

کنترل امواج خروشان در یک لیزر نیم‌رسانای تزریق نوری با مدولاسیون مربعی دامنه‌ی پمپ

معصومه زکی^۱ و سید مهدی حسینی^۱

تاریخ ارسال دی ۹۵، پذیرش بهمن ۹۵

چکیده: در این مقاله به بررسی امواج خروشان در یک لیزر نیمه‌هادی تزریقی نوری توسط مدولاسیون مربعی پمپ پرداخته شده است. بدین منظور، معادلات نرخ لیزر به صورت عددی حل شده‌اند و شدت میدان بر حسب زمان محاسبه و بررسی شده است. همچنین تغییرات امواج خروشان بر حسب دامنه و بسامد مدولاسیون برای مقادیر مختلف جریان محاسبه شده و اثر آن بر روی این امواج بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر جریان، روند تغییر امواج خروشان بر حسب دامنه و بسامد مدولاسیون تزریق نوری کاملاً متفاوت است. به طوری که در جریان‌های کم تمرکز امواج خروشان در ناحیه‌ی با بسامد مدولاسیون بالا است و در جریان‌های بیشتر این تمرکز در نواحی با دامنه‌ی مدولاسیون پایین است.

واژه‌های کلیدی: امواج خروشان، لیزر نیمه‌هادی و پمپ مربعی.

۱. مقدمه

اتفاقاتی را که ما در این جهان شاهد آن می‌باشیم گاه می‌تواند فاجعه‌آمیز و ویرانگر باشد، از جمله سونامی، زلزله و... [۱-۲]؛ بنابراین موضوع تحقیقات بسیاری از محققان هستند و چالش بزرگ، پیش‌بینی این‌گونه وقایع و کنترل آن‌ها می‌باشد تا بدین وسیله محیطی امن را برای انسان‌ها به وجود آورند [۲-۴]. در اقیانوس شناسی هم امواج فوق بلند موسوم به امواج خروشان^۱ به طور وسیعی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این امواج که حتی در آب‌های نسبتاً آرام نیز اتفاق می‌افتد، در بسیاری از سامانه‌های طبیعی دیگر نیز مشاهده می‌شود. اخیراً این امواج توجه زیادی را به خاطر ضرورت و کاربردش در زمینه‌های متفاوت از دینامیک سیالات و اقیانوس شناسی گرفته تا فیزیک

پلاسما، چگالش بوز - انیشتین و اپتیک غیر خطی به خود جلب کرده است [۵-۶]. یکی دیگر از ویژگی‌هایی که باعث شده این مبحث مورد توجه واقع شود، این است که این امواج نسبت به امواج مجاور خود، از ارتفاع و شیب بیشتری برخوردار هستند و شدت بیشتری دارند. همین ویژگی باعث شده که پتانسیل کافی برای ایجاد خرابی و خسارات غیرقابل جبران را داشته باشد، به همین دلیل دانشمندان در تمامی زمینه‌ها به دنبال یافتن راه‌هایی هستند که بتوانند خسارات وارده را به حداقل برسانند و به عبارتی وقوع این امواج را کنترل کنند [۵-۹]. در اپتیک هم سالی^۲ و همکارانش در این زمینه پیشگام بودند و نشان دادند که تابش‌های با پهنای باند بسیار زیاد می‌توانند از یک ورودی با پهنای باند باریک شبیه به امواج

$$\frac{dN}{dt} = \gamma_N \left[\mu - N - N|E|^2 \right] \quad (2)$$

که در آن E و N به ترتیب دامنه‌ی مختلط بهنجار شده میدان و چگالی حامل‌ها K نرخ تابش میدان، i واحد موهومی، α فاکتور افزایشی پهنای باند، γ نرخ تابشی حامل، μ جریان تزریقی بهنجار شده، $\Delta\omega$ بسامد نوری عدم تطبیق و ξ نویز سفید گوسی با قدرت D نشان‌دهنده‌ی نویز اپتیکی ناشی از نوسانات گسیل خود به خودی یا ناشی از تزریق نوری خارجی ناهمدوس است. P_{inj} نشان‌دهنده‌ی پمپ تزریقی نوری است که به صورت مربعی مدوله شده است. مقادیر عددی پارامترهای استفاده شده به صورت زیر است: $\alpha = 3, \kappa = 3 \cdot 10^{-3}, \gamma_N = 1ns^{-1}, D = 0.0001$ و $\Delta\omega = 0.4GHz$ [۹، ۷]. نکته قابل توجه در اینجا مشخص کردن مقدار آستانه است که تابعی از مقدار متوسط شدت $\langle I \rangle$ و انحراف از میانگین σ است و بسته به اینکه چه مقداری باشد تعداد امواج خروشان تعریف شده تغییر می‌یابد، بدین صورت که اگر این مقدار بیش از اندازه کوچک باشد امواج مشاهده شده امواج خروشان محسوب نمی‌شود و اگر بیش از حد معمول باشد ممکن است امواجی که حقیقتاً امواج خروشان محسوب می‌شوند در محاسبات اعمال نشوند و نادیده گرفته شوند. در این مدل‌سازی از رابطه $\tau = \langle I \rangle + 2\sigma$ برای تعریف مقدار آستانه استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

نمودار شدت میدان بر حسب زمان برای چند مقدار متفاوت از جریان، دامنه و بسامد مدولاسیون پمپ در شکل ۱ رسم شده است. در اینجا، امواجی که شدت آن‌ها از خط قرمز روی نمودار که نشان دهنده‌ی مقدار آستانه می‌باشد، بیشتر شود موج خروشان در نظر گرفته و تعدادشان محاسبه شد.

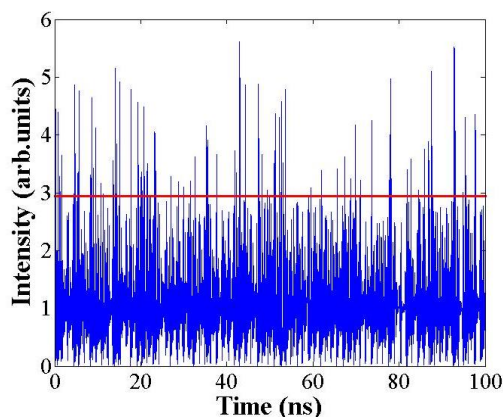
در شکل ۱- الف بسامد مدولاسیون $0.1GHz$ ، دامنه‌ی مدولاسیون $50ns^{-2}$ و مقدار جریان بهنجار شده ۲ بوده است که با در نظر گرفتن مقدار آستانه و شرط موج خروشان، ۴۱ موج خروشان در این شکل مشاهده شده

خروشان اقیانوس تولید شوند [۷، ۹، ۱۰]. امواج خروشان در لیزرها در چارچوب یک مدل قطعی و مشخص مورد مطالعه قرار می‌گیرند که دو نوع متفاوت از آشوب را از خود نشان می‌دهند، یکی که در آن امواج خروشان به‌طور مداوم و پی‌درپی رخ نمی‌دهد و دیگری که در آن امواج خروشان نسبتاً مکرر و پی‌درپی اتفاق می‌افتد [۱۱]. از آنجاکه سیستم‌های آشوب قطعی دارای طول هم‌بستگی می‌باشند، این امواج دارای چندین درجه از پیش‌بینی می‌باشند و به صورت تجربی و عددی نشان داده شده است که این امواج را می‌توان با یک زمان پیش‌بینی طولانی در مقایسه با زمان مشخصه‌ی لیزر پیش‌بینی کرد [۷]. از آنجا که لیزرهای نیمه‌هادی مورد توجه زیادی قرار دارند، راجع به وقوع امواج خروشان در این نوع لیزرها تحقیقات زیادی انجام شده است، از جمله تأثیرات نویز و مدولاسیون جریان روی وقوع و یا سرکوب امواج خروشان که نتایج خوبی را نیز دربر داشته است [۷، ۹]. با الهام از این نتایج، هدف در این کار، اعمال یک پمپاژ مربعی برای کنترل و کم و زیاد کردن تعداد این امواج است. برای رسیدن به این مهم، به صورت عددی تولید امواج را در یک لیزر نیمه رسانای تزریقی نوری با مدولاسیون پمپ مربعی مطالعه می‌کنیم. دینامیک امواج خروشان را می‌توان به صورت حل معادله شرودینگر غیرخطی^۳ بررسی کرد؛ بنابراین از معادلات نرخ برای مدل‌سازی استفاده می‌کنیم و نشان می‌دهیم که برای یک محدوده مناسب از تغییرات بسامد و دامنه‌ی مدولاسیون پمپ می‌توان امواج خروشان را کنترل و مقدار آن‌ها را کاهش یا افزایش داد.

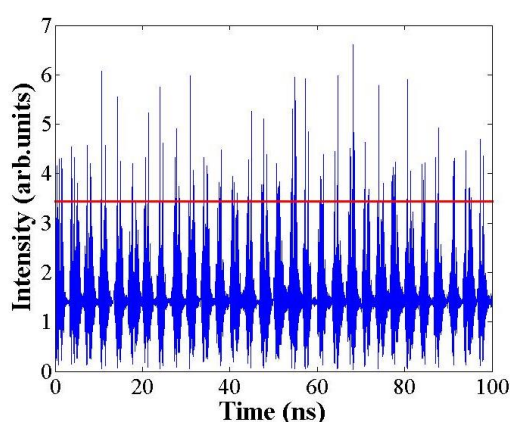
۲. مدل‌سازی

دینامیک القایی در یک لیزر تک مد تزریق نوری می‌تواند توسط دو معادله‌ی نرخ زیر توصیف شود [۹، ۱۰]:

$$\frac{dE}{dt} = \kappa(1+i\alpha)(N-1)E + i\Delta\omega E + \sqrt{P_{inj}} + \sqrt{D}\xi \quad (1)$$



(ج)

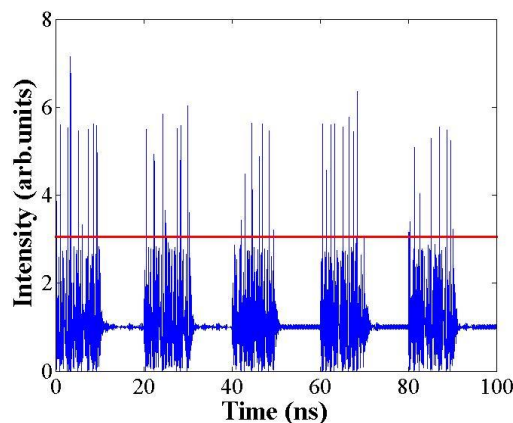


(د)

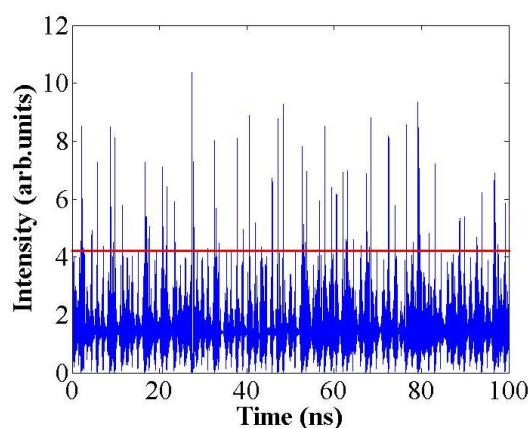
شکل ۱. نمودار تغییرات شدت میدان بر حسب زمان برای مقادیر مختلف جریان.

برای بررسی دقیق‌تر تعداد امواج خروشان نسبت به تغییرات پمپ نمودار تعداد این امواج بر حسب دامنه و بسامد مدولاسیون برای مقادیر مختلف جریان در شکل ۲ رسم شده است. در این شکل به خوبی تغییرات رخداد امواج خروشان نسبت به پارامترهای دیگر لیزر به خوبی قابل مشاهده است. محور افقی تغییرات بسامد مدولاسیون بر حسب GHz را نشان می‌دهد، محور عمودی نمایانگر تغییرات دامنه‌ی مدولاسیون است که واحد آن ns^{-2} می‌باشد و کد رنگی نیز تعداد امواج خروشان مشاهده شده را نشان می‌دهد. در شکل ۲-الف که مقدار جریان بهنجار شده ۲ است مشاهده می‌شود که امواج خروشان در نواحی که مقدار بسامد و دامنه‌ی مدولاسیون بیشتر است بیشینه است و هر چه این دو مقدار کاهش یابند، به نسبت آن‌ها تعداد امواج خروشان نیز کاهش می‌یابد. همچنین تمرکز امواج خروشان بیشتر در ناحیه‌ی با بسامد مدولاسیون بالا

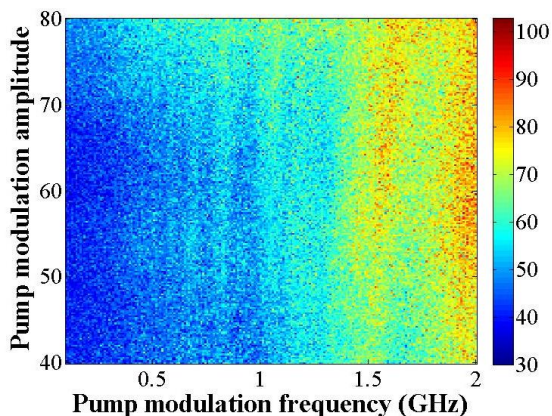
است. در شکل ۱-ب بسامد مدولاسیون $1/5 GHz$ ، دامنه‌ی مدولاسیون $63 ns^{-2}$ و جریان بهنجار شده $2/4$ است و با احتساب شرط موج خروشان، تعداد امواج خروشان مشاهده شده در این شکل ۶۸ می‌باشد. در شکل ۱-ج مقدار بسامد مدولاسیون $1/5 GHz$ ، مقدار دامنه‌ی مدولاسیون $75 ns^{-2}$ و مقدار جریان بهنجار شده ۲ است و تعداد امواج خروشان محاسبه شده به ۷۲ موج رسید و در آخر نیز در شکل ۱-د با بسامد مدولاسیون $0/6 GHz$ ، دامنه‌ی مدولاسیون $40 ns^{-2}$ و جریان بهنجار شده $2/4$ ، ۹۸ موج خروشان مشاهده شد. همچنین در شکل ۱-الف و ۱-د اثر مدولاسیون مربعی پمپ روی شدت امواج به وضوح نمایان است.



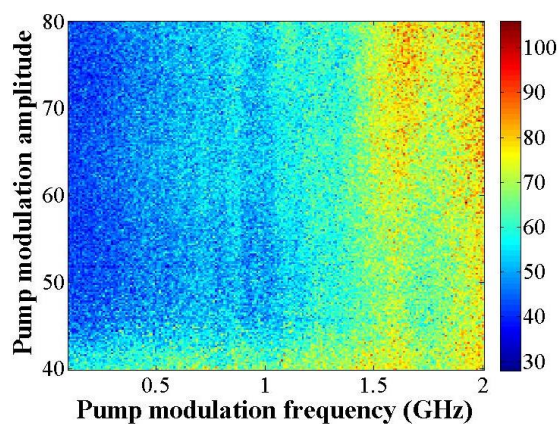
(الف)



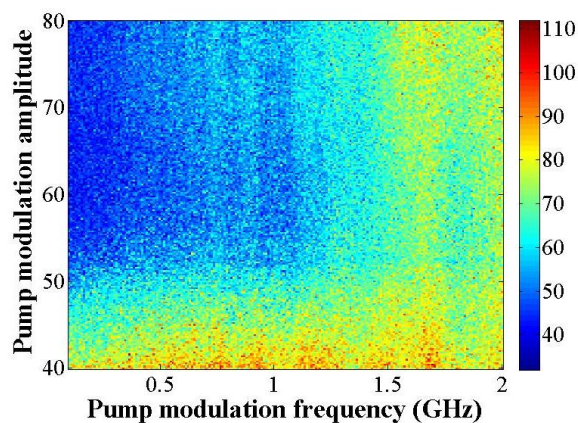
(ب)



(ب)

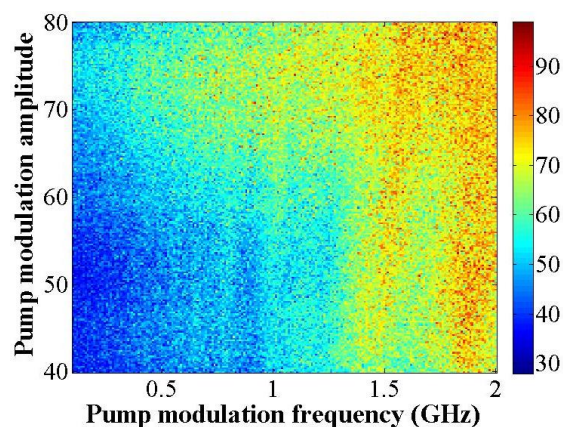


(ج)



(د)

است. برای مثال گوشه‌ی بالا سمت راست تعداد امواج خروشان به ۱۰۰ هم می‌رسد اما با کم شدن مقدار دامنه‌ی مدولاسیون و همچنین در بسامدهای کم (گوشه پایین سمت چپ) این مقدار به ۳۰ کاهش می‌یابد. در شکل ۲-ب نیز با مقدار جریان بهنجار شده $2/1$ در مناطقی که دامنه و بسامد مدولاسیون بیشتر است امواج خروشان نیز بیشتر است البته در مقایسه با نمودار قبل برای دامنه بالا و بسامد های کمتر تعداد امواج خروشان افزایش می‌یابد. در شکل ۲-ج با جریان $2/2$ روندی که در شکل‌های قبل وجود داشت، آهسته آهسته تغییر می‌کند. در این شکل مشاهده می‌شود که در دامنه‌ی مدولاسیون کم، تعداد امواج خروشان رو به افزایش است و از تعداد این امواج در نواحی با دامنه و بسامد زیاد کاسته می‌شود. چنان که این روند در شکل‌های ۲-د و ۲-ه با جریان‌های به ترتیب $2/3$ و $2/4$ کاملاً مشهود است. در این دو شکل، در دامنه‌ی مدولاسیون کم، تعداد امواج خروشان بیشتر شده و با افزایش دامنه‌ی مدولاسیون تعداد این امواج کاهش یافته است. با افزایش مقدار جریان، روندی که در دو شکل اول وجود داشت، در شکل‌های آخر کاملاً جابه‌جا شده است. در شکل ۲-الف تا ۲-ج تمرکز امواج خروشان بیشتر در ناحیه‌ی با بسامد مدولاسیون زیاد است (قسمت سمت راست نمودار) اما در شکل‌های ۲-د و ۲-ه این تمرکز در ناحیه‌ی با مقادیر کم دامنه‌ی مدولاسیون (قسمت پایین نمودار) می‌باشد.



(الف)

waves”, Probabilistic Eng. Mech **23**, No. 4 2008, pp. 359–363.

[3] Ganshin A. N., Efimov V. B., Kolmakov G. V, Mezhov-Deglin L. P and McClintock P. V.; “Observation of an inverse energy cascade in developed acoustic turbulence in superfluid helium”; Phys. Rev. Lett **101**, No. 6 2008, 065303.

[4] Solli D. R., Ropers C., Koonath P. and Jalali B., “Optical rogue waves”; Nature No. **450**, 2007, pp. 1054–1057.

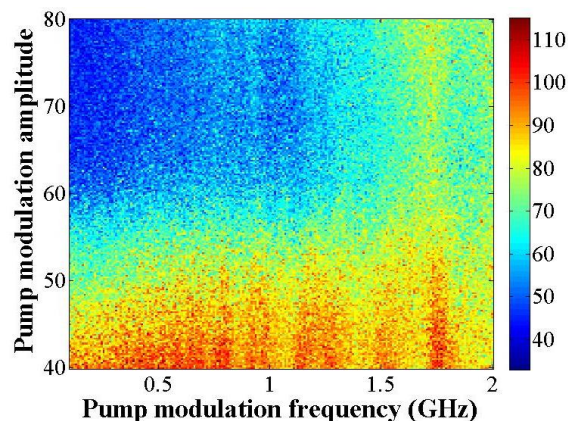
[5] Akhmediev N., Dudley J. M., Solli D. R. and Turitsyn S. K; “Recent progress in investigating optical rogue waves”; J. Opt. **15**, No. 6, 2013, 060201.

[6] Akhmediev N., and Pelinovsky E.; "Editorial–Introductory remarks on “Discussion & Debate: Rogue Waves–Towards a Unifying Concept?” The European Physical Journal Special Topics No. **185**, No. 1, 2010, pp. 1-4.

[7] Zamora-Munt J., Garbin B., Barland S., Giudici M., Leite J. R. R., Masoller C. and Tredicce J. R.; “Rogue waves in optically injected lasers: Origin, predictability, and suppression”, Phys. Rev. A **87**, No. 3, 2013 ,035802.

[8] White B. S. and Fornberg B.; “On the chance of freak waves at sea”; J. Fluid Mech. No. **355**, 1998, pp. 113–138.

[9] Perrone S., Vilaseca R., Zamora-Munt J. and Masoller C.; “Controlling the likelihood of rogue waves in an optically injected semiconductor laser via direct current modulation”; Phys. Rev. A **89**, No. 3, 2014, 033804.



(ه)

شکل ۲. نمودار تعداد امواج خروشان بر حسب دامنه و بسامد مدولاسیون.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به مطالعه‌ی دینامیک امواج خروشان در یک لیزر نیم‌رسانای تزریقی نوری با استفاده از مدولاسیون مربعی دامنه‌ی تزریق نوری پرداختیم و نمودار تغییرات امواج خروشان بر حسب دو متغیر بسامد و دامنه‌ی مدولاسیون بررسی شد. مشاهده گردید که در جریان‌های مختلف، روند تغییرات امواج خروشان بر حسب این دو متغیر نیز متفاوت است. به طوری که در جریان‌های کم، تمرکز امواج خروشان در ناحیه‌ای است که بسامد مدولاسیون بیشینه است و تقریباً مستقل از مقدار دامنه‌ی مدولاسیون است اما با افزایش تدریجی جریان، این روند تا جایی تغییر یافت که امواج خروشان در ناحیه‌ای که دامنه‌ی مدولاسیون کمینه بود، مستقل از اینکه مقدار بسامد مدولاسیون چقدر باشد، متمرکز شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر دامنه و بسامد تزریق، جریان نیز اهمیت به‌سزایی در تعداد امواج خروشان دارد.

مراجع

- [1] Hopkin M.; “Sea snapshots will map frequency of freak waves”; Nature No. **430**, 2004, pp. 492–492.
- [2] Aberg S. and Lindgren G.; “Height distribution of stochastic Lagrange ocean

[10] Ohtsubo J.; “Semiconductor lasers: stability, instability and chaos”; Springer. 2012, pp. 111.

Control of rogue waves in an optically injected semiconductor laser via square modulation of pump

M. Zaki and M. Hossini

Abstract

In this paper the rogue wave occurrence in an optically injected semiconductor laser via square modulation of injection amplitude has been investigated. By using the laser rate equations, the dynamics of system has been studied and investigated. Also the number of rogue waves in term of amplitude and frequency of modulation has been calculated and analyzed. It was found that the current changes strongly change the rogue wave numbers. The results show that in the low currents, rogue waves are focused in the regions that the modulation frequencies are high and in the high currents these waves are centered in the regions that modulation amplitudes are low.

Keywords: Wave occurrence, Semiconductor laser, square modulation.