



بهبود دوشکستی القایی لیزری در پلیمرهای نوری بسیار دوپه شده

عزالدین مهاجرانی*، محمد هاشم رضوانی، راضیه محزون

تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر، کدپستی ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳

دریافت: ۸۶/۷/۷، پذیرش: ۸۷/۷/۲۷

چکیده

گستره کاربرد پلیمرها در علوم و فناوری‌های نوین و پیشرفته در حال افزایش است و در این میان، پلیمرهای نوری جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. در بررسی ساز و کار استفاده از پلیمرهای نوری در کاربردهای فوتونیک، برهم‌کنش مولکول‌های رنگینه با محیط میزبان مورد توجه قرار گرفت. نمونه‌هایی تهیه شد که به شیوه‌ای شبیه ساختارهای خود سامان، از این برهم‌کنش برای افزایش قابل توجه شدت پاسخ و بهبود عملکرد غیرخطی قطعه فوتونیک بهره‌گیرند. این افزایش به دلیل ازدیاد تعداد پیوندهای غیرکووالانسی و در نتیجه، امکان افزایش نسبت مولی رنگینه به پلیمر است. پاسخ زمانی این نمونه‌ها نیز بررسی شد و تفاوت کیفی محسوسی مشاهده نشد. در مطالعات از اندازه‌گیری‌های طیفی و پدیده شکست مضاعف القایی لیزری استفاده شد. با بررسی نتایج مشخص شد، نمونه‌های بسیار دوپه شده از لحاظ کیفی، هم‌چنان عملکرد صحیحی در کاربردهای نوری غیرخطی دارند. از لحاظ کمی نیز، در مقایسه با بهترین گزارش‌های بین‌المللی که تا کنون در این باره منتشر شده‌اند، بهبود قابل توجهی در نتایج حاصل مشاهده شد. در مجموع، با توجه به تغییرات طیفی گسترده و افزایش قابل ملاحظه میزان شکست مضاعف القایی، این روش راهی مؤثر برای ساخت قطعات فوتونیک بهبود یافته شناخته شد.

واژه‌های کلیدی

لایه نازک پلیمری،
رنگینه آلی غیرخطی،
برهم‌کنش بین مولکولی،
ابزارهای پلیمری بسیار دوپه شده،
دوشکستی القایی لیزری

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

e-mohajerani@sbu.ac.ir

Improved Laser Induced Birefringence in Highly Doped Optical Polymers

E. Mohajerani*, M.H. Rezvani and R. Mahzoon

Faculty of Laser, Shahid Beheshti University, Postal Code: 1983963113, Tehran Iran

Received 29 September 2007; accepted 18 October 2008

Abstract

Application of polymers in novel and advanced scientific technologies is increasingly expanding. In this regard, optical polymers among different materials have found a special and unique position. A novel dye doped polymer thin film was prepared by taking advantage of dye molecules' interaction with the host environment. This sample, like self-assembled structures, makes use of this interaction to increase the response intensity significantly, and thus improve the performance of photonic devices. This highly improved response is mainly due to the possibility of making highly concentrated dye doped polymeric samples. In this way, the function of optical polymers in photonic applications and its mechanism were studied. Laser induced birefringence and spectral measurements were used in these studies. Time dependencies of the sample were studied and no significant qualitative differences were observed. It was shown that highly doped samples perform their function qualitatively correct in nonlinear optical applications. Also, in comparison with the best international reports published in this field so far, a significant improvement in final results has been observed quantitatively. Overall, according to extensive spectral changes and remarkable induced birefringence, this method is known as an effective way to construct improved photonic devices.

Key Words

polymer thin film,
nonlinear organic dye,
intermolecular interaction,
highly doped polymer devices,
laser induced birefringence.

(* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: e-mohajerani@sbu.ac.ir

مقدمه

امروزه پلیمرها بیش از پیش در حوزه های مختلف فناوری مورد استفاده قرار می گیرند و کاربردهای جدید و متنوع آنها سبب می شود که دانشمندان عرصه های مختلف علوم نیز به بررسی هر چه بیشتر این مواد بپردازند. خواص ویژه اپتیکی پلیمرها چه در حوزه فرایندهای خطی و چه در اپتیک غیرخطی موجب شده است تا کاربردهای پلیمرهای نوری به اپتوالکترونیک، قطعات نیمه رسانا، ابزارهای نورگسیل، مبدل ها و کلیدها و سایر قطعات فوتونیک گسترش یابد [۱،۲].

ویژگی های غیرخطی منحصر به فرد رنگینه های آلی نیز جای گزینی بلورهای غیرخطی فعلی را با آنها بسیار محتمل ساخته است. از میان این مولکول های کوچک آلی، آروبنزن ها با توجه به خواص فوتوکرومیک ویژه قابلیت استفاده در کاربردهای متنوع را نشان داده اند. افزودن این ویژگی ها به خواص پیش گفته پلیمرهای نوری، منجر به ایجاد خانواده مهمی از مواد مورد استفاده در اپتیک به ویژه اپتیک غیرخطی می شود و در حوزه فناوری نیز نتایج درخشانی را به دنبال دارد [۳-۵].

روش های معمول افزودن مولکول های رنگینه به محیط پلیمری، دوپه کردن محیط میزبان با مولکول های ماده میهمان و نیز وارد کردن مولکول های ماده میهمان به ساختار شیمیایی محیط میزبان طی مجموعه ای از واکنش هاست. دوپه کردن سبب غلظت کم شده و روش دوم یعنی وارد شدن در ساختار شیمیایی، پیچیده و هزینه بر است [۵]. برهم کنش غیرکووالانسی که در شیمی ابرمولکولی، پلیمرهای خودسامان، لایه نشانی تبخیری و خودسامانی یونی مورد توجه است [۶]، می تواند برای جلوگیری از به هم چسبیدن رنگینه ها هنگام افزایش غلظت و بنابراین کارایی بهتر این قطعات مفید باشد. بدین ترتیب پاسخ پویا و زمانی تحرک مولکول های رنگینه نیز تغییر می کند.

در این پژوهش با بررسی برهم کنش رنگینه با میزبان، از آن برای بهبود کارایی قطعات فوتونیک مزبور استفاده شده است. بدین منظور علاوه بر بررسی های طیفی، در چیدمان بیضی سنجی، دوشکستی القایی لیزری در نمونه های بهینه اندازه گیری شده است. دوشکستی القایی لیزری در اپتیک غیرخطی پدیده ای است که با عبور پرتوی لیزر با طول موج و شدت مناسب از محیطی همسان گرد، در آن محیط پدید می آید و موجب می شود ضریب شکست در راستای قطبش این پرتوی عبوری، نسبت به حالت عادی تغییر کند و در نتیجه، محیط ناهمسان گرد شود [۴،۵].

بنابراین مواد مورد استفاده بر اساس این نگرش نو، انتخاب شدند. هم چنین، دست یابی به نمونه هایی با خواص ویژه و منحصر به فرد و به دنبال آن، مشاهده کارایی بهبود یافته آنها به عنوان قطعات فوتونیک مد نظر قرار گرفت. در ادامه نتایج این تلاش ها تحلیل شده است.

تجربی

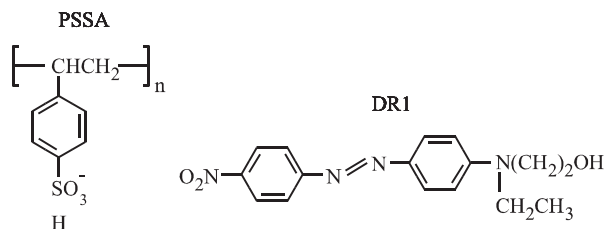
مواد و دستگاه ها

از پلی استیرن سولفونیک اسید (PSSA) محصول شرکت Aldrich به عنوان محیط میزبان استفاده شد. این پلیمر، خاصیتی اسیدی از خود نشان می دهد و معمولاً به شکل محلول آبی تهیه می شود. ماده فعال غیرخطی میهمان رنگینه آلی Disperse Red 1 یا DR1 محصول شرکت Aldrich بود که به دلیل خواص غیرخطی قابل توجه و حساسیت شکل هندسی آن به نور شناخته شده است [۵]. این رنگینه متعلق به گروه آروبنزن هاست. از آب مقطر به عنوان حلال استفاده شده است (شکل ۱). ضخامت سنج Dektak8000 برای اندازه گیری ضخامت، طیف سنج Ocean Optics HR4000 و منبع نوری دارای طیف وسیع ناقطبیده، برای برداشت طیف نمونه ها در گستره طول موجی زیرقرمز نزدیک تا فرابنفش به کار گرفته شد.

روش ها

ابتدا محلول DR1 در آب مقطر تهیه و سپس به منظور حذف ناخالصی ها صاف شد (۱٪ ناخالصی). محلول تهیه شده در هر بخش به منظور یکنواخت سازی، به مدت طولانی هم زده شد (با استفاده از فراصوت، هم زن مغناطیسی و هم چنین به شکل دستی) و به طور متناوب نیز گرم شد. پلیمر PSSA به حالت محلول آبی با غلظت ۳۰ درصد وزنی تهیه شد. این محلول به محلول آبی رنگینه اضافه و یکنواخت شد. سپس، از زیرلایه های شیشه ای که قبلاً به دقت شسته شده بودند، لایه های نازک پلیمری به روش های مختلف تهیه شدند. غلظت وزنی رنگینه نسبت به پلیمر در این نمونه ها حدود ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. یادآور می شود، تهیه نمونه ها به دلیل عدم فراریت حلال و غلظت زیاد رنگینه مشکل و زمان بر است.

سپس، ضخامت نمونه ها اندازه گیری و کیفیت سطح آنها بررسی شد. در مجموع و برای مقایسه، نمونه تهیه شده با پوشش دهی به روش غوطه ورسازی لایه نازک به ضخامت ۱۵۰ nm برای آزمایش انتخاب شد.



شکل ۱ - ساختار شیمیایی رنگینه DR1 و پلیمر PSSA.

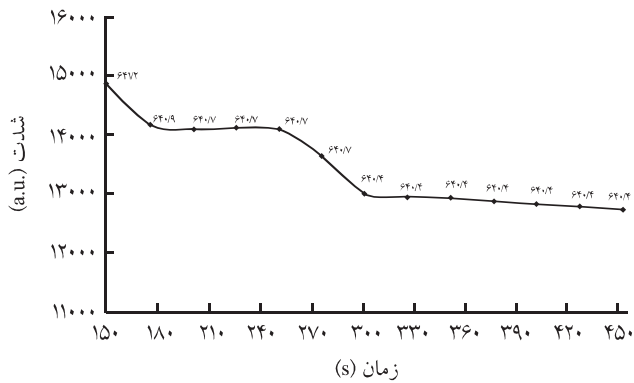
مولکول رنگینه، کمپلکس رنگینه - پلی الکترولیت پدید آورد. در چنین حالتی انتظار می‌رود که طیف در نواحی مرئی و زیرقرمز و نوسانات گروه SO_3^- دچار کشیدگی‌های متقارن و نامتقارن شده [7] و اضافه شدن هیدروژن مثبت به گروه آمین رنگینه طیف آن را تغییر دهد و نوسانات NH را تحریک کند [8]. تغییر قابل مشاهده دیگر، پهن شدن طیف جذبی است که می‌توان آن را به تشکیل گروه‌های به هم چسبیده مولکول‌های رنگینه نسبت داد یا آن را حاصل تغییر قطبیت محیط پیرامون رنگینه‌ها به طور موضعی دانست. وقتی غلظت نمونه‌ها زیاد می‌شود، قله جذب نیز بدون جابه‌جایی خاصی افزایش می‌یابد. این موضوع نشان‌گر آن است که اغلب مولکول‌های رنگینه به هم نچسبیده‌اند. اصولاً جفت شدن‌های اکسایونی سبب می‌شود که هنگام به هم چسبیدن مولکول‌های رنگینه به شکل‌های مختلف، مبتنی بر عواملی هم چون نوع مولکول و چگونگی قرارگیری مولکول‌ها در کنار هم، قله جذب به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر (به هم چسبیدگی نوع H) یا طول موج‌های بلندتر (به هم چسبیدگی نوع I) جابه‌جا شود [9]. با مشاهده طیف محلول رنگینه بدون افزودن پلیمر مشخص است که در غلظت‌های بسیار کم نیز جابه‌جایی به سمت آبی ناشی از به هم چسبیدگی رنگینه‌ها مشهود است. این امر با افزودن پلیمر تا حدی جبران می‌شود، زیرا به دلیل برهم‌کنش بین مولکولی میان محیط میزبان و رنگینه، این مولکول‌های کوچک آلی (طول حدود یک نانومتر) اندکی گیر افتاده و کمتر به هم می‌چسبند. هر چه این برهم‌کنش قوی‌تر باشد، این گیر افتادن افزایش یافته و به هم چسبیدگی کاهش می‌یابد. بنابراین، همان‌طور که انتظار می‌رود برای مختل نشدن طیف جذبی نمونه‌ها در سامانه‌های معمول باید غلظت کمتر از ۱۰ درصد باشد [5]. در حالی که در نمونه‌های تهیه شده غلظت بدون جابه‌جایی محسوسی به سمت آبی تا ۳۰ درصد افزایش یافته است. این امر بدان معناست که نسبت مولی رنگینه به پلیمر تقریباً ۱ به ۲ است و هر قطعه پلیمر به طور یک در میان، مولکول رنگینه‌ای را در خود درگیر ساخته است. گروه دیگری اخیراً توانسته‌اند مبتنی بر روش تولید هماهنگ دوم نوری و جذب سطحی، حد بالای این شیوه جلو‌گیری از به هم چسبیدگی رنگینه‌ها را حتی تا نسبت مولی ۱ به ۱ نیز اندازه‌گیری کنند [9].

بررسی دوشکستی القایی به وسیله لیزری در طول موج جذبی رنگینه مورد استفاده نیز کارایی مطلوب نمونه‌های بسیار دوپه شده را نشان می‌دهد. مولکول‌های رنگینه آزوی DR1 با جذب نور تابشی برانگیزش که در ناحیه جذب شکل هندسی پایدار ترانس مولکول قرار دارد، به حالت ناپایدار سیس می‌روند (که در ناحیه قرمز اندکی جذب دارد و جذبش در ناحیه سبز کمی کمتر است) و پس از اندک زمانی دوباره به

در مراحل مختلف آزمایش به کمک طیف سنج و منبع نوری دارای طیف وسیع ناقطبیده، طیف نمونه‌ها در گستره طول موج زیرقرمز نزدیک تا فرابنفش برداشت شد. طی آزمایش نیز تغییرات طیفی پرتوی خروجی به دقت پایش شد. به منظور سنجش کارایی غیرخطی لایه‌های نازک پلیمری تهیه شده به روش مزبور، دوشکستی القایی به وسیله لیزر در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. بدین منظور نمونه‌ها در چیدمان آزمایشی روش بیضی‌سنجی قرار گرفتند و از تابش قطبیده خطی پرتوی لیزر هماهنگ نوری دوم نئودیمیوم یگ (Nd-YAG) (532 nm) برای القای دوشکستی در آنها استفاده شد. توان این باریکه حدود 30 mW بود. باریکه تابشی لیزر دیودی (640 nm) انتخاب شد که به عنوان پرتوی کاونده تغییرات دوشکستی را اندازه‌گیری کند. توان آن حدود 19 mW بود. این پرتو پس از عبور از قطبنده خطی که راستای قطبش آن 45 درجه با قطبش پرتوی برانگیزش اختلاف داشت، به طور عمود به سطح نمونه رسیده و پس از عبور از آن، با عبور از قطبنده خطی دیگری که راستای قطبش آن با راستای قطبش پرتوی برانگیزش زاویه 45- درجه می‌ساخت، به آشکارساز می‌رسید. پهنای باریکه لیزر برانگیزش روی نمونه (حدود 4 mm) بزرگ‌تر از پهنای باریکه کاونده (حدود 2 mm) در نظر گرفته شد تا تنها بخشی از نمونه که برانگیخته شده بود، بررسی شود.

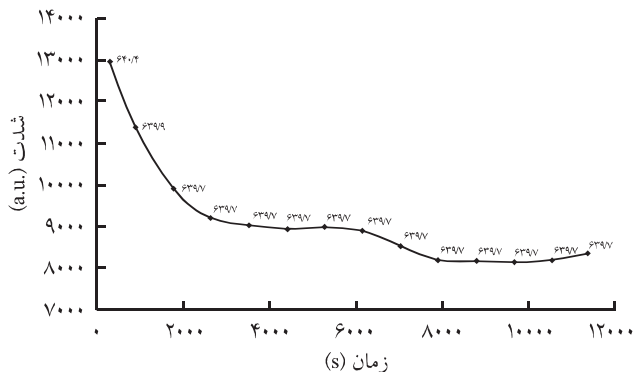
نتایج و بحث

در طیف نمونه‌ها، بر خلاف انتظار اولیه، قله جذبی عمدتاً در طول موج‌های حدود 520 nm قرار دارد. اغلب رنگینه‌های آلی غیرخطی جذبی در ناحیه آبی - سبز دارند و منشأ آن پایین‌ترین تراز یگانه مولکولی است که عامل گذار انتقال بار مولکولی است [5]. جابه‌جایی از این ناحیه به سمت قرمز از برهم‌کنش گروه‌های عاملی پلیمر میزبان با گروه‌های عاملی رنگینه حاصل می‌شود. در نمونه‌های تهیه شده تغییرات بسیار مشهود هستند. این امر تا بدان جاست که یک نوار جذبی جانبی در حدود 550 nm هم اضافه شده است که حاکی از وجود برهم‌کنشی قوی بین پلیمر میزبان و مولکول‌های رنگینه است. با نگاهی به ساختار شیمیایی رنگینه و پلیمر مورد استفاده، مشخص می‌شود که رنگینه گروه‌های فعالی از جمله گروه آمینی دارد که سه پیوند برقرار کرده و با داشتن جفت الکترون تنها، رفتاری بازگونه دارد و کاملاً قطبی و در حالت عادی تقریباً میله‌ای شکل است. در پلیمر PSSA گروه عاملی با خاصیت اسیدی موجود است که می‌تواند با دادن هیدروژن مثبت به



شکل ۳- واهلش دوشکستی القایی در کوتاه مدت (شدت و طول موج قله پرتو کاونده خروجی).

مولکول‌هایی که عمود بر راستای قطبش پرتوی برانگیزش جهت‌گیری می‌کنند، دیگر برانگیخته نمی‌شوند. اما، مولکول‌هایی که در جهتی دیگر به حالت پایدار برگشته‌اند، دوباره به حالت سیس برانگیخته می‌شوند. این فرایند به تدریج موجب می‌شود که مولکول‌های بیشتری در راستای عمود بر قطبش پرتوی برانگیزش باز جهت‌یابی کنند و بدین ترتیب، دوشکستی القایی را افزایش دهند. افزایش دوشکستی سبب می‌شود تأخیر فاز بیشتری بین دو مؤلفه قطبش تابش کاونده ایجاد شود. در نتیجه، شدت پرتوی کاونده خروجی از قطبند دوم که پیش از آشکارساز قرار گرفته، افزایش می‌یابد (شکل ۲). وقتی تابش پرتوی برانگیزش متوقف می‌شود، ابتدا فرایند تند بازگشت مولکول‌ها از حالت سیس به ترانس رخ می‌دهد و موجب کاهش دوشکستی و در نتیجه، شدت پرتوی کاونده خروجی می‌شود (شکل ۳). سپس، به تدریج اثر فرایند بازجهت‌یابی مولکولی از بین می‌رود، یعنی مولکول‌ها جهت‌گیری خود را از دست داده و به طور اتفاقی در جهت‌های مختلف قرار می‌گیرند. این فرایند کندتر است و نیز موجب کاهش دوشکستی و



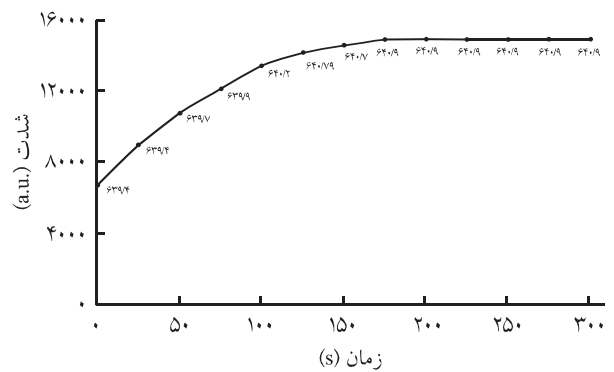
شکل ۴- واهلش دوشکستی القایی در بلند مدت (شدت و طول موج قله پرتو کاونده خروجی).

حالت اول باز می‌گردند. طی این فرایند، جهت‌گیری مولکول تغییر می‌کند و این امر تا آن‌جا ادامه می‌یابد که مولکول بر قطبش نور برانگیزش عمود شود. بدین ترتیب، با توجه به میله‌ای شکل بودن مولکول و تناسب ضریب جذب با زاویه دوقطبی گذار آن با قطبش نور برانگیزش، مولکول از چرخه برهم‌کنش خارج می‌شود [۵،۱۰]. این پدیده به نوبه خود سبب می‌شود، نور کاونده که تصویر قطبش آن در راستای قطبش نور برانگیزش و عمود بر آن (راستای باز جهت‌یابی رنگینه‌ها) برابر است، در این دو راستا با ضریب شکست‌های متفاوتی مواجه شده و در نتیجه هنگام خروج از نمونه قطبشی متفاوت یابد. قطبند پیش از آشکارساز در جهت عمود بر قطبند پیش از نمونه قرار گرفته و بنابراین در صورتی که دوشکستی وجود نداشته باشد، تقریباً نوری را عبور نمی‌دهد (توانی حدود $5/2 \mu W$).

در عمل مشاهده می‌شود که شدت نور رسیده به آشکارساز پس از آغاز برانگیزش، افزایش می‌یابد. از آهنگ این افزایش به تدریج کاسته می‌شود (شکل ۲).

پس از قطع تابش پرتوی برانگیزش، فرایند عکس می‌شود و از شدت نور رسیده به آشکارساز کاسته می‌شود. این کاهش ابتدا سریع است و کم‌کم کندتر می‌شود (شکل‌های ۳ و ۴)، اما در هر دو حال آهسته‌تر از تغییرات مشاهده شده در مرحله برانگیزش است (شکل ۵).

در ابتدا، مقدار دوشکستی القایی در محیط با رفتن مولکول‌های رنگینه از حالت پایدار ترانس به حالت ناپایدار سیس، افزایش می‌یابد. هر چه زمان بیشتری از آغاز تابش برانگیزش می‌گذرد، با تحت تأثیر قرار گرفتن مولکول‌های بیشتر، دوشکستی هم‌پیش از پیش مشهود می‌شود. این فرایند به تندی رخ می‌دهد. به جز این اثر، باز جهت‌یابی مولکولی که فرایندی کندتر است نیز، در نتیجه حاصل مؤثر است. مولکول‌های برانگیخته به تندی به حالت پایدار اما در جهتی اتفاقی باز می‌گردند.



شکل ۲- افزایش دوشکستی القایی در برانگیزش (شدت و طول موج قله پرتو کاونده خروجی).

متفاوت است، اما در مقام مقایسه با شرایط مشابه در آزمایش های قبلی گروه و نیز سایر گزارش های منتشر شده بین المللی تا کنون، در مجموع افزایشی به میزان یک مرتبه بزرگی را نشان می دهد [۵،۱۰].

به جز شدت، اندک تغییرات طیفی نور خروجی را که به شکل یک جا به جایی به قرمز (حدود ۳ nm) و پهن شدگی ظاهر می شود، می توان مبتنی بر تغییرات شکل طیف جذبی نمونه با توجه به افزایش تعداد ایزومرهای سیس هنگام برانگیزش و کاهش برهم کنش رنگینه ها با میزبان در این اثنا توضیح داد. تشریح دقیق این امر نیاز به بررسی های بیشتر دارد.

نتیجه گیری

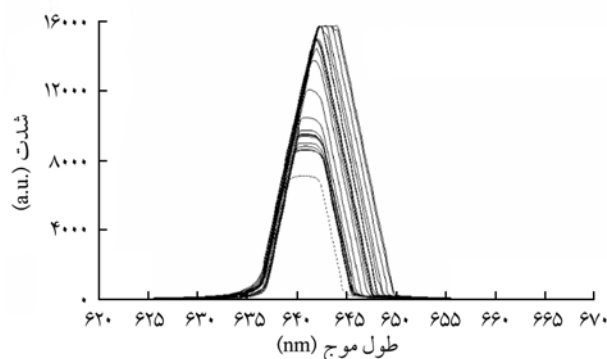
در این پژوهش به وسیله بررسی برهم کنش مولکول های رنگینه با محیط میزبان، راه آسان و ارزان بهبود کارایی قطعات فوتونیک پلیمری و افزایش شدت پاسخ آنها، انتخاب مطلوب مواد میهمان و میزبان برای افزایش برهم کنش غیر کووالانسی میان آنها و در نتیجه امکان افزایش مقدار رنگینه تا نسبت های مولی بسیار زیاد شناخته شد. بدین منظور بررسی های طیفی و تحلیل آنها انجام شد. هم چنین دوشکستی القایی لیزری در نمونه ساخته شده به این روش، در چیدمان بیضی سنجی اندازه گیری شد. عملکرد صحیح قطعه در این غلظت زیاد (کیفی) و بازده بالای عملکرد آن (کمی) قابل توجه است. از آن جا که انتظار می رفت، رفتارهای پویای نمونه تهیه شده به این روش نیز تغییر کند، تحولات زمانی پاسخ های مورد اشاره نیز تحلیل شد که تفاوت کیفی محسوسی دیده نشد.

قدردانی

از مرکز تحقیقات مخابرات ایران به دلیل حمایت از انجام این طرح پژوهشی تشکر می شود.

مراجع

1. Schnabel W., *Polymers and Light*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, Chap.1, 2007.
2. Lee K.S., *Advances in Polymer Sciences: Polymers for Photonics Applications*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, Chap. 1-3, 2002.
3. Dalton L.R., *Rational Design of Organic Electro-Optic Materials*,



شکل ۵- طیف پرتوی کاونده خروجی طی زمان آزمایش (طیف پیش از آغاز برانگیزش با خط چین رسم شده است).

در نتیجه، شدت پرتوی کاونده خروجی می شود (شکل ۴).

پس به طور خلاصه فرایندهای درگیر در این پدیده، برانگیختگی یا واهلش تند حالت سیس و باز جهت یابی کند مولکولی یا از دست دادن آن است. فرایند رفت در اثر نور برانگیزش رخ می دهد، اما فرایند بازگشت تنها بر اثر تحرک تصادفی گرمایی مولکول ها انجام می شود و به طبع آهسته تر است. ثابت های زمانی این رفتار پویا کاملاً تحت تأثیر برهم کنش با میزبان، حلال مورد استفاده و مقدار گیر افتاده آن در لایه و هم چنین دماست. در نهایت نیز مقدار نور خروجی به حالت اولیه بسیار نزدیک می شود، ولی کاملاً بدان باز نمی گردد. این امر حاکی از فرایندهای برگشت ناپذیری هم چون شکستن تعداد کمی از مولکول های رنگینه در اثر تابش است و اندک تغییر رنگ نمونه در ناحیه مورد نظر نیز مؤید آن است.

بنابراین، همان طور که از نمودارهای شدت پرتوی خروجی مشهود است، رفتار کلی نمونه از جهت های مختلف، تغییرات کیفی قابل ملاحظه ای را نشان نمی دهد و کارایی معمول قطعه حفظ شده است [۵،۱۰]. تنها تفاوت اساسی، در مقدار دوشکستی القا شده در نمونه است که اگر چه در نمونه های مختلف بسته به ویژگی های خاص هر یک

J. Phys. Condense. Matter, **15**, R897-934, 2003.

4. Moliton A., *Optoelectronics of Molecules and Polymers*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, Chap. 1, 2006.

5. Yesodha S.K., Pillai C.K.S., and Tsutsumi N., *Stable Polymeric Materials for Nonlinear Optics: A Review Based on Azobenzene Systems*, *Prog. Polym. Sci.*, **29**, 45-74, 2004.

6. Ikkala O., Ten Brinke G., Functional Materials Based on Self-Assembly of Polymeric Supramolecules, *Science*, **295**, 2407-2409, 2002.
7. Chen W., Sauer J.A., and Hara M., Morphology and Deformation Behavior of Polymer Blends Made of Poly(Styrene-co-Styrene-sulfonic Acid) and Poly(Methyl Methacrylate-co-4-Vinylpyridine), *Polymer*, **45**, 7219-7227, 2004.
8. Socrates G., *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies*, John Wiley & Sons, Chichester, England, Chap. 1, 2001.
9. Priimagi A., Cattaneo S., Ras R.H.A., Valkama S., Ikkala O., and Kaurann M., Polymer-Dye Complexes: A Facile Method for High Doping Level and Aggregation Control of Dye Molecules, *Chem. Mater.*, **17**, 5798-5802, 2005.
10. Mohajerani E. and Hosein Nataj N., Studying the Temperature Dependence of the Laser Induced Birefringence in Azo Dye Doped Polymer Films, *Optic. Mater.*, **11**, 29-32, 2007.