

تأثیر غلظت عامل کمپلکس ساز نمک آمونیم بر خواص ساختاری و نوری لایه نازک نانوساختار سولفید کادمیم تهیه شده به روش نشست شیمیایی

محمد حسن صرافی* و امیرعلی یوزباشی

پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده نیمه هادی‌ها

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۱۱/۳۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۲/۰۳/۲۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۳/۰۴/۱۵

چکیده

با توجه به اهمیت تهیه لایه‌های نازک نانوساختار نیمه هادی‌های نوری گروه II-VI از طریق روش‌های ارزان و ساده شیمیایی، در کار پژوهشی حاضر ضمن استفاده از روش لایه نشانی شیمیایی CBD، در راستای کنترل رشد چنین لایه‌هایی، تأثیر غلظت عامل کمپلکس ساز نمک آمونیم بر خواص ساختاری و نوری لایه‌های نازک CdS تهیه شده به این روش، توسط تکنیک‌های آنالیز XRD، SEM، AFM و UV-Visible مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت عامل کمپلکس ساز از حد معینی، مورفولوژی و اندازه ذرات، زبری سطح، ضخامت لایه، تراکم ذرات بر سطح زیرلایه و در نهایت خواص نوری لایه‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نتایج بطور کلی حاکی از آن است که با تنظیم بهینه عامل کمپلکس ساز، امکان کنترل برخی مشخصه‌های ساختاری در چنین لایه‌هایی که بتواند منجر به خواص نوری مناسب بشود، وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: لایه نازک نانوساختار، نشست شیمیایی در حمام، عامل کمپلکس ساز، خواص ساختاری و نوری.

۱- مقدمه

خورشیدی لایه نازک می‌باشد [۱]. روش CBD (Chemical Bath Deposition: CBD) بخاطر ویژگی‌هایی مانند سهولت انجام کار، هزینه‌های کم و کیفیت بالای لایه‌های نازک تهیه شده، مورد توجه بسیاری از تولیدکنندگان قطعات نیمه هادی با خواص فتوولتائیک قرار گرفته است [۲]. فرآیند تشکیل لایه نازک سولفید کادمیم به روش CBD به دو صورت انجام می‌شود: فرآیند یون به یون (Ion by Ion) و فرآیند خوشه به خوشه (Cluster by Cluster) در حالیکه در فرآیند یون به یون، ایجاد لایه نازک به دنبال تغلیظ یون‌ها در سطح واکنش صورت می‌گیرد، در طی فرآیند خوشه به خوشه ابتدا ذرات

روش موسوم به نشست شیمیایی در حمام یکی از روش‌های شناخته شده برای تهیه لایه‌های نازک بسیاری از ترکیبات کالکوژنید از جمله سولفید کادمیم، با خواص نوری مناسب برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی نسل جدید بشمار می‌رود. سولفید کادمیم جزو نیمه هادی‌های با انرژی بند گپ مستقیم (Direct Band Gap Energy) بشمار رفته و بخاطر دارا بودن خواص ویژه نوری در محدوده مرئی-فرابنفش و مقاومت الکتریکی کم، دارای کاربردهای بالقوه به عنوان لایه بافر در ساخت سلول‌های

* عهده‌دار مکاتبات: محمد حسن صرافی

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: ۰۲۶۳-۶۲۸۰۰۴۶، دورنگار: ۰۲۶۳-۶۲۸۰۰۴۶، پست الکترونیکی: m-sarrafi@merc.ac.ir

NH_4NO_3 به عنوان مواد کمپلکس ساز در غلظت‌های ۳، ۴/۵ و ۶ m/l، تیواوره ($\text{Tiourea CS}(\text{NH}_2)_2$) به عنوان ماده تأمین کننده یون سولفور با غلظت ثابت ۰/۲ m/l و KOH برای تنظیم pH محیط واکنش با غلظت ۰/۵ m/l استفاده شد. برای اجرای فرآیند واکنش به روش CBD، از یک بشر جهت انجام واکنش استفاده شد که به کمک یک پایه نگهدارنده درون ظرف محتوی آب معمولی قرار داده شد که مجموعاً بر روی صفحه گرمکن الکتریکی قرار گرفتند. در این حالت گرمادهی از طریق آب پیرامون ظرف واکنش به آن اعمال شد. برای کنترل دما و pH محیط واکنش و نیز امتزاج محلول‌های واکنشگر به ترتیب از یک ترموکوبل (سیستم ترموستاتیک)، یک pH متر دیجیتالی و یک همزن مغناطیسی استفاده شد. برای لایه‌نشانی از لام‌های شیشه‌ای میکروسکوپی (Corning Glass) به عنوان زیرلایه استفاده شد. به منظور چربی‌زدایی از لام‌های شیشه از مایع صابون و الکل پروپانول استفاده شد. در این پژوهش دمای واکنش در $75 \pm 2^\circ\text{C}$ و pH محیط در محدوده ۱۱ تنظیم شد. زمان ماندگاری زیرلایه در محلول واکنش بطور معمول ۲ ساعت در نظر گرفته شد.



شکل ۱: سازوکار روش CBD برای لایه نشانی.

بررسی‌های ساختاری و مورفولوژیکی لایه نازک CdS توسط دستگاه‌های پراش پرتو ایکس در محدوده زوایای ۷۰-۲۰ درجه با تابش معمولی توسط آند Cu تحت شرایط

کلوئیدی در محلول واکنش آگلومره شده و سپس توسط جذب سطحی لایه نازک را تشکیل می‌دهند [۳]. برای تهیه لایه سولفید کادمیم به روش CBD، از نمک‌های مختلف کادمیم و بطور عمده از سولفات کادمیم (CdSO_4) و یا کلرور کادمیم (CdCl_2) به عنوان تأمین کننده یون Cd در محلول واکنش استفاده می‌شود. تیواوره Thiourea ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$) ترکیبی است که عمدتاً جهت تأمین یون سولفور مورد نیاز برای ایجاد CdS مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان ماده کمپلکس ساز، در اکثر آزمایش‌ها از هیدراکسید آمونیوم NH_4OH و یا سایر نمک‌های حاوی یون NH_4^+ مانند نیترات آمونیم NH_4NO_3 استفاده می‌شود [۴]. آمونیا یک کمپلکس ساز مناسب اما نه چندان قوی برای Cd به شمار رفته و به منظور دستیابی به رشد سولفید کادمیم از طریق واکنش یون به یون (لایه‌نشانی غیرهمگن) که در تهیه لایه نازک CdS با ساختار نانویی مطلوب می‌باشد، در مقادیر اضافی استفاده می‌شود [۵]. تحقیقات نشان داده‌اند که در تهیه لایه‌های نازک نانو ساختار ترکیبات کالکوژنید مانند سولفید کادمیم به روش CBD، در کنار سایر عوامل تأثیرگذار در کیفیت لایه مانند طبیعت واکنشگرها، دما و pH محیط واکنش، کیفیت سطح زیرلایه، زمان ماندگاری زیرلایه در محلول واکنش [۱۰-۶]، نقش عامل کمپلکس ساز در محلول واکنش از اهمیت ویژه‌ای در کنترل لایه نازک برخوردار است. با وجود آنکه تاکنون تحقیقات وسیعی در خصوص اهمیت عامل کمپلکس ساز در تشکیل لایه نازک CdS انجام شده، اما در اغلب کارها بیشتر بر تاثیر نوع عامل کمپلکس ساز با در نظر گرفتن غلظت‌های ثابت و یا محدوده‌های غلظتی باریکی از آنها متمرکز بوده است [۱۱-۱۳]. لذا کار تحقیقاتی حاضر تاثیر غلظت نیترات آمونیم به عنوان ماده کمپلکس ساز در محدوده نسبتاً وسیعی بر ساختار و خواص نوری لایه‌های نازک CdS تهیه شده به روش CBD مورد بررسی قرار گرفت.

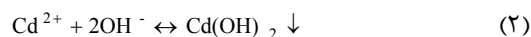
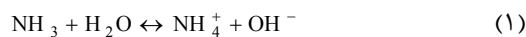
۲- فعالیت‌های تجربی

در این پژوهش برای انجام واکنش از محلول نمک‌های کلرور کادمیم آبدار ($\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) به عنوان تأمین کننده یون Cd^{2+} با غلظت ثابت ۰/۰۶ ml/l، نیترات آمونیم

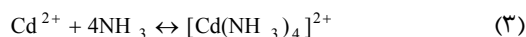
با توجه به ترکیبات شیمیایی استفاده شده در این آزمایش‌ها، واکنش‌های احتمالی را می‌توان به قرار زیر خلاصه نمود [۱۴، ۱۵].

- به دنبال انحلال نمک کلرور کادمیم در آب، یون‌های Cd^{2+} و Cl^- آزاد می‌شوند.

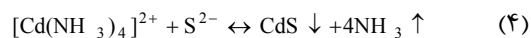
- در نتیجه هیدرولیز آمونیا (ناشی از انحلال نیترات آمونیم) در آب طبق واکنش ۱، یون OH^- جهت واکنش با یون‌های Cd^{2+} ایجاد می‌شود و در این حالت در صورتیکه محصول یونی $[OH^-]$ و $[Cd^{2+}]$ از فاکتور انحلال‌پذیری $Cd(OH)_2$ ($1/2 \times 10^{-14}$) در محلول بیشتر شود، طبق رابطه ۲ هیدرکسید کادمیم شروع به رسوب‌گذاری می‌کند.



- با افزایش مقدار آمونیا در محلول، رسوب $Cd(OH)_2$ ایجاد شده حل و با آمونیا تشکیل کمپلکس $[Cd(NH_3)_4]^{2+}$ را می‌دهد.



- در نتیجه واکنش یون سولفور آزاد شده از تیواوره با کمپلکس $[Cd(NH_3)_4]^{2+}$ در دما و pH مناسب، طبق رابطه زیر رسوب CdS تشکیل می‌شود.



۳-۲- خواص ساختاری

چنانکه مرور منابع مختلف نشان می‌دهند، سولفید کادمیم به لحاظ ساختاری عمدتاً به صورت فازهای اصلی مکعبی و هگزاگونال از نوع Wurtzite و Zinblend تشکیل می‌شوند [۷]. در بیشتر موارد، تشخیص و تفکیک انعکاس‌های مربوط به این دو فاز در الگوهای پراش بخاطر نزدیکی بسیاری از فواصل شبکه بلوری (d) در هر دو فاز از جمله صفحات (۱۱۱)، (۲۲۰) و (۳۱۱) در ساختار مکعبی به صفحات (۰۰۲)، (۱۱۰) و (۱۱۲) در ساختار هگزاگونال،

۳۰ mA و ۴۰ kV، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-Cambridge-Sterio 360)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM-Park Scientific) و بررسی‌های نوری توسط دستگاه طیف‌سنج نوری (UV-Vis-Perkinelmer 25) در محدوده طول موج‌های ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر انجام شد. ضخامت لایه‌های ایجاد شده با استفاده از دستگاه پروفیلومتر (Talystep) با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰ اندازه‌گیری شد. در شکل ۱ سازوکار حمام واکنش نمایش داده شده است.

۳- نتایج و بحث

پس از انجام واکنش و فرآیند لایه‌نشانی طی زمان در نظر گرفته شده، لایه‌های نازک CdS که به صورت یکنواخت به رنگ زرد مایل به نارنجی شفاف در سطح لام‌های شیشه‌ای تشکیل شده بودند، از حمام واکنش خارج و به منظور جداسازی ذرات آگلومره شده با چسبندگی ضعیف، در محفظه التراسونیک قرار داده شدند. لام‌های شیشه‌ای پس از خروج از محفظه و خشک شدن در دمای محیط با کدهای K1، K2 و K3 علامت‌گذاری شدند. کدهای در نظر گرفته شده به ترتیب معرف غلظت‌های ۳، ۴/۵ و ۶ m/l نیترات آمونیم مصرف شده در محلول واکنش می‌باشند.

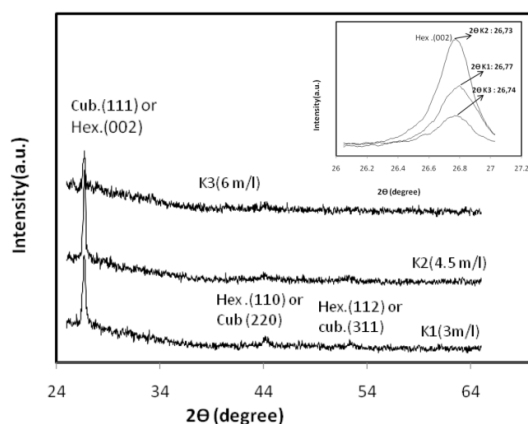
۳-۱- تشکیل لایه نازک سولفید کادمیم

همانطور که در مقدمه بدان اشاره شد، در روش CBD، رشد سولفید کادمیم بر سطح یک زیرلایه عمدتاً به دو صورت انجام می‌شود که شامل فرآیندهای رشد "یون به یون" و "خوشه به خوشه" می‌باشد. بطور خلاصه، در حالیکه در طی فرآیند یون به یون، شکل‌گیری لایه نازک با تغلیظ یون‌ها در سطح واکنش همراه است، در فرآیند خوشه به خوشه، قبل از عمل جذب در سطح زیرلایه و تشکیل لایه نازک، ابتدا ذرات کلوئیدی تشکیل شده و سپس در صورت مساعد بودن شرایط عمل، آگلومراسیون شکل می‌گیرد. بطوریکه گزارش‌های متعدد نشان می‌دهند، در اغلب موارد هر دو فرآیند بطور توأم انجام شده و لایه تشکیل شده حاوی مواد کلوئیدی نیز می‌باشد که معمولاً از چسبندگی کمی به سطح زیرلایه برخوردارند.

CdS و صرفه نظر کردن از تاثیر تنش‌های احتمالی درون شبکه‌ای، از رابطه شرر با بکارگیری نرم‌افزار X'Pert HighScore و اعمال آن برای صفحه (۰۰۲) استفاده شد [۱۹].

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (5)$$

در رابطه ۱، D اندازه کریستالیت، K مقدار ثابت برابر با ۰/۹۴، β پهنای پیک در نصف حداکثر ارتفاع (FWHM) بر حسب رادیان و θ زاویه پراش می‌باشند.



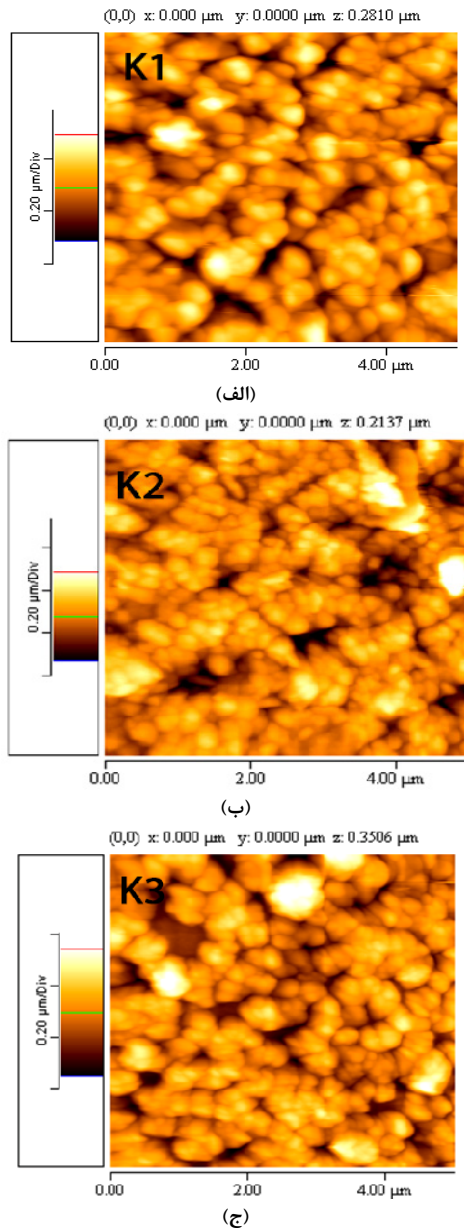
شکل ۲: مقایسه الگوهای پراش نمونه‌های K1، K2 و K3 تهیه شده از ترکیب NH_4NO_3 در غلظت‌های ۰.۳، ۴/۵ و ۶ مولار.

در این آزمون مشخص شد، با افزایش غلظت NH_4NO_3 در محلول واکنش، اندازه کریستالیت در لایه‌ها بدون روند خاصی تغییر پیدا کرده و مقدار آن از حدود ۸۰ نانومتر در نمونه K1 به ۶۰ نانومتر در نمونه K3 کاهش یافته است.

۳-۳- خواص مورفولوژیکی

تصاویر بدست آمده از آزمون‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی و نیروی اتمی نشان می‌دهند که ذرات CdS تقریباً به صورت کروی در مقیاس نانومتری تشکیل شده‌اند و تراکم آنها بر روی سطح از نمونه K1 با کمترین غلظت تا نمونه K3 با بیشترین غلظت NH_4NO_3 کاهش پیدا کرده است. ضمناً به نظر می‌آید که ذرات با افزایش غلظت NH_4NO_3 آگلومره‌های درشت‌تری را تشکیل می‌دهند، بطوریکه ابعاد متوسط ذرات از حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر

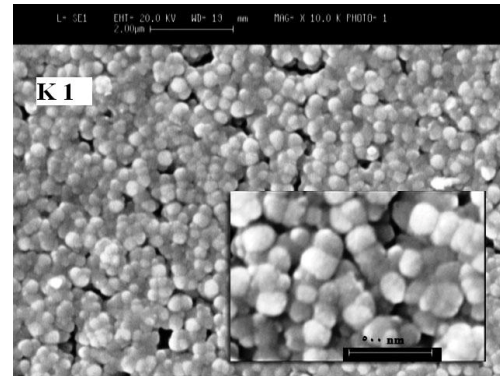
به علت همپوشانی انعکاس‌ها به دشواری امکان‌پذیر است [۱۰]. در بررسی اولیه از الگوهای پراش بدست آمده از لایه‌های نازک مشخص شد که با توجه به حضور یک انعکاس غالب در محدوده زاویه ۲۶-۲۷ درجه، احتمالاً بلورک‌های CdS در سطح لایه عمدتاً با جهات ترجیحی عمود بر امتداد صفحات بلورشناسی (۱۱۱) مربوط به ساختار مکعبی و یا (۰۰۲) مربوط به ساختار هگزاگونال تشکیل شده‌اند (شکل ۲). بعلاوه دو انعکاس ضعیف در محدوده زوایای ۴۴ و ۵۳ درجه در الگوی پراش نمونه K1 مشاهده می‌شوند که می‌توانند مربوط به تعدادی از بلورک‌های با جهات اتفاقی متعلق به هر دو فاز مکعبی یا هگزاگونال باشند. به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری در تعیین موقعیت مکانی انعکاس غالب در محدوده مورد نظر، الگوبرداری تحت حرکت گانیومتر با گام‌های ۰/۰۰۵ درجه و زمان توقف مرحله‌ای ۱۰ ثانیه در هر گام برای هر سه نمونه انجام شد. بطوریکه از مقایسه الگوهای پراش لایه‌های نازک مشاهده می‌شود، ماکزیمم انعکاس‌ها با اختلاف ناچیزی نسبت بهم در محدوده زاویه ۲۶/۷ درجه قابل مشاهده هستند (تصویر الصاقی در شکل ۲ سمت راست بالای تصویر). با بررسی کارهای PDF مربوط به ساختارهای بلورشناسی CdS مشخص شد، با احتساب جابجایی احتمالی انعکاس‌ها به علت تنش‌های شبکه کریستالین، نزدیکترین انعکاس در محدوده زاویه مورد بررسی منطبق با صفحه (۰۰۲) از فاز هگزاگونال Greenockite (کارت‌های شماره ۱-۷۸۳ و ۲-۵۶۳) می‌باشد. در خصوص ایجاد لایه‌های نازک CdS با جهات ترجیحی عقیده بر این است که ایجاد چنین ساختاری مرتبط با فرآیند هسته‌زایی کنترل شده همراه با نرخ رشد آهسته CdS در سطح زیرلایه می‌باشد. بعلاوه حضور فاز غالب هگزاگونال در لایه نازک دلالت بر تشکیل لایه به دنبال فرآیند یون با یون در سطح زیرلایه دارد [۱۶، ۱۷]. همانطور که از الگوی پراش ملاحظه می‌شود، شدت انعکاس‌ها و متعاقب آن پهنای آنها از نمونه K1 به K3 دچار تغییر شده است. پهن شدن انعکاس در الگوی پراش معمولاً می‌تواند ناشی از مواردی مانند تغییر اندازه کریستالیت‌ها و یا تنش‌های درونی شبکه باشد [۱۸]. در این آزمون به منظور تخمین تقریبی اندازه کریستالیت‌های



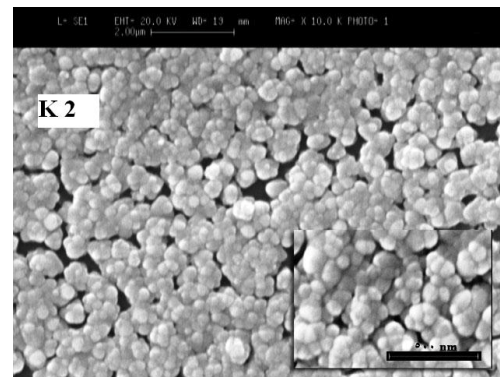
شکل ۴: تصاویر AFM لایه‌های نازک نانوساختار CdS.

در ارتباط با کاهش تراکم نانوذرات CdS در سطح لایه نازک نمونه K3 چنین به نظر می‌رسد در اثر افزایش غلظت عامل کمپلکس‌ساز با کاهش تشکیل مراکز هسته‌زا در سطح زیرلایه در طی فرآیند هسته‌زایی رخ خواهد داد که علاوه بر اینکه می‌تواند ناشی از کاهش سرعت لایه‌نشانی باشد، احتمالاً تفاوت در روند تغییرات pH در طی زمان واکنش، نیز می‌تواند دخیل باشد. در این خصوص، در تحقیقاتی که توسط Huang و همکاران وی

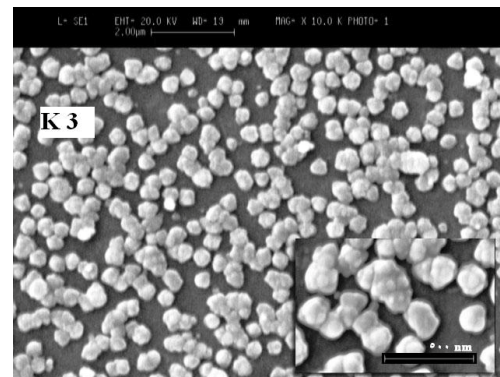
در نمونه‌های K1 و K2 به ۳۰۰ الی ۴۰۰ نانومتر در نمونه K3 افزایش یافته است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: تصاویر SEM لایه‌های نازک نانوساختار CdS، (الف) K1، (ب) K2 و (ج) K3.

ایجاد ذرات آگلومره شده احتمالاً ناشی از بهم پیوستگی بیشتر ذرات در نمونه K3 است که می‌تواند در نتیجه بهم پیوستن ذرات کروی شکل توسط رسوب بسیار ریز CdS با ساختار احتمالاً آمورف ایجاد شده باشند.

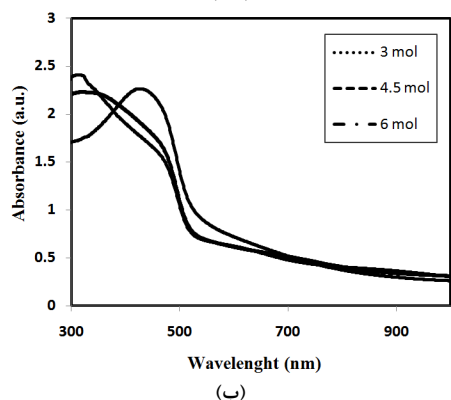
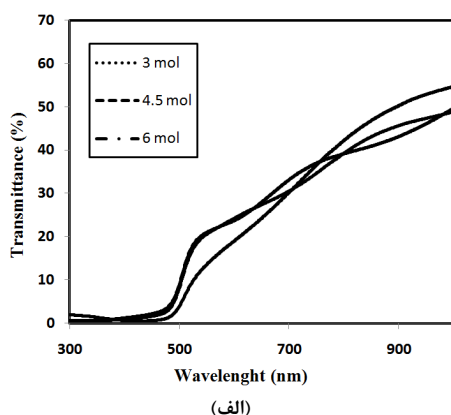
خطی منحنی با محور انرژی (صفر α) می توان گاف انرژی را محاسبه نمود [۷،۱۷].

$$\alpha_2 = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (۶)$$

در رابطه ۶، α ضریب جذب لایه نازک، E_g گاف انرژی و h و ν به ترتیب ثابت پلانک و فرکانس موج محسوب می شوند. برای محاسبه α از مقادیر منحنی عبور بر اساس رابطه زیر استفاده شد:

$$\alpha = -1/\ln(I/T) \quad (۷)$$

در رابطه ۷، d ضخامت لایه و T مقدار عبور در نظر گرفته می شوند.



شکل ۵: منحنی‌های مربوط به طیف‌های، الف) عبوری و ب) جذبی، تهیه شده در دمای 75 ± 2 درجه سانتیگراد و زمان ماندگاری ۲ ساعت در غلظت‌های مختلف عامل کمپلکس‌ساز NH_4NO_3 .

انجام شده [۱۶]، نامبردگان تغییر در مورفولوژی و شکل ذرات در لایه‌های نازک CdS تهیه شده به روش CBD را به کاهش نرخ لایه‌نشانی با افزایش غلظت عامل کمپلکس‌ساز نسبت داده‌اند و حضور مقادیر اضافی NH_3 تا غلظت‌های معین در محلول واکنش را موجب پایداری بیشتر کمپلکس $[Cd(NH_3)_4]^{2+}$ دانسته‌اند (رابطه ۳) که منجر به کاهش مقادیر یون آزاد Cd^{2+} و در نتیجه کاهش ذرات CdS در سطح زیرلایه می‌شود. بعلاوه آزمون AFM نشان می‌دهد که تغییرات در میانگین زبری سطح (rms-roughness) برداشت شده از ۳ ناحیه در هر نمونه) بطور شاخص از تغییرات غلظت NH_3NO_4 در محلول واکنش پیروی نمی‌کند. هر چند طبق نتایج بدست آمده، نمونه K3 از بیشترین زبری نسبت به نمونه‌های دیگر (حدود ۹۰ نانومتر) برخوردار است که می‌تواند دلالت بر تشکیل توده‌های آگلومره شده از ذرات CdS در سطح لایه داشته باشد. در شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر SEM و AFM مربوط به نمونه‌های K1 تا K3 جهت مقایسه ارائه شده‌اند.

۴-۳- خواص نوری

طیف‌های عبوری بدست آمده از نمونه‌ها دلالت بر رفتار تقریباً مشابه نمونه‌های K1 و K2 در تمامی طول موج‌ها داشته، در صورتیکه نمونه K3 در طول موج‌های کمتر از ۷۰۰ نانومتر درصد عبور کمتر (حدود ۳۰ درصد) و در طول موج‌های بالاتر از ۷۰۰ نانومتر درصد عبور بیشتری را نشان می‌دهد.

در مورد طیف‌های جذبی، ظاهراً طول موج بدست آمده برای حداکثر جذب نور در نمونه K3 در محدوده ۴۰۰ نانومتر نسبت به نمونه‌های K1 و K2 که تقریباً همانند طیف‌های عبوری رفتاری مشابه دارند، افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. چنین رفتار غیرمعمولی می‌تواند ناشی از عدم تراکم مناسب ذرات تشکیل شده بر روی سطح زیرلایه باشد. برای تخمین مقدار گاف انرژی در این لایه‌ها از رابطه تاک (Tauc Formula) ارائه شده در زیر استفاده شد که بر اساس رسم منحنی توان دوم ضریب جذب نور (α^2) در برابر انرژی فوتون ($h\nu$) حاصل می‌شود. در این حالت از محل برخورد خط امتداد یافته از قسمت

۴- نتیجه‌گیری

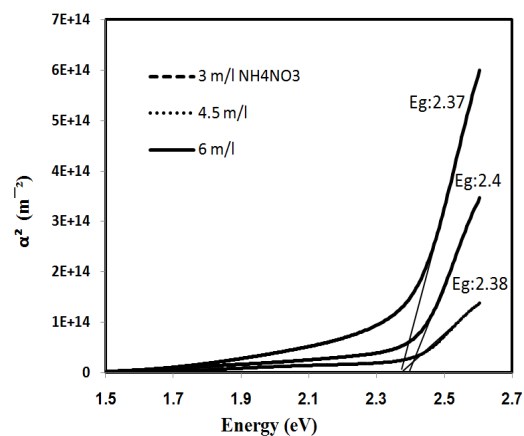
بررسی ساختاری لایه‌های نازک CdS توسط پراش پرتو ایکس نشان داد که لایه‌ها با ساختار بلورین هگزاگونال و با جهت ترجیحی (۰۰۲) کریستالی بر سطح زیرلایه شیشه‌ای شکل گرفته‌اند. ایجاد چنین ساختاری مرتبط با فرآیند هسته‌زایی کنترل شده همراه با نرخ رشد آهسته CdS در سطح زیرلایه می‌باشد. تصاویر SEM و AFM نشان می‌دهند که ذرات CdS در اشکال تقریباً کروی با ابعاد نانومتری تشکیل شده و دارای مورفولوژی یکنواخت و متراکم هستند که تحت تاثیر شرایط محیط واکنش از نظر غلظت عامل کمپلکس‌ساز در غلظت‌های بالا، از یکنواختی و پوشش‌دهی آن کاسته شده است (نمونه K3). چنین به نظر می‌رسد، تغییرات ناشی از غلظت ماده کمپلکس‌ساز در محلول واکنش می‌تواند موجب تغییر در اندازه کریستالیت‌ها، زبری سطح و حتی ضخامت لایه شود که در نهایت خواص نوری آنها را تحت تاثیر قرار داده است. بطور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که افزایش غلظت ماده کمپلکس‌ساز در محیط واکنش علیرغم اینکه می‌تواند فرآیند لایه‌نشانی را تحت کنترل قرار دهد، اما افزایش آن تا غلظت‌های معینی باعث کاهش تراکم ذرات و بالطبع کاهش کیفیت خواص نوری خواهد شد.

مراجع

- [1] S.S. Kwar, *Research Journal of Chemical Sciences*, **1**, 2011, 31.
- [2] H.M. Pathan, C.D. Lokhande, *Bull. Mater. Sci.*, **27**, 2004, 85.
- [3] R. Ortera-Borges, D. Lincot, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 1993, 3464.
- [4] P. Nemeč, I. Nemeč, P. Nahalkova, K. Knizek, P. Maly, *Thin Solid Films*, **403**, 2002, 9.
- [5] M. Kokotov, Y. Feldman, A. Avishai, M. DeGuire, G. Hodes, *Thin Solid Films*, **519**, 2011, 6388.
- [6] A. Kassim, S. Nagalingam, T. Wee-Tee, A.M. Sharif, D.K. Abdullah, M.J. Elas, H.S. Min, *Philippine Journal of Science*, **138**, 2009, 161.
- [7] E. Cetinorgu, C. Gumus, R. Esen, *Thin Solid Films*, **515**, 2006, 1688.
- [8] J. Moeller, C.H. Fischer, H.J. Mufer, R. Koenenkamp, I. Kaiser, C. Kelch, M.C. Lux-Steiner, *Thin Solid Films*, **361**, 2000, 113.
- [9] S. Tec-Yam, R. Patino, A.I. Oliv, *Current Applied Physics*, **11**, 2011, 914.
- [10] M. Eray-Erkan, M.H. Jin, *Materials Chemistry and Physics*, **133**, 2012, 779.
- [11] S.B. Patil, A.K. Singh, *Applied Surface Science*, **256**, 2010, 2884.

با تعیین ضخامت لایه‌های نازک و استفاده از روابط ۶ و ۷، منحنی‌های مربوطه رسم شد و مقادیر گاف انرژی در لایه‌های نازک CdS به ترتیب ۲/۴ (نمونه K1)، ۲/۳۸ (نمونه K2) و ۲/۳۷ (نمونه K3) الکتروولت تخمین زده شدند (شکل ۵).

تفاوت در مقادیر گاف انرژی بدست آمده در این آزمون با مقدار آن در نمونه‌های بالک (۲/۴۲ eV در نمونه CdS)، می‌تواند ناشی از تاثیر عوامل مختلفی مانند اندازه ذرات، پارامترهای ساختاری، حضور ناخالصی در شبکه کریستالین، اختلاف با مقدار استوکیومتری و تنش‌های شبکه بلورین باشد [۱۸]، که نیاز به مطالعات بیشتری در این زمینه دارد. بدین ترتیب نمونه K1 از نزدیکترین مقدار گاف انرژی به نمونه بالک برخوردار است.



شکل ۶: نمودار تخمین مقادیر گاف انرژی لایه‌های نازک CdS با استفاده از منحنی‌های درصد عبور.

در جدول شماره ۱ برخی از مشخصه‌های ساختاری لایه‌های تشکیل شده از قبیل اندازه کریستالیت، زبری سطح و گاف انرژی ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات لایه‌های نازک CdS.

گاف انرژی (eV)	میانگین زبری سطح لایه (nm)	اندازه کریستالیت (nm)	کد نمونه
۲/۴	۷۰	۸۰	K1
۲/۳۸	۶۰	۴۰	K2
۲/۳۷	۹۰	۶۰	K3

- L.Y. Zhang, S.M. Huang, *Physica B*, **405**, 2010, 4360.
- [17] A.Y. Jaber, S.N. Alamri, M.S. Aida, *Thin Solid Films*, **520**, 2012, 3485.
- [18] Y.S. Lo, R.K. Choubey, W.C. Yu, W.T. Hsu, C.W. Lan, *Thin Solid Films*, **520**, 2011, 217.
- [19] B.D. Cullity, "*Elements of X-ray Diffraction*", Wesley, 1978.
- [12] H. Zhang, X. Ma, D. Yang, *Materials Letters*, **58**, 2003, 5.
- [13] J. Liu, A. Wei, Y. Zhao, *Journal of Alloys and Compounds*, **588**, 2014, 228.
- [14] F.I. Ezema, R.U. Osuji, *Chalcogenide Letters*, **4**, 2007, 69.
- [15] I.O. Oladeji, L. Chow, *J. Electrochem. Soc.*, **144**, 1997, 2342.
- [16] Q.Q. Liu, J.H. Shi, Z.Q. Li, D.W. Zhang, X.D. Li, Z. Sun,