

تبدیل مستقیم انرژی III

پیل خورشیدی (مبدل فتوولتایی)

Photovoltaic Energy Conversion

Solar Cells

نوشته :

تقی ابتکار Ph.D.

دانشکده فنی

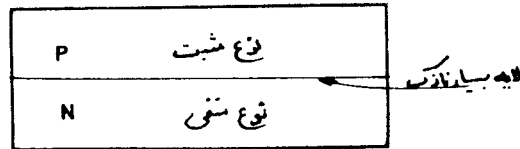
۱- مقدمه و معرفی

در مطالعه مبدل ترموالکتریک (صفحه ۱۸۴ مجله دانشکده فنی شماره ۱۳) مشاهده گردید که برای رسیدن به حداکثر ضریب تحسین لازمست که از نیمه رساناها جهت ساختمان مبدل استفاده شود. در آن بخش ملاحظه شد که چگونه جریان حرارت بتوسط اتصالات نیمه رساناها مناسب مستقیماً بجریان الکتریسیته مورد نظر تبدیل میشود. همچنین ملاحظه گردید که مزیت اصلی نیمه رساناها در این مورد اینست که سطوح طراز فیرمی Fermi Level در آنها در اثر حرارت تغییر فاهشی می یابد و همچنین باعث بالا رفتن ضریب سیبک (Seebeck) میگردد.

بطریق دیگری نیز میتوان از نیمه رساناها جهت تولید قدرت الکتریک استفاده نمود. طریق مورد نظر دیگر یک ماشین حرارتی نیست بلکه عبارتست از یک وسیله مکانیک کوانتیک. این وسیله موسوم است به مؤلد فتوولتائی که ذیلاً معرفی میگردد.

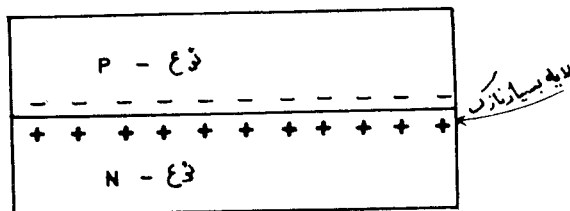
یک کریستال از جسم نیمه رسانا را انتخاب نموده و غشائی در اطراف آن تولید مینمائیم بطوریکه در یکطرف آن فقط نوع کریستال منفی وجود داشته باشد (N-type) و طرف دیگر آن مطابق شکل ۱ نوع مثبت (P-type) و فرض میکنیم که تغییر از حالت N به حالت P در یک لایه بسیار نازک صورت بگیرد و باستثنای این لایه در سایر قسمتهای کریستال وضع کاملاً یکنواخت وجود داشته باشد.

در مقایسه با نوع P چون نوع N دارای مقدار زیادتری الکترون آزاد است الکترونها از نوع N به نوع P نفوذ مینمایند - و حفرهها (که محل خالی الکترونها است) در جهت عکس حرکت میکنند. از طرفی چون اتصال P - N مزبور از نظر الکتریکی خنثی است بنابراین الکترونهاییکه منطقه N را ترك میکنند سطح متصل به منطقه P را دارای یک بار مثبت مینمایند و معکوس آنها در مورد منطقه P و سطح روی منطقه P دارای بار منفی میشود (مطابق شکل ۲).



(شکل ۱)

حال فرض کنیم که این قطعه در برابر اشعه نورانی با فرکانس معلوم قرار گیرد. بموجب پدیده فتوالکتریک اگر انرژی ذرات نورانی مزبور از تابع کار مربوط به سطح این قطعه بیشتر باشد باعث آزاد شدن الکترون از سطح میشود.



(شکل ۲)

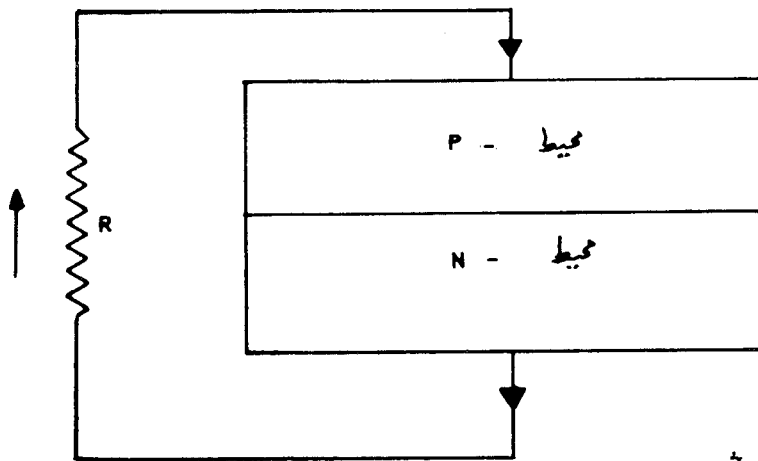
توضیح اینکه الکترونهای مربوط قطعه مورد بحث بحالت آزاد نیستند که بدون مانع پس از برخورد فوتوهای نورانی جابجا شوند بلکه مقداری انرژی هم باید صرف باصطلاح کردن آنها از سطح شود و این بخوبی بتوسط رابطه مشهور فتوالکتریک پیشنهادی البزت انیشتین معلوم میشود:

$$(E = hv - \Phi)$$

hv انرژی اشعه نورانی است که در آن h ثابت پلانک و v فرکانس نور است و Φ همان تابع کار است که بحساب انرژی نورانی باید گذاشته شود تا انرژی الکترون آزاد شده بدست آید.

پس از این توضیح ملاحظه میشود که در اتصال P و N مورد بحث اگر فوتونهای امواج نورانی دارای انرژی کافی باشند پس از برخورد با سطح باعث میشوند که یک الکترون پس از جدا شدن از محیط ممنوعه انرژی نیر عبور کرده و در نتیجه تولید یک زوج حفره - الکترون بنمایند. اگر کریستال مورد بحث خالص باشد این زوج در داخل کریستال حرکت میکند تا هنگامیکه تجمع مجدد صورت گرفته و این زوج منحلدم شوند.

اما اگر قطعه P-N مطابق آنچه گذشت جسم خالص نباشد و زوج حفره - انکترون تولید شده بطرف محل اتصال P-N حرکت کند - در این حال الکترونها جذب بار مثبت موجود در لایه N میشوند و حفره وضع معکوس را پیدا میکنند. باین ترتیب قرار گرفتن الکترون و حفره در اتصال P-N باعث بهم خورد تعادل این لایه ها میشود و در این وضع کریستال متماثل میشود که تعادل مجددی برقرار کند یک راه جهت امکان پیدایش این تعادل این است که توسط یک مقاومت خارجی مطابق شکل ۳ سطوح کریستال P و N را بهم مربوط کنند.



(شکل ۳)

اگر مقاومت R در مدار قرار گیرد الکترون موجود در محیط N از مدار و مقاومت R گذشته و بطرف محیط P رفته در آنجا با حفره تولید شده اولیه جمع میشود. باین ترتیب در اثر تابش نور مقدار زیادی الکترون مرتباً از محیط N توسط بار R به محیط P رفته در آنجا توسط حفره ها خنثی میشوند و عمل ادامه یافته. و تولید الکتروسیتمه میشود.

۲- محاسبات پیل خورشیدی

در مقدمه مشاهده گردید که اتصال P-N از دو قسمت تشکیل میشود که جنس آنها از آلیاژهای نیمه رسانا است و از طرفی میدانیم که اتصال دو نیمه رسانا هم زمان است با یکسان شدن سطح طراز فرسی (Fermi Level) در سراسر آنها دیاگرام انرژی ترکیبی مانند شکل ۴ خواهد بود.

الکترونها هنگام عبور از N بطرف P باید دیواره اختلاف پتانسیل اتصال V_0 را طی کنند انرژی مربوطه عبارتست از $\epsilon = eV_0$. حالا ملاحظه میشود که اگر طرز توزیع الکترونها ای که لازمست از این دیواره عبور کنند بشکل توزیع ماکسول باشد.

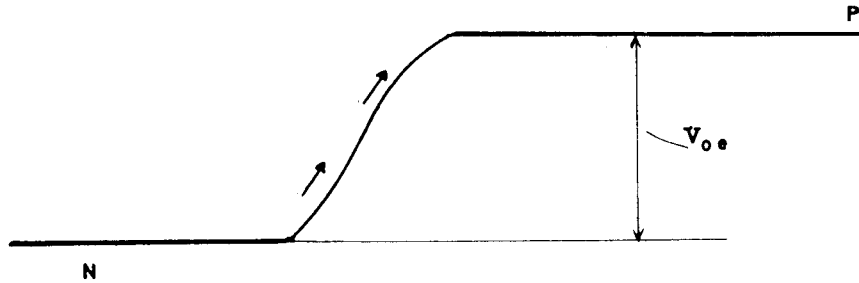
یعنی $\left(e^{-\frac{\epsilon}{KT}} \right)$ ، کسری از الکترونها که میتوانند از این دیواره عبور کنند عبارتست از

$e^{-\frac{eV_0}{KT}}$ بنابراین اگر n_n دانسیته الکترونها باشد در قسمت N جریان عبوری از نیمه رسانای N بطرف

نیمه رسانای P از عمل اتصال عبارت میشود از:

$$J_{n \rightarrow p} = C n_n e^{-\frac{eV_0}{KT}} \quad [1]$$

(C عدد ثابتی است و T درجه حرارت مطلق و K ثابت بولتزمن است) برعکس الکترونهای شبکه مسیری از P



(شکل ۴)

بطرف N دارند در مقابل دیواره ندارند و در واقع برخلاف حالت بالا که مطابق شکل ε لازم بود (سرپلائی) را طی کنند در این حال در مسیر (سرپلائی) قرار دارند پس:

$$J_{p \rightarrow n} = C n_p \quad [2]$$

n_p عبارتست از دانسیته الکترونها در قسمت یکنواخت نیمه رسانای P. توجه می نمائیم که در این تحلیل لایه تبدلات با مقایسه با مسیر متوسط الکترونی بسیار نازک فرض شده است.

در حالت تعادل مسلماً الکترون اضافی تولید نمیشود و بنابراین از معادلات (۱) و (۲):

$$J_{n \rightarrow p} = J_{p \rightarrow n} \equiv J_{eo} \quad [3]$$

و اینکه:

$$C n_n e^{-\frac{eV_0}{KT}} = C n_p$$

و یا:

$$n_p = n_n e^{-\frac{(eV_0)}{KT}} \quad [4]$$

معادله (۴) یک حالت تعادل را بین الکترونهای نیمه رسانای P و الکترونهای نیمه رسانای N مینماید همین الکترونهای n_p بر واحد حجم نیمه رسانای P بوجود آورنده پدیده فتولتائی است و به کاربرد اقلیت مشهور میباشد (Minority Carriers) حالا فرض کنیم بدلیلی اختلاف پتانسیل دیواره V_0 با اندازه V پائین آورده شود ارتفاع دیواره که الکترون باید بگذرد در این وضع $V_0 - V$ است.

معادله [۱] بفرم زیر درمیآید:

$$[۵] \quad J_{n \rightarrow p} = C_{n_0} e^{-\frac{e(V_0 - V)}{KT}}$$

و مانند قبل $J_{p \rightarrow n} = C_{p_0}$ چون ارتفاع دیواره تأثیری روی جریان معکوس ندارد. جریان خالص گذرنده از اتصال میشود:

$$[۶] \quad J_e = J_{n \rightarrow p} - J_{p \rightarrow n} = J_{e0} \left[e^{\frac{eV}{KT}} - 1 \right]$$

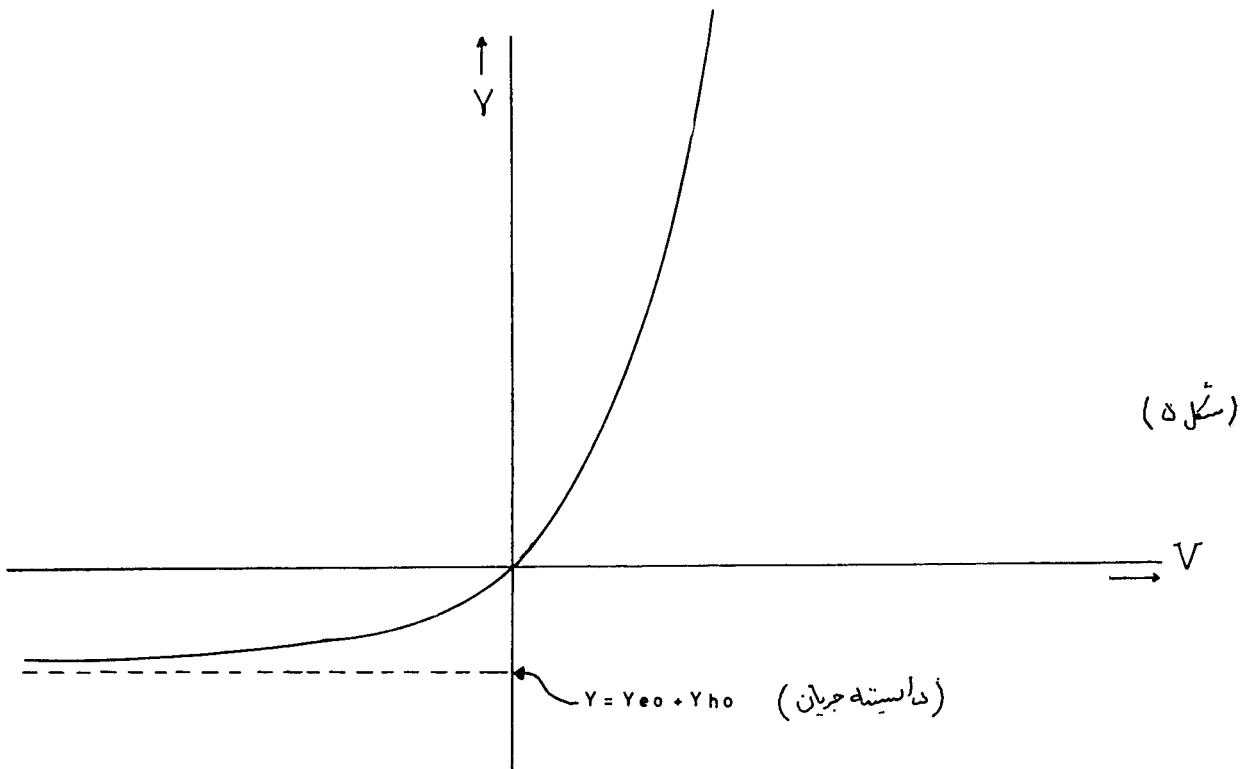
عیناً مانند آنچه در مورد اثبات رابطه [۶] بیان شد میتوان به سهولت رابطه در مورد حفره‌ها پیدا کرد جریان مربوطه میشود:

$$[۷] \quad J_h = J_{h0} \left[e^{\frac{eV}{KT}} - 1 \right]$$

J_{e0} را در معادله [۳] تعریف کردیم J_{h0} نیز متشابهاً قابل بیان است.

جریان کلی که از اتصال عبور میکند مجموع جریان الکترونها و جریان حفره‌ها است یعنی:

$$[۸] \quad J = J_e + J_h = (J_{e0} + J_{h0}) \left[e^{\frac{eV}{KT}} - 1 \right]$$

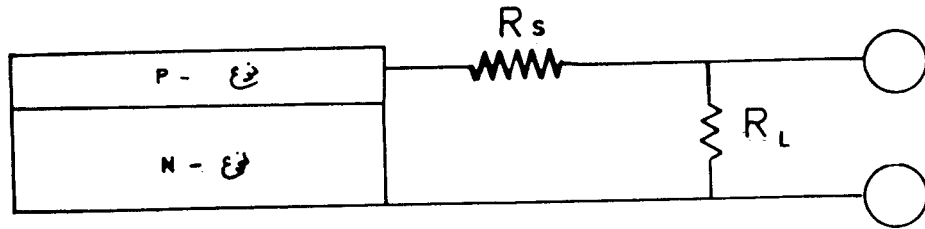


توضیح: در شکل ه بجای کلیه حروف Y بایستی حروف J خوانده شود.

از این معادله بخوبی پیداست که جریان کلی قویاً تابع ولتاژ V است - نمایش تغییرات J و V در شکل (ه) ترسیم شده است.

از این شکل بخوبی پیداست که دستگاه نظیر یک نوع یکسوکننده کار میکند.

اگر V مثبت باشد نتیجه عمل دستگاه تولید مقدار زیادی جریان J است و برعکس اگر V منفی باشد (جریان معکوس) دستگاه تولید مقدار کمی جریان میکند این پدیده در مطالعه ترانزیستورها اهمیت فراوان دارد اینک میپردازیم به توجیه ولتاژ پائین آورده شده V در همین مبحث پدیده فتوولتائی نیز توجیه میشود شکل ۶ را مورد توجه قرار میدهیم.



(شکل ۶)

در این شکل یک لایه نازک نوع P به یک لایه نوع N متصل شده و این دو لایه ساندویچ شکل بتوسط بار الکتریکی R_L بهم متصل شده اند مقاومت سری R_s نیز از جهت مقاومت لایه نازک نوع P اضافه شده است تا در مسیر جریان قرار گیرد.

حال مطابق آنچه در قسمت قبل ذکر شد فرض میکنیم در اثر برخورد اشعه نورانی به لایه ساندویچ شکل مزبور یک زوج الکترون و حفره در همسایگی محل اتصال دو نیمه رسانای P و N بوجود آید و این زوج بداخل محل اتصال نفوذ کنند (یعنی در محلی که بارهای مثبت و منفی جدا شده اند).

کاربر اقلیت که مولد جریان برق هستند آزادانه از محل اتصال عبور میکنند در این تحلیل جریان برق مورد نظر مزبور را به I_s نشان میدهیم.

حال فرض کنیم هیچگونه بار الکتریکی خارجی بین P و N نباشد چون مقدار خالص جریان در این حال صفر است بنابراین لازمست که یک اختلاف پتانسیل V در سراسر منطقه اتصال بوجود تا بتوسط آن دو جریان مساوی با علامت مختلف بطرف جلو (جریان اصلی) رانده شود. این جریان بطرف جلو درست برابر است یا جریانی که تولید میشود اگر اختلاف پتانسیل V مطابق آنچه قبلاً گفته شد در دو طرف اتصال P و N گذاشته شود معادله (۸) اگر برای جریانهایی بجای دانسیته جریان نوشته عبارتست از:

$$[9] \quad I_j = I_s = I_o \left[e^{\frac{eV}{R \cdot T}} - 1 \right]$$

که در این معادله پارامیترهای مختلف عبارتند از:

$-I_j$ - جریان اصلی مدار.

$-I_s$ - مقدار کل کاریر اقلیت در منطقه اتصال (جریان معکوس).

$-V$ - ولتاژ تولیدی در منطقه محل اتصال در جهت قداسی.

$-I_o$ - جریان سیر شده مدار در جهت معکوس (در غیاب اختلاف پتانسیل).

چون مطابق آنچه گذشت دستگاه مولد فتوولتائی بصورت یک مولد مدار باز است مقدار اختلاف

پتانسیل V در معادله (۹) عبارتست از حداکثر ولتاژ ممکن اگر معادله (۹) را جهت تعیین V حل کنیم خواهیم داشت:

$$[10] \quad V_{\max} = \frac{KT}{e} I_n \left[\frac{I_s}{I_j} + 1 \right]$$

حال اگر یک بار الکتریکی در دو طرف مدار مولد فتوولتائی قرار گیرد (مطابق شکل ۶) در مدار یک جریان الکتریکی برقرار میشود.

اختلاف پتانسیل قابل سنجش در اینحال ممکن است از V_{\max} کوچکتر باشد. زیرا در این مرحله

جریان اصلی مدار کمتر خواهد بود. جریانی که از مقاومت خارجی عبور میکند عبارتست از جریان معکوس

که هنوز برابر مقدار نظیر در حالت مدار باز است و جریان اصلی مدار که از حالت بی بار کمتر است یعنی اگر

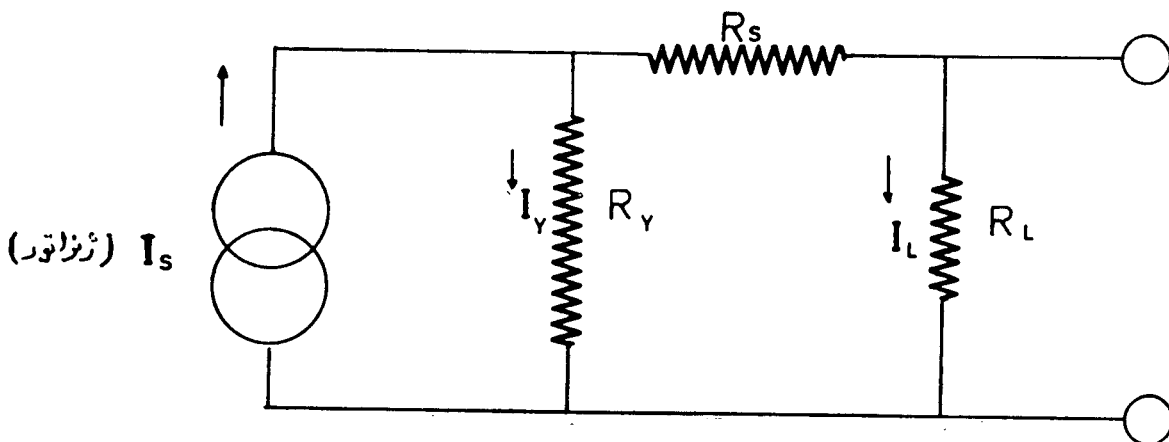
I_L جریانی باشد که از R_L عبور میکند:

$$I_L = I_s - I_j$$

و با بکار بردن معادله (۶):

$$[11] \quad I_L = I_s - I_o \left[e^{\frac{eV}{KT}} - 1 \right]$$

مدار الکتریکی شکل ۶ مطابق شکل (۷) پیش بینی میشود.



(شکل ۷)

توضیح: در شکل ۷ اندیمای Y بایستی J خوانده شود.

برای بررسی بیشتری در باره ژنراتور فتوولتائی این بحث را قدری بیشتری ادامه میدهیم و جهت سهولت محاسبات فرض میکنیم در مدار شکل (۷) مقاومت $R_s = 0$ باشد و در این حال در جستجوی وضعی برمیائیم که باطری خورشیدی حداکثر قدرت تولیدی را ایجاد میکند.

مقدمتاً ملاحظه میشود که مطابق مدار شکل شماره (۷) قدرت تولیدی حداکثر است اگر $R_L = R_J$ باشد از طرفی مقاومت اتصال لایه های مولد فتوولتائی بشکل خیلی زیادی غیر خطی است برای یک وضع کار ژنراتور R_J را میتوان بکمک معادله (۹) محاسبه گردد :

$$R_J = \frac{V_J}{I_J} = \frac{KT}{eI_0} c^{-\frac{eV}{KT}} \quad [12]$$

یعنی برای حداکثر قدرت :

$$R_L = R_J = \frac{c^{-\frac{eV_{mp}}{KT}}}{\frac{eI_0}{KT}} \quad [13]$$

در حالیکه V_{mp} عبارتست از اُفت تانسینون اتصال برای حداکثر قدرت تولیدی از آنجا شدت جریان عبوری از مدار خارجی نظیر حداکثر قدرت عبارت است از :

$$I_{mp} = \frac{V_{mp}}{R_{L,mp}} \quad [14]$$

اگر معادلات ۱۳ و ۱۴ در معادله ۱۱ گذارده شود داریم :

$$e^{\lambda V_{mp}(1 + \lambda V_{mp})} = \frac{I_s}{I_0} + 1 \quad [15]$$

که در آن :

$$\lambda = \frac{e}{KT}$$

حال بکمک معادلات (۱۱) و (۱۵) میتوان I_{mp} را حساب کرد :

$$I_{mp} = \left(\frac{\lambda V_{mp}}{1 + \lambda V_{mp}} \right) (I_s + I_0) \quad [16]$$

در پیلهای خورشیدی I_s در حدود ۱ ر. آمپر برای هرسانتیمتر مربع است در حالیکه اندازه I_0 در پیلهای خورشیدی به حدود میکروآمپر برای هرسانتیمتر مربع محدود میشود.

از طرفی عملاً در پیلهای خورشیدی $\lambda V_{mp} > 10$ میباشد بنابراین بموجب معادله (۱۶) :

$$I_{mp} \approx I_s \quad [17]$$

از طرف دیگر اگر معادله (۱۰) را بفرم زیر بنویسیم :

$$\frac{I_s}{I_0} + 1 = e^{\frac{eV_{max}}{KT}} = e^{\lambda V_{max}}$$

و آنرا با معادله (۱۰) مقایسه کنیم با توجه باینکه عملاً در پیل‌های خورشیدی $\lambda V_{mp} > 10$ میباشد با تقریب کافی نتیجه میشود که فرق زیادی بین V_{max} و V_{mp} نمیتواند وجود داشته باشد.

از مقایسه این نتیجه و معادله (۱۷) این مطلب مهم عاید میشود که بعلت مشخصه اصلی پیل فتوولتائی فرق زیادی بین پارامترهای نشان دهنده حداکثر قدرت (V_{mp} و I_{mp}) و حداکثر پارامترهای مزبور (V_{max} و I_{max}) وجود ندارد.

و این برای پیل خورشیدی بعنوان یک منبع تولید مستقیم انرژی یک مزیت بسیار زیادی است. اگر دو طرف رابطه (۱۶) را در V_{mp} ضرب کنیم حداکثر قدرت تولیدی پیل خورشیدی بدست

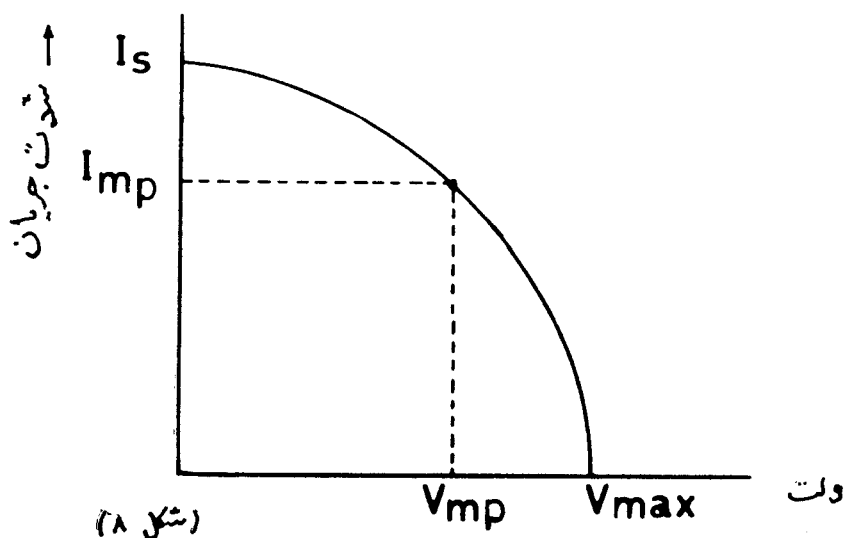
می آید :

$$[18] \quad P_{max} = \left(\frac{\lambda V_{mp}}{1 + \lambda V_{mp}} \right) \left(\frac{I_0}{I_s} + 1 \right) I_s V_{mp}$$

از آنچه قبلاً گفته شد مشاهده میشود که حاصلضرب پرانتزهای طرف راست معادله نزدیک بواحد است و حاصلضرب I_s در V_{mp} مقدار حداکثر قدرت تولیدی پیل خورشیدی را نشان میدهد.

نمایش تغییرات شدت جریان و اختلاف پتانسیل برای یک پیل خورشیدی مطابق شکل (۸)

است.



۳- موارد کاربرد پیل خورشیدی

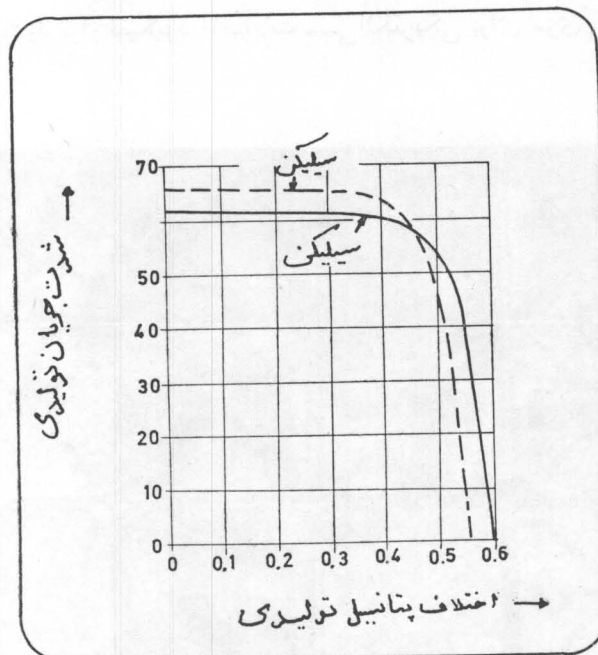
مولد پیل خورشیدی یکی از مبدل‌های مهم تبدیل مستقیم انرژی است ساختمان آن نسبتاً آسان است

است و معروف است که اگر سطح ایالت آریزونا آمریکا بوسیله سطوح این مبدلها پوشیده شود قدرت تولید شده باندازه است که میتواند جوابگوی مصرف آمریکا باشد. در کشور ما با وجود آفتاب فراوانی که وجود دارد بعزت منابع سرشار خدا داد نفت و گازهای طبیعی این نوع وسائل تولید انرژی فعلاً مقرون بصرفه نیست ولی همواره باید در نظر داشت که اشعه آفتاب تنها منبع انرژی است که تمام شدنی نیست بنابراین همین ایده است که پیل خورشیدی بعنوان منبع تولید انرژی در آینده اهمیت زیادی دارد در کارهای فضائی پیل خورشیدی منبع مهم تولید قدرت است و در زمره وسائلی است که فضانوردان در سطح ماه قرار داده اند و وسیله و محرك اصلی لونا خود کشور شوروی پیلهای آفتابی است.

در سالهای اول برنامه های فضائی (۶۰-۱۹۵۷) پیلهای طرح شده در حدود یک کیلو وات تولید قدرت مینمودند در سال ۱۹۶۵ ناسا برای مصرف پروژه آپولو طرح یک پیل خورشیدی ۵ کیلوواتی را پیشنهاد نموده بعداً برای مسافرت های بین کرات پیلی مورد بررسی قرار گرفت که تا ۵ کیلو وات قدرت داشت و وزن آن برای تولید هر کیلووات به ۵ پوند محدود میشود در طرح های جدید توانسته از هر فوت مربع تا ۱ وات قدرت استخراج نمایند.

در چند کلیشه که خاتماً ضمیمه میشود مشخصات عملی پیل خورشیدی بیان میگردد.

در شکل ۹ تغییرات شدت جریان و اختلاف پتانسیل برای پیلهای N روی P و پیلهای P روی N نشان داده شده اختلاف بین منحنیهای نمایش تغییرات جالب توجه میباشد (شکل ۹).



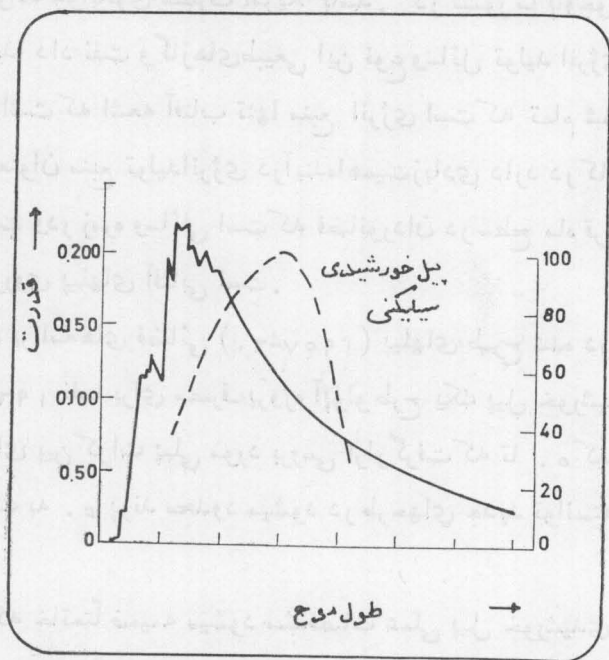
(شکل ۹)

در ساختمان پیلهای اول از نفوذ فسفر در سیلیکن (تیپ - P) استفاده شده.

شکل شماره ۱۰ نشان میدهد که چگونه یک قطعه ساندویچ شکل پیل خورشیدی نمیتواند تمامی

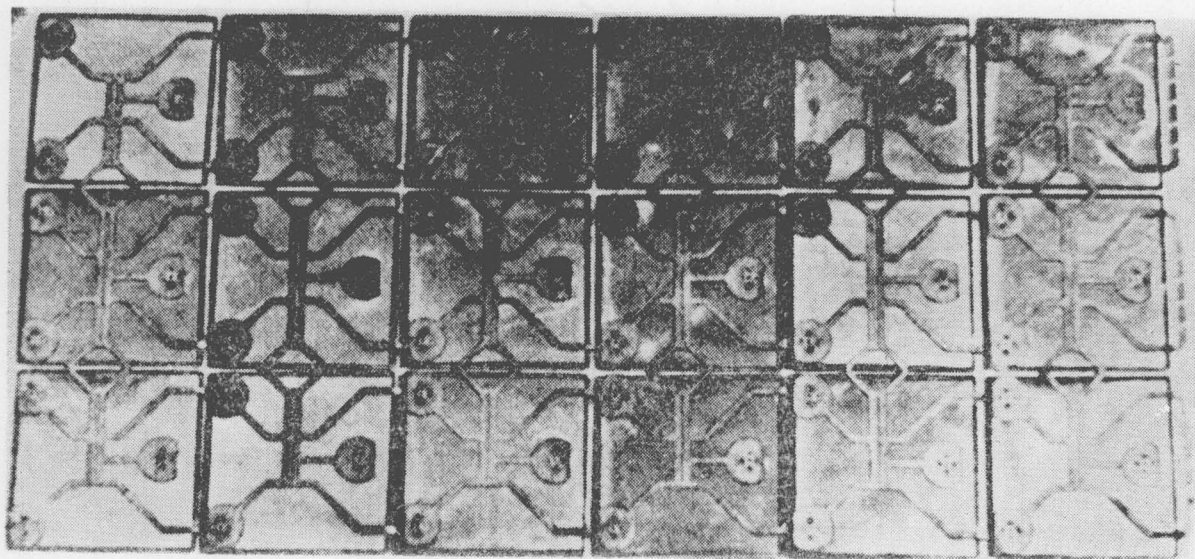
انرژی طیف خورشید را جذب کند روی محور عمودی قدرت جذب شده تشعشعی و روی محور افقی طول موج

نور برده شده است. اگر تماسی انرژی تشعشعی جذب شود بهره پیل بالا خواهد رفت.



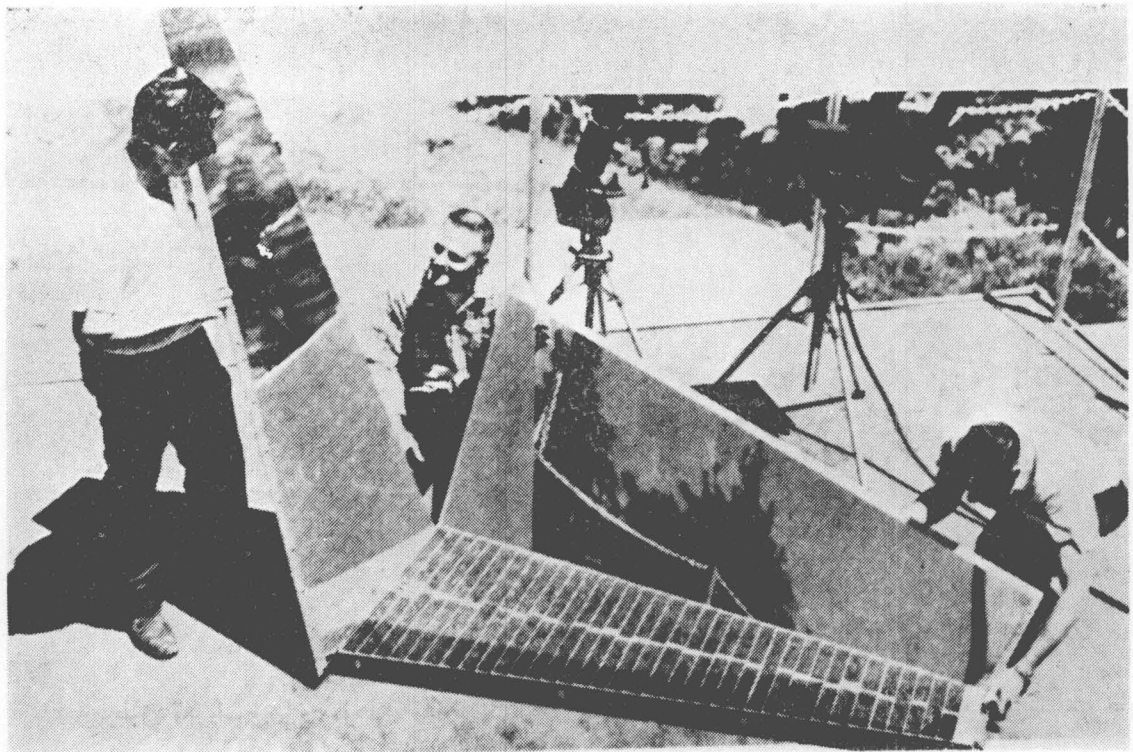
(شکل ۱۰)

شکل شماره ۱۱ ساختمان قسمت پشت عناصر تشکیل دهنده پیل خورشیدی را نشان میدهد. این قسمت مقابل اشعه خورشید قرار نمیگیرد اتصالات مسی الکتریکی برای سری کردن عناصر پیل در شکل پیداست.



(شکل ۱۱)

شکل ۱۲ یک صفحه از پیل های خورشیدی را نشان میدهد از آینه های منعکس کننده جهت بالا بردن قدرت پیل قبلاً استفاده میشد که اکنون بعللی متوقف شده است.



(شکل ۱۲)

در شماره بعد راجع به مبدل ترمیائیک بحث خواهد شد.

از منابع زیر در تهیه این مقاله استفاده شده

- 1) J.J. Loferski' Theoretical Consideration Governing The Choice of The Optimum Semiconductor For Photovoltaic Solar Energy Conversion. Jour. of Appl. Phys. 27 (1965) 777—784.
- 2) P. Rappaport , The Electron Voltaic Effect In P—N Junctions Induced By Beta Particles Bombardmbnt Phys. Rew. V1 a3. January 1954 , D. 246.
- 3) J. Mandelkorn, Improved Non P Silicon Solar Cells , Papero Presented At 19 Th Annual Power Sources Conference. Atlantic City , N. y. 1965.
- 4) Mechanical Engineering Vol. 88. No 10 Oct. 1966.