

مطالعه ضریب پخش گرمایی لایه‌های فوق نازک فلزی با استفاده از بیناب‌نمایی عدسی گرمایی

ایمان بیداروند^۱، امیر محمد احدی^۱ و فاطمه مطرودی^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

۲. مرکز تحقیقات لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

پست الکترونیکی: ahadi_a@scu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۲/۲۲)

چکیده

با وجود تحولات باورنکردنی در روش‌های پیشرفته مشخصه‌یابی مواد، این شاخه تحقیقاتی با چالش‌های علمی و فنی متعددی روبرو است. بیناب‌نمایی عدسی گرمایی به‌عنوان یک روش حساس و غیرمخرب بر پایه نورشناخت جهت تعیین ویژگی‌های نورگرمایی مواد و همچنین تشخیص ناخالصی‌ها در محلولات به‌شمار می‌رود. در این تحقیق با استفاده از روش بیناب‌نمایی عدسی گرمایی به بررسی ضریب پخش گرمایی لایه‌های فوق نازک نقره، تهیه شده به‌روش کندوپاش مغناطیسی، می‌پردازیم. برای این منظور مدل نظری شن بر سیگنال تجربی به‌دست آمده برازش داده شده و به دنبال آن ضریب پخش گرمایی نمونه استخراج می‌شود. نتایج به دست آمده به وضوح نشان می‌دهند در محدوده ضخامت مورد بررسی ($<15\text{nm}$)، ضریب پخش گرمایی با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد. علاوه بر آن یافته‌های ما مؤید این موضوع هستند که در ناحیه ضخامت بسیار نازک، ضریب پخش گرمایی به‌دست آمده وابستگی ضعیفی به تغییر ضخامت لایه نقره دارد. این موضوع را می‌توان با رفتار دو بعدی پخش گرما در نانو لایه‌های فوق نازک فلزی توضیح داد.

واژه‌های کلیدی: لایه‌های فوق نازک نقره، بیناب‌نمایی عدسی گرمایی، ضریب پخش گرمایی

۱. مقدمه

زیستی مبتنی بر تشدید [۴] اشاره کرد. لایه‌های نازک فلزی می‌توانند ساختار پیوسته و یا گسسته (جزیره‌وار) داشته و هم‌زمان رسانا و شفاف باشند. در این میان ساختارهای پیوسته رسانندگی بالاتر و ساختارهای گسسته شفافیت بالاتری نشان می‌دهند [۵]. از میان لایه‌های بسیار نازک، فیلم‌های مربوط به فلزات نجیب مانند طلا، نقره و مس بیشترین شفافیت را در پنجره نوری دارند [۵]. به عنوان نمونه لایه‌های نازک نقره با ضخامت بسیار کم، در طول موج 550 nm شفافیتی بیش از ۶۰٪ دارند [۶].

لایه‌های نازک فلزی شفاف به علت کاربردهای متنوعی که مشخصات فیزیکی آنها میسر می‌سازد، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. از جمله این کاربردها می‌توان به پوشش‌های رسانای شفاف در محدوده طیف فرابنفش [۱]، الکترودهای شفاف در سلول‌های خورشیدی [۲]، پوشش‌های کاتالیزوری برای رشد نانوساختارها [۳] و بخش فعال پلاسما سطحی حسگرهای

یکی از مشخصه‌های حائز اهمیت لایه‌های نازک فلزی، ضریب پخش گرمایی است. این کمیت مشخص‌کننده سرعت پخش شدن گرما و نیز سرعت از دست دادن گرمای نمونه است. عموماً ضریب پخش گرمایی به روش تماسی و به کمک اتصال ترموکوپل و عبور جریان الکتریکی از نمونه محاسبه می‌شود، اما روش‌های غیر تماسی بیناب‌نمایی نور گرمایی به دلیل غیر تخریبی بودن این روش‌ها به‌طور خاص مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷ و ۸].

پیشتر گزارش‌هایی در رابطه با محاسبه ضریب پخش گرمایی لایه‌های نازک فلزی و غیرفلزی به روش‌های مختلف منتشر شده است. به عنوان نمونه لیونگ و همکاران ضریب پخش گرمایی لایه‌های فلزی استیل ضد زنگ ۳۰۲ را در محدوده ضخامتی $12/5 \mu\text{m}$ تا $125 \mu\text{m}$ به دو روش نورگرمایی رادیومتری تپی و رادیومتری انتقالی محاسبه کردند که نتایج ایشان مؤید افزایش ضریب پخش گرمایی با افزایش ضخامت لایه‌ها بود [۷]. در تحقیق دیگری که برای لایه‌های فلزی صورت گرفت یامان و همکاران ضریب پخش گرمایی لایه‌های نازک نقره، طلا و مس را در ضخامت‌های بیش از ۳۰ نانومتر به روش فام‌نگاری مورد بررسی قرار دادند. برای هر سه فلز در رژیم ضخامتی مورد بررسی، رفتارهای مشابهی در ضریب پخش گرمایی مشاهده شد. با افزایش ضخامت، ضریب پخش گرمایی به صورت غیرخطی و با شیب کندشونده افزایش یافته و سپس به یک وضعیت اشباع می‌رسد [۹]. با معرفی روش‌های غیرتماسی بیناب‌نمایی نورگرمایی و مزایای متعدد آنها در عدم تخریب نمونه‌ها، محققین متعددی به توسعه این روش‌ها پرداختند. کابرا و همکاران در سال ۲۰۲۰ میلادی ضریب پخش لایه‌های غیر فلزی گرافن را به روش بیناب‌نمایی عدسی گرمایی محاسبه کردند. نتایج مطالعات آنان نشان دهنده کاهش غیرخطی ضریب پخش گرمایی با افزایش تعداد لایه‌های گرافن بود [۱۰].

از میان روش‌های غیرتخریبی، بیناب‌نمایی عدسی گرمایی به علت دقت و حساسیت بالا و نیز توانمندی محاسبه ضریب پخش گرمایی نمونه‌هایی با جذب کم مورد توجه قرار گرفته است. این تکنیک به‌عنوان روشی استاندارد برای محاسبه ضریب پخش گرمایی، نخستین بار توسط گوردن و همکاران، هنگام

قرار دادن سلول مایعات دو قطبی در تشدیدگر لیزر هلیوم-نئون مشاهده شد. این روش به علت تکرارپذیری بالا، غیر تخریبی بودن، حساسیت بالا و قابلیت استفاده جهت نمونه‌های حساس با جذب پایین، به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸، ۱۱ و ۱۲]. از کاربردهای این روش می‌توان به مواردی مانند تعیین ضریب پخش گرمایی [۱۲]، تشخیص کروماتوگرافی مواد، مطالعه خواص کریستال‌های مایع [۸]، بررسی ارتعاشات مولکول‌های آلی [۱۳]، آشکارسازی غلظت‌های کم مواد ناخالصی در محلول‌ها [۱۱]، مطالعه میکروشاره‌های سریع و تشخیص سیستمین در پزشکی اشاره کرد [۱۴]. پایه و اساس این روش مطالعه اثر انتقال انرژی به نمونه توسط لیزر القاگر، با به کارگیری منبع نور ثانویه‌ای است که به آن لیزر کاوشگر گفته می‌شود. با انتقال انرژی به نمونه، گرادیان شعاعی دما ایجاد شده در نمونه باعث تغییر دمای نمونه و تغییر متغیرهای ترمودینامیکی وابسته به دما نظیر ضریب شکست می‌شود. این امر باعث ایجاد گرادیان شعاعی در ضریب شکست شده و در نتیجه نمونه به‌مثابه یک عدسی در مقابل پرتو نور لیزر کاوشگر عمل کرده و باعث تغییر در جهت موج آن می‌شود. با مطالعه تغییرات ایجاد شده در جهت موج لیزر القاگر، ضریب پخش گرمایی نمونه مورد مطالعه مشخص می‌شود [۸]. جهت محاسبه ضریب پخش گرمایی در روش بیناب‌نمایی عدسی گرمایی از مدل شن کمک گرفته می‌شود. این مدل نظری توسط شن و همکاران در سال ۱۹۹۲ میلادی ارائه شد. در این روش برای استخراج معادله نظری فرض‌ها و تقریب‌های ساده‌سازی در نظر گرفته می‌شود که اصولاً مدل را برای نمونه‌هایی با جذب کم قابل کاربرد می‌سازد [۱۵]. لایه‌های فوق نازک فلزی به دلیل خواص فیزیکی و نوری منحصر بفرد مرتبط با ابعادشان مورد توجه ویژه بوده‌اند. با این وجود در رابطه با اندازه‌گیری ضریب پخش گرمایی لایه‌های فوق نازک فلزی متأسفانه گزارشی در دسترس نیست.

یکی از چالش‌های محدودکننده در مطالعه این دسته از مواد، روش‌های بهینه تولید و به ویژه کیفیت و یکنواختی آنها است. لایه‌های فوق نازک فلزی را به روش‌های فیزیکی و شیمیایی مانند تبخیر حرارتی، رسوب بخار شیمیایی و کندوپاش مغناطیسی می‌توان تولید کرد. لیکن کندوپاش مغناطیسی به‌علت

Megatek (DET210 Thorlabs) و یک پردازشگر سیگنال (DSO5200) به کار گرفته شد.

۲.۲. چیدمان بیناب‌نمایی عدسی گرمایی

به منظور محاسبه ضریب پخش گرمایی، در ثبت سیگنال تجربی، ابتدا چیدمان بیناب‌نمایی عدسی گرمایی برای نمونه استاندارد اتانول خالص مورد آزمایش قرار گرفت. به این منظور چیدمان استاندارد بیناب‌نمایی عدسی گرمایی، با دو لیزر در آرایش عدم تطابق حالت، مورد استفاده قرار گرفت. در این چیدمان لیزر سبز با طول موج 532 nm به عنوان لیزر القاگر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در تمام مراحل این مطالعه از لیزر هلیوم-نئون لیلد^۱ کم‌توان با خروجی 632.8 nm به عنوان لیزر کاوشگر استفاده شد [۱۸]. نتایج ضریب پخش گرمایی اتانول خالص با برآزش معادله نظری شن بر سیگنال تجربی، محاسبه و با داده‌های موجود مقایسه شد.

با توجه به تفاوت ویژگی‌های نوری نانو لایه‌های نقره با اتانول و نیز ضرورت به کارگیری لیزر با توان بیشتر جهت تشکیل عدسی گرمایی در لایه‌های فلزی، اعمال تغییراتی در چیدمان اولیه ضروری بود. به این منظور با توجه به جذب مناسب لایه‌های نقره در محدوده 405 nm [۱۹]، لیزر دیودی با توان 500 mW و طول موج خروجی 405 nm به عنوان لیزر القاگر جایگزین لیزر سبز در چیدمان قبلی شد. از طرف دیگر با توجه به نقش جداکننده پرتو در کاهش توان لیزر، جداکننده پرتو از چیدمان حذف شد. با حذف جداکننده پرتو به منظور فراهم کردن شرایط مشابه، لیزرها با کمترین زاویه ممکن از یکدیگر (حالت تقریباً پادموازی) تنظیم شدند. پرتوهای لیزر القاگر به کمک یک عدسی در نمونه متمرکز و پرتوهای لیزر کاوشگر به کمک دو عدسی موازی سازی و از نمونه عبور داده شدند. طحاره‌ای از چیدمان مورد استفاده برای مشخصه‌یابی لایه‌های فوق نازک نقره در شکل ۱ نمایش داده شده است.

مزایایی نظیر چسبندگی بالای نمونه بر زیرلایه، نرخ لایه‌نشانی بالا، یکنواختی لایه، خلوص بالا، تکرارپذیری بالا، امکان لایه‌نشانی بر زیرلایه‌های حساس و نیز کنترل‌پذیری بالا [۱۶] و [۱۷] مورد توجه ویژه قرار گرفته است.

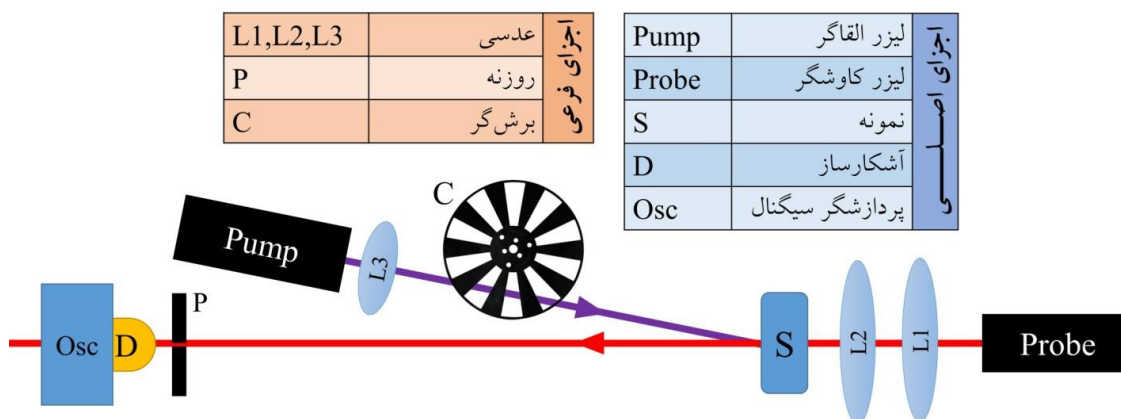
در پژوهش حاضر با به کارگیری روش کندوپاش مغناطیسی، نمونه‌های فوق نازک فلز نقره در محدوده ضخامتی کمتر از 15 nm نانومتر با کیفیت مطلوب تولید شده و با توجه به شفافیت بالا و جذب کم ضریب پخش گرمایی آنها به کمک بیناب‌نمایی عدسی گرمایی مورد مطالعه و کنکاش قرار می‌گیرد.

۲. چیدمان و آماده‌سازی نمونه‌ها

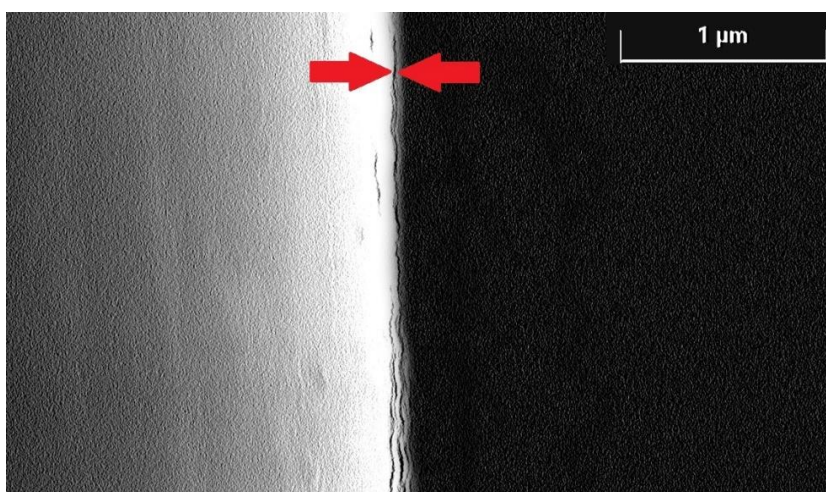
۲.۱. تهیه نمونه‌ها

به منظور تهیه نمونه‌ها، از یک تفنگ کندوپاش مغناطیسی مجهز شده با هدفی به قطر دو اینچ از نقره خالص استفاده شد. زیرلایه‌ها در فاصله ۶ سانتی‌متری از سطح هدف قرار داده شدند. به‌منظور شفاف بودن نمونه‌ها جهت بررسی توسط بیناب‌نمایی عدسی گرمایی از زیرلایه شیشه استفاده شد. جهت ایجاد تخلیه الکتریکی از یک منبع تغذیه جریان مستقیم با توان خروجی ثابت 50 W استفاده شد. پمپ خلأ توربو مولکولی با پشتیبانی پمپ چرخشی جهت تولید خلأ مورد استفاده قرار گرفتند.

نمونه‌ها در شرایط مشابه با زمان‌های لایه‌نشانی متفاوت تهیه شدند. در آماده‌سازی نمونه‌ها فشار اولیه محفظه خلأ قبل از تزریق گاز برابر با $4 \times 10^{-3} \text{ torr}$ تنظیم شد. گاز آرگون به عنوان گاز کاری و با آهنگ 58 sccm به درون محفظه تزریق شد به طوری که فشار محفظه در فرایند لایه‌نشانی مقدار ثابت $7/65 \times 10^{-2} \text{ torr}$ بود. از میکروسکوپ الکترونی رویشی گسیل میدانی (FESEM) به منظور برآورد ضخامت لایه‌ها و با تصویربرداری مقطعی از نمونه مرجع (تهیه شده بر زیرلایه اکسید سیلیکون) کمک گرفته شد. به منظور دریافت سیگنال و مطالعه تغییرات جبهه موج لیزر کاوشگر نیز یک آشکارساز نوری



شکل ۱. طرحواره چیدمان بیناب‌نمایی عدسی گرمایی دو لیزر در عدم تطابق حالت، مورد استفاده جهت مشخصه‌یابی لایه‌های بسیار نازک.



شکل ۲. تصویر FESEM (نمای کناری) نمونه لایه‌نشانی شده با ضخامت ۱۰ nm.

$$t_c(z) = \omega(z)^2 / 4D \quad (3)$$

در معادلات فوق، v عامل هندسی عدسی گرمایی، m درجه عدم تطابق مد دو لیزر، φ دامنه عدسی گرمایی القایی، l طول نمونه مورد مطالعه، κ ضریب رسانندگی گرمایی نمونه مورد مطالعه، t_c مشخصه زمانی عدسی گرمایی، P_p توان لیزر الفلایگر، D ضریب پخش گرمایی، ω اندازه کمر پرتو لیزر الفلایگر در مکان نمونه، λ_p طول موج لیزر کاوشگر و α و dn/dT به ترتیب ضریب جذب و نسبت تغییرات ضریب شکست به تغییرات دما در نمونه هستند [۱۰ و ۱۵]. تمامی متغیرهای رابطه فوق به جز D و φ به سادگی برای چیدمان قابل محاسبه هستند. D و φ نیز به کمک مقایسه و برازش معادله نظری بر سیگنال تجربی به دست می‌آیند. برای محاسبه متغیرها و همچنین مقایسه و برازش معادله نظری بر سیگنال تجربی از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار ممتیکا کمک گرفته شد.

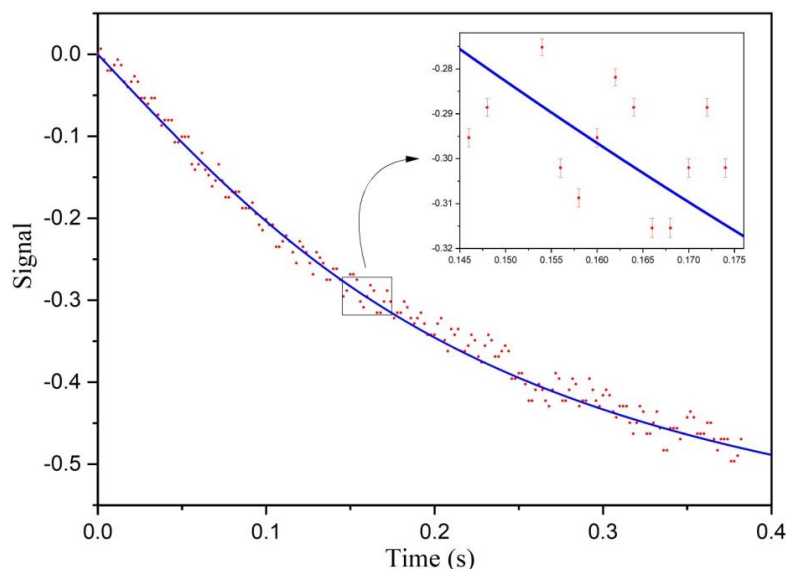
۲.۳. مدل شن

جهت محاسبه ضریب پخش گرمایی به روش شن، ابتدا شدت نور لیزر کاوشگر در محل آشکارساز به عنوان سیگنال نور گرمایی توسط آشکارساز و پردازشگر سیگنال دریافت و سپس نرمال می‌شود. در گام بعدی نمودار نظری شن بر سیگنال تجربی نرمال شده برازش داده می‌شود. برای این منظور از معادله نظری مکان-زمان شن به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$S(z, t) = \varphi \arctan(4m(z)v(z)t / t_c(z)) / [1 + 2m(z) + v(z)]^{1/2} / (t_c(z) + [1 + 2m(z)]^2 + v(z)^2), \quad (1)$$

که در آن

$$\varphi = P_p l \alpha \left(\frac{dn}{dT} \right) / \kappa \lambda_p, \quad (2)$$



شکل ۳. سیگنال‌های تجربی نرمال شده عدسی گرمایی نمونه با ضخامت ۵ nm (نقاط قرمز) و نمودار معادله‌شن برازش شده بر آنها (خط آبی).

فوق نازک نقره با ضخامت ۵ nm در شکل ۳ نمایش داده شده است. همچنین خلاصه محاسبات انجام شده شامل ضریب پخش گرمایی و متغیرهای موثر در مدل شن برای نمونه‌های مختلف لایه‌های فوق نازک نقره در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند.

نمودار تغییر ضریب پخش گرمایی نمونه‌های تهیه شده بر حسب ضخامت در شکل ۴ نمایش داده شده است. ضریب پخش گرمایی با افزایش ضخامت به طور غیرخطی افزایش می‌یابد. با مقایسه نتایج حاصله با نتایج گزارش‌های پیشین [۹]، که برای لایه‌های ضخیم‌تر صورت گرفته، مشاهده می‌شود که آهنگ کاهش ضریب پخش گرمایی با ضخامت در لایه‌های فوق نازک (ضخامت کمتر از ۱۵ nm) نسبت به لایه‌های نازک (ضخامت بیش از ۲۰ nm) متفاوت است. به طوری که در لایه‌های فوق نازک، شیب تغییرات ضریب پخش گرمایی با افزایش ضخامت لایه رشد فزاینده‌ای را نشان می‌دهد. همچنین با بررسی نمودار تغییر ضریب پخش گرمایی با ضخامت (شکل ۴) مشاهده می‌شود در ضخامت‌های کمتر از ۱۰ nm تغییرات ضخامت لایه‌ها اثر چندانی بر ضریب پخش گرمایی ندارد که این موضوع را می‌توان به تغییر ویژگی‌های پخش گرما در لایه‌های فوق نازک نقره، که عمدتاً رفتار دو بعدی دارند، نسبت داد درحالی‌که لایه‌های نازک هر سه بعدشان در پخش گرما تأثیرگذار است.

۳. نتایج و بحث

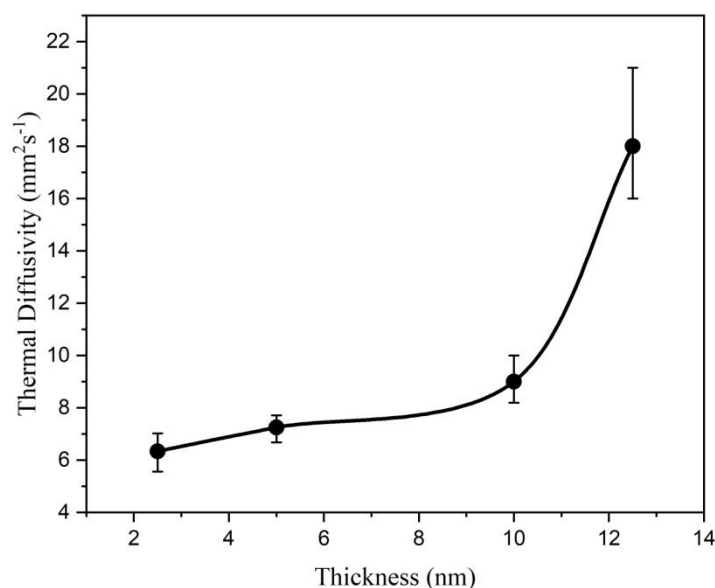
همان‌گونه که در بخش قبل نیز اشاره شد، جهت بررسی درجه اطمینان نتایج، ابتدا از نمونه اتانول به عنوان نمونه مرجع و در چیدمان عدم تطابق حالت استفاده شد. پس از انجام محاسبات و برازش رابطه‌شن بر نتایج تجربی، ضریب پخش گرمایی اتانول (به عنوان نمونه استاندارد مرجع) $95 \times 10^{-3} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد که با گزارش‌های پیشین همخوانی بسیار خوبی نشان می‌دهد [۲۰ و ۲۱].

در گام بعدی نمونه فلزی مرجع به روش کندوپاش مغناطیسی تولید و به کمک تصویربرداری مقطعی FESEM ضخامت‌سنجی شد. تصویر FESEM این نمونه (با ضخامت حدود ۱۰ nm) در شکل ۲ نمایش داده شده است.

پس از این مرحله، نمونه‌های فلزی با ضخامت‌های مختلف در شرایط مشابه و با کنترل زمان لایه‌نشانی بر روی زیرلایه شیشه-ای تولید و جهت بیناب‌نمایی عدسی گرمایی به چیدمان آزمایشی منتقل شد. با توجه به لزوم تغییر چیدمان برای لایه‌های نازک نقره، تمامی متغیرهای لازم با توجه به چیدمان مورد استفاده محاسبه شدند. سپس برای هر نمونه به کمک برازش نمودار نظری شن بر سیگنال تجربی، ضریب پخش گرمایی استخراج شد. نمونه‌ای از برازش انجام شده برای لایه

جدول ۱. متغیرهای معادله نظری شن محاسبه شده برای لایه‌های فوق نازک نقره.

شماره نمونه	ضخامت (nm)	عامل هندسی v	درجه عدم تطابق مد m	دامنه عدسی گرمایی ϕ_0	ضریب پخش گرمایی (mm^2s^{-1})
۱	۲٫۵	۶۲۴۹۸۸	۴۰۰	-۰/۴۱۶	۶٫۳۴
۲	۵	۶۲۴۹۸۸	۴۰۰	-۰/۴۲	۷٫۲۵
۳	۱۰	۶۲۴۹۸۸	۴۰۰	-۰/۴۵۶	۹
۴	۱۲٫۵	۶۲۴۹۸۸	۴۰۰	-۰/۱۹۲	۱۸



شکل ۴. تغییر ضریب پخش گرمایی بر حسب ضخامت لایه‌های فوق نازک نقره.

تجربی انجام این مطالعه بود. بی‌توجهی به این مهم باعث عدم دریافت و یا پهن‌شدگی سیگنال تجربی توسط اسیلوسکوپ می‌شود. لذا بخش مهمی از تلاش‌های تجربی متمرکز بر تنظیم دقیق پرتو لیزر بر نمونه و بهینه‌سازی سیگنال تجربی دریافتی با حداقل پهن‌شدگی در نهایت مقدار باقی‌مانده این خطا در خط خطای شکل ۴ در نظر گرفته شد. مضاف بر این خطایی ناشی از دقت اندازه‌گیری‌های اسیلوسکوپ در نتایج قابل بررسی است که البته بسیار پایین بوده و تأثیر معناداری در نتایج ایجاد نمی‌کند. با این وجود اثر این خطا برای چندین سیگنال دریافتی از نمونه منتخب، محاسبه و در قسمت بزرگ‌نمایی شده شکل ۳ نمایش داده شده است.

در مطالعه حاضر از اثر ضریب پخش گرمایی زیرلایه (شیشه) صرف‌نظر کردیم؛ چراکه ضریب رسانندگی گرمایی توده نقره در

بررسی‌های انجام شده نمایانگر برآورده شدن تمام فرض‌های مدل شن برای نمونه‌های فوق نازک نقره است. با این حال یک مقایسه کمی با نمونه استاندارد نیز صورت گرفت و نسبت تغییرات سیگنال در حالت ایجاد و عدم ایجاد عدسی گرمایی لایه‌های نازک نقره محاسبه و با نسبت مربوط به نمونه اتانول (به عنوان نمونه استاندارد) مقایسه شد. این نسبت‌ها برای اتانول و نمونه نازک نقره با ضخامت ۱۲/۵ nm به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۷۷ به دست آمدند که همخوانی قابل قبولی را نشان می‌دهند و این امر نشان دهنده قابلیت به کارگیری روش شن برای تحلیل سیگنال حاصل از لایه‌های فوق نازک نقره با جذب در محدوده ضخامتی مورد بررسی است.

با توجه به ضخامت بسیار پایین نمونه‌ها، تنظیم درست چیدمان و به ویژه تمرکز دقیق لیزر بر نمونه یکی از پرچالش‌ترین مراحل

نظری شن بر سیگنال عدسی گرمایی به دست آمده از چیدمان برآزش و ضریب پخش گرمایی هر نمونه محاسبه شد. نتایج نشان دادند که در لایه‌های فوق نازک نقره با کاهش ضخامت، ضریب پخش گرمایی با شیب کاهش یافته، کاهش می‌یابد. مضاف بر آن در لایه‌های با ضخامت کمتر از ۱۰ nm، با کاهش ضخامت لایه‌ها تغییر چندانی در ضریب پخش گرمایی ملاحظه نشد. این موضوع می‌تواند حاصل از کاهش اثر ضخامت بر پخش گرما به دلیل رفتار دو بعدی لایه‌ها در این محدوده ضخامت باشد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل حمایت مالی از این تحقیق در قالب پژوهانه شماره SCU.SP1401.750 تقدیر و تشکر می‌شود.

دمای اتاق حدود ۴۲۷ W/mK است که در میان فلزها بیشترین مقدار بوده و نسبت به ضریب رسانندگی گرمایی شیشه که در دمای اتاق حدود ۱ W/mK می‌باشد، بسیار بزرگ‌تر است [۲۲-۲۵]. در نتیجه اثر شیشه بر گرمای جذب شده توسط لایه نقره بسیار پایین است. جهت اطمینان، نمونه شیشه توسط چیدمان برپا شده آزمایش شد که به علت جذب بسیار پایین شیشه در محدوده طول موج لیزر القاگر، سیگنال عدسی گرمایی در آن مشاهده نشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق ضریب پخش گرمایی لایه‌های فوق نازک نقره، به روش غیرتخریبی بیناب‌نمایی عدسی گرمایی مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور نمونه‌ها به روش کندوپاش مغناطیسی تهیه و به چیدمان برپا شده در وضعیت عدم تطابق حالت منتقل شدند. مطالعه ما نشان داد که فرض‌های مدل شن توسط نمونه‌های فوق نازک نقره تهیه شده برآورده می‌شود. بنابراین نمودار

مراجع

1. G Golan and A Axelevitch, *Microelectron. Eng.* **31** (2000) 469.
2. M Khan and A Reza, *Appl. Phys.* **54** (1992) 204.
3. J H Shin, J Y Song, and H M. Park, *Mater. Lett.* **63** (2009) 145.
4. M Watanabe and K Kajikawa, *Sens. Actuators B Chem.* **89** (2003) 126.
5. A Axelevitch, B Gorenstein, and G Golan, *Phys. Procedia* **32** (2012) 1.
6. J Domaradzki, *et al.*, *Mater. Sci. -Pol.* **34** (2016) 747.
7. W P Leung and A C Tam, *Opt. Lett.* **9** (1984) 93.
8. S E Bialkowski, "*Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis*", John Wiley & Sons (1996).
9. T Yamane, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **82** (1997) 1153.
10. H Cabrera, *et al.*, *J. Phys. D* **48** (2015) 465501.
11. F Matroodi, H Cabrera, and D Korte, *J. Res. Many. Sys.* **9** (2020) 69.
12. H Cabrera, *et al.*, *Int. J. Heat Mass Transf.* **158** (2020) 120036.
13. T Higashi, T Imasaka, and N Ishibashi, *Anal. Chem.* **56** (1084) 2010.
14. J Yoosefian and N Alizadeh, *Anal. Chem.* **90** (2018) 8227.
15. J Shen, R D Lowe, and R D Snook, *Chem. Phys.* **165** (1992) 385.
16. G. Bräuer, *et al.*, *Vacuum* **84** (2010) 1354.
17. I V Tudose, *et al.*, "*Chemical and physical methods for multifunctional nanostructured interface fabrication*", Elsevier (2019).
18. I Bidarvand, F Matroodi, and A M Ahadi, *The 28th Optics and Photonics Conference of Iran and the 14th Photonics Engineering and Technology Conference of Iran* (2000) (Persian).
19. J Gong, *et al.*, *Sci. Rep.* **5** (2015) 1.
20. H Cabrera, A Marcano, and Y Castellanos, *Condens. Matter Phys.* **9** (2006) 385.
21. M Benitez, A Marcano, and N Melikechi, *Opt. Eng.* **48** (2009) 043604.
22. Z Sun, *et al.*, *J. Chem. Eng.*, **137319** (2022).
23. A Riahi, N Ben-Cheikh, and A Campo, *Int. J. Energy Environ. Eng.* **16** (2018) 1.
24. O Elenitoba-Johnson, *et al.*, *Biotechniques* **44** (2008) 487
25. L Su, *et al.*, *Front. Mater. Sci.* **6** (2019) 102.