



Sci. and Tech. note
یادداشت علمی و فنی

ساخت شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی با پیشینه انرژی ۲۰۰keV

جواد رحیقی*، مرتضی جعفرزاده خطیبانی، محمد لامعی رشتی، حسین قدس، آزاده وکیلی، فرهاد ذنوبی، حسن زندی، حبیب عزیزی، پیوند طاهر پرور
پژوهشکده‌ی علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

چکیده: پس از طراحی و ساخت ستون شتاب‌دهنده با انرژی ۱۵۰keV، طراحی و ساخت یک سیستم کامل شتاب‌دهنده با انرژی پیشینه‌ی 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 سهم خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: شتاب‌دهنده‌ی الکترواستاتیکی، باریکه یون، منبع ولتاژ بالا

Construction of Electrostatic Accelerator with a Maximum Energy of 200keV

J. Rahighi*, M. Jafarzadeh Khatibani, M. Lamehi Racht, 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



۱. مقدمه

توسط یک منبع ولتاژ از نوع کوکرافت 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^۶ ۱۰^{-۶} 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 ۱۰^{-۵} تور، مصرف کم گاز و جریان نسبتاً زیاد باریکه انتخاب شد. طرح‌واره‌ی این مولد یون در شکل ۱ نشان داده شده است.

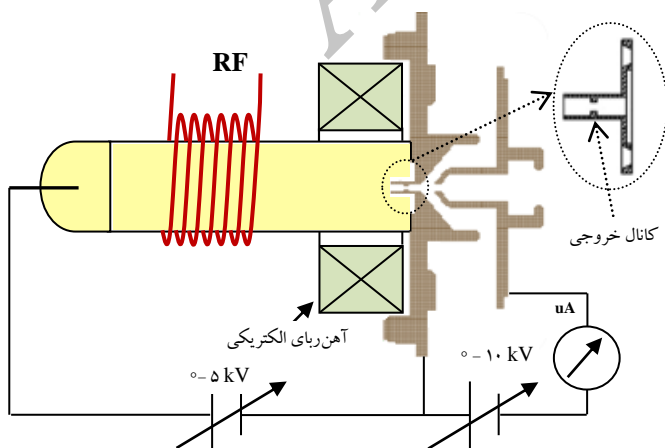
اجزای اصلی این مولد یون عبارت‌اند از:

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

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 الکترواستاتیکی 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 ۵kV پس از خروج از روزنه‌ی مجرای خروجی مولد یون وارد ستون شتاب‌دهنده شده، تحت اثر لزه‌های 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 الکتروده تشکیل‌دهنده‌ی لنز، تغییر می‌کند. ولتاژ ۲۰۰kV که

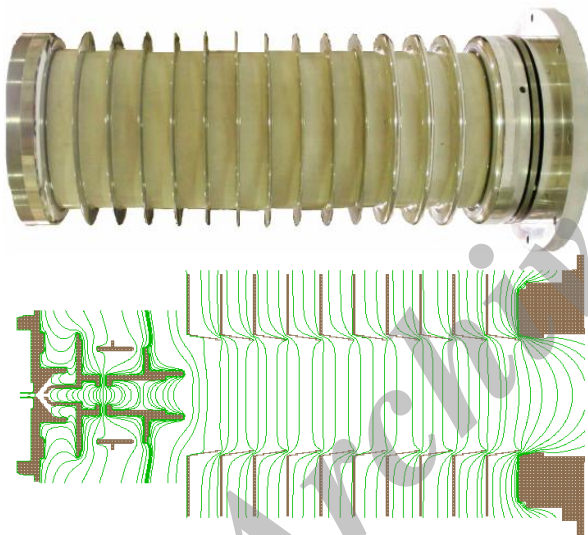


شکل ۱. طرح‌واره‌ی چشمه‌ی یون.

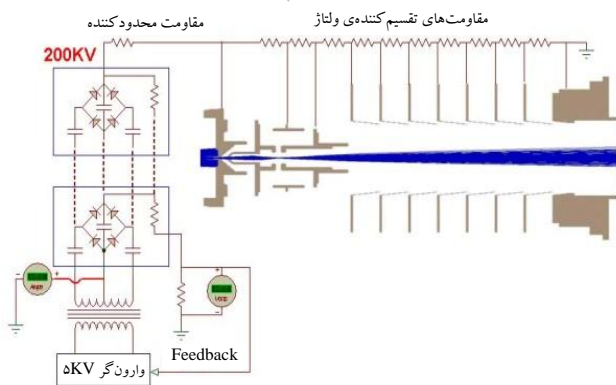
محوری و ناهمگن تولید کند. این میدان باعث فشرده شدن بارهای مثبت در پلاسما، حول محور چشمه‌ی یون و ثانیاً باعث دور شدن الکترون‌ها از محور و افزایش اندرکنش میان الکترون‌ها و اتم‌های گاز داخل محفظه می‌شود.

۲.۳ ستون شتاب‌دهنده با ولتاژ پیشینه‌ی ۲۰۰kV

ستون شتاب‌دهنده، که طولی در حدود ۵۰ سانتی‌متر دارد، از ۱۴ حلقه‌ی سرامیکی و ۱۳ الکتروود تشکیل شده است (شکل ۲). الکتروودها و حلقه‌های سرامیکی با چسب مخصوص خلأ به قطعات سرامیکی چسبانده شده‌اند. ولتاژ هر الکتروود ۱/۱۲ ولتاژ اعمال شده توسط منبع ولتاژ بالا است. برای اعمال ولتاژ بالا به الکتروودها 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.

- 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.

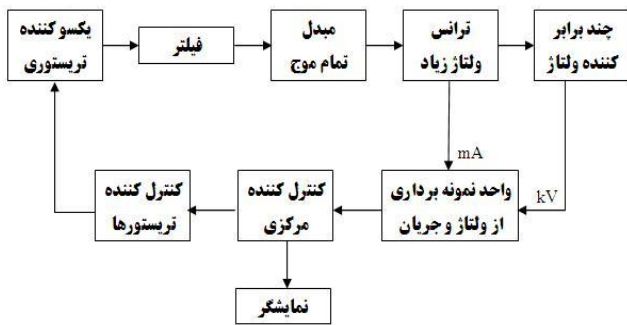
بسامد و توان تقویت‌کننده‌ی بسامد رادیویی به عنوان مشخصه‌ی اصلی به صورت پیش فرض ۷۰ مگاهرتز و ۱۰۰ وات در نظر گرفته شد. بسامد کار تقویت‌کننده‌های مولد یون عموماً بین ۲۰ تا ۴۵۰ مگاهرتز بود. هر چه بسامد کار کم‌تر باشد، هزینه‌ی ساخت تقویت‌کننده و پیچیدگی کار به همان اندازه کم‌تر می‌شود. اما با افزایش بسامد تقویت‌کننده به دلیل این که 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 ۵kV تا ۵kV به الکتروود خارج‌کن، می‌توان مقدار خروج یون‌ها از مولد یون به داخل ستون شتاب‌دهنده را کنترل نمود. این الکتروود 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

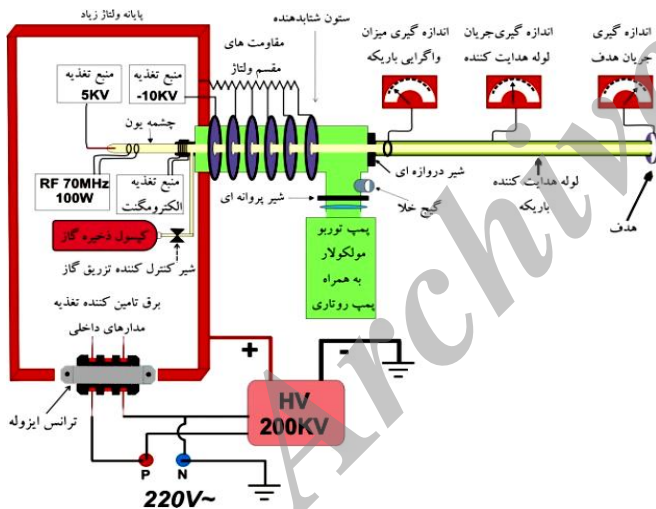


جدول ۱. مشخصه‌های فنی منبع ولتاژ بالا

ولتاژ ورودی	بسامد ورودی برق شهر	حداکثر جریان ورودی
۲۲۰V	۵۰Hz	۲۰A
تعداد فاز	بیشینه جریان خروجی	ریبل
تک فاز	۱۰mA	≤ ۵%
ولتاژ خروجی	بسامد سوئیچ	یکسو کننده
۲۰۰kV DC	۶.۳MHz	تمام موج نیم تریستوری
شیوه‌ی کار	قطبیت ولتاژ خروجی	مبدل DC/AC
پیوسته	مثبت	تمام موج IGBT



شکل ۴. نمودار منبع تغذیه‌ی ۲۰۰kV.



شکل ۵. محل قرار گیری ترانس عایق‌بندی شده.

که در آن P فشار برحسب تور، T دما برحسب کلونین، k ثابت بولتزمن و d قطر مولکول‌های گاز است. به راحتی می‌توان محاسبه نمود که پوشش 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 $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ است. در واقع می‌توان گفت $\lambda \propto 1/P$.

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

برای ایجاد ولتاژهای بسیار بالا با جریان کم یکی از بهترین روش‌ها- روش چند برابر کننده‌ی 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 فن آوری 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 برابر کننده‌ی 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.

۴.۳ 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 این که پایانه‌ی ولتاژ بالا مطابق شکل ۵ باید از بدنه‌ی دستگاہ 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

پوشش 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]

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

۶.۳ اندازه‌گیری جریان باریکه

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

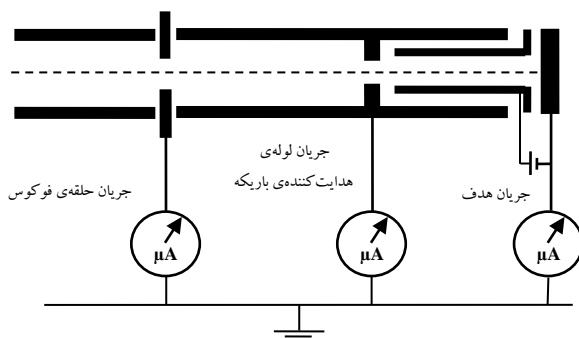
در شتاب‌دهنده‌ی ES-200 مطابق شکل ۶ جریان ناشی از برخورد باریکه را در سه نقطه‌ی مختلف از ستون شتاب‌دهنده و لوله‌ی هدایت‌کننده می‌توان اندازه‌گیری کرد. برخورد باریکه‌ی یون‌های مثبت با هدف منجر به جدا شدن الکترون‌های سطحی در محل برخورد و افزایش بار سطحی هدف می‌شود. در نتیجه‌ی چنین فرآیندی، جریان اندازه‌گیری 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 $600 \mu A$ 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 $170 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ نصب شد. در شکل ۷ تصویر این پانل کنترل آورده شده است. اجزای این پانل کنترل عبارت‌اند از:

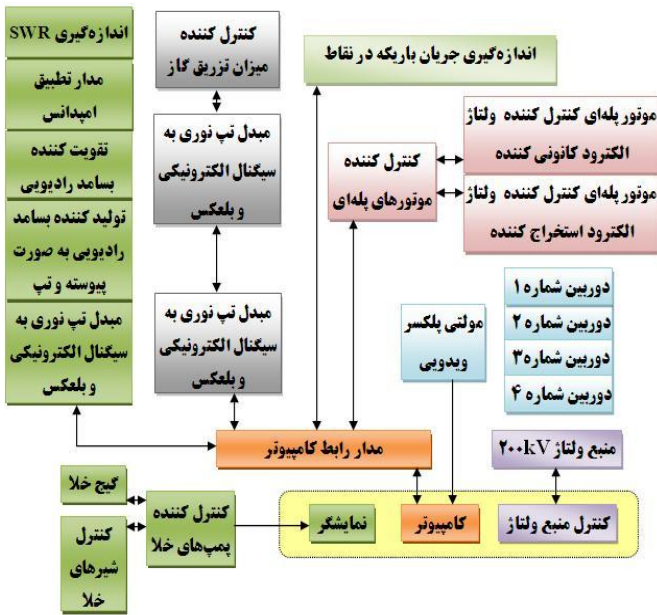
- یک کامپیوتر به منظور برقراری ارتباط دو طرفه با مدارهای واسطه‌ی کنترلی و مشاهده‌ی تصویر دوربین‌های نظارتی بر روی نمایش‌گر؛
- قسمت کنترلی مدار مولد ولتاژ بالا؛
- نمایش‌گر مقدار خلأ؛
- کلیدها و فیوزها.



شکل ۶. نحوه‌ی اندازه‌گیری جریان باریکه.

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.



شکل ۸. نمودار سیستم کنترل شتاب‌دهنده.



شکل ۷. پانل کنترل شتاب‌دهنده.

۳.۷.۳ مدار رابط نوری برای برقراری ارتباط دوطرفه بین کامپیوتر و کنترل‌کننده‌ی میزان تزریق گاز با توجه به این که 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 0.1 SCCM 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 $10 \mu\text{s}$ 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 $10 \mu\text{s}$ تا پیوسته) تنظیم نماید.

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 $1 \mu\text{A}$ تا 1 mA تنظیم شده است. در عمل به دلیل وجود نوسان در جریان باریکه با دقت تقریباً $10 \mu\text{A}$ می‌توان مقدار جریان‌ها را اندازه‌گیری نمود.

۲.۷.۳ مدار کنترل موتورهای پله‌ای برای تنظیم منابع تغذیه‌ی متصل به الکتروودهای 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.



- 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 تغییر 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_Feb2010. Pdf](http://controls.als.lbl.gov/als_physics/Fernando/FSannibaleWebSite/Teaching/USPAS/USPASHighLights/PhysiscsTodayUSPAS_Feb2010.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).

۴. 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 پس‌مانده‌های 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 میسر می‌سازد.