بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

# طراحی و ساخت لیزر تیتانیوم سفایر کوک‌پذیر دو طول موجی پالسی

امید پناهی[۱]، مجید ناظری[۲] و سید حسن توسلی[۳]

[۱]پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی

[۲] گروه فیزیک، دانشگاه کاشان

[۳] پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی

**چکیده - در این مقاله طراحی و ساخت یک لیزر تیتانیوم سفایر کوک پذیر** دو طول موجی نانوثانیه **و حل عددی معادلات نرخ مربوط به آن گزارش می‌شود. نتایج عددی حاصل از معادلات نرخ برای این سیستم چهار ترازی توضیح داده می‌شود. در بخش تجربی یک چیدمان اپتیکی که شامل کریستال تیتانیوم سفایر ، دو منشور و دو آینه‌ای که توسط یک تقسیم کننده نوری از هم جدا شده‌اند و برای تولید دو طول موج لیزری کوک پذیر استفاده شده‌اند معرفی می‌شود. کریستال توسط پالسهایی با انرژی ۳۳mJ از یک لیزر هماهنگ دوم Nd:YAG که Q_سوئیچ شده است بصورت طولی پمپ می‌شود. که خروجی آن پالسهایی با انرژی ۵mJ و نرخ تکرار ۱۰Hz اندازه گیری شده است که بیانگر بازدهی ۱۵٪ می‌باشد. دو طول موج خروجی حاصل از این لیزر بوسیله چرخش آینه‌ها بر محدوده طیفی ۷۶۰nm تا ۸۱۰nm قابل تنظیم می‌باشند.**

کلید واژه- دمش طولی، معادلات نرخ، منشور، لیزر تیتانیوم سفایر دو طول موجی نانوثانیه، لیزرNd:YAG .

# Design and Fabrication of Tunable Dual-Wavelength Nanosecond Ti:Sapphire Laser

Omid Panahi 1, Majid Nazeri 2 and Seyed Hassan Tavassoli 3
1 Laser And Plasma Research Institution, Shahid Beheshti University
2 Department of Physics, Kashan University
3 Laser And Plasma Research Institution, Shahid Beheshti University

Abstract- In this paper, the design and construction of a tunable dual-wavelength nanosecond Ti:Sapphire laser and the numerical solution of corresponding rate equations are reported. Numerical results of rate equations for this four-level system are explained. In experimental part an optical setup is introduced consist of a Ti:Saphhire crystal and two Prism with two mirrors that separated by a beam splitter are used to generate two wavelength tunable laser . 33mJ pulses from a second harmonics of a Q-Switched Nd:YAG laser longitudinally pump the crystal .As output, 5mJ pulses with 10Hz rep rate are measured this is equal to 15% efficiency. By rotating the mirrors the output dual-wavelength pulses adjusted over a wide range 760nm to 810 nm.

Keywords: longitudinally pumped, rate equations, prism, tunable dual-wavelength nanosecond Ti:Sapphire laser, Nd:YAG laser.



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]

## ۱- مقدمه

۲۲ سال پس از ساخت اولین لیزر یاقوت توسط میمن پیتر مولتن جایگزین کردن یون آلومینیوم به جای یون کروم در کریستال سفایر ($Al_2O_3$) ،نخستین لیزر تیتانیوم سفایر را گزارش کرد. در ادامه با رشد کریستالهای با اتلاف پایین،در سال ۱۹۸۶ ساخت اولین لیزر تیتانیوم سفایر پیوسته که در دمای اتاق عمل می‌کرد، گزارش شد[۱]. که پس از آن با توسعه روشهای تولید پالسهای فوق کوتاه فمتوثانیه با استفاده از لیزرهای سفایر کاربرد این لیزر گسترش چشمگیری یافته است. استفاده از لیزرهای نانوثانیه با دوپالس با طول موجهای متفاوت و تنظیم پذیر به علت استفاده در طیف سنجی لیزری مورد توجه زیادی قرار گرفت.

در این مقاله تئوری و معادلات نرخ به همراه نتایج مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی مربوط به یک لیزر تیتانیوم سفایر کوک پذیر دو طول موجی با طول پالس مرتبه نانوثانیه گزارش شده است..

## ۲- معرفی لیزر تیتانیوم سفایر

طیف جذبی کریستال تیتانیوم سفایر در محدوده ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر می‌باشد که پیک آن در ۴۹۵ نانومتر قرار دارد. طیف گسیلی آن نیز در محدوده ۶۶۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر قرار دارد که پیک آن در ۷۹۵ نانومتر می‌باشد. دلیل پهن بودن طیف جذبی و گسیلی به ساختار ترازها بر می‌گردد. ترازهای این لیزر بر اثر جفت شدگی حالات فونونی و الکترونی سیستم به زیر ترازهای متعدد نزدیک به هم تقسیم گشته است که گذارهای لیزری بین این زیر ترازها انجام می‌شود. بدین سبب لیزر تیتانیوم سفایر را می‌توان یک لیزر چهار ترازی ارتعاشی دانست. در لیزر تیتانیوم سفایر تحریک از پایین‌ترین تراز پایه که در حالت عادی طبق توزیع بولتزمن پر شده است، به

ترازهای مختلف تحریکی انجام می‌شود. زیر ترازهای ارتعاشی تحریکی به سرعت فروافت برخوردی انجام می‌دهند و به پایین‌ترین تراز برانگیخته فرو می‌ریزند. سپس گذار لیزری از این تراز به یکی از زیر ترازهای ارتعاشی تراز پایه انجام می‌شود که به همین علت، طیف گسیلی این لیزر بسیار پهن می‌باشد. آنگاه مجددا به سرعت فروافت برخوردی صورت می‌گیرد و الکترونها به پایین‌ترین زیر تراز حالت پایه می‌روند. این آرایش عملا ساختار یک لیزر چهار ترازی را به تصویر می‌کشد.

## ۳- معادلات نرخ لیزر تیتانیوم سفایر

تراز پائین لیزری در کریستال تیتانیوم سفایر بصورت یک باند انرژی می‌باشد که از ترازهای انرژی بسیار نزدیک بهم تشکیل شده است. این موضوع باعث می‌شود که لیزر تیتانیوم سفایر بتواند کوک پذیر باشد و در دو طول موج مختلف بصورت همزمان عمل کند. برای این منظور می‌بایست کاواک لیزر به دو زیر تشدیدگر A و B تقسیم شود که هر کدام مسئول تقویت یک طول موج می‌باشد. به منظور نوشتن معادلات نرخ برای لیزر تیتانیوم سفایر کوک‌پذیر دو طول موجی می‌بایست تراز پایین لیزری به دو زیر تراز شکافته شود. حال با توجه به نرخ گسیل خودبه‌خودی و نرخ واهلشهای برخوردی و احتمال جذب و گسیل القایی معادلات نرخ را می‌نویسیم:

$$\frac{dn_1}{dt} = n_4(A_{41} + S_{41}) + n_2(S_{21}^A + S_{21}^B) - n_1 R_{14} \quad (۱)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = n_4 S_{43} + n_2(W_{23}^A u_A(\mathcal{V}) + W_{23}^B u_B(\mathcal{V})) - n_3(W_{32}^A u_A(\mathcal{V}) + W_{32}^B u_B(\mathcal{V}) + A_{32}^A + A_{32}^B + S_{32}^A + S_{32}^B) \quad (۲)$$

$$\frac{dn_4}{dt} = n_1 R_{14} - n_4(A_{41} + S_{41} + S_{43}) \quad (۳)$$

$$\frac{d\Phi_A}{dt} = n_3 W_{32}^A u_A(\mathcal{V}) - n_2 W_{23}^A u_A(\mathcal{V}) - \frac{\Phi_A}{\tau_{ph_A}} + \alpha n_3 \quad (۴)$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = n_3 W_{32}^B u_B(\mathcal{V}) - n_2 W_{23}^B u_B(\mathcal{V}) - \frac{\Phi_B}{\tau_{ph_B}} + \alpha n_3 \quad (۵)$$

نمادهایی که در این معادلات و در ادامه متن با آن‌ها روبه‌رو خواهیم شد در جدول ۱ معرفی می‌شوند.

جدول ۱ : معرفی نمادهای بکار برده شده در معادلات نرخ

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\Phi$ | چگالی فوتونها در تشدیدگر | $R_{14}$ | نرخ دمش از تراز ۱ به ۴ |
| $A_{mn}$ | نرخ گسیل خودبه‌خودی بین تراز بین تراز m و n | $u(\mathcal{V})$ | چگالی انرژی درون کاواک بر واحد فرکانس |
| $S_{mn}$ | نرخ گذار غیرتابشی بین تراز m و n | $n_i$ | چگالی جمعیت در تراز i ام |
| $W_{mn}$ | احتمال گذار القائی بین تراز m و n | $\tau_{ph}$ | طول عمر فوتون در تشدیدگر |
| $\sigma$ | سطح مقطع گسیل القائی | $L_c$ | طول اپتیکی کاواک |



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]

که اندیس A و B در معادلات بالا بیانگر کمیت معرفی شده در زیر تشدیدگر مربوطه می‌باشد. در این سیستم چهار ترازی به علت خالی شدن سریع جمعیت در ترازهای ۲و۴ جمعیت در این دو تراز تقریبا برابر صفر در نظرگرفته می‌شود. از سوی دیگر فرض می‌شود که برای هر دو زیر تشدیدگر $A_{32} \gg S_{32}$ و $S_{41} \ll S_{43}$ ، $A_{41} \ll S_{43}$ باشد. از اینرو طبق معادله (۳) رابطه $n_1 R_{14} = n_4 S_{43}$ حاصل می‌شود. در بدست آوردن معادلات نرخ از دو رابطه زیر نیز استفاده می‌شود[۳]

$$W_{mn} = \frac{c\,\sigma_{mn}(\mathcal{V})}{\mathrm{h}\mathcal{V}\,\mathcal{G}(\mathcal{V})} \qquad (۷)$$

$$\Phi = \frac{u(\mathcal{V})}{h\mathcal{V}\,\mathcal{G}(\mathcal{V})} \qquad (۸)$$

جمله آخر در معادلات (۴) و(۵) بیانگر این موضوع می‌باشد که قسمتی از جمعیت وارون که در اثر گسیل خودبه‌خودی به تراز پائین لیزری فرو می‌ریزند، در راستای محور کاواک حرکت می‌کنند و شروع کننده نوسان‌های لیزری می‌باشند. در نهایت با استفاده از روابط و فرض‌های بالا، از معادلات (۲) و (۴) و (۵) معادلات نرخ بر حسب تعداد جمعیت در تراز بالای لیزری N و تعداد فوتون‌های درون تشدیدگر $\varphi$ بیان می‌شود:

$$\frac{dN}{dt} = W_P - \frac{c}{\pi\omega^2 L_c} N(\sigma_A\varphi_A + \sigma_B\varphi_B) - \frac{N}{\tau_o} \qquad (۹)$$

$$\frac{d\varphi_A}{dt} = \frac{c\,\sigma_A}{\pi\omega^2 L_c} N(\varphi_A + 1) - \frac{\varphi_A}{\tau_{ph_A}} \qquad (۱۰)$$

$$\frac{d\varphi_B}{dt} = \frac{c\,\sigma_B}{\pi\omega^2 L_c} N(\varphi_B + 1) - \frac{\varphi_B}{\tau_{ph_B}} \qquad (۱۱)$$

## ۴- حل عددی معادلات نرخ

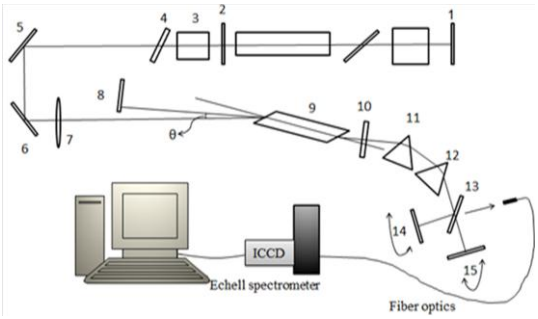
دستگاه معادلات بالا بصورت عددی در نرم افزار متلب با روش ode45 حل شده است. در آزمایش انجام شده طول کریستال l=۱/۵cm و T درصد عبور آینه خروجی است. $\tau_0$ طول عمر تراز بالای لیزری ۳/۲μs می‌باشد. فرض می‌شود که نرخ دمش یک شکل گوسین داشته باشد:

$$W_p = \frac{2\,E_p}{\sqrt{2\pi}T_0 h\nu_p}\left(1-\exp(-\alpha_p l)\right)\exp\left(\frac{-2t^2}{T_0^2}\right) \qquad (۱۲)$$

که در آن $E_p$ انرژی دمش ، $T_0$ پهنای پالس دمش ، $\nu_p$ فرکانس دمش و $\alpha_p$ ضریب جذب کریستال در طول موج دمش می‌باشد.

## ۵- چیدمان تجربی

در شکل ۱ چیدمان اپتیکی لیزر تیتانیوم سفایر کوک پذیر دو طول موجی نانوثانیه نشان داده شده است.




شکل۱: چیدمان اپتیکی لیزر تیتانیوم سفایر کوک‌پذیر دو طول موجی ۱- ۲ : لیزر پالسی Nd:YAG ۳ : کریستال KTP ، ۴ : فیلتر (۱۰۶۴nm را بازتاب و ۵۳۲nm را عبور می‌دهد) ، ۵،۶ : آینه‌های بازتاب کامل در ۴۵ درجه برای ۵۳۲nm ۷ : عدسی ۸ : آینه بازتاب کامل در محدوده طول موجی ۷۰۰-۹۰۰nm ۹ : کریستال تیتانیوم سفایر برش بروستر ۱۰ : آینه ۵۰٪ عبور در طول موج۷۰۰-۹۰۰nm ۱۱و۱۲ : منشور پاشنده ۱۳ : تقسیم کننده‌ی نوری ۵۰-۵۰ در ۴۵ درجه برای بازه‌ی طول موجی ۷۰۰-۹۰۰nm ۱۴و۱۵ : آینه ۱۰۰٪ بازتاب برای بازه‌ی طول موجی ۷۰۰-۹۰۰nm.

کریستال تیتانیوم سفایر که در برش بروستر می‌باشد توسط هماهنگ دوم یک لیزر Nd:YAG سوئیچ_Q شده پالسی با قطبش p ، که دارای پهنای پالس ۵ns و نرخ تکرار ۱۰Hz است، دمش می‌شود. که در نتیجه لیزر تیتانیوم سفایر بر پا شده یک لیزر سوییچ بهره می‌باشد. فاصله کانونی عدسی ۴۰cm می‌باشد. تشدیدگر لیزری در این چیدمان از دو قسمت تشکیل شده است که قسمت اول آن(۸-۱۰) کاواک اصلی لیزری است که عمل تقویت را انجام می‌دهد و قسمت دوم (۱۰- ۱۵و۱۰-۱۴)که وظیفه انتخاب طول موج را به روش تزریق بذر انجام می‌دهد. در این روش به منظور اینکه همزمان دو طول موج قابل تنظیم داشته باشیم می‌بایستی قسمت دوم، تزریق بذر را بصورت همزمان در دو طول موج انجام بدهد. برای رسیدن به این امر با قرار دادن یک تقسیم کننده‌ی نوری ۵۰-۵۰ در زاویه برخورد ۴۵ درجه برای طول موج لیزری (المان ۱۳ در شکل ۲) و قرار دادن دو آینه ۱۰۰٪ بازتاب در طول موج لیزری (المان ۱۴ و ۱۵) بعد از تقسیم کننده‌ی نوری به راحتی می‌توان در دو طول موج مختلف عمل تزریق بذر درون کاواک اصلی را انجام داد. به اینصورت که طیف پهن گسیلی از کاواک اصلی با عبور از دو منشور پاشنده از لحاظ طول موجی بصورت زاویه‌ای تفکیک می‌شود، این طیف که دستخوش پاشندگی شده است بعد از عبور از تقسیم کننده نوری ۵۰-۵۰ به دو

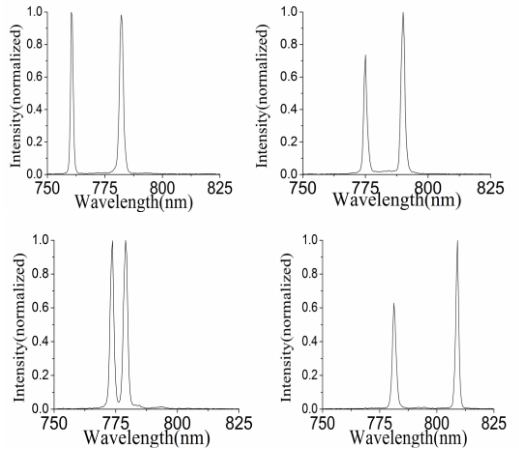


[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]

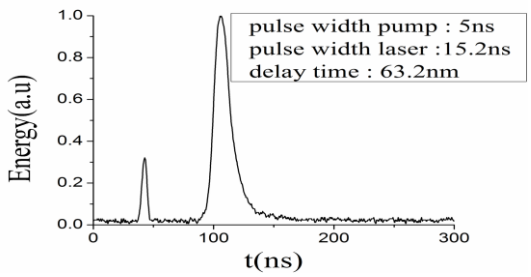
شاخه تقسیم می‌شود که با چرخش آینه‌های ۱۴ و ۱۵ می‌توان دو طول موج متفاوت را به درون کاواک اصلی برگرداند. در این چیدمان به دلیل مشترک بودن المان پاشنده، دو طول موج اتلاف یکسانی را تجربه می‌کنند. از سوی دیگر مساوی قرار دادن طول دو بازوی ۱۳-۱۴ و ۱۳-۱۵ باعث می‌شود که دو طول موج انتخاب شده توسط قسمت دوم، همزمان وارد کاواک اصلی بشوند. به این دو دلیل است که نوسانات لیزری در دو طول موج بصورت همزمان آغاز می‌شود و هیچگونه تأخیر زمانی بین دو طول موج خروجی از این لیزر مشاهده نمی‌شود در شکل ۱ یک زاویه θ دیده می‌شود. این زاویه به منظور قطع نشدن پرتو دمش توسط لبه آینه ۸ لحاظ می‌شود.

## ۶- نتایج تجربی

در این چیدمان طول کل تشدیدگر ۷۵cm می‌باشد. به ازاء انرژی دمش ۳۳mJ یک خروجی دو طول موجی ۵mJ ، ۱۰Hz به دست می‌آید. در شکل ۲ طیف‌های دو طول موجی این لیزر که با چرخش آینه‌های ۱۴ و ۱۵ در زمان‌های مختلف توسط Ocean optics ثبت شده‌اند، نشان داده شده است که مشاهده می‌شود دو طول موج نزدیک به ۵۰nm نسبت به هم قابل تنظیم می‌باشند.



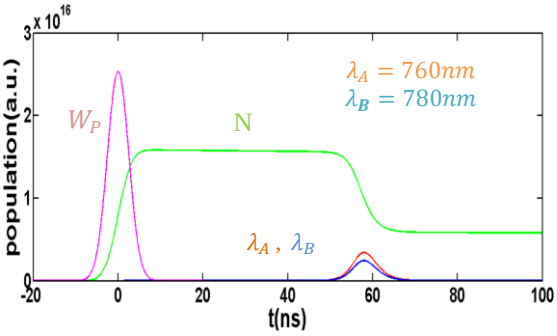

شکل۲: طیف‌های دو طول موجی خروجی از لیزر کوک‌پذیر دو طول موجی که با چرخش آینه‌های ۱۴ و ۱۵ در زمان‌های مختلف توسط Ocean optics ثبت شده‌اند.




شکل ۳ : پهنای زمانی پالس

پهنای زمانی پالس خروجی نیز در شکل ۳ نشان داده شده است که حاکی از یک خروجی دو طول موج همزمان می‌باشد.

نتایج خروجی حاصل از معادلات نرخ برای لیزر تیتانیوم سفایر کوک‌پذیر دو طول موجی در شکل ۴ نشان داده شده است که در آن $W_P$ نرخ دمش، N جمعیت معکوس و $\lambda_A$ ، $\lambda_B$ به ترتیب تعداد فوتونهای لیزری در دو طول موج خروجی ۷۶۰nm و ۷۸۰nm می‌باشد. این معادلات یک خروجی ۵/۵mJ با پهنای پالس ۱۱ns و تأخیر زمانی ۵۸ns را به ازاء انرژی دمش ۳۳mJ پیش بینی می‌کند، که این نتایج در توافق کاملی با نتایج تجربی می‌باشند.




شکل۴: خروجی حاصل از معادلات نرخ

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله به کمک معادلات نرخ یک لیزر تیتانیوم سفایر کوک پذیر دو طول موجی پالسی طراحی شد. در ادامه با برپایی چیدمان تجربی ساخت یک لیزر تیتانیوم سفایر کوک پذیر دو طول موجی پالسی که دو طول موج خروجی نزدیک به ۵۰nm نسبت به یکدیگر قابل تنظیم می‌باشد گزارش شد. این لیزر دارای دو طول موج خروجی همزمان قابل تنظیم می‌باشد که انرژی خروجی این لیزر برای انرژی دمش ۳۳mJ ، پالسهایی با انرژی ۵mJ با نرخ تکرار ۱۰Hz می‌باشد که بیانگر بازده ۱۵٪ این لیزر می‌باشد. در پایان دیده شد که نتایج بدست آمده از معادلات نرخ در تطابق خوبی با نتایج تجربی می‌باشند.

## مراجع

[1] K.F. Wall and A. Sanchez; *Titanium Sapphire Lasers*;THE LINCOLN LABORATORY JOURNAl , VOL .3 (1990) 447-461

[2] F.Song, J.Q.Yao; *Rate-equation theory and experimental research on dual-wavelength operation of a Ti:sapphire laser* ;Appl. Phys. B 72 (2001) 605-610

[3] Koechner,Walter; *Solid-State Laser Engineering*; 6th edition, Springer Series in OPTICAL SCIENCES.(2005)32-33



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30 ]