

تعیین پارامترهای مناسب فرآیند کندوپاش فلز مولیبدنیوم و بررسی اثر لایه‌های نازک از این فلز، بر روی گسیل الکترون‌ها از آرایه‌ی گسیل میدان متشکل از نانونوک‌های سیلیکانی

یزدانفر، پیام^۱؛ یثربی، نوید^۱؛ باقری، بهرنگ^۱؛ رشیدیان، بیژن^{۱،۲}

^۱دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

^۲پژوهشگاه علوم و فناوری نانو برق دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

چکیده

بررسی اولیه بر روی تأثیر کلی پارامترهای فشار عملیاتی و توان فرایند کندوپاش فلز مولیبدنیوم بر روی مقاومت لایه‌ی نازک ایجاد شده بر روی زیرلایه‌ی شیشه انجام گرفته و مقدار مناسب پارامترهای لایه نشانی تعیین شده است. آرایه‌ی نانونوک‌های سیلیکانی از پیش ساخته شده طی فرایندی چند مرحله‌ای، در محیط خلا فرار داده شده است و به منظور کاهش تابع کار گسیل کننده‌ها، لایه‌ای از فلز مولیبدنیوم به روش کند و پاش و بر اساس پارامترهای تعیین شده در مرحله‌ی قبل بر روی نوک‌ها نشانداده شده است. مشخصات هندسی گسیل کننده‌ها به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) قبل و بعد از لایه نشانی مولیبدنیوم ارائه شده است. نشان داده شده است که استفاده از پوشش مولیبدنیومی امکان مشاهده‌ی پدیده‌ی گسیل میدان را در ولتاژهای کمتر از ۱۰۰۰ ولت و در فواصل بین آند و کاتد بالای ۱ میکرومتر فراهم می‌آورد. منحنی فاولر-نورد هاپیم گسیل الکترون‌ها در فشار کمتر از 10^{-7} Torr 3×10^{-7} اندازه‌گیری و رسم شده است.

Determination of Molybdenum Thin Film Sputtering Parameters, and Investigation of the effect of Mo thin films deposition on Field Emission Properties of Silicon Field Emitter Arrays

Yazdanfar, Payam¹; Yasrebi, Navid¹; Bagheri, Begrang¹; Rashidian, Bizhan^{1,2}

¹Department of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

²Institute for Nanoscience and Nanostructures, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Molybdenum (Mo) thin films are deposited using RF sputtering technique, and the effect of operational pressure and RF power on resistivity of the films are investigated. Point of minimum resistivity is selected to sputter a thin layer of Mo on top of a pre-fabricated silicon field emitter array (Si-FEA). Geometric and field emission properties of the arrays are investigated before and after Mo deposition. It is shown that the Mo covered array shows better emission properties and lower turn on field, compared to the simple Si-FEA.

PACS No. 85.45.Db Field emitters and arrays, cold electron emitters

در زمینه‌هایی نظیر نمایشگرهای گسیل میدانی [۲]، لیزرهای
الکترون آزاد [۳]، لیتوگرافی باریکه الکترونی آرایه‌ای [۴] و ...
دارند. تاکنون آرایه‌های مختلفی از مواد گوناگون نظیر آرایه‌های

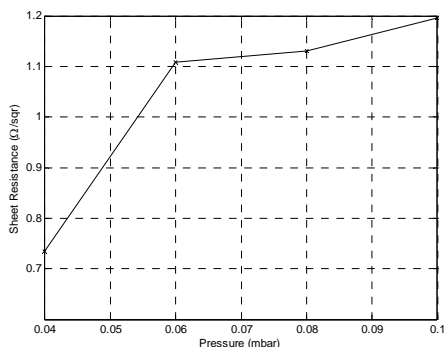
مقدمه

آرایه‌های گسیل میدانی (به عنوان پایه‌ای‌ترین عنصر الکترونیک
خلا) به دلیل قابلیت تولید چگالی جریان‌های بالا در ولتاژهای
پایین [۱] و همچنین قابلیت مجتمع سازی [۱]، کاربردهای فراوانی

پس از این مرحله، یکی از نمونه‌ها به محفظه‌ی خلأ منتقل شده و اندازه‌گیری گسیل میدان از آن در فشار کمتر از 10^{-7} Torr انجام گرفته و مشخصه‌ی جریان-ولتاژ آرایه ثبت گردیده است. سپس نمونه‌ی مورد نظر به محفظه‌ی کندوپاش منتقل شده و به کمک روش کندوپاش RF، ضخامت مورد نیاز از فلز مولیبدنیوم بر روی آن نشانده شده است. لازم به ذکر است که به منظور تعیین مقدار مناسب پارامترهای اساسی فرایند کندوپاش مورد استفاده پیش از انجام لایه نشانی بر روی نمونه‌های اصلی، فرایند کندوپاش فلز مولیبدنیوم به طور مجزا انجام گرفته و نمونه‌های حاصل از نظر مقاومت و همواری سطح به ترتیب به کمک پروب چهار نقطه‌ای و میکروسکوپ نیروی اتمی مورد مطالعه قرار گرفته اند. فشار و توان بهینه‌ی تعیین شده در این مرحله (به منظور رسیدن به حداقل مقاومت لایه) به عنوان پارامترهای مناسب جهت لایه‌نشانی بر روی نمونه‌های اصلی به کار گرفته شده است. نرخ لایه‌نشانی و ضخامت لایه‌ی نشانده شده در تمامی مراحل با دقت کنترل و ثبت شده است.

نتایج آزمایشات و بحث بر روی نتایج

شکل ۲ اثر تغییرات فشار عملیاتی فرایند کندوپاش را بر روی مقاومت صفحه‌ای نمونه‌های لایه نشانی شده در توان RF ثابت و برابر ۸۴ وات، نمایش می‌دهد. مطابق با این شکل افزایش فشار باعث افزایش مقاومت شده و در نتیجه فشار مناسب برای لایه نشانی برابر با 4×10^{-2} mbar تعیین می‌گردد.

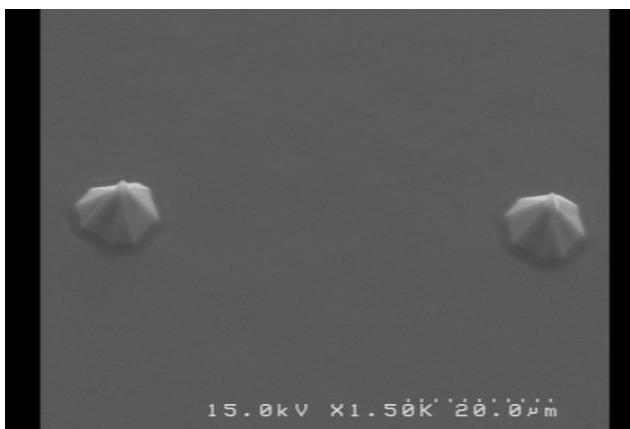


شکل ۲. تغییرات مقاومت صفحه‌ای بر حسب تغییرات فشار کندوپاش در توان ثابت ۸۴وات.

اسپینت^۱ ساخته شده از مولیبدنیوم [۵]، آرایه‌های سیلیکانی [۶]، آرایه‌های ساخته شده از نانولوله‌های کربنی [۷] و بسیاری از مواد دیگر ساخته و ارائه شده اند. در این میان آرایه‌های سیلیکانی به دلیل همخوانی زیاد فرایند ساخت آنها با فرایندهای استاندارد CMOS مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. مهمترین نقطه ضعف آرایه‌های سیلیکانی، کمتر بودن توانایی گسیل الکترون‌های در سیلیکان در مقایسه‌ی با فلزاتی نظیر مولیبدنیوم و تنگستن است. در این مقاله پس از تعیین پارامترهای مناسب جهت کندوپاش یک لایه‌ی دارای مقاومت کم مولیبدنیوم، اثر تغییر تابع کار سطح یک آرایه گسیل میدانی سیلیکانی به وسیله‌ی پوششی نازک از فلز مولیبدنیوم، بر روی منحنی جریان-ولتاژ گسیل میدان آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

آزمایش

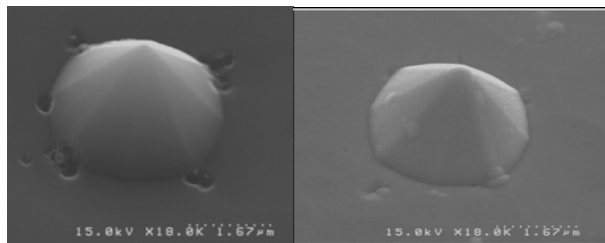
ساخت نمونه‌ی اولیه‌ی آرایه‌ی سیلیکانی بر روی ویفر سیلیکانی نوع n، دارای جهت کریستالی (۱۰۰) انجام شده است. این آرایه طی فرایندی چند مرحله‌ای به دقت طراحی شده و قابل تکرار شامل شستشوی استاندارد RCA [۸]، اکسیداسیون حرارتی مرطوب، لیتوگرافی نوری، زدایش شیمیایی به علاوه‌ی یک مرحله تیز کردن به کمک اکسیداسیون حرارتی خشک و در محیط تمیز انجام گرفته است. شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دو عدد از نوک‌های موجود در آرایه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از بخشی از آرایه‌های گسیل میدان اولیه پس از فرایند تیز کردن.

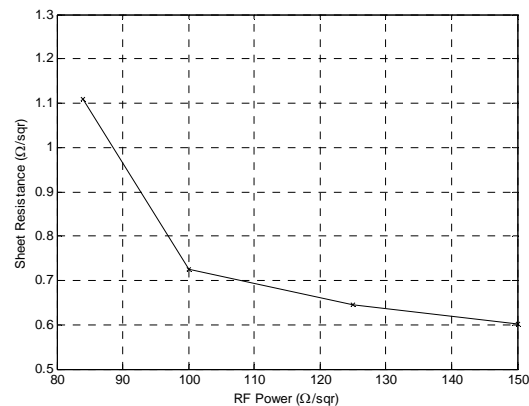
¹ Spindt

ضخامت لایه‌ی نشانده شده در لبه‌ها از ضخامت لایه در سایر نقاط کمتر خواهد بود. این مسئله ممکن است در ظاهر نامناسب جلوه نماید. در حالیکه کمتر بودن قطر لایه در محل نوک عدم تغییرات بسیار زیاد شعاع نوک به نسبت شعاع اولیه را تضمین می‌نماید. لازم به ذکر است که در پوشش دادن یک نانونوک گسیل کننده‌ی میدان، افزایش شعاع نوک به نوبه‌ی خود باعث کاهش ضریب افزایش میدان موضعی در سطح گسیل کننده و در نتیجه کاهش گسیل میدان می‌گردد و بنابراین نازک بودن لایه‌ی نشانده شده حائز اهمیت خواهد بود. شکل ۶ منحنی جریان ولتاژ گسیل از سطح دو آرایه‌ی دارای پوشش و معمولی را برای فاصله‌ی بین دو الکتروود $1\mu\text{m}$ و آندی از جنس لایه‌ی نازک اکسید قلع-ایندیم نمایش می‌دهد. فاصله‌ی بین آند و کاتد به کمک یک سیستم تنظیم فاصله‌ی دقیق و به کمک میکروسکوپ به دقیق تنظیم شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، استفاده از لایه‌ی مولیبدنیوم علی‌رغم افزایش شعاع نوک‌های آرایه ولتاژ مورد نظر برای رسیدن به جریان قابل اندازه‌گیری را تا ۴ برابر کاهش داده است. دلایل اصلی این بهبود گسیل را می‌توان بدین شرح بیان نمود. اولاً مقاومت الکتریکی بالای سیلیکان باعث افت ولتاژ در مسیر زیر لایه تا نوک شده و در نتیجه پوشش مولیبدنیومی با کاهش مقاومت مسیر عملاً میدان موضعی مؤثر را افزایش داده و باعث بهبود کارکرد آرایه می‌گردد. ثانیاً پوشش مولیبدنیومی باعث کاهش تابع کار در سطح گسیل کننده و در نتیجه‌ی آن افزایش احتمال تونل‌زنی الکترون‌ها و افزایش جریان گسیل می‌گردد.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نوک‌ها قبل (سمت چپ) و بعد از لایه نشانی فلز مولیبدنیوم (سمت راست)

شکل ۳ اثر تغییرات توان کندوپاش را بر روی مقاومت نمونه‌های تهیه شده، نمایش می‌دهد. به دلیل محدودیت موجود در سیستم کندوپاش مورد استفاده در توان‌های بالا، فشار عملیاتی این مرحله از آزمایش به جای $4 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ ، $6 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ در نظر گرفته شده است. مطابق با شکل افزایش توان باعث کاهش مقاومت شده است. این پدیده را می‌توان به افزایش نرخ لایه نشانی در اثر افزایش فشار نسبت داد.

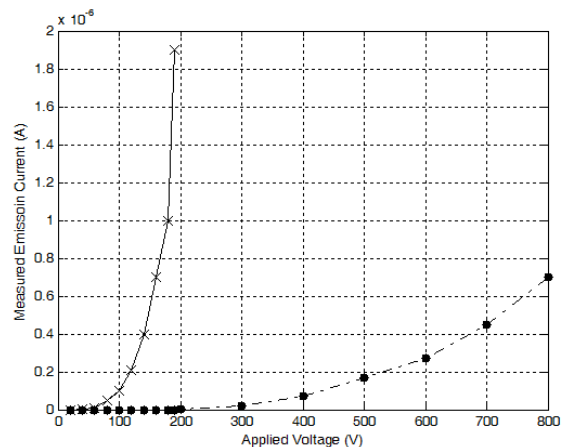


شکل ۳. منحنی تغییرات مقاومت صفحه‌ای بر حسب تغییرات توان منبع تغذیه در فشار ثابت $6 \times 10^{-2} \text{ mbar}$.

در نتیجه‌ی این مراحل توان و فشار مناسب برای لایه‌نشانی به ترتیب 150 W و $6 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ تعیین می‌گردد. لازم به ذکر است که دمای زیرلایه در کلیه‌ی آزمایشات در 35 درجه سانتیگراد ثابت نگاه داشته شده است.

شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از نوک‌های آرایه را قبل و بعد از لایه نشانی مولیبدنیوم نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، لایه نشانی مولیبدنیوم باعث افزایش شعاع نوک از کمتر از 15 nm به حدود 40 nm شده است. لازم به ذکر است که ضخامت سنج در این حالت ضخامت 100 nm را برای لایه‌ی نشانده شده نمایش می‌دهد. تفاوت موجود بین این مقدار و مقدار واقعی نشانده شده بر روی سطح نوک‌های آرایه به دلیل انحنای زیاد نوک به نسبت سطح ضخامت سنج کوارتزی و عدم وجود امکان در نظر گرفتن آن به عنوان یک سطح صاف برای کندوپاش است. لازم به یادآوری است که کندوپاش برای پوشاندن پله‌های تیز روش مناسبی به حساب نمی‌آید. بدین معنا که

- [۵] C.A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey, and E.R. Westerberg, "Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones"; *Journal of Applied Physics* **74** (1976) 5248-5263.
- [۶] D. Temple, W.D. Palmer, L.N. Yadon, J.E. Mancusi, D. Velenga, and G.E. McGuire, "Silicon field emitter cathodes: Fabrication, performance, and applications"; *Journal of Vacuum Science and Technology A* **16** (1998) 1980-1990.
- [۷] C. Li, Y. Zhang, M. Mann, D. Hasko, W. Lei, B. Wang, D. Chu, D. Pribat, G. Amaratunga, and W.I. Milne; "High emission current density, vertically aligned carbon nanotube mesh, field emitter array"; *Applied Physics Letters* **97** (2010) 113107.
- [۸] K. Reinhardt and W. Kern; "Silicon Wafer Cleaning Technology"; *William Andrew Inc.*, 2008, 24-27.



شکل ۵. مشخصه‌ی جریان-ولتاژ آرایه‌ی ۱۰۰ تایی سیلیکانی قبل (نقطه چین) و بعد (علامت‌های x) از لایه نشانی فلز مولیبدنیوم. پوشش مولیبدنیوم باعث بهبود کارایی آرایه شده است.

نتیجه‌گیری

لایه‌ای نازک از فلز مولیبدنیوم به کمک کندوپاش RF در خلأ ایجاد شده و نشان داده شد که مقاومت این لایه در شرایطی که فشار عملیاتی کندوپاش برابر با 6×10^{-2} mbar و توان RF برابر با ۱۵۰W باشد به حداقل خود می‌رسد. سپس گسیل میدان از آرایه-ای سیلیکانی از پیش ساخته شده قبل و بعد از پوششی ۱۰۰ نانومتری از فلز مولیبدنیوم اندازه‌گیری شده و نشان داده شد که استفاده از پوشش مولیبدنیومی امکان دستیابی به جریان $1/87 \mu A$ را در ولتاژ ۱۹۰ ولت فراهم می‌آورد.

مراجع

- [۱] C.A. Spindt, C.E. Holland, A. Rosengreen, and I. Brodie, "Field-Emitter Arrays for Vacuum Microelectronics"; *IEEE Transactions on Electron Devices* **38** No. 10 (1991) 2355-2363.
- [۲] D. Temple, "Recent Progress in field emitter array development for high performance applications"; *Materials Science and Engineering* **R24** (1999) 185-239.
- [۳] R. Ganter, K. Li, M. Dehler, J. Gobrecht, L. Rivkin and A. Wrulich, "Field Emitter arrays for a free electron laser application"; *Technical Digest of the 17th IVNC*, IEEE (2004) 112-113.
- [۴] L.R. Baylor, W.L. Gardner, S.J. Randolph, Y.F. Guan, P.D. Rack, J.A. Moore, and M.N. Ericson; "Operation of the Digital Electrostatic e-beam Array Lithography (DEAL) prototype with dose control"; *20th IVNC* (2007) 197-19.