بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

مطالعه اثر چیرپ پالس فمتوثانیه فرودی روی توزیع پلاسما کانونی شده داخل شیشه سیلیکا و کریستال لیتیم نیوبات

آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

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

چکیده – در این مقاله اثر میزان و علامت چیرپ فرکانسی پالس فمتوثانیه فرودی کانونی شده داخل دو محیط همسانگرد شیشه سیلیکا و ناهمسانگرد کریستال لیتیم نیوبات، روی توزیع چگالی پلاسما تشکیل شده در مجاورت کانون بطور عددی بررسی و مطالعه می شود. شبیه سازی ها نشان می دهد که این دو محیط رفتار متفاوتی در مقابل پالس فرودی با علامت چیرپ یکسان نشان می دهند، بعلاوه چیرپ فرکانسی پالس فرودی یک پارامتر کنترلی مناسب برای کنترل توزیع پلاسما در مجاورت کانون برای کاربردهای نوشتن موجبری برپایه لیزرهای فمتوثانیه می باشد.

کلید واژه- چیرپ فرکانسی، کریستال لیتیم نیوبات، شیشه سیلیکا، معادله شرودینگر، پلاسما.

Study on effect of chirp of incident femtosecond pulse on plasma distribution focused inside silica glass and Lithium Niobate crystal

Atoosa Sadat Arabanian, Reza Massudi

Tehran, Evin, Shahid Beheshti University, Laser and plasma research institute

Abstract- In this paper, effect of the magnitude and the sign of frequency chirp of femtosecond laser pulses focused inside both media of isotropic silica glass and anisotropic Lithium Niobate crystal on plasma density distribution generated in the vicinity of focus are numerically studied. The simulations reveal that these two media have different behavior for the same sign of chirp of incident pulse. Moreover, frequency chirp of the incident pulses is an appropriate parameter for controlling of the plasma distribution at the vicinity of focus in the applications of waveguide writing based on femtosecond lasers.

Keywords: Frequency chirp, Lithium Niobate crystal, silica glass, Schrodinger equation, plasma.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

نوشتن برپایه لیزر فمتوثانیه، امکان ساخت میکروساختارهای سه بعدی برپایه موجبری را داخل حجم مواد شفاف فراهم می کند. از میان مواد شفاف، شیشه سیلیکا و کریستال لیتیم نیوبات آلاییده به اکسید منیزیم (MgO-LN) یکی از مهمترین مواد برای ساخت دستگاههای فوتونیکی مجتمع نظیر موجبرها می باشند. در برهمکنش پالس فمتوثانیه با این مواد، ابتدائاً پالس فمتوثانیه کانونی شده منجر به تشکیل پلاسما در مجاورت کانون می شود. میزان و توزیع چگالی پلاسما تشکیل شده در توزیع تغییر ضریب شکست ایجاد شده برای ساختارهای موجبری بسیار تعیین کننده می باشد.

بررسی اثر مشخصات پالس فرودی جهت بهینه سازی پارامترهای لیزری در ساخت ساختارهای موجبری با تلفات پایین و هموار، بسیار مهم می باشد. نوشتن موجبر توسط پالسهای لیزری فمتوثانیه یک فضای پارامتری ۷ بعدی را برای بهینه سازی موجبر شامل می شود که شامل طول موج، نرخ تکرار، انرژی پالس، طول پالس، قطبش، هندسه کانونی کننده، و سرعت جاروب می باشد. بطور تجربی، اثرات اکثر این پارامترها روی تغییر القا شده لیزری اثبات شده است [۱-۴].

در این مقاله با استفاده از شبیه سازیها نشان خواهیم داد که پارامتر چیرپ فرکانسی پالس فمتوثانیه فرودی را نیز می توان به عنوان پارامتر اضافی دیگر (پارامتر هشتم)، بسیار اثرگذار در فرایند میکروماشین کاری لیزری ماده شفاف، در نظر گرفت. در اینجا بطور عددی نشان داده می شود که علامت و مقدار چیرپ فرکانسی پالس فرودی روی میزان و مکان بیشینه چگالی پلاسما تولید شده، بسیار مؤثر است. بررسی اثر این پارامتر برای هر دو ماده شفاف همسانگرد شیشه سیلیکا و ناهمسانگرد کریستال لیتیم نیوبات آلاییده به اکسید منیزیم انجام خواهد شد.

۲- تئوری و مدلسازی

ابتدا برهمکنش پالس لیزری فمتوثانیه با محیط همسانگرد شیشه سیلیکا و محیط ناهمسانگرد کریستال لیتیم نیوبات مدلسازی و فرمولبندی و معادله شرودینگر غیرخطی فضایی-زمانی چهاربعدی جفت شده با معادله پلاسما بدست می آید. این معادلات برای محیط همسانگرد شیشه سیلیکا بصورت زیر بدست می باشند:

(۱)

$$\frac{\partial}{\partial z}\mathbf{E}=-\frac{ik_2}{2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\mathbf{E}+\frac{i}{2k_0}\nabla_T^2\mathbf{E}+\frac{ik_0n_2}{n_b}\{\frac{2}{3}(\mathbf{E}\cdot\mathbf{E}^*)\mathbf{E}+\frac{1}{3}(\mathbf{E}\cdot\mathbf{E})\mathbf{E}^*\}$$
$$-\frac{1}{2}\sigma(1+i\omega\tau_c)\rho\mathbf{E}-\frac{1}{2}\beta^{(K)}(|\mathbf{E}|^2)^{K-1}\mathbf{E}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=\frac{\sigma}{E_g}\rho|\mathbf{E}|^2+\frac{\beta^{(K)}|\mathbf{E}|^{2K}}{K\hbar\omega}-a\rho^2$$

و معادلات شرودینگر غیرخطی چهاربعدی جفت شده با معادله پلاسما برای محیط ناهمسانگرد کریستال لیتیم نیوبات با برش x بصورت زیر بدست می آیند:

(۲)

$$\frac{\partial E_y}{\partial x}=-\frac{ik_{2o}}{2}\frac{\partial^2E_y}{\partial t^2}+\frac{i}{2k_{0o}}\nabla_T^2E_y$$
$$+\frac{ik_{0o}}{2n_o^2\varepsilon_0}\{3\varepsilon_0(\chi_{11}|E_y|^2E_y+\chi_{16}(2E_y|E_z|^2+E_z^2E_y^*)\}$$
$$-\frac{1}{2}\sigma_o(1+i\omega\tau_c)\rho E_y-\frac{1}{2}\beta^{(K)}\{(|E_y|^2+|E_z|^2)^{K-1}\}E_y$$
$$\frac{\partial E_z}{\partial x}=-\frac{ik_{2e}}{2}\frac{\partial^2E_z}{\partial t^2}+\frac{i}{2k_{0e}}\nabla_T^2E_z$$
$$+\frac{ik_{0e}}{2n_e^2\varepsilon_0}\{3\varepsilon_0(\chi_{33}|E_z|^2E_z+\chi_{16}(E_y^2E_z^*+2|E_y|^2E_z))\}$$
$$-\frac{1}{2}\sigma_e(1+i\omega\tau_c)\rho E_z-\frac{1}{2}\beta^{(K)}\{(|E_y|^2+|E_z|^2)^{K-1}\}E_z$$
$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=\frac{\rho}{E_g}(\sigma_o|E_y|^2+\sigma_e|E_z|^2)+\frac{\beta^{(K)}(|E_y|^2+|E_z|^2)^{(K)}}{K\hbar\omega_0}$$

معادلات مشابهی را می توان برای کریستال با برش z بدست آورد.

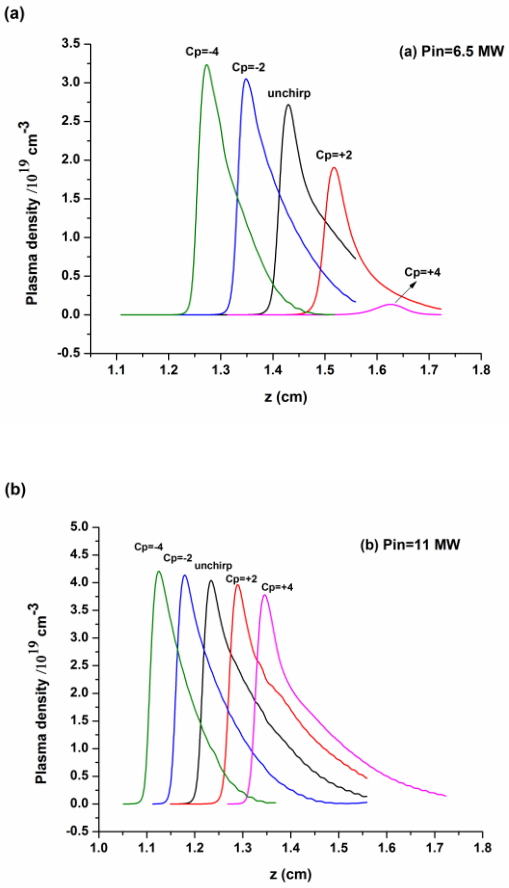
برای حل عددی معادلات شرودینگر چهاربعدی فضایی زمانی، از روش ترکیبی انتشار پرتو، و شکافت عملگری به همراه روش تفاضل محدود کرانک نیکلسون و با بکارگیری الگوریتم جهت متناوب ضمنی برای تبدیل معادلات حاصله به معادلات سه قطری، استفاده شده است. معادله پلاسما نیز بطور جفت شده با معادله

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

شرودینگر و توسط روش رانگ کوتا حل می شود.

۳- نتایج شبیه سازی

شبیه سازیها با حل عددی معادلات حاصله برای هر دو محیط شیشه سیلیکا و کریستال لیتیم نیوبات انجام شد. شکل (۱) تغییرات چگالی پلاسما در طول محور انتشار را به ازای مقادیر چیرپ فرکانسی فرودی مختلف و برای دو قله توانی سه برابر و پنج برابر توان بحرانی یعنی: a) 6.5 MW و b) 11 MW نشان می دهد.

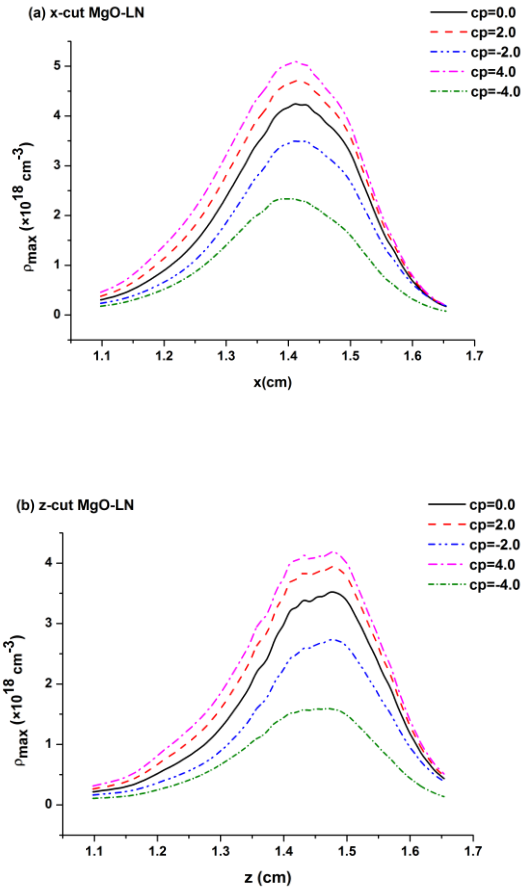


شکل ۱: تغییرات چگالی پلاسما در طول محور انتشار را به ازای مقادیر چیرپ فرکانسی فرودی مختلف و برای دو قله توانی a) 6.5 MW و b) 11 MW

به ازای پارامتر چیرپ منفی بیشینه چگالی پلاسما، از بیشینه چگالی پلاسما متناظر برای پارامتر چیرپ مثبت بزرگتر است. با افزایش مقدار پارامتر چیرپ، میزان تفاوت بیشینه چگالی پلاسما برای پارامتر چیرپ مثبت و منفی بیشتر می شود. این بدین دلیل است که هنگام انتشار و کانونی شدن پالس گوسی با ضریب چیرپ مثبت $C_p>0$ داخل محیط سیلیکا، با ضریب پاشندگی مثبت، پالس در نرخ سریعتری نسبت به پالس غیر چیرپ از نظر زمانی پهن می شود. چیرپ القا شده در اثر پاشندگی به چیرپ ورودی ابتدایی افزوده می شود، چون هر دو سهم، علامت یکسان دارند. بنابراین قله توانی در حین انتشار سریعتر به زیر مقدار توان بحرانی کاهش می یابد. نتیجتاً بیشینه چگالی پلاسمای تشکیل شده در محل کانون شدیداً کاهش می یابد. اما در صورتی که پالس فرودی دارای چیرپ منفی باشد، چیرپ القا شده در اثر پاشندگی شیشه، علامت متضاد با چیرپ فرودی دارد و پس از طی فاصله ای، پالس غیرچیرپ می شود. بنابراین پهنای پالس کاهش یافته و به یک مقدار کمینه ای می رسد و قله توانی پالس به مقدار بسیار بالاتر از توان بحرانی افزایش می یابد. نتیجتاً چگالی پلاسما افزایش یافته و پس از طی فاصله انتشار کمتری به مقدار بیشینه اش می رسد.

سپس اثر مقدار و علامت پارامتر چیرپ فرکانسی پالس فرودی، روی توزیع چگالی پلاسما در مجاورت کانون داخل محیط ناهمسانگرد کریستال لیتیم نیوبات با برش های X و Z، مطالعه می شود. شکل (۲) اثر علامت و مقدار پارامتر چیرپ فرکانسی پالس فرودی را روی توزیع چگالی پلاسما روی محور انتشار به ازای پالس لیزری فمتوثانیه با انرژی ۵ میکروژول و طول پالس ۲۵۰ فمتوثانیه کانونی شده داخل کریستال لیتیم نیوبات با برش a) X و b) برش Z نشان می دهد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]



شکل ۲: تغییرات توزیع چگالی پلاسما در محور انتشار به ازای پالسهای لیزری فمتوثانیه با مقدیر چیرپ فرکانسی مختلف و با انرژی ۵ میکروژول و طول پالس ۲۵۰ فمتوثانیه کانونی شده داخل کریستال لیتیم نیوبات با a) برش x و b) برش z

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود برای هر دو کریستال MgO-LN با برش x و z، بیشینه چگالی پلاسما به ازای پارامتر چیرپ پالس فرودی مثبت، در مقایسه با مقدار آن برای پارامتر چیرپ منفی بزرگتر است و با افزایش مقدار پارامتر چیرپ، میزان تفاوت بیشینه چگالی پلاسما برای چیرپ مثبت و منفی بیشتر می شود. رفتار مشاهده شده در اینجا برای پارامتر چیرپ مثبت و منفی عکس رفتار مشاهده شده برای شیشه سیلیکا است. علت تفاوت محیط کریستالی لیتیم نیوبات با شیشه سیلیکا بدلیل نقش بسیار غالب تر یونیزاسیون سه فوتونی در کریستال لیتیم نیوبات در مقایسه با یونیزاسیون ۵ فوتونی شیشه سیلیکا می باشد. در کریستال لیتیم نیوبات این اثر در مقایسه با اثر خودکانونی بسیار غالب تر است و قبل از این که قله توانی بواسطه اثر خود کانونی حین انتشار افزایش یابد، توسط اثر یونیزاسیون چند فوتونی و جذب پلاسما شدیداً کاهش می یابد.

۴- نتیجه‌گیری

اثر مقدار و علامت چیرپ فرکانسی پالس فرودی روی میزان و مکان تشکیل چگالی پلاسما داخل شیشه سیلیکا و کریستال لیتیم نیوبات بررسی شد. نتایج نشان می دهد که چیرپ پالس فرودی بطور مؤثر میزان و مکان تشکیل بیشینه چگالی پلاسما را تغییر می دهد. اثر علامت و مقدار چیرپ فرکانسی برای این دو محیط همسانگرد و ناهمسانگرد رفتار متفاوت و معکوسی را نشان داد. با توجه به نتایج شبیه سازی می توان دید که با تنظیم چیرپ فرکانسی پالس فرودی می توان مقدار و مکان چگالی پلاسما تولید شده داخل شیشه و کریستال لیتیم نیوبات را بخوبی کنترل و مهندسی کرد.

مراجع

[1].C. B. Schaffer, A. Brodeur, J. F. García, and E. Mazur, "Micromachining bulk glass by use of femtosecond laser pulses with nanojoule energy", Opt. Lett., 26 (2001) 93-95.
[2]. R. R. Gattass, "Femtosecond-laser interactions with transparent materials: applications in micromachining and supercontinuum generation", PhD thesis, Harvard University Cambridge, Massachusetts, June (2006).
[3]. A. Ferrer, V. Diez-Blanco, A. Ruiz, J. Siegel, "Deep subsurface optical waveguides produced by direct writing with femtosecond laser pulses in fused silica and phosphate glass". Appl. Surf. Sci., 254 (2007) 1121–1125.
[4]. M. Ams, G. D. Marshall and M. J. Withford, "Study of the influence of femtosecond laser polarization on direct writting of waveguides", Opt. Expr. 14 (2006) 13158-13163.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]