بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تغییرات ضریب شکست ماده شفاف بر اثر پروفایل دمایی القا شده توسط پالس لیزری فوق کوتاه در پردازش مواد

سمیه نجفی، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده –در این مقاله اثر پروفایل فضایی دما، ناشی از کانونی کردن پالس لیزری فوق کوتاه در ماده شفاف آمورف، بر پارامترهای فیزیکی مختلف ماده با حل معادله موج ترموالاستیک، با روش المان محدود، بررسی می شود. مشاهده شد که پروفایل دمایی ناحیه کانون اثر قابل توجهی بر رفتار فضایی و زمانی جابجایی، تنش، کرنش و در نتیجه ضریب شکست ماده دارد. بنابراین فرض پروفایل دمایی بصورت یکنواخت یا مشابه با پروفایل اولیه پالس لیزری می تواند منجر به نتایج غیرواقعی شود که در چنین شرایطی باید اثرات غیرخطی در طی انتشار پالس درنظر گرفته شده و پروفایل دمایی حاصل از آن محاسبه گردد.

کلید واژه– ضریب شکست، پروفایل دمایی، پردازش ماده، پالس لیزری فوق کوتاه، معادله موج ترموالاستیک

Transparent Material's Refractive Index Changes Due to Temperature Profile Induced by Ultra-Short Laser Pulses in Materials Processing

Somayeh Najafi, Atoosa.S.Arabanian , and Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University

Abstract- Effect of spatial temperature profile, which can be introduced due to illumination of an amorphous material by a focused ultra-short laser pulse, on different physical parameters of the material is studied by numerically solving thermoelastic wave equations by using Finite Element Method. It is observed that temperature profile in the focal region has significant effect on the spatial and temporal behavior of the displacement, strain, stress, and consequently, refractive index of the material. Therefore, assuming temperature profile as uniform or similar to the initial laser pulse profile may lead to inaccurate results, and are should take into account nonlinear effects during pulse propagation and the resulting temperature profile.

Keywords: Refractive Index, Temperature Profile, Material Processing, thermoelastic wave equations, Ultra-Short pulse laser

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پردازش مواد با لیزرهای فمتوثانیه، بدلیل ویژگی های خود، در سال های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. Kuper,Stuke در سال ۱۹۸۷ از پالس های فوق کوتاه برای کندوسوز در PMAA استفاده کرده اند و نشان دادند که آستانه پردازش با لیزر فمتوثانیه بطور قابل توجهی از لیزرهای نانوثانیه کمتر است[1].

از این تکنیک در ساخت سنسورها، مدولاتورها، حافظه های نوری باینری، لیزر و گسیلنده های نوری، میکروفلوئیدها، ساخت موجبرهای اپتیکی و در یک عبارت کلی تر، در اپتوالکترونیک و فوتونیک استفاده می شود. برای کنترل تغییرات ساختاری و بهینه سازی پردازش لیزری مواد، فهم عمیق فرآیندهایی که با تابش لیزر فمتوثانیه به ماده شروع می شوند، ضروری است. بر این اساس مطالعه اثرات حرارتی ناشی از برهم کنش پالس های لیزر فوق کوتاه با یک ماده جامد شفاف در ناحیه کانون و تغییرات ساختاری حاصل از آن دارای اهمیت فراوانی می باشد.

در این تکنیک پالس لیزری فوق کوتاه درون یک ماده شفاف، کانونی شده و حجم کوچکی از ناحیه کانون، بدلیل برهم کنش های غیرخطی با پالس فرودی، متحمل تغییرات ساختاری و فیزیکی می شود. در برهم کنش پالس با ماده، ابتدا بخشی از انرژی پالس، بطریق غیرخطی در ماده جذب شده و سبب گرم شدن جایگزیده ماده می شود، سپس با توجه به پروفایل دمایی حاصل در ناحیه کانون، تغییرات میکروساختاری در ماده ایجاد می شود. Bulgakova [2]، stoian[3] ، Hertel[4] و Hallo[5] با بررسی تئوری نحوه جذب انرژی پالس در ماده شفاف، توزیع انرژی جذب شده و در نتیجه توزیع دمایی در ناحیه کانون را بصورت یک توزیع غیریکنواخت با شکلی کاملا متفاوت با شکل اولیه پالس ورودی، بدست آوردند. از طرفی آزمایشات تکنیک لنز گذرا(TRL)، توری گذرا(TG) و تصویربرداری عبوری تفکیک زمانی[6]، نشان دادند که بر اثر گرادیان حرارتی، موج تنش و تغییرات ساختاری در ماده ایجاد می شود. برای توصیف این پدیده، گروههای زیادی، از معادله موج ترموالاستیک، که با تغییرات دمایی ناحیه کانون درایو می شود، استفاده کرده اند. از آنجاکه جمله درایو کننده معادله موج ترموالاستیک، گرادیان توزیع دمایی ناحیه کانون است، توزیع دمایی ناحیه کانون، که با توجه به مطالعات انجام شده[5-2] کاملا غیریکنواخت و متفاوت از شکل اولیه پالس فرودی است، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. با این وجود اغلب برای ساده تر کردن مساله، توزیع دمایی ناحیه کانون را بصورت یکنواخت و یا همانند پروفایل فضایی پالس لیزر، بدون در نظر گرفتن تغییرات ناشی از انتشار و پدیده های غیرخطی در ماده، فرض کرده اند[7].

در این مطالعه، به حل معادلات موج ترموالاستیک در مختصات استوانه ای برای ماده آمورف شفاف، که بواسطه تابش پالس های فمتوثانیه کانونی شده دچار یک توزیع دمایی معین شده است، می پردازیم. با درنظر گرفتن چندین توزیع دمایی مختلف، تاثیر پروفایل فضایی دما در پاسخ ماده، یعنی در رفتار جابجایی، کرنش و ضریب شکست، بررسی و نشان داده می شود که پروفایل دمایی نقش مهمی در پروفایل ضریب شکست در ناحیه کانون پالس درون ماده شفاف دارد.

۲- تئوری

تغییر ضریب شکست ماده شفاف، بر اثر تابش لیزر، شامل زنجیره ای از فرآیندهای مختلف می شود. فرض کنید پالس فوق کوتاه لیزری در امتداد محور z بر یک ماده آمورف، در اینجا شیشه، تابیده و در داخل آن کانونی شود. از آنجاکه طول عمر الکترون ها در باند رسانش (حدود ۱ پیکوثانیه) بیشتر از طول زمانی پالس لیزری است، انتقال انرژی از الکترون به شبکه بعد از عبور پالس از ماده اتفاق می افتد. این انتقال انرژی حرارتی با واهلش غیرتشعشعی صورت می گیرد و سبب ایجاد تنش، و در نتیجه یک موج فشاری، در ماده شده که پاسخ ماده به تابش پالس لیزری با معادله موج ترموالاستیک بیان می شود[8].

برای توصیف تغییرات ناشی از تنش در ماده، معادله حرکت زیر را درنظر می گیریم[8]:

$$\sigma_{ji,j} = \rho \ddot{u}_i \qquad (۱)$$

که σ_{ji} مولفه jiام تانسور تنش، j, مشتق نسبت به مولفه jام ،u_i مولفه iام جابجایی و ρ چگالی ماده می باشد. با فرض همسانگرد بودن ماده، دما در ناحیه کانون دارای تقارن استوانه ای خواهد بود. بنابراین معادله (۱) بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \qquad (۲)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r}+\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}+\frac{\sigma_{rz}}{r}=\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (۳)$$

که u میزان جابجایی در جهت شعاعی و w کمیت متناظر در جهت z (جهت تابش پالس لیزری) می باشد با توجه به رابطه مولفه های مختلف تنش و کرنش با دما و همچنین ارتباط مولفه های کرنش با بردار جابجایی[8]، معادله (۲) و(۳) بصورت زیر نوشته می شوند:

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=(2\mu+\lambda)\left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}-\frac{u}{r^2}\right]+ \quad (٤)$$
$$\mu\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+(\mu+\lambda)\frac{\partial^2 w}{\partial z\partial r}-\beta\frac{\partial(T-T_0)}{\partial r}$$

$$\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=(2\mu+\lambda)\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}+\mu\left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial r}\right]+ \quad (٥)$$
$$(\mu+\lambda)\left[\frac{\partial^2 u}{\partial z\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial z}\right]-\beta\frac{\partial(T-T_0)}{\partial z}$$

دو معادله فوق مولفه های شعاعی و طولی بردار جابجایی و دما را با یکدیگر جفت می کنند. همانطور که از این معادلات دیده می شود، گرادیان توزیع دمایی منبع درایو کننده این معادلات بوده، لذا انتظار می رود تنش و کرنش ایجاد شده، و در نتیجه، تغییر در ناحیه کانون تابعی از پروفایل فضایی دما در آن ناحیه باشد.

با حل معادلات (۴) و (۵) ، توزیع فضا- زمانی جابجایی در ناحیه کانون و اطراف آن، محاسبه می شود و با استفاده از رابطه کرنش (ε) با جابجایی، مولفه های این تانسور محاسبه می شوند. برای محاسبه تغییرات ضریب شکست ناشی از کرنش ایجاد شده در ناحیه کانون، می بایست تغییرات تانسور نفوذناپذیری (ΔB_{ij}) محاسبه شود، که بصورت زیر با تانسور کرنش مرتبط است[9]:

$$\Delta B_{ij}=P_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (۶)$$

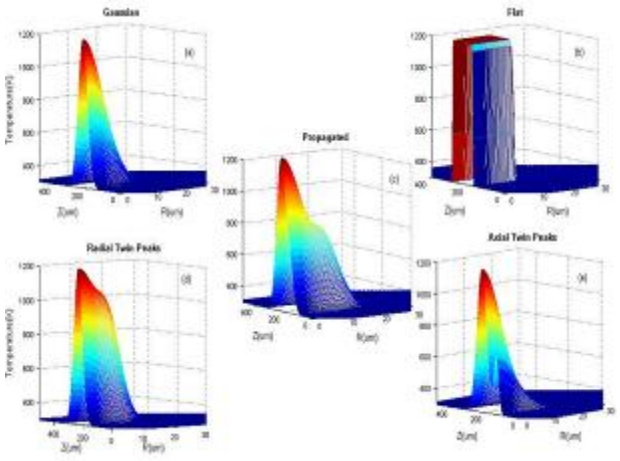
که P تانسور الاستواپتیک، از ویژگی های ماده، است. در نهایت با استفاده از رابطه (۷)

$$\Delta n_i=-\frac{1}{2}n_0^3\Delta B_{ii} \quad (۷)$$

توزیع فضا- زمانی تغییرات ضریب شکست ماده محاسبه می شود که n_0 ضریب شکست اولیه می باشد.

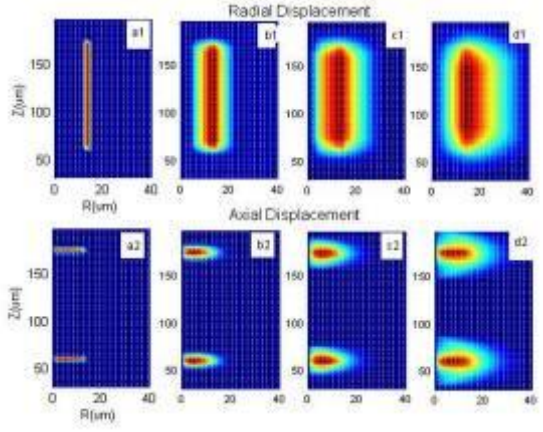
۳- نتایج و بحث

برای حل عددی معادلات (۴) و (۵) با استفاده از روش FEM، با راهکار باقیمانده وزنی گلرکین، و به ازای توزیع های دمایی متفاوت، به عنوان جملات درایو کننده معادلات ترموالاستیک، بصورت عددی در شیشه، حل و میزان جابجایی شعاعی و محوری، مولفه های تانسور کرنش و پروفایل فضایی تغییرات ضریب شکست، به همراه تغییرات زمانی آن، برای این توزیع های حرارتی محاسبه شده اند. میزان جابجایی در t=0 (برای کل فضا) و در مرزهای ناحیه مورد بررسی (برای همه زمان ها) ناچیز فرض شد. شکل ۱ توزیع های دمایی متفاوت مورد بررسی در این مطالعه، یعنی گاوسی، یکنواخت، تحت تاثیر انتشار، دوقله ای در جهت شعاعی و دوقله در جهت انتشار را نشان می دهد. برای همه توزیع ها، دما از ۱۲۰۰ درجه کلوین تا ۳۰۰ درجه تغییر می کند. از آنجاکه برای باریکه کانونی شده، ناحیه ریلی خیلی بزرگتر از قطر لکه کانونی می باشد، منطقه داغ می بایست بصورت بیضی در نظر گرفته شود.



شکل ۱: توزیع های دمایی مورد بررسی در این مطالعه: گوسین(a)، یکنواخت(b)، تحت تاثیر انتشار (c)، دوقله ای در جهت شعاعی(d)، دوقله ای در جهت انتشار

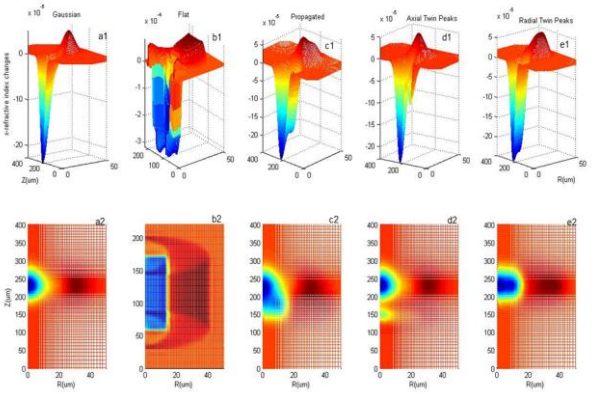
با درنظر گرفتن معادلات ۴ و۵ ، انتظار می رود جابجایی در ناحیه ای که دارای گرادیان حرارتی است، شروع شود.



شکل۲: توزیع فضایی جابجایی محوری و شعاعی برای پروفایل دمایی یکنواخت بعد از(a) 260ps، (b) 1.6ns، (c)2.8ns (d)4.5ns

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

برای بررسی این موضوع، ابتدا چشمه حرارتی را بصورت یکنواخت با مرزهای تیز در نظر می گیریم(شکل۱(b)). توزیع فضایی جابجایی حاصل، در راستای شعاعی و محوری، در زمان های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود، جابجایی اولیه در مرزهای منبع حرارتی، که گرادیان دمایی قابل توجه می باشد، اتفاق می افتد. در ابتدا امواج فشار در این ناحیه تشکیل شده، سپس به سمت خارج منتشر شده و سبب جابجایی می شوند. در زمان های بعدی این موج قوی تر شده و مقدار جابجایی را افزایش می دهد. با محاسبه توزیع های محوری و شعاعی جابجایی حاصل از توزیع های دمایی متفاوت دیده می شود که توزیع فضایی جابجایی به پروفایل دمایی بسیار وابسته است. با داشتن توزیع فضا-زمانی مولفه های محوری و شعاعی جابجایی، می توان مولفه های مختلف تانسور تنش و کرنش را محاسبه نمود. سپس با استفاده از معادلات ۶ و ۷ پروفایل تغییرات ضریب شکست محاسبه می شود. شکل ۳ توزیع فضایی مولفه x تغییرات ضریب شکست را در ناحیه کانون برای توزیع های دمایی مختلف نشان می دهد. همانطور که دیده می شود، پروفایل فضایی تغییرات ضریب شکست شدیدا به پروفایل دمایی در ناحیه کانون وابسته است. شکل ۳ نشان می دهد که برای نواحی با دمای بالاتر، ضریب شکست کمتر است. علت آن است که جابجایی شبکه به سمت خارج، چگالی ماده در نواحی گرمتر را کاهش، و در نواحی اطراف را افزایش می دهد. در نتیجه ضریب شکست در نواحی با دمای بالاتر کمتر از محیط پیرامون آن که دما پایین تر است، می باشد.



شکل ۳: پروفایل فضایی مولفه x تغییرات ضریب شکست(a-e)، بعد از 4.5ns از گذر پالس برای توزیع های دمایی متفاوت در ناحیه کانون

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه معادلات ترموالاستیک برای پروفایل های دمایی مختلف با استفاده از روش FEM بطور عددی حل و تغییرات ضریب شکست در ماده شفاف بررسی شد. نتایج نشان داد که پروفایل دمایی نقش مهمی در پروفایل ضریب شکست در ناحیه کانونی پالس فوق کوتاه دارد. از آنجاکه پروفایل دما در ناحیه کانون، بدلیل پروفایل چگالی الکترون های داغ بوده و این پروفایل، خود ناشی از پروفایل شدت پالس لیزری در آن ناحیه می باشد، بنابراین برای بررسی تغییرات ایجاد شده در ماده، بررسی انتشار غیرخطی پالس فوق کوتاه در ماده شفاف و محاسبه تغییرات پروفایل شدت در ناحیه کانون و سپس محاسبه توزیع دمایی، جابجایی و در نهایت تغییرات ضریب شکست، ضروری بوده و فرض یکسان بودن پروفایل دمایی بصورت پروفایل اولیه پالس فرودی و یا بصورت یکنواخت، ممکن است به نتایج دقیقی منجر نشود.

مراجع

[1] S. Kuper and M. Stuke, *Femtosecond UV- Excimer Laser Ablation*, **Appl. Phys. B**44, 199-204(1987).

[2] M. Watanabe, S. Juodkazis, H.-B. Sun, S. Matsuo and H. Misawa, *Luminescence and defect formation by visible and near-infrared irradiation of vitreous silica*, **Phys. Rev B** 60 (14), 9959 (1999).

[3] R. Stoian, A. Mermillod-Blondin, *Designing laser-induced refractive index changes in "thermal" glasses*, **Proceedings SPIE High-Power Laser Ablation VII 7005** (2008).

[4] M. Sakakura, *Initial temporal and spatial changes of the refractive index induced by focused femtosecond pulsed laser irradiation inside a glass*, **Phys. Rev B** 71 (2), 024113 (2005).

[5] M. Sakakura, T. Tochio, M. Eida, and K. Hirao, *Observation of laser-induced stress waves and mechanism of structural changes inside rock-salt crystals*, **Opt. Express** 19 (18), 17780-17789 (2011).

[6] S. Masaaki, T. Masahide, S. Yasuhiko, M. Kiyotaka and H. Kazuyuki, *Thermal and shock induced modification inside a silica glass by focused femtosecond laser pulse*, **J. Appl. Phys**. 109, 023503 (2011).

[7] X. Zhang, X. Xu and A. Rubenchik, *Simulation of microscale densification during femtosecond laser processing of dielectric materials*, **Applied Physics A** 79 (4-6), 945-948 (2004).

[8] R. B. Hetnarski , M. R. Eslami, *Thermal Stresses – Advanced Theory and Applications*, (Springer, 2009).

[9] D. Royer, E. Dieulesaint: *Elastic wave in solids II Generation, Acousto-optic Interaction, Application* (Springer, New York, 1999).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]