

اثر پلیمرها بر خواص نوری غیر خطی فیلمهای پلیمری دوپه شده با رنگهای آلی

The Role of Polymer Matrix in Nonlinear Optical Properties of Dye Doped Polymer Films

عزالدین مهاجرانی^۱، جفری میچل^۲

۱- جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، ۲- دانشگاه ری‌دینگ، مرکز علوم پلیمر، انگلستان

دریافت: ۷۶/۱۶/۱، پذیرش: ۷۳/۷/۶

چکیده

نقش پلیمرها در دو پدیده غیر خطی تولید هماهنگ دوم (SHG) و ترکیب چهار موج هم تراز (DFWM) در فیلمهای پلیمری دوپه شده با رنگهای آلی بررسی شده‌اند. در این دو پدیده نقش پلیمر تثبیت رنگسازها (از نظر دو مختصه فضایی و جهت‌یابی) به گونه‌ای است که امکان چرخش آنها در صورت لزوم آزاد باشد. جهت‌یابی رنگسازها در این دو پدیده به شکلهای متفاوت مطرح است. در SHG رنگسازها در ساختار شیشه‌ای پلیمر قفل می‌شوند و بدین ترتیب جلوی جهت‌یابی مجدد آنها به حالت تصادفی گرفته می‌شود. هر محدودیتی روی رنگسازها پایداری جهت‌یابی آنها را که برای مشاهده هر پدیده درجه دومی اساسی است، افزایش می‌دهد. در اثر برهم کنش رزونانسی نور لیزر با فیلمهای پلیمری دوپه شده، جهت‌یابی ترجیحی رنگسازها پیش می‌آید. معلوم شده است که مکانیسم این نوع جهت‌یابی با پدیده ایزومری در رنگهای مربوط قابل توصیف است. در این حالت نقش پلیمر تثبیت رنگسازها در فیلم پلیمری بدون جلوگیری از جهت‌یابی نور القایی و با حذف جهت‌یابی مجددی است که توسط گرما القا می‌شود.

در این مقاله، نقش پلیمر در هر دو مورد با مطالعه اثر اتصال مولکولهای فعال آلی به رشته پلیمری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: اپتیک غیر خطی، تولید هماهنگ دوم، ترکیب چهار موج هم تراز، فیلم پلیمری دوپه شده با رنگ

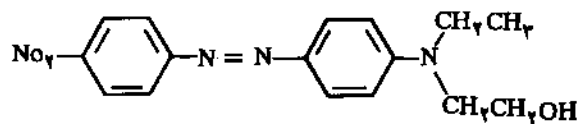
Key Words: nonlinear optics, second harmonic generation, degenerate four wave mixing, dye doped polymer film

مقدمه

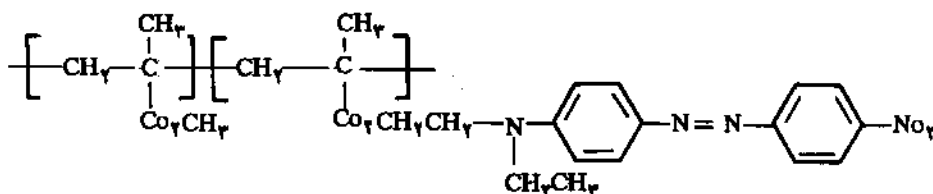
مواد زیادی وجود دارند که به عنوان محیطهای فعال نوری غیر خطی به کار می‌روند و هر کدام برای کاربردی مناسب هستند. کار روی مواد جدید برای تقویت آثار نوری غیر خطی مختلف هدف بسیاری از پژوهشگران است. معلوم شده است که برخی مواد آلی خصوصیات نوری غیر خطی بالایی نشان می‌دهند [۱، ۲]. در این مقاله نتایج آزمایشهای انجام شده روی گروه خاصی از مواد آلی ارائه می‌شود. این مواد شامل گروههای الکترون ده و الکترون پذیرند که با یک

سیستم الکترونی π به هم مربوط شده‌اند و به دلیل تحرک بالای الکترونها π قطبش پذیری (polarisability) نوری غیر خطی درجه دوم بالایی دارند [۳].

هرچند این قبیل رنگسازها دارای خواص نوری غیر خطی بالایی هستند، ولی مشکل می‌توان بلورهای بدون نقص و مناسبی را با استفاده از آنها ساخت. وارد کردن این مولکولهای فعال در پلیمرهای شیشه‌ای و تشکیل یک سیستم میهمان-میزبان (guest-host system)



(الف)



(ب)

شکل ۱- ساختار شیمیایی رنگساز DSR1 (الف) و پلیمر PMMA - DSR1 (ب).

این گروه مواد اخیراً در پدیده‌های رزونانسی درجه سوم (resonant third order phenomena) مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸ ، ۹]. برهم کنش رزونانس نور لیزر با فیلمهای پلیمری ممکن است برای ایجاد موج با فاز مزدوج (phase conjugate wave) از راه ترکیب چهار موج هم تراز، DFWM (Degenerate Four Wave Mixing)، به کار رود. این فرایند را می‌توان به صورت ایجاد دو مجموعه شبکه لیزر القایی (Laser induced grating) توضیح داد. در این پدیده پلیمر نقش حساسی در رفتار مولکولهای فعال آلی در واکنش با نور لیزر دارد.

تجربیه

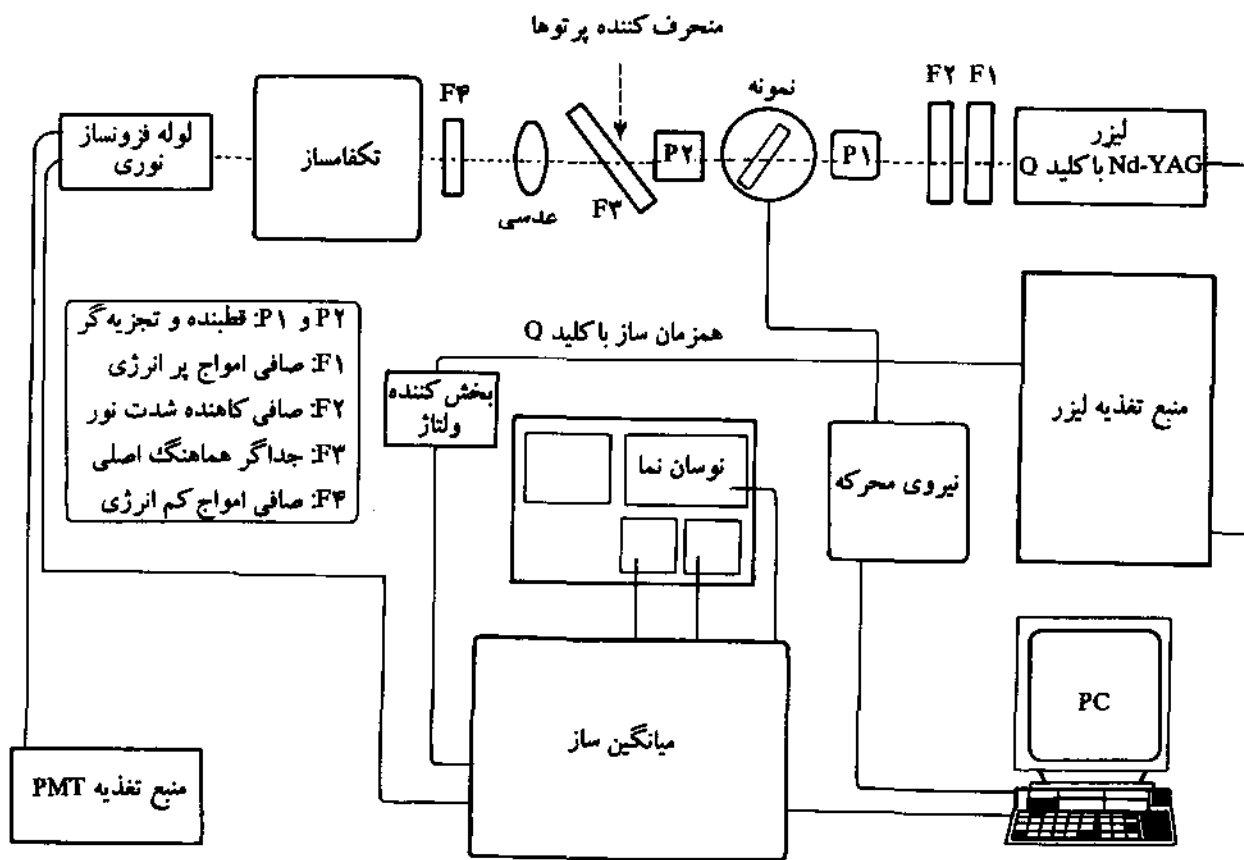
در این بخش مواد و تهیه فیلم و روشهای بررسی آثار درجه دوم و سوم مورد بحث قرار می‌گیرد.

مواد و تهیه فیلم

در این کار رنگ آلی DSR1 (Disperse Red1) به دو روش با پلیمر PMMA (پلی متیل متاکریلات) آمیخته شده است. بخشی از فیلمها با مخلوط کردن ساده رنگ و پلیمر ساخته شده‌اند که در ارائه مقاله فیلمهای پلیمر DSR1 نامیده می‌شوند. در بخش دیگر، مولکولهای DSR1 به طرز شیمیایی در پیکره پلیمر تثبیت شده‌اند که از این دسته فیلمها با نام DSR1-PMMA یاد می‌شود. درصد مولی DSR1 در پلیمر برابر با ۱/۳ بوده است [۱۰]. ساختار شیمیایی DSR1 و پلیمر

مزیت شکل پذیری پلیمر را به همراه دارد که در این صورت امکان تهیه موجرها (wave guides) با استفاده از این مواد نیز مقدور می‌شود. پلیمرهای شیشه‌ای مواد بی‌شکلی هستند که وارد کردن مولکولهای آلی در آنها منجر به یک ساختار متقارن می‌شود که برای مشاهده آثار درجه دوم مناسب نیست. پلیمرهای نظم یافته از لحاظ جهت‌یابی مولکولهای فعال از سوی ویلیامز پیشنهاد شده است [۴]. وقتی یک میدان الکتریکی جریان مستقیم (DC) روی یک فیلم نازک پلیمر دوپه شده با رنگ آلی در دمایی نزدیک به دمای انتقال شیشه‌ای اعمال می‌شود، مولکولهای فعال توسط میدان الکتریکی می‌چرخند که این جهت‌یابی با سرد کردن فیلم تا فاز شیشه‌ای می‌تواند حفظ شود. به این عمل قطب دهی میدان الکتریکی (electric field poling) می‌گویند.

در پلیمرها، مولکولها در دمای اتاق هنوز تحرک کافی را برای بازگشت یا آسایش مجدد به وضعیت تصادفی و ایجاد ساختار همسانگرد دارند [۵]. از دست رفتن آرایش مولکولها در دمای زیر دمای انتقال شیشه‌ای به حجم آزاد محلی (local free volume) و همچنین به ابعاد مولکولها بستگی دارد. وجود هر مانعی در مولکولهای فعال جهت‌یابی مجدد مولکولهای فعال به وضعیت تصادفی را محدود می‌کند. این موانع ممکن است توسط خود مولکول به دلیل ساختار آن (مثلاً طولانی و مسطح بودن مولکول) ایجاد شود [۶] یا به علت چگونگی ارتباط مولکول با پیکره پلیمر (مثلاً در مورد پلیمرهای دارای زنجیرهای جانبی و پلیمرهای دارای پیوندهای عرضی) باشد [۷].



شکل ۲ - قسمتهای مختلف دستگاه تولید هماهنگ دوم.

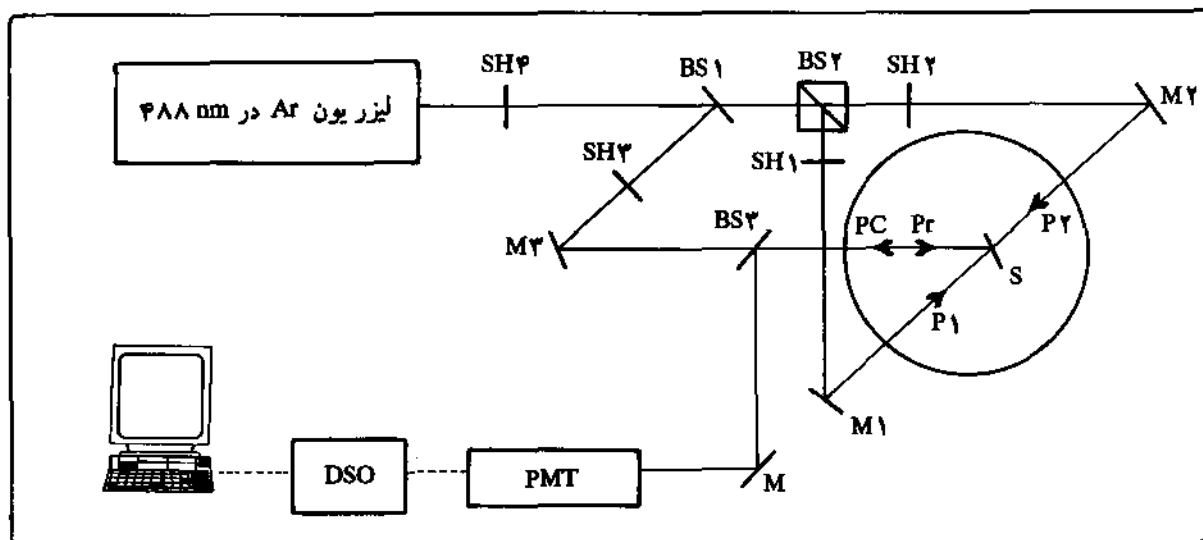
مشترک مناسبی است.

روش بررسی آثار درجه دوم

عدم تقارن مورد نیاز برای مشاهده خواص نوری غیرخطی درجه دوم فیلمهای پلیمری از راه قطب دهی میدان الکتریکی تامین شده است [۱۱]. برای این منظور فیلم بین دو الکترود رسانا قرار داده شده و شیشه با پوششی از اکسیدهای قلع و ایندیم (Baltracon Z10) به عنوان زیرسازه و الکترود پایینی به کار رفته است. الکترود بالایی از فیلم پوشیده از طلا، که به روش بیرون اندازی (sputtering) ایجاد شده، تشکیل یافته است. پس از آن، نمونه فیلم در یک آن کوچک مجهز به

DSR1-PMMA در شکل ۱ نشان داده شده است. فیلمهای DSR1-PMMA با درصد مولی مشابه پلیمر DSR1 ساخته شده اند. DSR1 با خلوص ۹۵ درصد از آلدریج و PMMA از BDH تهیه شده است. DSR1 پس از حل شدن در دی کلرو متان از صافی ۰/۴۵ میکرومتری عبور داده شده، ولی پلیمر به همان شکل تجاری مورد استفاده قرار گرفته است.

فیلمها با استفاده از روش غوطه وری تهیه شده اند [۱۰، ۱۱]. در این روش زیر سازه شیشه ای تمیز با سرعتی حدود ۰/۰۱ متر بر ثانیه به طور یکنواخت از محلول شامل رنگ و پلیمر بیرون کشیده می شود. دی کلرو متان در هر دو حالت، حلال



شکل ۳- قسمتهای مختلف دستگاه DFWM. در این شکل BS بخش کننده باریکه M آینه، SH1 متوقف کننده باریکه S، نمونه DSO نوسان نمای ذخیره ای، PMT فزونساز نوری و همچنین P1، P2، Pr و PC به ترتیب باریکه ها، موج سوم و موج فاز مزدوج می باشند [۱۲].

روش بررسی آثار درجه سوم برای مشاهده آثار درجه سوم به هیچ نوع تقارنی نیاز نیست. بنابراین، فیلمهای ساخته شده مستقیماً می توانند به کار روند. برای این آزمایشها، فیلمها پس از تمیز شدن روی اسلاید میکروسکوپ نشانداده شده اند.

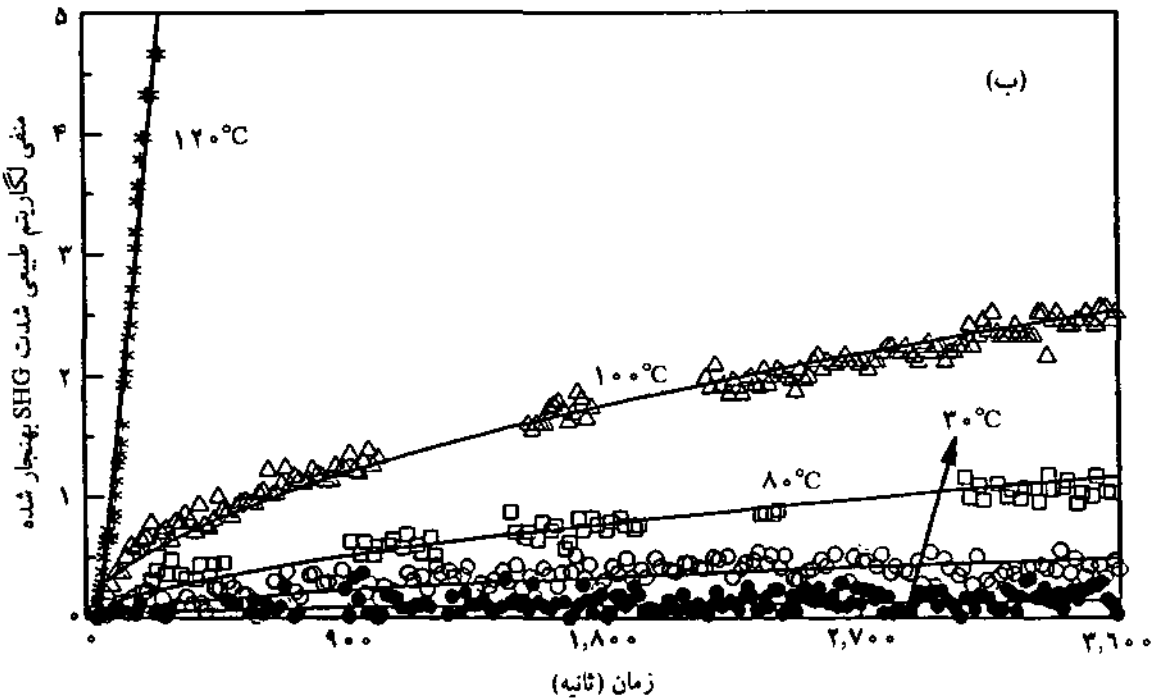
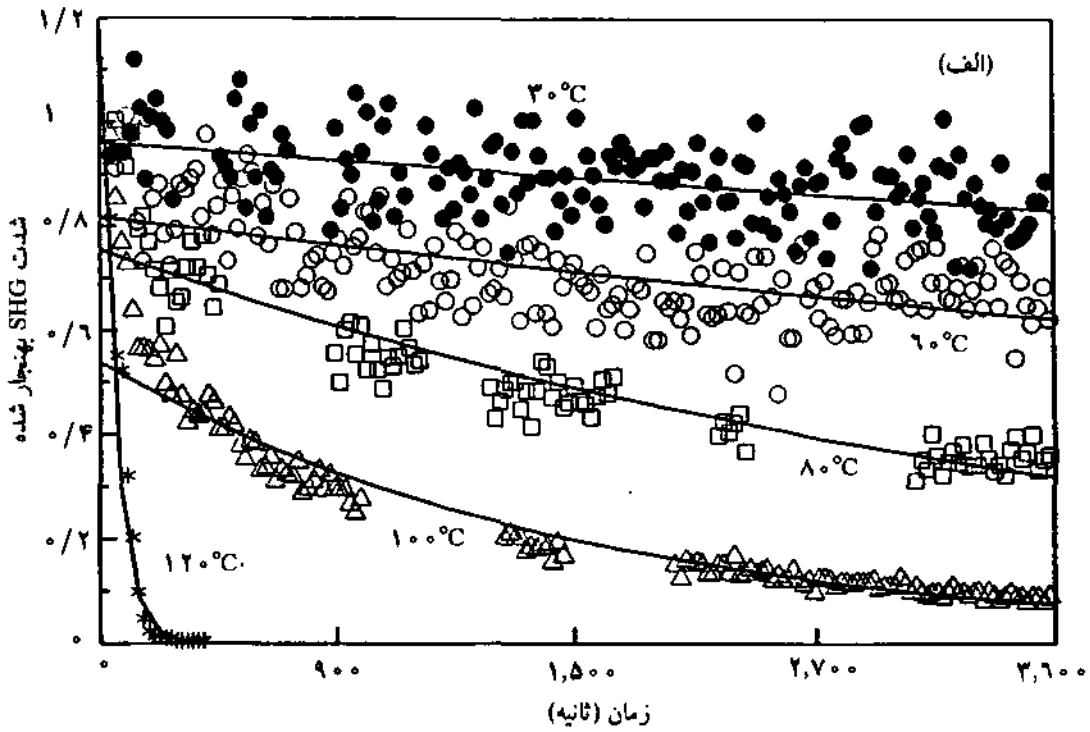
بخشهای مختلف این دستگاه، که بر مبنای نمونه استاندارد دارای دو باریکه پمپ انتشار دهنده متقابل (counter-propagating pump beam) است [۱۲] در شکل ۳ نشان داده شده است. یک باریکه لیزر پوسته یون Ar که قطبیده عمودی است با حداکثر خروجی حدود ۲۰ mW در ۴۸۸ nm به عنوان چشمه نور به کار رفته است (Spectra Physics Inc. ۱۶۲A-۰۷). برای این آزمایشها دو ترکیب از باریکه های ورودی، از نظر قطبش، به کار رفته است. ترکیب ۱ مربوط به حالتی است که هر سه باریکه ورودی دارای قطبش عمودی هستند و ترکیب ۲ مربوط به حالتی است که قطبش باریکه سوم (Pr در شکل ۳) توسط یک صفحه نیم موج افقی شده است. در ترکیب ۲ تداخل بین هر یک از باریکه های P1 یا P2 (شکل ۳) با Pr یک شبکه قطبیده می سازد، در حالی که هر دو تداخل در ترکیب ۱ ایجاد شبکه شدتی (intensity grating) می کند [۱۰].

یک کنترل کننده و با دقت یک درجه سانتیگراد (Eurotherm 810) قرار داده شد و میدان الکتریکی توسط Vari-Pack SRS153 تامین شد.

تولید هم‌امانگ دوم (SHG، Second Harmonic Generation) برای ارزیابی خصوصیات درجه دوم به کار برده شد. اشاره می شود که مشاهده این پدیده فقط در محیطهای بدون مرکز تقارن مقدور است. بنابراین، این آزمایش وسیله حساسی برای بررسی جهت چرخش مولکولهای فعال در پلیمر است.

برای مشاهده SHG از لیزر Nd-YAG (Spectrum SL800) با طول موج ۱۰۶۴ nm، سرعت تکرار ضربه ۱۰ Hz و ضربه های ۱۰ ns و انرژی ۶۰ mJ استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک صفحه گردان، یک آون (مشابه آونی که در قطب دهی به کار می رود)، صافیهای مربوط، تکفامساز (monochromator)، فزونساز نوری و یک نوسان ناماست که به یک کامپیوتر وصل شده است. شکل ۲ قسمتهای مختلف این دستگاه یا مجموعه را نشان می دهد.

برای مطالعه چرخش مجدد مولکولهای فعال پس از قطب دهی، نمونه ها در خلال آزمایش SHG تا دماهای مشخصی گرم شدند.



شکل ۴- کاهش شدت نور SHG برای نمونه‌های DSR1-PMMA در دماهای مختلف: (الف) شدت SHG بهنجار شده که خط پر نشان دهنده برازش تابع نمایی است و (ب) منهای لگاریتم شدت SHG بهنجار شده که خط پر نشان دهنده برازش تابع توانی است. زمان صفر مربوط به زمان گذاشتن نمونه در آون بادمای یاد شده و شروع اندازه‌گیری SHG است. این زمان تقریباً ۱۰ دقیقه پس از قطع میدان قطب دهنده در دمای اتاق بود.

نتایج

تولید هماهنگ دوم

برای مشاهده اثر پلیمر روی ثبات جهت‌یابی مولکولهای فعال، نمونه‌ها پس از قطب دهی در طول مدت آزمایشهای SHG تا دماهای خاصی گرم شدند. این کار جهت‌یابی مجدد مولکولهای فعال به حالت تصادفی را تندتر می‌کند که در نتیجه امکان بررسی تغییرات در زمانهای کوتاه عملی می‌شود. اندازه‌گیریها روی نمونه‌های مشابه در حدود ۱۰ دقیقه پس از قطب دهی در شرایط مشابه (۵ دقیقه در ۱۱۰V و ۳۰ دقیقه سردکردن) انجام گرفت. شکل ۴ الف شدت SHG بهنجار شده برای چند نمونه مشابه از فیلم DSR1-PMMA را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. در این شکل خطهای پربهترین برازش نمایی (exponential fit) می‌باشند. روشن است که به استثنای نمونه‌ای که در ۱۲۰°C قرار داده شده است، تغییرات اولیه سریعتر از تابع نمایی پیش‌بینی شده است. در عوض به نظر می‌رسد که تابع نمایی کشیده (stretched exponential function) بهتر منطبق می‌شود [۱۳]. برای منطبق کردن داده‌ها با تابع نمایی کشیده $[exp-(t/\tau)^{\beta}]$ ، منهای لگاریتم طبیعی علامت SHG بهنجار شده محاسبه شده است. شکل ۴ ب تغییرات این پارامتر را بر حسب زمان نشان می‌دهد. خطهای پر در این شکل برازش توانی (power fit) می‌باشند. از این شکل پیداست که چگونگی بازگشت یا آسایش مولکولهای DSR1 به حالت تصادفی با مدل مبتنی بر تابع نمایی کشیده انطباق خوبی دارد. شکل ۵ نتایج آزمایشهای مشابه روی پلیمر DSR1 را نشان می‌دهد. از شکل ۵ ب پیداست که انطباق تابع نمایی کشیده در چرخش مولکولها در پلیمر DSR1، به خوبی DSR1-PMMA نیست. پارامترهای تابع توانی برای محاسبه دو پارامتر τ و β تابع نمایی کشیده می‌تواند به کار رود. شکل ۶ الف و ب تغییرات این دو پارامتر را بر حسب دما نشان می‌دهد. برای فیلمهای DSR1-PMMA، مقادیر ثابت زمانی آسایش (τ) مولکولها بدون هیچ گونه گذری در دمای انتقال شیشه‌ای (حدود ۱۰۰°C) با کاهش دما به صورت نمایی افزایش می‌یابد. روشن است که وقتی فیلم DSR1-PMMA به حالت مایع نزدیک می‌شود (بالای دمای انتقال شیشه‌ای) پارامتر β به یک نزدیک می‌شود. از سوی دیگر، ثابت زمان آسایش مربوط در فیلمهای پلیمر DSR1 نه تنها به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مورد فیلمهای DSR1-PMMA است، بلکه گذری در تغییرات با عبور از دمای انتقال شیشه‌ای نشان می‌دهد. مقادیر τ برای فیلمهای پلیمر DSR1 در دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای برابر یک نمی‌باشد که این نتیجه از شکل ۵ نیز به دست می‌آید.

ترکیب چهار موج هم تراز

برای بررسی اثر پلیمر بر تولید موج با فاز مزدوج در آزمایش DFWM،

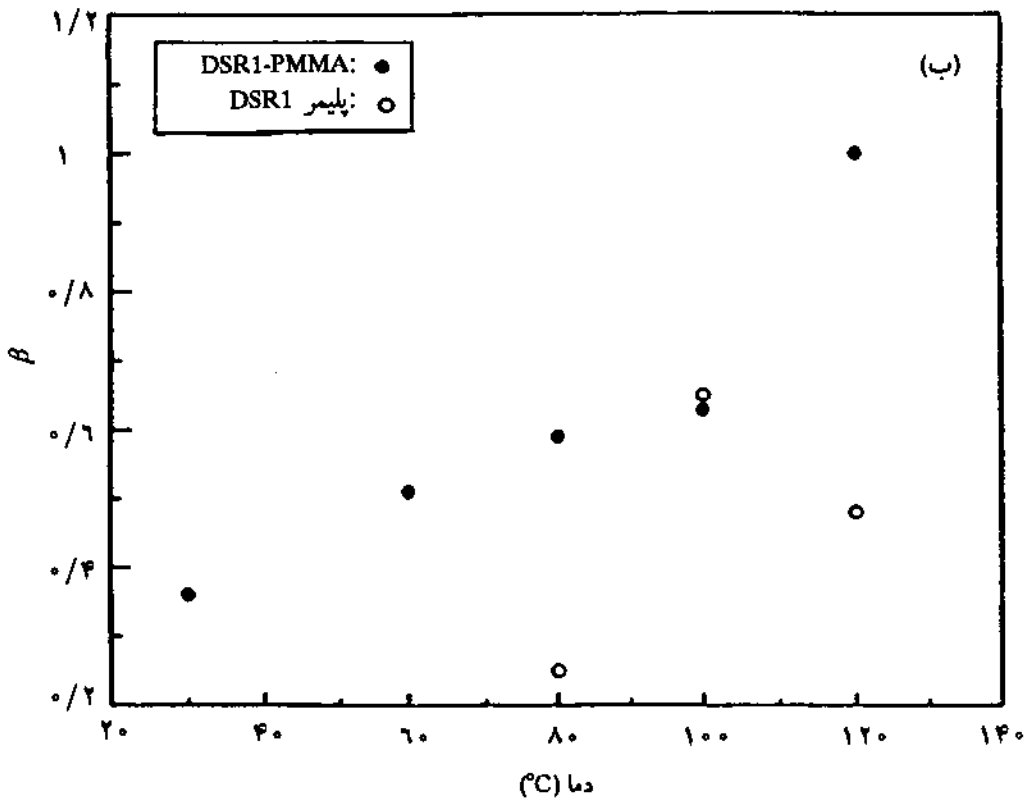
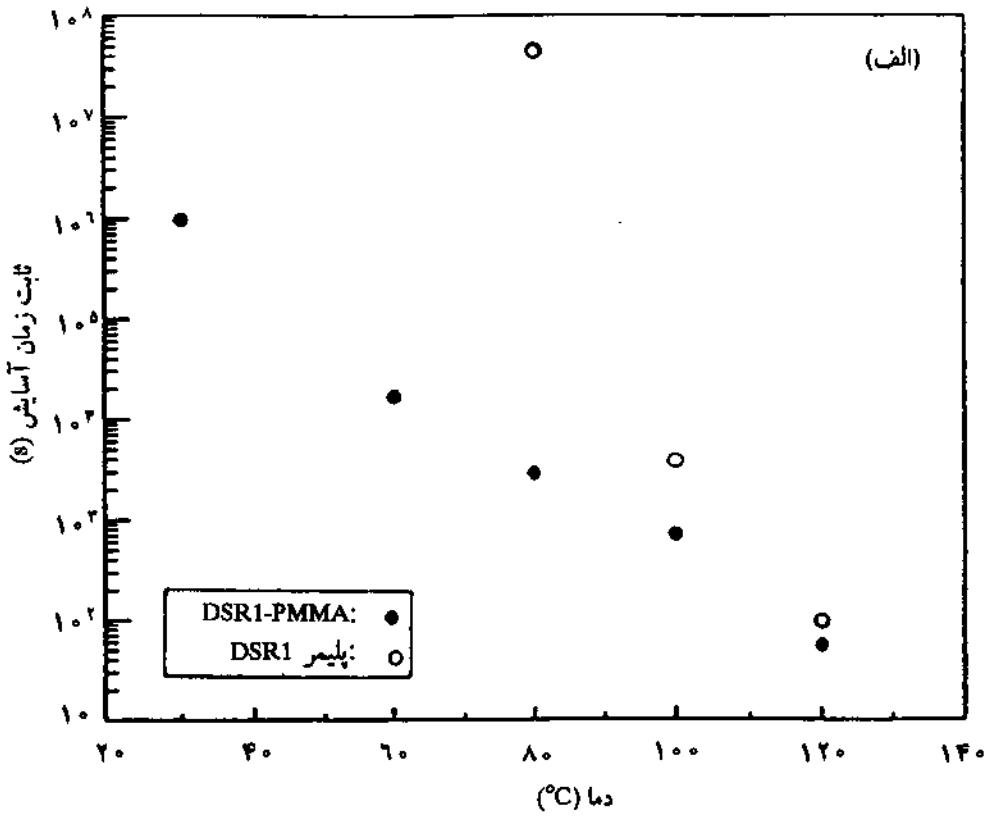
نتایج این آزمایشها برای چند نمونه ارائه شده است. شکل‌گیری و از بین رفتن موج با فاز مزدوج برای نمونه‌های DSR1-PMMA و پلیمر DSR1 در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که موج با فاز مزدوج تولید شده از نمونه پلیمر DSR1 شکل‌گیری و از بین رفتن کندتری نسبت به آزمایش مشابه روی نمونه DSR1-PMMA دارد. معلوم شده است که نمونه پلیمر DSR1 موج با فاز مزدوج را با شدت بیشتری نسبت به نمونه DSR1-PMMA تولید می‌کند [۱۰]. پاسخ (response) ناهمسانگرد این گونه مواد در برابر نور لیزر قطبیده باعث می‌شود که موج با فاز مزدوج ناشی از به کار بردن ترکیب قطبیده ۲ در آزمایش DFWM حتی شدیدتر از موج ناشی از ترکیب ۱ باشد.

در تمام آزمایشهای انجام شده فیلمها پس از خارج شدن کامل حلال (با قرار دادن در آون) مورد استفاده قرار گرفتند. ولی، آزمایش روی نمونه‌ای که هنوز دارای حلال بود نشان داد که ترکیب ۲ موج ضعیفتری نسبت به موج ناشی از کاربرد ترکیب ۱ ایجاد می‌کند. موج ضعیف حاصل از به کارگیری ترکیب ۲ با گذشت زمان و از بین رفتن حلال در فیلم بهتر شد. ولی، موج ایجاد شده با به کار بردن ترکیب ۱ در حلال از بین رفتن حلال تغییری نشان نداد.

بحث و نتیجه‌گیری

شکل ۴ الف نشان می‌دهد که برای نمونه‌های DSR1-PMMA فقط آسایش مولکولهای فعال به حالت تصادفی در ۱۲۰°C می‌تواند منطبق با تابع نمایی باشد. تابع نمایی کشیده می‌تواند اغلب این قبیل پدیده‌ها را توصیف کند [۱۴]. این واقعیت که β با افزایش دما به یک نزدیک می‌شود، نشان می‌دهد که توزیع با نزدیک شدن پلیمر به حالت مایع، باریکتر می‌شود [۵]. برای دماهای پایینتر از دمای انتقال شیشه‌ای فیلم پلیمری، مقدار β با افزایش دما به طور خطی افزایش می‌یابد. تغییرات به شکل تابع نمایی در نمونه‌ای که تا بالای دمای انتقال شیشه‌ای گرم شده است نشان می‌دهد که مولکولهای DSR1 در سیستم میزبان - میهمان ساده در یک محیط مایع به حالت تصادفی آسایش می‌یابند. سرعت کلی ایجاد حالت تصادفی در فیلمهای پلیمر DSR1 در هر دمایی به مراتب کندتر از فیلمهای DSR1-PMMA است (شکل ۵ الف) که دلیل آن حرکت محدودتر مولکولهای فعال در این سیستم است. مقدار β کمتر از یک برای دماهای بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای در فیلم پلیمر DSR1 و تغییر در روند تغییرات ثابت زمان آسایش در دماهای بالاتر و پایینتر از دمای انتقال شیشه‌ای، نشان دهنده آسایش اجزای تشکیل دهنده شیشه است. در حالی که عدم وجود چنین تغییری در فیلمهای DSR1-PMMA نشان می‌دهد که حرکات مولکولهای فعال در این حالت مستقل از زنجیر پلیمر است.

مکانیسمهایی که در ایجاد موج فاز مزدوج از راه DFWM



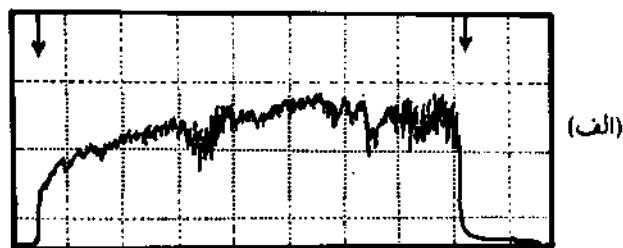
شکل ۶- (الف) ثابت زمان آسایش (z) و (ب) مقدار پارامتر β که از برازش تابع نمایی کشیده برای نمونه‌های DSR1-PMMA و پلیمر DSR1 به دست آمده است. خطا در اندازه‌گیری z و β به ترتیب در حدود ۵٪ و ۵٪/۰ بود.

نمی‌شود. برای بررسی بیشتر نقش پلیمر در ایجاد موج با فاز مزدوج، آزمایش روی فیلم دارای حلال انجام شد. حلال باقیمانده مثل یک عامل نرم کننده فیلم را نرم می‌کند. در ایجاد شبکه قطبیده نقش پلیمر حفظ جهت یابی مولکولهای فعال است. در این حالت که پلیمر نرم است، مولکولها برای چرخش آزادند. محیط نرم قادر به حفظ جهت یابی مولکولها نیست. بنابراین، برای شبکه قطبیده که در آن فرق بین مولکولهای فعال همسایه فقط جهت آنهاست، که در اثر قطبشهای متفاوت در نقاط مختلف ایجاد شده است، شبکه ایجاد نمی‌شود.

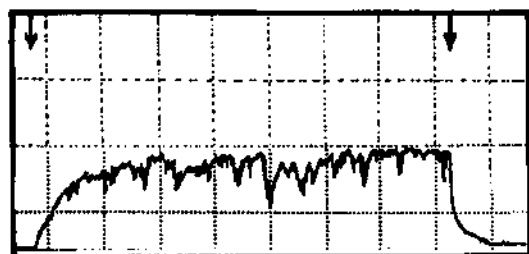
این مقاله در سمینار بین‌المللی علوم و تکنولوژی پلیمر نیز ارائه شده است.

مراجع

- 1 Prasad P.N. and Ulrich D.R. (eds.), *Nonlinear Optical and Electro-active Polymers*, Plenum, New York, 1988.
- 2 Heeger A., Orenstein A. and Ulrich D.R. (eds.), *Nonlinear Optical Properties of Polymers*, *MRS Symp. Proc.*, 109, 1988.
- 3 Oudor J.L., *Chem. Phys.*, **67**, 446, 1977.
- 4 Williams D.J., *Angew. Chem. Intl. Ed. Eng.*, **23**, 690, 1984.
- 5 Singer K.D. and King L.A., *J. Appl. Phys.*, **70**, 3251, 1991.
- 6 Dubois J.C., *Conjugated Polymeric Material*, Bredas J.L. and Chance R.R. (eds.), Kluwer Academic Publishers, 321, 1991.
- 7 Mohlman G.R., *Europhys. News*, **21**, 83, 1990.
- 8 Egami C., Nakagawa K. and Fujiwara H., *Japanese J. Appl. Phys.*, **29**, L1544, 1990.
- 9 Tomov I.V., VanWomterghem B., Dvornikov A.S., Dutton T.E. and Rentzepis P.M., *J. Opt. Soc. Amer. B*, **8**, 1477, 1991.
- 10 Mohajerani E., Wahle E. and Mitchell G.R., *Optics Comm.*, **92**, 403, 1992.
- 11 Mohajerani E., Gilbert A. and Mitchell G.R., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **25**, 1304, 1992.
- 12 Fisher R.A. (ed.), *Optical Phase Conjugation*, Academic Press, 1983.
- 13 Williams G. and Watts D.C., *Trans Faraday Soc.*, **66**, 80, 1970.
- 14 Scher H., Shlesinger M.F. and Rendler J.T., *Phys. Today*, **26**, Jan. 1991.



(الف)



(ب)

شکل ۷- شکل‌گیری و از بین رفتن موج با فاز مزدوج وقتی ترکیب قطبیده ۲ به کار رفته است: (الف) برای نمونه‌های DSR1-PMMA و (ب) پلیمر DSR1. پیکانها نشان دهنده زمان روشن کردن لیزر و قطع موج ورودی سوم است. زمان هر قسمت در محور زمان ۱۰ ثانیه برای هر دو نمونه و هر قسمت محور عمودی در (ب) چهار برابر (الف) است.

فیلمهای DSR1-PMMA برای ترکیبهای قطبیده مختلف دخیل هستند در مرجع ۱۰ مورد بحث قرار گرفته‌اند. در کل، این مکانیسم از پاسخ ناهمسانگرد فیلم پلیمری در برابر نور لیزر قطبیده متاثر است. در این گونه مواد ایجاد شبکه قطبیده به دلیل همین پاسخ مقدور است. این پاسخ نتیجه ایزومری شدن سپس و ترانس در رنگهای آزو است. در شبکه قطبیده که هیچ نوع تغییرات شدت نور در محدوده تداخل دو نور لیزر وجود ندارد تنها مکانیسم ایجاد شبکه، جهت‌یابی مولکولهای فعال به دلیل جهت قطبش نور در ناحیه تداخل است. در شبکه‌های شدتی این جهت‌یابی در مراحل اولیه نقشی در ایجاد موج خروجی ندارد [۱۰]. می‌باشد. نقش دوم حفظ جهت‌یابیهای خاص مولکولهاست. پلیمر نقش حساسی دارد، که نه تنها باید جلوی جهت‌یابی تصادفی مولکولهای فعال را بگیرد، بلکه باید با یک احتمال معقول جهت‌یابی مجدد نور القایی (photo induced) را مجاز سازد. در مورد مخلوط DSR1 و PMMA این نیروهای محدود کننده اساساً ناشی از برهم کنشهای وان‌دروالس بین پلیمر و مولکولهای فعال می‌باشند. ماهیت شیشه‌ای پلیمر جلوی حرکت‌های قطعه‌ای (segmental motions) را می‌گیرد. در نمونه‌های پلیمر DSR1 اتصال دائمی جلوی نفوذ یا جهت‌یابی مولکولهای فعال را تا حد زیادی می‌گیرد، ولی این اتصال مانع جهت‌یابی مجدد نور القایی