



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



## طراحی و ساخت لیزر هواخنک پالسی پرتوان نئودمیوم یاگ Q-سوئیچ شده با انرژی

### خروجی ۲/۵ ژول و پهنای پالس کمتر از ۱۰ نانوثانیه

مهدی قائدرحمتی<sup>۱</sup>، حسین عباسی بافطرت<sup>۲</sup>، علی اسفندیار<sup>۳</sup>، محسن قائدرحمتی<sup>۴</sup>

[m.gh.laser@gmail.com](mailto:m.gh.laser@gmail.com)

- ۱ مجتمع علمی پژوهشی زنده یاد دکتر اردشیر حسین پور - پژوهشکده الکترواپتیک و لیزر
- ۲ دانشگاه جامع امام حسین(ع) - دانشکده و پژوهشکده علوم پایه - مرکز تحقیقات لیزر و اپتیک
- ۳ دانشگاه صنعتی مالک اشتر پردیس شاهین شاهین شهر گروه فیزیک و مهندسی اپتیک و لیزر
- ۴ دانشگاه شهید باهنر کرمان گروه فیزیک و مهندسی اپتیک و لیزر

چکیده - در این پژوهش، یک روند مناسب برای طراحی لیزر پالسی پرتوان نئودمیوم یاگ Q-سوئیچ شده ارائه می‌شود. با برپایی چیدمان لیزر طراحی شده ملاحظه شد نتایج اندازه گیری های تجربی با پیش بینی های تئوری در تطابق بسیار خوبی هستند. در طبقه نوسانگر انرژی خروجی ۳۵۰ میلی ژول Q-سوئیچ شده با پهنای زمانی زیر ۱۰ نانوثانیه به روش کلید زنی فعال بدست آوریم. با استفاده از دو طبقه تقویت کننده، انرژی خروجی ۳۵۰ میلی ژول نوسانگر با ضریب تقویت ۷ به ۲/۵ ژول رسید.

کلید واژه- لیزر پرتوان - خنک سازی هوا - پهنای پالس - نئودمیوم یاگ

## Design and fabrication of high power pulsed Q-switched Nd:YAG Laser air-cooled with 2.5J output energy and 10ns Pulse width

M.GhaedRahmati<sup>1,\*</sup>, H.Abbasi<sup>1,2</sup>, H.Ghollar<sup>2</sup>, A.Esfandyar<sup>1,3</sup> and M.GhaedRahmati <sup>1,4</sup>

1 Hossein Pour Research Complex, Esfahan

2 Laser & Optics Research Center, Emam Hossein University, Tehran

3 Department of Physics, Malek\_e\_Ashhtar University, Shahin Shahr

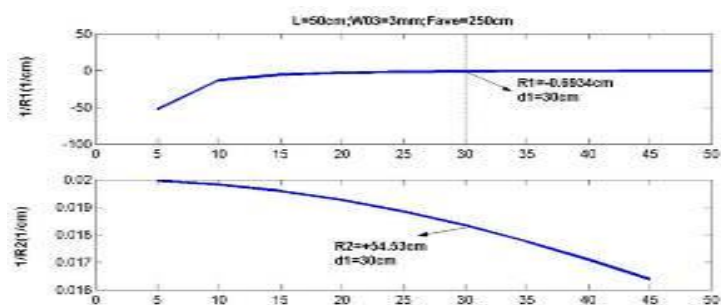
4 Department of Physics, Shahid Bahonar University, Kerman

Abstract- In this research we investigated a suitable algorithm to design the high power pulsed Q-switched Nd:YAG laser. Based on this algorithm we set up the Laser. Our experimental results showed a good agreement with the theoretical results. In this experiment, oscillator output was 350mJ with 10ns pulse width. Finally with the used tow amplifier stages was reached 350mJ oscillator output energy with to 2.5J by 7 gain coefficient.

Keywords: high power laser- air-cooled- Pulse width Nd:YAG

## ۱- مقدمه

با رسم نمودار  $\frac{1}{R}$  و انتخاب  $d_1$ ، شعاع انحنای آینه‌های لیزر،  $d_2$  و پارامترهای هندسی رزوناتور را بدست خواهیم آورد. پارامترهای معلوم عبارتند از: طول موج لیزر  $\lambda = 1064nm$ ، قطر میله لیزر Nd:YAG به کار رفته در رزوناتور  $6.33mm$  با طول  $l = 11.5cm$ ، فاصله کانونی عدسی گرمایی  $f_{OR} = 470cm$  و اندازه لکه مد اصلی روی میله لیزر که انتظار داریم به دست آید  $2W_{03} = 6mm$  می‌باشد. در طراحی طول کلی رزوناتور ثابت و برابر با  $L = 50cm$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: رفتار توابع  $\frac{1}{R_1}$  و  $\frac{1}{R_2}$  و برحسب تغییر پارامتر  $d_1$  برای طول رزوناتور  $L = 50cm$

با استفاده از داده‌های استخراج شده، مقادیر پارامترهای هندسی نوسانگر:

$$R_1 = 0.54m, R_2 = -0.069m$$

$$g_1^* = 0.055, g_2^* = 7.9 \text{ و } 0 < g_1^* g_2^* = 0.43 < 1$$

بنابراین رزوناتور طراحی شده پایدار می‌باشد.

## ۲-۱- محاسبه پهنای زمانی پالس Q- سوئیچ:

پهنای زمانی پالس لیزر در بخش نوسانگر با توجه به تلفات داخل رزوناتور و ضریب سیگنال کوچک قابل محاسبه می‌باشد. با وجود این محاسبات، در برپایی آزمایشگاهی Q- سوئیچ شرایط عملی و تلفات داخل نوسانگر تعیین کننده پهنای پالس لیزر می‌باشند. در این قسمت به محاسبه پهنای زمانی لیزر طراحی شده می‌پردازیم [4]:

پهنای پالس توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t_{p-FWHM} = \frac{t_r}{\delta} \left( \frac{\ln z}{z[1-a(1-\ln a)]} \right) = 9ns \quad (5)$$

امروزه لیزرهای پالسی پرتوان کاربردهای فراوانی در زمینه‌های صنعتی و دفاعی دارند بطوری که بسیاری از کشورهای جهان درصدد دستیابی به دانش فنی طراحی و ساخت این لیزرها می‌باشند. ما نیز در این پژوهش سعی کردیم، یک روند مناسب بمنظور طراحی لیزرهای پالسی پرتوان بدست آوریم تا بتوان با تقریب خوبی انرژی خروجی مورد نظر را با توجه به نتایج طراحی‌های انجام شده بدست آورد. همچنین با تنظیم تاخیر زمانی بین پالس الکتریکی لامپ درخششی و پالس الکتریکی کلید زنی Q توانستیم پهنای پالس لیزر را به کمتر از ۱۰ نانوثانیه برسانیم.

## ۲- گام اول: طراحی رزوناتور

برای کاهش حجم محاسبات و ساده‌سازی تحلیل رزوناتور، از چند متغیر جدید استفاده می‌کنیم [1,2,3]:

$$u_1 = \pm \frac{\pi}{2\lambda} W_{30}^2 \quad (1)$$

$$u_2 = -u_1 \frac{2x_0 u_1 + 1}{2x_0^2 u_1^2 + 2x_0 u_1 + 1} \quad (2)$$

که در آن  $W_{03}$  اندازه لکه مد اصلی روی میله لیزر و پارامتر  $x_0$  طبق رابطه زیر برای فاصله کانونی عدسی گرمایی میانگین ( $f_{OR}$ ) تعریف شده است [2]:

$$x_0 = \frac{1}{f_{OR}} - \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \quad (3)$$

که پارامترهای  $d_1$  و  $d_2$  فاصله آینه‌های شماره ۱ و ۲ با محیط فعال لیزری را نشان می‌دهد. شعاع انحنای آینه‌ها نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{d_1} \left( 1 - \frac{u_1}{d_1} \right) \quad (4)$$

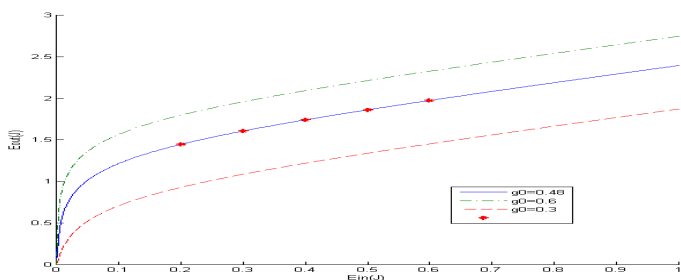
$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{d_2} \left( 1 - \frac{u_2}{d_2} \right)$$

با در نظر گرفتن فرض‌های اولیه و رسم معادله (۴) بر حسب پارامتر  $d_1$  می‌توان ساختار هندسی رزوناتور را پیدا کرد.

و در نتیجه انرژی خروجی از طبقه اول تقویت کننده می شود [۴]:

$$E_{out} = G \times E_{in} = 3.724 \times 0.5J = 1.862J \quad (9)$$

نمودار انرژی خروجی از طبقه اول بر حسب انرژی ورودی از نوسانگر را می توان در شکل (۲) مشاهده کرد.



شکل ۲: انرژی خروجی از طبقه اول تقویت کننده بر حسب انرژی ورودی از نوسانگر

مشخصات تقویت کننده طبقه دوم عبارتند از:

$$\begin{cases} 2r_{R(Amp2)} = 9mm \\ l_{R(Amp2)} = 11.5mm \\ E_{in(Amp2)} = 90J \\ F_{sat(Amp1)} = 0.66 J/cm^2 \\ \eta_{free-running} = 2\% \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} F_{in(Amp2)} = 2.9269 J/cm^2 \\ J_{sat(Amp2)} = 0.2460 J/cm^3 \\ g_0(Amp2) = 0.37273 cm^{-1} \end{cases} \quad (11)$$

حال با استفاده از پارامترهای بالا برای بهره ی یکبار عبور تقویت کننده و استفاده از معادله ی ۸ بهره طبقه ی دوم تقویت کننده  $G_{Amp2} = 1.9640$  بدست می آید.

و در نتیجه انرژی خروجی از طبقه دوم تقویت کننده می شود:

$$E_{out} = G \times E_{in} = 1.964 \times 1.862J = 3.65J \quad (12)$$

نمودار انرژی خروجی از طبقه ی دوم تقویت کننده بر حسب انرژی ورودی از طبقه اول را می توان در شکل (۳) مشاهده نمود.

که در رابطه فوق، تلفات داخل رزوناتور  $\delta = 0.04$  و پارامتر  $a$  و  $z$  با روابط زیر تعریف شده اند:

$$\begin{aligned} z &= \frac{2g_0l}{\delta} = 92 \\ a &= \frac{z-1}{z \ln z} = 0.218 \\ t_r &= \frac{2L}{c} = 3.3ns \end{aligned}$$

### ۳- گام دوم طراحی تقویت کننده های پالس های پرتو

در این بخش انرژی نهایی خروجی از هر طبقه تقویت کننده با توجه به انرژی نوری ورودی و همچنین با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی دمشی فلاش لامپ، محاسبه می شود. انرژی نوری ورودی به طبقات تقویت کننده 500mJ با قطر پرتو ۵ میلی متر می باشد.

با در نظر گرفتن سطح مقطع پرتو شار انرژی خروجی از طبقه ی نوسانگر از رابطه ی زیر بدست می آید [۵۴]:

$$F_{out(osci)} = \frac{E_{out(osci)}}{A_{beam}} = \frac{500mJ}{0.1964cm^2} = 2.5458 J/cm^2 \quad (6)$$

مشخصات تقویت کننده ی طبقه ی اول در زیر آمده است:

$$\begin{cases} 2r_{R(Amp1)} = 7mm \\ l_{R(Amp1)} = 11.5mm \\ E_{in(Amp1)} = 70J \\ F_{sat(Amp1)} = 0.66 J/cm^2 \end{cases} \quad (7)$$

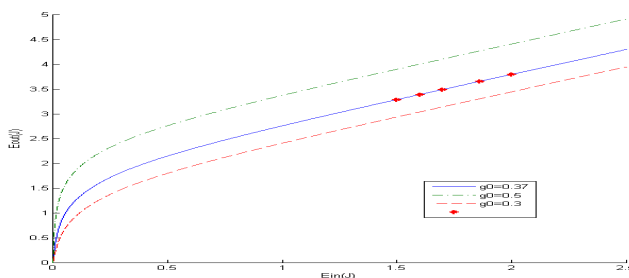
حال که سطح مقطع پرتو و انرژی ورودی به تقویت کننده را داریم، می توانیم ضریب تقویت پرتو را پس از عبور از تقویت کننده اول را با استفاده از معادله ۸ دست آوریم [۱]:

$$G = \frac{F_{sat}}{F_{in}} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp\left(\frac{F_{in}}{F_{sat}}\right) - 1 \right] \exp(g_0 l) \right\} \quad (8)$$

شار ورودی به طبقه اول  $F_{in(Amp1)} = 1.2992 J/cm^2$ ، چگالی انرژی ذخیره شده در تراز بالای تقویت کننده  $J_{sat(Amp1)} = 0.316 J/cm^3$  و بهره سیگنال کوچک  $g_0(Amp1) = 0.479 cm^{-1}$  می باشد.

حال پارامترهای مورد نیاز برای بهره ی یکبار عبور تقویت کننده را در معادله می گذاریم و بهره تقویت کننده اول  $G_{Amp1} = 3.724$  به دست می آید.

همانگونه که در شکل ۵ ملاحظه می شود زمان خیزش پالس الکتریکی بین دیود ۷/۶۷ نانو ثانیه می باشد که با احتساب ۱۰ درصد تا ۹۰ درصد آن بعنوان پهنای زمانی پالس لیزر، پهنای زمانی پالس لیزر برابر با ۶/۱۳۶ نانوثانیه بدست می آید. [۶]



شکل ۳: انرژی خروجی از طبقه‌ی دوم تقویت کننده بر حسب انرژی ورودی از طبقه اول

#### ۴- نتایج تجربی

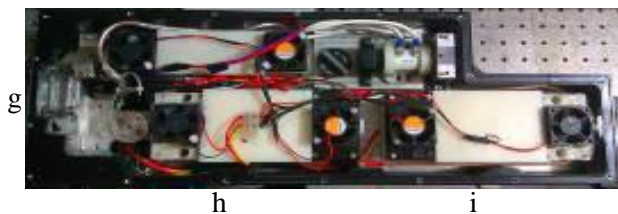
در این پژوهش برای تولید پالس های Q-سوئیچ شده لیزر نئودیمیوم یاگ همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، از ترکیب پلاریزور، تیغه ربع موج و سلول پاکلز KDP قبل از آینه عقب لیزر استفاده شده است. بطوریکه عملکرد سلول پاکلز در هنگام اعمال ولتاژ ۳/۸ کیلوولت به آن، همانند تیغه ربع موج بوده و عمل کلید زنی و تولید پالس هایی در حدود ۱۰ نانو ثانیه را انجام می دهد. در این چیدمان جهت خنک سازی کاواک لیزر از فن های سرعت بالا استفاده شده است.



شکل ۶: انرژی خروجی لیزر پس از دو طبقه تقویت کننده

#### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش یک روند مناسب بمنظور طراحی تقویت کننده های یک بار عبور بررسی گردید. با استفاده از دو طبقه تقویت کننده توانستیم انرژی خروجی ۳۵۰ میلی ژول از نوسانگر را پس از عبور از دو طبقه تقویت کننده به انرژی ۲۵۰۰ میلی ژول برسانیم. در نهایت مشخص گردید که ضریب تقویت G بدست آمده از نتایج تجربی میتواند بسته به نحوه خنک سازی و پمپ کردن میله لیزری با داده های تئوری تطابق نزدیکی داشته باشد.



شکل ۴: چیدمان تجربی لیزر نئودیمیوم یاگ Q-سوئیچ شده (a: آینه جلویی، b: کاواک لیزر، c: تیغه پلاریزور، d: تیغه ربع موج، e: سلول پاکلز، f: آینه عقبی، g: منشور فولد، h: تقویت کننده اول، i: تقویت کننده دوم).

بمنظور دستیابی به کیفیت پرتو خوب انرژی الکتریکی دو سر لامپ های درخششی را کاهش دادیم و در نهایت انرژی خروجی  $20 \pm 380$  میلی ژول با پهنای زمانی زیر ۱۰ نانوثانیه تولید شد. پهنای زمانی اندازه گیری شده به وسیله بین دیود بر روی نوسان نما در شکل (۵) نشان داده شده است.

#### مراجع

- [1] V. Magni: Appl. Opt. 25, 107 (1986); and 25, 2039 (1986).
- [2] V. Evtuhov, A.E. Siegman: Appl. Opt. 4, 142 (1965).
- [3] K. Tsubono, S. Moriwaki: Jpn. J. Appl. Phys. 31, 1241 (1992).
- [4] W. Koechner, "Solid-State Laser Engineering", 6th edn., Springer, Berlin (2006).
- [5] W.T. Silfvast, "Laser Fundamentals", 2nd edition, Cambridge, United states of America, (2004).
- [6] Robert W. Boyd. "Radiometry and the Detection of Optical Radiation", (June 1983).



شکل ۵: پهنای زمانی پالس لیزر اندازه گیری شده بر روی نوسان نما نشان داده شده است.