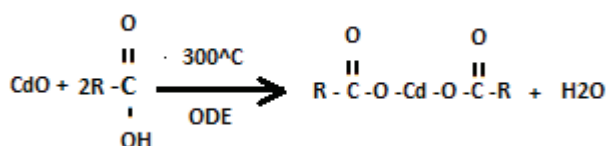
سولفور (S) و اکسید کادمیوم (CdO، خلوص بالا) دو پیش‌ماده اصلی در سنتز نانوبلورها، هم‌چنین اکتادسن (ODE) به‌عنوان حلال و اسیداولئیک (OA) به‌عنوان لیگاند و عامل پایدارکننده سطحی نانوبلورها [۸] همگی از شرکت Merck خریداری و استفاده شده‌اند. عملیات استخراج و شستشوی نانوبلورها با استفاده از حلال‌های هگزان، متانول و استون خریداری شده از همین شرکت انجام شده است. خواص نوری نانوبلورها با طیف‌های جذب، عبور و انعکاس به‌دست آمده از دستگاه طیف‌سنج (Avantes) UV-vis تعیین شده است. برای تعیین ترکیب درصد اجزا در نانوبلورها، از دستگاه میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM-EDAX) مدل XL۳۰، فیلمپس استفاده شده است.

۲-۱- سنتز نانوذرات

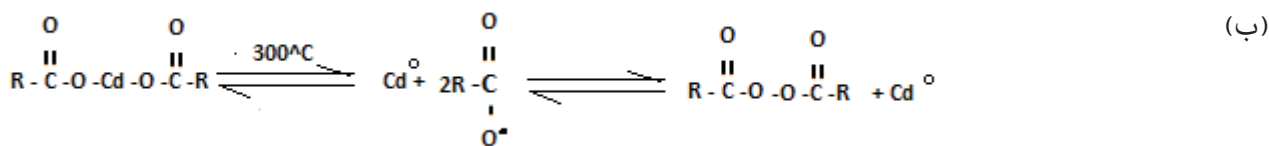
در این تحقیق، سنتز نانوبلورها به روش آلی-فلزی انجام شده است. در ابتدا، دو محلول مجزا از مواد اولیه ساخته شده است. برای تهیه محلول اول (تزریقی)، ابتدا ۰/۰۱۶ گرم (۱ میلی مول) از سولفور با ۲/۵ میلی لیتر از اکتادسن (محلول ۰/۲ M) مخلوط کرده، برای حل کردن سولفور، این محلول را در دمای کم‌تر از ۲۰۰°C تحت خلأ حرارت می‌دهیم تا محلول شفاف به رنگ زرد قناری به دست آید [۱]. برای تهیه محلول دوم، ۰/۰۲۵۶ گرم (۰/۲ میلی مول) از اکسید کادمیوم را با ۲۰۰ میکرو لیتر (۰/۶۳ میلی مول) از اسید اولئیک و ۱۰ میلی لیتر از اکتادسن در فلاسک ۳ دهانه‌ای هم زده، عملیات گاز زدایی بر روی این محلول به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۰°C تحت خلأ انجام می‌شود. پس از مرحله گاز زدایی، جریان نیتروژن به داخل ظرف وارد شده، دمای محلول را به آرامی افزایش می‌دهیم تا به ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد. در این زمان، مقدار لازم از محلول اول را به شدت به محلول دوم تزریق می‌کنیم، تغییر رنگ محلول مبین تشکیل نانوبلورهاست [۱]. واکنش با سرد کردن به دمای اتاق متوقف شده، با قرار دادن محلول در سانتی‌فیوژ با دور ۳۰۰۰ به مدت ۵ دقیقه، ذرات فلزی واکنش نداده به صورت رسوب سیاه رنگی جدا می‌شوند [۹]. به منظور استخراج و شستشوی مواد، از مقدار حجمی ۵ به ۱ استون به متانول و سانتی‌فیوژ استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری ثوابت نوری، با استفاده از روش پوشش دهی چرخشی، فیلم‌های نازک ۱۰۰ نانومتری از نانوبلورهای پخش شده در هگزان بر روی شیشه تهیه شده است.

۳- نتایج و بحث

نانوبلورهای CdS با استفاده از ذرات Cd⁰ به صورت درجا از ترکیب اولئیت کادمیوم با مکانیسم ذیل سنتز شده‌اند. فرایند در دو مرحله تشکیل ذرات Cd⁰ و سپس رشد انجام می‌شود. در ابتدا، CdO حل شده در اسیداولئیک و اکتادسن، تشکیل کادمیوم اولئیت Cd(OA)_۲ می‌دهد، (طرح ۱ الف) [۱]. سپس با حرارت دادن محلول در ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، ذرات فلزی Cd⁰ در اثر تجزیه Cd(OA)_۲ تشکیل می‌شوند، (طرح ۱ ب) [۱].

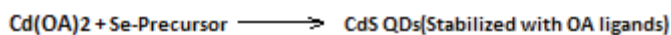
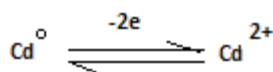


(الف)



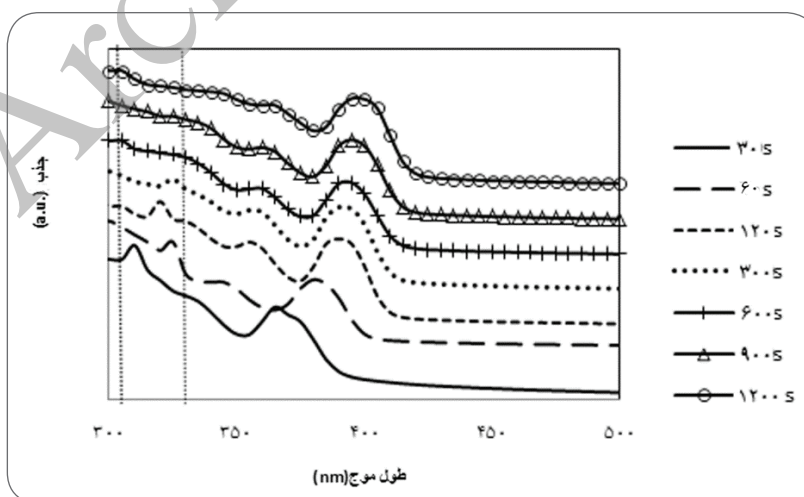
طرح ۱: (الف) حل شدن CdO در اسیداولئیک و اکتادسین و تشکیل کادمیوم اولئیت Cd(OA)₂.
 (ب) تشکیل ذرات فلزی Cd⁰ در اثر تجزیه Cd(OA)₂ [۱]

در مرحله دوم، Cd⁰ تشکیل شده، مونومر مورد نیاز برای رشد نقاط کوانتومی را فراهم می‌کند و در نتیجه بر سینتیک واکنش اثر می‌گذارد، (طرح ۲) [۱].



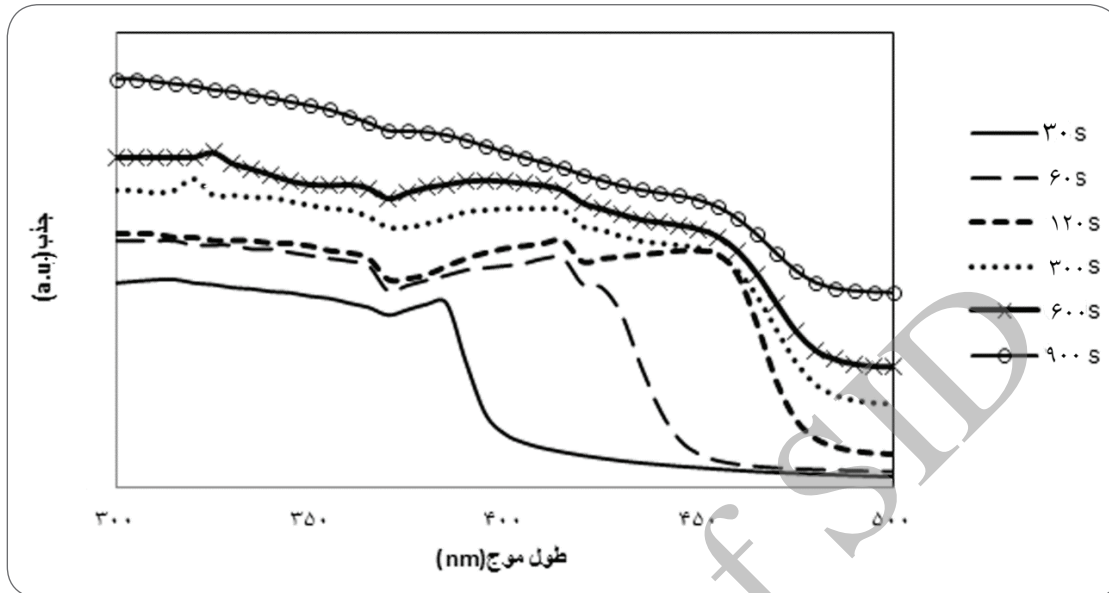
طرح ۲: تشکیل نانوبلورهای CdS [۱]

در واقع، Cd⁰ میزان مونومر وارد شده به واکنش را برای رشد نقاط کوانتومی CdS تنظیم می‌کند و نهایتاً، نانوبلورهایی با کیفیت بالا و توزیع اندازه باریک تولید می‌شود. طیف جذب نقاط کوانتومی سنتز شده در شکل ۱ بیش‌تر از ۲ انتقال اکسایتونی نشان می‌دهد و گسترش محدوده جذب به طول موج‌های بالاتر با افزایش اندازه آن‌ها، اثرات کوانتومی نانوبلورها را نشان می‌دهد. با گذشت زمان از ۳۰ s تا ۱۲۰۰ s، قطر نانوبلورها از ۲ nm به ۵ nm افزایش یافته است که کاهش نوار ممنوعه از ۲/۸ eV به ۲/۴ eV به دنبال داشته است. در ابتدای واکنش، سرعت رشد بالاست اما پس از ۹۰۰ ثانیه تقریباً به صفر می‌رسد، زیرا طیف جذب تغییر نمی‌کند. سرعت رشد بالا منجر به تخلیه مونومر در محلول واکنش می‌شود. پس از این که غلظت مونومر در محلول به مقدار کم‌تر از ۲۰٪ غلظت اولیه برسد، موقعیت اولین پیک با گذشت زمان تغییر نمی‌کند ولی پهن‌تر شده، شدت آن به تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۱: بررسی لحظه ای طیف جذب نانوبلورهای CdS سنتز شده با نسبت مولی ۰/۴ به ۱ از S به Cd در محلول واکنش‌دهنده با تشکیل درجه Cd⁰

برای مشاهده اثر نسبت مولی Cd به S در پیش ماده، در شرایط یکسان از مقایسه شکل های ۱ و ۲ مشاهده می شود که در نسبت بالاتر S به Cd (۲:۱)، واکنش با سرعت بیشتری پیش می رود. با گذشت ۶۰۰ s از شروع واکنش تغییری در موقعیت اولین پیک مشاهده نمی شود که نشان دهنده توقف واکنش است.



شکل ۲: بررسی لحظه ای طیف جذب نانوبلورهای CdS سنتز شده با نسبت مولی ۲ به ۱ از S به Cd در محلول واکنش دهنده با تشکیل درجه Cd⁰

نتایج حاصل از EDAX مربوط به نانوبلورهای سنتز شده با پیش ماده های مختلف در جدول ۱ مشاهده می شود. درصد دو جزء موجود در نقاط کوانتومی نشان می دهد که می توان با تغییر پیش ماده مورد استفاده به نانوبلورهایی با ترکیب و خواص متفاوت رسید. اندازه نانوبلورها با استفاده از رابطه ۱ که توسط Yu و همکارانش ارائه شده، اندازه گیری شده است [۱۰].

$$D = (-6.6521 \times 10^{-8})\lambda^3 + (1.9557 \times 10^{-4})\lambda^2 - (9.23529 \times 10^{-2})\lambda + (13.29) \quad (1)$$

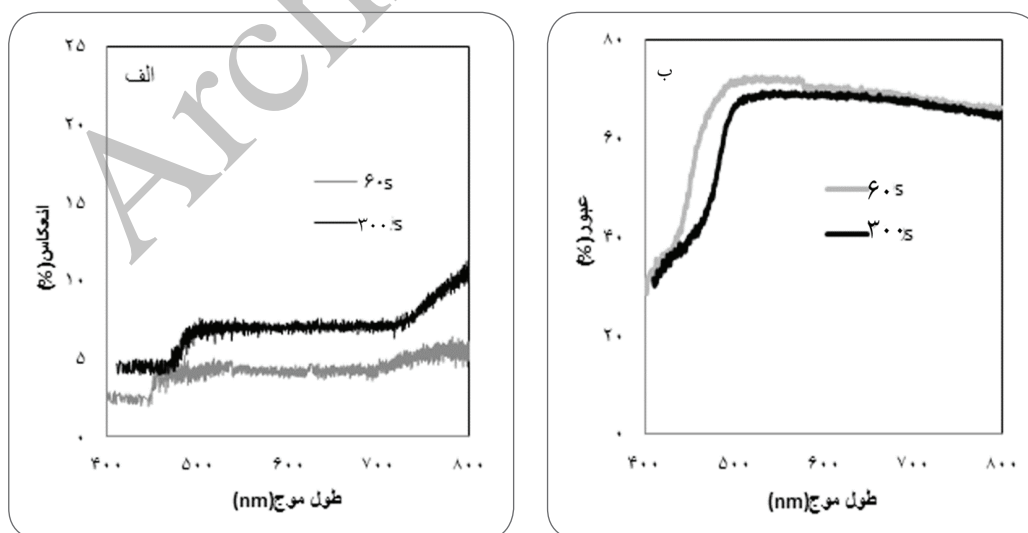
در معادله بالا، D قطر نانوبلور به nm و λ طول موج اولین پیک جذب اکسایدیونی هر نمونه است [۱۰]. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است با افزایش نسبت مولی S به Cd از ۰/۴ به ۲، در زمان ثابت ۳۰۰ s، اندازه نانوبلورها از ۳/۰۷ nm به ۴/۶ افزایش یافته است.

جدول ۱: درصد اتم های Cd و S محاسبه شده از EDX در نانوبلورها (تمام واکنش ها با افزودن 200 μL از OA انجام شده است)

درصد اتمی S در نانوبلورها	درصد اتمی Cd در نانوبلورها	نسبت مولی S به Cd در نانوبلور	قطر نانوبلور (nm)	زمان رشد (s)	نسبت مولی S به Cd در پیش ماده
۵۰/۱	۴۹/۹	۱/۰۵	۲/۴۰۱	۳۰	۱ به ۴
۷۴/۰۶	۲۵/۹۴	۲/۸۵	۲/۴۰۲	۳۰	۱ به ۲
۴۵/۰۲	۵۴/۹۸	۰/۸۲	۳/۰۷۲	۳۰۰	۱ به ۴
۵۶/۱	۴۳/۹	۱/۲۸	۴/۶۴۸	۳۰۰	۱ به ۲

گزارش شده است که نانوخوشه‌های با اندازه مجیک (MSNC)، (Nanoclusters Magic-size) که کوچک‌ترین واحدهای تشکیل دهنده نیم‌رسانا هستند می‌توانند در مراحل مختلف سنتز، ظاهر، سپس ناپدید شوند [۱۱]. این نانوخوشه‌های با ساختار مولکولی مشخص، اندازه‌ای بین ۱ nm تا ۲ nm دارند [۱۲]. آن‌ها خواصشان متفاوت از خواص نانوبلورها است. در نقاط کوانتومی سنتز شده در این تحقیق، پیک‌های موجود در محدوده ۳۲۵-۳۱۰ nm مربوط به MSNC ها هستند که در طیف جذب نقاط کوانتومی CdS در حین سنتز مشاهده می‌شوند (شکل ۱ و ۲). نکته قابل توجه تغییر زمان پیدایش و ناپدید شدن پیک‌های مربوط به این نانوخوشه‌ها است که رفتاری متفاوت را از خود نشان داده است. در حالتی که نسبت مولی S به Cd در پیش ماده ۰/۴ به ۱ است، این پیک‌ها از همان زمان‌های اولیه (۳۰ s) مشاهده می‌شوند و بعد از ۶۰۰ s هیچ پیکی مربوط به MSNC ها مشاهده نمی‌شود (شکل ۱)، که بیانگر این است که تمام MSNC ها به نانوبلور تبدیل شده‌اند.

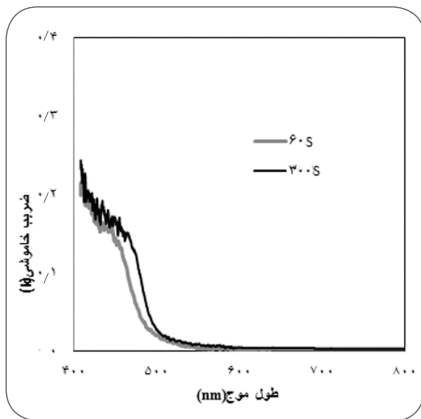
گزارش شده است که این نانوخوشه‌ها به دلیل اندازه بسیار کوچک‌شان در شرایطی که غلظت مونومر زیاد باشد می‌توانند به وجود آیند [۱۳]. از این رو، ناپدید شدن این پیک‌ها در زمان‌های بیش‌تر از ۶۰۰ s بیانگر کاهش غلظت مونومر است که عدم تغییر پیک جذب نیز این نتیجه را داده است. از طرف دیگر، با افزایش نسبت مولی S به Cd، پیک مربوط به این نانوخوشه‌ها در محدوده ۳۳۰-۳۱۰ nm و در زمان‌های بیش‌تر از ۳۰۰ s ظاهر می‌شود و در ۹۰۰ s ناپدید می‌شوند (شکل ۲) که در مقایسه با نسبت مولی کم، به زمان‌های بالاتر انتقال یافته است. مشاهده شدن نانوخوشه‌ها در زمان‌های بالاتر با افزایش نسبت مولی Se به Cd در سنتز نانوبلورهای CdSe نیز گزارش شده است [۱۳]. بررسی ثوابت نوری مواد به دلیل این‌که مشخصات ساختار الکترونیکی آن‌ها را تعیین می‌کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای محاسبه ثوابت نوری از جمله ضریب شکست (n) و ضریب خاموشی (k)، طیف‌های عبوری و انعکاس فیلم‌های نازک سنتز شده از نانوبلورهای CdS اندازه‌گیری شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. طیف عبور نشان می‌دهد که با افزایش زمان سنتز، عبور زیاد در طول موج‌های بالاتر رخ داده است. به عبارت دیگر، عبور زیاد در نانوبلورهای سنتز شده در زمان ۶۰ s در طول موج‌های بیش‌تر از ۴۶۰ nm و زمان ۳۰۰ s، در ۴۹۰ nm رخ می‌دهد. هم‌چنین، افزایش درصد انعکاس نور با بزرگ‌تر شدن اندازه بلورها قابل مشاهده است. ثوابت نوری نانوبلورها با استفاده از داده‌های عبور، انعکاس و رابطه ۲ [۱۴، ۱۵] محاسبه شده است.



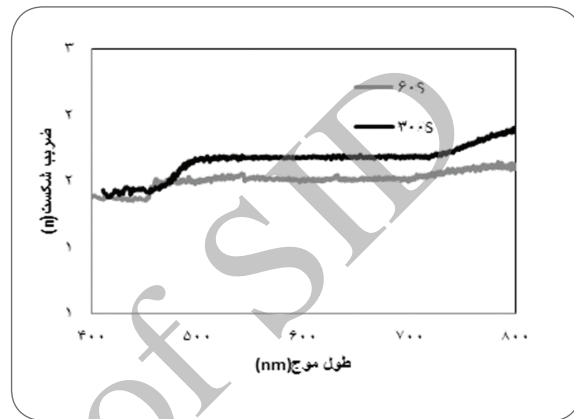
شکل ۳: طیف عبور (الف) و انعکاس نور (ب) از فیلم‌های تهیه‌شده از CdS با زمان سنتز متفاوت

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2)$$

در این رابطه، k ضریب خاموشی است که با استفاده از طیف جذب و رابطه $k = \alpha\lambda / 4\pi$ محاسبه شده است. چگونگی تغییرات ضریب شکست و خاموشی با طول موج در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش اندازه بلور، ضریب شکست به دلیل افزایش درصد انعکاس، افزایش یافته است. رفتار ضریب خاموشی مشابه با طیف جذب نانوبلور است و با افزایش اندازه بلور با زمان واکنش، به طول موج های بالاتر انتقال می یابد و طیف جذب گسترده تر می شود.



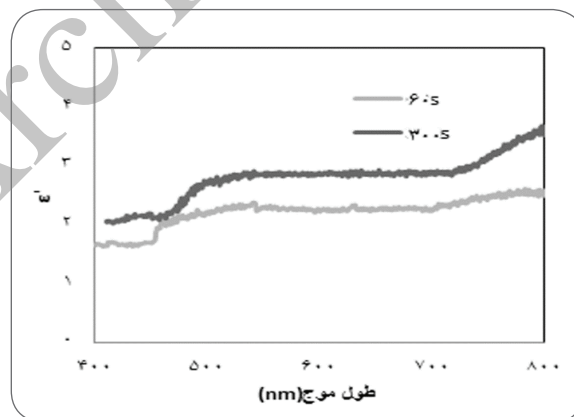
شکل ۵: ضریب خاموشی فیلم های نازک تهیه شده از نانوبلورهای CdS



شکل ۴: ضریب شکست فیلم های نازک تهیه شده از نانوبلورهای CdS

شکل ۶ قسمت حقیقی ثابت دی الکتریک (ϵ') نقاط کوانتومی CdS را نشان می دهد که از رابطه ۳ محاسبه شده است:

$$\epsilon' = k^2 - n^2 \quad (3)$$



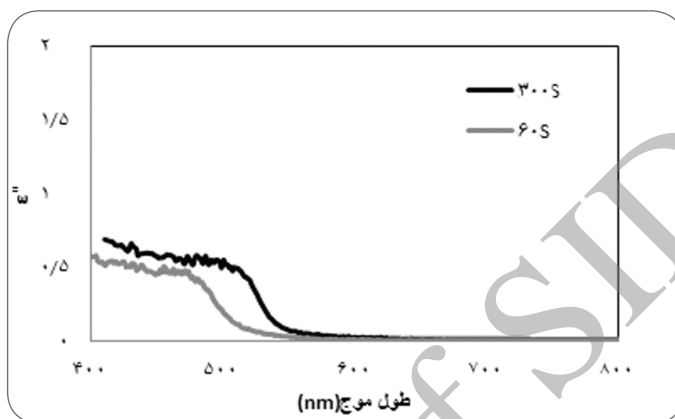
شکل ۶: قسمت حقیقی ثابت دی الکتریک (ϵ') نقاط کوانتومی CdS

از دیدگاه نظری، قسمت حقیقی ثابت دی الکتریک (ϵ') تناسب مستقیم با ضریب شکست (n) دارد که نتایج تجربی ارائه شده در اشکال ۴ و ۶ این روند را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ϵ' افزایشی در محدوده طول موجی ۴۵۰

تا 500 nm دارد که با افزایش زمان سنتز و اندازه بلور، این افزایش به طول موج بالاتر انتقال یافته است. قسمت موهومی (ϵ'') ثابت دی‌الکتریک با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده و در شکل ۷ ارائه شده است.

$$\epsilon'' = 2nk \quad (۴)$$

ϵ'' متناسب با میزان جذب نانوبلورها است که در نانوبلورهای CdS سنتز شده، با افزایش زمان سنتز این مشخصه به طول موج بالاتر انتقال پیدا کرده است و وابستگی جذب به قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک را نشان می‌دهد.



شکل ۷: قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک (ϵ'') نقاط کوانتومی CdS

۴- نتیجه‌گیری

با افزایش زمان سنتز، قطر نانوبلورها از ۲ به ۵ nm افزایش یافته و نوار ممنوعه آن‌ها از $2/8$ به $2/4\text{ eV}$ کاهش یافته است. همچنین، با افزایش نسبت مولی S به Cd در محلول پیش ماده واکنشی، درصد مولی S در نانوبلورهای CdS بیش‌تر شده است و بلورهای بزرگ‌تری در زمان کم‌تری تشکیل شده است. طیف جذب نانوبلورها حضور ناخوشه‌ها در مراحل اولیه سنتز را نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مولی S به Cd در زمان‌های بالاتر ظاهر می‌شوند. تابعیت ضریب شکست نانوبلورها از طول موج نشان داده است با عبور از محدوده جذب، ضریب شکست افزایش و ضریب خاموشی کاهش می‌یابد. همچنین، رشد نانوبلورها با افزایش زمان سنتز، منجر به افزایش درصد انعکاس نور و ضریب شکست می‌شود. محاسبه ثابت دی‌الکتریک، وابستگی ضریب شکست و ضریب خاموشی به قسمت حقیقی و موهومی را نشان داده است.

قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را از دانشگاه تربیت مدرس و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو به دلیل حمایت‌های مالی از این پژوهش ابراز می‌دارند.



مراجع

1. Kolny-Olesiak J., Synthesis and Surface Characterization of Semiconductor Nanocrystals for Photovoltaic Application, PhD Thesis, Russland, Carl Von Ossietzky University, 2010.
2. Woggon U., Optical Properties of Semiconductor Quantum Dots, Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.
3. Nozik A. J., Beard M. C., Luther J. M., Law M., Ellingson R. J. and Johnson J.C., Semiconductor Quantum Dots and Quantum Dot Arrays and Applications of Multiple Exciton Generation to Third-Generation Photovoltaic Solar Cells, Chemical Reviews, 110(2010), 6873-6890.
4. Guchhait A., Rath A.K. and Pal A.J., To Make Polymer: Quantum Dot Hybrid Solar Cells NIR-active by Increasing Diameter of PbS Nanoparticles, Solar Energy Material and Solar Cells, 95(2010), 651-656.
5. Kamat P.V., Quantum Dot Solar Cells. Semiconductor Nanocrystals as Light Harvesters, Physical Chemistry C, 112(2008), 18737-18753.
6. شادرخ ز، تهیه و بررسی خواص نوری خطی و غیرخطی نانوذرات نقاط کوانتومی سلناید کادمیوم، پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران، تربیت مدرس، ۱۳۸۷.
7. Kolny-Olesiak J., Kloper V., Osovsky R., Sashchiuk A. and Lifshitz E., Synthesis and Characterization of Brightly Photoluminescent CdTe Nanocrystals, Surface Science, 601(2007), 2667-2670.
8. Yu W.W. and Peng X., Formation of High-Quality CdS and Other II-VI Semiconductor Nanocrystals in Noncoordinating Solvents: Tunable Reactivity of Monomers, Angewandte Chemie International Edition, 41(2002), 2368-2371.
9. Lokteva I., Radychev N., Witt F., Borchert H., Parisi J.R. and Kolny-Olesiak J., Surface Treatment of CdSe Nanoparticles for Application in Hybrid Solar Cells: The Effect of Multiple Ligand Exchange with Pyridine, Physical Chemistry C, 114(2010), 12784-12791.
10. Yu W.W., Qu L., Guo W. and Peng X., Experimental Determination of the Extinction Coefficient of CdTe, CdSe, and CdS Nanocrystals, Chemistry of Material, 15(2003), 2854-2860.
11. Yu Q. and Liu. C.Y., Study of Magic-size-cluster Mediated Formation of CdS Nanocrystals: Properties of the Magic-size Clusters and Mechanism Implication, Physical Chemistry C, 113(2009), 12766-12771.
12. Soloviev V.N., Eichhöfer A., Fenske D. and Banin U., Molecular Limit of a Bulk Semiconductor: Size Dependence of the "Band Gap" in CdSe Cluster Molecules, Journal of American Chemical Society, 122(2000), 2673-2674.
13. Peng Z.A. and Peng X., Nearly Monodisperse and Shape-controlled CdSe Nanocrystals via Alternative Routes: Nucleation and Growth, Journal of American Chemical Society, 124(2002), 3343-3353.
14. Badran H.A., Study on Optical Constants and Refractive Index Dispersion of Neutral Red Doped Polymer Film, American Journal of Applied Science, 9(2012), 250-253.
15. Ravangave L.S. and Biradar U.V., Study of Optical Parameters of Chemical Bath Deposited Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films, Material Physics and Mechanics, 16(2013), 25-33.