

# Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

## Instituto de Ciencias

### Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores

# De la Electromecánica hacia la Investigación de Dispositivos Semiconductores

**PRESENTA:**

Dr. Jesús Capistrán Martínez

Abril 24, 2024

# Contenido

## 1. Ingeniería Electromecánica

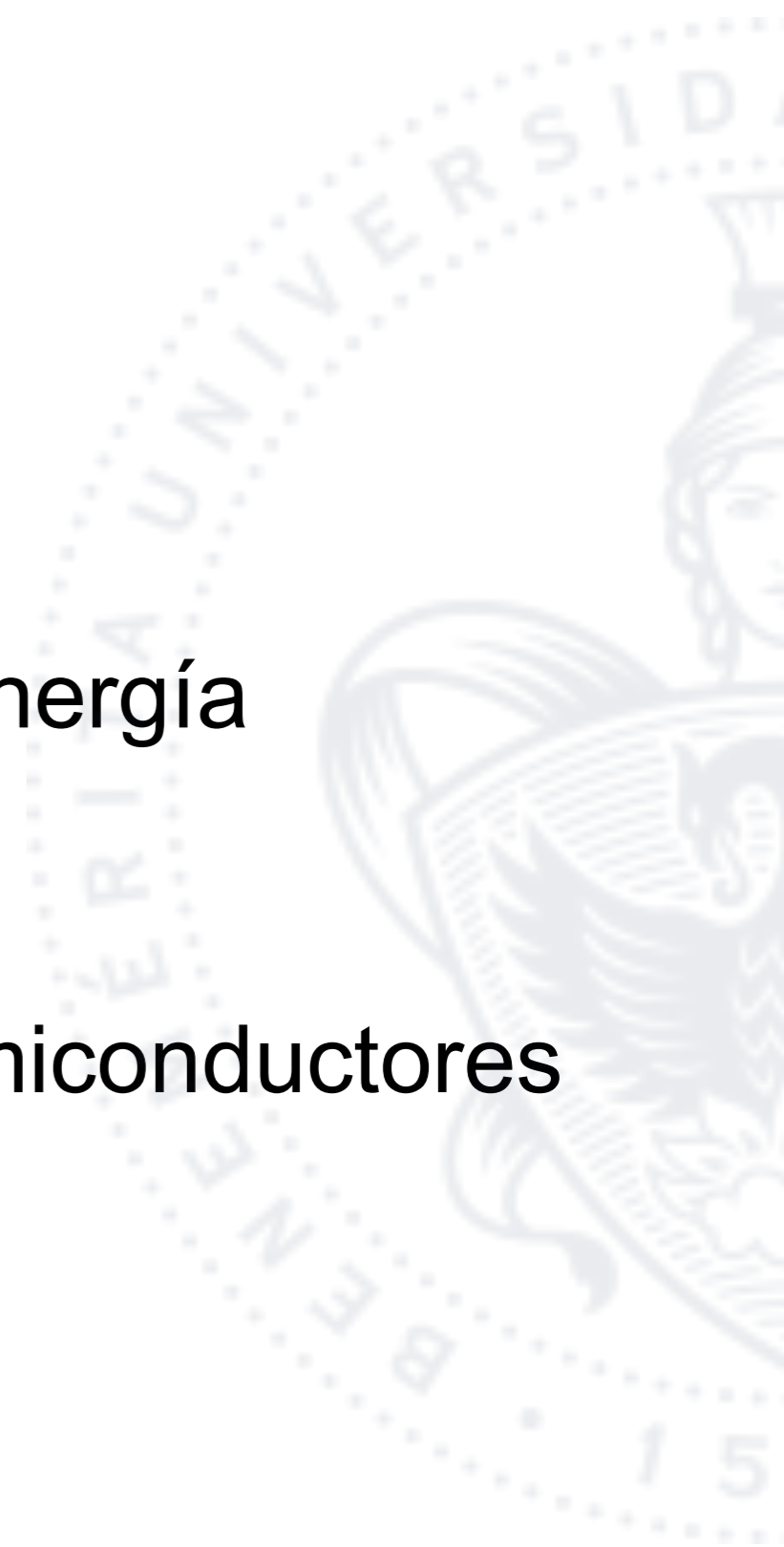
Generación de energía eléctrica

## 2. UNAM - Posgrado en Ingeniería en Energía

Especialidad: Solar fotovoltaica

## 3. BUAP - Posgrado en Dispositivos semiconductores

Celda solar flexible de película delgada



# 1. Ingeniería Electromecánica

Generación de energía eléctrica





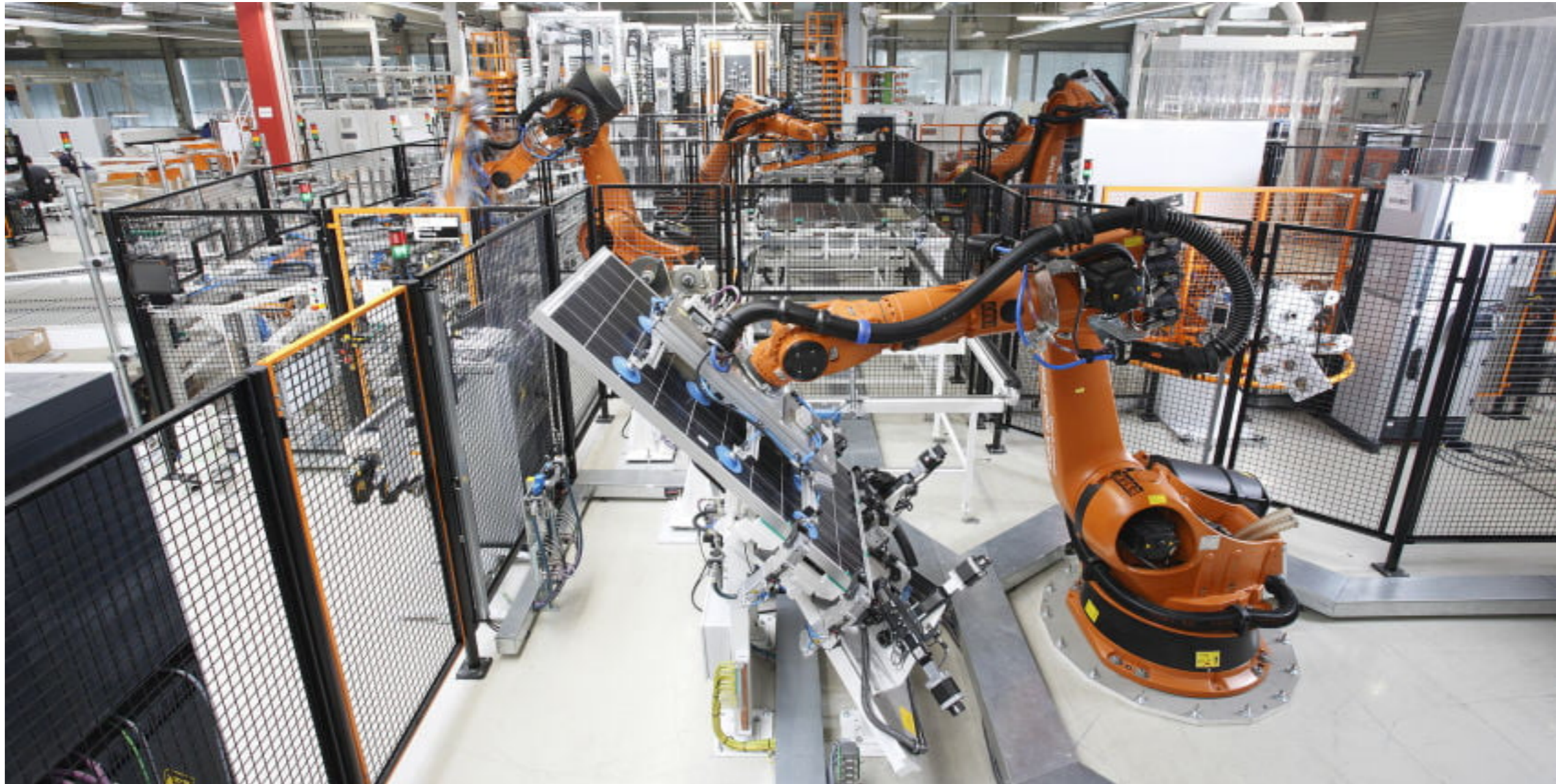
Principales ramas de la ingeniería.

Aplicación de **conocimientos científicos** para resolver problemas prácticos y desarrollar soluciones que mejoren la calidad de vida del ser humano

# Ingeniería Electromecánica



CIDS-ICUAP



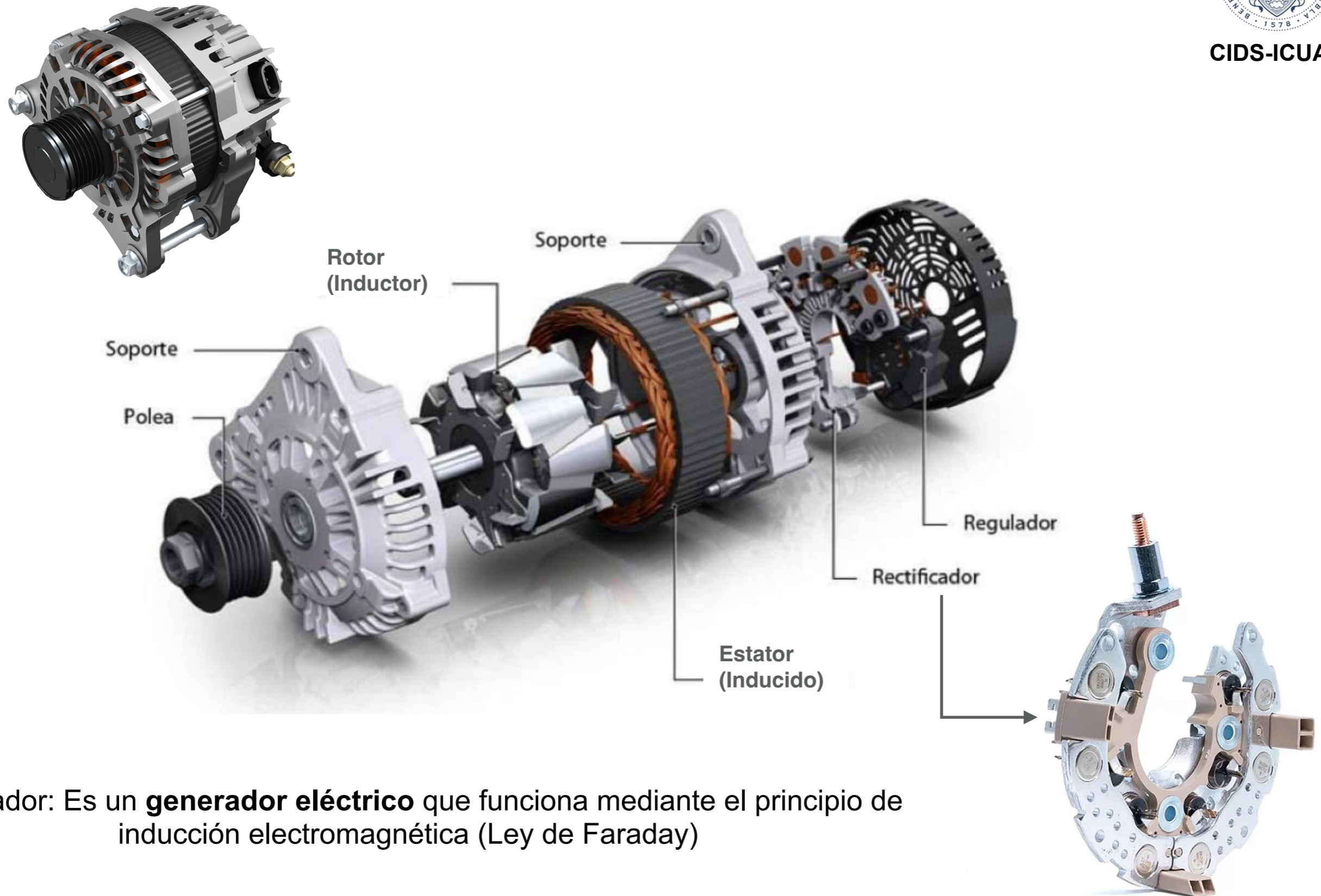
<https://www.edsrobotics.com/blog/que-es-la-automatizacion-industrial/>

Se centra en el diseño, desarrollo, prueba y mantenimiento de sistemas y dispositivos que involucran tanto **componentes eléctricos como mecánicos.**

# Dispositivos Electromecánicos: motores, generadores, actuadores, sensores, etc.



CIDS-ICUAP



Alternador: Es un **generador eléctrico** que funciona mediante el principio de inducción electromagnética (Ley de Faraday)

Puente rectificador de diodos

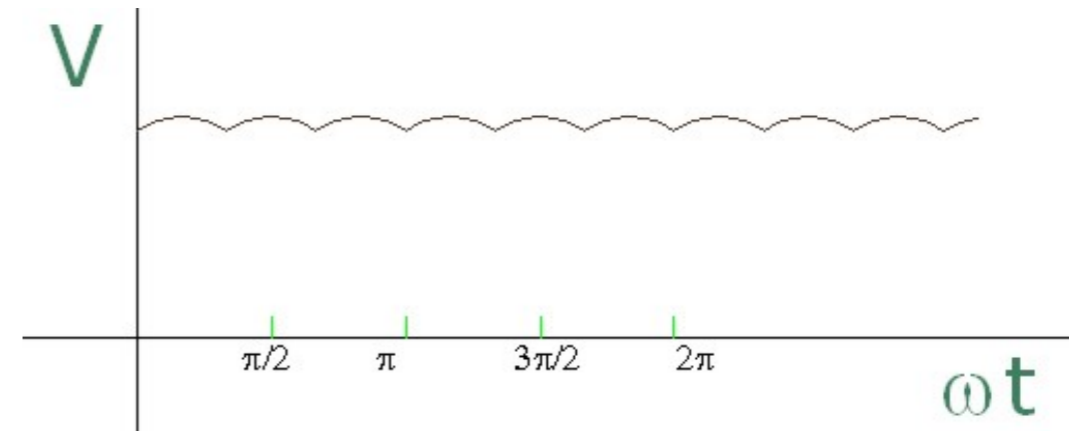
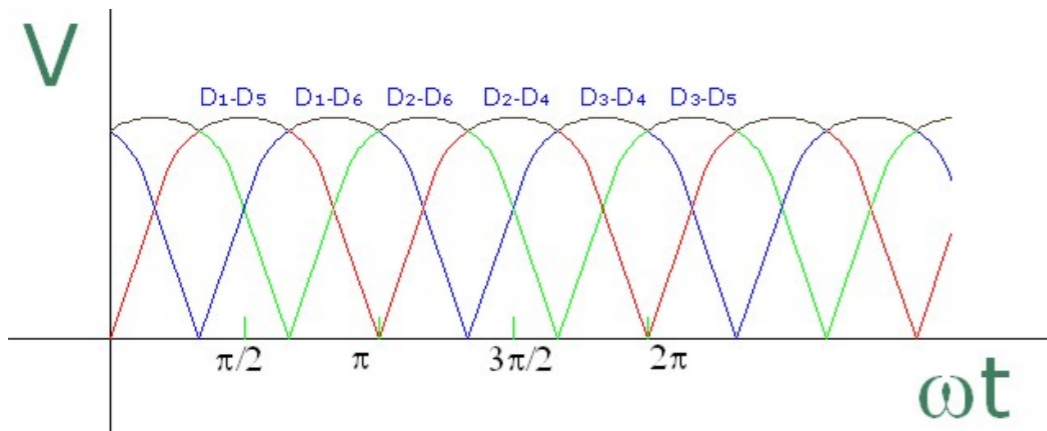
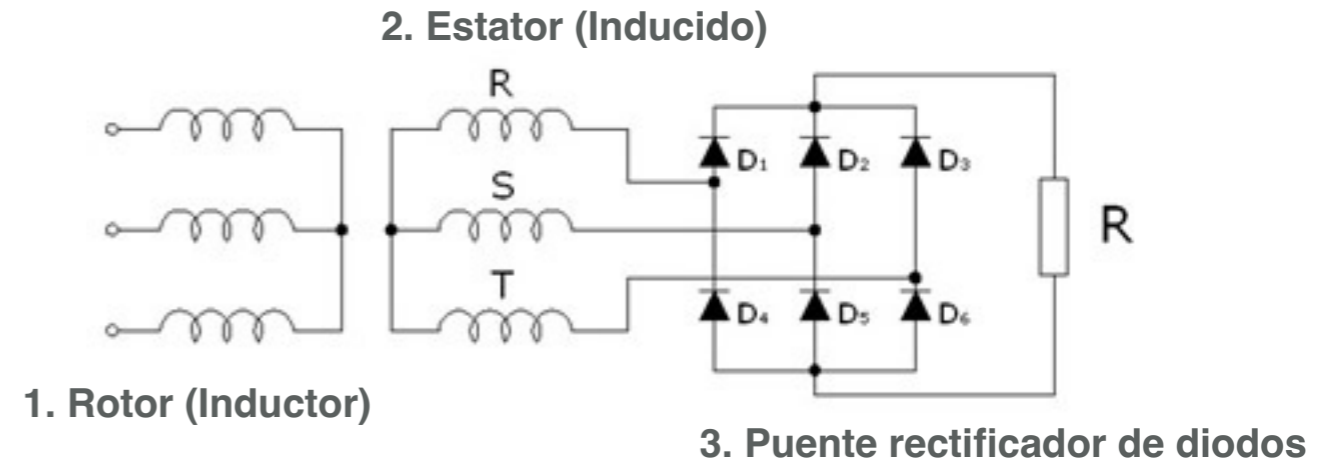
# Puente rectificador de diodos: CA → CC



CIDS-ICUAP



Diodo



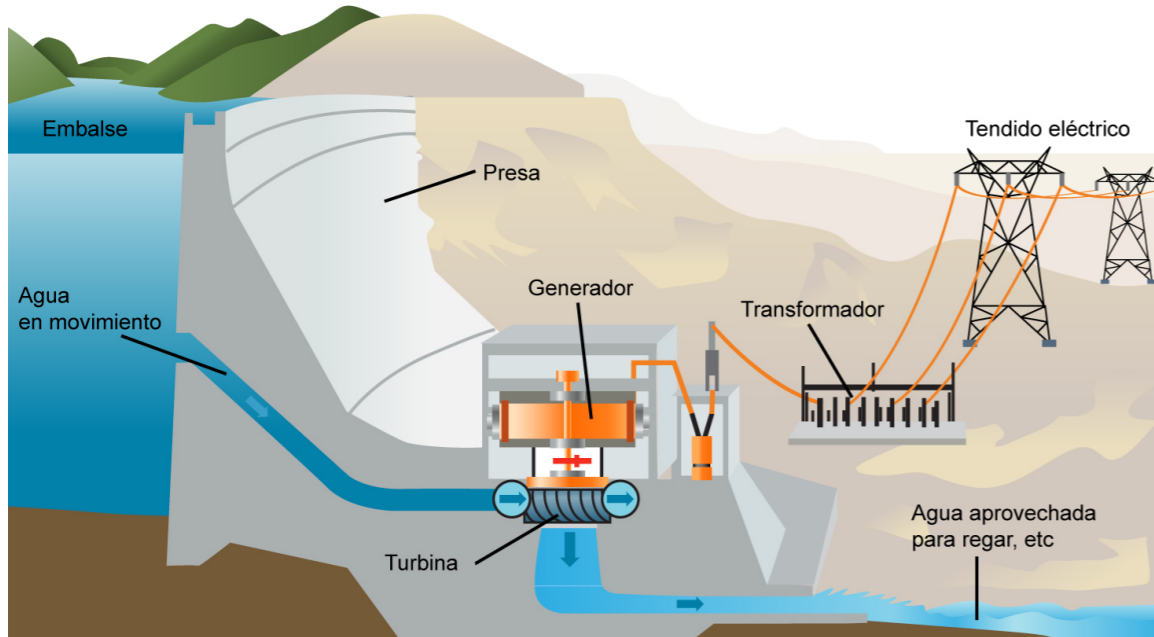
Rectificador trifásico de onda completa: Señal rectificada de corriente continua

[https://www.cienciasfera.com/materiales/electrotecnia/tema20/32\\_rectificador\\_trifisico\\_de\\_onda\\_completa.html](https://www.cienciasfera.com/materiales/electrotecnia/tema20/32_rectificador_trifisico_de_onda_completa.html)

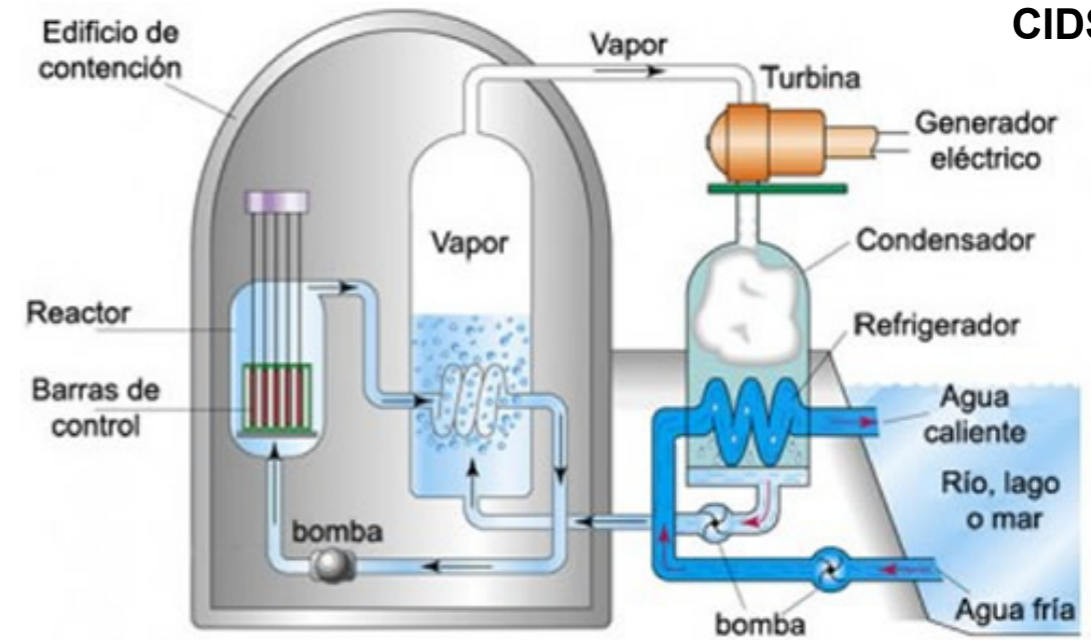
# Generación de energía eléctrica



CIDS-ICUAP



Central Hidroeléctrica



Central Nucleoeléctrica

Ing. C. Ramírez Ulloa (El Caracol) - 600 MW

Cuenta con tres (3) unidades generadoras donde las turbinas son tipo Francis con capacidad de 200 MW cada una

Laguna verde - 1620 MW

Cuenta con dos reactores BWR (Boiling Water Reactor) diseñados por General Electric con capacidad de 810 MW cada uno





## 2. Posgrado en Ingeniería en Energía

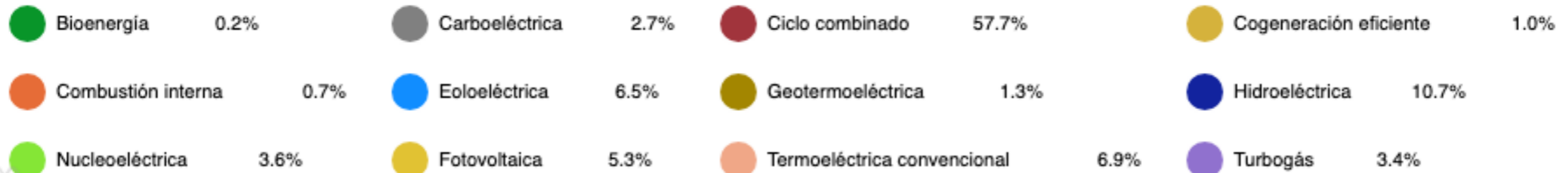
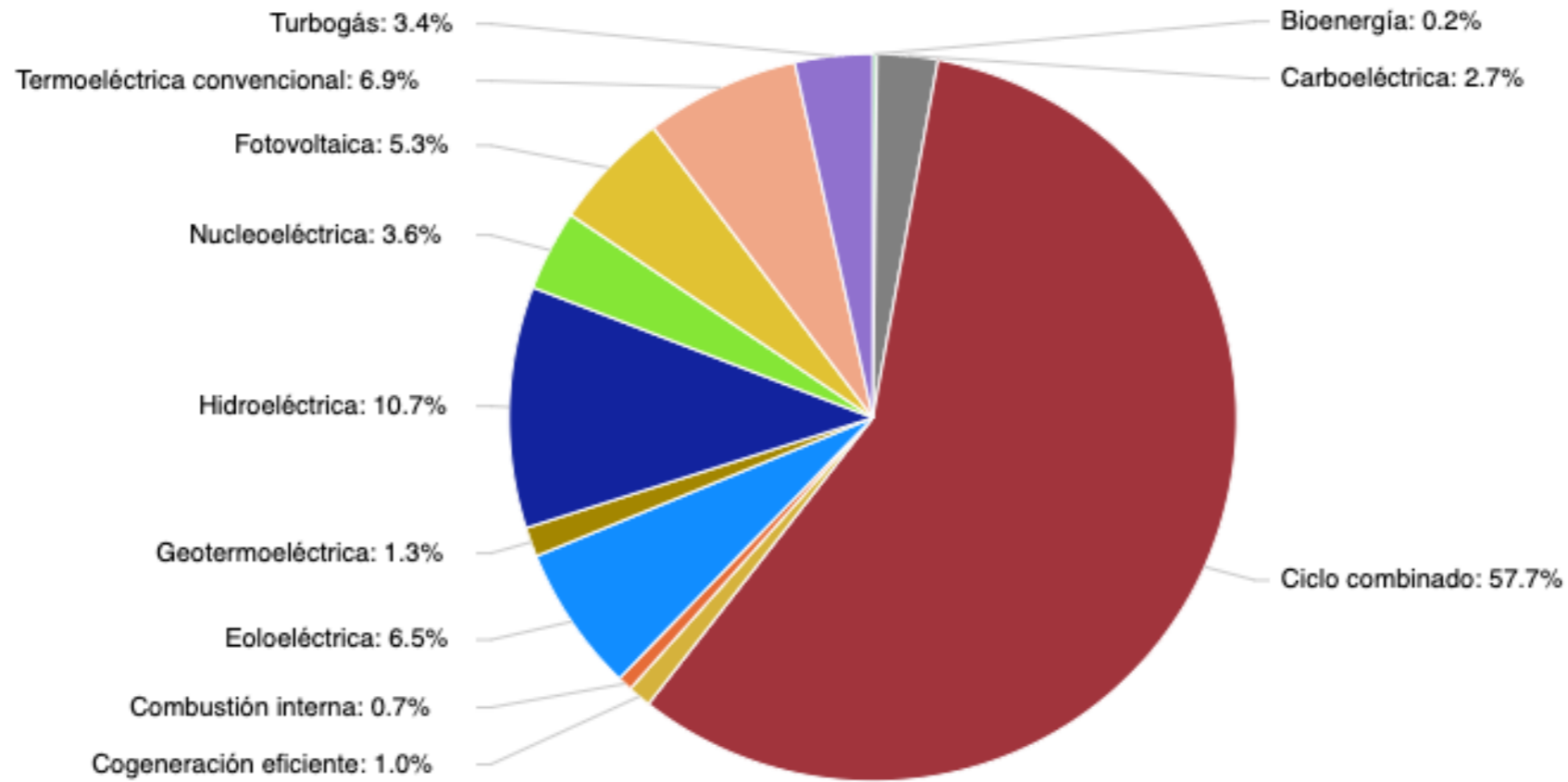
Especialidad: Solar Fotovoltaica (IER-UNAM)



# Generación de energía en México



CIDS-ICUAP



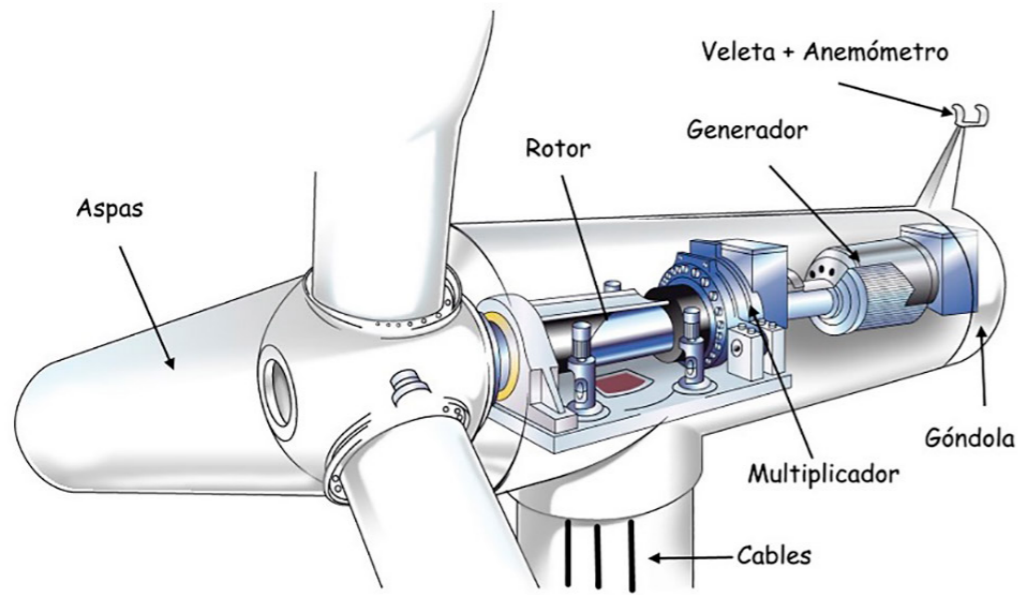
Generación de energía eléctrica por tecnología en México (2021)

<https://energia.conacyt.mx/planeas/electricidad/generacion>

# Energías renovables:

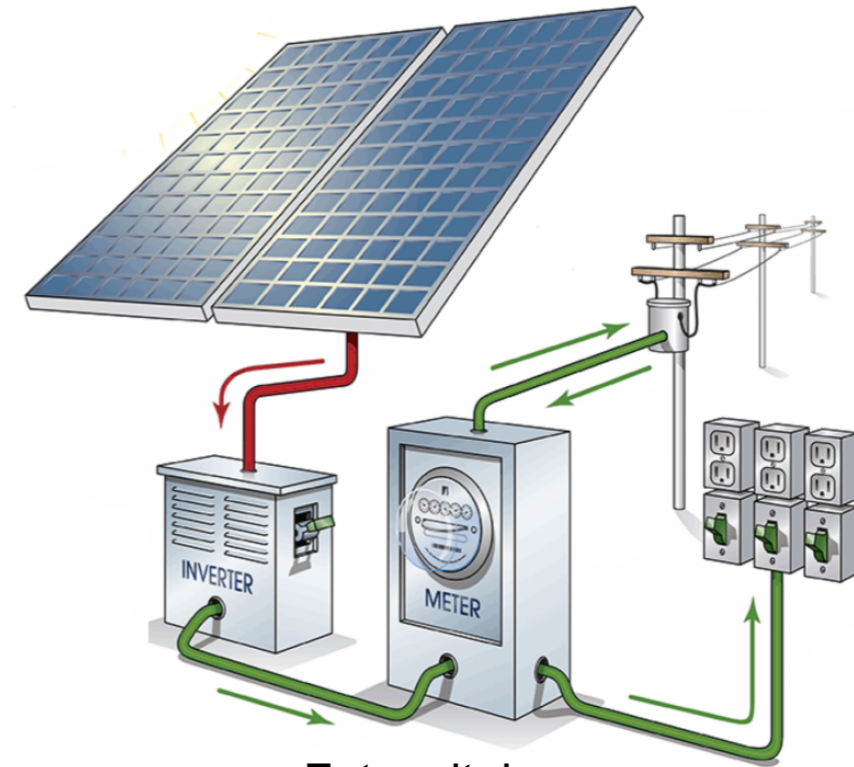


CIDS-ICUAP



Eólica

Aprovechamiento del viento



Fotovoltaica

Aprovechamiento de la luz solar

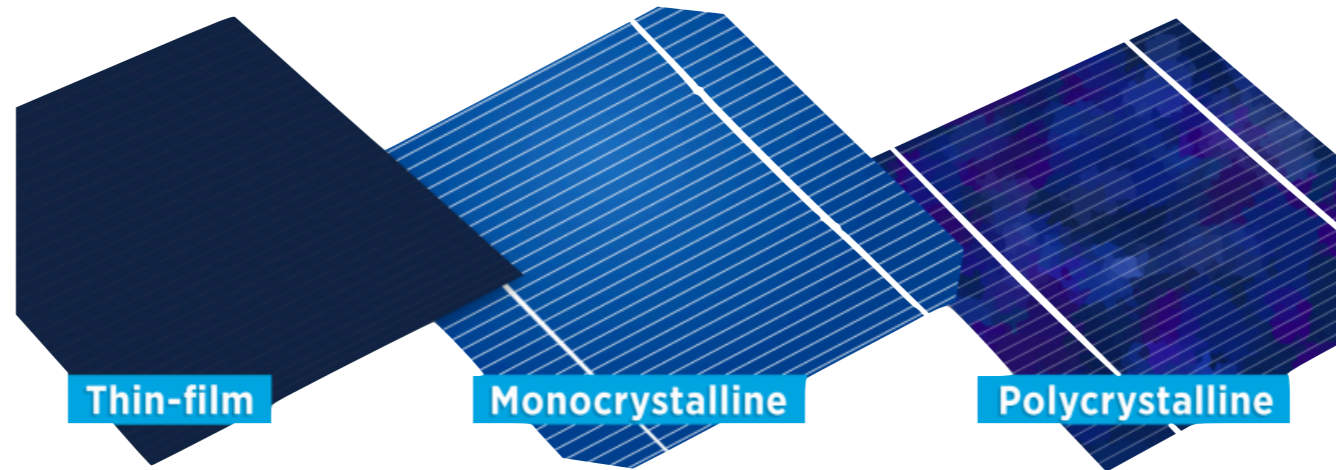
Estudiar y trabajar en el sector de las energías renovables es fundamental para mitigar el cambio climático mediante el uso de fuentes de energía limpia y sostenible.

<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>

# Celdas solares comerciales



CIDS-ICUAP



El silicio es el **semiconductor** más utilizado en la fabricación de **celdas solares**, en sus tres configuraciones domina más del 90% del mercado fotovoltaico

Tecnologías	Eficiencia [%]	Cuota de mercado [%]	
Silicio monocristalino	26.8	45	Obleas de Silicio
Silicio policristalino	24.4	35	
Silicio amorfo (a-Si:H)	10.2	10	Película delgada
Teluro de Cadmio (CdTe)	21.0	5	
Selenuro de Cobre Indio Galio (CIGS)	23.3	5	

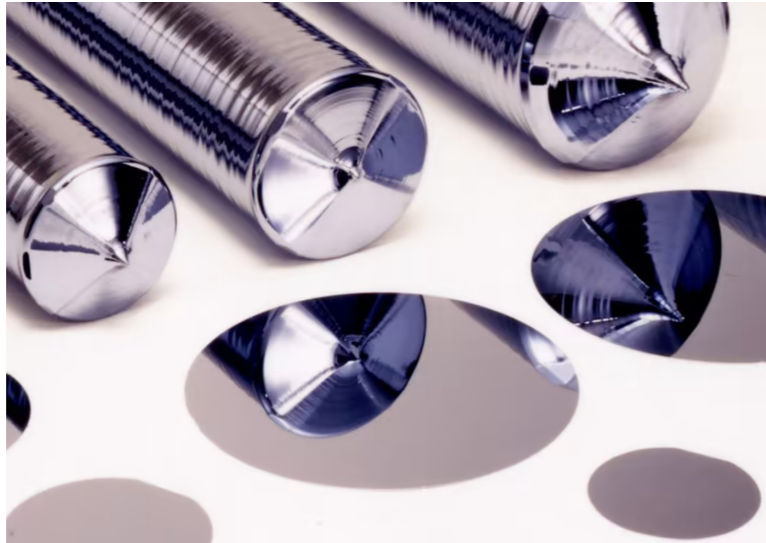
M.A. Green et al., Solar cell efficiency tables (Version 63), Progress in Photovoltaics 32 (2024) 3–13.

Solar Photovoltaic Cell Basics, Energy.Gov. (n.d.). <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics> (accessed August 18, 2023).

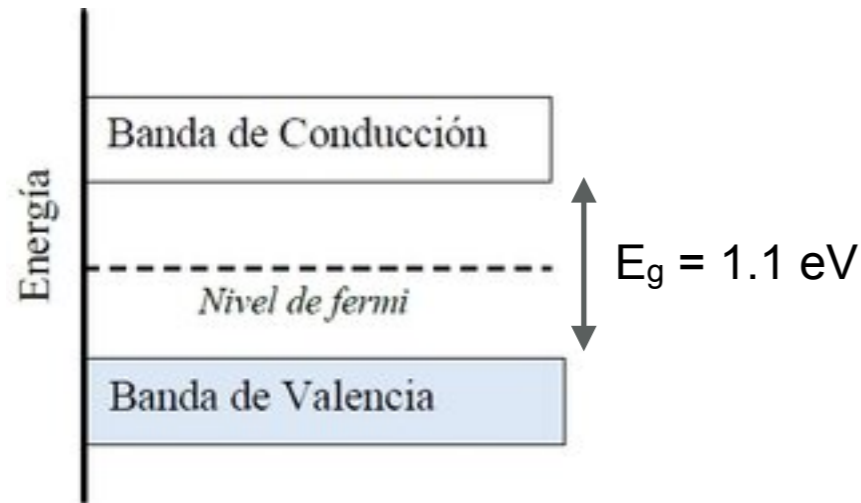
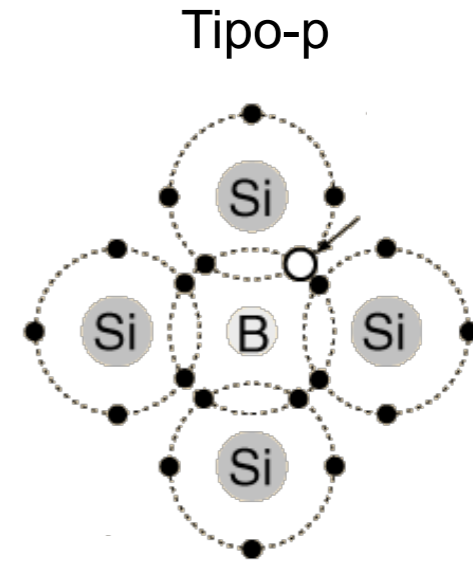
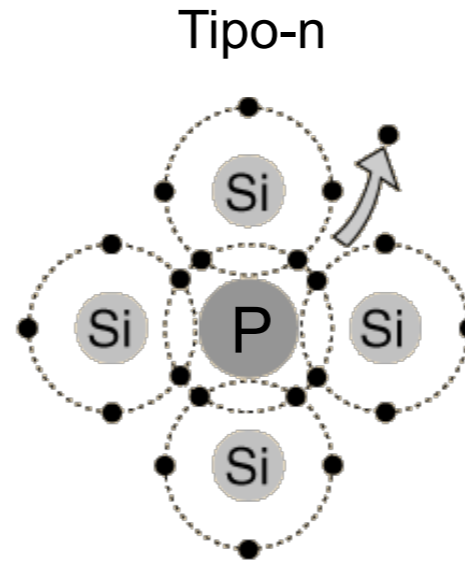
# ¿Qué es un material semiconductor?



CIDS-ICUAP

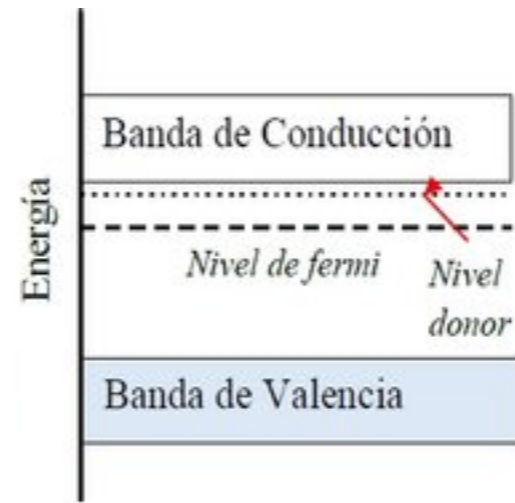


Lingotes y obleas de silicio monocristalino



$$n_i = 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

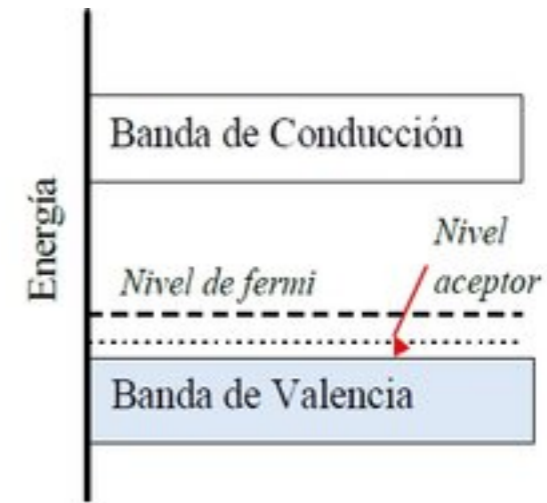
Semiconductor intrínseco



$$n_n = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\mu_n = 1500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Semiconductor Extrínseco



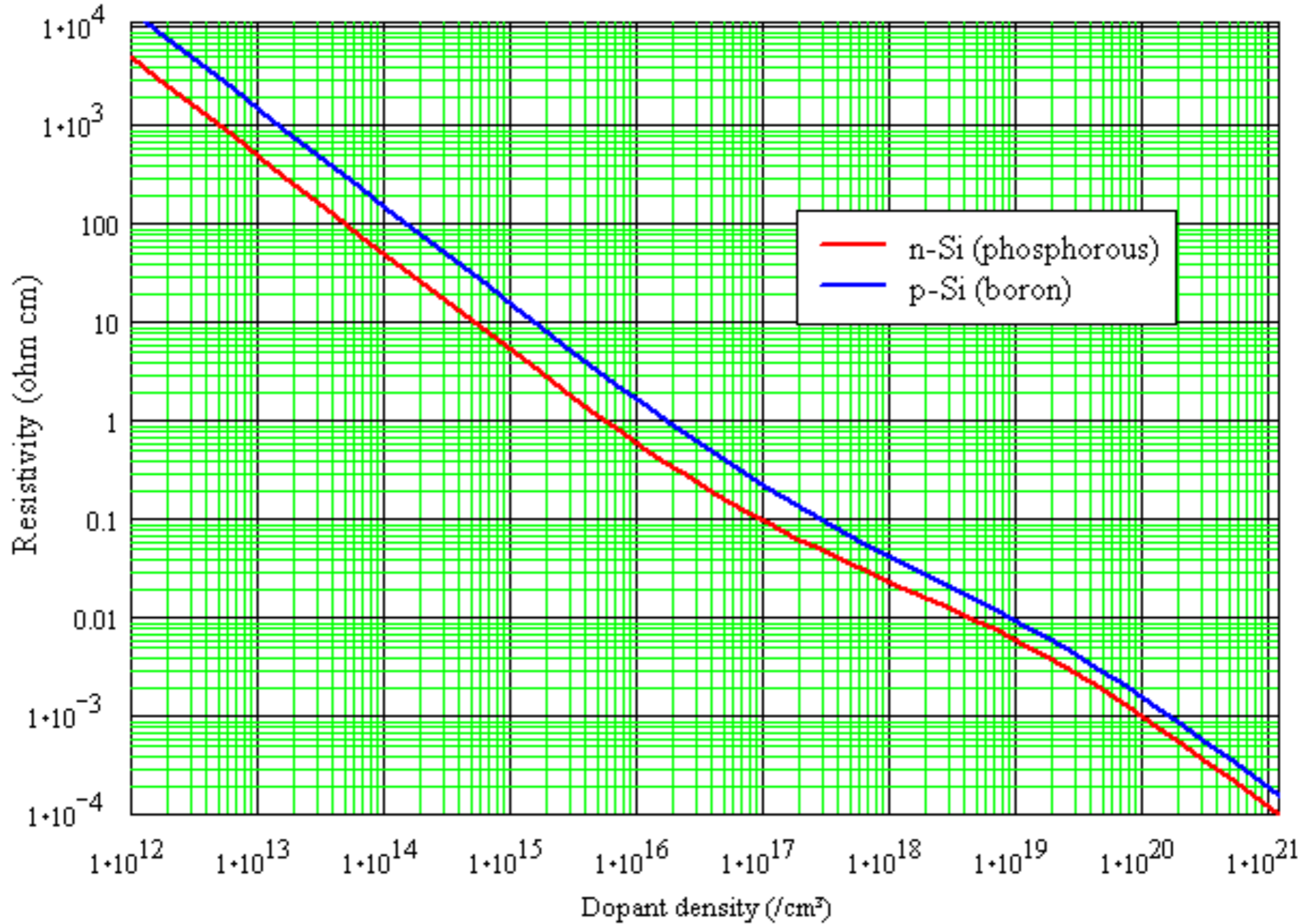
$$p_p = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\mu_n = 450 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

# ¿Qué es un material semiconductor?



CIDS-ICUAP



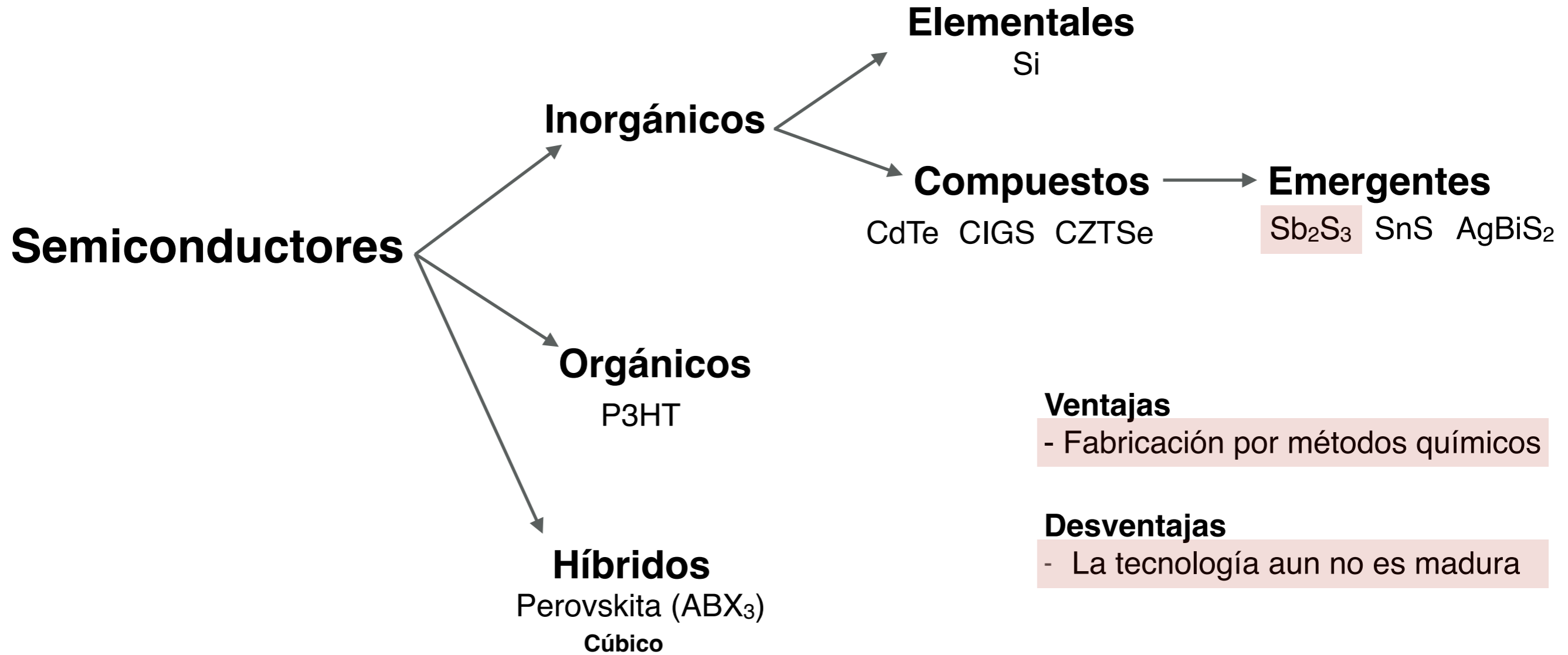
Resistividad eléctrica [ohm cm] en función de la densidad de portadores de carga mayoritarios de silicio. Fuente: [PV-Education](https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/general-properties-of-silicon)

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/general-properties-of-silicon>

# Materiales semiconductores emergentes para celdas solares



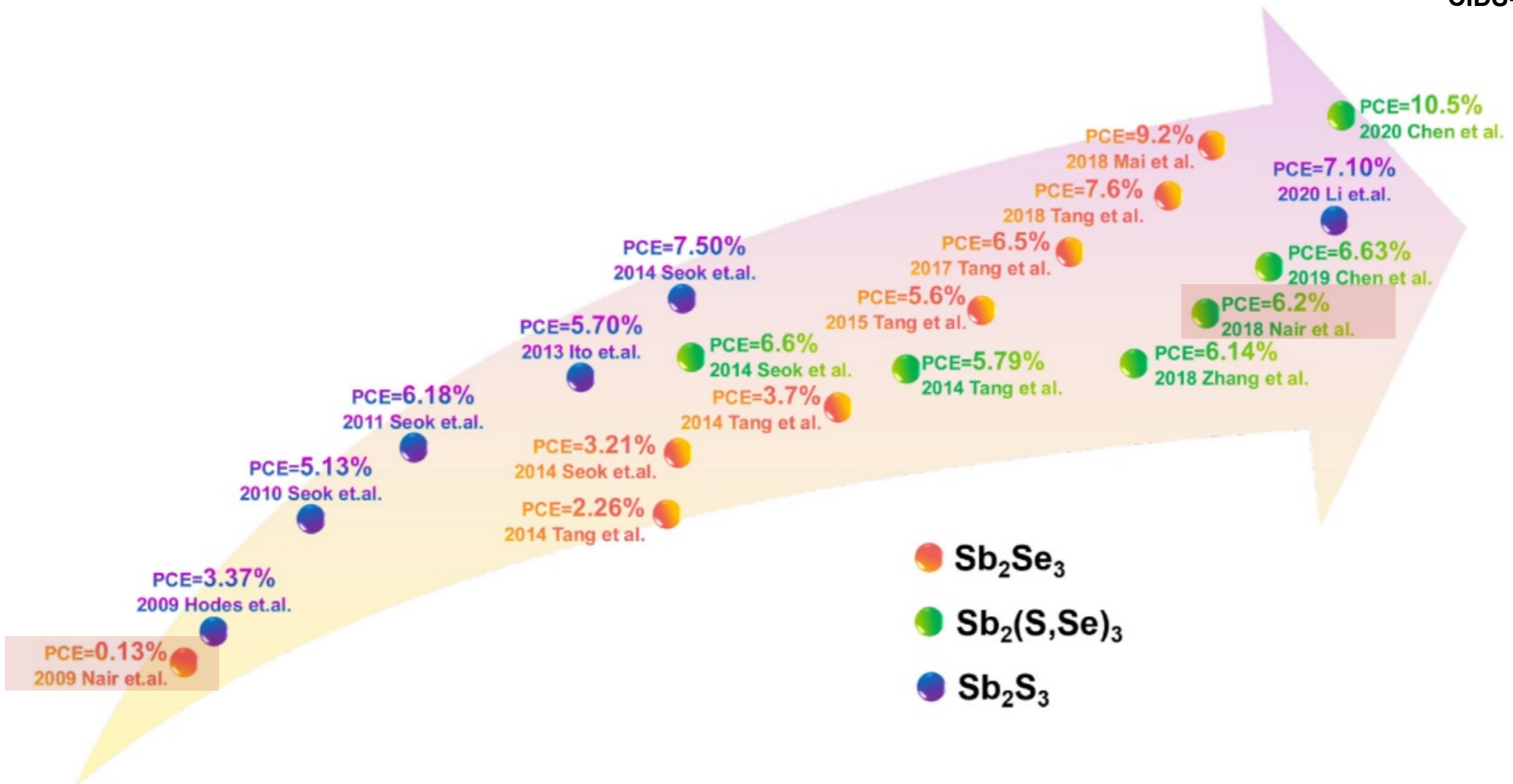
CIDS-ICUAP



# Celdas solares de calcogenuros de antimonio



CIDS-ICUAP



Historia del desarrollo de celdas solares de calcogenuros de antimonio:  
2009 a 2020

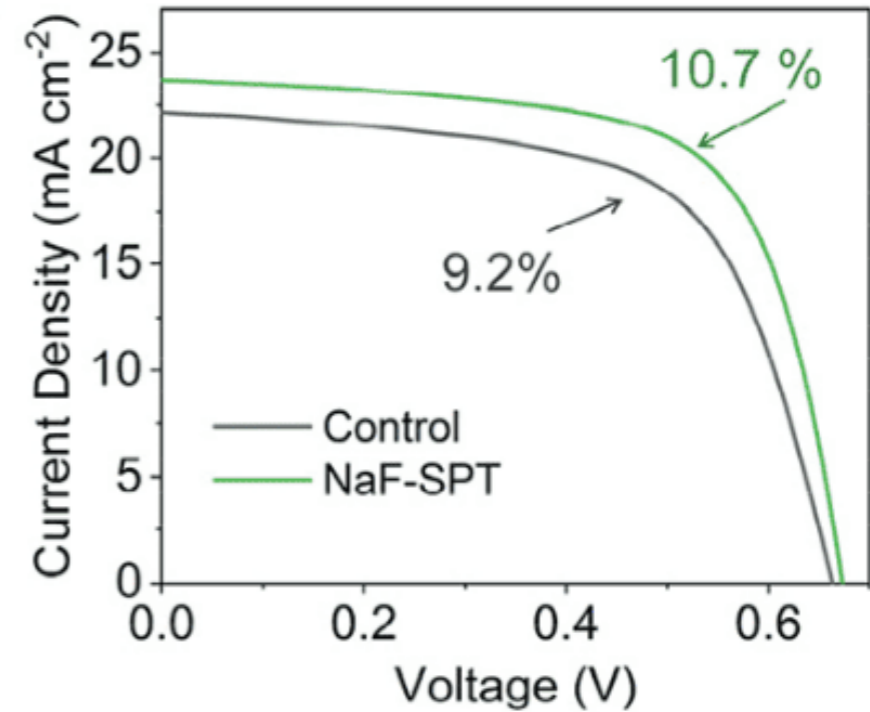
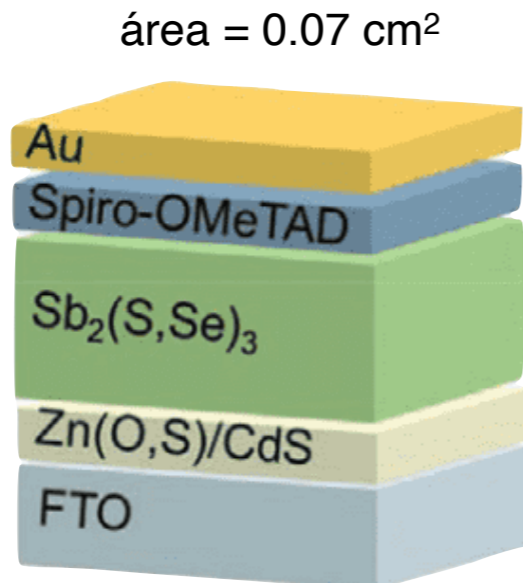
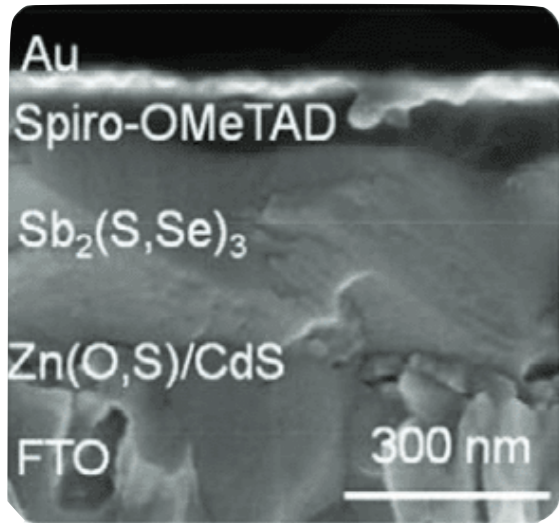
J. Dong et al., Boosting  $V_{OC}$  of antimony chalcogenide solar cells: A review on interfaces and defects, Nano Select. (2021) nano.202000288.



# Celda solar emergente de $Sb_2(S,Se)_3$



CIDS-ICUAP



Estructura de celda solar (*Superestrato*) de  $Sb_2(S,Se)_3$

Curva característica J-V de celdas solares de  $Sb_2(S,Se)_3$

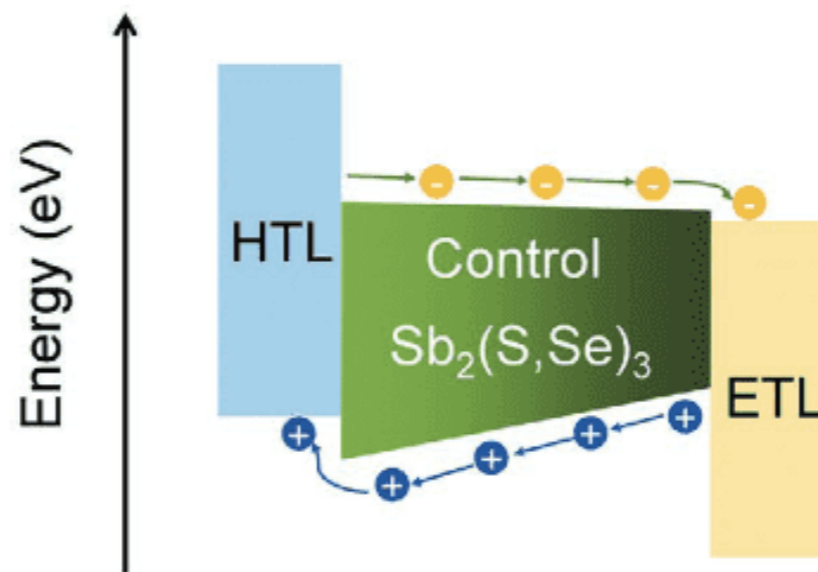
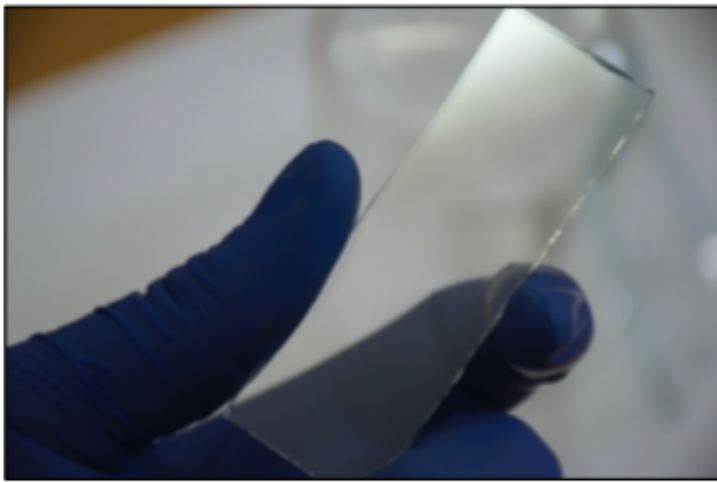
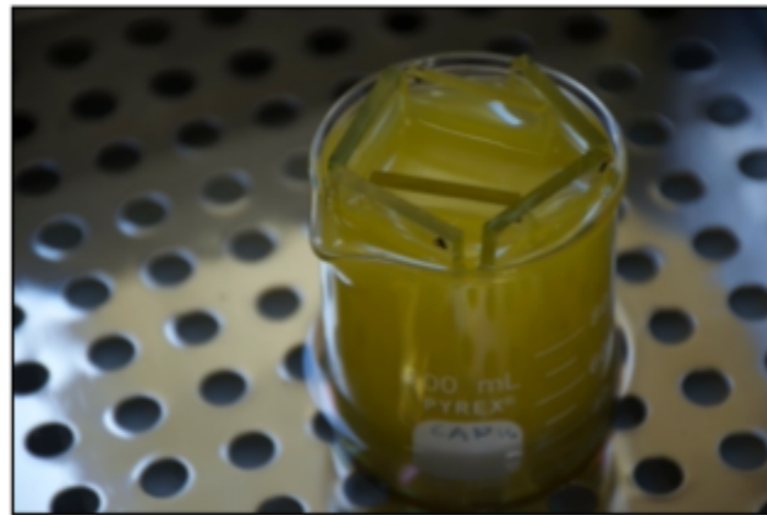


Diagrama de bandas de energía: Celda solar de sulfuro selenuro de antimonio

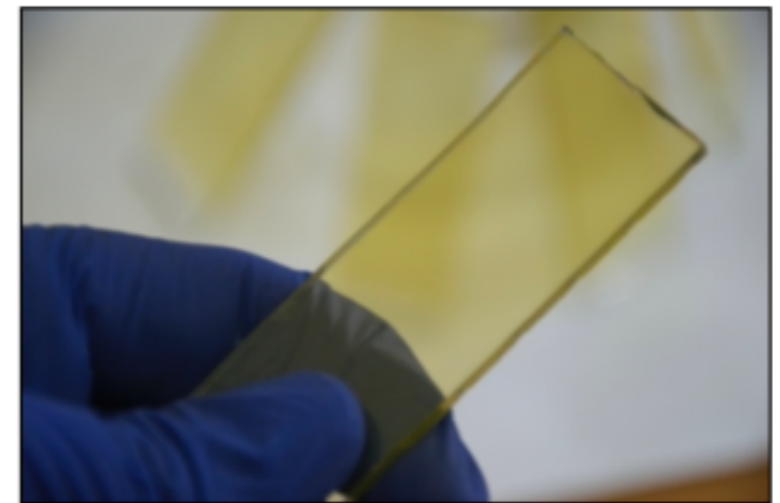
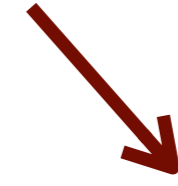
Y. Zhao, Regulating Energy Band Alignment via Alkaline Metal Fluoride Assisted Solution Post-Treatment Enabling  $Sb_2(S,Se)_3$  Solar Cells with 10.7% Efficiency, *Advanced Energy Materials*. 12 (2022) 2103015.



A) Limpieza del TCO - TEC15



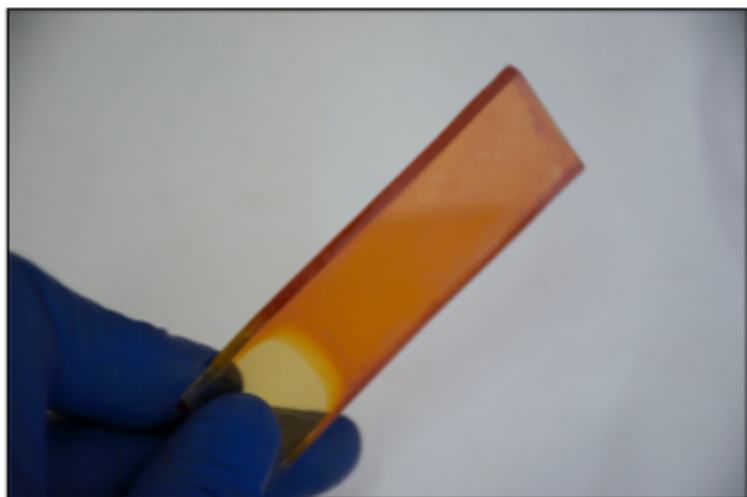
B) Depósito químico de CdS



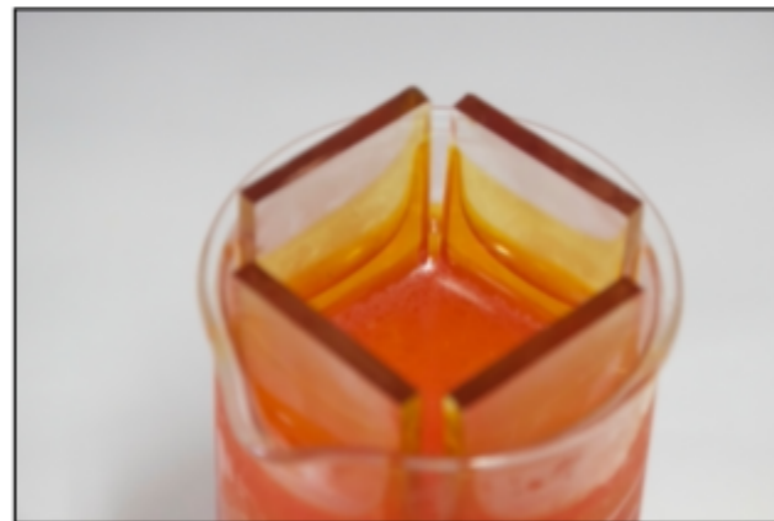
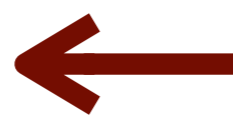
C) Película delgada de CdS sobre TCO

## Fabricación de heterounión: CdS/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>

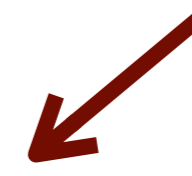
Investigación realizada en IER-UNAM (2010-2017)



E) Película delgada amorfa Ag-Sb-S



D) Depósito químico de AgSbS<sub>2</sub>



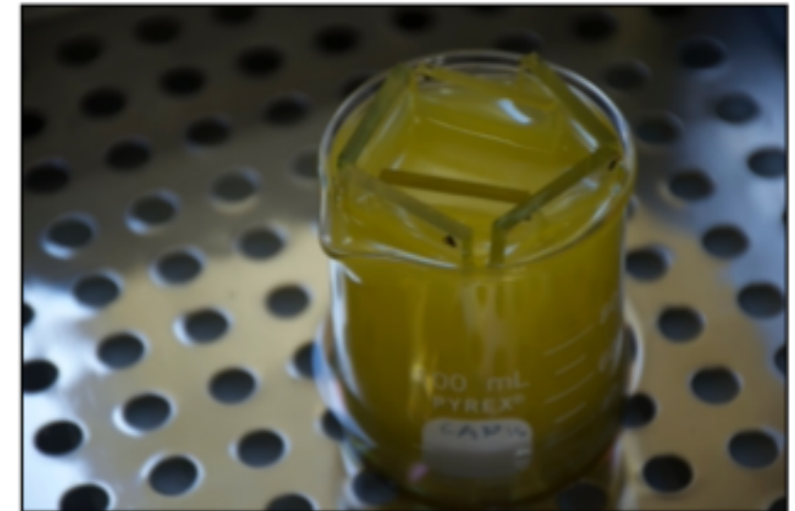
# Semiconductor tipo-n: CdS



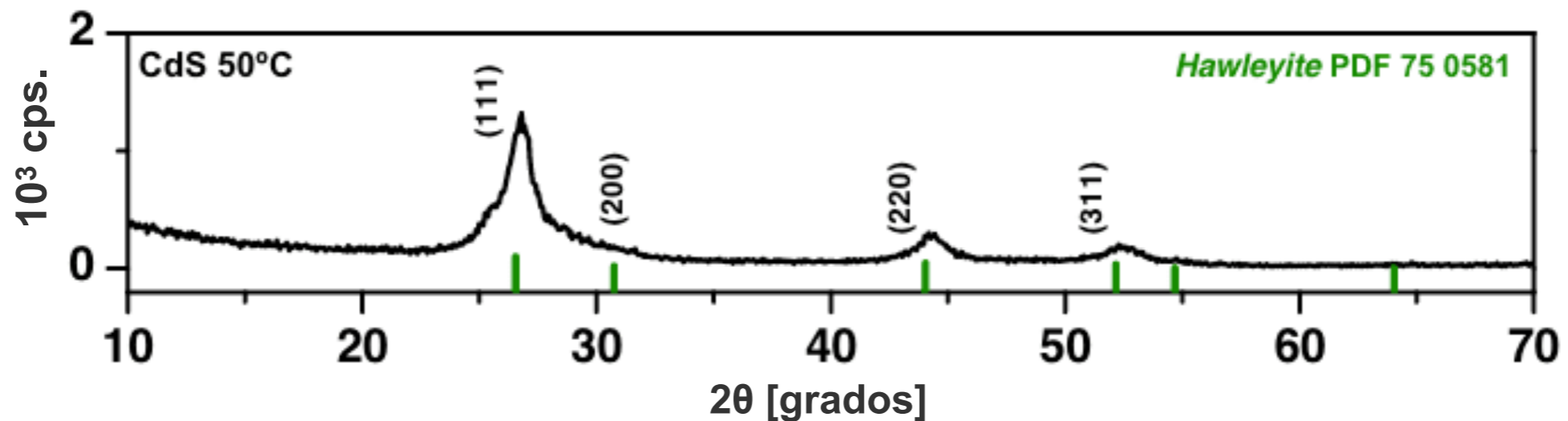
CIDS-ICUAP

Fórmula para depósito por baño químico de sulfuro de cadmio (CdS)

Reactivo	Molaridad [M]	Volumen [ml]
Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.1	5
(HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> N	3.7	5
NH <sub>4</sub> OH	15	5
(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CS	0.1	5
H <sub>2</sub> O		80



Película delgada de CdS de 100 nm depositada a 50 °C durante 2 h.



DRX en haz rasante ( $\vartheta = 0.5^\circ$ ) de película delgada de CdS con estructura cristalina cúbica ( $a = 0.5790$  nm).

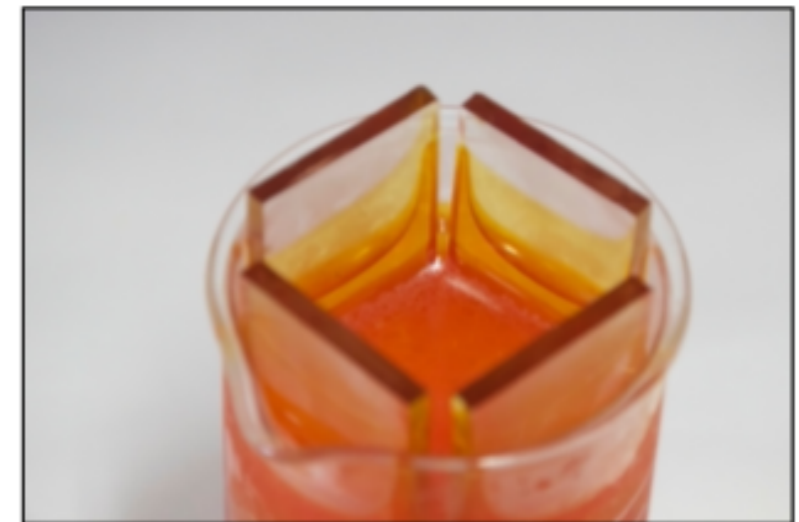
# Semiconductor tipo-p: AgSbS<sub>2</sub>



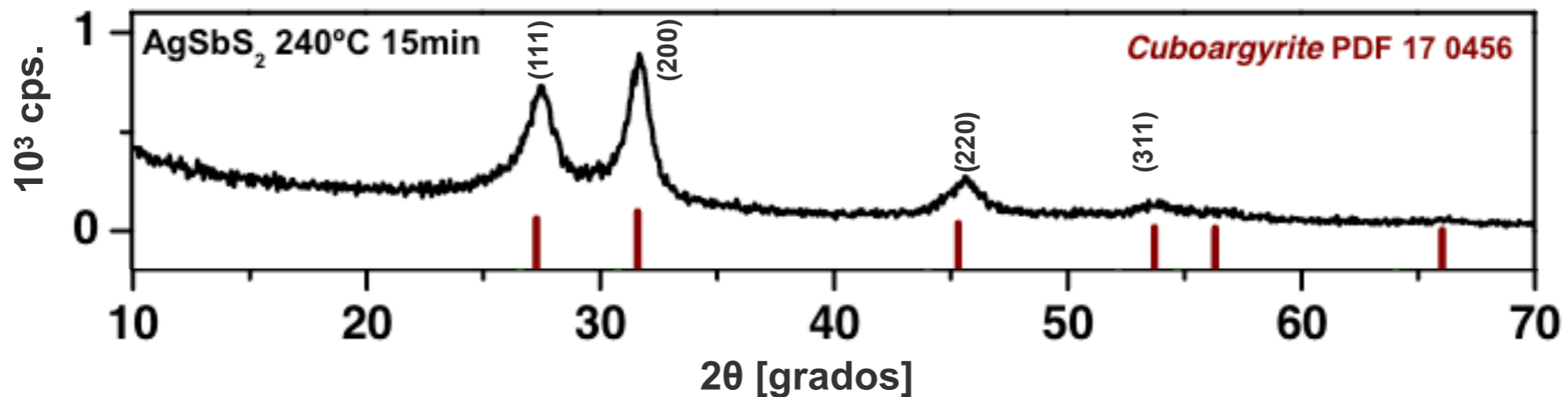
CIDS-ICUAP

Fórmula para depósito por baño químico de sulfuro de antimonio-plata (AgSbS<sub>2</sub>)

Reactivo	Molaridad [M]	Cantidad
SbCl <sub>3</sub>		0.520 g
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO		2 ml
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	20 ml
AgNO <sub>3</sub>	0.1	10 ml
H <sub>2</sub> O		48 ml



Película delgada de amorfa de AgSbS<sub>2</sub> con espesor de 350 nm depositada a 10 °C durante 4 h.

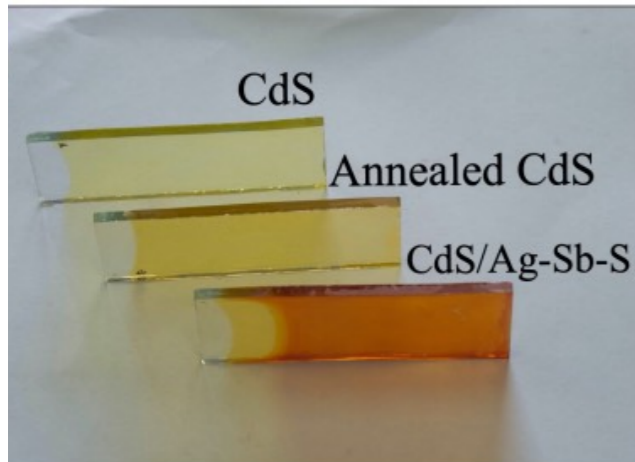


DRX en haz rasante ( $\theta = 0.5^\circ$ ) de película delgada de AgSbS<sub>2</sub> cúbica ( $a = 0.5636$  nm) con tratamiento térmico en atmósfera de N<sub>2</sub> a 240 °C durante 15 min.

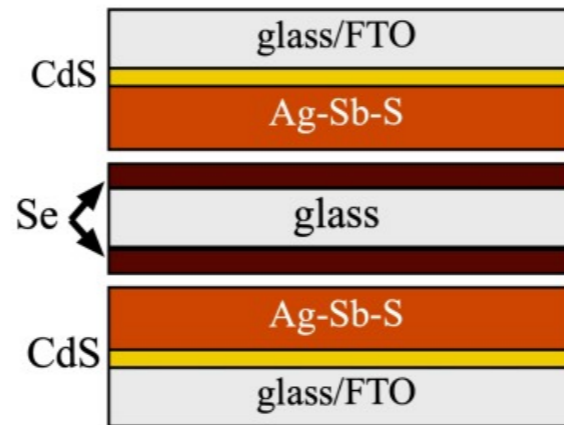
# Semiconductor tipo-p: $\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2$



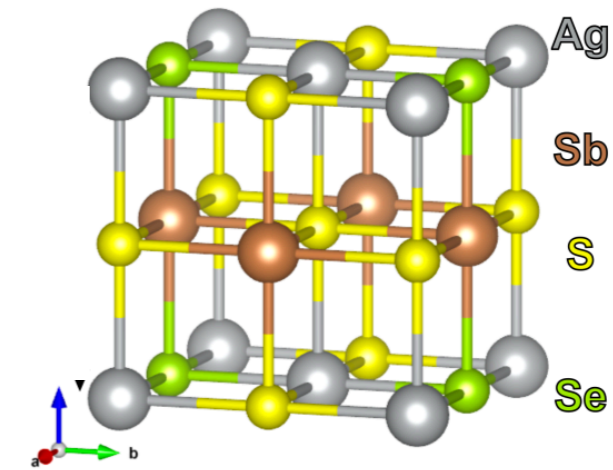
CIDS-ICUAP



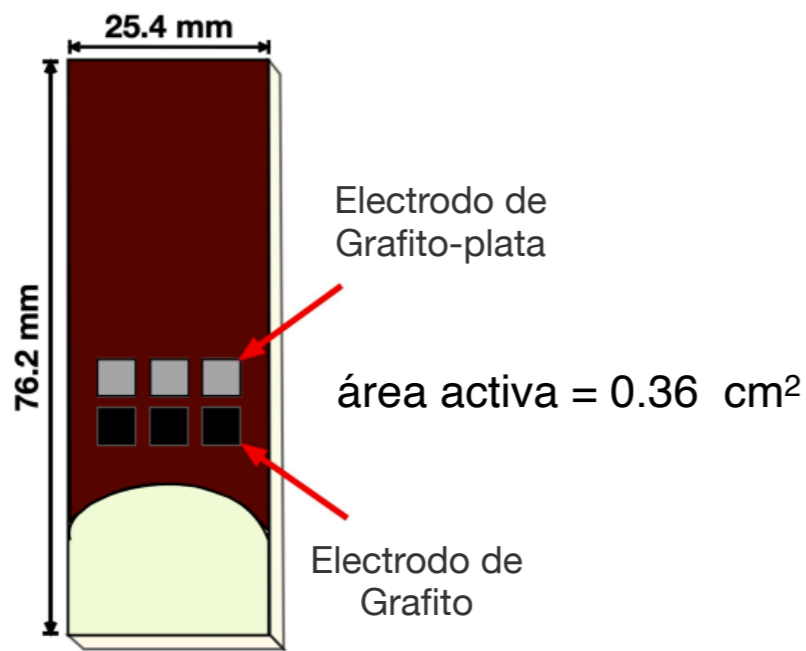
Películas delgadas que conforman a la celda depositadas sobre TCO ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ )



Incorporación de selenio mediante tratamiento térmico en un horno de vacío con atmósfera de nitrógeno a 300 °C.



Solución sólida  $\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2$  con estructura cristalina cúbica



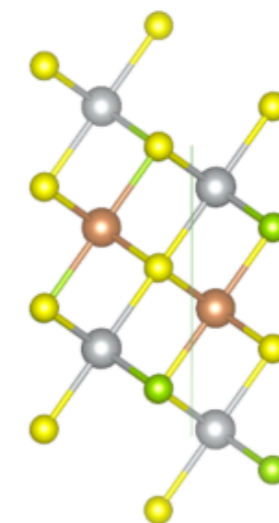
Celda solar en configuración superestrato:  
TCO/ $\text{CdS}/\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2/\text{C-Ag}$

$\text{CdS}$   
Cúbico



Vista lateral (111)

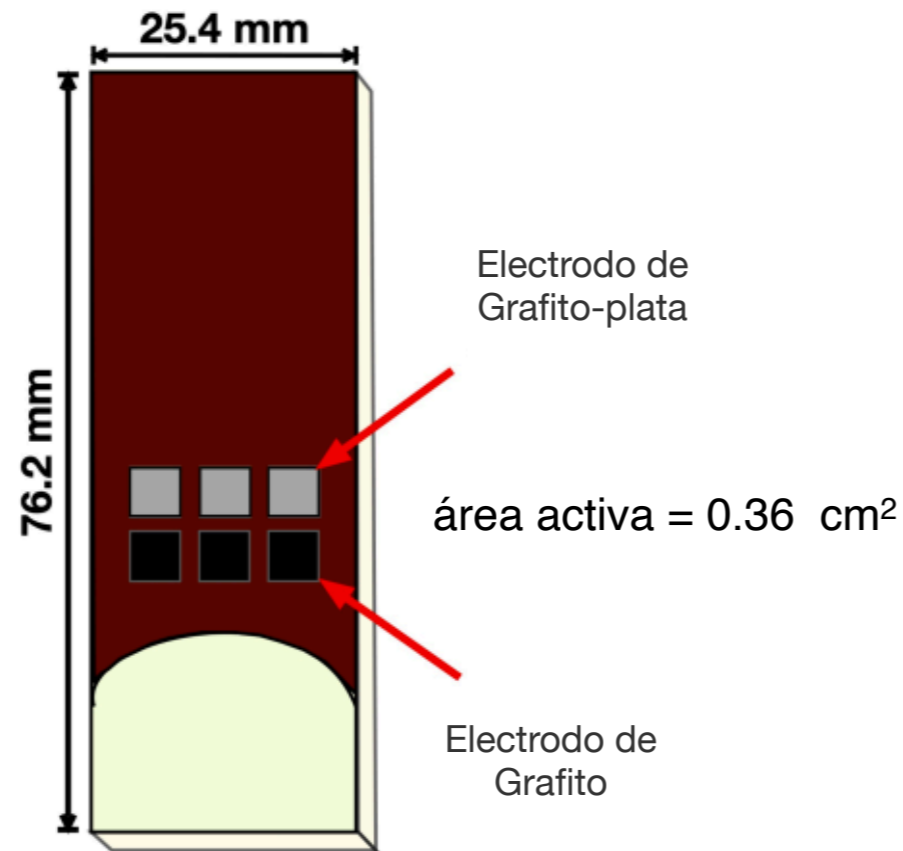
$\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2$   
Cúbico



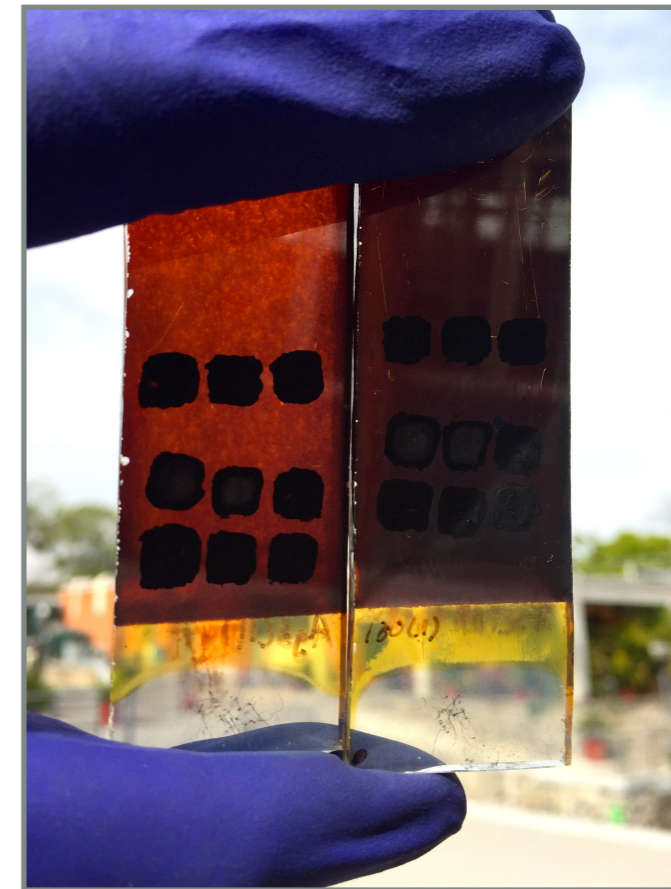
# Celda solar de película delgada sobre FTO (Vidrio conductor)



CIDS-ICUAP



Estructura de celda solar:  
TCO/CdS/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>/C-Ag



Celda solar de película delgada de Sulfuro Selenuro de Antimonio Plata: AgSb(S,Se)<sub>2</sub>

## RESEARCH ARTICLE

60 years of pss



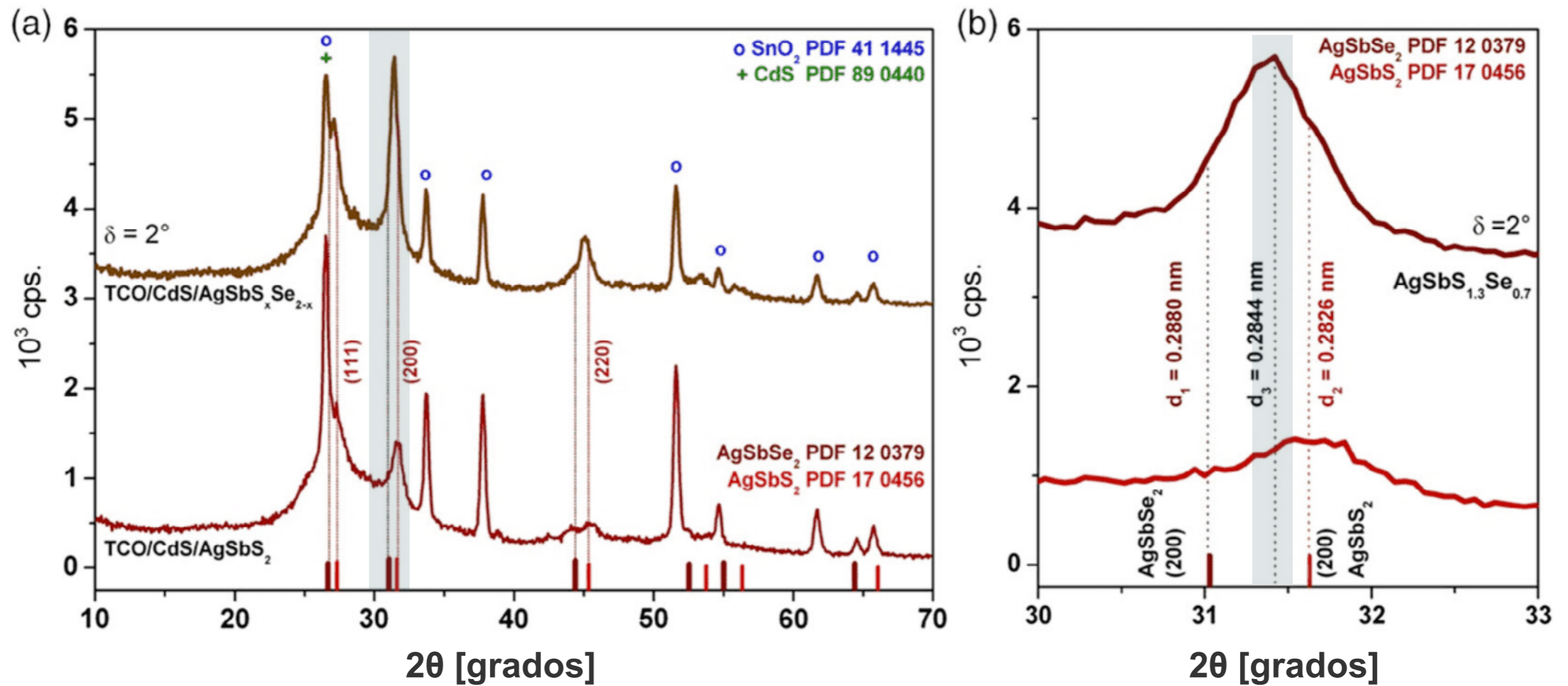
# Silver Antimony Sulfide Selenide Thin-Film Solar Cells via Chemical Deposition

Jesús Capistrán-Martínez, M. T. Santhamma Nair, and P. Karunakaran Nair\*

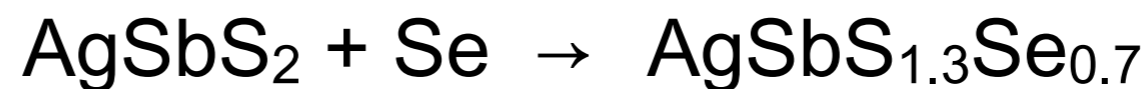
Silver antimony sulfide selenide ( $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$ ) thin film forms from silver antimony sulfide ( $\text{AgSbS}_2$ , 700 nm) and amorphous selenium (Se, 300 nm), both obtained via chemical deposition and heated in contact at 180 °C for 30 min in an argon ambient. The face-centered cubic (fcc) structure of  $\text{AgSbS}_2$  (cuboargyrite) is maintained in  $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$ . The optical bandgap of 1.8 eV (direct forbidden) in  $\text{AgSbS}_2$  reduces to 1.47 eV in  $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$  with an increase in the light-generated current density from 19 to 29  $\text{mA cm}^{-2}$ . The photoconductivity in  $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$  of  $2 \times 10^{-5} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  is an order of magnitude higher than that in  $\text{AgSbS}_2$ . A solar cell of  $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}(80 \text{ nm})/\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}(700 \text{ nm})/\text{C-Ag}$ , produced by heating at 280 °C with the graphite (C) electrode applied, shows a conversion efficiency ( $\eta$ ) of 0.65%, open-circuit voltage ( $V_{oc}$ ) of 0.537 V, short-circuit current density ( $J_{sc}$ ) of 2.07  $\text{mA cm}^{-2}$ , and fill factor of 0.60. In  $\text{AgSbS}_2$  solar cell,  $\eta$  is of 0.54% with a  $V_{oc}$  of 0.625 V. The merits of  $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$  as a solar cell absorber and ways to increase the  $J_{sc}$  in the  $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$  solar cell to match its  $J_L$  are discussed.

at 1.5G (AM1.5G,  $1000 \text{ W m}^{-2}$ ) is nearly  $30 \text{ mA cm}^{-2}$ ,<sup>[5]</sup> the same as in high-efficiency CdTe and perovskite-structured solar cells, also with  $E_g$  1.5 eV.<sup>[6,7]</sup> The substitution in  $\text{AgSbS}_2$  of S sites with Se would lead to an improved diffusion length ( $L_p$  or  $L_n$ ) and collection efficacy of photogenerated carriers across the solar cell. This would happen because the reported drift mobility for holes ( $\mu_p$ ) in  $\text{AgSbS}_2$  of  $0.24 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  increases to  $1500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  in  $\text{AgSbSe}_2$ .<sup>[1]</sup> A general trend in chalcogenide semiconductors is that the electron drift mobility ( $\mu_n$ ) is typically higher than  $\mu_p$ .<sup>[6]</sup> A higher drift mobility would increase the electron diffusion length  $L_n = [(0.026 \text{ V})\mu_n\tau_n]^{1/2}$  in the p-type  $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$  absorber in a p/n<sup>+</sup>CdS solar cell. Here, 0.026 V is the thermal voltage at 300 K and  $\tau_n$  is the minority carrier lifetime for electrons.

# Análisis estructural: GIXRD

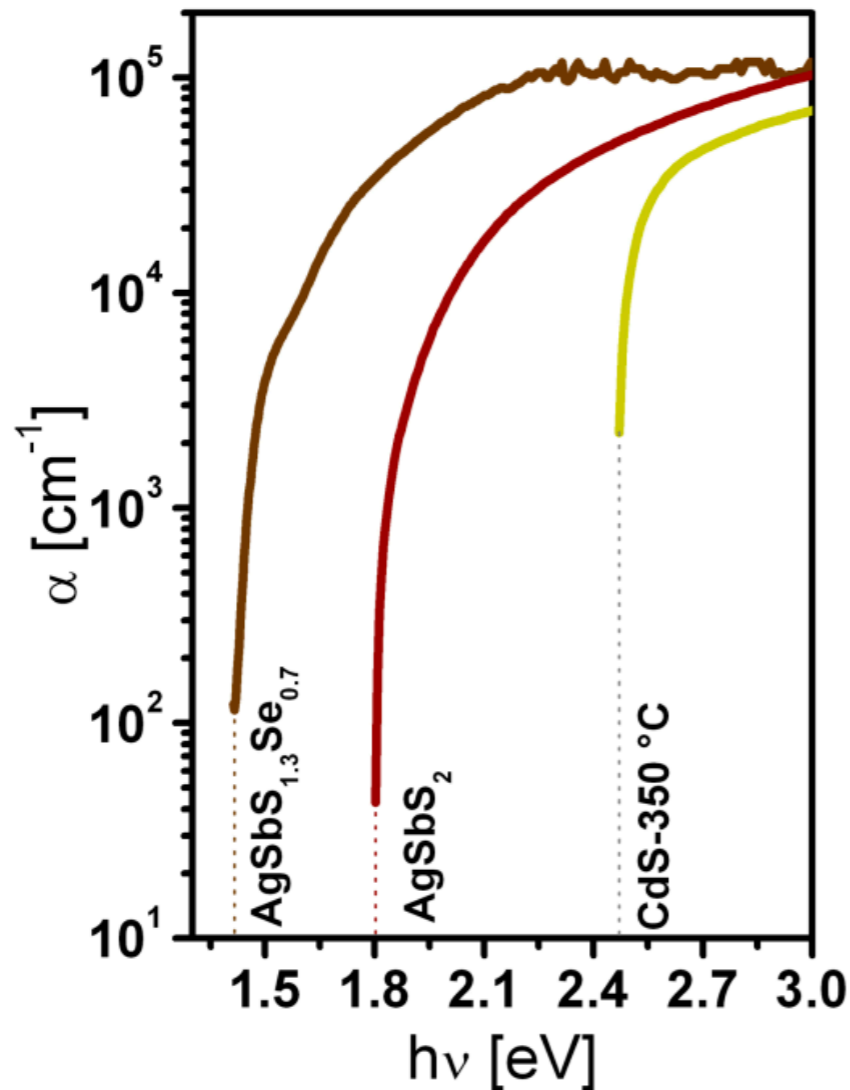


XRD en haz rasante ( $\delta = 2^\circ$ ) de celdas solares de AgSbS<sub>2</sub> (espesor = 700 nm) con incorporación de selenio en N<sub>2</sub> a 300 °C: Celdas solares de AgSbS<sub>2</sub> y AgSb(S<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>

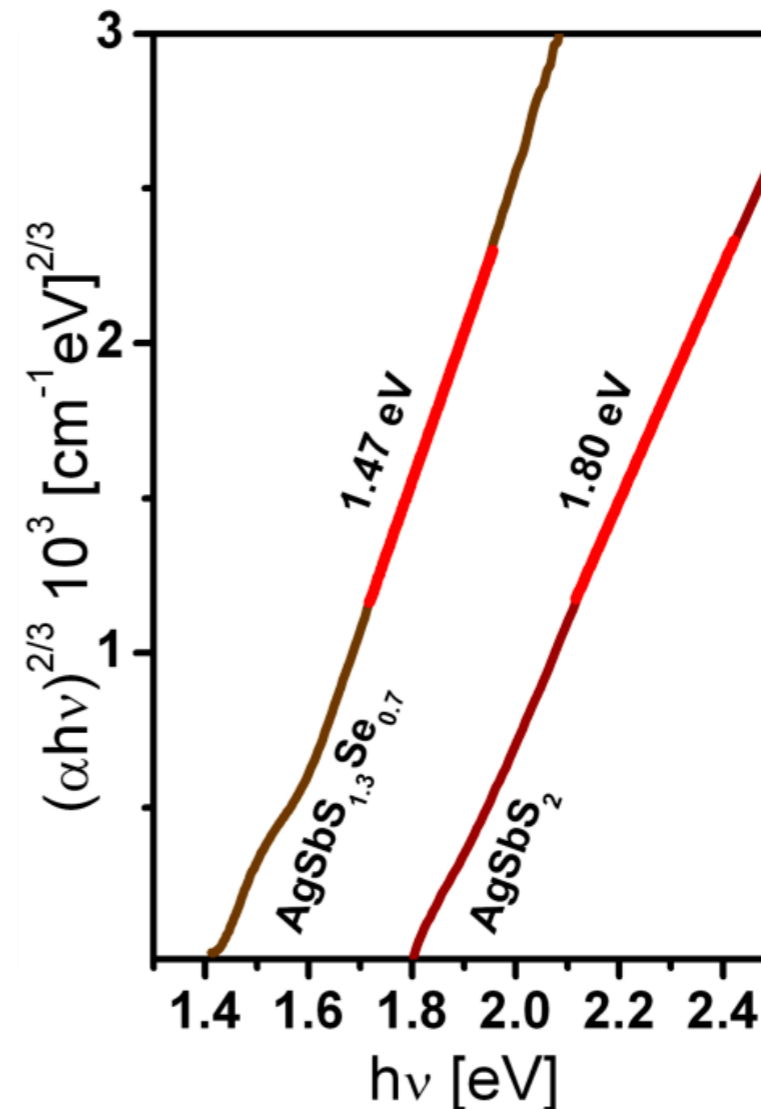




# Coeficiente de absorción óptica y brecha de energía



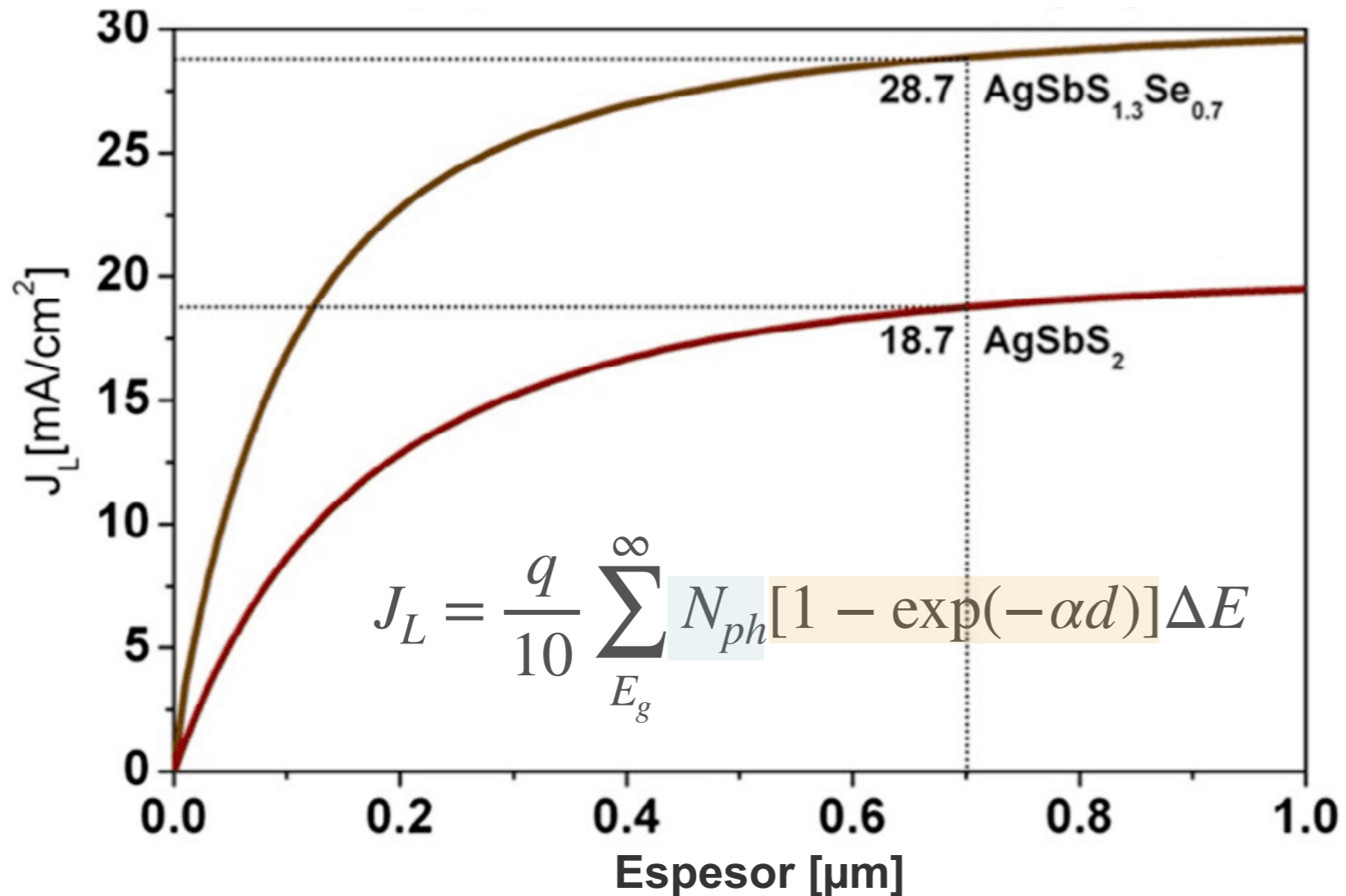
Coeficiente de absorción óptica ( $\alpha$  [ $\text{cm}^{-1}$ ]) de CdS,  $\text{AgSbS}_2$  y  $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$



Estimación de brecha de energía ( $E_g$ ) de  $\text{AgSbS}_2$  y  $\text{AgSbS}_{1.3}\text{Se}_{0.7}$  con 700 nm de espesor

[7] J. Capistrán-Martínez, M.T.S. Nair, P.K. Nair, Silver Antimony Sulfide Selenide Thin-Film Solar Cells via Chemical Deposition, Phys. Status Solidi A. 218 (2021) 2100058.

# Densidad de corriente fotogenerada ( $J_L$ )

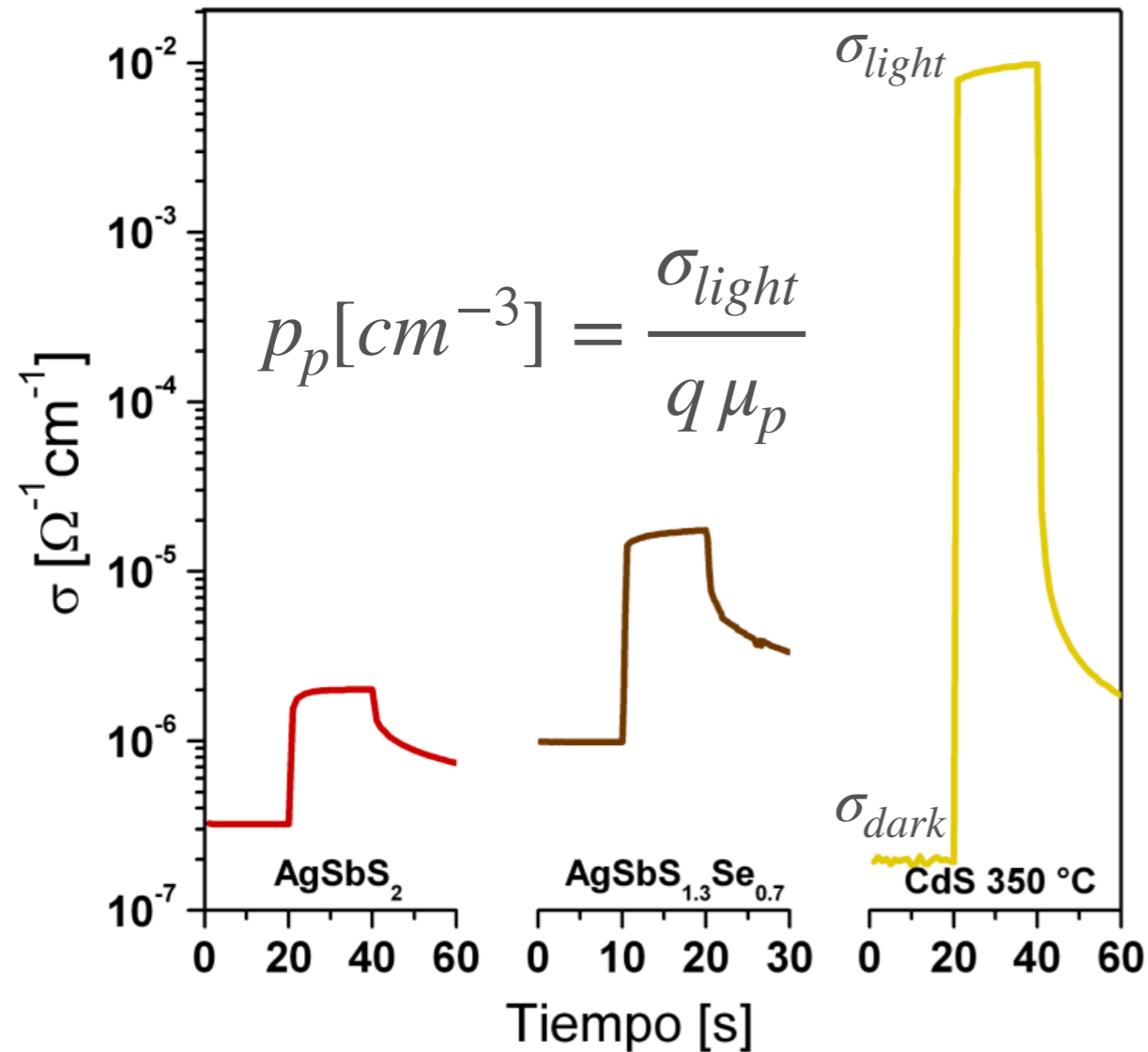


Estimación de densidad de corriente fotogenerada (ideal) para  $\text{AgSbS}_2$  y  $\text{AgSbS}_{1.4}\text{Se}_{0.7}$  utilizando el espectro de radiación AM1.5 de 1000 W/m<sup>2</sup>

## Condiciones

- Eficiencia cuántica externa (EQE = 1)
- No hay pérdidas ópticas por reflexión
- Absorción completa ( $h\nu > E_g$ )

# Fotoconductividad eléctrica ( $\sigma_{light}$ )

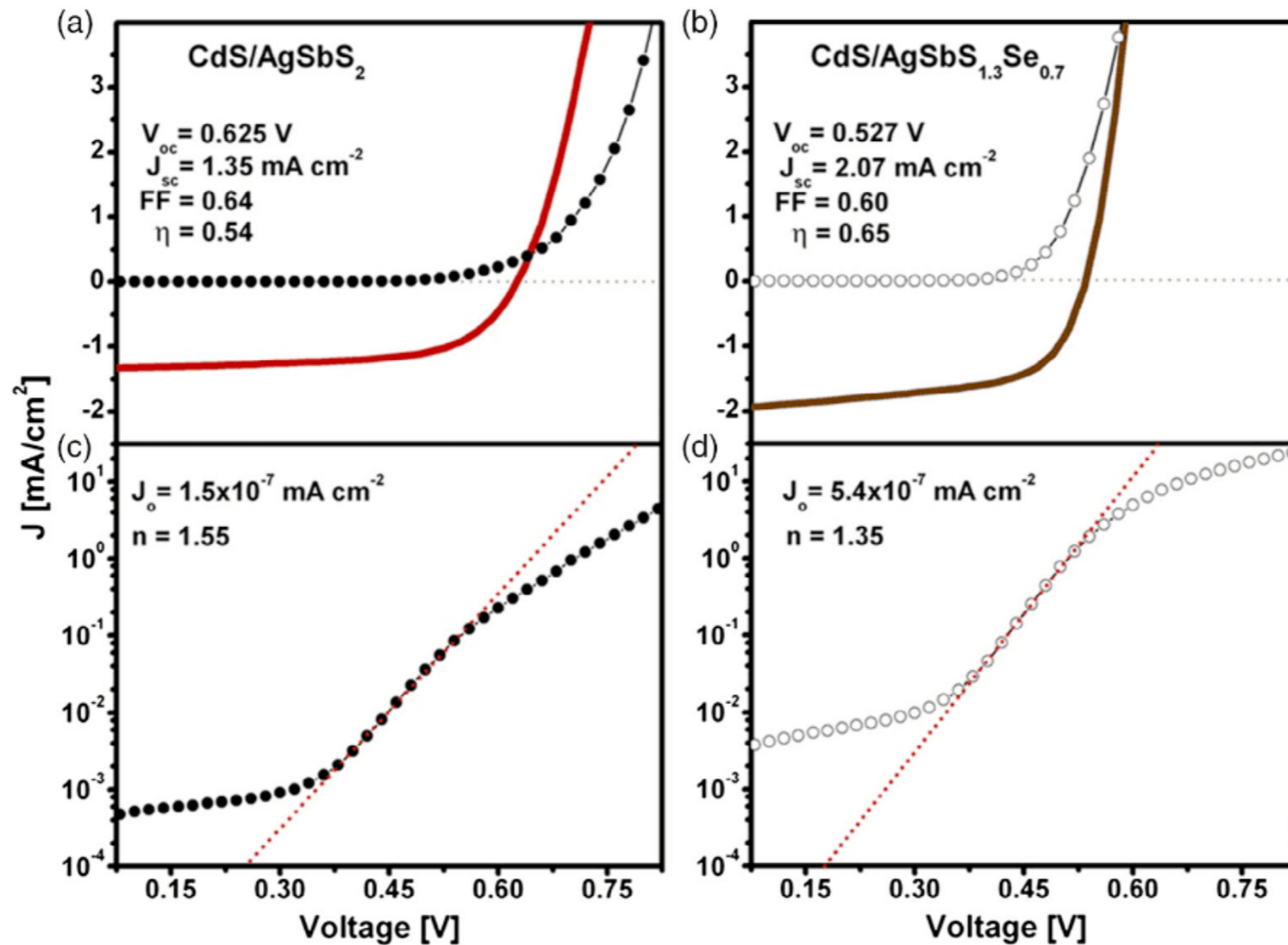


Conductividad eléctrica de películas delgadas de  $AgSbS_2$ ,  $AgSbS_{1.3}Se_{0.7}$  y  $CdS$  bajo iluminación de  $1000 W/m^2$  con una lámpara de Tungsteno-Halógeno

Parametro	CdS	$AgSbS_{1.3}Se_{0.7}$
Parametro de red [Å]	a = 5.7909	a = 5.5688
Tamaño de cristal [nm]	6	8
Espesor [nm]	80	700
Brecha de energía [eV]	2.47	1.47
Conductividad eléctrica [ $\Omega^{-1}cm^{-1}$ ]	$9.1 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-5}$
Movilidad de arrastre [eV]	5	180
Densidad de portadores [ $cm^{-3}$ ]	$4.3 \times 10^{17}$	$7.1 \times 10^{15}$

Resumen de parámetros obtenidos de forma experimental para el desarrollo de celda solar TCO/ $CdS$ / $AgSbS_{1.3}Se_{0.7}$ /C-Ag

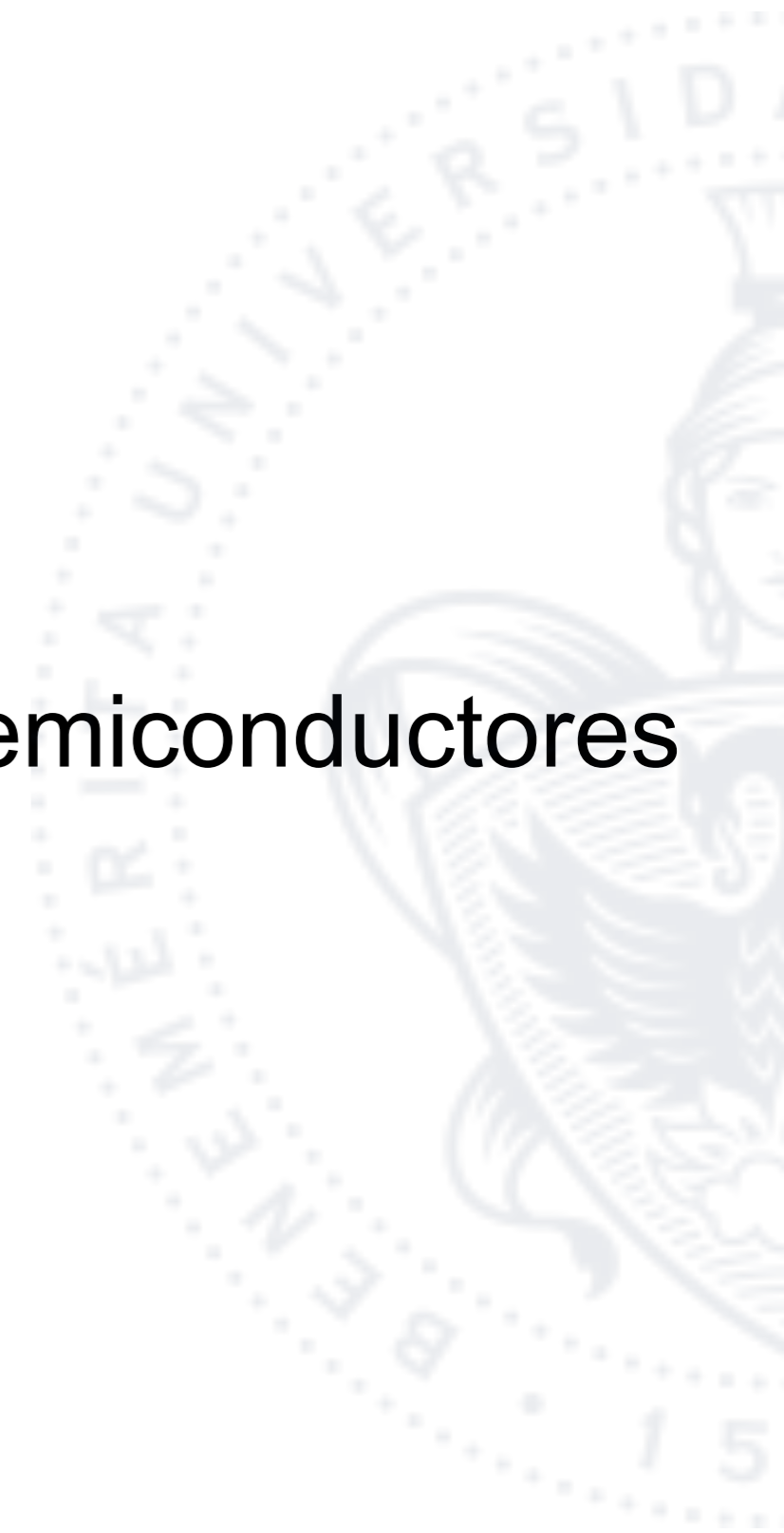
[7] J. Capistrán-Martínez, M.T.S. Nair, P.K. Nair, Silver Antimony Sulfide Selenide Thin-Film Solar Cells via Chemical Deposition, Phys. Status Solidi A. 218 (2021) 2100058.



**Figure 5.** a,b)  $J$ - $V$  curves in the dark and under illumination with intensity of  $1000 \text{ W m}^{-2}$  showing the cell parameters with efficiency  $\eta$  of 0.54% and 0.65%. c,d) Log-scale plot of  $J$  in the dark versus  $V$  for the analyses of the CdS/absorber junction to calculate saturation current density ( $J_0$ ) and the diode ideality factor ( $n$ ).

# 3. BUAP - Posgrado en Dispositivos Semiconductores

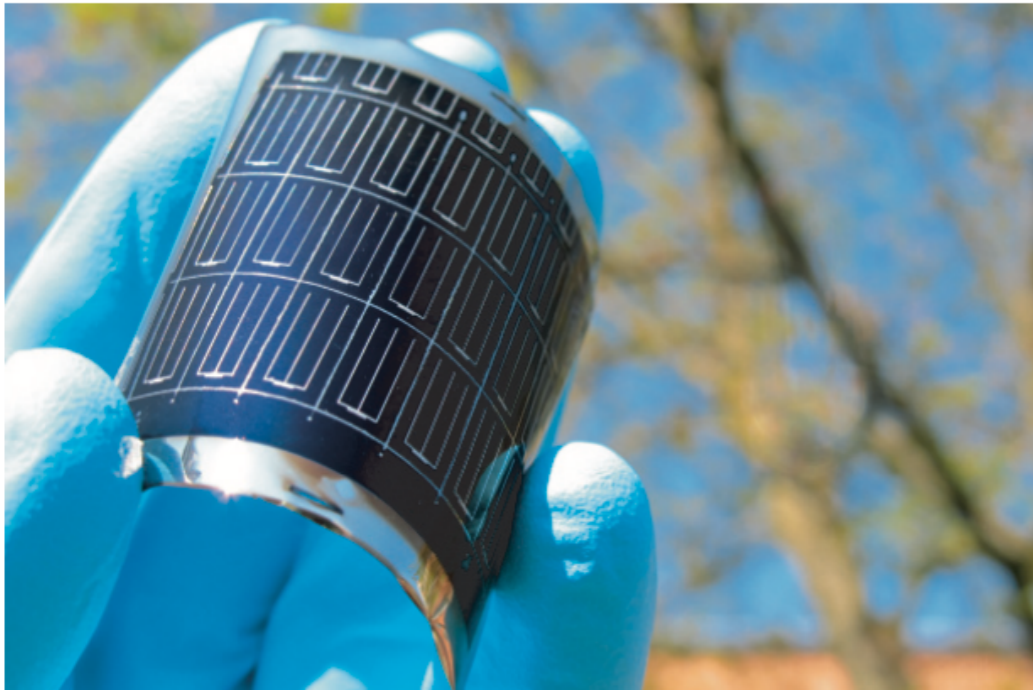
Celda solar flexible de película delgada



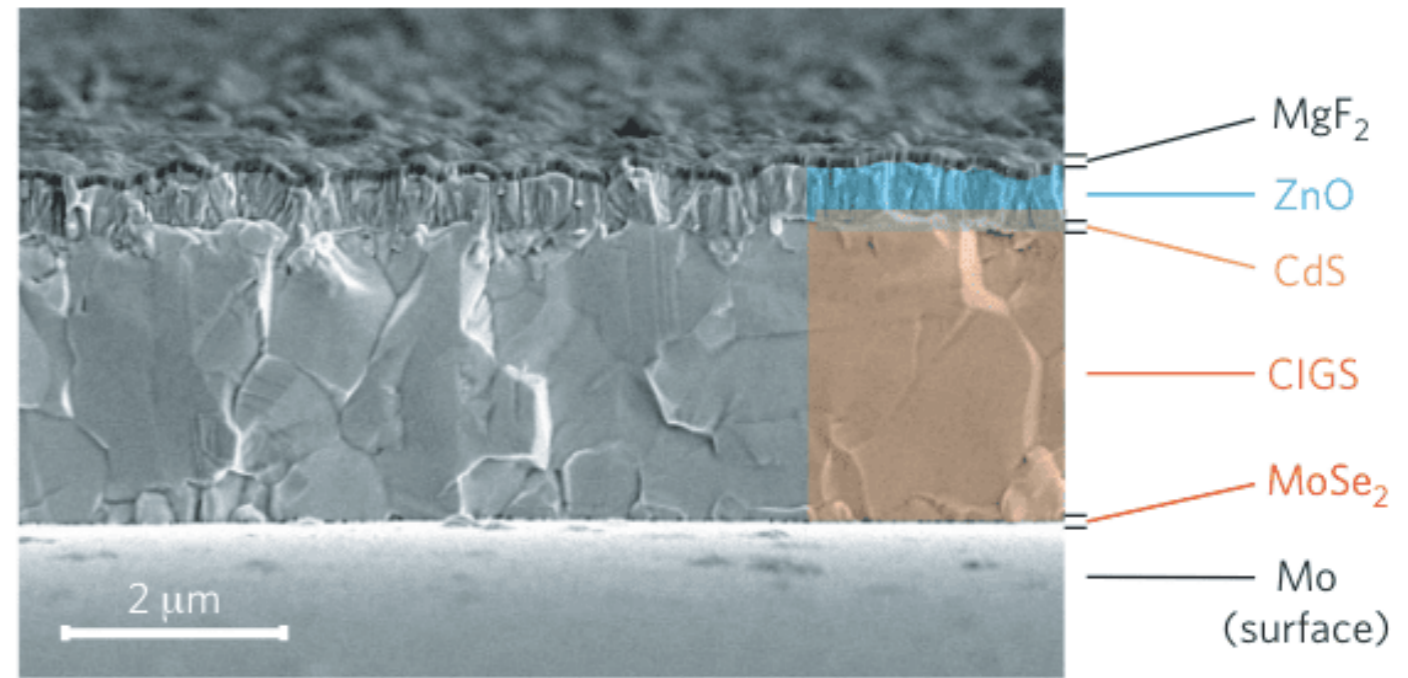
# Celda solar flexible: CIGS



CIDS-ICUAP



Celda solar flexible - CIGS



Componentes de una celda solar flexible - CIGS

## Dispositivos Flexibles

Las celdas solares flexibles son ligeras y pueden adaptarse a superficies irregulares.

[8] A. Chirilă, S. Buecheler, F. Pianezzi, P. Bloesch, Highly efficient Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells grown on flexible polymer films, **Nature Materials**. (2011).

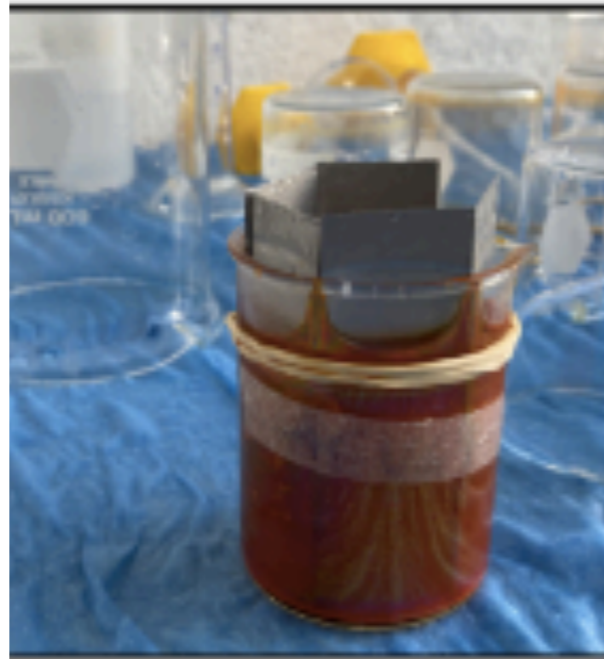
# Celda solar flexible: SS304/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>



CIDS-ICUAP



Solución de reacción inicial con sustratos de acero inoxidable



Solución de reacción después de 4 horas de depósito químico



Películas delgadas de AgSbS<sub>2</sub> amorfo sobre acero inoxidable

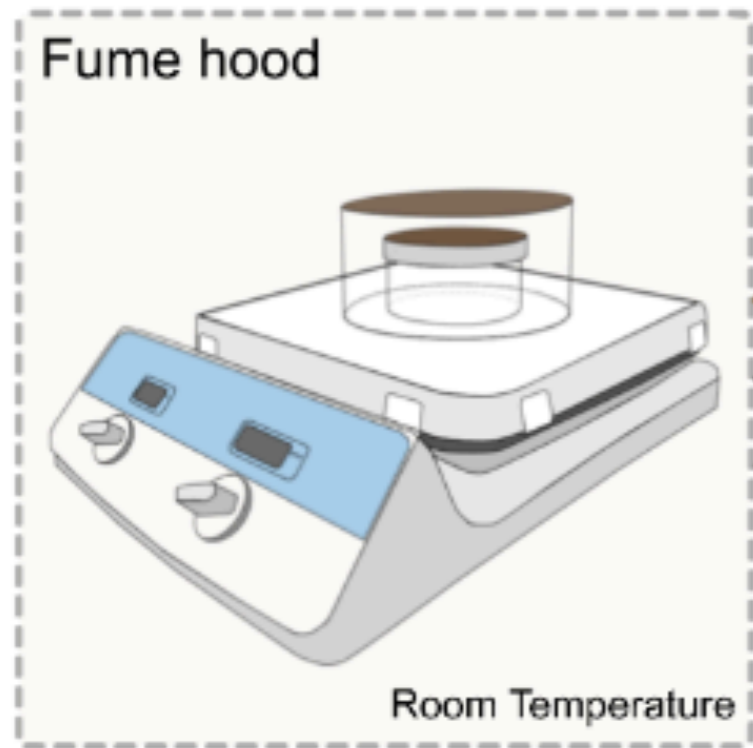
Reactivos	Chemical Formula	Molarity [M]	Quantity
Antimony chloride	SbCl <sub>3</sub>		520 mg
Acetone	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO		2 ml
Sodium thiosulfate	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	20 ml
Silver nitrate	AgNO <sub>3</sub>	0.1	10 ml
Distilled water	H <sub>2</sub> O		48 ml

Fórmula química para el depósito de sulfuro de antimonio-plata (AgSbS<sub>2</sub>)

# Celda solar flexible: SS304/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>



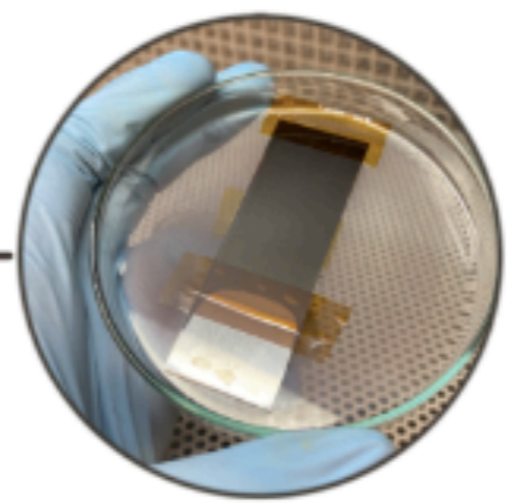
CIDS-ICUAP



Selenización en aire



La película delgada es colocada en una caja petri (cara abajo) para recibir el vapor de selenio.



Incorporación de selenio a presión atmosférica.



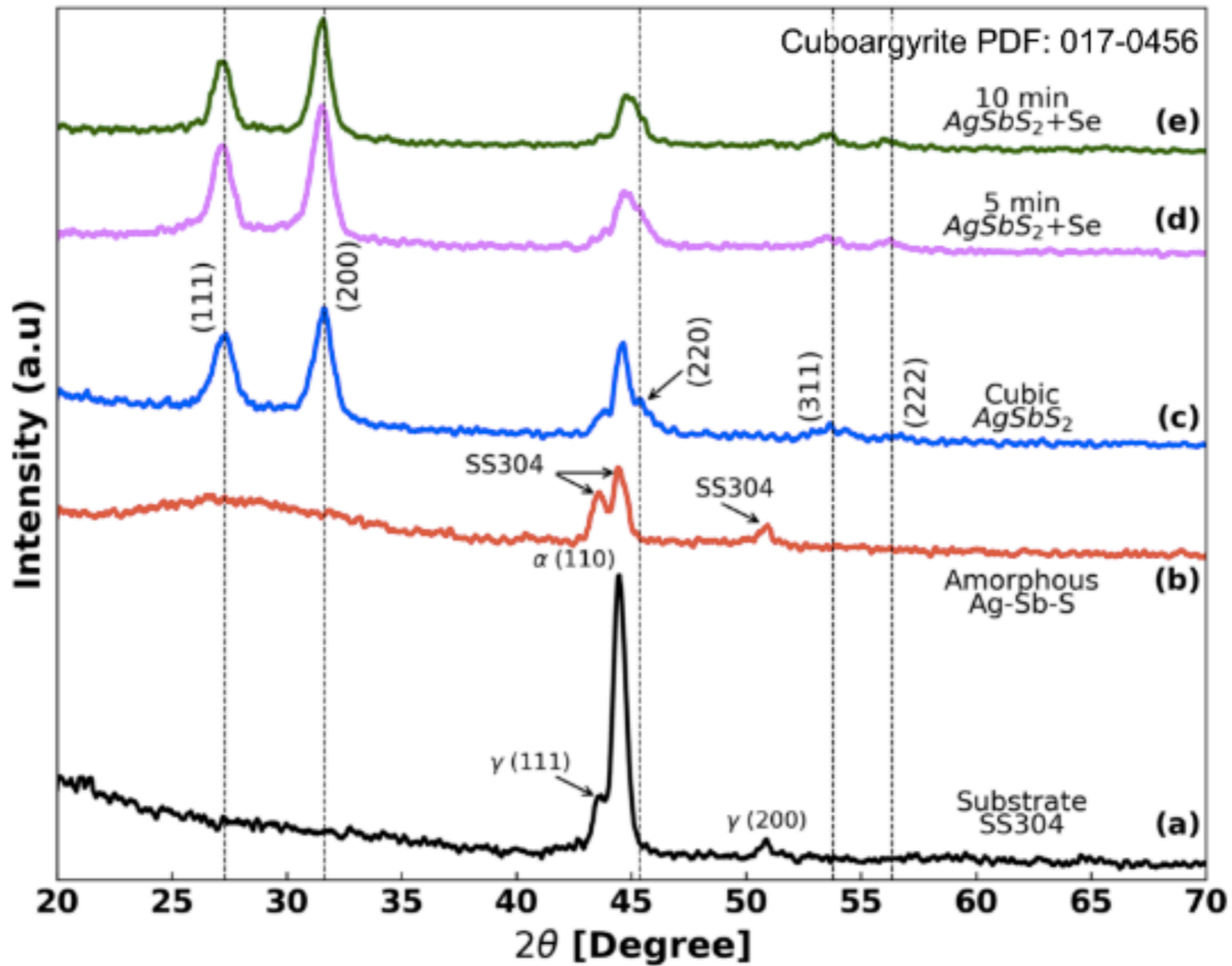
El tratamiento térmico se debe realizar dentro de una campana de extracción para evitar inhalar el vapor de selenio.



# Celda solar flexible: SS304/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>



CIDS-ICUAP

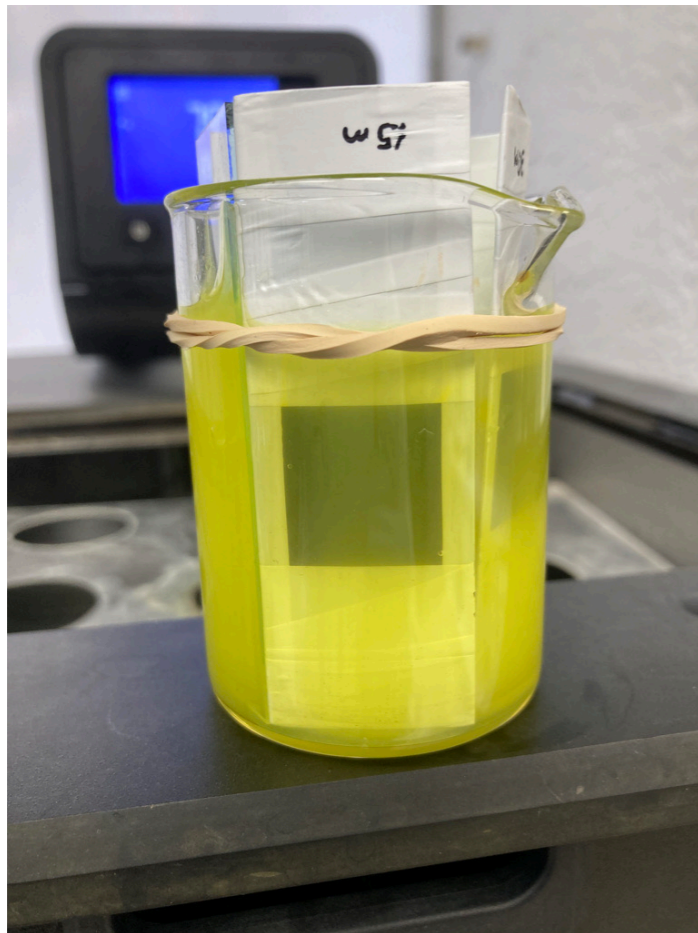


XRD en haz rasante ( $\theta = 1^\circ$ ) de películas delgadas de AgSbS<sub>2</sub> y AgSbS<sub>2</sub> + Se sobre acero inoxidable: a) acero inoxidable, b) AgSbS<sub>2</sub> amorfo, c) AgSbS<sub>2</sub> cristalizado d y e) AgSbS<sub>2</sub> + Se 5 min y 10 min respectivamente.

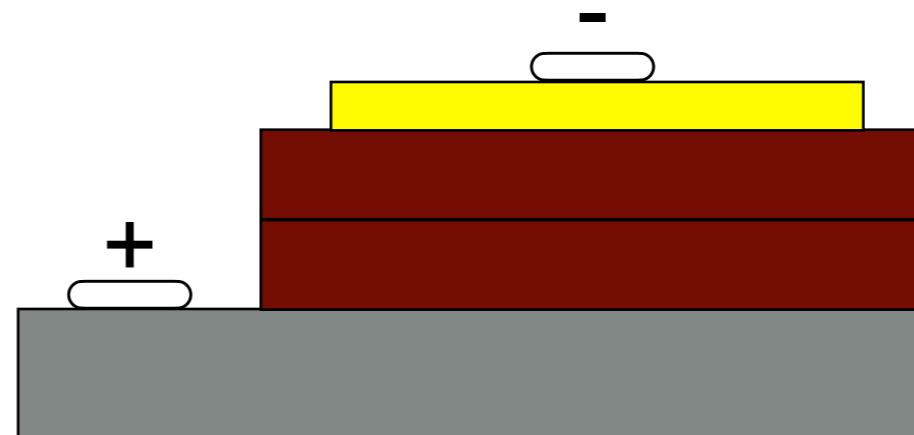
# Celda solar flexible: SS304/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>



CIDS-ICUAP



Deposito químico de sulfuro de cadmio: 80 °C



Dispositivo semiconductor: Diodo SS304/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>/CdS



Diagrama diodo ideal

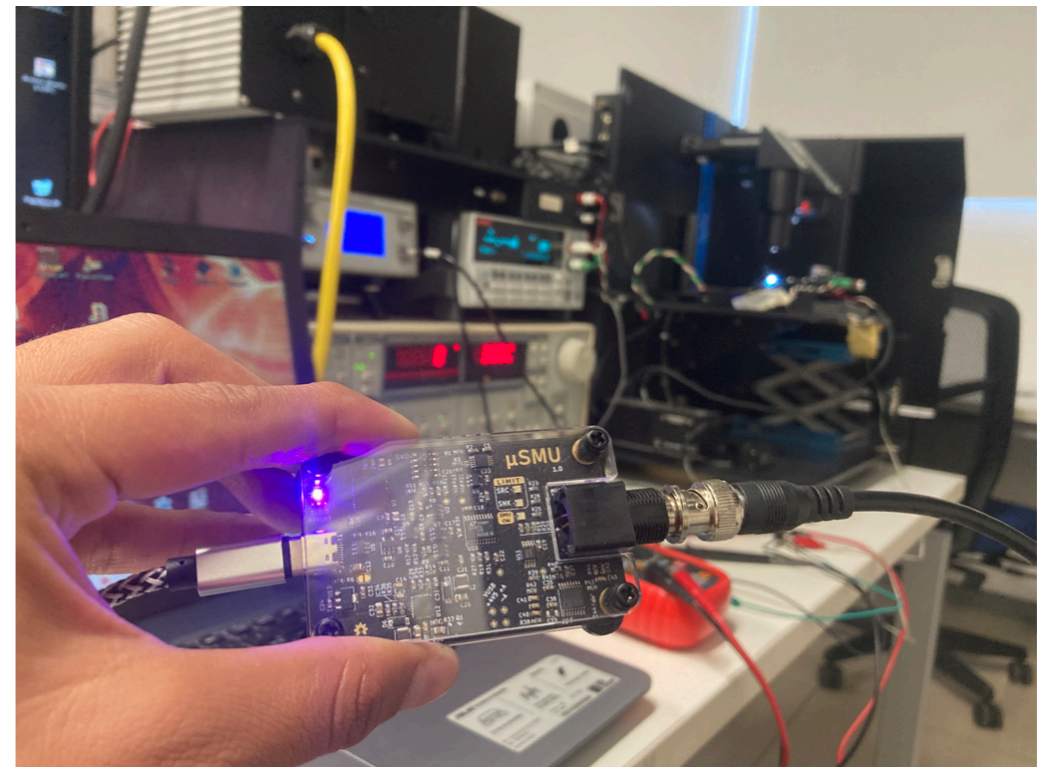
# Celda solar flexible: SS304/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>



CIDS-ICUAP



Heterounión principal: Ag/SS304/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>/CdS/Ag

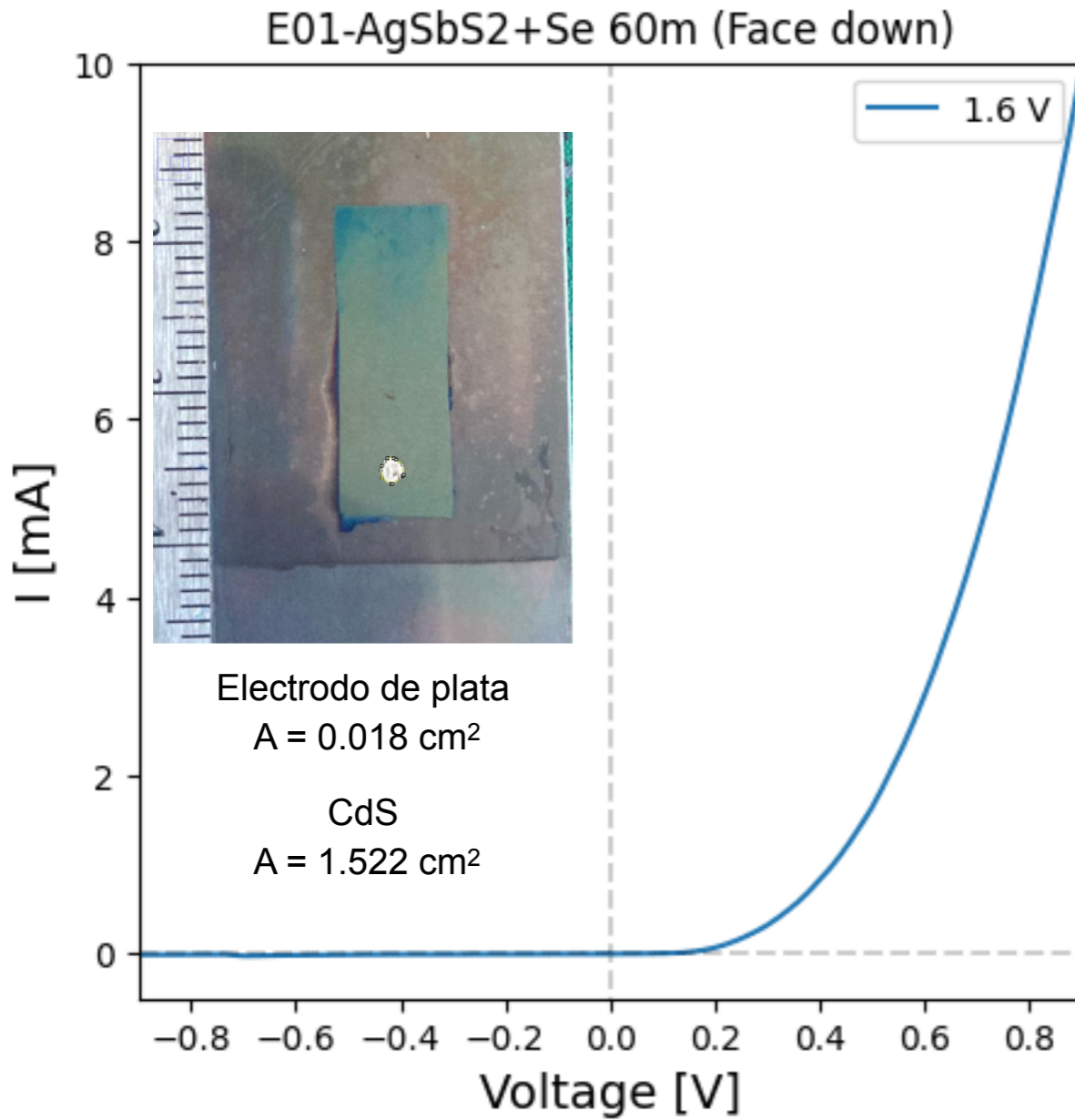


μSMU - Equipo de medición de curva IV de bajo costo  
( $I_{\max} = 40 \text{ mA}$ ,  $V_{\max} = 5\text{V}$ ) calibrado con equipo  
Keithley 2400

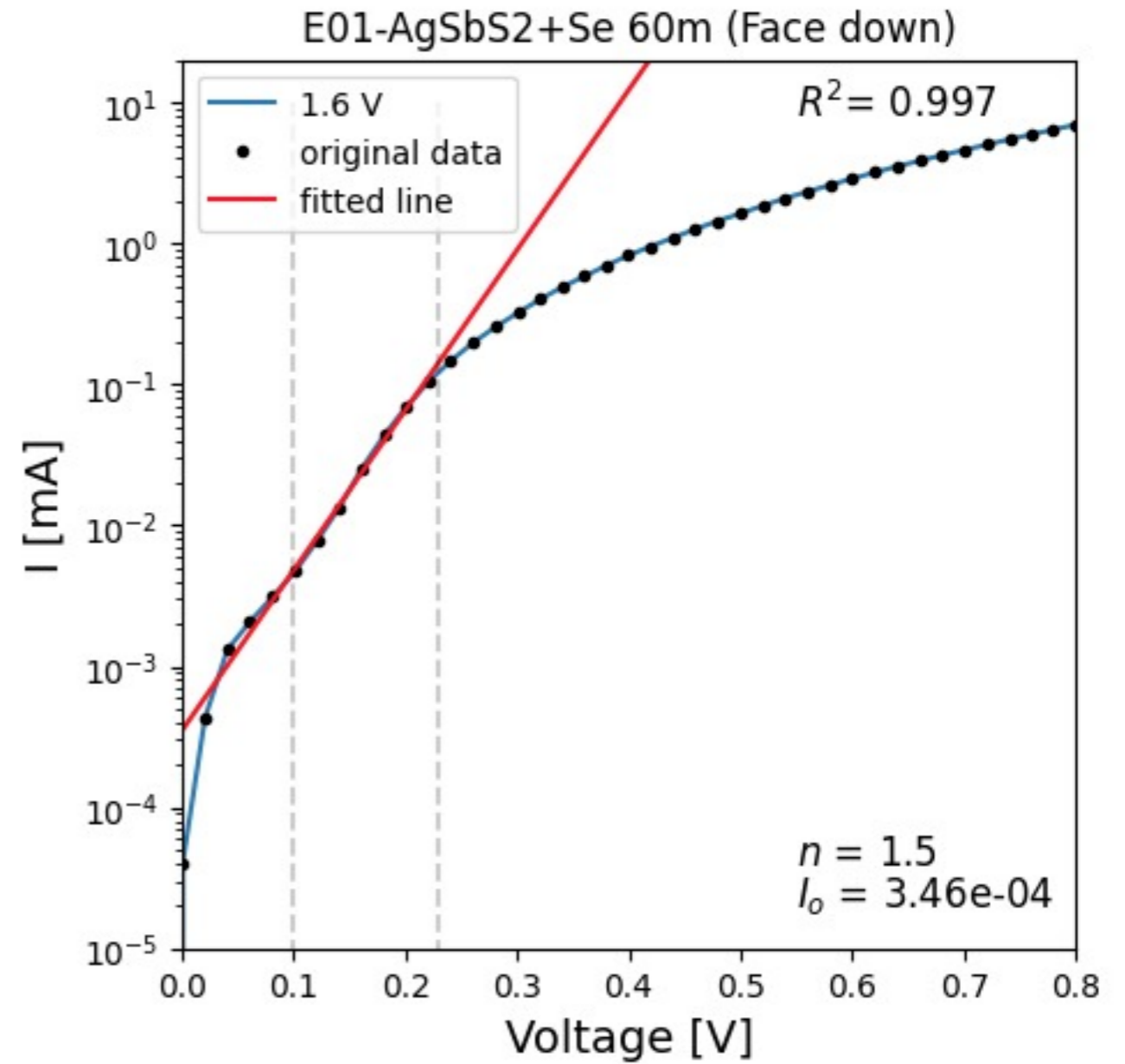
# Celda solar flexible: SS304/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>



CIDS-ICUAP



Curva I-V en oscuridad de la heterounión:  
AgSb(S,Se)<sub>2</sub>/CdS



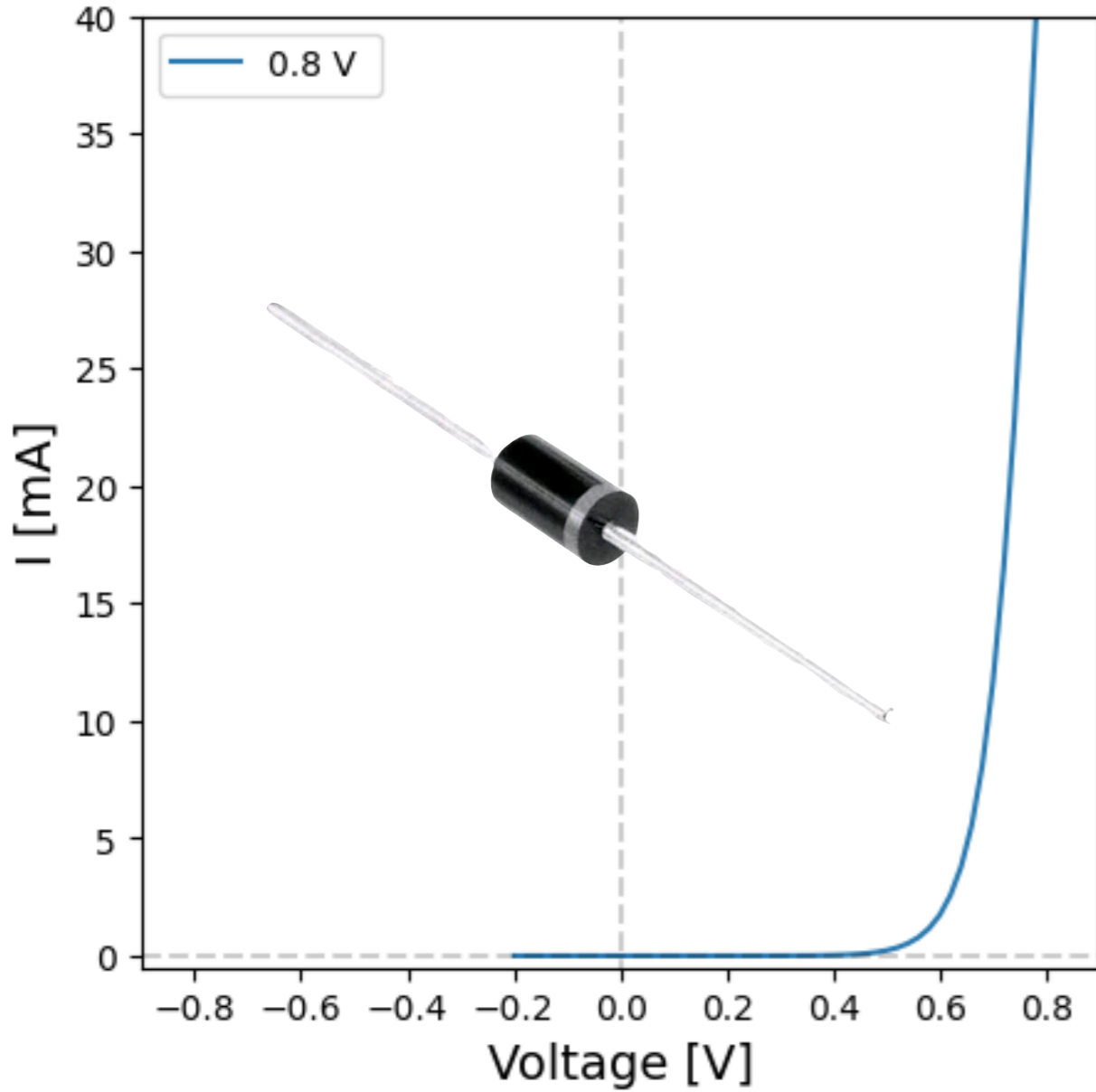
Curva I-V semi-logarítmica de AgSb(S,Se)<sub>2</sub>/CdS

# Diodo de silicio (Linea Base)



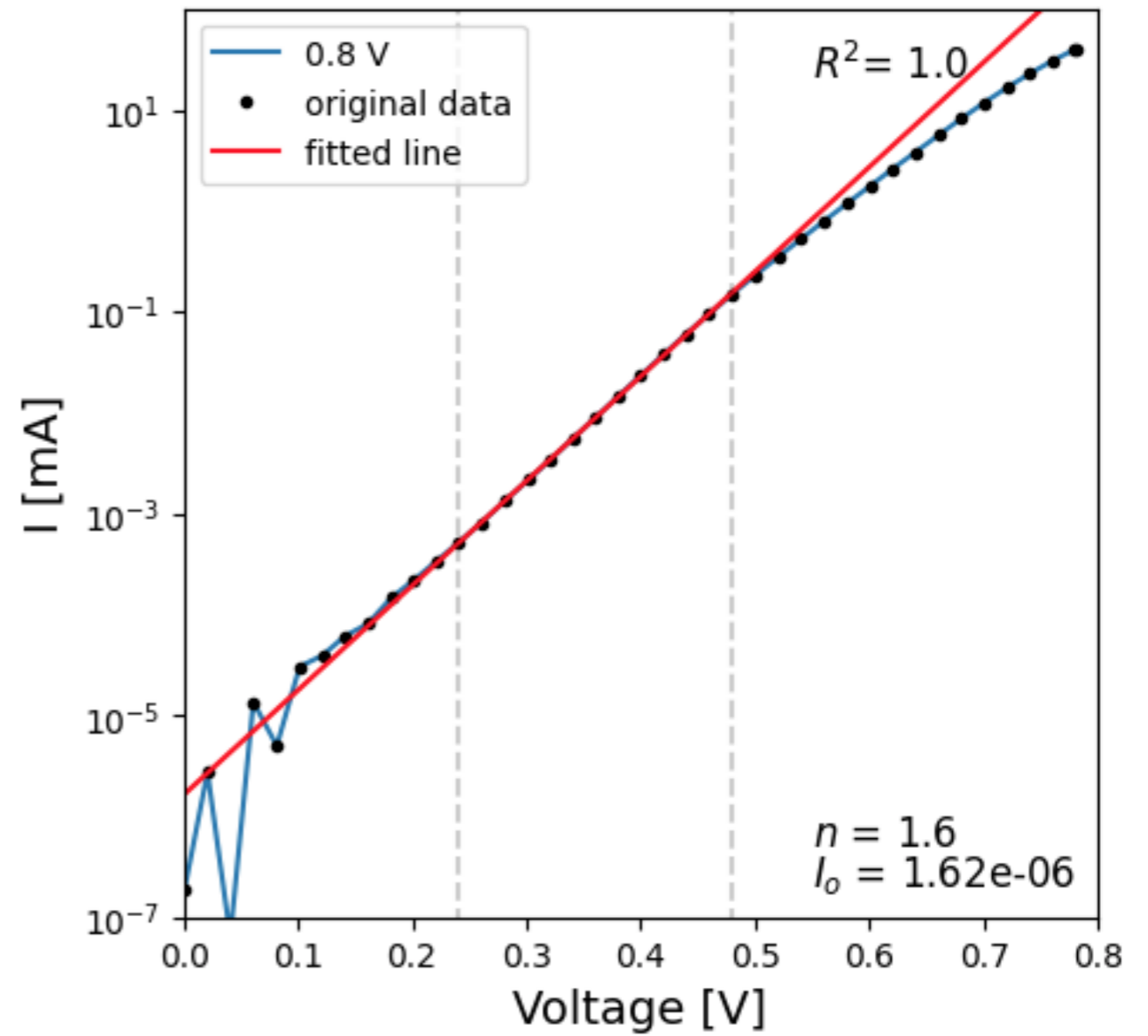
AP

1N4007 Diode



Curva I-V de un diodo silicio 1N4007

1N4007 Diode



Curva I-V semi-logaritmica de un diodo 1N4007

La búsqueda de materiales semiconductores emergentes es un tema relevante a nivel internacional. Por lo tanto, el desarrollo de celdas solares con calcogenuros de antimonio-plata posiciona a México como pionero en esta investigación.

Desarrollamos prototipos de celdas solares de  $\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2$  en configuración superestrato con  $\eta = 0.65\%$ . A corto plazo, es importante analizar los mecanismos de recombinación en la celda solar y proponer estrategias para incrementar  $J_{sc}$ .

La investigación sobre celdas solares flexibles muestra la formación de diodos  $\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2/\text{CdS}$  sobre acero inoxidable. El siguiente paso es colocar los contactos frontales (i-ZnO/ZnO:Al) para obtener la celda solar funcional.

# Lab101 del CIDS-ICUAP

## Posdoctorado:

Dr. Jesús Capistrán

## Doctorado:

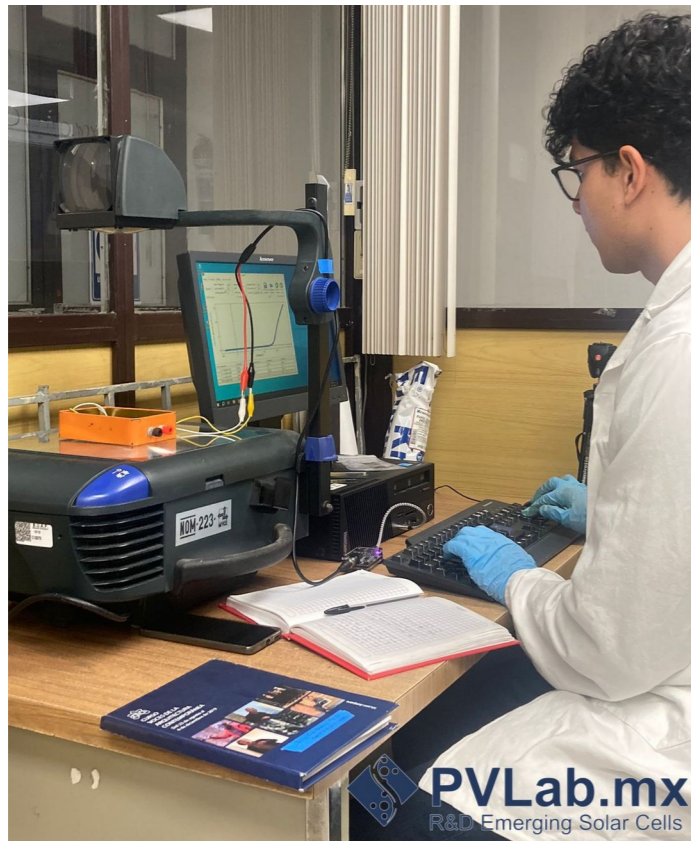
M.C. Irving Marquez

M. Gabriela Esquina

## Licenciatura:

Gustavo Ibarra

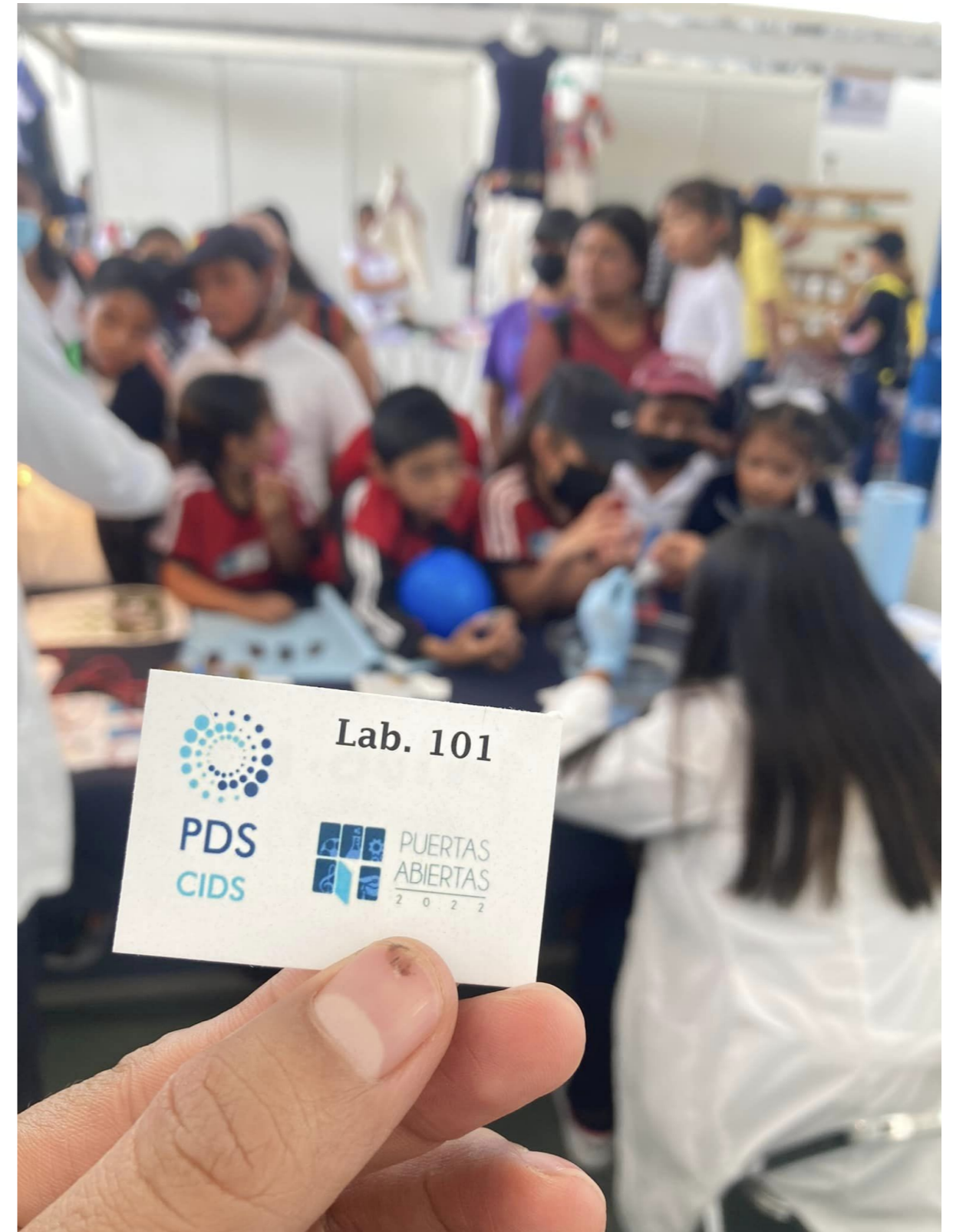
Ulises Paki



Investigador Principal - Dr. Roman Romano Trujillo

[roman.romano@correo.buap.mx](mailto:roman.romano@correo.buap.mx)

# Lab101 del CIDS-ICUAP



Investigador Principal - Dr. Roman Romano Trujillo  
[roman.romano@correo.buap.mx](mailto:roman.romano@correo.buap.mx)





**PVLab.mx**

811 likes · 869 followers



Advertise

Manage

Edit

Posts About Mentions Reviews Reels Photos More ▾

 **Únete a PVLab.mx para obtener tu maestría/doctorado en el desarrollo de dispositivos semiconductores y energías renovables.**

**Posgrado del Instituto de Ciencias de la #BUAP con derecho a beca #Conahcyt**

Más informes:  
[pvlab.mx@gmail.com](mailto:pvlab.mx@gmail.com), 777-188-5442

# Agradecimientos

**Agradezco al Instituto de Ciencias de la BUAP y al  
CA-97 Materiales y Dispositivos Semiconductores  
por el apoyo otorgado en la presente  
estancia postdoctoral**

