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

# تاثیر مواد چپگرد غیرخطی در کاواک خارجی بر دینامیک خروجی لیزر نیمه رسانا

اکبر جعفری، خسرو مبهوتی

ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه فیزیک

**چکیده – در این مقاله تاثیر مواد چپگرد غیرخطی موجود در کاواک خارجی بر دینامیک یک لیزر نیمه رسانا مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نحوه عملکرد محیط های چپگرد مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس نحوه تاثیر این مواد بر دینامیک شدت خروجی لیزر مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت، نمودارهای زمانی مربوط به این اندرکنش ها با استفاده از مجموعه معادلات اپتیکی و معادلات لیزری لانگ کابایاشی رسم شده است. نتایج عددی بدست آمده نشان می دهند که پس از اعمال تاثیر محیط چپ‌گرد، خروجی ناپایدار لیزر می‌تواند به خروجی پریودیک و پایدار اصلاح گردد.**

کلید واژه- لیزر نیمه رسانا،کاواک خارجی، مواد غیرخطی چپگرد.

# Effect of left hand nonlinear materials in the external cavity on the dynamics of semiconductor lasers

Akbar Jafari, Khosro Mabhouti

Physics Department, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia

Abstract- In this study, the effect of left hand nonlinear materials in the external cavity on the dynamics of semiconductor lasers is investigated. For this purpose, the performance of the left hand environment is examined and the effect of this materials on dynamics of the out put intensity of laser has been studied. Finally, the time series of these is plotted by the uses of the optical equations and the Lang-Kabayashi lasers rate equations. The numerical results showed that after applying the Left-Hand environment's effects, the unstable output of the laser can be improved to stable and periodic output.

Keywords: Semiconductor laser, External cavity, Left–Hand Nonlinear Materials.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]



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

## ۱- مقدمه

گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی یک محیط، یک اصل اساسی در پاسخ ماکروسکپیک محیط به میدانهای الکترومغناطیسی می باشد. اخیرا دسته دیگری از عناصر با ویژگی خاص اپتیکی ساخته شده اند. این مواد با عنوان مواد مغناطیسی چپگرد شناخته می‌شوند [۱و۲]. به عبارت دیگر مواد چپگرد موادی هستند که خواص الکترومغناطیسی آنها با خواص الکترومغناطیسی مواد موجود در طبیعت متفاوت می باشد. به همین علت به آنها واژه فرامواد اطلاق می شود. لازم به ذکر است که چنین موادی در طبیعت وجود ندارند. ساخت چنین موادی همراه با منفی شدن ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی می‌باشد [۳و۴]. یعنی در این‌گونه مواد $\varepsilon < 0$ و $\mu < 0$ می‌باشد. یک ویژگی شگفت آور مواد چپگرد توانایی آنها در تقویت امواج ناپایدار است. این موضوع امکان استفاده از مواد چپگرد را در ساخت لنزهای عالی میسر می سازد.

این مواد مصنوعی بطور معمول از ردیف فیلم های فلزی تشکیل می شوند و امواج را در فرکانس های تشدیدی، بطور غیر منتظره ای کاملا از خود عبور می دهند. تاکنون مطالعات گسترده ای در زمینه خواص خطی و غیرخطی مواد چپگرد و راستگرد انجام شده است [۵و۶]. اما آنچه که در این مطالعات مورد اهمیت قرار نگرفته نحوه تاثیر این محیط ها بر شدت، دینامیک و مشخصات اپتیکی میدان خروجی لیزرهای نیمه رسانا می باشد. در واقع از آنجائیکه لیزرهای نیمه رسانا از لحاظ تنوع دینامیکی جزء پرکاربردترین لیزرها می باشند، مطالعه بر روی این اندرکنش ها بین مواد فعال اپتیکی به عنوان کاواک خارجی از اهمیت بالایی برخوردار است. طراحی کاواک های چند لایه بر پایه مواد داری خاصیت ایجاد قطبش چپگرد و راستگرد می تواند شرایط جدیدی را از نقطه نظراندر کنش میدان لیزری با این مواد پدید آورد.

در این مقاله با قرار دادن یک ماده چپگرد در کاواک خارجی لیزر نیمه‌رسانا کاواک حلقه‌ای در نظر گرفته شده که پرتو لیزری پس از عبور از ماده چپگرد مجددا به لیزر نیمه‌رسانا تزریق می‌گردد. تزریق این پرتو دینامیک خروجی لیزر می‌تواند تحت تاثیر قرار بگیرد. تغییرات ایجاد شده در دینامیک خروجی لیزر به کمک معادلات لیزری اصلاح شده و حل عددی این معادلات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۱ ضریب شکست منفی در رابطه ی بین خلاء و مواد چپگرد

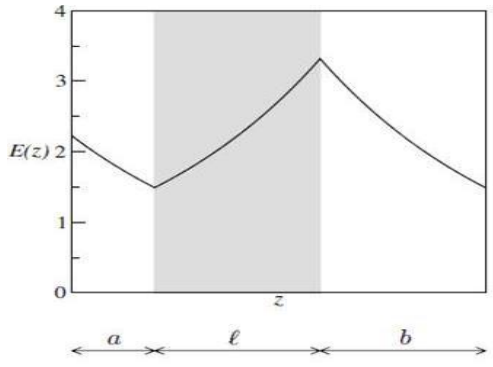
ضریب شکست منفی در رابطه ی بین خلاء و مواد چپگرد ساخت یک لنز را میسر میسازد. ابتدا حالت ایده آل زیر را در نظر بگیرید :

$$\varepsilon = -1 \ , \ \mu = -1 \qquad (۱)$$

در نتیجه $n = -1$ بوده و در این مورد ماتریس انتقال ماده ی چپگرد بصورت زیر خواهد بود[۷]:

$$M = \begin{pmatrix} e^{ik_{2z}l} & 0 \\ 0 & e^{-ik_{2z}l} \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

این ماتریس قطری نشان می‌دهد که هیچ بازتابی در تجزیه و تحلیل انتقال کامل موج نوری وجود ندارد. حال اگر یک منبع نقطه ای واقع در فاصله ی a از سطح مشترک مواد چپگرد در نظر گرفته شود، تمام امواج نوری در طرف دیگر مواد چپگرد قابل مشاهده می باشند. اگر $l$ ضخامت ماده چپگرد باشد پس فاصله تصویر از مواد چپگرد $b = l - a$ خواهد بود. همچنین فاصله حرکت هر موج در داخل مواد دقیقا قابل مشاهده است (شکل ۱).




شکل ۱: نمودار تغییرات موج الکترومغناطیسی انتقالی ناپایدار از یک ماده چپ‌گرد.

از آنجائیکه بردار موج داخل مواد چپگرد نسبت به بردار موج خارج از مواد چپگرد علامت مخالف دارد ولی هر دو بردار مقدار مشابهی دارند، لذا این نتیجه را خواهد داد که تفاوت فاز بین منبع نقطه و تصویر صفر است. یعنی مواد



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]

چپگرد علاوه بر اینکه تمام امواج خروجی را در یک نقطه متمرکز می کنند امواجی که در منبع بوده را نیز با فاز یکسان بهم می رسانند. انسجام فاز امواج ورودی در ساخت یک تصویر بسیار مهم است. لازم به ذکر است که گفته های فوق تنها زمانی صادق هستند که رابطه (۱) برقرار باشد.

## ۲-۲ انتشار امواج ناپایدار در مواد چپگرد

یکی از ویژگی های مواد چپگرد تقویت امواج ناپایدار است. برای درک بهتر این موضوع ابتدا بایستی انتقال موج ناپایدار در یک سطح، واقع در z = 0 بین خلاء و مواد چپگرد با ضریب شکست n مورد بررسی قرار گیرد. میدان الکترومغناطیسی ورودی بطور نمایی در امتداد محور z کاهش می یابد:

$$E=|E|e^{ik_x x-k_1 z} \qquad (۳)$$

در اینجا از $k_1 z=i\kappa_1$ استفاده می شود و :

$$\kappa_1=\sqrt{(k_x{}^2-\frac{\omega^2}{c^2})}\rangle 0 \qquad (۴)$$

در سمت راست، در سطح مشترک ماده چپگرد موج زیر وجود دارد :

$$E=|E|e^{ik_x x-k_2 z}\ ,\ z\rangle 0 \qquad (۵)$$

که در آن:

$$\kappa_1=\sqrt{(k_x{}^2-\frac{\omega^2}{c^2}n^2)} \qquad (۶)$$

در این حالت عنصر ماتریس انتقال $M_{22}$ برای معادله (۳) در مواد چپگرد به صورت زیر داده می شود [۷]:

$$M_{22}=e^{-\kappa_2 l} \qquad (۷)$$

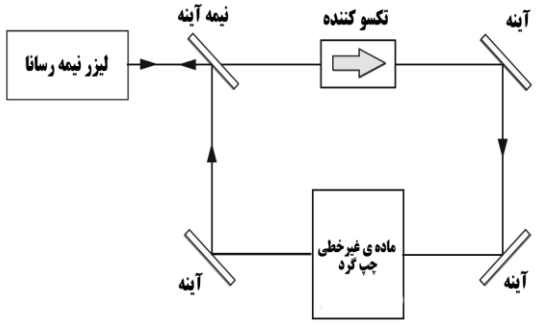
بنابراین دامنه انتقال بصورت نمایی درون مواد چپگرد افزایش خواهد یافت :

$$t=\frac{1}{M_{22}}=e^{\kappa_2 l} \qquad (۸)$$

عناصر خارج از قطر ماتریس انتقال به صورت $M_{12}=M_{21}=0$ داده می‌شود و این بدین معنی است که هیچ موج ناپایداری در سطح مشترک وجود ندارد. همانطورکه در شکل ۱ مشاهده می شود موج ناپایدار ساطع شده از منبع هنگامی که به سمت مواد چپگرد منتشر می‌گردد کاهش می‌یابد (این کاهش به صورت $e^{-\kappa z}$ می‌باشد). سپس هنگامی که موج به سطح می‌رسد، شروع به افزایش نمایی $e^{+\kappa z}$ می‌کند. در نهایت پس از عبور از ماده چپگرد، در طرف مقابل، دامنه موج ناپایدار دوباره کاهش می یابد.

## ۳- مدل ریاضی

در شکل ۲ با استفاده از آینه ها و نیز با استفاده از یکسو کننده نوری خروجی لیزر فرستنده می تواند بعد از عبور از ماده‌ی چپگرد مجددا به لیزر تزریق شود.




شکل۲: طرحواره اپتیکی لیزر نیمه رسانا با کاواک خارجی حلقه‌ای شامل ماده ای با خواص غیر خطی اپتیکی.

در حالت بی بعد، معادلات لانگ-کاباياشی ، قابلیت توصیف دینامیک لیزرهای نیمه رسانا با کاواک خارجی را خواهد داشت ، که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت [۸و۹]:

$$\frac{dE}{dt}=(1+i\alpha)NE+\eta\,E(t-\tau)e^{-iC_P+\kappa_2 l} \qquad (۹)$$

$$T\frac{dN}{dt}=P-N-(1+2N)|E|^2 \qquad (۱۰)$$

در معادله (۹) جمله $e^{\kappa_2 l}$ با در نظر گرفتن نتیجه حاصل از معادله (۸) نشاندهنده نحوه تاثیر ماده چپ‌گرد بر دامنه پرتوی لیزری عبوری از آن می‌باشد. در روابط فوق، $E$ نشانگر میدان الکتریکی بهنجار شده ، $N$ وارونی انبوهی، $\alpha$فاکتور پهن شدگی، $\eta$ شدت پس خوراند از آینه های خارجی و $C_P$ فاز پس خوراند می‌باشد. نسبت بین طول عمر کاواک به طول عمر حامل با $T$ ، میزان جریان دمش شده با $P$ و میزان تاخیر زمانی در کاواک ی خارجی با $\tau$ نشان داده شده است. در محاسبات از پارامترهای

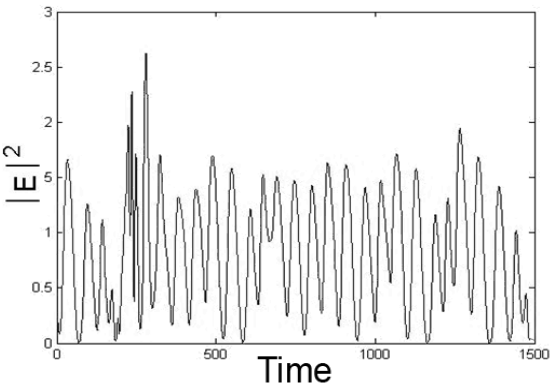


[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]

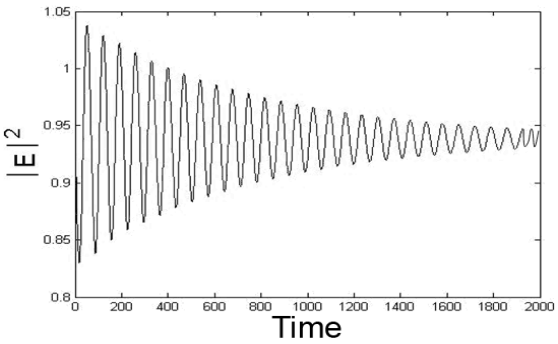
کاواک کوتاه به صورت $T = ۱۷۱۰$ و $\tau$=۷۰ استفاده شده است[۱۰].

## ۴- بحث و بررسی

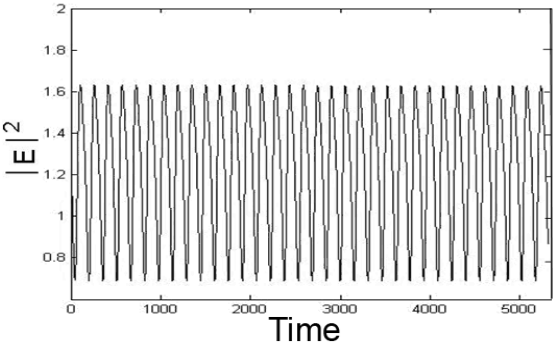
در این قسمت به مطالعه نحوه تاثیر ماده چپ گرد بر دینامیک شدت خروجی لیزر نیمه‌رسانا می‌پردازیم. دینامیک ورودی به ماده چپ گرد از نوع دینامیک ناپایدار انتخاب شده. نمودار تحول زمانی این دینامیک در شکل ۳ نشان داده شده است. با عبور این میدان لیزری از ماده چپ‌گرد مشاهده می شود که به ازای مقادیر مختلفی که برای $kl$ انتخاب می‌گردد، مشاهده می‌شود که میدان عبوری از این ماده، بعد از انعکاس توسط آینه ها و تزریق شدن به لیزر منجر به تغییر در دینامیک عملکرد لیزر می‌گردد. در شکل ۴ برای ($kl$=۰.۱) مشاهده می‌شود که وجود ماده چپ گرد منجر به تضعیف نوسانات لیزری می-گردد، و میتواند مانع از عملکرد لیزر گردد. با افزایش در مقدار $kl$ و انتخاب ($kl$=۰.۲) مشاهده می‌گردد که این بار بر خلاف حالت گذشته وجود ماده چپ گرد باعث اصلاح نوسانات ناپایدار لیزری گشته و نوساناتی منظم و پایدار در شدت خروجی لیزر مشاهده می‌شود (شکل ۵). با ادامه روند افزایشی در مقدار $kl$ می‌توان شرایط کارکرد لیزر را از حالت ناپایدار (شکل ۳) به سمت عملکرد پالسی سوق داد و این مهم با انخاب مقدار ۰.۶ برای $kl$ امکان پذیر است (شکل ۶). در واقع همانطور که مشاهده می‌شود حضور ماده‌ی چپ‌گرد در کاواک خارجی لیزری می‌تواند دینامیک ناپایدار لیزر را به سمت دینامیک های پایدار و یا حتی عملکرد پالسی سوق دهد. البته در مواقعی نیز می‌تواند مانع از عملکرد لیزر شده و نوسانات لیزری را به شدت تضعیف کند.



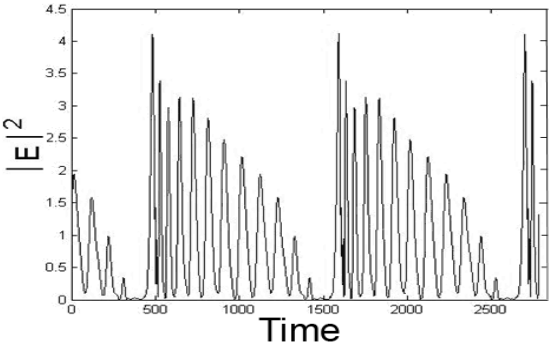

شکل ۳: نمودار تحول زمانی شدت خروجی لیزر برای دینامیک آشوبناک.




شکل ۴: نمودار تحول زمانی شدت خروجی لیزر برای $kl$=۰.۱.




شکل ۵: نمودار تحول زمانی شدت خروجی لیزر برای $kl$=۰.۲.




شکل ۶: نمودار تحول زمانی شدت خروجی لیزر برای $kl$=۰.۶.

## مراجع

[1]. R. A. Shelby, D. R. Smith, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, Appl. Phys. Lett. **78**, 489 (2001).
[2]. A. A. Zharov, N. A. Zharova, I. V. Shadrivov, and Y. S. kivshar, Appl. Phys. Lett. **87**, 091104 (2005).
[3]. A. Boardman, M. Brongersma, M. Stockman, and M. Wegener, J. Opt. Soc. Am. B **26**, PM1 (2009).
[4]. C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden, S. Burger, L. Zschiedrich, F. Schmidt, J. F. Zhou, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, Phys. Rev. Lett. **95**, 203901 (2005).
[5]. P. Kockaert, P. Tassin, G. Van der Sande, I. Veretennicoff, and M. Tlidi, Phys. Rev. A **74**, 033822 (2006).
[6]. V. M. Shadrivov, A. A. Zharov, and Y. S. Kivshar, J. Opt. Soc. Am. B **23**, 529 (2006).
[7] Peter Markoš Costas M. SoukoulisWave, *"Propagation From Electrons to Photonic Crystals and Left-Handed Materials*", Princeton University Press (2008).
[8] R. Lang and K.Kobayashi, IEEE J. Quantum Electron. **16**, 347 (1980).
[9] K. Green, Phys. Rev. E **79**, 036210 (2009).
[10] A. Jafari, H. Sedghi, Kh. Mabhouti, S. Behnia, Opt. Commun. **284**, 3018 (2011).



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]