آشنایی با سلول خورشیدی

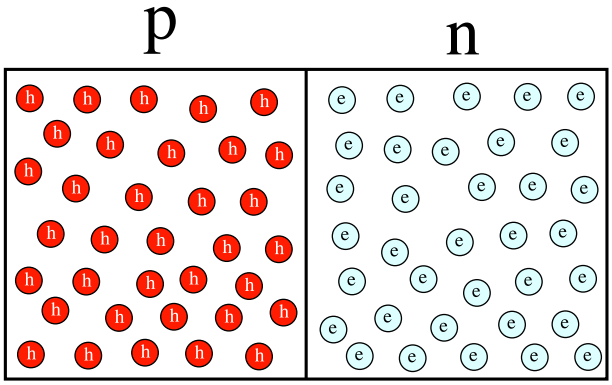
در حال حاضر علاقهٔ بسیار زیادی در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر وجود دارد. یکی از روش‌های تولید انرژی پاک، استفاده از نور خورشید و تبدیل آن به انرژی الکتریکی است. متأسفانه تا کنون بازده سلول‌های خورشیدی بسیار کم است یعنی درصدی از نور خورشید که به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود زیاد نیست. تلاش‌های بسیار زیادی در بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی در حال انجام است. به همین دلیل سلول‌های خورشیدی که یکی از حوزه‌های داغ در گرایش حالت جامد و ماده‌چگال است. سلول‌های خورشیدی معمولا از ترکیب و لایه‌نشانی نیم‌رساناها تولید می‌شود. در این آزمایش ما به بررسی خواص یک سلول خورشیدی خواهیم پرداخت.

مدل و نظریه

سلول خورشیدی تشکیل شده از یک اتصال نیم‌رساناهای نوع p و نوع n است. همان طور که می‌دانید نیم‌رساناها موادی هستند که گاف انرژی ($E_g = ۱/۱ ev$ در سیلیکون) کمی بین نوار رسانش و نوار والانس آن‌ها وجود دارد. اگر نیم‌رسانایی را گرم کنیم تعدادی از الکترون‌ها به نوار رسانش رفته و رسانندگی نیم‌رسانا افزایش می‌یابد. با افزودن ناخالصی نیز می‌توان رسانندگی نیم‌رسانا را افزایش داد. اگر مقدار کمی اتم‌هایی که یک الکترون بیش‌تر و یا یک الکترون کم‌تر دارند را به صورت ناخالصی به نیم‌رسانایی (مانند سیلیکون) اضافه کنیم، نتیجه آن است که شکل شبکهٔ نیم‌رسانا تغییر نکرده و درنتیجه نوار انرژی دست نخورده می‌ماند، اما به دلیل افزایش یا کاهش الکترون‌ها جمعیت حاملهای بار نوارهای انرژی تغییر می‌کند. ممکن است نوار والانس خالی‌تر شده و در نتیجه قابلیت رسانایی توسط جاهای خالی (حفره‌ها) به وجود بیاید. به چنین ماده‌ای نیم رسانای نوع p می‌گوییم. یا ممکن است نوار رسانش با الکترون‌های اضافی پر شده و در نتیجه قابلیت رسانایی توسط این الکترون‌های اضافی ایجاد شود که به اصطلاح نیم رسانای نوع n خواهیم داشت. نیم‌رسانای نوع n یا p در حالت عادی از لحاظ بار الکتریکی خنثی است. چرا که هستهٔ اتم ناخالصی با تعداد الکترونش بار خنثی ایجاد می‌کنند. یعنی اگر اتم سه ظرفیتی به سیلیکون اضافه شود، یک الکترون و یک پروتون کم‌تر دارد که در کل بار خنثی دارد.

وقتی دو نیم‌رسانای نوع n و p را مانند شکل ۱ به هم وصل می‌کنیم (این کار با لایه‌نشانی انجام می‌شود نه تماس مکانیکی!). تغییری در ناحیهٔ اتصال رخ می‌دهد. به دلیل زیاد بودن غلظت حفره‌ها در نیم‌رسانای نوع p و زیاد بودن غلظت الکترون‌های اضافی در نیم‌رسانای نوع n یک جریانی از الکترون و حفره ایجاد می‌شود که به جریان پخشی شناخته می‌شود. یعنی الکترون‌ها وارد ناحیهٔ p شده و حفره‌ها هم کمی به ناحیهٔ n نفوذ می‌کنند. این باعث می‌شود تا نیم‌رسانای p در محل اتصال کم‌بود حفره داشته و ناحیهٔ n کم‌بود الکترون داشته باشد. این لایه را لایهٔ کاهش [۱] می‌گویند. مسلما جریان

[۱] Depletion Layer



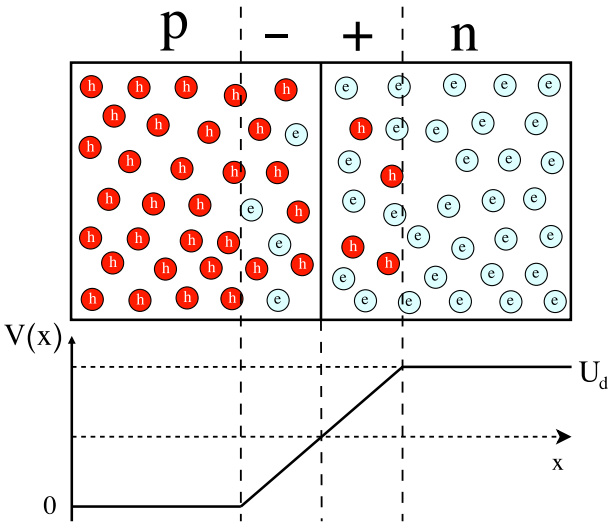
شکل ۱: اتصال pn. حفره‌ها با h و الکترون‌ها با e نشان داده شده‌اند. سمت راست نیم‌رسانای نوع n بوده که الکترون‌های آزاد دارد و سمت چپ نیم‌رسانای نوع p بوده که حفره‌های آزاد بیش‌تری دارد. هر دو نیم‌رسانا از نظر الکتریکی خنثی هستند و ذرات نمایش‌داده شده ذرات آزاد هستند. یعنی در سمت راست به تعداد الکترون‌های آزاد، پروتون‌های مقید بوده و در سمت چپ به میزان حفره‌ها، کاهش پروتون مقید داریم.

پخشی به خاطر اختلاف غلظت تا ابد وجود نخواهد داشت و اندازهٔ ناحیهٔ کاهش باید محدود باقی بماند. عامل متوقف کنندهٔ این جریان پخش میدان الکتریکی‌ای است که با این جریان مخالفت می‌کند. در واقع یک تعادلی بین جریان حاصل از پخش و جریان سوق الکترون و حفره به وجود می‌آید و شکل ۲ حاصل می‌گردد. به پتانسیل حاصل از این تعادل پتانسیل پخش گفته می‌شود و آن را با U_d نشان می‌دهیم. مقدار این پتانسیل بین $0/5v$ تا $0/7v$ است.

حالا این مجموعه رفتار یک سو کنندهٔ جریان و سلول خورشیدی را دارد. برای فهمیدن این موضوع باید دو مفهوم را معرفی کنیم.

فرض کنید در سمت راست که نیم‌رسانای نوع n داریم، خارج از لایهٔ کاهش (در عمق نیم‌رسانا) 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 حفرهٔ آزاد ایجاد شود. اگر این حفره بتواند به لایهٔ کاهش برسد، به سرعت به سمت نیم‌رسانای نوع p سوق داده می‌شود. چون در ناحیهٔ کاهش میدان الکتریکی به گونه‌ای است که حفره‌ها را به سمت نیم‌رسانای نوع p سوق می‌دهد (پتانسیل الکتریکی کمتر). چنین فرآیندی می‌تواند جریانی از حفره ایجاد کند که به آن جریان تولید حفره [۲] گفته می‌شود، ما این کمیت را با J_h^{gen} نشان می‌دهیم. امکان دار به صورت عکس حفره‌ای از قسمت p بر سد پتانسیل غلبه کرده (انرژی آن حفره به اندازهٔ کافی زیاد است) و پس از عبور از لایهٔ کاهش به ناحیهٔ 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 (حفره) را در نوار والانس پر کند. این رخداد

[۲] Generation Current



شکل ۲: اتصال pn در حالت تعادل. حفره‌ها با h و الکترون‌ها با e نشان داده شده‌اند. به دلیل اختلاف غلظت الکترون سمت راست و چپ الکترون‌ها به سمت چپ نفوذ می‌کنند (پخش). همین اتفاق برای حفره‌های سمت چپ می‌افتد. نتیجه این که مقداری عدم توازن بار ایجاد می‌شود و این عدم توازن اختلاف پتانسیلی در محل اتصال ایجاد می‌کند به گونه‌ای که نفوز الکترون‌ها در نیم‌رسانای p سخت‌تر شده. هر چه نفوذ الکترون و حفره بیش‌تر شود این پتانسیل قوی‌تر شده و در نتیجه یک تعادل بین پخش شدن آن‌ها بر قرار می‌گردد.

به عنوان بازترکیب [۳] شدن شناخته می‌شود. چگالی جریان حاصل از این موضوع را چگالی جریان بازترکیب گفته که با J_h^{rec} نشان می‌دهیم. مشابه همین اتفاق با کمی تفاوت برای الکترون‌ها می‌افتد با این تفاوت که جریان الکترون‌ها دقیقا عکس حفره‌ها می‌شود. یعنی در تولید، جفت الکترون حفره در قسمت p تشکیل شده و با حرکت ولگشت به لایهٔ کاهش می‌رسد و به دلیل میدان الکتریکی به راحتی به ناحیهٔ n می‌رود (بار الکترون معکوس بار حفره است). به همین منوال برخی از الکترون‌های ناحیهٔ n می‌توانند بر سد انرژی لایهٔ کاهش غلبه کرده و وارد ناحیهٔ p شده و با یک حفره بازترکیب شود و انرژی آزاد کند. در نتیجه دو چگالی جریان J_e^{gen} و J_e^{rec} را در جهت معکوس خواهیم داشت. اما جریان الکتریکی حاصل از مهاجرت الکترون‌ها با جریان الکتریکی حاصل از مهاجرت حفره‌ها همسو است چرا که بار الکترون و حفره مخالف است.

عمل سلول خورشیدی در ایجاد و تحریک جریانِ 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 هم با g نشان می‌دهیم.

قبل از هر چیز جریان‌های تولید و بازترکیب را باید به دست بیاوریم. می‌دانیم این جریان‌ها از افت و خیزهای گرمایی ناشی می‌شوند. به علاوه جریانِ تولید به پتانسیل پخش لایهٔ کاهش ربطی نداشته و مستقل از آن است. اما در عوض جریانِ بازترکیب به سدپتانسیل مربوط است چرا که حفره‌ها یا الکترون‌ها باید از این سد بگذرند. از مکانیک آماری می‌دانیم اگر ذره‌ای بخواهد با افت و خیز گرمایی بخواهد بین دو تراز با اختلاف انرژی $\Delta E > 0$ برود (از انرژی کمتر به بالاتر) نرخ چنین رخ‌دادهایی متناسب با $exp(-\Delta E/k_BT)$ است که k_B ثابت استفان بولتزمن و T دمای ماده است. طبیعتا هر چه اختلاف انرژی بالاتر باشد این نرخ پایین‌تر می‌آید و اگر دما هم بالا باشد احتمال وقوع این پرش بیش‌تر خواهد بود. پس می‌توانیم چگالی جریانِ بازترکیب حفره و الکترون‌ها را تا حدودی بنویسیم. اگر پتانسیل الکتریکی V به دو سر دیود اعمال شده باشد به گونه‌ای که V اختلاف پتانسیل اعمال شدهٔ به ناحیهٔ p با ناحیهٔ n باشد، چگالی جریانِ بازترکیب حفره متناسب می‌شود با

$$J_h^{rec} = r_{h-rec} exp\left(-\frac{e(U_d - V)}{k_B T}\right) \qquad (۱)$$

که r_{h-rec} نرخ این واکنش است. می‌دانیم در $V = 0$ جریانِ بازترکیب و جریانِ تولید یکدیگر را خنثی می‌کنند. یعنی اندازهٔ آن‌ها برابر است. به علاوه همان طور که گفتیم چگالی جریانِ تولید به اختلاف پتانسیل مربوط نخواهد بود. از

[۳] Recombination

این می‌توان فهمید که

$$J_h^{rec} \mid_{V=0} = J_h^{gen} \qquad (۲)$$

به عبارت دیگر با این دو معادله می‌توان فهمید که $r_{h-rec}exp(-\frac{eU_d}{k_BT})$ برابر با J_h^{gen} است. پس در نهایت داریم

$$J_h^{rec} = J_h^{gen} exp\left(\frac{eV}{k_BT}\right) \qquad (۳)$$

از آن‌جایی که جریانِ تولید و بازترکیب عکس یکدیگر هستند، چگالی جریانِ حفره‌ها را از سمت نیم‌رسانای p به سمت نیم‌رسانای n به شکل زیر در می‌آید

$$J_h = J_h^{rec} - J_h^{gen} = J_h^{gen}\left(exp\left(\frac{eV}{k_BT}\right) - ۱\right) \qquad (۴)$$

بر همین اساس چگالی جریان الکترون‌ها را می‌توان به دست آورد (در جهت معکوس حفره‌ها)

$$J_e = -(J_e^{rec} - J_e^{gen}) = -J_e^{gen}\left(exp\left(\frac{eV}{k_BT}\right) - ۱\right) \qquad (۵)$$

جریان الکترون‌ها و حفره‌ها با هم جریان الکتریکی ایجاد می‌کنند. هر حفره بار e حمل می‌کند و هر الکترون بار $-e$ بنا بر این چگالی جریان الکتریکی حاصل برابر است با

$$i = e(J_h^{gen} + J_e^{gen})\left(exp\left(\frac{eV}{k_BT}\right) - ۱\right) \qquad (۶)$$

این رابطه خاصیت یکسوکنندگی جریان دیود را هم نشان می‌دهد. برای پتانسیل‌های منفی اعمال شده، چگالی جریان مقدار زیادی پیدا نکرده و اشباع می‌شود. اما پتانسیل‌های مثبت باعث ایجاد چگالی جریان به صورت نمایی می‌شوند.
در سلول خورشیدی یک جمله باید به این رابطهٔ چگالی جریان اضافه کرد و آن چگالی جریان ایجاد شده به دلیل

جذب فوتون‌ها است. در سلول خورشیدی لایهٔ p را بسیار نازک می‌گیرند و آن را تحت تابش نور قرار می‌دهند. جذب فوتون‌ها در لایهٔ p باعث ایجاد جفت‌های الکترون و حفره شده و الکترون‌ها به دلیل نازک بودن لایه به راحتی می‌توانند به محل اتصال کاهش برسند. ناحیهٔ کاهش هم این الکترون‌ها را به سمت ناحیهٔ 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. به دلیل نزدیک بودن این زوج به لایهٔ کاهش می‌توان فرض کرد که الکترون حاصل به لایهٔ کاهش رسیده و چگالی جریان $-eg$ ایجاد می‌کند (جهت حرکت الکترون با بار $-e$ از p به n است. پس به صورت کلی‌تر چگالی جریان سلول خورشیدی بر حسب پتانسیل آن به شکل زیر می‌شود

$$i = e(J_h^{gen} + J_e^{gen}) \left(exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - ۱ \right) - eg \qquad (۷)$$

که g به توان تابش فرودی بر روی سلول مربوط است. در این مرحله تنها لازم است که ضرایب J_h^{gen} و J_e^{gen} را به دست بیاوریم. اگر D_e و D_h به ترتیب ضریب پخش الکترون در ناحیهٔ p و ضریب‌پخش حفره در ناحیهٔ n بوده و $n_۰$ و $p_۰$ غلظت الکترون‌های ناحیهٔ p و غلظت حفره‌های ناحیهٔ n باشد (حامل‌های فرعی [۴]) می‌توان تخمینی از نرخ و چگالی جریانِ تولید حفره و الکترون داشت. الکترون‌ها و حفره‌ها که در ناحیهٔ خود نیستند پس از کمی حرکت بازترکیب می‌شوند. اگر طول پویش آزاد یک الکترون در ناحیهٔ p قبل از باز ترکیب L_e و طول پویش آزاد حفره قبل از بازترکیب در ناحیهٔ n برابر با L_p باشد. می‌توان گفت که زمان پویش آزاد الکترون و حفره با طول پویش آزاد آن‌ها رابطهٔ $D_e\tau_e = L_e^۲$ و $D_h\tau_h = L_h^۲$ دارند. بنا بر این زمان حرکت آزاد هر کدام به دست می‌آید

$$\tau_e = \frac{L_e^۲}{D_e} \qquad (۸)$$

$$\tau_h = \frac{L_h^۲}{D_h} \qquad (۹)$$

تعداد حفره‌هایی که می‌توانند طول آزاد را طی کرده و به ناحیهٔ کاهش برسند را می‌توان محاسبه کرد. فاصلهٔ این حفره‌های داخل ناحیهٔ n نباید بیش‌تر از L_p باشد. اگر سطح مقطع اتصال A باشد، حفره‌های داخل حجم AL_p قادرند

[۴] Minority Carriers

که به ناحیهٔ کاهش برسند، تعداد این حفره‌ها هم از حاصل‌ضرب چگالی در این حجم یعنی $p_{\circ}AL_p$ به دست می‌آیند. این تعداد حفره‌ها در زمان τ_p به ناحیهٔ کاهش می‌رسند، پس تعداد حفرهٔ تولید شده و عبور کننده از لایهٔ کاهش در واحد زمان برابر است با $p_{\circ}AL_p/\tau_p$ و اگر چگالی جریان این حفره‌ها مورد نظر باشد سطح مقطع A با تقسیمی حذف خواهد شد یعنی $J_h^{gen} = p_{\circ}L_p/\tau_p$ به جای زمان پویش آزاد هم عبارتی که قبلا بر حسب ضریب پخش و طول پویش آزاد به دست آورده بودیم قرار می‌دهیم

$$J_h^{gen} = \frac{p_{\circ}D_p}{L_p} \qquad (۱۰)$$

ماجرا برای الکترون‌های تولیدی در ناحیهٔ p برای سلول کمی متفاوت است، چرا که ضخامت لایهٔ p در سلول خورشیدی بسیار نازک‌تر از طول پویش آزاد الکترون‌های آن است. اگر ضخامت را با t نشان دهیم $t << L_e$ هست. این یعنی حجمی که در آن ذرات الکترون داخل ناحیهٔ p قادر به رسیدن به لایهٔ کاهش هستند برابر است با tA در مقایسه با حالت قبل که L_pA (برای حفره‌ها بود). انجام فرآیند مشابه با این تصحیح شکل زیر را نتیجه می‌دهد

$$J_e^{gen} = \frac{n_{\circ}D_e t}{L_e^{۲}} \qquad (۱۱)$$

با استفاده از دو معادلهٔ آخر، چگالی جریان دیود و یا همان سلول خورشیدی به دست خواهد آمد

$$i = e(\frac{n_{\circ}D_e t}{L_e^{۲}} + \frac{p_{\circ}D_p}{L_p}) \left(exp\left(\frac{eV}{k_BT}\right) - ۱ \right) - eg \qquad (۱۲)$$

حساس‌ترین قسمت این معادله به دما غلظت جفت‌های الکترون حفره‌های ایجاد شده در هر ناحیه است که با دما افزایش می‌یابند

$$n_{\circ} \sim p_o \sim exp\left(-\frac{E_g}{۲k_BT}\right) \qquad (۱۳)$$

این آزمایش شامل قسمت‌های زیر است.

۱. مشاهدهٔ شکل رابطهٔ پتانسیل و جریان تولید شده توسط سلول خورشیدی بر حسب شدت نور.

۲. رابطهٔ جریان بر حسب پتانسیل در سلول خورشیدی

۳. رابطهٔ جریان بر حسب پتانسیل در سلول خورشیدی در دماهای مختلف و طیف نور مختلف

مسلما برای انجام موارد بالا ما نیاز داریم شدت تابش منبع بر حسب فاصله را بدانیم. برای این کار از وسیله‌ای با نام ترموپیل [۵] استفاده خواهیم کرد.

وسایل آزمایش

سلول خورشیدی، ترموپیل، صفحه شیشه‌ای به همراه نگهدارنده، تقویت کننده، لامپ و سرپیچ مخصوص آن، رئوستا، مولتی‌متر (دو عدد)، سشوار، پایه مثلثی شکل (۲ عدد)، پایه استوانه‌ای 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).

ترموپیل: به دلیل گران بودن این وسیله لطفا دقت کنید

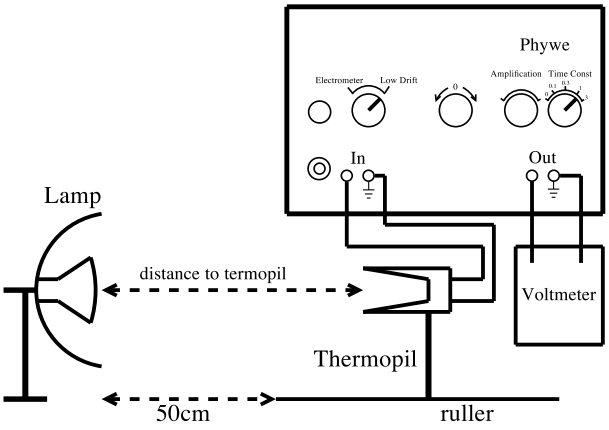
توجه: ترموپیل وسیلهٔ به شدت حساس و گران قیمتی است. این وسیله را فقط به ورودی ولت‌متر، میکرو ولت‌متر یا تقویت کننده وصل کنید. ضربه هم باعث کاهش کیفیت آن می‌شود پس حتما با لطافت برخورد نمایید. ترموپیل وسیله‌ای است که شدت نور دریافتی را به صورت یک ولتاژ خروجی نشان می‌دهد. برای دانستن شدت نور باید ضریبی در ولتاژ ترموپیل ضرب کرد که در هر ترموپیل متفاوت بوده و یک گواهی کالیبراسیون به همراه این ضریب برای هر ترموپیل وجود دارد. ضریبی که می‌گوید به ازای هر میکرو ولت ولتاژ چه شدت نوری بر حسب وات بر متر مربع دریافت می‌شود. این ضریب را از گواهی کالیبراسیون بخوانید (۳۵/۳۲ میکرو ولت بر وات بر متر مربع). به دلیل این که ولتاژ خروجی ترموپیل بسیار کم است، ولتاژ آن را یا باید با میکرو ولت‌متر خواند و یا توسط تقویت کننده ولتاژ آن را تقویت کرد.

روش آزمایش

اندازه‌گیری شدت نور منبع بر حسب فاصله

در تمامی آزمایش‌ها بهتر است که سطح میز با پارچهٔ سیاه پوشیده شود تا با جلوگیری از پراکنده شدن نور آزمایش دقیق‌تر انجام گردد. در این آزمایش ما از ترموپیل استفاده خواهیم کرد. چیدمان آزمایش باید به صورت شکل ۳ باشد. لامپ

[۵] Thermopile



شکل ۳: چیدمان مربوط به اندازه‌گیری شدت نور لامپ بر حسب فاصله

روی پایه نصب شده و به برق شهر متصل شود. تقویت‌کننده را روشن کنید. خطکش را در مقابل لامپ گذاشته و صفر خطکش را در ۵۰ سانتی‌متری از لامپ قرار دهید. با گیره‌ها خطکش را روی میز ثابت کنید (گیره‌ها را زیاد فشار ندهید چون به خطکش آسیب می‌رسانند). ترموپیل را روی پایه گذاشته و در صورت وجود در پوش شیشه‌ای دهانهٔ ترموپیل، آن را بردارید. خروجی ترموپیل را به ورودی تقویت کننده وصل کرده (به سیم زمین ترموپیل دقت کنید). خروجی تقویت کننده را هم به یک ولت‌متر بدهید تا ولتاژ تقویت شدهٔ ترموپیل را بخوانید. درجهٔ تقویت‌کننده روی low drift تنظیم شود. ضریب تقویت ۱۰۰ هم برای کار ما مناسب است. توجه کنید که ولتاژ خروجی تقویت شده نمی‌تواند بیش‌تر از ۱۰ ولت باشد یعنی اگر حاصل‌ضرب ورودی در ضریب تقویت بیش‌تر از ۱۰ ولت بود خروجی تقویت کننده مستقل از ورودی مقدار ثابت ۱۰ ولت را خواهد داشت. در صورت بروز این مشکل ضریب تقویت را کم کنید. مقدار Time Constant روی ۰٫۳ یا ۳ باشد. حتما قبل از روشن کردن لامپ صفر تقویت کننده را تنظیم کنید. یعنی ولتاژ خروجی تقویت کننده صفر باشد (عدد ولت‌متر). پس از مطمئن شدن از چیدمان، لامپ را روشن کنید. کمی صبر کنید تا لامپ گرم شود (چند ثانیه). به ولت‌متر دقت کنید چرا باید عدد غیر صفری را نشان دهد؟ سپس فاصلهٔ ترموپیل را از منبع نور تغییر داده، حدود ده ثانیه صبر کرده و ولتاژ آن را بخوانید. دقت کند ترموپیل به دمای اطرافش حساس است و برای دقت اندازه‌گیری به بدنهٔ آن دست نزده و دور و بر آن هم زیاد نچرخید!

پیشنهاد می‌شود که d فاصلهٔ دهانهٔ ترموپیل از منبع را به صورت نمایی افزایش دهید. مانند اعداد جدول ۱. کم‌ترین فاصلهٔ ترموپیل از لامپ باید $۵۰cm$ باشد، چرا که دهانهٔ ترموپیل یک میدان دید ۲۰ درجه دارد. یعنی اگر زاویهٔ نور فرودی به ترموپیل با محور آن بیش‌تر از میدان دید باشد به ترموپیل وارد نمی‌شود. برای این که ترموپیل کل لامپ را ببیند فاصله باید بیش‌تر از $۵۰cm$ باشد. در واقع قطر ظاهری لامپ از دید ترموپیل باید از ۲۰ درجه کمتر باشد.

پس از اندازه‌گیری ولتاژ، شدت نور دریافتی بر حسب فاصله را با ضرب کردن حساسیت ترموپیل محاسبه کرده و در جدول یادداشت نمایید.

۱۴۵	۱۳۳	۱۲۱	۱۱۰	۱۰۰	۹۵	۸۶.۵	۷۹	۷۲	۶۶	۶۰	۵۵	۵۰	d/cm
													V/mv
													$I/\frac{w}{m^۲}$

جدول ۱: ولتاژ و شدت ترموپیل بر حسب فاصله.

۱۴۵	۱۳۳	۱۲۱	۱۱۰	۱۰۰	۹۵	۸۶.۵	۷۹	۷۲	۶۶	۶۰	۵۵	۵۰	d/cm
													$J/\frac{w}{m^۲}$
													V_{nl}/v
													I_{sc}/mA

جدول ۲: ولتاژ قطع و جریان اتصال کوتاه برای شدت نورهای مختلف. شدت نورهای خالی جدول را با استفاده از داده‌های جدول‌های قبلی پر کنید.

نمودار تمام لگاریتمی شدت بر حسب فاصله را رسم کنید و معادلهٔ حاکم بر نقاط را با روش کم‌ترین مربعات یا برازش چشمی به دست بیاورید.

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

هنگامی که به یک سلول خورشیدی نور می‌تابانیم بسته به مقدار مقاومت مدار جریان و ولتاژ سلول متغیر است. اگر مقاومت بار صفر باشد یعنی دو سر سلول به شکل اتصال کوتاه باشد، جریان حاصل را جریان اتصال کوتاه I_{sc} خوانده و هنگامی که دو سر سلول به مقاومت بسیار زیاد (مقاومت ولت‌متر) وصل بوده به گونه‌ای که جریانی در سیستم نباشد ولتاژ را ولتاژ بدون بار V_{nl} می‌گوییم. در این قسمت رابطهٔ ولتاژ بدون بار و جریان اتصال کوتاه بر حسب شدت نور فرودی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

به جای ترموپیل و تقویت کننده در چیدمان قبلی سلول خورشیدی قرار می‌دهیم. یک عدد ولت‌متر و یک عدد آمپر متر قرار داده و برای ولتاژ بدون بار ولت‌متر را به سلول متصل کرده و برای جریان اتصال کوتاه نیز آمپرمتر را به سلول وصل می‌کنیم.

با استفاده از شدت فواصل قبلی که بدست آوردید ولتاژ بدون بار و جریان اتصال کوتاه را در همان فواصل اندازه‌گیری کرده و در جدول ۲ وارد نمایید.

از معادلهٔ ۱۲ می‌توان فهمید که ولتاژ سلول بر حسب شدت نور به شکل لگاریمتی تغییر می‌کند. اگر مدار هم اتصال کوتاه شود، جریان با شدت نور به صورت خطی تغییر خواهد کرد. بر این اساس نمودارهای ولتاژ بدون بار بر حسب شدت

$T/^\circ C$				
V_{nl}/v				

جدول ۳: ولتاژ بر حسب دما

تابش فرودی و جریان اتصال کوتاه بر حسب شدت تابش فرودی را رسم کنید و نتیجهٔ خود را با انتظار حاصل از تئوری مقایسه نمایید.

بستگی ولتاژ بدون بار به دما

در این قسمت فاصلهٔ سلول خورشیدی را ثابت (شدت ثابت) گرفته و تغییرات ولتاژ بدون بار را بر حسب دما اندازه‌گیری می‌کنیم. بهتر است سلول را در فاصلهٔ $۵۰cm$ از منبع قرار داده و آزمایش را انجام دهید. به دلیل کم بودن فاصله سلول کمی گرم می‌شود. دماسنج را با تماس به پشت سلول (به فلز متصل به آن) نگه داشته و صبر کنید تا دما ثابت شود. مقدار دما را یادداشت کنید. ولتاژ را هم یادداشت نمایید. با سشوار دمای سلول را به دمای اتاق رسانده و یا آن را گرم‌تر کنید. نتایج را وارد جدول ۳ کنید.

شیب تغییرات ولتاژ بر حسب دما را به دست آورید (نمودار لازم نیست). این عدد مثبت است یا منفی؟ آیا می‌توانید بر اساس رابطهٔ تحلیل کنید؟

بستگی ولتاژ به جریان برای بارهای مصرفی مختلف

در این قسمت می‌خواهیم رفتار یک سلول خورشیدی هنگامی که به یک مصرف کننده متصل است را مشاهده کنیم. یعنی سلول را به مقاومت متغیری را به سلول متصل کرده و ولتاژ سلول و جریان گذرنده از مقاومت را پیدا کنیم. در واقع ولتاژ سلول ثابت نیست و با افزایش جریان کاهش می‌یابد. شکل این بستگی یکی از سوال‌های این قسمت است. علاوه بر این می‌خواهیم ببینیم که بیشینهٔ توان مصرف شده توسط مقاومت چقدر بوده و در چه شرایطی است. به طور کلی اگر سلول را با یک مقاومت داخلی سری فرض کنیم، می‌توان گفت که وقتی توان مصرف بیشینه است که مقاومت مصرف کننده با مقاومت سلول برابر باشد. علاوه بر این‌ها بازده سلول را نیز به دست می‌آوریم.

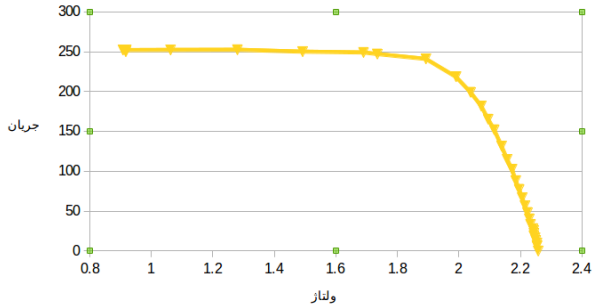
آزمایش به طور کلی به این شرح است. سلول را در جای ثابت، مقابل لامپ قرار داده و آن را به رئوستا وصل می‌کنیم. فقط یک آمپرسنج به صورت سری با رئوستا قراد می‌دهیم. به علاوه ولت‌متری نیز به دو سر سلول زده تا ولتاژ سلول را بخوانیم. رئوستا را تغییر داده و ولتاژ و جریان‌های مختلفی را می‌خوانیم. برای رسم منحنی بهتر است که ولتاژ بدون بار (یک سیم رئوستا را در بیاورید) و جریان اتصال کوتاه (دو سر رئوستا را اتصال کوتاه کنید) را نیز به دست بیاورید. به علاوه توجه داشته باشید که شکل کلی منحنی مانند شکل ۴ است. بنابراین در ابتدا مقدار جریان بیشینه را نگاه کرده و بر

													V/v
													I/mA
													P_R/mA
													V/v
													I/mA
													P_R/mA

جدول ۴: ولتاژ بر حسب جریان سلول به ازای بارهای مصرفی مختلف. به دلیل زیاد بودن نقاط برای اندازه‌گیری جدول یک بار تکرار شده است.

اساس آن مقدار جریان را از صفر با فاصلهٔ معقول زیاد کنید. در جریان‌های بالا اما توجه کنید که با تغییر کمی در جریان ولتاژ به شدت تغییر خواهد کرد به گونه‌ای که جریان عملن ثابت است و اساس تغییرات را بر ولتاژ بگذارید.

داده‌های اندازه‌گیری را در جدول ۴ وارد نمایید. علاوه بر این توان مصرفی P_R را از حاصل‌ضرب ولتاژ و جریان به دست آورده و یادداشت نمایید.



شکل ۴: منحنی مشخصه ولتاژ بر حسب جریان برای سلول خورشیدی

نقاط جدول ۴ را رسم کرده تا رفتار تغییر جریان بر حسب ولتاژ را مشاهده نمایید. نقطه‌ای که بیشینهٔ توان مصرفی را دارد مشخص کنید. مقدار این توان را هم یادداشت نمایید. در قدم بعد انرژی فرودی بر سلول را محاسبه کنید. با دانستن اطلاعات جدول ۱ شما می‌توانید شدت نور فرودی روی سلول را به دست آورده و با ضرب آن در سطح سلول $۵۰cm^۲$ توان فرودی بر روی سلول را محاسبه نمایید. در نهایت بازده سلول را از تقسیم توان مصرفی بر توان فرودی می‌توان به دست آورد.

													V/v
													I/mA
													P_R/mA
													V/v
													I/mA
													P_R/mA

جدول ۵: ولتاژ بر حسب جریان سلول به ازای بارهای مصرفی مختلف در فاصلهٔ ..... بدون جریان هوا. دمای سلول .....

بهینه کردن شرایط سلول

در این قسمت ما به دنبال بهینه کردن سلول هستیم. یعنی ببینیم سلول در سه شرایط مختلف چگونه عمل می‌کند. این سه شرایط شامل موارد زیر است

۱. سلول در دمای بالاتر از اتاق

۲. سلول هم‌دما با اتاق

۳. سلول با شیشه در مقابل آن

در این قسمت سلول را نزدیک لامپ می‌گذاریم (فاصلهٔ کم‌تر از $۵۰cm$) مقدار شدت نور فرودی را باید از برون‌یابی نتایج جدول ۱ پیدا کنیم. در واقع از نمودار و رابطهٔ شدت نور بر حسب فاصله استفاده کنید تا شدت نور را در فاصلهٔ نزدیکی که برای لامپ در نظر گرفتید بدانید. پیشنهاد ما فاصلهٔ $۲۰cm$ تا $۳۰cm$ است. پس از قرار دادن سلول و روشن کردن لامپ صبر کنید تا سلول دمای تعادلی‌اش را بگیرد. دمای سلول را از پشت آن توسط تماس دماسنج با اتصال فلزی پشت سلول کنترل نمایید. مدار هم مانند قسمت قبل است.

پس از به تعادل رسیدن گرمایی سلول و استقرار کامل چیدمان آزمایش، ولتاژ بر حسب جریان را درست مانند قبل به دست آورده و در جدول ۵ یادداشت نمایید.

حالا گرم کن سشوار را خاموش کرده و هوای آن را به سلول بزنید تا سلول کمی خنک شود. پس از به تعادل رسیدن دمای سلول را اندازه گرفته و اندازه‌گیری را شروع کنید (جدول ۶).

در نهایت شیشه را در مقابل سلول گذاشته و پس از به تعادل رسیدن دمای سلول را اندازه گرفته و اندازه‌گیری را شروع کنید (جدول ۷).

													V/v
													I/mA
													P_R/mA
													V/v
													I/mA
													P_R/mA

جدول ۶: ولتاژ بر حسب جریان سلول به ازای بارهای مصرفی مختلف در فاصلهٔ ..... با جریان هوا. دمای سلول .....

													V/v
													I/mA
													P_R/mA
													V/v
													I/mA
													P_R/mA

جدول ۷: ولتاژ بر حسب جریان سلول به ازای بارهای مصرفی مختلف در فاصلهٔ ..... با پوشش شیشه‌ای. دمای سلول .....

شرایط	دما	توان مصرفی بیشینه	بازده بیشینه
بدون خنک شدن			
با خنک شدن			
پوشش شیشه‌ای			

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

توان مصرفی هر سه حالت را در هر ولتاژ و جریان به دست آورده و در جدول مربوطه یادداشت نمایید. سپس توان بیشینهٔ هر حالت را پیدا کرده و در جدول ۸ یادداشت نمایید.

با توجه به این که نور فروسرخ توسط شیشه جذب می‌شود نتایج جدول ۸ را تحلیل کنید. آیا می‌توان فهمید که سلول خورشیدی در چه بازه‌ای از طیف نور کار می‌کند؟