بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

شبیه سازی تولید پالس فوق کوتاه لیزری به روش قفل مدی غیر فعال و با استفاده ازآینه SESAM

ژیلا اسگویی و سید علاء هاشمی گلپایگانی

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران

چکیده – در این مقاله به بررسی فرایند تولید پالسهای فوق کوتاه به روش قفل مدی غیر فعال و با استفاده از آینه‌های جاذب اشباع پذیر نیمه هادی *SESAM* در لیزرهای حالت جامد خواهیم پرداخت. برای توصیف لیزرهای پالسی از معادله اصلی هاس استفاده می‌نماییم. در حالت کلی جواب حالت پایای سیستم با استفاده از روشهای حل عددی امکان پذیر است. نتایج حاصل در حالت پایا منجر به ایجاد پالسهایی می‌شود که قادر به محاسبه شدت و طول آنها خواهیم بود.

کلید واژه- لیزر پالسی فوق کوتاه، قفل مدی غیر فعال، آینه جاذب اشباع پذیر نیمه هادی، معادله اصلی هاس.

Simulation of Ultra short laser pulse generation via passive mode-locking method by using SESAM mirrors

Zhilla Osgoui, Seyed Ala Hashemi Golpayegani,

Iranian National Center of Laser Science and Technology (INLC), Tehran

Abstract: In this paper we investigate the ultra-short pulse generation in solid state lasers with passive mode locking method and using SESAM mirrors. To describe this kind of laser we use the Haus master equation. In general the steady state solution will be found numerically. The steady state results can predict the pulse intensity and its length.

Keywords: Ultra short pulsed laser, passive mode-locking, semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), Haus master equation

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

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

مقدمه

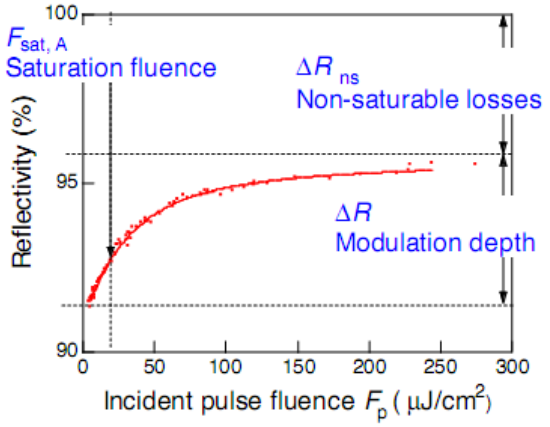
یکی از روشهای رایج در تولید پالسهای پیکوثانیه، استفاده از لیزرهای حالت جامد قفل مدی غیر فعال با پمپاژ دیودی و یک آینه جاذب اشباع پذیر SESAM[1] است. آینه جاذب اشباع پذیرمحیطی است که در آن میزان انعکاس پرتو با افزایش شدت نور عبوری از آن افزایش می‌یابد. در نتیجه پرتوهایی با شدت کم را عبور داده و آنها را از داخل کاواک حذف می‌کند، ولی پرتوهایی با شدت بالا همچنان در داخل کاواک نوسان می‌کنند. آینه های جاذب اشباع پذیر امکان بی نظیری در تولید پالس در لیزرهای حالت جامد با محدوده پالسی نانو و چند صد پیکو ثانیه با استفاده از فرایند سوئیچ Q تا پالسهای چند ده پیکو و فمتو ثانیه با استفاده از فرایند قفل مدی غیر فعال را فراهم می‌آورد [۱]. در این مقاله قصد داریم فرایند تولید پالس در لیزر حالت جامد Nd:glass قفل مدی غیر فعال با استفاده از آینه جاذب اشباع پذیر را شبیه سازی نماییم.

جاذب های اشباع پذیر و آینه‌های SESAM

ماده جاذب اشباع پذیر ماده‌ای است که در آن میزان جذب پرتو با افزایش شدت آن کاهش می‌یابد. در عمل احتیاج به موادی داریم که این ویژگی را در محدوده شدتهایی که لیزرهای حالت جامد تولید می‌کنند داشته باشند. بدین منظور مواد جاذب اشباع پذیر نیمه هادی مناسبترین مواد هستند. پارامترهای کلیدی یک ماده جاذب اشباع پذیر عبارتست از محدوده طول موج قابل جذب توسط ماده، پاسخ دینامیکی ماده، که چقدر طول می‌کشد تا به حالت اولیه برگردد و شدت یا فلوانس اشباع آن، که در چه شدت پالس و یا انرژی اشباع می‌شود. در گذشته عموماً دای[2] به عنوان ماده جاذب اشباع پذیر مورد استفاده قرار می‌گرفت که هم طول عمر کوتاهی داشت، هم سمی بود و هم تجهیزات مورد استفاده در آنها بسیار پیچیده بود. مواد حالت جامد نظیر کریستال Cr:YAG نیز جایگزین دیگری برای دای بودند و از معایب آنها نیز می‌توان به محدود بودن ناحیه طول موج، زمان بازگشت[3] و شدت اشباع آنها اشاره نمود.

مواد جاذب اشباع پذیر نیمه هادی قادر به جذب پرتو در محدوده وسیعی از طول موج (از ناحیه مرئی تا مادون قرمز) هستند. همچنین می‌توان زمان بازگشت و فلوانس اشباع آنها را (از ۱تا ۱۰۰ میکرو ژول بر سانتی متر مربع μJ/cm2) با تغییر پارامترهای رشد و طراحی تجهیزات کنترل نمود. با گنجاندن و یکپارچه کردن مواد جاذب اشباع پذیر نیمه هادی در ساختارآینه می‌توان به آینه-هایی دست یافت که قادر به انعکاس بیشتر پرتوهای پرتوان‌تر خواهند بود که به اینگونه از آینه‌ها، آینه‌های جاذب اشباع پذیر نیمه هادی SESAM گفته می‌شود [۲]. این آینه ها به جای جذب در فاز انعکاس کار می-کنند به گونه‌ای که میزان انعکاس آنها با افزایش شدت پالس افزایش می‌یابد.

هر آینه SESAM شامل پنج پارامتر ماکروسکوپیک مهم می‌باشد که تعیین کننده نحوه عملکرد آن در سیستم لیزری است که می‌توان به زمان بازگشت، پهنای باند طیفی[4]، عمق مدولاسیون[5]، شدت اشباع[6]، اتلاف غیر اشباع پذیر[7] اشاره نمود. شکل (۱) منحنی تغییرات ضریب بازتاب یک آینه SESAM و پارامترهای آن را نمایش می-دهد.



شکل ۱: منحنی تغییرات ضریب بازتاب بر حسب شدت پالس ورودی یک آینه‌ی SESAM و پارامترهای ماکروسکوپیک آن.

[1] Semiconductor Saturable Absorber Mirrors=SESAM
[2] dye
[3] recovery time
[4] spectral band width
[5] modulation depth
[6] saturation intensity
[7] nonsaturable loss

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

معادله حاکم بر آینه های SESAM به صورت معادله (۱) است. در معادله فوق q_0 اتلاف غیر اشباع پذیر، $P(t)$ توان پالس، τ_A زمان بازگشت و $E_{sat,A}$ شدت اشباع آینه جاذب اشباع پذیر نیمه هادی است.

$$\frac{dq(t)}{dt} = -\frac{q(t)-q_0}{\tau_A} - \frac{q(t)P(t)}{E_{sat,A}} \qquad (۱)$$

رژیمهای مختلف پالس تولید شده به وسیله آینه SESAM

رژیمهای مختلف پالس تولید شده به وسیله آینه جاذب اشباع پذیر عبارتند از پالس سوئیچ Q پیوسته[8]، پالس قفل مدی سوئیچ شده[9] و پالس قفل مدی پیوسته[10]. از آنجا که در لیزر های حالت جامد طول عمر تراز بالای لیزری بلند است، با استفاده از مواد جاذب اشباع پذیر موجود به دلیل محدودیت در بازه پارامترهای کلیدی آنها قادر به تولید پالسهای قفل مدی پیوسته نیستیم و رژیم قالب، قفل مدی سوئیچ شده و یا سوئیچ Q پیوسته خواهد بود. اما در آینه های SESAM، مهندسی و کنترل دقیق پارامترهای کلیدی آنها از جمله زمان بازگشت، شدت اشباع و طول موج جذبی در محدوده وسیعی با استفاده از ترکیب روشهای مختلف ساختاری و مواد مورد استفاده، امکان پذیر است. بنابراین می‌توان از آنها برای طراحی لیزرهای حالت جامد پالسی قفل مدی پیوسته استفاده کرد.

شرط عدم تشکیل پالسهای قفل مدی سوئیچ شده

در لیزرهای حالت جامد قفل مدی غیر فعال با آینه SESAM، شرط عدم تشکیل پالس قفل مدی سوئیچ شده آن است که نامساوی زیر در آن برقرار باشد [۳].

$$E_p^2 > E_{sat,L} \cdot E_{sat,A} \cdot \Delta R \qquad (۲)$$

اگر چه شرط فوق دارای یک حد بالایی نیز هست که به موجب آن پدیده چند پالسی اتفاق می‌افتد. در نامساوی فوق E_p انرژی پالس تولید شده، $E_{sat,L}$ انرژی اشباع لیزر، $E_{sat,A}$ و ΔR به ترتیب انرژی اشباع و عمق مدولاسیون آینه SESAM می‌باشند.

[8] CW-Q-Switching
[9] Q-Switched mode locking
[10] CW-mode locking

معادله‌ی اصلی (master equation)

به منظور شناخت چگونگی تولید پالس‌های فوق کوتاه، تئوری قفل مدی غیر فعال در قالب معادله‌ی اصلی هاس[11] بررسی می‌شود [۴]. در این معادله تحول زمانی جبهه موج در داخل کاواک لیزری در یک مسیر رفت و برگشت محاسبه می‌شود. در حالت پایا معادله دیفرانسیل حاکم به صورت معادله (۳) نوشته می‌شود. جملاتی که در این معادله ظاهر می‌شوند به صورت آثار بهره محیط فعال، پاشندگی تاخیر گروهی[12]، مدولاسیون خود فاز[13] و اتلاف هستند.

$$T_R \frac{\partial A(T,t)}{\partial T} = \Delta A_i = 0 \qquad (۳)$$

بنابراین می‌توان معادله اصلی را در حالت قفل مدی غیر فعال در حضور یک آینه جاذب اشباع پذیر به صورت معادله (۴) نوشت. در این معادله $A(T,t)$ دامنه جبهه موج کند تغیر[14]، T_R زمان رفت و برگشت داخل کاواک، g بهره اشباع، $D_g = g/\Omega_g^2$ اثر پاشندگی بهره، D ناشی از پاشندگی تاخیر گروهی داخل کاواکی GDD، $\delta = (2\pi n_2/\lambda_0 A_{eff})l$ ضریب مدولاسیون خود فازی SPM، (که در آن n_2 ضریب شکست غیر خطی ماده فعال لیزر، A_{eff} سطح مقطع موثر مد لیزری و l طول کریستال است)، l اتلاف خطی در یک مسیر رفت و برگشت و $q(T,t)$ اتلاف ناشی از آینه $SESAM$ است. معادله حاکم بر آینه جاذب اشباع پذیر نیز طبق رابطه (۱) توصیف می‌شود.

$$T_R \frac{\partial A(T,t)}{\partial T} = \begin{bmatrix} g + D_g \dfrac{\partial^2}{\partial t^2} + iD\dfrac{\partial^2}{\partial t^2} \\ -i\delta|A|^2 - l - q(T,t) \end{bmatrix} A \qquad (۴)$$

همچنین فرض می‌کنیم که بهره به مقدار ثابت خود متناظر با توان میانگین $P(T) = E_p(T)/T_R$ طبق معادله (۵) رسیده است. در معادله فوق g_0 بهره سیگنال کوچک و $E_p(T)$ انرژی پالس است.

$$g(T) = \frac{g_0}{1 + E_p(T)/P_L T_R} \qquad (۵)$$

[11] Haus master equation
[12] Group delay dispersion (GDD)
[13] Self-phase modulation (SPM)
[14] slowly varying field envelope

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

تنها در چند مورد خاص می‌توان معادلات کوپل شده (۱) و (۴) را با روش تحلیلی حل کرد. در حالت کلی جواب حالت پایای سیستم تنها با استفاده از روشهای حل عددی امکان پذیر است که ما در اینجا از روش Split-step-Fourier-transform method استفاده کرده‌ایم. در روش فوق جملات خطی در فضای فرکانس در یک مرحله و جملات غیر خطی در فضای زمان در مرحله دیگر محاسبه می‌شود. نتایج حاصل در حالت پایا منجر به ایجاد پالسهایی می‌شود که قادر به محاسبه شدت و طول آنها خواهیم بود.

شبیه سازی فوق برای لیزر حالت جامد Nd:glass با پارامترهای ذکر شده در مقاله [۵] انجام شده است.

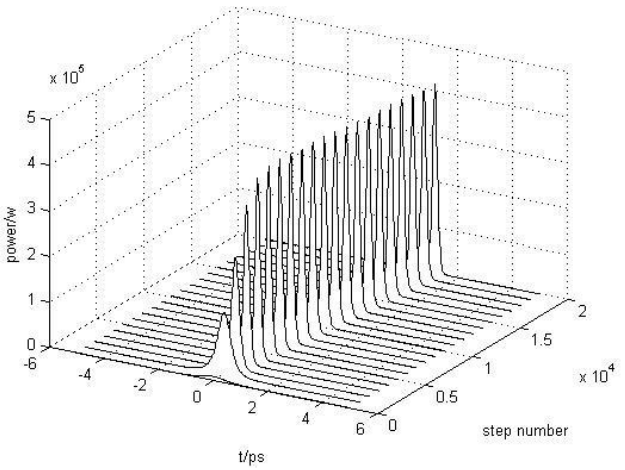
$$g_0 = 0.2, E_{sat,A} = 17nJ, \Omega_g = 2\pi.4THz, l = 0.01,$$

$$D = -75\ fs^2,\ q_0 = 0.05, \tau_A = 50\ fs, \delta = 0.2/MW$$

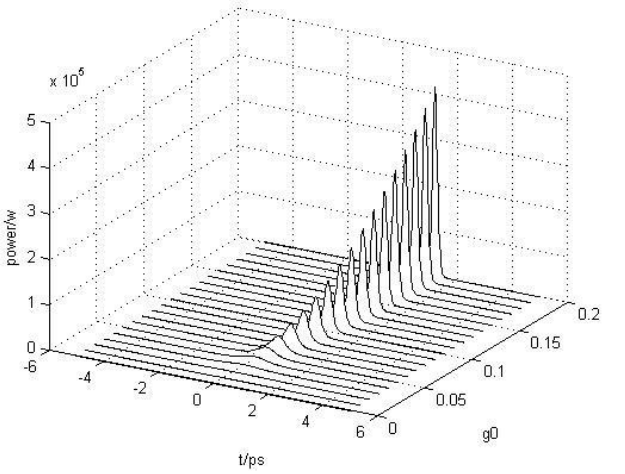
شکل (۳) نتایج حاصل از شبیه سازی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود پالس حدودا پس از ۲۰۰۰۰ رفت و برگشت به حالت پایا می‌رسد و پالسی به طول fs ۲۰۰ تولید می‌کند. شکل (۴) نیز پالس ایجاد شده به ازای مقادیر مختلف g_0 از ۰ تا ۰/۲ در ۱۰۰ مرحله را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای مقادیر کوچکتر از $g_0 = 0.05$ پالسی تشکیل نمی‌شود و به ازای مقادیر بزرگتر از آن پالس به حالت پایا می‌رسد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند تولید پالس در لیزر Nd:glass به روش قفل مدی غیر فعال و با استفاده از آینه SESAM مورد بررسی قرار گرفت. همچنین شرط عدم تشکیل پالسهای قفل مدی سوئیچ شده به منظور دستیابی به پالس قفل مدی پیوسته مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از حل عددی معادلات حاکم، پارامترهای پالس تولید شده ازجمله طول پالس و شدت را پیش بینی کردیم.



شکل ۲: تحول زمانی پالس تولید شده پس از ۲۰۰۰۰ رفت و برگشت داخل کاواک



شکل ۳: پالس ایجاد شده به ازای مقادیر مختلف g_0 از ۰ تا ۰/۲ در ۱۰۰ مرحله.

مراجع

[1] U. Keller,K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. H¨ onninger, N. Matuschek, and J. Ausder Au, "*Semiconductor saturable absorber mirros (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers*," **IEEE J. Select. Topics Quantum Electron**.,vol.2,pp.435–453,1996.

[2] U. Keller "*Recent developments in compact ultrafast lasers*" **Nature**, vol. 424, pp. 831-838, 2003

[3] Frede M., Wilhelm R., Kracht D., *Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking*, **J. Opt. Soc. Am. B.** vol 16, (1999) 46-56.

[4] H.A.Haus,"*Theory of mode locking with a slow saturable absorber,"* **IEEE J. Quantum Electron**.,vol.11,pp.736–746,1975.

[5] J. Aus der Au, D.Kopf, F.Morier-Gnoud, M..Moser, and U.Keller, "*60-fs pulses from a diode-pumped Nd:glass laser*," **Opt.Lett**.,vol.22, pp.307–309,1997.

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