



بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران

بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران

دانشگاه تربیت مدرس

۱۳۹۵ بهمن ۱۴-۱۲

23<sup>rd</sup> Iranian Conference on Optics and Photonics and 9<sup>th</sup> Conference on Photonics Engineering and Technology

Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

January 31- February 2, 2017



## بررسی اثر افزایش شدت بر جابه‌جایی لبه آبی بیناب ابرپیوستار تولید شده در آب

فرشته حاج اسماعیل بیگی، افتخارسادات بستان‌دوست، حسین رزاقی، اسماء‌السادات معتمدی

پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

چکیده - تعادل بین اثر نوری کر و اثر واگرایی پلاسما سبب رشته سازی فمتوثانیه می‌شود و در این حالت شدت لیزر درون رشته ثابت باقی می‌ماند و با افزایش انرژی لیزر تغییری در رشته ایجاد نمی‌شود. این پدیده با عنوان گیرافتادگی شدت مطرح می‌شود. در این مقاله بیناب ابرپیوستارهای تولید شده در اثر انتشار تپ فمتوثانیه لیزر تیتانیوم - سفایر در آب بدون یون به صورت تابعی از انرژی ورودی لیزر از ۶۶ میکرو ژول تا ۰/۶ میلی ژول بررسی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش انرژی ورودی لیزر پهن‌شدگی بیناب طول موجی به صورت نامتقارن است. همچنین با افزایش انرژی بیشتر از ۴۶۰ میکروژول جابه‌جایی طول موجی به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر ثابت باقی می‌ماند.

کلید واژه- ابرپیوستار، تپ فمتوثانیه، رشته سازی، گیرافتادگی شدت

## Study of the Intensity Increasing Effect on the Spectrum Blue Shift of Super Continuum Generation in Water

Fereshteh Hajiesmaeilbaigi, Eftekhhar Bostandoust, Hosein Razzaghi, Asma Motamedi,

Laser and Optics Research School, NSTRI, Tehran, Iran

Abstract- Balance between optical Kerr and plasma defocusing effects causes the femtosecond laser filamentation. In this case the laser intensity inside the laser filament is stable and becomes unvaried during increasing the laser energy. This phenomenon is called intensity clamping. In this paper the super continuum spectrums of the femtosecond Ti: Sapphire laser pulses which were propagated in water, at different input laser energy from 66  $\mu\text{J}$  to 0.6 mJ were investigated. The experimental results show asymmetric broadening spectrums by increasing the input laser energy. Also it was shown that the blue shifting toward the shorter wavelength is constant for the input energy above 460  $\mu\text{J}$ .

Keywords: supercontinuum, femtosecond pulse, filamentation, intensity clamping

## ۱- مقدمه

در اثر برانگیختگی چند فوتونی از نوار ظرفیت به نوار هدایت تولید می‌کند. هر دوی این فرآیندها در ضریب شکست ماده سهمی دارند که با رابطه ۲ مشخص می‌شوند [۱۴ و ۱۵]:

$$n(r,t) \approx (n_0^2 + \chi^{(3)} I(r,t) - \frac{4\pi e^2 N_e(r,t)}{m_e \omega_0^2})^{1/2} \quad (2)$$

که  $n_0$  ضریب شکست خطی و  $I(r,t)$  توزیع زمانی و مکانی شدت تپ را نشان می‌دهند.  $N_e(r,t)$  تعداد الکترون‌های آزاد تولید شده در مختصات  $r$  و زمان  $t$  در نقطه تمرکز لیزر را مشخص می‌کند و  $e$  و  $m_e$  بار و جرم الکترون هستند. نرخ یونیزاسیون زمانی که رشته سازی رخ می‌دهد را با رابطه ۳ می‌توان در نظر گرفت:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = \sigma I^m (N_0 - N_e) \quad (3)$$

که  $N_e$  چگالی الکترون آزاد درون رشته،  $\sigma$  سطح مقطع یونیزاسیون و  $I$  شدت لیزر است.  $N_0$  چگالی مولکول‌های خنثی را مشخص می‌کند. به دلیل اینکه یونیزاسیون چند فوتونی فرآیندی به شدت غیرخطی است و چگالی الکترون‌ها با شدت لیزر به سرعت افزایش می‌یابد، می‌توان در رابطه ۳ افزایش چگالی را با قانون توان موثر تخمین زد که  $m$  مرتبه غیرخطی موثر از یونیزاسیون است. با توجه به اینکه  $N_0 \gg N_e$  معادله ۳ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$N_e = N_0 \beta I^m \quad (4)$$

$\beta$  ثابت تناسبی است که سطح مقطع و انتگرال زمانی را در بر می‌گیرد. از سوی دیگر تغییر ضریب شکست در اثر پلاسما تولید شده می‌تواند با رابطه ۵ تقریب زده شود:

$$\Delta n_p = -\frac{\omega_p^2}{2\omega_0^2} \quad (5)$$

و فرکانس پلاسما با رابطه  $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2}{\epsilon_0 m_e} N_e}$  داده می‌شود. بنابراین ضریب شکست موثر در طی رشته سازی عبارت است از:

$$n = n_0 + \Delta n_{kr} + \Delta n_p \\ = n_0 + n_2 I - \frac{e^2}{2\epsilon_0 m_e \omega_0^2} N_0 \beta I^m \quad (6)$$

در جائیکه خود تمرکزی کر با واگرایی الکترون آزاد در تعادل قرار می‌گیرد یعنی  $\Delta n_{kr} + \Delta n_p = 0$  باریکه لیزر ضریب شکست  $n_0$  را تجربه می‌کند و با سرعت خطی  $c$  منتشر می‌شود. این شرط به گیرافتادگی شدت تعبیر می‌شود. با در نظر گرفتن انتشار موج تختی که با میدان الکتریکی مشخص  $E(z,t) = E_0 \exp(i(\omega_0 t - \frac{\omega_0 n(z,t)z}{c}))$

گسترش و فراوانی لیزرهای فمتوثانیه این امکان را فراهم آورده است تا مطالعات جامعی بر روی انتشار تپ‌های فوق کوتاه نوری در محیط‌های شفاف صورت پذیرد. رشته سازی و تولید نور سفید و یا تولید ابرپیوستار دو نتیجه مهم از انتشار تپ‌های فوق سریع لیزرهای پرشدت است. اثر رشته سازی درون ماده و اثر تولید ابرپیوستار در بیرون از ماده ظاهر می‌شوند. پهن‌شدگی بینایی تپ یکی از مهم ترین اثرهای ایجاد شده در حین عبور تپ‌های پرشدت کوتاه از ناحیه اپتیکی است که تولید ابرپیوستار را نتیجه می‌دهد.

پیوستار به صورت دیسک سفیدی که با گسیل مخروطی شبیه رنگین کمان احاطه شده ظاهر می‌شود؛ قسمت مرکزی باریکه با واگرایی کم، پیوستار نورسفید و یا ابرپیوستار نامیده می‌شود. از سازوکارهای مختلفی که امکان توصیف تولید ابرپیوستار را دارند می‌توان به مدولاسیون خودفاز [۱]؛ مدولاسیون خودفاز افزایش یافته با یونیزاسیون [۱،۲]؛ غیرخطیت لحظه‌ای کر [۳]؛ پراکندگی رامان برانگیخته؛ خودخمشی و فرآیندهای پارامتری چهارموج [۴-۸] اشاره نمود. اما با وجود تعدد سازوکارهای مختلف، هنوز توصیف قطعی با پشتوانه فیزیکی قوی از فرآیند تولید ابرپیوستار وجود ندارد [۹].

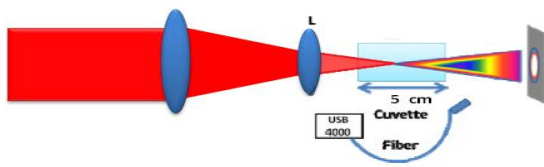
## ۲- بررسی نظری

بر اساس نتایج اولیه از پیوستار پیکوثانیه [۱۰]، توان آستانه برای تولید پیوستار با توان بحرانی محاسبه شده برای خود تمرکزی مطابقت دارد. بنابراین خودتمرکزی نقش مهمی در تولید پیوستار نور سفید دارد [۱۱ و ۱۲]. توان بحرانی برای خودتمرکزی  $P_{cr}$ ، در حالت موج پیوسته از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

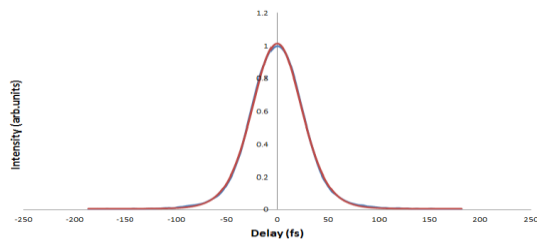
$$P_{cr} = \frac{3.72 \lambda_0^2}{8\pi n_0 n_2} \quad (1)$$

که  $n_0$  و  $n_2$  به ترتیب ضریب شکست خطی و غیرخطی محیط و  $\lambda_0$  طول موج لیزر برخوردی است. مقدار توان بحرانی برای نور مادون قرمز ( $800 \sim 80 \text{ nm}$ ) انتشار یافته در هوا و آب به ترتیب در حدود  $2/4$  گیگا وات و  $4/4$  مگا وات است [۱۳]. برهم کنش تپ لیزر پرشدت با محیط چگالی که پذیرفتاری مرتبه سوم غیرصفر دارد از یک سو قطبش غیرخطی در محیط ایجاد کرده و از سوی دیگر الکترون آزاد

۳۷ فمتوثانیه در نرخ تکرار ۱۰ هرتز به انرژی قابل تنظیم تا ۱/۲ میلی ژول می رسند. باریکه لیزر پس از عبور از یک تلسکوپ وارون که اندازه لکه را تا ۳۰۰ میکرومتر کاهش می دهد بر روی سلول کوارتز به طول ۵ سانتی متر حاوی آب بدون یون متمرکز می شود. در فاصله حدود ۳۵ سانتی متری بعد از سلول پرده ای ثابت برای مشاهده لکه ابرپیوستار تولید شده قرار دارد و نور پراکنده شده بعد از سلول توسط فیبر نوری متصل به بیناب سنج برای ثبت بیناب طول موجی ابرپیوستار جمع آوری می شود. انرژی تپ قبل از سلول با استفاده از انرژی متر اندازه گیری شده است.



شکل ۱: نمایش طرح وار چیدمان آزمایشگاهی برای تولید ابرپیوستار



شکل ۲: نمودار پهنای زمانی تپ ۳۷ فمتوثانیه تقویت شده

#### ۴- نتایج و بحث

نمودار پهنای زمانی تپ تقویت شده که توسط خودهمبستگی تک شات اندازه گیری شده در شکل ۲ نشان داده شده است. تپ های فمتوثانیه منتشره در آب ابرپیوستاری با حلقه های رنگی مخروطی شکل تولید می کنند که با افزایش انرژی ورودی همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است رنگ سفید در مرکز غالب می شود. بیناب های طول موجی ابرپیوستارهای تولید شده درون آب بدون یون در اثر انتشار باریکه با انرژی های ۶۶ میکروژول تا ۰/۶ میلی ژول در شکل ۴ نشان داده شده است. برای اینکه مقایسه نسبی بین نمودارها صورت پذیرد، هر کدام از نمودارها در طول موج بیشینه خود به ۱ بهنجار شده است. ملاحظه می شود که با افزایش انرژی تپ ورودی تا ۴۶۰ میکروژول، پهنای بیناب طول موجی ابرپیوستار افزایش پیدا می کند و با افزایش

می شود در ناحیه غیرخطی، تغییرات فرکانسی ایجاد شده در اثر مدولاسیون خود فازی با رابطه زیر مشخص می شود [۱۴ و ۱۵].

$$\Delta\omega(z, t) = -\frac{\omega_0 z}{c} \frac{\partial n}{\partial t} \quad (7)$$

$$\approx -a \frac{\partial I}{\partial t} + b I^m \quad (8)$$

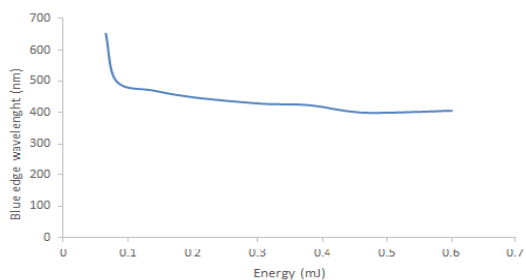
$$= -a I_0 \frac{\partial f}{\partial t} + b I_0^m f^m(t) \quad (9)$$

$I_0$  شدت قله و  $f(t)$  تابع نیمرخ زمانی است.  $C$  سرعت نور در خلاء،  $z$  فاصله انتشار در محیط،  $a = \frac{n_2 \omega_0 z}{c}$  و  $b = \frac{e^2}{2\epsilon_0 m_e \omega_0^2} N_0 \beta$  جمله اول در رابطه ۹ جابه جایی فرکانسی در اثر ضریب شکست غیرخطی  $n_2$  ماده، برهم کنش نور با الکترون های پیوندی را مشخص می کند. جمله دوم در اثر تولید پلاسما به دلیل برانگیختگی چند فوتونی در محیط چگال، برهم کنش نور با الکترون های آزاد ظاهر می شود و سبب جابه جایی آبی بیناب می شود. باید توجه شود که این دو جمله توان های مختلفی از شدت قله  $I_0$  را در بر می گیرند. بنابراین بیشینه جابه جایی فرکانس آبی در شدت های کم در اثر ضریب شکست غیرخطی و در شدت های زیاد در اثر پلاسما ایجاد می شود. در حالی که بسیاری از کاربردهای ابرپیوستار نیازمند بینابی با جابه جایی بزرگتر آبی هستند، گستره جابه جایی آبی ابرپیوستار از محیط های چگال در اثر پدیده گیرافتادن شدت مقداری ثابت گزارش شده است [۱۵]. همچنین پدیده گیرافتادن شدت که توسط بران [۱۶] مطرح شده به عنوان عاملی محدود کننده در جابه جایی آبی بیناب ابرپیوستار معرفی شده است. بنابراین در این مقاله به بررسی اثر افزایش انرژی تپ فمتوثانیه در جابه جایی لبه آبی بیناب ابرپیوستار تولید شده در آب بدون یون به صورت تجربی پرداخته می شود.

#### ۳- آزمایش تجربی

چیدمان آزمایشگاهی برای تولید ابرپیوستار از آب بدون یون در شکل ۱ به صورت طرح وار نشان داده شده است. تپ های فمتوثانیه توسط نوسانگر تیتانیوم سفایر با پهنای زمانی کمتر از ۵۰ فمتوثانیه و پهنای بینابی در نیمه بیشینه (FWHM) ۵۳ نانومتر در طول موج مرکزی ۷۹۸ نانومتر با توان میانگین ۳۸۰ میلی وات تولید شده و با استفاده از روش تقویت تپ چرپ پس از عبور از تقویت کننده باز تولیدی تا

طول موج‌های کوتاه‌تر مشاهده نشده است که این نتیجه در اثر گیرافتادگی شدت درون رشته قابل توجیه است.



شکل ۵: جابه‌جایی لبه آبی بیناب طول موجی بر حسب انرژی ورودی

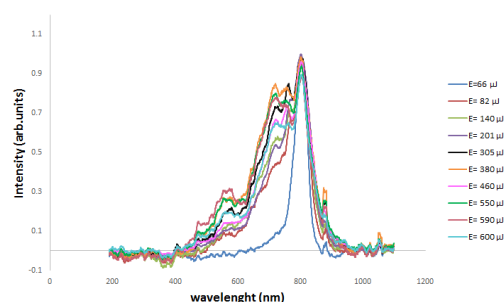
بیشتر انرژی ورودی تغییر قابل توجهی در پهنای بیناب طول موجی ایجاد نمی‌شود.



شکل ۳: عکس ابرپیوستار تولید شده توسط باریکه با انرژی ۶۶ میکروژول (راست) و انرژی ۰/۶ میلی ژول (چپ).

## مراجع

- [1] R.L. Fork, C.V. Shank, C. Hirlimann, R. Yen, W.J. Tomlinson, "Femtosecond white-light continuum pulses" *Opt. Lett.* 8, 1(1983)
- [2] P.B. Corkum, C. Rolland, T. Srinivasan-Rao, "Supercontinuum Generation in Gases" *Phys. Rev. Lett.* 57 18, 2268(1986)
- [3] J.T. Manassah, P.L. Baldeck, R.R. Alfano, "Self-focusing, self-phase modulation, and diffraction in bulk homogeneous material" *Opt. Lett.* 13, 1090 (1988)
- [4] G.Y. Yang, Y.R. Shen, "Spectral broadening of ultrashort pulses in a nonlinear medium" *Opt. Lett.* 9, 510 (1984)
- [5] A. Penzkofer, A. Seilmeier, W. Kaiser, "Parametric four-photon generation of picosecond light at high conversion efficiency" *Opt. Commun.* 14, 363 (1975)
- [6] A.L. Gaeta, "Catastrophic Collapse of Ultrashort Pulses" *Phys. Rev. Lett.* 84, 3582 (2000)
- [7] N. Ak'ozbek, M. Scalora, C.M. Bowden, S.L. Chin, "White-light continuum generation and filamentation during the propagation of ultra-short laser pulses in air" *Opt. Commun.* 191, 353(2001)
- [8] X.J. Fang, T. Kobayashi, "Evolution of a super-broadened spectrum in a filament generated by an ultrashort intense laser pulse in fused silica" *Appl. Phys. B* 77, 167 (2003)
- [9] D. Schumacher, "Controlling continuum generation" *Opt. Lett.* 27, 451 (2002)
- [10] N. Bloembergen, "The influence of electron plasma formation on superbroadening in light filaments" *Opt. Commun.* 8, 285 (1973)
- [11] J.K. Ranka, R.W. Schirmer, A.L. Gaeta, "Observation of Pulse Splitting in Nonlinear Dispersive Media" *Phys. Rev. Lett.* 77, 3783 (1996)
- [12] A. Couairon, A. Mysyrowicz, "Femtosecond filamentation in transparent media" *Phys. Rep.* 441, 47 (2007)
- [13] K. Ishikawa, H. Kumagi, K. Midorikawa, "High-power regime of femtosecond-laser pulse propagation in silica: Multiple-cone formation" *Phys. Rev. E* 66, 056608 (2002)
- [14] Weiwei Liu, "Intensity Clamping During Femtosecond Laser Filamentation" *CHINESE JOURNAL OF PHYSICS*, 465, 52 (2014)
- [15] W. Liu et al., "Intensity clamping of a femtosecond laser pulse in condensed matter" *Opt. Commun.* 202, 189 (2002)
- [16] A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, and G. Mourou, "Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air" *Opt. Lett.* 20, 73 (1995)



شکل ۴: بیناب‌های طول موجی ابرپیوستار تولید شده در انرژی‌های مختلف

همچنین با افزایش انرژی از ۶۶ میکروژول تا ۰/۶ میلی ژول لبه آبی بیناب به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر کشیده شده- اند و کوتاه‌ترین طول موج ثبت شده ۴۰۰ نانومتر است. در واقع با افزایش انرژی، پهن شدن نامتقارن بیناب ابر پیوستار مشاهده می‌شود. جابه‌جایی طول موجی بر حسب تغییر انرژی در شکل ۵ نشان داده شده است.

## ۵- نتیجه گیری

اثر افزایش انرژی باریکه ورودی بر پهن شدن بیناب طول موجی ابرپیوستار تولید شده در آب بدون یون مورد بررسی قرار گرفت. بیناب‌های طول موجی افزایش قابل توجهی در پهن شدن نامتقارن ابرپیوستار را در انرژی‌های بالاتر نشان می‌دهند. افزایش انرژی ورودی، افزایش تبدیل تپ لیزر برخوردی به ابرپیوستار را به همراه دارد که نقش شدت افزایش یافته در نقطه کانون را مشخص می‌کند. لبه آبی بیناب ابرپیوستار به صورت تابعی از انرژی باریکه ورودی از ۶۵۲ تا ۴۰۰ نانومتر کاهش پیدا می‌کند و پس از آن با افزایش بیشتر انرژی ورودی جابه‌جایی طول موجی به سمت