بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

لیزرهای حالت جامد مادون قرمز میانه: اهمیت، کاربرد و شبیه‌سازی عددی

امیرحسین فرهادیان[۱]، مهدی دهقان‌باغی[۲]

[۱]پژوهشکده فوتونیک و فناوری های کوانتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده – لیزرهای حالت جامد مادون قرمز میانه شامل Fe:ZnS(e)، Cr:ZnS(e) و Er:YAG معرفی شدند. لیزرهای Fe:ZnS(e) و Cr:ZnS(e) به عنوان منابع لیزری جدید و مورد توجه که کوک پذیری خوبی نیز دارند می تواند کاربری فروانی در صنعت دفاعی داشته باشد. در گام نخست از یک پژوهش گسترده، با توجه به چیدمان معرفی شده به تحلیل و شبیه سازی عددی لیزر Er:YAG به عنوان منبع دمش پرداخته شد. جهت دمش لیزر Fe:ZnSe به انرژی ۲۵۰ میلی ژول در حالت رانش آزاد نیاز است که با توجه به محاسبات، مشخصات دمش و بلور ماده فعال بدست آمد.

کلید واژه- لیزرهای کالکوژناید، Fe:ZnS(e)، Cr:ZnS(e)، Er:YAG و معادلات نرخ

Mid Infrared Solid State Lasers: Importance, Application and Numerical Simulation

Amir Hossein Farhadian[1], Mahdi Dehghanbaghi[2]

[1]Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

[2]Physics Faculty, Isfahan University, Isfahan, Iran

Abstract- Mid infrared solid state lasers including Fe:ZnS(e), Cr:ZnS(e) and Er:YAG were introduced. Fe:ZnS(e) and Cr:ZnS(e) lasers can be widely used in the defense industry as new and important laser sources that also have good tuning capability. According to the introduced setup, Er:YAG laser was analyzed and numerically simulated as the main pump source. For pumping of Fe:ZnSe laser, we need to 250 mJ of free-running 3 micron laser, which according to calculations, pump and laser rod properties obtained.

Keywords: Chalcogenide lasers, Fe:ZnS(e), Cr:ZnS(e), Er:YAG, Rate equations

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

مقدمه

امروزه استفاده از لیزرها در ناحیه مادون قرمز میانی (1.5-6 میکرون) به دلیل کاربری مناسب در بیناب-نمایی، لیدار، پزشکی و صنعت دفاعی گسترش روز افزونی داشته است. جذب بالای مولکول‌های زیستی و همچنین وجود حسگرهای نوری در ناحیه فروسرخ میانی سبب اهمیت دست یابی به تابش‌های لیزری در این ناحیه شده است [۱].

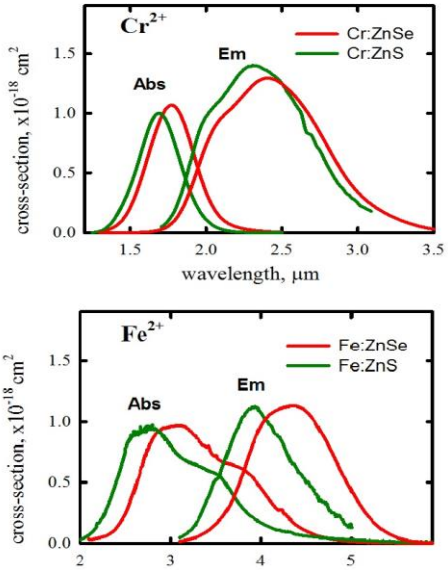
تاکنون لیزرهای مختلفی در این ناحیه معرفی شده است که مهمترین آنها شامل لیزرهای آبشار کوانتمی (QCL)[1]، لیزرهای شیمیایی، تبدیلات غیرخطی و لیزرهای حالت جامد است [۲].

دست یابی به لیزر در ناحیه مادون قرمز میانه با توان بالا، کوک پذیری، سهولت دستیابی و هزینه مناسب حائز اهمیت است. با توجه به بررسی های انجام شده و مطالعه منابع مختلف، استفاده از یون های فلزی در میزبان های کالکوژناید[2] (اکسید، سولفید و سلناید) به عنوان ماده فعال لیزری در ناحیه مادون قرمز میانه در حال گسترش می باشد [۳].

مهمترین این لیزرها شامل Fe:ZnS، Fe:ZnSe، Cr:ZnS و Cr:ZnSe هستند که تاکنون در داخل کشور مطالعاتی در این زمینه انجام نشده است. لذا در این تحقیق بر آن شدیم تا ضمن معرفی این لیزرها به بررسی چیدمان و مشخصات آنها بپردازیم و در نهایت نیز به عنوان گام نخست در طراحی، شبیه سازی عددی لیزر Er:YAG را به عنوان منبع دمش این لیزرها ارائه دهیم. به دلیل فضای محدود دراین مقاله، شبیه سازی و طراحی لیزرهای یاد شده در گزارشات آتی ارائه خواهند شد.

لیزرهای کالکوژناید

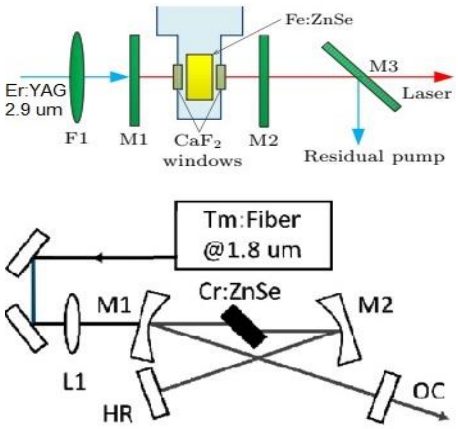
مطابق با شکل ۱، لیزرهای کروم و آهن به ترتیب در ناحیه ۳.۴-۱.۸ و ۵.۳-۳.۴ میکرون تابش می‌کنند که پهنای باند بسیار پهن و پرکاربردی می‌باشد [۳].



شکل ۱: سطح مقطع گسیل و جذب Fe:ZnS(e) و Cr:ZnS(e) [۳]

مطابق با پهنای باند جذب دمش لیزرهای کروم با لیزرهای نیمه رسانا یا فیبری که دارای طول موج حدود ۱.۸ میکرون و همچنین دمش لیزر آهن با لیزر Er:YAG و شیمیایی HF در حالت رانش آزاد که دارای طول موج ۳ میکرون هستند انجام می شود. شکل ۲ طرحواره‌ای از این لیزرها را نشان می دهد.

از ویژگی های مهم این لیزرها قابلیت تولید پالس های فوق کوتاه، کوک پذیری، خروجی با انرژی و توان بالا، کیفیت پرتو مناسب و بازده خوب است [۴].



شکل ۲: طرحواره از چیدمان لیزرهای Fe:ZnS(e) و Cr:ZnS(e) [۴]

همانطور که ملاحظه شد برای دمش لیزر کوک پذیر آهن به لیزر Er:YAG در حالت رانش آزاد نیاز است. لذا در گام نخست به مطالعه آن خواهیم پرداخت.

[1] Quantum Cascade Laser
[2] Chalcogenide

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

لیزر Er:YAG

مشخصات بلور

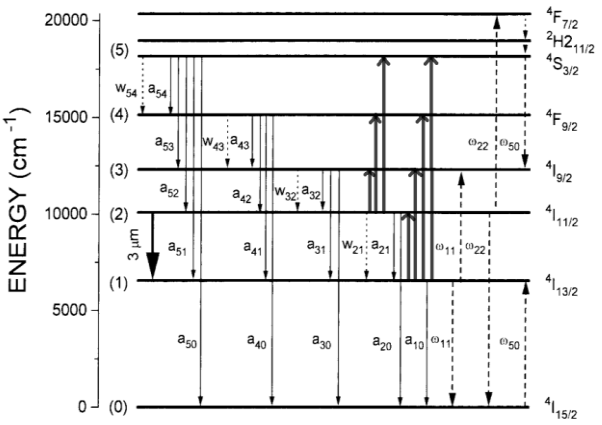
شکل ۳ ترازهای انرژی مربوط به یون Er^{+3} در میزبان گارنت را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود این محیط بهره قابلیت گسیل لیزر در دو طول موج ۱.۵۵ و ۲.۹۴ میکرون را دارد. لیز با طول موج ۱.۵۵ میکرون بین ترازهای $^4I_{13/2}$ و $^4I_{15/2}$ و با جذب دمش در ناحیه ۱/۵ میکرون صورت می‌گیرد. برای این منظور غلظت یون فعال Er^{+3} در میزبان در محدوده ۰/۱ تا ۱ درصد است.

برای گسیل لیزر در طول موج ۲.۹۴ میکرون باید غلظت یون فعال تا حدود ۵۰ درصد افزایش یافته و محدوده دمش نیز بایستی از ۶۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر باشد. در این حالت لیزر به صورت چهارترازه بین ترازهای $^4I_{11/2}$ و $^4I_{13/2}$ عمل می‌کند. بلور Er:YAG با غلظت ۵۰ درصد مانند Nd:YAG قابلیت دمش از طریق فلاش لامپ و لیزردیودها در ناحیه ۸۰۰ نانومتر را دارد. در مقایسه با Nd:YAG سطح مقطع گسیل القایی و طول عمر تراز کوچکتری داشته و لذا بازده کمتر و آستانه بالاتری دارند [۵].

معادلات نرخ و فرآیندهای انتقال انرژی

برای بررسی و شبیه سازی تابش لیزر در طول موج ۲۹۴۰ نانومتر به مطالعه دقیق فرآیندهای درگیر نیاز است. شکل ۳ ترازهای Er همراه با همه فرایندهای احتمالی نشان داده شده است. با توجه به شکل پس از دمش در مجموع ۴ دسته فرآیند شامل فرایندهای تابشی (a_{ij})، گذارهای چند فونونی (w_{ij})، فرآیندهای انتقال انرژی (ω_{ij}) و جذب حالت برانگیخته (ESA)[1] در طی ساز و کار دمش و برانگیختگی نقش دارند. معادلات نرخ توصیف کننده نیز در شکل آمده است [۵]. در این معادلات فرض شده است که تمامی انرژی دمش به تراز بالایی ($^4S_{3/2}$) منتقل شده است.

[1] Excited-state Absorption



$$\frac{dN_5}{dt} = -(a_{50} + a_{51} + a_{52} + a_{53} + a_{54} + w_{54})N_5$$
$$\omega_{50}N_5N_0 + \omega_{22}N_2^2 + R_p$$
$$\frac{dN_4}{dt} = -(a_{40} + a_{41} + a_{42} + a_{43} + w_{43})N_4$$
$$+ (a_{54} + w_{54})N_5$$
$$\frac{dN_3}{dt} = -(a_{30} + a_{31} + a_{32} + w_{32})N_3 + a_{53}N_5$$
$$+ (a_{43} + w_{43})N_4 + \omega_{11}N_1^{\,2} + \omega_{50}N_5N_0$$
$$\frac{dN_2}{dt} = -(a_{20} + a_{21} + w_{21})N_2 + a_{52}N_5 + a_{42}N_4$$
$$+ (a_{32} + w_{32})N_3 - 2\omega_{22}N_2^2 - c\sigma(\alpha N_2 - \beta N_1)\varphi$$
$$\frac{dN_1}{dt} = -a_{10}N_1 + (a_{21} + w_{21})N_2 + a_{31}N_3 + a_{41}N_4$$
$$+ a_{51}N_5 + 2\omega_{11}N_1^2 - \omega_{50}N_5N_0 + c\sigma(\alpha N_2 - \beta N_1)\varphi$$
$$\frac{dN_0}{dt} = a_{50}N_5 + a_{40}N_4 + a_{30}N_3 + a_{20}N_2 + a_{10}N_1$$
$$\omega_{11}N_1^2 + \omega_{22}N_2^2 - \omega_{50}N_5N_0 + R_p$$
$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{c\varphi}{(n \quad 1 + l'/l)}\left[\sigma(\alpha N_2 - \beta N_1) - \rho\right] + \kappa_{se}a_{21}N_2$$

شکل ۳: ترازهای Er، فرآیندهای انتقال انرژی و معادلات نرخ [۵]

N_0 تا N_5 به ترتیب جمعیت ترازهای $^4I_{15/2}$ تا $^4S_{3/2}$ است. φ چگالی فوتون، ρ اتلاف کل، α و β ضرایب جمعیت بولتزمن برای زیرترازهای استارک، σ سطح مقطع گسیل القایی، l و 'l طول محیط بهره و مشدد است. همچنین K_{se} ضریب گسیل خود به خودی اولیه در طول موج لیزر برای آغاز گسیل القایی است. کوچکتر بودن طول عمر تراز بالایی نسبت به تراز پایینی سبب خوداشباعی در لیزر و پایان یافتن آن می‌شود. در غلظت‌های بالا، فرایند تبدیل روبه بالا از هر دو تراز $^4I_{11/2}$ و $^4I_{13/2}$ (ω_{11} و ω_{22}) و همچنین واهلش مقطعی از تراز دمش $^4S_{3/2}$ (ω_{50}) بر مشکل خوداشباعی غلبه می‌کند.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

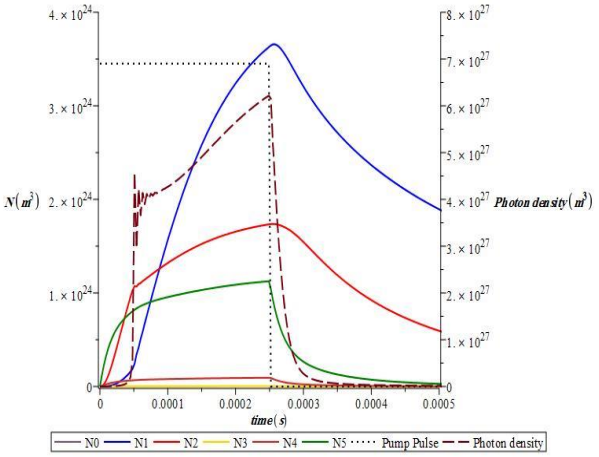
حل عددی و شبیه سازی

به منظور حل عددی معادلات نرخ فرض می‌کنیم یک مشدد خطی شامل ماده فعال Er:YAG توسط یک لامپ درخشی دمش می‌شود. مشخصات تپ لامپ درخشی، ماده فعال و همچنین مشدد در جدول ۱ آورده شده است. همچنین مقادیر مربوط به پارامترهای ذاتی ماده فعال (a_{ij}، ω_{ij}، w_{ij} و..) نیز با توجه به مراجع [۵ و۶] استخراج و استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات مشدد و دمش

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
l	0.1 (m)	T_p	250e-6 (s)
l'	0.25 (m)	E_p	120 (j)
R_1	1	λ_p	780-820 (nm)
R_2	0.9	r	0.002 (m)

با توجه به مقادیر، معادلات نرخ با در نظرگرفتن تمامی ترازها در محیط نرم افزار Maple به روش عددی حل و نتایج آن در ادامه آمده است.



شکل ۳: تغییرات جمعیت ترازها و چگالی فوتون

محور افقی سمت چپ تغییرات جمعیت ترازهای N0 تا N5 و سمت راست چگالی فوتون‌های درون کاواک (φ) و تپ دمش (R_p) را نشان می‌دهد. با شروع تپ دمش ابتدا جمعیت تراز N_5 شروع به افزایش می‌کند. پس از گذشت حدود ۲۰μs جمعیت در تراز N_2 شروع به افزایش و وارونگی جمعیت ایجاد می‌شود. چگالی فوتون نیز پس از گذشت حدود ۵۰μs با یک نوسان اولیه شروع و تا حدود ۳۰۰μs ادامه پیدا می‌کند. پهنای تپ لیزری با پهنای تپ دمش نیز تقریبا برابر هستند. بعد از ۲۵۰μs (پایان تپ دمش) جمعیت‌ها و چگالی فوتون درون کاواک شروع به افت می‌کند.

$$E_{out} = \left(\frac{hc}{\lambda_1}\right)\frac{(1-R_2)c\sum\varphi(t)}{(1+R_2)2l'} \qquad (۱)$$

با توجه به چگالی فوتون درون کاواک انرژی خروجی لیزر برای مقادیر ورودی داده شده مطابق با رابطه (۱) قابل محاسبه است [۵]. با توجه به نیاز ۲۵۰mJ خروجی (جهت دمش Fe:ZnSe) باید حدود ۱۲۰J انرژی ورودی در نظرگرفته شود. بازده تبدیل برای این مقادیر برابر ۰.۲ درصد است که با کارهای تجربی صورت گرفته توسط دیگران مطابقت خوبی دارد.

نتیجه‌گیری

یون های فلزی در میزبان های کالکوژناید به عنوان ماده فعال در تابش لیزر در ناحیه مادون قرمز میانه با کوک پذیری زیاد اهمیت دارد. لیزر هدف در تحقیق Fe:ZnSe می باشد که برای دمش آن به حدود ۲۰۰ میلی ژول تابش ۳ میکرون با پهنای چندصد میکروثانیه نیاز می باشد. برای این منظور گزینه اصلی لیزر Er:YAG با مشخصات جدول ۱ و دمش الکتریکی ۱۲۰ ژول در حالت رانش آزاد می باشد.

مراجع

[1] F. K. Tittel, "Mid-Infrared Laser Applications," Solid-state mid-infrared laser sources, pp. 458-529, 2003.

[2] P.W.Milonni and J.H.Eberly, Laser Physics, John Wiley & Sons, 2010.

[3] Kozlovsky, V. I and et al. "Middle infrared Fe^{2+}:ZnS, Fe^{2+}:ZnSe and Cr^{2+}:CdSe lasers: new results." In Journal of Physics, vol. 740, no. 1, IOP Publishing, 2016.

[4] Doroshenko, M. E and et al. "Tunable mid-infrared laser properties of Fe^{2+}:ZnSe crystals." Laser Physics Letters 7, no. 1 (2009).

[5] O. T. Serban Georgescu, "Er: YAG three-micron laser: performances and limits," IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 11, no. 3, pp. 682-689, 2005.

[6] J.Frauchiger and W. Lüthy, "Power limits of a YAG: Er laser," Optics & Laser Technology, vol. 19, no. 6, pp. 312-315, 1987.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]