



بررسی ریاضی پدیده جذب نوری در یک سلول فتوولتائیک پلیمری ترکیبی

علی ضمیری مغانلو - دانشگاه آزاد اسلامی - باشگاه پژوهشگران جوان - واحد اردبیل

E-mail: alizamiri63@gmail.com

چکیده: سلول های فتوولتائیک، انرژی تابشی خورشیدی را بطور مستقیم و بدون نیاز به فرایند واسطه ای به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند که بررسی و تحلیل ریاضی این فرایند هدف اصلی است. در این پژوهش به کمک مدل ماتریس پدیده جذب نور در سلول های فتوولتائیک با نیمه رسانای پلیمری ترکیبی شبیه سازی شده است و میدان الکتریکی و انرژی جذبی در نتیجه جذب اپتیکی با روابط ریاضی بیان می شوند. این شبیه سازی توسط نرم افزار MATLAB تحلیل شده است. نتایج تحلیل ها نشان می دهد که فرایند جذب اپتیکی به پارامترهای اپتیکی لایه ها، ضخامت لایه ها و طول موج پرتوی فرودی کاملاً وابسته است و این نتیجه در بهینه سازی فرایند جذب اپتیکی و انرژی جذبی در یک سلول فتوولتائیک بسیار مهم است.

واژه های کلیدی: سلول های فتوولتائیک، جذب اپتیکی، مطالعه ریاضی، مدل ماتریسی، نرم افزار MATLAB.

Mathematical Analysis of Optical Absorption Phenomena in a Composite Polymer Photovoltaic Cell

A. Zamiri Mokhanlo, Member of Association for Young Researchers , IAU, Branch of ardabil

Abstract: Photovoltaic cells are exchanging energy of polarization into electrical energy directly and without intermediate process, that mathematical investigation and analysis of this process is main the goal. In this research, by using of matrix model the light absorption phenomena in semiconductor-composite-polymer photovoltaic cells has been simulated. And electrical field and energy of absorption are expressed by mathematical relations. This simulation has been analyzed using MATLAB software. The result of analysis shows that, the optical absorption process completely depends on the optical parameters of layers and the thickness of layers and incident wavelength, and this result is very important to optimization of optical absorption process and energy of absorption in a photovoltaic cell.

Keywords: Photovoltaic cells, Optical absorption, Mathematical study, Matrix model, MATLAB software.

۱- مقدمه

تأمین انرژی، بویژه انرژی الکتریکی مهمترین عامل پیشرفت جوامع بشری از بعد صنعتی، کشاورزی و اقتصادی بعد از تأمین نیروی انسانی است. لذا شناخت منابع مختلف انرژی از جوانب گوناگون از جمله شناخت مزایا و معایب آنها و انتخاب پرمزیت ترین و کم عیب ترین منبع برای تولید انرژی حائز اهمیت است. در بررسی منابع مختلف انرژی، باتریهای خورشیدی یا سلولهای فتوولتائیک دارای ویژگی ها و مزایای مختلفی هستند که از آن جمله به نسب آسان، بازده خوب، پاک و بدون آلاینده بودن می توان اشاره کرد که با استفاده از آن می توان هزینه های انتقال برق، هزینه شبکه سراسری، مشکلات سوخت رسانی در مناطق صعب العبور را به کلی حذف کرد و با توجه به طول عمر مناسب و سهولت در بهره برداری از آن و توانایی ذخیره سازی انرژی تولیدی توسط باتری، بکارگیری آنها از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. [1]

سلولهای فتوولتائیک ابزارهایی الکترونیکی و اپتوالکترونیکی هستند که با استفاده از پدیده فتوولتائیک، انرژی فوتونهای پرتوی تابشی را مستقیماً به جریان و ولتاژ الکتریکی تبدیل می کنند. دانشمندان اولین باتری خورشیدی یا سلول فتوولتائیک را در سال ۱۹۵۴، با استفاده از ماده نیمه رسانای سیلیسیوم، در آزمایشگاههای تلفن بل ساختند. البته کشف پدیده فتوولتائیک به ۱۸۳۹ توسط ادموند بکیورل (Edmund Becquerel) بر می گردد که وی این پدیده را با مشاهده در کلرید نقره گزارش نمود. یک سلول فتوولتائیک از چند لایه تشکیل شده است که به دو قسمت زیر لایه شیشه ای و قسمت چند لایه (Multilayer) تقسیم می شود که هر کدام از این دو خصوصیتی مخصوص به خود را دارند. در این میان اهمیت قسمت چند لایه بیشتر است که خود از چندین لایه نازک شکل گرفته است که اولین لایه از آنها لایه آند بوده و آخرین لایه آن موسوم به کاتد می باشد. لایه های دیگر نیز در بین این دو لایه قرار دارند، که مهم ترین آنها که در واقع از آن به مهمترین و اصلی ترین قسمت یک سلول فتوولتائیک یاد میشود لایه فعال (Active Layer) نام دارد، که مرکز اصلی تولید حامل های بار یعنی الکترون با بار منفی و حفره با بار مثبت می باشد. [2]

قطعاً الکتریسیته تولیدی توسط یک سلول فتوولتائیک به میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی نور فرودی مربوط است که هدف اصلی در این مقاله طراحی ریاضی پدیده جذب اپتیکی و رسیدن به یک مدل ریاضی بهینه برای جذب نور در این ادوات و بیان میدان الکتریکی و انرژی جذبی از نور با روابط صریح و ساده ریاضی بر اساس پدیده های فیزیکی رخ داده در نتیجه جذب نور در سلول فتوولتائیک است. از طرفی فناوری نانو عرصه ی جدید از علم مواد می باشد تعیین شرایط بهینه یک سلول فتوولتائیک با استفاده از خصوصیات مواد در بعد نانومتر از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. مدلسازی ریاضی و استفاده از بیان و فرمول های ریاضی ابزاری قدرتمند در رسیدن به سلول فتوولتائیکی را فراهم می کند که بتوان ارتباط پدیده جذب اپتیکی را به ضخامت لایه ها و ثوابت اپتیکی لایه ها و دیگر شرایط فیزیکی حاکم بر ساختار سلول فتوولتائیکی و طریقه عمل آن در تولید جریان را به طور بهینه فرمول سازی کرد که با تحلیل آن معادلات انرژی جذبی و جریان تولیدی توسط سلول فتوولتائیک و در نتیجه بهره یا بازده سلول فتوولتائیکی بهینه شود. در این مقاله ثوابت اپتیکی همه لایه ها از اطلاعات تجربی موجود در مراجع [3,4] بدست آمده است.

۲- مدل ریاضی جذب اپتیکی

اندرکنش پرتوی فرودی با یک محیط تحت بررسی می تواند در چهار حالت پرتوی فرودی، بازتابی، عبوری و جذبی بیان شود. یک پرتوی فرضی که به سلول وارد می شود در برخورد با لایه ها می تواند در چهار حالت گفته شده فوق عمل کند. لذا میدان های

الکتریکی از این امواج در جهت های مختلفی تولید می شود، که بایستی در مدلسازی لحاظ شوند. تئوری بکار رفته در این مدلسازی مدل ماتریسی نام دارد در این مدل یک موج الکترومغناطیسی با پارامترهای مشخص بر روی یک چند لایه (سیستم فتوولتائیک) فرود می آید و پدیده جذب نور در این مدل بررسی می گردد. بر اساس این مدل با انجام محاسبات مربوط به فرایندهای عبور، بازتاب و جذب پرتوی نوری، می توان روابط میدان الکتریکی و انرژی جذبی از نور در لایه j ام در سلول فتوولتائیک را با یک ترکیب خطی از توابع نمایی بصورت زیر نوشت:

میدان الکتریکی:

$$E_j(z) = \frac{M_{j,11}'' e^{i\varepsilon_j(z-d_j)} + M_{j,21}'' e^{i\varepsilon_j(d_j-z)}}{M_{j,11}' M_{j,11}'' e^{-i\varepsilon_j d_j} + M_{j,12}' M_{j,21}'' e^{i\varepsilon_j d_j}} E_0^+ \quad (1)$$

انرژی جذبی:

$$Q_j(z) = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 \alpha_j n_j |E_j(z)|^2 \quad (2)$$

که d_j ضخامت، α_j ضریب جذب، n_j ضریب شکست و ε_j ضریب دی الکتریک لایه j ام، ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلا، E_0^+ میدان الکتریکی فرودی به سلول و ضرایب مولفه های نمایی عناصر ماتریس های M_j' و M_j'' هستند که از رابطه زیر تعیین می شوند:

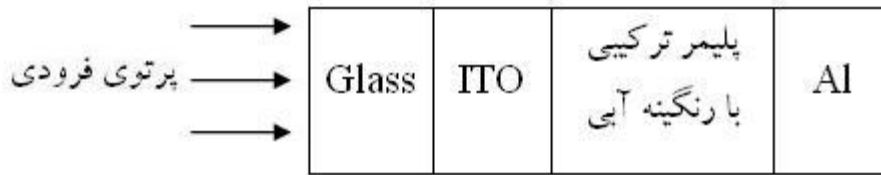
$$M = I_{01} L_1 I_{12} L_2 \dots L_j \dots L_m I_{mm+1} = M_j' L_j M_j'' \quad (3)$$

که ماتریس L_j ماتریس لایه j ام و ماتریس I_{ij} ماتریس سطح مشترک بین دو لایه i و j ام است. بدین ترتیب رابطه صریح ریاضی برای محاسبه میزان انرژی جذبی در هر لایه از یک سلول بدست می آید. از آنجایی که برای مواد مفروض هر لایه ضرایب جذب و دی الکتریک معلوم است، لذا تابع جذب Q بر حسب z یک تابع عددی یک بعدی است که با استفاده از یک برنامه نویسی در نرم افزار MATLAB می توان نمودار جذب در هر لایه را ترسیم کرده و تجزیه و تحلیل کرد. برای فرمول میدان الکتریکی نیز به همین ترتیب می توان عمل کرد. [5,6,7,8]

۳- ساختار سلول فتوولتائیک و بررسی آن

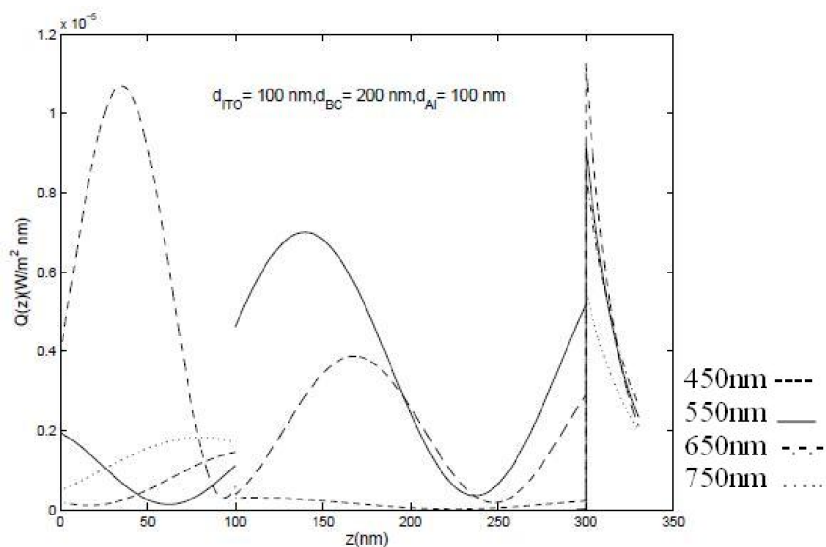
اثر فتوولتائیک در سلول های فتوولتائیک با جذب فوتونها در نیمه رسانا شروع می شود که با جذب انرژی طول موج های خاص فوتونی در نیمه رسانا حامل های بار (الکترونها و حفره ها) تولید می شوند؛ این حامل های بار به دو طرف سلول فتوولتائیک جدا شده و در نهایت توسط قطب های آند و کاتد برای تولید یک جریان الکتریکی در مدار بکار می روند. در ساختار یک سلول فتوولتائیک

بایستی الکتروود بالایی دارای خاصیت عبور بالا (شفافیت مناسب) و خاصیت رسانندگی مناسب باشد؛ که معمولاً از اکسیدهای شفاف فلزی می توان به ایندیوم تین اکسید (ITO) اشاره کرد؛ حضور فیلم نازک ITO در این انتخاب اساسی است. زیرا این لایه به عنوان اتصال مناسب برای جداسازی بیشینه حامل های بار تولید شده در لایه فعال نقش اساسی ایفا می کنند. علاوه بر این پلیمرهای مختلفی برای طراحی سلول های فتوولتائیک به کار می روند. که در ساختار تحت بررسی از ماده پلیمری ترکیبی بنام هیبرید پلی متیل متاکریلات - سیلیکا با رنگینه آبی به عنوان لایه فعال استفاده کرده ایم و لایه آخر نیز از آلومینیوم می باشد که نقش کاتد را در مدل دارد و ساختار بر روی زیر لایه شیشه ای بر پا شده است. شکل شماره (۱) نمایی از لایه های مدل تحت بررسی را نشان می دهد.



شکل ۱- ساختار یک سلول فتوولتائیک پلیمری ترکیبی.

در مدل اپتیکی فوق برای بیشینه کردن انرژی جذب در محل نفوذ فوتون با ثابت در نظر گرفتن ضخامت لایه ها برای طول موج های خاص و تک رنگ با در نظر گرفتن ثوابت دی الکتریک مربوط به هر لایه چگونگی پدیده جذب را مورد بررسی قرار می دهیم. اکنون با بکارگیری داده های معلوم و مدل سازی مطرح شده از پدیده جذب در سلول و با انتخاب عدد ۱۰۰ نانومتر برای ضخامت لایه ایندیوم تین اکسید و ۲۰۰ نانومتر برای ضخامت لایه فعال و همچنین استفاده از نرم افزار MATLAB، نمودارهای مربوط به جذب انرژی فوتون های فرودی برای هر کدام از طول موج های مختلف بر حسب تغییرات ضخامت بصورت شکل شماره (۲) زیر بدست می آید.



شکل ۲- نمودارهای جذب در لایه ها.

۴- نتیجه گیری

از بررسی و تجزیه و تحلیل نمودارها نتایج زیر حاصل می شوند:

۱- در طول موج ۵۵۰ نانومتری رفتار بیرلامبرتی (خاصیت میرایی) و پیک جذبی در لایه فعال مشاهده می شود؛ مشاهده می شود که نمودارهای جذب شدیداً به طول موج پرتوی فرودی به ساختار وابسته است برای طول موج ۵۵۰ نانومتری رفتار جذب در لایه فعال رفتار بیر- لامبرتی است. در این حالت بازتاب از لایه آلومینیومی و تداخل با امواجی که رفتاری شبیه به رفتار امواج ایستا دارند موجب بوجود آمدن بیشینه جذب در نقاط مختلف از لایه فعال شده است. که نقطه بیشینه جذب در ناحیه لایه پلیمری ترکیبی، در $z=140$ نانومتری مشاهده می شود. علت این امر اینکه با تغییر طول موج فرودی، در نسبت های جذب و انعکاس و عبور در لایه ها بویژه در لایه آلومینیومی بعلت وابستگی این ضرایب به طول موج پرتوی فرودی تفاوت ایجاد می شود، این امر تغییرات در رفتار جذب در لایه های دیگر مخصوصاً در لایه فعال را در پی دارد که کاهش جذب در لایه آلومینیومی و افزایش میزان انعکاس از آن موجب انعکاس دوباره پرتو به لایه فعال شده و موجب بوجود آمدن فرآیند جذب مجدد در لایه فعال می شود که این نیز موجب تولید جفت الکترون و حفره های جدید می گردد لذا در این طول موج نمودار جذب در لایه فعال به بیشینه مقادیر خودش می رسد.

۲- با افزایش طول موج فرودی جذب در لایه فعال کمتر شده و در نهایت در طول موج ۷۵۰ نانومتری به مقدار صفر می رسد که حاکی از شفاف بودن لایه مورد نظر برای این طول موج هاست. که ماده پلیمری ترکیبی در این طول موج ها هیچ گونه جذبی از انرژی موج الکترومغناطیسی پرتوی فرودی را ندارد. و همانطوریکه از نمودار مربوط معلوم می باشد امواج با عبور از لایه فعال در لایه آلومینیومی جذب شده است. لذا طول موج فرودی مناسب برای داشتن بیشینه جذب در لایه فعال از ماده پلیمری ترکیبی با رنگینه آبی گفته شده طول موج ۵۵۰ نانومتری است.

۳- نمودارهای جذب نمودارهای گسسته می باشند؛ با توجه به نمودارهای شکل (۲) غیر پیوسته بودن نمودارهای جذب در سطح مشترک لایه ها مشخص است که این مساله به دلیل تغییر شدید در ضریب جذب (α) و ضریب شکست (n) در سطح مشترک بین لایه ها می باشد، چون با انتقال موج الکترومغناطیسی از یک لایه به لایه دیگر ساختار ماده عوض می شود ثوابت اپتیکی آنها با هم فرق دارند و تغییر می کنند. تغییر ثوابت اپتیکی موجب ناپوستگی نمودارهای جذب می شود. لذا پدیده جذب تابعی از ثوابت اپتیکی لایه هاست. نتایج تحلیل ها نشان می دهد که پدیده جذب اپتیکی در لایه های مختلف که با ابعاد مشخص روی هم قرار گرفته اند، تابع برخی پارامترها مثل ثوابت اپتیکی لایه ها، ضخامت لایه ها و طول موج پرتوی فرودی می باشد. مشاهده گردید که توابع جذب هر کدام از لایه ها کاملاً به یکدیگر وابسته اند مثلاً با تغییر دادن یکی از پارامترهای اپتیکی، مثل طول موج فرودی رفتار پروفایل های جذب تغییر می کنند.

۵- مراجع

- 1- Wennerberg, J., "Design and Stability of Cu(In,Ga)Se₂-Based Solar Cell Modules", Doctoral thesis, Uppsala University, Sweden, 2002.

- 2- Lewis, N.S., "Basic research needs for solar energy utilization. Report on the basic energy sciences workshop on solar energy utilization", Argonne National Laboratory, 2005.
- 3- Almaral-Sanchez, J.L., Rubio, E., Calderon-Guilleng, J.A., Mendoza-Galvan, A., Peren-Rebles, J.F., Ramirez-Bon, R., "Colored transparent organic-inorganic hybrid coatings", *Azojomo*, vol. 2, 1-9, 2006.
- 4- Hoppe, H., Sariciftci, N. S., Meissner, D., "Optical constant of conjugated polymer/fullerene based bulk-heterojunction organic solar cells", *Mol. Cryst. Liq. Cryst*, vol. 385, 113–119, 2002.
- 5- Gruber, D.P., Meinhardt, G., Papousek, W., "Modelling the light absorption in organic photovoltaic devices", *Sol. Energy Mater & Solar Cells*, vol. 87, 215–223, 2005.
- 6- Gruber, D.P., Meinhardt, G., Papousek, W., "Spatial distribution of light absorption in organic photovoltaic devices", *Solar Energy*, vol. 79, 697-704, 2005.
- 7- Hoppe, H., Arnold, N., Sariciftci, N.S., Meissner, D., "Modeling the optical absorption within conjugated polymer/fullerene-based bulk-heterojunction plastic solar cells. *Thin Solid Films*", vol. 451, 582-592, 2003.
- 8- Persson, N.K., Inganas, O., "Simulations of Optical Processes in Organic Photovoltaic Devices, in S.S.Sun, N.S.sariciftci(Eds), *Organic Photovoltaic: Mechanisms Material and Devices*", CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2005.