



Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

ساخت ستون شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی ۱۵۰kV

جواد رحیقی^{۱*}، مرتضی جعفرزاده خطیبانی^۱، سیدمصطفی ساداتی^۲، حسین قدس^۱
۱. پژوهشکده علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران
۲. دانشکده علوم، دانشگاه اراک، صندوق پستی: ۸۷۹-۳۸۱۵۶، اراک - ایران

چکیده: یک ستون شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی برای تولید باریکه‌های پروتون، دوترون، آلفا و یون‌های سنگین‌تر با انرژی ۱۵۰keV طراحی و ساخته شده است. این ستون شتاب‌دهنده را می‌توان همراه با یک مولد ولتاژ بالا از نوع کاک کرافت والتون مورد استفاده قرار داد. ساخت این ستون شتاب‌دهنده قدم مهمی در به دست آوردن فن‌آوری طراحی و ساخت شتاب‌دهنده در کشور است. در ساخت این ستون ۱۱ الکتروود فلزی با شکل‌های گوناگون به کار رفته است که شامل سه عدسی استوانه‌ای تولیدکننده‌ی باریکه، عدسی کانونی‌کننده‌ی باریکه، عدسی خنک‌کننده‌ی باریکه و یک کانال شتاب‌دهنده با هفت عدسی دهانه‌ای است. آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده با استفاده از یک چشمه‌ی یونی از نوع بسامد رادیویی نشان داد که این ستون قادر است جریانی در حدود ۸۵۰μA را با انرژی ۱۵۰keV به هدف بتاباند.

کلید واژه‌ها: ستون شتاب‌دهنده، شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی، عدسی الکترواستاتیکی، Superfish، SIMION، اپتیک یونی

Construction of the 150kV Electrostatic Accelerator Tube

J. Rahighi^{1*}, M. Jafarzadeh Khatibani¹, S.M. Sadati², H. Ghods¹

1. Nuclear Science Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran
2. Faculty of Sciences, University of Arak, P.O.Box: 38156-879, Arak - Iran

Abstract: An electrostatic accelerator tube capable of accelerating proton, deuteron, alpha beam and heavier ions up to an energy of 150keV has been designed and constructed. This tube can be operated with a Cockroft-Walton type high voltage generator. The construction of the tube is important from two different standpoints. First, because it will initiate the use of low energy accelerators for both scientific and industrial development in country and also this step will lead the country toward approaching the accelerator design technology, an issue which has been severely overlooked for the past few decades. The present accelerator tube consists of 11 different electrodes forming 3 cylindrical lenses, i.e., extractor lens, focusing lens and cooling lens. An accelerator column which includes 7 collimating lenses follows the cooling lens. The tube can accelerate $^2\text{H}^+$ up to an energy of 150keV. The accelerator column was successfully tested for the high vacuum and the voltage up to 150kV. A radio frequency type ion source was used to check the performance of the tube. Measurements demonstrated that a beam current close to 850μA can be readily obtained in the present system.

Keywords: Accelerator Tube, Electrostatic Accelerator, Electrostatic Lenses, SIMION, Superfish, Ion Optics

*email: javad.rahighi@ipm.ir



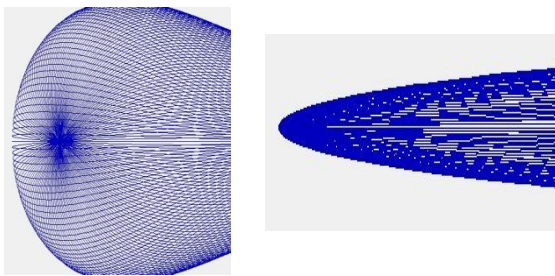
۱. مقدمه

از کدهای کامپیوتری SIMION [۶] و Superfish [۷] در طراحی الکترودها و شبیه‌سازی میدان الکتریکی الکترودهای ستون شتاب‌دهنده استفاده شده است. به کمک این شبیه‌سازی و مقایسه‌ی آن با فیزیک مسئله، به مطالعه‌ی پویایی شناسی رفتار باریکه در میدان الکترواستاتیکی درون ستون، بررسی شکل بهینه‌ی الکترودها و هم‌چنین نقش و وظیفه‌ی هر یک از آن‌ها پرداخته شده است. در ادامه، ابتدا به اختصار به قسمت‌های مهم یک شتاب‌دهنده و هم‌چنین به الکترودهای ستون شتاب‌دهنده اشاره می‌شود.

۱.۱ چشمه‌ی یونی از نوع بسامد رادیویی

یک چشمه‌ی یونی از نوع بسامد رادیویی^(۲) ذرات مثبتی مانند پروتون، دوترون، آلفا و یون‌های سنگین‌تر را برای تزریق به درون ستون شتاب‌دهنده تولید می‌کند. در این نوع چشمه، تعدادی از الکترون‌ها تحت تأثیر میدان الکتریکی امواج رادیویی از اتم‌های خود جدا شده و شروع به حرکت نوسانی می‌کنند؛ در اثر برخورد بین این الکترون‌های آزاد و اتم‌های گاز موجود در حجم چشمه‌ی یونی، پلاسمای حاوی یون‌های H^+ ، H_2^+ یا D^+ ، D_2^+ و He^+ تشکیل می‌شود. یون‌های تولید شده با قرار گرفتن در اختلاف پتانسیل میان آند چشمه‌ی یونی و الکتروود اول ستون شتاب‌دهنده که به آن استخراج‌کننده^(۳) می‌گویند، از چشمه‌ی یون خارج شده و تشکیل باریکه‌ی یونی را می‌دهند [۸، ۹ و ۱۰]. شبیه‌سازی چشمه‌ی یون (شکل ۲) نشان می‌دهد که یون‌های تولید شده با هر انرژی و راستای حرکت اولیه با اعمال میدان مغناطیسی و اختلاف پتانسیل بین آند و الکتروود اول (حداکثر ۵kV) به سمت الکتروود اول شروع به حرکت می‌کنند.

شکل ۲ نشان می‌دهد انحراف حرکت ذرات به انرژی اولیه آن‌ها وابسته است. با تغییر پتانسیل آند می‌توان این انحراف را جبران نمود. از این‌رو پتانسیل آند قابل تغییر است.

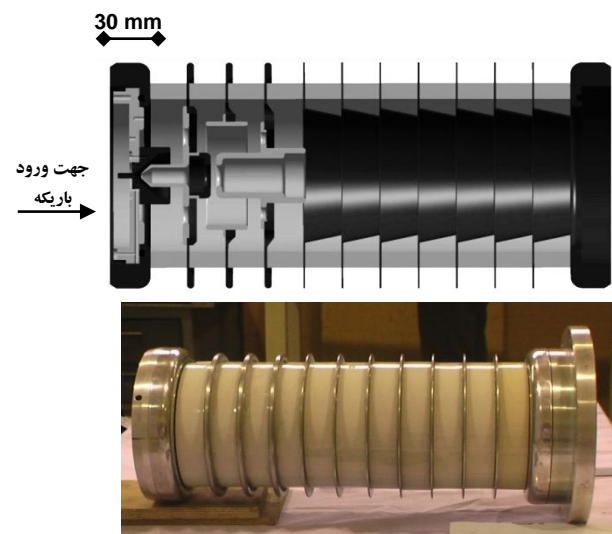


شکل ۲. انحراف یون‌های تولید شده در چشمه‌ی یون در اثر میدان الکترواستاتیکی بین آند و الکتروود اول، E_{ions} انرژی اولیه‌ی یون تولید شده است. (راست) $E_{ions}=10^{-1}eV$ ، (چپ) $E_{ions}=10^{-2}eV$.

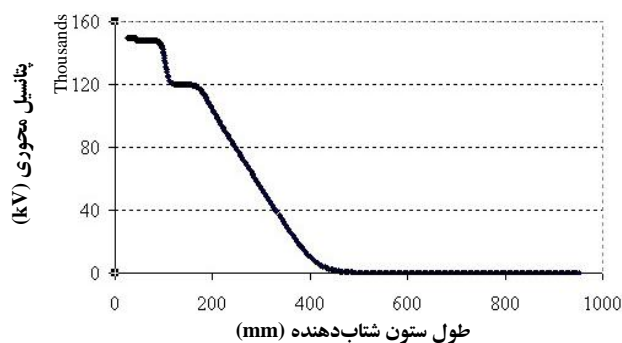
استفاده از شتاب‌دهنده‌ها در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی، آموزشی، صنعتی، پزشکی و کشاورزی بسیار متداول است. هدف از ساخت این ستون شتاب‌دهنده، شتاب دادن پروتون، دوترون، آلفا و یون‌های سنگین‌تر تا انرژی بیشینه‌ی ۱۵۰keV با استفاده از میدان الکترواستاتیکی است. شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین شتاب‌دهنده‌ها می‌باشند. بسته به انرژی و نوع باریکه‌ی تولید شده این گونه شتاب‌دهنده‌ها ممکن است مورد استفاده‌های گوناگون قرار گیرند [۱ تا ۵].

با توجه به این که جریان باریکه در این ستون شتاب‌دهنده در حدود $850 \mu A$ است، پروبیس^(۱) باریکه $K=(I/V^{3/2})$ بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است. از این‌رو در مطالعه‌ی اپتیک یونی و طراحی الکترودها می‌توان از اثر بار فضایی چشم‌پوشی کرد. در سیستم حاضر الکترودها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که باریکه پیرامون بوده و با اندازه‌گیری توان نشر باریکه در طول ستون می‌توان از رشد توان نشر جلوگیری کرد. توان نشر، مساحت اشغال شده توسط ذرات باردار در فضای فاز را نشان می‌دهد و پارامتر مهمی برای ارزیابی کیفیت باریکه است.

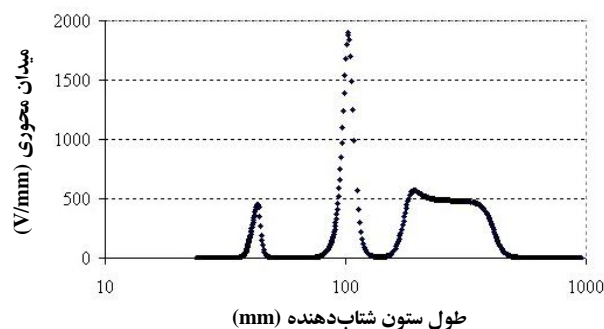
ستون شتاب‌دهنده‌ی ۱۵۰kV ساخته شده (شکل ۱) دارای ۱۱ الکتروود فلزی از جنس آلومینیم است که به وسیله‌ی ۱۱ قطعه استوانه‌ی سرامیکی از یک‌دیگر جدا شده‌اند. ولتاژ ۱۵۰kV بین الکترودها به‌طور مساوی تقسیم می‌شود. این، میدان یک‌نواختی را برای شتاب دادن ذرات باردار فراهم می‌کند.



شکل ۱. اجزای داخلی ستون شتاب‌دهنده‌ی ۱۵۰kV.

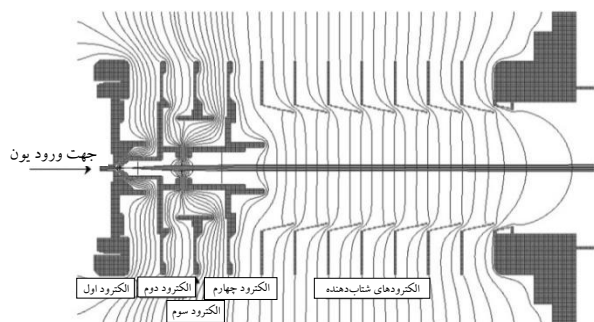


(a)



(b)

شکل ۳. توزیع پتانسیل محوری (a) و میدان محوری (b) ستون شتاب‌دهنده‌ی ۱۵۰ kV در طول ستون و لوله‌ی باریکه (۲۰۰۰ mm).



شکل ۴. بررسی اپتیک باریکه و عملکرد چهار الکترودهای اول، و الکترودهای شتاب‌دهنده‌ی مخروطی شکل.

شبه‌سازی‌های انجام شده با کد SIMION نشان می‌دهند که تغییر $\pm 10^\circ$ در این شیب یا در شیب الکترودهای اول، با توجه به مقیاس کوچک مورد استفاده، خللی در کار این الکترودها ایجاد نمی‌کند. فاصله‌ی کانونی این عدسی به طور تقریبی از معادله‌ی زیر به دست می‌آید که در آن V_f پتانسیل شتاب‌دهنده‌ی ذرات در قبل از ورود به عدسی کانونی کننده و dV/dx شیب یک‌نواخت پتانسیل در طول عدسی است.

$$F \approx 4V_f / (dV/dx) \quad (2)$$

۲.۱ نقش الکترودهای مختلف در عملکرد ستون شتاب‌دهنده

عملکرد کلی الکترودهای فلزی به صورتی است که با ایجاد یک پتانسیل با تقارن محوری، باریکه‌ای پیرامحور تولید کرده و با هدایت این باریکه به سمت هدف از رشد شعاعی آن جلوگیری می‌نمایند. برای محاسبه‌ی مسیر حرکت ذرات در یک عدسی الکترواستاتیک در حالت نانسیتی و در نبود میدان مغناطیسی از معادله‌ی زیر استفاده می‌شود [۱۱].

$$\frac{d^2\sigma}{dz^2} + \frac{3}{16} \left[\frac{U'(z)}{U(z)} \right]^2 \sigma = 0 \quad (1)$$

که در آن، $U(z)$ و $U'(z)$ به ترتیب پتانسیل و میدان محوری است، و تابع $\sigma(z)$ مسیر ذره را به دست می‌دهد.

کد کامپیوتری SIMION نیز از این معادله به روش تفاضل متناهی^(۴) (FDM) برای محاسبه‌ی پتانسیل محوری استفاده می‌کند. در شکل ۳ نمودار پتانسیل و میدان محوری پیش‌بینی شده‌ی ستون به وسیله‌ی کد SIMION نشان داده شده است.

الکترودهای اول همراه با آند چشمه‌ی یونی و الکترودهای دوم، وظیفه‌ی استخراج، تشکیل باریکه و کانونی کردن آن را برعهده دارند. ورودی الکترودهای اول به گونه‌ای طراحی شده است که دریافت^(۵) بسیار کوچکی برای پلاسمای تولید شده در چشمه، یون فراهم می‌کند تا باریکه‌ای پیرامحور ایجاد شود. برای ایجاد باریکه‌ای تقریباً یک‌نواخت و خطی، ابتدا ذرات به وسیله‌ی یک عدسی استوانه‌ای همگراکننده که شامل الکترودهای اول و دوم است همگرا می‌شوند (شکل ۴). قطر دهانه‌ی ورودی این الکترودهای تعیین‌کننده‌ی میزان دریافت سیستم و شدت جریان باریکه است.

بعد از خروج ذرات باردار از چشمه‌ی یون، ذرات، مسیر کاتوره‌ای متفاوتی را می‌پیمایند. بنابراین برای ایجاد باریکه‌ای تقریباً یک‌نواخت و خطی، با استفاده از یک عدسی همگراکننده که کانون آن بر کانون عدسی دوم منطبق است، ابتدا باید ذرات را همگرا کرد. الکترودهای اول و دوم تشکیل عدسی همگراکننده را می‌دهند. وجود شیب 45° در انتهای الکترودهای اول و ابتدای الکترودهای دوم باعث این همگرایی با کم‌ترین انحراف می‌شود.



- جلوگیری از برخورد ذرات باریکه به چسب در محل اتصال قطعات سرامیکی به فلز که می‌تواند باعث یونش، برانگیزش و حتی تخریب شبکه‌ی بلوری چسب شود.

با افزایش تعداد این الکترودها می‌توان انرژی باریکه را از ۱۵۰keV به ۲۰۰keV افزایش داد. فاصله‌ی الکترودها از هم نیز در بسیاری از طراحی‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ایجاد جرقه و شکست‌های الکتریکی محدودیتی است که در انتخاب فاصله‌ی بین الکترودها وجود دارد. با استفاده از معادله‌ی زیر می‌توان فاصله الکترودها را تعیین کرد [۱۲]

$$V=CX^a \quad (۳)$$

که در آن V اختلاف پتانسیل میان دو الکترودها، a یک مقدار ثابت بین ۰٫۱ و ۱٫۱ و C نیز یک مقدار ثابت وابسته به شدت میدان الکتریکی، فاصله‌ی بین الکترودها و جنس آن‌ها می‌باشد. در اکثر سیستم‌ها a بین ۰٫۵ و ۰٫۷ در نظر گرفته می‌شود.

۳.۱ انتخاب سرامیک یا عایق‌های الکتریکی

با توجه به اختلاف پتانسیل زیاد بین اجزای مختلف ستون شتاب‌دهنده عایق‌های با استحکام مکانیکی، ضریب دی‌الکتریک بزرگ و هدایت حرارتی و الکتریکی ضعیف مطلوب هستند. ضریب انبساط حرارتی نزدیک عایق‌ها و الکترودها مشخصه‌ی بسیار مطلوب در انتخاب مواد است، زیرا تنش حرارتی ناشی از اختلاف ضریب انبساط حرارتی ممکن است باعث ایجاد ترک در محل اتصال عایق-فلز شده و وجود تنش روی سطح (در اثر اختلاف فشار)، با تسریع رشد ترک منجر به بروز مشکلات جدی در نگهداری خلاء در محدوده‌ی 10^{-6} تا 10^{-7} torr شود.

بهترین عایق‌هایی که در ساخت ستون شتاب‌دهنده به کار می‌رود، شیشه‌های بوروسیلیکاتی و سرامیک‌های الکتریکی (پایه‌ی آلومینا) هستند [۱۳، ۱۴ و ۱۵]. با توجه به احتمال جرقه^(۶) روی سطح صاف شیشه‌ی بوروسیلیکاتی و مقاومت مکانیکی نسبتاً پایین این نوع عایق، معمولاً از سرامیک‌هایی بر پایه‌ی آلومینا، به عنوان عایق در سیستم‌های الکتریکی با اختلاف پتانسیل زیاد استفاده می‌شود.

شکل سرامیک باید به گونه‌ای باشد که از حرکت ذرات باردار سطحی بر روی آن، هم‌چنین از تجمع و انباشتگی ذرات باردار بر روی سطح آن جلوگیری شود. انتخاب سطوح موج‌دار امکان تخلیه‌ی بارهای الکتریکی سطحی بین الکترودها را به طور

این فاصله‌ی کانونی به شرایط خلاء، وجود میدان‌های خارجی، وجود لبه‌های نوک تیز و شرایط هندسی الکترودها وابسته است. با متغیر انتخاب کردن پتانسیل این عدسی، می‌توان نقطه‌ی کانونی را در حالت‌های مختلف دستگاه کنترل کرده و حالت بهینه را برای عملکرد ستون به دست آورد.

برای جلوگیری از نفوذ میدان‌های الکترواستاتیکی خارجی به درون ستون از سپرهای محافظ استفاده می‌شود. الکترودها یک سپر محافظ است که از نفوذ میدان‌های خارجی به عدسی خنک‌کننده‌ی باریکه جلوگیری می‌کند و نقش دیگری در اپتیک باریکه ندارد. در این ستون با اضافه کردن لبه‌ای به انتهای الکترودها اول و الکترودهای شتاب‌دهنده‌ی ستون، از نفوذ این میدان‌ها نیز جلوگیری شده است.

ذرات متمرکز شده توسط عدسی اول در کانون عدسی دوم واگرایی زیادی دارند و پس از ورود به این عدسی به اصطلاح خنک شده و در راستای حرکت ذرات با محور ستون موازی می‌شوند. یک عدسی استوانه‌ای همگراکننده که از الکترودهای دوم و چهارم تشکیل شده است، این وظیفه را برعهده دارد (شکل ۴). شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که بدون حضور الکترودها چهارم نیز می‌توان به هدایت باریکه پرداخت، در غیاب این الکترودها، تنها بازه‌ی پتانسیل متغیر برای کنترل باریکه کوچک‌تر می‌شود. چنین حالتی در طراحی ستون شتاب‌دهنده‌ی ۲MV واندوگراف مشهود است.

پس از خنک شدن باریکه و ایجاد باریکه‌ای تقریباً خطی، با استفاده از هشت الکترودها شتاب‌دهنده (شکل ۴) که پتانسیل آن‌ها از ۱۰۵kV شروع شده و با اختلاف ۱۵kV بین دو الکترودها متوالی به پتانسیل زمین (۰kV) می‌رسد، میدان الکترواستاتیکی یک‌نواختی در ستون تولید می‌شود که ذرات باریکه را شتاب داده و به انرژی مطلوب می‌رساند. این الکترودها دارای دهانه‌ی مخروطی شکل می‌باشند. این دهانه‌ی مخروطی شکل به سه دلیل به الکترودهای دیسکی شکل اضافه می‌شود:

- حفاظت باریکه در برابر میدان‌های الکترواستاتیکی خارجی که ممکن است بر اپتیک باریکه تأثیر نامطلوب داشته باشند.
- جلوگیری از برخورد ذرات باریکه به قطعات سرامیکی که باعث خوردگی آن‌ها، آسیب به اتصالات خلاء و تولید ذرات ثانویه می‌شود.



شکل ۵. چند الکترود ساخته شده.



شکل ۶. نمونه‌ای از سرامیک‌های مورد استفاده در ساخت ستون شتاب‌دهنده‌ی ۱۵۰kV.

در ساخت ستون شتاب‌دهنده معمولاً برای اتصال سرامیک به الکترود فلزی از رزین‌های PVA و اپوکسی استفاده می‌شود [۱۲]. ولی با توجه به موجود نبودن این چسب در کشور و هزینه‌ی بالای تهیه‌ی آن زیاد چندین نوع چسب مقاوم در برابر ضربه‌ی الکتریکی، و مناسب برای خلاء که در کشور موجود هستند، تهیه شده و پس از آزمایش‌های خلاء و قدرت چسبندگی، دو نوع چسب بر پایه‌ی اپوکسی انتخاب و در ساخت ستون از آن‌ها استفاده شد.

هم‌محور بودن الکترودها و یک‌نواختی ضخامت لایه‌ی چسب در عملکرد ستون بسیار مؤثر است. برای هم‌محور کردن الکترودها در حین اتصال و چسباندن، از ابزار خاصی به نام ثابت‌کننده^(۱۰) (ردیف دوم شکل ۷) استفاده شده است. ضخامت مناسب برای رزین PVA تقریباً ۱/۵mm و ضخامت بهینه در چسب کاری اپوکسی بسته به نوع چسب بین ۰/۱ تا ۰/۲mm تغییر می‌کند [۱۳].

چشم‌گیری کاهش می‌دهد [۱۶]. البته برای پتانسیل از مرتبه‌ی ۱۵۰kV می‌توان از این اثر چشم پوشید. از طرفی ایجاد خراش‌هایی در حد میکرون بر روی سرامیک و الکترود باعث افزایش تماس بین دو سطح می‌شود و در نتیجه باندهای بیش‌تری برای چین خوردن شکل می‌گیرد.

۲. ساخت ستون شتاب‌دهنده

فلز تیتانیم (Ti) دارای کم‌ترین تابش میدانی، میکروود شارژ، سایش سطحی در اثر جرقه، بهترین ولتاژ پایدار، بیش‌ترین تابع کار و گرادیان الکتریکی در فواصل کم می‌باشد. اما ماشین‌کاری و صیقل تیتانیم در مقایسه با سایر فلزات دشوارتر و هزینه‌ی آن نیز زیادتر است [۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۷] بنابراین در ساخت الکترودهای ستون شتاب‌دهنده‌ی مورد بحث از آلومینیم و فولاد ضدزنگ^(۷) استفاده شده است.

در ساخت الکترودهای شتاب‌دهنده از سه روش پرس کردن، شکل دادن عدسی^(۸) و تراشکاری می‌توان استفاده کرد. در ساخت الکترودهای این ستون از روش‌های شکل‌دهی و تراشکاری استفاده شده است؛ در شکل ۵ چند الکترود ساخته شده نشان داده شده است. دقت ساخت این قطعات از مرتبه‌ی ۰/۰۵mm است.

برای انتخاب سرامیک مناسب، چندین نوع سرامیک (با و بدون لعاب) [۱۸] تحت آزمایش خلاء قرار گرفتند. سرامیک لعاب داده شده از نظر خلاء برتری دارد و زمان خلاء کردن هنگامی که از قطعات لعاب‌دار استفاده می‌شود به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. شکل ۶ نمونه‌ای از سرامیک‌های مورد استفاده در ساخت ستون شتاب‌دهنده‌ی ۱۵۰kV را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها چسب‌های انتخاب شده نیز از لحاظ خاصیت چسبندگی و مقاومت در خلاء آزمایش شدند.

۱.۲ چسب کاری و اتصال قطعات

انتخاب چسب از مسایل بسیار مهم و حساس در اتصال الکترودها و قطعات سرامیکی است. چسب مورد استفاده باید دارای خواص ویژه‌ای هم‌چون پایداری در برابر ضربه‌ی الکتریکی و خوردگی، گاززدایی^(۹) کم در خلاء، تولید یون‌های ثانویه کم، پایداری در برابر اختلاف فشار ناشی از ایجاد خلاء و عدم تشکیل خازن الکتریکی باشد.



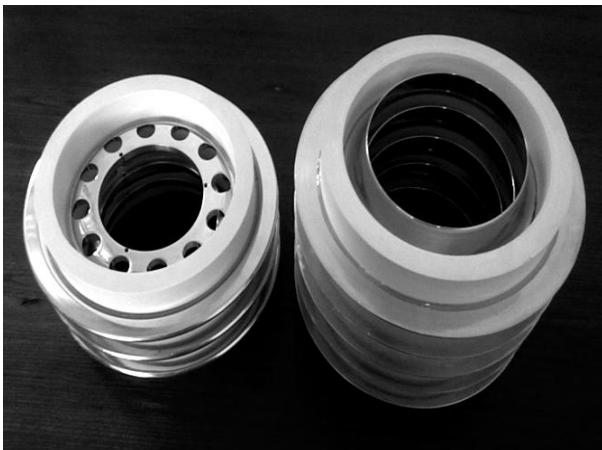
۳. اندازه‌گیری‌های تجربی، داده‌ها و نتیجه‌گیری

با افزایش ولتاژ به حدود ۱۵۰kV، بدون حضور باریکه هیچ‌گونه جرقه‌ای مشاهده نشد. با افزودن ولتاژ تا ۱۲۰kV و تنظیم پتانسیل استخراج‌کننده‌ی باریکه و کانونی‌کننده‌ی آن، پس از چندین مرحله آزمایش بیش‌ترین شدت جریان به دست آمده از چشمه‌ی یونی $830\ \mu\text{A}$ و بیش‌ترین جریان مشاهده شده بر روی هدف $520\ \mu\text{A}$ بود. بیش‌ترین میزان جریان پایدار به دست آمده نیز $460\ \mu\text{A}$ بود. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که هر اندازه کیفیت خلاء بهتر شود هدایت باریکه به همان اندازه آسان‌تر و شدت جریان روی هدف به همان اندازه افزایش می‌یابد (جدول ۱).

آزمایش تزریق باریکه به ستون باعث افزایش سرعت گاززدایی و بهبود شرایط خلاء می‌شود. مشاهده شد که پس از هر مرحله و تزریق باریکه، خلاء بهتر می‌شود و به همین دلیل در هر مرحله جریان بیش‌تری را می‌توان روی هدف اندازه‌گیری کرد.



شکل ۷. مراحل مختلف اتصال قطعات و آزمایش ستون شتاب‌دهنده.



شکل ۸. قطعات متصل شده، سمت راست الکترودهای شتاب‌دهنده و سمت چپ نگه‌دارنده‌های ۳ الکتروود اول.

جدول ۱. نتایج به دست آمده از آزمایش ستون شتاب‌دهنده‌ی ساخته شده.

فشار درون ستون بعد از ورود گاز دوتریم (Torr)	جریان لوله‌ی باریکه (μA)	جریان هدف (μA)	جریان حلقه‌ی فوکوس (μA)	جریان چشمه‌ی یونی (μA)
7×10^{-5}	—	۲۰	—	—
5×10^{-5}	—	۲۵۰	—	—
3×10^{-5}	—	۳۰۰	—	—
2.8×10^{-5}	۴۰۰	۳۵۰	۱۲	۷۶۰
2×10^{-5}	۴۰۰	۴۰۰	۱۵	۸۱۵
1.7×10^{-5}	۳۵۰	۴۶۰	۱۰	۷۲۰
1.2×10^{-5}	۵۰	۸۵۰	۱۰	۹۰۰

برای اتصال قطعات و چسب کاری، ابتدا سطوح قطعات آماده شدند. این فرایند شامل دو مرحله‌ی صاف و صیقلی کردن سطوح الکترودها و سرامیک در حد لازم و شستشوی قطعات با الکل و استون است. پس از آماده‌سازی سطوح و تهیه‌ی چسب، اتصال قطعات در چهار مرحله انجام گرفت. ابتدا نگه‌دارنده‌های ۳ الکتروود اول و الکترودهای شتاب‌دهنده (شکل ۸) به طور جداگانه به هم متصل شدند. پس از آزمایش خلاء و اطمینان از سالم بودن اتصالات، این دو قسمت نیز به یک‌دیگر متصل شده و پس از اطمینان از سالم بودن این اتصال، فلنج‌های ابتدا و انتهای ستون نیز بر روی آن نصب و چسبانده شدند.

ستون ساخته شده قبل از استفاده شدن، برای گاززدایی، به مدت ۳ روز در دمای ثابت 90°C تحت خلاء قرار گرفت تا به خلاء 10^{-5} torr برسد.

برای ایجاد خلاء از یک پمپ مکانیکی و یک پمپ دیفیوژن با قدرت مکندگی حدود ۶۰۰ لیتر در دقیقه استفاده شد. پس از دست‌یابی به خلاء مناسب (حدود 5×10^{-6} torr)، پتانسیل ۱۵۰kV در چند مرحله و با گام‌های حدود ۳۰kV به ستون اعمال شد.



پی‌نوشت‌ها:

۱. Perveance
۲. Radio Frequency
۳. Extractor
۴. Finite Difference Method
۵. Acceptance
۶. Flash Over
۷. Stainless Steel
۸. Forming
۹. Outgas
۱۰. Fixateus

References:

1. Waldemar Scharf, "Particle accelerator and their uses," Harwood Academic, New York (1978).
2. J.B. Hourst, M. Roche, J. Morin, Nucl. Instr. Methods, 145, 19-24 (1977).
3. Steve. Honsen, the Bell Jar, 6(314), 1-9 (1997).
4. Jinchoon kim, Nucl. Instr. Methods, 145, 9-17 (1977).
5. Martone, M. Angelone, M. Pillon, M. Proc. SPIE. 2339, 208.
6. David A. Dahl, SIMION 3D version 7.0 User's Manual (2000).
7. James H. Billen, Poisson Superfish, LA-UR-96-1834 (2003).
8. R. Hellborg, Electrostatic accelerators, Springer, New York (2005).
9. M.E. Abdelaziz, M.M. Abdelbaki, S.G. Zokhary, CH 2387-9/87/0000-0331 IEEE. 331 (1987).
10. Huashun Zhang, Ion Sources, Springer, New York (1999).
11. Miklos Szilagy, Electron and ion optics, Pelenum, New York (1988).

شرایط مطلوب کار ستون هنگامی است که جریان اندازه‌گیری شده بر روی هدف بیش‌ترین و جریان‌های دیگر کم‌ترین مقدار را داشته باشند. به‌طوری‌که در جدول ۱ نشان می‌دهد جریان لوله‌ی باریکه نسبتاً زیاد است که به دلیل برخورد باریکه با دیواره‌ی لوله‌ی باریکه است، این واگرایی و برخورد ممکن است در اثر برخورد ذرات باردار به ذرات موجود در لوله‌ی باریکه، اثر بار فضایی و توان نشر، اثرهای لبه‌ای و میدان‌های مغناطیسی خارجی باشد. با استفاده از یک الکتروود دهانه‌ای و یا میدان مغناطیسی در ابتدای کانال رانش، می‌توان این واگرایی و در نتیجه جریان ایجاد شده بر روی کانال رانش را کاهش داد.

در تحقیقات حاضر به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری با کد SIMION و بررسی دقیق قطعات ستون شتاب‌دهنده‌های تجاری، پویایی شناسی باریکه‌ی پروتونی و دوترونی مطالعه شده است. در این کار پژوهشی ستون شتاب‌دهنده‌ای که ممکن است در محدوده‌ی ولتاژ ۱۵۰ تا ۲۰۰kV مورد بررسی قرار گیرد طراحی و ساخته شده است. آزمایش این ستون در ولتاژ ۱۵۰kV نشان داد که استفاده از دو مغناطیس هدایت باریکه در دو جهت X-Y ستون طراحی شده قادر است جریانی در حدود $۸۵۰\mu A$ را که از کیفیت مطلوبی برخوردار است به هدف بتاباند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از آقای دکتر حسین غفوریان که در برپایی آزمایشگاه فیزیک نوترون اهتمام و کوشش فراوان نمودند سپاسگزاری و قدردانی می‌نمایند. مؤلفین هم‌چنین از آقای دکتر محمد لامعی‌رشتی که از مشورت‌های بسیار سودمندشان در طول انجام طرح برخوردار بوده‌اند، از آقایان فرهاد ذنوبی و حسن زندی به خاطر کمک‌های فنی و از آقای مهندس سعید صفا به جهت ساخت قطعات فلزی در مراحل مختلف، تشکر و قدردانی می‌نمایند.



- 12.A. Maitland, New Derivation of vacuum breakdown, J. Appl. Phys. 32, 2399 (1961).
- 13.T.W. Aitken, "The design study for the Nuclear Structural Facility at Daresbury," Daresbury Laboratory Report DNPL/NSF/R5 (1973).
- 14.J. Huguenin and R. Dubois, CERN Report, CERN. 22 (1965).
- 15.TH.J.M. Sluyters, R. Amari, V. Kovarik, Brookhaven National Laboratory Report AGS DIV. 11 (1969).
- 16.R.G. Herb, D.B. Parkinson, D.W. Kerst, Phys. Rev 48, 118 (1935).
- 17.Harding, US Patent 3729575, High Voltage insulator coating (1973).
- 18.Shirin Yar Co. theran, Iran, www.sheerinyar.com.