



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 تقویت کننده دوبار عبور کم حجم جهت تقویت میکرولیزر سویچ 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](mailto:saeed.op.la.2010@gmail.com)

چکیده - در این مقاله طراحی و ساخت تقویت کننده نوسان ساز میکرولیزر سویچ Q انفعالی Nd:YAG گزارش می شود. این میکرولیزر  
تپ‌هایی با انرژی ۸  $\mu\text{J}$  و پهنای ۸۰۰ ps در نرخ تکرار ۲ KHz و با فاکتور کیفیت باریکه  $M2 < 1.3$  تولید می کند. تپ‌های خروجی  
میکرولیزر بوسیله ی یک مرحله تقویت کننده فلش لامپی Nd:YAG به صورت رفت و برگشتی تا انرژی تپ ۹.۲mJ و قله توان 11.5  
MW 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، سویچ 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](mailto: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  $\mu\text{J}$  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.

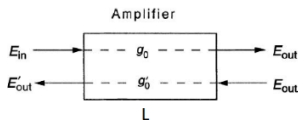
Keywords: Amplifier, Passively Q-switched, Flash Lamp, Microlaser

## مقدمه

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. در واقع یک آینه در خروجی سیستم، تابش را دوباره به داخل تقویت‌کننده باز می‌گرداند. لذا می‌توان با استفاده از معادله زیر چگالی انرژی خروجی از تقویت‌کننده ی دو عبوری را محاسبه کرد:

$$E'_{out} = E_s \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{E_{out}}{E_s} \right) - 1 \right] \exp(g'_0 l) \right\} \quad 2$$

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،  $\nu$  فرکانس طول موج لیزر و  $\sigma$  سطح مقطع گسیل القایی است. همچنین  $g_0$  بهره‌ی سیگنال کوچک و  $l$  طول موثر محیط بهره می‌باشد.



شکل ۱: نام‌گذاری سیستم تقویت‌کننده.  $E_{in}$  چگالی انرژی تپ ورودی و  $E_{out}$  چگالی انرژی تپ خروجی در مرحله اول می‌باشد.  $E'_{out}$  انرژی خروجی در عبور دوم می‌باشد.

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:

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

که بازده استخراج  $\eta_E$  را با انرژی استخراج‌شده از تقویت‌کننده تقسیم‌بهر انرژی ذخیره‌شده در تراز بالایی لیزر در زمان گذر تپ تعریف می‌نمایند و به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\eta_E = \frac{E_{out} - E_{in}}{g_0 l E_s} \quad 4$$

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

میکرولیزرهای سویچ Q 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، میکروجرراحی، 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 سیستم‌های 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 سویچ Q انفعالی با استفاده از یک مرحله پمپاژ فلش لامپ 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 می‌باشد.

## بررسی نظری

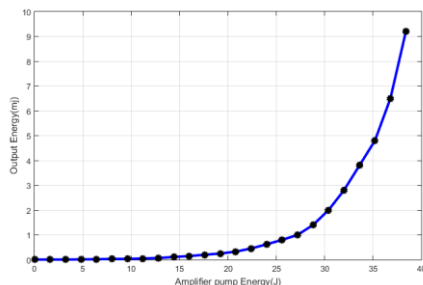
محاسبات نظری فرآیند تقویت براساس مدل فرانتز و نودویک می‌باشد. در این مدل چگالی انرژی تپ خروجی به عنوان تابعی از چگالی انرژی تپ ورودی به‌صورت زیر توصیف می‌شود [3].

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

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود،  $E_{in}$  چگالی انرژی ورودی به تقویت‌کننده و  $E_{out}$  چگالی انرژی خروجی از تقویت‌کننده می‌باشد. به‌دلیل اینکه یک بازده استخراج

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. نحوه‌ی جداسازی نور ورودی از نور تقویت شده برگشتی به این صورت است که ایزولاتور نور ورودی را ۴۵ درجه می‌چرخاند و سپس در برگشت به دلیل برگشت ناپذیر بودن ساختار ایزولاتور قطبش نور ۴۵ درجه دیگر نیز می‌چرخد و در انتها بوسیله جداکننده وابسته به قطبش (PBS)، باریکه خروجی به بیرون فرستاده می‌شود. در شکل ۳ انرژی خروجی از این تقویت کننده‌ی دو بار عبور Nd:YAG را برحسب انرژی تپ پمپاژ رسم کرده‌ایم.



شکل ۳: 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 انرژی 9.2mJ و پهنای تپ ۸۰۰ پیکواتنیه که

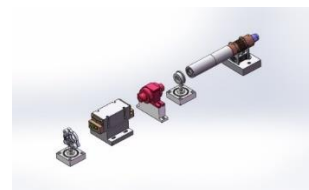
تقویت کننده دربرمی‌گیرد. در رژیم سیگنال کوچک، سیگنال خروجی به صورت نمایی رشد می‌کند در حالیکه در رژیم اشباع، سیگنال خروجی به صورت خطی رشد می‌کند [4]. سیستم تقویت کننده بوسیله‌ی لامپ زنون به صورت تپی پمپاژ می‌شود. در این حالت بهره‌ی سیگنال کوچک به صورت زیر بدست می‌آید [4,5].

$$g_0 = \frac{\sigma E_e \eta_r \eta_t \eta_a \eta_{PQ} \eta_o \eta_{st}}{h\nu V} \quad (5)$$

در این معادله  $E_e$  انرژی الکتریکی پمپاژ،  $\eta_r$  بازده تابشی مفید لامپ،  $\eta_t$  بازده انتقال نور لامپ روی میله،  $\eta_a$  بازده جذب،  $\eta_{PQ}$  بازده کوانتومی و استاکس،  $\eta_o$  بازده همپوشانی تابش پمپاژ و باریکه‌ی لیزر نوسانگر،  $\eta_{st}$  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

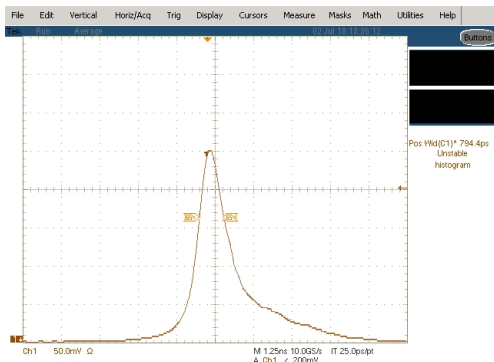
میکرولیزر استفاده شده در این چیدمان متشکل از یک محیط بهره‌ی Nd:YAG و یک محیط جاذب اشباع پذیر Cr:YAG می‌باشد که بوسیله‌ی روش اتصال نفوذی به هم متصل شده‌اند. بلور بهره بوسیله‌ی یک منبع پمپاژ دیودی کوپل شده به فیبر و دو عدسی تصویرساز پمپاژ می‌شود.



شکل ۲: طرحواره‌ای از سیستم دوبار عبور تقویت کننده فلش لامپ میکرولیزر سوئیچ Q انفعالی.

این میکرولیزر تپ‌هایی با انرژی ۸ میکروژول و پهنای تپ ۸۰۰ پیکواتنیه در نرخ تکرار 2kHz و با کیفیت باریکه  $M^2$  کمتر از ۱,۳ تولید می‌کند. مطابق با شکل ۲ برای تقویت خروجی این میکرولیزر ما از یک تقویت کننده دو بار عبور استفاده کرده‌ایم. این تقویت کننده تشکیل شده است از یک

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



شکل ۶: پهنای زمانی تپ پالس با لحاظ کردن ضریب اصلاح.

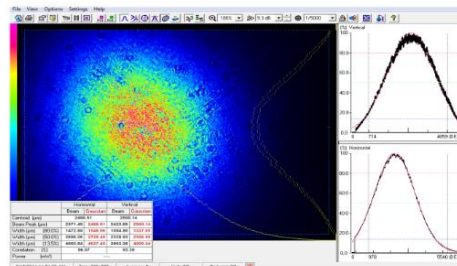
### نتیجه‌گیری

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 به ذکر است که این تپ‌ها پس از متمرکزسازی با عدسی مناسب، توانایی یونیزه کردن هوا را دارند. این سیستم کاربردهای زیادی در میکروماشین‌کاری، LIDAR، LIBS و دیگر حوزه‌ها دارد.

### مرجع‌ها

- [1] Alphan Sennaroglu (Book editor) “Solid-state lasers and applications” © 2007 by Taylor & Francis Group, LLC, chapter 1.
- [2] R. Dabu, A. Stratan, C. Fenic, C. Blaranu and L. Rusen, “Picosecond laser system based on microchip oscillator seed,” *Proc. of SPIE* Vol. **7022**, 70221B, 2008
- [3] A. Gaydardzhiev, D. Draganov and I. Bucharov, “A compact Nd:YAG slab amplifier for miniature solid state Q-switched lasers” 4<sup>th</sup> EPSQEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Hamburg, September 2010, paper WeP18.
- [4] Walter Koechner, “Solid-State Laser Engineering” Sixth Revised and Updated Edition, Springer 2006.
- [5] 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.

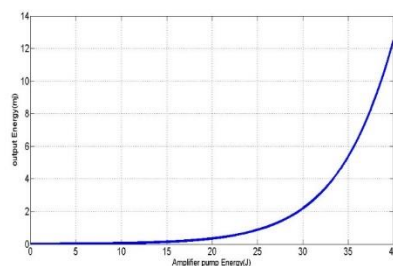
متناظر با قله‌ی توان بیش از 11.5MW قابل دستیابی می‌باشد. پروفایل شدت باریکه‌ی خروجی تقویت شده به صورت شکل زیر است که متناظر با قطر لکه (FWHM) ۴ میلی‌متر است. همانطور که مشاهده می‌شود شکل گوسی پرتو خروجی از میکرولیزر حفظ شده است.



شکل ۴: پروفایل شدت شعاعی خروجی تقویت کننده.

برای بررسی نظری تقویت، ما در معادلاتی که در بخش قبل ذکر شد (معادله شماره ۵) پارامترها را به صورت  $\eta_a = \eta_t = 0.45$  ،  $\eta_r = 0.43$  ،  $\sigma = 4.42 \times 10^{-19} \text{Cm}^2$  ،  $\eta_o = 0.49$  ،  $\eta_{PQ} = 0.59$  ،  $0.19$  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  $E_e$  به صورت 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 به دلیل تنش و گرمای موجود در میله به هم می‌ریزد که این باعث بوجود آمدن اتلاف در قسمت جدا کردن نور برگشتی تقویت شده بوسیله ایزولاتور می‌شود.



شکل ۵: داده‌های نظری انرژی تپ خروجی از تقویت کننده Nd:YAG برحسب انرژی پمپاژ.