بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

ساخت سه‌لایه $SnO_2/Ag/SnO_2$ به عنوان الکترود شفاف و لایه ضد بازتاب در سلولهای خورشیدی

مرتضی عاصمی و مجید قناعت‌شعار

آزمایشگاه نانومغناطیس و نیمرساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده – در این مقاله ساختارهای مختلفی از لایه نازک SnO_2 به همراه لایه Ag مورد بررسی قرار گرفت. از لایه‌نشانی تبخیر حرارتی برای لایه‌نشانی این لایه‌ها استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که لایه‌های SnO_2 مقاومت ویژه الکتریکی و بازتاب بالایی در طول موج ۵۵۰ نانومتر دارند. افزودن لایه Ag موجب کاهش مقاومت الکتریکی و بازتاب لایه‌ها در ۵۵۰ نانومتر می‌شود. این کاهش بازتاب که با افزایش تراگسیل همراه است، استفاده از این لایه‌ها به عنوان الکترود شفاف و لایه ضد بازتاب در سلولهای خورشیدی را ممکن می‌سازد. گاف انرژی لایه‌ها نیز با افزودن لایه Ag کاهش می‌یابد که با برهمکنشهای بس ذره‌ای قابل توصیف است.

کلید واژه- لایه‌های نازک SnO_2، لایه‌نشانی تبخیر حرارتی، لایه‌های ضد بازتاب، اثرات بس- ذره‌ای.

Tri-layer $SnO_2/Ag/SnO_2$ fabrication as transparent electrode and anti-reflection layer in solar cells

Morteza Asemi and Majid Ghanaatshoar

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983963113, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, different structures of SnO_2 thin films were investigated together with Ag layer. Thermal evaporation method was used for deposition of these layers. The results show that SnO_2 layers have high electrical resistivity and reflection at 550 nm. With embedding Ag layer, electrical resistivity and reflection of layers decrease. The decreased reflectance accompanied with the enhance transmittance makes these layer suitable as transparent electrode and anti-reflection layers in solar cells. We also observed that band gap decreases with embedding Ag layer that can be described by many-body effects.

Keywords: SnO_2 thin films, Thermal evaporation deposition, Anti-reflectance layer, Many-body effect.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

اکسید قلع با ناخالصی ایندیم (ITO) از رساناهای اکسیدی شفاف شناخته شده‌ای است که به دلیل رسانندگی و شفافیت بالا در ناحیه نور مرئی، به عنوان الکترود شفاف در الکترونیک نوری کاربرد فراوانی دارد. با توجه به اینکه ایندیم از عناصر کمیاب در طبیعت است، قیمت قطعاتی که از آن استفاده می‌کنند روز به روز در حال افزایش است [۱]. از این رو تمایل زیادی برای بهینه کردن خواص الکترواپتیکی رساناهای اکسیدی شفاف دیگر نظیر اکسید روی (ZnO) و اکسید قلع (SnO_2) وجود دارد تا بتوانند جایگزین لایه‌های نازک ITO شوند [۲]. روشهای مختلفی برای لایه‌نشانی SnO_2 وجود دارد که از این میان می‌توان به کندوپاش با امواج رادیویی (RF) و جریان مستقیم (DC) و لایه‌نشانی تبخیری اشاره کرد [۳]. خواص الکترواپتیکی این لایه‌ها به شرایط لایه‌نشانی نظیر دمای زیرلایه، حضور گاز زمینه، دمای عملیات حرارتی و غیره بستگی دارد. علاوه بر این، رسانندگی الکتریکی و خواص اپتیکی این لایه را با وارد کردن یک لایه میانی نظیر Al، Au و یا Ag می‌توان کنترل کرد. نقره به دلیل رسانندگی بالا و جذب اپتیکی پایین در ناحیه نور مرئی (کمتر از ۵ درصد) نسبت به طلا (۸ درصد) و آلومینیوم (۳۰ درصد) در اولویت قرار دارد [۴]. از این رو، چند لایه‌های مذکور با قابلیت ضدانعکاسی نور مرئی، جایگزین مناسبی برای ITO در سلولهای خورشیدی برای افزایش بازدهی و کاهش انعکاس نور مرئی هستند.

در این مقاله به منظور بهبود خواص الکترواپتیکی لایه‌های نازک SnO_2، به بررسی اثر لایه نازک Ag در ساختارهای SnO_2/Ag و $SnO_2/Ag/SnO_2$، تهیه شده به روش تبخیر حرارتی خواهیم پرداخت. همچنین، با ارائه نتایج تجربی نشان خواهیم داد که بازتاب نور در ناحیه نور مرئی کاهش می‌یابد که به عنوان لایه های ضدبازتاب می‌توانند در سلولهای خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند.

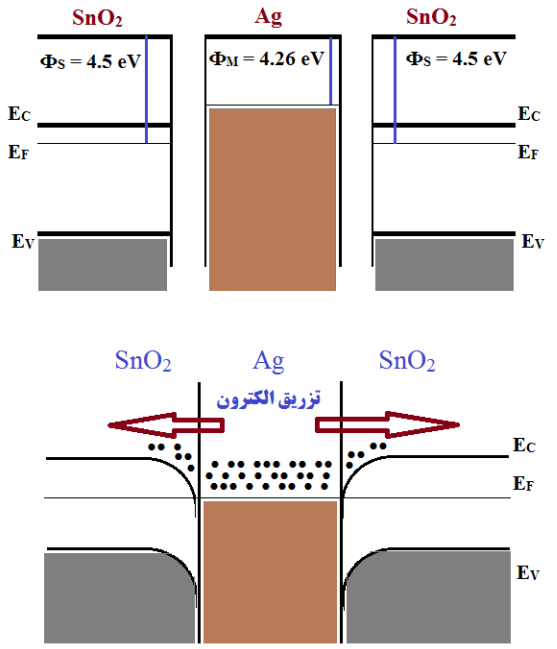
۲- روش انجام آزمایش

در ابتدا، زیرلایه‌ها (لام آزمایشگاهی) در محلولهای شوینده و سپس با الکل و استون شسته شدند و در ادامه پس از خشک شدن، در داخل محفظه خلأ قرار گرفتند. تخلیه محفظه به منظور رسیدن به فشار مورد نظر، ابتدا با پمپ روتاری و سپس با پمپ توربو انجام گرفت. پودر SnO_2 در داخل بوته تنگستن با اعمال جریان ۱۰۰ آمپری و در ولتاژ کاری ۱/۰۰ ولت، شروع به تبخیر کرد. ضخامت لایه‌ها با استفاده از ضخامت‌سنج کوارتزی مدل SQM-160 اندازه‌گیری شد. در ادامه فلز نقره با شرایط ۱۳۰ آمپر و ولتاژ ۱/۲ ولت بر روی لایه SnO_2، نشانده شد. در ادامه لایه نازکی از SnO_2 بر روی نقره نشانده شد. پس از اتمام فرآیند لایه‌نشانی، نمونه‌های $SnO_2(50)$، $SnO_2(50)/Ag(10)$ و $SnO_2(50)/Ag(10)/SnO_2(20)$ در کوره هوا، به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. سپس، خواص الکتریکی آنها با استفاده از چیدمان آزمایشگاهی پروب چهار نقطه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. طیف تراگسیلی نمونه‌ها نیز با استفاده از طیف سنج Avantes مدل ۳۶۴۸ اندازه‌گیری شد.

۳- بحث و نتایج

ضخامت ۱۰ نانومتر برای لایه نقره انتخاب شد. نتایج تجری نشان می‌داد در صورتی که ضخامت Ag کمتر از ۱۰ نانومتر باشد، تراگسیل نور کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش تراگسیل، به حضور جزیره‌هایی نسبت داده می‌شود که لایه نازک Ag در ضخامتهای پایین تشکیل می‌دهد. این جزایر جدا از هم، پراکندگی اپتیکی در مرز نیمرسانا را افزایش می‌دهند که نتیجه آن کاهش میزان تراگسیل نور است. با افزایش ضخامت Ag، این جزایر جدا از هم با اتصال به یکدیگر، یک لایه پیوسته با رسانندگی و تراگسیل بالا تشکیل می‌دهند. با افزایش ضخامت به مقدار بیش از ۱۰ نانومتر، رسانندگی تغییر چندانی نمی‌کند و در مقابل تراگسیل کاهش می‌یابد (نتایج نشان داده نشده‌اند)، این نتایج با نتایج دیگران در توافق است [۱]. نتایج اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی برای نمونه‌های SnO_2، SnO_2/Ag و $SnO_2/Ag/SnO_2$ در جدول ۱ نشان داده شده است. حضور لایه میانی نقره باعث کاهش مقاومت ویژه الکتریکی می‌شود. این نوع ساختارها را می‌توان شبیه اتصال یک فلز به یک نیمرسانا در نظر گرفت که در شکل ۱، ساختار نوار انرژی آن نشان داده شده است. در بررسی ساختار SnO_2/Ag، مشاهده می‌شود که تابع کار Ag و SnO_2 به ترتیب برابر ۴/۲۶ و ۴/۵ الکترون ولت است. در صورتی که این دو لایه در تماس با یکدیگر قرار گیرند، از

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



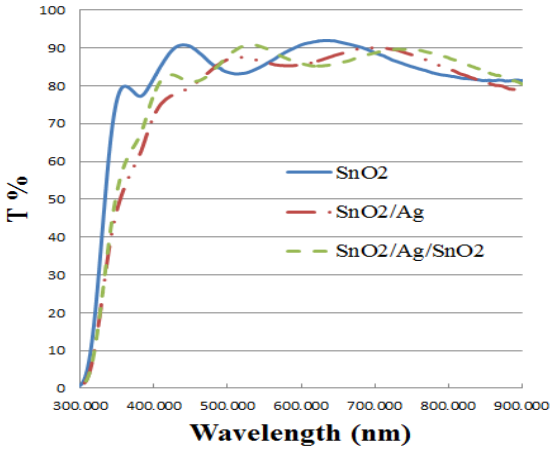
شکل ۱: تصویری نوعی از اتصال Ag به نیمرسانای SnO_2 و تزریق الکترون از فلز به نیمرسانا.

آنجا که پس از اتصال نیز هیچگونه سدی برای انتقال الکترون از فلز به نیمرسانا وجود ندارد، الکترونها به راحتی می‌توانند از لایه Ag به SnO_2 منتقل شوند. مشابه همین حالت برای ساختار SnO_2/Ag/ SnO_2 برقرار است. در این حالت با افزایش چگالی حاملهای بار که به دلیل تزریق الکترون از فلز به نیمرساناست، مواجه هستیم [۵].

در شکل ۲ طیف تراگسیلی لایه‌های نازک تهیه شده نشان داده شده است. با وارد نمودن لایه Ag، تراگسیل به مقدار جزئی تغییر می‌یابد و لبه جذب به سمت طول موجهای بلندتر جابجا می‌شود. این کاهش تراگسیل و جابجایی به سمت طول موجهای بلندتر را می‌توان به

جدول۱: مقاومت ویژه الکتریکی(ρ_s)، تراگسیل در طول موج ۵۵۰ نانومتر (T_{550}) و گاف انرژی لایه‌های تهیه شده.

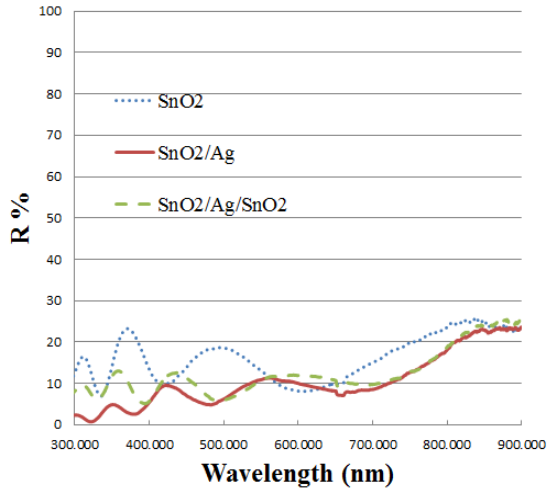
نمونه	ρ_s (Ωcm)	T_{550} (%)	E_g (eV)
SnO_2	۷×۱۰^{٤}	۸۵/۵۸	۳/٦۳
SnO_2/Ag	۳	۸٦/۲۳	۳/۳۰
SnO_2/Ag/SnO_2	۵×۱۰$^{-۱}$	۹۰/۰۳	۳/٤۲



شکل ۲: طیف تراگسیلی لایه‌های نازک ساخته شده.

جذب اپتیکی حاملهای بار آزاد نسبت داد که از طریق Ag به ساختار تزریق می‌شوند. شکل ۳ طیف انعکاسی لایه-های نازک تهیه شده را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزودن لایه Ag به لایه نازک SnO_2، میانگین انعکاس کاهش می‌یابد. برای مثال، افزایش تراگسیل و کاهش انعکاس به راحتی در محدوده طول موج ۵۵۰ نانومتر دیده می‌شود. به عبارت دیگر، افزودن لایه نازک Ag موجب افزایش مشخصه ضد بازتابی لایه-های نازک SnO_2 می‌شود که در سلولهای خورشیدی مورد توجه است[۵].

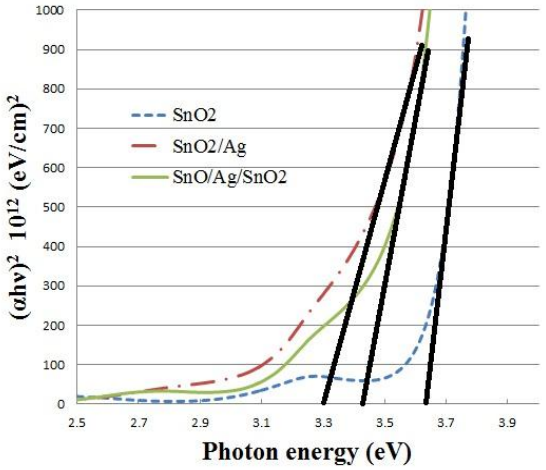
نمودار $(\alpha h\nu)^2$ برحسب انرژی فوتون در شکل شماره ۴ نشان داده شده است که همانطور که مشاهده می‌شود، با افزودن لایه میانی Ag، گاف انرژی کاهش می‌یابد که با



شکل ۳: طیف انعکاسی لایه‌های نازک ساخته شده.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

نتایج دیگران در توافق است [۵ و ۶]. کاهش یا افزایش گاف انرژی در نیمرساناهای اکسیدی با افزودن ناخالصی، به پدیده‌های مختلفی نسبت داده می‌شود. کاهش گاف انرژی در مورد فوق، به غلظت بالای حاملهای بار در نوار رسانش و همچنین به اتمهای یونیزه شده Ag در لایه Ag نسبت داده می‌شود. در صورتی که چگالی حاملهای بار در نیمرساناها به مقدار بحرانی مات Mott[1] برسد، کاهش گاف انرژی با پدیده‌های بس ذره‌ای پراکندگی الکترون-الکترون و پراکندگی الکترون- ناخالصی توصیف می‌شود [۷]. الکترونهای تزریق شده از فلز به نیمرسانا در نوار رسانش نیمرسانا تجمع می‌کنند و اتمهای نقره در سطح لایه نقره، دارای بار مثبت می‌شوند (Ag^+). الکترونهای نوار رسانش نیمرسانا نیروی جاذبه‌ای به اتمهای باردار نقره و نیروی دافعه‌ای به دیگر الکترونها در نوار رسانش وارد می‌کنند. در نتیجه یک میدان الکتریکی بین الکترونهای نوار رسانش نیمرسانا و اتمهای باردار فلز وجود دارد. این پدیده بس ذره‌ای موجب جابجایی نوار رسانش به سمت پایین و جابجایی نوار ظرفیت به سمت بالا می‌شود. بنابراین، کاهش گاف انرژی همچنان که بوسیله هان[2] و همکارانش در لایه‌های GZO/Ag/GZO مورد بررسی قرار گرفت [۶]، به پدیده بس ذره‌ای در مرز مشترک لایه Ag و SnO_2 نسبت داده می‌شود [۶].



شکل ۴: نمودار $(\alpha h\nu)^2$ برحسب انرژی فوتون.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار اثر حضور نقره بر خواص الکترواپتیکی لایه‌های نازک نیمرسانای اکسیدی شفاف SnO_2 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لایه نازک نقره، موجب کاهش مقاومت ویژه الکتریکی و انعکاس در لایه-های نازک SnO_2/Ag و $SnO_2/Ag/SnO_2$ می‌شود. علاوه براین، با افزودن لایه نازک Ag، گاف انرژی کاهش می‌یابد که با برهمکنشهای بس ذره‌ای قابل توجیه است.

مراجع

[1] S.J. Kim, E.A. Stach, C.A. Handwerker, Silver layer instability in a $SnO_2/Ag/SnO_2$ trilayer on silicon, Thin Solid Films, 520 (2012) 6189–6195.

[2] M.I. Ionescu, F. Benseba, B.L. Luan, Study of optical and electrical properties of ZnO/Cu/ZnO multilayers deposited on flexible substrate, Thin Solid Films, 525 (2012) 162 – 166.

[3] P.C. Lansaker, K. Gunnarsson, A. Roos, G.A. Niklasson, C.G. Granqvist, Au thin fi lms deposited on SnO_2:In and glass: Substrate effects on the optical and electrical properties, Thin Solid Films, 519 (2011) 1930 – 1933.

[4] W.S. Liu, Y.H. Liu, W.K. Chen, K.P. Hsueh, Transparent conductive Ga-doped MgZnO/Ag/Ga-doped MgZnO sandwich structure with improved conductivity and transmittance, Journal of Alloys and Compounds, 564 (2013) 105–113.

[5] H. Han, N.D. Theodore, T.L. Alford, Improved conductivity and mechanism of carrier transport in zinc oxide with embedded silver layer, Journal of Applied Physics, 103 (2008) 013708-013716.

[6] Y.S. Park, H.K. Kim, S.W. Kim, Thin Ag layer inserted GZO multilayer grown by roll-to-roll sputtering for flexible and transparent conducting electrodes, Journal of The Electrochemical Society, 157 (2010) J301-J306.

[7] S.H. Yu, C.H. Jia, H.W. Zheng, L.H. Ding, W.F. Zhang, High quality transparent conductive $SnO_2/Ag/ SnO_2$ tri-layer films deposited at room temperature by magnetron sputtering, Materials Letters, 85 (2012) 68–70.

[1] Mott
[2] Han

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]