

مطالعه اثر خلوص گاز نیتروژن و طول محیط فعال بر پارامترهای لیزری در سیستم نوسانگر - تقویت کننده لیزر نیتروژن

کامبیز رحیمیان، سهیل قریشی، اکبر حریری*

مرکز تحقیقات و کاربرد لیزر، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۲۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: در یک سیستم نوسانگر-تقویت کننده لیزر نیتروژن از نوع TE-TE که طول مؤثر محیط فعال تقویت کننده ۳۱ سانتی متر و هر دو نوسانگر و تقویت کننده آن با پیش یونش کورونا فعال است، اندازه گیری ضریب بهره (g_0) و چگالی انرژی اشباع (E_s) در فشارهای مختلف گاز و درجه های خلوص متفاوت انجام گرفته است. جزئیات مرتبط با این اندازه گیری ها جدول بندی، یا به صورت نمودارهای تجربی ارائه شده اند. برای بررسی اثر آکسید شدن سطوح الکترودها بر پارامترهای لیزری، مقادیر اندازه گیری شده در مواردی هم که الکترودهای تقویت کننده کار کرده بوده و تمیز شده اند نیز ارائه شده است. در نهایت، مقادیر اندازه گیری شده (g_0) همراه با اندازه گیری های پیشین برای تقویت کننده طولی به طول ۹۴ سانتی متر، همچنین مقادیر گزارش شده برای کانال های لیزر به طول های ۴۵ و ۵۰ سانتی متر، مقایسه شده اند. این مقایسه نشان می دهد که (g_0) از نمودار ویژه ای تبعیت می کند که به طول کانال لیزر بستگی شدید دارد. این اندازه گیری ها بیانگر آن است که طول کانال لیزر در حالی که سهم قابل ملاحظه ای در مقادیر (g_0) دارد، سهم استفاده از گازها با درجه های خلوص متفاوت، همچنین تمیز کردن الکترودها، حداکثر به ۱۹/۴٪ و ۱/۹٪ در فشار ۱۰۰ تور محدود می شود.

واژه های کلیدی: اندازه گیری های ضریب بهره و انرژی اشباع، نوسانگر - تقویت کننده، لیزر نیتروژن، درجه خلوص گاز، پیش یونش کورونا

Study of the Effect of N₂ Gas Purity and the Length of Active Medium on Laser Parameters in an Oscillator-Amplifier N₂-Laser System

K. Rahimian, S. Ghoreyshi, A. Hariri*

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

Abstract: In an Oscillator-amplifier N₂-laser system of the type TE-TE with the amplifier active effective length of 31 cm, both operating with corona-preionizer, the gain coefficient (g_0) and saturation energy density (E_s) measurements have been carried out for different gas pressures and gas purities. The details of our measurements are tabulated or presented graphically. The obtained values for the cases of used or cleaned electrodes are also presented for the comparison. At last, our g_0 values along with those of our previously reported values for the active length of 94 cm and other reported values for the active lengths of 45 and 50 cm have been introduced for the comparison, and it was found that the measured values of g_0 follow a characteristic curve showing their strong dependency on the length of laser channels. The present observation indicated that while the length of laser channel has the major contribution to the g_0 values, the contributions of gas purities and cleaned electrodes are limited to at most 19.4% and 1.9%, respectively, at the gas pressure of 100 Torr.

Keywords: gain and saturation energy measurements, oscillator-amplifier, nitrogen laser, gas purity, corona-preionization

۱- مقدمه

لیزرهای نیتروژن به سبب کاربرد زیادشان به عنوان چشمه مولد پرتو فرابنفش، مورد توجه‌اند. این لیزرها از بدو اختراع تاکنون توسط پژوهشگران متعدد در اکثر آزمایشگاهها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و مقالات پژوهشی بسیاری در زمینه‌های تجربی، فنی و نظری درباره آنها منتشر شده است. با وجودی که لیزرهای حالت جامد در گستره فرابنفش (UV) در سال‌های اخیر متحول شده‌اند، لیکن اهمیت لیزرهای گازی در ایجاد باریکه فرابنفش و فرابنفش دور رو به افزایش است، زیرا بعضی از طول‌موج‌های لیزرهای گازی بسیار کوتاه‌تر از طول موج‌های ناشی از به کارگیری لیزر حالت جامد با تبدیل بسامدشان در هارمونیک‌های مراتب بالا هستند. کوتاه‌ترین طول موج در لیزر نئودیموم یاگ در هارمونیک پنجم آن ۲۱۰ nm و با سیستم پیچیده مولد پارامتری ۱۹۳ nm است، ولی توان متوسط آنها روی هم‌رفته کمتر از توان متوسط لیزرهای گازی در ناحیه UV دور می‌باشد.

لیزرهای N_2 در طول موج ۳۳۷ nm چه به صورت تحریک طولی و چه به صورت تحریک عرضی به کرات به صورت موضوع‌های مختلف در ایران مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱ تا ۸]. این لیزرها را با به کارگیری از یک پیش‌یونش مناسب می‌توان به لیزرهای اگزایمر تبدیل کرد، لیکن به علت مسائل خوردندگی شدید گازهای مورد استفاده در لیزرهای اگزایمر، مانند F_2 ، HCl ، با بکاربردن نیتروژن به عنوان محیط فعال می‌توان بسیاری از ویژگی‌های تخلیه الکتریکی، پیش‌یونش، الکترودها (جنس، شکل و نیمرخ آنها)، اپتیک و نظایر آن را مورد مطالعه قرار داد، زیرا همگی در گروه لیزرهای سریع خود پایان‌دهنده محسوب می‌شوند و دارای سازوکارهای نسبتاً مشابه می‌باشند. علاوه بر آن، کاربرد مستقیم لیزرهای نیتروژن به ویژه لیزرهای نیتروژن با تحریک عرضی، به علت چگالی انرژی بالای آنها در دمش لیزرهای رزین‌ای، دستگاه‌های مناسبی برای مطالعات بیناب‌نمایی محسوب می‌شوند که هم به سبب هزینه پایین تهیه آنها و هم سهولت نگهداری دستگاه‌ها مورد توجه می‌باشند.

در مطالعاتی که درباره لیزر نیتروژن تاکنون انجام گرفته، هدف اصلی در اکثر مقاله‌های ارائه شده معرفی طراحی و ساخت لیزرها بوده است. تعداد محدودی از فعالیت‌ها هم به

اندازه‌گیری‌های پارامتری و محاسبات شبیه‌سازی اختصاص داده شده است. ضریب بهره یکی از پارامترهایی است که گروه‌های مختلف نسبت به اندازه‌گیری آن اقدام کرده‌اند. نتایج این اندازه‌گیری‌ها در مقاله پیشین ما به صورت یک جدول عرضه شده است [۸]. نگرشی کوتاه به این جدول نشان می‌دهد که بعضی از ضرایب اندازه‌گیری شده بزرگتر از حد متعارف و بعضی هم کوچکتر از مقدار متوسط اندازه‌گیری‌ها است. در مرحله اول چنین به نظر می‌رسد که از روش‌های مختلف اندازه‌گیری اعداد متفاوتی به دست می‌آیند، یا آنکه ناخالصی گاز به کار رفته باعث پراکندگی نتایج می‌شود. از طرف دیگر، در هیچ یک از مطالعاتی که تاکنون در این مورد در سطح جهانی انجام گرفته گزارشی درباره نقش درجه خلوص گاز نیتروژن ارائه نشده است و سازندگان لیزر تنها استفاده از گاز N_2 با درجه خلوص بالاتر از ۹۹/۹۹٪ را پیشنهاد داده و اشاره کرده‌اند که استفاده از گاز با درجه خلوص نامناسب، اکسید شدن الکترودها را به همراه دارد و به تدریج علاوه بر افت انرژی خروجی لیزر، باعث خواهد شد که از مدت عمر مفید دستگاه کاسته شود. بنابراین با اندازه‌گیری پارامترهای لیزری، از جمله ضریب بهره g_0 و چگالی انرژی اشباع E_s ، می‌توان پی برد که نقش درجه خلوص گاز در مقادیر اندازه‌گیری شده چگونه ظاهر می‌شود.

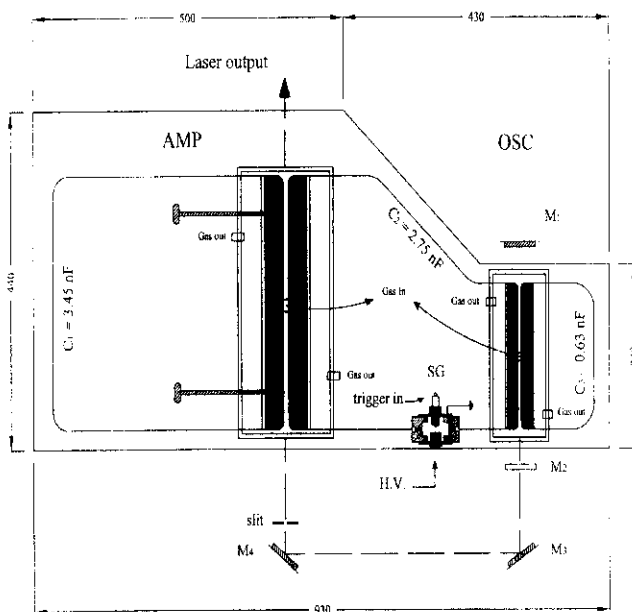
علاوه بر آن با توجه به داده‌های اخیر پژوهشگران در اندازه‌گیری مستقیم g_0 و E_s با استفاده از روش نوسانگر-تقویت‌کننده (OSC-AMP) با یک مرحله تقویت و کانال‌های لیزر به طول ۴۵ cm [۹] و ۵۰ cm [۱۰] و گزارش اندازه‌گیری اخیرمان برای لیزر کانال بلند ۹۴ سانتی‌متر که ضریب بهره را حدود 0.6 cm^{-1} به دست داده است [۶]، می‌توان استنباط کرد که نقش طول کانال لیزرهای N_2 با تحریک عرضی، ممکن است در ضریب بهره بسیار مؤثر باشد. این تأثیر باید شبیه به رفتار غیرعادی g_0 در لیزر N_2 با تحریک طولی بر حسب طول تقویت‌کننده باشد که قبلاً آن را گزارش داده‌ایم [۸].

در گزارشی که ارائه می‌شود، اندازه‌گیری پارامترهای لیزر g_0 و E_s با استفاده از یک نوسانگر-تقویت‌کننده لیزر N_2 با پیش‌یونش کورونا و به طول مؤثر کانال تقویت‌کننده برابر با ۳۱ cm برای گاز نیتروژن با درجه‌های خلوص متفاوت صورت گرفته است و نشان داده می‌شود که g_0 و E_s علاوه بر آنکه به

انرژی اشباع E_s است. به همین جهت باید روندی اتخاذ شود که موجب افزایش پارامتر E_s گردد تا بتوان خروجی قابل ملاحظه‌ای از لیزر دریافت کرد.

۲- شرح آزمایش

در این آزمایش از سیستم نوسانگر- تقویت کننده، که هر دو با پیش‌یونش کورونا فعال هستند استفاده شده است (شکل ۱). کلیات مربوط به نحوه عملکرد سیستم OSC-AMP به صورت تخلیه‌ی عرضی و طولی قبلاً در دو گزارش ارائه شده است [۶ و ۸]. در سیستم مورد بحث، بخش نوسانگر دارای الکترودهایی از جنس آلومینیوم به ضخامت ۶mm و طول ۱۹cm، و فاصله الکترودها از صفحه کورونا ۱۰mm است. الکترودها در یک لوله نیم‌استوانه‌ای از جنس پلکسی گلاس به قطر ۱۲cm که دو انتهای آن با پنجره‌های سلیکای مذاب بسته شده قرار داده شده‌اند. گاز نیتروژن از بالای محفظه وارد و از دو طرف دیگر آن خارج می‌شود. بخش تقویت کننده، سیستم بزرگتری است که امکان تغییر دادن فاصله الکترودها را دارد. طول کلی الکترودها ۳۴cm، طول مؤثرشان ۳۱cm و ضخامتشان ۱۰mm است که لبه‌های آنها به صورت مدور ساییده شده‌اند. فاصله سطح الکترودها از سطح کورونا ۳۵mm است. هنگامی که این سیستم به صورت نوسانگر کار می‌کند، نشان داده‌ایم که به علت فاصله سطح



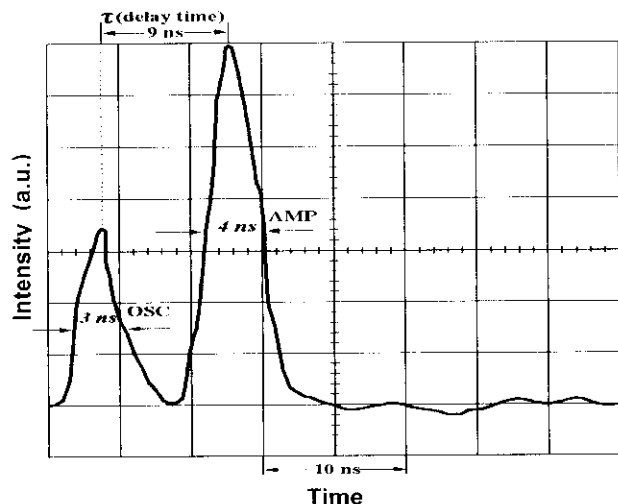
شکل ۱- طرح نوسانگر- تقویت کننده لیزر نیتروژن با پیش‌یونش کورونا (ابعاد شکل بر حسب mm است).

فشار گاز N_2 بستگی دارند، نسبت به درجه خلوص گاز به کار رفته و تمیز بودن الکترودها نیز حساسند. این حساسیت با درجه کمتری در پارامتر g_0 و با درجه بیشتری در پارامتر E_s نمایان می‌شود. با افزایش درجه خلوص گاز، انرژی خروجی لیزر افزایش می‌یابد، و این افزایش شامل پارامتر E_s نیز خواهد بود و همچنین، استفاده از گاز با درجه خلوص بالا و الکترودهای تمیز شده، کاهش پارامتر g_0 را به همراه خواهد داشت.

نتایج اندازه‌گیری به صورت نمودار و جدول ارائه شده‌اند و در نهایت ضریب بهره اندازه‌گیری شده با استفاده از سایر گزارش‌های منتشر شده برحسب طول کانال لیزر ترسیم شده است. این ترسیم نشان می‌دهد، در لیزرهای N_2 که در برگریخته سایر لیزرهای خودپایاندار نیز می‌باشد، g_0 به شدت به طول کانال لیزر بستگی دارد. نمودار g_0 پس از گذر از یک ماکزیموم به شدت افت می‌کند و درجه خلوص گاز در گستره ۷۰-۱۱۰ تور تنها موجب تغییراتی در حد بیشینه به مقدار ۳۹٪ می‌شود. در حالی که تغییرات فشار گاز در گستره ۷۰-۱۱۰ تور از نوع بسیار خالص تحقیقاتی، تنها به مقدار ۲۶٪ نسبت به بالاترین مقدار g_0 ، در تغییرات آن سهم است. با استفاده از داده‌های موجود می‌توان دریافت که مقدار تغییرات g_0 ناشی از کاربرد دو لیزر با کانال‌های متوسط و بلند حدود ۷۵٪ می‌باشد؛ یعنی در واقع نقش اصلی در تغییرات ضریب بهره، مرتبط با انتخاب طول کانال لیزر است. بنابراین می‌توان ادعا کرد که یکی از رقابت‌های تحقیقاتی مرتبط با ارائه بالاترین مقدار ضریب بهره، به علت بستگی g_0 به طول کانال، دستخوش تحول خواهد شد. چون در کلیه اندازه‌گیری‌های چگالی انرژی خروجی E_0 برحسب فشار گاز، افزایش تدریجی در E_0 مشاهده می‌شود که پس از گذر از یک مقدار بیشینه رو به اف‌ت می‌رود، به طوری که چگالی توان را می‌توان از رابطه $P_d = \frac{1}{2} E_s g_0 / \tau$ به دست آورد که در آن τ پهنای تپ لیزری است [۸]، بنابراین با توجه به تغییرات نسبتاً کند g_0 ، تغییرات E_0 کم و بیش از تغییرات E_s تبعیت می‌کند و بیشینه تغییرات E_s ناشی از کاربرد گاز با درجه‌های خلوص متفاوت است و در گستره ۷۰-۱۱۰ تور، حدود ۵۷٪ می‌باشد. بنابراین در مورد لیزری با طول کانال مفروض، مهمترین عامل که ممکن است در خروجی لیزر نقش اساسی داشته باشد چگالی



برای ایجاد پالس‌های لیزری از نوسانگر و تقویت کننده، از یک فوتو دایود خلاء با زمان صعود 100 ps (JTL، مدل TF 1850) و یک اسیلوسکوپ تکترونیکس مدل 7904 با واحد Plug in، 7A19 همراه با صافی‌های تضعیف کننده نوری استفاده شد. رویهمرفته تأخیر زمانی مناسب به وسیله فشار گاز OSC و AMP، طول مسیر اپتیکی و یا تغییر فاصله الکترودها حاصل می‌شود. در آزمایش انجام گرفته، فاصله الکترودهای OSC ثابت و 5mm در نظر گرفته شد. با آنکه فاصله الکترودهای AMP بین 3 تا 10 میلی‌متر قابل تغییر بود در آزمایش فعلی این فاصله 7 mm انتخاب شد. برای اندازه‌گیری چگالی انرژی، یک فوتو دایود کالیبره شده در طول موج 337 nm بکار رفت. برای کالیبره کردن، یک کالریمتر دیسکی «Scientech، Model 360001» همراه با نمایشگر «Scientech Model 1362» مورد استفاده قرار گرفت. ضریب تضعیف صافی‌های تضعیف کننده که برای تغییر دادن انرژی ورودی به تقویت کننده به کار می‌روند نیز در طول موج 337 nm کالیبره شدند. شکل 2 پالس لیزری را که از خروجی تقویت کننده و نوسانگر دریافت شده است نشان می‌دهد. برای دریافت این پالس، خروجی از OSC توسط یک تیغه نازک مقسم پرتو که سر راه باریکه قرار می‌گیرد همراه با صافی‌های ND وارد آشکارساز فوتو دایود خلاء گردید. خروجی از AMP را نیز توسط چند آینه و صافی‌های ND وارد آشکارساز کردیم. تأخیر زمانی این دو پالس، با انتخاب مسیر دو باریکه برابر 9 ns انتخاب شد. پهنای پالس نوسانگر 3 ns و پهنای پالس تقویت کننده 4 ns در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۲- پالس‌های لیزری دریافت شده از خروجی نوسانگر و تقویت کننده با پهنای 3 و 4 نانوثانیه و با 9 ns تأخیر.

الکترودها از سطح کورونا، پیش‌یونشی با قدرت ضعیف داریم. با وجود این، سیستم قادر است تا فشار 1 atm کار کند [4]. گاز نیتروژن در این سیستم نیز از بالای محفظه مکعب مستطیلی شکل دربرگیرنده مجموعه الکترودها وارد و از دو طرف محفظه خارج می‌شود. تغذیه هر دو سیستم به وسیله یک مدار چاپی «مدار بولوملین» به ابعاد کلی $44 \times 93 \text{ cm}^2$ که به دو قسمت $24 \times 43 \text{ cm}^2$ برای نوسانگر و $44 \times 50 \text{ cm}^2$ برای تقویت کننده تقسیم شده است، همراه با یک گاف جرقه‌زن (SG)، یک سیستم تریگر و یک منبع تغذیه HV انجام می‌گیرد. جریان سطحی کورونا با برداشتن دو نوار مسی به پهنای 23mm در بخش نوسانگر و 30mm در تقویت کننده حاصل می‌شود. با این ترتیب، سیستم مورد بحث OSC-AMP برای ذخیره انرژی دارای سه خازن خواهد بود که ظرفیت‌های آنها 2/70، 0/63 و 3/45 نانوفاراد می‌باشد. ولتاژ کاری هر دو سیستم که از یک منبع تغذیه تأمین می‌شود، 14 kV انتخاب شده است و در تمام مدت آزمایش ثابت می‌ماند. برای قرائت فشار کاری دو سیستم OSC و AMP از دو فشارسنج جیوه‌ای استفاده می‌شد که توسط یک فشارسنج نوع Baratron, MKS 220 BA، وضعیت هر دو سیستم در فشار پایین کنترل می‌شد. به علت استفاده از لوله‌های پلاستیکی به منظور انتقال و تخلیه گاز نیتروژن، همچنین استفاده از پلیکسی گلاس در ساخت محفظه‌ها و اتصالات، حد پایین فشار گاز سیستم حدود 2 تا 3 تور بوده است. با اندازه‌گیری‌های انجام گرفته می‌توان پیش‌بینی کرد که، با کوتاه کردن طول لوله‌های تخلیه و تزریق گاز، همچنین بهینه‌سازی محفظه لیزرها به لحاظ جنس، اتصال قطعات به یکدیگر و اتصال آنها به صفحه مدار چاپی، امکان دارد سیستم را به خلاء کاملاً بالا برده، تا چگالی انرژی اشباع به مقادیر بیشتری افزایش یابد.

۳- نتایج اندازه‌گیری

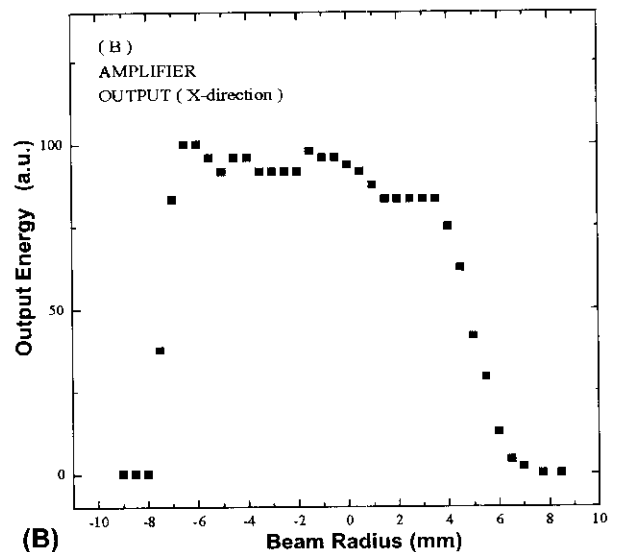
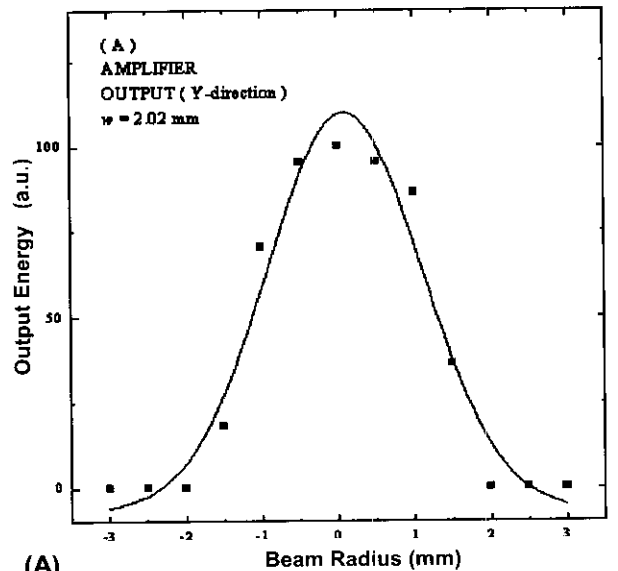
روش به کار رفته در اندازه‌گیری پارامترهای لیزری: ضریب تقویت و چگالی انرژی اشباع قبلاً در دو مقاله گزارش شده است [6 و 8]. در این اندازه‌گیری، تعیین رفتار زمانی پالس‌های نوسانگر و تقویت کننده لیزر در به دست آوردن بهترین شرایط تقویت در ناهمزمان سازی الکتریکی دو پالس، و اندازه‌گیری چگالی انرژی ورودی به تقویت کننده و خروج از آن نیاز است.



مرتبط با توزیع شدت، مقدار شعاع پرتو $w_{2y} = 2/0.2 \text{ mm}$ در مکانی که صفحه فوتو دایود همراه با روزنه قرار داده شده است و فاصله آن از خروجی AMP، $d = 143 \text{ cm}$ است به دست می‌آید. با اندازه‌گیری واگرایی باریکه لیزر در امتداد y ، $w_{1y} = w_{2y} - \theta_y(z_2 - z_1)$ رابطه از استفاده از رابطه $d = z_2 - z_1 = 143 \text{ cm}$ است، $w_{1y} = 1/133 \text{ mm}$ به دست می‌آید. برای امتداد x ، نیز با توجه به واگرایی اندازه‌گیری شده $\theta_x = 2/4$ میلی رادیان و رابطه $w_{1x} = w_{2x} - \theta_x(z_2 - z_1)$ مقدار $w_{1x} = 5/07 \text{ mm}$ و اندازه‌گیری $w_{2x} = 9 \text{ mm}$ خواهد شد. به این ترتیب، سطح مقطع خروجی از AMP: $A_0 = 2 w_{1x} w_{1y} = 0/126 \text{ cm}^2$ چگالی انرژی از رابطه $E_0 = \frac{\epsilon_0}{A_0}$ به دست می‌آید که ϵ_0 انرژی خروجی از تقویت کننده است. سطح مقطع باریکه ورودی به تقویت کننده با روش هندسی، مقدار $A_i = 0/18 \text{ cm}^2$ را به دست می‌دهد و چگالی انرژی ورودی به تقویت کننده از رابطه $E_i = \frac{\epsilon_i}{A_i}$ به دست می‌آید که ϵ_i انرژی باریکه ورودی OSC به بخش تقویت کننده است.

برای اندازه‌گیری ضریب بهره، چگالی‌های انرژی ورودی به تقویت کننده و خروجی از آن (E_0 و E_i) می‌باید اندازه‌گیری شوند. نمونه‌ای از این اندازه‌گیری در فشار ۱۱۰ تور نوسانگر و ۱۰۰ تور تقویت کننده در شکل ۴ ارائه شده است. این اندازه‌گیری در ولتاژ کاری 14 kV و رگبار لیزری 10 Hz انجام گرفته است. در شکل ۵ نتایج همان اندازه‌گیری شکل ۴ به صورت بهره G برحسب دسی‌بل (dB)، با استفاده از تعریف $10 \log(E_0/E_i)$ ، برحسب لگاریتم چگالی انرژی ورودی E_i نشان داده شده است. ترسیم اخیر، به منظور مشاهده رفتار بهره در انرژی‌های پایین ورودی به تقویت کننده ارائه شده است. نمودارها در هر دو شکل حاصل از برازش رابطه ساده شده فرانتز-نادویک [۱۱] به داده‌های تجربی چگالی‌های انرژی می‌باشند [۶، ۷ و ۸] و به طریق موفقیت‌آمیزی در مورد لیزرهای گازی که طول مدت پالس ورودی آنها کوتاه‌تر از طول عمر تراز بالایی محیط لیزری می‌باشد به کار رفته است [۱۲ و ۱۳]. در تقریب فرانتز-نادویک، فرض بر این است که فرایندهای تبادل انرژی در محیط لیزری، وقت کافی نخواهد داشت که در طول مدت پالس و بر همکنش

برای تعیین توزیع شدت باریکه لیزر در خروجی از OSC و AMP، از روش روبش یک روزنه (به قطر $700 \mu\text{m}$) که در مقابل فوتو دایود قرار داده شده بود، استفاده شد. به تجربه نیز دریافتیم که روش هندسی که با ترسیم خروجی لیزر روی یک صفحه مدرج و تعیین مساحت آن انجام می‌گیرد دارای دقت کافی می‌باشد. شکل ۳ شدت خروجی لیزر از AMP را در دو امتداد x (افقی) و y (عمودی) نشان می‌دهد. در امتداد y (شکل ۳A) توزیع شدت به صورت تابع گاوسی است، لیکن در امتداد x توزیع تابع تقریباً حالت یک شبه مستطیلی دارد (شکل ۳B). با برازش تابع $\epsilon(y) = \epsilon(0) \exp(-2y^2/w_y^2)$ به داده‌های



شکل ۳- نتایج اندازه‌گیری حاصل از روبش یک فوتو دایود با روزنه‌ای به قطر $700 \mu\text{m}$ که در مقابل خروجی AMP و در فاصله $d = 143 \text{ cm}$ از آن قرار می‌گیرد. نمودار (۳A) در امتداد y و (۳B) در امتداد x توزیع شدت خروجی AMP را نشان می‌دهد.

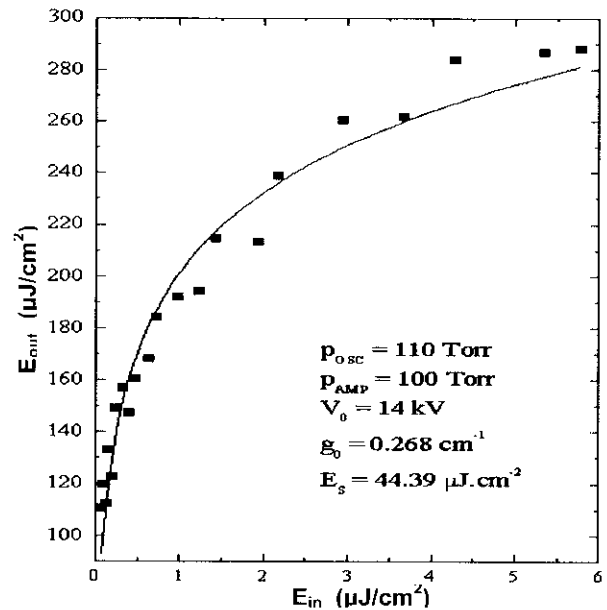


عمری حدود ۴۰ ns دارد، رابطه فرانتز - نادویک دارای اعتبار می‌باشد و قبلاً هم این رابطه را در فشارهای گاز خیلی پایین گاز نیتروژن حدود ۵-۴ تور که فرایند غالب در پهن‌شدگی خط از نوع دوپلری است، به کار برده‌ایم [۷ و ۸].

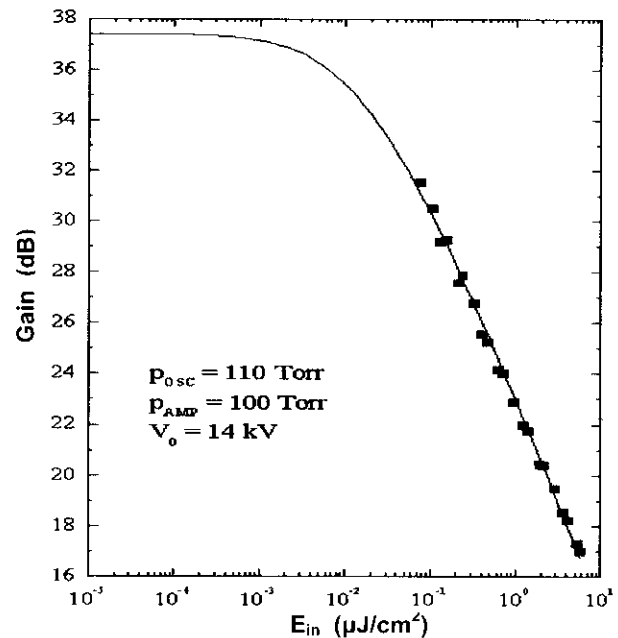
نتایج اندازه‌گیری‌های E_0 و E_s ، g_0 برای هر سه آزمایش در شرایط بکار رفته در جدول ۱ مندرج است. فشار نوسانگر ۱۱۰ تور و ثابت بوده و در مورد تقویت‌کننده، فشارهای گاز ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ تور انتخاب شده است. برای مقایسه اعداد جدول سه دسته نمودار ارائه کرده‌ایم که شامل ۲ پارامتر لیزری (g_0 و E_s) و چگالی انرژی خروجی E_0 برحسب فشار گاز AMP است. در هر سه آزمایش، ضریب بهره g_0 در گستره فشار ۷۰ تا ۱۱۰ تور تقویت‌کننده، روند صعودی داشته است؛ چگالی انرژی اشباع E_s ابتدا مقداری ثابت داشته، سپس در فشارهای بالاتر سقوط کرده است. چگالی انرژی دریافت شده از تقویت‌کننده ابتدا روند صعودی داشته، اما بعد از عبور از بیشینه‌ای حدود ۹۰ تا

جدول ۱ - نتایج اندازه‌گیری E_0 ، E_s ، g_0 برای سه آزمایش با شرایط مختلف.

استفاده از گاز N_2 با درجه خلوص تحقیقاتی (Air Product) با الکترودهای نظافت شده AMP $P_{OSC} = 110 \text{ torr}$ (C)	استفاده از گاز N_2 با درجه خلوص تحقیقاتی (Air Product) با الکترودهای کارکرده $P_{OSC} = 110 \text{ torr}$ (B)	استفاده از گاز N_2 با درجه خلوص تجاری (شرکت سیلان شمالی) $P_{OSC} = 110 \text{ torr}$ (A)
$P_{AMP} = 70 \text{ torr}$ $g_0 = 0.196 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 43.36 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 183.7 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 70 \text{ torr}$ $g_0 = 0.235 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 36.69 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 196.93 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 70 \text{ torr}$ $g_0 = 0.26 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 30.19 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 196.92 \mu\text{J.cm}^{-2}$
$P_{AMP} = 80 \text{ torr}$ $g_0 = 0.235 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 43.43 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 237.24 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 80 \text{ torr}$ $g_0 = 0.252 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 38.14 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 213.82 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 80 \text{ torr}$ $g_0 = 0.28 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 29.99 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 213.18 \mu\text{J.cm}^{-2}$
$P_{AMP} = 90 \text{ torr}$ $g_0 = 0.245 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 44.63 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 252.02 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 90 \text{ torr}$ $g_0 = 0.272 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 37.08 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 252.45 \mu\text{J.cm}^{-2}$	—
$P_{AMP} = 100 \text{ torr}$ $g_0 = 0.268 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 44.39 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 287.84 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 100 \text{ torr}$ $g_0 = 0.273 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 35.69 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 234.3 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 100 \text{ torr}$ $g_0 = 0.32 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 25.93 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 234.28 \mu\text{J.cm}^{-2}$
$P_{AMP} = 110 \text{ torr}$ $g_0 = 0.267 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 36.18 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 259.7 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 110 \text{ torr}$ $g_0 = 0.292 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 22.49 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 172.88 \mu\text{J.cm}^{-2}$	$P_{AMP} = 110 \text{ torr}$ $g_0 = 0.32 \text{ cm}^{-1}$ $E_s = 19.07 \mu\text{J.cm}^{-2}$ $E_0 = 172.85 \mu\text{J.cm}^{-2}$



شکل ۴ - چگالی انرژی خروجی از تقویت‌کننده برحسب ورودی به آن در مقیاس خطی. طول مؤثر الکترودهای تقویت‌کننده ۳۱ cm و طول کلی آن ۳۴ cm و فاصله بین آن دو الکتروده ۷ mm است.

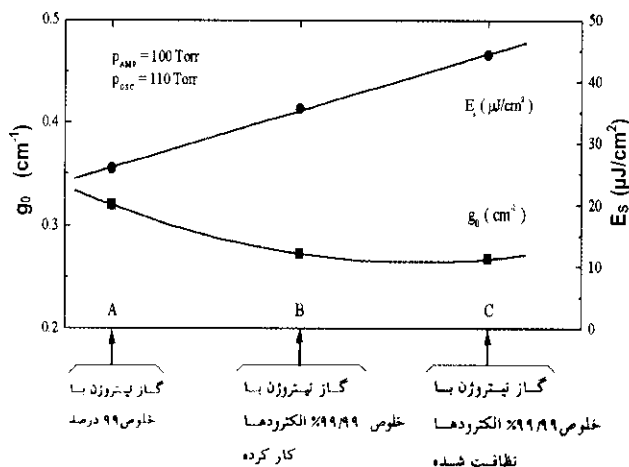


شکل ۵ - بهره بر حسب $10 \log(E_0/E_i)$ dB با استفاده از داده‌های تجربی شکل ۴.

مولکولی، بر مشخصه‌های عمل تقویت تأثیر گذار باشند. از طرف دیگر، اگر طول مدت پالس ورودی به تقویت‌کننده بلندتر از طول عمر تراز بالایی محیط لیزری باشد رابطه حالت «مانا» که برای گذارهای پهن شده همگن معتبر است به کار خواهد رفت. در مورد لیزر نیتروژن، به علت آن که طول مدت پالس ورودی به تقویت‌کننده معمولاً ۲ تا ۵ نانوثانیه است و تراز بالایی طول

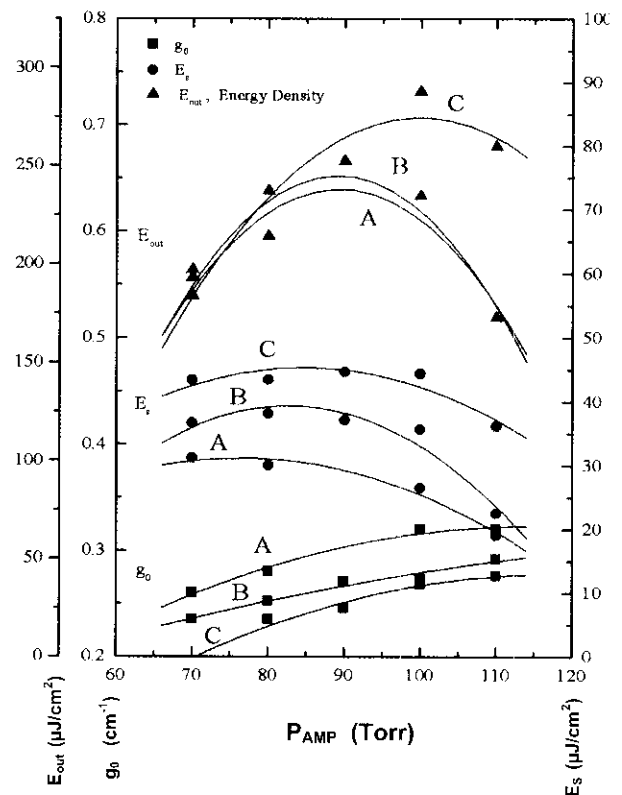
اولیه‌اش خواهد رسید. در واقع تمیز بودن الکترودها و بکار بردن گاز ناخالص، چگالی انرژی اشباع را تا ۴۰٪ مقدار اولیه‌اش کاهش می‌دهد. اثر عدم نظافت الکترودها بر ضریب بهره، افزایشی به مقدار ۱/۹٪ مقدار اولیه‌اش را نشان می‌دهد که نسبتاً جزئی است، لیکن هنگامی که الکترودها تمیز نباشند و از گاز تجاری دوبار تخلیص شده نیز استفاده شود، مقدار افزایش قابل ملاحظه و به حدود ۱۹/۴٪ مقدار اولیه‌اش خواهد رسید ($g_0 = 0.32 \text{ cm}^{-1}$). در این حالت کاهش چگالی انرژی ۱۸/۶٪ مقدار اولیه‌اش است. خلاصه این نتایج در شکل ۷ آورده شده است.

اکنون اعداد به دست آمده را با چند موردی که مرتبط با گزارش‌های اخیر است مقایسه می‌کنیم. Decchio و همکارانش ضریب بهره را 0.277 cm^{-1} (در فشار ۵۶ تور) و 0.207 cm^{-1} (در فشار ۷۷ تور) برای لیزری به طول کانال ۴۵ cm گزارش کرده‌اند [۹]. چگالی انرژی آنها در این فشارها ۱۰۴/۶ و ۱۳۸/۸ میکروژول بر سانتی‌متر مربع است و علت آن ولتاژ کاری بالاتر (16.5 kV) می‌باشد. نتایج آزمایش Serafetnides و همکارانش در اتمسفر (760 تور) مقادیر g_0 و E_s را به ترتیب 0.22 cm^{-1} و $54/55 \mu\text{Jcm}^{-2}$ برای طول کانال ۵۰ cm و ولتاژ ۲۰ kV نشان می‌دهند [۱۰]. در کارهای منتشر شده اخیرمان، برای طول کانال ۹۴ cm، در فشارهای ۶۳، ۳۹ و ۵۴ تور تقویت کننده به ترتیب اعداد 0.64 cm^{-1} ، 0.64 cm^{-1} و 0.68 cm^{-1} و چگالی‌های انرژی $65 \mu\text{Jcm}^{-2}$ و ۴۲ و ۲۵ به دست آمده است [۶]. نتایج اندازه‌گیری Jitsuno (0.5 cm^{-1} و $600 \mu\text{Jcm}^{-2}$)، [۶] با استفاده از ۶ مرحله تقویت چه در مقدار ضریب بهره و چه



شکل ۷- تغییرات g_0 و E_s بر حسب نوع و درجه خلوص گاز نیتروژن.

۱۰۰ تور، روند نزولی را پیموده است. این نمودارها در شکل ۶ آورده شده‌اند. نمودارهای A در این شکل مربوط به وضعیتی است که از گاز نیتروژن تجاری استفاده شده است (درجه خلوص حدود ۹۹٪). در نمودارهای B نوع گاز تغییر داده شده و گاز خلوص تحقیقاتی (با درجه خلوص ۹۹/۹۹۹٪) را جایگزین کرده‌ایم؛ در نمودارهای C از همان گاز تحقیقاتی استفاده شده است، لیکن الکترودها را کاملاً صیقلی و تمیز کرده‌ایم به نحوی که سطح الکترودها عاری از هر گونه نشست‌های ناشی از اکسید شدن فلز باشد. نتایج اندازه‌گیری در گستره فشارهای کاری روندی شبیه به یکدیگر داشته‌اند. فشار بهینه تقویت کننده در مقابل فشار ثابت ۱۱۰ تور نوسانگر، ۱۰۰ تور است. با توجه به ستون سوم (C) جدول ۱، در این وضعیت $E_s = 44/39$ میکروژول بر سانتی‌متر مربع است. با توجه به ستون‌های (B) و (C) جدول ۱ می‌بینیم که با تمیز نکردن الکترودها مقدار سقوط E_s به ۱۹/۶٪ مقدار اولیه‌اش می‌رسد؛ همچنین با تمیز نکردن الکترودها و استفاده از گاز تجاری این سقوط به ۴۱/۶٪ مقدار



شکل ۶- تعیین مقادیر g_0 ، E_s و E_{out} بر حسب فشار: (A) در تقویت کننده گاز تجاری با دوبار تخلیص به کار برده شده و الکترودهای نظافت شده، (B) گاز با درجه خلوص بالا (Air Product) و الکترودهای نظافت نشده؛ (C) درجه خلوص گاز بالا و الکترودهای نظافت شده.



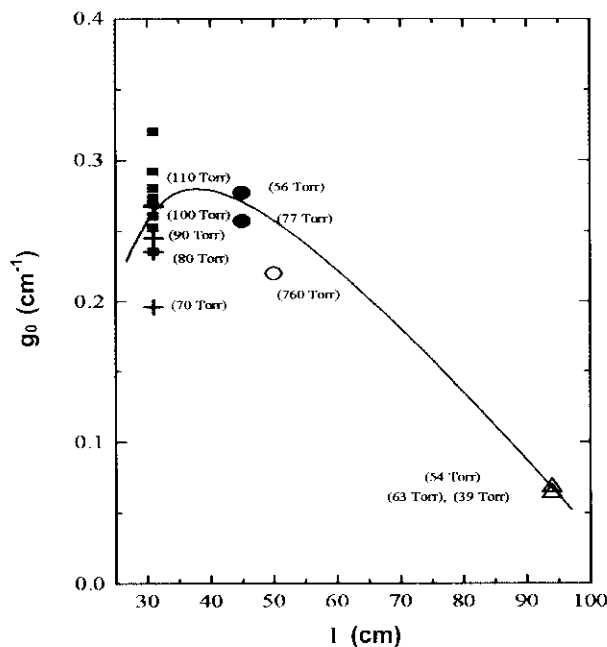
می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب طول کانال بلند سبب می‌شود که ضریب بهره حاصل بسیار زیادتر از هنگامی باشد که از گاز با درجه خلوص متفاوت استفاده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار پژوهشی، اثر درجه خلوص گاز در یک لیزر نیتروژن و تمیز کردن الکترودها، با استفاده از ترکیب OSC-AMP روی دو پارامتر لیزری: ضریب بهره و چگالی انرژی اشباع، مورد مطالعه تجربی قرار گرفت و نشان داده شد که بهترین شرایط کاری لیزر به لحاظ انرژی خروجی زمانی حاصل می‌شود که الکترودها کاملاً تمیز شده باشند و گاز نیتروژن هم با درجه خلوص بالا به کار برده شود. در این صورت، چگالی انرژی اشباع بالاترین مقدار را خواهد داشت. استفاده از گاز N_2 با درجه خلوص تجاری باعث افت خروجی لیزر و در نهایت افت چگالی انرژی اشباع خواهد شد. از طرف دیگر، ضریب بهره کمترین مقدار خود را هنگامی خواهد داشت که الکترودهای AMP کاملاً نظافت شده و از گاز نیتروژن خالص استفاده شده باشد. در این آزمایش در واقع اثرهای عوامل خارجی (نوع گاز و نظافت الکترودها) را روی دو پارامتر لیزری g_0 و E_s بررسی کرده‌ایم. بدیهی است سایر عوامل، از جمله تغییرات امپدانس سیستم، اضافه کردن گازهای کمکی و نظایر آن اثرهایی خواهد داشت که مشاهده آنها در شناخت سازوکار عملکرد لیزر حائز اهمیت است.

علاوه بر این، نشان دادیم که ضریب بهره بستگی زیادی به طول کانال لیزر دارد و شاید بتوان گفت که در ولتاژ ۱۴ kV، طول بهینه برای این کانال حدود ۳۰ cm است. نمودار به دست آمده از نتایج اندازه‌گیری‌های مرتبط با چهار طول کانال متفاوت که دو مورد آن مربوط به گزارش سایر پژوهشگران می‌باشد نیز ارائه شده است. به طوری که منحنی نشان می‌دهد تغییرات ضریب بهره نسبت به طول کانال لیزر بسیار بزرگتر از تغییرات ناشی از استفاده از گاز با درجات خلوص متفاوت است؛ در واقع طول کانال، نقش اساسی در ضریب بهره لیزرهای نیتروژن دارد.

در انرژی اشباع با سایر اندازه‌گیری‌ها در توافق نیست و مقادیر بالاتر گزارش آنها احتمالاً مرتبط به اعمال تقویت‌های متوالی در نوسانگر-تقویت کننده می‌باشد. با نمایش ترسیمی اعداد مرتبط با ضریب بهره اندازه‌گیری شده در گزارش اخیر به طول مؤثر کانال ۳۱ cm و سایر اندازه‌گیری‌ها به جز مرجع [۱۴]، نمودار شکل ۸ حاصل شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش طول کانال، ضریب بهره به شدت کاهش می‌یابد. داده‌های اندازه‌گیری g_0 قابل اعتمادی که بتوان مقادیر آن را در طول‌های کوتاه‌تر از ۳۱cm استخراج کرد در دسترس نیست، ولی در مقایسه با اندازه‌گیری ضریب بهره در لیزر N_2 با تحریک طولی می‌توان استنباط کرد که g_0 در لیزرهای نوع TE و یا TEA با افزایش طول کانال لیزر ابتدا روند صعودی داشته و پس از گذر از یک بیشینه، به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۱ و با استفاده از داده‌های مرتبط با فشار ۱۰۰ تور تقویت کننده مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار تغییرات، هنگامی که از گاز تجاری استفاده می‌شود، برای ضریب بهره ۱۹٪ است، در حالی که برای دو کانال به طول‌های ۳۱ و ۹۴ سانتی‌متر اختلاف به ۷۵٪ می‌رسد؛ بنابراین،



- Docchio et al.[9]
- Serafetinides et al.[10]
- △ Hariri et al.[6]
- + This work, for pure gas and cleaned electrodes
- corresponds to different gas purities in this work

شکل ۸- ضریب بهره (g_0) برحسب طول کانال لیزر. اعداد داخل پرانتز در شکل مرتبط با فشار گاز در عملکرد لیزر می‌باشند.



References:

1. A. Hariri, M. Tarkashvand, F. Ardavani, A. A. Yaraghchi, "Experimental investigation of the TE (Transversely Excited) N₂-Laser", *Scien. Bull. of the AEOI*, **3**, 62-79 (1983).
2. A. Hariri, M. Tarkashvand, A. Karami, "Uniform glow discharges for nano-second excitation of TEA and TE N₂ laser", *Proceedings of National Conference on Lasers and Their Applications*, 12-16, Sep. (1987), Tehran, Iran, edited: A. Hariri.
3. A. Hariri, S.A. Golpayegani, M. Nayeri, "Long pulse operation of a longitudinally discharge-pumped N₂-laser", *Sci. Bull. Of AEOI*, **9**, 33-41 (1989).
4. A. Hariri, M. Tarkashvand, A. Karami, "Corona-preionized nitrogen laser with variable pulse-width", *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 1408-1412 (1990).
5. S. Ghoreyshi, A. H. Farahbod, A. Hariri, "Experimental investigation of self-filtering unstable resonator in a longitudinally excited nitrogen laser", *J. of Nuclear Sci. and Tech.* **25**, 1-8 (2002).
6. A. Hariri, M. Tarkashvand, A. H. Farahbod, "Experimental study of an oscillator-amplifier transversely excited nitrogen laser", *J. of Nuclear Sci. and Tech.* **29**, 17-24, (2003).
7. S. Ghoreyshi, K. Rahimian, A. Hariri, "Double-pass amplification in a longitudinally excited low pressure N₂-laser", *Proceedings of International Conference on Physics* 427-432, January 6-9 (2004) Tehran, Iran.
8. S. Ghoreyshi, K. Rahimian, A. Hariri, "Gain and saturation energy measurements in low pressure, longitudinally excited N₂-laser", *Opt. Commun.* **238**, 139-149 (2004).
9. F. Docchio, V. Magni, R. Ramponi, "Thyratron-switched N₂ atmospheric-pressure oscillator, low pressure amplifier laser system", *Rev. Sci. Instrum.* **55**, 477-481 (1984).
10. A. A. Serafctinides, G. N. Tsirikas, "A semiconductively preionised TEA nitrogen oscillator-amplifier laser system", *Opt. Commun.* **79**, 448-454 (1990).
11. L. M. Frantz, J. S. Nodivk, "Theory of pulse propagation in a laser amplifier", *J. Appl. Phys.* **34**, 2346-2348 (1963).
12. J. Banic, T. Efthimiopoulos, B. P. Stoicheff, "Gain and saturation intensity measurements of mode-locked KrF oscillator-amplifier", *Appl. Phys. Lett.* **37**, 686-688 (1980).
13. T. Jitsuno, "A multi-stage TEA N₂ laser", *J. Phys. D : Appl. Phys.* **13**, 1405-1411 (1980).
14. T. Jitsuno, "A multi-stage TEA N₂ laser", *J. Phys. D : Appl. Phys.* **13**, 1405-1411 (1980).