

طراحی و برپایی آزمایشگاهی لیزر پیکوثانیه نئودیمیوم یاگ دمش دیودی با SESAM

محمدجواد عشقی^۱، عباس مجدآبادی^۲، عطااله کوهیان^۳

چکیده:

در این پژوهش یک لیزر نئودیمیوم یاگ که بوسیله ی آینه ی جاذب اشباع پذیر نیمه رسانا قفل مد شده، طراحی و ساخته شده است. پایداری تشدیدگر در سرتاسر توان دمشی مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین هم پوشانی بین پرتو دمش و مد اصلی لیزر و نیز اندازه لکه های قابل قبول بر روی آینه ی جاذب در نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است. با بکارگیری آرایش Z شکل برای تشدیدگر و نیز انتخاب مناسب طول بازوهای تشدیدگر، شرایط قفل شدگی مد پیوسته ایجاد می شود و در نهایت تپ های ۴۰ پیکوثانیه ای و با نرخ تکرار ۱۱۲ مگاهرتز تولید شده اند. لیزر دارای خروجی پایدار و بدون تپ های مدوله کننده ی Q کلید زنی می باشد.

واژه های کلیدی: لیزر نئودیمیوم یاگ، قفل شدگی مد، آینه ی جاذب اشباع پذیر نیمه رسانا، تپ های پیکوثانیه.

۱. مقدمه

لیزرهای حالت جامد با تپ های فوق کوتاه، کاربردهای وسیعی در حوزه های صنعتی، نظامی و پزشکی دارند. از آنجا که در بسیاری از کاربردها، ویژگی هایی از قبیل حجم کم، سبک و قابل حمل بودن اهمیت بسیاری دارد، توجه به لیزرهای حالت جامد با دمش دیودی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. فرآیند تولید تپ های لیزری به دو روش فعال و غیرفعال انجام می شود. در روش فعال به یک سیگنال خارجی جهت درایو مدولاتور نیاز است در صورتی که در روش غیرفعال از جاذب های

اشباع پذیر در آرایش های تشدیدگری مختلف استفاده می شود. جاذب اشباع پذیر یک ماده اپتیکی درون تشدیدگر لیزر است که ضریب جذب آن با افزایش شدت کاهش می یابد. این پدیده می تواند در مواد مختلف مانند رنگ، بلور و شیشه دوپ شده با یون ها و مواد نیمه رسانا اتفاق بیافتد. جاذب های اشباع شدنی دارای مزایای فراوانی نسبت به قفل کننده های مد فعال دارند که باعث شده است از این جاذب ها به طور گسترده در تولید تپ های فوق کوتاه استفاده شود با توجه به ویژگیهای فیزیکی جاذبهای اشباع پذیر نیمه رسانا، نظیر زمان بازیابی، عمق مدولاسیون، اتلاف غیر اشباع و ... و نیز ویژگی های محیط فعال نظیر پهنای باند، زمان عمر تراز بالایی لیزر و چگالی شار اشباع می توان به تپ هایی در محدوده ی پیکوثانیه دست پیدا کرد. هر جاذب اشباع شدنی پارامترهای مهم مخصوص به خود را دارد ولیکن

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران. آدرس پست

الکترونیک: m.j.eshghi@alumni.ut.ac.ir

(۲) استادیار، پژوهشکده لیزر و اپتیک، سازمان انرژی اتمی.

(۳) دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران.

در لیزرهایی که از SESAM به عنوان آینه عقبی لیزر استفاده می شود می توان به ۲ نوع تپ خروجی دست پیدا کرد. این ۲ نوع خروجی عبارتند از :

۱. تپ های فوق کوتاه که در حالت قفل شدگی مد پیوسته حاصل می شوند. نرخ تکرار تپ ها در این حالت از مرتبه ی مگاهرتز می باشد [۳ و ۲].

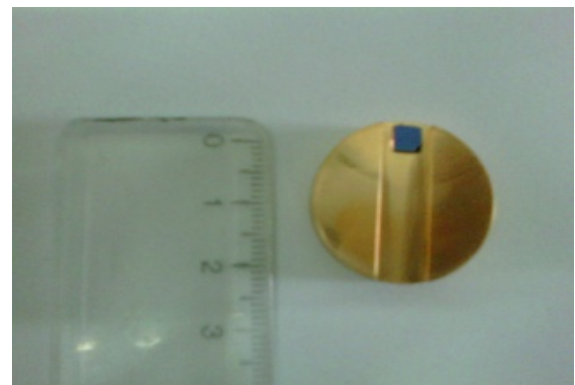
۲. تپ های فوق کوتاه (از مرتبه ی پیکوثانیه) که درون یک پوش تپ کلید زنی Q شده قرار دارند [۴ و ۵]. نرخ تکرار تپ های مدوله شده از مرتبه ی مگاهرتز بوده که ناشی از فرایند قفل شدگی مد می باشند. همچنین بسامد تپ های مدوله کننده از مرتبه ی کیلوهرتز می باشد. به چنین رژیمی QML₂ می گویند.

در واقع قفل شدگی مد پیوسته زمانی ایجاد می شود که انرژی تپ درون کاواک از انرژی تپ بحرانی $E_{p,c}$ بیشتر شود:

$$E_{p,c} = \left(F_{sat,L} A_{Laser} F_{sat,A} A_{Absorber} \Delta R \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

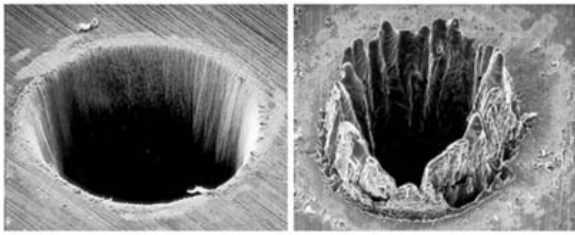
در رابطه ی فوق $F_{sat,L}$ و $F_{sat,A}$ به ترتیب شار انرژی اشباع محیط فعال و شار انرژی اشباع جاذب خواهد بود. همچنین A_{Laser} و $A_{absorber}$ مساحت لکه ی مد لیزر بر روی محیط فعال و آینه ی جاذب می باشد. ΔR نیز عمق مدولاسیون آینه ی جاذب اشباع پذیر می باشد. هدف در این پژوهش دستیابی به قطار تپ های پیکوثانیه ای با نرخ تکرار حدود ۱۰۰ مگاهرتز می باشد ولیکن قبل از شروع طراحی به کاربردهای این لیزرها خواهیم پرداخت.

یکی از پارامترهای مهم که در همه ی جاذب ها مشترک می باشد عبارت است از زمان بازیابی جاذب. به این معنا هنگامی که جاذب با استفاده از یک سیگنال نوری اشباع شد چه مدت زمان نیاز دارد تا به حالت پایه ی خود بازگردد. بنابر این جاذب های اشباع شدنی را به دو دسته ی تند و کند تقسیم بندی می کنند. جاذب تند به جاذبی اطلاق می شود که زمان بازیابی آن از پهنای تپ درون تشدیدگر بسیار کمتر باشد و جاذب کند به جاذبی اطلاق می شود که زمان بازیابی آن از پهنای تپ درون تشدیدگر بیشتر باشد. در این پژوهش از یک آینه جاذب اشباع پذیر نیمه رسانا ۱ (SESAM) به عنوان مدوله کننده ی غیرفعال استفاده شده است. ساختار کلی SESAM در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. الف) نمای کلی ساختار یک آینه جاذب اشباع پذیر نیمه رسانا [۱] ب) SESAM استفاده شده در آزمایش

در واقع SESAM ساختار مشابه ی با آینه های براگ دارد. چندین جفت از لایه های براگ ربع موجی GaAs/AlAs که برای طول موج لیزر طراحی شده اند بر روی یک زیرلایه نشانده می شوند. سپس لایه ای از یک چاه کوانتومی InGaAs به عنوان جاذب اشباع پذیر بر روی لایه های براگ لایه نشانی می شود و در نهایت لایه ای با ضریب بازتاب مشخص بر روی لایه ی جاذب نشانده می شود [۱].

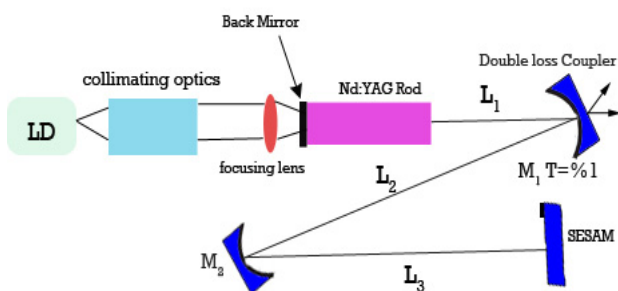


شکل ۲. مقایسه ی سوراخ های ایجاد شده با استفاده از تپهای الف) نانوثانیه ب) پیکوثانیه

یکی دیگر از کاربردهای تپ های فوق کوتاه فمتوثانیه ای دستیابی به تپ های آتو و زپتو ثانیه می باشد. تولید تپ های آتوثانیه ای یکی از پیشرفت های چشمگیر در حوزه ی فیزیک لیزر به شمار می رود.

۳. طراحی تشدیدگر لیزر

به منظور دستیابی به خروجی پیوسته ی پیکوثانیه، باید انرژی تپ درون کاواک از انرژی تپ بحرانی بیشتر شود. به منظور اشباع کافی آینه ی جاذب و نیز کمینه کردن انرژی تپ بحرانی درون کاواک، اندازه ی لکه ی مد اصلی لیزر بر روی آینه ی جاذب باید به مقدار کمینه ی خود برسد. به منظور ایجاد چنین شرایطی، از آرایش تشدیدگر Z شکل مطابق زیر استفاده کردیم.



شکل ۳ تشدیدگر Z شکل طراحی شده، شعاع آینه های M_1 و M_2 ، ۵۰ و ۲۰ سانتی متر می باشد.

دیود لیزر استفاده شده دارای توان بیشینه ۵ وات در طول موج ۸۰۶ nm است که جابجایی طیفی آن ۳ nm/c می باشد. جهت تنظیم کردن طول موج

۲. کاربردهای لیزرهای فوق کوتاه

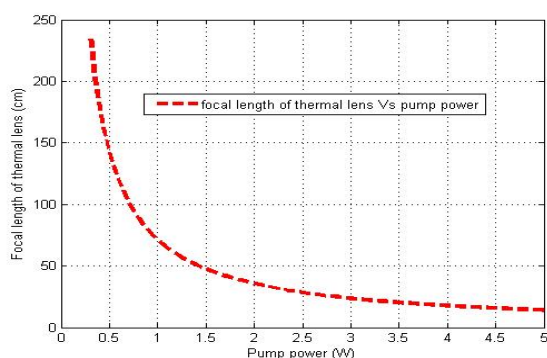
لیزرهای فوق کوتاه پیشرفت چشمگیری را دهه های گذشته داشته است. با بررسی دو ویژگی این لیزرها، می توان کاربرد آنها را مورد بررسی قرار داد.

۲-۱. پهنای تپ فوق کوتاه

پهنای تپ فوق کوتاه این لیزرها به منظور مطالعه دینامیک مولکولی و الکترونی استفاده می شود. به عنوان مثال با استفاده از این تپ می توان فرایند واهلش حامل ها در نیمه رسانا ها را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. همچنین مطالعه دینامیک واکنشهای شیمیایی و نمونه برداری الکترواپتیکی سریع از دیگر حوزه های کاربرد این تپها می باشد. مطالعه ی دینامیک مولکولی و واکنشهای شیمیایی باعث دریافت جایزه ی نوبل شیمی در سال ۱۹۹۹ توسط Zewail شد.

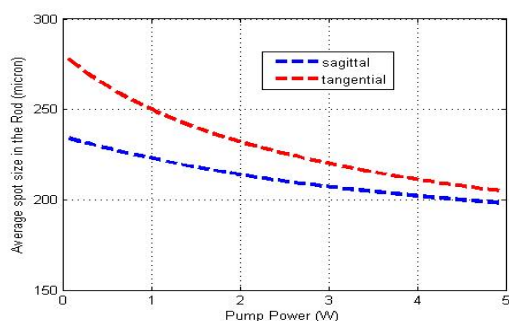
۲-۲. توان های قله ای بسیار بالا

شدت های قله ای بسیار بالا می تواند جهت تولید طول موجهای مختلف از طریق فرایند هارمونیک دوم مورد استفاده قرار گیرد. لیزرهای حالت جامد با دمش دیودی با توان های متوسط بالا می توانند تپ های فمتوثانیه ای با انرژی های بیش از یک میکرو ژول و بسامد ۳۰ مگاهرتز را تولید کنند. اینچنین تپ هایی می تواند کندوسوز^۱ غیر گرمایی ایجاد کنند که این خود در صنایع میکروماشین کاری بسیار کاربرد دارد. نمونه از سوراخ کاری انجام شده توسط تپهای فوق کوتاه در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۵. وابستگی فاصله ی کانونی عدسی گرمایی به توان دمش

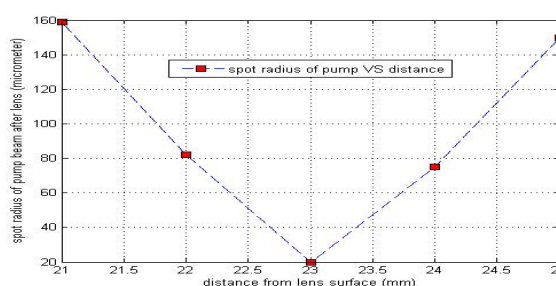
از آنجایی که فاصله ی کانونی عدسی گرمایی بر حسب توان دمش تغییر می کند، لذا انتظار داریم که اندازه ی لکه ی میانگین درون کریستال بر حسب توان دمش نیز تغییر کند. بدین منظور اندازه ی لکه ی میانگین درون کریستال برای پرتوهای مماسی و پیکانی بر حسب توان دمش شبیه سازی شده است که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. وابستگی اندازه ی لکه ی میانگین پرتوهای مماسی و پیکانی بر حسب توان دمش

به منظور کاهش آستیگماتیسم، زاویه فرود پرتو بر روی آینه ها، کمتر از ۱۰ درجه تنظیم شده است. همانطور که در شکل ۶ نیز مشخص شده است میانگین اندازه ی لکه های مماسی و پیکانی درون کریستال در سرتاسر توان دمش بیش از ۲۰۰ میکرومتر می باشد بنابراین انتظار داریم شرایط هم پوشانی مدی برقرار باشد. همچنین اندازه ی لکه بر روی آینه ی جاذب اشباع پذیر

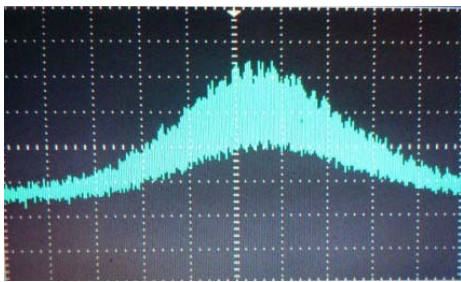
لیزر، از یک خنک ساز الکتریکی Peltier استفاده می - شود. پرتو خروجی از دیود لیزری بوسیله یک کولیماتور در دو راستا موازی می شود. سپس بوسیله ی یک سامانه ی جفت منشوری متقارن شده و توسط یک عدسی بر روی محیط فعال کانونی می شود. با توجه به مشخصات پرتو موازی شده و نیز عدسی استفاده شده، شعاع پرتو پمپ بر روی محیط فعال بر حسب فاصله عدسی تا محیط فعال شبیه سازی شد که نتایج حاصل در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. شعاع پرتو دمش بر حسب فاصله ی عدسی تا محیط فعال

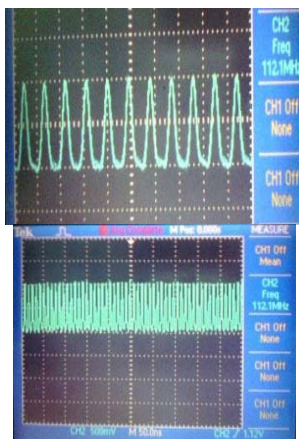
محیط فعال Nd:YAG استوانه ای شکل و دارای قطر ۵ mm و طول ۱۰ mm می باشد. سطح انتهایی محیط فعال به گونه ای لایه نشانی شده است که نسبت به طول موج ۸۰۸ nm دارای ضریب عبور ۹۹٪ و نسبت به طول موج ۱۰۶۴ nm دارای بازتاب کامل می باشد. این سطح به عنوان آینه عقبی لیزر عمل می کند. یکی از مهمترین پارامترهای تاثیر گذار در شعاع لکه ی لیزر، فاصله ی کانونی عدسی گرمایی می باشد. وابستگی فاصله ی کانونی عدسی گرمایی به توان دمش در شکل ۵ شبیه سازی شده است.

به منظور دستیابی به تپ های فوق کوتاه، SESAM را جایگزین آینه تخت کردیم. همچنین از یک آینه ۵۰ سانتی با عبوردهی $T=1\%$ به جای آینه M_1 استفاده کردیم. در ابتدا خروجی لیزر پیوسته بوده ولیکن با افزایش توان دمش، تپ های QML شکل می گیرند. در چنین حالتی تپ های پیکوثانیه ای بوسیله ی یک تپ میکروثانیه ای مدوله شده است که در شکل ۹ نشان داده شده است.



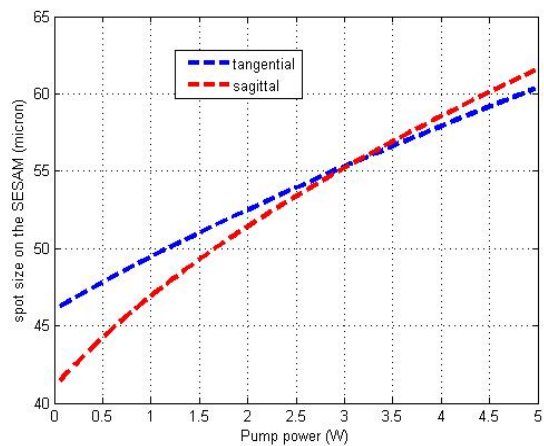
شکل ۹. نمایش تک تپ QML بر روی اسیلوسکوپ

با افزایش توان دمش، بسامد تپ های QML افزایش می یابد و در توان دمش ۳,۲ وات تپ های پیکوثانیه ای بدون هیچ پوش مدوله کننده ای شکل می گیرند. قطار تپ های پیکوثانیه ای با بسامد ۱۱۲ مگاهرتز در دو مقیاس زمانی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. الف) نمایش قطار تپ ها با بسامد ۱۱۲,۱ مگاهرتز و مقیاس زمانی اسیلوسکوپ ۱۰ نانوثانیه ب) نمایش قطار تپ ها در مقیاس زمانی اسیلوسکوپ ۵۰ نانوثانیه ای

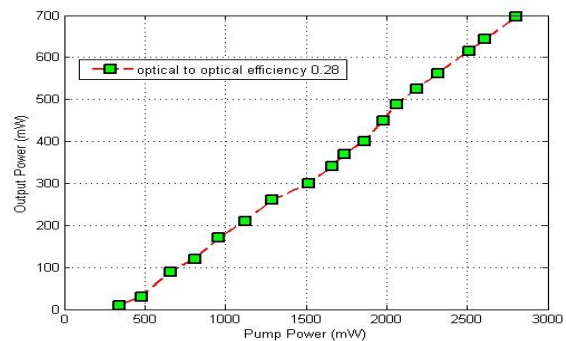
بر حسب توان دمش نیز شبیه سازی شده است که نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷ هم مشخص شده است اندازه ی لکه بر روی آینه ی جاذب از مقدار میانگین ۴۴ میکرومتر شروع و تا مقدار ۶۰ میکرومتر در توان دمشی ۵ وات افزایش می یابد. بنابراین شرایط برای دستیابی به کمترین انرژی تپ بحرانی نیز برقرار است.



شکل ۷. وابستگی اندازه لکه روی آینه جاذب به توان دمش

۴. برپایی آزمایشگاهی

با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی، اقدام به برپایی آزمایشگاهی تشدیدگر لیزر Z شکل نمودیم. در ابتدا با استفاده از یک آینه تخت با ضریب عبوردهی $T=5\%$ به جای SESAM توانستیم بازده نوری به نوری 28% دست یابیم. نمودار توان خروجی بر حسب توان دمش در شکل ۸ آمده است.



شکل ۸. توان خروجی لیزر بر حسب توان دمشی

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش یک لیزر Nd:YAG دمش از انتها بوسیله ی یک آینه جاذب اشباع پذیر نیمه رسانا قفل مد شده و نتایج آن به صورت تجربی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در نهایت با یک تشدیدگر ۱/۳۴ متر و آرایش Z شکل شرایط قفل شدگی مد ایجاد شده و تپ‌های ۴۰ پیکوثانیه با بسامد ۱۱۲ مگاهرتز حاصل شدند.

طول کل تشدیدگر طراحی شده برابر با ۱/۳۴ متر می باشد. زمان رفت و برگشت برابر با ۸/۹ ثانیه و بنابراین بسامد تکرار تپ ها برابر با ۱۱۲ مگاهرتز می باشد که این مقدار با بسامد بدست آمده در نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد که نشان از عملکرد لیزر در حالت قفل شدگی مد پایه می باشد. به منظور اندازه گیری پهنای تپ از یک سامانه ی همبسته ساز استفاده شده است که خروجی ۴۰ پیکوثانیه برای این لیزر بدست آمده است.

مراجع

- [1]. U. Keller, K. Weingarten and et al, "Semiconductor Saturable Absorber Mirrors (SESAM's) for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in Solid-State Lasers", *JSTQE*, Vol. 2, No. 3, 1996, pp. 8-26.
- [2]. G. Lin, H. Wie and et al, "Diode-end-pumped passively mode-locked ceramic Nd:YAG Laser with a semiconductor saturable mirror", *OPTICS EXPRESS*, Vol. 13, No. 11, 2005, pp. 485-490.
- [3]. Y. Yang, J. Hou and et al, "Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser at 1338 nm with a semiconductor saturable absorber mirror", *Applied Optics*, Vol. 50, No. 36, 2011, pp. 6713-6718.
- [4]. L. Qin, D. Tang and et al, "Diode-end-pumped passively mode-locked Nd:GdGG laser with a semiconductor saturable mirror", *Optics Communications*, Vol. 281, 2008, pp. 4762-4764.
- [5]. J. Spuhler, U. keller, and et al, "Diode-pumped passively mode-locked Nd:YAG laser with 10-W average power in a diffraction-limited beam", *Optics Letters*, Vol. 24, No. 8, 1999, pp. 528-531.
- [6]. U. Keller, "Recent Developments In Compact Ultrafast Lasers", *Nature*, Vol 424, 2003.
- [7]. H. A. Huas, "Theory Of Mode Locking With A Fast Saturable Absorber", *J. Appl. Phys.* 46, 1975, 3049.
- [8]. F. X. Kartner, U. Keller And Et Al, "Mode-Locking With Slow And Fast Saturable Absorbers—What's The Difference?", *Ieee Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, Vol. 4, No. 2, .1998.
- [9]. B. Zhang, G. Li And Et Al, "Comparative Study Of The Mode Locking Of Nd:Gdvo4 And Nd:Yag Lasers With Sesam", *Chinese Optics Letter*, Vol 1, No 8, 2003.

