

ساخت و بهینه سازی سلول های خورشیدی لایه نازک $\text{CuInGa}(\text{S}_{x}\text{Se}_{1-x})_2$ با استفاده از روش های تمام چاپ

اساتید راهنما

دکتر نیما تقوی نیا

دکتر عباس بهجت

استاد مشاور

دکتر فریبا تاج آبادی

پژوهش

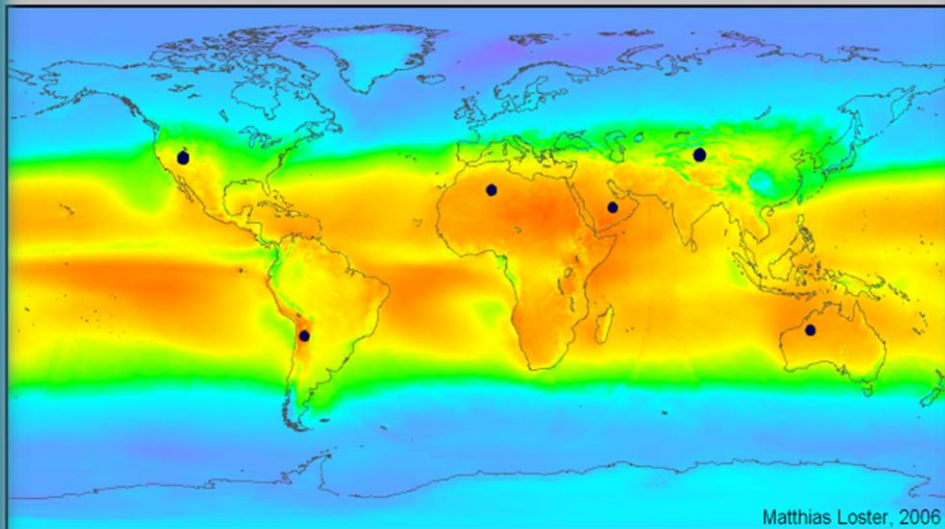
مهدی دهقانی

فهرست عناوین

- دلیل نیاز به سلول خورشیدی
- چگونگی عملکرد سلول خورشیدی
- نسل‌های مختلف سلول خورشیدی
- معرفی ساختار کریستالی لایه‌های جاذب CIGS
- معرفی ساختارهای موجود در سلول خورشیدی فیلم نازک CIGS
- روش‌های لایه‌نشانی لایه‌های مختلف
- پیشنهاد ساختار
- ساخت لایه‌ی پکیده‌ی تیتانیوم دی اکساید به عنوان لایه‌ی سد کننده
- ساخت لایه‌ی بافر با استفاده از روش محلول
- ساخت سلول خورشیدی با جوهر آبی
- ساخت سلول خورشیدی CIS_2 با استفاده از جوهر آلی

دلیل نیاز به سلول خورشیدی

- رشد تقاضای انرژی (۲۰ تراوات)
- ایجاد آلودگی در اثر استفاده از سوخت فسیلی
- انرژی خورشیدی (منبع تجدید پذیر، پاک، ارزان و در دسترس)
- میزان تابش خورشیدی بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال (در ایران)
- ۲۸۰ روزآفتابی در ایران

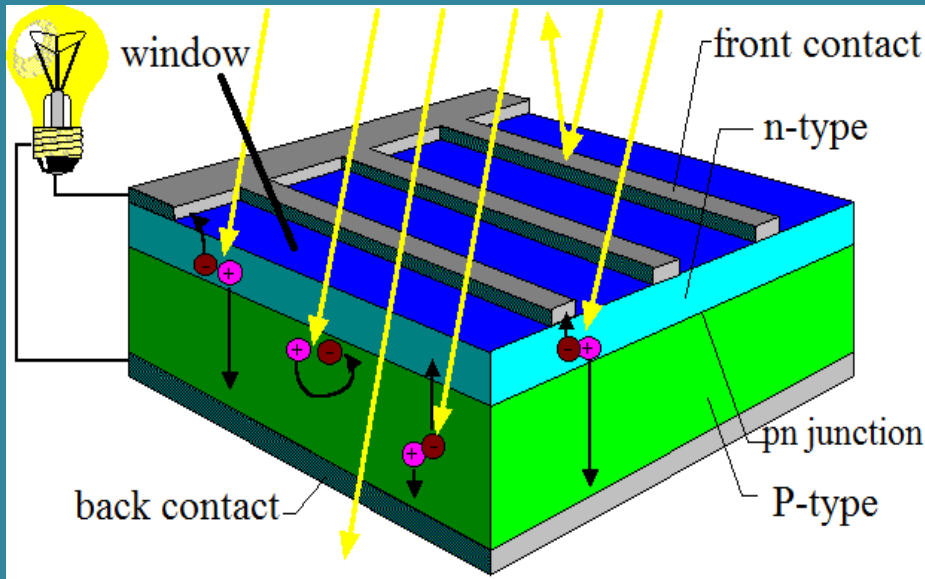


0 50 100 150 200 250 300 350 W/m²

$\Sigma \bullet = 18 \text{ TWe}$

مساحت نقاطی که با دایره‌های مشکی مشخص شده نیاز انرژی دنیا را در سال ۲۰۱۰ برآورده می‌کند. مقیاس به صورت وات بر متر مربع است.

عملکرد سلول خورشیدی



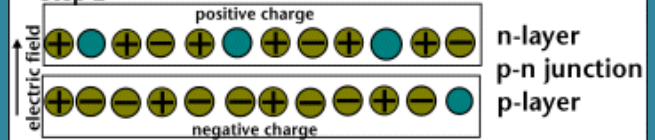
PHOTOVOLTAIC CELL

- A location that can accept an electron
- Free electron
- ⊕ Proton
- Tightly-held electron

Step 1



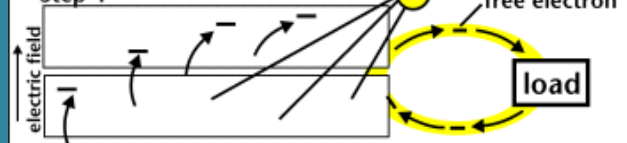
Step 2



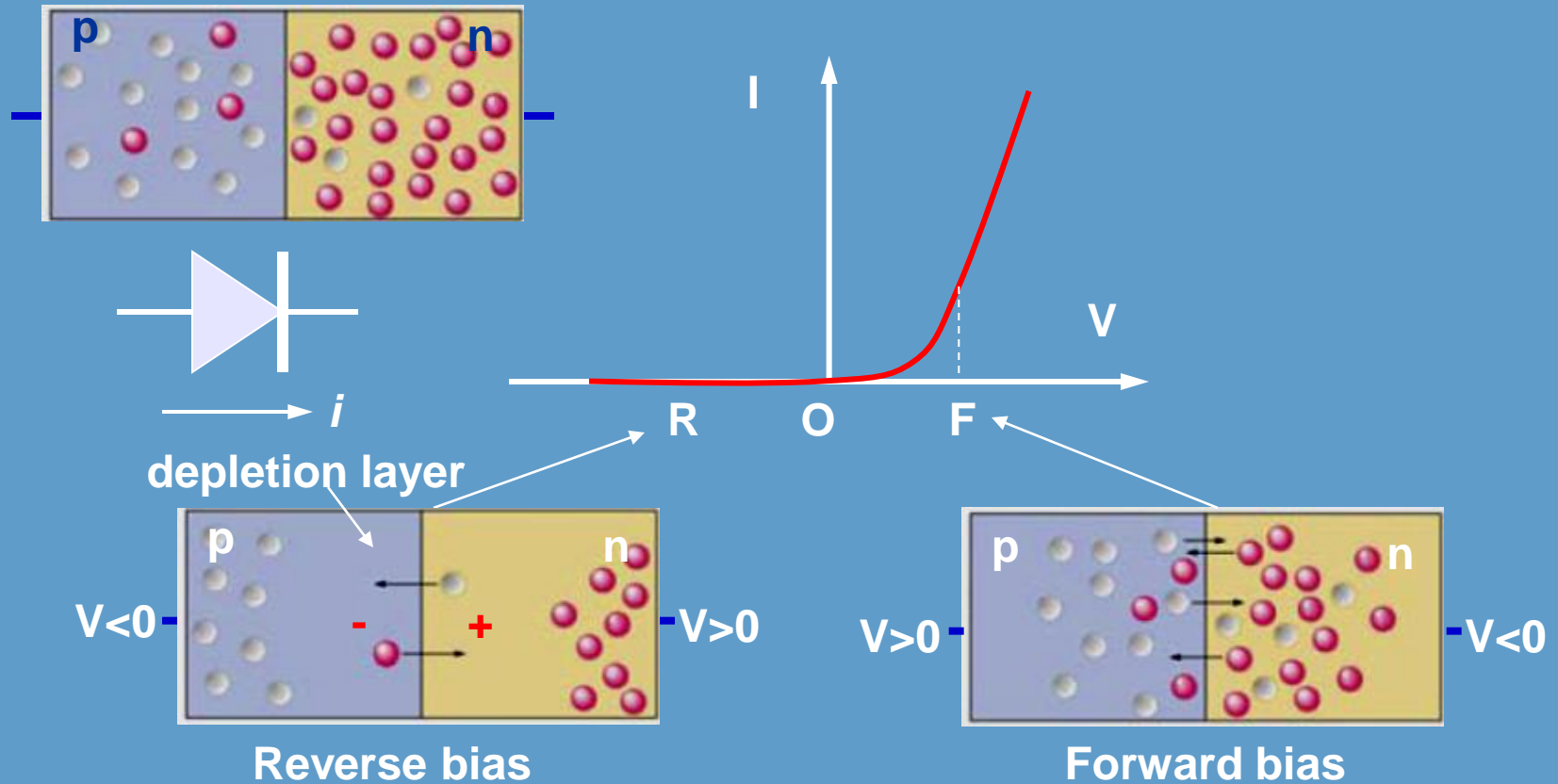
Step 3



Step 4



p-n Junction (p-n diode)



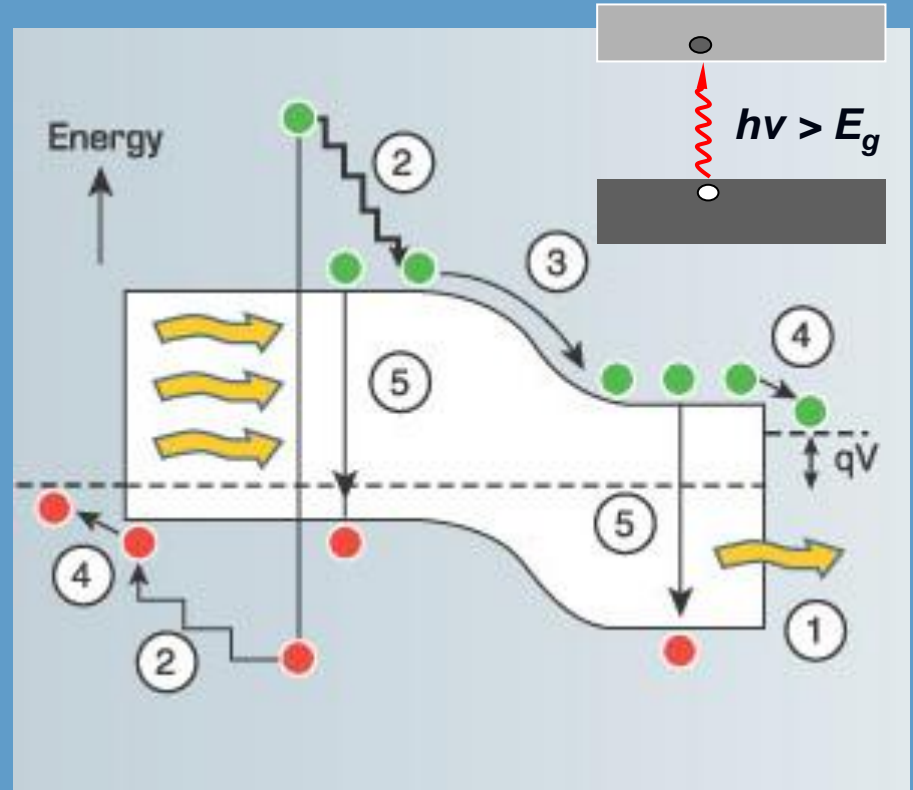
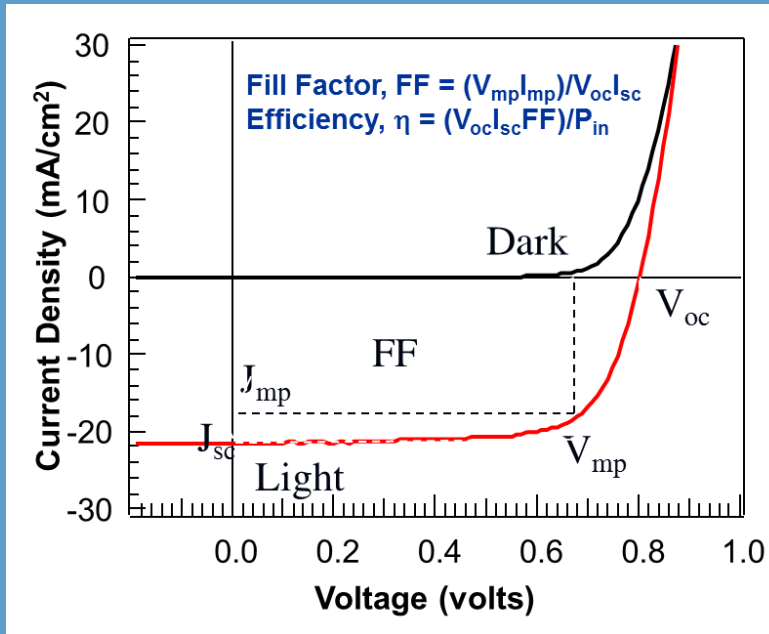
- A p-n junction is a junction formed by combining p-type and n-type semiconductors together in very close contact.
- In p-n junction, the current is only allowed to flow along one direction from p-type to n-type materials.

p-n Junction (p-n diode)

- ❖ Solar Cells
- ❖ Light-emitting Diodes
- ❖ Diode Lasers
- ❖ Photodetectors
- ❖ Transistors

➤ A p-n junction is the basic device component for many functional electronic devices listed above.

اثر باند ممنوعه‌ی انرژی



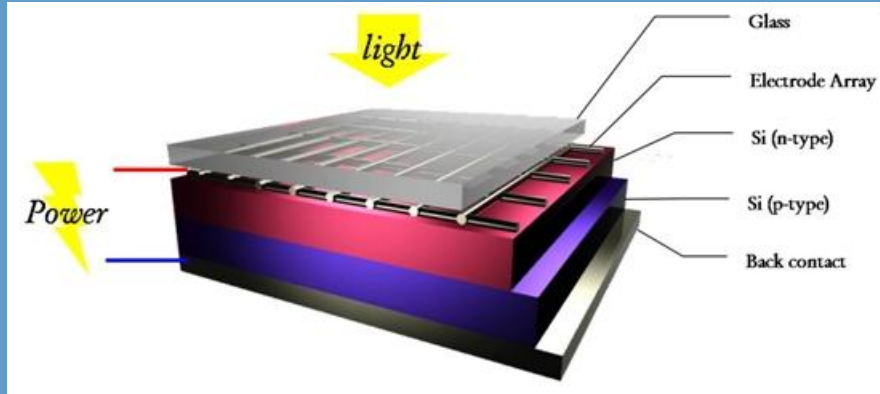
- Efficiency, $\eta = (V_{oc}I_{sc}FF)/P_{in}$ $V_{oc} \propto E_g$, $I_{sc} \propto \#$ of absorbed photons
- Decrease E_g , absorb more of the spectrum
- But not without sacrificing output voltage

تاریخچه

- 1839 - French physicist Alexandre-Edmond Becquerel first recognized the photovoltaic effect.(different AgCl coated electrode in acid solution illuminated by different light)
- 1894 - first solar cell built, by Charles Fritts, coated semiconductor selenium with an extremely thin layer of gold to form the junctions.
- 1954 - Bell Laboratories, experimenting with semiconductors, accidentally found that silicon doped with certain impurities was very sensitive to light. Daryl Chapin, Calvin Fuller and Gerald Pearson, invented the first practical device for converting sunlight into useful electrical power. Resulted in the production of the first practical solar cells with a sunlight energy conversion efficiency of around 6%.
- 1958 - First spacecraft to use solar panels was US satellite Vanguard 1

نسل اول

سلول سیلیکونی تک کریستالی و چند کریستالی

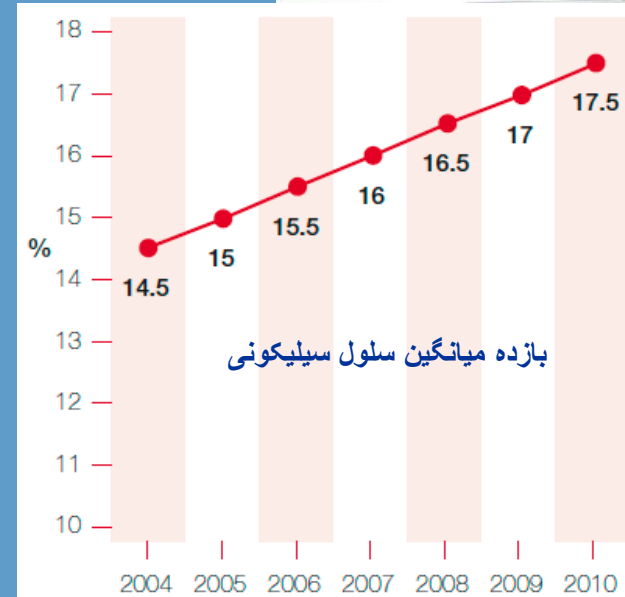


89.6% of 2007 Production

45.2% Single Crystal Si

42.2% Multi-crystal Si

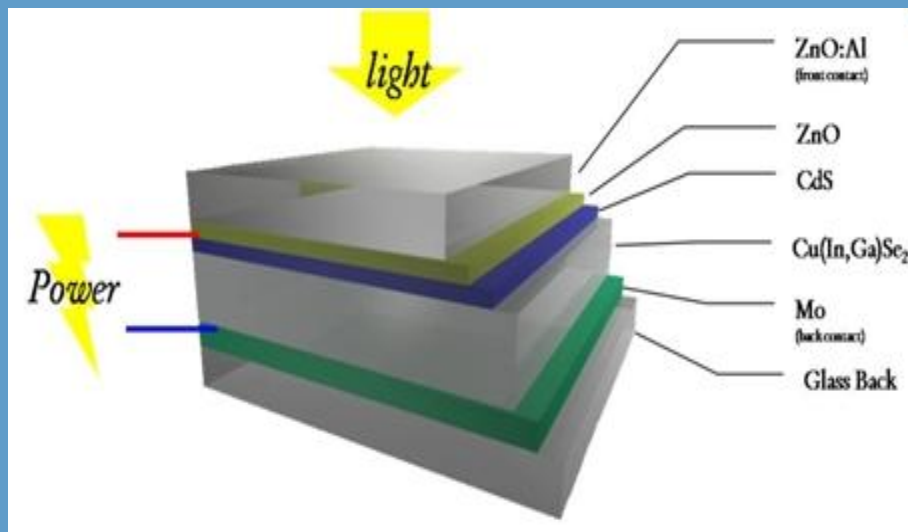
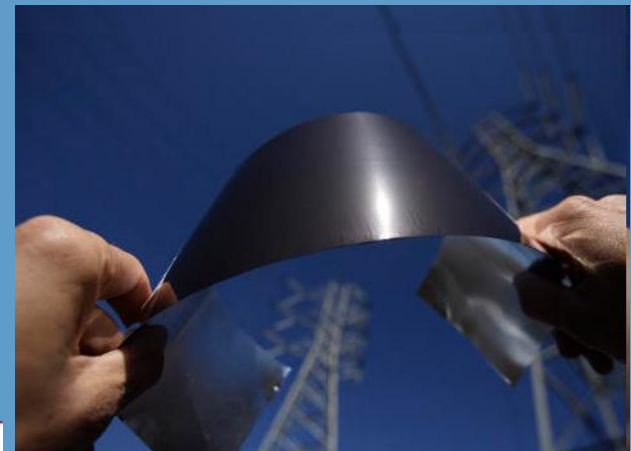
- Limit efficiency 31%
- Single crystal silicon - 16-19% efficiency
- Multi-crystal silicon - 14-15% efficiency
- Best efficiency by SunPower Inc 22%



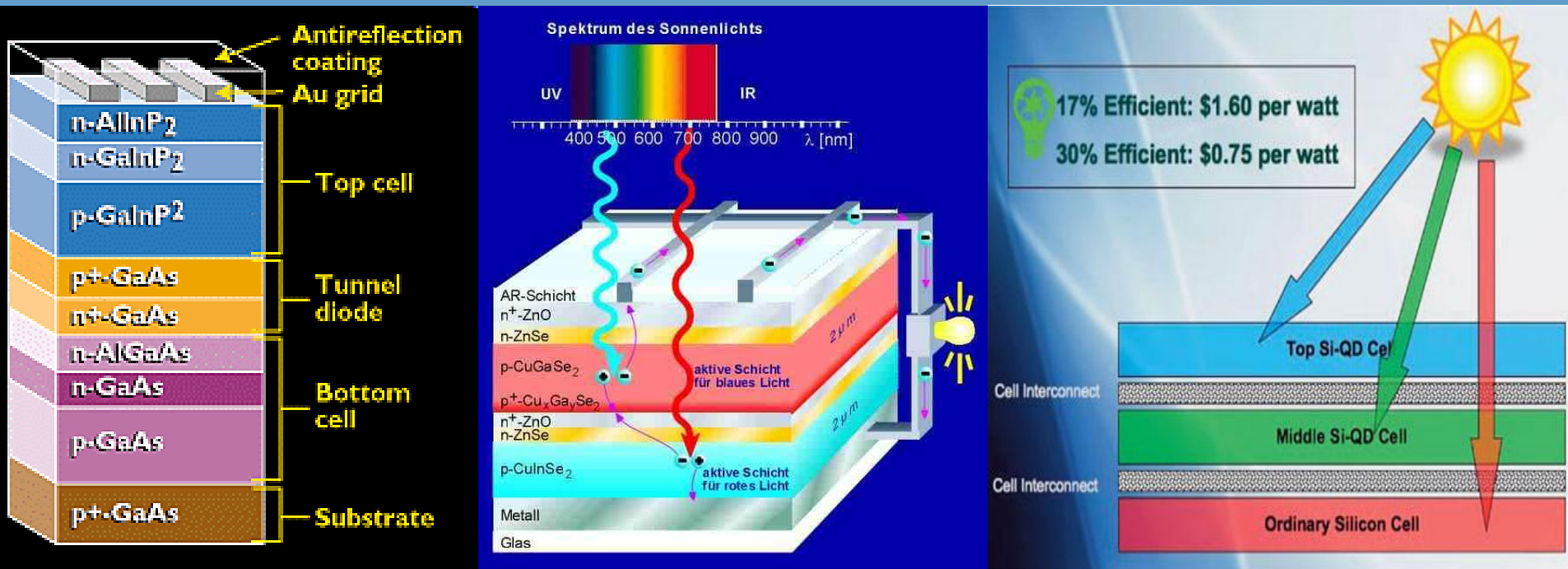
نسل دوم: سلول‌های لایه نازک

CdTe 4.7% & CIGS 0.5% of 2007 Production

- New materials and processes to improve efficiency and reduce cost.
- Thin film cells use about 1% of the expensive semiconductors compared to First Generation cells.
- CdTe – 8 – 11% efficiency (18% demonstrated)
- CIGS – 7-11% efficiency (20% demonstrated)



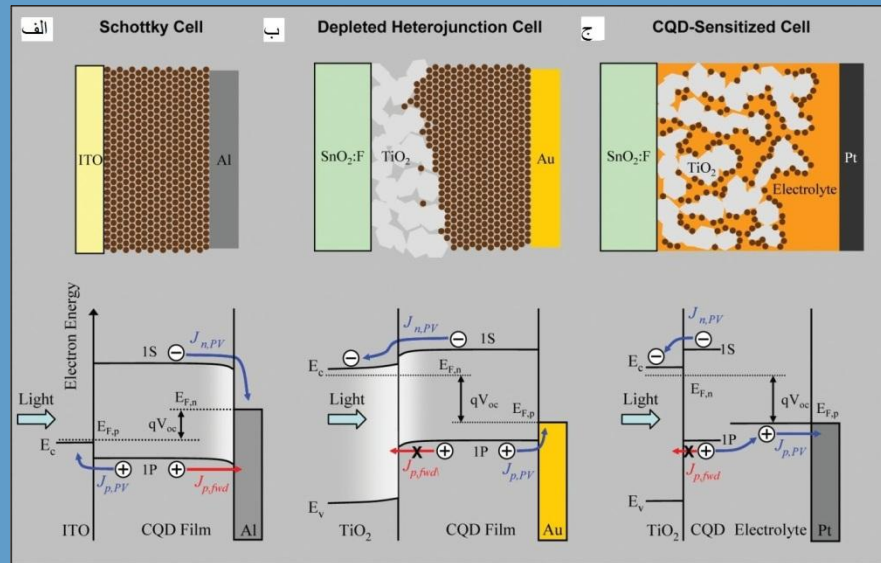
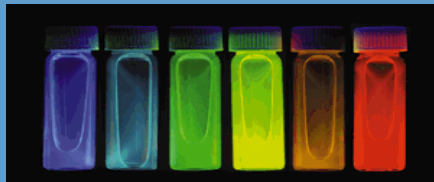
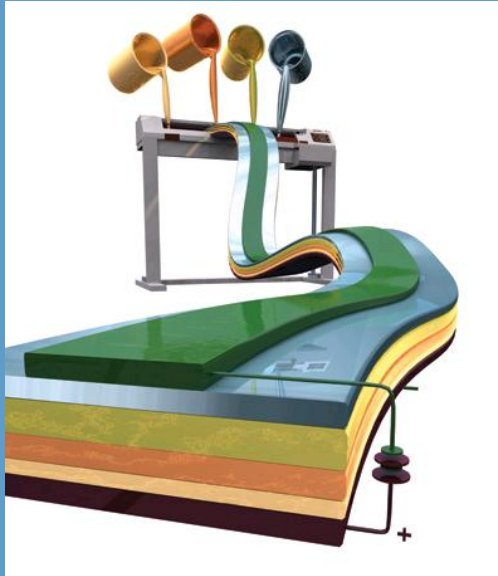
نسل سوم سلول‌های چند اتصال



- Enhance poor electrical performance while maintaining very low production costs.
- Current research is targeting **conversion efficiencies of 30-60%** while retaining low cost materials and manufacturing techniques.
- Multi-junction cells – 30% efficiency (40-43% demonstrated)

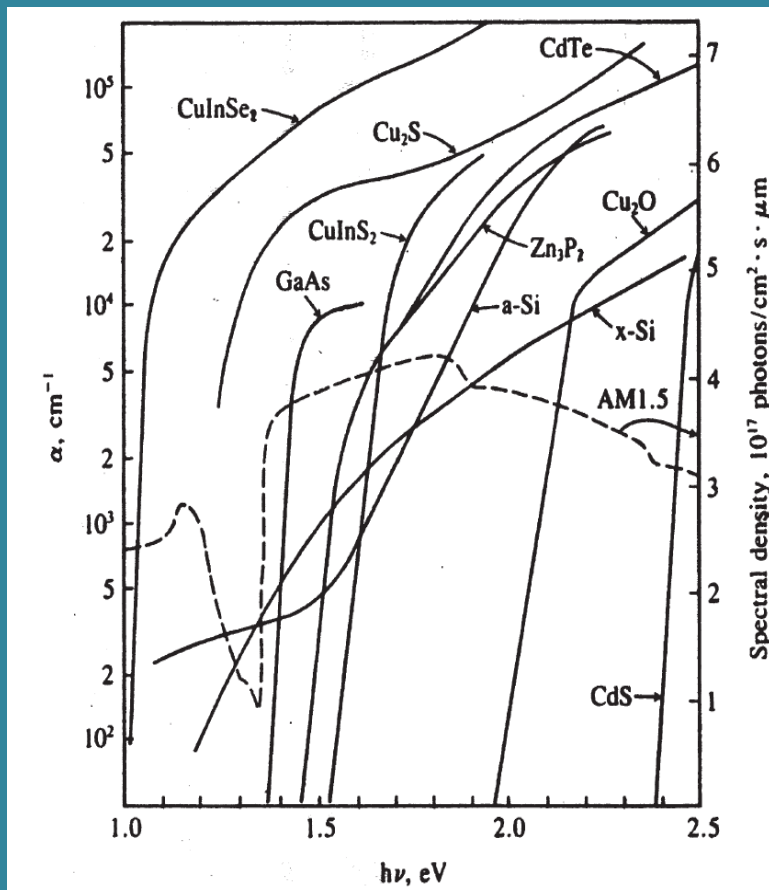
نسل‌های آینده: سلول‌های خورشیدی قابل چاپ

نیم‌رساناهای محلول پایه



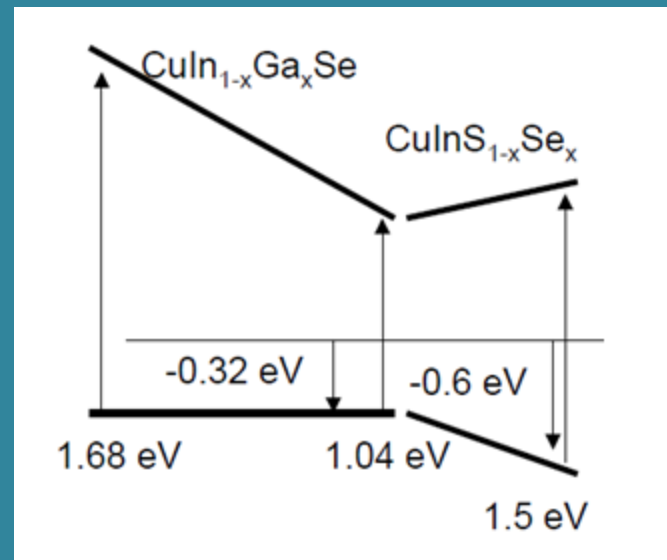
- Nanostructured solar cell
- Dye synthesized solar cell
- QD synthesized solar cell
- Polymer solar cell

نمودار ضریب جذب بر حسب اندازه‌ی نوار ممنوعه‌ی انرژی



مزایای استفاده از CuInGa(Se,S)

- نوار انرژی ممنوعه‌ی متغیر
- ضریب جذب بالا
- ضخامت کم لایه‌ها

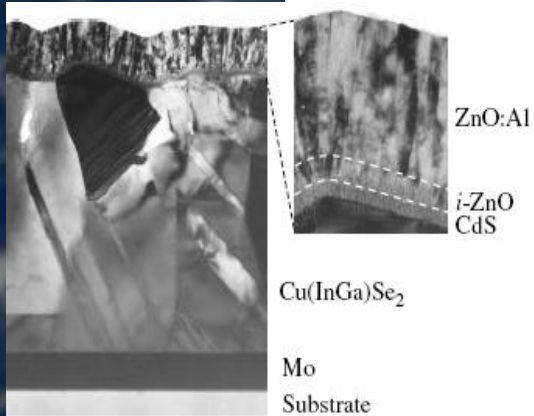
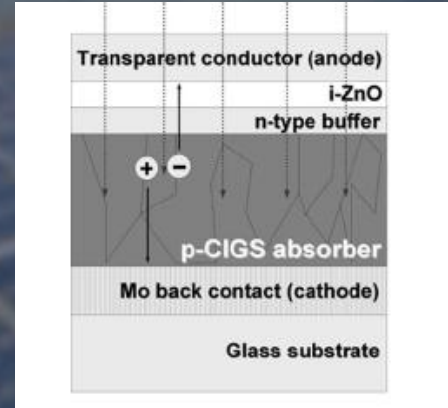


سلول خورشیدی لایه نازک CIGS

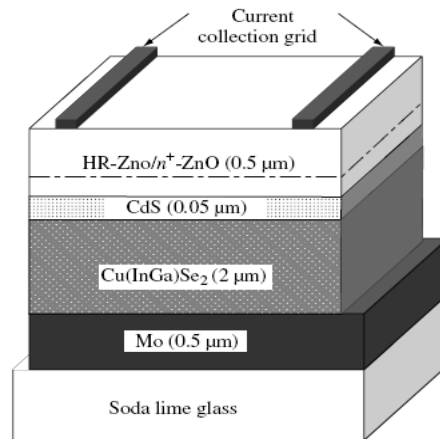
• سلول خورشیدی با ساختار زیر لایه

ZnO transparent oxide
Cds buffer layer (or Indium Sulfide (InS)
CIGS (absorber)
Mo contact layer
Glass

Fig. 11. Cross section for copper indium gallium di-selenide.



TEM cross section of a Cu(InGa)Se₂ solar cell



Schematic cross section of a typical Cu(InGa)Se₂ solar cell

ساختارهای سلول خورشیدی لایه نازک CIGS

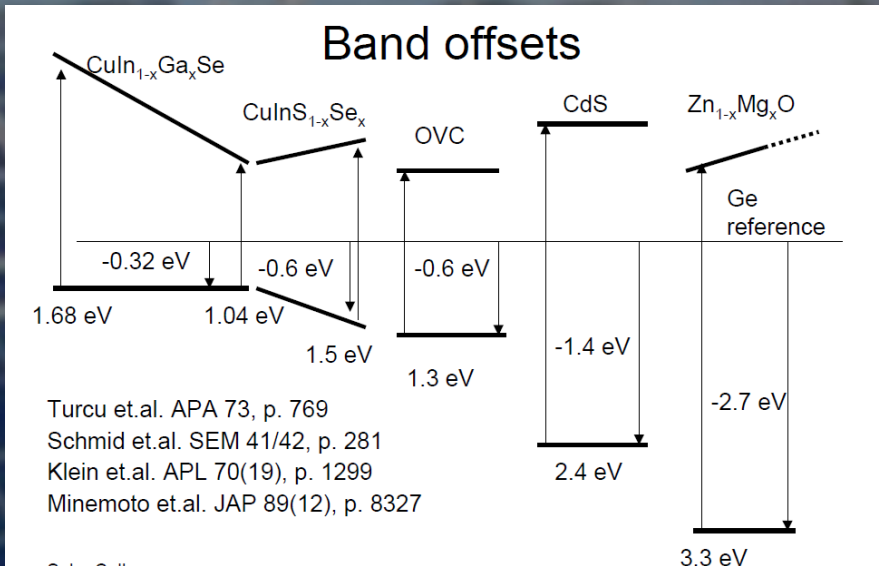
- سلول خورشیدی با ساختار زیر لایه

مزایا

- بازده بالا (۲۰/۳ درصد) در حد رقابت با سیلیکون
- نازک بودن لایه‌ها و جلوگیری از مصرف ماده
- امکان بالا بردن دما با زیر لایه‌ی سخت
- قابلیت لایه نشانی بر زیر لایه‌ی انعطاف پذیر (۱۹ درصد بازده)

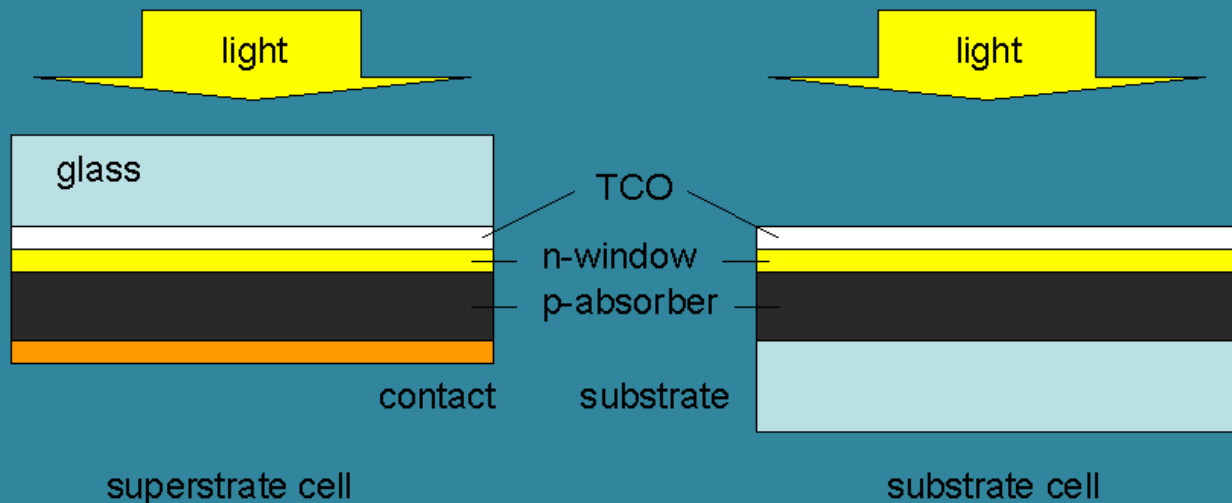
معایب

- روش‌های خلا
- سلنیزاسیون



ساختارهای سلول خورشیدی لایه نازک CIGS

• ساختار رولایه



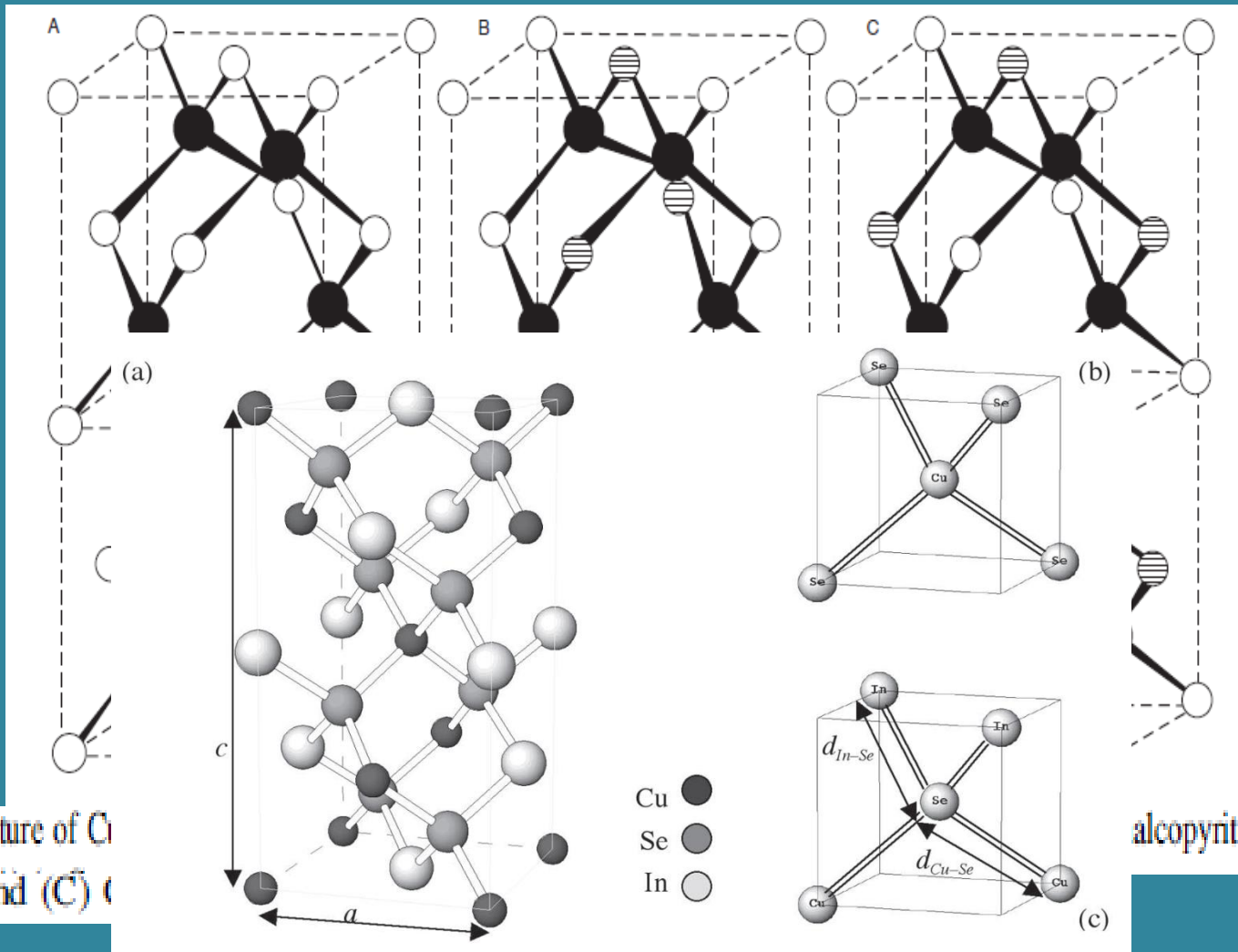
معایب:

- بازده کم
- ناتوانی در تحمل دمای بالا

مزایا:

- امکان کپسوله کردن بسیار راحت
- امکان استفاده از لایه نشانی‌ها به روش غیر خلا

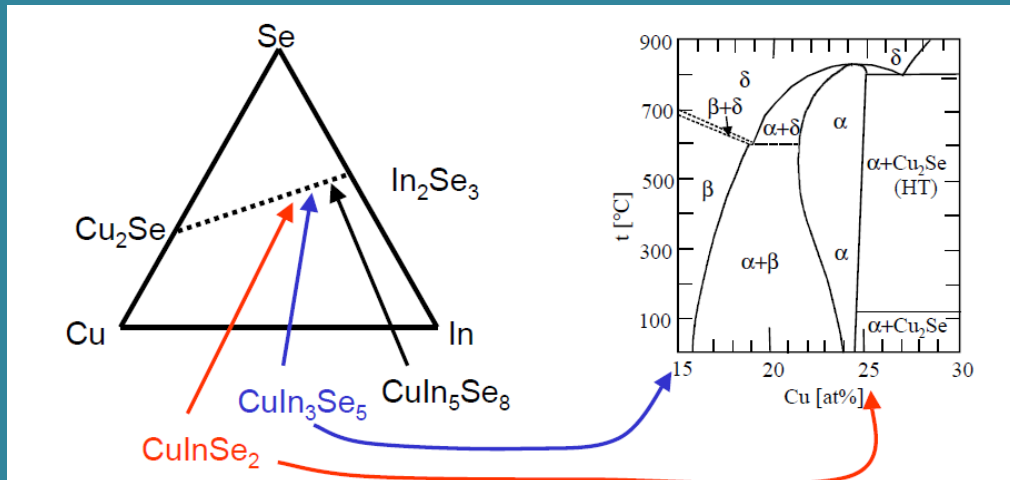
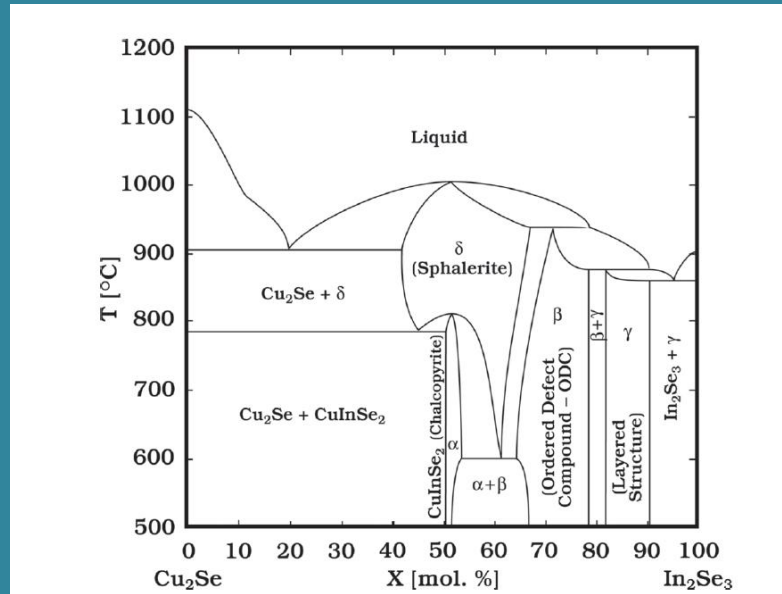
ساختار کریستالی لایه ی جاذب CIGS



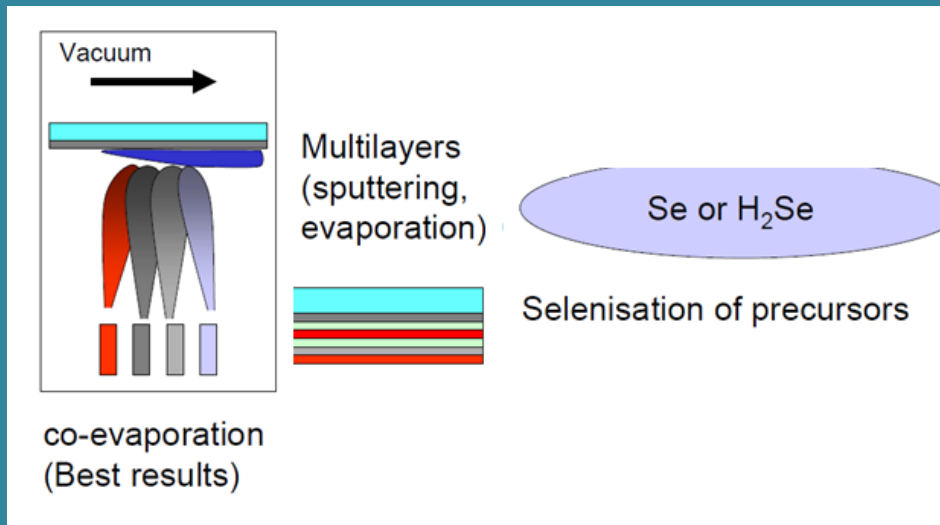
Crystal structure of CuInGaS₂ (CIGS) showing the arrangement of atoms (Cu, Se, In) in the crystal lattice.

chalcopyrite (Cu, In, and Ga) structure.

دیاگرام فازی



روش‌های لایه‌نشانی



• روش‌های لایه‌نشانی خلا

بهترین بازده ۲۰/۳ درصد

معایب:

سرعت کم

هدر رفت ماده

• روش‌های غیر خلا

• الکتروشیمیایی

• ساخت نانو جوهر (نانوذرات فلزی، نانوذرات سلنیدی

و سولفیدی، نانوذرات اکسیدی فلزی)

• روش حل کردن پیش‌ماده‌ها (استفاده از هیدرازین یا

محلول‌های آبی و آلی دیگر)

دکتر بلید،
اسکرین پرینت،
لایه نشانی
چرخشی و
افشانه کردن

معایب روش‌های لایه نشانی غیر خلا

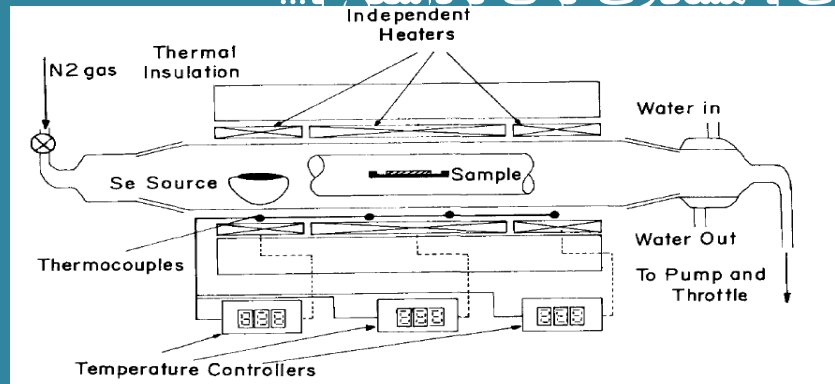
- روش ساخت نانوجوهر:

I. استفاده از وسایل و چیدمان‌های پیچیده و نیاز به محیط خنثی

II. عملیات اضافی برای جداسازی نانوذرات

III. به هم چسبیدن نانوذرات و مشکلات تک برداشتن و ...

IV. ناپایداری جوهر در اکسیداسیون

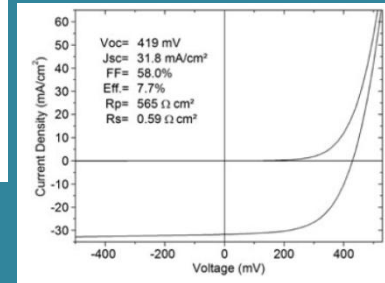
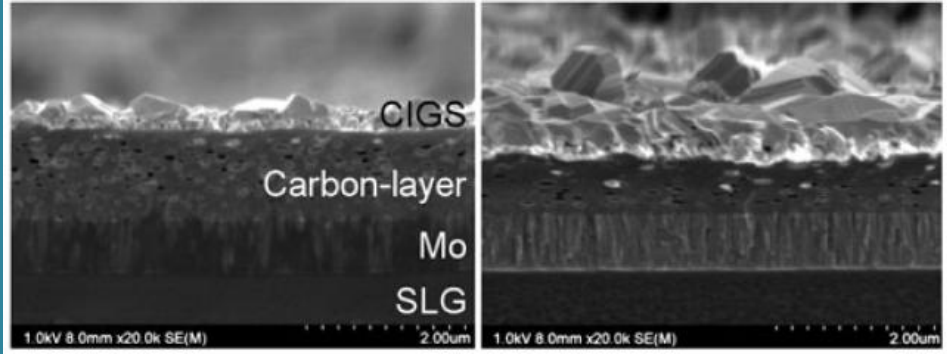


در نهایت نیاز به سلنیداسیون

معایب روش‌های غیر خلا

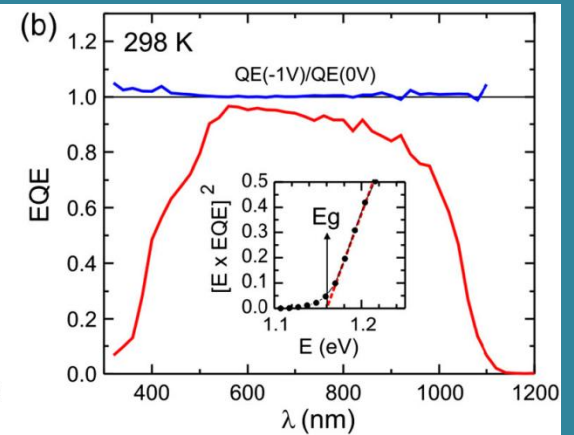
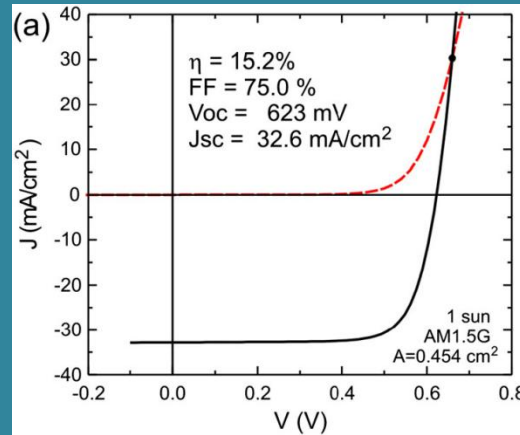
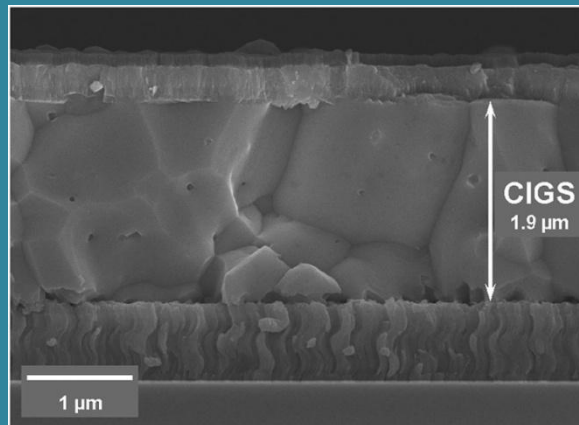
• روش پیش‌ماده‌ها:

۱. باقی ماندن کربن در حلال آلی



Prog. Photovolt: Res. Appl. 2012; **20**:526–533

۱۱. سمی بودن هیدرازین (بهترین بازده در میان روش‌های غیر خلا بدون سلنیزاسیون)



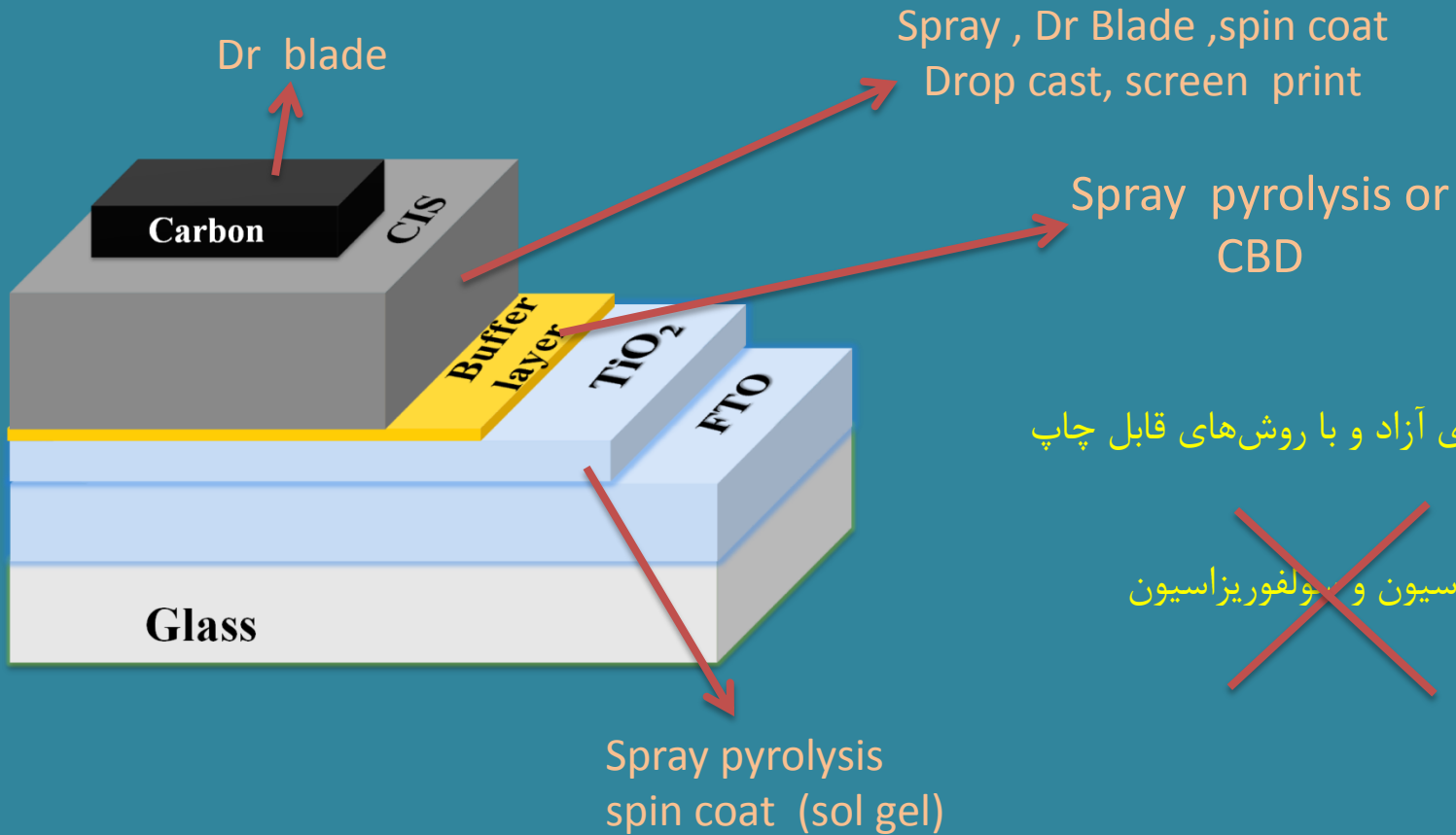
Prog. Photovolt: Res. Appl. 2013; **21**:82–87

پیشنهاد :

روش غیرخلا و دمای پایین بدون استفاده از سولفوریزاسیون و سلنیزاسیون با استفاده از ساختار ناهمگون تهی شده‌ی رولایه

- حلال باید سریعاً تبخیر شود و قدرت حلالیت آن زیاد باشد
- حلال سمی نباشد و ارزان باشد
- استفاده از ساختار معکوس (لایه‌نشانی خلا به حداقل برسد)
- دمای رشد کریستال پایین بیاید (بخاطر استفاده از ساختار معکوس)

ساختار پیشنهادی برای سلول



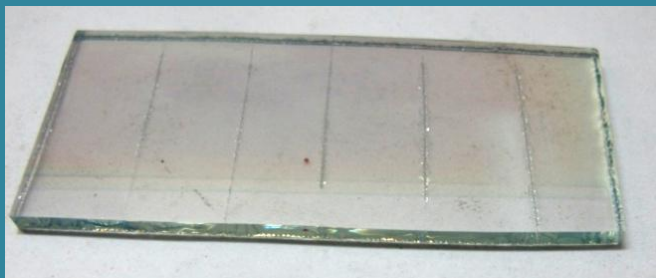
لایه‌نشانی‌ها در هوای آزاد و با روش‌های قابل چاپ

افشانه کردن لایه‌ی فشرده‌ی تیتانیوم دی‌اکسید

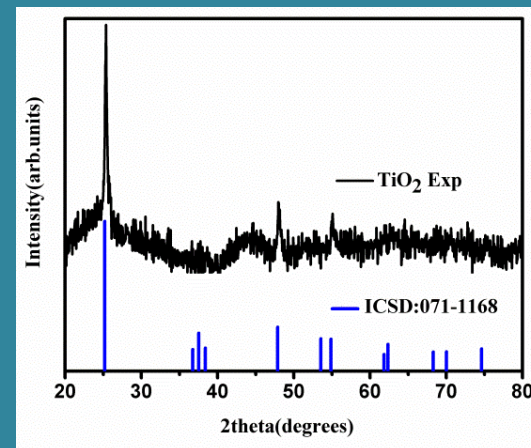
5.00ml Eth
0.36ml Acetyl acetone
0.24ml TTIP



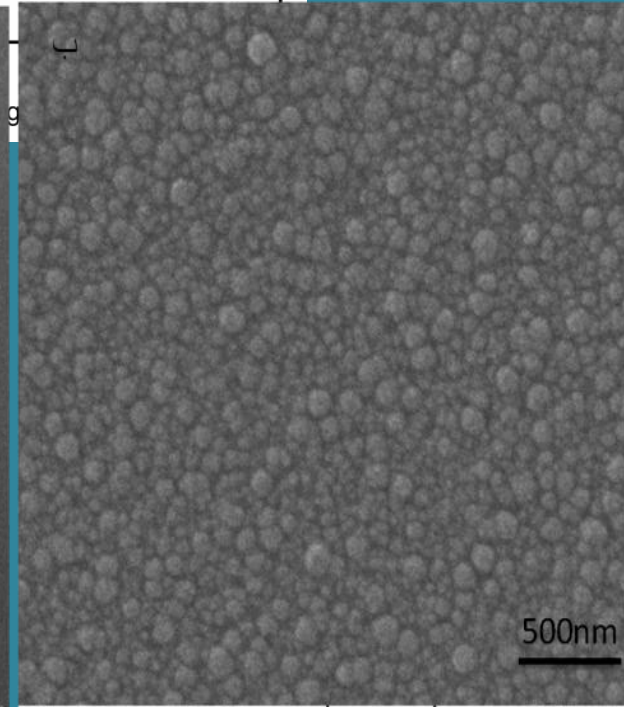
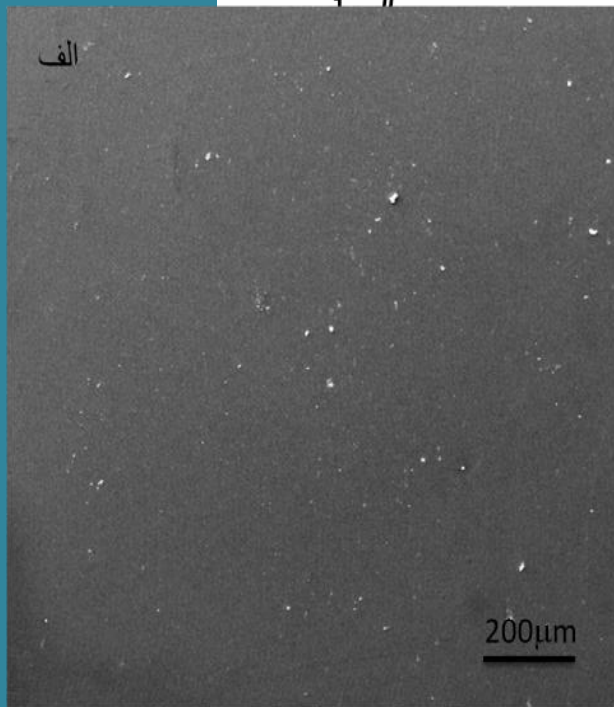
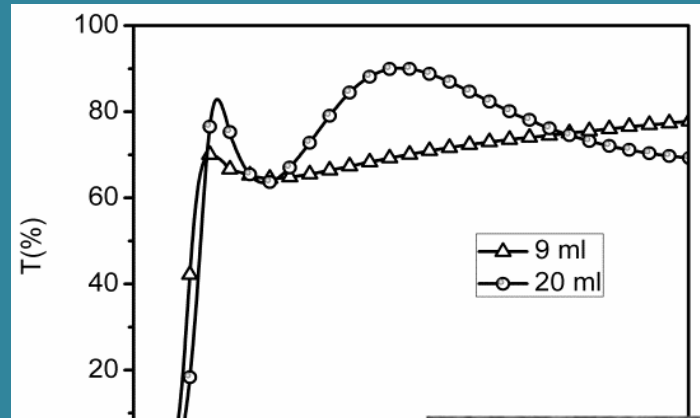
آهنگ ۲ میلی لیتر بر دقیقه
فاصله ۲۰ سانتی متر
فشار هوای کمپرسور ۲ بار
دما ۴۵۰ درجه



۲۴ لایه‌ی ۱ در ۲ سانتی متر



مورفولوژی و ضخامت لایه ی تیتانیوم دی اکسید

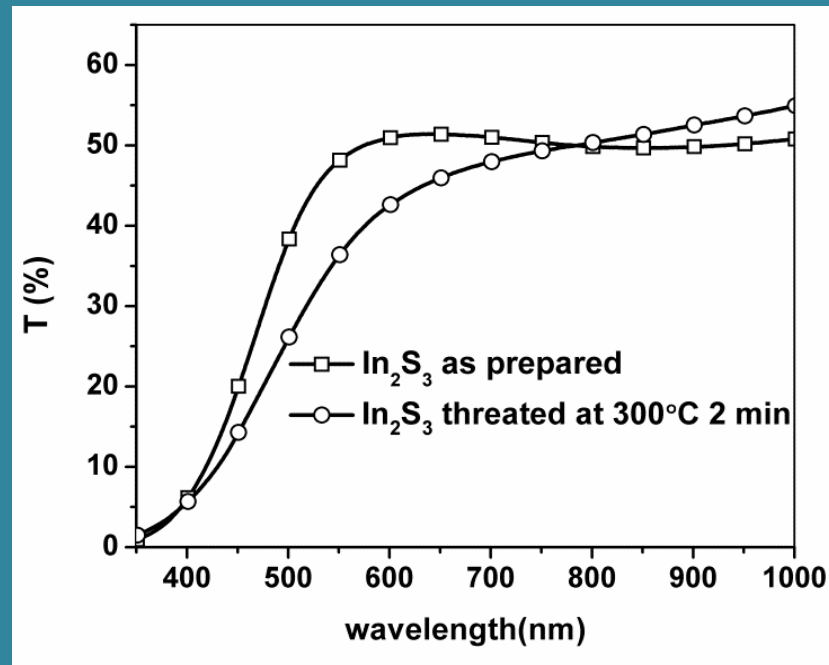


زیر لایه ی شیشه

لایه نشانی لایه‌ی بافر



• روش حمام شیمیایی (CBD)

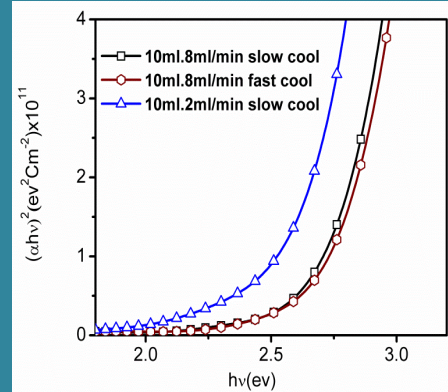
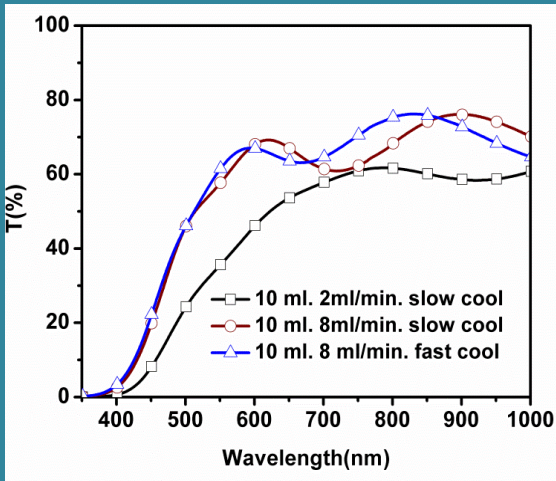


معایب

۱- تغییر ساختار با دما

۲- وقت گیر بودن

لایه‌نشانی لایه‌ی بافر ایندیوم سولفید



• روش افشانه‌ی گرماکافت

• ۱- آهنگ‌های مختلف

• آهنگ بیشتر، لایه ضخیم‌تر

• آهنگ‌های مختلف، باند انرژی مختلف

• آهنگ ۴ میلی‌لیتر بر دقیقه آهنگ بهینه برای ساخت سلول

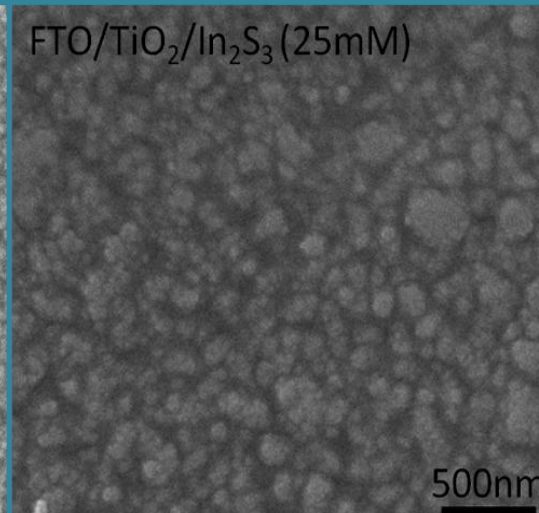
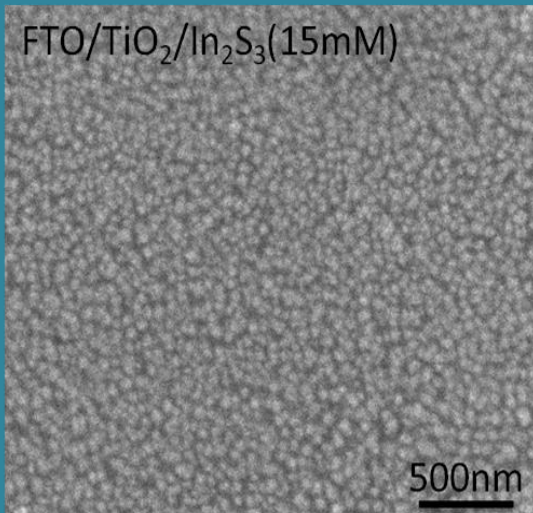
• ۲- مولاریته‌های مختلف

• مولاریته‌ی کمتر لایه تمیزتر و نازک‌تر

• جواب بهینه برای ساخت سلول

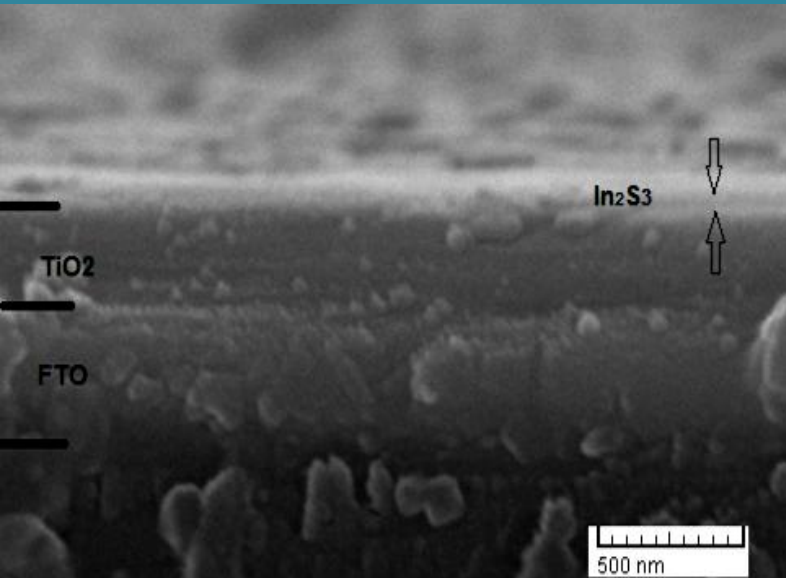
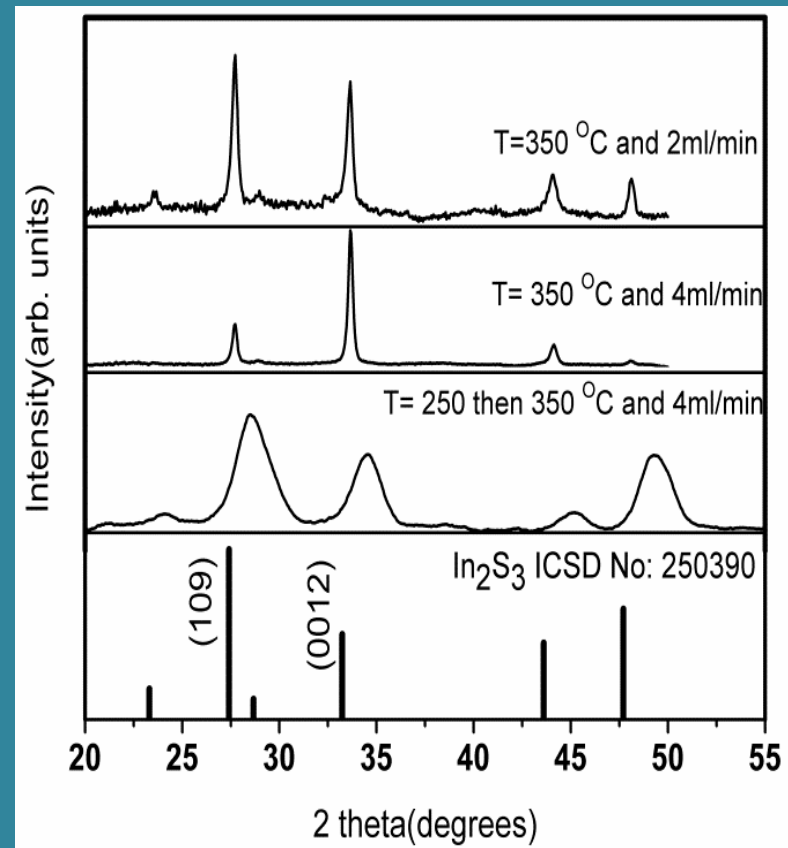
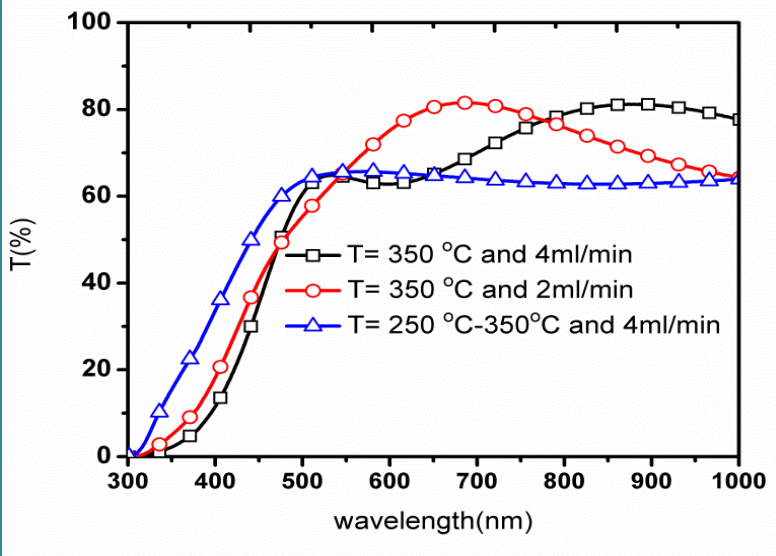
• ۲۵ میلی مولار ایندیوم

• با نسبت سولفور به ایندیوم ۶

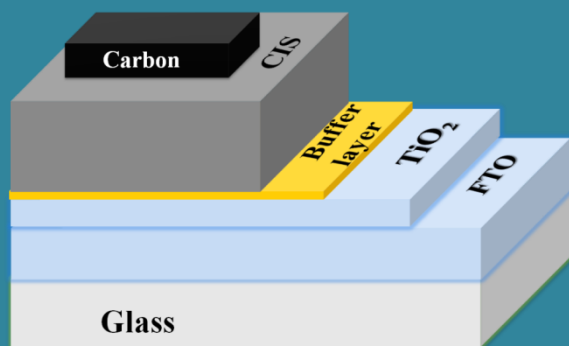


لایه نشانی لایه‌ی بافر ایندیوم سولفید

- روش افشانه‌ی گرماکافت
- ۳- دماهای مختلف

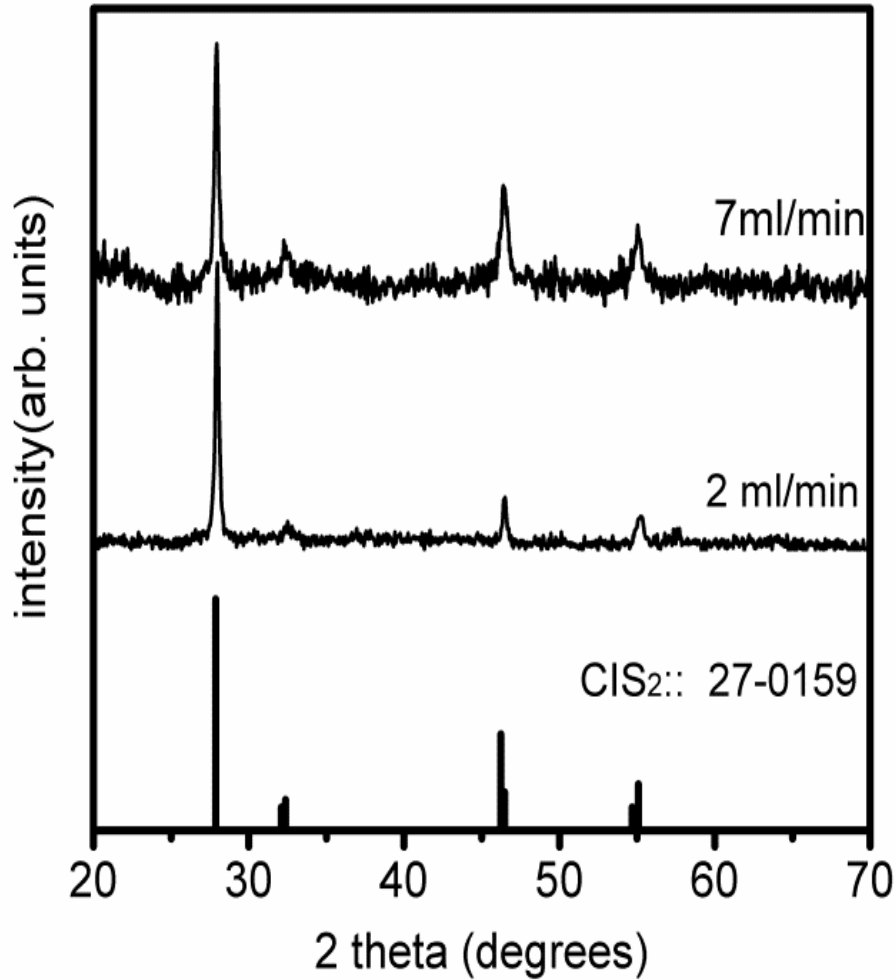


نتایج لایه نشانی لایه‌ی بافر ایندیوم سولفید



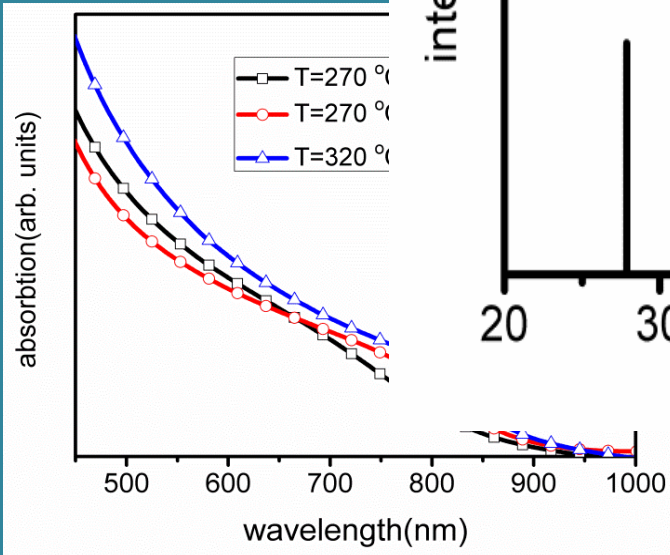
- آهنگ ۴ میلی لیتر بر دقیقه
- فاصله ی ۲۰ سانتی متر
- دمای ۳۵۰ درجه
- ۴ میلی لیتر محلول ۲۵ میلی مولار (۶ سلول)

ساخت لایه، حاذب CuInS_2



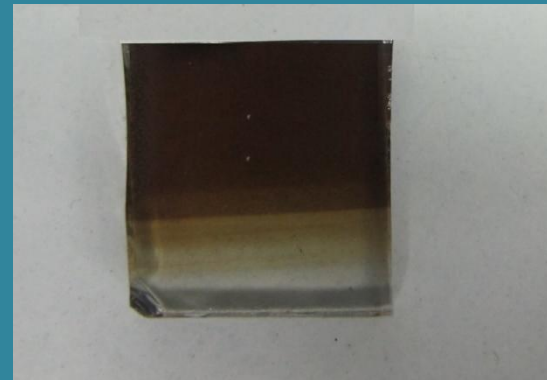
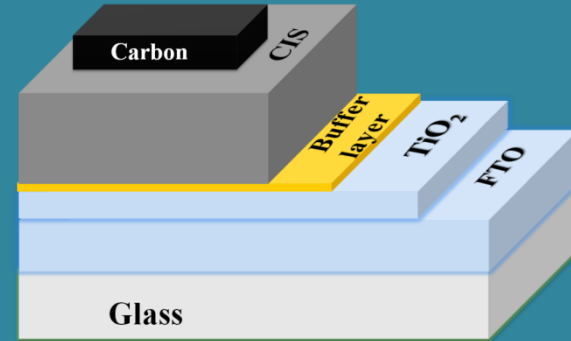
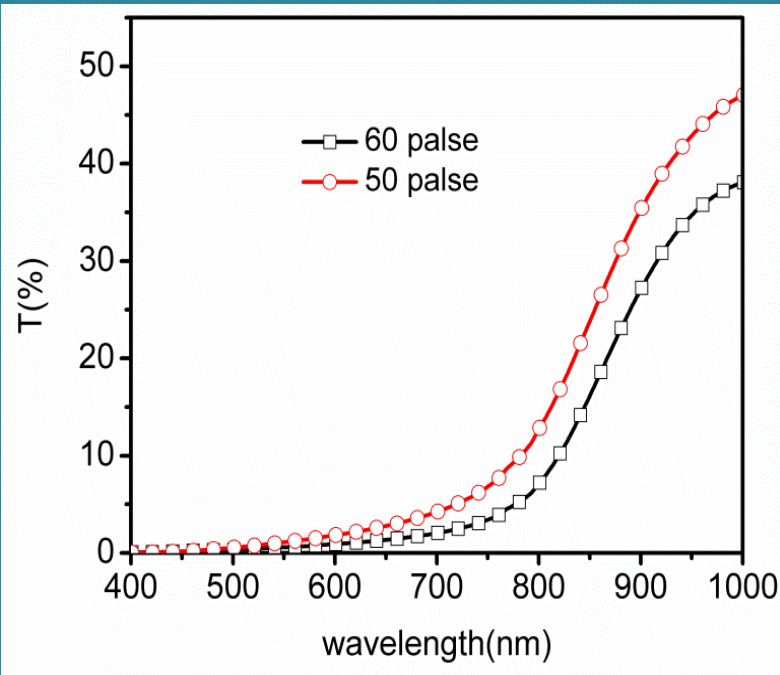
• محلول آبی (آب)

دمای ۳۲۰ درجه سانتی متر بهینه لحاظ این

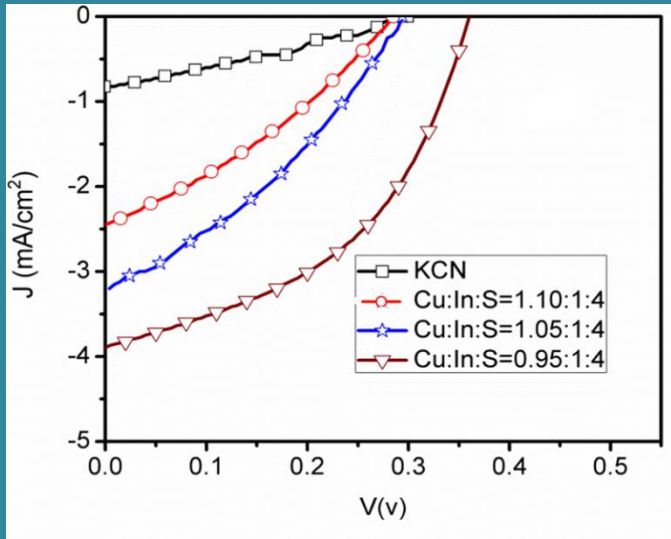


کیفیت لایه: دما، آهنگ لایه نشانی، کردن (پیوسته یا منفصل)، موربینه ی محلول، تعداد پالسها، فاصله ی نازل افشانه تا قطعه،

FTO/TiO₂/In₂S₃/CuInS₂



بهینه سازی کارکرد سلول با جوهر آبی

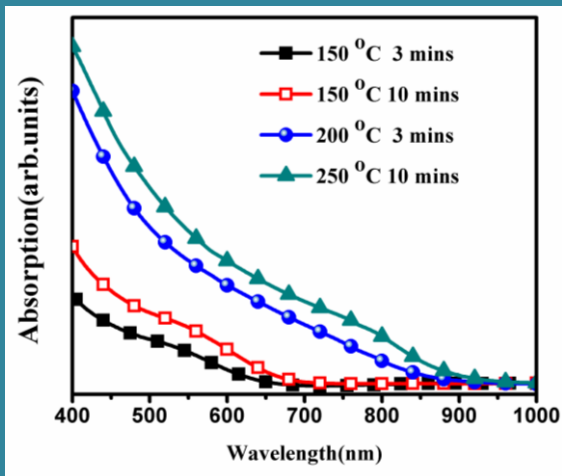


نسبت Cu:In:S	ولتاژ مدار باز (mV)	چگالی جریان mA/Cm ²	بازده %	عامل گنجایش %
۱/۱ : ۱ : ۴	۲۸۵	۲/۵	۰/۲۲	۳۳
KCN ۱/۱ : ۱ : ۴	۲۸۴	۰/۸	۰/۰۸	۲۸
۱/۰.۵ : ۱ : ۴	۲۹۳	۳/۲	۰/۳۳	۳۵
۰/۹۵ : ۱ : ۴	۳۷۵	۳/۸	۰/۶۵	۴۶

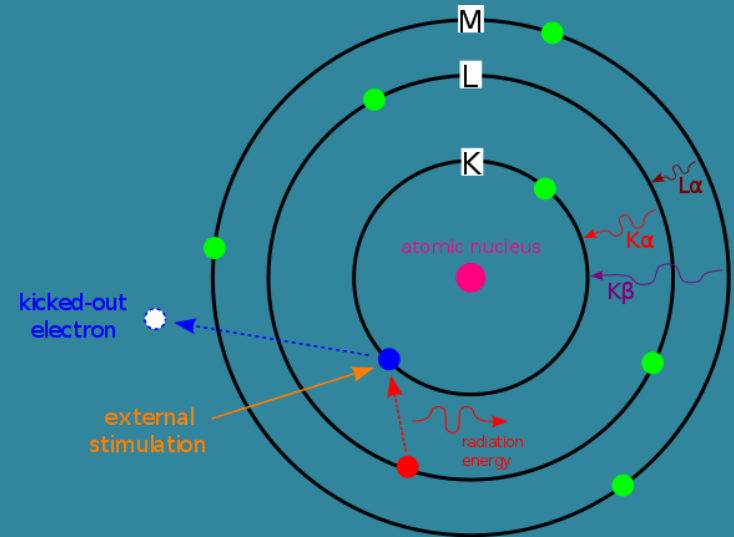
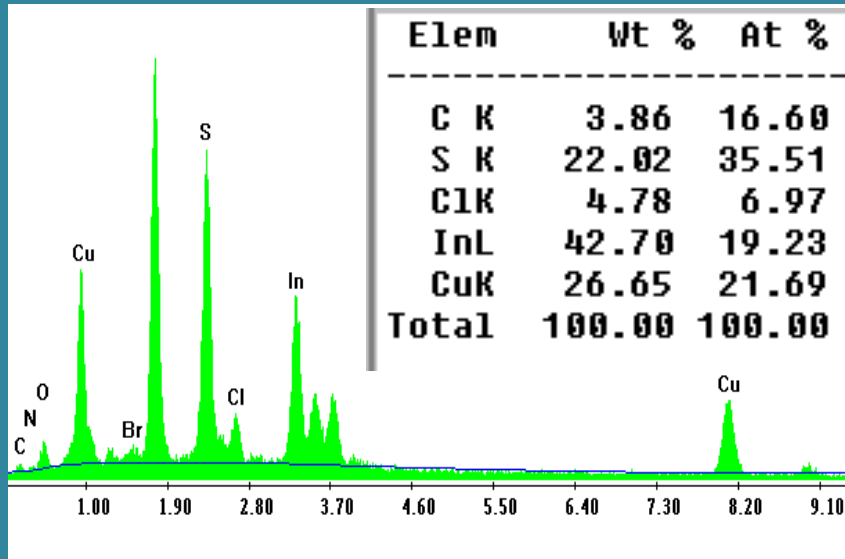
نتایج:

- ۱- عامل گنجایش کم
- ۲- چگالی جریان و ولتاژ پایین
- ۳- نفوذ مس زیاد
- ۴- کریستال لایه‌ی جاذب در دمای پایین‌تر با کیفیت بالاتر شکل بگیرد

استفاده از جوهر آلی و پایین آوردن دمای شکل‌گیری CIS_2



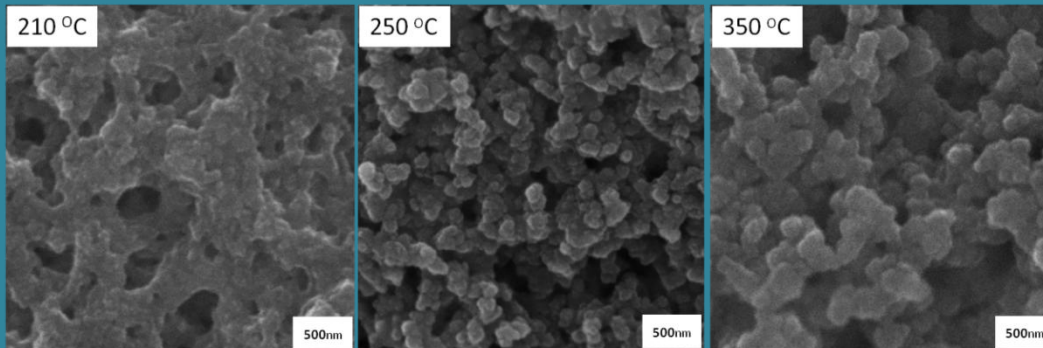
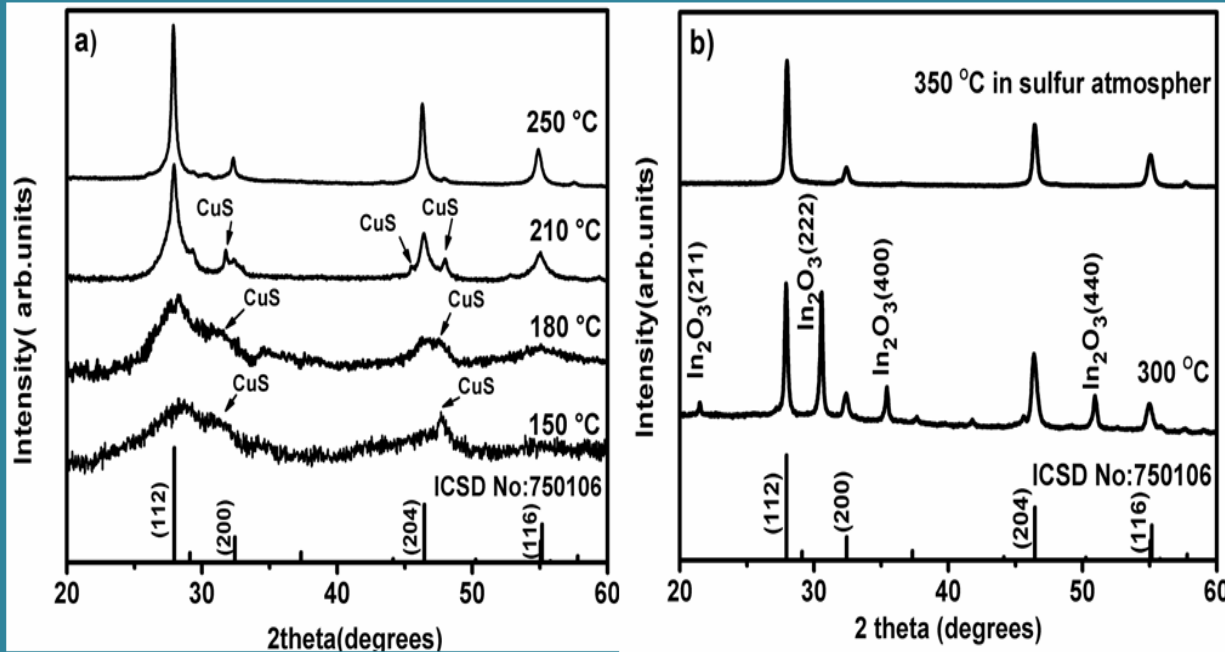
آزمایش طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)



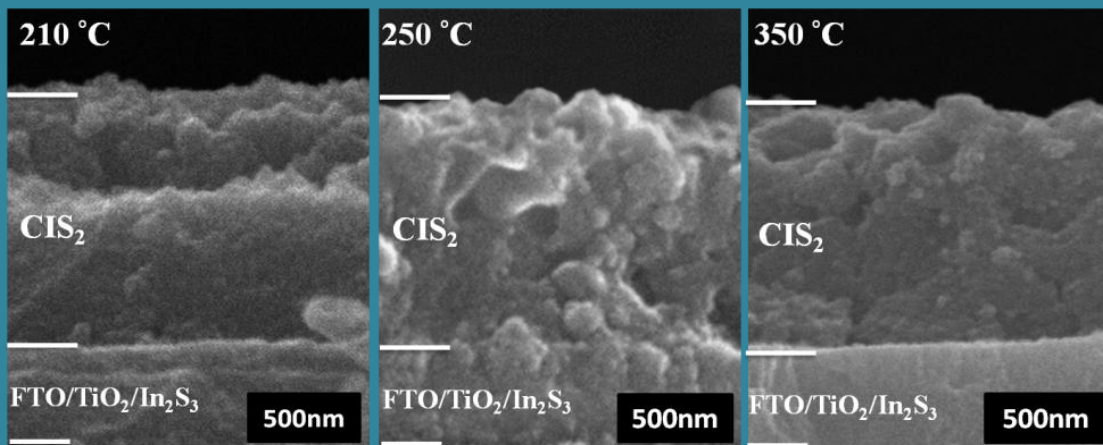
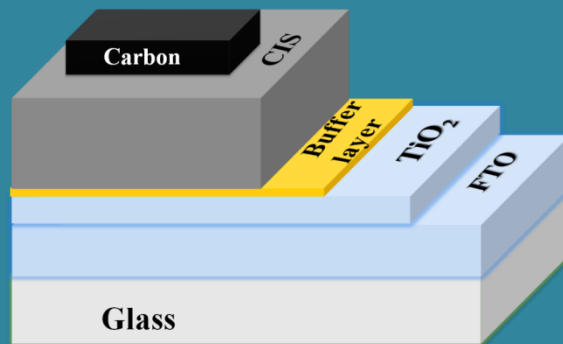
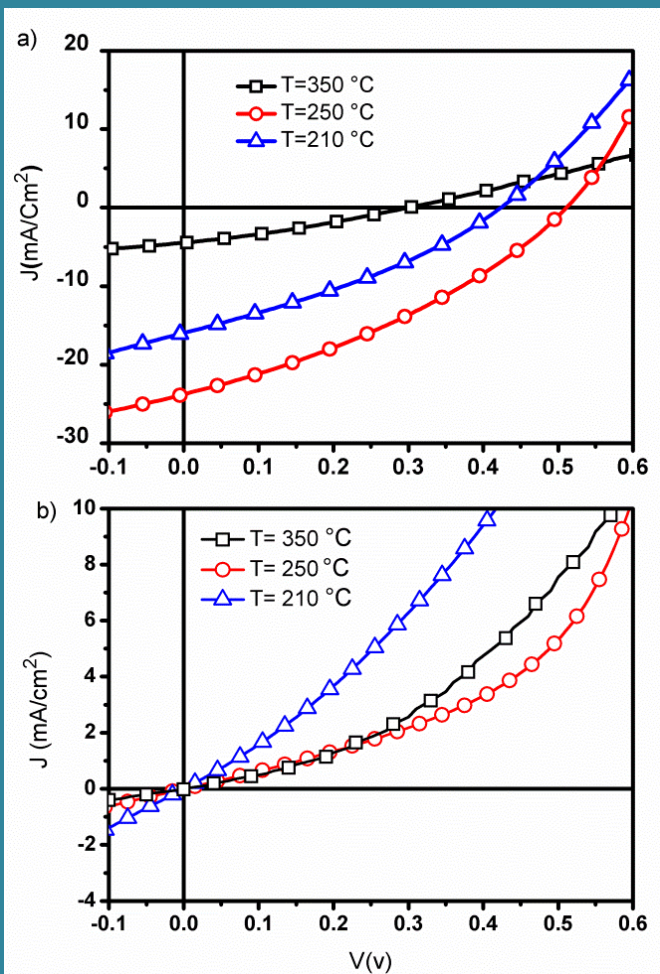
نسبت مس به ایندیوم برابر با ۱/۰۵

در آزمایشات با انرژی های مختلف
مقدار کربن میانگین در فیلم کلریدی
بین ۲۰ تا ۱۰ درصد بوده است

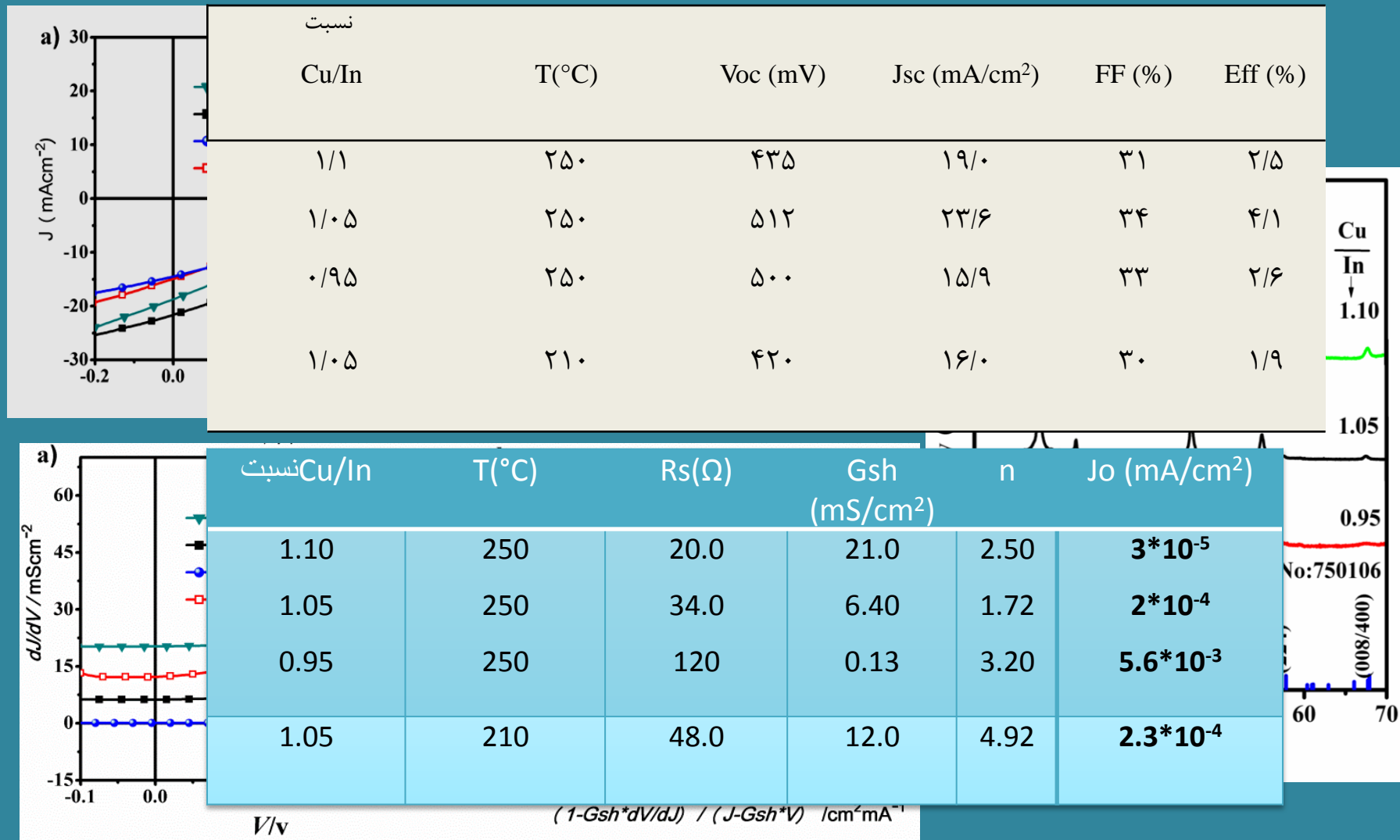
اثر دما بر مورفولوژی و کریستاله شدن لایه



اثر دما بر کارکرد سلول CIS₂



اثر مقدار مس در کارکرد سلول خورشیدی



نتایج

- ساخت سلول خورشیدی با ساختار رولایه به مراتب آسان تر است
- عدم نیاز به وسایل خلا
- استفاده از روش‌های محلول پایه در تمام لایه‌ها
- کاهش یافتن زمان لایه‌نشانی لایه‌ی بافر تا یک دقیقه
- پایین آمدن دمای رشد کریستال CIS₂ تا ۲۵۰ درجه
- کسب جریان ۲۳ میلی آمپری
- یافتن راهکاری برای مقابله با نفوذ مس در لایه‌های پایین تر در ساختار رولایه

***„Solar architecture
is not about fashion,
it is about survival“
Sir Norman Foster***

Thank you very much for your attention



