

کندگی پلی وینیل الکل با لیزر پالسی HF به وسیله تار نوری

Ablation of Poly(vinyl alcohol) Using Fiber-Delivered Pulse HF Laser

محمد عترتی خسروشاهی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پزشکی*

دریافت: ۷۶/۴/۲۴، پذیرش: ۷۶/۹/۱۶

چکیده

ضرب جذب نسبتاً زیاد پلی وینیل الکل ($7 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$) در برابر لیزر چند طول موجی HF ($2/6-2/9 \mu\text{m}$) برهمکنشی قوی، به دلیل وجود پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی، در 3597 cm^{-1} نشان داد. از آنجا که پهنای پالس لیزر (400 ns) بیشتر از زمان سرد شدن پلیمر (90 ns) است، مکانیسم سرد شدن به وسیله رسانندگی در قسمت اولیه آزمایش قابل چشمپوشی نخواهد بود. در شاریدگیهای بیشتر، قسمت خطی منحنی، ضرب جذب حدود $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ محاسبه شد. همچنین، با استفاده از تساوی پخشندگی گرما، دمای سطح در شاریدگیهای $0/3$ و 1 Jcm^{-2} به ترتیب برابر 340 K و 449 K بدست آمد که به دمای ذوب پلی وینیل الکل، یعنی 513 K ، بسیار نزدیک است. با استفاده از مقادیر 188 kJmol^{-1} برای انرژی فعالسازی میانگین و $6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ برای ثابت سرعت، مقدار سرعت واکنش $1/2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ محاسبه شد. عمل کندگی بوسیله تار نوری از جنس شیشه فلئورید با قطر مغزه $70 \mu\text{m}$ انجام گرفت. مشخص شد که مواد ذوب شده ابتدا تبخیر و سپس در ناحیه اطراف و طول تار انباشته می شوند که علت اصلی آن زمان زیاد بین پالسهای لیزر ($0/2 \text{ Hz}$) است. بدین ترتیب، فرصت کافی به این مواد داده شد تا در اطراف تار سرد و منجمد شوند، بطوری که ستونی از مواد به ارتفاع حدود $100 \mu\text{m}$ ایجاد شد.

واژه های کلیدی: انباشتگی مواد، پلی وینیل الکل، لیزر زیرقرمز، تار نوری زیرقرمز، حد پخشندگی

Key Words: material accumulation, poly(vinyl alcohol), IR laser, IR optical fiber, diffusion limit

مقدمه

درباره مزایای بالقوه لیزرهای زیرقرمز میانه ($2-3 \mu\text{m}$) برای کندگی قابل کنترل بافتهای آلی قبلاً بحث شده است [۱، ۲]. از میان لیزرهای مختلفی که برای چنین کاربردهایی مناسب اند، توجه خاصی به لیزر HF با پهنای ضربه بسیار کوتاه شده است. علت اصلی آن، بویژه در بافتهای زیست شناختی با ضرب جذب

زیاد، امکان جلوگیری از آسیب گرمایی در حین برهمکنش است [۲-۶]. این نکته نیز در پلیمرها صدق می کند، ولی برخی از پلیمرها مانند پلی ایمید در طول موج $2/6-3 \mu\text{m}$ لیزر HF جذب بسیار ضعیفی دارند که درباره مکانیسم آن قبلاً بطور مفصل بحث شده است [۷].

پلی وینیل الکل (PVA) کاربردهای متعددی در صنعت دارد که

* بخشی از این پژوهش در دانشکده فیزیک کاربردی دانشگاه هال انگلستان انجام شده است.

که به عنوان محیطی مناسب برای آزادسازی کنترل شده دارو مانند پنی سیلین است که به داخل بافت تریق می شود. برای درمان عفونتهای حیوانات از ایودین-PVA می توان استفاده کرد که البته باید وزن مولکولی آن کمتر از ۵۰,۰۰۰ باشد. در غیر این صورت، مشکلاتی از قبیل خونریزی کلیه بوجود خواهد آورد. ناگفته نماند که برای جلوگیری از خونریزی فوری می توان از محلول PVA به عنوان پلاسمای خون استفاده کرد، تا حجم طبیعی و فشار اسمزی خون را حفظ کند. در این گونه موارد باید دقت کرد که عمل فوق احتمالاً موجب کاهش محتوای هموگلوبین، گویچه های (گلبولهای) قرمز و گویچه های سفید و تاخیر در زمان انعقاد خون می شود.

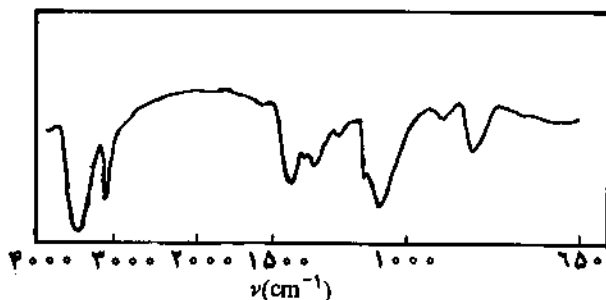
در این مقاله، نه تنها برهمکنش لیزر یادشده با پلی وینیل الکل که جذب نسبتاً خوبی دارد، بلکه تاثیر استفاده از تار نوری در کندگی نیز بررسی خواهد شد. اشاره می شود که نمونه ها از حالت مایع به صورت لایه های نازک به ضخامت کمتر از $400 \mu\text{m}$ تهیه می شوند.

تجربی

مواد و دستگاهها

همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می شود، پلیمر PVA $(-\text{CH}_2\text{CHOH}-)$ جذب نسبتاً خوبی در $3500-4000 \text{ cm}^{-1}$ دارد، که معادل طول موجهای $2/5-2/85 \mu\text{m}$ است. تریبی که برای کندگی پلیمر با تار نوری بکار رفته است در شکل ۲ نشان داده شده است.

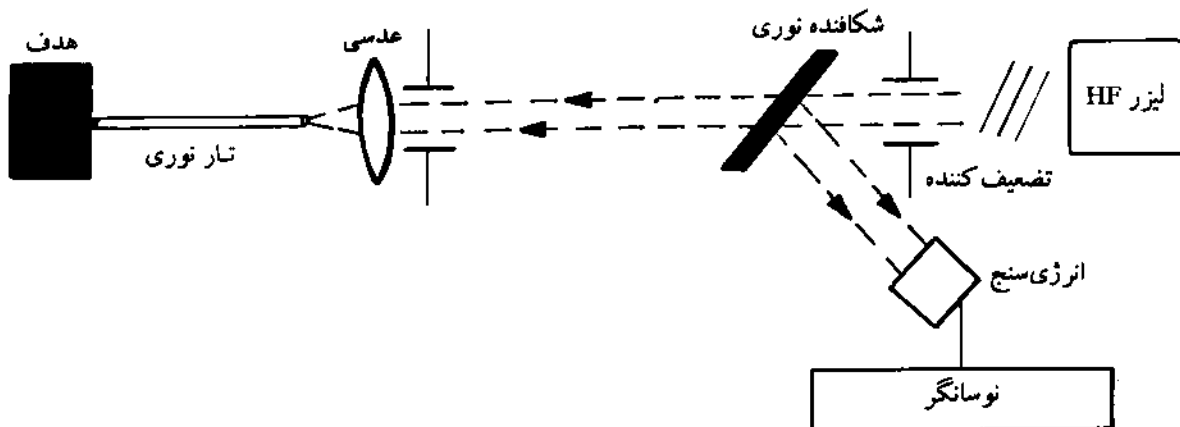
از تارنوع multimode step index شیشه فلوئورید به قطر مغزه $70 \mu\text{m}$ ، قطر مغزه با پوسته $125 \mu\text{m}$ و قطر کلی $250 \mu\text{m}$ استفاده شد



شکل ۱- طیف جذبی PVA از $2/5$ تا $15 \mu\text{m}$.

عمدتاً شامل الیاف و انواع غشا، اسفنج و فیلم می شود. همچنین، این پلیمر به عنوان چسب چوب، لباس و کاغذ کاربردهای بسیار زیادی دارد و در پزشکی نیز جایگاه خاص خود را حفظ کرده است. پلیمر PVA همانند سایر پلیمرها می تواند کاربردهای متعددی در پزشکی داشته باشد. مثلاً، در سیستمهای آزادسازی کنترل شده دارو، ایجاد روزنه ای بسیار کوچک در انتهای کپسول لازم است تا دارو بتواند بتدریج در بدن آزاد گردد. یکی از لیزرهای که جذب خوبی در این پلیمر دارد، لیزر HF است و هدف اصلی این پژوهش بدست آوردن اطلاعات و درکی بهتر درباره نحوه برهمکنش لیزر چند خطی HF با پلیمر PVA و پاسخ به این سؤال است که آیا اصولاً این لیزر قادر به انجام چنین کاری با کیفیتی خوب و قابل قبول در پلیمر است یا خیر. از این تحقیقات نتیجه گیری می شود که برای دست یافتن به هدف فوق، از عمل پراکندگی و پخش (splashing) مواد به اطراف محل برهمکنش باید جلوگیری کرد. بنابراین، بهتر است لیزر در طول موج $2/9 \mu\text{m}$ تنظیم شود و با پهنای پالس کوتاهتر از زمان سرد شدن پلیمر در اطراف آستانه کندگی و با تعداد پالس کمتر، عمل برداشت مواد صورت گیرد.

کاربرد دیگر این پلیمر در پزشکی بصورت ژلهای PVA است

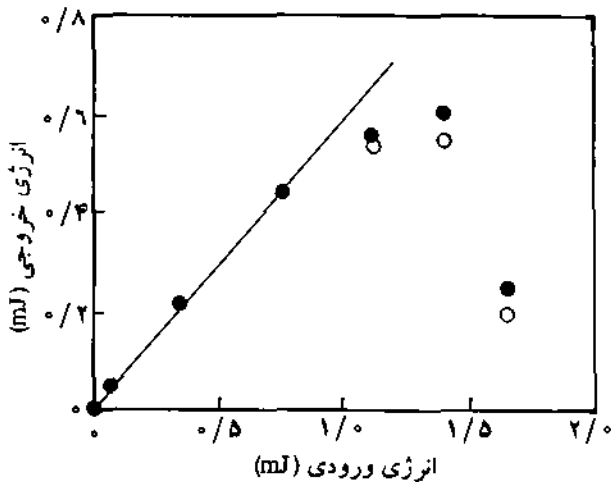


شکل ۲- ترتیب آزمایش کندگی PVA به وسیله لیزر HF.

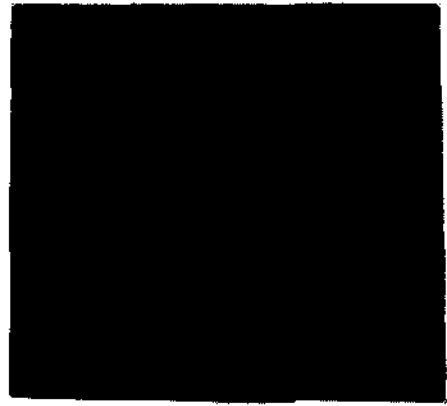
به طول ۲۰ cm نشان داده شده است. بنظر می‌رسد که تا $E_i = 0.7 \text{ mJ}$ رابطه‌ای خطی بین انرژی ورودی (E_i) و انرژی خروجی یعنی $E_o \approx 59\%$ وجود دارد که پس از آن غیرخطی می‌شود. علت آن می‌تواند به دلیل افت انرژی در حین جفت‌شدن باریکه در سطح ورودی و خروجی تار باشد [۶]. همچنین از آنجا که قطر باریکه ورودی بزرگتر از قطر مغزه تار است، لذا مقدار قابل ملاحظه‌ای از این انرژی صرف برانگیخته کردن مدهای پوسته تار می‌شود.

در شکل ۴ افت ناگهانی انرژی ورودی برابر $1/4 \text{ mJ}$ (شاریدگی 8 Jcm^{-2}) معادل چگالی توان 20 MWcm^{-2} به دلیل آسیب دیدگی برگشت‌ناپذیر سطح تار است. البته، قطر باریک‌تر از $150 \mu\text{m}$ و شاریدگی در سطح ورودی تار یکنواخت فرض شده است. در آزمایش‌های دیگر (نشان داده نشده است) در انرژی ورودی زیر 1 mJ در فرکانس 0.2 Hz تا 360 ضربه، افت انرژی چندانی روی نمی‌دهد و تار رفتار خطی خود را حفظ می‌کند. برای اثبات مناسب بودن انتقال انرژی این لیزر با این نوع تار، آزمایش با تار به طول یک متر تکرار شد، تا اینکه با استفاده از روش برش برگشتی (cut-back) طول آن به 0.2 m رسید. نسبت عبور انرژی به نسبت طول (m/m) $0.2:1$ ، $83:9$ ، بود که گویای افت ناچیزی در طول 1 m است. احتمالاً این اختلاف به دلیل اتلاف مدهای پوسته تار است تا اتلاف درونی.

یکی از دلایل اینکه مقدار زیادی از انرژی ورودی صرف برانگیخته شدن مدهای پوسته می‌گردد، در شکل ۵ بوضوح مشاهده می‌شود. قطر باریکه لیزر در قواصل مختلف اندازه‌گیری شده و چنانچه ملاحظه می‌شود در نقطه تماس $x=0$ این قطر تقریباً برابر $110 \mu\text{m}$ است که نشان دهنده تحریک بخش عمده‌ای از مدهای پوسته است.



شکل ۴ - نمودار تغییرات انرژی خروجی تار به ازای مقادیر مختلف انرژی ورودی.



شکل ۳ - نمای سطح ورودی تار شیشه‌فلوئورید پس از صیقل دهی ($20 \times$).

که این تارها از آزمایشگاه تحقیقاتی (British Telecommunication) BT تهیه شد. قبل از آغاز آزمایش سطح تار با دقت صیقل داده شد تا اتلاف انرژی به حداقل رسانده شود (شکل ۳). در طول موج $2/8 \mu\text{m}$ ، این تار دارای عدد V برابر با $15/7$ است که از معادله زیر بدست می‌آید:

$$V = \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right) rN \quad (1)$$

در این معادله r شعاع مغزه و $N=0.2$ دهانه عددی است. از محاسبات گزارش شده در مرجع [۸] پیداست که با این مقدار عدد V ، تقریباً 123 مد در تار می‌تواند وجود داشته باشد، بنابراین در طول موج لیزر HF این تار شدیداً چند مدی خواهد بود. اکثر آزمایش‌ها با تار به طول 20 cm انجام شده که با استفاده از دستگاه میکرو، جابجایی محل برهمکنش بطور دقیق مشخص شده است. این لیزر چند مدی دارای 20 خط گذار است که طول موج آن در محدوده $2/96 - 2/67 \mu\text{m}$ با پهنای ضربه 400 ns است. همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، خروجی لیزر از یک دهانه به قطر 6 mm عبور کرده و شاریدگی لیزر با حفظ هم‌دوسی فضایی نسبتاً زیاد تصویر دهانه را روی سطح ورودی تار منطبق کرده است. انطباق این تصویر به قطر 150 mm با استفاده از یک عدسی ZnSe با فاصله کانونی (f) برابر 20 mm و نسبت دهانه $f/6$ انجام پذیرفت. اندازه‌گیری انرژی به کمک انرژی سنج پیروالکترونیک حساس به عمل آمده و برای اطمینان یافتن از اندازه صحیح قطر باریکه در سطح ورودی و خروجی تار، اثر کندگی بر فیلم پولاروید قبل از آغاز آزمایش بررسی شده است.

نتایج

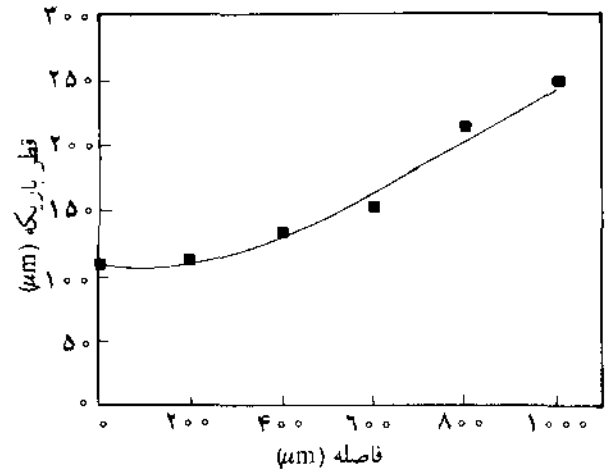
در شکل ۴ تغییرات انرژی خروجی مقادیر مختلف انرژی ورودی تار

$$V = A\alpha^{-1} \ln \frac{F}{F_1} \quad (2)$$

که در آن به ترتیب A مساحت برهمکنش، α ضریب جذب ماده، F شاریدگی لیزر و F_1 آستانه شاریدگی است.

در کمترین و بیشترین شاریدگی به ترتیب ۰/۳ و 4 Jcm^{-2} مقدار V به ترتیب مساوی $2/5 \times 10^{-9}$ و $8 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$ می‌شود. از نتایج فوق برداشت می‌شود که پس از آستانه شاریدگی ضربه‌های بعدی نقش مهمی در افزایش دما دارند و با افزایش دما، شاریدگی مورد نیاز برای کندگی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، عمق بیشتری بدست می‌آید.

شکل ۶ نمایی از سطح PVA است که در هوا با ۶۰ ضربه لیزر با انرژی خروجی ۱ ml / ۰ تار بوجود آمده است. در این مقدار انرژی، سطح پلیمر به قطر $70 \mu\text{m}$ متورم می‌شود و حلقه‌های ضعیف به قطر $110 \mu\text{m}$ اطراف آن احتمالاً بیانگر خروج انرژی بصورت مدهای پوسته و نیز منقبض شدن پلیمر به دلیل خشک شدن و از دست دادن آب است که به آستانه شاریدگی برای کندگی بسیار نزدیک است.



شکل ۵- واگرایی باریکه لیزر از تار شیشه فلوئورید $70 \mu\text{m}$.

واگرایی باریکه از نوک تار در این فاصله حدود 190 mrad بوده که البته کمی بیشتر از مقدار $f/6$ عدسی است. مقدار حجم ماده برداشته شده (V) را می‌توان با استفاده از معادله ۲ محاسبه کرد:



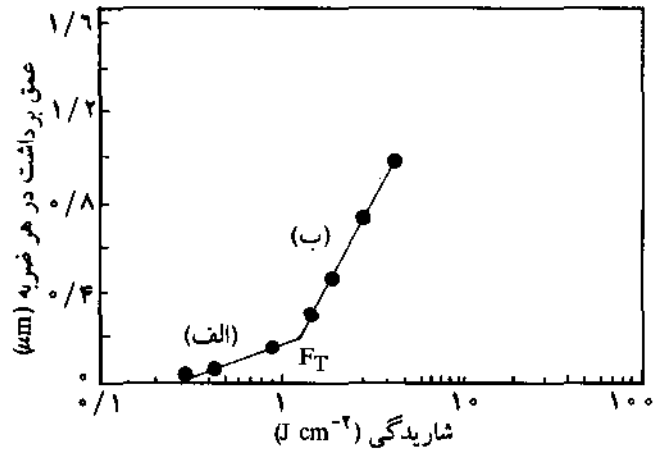
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح PVA در انرژی ۱ ml / ۰.

وجود دارد و حفره‌های ایجاد شده در سطح متورم شده می‌تواند به دلیل وجود آمدن و فرار مواد گازی از داخل پلیمر باشد. مشابه این رفتار در پلیمر پلی‌ایمید بالیزر HF [۷] و نیز بالیزرهای CO_2 ، TEA و اکسایمر مشاهده شده است [۹-۱۱]. شکل ۷ نشان دهنده عمق کندگی (x) فیلم PVA در هر ضربه در شاریدگیهای مختلف است که با استفاده از قانون بیر:

$$x = \alpha^{-1} \ln \frac{F}{F_T} \quad (3)$$

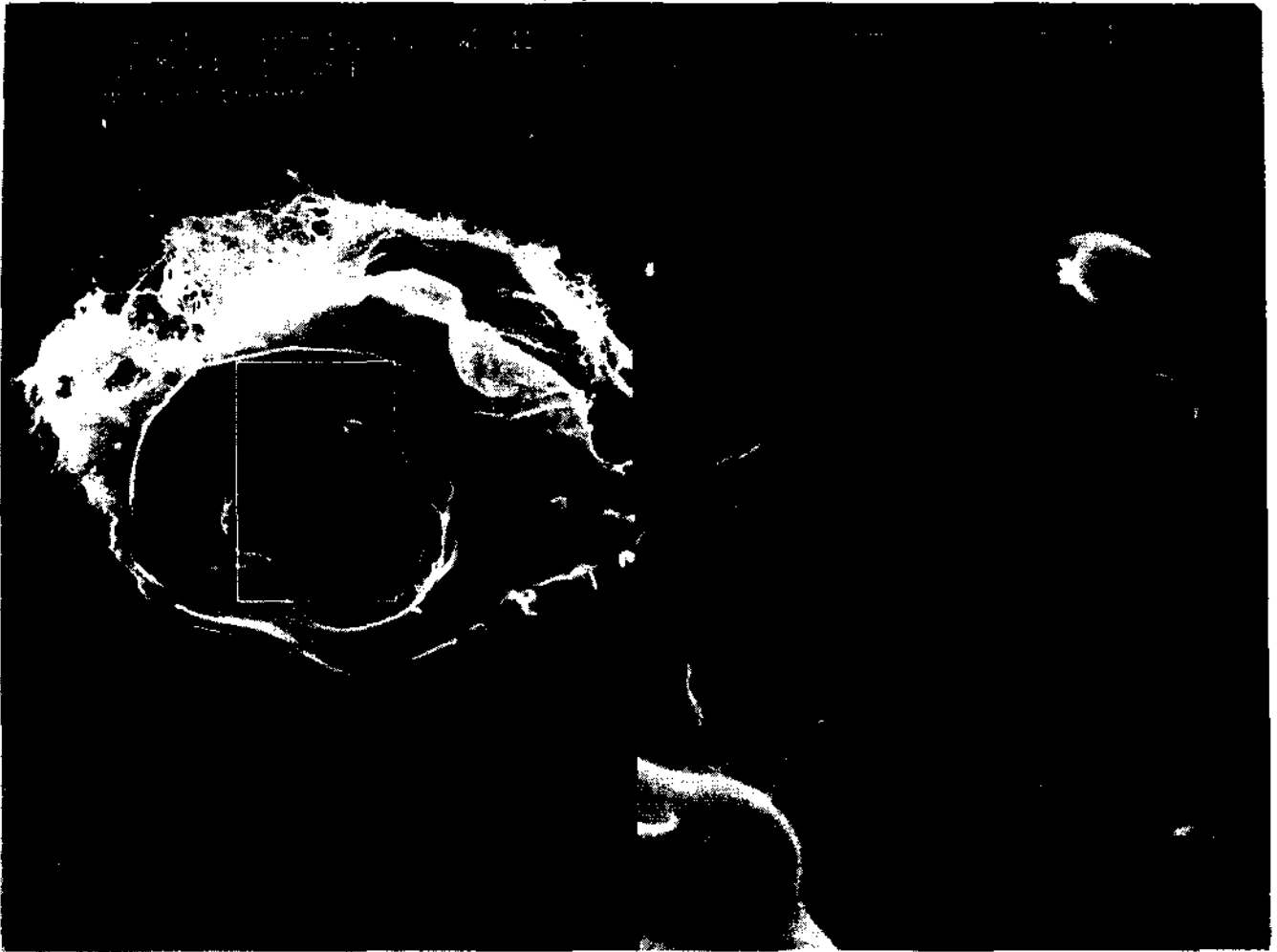
می‌توان ضریب جذب ماده را در ناحیه زیر آستانه شاریدگی F_T (ناحیه الف) بدست آورد، یعنی $\alpha \approx 7 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ و چون بالای F_T (ناحیه ب) رابطه کندگی با شاریدگی مستقیم است و با فرض اینکه چگالی پلوم کاهش می‌یابد و شفاف می‌گردد ($\alpha_p \rightarrow 0$)، بنابراین داریم:

$$x = \frac{F - F_T}{\alpha F_T} \quad (4)$$

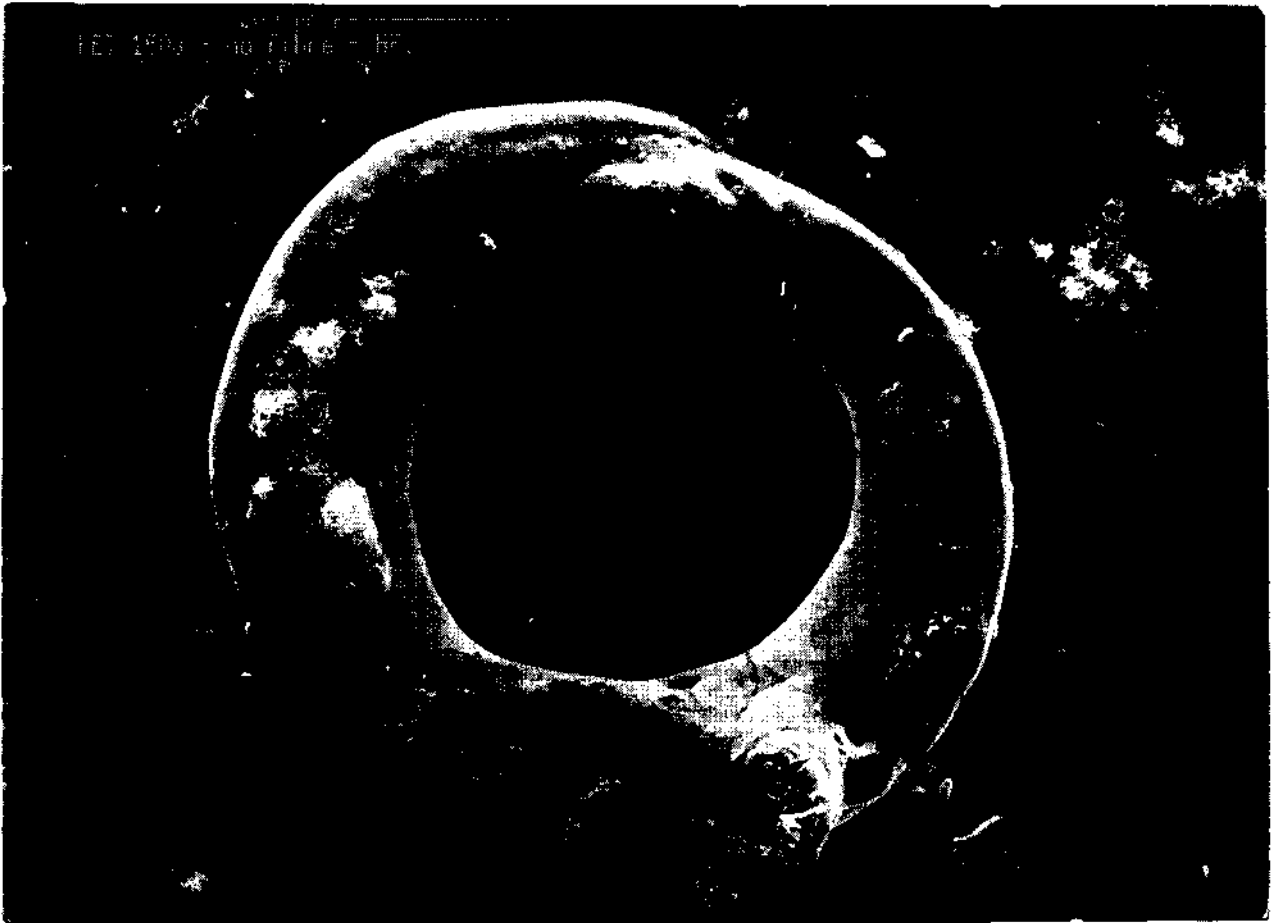


شکل ۷ - نمودار کندگی PVA با لیزر HF در شاریدگیهای مختلف.

این نتیجه حاکی از آن است که بیشتر انرژی لیزر در مغزه تار نوری



شکل ۸ - تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح PVA در انرژی ۰/۴ mJ.



شکل ۹ - نمونه‌ای از ذوب پلیمر PET با لیزر HF.

که معادل $2/94 \mu\text{m}$ است. در محدوده $2600 - 3400 \text{ cm}^{-1}$ مهم‌ترین ارتعاش مربوط به پیوند هیدروژنی بین مولکولی $(-\text{CH}_2\text{CHOH}-)$ است. ماهیت واکنش و فرایندها برای یک ماده مشخص به وسیله نرخ انرژی از دست رفته از محل برهمکنش نسبت به نرخ انرژی تحویل داده شده معین می‌گردد. به دلیل شار زیاد فوتونهای لیزر، ضریب جذب ماده می‌تواند بسیار کم و در عین حال منجر به گرمادهی و برداشت لایه نازکی از ماده باشد.

یکی از دلایل وجود دمای بسیار بالا در محل برهمکنش کوچک بودن رسانندگی گرمایی $(10^{-4} \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1})$ در اکثر پلیمرهاست، که توام با گسیل گرمایی کم از سطح است و تنها راه برای از دست دادن انرژی شکست پیوندهای شیمیایی همراه با تبخیر مواد است. بطور کلی، پلیمرها نسبت به رفتار خود در مقابل پرتوهای زیرقرمز طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- آن دسته که ذوب شده و از سر راه باریکه لیزر کنار زده می‌شوند (شکل ۹).

۲- آن گروه که تشکیل محل ضخیم کربونیزه می‌دهند و آسیب

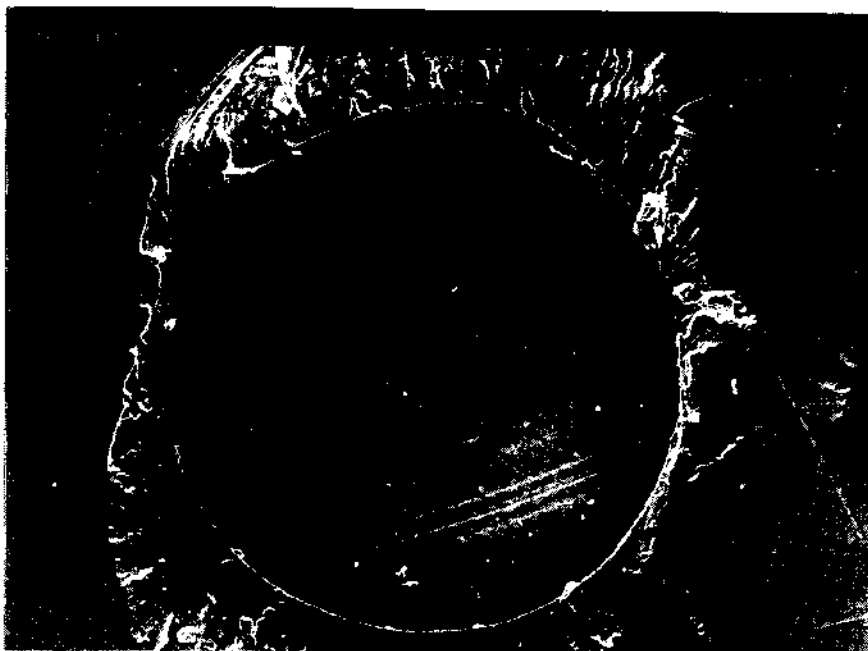
از معادله ۴ ضریب جذب برابر $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ می‌شود.

وقتی مقدار انرژی به $0/4 \text{ mJ}$ افزایش می‌یابد، پس از ۶۰ ضربه حفره‌ای به عمق حدود $45 \mu\text{m}$ و به قطر $65 \mu\text{m}$ بوجود می‌آید (شکل ۸) که کیفیت کندگی حفره گویای تجزیه گرمایی و استخراج مواد گازی است.

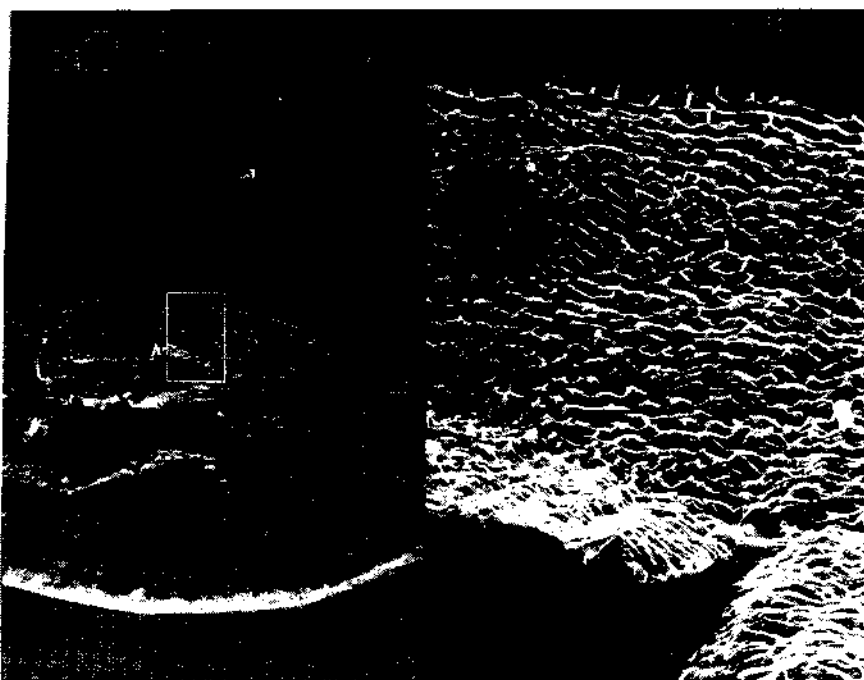
بحث

آیا گرما محدود شده است؟

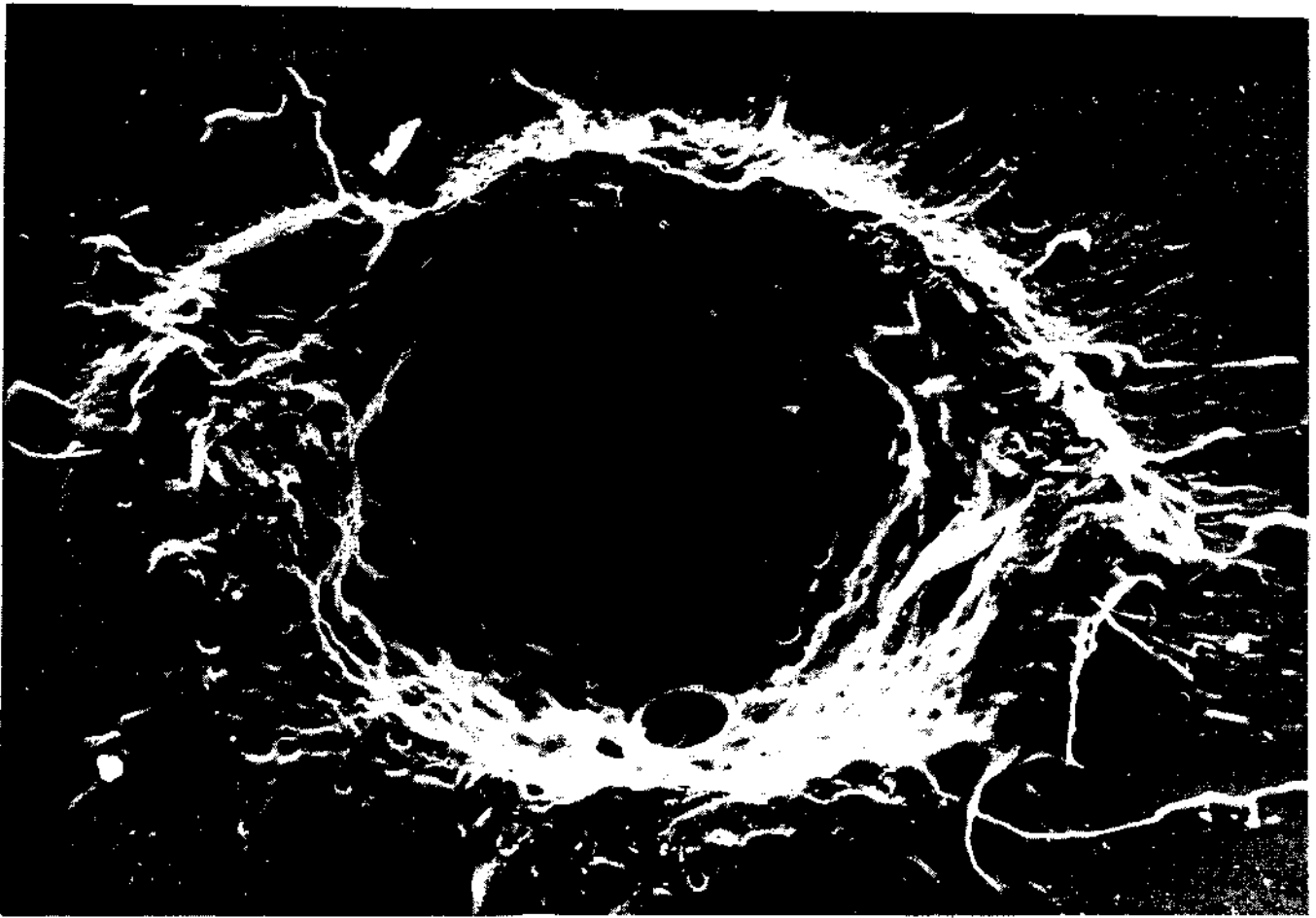
بطور کلی، برای اینکه در مدت پهنای ضربه لیزر آسیب یا عمل کندگی در پلیمر روی دهد، ماده مورد نظر باید طول موج مشخص پرتو را جذب کند. جذب پرتو باعث برانگیختگی ارتعاشی مولکولها می‌شود. در این آزمایش لیزر دارای 20 خط‌گذاری بوده که عمده‌ترین آن در $2/78 \mu\text{m}$ یا 3597 cm^{-1} است و همان‌طور که در طیف جذبی PVA در شکل ۱ نشان داده شد، بیشترین جذب در 3400 cm^{-1} است



شکل ۱۰ - الف): کندگی پلیمر PET که با لیزر KrF بدون استفاده از تار انجام شده است.



شکل ۱۰ - ب): کندگی پلیمر PET که با لیزر KrF با استفاده از تار انجام شده است.



شکل ۱۱- کندگی پلیمر PVA با لیزر HF بدون تار نوری.

می‌رسانند.

۳- آن دسته که تبخیر می‌شوند و موادی باقی نمی‌گذارند.

برای محدود ساختن گرما و جلوگیری از آسیب گرمایی به اطراف محل برهمکنش که هدفی است متمایز از کندگی نور گرمایی، پهنای ضربه باید کمتر از زمان آسایش گرمایی برای سرد شدن ماده باشد ($\tau_p < \tau_c$). در این آزمایش پهنای ضربه ns ۴۰۰ است و برای محاسبه زمان سرد شدن $\tau_c = d \sqrt{4k}$ است که در آن d عمق نفوذ فوتون و k ضریب پخشندگی گرماسمت و با داشتن رسانندگی گرمایی $12 \times 10^{-4} \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$ چگالی برابر $1/3 \text{ gcm}^{-3}$ و گرمای ویژه مساوی $1/67 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ برای پلیمر PVA در شکل ۷، $\tau_c = 90 \text{ ns}$ برای ناحیه الف و ns ۵۰۰ برای ناحیه ب خواهد شد. حال اگر عمق نفوذ گرما X_T را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$X_T = (\frac{4k\tau_p}{\pi})^{1/2} \approx 0.29 \mu\text{m} \quad (5)$$

مشاهده می‌شود که در ناحیه الف عمق نفوذ فوتون ($0.14 \mu\text{m}$) کمتر

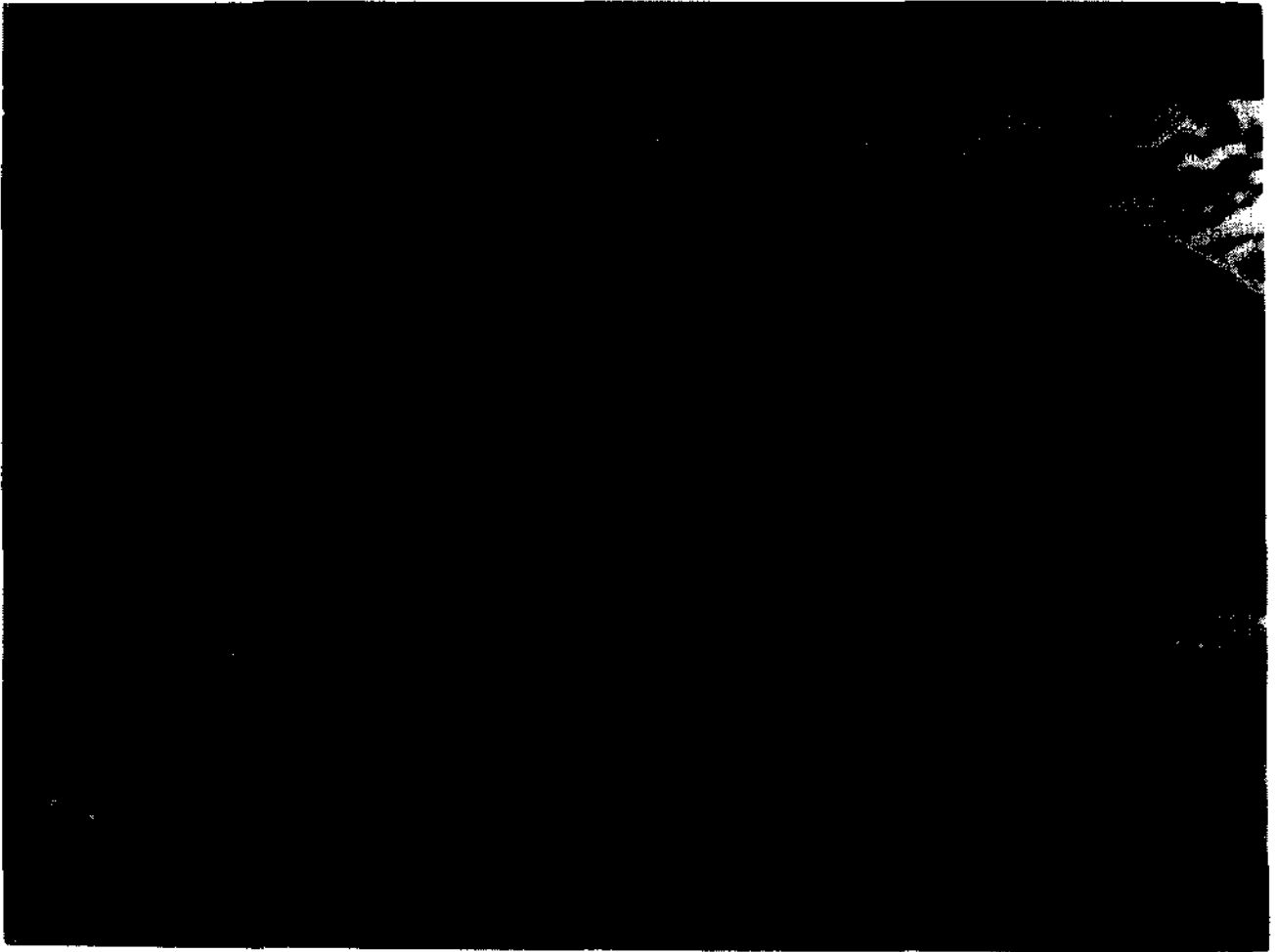
از عمق نفوذ گرماسمت و در ناحیه ب عکس این نتیجه به دست می‌آید، یعنی $d \approx 0.33 \mu\text{m}$ است. به عبارت دیگر، در ناحیه الف گرما محدوده نشده، به حد نفوذ نرسیده و پهنای ضربه بیشتر از زمان سرد شدن (ns ۹۰) است و در ناحیه ب گرمای باقیمانده در سطح پلیمر پس از کندگی یا تغییر ماهیت به سخنی محدود شده، حد بی‌دررو (adiabatic limit) و پهنای ضربه کمتر از زمان سرد شدن (ns ۵۰۰) است. اثر گرما در قسمت بعدی بررسی خواهد شد.

بررسی اثر گرما

پس از برخورد ضربه لیزر با سطح پلیمر، مقداری از شدت نور جذب و مقداری دیگر منعکس می‌گردد، بطوری که شدت نور به صورت نمایی در ماده افت می‌کند:

$$I(x) = (1-R)I_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

$$P(x) = \frac{-dI(x)}{dt} = (1-R)\alpha I_0 e^{-\alpha x} \quad (7)$$



شکل ۱۲ - کندگی PVA با لیزر HF با استفاده از تار نوری.

در پایان ضربه لیزر، دمای سطح پلیمر برابر خواهد بود با:

$$T_s = T_i + \frac{(1-R)I_0 \tau_p}{C \rho X_T} = T_i + \frac{F(1-R)}{C \rho (\pi k \tau_p)^{1/2}} \quad (12)$$

که در آن دمای اولیه و T_s دمای سطح در پایان ضربه لیزر است. چنانچه $d_0 > X_T$ باشد، معادله ۱۲ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$T_s = T_i + \frac{\alpha F(1-R)}{\rho C} \quad (13)$$

فرق اصلی بین معادله ۱۲ و ۱۳ در این است که در معادله ۱۲ دمای سطح فقط وابسته به شاریدگی است، در حالی که در معادله ۱۳ به شاریدگی و ضریب جذب ماده مربوط می‌شود. همچنین، برای محاسبه میزان انعکاس نور (R) از سطح پلیمری که جذب نسبتاً زیادی دارد، انعکاس فرنل به صورت زیر نوشته می‌شود:

گر ماده‌ی طبق معادله ۷ صورت می‌گیرد و انرژی ورودی را می‌دهد:

$$\Delta E = C \rho \Delta t \quad (8)$$

$$\frac{dE}{dt} = P(x) = C \rho \frac{dT(x)}{dt} \quad (9)$$

با مساوی قرار دادن معادله‌های ۷ و ۹، داریم:

$$C \rho \frac{dT(x)}{dt} = (1-R)I_0 a e^{-\alpha x} \quad (10)$$

معادله ۱۰ نرخ افزایش دما را به ضریب جذب و خواص گرمایی ماده ارتباط می‌دهد، ولی از آنجا که عمق نفوذ فوتون بسیار کمتر از عمق نفوذ گرماست، $d_0 \ll X_T$ است:

$$P = \frac{I_0(1-R)}{X_T} \quad (11)$$



شکل ۱۳- نمونه‌ای از آسیب‌دیدگی تار شیشه فلوئورید $500 \mu\text{m}$ در شاردگی زیاد در تماس با بافت.

معادل میانگین انرژی فعالسازی PVA و $R=8/314 \text{ Jmol}^{-1}\text{k}^{-1}$ عدد ثابت گاز است. از آنجا که دمای فعالسازی PVA حدود $146-230 \text{ K}$ است، با استفاده از مقدار میانگین، یعنی 188 KJmol^{-1} مقدار $\langle K \rangle \approx 6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ خواهد بود. هرچند به نظر می‌رسد مقدار $K=1/2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ که در حداقل دمای فعالسازی 600 K و با $E_A=146 \text{ KJmol}^{-1}$ بدست می‌آید به مقدار واقعی نزدیکتر باشد.

نقش تار نوری در عمل‌کنندگی

بدون تردید تارهای نوری کاربردهای وسیعی را در برمی‌گیرند که شاید مهمترین آنها انتقال پرتو لیزر به نقاط مورد نظر و غیرقابل دسترس است. با وجود این، اثر نقش فیزیکی تار را می‌توان بر روی هدف از لحاظ کیفی بررسی کرد.

هرگاه، مقدار شاردگی افزایش پیدا می‌کند، عمل‌کنندگی در اوایل پالس لیزر روی می‌دهد و به افزایش فشار منجر می‌گردد که این عمل نه تنها به شاردگی بلکه به شکل پالس نیز بستگی خواهد

$$R = (n_m - n_o)^2 + (\alpha n_m)^2 / [(n_m + n_o)^2 + (\alpha n_m)^2] \quad (14)$$

که در آن n_m و n_o به ترتیب ضریب شکست محیط و هواست. با استفاده از این معادله برای PVA، $R=0/99$ می‌شود که با جایگزین کردن تمام مقادیر مربوط در معادله ۱۲، دمای سطح پلیمر در شاردگیهای مختلف بدست می‌آید. مثلاً، در شاردگیهای ۱،۴ و $0/3 \text{ Jcm}^{-2}$ دمای پلیمر به ترتیب ۹۱۵، ۴۴۹ و 340 K می‌شود.

نکته قابل توجه این است که در آستانه شاردگی (شکل ۷) دمای نهایی حدود 438 K است که بسیار نزدیک به دمای ذوب PVA یعنی 531 K است. برای اینکه در مورد سرعت تجزیه گرمایی PVA اطلاعات بهتری بدست آوریم، از قانون سرعت واکنش آرنیوس استفاده می‌کنیم:

$$K(\text{s}^{-1}) = 6 \times 10^7 e^{-188000/(8/314)T} \quad (15)$$

که در آن $6 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ عدد ثابت واکنش، $E_A=188000 \text{ Jmol}^{-1}$

نتیجه‌گیری

- ۱- پلیمر PVA جذب نسبتاً زیادی در لیزر چند طول موجی HF به ویژه در خط 3400 cm^{-1} نشان می‌دهد و کندگی براحتی انجام می‌گیرد.
- ۲- چون پهنای ضربه لیزر بزرگتر از زمان سرد شدن پلیمر است، یعنی $\tau_p > \tau_c$ ، در نتیجه قبل از آنکه ضربه به پایان رسد، عمل آسایش گرمایی انجام گرفته و شرط بی دررو برای محدود ساختن گرما در قسمت لگاریتمی لحاظ نمی‌شود.
- ۳- چنانچه طول موج لیزر در $2/9 \mu\text{m}$ تنظیم گردد، جذب بهتری خواهیم داشت که در محدود کردن گرما در محل برهمکنش کمک خواهد کرد.
- ۴- در کاربرد تار نوری برای کندگی پلیمرهای آلی با لیزرهای زیرقرمز این احتمال وجود دارد که مواد ذوب شده و استخراج شده اطراف تار منجمد شوند که شکل‌شناسی آن بسیار متفاوت، یا در واقع برعکس لیزرهای فرابنفش است.
- ۵- سالم بودن سطح تار در تماس با مواد حین کندگی بسیار حائز اهمیت است و هرگونه آسیبی موجب اختلال در نتایج آزمایش خواهد شد.

مراجع

- 1 Walsh J. T., Flott T. and Deutsch T.; *Laser Surg. Med.*; **9**, 314, 1989.
- 2 Wolbarsht M. L.; *IEEE. J. QE.*; **20**, 14, 27, 1984.
- 3 Seiler J. and Marshall J. et al.; *Lasers in Ophthal.*; **1**, 49, 1986.
- 4 Leortscher H. and Mandelbaum S. et al.; *Am. J. Ophthal.*; **102**, 217, 1986.
- 5 Valderrama G. and Manefee R. et al.; *SPIE 1604*; 135, 1989.
- 6 Dyer P. E. and Khosroshahi M. E.; *Tufts. Lasers Med. Sci.*; **7**, 331, 1992.
- ۷- عترتی‌خسروشاهی محمد و دایر پیتر؛ مجله علوم و تکنولوژی پلیمر؛ سال هشتم، شماره سوم، صفحه ۱۶۱، پاییز ۱۳۷۴.
- 8 Sumiyoshi T. and Kannari F.; *J. Appl. Phys.*; **73**, 1576, 1993.
- 9 Srinivasan R., Braren B. and Casey K.; *J. Appl. Phys.*; **68**, 1842, 1990.
- 10 Dyer P. E. and Oldershaw J. et al.; *Appl. Phys.*; **B48**, 489, 1993.
- 11 Dyer P. E. and Karnakis D. et al.; *J. Phys.*; **D29**, 2554, 1994.

داشت. سرانجام در نهایت حداکثر تاثیر فشار در قله پالس مشاهده خواهد شد.

با افزایش دمای پلیمر به بالاتر از آستانه، عمل ذوب موضعی روی می‌دهد که در اثر آن پیوند واحدهای $(-\text{CH}_2\text{CHOH}-)$ گسیخته شده و با کمک کشش سطحی و تنش گرما-مکانیکی درونی، مرز محل ذوب شده در جهت مخالف توسعه می‌یابد که در نتیجه حفره به معنای محل کندگی بوجود می‌آید (شکل ۹). فرار مواد بصورت گاز با فشار زیاد از درون ماده موجب پیداشدن چندین حفره ریزتر دیگر در اطراف نقطه برهمکنش می‌شود که خود در زودتر سرد شدن سطح کمک می‌کند.

شکل ۱۰ الف تصویر میکروسکوپ الکترونی پلیمر PET را نشان می‌دهد که با لیزر KrF بدون استفاده از تار نوری کنده شده است. ولی، وقتی همان عمل از طریق تار در تماس با پلیمر انجام می‌گیرد، هندسه اطراف محیط برهمکنش بوسیله قطر خارجی تار دیکته می‌شود (شکل ۱۰ ب). نکته قابل توجه این است که لبه سطح پلیمر به صورت فرورفتگی (depression) خود را نشان می‌دهد.

در این تحقیقات نیز کندگی PVA به کمک تار و بدون تار انجام گرفته است و همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، ضربات متعدد لیزر HF شکل‌شناسی پلیمر را کاملاً تغییر داده است. این امر نشان می‌دهد که دما بسیار بالاتر از دمای ذوب PVA ($\approx 531 \text{ K}$) است و مواد ذوب شده با فشار زیاد به اطراف پراکنده شده است.

همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در آزمایش بعدی که تار با سطح پلیمر تماس مستقیم دارد، پس از چندین ضربه متوالی لیزر، فیزیک برهمکنش همانند قبل تکرار می‌شود، با این تفاوت که در این مورد مواد ذوب شده در فاز مایع با فشار از میان سطح پلیمر و نوک تار خارج می‌گردد. این نوع شکل‌شناسی بیانگر این نکته است که وقتی ضربه لیزر (400 ns) در شاریدگیهای حتی نزدیک به آستانه (F_1) با پلیمر برخورد می‌کند، مواد ذوب شده قبل از رسیدن ضربات بعدی پس از 5 s (با فرکانس $0/2 \text{ Hz}$) در دمای معمولی جامد و به بدنه خارجی تار نوری می‌چسبند. این عمل در ضربات بعدی تکرار شده تا اینکه بتدریج مواد انباشته شده دارای ارتفاع قابل توجهی می‌شوند، به طوری که پس از برداشتن تار، نمایی باقی می‌ماند.

نکته‌ای که باید بدان توجه کرد کیفیت خود تار است، چون اگر آسیب دیده باشد تاثیر مهمی بر کیفیت برهمکنش و محاسبات خواهد گذاشت، از این رو، سالم بودن تار در حین آزمایش بطور پیوسته باید بررسی شود. شکل ۱۳ نمونه‌ای از آسیب دیدگی تار شیشه فلوئورید با طول $500 \mu\text{m}$ در شاریدگی زیاد را در تماس با بافت نشان می‌دهد.

