بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

طراحی و ساخت الکترود شفاف نانوساختار برای سلول خورشیدی پروسکایتی

سید سعید موسویان، سید محمد باقر قریشی و آرزو محمدبیگی

کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده ی فیزیک

Saeed7970@gmail.com

چکیده – در این پژوهش، ابتدا الکترود شفاف $MoO_3/Ag/MoO_3$ با ضخامت بهینه‌ی ۲۰/۱۳/۲۰ نانومتر طراحی و ساخته شد. خواص اپتیکی و الکتریکی آن از قبیل تراگسیل اپتیکی و مقاومت سطحی مورد بررسی قرار گرفتند که برای آن‌ها در طول موج ۵۵۰ نانومتر، به ترتیب اعداد ۶۲,۸٪ و ۴,۵۶ Ω/cm^2 بد ست آمدند. سپس، بعد از ساخت سلول خور شیدی پرو سکایتی با ساختار Glass/FTO/TiO_2/Perovskite/CuPc، الکترود شفاف طراحی شده با ا ستفاده از روش لایه ن شانی تبخیر در خلأ به عنوان کاتد در سلول خورشیدی به کار برده شد. در نهایت، مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ سلول خورشیدی پروسکایتی ساخته شده با استفاده از کاتد شفاف، بازدهی ۴٪ را نشان داد. بنابراین، از کاتد شفاف به کار رفته در این ساختار می‌توان به جای کاتد گران قیمت طلا در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی استفاده کرد.

کلید واژه- بازدهی، MoO3/Ag/MoO3. ، سلول خورشیدی پروسکایتی، الکترود شفاف، تبخیر در خلأ

Design and Fabrication of Nanostructured Transparent electrode for Perovskite Solar Cell

Seyed Saeed Moosavian, Seyed Mohamad Bagher Ghoreyshi, and Arezoo Mohammad Beigi

Department of Physics, University of Kashan, Kashan

Abstract- In this study, first, $MoO_3/Ag/MoO_3$ transparent electrode with optimum thicknesses of 20/13/20 nm was designed and fabricated. The optical and electrical properties of it such as optical transmission and sheet resistance were investigated that at 550 nm wavelength, 62.8% and 4.56 Ω /cm^2 were obtained, respectively. Then, after fabrication of the perovskite solar cell with Glass / FTO / TiO_2 / Perovskite / CuPc structure, the designed transparent electrode by vacuum evaporation deposition method was used as cathode in solar cell. Finally, the current- voltage characterization of the fabricated perovskite solar cell with transparent cathode showed 4% efficiency. Therefore, the transparent cathode applied in this structure can be used instead of the expensive gold cathode in the Perovskite solar cells.

Keywords: Efficiency, MoO3/Ag/MoO3, Perovskite Solar Cell, Transparent electrode, Vacuum Evaporation.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مقدمه

امروزه با توجه به رشد روز افزون مصرف انرژی و محدودیت‌هایی که انرژی‌های تجدید ناپذیر ایجاد می‌کنند، بشر به دنبال جایگزین کردن منابع تجدید پذیر و پاک در همه‌ی عرصه‌ها است. در میان چشمه‌های تجدیدپذیر، سلول‌های فوتوولتائیک بیش از نیم قرن هست که مورد استفاده قرار می‌گیرند. سلول‌های فوتوولتائیک بدون اینکه هیچ گونه آلودگی‌ای برای محیط زیست در پی داشته باشند، مستقیماً انرژِی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. مواد هالیدی فلزی آلی- معدنی با عنوان پروسکایت برای ساخت سلول‌های خورشیدی مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته‌اند. اخیراً، بازدهی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از ۲۳ درصد فراتر رفته است [۱] که این موفقیت به خاطر دلایلی از جمله نزدیکی گاف نواری انرژی آن‌ها به گاف انرژی بهینه (که در حدود ۱,۵۵ الکترون ولت است)، نزدیکی به انرژی پیوندی کوچک زوج الکترون -حفره، تحرک پذیری بالای حامل، ضرایب جذب بالا، ثابت دی الکتریک بزرگ، طول‌های پخش زیادالکترون-حفره ممکن شده است [۲]. رایج‌ترین ماده پروسکایت مورد استفاده در ساختار سلول‌های خورشیدی، ترکیب آلی معدنی با فرمول شیمیایی $CH_3NH_3PbX_3$ است که اتم x می‌تواند یون‌های هالوژنی مانند ید، برم و یا کلر باشد. گاف نواری انرژی این ترکیب با کنترل مقدار عناصر هالوژنی قابل تغییر است که می‌تواند منجر به جذب بخش عمده‌ای از نور خورشید شود [۳]. یکی دیگر از ویژگی‌های جالب این سلول های خورشیدی با بازدهی بالا، این است که امکان ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی نیمه شفاف وجود دارد. این سلول‌های نیمه شفاف کاربردهای جالبی درساخت سیستم‌های فوتوولتاییک یکپارچه و وسایل الکترونیکی دارند [۴]. به طور کلی، سیستم‌های فوتوولتاییک امروزی نظیر سلول‌های خورشیدی پروسکایتی به علت استفاده از فلزاتی در کاتد مانند Ag، Au، Pt و Al که بازتاب بالایی دارند، غیرشفاف هستند. از طرف دیگر، اگرچه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی نیمه شفاف به سادگی با استفاده از لایه‌های بسیار نازکی از فلز Au یا Ag به عنوان کاتد، می‌توانند ساخته شوند؛ اما به دلیل بازتاب بالایی که دارند اتلاف انرژی در آنها بسیار زیاد است. می‌توان برای کاتدهای شفاف از نامزدهای مناسبی نظیر: فیلم های فلزی نازکی که توسط دی الکتریک‌هایی با گاف انرژی بالا ساندویچ شده‌اند ، نانوسیم های فلزی، نانولوله‌های کربنی، اکسیدهای رسانای شفاف وپلیمرهای رسانا، نام برد [۵]. به عبارت دیگر، برای کاهش اتلاف انرژی از الکترود نازک فلزی که دارای بازتاب بالا است، از لایه‌ی دی الکتریک مانند اکسید مولیبدن (MoO_3) استفاده می‌شود که برای عملکرد بهتر سلول‌های خورشیدی نیمه شفاف مؤثر است؛ این ساختارها به صورت الکترود دی الکتریک/فلز/دی الکتریک (D/M/D) شناخته می‌شوند [۶]. انواع مختلفی از مواد در الکترودهای چند لایه استفاده می‌شوند؛ به طور معمول برای لایه‌ی فلزی از موادی با ضخامت‌های فوق نازک و دارای تابع کار بالا مانند Ag، Au و Cu و برای لایه دی الکتریک از اکسیدهای فلزی مانند WO_3، MoO_3، V_2O_5، NiO استفاده می‌شود [۷]. در این مقاله، از الکترود چند لایه‌ای $MoO_3/Ag/MoO_3$ به عنوان کاتد در سلول خورشیدی پروسکایتی استفاده شده است؛ در الکترود مذکور، اولین لایه (MoO_3)، نقش لایه‌ی تزریق کننده/ استخراج کننده‌ی حفره را ایفا می‌کند و آخرین لایه‌ی الکترود (MoO_3) نیز می‌تواند بازتاب از الکترود سه لایه‌ای را کنترل کند که در صورت عدم وجود این لایه، چگالی جریان مدار کوتاه (J_{sc}) برای سلول خورشیدی نیمه شفاف مقدار کمی را نشان می‌دهد. به طور معمول، در سلول‌های خورشیدی نیمه شفاف با الکترود D/M/D، ضخامت بهینه برای لایه‌ی خارجی الکترود (MoO_3) ۲۰ تا ۴۰ نانومتر گزارش شده است [۸]. مقاومت سطحی برای چنین ساختارهایی در حدود 40 Ω/cm^2 گزارش شده که از مرتبه مقاومت سطحی فیلم‌های تجاری FTO ($36\Omega/cm^2$) است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از نرم افزار Mathcad15 به منظور طراحی و بهینه سازی سیستم سه لایه‌ای DMD (الکترود شفاف) از نظریه ماتریس انتقال لایه‌های نازک استفاده شد [۹] و ضخامت بهینه ۲۰/۱۳/۲۰ نانومتر برای لایه‌های آن به دست آمد. سپس، خواص

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

اپتیکی و الکتریکی آن از جمله طیف تراگسیل اپتیکی و مقاومت سطحی اندازه گیری شدند که در طول موج ۵۵۰ نانومتر به ترتیب اعداد ۶۲٫۸٪ و ۴٫۵۶ Ω/cm^2 بدست آمد. در نهایت، سلول خورشیدی پروسکایتی با ساختار Glass/FTO/TiO_2/Perovskite/CuPc ساخته شد و الکترود طراحی شده با ضخامت بهینه، به عنوان کاتد در سلول خورشیدی ساخته شده، به روش تبخیر در خلأ لایه نشانی شد.

روش ساخت

برای ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی، ابتدا شیشه‌ی لایه‌نشانی شده با اکسید قلع آلاییده شده با فلورین (FTO) به ابعاد $1.5cm^2 \times 1$ برش داده شد و سپس با پودر روی و اسید کلریدریک با توجه به الگوی مورد نیاز، تحت سونش قرار گرفت. در ادامه، به ترتیب در آب و صابون، استون، اتانول و آب مقطر شستشو داده شدند که در هر مرحله ظرف حاوی زیرلایه‌ها به مدت ده دقیقه درحمام آلتراسونیک قرار گرفت و در نهایت با هوای تمیز به طور کامل خشک شدند. سپس لایه سدکننده‌ی الکترون (محلول تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) در اتانول) با دستگاه لایه نشانی چرخشی به مدت ۶۰ ثانیه با دور ۴۰۰۰ بر روی زیرلایه‌ها لایه نشانی و بعد به مدت یک ساعت در کوره با دمای ۵۰۰ $^{\circ}C$ بازپخت شد. در مرحله بعد برای ساخت محلول پروسکایت، ابتدا محلول یدید سرب (PbI_2) با انحلال ۴۶۰ میلی‌گرم پودر PbI_2 در ۶۳۰ میکرولیتر دی متیل فرمامید (DMF) و ۷۵ میکرولیتر دی متیل سولفوکسید (DMSO) آماده شد و به مدت ۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت. سپس به میزان ۱۶۰ میلی‌گرم پودر متیل آمونیوم یدید (MAI) را به محلول PbI_2 اضافه کردیم و پروسکایت آماده شده با دستگاه لایه نشانی چرخشی به مدت ۴۵ ثانیه با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه روی زیرلایه قبلی لایه نشانی شد؛ البته، در ثانیه پانزدهم لایه نشانی محلول پروسکایت، باید به میزان ۱۵۰ میکرولیتر کلروبنزن بر روی پروسکایت چکانده شود. بعد از خشک شدن زیرلایه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه، فتالوسیانین مس (CuPc) به عنوان لایه‌ی انتقال دهنده‌ی حفره با استفاده از دستگاه تبخیر درخلأ در فشار ۳×۱۰^{-۴} میلی بار به ضخامت ۳۰ نانومتر بر روی زیرلایه، لایه نشانی شد. لازم به ذکر است که در این دستگاه برای اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها از یک دستگاه ضخامت سنج بلور کوارتز استفاده شده است که در هر لحظه می‌تواند ضخامت لایه و آهنگ انباشت را حین لایه نشانی بر روی صفحه نمایشگر نشان دهد. سپس برای لایه نشانی کاتد، اکسید مولیبدن و فلز نقره (با خلوص ۹۹/۹۹ درصد) که به ترتیب در بوته‌های مولیبدن و تنگستن قرار داده شده بودند، با دستگاه تبخیر در خلأ به صورت MoO_3(20nm)/Ag(13nm)/MoO_3(20nm) بر روی زیر لایه لایه نشانی شدند که البته برای کنترل ضخامت لایه‌ها از شاتر مکانیکی استفاده شد.

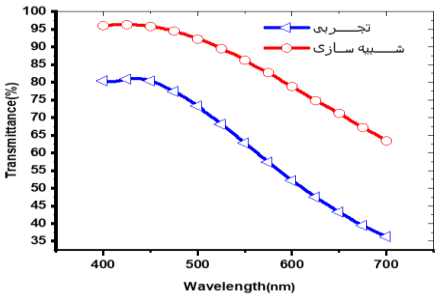
نتایج و بحث

طیف تراگسیل اپتیکی و مقاومت سطحی ساختار MoO_3/Ag/MoO_3 به ترتیب توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر دو پرتویی و دستگاه پروب چهارنقطه‌ای اندازه‌گیری شدند. در شکل ۱ نتایج تجربی و شبیه سازی شده‌ی تراگسیل اپتیکی الکترود شفاف مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است، در طیف تجربی و شبیه سازی عبور ساختار در طول موج ۵۵۰ نانومتر به ترتیب ۶۲٫۸٪ ۸۶٪ است؛ این تفاوت به این دلیل است که در شبیه سازی طیف عبور ساختار مورد نظر، ضریب شکست و ضریب خاموشی MoO_3 و Ag به صورت حجمی (bulk) در نظر گرفته شده است در حالی‌که طیف عبور تجربی، حاصل از لایه‌های نازکی است که با کیفیت بالا روی هم انباشت شده‌اند. هم‌چنین، مقاومت سطحی اندازه‌گیری شده به صورت ۴٫۵۶ Ω/cm^2 بدست آمد که در مقایسه با

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مقاومت‌های سطحی نمونه‌های تجاری الکترودهای شفاف مانند ITO و FTO بسیار کمتر است. در شکل ۲ شفافیت نمونه آزمایشگاهی ساخته شده الکترود شفاف $MoO_3/Ag/MoO_3$ به خوبی مشخص است.

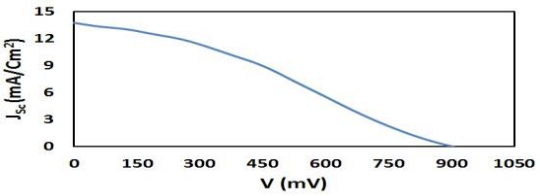


شکل ۱: طیف‌تراگسیل اپتیکی تجربی و شبیه‌سازی شده الکترود $MoO_3/Ag/MoO_3$



شکل ۲: نمونه ی ساخته شده الکترود شفاف $MoO_3/Ag/MoO_3$

مشخصات فوتوولتائیک سلول‌های ساخته شده توسط دستگاه ولتاژ- جریان تحت تابش نور با توان ۱۰۰ میلی وات بر سانتی متر مربع اندازه‌گیری شد. منحنی چگالی جریان بر حسب ولتاژ این سلول‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل۳: نمودار چگالی جریان-ولتاژ سلول‌های ساخته شده

نتایج نیز به طور خلاصه در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱: مقادیر ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ضریب پرشدگی و بازدهی

V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/Cm²)	FF (%)	PCE (%)
۹۱۰	۱۳,۷۴	۳۲	4.0

مشاهده می‌شود که الکترود طراحی شده می‌تواند جایگزین مناسبی به عنوان کاتد در سلول‌های خورشیدی باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بعد از طراحی الکترود شفاف نانوساختار $MoO_3/Ag/MoO_3$ به کمک نرم افزار Mathcad، ضخامت بهینه‌ی مناسب برای سه لایه‌ای به دست آمد. سپس با ساخت این الکترود، بررسی خواص اپتیکی و الکتریکی آن نشان داد که شفافیت و مقاومت مناسب جهت استفاده در سلول خورشیدی به عنوان کاتد را دارد. در نهایت، با ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی با استفاده از این الکترود، بازدهی قابل قبول به دست آمده به خوبی نشان داد که می‌تواند جایگزین مناسبی برای کاتد گران قیمت طلا در سلول‌های خورشیدی باشد.

مرجع‌ها

[1] W.S. Yang, B.-W. Park, E.H. Jung, N.J. Jeon, Y.C. Kim, D.U. Lee, S.S. Shin, J. Seo, E.K. Kim, J.H. Noh, S.I. Seok, “Iodide management in formamidinium-lead-halide–based perovskite layers for efficient solar cells”, Science, Vol. 356, pp.1376-1379, 2017.
[2] C. Wehrenfennig, M. Liu, H.J. Snaith, M.B. Johnston, L.M. Herz, “Homogeneous Emission Line Broadening in the Organo Lead Halide Perovskite CH3NH3PbI3 xClx”, J. Phys. Chem. Lett., Vol. 5, pp. 1300-1306, 2014.
[3] G.E. Eperon, S.D. Stranks, C. Menelaou, M.B. Johnston, L.M. Herz, H.J. Snaith, “Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells”, Energy Environ. Sci., Vol. 7, pp. 982, 2014.
[4] C. Roldan-Carmona, O. Malinkiewicz, R. Betancur, G. Longo, C. Momblona, F. Jaramillo, L. Camacho, H.J. Bolink, “High efficiency single-junction semitransparent perovskite solar cells”, Energy Environ. Sci., Vol. 7, pp. 2968-2973, 2014.
[5] K.-T. Lee, L. Guo, H. Park, “Neutral- and Multi-Colored Semitransparent Perovskite Solar Cells”, Molecules, Vol. 21, pp. 475, 2016.
[6] E. Della Gaspera, Y. Peng, Q. Hou, L. Spiccia, U. Bach, J.J. Jasieniak, Y.-B. Cheng, “Ultra-thin high efficiency semitransparent perovskite solar cells”, Nano Energy, Vol. 13, pp. 249-257, 2015.
[7] S. Wilken, V. Wilkens, D. Scheunemann, R.-E. Nowak, K. von Maydell, J. Parisi, H. Borchert, “Semitransparent Polymer-Based Solar Cells with Aluminum-Doped Zinc Oxide Electrodes”, ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 7, pp. 287-300, 2015.
[8] J.M. Cho, S.K. Lee, S.-J. Moon, J. Jo, W.S. Shin, “MoO3/Ag/MoO3 top anode structure for semitransparent inverted organic solar cells”, Curr. Appl. Phys., Vol. 14, pp. 1144-1148, 2014.
[9] H.M. Liddell, “Computer-Aided Techniques for the Design of Multilayer Filters, Adam Hilger Ltd, Bristol”, 1981

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]