

لیزر Ce:Nd:YAG با دمش دیود نورگسیل و سویچ Q انفعالی

مصطفی ترکشوند^{۱،۲}، امیرحسین فرهد^۱ و سید علی هاشمی زاده^۲

۱. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۲. دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران

پست الکترونیکی: afarahbod@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰)

چکیده

در این مقاله نخستین مشاهدات تجربی حاصل از کاربرد سویچ Q انفعالی با محیط فعال Ce:Nd:YAG و دمش نوری آرایه‌های دیود نور گسیل مورد بررسی قرار گرفته است. قطر و طول محیط فعال به ترتیب ۳ و ۶۰ میلی‌متر است که با استفاده از ۴ ردیف ۳۲ تایی دیود نور گسیل آبی در ۴۶۰ طول موج نانومتر دمیده می‌شود. تشدیدگر نوری با طول هندسی ۱۴ cm از دو آینه ۹۹ و ۹۳ درصد در طول موج گذار لیزر ۱۰۶۴ نانومتر تشکیل شده است که در حالت نوسان آزاد بیشینه انرژی خروجی نوسانگر بیش از ۲۰۰ میکرو ژول است. با قرار دادن یک سویچ نوری انفعالی با تراگیل اولیه ۹۶ درصد، یک تپ نوری سویچ Q با انرژی ۱۷ میکروژول و پهنای زمانی ۲۴۰ نانوثانیه به ازای ۰/۶ ژول انرژی الکتریکی دمش مشاهده شد. با افزایش انرژی دمش تا ۱/۲ ژول ۲ تپ سویچ Q کم و بیش هم انرژی پدید می‌آیند. همچنین روشی مبتنی بر کنترل نرخ دمش و شکل دهی جریان دیودهای نور گسیل برای کاهش پهنای تپ و افزایش انرژی با حفظ تک تپ لیزر ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: سویچ Q انفعالی، دمش با دیود نور گسیل، لیزر Ce:Nd:YAG

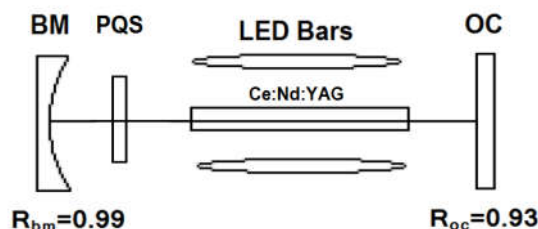
۱. مقدمه

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 طور طبیعی به نظر می‌رسد که گام بعدی در این حوزه تولید تک تپ تکرارپذیر و منظم برای کاربرد در فناوری‌های گوناگون باشد.

برای این منظور روش سویچ Q با استفاده از سویچ‌های نوری انفعالی^۲ [۵] به دلیل سادگی و ارزانی در اولویت قرار دارند. دو گزارش موجود برای اجرای عمل سویچ Q با لیزر حالت جامد و دمش دیود نور گسیل، به مراجع [۶ و ۷] باز می‌گردد که در آنها به ترتیب از دیودهای نوری ویژه در طول موج ۸۱۰ نانومتر یا مبدل و متمرکز کننده نوری Ce:YAG برای دمش نوری محیط فعال Nd:YAG استفاده شده است. علاوه بر این، ساختارهای مورد اشاره به محیط فعال با مقطع مربعی و قطعات نوری ویژه نیاز دارند که سبب می‌شود باریکه

۱. Relaxation Oscillations

۲. Passive Optical Switch



شکل ۱. آرایش تجربی نوسانگر سویچ Q با دمش دیود نور گسیل و محیط فعال بلور Ce:Nd:YAG. آینه عقبی و خروجی تشدیدگر به ترتیب با BM و OC، و سویچ Q انفعالی با PQS نشان داده شده است.

دیودهای نوری با طیف تابشی سبز و نارنجی و جایگزینی محیط فعال Nd:YAG با Ce:Nd:YAG است که دارای نوارهای جذبی بسیار مؤثر حاصل از حضور یون های سریم Ce برای تابش‌ها در نزدیکی طول موج ۴۶۰ نانومتر است. علاوه بر آن ساختار الکتریکی توانمندتر دیودهای نوری آبی در مقایسه با دیودهای نورگسیل نارنجی با قله تابش در نزدیکی ۵۹۲ نانومتر، امکان افزایش انرژی الکتریکی دمش را تا بیش از ۳ برابر دیودهای نوری نارنجی فراهم می‌آورد.

اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که بیشینه انرژی خروجی لیزر Ce:Nd:YAG با قله تابش چشمه دمش 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 ۵۹۲ نانومتر است [۸ و ۹]. 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 شده‌اند. 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 رفته‌اند. فاصله سطح میله لیزر تا سطح گسیلنده هر مجموعه دیود، کمتر از ۱ میلی‌متر است.

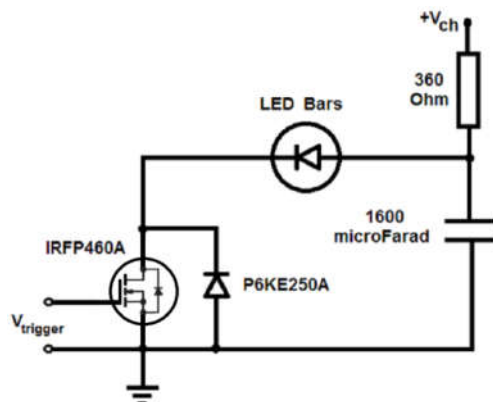
سویچ نوری انفعالی مورد استفاده در این پژوهش از جنس بلور YAG به ضخامت ۰/۶۶ میلی‌متر با آلیاژ Cr^{۴+} و

خروجی لیزر از کیفیت فضایی مناسبی برخوردار نباشد [۷]. در پژوهش حاضر نخستین نتایج حاصل از کاربرد سویچ Q انفعالی (PQS) از نوع Cr^{۴+}:YAG با محیط فعال Ce:Nd:YAG با مقطع دایروی و دمش به کمک آرایه‌های دیود نور گسیل آبی در ۴۶۰ نانومتر ارائه شده است. روش به کار رفته برای دمش محیط فعال بسیار شبیه رویکرد مراجع [۸ و ۹] برای دمش محیط فعال Nd:YAG با دیودهای نور گسیل در طول موج ۵۹۲ و ۵۲۰ نانومتر است. در این پژوهش ابتدا آرایش تجربی به کار رفته برای اجرای سویچ Q انفعالی معرفی می‌شود. در بخش ۳ نتایج تجربی به دست آمده ارائه شده است. رفتار نوسانگر لیزر نیز به کمک حل معادلات نرخ برای محیط فعال لیزر و سویچ انفعالی در بخش ۴ مورد مطالعه قرار گرفته و پس از مقایسه نتایج حاصل با مشاهدات تجربی به اختصار روشی برای افزایش انرژی و کوتاه سازی پهنای تپ لیزر از طریق تغییر رفتار نرخ دمش به کمک کنترل جریان دیودهای نور گسیل معرفی شده است.

۲. ساختار تجربی نوسانگر لیزر

ساختار هندسی دمش و ویژگی های نوسانگر لیزر که برای اجرای عمل سویچ Q مورد استفاده قرار گرفت به تفصیل در مرجع [۹] مورد بررسی قرار گرفته است و به جز سویچ نوری انفعالی، جنس محیط فعال و طیف تابشی دیودهای نورگسیل از لحاظ ابعاد هندسی با آن تفاوتی ندارد، شکل ۱ تفاوت موجود با مرجع مورد اشاره، استفاده از دیودهای نور گسیل آبی به جای

۱. Passive Q-switch



شکل ۲. مدار الکتریکی دمش برای آرایه‌های دیود نور گسیل [۹].

میکروثانیه و ولتاژ شارژ 140° ولتی خازن‌های ذخیره کننده انرژی، معادل با $1/8$ ژول انرژی الکتریکی اعمال شده به دیودهای نورگسیل، نوسانگر لیزر به آستانه نوسان نمی‌رسد.

حل عددی معادلات نرخ ارائه شده در بخش ۴ برای انبوهی ترازهای لیزر به همراه چگالی فوتون و مدل ۲ تراز انبوهی ترازهای پایه و تحریکی Cr^{2+} در محیط YAG برای سویچ انفعالی، به ازای تلفات اولیه معادل با تشدیدگر واقعی لیزر و نرخ دمش $cm^{-3}s^{-1} \approx 2/5 \times 10^{20}$ هم ارز برای تولید انرژی کل میخه‌های خروجی لیزر برابر با 200 میکروژول نیز مشاهدات تجربی را تأیید نمودند. محاسبات نشان دادند که به ازای $T_0 \approx 0/96$ نوسانگر لیزر قادر به تولید تک تپ سویچ Q در حد 230 نانوثانیه است که عملاً مشابه تپ لیزر مشاهده شده در آزمایشگاه با پهنای زمانی $240 ns$ است.

نمودارهای شکل ۳ نمونه‌های تجربی مشاهده شده برای رفتار زمانی تپ سویچ Q به ازای دو نرخ دمش متفاوت را برای انرژی دمش $0/8$ و $1/2$ ژول نشان می‌دهد که برای انرژی دمش $1/2$ ژول، دو تپ سویچ Q کم و بیش یکسان با انرژی 17 میکروژول به فاصله 124 میکروثانیه از یکدیگر پدید می‌آیند. اندازه‌گیری‌ها به کمک ترکیبی از اسیلوسکوپ تکترونیکس مدل TDS3054 با پهنای نوار 500 مگاهرتز و یک دیود نوری خلاء با زمان پاسخ $0/1$ نانوثانیه انجام شده است. برای مشاهده تپ‌های سویچ Q جهت جلوگیری از ورود آشکارساز به ناحیه پاسخ غیرخطی، یک صافی نوری با تراگسیل 8 درصد در مقابل

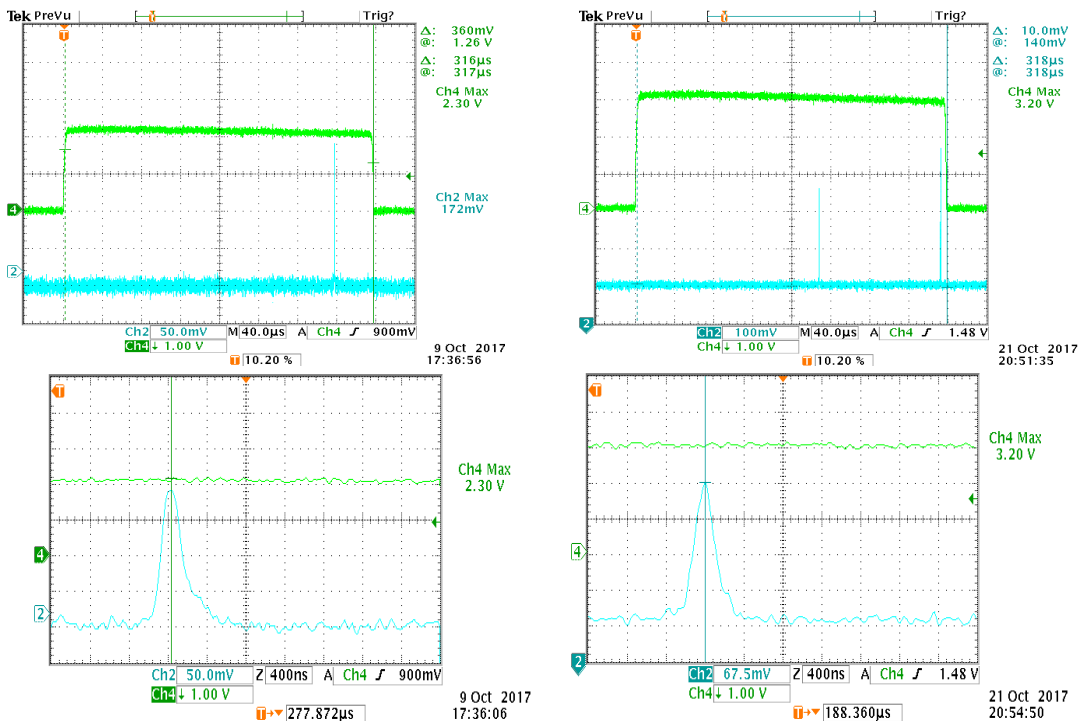
تراگسیل اولیه $T_0 = 95 \pm 2\%$ است که هر دو سطح آن دارای پوشش ضدبازتاب است. تشدیدگر لیزر از دو آینه با پوشش دی‌الکتریک تشکیل شده است که به فاصله $14 cm$ از یکدیگر قرار دارند. بازتابندگی آینه عقب (BM) و آینه خروجی تشدیدگر (OC) در طول موج 106 میکرون به ترتیب $R_{oc} = 0/93$ و $R_{bm} = 0/99$ است. آینه خروجی تخت و شعاع انحنا BM برابر با $50 cm$ است. بدین ترتیب تشدیدگر از نوع پایدار با عدد فرنل 15 است.

مدار الکتریکی دمش برای تحویل ذخیره انرژی بانک خازنی 1600 میکروفارادی به آرایه دیودهای نورگسیل، در شکل ۲ نشان داده شده است که در آن ترانزیستور اثر میدان 500 ولتی IRFP460A با قابلیت تحمل 50 آمپر تپ جریان با پهنای 300 میکروثانیه به ازای ولتاژ شارژ کمتر از 150 ولت، جهت تخلیه انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است.

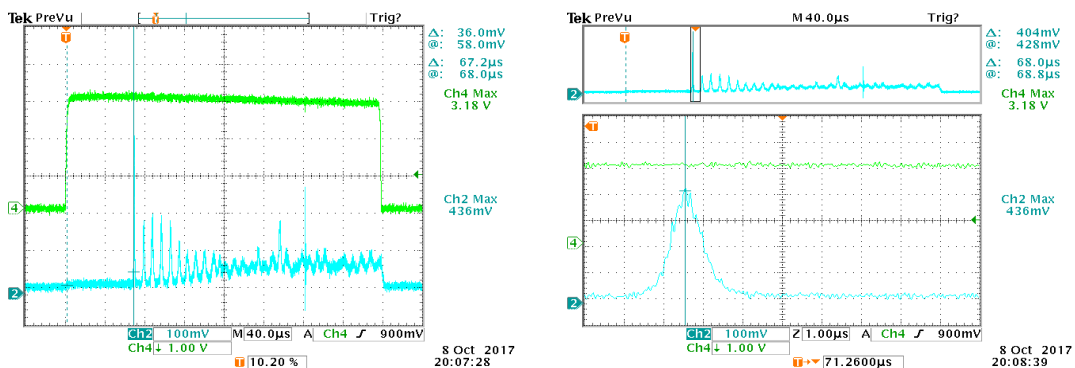
۳. مشاهدات تجربی

انتخاب مناسب تراگسیل اولیه سویچ نوری انفعالی، اولین و مهمترین عامل برای اجرای سویچ Q به ازای نرخ دمش معلوم برای محیط فعال به شمار می‌آید. بررسی‌های تجربی نشان دادند که با افزودن 10 درصد تلفات اضافی طی هر عبور نور از میان اجزای تشدیدگر، حتی با بیشترین مقدار انرژی الکتریکی دمش به ازای تپ جریان 40 آمپری با پهنای زمانی 318

۱. Initial transmission



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رفتار زمانی مشاهده شده برای تپ سویچ Q و موقعیت آن نسبت به تپ جریان آرایه‌های LED به ازای انرژی دمش ۰٫۸ ژول (چپ) تک تپ و ۱٫۲ ژول (راست) دو تپ لیزر، به ترتیب معادل با ۲۳ و ۳۲ آمپر جریان عبوری از دیودهای نور گسیل. در تصاویر بالایی موقعیت تپ‌های لیزر نسبت به تپ مربعی جریان دیودهای نور گسیل (رنگ سبز) مشاهده می‌شود.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) رفتار زمانی نوسانات آزاد لیزر به ازای ۱٫۲ ژول انرژی الکتریکی دمش. تصویر سمت چپ موقعیت میخه‌های لیزر (آبی) را نسبت به تپ جریان دمش (سبز) نشان می‌دهد. اولین میخه لیزر ۶۷ میکروثانیه پس از آغاز لحظه دمش پدید آمده است. در تصویر سمت راست، اولین میخه لیزر با تفکیک زمانی بیشتر با پهنای زمانی ۸۰۰ نانوثانیه دیده می‌شود.

مقایسه‌ای میان میخه‌های لیزر در رژیم نوسانات آزاد با تک تپ سویچ Q نشان می‌دهد که پهنای زمانی تپ لیزر از حدود ۱ الی ۲ میکروثانیه به ۰٫۲ میکروثانیه کاهش یافته و دامنه تپ نیز ۱۰ برابر افزایش نشان می‌دهد، شکل ۳ و ۴ بدین ترتیب با

آشکارساز قرار دارد. انرژی تپ‌های لیزر به روش ارائه شده در مرجع ۹، با اندازه‌گیری پاسخ دهی آشکارساز و لحاظ نمودن تراگسیل صافی‌های نوری و انتگرال‌گیری زمانی نمایه تجربی تپ لیزر، شکل ۳، انجام شده است.

$$\frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{L_r}{L_g} \right) c \sigma \phi \left(N_v - \frac{g_v}{g_1} N_1 \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{a_r}{L_r} \right)^2 \frac{N_v}{t_f} - \phi \left(\frac{1}{\tau_c} + \left(\frac{L_{sa}}{L_g} \right) c \left(N_{es} \sigma_{es} + N_{gs} \sigma_{gs} \right) \right),$$

$$\frac{dN_v}{dt} = -c \sigma \phi \left(N_v - \frac{g_v}{g_1} N_1 \right) - \frac{N_v}{t_f} + W(t), \quad [1]$$

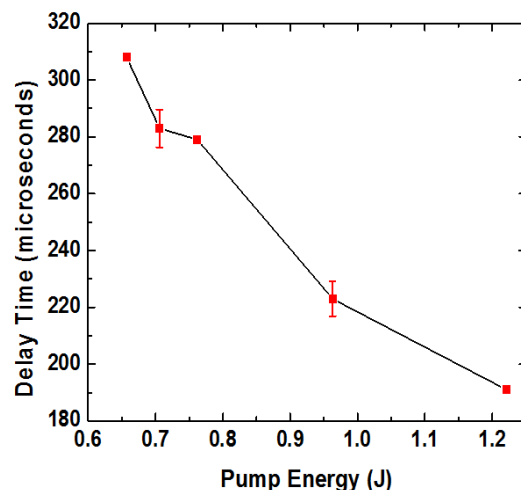
$$\frac{dN_1}{dt} = c \sigma \phi \left(N_v - \frac{g_v}{g_1} N_1 \right) - \frac{N_1}{\tau_1},$$

$$\frac{dN_{gs}}{dt} = \frac{N_{es} - N_{gs}}{\tau_s} - c \sigma_{gs} \phi N_{gs},$$

$$N_{es} = N_{os} - N_{gs}$$

در رابطه (۱)، c سرعت نور در محیط YAG، $\sigma = 3/3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ مقطع گسیل القایی محیط فعال، $\sigma_{gs} = 3/2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ و $\sigma_{es} = 4/5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ به ترتیب سطح مقطع جذب برای تراز پایه و تحریکی PQS، $t_f = 240 \text{ } \mu\text{s}$ طول عمر فلورسانس تراز بالای محیط فعال، $\tau_s = 3/4 \text{ } \mu\text{s}$ طول عمر تراز تحریکی برای PQS، τ_c طول عمر فوتون درون تشدیدگر، L_g طول هندسی تشدیدگر و L_{sa} ضخامت PQS است [۱۰ و ۱۱]. برای نرخ دمش $W(t)$ ، رفتاری متناظر با تپ جریان دیودهای نور گسیل با دامنه W_0 در بازه زمانی $315 \text{ } \mu\text{s}$ در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که به ازای $T_0 \approx 0.96$ و نرخ دمش $3/9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ در لحظه ۲۸۰ میکروثانیه پس از آغاز عمل دمش، نوسانگر لیزر قادر به تولید تک تپ سوئیچ Q در حد 230 ns است که عملاً با پهنای زمانی تجربی مشاهده شده برای تپ لیزر، $t_{QS} \approx 240 \text{ ns}$ سازگاری دارد.

نتایج محاسبات برای بستگی پهنای تپ سوئیچ Q به بازتابندگی آینه خروجی، بیشینه نرخ دمش و تراکسیل اولیه سوئیچ Q انفعالی در شکل ۶ نشان داده شده است. نمودارها نشان می‌دهند که برای کاهش پهنای زمانی تپ لیزر تا 30 ns لازم است تراکسیل اولیه سوئیچ Q انفعالی تا $T_0 \approx 0.85$ کاهش یافته و نرخ دمش تا ۲ برابر افزایش یابد. برای این منظور و با توجه به محدودیت‌های هندسی برای نصب تعداد بیشتری دیود



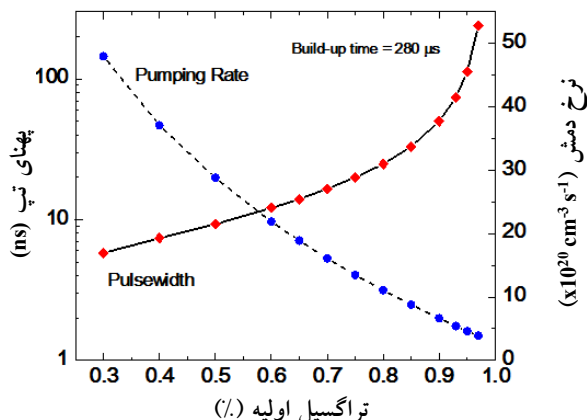
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) چگونگی تأخیر زمانی لازم برای پدید آمدن اولین تپ سوئیچ Q بر حسب انرژی دمش.

توجه به تعداد میخه‌ها و رفتار زمانی شدت خروجی لیزر در رژیم نوسان آزاد، شکل ۴، توان قله تپ لیزر دست کم ۱۰ برابر افزایش یافته است.

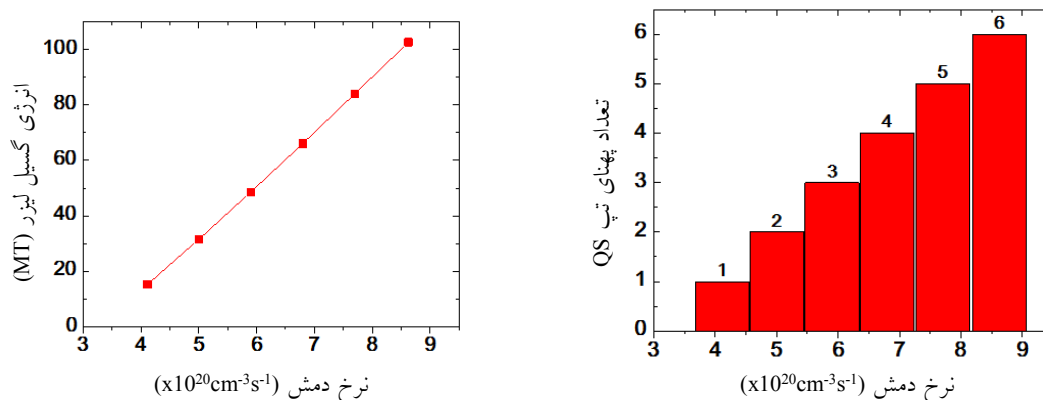
با افزایش انرژی دمش، بهره نوری محیط فعال افزایش می‌یابد و برای رسیدن شدت میدان نوری درون تشدیدگر به شدت اشباع سوئیچ نوری $I_{sa} \approx 68 \text{ (mJ/cm}^2)$ [۱۰] و پدید آمدن تپ سوئیچ Q، به تعداد عبور کمتری از میان محیط بهره لیزر نیاز است. نمودار شکل ۵، مقادیر تجربی مشاهده شده برای تأخیر زمانی لازم جهت پدید آمدن اولین تپ سوئیچ Q نسبت به انرژی دمش را نشان می‌دهد.

۴. بررسی‌های عددی

بررسی رفتار شار فوتون و بهره نوری به کمک حل عددی معادلات نرخ مطابق با رابطه (۱) امکان پذیر است [۱۲-۱۴]. برای این منظور انبوهی ترازهای لیزر (N_1, N_v) ، به همراه چگالی فوتون ϕ و مدل ۲ تراز انبوهی ترازهای پایه و تحریکی (N_{gs}, N_{es}) برای سوئیچ نوری انفعالی Cr^{4+} در محیط YAG برای سوئیچ نوری انفعالی [۱۳ و ۱۴]، به ازای تلفات اولیه معادل با تشدیدگر واقعی لیزر در بازه زمانی $315 \text{ } \mu\text{s}$ میکروثانیه مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بستگی پهنای تپ سوئیچ Q به تراگیسیل اولیه سویچ نوری انفعالی و نرخ دمش. در تمام حالت‌ها بازتابندگی آینه جلو ۹۳٪ و زمان لازم برای شکل‌گیری تپ از لحظه دمش ۲۸۰ میکروثانیه است.



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بستگی تعداد تپ‌های سوئیچ Q و انرژی کل باریکه لیزر به نرخ دمش. در تمام حالت‌ها $T_0 \approx 0.96$ و $R_{oc} = 0.93$ است.

می‌یابند که این امر برای تنظیم زمانی تپ لیزر با هر فرایند خارجی مشکل مهمی محسوب می‌شود. در شکل ۷، تعداد تپ‌ها و انرژی کل لیزر برای $T_0 \approx 0.96$ و $R_{oc} = 0.93$ بر حسب نرخ دمش محاسبه و ترسیم شده است.

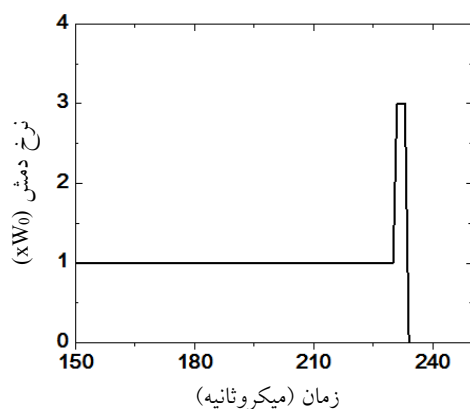
محاسبات عددی نشان می‌دهند که کنترل مناسب نرخ دمش به کمک پایش صحیح جریان دیودهای نورگسیل می‌تواند با حفظ تک تپ لیزر، افزایش انرژی تپ را به همراه داشته باشد که به روش مرسوم دمش محیط فعال با لامپ درخش انجام این امر مقدور نیست. برای این منظور نمایه زمانی نرخ دمش را به صورت ترکیبی از دو تپ سر تخت انتخاب می‌کنیم که بخش ابتدایی آن از لحظه $t_0 = 0$ تا $t_1 = 230 \mu s$ با نرخ

نور گسیل با آرایش ارائه شده در شکل ۱، لازم است طراحی نوری ویژه‌ای برای تصویر کردن و هدایت تابش تعداد بیشتری دیود نور گسیل بر روی محیط فعال به کار گرفته شود.

مشاهدات تجربی و محاسبه نشان می‌دهد که افزایش نرخ دمش و افزایش فزاینده انرژی انباشته شده در محیط فعال، به دلیل بهره بالای نوری و بازیافت شدت میدان نوری کاهش یافته درون تشدیدگر پس از بروز هر تپ سوئیچ Q و عبور مجدد شدت از I_{sa} می‌تواند منجر به بروز بیش از یک تپ لیزر شود. در این حال رفتار زمانی و انرژی تپ‌ها عملاً با یکدیگر برابر است اما مکان بروز تپ‌ها نسبت به آغاز لحظه دمش تا حد قابل ملاحظه‌ای در حد ۱۰ میکروثانیه و بیشتر تغییر

جدول ۱. برخی نتایج به دست آمده به روش کنترل نمایه نرخ دمش برای تک تپ سویچ Q.

$R_{oc} = 0.93, T_o = 0.96, t_{spike} = 3 \mu s, E_o = 15/5 \mu J$			
N	$t_{peak} (\mu s)$	$t_{pw} (ns)$	E_L / E_o
۲	۲۳۲.۴	۱۹۵	۱.۰۸
۳	۲۳۲	۱۷۹	۱.۱۴
۴	۲۳۱.۸	۱۶۸	۱.۱۹
۶	۲۳۱.۵	۱۵۳	۱.۲۶
۸	۲۳۱.۳	۱۴۳	۱.۳۲
۱۰	۲۳۱.۲	۱۳۵	۱.۳۸



شکل ۸. نمونه‌ای از نمایه زمانی نرخ دمش برای کنترل رفتار زمانی و افزایش انرژی تک تپ سویچ Q.

تجربی در آینده ارایه خواهد شد. نرخ دمش از آغاز تا لحظه $t_1 = 230 \mu s$ ثابت و برابر با $3W_o$ است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

کاربرد مؤثر لیزر تپی مستلزم رفتار زمانی تکرارپذیر و منظم تپ است و علیرغم ویژگی‌های 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 کلاسیک سویچ Q انفعالی، تک تپ تکرارپذیر لیزر Ce:Nd:YAG از مرتبه ۲۰۰ نانوثانیه با دمش آرایه‌های دیود نور گسیل آبی، تولید و ویژگی‌های آن مورد مطالعه قرار گرفت. محاسبات عددی نشان می‌دهند که پهنای تپ لیزر سویچ Q در حله نخست به تراگسیل اولیه سویچ انفعالی

دمش $W_o = 4/2 (\times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1})$ زیر آستانه نوسان لیزر است و قسمت انتهایی با نرخ $N \times W_o$ با پهنای $t_{spike} \sim 1 \mu s$ سبب بروز یک تپ کنترل‌پذیر لیزر می‌شود. در شکل ۸ نمونه‌ای از نمایه نرخ دمش برای $N = 3$ نشان داده شده است.

جدول ۱ نمونه‌ای از نتایج به دست آمده به روش کنترل نمایه نرخ دمش را در مقایسه با دمش با نرخ یکنواخت نشان می‌دهد که منجر به افزایش انرژی تپ لیزر E_L ، کاهش پهنای زمانی و تا حد زیادی تثبیت لحظه ظهور تپ سویچ Q در حد ۱ میکروثانیه شده است. $E_o = 15/5 \mu J$ انرژی تپ برای تک تپ لیزر با دمش یکنواخت بدون میخه انتهایی شکل ۸ در $t_1 = 230 \mu s$ به ازای $W_o = 4/36 (\times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1})$ ، t_{peak} مکان قله تپ لیزر و t_{pw} پهنای نیم‌پیشینه تپ لیزر است. جزئیات بیشتر روش مورد اشاره به همراه محاسبات مفصل و داده‌های

مناسب برای هدایت تابش‌های منابع دمش بر روی محیط فعال می‌باشد. همچنین محاسبات نشان می‌دهند که کنترل مناسب زمانی نرخ دمش به روش شکل‌دهی جریان دیودهای نور گسیل می‌تواند ضمن حفظ تک تپ سویچ Q منجر به کاهش پهنای زمانی و افزایش انرژی و توان تپ لیزر شود.

نوری وابسته است و با کاهش T_0 تا ۲۰ درصد می‌توان به تپ‌هایی به کوتاهی ۶ نانوثانیه دست یافت، با این حال 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 یا افزایش تعداد آرایه دیودهای نور گسیل به همراه ساختار نوری

مراجع

- بیست و چهارمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شهرکرد (۱۳۹۶).
9. M Tarkashvand, A H Farahbod, and S A Hashemizadeh, *Laser Physics* **28** (2018) 055801.
 10. Y Kalisky, A Ben-Amar Baranga, Y Shimony, and M R Kokta, *Optical Materials* **8** (1997) 129.
 11. W Koechner, "Solid-State Laser Engineering", 6 th Edition, Chap.8, Springer (2006).
 ۱۲. اح فرهبد، ف تحصیلداران‌فرد، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۱، ۲ (۱۳۹۰) ۱۱۷.
 12. A H Farahbod and F Tahsildaran Fard, *Iranian Journal of Physics Research* **11**, 2 (2011) 117.
 13. X Zhang, S Zhao, Q Wang, Q Zhang, L Sun, and S Zhang, *IEEE Journal of Quantum Electron.* **33**, 12 (1997) 2286.
 14. J Dong, *Optics Communications* **226** (2003) 337.

1. J Bhardwaj, G Guth, J M Cesaratto, O B Shchekin, W A Soer, W Götz, R Bonné, Z F Song, and J Breejen, *Devices and Applications for Solid State Lighting XXI* (2017) 1012417.
2. A Barbet, F Balembois, A Paul, J P Blanchot, A L Viotti, J Sabater, F Druon, and P Georges, *Opt. Lett.* **39** (2014) 6731.
3. B Villars, E S Hill, and C G Durfee, *Opt. Lett.* **40** (2015) 3049.
4. K Y Huang, C K Su, M W Lin, Y C Chiu, and Y C Huang, *Opt. Express* **24** (2016) 12043.
5. J Chen and J N Chen, *Optical Review* **13**, 6 (2006) 427.
6. C Y Cho, C C Pu, K W Su, and Y F Chen, *Opt. Lett.* **42**, 12 (2017) 2394.
7. P Pichon, A Barbet, D Blengino, P Legavre, T Gallinelli, F Druon, J P Blanchot, F Balembois, S Forget, S Chénais, and P Georges, *Optics and Laser Technology* **96** (2017) 7.
۸. م ترکاشوند، اح فرهبد، س ع هاشمی‌زاده، "لیزر $YAG:Nd:Ce$ با دمش دیود نورگسیل و سویچ Q انفعالی"،