

مدلسازی دقیق سلول فتوولتائیک با تاثیرات دقیق دما و تابش

محمد ياسين ديواني

آموزشکده فنی و حرفه ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کازرون yasindivani@yahoo.com

محبوبه سعيدى مقدم

دانشگاه شيراز،واحد بين الملل، دانشكده فيزيک Msaeedi_65@yahoo.com

جمشید امیرعضدی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کازرون،دانشکده مهندسی برق J.amirazodi@gmail.com

چکیدہ

در این مقاله ابتدا به استخراج معادلات مدل دقیق سلول فتوولتائیک پرداخته شده است و که شامل: معادلات اصلی، معادلات تاثیر دما و معادلات تاثیر ولتاژ میباشد. سپس این معادلات در نرمافزار سیمولینک متلب پیاده سازی شده است، مشخصه های جریان ولتاژ و ولتاژ - توان این مدلسازی و شبیه سازی به ازای تابشها و دماهای مختلف به صورت مجزا استخراج شده است، که رفتار سلول شبیه سازی را بیان میکند، و در پایان با مقایسه منحنی مشخصههای این مدلسازی با رفتار واقعی یک سلول فتوولتائیک، صحت مدلسازی و شبیه سازی انجام شده را تایید مینماید.

واژگان کلیدی: سلولهای خورشیدی، مدلسازی تک دیودی، شبیه سازی



مقدمه

سلولهای فتوولتائیک در اصل از پیوند بین دو لایه نازک از مواد نیمه رسانای غیر متشابه تشکیل شدهاند که به عنوان نیمه رسانای نوع P و نیمه رسانای نوع N شناخته میشوند. ماده اصلی مورد استفاده در سلولهای خورشیدی همان سیلیکون تک کریستالی است که باید تا ۹۹٬۹۹ درصد خالص سازی شده و به شکل کریستالی درآید و در لایههای نازکی بریده شود که در نتیجه این مراحل قیمت آن بالا میرود. نیمه رساناهای دیگری نیز وجود دارند که میتوانند در ساختار این سلولها به کار روند. این رساناها دارای اختلاف باندی بین ۱ تا ۱٫۶ الکترون ولت میباشند و اختلاف باند بهینه برای تعادل ولتاژ و جریان ماکزیمم شدن توان در حدود ۱٫۴ الکترون ولت میباشد. (F. Spertino and J. S. Akilimali, 2009)

مواد نیمه رسانایی که در سلولها استفاده می شوند باید مانند سیلیکون قابلیت ناخالص شدن و تشکیل نوع N و P را داشته باشند تا بتوانند اتصال PN یا حوزه الکتریکی را که مهم ترین عامل برای عملکرد سلول میباشد به وجود آورند. این عمل بسته به نوع ماده به شکلهای گوناگونی انجام می گیرد. نمونهای از این مواد عبارتند از سیلیکون آمورف، فیلمهای نازک تهیه شده از مواد چند کریستالی مانند سیلیکون چند کریستالی که ارزانتر از سیلیکون تک کریستالی است ولی راندمان پایینتری دارد که تحقيقات براي بهبود عملكرد أن در حال انجام است. ديگر مواد چند كريستالي عبارتند از: كادميوم تولرايد (CdTe) و وانيديم مس دی سلناید (CuInSe2) که امید است در آینده ای نزدیک از آن ها استفاده شود . نیمه رساناهای نوع N از کریستال سیلیکان ساخته میشود ،به طوری که ذرات ریزی از ناخالصی (معمولا فسفر) در داخل آن آکنده (Doped) شده و موجب ایجاد الکترونهای آزاد اضافی در ماده شده است. نیمه رساناهای نوعP نیز از کریستال سیلیکان ساخته میشوند اما با مقدار بسیار کمی ناخالصی (معمولاً بور) آکنده میشوند که در نتیجه آن ماده دارای کمبود الکترون آزاد میشود. این جای خالی الکترونها را حفره مینامند. ما میتوانیم با پیوند دو نوع نیمه رسانای غیر مشابه فوق یک پیوند P-N بسازیم. این پیوند یک میدان الکتریکی در محل پیوند ایجاد می کند. این میدان الکتریکی مشابه میدان الکترواستاتیکی است که می توانید با مالش یک شانه پلاستیکی به روی لباس گرمکن خود، تولید کنید. این میدان موجب می شود که ذرات باردار منفی به یک سمت و ذرات باردار مثبت به سمت مخالف آن حرکت کنند. هنگامی که فوتونهای یک نور با طول موج مناسب به یک پیوند P-N برخورد کنند، انرژی خود را به برخی الکترونهای ماده منتقل میکنند و موجب ارتقای آنها به تراز انرژی بالاتر میشوند. اغلب این الكترونها به كمك پيوند ظرفيتي به اتم مجاور كمك ميكنند تا اتمهاي ماده در كنار هم باقي بمانند و نمي توانند حركت کنند (منظور حرکت عمودی است نه دورانی دور هسته) اما در حالت تحریک شده توسط نور، الکترون ها آزاد شده و میتوانند با حركت در درون ماده، جريان الكتريكي را هدايت كنند. به علاوه وقتى كه الكترونها حركت مي كند در يشت سر خود، حفرههایی را به جای میگذارند که آنها نیز به این ترتیب حرکت میکنند. هنگامی که پیوند P–N تشکیل شد برخی از الکترونها بلافاصله در نزدیکی پیوند و در قسمتN به سمت حفرههای نزدیک در قسمتP جذب می شوند. به همین ترتیب حفرههای قسمت P و در نزدیکی پیوند، برای ترکیب با الکترونها در نزدیکی پیوند و در قسمت Nجذب میشوند. پدیده خالص این اتفاقات این است که یک لایه در قسمت N و در نزدیکی پیوند تشکیل می شود که بیشتر از قبل دارای بار مثبت میشود و به همین ترتیب در قسمتP و در نزدیکی پیوند لایهای که بیشتر از قبل دارای بار منفی است تشکیل میشود. در نتیجه یک میدان الکتریکی معکوس در نزدیکی پیوند ایجاد میشود (میدان منفی در قسمت P و مثبت در قسمت N). هنگامی که یک الکترون در ناحیه پیوندی توسط فوتون فرودی تحریک شده و به باند رسانایی پرش میکند، یک حفره در باند ظرفیتی از خود بر جاي مي گذارد بنابراين دو حامل بار (جفت الكترون- حفره) توليد مي شود. تحت تاثير ميدان الكتريكي معكوس در نزديكي پيوند، الكترونها تمايل به حركت به سمت ناحيه N و حفرهها به سمت ناحيه P خواهند داشت. جريان الكترونها به ا



سمت ناحیه N بنا به تعریف، یک جریان الکتریکی است. اگر یک مدار خارجی وجود داشته باشد تا الکترونها در آن جریان یابند، این الکترونها سرانجام از راه یکی از اتصالات فلزی در بالای سلول، از نیمهرسانا به خارج میدان جریان پیدا می (M. Laranja, 2009)

در همین حالا حفرهها در سمت مخالف الکترونها در ماده حرکت میکنند تا به اتصالات فلزی در زیر سلول برسند و در آنجا با الکترونهایی که از قسمت دیگر مدار خارجی آمده بودند، ترکیب میشوند. به منظور تولید توان، سلول PV باید از حرکت الکترونها، ایجاد ولتاژ و جریان کند.

پديده فتوولتائيک

در اواخر قرن ۱۹ هانریش هرتز مشاهده نمود که هرگاه نور فرابنفش به کلاهک فلزی الکتروسکوپ باردار با بار منفی بتابد الکتروسکوپ خنثی می شود یعنی نور فرودی توانسته است الکترونهای اضافی را از الکتروسکوپ جدا کند.اثر فتوالکتریک برای اولین بار در سال ۱۹۰۵ توسط آلبرت انیشتین شرح داده شد. بر اساس این پدیده وقتی که یک کوانتوم انرژی نوری یعنی یک فوتون در یک ماده نفوذ می کند، این احتمال وجود دارد که بوسیله الکترون جذب شود و الکترون انتقال پیدا می کند. در فرمول زیر می بینیم که انرژی فوتونهای فرودی(نور تابیده شده به صفحه)کمی صرف آزاد کردن الکترون مقید و مقداری هم صرف جنبش الکترونها میشود. (M. G. Villalva et al, 2009) (A. S. Sedra and K. C. Smith, 2006)

 $E = H_f + k \tag{1}$

E= انرژی فوتون فرودی Hf= انرژی مقید الکترون در فلز K= انرژی جنبشی الکترون بطور خلاصه نتایج حاصل از نظریه انیشتین:

۱-برای جدا کردن یک الکترون مقید به فلز باید انرژی نور فرودی بزرگتر و یا مساوی با بسامد الکترون مقید به فلز باشد.



شکل(۱):فرایند تاثیر فتوالکتریک بر فلز (M.A. Eltawil and Z. Zhao, 2010)

همانطور که در شکل می بینم نور قرمز چون طول موجش بلندتر و در نتیجه بسامد و انرژی کوچکتری نسبت به نور سبز و مشکی دارد نمی تواند الکترون مقید فلز پتاسیم را جدا کند در مقایسه نور سبز و مشکی می بینیم که چون طول موج نور مشکی کمتر و بسامد آن بیشتر است و انرژی بیشتری دارد نه تنها الکترون را از سطح فلز جدا می کند بلکه سرعت بیشتری هم به آن می دهد. همان فرکانس یا بسامد فرودی نورهای قرمز و سبز و مشکی f انرژی فوتون فرودی را می توان به صورت



زير هم نوشت است:

 $E_{photon} = H \times f \tag{(7)}$

۲- هر چقدر شار نور فرودی مناسب بیشتر باشد تعداد الکترونهای بیشتری از سطح فلز آزاد خواهد شد Universitat)
Kassel, 2006)

مدل مداري سلول فتوولتائيک

در شکل (۲) مدل تک دیودی سلول فتوولتائیک نشان داده است.



شکل (۲): مدار معادل سلول های خورشیدی

مدار معادل فوق بر اساس مدار معادل یک دیود شاتکی بدست آمده است. این مدار معادل دارای یک منبع جریان که بر وابسته به نور، یک دیود معکوس، مقاومت سری و مقاوت موازی می باشد. اندازه جریان منبع جریان به نسبت مستقم وابسته به نور تابیده به سلول فتوولتائیک است که به صورت یک ضریب خطی با نور تغییر می کند(G.R. Walker, 2001). با توجه به پیوند نیمه هادی در سلول های فتوولتائیک در این مدل نیز برای مدلسازی آن از یک دیود و دو مقاومت استفاده شده است، با توجه به مدل ارائه شده در شکل (۱)، روابط مداری به شرح زیر برقرار است(J. Yuncong et al, 2010):

$$\begin{split} I_d = I_{rsat} \left(e^{\frac{q_V d}{nmkT}} - 1 \right) & (\texttt{m}) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ V_d = V_{out} - I_{out} R_s & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1) \\ \\ (\texttt{mkt} - 1) & (\texttt{mkt} - 1)$$

و جریان مقاوت موازی عبارت است از:

$$I_{sh} = \frac{V_{out} - I_{out}R_s}{R_{sh}} \tag{(b)}$$

جريان خروجي برابر خواهد بود با:

$$I_{out} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{9}$$

www.SID.ir



$$I_{out} = I_{ph} - I_{rsat} \left(e^{\frac{q(V_{out} - I_{out}R_s)}{nmkT}} - 1 \right) - \frac{V_{out} - I_{out}R_s}{R_{sh}} \quad (Y)$$

و در روابط (۳) تا (۲) پارامترها به شرح زیر است: I_d : جریان دیود (آمپر) I_{rsat} : جریان معکوس اشباع دیود (آمپر) V_d : ولتاژ دیود (آمپر) V_d : ولتاژ دیود (آمپر) $I_{100218} \times I_{20065} \cong 1$: بار الکترون (کولن) $I_{10028} \times I_{20065} \cong k$: ثابت بولتزمن

- **T** : دمای محیط (کلوین) m : صریب ایدهآلی دیود
- : تعداد سلول های فتوولتایئک n
- ا جریان منبع جریان نوری (آمپر) ا
 - *I_{out}* : جریان خروجی (آمپر) R_s : مقاومت سری (اهم)
 - (اهم) : مقاوت موازی (اهم) R $_{sh}$

شبیه سازی

شکل (۳) بلوک دیاگرام شبیه سازی شده مدل سلول فتوولتائیک را در نرم افزار متلب نشان داده شده است.



شکل (۳) بلوک دیاگرام شبیه سازی سلول فتوولتائیک در نرم افزار متلب



همانگونه که در شکل (۳) مشاهد می شود ورودیهای مدل عبارتنداز: تابش، دما، مقاومت سری، مقاومت موازی و تعداد سلولها. مشخصه ولتاژ- جریان سلول های فتوولتائیک به دو پارامتر وابسته است: دما و تابش. با کاهش دما و افزایش تابش توان خروجی، افزایش و با افزایش دما و کاهش تابش، توان خروجی، کاهش می یابد. تابش و دما با توان خروجی به ترتیب رابطه مستقیم و عکس دارند. بنابراین بایستی این وابستگیها در مدل سازی سلول فتوولتائیک لحاظ گردد.به منظور لحاظ نمودن مستقیم و عکس دارند. بنابراین بایستی این و باستگیها در مدل سازی سلول فتوولتائیک لحاظ گردد.به منظور لحاظ نمودن مستقیم و عکس دارند. بنابراین بایستی این وابستگیها در مدل سازی سلول فتوولتائیک لحاظ گردد.به منظور لحاظ نمودن تاثیرات تابش و دما بر مدل، کافیست تاثیر این دو پارامتر بر جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) و ولتاژ مدار(V_{oc}) باز اعمال شود. در شکل (۴) تاثیرات دما و تابش را بر جریان اتصال کوتاه نمی در مای ورودی است و دمای مرجع را برابر ۲۵ در شکل (۴) تاثیرات دما و تابش را بر جریان اتصال کوتاه نمی وردی است و دمای مرجع را برابر ۲۵ در شکل (۴) تاثیرات دما و تابش را بر جریان اتصال کوتاه نشان میدهد. T_{op} دمای مرجع را برابر ۲۵ در بری در بالوگ در به مانتی گراد (یا همان ۲۹۸ کلوین) می باشد. KI می سایک مرجع را برابر ۵ مای سایتی گراد (یا همان دول تای می دود.) می بایست که در کاتالوگ درجه سانتی گراد (یا همان دول در یا می برد.



شکل (۴): بلوک دیاگرام شبیه سازی تاثیر تابش و دما بر جریان اتصال کوتاه

بنابراین با این تاثیر دما بدین گونه در شبیه سازی اعمال می شود. در شکل (۴) عددی با نام Irr در جریان اتصال کوتاه ضرب شده این عدد به صورت یک ضریب خطی است که میزان تابش را تعیین می کند. و در پایان Iph به عنوان جریان اتصال کوتاه اصلاح شده برای ولتاژ و تابش مشخص می باشد که در خود تاثیرات دما و تابش را دارد. در شکل (۵) تاثیرات دما و تابش را بر ولتاژ مدار باز نشان می دهد.

Phase Voltage Eqn



شکل (۵): بلوک دیاگرام شبیه سازی تاثیر تابش و دما بر ولتاژ مدار باز



KV ضریب تغییر ولتاژ مدار باز نسبت به دما است که با توجه به اختلاف دمای مورد نظر و دمای مرجع، مقدار افزایش یا کاهش ولتاژ مدار باز را تعیین مینماید و این مقدار به صورت منفی یا مثبت با ولتاژ مدار باز جمع می گردد. با ضریب Vrr که رابطه ی لگاریتمی با میزان تابش دارد، تاثیر تابش بر مقدار ولتاژ مدار باز لحاظ می گردد.

نتايج شبيه سازى

نمودار شکل (۶) منحنی مشخصه جریان- ولتاژ سلول فتوولتائیک را در دماهای ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد نشان میدهد.



همان گونه که در شکل (۶) نشان داده شده است با کاهش دما، ولتاژ به مقدار قابل توجهای افزایش مییابد و همچنین کاهش دما، موجب کاهش جزئی مقدار جریان میشود. این تاثیرات دما نیز بر روی نقطه ماکزیمم توان هم موثر است و موجب می-گردد که نقطه ماکزیمم توان در ولتاژ بالاتری قرار میگیرد. کاهش دما موجب بهبود عملکرد سلولهای فتوولتائیک میشود و دارای بازده بالاتری خواهد بود. نمودار شکل (۷) منحنی مشخصه ولتاژ- توان سلول فتوولتائیک نشان میدهد این منحنی مشخصه در دماهای ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سانتی گراد بدست آمده است.



شکل (۷): منحنی جریان - توان در دماهای مختلف



در شکل (۷) تاثیر دما بر منحنی مشخصه ولتاژ- توان را نشان میدهد. این شکل نشان میدهد که با توجه به افزایش ولتاژ به دلیل کاهش دما، توان تولیدی نیز افزایش مییابد.با کاهش دما، افزایش ولتاژ به حدی زیاد است که مقدار کاهش جریان را به علت جزئی بودن، محسوس نیست. از این رو با کاهش دما توان خروجی افزایش مییابد. کاهش دما موجب می گردد تا نقطه ماکزیمم توان در ولتاژ بالاتر و با توان بالاتر قرار گیرد.



شکل (۸): منحنی جریان – ولتاژ در تابشهای مختلف

نمودار شکل (۸) منحنی مشخصه جریان- ولتاژ سلول فتوولتائیک را در ازای ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۴۰٪ تابش نشان میدهد. همانطور که در شکل دیده می شود با افزایش تابش، جریان و ولتاژ سلول فتوولتائیک فزایش مییابد. افزایش تابش، مقدار جریان را به مقدار بسیار زیادی افزایش میدهد و میتوان بیان کرد که جریان سلول فتوولتائیک با تابش به صورت تقریبی نسبت خطی دارد. اما ولتاژ سلول فتوولتائیک رابطه لگاریتمی با تابش دارد و با افزایش تابش، مقدار ولتاژ به میزان جزئی افزایش مییابد.



شکل (۹): منحنی ولتاژ - توان در تابشهای مختلف

نمودار شکل (۹) منحنی مشخصه ولتاژ- توان سلول فتوولتائیک نشان میدهد این منحنی مشخصه در تابشهای ۱۰۰٪، ۸۰٪، ۶۰٪ و ۴۰٪ بدست آمده است. با افزایش تابش، جریان و ولتاژ سلول فتوولتائیک افزایش مییابد و در نتیجه توان تولیدی افزایش مییابد. همچنین نقطه ماکزیمم توان سلول فتوولتائیک در ولتاژ نزدیک به حالت قبل اما با توان قابل ملاحظهای بالاتر

3-rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH IN SCIENCE AND TECHNOL GY

BERLIN . GERMANY 9 July, 2016

قرار میگیرد.

نتيجه گيرى

در شبیه سازی انجام شده مشاهد شد که مدل سلول فتوولتائیک شبیه سازی شده به دو پارامتر دما و تابش وابسته است. همانگونه که نتایج شبیه سازی نشان داد که کاهش دما موجب، موجب افزایش قابل ملاحظهای در ولتاژ و کاهش بسیار جزئی جریان میگردد. و در نتیجه توان تولیدی افزایش مییابد. و همچنین مشاهد گردید که افزایش تابش موجب افزایش قابل ملاحظهی جریان و افزایش بسیار جزئی در ولتاژ میشود که در ادامه باعث افزایش توان تولیدی میگردد. از مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی و عملکرد واقعی سلول فتوولتائیک، صحت مدلسازی و شبیه سازی را تایید می میاید.

listin

.....

- منابع:

- F. Spertino and J. S. Akilimali, "Are manufacturing I–V mismatch and reverse currents key factors in large photovoltaic arrays?", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 11, pp. 4520-4531, Nov. 2009.
- M. Laranja, "Portuguese National Strategy ENE". Available: http://www.ccr-norte.pt/norte2020/laranja.pdf
- M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- A. S. Sedra and K. C. Smith, Microelectronic Circuits. London, U.K.: Oxford Univ. Press, 2006.
- M.A. Eltawil, Z. Zhao, "Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 1, pp. 112–129, Jan. 2010.

"Photovoltaic systems technology," Universitat Kassel, Kassel, Germany, 2003.

- G.R. Walker, "Evaluating MPPT topologies using a Matlab PV model", Journal of Electrical & Electronics Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 49-56, 2001.
- J. Yuncong, J.A.A. Qahouq, and I. Batarseh, "Improved solar PV cell Matlab simulation model and comparison", in: Proc. 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS'10, Tuscalosa, Alabama, USA, 2010.