



لیزر
پژوهش
و فناوری
فوتونیک

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 هوaxنک پالسی پرتوان نئودمیوم یاگ Q-سوئیچ شده با انرژی

خروجی ۲/۵ ژول و پهنهای پالس کمتر از ۱۰ نانوثانیه

مهدی قائد رحمتی^۱، حسین عباسی بافترت^{۱,۲}، علی اسفندیار^{۱,۳}، محسن قائد رحمتی^{۱,۴}

m.gh.laser@gmail.com

- ۱ مجتمع علمی پژوهشی زنده یاد دکتر اردشیر حسین پور - پژوهشکده الکتروپیک 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 پهنهای 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 - پهنهای 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^{1,*}, H.Abbasi^{1,2}, H.Ghollar², A.Esfandyar^{1,3} and M.GhaedRahmati^{1,4}

1 Hossein Pour Research Complex, Esfahan

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

3 Department of Physics, Malek_e_Ashtar University, Shahin Shahr

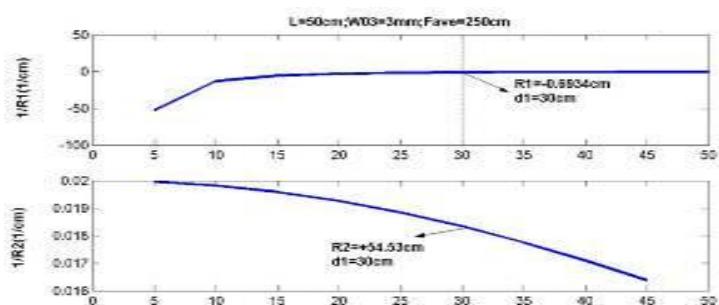
4 Department of Physics, Shahid Bahonar University, Kerman

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

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 $\lambda = 1064\text{nm}$ ، قطر میله لیزر Nd:YAG به کار رفته در رزوناتور 6.33mm با طول $l = 11.5\text{cm}$ ، فاصله کانونی عدسی گرمایی $f_{0R} = 470\text{cm}$ و اندازه لکه مد اصلی روی میله لیزر که انتظار داریم به دست آید $2W_{03} = 6\text{mm}$ می‌باشد. در طراحی طول کلی رزوناتور ثابت و برابر با $L=50\text{cm}$ در نظر گرفته شده است.



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

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

$$R_1 = 0.54\text{m}, R_2 = -0.069\text{m}$$

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

بنابراین رزوناتور طراحی شده پایدار می‌باشد.

۱-۲- محاسبه پهنه‌ی زمانی پالس Q - سوئیچ:

پهنه‌ی 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 پهنه‌ی پالس لیزر می‌باشند. در این قسمت به محاسبه پهنه‌ی زمانی لیزر طراحی شده می‌پردازیم [4]:

پهنه‌ی 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 کاپردهای فراوانی در زمینه‌های صنعتی و دفاعی دارند بطوری که بسیاری از کشورهای جهان در صدد دستیابی به دانش فنی طراحی و ساخت این لیزرهای 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 پهنه‌ی پالس لیزر را به کمتر از ۱۰ نانو ثانیه بررسانیم.

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_{0R}) تعریف شده است [2]:

$$x_0 = \frac{1}{f_{0R}} - \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \quad (3)$$

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:

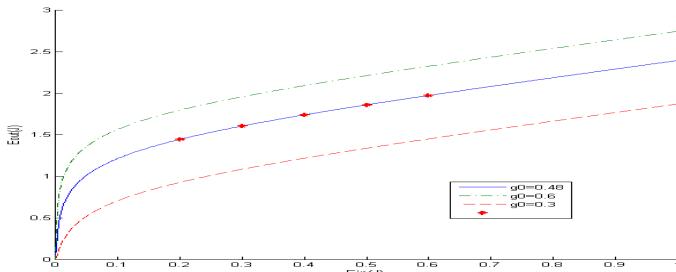
$$\begin{aligned} \frac{1}{R_1} &= \frac{1}{d_1} \left(1 - \frac{u_1}{d_1} \right) \\ \frac{1}{R_2} &= \frac{1}{d_2} \left(1 - \frac{u_2}{d_2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن فرض‌های اولیه و رسم معادله (4) بر حسب پارامتر d_1 می‌توان ساختار هندسی رزوناتور را پیدا کرد.

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

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

نمودار انرژی خروجی از طبقه 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 تقویت‌کننده طبقه‌ی دوم عبارتند از:

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

$$\begin{cases} F_{in(Amp2)} = 2.9269 J/cm^2 \\ J_{sat(Amp2)} = 0.2460 J/cm^3 \\ g_{0(Amp2)} = 0.37273 cm^{-1} \end{cases} \quad (11)$$

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

و در نتیجه انرژی خروجی از طبقه دوم تقویت‌کننده می‌شود:

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

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

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

$$z = \frac{2g_0l}{\delta} = 92$$

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

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

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 تقویت‌کننده $J = 500mJ$ با قطر پرتو ۵ میلی‌متر می‌باشد.

با در نظر گرفتن سطح مقطع پرتو شار انرژی خروجی از طبقه‌ی نوسانگر از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۴ و ۵]:

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

مشخصات تقویت‌کننده‌ی طبقه‌ی اول در زیر آمده است:

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

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

$$G = \frac{F_{sat}}{F_{in}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{F_{in}}{F_{sat}} \right) - 1 \right] \exp(g_0l) \right\} \quad (8)$$

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 سیگнал کوچک $g_{0(Amp1)} = 0.479 cm^{-1}$ می‌باشد.

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

همانگونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود زمان خیزش پالس الکتریکی پین دیود ۷/۶۷ نانو ثانیه می‌باشد که با احتساب ۱۰ درصد تا ۹۰ در صد زمان آن بعنوان پهنانی زمانی پالس لیزر، پهنانی زمانی پالس لیزر برابر با ۶/۱۳۶ نانو ثانیه بدست می‌آید. [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 می‌باشد که با دو فلاش لامپ که در کواک سرامیکی قرار دارند پمپ می‌شود و با بهره گیری از دو فن در ابتدا و انتهای کواک خنک سازی می‌گردد. در این طبقه پرتو ورودی پس از عبور از آن با ضریب تقویت ۳/۷ تقویت شده و پرتوی با انرژی ± 100 میلی جول تولید شد. سپس پرتو با انرژی ۱۳۰۰ میلی جول 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 ± 200 میلی جول رسید.



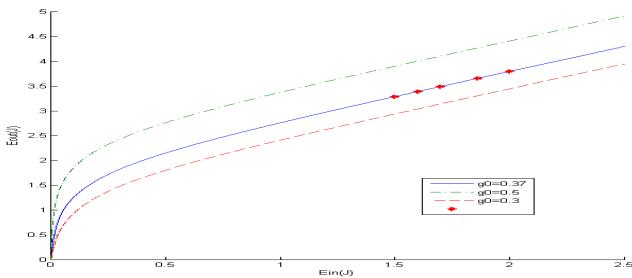
شکل ۶: انرژی خروجی لیزر پس از دو طبقه تقویت کننده

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روند مناسب بمنظور طراحی تقویت کننده‌های یک بار عبور بررسی گردید. با استفاده از دو طبقه تقویت کننده توانستیم انرژی خروجی ۳۵۰ میلی جول از نوسانگر را پس از عبور از دو طبقه تقویت کننده به انرژی ± 200 میلی جول 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

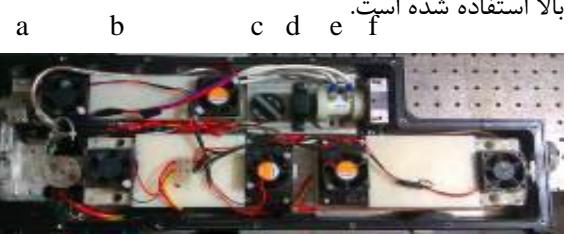
- [1] V. Magni: Appl. Opt. 25, 107 (1986); and 25, 2039 (1986).
- [2] V. Evtuhov, A.E. Siegman: Appl. Opt. 4, 142 (1965).
- [3] K. Tsubono, S.Moriwaki: Jpn. J. Appl. Phys. 31, 1241 (1992).
- [4] W. Koechner, "Solid-State Laser Engineering", 6th edn., Springer, Berlin (2006).
- [5] W.T. Silfvast, "Laser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



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

۴- نتایج تجربی

در این پژوهش برای تولید پالس‌های Q-سوئیچ شده لیزر نئودمیوم یاگ همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، از ترکیب پلاریزور، تیغه رباعی موج و سلول پاکلز KDP قبل از آینه عقب لیزر استفاده شده است. بطوریکه عملکرد سلول پاکلز در هنگام اعمال ولتاژ $3/8$ کیلوولت به آن، همانند تیغه رباعی موج بوده و عمل کلید زنی و تولید پالس‌هایی در حدود ۱۰ نانو ثانیه را انجام می‌دهد. در این چیدمان جهت خنک سازی کواک لیزر از فن‌های سرعت بالا استفاده شده است.



شکل ۴: چیدمان تجربی لیزر نئودمیوم یاگ Q-سوئیچ شده (a: آینه جلویی، b: کواک لیزر، c: تیغه پلاریزور، d: تیغه رباعی 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 لامپ‌های درخششی را کاهش دادیم و در نهایت انرژی خروجی ± 20 میلی جول با پهنانی زمانی زیر ۱۰ نانو ثانیه تولید شد. پهنانی زمانی اندازه گیری شده به وسیله پین دیود بر روی نوسان نما در شکل (۵) نشان داده شده است.



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