

# نور شکست در پلیمرها

## Photorefraction in Polymers

حبیب خوش‌سیدآباد، حبیب تجلی<sup>۱</sup>، علی‌اکبر انتظامی<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه تبریز، مرکز تحقیقات فزیک کاربردی، ۲- دانشگاه تبریز، دانشکده شیمی، آزمایشگاه فیزیک پلیمر

دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۲۶

### چکیده

اینک غیرخطی زمینه جدیدی از علوم و تکنولوژی است که بخش‌های زیادی از پدایش تکنولوژی فوتونیک دارند. فوتونیک که فوتونها را جهت برداش تصویر و اطلاعات نگار می‌گیرد، به‌نام تکنولوژی قرن ۲۱ نامگذاری شده است. در سالهای اخیر، مواد مولکولی و سیستمهای پلیمری به‌عنوان مجموعه جدیدی از مواد نوری غیرخطی که آینده روشنی دارند مطرح شده‌اند. به‌دلیل دارا بودن انعطاف‌پذیری، چه در سطح مولکولی و چه در سطح نوری، خاصیت غیرخطی بودن را به‌سهل می‌سازند، و علاوه بر آن سایر خواص لازم برای کاربردهای آوازی را باهمین می‌کنند.

یکی از پدیده‌های اینک غیرخطی، نور شکست است. وقتی نور از برخی پلیمرها عبور می‌کند، میدان نوری الکتریکی آن سه مهاجرت و جدایی حاملان باره الکترونها و حفره‌ها، می‌شود. اگر شدت نور فرودی بکواخت باشد، حاملان بار در نواحی با رانشایی کمتر به دام می‌افتند و میدانهای الکتریکی باز قضایی درونی ایجاد می‌کند. میدان الکتریکی بوجود آمده تغییرات ضریب شکست نور را در پلیمر سه می‌شود و این تغییر ضریب شکست، همانند شامپنگار، بر گردان فاز نور باعث است و اثر نور شکست نامیده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نور شکست، پلیمر نوری غیرخطی، پلیمر قطبی شده، پلی‌وینیل کاربازول، شامپنگاری

*Key Words: photorefraction, nonlinear optical polymer, poled polymer, polyvinyl carbazole, holography*

### مقدمه

تپه و تولید مواد نوری غیرخطی با توجه به کاربردهای متنوع آنها در لیزرها، ابزارهای الکترواپتیکی، تکنولوژیهای محاسباتی، پردازنده‌های نوری و کامپیوترها کثاری ضروری است. اینک غیرخطی زمینه گسترده‌ای از علم فیزیک را دربرمی‌گیرد که در آن استفاده از مواد دارای قابلیتها و خصوصیات گوناگون لازم است. مواد نور شکن نیز که روشن‌سازی غیر بکواخت آنها سبب تغییر ضریب شکستشان می‌شود از جمله این موادند. بنابراین، جا دارد که قبل از شروع بحث اصلی به پدیده اینک غیرخطی اشارهای شود تا جایگاه پلیمرها در رفع نیازهای فزاینده

به مواد نوری غیرخطی مشخص شود.

می‌دانیم که ضریب شکست یک محیط به آرایش اتمها و توزیع الکترونهاي آن وابسته است. وقتی ماده‌ای زیر تابش نور قرار می‌گیرد، بارهای الکتریکی موجود در آن، عمدتاً الکترونها به‌وسیله میدان الکتریکی پرتو نور تابیده به نوسان درمی‌آیند. این الکترونهاي متحرک به نوبه خود شروع به تابش کرده و میدانی الکتریکی تولید می‌کند که با میدان الکتریکی نور فرودی متناسب است. اگر شدت بار بکه فرودی کم باشد، به‌طوری‌که میدان الکتریکی نور در مقایسه با میدان سین اتمی خیلی کوچک باشد، می‌توان نشان داد که جنبه‌هایی فلز، به عبارت دیگر

ضریب شکست، مستقل از شدت پرتو است. این حالت در محدوده نورخطی قرار می‌گیرد.

زمانی که میدان الکتریکی نور قابل مقایسه با میدان الکتریکی بین اتمی باشد، توزیع الکتروتهای درون ماده می‌تواند به وسیله تابش تغییر یابد و این عمل به تغییر ضریب شکست منجر می‌شود. در این حالت، بازتابش و شکست در سطح جدایی و عبور یا تراگیل (transmission) در محیط به شدت نور فرودی وابسته خواهد بود و این در محدوده نور غیرخطی قرار می‌گیرد. به بیان ساده اپتیک غیرخطی (nonlinear optics, NLO) مطالعه برهم‌کنش پرتوهای نور در ماده است و به دلیل پاسخ غیرخطی مواد به دامنه میدان الکتریکی است که غیرخطی نامیده می‌شود. می‌دانیم که عبور بازیکه‌های نور در محیط مادی به ضریب شکست بستگی دارد. پس اگر ضریب شکست محیط بتواند توسط تابش بازیکه‌ای از نور کنترل شود، می‌توان انتشار پرتو نور را با پرتو نور دیگر کنترل کرد. این امر می‌تواند به نوع زیاد ابداعات تکنولوژیکی براساس کنترل نور به وسیله خود نور منجر شود.

در نظریه الکترومغناطیسی نور، پاسخ مواد به تابش نور با معادله زیر بیان می‌شود:

$$P = \epsilon_0 \chi_1 E + \epsilon_0 \chi_2 E^2 + \epsilon_0 \chi_3 E^3 + \dots \quad (1)$$

که در آن  $P$  قطب‌دهی القایی (induced poling) محیط،  $\epsilon_0$  ثابت دی‌الکتریک خلاء،  $E$  میدان الکتریکی نور و  $\chi_1$ ،  $\chi_2$  و  $\chi_3$  مقادیری ثابت است. خواص نوری غیرخطی محیط با پارامترهای  $\chi_1$ ،  $\chi_2$  و  $\chi_3$  به‌عنوان مشخص می‌شود. جمله مرتبه دوم  $\chi_2 E^2$ ، علت تولید هماهنگ‌دوم (SHG) یعنی دو برابر سازی فرکانس و نیز تولید فرکانس جمع، تفریق، تقویت و نوسان پارامتری است. جمله سوم  $\chi_3 E^3$ ، علت چند پدیده گوناگون، مانند تولید هماهنگ‌دوم سوم (THG)، پراکندگی رامان-بریلیون، خودکانونی و ترویج‌فازی نور (light phase conjugate) است.

تا پیش از سال ۱۹۶۱، یعنی قبل از کشف لیزرها، بسیاری از خواص نوری غیرخطی در سواد مشاهده نشده بود. نتایج تحقیقات علمی نشان می‌داد که در محدوده نورخطی، عبور، بازتاب و شکست نور در مواد شفاف نه تحت تاثیر شدت نور قرار می‌گیرد و نه از وجود یک نور دیگر متاثر می‌شود و در آن محدوده اصل برهم‌نهی (superposition principle) صادق است. از این رو، مواد شفاف با ضریب شکستی مشخص می‌شدند که به نظر می‌رسید مستقل از شدت نور باشد. بنابراین، دانشمندان نتیجه گرفتند که در ناحیه نورخطی، شدت نور خروجی همیشه تناسب مستقیم با شدت نور ورودی دارد و فرکانس نور خروجی همیشه برابر با فرکانس نور ورودی است. در اپتیک

غیرخطی خلاف این ثابت می‌شود که ابزار کنترل فرکانس و شدت پرتو نور را در اختیار می‌گذارد. بدین ترتیب، در بجه بزرگی به روی کاربردهای نوری جدید گشوده می‌شود.

## بحث

### نقش پلیمرها در اپتیک غیرخطی

پلیمرها، به دلیل مزایای زیادی که نسبت به مواد معدنی در کاربردهای اپتیک غیرخطی دارند، در صنایع مختلف اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. پلیمرها را می‌توان برای کاربردهای نوری غیرخطی مرتبه دوم و سوم ستر و طراحی کرد. خواص نظیر پایداری نوری، فیزیکی و همگنی، جذب و پخش کم، سازگاری با روشهای میکروالکترونیک و خواص مکانیکی مناسب از ویژگیهای پلیمرها در کاربردهای نوری غیرخطی است. همچنین، معلوم شده است که پایداری شیمیایی زیاد، ثابت دی‌الکتریک کم، شفافیت، قیمت کم و امکان تولید اسوه یا حفظ خواص در محدوده میکروسکوپی از مزایای دیگر پلیمرهاست. در ضمن، پلیمرها پایداری محیطی و گرمایی بسیار خوبی دارند. پیشرفتهای اخیر سب ظهور موادی شده‌است که از پایداری گرمایی فراتر از  $350^\circ\text{C}$  برخوردارند. بنابراین، مشخص می‌شود که پلیمرها می‌توانند کاربردهای وسیعی در اپتیک غیرخطی داشته باشند. اکثر پلیمرهای بکار رفته در اپتیک غیرخطی یا دوپه شده‌اند یا با استفاده از رنگزها، که خاصیت نوری غیرخطی دارند، خواص عاملی پیدا کرده‌اند [۱، ۲].

باید توجه داشت که مواد مختلف برای داشتن خواص نوری غیرخطی مرتبه دوم باید دارای سیستمی بدون تقارن مرکزی باشند. اما در پلیمرها، به دلیل قرار گرفتن نامنظم و اتفاقی دوقطیهای ذاتی، می‌توان سیستم را با یک مرکز تقارن در نظر گرفت. به همین جهت، برای آنکه پلیمرها خاصیت نوری غیرخطی داشته باشند باید این مرکز تقارن را از بین برد. این مسئله به روشهای مختلف قطب‌دهی (poling) تماسی یا کورونایی (corona) انجام می‌گیرد. بدین ترتیب که پلیمر را در میدان الکتریکی خارجی قرار می‌دهند تا تمام دوقطیهای آن در جهت میدان قرار گیرند که بدین ترتیب مرکز تقارن سیستم از بین می‌رود و پلیمر خاصیت نوری غیرخطی پیدا می‌کند. چنین پلیمری را پلیمر قطبی شده (poled polymer) می‌نامند.

کاربرد پلیمرها به‌عنوان ابزارهای نوری غیرخطی از اوایل سال ۱۹۸۰ در گروههای مختلف پژوهشی آغاز شد. خواص پیروالکتریک و خاصیت نوری غیرخطی فیلمهای پلی‌وینیلیدن فلوئورید (PVDF) قطبی شده تماسی به وسیله میدان الکتریکی مورد آزمایش قرار گرفتند [۳-۵] و با بکارگیری میدان الکتریکی در حدود  $10^7 \text{ V/cm}$  در دمای  $120^\circ\text{C}$ ، ضریب پیروالکتریک این ماده در حدود مقدار اندازه‌گیری شده برای لیتیم نیوبات ( $\text{LiNbO}_3$ )، یکی از بهترین بلورهای

از پلیمرهای دوپه شده است. همچنین، ماتریسهای اپوکسی دوپه شده و پلی استیرن عامل دار شده با رنگزا [۲۳، ۲۴] نیز از لحاظ مقدار، علامت SHG و پایداری زمانی آن مورد آزمایش قرار گرفتند، که در نتیجه هر دو سیستم پایداری زمانی بیشتری را نسبت به پلیمرهای شیشه‌ای دوپه شده نشان دادند.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت که علایق پژوهشی روی خواص غیرخطی پلیمرها در سه زمینه زیر تمرکز یافته است:

الف - درک پدیده‌های فیزیکی و کار با مواد،

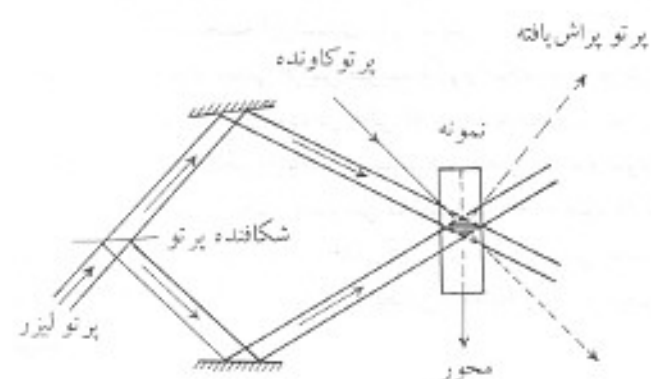
ب - مطالعه پتانسیل کاربردی این مواد،

ج - دستیابی به مواد جدید با قابلیت زیاد.

یکی از زمینه‌هایی که نظر پژوهشگران را در یکی دوسال اخیر به خود جلب کرده است، بررسی پدیده نور شکست در پلیمرها و کاربردهای آن است. زیرا، مواد نور شکن انتخابی بسیار خوبی برای تمام کاربردهای پردازش نوری داده‌ها هستند. مطالعات اولیه نشان می‌دهد که پلیمرها می‌توانند به عنوان محیطهای ذخیره داده‌های نوری با چگالی زیاد، فون پردازش تصویر وابسته مشتمل بر تمام‌نگاری دینامیکی و تقویت تصویر، مدوله‌سازی فضایی نور، اتصالات قابل برنامه‌ریزی و شبیه‌سازی شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گیرند [۲۵، ۲۶]. در ادامه این مقاله ابتدا توضیح ساده‌ای درباره نظریه نور شکست ارائه می‌شود و سپس به شرح خواص عملی که پلیمرها برای کاربرد به عنوان مواد نور شکن باید بپذیرند، می‌پردازیم.

#### مدل ساده‌ای از پدیده نور شکست

می‌دانیم که اگر دو پرتو نور حاصل از یک منبع نور هم‌دوس با زاویه‌ای معین روی یک ماده با یکدیگر تداخل کنند، در اثر اختلاف فاز بین نورهای تداخل کننده، توزیع شدت غیر یکنواختی حاصل می‌شود. این توزیع شدت غیر یکنواخت که به صورت نواحی روشن و تاریک متوالی ظاهر می‌شود شبکه فازی نام دارد (شکل ۱).



شکل ۱ - چگونگی ایجاد شبکه فازی از راه تداخل دو پرتو لیزر [۳۰].

نوری غیرخطی) و ضرایب تولید هماهنگ دوم آن در حدود مقادیر اندازه‌گیری شده برای کوآرتز بدست آمده است [۳]. اموالین نشان داد که تعیین ضریب شکست، ضخامت فیلم و اتلاف نوری در پلیمرها را می‌توان با بکارگیری فنون اپتیک مجتمع (integrated optics, IO) انجام داد [۶، ۷]. در پی آن فنون طیف‌نمایی و الیومتری برای بررسی فیلمهای نازک پلیمری بکار گرفته شدند [۸] و روشهای الکترواپتیک مرتبه دوم و سوم برای تعیین مشخصات پلیمرها و پلیمرهای دوتایی آزمایش شدند [۹].

کوپلیمرها نیز به عنوان مواد نوری غیرخطی پیشنهاد شده‌اند. کوپلیمرهای بی‌شکل و پنبیلیدن سیانید و وینیل استات، که به روش تماسی قطبی شده بودند، شدتهای تولید هماهنگ دوم قابل ملاحظه‌ای نشان دادند [۱۰]. هیل و همکاران قابلیت جذب این مواد را مورد آزمایش قرار دادند و در بررسی قطب‌دهی کورونایی، پدیده الکتروکرومیک (electrochromic) آنها را در دمای معمولی مشاهده کردند. این گروه پژوهشی با استفاده از پلیمرهای آکریلات دارای خواص عاملی، مدوله‌سازهای خطی الکترواپتیک (linear electro-optic modulator, LEOM) را تهیه کرده و شدت هماهنگ دوم و پایداری آن را در پلیمرهای استر آکریلات عامل‌دار شده آزمایش کردند [۱۱]. اشاره می‌شود که این مواد برای تولید موجبرهایی بکار گرفته شده‌اند که با استفاده از آنها درباره خواص فیزیکی پلیمرها نیز مطالعه شده است [۱۲-۱۷].

سپنر و همکاران تولید هماهنگ دوم پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) دوپه شده با رنگ فرمز پراکنده شده (DR۱) را که به روش تماسی قطبی شده بود بررسی کردند [۱۸، ۱۹].

نخستین کار روی اثر آسایش پلیمر بر پایداری زمانی جهتگیری رنگزا با استفاده از قطب‌دهی تماسی در PMMA و پلی‌استیرن (PS) دوپه شده با ۴-دی‌متیل آمینو - ۴' نیترواستیلن و DR۱ نشان داد که در چند دقیقه اول حذف میدان اعمال شده، شدت SHG قطبی شده تماسی فیلمهای دوپه شده به نصف مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد و بعد از چند ساعت کاملاً از بین می‌رود. چند ماه بعد همین آزمایش با قطب‌دهی کورونایی انجام گرفت و زمان آسایش طولانی‌تری برای شدت SHG بدست آمد [۲۰، ۲۱]. سپس، آزمایش اخیر روی پلیمرهای عامل‌دار شدنی انجام شد و بعد از حذف میدان، کاهش شدت کمتری نسبت به دو حالت یاد شده بدست آمد (کاهش ده درصد در چند روز اول و مقدار ثابت برای سی روز بعد) [۲۲]. به دنبال کارهای یاد شده، ضرایب LEO و SHG در دی‌سیانوونیل (DCV) و نری‌سیانوونیل دوپه شده، پلیمرهای عامل‌دار شده و PMMA دوپه شده با DR۱ به وسیله قطب‌دهی تماسی مورد آزمایش قرار گرفتند [۲۲] و معلوم شد که کاهش شدت SHG با حذف میدان در پلیمرهای عامل‌دار شده کمتر

چنانچه شبکه فازی روی ماده‌ای ایجاد شود، در صورتی اثر آن به صورت پدیده نورشکست نمایان می‌گردد که ماده بتواند در نواحی روشن از راه یونش نوری یارکافی تولید کند و این بارها بتوانند فاصله‌های قابل مقایسه‌ای را با عکس‌بردار موج شبکه در درون ماده طی کنند. حال، چنانچه این بارها در جایگاههای گیراندازی قابل یونش نوری مناسب در ماده به دام افتند، با ایجاد میدان بارفضایی و از راه پدیده الکترواپتیکی تغییر ضریب شکست را در ماده سبب خواهند شد (شکل ۲). این تغییر که برگردان فاز توزیع شدت نور است، نظیر آنچه که در بکت تمام‌نگاری اتفاق می‌افتد، پدیده نورشکست نامیده می‌شود [۲۶-۲۸] و شبکه جدید حاصل از به دام افتادن بارها، شبکه نورشکست نامیده می‌شود. پدیده نورشکست بکت پدیده نوری غیرخطی است و برای نخستین بار در سال ۱۹۸۲ به صورت تجربی در نیتیم نیوبات مشاهده شد [۲۹،۳۰].

پدیده نورشکست در مواد پلیمری را برای نخستین بار در سال ۱۹۹۱ مورنز و همکاران در پلیمر الکترواپتیکی بیس‌فول ۸ - دی‌گلیسیدیل اثر ۴-نیترو-۱،۲-فنیل دی‌آمین مشاهده کردند [۳۱]. آنها برای نوررسانا کردن پلیمر، آن را با حامل حفره دی‌نیل آمینو-بزالدهید دی‌فنیل هیدرازون دوپه کردند. این کار تجربی، آغاز یک زمینه پژوهشی جدید بود که همچنان بطور گسترده ادامه دارد.

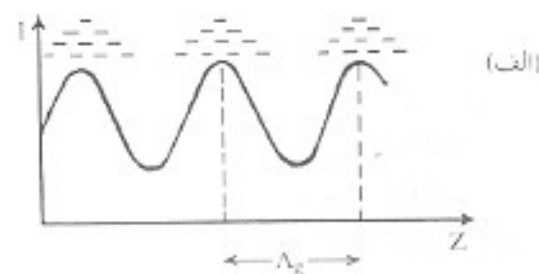
#### مشخصه‌های پدیده نورشکست

در پدیده نورشکست، تغییر ضریب شکست به‌وسیله معادله زیر با میدان بار فضایی مربوط می‌شود [۲۵،۳۲]:

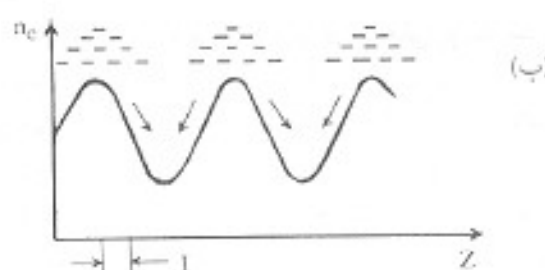
$$\Delta n(z,t) = -\frac{n^3 \epsilon}{4} E_{sc}(z,t) \quad (2)$$

که در آن  $n$  ضریب شکست ماده،  $\epsilon$  ضریب الکترواپتیکی آن و  $E_{sc}(z,t)$  میدان بارفضایی وابسته به زمان و فضا است. در بخش بعدی خواهیم دید که  $E_{sc}$  به‌طور معکوس با ثابت دی‌الکتریک ماده ( $\epsilon$ ) مناسب است. از این‌رو، عامل  $\frac{n^3 \epsilon}{4}$  مشخصه ارزشمندی برای نمایش پدیده نورشکست در مواد است. در مواد معدنی افزایش ضریب الکترواپتیکی سبب افزایش ثابت دی‌الکتریک ماده می‌شود، در حالی که به علت متفاوت بودن ساز و کارهای پدیده الکترواپتیکی بین پلیمرهای قطبی شده و مواد معدنی، برای پلیمرها امکان دسترسی به ضرایب  $\frac{n^3 \epsilon}{4}$  وجود دارد که حدود  $10^6$  مرتبه بزرگتر از مقدار آن برای مواد معدنی است. برای یک شبکه نورشکست، میدان بار فضایی با معادله زیر توصیف می‌شود:

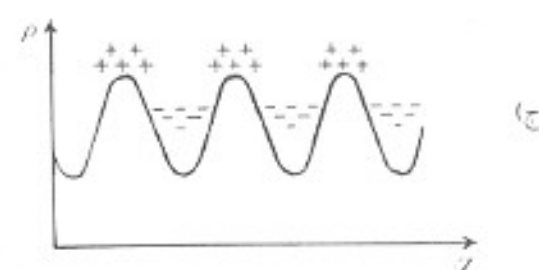
$$E_{sc} = \left(\frac{q}{h\nu}\right) (c1 - \epsilon) \left(\frac{m1 + \epsilon \epsilon_0}{\epsilon \epsilon_0}\right) \quad (3)$$



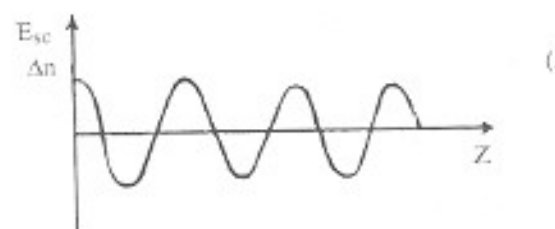
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲ - مراحل مختلف نوشته شدن یک شبکه نورشکست: (الف) تداخل دو باریکه لیزری که سبب تولید تناوبی حاملان بار در اثر نور می‌شود، (ب) انتقال بارها (از راه پخش یارانش) صورت می‌گیرد، (ج) توزیع بارهای فضایی سبب تولید میدان بار فضایی می‌شود، (د) از راه پدیده الکترواپتیکی مدوله‌سازی ضریب شکست صورت می‌گیرد [۲۶-۲۸].

که بهره تولید حاملان بار به روش نوری،  $m$  انرژی فوتون،  $n$  بار الکترون،  $1 - \epsilon$  طول مؤثر حمل،  $m$  ضریب مدوله‌سازی که تابع ساختار هندسی شبکه است،  $1$  چگالی انرژی ناشی،  $\epsilon$  ضریب جذب و  $\epsilon_0$  گذردهی نسبی خلاء است. بهره تولید حاملان بار به روش نوری در

در ضریب شکست این مواد از راه نور انقایی است که به گستره دینامیک (dynamic range) معروف است. این گستره تعیین کننده بزرگترین بهره پراش ایجاد شده در ضخامت معینی از ماده و مشخص کننده تعداد تمام‌نگارهایی است که در حجم معینی از آن می‌توان ثبت کرد. بطور نظری نشان داده شده است که گستره دینامیک در مواد الکترواپتیکی از طریق چگالی دامها محدود می‌شود و این حد بالاترین چگالی بار فضایی را که می‌توان از راه تابش نور تولید کرد مشخص می‌سازد.

ثبت زمانی، که زمان لازم برای نوشتن یک شبکه نور شکست را بیان می‌کند، از دیگر مشخصه‌های مواد نور شکن است. زیرا، تغییرات ضریب شکست در مواد ناشی از میدان الکترونیکی بار فضایی است و این میدان از راه تولید بار و انتقال آن در ماده ایجاد می‌شود. در نتیجه، ثبت زمانی به بهره تولید بار و پدیده انتقال بستگی دارد. در پلیمرها برای فواصل شبکه‌ای بزرگ و میدان اعمال شده کوچک، زمان پاسخ‌دهی به وسیله معادله زیر بیان می‌شود [۲۴]:

$$\tau_{gr} = \frac{eE_c \cdot h\nu}{\alpha I_c \cdot eE} \quad (7)$$

از معادله بالا مشخص است که کوچک بودن زمان پاسخ‌دهی را بزرگی حاصلضرب  $eE_c$  موجب می‌شود.

شبکه نور شکست نوشته شده می‌تواند دارای آن‌گونه اطلاعات فازی باشد که به وسیله نورهای نویسنده (نورهایی که از تلاقی آنها شبکه فازی ایجاد می‌شود) به صورت شبکه ثبت شده‌اند. این شبکه نور شکست را می‌توان با تابش یک نور همگن به آن و در اثر پراش این نور همگن بر روی شبکه بازخوانی کرد. بنابراین، اطلاعات نوری ثبت شده در شبکه به صورت یک تمام‌نگاری قابل بازخوانی است. زیرا اطلاعات فازی یک جسم سه بعدی ثبت شده به صورت شبکه به هنگام بازخوانی یک تصویری سه بعدی را ایجاد می‌کند.

به علت بالا بودن بهره پراش مواد نور شکن و مشخصه‌های دیگر تمام‌نگاری فازی در حجم می‌توان چند تمام‌نگار را فقط در یک نمونه ثبت کرد. بنابراین با دوران ماده نور شکن نسبت به امتداد پرتوهای نویسنده اطلاعات فازی جسم متحرک به صورت متوالی و به شکل شبکه‌های نور شکست در ماده ثبت می‌شود. سپس، با تابیدن نور همگن به این شبکه‌های نور شکست و دوران ماده نور شکن، اطلاعات فازی ثبت شده در این شبکه‌ها به صورت تمام‌نگاری دینامیک خواننده می‌شوند که یکی از جالبترین کاربردهای پدیده نور شکست است. برای نسبت متوالی شبکه‌ها، زاویه دورانی کمتر از  $1^\circ / 1^\circ$  درجه بکار می‌رود. به عنوان مثال، اخیراً حدود  $50000$  تمام‌نگار در  $3\text{mm}^2$  از نمونه  $\text{LiNbO}_3 : \text{Fe}$  ثبت شده است.

عمل خواندن شبکه می‌تواند تا حدودی باعث پاک شدن شبکه

پلیمرها بستگی به میدان الکتریکی اعمال شده و چگالی دهنده‌های یون‌شده دارد. این بهره در اکثر پلیمرها از راه پدیده ترکیب مجدد یا انتقال برگشتی الکترون‌ها در اثر کوچکی شعاع گرمایی محدود می‌شود. بدین معنی که بارهای آزاد شده نمی‌توانند به حد کافی از هم جدا شوند و بنابراین انرژی جذبی آنها کمتر از  $K_B T$  (ضریب بولتزمن) است [۳۲]. اعمال میدان الکتریکی قوی می‌تواند به جدایی حاملان بار کمک کرده و بهره تولید حاملان موثر را تقویت کند. در تمام‌نگار بوجود آمده از پرتوهای تداخل کننده در یک نمونه، توزیع شدت به صورت معادله ۴ بیان می‌شود:

$$I(z,t) = I_0(1 + \cos(K_{gr}z)) \quad (4)$$

که در آن  $K_{gr}$  بردار موج و برابر  $K_{gr} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta$ ،  $\lambda$  طول موج نور فرودی و  $\theta$  زاویه بین پرتوهای تداخل کننده است.

معادله ۳ نشان می‌دهد که مقدار  $E_{gr}$  متناسب با  $E_{eff}$  است. در پلیمرهای قطبی شده  $E_{gr}$  رابطه مستقیم با حاصلضرب  $eE_c$  دارد، که در آن  $e$  تحرک پذیری و  $E_c$  طول عمر آزاد موثر حاملان بار است. بنابراین می‌توان در پلیمرها با افزایش این حاصلضرب مقدار  $E_{gr}$  را نیز افزایش داد.

مواد نور شکن به وسیله مشخصه دیگری به نام حساسیت نور شکست نیز معرفی می‌شوند که بیانگر تغییر ضریب شکست حاصل از شدت انرژی جذب شده در ماده است. این مشخصه به حساسیت داخلی ( $S_{in}$ ) معروف است و با استفاده از معادله‌های ۲ و ۳ به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$S_{in} = \frac{dn}{d(\alpha I_c)} = \left( \frac{n^2 \tau}{2 \tau_{eff}} \right) \left( \frac{\phi}{h\nu} \right) (\alpha E_{eff})^m \quad (5)$$

مشخصه دیگر برای مواد نور شکن، انرژی لازم جهت رسیدن به بهره پراش خاص، معمولاً  $1/10$  درصد، در ضخامت معینی از ماده است. بهره پراش، نسبت توان پرتو پراکنده به توان پرتو ناشی در یک شبکه است. این بهره به صورت نظری با معادله زیر بیان می‌شود [۲۵]:

$$\eta = e^{-\alpha d} \cos\theta \sin^2 \left( \frac{\pi \Delta n d G}{\lambda} \right) \quad (6)$$

که در آن  $e$  ضریب جذب،  $d$  عمق شبکه و  $G$  تابعی از ساختار هندسی شبکه و قطب‌دهی نور فرودی روی ماده است. با استفاده از اندازه‌گیری بهره پراش و معادله ۶ می‌توان میدان بار فضایی  $E_{gr}$  را برای یک ماده حساب کرد.

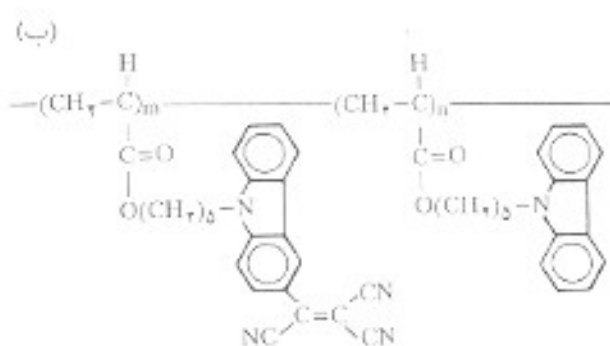
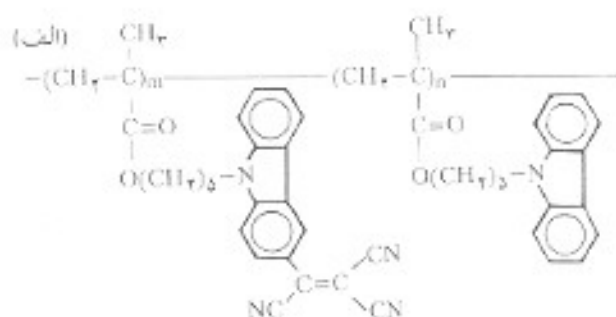
از مشخصه‌های دیگر مواد نور شکن، بیشترین تغییر قابل دستیابی

کردن موادی به پیکره پلیمر در ساختار شبکه‌ای آن ایجاد کرد.

به عنوان مثال می‌توان به کربازول-تری‌سیانو وینیل کربازول اشاره کرد (شکل ۳). این ماده از پلیمر شدن استرهای متاکریلات دارای گروه‌های کربازول، که به‌عنوان زنجیر جانبی به پیکره پلیمر با فاصله دهنده آلکینی متصل شده‌اند، ایجاد می‌شود [۳۹].

بیشترین خاصیت نوری غیرخطی در مواد آلی در پلیمرهایی ظاهر می‌شود که دارای سیستم وسیعی از الکترونها،  $\pi$  پرتحرک با گروه‌های دهنده و گیرنده الکترون در وضعیتهای پارا باشند [۴۰]. معمولاً، بعد از پلیمر شدن باید یک یا چند عاملیت اضافی را نیز، از راه دوطرفه کردن، به سیستم اضافه کرد. خصیصه‌های انتقال و گیراندازی بار را می‌توان با اتصال مولکولهای دارای انرژی یونش یا الکترون‌خواهی مناسب، به ساختار پلیمر در یک جاگرد آورد. به‌علاوه، با توجه به اینکه بسیاری از پلیمرهای مناسب در ناحیه فرابنفش نمایان به جذب دارند می‌توان با حساس‌سازی این پلیمرها، به‌وسیله رنگ و از راه رهاکردن حاملان بار در آن، خاصیت جذب آنها را در نور مرئی بیشتر کرد [۴۱]. در ترکیب پلیمر نورشکی که مورنو و همکارانش گزارش کرده‌اند، در یک ماده الکترواپتیکی اپوکسی بیس فنول A دی‌گلیسیدیل اتراسید جزئاً شبکه‌ای شده با یک رنگزای غیرخطی مانند ۴-نیترو-۱،۲-فنیل دی‌آمین ویژگیهای غیرخطی نوری را به همراه جذب نور لازم برای تولید بار فراهم آورده‌اند [۲۶،۳۱،۴۲،۴۳]. در ضمن، پلیمر یادشده برای داشتن خاصیت نورشکست به‌وسیله یک حامل انتقال دهنده حفره مانند دی‌اتیل آمینو بنزالدهید دی فتیدرازون دوطرفه شده است.

علاوه بر این، شیلدکرات و همکاران [۳۹،۴۴،۴۵] در فرمولبندی خود از فیلمهای پلیمری الکترواپتیکی تورسازا و یک رنگزای غیرخطی استفاده کرده‌اند که به‌صورت یک شاخه جانبی به پیکره آکرلیکی متصل بوده و به آن یک حساس‌کننده تولید بار و یک مولکول انتقال حفره نیز اضافه شده است. به‌هنگام اضافه کردن یک حساس‌کننده نوری تولید بار به سیستم، نکته مهم قابل توجه این است که حساس‌کننده یاد شده دارای قدرت جذب در طول موج بلندتر از رنگزای غیرخطی باشد تا تضعیف پرتو به‌وسیله حساس‌کننده به کمترین مقدار برسد. به روشنی این مسئله مستلزم موازنه دقیق عواملی است که در درون پلیمر برای جذب با یکدیگر رقابت می‌کنند. بهینه‌سازی پاسخ غیرخطی پلیمر معمولاً نیازمند سیرکردن پلیمر با رنگزای مناسب است، اما برای مطابقت عوامل دیگر، نظیر ادغام حساس‌کننده‌های نوری تولید بار و عاملهای حمل بار، باید به مقدار کمتر پاسخ غیرخطی بهینه قناعت کرد. همچنین، دوطرفه کردن مواد اغلب به افزایش میزان حساس‌سازی فاز منجر می‌شود که این خود سبب پراکندگی نور به‌طور غیرمنتظره شده و سبب می‌شود که طول عمر مفید پلیمر یا



شکل ۳ - ساختار پلیمر کربازول - تری سیانو وینیل کربازول به شکل: (الف) متاکریلات و (ب) آکرلیات [۳۹].

نورشکست شود، زیرا تابش یکجواخت نور روی نمونه سبب حرکت الکترونها به خارج از دامپاشده و با توزیع مجدد یکجواخت الکترونها میدان بار فضایی، که شبکه نورشکست ایجاد می‌کند، از بین می‌رود و نمونه به وضعیت اولیه خود برمی‌گردد. بنابراین، برای جلوگیری از این عمل، به‌هنگام خواندن اطلاعات از نورهایی با شدت پایین استفاده می‌شود. همچنین، روشهای ثابت‌سازی (fixing) نیز بکارگرفته می‌شوند [۳۸-۳۵].

از کاربردهای دیگر پدیده نورشکست می‌توان به پردازش تصویر، مخازن سولیتونی، داده‌پردازی نوری، آینه‌های تزویج فاز، تشدیدگر و اپتیك خود القا نیز اشاره کرد [۲۵،۲۶].

#### ساختار پلیمرهای مناسب نورشکست

در پلیمرها برای دستیابی به خاصیت نورشکست مطلوب، مواد مورد استفاده باید به صورت طبیعی از ویژگیهای بهینه‌ای برخوردار باشند که خواص نوری غیرخطی، تولید بار از راه تابش نور و توانایی انتقال بار از آن جمله‌اند، در غیر این صورت، می‌توان ویژگیهای لازم را با اضافه

- Materials for Nonlinear Optics*; Hann R. A. and Bloor D. (Eds.), Royal Society of Chemistry (London), 1989.
- 12 Page R. H. et al.; *J. Opt. Soc. Am.*; **B7**, 1239, 1990.
- 13 Dienteer M. B. J. et al.; *Electron. Lett.*; **26**, 379, 1990.
- 14 Ashley P. R. and Tumullo T. A.; *J. Appl. Phys. Lett.*; **58**, 884, 1991.
- 15 Luckemeyer T., Franke H. and Frank W. F. X.; *Proc. SPIE*; 1213, 126, 1990.
- 16 Kirkby G. J. G., Cosh R. and Bennion I.; *Opt. Commun.*; **56**, 288, 1985.
- 17 Van Eck T. E., Ticknor A. J., Lytel R. S. and Lipscomb G. F.; *Appl. Phys. Lett.*; **58**, 1588, 1991.
- 18 Singer K. D., Kuzyk M. G. and Sohn J. F.; *J. Opt. Soc. Am.*; **B4**, 968, 1987.
- 19 Singer K. D., Sohn J. F. and Lalama S. J.; *Appl. Phys. Lett.*; **49**, 248, 1986.
- 20 Mortezaei M. A. et al.; *Appl. Opt.*; **28**, 3278, 1989.
- 21 Knoesen A. et al.; *Nonlinear Optical Properties of Materials, Technical Digest Series*, Optical Society of America, New York; **9**, 244, 1988.
- 22 Singer K. D. et al.; *Appl. Phys. Lett.*; **53**, 1800, 1988.
- 23 Hubbard M. A. et al.; *Proc. SPIE*; **971**, 136, 1988.
- 24 Ye C. et al.; *Macromolecules*; **21**, 2901, 1987.
- 25 Gunter P. and Huignard J. P.; *Photorefractive Materials and Their Applications: I*; Gunter J. P. and Huignard J. P. (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- 26 Moerner W. E. et al.; *Proc. SPIE*; 1560, 278, 1991.
- 27 Feinberg J., Heiman D., Tanguay A. R. (Jr.) and Hellwarth R. W.; *J. Appl. Phys.*; **51**, 1297, 1980 and *J. Appl. Phys.*; **52**, 537, 1980.
- 28 Zyss J.; *Molecular Nonlinear Optics: Materials, Physics and Devices*; Academic, 1994.
- 29 Gunter P.; *Phys. Rep.*; **93**, 199, 1982.
- 30 Arizmendi L. and Agullo-Lopez F.; *M. R. S. Bulletin*; **19**, 3, 1994.
- 31 Ducharme S., Scott J. C., Twieg R. J. and Moerner W. E.; *Phys. Rev. Lett.*; **66**, 1846, 1991.
- 32 Glass A. M.; *Opt. Eng.*; **17**, 470, 1978.
- 33 Twarowski A.; *J. Appl. Phys.*; **65**, 2833, 1989.

قابلیت پردازش آن به شدت محدود شود. علاوه بر این اضافه شدن حساس‌کننده‌ها و عاملان حمل بار به نرم‌شدگی و دمای انتقال شیشه‌ای کمتر منجر می‌شود.

با همه اینها، رعایات امیدوارکننده‌تر را می‌توان در روشهای لی و همکاران یافت. این پژوهشگران تولید پلیمری با خاصیت نوری غیرخطی و قابلیت شبکه‌ای شدن با نور (photocrosslinkable) را که با رنگ پلی‌وینیل سیانات ۲- سیانواتیل‌اکسی -۴- (N,N-دی‌متیل آمینو) -۲- سیانواتیل‌اکسی فنیلات در ساختار میهمان - میزبان دوبه‌شده است گزارش کرده‌اند که بدون وارد کردن حساس‌کننده نوری تولید بار یا عاملهای حمل بار نوری، قویاً توررسانا شده است [۴۶].

### نتیجه‌گیری

از مطالب ارائه شده درباره مزایای نسی پلیمرها در کاربردهای اپتیک غیرخطی نتیجه می‌شود که مواد مزبور برای کاربردهای نوری غیرخطی آینده روشنی دارند. حوزه پدیده‌های نوری غیرخطی در سیستمهای پلیمری، یکت حوزه چند ضابطه‌ای است که در آن پژوهشگران و مهندسان در زمینه‌های مختلف می‌توانند تخصصشان را برای پیشرفت‌های آتی بکار گیرند.

### مراجع

- 1 Prasad P. N. and Williams D. J.; *Introduction to Nonlinear Optical Effects in Molecules and Polymers*; John Wiley & Sons, New York, 1991.
- 2 Yeh P.; *Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics*; John Wiley & Sons, New York, 1993.
- 3 McFee J. H., Bergman J. G.(Jr.) and Crane G. R.; *Ferroelectrics*; **3**, 305, 1972.
- 4 Kerhervé F.; *Opt. Commun.*; **9**, 420, 1973.
- 5 Mopsik F. I. and Dereggi A. S.; *Appl. Phys. Lett.*; **44**, 65, 1985.
- 6 Swalen J. D., Tacke M., Santo R. and Fischer J.; *Opt. Commun.*; **18**, 387, 1976.
- 7 Swalen J. D. et al.; *Helv. Chim. Acta*; **61**, 960, 1978.
- 8 Cross G. G. et al.; *Thin Solid Films*; **156**, 39, 1988.
- 9 Jennings B. R.; *Pure Appl. Chem.*; **54**, 395, 1982.
- 10 Sato H., Yamamoto T., Seo I. and Gamo H.; *Opt. Lett.*; **12**, 579, 1987.
- 11 Hill J. R., Pantelis P., Abbas F. and Hodge P.; *Organic*

- 41 Reuvert P. J.; *PhotocARRIER Generation Mechanisms in Polymers: An Interdisciplinary Approach*; Patsis A. V. and Scanlon D. A. (Eds.), Technomic, Westport, 1976.
- 42 Walsh C. A. and Moerner W. E.; *J. Opt. Soc. Am.*; **B9**, 1642, 1992.
- 43 Scott J. C., Pautmeier L. T. and Moerner W. E.; *J. Opt. Soc. Am.*; **B9**, 2059, 1992.
- 44 Cui Y. et al.; *Appl. Phys. Lett.*; **61**, 2132, 1992.
- 45 Sandalphon and Kippelen B., et al.; *Opt. Lett.*; **19**, 1, 68, 1994.
- 46 Li L. et al.; *Proc. SPIE*; 1560, 243, 1991.
- 34 Glassand A. M. and Strain J.; *Photorefractive Materials and Their Applications: 1*; Gunter P. and Huignard J. P. (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- 35 Micheron F. and Bismuth G.; *Appl. Phys. Lett.*; **20**, 79, 1972.
- 36 Thaxter J. B. and Kestigan M.; *Appl. Opt.*; **13**, 913, 1974.
- 37 Vormann H., Weber G., Kaplan S. and Kratzing I.; *Solid State Commun.*; **40**, 543, 1981.
- 38 Staebler D. L. and Amodei J. J.; *Ferroelectrics*; **3**, 107, 1972.
- 39 Kippelen B. et al.; *Phys. Rev.*; **B48**, 15, 10710, 1993.
- 40 Sutter K. and Gunter P.; *J. Opt. Soc. Am.*; **B7**, 2274, 1990.