

Research Paper

# Producing High Average Power Pulses From the Yb:YAG Thin-disk Active Medium with Acousto-optic Modulator<sup>1</sup>

Kaveh Pasandideh<sup>\*2</sup>, Ahmad Moshaii<sup>3</sup>, Saeid Radmard<sup>4</sup> and Tahereh Namdari<sup>5</sup>

Received: 2024.03.16

Revised: 2024.06.08

Accepted: 2024.09.18

## Abstract

In recent years, thin-disk active media geometry has facilitated the development of pulsed and continuous laser sources with extremely high output powers. In this study, the technique of Q-switching utilizing an acousto-optic modulator and a Yb: YAG thin-disk active medium was employed to produce high average power and high repetition rate pulses at a wavelength of 1030 nm. The characteristics of output pulses, including time duration, single pulse energy, and average power were measured and analyzed at different pump levels and repetition rates. Depending on the pump level, the fabricated laser operated stably in the repetition range from 0.5 to 9 kHz. The time duration of the output pulses using this approach was approximately one microsecond. Moreover, the output pulse with the maximum energy above 50 mJ and also the maximum average output power of 340 watts was obtained from this laser. Also, the findings indicated that the repetition rate does not significantly affect the output pulse energy at higher pump powers.

**Keywords:** *Thin Disk, Acousto-optic Modulator, Average Power, Repetition Rate.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46497.1399>

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Engineering Physics, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran. (Corresponding Author) Email: k.pasandideh@kut.ac.ir

<sup>3</sup>Associate Professor, Department of Physics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: moshaii@modares.ac.ir

<sup>4</sup>PhD Graduated, Department of Physics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: s\_radmard@modares.ac.ir

<sup>5</sup>PhD Graduated, Department of Engineering Physics, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran. Email: tahereh.namdari@yahoo.com



## تولید پالس‌های پرتوان از محیط فعال دیسک نازک Yb: YAG با مدولاتور آکوستو-اپتیک<sup>۱</sup>

کاوه پسندیده<sup>۲\*</sup>، احمد مشاعی<sup>۳</sup>، سعید رادمرد<sup>۴</sup> و طاهره نامداری<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۹، زمستان ۱۴۰۳

صص ۳۰ - ۴۴

### چکیده:

در سال‌های کنونی محیط‌های فعال دیسک نازک امکان ساخت منابع نوری لیزری پالسی و پیوسته با توان متوسط بالا را فراهم کرده است. در این پژوهش از روش کلیدزنی-کیو با مدولاتور آکوستو-اپتیک و محیط فعال دیسک نازک Yb: YAG برای تولید پالس‌های پرتکرار با توان متوسط بالا در طول موج ۱۰۳۰ نانومتر استفاده شد. مشخصات پالس‌های خروجی شامل پهنای زمانی، انرژی تک پالس و توان متوسط در توان دمش‌ها و همچنین نرخ تکرارهای مختلف اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت. لیزر ساخته شده در محدوده نرخ تکرار ۰/۵ تا ۹ کیلوهرتز به صورت پایدار کار می‌کرد. پهنای زمانی پالس‌های خروجی با این روش حدود ۱ میکروثانیه بودند. پالس خروجی با بیشینه انرژی بالای ۵۰ میلی ژول و همچنین بیشینه توان متوسط خروجی ۳۴۰ وات از این لیزر به دست آمدند. همچنین نتایج نشان دادند که در توان دمش‌های بالا، انرژی پالس‌های خروجی حساسیت کمتری به نرخ تکرار دارد.

**واژگان کلیدی:** دیسک نازک، مدولاتور آکوستو-اپتیک، توان متوسط، نرخ تکرار.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46497.1399>

<sup>۲</sup> استادیار، گروه فیزیک مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. (نویسنده مسئول) Email: k.pasandideh@kut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. Email: moshaii@modares.ac.ir

<sup>۴</sup> دانش‌آموخته دکترا، گروه فیزیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. Email: s\_radmard@modares.ac.ir

<sup>۵</sup> دانش‌آموخته دکترا، گروه فیزیک مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. Email: tahereh.namdari@yahoo.com



## ۱. مقدمه

لیزرهای دیسک نازک به دلیل هندسه ویژه خود گزینه‌ای برجسته در تولید منابع نوری توان بالا در ناحیه مادون قرمز نزدیک هستند [۱]. محیط فعال این لیزرها به صورت یک دیسک دایره‌ای با ضخامت حدود ۲۰۰ میکرون و قطر حدودی ۱ تا ۲ سانتی‌متر است. نسبت پایین ضخامت به قطر، بازدهی دفع گرمای تولید شده در محیط فعال در توان‌های دمش بالا را بهبود می‌بخشد و در نتیجه امکان ساخت لیزر با توان متوسط خروجی بسیار بالا را فراهم می‌کند [۲،۳]. امروزه توان متوسط خروجی تا ۱۰ کیلووات از این نوع لیزرها گزارش شده است [۴]. از طرفی این نوع محیط‌های فعال برای تولید پالس‌های بسیار کوتاه و پراورزی برتری قابل توجهی نسبت به محیط‌های توده<sup>۱</sup> یا حجمی دارند [۱،۵]. دلیل این برتری نیز در درجه اول ضخامت پایین محیط فعال و در نتیجه کاهش قابل توجه اثرات غیرخطی است. همچنین با طراحی مناسب کاواک می‌توان قطر لکه لیزر روی دیسک را افزایش و از تخریب قطعات اپتیکی ناشی از شدت بالای پالس جلوگیری کرد [۶].

بسته به پهنای زمانی مورد نیاز، روش‌های معمول مانند کلیدزنی - کیو<sup>۲</sup>، ذخیره‌سازی در کاواک<sup>۳</sup> و قفل کردن مدها جهت تولید پالس از این نوع محیط‌های فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵،۷]. به دلیل ضخامت کم محیط فعال و در نتیجه مقدار پایین ضریب بهره، با روش کلیدزنی - کیو پالس‌هایی با پهنای زمانی بالای ۱۰۰ نانوثانیه تولید می‌شوند [۵]. برای تولید پالس با پهنای زمانی زیر ۱۰۰ نانوثانیه از روش ذخیره‌سازی در کاواک استفاده می‌شود [۸]. در این روش پالس لیزر تا کسب انرژی لازم در داخل کاواک نگه داشته می‌شود. از طرفی به کارگیری روش قفل کردن مدها به همراه محیط‌های فعال جدید با پهنای بسامدی بالای منحنی بهره، مانند  $Yb:GALCO$ ، منجر به تولید پالس‌هایی با پهنای زمانی زیر ۱۰۰ فمتوثانیه شده است [۹]. این ویژگی‌های منحصر به فرد موجب شده است که لیزرهای دیسک نازک کاربردهای گسترده و جدیدی در حوزه علوم و فناوری پیدا کنند [۱۰،۱۱].

از میان محیط‌های فعال مورد استفاده، بلور  $Yb:YAG$  در سال‌های کنونی بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. دمش این بلور توسط لیزرهای دیودی با طول موج ۹۴۱ تا ۹۷۰ نانومتر انجام می‌شود [۹]. فاصله طول موج دمش با گذار لیزری (۱۰۳۰ نانومتر) بسیار کم و بنابراین بازدهی کوانتومی بیشتر از ۹۰٪ است. این بلور رسانایی حرارتی و استحکام مکانیکی بالا دارد و دارای نقص

<sup>1</sup> Bulk

<sup>2</sup> Q-switching

<sup>3</sup> Cavity dumping



کوانتومی پایین است. همچنین ظرفیت پذیرش غلظت بالای یون‌های Yb تا بالای ۱۰٪ را دارد [۱۳، ۱۲، ۱]. افزون بر این، طول عمر فلورسانس تراز بالایی لیزر کمابیش زیاد (حدود یک میلی ثانیه) است که آن را برای کلیدزنی-کیو و تولید پالس پراثری بسیار مناسب می‌کند [۱۴].

به صورت رایج، از ادوات الکترو-اپتیک برای کلیدزنی-کیو در کاواک استفاده می‌شود ولی به دلیل قیمت بالا و همچنین محدودیت بسامد مدولاسیون گزینه ایده‌آلی برای تولید پالس با توان متوسط بالا در این نوع محیط فعال نیستند. از طرفی مدولاتورهای آکوستو-اپتیک قیمت پایین‌تری دارند و در عین حال محدودیت بسامد کلیدزنی اتلاف در کاواک را هم ندارند [۱۵، ۵]. با این مدولاتورها، بسامد مدولاسیون تا یک مگاهرتز و کنتراست مدولاسیون<sup>۱</sup> تا ۵۰ دسی‌بل قابل دسترس هستند [۱۶]. توان لیزرهای پالسی تولید شده با این ابزار کلید زنی تا چند کیلووات و پهنای پالس از چند نانوثانیه تا ناحیه میکروثانیه قابل تولید است [۱۶]. زمان پاسخ بالاتر این نوع از مدولاتورها در مقایسه با نوع الکترو-اپتیک منجر به تولید پالس‌های بلندتر در روش کلید زنی اتلاف خواهد شد.

امروزه دانشمندان و پژوهشگران این حوزه بیشتر پژوهش‌های خود را روی تولید پالس‌های بسیار کوتاه و پراثری با روش قفل کردن مدها متمرکز کرده‌اند [۹]. بنابراین گزارشات محدودی در زمینه تولید پالس‌های بلندتر از این محیط فعال منتشر شده است. پالس‌های میکروثانیه با نرخ تکرار<sup>۲</sup> بالا در ناحیه مادون قرمز نزدیک در بسیاری از حوزه‌های پژوهشی چون اسپکتروسکوپی و پژوهش‌های جوی کاربرد دارند [۱۷، ۱۸]. مدولاتورهای آکوستو-اپتیک در کنار محیط فعال دیسک نازک گزینه مناسبی برای تولید این نوع پالس با نرخ تکرار و توان متوسط بالا هستند. در منبع [۱۹] توان میانگین خروجی و مشخصات پالس‌های تولید شده از لیزر دیسک نازک Yb: YAG با روش کلیدزنی-کیو در کاواکی با آرایشی به شکل I (فابری پرو) بررسی شده است. این کار برای توان‌های متوسط خروجی زیر ۳۵ وات و انرژی پالس کمتر از ۶ میلی ژول انجام شده است. در منبع [۷] نیز کاواکی به شکل V برای لیزر طراحی شده است و اثر نرخ تکرار و توان دمش روی انرژی و پهنای زمانی پالس‌ها مطالعه شده است. در این کار نیز بیشینه توان متوسط خروجی ۶۵ وات و بیشینه انرژی پالس ۱۸ میلی ژول گزارش شده است. بنابراین عملکرد این لیزر در تولید پالس بلند با روش کلیدزنی-کیو در توان‌های خروجی بالا بررسی نشده است.

هدف اصلی این کار پرکردن این خلاء و بررسی امکان ساخت یک لیزر پالسی با توان متوسط بالا از محیط فعال Yb: YAG با روش کلیدزنی-کیو توسط مدولاتور آکوستو-اپتیک است. برای

<sup>1</sup> Modulation contrast

<sup>2</sup> Repetition rate



این منظور، اثرات مربوط به گرما در توان دمش بالا در محاسبات پایداری کاواک در نظر گرفته خواهند شد. ناحیه کاری لیزر برای جلوگیری از تخریب المانها توسط پالس های پر شدت تنظیم می شود. همچنین مشخصات پالس های خروجی شامل پهنای زمانی، انرژی و توان متوسط ثبت و با مدل تئوری بر اساس معادلات نرخ تحلیل می شوند.

## ۲. چیدمان آزمایش

به دلیل توان دمش بالا و در نتیجه حرارت زیاد تولید شده در دیسک، باید همه قطعات و سامانه ها با توجه به شرایط عملیاتی لیزر طراحی و ساخته شوند. بنابراین این قطعات در مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران طراحی و ساخته شدند.

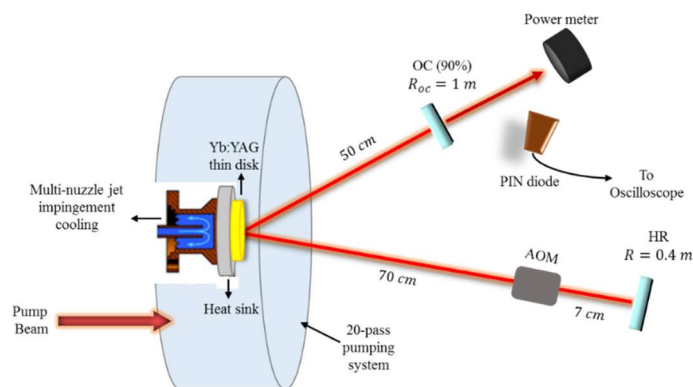
در شکل (۱) چیدمان کلی آزمایش به همراه قطعات و اپتیک مورد استفاده نشان داده شده است. در ادامه نکات و جزئیات کلیدی آزمایش توضیح داده می شوند.

دیسک نازک  $Yb:YAG$  با تغلیظ ۹٪، قطر ۲ سانتی متر و ضخامت  $220 \mu m$  به عنوان محیط فعال روی یک گرماگیر<sup>۱</sup> مسی لحیم شده است. گرماگیر به صورت مستقیم با استفاده از یک سامانه خنک کننده آبی سرد می شود. هر دو طرف دیسک با لایه های دی الکتریک گوناگون پوشش داده شده است. پوشش جلویی اتلاف بسیار کمی در طول موج های دمش،  $940 nm$  و لیزر،  $1030 nm$  دارد. قسمت پشتی دارای یک پوشش با بازتاب بالا در طول موج لیزر و دمش است. برای دمش این محیط فعال از یک پشته لیزر دیود<sup>۲</sup> با طول موج مرکزی  $940 nm$  استفاده شد. به دلیل واگرایی زیاد و پروفایل عرضی غیریکنواخت باریکه لیزر دیود، در ابتدا با استفاده از یک سامانه اپتیکی متشکل از ۳ عدسی و یک همگن ساز، باریکه موازی سازی و دارای پروفایل عرضی یکنواخت می شود. سپس این باریکه با استفاده از یک سامانه اپتیکی دیگر متشکل از عدسی های استوانه ای، کروی و یک آینه سهموی  $20$  بار روی سطح دیسک تصویر می شود. به دلیل جذب پایین بلور در این طول موج، استفاده از پیکربندی های دمش چند-عبوری برای لیزرهای دیسک نازک ضروری است. در سامانه دمش مورد استفاده بازدهی جذب دیسک در طول موج  $940$  نانومتر بالای ۹۵٪ بود.

<sup>1</sup> Heat sink

<sup>2</sup> Laser Diode Stack





**شکل ۱** چیدمان کلی آزمایش لیزر پالسی دیسک نازک Yb: YAG با روش کلید زنی توسط مدولاتور آکوستو-اپتیک (AOM). در شکل OC به معنی آینه کوپلر خروجی و آینه بازتاب بالای عقب با HR مشخص شده است.

در مرحله بعد یک کاواک با پیکربندی به شکل V برای این لیزر طراحی شد که در گستره توان دمش مورد استفاده پایدار باشد. در محاسبات مربوط به پایداری کاواک، تغییرات شعاع دیسک در توان دمش های مختلف و حضور سلول آکوستو-اپتیک در نظر گرفته شدند. بیان این نکته ضروری است که با افزایش توان دمش از ۴۰۰ وات به ۱۱۰۰ وات، شعاع دیسک از ۰/۴ متر به ۲/۴ متر افزایش پیدا می کرد. بر اساس محاسبات نظری، تغییرات ضریب پایداری کاواک،  $g_1 g_2$ ، با این تغییر شعاع انحنای دیسک در اثر گرما در محدوده ۰/۴۷-۰/۵۴ بود. در مقایسه با کاواک به شکل I، باریکه لیزر در این چیدمان در هر رفت و برگشت ۴ بار از عرض محیط فعال عبور می کند و بنابراین ضریب بهره افزایش می یابد. مطابق شکل (۱)، شعاع انحنای آینه عقب کاواک ۰/۴ متر و این عدد برای آینه جلو ۱ متر است. همچنین ضریب عبور آینه جلو ۹۰٪ است. در این آزمایش شعاع باریکه دمش روی سطح دیسک ۵/۵ میلی متر بود.

کلید زنی - کیو در این لیزر با استفاده از یک مدولاتور آکوستو-اپتیک و یک مولد RF<sup>۱</sup> انجام شد. مدولاتور دارای سلول غیرخطی BBO<sup>۲</sup> با طول ۵ سانتی متر و قطر پنجره ورودی ۹ میلی متر بود. مدولاتور در فاصله ۷ سانتی متری از آینه عقب قرار داده شده بود. در ابتدا کاواک در حضور مدولاتور تنظیم و راه اندازی می شد. با روشن شدن مولد RF باریکه از محور منحرف شده و کاواک از تنظیم خارج می شد. در این حالت اتلاف بیشینه و خروجی لیزر برای همه مقادیر توان دمش صفر

<sup>۱</sup> Radio-Frequency

<sup>۲</sup> Beta Barium Borate



بود. وارونگی جمعیت در این مرحله رشد می‌کند. سپس با اعمال یک پالس ولتاژ مربعی با قله ۵ ولت به مولد RF، اتلاف کاواک کمینه و وارونگی جمعیت ایجاد شده از راه یک پالس نوری از محیط فعال استخراج می‌شد. نرخ تکرار و پهنای زمانی پنجره شفافیت کاواک با استفاده از بسامد و پهنای زمانی این پالس‌های ولتاژ مربعی کنترل می‌شد. در این کار از یک سامانه <sup>1</sup>TTL برای تولید این پالس‌ها استفاده شد. برتری مدولاتورهای اکوستو-اپتیک در مقایسه با نوع الکترو-اپتیک توانایی مدولاسیون اتلاف با بسامد بالا است. باید یادآور شد که برای جلوگیری از تخریب و آسیب ناشی از نوسانات واهلشی اولیه به دیسک و سایر قطعات اپتیکی، اتلاف در شروع به کار لیزر با یک برد الکترونیکی به صورت کنترل شده اعمال می‌شد. نوسانات واهلشی در شروع به کار لیزر سبب تولید پالس‌هایی با شدت بالا می‌شوند. بنابراین اتلاف کاواک در شروع به کار لیزر به صورت خطی پایین آورده می‌شود تا این پالس‌های اولیه انرژی بالا نداشته باشند.

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، توان میانگین لیزر نیز با استفاده از یک توان‌سنج حرارتی توان بالا اندازه‌گیری شد. دینامیک زمانی پالس‌های خروجی با استفاده از یک فوتودیود سریع و یک اسیلوسکوپ ثبت می‌شدند. فوتودیود نور پراکنده شده از صفحه توان‌سنج را اندازه‌گیری می‌کرد. لازم به بیان است که به دلیل ضریب بهره پایین محیط فعال، در نرخ تکرارهای بالا این لیزر وارد ناحیه آشوبناک شده و پالس‌هایی با مشخصات متفاوت تولید می‌کند [۲۰]. محدوده بررسی ما در این کار شامل این ناحیه نمی‌شود زیرا امکان آسیب و تخریب دیسک وجود دارد.

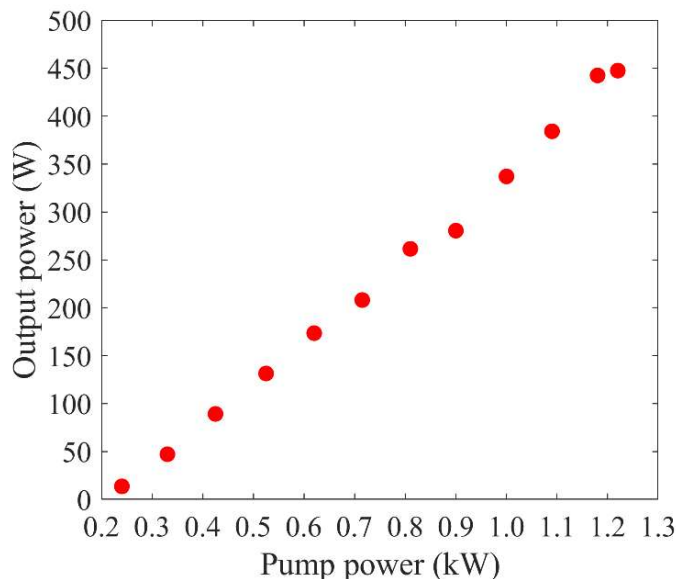
### ۳. نتایج

در ابتدا لیزر در حضور مدولاتور به صورت پیوسته راه‌اندازی شد و توان خروجی در دمش‌های مختلف اندازه‌گیری شد. در شکل (۲) این داده‌ها را نشان داده‌ایم. همانطور که از شکل مشخص است توان خروجی لیزر کمابیش به صورت خطی رشد می‌کند و لیزر هنوز از حالت اشباع فاصله دارد. بیان این نکته مهم است که اتلاف در حضور مدولاتور کمی افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که در توان‌های دمش پایین میزان اتلاف ناشی از حضور سلول یک درصد است ولی در توان‌های بالاتر تا ۱/۵ درصد رشد می‌کرد.

در مرحله بعد لیزر در حالت پالسی راه‌اندازی شد. کلید زنی - کیو با راه‌اندازی مولد RF و اعمال پالس‌های TTL مربعی با پهنای زمانی ۸ میکروثانیه به آن انجام شد. با اعمال این پالس‌ها دامنه

<sup>1</sup> Transistor-Transistor Logic

سیگنال RF کمینه و در نتیجه اتلاف کاواک در این پنجره زمانی نیز کمینه خواهد شد. پالس لیزر در این مرحله شکل می‌گیرد. لازم به بیان است که توان RF اعمالی در همه مقادیر دمش از شکل-گیری لیزر جلوگیری می‌کند. بنابراین تنها با اعمال سیگنال TTL پالس شکل می‌گرفت.



شکل ۲ توان خروجی لیزر دیسک نازک Yb: YAG بر حسب توان دمش در حالت پیوسته.

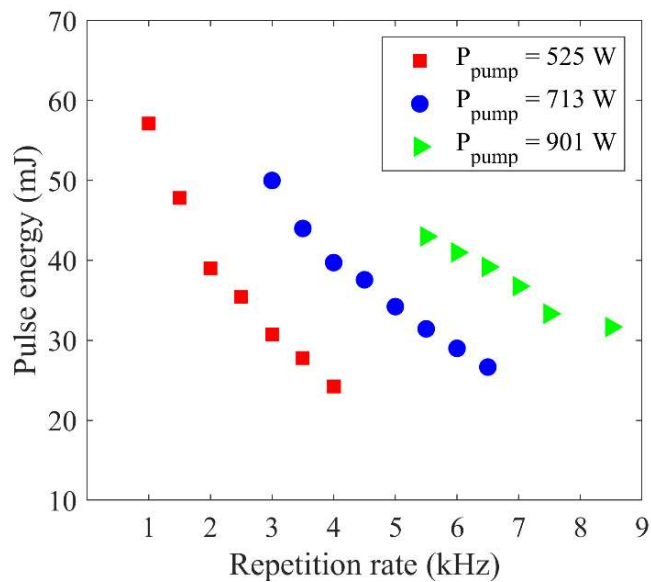
در این مرحله مشخصات پالس‌های خروجی در نرخ تکرارهای مختلف و تحت توان دمش‌های متفاوت با استفاده از فوتودیود و توان‌سنج حرارتی ثبت شدند. در شکل (۳)، انرژی پالس‌ها را بر حسب نرخ تکرار برای چند دمش متفاوت نشان داده شده است.

این داده‌ها از تقسیم متوسط توان خروجی اندازه‌گیری شده با استفاده از توان‌سنج بر نرخ تکرار مدولاتور بدست آمده‌اند. بنابراین این اعداد میانگین انرژی پالس‌ها هستند. همانطور که انتظار می‌رود، افزایش نرخ تکرار در توان دمش ثابت، منجر به کاهش انرژی پالس می‌شود. با افزایش نرخ تکرار، وارونگی جمعیت زمان کمتری برای رشد دارد و در نتیجه، در پنجره شفافیت ۸ میکروثانیه‌ای پالس انرژی کمتری بدست می‌آورد. این الگو برای همه مقادیر دمش مورد استفاده مشاهده می‌شود. قابل توجه اینکه در توان‌های دمش بالاتر انرژی پالس با افزایش نرخ تکرار تغییرات کندتری دارد. بیشینه مقدار انرژی پالس خروجی ۵۷ میلی ژول است که در نرخ تکرار یک کیلوهرتز و توان دمش ۵۲۵ وات اندازه‌گیری شده است. لازم به بیان است که به دلیل احتمال تخریب دیسک در توان‌های





دمش بالاتر، اندازه گیری‌ها در نرخ تکرارهای پایین‌تر انجام نشد. این نتایج با داده‌های ارائه شده در منابع [۷،۱۹] هماهنگی دارند. در این منابع نیز الگوی مشابهی برای وابستگی انرژی پالس به نرخ تکرار گزارش شده است. با این حال توان‌های خروجی مورد بررسی بسیار پایین‌تر از محدوده مورد بررسی در این کار هستند.



شکل ۳ انرژی پالس‌های خروجی بر حسب نرخ تکرار در چند توان دمش متفاوت.

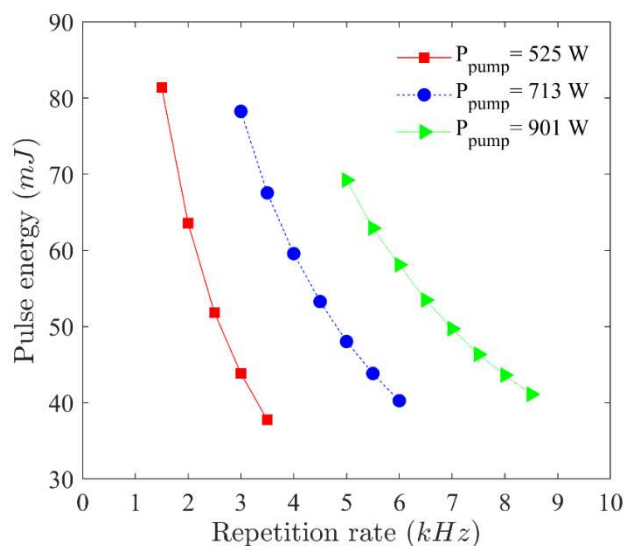
در توان دمش بالاتر، برای نمونه نمودار مربوط به توان ۹۰۱ وات در شکل (۳)، به دلیل دمای بالای دیسک و تغییر مشخصات آن داده‌ها الگوی یکنواخت بدست آمده در دمش‌های کمتر را نداشتند. لازم به بیان است که برای هر مقدار توان دمش، اندازه گیری‌ها تا زمانی که انحراف معیار دامنه پالس‌های خروجی لیزر روی اسیلوسکوپ زیر ۱۵٪ بود، انجام شدند. در نرخ تکرار بالاتر از مقادیر گزارش شده پالس‌ها ناپایدار می‌شدند. همانطور که از شکل (۳) مشخص است هر چه دیسک با توان بیشتری دمش شود لیزر در ناحیه بسامدی بالاتری به صورت پایدار کار می‌کند. این یافته‌ها با نتایج بدست آمده از الگوی نظری هماهنگی دارند. برای نشان دادن این موضوع، با استفاده از معادلات نرخ<sup>۱</sup> لیزر ارائه شده در منبع [۱۵] و مقادیر کمیت‌های فهرست شده در جدول (۱)، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های عددی در شرایط کاری مختلف انجام شد.

<sup>۱</sup> Rate equations

**جدول ۱** کمیت‌ها و مقادیر مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های انجام شده با معادلات نرخ.

مقدار	معنی	کمیت
950 $\mu s$	طول عمر تراز بالای لیزر	$\tau_f$
$7.21 \times 10^{-21} cm^2$	سطح مقطع جذب در طول موج دمش	$\sigma_{abs}^p$
$1.6 \times 10^{-21} cm^2$	سطح مقطع گسیل در طول موج دمش	$\sigma_{em}^p$
$1.25 \times 10^{-21} cm^2$	سطح مقطع جذب در طول موج لیزر	$\sigma_{abs}^L$
$2.01 \times 10^{-20} cm^2$	سطح مقطع گسیل در طول موج لیزر	$\sigma_{em}^L$
0.014	اتلاف داخلی کاواک	$Loss_{int}$
8 $\mu s$	پنجره زمانی مدولاتور	$AO\ gate$
$1.24 \times 10^{21} cm^{-3}$	چگالی تعداد یون بلور	$N_t$

برای بررسی نظری عملکرد این لیزر در حالت پالسی، اتلاف کل شامل دو بخش ثابت و وابسته به زمان بود. بخش ثابت،  $Loss_{in}$ ، اتلاف داخلی کاواک و بخش زمانی اتلاف وارد شده با استفاده از مدولاتور را شرح می‌دهد. برای حل معادلات جفت شده نرخ از روش رانگ-کوتا<sup>۱</sup> مرتبه ۴ استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای انرژی پالس تحت توان‌های دمش ۵۲۵، ۷۱۳ و ۹۰۱ وات، در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.



**شکل ۴** نتایج شبیه‌سازی وابستگی انرژی پالس به نرخ تکرار در توان‌های دمش ۵۲۵، ۷۱۳ و ۹۰۱ وات.

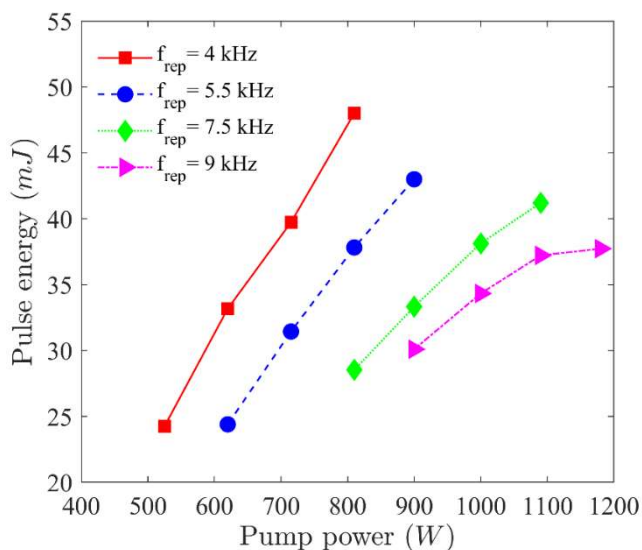
<sup>۱</sup> Runge-Kutta



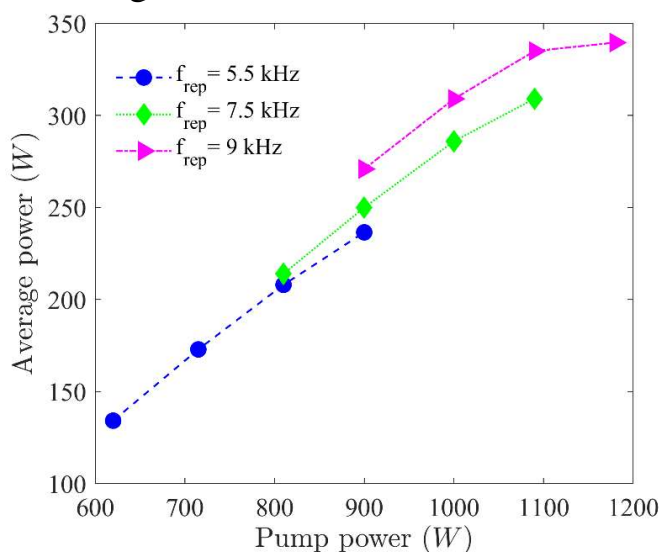
در شکل (۴) هنگامی که نرخ کلیدزنی مدولاتور در توان دمش ثابت افزایش می‌یابد، الگویی مشابه نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در شکل (۳) مشاهده می‌شود. با این حال، مقدار انرژی پالس در الگوی نظری بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. دلیل این تفاوت نیز در تقریب‌های استفاده شده در الگو بر اساس معادلات نرخ برای حالت تک مدی است. پدیده‌هایی مانند چاله سوزی فضایی<sup>۱</sup> و توزیع فضایی باریکه دمش روی دیسک در محاسبات الگو در نظر گرفته نشده‌اند.

در ادامه وابستگی انرژی پالس به توان دمش در نرخ تکرارهای مختلف اندازه‌گیری شد. در شکل (۵)، انرژی میانگین پالس خروجی بر حسب توان دمش در ۴ نرخ تکرار مختلف نشان داده شده است. برابر با پیش‌بینی‌های نظری، در نرخ تکرار ثابت، افزایش توان دمش منجر به افزایش انرژی پالس می‌شود. نکته قابل توجه در این شکل وابستگی کمتر این مشخصه به توان دمش در نرخ تکرار ۹ کیلوهرتز است. برابر با محاسبات نظری انجام شده بر اساس معادلات نرخ، در این شرایط وارونگی جمعیت نزدیک بیشینه مقدار خود نوسان می‌کند و افزایش بیشتر دمش منجر به اثر اشباع می‌شود. توان متوسط خروجی لیزر نیز الگویی مشابه شکل قبل خواهد داشت. مقدار این کمیت بر حسب توان دمش برای مقادیر نرخ تکرار ۵/۵، ۷/۵ و ۹ کیلوهرتز در شکل (۶) نشان داده شده است. از شکل مشخص است که در نرخ تکرار ۹ کیلوهرتز وقتی توان دمش از ۱۰۸۰ وات عبور می‌کند، نرخ افزایش توان لیزر کاهش می‌یابد. تحت این شرایط، با افزایش بیشتر دمش، خروجی لیزر ناپایدار شده و توان متوسط خروجی کاهش می‌یابد. بیان این نکته مهم است که در توان دمش ثابت با افزایش نرخ تکرار، با اینکه انرژی پالس کاهش می‌یابد، توان متوسط خروجی افزایش می‌یابد و در نتیجه انرژی بیشتری از محیط فعال استخراج می‌شود. افزایش توان خروجی متوسط لیزر نتیجه کاهش اثرات اتلافی گسیل خودبه‌خودی در نرخ تکرارهای بالا است. در این آزمایش بیشینه توان خروجی ۳۴۰ وات تحت توان دمش ۱۱۸۰ وات و نرخ تکرار ۹ کیلوهرتز اندازه‌گیری شد.

<sup>1</sup> Spatial hole burning



شکل ۵ انرژی میانگین پالس خروجی بر حسب توان دمش برای چند نرخ تکرار مختلف.

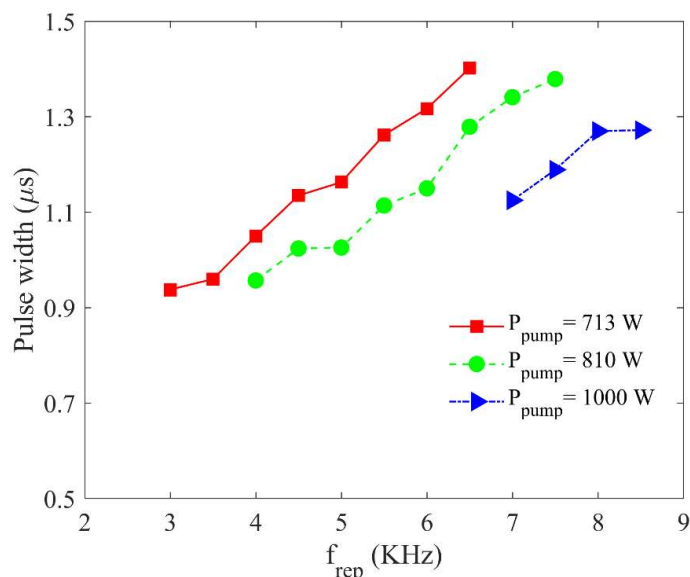


شکل ۶ توان متوسط خروجی لیزر بر حسب توان دمش برای چند نرخ تکرار مختلف.

در همه آزمایش های انجام شده پهنای زمانی پالس های خروجی نیز با استفاده از یک فوتودیود سریع اندازه گیری شدند. مقادیر ثبت شده نشان می دهند که پهنای زمانی پالس های تولید شده از این محیط فعال با روش کلیدزنی-کیو و مدولاتور آکوستو-اپتیک حدود یک میکروثانیه هستند. پهنای پالس با نرخ تکرار رابطه مستقیم دارد و نرخ تغییرات به توان دمش بستگی دارد. نرخ افزایش سریعتر پهنای

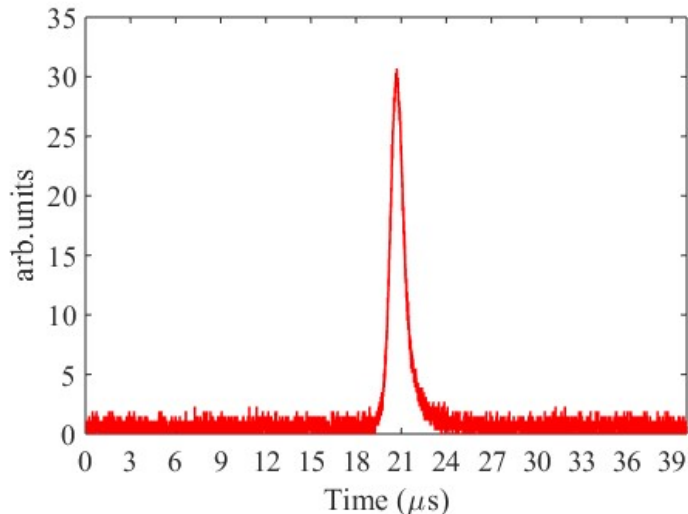


در توان دمش کمتر مشاهده می‌شود. با این حال، این تغییرات به یک گستره کوچک محدود می‌شوند. در سطوح بالاتر دمش، به دلیل افزایش وارونگی جمعیت، زمان شکل‌گیری پالس و در نتیجه پهنای زمانی آن کاهش می‌یابد. در شکل (۷)، پهنای زمانی پالس‌ها را بر حسب نرخ تکرار در توان دمش‌های ۷۱۳، ۸۱۰ و ۱۰۰۰ وات نشان داده‌ایم. مشخص است که داده‌های ارائه شده در این شکل نتایج گفته شده را تایید می‌کنند. لازم به بیان است نتایج ارائه شده در منبع [۷] الگوی مشابهی را برای تغییرات پهنای زمانی پالس با نرخ تکرار گزارش کرده‌اند.



شکل ۷ پهنای زمانی پالس‌های خروجی لیزر بر حسب نرخ تکرار در چند توان دمش متفاوت.

در شکل (۸)، گراف زمانی یکی از پالس‌های خروجی به ازای توان دمش ۶۲۰ وات و نرخ تکرار ۳ کیلوهرتز نشان داده شده است. برابر انتظار، پالس زمان خیز سریع و افت به نسبت کندتری دارد. این یک ویژگی معمول در لیزرهای پالسی با روش کلیدزنی-کیو است.



شکل ۸ گراف زمانی پالس‌های خروجی لیزر در نرخ تکرار ۳ کیلوهرتز و توان دمش ۶۲۰ وات.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این کار، امکان تولید پالس‌های توان بالا از محیط فعال دیسک نازک  $Yb: YAG$  با روش کلید زنی-کیو با استفاده از مدولاتور آکوستو-اپتیک بررسی شد. برای این منظور یک کاواک پایدار به شکل V با در نظر گرفتن اثرات گرما روی دیسک در توان دمش بالا طراحی و ساخته شد. همچنین با استفاده با شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ناحیه کاری لیزر جهت جلوگیری از تخریب دیسک با استفاده از پالس‌های پر شدت مشخص شد. مشخصات خروجی لیزر، شامل توان متوسط و پهنای زمانی پالس‌ها تحت مقادیر مختلف نرخ تکرار مدولاتور و توان دمش ثبت و بررسی شدند. گستره توان دمش ۵۲۵-۱۱۸۰ وات و نرخ تکرار تا ۹ کیلوهرتز در این آزمایش استفاده شد. یافته‌های آزمایش نشان دادند که پالس‌های تولید شده با این روش پهنای زمانی در حدود یک میکروثانیه دارند. بیشینه توان متوسط خروجی لیزر ۳۴۰ وات در توان دمش ۱۱۸۰ وات و نرخ تکرار ۹ کیلوهرتز بدست آمد. همچنین بیشینه انرژی پالس خروجی ۵۷ میلی ژول در توان دمش ۶۲۰ وات و نرخ تکرار ۱ کیلوهرتز اندازه‌گیری شد. افزون بر این، اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که با افزایش توان دمش، لیزر در نرخ تکرارهای بالاتری به صورت پایدار کار می‌کند. دلیل ناپایداری پهنای پالس‌های خروجی از این نوع لیزرها ضریب بهره پایین به دلیل ضخامت کم محیط فعال است. جهت پایداری بیشتر مشخصات پالس‌های خروجی استفاده از کاواک با چیدمان 2V پیشنهاد می‌شود. در این نوع



از کاواک‌ها، باریکه لیزر در هر رفت و برگشت ۸ بار از محیط فعال عبور می‌کند و در نتیجه ضریب بهره افزایش خواهد یافت.

## منابع

- [1] Saraceno, C.J., Sutter, D., Metzger, T. and Ahmed, M.A., "The amazing progress of high-power ultrafast thin-disk lasers", *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 15(1), 15, 2019. <https://doi.org/10.1186/s41476-019-0108-1>.
- [2] Giesen, A., "High-Power Thin-Disk Lasers", *Advanced Solid-State Photonics*, Vancouver, Canada, 28–31 January, 2007. <https://doi.org/10.1364/ASSP.2007.MA1>.
- [3] Papastathopoulos, E., Baumann, F., Bocksrocker, O., Gottwald, T., Killi, A., Metzger, B., Schad, S.S., Speker, N., Ryba, T. and Zaske, S., "High-power high-brightness disk lasers for advanced applications", *Solid State Lasers XXX: Technology and Devices*, 11664, 116640M, 2021. <https://doi.org/10.1117/12.2578436>.
- [4] Nagel, S., Metzger, B., Bauer, D., Dominik, J., Gottwald, T., Kuhn, V., Killi, A., Dekorsy, T. and Schad, S.S., "Thin-disk laser system operating above 10 kW at near fundamental mode beam quality", *Optics Letters*, 46(5), 965-968, 2021. <https://doi.org/10.1364/OL.416432>.
- [5] Stolzenburg, C., Voss, A., Graf, T., Larionov, M. and Giesen, A., "Advanced pulsed thin disk laser sources", In *Solid State Lasers XVII: Technology and Devices*, 6871, 137-150, 2008. <https://doi.org/10.1117/12.775151>.
- [6] Wandt, C., Herkommer, C., Jung, R., Klingebiel, S., Krötz, P., Prinz, S., Rampp, M., Teisset, C.Y., Michel, K. and Metzger, T., "Ultrafast Thin-Disk based CPA System with >.1kW Output Power and <.500 fs Pulse Duration", *OSA High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress*, Washington DC, United States, 16–20 November, 2020. <https://doi.org/10.1364/HILAS.2020.HM2B.4>.
- [7] Butze, F., Larionov, M., Schuhmann, K., Stolzenburg, C. and Giesen, A., "Nanosecond pulsed thin disk Yb:YAG lasers", *Advanced Solid-State Photonics*, Santa Fe, New Mexico United States, 1–4 February, 2004. <https://doi.org/10.1364/ASSP.2004.237>.
- [8] Dai, L., Liu, R., Li, X., Gong, F., Lei, X., Li, H., Deng, S., Lv, Q., Sun, T., Teng, F. and Li, G., "High-efficiency, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched Yb:YAG thin-disk laser based on a 72-pass pump module", *Opt. Express*, 30(11), 19629-38, 2022. <https://doi.org/10.1364/OE.459255>.
- [9] Drs, J., Fischer, J., Modsching, N., Labaye, F., Müller, M., Wittwer, V.J. and Südmeyer, T., "A Decade of Sub-100-fs Thin-Disk Laser Oscillators", *Laser and Photonics Rev*, 17, 2200258, 2023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/lpor.202200258>.
- [10] Drs, J., Müller, M., Trawi, F., Modsching, N., Wittwer, V.J. and Südmeyer, T., "Ultrafast thin-disk laser oscillators as driving sources for high harmonic generation", *EPJ Web Conf*, 287, 8007, 2023. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202328708007>.
- [11] Dietz, T., Jenne, M., Bauer, D., Scharun, M., Sutter, D. and Killi, A., "Ultrafast thin-disk multi-pass amplifier system providing 1.9 kW of average output power and pulse energies in the 10 mJ range at 1 ps of pulse duration for glass-cleaving applications", *Opt. Express*, 28, 11415-23, 2020. <https://doi.org/10.1364/OE.383926>.
- [12] Brauch, U., Röcker, C., Graf, T. and Abdou Ahmed, M., "High-power, high-brightness solid-state laser architectures and their characteristics", *Appl. Phys. B*, 128, 58, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07736-0>.



- [13] Radmard, S., Moshaii, A. and Pasandideh, K., "400 W average power Q-switched Yb:YAG thin-disk-laser", *Sci. Rep.*, 12(1), 16918, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20917-x>.
- [14] Chu, H., Zhao, S., Yang, K., Li, Y., Li, D., Li, G., Zhao, J., Qiao, W., Xu, X., Di, J. and Zheng, L., "Experimental and theoretical study of passively Q-switched Yb:YAG laser with GaAs saturable absorber near 1050 nm", *Opt. Laser Technol.*, 56, 398-403, 2014. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.09.023>.
- [15] Radmard, S., Moshaii, A., Pasandideh, K. and Arabgari, S., "Introducing a 2V-resonator for the improvement of pulse stability in a high-gain Q-switched Yb:YAG thin-disk laser", *Opt. Express*, 31(8), 12128-37, 2023. <https://doi.org/10.1364/OE.485961>.
- [16] Richardson, D.J., Nilsson, J. and Clarkson, W.A., "High power fiber lasers: current status and future perspectives", *J. Opt. Soc. Am. B*, 27(11), B63-B92, 2010. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.27.000B63>.
- [17] Ready, J.F., *Industrial Applications of Lasers*, second ed, Academic press, New York, 1997.
- [18] Tasumi, M., "Introduction to Experimental Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Practical Methods", *John Wiley & Sons, Chichester*, 2014.
- [19] Johannsen, I., Erhard, S., and Giesen, A., "Q-switched Yb:YAG thin disk laser", *Advanced Solid-State Lasers*, Seattle, Washington, United States, 2001. <https://doi.org/10.1364/ASSL.2001.MD3>.
- [20] Tarra, L., Deutschmann-Olek, A., Stummer, V., Flöry, T., Baltuska, A., and Kugi, A., "Stochastic nonlinear model of the dynamics of actively Q-switched lasers", *Opt. Express*, 30, 32411, 2022. <https://doi.org/10.1364/oe.464508>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

