

گزارش آزمایش سلول خورشیدی

شعرا جعفری تبار

دانشکده ی فیزیک دانشگاه تهران ، انتهای خیابان کارگر شمالی ، تهران

چکیده

نگرانی های زیست محیطی جهانی و افزایش تقاضا برای انرژی، فرصت های جدیدی را برای استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر فراهم می کند. انرژی خورشیدی فراوان تری، پایان ناپذیرترین و تمیزترین منبع انرژی تجدید پذیر تا به امروز است. این مقاله به بررسی فناوری فتوولتائیک در سیلیکون، ساخت و کار آن و برخی از ویژگی های سلول خورشیدی می پردازد. در پایان با رسم نمودار چگالی جریان به ولتاژ در دو حالت تاریک و روشن، پس میبریم که در تاریکی، سلول خورشیدی همانند دیود عمل می کند.

واژه های کلیدی: سلول خورشیدی، فتوولتائیک، سیلیکون

Laboratory report of Solar Cell
Shera Jafaritabar
Department of Physics, University of Tehran, Tehran

Abstract

Global environmental concerns and rising demand for energy provide new opportunities for the use of renewable energy sources. More abundant solar energy is the most inexhaustible and cleanest source of renewable energy to date. This article examines photovoltaic technology in silicon, its construction and some features of the solar cell. Finally, by plotting the current-to-voltage density in both dark and light, we find that in the dark, the solar cell acts like a diode.

Keywords: Solar cell, photovoltaic, Silicone

مقدمه

خورشید را به انرژی الکتریکی قابل استفاده تبدیل می کند. این نوع فناوری انرژی تجدید پذیر و بدون آلاینده، باعث کاهش مسائل مربوط به گرم شدن کره زمین، کاهش هزینه های عملیاتی و حداقل تعمیر و نگهداری و بالاترین چگالی توان را در مقایسه با سایر فن آوری های انرژی تجدیدپذیر ارائه می دهد. [2]

سلول های خورشیدی کاربردهای فراوانی از جمله نیروگاه ها و سیستم های فتوولتائیک (PV)، سیستم های برق ترکیبی با خورشیدی، پنل های خورشیدی، لیزرهای پمپ خورشیدی، وسایل نقلیه خورشیدی. و همچنین در صفحات خورشیدی که در صنایع دستی فضایی و ایستگاه های فضایی استفاده می شود. [3]

از آنجا که منابع سوخت فسیلی طبیعی به طور فزاینده ای کمتر در دسترس و گران تر می شوند و با توجه به پیامدهای طولانی مدت آنها منابع انرژی پاک تجدید پذیر جایگزین برای دهه های آینده به ویژه با توجه به پیامدهای طولانی مدت استفاده از سوخت های فسیلی تقاضای زیادی دارند. در میان منابع مختلف انرژی، نور خورشید فراوان ترین منبع انرژی طبیعی است که انرژی حاصل از تابش آن در یک ساعت به زمین می تواند مصرف جهانی انرژی سالانه ما را برآورده کند. [1]

یکی از گسترده ترین فن آوری های تولید انرژی های تجدید پذیر استفاده از سیستم های فتوولتائیک (PV) است که نور

مبانی نظری

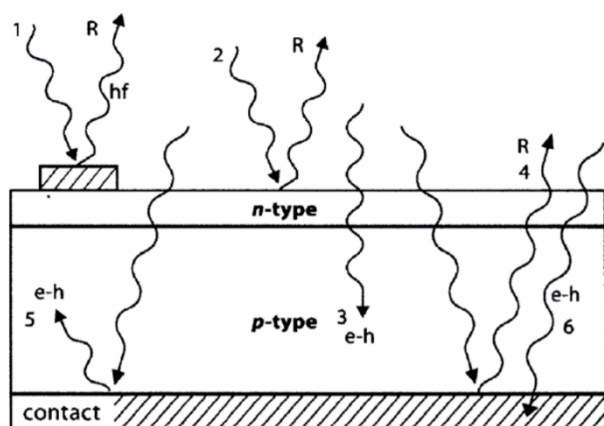
اتم سیلیکون به طور معمول دارای 14 الکترون است که چهار مورد از آنها الکترونهاي ظرفيت هستند. در یک کریستال خالص سیلیکون، هر اتم با چهار اتم دیگر در پیوند والانس تشکیل میدهد و با هر یک از آنها دو الکترون به اشتراک میگذارد. این پیوند الکترواستاتیک نسبتاً می تواند با اعمال انرژی شکسته شود. با یک مقدار مناسب انرژی، الکترون به یک سطح انرژی به نام نوار هدایت انتقال داده می شود، که در آن میتواند آزادانه حرکت کند و در رسانایی الکتريسيته شرکت کند. این جابجایی یک حفره را ایجاد میکند، مکانی که فاقد الکترون است. میتوان انتظار داشت که یک الکترون در نزدیکی حفره حرکت کرده و مکان هایشان با یکدیگر جابه جا شود. از این رو الکترون و حفره ها می توانند درون یک بلور حرکت کنند. [4-8]

سلول خورشیدی در واقع یک دیود با مساحت زیاد است. در یک دیود عبور جریان، به صورت حامل های بار آزاد مانند الکترونها، در یک جهت مانع و در جهت دیگر تسهیل می شود. این نتیجه با وجود یک میدان الکتریکی ثابت در دیود حاصل می شود، نتیجه این است که دیود با دو نیمه هادی از مواد مختلف ساخته شده است. چنین میدان الکتریکی حامل های یک بار را از عبور میدهد و حامل های بار مخالف را دفع می کند. به دلیل وجود فاصله در ترازهای هم انرژی، با اتصال چندین نیمه رسانا پتانسیلی را ایجاد میکنیم که الکترون و حفره ها را از یکدیگر جدا نگه میدارد. سلول خورشیدی با لایه های نیمه رسانای مختلف n و p ساخته می شود تا یک میدان دیودی ثابت در سلول ایجاد کند. نیمه رسانای نوع n یک الکترون بدون پیوند پس بار نسبتاً منفی دارد و نوع p هم کمبود الکترون و بار مثبت نسبی دارد. [4-8]

نور خورشید انرژی حدود 1000 وات بر متر مربع حمل میکند. وقتی فوتون های خورشیدی به یک نیمه هادی در سلول خورشیدی برخورد می کنند، ممکن است بازتابیده شوند، عبور کرده یا در یک نیمه هادی جذب میشود که یا باعث افزایش جنبش مولکولها باعث ایجاد گرما میشود و یا در صورت داشتن انرژی کافی الکترون را از یک تراز انرژی خارج و به حالت آزاد در باند رسانایی ماده ببرد. انتقال الکترون به باند هدایت، یک حفره ایجاد می کند.

این حفره بیانگر یک بار مثبت آزاد است که به طور مشابه اما متضاد با بار منفی آزاد عمل می کند. اگر یک حفره در یک نیمه هادی سیلیکونی وجود داشته باشد، میتواند آزادانه حرکت کند زیرا یک الکترون مقید در اطراف آن می تواند به راحتی داخل حفره شود، و در نتیجه حفره به محلی که توسط الکترون خالی شده منتقل میشود. هنگامی که نور در یک نیمه هادی جذب میشود، دو حامل آزاد تولید می کند: الکترون آزاد در باند هدایت و حفره آزاد در باند ظرفیت. [4-8]

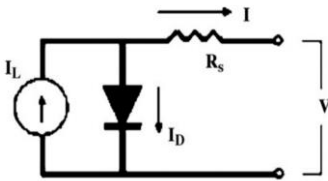
فرآیند اصلی در تبدیل سلول خورشیدی به نور خورشید به الکتريسيته این است که این حامل های آزاد تولید شده توسط نور، توسط نیروی میدان الکتریکی داخلی در جهت مخالف هدایت می شوند. حفره ها و الکترون های نزدیک میدان به گونه ای قرار میگیرند که عبور الکترونها را تسهیل کند و حفره ها را دفع کند. الکترونها از طریق میدان شتاب میگیرند و حفره ها در نزدیکی مکانی که تولید شده اند باقی می مانند (شکل 1). وقتی الکترونهاي آزاد از میدان الکتریکی عبور کردند، دیگر برنخواهند گشت، زیرا این میدان با عملکرد میدان دیود، مانع بازگشت آنها می شود. از این رو، با تابش نور به سلول، تعداد فزاینده ای از بارهای مثبت به بالای سلول و منفی ها به پایین یا برعکس بسته به نوع سلول منتقل می شوند. اگر یک رسانا هم به بالا و هم به پایین متصل باشد، بارهای آزاد به عنوان برق از طریق آن جریان می یابد. تا زمانی که سلول در معرض نور باشد، جریان برق به طور مداوم جریان خواهد داشت. [4-9]



سختل 1، رسانا تابش نور به سلول خورشیدی. 1/ بازتاب و جذب از ناحیه بالا / 2/ بازتاب در سطح سلول. 3/ جذب مورد نظر و تولید الکترون و حفره 4/ انعکاس از پایین سلول. 5/ جذب پس از بازتاب 6/ جذب در کانکتک پایین [9]

لرزش شبکه (به نام فونون). در مواد باند گپ مستقیم، انرژی نور به تنهایی کافی است. اختلاف احتمال بین یک مورد و دو مورد همزمان اختلاف مرتبه اندازه جذب نور توسط مواد را به حساب می آورد. [4-8]

مدار معادل سلول خورشیدی اولیه به عنوان منبع جریان با دیود موازی مدل شده است. (شکل 2) معادله شاکی جریان دیود را فراهم می کند: [9]



شکل 2 مدل الکتریکی معادل سلول

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma K T_c} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

که جریان اشباع معکوس آن برابر است با: [9]

$$I_0 = D T_c^3 \exp \left(\frac{q \varepsilon_G}{A K T_c} \right) \quad (2)$$

برای دستیابی به ولتاژ و سطح جریان مطلوب، سلول های خورشیدی به صورت سری و ترکیب های موازی متصل می شوند از این رو معادله $I_g - V_g$ مولد سلول خورشیدی توسط دو معادله ی زیر داده میشوند. [9]

$$V_g = I_g R_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \ln \left(1 + \frac{N_p I_{ph} - I_g}{N_p I_0} \right) \quad (3)$$

$$I_g = I_{ph} - I_0 \exp \left(\frac{q V_g}{k T} - 1 \right) \quad (4)$$

سلول خورشیدی دارای دو جز محدود کننده است (شکل 3): V_{oc} و I_{sc} . برای پیدا کردن جریان اتصال کوتاه، $V_g = 0$ و $I_{sc} = I_{ph}$ را قرار میدهیم و این مقدار متناسب با تابش سلول تغییر می کند. برای تعیین ولتاژ مدار باز، جریان سلول برابر با $I_g = 0$ است، از این رو به معادله ی (3) منجر می شود [9]

$$V_{oc} = \frac{k T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (5)$$

در یک سلول خورشیدی معمولی، ماده ای مانند شیشه یا پلاستیک برای حمایت از سلول عمل می کند و به آن بستر گفته می شود. بر روی آن، یک لایه رسانا مانند فلز به عنوان یک تماس برگشت رسوب می کند. بعد، نیمه هادی جذب نور رسوب می کند. بر روی آن یک نیمه هادی متفاوت قرار دارد. سطح بین دو نیمه هادی محل میدان داخلی است. نیمه هادی بالا اغلب شفاف است تا نور خورشید از آن عبور کرده و تا حد ممکن به میدان الکتریکی جذب شود. این ترتیب احتمال رسیدن الکترون ها یا حفره های تولید شده به ناحیه میدان و جدا شدن آنها را افزایش میدهد. [4-8]

رانس (drift) و نفوذ (diffusion)، در اثرگذاری حامل های آزاد تولید شده در نور در جریان جریان تأثیر می گذارند. حامل های تولید شده در داخل منطقه توسط میدان قوی جدا شده و با سرعت زیاد به بالا و پایین سلول منتقل می شوند. این روند، رانش (drift) است. در طرف دیگر برای حامل های آزاد تولید شده در خارج از منطقه نفوذ (diffusion) اعمال می شود. هر الکترون آزاد احتمال مشخصی برای مواجهه با میدان الکتریکی داخلی دارد. اگر چنین شود، به سمت دیگر سلول هدایت می شود و میتواند به جریان الکتریکی کمک کند. سلول های خورشیدی با کارایی بالا برای به حداکثر رساندن این احتمال طراحی شده اند. دو عامل مهم، نوار ممنوعه (band gap) و ضریب جذب در جذب نور تأثیر دارند. نوار ممنوعه در یک نیمه هادی سطح انرژی مشخصی است که در آن شروع به جذب نور میکند. موادی مانند سیلیکون، گالیم آرسنید در سلول های خورشیدی استفاده میشوند زیرا به طور مشخص جذب نور را در طول موج های طولانی شروع می کنند پس قادر به جذب بخش عمده ای از نور خورشید هستند. [4-8]

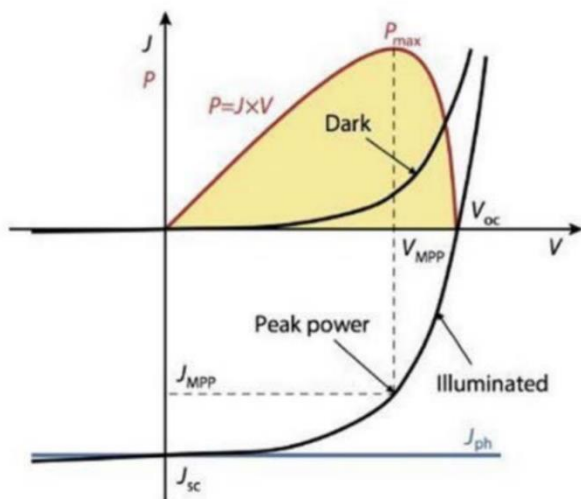
تغییرات جذب به دلیل تفاوت در ساختار اتمی مواد مختلف نیمه رسانا است. برخی از مواد، با شکاف باند مستقیم، توانایی جذب در آنها بالا است و برخی دیگر، مواد با شکاف باند غیر مستقیم جذب در آنها پایین است. سیلیکون کریستالی، دارای شکاف باند غیر مستقیم است. مواد لایه نازک مانند سیلیکون آمورف و دی سیلنید ایندیم مس از مواد با شکاف باند مستقیم هستند. در نوع غیر مستقیم، دو پدیده همزمان برای انتقال الکترون ظرفیت به باند هدایت مورد نیاز است: جذب نور و برهم کنش مطلوب یک

عملکرد این دستگاه به این گونه است که با وارد کردن ولتاژ منفی تا مثبت، جریان خروجی از سلول را میخواند و آن را ثبت میکند. این آزمایش را در دو حالت تاریکی و تحت تابش نور



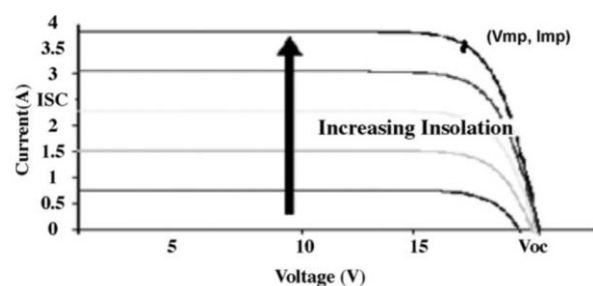
شکل 4: چیدمان آزمایش [10]

بررسی میکنیم. (لامپی که در شکل قرار دارد به عنوان نور خورشید عمل میکند). و نتایج نمودار آن ها در شکل 5 رسم شده است.



شکل 5 نمودار مشکلی نمودار جریان بر حسب ولتاژ $n-p$ در دو حالت تاریک و تحت تابش نور و نمودار قرمز نمودار توان که حاصل ضرب جریانی ولتاژ است [11]

همانگونه که در تصویر دیده میشود، حداکثر توان در V_{mp} اتفاق می افتد همانگونه که در معادله ی 7 به دست آورده ایم. همچنین جریان اتصال کوتاه را در نقطه ی $V_g = 0$ به دست آوردین که خط $I_{sc} = I_{ph}$ را به ما میدهد و علاوه بر آن، ولتاژ مدار باز را در نقطه ی $I_g = 0$ برابر مقدار V_{oc} به دست می آید.



شکل 3: $I_g - V_g$ در شدت های مختلف [9]

هنگامی که $V_{mp} \times I_{mp}$ در حداکثر مقدار خود باشد، حداکثر توان خروجی به دست می آید: [9]

$$\frac{d(I_g - V_g)}{dt} = 0 \quad (6)$$

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{KT}{q} \ln \left[\left(\frac{V_{mp}}{\frac{KT}{q}} + 1 \right) \right] \quad (7)$$

یک سلول خورشیدی به طور معمول تحت W_p خود طبقه بندی می شود که در شرایط آزمایش استاندارد، به طور معمول 1 کیلووات بر متر مربع است. برای اندازه گیری کیفیت اتصال و مقاومت سری از رابطه ی زیر استفاده میکنیم: [9]

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (8)$$

و هرچه FF به واحد نزدیکتر باشد، کیفیت سلول خورشیدی بالاتر است.

سرانجام آخرین و مهمترین عامل در یک سلول خورشیدی: [9]

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \quad (9)$$

که در آن P_{in} توان نور فرودی بر سلول است. [9]

شرح آزمایش

مطابق شکل 4، دستگاه ها را میچینیم. حال برای مشاهده منحنی مشخصه این سلول، پس از روشن کردن رایانه با استفاده از نرم افزار EISProject، دستگاه V-I را روشن کرده سپس چهار سیم را به ورودی های سلول و سپس آن را به دستگاه V-I وصل میکنیم.

نتیجه گیری

در این مقاله چگونگی کارکرد سلول خورشیدی معرفی شد و منحنی مشخصه ی جریان-ولتاژ و توان بر حسب ولتاژ را رسم کردیم که مطابق روابطی بود که با تئوری به دست آوردیم متوجه شدیم که منحنی مشخصه ی سلول خورشیدی در حالت تاریکی همان منحنی مشخصه دیود است.

مرجع ها

- [1] K.-Q. Peng and S.-T. Lee, *Silicon Nanowires for Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Adv. Mater. **23**, 198 (2011).
- [2] J. Siecker, K. Kusakana, and B. P. Numbi, *A Review of Solar Photovoltaic Systems Cooling Technologies*, Renew. Sustain. Energy Rev. **79**, 192 (2017).
- [3] A. R. Jha, *Solar Cell Technology and Applications* (CRC Press, 2009).
- [4] M. T. Zarmai, N. N. Ekere, C. F. Oduoza, and E. H. Amalu, *A Review of Interconnection Technologies for Improved Crystalline Silicon Solar Cell Photovoltaic Module Assembly*, Appl. Energy **154**, 173 (2015).
- [5] B. Parida, S. Iniyan, and R. Goic, *A Review of Solar Photovoltaic Technologies*, Renew. Sustain. Energy Rev. **15**, 1625 (2011).
- [6] B. J. Feldman, *An Introduction to Solar Cells*, Phys. Teach. **48**, 306 (2010).
- [7] M. A. Green, *Photovoltaic Principles*, Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures **14**, 11 (2002).
- [8] J. G. Fossum, E. L. Burgess, and F. A. Lindholm, *Silicon Solar Cell Designs Based on Physical Behavior in Concentrated Sunlight*, Solid-State Electron. **21**, 729 (1978).
- [9] L. El Chaar, L. A. lamont, and N. El Zein, *Review of Photovoltaic Technologies*, Renew. Sustain. Energy Rev. **15**, 2165 (2011).
- [10] دستور کار آزمایشگاه فیزیک حالت جامد پیشرفته؛ دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، صفحه 83 تا 96
- [11] A. HM. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R. A. van Swaaij and M. Zeman; "SOLAR ENERGY- The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems"; ch. 1, UIT Cambridge Ltd, (2016)