





سيد محسن ايزديار'، محمد رزاقي

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 با افزایش جریان تزریقی 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 Izadyar¹, Mohammad Razaghi⁷

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

Y 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 *f*th 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

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 تقویت کننده های نوری نیمرسانا نقطه کوانتومی^۲ در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته اند، زیرا دستگاه های شامل نقاط کوانتومی دارای ویژگی های چشمگیری از جمله بهره دیفرانسیلی خیلی بالا، جریان آستانه پایین و پایداری دمایی بالایی هستند. تقویت کننده های نقطه کوانتومی دارای کاربردهای متنوعی در شبکه مخابراتی نوری هستند که میتوان به موارد ذیل اشاره کرد: سوئیچ تمام نوری با سرعت بسیار پرداز شگر سیگنال [۲]. از مزایای تقویت کننده های نقطه پرداز شگر سیگنال [۲]. از مزایای تقویت کننده های نقطه مرتبه پیکوثانیه) نسبت به AOSهای مرسوم و چاه کوانتومی و از همه مهمتر، سطح مقطع کمتر اندر کنش فوتون – حامل است که منجر به زمان واهلش کوتاه تر حامل و اشباع بهره کمتر میشود [۳].

در این مقاله، تقویت کننده نوری نیمرسانا نقطه کوانتومی نوع InGaAs/GaAs خودآراسته^۳ مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات آهنگ حاکم بر این تقویت کننده در یک سیستم سه ترازی بدست میآیند و به همراه معادله انتشار پالس نوری در تقویت کننده برای شبیه سازی ویژگیهای SOA بکار میروند. معادلات آهنگ با استفاده از روش عددی رونگ – کوتای مرتبه چهارم حل میشوند. سه تراز SCH⁴ و تراز پایه است. فرض میشود که همه ایرژی نوار رسانش تقویت کننده شامل لایهی سد ⁴

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.

QD-SOA معادلات آهنگ حاکم بر AD-SOA معادلات آهنگ حاکم بر

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 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 میان حفرهها در نوار الکترونها در نوار رسانش میانتد برای حفرهها در نوار

ثابتهای زمانی شکل ((.)) که در معادلات آهنگ SCH استفاده می شوند عبارتند از: پخش در ناحیه SCH SCH (τ_s)، گسیل حامل از چاه کوانتومی به ناحیه (τ_e)، گسیل حامل از QD به چاه کوانتومی (τ_q)، اهلش حامل به بازترکیب حامل در چاه کوانتومی (τ_{qr})، واهلش حامل به نقاط کوانتومی (τ_r).

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

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

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

معادلات آهنگ حاملها بصورت زیر نوشته میشوند:

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N_s}{\tau_s} - \frac{N_s}{\tau_{sr}} + \frac{N_q}{\tau_{qe}}$$
(7)

$$\frac{dN_q}{dt} = \frac{N_s}{\tau_s} + \frac{N}{\tau_e} - \frac{N_q}{\tau_{qe}} - \frac{N_q}{\tau_{qr}} - \frac{N_q}{\tau_d}$$
(7)

Quantum Dot (QD)

Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier ^r

Self Assembled "

Separated Confinement Heterostructure *

Wetting Layer (WL)⁴

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



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

 N_s جمعیت حامل در لایه Nq ، SCH جمعیت حامل در N_s جمعیت حامل در نقطه کوانتومی، I لایه مرطوب، N جمعیت حامل در نقطه کوانتومی، r جریان تزریقی، m ضریب بهره غیرخطی، 2 سرعت نور، n_r ضریب شکست، β بازده جفت شدگی گسیل خودبه خودی و V_a حجم لایه پاه کوانتومی خودبه خودی در برگیرنده ی نقطه کوانتومی است. P احتمال اشغال در برگیرنده ی نقطه کوانتومی است. P احتمال اشغال حامل است که بر طبق اصل طرد پاولی به وسیله ی توازن بین نرخ فرآیندهای واهلش و گسیل تعیین می شود:

$$P = \frac{N}{2N_D V_a} \tag{(a)}$$

و مرابع است: واهلش حامل به تراز پایین است: QD و N_D

$$\tau_d^{-1} = (1 - P)\tau_0^{-1} \tag{9}$$

نرخ واهلش است وقتی حالت پایه اشغال نباشد τ_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 می شود [۵]:

$$g_{\max} = \frac{2.35\sqrt{2\pi}e^{2}\hbar\xi}{cn_{r}\varepsilon_{0}m_{0}^{2}V_{D}}\frac{\left|P_{11}^{k\sigma}\right|^{2}}{\hbar\omega_{11}}\frac{2P-1}{\Gamma_{0}}$$
(Y)

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

$$\xi = N_D V_D \tag{A}$$

در شبیه سازی، طول تقویت کننده μm در شبیه سازی، طول تقویت کننده τ.=۱۰ ۵، ۱۲۰۰ (۲]. [۲]، ۲/-۲=۲ و τ.=۱۰ و τ.=۲ 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 تقویت کننده عبور می کند، نامتقارن می شود، به عبارتی، لبه ی جلویی پالس نسبت به لبه ی انتهایی تیزتر می شود. این ویژگی، که به شیفت مرکز پالس نیز معروف است، در همه تقویت کننده ها وجود دارد و علت آن این است که لبه جلویی پالس بهره ی بیشتری را در مقایسه با لبه انتهایی تجربه می کند. شکل ۲(ب) تقویت پالس خروجی در جریان های تزریقی مختلف را نشان می دهد. همانطور که انتظار می رود، با افزایش جریان پالس خروجی بیشتر تقویت می شود. همچنین بهره نوری نیز با افزایش جریان تزریقی افزایش می یابد.

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

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 اتفاق میافتد. بهره نوری در جریانهای ادر به ترتیب ۳/۱۲۳ و ۱۵/۴۳۶۸ دسی بل است.



شکل ۳: بهره نوری برحسب زمان در جریانهای تزریقی مختلف

شکل ۴ ضریب بهره نوری خروجی تقویت کننده را بر حسب طول آن در جریان های مختلف تزریقی نشان می دهد. با افزایش جریان تزریقی و طول تقویت کننده می توان بهره را افزایش داد. البته باید توجه کرد که اتلاف نیز با افزایش طول کاواک، افزایش می یابد و نمی توان افزایش طول را بصورت دلخواه انجام داد.



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

اکنون ورودی تقویت کننده نقطه کوانتومی را قطاری از پالس گاوسی در نظر می گیریم. شکل ۵ پالس خروجی از تقویت کننده را نشان می دهد. با اعمال قطار پالس گاوسی، به علت عدم بازیابی بهره، پالس های بعدی تقویت کمتری را تجربه می کنند. همچنین همانند حالت تک پالس گاوسی، شیفت مراکز پالس نیز در این حالت اتفاق می افتد. ضمیمه شکل ۵ این ویژگی را برای اولین و دومین پالس نرمالیزه نشان می دهد.



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 W۵، بررسی شد. برای تک پالس گاوسی، رفتار تقویت پالس و نیز شیفت مرکز پالس نشان داده شد. برای یک پالس WW 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

- [1] 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, ", "IY-IIT, Y.IT.
- [Y] M. Sugawara, T. Akiyama, N. Hatori¹, Y. Nakata, H. Ebe¹ and H. Ishikawa, "Quantum-dot semiconductor optical amplifiers for high-bit-rate signal processing up to 17. Gbs-1 and a new scheme of *TR* regenerators" Institute of Physics Publishing Meas. Sci. Technol. 1T 17AT-1791, Y.Y.
- [^ν] A. Kotb "NOR gate based on QD-SOA at ^νo· Gbit/s" Opt Quant Electron. ^εο, ^ενν₋ελ·, ^ν·νν.
- [°] 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, "YAT, 9A, AA-99, 199A.