





ساخت سهلایه SnO2/Ag/SnO2 به عنوان الکترود شفاف و لایه ضد بازتاب در سلولهای خورشیدی

مرتضي عاصمي و مجيد قناعتشعار

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

چکیده – در این مقاله ساختارهای مختلفی از لایه نازک SnO₂ به همراه لایه Ag مورد بررسی قرار گرفت. از لایهنشانی تبخیر حرارتی برای لایهنشانی این لایه ها استفاده شد. نتایج نشان میدهد که لایه های SnO₂ مقاومت ویژه الکتریکی و بازتاب بالایی در طول موج ۵۵۰ نانومتر دارند. افزودن لایه Ag موجب کاهش مقاومت الکتریکی و بازتاب لایه ها در ۵۵۰ نانومتر می شود. این کاهش بازتاب که با افزایش تراگسیل همراه است، استفاده از این لایه ها به عنوان الکترو شفاف و لایه ضد بازتاب در سلولهای خورشیدی را ممکن می سازد. گاف انرژی لایه ها نیز با افزودن لایه Ag کاهش می یابد که با برهمکنشهای بس ذره ای قابل توصیف است.

کلید واژه- لایههای نازک SnO₂، لایهنشانی تبخیر حرارتی، لایههای ضد بازتاب، اثرات بس- ذرهای.

Tri-layer SnO₂/Ag/SnO₂ fabrication as transparent electrode and antireflection 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: SnO₂ thin films, Thermal evaporation deposition, Anti-reflectance layer, Many-body effect.

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 الكترواپتيكي رساناهاي اكسيدي شفاف ديگر نظير اكسيد روى (ZnO) و اكسيد قلع (SnO₂) وجود دارد تا بتوانند جایگزین لایههای نازک ITO شوند [۲]. روشهای مختلفی برای لایهنشانی SnO₂ وجود دارد که از این میان میتوان به کندوپاش با امواج رادیویی (RF) و جریان مستقیم (DC) و لایهنشانی تبخیری اشاره کرد [۳]. خواص الكترواپتيكي اين لايهها به شرايط لايهنشاني نظير دماي 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 می توان 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 كاهش انعكاس نور مرئي هستند.

در این مقاله به منظور بهبود خواص الکترواپتیکی لایههای نازک SnO₂، به بررسی اثر لایه نازک Ag در ساختارهای SnO₂/Ag و SnO₂/Ag/SnO، 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 SnO₂ 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 اندازه گیری شد. در ادامه فلز نقره با شرایط ۱۳۰ آمپر و ولتاژ ۱/۲ ولت بر روی لایه SnO₂، نشانده شد. در ادامه لایه نازکی از SnO₂ بر روی نقره نشانده شد. پس از اتمام (SnO₂(50) لايەنشانى، نمونەھاي فرآيند SnO₂(50)/Ag(10)/SnO₂(20) و SnO₂(50)/Ag(10) در کوره هوا، به مدت ۱ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه تحت عمليات حرارتي قرار گرفتند. سپس، خواص الكتريكي 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 اندازه گیری شد.

۳- بحث و نتايج

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 می یابد. دلیل این کاهش تراگسیل، به حضور جزیرههایی نسبت داده می-شود که لایه نازک Ag در ضخامتهای پایین تشکیل می-دهد. 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 می یابد (نتایج نشان داده نشده-اند)، این نتایج با نتایج دیگران در توافق است [۱]. نتایج اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی برای نمونه های SnO₂، SnO₂/Ag/ SnO₂ و SnO₂/Ag/ SnO₂ در جدول ۱ نشان داده شده است. حضور لايه مياني نقره باعث كاهش مقاومت ویژه الکتریکی می شود. این نوع ساختارها را می توان 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 SnO₂/Ag، مشاهده می شود که تابع کار Ag و SnO₂ به ترتیب برابر ۴/۲۶ و ۴/۵ الکترون ولت است. در صورتی که این دو لایه در تماس با یکدیگر قرار گیرند، از



شکل ۱: تصویری نوعی از اتصال Ag به نیمرسانای SnO₂ 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 SnO₂ منتقل شوند. مشابه همین حالت برای ساختار SnO₂/Ag/ SnO₂ 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(۵٫۵)، تراگسیل در طول موج ۵۵۰ نانومتر (T₅₅₀) و گاف انرژی لایههای تهیه شده.

E _g (eV)	T ₅₅₀ (%)	$\rho_{s}\left(\Omega cm\right)$	نمونه
٣/٦٣	٨٥/٥٨	٧×١٠ ^٤	SnO ₂
٣/٣.	۸٦/۲۳	٣	SnO ₂ /Ag
٣/٤٢	۹۰/۰۳	0×1·-1	SnO ₂ /Ag/SnO ₂



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 افزدون لایه Ag به لایه نازک SNO² 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 SnO² میشود که در سلولهای خورشیدی مورد توجه است[۵].

نمودار ²(αhv) 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.

نتایج دیگران در توافق است [۵ و ۶]. کاهش یا افزایش گاف انرژی در نیمرساناهای اکسیدی با افزودن ناخالصی، به پدیدههای مختلفی نسبت داده می شود. 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 می شود. در صورتی که چگالی حاملهای بار در نيمرساناها به مقدار بحراني مات Mott برسد، كاهش گاف انرژی با پدیدههای بس ذرهای پراکندگی الکترون-الكترون و پراكندگی الكترون- ناخالصی توصيف می شود [۷]. الکترونهای تزریق شده از فلز به نیمرسانا در نوار رسانش نیمرسانا تجمع می کنند 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 می-کنند. 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 می شود. بنابراین، کاهش گاف انرژی همچنان که بوسیله هان ٔ و همکارانش در لایههای GZO/Ag/GZO مورد بررسی قرار گرفت [۶]، به یدیده بس ذرهای در مرز مشترک لایه Ag و SnO₂ نسبت داده می شود [۶].



شكل ۴: نمودار $^{(\alpha hv)^{2}}$ برحسب انرژی فوتون.

۴- نتیجهگیری

در این کار اثر حضور نقره بر خواص الکترواپتیکی لایههای نازک نیمرسانای اکسیدی شفاف 2NO مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان میدهد که افزودن لایه نازک نقره، موجب کاهش مقاومت ویژه الکتریکی و انعکاس در لایه-های نازک SnO₂/Ag و SnO₂/Ag/SnO میشود. علاوه براین، با افزودن لایه نازک Ag، گاف انرژی کاهش مییابد که با برهمکنشهای بس ذرهای قابل توجیه است.

مراجع

- S.J. Kim, E.A. Stach, C.A. Handwerker, Silver layer instability in a SnO₂/Ag/SnO₂ 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 SnO₂: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 SnO₂/Ag/ SnO₂ trilayer films deposited at room temperature by magnetron sputtering, Materials Letters, 85 (2012) 68–70.

¹ Mott

² Han