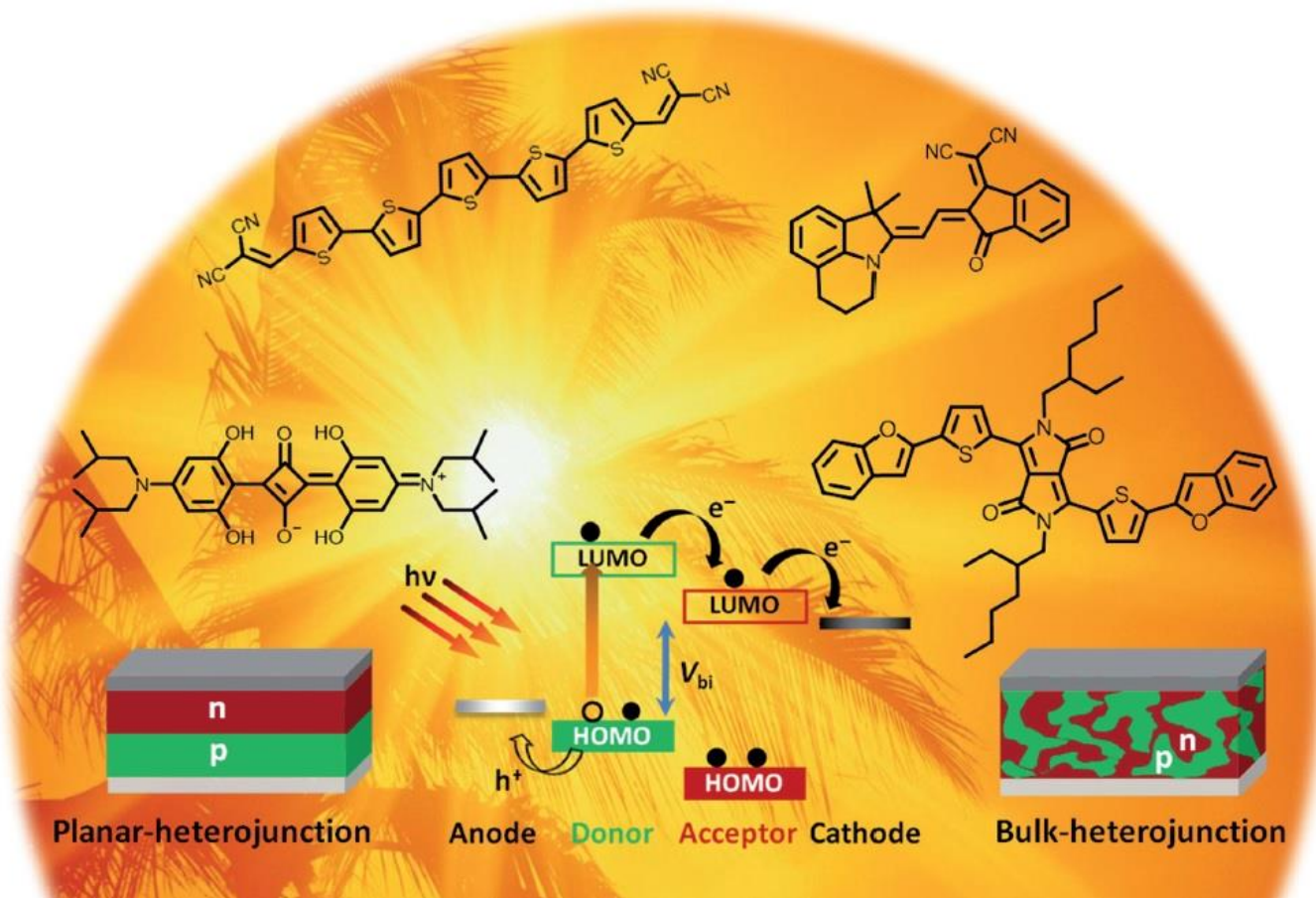
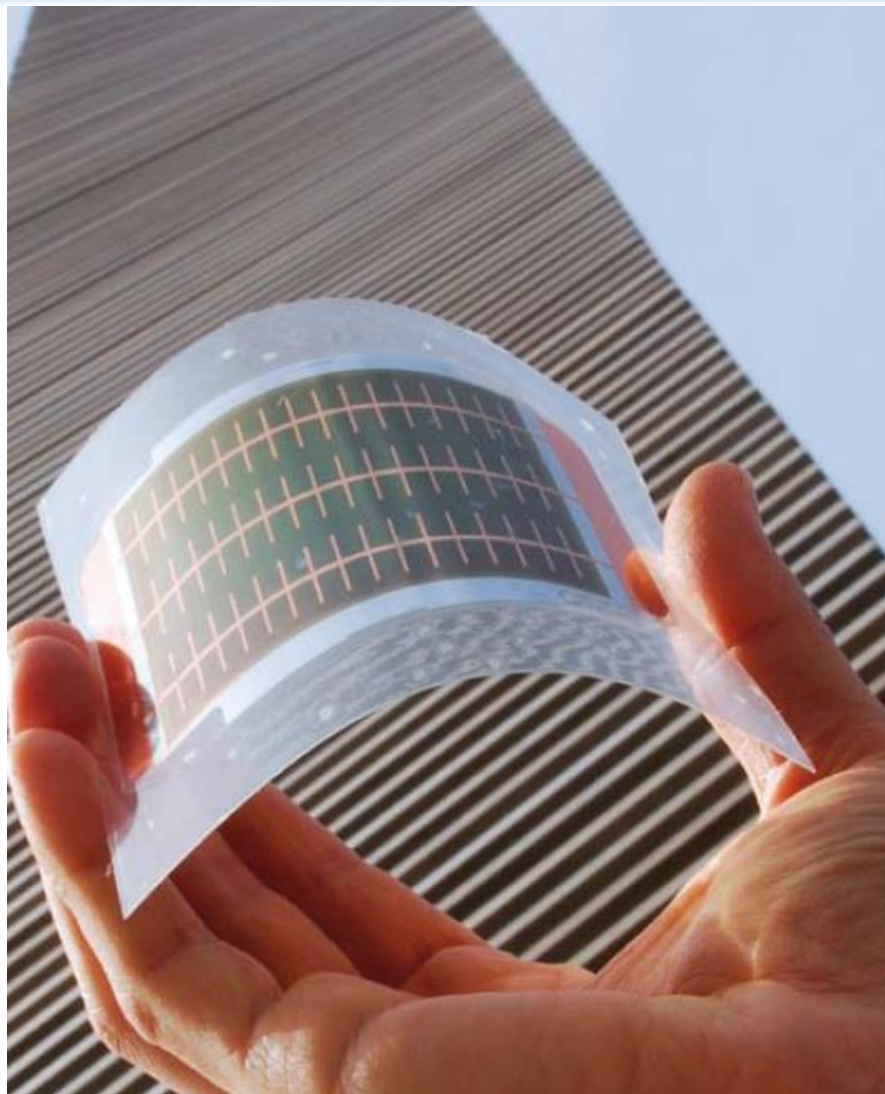




مدل سازی الکتریکی و نوری در سلول های
خورشیدی لایه نازک: با تمرکز بر سلول های
خورشیدی آلی لایه نازک

استاد:
دکتر شهرام محمدنژاد

فهرست مطالب



بخش اول: مقدمه

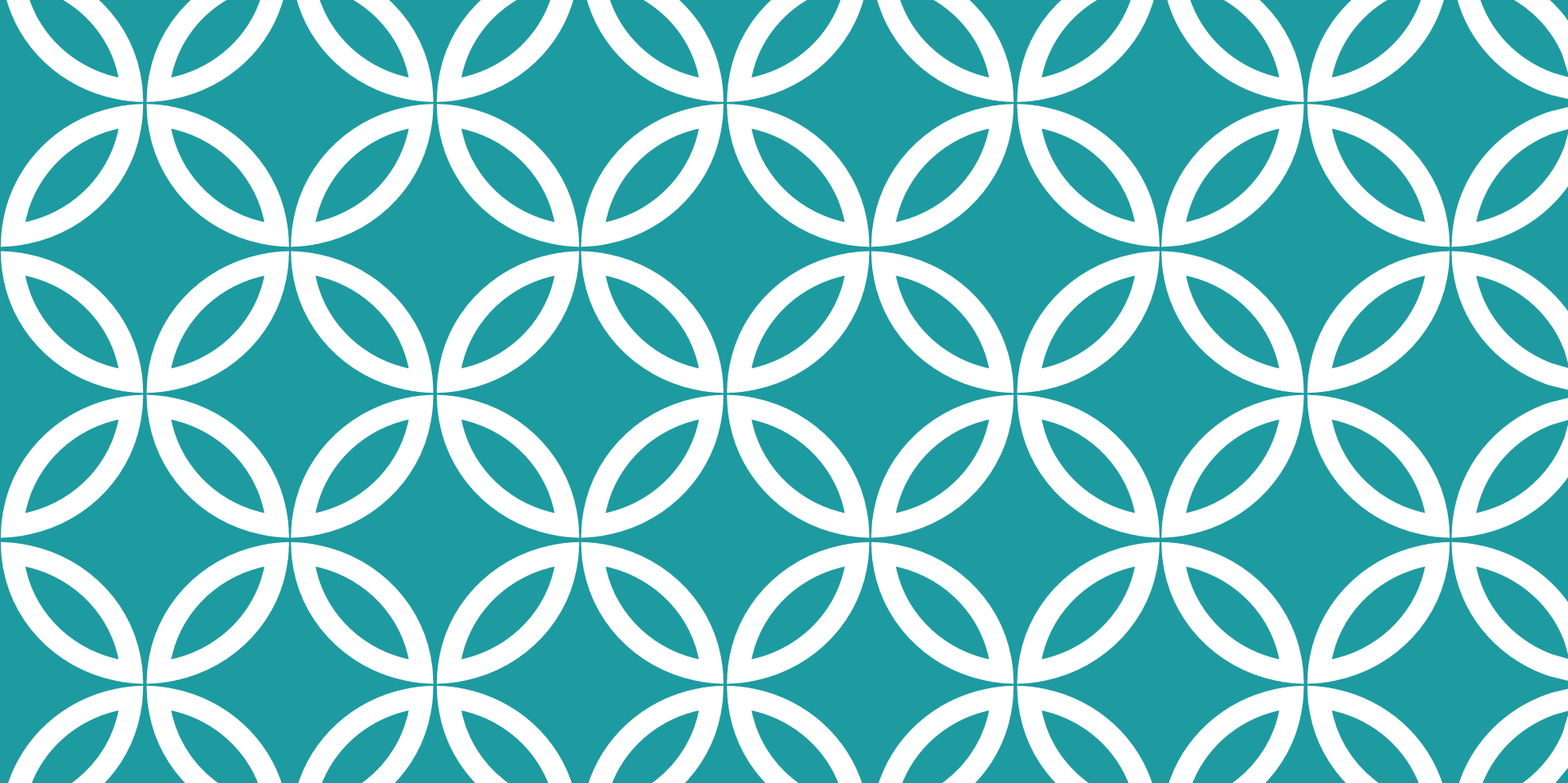
- سلول خورشیدی لایه نازک
- استخراج پارامترها
- سلول‌های خورشیدی آلی

بخش دوم: شبیه‌سازی نوری

- محاسبه طیف جذبی
- طیف خورشیدی و طیف جذبی نور خورشید

بخش سوم: شبیه‌سازی الکتریکی

- محاسبه مشخصه ولتاژ-جریان
- بررسی اثر تغییر پارامترها
- زاویه تابش نور ورودی
- ضخامت و پراکندگی مواد آلی در لایه فعال



بخش اول: مقدمه

- سلول خورشیدی لایه نازک
- استخراج پارامترها
- سلول‌های خورشیدی آلی

سلول‌های خورشیدی لایه نازک



سلول‌های لایه نازک مرسوم:

- *Cadmium telluride*
- *Copper indium gallium selenide*
- *Silicon thin film solar cell*
- *Gallium arsenide thin film cells*

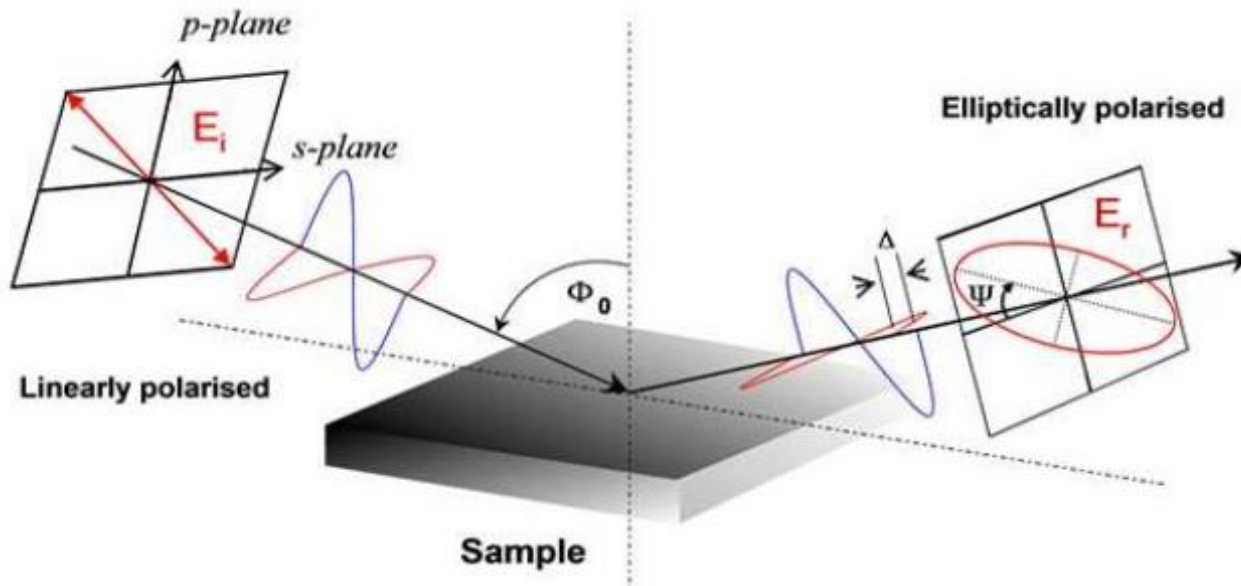
سلول‌های لایه نازک در حال توسعه:

- *Copper zinc tin sulfide solar cell*
- *CZTS*, *CZTSe*, و *CZTSSe*
- *Dye-sensitized solar cell*
- *Organic solar cell*
- *Perovskite solar cell*
- *Quantum dot solar cell*

استخراج پارامترهای لایه‌های نازک

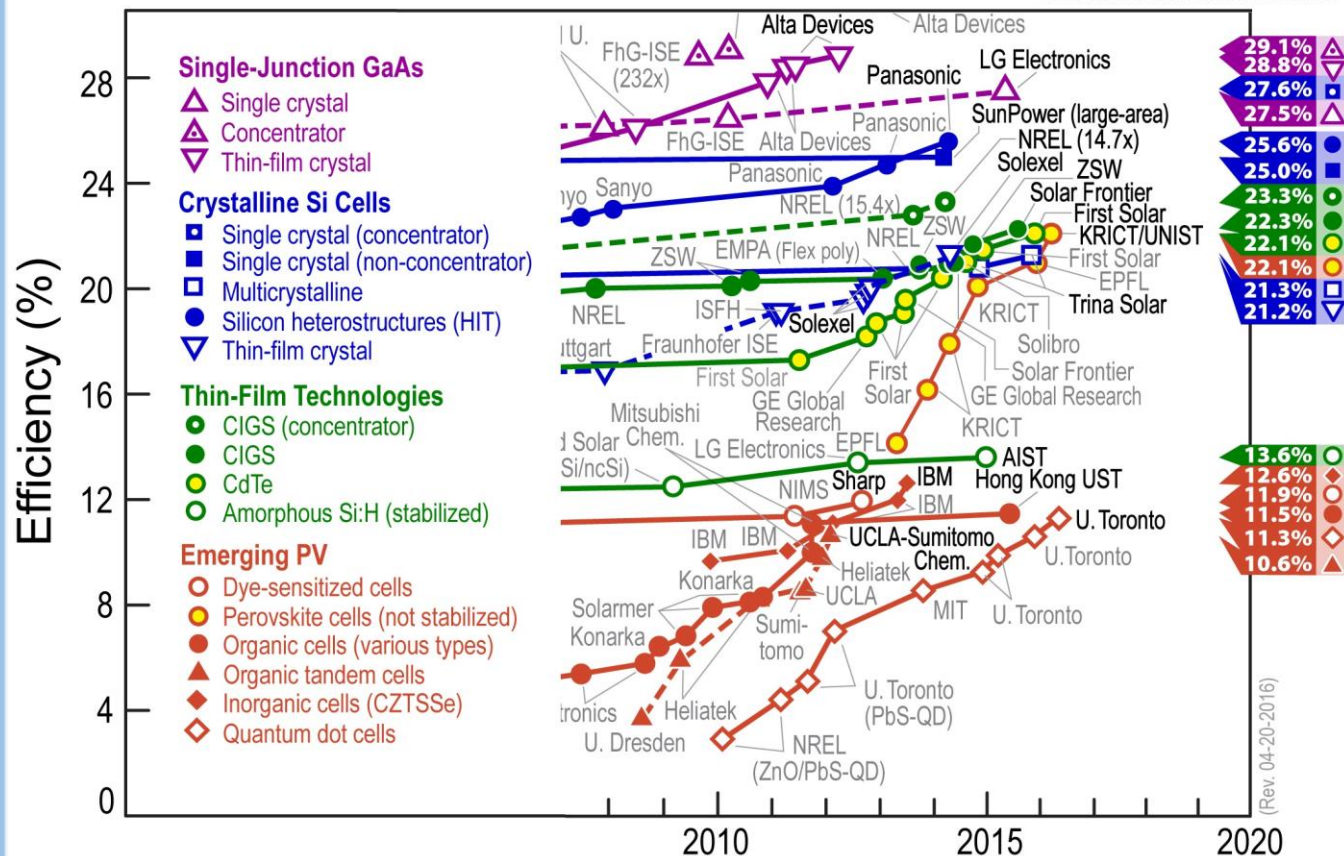
قطبش‌سنجی (*Ellipsometry*):

- تابش نور با قطبش خطی
- دریافت نور منعکس شده از سطح
- استخراج اطلاعات تغییر فاز و دامنه
- تحلیل اطلاعات دریافت شده با مدل‌سازی انتشار نور
- مدل‌سازی انتشار نور با روش‌های مرسوم مانند *(TMM) Transfer Matrix Method*



بازده سلول‌های خورشیدی در حال توسعه و لایه نازک

Best Research-Cell Efficiencies



سلول خورشیدی آلی:
تولید آسان

پوشش دهی چرخشی
چاپ

قابلیت تنظیم مواد آلی

حل پذیری

خواص الکتریکی

خواص نوری

مدل سازی عددی:

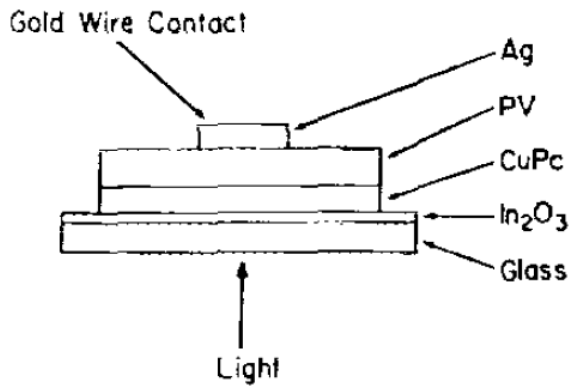
پیش بینی رفتار قطعه

استخراج پارامترها

درک فرآیندها

ابزار مناسب طراحی

تاریخچه سلول‌های خورشیدی آلی

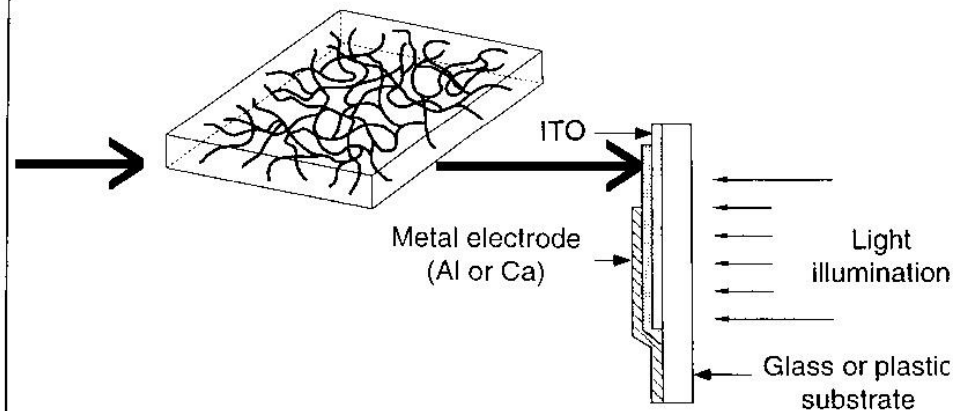
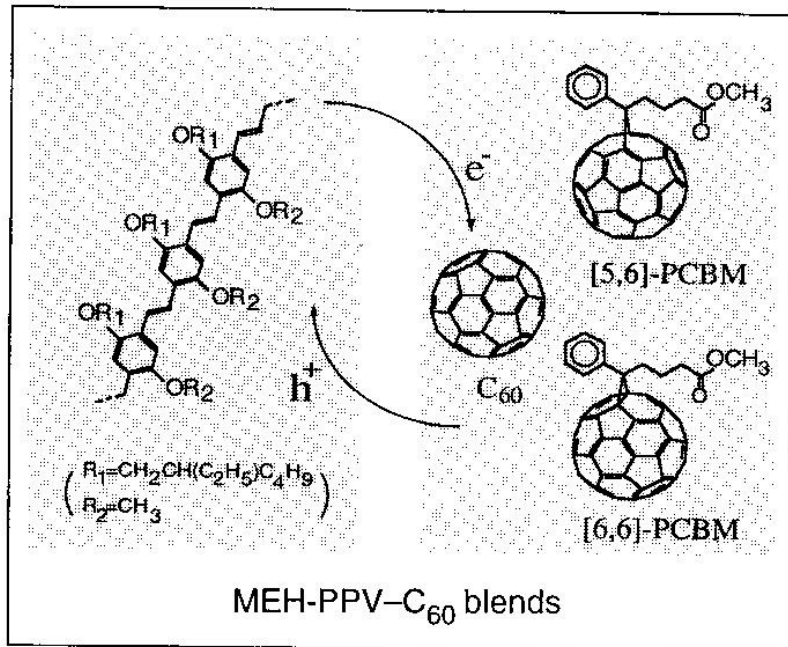


ساختار ناهمگون لایه‌ای، سال ۱۹۸۶، بازده ۰٫۹۵٪

■ لایه فعال، ۲ لایه موازی بین الکترودها

ساختار ناهمگون توده‌ای، سال ۱۹۹۵، بازده ۲٫۹٪

■ لایه فعال، مخلوطی از ۲ ماده آلی قابل حل



اکسیتون

جذب فوتون

تولید اکسیتون

نیمه‌هادی غیر آلی:

■ شعاع اکسیتون زیاد

■ انرژی همبستگی کم

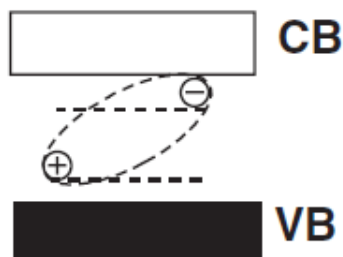
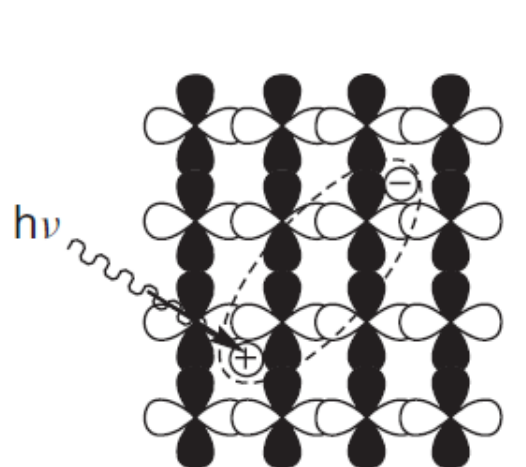
■ تامین انرژی در دمای اتاق

نیمه‌هادی آلی:

■ شعاع اکسیتون کم

■ انرژی همبستگی زیاد

■ نیاز به محیط مناسب جداسازی

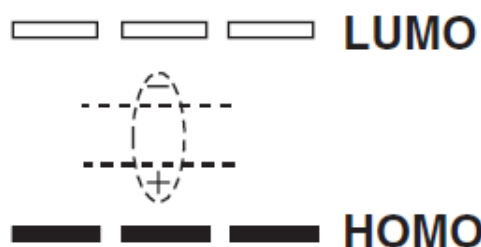
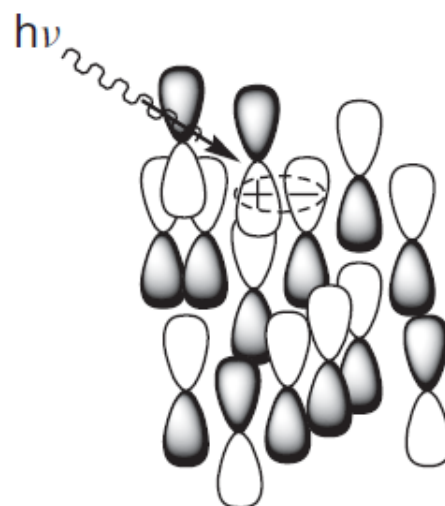


"Wannier Exciton"

$r > 10 \text{ nm}$

$E_B < 0.02 \text{ eV} < E_T$

(a)



"Frenkel Exciton"

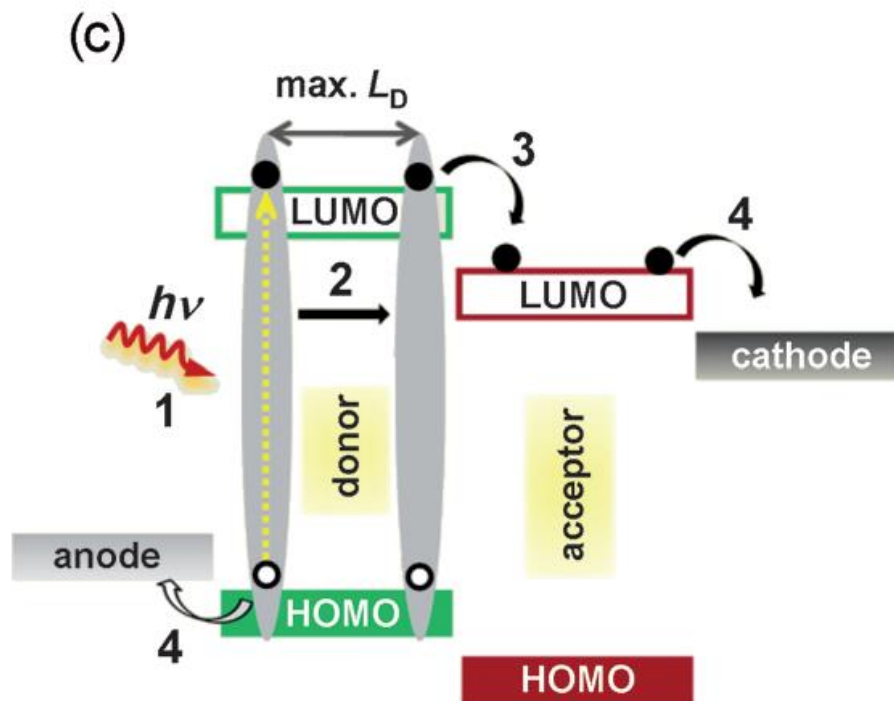
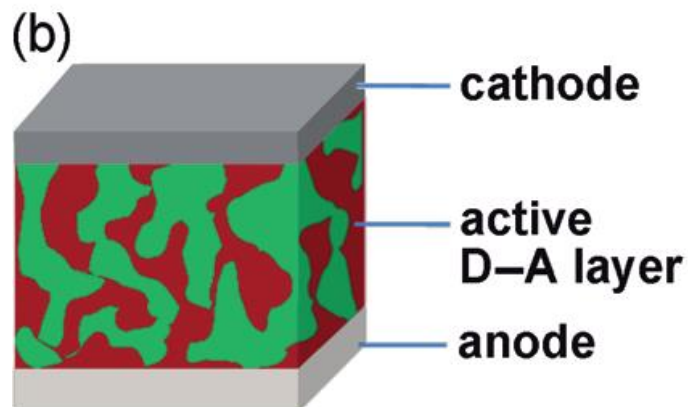
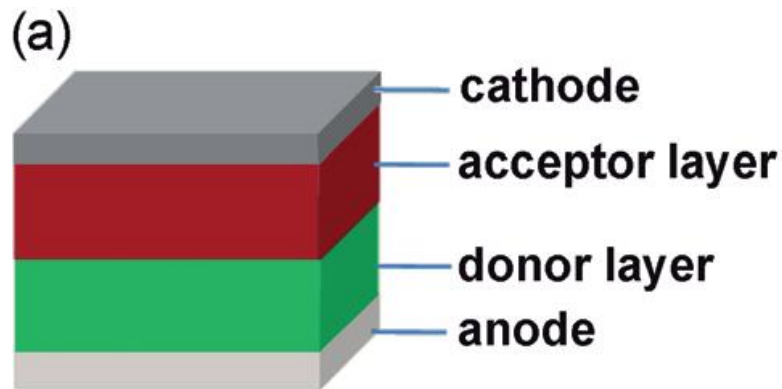
$r < 1 \text{ nm}$

$E_B > 0.1 \text{ eV} > E_T$

(b)

فرایند تبدیل انرژی در سلول‌های خورشیدی آلی

جداسازی اکسیژن در مرز دو نیمه‌هادی
تولید حامل‌های آزاد و جذب در الکترودها



مدل سازی عددی

شبیه سازی نوری:

▪ منبع نور

▪ منبع تک فرکانس یا همدوس

▪ طیف خورشیدی با منابع همدوس

▪ محاسبه طیف جذبی

▪ محاسبه توزیع جذب در لایه فعال

شبیه سازی الکتریکی:

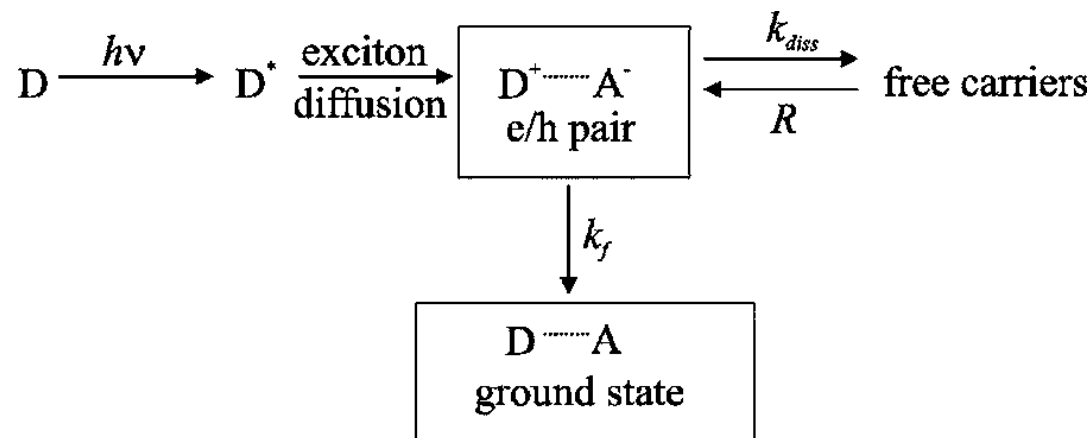
▪ مدل سازی فرایندها

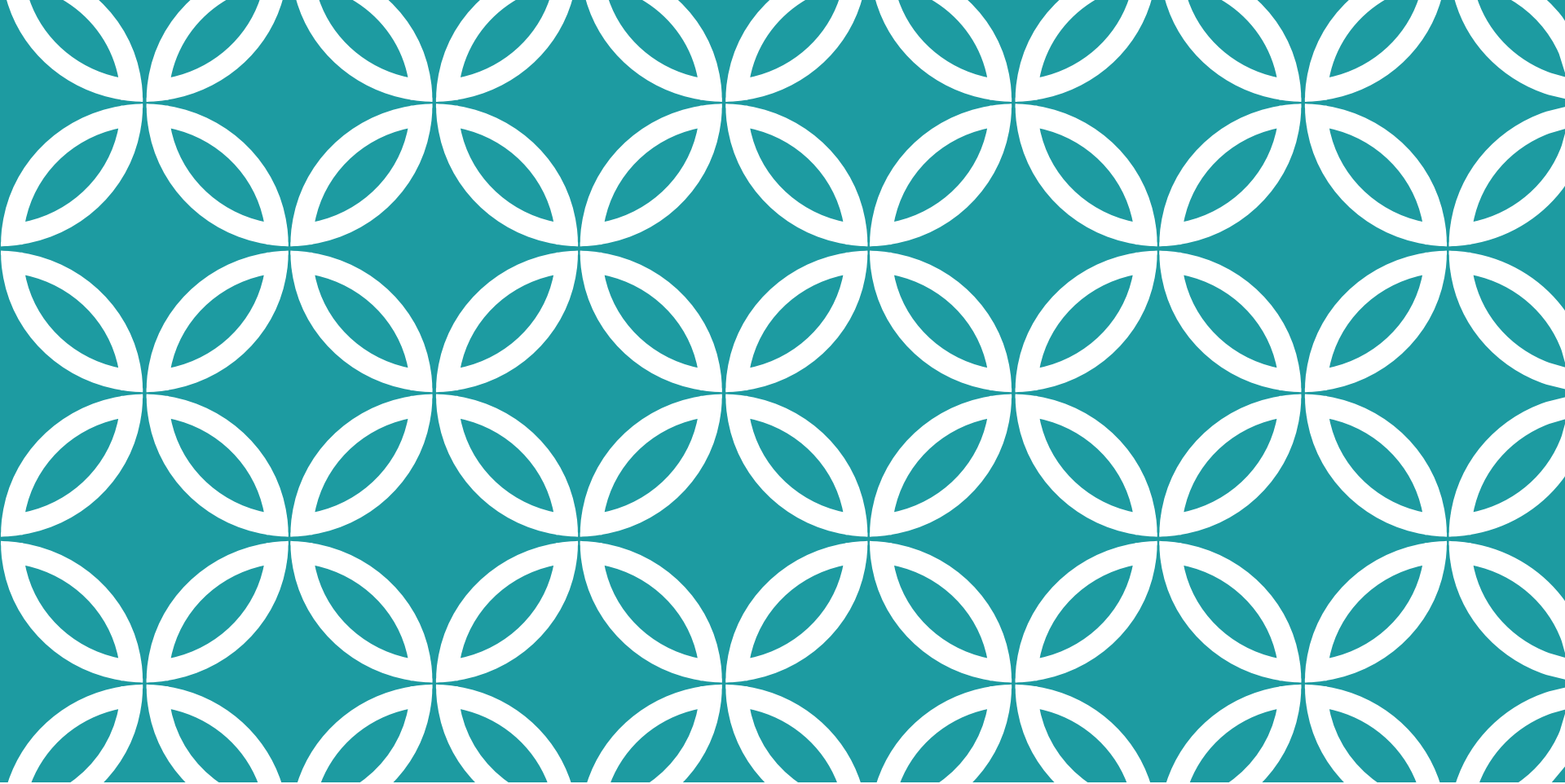
▪ تولید و نفوذ اکسیتون

▪ بازترکیب یا جدا سازی اکسیتون

▪ نفوذ و رانش حامل های بار

▪ بازترکیب حامل های بار یا جذب در الکترودها





بخش دوم: شبیه سازی نوری

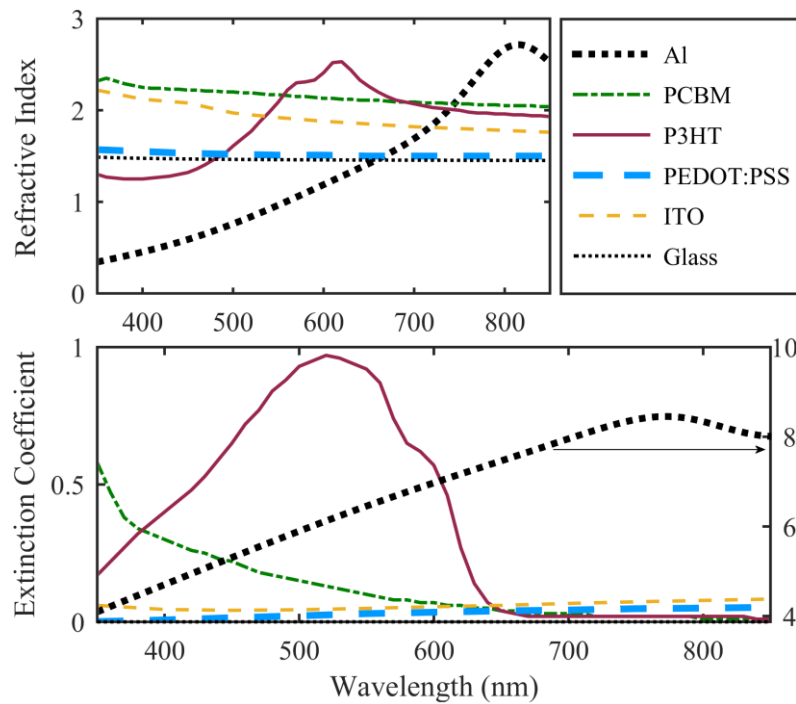
- محاسبه طیف جذبی
- طیف خورشیدی
- طیف جذبی نور خورشید

ساختارهای ناهمگون لایه‌ای و توده‌ای

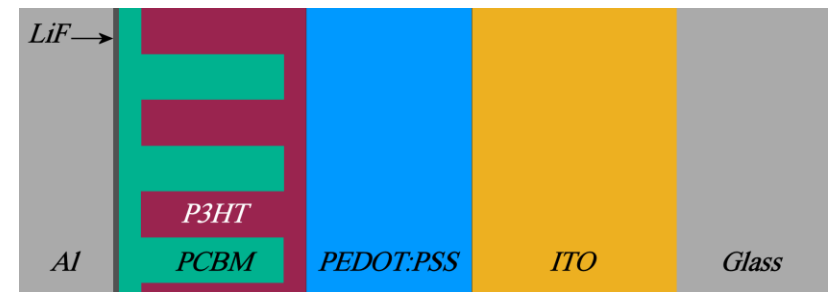
ساختار ناهمگون لایه‌ای



ضرایب نوری مواد



ساختار ناهمگون توده‌ای



شرایط آزمایش سلول‌های خورشیدی

شرایط قابل تکرار

توده هوا = $\frac{\text{میزان هوای مسیر انتشار}}{\text{میزان هوای راستای عمود}}$

شرایط استاندارد:

▪ طیف AM 1.5

▪ تابش 1000 W m^{-2}

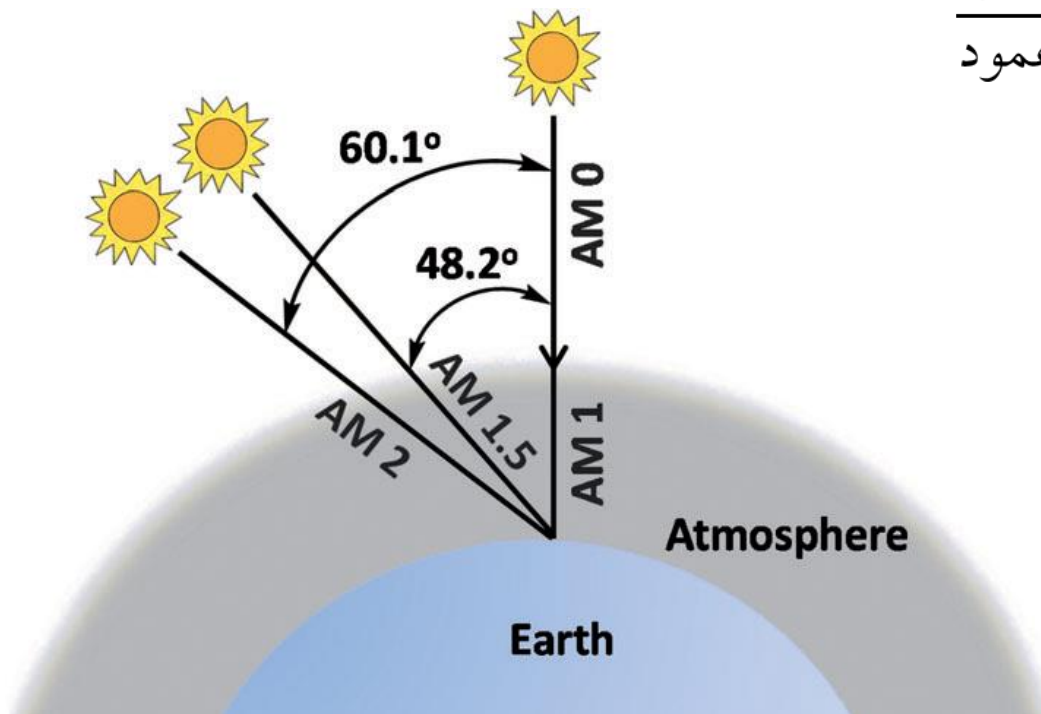
▪ دمای 25°C

تابش مستقیم: *Direct*

▪ AM 1.5D

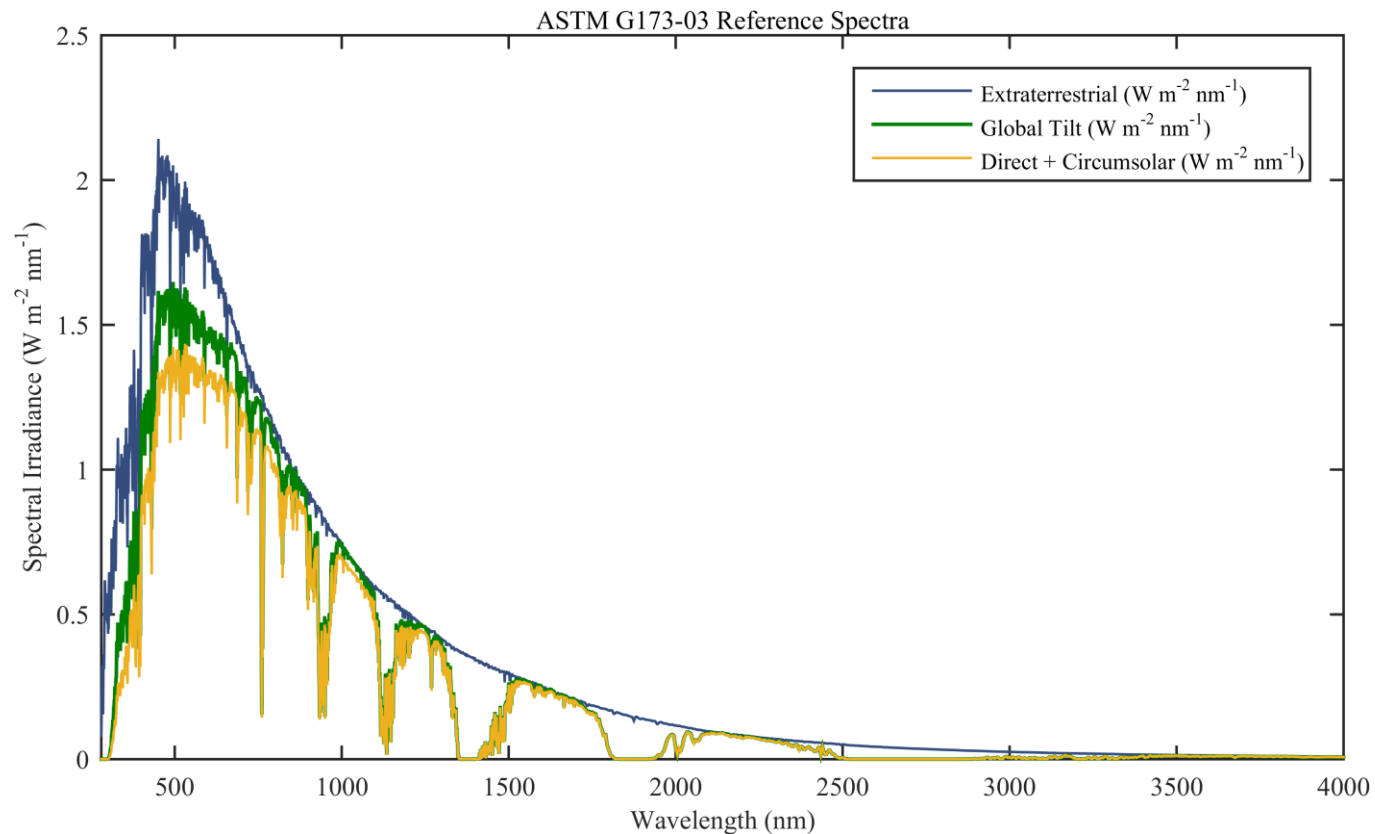
تابش کلی: *Global*

▪ AM 1.5G

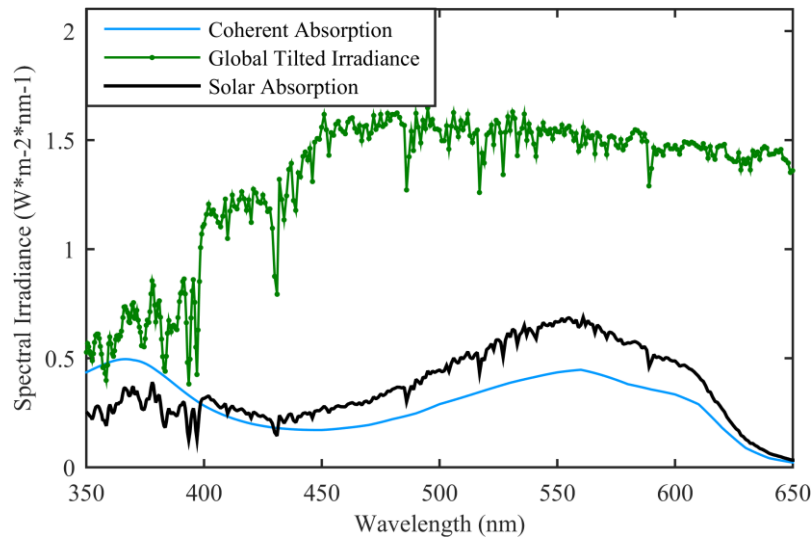


طیف خورشیدی استاندارد

- طیف خارج جو ($AM\ 0$ یا *Extraterrestrial*)
- طیف کلی ($AM\ 1.5G$ یا *Global Tilt*)
- طیف مستقیم ($AM\ 1.5D$ یا *Direct + Circumsolar*)



طیف جذبی نور خورشید



بازده جذب در هر طول موج:

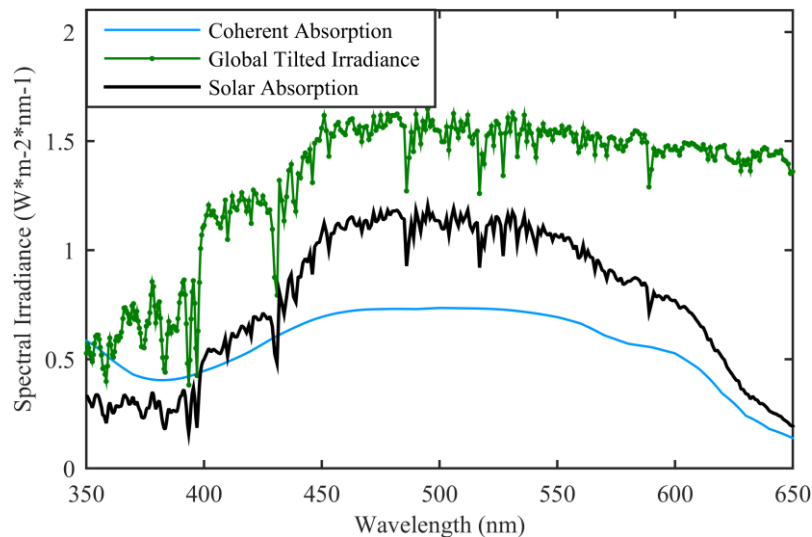
$$A_{coherent}[\lambda]$$

توان هر خط طیف نور خورشید:

$$S_G[\lambda_0]$$

محاسبه طیف جذبی نور خورشید:

$$A_{solar}[\lambda_0] = S_G[\lambda_0] A_{coherent}[\lambda]$$

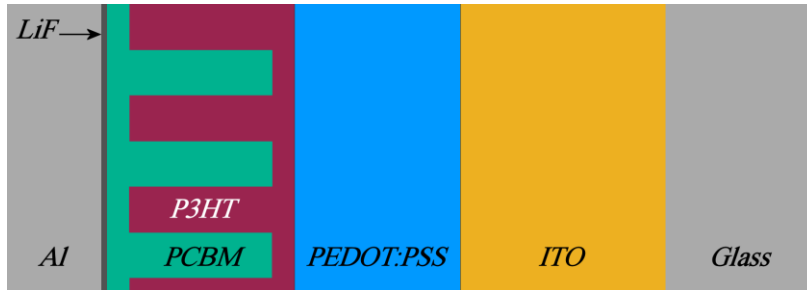


شار فوتون‌های جذب شده و بازده جذب فوتون‌ها

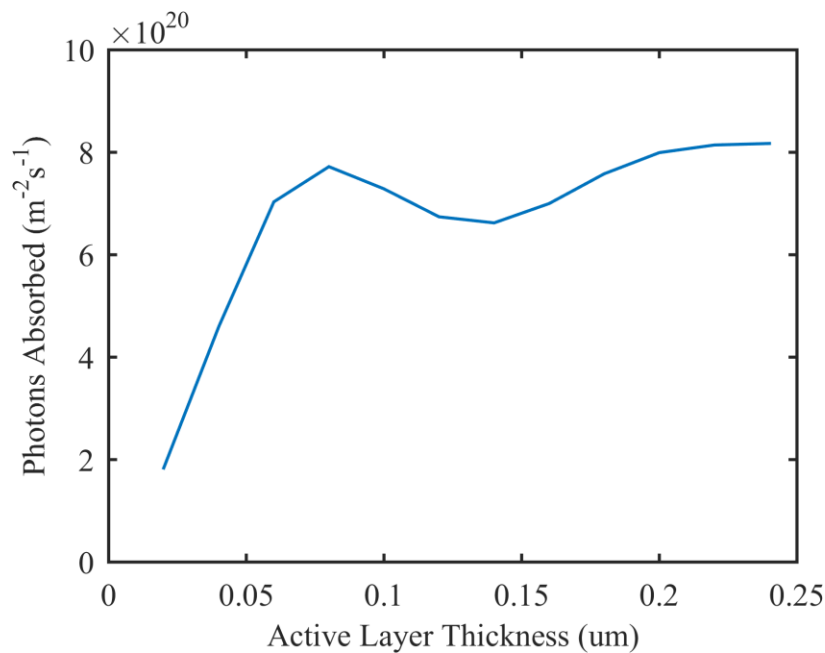
سلول‌های خورشیدی آلی						پارامتر
نمونه ۳		نمونه ۲		نمونه ۱		ساختر
ناهمگون توده‌ای		ناهمگون لایه‌ای		ناهمگون لایه‌ای		ضخامت لایه فعال
	ضخامت لایه فعال		$0.03 \mu m$		$0.08 \mu m$	

سلول‌های خورشیدی آلی						پارامتر
نمونه ۳		نمونه ۲		نمونه ۱		شار فوتون‌های جذب شده
20	شار فوتون‌های جذب شده	20	$3.16 \times 10^{20} m^{-2} s^{-1}$		$7.66 \times 10^{20} m^{-2} s^{-1}$	
7.34 %	بازده جذب فوتون‌ها	7.80 %	$\frac{3.16 \times 10^{20}}{4.3 \times 10^{21}} =$	7.93 %	$\frac{7.66 \times 10^{20}}{4.3 \times 10^{21}} =$	بازده جذب فوتون‌ها

تغییرات بازده جذب در ساختار ناهمگون توده‌ای



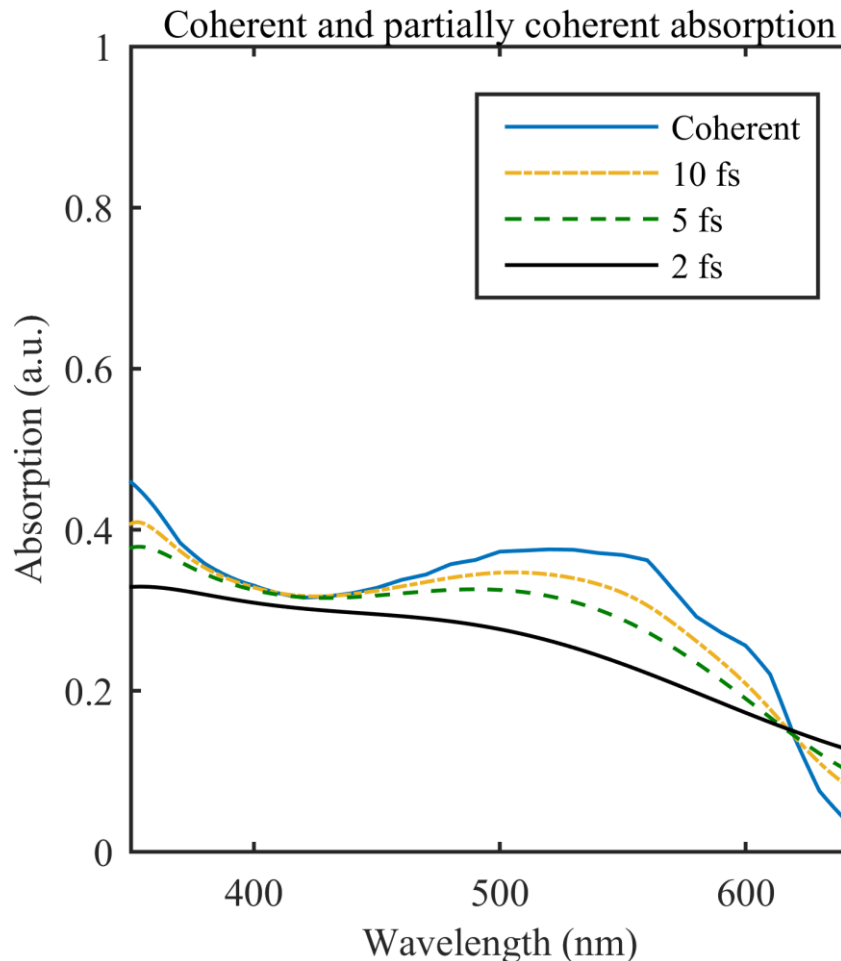
افزایش متناوب:
■ برهم‌نهی امواج
■ تغییر در توزیع جذب



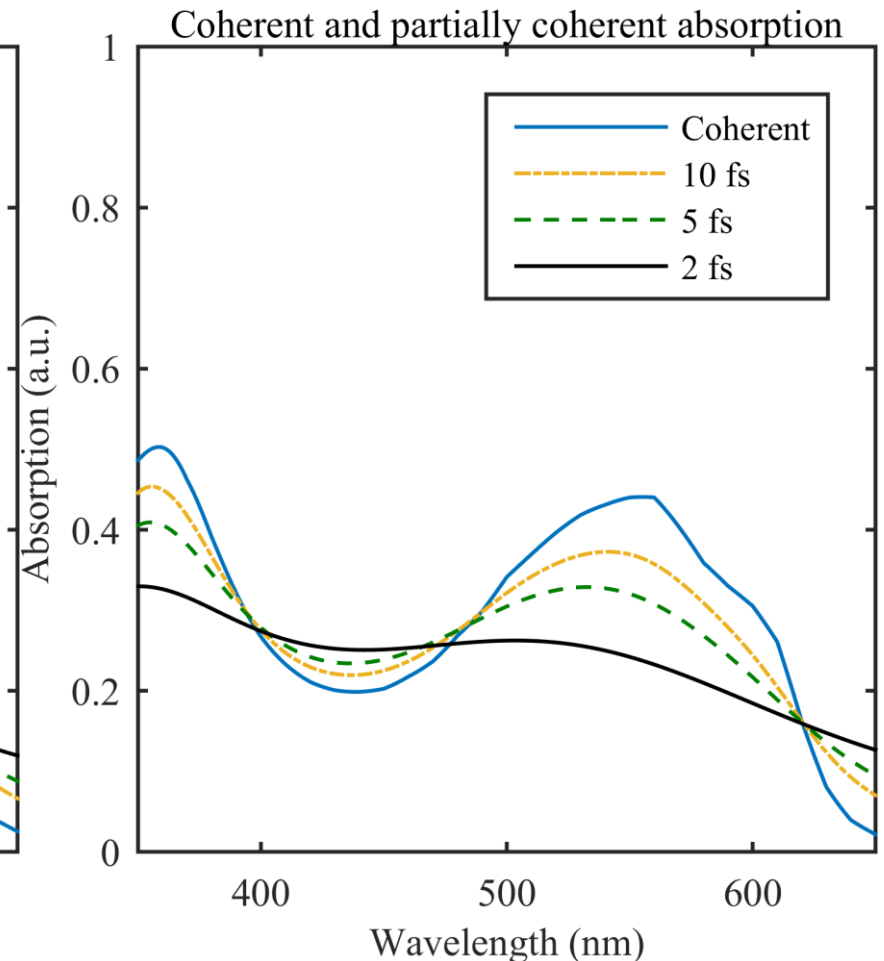
محدودیت نهایی:
■ توان ورودی محدود
■ جذب توان در سایر لایه‌ها
■ انعکاس ثابت در سطح

جذب نور غیر عمود با قطبیدگی TM

نور ورودی با زاویه ۶۰ درجه

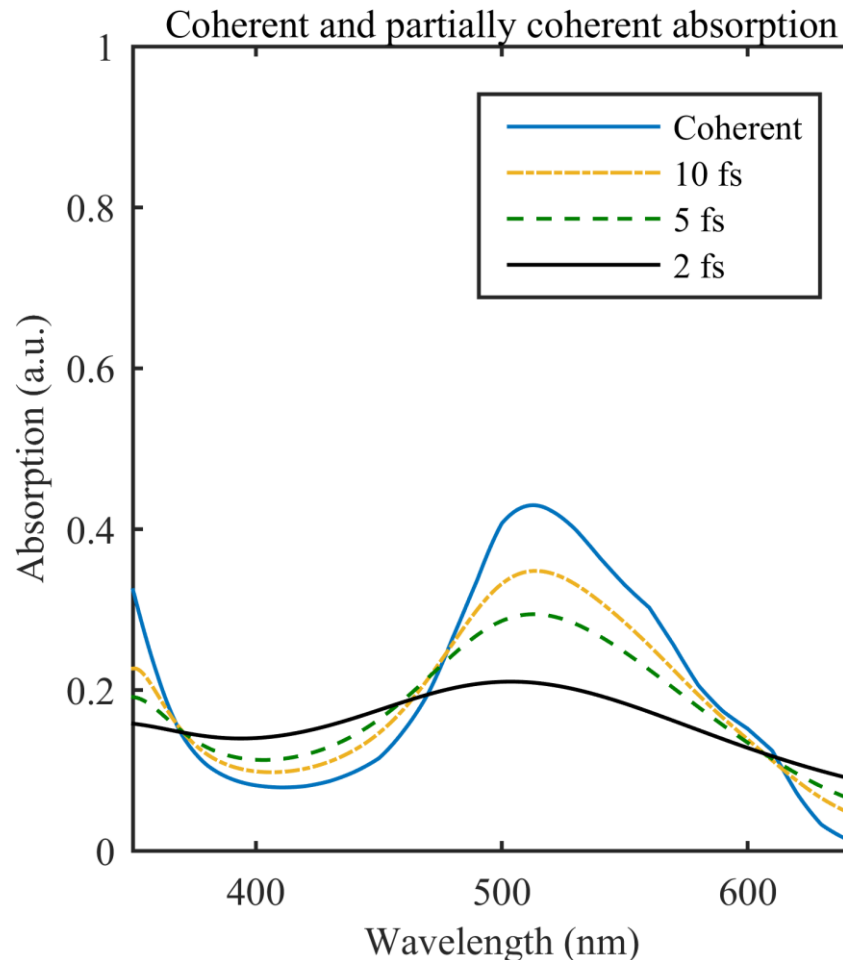


نور ورودی با زاویه ۳۰ درجه

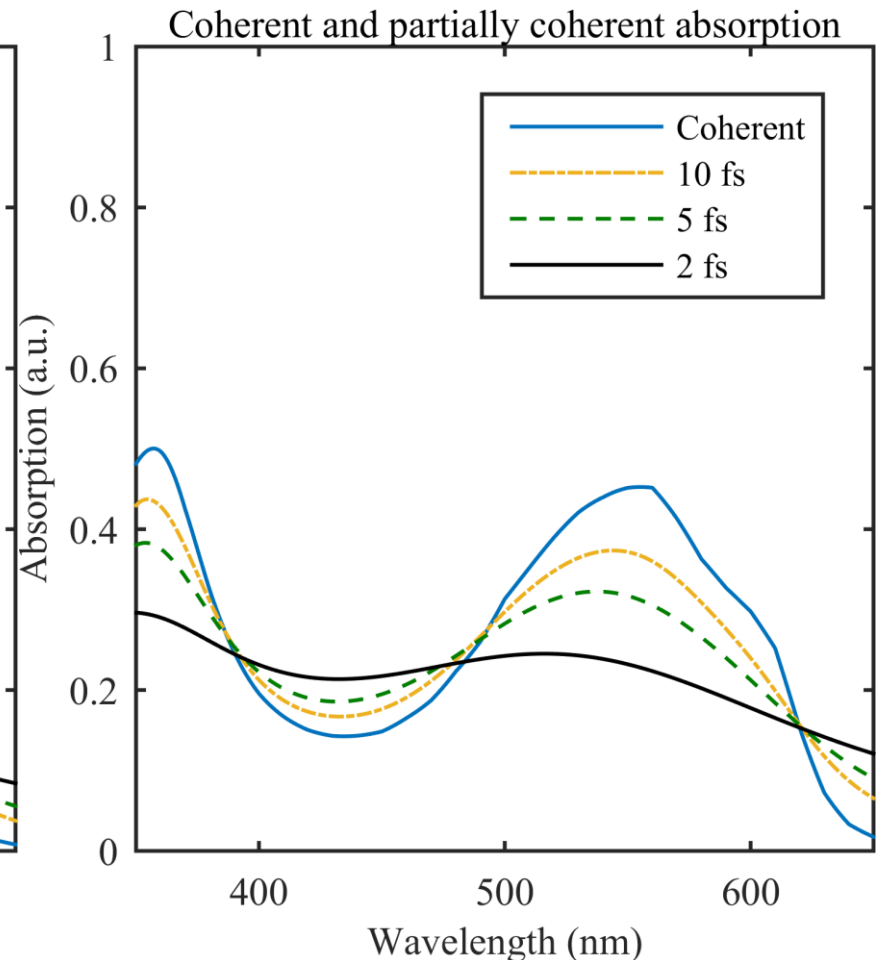


جذب نور غیر عمود با قطبیدگی TE

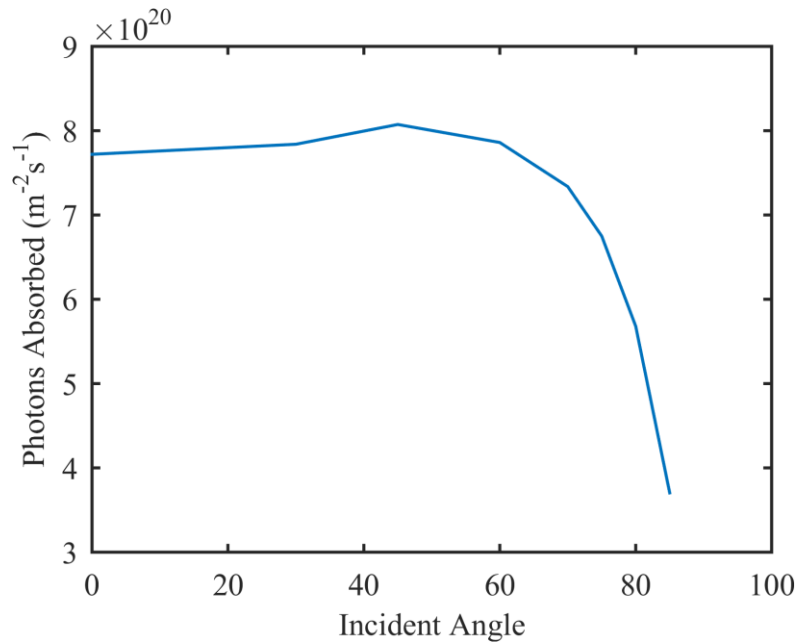
نور ورودی با زاویه ۶۰ درجه



نور ورودی با زاویه ۳۰ درجه



طیف جذبی نور خورشید با تغییر زاویه تابش



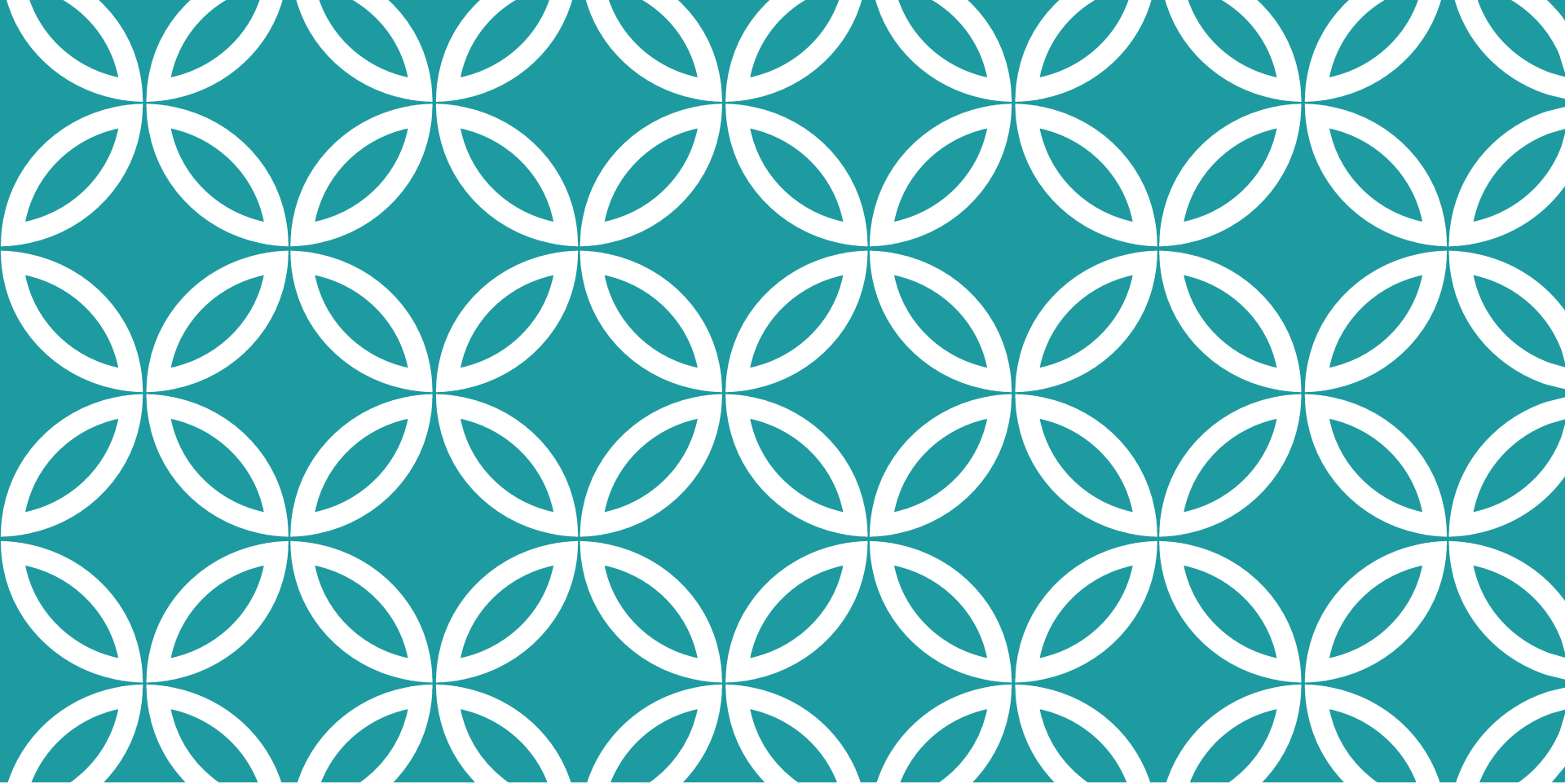
طیف جذبی نور غیر قطبیده

■ میانگین طیف جذبی نور TE و TM

افزایش زاویه

■ کاهش نور رسیده به واحد سطح

■ تغییر در میزان بازتابش در سطح



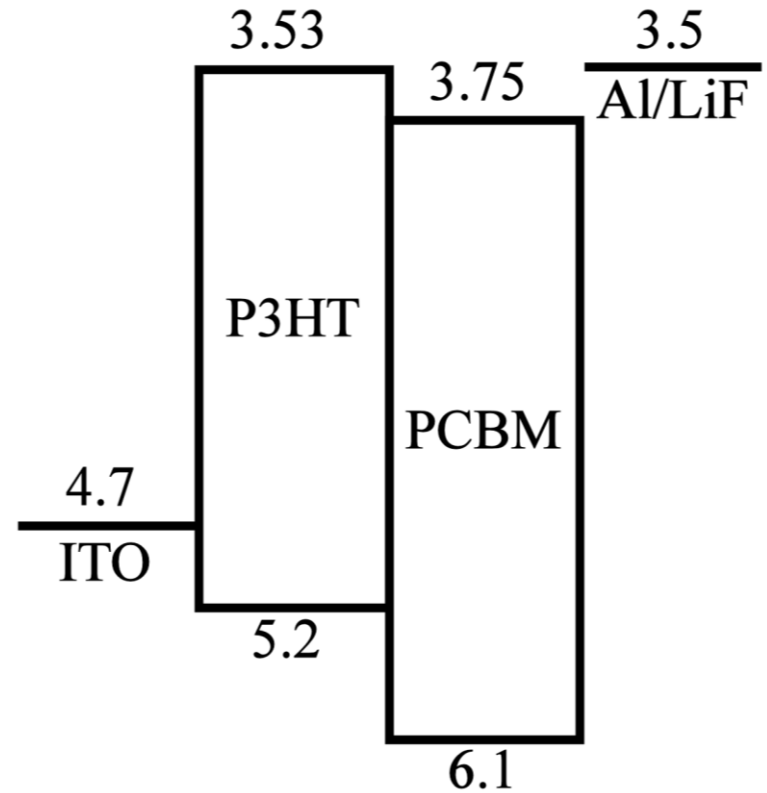
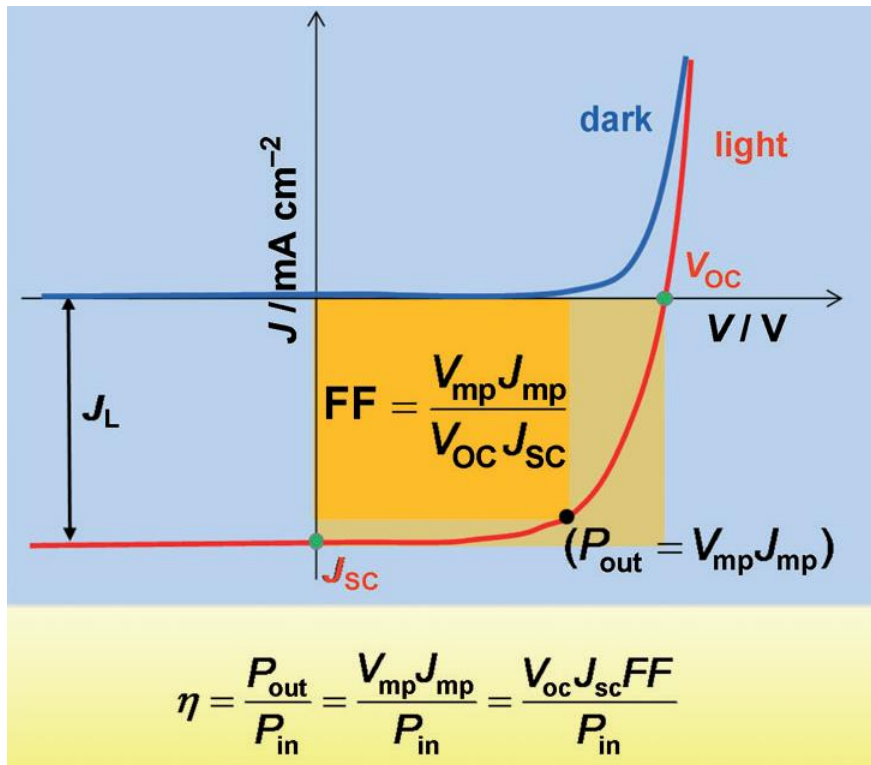
بخش سوم: شبیه سازی الکتریکی

- محاسبه نتایج الکتریکی
- بررسی اثر تغییر پارامترها

ساختار ساده شده و محاسبه مشخصه ولتاژ-جریان

سطوح انرژی

مشخصه ولتاژ-جریان و سایر پارامترها



معادله پواسون:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \psi) = -\rho$$

معادلات پیوستگی:

$$\partial n / \partial t = \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n + G_n - R_n$$

$$\partial p / \partial t = \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p + G_p - R_p$$

معادلات نفوذ و رانش:

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E}_n + qD_n \nabla n$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E}_p - qD_p \nabla p$$

معادله تغییرات اکسیتون:

$$dS/dt = G_{ph} + \nabla \cdot (D_s \nabla S) - R_{Dn,p} S + R_{singlet} R_{Ln,p} - (1/\tau_s) S$$

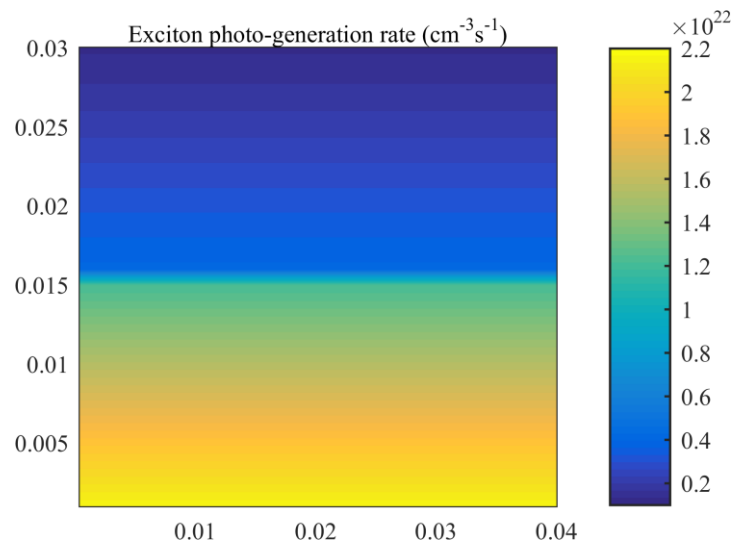
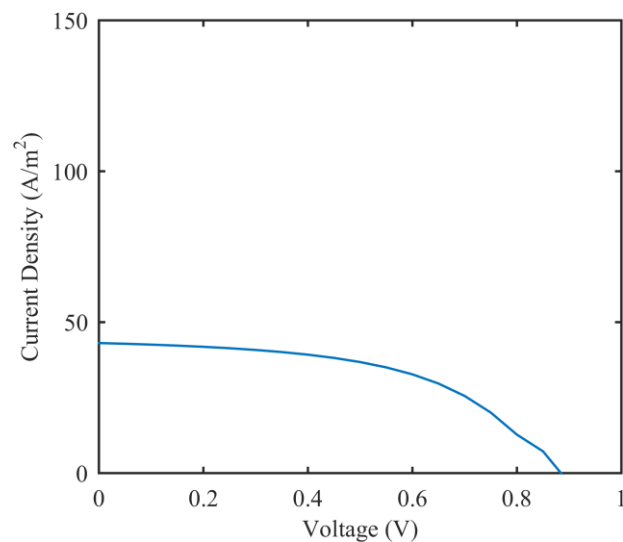
نرخ تولید اکسیتون و مشخصه ولتاژ-جریان



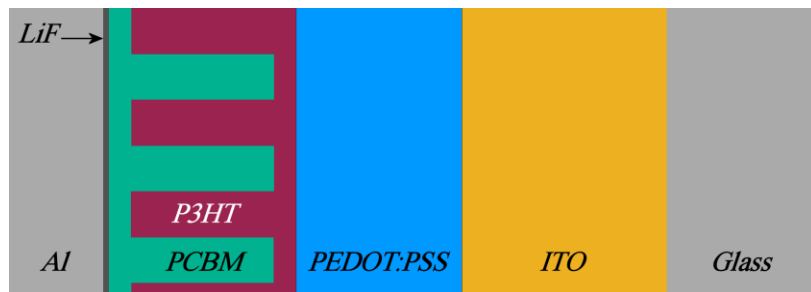
ساختار:

- ناهمگون لایه‌ای
- ضخامت لایه فعال: ۳۰ نانومتر

بازده: ۱,۵۹٪



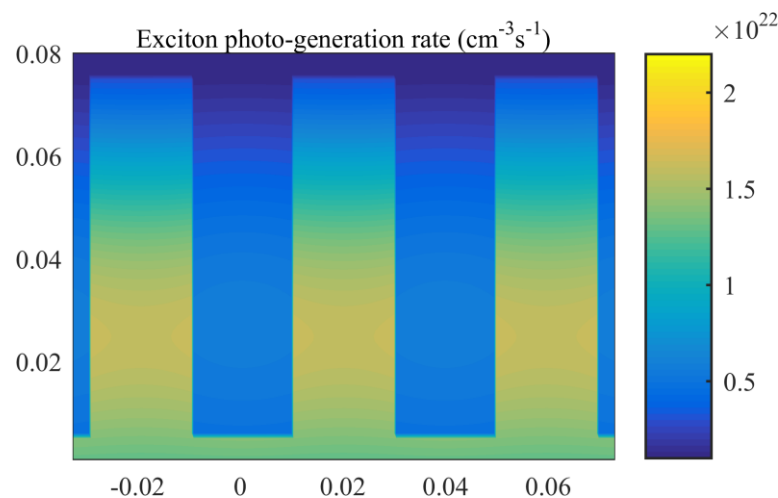
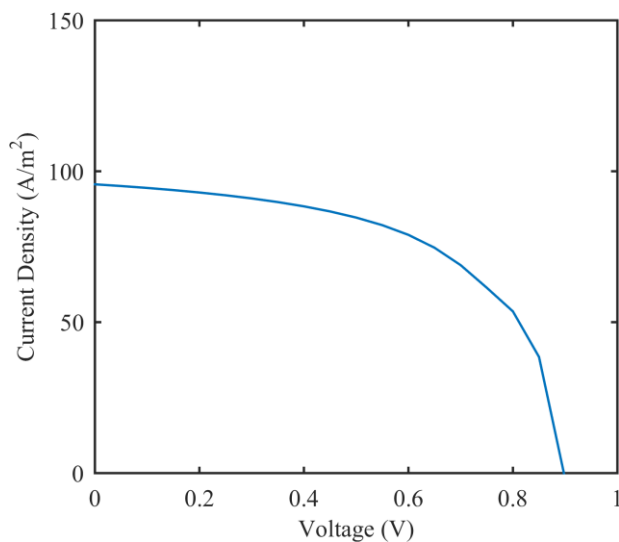
نرخ تولید اکسیژن و مشخصه ولتاژ-جریان



ساختار:

- ناهمگون توده‌ای
- ضخامت لایه فعال: ۸۰ نانومتر

بازده: ۰.۵، ۲۵٪

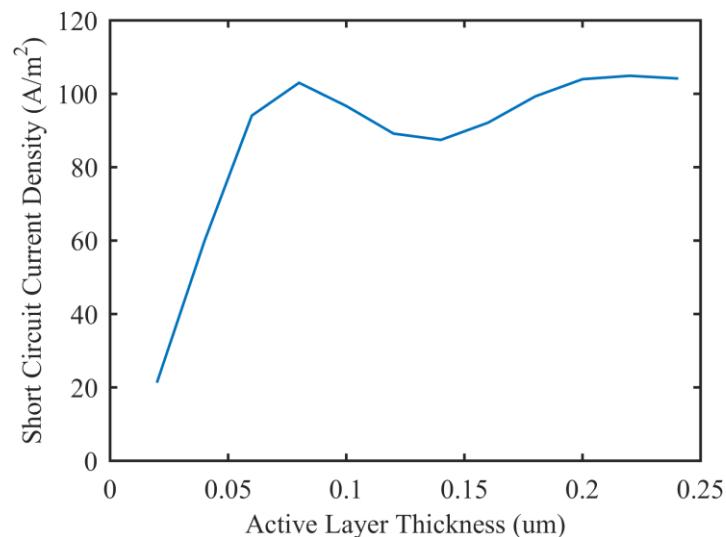


بازده جذب فوتون‌ها و بازده تبدیل توان

سلول‌های خورشیدی آلی						پارامتر
نمونه ۳		نمونه ۲		نمونه ۱		
ناهمگون توده‌ای		ناهمگون لایه‌ای		ناهمگون لایه‌ای		ساختار
	ضخامت لایه فعال		0.03 μm		0.08 μm	ضخامت لایه فعال

سلول‌های خورشیدی آلی						پارامتر
نمونه ۳		نمونه ۲		نمونه ۱		
	بازده جذب فوتونها		7.34 %		17.80 %	بازده جذب فوتونها
	FF		46.36 %		43.24 %	FF
	بازده تبدیل توان		1.59 %		3.89 %	بازده تبدیل توان

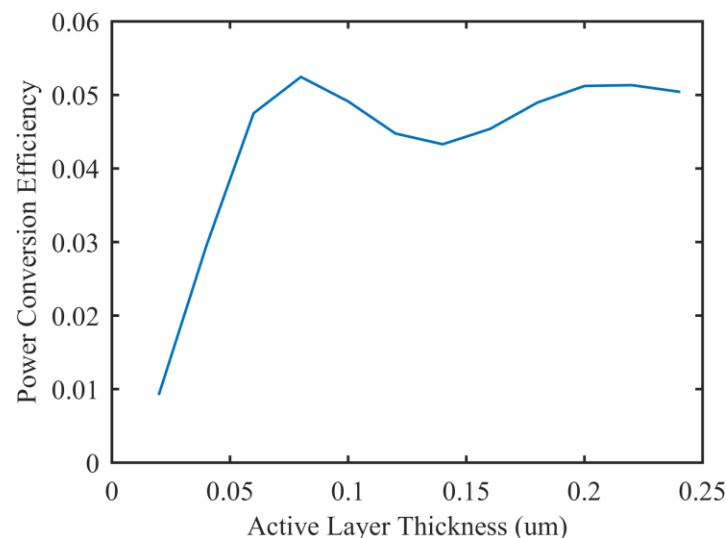
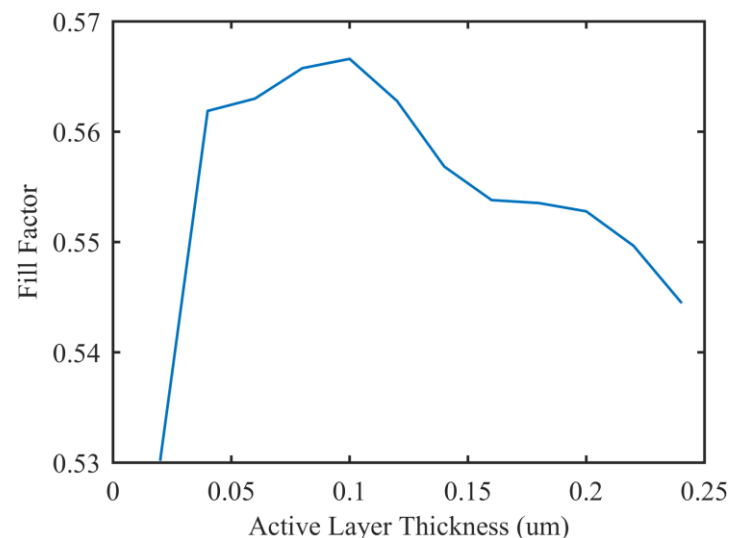
بررسی اثر ضخامت لایه فعال در ساختار ناهمگون توده‌ای



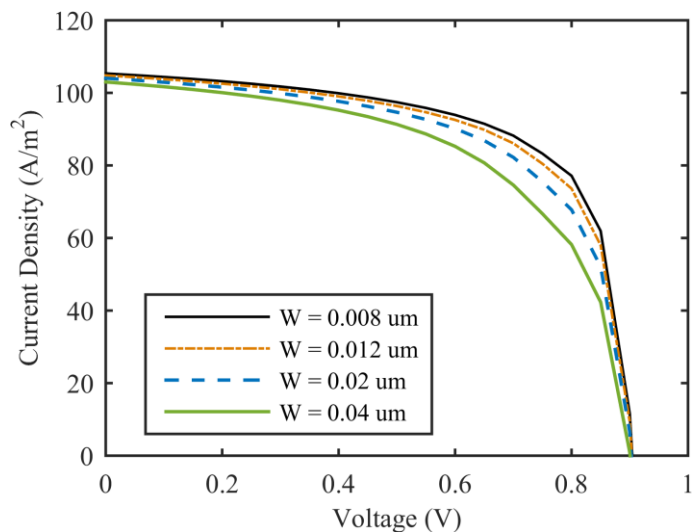
افزایش ضخامت:

- افزایش احتمال بازترکیب حامل‌های آزاد
- کاهش نسبی جریان اتصال کوتاه
- کاهش FF
- کاهش نسبی بازده

بیش‌ترین بازده در ضخامت ۸۰ میکرومتر

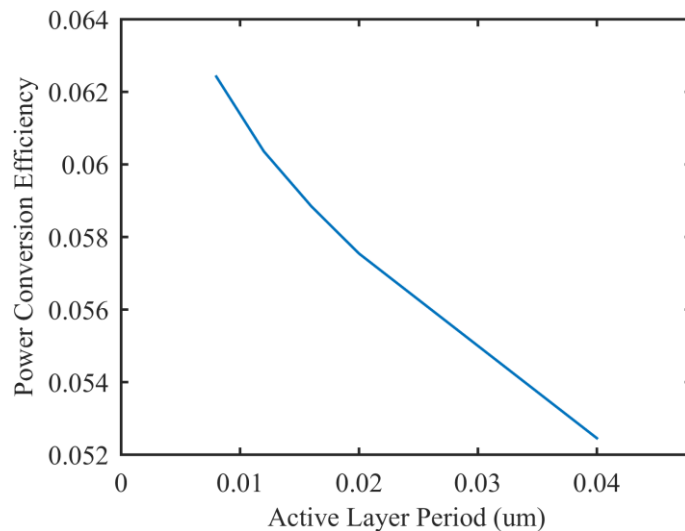
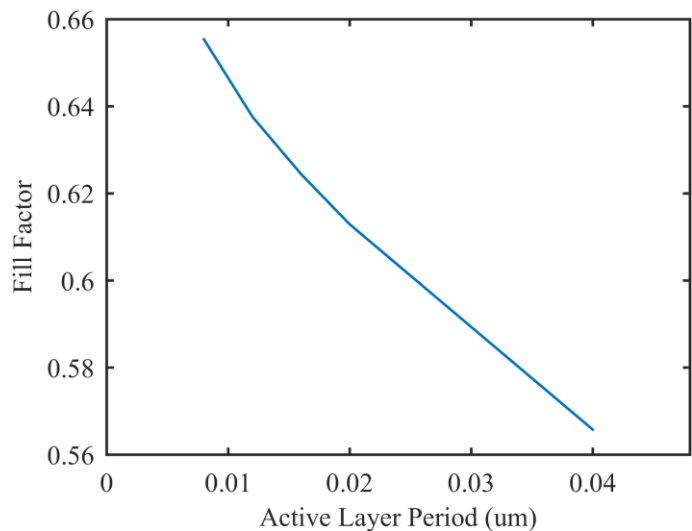


بررسی اثر پراکندگی نیمه هادی ها در لایه فعال



افزایش دوره تناوب:

- دورتر شدن مرزها
- کاهش احتمال جداسازی اکسیژن
- کاهش جریان
- افزایش چگالی حامل ها در مرز
- کاهش FF و بازده

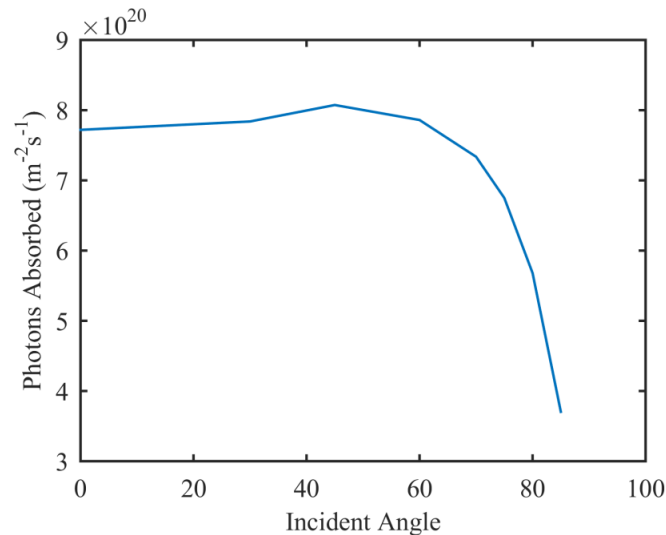


بررسی اثر زاویه نور ورودی

فرایندهای نوری تعیین کننده هستند

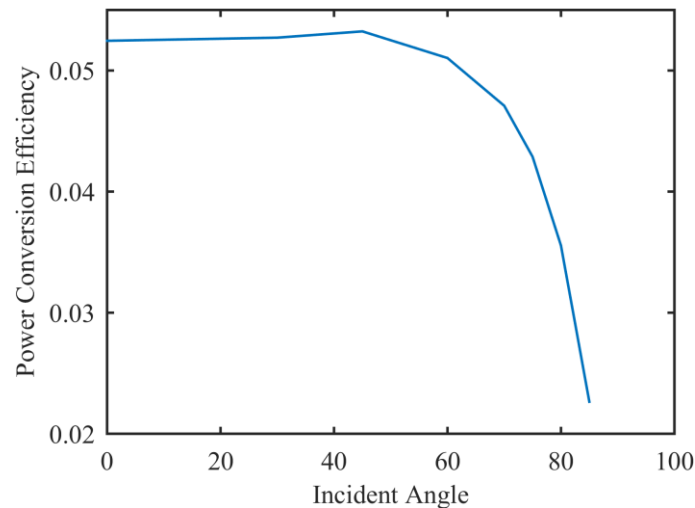
تغییرات بازده تا ۶۰ درجه:

- به دلیل کاهش توان رسیده به واحد سطح
- تغییر در میزان بازتابش در سطح



کاهش بازده بین ۶۰ تا ۹۰ درجه:

- به دلیل افزایش بازتابش در سطح



جذب بخش غیر مستقیم نور خورشید:

- لزوم استفاده از سطح ضد انعکاس مناسب

افزایش ضخامت لایه فعال

- به طور کلی موجب افزایش جذب می شود
- بیشترین بازده در ضخامت ۸۰ نانومتر

افزایش دوره تناوب در لایه فعال

- کاهش بازده

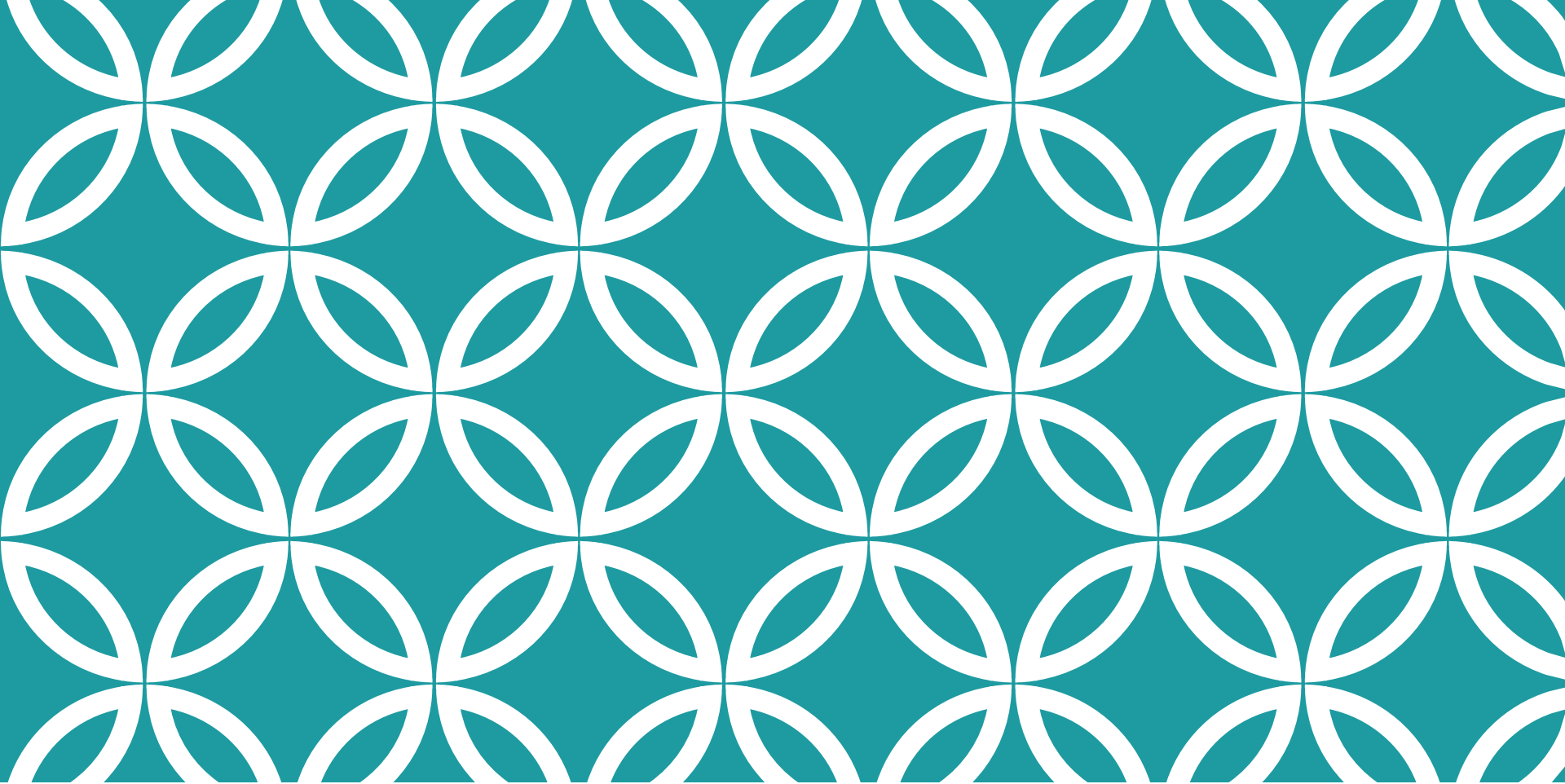
افزایش زاویه تابش

- کاهش نور رسیده به واحد سطح
- افزایش انعکاس

طیف خورشیدی

- غیر قطبیده
- مجموعه ای از خطوط طیف
- طیف جذبی هموار

■ بررسی اثر نقص‌ها و مرزهای غیر ایده‌آل	ضخامت لایه فعال
■ استفاده از مرزهای غیر هموار ■ مرزهای با تغییرات متناوب یا تصادفی	دوره تناوب در لایه فعال
■ استفاده از سطوح ضد انعکاس مناسب	زاویه تابش
■ بررسی بخش غیرمستقیم نور خورشید با زاویه های متفاوت	طیف خورشیدی



با تشکر