



طراحی و ساخت سیستم کنترلر چشمه یونی از نوع برخورد الکترونی برای سیستم طیف نگار جرمی

حمیدرضا انصاری^۱، احمدرضا ذوالفقاری^{۲*}، سید امیرحسین فقهی^۱

۱. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

۲. گروه راکتور، دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

*Email: a-zolfaghari@sbu.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

قدرت تفکیک دستگاه طیف‌نگار جرمی به صورت مستقیم به شدت یون خروجی و انرژی آن بستگی دارد. مقدار یون تولید شده به جریان و انرژی باریکه الکترونی وابسته است. از جمله وظایف مدار کنترلر چشمه برخورد الکترونی تنظیم جریان و انرژی باریکه الکترونی برای رسیدن به قدرت تفکیک بهینه می‌باشد. در ساخت مدار کنترلر چشمه برخورد الکترونی پارامترهایی نظیر تثبیت جریان باریکه الکترونی و انرژی آن، تنظیم دقیق پتانسیل الکتریکی لنز و الکترودهای چشمه یونی بسیار حایز اهمیت می‌باشد. در این مقاله مدار کنترلر چشمه یونی با قابلیت تنظیم و تثبیت دقیق جریان انتشار الکترون، انرژی باریکه و پتانسیل الکتریکی نقاط طراحی و ساخته شد. این مدار کنترلر بر روی دستگاه طیف نگار جرمی Varian MAT ۴۴ نصب و مورد آزمایش قرار گرفت. مدار کنترلر ساخته شده قادر به تثبیت جریان و انرژی الکترون بهتر از ۱٪ می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: کنترلر چشمه یونی برخورد الکترونی، تثبیت‌کننده جریان انتشار الکترون، طیف نگار جرمی

Design and construction of electron impact ion source controller for Mass spectrometer system

H.R. Ansari¹, A. Zolfaghari^{*2}, A.H. Feghhi¹

1. Radiation Application Department, Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O. Box: 1983963113, Tehran – Iran

2. Reactor Department, Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, P.O. Box: 1983963113, Tehran – Iran

Research Article

Received 7.10.2021, Accepted 15.3.2022

Abstract

The resolution of a mass spectrometer is dependent directly on the strength of the output ion and its energy. The number of produced ions depends on the current and the energy of the electron beam. One task of the electronic collision source control circuit is to regulate the current and energy of the electron beam to achieve optimal resolution. Parameters such as the stabilization of the electron beam current and its energy, the precise change of the electrical potential of the lens, and the ion source electrodes are very important in the construction of the electronic collision source control circuit. In this paper, the ion source control circuit was designed and built and stabilize the electron emission current, beam energy, and electrical potential of points. This controller circuit was installed and tested on the Varian MAT 44 mass spectrometer. The stabilization of the current and energy of the electron in this control circuit was measured to be less than 1%.

Keywords: Electron impact ion source controller, Electron emission current stabilizer, Mass spectroscopy



۱. مقدمه

برای تولید یون در چشمه برخورد الکترونی، نمونه گازی شکل به اتاقک یونیزاسیون وارد می‌شود. یک فیلامان حرارت داده شده (فیلامان از جنس تنگستن با درجه حرارت بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) طبق پدیده گسیل ترمویونی الکترون تولید می‌کند و به دلیل وجود میدان الکتریکی ناشی از پتانسیل الکتریکی بین فیلامان و اتاقک یونش، الکترون‌ها به سمت آن شتاب می‌گیرند.

پرتو الکترونی تحت تأثیر میدان الکتریکی و مغناطیسی، به گونه‌ای طراحی می‌شود که بیش‌ترین بهره‌مکنش با نمونه گازی را داشته باشد. آن سوی اتاقک یونش، الکترودی با پتانسیل مثبت نسبت به اتاقک یونیزاسیون، مقداری از باریکه الکترونی را جمع‌آوری می‌کند تا در سیستم کنترل جریان انتشار استفاده شود.

چگالی جریان الکترون‌ها یا نرخ الکترون‌های منتشر شده از سطح فیلامان توسط معادله ریچاردسون بیان می‌شود [۴].

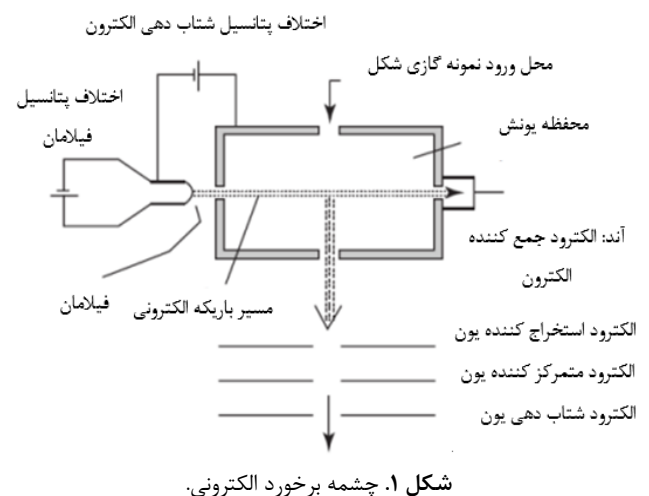
$$J = AT^2 \exp\left(\frac{-\phi}{K_B T}\right)$$

که T درجه حرارت، A ثابت ریچاردسون و ϕ تابع کار کاتد می‌باشد. مهم‌ترین جنبه رابطه ریچاردسون تغییرات نمایی چگالی جریان با دما و تابع کار است لذا جنس کاتد اهمیت ویژه‌ای دارد. مقادیر بالای گسیل به ازای تابع کار کوچک و دمای بالا امکان‌پذیر است. مقدار یون تولید شده بستگی به فشار و دمای نمونه گاز، جریان باریکه الکترون، سطح مقطع یا احتمال یونیزاسیون گاز و هندسه چشمه دارد. شدت جریان و انرژی باریکه الکترونی، دو عامل اصلی تعیین‌کننده نرخ یونیزاسیون می‌باشند [۵].

سیستم کنترل‌کننده چشمه یونی وظیفه تثبیت جریان گسیل الکترون، تثبیت انرژی باریکه الکترون و در نتیجه تثبیت انرژی باریکه یونی را بر عهده دارد. تولید و تثبیت باریکه الکترونی توسط تثبیت‌کننده جریان انتشار و تأمین پتانسیل الکتریکی نقاط مختلف به منظور شتابدهی باریکه الکترون، استخراج و متمرکز کردن باریکه یونی توسط منبع تغذیه DC و تقویت‌کننده‌های ولتاژ صورت می‌گیرد. سیستم تثبیت‌کننده با قابلیت پاسخ کنترلی سریع برای ثابت نگه داشتن نرخ جریان گسیل الکترون و محافظت از فیلامان در برابر آسیب دیدن (در اثر جریان گذرای سریع عبوری از آن و افزایش بیش از حد دما) لازم است.

چشمه یونی از اجزاء اصلی دستگاه‌های مختلفی از قبیل اندازه‌گیرهای فشار خلأ، طیف‌نگارهای جرمی، شتاب‌دهنده‌های ذرات و کنترل فرایندهای تبخیر کاشت یونی و غیره است. عملکرد اساسی چشمه‌های یونی تولید و استخراج یون، شکل‌دهی به باریکه یون و هدایت آن به سمت سایر قسمت‌ها است [۱]. قدیمی‌ترین و در عین حال پر استفاده‌ترین روش یونیزاسیون که به طور گسترده در طیف‌نگارهای جرمی به خصوص در کروماتوگرافی گازی (GCMS) استفاده می‌شود، چشمه برخورد الکترونی (EI) است که تقریباً برای اکثر گازها، ترکیبات فرار و بخارات فلزی می‌تواند استفاده شود. چشمه برخورد الکترونی باید با کارایی و راندمان بالا، یون‌هایی با انرژی یکسان، واگرایی کم، یک بار مثبت (حالت ایده‌آل)، نسبت ایزوتوپی برابر با نمونه اصلی و پایدار در زمان، تولید نماید. در چشمه برخورد الکترونی که در دستگاه‌های طیف‌نگار جرمی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شدت جریان یون تولیدی بر روی حساسیت دستگاه، انرژی و واگرایی یون در قدرت تفکیک اثر واضح و مشخصی دارند و هم‌چنین بار یونی تولید شده در پیچیدگی تحلیل طیف خروجی اهمیت دارد [۱، ۲].

انواع مختلفی از چشمه‌های یونیزاسیون الکترونی وجود دارد که بسته به کاربرد آن‌ها ساختمان مشابه داشته ولی در جزئیات با هم تفاوت‌هایی دارند. این چشمه‌های شامل بخش‌های فیلامان یا کاتد، محفظه یون‌سازی، جمع‌کننده یا همان آند، صفحه دفع‌کننده یون، صفحه استخراج‌کننده یون، لنز متمرکزکننده یون، آهنرباهای دایمی، گرم‌کننده محفظه و حسگر حرارت محفظه یونش می‌باشند که در شکل ۱ نمایش داده شده است [۳].



برای دستیابی به مشخصات گفته شده، کنترل از سه بخش سخت افزار الکترونیکی، نرم افزار کنترلی و نرم افزار رایانه ای تشکیل شده است. بخش های اصلی سخت افزار شامل منابع تغذیه، تقویت کننده ولتاژ و جریان، مدار نمونه گیر جریان فیلامان و گسیل الکترون می باشد. نرم افزار کنترلر بر روی میکروکنترلر اجرا می شود. این نرم افزار شامل توابعی برای مقاداردهی اولیه متغیرها و رجیسترها، بررسی پورت سریال برای دریافت داده، استخراج اطلاعات از داده دریافت شده، مقداردهی مبدل D/A بر اساس داده های دریافت شده، خوانش مبدل A/D و میانگین گیری از آن ها (با نرخ ۵۰۰ نمونه در ثانیه)، اجرای حلقه بسته PID کنترلر برای تثبیت جریان فیلامان یا جریان انتشار الکترون با نرخ ۲۵۰ سیکل در ثانیه و ارسال مقادیر نمونه گیری شده به رایانه می باشد.

بلوک دیاگرام کنترل کننده چشمه یونی در شکل ۲ نشان داده شده است.

برنامه رایانه ای به زبان C# نوشته شده و با رابط USB، مقادیر و حالت مختلف عملکردی وارد شده توسط کاربر را به سخت افزار کنترلی ارسال می کند. این نرم افزار مقادیر واقعی اندازه گیری شده توسط برد کنترل را به صورت عددی و گراف نمایش می دهد. بخش های اصلی سخت افزار الکترونیکی که در قسمت قبل گفته شده، در این جا با جزئیات بیشتر شرح داده می شوند.

۱.۲ منبع تغذیه

تأمین پتانسیل الکتریکی و جریان مورد نیاز بخش های مختلف، به عنوان مثال، ولتاژ کاند، آند و سایر بخش ها اولین قدم برای طراحی مدار کنترل چشمه یونی می باشد. دو منبع تغذیه مورد استفاده در طرح کنترلر چشمه یونی به همراه مقادیر ورودی و خروجی های آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

این بخش از دو منبع تغذیه خطی و سوئیچینگ تشکیل شده است. منبع تغذیه سوئیچینگ (مدل ۱۲-۱۰۰-MeanWell RS) با ورودی ۲۲۰ ولت و خروجی ۱۲ ولت ثابت، برای تأمین جریان فیلامان، در نظر گرفته شده است. برای منبع تغذیه خطی از ترانسفورماتور با ولتاژ ورودی ۲۲۰ ولت و ولتاژهای خروجی مختلف به همراه مدار یکسوکندره و رگولاتورهای ولتاژ استفاده شد. برد منبع تغذیه شامل رگولاتورهای ولتاژ $\pm 125V$ ، $\pm 85V$ ، $\pm 15V$ ، $\pm 5V$ می باشد. رگولاتورها $\pm 125V$ و $\pm 85V$ برای تأمین جریان خروجی حداکثر ۱۰۰mA در نظر گرفته شده اند.

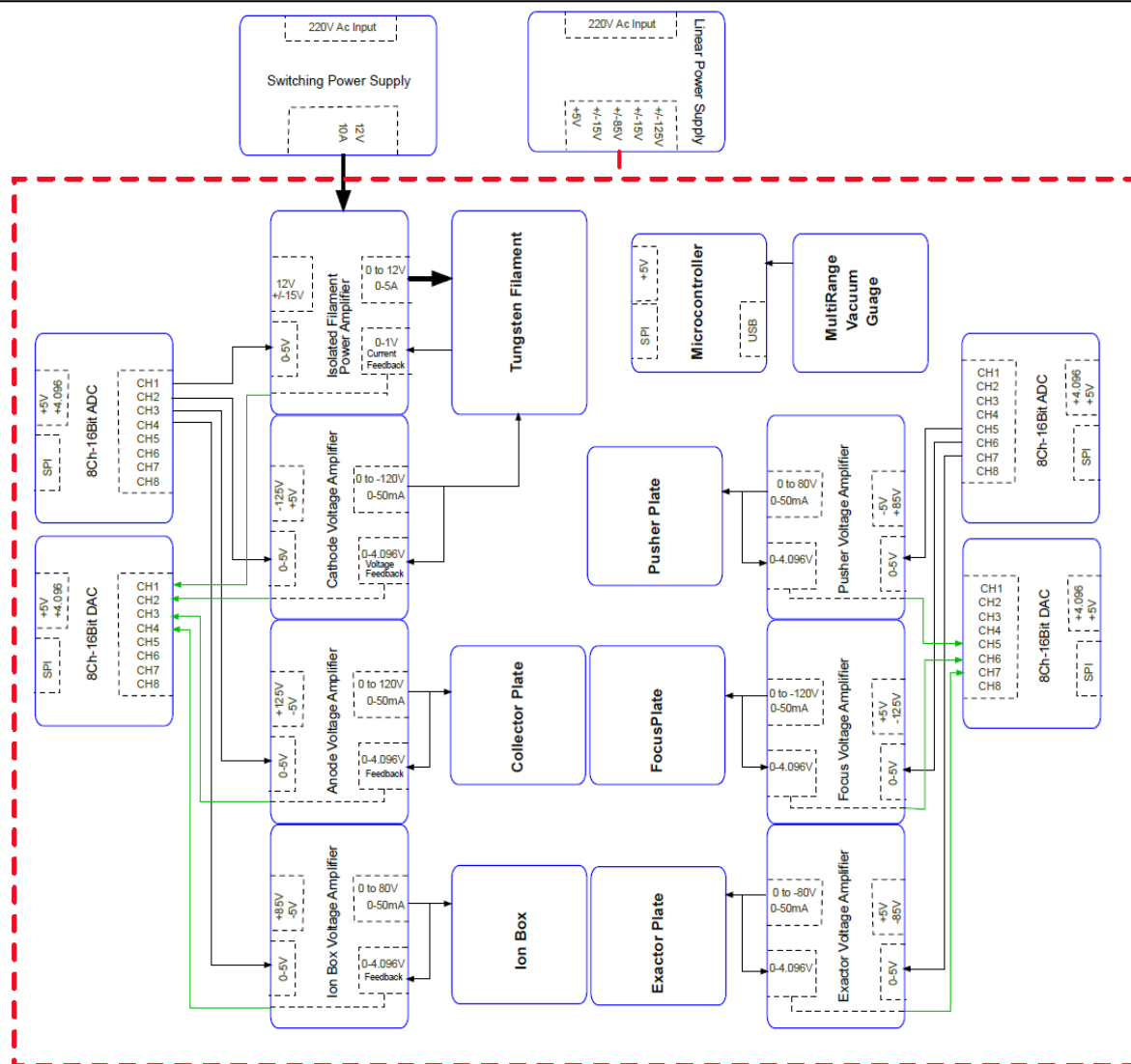
در گذشته تثبیت کننده های گسیل الکترونی به دلیل ساختمان ساده، هزینه پایین و درصد تثبیت خوب اکثراً به صورت سیستم های کنترل حلقه بسته آنالوگی ساخته می شدند. به دلیل انعطاف پذیری کم، دقت پایین، پیچیدگی در تغییرات، کالیبراسیون و عدم ارتباط با سیستم کامپیوتری در حال حاضر کم تر استفاده می شوند. امروزه سیستم های کنترلی جدید با به کار بردن الگوریتم های نرم افزاری، پاسخ سریع به تغییرات کوچک دارند و به دلیل استفاده از کنترلرهای برنامه پذیر، امکان اصلاح و ارتقاء و افزودن عملکردهای مختلفی به آن وجود دارد. در این پژوهش سیستم کنترل کننده چشمه یونی که قابلیت تثبیت جریان و انرژی باریکه الکترونی برای اتصال به دستگاه طیف نگاری جرمی طراحی و ساخته شده است. امکان برنامه ریزی و مشاهده نقاط مختلف چشمه یونی با استفاده از نرم افزار رایانه ای نوشته شده فراهم شده است [۶، ۷]. از جمله نوآوری این پژوهش، با استفاده از حالت حلقه باز کنترلر، دینامیک فیلامان را تحلیل و تابع سیستمی آن را استخراج کرده و در الگوریتم های کنترلی مختلف استفاده کرد. همچنین با تغییرات محدودی در منبع تغذیه و تقویت کننده های ولتاژ، می توان از این سیستم در دستگاه هایی که نیاز به تثبیت جریان انتشار الکترونی دارند، به عنوان مثال اندازه گیر فشار خلأ از نوع بایارد- آلبرت استفاده نمود.

۲. مواد و روش ها

در این مقاله، کنترل کننده چشمه یونی برای دستگاه طیف نگار جرمی GC-MS طراحی و ساخته شد. مشخصات اصلی در نظر گرفته شده برای طراحی کنترلر شامل موارد ۱ تا ۹ می باشد.

۱. تأمین جریان فیلامان در محدوده ۵-۰ A و نمونه گیری از جریان فیلامان
۲. گرمایش تدریجی فیلامان در هنگامی روشن شدن فیلامان
۳. قفل محافظتی فیلامان در فشار بالای ۱۰ mbar
۴. کنترل و تثبیت ولتاژ شتابدهی الکترون ۰V تا ۱۲۵V
۵. کنترل و تثبیت ولتاژ جمع کننده الکترون ۰V تا ۱۲۵V
۶. کنترل و تثبیت ولتاژ صفحه دفع کننده یون ۰V تا ۸۰V
۷. کنترل و تثبیت ولتاژ صفحه استخراج کننده یون ۰V تا ۸۰V
۸. کنترل و تثبیت ولتاژ لنز متمرکز کننده یون ۰V تا ۱۲۵V
۹. اندازه گیری، کنترل و تثبیت جریان گسیلی از فیلامان در محدوده ۲ mA-۰



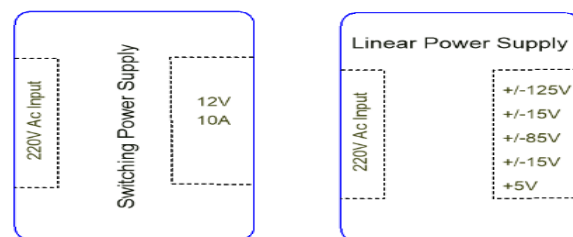


شکل ۲. شماتیک کنترلر چشمه یونی.

استفاده شود. در شکل ۴ مدار الکترونیکی کنترل فیلامان نشان داده شده است.

۳.۲ تقویت کننده های ولتاژ

بسیاری از تجهیزات و ادوات علمی به تقویت کننده های ولتاژ بالا نیاز دارند به عنوان مثال می توان به تجهیزاتی از قبیل سیستم های دقیق موقعیتی MEMS، درایورهای PZT، سیستم های هدایتی باریکه و التراسونیک و بسیاری موارد دیگر اشاره کرد. در این نوع تقویت کننده ها پارامترهای مانند خطی بودن، اتصال^۱ DC، حداقل تغییر فاز، کم بودن نویز، سرعت بالای ولتاژ خروجی و پهنای باند مد نظر قرار می گیرد. رویکردهای مختلفی برای ساخت این نوع تقویت کننده های خطی وجود دارد [۸-۱۰]. طرح های مختلفی برای تأمین ولتاژهای شتابدهی الکترون، صفحات دفع کننده یون،



شکل ۳. طرح منبع تغذیه.

۲.۲ مدار فیلامان

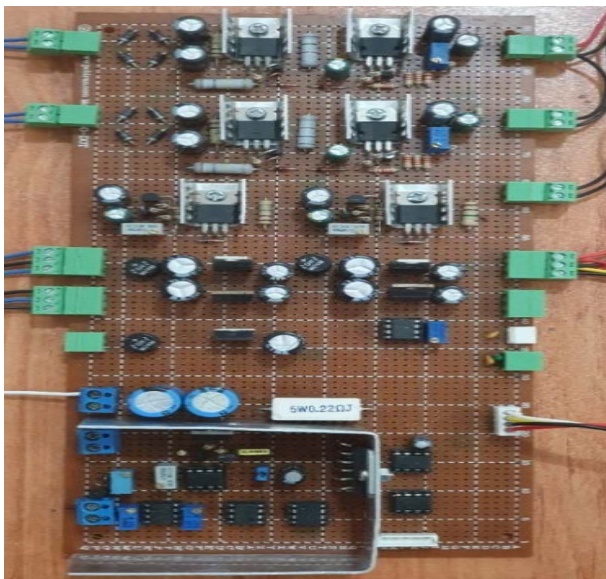
برای تأمین جریان فیلامان تا ۵ آمپر از تقویت کننده عملیاتی OPA549 با بهره حلقه بسته ۳ استفاده گردید. برای ایزوله کردن ورودی این تقویت کننده از ISO124 استفاده شد. جریان فیلامان توسط مقاومت دقیق ۰/۲ اهمی تبدیل به ولتاژ شده و توسط تقویت کننده تفاضلی ایزوله می گردد. ولتاژ خروجی بافر و به مبدل A/D اعمال نمونه برداری شده تا بتوان از جریان فیلامان کرده و برای تثبیت جریان فیلامان و انتشار الکترون

1. Couple

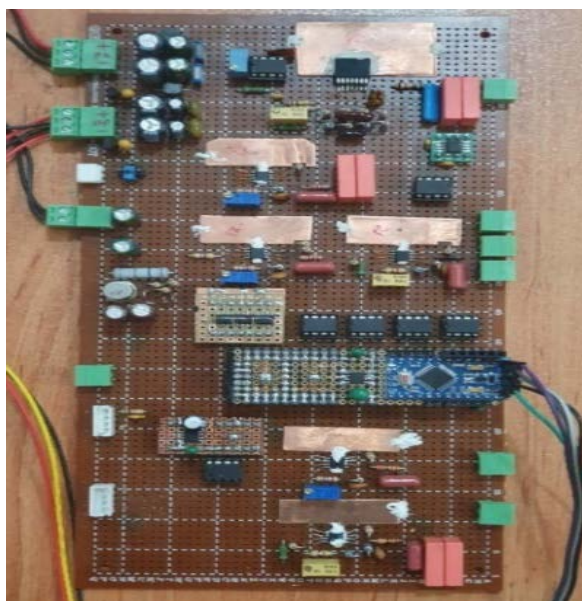


۴.۲ بخش میکروکنترلر

میکروکنترلر مورد استفاده PSOC δ LP از شرکت CYPRESS می باشد. مبدل A/D با شماره ADV۶۸۹ با قابلیت نمونه برداری ۲۵۰۰۰۰ نمونه در ثانیه از نوع SAR، ۸ کاناله و ۱۶ بیتی می باشد و توسط پورت SPI به میکرو کنترلر متصل و خوانش می شود. دو مبدل D/A با شماره AD۵۴۴۶ با چهار کانال ۱۶ بیتی با پورت SPI به میکرو متصل و ارتباط دارد. برنامه نوشته شده به زبان C عملیات مختلف را اجرا می کند. در شکل ۶ تا ۸ تصویری از بردهای مدار کنترلی ساخته شده نشان داده شده است.

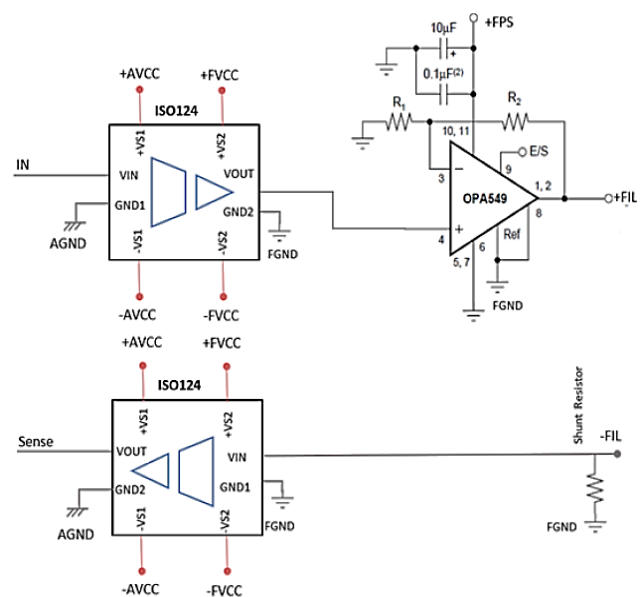


شکل ۶. برد منبع تغذیه.

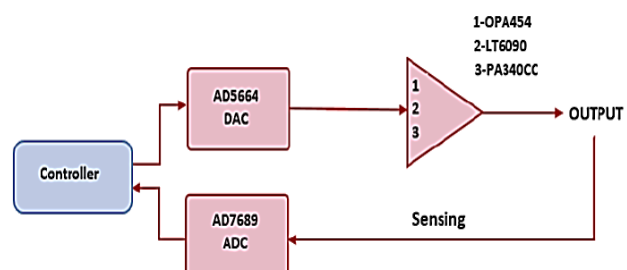


شکل ۷. برد تقویت کننده ولتاژ و میکروکنترلر.

استخراج کننده یون و لنز متمرکز کننده یون می توان در نظر گرفت. در مدار کنترل چشمه یونی به علت عدم نیاز به پهنای باند بالا (پهنای باند مورد نیاز یک کیلوهرتز)، سادگی و فشردگی طراحی و همچنین یکسان بودن مشخصات از تقویت کننده های دقیق عملیاتی استفاده شد. برای تأمین ولتاژ قسمت هایی نظیر صفحه های دفع کننده یون، صفحه استخراج کننده یون، بدنه اتاقک یونش از تقویت کننده عملیاتی OPA۴۵۴ با ولتاژ تغذیه ۱۰۰ ولت و جریان ۵۰ میلی آمپر استفاده شد. بهره تقویت کننده ۱۶ است. برای تولید ولتاژ لنز متمرکز کننده و ولتاژ شتاب دهی از تقویت کننده عملیاتی PP۳۴۰CC و LT۶۰۹۰ با ولتاژ تغذیه ۳۴۰ ولت و جریان دهی ۵۰ و ۲۰۰ میلی آمپری استفاده شد. بهره تقویت کننده ۲۵ تنظیم شد تا ورودی ۰ الی ۵ ولتی از مبدل D/A را به ۱۲۵ ولت برساند. در شکل ۵ مدار تقویت کننده مورد استفاده برای ولتاژ شتاب دهی نمایش داده شده است. مدار تقویت کننده ولتاژ شتاب دهی الکترون به صورت تقویت کننده آنباشی بسته شده است تا از مزایای تقویت کننده دقیق OP۰۲۷ به همراه PA۳۴۰CC (نویز پایین، رانش حداقلی و آفست خروجی کمتر و ...) استفاده شود.



شکل ۴. شماتیک مدار کنترل کننده فیلمان.



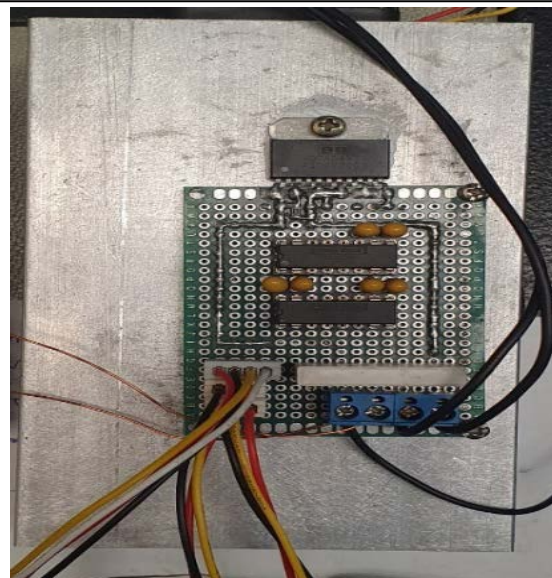
شکل ۵. طرح کلی از یک طبقه تقویت کننده ولتاژ.



گرفته و سعی در از بین بردن آن می‌کند و مقدار واقعی سیستم به مقدار مورد نظر نزدیک‌تر خواهد شد. در صورت وجود خطای ماندگار، خروجی این کنترلر به طور مداوم با گذشت زمان در حال افزایش است مگر این که خطا صفر شود. این کنترل‌کننده به تنهایی به کار نمی‌رود و معمولاً همراه با کنترل‌کننده تناسبی استفاده می‌شود. کنترل‌کننده مشتق‌گیر با ضریب K_d نسبت به نرخ تغییرات خطا در طول زمان، حساس می‌باشد. پاسخ مشتق‌گیر متناسب با نرخ تغییر خطا است، لذا سیستم کنترل نسبت به تغییرات خطا پاسخ سریع‌تری نشان می‌دهد. این کنترل‌کننده به تنهایی به کار نمی‌رود و معمولاً همراه با کنترل‌کننده تناسبی استفاده می‌شود.

فرایند مقداردهی بهینه ضرایب K_p ، K_i و K_d برای دریافت پاسخ نزدیک به ایده‌آل را فرایند تنظیم می‌نامند. روش‌های مختلفی برای این منظور استفاده می‌شود که از میان آن‌ها می‌توان به سعی و خطا، زیگلر نیکولز، کوئن کن و غیره نام برد. اگر اهمیت هر پارامتر به خوبی درک شود، روش آزمون و خطا روش نسبتاً آسان و کاربردی است. در این روش، ضریب انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر ابتدا روی صفر تنظیم می‌شوند و ضریب تناسبی افزایش می‌یابد تا زمانی که خروجی سیستم نوسان کند. با افزایش ضریب تناسبی، سیستم سریع‌تر می‌شود، اما باید مراقب بود که سیستم ناپایدار نشود. هنگامی که K_p یا ضریب تناسبی برای دستیابی به یک پاسخ سریع مطلوب تنظیم شد، ضریب انتگرال‌گیر K_i برای جلوگیری از نوسانات افزایش می‌یابد [۱۴، ۱۵].

ضریب انتگرال‌گیر خطای حالت پایدار را کاهش می‌دهد، اما جهش (Overshoot) را افزایش می‌دهد. مقداری کمی جهش برای یک سیستم سریع لازم است تا بتواند سریعاً به تغییرات پاسخ دهد. هنگامی که K_p و K_i تنظیم شده تا سیستم کنترل به حداقل خطای حالت پایدار دست یابد، ضریب مشتق‌گیر افزایش می‌یابد تا زمانی که حلقه به سرعت به مقدار مورد نظر خود برسد. افزایش ضریب مشتق‌گیر باعث کاهش جهش می‌شود اما افزایش بیش از حد آن سیستم را نسبت به نویز بسیار حساس می‌کند. اغلب اوقات، مصالحه‌ای بین موارد مختلف صورت می‌گیرد. در شکل ۹ فلوچارت نرم‌افزار کنترلی نمایش داده شده است.



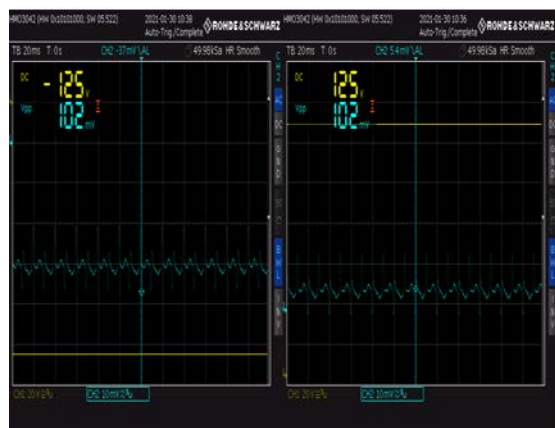
شکل ۸. برد مدار فیلمان.

۵.۲ نرم‌افزار کنترلی

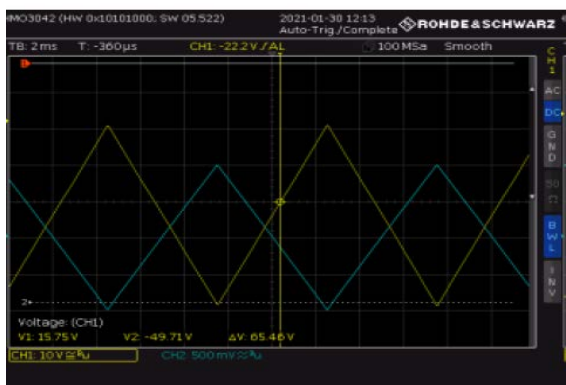
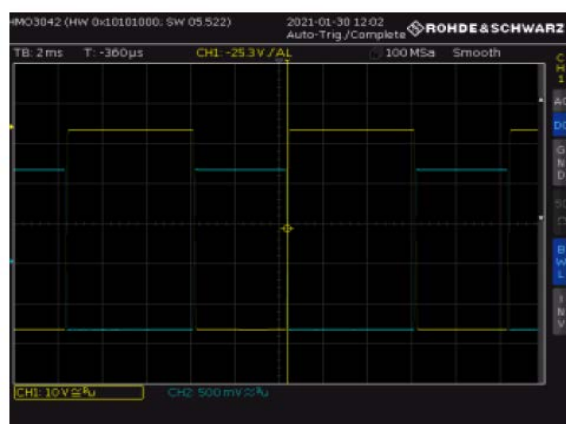
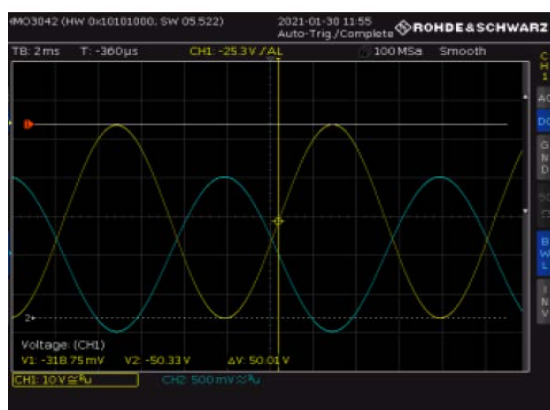
در علوم مهندسی به خصوص در کنترل، تابع انتقال موضوع بسیار با اهمیتی است. تابع انتقال در ساده‌ترین شکل، رابطه‌ای است که ارتباط بین خروجی و ورودی یک سیستم کنترلی را به فرم ریاضی مشخص می‌کند در واقع تابع انتقال مشخص‌کننده رفتار سیستم و تعیین عملکرد کلی یک سیستم می‌باشد. در صورتی که تابع انتقال سیستمی مشخص باشد، می‌توان رفتار آن را در حالات مختلف ارزیابی کرد و با افزودن کنترلر مناسب، سیستم کنترل حلقه بسته کارآمدی را ایجاد کرد. تابع انتقال سیستم‌های فیزیکی معمولاً پیچیده بوده و نیاز به شناسایی مدل ریاضی دارند. تاکنون تلاش‌هایی برای مدل‌سازی منبع گرمایی انتشار الکترونی و استخراج تابع انتقال صورت گرفته است اما هنوز مدل ریاضی دقیق و کاملی برای سیستم گسیل حرارتی الکترونی تعریف نشده است [۱۱-۱۳].

مهم‌ترین بخش یک سیستم حلقه بسته، کنترلر آن است که با اندازه‌گیری مقدار خروجی سیستم، ورودی را برای حفظ خروجی در مقدار مورد نظر کنترل می‌کند. متداول‌ترین نمونه کنترل‌کننده PID است که ترکیبی از کنترل‌کننده تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر است. کنترل‌کننده PID سابقه طولانی در حوزه کنترل خودکار دارد. کنترل‌کننده تناسبی با ضریب K_p ، متناسب با میزان خطای ناشی از مقدار مورد نظر و مقدار واقعی، با تغییر ورودی فرایند سعی در جبران‌سازی خطا می‌کند. افزایش ضریب تناسبی سرعت پاسخ سیستم کنترلی را افزایش می‌دهد. در عمل با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی به تنهایی، خطای ماندگار در اکثر اوقات وجود خواهد داشت. کنترل‌کننده انتگرالی با ضریب K_i از خطای ماندگار در طول زمان انتگرال

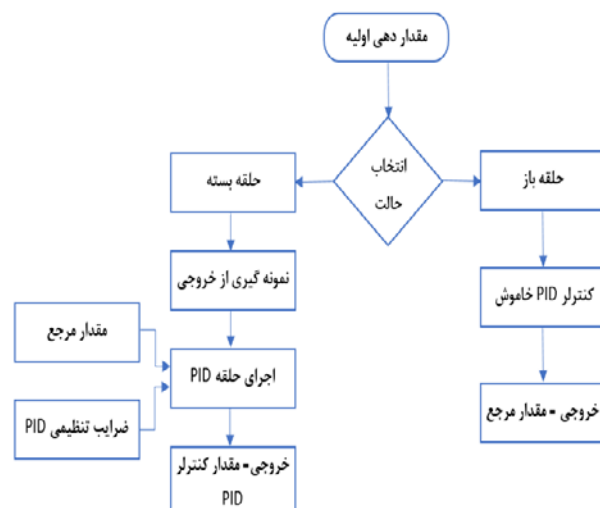




شکل ۱۰. ولتاژ و نوسان خروجی منبع تغذیه ۱۲۵ ولتی.



شکل ۱۱. سیگنال‌های ورودی (آبی رنگ) و خروجی (زرد رنگ) برای ورودی‌های سینوسی، مربعی و مثلثی.



شکل ۹. بلوک دیاگرام نرم افزار کنترلی.

۳. نتایج و مباحث

۳.۱ تست مدار کنترلر چشمه یونی

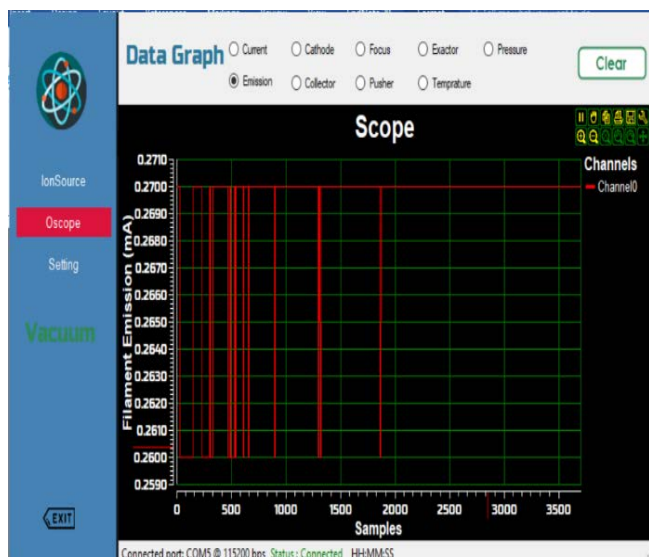
در اولین قدم برد منبع تغذیه بررسی می‌شود تا با اطمینان کافی آن را به تقویت‌کننده‌ها متصل نمود. در شکل ۱۰ ولتاژ خروجی رگولاتورهای $\pm 125V$ که اهمیت بیش‌تری از بقیه رگولاتورها دارند، را به همراه رپل خروجی بر روی اسیلوسکوپ نشان می‌دهد. رپل خروجی در منبع تغذیه $\pm 125V$ کم‌تر $15mV$ و در سایر منبع تغذیه‌ها حدود $25mV$ اندازه‌گیری شده است.

در مرحله بعدی آزمایش تقویت‌کننده‌های ساخته شده، سیگنال‌های ورودی $2V_{p-p}$ سینوسی، مربعی و مثلثی $100Hz$ به آن‌ها اعمال می‌شود. بهره تقویت‌کننده الکتروند، الکتروند متمرکزکننده، الکتروند دفع‌کننده یون و بیرون کشنده یون به ترتیب 25 ، 25 ، $16/5$ و $16/5$ تنظیم شده است. هر چهار تقویت‌کننده می‌تواند حداکثر $50mA$ جریان به بار تحویل دهد. سیگنال تقویت شده خروجی بدون هیچ گونه اعوجاج و انحرافی در شکل ۱۱ دیده می‌شود.

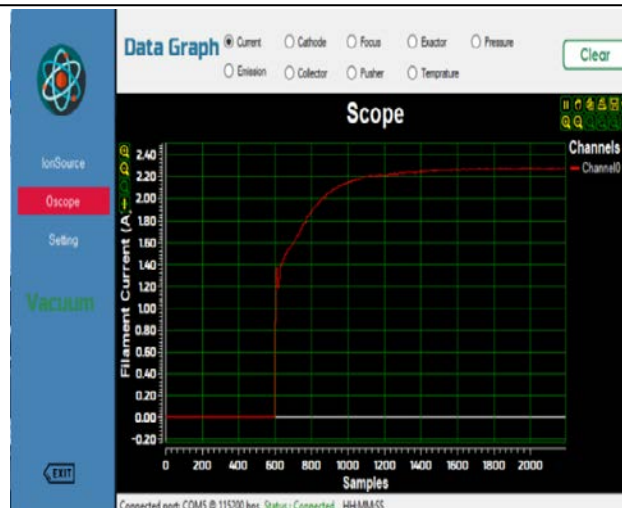
بعد از اطمینان از عملکرد صحیح منبع تغذیه و تقویت‌کننده‌ها؛ تثبیت جریان فیلمان مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در این حالت با انتخاب مد تثبیت جریان فیلمان و مقداردهی در بخش مربوطه نرم‌افزار، کنترلر، فیلمان را در جریان وارد شده تثبیت کند. با وارد کردن مقدار دلخواه، کنترلر با اجرای سیستم حلقه بسته PID جریان فیلمان را در این مقدار ثابت نگه می‌دارد. شکل ۱۲ نشان‌دهنده تثبیت جریان فیلمان است.



در صورتی که در یک دستگاه طیف‌نگار جرمی، چهار قطبی، بخش‌های اصلی مانند فیلتر چهار قطبی (به همراه مدار الکترونیکی آن)، آشکارساز و پیش‌تقویت‌کننده خروجی و خود چشمه یونی به همراه مدار کنترلر آن، در بهترین حالت عملکردی خود باشند، قدرت تفکیک در حدود $0.6-0.7$ amu (دستگاه‌های تجاری رایج) به دست می‌آید. دستگاه طیف‌نگار جرمی Varian MAT ۴۴ از نوع GC-MASS با عمری بیش از ۵۰ سال، قدرت تفکیکی در حدود 0.8 amu در بازه جرمی 1000 amu دارد. در شکل ۱۵ طیف نمونه هوا که مستقیماً از پیش‌تقویت‌کننده دریافت و بر روی اسیلوسکوپ، مانیتور شده را می‌توان دید. قدرت تفکیک دستگاه با هر دو کنترلر اصلی و کنترلر ساخته شده در حدود 0.8 amu است و لذا عملکرد هر دو کنترلر مشابه است. کنترلر ساخته شده در حدود یک سال بر روی دو چشمه یونی دیگر در حال استفاده است.



شکل ۱۳. منحنی تغییرات جریان انتشار فیلمان.



شکل ۱۲. منحنی تغییرات جریان فیلمان.

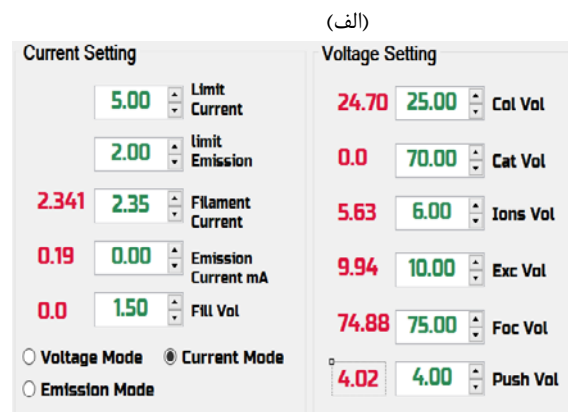
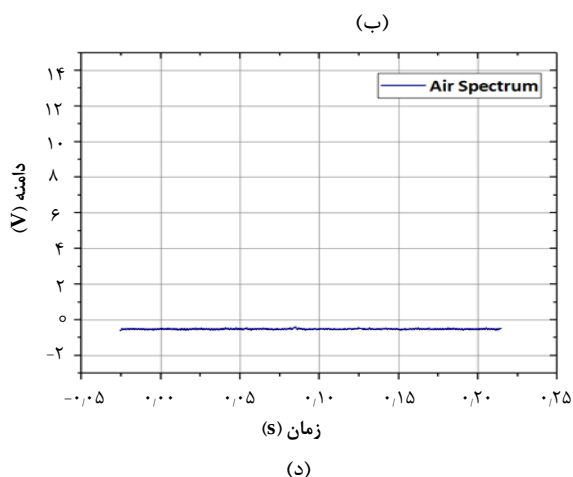
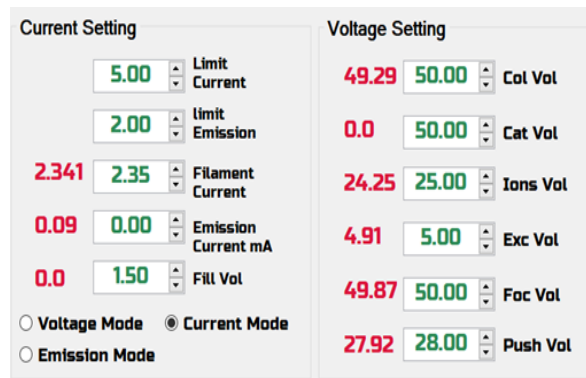
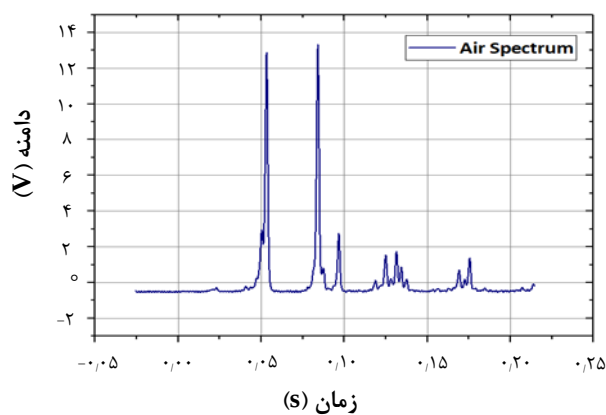
با اندازه‌گیری جریان فیلمان در حالت پایدار درصد تثبیت آن در حدود ۱٪ به دست آمده است. در حالت تثبیت جریان انتشار الکترون می‌بایست ولتاژ شتاب‌دهی بین فیلامان (کاتد)، محفظه یونش و آند وارد شود. در این جا مقدار پیش‌فرض (70 V) باید بین کاتد و محفظه یونش قرار داشته باشد. ولتاژ آند می‌تواند بین 20 V تا 40 V بالاتر از محفظه یونش تنظیم شود. در شکل ۱۳ مقدار جریان انتشار حدود $270\text{ }\mu\text{A}$ تثبیت شده است. درصد تثبیت این جریان نیز حدود ۱٪ به دست آمده است.

۲.۳ تست نهایی کنترلر چشمه یونی

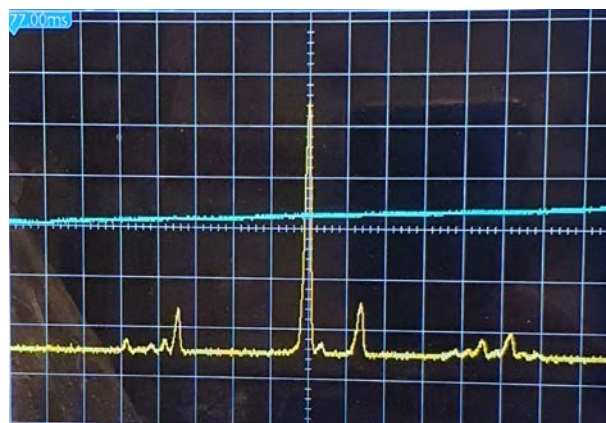
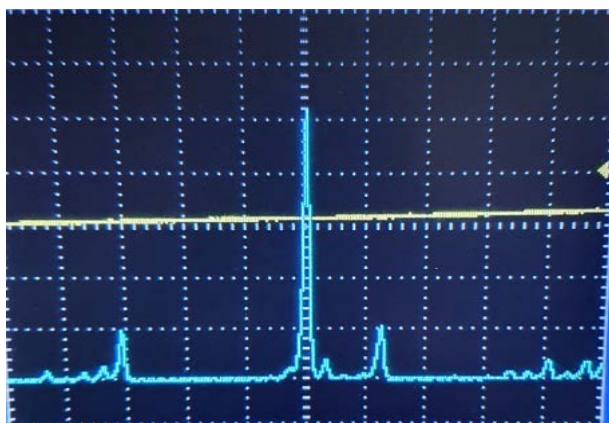
کنترلر چشمه یونی بر روی دستگاه طیف‌نگار جرمی Varian MAT ۴۴ از نوع چهار قطبی نصب شد. کنترلر اصلی این دستگاه از نوع آنالوگ می‌باشد و دارای دو حالت تثبیت جریان فیلامان تا ۸ آمپر و تثبیت جریان انتشار الکترون تا ۱ میلی آمپر است.

می‌توان طیف نمونه ورودی به دستگاه را پس از تولید یون و هدایت آن به سمت فیلتر جرمی به دست آورد. در صورتی که پتانسیل اعمالی به چشمه یونی به صورت مناسبی تنظیم نشده باشد، حتی با وجود جریان انتشار الکترونی، یونی به سمت فیلتر هدایت نمی‌شود. با تنظیم صحیح مقادیر چشمه یونی می‌توان طیف جرمی مناسبی از نظر شدت و قدرت تفکیک به دست آورد. طیف جرمی هوا برای دو تنظیم مختلف چشمه یونی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۴ دیده می‌شود در صورت مناسب نبودن تنظیمات، طیف خروجی مورد نیاز برای تحلیل نمونه به دست نمی‌آید.





شکل ۱۴. الف) تنظیمات مقادیر چشمه یونی برای نمونه هوا. ب) طیف جرمی هوا برای تنظیمات حالت الف. ج) تنظیمات متفاوتی برای چشمه یونی برای نمونه هوا. د) طیف خروجی برای تنظیمات حالت.



شکل ۱۵. الف) طیف نمونه هوا با کنترلر اصلی دستگاه، ب) طیف همان نمونه با کنترلر ساخته شده.

۴. نتیجه گیری

و اعمال مقادیر مناسب (با توجه به هندسه چشمه یونی) می توان با تولید و متمرکزسازی یون، به طیف با قدرت تفکیک مناسب رسید. کنترلر ساخته شده با اعمال تغییراتی می تواند برای اندازه گیریهای فشار خلأ نیز استفاده شود. مدار کنترل ساخته شده قادر به تثبیت جریان و انرژی الکترون بهتر از ۱٪ می باشد.

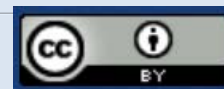
این مقاله گزارشی از ساخت کنترلر چشمه یونی آزمایش بر روی دستگاه طیف نگار جرمی با فیلتر چهار قطبی و آشکارساز تکثیرکننده الکترونی است. کنترلر ساخته شده در سه مد عملکردی تثبیت ولتاژ فیلمان، تثبیت جریان فیلمان و تثبیت جریان الکترون کار می کند. نرم افزار رایانه ای برای مقارنه به کنترلر و مشاهده نتایج نوشته شده است. با انتخاب نوع عملکرد



1. I.G. Brown, *The Physics and Technology of Ion Sources*, 2nd ed. (Wiley& Sons, 2004).
2. J.T. Watson, O.D. Sparkman, *Introduction to mass spectrometry: instrumentation applications, and strategies for data interpretation*, John Wiley & Sons (2007).
3. M. Bart, *Electron impact ionization: Measurements of absolute cross-sections and cross-beam studies*. (2003).
4. D.H. Dowell, *Electron emission and cathode emittance*, *High Brightness Electron Injectors for Light Sources*, 4-5 (2010).
5. K.L. Jensen, *Introduction to the physics of electron emission*, John Wiley & Sons (2017).
6. W.M. Arnold, *Particle patterning using fluidics and electric fields*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **15**(1), 144-151 (2008).
7. E. Flaxer, *Programmable smart electron emission controller for hot filament*, *Review of Scientific Instruments*, **82**(2), 025111 (2011).
8. J.-F. Saheb, et al., *System integration of high voltage electrostatic MEMS actuators*, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, **53**(1), 27-34 (2007).
9. E. Flaxer, *Multichannels high voltage programmable driver for piezoelectric transducer*, *Review of Scientific Instruments*, 35104 (2008).
10. E. Flaxer, *Compact programmable controller for a linear piezo-stepper motor*, *Mechatronics*, **16**(6), 303-308 (2006).
11. B. Kania, *A LabView-based hot cathode electron source simulator with no-boundary condition computation method*, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, **29**(6), 1149-1160 (2016).
12. B. Kania, J. Sikora, *System identification of a hot cathode electron source: Time domain approach*, *AIP Advances*, **8**(10), 105107 (2018).
13. N. Donkov, W. Knapp, *Control of hot-filament ionization gauge emission current: mathematical model and model-based controller*, *Measurement Science and Technology*, **8**(7), 798 (1997).
14. A. O'dwyer, *Handbook of PI and PID controller tuning rules*, World Scientific (2009).
15. R.P. Borase, et al., *A review of PID control, Tuning methods and applications*, *International Journal of Dynamics and Control*, **9.2**, 818-827 (2021).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

حمیدرضا انصاری، احمدرضا ذوالفقاری، سید امیرحسین فقهی (۱۴۰۲)، طراحی و ساخت سیستم کنترلر چشمه یونی از نوع برخورد الکترونی برای سیستم طیف نگار جرمی، دوره ۴۴، شماره ۲، جلد ۱۰۴، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۰۶-۱۱۵

DOI: 10.24200/nst.2023.1398

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1398.html