

الحمد لله

سمینار درس:

سلول های خورشیدی

بررسی عملکرد سلول خورشیدی چندپیوندی، بررسی بازدهی بالای این سلول ها،
مقایسه آنها با سلول های تک پیوندی و شبیه سازی چند نمونه از
سلول های خورشیدی چندپیوندی (Tandem solar cell)

استاد:

پروفسور محمدنژاد



مقدمه

عملکرد سلول خورشیدی چند پیوندی

بازدهی سلول خورشیدی چند پیوندی

تعریف و شبیه سازی ساختار

پارامترهای مورد استفاده و مشخصه خروجی

جمع بندی

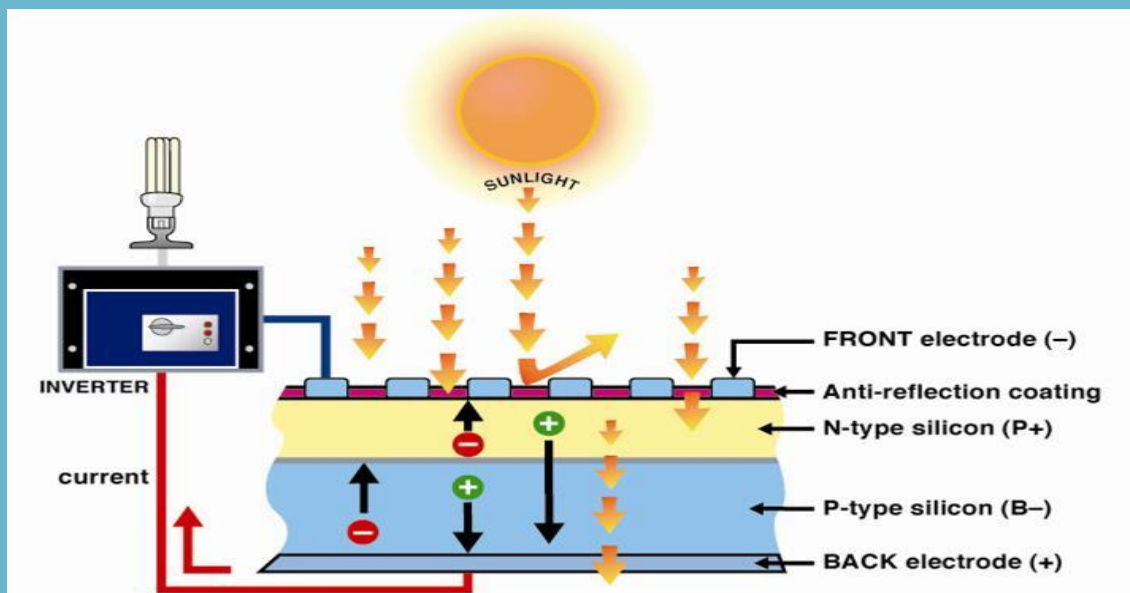
با قرار گرفتن صفحات نقره ای باتری در معرض نور خورشید

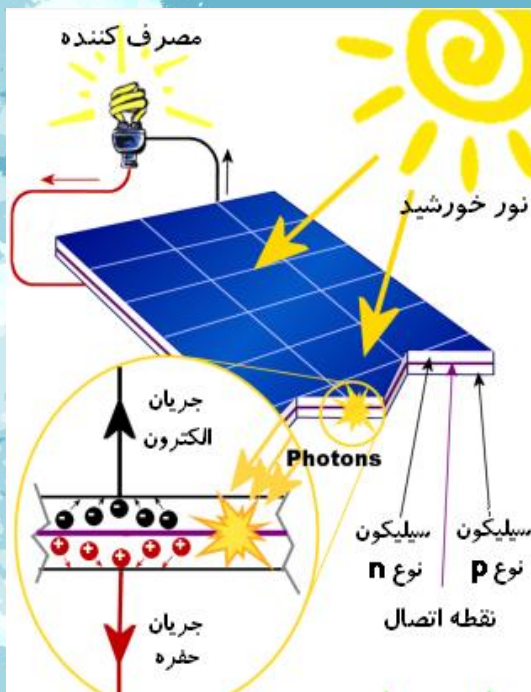
افزایش پتانسیل دو سر باتری

کشف این پدیده در سال ۱۸۳۹ توسط فیزیکدان الکساندر ادmond

مقدمه

تاریخچه





در اثر تابش نور به اتصال پیوند p-n
تولید زوج الکترون-حفره
رفتن حامل های اضافی به مرز ناحیه تخلیه
تولید جریان نوری در مدار خارجی



بازدهی سلول خورشیدی

$$h\nu < E_g$$

یک دیود تک اتصالی از یک نوع نیمه هادی با E_g
مشخص

عبور فوتون های با انرژی کمتر
شفاف بودن دیود برای این فوتون ها

عدم جذب برخی طیف های خورشید

کاهش بازدهی

بازدهی

سلول

تحلیل افزایش بازدهی

$$\eta = \frac{v_m I_m}{p_{in}}$$

افزایش شدت نور $\leftarrow$ حداکثر جریان نوری

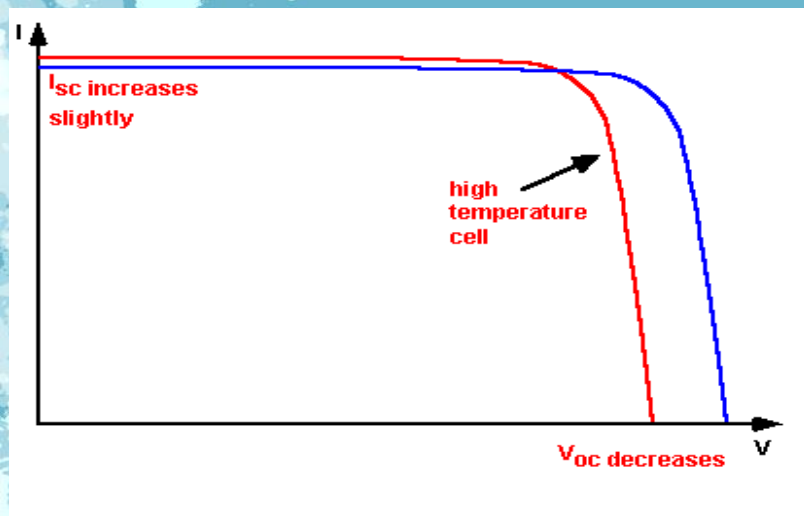
بازده

سلول

مواد با $E_g \downarrow \leftarrow \text{Voc} \downarrow, \text{Isc} \uparrow$

مواد با $E_g \uparrow \leftarrow \text{Voc} \uparrow, \text{Isc} \downarrow$

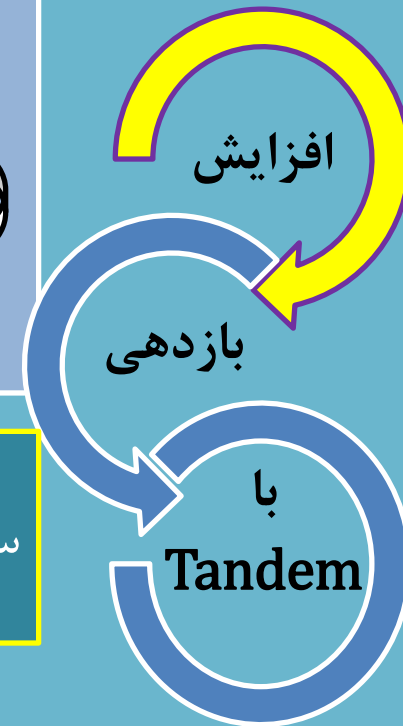
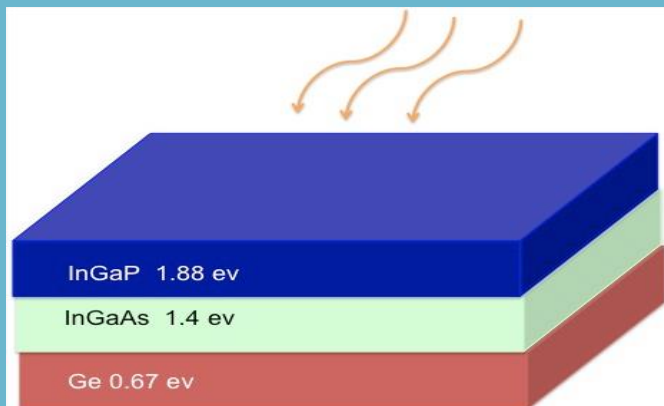
افزایش بازدهی با Tandem



افزایش بازدهی با Tandem

سری قرار دادن دو یا چند سلول خورشیدی
 افزایش جریان نوری بیشتر به ازای شدت نور تابشی ثابت

سری قرار گرفتن دیودهای نوری ← برقرار بودن شرط تطبیق جریان



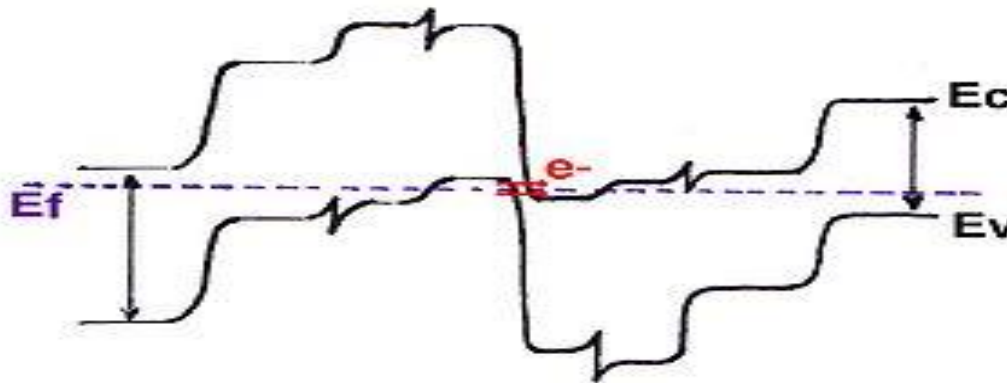
برای افزایش بازدهی باید تلفات کم شود

ضخامت لایه ها کم شود
مقاومت اهمی دیود کم شود
ناخالصی را افزایش دهیم

برای کم کردن تلفات

دیود

تونل



InGaP	n	InGaP	p	AlInP	p+	InGaP	p++	InGaP	n++	AlInP	n+	GaAs	n	GaAs	p
-------	---	-------	---	-------	----	-------	-----	-------	-----	-------	----	------	---	------	---

Anode Contact			
0.030 μm	Window	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{P}$	$p=2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.050 μm	Emitter	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$p=2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.550 μm	Base	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$n=7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
0.030 μm	BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{P}$	$n=2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
0.030 μm	BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{P}$	$n=2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.025 μm	Tunnel diode	GaAs	$n=5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
0.025 μm	Tunnel diode	GaAs	$p=3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
0.040 μm	Window	$\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$	$p=3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.500 μm	Emitter	GaAs	$p=2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
2.000 μm	Base	GaAs	$n=2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
0.500 μm	BSF	$\text{In}_{0.5}(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{P}$	$n=5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
0.200 μm	Substrate	GaAs	$n=1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Cathode Contact			

ساختار یک سلول دو پیوندی

پنجره
امیتر
سلول
لایه BSF
دیود تونلی

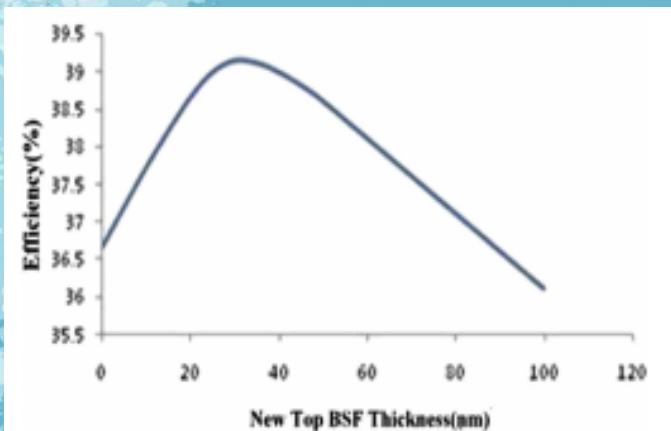
هر سلول چند پیوندی
متشکل از چند لایه
است:



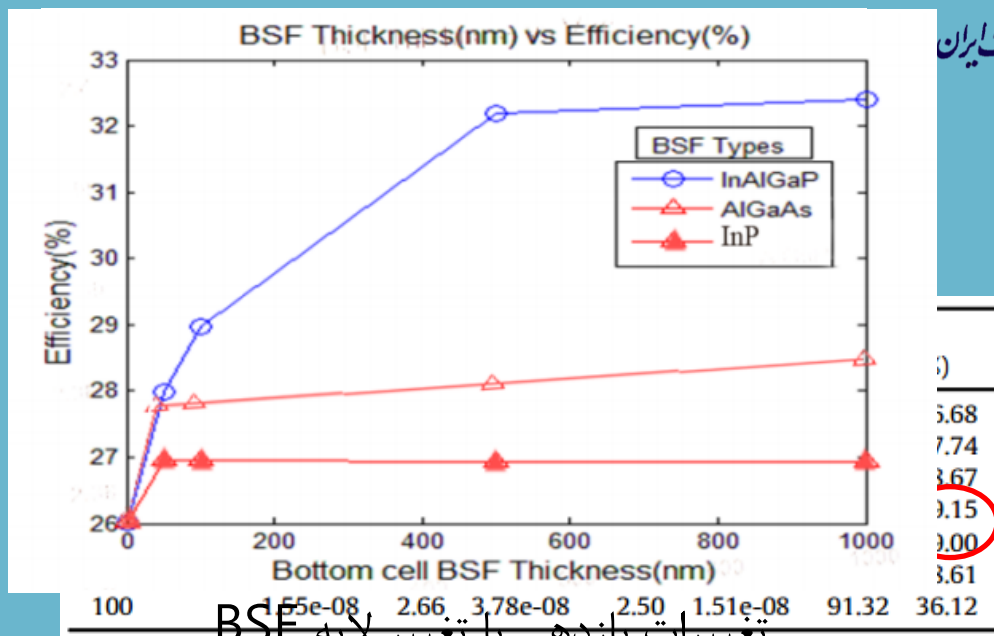
Material	GaAs	InGaP	InAlGaP
Band gap E_g (eV) @300 K	1.42	1.9	2.3
Lattice constant a (Å)	5.65	5.65	5.65
Permittivity (ϵ_s/ϵ_0)	13.1	11.6	11.7
Affinity (eV)	4.07	4.16	4.2
Heavy e ⁻ effective mass (m_e^*/m_0)	0.063	3	2.85
Heavy h ⁺ effective mass (m_h^*/m_0)	0.5	0.64	0.64
e ⁻ mobility μ_{nE} ($\text{cm}^2/\text{V} \times \text{s}$)	8800	1945	2150
h ⁺ mobility μ_{pE} ($\text{cm}^2/\text{V} \times \text{s}$)	400	141	141
e ⁻ density of states N_c (cm^{-3})	4.7×10^{17}	1.30×10^{20}	1.20×10^{20}
h ⁺ density of states N_v (cm^{-3})	7.0×10^{18}	1.28×10^{19}	1.28×10^{19}
Lifetime (el) (s)	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-9}
Lifetime (ho) (s)	2.00×10^{-8}	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-9}
n_i (per cc)	2.12×10^6	7.43×10^4	1
V_{satn} (cm/s)	7.70×10^6	1.00×10^6	1.00×10^6
V_{satp} (cm/s)	7.70×10^6	1.00×10^6	1.00×10^6

پارامترهای مهم مواد مورد استفاده در ساختار

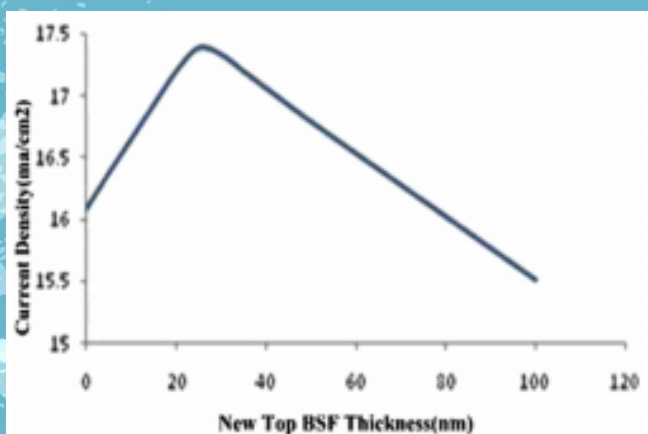
لایه میدان سطح پشتی (BSF)



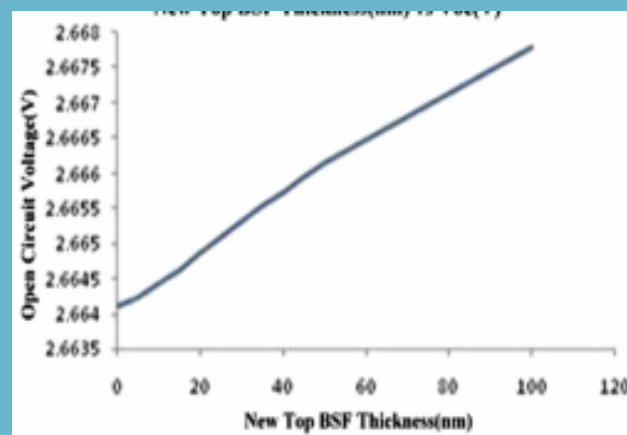
تغییر بازدهی با ضخامت BSF بالایی



تغییرات بازدهی با تغییر لایه BSF بالایی
تغییرات بازدهی با ضخامت BSF بالایی



تغییرات چگالی جریان با ضخامت لایه BSF بالایی



تغییرات ولتاژ مدار باز با ضخامت ولتاژ BSF بالایی

پارامترها و مدل های استفاده شده

اثر باریک شدن شکاف باند

BGN

باز ترکیب شاکی رید هال

SRH

ارتباط موبلیتی با تمرکز ناخالصی ها

CONMOB

باز ترکیب ناشی از گذار فوتون

OPTR

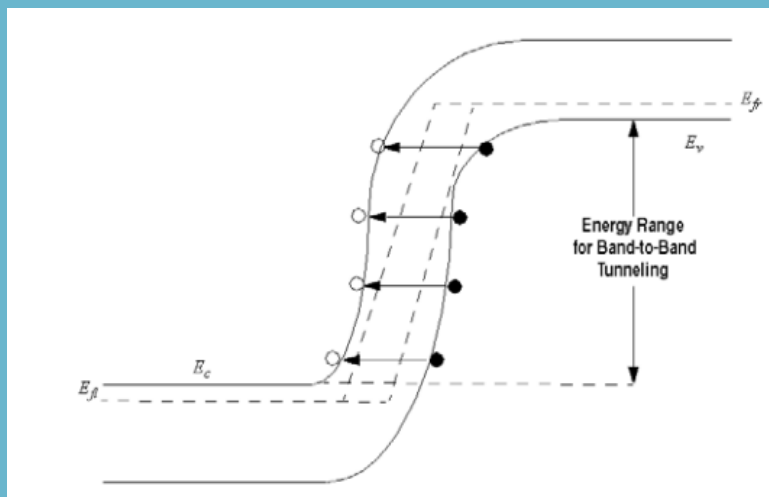
BBT-NONLOCAL

$$J = \frac{qkT}{2\pi^2 h^3} \sqrt{m_z m_y} \int T(E) \ln \left\{ \frac{1 + \exp(E_{Fp} - E)/kT}{1 + \exp(E_{Fn} - E)/kT} \right\}$$

پارامتر

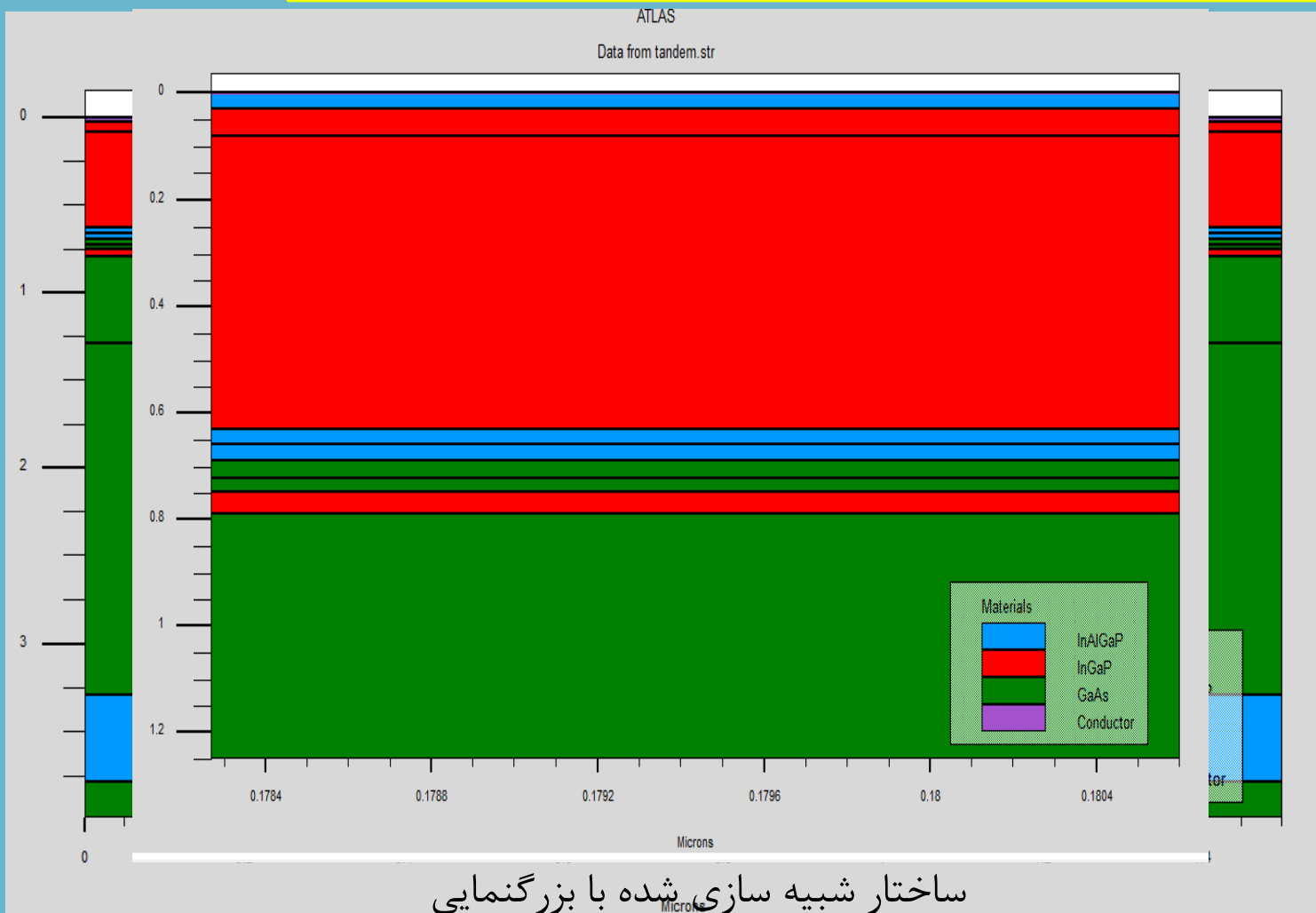
شبیه

سازی



جریان تونل زنی باند به باند در بایاس معکوس

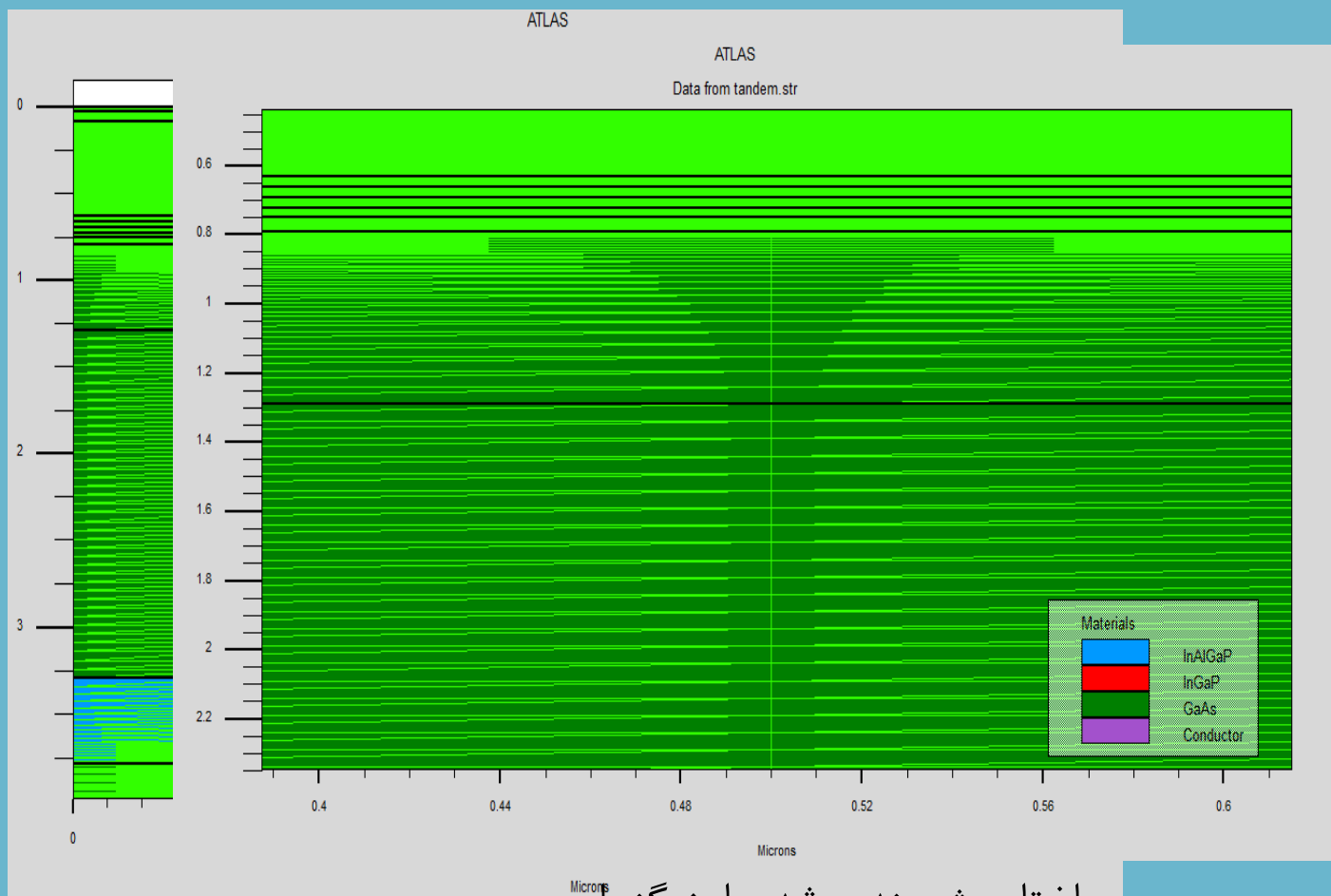
شبیه سازی ساختار



ساختار شبیه سازی شده



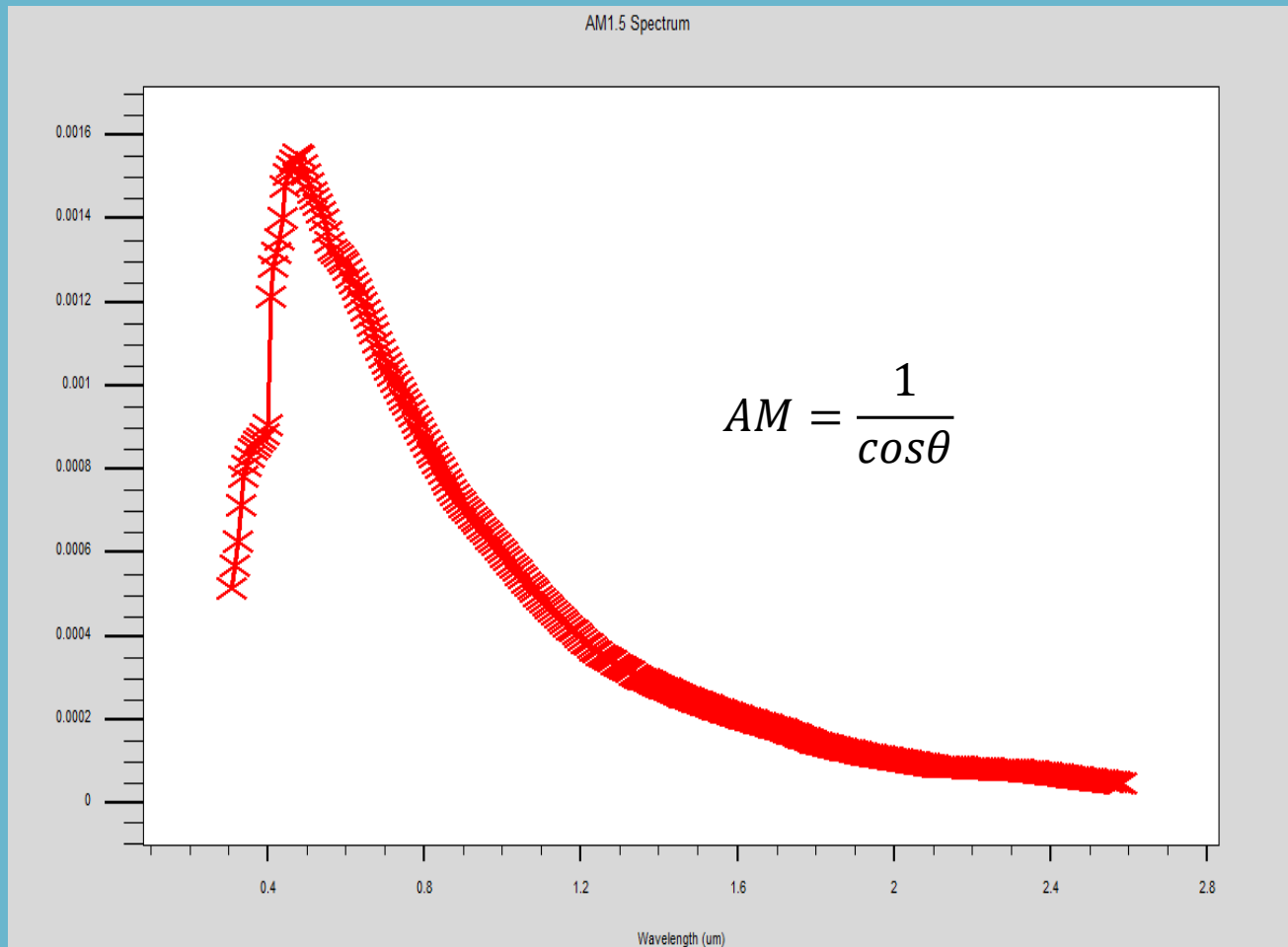
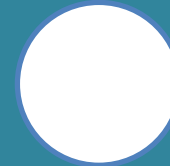
مش بندی



ساختار مش بندی شده با بزرگنمایی ساختار مش بندی



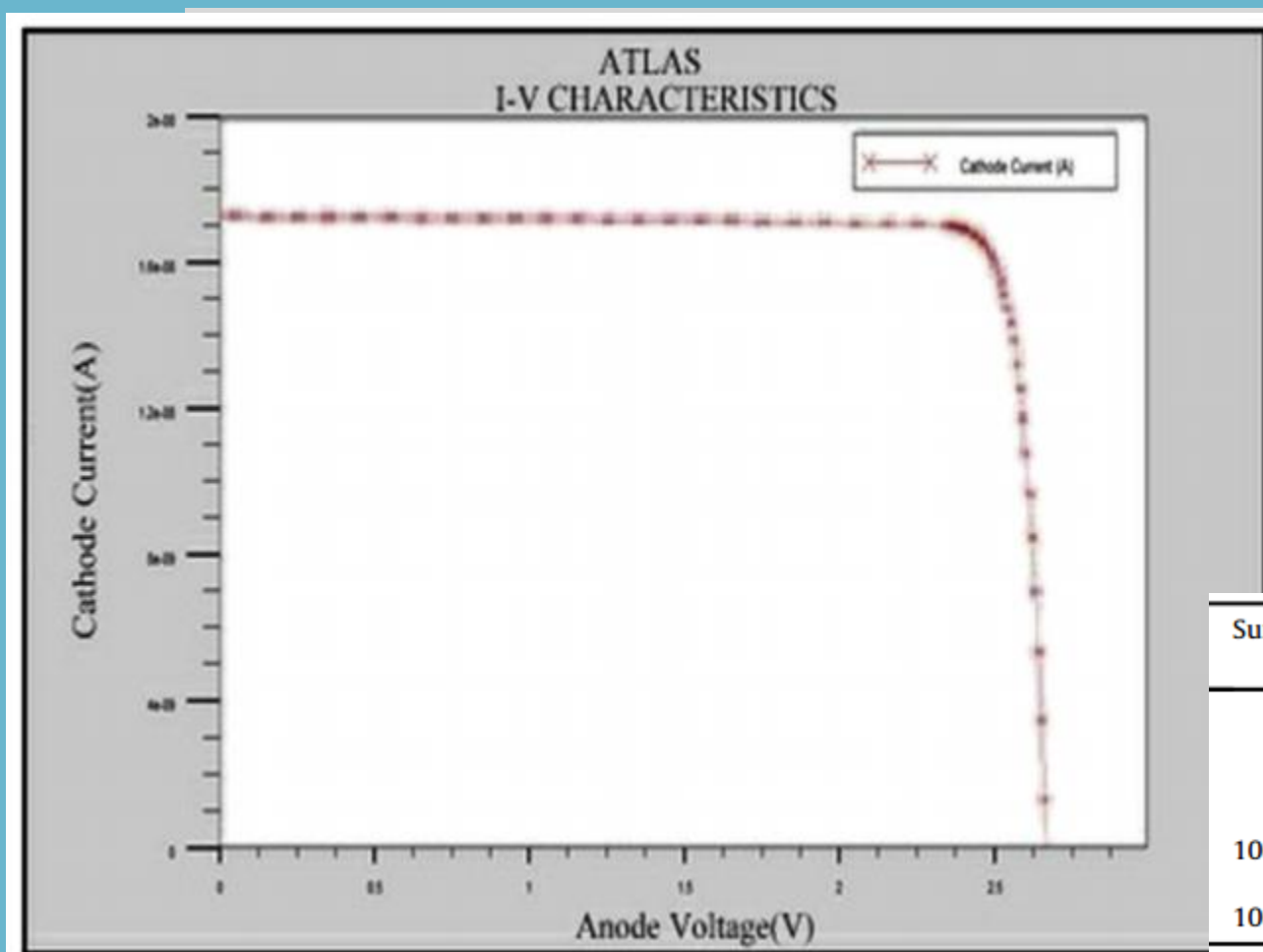
طیف خورشید



تابش طیف خورشید AM1.5



مشخصه جریان ولتاژ



(A)

مشخصه

خروجی

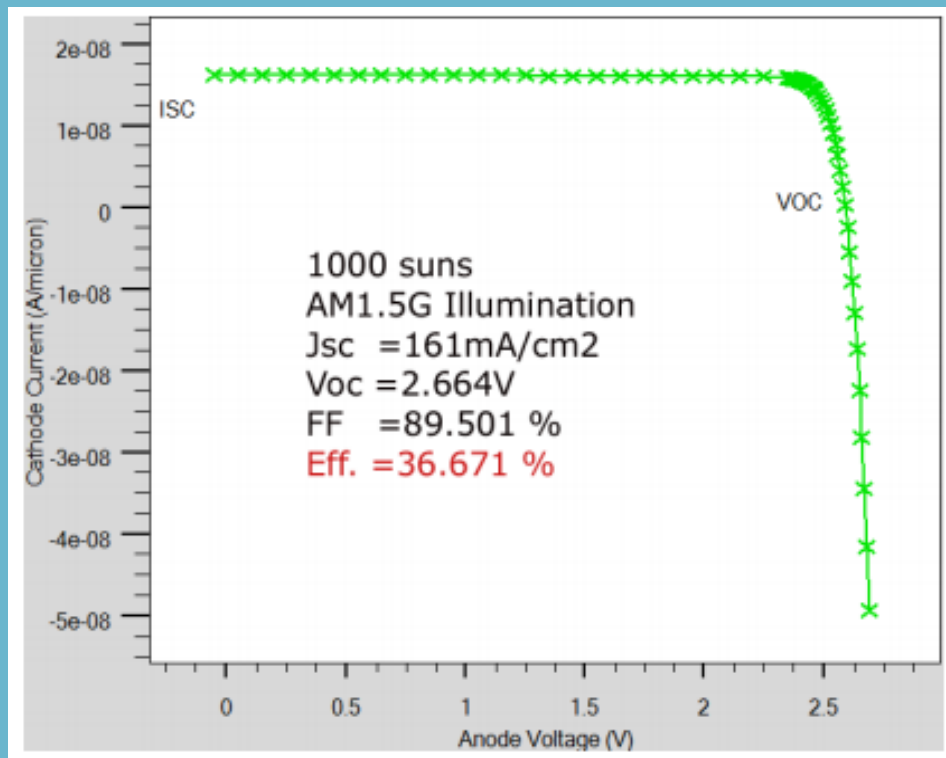
Sun	V_{oc} (V)	J^{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1	2.32	1.090e-10	79.00	23.6
1	2.30	1.060e-10	87.55	25.14
1000	2.66	1.609e-08	89.50	36.678
1000	2.66	1.733e-08	88.67	39.15

مشخصه جریان بر حسب ولتاژ شبیه سازی شده
مشخصه جریان بر حسب ولتاژ

ساختار دوم ارائه شده

Anode		Al ₂ O ₃ /TiO ₂ ARC	
n+AlInP	0.03um	2E18cm ⁻³	Window
n+InGaP	0.05um	2E18cm ⁻³	Emitter
p+InGaP	0.55um	1.5E17cm ⁻³	Base
p+InGaP	0.030um	2E18cm ⁻³	BSF
p+AlInP	0.030um	1E18cm ⁻³	Buffer
p+InGaP	0.015um	8E18cm ⁻³	Tunnel Emitter
n+InGaP	0.015um	1E19cm ⁻³	Tunnel Base
n+AlInP	0.05um	1E19cm ⁻³	Window
n+GaAs	0.1um	2E18cm ⁻³	Emitter
p+GaAs	3.0um	1E17cm ⁻³	Base
p+InGaP	0.1um	2E18cm ⁻³	BSF
p+GaAs	0.3um	7E18cm ⁻³	Buffer
p+GaAs	300um	1E19cm ⁻³	Substrate
Cathode			

ساختار سلول خورشیدی دو پیوندی

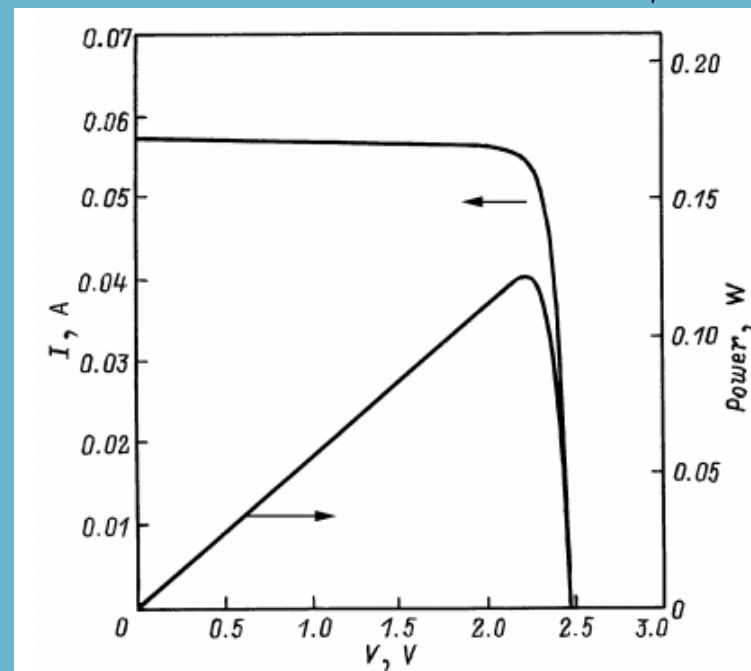


مشخصه جریان بر حسب ولتاژ

افزودن بافر با یک ثابت شبکه تدریجی به منظور حل مشکل عدم تطبیق شبکه

ساختار سوم ارائه شده

	AR coating MgF ₂ /ZnS	Au	Front contact
		Au-Ge/Ni/Au	
		n ⁺ -GaAs 0.3 μm	
InGaP (E _g = 1.88 eV) top cell	n ⁺ -AlInP 0.03 μm	<2 · 10 ¹⁸ cm ⁻³ (Si)	
	n ⁺ -InGaP 0.05 μm	2.0 · 10 ¹⁸ cm ⁻³ (Si)	
	p ⁺ -InGaP 0.55 μm	1.5 · 10 ¹⁷ cm ⁻³ (Zn)	
Tunnel junction	p ⁺ -InGaP 0.03 μm	2.0 · 10 ¹⁸ cm ⁻³ (Zn)	
	p ⁺ -AlInP 0.03 μm	<5 · 10 ¹⁷ cm ⁻³ (Zn)	
	p ⁺ -InGaP 0.015 μm	8.0 · 10 ¹⁸ cm ⁻³ (Zn)	
GaAs (E _g = 1.43 eV) bottom cell	n ⁺ -InGaP 0.015 μm	1.0 · 10 ¹⁹ cm ⁻³ (Si)	
	n ⁺ -AlInP 0.05 μm	1.0 · 10 ¹⁹ cm ⁻³ (Si)	
	n ⁺ -GaAs 0.1 μm	2.0 · 10 ¹⁸ cm ⁻³ (Si)	
	p ⁺ -GaAs 3.0 μm	1.0 · 10 ¹⁷ cm ⁻³ (Zn)	
	p ⁺ -InGaP 0.1 μm	2.0 · 10 ¹⁸ cm ⁻³ (Zn)	
	p ⁺ -GaAs 0.3 μm	7.0 · 10 ¹⁸ cm ⁻³ (Zn)	
	p ⁺ -GaAs substrate	<1.0 · 10 ¹⁹ cm ⁻³ (Zn)	
		Au	Back contact



ساختار سلول خورشیدی دو پیوندی

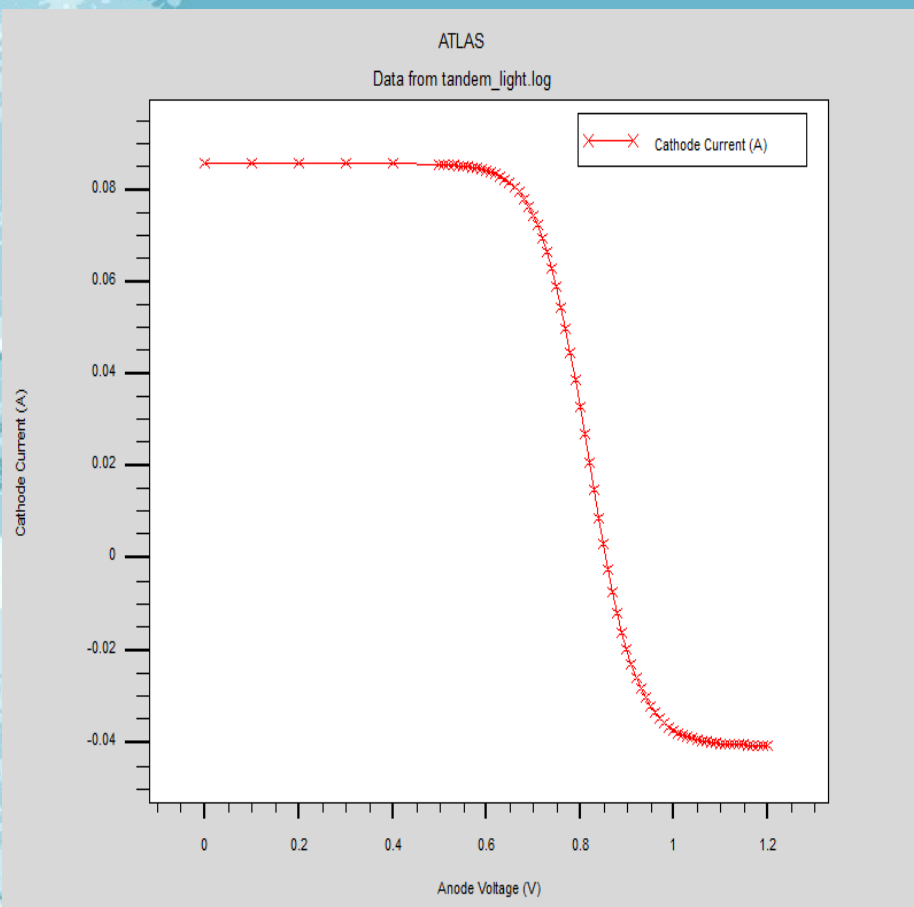
$$I_{sc} = 56.88 \text{ mA}$$

$$V_{oc} = 2.488 \text{ V}$$

$$FF = 85.6\%$$

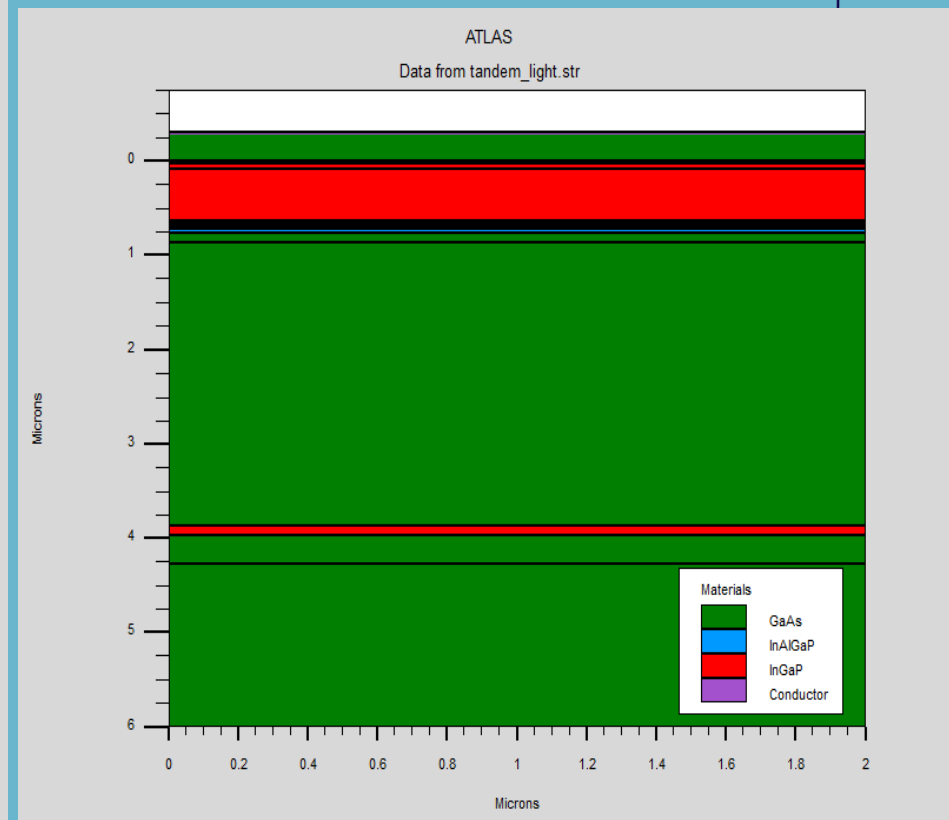
$$\text{Efficiency} = 30.3\%$$

مشخصه جریان و توان بر حسب ولتاژ



مشخصه جریان بر حسب ولتاژ

$J_{sc}=0.086$
 $V_{oc}=0.855$
 $FF=72.5383$
 $Eff=38.52\%$



ساختار شبیه سازی شده

پیوند تونلی با کم کردن مقاومت بین دو پیوند موجب می شوند تا حامل های جریان راحت تر از میان پیوندها عبور کنند و شرط برابری جریان برقرار باشد.

برای حل مشکل عدم تطبیق شبکه از بافر استفاده شد.

به منظور بهبود کارایی سلول های خورشیدی چندپیوندی می توان تعداد پیوندها، تعداد میدان سطح پستی (BSF) ولایه پوشش ضد بازتاب را افزایش داد.

پارامتر اصلی سلول های خورشیدی **بازدهی** است که در سلول های خورشیدی تک پیوندی نسبت به چند پیوندی ها کمتر است و در چندپیوندی ها به ۴۰.۸ درصد هم رسیده است.

لایه پنجره دارای انرژی شکاف باند بزرگی است بنابراین حداکثر طیف خورشید وارد سلول می شود.

لایه میدان سطح پستی نه تنها از باز ترکیب حامل ها جلوگیری می کند بلکه به افزایش بازدهی هم کمک می کند.



باساس از
حسن توجه شما