

آشنایی با سلول خورشیدی

آزمایش شماره یک - آزمایشگاه فیزیک حالت جامد

پارسا رنگریز

تاریخ: ۱۰ اسفند ۱۴۰۰

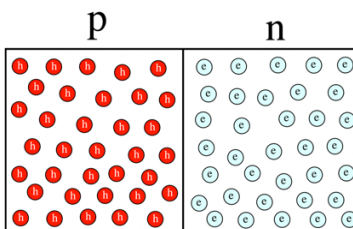
چکیده

در این آزمایش قصد داریم خصوصیات و مشخصات سلول‌های خورشیدی را بر حسب متغیرات محیطی و درونی سیستم سلول بدست آوریم. بدین جهت از آزمایش‌های ساده‌ای چون اتصال کوتاه و مدار باز و تغییرات ولتاژ بر اساس حرکت رئوستا و نیز دمای آن استفاده می‌کنیم و در نهایت به نتایجی از قبیل وابستگی دمایی یا شدت ورودی به میزان بازدهی می‌رسیم.

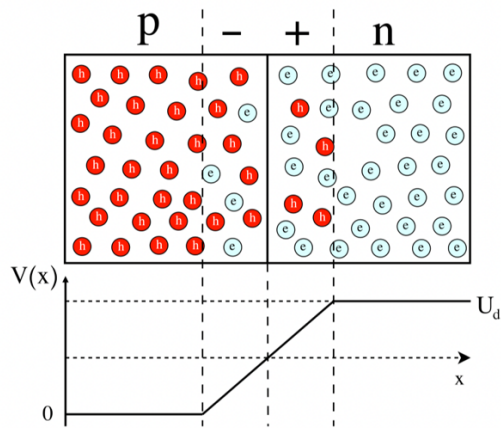
مقدمه

سلول خورشیدی متشکل است از اتصال نیم‌رساناهای نوع p و نوع n (شکل ۱). به دلیل زیاد بودن غلظت حفره‌ها در نیم‌رساناهای نوع p و زیاد بودن غلظت الکترون‌های اضافی در نیم‌رسانای نوع n یک جریانی از الکترون و حفره ایجاد می‌شود و بدین ترتیب یک جریان پخشی بوجود می‌آید. عامل متوقف کننده این جریان پخش یک میدان الکتریکی است که با این جریان مخالفت می‌کند که می‌توان در شکل ۲ این تعادل را مشاهده کرد. به پتانسیل حاصل از این تعادل پتانسیل پخش گفته می‌شود و آن را با U_d نشان می‌دهیم. مقدار این پتانسیل حدود نیم ولت است.

همچنین فرض کنید در سمت راست که نیم‌رسانای نوع n داریم، خارج از لایه کاهش هستیم. در این ناحیه به دلیل افت و خیزهای گرمایی امکان دارد که یک الکترون از نوار والانس به نوار رسانش پریده و یک جفت الکترون و حفره آزاد ایجاد شود. اگر این حفره بتواند به لایه کاهش برسد، به سرعت به سمت نیم‌رسانای نوع p سوق داده می‌شود. چون در ناحیه کاهش میدان الکتریکی به گونه‌ای است که حفره‌ها را به سمت نیم‌رسانای نوع p سوق می‌دهد. چنین فرایندی می‌تواند جریانی از حفره ایجاد کند که به آن جریان تولید حفره گفته می‌شود، ما این کمیت را با J_h^{gen} نشان می‌دهیم. همچنین امکان دارد به صورت عکس، حفره‌ای از قسمت p بر سد پتانسیل غلبه کرده و پس از عبور از لایه کاهش به ناحیه n برسد، در این صورت این حفره با یکی از الکترون‌ها ترکیب شده و باعث می‌شود الکترون آزادی به نوار والانس آمده و جای خالی را در نوار والانس پر کند. این رخداد به عنوان بازتکیب شدن شناخته می‌شود و آن را با J_e^{rec} نشان می‌دهیم. به همین منوال می‌توان دو چگالی جریان J_e^{rec} و J_e^{gen} را در جهت معکوس برای الکترون‌های ناحیه n داشته باشیم.



شکل ۱: اتصال p-n



عمل سلول خورشیدی در ایجاد و تحریک جریان تولید جفت الکترون حفره است. در واقع فوتون‌ها باعث می‌شوند تا انرژی تحریک لازم برای تشکیل زوج حفره و الکترون ایجاد شود. چگالی جریان حاصل از جذب فوتون‌ها که باعث تولید جفت الکترون حفره می‌شود را با g نشان می‌دهیم. اگر پتانسیل الکتریکی V به دو سر دیود اعمال شده باشد به گونه‌ای که اختلاف پتانسیل اعمال شده به ناحیه p با ناحیه n باشد، چگالی جریان بازترکیب حفره متناسب است با

$$J_h^{rec} = r_h^{rec} \exp\left(-\frac{e(U_d - V)}{k_B T}\right)$$

که r_h^{rec} نرخ این واکنش است. همچنین با توجه به شرایط خاص پتانسیل صفر، می‌توان نوشت

$$J_h^{rec} = J_h^{gen} \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right)$$

بنابراین چگالی جریان حفره‌ها برابر است با

$$J_h = J_h^{rec} - J_h^{gen} = J_h^{gen} \left(\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right)$$

بر همین اساس چگالی جریان الکترون‌ها را نیز می‌توان بدست آورد

$$J_e = -J_e^{gen} \left(\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right)$$

این رابطه در واقع خاصیت یکسوکنندگی جریان دیود را هم نشان می‌دهد.

در سلول خورشیدی یک جمله باید به این رابطه چگالی جریان اضافه کرد و آن چگالی جریان ایجاد شده به دلیل جذب فوتون‌ها است. در سلول خورشیدی لایه p را بسیار نازک می‌گیرند و آن را تحت تابش نور قرار می‌دهند. جذب فوتون‌ها در لایه p باعث ایجاد جفت‌های الکترون و حفره شده و الکترون‌ها به دلیل نازک بودن لایه به راحتی می‌توانند به محل اتصال کاهش برسند. ناحیه کاهش هم این الکترون‌ها را به سمت ناحیه n سوق داده و جریانی به وجود می‌آید. به این صورت این اتصال نیم‌رسانا به صورت یک منبع ولتاژ و جریان رفتار خواهد کرد. نرخ تولید جفت الکترون و حفره در واحد سطح را g در نظر گرفتیم. بنابراین چگالی جریان سلول خورشیدی بر حسب پتانسیل آن به شکل زیر می‌شود

$$i = e(J_h^{gen} + J_e^{gen}) \left(\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right) - eg$$

همچنین می‌توان چگالی جریان دیود (سلول خورشیدی را بر حسب طول پویش آزاد و زمان حرکت آزاد نوشت

$$i = e \left(\frac{n_0 D_e t}{L_e^2} + \frac{p_0 D_p}{L_p} \right) \left(\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right) - eg$$

در ادامه این آزمایش شامل سه قسمت زیر است:

- مشاهده شکل رابطه پتانسیل و جریان تولید شده توسط سلول خورشیدی بر حسب شدت نور
- رابطه جریان بر حسب پتانسیل در سلول خورشیدی
- رابطه جریان بر حسب پتانسیل در سلول خورشیدی در دماهای مختلف و طیف نور مختلف

وسایل آزمایش

سلول خورشید، ترموپیل، صفحه شیشه‌ای به همراه نگه‌دارنده، تقویت کننده، لامپ و سربیس، رئوستا، مولتی‌متر (دو عدد)، سشوار، پایه مثلی شکل (۲ عدد)، میله به طول ۲۵ سانتی‌متر، گیره نود درجه (۲ عدد)، گیره چنگکی، خط‌کش، گیره برای خط‌کش (دو عدد)، ترمومتر، سیم رابط (۵ عدد)

جدول داده‌ها

اندازه‌گیری شدت نور منبع بر حسب فاصله

d/cm	۵۰	۵۵	۶۰	۶۶	۷۲	۷۹	۸۶.۵	۹۵	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۱	۱۳۳	۱۴۵
V/mv	۱.۱۶۸	۱.۰۲۴	۰.۸۹۷	۰.۷۶۶	۰.۶۶۴	۰.۵۶۳	۰.۴۸۰	۰.۴۰۲	۰.۳۶۶	۰.۳۰۹	۰.۲۵۶	۰.۲۱۲	۰.۱۷۶
$I/\frac{W}{m^2}$	۳۳.۰۷	۲۸.۹۹	۲۵.۴۰	۲۱.۶۹	۱۸.۸۰	۱۵.۹۴	۱۳.۵۹	۱۱.۳۸	۱۰.۳۶	۸.۷۵	۷.۲۵	۶.۰۰	۴.۹۸

جدول ۱: ولتاژ و شدت ترموپیل بر حسب فاصله

رابطه بین شدت نور با ولتاژ بدون بار و جریان اتصال کوتاه

d/cm	۵۰	۵۵	۶۰	۶۶	۷۲	۷۹	۸۶.۵	۹۵	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۱	۱۳۳	۱۴۵
$I/\frac{W}{m^2}$	۳۳.۰۷	۲۸.۹۹	۲۵.۴۰	۲۱.۶۹	۱۸.۸۰	۱۵.۹۴	۱۳.۵۹	۱۱.۳۸	۱۰.۳۶	۸.۷۵	۷.۲۵	۶.۰۰	۴.۹۸
V_{nl}/v	۲.۰۴۵	۲.۰۲۴	۲.۰۰۴	۱.۹۸۲	۱.۹۶۲	۱.۹۴۷	۱.۹۲۵	۱.۸۹۹	۱.۸۸۵	۱.۸۶۰	۱.۸۳۴	۱.۸۰۷	۱.۷۸۳
I_{sc}/mA	۲۹.۹	۲۶.۳	۲۳.۴	۲۰.۴	۱۷.۹	۱۵.۸	۱۳.۹	۱۲.۱	۱۱.۲	۹.۷	۸.۳	۷.۳	۶.۳

جدول ۲: ولتاژ قطع و جریان اتصال کوتاه برای شدت نورهای مختلف

بستگی ولتاژ بدون بار به دما

$T/^{\circ}C$	۲۳	۲۷	۳۱	۳۶	۳۹
V_{nl}/v	۲.۱	۲.۰۳۴	۱.۸۴۵	۱.۷۴۹	۱.۶۸۸

جدول ۳: ولتاژ بر حسب دما

بستگی ولتاژ به جریان برای بارهای مصرفی مختلف

V/v	۰.۱۶۷	۰.۳۱۵	۰.۷۹۸	۱.۲۵۱	۱.۶۹۹	۱.۸۵۲	۱.۹۰۸	۱.۹۳۶	۱.۹۴۹	۱.۹۶۹	۱.۹۷۶	۱.۹۸۰
I/mA	۳۳.۱	۳۲.۴	۳۲.۴	۳۲.۳	۳۱.۱۷	۲۷.۳	۲۳.۰	۱۹.۷	۱۷.۲	۱۳.۸	۱۲.۴	۱۱.۴
P_R/mW	۵.۵۲۸	۱۰.۲۰۶	۲۵.۸۵۵	۴۰.۴۰۷	۵۲.۹۵۸	۵۰.۵۵۹	۴۳.۸۸۴	۳۸.۱۳۹	۳۳.۵۲۲	۲۷.۱۷۲	۲۴.۵۰۲	۲۲.۵۷۲
V/v	۱.۹۸۵	۱.۹۸۷	۱.۹۹۰	۱.۹۹۲	۱.۹۹۳	۱.۹۹۳	۱.۹۹۵	۱.۹۹۴	۱.۹۹۵	۱.۹۹۴	۱.۹۹۳	۱.۹۹۳
I/mA	۱۰.۵	۹.۷	۹.۰	۸.۵	۷.۹	۷.۴	۷.۰	۶.۶	۶.۳	۶.۱	۶	۵.۸
P_R/mW	۲۰.۸۴۳	۱۹.۲۷۳	۱۶.۹۳۲	۱۶.۹۳۲	۱۵.۷۴۴	۱۴.۷۴۸	۱۳.۹۶۵	۱۳.۱۶۰	۱۲.۵۸۶	۱۲.۱۶۳	۱۱.۹۸۵	۱۱.۵۵۹

جدول ۴: ولتاژ بر حسب جریان سلول به ازای بارهای مصرفی مختلف

بهبود کردن شرایط سلول

V/v	۰.۰۵۲۹	۰.۷۷۹	۱.۷۰۰	۱.۸۵۹	۱.۹۰۰	۱.۹۱۸	۱.۹۲۶	۱.۹۳۴	۱.۹۴۱	۱.۹۴۵	۱.۹۴۹	۱.۹۵۲	۱.۹۵۴
I/mA	۷۲.۶	۷۲.۷	۶۴.۸	۴۶.۰	۳۴.۴	۲۷.۵	۲۴.۹	۲۱.۳	۱۷.۹	۱۶.۰	۱۴.۱	۱۲.۸	۱۱.۸
P_R/mW	۳.۸۴۱	۵۶.۶۳۳	۱۱۰.۱۶۰	۸۵.۵۱۴	۶۵.۳۶۰	۵۲.۷۴۵	۴۷.۹۵۷	۴۱.۱۹۴	۳۴.۷۴۴	۳۱.۱۲۰	۲۷.۴۸۰	۲۴.۹۸۶	۲۳.۰۵۷
V/v	۱.۹۵۵	۱.۹۵۷	۱.۹۵۸	۱.۹۵۹	۱.۹۶۰	۱.۹۶۱	۱.۹۶۲	۱.۹۶۲	۱.۹۶۳	۱.۹۶۳	۱.۹۶۴	۱.۹۶۴	-
I/mA	۱۱.۲	۱۰.۴	۹.۴	۸.۹	۸.۴	۷.۷	۷.۲	۶.۹	۶.۵	۶.۲	۵.۹	۵.۶	-
P_R/mW	۲۱.۸۹۶	۲۰.۳۵۳	۱۸.۴۰۵	۱۷.۴۳۵	۱۶.۲۶۸	۱۵.۱۰۰	۱۴.۱۲۶	۱۳.۵۳۸	۱۲.۷۶۰	۱۲.۱۷۱	۱۱.۵۸۸	۱۰.۹۹۸	-

جدول ۵: ولتاژ بر حسب جریان سلول به ازای بارهای مصرفی مختلف در فاصله ۵۰ سانتی متر بدون جریان هوا و دمای سلول ...

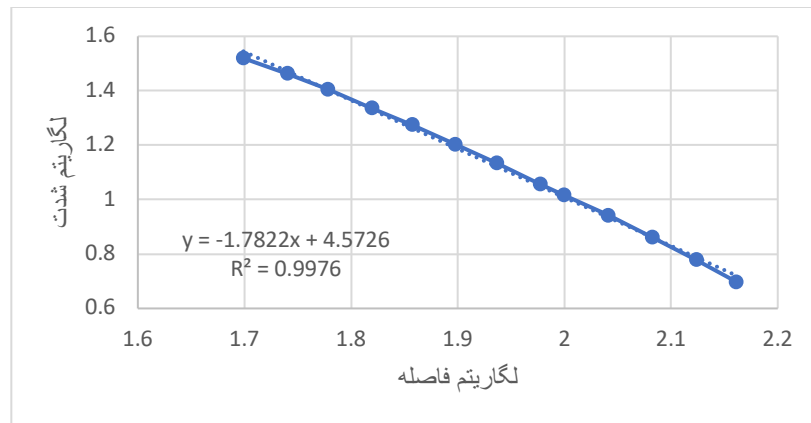
V/v	۰.۲۱۳	۰.۳۵۹	۰.۷۸۲	۱.۳۳۳	۱.۷۵۰	۱.۹۷۵	۲.۰۵۷	۲.۰۷۴	۲.۰۹۷	۲.۱۰۷	۲.۱۱۸	۲.۱۰۸	۲.۱۲۸
I/mA	۶۹.۶	۶۹.۵	۶۹.۶	۶۹.۷	۶۹.۴	۵۱.۲	۳۸.۴	۳۰.۷	۲۵.۳	۲۱.۶	۱۸.۷	۱۶.۴	۱۴.۸
P_R/mW	۱۴.۸۲	۲۴.۹۵	۵۴.۴۳	۹۲.۹۱	۱۲۱.۴۵	۱۰۱.۱۲	۷۸.۹۹	۶۳.۶۷	۵۳.۰۵	۴۵.۵۱	۳۹.۶۱	۳۴.۵۷	۳۱.۴۹
V/v	۲.۱۲۷	۲.۱۴۲	۲.۱۴۵	۲.۱۱۸	۲.۱۲۳	۲.۱۲۰	۲.۱۱۵	۲.۱۱۵	۲.۱۲۷	۲.۱۴۷	۲.۱۴۷	۲.۱۴۲	۲.۱۴۸
I/mA	۱۳.۴	۱۲.۳	۱۱.۳	۱۰.۴	۹.۶	۹.۰	۸.۴	۷.۹	۷.۵	۷.۲	۶.۸	۶.۴	۶.۳
P_R/mW	۲۸.۵۰	۲۶.۳۵	۲۴.۰۱	۲۲.۰۳	۲۰.۳۸	۱۹.۰۸	۱۷.۷۷	۱۶.۷۱	۱۵.۹۳	۱۵.۴۶	۱۴.۵۳	۱۳.۷۱	۱۳.۵۳

جدول ۶: ولتاژ بر حسب جریان سلول به ازای بارهای مصرفی مختلف در فاصله ۲۰ سانتی متر با جریان هوا و دمای سلول ...

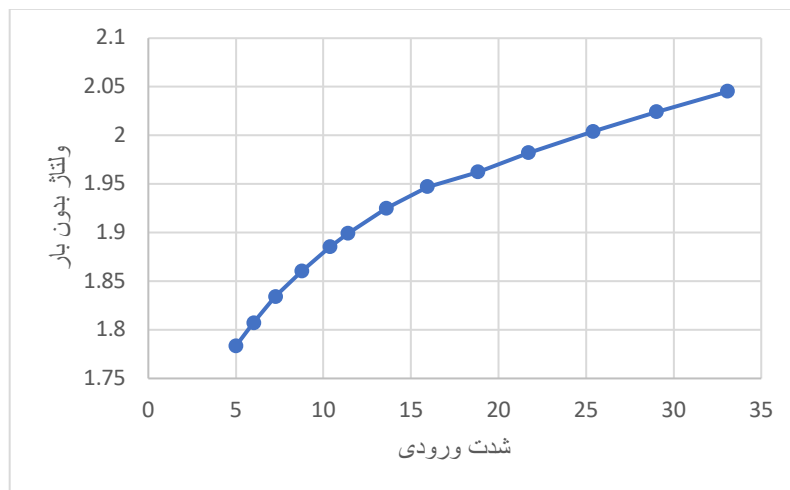
V/v	۰.۶۷۶	۰.۴۱۶	۱.۰۶۰	۱.۸۴۶	۱.۹۹۹	۲.۰۴۱	۲.۰۵۲	۲.۰۵۸	۲.۰۶۰	۲.۰۶۸	۲.۰۷۴	۲.۰۸۸	۲.۰۹۳
I/mA	۶۰.۸	۶۰.۸	۶۰.۸	۵۵.۴	۴۲.۹	۳۳.۶	۳۰.۳	۲۳.۸	۲۴.۸	۲۰.۹	۱۸.۳	۱۶.۲	۱۴.۶
P_R/mW	۴۱.۱۰	۲۵.۲۸	۶۴.۴۴	۱۰۲.۲۷	۸۵.۷۶	۶۸.۵۸	۶۲.۱۸	۴۸.۹۸	۵۱.۰۹	۴۳.۲۲	۳۷.۹۵	۳۳.۵۶	۳۰.۵۶
V/v	۲.۰۹۶	۲.۰۹۱	۲.۰۹۰	۲.۱۰۰	۲.۱۱۶	۲.۱۱۶	۲.۱۲۵	۲.۱۰۸	۲.۱۲۰	۲.۱۰۷	۲.۱۰۶	۲.۱۰۲	۲.۱۰۸
I/mA	۱۳.۲	۱۲.۱	۱۱.۰	۱۰.۳	۹.۶	۸.۹	۹.۴	۷.۸	۷.۴	۷.۰	۶.۶	۶.۳	۶.۰
P_R/mW	۲۷.۶۷	۲۵.۳۰	۲۲.۹۹	۲۱.۶۳	۲۰.۳۱	۱۸.۸۳	۱۹.۹۸	۱۶.۴۴	۱۵.۶۹	۱۴.۷۵	۱۳.۹۰	۱۳.۲۴	۱۲.۶۵

جدول ۷: ولتاژ بر حسب جریان سلول به ازای بارهای مصرفی مختلف در فاصله ۲۰ سانتی‌متر با پوشش شیشه‌ای و دمای سلول ...

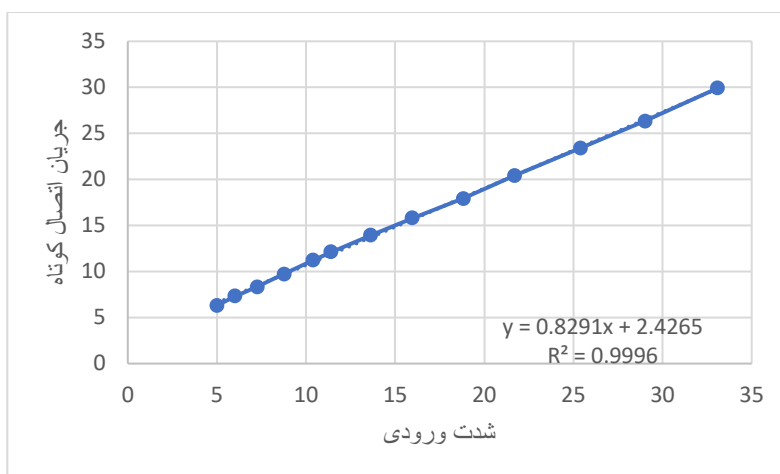
نمودار داده‌ها



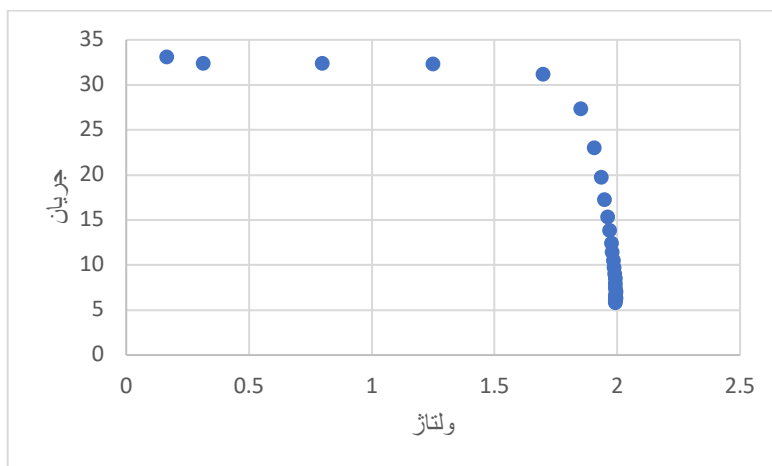
نمودار ۱: لگاریتم شدت ترموپیل بر حسب لگاریتم فاصله (جدول ۱)



نمودار ۲: ولتاژ بدون بار (ولت) بر حسب شدت ورودی (وات بر متر مربع) (جدول ۲)



نمودار ۳: جریان اتصال کوتاه (میلی آمپر) بر حسب شدت ورودی (وات بر متر مربع) (جدول ۲)



نمودار ۴: جریان (میلی آمپر) بر حسب ولتاژ (ولت) (جدول ۴)

خطای آزمایش

عوامل خطا را در ذیل اشاره می‌کنیم:

ارتباط علی بین فاصله و گرما به دلیل متناهی بودن منبع نوری، خطای محاسبه فاصله به دلیل ارتباط مجذور و افزایش مقدار خطا، خطای رئوستا و دستگاه‌های موثر بر جریان و در نهایت خطای همیشگی آزمایشگر

نتیجه گیری

اندازه‌گیری شدت نور بر حسب فاصله

با استفاده از نمودار ۱ (جدول ۱) می‌توان مشاهده کرد که لگاریتم مقدار شدت ورودی از منبع به لگاریتم فاصله یک رابطه خطی دارد و بنابراین خواهیم داشت

$$\log I = \alpha \log d + \beta$$

که α و β شیب و عرض از مبدا نمودار است. بر این اساس خواهیم داشت.

$$\alpha = -1.7882$$

$$\beta = 4.573$$

$$R^2 = 0.9976$$

رابطه بین شدت نور با ولتاژ بدون بار و جریان اتصال کوتاه

با استفاده از نمودارهای ۲ و ۳ (جدول ۲) می‌توان مشاهده کرد که رابطه بین ولتاژ بدون بار بر حسب شدت ورودی یه نمودار لگاریتمی است که با نظریه سازگار است چنان که از روابط نظری می‌دانیم که یک تابع نمایی ارتباط دهنده این دو متغیر است (مراجعه به بخش نظریه و مدل). همچنین واضح است که رابطه بین جریان اتصال با شدت ورودی یک رابطه خطی دارد که این نیز با نظریه سازگار است. دلیل این سازگاری نیز از بخش نظریه و مدل واضح و عیان است.

بستگی ولتاژ بار به دما

با استفاده از جدول شماره ۳ می‌توان دید که شیب تغییرات واضحا منفی است. علت چنین شیبی به دلیل رابطه تعادل گرمایی (توزیع بولتزمن) جریان‌های عبوری با دماست بنابراین چنان که دما را افزایش دهیم، از میزان موثر بودن سلول خورشیدی کاسته‌ایم. چنان که

بستگی ولتاژ به جریان برای بارهای مصرفی مختلف

اکنون نوبت محاسبه بازدهی سلول خورشیدی است. برای اینکار ابتدا نقطه بیشینه توان مصرفی را در جدول ۴ پیدا کرده (به رنگ زرد) و مقدار توان ورودی را محاسبه می‌کنیم. سپس با در نظر گرفتن اینکه نسبت مربع‌های مذکور در نمودار مشخصه، مقدار بازدهی را به ما خواهد داد، این نسبت را محاسبه کرده و آن را یادداشت می‌کنیم.

$$r = \frac{P_R}{P_0} = \frac{52.958}{33.07 \times 5} = 32.03 \%$$

بنابراین همانطور که واضح است بازدهی این سلول خورشیدی اندک است و نزدیک به یک‌سوم توان ورودی است.

بهینه کردن شرایط سلول

همانند بخش بالا می‌خواهیم بازدهی سلول خورشیدی را بدست آوریم با این اختلاف که شرایط را تغییر می‌دهیم تا به یک شهودی از ساختار سلول خورشیدی برسیم. اما قبل از آن نیاز است که مقدار توان ورودی را برای فاصله ۲۰ سانتی‌متری از

طریق خط برازشی که در نمودار یک رسم کردیم، حساب کنیم. بر این اساس مقدار توان ورودی برابر با ۸۸۱.۹۸ میلی‌وات است.

شرایط	دما	توان مصرفی بیشینه	بازده بیشینه
بدون خنک شدن	?	۱۱۰.۱۶ میلی‌وات	۱۲.۴۹ درصد
با خنک شدن	?	۱۲۱.۴۵ میلی‌وات	۱۳.۷۷ درصد
پوشش شیشه‌ای	?	۱۰۲.۲۷ میلی‌وات	۱۱.۶۰ درصد

جدول ۸: توان مصرفی بیشینه و بازده سلول در شرایط گوناگون

همانطور که مشخص است بازدهی سلول‌های سیلیکونی بسیار کم و نزدیک ۳۰ درصد است و با ایجاد شرایط و موانع گرمایی و حتی رفع این موانع باعث کاهش بازدهی می‌شود. بدین ترتیب باید به دنبال جایگزین‌های دیگری جهت افزایش بازدهی باشیم.