

تولید ابرپیوستار با استفاده از نواری شدن لیزر فمتوثانیه در آب بدون یون

فرشته حاج اسماعیل بیگی[✉]، افتخار سادات بستان دوست^{ID}، اسما سادات معتمدی^{ID}، حسین رزاقی^{ID}
پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران-ایران

*Email: fesmaeilbaigi@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱۱ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

چکیده

در این مقاله به منظور دست‌یابی به چشمه نور سفید تولید ابرپیوستار توسط پدیده نواری شدن تپ‌های تقویت شده فمتوثانیه لیزر تیتانیم سفایر در آب بدون یون به‌طور تجربی بررسی شده است. در طی انتشار تپ‌های فمتوثانیه در داخل آب پدیده غیرخطی خودکانونگی منجر به نواری شدن و تولید ابرپیوستار می‌گردد. اثر تغییر فاصله نقطه کانون از دیواره سلول حاوی آب و همچنین اثر تغییر انرژی تپ فمتوثانیه فرودی مطالعه شده است. در توان‌های نزدیک توان بحرانی حلقه‌ها و گسیل مخروطی بخش قابل توجهی از پیوستار خروجی را تشکیل می‌دهند و در توان‌های بسیار بالا بخش نور سفید مرکزی کل خروجی را در برمی‌گیرد. ابرپیوستاری با پهنای ۶۰۰ نانومتر توسط تپ‌های لیزری فمتوثانیه با انرژی ۱/۱۹ میلی‌ژول تولید شده است. پهن شدن بیناب پیوستار تولید شده به‌واسطه دو اثر خودکانونگی کر و واکانونی پلاسما برای تپ‌های با پهنای زمانی ۳۷ فمتوثانیه در بازه ۴۲۰ تا ۳۸۰۰ برابر توان بحرانی آب بررسی شده است. با افزایش انرژی تپ ورودی تا ۴۶۰ میکروژول که توان متوسط آن ۲۹۰۰ برابر توان بحرانی است، پهنای بیناب ابرپیوستار به‌صورت نامتقارن افزایش یافته و لبه آبی بیناب تا طول‌موج ۴۰۰ نانومتر جابه‌جا می‌شود. با افزایش بیشتر انرژی به دلیل گیرافتادگی شدت درون نوار جابه‌جایی بیشتری مشاهده نشده است.

کلیدواژه‌ها: ابرپیوستار، نواری شدن، لیزر فمتوثانیه، خودکانونگی کر، واکانونی پلاسما

Supercontinuum generation by femtosecond laser filamentation in deionized water

F. Hajiesmaeilbaigi*, E.S. Bostandoost, A.S. Motamedi, H. Razzaghi

Photonic and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

Research Article

Received: 2.9.2023, Revised: 31.12.2023, Accepted: 31.12.2023

Abstract

The experimental investigation of supercontinuum generation in deionized water using an amplified Ti:sapphire femtosecond laser pulses is presented. During the propagation of femtosecond pulses in deionized water, self-focusing leads to filamentation and subsequent supercontinuum generation. The effects of varying the focal point distance from the cell and altering the incident femtosecond laser pulse energy on the supercontinuum spectra were studied. Near critical power, ring and cone emissions contribute significantly to the continuum. The central white light part covers the output signal at very high laser powers. A supercontinuum emission with a bandwidth of 600 nm was achieved using a laser pulse energy of 1.19 mJ. The spectrum broadening, due to Kerr self-focusing and plasma defocusing, was analyzed for 37 femtosecond laser pulses with average powers ranging from 420 to 3800 times the critical power. Increasing the input pulse energy to 460 μ J, corresponding to 2900 times the critical power, resulted in an asymmetric broadening of the spectrum, with the blue edge shifting to 400 nm. Further increases in energy showed no additional shift due to intensity clamping.

Keywords: Supercontinuum, Filamentation, Femtosecond laser, Kerr self-focusing, Plasma defocusing



۱. مقدمه

گسترش و فراوانی لیزرهای فمتوثانیه امکان مطالعات جامع بر روی انتشار تپ‌های فوق کوتاه نوری در محیط‌های شفاف را فراهم نموده است. امروزه این زمینه تحقیقات از اهمیت زیادی برخوردار است و تلاش‌های مؤثری توسط فیزیک‌دانان، دانشمندان علم مواد و شیمی‌دانان برای درک بهتر اثرگذاری تپ‌های پرشدت فوق کوتاه بر روی مواد در حین انتشار انجام گرفته است. تحقیقات انجام شده از دو منظر علوم پایه و علوم کاربردی از اهمیت خاصی برخوردار هستند [۱-۴].

نواری شدن لیزر فمتوثانیه یک پدیده غیرخطی منحصربفردی است که در طی انتشار لیزر فوق سریع پر قدرت در تمام محیط‌های نوری شفاف اتفاق می‌افتد. در طی نواری شدن یک کانال پلاسما تولید می‌شود که طول آن می‌تواند از طول رایلی بیشتر باشد. به دلیل ساز و کارهای متفاوت تولید الکترون آزاد، چگالی پلاسما و طول نوار، نقطه تمایز آشکار برای گازها و مواد چگال مختلف است. همچنین بسیاری از اثرات نوری خطی و غیرخطی مانند پراش، پراکندگی، خود-کانونگی کر، واکانونی پلاسما، تولید ابرپیوستار، گسیل و تقویت فلورسانس و خود متراکم‌سازی تپ در وقوع این پدیده درگیر هستند [۵].

یکی از پدیده‌هایی که در هنگام نواری شدن لیزر فمتوثانیه در محیط نوری اتفاق می‌افتد پهن شدگی بینایی قابل ملاحظه‌ای به سمت بیناب پیوسته نور سفید است که می‌تواند محدوده وسیعی از ماورابنفش تا مادون قرمز را پوشش دهد [۶-۷]. 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.

نواری شدن و تولید نور سفید و یا تولید ابرپیوستار دو نتیجه مهم از انتشار تپ‌های فوق سریع لیزرهای پرشدت است. اثر نواری شدن درون ماده و اثر تولید ابرپیوستار در بیرون از ماده ظاهر می‌شوند.

تولید ابرپیوستار در محیط‌های مختلف گازی، مایع و جامد در طول سه دهه گذشته به دلیل فراهم آوردن فرصت‌هایی برای کاوش در جنبه‌های متنوع و جذاب برهم‌کنش‌های غیرخطی نور با ماده [۸-۱۰] و همچنین برای کاربردهای بالقوه شامل توسعه لیزرهای فوق سریع [۱۱-۱۲]، تصویربرداری و میکروسکوپی [۱۳-۱۴] به شدت مورد بررسی قرار گرفته است.

پهن شدگی بینایی یا تولید پیوستار در طی انتشار غیرخطی نتیجه خودمدولاسیون فازی است که در اثر خودکانونگی ایجاد

می‌شود. همچنین وقتی توان لیزر برخوردی زیاد باشد، پلاسما تشکیل شده و تولید الکترون‌های آزاد در اثر فرایند یونیزاسیون القایی چند فوتونی، سهم عمده‌ای در تغییر بیناب دارند. بنابراین در اثر شدت بسیار زیاد لیزر که لازمه شروع تولید ابرپیوستار است پدیده خود کانونگی تپ نوری درون ماده حاصل می‌شود و در ادامه این پدیده به وسیله سازوکاری مانند یونیزاسیون چندفوتونی متوقف می‌شود. در واقع تشکیل پلاسما به صورت عامل توازن در برابر اثر خودکانونگی عمل می‌کند، زیرا قطر باریکه در ناحیه خودکانونی را محدود کرده و بنابراین شدت قله‌ای که در ماده قابل دست‌یابی است نیز محدود می‌شود.

ماهیت غیرخطی تولید ابرپیوستار نیاز به تپ‌هایی با شدت‌های معمولاً بالاتر از صدها گیگاوات بر سانتی‌مترمربع دارد که این شدت‌ها اغلب باعث ایجاد اثرات حرارتی در مواد می‌شوند. به طور کلی اگر زمان واهلش حرارتی محیط از فاصله زمانی بین تپ‌های نوری متوالی بیشتر باشد این اثرات بر پایداری ابرپیوستار تولید شده تأثیر می‌گذارند. عدسی حرارتی [۱۵] از جمله اثرات کوتاه‌مدت و تخریب در مواد جامد از اثرات بلندمدت هستند که می‌توانند هندسه پیوستار و به دنبال آن بیناب و کارایی تبدیل آن را تغییر دهند [۱۶]. بنابراین در اندرکنش با تپ‌های لیزری پرشدت، مایعات عملکرد بهتری نسبت به گازها و جامدات با ویژگی‌های منحصربفرد دارند. در مقایسه با محیط‌های گازی، مایعات دارای غیرخطیت نوری بالاتر و چگالی الکترون آزاد بیشتری هستند (معمولاً در محدوده 10^{18} تا 10^{19}cm^{-3}) [۱۴] همچنین برخلاف مواد جامد، مایعات به طور مداوم قابل تجدید هستند و آستانه تخریب بالاتری دارند. برخی از پدیده‌های غیرخطی مانند تولید ابرپیوستار [۷] و تولید حباب [۱۷] را می‌توان به راحتی در مایعات مشاهده کرد.

آب در مقایسه با جامدات غیرخطیت نسبتاً بالایی دارد [۱۸] و علی‌رغم ضریب شکست غیرخطی نسبتاً پایین آن در مقایسه با سایر محیط‌ها وقتی توسط لیزر 800 نانومتر دمیده شود دارای یکی از وسیع‌ترین بیناب‌های پاداستوکس است که به گاف انرژی بزرگ و پراکندگی سرعت گروه پایین آن مربوط می‌باشد [۱۹]. همچنین آب کاملاً غیرسمی است و به آسانی می‌توان با اضافه کردن ذرات رنگینه زیستی به آن محیط مایع غیرخطی مناسب برای تولید ابرپیوستار را ایجاد نمود. از این رو در بررسی تولید ابرپیوستار در برهم‌کنش بین لیزر فمتوثانیه و مایعات، آب به دلیل خواص نوری آن و همچنین به دلیل آن‌که متداول‌ترین حلال و جزء اصلی بافت‌های زیستی است از اهمیت بالایی برخوردار است.



مرکزی ۱۰۳۰ نانومتر دمیده شود برابر با ۱۰۲/۵ نانومتر است [۳۱]. همچنین اخیراً کلر و همکاران پایداری تولید نور سفید در آب برای نرخ تکرار ۵۰ و ۱۰۰ کیلوهرتز و دو طول موج دمش ۱۰۳۰ و ۵۱۵ نانومتر را بررسی کرده‌اند، در حضور غلاف آب پهنای باند بینایی تولید شده برای بیشینه جابه‌جایی استوکس و پاد استوکس ناحیه ۴۱۵ تا ۸۵۰ نانومتر را دربرمی‌گیرد [۳۲].

امروزه محققین برای دست‌یابی به چشمه نور سفید یکپارچه به‌جای استفاده از منابع نوری مجزا در کاربردهای مختلفی که نیازمند بازه وسیعی از طول موج‌ها است از محیط‌های غیرخطی مختلفی استفاده می‌کنند. بنابراین در این مقاله با توجه به ویژگی‌های خاص آب، ضمن بررسی اندرکنش تپ لیزری فمتوثانیه با آن، تولید ابرپیوستار توسط نواری شدن تپ‌های فمتوثانیه لیزر تیتانیوم سفایر با طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر در آب بدون یون به منظور دست‌یابی به چشمه نور سفید به‌طور تجربی مطالعه شده است. تغییرات پهنای و بیناب پیوستار تولید شده با تغییر انرژی تپ‌های فمتوثانیه ورودی و همچنین تغییر محل تشکیل کانون به‌طور تجربی بررسی و نتایج آن با نظریه‌های موجود به‌صورت کیفی تحلیل شده است.

۲. بررسی نظری

مدل‌های بسیاری در طی سال‌های اخیر برای توصیف تولید ابرپیوستار ارائه شده‌اند. به‌طور کلی فیزیک پیچیده نواری شدن را می‌توان به‌صورت تعادل دینامیکی بین خود-کانونی‌گری و کانونی‌پلاسمای تولید شده در ناحیه خود-کانونی در نظر گرفت [۸-۱۳]. پلاسمای در نتیجه یونیزاسیون چند فوتونی یا تحریک چند فوتونی الکترون‌ها از نوارهای ظرفیت به نوارهای هدایت تشکیل می‌شود.

برهم‌کنش 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 در اثر برانگیختگی چند فوتونی از نوار ظرفیت به نوار هدایت الکترون‌آزاد تولید می‌کند. هر دوی این فرایندها در ضریب شکست ماده سهمی دارند که با رابطه (۱) مشخص می‌شوند [۳۳-۳۴]:

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

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

برای توصیف فرایند یونیزاسیون آب به‌عنوان یک نیم‌رسانای آمورف (بی‌شکل) در نظر گرفته می‌شود و مقدار گاف انرژی همان انرژی مورد نیاز برای انتقال از اوربیتال مولکولی به نوار تحریک است [۲۰-۲۱]. پلاسمای القا شده توسط لیزر فمتوثانیه در آب در واقع حاصل یونیزاسیون و تجزیه مولکول‌های آب است.

در برهم‌کنش بین آب و تپ‌های لیزری فمتوثانیه هنگامی که توان قله تپ لیزری از توان بحرانی (Pcr) فراتر رود، مقدار زیادی پلاسمای در محیط تولید می‌شود [۲۲]. بنابراین نواری شدن به‌طور خودبه‌خود با تولید ابرپیوستار که طول موج آن از فرابنفش تا مادون قرمز نزدیک گسترده است همراه می‌شود [۲۳-۲۵]. علاوه بر این، به‌دلیل دمای بالا، یک لایه نازک از بخار آب در پیرامون آن ایجاد می‌شود و پس از چند ده میکرو ثانیه منبسط شده و یک موج ضربه‌ای [۱۷، ۲۲، ۲۳] مافوق صوت ایجاد کرده و به‌طور هم‌زمان حباب‌های میکرونی شکل می‌گیرند [۲۴-۲۵]. انگیزه بررسی پدیده‌های غیرخطی فوق‌الذکر کاربردهای بالقوه آنها در شکل‌دهی مجدد تپ‌ها، میکروسکوپی نوری، تولید نانوذرات و غیره می‌باشد [۲۶-۲۷].

بیناب‌هایی که بازه مرئی تا مادون قرمز نزدیک، که در آن بافت و سلول دارای ضریب جذب و پراکندگی پایین هستند را پوشش می‌دهند، برای کاربردهای زیست‌شناسی و زیست‌پزشکی مناسب می‌باشد [۲۸]. با توجه به اهمیت و کاربرد تپ‌های فمتوثانیه در چشم پزشکی برای درک پیامدهای احتمالی ایمنی چشم انسان در مقابل خطرات ناشی از تولید ابرپیوستار که شامل خطر پهنای باند وسیع و تولید نور با فرکانس‌های کوتاه‌تر می‌شود، شبیه‌سازی تولید ابر پیوستار در آب و چشم انسان با استفاده از لیزر با طول موج ۱۱۸۵ نانومتر و پهنای تپ ۳۵ فمتوثانیه و انرژی ۱/۹۲۸ میکروژول توسط ماربل و همکاران [۲۹] انجام شده است.

در اثر رشد سریع فناوری جدید ساخت فیبرهای بلور فوتونی، به‌ویژه آنهایی که پر شده از مایع هستند، چشم‌اندازهای جدیدی به‌وجود آمده که از مزایای ابرپیوستار بهره می‌برند [۳۰]. در واقع به‌دلیل این‌که مایعات اغلب دارای غیرخطیت و شفافیت نوری بالایی هستند، در نتیجه نفوذ جزئی یا کامل مایع به‌داخل حفره‌های هوا در فیبرهای نوری امکان کنترل پراکندگی، غیرخطیت و اتلاف فراهم می‌شود. وان و همکاران تولید ابرپیوستار در فیبر بلور فوتونی با غلاف پر شده از آب را بررسی کرده و نشان داده‌اند که پهنای ابرپیوستار تولید شده وقتی با تپ لیزری ۴۰۰ فمتوثانیه و انرژی ۹ نانوژول در طول موج



I_0 شدت قله و $f(t)$ تابع نیمرخ زمانی است. C سرعت نور در خلأ و z فاصله انتشار در محیط است، $a = \frac{n_1 \omega_0 z}{c}$ و $b = \frac{e^2}{2 \epsilon_0 m_e \omega_0^2} N_0 \beta$ مثبت و مستقل از زمان هستند.

با در نظر گرفتن ۶/۵ الکترون ولت برای گاف انرژی آب، m حدود ۵ است [۳۶].

جمله اول در رابطه (۴) جابه‌جایی فرکانسی در اثر ضریب شکست غیرخطی n_2 ماده، اساساً به واسطه خود مدولاسیون فاز میدان الکتریکی در طی انتشار در محیط غیرخطی است. جمله دوم در اثر تولید پلاسما به دلیل برانگیختگی چند فوتونی در محیط چگال و برهم‌کنش نور با الکترون‌های آزاد ظاهر می‌شود. بنابراین اثر متقابل بین خودکانونگی که توسط ضریب شکست وابسته به شدت ناحیه انتشار القاء می‌شود و پلاسمای ایجاد شده در اثر فرایندهای چند فوتونی که واگرایی را القاء می‌کند، دینامیک انتشار تپ لیزر فمتوثانیه در نواحی اپتیکی را تعیین می‌کند. از دیدگاه تجربی کمینه توان لیزر که برای خود کانونگی در محیط لازم است عامل مهمی در چنین دینامیکی می‌باشد. توان بحرانی برای خودکانونگی P_{cr} ، از رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۷]:

$$P_{cr} = \frac{3.72 \lambda_0^2}{8 \pi n_0 n_2} \quad (5)$$

که n_0 و n_2 به ترتیب ضریب شکست خطی و غیرخطی محیط و λ_0 طول موج لیزر برخوردی است. برای نور لیزر با طول موج ۸۰۰ نانومتر مقدار توان بحرانی در هوا حدود ۳ گیگا وات و برای آب ۴/۲ مگاوات است [۲۲].

تعریف توان بحرانی مطابق رابطه (۵) نشان می‌دهد که فقط به n_0 ، n_2 و λ_0 وابسته بوده و مستقل از شدت است. بنابراین زمانی که توان باریکه از توان بحرانی برای خودکانونگی بیشتر باشد جبهه موج باریکه در حال انتشار به سمت جلو هم‌گرا شده تا مکانی که در نقطه‌ای بنام خود-کانون متمرکز می‌شود. خود-کانون در فاصله Z_f از نقطه شروع انتشار در محیط قرار دارد که توسط رابطه (۶) داده می‌شود [۲۶، ۳۷]:

$$Z_f(P) = \frac{0.367 K a_0^2}{\left[\left(\sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} - 0.852 \right)^2 - 0.00219 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

مشخص می‌کند، e و m_e بار و جرم الکترون و ω_0 بسامد زاویه‌ای مرکزی لیزر هستند. به دلیل فرایند یونیزاسیون تونلی چگالی الکترون آزاد با افزایش شدت به صورت $Ne(t) \propto I^m$ افزایش می‌یابد که m مرتبه غیرخطی مؤثر از یونیزاسیون است.

بنابراین ضریب شکست مؤثر در طی نواری شدن لیزر فمتوثانیه عبارت است از:

$$\begin{aligned} n &= n_0 + \Delta n_{kr} + \Delta n_p \\ &= n_0 + n_1 I - \frac{e^2}{2 \epsilon_0 m_e \omega_0^2} N_0 \beta I^m \end{aligned} \quad (2)$$

که β ثابت تناسب و Δn_{kr} تغییر ضریب شکست در اثر خودکانونگی کر و Δn_p تغییر ضریب شکست در اثر پلاسمای ایجاد شده را نشان می‌دهند. هنگامی که خود کانونگی 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. در حالی که بسیاری از کاربردهای ابرپیوستار نیازمند بینایی با جابه‌جایی بزرگتر آبی هستند، گستره جابه‌جایی آبی ابرپیوستار از محیط‌های چگال در اثر پدیده گیرافتادن شدت مقداری ثابت گزارش شده است [۳۴-۳۵].

به دلیل کوتاهی تپ‌های لیزری فمتوثانیه، یکی از نتایج اندرکنش محیط در طی نواری شدن خود مدولاسیون فازی است. اندرکنش تپ با شدت بالا در نواحی کانون با پلاسمای ایجاد شده منجر به خود مدولاسیون فازی می‌شود که نتیجه آن پهن شدگی بیناب به سمت آبی و قرمز است. در واقع در محیط با تغییرات زمانی ضریب شکست، خودمدولاسیون فازی ایجاد می‌شود.

تغییرات فرکانسی ایجاد شده در اثر خود مدولاسیون فازی با رابطه (۳) ارائه می‌شود [۲۳-۲۴]:

$$\Delta \omega(z, t) = -\frac{\omega_0 z}{c} \frac{\partial n}{\partial t} \quad (3)$$

که با استفاده از روابط (۲) خواهد شد:

$$\begin{aligned} &\approx -a \frac{\partial I}{\partial t} + b I^m \\ &= -a I_0 \frac{\partial f}{\partial t} + b I_0^m f^m(t) \end{aligned} \quad (4)$$



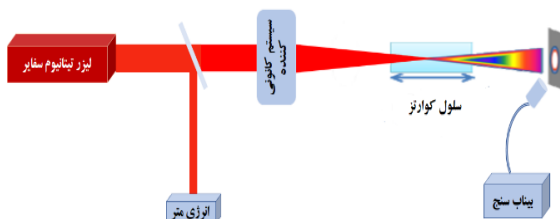
۳. چیدمان تجربی

چیدمان تجربی برای تولید ابرپیوستار در آب بدون یون به صورت طرح‌وار در شکل ۱ نشان داده شده است. تپ‌های فمتوثانیه لیزر تیتانیم سفایر توسط سیستم کانونی‌کننده بر روی سلول کوآرتز به طول ۵ سانتی‌متر حاوی آب بدون یون متمرکز می‌شود. در فاصله ۳۵ سانتی‌متری بعد از سلول پرده سفید ثابتی برای مشاهده لکه ابرپیوستار تولید شده قرار دارد و نور پراکنده شده بعد از سلول توسط فیبر نوری متصل به بیناب‌سنج برای ثبت بیناب طول موجی ابرپیوستار جمع‌آوری می‌شود. انرژی تپ نیز قبل از ورود به سلول با استفاده از انرژی‌متر اندازه‌گیری می‌شود.

برای بررسی اثر تغییر فاصله نقطه کانون از دیواره سلول، اندازه لکه باریکه لیزر پس از عبور از یک عدسی با فاصله کانونی ۸٫۵ سانتی‌متر تا ۱۶۰ میکرومتر کاهش یافته و برای بررسی اثر افزایش انرژی بر تغییر پهنای بیناب ابرپیوستار و جابه‌جایی لبه آبی با استفاده از ترکیب دو عدسی اندازه باریکه لیزر تا ۳۰۰ میکرومتر کاهش یافته است.

۴. نتایج و بحث

برای انجام آزمایش‌های تجربی از تپ‌های فمتوثانیه با پهنای زمانی کمتر از ۵۰ فمتوثانیه و پهنای بینایی در نیمه پیشینه (FWHM) ۵۳ نانومتر در طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر با توان میانگین ۳۸۰ میلی‌وات که توسط نوسانگر تیتانیم سفایر تولید شده‌اند استفاده شده است [۳۸]. با بهره‌گیری از روش تقویت تپ چیرپ، تپ‌ها پس از عبور از تقویت‌کننده باز تولیدی تا ۳۷ فمتوثانیه در نرخ تکرار ۱۰ هرتز به انرژی قابل تنظیم تا ۱٫۲ میلی‌ژول می‌رسند [۳۹]. نمودار پهنای زمانی تپ خروجی از تقویت‌کننده که توسط خودهمبستگی تک شات که قادر به اندازه‌گیری تپ‌های با مدت زمانی ۲۰ تا ۲۰۰ فمتوثانیه در بازه طول موجی ۷۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر است اندازه‌گیری شده در شکل ۲ و بیناب طول موجی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمایش طرح‌وار چیدمان آزمایشگاهی برای تولید ابرپیوستار.

که P توان باریکه، K عدد موج و a_0 شعاع باریکه ورودی است. در اغلب آزمایش‌ها برای انتقال نقطه خود کانونی به داخل محیط غیرخطی کر از یک عدسی خارجی استفاده می‌شود. با استفاده از عدسی با فاصله کانونی f فاصله خودکانونی نهایی از رابطه (۷) به دست می‌آید [۳۶]:

$$Z_{f'} = \frac{Z_f f}{Z_f + f} \quad (7)$$

زمانی که توان لحظه‌ای باریکه لیزر بیشتر از توان بحرانی باشد انتشار تپ لیزر براساس پدیده خودکانونگی رخ می‌دهد در صورتی که در توان‌های کمتر از توان بحرانی از دینامیک انتشار خطی تبعیت می‌کند و در صورت استفاده از عدسی، باریکه در نقطه کانون هندسی متمرکز می‌شود. بنابراین محل خودکانونی و همچنین نقطه شروع نواری شدن با افزایش توان بالاتر از توان بحرانی از نقطه کانون اصلی به سمت عدسی جابه‌جا می‌شود.

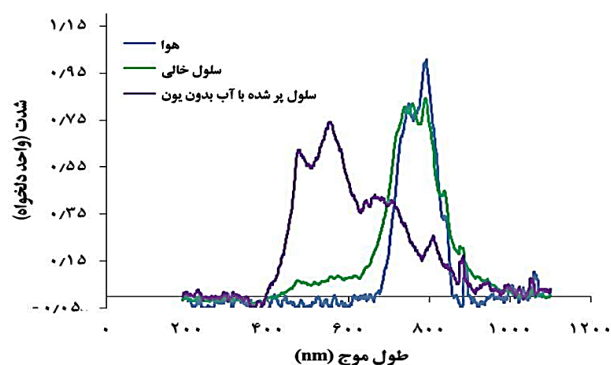
معمولاً طول نوار تشکیل شده در محیط توسط فاصله بین نقطه خودکانونی و کانون هندسی تقریب زده می‌شود که وابسته به توان قله تپ و نحوه متمرکز شدن باریکه دارد. اولین نقطه خودکانونی از کانون هندسی در توان بحرانی شروع می‌شود و سپس با افزایش توان ورودی به سمت عدسی جابه‌جا می‌شود. از طرف دیگر با افزایش توان ورودی در اثر پلاسمای ایجاد شده امکان وقوع پدیده شکست نوری نیز وجود دارد. پدیده شکست نوری فرایندی تجمعی در طول زمان است به طوری که در ابتدا با برانگیزش یا یونیزاسیون چند فوتونی شروع می‌شود و با یونیزاسیون بهمنی ادامه پیدا می‌کند و در نهایت پلاسمای قویی شکل می‌گیرد. بنابراین با فاصله کانونی مناسب، پلاسمای در اثر شکست نوری در توان‌های ورودی حتی پایین‌تر از توان بحرانی می‌تواند تشکیل شود. با افزایش بیشتر توان ورودی تا کمی بیشتر از توان بحرانی، شکست نوری تولید شده در قسمت صعودی تپ همچنان می‌تواند سبب نواری شدن گردد. این پدیده می‌تواند در اطراف تمرکز هندسی رخ دهد متعاقباً خودکانونی قله تپ وارد ناحیه پلاسمای حاصل از شکست نوری شده و به شدت باعث واگرایی تپ می‌شود و بدین ترتیب هیچ نواری درون ناحیه شکست نوری در اطراف تمرکز هندسی ایجاد نمی‌شود.



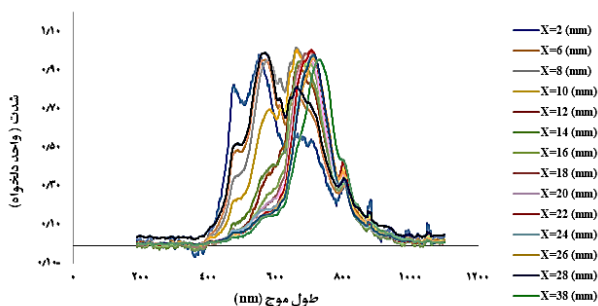
نسبی هر کدام از نمودارها در طول موج بیشینه خود به ۱ بهنجار شده است.

اولین بیناب طول موجی ثبت شده مربوط به حالتی است که نقطه کانون هندسی از دیواره داخلی سلول ۲ میلی متر فاصله دارد و بیناب پیوستار تولید شده از ۳۹۶ تا ۹۸۰ نانومتر گسترده شده است. با توجه به این که انرژی باریکه لیزر ۱/۱۹ میلی ژول، پهنای زمانی تپها ۳۷ فمتوثانیه، طول موج مرکزی باریکه لیزر ۸۰۰ نانومتر، شعاع باریکه ۵ میلی متر و فاصله کانونی عدسی ۸/۵ سانتی متر است و با استفاده از روابط ۶ و ۷ فاصله کانونی اثر خود کانونی ۸۳/۳ سانتی متر و فاصله کانونی نهایی برابر با ۷/۷۲ سانتی متر می شود.

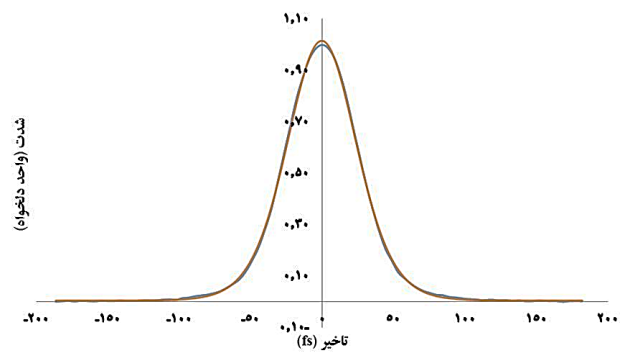
برای تپهای لیزری با پهنای زمانی ۳۷ فمتوثانیه و با در نظر گرفتن گاف انرژی ۶/۵ الکترون ولت برای آب در طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر، شدت آستانه شکست آب $2/4 \times 10^{11}$ وات بر سانتی متر مربع به دست می آید. با توجه به این که در آزمایش انجام شده شدت باریکه لیزر در نقطه کانون برابر با $1/6 \times 10^{14}$ وات بر سانتی متر مربع است می توان نتیجه گرفت هنگامی که نقطه کانون در داخل سلول قرار می گیرد سبب بروز شکست نوری می شود.



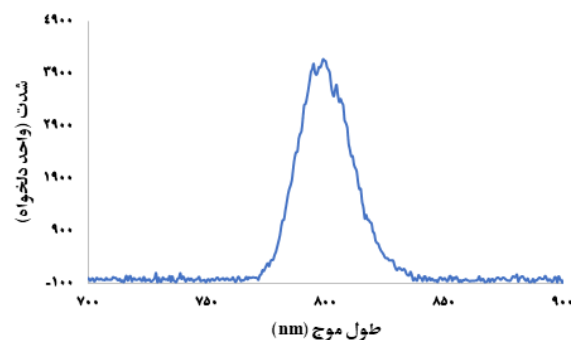
شکل ۴. مقایسه بیناب طول موج باریکه لیزر ۱/۱۹ میلی ژول پس از عبور از سلول خالی و سلول پر با حالت عبور از هوا.



شکل ۵. روند تغییرات بینابهای طول موجی در بازه ۳۶ میلی متری جاروب شده توسط عدسی.



شکل ۲. نمودار پهنای زمانی تپ ۳۷ فمتوثانیه تقویت شده.



شکل ۳. بیناب طول موجی اندازه گیری شده تپ تقویت شده.

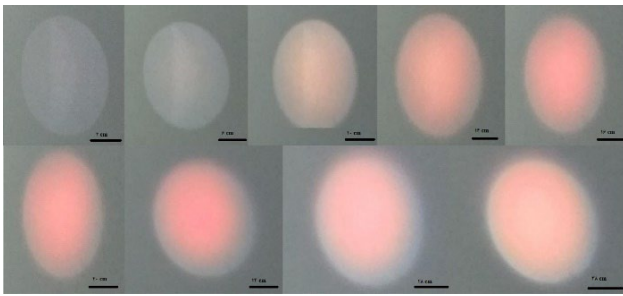
قبل از انجام آزمایشهای اصلی اثر وجود سلول خالی بر بیناب طول موجی باریکه لیزر ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار بیناب طول موجی باریکه لیزر با انرژی ۱/۱۹ میلی ژول پس از عبور از سلول کوارتز در حالت خالی و پر شده از آب بدون یون در مقایسه با حالت عبوری در هوا در شکل ۴ ارائه شده است.

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود وجود سلول خالی به دلیل عبور باریکه از دیواره آن بر پهن شدگی بیناب طول موجی باریکه لیزر مؤثر است. اضافه شدن آب به سلول، سبب پهن شدگی و جابه جایی قله های بیناب به سمت طول موجهای کوتاه تر شده است. پیوستار تولید شده با پهنای حدود ۶۰۰ نانومتر به صورت نامتقارن از ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر گسترده شده است.

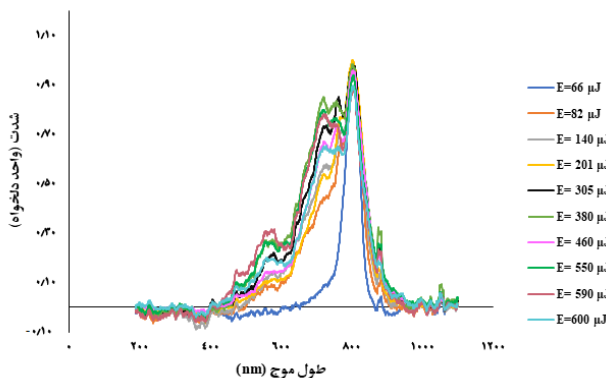
۱.۴ بررسی اثر تغییر فاصله نقطه کانون از دیواره سلول

برای بررسی اثر تغییر فاصله نقطه کانون، سلول حاوی آب بدون یون ثابت نگه داشته شده و عدسی با گامهای ۲ میلی متری به طرف سلول نزدیک می شود و در هر گام بیناب طول موجی ابرپیوستار تولید شده ثبت شده است. بینابهای طول موجی ابر پیوستارهای تولید شده در بازه ۳۶ میلی متری جاروب شده توسط عدسی در شکل ۵ نشان داده شده است. برای مقایسه





شکل ۶. عکس‌های ابرپیوستار تولید شده به ازای فواصل مختلف نقطه تمرکز هندسی از دیواره سلول (از بالاچپ به راست به ترتیب فاصله از ۲ تا ۳۸ میلی‌متر افزایش یافته است).



شکل ۷. بیناب‌های طول موجی ابرپیوستار تولید شده در انرژی‌های مختلف.



شکل ۸. عکس ابرپیوستار تولید شده توسط باریکه با انرژی (الف) ۶۶ میکروژول و (ب) ۶۰۰ میکروژول.

به منظور تجزیه و تحلیل بیشتر تغییرات بیشینه جابه‌جایی لبه آبی بیناب به ازای انرژی‌های ورودی مختلف در شکل ۹ ارائه شده است. تغییرات اولیه نشان می‌دهند که پهن‌شدگی بیناب قبل از نواری شدن به دلیل تأثیر ضریب شکست غیرخطی در جمله اول رابطه (۴) اتفاق می‌افتد درحالی‌که تغییر تیز در لبه آبی از افزایش شدت ناشی از افزایش انرژی تپ ورودی است که نشان دهنده خودکانونگی و نواری شدن است. براساس دو جمله رابطه (۴) بیشینه جابه‌جایی آبی را می‌توان توسط موازنه افزایش

با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش در ۴ گام اولیه تا فاصله ۱۰ میلی‌متری نقطه کانون از دیواره سلول، نقطه خودکانونی در بیرون از سلول قرار گرفته است و در این موارد تشکیل نوار و همچنین تولید ابرپیوستار مشاهده شده است. در این موارد شکست نوری در خارج از سلول و محیط آب رخ می‌دهد و بنابراین پلاسمای حاصل از شکست نوری در آب قرار نمی‌گیرد و این امکان را فراهم آورده است که با توان بسیار بزرگتر از توان بحرانی تپ درون محیط متمرکز شده و ابرپیوستار تولید کند. در این حالت‌ها پهنای بیناب بیشتر و همچنین نموداری نامتقارن به وجود آمده است در حالی‌که در باقی موارد بیناب حول طول موج مرکزی باریکه لیزر متقارن‌تر است. عکس ابرپیوستارهای تولید شده بر روی پرده در شکل ۶ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با استفاده از جابه‌جایی نقطه تمرکز و ایجاد تمرکز ضعیف حتی در توان برخوردی بالا تولید ابرپیوستار با مقدار بازده خوبی قابل دسترس است.

۲.۴ بررسی اثر تغییر انرژی باریکه ورودی

برای بررسی اثر افزایش انرژی باریکه ورودی بر پهنای بیناب ابرپیوستار تولید شده در آب بدون یون، انرژی تپ‌های لیزری ورودی از ۶۶ میکروژول تا ۶۰۰ میکروژول تغییر داده شده است که برای تپ‌های با پهنای زمانی ۳۷ فمتوثانیه بازه ۴۲۰ تا ۳۸۰۰ برابر توان بحرانی آب را پوشش می‌دهد. بیناب پیوستارهای تولید شده در شکل ۷ نشان داده شده است. برای مقایسه نسبی هر کدام از نمودارها در طول موج بیشینه خود به ۱ بهنجار شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش انرژی تپ ورودی از ۶۶ میکروژول تا ۴۶۰ میکروژول که توان متوسط آن حدود ۲۹۰۰ برابر توان بحرانی آب است، پهنای بیناب طول موجی ابرپیوستار افزایش پیدا می‌کند و با افزایش بیشتر انرژی ورودی تغییر قابل توجهی در پهنای بیناب طول موجی ایجاد نمی‌شود.

عکس میدان دور ابر پیوستار تولید شده که به صورت حلقه‌های رنگی مخروطی شکل می‌باشند برای تپ ورودی با انرژی ۶۶ میکروژول و ۶۶۰ میکروژول در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی ورودی بخش نور سفید مرکزی کل سیگنال خروجی را در بر می‌گیرد.

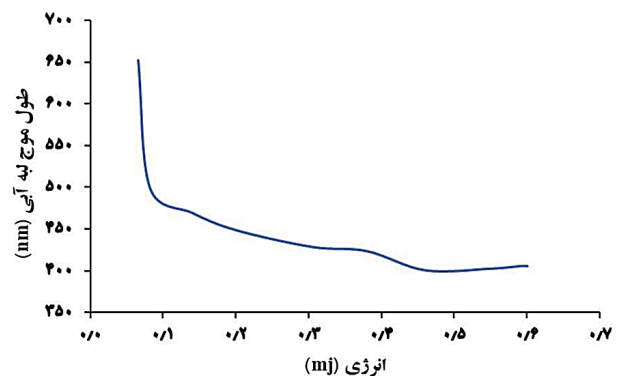
همچنین با افزایش انرژی از ۶۶ میکروژول تا ۶۶۰ میکروژول لبه آبی بیناب پیوستار به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر منتقل شده و کوتاه‌ترین طول موج ثبت شده ۴۰۰ نانومتر است. در واقع با افزایش انرژی، پهن‌شدگی نامتقارن بیناب ابر پیوستار مشاهده می‌شود.



بزرگتر از توان بحرانی نیز باریکه لیزر درون محیط متمرکز شده و ابرپیوستار تولید می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده در توان‌های نزدیک به توان بحرانی حلقه‌ها و گسیل مخروطی بخش قابل توجهی از سیگنال خروجی را تشکیل می‌دهند و در توان‌های بسیار زیاد بخش نور سفید مرکزی کل سیگنال خروجی را در بر می‌گیرد و با استفاده از تمرکز ضعیف و توان برخوردی بالا می‌توان ابرپیوستاری با بازده نسبتاً خوبی تولید کرد.

در بررسی اثر افزایش انرژی باریکه ورودی بر پهن‌شدگی بیناب طول موجی ابرپیوستار تولید شده در آب بدون یون نشان داده شد که پهن‌شدگی بیناب به دلیل دو جمله خودکانونگی و واکانونی پلاسما به وجود می‌آید که این دو جمله توان‌های مختلفی از شدت قله I_0 را در بر می‌گیرند. برای تپ‌های با انرژی کم خود مدولاسیون فاز سبب پهن‌شدگی بیناب می‌شود. در قسمت جلویی تپ لیزر تولید بسامدهای پایین‌تر (پهن‌شدگی استوکس) رخ می‌دهد در حالی که در قسمت انتهایی تپ موقعیت برعکس پیش آمده و بسامدهای بالاتر (پهن‌شدگی پاداستوکس) تولید می‌شوند و بنابراین تغییر بسامد نسبت به قله توزیع بسامد تپ برخوردی متقارن است. در مقابل برای تپ‌های با انرژی بالاتر از متوسط، تولید ابرپیوستار علاوه بر اثر کر تحت تأثیر پلاسمای تولید شده به واسطه تحریک چند فوتونی نیز قرار می‌گیرد و بنابراین جابه‌جایی قله بیناب نور سفید به سمت آبی مشاهده می‌شود. 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 طول موج‌های کوتاه‌تر مشاهده نشده است که نشان‌دهنده اثر گیرافتادگی شدت درون نوار است. در نهایت در این تحقیق براساس خواص پراکندگی ویژه و برتر آب برای بیشینه کردن پهنای بینابی ابرپیوستار نشان داده شد که با استفاده از یک سلول حاوی آب به جای هر محیط غیرخطی دیگر تولید چشمه نور سفید امکان‌پذیر است و می‌تواند به جای منابع نوری مجزا در کاربردهای مختلفی که نیازمند بازه وسیعی از طول موج‌ها است مورد استفاده قرار گیرد. همچنین جابه‌جایی لبه آبی نیز دستیابی به چشمه ماورابنفش، که کمتر در دسترس است را امکان‌پذیر می‌سازد.

شدت قله با تغییرات در نیم‌رخ زمانی تپ ناشی از افزایش انرژی تپ فرودی یا به وسیله اثر گیرافتادگی شدت به یک مقدار ثابت (یعنی موازنه دو جمله رابطه (۴)) توضیح داد. در ارتباط با مورد اول مشخص است که مدولاسیون خود-فاز و خود-کانونگی سبب متراکم شدن تپ شده و اغلب منجر به میخه‌های تیز در جلو و عقب تپ در انرژی فرودی‌های بالا می‌شوند. بنابراین انتظار داریم که با افزایش انرژی تپ مشتق زمانی نیم‌رخ تابع شدت افزایش یابد. بنابر جمله اول رابطه (۴) افزایش مشتق زمانی همراه با افزایش شدت قله منجر به افزایش یکنواخت پهنای بیناب می‌شود و این چیزی است که در آزمایش با تپ‌های با انرژی بالاتر مشاهده نشده است و در نتیجه این فرضیه غیرمحمتمل بوده و بنابراین بیشینه تغییر فرکانس لبه آبی در انرژی‌های بالا نشانه‌ای از شدت قله ثابت در داخل نوارها است که به پدیده گیرافتادگی شدت منجر می‌شود. باید توجه داشت که هر دو جمله رابطه (۴) به شدت وابسته است بنابراین بیشینه جابه‌جایی آبی در شدت‌های کم تحت تأثیر تغییر ضریب شکست و در شدت‌های بالا ناشی از سهم پلاسما خواهد بود و از نظر کیفی به شدت قله و حداقل مشتق زمانی شکل تپ بستگی دارد.



شکل ۹. جابه‌جایی لبه آبی بیناب طول موجی بر حسب تغییر انرژی ورودی.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از نواری شدن تپ‌های تقویت شده لیزر فمتوثانیه تیتانیم سفایر در آب بدون یون ابرپیوستار تولید شده و نتایج حاصل از آزمایش‌ها با نظریه‌های موجود به‌طور کیفی تحلیل شده است. با بررسی تغییر فاصله کانونی عدسی تا سلول اثر ایجاد شکست نوری بر نواری شدن لیزر فمتوثانیه و تولید ابرپیوستار مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شد که با تغییر محل نقطه خود کانونی و انتقال آن به خارج از سلول، پلاسمای حاصل از شکست نوری در آب قرار نمی‌گیرد و با توان بسیار



مراجع

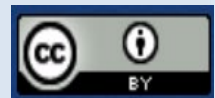
1. He B, Nan J, Liu F, Yuan S, Li M, Peng J, Zeng H. Terahertz Generation Enhanced by Nonlinear Filaments Interaction in Liquids. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2019;31:15.
2. Hatanaka K, Tightly-focused femtosecond laser interaction with water. *Proc. SPIE 11201, SPIE Micro + Nano Materials, Devices and Applications 112010U*. 2019.
3. Guo B, Sun J, Lu Y.F, Jiang L. Ultrafast dynamics observation during femtosecond laser-material interaction. *Int. J. Extrem. Manuf.* 2019;1:032004.
4. Miloshevsky G. Ultrafast laser matter interactions: modeling approaches, challenges, and prospects. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 2022;30:083001.
5. Qi P, Qian W, Guo L, Xue J, Zhang N, Wang Y, Zhang Z, Zhang Z, Lin L, Sun C, Zhu L, Liu W. Sensing with Femtosecond Laser Filamentation. *Sensors*. 2022;22:7076.
6. Chin S.L, Hosseini S.A, Liu W, Luo Q, Théberge F, Aközbek N, Becker A, Kandidov V.P, Kosareva O.G, Schroeder H. The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: Physics, applications, and new challenges. *Can. J. Phys.* 2005;83:863–905.
7. Vasa P, Dharmadhikari J.A, Dharmadhikari A.K, Sharma R, Singh M, Mathur D. Supercontinuum Generation in Water by Intense, Femtosecond Laser Pulse under Anomalous Chromatic dispersion. *Phys. Rev.A*. 2014;89:043834.
8. La Fontaine B, Vidal F, Jiang Z, Chien C.Y, Comtois D, Desparois A, Johnston T.W, Kieffer J.-C, Pépin H, Mercure H.P. Filamentation of ultrashort pulse laser beams resulting from their propagation over long distances in air. *Phys. Plasmas*. 1999;6:1615–1621.
9. Schillinger H, Sauerbrey R. Electrical conductivity of long plasma channels in air generated by self-guided femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. B*. 1999;68:753–756.
10. Tzortzakis S, Prade B, Franco M, Mysyrowicz A. Time-evolution of the plasma channel at the trail of a self-guided IR femtosecond laser pulse in air. *Opt. Comm.* 2000;181:123–127.
11. Sun Q, Jiang H, Liu Y, Wu Z, Yang H, Gong Q. Measurement of the collision time of dense electronic plasma induced by a femtosecond laser in fused silica. *Opt. Lett.* 2005;30:320–322.
12. Mao X, Mao S.S, Russo R.E. Imaging femtosecond laser-induced electronic excitation in glass. *Appl. Phys. Lett.* 2003;82:697–699.
13. Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media. *Phys. Rep.* 2007;441:47–189.
14. Dubietis A, Couairon A, Kučinskas E, Tamošauskas G, Gaižauskas E, Faccio D, Di Trapani P. Measurement and calculation of nonlinear absorption associated with femtosecond filaments in water. *Apl. Phys. B*. 2006;84(3):439–446.
15. Reich S, Schäffer S, Lueck M, Wickert M, Osterholz J. Continuous wave high-power laser propagation in water is affected by strong thermal lensing and thermal blooming already at short distances. *Sci. Rep.* 2021;11(1):1–10.
16. Dubietis A, Couairon A. Ultrafast Supercontinuum Generation in Transparent Solid-State Media. *Springer Verlag*. 2019.
17. Liu F. Laser filamentation induced bubbles and their motion in water. *Opt. Express*. 2016;24(12):13258.
18. Kedenburg S. Nonlinear refractive indices of nonlinear liquids: wavelength dependence and influence of retarded response. *Appl. Phys. B*. 2014;117:803–816.
19. Daimon M, Masumura A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near infrared region to the ultraviolet region. *Appl. Opt.* 2007;46(18):3811–3820.
20. Williams F, Varma S.P, Hillenius S. Liquid water as a lone-pair amorphous semiconductor. *J. Chem. Phys.* 1976;64:1549–1554.
21. Grand D, Bernas A, Amouyal E. Photoionization of aqueous indole: Conduction band edge and energy gap in liquid water. *Chem. Phys.* 1979;44:73–79.
22. Liu W, Kosareva O, Golubtsov I.S, Iwasaki A, Becker A, Kandidov V.P, Chin S.L. Femtosecond laser pulse filamentation versus optical breakdown in H₂O. *Appl. Phys. B*. 2006;76:215.
23. Wang L, Fan Y.X, Yan Z.D, Wang H.T, Wang Z.L. Flat-plateau supercontinuum generation in liquid absorptive medium by femtosecond filamentation. *Opt. Lett.* 2010;35:2925–2927.
24. Potemkin F.V, Mareev E.I, Podshivalov A.A, Gordienko V.M. Highly extended high-density filaments in tight focusing geometry in water: from femtoseconds to microseconds. *New J. Phys.* 2015;17:053010.
25. Dharmadhikari J.A, Steinmeyer G, Gopakumar G, Mathur D, Dharmadhikari A.K, Femtosecond supercontinuum generation in water in the vicinity of absorption bands. *Opt. Lett.* 2016;41:3475–3478.
26. Nie Y, Yuan S, Du Y, Yan M, Wang J, Zhang Q, Xu H, Li M, Zeng H. Colorful light channel for femtosecond laser filamentation in nanoparticle colloidal solutions. *AIP Advances*. 2020;10:065010.
27. Panagiotopoulos P, Papazoglou D.G, Couairon A, Tzortzakis S. Sharply autofocused ring-Airy beams transforming into non-linear intense light bullets. *Nature Communications*. 2013;4:2622.
28. Dasa M.K, Nteroli G, Bowen P, Messa G, Feng Y, Petersen C.R, Koutsikou S, Bondu M, Moselund P.M, Podoleanu A, Bradu A, Markos Ch, Bang O. All-fiber supercontinuum laser for in vivo multispectral photoacoustic microscopy of lipids in the extended near-infrared region. *Photoacoustics*. 2020;18(100163):1–7.



29. Marble C.B, Yakovlev V.V, Wharmby A.W. Simulated supercontinuum generation in water and the human eye. *Proceeding of SPIE, Materials and Device XVIII*. 2019;10902.
30. Le H.V. Low pump power coherent supercontinuum generation in heavy metal oxide solid-core photonic crystal fibers infiltrated with carbon tetrachloride covering 930–2500 nm. *Opt. Express*. 2021a;29(24):39586–39600.
31. Van B.C, Hai T.T, Thao N.T, Dinh Q.H, Nguyen D.T, Van Le H. Experimental study of supercontinuum generation in water-filled-cladding photonic crystal fiber in visible and near-infrared region. *Opt Quant Electron*. 2023;55:229.
32. Keller K.R, Rojas-Aedo R, Vanderhaegen A, Ludwig M, Brida D. High stability white light generation in water at multi-kilohertz repetition rates. *Optics Express*. 2023;31(23):38400–38408.
33. Liu W.W. Intensity Clamping during Femtosecond Laser Filamentation. *Chinese Journal of Physics*. 2014;52:465.
34. Liu W, Petit S, Becker A, Aközbek N, Bowden C.M, Chin S.L. Intensity clamping of a femtosecond laser pulse in condensed matter. *Opt. Commun*. 2002;202:189.
35. Braun A, Korn G, Liu X, Du D, Squier J, Mourou G. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air. *Opt. Lett*. 1995;20:73.
36. Kennedy P.K. A first-order model for computation of laser-induced breakdown thresholds in ocular and aqueous media. I. Theory, *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1995;31:12.
37. Chin S.L. Some Fundamental Concepts of Femtosecond Laser Filamentation. *Chapter in Springer Series in Chemical Physics*. 2008 January.
38. Hajiesmaeilbaigi F, Azima A. Ultrashort pulse generation by self-mode-locked Ti:sapphire laser without apertures and with low pumping powers. *Canadian Journal of Physics*. 1998;76(6):495-499.
39. Hajiesmaeilbaigi F, Bostandoost E.S, Motamedi A.S, Razaghi H. Amplification of Ti:sapphire femtosecond laser pulses by Z- scheme Regenerative Amplifier. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2023;44(2):144-150 [In Persian].

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

حاج اسماعیل بیگی، فرشته، بستان دوست، افتخار سادات، معتمدی، اسما سادات، رزاقی، حسین. (۱۴۰۳)، تولید ابرپیوستار با استفاده از نواری شدن لیزر فمتوثانیه در آب بدون یون. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*. ۱۱۰(۴)، ۱۱۵-۱۲۴. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2023.1620>

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1620.html

