بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

ضریب بهره اشباع با استفاده از معادلات نرخ در یک فیبر لیزری متشکل از ماده چلگوجناید ($Ga_5Ge_{20}Sb_{10}S_{65}$)

عیسی حیدرپور، محسن حاتمی

شیراز،دانشگاه صنعتی شیراز،دانشکده فیزیک

I.Heidarpour@sutech.ac.ir

hatami@sutech.ac.ir

چکیده – ما به بررسی ضریب بهره اشباع با استفاده از معادلات نرخ دریک فیبرلیزری که متشکل از ماده چلگوجناید است، می پردازیم. اگرچه،مدل تئوری همه جانبه ای وجود ندارد که بتوان برای شبیه سازی دقیق از کارایی پالس لیزر فیبری استفاده کرد اما با یکپارچه سازی معادله نرخ لیزر و بدست آوردن جمعیت حالت پایدار ،یک ترکیب مدل تئوری پیشنهاد شده است. با شبیه سازی ضریب بهره ای که از معادلات نرخ لیزر فیبری بدست آمده است،توان پمپ و توان سیگنال نیز بررسی می شود. همچنین پارامترهای موثر لیزر فیبر حاوی ماده چلگوجناید (Ga5Ge20Sb10S65) در توان خروجی نظیر طول فیبر، توان پمپ را بررسی کرده ایم و نشان داده ایم که در مقایسه با فیبرهای سیلیکا در مواد چلگوجناید (Ga5Ge20Sb10S65) با توان پمپ کمتر به بهره خروجی بیشتری می‌رسیم.

کلید واژه: توان پمپ و سیگنال، چلگوجناید، ضریب بهره اشباع، فیبر لیزری، معادلات نرخ

Gain saturation coefficient using the rate equations in a laser fiber composed of Chalcogenide(Ga5Ge20Sb10S65)

Isa heidarpour, Mohsen hatami

Abstract - We study the gain saturation coefficient by using the rate equations for a fiber laser made of Chalcogenide (Ga5Ge20Sb10S65) material. Although there is no comprehensive theoretical model that can be used to accurate simulation of fiber laser pulse performance but by integrating the laser rate equations and obtaining a steady-state population, a combination of theoretical model is proposed. By simulating the gain factor which obtained from the fiber laser rate equations, the pump power and the signal power are also investigated. Thus, with this simulation, it can be seen that by increasing the length of the fiber containing Chalcogenide (Ga5Ge20Sb10S65), the output signal power is increased by increasing the input pump power. We have also studied the effective parameters of the fiber laser such as fiber length, pump power containing Chalcogenide (Ga5Ge20Sb10S65) material on the output power. We have shown by smaller input pump power in chalcogenide fiber laser we reache larger output power than silica one.

Keywords: Chalcogenide, gain saturation coefficient, laser fibber, rate equations, pump power and signal

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت *www.opsi.ir* قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

مقدمه

تحقیق درمورد لیزر فیبری علاقه بسیاری از دانشمندان را جذب کرده است تا شرایط مورد نیاز را در زمینه های زیست،پزشکی،دفاع و فرآیند مواد و غیره برآورده کنند. لیزرهای فیبری درآینده مزایای مثل کیفیت بالای پرتو،فشرده سازی،طیف عملیاتی گسترده و غیره دارند.

دیود لیزر توان بالا با طول موج ۷۹۰ نانومتر معمولا بعنوان منبع پمپ برای لیزرهای فیبری چلگوجناید استفاده می شود.تکنولوژی لیزر فیبری با توان فوق بالا در سالهای اخیر به سرعت درحال توسعه است که می توان بعنوان منبع پمپ برای ابرمنبع های مادون قرمز استفاده کرد.

طرح نوسان ساز اصلی و تقویت کننده قدرت(MOPA) معمولا به مقیاس انرژی پالس و میانگین توان مرحله به مرحله اعمال می شود.برخلاف مدل معادله نرخ لیزر(LRE) که می توان موج مداوم(CW) لیزرفیبری را دقیقا توصیف کرد،هنوز مدل تئوری برای شبیه سازی دقیق از پالس لیزر فیبری چلگوجناید به خوبی وجود ندارد.برای شبیه سازی از انتشار غیرخطی و تقویت پمپ استفاده از معادله ی نرخ لیزر (*LRE*) ضروری است [1].

مدل نظری

معادلات نرخ لیزر گذرا برای تقویت پمپ دیود فیبر چلگوجناید به شکل زیر داده شده است:

$$\partial N_3/\partial t = \frac{N_3}{hc}\frac{\Gamma_p}{\pi a^2}\sum_{l=1}^{M_P}\sigma_e(\lambda_{p,l})\lambda_{p,l}(P_{p,l}^{+}+P_{p,l}^{-}) - \frac{N_3}{hc}\frac{\Gamma_p}{\pi a^2}\sum_{l=1}^{M_p}\sigma_e(\lambda_{p,l})\lambda_{p,l}(P_{p,l}^{+}+P_{p,l}^{-}) - CR_{30\leftrightarrow 11} - (A_{32}+A_{31}+A_{30})N_3 \quad (1)$$

$$\partial N_2/\partial t = A_{32}N_3 - (A_{21}+A_{20})N_2 - CR_{20\leftrightarrow 11} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \frac{N_0}{hc}\frac{\Gamma_s}{\pi a^2}\sum_{j=1}^{M_s}\sigma_a(\lambda_{s,j})\lambda_{s,j}(P_{s,j}^{+}+P_{s,j}^{-}) - \frac{N_0}{hc}\frac{\Gamma_s}{\pi a^2}\sum_{j=1}^{M_s}\sigma_e(\lambda_{s,j})\lambda_{s,j}(P_{s,j}^{+}+P_{s,j}^{-}) + A_{31}N_3 + A_{21}N_2 - A_{10}N_1 + 2CR_{30\leftrightarrow 11} + 2CR_{20\leftrightarrow 11} \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = -\frac{N_0}{hc}\frac{\Gamma_s}{\pi a^2}\sum_{l=1}^{M_p}\sigma_a(\lambda_{p,l})\lambda_{p,l}(P_{p,l}^{+}+P_{p,l}^{-}) + \frac{N_3}{hc}\frac{\Gamma_p}{\pi a^2}\sum_{l=1}^{M_p}\sigma_e(\lambda_{p,l})\lambda_{p,l}(P_{p,l}^{+}+P_{p,l}^{-}) - \frac{N_0}{hc}\frac{\Gamma_s}{\pi a^2}\sum_{j=1}^{M_s}\sigma_a(\lambda_{s,j})\lambda_{s,j}(P_{s,j}^{+}+P_{s.j}^{-}) + \frac{N_1}{hc}\frac{\Gamma_s}{\pi a^2}\sum_{j=1}^{M_s}\sigma_e(\lambda_{s,j})\lambda_{s,j}(P_{s,j}^{+}+P_{s,j}^{-}) + A_{30}N_3 + A_{20}N_2 + A_{10}N_1 - CR_{30\leftrightarrow 11} - CR_{20\leftrightarrow 10} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_{p,l}^{\pm}}{\partial z} = \mp\alpha_p P_{p,l}^{\pm} \mp \sigma_a(\lambda_{p,l})\Gamma_p P_{p,l}^{\pm}N_0 \mp \sigma_e(\lambda_{p,l})\Gamma_p P_{p,l}^{\pm}N_3 \quad (5)$$

$$\partial P_{s,j}^{\pm}/\partial z = \mp\alpha_s P_{s,j}^{\pm} \pm \sigma_e(\lambda_{s,j})\Gamma_s P_{s,j}^{\pm}N_1 \mp \sigma_a(\lambda_{s,j})P_{s,j}^{\pm}\Gamma_s N_0 \pm \Gamma_s M_{eff}\sigma_e(\lambda_{s,j})\frac{2hc^2}{\lambda_{s,j}^3}\Delta\lambda_s N_1 \quad (6)$$

که t و z ،زمان و محورهای طولی هستند، $N_i(i=0,1,2,3)$ چگالی اعداد از چهار سطح، در $P_{s,j}^{\pm}$ ،(+) سیگنال توان انتقال و (-)سیگنال توان برگشت از کانال طیفی j^{th} هستند($j=1,\ldots\ldots,M_s$)،در $P_{p,l}^{\pm}$ ،(+)توان پمپ انتقال و (-) توان پمپ برگشت از کانال طیفی l^{th} هستند ($j=(1,\ldots\ldots,M_s$)،$\Gamma_{p,s}$ عوامل توان پمپ و سیگنال هستند، α_s ضریب جذب سیگنال، α_pضریب جذب پمپ، aشعاع هسته، h ثابت پلانک، cسرعت نور، $\sigma_{a,e}$ مقطع جذب و انتشار هستند، $A_{i,j}(i,j=0,1,2,3)$ نرخ انتقال خودبخودی،λ طول موج،$\Delta\lambda_s$ فاصله بین کانال های طیفی است،M_{eff} عدد فوتون برانگیخته در هر حالت است که واحد ها را در شبیه سازی مرتب می کند،زیرا فرض شده است که عملگر تک مد است.

برای حالت تقریباً گاوسی از حالت بنیادی، Γ_s می تواند ساده شود همانند $1-exp(-2\,a^2/w^2)$ که w شعاع مؤثر میدان مد است. Γ_p ساده شده ی A_{core}/A_{clad} برای

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت *www.opsi.ir* قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

پمپ یکنواخت در لایه داخلی است. شرایط آرام سازی متقاطع به شرح زیر است

$$CR_{30\leftrightarrow 11} = k_{3011}N_3N_0 - k_{1130}N_1^2 \quad (7)$$

$$CR_{20\leftrightarrow 11} = k_{2011}N_2N_0 - k_{1120}N_1^2 \quad (8)$$

که k_{1130}, k_{1120} و k_{2011} و k_{3011} تاثیر عبور متناظر هستند.

برای ساده سازی، ما نسبت جمعیت را تعریف می کنیم به شکل $n_i = N_i/N_d\ (i = 0,1,2,3)$ که N_d چگالی غلظت کل است. برای تقویت سیلیکات معمولی TDF، جمعیت سطح ۲ می تواند نادیده گرفته شود.پس، $n_0 + n_1 + n_3 = 1$ است. تعدادی ضرایب پمپ جذب وانتشار(بااندیس pe و pa)و ضرایب سیگنال جذب و انتشار (با اندیس sa و se)به شکل زیر تعریف می کنیم

$$C_{pa} = \frac{\Gamma_P}{\pi a^2}\sum_{l=1}^{M_p}\sigma_a(\lambda_{p,l})\frac{P_{p,l}^{+}+P_{p,l}^{-}}{h\nu_{p,l}} \quad (9)$$

$$C_{pe} = \frac{\Gamma_P}{\pi a^2}\sum_{l=1}^{M_p}\sigma_a(\lambda_{p,l})\frac{P_{p,l}^{+}+P_{p,l}^{-}}{h\nu_{p,l}} \quad (10)$$

$$C_{sa} = \frac{\Gamma_s}{\pi a^2}\sum_{j=1}^{M_s}\sigma_a(\lambda_{s,j})\frac{P_{s,j}^{+}+P_{s,j}^{-}}{h\nu_{s,j}} \quad (11)$$

$$C_{se} = \frac{\Gamma_s}{\pi a^2}\sum_{j=1}^{M_s}\sigma_e(\lambda_{s,j})\frac{P_{s,j}^{+}+P_{s,j}^{-}}{h\nu_{s,j}} \quad (12)$$

که $\nu\nu = c/\lambda$ فرکانس است. معادلات نرخ گذرا لیزر از n_i ساده می شوند به

$$\frac{\partial n_3}{\partial t} = n_0C_{pa} - n_3C_{pe} - (A_{31}+A_{30})n_3 - N_d(k_{3011}n_3n_0 - k_{1130}n_1^2) \quad (13)$$

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = n_0C_{sa} - n_1C_{se} + A_{31}n_3 - A_{10}n_1 + 2N_d(k_{3011}n_3n_0 - k_{1130}n_1^2) \quad (14)$$

$$\frac{\partial n_0}{\partial t} = (n_0C_{pa} - n_3C_{pe}) - (n_0C_{sa} - n_1C_{sa}) + A_{30}n_3 - A_{10}n_1 - N_d(k_{3011}n_3n_0 - k_{1130}n_1^2) \quad (15)$$

برای حالت پایدار، مشتقات جزئی با توجه به t صفر هستند. معادلات نرخ لیزر پایدار ($SLRE$) را می توان بااستفاده از معادلات درجه ۲ آنالیز کرد و نتیجه به شکل زیر است

$$n_3 = \frac{-G_2 + \sqrt{G_2^2 - 4G_1G_3}}{2G_1} \quad (16)$$

$$n_1 = \frac{1}{E_1+1} - \frac{E_2+1}{E_1+1}n_3 \quad (17)$$

$$n_0 = \frac{E_1}{E_1+1} + \frac{E_2-E_1}{E_1+1}n_3 \quad (18)$$

که E نشان دهنده میدان الکتریکی در ضرایب ذکر شده است،

$$G_1 = -N_dk_{3011}\frac{E_2-E_1}{E_1+1} + N_dk_{1130}\left(\frac{E_2+1}{E_1+1}\right)^2 \quad (19)$$

$$G_2 = \frac{E_2-E_1}{E_1+1}C_{pa} - (C_{pe}+A_{31}+A_{30}) - N_dk_{3011}\frac{E_1}{E_1+1} - N_dk_{1130}\left[\frac{2E_2+2}{(E_1+1)^2}\right] \quad (20)$$

$$G_3 = \frac{E_1}{E_1+1}C_{pa} + N_dk_{1130}\left(\frac{1}{E_1+1}\right)^2 \quad (21)$$

$$E_1 = \frac{C_{se}+A_{10}}{2C_{pa}+C_{sa}} \quad (22)$$

$$E_2 = \frac{2C_{pe}+2A_{30}+A_{31}}{2C_{pa}+C_{sa}} \quad (23)$$

بهره $g_0(z,t)$ باتوجه به تاثیر بهره اشباع به شکل زیر است

$$g_0(z,t) \approx g_{ss}(z)exp\left(-\frac{1}{E_s^{sat}}\int_{-\infty}^{t}|A(z,t)|^2dt\right) \quad (27)$$

که $g_{ss}(z) = \Gamma_sN_d(n_1(z)\sigma_e - n_0(z)\sigma_a)$ بهره مؤثر سیگنال، $E_{sat} = h\upsilon_0\pi a^2/\Gamma_s(\sigma_a(\lambda_0)+\sigma_e(\lambda_0))$ انرژی اشباع و $A(z,t)$ دامنه ی مختلط هستند.[2]

روش شبیه سازی بهره موثر به این صورت است: در مرحله اول، بعد از شبیه سازی پارامترهای شامل فیبر، ماده چلگوجناید،پمپ و پالس از پیش تعیین شده هستند.

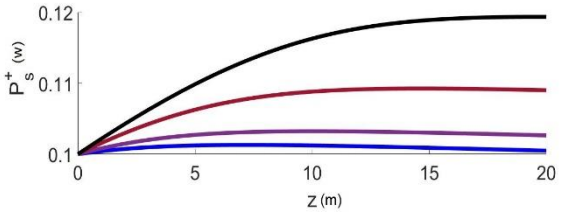
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

درمرحله ی دوم، شبیه سازی حالت پایه با استفاده از معادلات نرخ لیزر با تنظیمات توان میانگین از شرایط مرزی،و وارد کردن مشخصات ماده چلگوجناید[7]،در معادله (۲۷) انجام شده است.در مرحله ی سوم، شبیه سازی معادلات نرخ لیزر گذرا برای فاصله بین دو همسایگی پالس،انجام شده است.در مرحله ی چهارم،توان پمپ ورودی با استفاده از توان سیگنال شبیه سازی شد. [4]

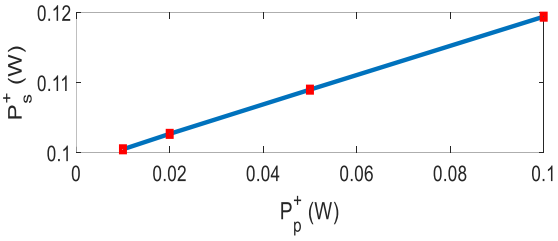
شیشه‌های چلگوجناید یک گروه شناخته شده‌ای از مواد معدنی هستند که شامل یک یا چند درایه‌ی چلگوجن مانند S، Se و Te هستند اما برخلاف سیلیس شامل اکسیژن نمی‌شوند.این شیشه‌ها خواص زیادی دارند که مهم‌ترین آنها این است که ضریب شکست بالا (۳-۲) ولی در سیلیکا حدود(۲,۶-۱,۵)و شفافیت باند مادون قرمز آن در محدوده $(0.6-1.5\mu m)$است،انرژی فونونی کمی دارند $(200-300\,cm^{-1})$،تلفات در این نوع موجبری که از این شیشه ساخته می‌شود پایین است برخلاف شیشه سیلیکا،پایداری شیمیایی بالایی دارند،در ناحیه مرئی و فروسرخ فعال هستند.

مقایسه ی بین نمودارها



شکل(۱):نمودار طول فیبر برحسب توان سیگنال(منحنی رنگ مشکی برای ۰,۱، منحنی ارغوانی برای ۰,۰۵، منحنی بنفش برای ۰,۰۲ و منحنی آبی برای ۰,۰۱)

با انجام شبیه سازی در توان های ورودی پمپ (P_p^+) مختلف، به ترتیب ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ منحنی های شکل(۱) بدست آمد که حالت های به اشباع رسیده ی توان ورودی در فاصله ی $z=20$(m) است.همانطور که در شکل (۱) مشهود است، توان سیگنال P_s^+ با افزایش طول فیبر به مقداری افزایش می یابد تا به حالت اشباع خود برسد. به ازای توان های ورودی ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ توان های خروجی ۰/۱۱۹۴، ۰/۱۰۹، ۰/۱۰۲۷ و ۰/۱۰۰۵ را در طول فیبر $z=20$(m) بدست آوردیم. با شبیه سازی ضریب بهره بدست آمده از معادلات نرخ و داده های توان پمپ ورودی و توان سیگنال، نمودار شکل (۲) را بدست آوردیم.



شکل (۲):نمودار توان پمپ ورودی برحسب توان سیگنال خروجی

نتیجه گیری و بحث ها

با استفاده از مدل تئوری برای شبیه سازی بهره لیزر از معادلات نرخ در طراحی فرایندهای تکراری استفاده شده است. ما نشان داده ایم که در مقایسه با فیبرهای سیلیکا در چلگوجناید *(Ga5Ge20Sb10S65)* با توان پمپ کمتر به بهره خروجی بیشتری می رسیم. این مدل می تواند به طور گسترده ای برای ارزیابی عملکرد و بهینه سازی طراحی لیزرهای فیبری بکاربرده شود.

مرجع‌ها

[1] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics (Elsevier, 2007).

[2] A. V. Smith and J. J. Smith, “Mode instability in high power fiber amplifiers,” Opt. Express 19, 10180–10192(2011).

[3] F. Haxsen, D. Wandt, U. Morgner, J. Neumann, and D.Kracht, Opt. Express 18, 18981 (2010).

[4] J. Liu, Q. Wang, and P. Wang, “High average power picosecond pulse generation from a thulium-doped all-fiber MOPA system,” Opt. Express **20**, 22442-22447 (2012).

[5] F. Stutzki, F. Jansen, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, “2.4 mJ, 33 W Q-switched Tm-doped fiber laser with near diffraction-limited beam quality,” Opt. Lett. **38**, 97-99 (2013).

[6] Darman, M., Fasihi, K.: Circuit-level modeling of quantum cascade lasers: influence of Kerr effect on static and dynamic responses. Optik 127, 10303–10310 (2016)

[7] Z. Tahmasebi, M. Hatami: Study of the gain saturation effect on the propagation of dark soliton in Er+3-doped,Ga5Ge20Sb10S65 chalcogenide fiber amplifier (2011)

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت *www.opsi.ir* قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]