



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک
ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۴ بهمن ۱۴۰۰



تعمیم مدل ارتعاشی - چرخشی ۶ دمایی برای شبیه سازی خروجی لیزر CO₂ پالسی فوق اتمسفری

رضا ترابی^۱ و کاوه سیلاخوری^۲

^۱ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، شاهین شهر

^۲ سازمان انرژی اتمی، گروه تحقیقاتی فوتونیک و فناوری های کوانتومی، پژوهشکده علوم و فناوری هسته ای، تهران

چکیده - در این مقاله پارامترهای خروجی یک لیزر CO₂ پالسی ۱ تا ۳ اتمسفری با استفاده از مدل ارتعاشی - چرخشی ۶ دمایی 6TVRM شبیه سازی شده است. با مدلسازی حجم تخلیه با استفاده از یک شبکه الکترونی توزیع شده غیر خطی RLC، چگالی الکترونی بوسیله روش خط انتقال محاسبه شد. پارامترهای خروجی لیزر از قبیل انرژی، زمان شروع پالس، عرض پالس و دنباله پالس در شرایط عملکردی مختلف فشار، ولتاژ تخلیه و ظرفیت خازن، اندازه گیری شده و داده های بدست آمده با نتایج شبیه سازی مقایسه شده است. توافق خوب مشاهده شده میان نتایج آزمایشات تجربی و شبیه سازی، قابلیت استفاده از مدل دینامیکی ارتعاشی - چرخشی ۶ دمایی 6TVRM برای توصیف پارامترهای خروجی لیزر TEA CO₂ سوپراتمسفری را نشان داد.

کلید واژه - مدل ارتعاشی - چرخشی ۶ دمایی؛ 6TVRM و لیزر TEA CO₂ سوپراتمسفری

Generalization of the 6-Temperature Model for Simulation of Super-Atmospheric Pulsed CO₂ lasers Output

Reza Torabi¹ and Kaveh Silakhori²

¹ Faculty of applied Sciences, Malek Ashtar University of Technology, Iran, r.torabi@mut-es.ac.ir

² Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran, ksilakhori@yahoo.com

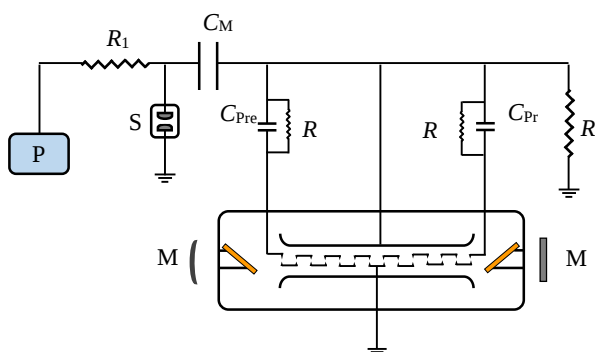
Abstract- The output characteristics of a home-made 1-3 atm pulsed CO₂ laser are simulated by using Six-Temperature Vibrational-Rotational Dynamic Model (6TVRM). The discharge volume was modeled by a non-linear distributed lumped electric circuit and the electron density was calculated by Transmission Line Method. Different characteristics of the laser pulses such as energy, build-up time and duration of the spike and tail parts were measured at various operational conditions of the pressure, discharge voltage and main capacitance. Then, the obtained data were compared with the simulation results calculated for the corresponding conditions. The good agreement observed between the experimental and simulation results has revealed the promising capability of 6TVRM to be generalized for describing the output behavior of the super-atmospheric pulsed CO₂ lasers.

Keywords: Six-Temperature Vibrational-Rotational Dynamic Model; 6TVRM; High Pressure CO₂ Laser;

مقدمه

افزایش روزانه کاربردهای لیزرهای CO₂ پالسی در زمینه‌های مختلف از جمله طیف‌سنجی لیزری، لیدار، صنعت، پزشکی و همچنین فعالیت‌های تحقیقاتی، محققان را قویاً تشویق کرده است تا مدل‌های نظری جدیدی را برای شبیه‌سازی ویژگی‌های ذاتی، دینامیک عملکردی و مشخصه‌های خروجی این نوع لیزر، توسعه دهند. در این راستا، K. Manes و H. Sequin [۱] مجموعه‌ای از معادلات جنبشی را برای شبیه‌سازی پارامترهای خروجی لیزرهای TEA CO₂ ایجاد کردند و توصیفی نظری از فرآیندهای دینامیکی محیط تخلیه با فرض محیط بهره‌ی یکنواخت ارائه کردند. اولین کار برجسته در مدل‌سازی کامپیوتری حجم تخلیه لیزر CO₂ توسط K. Smith و همکاران انجام شد. [۲]. آنها همچنین اولین کسانی بودند که حالت‌های ارتعاشی مولکول‌های CO را به حالت‌های CO₂ و N₂ برای پیش‌بینی ویژگی‌های خروجی لیزر CO₂ توسط مدل ۶ درجه دمایی (6TM) اضافه کردند. این مدل با در نظر گرفتن سطوح انرژی ارتعاشی بیشتر درگیر در توزیع جمعیت، نتایج شبیه‌سازی بهتری (در مقایسه با مدل‌های قبلی ۴ و ۵ دمایی) ارائه می‌کند. امروزه، این مدل به طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل نظری عملکرد لیزرهای CO₂ پیوسته و پالسی، مدل‌سازی ریاضی لیزرهای CO₂ کوک‌پذیر و هیبریدی، استفاده می‌شود. اگرچه کارهای زیادی تاکنون بر روی شبیه‌سازی عملکرد لیزرهای TEA CO₂ انجام شده است، گزارش‌های کمی در مورد شبیه‌سازی لیزرهای CO₂ پالسی با فشار گاز بالاتر از فشار اتمسفر منتشر شده است که عمدتاً در بر روی تخمین تئوری و تجربی طیف بهره سیگنال کوچک در لیزرهای با پیش‌یونش UV در فشارهای تا ۱۵ اتمسفر آن هم با استفاده از مدل‌های اولیه ۵ دمایی متمرکز بوده

است. همچنین گزارشاتی در زمینه فرایندهای تقویت در پالس‌های لیزری پیکوثانیه CO₂ منتشر شده است. با این حال، با توجه به دانش ما، تاکنون هیچ تلاشی برای شبیه‌سازی شکل پالس یا سایر ویژگی‌های خروجی لیزرهای CO₂ پالسی چند اتمسفری با استفاده از مدل ۶ دمایی انجام نشده است. بنابراین، در این کار، در ادامه کار قبلی ما بر روی شبیه‌سازی حجم تخلیه و استخراج پارامترهای خروجی لیزرهای TEA CO₂ با استفاده از مدل 6TVRM، این مدل به لیزرهای CO₂ پالسی با فشار گاز بالاتر از فشار اتمسفر تعمیم داده شده است. شماتیک لیزر CO₂ پالسی چند اتمسفری ساخته‌شده که در آزمایش‌ها به کار رفته است، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایی شماتیک از لیزر CO₂ چند اتمسفری استفاده شده.

این لیزر کوچک دارای حجم فعال ۵ سانتی متر مکعب است که از یک جفت الکترود صاف لبه گرد $0.6\text{cm} \times 14\text{cm}$ که ۰.۶ سانتی متر از یکدیگر جدا شده اند، تشکیل شده است. سیستم پیش UV محیط فعال، توسط دو سری ۱۵ عددی شکاف جرقه به عرض ۰.۲۵ میلی متر است که به طور موازی در امتداد حجم فعال قرار دارند. مدار تخلیه توسط یک کلید شکاف جرقه که توسط گاز N₂ در فشارهای مختلف تغذیه می شود تا ولتاژ شکست را کنترل کند، روشن می شود. به طوری که با تغییر ولتاژ تخلیه و خازن اصلی، نرخ تکرار پالس ثابت ۱ هرتز با تنظیم فشار گاز N₂ و همچنین مقاومت R₁ قابل حصول است. تشدید کننده لیزری متشکل از یک آینه عقب تمام تابنده از

کاملاً همگن فرض می‌شود. از سوی دیگر، فرآیندهای واهلش هر تراز ارتعاشی را می‌توان به طور کامل توسط فرآیندهای انتقال انرژی مربوطه توصیف کرد. بنابراین، چگالی انرژی حالت های مختلف را می‌توان بر اساس دماهای انتقالی و ارتعاشی سیستم تعیین کرد.

تغییرات زمانی وارونی جمعیت بین زیرترازهای چرخشی ترازهای ارتعاشی بالایی و پایینی لیزر به شکل زیر است:

$$\dot{\delta}^J = -2\delta^J WI_v - \frac{\delta^J - P(J)\Delta}{\tau_R} \quad (۱)$$

که $\Delta = N^u - N^l = N_{00^0_1} - N_{10^0_0}$ چگالی وارونی جمعیت بین تراز بالایی و پایینی لیزر و I_v شدت دورن کاواک است. وابستگی فشاری پهنای خط برخوردی تابش لیزر به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta v = \sum_i \left\{ \frac{P_i Q_i}{\pi kT} \left[\frac{8kT}{\pi} \left(\frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_i} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (۲)$$

که Q_i ($i=CO_2, CO, N_2, He$) سطح مقطع برخورد هر یک از مولکول‌هاست. ضریب بهره موضعی محیط لیزر به شکل زیر بیان می‌شود:

$$g(v) = v h W \Delta = \frac{F \lambda^2 \Delta}{4\pi^2 \Delta v \tau_{sp}} \quad (۳)$$

سایر جزئیات ریاضی و فیزیکی و مجموعه کامل معادلات مشتق شده و نیز تمام ثوابت فیزیکی و پارامترهای استفاده شده جهت شبیه‌سازی را می‌توان در گزارش های قبلی ما یافت [۳].
Error! Reference source not found. آورده شده است.

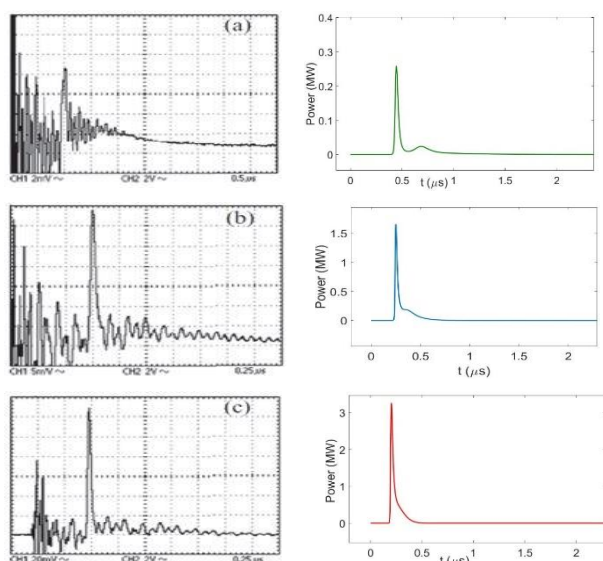
آنچه به وضوح در شکل پالس‌های واقعی دیده می‌شود و به طور منطقی در نمودارهای مشابه شبیه‌سازی شده منعکس می‌شود، افت قابل توجه در دامنه و مدت زمان دنباله پالس‌ها با افزایش فشار گاز است. علاوه بر این، زمان ایجاد پالس های لیزر با افزایش فشار گاز کاهش می یابد.

جنس مولیبدن با شعاع انحنای ۵ متر و یک آینه جلویی تخت ژرمانیوم طبیعی است که به فاصله ۳۵ سانتی متر از یکدیگر قرار دارند. دو پنجره بوستر ZnSe در امتداد محور تشدیدگر محفظه لیزر را از محیط پیرامون جدا می‌کنند. یک جریان ثابت گاز با نسبت گاز $CO_2:N_2:He=1:1:8$ توسط یک سیستم گاز مناسب شامل شیرهای متغیر، فشارسنج و جریان سنج گاز به محفظه لیزر تزریق می‌شد. انرژی و شکل زمانی پالس های خروجی لیزر توسط یک ژول‌متر (LM-P10, Coherent) و یک فوتون درگ (7455, ORIEL) متصل به یک اسیلوسکوپ دیجیتال ۲۵۰ مگاهرتز (DS-1250-EZ) پایش شد.

مدل ارتعاشی-چرخشی ۶ دمایی

دو روش مرسوم برای تجزیه و تحلیل عملکرد و توصیف دینامیک تابش لیزرهای CO_2 وجود دارد که اصطلاحاً مدل دمایی و مدل معادله نرخ نامیده می شوند. ما ترجیح می‌دهیم با مدل دمایی به دلیل جامعیت، سادگی بکارگیری آن برای روش های مختلف برانگیزش و تطابق بهتر با داده های تجربی کار کنیم.

اکثر مدل های کاربردی در این زمینه با معادلات دیفرانسیل جفت شده متعددی سروکار دارند که در حالت پایدار به معادلات جبری غیرخطی تبدیل می شوند. توزیع جمعیت در سطوح مختلف هر مد ارتعاشی با دمایی مشخصه معین بر اساس توزیع بولتزمن تعیین می‌شود. بنابراین، توصیف انتقال انرژی انتقالی و ارتعاشی مولکول‌ها بر اساس معادلات لاندو-تلا امکان پذیر می شود [۲]. این معادلات را می‌توان به صورت عددی با این فرض حل کرد که توزیع فضایی چگالی الکترون و نرخ برانگیزش هر سطح انرژی مشخص است. این رویکرد باعث می‌شود که فرآیندهای انتقال انرژی بین سطوح چرخشی حالت‌های ارتعاشی CO_2 و CO ، N_2 به صورت کیفی توضیح داده شوند (مدل ۶ درجه حرارت). در این مدل، محیط فعال



شکل ۲ شکل پالس‌های نوعی تجربی و شبیه‌سازی شده لیزر
a) $P=1$ atm, $V=15$ kV, $C_M=5.4$ nF; b) $P=2$ atm, $V=25$ kV, $C_M=8.1$ nF; c) $P=3$ atm, $V=35$ kV, $C_M=10.8$ nF.

جدول ۱ مقادیر برخی کمیت‌ها

علامت	کمیت	مقدار	واحد
L	طول تشدیدگر	35	سانتی‌متر
λ	طول موج	10.6	میکرومتر
J	عدد کوانتومی چرخشی	20	---
F	فاکتور همپوشانی	0.46	---
R_{out}	ضریب بازتاب آینه خروجی	0.65	---
$f_1 atm$	فاکتور شکستن مولکول CO_2 در فشار ۱ اتمسفر	0.15-0.2	---
$f_2 atm$	فاکتور شکستن مولکول CO_2 در فشار ۲ اتمسفر	0.15-25	---
$f_3 atm$	فاکتور شکستن مولکول CO_2 در فشار ۳ اتمسفر	0.12-22	---
$f_5 atm$	فاکتور شکستن مولکول CO_2 در فشار ۵ اتمسفر	0.25	---
$f_{10 atm}$	فاکتور شکستن مولکول CO_2 در فشار ۱۰ اتمسفر	0.27	---
A	سطح مقطع موثر آینه خروجی	0.49	cm^2

جدول ۲ مشخصات پالس‌های لیزر تجربی و شبیه‌سازی شده در شرایط متفاوت

P (atm)	E_{in} (J)	E_{out} (mJ)		E_s / E_t		τ_s (ns)		τ_t (μs)		t_b (μs)	
		Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim
1	0.6	20	18	~0.7	~0.8	110	45	1.2	0.8	0.7	0.45
1	2.5	45	42	---	~0.8	---	42	---	0.7	---	0.4
2	2.4	55	50	~1.1	~1.3	47	42	0.8	0.6	0.6	0.35
2	3.6	90	90	~1.1	~1.3	45	40	0.7	0.6	0.5	0.35
2	6.6	115	120	~1.1	~1.3	45	40	0.7	0.5	0.5	0.3
3	3.3	50	48	~1.4	~1.5	47	46	0.6	0.4	0.4	0.3
3	4.9	100	98	~1.4	~1.5	40	35	0.6	0.3	0.4	0.3
3	6.6	160	155	~1.4	~1.5	37	30	0.5	0.3	0.3	0.25

مشاهده شد. این مدل همچنین می‌تواند رفتار نسبت انرژی پالس اصلی به دنباله را در شرایط مختلف عملکردی پیش‌بینی کند.

مراجع

- [1] K. R. Manes and H. J. Seguin, **Analysis of the CO_2 TEA laser**, J. Appl. Phys. 43, 5073 (1972).
- [2] K. Smith, R.M. Thomson, **Computer Modeling of Gas Lasers**, Plenum Press, New York, 1978.
- [3] R. Torabi, et al., **Theoretical and experimental analyses of the TEA CO_2 lasers dynamics by six temperature vibrational-rotational model**, Optik 135 (2017)

به منظور تحلیل دقیق نتایج شبیه‌سازی با آزمایشات تجربی، برخی پارامترهای کمی شکل پالس‌ها در شرایط عملیاتی مختلف در جدول ۲ خلاصه شده است.

نتیجه‌گیری

از مدل ارتعاشی-چرخشی ۶ دمایی 6TVRM جهت شبیه‌سازی انرژی خروجی و برخی مشخصه‌های زمانی پالس اصلی و دنباله پالس یک لیزر CO_2 پالسی فشار بالا استفاده شد. توافق خوبی بین مقادیر تجربی و شبیه‌سازی شده انرژی پالس خروجی در فشارهای مختلف گاز