J. of Nuclear Sci. and Tech.
63, 2013, 81-87

مجله علوم و فنون هسته‌ای
۶۳، ۱۳۹۲، ۸۱-۸۷

Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

ساخت شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی با بیشینه انرژی ۲۰۰keV

جواد رحیقی*، مرتضی جعفرزاده خطیبانی، محمد لامعی‌رشتی، حسین قدس، آزاده وکیلی، فرهاد ذنوبی، حسن زندی، حبیب عزیزی، پیوند طاهرپرور

پژوهشکده‌ی علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران ـ ایران

چکیده: پس از طراحی و ساخت ستون شتاب‌دهنده با انرژی ۱۵۰keV، طراحی و ساخت یک سیستم کامل شتاب‌دهنده با انرژی بیشینه‌ی ۲۰۰keV در گروه فیزیک پژوهشکده‌ی علوم هسته‌ای انجام شد. در این راستا علاوه بر ساخت ستون شتاب‌دهنده با انرژی ۲۰۰keV، منبع تغذیه‌ی ۲۰۰kV، ترانس عایق‌بندی شده‌ی ۲۰۰kV، چشمه‌ی یونی از نوع بسامد رادیویی، اتصال‌ها و متعلقه‌های مرتبط با هدایت باریکه در خلأ، و سیستم کنترل، دیدبانی و ... نیز طراحی و ساخته شدند. در این مقاله به طرح کلی دستگاه و توضیح مختصری از عملکرد اجزای اصلی و مهم آن پرداخته شده است. این شتاب‌دهنده نه تنها می‌تواند یک ابزار سودمند برای پژوهش‌گران باشد، بلکه در به دست آمدن فن‌آوری‌های مهم در زمینه‌های چشمه‌ی یونی، ولتاژ و خلأ بالا نیز سهیم خواهد بود.

کلیدواژه: شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیک، باریکه یون، منبع ولتاژ بالا

Construction of Electrostatic Accelerator with a Maximum Energy of 200keV

J. Rahighi*, M. Jafarzadeh Khatibani, M. Lamehi Rachti, H. Ghods, A. Vakili, F. Zounobi, H. Zandi, H. Azizi, P. Taherparvar

Nuclear Science Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran – Iran

Abstract: Following the successful design and construction of a 150keV accelerator tube, the construction of a 200keV electrostatic accelerator system at the Physics Department of the Nuclear Science Research School has been completed. This accelerator includes a 200keV accelerator tube, a high voltage power supply capable of supplying 200kV at 10mA current and a 200kV isolating transformer. An RF type ion source with a system for the control of ion beam could provide ions to the accelerator system. The vacuum system employed is a turbo molecular pumping system coupled with a mechanical rotary pump, where they can provide clean vacuum in the order of 7-10 Torr. In this paper the design criteria and some technical details of the construction of the accelerator system are presented. The construction of this accelerator provides a useful tool for research in various fields and gives an opportunity for the Iranian industry to develop and build accelerator components such as RF, vacuum and accelerator control systems.

Keyword: ***Electrostatic Accelerator, Ion Beam, High Voltage Power Supply***

*email: javad.rahighi@ipm.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۷/۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۲/۱۲

۱. مقدمه

شتاب‌دهنده‌ها امروزه به صورت ابزار بسیار مفیدی برای پژوهش در علوم بنیادی و کاربردی درآمده‌اند، این ابزار، کاربردهای متنوعی در زمینه‌های فنی و صنعتی دارد. طبق برآوردهای صورت گرفته، حدود ۲۶۰۰۰ شتاب‌دهنده در سراسر جهان وجود دارد که از این تعداد تنها حدود ٪۱ با انرژی بالاتر از ۱GeV صرفاً برای پژوهش‌های بنیادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ٪۴۴ برای مقاصد پرتودرمانی، ٪۴۱ برای کاشت یون و ٪۴ نیز برای پژوهش در زمینه‌های پزشکی به کار گرفته می‌شوند [۱]. در این بین شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی بر خلاف سایر انواع شتاب‌دهنده‌ها که از میدان الکتریکی متغیر برای شتاب دادن به ذرات باردار استفاده می‌کنند، به دلیل بهره بردن از یک منبع ولتاژ ثابت و ایجاد میدان الکتریکی ثابت، از پیچیدگی نسبتاً کم‌تری و در نتیجه از هزینه‌ی پایین‌تری برای ساخت، تجهیز و نگه‌داری برخوردارند. این امر موجب رواج این دسته از شتاب‌دهنده‌ها در بسیاری از دانشگاه‌ها و مراکز صنعتی و پزشکی شده است. شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی عموماً در مواردی استفاده می‌شوند که باریکه با کیفیت بالا، انرژی نسبتاً کم اما با ثبات بالا مورد نیاز باشد. هم‌چنین توانایی شتاب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی برای شتاب دادن به طیف وسیعی از یون‌ها مزیت دیگر این نوع شتاب‌دهنده‌ها محسوب می‌شود. شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی ES-200 یک شتاب‌دهنده‌ی الکتروستاتیکی با دامنه‌ی کاربرد وسیع است که برای پژوهش‌های فیزیک هسته‌ای پایه، فیزیک شتاب‌دهنده و کاربردهای تشخیصی در حوزه‌های مختلف صنعت یون نشانی، پزشکی و آموزشی استفاده می‌شود.

آن‌چه در این مقاله بدان پرداخته می‌شود گزارشی از ساخت شتابدهنده‌ی الکترواستاتیکی و مروری بر نحوه‌ی عملکرد و مشخصه‌های اجزای اصلی تشکیل‌دهنده‌ی آن است.

۲. اصول کار

در این شتاب‌دهنده یون‌های مثبت که توسط مولد یون تولید می‌شوند، تحت اثر میدان الکتریکی ناشی از اعمال ولتاژ ۰ -۵kV پس از خروج از روزنه‌ی مجرای خروجی مولد یون وارد ستون شتاب‌دهنده شده، تحت اثر لنزهای الکترواستاتیکی طبقات اول شتاب‌دهنده به صورت باریکه‌ی یونی پیرامحور در می‌آیند. قطر این باریکه با تغییر در ولتاژ اعمالی (در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰kV) به اولین الکترود تشکیل‌دهنده‌ی لنز، تغییر می‌کند. ولتاژ ۲۰۰kV که توسط یک منبع ولتاژ از نوع کوککرافت والتون تولید می‌شود، از طریق مقاومت‌های تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ به الکترودهای ستون شتاب‌دهنده متصل می‌شود. در اثر تولید میدان الکترواستاتیکی، انرژی یون‌های تشکیل‌دهنده‌ی باریکه‌ی یونی تا ۲۰۰keV افزایش می‌یابد. این یون‌ها طول شتاب‌دهنده و لوله‌ی هدایت‌گر باریکه را تحت شرایط خلأ 10^{-6} تور پیموده و در نهایت بر هدف موردنظر که در محفظه‌ی مخصوص آن نصب شده است تابانیده می‌شوند.

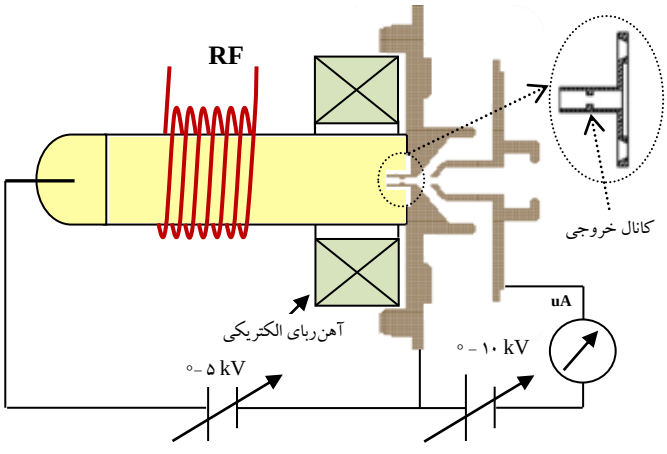
۳. اجزای شتاب‌دهنده‌ی ES-200

۱.۳ چشمه‌ی یون

از میان انواع مولدهای یون، در این شتاب‌دهنده مولد یون از نوع بسامد رادیویی[(۱)] به دلیل پیچیدگی کم‌تر، زیاد بودن نرخ تولید یون‌های اتمی نسبت به یون‌های مولکولی، سهولت به کارگیری در شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی، قابلیت کارکرد مناسب در خلأ از مرتبه‌ی 10^{-5} تور، مصرف کم گاز و جریان نسبتاً زیاد باریکه انتخاب شد. طرح‌واره‌ی این مولد یون در شکل ۱ نشان داده شده است.

اجزای اصلی این مولد یون عبارت‌اند از:

- محفظه‌ی اصلی از جنس شیشه‌ی پیرکس به شکل استوانه به طول ۲۳ سانتی‌متر و به قطر ۲ سانتی‌متر.
- الکترود خارج از جنس تنگستن.
- منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا با ولتاژ ۰ تا ۵kV به منظور خارج کردن یون‌ها.
- نوسان‌ساز و تقویت‌کننده‌ی ۷۰ مگاهرتز با توان تقریبی ۱۰۰ وات.



شکل ۱. طرح‌واره‌ی چشمه‌ی یون.

- آنتن انتقال توان امواج الکترومغناطیسی و مدار تطبیق امپدانس.
- کانال خروجی یون که از آن برای تزریق گاز نیز استفاده می‌شود.
- غلاف کانال خروجی از جنس کوارتز.
- آهن‌ربای الکتریکی با شدت میدان 10^{-3} تسلا.

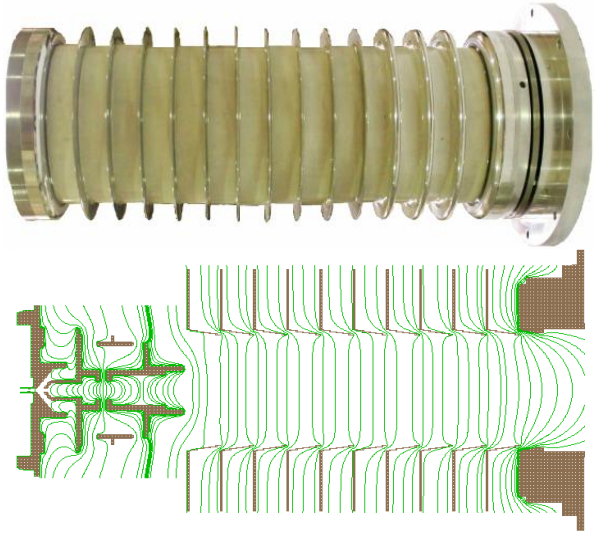
پارامترهای اصلی این نوع مولد که عبارت‌اند از: بسامد و توان تقویت‌کننده‌ی بسامد رادیویی، نوع آنتن، جنس و طول محفظه‌ی شیشه‌ای به یک‌دیگر وابسته بوده و انتخاب آن‌ها با توجه به امکانات آزمایشگاه به انجام رسید.

بسامد و توان تقویت‌کننده‌ی بسامد رادیویی به عنوان مشخصه‌ی اصلی به صورت پیش فرض ۷۰ مگاهرتز و ۱۰۰ وات در نظر گرفته شد. بسامد کار تقویت‌کننده‌های مولد یون عموماً بین ۲۰ تا ۴۵۰ مگاهرتز بود. هر چه بسامد کار کم‌تر باشد، هزینه‌ی ساخت تقویت‌کننده و پیچیدگی کار به همان اندازه کم‌تر می‌شود. اما با افزایش بسامد تقویت‌کننده به دلیل این‌که مسیر حرکت الکترون‌هایی که تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی قرار گرفته‌اند، افزایش می‌یابد، تولید یون نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر توان کم‌تری برای تولید یون مورد نیاز است. هم‌چنین علاوه بر آن با افزایش بسامد می‌توان از محفظه‌ی مولد یون با طول کوتاه‌تر استفاده نمود.

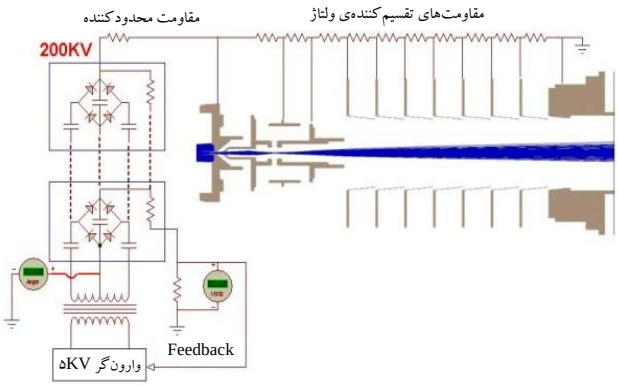
با در نظر گرفتن این موضوع که در فشار 10^{-3} میلی‌بار که نقطه‌ی کار این نوع مولد یون است، میانگین پویش آزاد یون‌ها بسیار بیش‌تر از طول محفظه است، لذا بازترکیب یون‌ها در داخل محفظه نسبت به امکان بازترکیب آن‌ها در اثر برخورد با جداره‌ی محفظه، قابل چشم‌پوشی است. بنابراین مناسب‌ترین ماده برای محفظه‌ی اصلی، ماده‌ی عایقی است که ضریب بازترکیب یون‌ها در اثر برخورد با آن کم‌تر از سایر مواد است. پیرکس با ضریب 2×10^{-5} در مقایسه با کوارتز با ضریب 7×10^{-4} و آلومینیم اکسید با ضریب ۰٫۳۳ برای این منظور انتخاب شد [۲]. با اعمال ولتاژ حدود ۰ تا 5kV به الکترود خارج‌کن، می‌توان مقدار خروج یون‌ها از مولد یون به داخل ستون شتاب‌دهنده را کنترل نمود. این الکترود از جنس تنگستن بوده و توسط یک قطعه از جنس کوارتز از یون‌ها مجزا شده است. در انتهای چشمه‌ی یون و ابتدای دهانه‌ی خروجی یک آهن‌ربای الکتریکی با شدت میدان حدود 10^{-3} تسلا قرار داده شد تا یک میدان مغناطیسی استاتیکی محوری و ناهمگن تولید کند. این میدان باعث فشرده شدن بارهای مثبت در پلاسما، حول محور چشمه‌ی یون و ثانیاً باعث دور شدن الکترون‌ها از محور و افزایش اندرکنش میان الکترون‌ها و اتم‌های گاز داخل محفظه می‌شود.

۲.۳ ستون شتاب‌دهنده با ولتاژ بیشینه‌ی ۲۰۰kV

ستون شتاب‌دهنده، که طولی در حدود ۵۰ سانتی‌متر دارد، از ۱۴ حلقه‌ی سرامیکی و ۱۳ الکترود تشکیل شده است (شکل ۲). الکترودها و حلقه‌های سرامیکی با چسب مخصوص خلأ به قطعات سرامیکی چسبانده شده‌اند. ولتاژ هر الکترود ۱/۱۲ ولتاژ اعمال شده توسط منبع ولتاژ بالا است. برای اعمال ولتاژ بالا به الکترودها از ۳ زنجیره‌ی مقاومتی به عنوان مقسم ولتاژ ایزوله شده استفاده می‌شود مقاومت هر یک از این زنجیره‌ها ۲۰ مگا اهم است (شکل ۳).



شکل ۲. ستون شتاب‌دهنده‌ی ۲۰۰kV.



شکل ۳. نحوه‌ی اتصال منبع ولتاژ بالا.

۳.۳ مولد ولتاژ بالا از نوع کوککرافت- والتون با ولتاژ بیشینه‌ی ۲۰۰kV

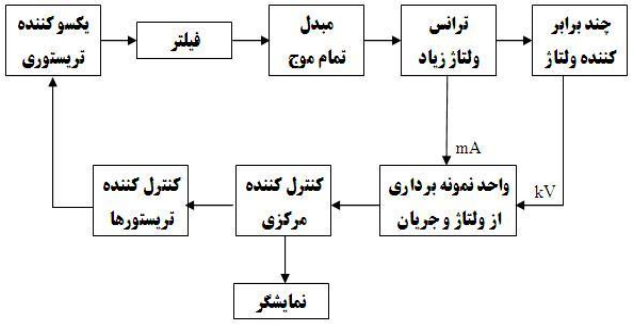
برای ایجاد ولتاژهای بسیار بالا با جریان کم یکی از بهترین روش‌ها- روش چند برابرکننده‌ی دیودی- استفاده شد. ویژگی‌های این مدار عبارت‌اند از:

- سادگی سیستم؛
- قابلیت افزایش ولتاژ خروجی تنها با اضافه کردن تعداد طبقات، دیود خازنی؛
- کم حجم بودن نسبی سیستم در مقایسه با دیگر سیستم‌ها؛
- استفاده از فن‌آوری نسبتاً ساده در ایجاد ولتاژ بالا؛
- امکان تعدیلی کردن سیستم، این امکان باعث افزایش سرعت نصب و راه‌اندازی و رفع عیب می‌شود.

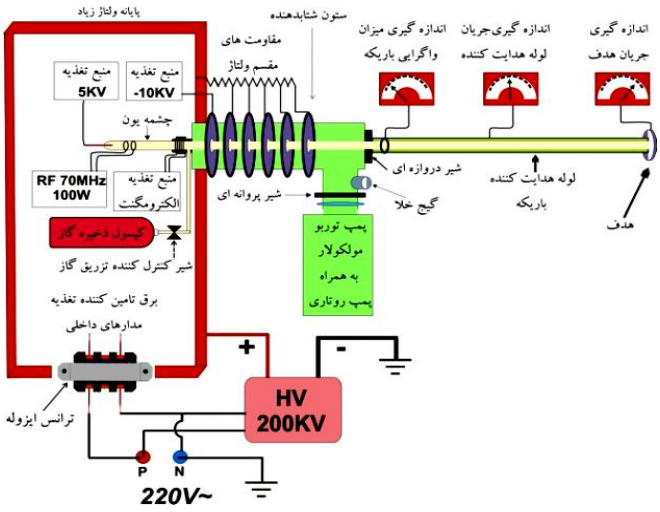
در این سیستم با استفاده از یک مدار چند برابرکننده‌ی شامل ۲۴ طبقه (شکل ۳) ولتاژ جریان مستقیم ۵ تا ۲۰۰ کیلوولت تولید می‌شود. مشخصات فنی و نمودار این منبع ولتاژ در جدول ۱ و شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصه‌های فنی منبع ولتاژ بالا

ولتاژ ورودی	بسامد ورودی برق شهر	حداکثر جریان ورودی
۲۲۰V	۵۰HZ	۲۰A
تعداد فاز	بیشینه جریان خروجی	ریپل
تک فاز	۱۰mA	≤ ۵٪
ولتاژ خروجی	بسامد سوئیچ	یکسوکننده
۲۰۰kV DC	۶٫۳MHz	تمام موج نیم تریستوری
شیوه‌ی کار	قطبیت ولتاژ خروجی	مبدل DC/AC
پیوسته	مثبت	تمام موج IGBT



شکل ٤. نمودار منبع تغذیه‌ی ۲۰۰kV.



شکل ۵. محل قرار گیری ترانس عایق‌بندی شده.

٤.۳ ترانس عایق‌بندی شده

یکی از قسمت‌های چالش برانگیز در ساخت این شتاب‌دهنده، تأمین ولتاژ تغذیه‌ی مورد نیاز برای مدارهای الکترونیکی نصب شده در داخل پایانه‌ی ولتاژ بالا (HV) بود. با توجه به این‌که پایانه‌ی ولتاژ بالا مطابق شکل ۵ باید از بدنه‌ی دستگاه و زمین مجزا شده باشد لذا طراحی و ساخت یک ترانس با نسبت ۱:۱ در دستور کار قرار گرفت.

در ساخت این ترانس به منظور عایق‌سازی آن، سیم‌پیچ ثانویه در محفظه‌ای که با نوعی رزین به طور کامل پر شده است، قرار داده شد (شکل ۵). مدل‌های مختلفی از این ترانس ساخته شد که در فرایند ساخت آن‌ها روش‌های گوناگونی در تزریق رزین برای عایق‌کاری سیم‌پیچ‌های ثانویه به کار گرفته شد و بارها تحت ولتاژ ۲۰۰ کیلو ولت مورد آزمایش قرار گرفت، تا نتیجه‌ی دلخواه حاصل شود.

۵.۳ سیستم خلأ و تزریق گاز

پویش آزاد متوسط یا میانگین مسافتی که یک مولکول گاز بدون برخورد با دیگر مولکول‌ها در فاصله‌ی بین دو برخورد متوالی طی می‌کند در حالت کلی چنین به دست می‌آید [۳]

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}N\pi d^2} = \frac{kT}{\sqrt{2}P\pi d^2} \qquad (1)$$

که در آن P فشار برحسب تور، T دما برحسب کلوین، k ثابت بولتزمن و d قطر مولکول‌های گاز است. به راحتی می‌توان محاسبه نمود که پویش آزاد متوسط برای مولکول‌های گاز نیتروژن که ٪۸۰ حجم هوا را شامل می‌شود و قطر مولکول‌های آن در حدود ۳٫۷ آنگستروم است در دمای ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار ۱ تور تقریباً 5×10^{-3} cm است.

در واقع می‌توان گفت $\lambda \propto 1/P$.

در یک شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی، یون‌ها طی فرایند تولید در مولد یون و افزایش انرژی در ستون شتاب‌دهنده تا برخورد با هدف، مسیری در حدود چند متر را طی می‌کنند. در طی این مسیر برخورد یون‌های موجود در باریکه با مولکول‌های گازهای موجود در فضای داخلی شتاب‌دهنده و یا پراکندگی آن‌ها از این مولکول‌ها موجب کاهش جریان و کیفیت باریکه می‌شود. به عبارت دیگر، فشار فضای داخلی شتاب‌دهنده باید به اندازه‌ای باشد که پویش آزاد متوسط یون‌ها (λ) به بیش از چند متر برسد. با استفاده از رابطه‌ی (۱) حداکثر فشار باید از مرتبه‌ی 10^{-6} تور باشد. برای رسیدن به این خلأ می‌توان از پمپ‌های پخشی و یا توربومولکولی به همراه یک پمپ مکانیکی دورانی استفاده کرد. اگر چه پمپ‌های پخشی نسبت به پمپ‌های توربومولکولی از قیمت به مراتب کم‌تری برخوردارند اما بخار روغنی که به هنگام کار از این پمپ‌ها متصاعد می‌شود در صورت عبور از تله‌ی سرد[۲] می‌تواند به میزان بسیار کم وارد محیط شتاب‌دهنده شده و لایه‌ی نازکی از روغن بر روی سطوح داخلی و از جمله هدف تشکیل دهد که موجب افزایش زمان پمپ کردن و کاهش کیفیت باریکه به هنگام برخورد با هدف می‌شود. به دلایلی که ذکر شده در ساخت این شتاب‌دهنده از یک پمپ توربومولکولی با دهانه‌ی ۱۰۰ میلی‌متری و سرعت پمپ کردن تقریباً ۱۷۰ لیتر بر ثانیه به همراه یک پمپ دورانی دو مرحله‌ای با سرعت پمپ کردن ۱۷ لیتر بر دقیقه استفاده شد. با توجه به حجم فضای داخلی شتاب‌دهنده پس از گذشت حدود یک ساعت از آغاز پمپ کردن، خلأ به حدود 10^{-5} تور رسید، که با ادامه‌ی کار پمپاژ خلأ بهتر از 2×10^{-6} تور شد. این نقطه برای تزریق گاز به مولد یون مناسب است.

به منظور تولید یون باید مقداری گاز با دقت بسیار زیاد به داخل مولد یون تزریق شود. مقداری از این گاز به طور ناخواسته وارد ستون شتاب‌دهنده شده موجب افت خلأ و افزایش مصرف گاز می‌شود. در این شتاب‌دهنده برای تزریق گاز از یک کنترل‌کننده‌ی جرمی[۳] استفاده شد. این وسیله در واقع ترکیبی از یک شیر سلونوئید بسیار سریع به همراه مدار اندازه‌گیر جرم عبوری و یک کنترل‌کننده‌ی PID برای کنترل دقیق جریان گاز است که می‌تواند میزان عبور گاز را (بسته به نوع آن) از صفر تا ۵SCCM تغییر دهد.

۶.۳ اندازه‌گیری جریان باریکه

جریان باریکه و میزان واگرایی آن مشخصه‌هایی هستند که در شتاب‌دهنده‌ها با روش‌های مختلف قابل اندازه‌گیری هستند.

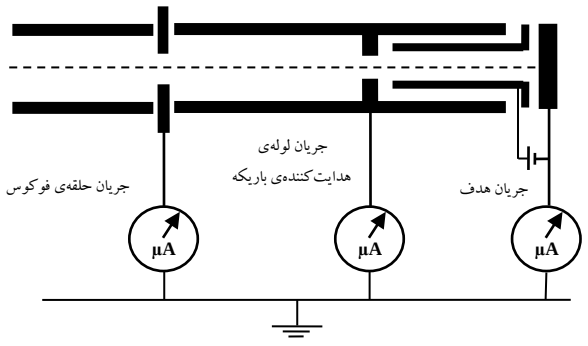
در شتاب‌دهنده‌ی ES-200 مطابق شکل ۶ جریان ناشی از برخورد باریکه را در سه نقطه‌ی مختلف از ستون شتاب‌دهنده و لوله‌ی هدایت‌کننده می‌توان اندازه‌گیری کرد. برخورد باریکه‌ی یون‌های مثبت با هدف منجر به جدا شدن الکترون‌های سطحی در محل برخورد و افزایش بار سطحی هدف می‌شود. در نتیجه‌ی چنین فرآیندی، جریان اندازه‌گیری شده بیش از جریان واقعی نشان داده خواهد شد. برای جلوگیری از چنین خطایی در اندازه‌گیری باریکه تمهیدات لازم برای بازگرداندن الکترون‌های سطحی به هدف از طریق اعمال ولتاژ مثبت در حد چند ده ولت در اطراف هدف پیش‌بینی شد.

جریان باریکه‌ی اندازه‌گیری شده با این روش در شتاب‌دهنده‌ی ES-200 در حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰μA است که نسبت به شرایط چشمه‌ی یونی می‌تواند متفاوت باشد.

۷.۳ واحد کنترل سیستم

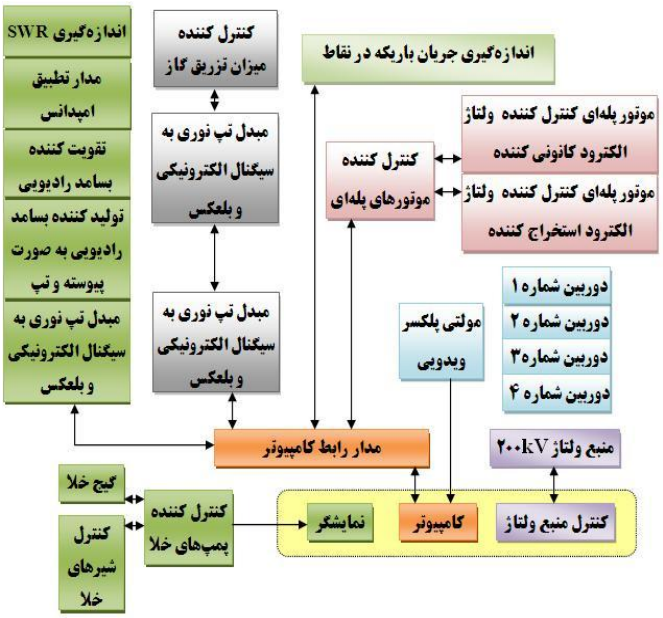
به منظور سهولت در کاربری این شتاب‌دهنده، همه‌ی ابزارهای کنترلی و نظارتی موردنیاز، به صورت متمرکز در داخل یک پانل به ابعاد ۱۷۰cm×۶۰cm×۶۰cm نصب شد. در شکل ۷ تصویر این پانل کنترل آورده شده است. اجزای این پانل کنترل عبارت‌اند از:

- یک کامپیوتر به منظور برقراری ارتباط دو طرفه با مدارهای واسطه‌ی کنترلی و مشاهده‌ی تصویر دوربین‌های نظارتی بر روی نمایش‌گر؛
- قسمت کنترلی مدار مولد ولتاژ بالا؛
- نمایش‌گر مقدار خلأ؛
- کلیدها و فیوزها.



شکل ۶. نحوه‌ی اندازه‌گیری جریان باریکه.

شکل ۷. پانل کنترل شتاب‌دهنده.



شکل ۸. نمودار سیستم کنترل شتاب‌دهنده.

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود واحد کنترل از اجزای مختلفی تشکیل شده است که ارتباط بیش‌تر آن‌ها با کامپیوتر، از طریق یک مدار واسطه با استفاده از درگاه موازی (RS-232) برقرار می‌شود.

۱.۷.۳ مدار اندازه‌گیری جریان‌های حاصل از برخورد باریکه در نقاط مختلف

این قسمت از ۳ مدار تبدیل جریان به ولتاژ در روش انتگرالی، به همراه ۳ کانال مبدل قیاسی به عددی ۱۰ بیتی داخلی یک ریزکنترل‌کننده، تشکیل و برای اندازه‌گیری جریان‌های ۱μA تا ۱mA تنظیم شده است. درعمل به دلیل وجود نوسان در جریان باریکه با دقت تقریباً ۱۰μA می‌توان مقدار جریان‌ها را اندازه‌گیری نمود.

۲.۷.۳ مدار کنترل موتورهای پله‌ای

برای تنظیم منابع تغذیه‌ی متصل به الکترودهای کانونی‌کننده و خارج‌کننده، از ۳ موتور پله‌ای به همراه ۳ عدد واریاک استفاده شد. برای کنترل این موتورها مداری طراحی و ساخته شد که علاوه بر ارسال فرمان کنترل و راه‌اندازی موتورها، موقعیت زاویه‌ای محور آن‌ها را نیز اندازه‌گیری کرده و به مدار واسط ارسال می‌نماید تا در اختیار کاربر قرار گیرد.

۳.۷.۳ مدار رابط نوری برای برقراری ارتباط دوطرفه بین کامپیوتر و کنترل‌کننده‌ی میزان تزریق گاز

با توجه به این‌که کنترل‌کننده‌ی گاز باید در داخل پایانه‌ی ولتاژ بالا قرار داده شود، لذا برقراری ارتباط با آن تنها با استفاده از فیبر نوری امکان‌پذیر است. بنابراین مدارهای مبدل علامت‌های الکتریکی به نوری و بالعکس طراحی و ساخته شد، به طوری که کاربر بتواند از طریق سطح مشترک گرافیکی در نرم‌افزار کنترلی شتاب‌دهنده و این رابطه‌های نوری- الکترونیکی به سهولت حجم گاز تزریق شده به چشمه‌ی نوری را با دقتی از مرتبه ۰٫۰۱SCCM کنترل نماید. فشار گاز داخل مخزن و دمای شیر کنترل‌کننده‌ی جرمی نیز مشخصه‌هایی هستند که در نرم‌افزار به نمایش درمی‌آیند.

۴.۷.۳ مدار مولد تپ برای تولید باریکه‌ی یونی

با اعمال تپ‌هایی با پهنای دست کم ۱۰μs به قسمت نوسان‌ساز قسمت بسامد رادیویی RF، می‌توان دامنه‌ی امواجی که به چشمه یونی اعمال می‌شوند را تعدیل نمود. در نتیجه تولید و تزریق یون‌ها از حالت پیوسته به حالت تپی تغییر می‌یابد. مداری که برای این کار طراحی و ساخته شد از یک ریزکنترل‌کننده، فیبر نوری و ملحقات آن تشکیل شده است و کاربر می‌تواند به کمک نرم‌افزار کنترلی، چشمه‌ی یون را با پهنای تپ دلخواه (بزرگ‌تر از ۱۰μs تا پیوسته) تنظیم نماید.

٤. کاربردهای شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی ES-200

- صنعت: کاشت یون، کنترل فرایندهای صنعتی هم‌چون کنترل فرایند تولید سیمان، تجزیه و تحلیل کیفیت زغال سنگ، و ... .
- پزشکی: اندازه‌گیری عناصر کم مقدار در بدن و مطالعات مربوط به تغذیه و رژیم غذایی.
- محیط زیست: سنجش پس‌ماندهای هسته‌ای.
- اندازه‌گیری ژئوفیزیکی مانند: نقشه‌برداری، تجزیه‌ی مواد معدنی و کانی‌ها، اکتشاف نفت.

۵. نتیجه‌گیری

طراحی و ساخت سیستم کامل شتاب‌دهنده با انرژی بیشینه‌ی ۲۰۰keV را می‌توان گامی مؤثر و رو به جلو در گسترش فن‌آوری‌های مربوط به این شاخه از علم در کشور محسوب نمود، که علاوه بر آن ابزار سودمندی در اختیار دانشگاه‌ها و مراکز علمی قرار می‌دهد.

نکته مهمی که جا دارد در انتها به آن اشاره شود مواردی است که در شتاب‌دهنده‌ی ES-200 در مقایسه با نمونه‌های خارجی آن (الگوی اصلی برای برگردان و ساخت) ارتقاء یافته است. برخی از این موارد عبارت‌اند از:

- استفاده از پمپ توربومولکولی به جای پمپ پخشی برای رسیدن به شرایط خلأ عاری از بخار روغن؛
- افزایش انرژی شتاب‌دهنده از ۱۵۰ به ۲۰۰keV؛
- استفاده از کنترل‌کننده‌ی جرمی به جای شیر نشتی پالادیم که این امکان را به کاربر می‌دهد تا بتواند از هر گاز دیگری برای تزریق به چشمه‌ی یون و شتاب دادن به آن‌ها استفاده کند. در حالی که در نمونه‌ی اصلی شیر نشتی پالادیم تنها به گاز هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن اجازه عبور می‌دهد. به عبارت دیگر تنها می‌توان باریکه‌ای از یون‌های هیدروژن تولید نمود. هم‌چنین سرعت و دقت کنترل‌کننده‌های جرمی به مراتب از نمونه‌های پالادیمی بیش‌تر است.
- استفاده از کامپیوتر برای کنترل و مشاهده‌ی متغیرهای کنترلی که افزودن امکاناتی هم‌چون استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر کنترل خودکار را در آینده میّسر می‌سازد.
- استفاده از مدار تطبیق امپدانس که موجب افزایش کارآیی چشمه‌ی یونی می‌شود. در نمونه‌ی اصلی به دلیل فقدان این بخش، چشمه‌ی یون تنها در شرایط خاصی دارای عملکرد مطلوب بود و هر گونه تغییری در میزان تزریق گاز یا خلأ کل سیستم موجب از کار افتادن موقت چشمه‌ی یون می‌شد.
- استفاده از تقویت‌کننده‌ی ترانزیستوری به جای تقویت‌کننده‌ی لامپی که علاوه بر موجود بودن در بازار داخل، در شرایط کاری تپی دارای مشخصات به مراتب بهتری نسبت به نمونه‌ی اصلی است که بر پایه‌ی لامپ بسامد رادیویی طراحی شده بود.

پی‌نوشت‌ها:

۱. RF Ion Source

۲. Cold Trap

۳. Mass Flow Controller

مرجع‌ها:

1. T. Feder, Accelerator school travels university circuit, http:// controls.als.lbl.gov/ als_physics/ Fernando/FSannibaleWebSite/Teaching/USPAS/USPASHighLights/PhysiscsTodayUSPAS_Feb 2010. Pdf.

2. C. D. Moak, H. Reese, M. W. Good, Nucleonics 9 (1951).

3. R. Reid, Vacuum Science and Technology in Accelerators Cockcroft Institute Lectures (2010).