



بررسی اثر میدان مغناطیسی بر روی باریکه خروجی از تفنگ الکترونی گرما یونی

زهرة دهقانی* ، مهدی بخش زاد محمودی

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله، شبیه سازی یک دستگاه تفنگ الکترونی توسط نرم افزار CST-Particle Studio انجام گرفته است. مدل گسیلی مورد استفاده در این کار از نوع گسیل گرما یونی می باشد که بر اساس گرم شدن فیلمان و گسیل الکترون از آن کار می کند. با توجه به اهمیت استفاده از میدان مغناطیسی در تنظیم باریکه خروجی از دستگاه تفنگ الکترونی، تاثیر مقادیر مختلف میدان مغناطیسی بر روی باریکه خروجی مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی با افزایش مقدار میدان مغناطیسی، باریکه خروجی از آند دستگاه متمرکز و قطر باریکه کوچکتر می شود. در انتها نیز یک دستگاه تفنگ الکترونی گرمایونی، با استفاده از پارامترهای بدست آمده از شبیه سازی و طراحی، ساخته شد. جریان باریکه که توسط تفنگ الکترونی تولید می شود، از محدوده میکرو آمپر می باشد که در توافق کامل با نتایج بدست آمده از شبیه سازی است. دستگاه طراحی شده می تواند برای تبخیر و لایه نشانی مواد با نقاط ذوب متفاوت مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: دستگاه تفنگ الکترونی، انرژی باریکه خروجی، نرم افزار CST.

Investigation of the effect of magnetic field on the output beam of thermionic electron gun

Z. Dehghani*, M. Bakhshzad Mahmoudi

1. Plasma and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.BOX: 14395-836, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, a thermionic electron gun is simulated and fabricated. Several parameters characterize electron beams, including current, energy, and electrical potential. Moreover, electron beam energy of electron gun has been investigated by changing in applied the magnetic field. As the magnetic field increases, the output beam from the anode is concentrated. Finally, a thermionic electron gun is designed and fabricated.

Keywords: Electron gun, Energy beam, CST STUDIO software.

Email: dehghanyz93@gmail.com

۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، کاربرد تفنگ‌های الکترونی وسعت چشمگیری پیدا کرده است. در تفنگ الکترونی به وسیله یک چشمه الکترونی الکترون تولید می‌شود، سپس الکترون‌های تولید شده شتاب داده می‌شوند. الکترون‌های تولیدی توسط تفنگ الکترونی سرعت و انرژی بالایی دارند، به همین دلیل در زمینه‌های گوناگونی مثل صنعت، پزشکی، هوافضا، کشاورزی و غیره کاربرد دارند. پرتو الکترونی در این تفنگ‌ها، با کانونی کردن توسط لنزهای مغناطیسی و الکتریکی، توزیعی کانونی را بر روی هدف‌های مختلف به دست آورده و در کاربردهای مختلف استفاده می‌گردند. در تفنگ‌های الکترونی استفاده شده در دستگاه‌های لایه نشانی، فشار محفظه کمتر از ۵-۱۰ تور بوده و انتشار الکترون از کاتد فیلمانی داغ از جنس تنگستن یا تانتالیم، صورت می‌پذیرد [۱-۳].

روش‌های مختلف و متنوعی در زمینه تولید الکترون وجود دارد. در هر یک از این روش‌ها، تفاوت در نوع و ابعاد باریکه الکترونی می‌باشد. یکی از کاربردهای تفنگ الکترونی و تولید باریکه الکترونی می‌توان به، استفاده از آن در دستگاه‌های لایه نشانی اشاره کرد. همانطور که می‌دانید، لایه نشانی یکی از مهمترین بخش‌های مهندسی سطح است که امروزه با پیشرفت صنعت لایه‌های نازک و پوشش دهی، این فناوری وارد بخش‌های گوناگون صنعت شده است که می‌توان به کاربرد آن در ادوات اپتیکی، میکروالکترونیک، معماری و ساختمان اشاره کرد. روش‌های مختلفی برای ساخت لایه‌های نازک به کار گرفته می‌شود. یکی از این روشها، لایه نشانی بخار فیزیکی^۱ است که در خلا انجام می‌شود. یکی از روشهای لایه نشانی بخار فیزیکی، تبخیر به کمک باریکه الکترونی^۲ است [۲].

با استفاده از این روش می‌توان لایه‌ها را با نرخ‌های متفاوت پوشش دهی از ۱ نانومتر در هر دقیقه تا چندین میکرومتر در هر دقیقه انجام داد. کنترل ساختار و مورفولوژی (ریخت) پوشش‌ها در مقایسه با سایر روش‌های لایه نشانی بیشتر است. این روش لایه نشانی در صنایع مختلف صنعتی مانند پوشش‌های نوری و الکترونیکی و پوشش‌های حرارتی و مکانیکی در هوا و فضا کاربرد گسترده دارد [۴ و ۵]. هدف از این کار، بررسی اثر میدان مغناطیسی بر روی باریکه خروجی از دستگاه تفنگ الکترونی از نوع چشمه گسیل گرما یونی است. این بررسی با استفاده از شبیه سازی دستگاه در حضور میدان مغناطیسی و با استفاده از نرم افزار CST انجام می‌شود.

۲. تئوری شبیه سازی

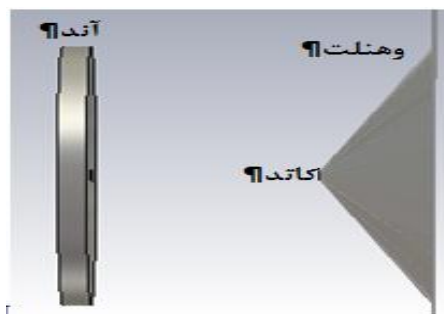
در این کار برای تبخیر و استفاده در دستگاه لایه نشانی، تفنگ الکترونی توسط نرم افزار STUDIO CST شبیه سازی می‌شود. مدل گسیلی مورد استفاده در این کار از نوع گسیل گرما یونی می‌باشد که بر اساس گرم شدن فیلمان و گسیل الکترون از آن کار می‌کند. هدف از این بررسی، تولید انرژی باریکه خروجی تا حدود ۱ کیلو ولت می‌باشد. نکته مهمی که در طراحی تفنگ الکترونی اهمیت دارد این است که سعی شود کل سیستم طوری طراحی گردد که جریان مورد نظر تا حد امکان کمتر باشد. زیرا جریان زیاد باریکه هزینه‌های ساخت منبع تغذیه را افزایش می‌دهد.

نرم افزار CST STUDIO از جمله نرم افزار شبیه ساز مسیر باریکه یونی یا الکترونی است که برای شبیه سازی تفنگ الکترونی در آن لازم است نخست شکل ابتدایی الکترودها رسم شده و سپس پتانسیل‌های هر الکترودها تعیین و نوع مدل گسیل و نوع ذرات تعریف گردند. شرایط مرزی تعیین و سپس دقت مورد نظر مشخص گردد. به منظور دستیابی به باریکه‌ای مناسب با بهترین شکل، خطوط هم پتانسیل الکتریکی از اهمیت زیادی برخوردارند .

طرحواره‌ای از اجزای تفنگ الکترونی گرمایونی در شکل ۱ آورده شده است. در این کار، از کاتد تنگستنی به ضخامت ۰/۸ میلی متر استفاده شده است. بعد از شبیه سازی های بسیار و تغییر پارامترهای بدست آمده بهینه مقادیر در این کار آورده شده است.

¹ Physical Vapor Deposition (PVD)

² Electron Beam Evaporation

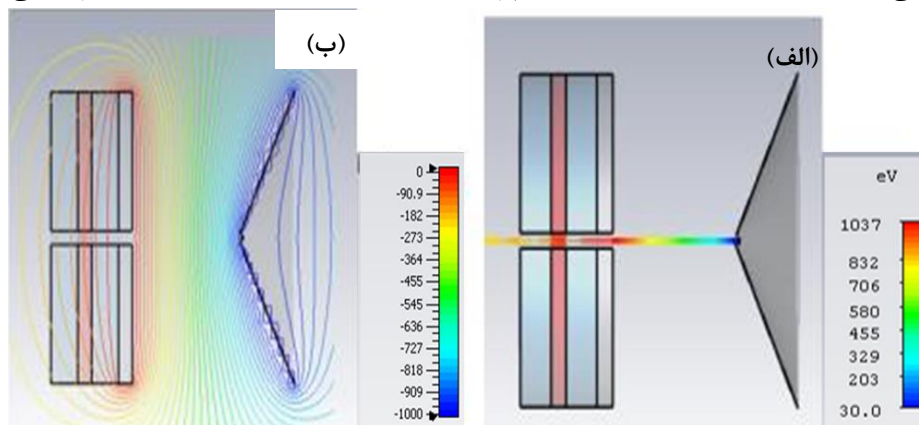


شکل ۱. طرحواره ای از تفنگ الکترونی گرمایونی طراحی شده.

۳. شبیه سازی و نتایج

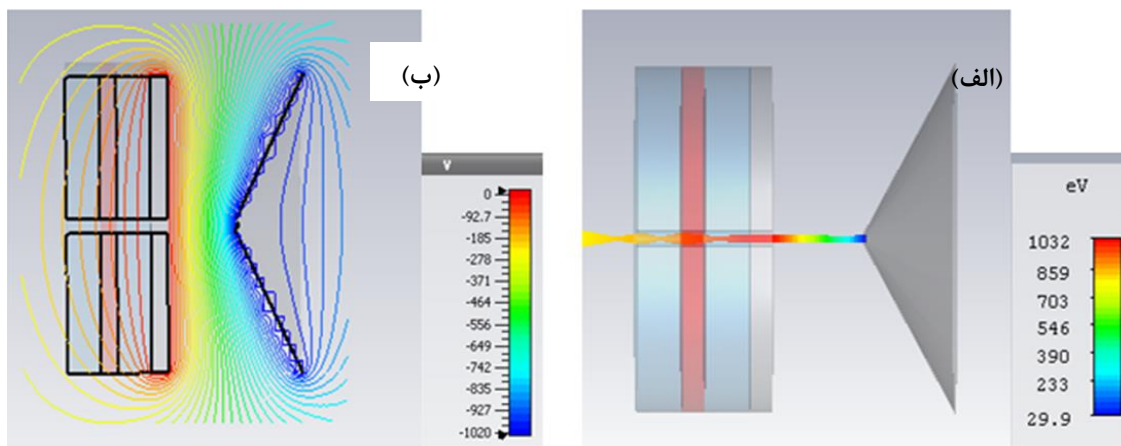
در این بخش مراحل شبیه سازی تفنگ الکترونی و نتایج آن آورده شده است. در این طراحی با توجه به اهداف در نظر گرفته شده در کار، پتانسیل کاتد ۱- کیلو ولت و پتانسیل وهندت ۱۰۲۰- ولت و پتانسیل آند صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین فاصله کاتد تا آند ۴۰ میلی متر می‌باشد. برای کنترل تمرکز و قطر پرتوی الکترونی، با افزایش انرژی خروجی از یک آهنربای مغناطیسی استفاده شده است. این آهنربایی است که درست پس از آند قرار داده می‌شود. مولفه ی میدان مغناطیسی ناشی از این آهنربا، در راستای محور اپتیکی و در جهت Z می‌باشد. چنین میدان مغناطیسی، نهایتاً سبب تمرکز پرتوهای الکترونی می‌شود.

شکل (۲) شبیه سازی تفنگ الکترونی با اعمال میدان مغناطیسی ۴۰۰ گوس برای پتانسیل کاتد ۱- کیلو ولت و پتانسیل وهندت ۱۰۲۰- ولت و پتانسیل آند صفر را نشان می‌دهد (مشخصات فیزیکی این کار مشابه تفسیر فیزیک آورده شده در شکل ۱ است). این تصویر مسیر پرتوی الکترونی خروجی از وهندت (شکل ۲ الف)) و خطوط هم پتانسیل (شکل ۲ ب)) ایجاد شده در مسیر پرتو می‌باشد.



شکل ۲. الف) مسیر پرتو و ب) خطوط هم پتانسیل برای تفنگ الکترونی با اعمال میدان مغناطیسی ۴۰۰ گوس.

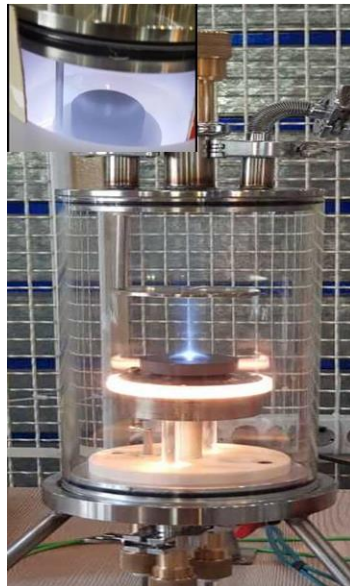
شکل ۳ اعمال میدان مغناطیسی ۱۰۰۰ گوس را با استفاده از آهنربای مغناطیسی، بر روی باریکه الکترونی خروجی از تفنگ الکترونی گرمایونی و در شرایطی که فاصله بین کاتد و آند در تفنگ تغییر می‌کند، را نشان می‌دهد (مشخصات فیزیکی این کار مشابه تفسیر فیزیک آورده شده در شکل ۱ است). این تصویر (شکل ۳ الف)) شامل مسیر پرتوی الکترونی خروجی از وهندت و خطوط هم پتانسیل (شکل ۳ ب)) ایجاد شده در مسیر پرتو می‌باشد. در این بررسی پتانسیل کاتد ۱- کیلو ولت و پتانسیل وهندت ۱۰۲۰- ولت و پتانسیل آند صفر در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳. (الف) مسیر پرتو و (ب) خطوط هم پتانسیل برای تفنگ الکترونی با اعمال میدان مغناطیسی ۱۰۰۰ گوس.

همان طور که از شکل های ۲ و ۳ دیده می شود، میدان مغناطیسی ناشی از آهنربا سبب تمرکز پرتو خروجی و کاهش قطر آن می شود. با افزایش میدان مغناطیسی باریکه الکترونی بهتر متمرکز شده و قطر آن کاهش می یابد. به طور کلی، به علت وجود نیروهای کولنی تولیدی توسط الکترون ها، این ذرات، تمایل دارند تا پس از عبور از شکاف آند، منحرف شوند. علاوه بر آن، اگر برای پرتوهای الکترونی مؤلفه‌ی سرعت عرضی آن‌ها را در نظر بگیریم، پرتو الکترونی، به صورت خطی بدست می آید. با این وجود، در ناحیه انتقال پرتو، زمانی که نیروی بار فضا شروع به غلبه می کند، پرتو الکترون واگرا می شود. اگر میدان مغناطیسی محوری بر روی پرتو الکترونی اعمال شود، نیروی مغناطیسی اعمالی بر روی الکترون ها، به علت وجود مؤلفه عرضی، در جهت سمتی منحرف می شود. در نتیجه پرتو الکترون در حضور میدان مغناطیسی، با حرکت چرخشی توسط نیروی مغناطیسی دوباره متمرکز می شود. پس از تمرکز دوباره، نیروی الکتریکی بزرگتر از نیروی مغناطیسی شده و دوباره واگرایی رخ می دهد. این روش در امتداد ناحیه انتقال، متناوباً تکرار می شود و همین امر باعث یکنواخت شدن مسیر الکترون در میدان مغناطیسی می گردد. شکل ۴ طرحواره دستگاه تفنگ الکترونی گرمایونی با اعمال میدان مغناطیسی ۱۰۰۰ گوس، بر روی باریکه الکترونی خروجی از تفنگ الکترونی گرمایونی و در شرایطی که فاصله بین کاتد و آند در تفنگ ثابت و ۴۰ میلی متر است، را نشان می دهد.

در این کار، فیلمان توسط استوانه وهنلتی (یا درپوش شبکه) احاطه شده است که پیش تر با مقاومت متغیر خود بایاس، به صورت سری با منبع ولتاژ بالا، به فیلمان متصل می شود. انتشار الکترون ها استوانه وهنلت را اندکی در پتانسیل منفی تر از فیلمان قرار می دهد و باعث ایجاد بایاس منفی بین این دو می گردد. این افت ولتاژی را مقاومتی ایجاد می کند که بایاس را به طور پیوسته برای برگرداندن الکترون های از دست رفته در فیلمان به وجود می آورد. الکترون های ساطع شده از منبع، تمایل به پخش شدن در تمام جهات دارند. بایاس منفی بین استوانه وهنلت و کاتد فیلمانی باعث می شود که الکترون ها از ناحیه ی فیلمان و فقط نزدیک به نوک آن ساطع شوند. این بایاس پرتو را متمرکز کرده و انتشار و زاویه واگرایی الکترون ها را کنترل می کند.



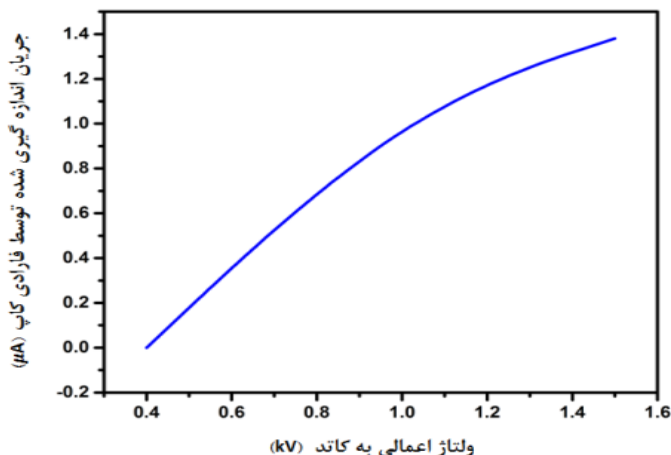
شکل ۴. پرتو باریکه الکترونی تولیدی توسط تفنگ الکترونی با اعمال میدان مغناطیسی.

در این حالت جریان باریکه الکترونی توسط فارادی کاپ اندازه گیری شده و با ولت متر خوانده می شود. این اندازه گیری برای بازه ولتاژی ۱ تا ۳ کیلو ولت صورت گرفته و با استفاده از مقاومت متغیر ولتاژ اعمالی به کاتد از ۰/۴ تا ۱/۵ کیلو ولت تغییر می کند. نتایج آزمایش ها تحت شرایط گفته شده، در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۵ نیز تغییرات جریان باریکه الکترونی اندازه گیری شده توسط فارادی کاپ را بر حسب ولتاژ اعمالی به کاتد نشان می دهد.

جدول ۱. مشخصات پارامترهای مختلف تفنگ الکترونی و جریان اندازه گیری شده توسط فارادی کاپ.

۳	۲/۵	۱	ولتاژ کل (kV)
۱/۵	۱	۰/۴	ولتاژ اعمالی به کاتد (kV)
$4/7 \times 10^{-3}$	$4/7 \times 10^{-3}$	$4/7 \times 10^{-3}$	فشار دستگاه (mbar)
۱/۳۸	۱/۰۷	۰	جریان اندازه گیری شده توسط فنجان فارادی (μA)
۴	۴	۴	فاصله کاتد تا آند (cm)

همانطور که نشان داده شده است، جریان باریکه که توسط تفنگ الکترونی تولید می شود، از محدوده میکرو آمپر می باشد که در توافق کامل با نتایج بدست آمده از شبیه سازی است. در ولتاژ اعمالی ۱ کیلو ولت، فنجان فارادی هیچ جریان الکترونی را نشان نمی دهد. در حالی که با افزایش ولتاژ، جریان از صفر شروع به افزایش می کند و در ولتاژ ۳ کیلو ولت و حدود ۱ کیلو ولت ولتاژ اعمالی به کاتد، جریان به مقدار ۱/۳۸ میکرو آمپر می رسد. علاوه بر آن، در این پژوهش، از طریق میدان مغناطیسی منبع تبخیر الکترونی به وسیله نرم افزار CST طراحی شده و بر اساس نتایج شبیه سازی، دارای قابلیت استفاده در دستگاه های لایه نشانی می باشد. نمونه ساخته شده آن به دلیل دارا بودن فاصله متغیر بین کاتد و آند، قابلیت تغییر انرژی و قطر پرتو را دارد. به همین دلیل، می تواند برای تبخیر و لایه نشانی مواد مختلف با نقاط ذوب متفاوت مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵. تغییرات جریان باریکه الکترونی اندازه گیری شده توسط فنجان فارادی بر حسب ولتاژ اعمالی به کاتد.

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، از طریق میدان مغناطیسی دستگاه تفنگ الکترونی به وسیله نرم افزار CST طراحی شده و بر اساس نتایج شبیه سازی، دارای قابلیت استفاده در دستگاه های لایه نشانی می باشد. با افزایش میدان مغناطیسی باریکه الکترونی بهتر متمرکز شده و قطر آن کاهش می یابد. دستگاه طراحی شده با توجه به ویژگی های منحصر به فرد آن، می تواند برای تبخیر و لایه نشانی مواد مختلف با نقاط ذوب متفاوت مورد استفاده قرار گیرد.

۶. مراجع

- [1] S. Humphries; "John Wiley and Sons"; Charged Particle Beams, 1990.
- [2] J. Rodney and M. Vaughan; "IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES"; VOL. ED-28, NO. 1. (1981) 37.
- [3] D M Mattox, "Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Noyes Publications", (1998).
- [4].N P Blanchard, A Niguès, M Choueib, S Perisanu, A Ayari, P Poncharal, S T Purcell, A Siria and P Vincent, Appl. Phys. Lett, 106 (2015) 193102.
- [5] M. M. Abdelrahman, etal, "Simion Calculations for the triode extraction system" International Journal of theoretical and mathematical physics, 2, No. 5, (2012), 122-129