



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 از آینه SESAM

ژیللا 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

## 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<sup>۱</sup> SESAM است. آینه جاذب اشباع پذیر محیطی است که در آن میزان انعکاس پرتو با افزایش شدت نور عبوری از آن افزایش می یابد. در نتیجه پرتوهایی با شدت کم را عبور داده و آنها را از داخل کاواک حذف می کند، ولی پرتوهایی با شدت بالا همچنان در داخل کاواک نوسان می کنند. 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 می آورد [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.

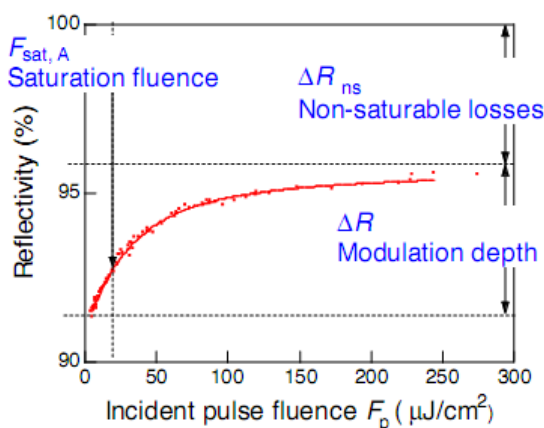
## جاذب های اشباع پذیر و آینه های SESAM

ماده جاذب اشباع پذیر ماده ای است که در آن میزان جذب پرتو با افزایش شدت آن کاهش می یابد. در عمل احتیاج به موادی داریم که این ویژگی را در محدوده شدتهایی که لیزرهای حالت جامد تولید می کنند 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 می کشد تا به حالت اولیه برگردد و شدت یا فلوانس اشباع آن، که در چه شدت پالس و یا انرژی اشباع می شود. در گذشته عموماً دای<sup>۲</sup> به عنوان ماده جاذب اشباع پذیر مورد استفاده قرار می گرفت 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 می توان به محدود بودن ناحیه طول موج، زمان بازگشت<sup>۳</sup>

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 می توان زمان بازگشت و فلوانس اشباع آنها را (از ۱ تا ۱۰۰ میکرو ژول بر سانتی متر مربع  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ) با تغییر پارامترهای رشد و طراحی تجهیزات کنترل نمود. با گنجاندن و یکپارچه کردن مواد جاذب اشباع پذیر نیمه هادی در ساختار آینه می توان به آینه های دستیافت یافت که قادر به انعکاس بیشتر پرتوهای پرتوان تر خواهند بود که به اینگونه از آینه ها، آینه های جاذب اشباع پذیر نیمه هادی SESAM گفته می شود [۲]. این آینه ها به جای جذب در فاز انعکاس کار می کنند به گونه ای که میزان انعکاس آنها با افزایش شدت پالس افزایش می یابد.

هر آینه SESAM شامل پنج پارامتر ماکروسکوپیک مهم می باشد که تعیین کننده نحوه عملکرد آن در سیستم لیزری است که می توان به زمان بازگشت، پهنای باند طیفی<sup>۴</sup>، عمق مدولاسیون<sup>۵</sup>، شدت اشباع<sup>۶</sup>، اتلاف غیر اشباع پذیر<sup>۷</sup> 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.

<sup>۴</sup> spectral band width

<sup>۵</sup> modulation depth

<sup>۶</sup> saturation intensity

<sup>۷</sup> nonsaturable loss

<sup>۱</sup> Semiconductor Saturable Absorber Mirrors=SESAM

<sup>۲</sup> dye

<sup>۳</sup> recovery time

## معادله‌ی اصلی (master equation)

به منظور شناخت چگونگی تولید پالس‌های فوق کوتاه، تئوری قفل مدی غیر فعال در قالب معادله‌ی اصلی هاس<sup>۱۱</sup> 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<sup>۱۲</sup>، مدولاسیون خود فاز<sup>۱۳</sup> و اتلاف هستند.

$$T_R \frac{\partial A(T, t)}{\partial T} = \Delta A_i = 0 \quad (3)$$

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 تغییر<sup>۱۴</sup>،  $T_R$  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  $GDD$ ،  $\delta = (2\pi n_2 / \lambda_0 A_{eff})$  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.

$$T_R \frac{\partial A(T, t)}{\partial T} = \left[ g + D_g \frac{\partial^2}{\partial t^2} + iD \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] A - i\delta |A|^2 - l - q(T, t) \quad (4)$$

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.

$$g(T) = \frac{g_0}{1 + E_p(T) / P_L T_R} \quad (5)$$

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

$$\frac{dq(t)}{dt} = -\frac{q(t) - q_0}{\tau_A} - \frac{q(t)P(t)}{E_{sat,A}} \quad (1)$$

## 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<sup>۸</sup>، پالس قفل مدی سوئیچ شده<sup>۹</sup> و پالس قفل مدی پیوسته<sup>۱۰</sup>. از آنجا که در لیزرهای 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 آینه‌های 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.

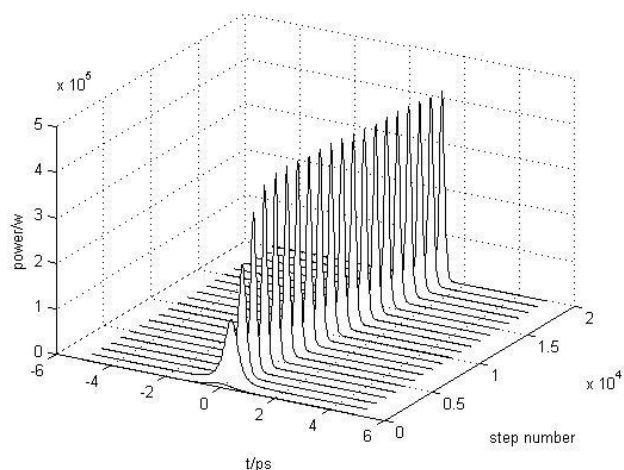
## شرط عدم تشکیل پالسهای قفل مدی سوئیچ شده

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].

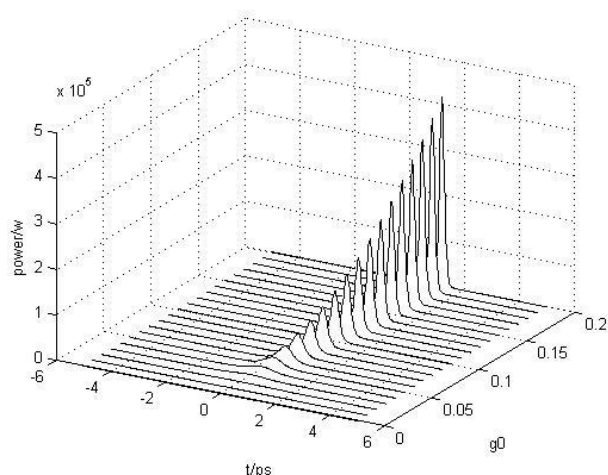
$$E_p^2 > E_{sat,L} \cdot E_{sat,A} \cdot \Delta R \quad (2)$$

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  $\Delta R$  به ترتیب انرژی اشباع و عمق مدولاسیون آینه SESAM می‌باشند.

<sup>11</sup> Haus master equation<sup>12</sup> Group delay dispersion (GDD)<sup>13</sup> Self-phase modulation (SPM)<sup>14</sup> slowly varying field envelope<sup>8</sup> CW-Q-Switching<sup>9</sup> Q-Switched mode locking<sup>10</sup> CW-mode locking



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. Hönninger, N. Matuschek, and J. Ausder Au, "Semiconductor saturable absorber mirrors (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.

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.

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

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

شکل (۳) نتایج حاصل از شبیه سازی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود پالس حدوداً 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 از جمله طول پالس و شدت را پیش بینی کردیم.