

مطالعه‌ی خواص الکتریکی دیود شاتکی هیبریدی با ساختار $\text{Al/TiO}_2\text{-ZnS: MAPbI}_3/\text{Au}$

فاطمه بمانی^۱، محمود برهانی زرنندی^۲، حجت امراللهی بیوکی^۳، سیدمحمد مهدی حسینی زارچ^۱، علیرضا رهنمایک^۳

^۱ گروه پژوهشی فوتونیک، مرکز تحقیقات مهندسی، دانشگاه یزد

^۲ گروه اتمی مولکولی، دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه یزد

^۳ گروه حالت جامد، دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه یزد

چکیده - دیود سد شاتکی با ساختار هیبریدی $\text{Al/TiO}_2\text{-ZnS:CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Au}$ با استفاده از دستگاه لایه‌نشانی چرخشی تهیه گردید. منحنی مشخصه جریان-ولتاژ (I - V) نمونه جهت وجود یکسوسازی مورد بررسی قرار گرفت. این دیود یک رفتار کاملاً نامتقارن و غیرخطی با فاکتور ایده‌آل بزرگتر از یک را از خود نشان داد. مکانیسم جریان رسانش نیز مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین پارامترهای شاتکی از قبیل ارتفاع سد پتانسیل و فاکتور ایده‌آل به ترتیب نزدیک به 0.71 eV و 4.86 و $4/86$ به دست آمد.

کلیدواژه-: پروسکایت، تیتانیوم‌دی‌اکسید، دیود شاتکی هیبریدی، سولفید روی

Study on Electrical Properties of Hybrid Schottky Diode Based on $\text{Al/TiO}_2\text{-ZnS: MAPbI}_3/\text{Au}$

Fatemeh Bemani^{a,b}, Mahmoud Borhani Zarandi^{a,b}, Hojjat Amrollahi Bioki^{a,b}, S.M.M. Hosseini Zarch^{a,b}, A.R. Rahnamanic^{a,c}

^a Photonics Research Group, Engineering Research Center, Yazd University, Yazd, Iran

^b Atomic and Molecular Physics group, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran

^c Solid state group, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract- $\text{Al/TiO}_2\text{-ZnS:MAPbI}_3/\text{Au}$ schottky diode was fabricated by spin coating method. The current-voltage characteristics have been studied to explain of rectification generation. The diode shows non-ideal I - V behavior with an ideality factor greater than unity. The conduction mechanism was investigated. The diode parameters such as barrier height and ideality factor were found as 0.71 eV and 4.86 , respectively.

Keywords: Perovskite, TiO_2 , Hybrid Schottky Diode, ZnS.

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

۱- مقدمه

دست آمد. برای ایجاد اتصال با مدار قطعات ساخته شده چسب نقره بر روی الکترودهای فلزی طلا و آلومینیوم قرار داده شد. دیودهای هیبریدی ساخته شده دارای ساختار ساندویچی $\text{Al/TiO}_2\text{-ZnS:MAPbI}_3/\text{Au}$ می باشد. مشخصه جریان-ولتاژ قطعات ساخته شده به وسیله میکروآمپر متر Keithely 2400 اندازه گیری شد.

۳- بخش تئوری

ساکننا پیشنهاد کرد که مشخصه I-V غیرخطی اتصال فلز-نیمرسانا می تواند بر طبق یکی از مکانیزمهای جریان محدود شده بار فضائی (SCLC)، تئوری گسیل پوله-فرنکل و یا تئوری گسیل ترمیونی تفسیر شود [۲]. چگالی جریان برای گسیل پوله-فرنکل می تواند از معادله زیر بدست آید:

$$\frac{J}{V} = \left(\frac{J}{V}\right)_0 \exp\left(\frac{\beta\left(\frac{V}{d}\right)^{1/2}}{nk_B T}\right) \quad (1)$$

در این رابطه $\beta = \frac{q^3}{\pi\epsilon\epsilon_0}$ ، n فاکتور ایده آل، ϵ ثابت دی الکتریک نیمرسانا، ϵ_0 پذیرفتاری خلاء، d ضخامت لایه، q بار الکتریکی، J دانسیته جریان و V ولتاژ اعمالی، k_B ثابت بولتزمن و T دمای مطلق می باشد [۳]. اثر شاتکی شامل گسیل الکترون توسط فعالیت گرمایی از الکتروده فلز به سمت نوار رسانش نیمرسانا از روی سد پتانسیل در فصل مشترک فلز-نیمرسانا است. در این حالت مشخصه جریان-ولتاژ سد شاتکی را می توان به وسیله فرایند گسیل ترمیونی استاندارد توصیف کرد. معادله چگالی جریان از رابطه معروف شاتکی (رابطه (۲)) داده می شود [۳].

$$J_{S \rightarrow m} = J_0 \exp\left(\frac{qV_{eff}}{nkT} - 1\right) \\ = A^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_{eff}}{nkT} - 1\right) \quad (2)$$

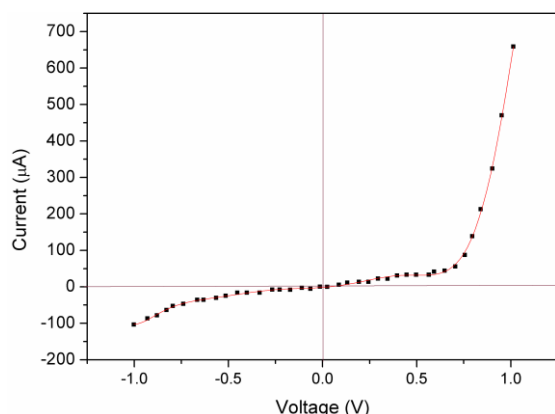
که در آن $A^{**} = AA^*$ می باشد. A^* ثابت مؤثر ریچاردسون و تقریباً برابر $120 \text{ A.cm}^{-2}.\text{K}^{-2}$ ، A مساحت پیوند، T دمای مطلق بر حسب درجه کلوین، k ثابت بولتزمن، V_{eff} ولتاژ مؤثر دو سر پیوند و n فاکتور ایده آل دیود است. بدین معنی که برای یک دیود شاتکی ایده آل،

قطعات الکترونیکی آلی-معدنی و پلیمری همان گونه که از نامشان آشکار است، با لایه نشانی مواد آلی-معدنی یا پلیمری ساخته می شوند و با توجه به تنوع مواد آلی و ترکیبات و مشتقات آنها می توانند گستره وسیعی از خواص الکترونیکی و نوری را بروز دهند. قطعات الکترونیکی ساخته شده از مواد آلی-معدنی علاوه بر قابلیت های مذکور، توانایی پاسخگویی به مهمترین چالش های صنعت قطعات نیمرسانا یعنی سختی فرایند لایه نشانی و آلائیدن و عدم سازگاری با محیط زیست را دارند. تاکنون از پلیمرهای نیمرسانا از قبیل پلی پیرول، پلی تیوفن و مشتقات آنها برای ساخت ترانزیستورهای اثر میدانی، دیودهای نورگسیل، سلول های فوتوولتایی و دیودهای شاتکی [۱] استفاده شده و خواص و پارامترهای آن مورد بررسی قرار گرفته است. اخیراً مواد با ساختار هالوژنی پروسکایت با فرمول عمومی RNH_3MX_3 که در آن $X = \text{I, Br, Cl}$ و $M = \text{Pb}$ ، $R = \text{C}_n\text{H}_{2n+1}$ است، به دلیل قابلیت کاربرد در سلول های خورشیدی، عایق های توپولوژیکی و ابررسانایی مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله خواص الکتریکی یک نمونه دیود شاتکی با ساختار $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (متیل آمونیوم سرب یدید MAPbI_3) و نانوذرات تیتانیوم دی اکسید و سولفید روی مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد.

۲- بخش تجربی

لایه نازک آلومینیوم به عنوان اتصال اهمی به روش تبخیر حرارتی-مقاومتی توسط دستگاه VAS BUC 78535 دانشکده فیزیک دانشگاه یزد تهیه شد. خمیر نانوذرات TiO_2 با استفاده از اتانول رقیق شد و سپس به ضخامت یک میکرومتر به روش لایه نشانی چرخشی روی زیرلایه آلومینیوم قرار گرفت و در دمای 500°C درجه سانتی گراد پخت داده شد. در این مرحله، لایه نازک سولفیدروی به ضخامت 100 نانومتر بر روی لایه TiO_2 به روش چرخشی لایه نشانی شد و در دمای 120°C درجه سانتی گراد خشک شد. سپس لایه هیبریدی MAPbI_3 با استفاده از روش دومرحله ای غوطه وری لایه نشانی شد. با قرار دادن ماسک مناسب، فلز طلا نیز با استفاده از روش کندوپاش کاندی بر روی زیرلایه هیبریدی لایه نشانی شد به طوری که سطح مقطع مؤثر دیود برابر 0.12 cm^2 به

۵/۱ الکترون ولت است [۳] در سمت طلا اتصال اهمی شکل می‌گیرد. این نشان می‌دهد که تابع کار ترکیب $\text{TiO}_2\text{-ZnS:MAPbI}_3$ بین مقادیر ۳/۷۵ و ۵/۱ الکترون ولت می‌باشد. از آنجا که نیم‌رسانای $\text{TiO}_2\text{-ZnS}$ یک نیم‌رسانای نوع n می‌باشد [۵]، با توجه به نمودار کاملاً نامتقارن جریان-ولتاژ پیوند $\text{TiO}_2\text{-ZnS:MAPbI}_3$ می‌توان نتیجه گرفت ساختار MAIPbI_3 به عنوان لایه نیم‌رسانای نوع p عمل می‌کند که با نتایج دیگر محققان که از این ساختار برای لایه جاذب از نوع p در سلول‌های خورشیدی پروسکایت مورد استفاده قرار می‌دهند مطابقت دارد [۵].



شکل ۲: مشخصه جریان-ولتاژ دیود ساخته شده با ساختار $\text{Al/TiO}_2\text{-ZnS:MAPbI}_3\text{/Au}$

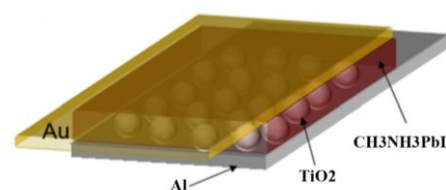
شکل ۳، نمودارهای $\ln I\text{-}\ln V$ ، $\ln I\text{-}\ln(V)^{1/2}$ و $\ln I\text{-}V$ برای دیود ساخته شده از ترکیب $\text{TiO}_2\text{-ZnS:MAPbI}_3$ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در ولتاژهای بالاتر از ۰/۶ ولت نمودار $\ln I$ بر حسب V ، همچنین نمودار $\ln(I/V)$ بر حسب $V^{1/2}$ خطی است که مؤید این است که فرایند غالب در این محدوده، گسیل ترمویونی و گسیل پوله-فرنکل می‌باشد و برای ولتاژهای پایین‌تر فرایند حاکم گسیل پوله-فرنکل می‌باشد. از روی شیب نمودار $\ln I$ بر حسب V می‌توان فاکتور ایده‌آل دیود مورد نظر را با استفاده از رابطه (۳) به دست آورد.

$$n = \frac{q}{kT \left(\frac{d \ln J}{dV} \right)} \quad (3)$$

مقدار n برابر ۱ و برای دیود شاتکی غیرایده‌آل، مقداری بزرگتر از ۱ خواهد بود. حال برای تشخیص اینکه کدام یک از فرایندهای فوق بر مشخصه غیرخطی جریان-ولتاژ دیود ساخته شده حاکم است نیاز به یک بررسی کمی است. سیستمی که مکانیزم SCLC بر آن حاکم است در صورتی که نمودار $\ln I$ بر حسب $\ln V$ برای آن رسم شود نمودار خط راستی با شیب ۲ می‌شود. اگر مکانیزم غالب گسیل پوله-فرنکل باشد از رسم نمودار $\ln(I/V)$ بر حسب $V^{1/2}$ یک خط راست بدست می‌آید و در نهایت اگر برای سیستمی تغییرات $\ln I$ بر حسب V خطی شود نشان‌دهنده آن است که گسیل ترمویونی فرایند غالب انتقال جریان در پیوندگاه فلز-نیم-رسانا می‌باشد [۴].

۴- نتایج و بحث

دیود شاتکی هیبریدی به شکل ساندویچی بین دو الکتروود فلزی غیر مشابه تهیه می‌گردد. انتخاب این فلزات باید به گونه‌ای باشد که تابع کار نیم‌رسانا بین توابع کار آن‌ها قرار گیرد و معمولاً با توجه به نوع آرایش لایه، یکی از فلزات باعث ایجاد اتصال اهمی و دیگری باعث ایجاد اتصال یکسوساز سد شاتکی می‌شود. برای ایجاد سد یکسوساز در فصل مشترک نیم‌رسانای هیبریدی/فلز، تابع کار فلز باید کمتر از نیم‌رسانای نوع p باشد. اگر تابع کار برعکس باشد اتصال ایجاد شده اهمی است. شکل ۱ نمایش طرح‌وار از دیودهای شاتکی هیبریدی ساخته شده با ساختار $\text{Al/TiO}_2\text{:MAPbI}_3\text{/Au}$ نشان می‌دهد.



شکل ۱: یک نمونه دیود ساخته شده از $\text{Al/TiO}_2\text{:MAPbI}_3\text{/Au}$

شکل ۲، نمودار جریان-ولتاژ دیود هیبریدی با ساختار $\text{Al/TiO}_2\text{-ZnS:MAPbI}_3\text{/Au}$ را نشان می‌دهد که به صورت کاملاً نامتقارن و غیرخطی می‌باشد. در بایاس مستقیم برای ولتاژهای پایین جریان به صورت نمایی افزایش می‌یابد و برای ولتاژهای بالا به صورت خطی در حال افزایش می‌باشد. این دیود به طور واضح یک رفتار یکسوکندگی از خود نشان می‌دهند. از آنجا که آلومینیوم دارای تابع کار ۳/۷۵ الکترون ولت و طلا دارای تابع کار

باشد که باعث کاهش پهنای لایه تهی و افزایش جریان تونل زنی می شود که در اثر آن یکسوکنندگی پیوندگاه فلز- نیم رسانا کاهش خواهد یافت [۳].

با استفاده از معادله (۲) و (۳) و با توجه به شکل ۳-ج، جریان اشباع معکوس و ارتفاع سد شاتکی به ترتیب 0.25 mA و 0.71 eV برای دیود ساخته شده به دست آمد که با نتایج دیگران قابل مقایسه است [۵].

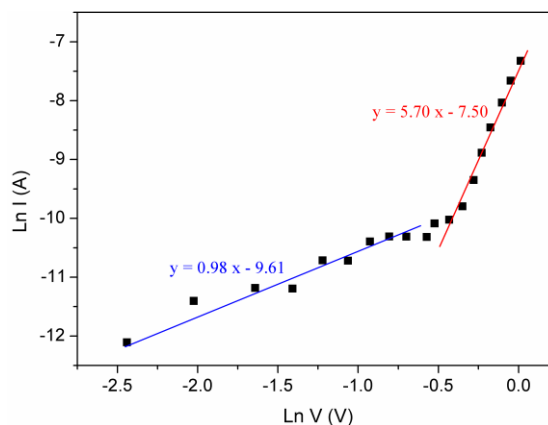
از آنجا که تعیین پارامترهای یک دیود بر پایه چندین فرض است، در عمل ممکن است یک یا چند تا از این فرضها معتبر نباشد؛ در نتیجه در فرایند انتقال جریان امکان دارد که چندین مکانیزم به طور همزمان دخالت داشته باشند که این پدیده برای ساختارهای آمورف مشاهده شده است [۴].

۵- نتیجه گیری

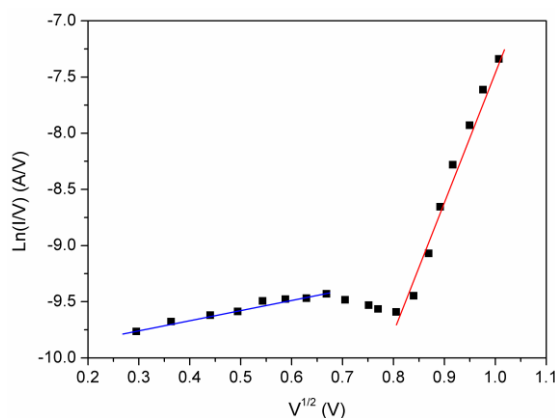
از روی منحنی مشخصه I-V دیود ساخته شده با ساختار $\text{Al/TiO}_2:\text{MAPbI}_3/\text{Au}$ یک رفتار کاملاً نامتقارن و غیرخطی مشاهده شد که یک نوع رفتار یکسوکنندگی برای این ساختار با لایه ZnS از خود نشان می دهد. از نمودارهای رسم شده می توان استنباط کرد که سازوکار رسانش در ولتاژهای پایین به وسیله گسیل پوله-فرنکل از روی سد پتانسیل فصل مشترک فلز/ نیم رسانا و در ولتاژهای بالا توسط اثر پوله- فرنکل همراه با گسیل ترمویونی تعیین می گردد. همچنین پارامترهای شاتکی این نوع ساختار پیوندی شامل ارتفاع سد پتانسیل، چگالی جریان معکوس و فاکتور ایده آل به ترتیب نزدیک به 0.71 eV ، 2.05 mA/cm^2 و 4.86 به دست آمد.

مراجع

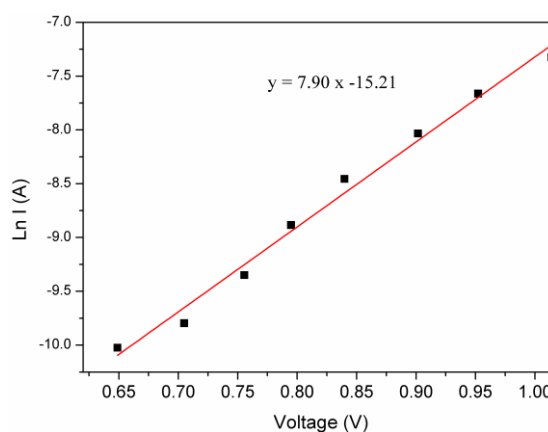
- [1] G. Sharma, S. Sharma, M. Roy, "Electrical and photoelectrical properties of dye-sensitized allyl viologen-doped polypyrrole solar cells". Solar energy materials and solar cells, Vol. 80, No. 2, 131-142, 2003.
- [2] I. S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd edition. New York, Wiley international (1981).
- [3] J. Zhang, H. Tanaka, T. Kawai, "Rectifying characteristic in all-perovskite oxide film pn junction with room temperature ferromagnetism". Applied physics letters, Vol. 80, No. 4378-4380, 2002.
- [4] R. Gupta, R. Singh, "Schottky diode based on composite organic semiconductor oxide film pn junction with room temperature ferromagnetism". Applied physics letters, Vol. 80, No. 4378-4380, 2002.
- [5] J. Liu, C. Gao, L. Luo, Q. Ye, X. He, L. Ouyang, X. Guo, D. Zhuang, C. Liao, J. Mei, "Low-temperature, solution processed metal sulfide as an electron transport layer for efficient planar perovskite solar cells", Journal of Materials Chemistry A, Vol. 3, No. 22, pp. 11750-11755, 2015.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳: منحنی $\ln I - \ln V$ ، ب- منحنی $\ln(I/V) - V^{1/2}$ ، ج- منحنی $\ln I - V$ برای دیود شاتکی با ساختار $\text{Al/TiO}_2\text{-ZnS:MAPbI}_3/\text{Au}$

از محل قطع نمودار $\ln I$ بر حسب V ، با محور عمودی، جریان اشباع معکوس I_0 بدست می آید و با جایگذاری آن در رابطه (۲)، ارتفاع سد شاتکی ($q\phi_B$) پیوند $\text{Al/TiO}_2:\text{MAPbI}_3$ بدست می آید. فاکتور ایده آل برای این دیود 4.86 بدست آمد. علت انحراف فاکتور ایده آل از مقدار ۱ می تواند به آرایش بالای پروسکایت هم مربوط