

Photo-induced optical rotation by excitation of higher modes in AgCl-Ag nano-layers under elliptically polarized light irradiation

Bentolhoda Assakereh*, Arashmid Nahal

Atomic and Molecular physics group, Department of Physics, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 29.09.2020 Final revised: 05.08.2021 Accepted: 17.10.2021

 [10.22055/JRMBS.2021.17270](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.17270)

Abstract

In the present work, formation of self-organized periodic nanostructures (SPN) in photosensitive thick ($h \sim 280$ nm) slab waveguide AgCl films doped by silver nanoparticles is studied. The SPN is formed as a result of interaction of a elliptically polarized light, incident light, with the AgCl-Ag layer. Formation of such nanostructure induces in the film an optical activity, which is due to the induced anisotropy and the chirality of the formed structure. The greater thickness of the layer results in excitation of higher mode TE_1 of the slab waveguide which leads to simultaneous formation of two SPN associated with TE_0 and TE_1 modes, accordingly. It is shown that, irradiation by elliptically polarized light results in more complicated SPN with enhanced chirality, which creates stronger induced optical activity of the samples.

Keywords: Photosensitive nano-layers, Ag nanoparticles, Self-organized periodic nanostructures, Chirality, Optical activity



بررسی چرخش اپتیکی القا شده در نانولایه‌های موجبری AgCl-Ag با

تحریک مدهای مرتبه بالاتر در قطبش بیضوی نور فرودی

بنت الهدی عساکره*، ارشید نهال

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: 1399/07/08 ویرایش نهایی: 1400/05/14 پذیرش: 1400/07/25

doi: [10.22055/JRMBS.2021.17270](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.17270)

چکیده

در این مقاله، تأثیر شکل‌گیری ساختارهای دوره‌ای خودزا در لایه‌های نازک حساس به نور کلرید نقره-نقره در حالت برانگیختگی مدهای بالاتر (تحریک همزمان مدهای TE_0 و TE_1) بر روی میزان القای چرخش اپتیکی، تحت تابش با نور قطبیده بیضوی یک لیزر هلیوم نئون بررسی شده است. در لایه‌های نازک AgCl-Ag، در برهم‌کنش با نور قطبیده بیضوی نانو ساختارهای خودسامانده پریودیک (SPN) تشکیل می‌شوند که حاصل تداخل نور فرودی با مدهای تحریک شده در لایه است. بیضوی بودن قطبش نور فرودی موجب پیچیده‌تر شدن ساختارها شده و به نمونه‌ها خاصیت فعالیت اپتیکی القا می‌کند. در واقع شکل‌گیری SPN منجر به افزایش ناهمگنی و شکل‌گیری ساختارهای کایرال متشکل از نانوذرات نقره شده و باعث بروز فعالیت اپتیکی در نمونه‌ها می‌شود. از طرفی، افزایش زمان نوردهی و برانگیختگی همزمان دو مد تحت تابش نور قطبیده بیضوی موجب تقویت فعالیت نوری القاء شده می‌شود.

کلیدواژگان: لایه‌های نازک حساس به نور، نانوذرات نقره، نانو ساختارهای دوره‌ای خودزا، کایرالیته، چرخش اپتیکی

مقدمه

نانوساختارهایی که به‌روش‌های مختلفی از جمله لیتوگرافی یا باریکه‌الکترونی تولید می‌شوند مورد توجه قرار گرفته‌اند [3]. تمامی روش‌های اشاره شده، نیازمند صرف هزینه‌های بالا و یا سیستم‌های پیچیده هستند. یک روش ساده و کم‌هزینه، ایجاد ساختارهای دوره‌ای سطحی با کمک نور لیزر است [4]. در سازوکار این روش، تابش یک لیزر کم‌توان به یک لایه موجبری حساس به نور آلائیده به نانوذرات فلزی باعث ایجاد

اخیراً مطالعه تولید نانوساختارها و همچنین برهم‌کنش آنها با باریکه نوری مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [1]. به دلیل اهمیت کاربرد نانوساختارها بر روی سطوح و برهم‌کنش آنها با امواج الکترومغناطیسی، از جمله ثبت اطلاعات نوری در مواد حساس به نور، تمام‌نگاری، بهبود کارایی موجبرهای نوری به‌منظور انتقال انرژی در دستگاه‌های اپتوالکترونیک [2] و ...

* نویسنده مسئول: asakereh.hoda@ut.ac.ir

1995 گزارش شدند [4]. نخستین اثری که در این فیلم‌ها در هنگام نوردهی با تک باریکه نور لیزر قطبیده خطی (E_0) القا می‌شود، دوفامی خطی یا اثر ویگرت¹ است. به این معنا که طیف‌های جذب برای دو حالت $E \perp E_0$ و $E \parallel E_0$ که در آن بردار قطبش نور آزمون است متفاوت هستند. فرآیند تنها با تابش یک پرتوی نوری انجام می‌شود. از طرفی، این ساختارهای ایجاد شده به شدت به قطبش و طول موج پرتوی فرودی، ضریب شکست زیرلایه و ضخامت لایه نازک وابسته‌اند که امکان کنترل توپوگرافی و ویژگی‌های نوری این ساختارها مانند چرخش نوری و دوفامی را امکان پذیر می‌کند. آراگو² در سال 1811 میلادی، پدیده چرخش نوری را نخستین بار هنگام عبور نور قطبیده خطی از کوارتز مشاهده کرد. چرخش نوری یعنی صفحه قطبش نور آزمون قطبیده خطی در عبور از ماده، نسبت به راستای اولیه می‌چرخد و ممکن است قطبیده بیضوی شود. مطالعاتی که بر روی نانولایه‌های موجبری $AgCl-Ag$ صورت گرفته است [7-9]، نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که با نور قطبیده خطی و یا قطبش‌های دیگر ساخته شده‌اند، می‌توان فعالیت اپتیکی القا کرد. مطالعه چرخش اپتیکی القایی و کنترل آن به‌خاطر کاربردهایش، از اهمیت زیادی در اپتیک و فوتونیک برخوردار است.

فعالیت نوری ساختارهای دوره‌ای که با تابش نمونه‌ها با نور لیزر با قطبش بیضوی ایجاد می‌شوند، با افزایش ضخامت نانولایه‌های $AgCl$ و تحریک مدهای بالاتر، فعالیت و چرخش نوری این نمونه‌ها به‌میزان قابل

این ساختارها می‌شود. در واقع تداخل نور فرودی با مدهای برانگیخته شده در لایه، منجر به تشکیل این ساختارها می‌شود. هنگام نوردهی لایه‌های موجبری حساس به نور با تک باریکه لیزر با قطبش‌های گوناگون، اثراتی پیچیده و جالب توجه در این لایه‌ها القا می‌شود که از دو دیدگاه مهم است: 1: مدلی عملی برای مطالعه پراکندگی نور توسط نانوذرات فلزی کوچک را ارائه می‌دهند. 2: با کمک تغییرات ایجاد شده در ساختار لایه‌های نازک حساس به نور، ثبت اطلاعات نوری امکان پذیر می‌شود [5]. متداول‌ترین لایه‌های حساس به نور، لایه‌های نازک هالید نقره-نقره مانند $AgCl-Ag$ ، $AgBr-Ag$ و $AgI-Ag$ هستند. ساختارهای دوره‌ای مورد بررسی در این مقاله، توری‌هایی متشکل از نانوذرات نقره هستند که در اثر برهم‌کنش باریکه لیزر هلیوم-نئون (توان 5mW و طول موج 632/8nm) در یک لایه نازک حساس به نور $AgCl$ تشکیل می‌شوند. در واقع نور فرودی موجب تحریک مدهای لایه دی الکتریک $AgCl$ ، که به صورت یک موجبر تخت نامتقارن عمل می‌کند، شده و سپس این مد تحریک شده در حال انتشار با نور فرودی تداخل کرده و یک نقش تداخلی که طرح آن بستگی به قطبش نور فرودی دارد [6]، در سطح نمونه ایجاد می‌شود. پس از این مرحله نانو ذرات نقره که روی سطح لایه $AgCl$ قرار دارند برای کمینه کردن انرژی خود به کمینه‌های نقش تداخلی رفته و تشکیل یک ساختار دوره‌ای یا توری را می‌دهند. این ساختارها اولین بار توسط میلواسلاوسکی و آگه یف در سال

² Arago¹ Weigert Effect

به شرط خودسازگاری مرسوم است. شرط خودسازگاری باید در هر دو مرز موجبر به‌طور همزمان برآورده شود. می‌توان شرط خودسازگاری یا پاشندگی را به صورت معادله 1 نوشت [10]:

$$h_m = \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2}} \right) + m\pi \right] \quad 1$$

در این رابطه m شماره مدهای مجاز به انتشار در موجبر تخت، h_m ضخامت موجبر کلرید نقره، $1/52$ ، $n_s =$ ضریب شکست لام شیشه‌ای به‌عنوان زیرلایه، $n_f = 2,06$ ضریب شکست فیلم کلرید نقره، $\lambda_0 = 632,8nm$ طول موج نور فرودی لیزر هلیوم نئون و $n_c = 1$ ضریب شکست هوا است. از رابطه 1 آشکار است که تعداد مدهای قابل انتشار در موجبر به ضخامت موجبر وابسته است. از اینرو با جای‌گذاری مقدار $m = 1$ ضخامت مورد نیاز برای انتشار دو مد هم‌زمان TE_0 و TE_1 ، در حدود $280nm$ به دست می‌آید. هنگام تابش باریکه لیزر بر لایه‌های نازک AgCl-Ag، با ایجاد شرایط موجبری، بخشی از نور پراکنده شده از نانوذررات نقره باعث تحریک مدهای TE_n در موجبر AgCl شده و در این لایه موجبری منتشر می‌شود. مد منتشر شده در موجبر با باریکه فرودی لیزر تداخل کرده و فریزهای تداخلی تشکیل می‌شوند. سپس نانوذررات نقره برای کمینه شدن انرژی شان به فریزهای تاریک نقش تداخلی رفته و مطابق با نقش تداخلی توری تشکیل می‌دهند (شکل 1).

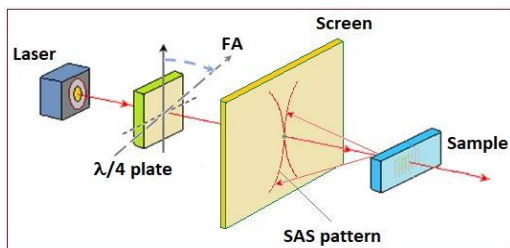
توجهی نسبت به نمونه‌هایی که با نور قطبیده خطی و بیضوی در لایه‌های نازک (فقط دارای مد TE_0) ساخته شده‌اند، بیشتر است.

سازوکار تشکیل توری‌های خودزا با نور

قطبیده بیضوی

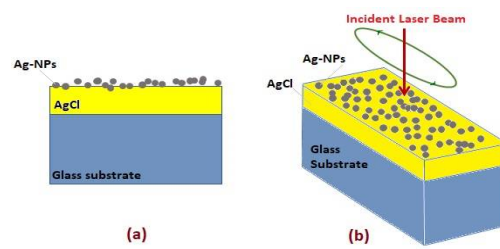
برای ساخت نمونه‌ها، از لام میکروسکوپ که به‌روش استاندارد تمیز شده است به‌عنوان زیرلایه AgCl استفاده کردیم. لایه کلرید نقره با ضخامتی معین را بر روی زیرلایه‌ها به‌روش تبخیر در خلأ (مرتبه خلأ $10^{-5} mmHg$) لایه‌نشانی کردیم. سپس روی لایه موجبر AgCl، یک لایه بسیار نازک نقره لایه‌نشانی می‌شود. در این صورت سیستم AgCl-Ag به نور حساس می‌شود. ضخامت لایه نقره ($15nm$) به‌اندازه‌ای کم است که به‌صورت یک لایه ناپیوسته دانه‌ای روی سطح کلرید نقره شکل می‌گیرند. افزایش ضخامت لایه نقره سبب افزایش عامل پرشدگی حجمی می‌شود و خوشه‌های سنگین‌تر نقره‌ها تشکیل می‌شوند که تحرک کمتری تحت تابش میدان نور دارند. با توجه به ابعاد بسیار کوچک نانوذررات نسبت به سطح مقطع پرتو فرودی، می‌توان جبهه موج باریکه لیزر را تخت در نظر گرفت. طبق تعریف [10] لایه نازک کلرید نقره/زیرلایه شیشه‌ای و هوا، یک موجبر دی‌الکتریک تخت نامتقارن را تشکیل می‌دهند. برای اینکه موج در لایه موجبری امکان انتشار داشته باشد، باید زاویه پراکندگی نور فرودی از نانوذررات روی سطح به داخل لایه AgCl به‌گونه‌ای باشد که شرط انتشار مد موجبر برقرار شود. شرایطی که این منظور را برآورده کند

شکل 2 مشاهده می‌شود، ابتدا پرتو قطبیده خطی لیزر هلیوم نئون با طول موج 632/8 نانومتر وارد تیغه ربع موج می‌شود و با چرخش محور تند (FA) تیغه ربع موج نسبت به محور قائم، نور قطبیده بیضوی ایجاد می‌شود. برای مشاهده پراکندگی در زاویه کوچک (SAS) یک صفحه سفید روزنه دار بین چشمه نور و نمونه کلرید نقره-نقره قرار داده می‌شود.



شکل 2. شماتیک چیدمان استفاده شده برای ساخت توری با نور قطبیده بیضوی

شکل 3 تصاویر AFM از سطح لایه ضخیم حساس به نور کلرید نقره-نقره (دارای دو مد همزمان TE_0 و TE_1 در موجبر) بر شیشه پس از تابش نور قطبیده راستگرد و چپگرد با زاویه $22/5$ درجه نسبت به قائم تحت مدت زمان نوردهی‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همچنین در شکل 4 اثر پراکندگی در زاویه کوچک (SAS) این ساختارهای ذکر شده قابل مشاهده است. بر اساس تصاویر AFM نظم به‌همراه پیچیدگی در نمونه‌های ساخته شده در زمان نوردهی 80 دقیقه، نسبت به نمونه‌های ساخته شده پس از 10 دقیقه بیشتر است. بنابراین تعداد ساختارهای کایرال و بیضوی که متناظر با نور فرودی با قطبش بیضوی هستند افزایش می‌یابند. از اینرو پارامتر افزایش زمان نوردهی در نمونه‌های ضخیم تحت نور قطبیده بیضوی، می‌تواند موجب



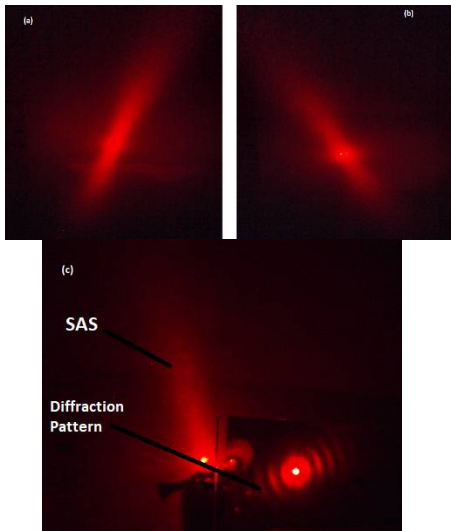
شکل 1. a: نمونه نور نخوره لایه کلرید نقره-نقره b: تشکیل ساختارهای دوره‌ای خودسامانده بر سطح AgCl-Ag تحت تابش نور قطبیده بیضوی.

توری می‌تواند به‌عنوان المان ورودی مد به موجبر عمل کند [4]. از این رو شکل‌گیری توری خودزا موجب ورود نور بیشتر به موجبر تخت کلرید نقره می‌شود. در نتیجه اختلاف شدت باریکه لیزر و شدت مد منتشر شده کمتر شده و تباین نقش تداخلی افزایش می‌یابد. این امر مهاجرت نانوذرات نقره را تسریع کرده و توری کاملتری ایجاد می‌شود که خود عامل ورود بهتر مد به موجبر است. این چرخه تکرار می‌شود. این فرایند بازخورد مثبت¹ نامیده می‌شود. پراکندگی مدهای تابشی در توری منجر به ظاهر شدن نقش پراکندگی در زاویه کوچک² بر روی پرده، همزمان با رشد توری‌ها می‌شود [11]. نشان داده شده است که ساختار بوجود آمده تابعی از طول موج، زاویه فرود و قطبش باریکه لیزر و ضریب شکست زیرلایه می‌باشد [12]. قطبش‌های مختلف پرتو فرودی، ساختارهای متفاوتی در سطح لایه‌های حساس به نور ایجاد می‌کنند. با تابش نور قطبیده بیضوی به سطح AgCl-Ag هم‌زمان با تغییر جهت میدان الکتریکی نسبت به زمان، توری در راستاهای مختلف موازی میدان تشکیل می‌شود. برای ایجاد توری با نور قطبیده بیضوی، همان‌گونه که در

² Small Angle Scattering

¹ Positive Feedback of Light

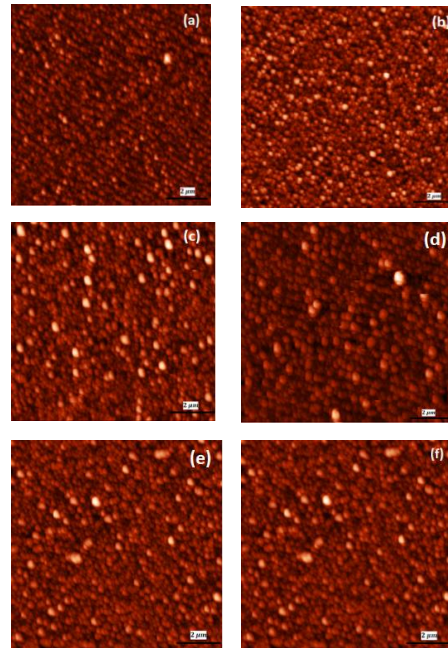
افزایش کایرالیته و در نتیجه افزایش چرخش اپتیکی شود.



شکل 4. پراکندگی در زاویه کوچک (SAS) توری‌های ساخته شده در 60 دقیقه زمان نوردهی با قطبش بیضوی a: چپگرد. b: راستگرد. c: نقش پراش هم‌زمان با نقش پراکندگی در زاویه کوچک توری ساخته شده تحت نور قطبیده بیضوی چپگرد.

شکل 4 اثر پراکندگی در زاویه کوچک و همچنین نقش پراش هم‌زمان با تشکیل توری را نشان می‌دهد. با توجه به آنکه نقش پراکندگی در زاویه کوچک¹ (SAS) تمامی اطلاعات لازم را درباره چگونگی رشد توری‌ها نمی‌دهد، مطالعه نقش پراش این توری‌ها اهمیت می‌یابد. برای مشاهده نقش پراش به صورت مستقیم، یا باید زاویه جهت‌گیری نمونه تغییر کند و یا از یک نور آزمون با طول موج کوچکتر از پرپود ساختارها استفاده کرد [14]. اما هر دو روش منجر به ایجاد اختلال در فرایند رشد توری‌ها خواهند شد. در نتیجه مشاهده مستقیم نقش پراش به این روش ممکن نیست [14].

برای مشاهده مستقیم اثر پراش از روشی که در [14] ذکر شده است، استفاده کردیم. در این روش با استفاده از یک لایه دی الکتریک میانی² که مابین لایه موجبری حساس به نور و زیرلایه شیشه‌ای قرار دارد، امکان مشاهده نقش پراش مرتبه صفر به صورت مستقیم بدون



شکل 3. تصاویر AFM از سطح کلرید نقره-نقره پس از تابش نور قطبیده بیضوی a: 10 دقیقه نوردهی نور قطبیده چپگرد. b: 60 دقیقه نوردهی نور قطبیده چپگرد. c: 60 دقیقه نوردهی راستگرد. d: 80 دقیقه نوردهی چپگرد. e: 80 دقیقه نوردهی راستگرد و f: 90 دقیقه نوردهی چپگرد.

افزایش بیش از حد زمان نوردهی بر نمونه‌ها (بیشتر از 100 دقیقه) به علت افزایش میزان جفت شدگی پلاسمونی بین نانوذرات نقره و غالب شدن پروفایل گاوسی لیزر بر مد موجبری، باعث از بین رفتن ساختار توری‌ها می‌شود [13].

² Buffer layer

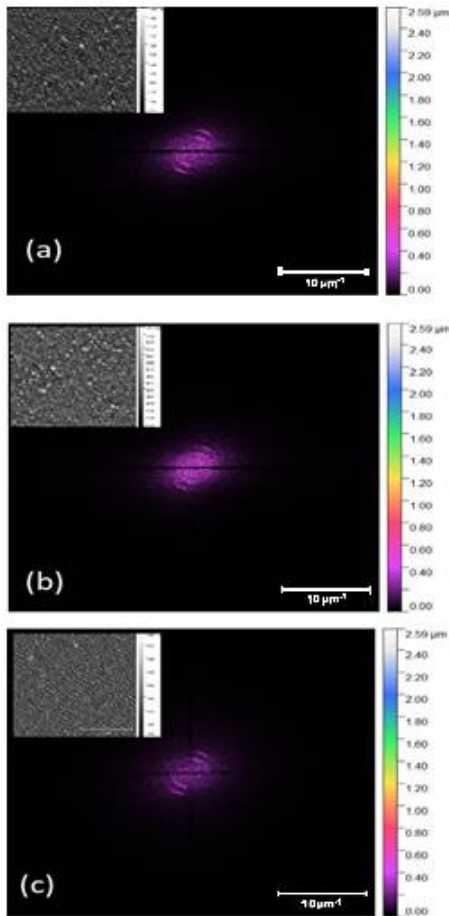
¹Small Angle Scattering

شکل 5 دیده می‌شود (دو پراش به صورت دو قوس با دو شعاع متفاوت) [10].

آنکه در فرایند رشد توری‌ها اختلالی وارد کند، امکان پذیر شد.

جدول 1. محاسبه پریود توری‌ها از روی تبدیل سریع فوریه عکس‌های AFM در برنامه Gwyddion.

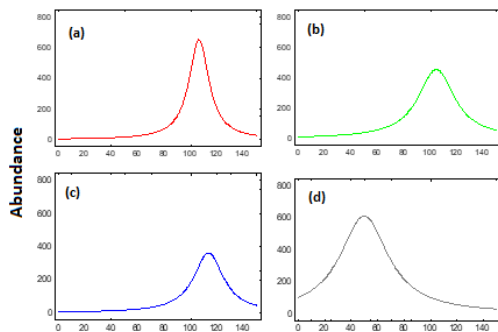
زمان و جهت نوردی نمونه (دقیقه)	محاسبه پریود توری (نانومتر)
10 دقیقه چپگرد	$L_1 = \frac{1}{3.90} \times 1000 = 256$ $L_2 = \frac{1}{6.42} \times 1000 = 155$
60 دقیقه چپگرد	$L_1 = \frac{1}{4.01} \times 1000 = 249$ $L_2 = \frac{1}{6.42} \times 1000 = 155$
90 دقیقه چپگرد	$L_1 = \frac{1}{4.01} \times 1000 = 249$ $L_2 = \frac{1}{6.53} \times 1000 = 153$



شکل 5. تصاویر AFM از توری ایجاد شده تحت نور قطبیده بیضوی چپگرد و تبدیل فوریه سریع (FFT) متناظر با هر تصویر به ترتیب a: در 10 دقیقه نوردی. b: 60 دقیقه نوردی و c: 90 دقیقه نوردی.

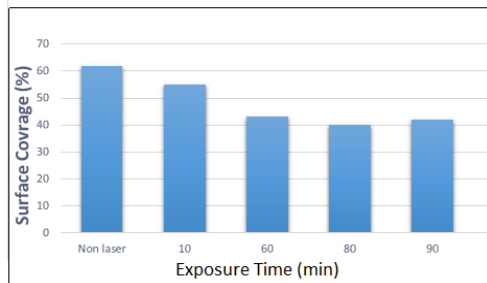
مطابق جدول 1 پریود توری‌های متناظر با دو مد TE_0 و TE_1 تقریباً مستقل از جهت و زمان نوردی است. برای نمونه‌های ساخته شده تحت نوردی‌های چپگرد و همچنین در زمان‌های نوردی 10 تا 90 دقیقه، پریود توری تقریباً ثابت می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که در زمان‌های نخست نوردی، دو توری تشکیل می‌شوند و

مطالعه پریود توری‌ها با افزایش زمان نوردی، معیاری جهت مطالعه تحول زمانی توری‌های خودزا است. برای تعیین پریود توری‌ها، در نرم‌افزار Gwyddion با کمک تبدیل سریع فوریه (FFT) تصاویر AFM در شکل 3، توری‌های پراش را از دامنه فضایی به دامنه بسامد انتقال دادیم و دوره تناوب را تعیین کردیم. شکل 5 تصاویر تبدیل فوریه تصاویر AFM در حوزه بسامد را نشان می‌دهد که نتایج اندازه‌گیری پریود توری‌ها در جدول 1 نشان داده شده است. برانگیختگی همزمان دو مد TE_0 و TE_1 و تشکیل دو توری با دو پریود متفاوت، در



Ag nanoparticles' Radius

شکل 6. توزیع اندازه شعاع نانوذرات در توری‌های ساخته شده تحت نور قطبیده بیضوی چپگرد در a: 10 دقیقه نوردهی، b: 60 دقیقه نوردهی، c: 80 دقیقه نوردهی و d: 90 دقیقه نوردهی.



شکل 7. نمودار پوشش سطحی 4 نمونه کلرید نقره-نقره تحت نور قطبیده بیضوی چپگرد در زمان نوردهی متفاوت

$$\varepsilon_{eff} = \int_0^{\infty} \varepsilon_{av}(D) f(D) dD \quad 3$$

که در آن $\varepsilon_{av}(D)$ ثابت دی‌الکتریک نانوذرات نقره است. $f(D)$ تابع توزیع اندازه قطر ذره است. همزمان با انباشتگی نانوذرات نقره در یک مکان و تشکیل خوشه‌های بزرگتر، محیط اطراف خوشه عاری از نانوذرات نقره می‌شود. بنابراین می‌توان با پارامتری بنام

با گذشت زمان نوردهی، نانوذرات نقره تنها برای تشکیل کامل و بهتر توری‌ها جابه‌جا می‌شوند تصاویر AFM شکل 3 و تشکیل ساختار بیضوی مربوط به هر دو مد در 10 دقیقه اول، این امر را تأیید می‌کند.

علاوه بر پرپود توری‌ها، بررسی توزیع اندازه ذرات با افزایش زمان نوردهی، در درک بهتر تشکیل توری‌ها نیز می‌تواند مؤثر باشد. به همین دلیل در شکل 6 با پردازش تصاویر AFM از نمونه‌ها، توزیع اندازه نانوذرات نقره را بررسی کردیم. مطابق شکل 6 با افزایش زمان نوردهی، اندازه نانوذرات نقره افزایش می‌یابد.

توزیع اندازه قطر نانوذرات یک توزیع نرمال است که تابع گاوسی برازش شده بر آن به شکل زیر است:

$$f(D) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(D-D_0)^2}{2\sigma^2}} \quad 2$$

که D قطر هر یک از نانوذرات نقره، D_0 قطر میانگین نانوذرات نقره و σ انحراف استاندارد است. با تابش نور و افزایش زمان نوردهی، خوشه‌های نقره بزرگتری بر اثر نیروی جاذبه بین دو قطبی‌های القا شده در نانوذرات تشکیل می‌شوند و توزیع قطر خوشه‌ها نیز بزرگتر است. اندازه نانوذرات نقره در 10 دقیقه نوردهی در حدود 50 نانومتر است اما با افزایش زمان نوردهی و تشکیل خوشه‌های بزرگتر، اندازه شعاع نانوذرات به 110 نانومتر می‌رسد (شکل 6). توزیع اندازه نانوذرات نقره بر ثابت دی‌الکتریکی و ضریب شکست محیط تأثیر می‌گذارد. برای چنین محیطی یک ثابت دی‌الکتریک براساس تابع توزیع اندازه قطر ذره به صورت زیر تعریف می‌شود [15]:

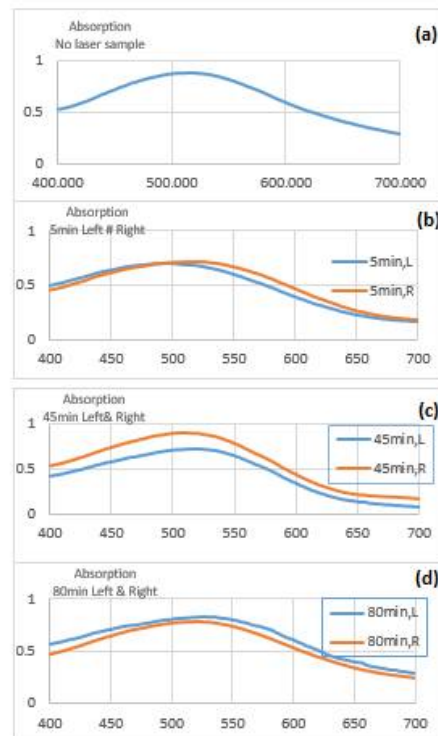
و جابه‌جا شدن نانوذرات، در طیف جذب نمونه‌ها تغییر ایجاد شده و مقدار جذب در توری‌ها کاهش می‌یابد. دلیل آن را این‌گونه می‌توان ذکر کرد که با افزایش زمان نوردی و کاهش پوشش سطحی نمونه‌ها در شکل 7، فضای خالی نمونه افزایش یافته و در نتیجه طیف عبوری افزایش و طیف جذب نمونه کاهش می‌یابد.

بررسی اثر فعالیت نوری در لایه ضخیم حساس به نور کلرید نقره-نقره در نور قطبیده

بیضوی

تصاویر AFM و طرح پراش ساختارها نشان می‌دهد که تابش پرتو لیزر سبب نظم‌گیری نانوذرات نقره در سطح کلرید نقره در راستای قطبش پرتو می‌گردد. چگونگی پاسخ‌دهی این ساختارها به نور قطبیده بیضوی راستگرد و چپگرد، میزان فعالیت نوری این ساختارها را مشخص می‌کند. نتایج اندازه‌گیری دوفامی دایره‌ای و طیف عبور برای ساختارهای دوره‌ای خودسامانده ایجاد شده با نور قطبیده بیضوی راستگرد و چپگرد 22/5 درجه تحت زمان‌های متفاوت نوردی در جدول 2 و 3 خلاصه شده است. در جدول 2 مشاهده می‌شود که با افزایش زمان نوردی نمونه‌ها، طیف عبوری از نمونه‌ها افزایش می‌یابد که با نتایج شکل 7 نمودار پوشش سطحی در تطابق است. با افزایش زمان نوردی و حرکت نانوذرات نقره برای کامل کردن توری‌ها، فضای خالی نمونه افزایش می‌یابد که منجر به افزایش طیف عبوری از نمونه‌ها می‌گردد.

پوشش سطح¹، نسبت سطح اشغال شده توسط نانوذرات نقره به کل سطح را سنجید.



شکل 8. طیف جذب نور غیر قطبیده توری‌های ساخته شده تحت نور قطبیده بیضوی راستگرد و چپگرد در a: بدون تشکیل توری 5 دقیقه نوردی. b: 45 دقیقه نوردی. c: 45 دقیقه نوردی. d: 80 دقیقه.

در شکل 7، پوشش سطح برای چهار نمونه با زمان نوردی متفاوت را نشان می‌دهد. مطابق شکل 7، با افزایش زمان نوردی نمونه، پوشش سطحی نانوذرات کاهش می‌یابد.

اندازه‌گیری طیف جذب نمونه‌ها نیز عامل مؤثری در شناخت بهتر توری‌هاست. همان‌گونه که از طیف جذب نمونه‌ها در شکل 8 مشاهده می‌شود، در زمان‌های نوردی نخست نمونه، به علت جابه‌جا شدن تعداد زیادی از نانوذرات نقره، تفاوتی بین دو نمونه راستگرد و چپگرد مشاهده نمی‌شود، اما با افزایش زمان نوردی

¹ Surface Coverage

دوفامی دایره‌ای و ضریب عبور نمونه‌ها به طول موج تابشی بستگی دارد (جدول 3). دوفامی دایره‌ای نمونه‌ها برای طول موج قرمز از رنگ سبز بیشتر است. دوفامی دایره‌ای در طول موج تشدید پلاسمونی نانوذرات نقره (در حدود نانومتر)، برای نمونه‌های ساخته شده تحت نور قطبیده بیضوی کمینه است و در حوالی این طول موج تغییر علامت می‌دهد [7]. نتایج جدول 3 با این نکته کاملاً سازگار است.

جدول 3. مقادیر دوفامی دایره‌ای و ضریب ناهمگنی برای سه زمان نوردی متفاوت و دو طول موج قرمز و سبز رنگ

	g		CD		زمان نوردی (دقیقه)
	$= \frac{1}{2}(T_R + T_L)$		$= T_R - T_L$		
	سبز	قرمز	نور سبز	نور قرمز	
راستگرد	0.035	0.04	0.030	0.037	5
	0.041	0.057	0.036	0.05	45
	0.055	0.108	0.048	0.095	80
چپگرد	-0.034	-0.03	-	-0.026	5
	-0.035	-0.07	-	-0.06	45
	-0.054	-0.14	-	-0.13	80

نکته جالب توجه دیگر در جدول 2، آن است که در نمونه‌های ساخته شده تحت نور قطبیده بیضوی راستگرد، ضریب عبور راستگرد (T_R)، از ضریب عبور چپگرد (T_L) بیشتر است و در توری‌های ساخته شده تحت نور قطبیده چپگرد، عکس این امر اتفاق می‌افتد.

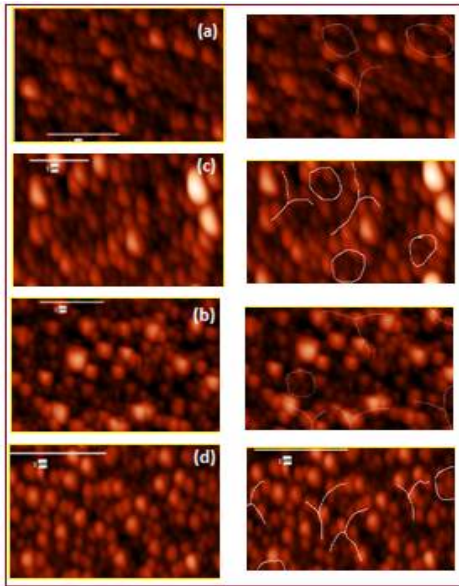
جدول 2. مقادیر طیف عبوری اندازه‌گیری شده برای سه زمان نوردی متفاوت و دو طول موج قرمز و سبز رنگ.

	نور سبز $\lambda = 520 \text{ nm}$	نور قرمز $\lambda = 620 \text{ nm}$	زمان نوردی (دقیقه)
راست	$T_R = 0.88$ $T_L = 0.85$	$T_R = 0.86$ $T_L = 0.82$	5
	$T_R = 0.88$ $T_L = 0.85$	$T_R = 0.90$ $T_L = 0.85$	45
	$T_R = 0.90$ $T_L = 0.85$	$T_R = 0.92$ $T_L = 0.82$	80
چپ	$T_R = 0.86$ $T_L = 0.89$	$T_R = 0.83$ $T_L = 0.86$	5
	$T_R = 0.85$ $T_L = 0.88$	$T_R = 0.83$ $T_L = 0.89$	45
	$T_R = 0.86$ $T_L = 0.91$	$T_R = 0.81$ $T_L = 0.94$	80

این تفاوت علامت در ضریب عبور راستگرد و چپگرد، منجر به اثر جالبی در علامت دوفامی دایره‌ای در نمونه‌های ساخته شده با نور قطبیده راستگرد و چپگرد می‌شود. به طوری که در جدول 3 مشاهده می‌شود، دوفامی دایره‌ای نمونه‌های چپگرد و راستگرد عکس علامت همدیگر هستند در واقع یک ساختار SPN¹ اطلاعات مربوط به قطبش نور فرودی را در خود ثبت می‌کند.

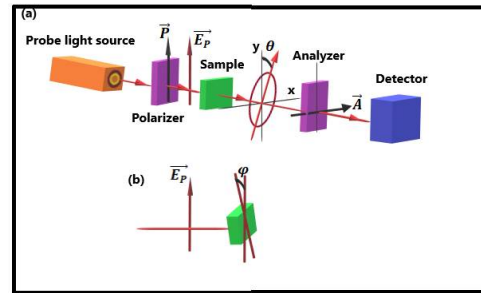
¹ self-organized periodic nanostructures

کمینه شود. میزان چرخیده شدن تحلیلگر، زاویه چرخش نوری را مشخص می‌کند.



شکل 10. چرخش نوری برحسب زاویه جهت‌گیری نوری ایجاد شده در نور قطبیده بیضوی در زمان‌های نوردهی متفاوت.

شکل 10 میزان چرخش نور آزمون با طول موج 643 نانومتر در ساختارهای دوره‌ای خودسامانده که با نور قطبیده بیضوی چپگرد با زاویه 22/5 درجه نسبت به قائم ساخته شده‌اند، را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش زمان نوردهی ساخت نمونه‌ها، چرخش نوری آنها افزایش می‌یابد و در 80 دقیقه زمان نوردهی، چرخش اپتیکی نمونه‌ها به بیشترین مقدار خود می‌رسد. چرخش نوری می‌تواند ناشی از ناهمسانگردی ساختارهای دوره‌ای خودزا و یا فعالیت نوری آنها باشد، که برای تشخیص اینکه چه اندازه از سهم چرخش نوری ناشی از ناهمسانگردی ساختارهای دوره‌ای خودزا و چه مقدار ناشی از فعالیت نوری محیط است، مطابق چیدمان شکل 9، نمونه را در زاویه‌های مختلف

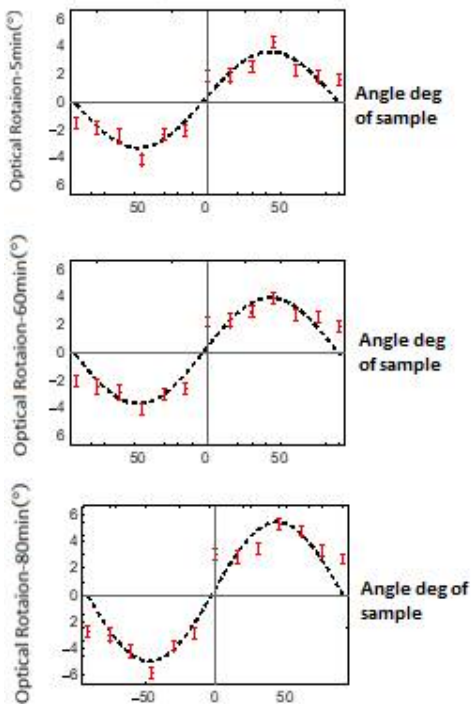


شکل 9. چیدمان آزمایشگاه برای اندازه‌گیری چرخش اپتیکی نمونه a: در $(\varphi=0^\circ)$ ، b: در زاویه‌های مختلف نمونه نسبت به E_0 ، یعنی $(\varphi \neq 0^\circ)$.

پس از تهیه ساختارهای دوره‌ای خودسامانده با قطبش بیضوی 22/5 درجه، با ایجاد چیدمان شکل 9، میزان چرخش نوری در این ساختارها را اندازه‌گیری کردیم. چشمه نوری که در چیدمان شکل 9 استفاده می‌شود، LED کم توان است که شدت آن نسبت به چشمه‌های لیزری بسیار کمتر است و در واقع در هنگام اندازه‌گیری، به علت شدت پایین، ویژگی‌های نوری ساختارهای دوره‌ای را تغییر نمی‌دهد. در چیدمان شکل 9، از منشورهای نیکول به عنوان قطبشگر و تحلیلگر استفاده شده که می‌توان به ناچیز بودن جذب این منشور و دقت بالای اندازه‌گیری آنکه 0/03 درجه است اشاره کرد. نمونه‌های ساختار دوره‌ای خودزا شفاف هستند و نور آزمون به راحتی می‌تواند از نمونه عبور کرده و به تحلیل‌گر برسد. تحلیل‌گر در مرکز یک گونیومتر با دقت 20 ثانیه قرار گرفته است.

با قرار دادن نمونه بین قطبش‌گر و تحلیل‌گر در حالتی که محورهای نوری قطبش‌گر و تحلیل‌گر متعام باشند، شدت نور خروجی دیگر صفر نیست زیرا نمونه سبب چرخش راستای قطبش نور می‌شود. در این حالت تحلیل‌گر را می‌چرخانیم تا شدت نور مجدداً صفر یا

ایجاد شده در توری‌ها به جهت راستگرد یا چپگرد بودن نور قطبیده بیضوی تابشی می‌باشد. طبق قرارداد، اگر رو به سمت چشمه نور بایستیم و بردار میدان الکتریکی به سمت راست چرخید، نور قطبیده راستگرد و اگر به سمت چپ چرخید، قطبیده چپگرد است. بدین ترتیب که وقتی نور قطبیده بیضوی راستگرد باشد ساختارهای کایرال تشکیل شده در توری در جهت راست است و اگر نور قطبیده تابشی چپگرد باشد، ساختارهای کایرال چپگرد می‌باشند.



شکل 11. تصاویر AFM و ساختارهای کایرال آنها در نمونه‌های ضخیم کلرید نقره تحت a: 10 دقیقه نوردهی راستگرد. b: 60 دقیقه نوردهی راستگرد. c: 80 دقیقه نوردهی چپگرد. d: 80 دقیقه نوردهی راستگرد.

شکل 12، شماتیک و تصویر AFM تشکیل دو توری مربوط به دو مد همزمان TE_0 و TE_1 تحت تابش نور لیزر هلیوم نئون با قطبش بیضوی را نشان می‌دهد. در هنگام نوردهی ابتدایی بر نمونه‌ها، دو بیضی متناظر با

می‌چرخانیم و در نهایت یک تابع سینوسی را بر داده‌های تجربی برازش می‌کنیم.

در لایه‌های ضخیم (که در آنها هر دو مد TE_0 و TE_1 هم‌زمان برانگیخته می‌شوند) ساخته شده با نور قطبیده بیضوی، وجود رقابت بین دو مد برای جذب نانو ذرات نقره و تشکیل توری مربوطه، باعث می‌شود که در زمان‌های ابتدایی نوردهی، ناهمسانگردی و در نتیجه چرخش نوری نمونه‌ها کم باشد. این رقابت از آنجا ناشی می‌شود که مقدار نانو ذرات در دسترس محدود بوده و از طرفی سرعت رشد SPN مربوط به مد TE_0 متفاوت از مد TE_1 است، اما با افزایش زمان نوردهی و تشکیل کامل هر دو توری مربوط به دو مد TE_0 و TE_1 ، علاوه بر افزایش ناهمسانگردی نمونه، کایرالیته نمونه‌ها نیز افزایش یافته و در نتیجه منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای از چرخش نوری نمونه‌ها می‌شود، به طوری که در 80 دقیقه نوردهی بیشترین میزان چرخش نوری را شاهد هستیم.

شکل 11 تصاویر AFM از نمونه‌های ساخته شده تحت نور قطبیده بیضوی را نشان می‌دهد. همان‌گونه از شکل 11 مشاهده می‌شود در زمان‌های نخست نوردهی برای ساخت نمونه، نانو ذرات نقره به اندازه کافی برای تشکیل توری جابه‌جا نشده‌اند و تعداد ساختارهای کایرال توری اندک است. اما با گذشت زمان کافی و تشکیل دو توری مربوط به دو مد همزمان TE_0 و TE_1 ، تعداد ساختارهای کایرال نیز افزایش یافته است. نکته قابل توجهی که از شکل (11-c,d) مشاهده می‌شود، وابستگی جهت ساختارهای کایرال

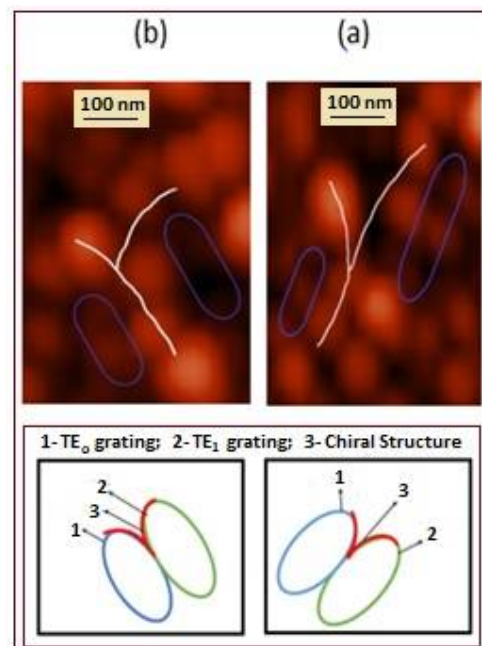
حضور ساختارهای کایرال مشابه، فعالیت نوری نمونه را در حد قابل توجهی افزایش می‌دهد [16]. در حضور ساختارهای بیضوی مربوط به دو مد هم‌زمان، علاوه بر اینکه نور قطبیده بیضوی با ایجاد ساختارهای کایرال حلقوی باعث القای چرخش اپتیکی در نمونه می‌شود، بلکه در محل اتصال دو بیضی مربوط به هر مد متناظر، ساختارهای کایرال یکپارچه و مشابه نیز به وجود می‌آید که در میزان افزایش القای چرخش اپتیکی مؤثر است (شکل 12). نکته قابل توجه دیگر در توری‌هایی که در این مطالعه به آنها پرداختیم، این است که با افزایش مدت زمان نوردهی با قطبش بیضوی در تشکیل توری، با جابه‌جایی نانوذرات در مسیرهای مشخص بیضوی که ناشی از قطبش نور تابشی است، ناهمسانگردی این توری‌ها نیز به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

شکل 13 چرخش اپتیکی دو توری ساخته شده تحت دو نور قطبیده بیضوی راستگرد و چپگرد را نشان می‌دهد. کاملاً نمایان است که چرخش اپتیکی این دو نوع توری در یک زمان نوردهی مشخص، دارای علامت‌های مخالف است. که ساختارهای کایرال ایجاد شده در این دو نوع توری در شکل 11، کاملاً این مطلب را تأیید می‌کند.

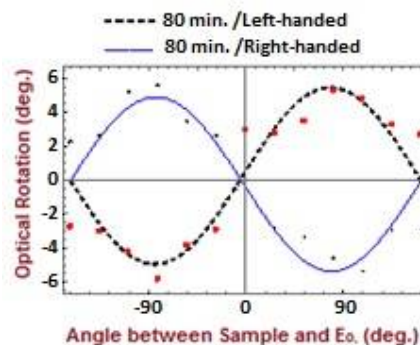
یکی دیگر از پارامترهای شناسایی توری‌ها، درجه بیضی بودن نور آزمون عبوری از نمونه‌هاست. درجه بیضی بودن نور آزمون معیاری از ناهمگنی القا شده در نمونه‌هاست. برای اندازه‌گیری درجه بیضی بودن نور آزمون عبوری به صورت زیر عمل می‌کنیم:

با استفاده از چیدمان ذکر شده در شکل 9، برخلاف روش ذکر شده برای اندازه‌گیری چرخش اپتیکی، که

مدها به طور کامل شکل نگرفته‌اند و از این رو، هر چند که ساختارهای کایرال را می‌توان حتی در زمان‌های ابتدایی نوردهی در ساختارها مشاهده کرد، اما با افزایش زمان نوردهی و ظاهر شدن کامل دو توری مربوط به هر مد، تعداد ساختارهای کایرال یکپارچه و مشابه افزایش می‌یابد.



شکل 12. تصاویر واضح از ساختارهای کایرال در توری‌های ساخته شده تحت نور قطبیده بیضوی 22/5 درجه. a: توری چپگرد در بالا و شماتیک آن در پایین. b: توری راستگرد در بالا و شماتیک آن در پایین.



شکل 13. چرخش اپتیکی توری ساخته شده در 80 دقیقه نوردهی نور قطبیده بیضوی راستگرد و چپگرد.

برای سادگی رابطه 5 را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$I(\psi) = a + b \cos(2 * \psi) + c \sin(2 * \psi) \quad 6$$

با تغییر زاویه آنالیزور نسبت به محور قائم آزمایشگاه (ψ) ، شدت نور آزمون ثبت شده توسط آشکارساز $(I(\psi))$ تغییر می‌کند. داده‌های تجربی حاصل از ψ و $I(\psi)$ را بر رابطه 6 برازش می‌کنیم و بدین ترتیب ضرایب a, b, c را به دست می‌آوریم. با برابر قرار دادن این ضرایب در رابطه‌های 7 و 8، بیضویت و چرخش اپتیکی را به دست می‌آوریم:

$$\cos(2 * \chi) \cos(2 * \theta) = \frac{b}{a} \quad 7$$

$$\cos(2 * \chi) \sin(2 * \theta) = \frac{c}{a} \quad 8$$

زاویه θ نشان دهنده چرخش اپتیکی و $\tan \chi$ برابر با درجه بیضی بودن نور آزمون فرودی است. مقادیر به دست آمده به شرح جدول 4 است.

همان‌گونه که از جدول 4 مشاهده می‌شود، نمونه‌های ساخته شده در مدت زمان نوردهی بیشتر، دو پارامتر چرخش اپتیکی و درجه بیضی بودن نور آزمون یا به عبارت دیگر ناهمگنی آنها بیشتر است. این نتیجه با نتایج تجربی در شکل 7 که نشان دهنده ناهمگنی نمونه‌ها و شکل 10 که نشان دهنده چرخش اپتیکی نمونه‌هاست، کاملاً در توافق است. به این ترتیب توانستیم داده‌های به دست آمده در شکل‌های 7 و 10 را تأیید کنیم.

نمونه را در زوایای مختلف نسبت به محور قائم آزمایشگاه $(\varphi \neq 0^\circ)$ قرار می‌دادیم و آنالیزور در زاویه ثابتی نسبت به محور قائم آزمایشگاه $(\psi = 0^\circ)$ قرار می‌گرفت، در این روش نمونه در زاویه ثابت نسبت به محور قائم آزمایشگاه $(\varphi = 0)$ قرار می‌گیرد و به‌ازای زوایای مختلف آنالیزور نسبت به محور قائم آزمایشگاه $(\psi \neq 0)$ ، شدت نور آزمون ثبت شده توسط آشکارساز را یادداشت می‌کنیم [8].

می‌دانیم که درجه بیضی بودن نور قطبیده با استفاده از پارامترهای استوکس رابطه 4 نوشته می‌شوند [17]:

$$S = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ \cos(2 \chi) \cos(2 \theta) \\ \cos(2 \chi) \sin(2 \theta) \\ \sin(2 \chi) \end{pmatrix} \quad 4$$

که $\tan \chi$ بیضویت و θ زاویه چرخش اپتیکی است.

جدول 4. نتایج به دست آمده برای چرخش اپتیکی و درجه بیضی بودن نور آزمون برای نمونه‌های ساخته شده تحت زمان نوردهی متفاوت.

Time (min)	Optical rotation(θ)	Ellipticity ($\tan \chi$)
10 - Left	1.243	1.2625
60- Left	-2.48	1.2924
80- Left	-6.31	1.2948
10-Right	1.253	1.2695
60- Right	3.25	1.2884
80- Right	5.34	1.2910

رابطه بین θ و χ با شدت نور آزمون پس از عبور از آنالیزور به‌ازای یک زاویه خاص از آنالیزور $(I(\psi))$ ، طبق رابطه 5 نوشته می‌شود [17]:

$$I(\psi) = S_0 \left[\frac{1}{2} + \frac{[\cos(2 \chi) \cos(2 \theta)]}{2} \cos(2 \chi) + \frac{[\cos(2 \chi) \sin(2 \theta)]}{2} \sin(2 \chi) \right] \quad 5$$

بحث و نتیجه گیری

به طور خلاصه، اگر نور قطبیده بیضوی را به لایه ضخیم $AgCl-Ag$ (که در آن دو مد همزمان TE_0 و TE_1 برانگیخته می شوند) بتابانیم، SPN پیچیده دائمی با ویژگی فعالیت اپتیکی شکل می گیرند با افزایش زمان نوردی چهار عامل مهم باعث تقویت قابل توجه چرخش اپتیکی در نمونه ها می شود.

1: حضور ساختارهای کایرال حلقوی که متأثر از نور قطبیده بیضوی تابشی هستند.

2: تشکیل ساختارهای کایرال یکپارچه و منظم ناشی از قرار گرفتن نانوذرات نقره در بیضی های مجاور مربوط به هر یک از مدها.

3: افزایش ناهمگنی نمونه ها در اثر تجمع نانوذرات نقره در مسیرهای مشخص بیضوی مطابق با نقش تداخلی ایجاد شده.

4: اغلب ساختارهای کایرال سه بعدی هستند [17]، که بعد سوم یا ضخامت نمونه در ایجاد فعالیت نوری مؤثر است [18]. از اینرو، در لایه های ضخیم $AgCl-Ag$ که در مجموع ضخامتی در حدود 300 نانومتر دارند، افزایش ضخامت کلرید نقره را می توان چهارمین عامل افزایش چرخش اپتیکی عنوان کرد. در نتیجه در نمونه های ساخته شده در این پژوهش، با افزایش زمان نوردی و ضخامت لایه $AgCl$ ، شاهد افزایش قابل ملاحظه ای از چرخش اپتیکی هستیم، که از اهمیت کاربردی زیادی برخوردار است.

مرجع ها

- [1] L. Jiang, W. Wang, H. Fuchs, L. Chi, One-Dimensional Arrangement of Gold Nanoparticles with Tunable Interparticle Distance, *Small* 5 (2009) 28192822. <https://doi.org/10.1002/smll.200900770>
- [2] E.D. Epstein, L. Singh, S. Sternklar, Y. Gorodetski, The role of plasmonic excitations in the optical activity of periodic structures with configurational chirality, *Applied Physics Letters* (2020) 131106. <https://doi.org/10.1063/5.0003478>
- [3] D. Solis Jr, B. Willingham, S.L. Nauert, L.S. Slaughter, J. Olson, P. Swanglap, A. Paul, W.-S. Chang, S. Link, Electromagnetic energy transport in nanoparticle chains via dark plasmon modes, *Nano letters* 12 (2012) 1349-1353. <https://doi.org/10.1021/nl2039327>
- [4] W. Rechberger, A. Hohenau, A. Leitner, J. Krenn, B. Lamprecht, F. Aussenegg, Optical properties of two interacting gold nanoparticles, *Optics communications* 220 (2003) 137-141. [https://doi.org/10.1016/S00304018\(03\)01357-9](https://doi.org/10.1016/S00304018(03)01357-9)
- [5] L.A. Ageev, V.K. Miloslavsky, Photoinduced effects in light-sensitive films, *Optical Engineering* 34 (1995) 960-973. <https://doi.org/10.1117/12.197211>
- [6] L.A. Ageev, V.K. Miloslavsky, A. Nahal, Study of spontaneous grating formation in photosensitive films by means of small-angle scattering, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 7 (1998) 1-5. [DOI:10.1088/0963-9659/7/1/001](https://doi.org/10.1088/0963-9659/7/1/001)
- [7] A. Nahal, R. Talebi, Ellipticity-dependent laser-induced optical gyrotropy in $AgCl$ thin films doped by silver nanoparticles, *Journal of nanoparticle research* 16 (2014) 2442. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11051-014-2442-y>
- [8] A. Nahal, S. Kashani, Optical chirality in $AgCl-Ag$ thin films through formation of laser-induced planar crossed-chain

- optics* **29** (1998) 253.
DOI: [10.1088/0150-536X/29/4/001](https://doi.org/10.1088/0150-536X/29/4/001)
- [15] S. Wang, R. Wang, X. Liu, X. Wang, D. Zhang, Y. Guo, X. Qiu, Optical spectroscopy investigation of the structural and electrical evolution of controllably oxidized graphene by a solution method, *The Journal of Physical Chemistry C* **116** (2012) 10702-10707.
<https://doi.org/10.1021/jp212184n>.
- [16] M. Kuwata-Gonokami, N. Saito, Y. Ino, M. Kauranen, K. Jefimovs, T. Vallius, J. Turunen, Y. Svirko, Giant optical activity in quasi-two-dimensional planar nanostructures, *Physical review letters* **95** (2005) 227401.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.227401>
- [17] E. Collett, *Polarized light fundamentals and applications*, CRC (1992).
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992plfa.book..C/abstract>
- [18] L.D. Barron, *Molecular Light Scattering and optical Activity*, Cambridge University, (2004).
https://cds.cern.ch/record/803735/files/0521813417_TOC.pdf
- nanostructures, *Journal of Applied Physics* **122** (2017) 103103.
<https://doi.org/10.1063/1.4994138>
- [9] A. Nahal, B. Asaakareh, M. Miri, Temporal evolution of photoinduced optical chirality in nanostructured light-sensitive waveguide thin films: Simultaneous excitation of TE0 and TE1 modes, *Journal of Applied Physics* **125** (2019) 123101. <https://doi.org/10.1063/1.5079506>
- [10] T. Tamir, *Integrated optics*, Topics in Applied Physics, Springer, Berlin, (1979).
<https://link.springer.com/book/9783540347170>
- [11] L.A. Ageev, V.K. Miloslavskii, K.S. Beloshenko, Peculiarities of spontaneous grating generation in light-sensitive waveguide layers during holographic grating formation, *Optics and Spectroscopy* **6** (2010) 971-977.
<https://link.springer.com/article/10.1134/S0030400X10120222>
- [12] A. Mokhberi, A study on generation of spontaneous periodic structures in AgCl-Ag thin films and its application to the measurement of index of refraction of substrates and preforms, *Master thesis in Atomic and Molecular physics* (2009).
<https://library.ut.ac.ir/thesis>
- [13] S. Kashani, A. Nahal, The role of coupled nanoplasmon excitation in growth mechanism of laser-induced self-organized nanostructures in AgCl-Ag waveguide thin films, *Plasmonics* **12** (2017) 1305-1316.
<https://doi.org/10.1007/s11468-016-0388-x>
- [14] M. Varminsky, L. Ageev, V. Miloslavsky, Observing diffraction from photo-induced TE gratings in the process of their formation in thin films, *Journal of*