

مطالعه تجربی لیزر حالت جامد با دمش دیود نور گسیل و سویچ Q انفعالی

مصطفی ترکاشوند^۱، 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 ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران

*E_mail: afarabod@aeoi.org.ir

چکیده - در این مقاله نخستین نتایج تجربی حاصل از کاربرد سویچ Q انفعالی $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 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 سویچ نوری انفعالی از جنس $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ با تراگسیل اولیه ۹۶ درصد، یک تپ نوری سویچ 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 - سویچ 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. Hashemizadeh²

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: afarabod@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 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 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

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]. گزارش‌ها نشان می‌دهند که امکان تولید تپ‌های لیزر با انرژی از مرتبه میلی ژول با دمش دیودهای نور گسیل با قابلیت اطمینان مناسب در رژیم کاری نوسانات آزاد^۱ نوسانگر لیزر وجود دارد [۲-۴]. به نظر می‌رسد که گام بعدی در این حوزه تولید تک تپ تکرار پذیر و منظم برای کاربرد در فناوری‌های گوناگون باشد. برای این منظور روش سویچ Q با استفاده از سویچ‌های نوری انفعالی (PQS)^۲ [۵] به دلیل سادگی و ارزانی در اولویت قرار دارند. گزارش‌های موجود برای اجرای عمل سویچ Q با لیزر حالت جامد و دمش دیود نور گسیل، تنها به دو مرجع [۶ و ۷] باز می‌گردد که در آن از دیودهای نوری ویژه با گسیل در طول موج ۸۱۰ نانومتر [۶] و یا مبدل نوری Ce:YAG برای تبدیل تابش‌های دیودهای نورگسیل از ناحیه آبی به سبز و هدایت موثر تابش‌ها به محیط فعال Nd:YAG [۷] استفاده شده است.

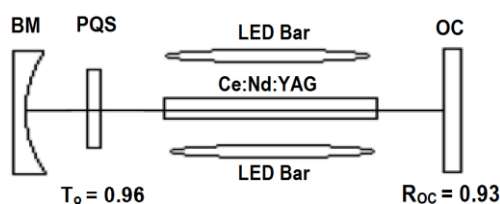
در پژوهش حاضر نخستین نتایج حاصل از کاربرد سویچ Q انفعالی از نوع Cr^{۴+}:YAG با محیط فعال Ce:Nd:YAG و دمش به کمک آرایه‌های دیود نور گسیل آبی در ۴۶۰ نانومتر ارائه شده است.

۲- ساختار تجربی نوسانگر لیزر

شکل ۱ ساختار نوسانگر لیزر را برای اجرای عمل سویچ Q نشان می‌دهد. استفاده از دیودهای نور گسیل آبی به دلیل وجود نوارهای جذبی بسیار موثر حاصل از حضور یون‌های سربیم Ce برای تابش‌ها در نزدیکی طول موج ۴۶۰ 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 مرئی امکان افزایش قابل ملاحظه انرژی الکتریکی دمش را فراهم می‌آورد.

اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که بیشینه انرژی خروجی لیزر برای نوسانات آزاد لیزر با محیط فعال Ce:Nd:YAG و چشمه دمش با قله تابش در ۴۶۰ 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 آینه‌های تشدیدگر، بیش از ۴ برابر انرژی لیزر Nd:YAG با دمش دیودهای نوری در ۵۹۰ نانومتر است. آرایه‌های 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.



شکل ۱: آرایش تجربی نوسانگر سویچ 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 سویچ Q انفعالی با PQS نشان داده شده است.

محیط فعال Ce:Nd:YAG به قطر $2a_r = 3 \text{ mm}$ و طول $L_r = 60 \text{ mm}$ 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 انحنای BM برابر با ۵۰ cm است. بدین ترتیب تشدیدگر از نوع پایدار با عدد فرنل ۱۵ است.

۳- مشاهدات تجربی

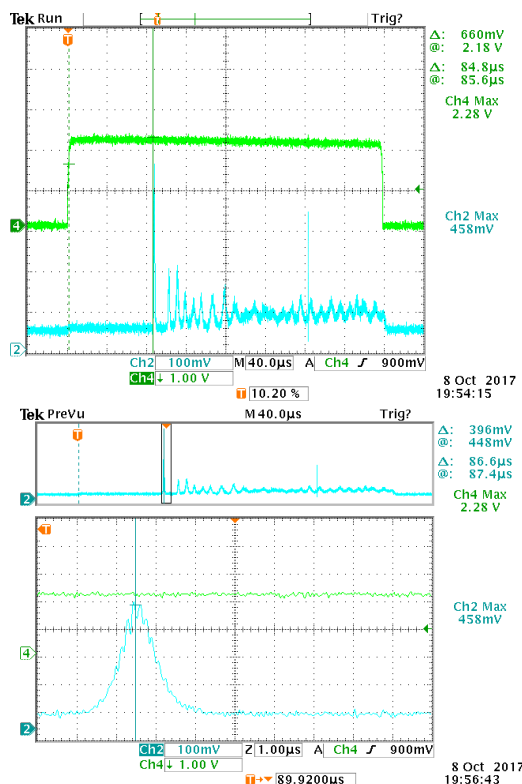
انتخاب مناسب تراگسیل اولیه^۳ سویچ نوری انفعالی، اولین و مهمترین عامل برای اجرای سویچ Q به ازای نرخ

³ Initial transmission

¹ Relaxation Oscillations

² Passive Optical Switches

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.



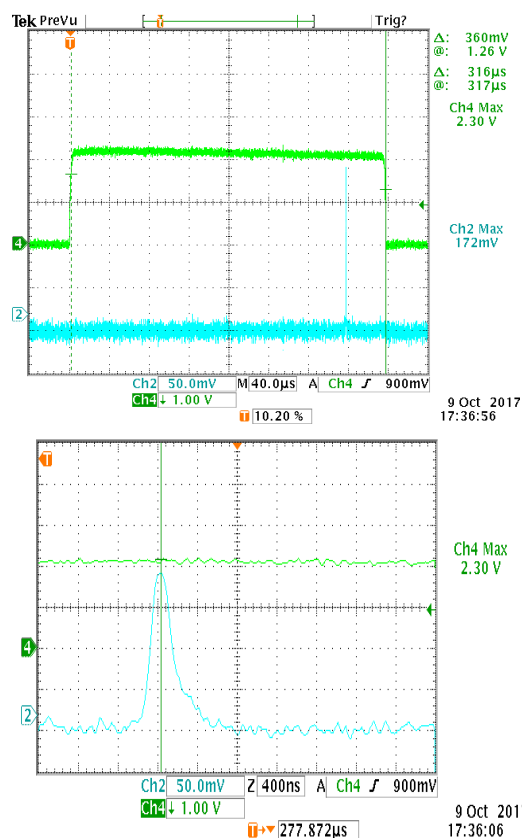
شکل ۳: بالا) رفتار زمانی نوسانات آزاد لیزر به ازای ۰/۸ ژول انرژی الکتریکی دمش. اولین میخه لیزر ۸۶ میکروثانیه پس از آغاز لحظه دمش پدید آمده است. پایین) اولین میخه لیزر با تفکیک زمانی بیشتر با پهنای زمانی ۱ میکروثانیه.

مقایسه ای میان میخه های لیزر در رژیم نوسانات آزاد شکل ۳، با تپ سویچ Q نشان می دهد که پهنای زمانی تپ لیزر از حدود ۲ میکروثانیه برای هر میخه به ۰/۲ میکروثانیه برای تپ سویچ 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 تراز انبوهی ترازهای پایه و تحریکی Cr^{4+} در

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 سویچ 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 $T_0 \approx ۰/۹۶$ است.



شکل ۲: بالا) موقعیت تپ سویچ 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 سویچ Q.

شکل ۲ نمونه ای از رفتار زمانی مشاهده شده برای تپ سویچ Q را به ازای انرژی دمش ۰/۸ ژول نشان می دهد. با افزایش انرژی دمش تا ۱/۲ ژول، دو تپ سویچ Q کم و بیش یکسان به فاصله ۱۲۴ میکروثانیه از یکدیگر پدید می آیند. اندازه گیری ها به کمک ترکیبی از اسیلوسکوپ

۴- بحث و نتیجه گیری

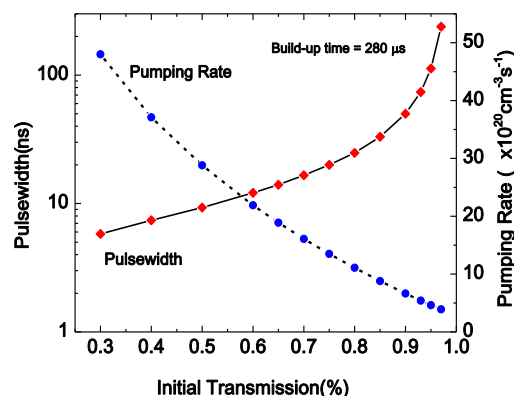
کاربرد موثر لیزر تپی مستلزم رفتار زمانی تکرار پذیر و منظم تپ است و علیرغم ویژگی های برجسته لیزر تپی با دمش دیود نور گسیل، ضروری است تا رفتار زمانی نامنظم نوسانات آزاد لیزر به رفتاری منظم بدل شود. در این پژوهش برای نخستین بار با استفاده از روش سویچ Q انفعالی، تک تپ تکرار پذیر لیزر Ce:Nd:YAG از مرتبه ۲۰۰ 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 سویچ Q در وحله نخست به تراگسیل اولیه سویچ انفعالی نوری وابسته است و با کاهش T_0 تا ۳۰ درصد می توان به تپ هایی به کوتاهی ۶ نانوثانیه دست یافت، معهذ این امر مستلزم غلبه بر تلفات تشدیدگر با افزایش نرخ دمش تا $10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 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).

محیط YAG، (N_{gs}, N_{es}) ، برای سویچ انفعالی [۸، ۹] به ازای تلفات اولیه معادل با تشدیدگر واقعی لیزر و نرخ دمش $3/9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ برای تولید تپ سویچ Q در لحظه ۲۸۰ میکروثانیه پس از آغاز عمل دمش مطابق با مشاهدات تجربی شکل ۳ نشان دادند که به ازای $T_0 \approx 0.96$ نوسانگر لیزر قادر به تولید تک تپ سویچ Q در حد ۲۳۰ نانوثانیه است که عملاً با رفتار تپ لیزر با پهنای زمانی 240 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.

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



شکل ۴: بستگی پهنای تپ سوئیچ Q به تراگسیل اولیه سویچ 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 سویچ Q به بازتابندگی آینه خروجی، بیشینه نرخ دمش و تراگسیل اولیه سویچ Q انفعالی در شکل ۴ نشان داده شده است.