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

مدل سازی سینتیکی یک لیزر گازکربنیک پیوسته با شارش آهسته گاز و مقایسه آن با داده های تجربی

عزیز مراد کوشکی، کاوه سیلاخوری و حسین امیری

پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران-ایران

چکیده - در این مقاله، با استفاده از یک مدل سینتیکی برای لیزر گاز کربنیک پیوسته با شارش آهسته‌ی گاز، وابستگی رفتار توان به پارامترها توصیف شده است و دمای گاز با بهره‌گیری از معادله‌ی توازن انرژی به‌دست آمده است.

کلید واژه- لیزر گاز کربنیک، مدلسازی، سینتیک

Kinetic modeling of slow flow CO2 laser with diffusion cooling and its comparison with experimental data

A.M. Koushki, K. Silakhori and H. Amiri

Laser and Optic School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran-Iran

Abstract-In this article, by the use of a kinetic model for slow flow CO2 laser, we calculated the dependency of the output power on the parameters such as time, loss coefficient and current discharge. And also, the gas temperature obtained from thermodynamic balance equation.

Keywords: CO2 laser, Modeling, kinetics

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

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

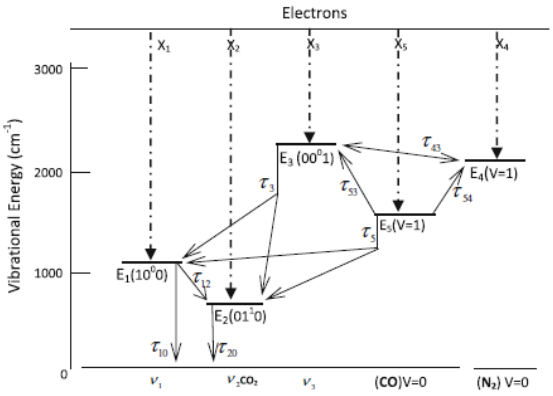
۱- مقدمه

در این مقاله، مجموعه معادلات دیفرانسیل بر پایه مدل پنج درجه حرارتی که فرآیند انتقال انرژی بین شیوه‌های ارتعاشی متفاوت در محیط لیزر گازکربنیک پیوسته اتفاق می‌افتد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

بر اساس این مدل برای ارزیابی توان خروجی لیزر، رفتار پارامترهای مختلفی همانند جریان الکتریکی، ضریب اتلاف و ... مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مدل همچنین، معادله مربوط به تخریب CO_2 در محیط تخلیه الکتریکی در نظر گرفته شده است و دمای گاز از معادلات توازن ترمودینامیکی بدست آمده است. سپس نتایج بدست آمده از مدل با نتایج تجربی مقایسه گردیدند و توافق خوبی حاصل گردید. [۴-۱].

۲- تحلیل نظری معادلات آهنگ چگالی انرژی

شکل ۱ فرآیندهای بنیادی برانگیزش و واهلش (فرو افت) ترازهای لیزری را نشان می‌دهد. برپایه این شکل، وابستگی زمانی (Time Dependence) چگالی‌های انرژی ترازهای درگیر در فرآیند لیزر برای گذار λ=۱۰/۶μm را می‌توان بدین‌گونه نوشت [۲].



شکل (۱): نمودار ترازهای انرژی لیزر CO_2.

$$\frac{dE_1}{dt} = n_e(t) f\ n_{CO_2} h\nu_1 X_1(T) + \nu_1 \Delta N W\ I_\nu(t) + \left(\frac{h\nu_1}{h\nu_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T,T_1,T_2)}{\tau_3(T,T_1,T_2)} - \frac{E_1 - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} + \left(\frac{h\nu_1}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T,T_1,T_2)}{\tau_5(T,T_1,T_2)} - \frac{E_1 - E_1(T_0)}{\tau_f} \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = n_e(t) f\ n_{CO_2} h\nu_2 X_2(T) + \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} + \left(\frac{h\nu_2}{h\nu_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T,T_1,T_2)}{\tau_3(T,T_1,T_2)} - \frac{E_2 - E_2(T)}{\tau_{20}(T)} + \left(\frac{h\nu_2}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T,T_1,T_2)}{\tau_5(T,T_1,T_2)} - \frac{E_2 - E_2(T_0)}{\tau_f} \quad (2)$$

$$\frac{dE_3}{dt} = n_e(t) f\ n_{CO_2} h\nu_3 X_3(T) + \nu_3 \Delta N W I_\nu(t) - \frac{E_3 - E_3(T,T_1,T_2)}{\tau_3(T,T_1,T_2)} - \frac{E_4 - E_4(T)}{\tau_{43}(T)} + \left(\frac{h\nu_3}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T,T_1,T_2)}{\tau_{53}(T,T_3)} - \frac{E_3 - E_3(T_0)}{\tau_f} \quad (3)$$

$$\frac{dE_4}{dt} = n_e(t) f\ n_{N_2} h\nu_4 X_4(T) - \frac{E_4 - E_4(T_3)}{\tau_{43}(T)} + \left(\frac{h\nu_4}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T,T_4)}{\tau_{54}(T,T_4)} - \frac{E_4 - E_4(T_0)}{\tau_f} \quad (4)$$

$$\frac{dE_5}{dt} = n_e(t)(1-f) n_{CO_2} h\nu_5 X_5(T) - \frac{E_5 - E_5(T,T_3)}{\tau_{53}(T,T_3)} + \frac{E_5 - E_5(T,T_1,T_2)}{\tau_3(T,T_1,T_2)} + \frac{E_5 - E_5(T,T_4)}{\tau_{43}(T,T_4)} - \frac{E_5 - E_5(T_0)}{\tau_f} \quad (5)$$

در معادلات بالا، E_1، E_2 و E_3 چگالی انرژی ذخیره شده در ترازهای ارتعاشی گوناگون مولکول‌های CO_2 و E_4 چگالی انرژی ذخیره شده در ترازهای ارتعاشی مولکول N_2 و E_5 چگالی انرژی ذخیره شده در ترازهای ارتعاشی مولکول CO است. پارامترهای c, h, ν ، τ_c و τ_s به‌ترتیب بسامد مرکزی نوسان، ثابت پلانک، سرعت نور، طول عمر فوتون در کاواک و گسیل خودبه‌خودی و x_1 تا x_2 نیز ضرایب آهنگ برانگیختگی هستند. در این روابط f کسر تفکیک نشده مولکول‌های CO_2 است.

چگالی الکترون‌ها (n_e) در محیط تخلیه وجریان تخلیه $(i(t))$ به صورت زیر می‌باشند[۴]:

$$n_e = \frac{i(t)}{e \cdot v_d \cdot A} \qquad i(t) = i_0 + i_1 \cos(2\pi f)$$

f بسامد خطی ریپل ولتاژ است. در سیستم CW متداول آن است که $i(t) = i_0$ ثابت در نظر گرفته شود. لیکن در این بررسی چون حضور ریپل‌های جریان مد نظر استفاده از تغییر زمانی بوده است، جمله تخلیه را شامل دو جمله پایا و گذرا در نظر گرفتیم که نقش جمله گذرا در خروجی لیزر به خوبی در شبیه سازی آشکار گردید.

$\tau_{ij} = k_{ij}^{-1}$ زمان واهلش از تراز i به تراز j و تابعی از دما و فشار و ترکیب گاز است و به‌گونه‌ی زیر تعریف می‌شود [۲و۴]:

$$\tau_{ij} = \left[N_{CO_2} \cdot k_{ijCO_2} + N_{N_2} \cdot k_{ijN_2} + N_{He} \cdot k_{ijHe}\right]^{-1}$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

تحول زمانی شدت فوتون‌ها در داخل کاواک لیزر به صورت زیر است:

$$\frac{dI_\nu}{dt}=-\frac{I_\nu}{\tau_c}+ch\nu_\circ\left[\frac{\Delta N W\, I_\nu}{h}+N_{\circ\circ\text{۱}}P(j)S\right] \qquad (۶)$$

در این رابطه، τ_c طول عمر فوتون در داخل کاواک لیزر است و به صورت زیر تعریف می‌گردد[۴]:

$$\tau_C=-\frac{\text{۲}L}{c}\left[\frac{\text{۱}}{\ln(R_\text{۱}R_\text{۲})+\ln(\text{۱}-k_{loss})}\right]$$

که در آن، $R_\text{۱}$ بازتابندگی آینه‌ی خروجی، $R_\text{۲}$ بازتابندگی آینه‌ی عقب و k_{loss} اتلاف و ΔN اختلاف انبوهی تراز بالایی و پایینی لیزر است[۳-۲]:

$$\Delta N=N_{\circ\circ\text{۱}}P(j)-\frac{\text{۲}j+\text{۱}}{\text{۲}j+\text{۳}}N_{\text{۱}\circ\circ}P(j+\text{۱})$$

که در آن، انبوهی تراز بالایی و پایینی لیزر برابر است با:

$$N_{\circ\circ\text{۱}}=f\ n_{CO_\text{۲}}\exp(-{h\nu_\text{۳}}/{kT_\text{۳}})Z$$

$$N_{\text{۱}\circ\circ}=f\ n_{CO_\text{۲}}\exp(-{h\nu_\text{۱}}/{kT_\text{۱}})Z$$

در این روابط f کسر تخریب نشده‌ی مولکول‌های $CO_\text{۲}$ و Z تابع پارش است:

$$Z=\left[\text{۱}-\exp(-{h\nu_\text{۱}}/{kT_\text{۱}})\right]\left[\text{۱}-\exp(-{h\nu_\text{۲}}/{kT_\text{۲}})\right]^\text{۲}$$
$$\left[\text{۱}-\exp(-{h\nu_\text{۳}}/{kT_\text{۳}})\right]$$

$P(J)$ نسبت انبوهی تراز چرخشی νام از تراز ارتعاشی iام است و برابر است با:

$$P(J)=\left(\frac{\text{۲}hB_\text{۱}c}{kT}\right)(\text{۲}J+\text{۱})\exp\left[\frac{-hcB_\nu J(J+\text{۱})}{kT}\right]$$

که در آن، B_ν ثابت چرخشی مولکول $CO_\text{۲}$ است. در رابطه زیر σ سطح مقطع گسیل القایی است. همچنین W به سطح مقطع القایی مرتبط می‌باشد. رابطه σ با W به صورت زیر است[۵]:

$$W=F\sigma=\frac{F\lambda^\text{۲}}{\text{٤}\pi^\text{۲}\nu_\circ\Delta\nu_\ell\tau_{sp}} \quad \text{و} \quad \sigma=\frac{\lambda^\text{۲}}{\text{۸}\pi n^\text{۲}\tau_{sp}}g(\nu)$$

ضریب بهره سیگنال کوچک برابر است[۱و۸]:

$$\gamma_\circ=\sigma\Delta N=\sigma\left(N_\text{۳}P(J)-\left(\frac{\text{۲}J+\text{۱}}{\text{۲}J+\text{۳}}\right)P(J+\text{۱})N_\text{۲}\right)$$

در این رابطه j مرتبط با تراز زیرین است. پهن‌شدگی در لیزرهای $CO_\text{۲}$ فشار پایین از رابطه‌ی Stern-Volmer به‌دست می‌آید [۹].

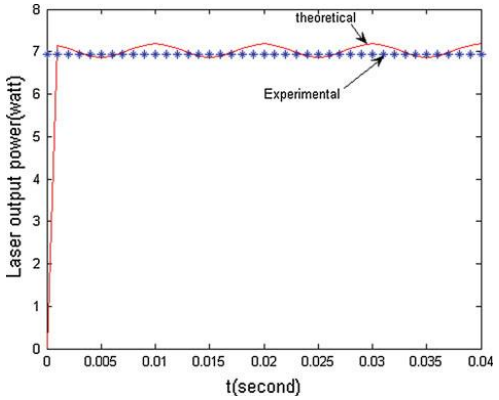
سرانجام توان گسیلی لیزر نیز از رابطه‌ی زیر محاسبه شده است[۴]:

$$P_{out}=A_bI_\nu\frac{\{-\ln(R_\text{۱}R_\text{۲})\}(\text{۱}-R_\text{۱}R_\text{۲}-K_{loss})}{\text{۲}(\text{۱}-R_\text{۱}R_\text{۲})}$$

که در آن، A_b مساحت سطح مقطع آینه‌ی خروجی، $R_\text{۱}$ بازتابندگی آینه‌ی خروجی، $R_\text{۲}$ بازتابندگی آینه‌ی عقب و I_ν شدت فوتون‌های گسیلی داخل کاواک است.

۳- تحلیل نتایج

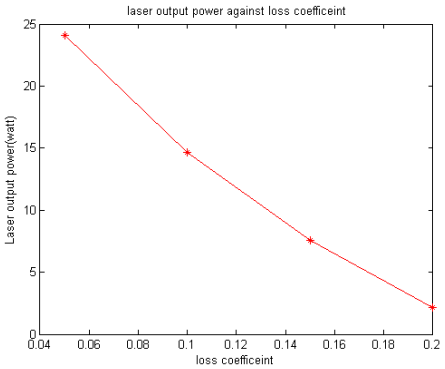
رفتار زمانی توان شبیه سازی شده از راه برآورد چگالی الکترون با بهره‌گیری از معادله‌ی چگالی انرژی و همچنین مقایسه آن با نتیجه تجربی در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نقاط خروجی لیزر را به صورت مقداری ثابت نشان می‌دهند. ولی در شبیه سازی در لحظات پس از شروع نقطه کاری، توان لیزر خیزش داشته و پس از آن دارای نوسان‌هایی با فرکانس f خواهد داشت، یعنی در واقع حضور ریپل‌های جریان خود را در خروجی لیزر به صورت حدود ده درصد نشان می‌دهند که با دقت وسایلی که در آزمایشگاه موجود بوده است به زحمت قابل مشاهده است[۲].



شکل (۲): رفتار زمانی شبیه سازی شده‌ی توان خروجی لیزر.

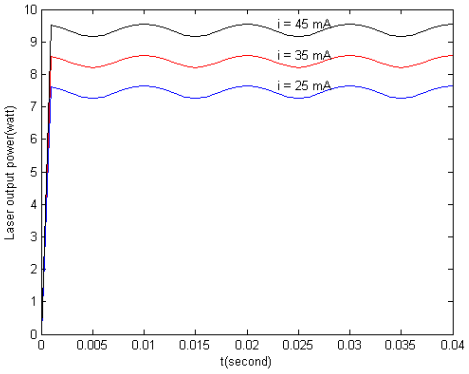
رفتار توان خروجی لیزر نسبت به ضریب اتلاف، در شکل (۳) آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، برپایه‌ی این برآوردها، با افزایش ضریب اتلاف توان خروجی لیزر کاهش می‌یابد[۴].

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]



شکل (۳): وابستگی توان شبیه سازی شده‌ی لیزر به ضریب اتلاف.

وابستگی توان شبیه سازی شده‌ی لیزر به جریان تخلیه، در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، توان گسیلی با افزایش جریان تخلیه رو به افزایش می‌گذارد، که به افزایش چگالی الکترون‌ها در گنجایش تخلیه‌ی الکتریکی بازمی‌گردد و با یافته‌های تجربی ما نیز سازگاری خوبی از خود نشان می‌دهد.



شکل (۴): وابستگی توان شبیه سازی شده‌ی لیزر به چگالی جریان.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل سینتیکی برای لیزر گاز کربنیک پیوسته با شارش آهسته‌ی گاز بکار رفته است، که می‌تواند ویژگی‌های لیزر را به‌خوبی پیش‌بینی کند. نخست، یک رشته معادله‌های دیفرانسیل غیرخطی برای چگالی انرژی‌های انباشته شده در مدهای ارتعاشی مولکول‌های CO_2، N_2 و CO نوشته شد و سپس، دمای گاز با بهره‌گیری از معادله‌ی توازن انرژی به‌دست آورده شد. رفتار زمانی توان خروجی لیزر به پارامترهای گوناگون بررسی شدند. با مقایسه یافته‌های به‌دست آمده از این مدل، با داده‌های تجربی نشان داده شده است که در شروع کار لیزر رفتار گذرایی وجود دارد که به موج پیوسته لیزر می‌انجامد. همچنین با توجه به اینکه جریان الکتریکی اعمال شده به صورت فرتوش عمل می‌کند، خروجی لیزر را به صورت نوسان هایی پیش بینی می‌کند که تقریبا ده درصد از کل خروجی را در بر می‌گیرد.

مرجع‌ها

[۱] S. Jelvani, H. Saeedi, A. M; Koushki, Theoretical Analysis of Dynamics of a fast-axial-flow CW-CO_2 laser, Lasers in engineering .**21**, (2011) 289–303

[۲] A. M. Koushki, S.Jelvani and K. Silakhori, Kinetic modeling of a slow flow CW CO_2 laser. *Optical and Quantum electron*. **43**(2012) 265-280.

[۳] R. Rudolph, A. Harendt, P. Bisin and H. Gundel; Numerical modeling of fast-flow CO_2 lasers. I: the model*; J. Phys. D: Appl. Phys*; **26**, (1993), 552-559.

[٤] Sharif Al-Hawat, Kheir Al-Mutaib; Numerical Modeling of a fast-axial-flow CW-CO_2 laser; Opt Laser Technol; **39,** (2007), 610-15.

[٥] K. Smith, R. M. Thomson, Computer Modeling of Gas Lasers, *Plenum, New York*, 1978.

[٦] Ravil S. Galeev, Numerical simulation of fast axial flow CO2 laser; *SPIE*, **2117**, (1994), 205-213.

[۷] Marion W. Scott and Gary D. Myers; steady-state CO2 laser model, *Applied optics*, **23**, No: 17 (1984), 2874-2878.

[۸] S.Jelvani, H.Saeedi; Numerical investigation of a fast-axial-flow CW-CO2 laser; *Opt Laser Technical*; 40, (2008), 459-465.

[۹] D. Toebaert, P. Muys, E. Desoppere; Theoretical study of the properties of a modulated fast-flow CO_2 laser. *Infrared Phys Technol*, **37**, (1997), 337-355.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]