بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

بررسی ایجاد ساختارهای سه بعدی در مواد شفاف اپتیکی با استفاده از لیزرهای پیکوثانیه

میلاد فتحی[۱]، الهه نحوی فرد[۱]، مریم جندقی[۲] ، المیرا حاجی نیا[۲]

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)[۱]، مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران [۲]

milad.fathi.003@gmail.com, nahvifard@sci.ikiu.ac.ir, maryamjandaghi@gmail.com, e.hajinia@yahoo.com

چکیده – در سال‌های اخیر امکان دسترسی به لیزرهای با توان بالا و با پهنای زمانی فوق کوتاه فراهم شده‌است. از مهم ترین موضوعات مرتبط با لیزرهای فوق کوتاه، می‌توان به برهمکنش آن با مواد شفاف اشاره‌کرد. اندرکنش تپ‌های لیزر پیکوثانیه با شیشه سبب تغییر در چگالی و ضریب شکست ناحیه‌ی تابش داده شده می‌شود. به دلیل موضعی بودن اندرکنش، نواحی اطراف ناحیه‌ی تمرکز بدون تغییر باقی می‌ماند. از این ویژگی برای ساخت دستگاه‌های نوری، مانند موجبرها می‌توان استفاده‌کرد. در این مقاله اندرکنش تپ‌های لیزر ۱۰ پیکوثانیه با شیشه (BK7) در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آزمایشگاهی مربوط به آن برای ساخت موجبر ارائه شده‌است.

کلید واژه- لیزرهای پیکوثانیه، مواد شفاف اپتیکی، موجبر.

Investigation of 3D structure fabrications in optical transparent materials using picoseconds lasers

Milad Fathi[1], Elahe Nahvifard[1], Maryam Jandagi[2], Elmira Hajinia[2]

Imam Khomeini International University [1], National Center for Laser Science &Technology of Iran[2]

milad.fathi.003@gmail.com, nahvifard@sci.ikiu.ac.ir, maryamjandaghi@gmail.com, e.hajinia@yahoo.com

Abstract- In recent years, it has become possible to access high- power lasers with ultra-short time range. One of the most important issues related to ultra-short lasers is their interaction with transparent materials. The interaction of picoseconds laser pulses with glass changes density and refractive index of the irradiated region. Because the interaction is localized, the areas around the focus remain unchanged. This feature can be used to build optical devices such as waveguides. In this paper, the interaction of ten picoseconds laser pulses with glass (BK7) in the laboratory is investigated and the laboratory results are presented for the construction of waveguides.

Keywords: picoseconds lasers, optical transparent material, waveguide

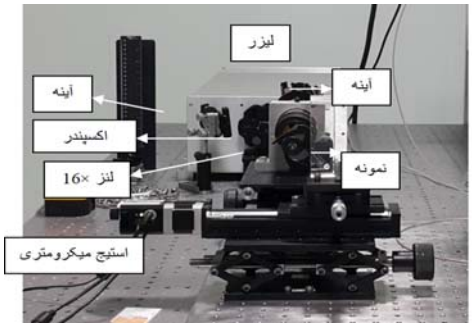
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

در میان پدیده‌های مختلفی که در اثر اندرکنش تپ‌های فوق کوتاه با مواد مشاهده می‌شود، پدیده‌ی تخریب القایی لیزری اهمیت بسیار بالایی دارد، زیرا این پدیده هم می-تواند مخرب و هم مفید باشد. در اندرکنش تپ‌های لیزر پیکوثانیه با مواد شفاف، پدیده‌ی اصلی که موجب تغییرات ساختاری در ناحیه‌ی فوکوس می‌شود، تخریب القایی لیزر است. تخریب القایی لیزری که به معنی ایجاد تغییرات دائمی در مواد نوری است پس از برهمکنش ماده با تپ-های لیزری و تشکیل پلاسما ایجاد می‌شود. از کاربردهای تخریب القایی لیزری می‌توان به ایجاد حفره یا کانال، تولید موجبر، ایجاد ساختارهای سه بعدی در مواد شفاف اشاره کرد. یکی از مهمترین مشخصه ها در برهم کنش لیزر با ماده، پهنای زمانی پالس لیزر است[۱-۴]. زمان انتقال حرارت از حامل‌ها به شبکه در حدود ۱۰ پیکوثانیه است درنتیجه می‌توان این زمان را به عنوان مرز تفکیک پالس کوتاه از فوق کوتاه در نظر گرفت. اگر زمان پالس بیشتر از ۱۰ پیکوثانیه باشد، تمام انرژی لیزر صرف کندوسوز نمی-شود و بخشی از آن به محیط اطراف ناحیه کانونی منتقل می‌شود. در برهمکنش مواد دی الکتریک با پالس‌های فوق کوتاه، آستانه کندوسوز با کاهش مدت زمان پالس کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع، جذب کاملا غیرخطی است که با کاهش مدت زمان، توان قله و جذب غیرخطی افزایش و آستانه کندوسوز کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر توانایی لیزرهای فوق‌کوتاه در میکرو ماشین‌کاری لیزری به منظور ساخت اجزا و تجهیزات نوری داخل شیشه به اثبات رسیده است. فرایند ساخت شامل متمرکز کردن پالس‌های لیزری فوق کوتاه مادون قرمز داخل ماده شفاف جهت القای تغییرات ضریب شکست در نقطه کانونی پرتوی لیزر است [۱،۴-۷]. با حرکت شیشه نسبت به نقطه کانونی یا حرکت نقطه کانونی، ساختارهای سه بعدی پیچیده در داخل زیرماده شیشه‌ای قابل ساخت می‌باشد. نتیجه این اغتشاش تغییر ساختاری و تغییر در خواص نوری (ضریب شکست) محل تحت تابش و ایجاد ساختارهای میکرونی درون شیشه می‌باشد.

ساخت موجبر

هدف از این پروژه ایجاد موجبر در داخل زیر ماده شیشه ای از طریق تابش پالسهای فوق کوتاه می‌باشد. شکل ۱ چیدمان آزمایشگاهی مرتبط با ساخت موجبر در آزمایشگاه لیزرهای پالس کوتاه را نشان می‌دهد. منبع لیزری مورد استفاده لیزر Nd:Yag مدلاک با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و پهنای پالس ۱۰ پیکوثانیه با نرخ تکرار تا ۱ مگا هرتز و توان میانگین ۲۰ وات و نمونه شیشه‌ای مورد نظر، شیشه بورسیلیکات BK7 با پولیش در همه سطوح می‌باشد. پرتوی لیزر به دو آینه کاملا بازتابنده در طول موج لیزر برخورد کرده و پس از عبور از پهن کننده قطر با استفاده از میکروسکوپ شیئی ۱۶Xدر زیر سطح BK7 کانونی می شود. نمونه شیشه ای مذکور بر روی استیج خطی موتوری قرار داده شده است. جهت ایجاد موجبر محل کانون لیزر از سطح به داخل شیشه منتقل می گردد. با جابه جایی نمونه در جهت عمود بر راستای انتشار پرتوی لیزر (روش عرضی) با سرعت ثابت و به ازای چگالی انرژی های مختلف ۱۰ آزمایش درون نمونه انجام گردید. پارامترهای آزمایشگاهی مختلفی که به منظور بررسی فرآیند ساخت موجبر تغییر داده شد در جدول شماره ۱ آورده شده است. شایان ذکر است که با تغییر فاکتور توان، انرژی خروجی از لیزر تغییر می کند.



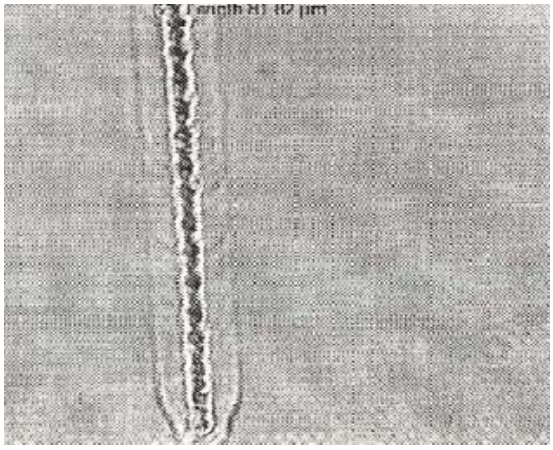
شکل ۱- چیدمان ساخت موجبر لیزری

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

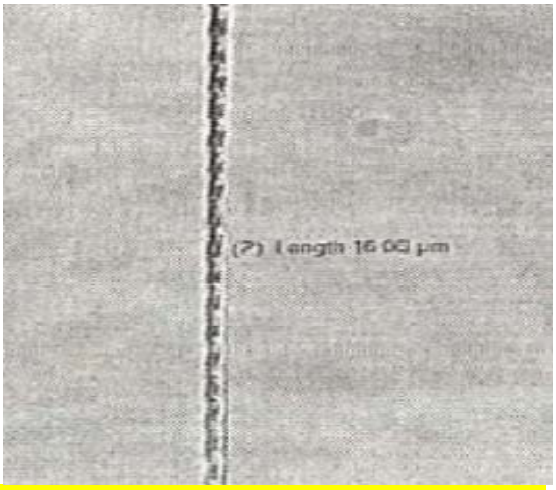
جدول ۱- آزمایشات مختلف انجام شده به منظور بررسی ساخت موجبر

ردیف	فاکتور توان	نرخ تکرار (KHz)
1	500	100
2	200	100
3	300	100
4	100	100
5	100	500
6	200	500
7	300	500
8	300	10
9	200	10
10	100	10

در این آزمایشها انرژی لیزر و نرخ تکرار آن تغییر داده شده است تا بهترین پارامترهای لیزری جهت ایجاد موجبر کامل بدست آید. شکل های (۲ و۳) دو نمونه ساخته شده موجبر در انرژی های مختلف و در نرخ تکرار یکسان را نشان میدهد.

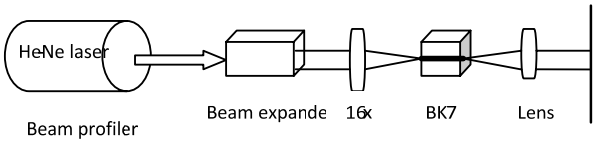


شکل ۲ - موجبر شماره ۱: سرعت حرکت نمونه ثابت و برابر ۱mm در ثانیه ۱۰۰ کیلوهرتز و ۵۰ میکروژول



شکل ۳ - موجبر شماره ۲: موجبر شماره ۱: سرعت حرکت نمونه ثابت و برابر ۱mm در ثانیه در ۱۰۰ کیلوهرتز و 20 میکروژول

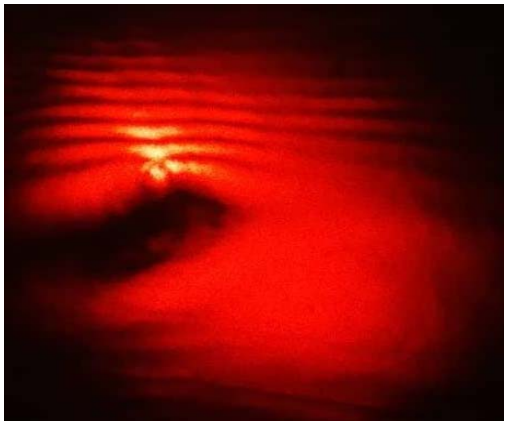
به منظور بررسی کیفیت موجبرها، از چیدمان شکل ۴ استفاده شده است.



شکل ۴- چیدمان بررسی ساخت/کیفیت موجبر.

پرتو تولید شده توسط لیزر هلیوم-نئون ۶۳۲,۸ نانومتر به داخل پهن کننده پرتو، نوری تابیده می‌شود. پهن کننده پرتو، قطر پرتو را ۲ الی ۳ برابر افزایش می‌دهد. سپس پرتو نور وارد یک میکروسکوپ شی با بزرگنمایی ۱۶ برابر می‌شود و قطر پرتو کاهش می‌یابد. سپس پرتو نوری که قطرش ۱۶ برابر کاهش یافته‌است وارد میکروکانالی می-شود که مطابق توضیحات داده شده درBK7 ایجاد کرده-ایم. سپس از لنز خروجی بیم پروفایلر لیزری یا صفحه‌ای که از داخل آن شکل پرتو را مشاهده می‌کنیم، می‌توانیم آن را ثبت کنیم.

در حالتی که موجبر به شکل کامل ایجاد نشده باشد در صورت عبور پرتوی لیزر هلیوم نئون از درون موجبر ایجاد شده در حجم شیشه ای مقداری از انرژی پرتوی لیزر از مکانهای گسسته تغییر ساختار یافته، پراکنده شده و در تصویر میدان دور شدت در مرکز کاهش یافته و شکل منظمی قابل مشاهده نمی باشد(شکل۵).

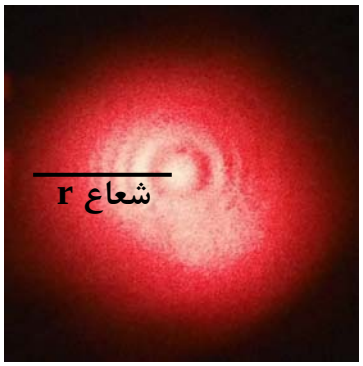


شکل۵: الگوی میدان دور به دست آمده از موجبر غیرصحیح

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

اما در صورت عبور پرتوی نور از داخل موجبر کامل، پرتو نور پس از عبور از موجبر همگرا می شود و لکه روشن در مرکز و حلقه های تداخلی منظم اطراف آن، قابل مشاهده-است.

تصویر بیم پروفیلر برای عبور نور از یک موجبر کامل در شکل شماره ۶ آورده شده‌است.



شکل ۶: الگوی میدان دور به شکل حاشیه‌های گرد بر روی صفحه‌ی بیم پروفایلر

D فاصله بین صفحه خروجی موجبر و صفحه‌ای که حاشیه روی آن دیده می‌شد و شعاع (r)، فاصله از مرکز حلقه تا جایی که حاشیه‌ها محو می‌شوند، ثبت شد.

برای محاسبه نسبت $\frac{r}{D}$ برای هر موجبر، چهار خوانش برای فاصله‌های مختلف موجبر نسبت به صفحه انجام گرفت

مقدار متوسط $\frac{r}{D}$ برآورد دیافراگم عددی (NA) موجبر را ممکن می‌سازد:

$$NA = \sqrt{2n\Delta n} \qquad (۱)$$

$$NA = \sin\left(\arctan\left(\frac{r}{D}\right)\right) \qquad (۲)$$

n ضریب شکست ماده اصلی (برای BK7 برابر است با ۱,۵۱)؛ Δn تغییر ضریب شکست در هسته‌ی موجبر است که می‌توان از طریق آزمایش‌ها آن را اندازه‌گیری کرد مقادیر NA برای موجبرهای کامل تولید شده در این پژوهش در محدوده‌ی ۰,۰۹ قرار دارد و تغییر ضریب شکست در این محدوده، حدود ۰,۰۰۳ اندازه گیری شد. این موجبرهای کامل در انرژی بین ۲۰ تا ۳۰ میکروژول و نرخ تکرار ۱۰۰ کیلو هرتز تشکیل شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نمونه‌های موجبر در مقیاس میکرومتری در حجم شیشه بوروسیلیکات BK7 با استفاده از منبع لیزری Nd:Yag مدلاک با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و پهنای پالس ۱۰ پیکوثانیه با نرخ تکرار تا ۱ مگا هرتز و توان میانگین ۲۰ وات ساخته شد. مشخص شد که انرژی لیزر باید در محدوده ۲۰ تا ۳۰ میکروژول در نرخ تکرار ۱۰۰ کیلو هرتز استفاده شود تا موجبری کامل با ساختار پیوسته و بدون شکست ایجادگردد. در انرژیهای زیر ۲۰ میکروژول ما تغییر قابل ملاحظه ای در ضریب شکست مشاهده نکردیم و در انرژی های بالاتر از ۳۰ میکروژول ساختار شیشه دچار شکست و تخریب گردید.

مرجع‌ها

[۱] گودرزی، رضا، بررسی خواص نوری و ساختاری مواد پس از اندرکنش با پالسهای لیزری فوق کوتاه، رساله دکتری(۱۳۹۷).

[2] W. Koeshner, Solid state laser engineering, Sixed revised & updated edition.

[3] R. W. Boyd, Nonliear optics, second edition.

[4] I. Alexeev, K. Cvecek, J. Genser, M. Schmidt, “Direct waveguide writing with high energy high repetition rate picoseconds laser pulses”, Physics Procedia 39, 621-627, 2012.

[5] J. W. Chan, T.R. Huser, S.H. Risbud, D.M. Krol, “Waveguide Fabrication In Fused Silica Using Tightly Focused Femtosecond Laser Pulses”, Photonics West, UCRL-JC-142760,2002.

[6] J. W. Chan,T. Huser, S. Risbud, D. M. Krol, “Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses”, OPTICS LETTERS, 26(21), 2001.

[7] D. Homoelle, S. Wielandy, and Alexander L. Gaeta” Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses”, OPTICS LETTERS, 24(18),1999.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]