بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۳-۱۴۳۲-۱۰-A

شبیه‌سازی دینامیک و مشخصه های خروجی لیزرهای آبشار کوانتومی در ناحیه‌ی تراهرتز

فائزه،پاک‌فطرت[۱] ؛ حسن،پاکارزاده[۱] ؛ محسن،حاتمی[۱]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، ایران

F.pakfetrat@sutech.ac.ir

چکیده –یکی از منابع مهم تولید تابش تراهرتز، لیزرهای آبشار کوانتومی (QCLs) با کاواک‌های پلاسمونیکی هستند. مشخصات خروجی یک QCL را می‌توان با معادلات نرخ سه ترازی شرح داد. با حل این معادلات به تحول وارونگی جمعیت و تعداد فوتون‌ها برحسب زمان دست پیدا می‌کنیم. در این مقاله، تاثیر جریان الکتریکی را بر وارونگی جمعیت و تعداد فوتون‌ها بررسی می‌کنیم و خواهیم دید که اعمال جریان الکتریکی تا مقدار ۲/۵ آمپر باعث افزایش وارونگی جمعیت شده و به قله می‌رسد و بعد از آن وارونگی جمعیت کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از رابطه‌ی بین توان خروجی و تعداد فوتون‌ها، نمودار P-Iرا برای لیزرهای آبشار کوانتومی تراهرتز با دو نوع ساختار (توری با گام ثابت و توری چرپ شده) با دو افت متفاوت، رسم می کنیم خواهیم دید که مقدار جریان آستانه و بازدهی شیب برای این دو توری کاملا متفاوت است.

کلید واژه- تراهرتز، توان خروجی، جریان الکتریکی، لیزرهای آبشار کوانتومی، وارونگی جمعیت.

Simulation ofDynamics and Output Characteristics of Quantum Cascade Lasers and in Terahertz Region

Faezeh Pakfetrat[1], Hasan Pakarzadeh[1], Mohsen Hatami[1]
[1]Department of Physics, Shiraz University of Technology, Iran
F.pakfetrat@sutech.ac.ir

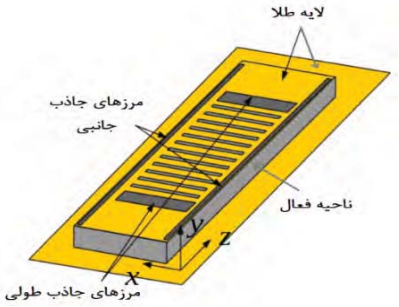
Abstract-One of important sourcesfor terahertz radiation is quantum cascade lasers (QCLs) with plasmonic cavities. The output characteristics of a QCL can be described by three-level rate equations. By solving these equations, we obtain the time evolution of population inversion and the number of photons. In this paper, we examine the effect of injection current on the population inversion and the number of photons, and we will see that applying current up to 2.5 A increases the population inversion and reaches the peak, and then the population inversion decreases.Also, using the relationship between the output power and the number of photons, we plot the P-I diagram for terahertz quantum cascade lasers based on two types of structures (fixed-pitch grating and chirped grating) and we observe that the threshold current and slop efficiency for these two structures are totally different.

Keywords: Injectioncurrent, Output power, Population inversion, quantum cascade lasers, Terahertz

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

مقدمه

تابش تراهرتز بازه فرکانس۱۰-۰/۱ THz،و طول‌موج۳mm - ۳۰ µmاز طیف الکترومغناطیسی را شامل می شود. امروزه تابش تراهرتز کاربردهای مهمی در تصویربرداری زیست پزشکی، بازرسی‌های غیرتهاجمی، زمینه‌ی نجومو غیره دارد[۱]. تابش تراهرتز از طریق منابع مختلفی مانند لیزرهای گازی و لیزرهای آبشار کوانتومی (QCLs)با توان متوسط بالا، تولید می‌شود[۲]. لیزرهای آبشار کوانتومی مبتنی بر گذارهای درون‌باندی(intersubband)عمل می‌کنند. ماهیت تک قطبی گذارهای درون‌باندی،احتمال آبشاری شدن را ایجاد می‌کند. در اینجا، مطابق شکل ۱QCLها با استفاده از توری‌های خارج از کاواک و ناحیه فعالGaAs/ AlGaAsنشان داده شده‌اند.

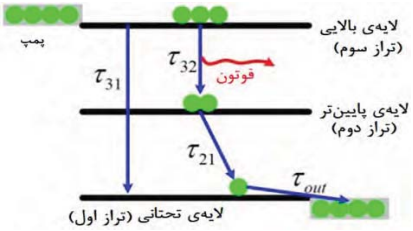


شکل ۱: طرح کلی یک کاواک پله‌ای با صفحات موازی فلز-فلز (لایه‌ی فلزی بالایی به‌صورت توری همراه با مرزهای جاذب) [۳].

در این مقاله، با حل معادلات نرخ سه ترازی تحول جمعیت ترازهای ۳ و ۲ و تعداد فوتون داخل کاواک را برای لیزرهای آبشار کوانتومی شبیه‌سازی و تاثیر جریان الکتریکی بر روی آن را بررسی می کنیم. همچنین،نمودار P-Iرا برای دو نوع ساختار مختلف (توری با گام ثابت و توری چرپ شده) با دو افت متفاوت، رسم می کنیم.

مبانی نظری

به کمک چند روش مختلف عددی، مانند مدل معادلات نرخ خودسازگار و فرم تابع گرین غیرتعادلی[۴]، عملکردQCLهای ترا هرتز را می‌توان به طور دقیق توصیف کرد. شکل۲،طرحواره‌ای از ساختار الکترونی سه ترازی QCLها را نشان می‌دهد. انتشار شبیه‌سازی شده توسط وارونگی جمعیت بین تراز ۳و ۲ لیزر امکانپذیر است[۵].



شکل ۲: طرحوارهساختار الکترونی سه ترازی QCLها[۵].

مشخصات خروجی یکQCLرا می‌توان با معادلات نرخ سه ترازی ذیل شرح داد [۵] و به کمک نرم افزار متلب حل کرد:

$$\frac{dN_3}{dt} = \eta\frac{I}{q} - \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_3}{\tau_{31}} - g_0 S\Delta N \quad (۱)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} + g_0 S\Delta N \quad (۲)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{31}} + \frac{N_2}{\tau_{21}} - \frac{N_1}{\tau_{out}} \quad (۳)$$

$$\frac{dS}{dt} = [\, m g_0 \Delta N - \frac{1}{\tau_p}]S + m\beta\frac{N_3}{\tau_{sp}} \quad (۴)$$

که ηبازده تزریق، Iجریان تزریق،qبار الکتریکی، N_1،N_2،N_3به ترتیب جمعیت حامل‌ها در سه تراز،$\Delta N = N_3 - N_2$ وارونگی جمعیت،g_0ضریب بهره است،Sتعداد فوتون‌ها را مشخص می‌کند و τ_{31}, τ_{32}وτ_{21}طول عمر هستند که نشان دهنده گذار بین ترازهای مربوطه است،τ_{out}نرخ تونل زنی را نشان می‌دهد، τ_{sp}طول عمر گسیل خود به خودی، τ_pطول عمر فوتون،m ضریب چندگانگی بهره و βنشان‌دهنده‌ی ضریب جفت شدگی گسیل خود به خودی است.

همچنین می‌توان توان خروجی مورد نیاز QCL را با استفاده از معادلات نرخ محاسبه کرد[۶]و تاثیر پارامترهای مختلف از جمله فرکانس، ضریب شکست و وارونگی

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

جمعیت را بر روی آن بررسی کرد. توان خروجی این لیزر از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$P = \frac{\pi c \hbar \omega_0}{4nL\pi} \ln\left(\frac{1}{R}\right) S \qquad (۵)$$

که S تعداد فوتون، L طول کاواکلیزر، $\hbar$ مقدار ثابت پلانک، c سرعت نور، nضریب شکست موثر لیزر و R ضریب بازتاب وجه کاواک می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی

در ابتدا به کمک نرم‌افزارMaple، معادلات ۴-۱ را با استفاده از داده های جدول ۱، حل می‌کنیم:

g_0	τ_{31}	τ_{32}	τ_{21}	τ_{sp}	τ_p	τ_{out}	β	m
5.3×10^4 (1/S)	2.4 (ps)	2.0 (ps)	0.5 (ps)	7.0 (ns)	3.7 (ps)	0.5 (ps)	10^{-6}	30

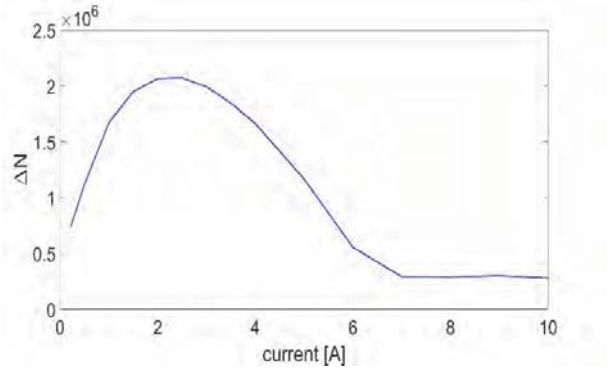
جدول ۱: مقادیر پارامترهای مختلف برای شبیه‌سازیQCLها[۴].

و بیشینه مقادیر N_1،N_2،N_3 و Sرابدست می‌آوریم.

با نرم‌افزار متلب و اعمال جریانI، طبق جدول ۲ به مقادیر مختلفی برای وارونگی جمعیت و Sدست پیدا می‌کنیم:

I(A)		S
0.2	7.4388×10^5	2.0355×10^6
0.5	1.1167×10^6	4.1610×10^7
1.0	1.6697×10^6	1.4364×10^8
1.5	1.9497×10^6	2.4390×10^8
2.0	2.0657×10^6	3.4361×10^8
2.5	2.0720×10^6	4.4303×10^8
3.0	1.9928×10^6	5.4248×10^8
3.5	1.8458×10^6	6.4206×10^8
4.0	1.6632×10^6	7.4139×10^8
5.0	1.1652×10^6	9.3994×10^8

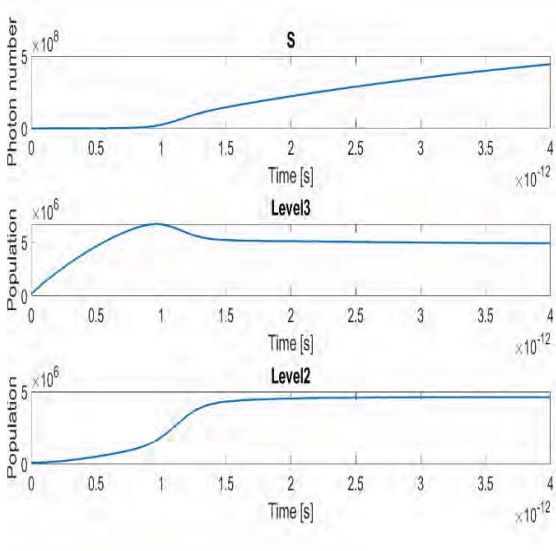
جدول ۲: مقادیر بدست آمده برای وارونگی جمعیت و Sبا اعمال جریان.



شکل ۳: نمودار وارونگی جمعیت برحسب جریان.

همانطور که از شکل ۳ ملاحظه می‌کنید، تا جریان ۲/۵ آمپر روند افزایشی، تا جریان ۷ آمپر روند کاهشی و بعد از آن وارونگی جمعیت تقریبا ثابت می‌ماند. اما در آزمایشگاه این لیزرهای آبشار کوانتومی تراهرتز تا حدود جریان ۴ آمپر را می‌توانند تحمل کنند.

همچنین می‌توان نمودار دینامیک جمعیت حامل‌ها در تراز ۳ و ۲ و تعداد فوتون‌ها را در جریان‌های مختلف رسم کرد. در شکل ۴، نمودارهای جمعیت را در جریان ۲/۵ آمپر مشاهده خواهید کرد:

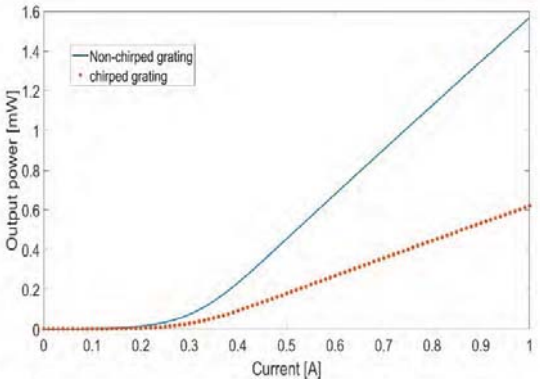


شکل ۴:جمعیت حامل‌ها در تراز ۳ و ۲ و Sدر جریان ۲/۵ آمپر.

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

با استفاده از رابطه‌ی بین توان خروجی نوری Pو تعداد فوتون‌هایSکه در معادله‌ی (۵) آورده شده، می‌توان نمودار P-Iرا در طول کاواک ۱/۴ میلی‌متر و ضریب شکست موثر تقریبا ۳/۶ بدست آورد.

شکل ۵، زمانی است که نمودار خطی دارای گام توری روی سطح کاواک با مقدار ثابت ۲۱/۷ میکرومتر، افت cm^{-1} ۱۲و فرکانس تشدید ۳/۱۲ تراهرتز ونمودار بصورت نقطه چین برای توری چرپ شده با گام توری $\Lambda_t= \Lambda_{t-1}+1$، افت$30/31cm^{-1}$و فرکانس تشدید ۲/۹۷ تراهرتز است بطوریکه tشماره‌ی شکاف توری می‌باشد. انتشار پرتویی این لیزر در مرجع[۷] شبیه‌سازی شده است.



شکل ۵: نمودار P-I. نمودار خط ممتد آبی رنگ برای توری با گام ثابت و نمودار قرمز رنگ نقطه چین، برای توری با گام چرپ شده می‌باشد.

همانطور که مشاهده می شود،در شکل ۵ توان خروجی در جریان ۱ آمپر برای توری با گام ثابت حدود ۱/۵ میلی‌وات و برای توری چرپ شده حدود ۰/۶ میلی‌وات است. همچنین، QCL با توری چرپ شده، دارای جریان آستانه بیشتر و بازدهی شیب کمتر نسبت به QCL با توری با گام ثابت است. این امر به دلیل افت بیشتر ایجاد شده توسط توری چرپ شده است.

نتیجه‌گیری

در QCLهای تراهرتز، با حل معادلات نرخ سه ترازی دینامیک جمعیت حامل‌ها در تراز ۳ و ۲ و تعداد فوتون‌های کاواک را در جریان ۲/۵ آمپر شبیه سازی کردیم که روند تغییر جمعیت حامل‌ها در این جریان الکتریکی به وضوح قابل رویت است. در آخر با استفاده از رابطه‌ی بین توان خروجی و تعداد فوتون‌ها، نمودار P-Iرابرای دو نوع ساختار لیزری با گام‌های توری ثابت و چرپ شده با افت‌های به ترتیب$12cm^{-1}$ و$30/31cm^{-1}$ رسم کردیم. مشاهده شد کهQCL با توری چرپ شده بخاطر افت بیشتر، دارای جریان آستانه بیشتر و بازدهی شیب کمتر نسبت به QCL با توری با گام ثابت است.

مرجع‌ها

[1] B. S. Williams, " Terahertz quantum cascade lasers", Nature. Photonics.,Vol. 1, 517–525,2007.

[2] G. Chattopadhyay, "Technology, capabilities, and performance of low power terahertz sources", IEEE Trans. THz Sci. Technol., Vol. 1, 33-53, 2011.

[3] C. Wu, "Terahertz Plasmonic Lasers with Distributed-Feedback", Lehigh University, Theses and Dissertations., 2882, 2016.

[4] S. Lee, A. Wacker, "Nonequilibrium Green's function theory for transport and gain properties of quantum cascade structures", Phys. Rev. B., Vol. 66, 245314-18, 2002.

[5] X. G. Wang, F. Grillot, C. Wang, "Rate equation modeling of the frequency noise and the intrinsic spectral linewidth in quantum cascade lasers", Opt. Express,Vol. 26, 002325-002334, 2018.

[6] C. Yao, T. H. Xu, W.J. Wan, Y.H. Zhu, J. C. Cao, "An equivalent circuit model for terahertz quantum cascade lasers: Modeling and experiments", Chin. Phys. B., Vol. 9,094208-4, 2015.

[۷]پاک‌فطرت. فائزه، پاکارزاده. حسن، شریف. وحید، "تاثیر ساختار هندسی بر لیزرهای پلاسمونیکی تراهرتز با پسخوراند توزیع‌شده"، اولین همایش نانوفوتونیک ایران، زاهدان، در دست چاپ، ۱۳۹۹.

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