



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 گاز کربنیک 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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: CO<sub>2</sub> laser, Modeling, kinetics

۱- مقدمه

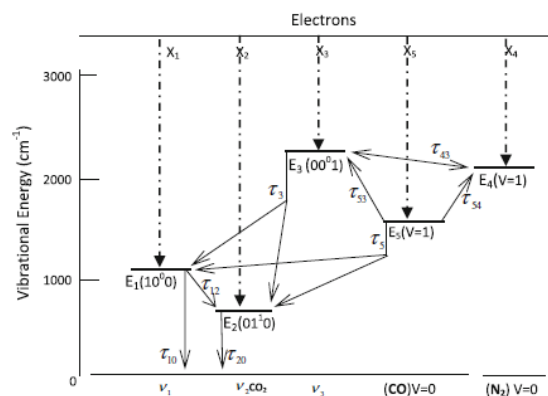
در این مقاله، مجموعه معادلات دیفرانسیل بر پایه مدل پنج درجه حرارتی که فرآیند انتقال انرژی بین شیوه‌های ارتعاشی متفاوت در محیط لیزر گاز کربنیک پیوسته اتفاق می‌افتد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

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. [۱-۴].

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  $\lambda = 10.6 \mu m$  را می‌توان بدین‌گونه نوشت [۲].



شکل (۱): نمودار ترازهای انرژی لیزر  $CO_2$ .

$$\frac{dE_{\gamma}}{dt} = n_e(t) f n_{CO_2} h\nu_{\gamma} X_{\gamma}(T) + \frac{E_1 - E_1(T_{\gamma})}{\tau_{1\gamma}(T_{\gamma})} + \left( \frac{h\nu_{\gamma}}{h\nu_{\gamma}} \right) \frac{E_{\gamma} - E_{\gamma}(T, T_1, T_{\gamma})}{\tau_{\gamma}(T, T_1, T_{\gamma})} - \frac{E_{\gamma} - E_{\gamma}(T)}{\tau_{\gamma_0}(T)} + \left( \frac{h\nu_{\gamma}}{h\nu_{\gamma_0}} \right) \frac{E_{\gamma_0} - E_{\gamma_0}(T, T_1, T_{\gamma})}{\tau_{\gamma_0}(T, T_1, T_{\gamma})} - \frac{E_{\gamma} - E_{\gamma}(T_0)}{\tau_f} \quad (2)$$

$$\frac{dE_{\gamma}}{dt} = n_e(t) f n_{CO_2} h\nu_{\gamma} X_{\gamma}(T) + \nu_{\gamma} \Delta N W I_{\nu}(t) - \frac{E_{\gamma} - E_{\gamma}(T, T_1, T_{\gamma})}{\tau_{\gamma}(T, T_1, T_{\gamma})} - \frac{E_{\gamma} - E_{\gamma}(T)}{\tau_{\gamma_0}(T)} + \left( \frac{h\nu_{\gamma}}{h\nu_{\gamma_0}} \right) \frac{E_{\gamma_0} - E_{\gamma_0}(T, T_1, T_{\gamma})}{\tau_{\gamma_0}(T, T_1, T_{\gamma})} - \frac{E_{\gamma} - E_{\gamma}(T_0)}{\tau_f} \quad (3)$$

$$\frac{dE_{\xi}}{dt} = n_e(t) f n_{N_2} h\nu_{\xi} X_{\xi}(T) - \frac{E_{\xi} - E_{\xi}(T)}{\tau_{\xi\gamma}(T)} + \left( \frac{h\nu_{\xi}}{h\nu_{\gamma}} \right) \frac{E_{\gamma} - E_{\gamma}(T, T_{\xi})}{\tau_{\gamma}(T, T_{\xi})} - \frac{E_{\xi} - E_{\xi}(T_0)}{\tau_f} \quad (4)$$

$$\frac{dE_0}{dt} = n_e(t) (1-f) n_{CO_2} h\nu_0 X_0(T) - \frac{E_0 - E_0(T, T_{\gamma})}{\tau_{0\gamma}(T, T_{\gamma})} + \frac{E_0 - E_0(T, T_1, T_{\gamma})}{\tau_{\gamma}(T, T_1, T_{\gamma})} + \frac{E_0 - E_0(T, T_{\xi})}{\tau_{\xi\gamma}(T, T_{\xi})} - \frac{E_0 - E_0(T_0)}{\tau_f} \quad (5)$$

در معادلات بالا،  $E_1$ ،  $E_{\gamma}$  و  $E_{\xi}$  چگالی انرژی ذخیره شده در ترازهای ارتعاشی گوناگون مولکول‌های  $CO_2$  و  $E_0$  چگالی انرژی ذخیره شده در ترازهای ارتعاشی مولکول  $N_2$  و  $E_0$  چگالی انرژی ذخیره شده در ترازهای ارتعاشی مولکول  $CO$  است. پارامترهای  $C$ ،  $h$ ،  $\nu$ ،  $\tau_c$  و  $\tau_s$  به ترتیب بسامد مرکزی نوسان، ثابت پلانک، سرعت نور، طول عمر فوتون در کاواک و گسیل خودبه‌خودی و  $x_1$  تا  $x_{\gamma}$  نیز ضرایب آهنگ برانگیختگی هستند. در این روابط  $f$  کسر تفکیک نشده مولکول‌های  $CO_2$  است.

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

$$n_e = \frac{i(t)}{e \cdot \nu_d \cdot A} \quad i(t) = i_0 + i_1 \cos(\nu \pi f t)$$

$f$  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 شبیه‌سازی 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 [۴ و ۲]:

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

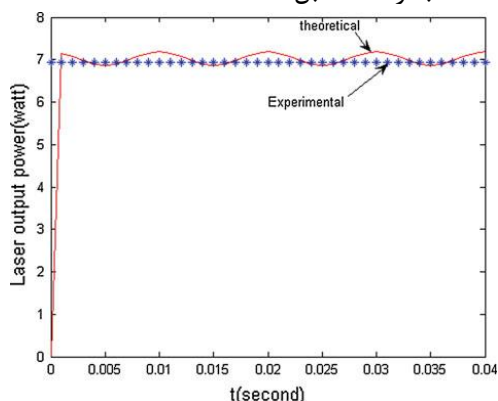
$$\frac{dE_1}{dt} = n_e(t) f n_{CO_2} h\nu_1 X_1(T) + \nu_1 \Delta N W I_{\nu}(t) + \left( \frac{h\nu_1}{h\nu_{\gamma}} \right) \frac{E_{\gamma} - E_{\gamma}(T, T_1, T_{\gamma})}{\tau_{\gamma}(T, T_1, T_{\gamma})} - \frac{E_1 - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1(T_{\gamma})}{\tau_{1\gamma}(T_{\gamma})} + \left( \frac{h\nu_1}{h\nu_{\gamma_0}} \right) \frac{E_{\gamma_0} - E_{\gamma_0}(T, T_1, T_{\gamma})}{\tau_{\gamma_0}(T, T_1, T_{\gamma})} - \frac{E_1 - E_1(T_0)}{\tau_f} \quad (1)$$

$$P_{out} = A_b I_v \frac{\{-\ln(R_1 R_r)\}(1 - R_1 R_r - K_{loss})}{2(1 - R_1 R_r)}$$

که در آن،  $A_b$  مساحت سطح مقطع آینه‌ی خروجی،  $R_1$  بازتابندگی آینه‌ی خروجی،  $R_r$  بازتابندگی آینه‌ی عقب و  $I_v$  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 ریبیل‌های 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].

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

$$\frac{dI_v}{dt} = -\frac{I_v}{\tau_c} + chv_0 \left[ \frac{\Delta N W}{h} I_v + N_{001} P(j) S \right] \quad (۶)$$

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

$$\tau_c = -\frac{\gamma L}{c} \left[ \frac{1}{\ln(R_1 R_r) + \ln(1 - k_{loss})} \right]$$

که در آن،  $R_1$  بازتابندگی آینه‌ی خروجی،  $R_r$  بازتابندگی آینه‌ی عقب و  $k_{loss}$  اتلاف و  $\Delta N$  اختلاف انبوهی تراز بالایی و پایینی لیزر است [۲-۳]:

$$\Delta N = N_{001} P(j) - \frac{\gamma_j + 1}{\gamma_j + 3} N_{100} P(j + 1)$$

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

$$N_{001} = f n_{CO_2} \exp\left(-\frac{h\nu_r}{kT_r}\right) Z$$

$$N_{100} = f n_{CO_2} \exp\left(-\frac{h\nu_1}{kT_1}\right) Z$$

در این روابط  $f$  کسر تخریب نشده‌ی مولکول‌های  $CO_2$  و  $Z$  تابع پارش است:

$$Z = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h\nu_1}{kT_1}\right) \right] \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h\nu_r}{kT_r}\right) \right] \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h\nu_2}{kT_2}\right) \right]$$

$P(j)$  نسبت انبوهی تراز چرخشی  $\nu$  ام از تراز ارتعاشی  $i$  ام است و برابر است با:

$$P(j) = \left( \frac{\gamma h B_\nu c}{kT} \right) (\gamma j + 1) \exp\left[ \frac{-hc B_\nu j (j + 1)}{kT} \right]$$

که در آن،  $B_\nu$  ثابت چرخشی مولکول  $CO_2$  است. در رابطه زیر  $\sigma$  سطح مقطع گسیل القایی است. همچنین  $W$  به سطح مقطع القایی مرتبط می‌باشد. رابطه  $\sigma$  با  $W$  به صورت زیر است [۵]:

$$W = F\sigma = \frac{F\lambda^2}{\xi\pi^2\nu\Delta\nu\tau_{sp}} \quad \text{و} \quad \sigma = \frac{\lambda^2}{\Lambda\pi n^2\tau_{sp}} g(\nu)$$

ضریب بهره سیگنال کوچک برابر است [۸ و ۱]:

$$\gamma_0 = \sigma\Delta N = \sigma \left( N_r P(j) - \left( \frac{\gamma_j + 1}{\gamma_j + 3} \right) P(j + 1) N_r \right)$$

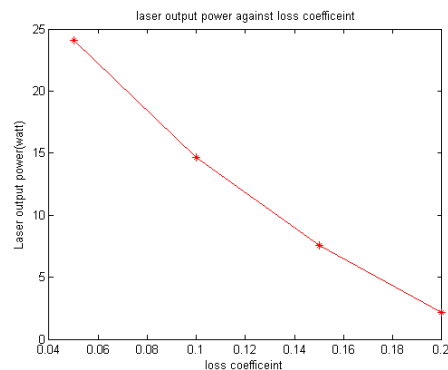
در این رابطه  $j$  مرتبط با تراز زیرین است. پهن‌شدگی لیزرهای  $CO_2$  فشار پایین از رابطه‌ی Stern-Volmer به‌دست می‌آید [۹].

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

پیوسته لیزر می‌انجامد. همچنین با توجه به اینکه جریان الکتریکی اعمال شده به صورت فرتوش عمل می‌کند، خروجی لیزر را به صورت نوسان‌هایی پیش‌بینی می‌کند که تقریباً ده درصد از کل خروجی را در بر می‌گیرد.

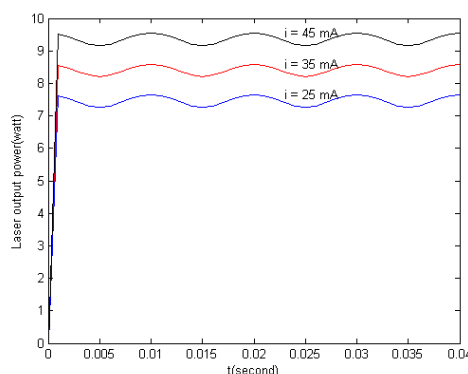
### مرجع‌ها

- [۱] S. Jelvani, H. Saeedi, A. M; Koushki, Theoretical Analysis of Dynamics of a fast-axial-flow CW-CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> lasers. I: the model; *J. Phys. D: Appl. Phys*; **26**, (1993), 552-559.
- [۴] Sharif Al-Hawat, Kheir Al-Mutaib; Numerical Modeling of a fast-axial-flow CW-CO<sub>2</sub> laser; *Opt Laser Technol*; **39**, (2007), 610-15.
- [۵] K. Smith, R. M. Thomson, Computer Modeling of Gas Lasers, *Plenum, New York*, 1978.
- [۶] Ravil S. Galeev, Numerical simulation of fast axial flow CO<sub>2</sub> laser; *SPIE*, **2117**, (1994), 205-213.
- [۷] Marion W. Scott and Gary D. Myers; steady-state CO<sub>2</sub> laser model, *Applied optics*, **23**, No: 17 (1984), 2874-2878.
- [۸] S.Jelvani, H.Saeedi; Numerical investigation of a fast-axial-flow CW-CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> laser. *Infrared Phys Technol*, **37**, (1997), 337-355.



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

وابستگی توان شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی 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 به خوبی پیش‌بینی کند. نخست، یک رشته معادله‌های دیفرانسیل غیرخطی برای چگالی انرژی‌های انباشته شده در مدهای ارتعاشی مولکول‌های CO<sub>۲</sub>، N<sub>۲</sub> 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 گذرای وجود دارد که به موج