



بررسی تشدیدگر ناپایدار خود پالاینده تعمیم یافته (GSFUR)^(۱) در لیزر مولکولی نیتروژن با تحریک طولی

سهیل قریشی، امیر حسین فرهبد، اکبر حریری*

مرکز تحقیقات و کاربرد لیزر، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶

چکیده: در این کار پژوهشی کاربرد تشدیدگر ناپایدار خود پالاینده تعمیم یافته در لیزر مولکولی نیتروژن با تحریک طولی بررسی و با تشدیدگر صفحه - موازی مقایسه شده است. واگرایی و درخشایی برای این تشدیدگر با بزرگنمایی $M=-5$ به ترتیب 0.33 mrad و $1.3 \times 10^9 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}}$ و برای تشدیدگر صفحه موازی با طول هندسی معادل، به ترتیب 1 mrad و $2.3 \times 10^7 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}}$ به دست آمده است، به طوری که واگرایی GSFUR نسبت به تشدیدگر صفحه - موازی $\frac{1}{3}$ برابر و درخشایی آن ۵۶ برابر بیشتر است. با استفاده از روزنه محدودکننده میدان^(۲) به عنوان جفت ساز خروجی^(۳) توزیع شدت پرتو خروجی لیزر در میدان دور به صورت گاوسی و در میدان نزدیک به شکل حلقه‌ای به دست آمده است. همچنین مدل نظری بر اساس حل همزمان معادلات آهنگ محیط فعال و معادلات مدار تخلیه الکتریکی لیزر، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل با آزمایشهای تجربی سازگار بود.

واژه‌های کلیدی: تشدیدگر ناپایدار خود پالاینده، لیزر مولکولی نیتروژن، روزنه محدودکننده میدان، شرط خودتصویری

Experimental Investigation of Generalized Self-Filtering Unstable Resonator in a Longitudinally Excited Molecular Nitrogen Laser

S. Ghoreyshi, A.H. Farahbod, A. Hariri*

Laser Research Center, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran,

Abstract: In this research work the application of the generalized self-filtering unstable resonator (GSFUR) in a longitudinally excited molecular nitrogen laser has been investigated and compared with the plane-parallel resonator. In a typical design of magnification $M=-5$, the beam divergence of 0.33 mrad , and the brightness of $1.3 \times 10^9 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}}$ have been obtained. For a plane-parallel resonator of equivalent length these figures are 1 mrad and $2.3 \times 10^7 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}}$ respectively, where it is shown that in the GSFUR design there is a reduction in the beam divergence by a factor of 3 and enhancement in measured brightness by a factor of 56, as compared with the plane-parallel design. Using a field limiting aperture as an output coupler, the beam profile in the far-field and near-field were Gaussian and donut shape, respectively. A

*- e-mail: ahariri@seai.neda.net.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۷۹/۶/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۱/۴/۱۷

mathematical model based on the rate equations for the gain medium and equation for the electric circuit is introduced and the results are consistent with the experimental measurements.

Keywords: self-filtering unstable resonator, molecular nitrogen laser, field-limiting aperture, self-imaging condition

۱- مقدمه

تشدیدگر ناپایدار خود پالاینده (SFUR) نخستین بار توسط گوبی و ریالی معرفی شد [۱ و ۲]. سپس آرایش‌های نوری مختلف با محیط‌های فعال گوناگون لیزر به کار رفت [۳ و ۴]. در آرایش (SFUR) معمولاً از دو آینه مقعر هم‌کانون استفاده می‌شود که روزنه محدود کننده میدان، با قطر مناسب، در کانون مشترک آینه‌ها قرار می‌گیرد. چون حجم مودی SFUR کوچک است، تشدیدگر ناپایدار خود پالاینده تعمیم یافته (GSFUR) به صورت مستقل [۵ و ۶] یا جفت شده [۷] عرضه شده‌اند. در این کار پژوهشی نشان داده شده است که می‌توان (GSFUR) را برای لیزر N_2 با تحریک طولی بکار برد. آزمایش‌های اولیه نشان داده‌اند که کاواک‌های متداول بکار رفته در لیزر نیتروژن با تخلیه الکتریکی عرضی، به طول تقریباً ۵۰ cm، به علت کوتاه بودن پهنای پالس لیزر با توجه به این که دست کم یک رفت و برگشت نوری برای تشکیل مود گاوسی تشدیدگر SFUR مورد نیاز است، برای تشدیدگر ناپایدار مناسب نیستند و لازم است که طول گل تشدیدگر و محیط فعال آن به حد ۱۰ cm کاهش یابد. این نکته در مقالات دیگران، که در آنها راجع به کاربرد تشدیدگر ناپایدار با محیط فعال N_2 و با تحریک عرضی بحث شده است، نیز مشاهده می‌شود [۸ و ۱۰]. برای محیط فعال نیتروژن با تحریک طولی و پهنای پالس تقریباً ۲۰ ns، با استفاده از تشدیدگر پایدار ساختار مودی گاوسی بدست آمد. بنابراین، در استفاده از تشدیدگر ناپایدار، یا باید طول محیط فعال در تحریک عرضی کوچک انتخاب شود [۵] و یا پالس به اندازه کافی پهن باشد تا شرایط لازم برای تشکیل ساختار مودی فراهم گردد. این امر هنگامی تحقق می‌یابد که لیزر نیتروژن در فشار پایین، حدود ۱۰ mmHg، فعال باشد و به همین جهت نوع لیزر با ساختار تحریک طولی باید انتخاب شود [۹]. بازدهی دریافت انرژی خروجی بالا، حساسیت کم به نامیزانی آینه‌های

تشدیدگر، وجه تمایز دقیق در ساختار مودی و دریافت خروجی نزدیک به حد پراش را می‌توان به عنوان نمودهای ویژه GSFUR به شمار آورد.

گذار $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ لیزر مولکولی نیتروژن در طول موج ۳۳۷/۱ nm در ناحیه فرابنفش به تفصیل مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱ و ۱۲] و بر این پایه، لیزر مولکولی نیتروژن برای دمش رنگهای آلی و مطالعات زیست شناختی بسیار مناسب است [۱۳].

۲- طراحی سیستم تشدیدگر ناپایدار خود پالاینده تعمیم یافته

محاسبات مربوط به طراحی این سیستم تشدیدگر در مأخذهای ۵ تا ۷ آورده شده است. این سیستم متشکل از دو آینه مقعر و یک روزنه محدود کننده میدان به شعاع a است. با اعمال «شرط خود تصویری»^(۴) و حذف نوسانات مربوط به مود ویژه TEM_{۰۰}^(۵) پارامترهای مورد نیاز به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

$$g_1 = 1 \text{ و } g_2 = 1 - \frac{L_2}{2f_2} \quad (1)$$

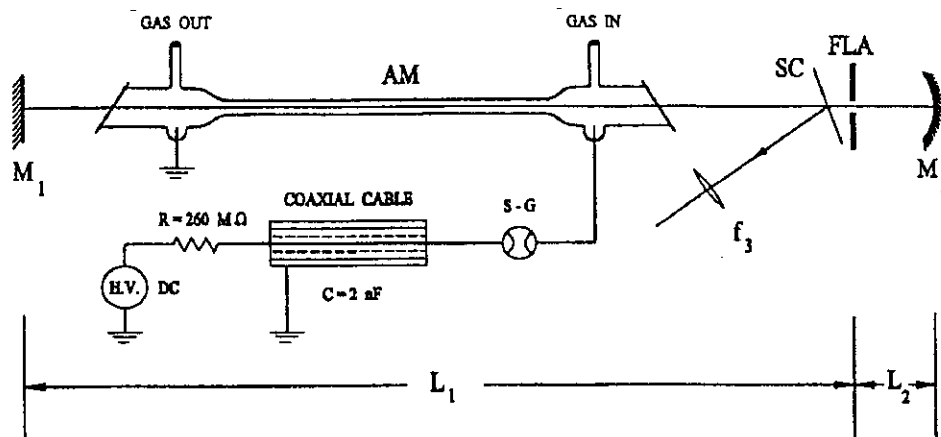
$$M_G = -\frac{L_1 g_1}{L_2 g_2} = \frac{2g_1 - 1}{2g_2 - 1} \quad (2)$$

$$L_1 = \left(\frac{1}{M} - M\right) \frac{f_2}{2} \text{ و } L_2 = \left(1 - \frac{1}{M}\right) f_2 \quad (3)$$

$$a = (g_2 L_2 \lambda)^{1/2} \simeq \left(f_2 \frac{\lambda}{2}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{1}{2M^2}\right) \quad (4)$$

$$f_2 = d - \frac{2g_2 L_2}{(2g_2 - 1)} \quad (5)$$

که L_1 و L_2 فواصل آینه‌های M_1 و M_2 از روزنه محدود کننده میدان، a شعاع روزنه، M بزرگنمایی تشدیدگر، f_2



شکل ۱- آرایش دمش الکتریکی لیزر مولکولی نیتروژن همراه با طرح GSFUR.

SC=Scrapper (آینه با روزنه پراش)

AM=Active Medium (محیط فعال)

SG= Spark Gap (جرقه‌زن)

FLA= Field-Liming Aperture (روزنه محدودکننده میدان)

هم محور است. که به طور موازی بسته شده‌اند. از خازنهای سرامیکی سریع که تحمل ولتاژ بالا را دارند نیز می‌توان استفاده کرد؛ ظرفیت خازن ۲nF است و انرژی ذخیره شده در آن به وسیله جرقه‌زن^(۷) درون لوله پلاسما تخلیه می‌شود. مقاومت $R=260\text{ M}\Omega$ به عنوان مقاومت متعادل‌ساز^(۸) انتخاب شد. جرقه‌زن در این سیستم به صورت «خود شکست» عمل می‌کند. در سیستم تخلیه گاز از یک پمپ مکانیکی استفاده شد و گاز نیتروژن با درجه خلوص ۹۹/۹۹۶٪ در فشار ۷ تا ۱۰ میلی‌متر جیوه (torr) مستقیماً از ورودی لوله پلاسما وارد آن شده و از خروجی آن تخلیه می‌شود. دو فشارسنج مدرج ۰-۱۰۰ و ۰-۱۰۰۰ میلی‌بار به طور همزمان فشار درون لوله لیزر را اندازه‌گیری می‌کنند.

در آرایش تجربی تشدیدگر GSFUR با بزرگنمایی $M=-5$ ، از آینه کروی M_2 دارای پوشش آلومینیومی، به فاصله کانونی $f_3 = 15\text{ cm}$ ، آینه تخت M_1 و عدسی تصحیح کننده جبهه موج پرتو خروجی لیزر، به فاصله کانونی $f_3 = 100\text{ cm}$ استفاده شده است. با توجه به روابط ۱ تا ۵، مقادیر $g_1=1$ و $g_2=0/4$ ، $a=0/17\text{ mm}$ ، $L_2=18\text{ cm}$ و $L_1=37\text{ cm}$ ، $d=28\text{ cm}$ محاسبه و در آرایش اپتیکی به کار برده شده‌اند. برای جفت ساز خروجی و روزنه محدود کننده میدان از یک تیغه نازک شیشه‌ای به ضخامت ۱mm با پوشش

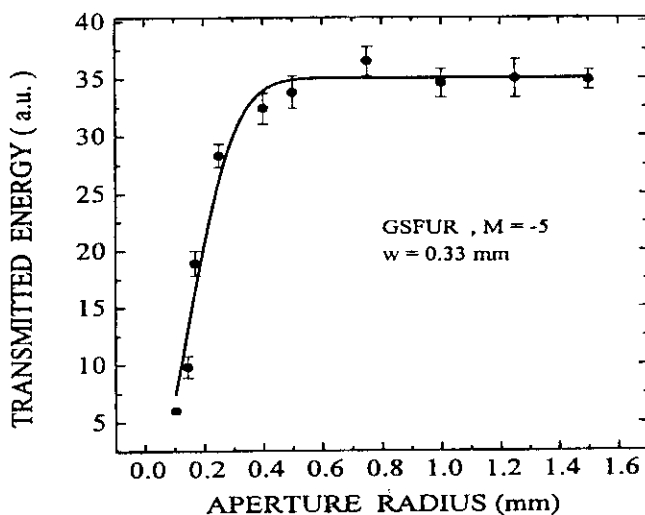
فاصله کانونی آینه M_2 و f_3 فاصله کانونی عدسی تصحیح کننده F_3 است که در فاصله d از جفت ساز خروجی قرار می‌گیرد.

۳- روش آزمایش

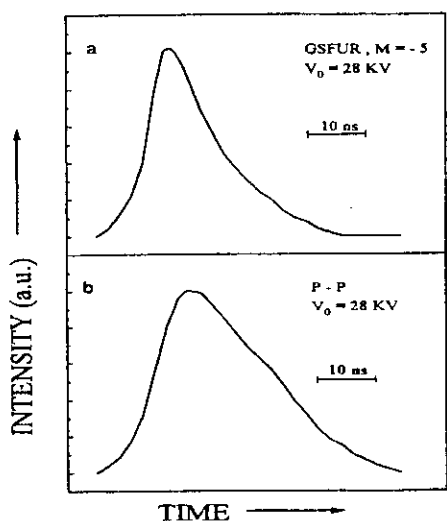
طرح کلی لیزر نیتروژن با تحریک طولی در شکل ۱ نشان داده شده است. لوله پلاسمای بکاررفته از جنس پیرکس به قطرهای داخلی ۴mm و خارجی ۷mm است. قطر خارجی این لوله در دو انتهای آن به اندازه ۱۳mm افزایش می‌یابد تا از حذف «مدهای خارج از محور»^(۱) جلوگیری شود. اتصال الکترودهای تنگستن به وسیله جوش شیشه به فلز صورت گرفته است. دو انتهای لوله پلاسما با رعایت زاویه بروستر بریده شده‌اند و از پنجره سیلیکای ذوب شده برای مسدود کردن این لوله استفاده شده است. طول لوله پلاسما کلاً ۲۹cm و فاصله دو الکترود آن ۲۰/۵cm انتخاب شده است. چون لیزر بر اساس جریان گاز نیتروژن عمل می‌کند، در دو انتهای آن مجراهای ورودی و خروجی گاز تعبیه شده است. برای تحریک گاز N_2 از یک سیستم مجهز به خازنهای سریع با اندوکتانس تقریباً ۱nH استفاده شده است که می‌تواند ولتاژ بالا تا حد ۴۰kV را تحمل کند. بهترین روش برای انتخاب خازنها استفاده از چند رشته کابل

آلومینیومی، که روزنه‌ای به قطر $a = 0.34 \text{ mm}$ بر طبق رابطه ۴ در میان آن ایجاد شده بود استفاده شد. برای مقایسهٔ خروجی این لیزر یک تشدیدگر صفحه - موازی با طولی معادل طول تشدیدگر GSFUR مورد استفاده قرار گرفت. آینه M_1 این تشدیدگر دارای پوشش آلومینیومی است که به عنوان آینهٔ انتهایی عمل می‌کند. از یک تیغهٔ کوآرتز بدون پوشش با ضریب بازتابش ۴٪ نیز به عنوان جفت‌ساز خروجی استفاده شد.

برای مشاهده رفتار زمانی تپ (پالس) لیزر، از آشکارساز ITL مدل ۱۸۵۰، TFI با زمان صعود ۱۰۰ ps و نوسان‌نمای^(۹) تکترونیکس مدل ۷۹۰۴ با پهنای نوار ۵۰۰ MHz به همراه تقویت‌کننده‌های ۷A۱۹ و ۷A۲۶ استفاده شد، که زمان صعود سیستم اندازه‌گیری آنها به ترتیب



شکل ۲- نتایج اندازه‌گیری مربوط به تعیین شعاع پرتو W، با استفاده از روزنه‌هایی با قطر b و برازش داده‌های تجربی به تابع $I = I_0 [1 - \exp(-\frac{2b^2}{w^2})]$.



شکل ۳- نمونه‌ای از رفتار زمانی تپ لیزر اندازه‌گیری شده به وسیلهٔ ترکیب فوتودیود و نوسان‌نما.

۴- یافته‌ها و بررسیها

برای تعیین توزیع شدت باریکهٔ لیزر در میدان دور از یک فوتودیود سیلیکون با حساسیت کافی در طول موج ۳۳۷/۱ nm استفاده شد که به وسیلهٔ توان‌سنج Scientech مدل 360001 سنج‌بندی شده بود، و برای جلوگیری از اشباع شدن فوتودیود فیلترهای تضعیف‌کننده ND بکار رفت. در اندازه‌گیری انرژی خروجی، با توجه به اینکه جرقه‌زن به صورت خود شکست عمل می‌کند، انرژی‌های اندازه‌گیری شده برای تشدیدگر GSFUR با بزرگنمایی $M = -5$ و تشدیدگر صفحه - موازی هم طول آن، به ترتیب ۰/۵۷۹ μJ و ۱ μJ به دست آمد.

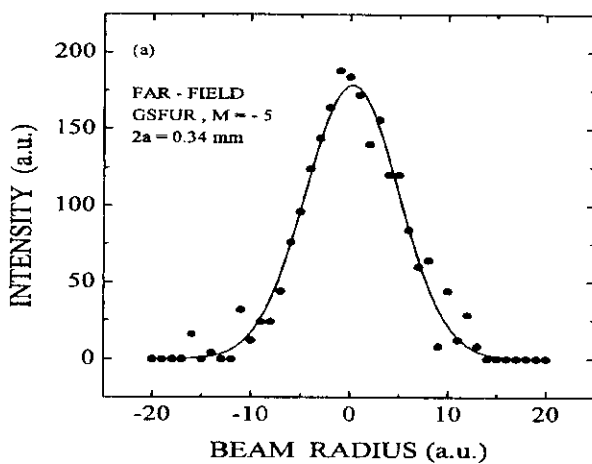
واگرایی باریکهٔ لیزر با دو روش اندازه‌گیری شد: در مورد تشدیدگر پایدار صفحه - موازی، این اندازه‌گیری با تعیین سطح لکه لیزر روی صفحه مشاهده در دو فاصله متفاوت از آینه خروجی انجام گرفت، سپس با استفاده از رابطه $\frac{D_2 - D_1}{2d} = \theta$ و واگرایی، که D_1 و D_2 قطر لکه‌ها در فاصله d از یکدیگر است این واگرایی برابر ۱/۱۸ mrad حساب شد. در تشدیدگر GSFUR با بزرگنمایی $M = -5$ به دلیل کوچک بودن قطر پرتو خروجی لیزر نسبت به تشدیدگر صفحه - موازی، روش هندسی اندازه‌گیری واگرایی با خطای زیاد همراه است، به همین جهت از روش شدت‌سنجی باریکهٔ خروجی لیزر استفاده شد. برای این منظور شدت باریکهٔ خروجی به هنگام عبور از روزنه‌هایی به قطرهای مختلف b، در کانون یک عدسی همگرا به فاصله کانونی یک متر اندازه‌گیری شد. با برازش نقاط تجربی به تابع



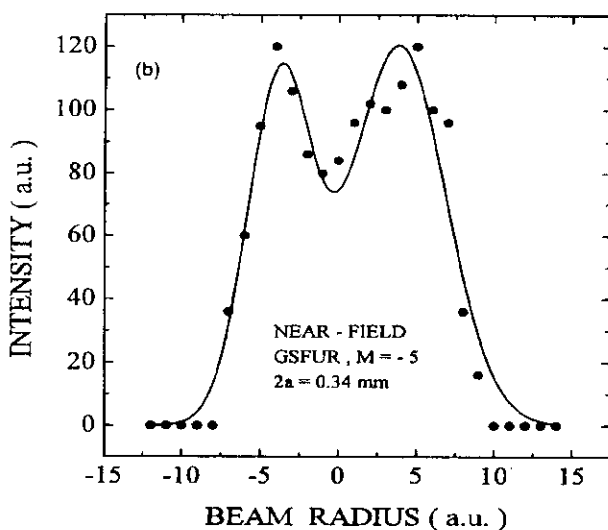
جدول ۱- مقایسه پارامترهای فیزیکی تشدیدگر GSFUR و تشدیدگر صفحه - موازی با طول معادل ۵۴cm

درخشانی	FWHM	حد پراش	واگرایی (mrad)	انرژی خروجی μJ	نوع تشدیدگر
$2/3 \times 10^7 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{sr}}$	۲۰	-	۱/۱۸	$\cong 1$	P-P
$1/3 \times 10^9 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{sr}}$	۱۲	۰/۲۳۹	۰/۳۳۵۸	$\cong ۰/۵۷۹$	GSFUR M=-۵

به وسیله پالس ترانسفورمر روگوفسکی و نوسان‌نمای تکترونیکی مدل ۷۹۰۴ و تقویت‌کننده عمودی ۷A۲۶ و با



شکل ۳- نمونه‌ای از توزیع شدت میدان دور، اندازه‌گیری با مشاهده فلورسان صفحه مشاهده و آشکار سازی به وسیله دوربین CCD بوده است.

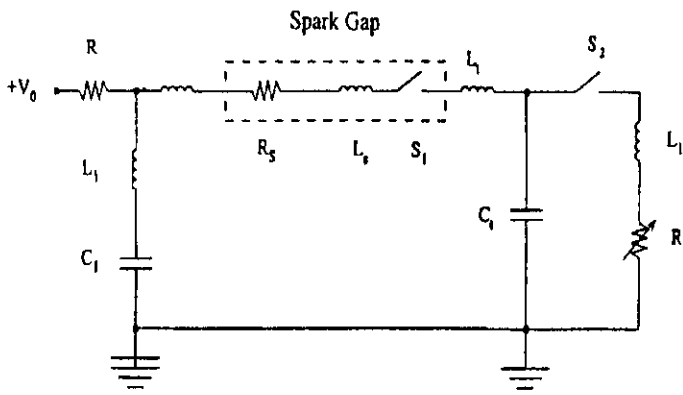


شکل ۴- نمونه‌ای از توزیع شدت میدان نزدیک، اندازه‌گیری با مشاهده فلورسان صفحه مشاهده و آشکار سازی به وسیله دوربین CCD بوده است.

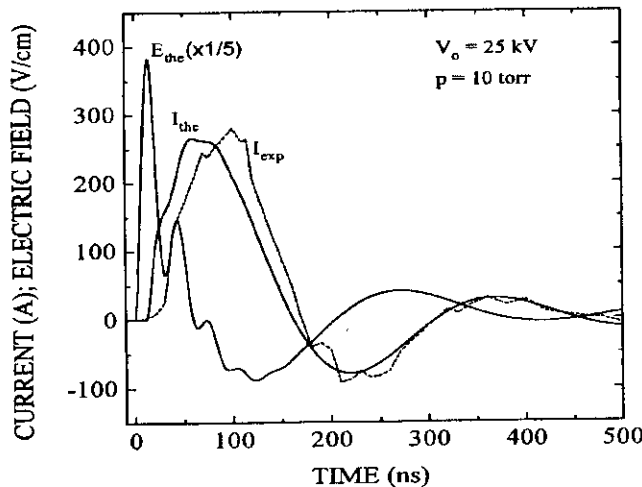
۰/۸NS و ۱/۶NS است. رفتار زمانی و پهنای تپ در شکل ۳ نشان داده شده است. بررسی شکل تپ‌ها نشان می‌دهد که به ازای ولتاژهای مختلف، تپ لیزر به سرعت صعود می‌کند و پس از عبور از قله با روندی آرام فرود می‌آید و بجز پهنای تپ، تفاوت قابل توجهی در رفتار زمانی تپ لیزر مشاهده نمی‌شود. نتایج این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ مندرج است. برای تعیین توزیع شدت پرتو خروجی لیزر در میدانهای دور و نزدیک از یک دوربین CCD ساخت Philips مدل LDH 0600/00 به همراه مجموعه اپتیکی ernitec مدل MK3 12Z6ME6 استفاده شد. به علت عدم حساسیت دوربین CCD در ناحیه فرابنفش، پرتو لیزر را به یک صفحه کاغذ سفید تابانیدیم و از فلورسان حاصل از سطح کاغذ در میدانهای دور و نزدیک عکسبرداری کردیم. تصاویر حاصل بوسیله کامپیوتر و نرم‌افزار مناسب در دو راستای متعامد X و Y رویش شد. نمونه‌هایی از توزیع شدت در میدانهای دور و نزدیک در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

۵- محاسبات نظری

تحریک الکتریکی لیزر نیتروژن طولی، که در عمل مورد استفاده ما بود، از راه تخلیه الکتریکی خازن C_1 به وسیله جرقه‌زن S_1 با خود القای L_s و مقاومت الکتریکی R_s در محیط فعال انجام گرفت. شکل ۶ مدار معادل سیستم تخلیه الکتریکی دمش لیزر مولکولی نیتروژن را نشان می‌دهد [۱۴]. L_1 و L_2 به ترتیب نمایانگر «خود القای» معادل خازن C_1 و خط انتقال، و C_2 مین ظرفیت خط انتقال است. امپدانس خط انتقال نیز با $Z_c = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$ تبیین می‌شود. شکل ۷ نمونه‌ای از تپ جریان مشاهده شده را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری پالس جریان



شکل ۶- مدار معادل سیستم تخلیه الکتریکی دمش لیزر مولکولی نیتروژن.



شکل ۷- نمونه‌ای از نتایج بدست آمده نظری میدان الکتریکی E و شدت جریان بر حسب زمان (خط تمام). شدت جریان اندازه‌گیری شده به وسیله بوبین روگوفسکی (نقطه چین).

اولیه $n_e(0) = 10^{11} \text{cm}^{-3}$ و $V_0 = 25 \text{kV}$ ، $E(0) = I_1(0) = 0$ به روش رونگک - کوتای مرتبه چهار، با گام زمانی $\Delta t = 20 \text{ps}$ در بازه زمانی $0 - 500 \text{ns}$ حل شد. نتایج محاسبات عددی برای $E(t)$ و $I_1(t)$ و رفتار تجربی مشاهده شده برای I_1 در شکل ۷ نشان داده شده است.

معادلات تغییرات انبوه ترازهای $N_B(t)$ و $N_C(t)$ و چگالی فوتون $\phi(t)$ برای سیستم سه تراز مولکول نیتروژن با تراز پایه $X^1\Sigma_g^+$ ، تراز بالایی $C^3\Pi_u$ با طول عمر $\tau_C \approx 40 \text{ns}$ و تراز پایینی $B^3\Pi_g$ با طول عمر $\tau_B \approx 6 \mu\text{s}$ و میانگین مقطع گسیل القایی $\sigma_s \approx 5 \times 10^{-15} \text{cm}^2$ برای پنج خط لیزر در نزدیکی 337.1nm با پهنای کلی $\Delta \lambda \leq 1 \text{\AA}$ [۱۴]، به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۵]:

پهنای نوار 250MHz انجام گرفته است. با توجه به شکل ۷، پریود نوسانات جریان $T = 2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}} \approx 280 \text{ns}$ است، در این صورت خود القای معادل مدار، با توجه به $C_1 \approx 0.18 \text{nF}$ و $C_1 \approx 10 \text{pF}$ برابر است با $L_{eq} = L_1 + L_s + L_1 + L_1 \approx 2.48 \mu\text{H}$ داده‌های تجربی [۱۵] برای سرعت رانش v_d بستگی پارامتر یونش α و v_d نسبت میدان الکتریکی و فشار E/p [۱۶] و معادله کیرشلف درباره مدار الکتریکی، معادلات لازم برای انتگرال‌گیری عددی و یافتن رفتار زمانی جریان $I_1(t)$ و میدان الکتریکی $E(t)$ و چگالی الکترونها $n_e(t)$ به ترتیب زیر به دست می‌آیند.

$$\frac{dE}{dt} = -\left(\frac{1}{L_1}\right)[R_1 + Z_s]E + \left(\frac{V_{eff}}{d}\right)\left(\frac{R_1}{L_1}\right) + \frac{dV_{eff}}{dt}\left(\frac{1}{d}\right) \quad (6)$$

$$\frac{dn_e}{dt} = \alpha v_d n_e = (2/9 \times 10^5)(1/4 \times 10^{-8})\left(\frac{E^{2/9}}{p^{2/9}}\right)n_e \quad (7)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \left[\frac{R_1 + Z_s}{Z_s}\right]\left(\frac{d}{L_1}\right)E - V_{eff}\left(\frac{R_1}{Z_s L_1}\right) \quad (8)$$

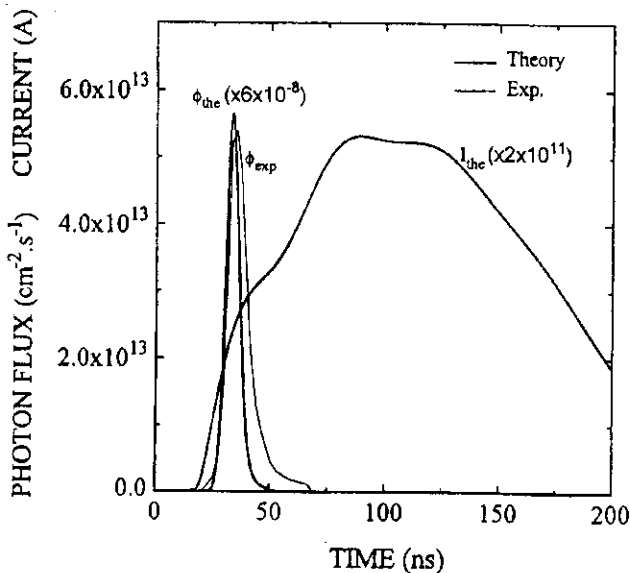
$$L_1 \frac{dI_1}{dt} + R_1 I_1 = V_{eff} \quad (9)$$

$$V_{eff} = V_0(1 - e^{-t/\tau} \cos \omega t) - \left(\frac{1}{C_{eq}}\right) \int_0^t I_1 dt \quad (10)$$

کانال لیزر با خود القای L_1 و مقاومت الکتریکی R_1 وابسته به زمان متناظر است. با توجه به قانون اهم $J = qn_e v_d = \sigma E$ ، می‌توان R_1 را بر حسب n_e نوشت:

$$R_1 = \frac{d}{A\sigma} = \left(\frac{d}{A}\right)\left(\frac{E}{qn_e v_d}\right) = \left(\frac{d}{\pi r^2}\right)\left(\frac{E}{qn_e v_d}\right) \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، q بار الکترون و r شعاع داخلی لوله لیزر است و در رابطه (۱۰)، V_0 اختلاف پتانسیل دو سر خازن C_1 در لحظه $t=0$ و τ ثابت زمانی مدار است. دستگاه معادلات ۶ تا ۹ برای فاصله دو الکتروود لوله پلاسما، $d = 20/5 \text{cm}$ ، و با شرایط



شکل ۸- رفتار زمانی محاسبه شده شار فوتون (خط تمام)، شدت جریان (خط تمام) و رفتار زمانی پالس اندازه‌گیری شده (خط چین).

کاربرد تشدیدگر ناپایدار در مورد لیزرهای مولکولی نیتروژن با تحریک طولی و با ابعاد محیط فعال ~ 30 cm است. گزارشهای قبلی در این زمینه، مربوط به تشدیدگرهای ناپایدار با طول محیط فعال ~ 10 cm بوده است. از سوی دیگر، این نخستین گزارش در ارتباط با تشدیدگرهای خودپالایند تمیم یافته در لیزر مولکولی نیتروژن نیز می‌باشد.

محاسبات نظری مبتنی بر حل معادلات آهنگ و مشخصه الکتریکی، با توجه به داده‌های مربوط به سطح مقطع‌های C و B مولکول نیتروژن، سازگاری قابل قبولی میان نتایج حاصل از محاسبات و اندازه‌گیری در آزمایشگاه به دست داده است.

پی‌نوشت‌ها:

- ۱- generalized self-filtering unstable resonator
- ۲- filed limiting aperture
- ۳- output coupler
- ۴- self - imaging condition
- ۵- transvers electromagnetic کوتاه شده:
- ۶- off - axis modes
- ۷- spark gap
- ۸- ballast resistor
- ۹- oscilloscope

$$\frac{dN_C}{dt} = n_e N_g \int_0^\infty g(T_e, \nu) \sigma_C(\nu) \nu d\nu - \sigma_s c [N_C - N_B] \phi - \frac{N_C}{\tau_C} \quad (12)$$

$$\frac{dN_B}{dt} = n_e N_g \int_0^\infty g(T_e, \nu) \sigma_B(\nu) \nu d\nu - \sigma_s c [N_C - N_B] \phi - \frac{N_B}{\tau_B} + \frac{N_C}{\tau_C} \quad (13)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \sigma_s c [N_C - N_B] \phi - \frac{\phi}{\tau_{ph}} + \gamma \frac{N_C}{\tau_C} \quad (14)$$

τ_{ph} ، γ و N_g به ترتیب عبارتند از سرعت سیر نور، طول عمر فوتون برای تشدیدگر، سهم گسیل خودبخود تقویت شده از یک انتهای لوله به انتهای دیگر آن $\gamma = \left(\frac{r}{2d}\right)^2 = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\pi r^2}{d^2}\right)$ ، و چگالی مولکولهای نیتروژن $N_g = 3/2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ، در لوله لیزر در فشار $p = 10 \text{ torr}$ و در دمای 300 K است. طول عمر فوتون در داخل تشدیدگر GSFUR با بزرگنمایی $M = -6$ با توجه به بازتابندگی آینه‌های تشدیدگر R_1 و R_2 و جفت ساز خروجی R_C ، $R_C = R_1 = R_2 = 0.8$ ، و بازتابندگی مؤثر خروجی $R_{eff} = R_{OC} \left[\frac{1/968}{M^2} \left(1 - \frac{0/6048}{M^2}\right) \right]$ ، با رابطه زیر داده می‌شود.

$$\tau_{ph} = \frac{t_r}{\varepsilon} = \left(\frac{2L_{cavity}}{c}\right) \frac{1}{-\ln(R_1 R_2 R_{eff})} = 1/136 \times 10^{-9} \text{ s} \quad (15)$$

t_r زمان گردش کامل نور در تشدیدگر و $L_{cavity} = 61/25 \text{ cm}$ طول تشدیدگر است. $g(T_e, \nu)$ تابع توزیع سرعت برای الکترونها در دمای T_e ، معمولاً به صورت توزیع ماکسول - بولتزمن فرض می‌شود [۱۷ و ۱۸]. مقادیر عددی برای سطح مقطع برخورد الکترونی برای گذار C و B مولکول نیتروژن، $\sigma_C(\nu)$ و $\sigma_B(\nu)$ ، از گزارش نیومن [۱۹] استخراج شده است. شکل ۸ رفتار زمانی شارفوتون مشاهده شده در آزمایش و نتایج محاسبات عددی را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله کاربرد تشدیدگر ناپایدار خودپالایند تمیم یافته در لیزر مولکولی نیتروژن با تحریک طولی مورد مطالعه نظری و تجربی قرار گرفت. این نخستین گزارش مربوط به

References

1. P.G. Gobbi and G.C. Reali, "A novel unstable resonator configuration with a self-filtering operature," *Opt. commun.* **52**, 195-198 (1984).
2. P.G Gobbi, S.Morosi, G.C. Reali, and A.S. Zarkasi, "Novel unstable resonator with a self-filtering aperature: experimental charcterization of the Nd:YAG loaded cavity," *Appl. Opt.* **24**, 26-33 (1985).
3. V.Boffa, P.D. Lazzaro, G.P. Gallerno, G. Giradano, T.Hermson, T. Letardi and C.E. Zheng, "Self-filtering unstable resonator operation of XeCl excimer laser," *IEEE J. Quant. Electron.* **QE-23**. 1241-1244 (1987).
4. L.H Min and K.Vogler, "Confocal positive branch-filtering unstable resonator for Nd: YAG laser," *Opt. commun.* **74**, 79-83 (1989).
5. A.H Farahbod and A.Hariri "Application of generalized self-filtering unstable resonator to a N₂-laser pumped dye laser," *Opt. Commun.* **108**, 84-90 (1994)
6. M. Mahmodi, A.H. Farahbod and A. Hariri, "Experimental study of generalized self-filtering unstable resonators in an ablative - wall flash - lamp - pumped dye laser," *Appl. Opt.* **37**, 1053-1059 (1989).
7. A.H. Farahbod, B. Daneshvar and A. Hariri, "Perfomence of Nd:YAG laser in coupled generalized self-filtering and positive-branch unstable resonstors," *Appl.Opt.* **38**, 4516-4572 (1999).
8. G.C. Thomas, G. Gharkapani and C.M.L. Kerr, "Coherent radiation from a nitrogen laser," *Appl. Phys. Lett.* **30**, 633-635 (1977).
9. S. Ghorcyshi, "Experimental investigation of unstable resonator in self-terminating laser with longitudinal excition," M.S Thesis, Azad University (1998).
10. H.M. Von Bergman, "Miniature TEA. nitrogen laser with diffraction-limited sub - nanosecond output pulses," *J.Phys, E:Sci, Instrum.* **15**, 807-809 (1982).
11. ا. حریری، س.ع. گلپایگانی و م. ترکاشوند، "ایجاد پالس بلند در لیزر مولکولی ازت با تخلیه طولی،" نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران، شماره 9، صفحات 41-33 (1368).
12. A. Hariri, M. Tarkashvand and A. Karimi, "Corona-preionized nitrogen laser with varitable pulse Width," *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 1408-1412, (1990).
13. Y. Carls Powell, "Nitrogen laser cuts and catapults cell," *Laser Focus World*, pp: 34-37, Jan (1999).
14. B. Woodward, W.V.J. Ehlers, and W.C. Lineberger, "A reliable, repetitively pulsed, high-power nitrogen laser," *Rev. Sci. Instrum.* **44**, 882-887 (1973).
15. W.A. Fitzsimmons, L.W. Andersson, C.E. Riedhouser and J.M. Vrtilek, "Experimental and theoretical investigation of the nitrogen laser," *IEEE J. Quant. Electron*, **QE-12**, 624-633 (1976).
16. H. Raether, "Electron avalanches and breakdown in gases," London, England Butterworths, (1964).
17. H.E.B. Andersson and Rod C. Tobin, "Electrical break down and pumping in an axial-Field nitrogen laser," *Physica scripta.* **9**, 7-14 (1974).
18. A.W. Ali, C. Kolb and A.D Andersson, "Theory of the pulsed molecular nitrogen laser," *Appl. Opt.* **6**, 2115-2119 (1967).
19. L.A. Newman and T.A. Determple, "Electron - beam - controlled infrared laser," *J. Appl. Phys.* **47**, 376-377 (1976).