بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

مطالعه برهم‌کنش پالس‌های فوق کوتاه لیزری با ماده شفاف فیوز سیلیکا

سمیه نجفی[۱]، آتوسا سادات عربانیان[۱]، رضا مسعودی[۱]، علی اصغر عجمی[۲و۳]، چاندرا ناتالا[۲و۴]، ولفگنگ هوزینسکی[۲]

[۱]ایران، تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

[۲]اتریش، وین، دانشگاه تکنولوژی وین، دانشکده فیزیک کاربردی

[۳] ایران، سمنان، دانشکده فیزیک

[۴] اتریش، وین، شرکت فمتولیز

چکیده - در این مقاله مدل تئوری جامعی برای بررسی کل زنجیره فرآیندهایی که در برهم کنش تک پالس لیزری فوق کوتاه کانونی شده درون حجم ماده جامد شفاف اتفاق می افتد، ارائه شده و معادلات حاکم بر انتشار غیرخطی پالس، تحول چگالی الکترون‌های تحریک شده، هدایت حرارتی و جابجایی ترموالاستوپلاستیک بطور عددی حل می شوند و در نهایت تغییرات القایی ضریب شکست درون عمق ماده شفاف، در ناحیه کانون پالس فوق کوتاه لیزری، محاسبه و با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی بصورت کیفی مقایسه می گردد. نتایج نشان می‌دهد که عمده تغییرات القایی ضریب شکست بصورت منفی و واقع در مرکز پروفایل می باشد. در ادامه آزمایشات انجام شده نشان می‌دهند که افزایش تعداد پالس فرودی در ناحیه کانون سبب القای دوشکستی شدید، بواسطه تشکیل نانوساختارهای پریودیک، در ناحیه کانون می‌شود که جهت گیری محورهای دوشکستی القا شده به قطبش پالس فرودی بستگی دارد.

کلید واژه- تغییرات القایی ضریب شکست، دوشکستی، مدل ترموالاستوپلاستیک، میکروماشین کاری لیزری فوق کوتاه، نانوتوری های القایی.

Study on interaction of ultra-short laser pulses with transparent material of fused silica glass

Somayeh Najafi[1], Atoosa Sadat Arabanian[1], Reza Massudi[1], Aliasghar Ajami[2,3], Chandra S.R Nathala[2,4], and Wolfgang Husinsky[2]

[1]Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, Tehran, Iran
[2]Institute of Applied Physics, Vienna University of Technology, Wiedner Hauptstrasse. 8, 1060 Vienna, Austria
[3]Faculty of Physics, Semnan University, Semnan, Iran
[4]Femtolasers Productions GmbH, Fernkorngasse10, 1100 Vienna, Austria

Abstract- In this paper, a comprehensive theoretical model is presented to investigate the whole chain of processes occurring in the interaction of a focused ultrashort laser pulse with fused silica glass. The equations describing the nonlinear propagation of an ultrashort pulse inside transparent material, electron density evolution, heat conduction, and thermo-elasto plastic displacement are respectively solved, and lastly, it is calculated induced refractive index changes inside the material and qualitatively compared with experimental results. The results show that the major induced refractive index changes is negative and located in the center of the profile. In the following, the performed experiments show that increasing the number of incident pulses causes inducing periodic nano-structures in focal region that orientation of the induced birefringence axes depends on the polarization of the incident pulses.

Keywords: Induced refractive index changes, Birefringence, Thermo-elasto plastic model, Femtosecond laser micromachining, Induced nano-gratings.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

۱- مقدمه

در سالهای اخیر ایجاد ساختارهای سه بعدی اپتیک مجتمع بوسیله پالس‌های لیزری فوق کوتاه کانونی شده داخل حجم ماده شفاف در بسیاری از حوزه‌های کاربردی نظیر بیوتکنولوژی، ذخیره سازی سه بعدی داده اپتیکی، اپتوالکترونیک و دستگاههای آزمایشگاه روی تراشه[۱] مورد توجه قرار گرفته است. همچنین قابلیت ایجاد دوشکستی اپتیکی درون حجم شیشه‌ها بواسطه ایجاد نانوتوری‌های خود تشکیل حوزه پیش‌رو برای ساخت ابزارهای اپتیک مجتمع را بسیار وسیع‌تر گردانده است. این روش پتانسیل ساخت ابزارهای حساس به قطبش نظیر تیغه‌های موج، صفحات موج با محور نوری چرخنده(مبدل قطبش)، هولوگرام‌های حساس به قطبش، موجبرهای حساس به قطبش، صفحات منطقه فرنل و ... را دارد.

تغییرات القا شده لیزری مواد شفاف، شامل زنجیره‌ای پیچیده از فرایندهای مختلف بوده که بطور پی در پی در بازه های زمانی مشخصی درون ماده رخ می دهد و سرانجام به تغییرات دائمی ضریب شکست ماده می‌انجامد. برای کنترل دقیق توزیع ضریب شکست، مدلسازی کامل کل زنجیره فرایندهای دخیل در این برهمکنش، و تعیین نحوه وابستگی آن به پارامترهای پالس ورودی (انرژی، طول پالس، نرخ تکرار، قطبش و ...) و هندسه کانونی، بسیار بحرانی و اساسی می باشد. عدم تعیین دقیق پارامترهای پالس فرودی در نوشتن با لیزرهای فوق کوتاه می تواند منجر به افزایش تلفات موجبری در ساختارهای سه بعدی اپتیک مجتمع شود. تاکنون آزمایشات تجربی زیادی برای بررسی اثر پارامترهای پالس فرودی روی تغییرات ساختاری و توزیع تغییرات ضریب شکست داخل محیط شفاف انجام شده است[۱, ۲]. در مشاهدات تجربی وابستگی توزیع تغییرات ضریب شکست به طول و پروفایل زمانی پالس[۳]، تعداد پالس[۳]، انرژی پالس فرودی[۴]اثبات شده است.

محققان مشاهده کردند که در نوشتن خطوط درون حجم ماده بعد از یک آستانه انرژی برای پالس‌های فوق‌کوتاه با افزایش تعداد پالس به بیشتر از ۱۰۰پالس در هر نقطه، دوشکستی بزرگی، با نام دوشکستی فرم، در ماده القا می‌شود[۵]، که تصاویر میکروسکوپ روبش الکترونی منشاء آن را تشکیل نانوتوری‌های متناوبی که عمود بر قطبش لیزر جهت‌گیری می‌کنند نشان داد[۶]. دینامیک تشکیل نانوتوری‌ها هنوز بطور کامل مشخص نیست و تحقیقات زیادی در این حوزه در حال انجام است[۷].

با وجود گستردگی کارهای تحقیقاتی انجام شده در زمینه برهمکنش پالس فوق‌کوتاه با ماده جامد شفاف، هنوز نقایص جدی در این حوزه وجود دارد. گزارشات موجود هر یک به بخشی از زنجیره برهمکنش پرداخته اند و رفتار ماده را بر اساس آن بخش تخمین زده‌اند. حل زنجیره کامل برهم کنش تک پالس لیزری از ابتدای ورود به محیط و دنبال کردن تمامی فرآیندها بصورت پی‌درپی تا ایجاد تغییرات ضریب شکست در ماده و نحوه وابستگی آن به پارامترهای پردازش نظیر انرژی، پهنای زمانی و چیرپ پالس در هیچ یک از گزارشات دیده نمی‌شود. نکته مهمتر این که طبق دانش ما تاکنون تغییرات القایی ضریب شکست ماده و وابستگی آن به پارامترهای پالس محاسبه نشده است.

در این مقاله، با هدف مطالعه کامل برهم‌کنش پالس‌های لیزری فوق کوتاه شدید با ماده جامد شفاف آمورف، ابتدا مدل‌سازی جامع کل زنجیره برهم‌کنش تک پالس لیزری فوق کوتاه کانونی شده با ماده جامد شفاف آمورف ارائه شده و اثر پارامترهای پالس فرودی روی تغییرات القایی ضریب شکست شیشه فیوز سیلیکا بررسی می شود. سپس نتایج حاصل از محاسبات با آزمایشات انجام شده روی شیشه فیوز سیلیکا بصورت کیفی مقایسه می شود. در ادامه با افزایش تعداد پالس‌های کانونی شده در این شیشه با توجه به دوشکستی القایی مشاهده شده در نقطه کانون، تشکیل نانوتوری ها اثبات شده و نشان داده می شود که جهت گیری محورهای دوشکستی القا شده به قطبش پالس فرودی بستگی دارد.

نتایج نشان می دهند که انرژی و طول پالس پارامترهای شدیداً اثر گذار در توزیع فضایی ضریب شکست می باشند و با تغییر این دو پارامتر، تغییرات ساختاری کاملا متفاوتی در ماده ایجاد می شود. همچنین دیده می شود که اندازه و علامت چیرپ فرکانسی پالس فرودی در توزیع دما و در نتیجه توزیع ضریب شکست حاصله تاثیر قابل توجهی ندارد و پارامتر کلیدی پهنای زمانی پالس می باشد. این نتیجه برای انجام آزمایشات تجربی مهم می باشد چراکه در عمل می توان از پالس های چیرپ به جای پالس های حد تبدیل (که عملا دستیابی به آن مشکل است) با همان پهنای زمانی استفاده کرد.

۲- تئوری

زنجیره برهمکنش پالس‌های لیزری فمتوثانیه با یک ماده شفاف، از جذب غیرخطی پالس‌های فوق کوتاه داخل ماده، آغاز می شود. برای پالس‌های با قله توانی بالاتر از حد بحرانی، اثر خودکانونی شدن منجر به افزایش شدت پالس و نرخ جذب چندفوتونی در ناحیه کانونی شده و سبب تحریک الکترون ها از لایه ظرفیت به لایه رسانش می‌شود. بدنبال آن، الکترون‌های تحریک شده با کسب انرژی از دنباله پالس، شتاب گرفته و انرژی آنها افزایش می یابد. الکترونهای پر انرژی در برخورد با الکترونهای باند ظرفیت سبب تحریک الکترون های بیشتری می شوند و با تکرار این رویه، سرانجام بهمنی از الکترون‌های پر انرژی ایجاد خواهد شد. اثرات کانونی شدن خطی، خودکانونی شدن و واکانونی پلاسمایی، ناشی از افزایش چگالی الکترونی در ناحیه کانون، تعیین کننده نحوه توزیع میدان پالس و چگالی پلاسما در مجاورت کانون می باشد. در این مقاله، توزیع فضا-زمانی دامنه میدان الکتریکی و چگالی پلاسمای الکترونی ناشی از انتشار پالس درون محیط شفاف، با حل عددی معادلات کوپل شده شرودینگر غیرخطی و معادله تحول چگالی پلاسما حاصل می شود. با حل این معادلات، توزیع فضایی چگالی انرژی نشانده شده در ماده، که همان انرژی الکترون‌های داغ جایگزیده درون حجم ماده می باشد، محاسبه می گردد. با بازترکیب الکترون-حفره، انرژی الکترون های تحریکی طی چند پیکوثانیه به شبکه منتقل، و این پدیده منجر به افزایش سریع دمای ناحیه کانونی می شود، که توزیع فضا- زمانی دمای ناحیه داغ با حل عددی معادله فوریه با روش ترکیبی المان محدود/ دیفرانسیل محدود بدست می آید[۸]. گرادیان دمایی بالای آن ناحیه با محیط اطراف، منجر به انبساط گرمایی سریع و جابجایی ماده می گردد که مولفه های بردار جابجایی با معادلات کوپل شده زیر حاصل می شوند.

[۱] Lab on Chip

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (2\mu+\lambda)\left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}-\frac{u}{r^2}\right]+\mu\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+(\mu+\lambda)\frac{\partial^2 w}{\partial z\,\partial r}-\beta\frac{\partial(T-T_0)}{\partial r} \quad (۱)$$

$$\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (2\mu+\lambda)\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}+\mu\left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial r}\right]+(\mu+\lambda)\left[\frac{\partial^2 u}{\partial z\,\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial z}\right]-\beta\frac{\partial(T-T_0)}{\partial z} \quad (۲)$$

که u میزان جابجایی در جهت شعاعی و w کمیت متناظر در جهت z (جهت انتشار پالس لیزری) می باشد. T_0 دمای ابتدایی، T دمای لحظه ای در ناحیه کانون، و $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha$ می باشد، که α ضریب انبساط گرمایی و λ,μ ثوابت لامه هستند. با قرار دادن توزیع دمایی ماده، و حل عددی این دو معادله کوپل شده با روش FEM در هر دو حوزه فضا و زمان، توزیع فضا- زمانی بردار جابجایی در ناحیه کانون و اطراف آن، حاصل می شود و با استفاده از نتایج حاصل از این بخش مولفه های مختلف تانسور کرنش(ϵ) و تنش(σ) محاسبه می گردند[۸].

تغییرات ضریب شکست در ناحیه کانون، بصورت زیر با تانسور کرنش مرتبط است[۹]:

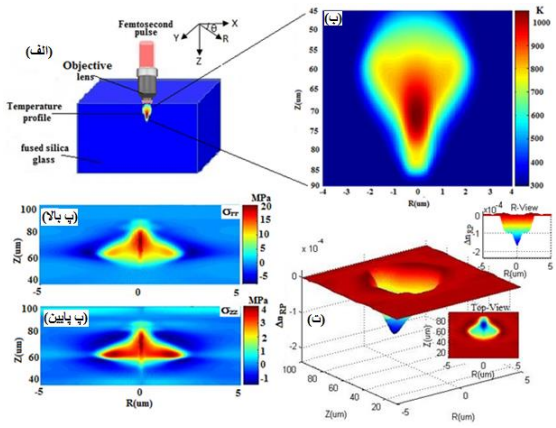
$$\Delta n_{ij} = -\frac{1}{2}n_0^3 P_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (۳)$$

که Pijkl مولفه های تانسور الاستواپتیک ماده می باشد. بایستی دقت شود برای اینکه تغییرات ایجاد شده در ماده، دائمی باشد، می بایست شرط تسلیم ون-میسس برقرار باشد [۸].

۳- نتایج و بحث

فرض کنید یک پالس لیزری با طول‌موج ۸۰۰ نانومتر، پروفایل فضایی و زمانی گوسین، بوسیله یک شیئی میکروسکوپ 20X (NA=0.5) در عمق ۷۵ میکرون زیر سطح شیشه فیوز سیلیکا کانونی می شود. شعاع انحنای موج و قطر باریکه در ورودی شیشه، به ترتیب، ۷۵میکرون و۱۳/۹ میکرون می‌باشند (شکل۱(الف)). انتشار غیرخطی پالس مذکور درون ماده شفاف، مقدار و توزیع فضایی انرژی نشانده در محیط و پروفایل ناحیه داغ در حوالی کانون را تعیین می کند. شکل‌های ۱(ب)، (پ بالا) و (پ پایین) به ترتیب توزیع دمایی حاصل از انرژی نشانده در حجم ماده و توزیع فضایی تنش ایجاد شده در راستای شعاعی (σ_{rr}) و محوری (σ_{zz}) را برای پالس با پهنای 100 فمتوثانیه و انرژی ۱ میکروژول نشان می دهد. توزیع دمایی این ناحیه به پارامترهای پردازش بستگی دارد و با طراحی پارامترهای پالس فرودی می توان توزیع دمایی ایجاد شده درون حجم ماده را کنترل کرد. عدم تقارن توزیع حرارتی و بنابراین، گرادیان حرارتی متفاوت در دو راستای شعاعی و محوری سبب اعمال تنش متفاوت می شود. براین اساس جابجایی در این دو راستا ((u,w) در معادلات (۱),(۲)) متفاوت خواهد بود و سبب عدم تقارن تحولات ایجاد شده درون ماده خواهد شد. تنش ایجاد شده بر اثر گرادیان حرارتی سبب جابجایی رو به خارج ماده در ناحیه کانونی خواهد شد. از طرف دیگر، مواد سرد اطراف ناحیه داغ مانع از جابجایی بیشتر ماده شده و در نتیجه در اطراف ناحیه داغ، تنش تغییر علامت داده و منفی می شود و جهت آن به سمت داخل تغییر می کند. مقدار بیشینه تنش به سمت خارج حدود ۱۸ مگاپاسکال واقع بر روی محور و مقدار بیشینه تنش به سمت داخل، ۵ مگاپاسکال و در شعاع ۳ میکرون مشاهده می‌شود (شکل۱(پ بالا)). با مقایسه تنش شعاعی و محوری دیده می شود که مقدار تنش شعاعی حدود ۵ برابر بیشتر از مولفه محوری است.

عدم تقارن توزیع حرارتی و بنابراین، گرادیان حرارتی متفاوت در دو راستای شعاعی و محوری سبب اعمال تنش متفاوت می شود. براین اساس جابجایی در این دو راستا ((u,w) در معادلات (۱),(۲)) متفاوت خواهد بود و سبب عدم تقارن تحولات ایجاد شده درون ماده خواهد شد. تنش ایجاد شده بر اثر گرادیان حرارتی سبب جابجایی رو به خارج ماده در ناحیه کانونی خواهد شد. از طرف دیگر، مواد سرد اطراف ناحیه داغ مانع از جابجایی بیشتر ماده شده و در نتیجه در اطراف ناحیه داغ، تنش تغییر علامت داده و منفی می شود و جهت آن به سمت داخل تغییر می کند. مقدار بیشینه تنش به سمت خارج حدود ۱۸ مگاپاسکال واقع بر روی محور و مقدار بیشینه تنش به سمت داخل، ۵ مگاپاسکال و در شعاع ۳ میکرون مشاهده می‌شود (شکل۱(پ بالا)). با مقایسه تنش شعاعی و محوری دیده می شود که مقدار تنش شعاعی حدود ۵ برابر بیشتر از مولفه محوری است. چنین رفتاری به این دلیل است که توزیع انرژی نشانده در ناحیه کانون دارای گرادیان بزرگتری در جهت شعاعی نسبت به محوری می باشد. این توزیع تنش شعاعی و محوری منجر به کاهش ضریب شکست در مرکز ناحیه داغ و افزایش آن در اطراف این ناحیه خواهد شد (شکل۱(ت)). نتایج محاسبات نشان داد افزایش توان قله پالس، بر اثر کاهش پهنای زمانی یا افزایش انرژی، سبب افزایش گستره ناحیه دارای تغییرات می شود.



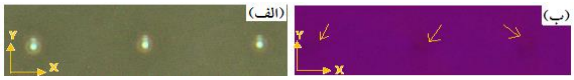
شکل۱:(الف) نمایی از مساله مورد مطالعه، توزیع فضایی (ب)دما،(پ) تنش،(ت) تغییرات القایی ضریب شکست.

در بخش آزمایشات تجربی ابتدا تغییرات القایی در شیشه فیوزسیلیکا در اثر تک پالس لیزری فوق کوتاه تیتانیوم سفایر با انرژی ۱میکروژول و پهنای زمانی حدود ۱۰۰فمتوثانیه مطالعه می شود. برای این منظور باریکه لیزری با نرخ تکرار ۱کیلوهرتز با سرعت 1cm/s توسط XYZ-Stage نسبت به نمونه حرکت می‌کند تا نواحی تغییر یافته ناشی از تک پالس لیزری در فاصله ۱۰ میکرون از یکدیگر درون شیشه ایجاد شوند. شکل ۲(الف) تصویر میکروسکوپ کنتراست فازی(PCM) مربوط به این حالت را در صفحه X-Y نمایش می‌دهد. در این تصاویر مناطق روشن بیانگر کاهش ضریب شکست می‌باشند. همانطور که دیده می‌شود مرکز پروفایل دارای تغییرات منفی است. رفتار مشاهده شده در آزمایشات تجربی با توزیع تغییرات ضریب شکست محاسبه شده تطابق دارد. برای مطالعه دوشکستی القا شده نمونه زیر میکروسکوپ قطبشی قرار داده شد. شکل۲ (ب) تصویر مربوط به این حالت را نشان می‌دهد. فلش‌ها مکان نواحی تغییر یافته بر اثر تک پالس‌ها را مشخص می‌کنند. همانطور که دیده می‌شود این نقاط هم رنگ

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

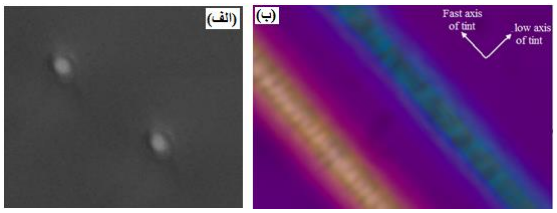
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

زمینه بوده و بنابراین نمونه در این جهت‌گیری هیچ‌گونه دوشکستی نشان نمی‌دهد. همانطور که گفته شد نقاط تحریک شده در نمونه در یک خط با فواصل ۱۰ میکرون ایجاد شده‌اند. عدم وجود دوشکستی نشان می‌دهد نقاط متوالی با فاصله ۱۰ میکرون تحت تاثیر یکدیگر نبوده و مستقل از هم می باشند و برای هر نقطه در صفحه X-Y تقارن وجود دارد.



شکل۲:(الف)تصویر pcm، (ب) تصویر قطبشی محیط تغییر یافته بر اثر تک پالس‌های فوق کوتاه با انرژی ۱میکروژول و پهنای زمانی ۱۰۰فمتوثانیه.

در آزمایشی دیگر با کاهش سرعت نمونه نسبت به قطار پالس فرودی، نمونه تحت تابش تعداد زیادی پالس در یک نقطه (در اینجا بیشتر از ۱۰۵ پالس) قرار داده می شود. تصویر قطبشی آن (شکل۳(الف)) القای دوشکستی شدیدی را در صفحه X-Y، در محل کانونی شدن تک پالس‌ها، نشان می‌دهد. این موضوع نشان دهنده شکسته شدن تقارن در صفحه X-Y، علی‌رغم وجود تقارن در پروفایل پالس فرودی و محیط مادی در این صفحه، می‌باشد. مشاهدات محققان دیگر نشان می‌دهد علت شکسته شدن تقارن در صفحه X-Y تشکیل نانوتوری‌ها (دوشکستی فرم) در این شرایط می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت نانوتوری‌ها در حالت استفاده از تک پالس تشکیل نمی‌شوند، اما در شرایط استفاده از تعداد زیاد پالس، القای این نانو ساختارها سبب ایجاد دوشکستی شدیدی در ماده می‌شود. در ادامه برای بررسی اثر قطبش قطار پالس، خطوطی با پالس‌های فوق کوتاه دارای انرژی۱میکروژول، پهنای زمانی حدود ۱۰۰ فمتوثانیه و سرعت 1μm/s در عمق ۱۰۰میکرونی شیشه نوشته شدند که شکل ۳(ب) تصویر نمونه را زیر میکروسکوپ قطبشی نشان می‌دهد. در شکل ۳(ب) خط سمت راست (خط آبی) با قطار پالس دارای قطبش P (در راستای خط) و خط سمت چپ (خط قرمز) قطبش S (عمود بر خط) نوشته شدند. خط دارای رنگ آبی تاخیر بیشتر از زمینه دارد و نشان می‌دهد که محورهای دوشکستی ناشی از نانوتوری القا شده بر محورهای تیغه تمام موج Tint (تیغه موجی که در میکروسکوپ قطبشی استفاده می شود) منطبق است، یعنی محور تند نمونه با محور تند تیغه هم‌راستا می‌باشد و این موضوع سبب افزایش تاخیر شده است. بنابراین محور کند نمونه عمود بر راستای قطبش پالس نویسنده ایجاد می‌شود و از آنجا که صفحات نانوتوری عمود بر قطبش تشکیل می شوند، این صفحات در خط آبی عمود بر خط القا شده‌اند. اما خطی که با قطبش S نوشته شده (خط قرمز رنگ در شکل۳(ب)) مقدار تاخیر کمتر از زمینه نشان می‌دهد و رنگ قرمز آن بیانگر انطباق محور کند نمونه بر محور تند تیغه می‌باشد. بنابراین جهت نانوتوری تشکیل شده بر اثر پالس‌های با قطبش P عمود بر جهت‌های متناظر برای نانوتوری نوشته شده با قطبش S می‌باشد. بنابراین با شناخت جهت محورهای تند و کند تیغه تمام موج Tint می‌توان نوع محورهای دوشکستی القایی خطوط نوشته شده را به سادگی تعیین کرد. در این آزمایش مشخص شد که محورهای تند و کند خط نوشته شده با قطبش P عمود بر محورهای متناظر خط نوشته شده با قطبش S می‌باشد.



شکل۳: تصاویر قطبشی محیط تغییر یافته بر اثر (الف) 10^5 پالس اعمال شده در یک نقطه، (ب) قطار پالس‌های با قطبش های مختلف.

۴- نتیجه‌گیری

با مطالعه کامل برهم‌کنش تک پالس لیزری فوق کوتاه با شیشه فیوز سیلیکا نشان داده شد که عمده تغییرات القایی ضریب شکست بصورت منفی و در مرکز پروفایل می باشد و تک پالس کانونی شده در ماده هیچ‌گونه دوشکستی در صفحه x-y القا نمی کند. اما افزایش تعداد پالس کانونی شده در یک نقطه، با شکستن تقارن بعلت تشکیل نانوتوری‌ها، سبب القای دوشکستی فرم در صفحه x-y می شود که قطبش قطار پالس نویسنده عامل اصلی و تعیین کننده جهت‌گیری صفحات نانوتوری‌های القایی و محورهای دوشکستی می‌باشد.

مراجع

[۱] A. Couairon, L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, and A. Mysyrowicz, "Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses," *Physical Review B*, vol. **71**, p. 125435, 2005.

[۲] M. Sakakura and M. Terazima, "Initial temporal and spatial changes of the refractive index induced by focused femtosecond pulsed laser irradiation inside a glass," *Physical Review B*, vol. **71**, p. 024113, 2005.

[۳] A. Mermillod-Blondin, I. M. Burakov, Y. P. Meshcheryakov, N. M. Bulgakova, E. Audouard, A. Rosenfeld, *et al.*, "Flipping the sign of refractive index changes in ultrafast and temporally shaped laser-irradiated borosilicate crown optical glass at high repetition rates," *Physical Review B*, vol. **77**, p. 104205, 2008.

[٤] I. M. Burakov, N. M .Bulgakova, R. Stoian, A. Mermillod-Blondin, E. Audouard, A. Rosenfeld, *et al.*, "Spatial distribution of refractive index variations induced in bulk fused silica by single ultrashort and short laser pulses," *Journal of Applied Physics*, vol. **101**, p. 043506 , ۲۰۰۷.

[٥] L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, and A. Mysyrowicz, "Study of damage in fused silica induced by ultra-short IR laser pulses," *Optics Communications*, vol. **191**, pp. 333-339, 2001.

[٦] J. D. Mills, P. G. Kazansky, E. Bricchi, and J. J. Baumberg, "Embedded anisotropic microreflectors by femtosecond-laser nanomachining," *Applied physics letters*, vol. **81**, pp. 196-198, 2002.

[٧] R. Stoian, C. D'Amico, M. Bhuyan, and G. Cheng, "Ultrafast laser photoinscription of large-mode-area waveguiding structures in bulk dielectrics," *Optics & Laser Technology*, vol. **80**, pp. 98-103, 2016.

[٨] S. Najafi, A. S. Arabanian, and R. Massudi, "Comprehensive modeling of structural modification induced by a femtosecond laser pulse inside fused silica glass," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **49**, p. 255101, 2016.

[٩] D. Royer and E. Dieulesaint, *Elastic waves in solids II: generation, acousto-optic interaction, applications* vol. **2**: Springer Science & Business Media, 2000.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]