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

# شبیه‌سازی تقویت‌کننده نوری نیمرسانا نقطه کوانتومی نوع InGaAs/GaAs خودآراسته با استفاده از معادلات آهنگ

سید محسن ایزدیار[۱]، محمد رزاقی[۲]

۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه کردستان، سنندج

۲ گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج

**چکیده - در این مقاله، تقویت‌کننده نوری نیمرسانا نقطه کوانتومی نوع *InGaAs/GaAs* شبیه‌سازی شده است. معادلات آهنگ حاکم بر *QDSOA* بدست آمده‌اند و با استفاده از معادله انتشار پالس نوری در تقویت‌کننده رفتار تقویت‌کننده نقطه کوانتومی بررسی شده است. معادلات آهنگ با استفاده از روش عددی رونگ - کوتای مرتبه چهارم حل شده‌اند. شبیه‌سازی برای دونوع ورودی *CW* و گاوسین انجام شده است. همچنین به بررسی نحوه تقویت قطاری از پالس‌های گاوسی پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش جریان تزریقی به تقویت‌کننده، میزان بهره بیشتر می‌شود و بازیابی بهره با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که به سبب تقویت بیشتر لبه جلویی پالس ورودی، در پالس خروجی عدم تقارن دیده می‌شود.**

کلید واژه- تقویت‌کننده نوری نیمرسانا، نقاط کوانتومی خودآراسته InGaAs/GaAs، شبیه‌سازی، معادلات آهنگ، حل عددی رونگ-کوتای مرتبه چهارم

# Simulation of Self-Assembled InGaAs/GaAs Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier Based upon Rate Equations

Seyed Mohsen Izadyar[۱], Mohammad Razaghi[۲]

۱ Department of Physics, Faculty of Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

۲ Department of Electronic, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

Abstract- In this paper, InGaAs/GaAs Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier has been simulated. Rate equations have been obtained and by using propagation equation of optical pulse in SOA, its response has been investigated. Rate equations have been solved using 4th order Runge-Kutta method. The response of SOA to CW and Gaussian inputs has been investigated. Amplification of Gaussian pulse train has been investigated. It has been observed that increasing in the injection current increases the gain and gain recovery has been faster. Also, due to more amplification of forward edge of input pulse, asymmetry has been observed.

Keywords: Quantum dot semiconductor optical amplifier, Self-assembled InGaAs/GaAs QD, Simulation, Rate equations



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31 ]

## ۱- مقدمه

نقاط کوانتومی[۱] نوع جدیدی از نانوساختارهای نیمرسانا هستند که در آن‌ها حرکت حامل‌ها در هر سه بعد محدود شده‌است. این باعث عدم پیوستگی در نمودار چگالی حالتهای انرژی نیمرسانا و حالتهای انرژی گسسته و شبه دلتای دیراک در نقاط کوانتومی می‌شود، در نتیجه نقاط کوانتومی بسیار شبیه به اتم‌ها رفتار می‌کنند و به آنها اتم‌های مصنوعی نیز گفته می‌شود [۱].

لیزرها و تقویت‌کننده‌های نوری نیمرسانا نقطه کوانتومی[۲] در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند، زیرا دستگاه‌های شامل نقاط کوانتومی دارای ویژگی‌های چشمگیری از جمله بهره دیفرانسیلی خیلی بالا، جریان آستانه پایین و پایداری دمایی بالایی هستند. تقویت‌کننده‌های نقطه کوانتومی دارای کاربردهای متنوعی در شبکه مخابراتی نوری هستند که می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: سوئیچ تمام نوری با سرعت بسیار بالا، مبدل‌های طول موج [۲]، گیت‌های منطقی و پردازشگر سیگنال [۲]. از مزایای تقویت‌کننده‌های نقطه کوانتومی، بازیابی سریع بهره نوری، اشباع بسیار سریع (از مرتبه پیکوثانیه) نسبت به SOAهای مرسوم و چاه کوانتومی و از همه مهمتر، سطح مقطع کمتر اندرکنش فوتون-حامل است که منجر به زمان واهلش کوتاه‌تر حامل و اشباع بهره کمتر می‌شود [۳].

در این مقاله، تقویت‌کننده نوری نیمرسانا نقطه کوانتومی نوع InGaAs/GaAs خودآراسته[۳] مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات آهنگ حاکم بر این تقویت‌کننده در یک سیستم سه ترازی بدست می‌آیند و به همراه معادله انتشار پالس نوری در تقویت‌کننده برای شبیه‌سازی ویژگی‌های QDSOA بکار می‌روند. معادلات آهنگ با استفاده از روش عددی رونگ - کوتای مرتبه چهارم حل می‌شوند. سه تراز انرژی نوار رسانش تقویت‌کننده شامل لایه‌ی سد SCH[۴]، لایه‌ی مرطوب[۵] و تراز پایه است. فرض می‌شود که همه QDها یکنواخت و دارای اندازه و شکل یکسان هستند. از این رو، هر دو اثر پهن‌شدگی همگن و غیرهمگن نادیده گرفته می‌شود. رفتار سیستم را برای دونوع ورودی CW و گاوسین مورد بررسی قرار می‌دهیم.

## ۲- معادلات آهنگ حاکم بر QD-SOA

نقاط کوانتومی InGaAs خودآراسته که بر زیرلایه GaAs ایجاد شده‌اند و نیز کاربردشان در لیزرهای نیمرسانا، از سال ۱۹۹۴ مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. QD-SOA یکی از کاربردهای جدید نقاط کوانتومی خودآراسته است که ساختار آن درشکل ۱(الف) نشان داده شده است. سیگنال ورودی .S با عبور از محیط QD به طول L که تحت جریان الکتریکی I قرار گرفته است، تقویت می‌شود. شکل ۱(ب) ترازهای انرژی در نوار رسانش QD را نشان می‌دهد. برای سادگی نرخ تزریق جریان را ثابت در نظر گرفته‌ایم. بعنوان نتیجه‌ای از انتخاب تقریب اکسیتونی برای توصیف اندرکنش بین حفره‌ها و الکترون‌ها، هر رویدادی که برای الکترون‌ها در نوار رسانش می‌افتد برای حفره‌ها در نوار ظرفیت نیز می‌افتد که دلیل نشان دادن یک نوار است.

ثابت‌های زمانی شکل ۱(ب) که در معادلات آهنگ استفاده می‌شوند عبارتند از: پخش در ناحیه‌ی SCH ($\tau_s$)، گسیل حامل از چاه کوانتومی به ناحیه‌ی SCH ($\tau_{qe}$)، گسیل حامل از QD به چاه کوانتومی ($\tau_e$)، بازترکیب حامل در چاه کوانتومی ($\tau_{qr}$)، واهلش حامل به نقاط کوانتومی ($\tau_d$) و بازترکیب درآن‌ها ($\tau_r$).

در تقویت‌کننده نیمرسانا نوع عبوری با موجبری در جهت مثبت محور z، معادله انتشار پالس نوری بصورت زیر است:

$$\frac{dS(z,t)}{dz} = (g_m^{(1)}\Gamma - \alpha_{loss})S(z,t) \qquad (۱)$$

که $S$ جمعیت فوتون‌ها (بدون بعد)، $g_m$ بهره‌ی مدال نوری خطی، $\Gamma$ فاکتور محبوس‌سازی و $\alpha_{loss}$ اتلاف درونی است.

معادلات آهنگ حامل‌ها بصورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N_s}{\tau_s} - \frac{N_s}{\tau_{sr}} + \frac{N_q}{\tau_{qe}} \qquad (۲)$$

$$\frac{dN_q}{dt} = \frac{N_s}{\tau_s} + \frac{N}{\tau_e} - \frac{N_q}{\tau_{qe}} - \frac{N_q}{\tau_{qr}} - \frac{N_q}{\tau_d} \qquad (۳)$$

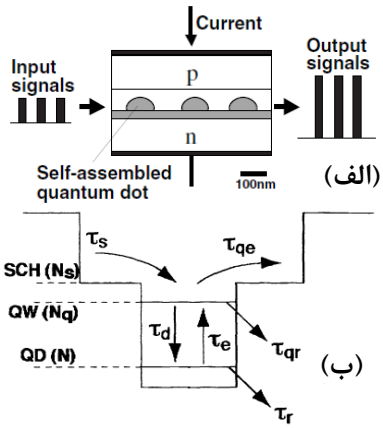
---

[۱] Quantum Dot (QD)
[۲] Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier
[۳] Self Assembled
[۴] Separated Confinement Heterostructure
[۵] Wetting Layer (WL)



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31 ]

$$\frac{dN}{dt}=\frac{N_q}{\tau_d}-\frac{N}{\tau_r}-\frac{N}{\tau_e}-\frac{c/n_r g_m^{(1)}\Gamma}{1+\varepsilon_m\Gamma S/V_a}S \qquad (۴)$$




شکل ۱: (الف) ساختار تقویت‌کننده نوری نیمرسانا نقطه کوانتومی [۱] (ب) ترازهای انرژی QD در نوار رسانش تقویت‌کننده [۴]

$N_s$ جمعیت حامل در لایه‌ی SCH ، $N_q$ جمعیت حامل در لایه مرطوب، $N$ جمعیت حامل در نقطه کوانتومی، $I$ جریان تزریقی، $\varepsilon_m$ ضریب بهره‌ی غیرخطی، $c$ سرعت نور، $n_r$ ضریب شکست، $\beta$ بازده جفت‌شدگی گسیل خودبه‌خودی و $V_a$ حجم لایه‌ی چاه کوانتومی دربرگیرنده‌ی نقطه کوانتومی است. $P$ احتمال اشغال حامل است که بر طبق اصل طرد پاولی به‌وسیله‌ی توازن بین نرخ فرآیندهای واهلش و گسیل تعیین می‌شود:

$$P=\frac{N}{2N_D V_a} \qquad (۵)$$

$N_D$ چگالی QD و $\tau_d$ نرخ واهلش حامل به تراز پایین است:

$$\tau_d^{-1}=(1-P)\tau_0^{-1} \qquad (۶)$$

$\tau_0^{-1}$ نرخ واهلش است وقتی حالت پایه اشغال نباشد (P=۰). با فرض اینکه پهن‌شدگی همگن در مقایسه با پهن‌شدگی غیرهمگن ناچیز باشد، بیشنه بهره‌ی نوری در مرکز تابع پهن‌شدگی بصورت زیر داده می‌شود [۵]:

$$g_{\max}=\frac{2.35\sqrt{2\pi}e^2\hbar\xi}{cn_r\varepsilon_0 m_0^2 V_D}\frac{\left|p_{11}^{k\sigma}\right|^2}{\hbar\omega_{11}}\frac{2P-1}{\Gamma_0} \qquad (۷)$$

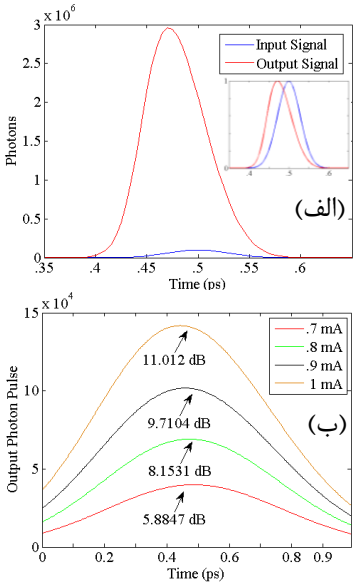
که $\Gamma$. پهنای کل در نصف بیشینه (FWHM) تابع پهن‌شدگی است. همپوشانی نقاط، $\xi$، به چگالی نقطه کوانتومی $N_D$ و حجم نقطه کوانتومی $V_D$ مرتبط می‌شود.

$$\xi=N_D V_D \qquad (۸)$$

در شبیه‌سازی، طول تقویت‌کننده ۱۲۰۰ µm، $\Gamma$=٪۱۵ [۲]، $\xi$=۰/۲، $\hbar\omega$=۱ ev و $\tau$.=۱۰ ps است.

## ۳- شبیه‌سازی و نتایج

معادلات آهنگ را با استفاده از روش حل عددی رونگ - کوتای مرتبه چهارم محاسبه می‌کنیم. ابتدا تک پالس گاوسی را به عنوان پالس ورودی تقویت‌کننده در نظر می‌گیریم. شکل ۲ (الف) پالس ورودی و پالس خروجی تقویت شده بر حسب زمان را نشان می‌دهد.



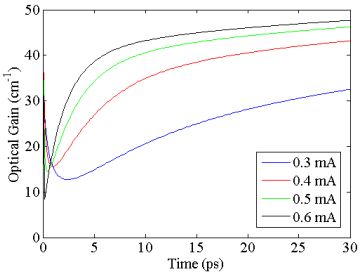

شکل ۲: (الف) پالس‌های ورودی (آبی) و خروجی (قرمز) در تقویت‌کننده. ضمیمه: نمودار نرمالیزه شده پالسهای ورودی (آبی) و خروجی (قرمز)، (ب) پالس خروجی در جریان‌های تزریقی مختلف

وقتی پالس از تقویت‌کننده عبور می‌کند، نامتقارن می‌شود، به عبارتی، لبه‌ی جلویی پالس نسبت به لبه‌ی انتهایی تیزتر می‌شود. این ویژگی، که به شیفت مرکز پالس نیز معروف است، در همه تقویت‌کننده‌ها وجود دارد و علت آن این است که لبه جلویی پالس بهره‌ی بیشتری را در مقایسه با لبه انتهایی تجربه می‌کند. شکل ۲(ب) تقویت پالس خروجی در جریان‌های تزریقی مختلف را نشان می‌دهد. همانطورکه انتظار می‌رود، با افزایش جریان پالس خروجی بیشتر تقویت می‌شود. همچنین بهره نوری نیز با افزایش جریان تزریقی افزایش می‌یابد.

شکل ۳ بهره نوری را برای یک پالس CW بعنوان ورودی نشان می‌دهد. اشباع بهره در خروجی تقویت‌کننده در

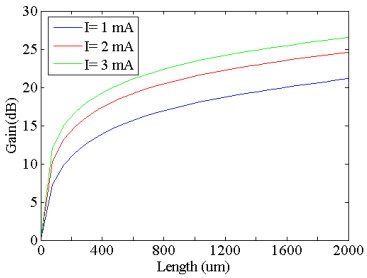
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31 ]

جریان‌های تزریقی مختلف نشان داده شده است. همانطورکه دیده می‌شود، با افزایش جریان تزریقی مقدار بهره افزایش می‌یابد و بازیابی بهره با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. بهره نوری در جریان‌های بالا در زمانی حدود ps ۱۰ بازیابی می‌شود. بهره نوری در جریان‌های ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ میلی آمپر به ترتیب ۹/۱۲۳، ۱۲/۳۰۹۷، ۱۴/۱۴۷۵ و ۱۵/۴۳۶۸ دسی بل است.



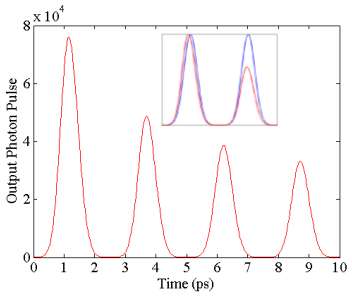

شکل ۳: بهره نوری برحسب زمان در جریان‌های تزریقی مختلف

شکل ۴ ضریب بهره نوری خروجی تقویت‌کننده را برحسب طول آن در جریان‌های مختلف تزریقی نشان می‌دهد. با افزایش جریان تزریقی و طول تقویت‌کننده می‌توان بهره را افزایش داد. البته باید توجه کرد که اتلاف نیز با افزایش طول کاواک، افزایش می‌یابد و نمی‌توان افزایش طول را بصورت دلخواه انجام داد.




شکل ۴: ضریب بهره نوری خروجی QDSOA برحسب طول تقویت‌کننده در جریان‌های تزریقی مختلف

اکنون ورودی تقویت‌کننده نقطه کوانتومی را قطاری از پالس گاوسی در نظر می‌گیریم. شکل ۵ پالس خروجی از تقویت‌کننده را نشان می‌دهد. با اعمال قطار پالس گاوسی، به علت عدم بازیابی بهره، پالس‌های بعدی تقویت کمتری را تجربه می‌کنند. همچنین همانند حالت تک پالس گاوسی، شیفت مراکز پالس نیز در این حالت اتفاق می‌افتد. ضمیمه شکل ۵ این ویژگی را برای اولین و دومین پالس نرمالیزه نشان می‌دهد.




شکل ۵: پالس خروجی گاوسی از تقویت‌کننده، ضمیمه: نمودار پالس‌های نرمالیزه ورودی (آبی) و خروجی (قرمز) تقویت‌کننده

## ۴- نتیجه‌گیری

با حل عددی معادلات آهنگ حامل و معادله انتشار، رفتار تقویت کننده نوری نیمرسانا شبیه‌سازی شد. رفتار تقویت‌کننده در حالت‌های پالس گاوسی و CW، بررسی شد. برای تک پالس گاوسی، رفتار تقویت پالس و نیز شیفت مرکز پالس نشان داده شد. برای یک پالس CW نیز مشاهده شد که با افزایش جریان تزریقی، بهره نوری افزایش می‌یابد و در جریان‌های بالا، بازیابی بهره با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. همچنین اثر طول تقویت‌کننده بر ضریب بهره نوری در جریان‌های مختلف بررسی شد. برای ورودی قطار پالس گاوسی، شیفت مرکز پالس و نامتقارن شدن پالس مشاهده شد.

## مراجع


[۱] A. Daraei, S. M. Izadyar and N. Chenarani , "*Simulation and Analysis of Carrier Dynamics in the InAs/GaAs Quantum Dot Laser, Based upon Rate Equations*" Optics and Photonics Journal, ۳, ۱۱۲-۱۱۶, ۲۰۱۳.

[۲] M. Sugawara, T. Akiyama, N. Hatori۱, Y. Nakata, H. Ebe۱ and H. Ishikawa, "*Quantum-dot semiconductor optical amplifiers for high-bit-rate signal processing up to ۱۲۰ Gbs−۱ and a new scheme of ۳R regenerators*" Institute of Physics Publishing Meas. Sci. Technol. ۱۳ ۱۶۸۳–۱۶۹۱, ۲۰۰۲.

[۳] A. Kotb "*NOR gate based on QD-SOA at ۲۵۰ Gbit/s*" Opt Quant Electron. ٤٥, ٤٧٣–٤٨٠, ۲۰۱۳.

[٤] A. Sakamoto and M. Sugawara, "*Theoretical Calculation of Lasing Spectra of Quantum-Dot Lasers: Effect of Homogeneous Broadening of Optical Gain*" IEEE Photon. Technol. Lett. ۱۲, ۱۰۷-۱۰۹ , ۲۰۰۰.

[٥] M. Sugawara, "*Effect of carrier dynamics on quantum-dot laser performance and possibility of bi-exciton lasing*", Part of the SPIE Conference on Physics and Simulation of Optoelectronic Devices VI, San Jose, California. SPIE, ۳۲۸۳, ۹۸, ۸۸-۹۹, ۱۹۹۸.


[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31 ]