مطالعه تجربی لیزر حالت جامد با دمش دیود نورگسیل و سوییچ Q انفعالی

مصطفی ترکاشوند[۱و۲]، امیر حسین فرهبد[۱*]، سید علی هاشمی زاده[۲]

[۱] پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، انتهای کارگر شمالی، تهران
[۲] دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران
*E_mail: afarahbod@aeoi.org.ir

چکیده – در این مقاله نخستین نتایج تجربی حاصل از کاربرد سوییچ Q انفعالی $Cr^{4+}:YAG$ با محیط فعال لیزر Ce:Nd:YAG و دمش نوری به کمک آرایه های دیود نور گسیل مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور محیط فعال به قطر ۳ و طول ۶۰ میلیمتر با استفاده از ۴ ردیف ۳۲ تایی دیود نور گسیل آبی در طول موج ۴۶۰ نانومتر دمیده شده اند. تشدیدگر نوری با طول هندسی ۱۴ cm از دو آینه ۹۹ و ۹۳ درصد در طول موج گذار لیزر ۱۰۶۴ نانومتر تشکیل شده است. با قرار دادن یک سوییچ نوری انفعالی از جنس $Cr^{4+}:YAG$ با تراگسیل اولیه ۹۶ درصد، یک تپ نوری سوییچ Q با پهنای زمانی ۲۴۰ نانوثانیه با انرژی در حد ۲۰ میکرو ژول به ازای ۰/۸ ژول انرژی الکتریکی دمش مشاهده شد.

کلید واژه- سوییچ Q انفعالی، دمش با دیود نور گسیل، لیزر Ce:Nd:YAG

Experimental Study of Passively Q-switched LED-Pumped Solid-state Laser

M. Tarkashvand[1,2], A.H. Farahbod[1]*, S.A. Hashemizadeh[2]

[1] Department of plasma and nuclear fusion, NSTRI, North Kargar, Tehran
[2]Faculty of Science, Payame Noor University, P.O. 19395-3697, Tehran

*E-mail: afarahbod@aeoi.org.ir

Abstract: The experimental study of passively Q-switched, LED-pumped Ce:Nd:YAG laser is reported. The active medium is a 3 mm diameter laser rod of 60 mm length, which is optically pumped with four segments of blue LEDs at 460 nm where each segment consists of 32 single LED. The 14 cm length optical resonator equipped with two dielectric mirrors and reflectivity, 99 and 93 percent at 1064 nm. Using a $Cr^{4+}:YAG$ passive optical switch with 96% initial transmission and 0.8 J electrical pumping energy, nearly 20 micro-joules, 240 ns pulse-width, and single Q-switch laser pulse was generated.

Keywords: Passive Q-switch, LED pumping, Ce:Nd:YAG laser

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

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

۱- مقدمه

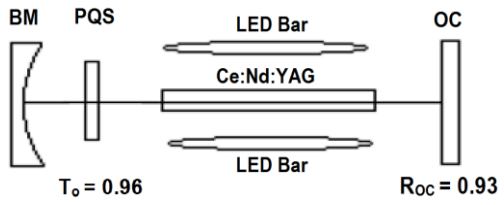
توسعه و تکامل فناوری دیودهای نور گسیل طی یک دهه اخیر، امکان کاربردهای متنوعی از این گونه منابع نوری را در حوزه فناوری لیزر فراهم آورده است [۱]. گزارش ها نشان می دهند که امکان تولید تپ های لیزر با انرژی از مرتبه میلی ژول با دمش دیود های نور گسیل با قابلیت اطمینان مناسب در رژیم کاری نوسانات آزاد[۱] نوسانگر لیزر وجود دارد[۴-۲]. به نظر می رسد که گام بعدی در این حوزه تولید تک تپ تکرار پذیر و منظم برای کاربرد در فناوری های گوناگون باشد. برای این منظور روش سوییچ Q با استفاده از سوییچ های نوری انفعالی(PQS)[۲] [۵] به دلیل سادگی و ارزانی در اولویت قرار دارند. گزارش های موجود برای اجرای عمل سوییچ Q با لیزر حالت جامد و دمش دیود نور گسیل، تنها به دو مرجع [۷و ۶] باز می گردد که در آن از دیودهای نوری ویژه با گسیل در طول موج ۸۱۰ نانومتر[۶] و یا مبدل نوری Ce:YAG برای تبدیل تابش های دیودهای نورگسیل از ناحیه آبی به سبز و هدایت موثر تابش ها به محیط فعال Nd:YAG [۷] استفاده شده است.

در پژوهش حاضر نخستین نتایج حاصل از کاربرد سوییچ Q انفعالی از نوع $Cr^{4+}:YAG$ با محیط فعال $Ce:Nd:YAG$ و دمش به کمک آرایه های دیود نور گسیل آبی در ۴۶۰ نانومتر ارائه شده است.

۲- ساختار تجربی نوسانگر لیزر

شکل ۱ساختار نوسانگر لیزر را برای اجرای عمل سوییچ Q نشان می دهد. استفاده از دیودهای نور گسیل آبی به دلیل وجود نوارهای جذبی بسیار موثر حاصل از حضور یون های سریم Ce برای تابش ها در نزدیکی طول موج۴۶۰ نانومتر برای محیط فعال $Ce:Nd:YAG$ است. علاوه بر آن ساختار الکتریکی توانمندتر دیودهای نوری آبی در مقایسه با سایر دیودهای نورگسیل در ناحیه مریی امکان افزایش قابل ملاحظه انرژی الکتریکی دمش را فراهم می آورد.

اندازه گیری ها نشان می دهند که بیشینه انرژی خروجی لیزر برای نوسانات آزاد لیزر با محیط فعال $Ce:Nd:YAG$و چشمه دمش با قله تابش در۴۶۰ نانومتر تحت شرایط یکسان برای تشدیدگر نوری (عدد فرنل برابر)، نظیر طول تشدیدگر، قطر محیط فعال و طول موج ۱/۰۶ میکرون گذار لیزر و بازتابندگی مشابه برای آینه های تشدیدگر، بیش از ۴ برابر انرژی لیزر Nd:YAG با دمش دیودهای نوری در۵۹۰ نانومتر است. آرایه های دیودهای نور گسیل به کار رفته در این پژوهش متشکل است از ۸ ردیف ۱۶ تایی دیود نور گسیل آبی که از ۸ ماتریس RGB دیود نور گسیل ساخت شرکت EPILEDS بریده و آماده شده است. هر دو آرایه ۱۶ تایی که از نظر الکتریکی سری هستند بر روی یک تسمه فولادی به پهنای ۴ میلیمتر نصب شده است. در مجموع ۴ مجموعه ۳۲ تایی دیود نوری به طول ۵۵ میلیمتر برای دمش میله لیزر به کار رفته است. فاصله سطح میله لیزر تا سطح گسیلنده هر مجموعه دیود، کمتر از ۱ میلیمتر است تا بیشینه جفت شدگی نوری میان پرتوهای خروجی دیودهای نور گسیل با زاویه واگرایی ۱۲۰ درجه و میله لیزر پدید آید.



شکل۱: آرایش تجربی نوسانگر سوییچ Q با دمش دیود نور گسیل و محیط فعال بلور $Ce:Nd:YAG$، به ترتیب آینه عقبی با BM و آینه خروجی با OC، و سوییچ Q انفعالی با PQS نشان داده شده است.

محیط فعال $Ce:Nd:YAG$ به قطر $2a_r = 3\ mm$و طول $L_r = 60\ mm$ است. تشدیدگر لیزر از دو آینه با پوشش دی الکتریک تشکیل شده است که به فاصله ۱۴ cm از یکدیگر قرار دارند. بازتابندگی آینه عقب (BM) و آینه خروجی تشدیدگر (OC) در طول موج ۱/۰۶ میکرون به ترتیب ۹۹ و ۹۳ درصد است. آینه خروجی تخت و شعاع انحنایBM برابر با ۵۰ cm است. بدین ترتیب تشدیدگر از نوع پایدار با عدد فرنل ۱۵ است.

۳- مشاهدات تجربی

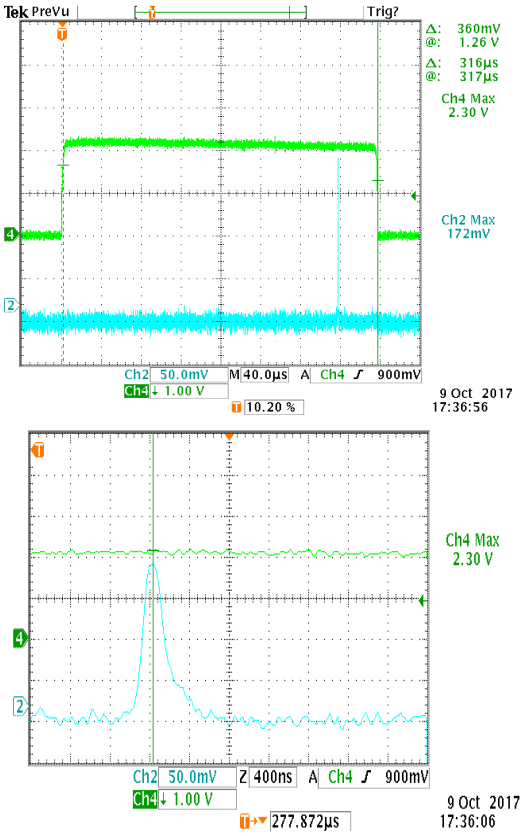
انتخاب مناسب تراگسیل اولیه[۳] سوییچ نوری انفعالی، اولین و مهمترین عامل برای اجرای سوییچ Q به ازای نرخ

[1] Relaxation Oscillations
[2] Passive Optical Switches
[3] Initial transmission

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

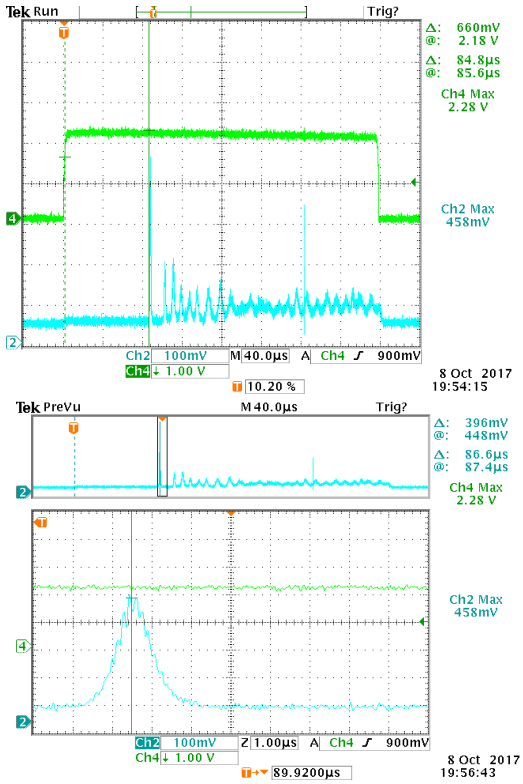
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

دمش معلوم برای محیط فعال شمار می آید. بررسی های تجربی نشان دادند که با افزودن ۱۰ درصد تلفات اضافی طی هر عبور نور از میان اجزای تشدیدگر، حتی با بیشترین مقدار انرژی الکتریکی دمش به ازای تپ جریان ۴۰ آمپری با پهنای زمانی ۳۱۸ میکروثانیه و ولتاژ شارژ ۱۴۰ ولتی خازن های ذخیره کننده انرژی، معادل با ۱/۸ ژول انرژی الکتریکی اعمال شده به دیودهای نورگسیل، نوسانگر لیزر به آستانه نوسان نمی رسد. از این رو سوییچ نوری انفعالی مورد استفاده در این پژوهش از جنس بلور YAG به ضخامت ۰/۶۶ میلیمتر با آلاییدگی Cr^{4+} با تلفات ۴ درصد در هر عبور و تراگسیل اولیه $T_o \approx 0/96$ است.



شکل۲: بالا) موقعیت تپ سوییچ Q نسبت به تپ جریان(سبز) آرایه های LED به ازای انرژی دمش ۰/۸ ژول معادل با ۲۳ آمپر جریان عبوری از دیودهای نور گسیل. پایین) رفتار زمانی تپ سوییچ Q.

شکل۲ نمونه ای از رفتار زمانی مشاهده شده برای تپ سوییچ Q را به ازای انرژی دمش ۰/۸ژول نشان می دهد. با افزایش انرژی دمش تا ۱/۲ ژول، دو تپ سوییچ Q کم و بیش یکسان به فاصله ۱۲۴ میکروثانیه از یکدیگر پدید می آیند. اندازه گیری ها به کمک ترکیبی از اسیلوسکوپ تکترونیکس مدل TDS3054 با پهنای باند ۵۰۰ مگاهرتز و یک دیود نوری خلاء با زمان پاسخ ۰/۱ نانوثانیه انجام شده است. برای اندازه گیری های شکل ۳ یک فیلتر نوری تضعیف کننده با عبوردهی ۰/۱ در مقابل آشکارساز قرار دارد تا از ورود به ناحیه پاسخ غیر خطی آشکارساز پرهیز شود.



شکل۳: بالا) رفتار زمانی نوسانات آزاد لیزر به ازای ۰/۸ ژول انرژی الکتریکی دمش. اولین میخه لیزر۸۶ میکروثانیه پس از آغاز لحظه دمش پدید آمده است. پایین) اولین میخه لیزر با تفکیک زمانی بیشتر با پهنای زمانی ۱ میکروثانیه.

مقایسه ای میان میخه های لیزر در رژیم نوسانات آزاد شکل۳، با تپ سوییچ Q نشان می دهد که پهنای زمانی تپ لیزر از حدود ۲ میکروثانیه برای هر میخه به ۰/۲ میکروثانیه برای تپ سوییچ Q کاهش و دامنه تپ نیز ۵ برابر افزایش یافته است. اما انرژی کل باریکه لیزر از ۲۰۰ به قریب ۲۰ میکروژول کاهش یافته است.

۴- محاسبات عددی

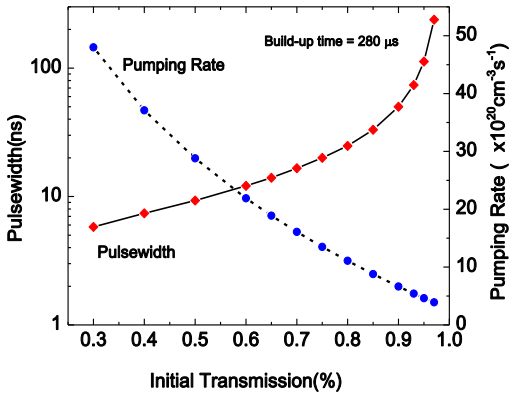
حل عددی معادلات نرخ، رابطه (۱)، برای انبوهی ترازهای لیزر (N_1, N_2)، به همراه چگالی فوتون ϕ و مدل ۲ ترازی انبوهی ترازهای پایه و تحریکی Cr^{4+} در

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

محیط YAG، (N_{gs}, N_{es})، برای سوییچ انفعالی [۸، ۹] به ازای تلفات اولیه معادل با تشدیدگر واقعی لیزر و نرخ دمش $\approx ۳/۹\times ۱۰^{۲۰}\ cm^{-۳}s^{-۱}$ برای تولید تپ سوییچ Q در لحظه ۲۸۰ میکروثانیه پس از آغاز عمل دمش مطابق با مشاهدات تجربی شکل۳ نشان دادند که به ازای $T_o \approx ۰/۹۶$ نوسانگر لیزر قادر به تولید تک تپ سوییچ Q در حد ۲۳۰ نانوثانیه است که عملاً با رفتار تپ لیزر با پهنای زمانی $\approx ۲۴۰\ ns$ مشاهده شده در آزمایشگاه مطابقت دارد. در رابطه(۱)، c سرعت نور در محیط YAG، σ مقطع گسیل القایی محیط فعال، σ_{gs} سطح مقطع جذب PQS، t_f طول عمر فلورسانس تراز بالای محیط فعال، τ_s طول عمر تراز تحریکی برای PQS، τ_c طول عمر فوتون درون تشدیدگر، L_g و L_{sa} به ترتیب طول هندسی تشدیدگر و ضخامت PQS می باشند.

$$\begin{aligned}
\frac{d\phi}{dt} &= \left(\frac{L_r}{L_g}\right)c\sigma\phi\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right) \\
&\quad + \frac{1}{4}\left(\frac{a_r}{L_r}\right)^2\frac{N_2}{t_f} - \phi\left(\frac{1}{\tau_c} + \left(\frac{L_{sa}}{L_g}\right)c\left(N_{es}\sigma_{es} + N_{gs}\sigma_{gs}\right)\right) \\
\frac{dN_2}{dt} &= -c\sigma\phi\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right) - \frac{N_2}{t_f} + W(t) \\
\frac{dN_1}{dt} &= c\sigma\phi\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1}N_1\right) - \frac{N_1}{\tau_1} \\
\frac{dN_{gs}}{dt} &= \frac{N_{es} - N_{gs}}{\tau_s} - c\sigma_{gs}\phi N_{gs} \\
N_{es} &= N_{os} - N_{gs}
\end{aligned} \qquad (۱)$$



شکل۴: بستگی پهنای تپ سوئیچ Q به تراگسیل اولیه سوییچ نوری انفعالی و نرخ دمش. در تمام حالت ها بازتابندگی آینه جلو ۹۳٪ و زمان لازم برای شکل گیری تپ از لحظه دمش ۲۸۰ میکروثانیه است.

نتایج محاسبات برای بستگی پهنای تپ سوییچ Q به بازتابندگی آینه خروجی، بیشینه نرخ دمش و تراگسیل اولیه سوییچ Q انفعالی در شکل ۴ نشان داده شده است.

۴- بحث و نتیجه گیری

کاربرد موثر لیزر تپی مستلزم رفتار زمانی تکرار پذیر و منظم تپ است و علیرغم ویژگی های برجسته لیزر تپی با دمش دیود نور گسیل، ضروری است تا رفتار زمانی نامنظم نوسانات آزاد لیزر به رفتاری منظم بدل شود. در این پژوهش برای نخستین بار با استفاده از روش سوییچ Q انفعالی، تک تپ تکرار پذیر لیزر Ce:Nd:YAG از مرتبه ۲۰۰ نانوثانیه با دمش آرایه های دیود نور گسیل آبی تولید، و ویژگی های آن مورد مطالعه قرار گرفته است. محاسبات عددی نشان می دهند که پهنای تپ لیزر سوییچ Q در وحله نخست به تراگسیل اولیه سوییچ انفعالی نوری وابسته است و با کاهش T_o تا ۳۰ درصد می توان به تپ هایی به کوتاهی۶ نانوثانیه دست یافت، معهذا این امر مستلزم غلبه بر تلفات تشدیدگر با افزایش نرخ دمش تا $\approx ۵\times ۱۰^{۲۱}\ cm^{-۳}s^{-۱}$ با استفاده از دیودهای نوری قدرتمندتر است.

مراجع

[1] J. Bhardwaj, J.M. Cesaratto, O.B. Shchekin, W.A. Soer, W. Götz, R. Bonné, Z.F. Song, J. Breejen: Progress in LED technology for solid-state lighting, Proc. SPIE 10124, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XXI, 1012417 (2017).

[2] A. Barbet, F. Balembois, A. Paul, J.P. Blanchot, A.L. Viotti, J. Sabater, F. Druon, P. Georges: Revisiting of LED pumped bulk laser: first demonstration of Nd:YVO4 LED pumped laser, Opt. Lett. 39, 6731 (2014).

[3] B. Villars, E.S. Hill, C.G. Durfee: Design and development of a high-power LED-pumped Ce:Nd:YAG laser, Opt. Lett. 40, 3049 (2015).

[4] K.Y. Huang, C.K. Su, M.W. Lin, Y.C. Chiu, Y.C. Huang: Efficient 750-nm LED-pumped Nd:YAG laser, Opt. Express 24, 12043 (2016).

[5] J. Chen, J.N. Chen, Five Simultaneously Q-Switch Mode-Locked Passive Laser Modulators, Optical Review 13, 6, 427 (2006).

[6] C.Y. Cho, C.C. Pu, K.W. Su, Y. F. Chen, LED-side-pumped Nd:YAG laser with>20% optical efficiency and the demonstration of an efficient passively *Q*-switched LED-pumped solid-state laser, Opt. Lett. 42, 12, 2394 (2017).

[7] P. Pichon, A. Barbet, D. Blengino, P. Legavre, T. Gallinelli, F. Druon, J.P. Blanchot, F. Balembois , S. Forget, S. Chénais, P. Georges, High-radiance light sources with LED-pumped luminescent concentrators applied to pump Nd:YAG passively Q-switched laser, Optics and Laser Technology 96, 7 (2017).

[8] X. Zhang, S. Zhao, Q. Wang, Q. Zhang, L. Sun, S. Zhang, Optimization of Cr4+ doped saturable-absorber Q-switched lasers, IEEE Journal of Quantum Electron., 33,12, 2286 (1997).

[9] J. Dong, Numerical modeling of CW-pumped repetitively passively Q-switched Yb:YAG lasers with Cr:YAG as saturable absorber, Optics Communications 226, 337 (2003).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]