

## بررسی امکان تولید سولیتونهای کاواک در میکرومشدهای

### نیمه هادی بالای آستانه لیزری

خردمند، رضا؛ تجلی، حبیب

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی دانشگاه تبریز

#### چکیده

اخیراً، سولیتونهای کاواک (CSs) در لیزرهای دیودی نشرکننده سطحی با کاواک عمودی (VCSEL) در حالت زیر آستانه لیزر زایی بطور نظری پیش بینی و در تجربه مشاهده شده اند. حذف آدیاباتیکی متغیر پلاریزاسیون در بالای آستانه لیزری سبب ناپایداری سیستم خواهد شد. در این مقاله امکان تولید CS در چنین سیستمی با استفاده از مجموعه کامل معادلات دینامیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. بهمین منظور جوابهای هموژن و نواحی ناپایدار سیستم تعیین و در گستره وسیعی از مشخصات فیزیکی اثرگذار سیستم بررسی شده اند.

## The possibility of Cavity Solitons in semiconductor microresonators slightly above threshold

Kheradmand, Reza; Tajalli, Habib

Research Institute for Applied Physics and astronomy, University of Tabriz, Tabriz

#### Abstract

CSs have been theoretically predicted and recently experimentally demonstrated in vertical cavity driven semiconductor lasers (VCSELs) slightly below the lasing threshold. Above threshold, the simple adiabatic elimination of the polarization variable is not correct, leading to instabilities in the system. In this paper, the possibility of CS generation using the complete system of equations studied. For this purpose, we obtained homogeneous steady state and instability branch in wide variety of physical parameters.

PACS No. 42, 78

#### مقدمه

سولیتونهای کاواک (CS) ساختارهای جایگزیده در صفحه عرضی میدان الکتریکی هستند که مستقل از هم بوده و بطور جداگانه قابل آدرس دهی میباشند. چنین ساختارهایی بطور نظری پیش بینی شده [۱-۴] و بطور تجربی در مشدهای نور شکست و جاذب اشباع پذیر عملی گردیده اند [۵ و ۶].

در محل عبور پالس تولید میشود. CS تولید شده بعد از حذف پالس پایدار می ماند. در ضمن میتوان این ساختار را توسط پالس دیگری که در فاز مخالف پرتو نگهدارنده قرار دارد، پاک کرد [۸].

در این کار تحقیقی، بررسیهای فوق الذکر برای جریان تزریقی برابر و حتی با لایر از آستانه لیزر زایی انجام گرفته و امکان تولید CS بررسی شده است.

چنانچه بخوبی شناخته شده است، حذف آدیاباتیکی قطبش در لیزرهای دوترازی صحیح نبوده و باعث ناپایداری نوسانی با بردار موج بحرانی بزرگ خواهد شد [۹ و ۱۰]. چنین مساله ای برای لیزرهای نیمه هادی با جریان تزریقی، وقتی جریان بالای آستانه لیزری باشد، نیز اتفاق می افتد.

اخیراً، همچنین، سولیتونهای کاواک در میکرومشدهای نیمه هادی اندکی زیر آستانه لیزری بطور تجربی مشاهده شده اند [۷].

تمامی این بررسیها برای جریان تزریقی زیر آستانه انجام گرفته است. در این کارهای تجربی از پرتو نگهدارنده پایدار و همدوس استفاده شده و با تزریق یک پالس لیزری، سولیتون کاواک، CS،

مدل:

$$|F_I|^2 = |F_S|^2 \left( 1 - \frac{\mu}{1 + |F_S|^2} \right)^2 + \left( \theta + \frac{\alpha\mu}{1 + |F_S|^2} \right)^2 \quad (6)$$

سپس نا پایداریهای حالت هموزن، که سیستم را به حالت هموزن دیگر (ناپایداری موج-تخت PWI) یا طرحهای مدوله عرضی (ناپایداری مدوله MI) میبرند، مورد مطالعه قرار گرفت. بهمین منظور تحلیل پایداری خطی با در نظر گرفتن پاسخ سیستم به اختلالات مدوله فضایی کوچک حول جوابهای هموزن بررسی شد.

از آنجائیکه سیستم دارای پنج متغیر مستقل از هم میدان الکتریکی، پلاریزاسیون ماده، مزدوج مختلط آنها و چگالی حاملین است، بنابراین معادله مشخصه مرتبه پنج زیر بدست آمد.

$$\lambda^5 + a_4\lambda^4 + a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 = 0 \quad (7)$$

در حالیکه ضرایب  $a_i$  (که در آن  $i=0,1,2,3,4$  است) به مشخصه های  $\Gamma, \Delta, D, E_I, I, \alpha, \theta, \sigma$  و مربع بردار موجی  $(K^2)$  بستگی دارد. سپس با استفاده از معادله (7) مرزهای نواحی ناپایدار در صفحه  $(|E_S, K|)$  تعیین گردیدند. همچنین ناحیه تورینگ با استفاده از شرط  $\lambda = 0$  ( $\lambda$  حقیقی)، که هم ارز  $a_0 = 0$  در رابطه (7) میباشد، بدست آمد. مرز ناحیه هوپف با شرط  $\lambda = i\nu$  بدست می آید، که با جایگذاری آن در معادله مشخصه و ساده سازیهای جبری، مرز پایداری هوپف از رابطه زیر تعیین شد.

$$\frac{(a_4 a_1 - a_0)^2 - (a_4 a_3 - a_2)}{(a_1 a_2 - a_0 a_3)} = 0 \quad (8)$$

نتایج:

بررسی نواحی ناپایدار سیستم در گستره وسیعی از مشخصات سیستم نشان میدهد که ناپایداری هوپف فقط شاخه پایینی حالت همگن را تحت تاثیر قرار میدهد. چنانچه در شکل (1) نشان داده شده است، شاخه بالایی دارای ناپایداری تورینگ است.

سیستم انتخابی VCSEL (لیزر دیودی نشر کننده سطحی با کاواک عمودی) است و میکرومشدد نیمه هادی آن از نوع فابری پرو با چاههای کوانتومی چندگانه است که عمود بر جهت انتشار پرتونوری قرار گرفته اند.

برای ارائه معادلات دینامیکی از مدل مطرح شده در مرجع [۱۱] استفاده شده است.

$$\dot{F} = \sigma [P + F_I - (1 + i\theta)F + i\nabla^2 F] \quad (1)$$

$$\dot{P} = \Gamma(1 + i\Delta)[(1 - i\alpha)DF - P] \quad (2)$$

$$\dot{D} = -b[0.5(F^*P + FP^*) + D - \mu - d\nabla^2 D] \quad (3)$$

که در آن  $P, F, D$  به ترتیب نشانگر میدان الکتریکی، پلاریزاسیون و اختلاف جمعیت حاملین،  $F_I$  میدان الکتریکی تزریقی؛  $\sigma$  و  $b$  آهنگ واهلش میدان الکتریکی و اختلاف جمعیت حاملین،  $\theta$  نامیزانی کاواک و  $\alpha$  فاکتور افزایش پهنای خطی است.

در معادله (۲) مشخصه های  $\Gamma(D) = \frac{3.214D + 0.874}{\sqrt{1 + \alpha^2}}$

برده شده اند که در آن  $\Delta = -\alpha + \frac{2\delta}{\Gamma}$  و  $\delta(D) = 0.216D - 0.169 + \delta_0$  جابجایی فرکانس نسبت به فرکانس بیشینه بهره،  $\omega_m$  است.  $\mu$  بیانگر جریان پمپ بوده و به صورت  $\mu = \eta \left( \frac{I}{I_0} - 1 \right)$  تعریف میشود که در آن  $\eta = 0.9821$  و  $I$  شدت جریان اعمالی است.

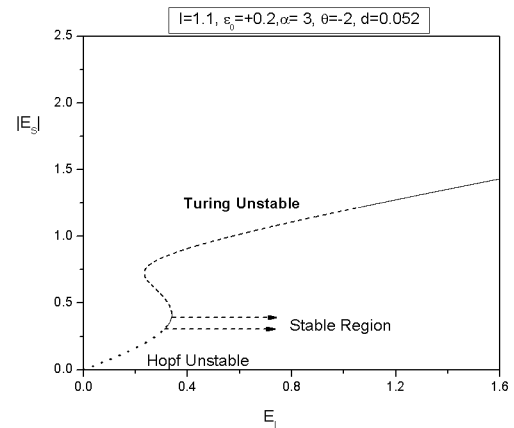
جوابهای پایا و تحلیل پایداری خطی:

با مساوی صفر قرار دادن مشتقات زمانی و صرف نظر از جمله لاپلاسین در معادلات دینامیکی (۱-۳)، جوابهای همگن  $F_S, P_S, D_S$  به شکل زیر تعیین شدند.

$$D_S = \frac{\mu}{1 + |F_S|^2} \quad (4)$$

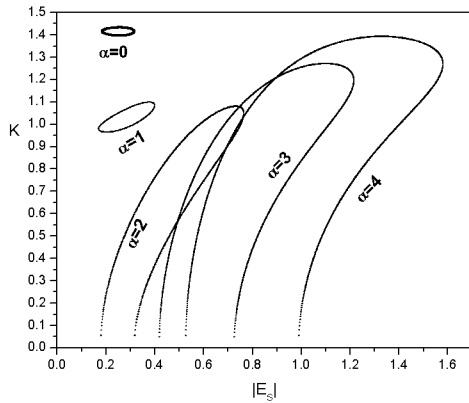
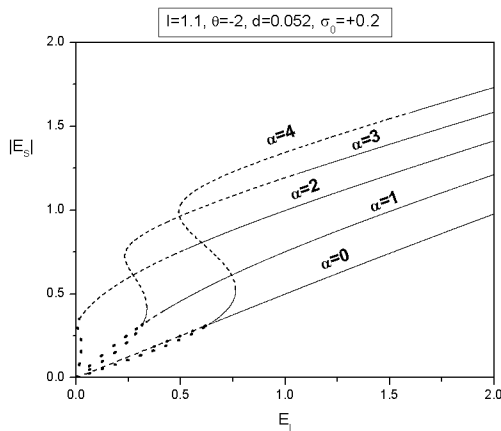
$$P_S = (1 - i\alpha) \frac{\mu}{1 + |F_S|^2} F_S \quad (5)$$

تغییرات منحنی پایداری و نواحی ناپایداری بر حسب ضریب افزایش پهنای خطی،  $(\alpha)$ ، مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه در شکل (۳) نشان داده شده است، به ازای  $\alpha = 0$  دو پایایی تشکیل نمی شود و ناپایداری تورینگ در داخل ناحیه هویف است. با افزایش ضریب افزایش پهنای خطی، منحنی پایایی و نواحی ناپایدار تغییر می کند. در حالت خاص  $\alpha = -\theta = 2$  منحنی دو پایا بوده و به ازای  $E_I = 0$  دو مقدار متفاوت برای میدان داخل کاواک  $(E_S)$  وجود دارد.



شکل ۱:

منحنی پایداری با  $\mu = 1.1$ ،  $\delta_0 = +0.2$ ،  $\alpha = 3$ ،  $\theta = -2$  و  $d = 0.052$

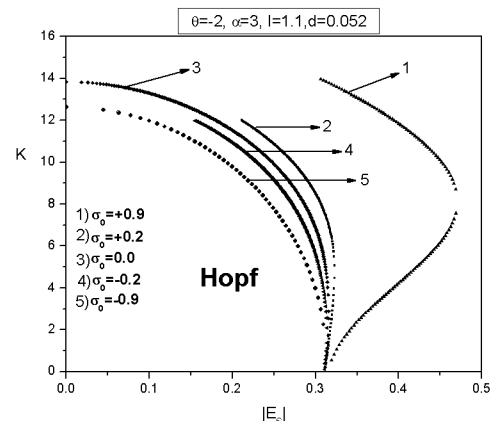


شکل ۳: تغییرات منحنی پایداری و نواحی تورینگ با  $\alpha$  های متفاوت. سایر مشخصات همانند شکل ۱ انتخاب شده اند.

**مرجعها:**

[1] F. Arecchi, "Space-time complexity in nonlinear optics" *Physica D* **51** (1991) 450-464.  
 [2] L. Lugiato, "Spatio-temporal structures : I.," *Phys. Rep.* **219** (1992) 293-310.  
 [3] L. Lugiato, M. Brambilla, and A. Gatti, "Optical pattern formation," **40**, Academic press, New York,(1998)229-306.

با تغییر موقعیت فرکانس نسبت به فرکانس بیشینه بهره  $(\delta_0)$ ، ناحیه هویف تغییر می کند. شکل (۲) تغییرات ناحیه هویف بر حسب جابجایی فرکانس،  $(\delta_0)$ ، برای همان مشخصه های شکل (۱) نشان میدهد. همانطوریکه ملاحظه میشود، اگر فرکانس به سمت چپ منحنی بهره جابجا شود ناحیه هویف بزرگتر می شود در حالیکه برای  $\delta_0 < 0$  منحنی  $\delta_0$  منحنی هویف منقبض میشود.



شکل ۲:

تغییرات ناپایداری هویف به ازای جابجاییهای متفاوت فرکانس.

- [4] J. Moloney and H. M. Gibbs, " Role of diffractive coupling and self-focusing or defocusing in the dynamical switching of a bistable optical cavity," *Phys. Rev. Lett.* **48**, (1982) 1607-1610.
- [5] M. Saffman, D. Montgomery, and D. Anderson, "Collapse of a transverse -mode continuum in a self-imaging photorefractively pumped ring resonator," *Opt. Lett.* **19**(1994),518-520.
- [6] C. Weiss, M. Vaupel, K. Staliunas, G. Sleky, and V. Taranenko, "Solitons and vortices in lasers," *Appl. Phys. B* **68** (1999) 151-168.
- [7] S. Barland, J. Tredicce, M. Brambilla, L. A. Lugiato, S. Balle, M. Giudici, T. Maggipinto, L. Spinelli, G. Tissoni, T. Konedl, M. Miller, and R. Jaeger, "Cavity solitons as pixels in semiconductor microcavities," *Nature*. **419** (2002)699-702.
- [8] L. Spinelli, G. Tissoni, M. Brambilla, F. Pratti, and L. Lugiato, " Spatial solitons in semiconductor microcavities," *Phys. Rev. A*. **58**(1998)2542-2559.
- [9] P. Jakobsen, J. Lega, Q. Feng, J. Moloney, and A. Newell, " Nonlinear transverse modes of large-aspect-ratio homogeneous broadened lasers: I. Analysis and Numerical simulation," *Phys. Rev. A* **49**(1994)4189-4200.
- [10] J. Lega, P. Jakobsen, J. Moloney, and A. Newell, " Nonlinear transverse modes of large-aspect-ratio homogeneous broadened lasers: II. Pattern analysis near and beyond threshold," *Phys. Rev. A* **49**(1994)4201-4212.
- [11] J. Yao et. al., " Semiconductor laser dynamics beyond the rate-equation approximation," *Opt. Commun.* **199** (1995)246-255.