

گزارش ویژه علمی و فنی ساخت لیزر هوا در فشار اتمسفر

خلاصه

محمد رضا رضایی رایبی نژاد^۱علیرضا بهرام پور^۲^۱دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی، کرمان
^۲پروفسور دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریفنویسنده مسئول: محمدرضا رضایی رایبی نژاد، کرمان، بزرگراه هفت
باغ، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان، تلفن: ۰۳۴۱۳۳۲۰۴۴۴
پست الکترونیک: mohammadreza45@gmail.com

واژه‌های کلیدی: لیزر نیتروژن، لیزر هوا

گاز نیتروژن مورد استفاده در لیزرهای نیتروژن باید از درصد خلوص بسیار بالایی برخوردار باشد. گازهایی مانند اکسیژن عمل لیزر را سریعاً متوقف می‌کنند. نزدیک به ۲۳ درصد هوا را اکسیژن و ۷۴ درصد نیتروژن تشکیل می‌دهد. به‌علت زیاد بودن اکسیژن در هوا عمل لیزر در فشار اتمسفر عملاً غیرممکن است. عمل لیزر در هوا در فشارهای خیلی کم گزارش شده است. هدف این تحقیق دستیابی به عمل لیزر در هوا و در فشار اتمسفر است. با ساخت لیزر TEA N₂ کاملاً بهینه‌سازی شده اثر اکسیژن، مورد مطالعه دقیق قرار گرفته است. نتیجه به‌دست آمده ساخت لیزر TEA Air است که قادر است با استفاده از هوا در فشارهای مختلف نیز کار کند.

مقدمه

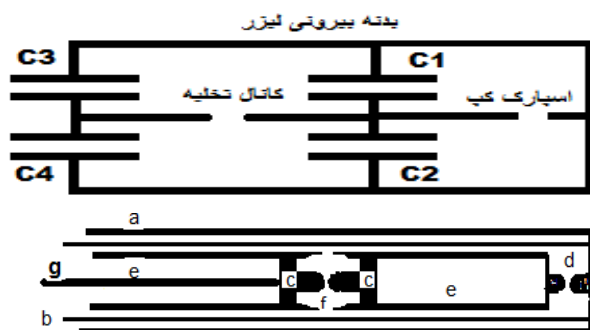
تخلیه الکتریکی در لیزرهای گازی به دو صورت عرضی و طولی انجام می‌پذیرد. در تخلیه عرضی میدان الکتریکی اعمال شده عمود بر جهت انتشار نور لیزر (TE) است درحالی‌که در تخلیه طولی هم‌راستا می‌باشد (LE)^۱.

اگر تخلیه عرضی در فشار اتمسفر انجام گیرد به اختصار به آن TEA^۲ و اگر تخلیه طولی در فشار اتمسفر صورت گیرد به آن LEA^۳ گفته می‌شود. در عمل به علت کم‌بودن ولتاژ کاری لیزرهای گازی با تخلیه عرضی، هزینه ساخت آن‌ها کمتر از لیزرهای با تخلیه طولی است. اولین لیزر عرضی نیتروژن در فشار اتمسفر (TEA N₂) در سال ۱۹۷۲ ساخته شده است. در این لیزر طراحی مدار الکتریکی و کانال تخلیه از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق سعی شده است تا با مطالعه اثر اکسیژن به‌صورت تئوری و تجربی بر لیزر TEA N₂ امکان ساخت لیزر هوا در فشار اتمسفر (TEA Air laser) جهت کاربردهای مختلف بررسی شود.

مراحل ساخت لیزر هوا:

لیزر هوا نوعی لیزر نیتروژن با تخلیه عرضی است. این لیزر از چهار خازن تخت که یکی از صفحات آن‌ها به‌صورت مشترک به‌هم وصل شده، ساخته شده است. این صفحات بدنه بیرونی لیزر را تشکیل می‌دهند. صفحات دیگر خازن‌ها دو به دو به دو الکترود آلومینیومی

متصل شده است. تخلیه یکنواخت با عمل کردن اسپارک گپ قرار داده شده بین دو خازن و بدنه بیرونی لیزر و در فضای بین الکترودها شروع می‌شود. سیستم پیش‌یونش‌کننده مناسبی که در فضای داخلی الکترودها تعبیه شده است به ایجاد تخلیه یکنواخت کمک می‌کند. برای دستیابی به عمل لیزر در هوا با تعبیه میله‌های کنترل‌کننده، بعضی از پارامترهای کانال تخلیه را می‌توان از بیرون تغییر داد. شماتیکی از لیزر هوای ساخته شده به‌صورت زیر است (شکل ۱).



شکل ۱: شماتیکی از لیزر هوا، الف) صفحه بالایی خازن، ب) دی الکتریک، ج) الکترودهای لیزر، د) اسپارک گپ، ه) صفحات پایینی خازن، و) سیستم پیش‌یونش‌کننده UV، ز) میله تنظیم‌کننده الکترودها

لیزر هوا شامل قسمت‌های زیر است:

الف) الکترودهای اصلی تخلیه:

^۱ Transverse Excitation^۲ Longitude Excitation^۳ Tansverse Excitation Atmospheric^۴ Atmospheric Excitation Longitude

در ساخت لیزر مناسب‌ترین دی‌الکتریک، فیلم رادیولوژی تشخیص داده شده است. برای جلوگیری از جرقه‌های ناخواسته و مخرب، هر دو طرف دی‌الکتریک به روغن HV آغشته شده است. از چهار صفحه آلومینیومی به ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد ۳۰×۲۵ سانتی‌متر مربع به‌عنوان چهار الکتروود از هشت الکتروود مورد نیاز برای چهار خازن مدار برانگیختگی استفاده شده است (شکل ۴).



شکل ۴: الکتروودهای خازن‌ها

اتصالات الکتروودهای خازن و الکتروودهای تخلیه باید طوری باشد که هیچ برجستگی ایجاد نشود به همین علت ضخامت ۳ میلی‌متر مناسب است (شکل ۵).



شکل ۵: اتصالات الکتروودهای خازن و الکتروودهای تخلیه

علاوه بر آن جهت تنظیم صفحات پیش‌یونش‌کننده که متصل به صفحات خازن‌اند با تعبیه شیارهای مناسبی روی چهار الکتروود، سیستم برای فاصله‌های مختلف پیش‌یونش‌کننده در فشارهای مختلف قابلیت تنظیم دارد. لبه صفحات باید گرد باشد تا تخلیه یکنواخت شود. دو صفحه از چهار صفحه آلومینیومی را به شکل سهمی ساخته‌ایم (شکل ۶).



شکل ۶: صفحه آلومینیومی خازن به شکل سهمی

برای ساخت الکتروودهای تخلیه اصلی از قوطی‌های توپر آلومینیومی به ابعاد ۳۵ × ۴ × ۴ سانتی‌متر مکعب استفاده شده است (شکل ۲) [۱].



شکل ۲: الکتروودهای اصلی تخلیه

در یک طرف الکتروودها شیارهایی برای ورود و خروج هوا تعبیه شده است. روی هر الکتروود ۳۰ سوراخ ریز وجود دارد. سوراخ‌ها باعث یکنواختی در جریان گاز می‌شوند و افت فشار در هر پالس را بران می‌کنند. مطالعه و ساخت این الکتروودها و تراش آن‌ها دو سال وقت برده است. جریان گاز در کانال عرضی است چون در حالت جریان عرضی توان لیزر در فرکانس‌های بالا از کارآیی بیشتری برخوردار است [۲]. قطر و تعداد سوراخ‌ها نیز در فرکانس‌های بالا مؤثر است [۳]. قطر سوراخ‌ها ۲ میلی‌متر می‌باشد و تعداد ۳۰ سوراخ در هر الکتروود تعبیه شده است چون در این حالت توان خروجی ماکزیمم است [۴]. پشت سوراخ‌ها را برای یکنواخت شدن جریان گاز به صورت ونتوری درآورده‌ایم. روی الکتروودها برآمدگی استوانه‌ای مانندی به شعاع ۱/۲ سانتی‌متر ایجاد شده است [۵].

ب) صفحات خازن:

برای دستیابی به توان ماکزیمم لازم است که ظرفیت خازن‌ها را بهینه کنیم. مطالعات نشان می‌دهد که ظرفیت خازن‌ها حداقل بایستی در حدود ۰/۷۵nF باشد (شکل ۳).



شکل ۳: خازن‌ها

از چهار نوع دی‌الکتریک به ابعاد ۳۵/۵×۶۵/۵ سانتی‌متر مربع استفاده شده است.

- فایبرگلاس به ضخامت ۱/۲ میلی‌متر
- فیبر استخوانی به ضخامت ۱/۲ میلی‌متر
- مایلر به ضخامت ۰/۱۲ میلی‌متر
- فیلم رادیولوژی به ضخامت ۰/۱۸ میلی‌متر

ج) سیستم پیش یونش مناسب:

مطالعات نشان می‌دهد که پیش‌یونش کرونا در طراحی و ساخت لیزرها مناسب‌تر است [۸]. در طراحی الکترودهای چهار خازن مورد نیاز برای تخلیه‌ی عرضی دوگانه (هم تخلیه‌ی اصلی هم تخلیه‌ی پیش یونش کننده)، سیستم پیش یونش مناسب طوری طراحی شده است که UV تابش‌شده از تخلیه‌ی کرونای سطحی متوجه مرکز لیزر باشد [۹]. در این صورت الکترون‌ها و یون‌های اولیه برای شروع تخلیه‌ی اصلی در سرتاسر فضای داخلی الکترودهای اصلی همزمان ایجاد می‌شود. فاصله‌ی بین الکترودهای پیش‌یونش‌کننده در صورتی که فاصله‌ی بین الکترودهای اصلی در حدود ۴ میلی‌متر باشد [۱۰]، باید در حدود ۱۱ میلی‌متر باشد تا توان خروجی ماکزیمم شود [۱۱].

د) اسپارک گپ:

با مطالعه‌ی انواع اسپارک‌گپ‌های مورد استفاده، اسپارک‌گپ P-GAP از کارایی نسبتاً خوبی برخوردار است [۱۲]. این اسپارک‌گپ‌ها نیز بر دو نوع می‌باشند. نمونه‌ای که اسپارک داخل یکی از الکترودهای اسپارک گپ باشد، تخلیه‌ی یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند. فشار داخل اسپارک‌گپ در بهترین شرایط باید در حدود ۲ اتمسفر نگه داشته شود [۱۳]. فاصله‌ی بین الکترودهای اسپارک‌گپ نیز در حدود ۳ میلی‌متر گرفته شده است علت این است که تابش ناشی از تغییر میدان در این حالت حذف می‌شود. در این حالت پهنای پالس خروجی بسیار کم است (شکل ۹).



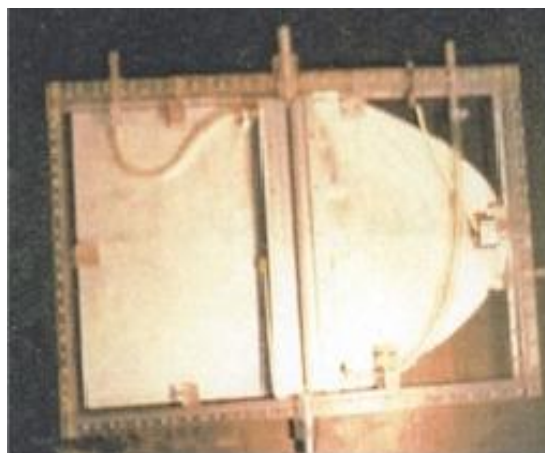
شکل ۹: اسپارک گپ

الکتروود بزرگ اسپارک گپ در کانون دو الکتروود خازن‌های بالایی و پایینی قرار می‌گیرد، الکتروود کوچک‌تر که داخل آن الکتروود اسپارک تعبیه شده است به صفحات بیرونی خازن‌ها متصل می‌شود.

ه) آینه‌های انعکاسی و پنجره‌ی خروجی:

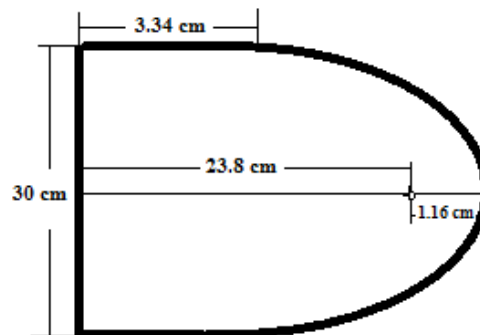
با استفاده از صفحات ماموت، قرص‌های آلومینیومی به شعاع ۱ سانتی‌متر را کاملاً صیقلی کرده‌ایم تا آینه‌ی انعکاسی با ضریب انعکاس نزدیک ۱۰۰ درصد ساخته شود (شکل ۱۰) [۱۴].

اگر صفحات به شکل مستطیل باشند، موج پتانسیلی در اثر عمل اسپارک گپ به‌طور همزمان به نقاط مختلف الکترودهای اصلی نمی‌رسد و تخلیه‌ی یکنواختی به‌وجود نمی‌آید. به‌علت اینکه سهمی مکان هندسی نقاطی است که فاصله‌ی آن‌ها از یک نقطه‌ی الکتروود اصلی و یک نقطه‌ی کانون سهمی ثابت است، بایستی اسپارک گپ را در کانون سهمی قرار دهیم (شکل ۷).



شکل ۷: کانون در فضای داخلی اسپارک گپ

با توجه به اینکه ابعاد اسپارک گپ باید تا حد مناسب کوچک باشد و با توجه به ابعاد صفحات خازن، کانون مناسب سهمی در حدود ۱/۱۶ سانتی‌متر به‌دست آمده است (شکل ۸).



شکل ۸: کانون مناسب سهمی در حدود ۱/۱۶ سانتی‌متر

بهتر آن است که کانون در فضای داخلی اسپارک گپ باشد چون عمل اسپارک دقیقاً در همین فضا صورت می‌گیرد. شکل پالس به زاویه‌ی الکترودهای اصلی وابسته است [۶]. زاویه‌ی الکترودهای اصلی بایستی طوری باشد که فاصله‌ی جلوی الکترودها ۴ میلی‌متر و عقب الکترودها ۱/۴ میلی‌متر شود [۷]. در این صورت موج تخلیه همراه با انتشار نور لیزر حرکت می‌کند.

الکترودهای اسپارک‌گپ نصب شده است روی پلکسی جانبی دیگر میله‌هایی برای تنظیم الکترودهای اصلی تخلیه و الکترودهای سیستم پیش‌یونش‌کننده تعبیه شده است.

ز) دستیابی به عمل لیزر در هوا در فشارهای مختلف

با مطالعه تمام پارامترهای مؤثر بر توان خروجی، ابتدا یک لیزر TEA N₂ ساخته شده است. سپس گاز O₂ به لیزر کاملاً بهینه‌سازی شده تزریق شده است. بعد از خاموشی عمل لیزر، پارامترهای مؤثر در افزایش توان خروجی را به صورت تجربی تغییر دادیم. سخت‌ترین مرحله دستیابی به عمل لیزر در هوا در فشار اتمسفر است. تنظیم، تغییر و اصلاح پارامترهای مؤثر مثل الکترودهای اصلی و سیستم پیش‌یونش‌کننده، ساختار اسپارک‌گپ، الکترودها و عایق خازن‌ها و ... وقت و انرژی زیادی برده است.

در نتیجه با صرف زمان زیاد به عمل لیزر در هوا در فشارهای مختلف دست یافته‌ایم.

یافته‌ها

الف) نتایج بررسی تئوری لیزر هوا:

با مطالعه چگالی جمعیت مؤلفه‌های مختلف در تخلیه N₂ می‌توان نتیجه گرفت که یون غالب در تخلیه، یون O₂ می‌باشد. حدود ۵ درصد از مولکول‌های O₂ به یون O₂ تبدیل می‌شوند مؤلفه اکسیژن پلاسمای تخلیه را تغییر می‌دهد. غالب شدن یون O₂ باعث افزایش E/N تخلیه می‌شود و عمل پمپ تراز C₃π₀ نیتروژن کارآمدتر می‌گردد. برای بررسی علت خاموشی عمل لیزر در اثر اضافه شدن مؤلفه O₂ فرض می‌کنیم که عکس طول عمر تراز C₃π₀ در ترکیب N₂+O₂ به صورت زیر باشد:

$$1/\tau = K_1 + K_2 P_{N_2} + K_3 P_{O_2}$$

در صورتی که زمان واهلش $1/K_3 P_{O_2}$ از طول عمر تراز در غیاب مؤلفه O₂ یعنی $1/(K_1 + K_2 P_{N_2})$ کوچک‌تر باشد، واهلش در هنگام عمل لیزر در کاهش جمعیت تراز مؤثر خواهد بود.

$$P_{O_2} \geq (k_1 + PK_2) / (K_2 + K_3)$$

به‌طورمثال در فشار P=760torr و با استفاده از مقادیر K₁, K₂, K₃ داریم. در نتیجه اگر درصد گاز O₂ در ترکیب بیشتر از 3% $(P_{O_2}/P) = 3\%$ باشد، عمل لیزر در اثر اضافه شدن O₂ خاموش خواهد شد [۱۸].

ب) نتایج بررسی عملی لیزر هوا:

نمودارهای به‌دست آمده زیر نشان می‌دهد که با افزایش درصد اکسیژن، عمل لیزر کاملاً متوقف می‌گردد (شکل ۱۲).



شکل ۱۰: آینه انعکاسی با ضریب انعکاس نزدیک ۱۰۰ درصد

واگرایی و توان خروجی با ضریب عبور پنجره خروجی رابطه عکس دارد [۱۵]. به‌طور مثال اگر ضریب عبور کاهش یابد توان خروجی و واگرایی نور لیزر افزایش می‌یابد [۱۶]. پنجره خروجی از جنس لامل میکروسکوپ با ضریب عبور ۵۵ درصد است. در نتیجه واگرایی نور خروجی زیاد است. محل قرار گرفتن آینه و پنجره خروجی در شکل پالس خروجی و انرژی پالس نیز مؤثر است [۱۷]. هنگامی که فاصله آینه و پنجره خروجی تا الکترودها ۵ سانتی‌متر باشد، انرژی خروجی ماکزیمم است این امر در ساخت لیزر نیز رعایت شده است.

در صورتی که هیچ مقاومتی به الکترودهای اصلی وصل نشود، در کانال تخلیه جرقه ایجاد می‌شود. زمانی که از سیم‌پیچی به طول ۴ سانتی‌متر و تعداد حلقه‌های ۳۵ عدد نیز استفاده شده است همان نتیجه گرفته شده است ولی اگر از مقاومت 1MΩ استفاده شود، تخلیه یکنواخت‌تر و با سرعت بالا اتفاق می‌افتد که علت آن افزایش میرایی نوسان در حلقه لیزر است.

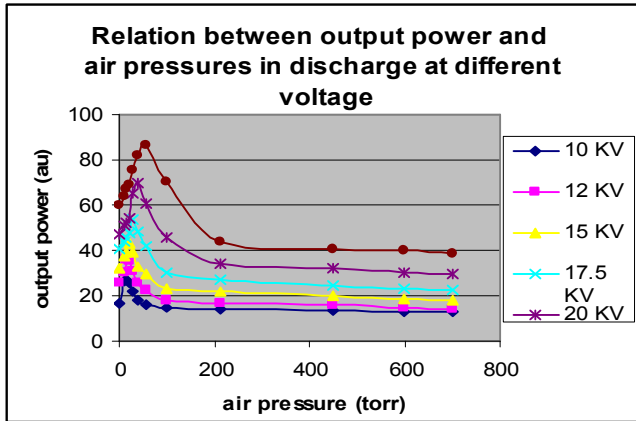
و) بدنه دستگاه:

به علت بررسی عملکرد لیزر در فشارهای مختلف، بدنه پلکسی گلاس به ضخامت ۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۳/۴ سانتی‌متر با طول‌های ۶۴ سانتی‌متر و ۳۱ سانتی‌متر استفاده شده است، شیارهای به عمق ۴ میلی‌متر روی آن تعبیه شده‌اند تا با استفاده از اورینگ پلاستیکی به همین قطر در فشارهای پایین و بالا سیستم ایزوله باشد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: بدنه پلکسی گلاس به ضخامت ۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۳/۴ سانتی‌متر

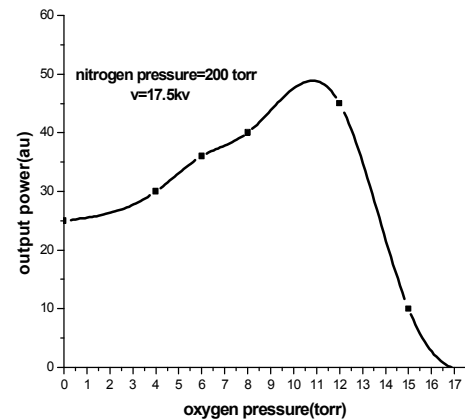
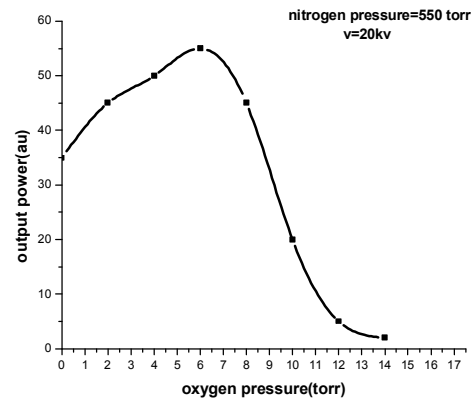
دو سوراخ برای ورود و خروج گاز به کانال تخلیه و دو سوراخ به قطر ۱۸ میلی‌متر برای نصب آینه‌های انعکاسی روی پلکسی‌های جانبی ایجاد شده است. روی یکی از پلکسی‌های کوچک جانبی یکی از



شکل ۱۳: رابطه بین توان خروجی و فشار هوا در ولتاژهای مختلف

بحث و نتیجه گیری

هوا ترکیبی از گازهای مختلف است. ممکن است که از هوا به عنوان ماده فعال لیزری استفاده زیادی به عمل آید به علت اینکه در حدود ۷۴ درصد هوا را گاز نیتروژن تشکیل می دهد. ولی لیزرهای نیتروژن نسبت به حضور گاز اکسیژن در محیط فعال بسیار حساس اند. با مطالعه پارامترهای حساس در ساختار لیزرهای نیتروژن و اصلاح آنها به عمل لیزر در هوا و در فشارهای مختلف خصوصاً در فشار هوا دست یافته ایم. لیزر TEA Air ساخته شده کاربردهای زیادی در پزشکی و علوم دیگر دارد.



شکل ۱۲: اثر اکسیژن بر خروجی لیزر

توان خروجی لیزر هوا بر حسب فشار هوا در ولتاژهای مختلف به صورت زیر است (شکل ۱۳).

References

1. Knyazev I, Letskhov V, Moushev V. TEA N2 W laser with reduced spectra. Opt Commun 1973; 6: 250-2.
2. Santa I, Kozma L, Nemeth B, Helbling J, Gorbali M. Experimental and theoretical investigation of a traveling wave exited TEA Nitrogen laser. IEEE J Quantum Electronics 1986; 22: 2174- 80.
3. Cubeddu R, Desilvestri S. A simple and reliable atmospheric pressure nitrogen laser. Opt Quant Elect 1979; 11: 276-81.
4. Neukum J, Heber J, Haschka H, Umhofer, Strobel U, Xiao T. A compact nitrogen laser for long-term stable operation Meas. Sci Technol 1992; 3: 1198-203.
5. Vazwuez A, Martine Z, Abaites V. High- Efficiency Low-Pressure Blumlein. Nitrogen Laser IEEE J Quant Electr 1993; 29: 2364.
6. Santa I, Racz B, Kozma L, Nemet B, Actauniv, Szeged. Investigations of uv TEA N2 lasers. Acta Phys Chem 1978; 24: 395-403.
7. Sonin A, Batygov A. Simple TEA ultraviolet traveling-wave nitrogen laser. Sov J Quantum Electron 1988; 18: 316-21.

8. Bergmann V, Hasson H, Gain V. Fluorescence and energy extraction characteristics of photostabilised atmospheric pressure UV nitrogen lasers. *J Phys D Appl Phys* 1978; 11: 2341-7.
9. Tarasenko V, Fedorov A, Bychkov Y, Highpower I. Nitrogen laser. *Sov J Quantum Electron* 1974; 4: 674-9.
10. Mcfarlaane R. Precision spectroscopy of new infrared emission system of molecular nitrogen *IEEE J Quant Electron* 1966; 2: 229.
11. Vazquez, Martinez A, Abaites V. High-efficiency low-pressure Blumlein nitrogen laser. *IEEE J Quant Electr* 1993; 29: 2364-71.
12. Chingusa I. A Two-Stage Spark Gap for Blumlein-Driven Transversely Excited Atmospheric Nitrogen Laser. *IEEE J Quant Electron* 1982; 18: 423-8.
13. Basting D, Schafer FP, Steyer B. A simple, high power nitrogen laser. *Opto-Electro* 1972; 4: 43-9.
14. Bergmann V, Penderis H, Miniaturized A. Atmospheric pressure nitrogen laser. *J Phys E SciInstrums* 1977; 10: 602-9.
15. Bergmann H. Sealed- off, miniature, high-power nitrogen laser. *J Phys E Sci Instrums* 1977; 10: 1210.
16. Baranov S, Bystritski V, Kozhevnikov A, Sulakshin S. Investigation of an Ar-N₂ laser pumped by an intense proton beam. *Sov J Quant Electron* 1982; 12: 244-8.
17. Leonard D. Airborne laser development. *Avco Ressearch Repert* 1970; 362: 198-205.
18. Bergmann V, Hasson H, Preussler D. Pulsed corona excitation of high-power uv nitrogen lasers at pressures of 0-3 bar. *Appl Phys Lett* 1975; 21: 553.