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 نانو پوشش اپتیکی چند لایه‌ای به عنوان انتخابگر طیفی در پنل‌های فتوولتائیک سیلیکونی

**کامبیز دهقانی[۱]، مجتبی رحیمی[۲] و سید محمد باقر مرعشی[۳]**

**۱-دانشگاه ولی عصر(عج) رفسنجان ،** k.dehghani@stu.vru.ac.ir

**۲-دانشگاه ولی عصر(عج) رفسنجان،** m_rahimi@vru.ac.ir

**۳-دانشگاه ولی عصر(عج) رفسنجان،** smb_marashi@vru.ac.ir

**چکیده - در این مقاله، نانو پوشش چند لایه‌ای $TiO_2\backslash Ag\backslash TiO_2$ به عنوان انتخابگر طیفی در پنل‌های خورشیدی بر روی بستر شیشه ای با استفاده از روش لایه نشانی لیزری تحت خلاء ساخته شده است. ضخامت‌های متفاوتی برای هر یک از لایه‌ها انتخاب گردید و این ضخامت‌ها بهینه شدند تا حداکثر بازتاب را در محدوده مادون قرمز و همچنین حداکثر عبور را هم در محدوده مرئی طیف خورشید داشته باشند. حالت بهینه نانو پوشش $TiO_2\backslash Ag\backslash TiO_2$ با ضخامت ۴۸/۱۸/۴۸ نانومتر بدست آمده که دارای انتقال حداکثر ۸۸٪ در طول موج متوسط ۵۸۰ نانومتر و بازتاب بالای ۹۰٪ در طول موج متوسط ۹۰۰ نانومتر دارد.**

کلید واژه- فیلتر اپتیکی، انتخابگر طیفی، پنل خورشیدی، $TiO_2\backslash Ag\backslash TiO_2$.

# Design and fabrication of multilayer optical nano coating as spectral selector in silicon solar photovoltaic panels

Kambiz Dehghani[1], Mojtaba Rahimi[2] and Seyed Mohammad Bagher Marashi [3]

**1-Vali-e-Asr University of Rafsanjan, k.dehghani@stu.vru.ac.ir**
**2-Vali-e-Asr University of Rafsanjan, m_rahimi@vru.ac.ir**
**3-Vali-e-Asr University of Rafsanjan, smb_marashi@vru.ac.ir**

**Abstract- In this paper, $TiO_2\backslash Ag\backslash TiO_2$ multilayer optical nano coating as spectral selector in silicon solar photovoltaic panels on a glass substrate using the PLD method. Different Thickness choose for each of layer and Thickness are optimized for maximum reflection in the NIR-IR region and maximum transmission in the visible region of sin light. $TiO_2\backslash Ag\backslash TiO_2$ optimized coating which has a transmission capability of 88% in Wavelength 580 nm in the visible region and a reflection of 90% in Wavelength 900 nm in the NIR-IR region.**

Keywords: optical filter, spectral selector, solar panel, $TiO_2\backslash Ag\backslash TiO_2$.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2025-12-07 ]

## مقدمه

کارایی پنل خورشیدی فوتوولتائیک سیلیکونی برای نور ورودی بین ۷۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر، بیش از ۵۰ درصد می‌باشد، اما در طول موج کوتاه یا بزرگتر از این محدوده کم یا صفر است[۱]. نور جذب شده با طول موج بزرگتر از ۱۱۰۰نانومتر در پنل خورشیدی فتوولتائیک سیلیکونی به گرما تبدیل می‌شود. در عمل دمای سطح پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک بسته به شرایط محیطی در ماه‌های مختلف سال در حدود ۴۰الی ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که این دما در تابستان در مناطق کویری به حدود ۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد[۲]. برای جلوگیری از جذب طیف مادون قرمز نور خورشید توسط پنل خورشیدی که یکی از دلایل افزایش دمای پنل است می‌توان از نانو پوشش‌های اپتیکی لایه نازک به عنوان انتخابگر طیفی استفاده نمود.

## طراحی نانوپوشش اپتیکی سه لایه‌ای $TiO_2\backslash Ag\backslash TiO_2$

استفاده از نانو پوشش سه یا چند لایه، ناحیه وسیع‌تری با بازتابندگی کمتری را ممکن می‌سازد که در آن پاسخ لایه صاف‌تر است. نانو پوشش‌های سه لایه‌ای دی‌الکتریک/فلز/دی‌الکتریک (D/M/D ) مورد استفاده به عنوان انتخابگر طیفی در پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی باید در ناحیه مرئی طیف نور خورشید دارای T=1 و R=0 و در ناحیه مادون قرمز نیز دارای T=0 و R=1 باشند. لایه‌های نانو پوشش اپتیکی سه لایه‌ای به ترتیب هوا/دی الکتریک/فلز/دی‌الکتریک/شیشه از بالا به پایین بر روی زیر لایه شیشه قرار داده شدند. عملکرد نانو پوشش D/M/D به طور چشمگیری به ثابت‌های اپتیکی و ضخامت لایه‌ها بستگی دارد. لایه‌های اکسیدی به شدت به استوکیومتری، ناخالصی و نقص موجود در هر لایه بستگی دارند. لایه‌های فلزی به پدیده‌های هسته‌زایی و همبستگی بسیار وابسته هستند. فلز مورد استفاده در این پوشش در ناحیه مادون قرمز بسیار بازتابنده است. برای لایه فلزی از موادی همچون Ag، Au، Cu و .... استفاده می‌گردد[۳]. مس در مقایسه با نقره ارزانتر است ولی عملکرد آن به شدت تحت تاثیر اکسیداسیون قرار می‌گیرد و رنگ قهوه‌ای آن هم مانعی برای عبور طیف مرئی نور خورشید می‌باشد. ولی نقره در مقایسه با طلا قیمت کمتری دارد پس نقره نامزد مناسبی برای این هدف می‌باشد. لایه‌های دی‌الکتریک در ناحیه طیفی ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر جذب ندارند. انتقال بالای نور در ناحیه مرئی، ضریب شکست بالا و شکاف باند گسترده، $TiO_2$ را برای پوشش‌های جاذب UV و کاربردهای لایه نشانی انعکاس حرارتی مناسب کرده است[۴]. انتخاب سه لایه‌ای D/M/D با داده‌های پذیرفته شده برای Ag و $TiO_2$ تایید شده است[۵و۶]. معادله (۱) رابطه ماتریس تبدیل نام دارد. که عناصر ماتریس موارد فوق هستند $m_{11}=\cos\delta$، $m_{12}=\frac{i\sin\delta}{n_1\sqrt{\varepsilon_o\mu_o}}$، $m_{21}=in_1\sqrt{\varepsilon_o\mu_o}\sin\delta$ و $m_{22}=\cos\delta$ که $\delta$ اختلاف فاز نام دارد.

$$M=\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \qquad (۱)$$

همچنین در معادلات (۲) و (۳) روابط ضرایب عبور و بازتاب آمده است که با استفاده از آنها خواص بازتابی و عبوری تک لایه یا چند لایه را بررسی می‌کنیم.

$$t=\frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11}+\gamma_0\gamma_s m_{12}+m_{21}+\gamma_s m_{22}} \qquad (۲)$$

$$r=\frac{\gamma_0 m_{11}+\gamma_0\gamma_s m_{12}-m_{21}-\gamma_s m_{22}}{\gamma_0 m_{11}+\gamma_0\gamma_s m_{12}+m_{21}+\gamma_s m_{22}} \qquad (۳)$$

با توجه به پژوهش های انجام شده [۶-۳] و معادلات (۱)، (۲) و (۳) برای لایه دی‌الکتریک ضخامت‌های ۸،۱۵،۲۰،۳۰،۴۵،۴۸ نانومتر و برای لایه فلزی ضخامت‌های ۳،۶،۹،۱۲،۱۶،۱۸،۲۰،۲۴ نانومتر مورد استفاده و قرار گرفت.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2025-12-07 ]

## ساخت نانو پوشش اپتیکی $TiO_2/Ag/TiO_2$

نانو پوشش اپتیکی سه لایه‌ای $TiO_2/Ag/TiO_2$ با استفاده از روش لایه نشانی با استفاده از لیزر پالسی در دمای اتاق بر روی زیر لایه‌هایی از جنس شیشه انجام شد که در شکل۱ تصویر دستگاه PLD آمده است. کلیه زیر لایه‌ها ابتدا بوسیله اسکاج و مایع ظرف‌شویی شستشو داده شدند سپس به مدت ۱۰ دقیقه درون حمام التراسونیک به همراه استون و بعد درون حمام التراسونیک به همراه اتانول و در نهایت درون حمام التراسونیک با پروپانول به مدت ۱۰ دقیقه شستشو داده شدند و بعد با آب فوق خالص شستشو داده شدند و با جریان مستقیم گاز نیتروژن خشک گردیدند.

شکل۱: تصویر دستگاه لایه نشانی PLD.

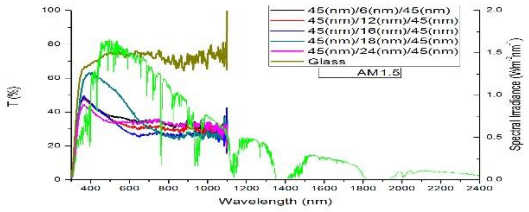
قبل از لایه نشانی فشار محفظه با استفاده از پمپ‌های خلاء توربو و چرخشی تا حد میلی بار کاهش داده شد. برای لایه نشانی دولایه $TiO_2$ از قرص $TiO_2$ با قطر۳۲ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر با خلوص ۹۹,۹۹٪ و برای لایه فلز نقره از ورق نقره به قطر۳۲ میلی‌متر و ضخامت ۰/۳میلی‌متر با خلوص ۹۹,۹۹٪ استفاده شد.

ابتدا اولین لایه $TiO_2$ به عنوان بر روی زیر لایه نشانی می-گردد. سپس بدون شکستن خلاء محفظه، لایه Ag به عنوان لایه فلزی بر روی لایه اول لایه نشانی گردید. در آخر لایه $TiO_2$ بر روی لایه نقره میانی لایه نشانی گردید تا در نهایت نانو پوشش سه لایه‌ای D/M/D بر روی زیر لایه شیشه ساخته شود.

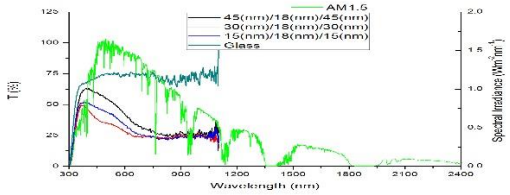
ضخامت لایه‌ها در حین لایه نشانی توسط سنسور ضخامت سنجی با استفاده از کریستال طلا به صورت لحظه‌ای اندازه-گیری شد. برای لایه‌های مورد استفاده ضخامت‌های متفاوتی ایجاد گردید و میزان جذب، عبور و بازتاب کلیه پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت و ضخامت‌ها به منظور داشتن بالاترین میزان بازتاب در ناحیه مادون قرمز و بالاترین میزان عبور در ناحیه مرئی طیف نور خورشید بهینه شدند.

## نتایج تجربی

برای اندازه‌گیری خواص اپتیکی ساختار سه لایه‌ای از روش طیف سنج مادون قرمز-مرئی–فرابنفش با استفاده از دستگاه اسپکترومتر Lambda 950 در ناحیه ۲۰۰ الی۲۵۰۰نانومتر و دستگاه PL در محدوده ۲۰۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر استفاده شده است. با توجه به شکل‌های ۲ و ۳ بهترین ضخامت برای لایه دی‌الکتریک حدود ۴۵ الی ۴۸ نانومتر و برای لایه فلزی حدود ۱۶ الی۲۰ نانومتر است.




شکل۲: نمودار عبور برای ضخامت‌های مختلف لایه Ag




شکل۳: نمودار عبور برای ضخامت‌های مختلف لایه $TiO_2$

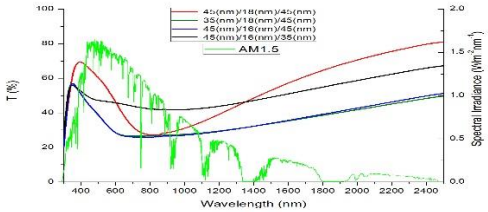
در شکل ۴ و ۵ نمودار عبور و بازتاب برای $TiO_2/Ag/TiO_2$ با ضخامت‌های مختلف آمده که مبین بازتاب بیش از ۹۰٪ در محدوده۱۱۰۰ الی ۲۰۰۰ نانومتر و عبور بالا در محدوده



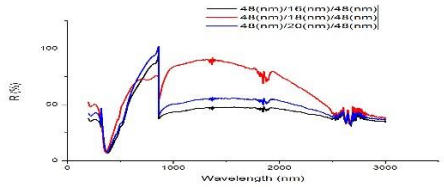
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2025-12-07 ]

طیف AM1.5 نور خورشید برای نمونه با ضخامت۴۸/۱۸/۴۸ نانومتر می‌باشد.

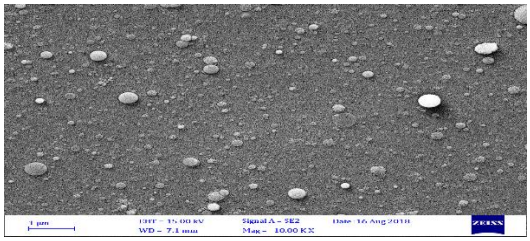



شکل۴: نتایج آنالیز PL در ناحیه ۲۰۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر به همراه طیف AM1.5




شکل۵: نتایج آنالیز بازتاب در ناحیه ۲۰۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر

خواص ساختاری لایه‌های نازک توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی ساختار $TiO_2$ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل در شکل۶ آمده که مبین تشکیل یکنواخت و هموار سطح در مقیاس نانومتری با سایز ذرات ۱۷ الی ۲۶ نانومتر می‌باشد. در این آنالیز از میکروسکوپ FE-SEM شرکت ZEISS مدل SIGMA VP با آشکارساز EDS و Mapping شرکت Oxford Instrument استفاده شده است.



شکل۶: تصویر برداری از سطح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

## نتیجه‌گیری

در این مقاله ساخت نانو پوشش اپتیکی سه لایه‌ای $TiO_2/Ag/TiO_2$ به عنوان انتخابگر طیفی در پنل‌های خورشیدی سیلیکونی به روش PLD مورد بررسی قرار گرفت. نانو پوشش اپتیکی $TiO_2/Ag/TiO_2$ از نظر خواص اپتیکی در بازه طول موجی ۲۰۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر مورد بررسی قرار گرفت.نتایج نشان می‌دهند که نانوپوشش $TiO_2/Ag/TiO_2$ با ضخامت ۴۸/۱۸/۴۸ نانومتر دارای بهترین عملکرد در پنجره اپتیکی ازطول موج ۲۰۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر می‌باشد. نانو پوشش اپتیکی $TiO_2/Ag/TiO_2$ در حالت بهینه توانایی عبور ۸۸٪ طول موج متوسط ۵۸۰ نانومتر را دارد و همزمان توانایی بازتاب بیش از ۹۰٪ در طول موج متوسط ۹۰۰ نانومتر را دارد. از این نانوپوشش می‌توان به عنوان یک فیلتر اپتیکی بر روی پنل‌های خورشیدی موجود در بازار که معمولا سطح روی آنها با شیشه یا اپوکسی پوشانده شده است استفاده نمود و با حذف فوتون‌های مزاحم از گرم شدن پنل خورشیدی و خصوصا در فصول گرم سال جلوگیری نمود.

## مرجع‌ها

**[1]** R.A. Taylor, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, C.A. Walker, M. Nguyen, S. Trimble, et al., “Applicability of nanofluids in high flux solar collectors,” J Renew Sustain Energy, Vol. 3, 2011.

**[2]** SyedA.M, SaidGhassan, HassanHusam, M.Walwil, N.Al-Aqeeli, “The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 743-760, 2018.

**[3]** Hong, Kihyon, et al. "Optical properties of WO3/Ag/WO3 multilayer as transparent cathode in top-emitting organic light emitting diodes." The Journal of Physical Chemistry C, 115(8), pp.3453-3459, 2011.

**[4]** Lee, Cheng-Chung, Shang-Hui Chen, and Cheng-chung Jaing. "Optical monitoring of silver-based transparent heat mirrors." Applied optics 35.28, pp.5698-5703, 2011.

**[5]** Tonooka, K. & Kikuchi, N. Super-hydrophilic and solar-heat-reflective coatings for smart windows. Thin Solid Films, Vol. 532, pp.147–150, 2013.

**[6]** Xu, Y. J., Liao, J. X., Cai, Q. W. & Yang, X. X. Preparation of a highly-reflective TiO2/SiO2/Ag thin film with self-cleaning properties by magnetron sputtering for solar front reflectors. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 113, pp.7–12, 2013.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2025-12-07 ]