

طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ برای سیکلوترون کلاسیک و بررسی پارامترهای مؤثر در جریان خروجی آن

INC29-1367

الناز مصلحی بهارانچی*، سید ظفر... کلانتری

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، اصفهان، ایران

چکیده:

سیکلوترون نوعی شتاب‌دهنده دایروی است که در آن ذرات باردار تولید شده در چشمه یون، در حضور میدان مغناطیسی به چرخش در می‌آیند و با وجود میدان الکتریکی در هر گاف، انرژی آن‌ها افزایش می‌یابد تا به شعاع و انرژی نهایی برسند. چشمه یونی یکی از اجزای مهم و اساسی در شتاب‌دهنده‌هاست. لازمه یک شتاب‌دهنده ایجاد باریکه خروجی با جریان مناسب است که ایجاد باریکه با انرژی و جریان مورد نیاز در چشمه یون نقش اساسی در آن دارد. در این مقاله برای شتاب‌دهنده سیکلوترون کلاسیک، چشمه یونی پنینگ که مناسب‌ترین چشمه پروتونی برای این شتاب‌دهنده است طراحی و ساخته شد و تأثیر پارامترهای جریان گاز ورودی، ولتاژ کاتد، میدان مغناطیسی و ولتاژ کشنده بر جریان پرتو یونی آزمایش و شرایط بهینه برای ایجاد بیشترین جریان چشمه به ترتیب 6 sccm ، 1 kV ، $T544$ و 1500 V به دست آمد. مقدار جریان بهینه در شرایط خلأ 10^{-4} Torr ، $22 \mu\text{A}$ به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که یون با جریان مناسبی از چشمه یونی طراحی شده خارج می‌شود.

کلیدواژه‌ها: چشمه یونی پنینگ، شتاب‌دهنده سیکلوترونی، باریکه پروتون، ولتاژ کشنده، ولتاژ کاتد، جریان خروجی چشمه یونی.

Design and construction of Penning ion source for classical cyclotron and investigation of effective parameters in its output current

Elnaz Mosleli Baharanchi, Seyed Zafarollah Kalantari

Department of Physics, Isfahan University of Technology, Isfahan

Abstract:

Cyclotron is a type of circular accelerator in which the charged particles produced in the ion source rotate in the presence of a magnetic field, where their energy is increased to reach the final radius and energy by an electric field in each gap. The ion source is one of the important and basic devices in accelerators. The requirement of an accelerator is to create an output beam with the appropriate current, in which creating a beam with the required energy and current in the ion source plays a fundamental role. In this article, for the classic cyclotron accelerator, the Penning ion source, which is the most suitable proton source for this accelerator, was designed and built. The effect of the parameters of the inlet gas flow, cathode voltage, magnetic field, and puller voltage on the ion beam current was tested and the optimal conditions to create the maximum current was determined. The optimum values of the gas flow, cathode voltage, magnetic field and puller voltage are 6 sccm , 1 kV , 0.544 T and 1500 V , respectively. The results show that the ion beam exits the designed ion source with a suitable current.

Keywords: ion source Penning, Cyclotron accelerator, proton beam, Puller voltage, cathode voltage, Output Current of Ion source.

۱. مقدمه

شتاب‌دهنده سیکلوترونی از جمله شتاب‌دهنده‌های ذرات است که کاربردهای متنوعی از جمله در تولید رادیوداروها دارد. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های سیکلوترون چشمه یونی است. در این مقاله به بررسی چشمه یونی پنینگ که مناسب‌ترین چشمه یونی برای این شتاب‌دهنده است می‌پردازیم و با اندازه‌گیری، پارامترهای بهینه آن را برای ایجاد بیشترین جریان به دست خواهیم آورد. چشمه یونی پنینگ از یک دیواره‌ی استوانه‌ای آند و دو قاعده بالایی و پایینی کاتد تشکیل شده است [۱]. نمایی از این چشمه در شکل ۱ آورده شده است. به روش کاتد سرد، اختلاف پتانسیل بین آند و کاتدها اعمال می‌شود. میدان الکتریکی ایجاد شده شاری از الکترون‌ها به وجود می‌آورد و وجود میدان مغناطیسی سبب محصورسازی آن‌ها می‌گردد. با وارد شدن گاز در محیط، الکترون‌ها در مسیر حرکتشان با اتم‌های خنثای گاز زمینه برخورد می‌کنند و منجر به یونش گاز و تشکیل یون می‌شوند. نهایتاً با اعمال اختلاف پتانسیل بین آند و پولر، یون‌های ایجاد شده از شکاف آند خارج می‌شوند [۲].



شکل ۱: نمایی از چشمه یونی پنینگ.

عملکرد منبع یونی به ولتاژ کاتد، فشار گاز، ولتاژ کشنده و میدان مغناطیسی سیکلوترون بستگی دارد. به‌طور خلاصه در این آزمایش‌ها به مشاهده تأثیر پارامترهای مؤثر بر جریان منبع یون شامل ولتاژ کاتد، نرخ گاز ورودی، میدان مغناطیسی و ولتاژ کشنده می‌پردازیم.

۲. روش کار

دستگاه آزمایش متشکل از یک منبع یون، یک آهنربای سیکلوترون و بخش مرکزی دی است که یک کشنده و پروب جریان پرتو روی آن نصب شده است. تصویری از دستگاه آزمایشی در ناحیه مرکزی سیکلوترون در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین منبع یونی مجهز به یک جزء تأمین گاز هیدروژن است که توسط یک تنظیم کننده، سرعت جریان گاز کنترل می‌شود. میدان مغناطیسی آهنربای سیکلوترون در جهت عمود بر چشمه به‌وسیله آهنربا الکتریکی ۲۰۰ دور ۱۰۰ آمپر است [۳]. پرتو یونی توسط یک کشنده نصب شده بر روی قسمت مرکزی دی کنترل می‌شود. جریان پرتو یونی خروجی از چشمه با استفاده از پروب پرتو متحرک متصل به الکترومتر اندازه‌گیری شد. پروب پرتو در فاصله ۲ میلی‌متری از کشنده قرار گرفته و با برخورد یون‌های خارج شده از چشمه، جریان خروجی اندازه‌گیری می‌شود.

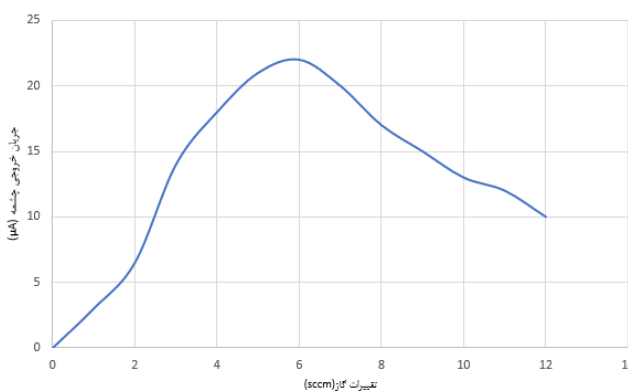


شکل ۲: تصویری دستگاه آزمایشی متمرکز در ناحیه مرکزی سیکلوترون.

پس از طراحی و ساخت چشمه یونی پنینگ تأثیر نرخ گاز ورودی، ولتاژ کاتد، میدان مغناطیسی و ولتاژ کشنده بر جریان پرتو یونی چشمه پنینگ اندازه‌گیری و شرایط بهینه استخراج شد.

مشاهده تأثیر نرخ گاز ورودی بر جریان پرتو یونی

متناسب با ذره‌ای که در سیکلوترون شتاب می‌گیرد، نوع گاز انتخاب می‌شود. میزان گاز ورودی بر شدت یونیزاسیون تأثیر می‌گذارد. جریان پرتو یونی در شرایط اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت ۰/۵۴۴ تسلا، اختلاف پتانسیل ۱kV به کاتدها و اعمال اختلاف پتانسیل ۱۵۰۰ ولت به دی و در مقادیر مختلف جریان گاز ورودی اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



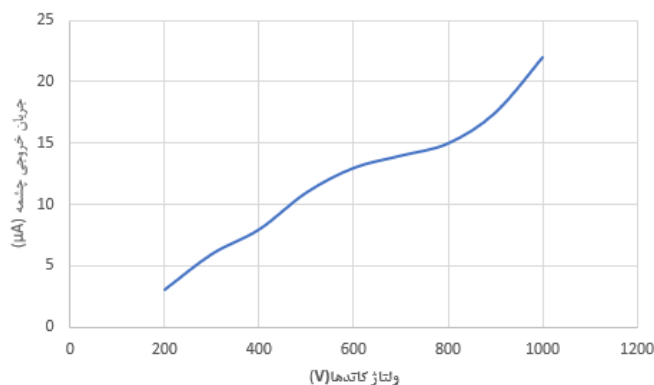
شکل ۳: جریان خروجی چشمه برحسب نرخ گاز ورودی.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت گاز ورودی، جریان خروجی چشمه افزایش می‌یابد و در ادامه با افزایش گاز، جریان پرتو یونی کاهش می‌یابد زیرا زمانی که نرخ گاز وارد شده در چشمه مقدار کمی باشد، گاز کمتری یونیز می‌شود، از طرفی در صورتی که گاز زیادی وارد چشمه شود، یون‌های موجود در چشمه خنثی می‌شوند و جریان کمتری از چشمه خارج می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که در جریان گاز ورودی با نرخ ۶ sccm بیشترین جریان پرتو یونی را داریم.

مشاهده تأثیر ولتاژ کاتد بر جریان پرتو یونی

اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند سبب ایجاد میدان الکتریکی می‌شود و الکترون‌هایی که از کاتد جدا شده و به سمت آند حرکت می‌کنند با برخورد به اتم‌های گاز سبب یونیزاسیون آن‌ها می‌شوند [۴]. هر چه اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند بیشتر باشد، الکترون‌های بیشتری از کاتد کنده شده و انرژی الکترون‌ها بیشتر خواهد بود [۲]. در این آزمایش ولتاژ

کشنده $1500V$ مقدار میدان مغناطیسی ثابت $0.544T$ تسلا باقی می‌ماند و جریان خروجی از چشمه برای هر مقادیر مختلف ولتاژ کاتد اندازه‌گیری شد. نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است.

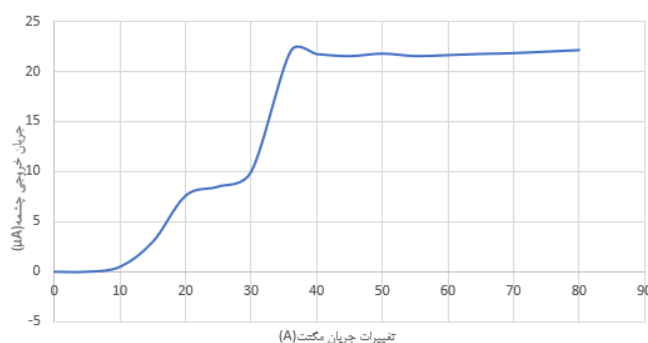


شکل ۴: تغییرات جریان خروجی چشمه برحسب ولتاژ کاتدها.

همان‌طور که انتظار می‌رود افزایش ولتاژ کاتد منجر به افزایش قابل توجه شدت یونیزاسیون در محفظه یونیزاسیون و سپس افزایش قابل توجه جریان پرتو یونی می‌شود.

مشاهده تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان پرتو یونی

با اعمال اختلاف پتانسیل بین کاتد و آند، الکترون‌ها با سرعت زیادی از کاتد به سمت آند حرکت می‌کنند. در صورتی که میدان مغناطیسی اعمال نشود با حرکت سریع الکترون‌ها از کاتد به آند گازی یونیزه نمی‌شود و برخوردی بین الکترون‌ها و گاز اتفاق نمی‌افتد. اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت به همراه میدان الکتریکی باعث کوچک شدن شعاع چرخش در نتیجه افزایش مسیر حرکت الکترون‌ها، افزایش برخورد و در نهایت افزایش بازده یونش می‌شود. در نتیجه میدان مغناطیسی احتمال یونیزاسیون را افزایش می‌دهد. با اعمال پتانسیل ۱ کیلوولت بر کشنده و نرخ گاز ورودی $6sccm$ ، شدت میدان مغناطیسی $0.1T$ تا $0.89T$ اعمال شد. شکل ۵ تغییرات جریان پرتو یونی را برحسب میدان مغناطیسی اعمال شده بر چشمه یونی نشان می‌دهد.

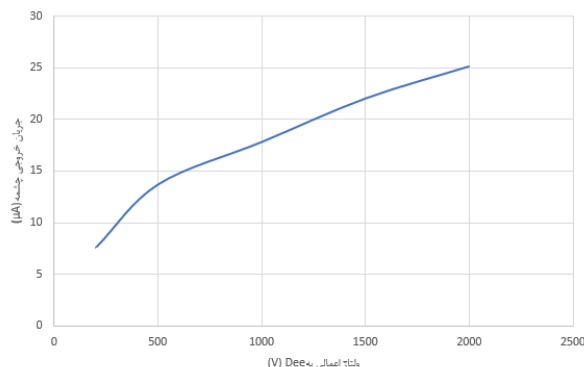


شکل ۵: جریان خروجی چشمه برحسب تغییرات میدان مغناطیسی

مشاهده می‌شود با افزایش میدان مغناطیسی، جریان خروجی چشمه نیز افزایش می‌یابد زیرا با افزایش میدان مغناطیسی شعاع چرخش کوچک‌تر می‌شود و مسیر حرکت ذرات طولانی‌تر می‌شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی بیشتر از $0.544T$ تسلا جریان خروجی چشمه تقریباً ثابت می‌ماند. ثابت ماندن جریان اندازه‌گیری شده پرتو یونی نشان می‌دهد که در میدان‌های بیش از $0.544T$ تسلا یونش به حالت اشباع می‌رسد و به همین دلیل جریان با افزایش میدان تغییر نمی‌کند.

مشاهده تأثیر ولتاژ کشنده بر جریان پرتو یونی

برای خروج یون از داخل چشمه و محفظه‌ی پلازما به یک الکتروود کشنده نیاز است. ولتاژ اعمال به کشنده باید بر اساس انرژی اولیه مورد نیاز یون که از چشمه خارج شود، باشد. اختلاف پتانسیلی که بین کشنده و آند برقرار است باعث بیرون کشیدن یون از چشمه می‌شود. بهترین مقدار میدان مغناطیسی ۰/۵۴۴ تسلا که در نتایج قبل به دست آمد، برای مشاهده تأثیر ولتاژ کشنده بر جریان پرتو یونی اعمال می‌شود. ولتاژهای کشنده ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ ولت برای کشیدن پرتو یونی از منبع یون اعمال شده است و نتایج آن بر جریان خروجی پرتو یونی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: جریان خروجی چشمه بر حسب ولتاژ کشنده

با افزایش ولتاژ اعمالی به دی، تعداد یون بیشتری از شکاف چشمه خارج می‌شوند و جریان بیشتری بر روی دی خوانش می‌شود. به دلیل ایجاد کرونا در کشنده، در پتانسیل‌های بیشتر از ۱۵۰۰ ولت ولتاژ بیشینه کشنده در همین حد تعیین می‌شود. به‌طور معمول، منحنی جریان پرتو یونی در مقابل ولتاژ کشنده مطابق شکل ۶ یک رابطه خطی با شیب تند را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مقدار ولتاژ ۱۵۰۰ ولت جریان پرتو یونی $22 \mu A$ اندازه‌گیری می‌شود.

نتیجه‌گیری

این آزمایش جهت بهینه‌سازی جریان خروجی چشمه یون در سیکلوترون کلاسیک انجام شده است. آزمایش در ناحیه مرکزی سیکلوترون کلاسیک انجام شد. نتایج آزمایش وجود عملکرد اجزای سیکلوترون کلاسیک در جریان منبع یونی را نشان می‌دهد. در این آزمایش بهینه‌سازی مقادیر میدان مغناطیسی، نرخ گاز ورودی، ولتاژ کاتد و ولتاژ کشنده به ترتیب به دست آمد و در این شرایط جریان بیشینه منبع یونی $22 \mu A$ استخراج شد.

تشکر و قدردانی

این آزمایش بخشی از تحقیق و توسعه در فعالیت ساخت و ساز سیکلوترون کلاسیک شرکت دانش‌بنیان بهیار صنعت سپاهان است که با همکاری مشترک در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد تعریف شده در دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است. بنابراین، نویسندگان مایلند از رئیس مرکز و رئیس قسمت فیزیک آن شرکت که حمایت مالی و همکاری علمی در ساخت سیکلوترون کلاسیک را بر عهده داشتند، تشکر کنند.

۵. مراجع

- توکلی، م، طراحی و شبیه‌سازی منبع یون pig برای شتاب‌دهنده سیکلوترون با استفاده از نرم‌افزار CST، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۵.
- S Silakhuddin, S. et al., 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 432 012026.
- Faircloth, D., "Ion sources for high-power hadron accelerators", *CERN-2013-001*, pp. 369-407, 2013.



۴. Faircloth, D., “Negative Ion Sources: Magnetron and Penning”, *CERN Yellow Report CERN-2013-007*, pp.285-310, 2014.