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

مهدی‌قائدرحمتی[۱]، حسین عباسی بافطرت[۱و۲]، علی اسفندیار[۱و۳]، محسن قائدرحمتی[۱و۴]

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 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 تقویت‌کننده، 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.GhaedRahmati1,*, H.Abbasi1,2, H.Ghollar2, A.Esfandyar1,3 and M.GhaedRahmati 1,[4]

1 Hossein Pour Research Complex, Esfehan

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

3 Department of Physics, Malek_e_Ashtar 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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

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

۱- مقدمه

امروزه لیزرهای پالسی پرتوان کابردهای 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 ا نجام 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 نانو ثانیه برسانیم.

۲- گام اول: طراحی رزوناتور

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

$$u_1 = \pm \frac{\pi}{2\lambda} W_{30}^2 \qquad (۱)$$

$$u_2 = -u_1 \frac{2x_0 u_1 + 1}{2x_0^2 u_1^2 + 2x_0 u_1 + 1} \qquad (۲)$$

که در آن W_{03} اندازه لکه مد اصلی روی میله لیزر و پارامتر x_0 طبق رابطهٔ زیر برای فاصلهٔ کانونی عدسی گرمایی میانگین(f_{0R}) تعریف شده است[2]:

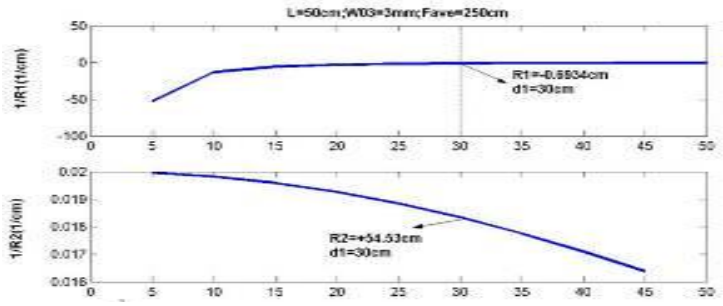
$$x_0 = \frac{1}{f_{0R}} - \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \qquad (۳)$$

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:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{d_1}(1 - \frac{u_1}{d_1}) \qquad (۴)$$
$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{d_2}(1 - \frac{u_2}{d_2})$$

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

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 $f_{0R} = 470cm$ 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 نظرگرفته 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:

$$R_1 = 0.54m \text{،} R_2 = -0.069m$$
$$g_1^* = 0.055 \text{،} g_2^* = 7.9 \text{ و } 0 \prec g_1^* g_2^* = 0.43 \prec 1$$

بنابراین رزوناتور طراحی شده پایدار می باشد.

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 می باشد .با وجود این محاسبات ، در برپایی آزمایشگاهی Q- سوئیچ شرایط عملی و تلفات داخل نوسانگر تعیین کننده پهنای پالس لیزر می باشند. دراین قسمت به محاسبه پهنای زمانی لیزر طراحی شده می پردازیم[4]:

پهنای پالس توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$t_{p-FWHM} = \frac{t_r}{\delta}\left(\frac{\ln z}{z[1 - a(1 - \ln a)]}\right) = 9ns \qquad (۵)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

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

$$z = \frac{2g_0 l}{\delta} = 92$$

$$a = \frac{z-1}{z \ln z} = 0.218$$

$$t_r = \frac{2L}{c} = 3.3ns$$

۳- گام دوم طراحی تقویت‌کننده‌های پالس‌های پرتوان

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

با در نظر گرفتن سطح مقطع پرتو شار انرژی خروجی از طبقه‌ی نوسانگر از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید[۴و۵]:

$$F_{out(osci)} = \frac{E_{out(osci)}}{A_{beam}} = \frac{500mJ}{0.1964cm^2} = 2.5458\ J/cm^2 \quad (۶)$$

مشخصات تقویت کننده‌ی طبقه‌ی اول در زیر آمده است:

$$\begin{cases} 2r_{R(Amp1)} = 7mm \\ l_{R(Amp1)} = 11.5mm \\ E_{in(Amp1)} = 70J \\ F_{sat(Amp1)} = 0.66\ J/cm^2 \end{cases} \quad (۷)$$

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

$$G = \frac{F_{sat}}{F_{in}} \ln\left\{1 + \left[\exp\left(\frac{F_{in}}{F_{sat}}\right) - 1\right]\exp(g_0 l)\right\} \quad (۸)$$

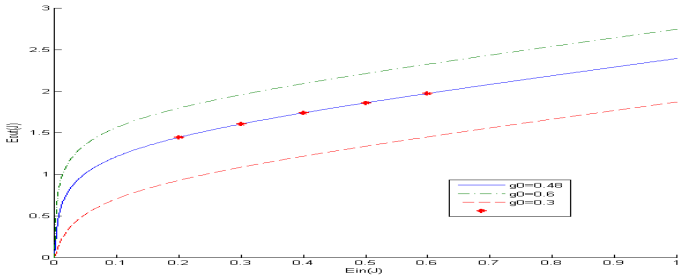
شار ورودی به طبقه اول $F_{in(Amp1)} = 1.2992\ J/cm^2$، چگالی انرژی ذخیره شده در تراز بالایی تقویت‌کننده $J_{sat(Amp1)} = 0.316\ J/cm^3$ و بهره سیگنال کوچک $g_{0(Amp1)} = 0.479cm^{-1}$ می‌باشد.

حال پارامترهای مورد نیاز برای بهره‌ی یکبار عبور تقویت‌کننده را در معادله می‌گذاریم و بهره تقویت‌کننده اول $G_{Amp1} = 3.724$ به دست می آید.

و در نتیجه انرژی خروجی از طبقه اول تقویت‌کننده می‌شود[۴]:

$$E_{out} = G \times E_{in} = 3.724 \times 0.5J = 1.862J \quad (۹)$$

نمودار انرژی خروجی از طبقه‌ی اول بر حسب انرژی ورودی از نوسانگر را می‌توان در شکل (۲) مشاهده کرد.



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

مشخصات تقویت کننده طبقه‌ی دوم عبارتند از:

$$\begin{cases} 2r_{R(Amp2)} = 9mm \\ l_{R(Amp2)} = 11.5mm \\ E_{in(Amp2)} = 90J \\ F_{sat(Amp1)} = 0.66\ J/cm^2 \\ \eta_{free-running} = 2\% \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$\begin{cases} F_{in(Amp2)} = 2.9269\ J/cm^2 \\ J_{sat(Amp2)} = 0.2460\ J/cm^3 \\ g_{0(Amp2)} = 0.37273cm^{-1} \end{cases} \quad (۱۱)$$

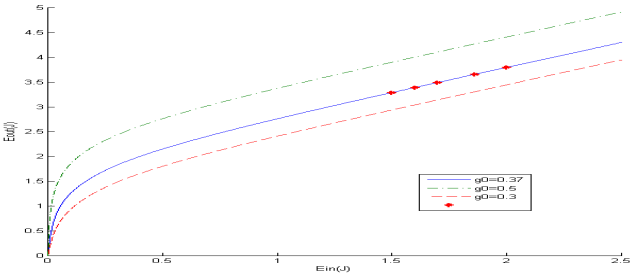
حال با استفاده از پارامترهای بالا برای بهره‌ی یکبار عبور تقویت کننده و استفاده از معادله‌ی ۸ بهره طبقه‌ی دوم تقویت‌کننده $G_{Amp2} = 1.9640$ بدست می‌آید.

و در نتیجه انرژی خروجی از طبقه دوم تقویت‌کننده می‌شود:

$$E_{out} = G \times E_{in} = 1.964 \times 1.862J = 3.65J \quad (۱۲)$$

نمودار انرژی خروجی از طبقه‌ی دوم تقویت‌کننده بر حسب انرژی ورودی از طبقه اول را می‌توان در شکل (۳) مشاهده نمود.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]



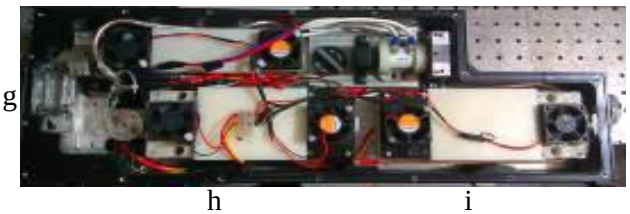
شکل ۳: انرژی خروجی از طبقه‌ی دوم تقویت‌کننده بر حسب انرژی ورودی از طبقه اول

۴- نتایج تجربی

در این پژوهش برای تولید پالس های Q-سوئیچ شده لیزر نئودمیوم 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 پالس‌هایی در حدود ۱۰نانو ثانیه را انجام می‌دهد. در این چیدمان جهت خنک سازی کاواک لیزر از فن‌های سرعت بالا استفاده شده است.

a b c d e f

g



h i

شکل ۴: چیدمان تجربی لیزر نئودمیوم 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 ۲۰±۳۸۰ میلی ژول با پهنای زمانی زیر ۱۰ نانوثانیه تولید شد.پهنای زمانی اندازه گیری شده به وسیله پین دیود بر روی نوسان نما در شکل (۵) نشان داده شده است.

شکل۵ :پهنای زمانی پالس لیزر اندازه گیری شده بر روی نوسان نما نشان داده شده است.

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

حال پرتو تولید شده در نوسانگر را از منشور فولد مطابق شکل ۴ عبور داده و سپس وارد طبقه اول تقویت کننده گردید. طبقه اول تقویت کننده شامل میله لیزری با قطر ۷ میلی متر و طول ۱۱۵ میلی متر می باشد که با دو فلاش لامپ که در کاواک سرامیکی قرار دارند پمپ می شود و با بهره گیری از دو فن در ابتدا و انتهای کاواک خنک سازی می‌گردد.در این طبقه پرتو ورودی پس از عبور از آن با ضریب تقویت ۳/۷ تقویت شده و پرتوی با انرژی۱۰۰± ۱۳۰۰ میلی‌ژول تولید شد.سپس پرتو با انرژی ۱۳۰۰ میلی ژول وارد دومین طبقه تقویت کننده می‌شود. در این طبقه میله لیزری با قطر ۹ میلی متر و طول ۱۱۵ میلی متر قرار دارند. در نهایت پرتو خارج شده از دومین طبقه تقویت کننده با ضریب تقویت ۲ به انرژی ۲۰۰±۲۵۰۰میلی ژول رسید.

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

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روند مناسب بمنظور طراحی تقویت کننده‌های یک بار عبور بررسی گردید. با استفاده از دو طبقه تقویت‌کننده توانستیم انرژی خروجی ۳۵۰ میلی‌ژول از نوسانگر را پس از عبور از دو طبقه تقویت کننده به انرژی ۲۵۰۰ میلی‌ژول 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 داده‌های تئوری تطابق نزدیکی داشته باشد.

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).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]