بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

آنالیز تقویت کننده آبشاری کوانتومی مبتنی بر اثر غیرخطی

مریم پاشاپور، حمید واحد و حامد باغبان

گروه مهندسی فوتونیک، دانشکده مهندسی فناوریهای نوین، دانشگاه تبریز، ایران

چکیده - در این مقاله ساختار کامل یک تقویت کننده آبشاری کوانتومی و چگونگی تولید پالس خروجی مبتنی بر اثر غیر خطی ترکیب چهار موج برپایه گذارهای بین زیرباندی مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات نرخ ارائه شده برای ساختار چهار ترازی از این تقویت کننده، با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر زمان واهلش حامل ها، بهره نوری ترازها و توان پالس های ورودی حل شده و جمعیت ترازها و آهنگ تغییرات آنها محاسبه شده است. برای تحلیل توان پالس خروجی، ضریب غیرخطیت مرتبه سوم و ویژگیهای پالس های ورودی در حوزه زمان بررسی شده است. نتایج شبیه سازیها، تاثیر عرض و توان پالس های پمپ و پروب و همچنین زمان بازیابی جمعیت تراز پایه را در نحوه عملکرد تقویت کننده نشان می دهد.

کلید واژه- زمان بازیابی، ترکیب چهارموج، غیرخطیت مرتبه سوم، تقویت کننده آبشاری کوانتومی، معادلات نرخ.

Analysis of Quantum Cascade Amplifier Based on Nonlinear Effect

Maryam Pashapour, Hamid Vahed and Hamed Baghban

Photonic Engineering Department, School of Engineering-Emerging Technologies, University of Tabriz, Iran

Abstract-In this paper, the structure of a quantum cascade amplifier based on nonlinear effect of four-wave mixing (FWM) for pulse generation based on intersubband transitions has been investigated completely. The proposed rate equation model for four-level structure takes into account parameters such as carriers' relaxation time, optical gain and input pulses power. FWM output power analysis has been performed by investigation of third-order nonlinear coefficient and input pulses characteristics in the time domain. Simulation results show the recovery time of ground state concentration and pump and probe powers and width on the amplifier performance.

Keywords: Recovery time, Four-wave mixing, Third-order nonlinearity, Quantum cascade amplifier, Rate equations.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

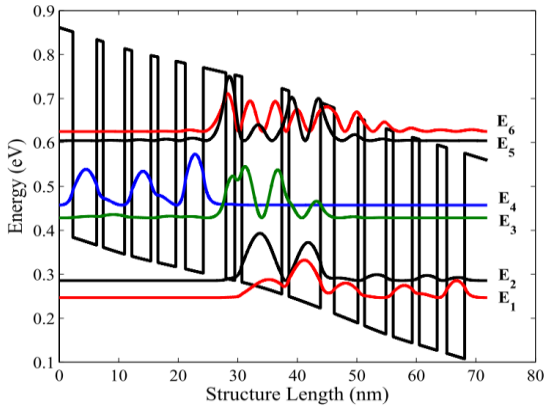
۱- مقدمه

لیزرهای آبشاری کوانتومی با قابلیت گسیل نور در محدوده مادون قرمز میانی و دور، با روش‌های مهندسی ساختار باند طراحی شده و برپایه گذارهای نوری درون زیرباندی عمل می‌کنند. استوار بودن این ساختارها بر پایه گذارهای زیرباندی سبب بروز مزایای متعددی از قبیل ضرایب غیرخطی زیاد، ممان دوقطبی بالا و انعطاف در طراحی ساختار به دلیل قابلیت مهندسی ساختار از طریق انتخاب دقیق ابعاد و نوع ماده می‌شود [۱]. تقویت کننده های آبشاری که اساس کار کاملا مشابهی با لیزرهای آبشاری دارند، به دلیل تعداد زیاد طبقات ناحیه فعال، ضریب محدودیت بالایی دارند که منجر به ضریب بهره‌ی مودی بیشتر و درنتیجه جریان آستانه کمتر می‌شود. این تقویت کننده ها معمولاً توسط اشباع بهره محدود می شوند، با این حال دارای بهره تبدیل ترکیب چهارموج (FWM) زیاد به ازای پالس های با عرض کم بوده و به دلیل گسیل چندین فوتون از هر الکترون درساختار آبشاری منابعی با توان بالا به شمار می روند. اخیرا، ساختار یک لیزر کوانتومی آبشاری ارائه شده و مقدار بهینه تعداد طبقات ناحیه فعال ساختار برای داشتن بهترین عملکرد لیزر از نظر پارامترهایی نظیر چگالی جریان آستانه، توان خروجی، وابستگی دمایی مورد بررسی قرارگرفته است[۲]. همچنین با اعمال دو سیگنال پمپ و پروب به ساختار آبشاری کوانتومی و تنظیم دقیق زیرباندها، پالس FWM با تکیه بر پدیده های غیرخطی در خروجی لیزر تولید شده و اثر نامیزانی بین سیگنال ورودی و ترازهای انرژی در ساختار روی توان خروجی مورد بررسی قرار گرفته است[۳].

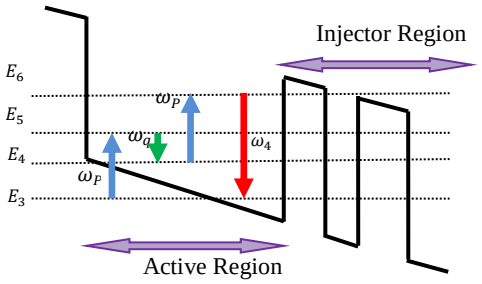
در این مقاله، ساختار ناحیه فعال یک تقویت کننده آبشاری مورد بررسی قرار می گیرد. ساختار در ورودی توسط دو سیگنال پالسی پمپ و پروب با فرکانس‌های متفاوت تحریک شده و با توجه به نامتقارن بودن پتانسیل ساختار و بزرگ بودن میدان الکتریکی اعمالی، نور خروجی ترکیب یا تفاضل فرکانسی از نورهای ورودی خواهد بود. با تنظیم دقیق ساختار و شرط تطبیق فاز، پالس FWM در خروجی تقویت کننده تولید شده و بررسی کاملی روی توان خروجی و وابستگی آن به پارامترهای ساختار نظیر عرض پالس و توان پمپ و پروب و زمان بازیابی جمعیت ترازها در حوزه زمان انجام شده است.

۲- ساختار لیزر و ناحیه فعال

ساختار لیزر آبشاری کوانتومی بکار رفته در این مقاله شامل ۳۰ لایه InAlAs/InGaAs به عنوان ناحیه فعال منطبق بر زیربنای InP می‌باشد. دو لایه پوسته ضخیم‌ترInP با ضخامت ۳ میکرومتر با ناخالصی $1\times10^{17}\mathrm{cm}^{-3}$ در دو طرف ناحیه فعال و موجبر قرار گرفته و در بالا نیز یک لایه با ناخالصی زیاد $5\times10^{18}\mathrm{cm}^{-3}$ و ضخامت ۰/۵ میکرومتر و یک اتصال InGaAs در بالاترین ناحیه رشد داده شده اند [۴]. ساختار آبشاری مورد استفاده در ناحیه فعال شامل سه چاه کوانتومی $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ و سدهایی از جنس $In_{0.52}Al_{0.48}As$ می باشد. ضخامت لایه ها در یک دوره تناوب از ناحیه فعال/تزریق برحسب آنگستروم به صورت **۳۸**/۱۵/**۱۲**/۶۷/**۱۲**/۵۳/**۲۳**/۴۰/**۱۱**/۳۶/**۱۲**/۳۲/**۱۲**/۳۰/**۱۶**/۳۰ است که از چپ به راست از سد تزریق آغاز شده است. لایه هایی که زیر آنها خط کشیده شده دارای ناخالصی سیلیکون به میزان $2\times10^{17}\mathrm{cm}^{-3}$ بوده و اعداد پررنگ شده، ضخامت مربوط به لایه های سد را نشان می دهند.



(الف)



(ب)

شکل ۲: (الف) ساختار انرژی و مربع اندازه توابع موج در ساختار آبشاری کوانتومی و (ب) شماتیک زیرترازهای درگیر در گذارهای رزونانسی مطلوب برای تولید پالس FWM. E_3، E_4، E_5 و E_6 به ترتیب دارای مقادیر ۴۴۹/۵، ۴۷۲/۶، ۶۰۷/۲ و ۶۲۸ میلی الکترون ولت و $\omega_4=2\omega_P-\omega_q$

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

می باشند.

برای داشتن وارونگی جمعیت بین ترازهای ۳ و ۶ و نهایتاً پالس FWM در خروجی باید نرخ واهلش الکترون ها از ۶ به ۵ و همچنین از ۴ به ۳ کم باشد که با کم نمودن گسیل فونون های نوری که غالبترین فرایند پراکندگی در این ساختار می باشند رخ خواهد داد. با حل عددی معادله خودسازگار شرودینگر و پواسن به روش تفاضل محدود و با درنظرگرفتن آفست باند ۰/۵۲ الکترون ولت و جرم موثر الکترون در چاه و سد به ترتیب به میزان۰/۰۴۳ و ۰/۰۷ برابر جرم الکترون، ساختار باند و توابع موج مربوطه بدست می آید. با طراحی و تنظیم دقیق ساختار و زیرباندهای مربوطه، سیگنال FWM از سیگنال‌های پمپ با طول موج ۹/۲ میکرون و پروب با طول موج ۷/۹ میکرون حاصل شد [۳].

۳- معادلات نرخ

برای بدست آوردن دقیق جمعیت حامل ها در هر زیرباند و آهنگ تغییرات مربوط به آنها باید معادلات نرخ لیزر حل شوند که در زیر آورده شده اند:

$$\frac{dN_3}{dt}=\frac{N_6}{\tau_{63}}+\frac{N_5}{\tau_{53}}+\frac{N_4}{\tau_{43}}-(N_3-N_5)S_P g_{53}+(N_6-N_3)S_4 g_{63}+\frac{N_6}{\tau_{SP}} \quad (۱)$$

$$\frac{dN_4}{dt}=\frac{N_6}{\tau_{64}}+\frac{N_5}{\tau_{54}}-\frac{N_4}{\tau_{43}}-(N_4-N_6)S_P g_{64}+(N_5-N_4)S_q g_{54} \quad (۲)$$

$$\frac{dN_5}{dt}=(N_3-N_5)S_P g_{53}-\frac{N_5}{\tau_{54}}-\frac{N_5}{\tau_{53}}+\frac{N_6}{\tau_{65}}-(N_5-N_4)S_q g_{54} \quad (۳)$$

$$\frac{dN_6}{dt}=(N_4-N_6)S_P g_{64}-\frac{N_6}{\tau_{65}}-\frac{N_6}{\tau_{64}}-\frac{N_6}{\tau_{63}}-(N_6-N_3)S_4 g_{63}-\frac{N_6}{\tau_{SP}} \quad (۴)$$

$$\frac{dS_4}{dt}=Zg_{63}(N_6-N_3)S_4+Z\beta\frac{N_6}{\tau_{SP}}-\frac{S_4}{\tau_{Ph}} \quad (۵)$$

که در این معادلات، N_i جمعیت ترازها، S_P و S_q شار فوتون‌های جذبی و S_4 شار فوتون گسیلی، τ_{ij} زمان واهلش از تراز i به j ، τ_{ph} طول عمر فوتون، τ_{sp} طول عمر گسیل خود به خودی، Z تعداد لایه ها درناحیه فعال و β ضریب گسیل خود به خودی می باشند. g_{ij} بهره اپتیکی ناحیه فعال بین ترازهای i و j است.

معادلات بالا برای یک تناوب از ناحیه فعال در سیستم لیزری چهارترازه درنظرگرفته شده است. پس از حل معادلات نرخ و تعیین جمعیت حاملها در زیرترازهای انرژی موردنظر، ضریب غیرخطیت نوری سیستم و توان سیگنال FWM خروجی محاسبه می شود [۳]:

$$\chi^3(\omega_4)=\frac{Ne^4}{\hbar^3\varepsilon_0}\frac{z_{35}z_{45}z_{64}z_{63}}{(\omega_p-\omega_q-\omega_{34}-i\gamma_{34})(\omega_4-\omega_{63}-i\gamma_{63})}\times\left[\frac{1}{(\omega_p-\omega_{53}-i\gamma_{53})}+\frac{1}{(-\omega_q-\omega_{53}-i\gamma_{53})}\right] \quad (۶)$$

$$P_{\omega_4}=\frac{P_{\omega_p}^2 P_{\omega_q}\pi^2\sum\omega_4}{n_{\omega_p}^2 n_{\omega_q} n_{\omega_4}\lambda_{\omega_4}^2\varepsilon_0^2c^2(\Delta k^2+\alpha_{\omega_4}^2)}\times\left[1+\exp(-2\alpha_{\omega_4}z)-2\exp(-\alpha_{\omega_4}z)\cos(\Delta kz)\right] \quad (۷)$$

که Δk اختلاف ثابت فاز، $\sum\omega_4$ ضریب همپوشانی غیرخطی، α_{ω_4} اتلاف کل و n_{ω_p}، n_{ω_q} و n_{ω_4} به ترتیب ضرایب شکست مودهای پمپ، پروب و FWM هستند.

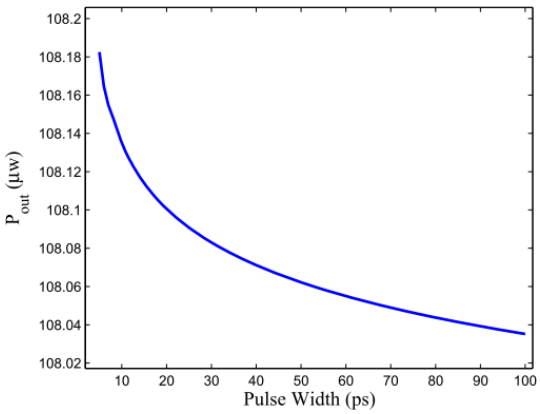
۴- نتایج و بحث

در شبیه سازی های این مقاله τ_{ph}، τ_{65}، τ_{63}، τ_{64}، τ_{54}، τ_{53}، τ_{43} به ترتیب دارای مقادیر ۱۰، ۶/۷، ۱۰، ۸/۲، ۱/۲، ۲ و ۳/۵ پیکوثانیه و z_{35}، z_{63}، z_{54} و z_{64} به ترتیب ۱/۱، ۰/۸۴، ۰/۸۱ و ۰/۵۶ نانومتر می باشند. ضریب اتلاف α_{ω_4} برابر با Δk ،۱۴/۶ cm^{-1} مقدار ۴۰۹ cm^{-1}، γ_{35}، γ_{63} و γ_{34} به ترتیب ۰/۱۸، ۰/۵۲ و ۱/۱ بر پیکوثانیه، تعداد تناوب های ناحیه فعال ۳۰، طول هر تناوب ۴۳/۹ نانومتر و β برابر با 10^{-4} درنظر گرفته شدند.

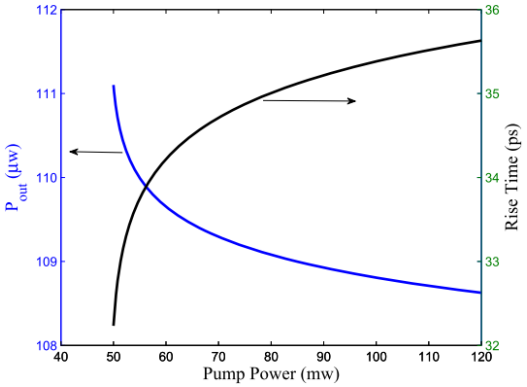
شکل ۲، تغییرات اندک توان خروجی را به ازای عرض پالس-های مختلف در ورودی لیزر نشان می دهد.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



شکل ۲: اثر تغییر عرض پالس های ورودی روی توان خروجی FWM به ازای توان پمپ و پروب به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰ میلی وات.

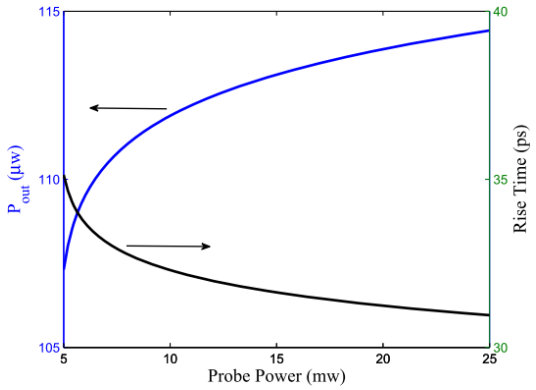


شکل ۳: اثر تغییرات توان پمپ روی الف) توان خروجی، و ب) زمان بازیابی جمعیت حامل ها در تراز N_3، با توان پروب ۱۰ میلی وات و عرض پالس ۵ پیکوثانیه

همانطور که انتظار داشتیم تغییر عرض پالس به دلیل آن که مقدار پیک را تغییر نمی‌دهد، تاثیر قابل توجهی روی توان خروجی FWM ندارد، اگرچه عرض پالس روی زمان بازیابی بهره تاثیر گذار خواهد بود.

اما با تغییر مقدار توان سیگنال های ورودی پمپ و پروب، توان خروجی دستخوش تغییر می شود. نتایج نشان می‌دهند هرچه توان سیگنال پمپ افزایش یابد توان خروجی نسبتاً کاهش می یابد. دلیل این موضوع این است که با افزایش توان پمپ، جمعیت بیشتری از الکترون ها از تراز N_3 خارج و درنتیجه زمان بازیابی این الکترونها برای این تراز افزایش می یابد. نمودار توان خروجی و زمان بازیابی جمعیت تراز N_3 بر حسب توان پمپ درشکل ۳ آمده است .

افزایش توان سیگنال پروب، کاهش زمان بازیابی تراز N_3 و به تبع آن افزایش توان خروجی را در پی خواهد داشت. درواقع با افزایش توان پروب، شدت گذار الکترونها از تراز ۵ به ۴ افزایش می یابد و با افزایش جمعیت N_4، هم احتمال گذار از ۴ به ۳ زیاد شده که زمان بازیابی N_3 را بهبود می-بخشد و هم شدت گذار الکترونی ۴ به ۶ افزایش خواهد داشت که سبب افزایش جمعیت تراز ۶ و به تبع آن افزایش توان خروجی می شود. نمودارهای مربوط به زمان بازیابی جمعیت تراز N_3 و توان خروجی در اثر تغییرات توان پروب در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴: اثر تغییرات توان پروب روی الف) توان خروجی، و ب) زمان بازیابی جمعیت حامل ها در تراز N_3، به ازای توان پمپ ۱۰۰ میلی وات و عرض پالس ۵ پیکوثانیه

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار کامل یک تقویت کننده آبشاری کوانتومی به منظور تولید پالس FWM توصیف و مورد بررسی قرار گرفت و معادلات نرخ مربوط به این ساختار ارائه و حل شدند. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهند که توان پالس FWM خروجی تحت تاثیر ضریب غیرخطیت مرتبه سوم و زمان بازیابی جمعیت تراز پایه لیزر با افزایش توان پمپ، کاهش و با افزایش توان پروب، افزایش می یابد.

مراجع

[1] Jing Bai, D. S. Citrin, “Intracavity nonlinearities in quantum cascade lasers”, J. Appl. Phys, 106, 031101, 2009.
[2] C. Gmachl, F. Capasso, A.Tredicucci, D.L. Sivco, R.Kohler, A. L. Hutchinson, A.Y. Cho, “Dependence of the Device Performance on the Number of Stages in Quantum-Cascade Lasers”, IEEE J. of Sel. Top. Quantum Elec, Vol. 5, No.3, 1999.
[3] B. Hekmat, V. Ahmadi, E. Darabi, “Quantum cascade structure for mid-IR four-wave mixing”,Phys. E 64, 117–121, 2014.
[4] M.Troccoli, S. Corzine, D. Bour, J. Zhu, O.Assayang, L. Diehl, B.G. Lee, G.Hofler, F.Capasso, “Room Temperature Continuous-Wave Operation of Quantum-Cascade Lasers Grown by Metal Organic Vapour Phase Epitaxy”, Elec. Lett. Vol. 41, No. 19, 2005.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]