



بررسی اثر نوع اتمسفر بر تغییرات ولتاژ و پایداری قوس در فرآیند تبخیر قوس کاتدی

جعفر خاکزادیان ابرقوئی^۱، سید حجت‌اله حسینی^۲، کریم زنگنه مدار^۳

^۱ پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران (کارشناسی ارشد)

^۲ (دکتری)

^۳ (دانشیار)

چکیده

فرآیند رسوب‌دهی قوس کاتدی (CAD) یکی از روش‌های رسوب فیزیکی بخار (PVD) می‌باشد که بوسیله آن، قابلیت ایجاد انواع پوشش‌های فلزی و سرامیکی با نرخ رسوب نسبتاً بالا وجود دارد. در این تحقیق ابتدا یک سیستم تبخیر قوس کاتدی طراحی و سپس اثر نوع اتمسفر محفظه بر ولتاژ و پایداری قوس مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، کاتد (هدف) از جنس آلومینیم به قطر ۶۰ میلیمتر، فشار محفظه ۲۰ پاسکال و جریان قوس ۴۰ آمپر مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد در شرایطی که از هوا به عنوان گاز محفظه استفاده می‌شود ولتاژ قوس به دلیل تشکیل لایه عایق بر سطح آند، به صورت تدریجی افزایش یافته و موجب ناپایداری قوس می‌گردد. چنانچه فرآیند تبخیر قوس کاتدی تحت گاز آرگون انجام شود، علاوه بر کاهش ولتاژ قوس از تشکیل لایه عایق روی سطح آند نیز جلوگیری شده و قوس برای مدت زمان طولانی‌تری پایدار خواهند ماند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر قوس کاتدی؛ ولتاژ قوس؛ اتمسفر فرآیند.

^۱. Jafar.khazadian@yahoo.com

مقدمه

قوس نوعی از تخلیه الکتریکی تحت ولتاژ پایین و جریان بالا بوده که می‌تواند در محیط‌های حاوی گازهای مختلف و تحت فشارهای متفاوت ایجاد شود. الکترودها (کاتد و آند) در تخلیه الکتریکی در معرض شار بالایی از ذرات پرانرژی قرار می‌گیرند که این موضوع سبب گرم شدن آن‌ها می‌شود. در نتیجه از تخلیه الکتریکی می‌توان برای تبخیر مواد الکتروود استفاده کرد [۱]. فرآیند رسوب‌دهی قوس کاتدی بر پایه درصد بالای شار یون ساطع شده و انرژی جنبشی بالای یون‌ها (۱۰۰-۴۰ eV) استوار است. حضور یون‌های پرانرژی در فرآیند رشد لایه بسیار مؤثر بوده و باعث بهبود چسبندگی، افزایش چگالی لایه و واکنش‌پذیری بالا برای تشکیل پوشش‌های ترکیبی می‌شود [۲]. به وسیله این فرآیند قابلیت ایجاد انواع پوشش‌های فلزی یک جزئی (مانند تیتانیم، آلومینیم، مس و کربن شبه الماس^۱) و چند جزئی (مانند Al-Li، TiAlV، و MCrAlY)، اکسیدی (مانند Al₂O₃) و نیتریدی (مانند (Ti,Al)N) وجود دارد [۳].

طی فرآیند تبخیر قوسی، الکترون‌ها از نقاطی روی سطح کاتد (موسوم به نقطه کاتدی^۲) خارج شده و به سمت آند جریان می‌یابند. سرعت حرکت نقطه کاتدی روی سطح کاتد، متناسب با شرایط فرآیند از جمله جریان قوس و اعمال میدان مغناطیسی تغییر می‌کند [۳, ۴].

مواد کاتد مختلف دارای میل ترکیبی متفاوتی با گازهای واکنش‌دهنده هستند [۵]. اگر مساحت سطح کاتد کوچک و فشار جزئی گاز واکنش‌دهنده در محفظه خلا پایین باشد، روی سطح کاتد، نرخ تبخیر ماده کاتد از نرخ تشکیل لایه (به دلیل واکنش ماده کاتد با گاز واکنش‌پذیر) بیشتر می‌شود. این شرایط برای حالتی که ترکیب لایه ایجاد شده روی سطح کاتد، دارای آنتالپی تشکیل پایینی باشد نیز حاکم خواهد بود. در این حالت ترکیب پلاسما اغلب شامل یون‌های فلزی می‌باشد. در مقابل زمانی که سطح کاتد بزرگ و فشار جزئی گاز بالا باشد، یک لایه ناشی از واکنش ماده کاتد با گاز واکنش‌پذیر، روی سطح کاتد ایجاد شده و پلاسما شامل یون‌های گازی و فلزی می‌شود. این شرایط زمانی که ترکیب لایه ایجاد شده دارای آنتالپی تشکیل بالایی باشد نیز محتمل خواهد بود [۶].

در حضور یک لایه روی سطح کاتد (در نتیجه واکنش ماده کاتد با گاز)، ایجاد نقطه کاتدی با سهولت بیشتری انجام می‌شود. این پدیده به این دلیل رخ می‌دهد که در نتیجه قرار گرفتن بارهای الکتریکی روی این لایه، میدان الکتریکی موضعی بالایی روی سطح کاتد ایجاد می‌شود. این پدیده زمانی تشدید خواهد شد که لایه ایجاد شده عایق باشد زیرا پتانسیل سطحی لایه توسط هدایت آن تعیین می‌شود. مدار معادل مطابق شکل ۱ ارائه شده است که شامل یک مقاومت و یک خازن موازی برای این لایه روی سطح کاتد می‌باشد [۷, ۸].

لایه‌های ایجاد شده روی سطح کاتد، بر روی سطح آند نیز ایجاد می‌شوند. با قرار گرفتن لایه‌های عایق مانند اکسید آلومینیم روی سطح آند، جت پلاسمای تشکیل شده در فرآیند، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در حقیقت به

¹ Diamond like carbon (DLC)

² Cathode spot

دلیل عایق شدن آند در این مناطق، جت پلاسما به سمت مناطقی از آند یا آندهای ثانویه طراحی شده حرکت کرده و الکترون‌های ساطع شده از کاتد از این نواحی منتقل می‌شوند [۴].

در مطالعات مختلف [۸-۱۲] لایه عایق تشکیل شده روی سطح کاتد به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. اما تاثیر لایه عایق تشکیل شده روی سطح آند بر پایداری قوس در شرایطی که از آند حلقوی استفاده شود، تاکنون مطالعه نشده است. هدف از این مقاله، علاوه بر معرفی فرآیند تبخیر قوس کاتدی (CAD)، بررسی اثر لایه عایق ایجاد شده روی سطح آند بر پایداری قوس نیز می‌باشد.

مواد و روش تحقیق

شماتیک دستگاه تبخیر قوس کاتدی در شکل ۲ ارائه شده است. در این پژوهش از دیسک آلومینیم خالص با قطر ۶۰ میلیمتر به عنوان ماده هدف (کاتد) استفاده شد و اندازه‌گیری ولتاژ قوس تحت جریان ۴۰ آمپر انجام گردید. تبخیر تحت دو اتمسفر هوا و گاز آرگون انجام شد. تحت اتمسفر هوا، فشار محفظه توسط پمپ خلأ تا ۲۰ پاسکال کاهش داده شده درحالی که تحت گاز آرگون، ابتدا محفظه به فشار ۱۰ پاسکال رسانده شده و سپس با ورود گاز آرگون، فشار به ۱۰۰۰ پاسکال افزایش داده شد و پس از آن با کنترل دبی گاز آرگون فشار روی ۲۰ پاسکال تنظیم گردید. در ادامه، جریان منبع قوس روی ۴۰ آمپر تنظیم شده و فرآیند تبخیر توسط آغازگر قوس، شروع گردید. تحت اتمسفر هوا، جهت بررسی اثر لایه عایق ایجاد شده روی آند و کاتد بر ولتاژ و پایداری قوس، بعد از اتمام فرآیند، لایه عایق مذکور توسط سنباده و محلول هیدروکسید سدیم به صورت کامل از سطح آند برداشته شده و تبخیر مجدداً تکرار شد. قابل ذکر است که سطح کاتد بدون تمیزکاری، برای مرحله بعد استفاده شده تا اثر لایه‌ی قرار گرفته روی آند و کاتد مشخص گردد. مقادیر ولتاژ قوس پس از گذشت ۵ ثانیه از برقراری قوس به منظور پایدار شدن فرآیند، در گام‌های زمانی ۱ ثانیه ثبت گردید.

نتایج و بحث

در شکل ۳ نمودار تغییرات ولتاژ قوس بر حسب زمان، برای تبخیر تحت اتمسفر هوا ترسیم شده است. در این شکل یک منحنی مربوط به حالتی است که سطوح آند و کاتد عاری از لایه عایق بوده و منحنی دیگر مربوط به حالتی است که لایه عایق از روی سطح آند حذف شده و سطح کاتد بدون تمیزکاری استفاده شده است. همانگونه که مشهود است، ولتاژ قوس پس از پایداری فرآیند از حدود ۴۰ ولت آغاز شده و با گذشت ۲۸ ثانیه به تدریج تا ۵۱ ولت افزایش یافته و پس از آن قوس ناپایدار شده و قطع می‌گردد. در فرآیندهای قوس کاتدی تحت خلأ، ولتاژ قوس گزارش شده برای هدف از جنس آلومینیم در بازه ۲۱-۱۶ ولت گزارش شده است [۱۳].

[۱۴] در حالی که در تحقیق حاضر در ابتدای فرآیند این ولتاژ در حدود ۴۰ ولت می‌باشد. دلیل این افزایش در ولتاژ قوس به حضور گازهای دو اتمی اکسیژن و نیتروژن (هوا) در گاز محفظه برمی‌گردد. گازهای دو اتمی دارای پتانسیل یونیزاسیون بالاتری نسبت به گازهای تک اتمی بوده و همین امر سبب افزایش در ولتاژ قوس می‌-

شود. چنین رفتاری در مطالعات صورت گرفته روی اثر فشار و نوع گاز بر ولتاژ قوس برای کاتد تیتانیوم نیز گزارش شده است [۱۵، ۱۶]. با گذشت زمان به دلیل وجود گازهای واکنش پذیری مانند اکسیژن و نیتروژن که در حین فرآیند نیز یونیزه شده‌اند و تمایل بالای واکنش یون‌ها و اتم‌های تبخیر شده آلومینیم با یون‌های گازی مذکور به خصوص اکسیژن، لایه عایقی روی سطح آند و کاتد ایجاد شده و به تدریج ضخیم می‌شود. قرارگیری این لایه عایق و ضخیم شدن آن روی سطح آند و کاتد سبب اختلال در حرکت الکترون از کاتد به آند شده و ولتاژ قوس افزایش می‌یابد. این افزایش تا جایی که قوس ناپایدار و قطع گردد ادامه خواهد یافت. ناپدید شدن آند توسط لایه‌ی عایق در فرآیندهای ایجاد پوشش‌های واکنش‌پذیر توسط آندر^۱ [۴] نیز اشاره شده است.

از آنجایی که لایه عایق می‌تواند هم روی آند و هم روی کاتد تشکیل شود، به منظور بررسی سهم اثر لایه عایق ایجاد شده روی سطح آند در افزایش ولتاژ قوس پس از قطع شدن فرآیند قوس، لایه عایق از روی سطح آند حذف و فرآیند تبخیر مجدداً تکرار شد. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ولتاژ قوس در ابتدای فرآیند در حدود ۴۰ ولت بوده و سپس مقداری کاهش یافته و بعد از گذشت ۲۶ ثانیه به تدریج تا ۵۰ ولت افزایش یافته و فرآیند قوس کاتدی ناپایدار و قوس قطع شده است. این رفتار نشان می‌دهد لایه عایق موجود روی آند نقش اصلی در افزایش ولتاژ قوس را ایفا کرده زیرا با جدا شدن این لایه از سطح آند، شرایط پایداری قوس به حالت قبل بازگشته است. با مقایسه منحنی‌ها در شکل ۳ مشاهده می‌شود در زمان‌های مشابه، ولتاژ قوس در غیاب لایه عایق به صورت میانگین حدود ۵ ولت کمتر از شرایط حضور لایه عایق است. روی سطح کاتد دو پدیده در حال وقوع است: (۱) تبخیر ماده کاتد و (۲) ایجاد لایه عایق. با توجه به ابعاد کاتد، فشار گازهای واکنش‌پذیر، دمای سطح کاتد و میل واکنشی ماده کاتد با گازهای واکنش‌پذیر؛ نرخ رشد لایه عایق روی سطح کاتد سرعت‌های مختلفی خواهد داشت [۴-۶]. به همین دلیل نرخ ایجاد لایه عایق روی سطح آند بیشتر از سطح کاتد است. با توجه به مدل ارائه شده توسط آندر [۸] مشاهده می‌شود ایجاد لایه عایق روی سطح کاتد در ضخامت‌های کم سبب سهولت در ایجاد نقطه کاتدی روی سطح شده که این مسئله می‌تواند منجر به کاهش ولتاژ قوس می‌گردد.

به منظور حذف اثر لایه عایق ایجاد شده روی سطح آند بر ولتاژ قوس، از گاز آرگون به عنوان اتمسفر تبخیر استفاده شد. در شکل ۴ تغییرات ولتاژ قوس بر حسب زمان برای این شرایط نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با گذشت زمان، ولتاژ قوس در بازه ۱۸-۱۶ ولت ثابت بوده و فرآیند تا مدت زمان ۷ دقیقه با قوس کاملاً پایدار ادامه یافته است. حضور گاز آرگون، مانع از تشکیل لایه عایق روی سطح آند می‌شود. به همین دلیل با گذشت زمان ولتاژ قوس بدون تغییر مانده است. همچنین پتانسیل یونیزاسیون پایین‌تر گاز آرگون (۱۵/۸ ولت) در مقایسه با گازهای اکسیژن و نیتروژن (۲۵-۱۵ ولت) سبب می‌شود ولتاژ قوس تحت اتمسفر گاز

¹ Andre

آرگون در حدود ۱۸-۱۶ ولت باشد در حالی که تحت اتمسفر گازهای اکسیژن و نیتروژن ۴۰ ولت است. کاهش مقدار ولتاژ قوس در حضور گاز آرگون سبب پایداری بیشتر فرآیند تبخیر قوس کاتدی خواهد شد.

نتیجه گیری

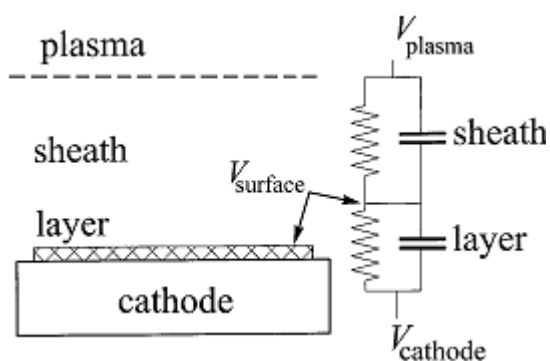
با تبخیر آلومینیم خالص تحت فشار ۲۰ پاسکال و جریان قوس ۴۰ آمپر توسط دستگاه تبخیر قوس کاتدی طراحی شده، اثر اتمسفر تبخیر بر پایداری قوس بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

- ۱) در فرآیند تبخیر تحت اتمسفر هوا، لایه عایق تشکیل شده روی آند سبب افزایش تدریجی ولتاژ قوس و ناپایداری و قطع آن می شود.
- ۲) لایه عایق تشکیل شده روی سطح کاتد، بر خلاف آند، باعث کاهش ولتاژ قوس می شود.
- ۳) تحت اتمسفر آرگون، ولتاژ قوس کاهش و پایداری قوس افزایش می یابد. همچنین در این شرایط لایه عایق روی آند حلقوی ایجاد نشده و ولتاژ قوس با گذشت زمان در بازه ۱۸-۱۶ ولت ثابت باقی می ماند.

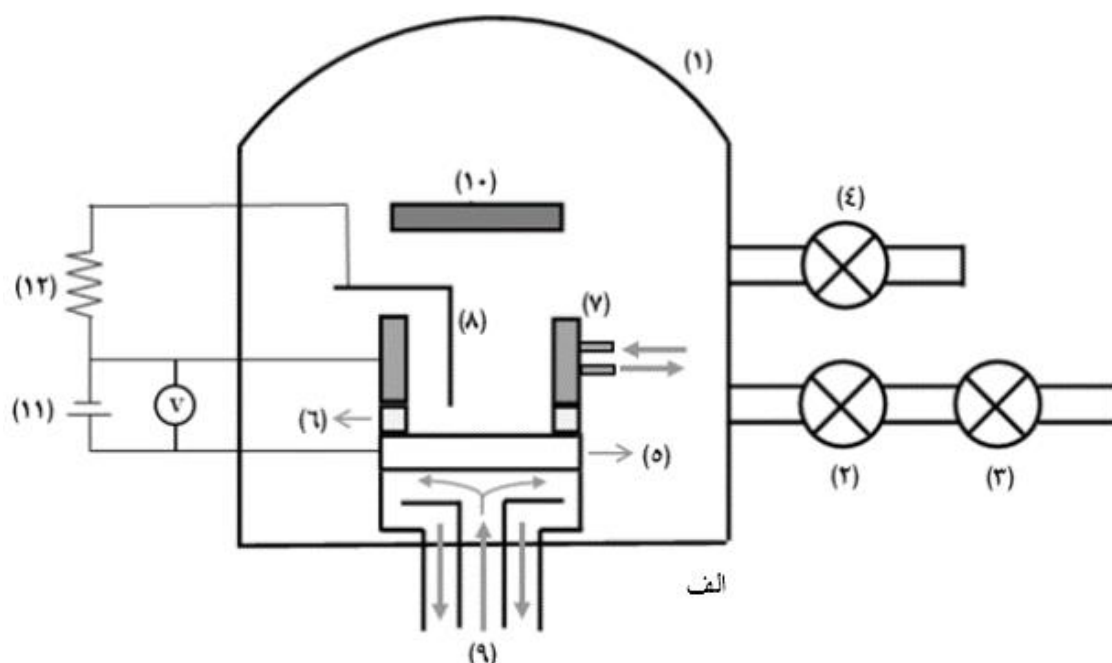
مراجع

1. J. Vyskočil and J. Musil, "Arc evaporation of hard coatings: process and film properties," *Surface and Coatings Technology*, vol. 43, 1990, 299-311.
2. P. Martin, D. McKenzie, R. Netterfield, P. Swift, S. Filipczuk, K. Müller, *et al.*, "Characteristics of titanium arc evaporation processes," *Thin Solid Films*, vol. 153, 1987, 91-102.
3. R. L. Boxman, D. M. Sanders, and P. J. Martin, Handbook of vacuum arc science & technology: fundamentals and applications, 1996, William Andrew.
4. A. Anders, Cathodic Arcs From Fractal Spots to Energetic Condensation, 2008, Springer New York.
5. M. Kuhn and F. Richter, "Characteristics in reactive arc evaporation," *Surface and Coatings Technology*, vol. 89, 1997, 16-23.
6. Y. George and A. André, "Effect of the Pulse Repetition Rate on the Composition and Ion Charge-State Distribution of Pulsed Vacuum Arcs," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 26, 1998, 220-226.
7. V. B. Edward and T. M. Lu, "Transient Charging Effects on Insulating Surfaces Exposed to a Plasma During Pulse," *Journal of Applied Physics*, vol. 90, 2001, 5898-5903.
8. A. André, "Physics of Arcing and Implications to Sputter Deposition," *Thin Solid Films*, vol. 502, 2006, 22-28.
9. P. Hovsepian and D. Popov, "Cathode Poisoning During Reactive Arc Evaporation of Titanium in Nitrogen Atmosphere," *Vacuum*, vol. 45, 1994, 603-607.
10. P. Jörg, R. Richard, R. Jürgen, P. Peter, and H. M. Paul, "Influence of Si on the Target Oxide Poisoning During Reactive Arc Evaporation of (Al,Cr)₂O₃ Coatings," *Vacuum*, vol. 100, 2014, 29-32.
11. D. Rohde, H. Kersten, C. Eggs, and R. Hippler, "Thin Film Deposition by Reactive Magnetron Sputtering: on the Influence of Target Oxidation and Its Effect on Surface Properties," *Thin Solid Films*, vol. 305, 1997, 164-171.
12. D. Güttler, B. Abendroth, R. Grötzschel, W. Möller, and D. Depla, "Mechanisms of Target Poisoning During Magnetron Sputtering as Investigated by Realtime in Situ

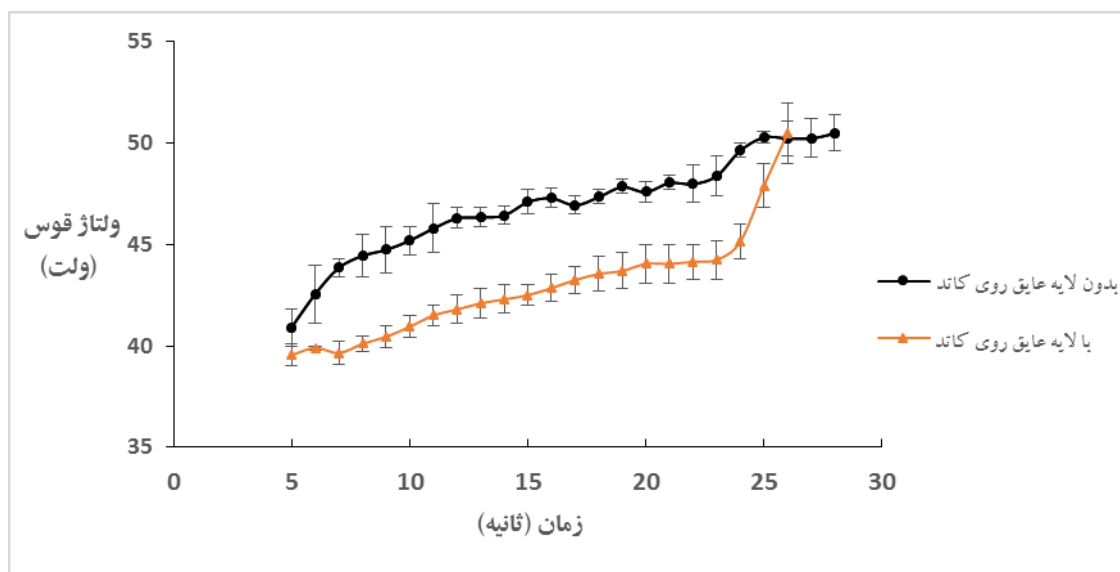
- Analysis and Collisional Computer Simulation," *Applied Physics Letters*, vol. 85, 2004, 6134-6136.
13. M. P. Reece, "The Vacuum Switch Part 1. Properties of the Vacuum Arc," *Proceedings I.E.E.*, vol. 110, 1963, 793-802.
 14. T. Koichi, N. Masatoshi, and Y. Takeshi, "Experimental Characterization of Vacuum Arc Instabilities for Different Electrode Metals," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 31, 2003, 953-957.
 15. R. Miyano, T. Saito, H. Takikawa, and T. Sakakibara, "Influence of Gap Length and Pressure on Medium Vacuum Arc with Ti Cathode in Various Ambient Gases," *Thin Solid Films*, vol. 407, 2002, 221-227.
 16. R. Miyano, T. Saito, K. Kimura, M. Ikeda, H. Takikawa, and T. Sakakibara, "Anode Mode in Cathodic Arc Deposition Apparatus with Various Cathodes and Ambient Gases," *Thin Solid Films*, vol. 390, 2001, 192-196.



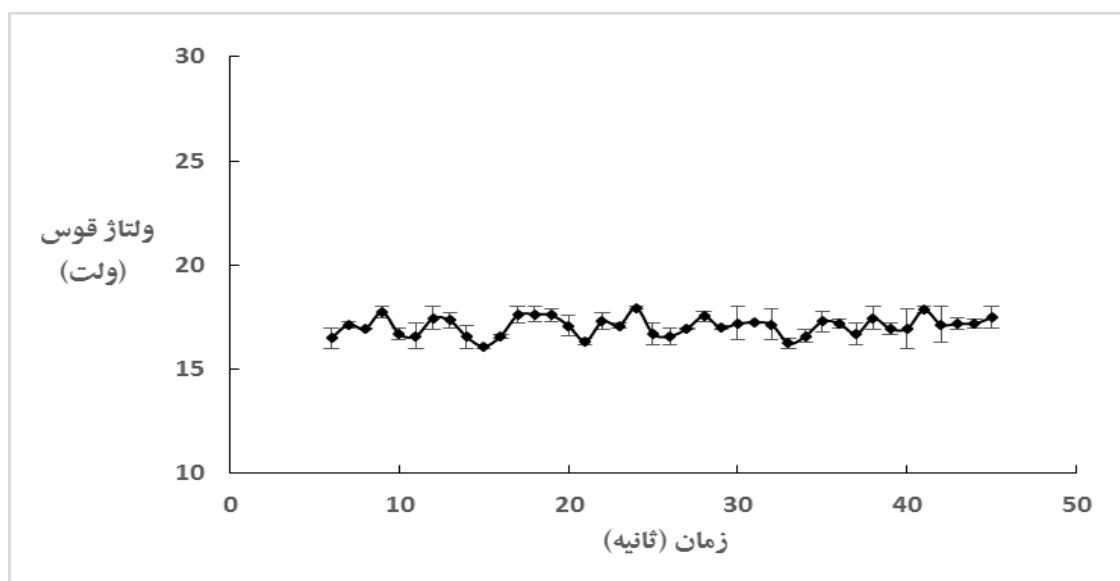
شکل ۱: شماتیک مدار معادل برای لایه ایجاد شده و ناحیه بین کاتد و پلاسما نزدیک به سطح کاتد [۸].



شکل ۲: الف) نمای کلی دستگاه تبخیر قوسی: ۱) محفظه، ۲ و ۳) پمپ‌های خلأ، ۴) ورودی گاز، ۵) کاتد، ۶) سرامیک عایق، ۷) آند، ۸) سیستم آغازگر قوس، ۹) قسمت آبگرد، ۱۰) زیر لایه، ۱۱) منبع تغذیه و ۱۲) مقاومت مربوط به سیستم آغازگر قوس؛ ب) تصویری از پلاسمای پایدار تشکیل شده در محفظه.



شکل ۳: تغییرات ولتاژ قوس بر حسب زمان برای تبخیر آلومینیم خالص در شرایط حضور لایه عایق و بدون لایه عایق (فشار محفظه ۲۰ پاسکال، جریان قوس ۴۰ آمپر و اتمسفر هوا).



شکل ۴: تغییرات ولتاژ قوس بر حسب زمان برای تبخیر آلومینیم خالص (فشار محفظه ۲۰ پاسکال، جریان قوس ۴۰ آمپر و اتمسفر آرگون).