بیست و ششمین کنفرانس اپتیک
و فوتونیک ایران و دوازدهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

طراحی و ساخت یک مرحله سیستم تقویت‌کننده دوبار عبور کم حجم جهت تقویت میکرولیزر سوییچ Q انفعالی تا قله توان 11.5MW

سعید سلیمیان ریزی ، مریم جندقی ، سمیرا علیپور ، زهرا محمدظاهری ، محمد جوادی داشکسن ، المیرا حاجی نیا

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران، ۵۷۶-۱۴۶۶۵، saeed.op.la.2010@gmail.com

چکیده – در این مقاله طراحی و ساخت تقویت‌کننده نوسان ساز میکرولیز سوییچ Q انفعالی Nd:YAG گزارش می‌شود. این میکرولیزر تپ‌هایی با انرژی ۸ µJ و پهنای ۸۰۰ ps در نرخ تکرار ۲ KHz و با فاکتور کیفیت باریکه M2<1.3 تولید می‌کند. تپ‌های خروجی میکرولیزر بوسیله ی یک مرحله تقویت کننده فلش‌لامپی Nd:YAG به صورت رفت و برگشتی تا انرژی تپ ۹,۲mJ و قله توان MW ۱۱,۵ در نرخ تکرار ۱-۱۰ Hz تقویت شده است. نتایج تجربی بدست آمده با نتایج شبیه سازی به خوبی مطابقت دارد.

کلید واژه- تقویت کننده، سوییچ **Q** انفعالی ، فلش لامپ، میکرولیزر

Design and fabrication of a round trip and compact amplifier system of passively Q-switched microlaser up to 11.5MW

Saeed Salimian Rizi, Maryam Jandaghi, Samira Alipour, Zahra Mohammad Zaheri, Mohammad Javadi Dashkasan, Elmira Hajinia

Iranian National Center for Laser Science and Technology, P.O. Box 14665-576, Tehran, Iran,
saeed.op.la.2010@gmail.com

Abstract- In this paper design and fabrication of a Nd:YAG amplifier of passively Q-switched microlaser oscillator is reported. The microlaser generates pulses of 8 µJ energy and 800 ps duration at 2 kHz repetition rate with beam quality factor, M2 < 1.3. The microlaser pulse was amplified up to 9.2mJ energy and 11.5MW peak power at 1-10 Hz repetition rate in a round trip one-stage flash-pumped Nd:YAG amplifier. In addition, presented experimental results have a very good concurrence with simulation data.

Keywords: Amplifier, Passively Q-switched, Flash Lamp, Microlaser

[Downloaded from opsi.ir on 2025-08-24]

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

مقدمه

میکرولیزرهای سوییچQ انفعالی با داشتن ویژگی‌های منحصر بفردی نظیر کیفیت پرتو بالا، پهنای تپ چند صد پیکو ثانیه تا یک نانو ثانیه، قله توان بیش از 10kW، نرخ تکرار چند کیلوهرتز و انرژی تپ چندین میکروژول، همچنین به علت حجم کم، قیمت پایین و بازدهی بالا کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده‌اند. این کاربردها شامل اپتیک غیرخطی، فاصله‌یاب‌ها، میکروماشین‌کاری، میکروجراحی، پرینتر سه‌بعدی و زمینه‌های دیگر که نیاز به تپ‌های با پهنای زمانی کوتاه و نرخ تکرار بالا را دارند، می‌باشد[1,2]. به‌منظور توسعه‌ی کاربردها و استفاده از این نوع لیزرها در سیستم های طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری(LIBS) ، نوسان‌ساز پارامتری اپتیکی(OPO)، و فاصله‌یاب‌های LIDAR و کاربردهای دیگر علمی و صنعتی، تقویت انرژی تپ‌های میکرولیزرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در این مقاله سیستم کم حجم تقویت توان میکرولیزر سوییچQ انفعالی با استفاده از یک مرحله پمپاژ فلش‌لامپ که قابلیت تولید انرژی بیش از 9mJ با پهنای تپ کمتر از 1ns و نرخ تکرار 10Hz را دارد گزارش می‌شود. این چیدمان در مقایسه با استفاده از دو مرحله تقویت یکبار عبور بسیار مقرون به صرفه تر و کم حجم تر می باشد.

بررسی نظری

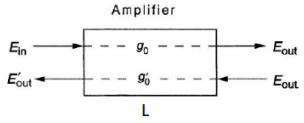
محاسبات نظری فرآیند تقویت براساس مدل فرانتز و نودویک می‌باشد. در این مدل چگالی انرژی تپ خروجی به عنوان تابعی از چگالی انرژی تپ ورودی به‌صورت زیر توصیف می‌شود[3].

$$E_{\text{out}} = \mathrm{E_s}\ln\{1 + \left[\exp\left(\frac{\mathrm{E_{in}}}{\mathrm{E_s}}\right) - 1\right]\exp(g_0 l)\} \qquad 1$$

همانطورکه در شکل۱ مشاهده می‌شود، E_{in} چگالی انرژی ورودی به تقویت‌کننده و E_{out} چگالی انرژی خروجی از تقویت‌کننده می‌باشد. به‌دلیل اینکه یک بازده استخراج خوب هنگامی حاصل می‌شود که چگالی انرژی ورودی قابل مقایسه با چگالی انرژی اشباع مربوط به انتقال لیزری باشد، تقویت‌کننده‌ها عموماً در رژیم دو عبوری کار می‌کنند. درواقع یک آینه در خروجی سیستم، تابش را دوباره به داخل تقویت‌کننده باز می‌گرداند. لذا می توان با استفاده از معادله زیر چگالی انرژی خروجی از تقویت کننده ی دو عبوری را محاسبه کرد:

$$E'_{out} = \mathrm{E_s}\ln\{1 + \left[\exp\left(\frac{\mathrm{E}_{out}}{\mathrm{E_s}}\right) - 1\right]\exp(g'_0 l)\} \qquad ۲$$

در معادله ۱، E_s چگالی انرژی اشباع می‌باشد که برای یک لیزر چهارترازی با واهلش سریع تراز پایینی، به صورت $E_s = \frac{h\nu}{\sigma}$ می‌باشد که h ثابت پلانک، ν فرکانس طول‌موج لیزر و σ سطح‌مقطع گسیل القایی است. همچنین g_0 بهره‌ی سیگنال کوچک و l طول موثر محیط بهره می‌باشد.



شکل۱: نام‌گذاری سیستم تقویت کننده. E_{in} چگالی انرژی تپ ورودی و E_{out} چگالی انرژی تپ خروجی در مرحله اول می‌باشد. E'_{out} انرژی خروجی در عبور دوم می باشد.

در معادله ۲ پارامتر ورودی برای عبور بازگشتی همان E_{out} است که از رابطه‌ی ۱ به‌عنوان خروجی اولین عبور به‌دست‌آمده است. و مقدار بهره برای عبور بازگشتی به دلیل اینکه انرژی از محیط بهره در عبور اول استخراج شده‌است، هم‌اکنون کمتر است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$g'_0 = (1 - \eta_E)g_0 \qquad 3$$

که بازده استخراج η_E را با انرژی استخراج‌شده از تقویت‌کننده تقسیم‌بر انرژی ذخیره‌شده در تراز بالایی لیزر در زمان گذر تپ تعریف می نمایند و به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\eta_E = \frac{E_{\text{out}} - \mathrm{E_{in}}}{g_0 l \mathrm{E_s}} \qquad ۴$$

معادله ۱ هر دو رژیم بهره سیگنال کوچک (سیگنال ورودی به تقویت کننده به قدری کوچک باشد که شرط $E_{in}/E_s \ll 1$ و $\exp(\mathrm{g_0 l})\mathrm{E_{in}}/\mathrm{E_s} \ll 1$ برقرار می‌شود) و رژیم کاملا اشباع (چگالی انرژی ورودی در سطح بالاتری قرار می‌گیرد به گونه‌ای که $E_{in}/E_s \gg 1$ برقرار باشد) را در

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-08-24]

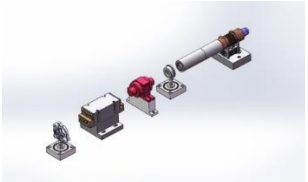
تقویت کننده دربرمی‌گیرد. در رژیم سیگنال کوچک، سیگنال خروجی به‌صورت نمایی رشد می‌کند در حالیکه در رژیم اشباع، سیگنال خروجی به‌صورت خطی رشد می‌کند[4]. سیستم تقویت‌کننده بوسیله‌ی لامپ زنون به‌صورت تپی پمپاژ می‌شود. در این حالت بهره‌ی سیگنال کوچک به‌صورت زیر بدست می‌آید[4,5].

$$g_0 = \frac{\sigma E_e \eta_r \eta_t \eta_a \eta_{PQ} \eta_o \eta_{st}}{h\upsilon V} \qquad ۵$$

در این معادله E_e انرژی الکتریکی پمپاژ، η_r بازده تابشی مفید لامپ، η_t بازده انتقال نور لامپ روی میله، η_a بازده جذب، η_{PQ} بازده کوانتومی و استاکس، η_o بازده همپوشانی تابش پمپاژ و باریکه‌ی لیزر نوسانگر، η_{st} بازده ذخیره‌سازی و V حجم ناحیه‌ای از میله‌ی تقویت که پمپاژ شده است، می‌باشد. با محاسبه و رسم این معادلات می‌توان نحوه‌ی رشد انرژی تپ ورودی به تقویت کننده را مشاهده کرد. از آنجاییکه شار ورودی به تقویت کننده در مقایسه با چگالی انرژی اشباع E_s خیلی کوچکتر است ما انتظار رشد نمایی را خواهیم داشت.

چیدمان تجربی

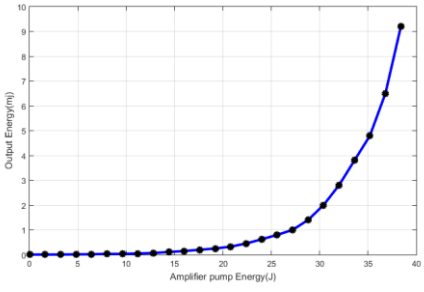
میکرولیزر استفاده‌شده در این چیدمان متشکل از یک محیط بهره‌ی Nd:YAG و یک محیط جاذب اشباع پذیر Cr:YAG می‌باشد که بوسیله‌ی روش اتصال نفوذی به هم متصل شده‌اند. بلور بهره بوسیله‌ی یک منبع پمپاژ دیودی کوپل شده به فیبر و دو عدسی تصویرساز پمپاژ می‌شود.



شکل۲: طرحواره‌ای از سیستم دوبار عبور تقویت کننده فلش‌لامپ میکرولیزر سوییچ Q انفعالی.

این میکرولیزر تپ‌هایی با انرژی ۸ میکروژول و پهنای تپ ۸۰۰ پیکوثانیه در نرخ تکرار 2kHz و با کیفیت باریکهٔ M^2 کمتر از ۱,۳ تولید می‌کند. مطابق با شکل ۲ برای تقویت خروجی این میکرولیزر ما از یک تقویت کنندهٔ دو بار عبور استفاده کرده‌ایم. این تقویت کننده تشکیل شده است از یک میله‌ی Nd:YAG با قطر ۵ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر که توسط یک لامپ زنون به طول آرک ۹۶ میلی‌متر از کنار پمپاژ می‌شوند. این تجهیزات در یک محفظه از جنس سرامیک قرار گرفته‌اند.

این لامپ توسط یک منبع تغذیه‌ی تپی پمپ می‌شوند که تپ‌های الکتریکی با نرخ تکرار 1-10 Hz را تا ۴۰ ژول تولید می‌کند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید باریکه‌ی خروجی میکرولیزر توسط یک باز کننده‌ی باریکه پهن می‌شود تا همپوشانی آن با محیط بهره افزایش یابد. سپس این باریکه که دارای قطبش خطی نیز می‌باشد از یک تیغه‌ی نیم‌موج عبور می‌کند تا محور قطبش آن منطبق با محور قطبش ورودی ایزولاتور شود. از این ایزولاتور جهت جلوگیری از برگشت نورهای احتمالی به درون میکرولیزر و آسیب رساندن به آن و مهمتر از آن برای جداسازی باریکه ورودی از باریکه تقویت شده برگشتی استفاده شده است. در آخر هم با تنظیم کردن آینه عقب، باریکه از این تقویت کننده دو بار عبور می‌کند.. نحوه ی جداسازی نور ورودی از نور تقویت شده برگشتی به این صورت است که ایزولاتور نور ورودی را ۴۵ درجه می چرخاند و سپس در برگشت به دلیل برگشت ناپذیر بودن ساختار ایزولاتور قطبش نور ۴۵درجه دیگر نیز می چرخد و در انتها بوسیله جداکننده وابسته به قطبش(PBS)، باریکه خروجی به بیرون فرستاده می شود. در شکل ۳ انرژی خروجی از این تقویت کننده‌ی دو بار عبور Nd:YAG را برحسب انرژی تپ پمپاژ رسم کرده‌ایم.



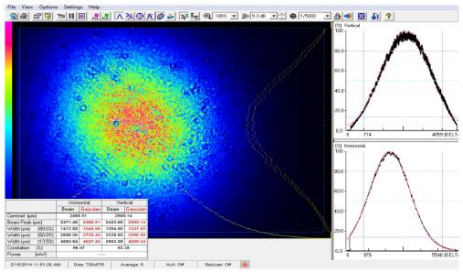
شکل۳: داده‌های تجربی انرژی تپ خروجی دوبار عبور از تقویت کننده Nd:YAG برحسب انرژی پمپاژ الکتریکی.

همانطور که مشاهده می‌شود در انرژی پمپاژ 40J، تپ‌های خروجی با انرژی9.2mJ و پهنای تپ ۸۰۰ پیکوثانیه که

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-08-24]

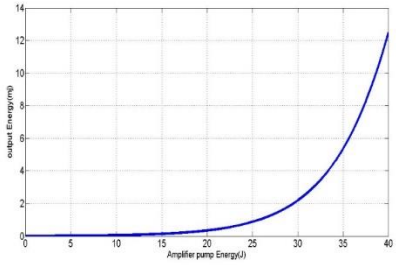
متناظر با قله‌ی توان بیش از 11.5MW قابل دستیابی می‌باشد. پروفایل شدت باریکه‌ی خروجی تقویت شده به‌صورت شکل زیر است که متناظر با قطر لکه (FWHM) ۴ میلی‌متر است. همانطور که مشاهده می‌شود شکل گوسی پرتو خروجی از میکرولیزر حفظ شده است.



شکل۴: پروفایل شدت شعاعی خروجی تقویت کننده.

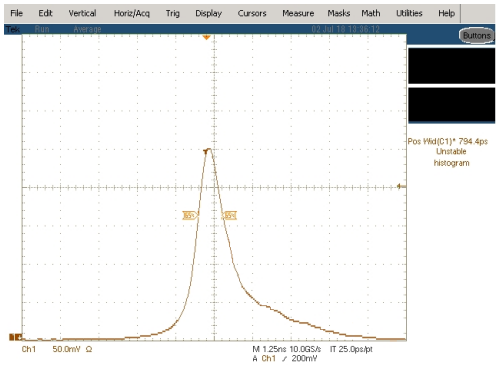
برای بررسی نظری تقویت، ما در معادلاتی که در بخش قبل ذکر شد (معادلهٔ شماره ۱و۵) پارامترها را به صورت $\eta_a =$ ،$\eta_t = 0.45$ ،$\eta_r = 0.43$ ، $\sigma = 4.42 \times 10^{-19} Cm^2$ 0.19، $\eta_{PQ} = 0.59$ ،$\eta_O = 0.49$ و $V = 1884 mm^3$ استفاده کرده‌ایم. همچنین طول هر یک از تقویت کننده‌ها را برابر 96mm گرفتیم که با رسم معادلات مذکور انرژی خروجی از تقویت کننده‌ها برحسب انرژی پمپاژ الکتریکی لامپ E_e به‌صورت شکل زیر بدست می‌آید. همانطور که مشاهده می‌شود در بیشینه پمپاژ اختلاف انرژی خروجی تئوری و تجربی به ۳,۳ میلی‌ژول می‌رسد که می‌توان به دلایل زیر برای آن اشاره کرد:

- در محاسبه ضرایب مختلف بازده در معادله ۵ تقریب زده شده است.
- در گذر دوم بهره سیگنال کوچک کاهش می‌یابد.
- قطبش نور به‌دلیل تنش و گرمای موجود در میله به هم می‌ریزد که این باعث بوجود آمدن اتلاف در قسمت جدا کردن نور برگشتی تقویت‌شده بوسیله ایزولاتور می‌شود.



شکل۵: داده‌های نظری انرژی تپ خروجی از تقویت کننده Nd:YAG برحسب انرژی پمپاژ.

در ضمن همانطور که انتظار می‌رفت رشد سیگنال خروجی به صورت نمایی می‌باشد. پروفایل زمانی تپ پالس تقویت شده نیز به‌صورت شکل ۶ است که با لحاظ کردن ضریب تصحیح متناظر با ۸۰۰ پیکوثانیه می‌شود[2].



شکل۶: پهنای زمانی تپ پالس با لحاظ کردن ضریب اصلاح.

نتیجه‌گیری

در این پروژه یک سیستم لیزری کم‌حجم و مقرون به صرفه طراحی و ساخته شده است که تپ‌هایی پر انرژی با قله توان چندین مگاوات با پهنای زمانی ۸۰۰ پیکوثانیه و کیفیت باریکه‌ی خوب تولید می‌کند. لازم به‌ذکر است که این تپ‌ها پس از متمرکزسازی با عدسی مناسب، توانایی یونیزه کردن هوا را دارند. این سیستم کاربردهای زیادی در میکروماشین‌کاری، LIBS، LIDAR و دیگر حوزه‌ها دارد.

مرجع‌ها

[1] Alphan Sennaroglu (Book editor) *"Solid-state lasers and applications"* © 2007 by Taylor & Francis Group, LLC, chapter 1.

[۲] R. Dabu, A. Stratan, C. Fenic, C. Blanaru and L. Rusen, "Picosecond laser system based on microchip oscillator seed," *Proc. of SPIE* Vol. **7022**, 70221B, 2008

[۳] A. Gaydardzhiev, D.Draganov and I. Bucharov, "A compact Nd:YAG slab amplifier for miniature solid state Q-switched lasers"4th EPSQEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Hamburg,September 2010,paper WeP18.

[۴] Walter Koechner, *" Solid-State Laser Engineering"* Sixth Revised and Updated Edition,springer 2006.

[۵] P. Peuser, W. Platz, P. Zeller, T. Brand, M. Haag, and B. Köhler, "High-power, longitudinally fiber-pumped, passively Q-switched Nd:YAG oscillator–amplifier" *Optical Society of America, OPTICS LETTERS*, Vol. **31**, No. 13, 2006.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-08-24]