



بررسی اثر زمان نوردهی در نگارش لیزری و حذف آن بر لایه فوتوکرومیک نقره-کلرید نقره

راضیه طالبی

دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: r.talebi@sci.ui.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۷/۲۲)

چکیده

در این پژوهش، اثر زمان نوردهی بر پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی در لایه نازک نقره-کلرید نقره بررسی شده است. اثر فوتوکرومیسم چندرنگی در لایه نقره-کلرید نقره با تابش پرتو لیزر پیوسته-موج در مدت زمان کوتاه، ایجاد می‌شود. تابش پرتو تکفام و قطبیده خطی لیزر در ناحیه مرئی به لایه زیرطول موجی نقره-کلرید نقره، پدیده‌های فوتوکرومیسم چندرنگی و القاء ناهمسانگردی را به طور همزمان ایجاد می‌کند. ناهمسانگردی در این لایه‌ها ناشی از به خط شدن نانوذرات نقره در امتداد قطبش نور است؛ در حالی که فوتوکرومیسم چندرنگی ناشی از تغییر اندازه نانوذرات نقره، متناسب با طول موج نور فرودی است. پدیده جالب توجه در لایه‌های نازک نقره-کلرید نقره امکان حذف هر دو اثر ایجاد شده، با تابش پرتو فرابنفش است. همچنین، در این پژوهش نشان داده‌ایم، اگر چه پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی با نگارش لیزری در مدت زمان کوتاه ایجاد می‌شود، حذف کامل این اثر با تابش پرتو لامپ فرابنفش، آنی نیست و به مرور زمان انجام می‌شود. بنابراین، استفاده از لایه‌های نازک نقره-کلرید نقره نه تنها برای چاپ رنگی چندباره کاربرد دارد، بلکه پتانسیل به کارگیری به منظور دزیمتری پرتو فرابنفش نیز دارد.

واژه‌های کلیدی: نقره-کلرید نقره، پرتو فرابنفش، تشدید پلاسمون سطحی، فوتوکرومیسم، بیناب جذب

۱. مقدمه

شیشه‌های عینک حساس به نور خورشید نیز کاربرد دارد. شیشه‌های فوتوکرومیک حاوی هالیدهای نقره، تحت تابش نور تیره می‌شوند؛ اما چند رنگ نیستند [۱ و ۲].

در سال ۲۰۰۳ میلادی، پدیده دیگری به نام فوتوکرومیسم چندرنگی در لایه نقره-دی‌اکسید تیتانیوم (Ag-TiO_2) گزارش شد [۳]. در این پدیده، لایه نقره-دی‌اکسید تیتانیوم تحت تابش

پدیده فوتوکرومیسم یا شیدرنگی، رنگ‌پذیری مواد با تابش نور و از دست دادن رنگ به طور بازگشت‌پذیر است. موادی که ویژگی فوتوکرومیسم دارند، به مواد فوتوکرومیک موسوم هستند. استفاده از هالیدهای نقره در شیشه‌های سیلیکات منجر به ساخت مواد فوتوکرومیک شده است که در ساخت

نور مرئی تکفام، به رنگ مشابه با نور فرودی تغییر می‌یابد. تغییر رنگ ایجاد شده با تابش پرتو فرابنفش از بین می‌رود [۴] و [۵]. مواد فوتوکرومیک چندرنگی به عنوان کاغذهای کپی رنگی یا کاغذهای قابل بازنویسی و حافظه‌های اپتیکی چند طول موجی با ظرفیت بالا کاربرد دارند [۳].

اخیراً، پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی در لایه نازک کلرید نقره بارگذاری شده با نانوذرات نقره (Ag-AgCl) نیز مشاهده و گزارش شد [۶]. اساس پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی در مواد فوتوکرومیک که حاوی نانوذرات نقره هستند، تنوع در شکل و اندازه نانوذرات است. نانوذرات فلزی به سبب نوسان‌های جمعی الکترون‌های سطحی که به پلاسمون‌های سطحی موسوم است، در طول موج‌های ویژه‌ای جذب دارند که منجر به رنگی دیده شدن آنها می‌شود [۳ و ۶]. به عنوان مثال، قله جذب نانوذرات نقره که اندازه آنها بین دو تا ۷۰ نانومتر است، به طور تقریبی بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر است [۷]. افزایش ضریب شکست بستره، سبب جابه‌جایی قله جذب به سمت قرمز بیناب جذب می‌شود. به عنوان مثال، هنگامی که نانوذرات نقره بر بستره کلرید نقره با ضریب شکست بین ۲/۰ تا ۲/۱ بارگذاری می‌شوند، جابه‌جایی به سمت طول‌موج بلندتر (جابه‌جایی - قرمز) قله جذب نسبت به حالتی که نانوذرات در هوا هستند، تقریباً ۱۷۰ نانومتر است [۸].

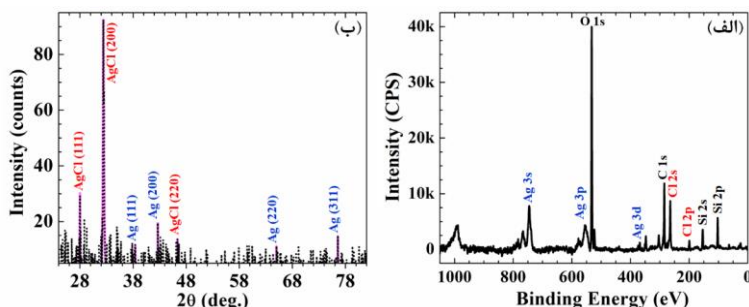
هنگامی که فلزات نجیب در مجاورت یک ماده نیم‌رسانا قرار می‌گیرند، یک ناحیه بار فضایی در مرز فلز-نیم‌رسانا ایجاد می‌شود که اصطلاحاً به پیوندگاه شاتکی موسوم است [۹]. ایجاد این پیوندگاه در لایه نقره-کلرید نقره که تحت تابش نور است، سبب انتقال الکترون‌ها از نانوذرات نقره برانگیخته به کلرید نقره می‌شود. این انتقال بار در تغییر اندازه نانوذرات نقره و پدیدار شدن اثر فوتوکرومیسم چندرنگی در لایه نقره-کلرید نقره مؤثر است [۶].

هنگامی که لایه‌های نازک نقره-کلرید نقره تحت تابش پرتو قطبیده خطی و تکفام لیزر قرار می‌گیرد، همزمان با پدیدار شدن اثر فوتوکرومیسم چندرنگی، نانوذرات نقره در امتداد قطبش نور به خط می‌شوند و یک ساختار ناهمسانگرد

ایجاد می‌شود. این پدیده ناشی از تداخل پرتو هم‌دوس فرودی با پرتو منتشر شده در لایه نازک کلرید نقره است که منجر به تشکیل فریزهای روشن و تاریک در لایه کلرید نقره می‌شود. در مکان فریزهای روشن نانوذرات برانگیخته شده نقره تحت فرایند انتقال بار، در مکان فریزهای روشن محو می‌شوند و نهایتاً در مکان فریزهای تاریک با شکل و اندازه جدید پدیدار می‌شوند. بنابراین، نانوذرات نقره در مکان فریزهای تاریک به خط می‌شوند و ساختار توری مانند ایجاد می‌کنند [۱۰].

اثر فوتوکرومیسم چندرنگی در لایه نازک نقره-کلرید نقره ناشی از تغییر اندازه نانوذرات نقره است و به طول‌موج پرتو فرودی وابسته است [۳ و ۶]. در حالی که القاء ناهمسانگردی که تنها با تابش پرتوهای هم‌دوس لیزر پدیدار می‌شود، وابسته به قطبش پرتو فرودی است [۱۱ و ۱۲]. به دلیل منشأ متفاوت این دو پدیده، تا به حال بروز همزمان اثر فوتوکرومیسم چندرنگی و القاء ناهمسانگردی در لایه‌های نازک نقره-کلرید نقره بررسی نشده است. در این پژوهش، ضمن بررسی همزمان اثر فوتوکرومیسم چندرنگی و القاء ناهمسانگردی، اثر زمان نوردهی متوالی بر این پدیده‌ها بررسی می‌شود. همچنین، نشان می‌دهیم که حذف همزمان هر دو اثر با تابش پرتو فرابنفش امکان پذیر است. این موضوع از این جهت اهمیت دارد که می‌تواند به عنوان یک ابزار بسیار دقیق برای دزیمتری پرتو فرابنفش مورد استفاده قرار گیرد.

در این پژوهش، ابتدا نحوه آماده‌سازی و مشخصه‌یابی لایه نقره-کلرید نقره بیان می‌شود. نمونه آماده شده تحت تابش پرتوهای لیزر با طول‌موج‌های مختلف، در بازه‌های زمانی متوالی مختلف، قرار می‌گیرد. با اندازه‌گیری بیناب جذب نمونه در هر مرحله نوردهی با لیزر، اثر زمان نوردهی بر پدیده‌های فوتوکرومیسم چندرنگی و همچنین القاء ناهمسانگردی بررسی می‌شود. در ادامه، نمونه‌های نوردهی شده با لیزر، تحت تابش پرتو لامپ فرابنفش در بازه‌های زمانی مختلف قرار می‌گیرد و مجدداً بیناب جذب در هر مرحله اندازه‌گیری می‌شود تا حذف تدریجی اثرات ایجاد شده بررسی شود.



شکل ۱. الف) بیناب فوتوالکترون پرتو ایکس و ب) پراش پرتو ایکس، مربوط به لایه نازک نقره-کلرید نقره بر زیرلایه شیشه‌ای.

آلودگی‌های هیدروکربنی دستگاه است.

روش دیگر برای تشخیص ترکیب شیمیایی لایه انباشته شده بر سطح شیشه، استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD) است. در این روش، علاوه بر تشخیص ترکیبات شیمیایی، ساختار بلوری ترکیب را نیز می‌توان تشخیص داد. برای اندازه‌گیری پراش پرتو ایکس لایه نازک نقره-کلرید نقره، از دستگاه پراش پرتو ایکس ریگاکو اولتیمای iv^۱ در بازه تغییرات زاویه‌ای ۱۰ تا ۹۰ درجه برای لایه نازک نقره-کلرید نقره بر زیرلایه شیشه‌ای استفاده شده است. با وجود ضخامت کم لایه کلرید نقره، در شکل ۱. ب قله مشخصه بلور مکعبی کلرید نقره در ۲۸/۰ درجه، ۳۲/۴ درجه و ۴۶/۳ درجه، به ترتیب، مربوط به صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) در نمودار پراش پرتو ایکس قابل تشخیص است. اما قله‌های مربوط به بلور نقره به خوبی دیده نمی‌شود که دلیل آن اندازه و تراکم اندک نقره در سطح نمونه است.

۲.۲. نوردی نمونه

به منظور نوردی لایه نازک نقره-کلرید نقره و بررسی پدیده‌های فوتوکرومیسم چندرنگی و القاء ناهمسانگردی از لیزرهای پیوسته-موج (cw) که پرتو آن با کمک قطبشگر گلان-تیلور (Thorlabs: GT10-A) به طور خطی قطبیده شده است، استفاده می‌شود. لیزرهای مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از لیزر هلیم-نئون با توان ۳۰ میلی‌وات و طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر، لیزر دیودی قرمز با توان ۴/۵ میلی‌وات و طول موج ۶۳۵ نانومتر (Thorlabs: CPS635) و لیزر دیودی سبز با توان ۴/۵ میلی‌وات

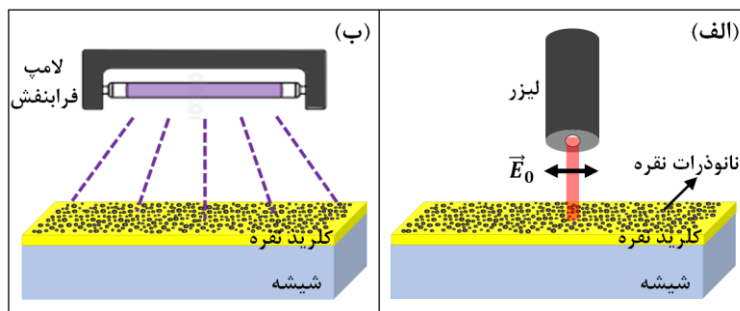
۲. جزئیات تجربی

۲.۱. آماده‌سازی نمونه اولیه

لایه نازک نقره-کلرید در دو مرحله لایه‌نشانی متوالی بر لام شیشه‌ای تمیز به روش تبخیر حرارتی در خلأ با فشار 5×10^{-5} میلی‌بار انجام می‌شود. در مرحله اول، پودر سفید رنگ کلرید نقره در بوتله مولیدن تبخیر می‌شود و با آهنگ تقریبی سه آنگستریم بر ثانیه روی شیشه با ضخامت ۵۰ نانومتر انباشته می‌شود. متعاقباً، بدون شکست خلأ، لایه ۱۰ نانومتری نقره بر لایه کلرید نقره با آهنگ نیم آنگستریم بر ثانیه انباشته می‌شود. لایه ۱۰ نانومتری نقره در دمای اتاق به آهستگی پیوستگی خود را از دست می‌دهد و به نانوذرات نقره با اندازه بین ۴۰ تا ۶۰ نانومتر تبدیل می‌شود.

برای بررسی و تحلیل ترکیب شیمیایی لایه انباشته شده بر سطح شیشه از بیناب‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS) استفاده می‌شود. برای این منظور از دستگاه XPS/UVS-SPECS که مجهز به تحلیلگر PHOIBOS 150 با وضوح تشخیص زیر یک الکترون ولت است، استفاده شده است. در شکل ۱. الف بیناب فوتوالکترون پرتو ایکس لایه نازک نقره-کلرید نقره بر زیرلایه شیشه‌ای در بازه انرژی پیوند از صفر تا ۱۰۰۰ الکترون ولت نشان داده شده است. عناصر اصلی لایه نازک نقره-کلرید نقره که عبارتند از نقره (Ag) و کلر (Cl) به خوبی قابل تشخیص هستند. عناصر تشکیل دهنده زیرلایه شیشه‌ای، سیلیسیم (Si) و اکسیژن (O) نیز در بیناب فوتوالکترون پرتو ایکس مشاهده می‌شوند. وجود عنصر کربن (C) و مقداری از عنصر اکسیژن (O) در بیناب فوتوالکترون پرتو ایکس ناشی از

۱. Rigaku ultima iv



شکل ۲. لایه نقره-کلرید نقره بر زیرلایه شیشه‌ای تحت تابش (الف) پرتو لیزر و (ب) پرتوهای لامپ فرابنفش.

لایه کلرید نقره که بسیار کوچک‌تر از طول همدوسی پرتو لیزر است، پرتو منتشر شده در این لایه نیز همچنان همدوس است. پرتو منتشر شده در لایه مجبوری کلرید نقره و پرتو نور فرودی لیزر، که هر دو همدوس هستند و راستای قطبش یکسانی دارند، تداخل می‌کنند و فریزهای تاریک و روشن در راستای قطبش در لایه کلرید نقره ایجاد می‌کنند [۱۴]. اگر از چشمه‌های ناهمدوس برای نوردهی لایه نازک نقره-کلرید نقره استفاده شود، به دلیل طول همدوسی بسیار کوچک این چشمه‌ها، نقش تداخل با نمایی بسیار کمی تشکیل می‌شود [۱۱].

نانوذرات نقره برانگیخته شده در فریزهای روشن نقش تداخل با بلورهای کلرید نقره تبادل یون نقره و الکترون انجام می‌دهند. بنابراین، نانوذرات نقره که در قسمت روشن نقش تداخل قرار دارند، به مرور از بین می‌روند و نانوذرات دیگری با اندازه و شکل جدید در قسمت تاریک نقش تداخل به وجود می‌آیند. گویا نانوذرات نقره در فریزهای روشن نقش تداخل حل می‌شوند و فریزهای تاریک نقش تداخل رشد می‌کنند [۱۵] و [۱۶]. در بخش بعد نشان داده می‌شود که اندازه، شکل و فاصله بین-ذره‌ای نانوذرات پدیدار شده در فریزهای تاریک نقش تداخل به گونه‌ای است که طول‌موج تشدید پلاسمون سطحی آنها با طول‌موج نور فرودی متفاوت است [۶].

۳. نتایج و بحث

۳.۱. اثر مدت زمان نوردهی بر پدیده فوتوکرومیسم

چندرنگی

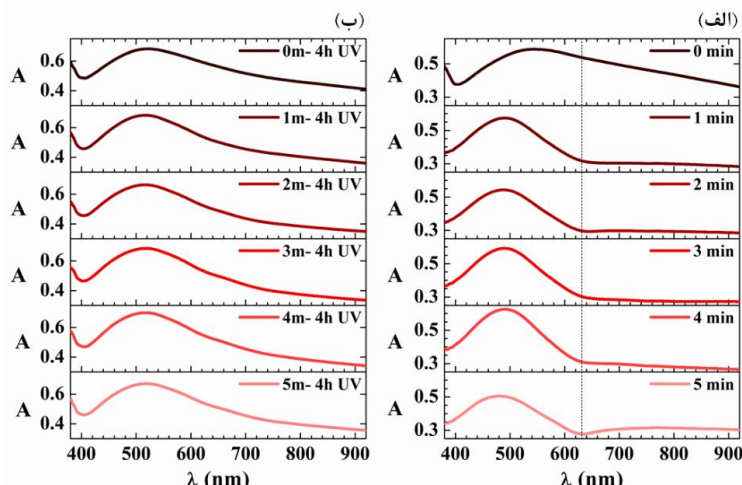
برای بررسی پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی در لایه نیمه‌شفاف

و طول‌موج ۵۳۲ نانومتر (Thorlabs: CPS532). پرتو لیزر به طور عمودی بر سطح نمونه تابیده می‌شود. قطر پرتو لیزر حدود دو میلی‌متر است. در شکل ۲. الف طرحواره لایه نقره-کلرید نقره بر زیرلایه شیشه‌ای که تحت تابش عمودی پرتو لیزر است، نشان داده شده است. ناحیه نوردهی شده، رنگی مشابه رنگ پرتو لیزر به خود می‌گیرد.

پس از نوردهی نمونه با طول‌موج‌های مختلف لیزری در مدت زمان‌های متوالی مختلف، به منظور حذف اثر نوردهی از لامپ فرابنفش با مدل B-100AP با توان ۱۰۰ وات و طول‌موج ۳۶۵ نانومتر استفاده می‌شود که به طرحواره آن در شکل ۲. ب نشان داده شده است. پرتوهای لامپ فرابنفش با چشم قابل مشاهده نیست.

هنگامی که لایه نازک نقره-کلرید نقره تحت تابش پرتو قطبیده خطی لیزر قرار می‌گیرد، بخشی از پرتو نور فرودی که به طور عمود بر سطح تابیده شده است، توسط نانوذرات نقره پراکنده می‌شود. با توجه به این که ابعاد نانوذرات از طول‌موج نور فرودی بسیار کوچک‌تر است، پراکنندگی از نوع ریلی است و قطبش پرتو پراکنده شده در راستای قطبش پرتو فرودی باقی می‌ماند. پرتوهای پراکنده شده که شرط بازتاب کلی در سطح مرزی کلرید نقره-هوا را برآورده می‌کنند، در لایه کلرید نقره منتشر می‌شوند. راستای انتشار پرتو نور در لایه کلرید نقره عمود بر راستای قطبش و راستای انتشار پرتو لیزر فرودی است [۱۳].

لایه کلرید نقره با ضخامت ۵۰ نانومتر یک موجبر نامتقارن است که تنها مد الکتریکی عرضی مرتبه صفرم (TE_0) از پرتوهای مرئی می‌تواند در آن منتشر شود. به دلیل ضخامت کم



شکل ۳. مقایسه بیناب جذب نمونه نقره-کلرید نقره (الف) قبل و بعد از نوردهی توسط لیزر در مدت زمان ۱-۵ دقیقه، سپس (ب) تمام نمونه‌های قسمت (الف) چهار ساعت تحت تابش لامپ فرابنفش قرار گرفته‌اند.

نمونه جذب کمتری دارد؛ به همین دلیل نمونه به رنگ قرمز دیده می‌شود. با افزایش زمان نوردهی، قله جذب در طول موج ۵۰۰ نانومتر بلندتر می‌شود و نمونه قرمزتر به نظر می‌رسد. بعد از پنج دقیقه نوردهی، فرورفتگی بیناب جذب در طول موج پرتو لیزر (۶۳۲/۸ نانومتر) متمرکزتر و رنگ نمونه به رنگ پرتو لیزر نزدیک‌تر می‌شود.

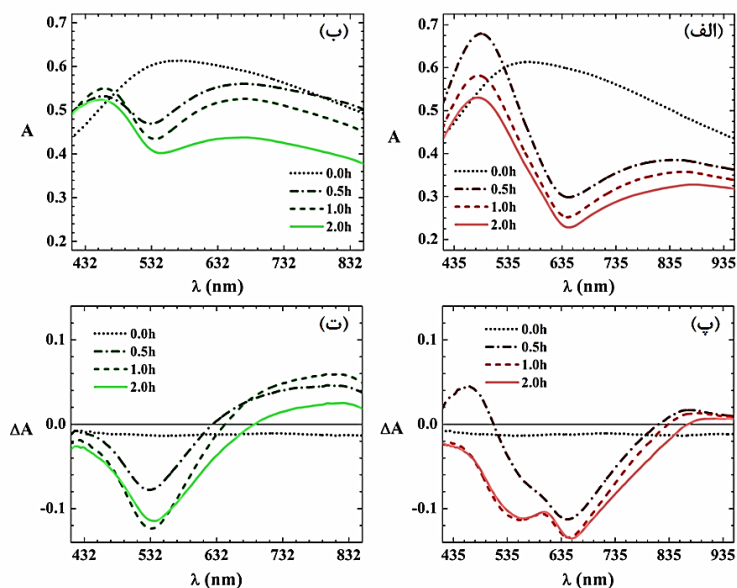
پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی، تنها رنگ‌پذیری مواد فوتوکرومیک نیست، بلکه باید ویژگی بازگشت‌پذیری رنگ نیز در نمونه وجود داشته باشد. به همین منظور، نمونه‌های نوردهی شده با لیزر هلیوم-نئون، به مدت چهار ساعت تحت تابش پرتو فرابنفش قرار گرفتند و نتایج آن در شکل ۳. ب نشان داده شده است. تمام نمونه‌ها بعد از نوردهی با پرتو فرابنفش، بیناب جذب یکسانی دارند و فرورفتگی در طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر کاملاً از بین رفته است. پس از تابش پرتو فرابنفش، بیناب جذب نمونه‌ها تقریباً مشابه نمونه اولیه قبل از هر گونه نوردهی است، با این تفاوت که قله جذب آن اندکی جابه‌جا شده و تقریباً در ۵۲۰ نانومتر قرار گرفته است. پهنای بیناب جذب نمونه‌ها بعد از تابش پرتو فرابنفش نسبت به حالت نورنخورده اندکی کاهش یافته است. همچنین، ارتفاع قله جذب نمونه‌های نوردهی شده با پرتو فرابنفش در شکل ۳. ب نسبت به نمونه‌های شکل ۳. الف افزایش یافته است.

نقره-کلرید نقره، بیناب جذب نمونه قبل و بعد از تابش لیزر اندازه‌گیری و مقایسه می‌شود. بیناب جذب نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفوتومتر مدل زیس ۱ MMS1 مجهز به لامپ هالوژن با تفکیک طیفی سه نانومتر اندازه‌گیری شده است. شدت نور جذب شده یا اصطلاحاً چگالی اپتیکی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$A = -\ln(T/T_0), \quad (1)$$

که T شدت نور عبوری از نمونه مورد بررسی و T_0 شدت نور عبوری از نمونه مرجع است که در این پژوهش شیشه لام تمیز در نظر گرفته شده است.

نمونه در مدت زمان‌های یک تا پنج دقیقه با فاصله زمانی یک دقیقه تحت تابش لیزر هلیوم-نئون قرار می‌گیرد. طبق شکل ۳. الف، نمونه قبل از نوردهی بیناب جذب پهنی در ناحیه مرئی دارد و قله آن در نزدیکی ۵۴۰ نانومتر است. در دقیقه اول تابش لیزر، قله جذب جابه‌جایی به سمت طول‌موج کمتر (جابه‌جایی-آبی) دارد و در نزدیکی ۵۰۰ نانومتر قرار می‌گیرد. همچنین، در طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر که با خط‌چین مشخص شده است و طول‌موج‌های بالاتر از آن، با تابش نور لیزر هلیوم-نئون فرورفتگی در بیناب جذب ایجاد شده است. در محل فرورفتگی که ناحیه قرمز بیناب نور مرئی است،



شکل ۴. منحنی‌های جذب لایه نقره-کلرید نقره پیش و پس از نوردهی در بازه‌های زمانی نیم ساعت، یک ساعت و دو ساعت توسط (الف) لیزر دیودی قرمز با طول موج ۶۳۵ نانومتر و (ب) لیزر دیودی سبز با طول موج ۵۳۲ نانومتر. بیناب دوفامی خطی نمونه‌های نوردهی شده در بازه‌های زمانی مختلف توسط (پ) لیزر دیودی قرمز و (ت) لیزر دیودی سبز.

فرورفتگی در طول موج مشخصه پرتو لیزر در بیناب جذب سبب شفاف شدن نمونه در آن ناحیه بینابی و در نتیجه تغییر رنگ نمونه به رنگی مشابه پرتو لیزر می‌شود. چنین رفتاری در نمونه، پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی است. با افزایش زمان نوردهی، فرورفتگی منحنی جذب عمیق‌تر می‌شود. ارتفاع منحنی جذب نمونه‌هایی که به مدت دو ساعت نوردهی شده‌اند، در کل بیناب جذب کاهش یافته است که سبب گرایش رنگ نمونه به سفیدی می‌شود.

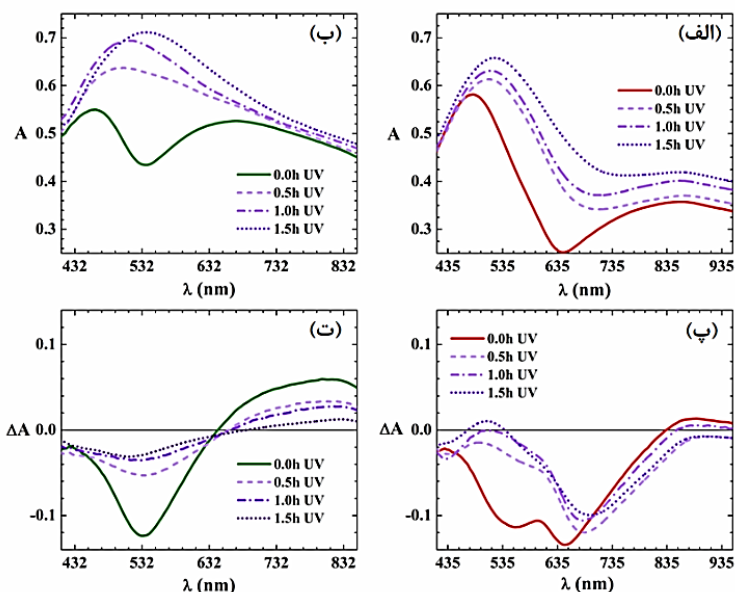
در شکل‌های ۴. پ و ۴. ت، به ترتیب، بیناب دوفامی خطی برای نمونه‌های تحت تابش لیزرهای قرمز و سبز در بازه‌های زمانی مختلف نشان داده شده‌اند. منحنی دوفامی خطی نمونه نور نخورده که با نقطه‌چین مشکی نشان داده شده است، یک خط ثابت با مقدار ناچیز ۰/۰۱٪ و از مرتبه خطای اندازه‌گیری است. در نمونه‌های تحت تابش پرتو قطبیده لیزر، منحنی دوفامی خطی در نزدیکی طول موج لیزر غیر صفر است که نشان دهنده القاء ناهمسانگردی در نمونه است. با افزایش زمان نوردهی از نیم ساعت به یک ساعت، اندازه دوفامی خطی به ویژه در طول موج مشخصه لیزر افزایش می‌یابد. اما، با

۳.۲. اثر مدت زمان نوردهی بر پدیده القاء ناهمسانگردی

به منظور ایجاد ناهمسانگردی در لایه نازک نقره-کلرید نقره، نمونه تحت تابش پرتو قطبیده خطی لیزرهای دیودی قرمز و سبز، به طور جداگانه، قرار داده می‌شود. پس از نوردهی نمونه در مدت زمان‌های نیم ساعت، یک ساعت و دو ساعت، بیناب جذب با کمک نور قطبیده خطی در دو راستا، موازی با قطبش نور فرودی (A_{\parallel}) و عمود بر راستای قطبش نور فرودی (A_{\perp})، اندازه‌گیری می‌شود. در محیط‌های ناهمسانگرد، بیناب‌های جذب در دو راستای مختلف، متفاوت هستند. اختلاف بیناب جذب در دو راستای متعامداً به دوفامی خطی موسوم است و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]:

$$\Delta A = A_{\parallel} - A_{\perp} \quad (2)$$

بیناب جذب نمونه‌های تحت تابش لیزرهای دیودی قرمز با طول موج ۶۳۵ و لیزر دیودی سبز با طول موج ۵۳۲ نانومتر، به ترتیب، در شکل‌های ۴. الف و ۴. ب نشان داده شده‌اند. منحنی جذب نمونه نور نخورده با نقطه‌چین مشکی نیز رسم شده است که با نمودارهای جذب نمونه‌های تحت تابش لیزر مقایسه شود.



شکل ۵. منحنی‌های جذب و دوفامی خطی نمونه نقره-کلرید نقره که یک ساعت با لیزر نوردهی شده است و سپس با پرتو فرابنفش در بازه‌های زمانی نیم ساعت، یک ساعت و یک و نیم ساعت. (الف) منحنی‌های جذب نمونه تحت تابش لیزر دیودی قرمز، (ب) منحنی‌های جذب نمونه تحت تابش لیزر دیودی سبز، (پ) منحنی‌های دوفامی خطی نمونه تحت تابش لیزر دیودی قرمز و (ت) منحنی‌های دوفامی خطی نمونه تحت تابش لیزر دیودی سبز.

تحت تابش پرتو فرابنفش قرار گرفته است، فرورفتگی در طول-موج ۵۳۲ نانومتر کاملاً از بین رفته است؛ در حالی که در شکل ۵. الف نمونه نوردهی شده با لیزر قرمز، پس از تابش پرتو فرابنفش، فرورفتگی در طول موج ۶۳۵ نانومتر به سمت طول-موج‌های بلندتر جابه‌جا شده است و با افزایش زمان نوردهی فرورفتگی به آهستگی از بین می‌رود. برای حذف کامل فرورفتگی باید نوردهی به مدت طولانی‌تری ادامه داشته باشد. برای این مورد، نوردهی را چهار ساعت ادامه داده‌ایم.

برای برآورد کردن میزان بازگشت‌پذیری اثر فوتوکرومیسم چند رنگی در لایه نقره-کلرید نقره، نمودارهای جذب نمونه-های تحت تابش لیزرهای دیودی قرمز و سبز که در بازه‌های زمانی مختلف تحت تابش پرتو فرابنفش قرار گرفته‌اند، تحلیل شده‌اند و نتایج آن در جدول ۱ با نمونه نوردهی نشده با لیزر (نمونه خام) مقایسه شده است.

در جدول ۱ نشان داده شده است که نمونه نوردهی شده با لیزر دیودی قرمز، پس از این که تحت تابش پرتو فرابنفش قرار گرفت، ارتفاع فرورفتگی ایجاد شده با تابش لیزر افزایش

افزایش زمان نوردهی به دو ساعت، دوفامی خطی و ناهمسانگردی ساختار بهبود پیدا نمی‌کند.

نمودارهای شکل ۴ نشان می‌دهند، پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی و القاء ناهمسانگردی به طور همزمان در لایه‌های نازک نقره-کلرید نقره رخ می‌دهند. نوردهی طولانی‌تر نمونه با لیزر، این پدیده‌ها را بهبود نمی‌بخشد. مدت زمان بهینه نوردهی نمونه با لیزرهای دیودی کم-توان (۴/۵ میلی‌وات) تقریباً یک ساعت است. برای حذف هر دو اثر ایجاد شده در نمونه‌ها، آنها را تحت تابش پرتو لامپ فرابنفش در بازه‌های زمانی مختلف قرار می‌دهیم.

در شکل ۵. الف و ۵. ب، به ترتیب، بیناب جذب نمونه-هایی که یک ساعت با لیزر دیودی قرمز و لیزر دیودی سبز نوردهی شده بودند نشان داده شده است. سپس، این نمونه‌ها با پرتو فرابنفش در بازه‌های زمانی نیم ساعت، یک ساعت و یک و نیم ساعت نوردهی شده‌اند. تابش پرتو فرابنفش سبب پر شدن فرورفتگی در بیناب جذب نمونه‌ها شده است. طبق شکل ۵. ب نمونه نوردهی شده با لیزر دیودی سبز، پس از این که

جدول ۱. تحلیل نمودار جذب نمونه‌های نقره-کلرید نقره که یک ساعت با لیزر نوردهی شده‌اند، سپس تحت تابش پرتو فرابنفش در بازه‌های زمانی مختلف قرار گرفته‌اند. جهت مقایسه، منحنی جذب نمونه خام نقره-کلرید نقره، قبل از نوردهی با پرتو لیزر نیز تحلیل شده است.

نمونه تحت تابش لیزر دیودی سبز			نمونه تحت تابش لیزر دیودی قرمز			
ارتفاع قله	طول موج قله (نانومتر)	ارتفاع فرورفتگی	طول موج فرورفتگی (نانومتر)	ارتفاع قله	طول موج قله (نانومتر)	مدت نوردهی با پرتو فرابنفش (ساعت)
۰/۵۵	۴۶۴	۰/۲۵	۶۴۵	۰/۵۸	۴۷۵	۰/۰
۰/۶۴	۵۰۲	۰/۳۴	۷۱۱	۰/۶۱	۵۱۰	۰/۵
۰/۶۹	۵۰۹	۰/۳۷	۷۱۳	۰/۶۳	۵۱۲	۱/۰
۰/۷۱	۵۳۸	۰/۴۱	۷۶۳	۰/۶۶	۵۱۹	۱/۵
-	-	۰/۴۲	۹۴۴	۰/۶۵	۵۴۹	۴/۰
۰/۶۷	۵۷۵	-	-	۰/۶۷	۵۷۵	نمونه خام

شده با لیزر سبز با طول موج ۵۳۲ نانومتر نشان داده شده است. این نمونه نیز در بازه‌های زمانی نیم ساعت، یک ساعت و یک و نیم ساعت تحت تابش پرتو فرابنفش قرار گرفته است. در این نمونه، بعد از نوردهی با پرتو فرابنفش، دوفامی خطی به شدت کاهش می‌یابد. با افزایش زمان نوردهی، مقدار دوفامی خطی در طول موج مشخصه لیزر کاهش می‌یابد.

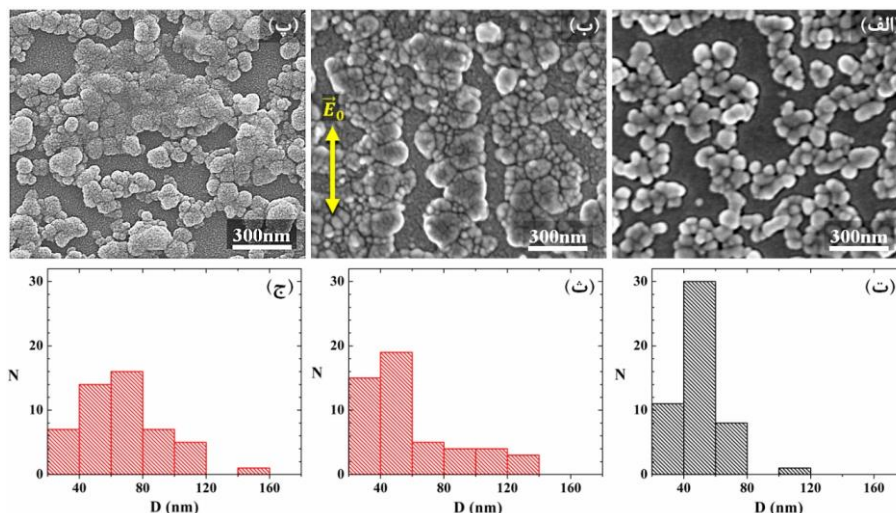
رفتار فوتوکرومیسم چندرنگی و ناهمسانگردی در لایه‌های نازک نقره-کلرید نقره تحت تابش لیزر را با بررسی بیناب جذب آنها تفسیر کردیم. تغییرات بیناب جذب پس از نوردهی نمونه‌ها ناشی از تغییرات اندازه، شکل و فاصله بین-ذره‌ای نانوذرات نقره است که منجر به تغییر در تشدید پلاسمون سطحی نانوذرات نقره و بیناب جذب آنها می‌شود [۱۸ و ۱۹].

در شکل‌های ۶. الف، ۶. ب و ۶. پ تصاویر سطح نمونه نوردهی نشده، نمونه نوردهی شده با لیزر دیودی قرمز و نمونه نوردهی شده با لیزر دیودی قرمز و سپس لامپ فرابنفش، به ترتیب، نشان داده شده‌اند. این تصاویر با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرفته شده و ذرات نشان داده شده، نانوذرات نقره در سطح نمونه هستند. نمودارهای توزیع اندازه نانوذرات نقره با اندازه‌گیری قطر (D)

می‌یابد و به سمت طول‌موج‌های بلند در ناحیه فرورسرخ جابه‌جا می‌شود تا به آهستگی از بین برود. مکان قله جذب این نمونه‌ها و ارتفاع آنها نیز با افزایش زمان نوردهی با پرتو فرابنفش به نمونه خام نزدیک‌تر می‌شود که گواه بر بازگشت‌پذیری آن است. برای نمونه تحت تابش لیزر دیودی سبز در نیم ساعت ابتدایی تابش پرتو فرابنفش، فرورفتگی ناشی از تابش لیزر از بین می‌رود. با ادامه نوردهی با پرتو فرابنفش، قله جذب این نمونه به سمت طول‌موج‌های بلند جابه‌جا می‌شود و به قله جذب نمونه خام در ۵۷۵ نانومتر نزدیک می‌شود.

منحنی‌های دوفامی خطی نمونه نوردهی شده با لیزر قرمز با طول موج ۶۳۵ نانومتر در شکل ۵. پ نشان داده شده است. این نمونه در بازه‌های زمانی نیم ساعت، یک ساعت و یک و نیم ساعت تحت تابش پرتو فرابنفش قرار گرفته است. میزان دوفامی خطی در این نمونه، با افزایش زمان نوردهی با پرتو فرابنفش، کاهش می‌یابد؛ اما کاملاً از بین نمی‌رود. بنابراین، ناهمسانگردی همچنان در نمونه وجود دارد و با افزایش زمان نوردهی با پرتو فرابنفش، مقدار بیشینه دوفامی خطی به سمت طول‌موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شود.

در شکل ۵. ت منحنی‌های دوفامی خطی نمونه نوردهی



شکل ۶. تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح (الف) نمونه نوردهی نشده، (ب) نمونه نوردهی شده با لیزر دیودی قرمز و (پ) نمونه نوردهی شده با لامپ فرابنفش. نمودار توزیع اندازه نانوذرات نقره (ت) مربوط به تصویر (الف)، (ث) مربوط به تصویر (ب) و (ج) مربوط به تصویر (پ).

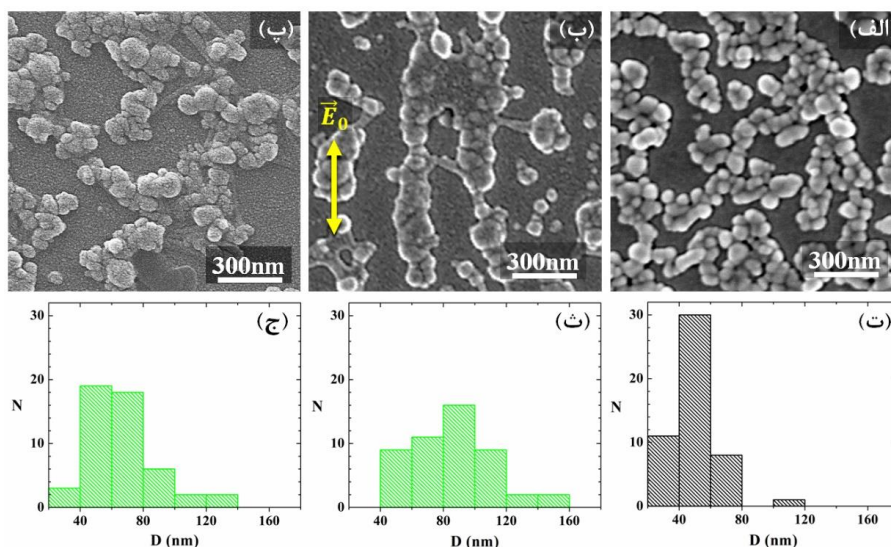
که ابتدا با لیزر دیودی قرمز به مدت یک ساعت نوردهی شده است، سپس یک و نیم ساعت تحت تابش پرتو فرابنفش قرار گرفته است. در این شکل نانوذرات نقره به خط نیستند. همچنین، نمودار توزیع اندازه نانوذرات نقره شکل ۶. پ در شکل ۶. ج نشان داده شده است. پس از تابش پرتو فرابنفش، اندازه نانوذرات نقره تغییر کرده است. با تابش پرتو فرابنفش، اندازه متوسط نانوذرات تقریباً ۶۶ نانومتر است. افزایش اندازه متوسط نانوذرات نقره پس از تابش پرتو فرابنفش، همان طور که در شکل ۵. الف نشان داده شده است، سبب جابه‌جایی قله جذب به سمت طول‌موج بلندتر، یعنی از ۴۸۵ نانومتر به ۵۳۰ نانومتر، می‌شود.

در شکل ۷. الف تصویر سطح نمونه نوردهی نشده مجدداً نشان داده شده است. تصویر سطح نمونه تحت تابش لیزر دیودی سبز با پرتو قطبیده خطی به مدت یک ساعت، در شکل ۷. ب نشان داده شده است. به خط شدن نانوذرات در راستای قطبش پرتو لیزر سبب القای ناهمسانگردی در نمونه می‌شود که در شکل ۷. ب به طور واضح نشان داده شده است. هنگامی که این نمونه به مدت یک و نیم ساعت تحت تابش پرتو فرابنفش قرار می‌گیرد، ناهمسانگردی القاء شده در

پنجانه نانوذره ($N=50$) از تصاویر شکل ۶. الف، ۶. ب و ۶. پ به ترتیب در شکل ۶. ت، شکل ۶. ث و ۶. ج نشان داده شده‌اند.

در نمونه نوردهی نشده در شکل ۶. الف، تابع توزیع اندازه نانوذرات نقره در شکل ۶. ت نشان می‌دهد که متوسط اندازه نانوذرات ۵۳ نانومتر است و توزیع نسبتاً تیزی دارد. نانوذرات نقره در نمونه نوردهی شده با لیزر دیودی قرمز با پرتو قطبیده خطی به مدت یک ساعت، در امتداد قطبش پرتو فرودی (\vec{E}_0) به خط شده‌اند که در شکل ۶. ب به وضوح نشان داده شده است. اندازه متوسط نانوذرات نقره در این تصویر تقریباً ۵۸ نانومتر است. نمودار جذب این نمونه در شکل ۴. الف نشان داده شده است. در نمودار جذب این نمونه، دو قله جذب وجود دارد؛ قله جذب در طول‌موج کوتاه‌تر، حدود ۴۸۵ نانومتر، مربوط به نانوذرات کوچک‌تر است و ارتفاع بیشتری نسبت به قله جذب در طول‌موج بلندتر، ۸۶۰ نانومتر، که مربوط به نانوذرات درشت‌تر است، دارد. بنابراین، نمودار توزیع اندازه شکل ۶. ث رفتار اپتیکی نمونه در شکل ۴. الف را به خوبی تفسیر می‌کند.

شکل ۶. پ تصویر نانوذرات نقره نمونه‌ای را نشان می‌دهد



شکل ۷. تصویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح (الف) نمونه نوردی نشده، (ب) نمونه نوردی شده با لیزر دیودی سبز و (پ) نمونه نوردی شده با لیزر با لامپ فرابنفش. نمودار توزیع اندازه نانوذرات نقره (ت) مربوط به تصویر (الف)، (ث) مربوط به تصویر (ب) و (ج) مربوط به تصویر (پ).

۳.۳. ساز و کار تغییر اندازه نانوذرات نقره تحت تابش

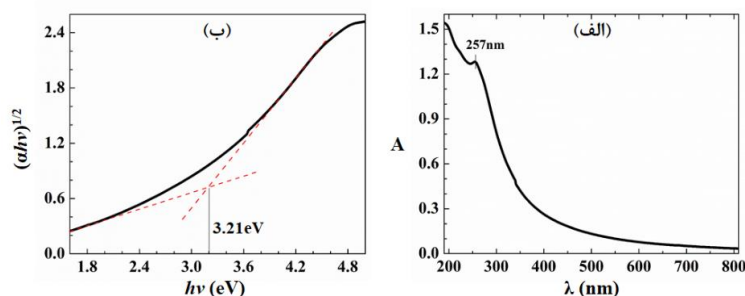
نور مرئی و فرابنفش

با تابش پرتو لیزر به سطح لایه نازک نقره-کلرید نقره، نانوذرات نقره‌ای که طول موج تشدید پلاسمون سطحی آنها با طول موج - پرتو لیزر فرودی یکسان است، برانگیخته می‌شوند. نانوذرات نقره برانگیخته که در تماس مستقیم با کلرید نقره هستند، تحت تابش نور مرئی لیزر الکترون خود را از دست می‌دهند؛ زیرا حضور کلرید نقره در مجاورت نانوذرات نقره سبب اصلاح تراز فرمی نقره و ایجاد سد شاتکی می‌شود [۲۰]. پلاسمون‌های برانگیخته شده توسط نور مرئی در نانوذرات نقره، الکترون‌های پر انرژی که به الکترون‌های داغ موسوم است، ایجاد می‌کنند [۹]. الکترون‌های داغ می‌توانند از سد شاتکی عبور کنند. تعدادی از این الکترون‌ها از سطح مشترک نقره با کلرید نقره به داخل بلور کلرید نقره تزریق می‌شوند [۴ و ۶]. یون‌های نقره نیز از سطح نانوذرات نقره آزاد می‌شوند و به لایه کلرید نقره نفوذ می‌کنند. بنابراین، اندازه نانوذرات نقره برانگیخته شده توسط لیزر کاهش می‌یابد [۲۱ و ۲۲]. موج پرتو نور فرودی در برانگیختگی پلاسمون‌های سطحی و تغییر اندازه نانوذرات نقره، مؤثر است؛ در حالی که هم‌دوسی پرتو نور فرودی در این زمینه

نمونه مطابق آنچه در شکل ۷. پ نشان داده شده است، از بین می‌رود.

نمودارهای توزیع اندازه مربوط به شکل ۷. الف، ب و شکل ۷. پ به ترتیب در شکل ۷. ت، ۷. ث و شکل ۷. ج نشان داده شده‌اند. اندازه متوسط نانوذرات نقره بعد از تابش لیزر سبز، ۸۷ نانومتر است و قله جذب مربوط به آن چنانچه در شکل ۴. ب نشان داده شده است تقریباً در ۶۷۰ نانومتر است. با تابش پرتو فرابنفش این نمونه، اندازه متوسط نانوذرات نقره به ۶۵ نانومتر کاهش پیدا می‌کند و قله جذب آن، مطابق شکل ۵. ب، به سمت طول‌موج‌های کوتاه‌تر، به طول‌موج ۵۳۰ نانومتر، جابه‌جا می‌شود.

نتیجه جالب توجه این است که مستقل از این که نمونه نقره-کلرید نقره با چه لیزری نوردی شده باشد و اندازه متوسط نانوذرات نقره چقدر باشد، پس از تابش پرتو فرابنفش به لایه نازک نقره-کلرید نقره، اندازه متوسط نانوذرات تقریباً ۶۵ نانومتر است و قله جذب مشخصه آن تقریباً در ۵۳۰ نانومتر است. در شکل ۳. ب نیز که مربوط به نمونه نقره-کلرید نقره تحت تابش پرتو فرابنفش، پیش و پس از تابش لیزر هلیوم-نئون است، قله جذب در ۵۳۰ نانومتر است.

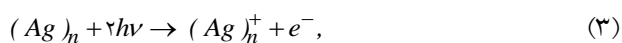


شکل ۸. (الف) بیناب جذب لایه نازک کلرید نقره (ب) نمودار تاک لایه نازک کلرید نقره برای تعیین گاف انرژی غیرمستقیم.

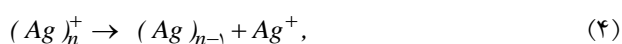
بی تأثیر است [۱۱].

ناحیه مرئی تقریباً شفاف است، در ناحیه فرابنفش جذب شدیدی دارد. با استفاده از بیناب جذب لایه نازک کلرید نقره، می توان گاف انرژی آن را به دست آورد. برای تعیین گاف انرژی غیرمستقیم لایه نازک کلرید نقره از نمودار تاک در شکل ۸ ب استفاده شده است که α ضریب جذب نمونه و $h\nu$ انرژی فوتونها است [۲۶]. بر اساس نمودار شکل ۸ ب انرژی گاف غیرمستقیم لایه نازک کلرید نقره، حدود $3/21$ الکترون ولت (≈ 386 نانومتر) است. بنابراین با تابش پرتو فرابنفش به کلرید نقره، الکترون ها از تراز ظرفیت کلرید نقره به تراز رسانش گذار می کنند. از آنجایی تراز فرمی نانوذرات نقره پایین تر از تراز رسانش کلرید نقره است، الکترون های برانگیخته از تراز رسانش کلرید نقره به نانوذرات نقره منتقل می شوند [۲۷].

نانوذرات نقره که از n اتم تشکیل شده اند، در یک فرایند دو فوتونی که در رابطه زیر نشان داده شده است، الکترون خود را از دست داده اند [۲۴]



یون های نقره باقی مانده، تحت فرایند زیر به نانوذرات کوچک تری تبدیل می شوند [۲۴]



یون نقره ایجاد شده (Ag^+) با جذب الکترون از لایه کلرید نقره به رادیکال های نقره (Ag^0) تبدیل می شوند. فرایندهای بیان شده در روابط (۳) و (۴) به طور زنجیروار ادامه پیدا می کند تا تکه تکه شدن نوری در خوشه های نقره رخ دهد [۲۴].

با تابش پرتو فرابنفش، مولکول های کلرید نقره تجربه

با افزایش زمان نوردهی با لیزر، تعدادی بیشتری از یون های نقره از نانوذرات برانگیخته جدا می شوند و جایگزین یون های نقره در بلور کلرید نقره می شوند [۶]. این فرایند تا زمانی ادامه می یابد که اختلاف طول موج تشدید پلاسمون سطحی نانوذرات نقره با طول موج پرتو لیزر فرودی، زیاد شود. از طرف دیگر، الکترون های منتقل شده به داخل لایه کلرید نقره، با یون های نقره آزاد شده از بلور کلرید نقره برانگیخته ترکیب می شوند و رادیکال های نقره (Ag^\cdot) ایجاد می کنند. رادیکال های نقره به نانوذرات برانگیخته نشده نقره می چسبند و نانوذرات نقره بزرگ تری ایجاد می کنند. همچنین، این امکان وجود دارد که رادیکال های نقره با هم ترکیب شوند و نانوذرات کوچکی ایجاد کنند [۲۳]. با افزایش بیشتر زمان نوردهی، نانوذرات نقره متراکم می شوند و خوشه های نقره با ابعاد بیش از 100 نانومتر ایجاد می کنند. در خوشه های بزرگ نقره تشدید پلاسمون سطحی و جذب در ناحیه مرئی رخ نمی دهد. به همین دلیل در نمودارهای شکل ۴ الف و شکل ۴ ب برای نمونه هایی که به مدت دو ساعت توسط لیزر نوردهی شده بودند، ارتفاع بیناب جذب کاهش می یابد.

هنگامی که نانوذرات نقره تحت تابش پرتو فرابنفش قرار می گیرند، دو فرایند مختلف در لایه نقره-کلرید نقره رخ می دهد که عبارتند از تکه تکه شدن نوری نانوذرات درشت نقره [۲۴] و دیگری رشد نانوذرات نقره کوچک در لایه نیم رسانا [۲۵] که در ادامه توضیح می دهیم.

با توجه به شکل ۸ الف، لایه نازک کلرید نقره که در

می‌شوند. یون‌های نقره در بلور کلرید نقره الکترون تولید شده در رابطه (۳) را جذب می‌کنند و به رادیکال‌های نقره تبدیل می‌شوند. بنابراین با تابش پرتو فرابنفش، نانوذرات نقره جدیدی در کلرید نقره تشکیل می‌شوند و رشد می‌کنند [۲۵]. افزایش ارتفاع قله جذب نمونه‌های نورددهی شده با پرتو فرابنفش در شکل ۵ الف و شکل ۵ ب به سبب افزایش تعداد نانوذرات نقره است.

۴. نتیجه‌گیری

لایه نازک نقره-کلرید نقره از جمله مواد فوتوکرومیک است که می‌تواند به طور هم‌زمان طول‌موج و قطبش پرتو لیزر فرودی را ذخیره کند. پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی که شفاف شدن نمونه در طول‌موج مشخصه لیزر فرودی است، با افزایش زمان نورددهی تا مدت زمان ویژه‌ای بهبود می‌یابد. این زمان ویژه به توان لیزر بستگی دارد. با طولانی‌تر شدن زمان نورددهی، نمونه در یک بازه بینایی پهنی شفاف می‌شود. قطبش خطی پرتو لیزر سبب القاء دوفامی خطی در لایه نازک نقره-کلرید نقره می‌شود که از ویژگی‌های مهم ساختارهای ناهمسانگرد است. هر دو پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی و القاء دوفامی خطی هم‌زمان رخ می‌دهند. مقدار بیشینه دوفامی خطی در نزدیکی طول‌موج مشخصه لیزر نیز تا زمان ویژه‌ای بهبود می‌یابد و با افزایش

بیشتر زمان نورددهی این مقدار کاهش می‌یابد.

برای حذف پدیده رنگ‌پذیری لایه نازک نقره-کلرید نقره، از تابش پرتو فرابنفش استفاده می‌شود. با افزایش زمان نورددهی با پرتو فرابنفش شفافیت‌های ایجاد شده در طول‌موج مشخصه لیزر، از بین می‌رود و ارتفاع بیناب جذب در ناحیه مرئی افزایش می‌یابد. دوفامی خطی ایجاد شده با تابش پرتو فرابنفش به آهستگی از بین می‌رود که این اثر امکان استفاده از این ساختارها برای دزیمتری پرتو فرابنفش را فراهم می‌کند.

لایه نازک نقره-کلرید نقره یک ساختار فلز-نیم‌رسانا است که تبادل الکترون و یون نقره بین فلز و نیم‌رسانا تحت تابش نور مرئی و فرابنفش، سبب بروز پدیده فوتوکرومیسم چندرنگی و القاء ناهمسانگردی در این لایه می‌شود. ساز و کار تبادل بار بین نقره و کلرید نقره به طول‌موج نور فرودی بستگی دارد. با تابش پرتو مرئی، الکترون‌های داغ تمایل دارند که از نانوذرات نقره به کلرید نقره منتقل شوند؛ در حالی که با تابش پرتو فرابنفش، الکترون‌ها از کلرید نقره به نانوذرات نقره منتقل می‌شود.

۵. سپاس‌گزاری

نویسنده مقاله از جناب آقای دکتر داریوش وشائی، برای بیناب‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس بسیار سپاس‌گزار است.

مراجع

1. H Bouaslaurent and H Durr, *Pure Appl. Chem.* **73** (2001) 639.
2. W H Armistead and S D Stookey, *Science* **144** (1964) 150.
3. Y Ohko, T Tatsuma, T Fujii, K Naoi, C Niwa, Y Kubota, and A Fujishima, *Nat. Mater.* **2** (2002) 29.
4. N Couzon, M Maillard, L Bois, F Chassagneux, and A Brioude, *J. Phys. Chem. C* **121** (2017) 22147.
5. D K Diop, L Simonot, J Martizengaria, M Herbert, Y Lefkir, G Abadias, P Guerin, D Babonneau, and N Destouches, *Appl. Spectrosc.* **71** (2016) 6.
6. R Talebi, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20** (2018) 5734.
7. W Kleemann, *Z. Phys.* **215** (1968) 113.
8. R H Doremus, *J. Chem. Phys.* **116** (2002) 6755.
9. C Clavero, *Nat. Photonics* **8** (2014) 95.
10. R Talebi and S Izadi, *Appl. Opt.* **57** (2018) 36.
11. R Talebi, A Nahal, M Y Bashouti, and S H Christiansen, *Opt. Express* **22** (2014) 30669.
12. R Talebi, and A Nahal, *J. Nanopart. Res.* **16** (2014) 2442.
13. C Bohren and D Huffman, "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", Wiley (1983).
14. R Talebi, F Taherighahfarokhi, and D Vashaei, *J. Opt. Soc. Am. B* **37** (2020) 10.
15. L A Ageev and V K. Miloslavsky, *Opt. Eng.* **34** (1995) 960.
16. L A Ageev, et al., *Opt. Spectrosc.* **115** (2013) 843.

17. R D Guenther, "Modern optics" John Wiley & Sons, Inc., New York (1990).
18. U Kriebig and M Vollmer, "Optical Properties of Metal Clusters", Springer-Verlag (1995).
19. P N Prasad, "Nanophotonics", Wiley-Interscience (2004).
20. M Bashouti, et al., *Sci. Rep.* **6** (2016) 21439.
21. C Dahmen, et al., *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 011923.
22. D Babonneau, et al., *Nano Futures* **2** (2018) 015002.
23. K Matsubara and T Tatsuma, *Adv. Mater.* **19** (2007) 2802.
24. P V Kamat, M Flumiani, and G V Hartland, *J. Phys. Chem. B* **102** (1998) 3123.
25. Y Battie, et al., *J. Phys. Chem. C* **114** (2010) 8679.
26. N Ghobadi, *Int. Nano Lett.* **3** (2013) 2.
27. G Calzaferri, et al., *J. Imaging Sci. Technol.* **45** (2001) 4.