

بررسی تولید توری پراش درون شیشه با استفاده از تپ‌های لیزر فمتوثانیه

رضا گودرزی، فرشته حاج‌اسماعیل بیگی*

پژوهشکده‌ی فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳-۱۴۳۹۹۵۱۱، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۵/۲۹

چکیده: این مقاله، برهم‌کنش تپ‌های لیزر با شیشه‌ی BK7 را مورد مطالعه قرار می‌دهد. با بررسی ابعاد سطح کندوسوز شده، شایستگی آستانه برای کندوسوز سطحی شیشه با تپ‌های ۴۰ fs با طول‌موج مرکزی ۸۰۰ nm، در حدود 2.7 J cm^{-2} به دست آمد. با انتقال محل کانون لیزر به زیر سطح و تغییر سرعت جابه‌جایی باریکه‌ی لیزر فمتوثانیه عمق شیشه با تپ‌های لیزر فمتوثانیه میکروماشین کاری شد. با استفاده از تصویرهای دوربین CCD، حاصل از انتشار نور لیزر هلیوم-نئون در درون شیشه‌ی میکروماشین کاری شده اثر به‌جامانده پس از برهم‌کنش با تپ‌های $0.35 \mu\text{J}$ و به ازای سرعت‌های جاروب 0.01 mm s^{-1} مطالعه شد. یافته‌ها نشان داد که در اثر برخورد ۱۰ تپ با انرژی $0.35 \mu\text{J}$ در هر موضع، توری پراش درون شیشه تشکیل می‌شود. گام توری پراش ایجاد شده در حدود $4.52 \mu\text{m}$ به‌دست آمد.

کلیدواژه‌ها: توری پراش، لیزر فمتوثانیه، شیشه BK7، کندوسوز

Investigation of diffractive grating creation in glass by using femtosecond laser pulses

R. Goodarzi, F. Hajiesmaeilbaigi*

Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399511-13, Tehran-Iran

Abstract: In this paper, the interaction of femtosecond laser pulses with BK7 glass is investigated. A Ti:sapphire femtosecond laser with the chirped pulse amplification is used. By studying the diameter of the ablated area, the threshold fluence for the 40 femtosecond pulses at the 800 nanometers is obtained to be around 2.7 J/cm^2 . By moving the position of the laser focus into depth of the glass, and by changing the translation speed of the femtosecond laser pulses, depth of the glass has been micro machined by laser pulses. By using CCD camera pictures, obtained from propagation of the He-Ne light through the micromachined region, effect of the interaction with three different translation speeds, 0.01, 0.02 and, 0.05 mm/s is investigated. The results show that the diffractive grating is formed inside the volume of the glass due to the interaction of 10 femtosecond laser pulses having 0.35 microjoules at each position. Finally, the created diffraction grid step is obtained about 4.52 micrometers.

Keywords: Grating, Femtosecond laser, BK7 glass, Ablation

*Email: fesmaeilbaigi@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

برهم‌کنش، منجر به تغییر ضریب شکست ماده در آن ناحیه می‌شود [۹]. کمی بعد در سال ۱۹۹۷ تپ لیزر فمتوثانیه را با استفاده از عدسی‌های میکروسکوپ شیئی، درون شیشه متمرکز کردند که نتیجه‌ی آن ایجاد ریزانفجار در ناحیه‌ی برهم‌کنش بود [۱۰]. در اثر ریزانفجارها، ناحیه‌های توخالی کوچکی ایجاد می‌شود (معمولاً در ابعاد چندصد نانومتر) که اطراف این ناحیه‌های توخالی، ناحیه‌های با چگالی بسیار بالا وجود دارد. در سال ۱۹۹۹ همراه با پراش ناهمسانگرد نور [۱۱] و در سال ۲۰۰۱ با مشاهده‌ی پدیده‌ی دوشکستی [۱۲] در برهم‌کنش تپ‌های لیزر فوق‌کوتاه با شیشه، احتمال ایجاد نانو ساختارهای تناوبی با جدیت بیشتری بررسی شد. در سال ۲۰۰۲ نظریه‌ی مربوط به نانوتوری‌های پراش بررسی [۱۳] و در سال ۲۰۰۳ نخستین بررسی تجربی برای اثبات تشکیل نانوتوری پراش در اثر برهم‌کنش تپ‌های فوق‌کوتاه با شیشه، انجام شد [۱۴]. از ساخت هولوگرام‌های رایانه‌ای می‌توان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کاربردهای نانوتوری‌های پراش نام برد [۱۵].

نانوتوری‌های پراش در واقع در اثر تغییرات تناوبی چگالی شکل می‌گیرند [۱۴]. اگرچه تشکیل نانوتوری‌های پراش امری کاملاً اثبات شده است اما سازوکار شکل‌گیری آن‌ها هنوز به‌طور کامل مشخص نیست. تاکنون سازوکارهای مختلفی پیشنهاد شده است [۱۶-۱۸]. در توجیه پدیده‌ی ایجاد نانوتوری پراش، شیموتسوما و همکاران، مدلی بر مبنای تداخل بین میدان‌های الکتریکی لیزر فرودی و موج پلاسما الکترونی پیشنهاد کردند. تداخل بین میدان نور فرودی و میدان الکتریکی موج‌های پلاسما الکترونی سبب مدوله شدن تناوبی الکترون‌های پلاسما و ایجاد تغییرات ساختاری در شیشه می‌شود [۱۴]. در این مدل، دوره‌ی تناوب توری پراش به چگالی الکترونی پلاسما و دمای آن بستگی دارد [۱۴]. تداخل و برهم‌کنش دوقطبی- دوقطبی پلاریتون‌ها، سازوکار دیگری است که برای تشکیل نانوتوری‌های پراش پیشنهاد شده است. در این سازوکار، به دلیل خودجای‌گزیدگی فوق سریع اکسیتون در ساختار شبه‌بلوری، توری‌های پلاریتونی درون شیشه منجمد شده و یک ساختار دائمی حاصل می‌شود [۱۹].

با پیشرفت‌های سریعی که در فن‌آوری ساخت لیزرها بعد از اختراع روش تقویت تپ چیرپ شده^۱ [۱] اتفاق افتاد، امروزه امکان دسترسی به لیزرهای با توان تراوات تا پتاوات با پهنای زمانی فوق‌کوتاه (پیکوثانیه تا فمتوثانیه) به راحتی در آزمایشگاه فراهم شده است. برهم‌کنش لیزر با مواد از مهم‌ترین موضوع‌های مرتبط با چنین لیزرهایی است که می‌توان به آن اشاره کرد [۲]. در میان پدیده‌های مختلفی که در اثر برهم‌کنش تپ‌های فوق‌کوتاه با مواد مشاهده می‌شود، آسیب لیزر- القا^۲ به دلیل آن‌که می‌تواند هم مخرب و هم مفید باشد از اهمیت بسیاری برخوردار است. آسیب لیزر- القا به معنی ایجاد تغییرهای دائمی در مواد اپتیکی است که پس از برهم‌کنش با تپ‌های لیزر روی می‌دهد. این پدیده دارای رفتار آستانه‌ای است به‌طوری‌که در مواد مختلف آستانه‌ی شدت لیزر برای ایجاد پلاسما با چگالی بحرانی متفاوت است. آستانه‌ی قدرت میدان برحسب شاریدگی^۳ انرژی لیزر بیان می‌شود. از آنجایی که ضریب جذب چند فوتونی، گاف انرژی، انرژی پیوند و خواص گرمایی مانند رسانندگی گرمایی، ضریب انبساط گرمایی و دمای ذوب در مواد مختلف، متفاوت است، از این‌رو انتظار می‌رود آستانه‌ی شاریدگی نیز برای مواد مختلف متفاوت باشد [۳]. هم‌چنین با توجه به آن‌که حجم و سطح دارای خواص فیزیکی و ترازهای انرژی متفاوتی هستند، در نتیجه مقدار شاریدگی آستانه برای یک ماده‌ی خاص در سطح و حجم آن نیز متفاوت است [۴].

اثر تپ‌های لیزر روی شیشه می‌تواند منجر به ساخت ابزارهایی مانند ریزکانال، موج‌بر و توری پراش شود [۵-۷]. تپ‌های فمتوثانیه با توان کم‌تر یا نزدیک آستانه‌ی خود- کانونی و شدت پس از تمرکز بیش از آستانه‌ی یونش چندفوتونی، می‌توانند انرژی خود را به‌طور یکنواخت در دی‌الکتریک‌های شفاف تخلیه و پلاسمایی با چگالی متوسط ایجاد کنند [۸]. در سال ۱۹۹۶ مشخص شد که تشکیل پلاسما در ناحیه‌ی

1. Chirped pulse amplification (CPA)

2. Laser induced damage (LID)

3. Energy fluence

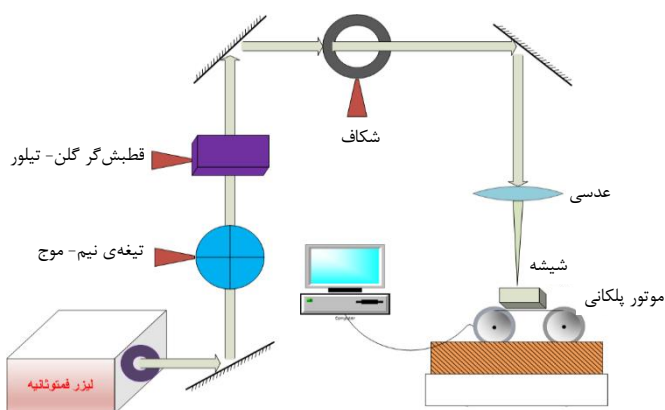
انرژی تپ پس از عبور از تقویت کننده^۳ تا چندصد μJ افزایش می یابد. طول موج مرکزی لیزر در حدود 790 nm و آهنگ تکرار آن 10 Hz است. زمان دیرش تپ های لیزر در هر آزمایش با استفاده از سیستم خودهمبسته ساز^۴ اندازه گیری می شود. تپ های استفاده شده در این پژوهش دارای زمان دیرش تقریباً 40 fs هستند (پهنای نیم-ارتفاع تپ^۵). تپ های لیزر تقویت شده پس از خروج از لیزر به چینش آزمایش برهم کنش منتقل می شوند. در این چینش آزمایش تپ لیزر قبل از برخورد به هدف، به منظور کنترل انرژی، به ترتیب از یک تیغه نیم-موج و یک قطبش گر گن-تیلور عبور کرده و سپس با استفاده از یک آینه ی تمام بازتابنده از طریق یک عدسی شیئی المپیوس^۶ ($f = 45.06\text{ mm}$) روی نمونه، کانونی می شود. قطبش لیزر فرودی، خطی بوده و با چرخش قطبش گر می توان میزان انرژی تپها را به طور پیوسته کنترل کرد. نمونه ی هدف از جنس شیشه ی BK7 است که روی یک موتور پلکانی^۷ قرار گرفته و امکان جابه جایی میکرومتری نمونه را با استفاده از رایانه فراهم می کند. چینش آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش، پس از برهم کنش تپ های لیزر با شیشه، به منظور بررسی ریخت شناسی سطح از تصویرهای حاصل از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۵۰ برابر استفاده شده است.

پژوهش ها نشان داده است که اگر آهنگ تکرار تپها بیش از 500 kHz و انرژی هر تپ بیش از $1\text{ }\mu\text{J}$ باشد و یا اگر آهنگ تکرار تپها بیش از 1 MHz و انرژی هر تپ بیش از $0.6\text{ }\mu\text{J}$ باشد، نانوتوری پراش تشکیل نمی شود [۲۰]. شرایط تمرکز باریکه ی لیزر نیز بسیار مهم است، با استفاده از عدسی هایی با گشودگی عددی $0.9 < NA < 0.25$ نانوتوری پراش ایجاد نمی شود [۲۱]. هم چنین نشان داده شده است که نانو ساختارهای تناوبی تنها با استفاده از تپ هایی با انرژی $0.2\text{ }\mu\text{J}$ تا $11\text{ }\mu\text{J}$ شکل می گیرند. در انرژی های بالاتر از این محدوده، ساختارهای شکل گرفته بی نظم هستند و در انرژی های پایین تر از این محدوده، ساختار ایجاد شده یکنواخت بوده و دارای تناوب نیست [۲۲]. توری های ایجاد شده دو دسته اند؛ دسته ای در جهت انتشار باریکه ی لیزر و دسته ی دیگر در جهت قطبش لیزر دارای تناوب اند [۲۳]. دوره ی تناوب نانوتوری پراش از مرتبه ی $(\lambda/2n)$ است [۱۷].

با توجه به محدودیت دسترسی به لیزرهای فوق کوتاه با آهنگ تکرار بالا (MHz) برای همگان، میکروماشین کاری لیزری با آهنگ تکرار کم (از مرتبه ی Hz) می تواند کاربردهای بسیاری داشته باشد. تولید توری پراش با آهنگ تکرار کم یکی از این کاربردها به شمار می رود. با توجه به اهمیت بررسی برهم کنش تپ های لیزر فمتوثانیه با مواد شفاف از جمله شیشه، این مقاله پس از تعیین مشخصه های مربوط به تخریب لیزر-القا با استفاده از تپ های لیزر فمتوثانیه، شاریدگی آستانه ی تخریب لیزر در شیشه ی BK7^۱ را به دست می آورد. هم چنین به طور تجربی اثر برهم کنش تپ های برخوردی به شیشه و ایجاد نانوتوری پراش درون شیشه را با استفاده از لیزر فمتوثانیه مورد بررسی قرار می دهد.

۲. چینش آزمایش

در این پژوهش، از لیزر فمتوثانیه ی تیتانیم: سفایر^۲ با سیستم تقویت بر مبنای تقویت تپ چیرپ شده، استفاده شده است.



شکل ۱. چینش آزمایش استفاده شده.

3. Regenerative amplifier
4. Autocorrelator
5. Full width at half maximum (FWHM)
6. Olympus
7. Step motor

1. Borosilicate glass schott
2. Ti:sapphire

قطر باریکه پس از کانونی شدن ($2w_0$) به طول موج (λ)، قطر باریکه در قبل از کانونی شدن و فاصله‌ی کانونی (f) عدسی وابسته است [۲۴]،

$$2w_0 = \left(\frac{4\lambda}{\pi}\right)\left(\frac{f}{l}\right) \quad (2)$$

قطر باریکه پس از کانونی شدن توسط عدسی شیئی با فاصله‌ی کانونی 45.06 mm ، به حدود $4.1 \text{ }\mu\text{m}$ می‌رسد. با مشخص شدن قطر باریکه پس از کانونی شدن، می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر شار انرژی لیزر را محاسبه کرد:

$$F = \frac{2E}{\pi w_0^2}$$

که در آن، E انرژی تپ لیزر است.

برای بررسی شاریدگی آستانه‌ی سطحی، تپ‌های لیزر با انرژی‌های مختلف به سطح نمونه‌ی شیشه‌ی BK7 تابانده شده و اثر ایجاد شده روی سطح با استفاده از میکروسکوپ نوری تصویرگیری شد. در شکل ۳ اثر تپ فمتوثانیه روی شیشه، به ازای شاریدگی انرژی‌های مختلف نشان داده شده است. بین ابعاد سطح تخریب شده و شاریدگی انرژی لیزر یک رابطه‌ی تجربی وجود دارد [۲۵]،

$$D^2 = 2w_0^2 \ln(F / F_{th}) \quad (3)$$

که در آن D قطر سطح تخریب شده و F شاریدگی انرژی لیزر است.

با استفاده از رابطه‌ی بالا می‌توان شاریدگی آستانه را به دست آورد.

در رابطه‌ی (۲) با معلوم بودن اندازه‌ی لکه (w_0) و رسم منحنی D^2 بر حسب F می‌توان شاریدگی انرژی آستانه F_{th} را به دست آورد (شکل ۴). با استفاده از منحنی شکل ۴ و با برون‌یابی آن، مقدار تقریبی شاریدگی انرژی آستانه‌ی سطحی در حدود $F_{th} \approx 2.7 \text{ J cm}^{-2}$ به دست آمد.

۳. اندازه‌گیری شاریدگی آستانه برای آسیب لیزر- القا

همان‌طور که بیان شد مشخصه‌ی مهم در آسیب لیزر- القا شاریدگی آستانه است که از تقسیم انرژی تپ بر مساحت لکه‌ی روی نمونه به دست می‌آید. با جابه‌جایی نمونه در جهت عمودی، محل کانون تپ روی سطح نمونه قرار گرفت. برای محاسبه‌ی قطر باریکه‌ی لیزر در کانون، باید قطر باریکه‌ی لیزر قبل از عدسی اندازه‌گیری شود. برای اندازه‌گیری قطر لیزر از روش روزنه‌ی متحرک استفاده شد. در این روش میانگین انرژی تپ‌های لیزر برای قطرهای مختلف روزنه اندازه‌گیری می‌شود و با توجه به توزیع فضایی تقریباً گاوسی تپ‌ها، می‌توان با استفاده از رابطه‌ی بین توان و قطر باریکه‌ی لیزر، قطر کمر باریکه‌ی لیزر در کانون را به دست آورد. در شکل ۲، انرژی میانگین هر تپ به ازای قطرهای مختلف روزنه رسم شده است. برای محاسبه‌ی اندازه‌ی لکه از رابطه‌ی زیر استفاده شد:

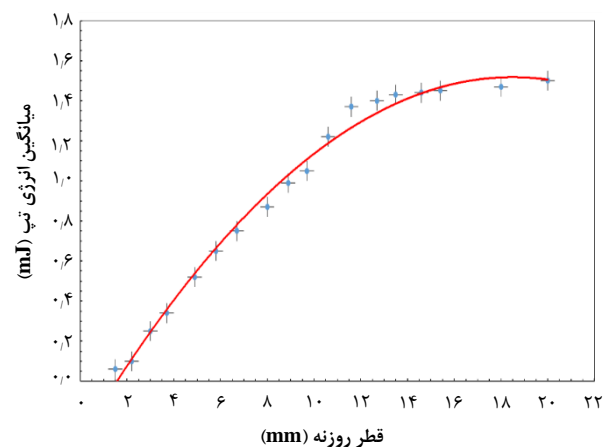
$$P(x) = P(\infty) \left[1 - e^{-\frac{rx^2}{l}} \right], x = l$$

$$P(l) = 0.865 \times P(\infty)$$

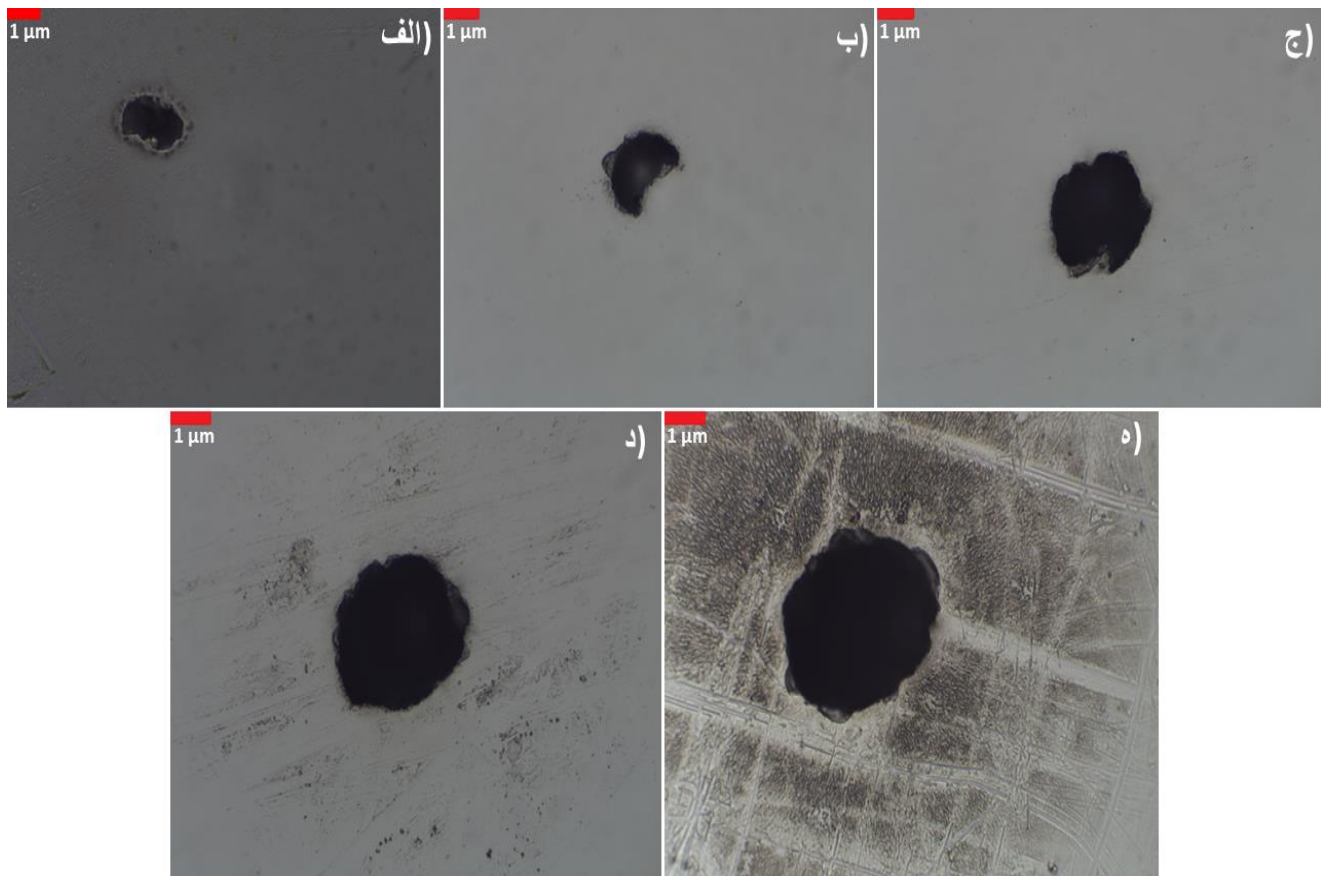
$$l = 10.9 \text{ mm}$$

(۱)

در این‌جا، l اندازه‌ی لکه قبل از کانونی شدن (در حدود 10.9 mm) است.



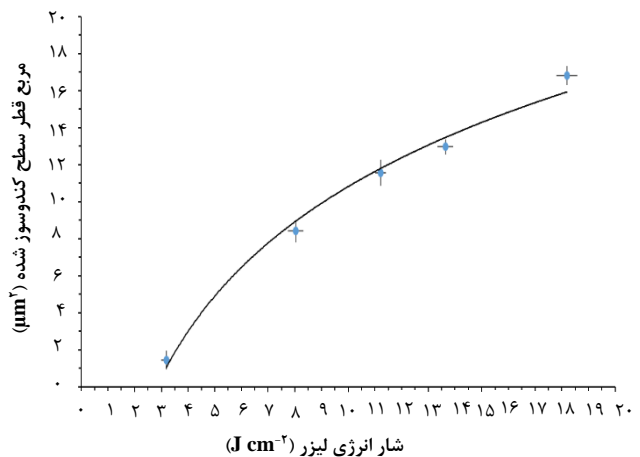
شکل ۲. نمودار انرژی تپ بر حسب قطر روزنه.



شکل ۳. اثر تپ‌های لیزر فوق کوتاه با شاریدگی انرژی‌های، (الف) ۳٫۱۸، (ب) ۸٫۰۳، (ج) ۱۱٫۲، (د) ۱۳٫۶، (ه) ۱۸٫۲ $J cm^{-2}$ ، روی سطح شیشه.

مربوط به سطح مشخص شد، می‌توان مکان کانون باریکه‌ی لیزر را به نحوی به درون شیشه انتقال داد به طوری که شاریدگی انرژی تپ لیزر در روی سطح کم‌تر از شاریدگی آستانه باشد اما در عمق که بیشینه‌ی کانونی شدن اتفاق می‌افتد، شاریدگی انرژی لیزر به حدی برسد که بتواند سبب آسیب در شیشه در آن نقاط شود. با توجه به آن‌که در این پژوهش شاریدگی آستانه برای سطح شیشه در حدود $2.7 J cm^{-2}$ به دست آمده است، برای آسیب در حجم، مکان کانون را در عمق $100 \mu m$ از سطح قرار داده و از تپی با انرژی حدود $0.22 \mu J$ استفاده شده است.

برای ایجاد طرح دلخواه در درون شیشه، باید با جابه‌جایی شیشه به وسیله‌ی موتور پلکانی، مکان کانون تپ‌ها را تغییر داد. در آزمایش‌های انجام شده، نمونه با سرعت‌های $v_1 = 0.2 mm s^{-1}$ ، $v_2 = 0.5 mm s^{-1}$ در جهت عمود بر جهت انتشار لیزر جابه‌جا می‌شد. با توجه به بزرگی پهنای باریکه لیزر



شکل ۴. نمودار تغییرات مربع قطر سطح کندوسوز شده (D^2) بر حسب شاریدگی انرژی لیزر (F).

۴. میکروماشین‌کاری در حجم شیشه

با توجه به آن‌که برای القای آسیب باید شاریدگی انرژی لیزر در حد شاریدگی آستانه و یا بزرگ‌تر باشد، می‌توان آسیب را از سطح به عمق انتقال داد. پس از آن‌که شاریدگی انرژی آستانه‌ی

و یا موج‌بر پیوستگی مسیر کندوسوز اهمیت دارد این امر می‌تواند برای ساخت این اقلام مدنظر قرار بگیرد.

۵. ایجاد نانوتوری پراش درون شیشه

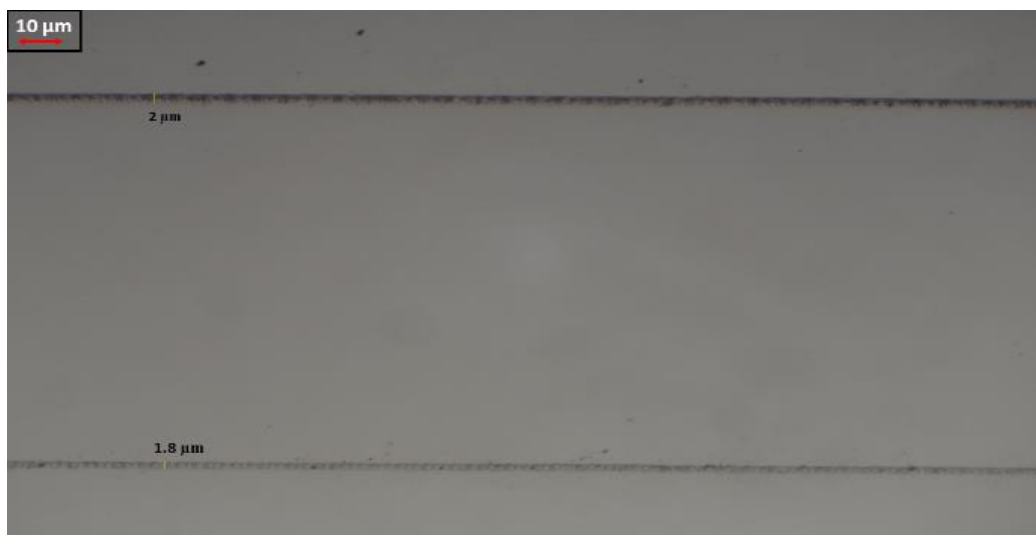
همان‌طور که در بخش قبل به آن اشاره شد، ایجاد ساختارهای حجمی درون مواد شفاف کاربردهای فراوانی از جمله در تولید موج‌بر، ریزکانال و توری پراش براگ دارد [۳]. اساساً استفاده از لیزرهای فوق‌کوتاه در روش تداخلی برای تولید ریزساختارهای تناوبی در مواد شفاف، یک روش متداول است زیرا انتشار آن سبب مدوله شدن شدت درون ماده می‌شود. دوره‌ی تناوب این مدولاسیون از مرتبه‌ی طول موج لیزر است [۲۷]. همراه با جذب غیرخطی تپ‌های فوق‌کوتاه در محل کانون تپ لیزر، تخلیه‌ی انرژی به صورت کاملاً جای‌گزیده نیز میسر می‌شود. جذب انرژی منجر به یونش اتم‌ها می‌شود که پس از سرد شدن باعث تغییر چگالی الکترون‌ها و در نتیجه تغییر ضریب شکست می‌شود. در اثر برهم‌کنش تپ‌های متوالی با نمونه، ساختارهای تناوبی به‌طور خودبه‌خود شکل می‌گیرند [۲۸]. همان‌طور که در مقدمه گفته شد، تحت شرایط خاصی تغییر ضریب شکست می‌تواند باعث تولید نانوتوری‌های پراش شود [۱۴]. انرژی هر تپ باید بین $0.2 \mu\text{J}$ تا $11 \mu\text{J}$ و گشودگی عددی عدسی خارج از بازه‌ی $0.9 < NA < 0.25$ باشد [۲۲].

در کانون، با استفاده از رابطه‌ی زیر تعداد تپ‌هایی که به هر نقطه از حجم شیشه برخورد می‌کند، قابل محاسبه است [۲۶]:

$$N_{eff} \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{r_w \cdot f}{v} \quad (4)$$

در این جا f نرخ تکرار لیزر، v سرعت جابه‌جایی و W_0 شعاع کمر باریکه‌ی لیزر است.

در شکل ۵ اثر به‌جامانده در عمق، پس از برهم‌کنش تپ‌های ۴۰ fs با شیشه مشاهده می‌شود. ردهای به‌جامانده در بالا و پایین تصویر به ترتیب مربوط به سرعت جاروب v_1 و v_2 هستند. با استفاده از سرعت v_1 تعداد تپ‌هایی که با هر نقطه از شیشه برهم‌کنش می‌کنند، حدود $2/5$ برابر بیش‌تر از حالت مربوط به سرعت v_2 است در این جا، $N_1 = 5$ ، $N_2 = 2$. ضخامت میانگین نوار مربوط به سرعت v_1 حدود $0.2 \mu\text{m}$ بیش‌تر از ضخامت میانگین نوار ایجاد شده با سرعت v_2 است. اندک تغییر ضخامت مشاهده شده، احتمالاً می‌تواند به دلیل اثر جمعی گرما باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با دقت در تصویر میکروسکوپی حاصل، می‌توان مشاهده کرد که با سرعت جاروب کم‌تر، کندوسوز به‌طور مؤثرتری رخ داده به‌طوری‌که نقاط تیره‌ی بیش‌تر با پیوستگی بهتری در مسیر کندوسوز حاصل شده است. با توجه به آن‌که برای ساخت توری، ریزکانال



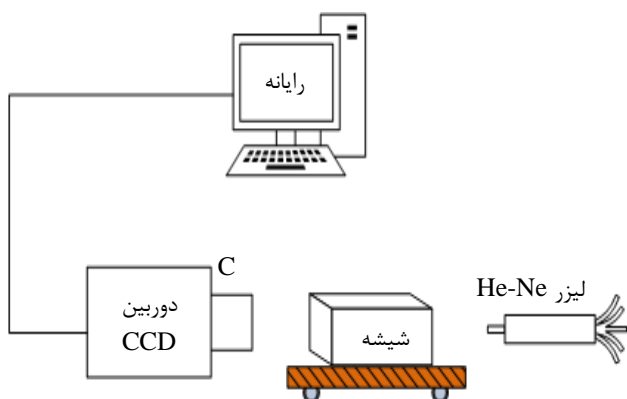
شکل ۵. ریزنگاره‌ی میکروسکوپ نوری عبوری از رد به‌جامانده در اثر برهم‌کنش تپ‌های لیزر فمتوثانیه با نمونه‌ی شیشه‌ای برای جابه‌جایی‌های نمونه با سرعت‌های مختلف: بالای تصویر، $v_1 = 0.2 \text{ mm s}^{-1}$ و پایین تصویر، $v_2 = 0.05 \text{ mm s}^{-1}$.

۶. تحلیل و بررسی توری پراش ایجاد شده در درون

شیشه

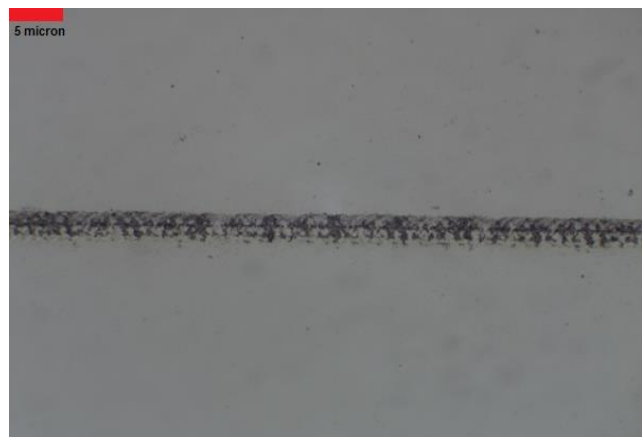
برای بررسی اثر ایجاد شده توسط باریکه‌ی لیزر فمتوثانیه در ناحیه‌ی کانون، از لیزر هلیوم-نئون (He-Ne) با طول موج 632.8 nm استفاده شد. پس از ایجاد توری پراش درون شیشه، باریکه‌ی لیزر هلیوم-نئون به نمونه‌ی شیشه‌ای تابانده شد. جهت انتشار لیزر هلیوم-نئون درون شیشه به‌گونه‌ای انتخاب شد که عمود بر راستای انتشار لیزر فمتوثانیه و نیز عمود بر جهت جابه‌جایی نمونه باشد. از آنجایی که نمونه‌ی BKV برای طول‌موج لیزر He-Ne شفاف است، باریکه‌ی لیزر می‌تواند بدون جذب قابل توجهی از نمونه خارج و تصویر آن توسط دوربین دستگاه با بار جفت شده^۱ (CCD) ثبت شود. طرح‌واره‌ی چینش انتشار لیزر هلیوم-نئون درون شیشه در شکل ۷ نشان داده شده است.

ساختارهای تناوبی تشکیل شده در درون شیشه می‌تواند همانند توری پراش عمل کرده و منجر به تشکیل طرح تداخلی شود. در این پژوهش یک رد توسط لیزر فمتوثانیه ایجاد و توری پراش در درون آن ایجاد شده است. طول توری پراش نیز قابل کنترل است و بسته به این‌که جاروب توسط باریکه‌ی لیزر فمتوثانیه در درون شیشه تا چه طولی ادامه یابد، متغیر خواهد بود. در این آزمایش طول برهم‌کنش در حدود $200 \mu\text{m}$ بوده است. در نتیجه با توجه به تعداد خط بر میلی‌متر، می‌توان تعداد کل خط‌های ایجاد شده به عنوان توری پراش را به دست آورد. در شکل ۸ ریزنگاره‌ی میکروسکوپی جانبی نمونه نشان داده شده است.



شکل ۷. چینش آزمایش استفاده شده برای بررسی تغییرات ایجاد شده در درون نمونه.

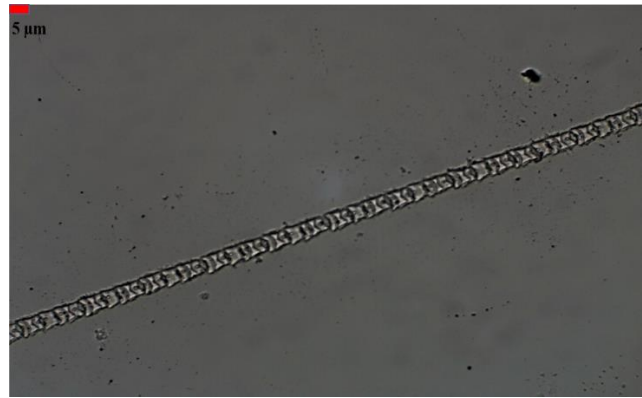
اکثر مطالعات انجام شده روی سیلیکا بوده [۲۹] و در زمینه‌ی شیشه‌های دیگر مانند BKV، پژوهش‌های کم‌تری انجام شده است [۵]. در این پژوهش نشان داده شده است که با استفاده از تپ‌های فمتوثانیه با آهنگ تکرار پایین در درون شیشه‌ی BKV توری پراش ایجاد می‌شود. با کانونی کردن باریکه‌ی لیزر فمتوثانیه در عمق $100 \mu\text{m}$ در شیشه‌ی BKV و جابه‌جایی نمونه در جهت عمود بر جهت انتشار لیزر، آسیب حجمی صورت گرفته است. برای آن‌که شرایط لازم برای ایجاد نانتوتوری پراش حاصل شود، انرژی تپ بیش از $0.2 \mu\text{J}$ و در حدود $0.35 \mu\text{J}$ انتخاب شد. با استفاده از عدسی با $f = 45 \text{ mm}$ و $D = 10.9 \text{ mm}$ ، گشودگی عددی نیز در حدود 0.12 خواهد بود که در بازه‌ی مجاز قرار می‌گیرد. اما برای به دست آوردن تعداد تپ مورد نیاز، سرعت‌های $v_1 = 0.01 \text{ mm s}^{-1}$ ، $v_2 = 0.02 \text{ mm s}^{-1}$ و $v_3 = 0.05 \text{ mm s}^{-1}$ انتخاب شد که در این میان تنها سرعت $v = 0.01 \text{ mm s}^{-1}$ منجر به تشکیل نانتوتوری پراش شد. در شکل ۶ ریزنگاره‌ی میکروسکوپ نوری از رد به‌جامانده در درون شیشه مشاهده می‌شود. علت این موضوع می‌تواند به اثری که تپ‌های متوالی روی یک‌دیگر می‌گذارند و هم‌چنین مجموع انرژی که در هر ناحیه تخلیه می‌شود بستگی داشته باشد [۳۰].



شکل ۶. رد به‌جامانده از برهم‌کنش تپ‌های لیزر فمتوثانیه با انرژی $0.35 \mu\text{J}$ با نمونه‌ی شیشه‌ی BKV جابه‌جا شده با سرعت 0.01 mm s^{-1} در جهت عمود بر جهت انتشار لیزر.

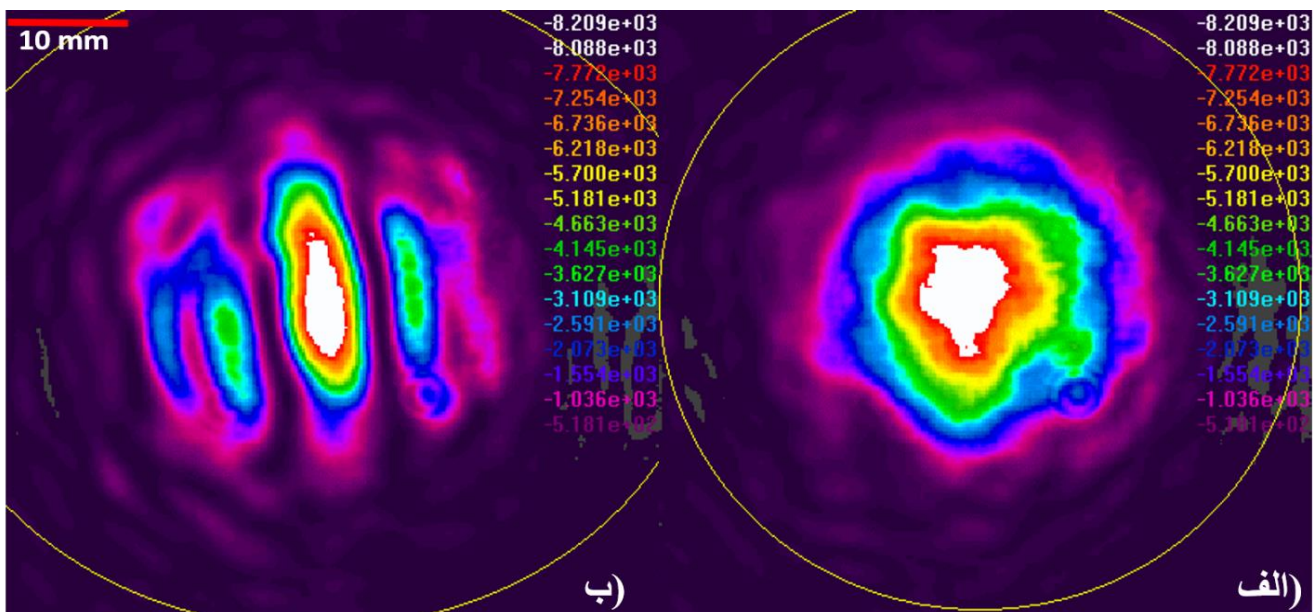
1. Charged coupled device

شده و بنابراین برهم‌کنش لیزر فمتوثانیه با نمونه‌ی شیشه‌ای منجر به ایجاد توری پراش شده است. تیلور و همکاران [۲۹] برای شکل‌گیری نانوتوری پراش درون سیلیکای گداخته توسط تپ‌های فمتوثانیه با آهنگ تکرار مگاهرتز مدلی سه مرحله‌ای را پیشنهاد داده‌اند [۳۱]. در مرحله‌ی نخست، در اثر شکست ناهمگن دی‌الکتریک نانوپلازما تشکیل می‌شود. در مرحله‌ی دوم، رشد تغییرات شکل گرفته در ماده تا ابعاد چند نانومتر و شکل‌گیری نانوصفحه‌ها اتفاق می‌افتد. در مرحله‌ی سوم و نهایی، این نانوصفحه‌ها به صورت خودبه‌خود نظم‌دار می‌شوند. دلیل منظم شدن نانوصفحه‌ها، ویژگی شبه-فلز بودن آن‌ها است که در اثر برهم‌کنش با تپ لیزر تحت تأثیر میدان الکتریکی لیزر، جهت‌مند می‌شوند [۲۸]. در این مدل، گام توری پراش ایجاد شده از مرتبه‌ی $\lambda/2n$ است [۲۳]. اگرچه در این مدل پهنای تپ، انرژی تپ و آهنگ تکرار آن تأثیر مستقیم ندارد اما تولید نانوصفحه‌ها در عمق، بدون تغییر سطح تنها با لیزرهای فوق‌کوتاه و انرژی‌های بالا امکان‌پذیر است. در این آزمایش نیز از فرض شناخته شده و پذیرفته شده‌ی تشکیل توری پراش در اثر تغییرات تناوبی چگالی در ناحیه‌ی برهم‌کنش استفاده و نتیجه شده است که احتمالاً علت تشکیل توری پراش در ناحیه‌ی برهم‌کنش، تغییر ضریب شکست نمونه در آن ناحیه است.



شکل ۸. ریزنگاره‌ی میکروسکوپی جانبی ساختارهای تناوبی تشکیل شده در درون شیشه.

همان‌طور که گفته شد، وجود صفحه‌های تناوبی می‌تواند باعث ایجاد طرح تداخلی شود. از این رو برای مقایسه، تصویرهای دوربین CCD حاصل از باریکه‌ی عبوری از محل برهم‌کنش تپ‌های فمتوثانیه، با سرعت جاروب 0.1 mm s^{-1} ، با شیشه و هم‌چنین باریکه‌ی عبوری از نقطه‌ای از شیشه که برهم‌کنشی با تپ‌های لیزر فمتوثانیه نداشته، در شکل ۹ نشان داده شده است. قسمت (الف) مربوط به عبور باریکه‌ی لیزر از ناحیه‌ی بدون تغییر شیشه و قسمت ب مربوط به عبور باریکه‌ی لیزر از ناحیه‌ی برهم‌کنش است. همان‌طور که از شکل ۹ نتیجه می‌شود، تصویر باریکه‌ی لیزر پس از عبور از توری به صورت نوارهای تداخلی تشکیل



شکل ۹. تصویر دوربین CCD باریکه‌ی لیزر هلیوم-نئون، (الف) بدون برهم‌کنش، (ب) توأم با برهم‌کنش با شیشه.

سرعت‌های از مرتبه‌ی 0.1 mm s^{-1} استفاده شود، قله‌ی شدت تپ‌های فمتوثانیه در فاصله‌ی کم‌تری از یک‌دیگر قرار می‌گیرند و در نتیجه تغییرات چگالی با دوره‌ی تناوب کوتاه‌تری رخ می‌دهد که منجر به هم‌پوشانی بیش‌تر تپ‌ها و تشکیل توری پراش با گام‌های کوچک‌تر می‌شود. بنابراین هر چه هم‌پوشانی بیش‌تر شود گام توری پراش به حد کمینه‌ی خود نزدیک‌تر خواهد شد.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا شایستگی آستانه‌ی لیزر برای ایجاد کندوسوز سطحی شیشه BK۷ در حدود $2.7 \text{ J cm}^{-2} \approx F_{th}$ به دست آمد. سپس نشان داده شد که افزایش تعداد تپ‌هایی که با سطح برهم‌کش می‌کنند سبب افزایش کمی در سطح کندوسوز شده می‌شود اما عمق ناحیه‌ی کندوسوز به وضوح با افزایش تعداد تپ‌ها، افزایش می‌یابد. با تمرکز تپ‌های لیزر فمتوثانیه در عمق شیشه و انتخاب شار انرژی تپ به نحوی که مقدار آن در سطح نمونه کم‌تر از شایستگی آستانه باشد، میکروماشین‌کاری در حجم شیشه انجام شد. هم‌چنین، نشان داده شد که تحت شرایط خاصی برهم‌کنش تپ‌های لیزر فمتوثانیه با عمق شیشه می‌تواند از طریق مدولاسیون ضریب شکست باعث ایجاد ساختارهای تناوبی درون شیشه شود که این ساختارهای تناوبی می‌توانند نقش یک توری پراش عبوری را ایفا کنند. با استفاده از تپ‌هایی با انرژی $0.35 \text{ } \mu\text{J}$ و جابه‌جایی نمونه با سرعت 0.1 mm s^{-1} چنان‌که در حدود ۱۰ تپ با هر موضع از حجم شیشه‌ی BK۷ برهم‌کنش داشته باشد، توری پراشی با گام $4.52 \text{ } \mu\text{m}$ ساخته می‌شود.

ریچتر و همکاران [۲۸] نشان دادند که برای تشکیل نانوتوری پراش در سیلیکای گداخته، رابطه‌ای بین آهنگ تکرار (در محدوده‌ی مگاهرتز) و انرژی تپ‌ها وجود دارد؛ چنان‌که با کاهش آهنگ تکرار به کیلوهرتز، باید انرژی تپ تا چند صدم میکروژول افزایش یابد و با افزایش آهنگ تکرار تا چند صد مگاهرتز انرژی تپ باید تا چند نانوژول کاهش یابد. در این پژوهش در راستای کارهای ریچتر و همکاران، نشان داده شد که با کاهش آهنگ تکرار لیزر فمتوثانیه تا ده هرتز نیز می‌توان نانوتوری پراش تولید کرد مشروط بر آن‌که انرژی تپ‌ها تا $0.35 \text{ } \mu\text{J}$ افزایش یابد و سرعت حرکت نمونه تا 0.1 mm s^{-1} کاهش یابد به طوری که حدود ۱۰ تپ با هر موضع از حجم شیشه‌ی BK۷ برهم‌کنش داشته باشند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود فاصله‌ی نوآرهای تداخلی (d) در حدود 7 mm است. بنابراین، با توجه به آن‌که فاصله‌ی دوربین تا نمونه‌ی شیشه‌ای (l) در حدود 5 cm اندازه‌گیری شده است، می‌توان با استفاده از رابطه‌ی $\alpha = \frac{l}{d} = \frac{lA}{\sin \theta}$ گام توری پراش را به دست آورد که در این رابطه، a گام توری پراش و A طول‌موج لیزر He-Ne است. در نتیجه، در ناحیه‌ی برهم‌کنش تپ لیزر فمتوثانیه با نمونه، توری پراشی با گام $\alpha = 4.52 \text{ } \mu\text{m}$ ایجاد شده است.

لازم به ذکر است که توری پراش ایجاد شده در این پژوهش، یک مرتبه‌ی بزرگی از مقدار پیشنهادی توسط رابطه‌ی $\frac{\lambda}{2n} = 0.26 \text{ } \mu\text{m}$ بزرگ‌تر است. این امر در مقاله‌ی ریچتر نیز گزارش شده است و در واقع این رابطه بیان‌گر یک حد کمینه برای گام توری پراش ایجاد شده است [۲۸] و با افزایش انرژی و کاهش آهنگ تکرار، اندازه‌ی گام افزایش می‌یابد و همان‌طور که از نتیجه‌ها حاصل می‌شود این مقدار تا مرتبه‌ی چند میکرومتر افزایش یافته است. در صورتی که از آهنگ تکرار کیلوهرتز به همراه موتور پلکانی با قابلیت جابه‌جایی نمونه با

1. P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot and G. Mourou, *Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification*, IEEE J. Quantum Electron. **24** 398–403 (1988).
2. D. von der Linde, K. Sokolowski-Tinten and J. Bialkowski, *Laser-solid interaction in the femtosecond time regime*, Appl. Surf. Sci. **109–110** 1–10 (1997).
3. K. Miura, J. Qiu, H. Inouye, T. Mitsuyu and K. Hirao, *Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser*, Applied Physics Letters **71.23**: 3329–3331 (1997).
4. O. Efimov, S. Juodkzisz and H. Misawa, *Intrinsic single- and multiple-pulse laser-induced damage in silicate glasses in the femtosecond-to-nanosecond region*, Phys. Rev. A **69** 42903 (2004).
5. F. Zimmermann, A. Plech, S. Richter, A. Tünnermann and S. Nolte, *Ultrashort laser pulse induced nanogratings in borosilicate glass*, Appl. Phys. Lett. **104** 211107 (2014).
6. K. C. Phillips, H. H. Gandhi, E. Mazur and S. K. Sundaram, *Ultrafast laser processing of materials: a review*, Adv. Opt. Photonics **7** 684–712 (2015).
7. D. Correa, J. Almeida, G. Almeida, M. Cardoso, L. De Boni and C. Mendonça, *Ultrafast Laser Pulses for Structuring Materials at Micro/Nano Scale: From Waveguides to Superhydrophobic Surfaces*, Photonics **4** 8 (2015).
8. D. M. Rayner, A. Naumov and P. B. Corkum, *Ultrashort pulse non-linear optical absorption in transparent media*, Opt. Express **13** 3208 (2005).
9. K. M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto and K. Hirao, *Writing waveguides in glass with a femtosecond laser*, Opt. Lett. **21** 1729 (1996).
10. E. N. Glezer and E. Mazur, *Ultrafast-laser driven micro-explosions in transparent materials*, Appl. Phys. Lett. **71** 882 (1998).
11. P. G. Kazansky, H. Inouye, T. Mitsuyu, K. Miura, J. Qiu, K. Hirao and F. Starrost, *Anomalous Anisotropic Light Scattering in Ge-Doped Silica Glass*, Phys. Rev. Lett. **82** 2199–202 (1999).
12. L. Sudrie, M. Franco, B. Prade and A. Mysyrowicz, *Study of damage in fused silica induced by ultrashort IR laser pulses*, Opt. Commun. **191** 333–9 (2001).
13. J. D. Mills, P. G. Kazansky, E. Bricchi and J. J. Baumberg, *Embedded anisotropic microreflectors by femtosecond-laser nanomachining*, Appl. Phys. Lett. **81** 196–8 (2002).
14. Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu and K. Hirao, *Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses*, Phys. Rev. Lett. **91** 247405 (2003).
15. W. Cai, A. R. Libertun and R. Piestun, *Polarization selective computer-generated holograms realized in glass by femtosecond laser induced nanogratings*, Opt. Express **14** 3785, (2006).
16. C. Hnatovsky, R. S. Taylor, E. Simova, P. P. Rajeev, D. M. Rayner, V. R. Bhardwaj and P. B. Corkum, *Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching*, Appl. Phys. A **84** 47–61 (2006).
17. R. Taylor, C. Hnatovsky and E. Simova, *Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass*, Laser Photonics Rev. **2** 26–46 (2006).
18. P. G. KAZANSKY and Y. SHIMOTSUMA, *Self-assembled sub-wavelength structures and form birefringence created by femtosecond laser writing in glass: properties and applications*, J. Ceram. Soc. Japan **116** 1052–62 (2008).
19. M. Beresna, M. Gecevičius, P. G. Kazansky, T. Taylor and A. V. Kavokin, *Exciton mediated self-organization in glass driven by ultrashort light pulses*, Appl. Phys. Lett. **101** 53120 (2012).
20. W. Yang, E. Bricchi, P. G. Kazansky, J. Bovatsek and A. Y. Arai, *Self-assembled periodic sub-wavelength structures by femtosecond laser direct writing*, Opt. Express **14** 10117 (2006).
21. C. Hnatovsky, R. S. Taylor, E. Simova, P. P. Rajeev, D. M. Rayner, V. R. Bhardwaj and P. B. Corkum, *Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching*, Appl. Phys. A **84** 47–61 (2006).
22. V. R. Bhardwaj, E. Simova, P. P. Rajeev, C. Hnatovsky, R. S. Taylor, D. M. Rayner and P. B. Corkum, *Optically Produced Arrays of Planar Nanostructures inside Fused Silica*, Phys. Rev. Lett. **96** 57404 (2006).
23. W. Yang, E. Bricchi, P. G. Kazansky, J. Bovatsek and A. Y. Arai, *Self-assembled periodic sub-wavelength structures by femtosecond laser direct writing*, Opt. Express **14** 10117 (2006).
24. S. A. Self, *Focusing of spherical Gaussian beams*, Appl. Opt. **22** 658 (1983).
25. A. Ben-Yakar and R. L. Byer, *Femtosecond laser ablation properties of borosilicate glass*, J. Appl. Phys. **96** 5316–23 (2004).
26. D. Puerto, M. Garcia-Lechuga, J. Hernandez-Rueda, A. Garcia-Leis, S. Sanchez-Cortes, J. Solis and J. Siegel, *Femtosecond laser-controlled self-assembly of amorphous-crystalline nanogratings in silicon*, Nanotechnology **27** 265602 (2016).
27. J. Shingo Kanehira, S. I. Jinhai, Q. Jianrong, J. Koji Fujita and K. Hirao, *Periodic Nanovoid Structures via Femtosecond Laser Irradiation*, Nano Letters, **5**(8), 1591-1595 (2005).
28. S. Richter, M. Heinrich, S. Döring, A. Tünnermann and S. Nolte, *Formation of femtosecond laser-induced nanogratings at high repetition rates*, Appl. Phys. A **104** 503–7 (2011).
29. R. S. Taylor, E. Simova and C. Hnatovsky, *Creation of chiral structures inside fused silica glass*, Opt. Lett. **33** 1312 (2000).
30. Y. Shimotsuma, P. G. Kazansky, J. Qiu and K. Hirao, *Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses*, Phys. Rev. Lett. **91** 247405 (2003).
31. C. Hnatovsky, R. S. Taylor, E. Simova, P. P. Rajeev, D. M. Rayner, V. R. Bhardwaj and P. B. Corkum, *Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching*, Appl. Phys. A **84** 47–61 (2006).