

تحلیل و مقایسه رژیم‌های پویای لیزرهای نقطه کوانتومی حالت قفل شده غیرفعال و ترکیبی

بابک رستمی فرد اهری^۱، کارشناس ارشد؛ حامد باغبان^۲، دانشیار؛ هادی ولادی^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - rostamybabak@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - h-bagbhan@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - veladi@tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله با استفاده از تحلیل معادلات نرخ تفاضلی تأخیری، رژیم‌های پویا و پویایی رفتاری لیزر نیمه‌هادی مبتنی بر نقاط کوانتومی با استفاده از معیار عملکرد جاذب اشباع‌پذیر کوتاه و بلند برای قفل‌شدگی حالت غیرفعال مورد بررسی قرار گرفته است. سپس این معیارها برای اولین بار برای حالت قفل ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده که در قفل حالت ترکیبی با جاذب اشباع‌پذیر کوتاه در مقایسه با قفل حالت غیرفعال، رژیم‌های کاری ناخواسته کلیدزنی (Q)، (Qs)، کلیدزنی حالت قفل‌شده، (QS-ML)، حذف شده، جریان آستانه در تمام رژیم‌های کاری کاهش و نرخ تمایز پالس‌های تولیدی افزایش می‌یابد. همچنین با تحلیل سازوکار تولید پالس و فرکانس‌های پالس هارمونیکی، راهکارهای مناسب جهت تولید فرکانس‌های پالس هارمونیکی بالاتر به‌ویژه هارمونیک سوم و نیز افزایش بازه رژیم‌های عملکردی مطلوب مورد بحث قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: لیزر نقطه کوانتومی، کلیدزنی Q، قفل حالت ترکیبی، قفل حالت غیرفعال.

Analysis and Comparative Study between Dynamical Regimes of Passive and Hybrid Mode-Locked Quantum Dot Lasers

B. Rostami Fard Ahari¹, MSc; H. Bagbhan², Associate Professor; H. Veladi³, Associate Professor

1- School of Engineering-Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: rostamybabak@gmail.com

2- School of Engineering-Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: h-bagbhan@tabrizu.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: veladi@tabrizu.ac.ir

Abstract: In this article, the operational regimes and behavior of passively mode-locked quantum dot (QD) lasers have been investigated based on analyzing delay-differential rate equations and exploiting short and long saturable absorber criteria. Then, these criteria have been used for hybrid mode-locked QD lasers for the first time and it has been shown that elimination of unwanted Q-switching, Qs, Q-switching mode-locked, QS-ML regimes, decrease of the threshold current for all operation regimes, and enhancement of the extinction ratio for generated pulses can be obtained in short-absorber hybrid structure compared with passively mode-locked QD lasers. Also, by analyzing the pulse and harmonic pulse frequency generation mechanisms, proper approaches for generation of higher-frequency harmonic pulses especially third harmonic generation and increase of required dynamical regimes' range have been discussed.

Keywords: Quantum-dot laser, Q-switching, hybrid mode locking, passive mode locking.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۹ و ۱۳۹۶/۰۳/۲۶ و ۱۳۹۶/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۱

نام نویسنده مسئول: حامد باغبان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین.

۱- مقدمه

لیزرهای مبتنی بر نقاط کوانتومی به دلیل دارا بودن ویژگی‌های ممتاز و منحصر به فردی همچون جریان آستانه پائین، پایداری حرارتی بالا، قابلیت حبس سه بعدی حامل‌ها، پویایی سریع حامل‌ها، ضریب α بسیار کوچک و پهن‌شدگی غیرهمگن^۱ ترازهای انرژی، در زمینه تولید پالس‌های با عرض کم و فرکانس بالای نوری از اهمیت بسیار زیادی برخوردار هستند [۱-۶]. مطالعات صورت گرفته در زمینه تولید پالس‌های باریک، صرف‌نظر از انواع روش‌های فشرده‌سازی پالس، منجر به ابداع روش‌هایی همچون استفاده از حلقه‌های بازخورد خارجی^۲ و داخلی، قفل کردن حالت^۳ (ML) فعال^۴، غیرفعال^۵، ترکیبی^۶، تزریق نوری^۷ و سایر روش‌های ترکیبی شده است [۳، ۶-۹]. در کل اعمال هریک از روش‌های قفل حالت به لیزر، منجر به تولید پالس‌های منظم و فرکانس بالا و نیز باعث کاهش چشمگیر بی‌ثباتی زمانی^۸ بین پالس‌ها می‌شود به گونه‌ای که برای لیزر نوعی InAs/InGaAs با طول کاواک ۱mm در طول موج $1/3 \mu\text{m}$ و فرکانس ۴۰GHz، بی‌ثباتی زمانی با اعمال روش قفل حالت غیرفعال به ۹ps، با اعمال سیگنال RF به ۶۲۰fs، با تزریق نوری به ۲۴۰fs و با اعمال تزریق نوری دوگانه به ۱۲۱fs کاهش یافته است [۶]. در مطالعات اخیر با تغییر در ساختار بدنه لیزر و اضافه کردن دو حلقه بازخورد نوری به آن در یک لیزر InAs/InGaAs با طول کاواک ۲mm و در طول موج کاری $1/25 \mu\text{m}$ و فرکانس ۲۰GHz، بی‌ثباتی زمانی در قفل حالت غیرفعال به ۱۰/۵fs کاهش داده شده است [۴]. روش قفل حالت غیرفعال نسبت به سایر روش‌های قفل حالت دارای سادگی بیشتر و نیازمند صرف هزینه کمتری است. علاوه بر این، به علت ساختار فشرده در این روش، لیزر دارای قابلیت استفاده و حمل بیشتری است. ولی مشکل عمده این روش قفل حالت به بی‌ثباتی‌های زمانی بالای پالس‌های آن باز می‌گردد که در سال‌های اخیر جهت حل این چالش مطالعاتی در زمینه استفاده از فیدبک‌های نوری خارجی و همچنین تزریق نوری به لیزر غیرفعال صورت گرفته است [۷]. در سال‌های اخیر در زمینه لیزرهای حلقوی^۹ حالت قفل‌شده ترکیبی مطالعات مهمی صورت گرفته است. ارائه مدل ریاضی منطبق بر نتایج عملی و آزمایشگاهی، بررسی عملی تأثیر پهنای باند فیلتر طیفی، نسبت شدت اشباع نواحی بهره و جاذب اشباع‌پذیر و همچنین تأثیر تغییر ولتاژ اعمالی معکوس و دامنه ولتاژ مدوله‌کننده ناحیه جاذب، بر^{۱۰} بازه قفل‌شدگی و طول زمانی پالس‌ها از جمله این تحقیق‌ها هستند [۶، ۱۰].

در سال ۲۰۰۵، معادلات تفاضلی برای قفل حالت غیرفعال به همراه تأخیر گزارش شده است [۱۱]. از آنجایی‌که در اثبات این مدل مفروضاتی همچون بهره و تلفات پایین و عدم اشباع کامل نواحی بهره و تلفات در نظر گرفته نشده، این معادلات برای لیزرهای نقطه کوانتومی که دارای تلفات و بهره بالایی هستند بسیار مناسب است.

در سال ۲۰۱۰ رژیم‌های عملیاتی لیزر حالت قفل‌شده نقطه کوانتومی یکپارچه دو قسمته به صورت تحلیلی و عملی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۲]. معیار جاذب کوتاه و بلند برای اولین بار در این مرجع ارائه

شده و به بررسی رژیم‌های پویای لیزر تحت این دو نوع ساختار پرداخته شده است. در این مرجع تأثیر پارامترهای مختلف لیزر بر روی دامنه رژیم‌های پویای مختلف آن مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال ۲۰۱۰ همچنین لیزرهای نقطه کوانتومی یکپارچه تحت قفل حالت ترکیبی به طور تحلیلی و عملی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰]. دامنه قفل‌شدگی برای روش قفل حالت ترکیبی به دست آمده و عدم تقارن این بازه قفل‌شدگی نسبت به قفل حالت غیرفعال نشان داده شده است. امکان قفل‌شدگی حالت ترکیبی با اعمال سیگنال خارجی با فرکانس نصف، برابر و دو برابر فرکانس اصلی کاواک لیزر به طور عملی و نظری مورد بررسی قرار گرفته و بازه قفل‌شدگی به ازای هر سه حالت به دست آمده است. همچنین مدل ریاضی ساده‌شده‌ای که انطباق قابل توجهی با نتایج آزمایشگاهی دارد، ارائه شده است [۲، ۱۰]. از طرف دیگر روش قفل حالت غیرفعال به دلیل ساختار ساده نسبت به سایر روش‌های قفل حالت هنوز هم مورد توجه پژوهشگران بوده و روش‌ها و ساختارهای فیزیکی جدیدی برای بهبود پالس‌های تولیدی آن ارائه می‌شود که استفاده از حلقه‌های بازخورد متعدد نوری از جمله این روش‌ها است [۴، ۷].

در این مطالعه به بررسی رژیم‌های پویای تولیدشده در اثر تغییر پارامتر جریان ورودی لیزرهای با جاذب اشباع‌پذیر کوتاه و بلند در قفل حالت غیرفعال و ترکیبی با استفاده از نرم‌افزار متلب^{۱۱} و روش عددی تفاضل محدود^{۱۲} پرداخته شده است. اگرچه تاکنون رژیم‌های پویای لیزرهای حالت قفل‌شده غیرفعال و فعال به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اما تاکنون مطالعه‌ای در زمینه رژیم‌های پویا و رفتار لیزرهای حالت قفل‌شده ترکیبی صورت نگرفته است. همچنین معرفی و استفاده از معیار جاذب اشباع‌پذیر بلند و کوتاه در این مطالعه برای بررسی دقیق‌تر اثر همزمان سه پارامتر بهره، تلفات و طول لیزر، علاوه بر امکان مطالعه رژیم‌های پویای لیزر قفل حالت شده ترکیبی، امکان مقایسه ویژگی‌های این حالت عملکرد با قفل حالت غیرفعال را فراهم می‌سازد. این معیار بر مبنای پایداری رژیم تولید پالس^{۱۳} بوده (رژیم پالسی پایداری زمانی برقرار خواهد بود که دامنه میدان الکتریکی خروجی لیزر در فاصله زمانی بین دو پالس متوالی به صفر برسد [۱۱، ۱۲]) و باعث پیدایش یا حذف رژیم‌های کاری در لیزر شده و باعث پدید آمدن نتایج جالبی در زمینه رژیم‌های پویای لیزر می‌شود. بر اساس روش طراحی شرح داده‌شده در این مقاله، امکان دست‌یابی به قابلیت حذف رژیم‌های ناخواسته کاری از جمله رژیم‌های Qs-ML و Qs، تولید هارمونیک‌های بالاتر (به‌ویژه هارمونیک سوم) در خروجی و اعمال هر یک از روش‌های قفل حالت مذکور به ساختارهای مطرح‌شده وجود خواهد داشت.

در بخش ۲ مقاله حاضر، به بررسی ساختار لیزر قفل حالت شده و معادلات حاکم بر آن پرداخته می‌شود و در بخش ۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده و در رابطه با نتایج مربوط به عملکرد لیزرهای قفل

g و q به ترتیب بیانگر ناحیه بهره و جاذب اشباع‌پذیر هستند. P احتمال یافت حامل‌ها در ترازهای نقاط کوانتومی و N چگالی حامل‌ها در لایه ویتینگ^{۱۴} نقاط کوانتومی است. b نرخ شکار حامل‌ها از لایه ویتینگ به نقطه کوانتومی و r نرخ فرار حامل‌ها از نقطه کوانتومی به لایه ویتینگ است. γ و δ به ترتیب عکس طول عمر حامل‌ها در نقطه کوانتومی و لایه ویتینگ بوده و $s = gq/gq$ نسبت بهره تفاضلی به تلفات جاذب اشباع‌پذیر است. پارامتر g_0 معیاری از جریان ورودی به داخل ناحیه بهره است و طبق رابطه (۶)، به مشخصات مربوط به ساختار فیزیکی ناحیه بهره وابسته است.

$$g_0 = \int v g_g F (J_g - \gamma_g N_g^r) / \gamma_q^2 d\zeta \quad (6)$$

در این رابطه v سرعت گروه، F ضریب کیفیت پرشدگی متقاطع و N_g^r چگالی حامل‌ها در آستانه شفافیت لیزر و ξ طول ناحیه بهره لیزر است. اثر ولتاژ معکوس و ولتاژ مدوله‌کننده خارجی اعمال‌شده به جاذب اشباع‌پذیر طبق رابطه (۷) در پارامتر τ_{ω} وارد شده و طبق روابط (۳) و (۵) به‌عنوان ضریب به پارامتر r اعمال می‌شود [۱۳] (طبق [۱۴-۱۶] اثر ولتاژ خارجی اعمالی بر سایر زمان‌های گذار و طول عمرها قابل صرف‌نظر است).

$$\tau_{\omega} = \exp(V[1 + a \cos(2\pi f_{ext})] / v_0) \quad (7)$$

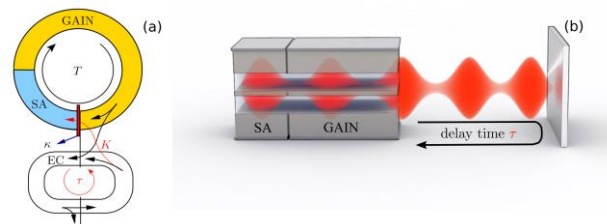
در رابطه (۷) اندازه ولتاژ معکوس، a دامنه ولتاژ مدوله‌کننده و f_{ext} فرکانس سیگنال خارجی و v_0 عددی ثابت (در این مقاله ۲- ولت در نظر گرفته شده است) است. مقادیر استفاده‌شده در محاسبات از مرجع [۱۲] اقتباس شده‌اند.

در این مطالعه جهت کاهش زمان و حجم شبیه‌سازی‌ها و همچنین قابل مقایسه بودن پهنای طیف تولید اندازه‌گیری شده عملی در رژیم حالت قفل‌شده با پهنای خط همگن، از در نظر گرفتن پدیده پهن‌شدگی ناهمگن نقاط کوانتومی صرف‌نظر شده است [۱۲]. همان‌طور که از معادلات نرخ مشخص است، پارامترهایی نظیر ابعاد و جنس نقاط کوانتومی به‌صورت مستقیم وارد معادلات نرخ نمی‌شود چرا که ابعاد و جنس نقاط کوانتومی به‌صورت مستقیم (از طریق تحلیل معادله شرودینگر) بر روی تعداد ترازهای انرژی (مقادیر ویژه حاصله از معادله شرودینگر) و انرژی رزونانس (اختلاف انرژی‌های حاصله) تأثیر داشته و به‌صورت غیرمستقیم بر روی زمان‌های واهلش که در معادلات نرخ وارد می‌شوند، اثر می‌گذارد. همچنین، معادلات نرخ با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و در نرم‌افزار متلب مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. لیزرهای قفل حالت شده مبتنی بر نقاط کوانتومی به ازای افزایش جریان ورودی به ناحیه بهره، در رژیم‌های عملکرد مختلفی همچون رژیم‌های QS- و QS-ML، رژیم حالت قفل‌شده اصلی و هارمونیک قرار می‌گیرند. کیفیت و فرکانس پالس‌های تولیدی صرف‌نظر از پارامترهای اساسی مثل طول کاواک و تکنولوژی رشد لایه‌ها و نقاط کوانتومی عمدتاً به طراحی ساختار خود لیزر وابسته است. سازوکار تولید پالس در لیزرهای دوقسمتی (که از ادغام ناحیه بهره و ناحیه جاذب تشکیل شده‌اند) به نحوی است که

حالت شده غیرفعال و ترکیبی با جاذب‌های اشباع‌پذیر به ترتیب کوتاه و بلند، به بحث، مقایسه و نتیجه‌گیری پرداخته‌شده است.

۲- معرفی ساختار لیزر و معادلات حاکم بر آن

لیزر مورد بحث دارای ساختار یکپارچه در یک چیدمان حلقوی بوده که از سه قسمت اصلی بهره، جاذب اشباع‌پذیر و آینه‌ها تشکیل شده و شمای آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. مجموع طول ناحیه بهره و جاذب اشباع‌پذیر لیزر ۱mm بوده (نسبت ناحیه بهره به ناحیه جاذب ۹/۱ است) و حلقه‌ی بازخورد غیرفعال، تأخیری به میزان ۲۵ps به پالس‌های نوری بازگردانده شده به داخل کاواک اعمال می‌کند. در این ساختار، ناحیه بهره در بایاس مستقیم و ناحیه جاذب اشباع‌پذیر در بایاس معکوس قرار دارد. به‌علت مدولاسیون آسان ولتاژ نسبت به جریان الکتریکی، سیگنال مدوله‌کننده (RF) قفل حالت ترکیبی به ناحیه جاذب اشباع‌پذیر اعمال می‌شود. فرکانس اصلی خروجی لیزر حدود ۴۰GHz است. معادلات حاکم بر لیزر از یک معادله موج تفاضلی تأخیردار (رابطه ۱) و چهار معادله نرخ (روابط ۲-۵) تشکیل شده است که مشابه روابط ارائه‌شده در [۱۰، ۱۲] است.



شکل ۱: شمایی از ساختار لیزر قفل حالت شده. (a) شمای

توصیف‌کننده فیدبک لیزر، (b) شمای قسمت‌های تشکیل‌دهنده لیزر نقطه کوانتومی به ترتیب از سمت چپ: ناحیه جاذب اشباع‌پذیر (SA)، ناحیه بهره (GAIN) و آینه. فاصله تأخیری τ مبین ساختار حلقوی لیزر است که در معادله موج لحاظ شده است [۷].

$$\Gamma^{-1} \frac{dA}{dt} = \sqrt{\kappa} e^{G(t-T)/2 + Q(t-T)/2} A(t-T) - A \quad (1)$$

$$\frac{dP_g}{dt} = b_g N_g (1 - P_g) - (\gamma_g + r_g) P_g - e^Q (e^G - 1) |A|^2 \quad (2)$$

$$\frac{dP_q}{dt} = b_q N_q (1 - P_q) - (\gamma_q + r_q \tau_{\omega}) P_q - s (e^Q - 1) |A|^2 \quad (3)$$

$$\frac{dN_g}{dt} = \delta_g (g_0 - N_g) + 2r_g P_g - 2P_g N_g (1 - P_g) \quad (4)$$

$$\frac{dN_q}{dt} = 2r_q \tau_{\omega} P_q - \delta_q N_q - 2b_q N_q (1 - P_q) \quad (5)$$

در روابط بالا A اندازه پوش میدان الکتریکی در ابتدای جاذب اشباع‌پذیر و κ ضریب تضعیف کاواک است. $G = g_g l_g (2P_g - 1)$ و $Q = g_q l_q (2P_q - 1)$ به ترتیب اندازه بهره تولیدشده توسط ناحیه بهره و تلفات ایجادشده توسط جاذب اشباع‌پذیر را بیان می‌کنند که اندیس‌های

این مدولاسیون باعث افزایش نرخ گسیل تحریک‌شده^{۱۸} در دوره تناوب زمانی برابر با عکس فرکانس اصلی لیزر شده و از طرف دیگر نرخ گسیل تحریک‌شده در فاصله زمانی بین دو بیشینه متوالی پارامتر τ_w (دو کمینه سیگنال مدوله‌کننده) را کاهش داده و نهایتاً سبب حذف رژیم QS می‌شود.

همچنین جریان آستانه لیزر کاهش یافته و لیزر به ازای جریان کمتری به رژیم فرکانس اصلی گذر خواهد کرد. بنابراین، اگرچه نمی‌توان با اعمال قفل حالت ترکیبی هر دو رژیم نامطلوب QS-ML و QS-MLR را حذف کرد ولی با اعمال این نوع قفل حالت علاوه بر حذف یکی از این رژیم‌ها، می‌توان جریان آستانه لیزینگ و نیز جریان آستانه برای کلیه رژیم‌ها را کاهش داد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در لیزرهای که دارای دو قسمت بهره و جاذب اشباع‌پذیر هستند لبه پیشرو پالس خروجی توسط شفاف شدن جاذب اشباع‌پذیر و لبه پسرو آن توسط اشباع ناحیه بهره ایجاد می‌شود.

از طرفی در روش قفل حالت ترکیبی در رژیم فرکانسی اصلی لیزر اعمال سیگنال RF به جاذب اشباع‌پذیر سبب کاهش سریع احتمال واهلش‌ها در ناحیه جاذب اشباع‌پذیر به‌طور همزمان با لبه پس‌رونده پالس تولیدی لیزر می‌شود. این خود سبب به صفر رسیدن میدان الکتریکی خروجی لیزر بین دو پالس متوالی می‌شود.

لبه پیشرو^{۱۹} پالس توسط اشباع ناحیه جاذب اشباع‌پذیر و لبه پسرو^{۱۶} آن توسط اشباع ناحیه بهره شکل می‌گیرد. به عبارت دیگر، میزان تلفات و بهره در این نوع از لیزرها در طی فرایند تولید پالس ثابت نبوده و متغیر است. بنابراین این تغییر بهره و تلفات فرصتی را برای مطالعه رژیم‌های تولید پالس تحت عنوان ساختارهای ۱- با ناحیه جاذب اشباع‌پذیر بلند و ۲- با ناحیه جاذب اشباع‌پذیر کوتاه ارائه می‌کند [۱۲]. معیار و ملاک برای لیزر با ساختار جاذب بلند برقراری رابطه $g_{ql} > g_{gl} + \ln(\kappa)$ به ازای پارامترهای لیزر است [۱۲]. بدیهی است که با تعویض جهت علامت نامساوی معیار ساختار جاذب کوتاه به‌دست خواهد آمد. طبق رابطه ارائه‌شده، بدیهی است که این معیار برحسب بیشینه تلفات و بیشینه بهره نوع ساختار را مشخص می‌نماید. به بیان دیگر در این رابطه احتمال حضور الکترون در نقاط کوانتومی ناحیه بهره ۱ (بیشینه بهره تولیدشده توسط ناحیه بهره) و در ناحیه جاذب ۰ (بیشینه تلفات ایجادشده توسط جاذب اشباع‌شونده) در نظر گرفته شده است که $Q = -g_{ql}q$ و $G = g_{gl}g$ بیانگر تلفات ذاتی کاواک است. همچنین پارامتر $\ln(\kappa)$ بیانگر تلفات ذاتی کاواک است.

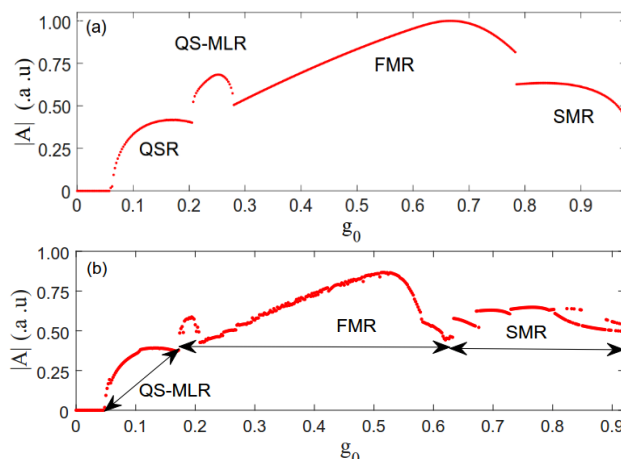
۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی لیزر با ساختار کوتاه و بلند تحت اعمال قفل حالت غیرفعال و ترکیبی ارائه می‌شود. به این منظور این بخش به سه قسمت ساختار جاذب کوتاه، ساختار جاذب بلند و نتیجه‌گیری تقسیم شده است.

۳-۱- عملکرد پویایی در ساختار جاذب کوتاه

در ساختار جاذب کوتاه بیشینه بهره تولیدشده در ناحیه بهره از مجموع تلفات ذاتی کاواک و بیشینه تلفات ناحیه جاذب اشباع‌پذیر بیشتر است. در بررسی‌های صورت گرفته برای این نوع ساختار، در لیزر قفل حالت شده غیرفعال به ازای افزایش جریان به ترتیب رژیم‌های کاری QS (در شکل ۲ به اختصار با QSR نمایش داده شده است)، QS-ML (QS-MLR)، فرکانسی اصلی و فرکانسی هارمونیک پیش‌بینی شده است [۱۲]. نتایج شبیه‌سازی‌های ما همان‌طور که در شکل ۲- (a) نشان داده‌شده منطبق بر نتایج مرجع [۱۲] بوده و وجود تمام رژیم‌های اشاره‌شده را در این نوع ساختار و به ازای قفل حالت غیرفعال تأیید می‌کند.

در روش قفل حالت ترکیبی همان‌طور که در شکل ۲ (b) پیداست به‌علت مدولاسیون تلفاتی که در ناحیه جاذب اشباع‌پذیر صورت می‌گیرد رژیم کاری QS حذف شده و اولین رژیم کاری که لیزر در آن شروع به تولید پالس می‌کند رژیم QS-ML است. عمده‌ترین علت حذف‌شدگی این رژیم وجود سیگنال مدوله‌کننده خارجی است. سیگنال RF اعمال‌شده با استفاده از اثر فرانز کلدیش^{۱۷} باعث تغییر زمان فرار حامل‌ها از داخل نقاط کوانتومی به لایه و تینگ جاذب اشباع‌پذیر شده و احتمال حضور الکترون در نقاط کوانتومی این ناحیه را تغییر می‌دهد. در نتیجه میزان تلفات تغییر کرده و به‌علت وجود تزویج نوری بین دو ناحیه بهره و جاذب، منجر به تغییر بهره لیزر شده و آن را با فرکانس سیگنال اعمالی مدوله می‌کند (شکل ۳) [۱۳].



شکل ۲: (a) رژیم‌های کاری لیزر برحسب جریان در قفل‌شدگی حالت غیرفعال. (b) رژیم‌های کاری لیزر برحسب جریان در حالت قفل‌شدگی حالت ترکیبی به ازای $V = 0.5\text{V}$, $a = 1$. سایر پارامترها یکسان هستند. در شکل‌های بالا عبارات: QSR, QS-MLR, FMR, SMR به ترتیب مبین ناحیه‌های: رژیم QS، رژیم QS-ML و رژیم حالت قفل‌شده اصلی و هارمونیک است.

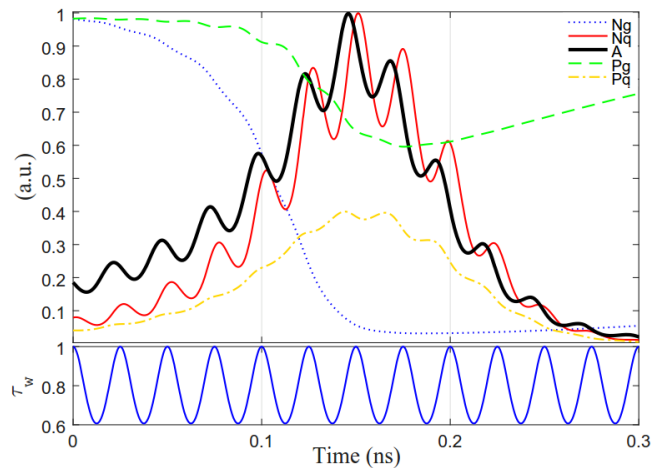
علاوه بر این‌ها، همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، نتایج به‌دست‌آمده حاکی از تأثیر بسیار اندک نا هم‌فازی بین سیگنال اعمالی و پالس‌های خروجی لیزر است. به عبارتی لیزر در رژیم فرکانسی اصلی نسبت به نا هم‌فازی سیگنال خارجی حساسیت کمتری دارد. همانند روش قفل حالت غیرفعال، رژیم فرکانسی هارمونیک در روش قفل حالت ترکیبی نیز وجود دارد. با توجه به اینکه روش قفل حالت ترکیبی از ترکیب روش قفل حالت فعال (استفاده از سیگنال RF) و قفل حالت غیرفعال (استفاده از جاذب اشباع شونده) تشکیل شده است، بنابراین در هر یک از رژیم‌های کاری اثر یکی از این روش‌ها بر دیگری غالب خواهد بود. همان‌طور که در رژیم فرکانسی اصلی روش قفل حالت ترکیبی اثر جاذب اشباع‌پذیر بر اثر اعمال سیگنال خارجی غالب بوده و فاز سیگنال تأثیر بسزایی بر روی خروجی نداشت.

نتایج تحلیل در روش قفل حالت ترکیبی حاکی از آن است که در رژیم فرکانسی هارمونیک قفل حالت ترکیبی اثر سیگنال خارجی پدیده غالب بوده و لیزر نسبت به فرکانس و فاز سیگنال خارجی بسیار حساس است. در رژیم فرکانسی هارمونیک روش قفل حالت غیرفعال با توجه به افزایش میزان جریان تزریقی به لیزر، افزایش جمعیت حامل‌های موجود در لایه وتینگ و احتمال حامل‌های نقاط کوانتومی ناحیه بهره سبب می‌شوند تا ناحیه بهره به‌سختی اشباع شود. این مقاومت در برابر اشباع سبب کاهش نرخ تمایز پالس‌ها مطابق شکل ۵(a) می‌شود. در رژیم هارمونیک روش قفل حالت ترکیبی، به‌دلیل این‌که فرکانس سیگنال اعمالی تقریباً نصف فرکانس پالس‌های خروجی لیزر است، از هر دو پالس لیزر یکی به‌طور ناخواسته مورد تضعیف قرار می‌گیرد و این باعث کاهش نرخ تمایز پالس‌ها می‌شود. همچنین در این رژیم فاصله زمانی پالس‌ها به‌گونه‌ای است که گویا دو قطار پالس مجزا در داخل کاواک لیزر مشابه شکل ۵(b) وجود دارد.

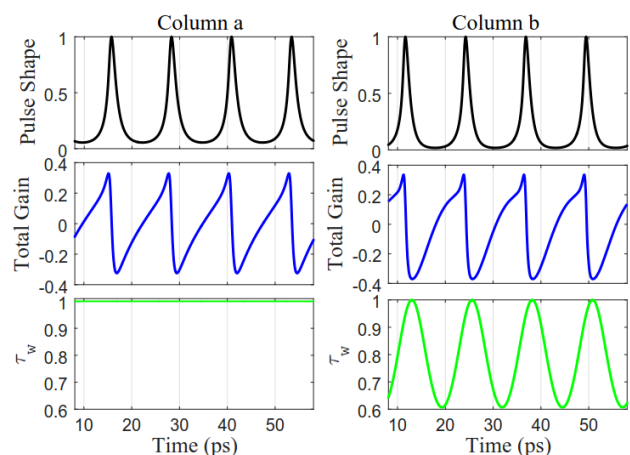
به‌طور کلی در روش قفل حالت ترکیبی فرکانس پالس‌های خروجی در یک محدوده فرکانسی برابر و یا مضربی از فرکانس سیگنال خارجی می‌شود که اصطلاحاً این محدوده را بازه قفل‌شدگی می‌نامند [۲، ۴، ۸]. در روش قفل حالت ترکیبی مخصوصاً در رژیم‌های کاری هارمونیک نصف فرکانس اصلی باید توجه داشت که فرکانس اعمالی باید در محدوده این بازه قفل‌شدگی باشد. در غیر این‌صورت لیزر با فرکانس اصلی به تولید پالس خود ادامه می‌دهد و این در حالی است که پالس‌های تولیدی دارای اعوجاج و بی‌ثباتی‌های زمانی خواهند بود. نکته حائز اهمیت در اعمال قفل حالت ترکیبی به لیزر با جاذب اشباع‌پذیر کوتاه این است که فرکانس خروجی لیزر مضرب مشترک فرکانس اصلی کاواک و فرکانس سیگنال اعمالی است.

۳-۲- عملکرد پویایی در ساختار جاذب بلند

در این حالت مقدار بیشینه بهره کمتر از مجموع تلفات کاواک و بیشینه تلفات جاذب اشباع‌پذیر است. همان‌طور که در [۶] بیان شده، در روش قفل حالت غیرفعال رژیم‌های کاری Qs و Qs-ML حذف می‌شود.

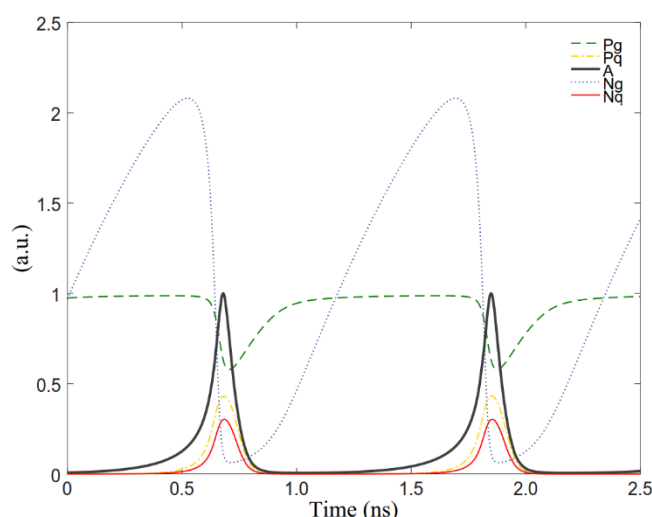


شکل ۳: پالس‌های خروجی رژیم Qs-ML ($g_0=0/10$) منتج از اعمال سیگنال RF به ناحیه جاذب اشباع شونده. خطوط خط‌چین، نقطه - خط، خط ممتد ضخیم، نقطه‌چین و خط ممتد نازک به ترتیب مبین چگالی احتمال حامل‌ها در نقاط کوانتومی ناحیه فعال و غیرفعال، پالس خروجی لیزر، چگالی حامل‌ها در قسمت وتینگ ناحیه فعال و غیرفعال است.



شکل ۴: جاذب اشباع‌پذیر بر روی بهره کل کاواک ($f_m=40\text{GHz}$ و $g_0=0/6$) تأثیر سیگنال خارجی اعمالی به ناحیه سازوکار تولید پالس. ستون a برای لیزر قفل حالت شده غیرفعال و ستون b برای لیزر قفل حالت شده ترکیبی با ولتاژ معکوس ۰/۵ ولت به‌دست آمده است. ردیف اول شکل موج خروجی لیزر، ردیف دوم بهره کل کاواک و ردیف سوم شکل و دامنه ضریب اعمال‌شده به نرخ فرار حامل‌ها از نقاط کوانتومی در اثر سیگنال خارجی است. در ردیف دوم شکل، بهره کل بزرگ‌تر از صفر به معنای تولید فوتون در خروجی لیزر و بهره کل کوچک‌تر از صفر به معنای جذب تمام فوتون‌ها در داخل کاواک و خروجی صفر است.

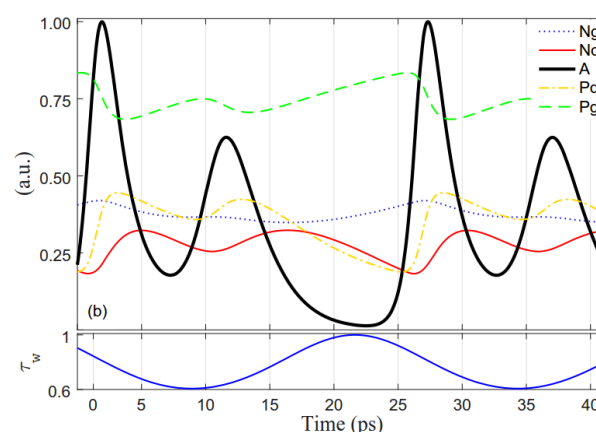
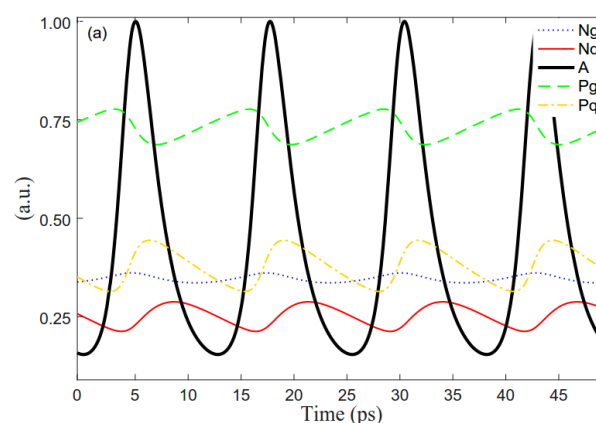
علاوه بر این، بین دو پالس تولیدی تلفات کاواک افزایش یافته و حساسیت لیزر را نسبت به نوسانات و نوفه تابش خودبه‌خودی^{۱۹} کاهش داده و نهایتاً باعث افزایش چشمگیر نرخ تمایز^{۲۰} پالس‌های تولیدی مطابق شکل ۴ می‌شود.



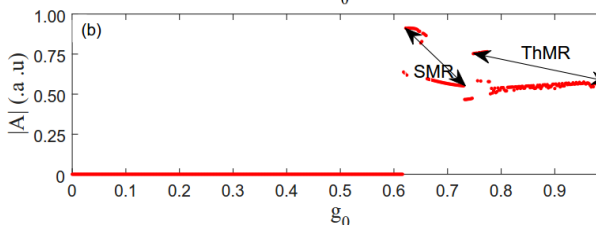
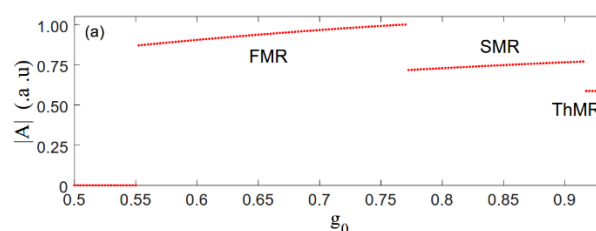
شکل ۷: پالس‌های خروجی رژیم Qs ($g_0=0.12$) و وابستگی آن به احتمال واهلش‌ها در نقاط کوانتومی و چگالی حامل‌های لایه و تینگ ناحیه بهره و جاذب اشباع شونده. خطوط خط‌چین، نقطه-خط، خط ممند ضخیم، نقطه‌چین و خط ممند نازک به ترتیب بیانگر احتمال یافت حامل‌ها در نقاط کوانتومی ناحیه بهره و جاذب اشباع شونده، پالس خروجی لیزر، چگالی حامل‌ها در لایه و تینگ ناحیه بهره و جاذب اشباع‌پذیر است.

نتایج شبیه‌سازی‌های به‌دست‌آمده به ازای قفل حالت غیرفعال و ترکیبی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، این دو رژیم ناخواسته در روش قفل حالت ترکیبی هم حذف شده است. علت حذف این دو رژیم به سازوکار تولید پالس در لیزرهای مبتنی بر نقاط کوانتومی مربوط است. در این لیزرها، رژیم‌های Qs و Qs-ML به دلیل پائین بودن نرخ تزریق حامل به ناحیه بهره نسبت به نرخ تولید فوتون در ناحیه بهره به وجود می‌آید. به عبارت دیگر، با شفاف شدن جاذب اشباع‌پذیر و افزایش میزان گسیل تحریک‌شده داخل کاواک به دلیل تزریق ناکافی حامل به ناحیه بهره جمعیت حامل‌ها در لایه و تینگ و متعاقباً در نقاط کوانتومی ناحیه بهره سریعاً تخلیه می‌شوند. زمان بازیابی حامل‌های لایه و تینگ که رابطه مستقیم با میزان جریان ورودی دارد فرکانس پالس‌های رژیم Qs را تعیین می‌کند. سازوکار تولید پالس در رژیم Qs در شکل ۷ نشان داده شده است.

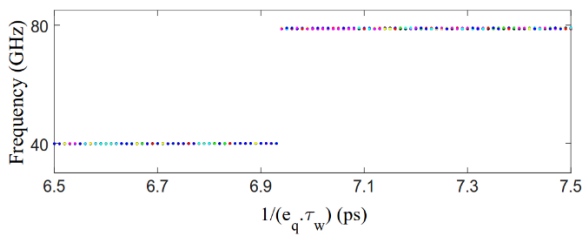
رژیم Qs-ML هم همانند رژیم Qs بوده و تنها تفاوت آن‌ها با هم مدوله شدن پالس‌های بزرگ رژیم Qs با فرکانس اصلی لیزر به دلیل وجود ساختار حلقوی کاواک است. در شکل ۸ سازوکار تولید پالس این رژیم نیز نشان شده است. علت حذف شدن این دو رژیم، تلفات بالای ایجادشده در ساختار جاذب بلند است. تلفات بالا باعث افزایش جریان آستانه لیزر و پر شدن لایه و تینگ ناحیه بهره می‌شود. به این دلیل این دو رژیم ناخواسته در این نوع از ساختار وجود نخواهند داشت. لیزرهای مبتنی بر نقاط کوانتومی اولین نوع از لیزر هستند که این دو رژیم ناخواسته را به کلی می‌توان در آن حذف کرد. در [۲] جهت به حداقل رساندن بازه این رژیم در لیزرهای مبتنی بر چاه کوانتومی روش‌هایی مثل -کاهش تعداد لایه‌ها در ساختار ناحیه بهره جهت بالا بردن جمعیت



شکل ۸: پالس‌های خروجی رژیم HML ($g_0=0.634$). خطوط خط‌چین، نقطه-خط، خط ممند کلفت، نقطه‌چین و خط ممند نازک به ترتیب بیان چگالی احتمال حامل‌ها در نقاط کوانتومی ناحیه بهره و جاذب اشباع شونده، پالس خروجی لیزر، چگالی حامل‌ها در قسمت و تینگ ناحیه بهره و جاذب اشباع‌پذیر است. (a) متعلق به روش قفل حالت غیرفعال و (b) متعلق به روش قفل حالت ترکیبی است.



شکل ۹: (a) و (b) به ترتیب رژیم‌های کاری و فرکانس خروجی لیزر برحسب جریان در قفل‌شدگی حالت غیرفعال. (c) و (d) به ترتیب رژیم‌های کاری و فرکانس خروجی لیزر برحسب جریان در قفل‌شدگی حالت ترکیبی به ازای $V=0.5\text{V}$, $\alpha=1$. سایر پارامترها یکسان هستند.



شکل ۹: تغییر فرکانس خروجی با تغییر ولتاژ معکوس ناحیه جاذب اشباع‌پذیر و تغییر رژیم کاری لیزر از رژیم هارمونیک به رژیم فرکانس اصلی و برعکس ($g_0 = 0.626$).

بنابراین اعمال قفل حالت ترکیبی برای ساختار جاذب بلند به‌علت کیفیت بسیار پائین پالس‌های تولیدی امری نامطلوب است مگر اینکه اختلاف بین کل تلفات کاواک و جاذب اشباع‌پذیر با کل بیشینه بهره مقدار جزئی باشد.

همان‌طور که در شکل ۶ (a) نمایش داده شده است، ساختار جاذب بلند در قفل حالت غیرفعال توانائی تولید هارمونیک‌های فرکانسی بالاتر (حتی هارمونیک سوم) را در خروجی خود با کیفیت قابل قبولی دارد ولی در قفل حالت ترکیبی در خروجی لیزر پالسی تولید نمی‌شود.

قابلیت دیگری که در لیزرهای یکپارچه دوقسمتی^{۳۱} در هر دو نوع از ساختار جاذب بلند و کوتاه وجود دارد، توانایی گذر بین دو رژیم کاری متوالی در هر دو روش قفل حالت غیرفعال و ترکیبی است. با تغییر مقدار ولتاژ DC معکوس که به ناحیه جاذب اشباع‌پذیر اعمال شده است می‌توان بدون این‌که تغییری در جریان تزریقی به ناحیه بهره داد، رژیم کاری لیزر را تغییر داد. شکل ۹ تغییر رژیم از رژیم فرکانسی هارمونیک به رژیم فرکانس اصلی را به ازای افزایش ولتاژ معکوس جاذب اشباع‌پذیر در ساختار جاذب بلند نمایش می‌دهد.

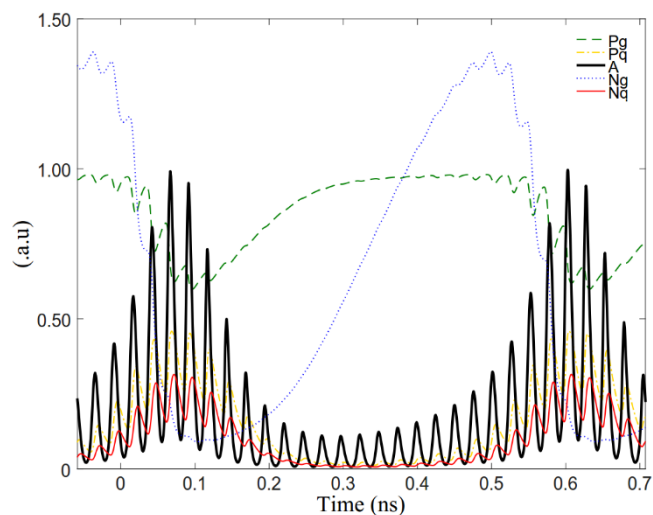
۴- نتیجه‌گیری

لیزرهای قفل حالت شده با ساختار جاذب بلند علاوه بر حذف کامل رژیم‌های کاری ناخواسته Qs و Qs-ML، در قفل حالت غیرفعال، از پایداری دامنه و فرکانسی نسبی بیشتری نسبت به ساختار جاذب کوتاه برخوردار هستند. اعمال قفل‌شدگی حالت ترکیبی به این ساختار به‌دلیل بالا بودن تلفات کل باعث افزایش جریان آستانه، لب ریز شدن^{۳۲} لایه وتینگ ناحیه بهره از حامل‌ها و عدم اشباع این ناحیه و همچنین کاهش نرخ تمایز پالس‌ها در رژیم فرکانس اصلی و هارمونیک آن می‌شود. در مقابل، لیزر با ساختار جاذب کوتاه علیرغم جریان آستانه پائین به‌علت تلفات نسبتاً کم لیزر نسبت به نوفه و نوسانات دامنه‌ای خارجی حساس‌تر است. مناسب‌ترین روش قفل‌شدگی حالت برای این ساختار روش ترکیبی است. در قفل‌شدگی حالت ترکیبی فرکانس هارمونیک مضرب مشترک سیگنال اعمالی خارجی و فرکانس اصلی خود لیزر است بنابراین با اعمال فرکانس دو برابر و یا ساخت کاواک کوتاه‌تر می‌توان به فرکانس‌های هارمونیک بالاتری نیز دست یافت. همچنین حذف حالت کاری Qs، کاهش جریان آستانه در تمام رژیم‌های کاری و افزایش نرخ

حامل این ناحیه و کاهش تلفات کاواک ارائه شده است. اگرچه این روش‌ها دارای معایب و محدودیت‌های فراوانی از جمله عدم توانائی در کنترل تلفات ذاتی کاواک، کاهش شدت میدان خروجی در اثر کاهش تعداد لایه‌های ناحیه بهره (و یا در اثر کاهش چگالی نقاط کوانتومی در هر لایه از ناحیه بهره) و کاهش نرخ تمایز پالس‌ها به‌علت ازدیاد بیش از حد جمعیت حامل در ناحیه فعال به‌دلیل تزریق جریان بالا هستند. این در حالی است که تنها ایراد ساختار جاذب بلند، جریان آستانه بالای آن و در نتیجه افزایش تلفات حرارتی لیزر است. همچنین نباید فراموش کرد که لیزرهای مبتنی بر نقاط کوانتومی حساسیت بسیار پائینی نسبت به دما دارند و افزایش دما اختلال چندانی بر عملکرد آن‌ها وارد نمی‌کند [۳، ۱۳].

در لیزر با جاذب اشباع‌پذیر بلند با اعمال روش قفل حالت ترکیبی با توجه به این‌که تلفات به خاطر اعمال ولتاژ معکوس افزایش یافته، جریان آستانه نیز شدیداً افزایش می‌یابد و در عین حال رژیم فرکانسی اصلی شدیداً به فاز سیگنال اعمالی وابسته می‌شود (ناهم‌فازی کوچکی بین سیگنال اعمالی و پالس‌های خروجی لیزر می‌تواند منجر به عدم تولید خروجی در لیزر شود). در شکل ۶ (b) حذف رژیم فرکانس اصلی قابل مشاهده است. با اعمال فاز مناسب به سیگنال خارجی این رژیم مجدداً به نتایج اضافه خواهد شد.

به‌علت جریان بالای اعمال‌شده، تعداد حامل‌های لایه وتینگ ناحیه بهره افزایش یافته و این امر منجر به کاهش نرخ تمایز در پالس‌های تولیدی در بقیه رژیم‌های موجود در لیزر می‌شود.



شکل ۸: پالس‌های خروجی رژیم Qs-ML ($g_0 = 0.18$) و وابستگی آن به احتمال واهلش در نقاط کوانتومی و چگالی حامل‌های لایه وتینگ ناحیه بهره و جاذب اشباع‌پذیر در ساختار با جاذب کوتاه. خطوط خط‌چین، نقطه-خط، خط ممتد ضخیم، نقطه‌چین و خط ممتد نازک به ترتیب بیانگر احتمال یافت حامل‌ها در نقاط کوانتومی ناحیه بهره و جاذب اشباع‌پذیر، پالس خروجی لیزر، چگالی حامل‌ها در لایه وتینگ ناحیه بهره و جاذب اشباع‌پذیر است.

- [7] C. Otto, K. Lüdge, A. Vladimirov, M. Wolfrum and E. Schöll, "Delay-induced dynamics and jitter reduction of passively mode-locked semiconductor lasers subject to optical feedback," *New Journal of Physics*, vol. 14, pp. 113033, 2012.
- [8] W. Zhou, X. Fan, H. Xue, R. Xu, Y. Zhao, X. Xu, D. Tang and D. Shen, "Stable passively harmonic mode-locking dissipative pulses in 2 μ m solid-state laser," *Optics Express*, vol. 25, no. 3, pp. 1815-1823, 2017.
- [9] C. Otto, B. Lingnau, E. Schöll and K. Lüdge, "Manipulating coherence resonance in a quantum dot semiconductor laser via electrical pumping," *Optics Express*, vol. 22, no. 11, pp. 13288-13307, 2014.
- [10] G. Fiol, D. Arsenijević, D. Bimberg, A. G. Vladimirov, M. Wolfrum, E. A. Viktorov and P. Mandel, "Hybrid mode-locking in a 40 Ghz monolithic quantum dot laser," *Applied Physics Letters*, vol. 96, no. 1, pp. 011104, 2010.
- [11] A. G. Vladimirov and D. Turaev, "Model for passive mode locking in semiconductor lasers," *Physical Review A*, vol. 72, pp. 033808, 2005.
- [12] A. G. Vladimirov, U. Bandelow, G. Fiol, D. Arsenijević, M. Kleinert, D. Bimberg, *et al.*, "Dynamical regimes in a monolithic passively mode-locked quantum dot laser," *Journal of Optical Society of America B*, vol. 27, no. 10, pp. 2102-2109, 2010.
- [13] G. Vincent, A. Chantre and D. Bois, "Electric field effect on the thermal emission of traps in semiconductor junctions," *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 8, pp. 5484-5487, 1979.
- [14] T. Erneux, E. A. Viktorov, P. Mandel, T. Piwonski, G. Huyet and J. Houlihan, "The fast recovery dynamics of a quantum dot semiconductor optical amplifier," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 11, pp. 113501, 2009.
- [15] T. Piwonski, J. Pulka, G. Madden, G. Huyet, J. Houlihan, E. A. Viktorov, *et al.*, "Intradot dynamics of Inas quantum dot based electroabsorbers," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 12, pp. 123504, 2009.
- [16] E. A. Viktorov, T. Erneux, P. Mandel, T. Piwonski, G. Madden, J. Pulka, *et al.*, "Recovery time scales in a reversed-biased quantum dot absorber," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 26, pp. 263502, 2009.

تمایز پالس‌های تولیدی از دیگر ویژگی‌های لیزرهای قفل حالت شده ترکیبی با جاذب کوتاه هستند. در هر دو ساختار عامل محدودکننده در دستیابی به هارمونیک‌های فرکانسی بالاتر، عدم اشباع کامل ناحیه بهره است که این مشکل را می‌توان با افزایش چگالی نقاط کوانتومی در ناحیه بهره و یا افزایش تعداد لایه‌های ناحیه بهره حل کرد. در هر دو نوع از ساختار لیزر با اعمال ولتاژ معکوس به ناحیه جاذب اشباع‌پذیر و تغییر آن می‌توان رژیم کاری لیزر را تغییر داد. در این خصوص باید در نظر داشت که فقط تغییر بین دو رژیم کاری متوالی امکان‌پذیر است.

مراجع

- [1] A. Y. Liu, S. Srinivasan, J. Norman, A. C. Gossard and J. E. Bowers, "Quantum dot lasers for silicon photonics [Invited]," *Photonics Research*, vol. 3, no. 5, pp. B1-B9, 2015.
- [2] R. Arkhipov, A. Pimenov, M. Radziunas, D. Rachinskii, A. G. Vladimirov, D. Arsenijević, H. Schmeckebier and D. Bimberg, "Hybrid mode locking in semiconductor lasers: simulations, analysis, and experiments," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1100208-1100208, 2013.
- [3] E. U. Rafailov, M. A. Cataluna and W. Sibbett, "Mode-locked quantum-dot lasers," *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 395-401, 2007.
- [4] L. Jaurigue, O. Nikiforov, E. Schöll, S. Breuer and K. Lüdge, "Dynamics of a passively mode-locked semiconductor laser subject to dual-cavity optical feedback," *Physical Review E*, vol. 93, no. 2, pp. 022205, 2016.
- [5] B. Jang, K. Tanabe, S. Kako, S. Iwamoto, T. Tsuchizawa, H. Nishi, N. Hatori, M. Noguchi, T. Nakamura and K. Takemasa, "A hybrid silicon evanescent quantum dot laser," *Applied Physics Express*, vol. 9, pp. 092102, 2016.
- [6] T. Habruseva, D. Arsenijević, M. Kleinert, D. Bimberg, G. Huyet and S. P. Hegarty, "Optimum phase noise reduction and repetition rate tuning in quantum-dot mode-locked lasers," *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 2, pp. 021112, 2014.

زیرنویس‌ها

¹² finite difference

¹³ New's background stability criterion

¹⁴ wetting layer

¹⁵ leading edge

¹⁶ trailing edge

¹⁷ Franz-Keldysh

¹⁸ stimulated emission

¹⁹ spontaneous emission noise

²⁰ extension ratio

²¹ two-section monolithic lasers

²² full filling

¹ inhomogeneous broadening

² external feedback

³ mode locking

⁴ active ML

⁵ passive ML

⁶ hybrid ML

⁷ light injection

⁸ timing jitter

⁹ ring laser

¹⁰ locking range

¹¹ MATLAB