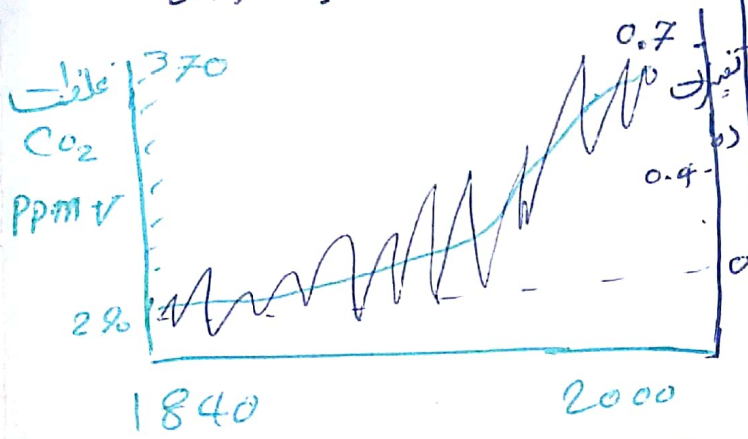


Greenhouse effects

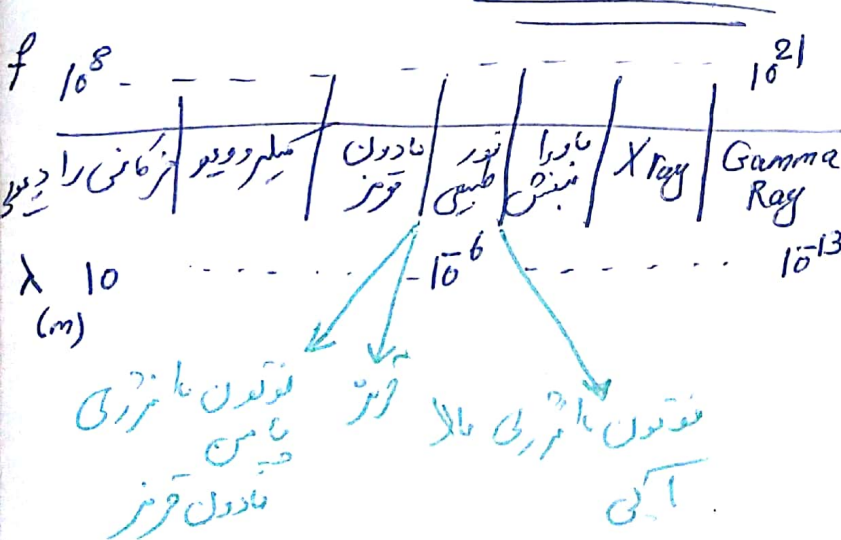


ارتباط بین افزایش CO_2 و دما و تناسب آن

بنابر این حرکت به سمت اثری قدرتی قوی در دما است.

تغییرات دما بین 1 الی 4 درجه سانتی گراد می باشد که این تغییرات موجب ایجاد طوفان و باران می شود و همچنین ایجاد خشکسالی ها و افزایش آب و قیاسها

خواص نور خورشید



سلول خورشیدی - نانوتقارها

مراجع : ① pveducation.org
pvlighthouse.com

② Nano Structured Materials for Solar Energy Conversion

By: Tetsuo Soga : 2010

③ HandBook of Photovoltaic Science and Engineering

Antonio Luque

④ Some paper

ارزگویی
1- چقدر انرژی خورشید در زمین

انواع تقارها یا چینی

⑤ سبب یک تقار

⑥ انرژی تقار

تعداد فوتون

تعداد فوتونی که بر واحد زمان و واحد سطح می‌تابد

$$\Phi = \frac{\text{تعداد فوتون}}{s \cdot m^2}$$

$$H \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad \text{گنجای توان}$$

تعداد فوتون $\times$ انرژی هر کد

$$H \left(\frac{W}{m^2} \right) = \Phi \times \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \quad \mu m: \lambda$$

$$H \left(\frac{W}{m^2} \right) = \Phi \times q E(eV) \quad eV: E$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= 3 \times 10^{21} m^{-2} s^{-1} \\ E &= 2 eV \end{aligned} \right\} \begin{aligned} H &= 961.2 \\ W &= m^2 \end{aligned}$$

Irradiance spectral

طیف تابشی $F(\lambda)$ درختندی

تعداد گنجای توان را در یک طول موج خاص می‌دهد

$$\frac{W}{\mu m \times m^2} \quad \text{واحد}$$

بعبارتی $W m^{-2}$ بر یک $\lambda(\mu m)$ خاص

m^{-2} مربوط به سطحی است که نور بر آن تابد

$$F_{(\lambda)} = \Phi E \frac{1}{\Delta \lambda} \quad \text{در واحد SI}$$

$$F_{(\lambda)} = \Phi \times \frac{1.24}{\lambda(\mu m)} \times \frac{1}{\Delta \lambda(\mu m)}$$

2) S.C

دلیل

محدودیت جهت برخورد نور با PV

① طیف نور خورشیدی Incident light

② گنجای توان تابشی خورشید

③ زاویه تابش

④ تعداد انرژی تابشی در یک سال یا در هر روز

رابطه مورد نیاز برای به دست آوردن

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 m/s}{\lambda}$$

$$E = h \nu \rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$hc = \nu \cdot m$$

هنگام استفاده از یک ذره به الکترون - فوتون برخورد می‌دهد و غیره بجای دادن

eV استفاده می‌شود

$$1 eV = 1.602 \times 10^{-19} J$$

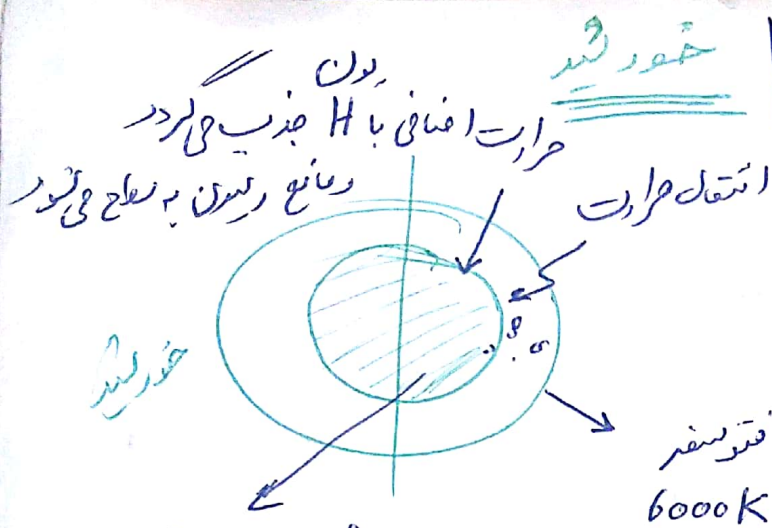
$$hc = (1.99 \times 10^{-25} J \cdot m) \times \frac{1 eV}{1.602 \times 10^{-19} J}$$

$$hc = 1.24 \times 10^{-6} eV \cdot m$$

$$hc = 1.24 eV \cdot \mu m$$

$$E = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)}$$

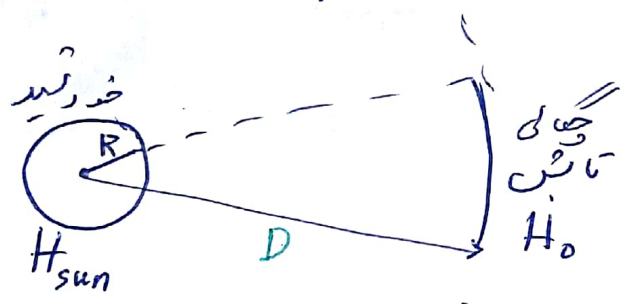
$$\lambda = 0.85 \Rightarrow \text{انرژی فوتون} \quad E = \begin{cases} 1.458 eV \\ 2.34 \times 10^{-16} J \end{cases}$$



درینجا دماقت هسته
 H را به H_e تبدیل می کنه
 هیدروژن

نقد رتابش خورشید (چگالی توان) بر سطح

$$H = 9.5 \times 10^{25} \text{ W}$$



$$H_0 = \frac{R_{sun}^2}{D^2} H_{sun} \rightarrow \frac{W}{m^2}$$

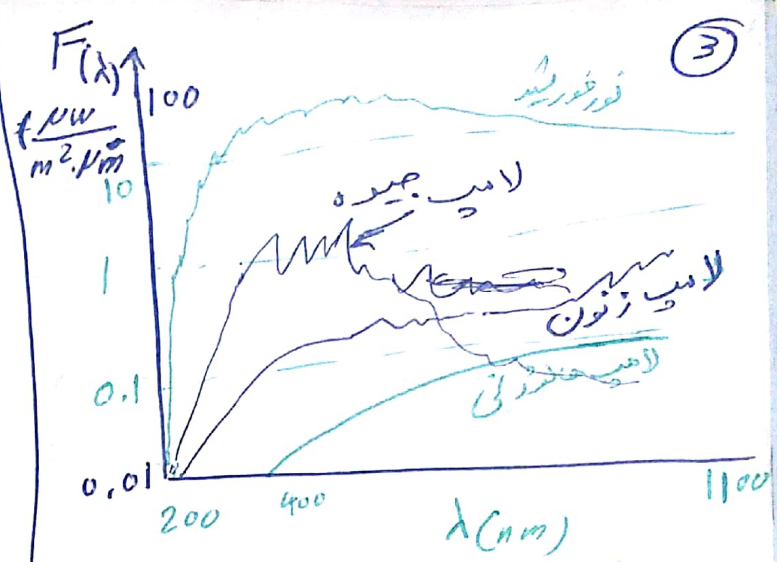
به عبارتی $4\pi R^2$ و $4\pi D^2$ به نسبت

تقسیم می شود
 H_{sun} نقد رتابش خورشید
 از معادله تابش هم می آید که است

$$H_0 = 47.82 \frac{W}{m^2} \leftarrow D = 778 \times 10^9 \text{ m}$$

مقدار تابش خورشید به زمین $1366.1 \frac{W}{m^2}$
 وینکون 1.51

فاصله تا زمین $150 \times 10^9 \text{ m}$



راه دیگری به چگالی توان تابشی

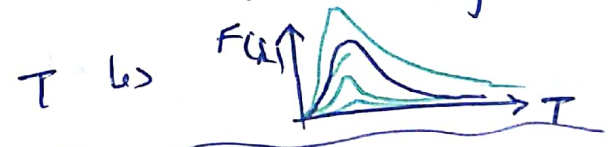
$$H = \int_0^\infty F(\lambda) d\lambda = \sum_i F(\lambda_i) \Delta \lambda$$



تابش هم می آید

نسبت بر این هر تابش از هر جایی

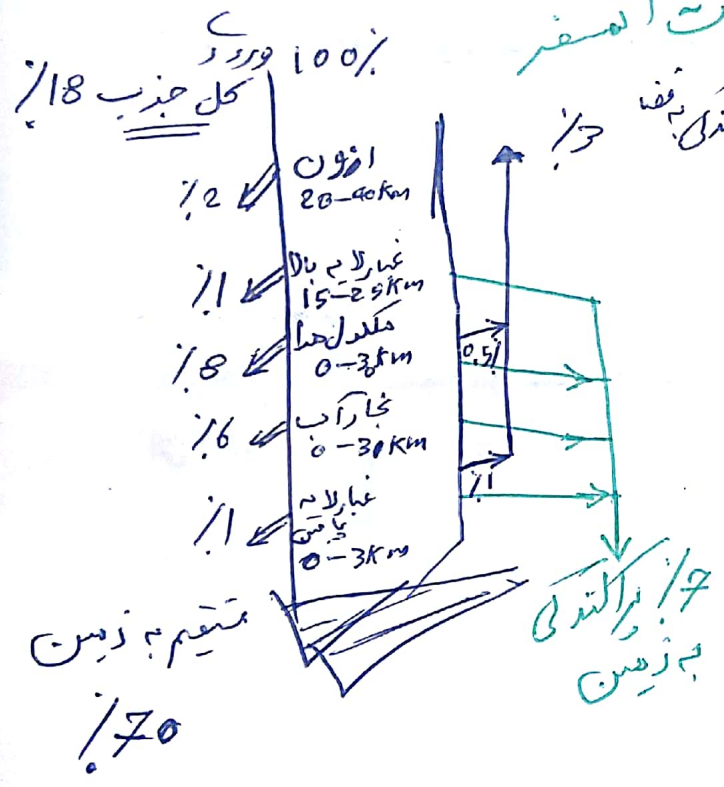
$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}$$



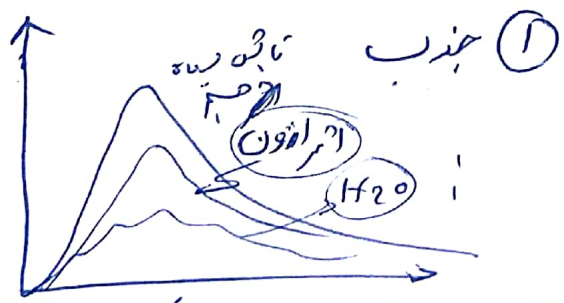
تأثیر بر سطح زمین عوامل اثر گذار بر جذب

- 1 اثرات اتمسفر (جذب و پراکندگی)
- 2 اثرات تغییر بر اتمسفر (بخار آب - ابر و ...)
- 3 جهت قرار گیر
- 4 فصل سال و ساعت روز

اثرات اتمسفر



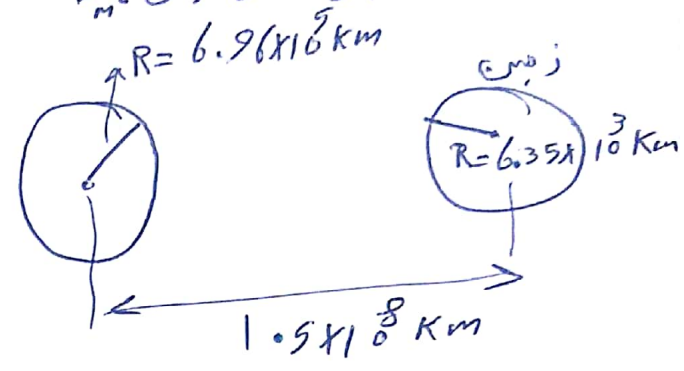
به دلتا اثر



- 2 طول موج کوتاهتر از (فرکانس بیشتر) به نسبت 4-1 پراکندگی بیشتر به نسبت به طول موج قرمز دارد (در بر خورد با ذرات) که همان اثر پراکندگی بر روی لنته می

(4) حال $H_{sun} = 5.961 \times 10^7 \frac{W}{m^2}$

گچفل توان تابشی در سطح غور کشید
و گچفل توان تابشی در سطح زمین $1.36 \frac{KW}{m^2}$



با توجه به عرض زمین به صورت بیضی
مقدار H_0 ثابت نخواهد بود و متناسب
با تعداد روزها تغییر خواهد کرد.

$$\frac{H}{H_{Constant}} = 1 + \frac{0.033}{4} \cos\left(\frac{360(n-2)}{365}\right)$$

$H \rightarrow \frac{W}{m^2}$
 $H_{Constant} = 1.36 \frac{KW}{m^2}$
 n تعداد روزها سال

$n=365 \rightarrow H = 1397.6 \frac{W}{m^2}$
 $n=1 \rightarrow H = 1397.6 \frac{W}{m^2}$
 $n=100 \rightarrow H = 1347.8 \frac{W}{m^2}$

استاندارد هفت خورشیدی تابش خورشیدی

AM 1.5G → Global
تابش مستقیم
که شامل حد در تابش نفوذی

AM 1.5D → تابش مستقیم می باشد
Direct

AM 1.5D می تواند 28/ لستر از AM 0 باشد
(18/ جذب و 10/ نفاذندگی)

AM 1.5G به مقدار 10/ بزرگتر از AM 1.5D است
می رسد به مقدار $70 \frac{W}{m^2}$ برابر با AM 1.5G دارد
- معمولاً به $1 \frac{KW}{m^2}$ توانایی تولید

می رسد به چگالی بر حسب AM

$$I_D = 1.353 \times 0.7^{AM^{0.678}}$$

$(\frac{KW}{m^2}) I_D$ چگالی انرژی خورشیدی موج عمود

0.7 ← 70/ از قدر زمین می رسد

0.678 به صورت تجربی

$$I_G = 1.1 I_D$$

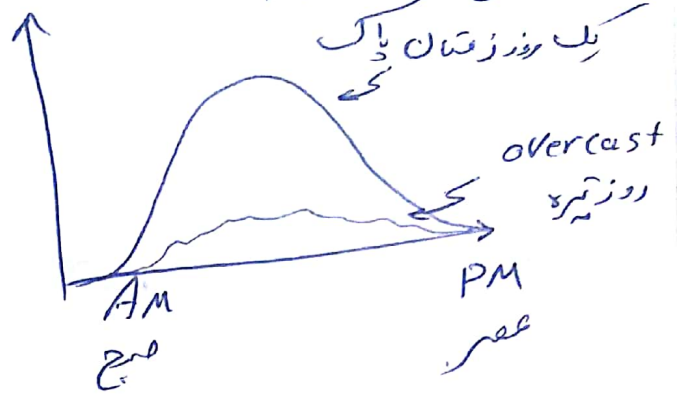
در سطح دریا

$$I_D = 1.353 (1 - (ah) 0.7^{AM^{0.678}} + ah)$$

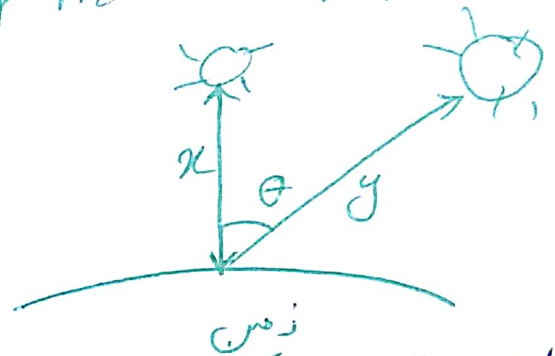
0.14 = a

h ارتفاع از سطح دریا

S.C (5) اثر ابر و دگر تغییرها



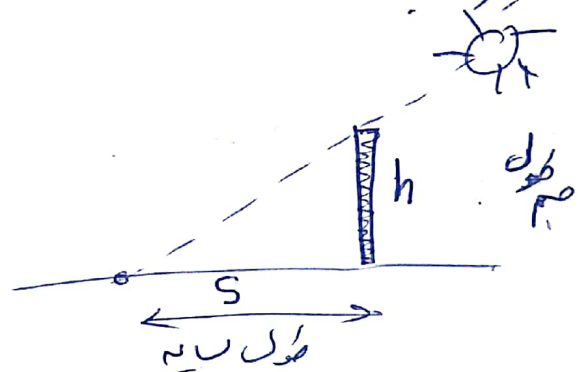
Air mass A.M



$$AM = \frac{1}{\cos \theta}$$

$\theta = 30 \rightarrow 1.054$
 $\theta = 10 \rightarrow 1.0154$

راه دگر می رسد



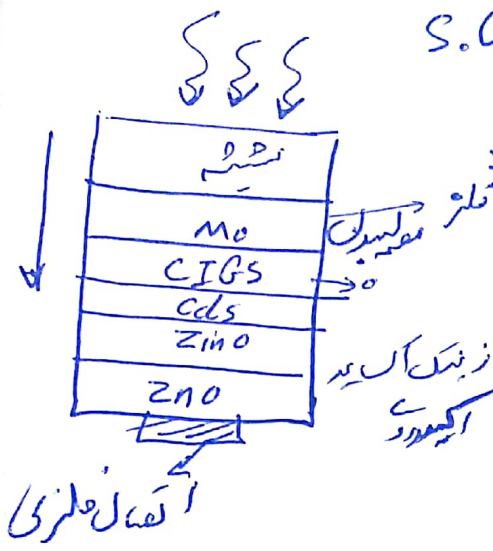
$$AM = \sqrt{1 + (\frac{s}{h})^2}$$

این را به روشی که زمین تخت باشد
را به دقت به صورت زیر است

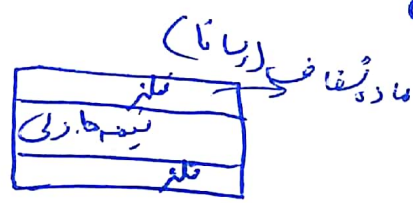
$$AM = \frac{1}{\cos \theta + 0.50562 (96.07995 - \theta)^{-1.6364}}$$

فصل کلی س.ا.

سیلا CIGS



ساده ترین شکل



$Si \rightarrow E_g = 1.1 eV$

$GaAs \ E_g = 1.45 eV$

$CdTe \ E_g \approx 1.4 eV$

$CIGS \ E_g \approx$

p+table.com

خواص مواد (تولید)

جدول تناوبی

		III					IV		V		VI		VII		VIII	
		B					C		N		O		F		Ne	
		Al					Si		P		S		Cl		Ar	
		Ga					Ge		As		Se		Br		Kr	
		In					Sn		Sb		Te		I		Xe	
		Tl					Pb		Bi		Po		At		Rn	

سیلا CIGS

G-Si
poly-Si
mg-Si

سیلکونی

Thin Film
GaAs
CdTe
CIGS

حسب به رنگ

بلیمبر
کریستال

تفاوت دارند

نکته S.C

مویب	نمونه	نکته
گرم کردن وابسته به ضخامت زیاد تجربه 14/18	راندن تجربه 14/18	نکته 1 Si آب و قند چند بلور
تجهیزات پیچیده محطات زمینی وابسته به زاویه تابش گرم کردن	راندن بالا 14/15	نکته 2 بلورهای GaAs CdTe CIGS
بازده پایین نترل زیاد و انرژی عمر زیاد	بازده بالا بازده بالا بازده بالا بازده بالا	نکته 3 بلورهای بلورهای بلورهای بلورهای

لایه جاذب
مختبرین بخش
آب لایه

(7)
طراحی شده در نظر
ساخته شود لایه نازک
TFSC

Cadmium
~~Copper~~
Cadmium Telluride CdTe
Copper Indium Disulphide CIGS
Cadmium Gallium
Copper Se₂
GaAs

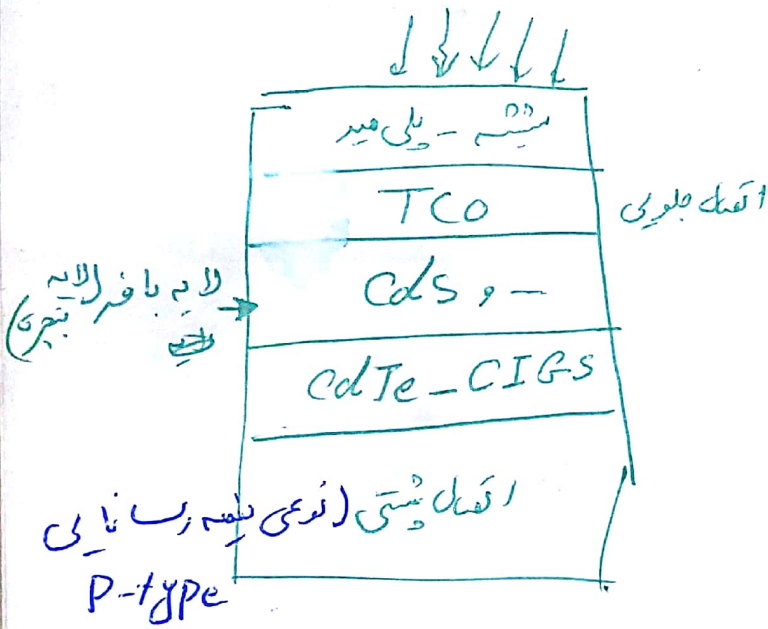
بسیار آبی
در لایه و نیل
آب لایه
آب لایه

Substrate	هسته
TCO	لایه شفاف
Window layer	لایه جذب
Absorber Layer	لایه جذب
Metal contact	لایه جذب

در لایه نازک لایه یا آب لایه

یک فیلم

در لایه نازک لایه کم اثر
* مکانیکال ثابت
* ضربه ای در لایه
* انبساطی
* در لایه نازک لایه
* در لایه



CdTe $\rightarrow E_g = 1.5 \text{ (eV)}$
سی-ذرات
میکرومتر $\rightarrow$ طول موج کوتاه
کم هزینه
CIGS $\Rightarrow E_g = (1 \sim 1.6 \text{ eV})$
با تغییر Ga

TCO: ⑤
⑤ نیمه رسانا که هم کارز بارش نایی
خوب و شفاف
① تعاقبت بالا
① رانندگی
③ گاف نازک نزدیک به لایه جذب

F فلورین
SnO₂:FTO
SnO₂ آلیاژ قلع
ITO آلیاژ تانتالیم

لایه جذب
گفت تامل یک اتصال
بالای جذب

گفتی می باشد

$$g_c(E) = \frac{\sqrt{2} m_n^{*3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E - E_c} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$$

$$g_v(E) = \frac{\sqrt{2} m_p^{*3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E_v - E}$$

اقبال افعال

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

از قبل می دانیم

$$n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

$$p_0 = N_v e^{-\frac{(E_v - E_F)/kT}{kT}}$$

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

ولت طغنی بودن مار

$$n_0 p_0 = n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

در کیه دانی

$$n_0 = p_0 = n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g/2}{kT}}$$

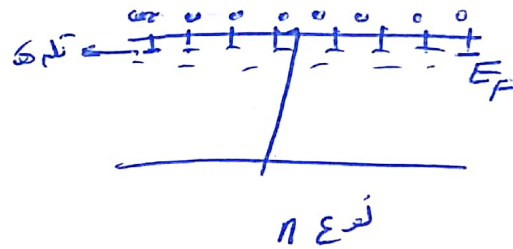
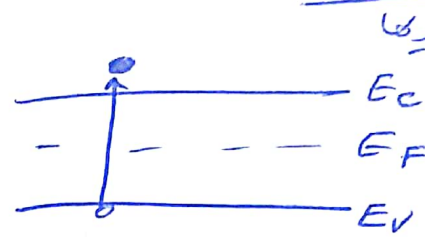
خرداتی

$$E_i = E_F$$

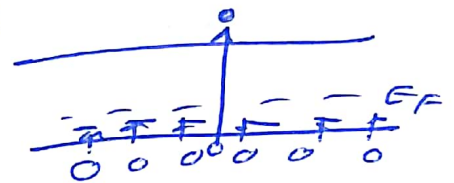
$$E_F = E_i = \frac{E_v + E_c}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$$

8) ~~بسیار مهم است~~

~~تفاوت بین اقل و بیش~~
 فنرنگ یا نه (مردار رنرنگ اقل و بیش)



p-type

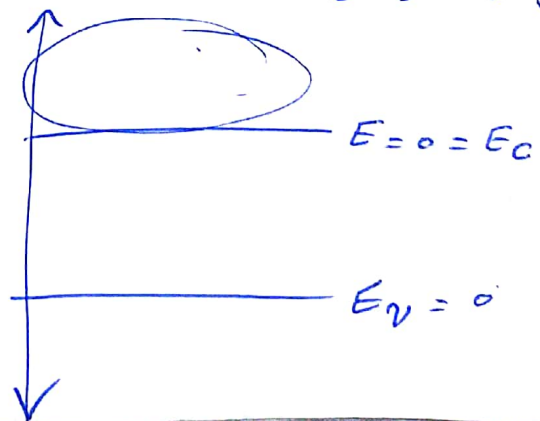


E_g انتفاهی بسیار مهم است

گفت می باشد اقل و بیش اقل و بیش کردی اند

مثلا برای نوع n

$$n = \int_{E=0}^{E_{top}} \left(\text{اقبال افعال} \right) \left(\text{گفتی می باشد} \right) dE$$



س.ع 9 در نیمه هادی غیر ذاتی

ن-type

$$n = N_D, \quad p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$E_c - E_F = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

p-type →

$$p = N_A, \quad n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$E_F - E_v = kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

Carrier Transport in Semiconductor

در جهت میدان الکتریکی

$$m_n v_n = -q E \tau_c \rightarrow v_n = -\frac{q \tau_c}{m_n} E = -\mu_n E$$

$$v_n = -\mu_n E$$

$$v_p = \mu_p E$$

جریان Drift (فشرده)

$$J_n = \frac{I_n}{A} = -n q v_n = n q \mu_n E$$

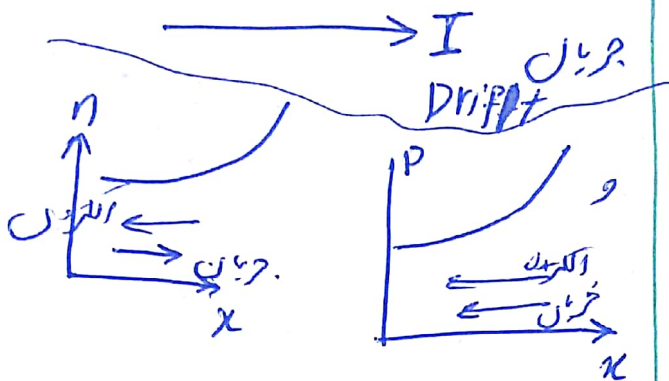
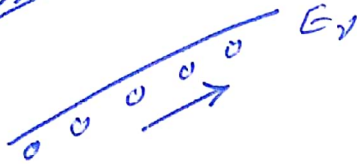
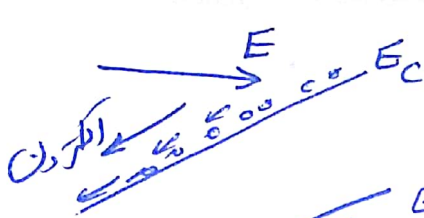
$$J_p = p q \mu_p E$$

$$J = J_n + J_p = (n q \mu_n + p q \mu_p) E = \sigma E$$

پخش Diffusion

$$F = -D_n \frac{dn}{dx}$$

فشار پخش



$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx}$$

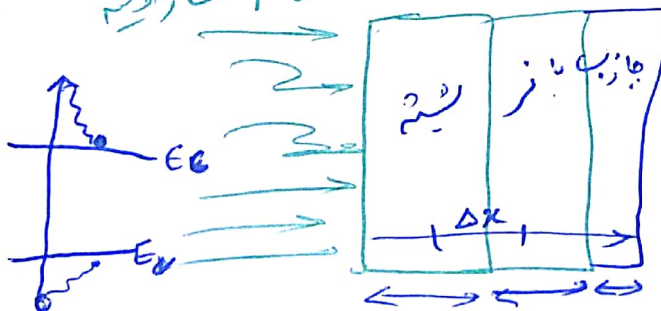
$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

$$\begin{cases} J_n = n q \mu_n E + q D_n \frac{dn}{dx} \\ J_p = p q \mu_p E - q D_p \frac{dp}{dx} \end{cases}$$

$$\frac{kT}{q} = \frac{D}{\mu}$$

Optical Absorption and Recombination

فشار تابش Fo



$$F(x + \Delta x) - F(x) = -\alpha F_0 \Delta x$$

در باز ترکیب سطحی با Low-Injection

$$V_s = S(P_s - P_{n0})$$

$\downarrow$
 سرعت باز ترکیب سطحی ترمیم در سطح

با افزایش نور، باز ترکیب سطحی را افزایش می‌دهیم

$$q D_n \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x=0} = q U_s - q S(P_s - P_{n0})$$

ماده پیوستگی

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} A dx = \left[\frac{J_n(x) A}{-q} - \frac{J_n(x+dx) A}{-q} \right] + (G_n - R_n) A dx$$

$$\begin{cases} \frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + (G_n - R_n) \\ \frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + (G_p - R_p) \end{cases}$$

با یکدیگر

$$\textcircled{1} \frac{\partial n_p}{\partial t} = n_p \mu_n \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n E \frac{\partial n_p}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

$$\textcircled{2} \frac{\partial p_n}{\partial t} = -p_n \mu_p \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

$$\frac{dF}{dx} = -\alpha F(x)$$

$$F(0) = (1-R) F_0$$

اگر R

$$F(x) = (1-R) F_0 e^{-\alpha x}$$

انگاز منفی

$$\alpha \approx A^* (h\nu - E_g)^2$$

و س را باند مستقیم

$$\frac{A^{**} (h\nu - E_g + E_p)^2}{e^{\frac{E_p}{kT}} - 1} + \frac{A^{**} (h\nu - E_g - E_p)^2}{1 - e^{-\frac{E_p}{kT}}}$$

در غیر مستقیم

E_p انرژی فوتون که قابل چشم پوشی است

Recombination

Low Injection



$$u = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

$$u = \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

$$\tau_p = \frac{1}{\beta n_{p0}} = \frac{1}{v_{th} \alpha_p N_t}$$

$$\tau_n = \frac{1}{\beta p_{p0}}$$

در باز ترکیب اوره

$$U = A p^2 n$$

$$U = A n^2 p$$

electron-electron-hole

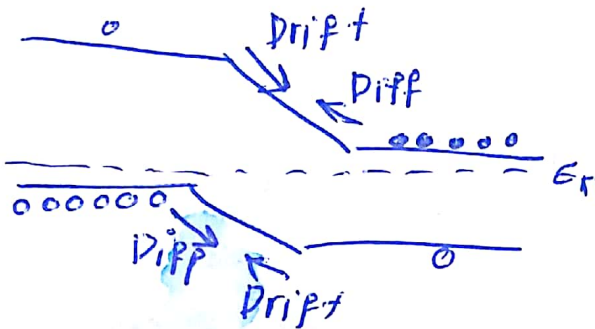
hole-hole-electron

لیکچر pn



روابط اساسی

$$V_b = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$



$$E = -\frac{q N_D (x - x_n)}{\epsilon}$$

$$E = -\frac{q N_A (x + x_p)}{\epsilon}$$

$$E_m = \frac{q N_D x_n}{\epsilon} = \frac{q N_A x_p}{\epsilon}$$

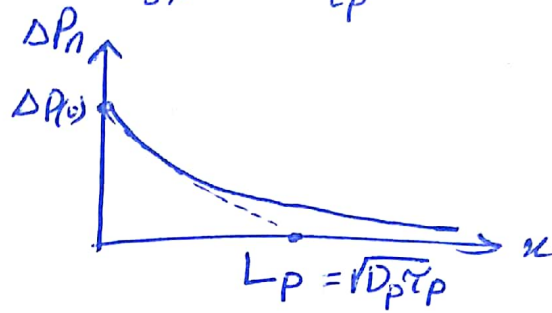
$$V_b = - \int_{x_p}^{x_n} E dx = \frac{1}{2} E_m W$$

$$W = \sqrt{\frac{2 \epsilon}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} V_b}$$

سوال: در صورت پایداری و در حالت پایدار

خواهیم داشت

$$D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0$$

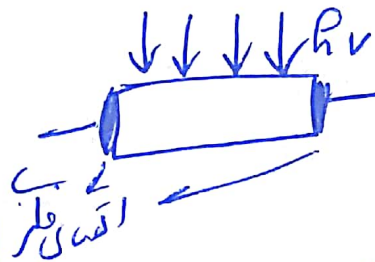


$$\Delta p_n(x) = \Delta p_n(0) e^{-x/L_p}$$

photoconductive effects

$$\sigma_{ph} = (n + \Delta n) q \mu_n + (p + \Delta p) q \mu_p$$

$$= \sigma + \Delta \sigma$$



وکتور پهنای و پهنای

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0 \Rightarrow \Delta n = G \tau_n$$

$$\frac{\Delta p}{\partial t} = G - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0 \Rightarrow \Delta p = G \tau_p$$

$$\Delta \sigma = q G (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p)$$

Photoconductive gain

$$g = \frac{\tau_n}{t_n} + \frac{\tau_p}{t_p}$$

مدت زمان ندرین حاد

مشخصات جریان - ولتاژ ایدئال
در حالت کلی

گفت درک ابتدا رو باید کامل در بایاس مستقیم و معکوس

$$n_{n0} = n_{p0} e^{\frac{qV_b}{kT}}$$

بدون بایاس
یا بیار مرارتی

$$n_n = n_{p0} e^{\frac{q(V_b - V_F)}{kT}}$$

V_F با

در ترمینال مثبت

$$n_p = n_{p0} e^{\frac{qV_F}{kT}}$$

مقدار بستگی

$$D_p \frac{d^2 P_n}{dx^2} - \frac{P_n - P_{n0}}{\tau_p} = 0$$

$$P_n - P_{n0} = P_{n0} \left(e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{-x - x_n}{L_p}}$$

$$J_p = -qD_p \left. \frac{dP_n}{dx} \right|_{x=x_n} = \frac{qD_p P_{n0}}{L_p} \left(e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1 \right)$$

$x = x_n$
 $x = -x_p$ و

$$J_n = qD_n \left. \frac{dP_p}{dx} \right|_{x=-x_p} = \frac{qD_n P_{p0}}{L_n} \left(e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1 \right)$$

حال

$$J = J_n + J_p = J_0 \left(e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1 \right)$$

$$J_0 = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A}$$

در بایاس معکوس

$$J = J_0 \left(e^{-\frac{qV_R}{kT}} - 1 \right)$$

اثرات تولید و بازترکیب در S.C

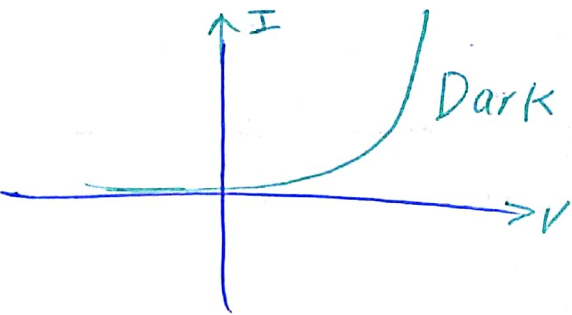
در ناحیه تخلیه رخ می دهد

$$J_{rec} \propto e^{\frac{qV_F}{2kT}}$$

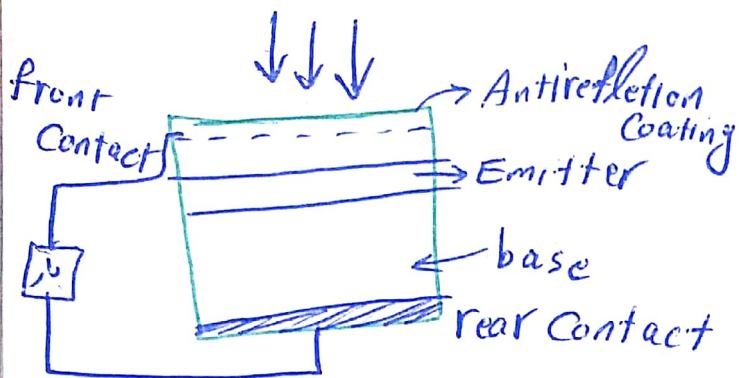
$$J = J_0 \left(e^{\frac{qV_F}{kT}} - 1 \right)$$

فاکتور ایدئال

$n=1$ اگر جریان نفوذ غالب باشد
 $n=2$ اگر بازترکیب غالب باشد



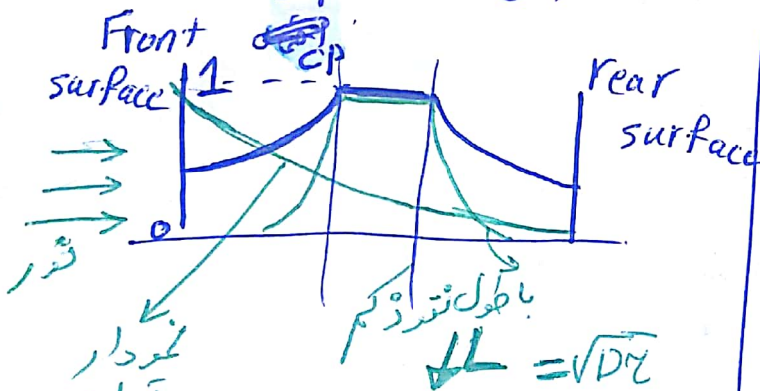
ساختار سلول خورشیدی



Collection Probability (CP)

احتمال تولید حامل توسط نور جذب شده در یک

ناحیه مشخص
با افزایش طول نفوذ کم می شود



$$G(x) = \frac{1}{\beta n} = \frac{1}{\frac{q D n}{L_p p} t}$$

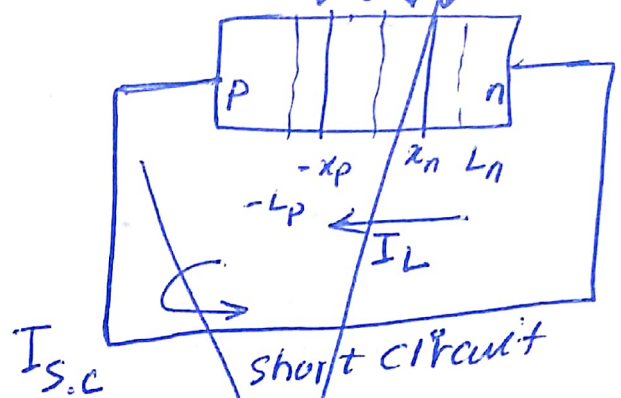
$$J_L = q \int_0^w G(x) C P(x) dx$$

$$= q \int_0^w \left[\int_0^x \alpha(\lambda) H_0 e^{-\alpha(\lambda) x} d\lambda \right] C P(x) dx$$

تحلیل راجعه
H₀ توان فوتونی در هر طول موج
α ضریب جذب
CP که احتمال گزیده شدن حامل

S.C (13)

خفاص فوتوولتائیک



$$V_b = 0 \Rightarrow I_{sc} = P_{ct}$$

روابط در انت

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) - I_{sc}$$

$$I_L = I_{sc}$$

در اتصال باز

$$I = 0$$

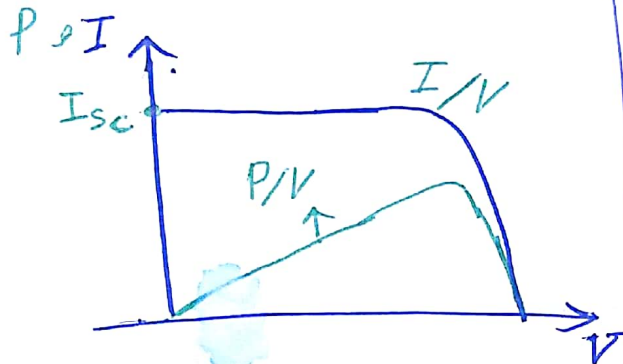
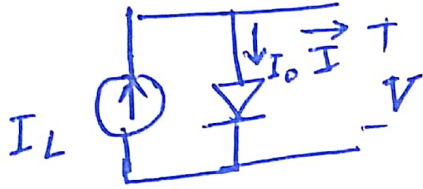
$$\Rightarrow V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)$$

تعداد، I/V

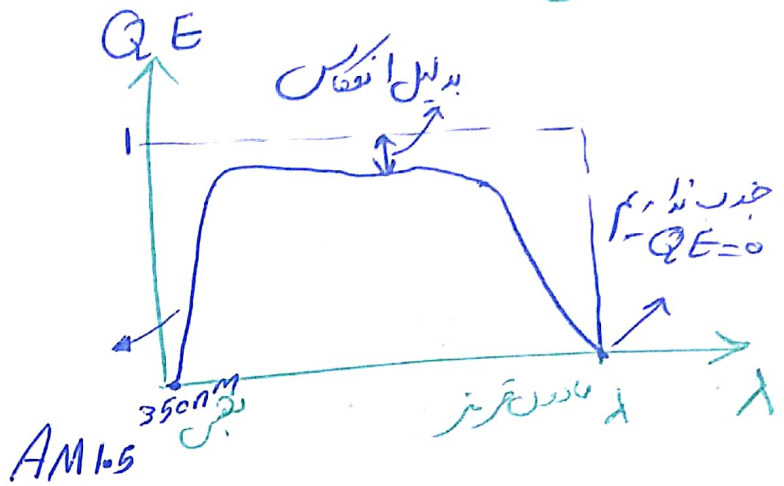
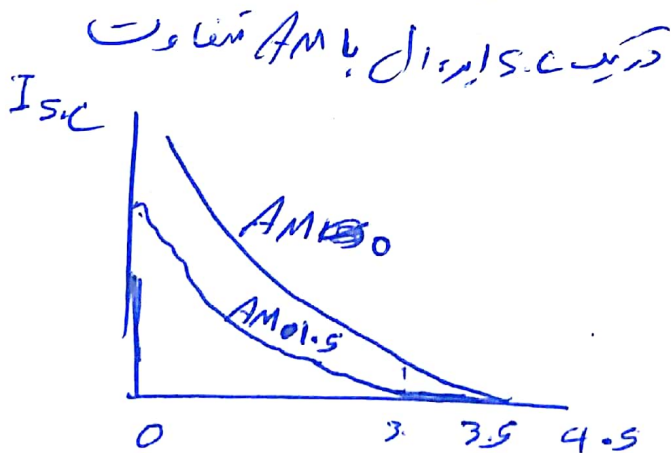
Quantum efficiency QE s.c (14)

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L$$

که تولد نور ایجاد می شود



سطح س.ع که تحت رشح J_{sc} $\frac{mA}{cm^2}$ -
 تعداد فوتون (توان نور ورودی)
 - سطح نور ورودی $AM_{1.5}$
 - خواص نوری جذب و انعکاس
 CP -
 collective Probability



تعداد فوتون جمع شده
 تعداد فوتون که به س.ع فرود آمده

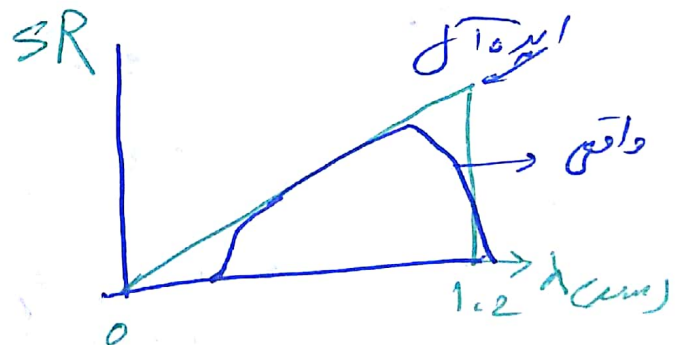
$$QE = \frac{\text{تعداد فوتون جمع شده}}{\text{تعداد فوتون که به س.ع فرود آمده}}$$

$QE(\lambda)$ و $QE(E)$

Spectral Response

$$SR = \frac{q \lambda}{hc} QE$$

$$\Rightarrow SR(A/W) = \frac{QE}{\lambda(\mu m)} \times \frac{1.238}{1.24}$$



راه ساده تر: $FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 1.72)}{V_{oc} + 1}$

$V_{oc} = ?$

$I = 0 \Rightarrow V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$

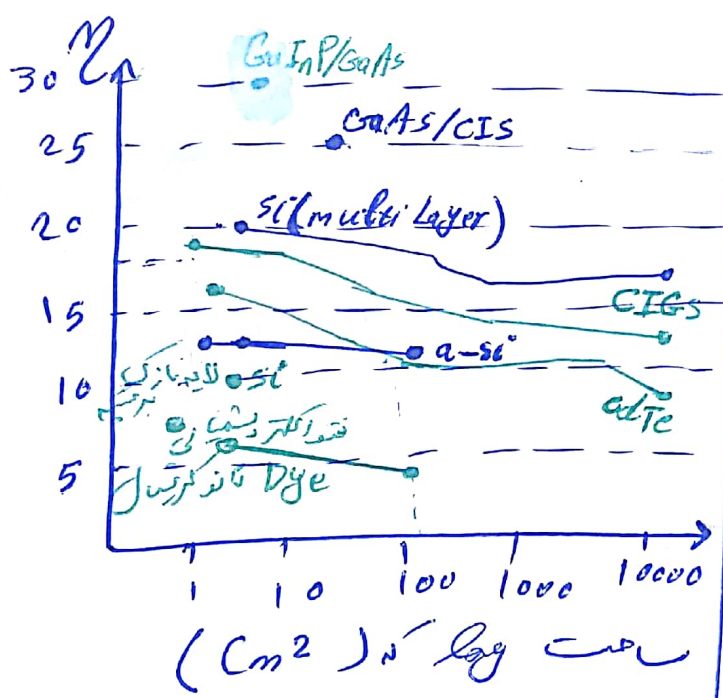
$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{(N_A + \Delta n)\Delta n}{n_i^2}\right)$

Efficiency (η)

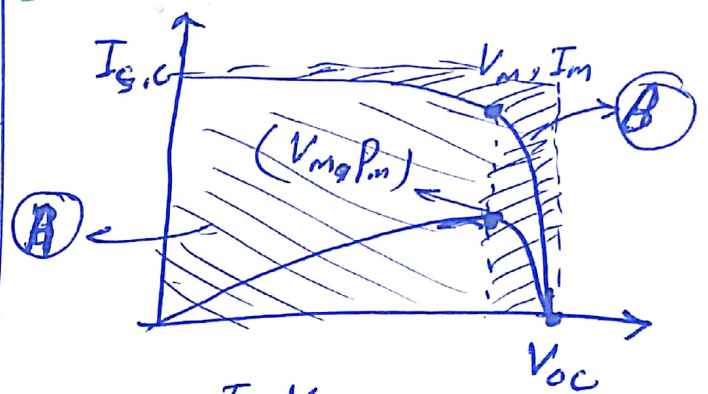
$P_{max} = V_{oc} I_{sc} FF$

$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} = \frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان ورودی}}$

در دما 25° و تابش AM.5



FF = Fill Factor



$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$

$FF = \frac{A}{B}$

تحت ولت V_m

$\frac{d(IV)}{dV} = 0$

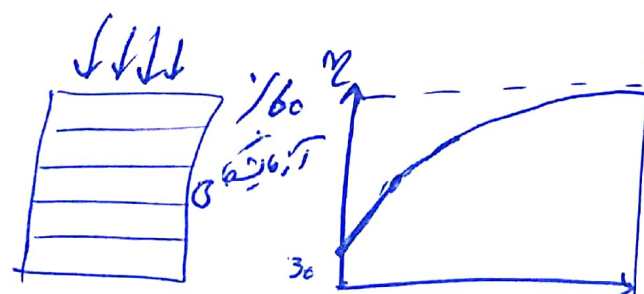
$V_m = V_{oc} - \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{V_m}{\frac{nKT}{q}} + 1\right)$

از این رابطه V_m می توان بدست آورد

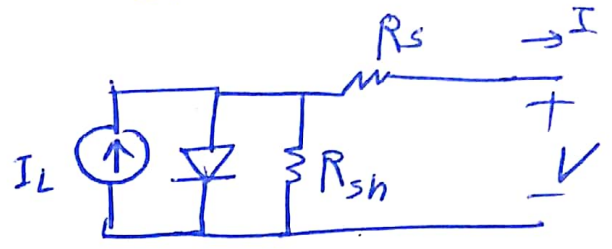
با دانستن I_m

$I_{mp} = -(I_{sc} + I_0) \frac{qV_{mp}/nKT}{1 + qV_{mp}/nKT}$

Tandom cells

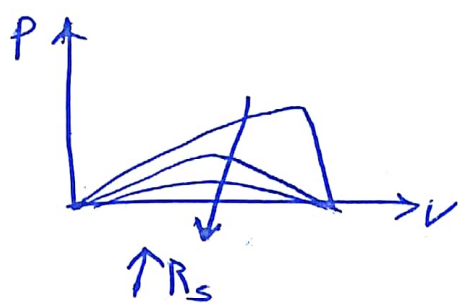
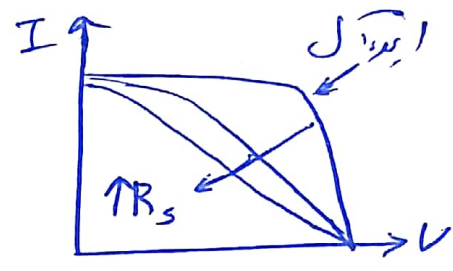


تعداد با نرنگ
معمولاً max بزرگ در $E_g = 1.63$ زرد و سبز



در صورتی که فقط R_s باشد

$$I = I_L - I_0 e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}}$$



می توان ثابت کرد

$$FF' = FF(1 - r_s)$$

$$FF_s = FF_0(1 - 1.1r_s) + \frac{r_s^2}{5.4}$$

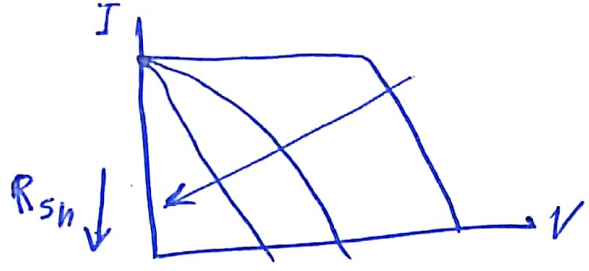
س. $r_s < 0.4$ و $r_s > 10$ را اعتبار دارد

- تفاوت افت ولتاژ و تلفات
- افت ولتاژ ناشی از تلفات
 - افت ولتاژ ناشی از تلفات
 - افت ولتاژ ناشی از تلفات
 - افت ولتاژ ناشی از تلفات
 - افت ولتاژ ناشی از تلفات

تفاوت افت ولتاژ و تلفات ناشی از تلفات - حفره ها
 Grain boundaries (مزدانه ها) و R_{sh} را کاهش می دهند

اثر تفاوت ولتاژ و تلفات

$$I = I_L - I_0 e^{\frac{qV}{nkT}} - \frac{V}{R_{sh}}$$



$$FF_{sh} = FF_0 \left(1 - \frac{1}{r_{sh}}\right)$$

$$FF_{sh} = FF_0 \left(1 - \frac{V_{oc} + 0.7}{V_{oc}} \frac{FF_0}{r_{sh}}\right)$$

س. r_{sh} را بیشتر

تا بیشتر هر دو

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}}$$

که می توان ثابت کرد

$$FF_{sh} = FF_s \left(1 - \frac{V_{oc} + 0.7}{V_{oc}} \frac{FF_s}{r_{sh}}\right)$$

$$FF_s = FF_0(1 - 1.1r_s) + \frac{r_s^2}{5.4}$$

که می توان ثابت کرد که در این رابطه