



تحلیل لیزر هم آلائیده Yb:Er:Glass

حسین ثقفی فر^۱، احمد مزنگی^۱، عباس ملکی^۱، حسن عبادیان^۱

^۱دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده - در این تحقیق به تحلیل ماده لیزری Yb:Er:Glass از دیدگاه معادلات آهنگ پرداخته می‌شود. در تحلیل اول از توزیع یکنواخت میدان مشدد استفاده می‌شود و معادلات آهنگ با روش رانگ-کوتای مرتبه چهار حل می‌شود. در تحلیل دیگری که با استفاده از نرم افزار GLAD صورت می‌گیرد تغییرات فضایی میدان مشدد به حساب آورده می‌شود و روشی برای تحلیل معادلات آهنگ مواد لیزری هم آلائیده ارائه می‌گردد. در هر دو تحلیل وابستگی زمانی توان خروجی لیزر و وارونی جمعیت بهنجار شده یونهای Yb و Er بدست آورده می‌شود. انرژی لیزر در هر دو تحلیل محاسبه شده و با هم مقایسه می‌شود.

کلید واژه- لامپ درخشی، لیزر Yb:Er:Glass، معادلات آهنگ، هم آلائیدگی

کد PACS - ۱۴۰، ۰۱۴۰

۱- مقدمه

اهمیت لیزر Erbium:Glass بواسطه طول موج گسیلی آن (۱۵۴۰nm) است که در محدوده ایمن برای چشم قرار دارد و آشکارسازی آن نیز آسان است [۱]. لیزر Er:Glass لیزر سه ترازی است و به منظور افزایش بازده جذب آن از هم آلائیده Ytterbium استفاده می‌شود. یونهای Yb³⁺ در ۹۸۰nm نوار جذبی قوی دارند و می‌توانند انرژی جذب شده را به یونهای Er³⁺ انتقال دهند [۲]. الگوی ترازهای انرژی Yb:Er:Glass نسبتاً پیچیده است و شامل فرایندهای تابشی، غیر تابشی و انتقال انرژی می‌باشد. در این تحقیق مدل ساده شده‌ای برای توصیف لیزر Yb:Er:Glass با دممش لامپ درخشی ارائه می‌گردد. این مدل بر اساس تحلیل معادلات آهنگ است. در تحلیل اول توزیع یکنواختی برای میدان مشدد در نظر گرفته می‌شود و معادلات آهنگ با استفاده از روش رانگ-کوتای مرتبه چهار ارزیابی می‌گردد. در تحلیل دیگری که با استفاده از نرم افزار GLAD صورت می‌گیرد تغییرات فضایی میدان مشدد به حساب آورده می‌شود و روشی برای تحلیل معادلات آهنگ مواد لیزری هم آلائیده ارائه می‌گردد.

۲- زمینه نظری

در این بخش معادلات آهنگ مربوط به چگالی جمعیت ترازهای مختلف یونهای Er و Yb و تعداد فوتونهای داخل مشدد بدست آورده می‌شود.

۲-۱- معادلات آهنگ چگالی یونها

تابش دمش توسط یونهای Yb که تنها دو تراز دارند، جذب می‌شود (شکل ۱). انرژی جذب شده توسط یونهای Yb به تراز $^4I_{11/2}$ یونهای Er منتقل می‌شود. انتقال انرژی به عقب از یونهای Er به Yb نیز ممکن است. یونهای Er در تراز $^4I_{11/2}$ در گذار غیر تابشی به تراز $^4I_{13/2}$ یا $^4I_{15/2}$ می‌افتند. در نهایت گذار لیزری مابین تراز شبه پایدار $^4I_{13/2}$ و تراز زمینه $^4I_{15/2}$ صورت می‌گیرد.

لیزر Yb:Er:Glass را می‌توان با پارامترهای زیر توصیف کرد:

- چگالی کل یونهای Er و Yb $N_{Yb}, n_{er} (cm^{-3})$

- چگالی یونهای Er در تراز e_1 و e_2 $n_2, n_1 (cm^{-3})$

- چگالی یونهای Yb در تراز E_1 و E_2 $N_2, N_1 (cm^{-3})$



که c_0 سرعت نور در خلأ و n ضریب شکست ماده لیزر است. τ_{cav} زمان ماندگاری فوتونها در داخل مشدد است بطوریکه:

$$\tau_{cav} = \frac{2l_{opt}}{\ln(R(1-p))c_0} \quad (6)$$

در این رابطه l_{opt} طول اپتیکی مشدد، R ضریب بازتابندگی آینه لیزر و p اتلاف‌های مشدد است. N_{noise} سهم گسیل خودبخودی را نشان می‌دهد و $\varphi(\vec{r})$ نیز تابع چگالی فضایی تک فوتون است. رابطه شار دمش Φ_l با N_L و $\varphi(\vec{r})$ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi_l(\vec{r}, t) = \frac{c_0}{n} N_l(t) \varphi(\vec{r}) \quad (7)$$

و توان خروجی لیزر را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$P_{out}(t) = h\nu_e c_0 \frac{N_l(t)}{2l_{opt}} \ln(1/R) \quad (8)$$

۳- بازده دمش

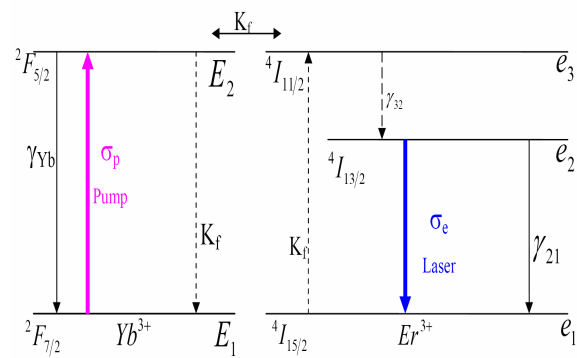
بازده دمش η_{pump} کسری از انرژی الکتریکی $E_{in}(J)$ تحویل داده شده به لامپ درختی است که موجب دمش یونهای Yb می‌شود. با در نظر گرفتن بازده دمش، می‌توان رابطه‌ای برای آهنگ دمش یونهای Yb نوشت [۴]:

$$\sigma_p \Phi_p(t) = \eta_{pump} \frac{E_{in}}{h\nu_p A (0.4t_p)^2} t \exp\left(-\frac{t}{0.4t_p}\right) \quad (9)$$

که A مساحت سطح دیواره لامپ درختی و t_p پهنای تپ دمش است. تابع $t \exp\left(-\frac{t}{0.4t_p}\right)$ تغییرات زمانی توان نشر شده از لامپ درختی را نشان می‌دهد.

۴- تحلیل عددی

این بخش را به محاسبه انرژی خروجی لیزر اختصاص می‌دهیم. برای این منظور دو نوع تحلیل صورت می‌گیرد. در تحلیل اول توزیع یکنواختی برای میدان نوری مشدد در نظر گرفته می‌شود و در تحلیل دوم که با نرم‌افزار GLAD صورت می‌گیرد از توزیع گاوسی میدان مشدد استفاده می‌شود و روشی برای تحلیل چنین مواد لیزری هم آلائیده ارائه می‌گردد. در پایان نتایج این دو روش با هم مقایسه می‌شود.



شکل ۱: نمودار ترازهای انرژی ماده لیزری Yb:Er:Glass

$\gamma_{21} (s^{-1})$ - آهنگ فروافت از تراز $4I_{13/2}$ به تراز $4I_{15/2}$

$\gamma_{Yb} (s^{-1})$ - آهنگ فروافت از تراز $2F_{5/2}$ به تراز $2F_{7/2}$

$\sigma_p (cm^2)$ - سطح مقطع جذب یونهای Yb

$\sigma_e (cm^2)$ - سطح مقطع گسیل یونهای Er

$K_f (cm^3 s^{-1})$ - آهنگ انتقال انرژی از Yb به Er

$\Phi_p, \Phi_l (cm^{-2} s^{-1})$ - شار فوتونهای لیزر و دمش

با توجه به نمودار ترازهای انرژی شکل ۱ معادلات آهنگ مربوط به چگالی جمعیت یونهای Yb و Er نوشته می‌شود [۳]:

$$\frac{dN_2}{dt} = \sigma_p \Phi_p (N_{Yb} - 2N_2) - K_f N_2 n_1 - \gamma_{Yb} N_2 \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = K_f N_2 n_1 - \sigma_e \Phi_l (2n_2 - n_{er}) - \gamma_{21} n_2 \quad (2)$$

$$N_1 + N_2 = N_{Yb} \quad (3)$$

$$n_1 + n_2 = n_{er} \quad (4)$$

۲-۲- معادله آهنگ فوتونها

در یک مشدد لیزری تعداد فوتونهای داخل مشدد (N_l) بواسطه فرایندهای گسیل برانگیخته، گسیل خودبخودی و اتلاف تغییر می‌کند. معادله حاکم بر تعداد فوتونهای لیزر به صورت زیر نوشته می‌شود:

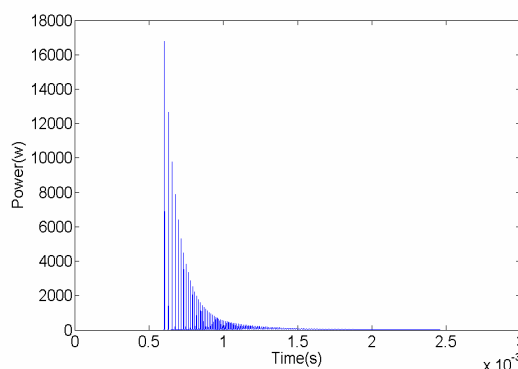
$$\frac{dN_l}{dt} = \iiint_{V_a} \sigma_e (n_2 - n_1) \frac{c_0}{n} N_l \varphi(\vec{r}) dV + N_{noise} - N_l / \tau_{cav} \quad (5)$$

۴-۱- توزیع یکنواخت میدان مشدد

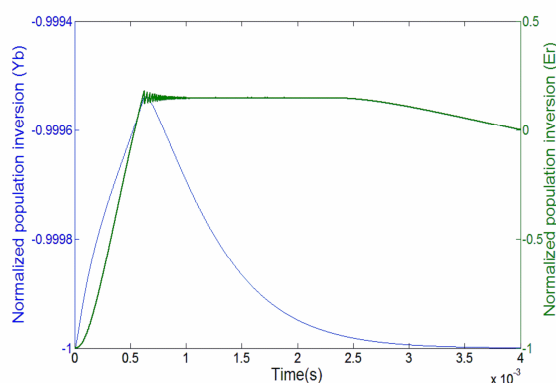
اگر توزیع یکنواختی برای میدان مشدد در نظر بگیریم، تابع چگالی فضایی تک فوتون را می توان چنین نوشت:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{n}{l_{opt} S} \quad (10)$$

که S مساحت سطح مقطع پرتو است. با این فرض مختصه مکانی (\vec{r}) از معادلات آهنگ حذف می شود. با استفاده از روش رانگ-کوتای مرتبه چهار معادلات آهنگ ۱، ۲ و ۵ تحلیل شدند. شکل ۲ توان خروجی لیزر را بر حسب زمان نشان می دهد. از این شکل می توان انرژی خروجی لیزر را بدست آورد. شکل ۳ وارونی جمعیت بهنجار شده برای یونهای Er ($n' = (n_2 - n_1)/n_{er}$) و یونهای Yb ($N' = (N_2 - N_1)/N_{yb}$) را نشان می دهد.



شکل ۲: تغییرات زمانی توان خروجی لیزر ($E_{in} = 25J$ $R = 90\%$)



شکل ۳: تغییرات زمانی وارونی جمعیت بهنجار شده یونهای Er و Yb ($E_{in} = 25J$ $R = 90\%$)

اپتیکی بصورت صحیحی مدل سازی می کند. در این بخش به تغییر روش GLAD در تحلیل لیزرهای سه ترازی پرداخته می شود، بطوریکه بتواند محیط لیزری هم آلاینده Yb:Er:Glass را تحلیل کند.

تحلیل لیزر Yb:Er:Glass در سه مرحله زیر انجام می شود:

- عمل دمش و گسیل خودبخودی یونهای Yb:

$$\frac{dN_2}{dt} = \sigma_p \Phi_p (N_{yb} - 2N_2) - \gamma_{yb} N_2 \quad (11)$$

که جواب آن بصورت زیر است:

$$N_2(t) = \frac{\beta}{\alpha} + [N_2(0) - \frac{\beta}{\alpha}] \text{Exp}(-\alpha t) \quad (12)$$

$$\beta = \sigma_p \Phi_p N_{yb}, \quad \alpha = 2\sigma_p \Phi_p + \gamma_{yb}$$

- فرایند انتقال انرژی از Yb به Er:

$$\frac{dn_2}{dt} = -\frac{dN_2}{dt} = K_f N_2 n_1 \quad (13)$$

که جواب آن بصورت زیر است:

$$N_2(t) = \frac{c' \chi \text{Exp}(c' K_f t)}{1 + \chi \text{Exp}(c' K_f t)} \quad (14)$$

$$c' = N_2(0) - n_1(0), \quad \chi = -N_2(0)/n_1(0)$$

- برهمکنش میدان مشدد با محیط بهره:

$$\frac{dn_2}{dt} = -\sigma_e \Phi_l (2n_2 - n_{er}) \quad (15)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \iiint_{V_a} \sigma_e (n_2 - n_1) \frac{c_0}{n} N_1 \varphi(\vec{r}) dV$$

نرم افزار Glad از روش Franz-Nodvik برای حل معادلات ۱۵ استفاده می کند. در هر بار انتشار امواج نوری از ماده لیزری، از سه مرحله بالا برای تحلیل بهره استفاده می شود. اتلاف های درون مشدد نیز بصورت جداگانه ای به میدان مشدد اعمال می شود. نتیجه چنین تحلیلی در شکل های ۴ تا ۶ آمده است. شکل ۴ توزیع گاوسی میدان مشدد را نشان می دهد. تغییرات زمانی توان خروجی لیزر نیز در شکل ۵ آورده شده است. همچنین وابستگی زمانی وارونی جمعیت بهنجار شده یونهای Er (n') و یونهای Yb (N') در شکل

۴-۲- توزیع گاوسی میدان مشدد

نرم افزار GLAD انتشار امواج الکترومغناطیسی را در عناصر



۶ نشان داده شده است.

تحلیل گاوسی بدست آمد، بیشتر است. مقادیر انرژی خروجی بدست آمده از این تحلیل، این موضوع را تأیید می کند (جدول ۱). لازم بذکر است که در مورد لیزرهای سه تراز، برای داشتن بهره لازم است که بیش از نیمی از جمعیت تراز زمینه به تراز شبه پایدار دمش شود و از این رو شروع نوسانات لیزر با یک تاخیر زمانی نسبت به عمل دمش صورت می گیرد. هر دو تحلیل صورت گرفته این موضوع را نشان می دهد (شکل های ۲ و ۵).

جدول ۱: انرژی خروجی لیزر Yb:Er:Glass

$E_{in} (J)$	۲۰	۲۵	۳۰
$E_{out} (J)$ (توزیع یکنواخت)	۰.۲۰۲	۰.۲۹۳	۰.۳۶۸
$E_{out} (J)$ (توزیع گاوسی)	۰.۱۳۷	۰.۲۳۳	۰.۳۳۱

پارامترهایی که در تحلیل عددی از آنها استفاده شده است:

$$n_{er} = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}, \quad N_{yb} = 1.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma_p = 1.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2, \quad \sigma_e = 7 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$$

$$K_f = 7 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}, \quad \gamma_{21} = 125 \text{ s}^{-1}, \quad \gamma_{yb} = 1000 \text{ s}^{-1}$$

$$t_p = 1 \text{ ms}, \quad R = 90\%, \quad p = 2\%, \quad \eta_{pump} = 3\%$$

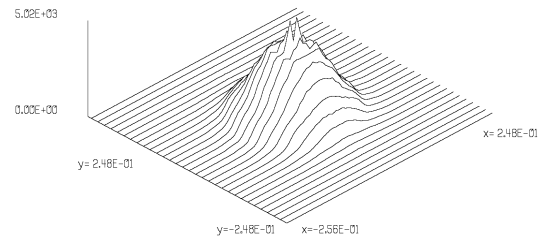
Laser Rod : Diameter = 3 mm Length = 5 cm

۶- نتیجه گیری

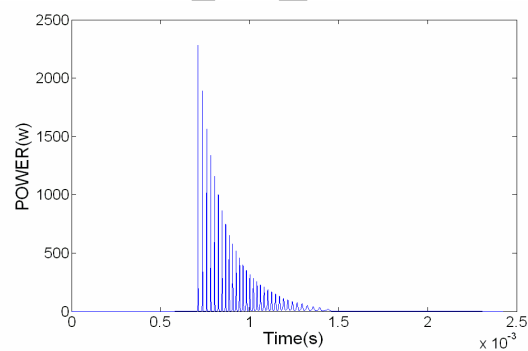
در این تحقیق لیزر Yb:Er:Glass با دمش لامپ درخشی از دیدگاه معادلات آهنگ و با دو روش تحلیل شد. توان خروجی لیزر و وارونی جمعیت یونهای Yb و Er در هر دو تحلیل رفتار زمانی مشابهی دارند. با اینحال انرژی خروجی لیزر در تحلیل توزیع یکنواخت مقدار بیشتری را نتیجه می دهد. همچنین زمان آغاز نوسانات در هر دو تحلیل مقدار یکسانی دارد. با استفاده از نتایج چنین تحلیلی می توان پارامترهای خروجی لیزر را بهینه کرد و بازده این لیزر را در زمینه های مختلف بویژه زمینه نظامی افزایش داد.

مراجع

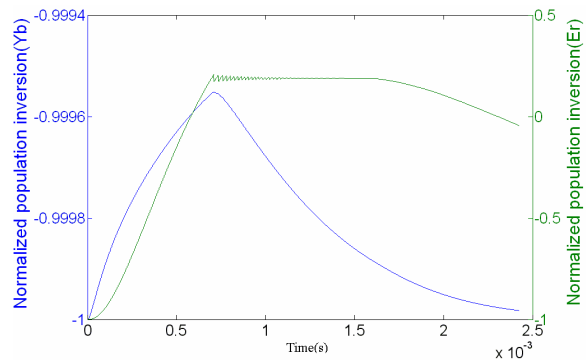
- [1] P. Laporta, S. Taccheo, S. Longhi, O. Svelto, C. Svelto "Erbium-ytterbium micro lasers: optical properties and lasing characteristics" *Optical Materials* 11 (1999) 269-288
- [2] P. Laporta, S. Longhi, S. Taccheo, O. Svelto, "Analysis and modeling of the erbium-ytterbium glass laser" *Optics Communications* 100 (1993) 311-321
- [3] E. Tanguy, C. Larat, J.P. Pocholle, " Modeling of the erbium-ytterbium laser " *Optics Communications* 153 (1998) 172-183
- [4] M.Lukac, " Transient population dynamics in flash lamp pumped sensitized erbium glass lasers " *APPLIED OPTICS* 30(1991) 2489-2494



شکل ۴: توزیع عرضی مد مشدد تخت-تخت با طول $L = 35 \text{ cm}$



شکل ۵: تغییرات زمانی توان خروجی لیزر ($E_{in} = 25 \text{ J}$ $R = 90\%$)



شکل ۶: تغییرات زمانی وارونی جمعیت بهنجار شده یونهای Yb و Er

($E_{in} = 25 \text{ J}$ $R = 90\%$)

۵- بحث و مقایسه دو روش

در نرم افزار GLAD از توزیع واقعی میدان مشدد (پرتو گاوسی) استفاده می شود و بنابراین میزان استخراج انرژی در لبه های میله لیزر کمتر از قسمت مرکزی آن است. در تحلیلی که بر اساس توزیع یکنواخت میدان مشدد صورت گرفت، استخراج انرژی بصورت یکسانی انجام می شود و بنابراین مقدار انرژی بدست آمده نسبت به مقداری که از