



Seminario sobre ENERGIA SOLAR

20-21 de Febrero 2006
Consejo Social, Universidad Politécnica de Madrid

1ª Jornada, día 20 de febrero, 2006
1ª Sesión: Promoción, ciencia, industria y despliegue de la
Fotovoltaica

D. Antonio Luque
Director del Instituto de Energía Solar de la UPM
"La I+D del futuro fotovoltaico"



La I+D del Futuro Fotovoltaico

Antonio Luque

Instituto de Energía Solar, ETSIT, UPM

Seminario Sobre Energía Solar

Consejo Social de la UPM

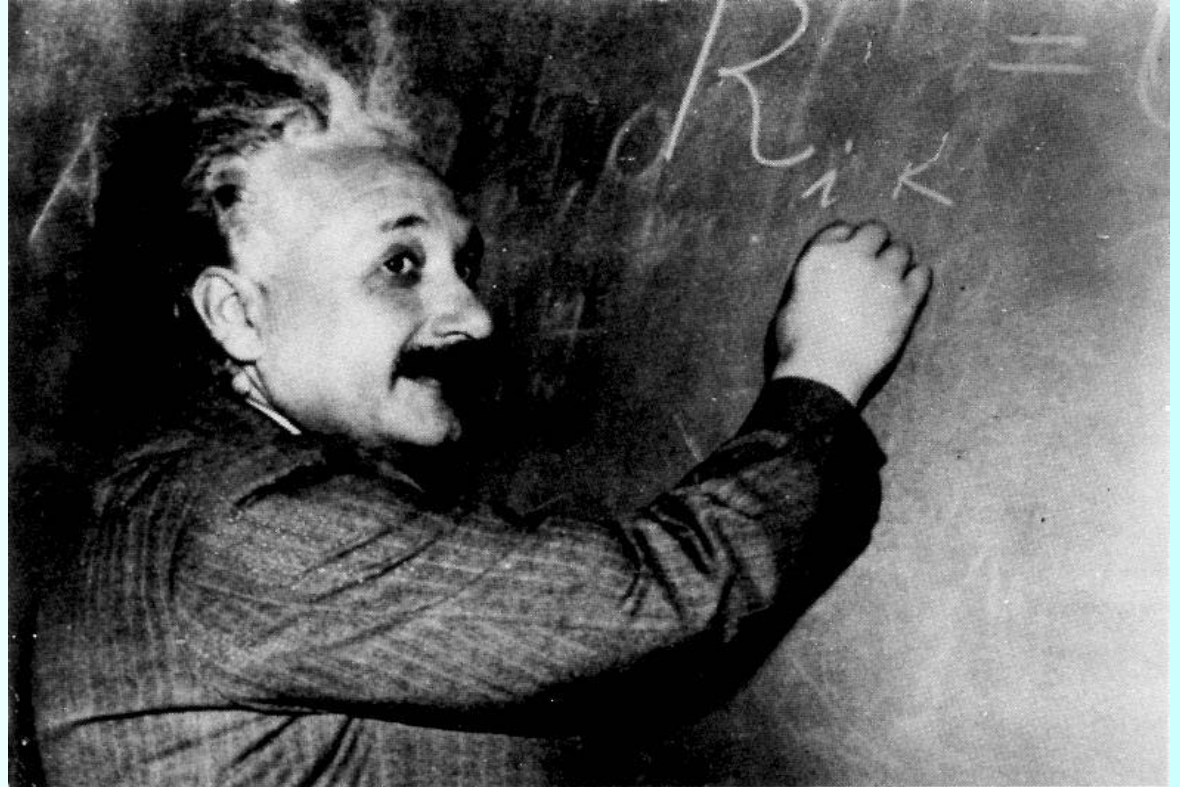
Madrid, 20 de febrero de 2005^s



Einstein explica la interacción luz-corriente

Premio Nobel en Física 1921

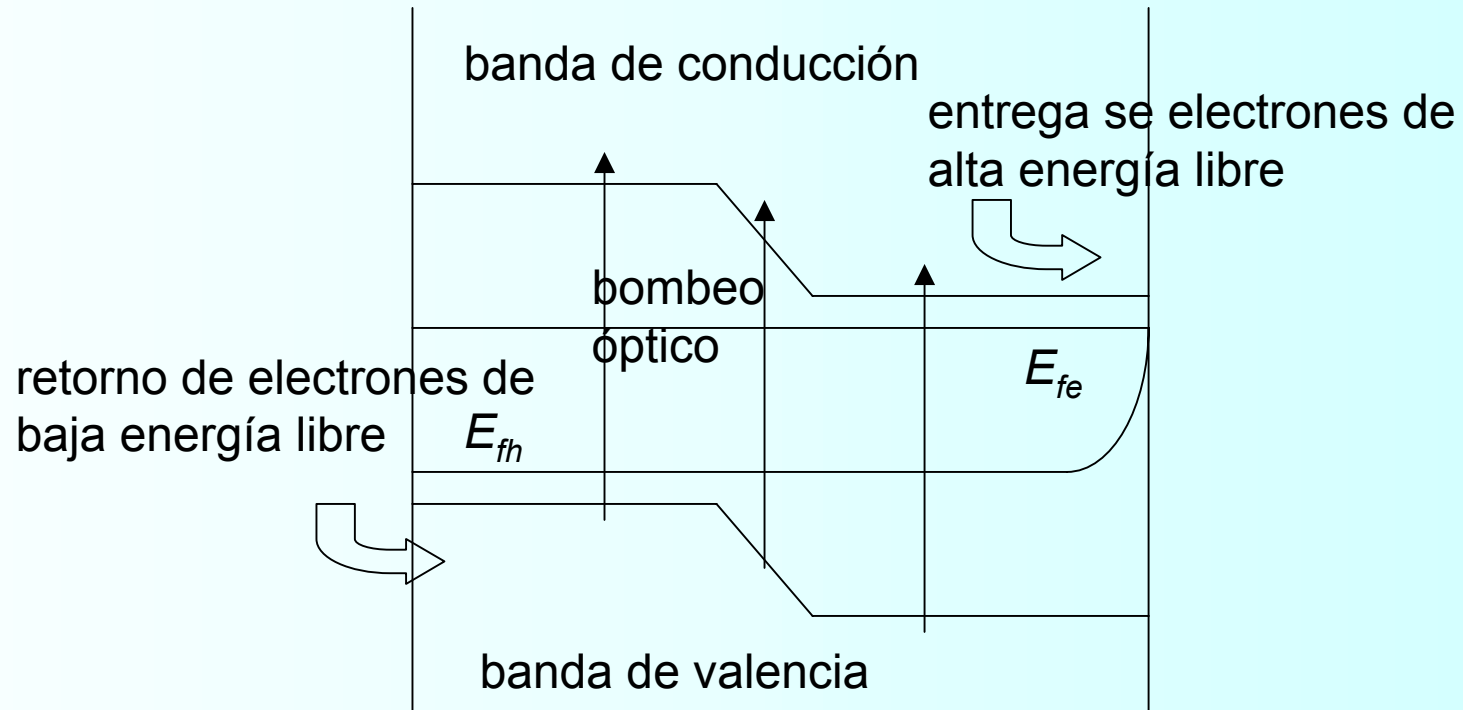
Por sus servicios a la Física Teórica y especialmente por su descubrimiento del efecto fotoeléctrico



Albert Einstein, “Über einen Erzeugung und Erwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt” *Annalen der Physik*, 17, 132 (1905)



El efecto fotovoltaico



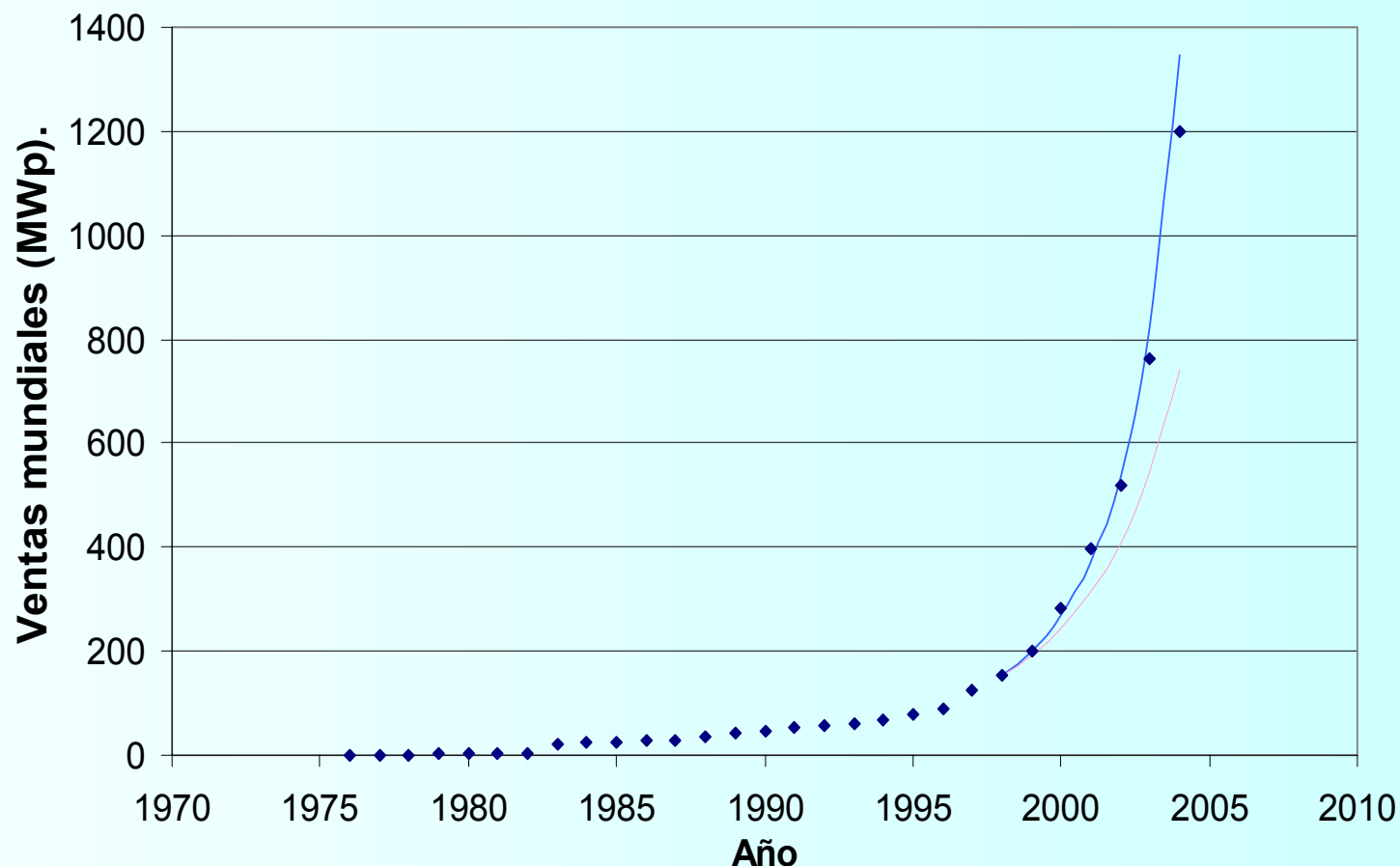
Puede haber un descubrimiento radical. No será ostensible en el mercado antes de 10 años



Crecimiento del mercado de módulos

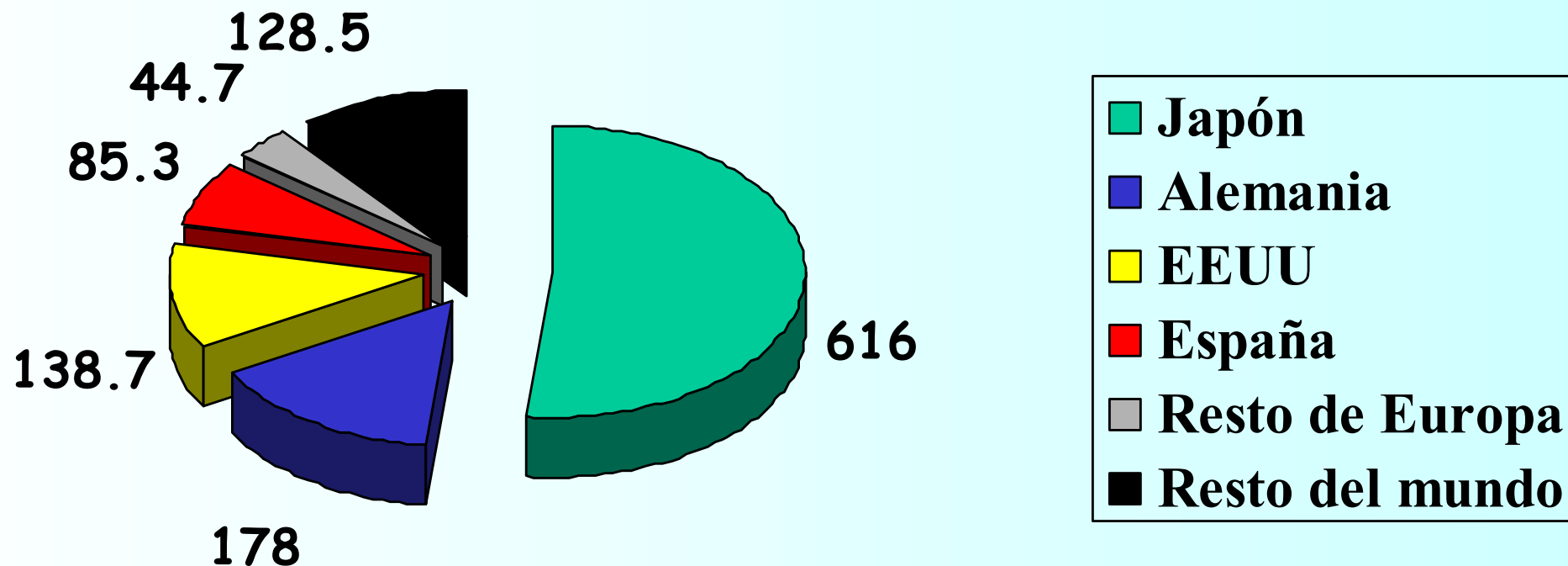
Puntos: datos de varias fuentes: básicamente de Paul Maycock, *PV news* años sucesivos,

Linea: predicciones del modelo de A. Luque *Progress in Photovoltaics* 9 (2001) 303





Principales países productores en 2004



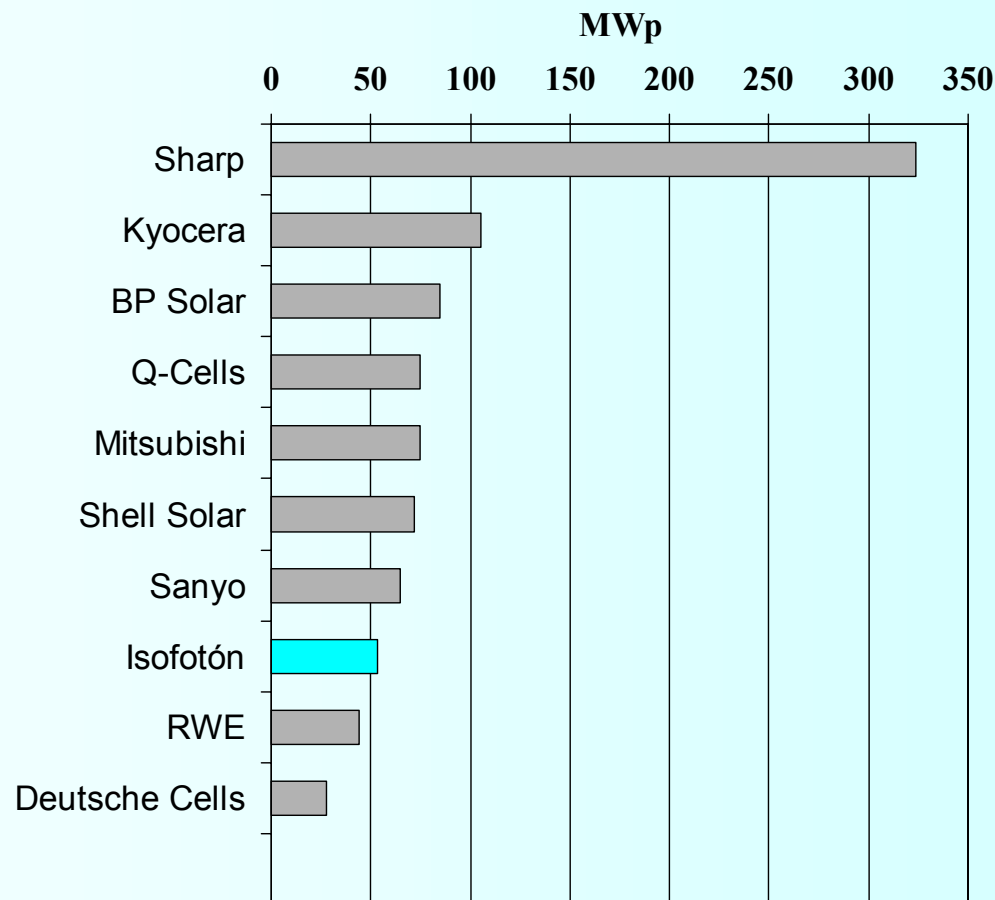
PV News, 24,
March 2005, 1-4



Los diez principales fabricantes mundiales en 2004

PV News, **24**,
March 2005, 1-4

Isofotón, un spin-off
de éxito de la UPM,
caso único en el
mundo



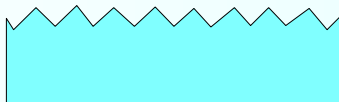
Totalizan el
77.5% del
mercado
mundial



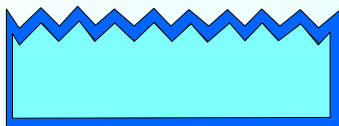
Fabricación de células por serigrafía

$\eta \approx 15\%$

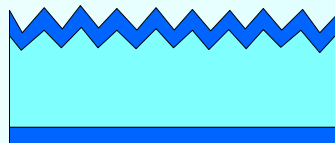
1. Texture etching



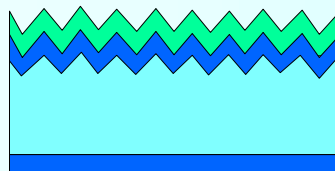
2. P-diffusion



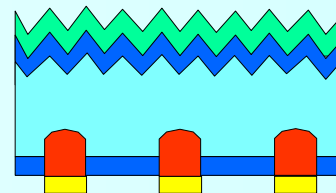
3. Plasma etching



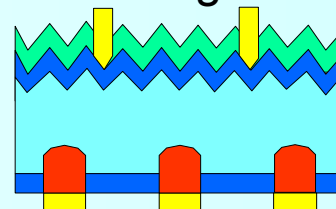
4. TiO₂ AR coating



5. Al/Ag screen printing & annealing



6. Ag screen printing & annealing



Al



n⁺



metal



TiO₂

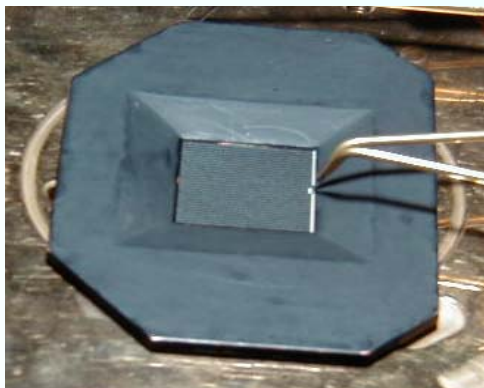


Silicio solar español

Purificación de silicio
metalúrgico.
270 gr con las siguientes
impurezas:

B-- 25 ppm
C--90 ppm
O-- 25 ppm
P--12 ppm
Ca-- 0,6 ppm
N-- 50 ppm
Fe-- 30 ppm
Al-- 3,2 ppm

PRIMERAS CÉLULAS



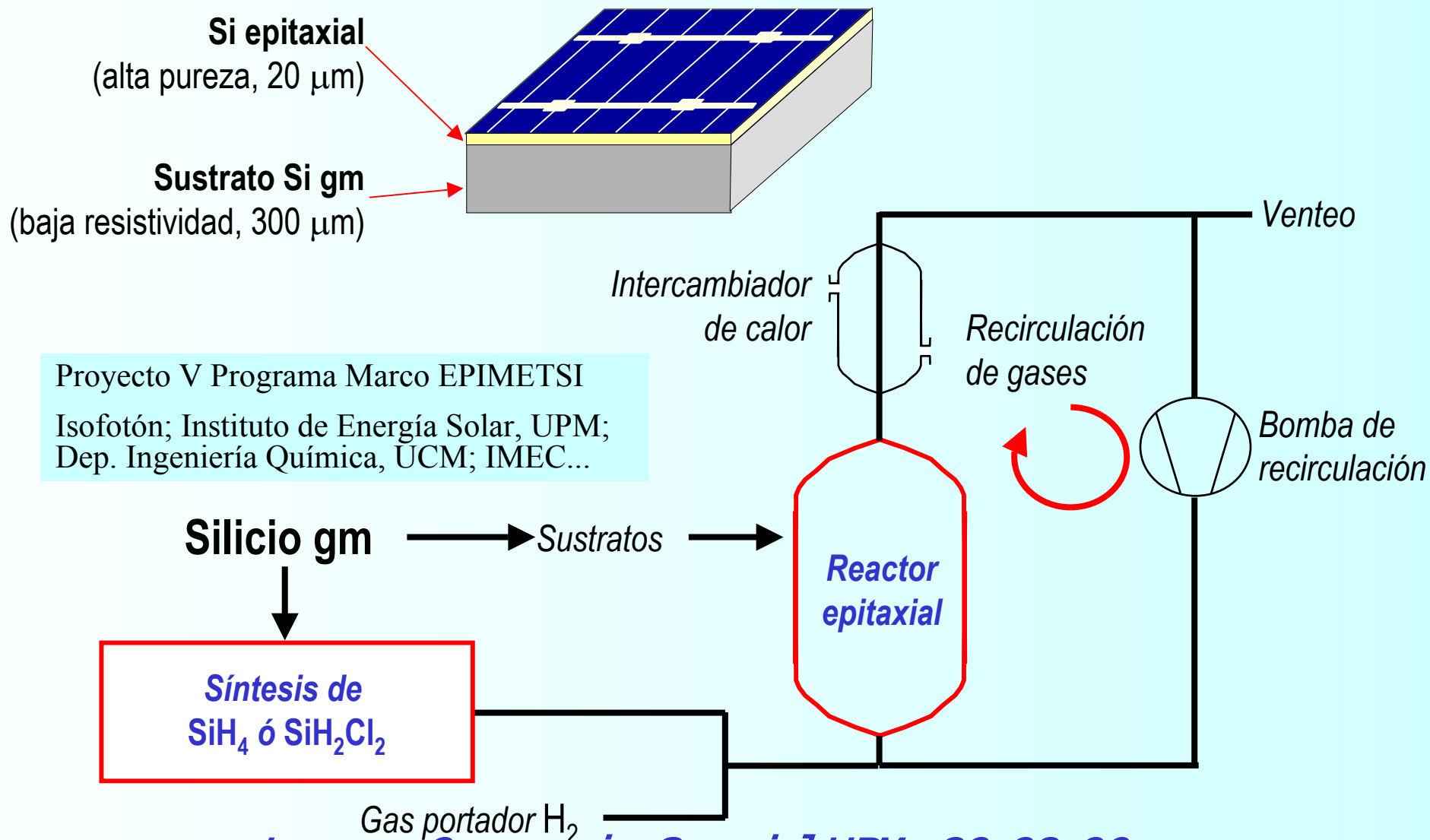
Colaboración: Ferroatlántica, UPM-IES,
Instituto de Cerámica de Galicia, IKZ (Berlín)



4 cm ² Condiciones estándar	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η(%)
SEMILLA	21.35	612.2	0.773	10.10
COLA	21.87	613.7	0.797	10.70

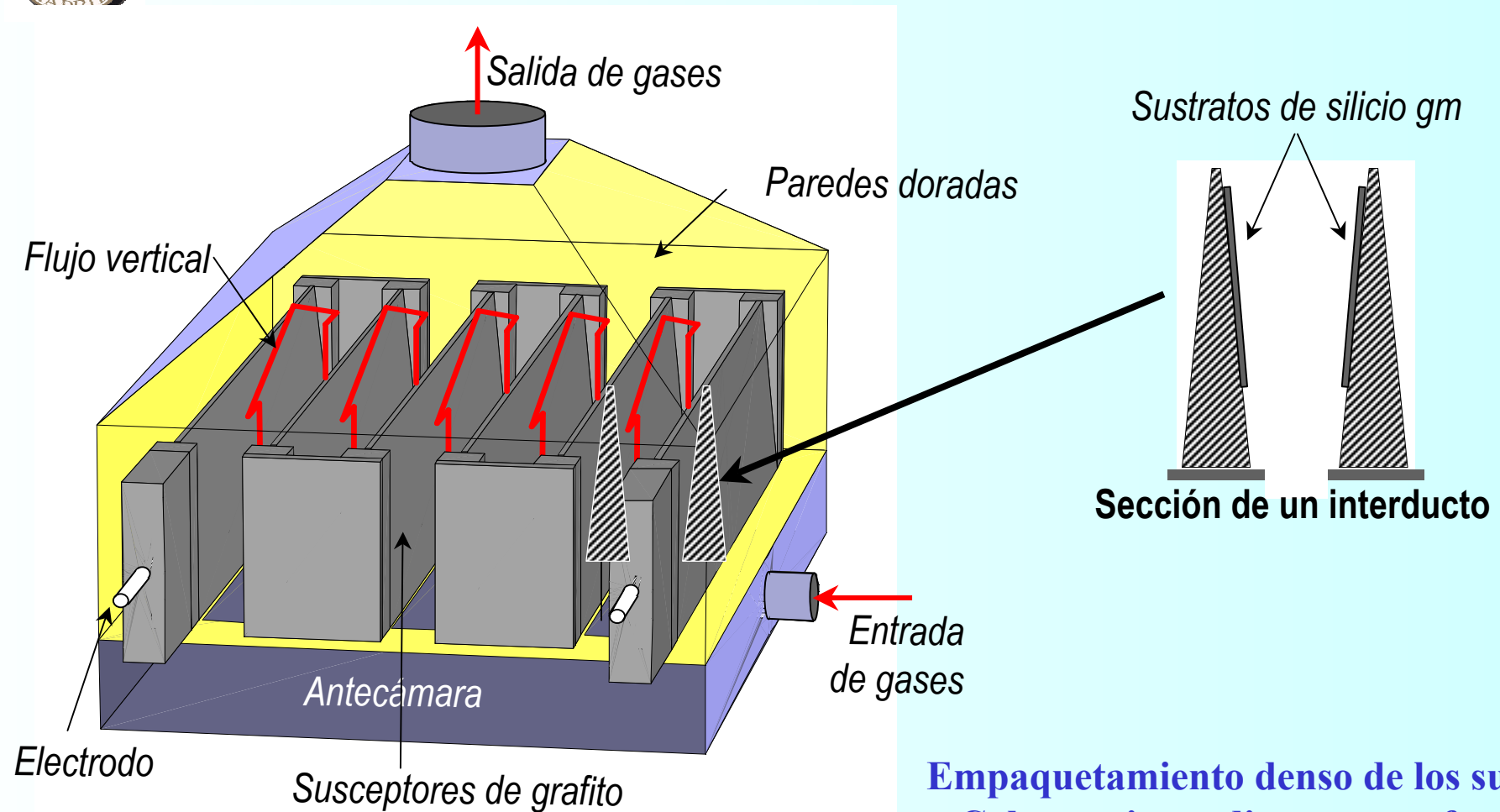


Otro proyecto: Células de Silicio epitaxial





Reactor epitaxial de gran capacidad (SSR)



Empaquetamiento denso de los sustratos
Calentamiento directo por efecto Joule
Recirculación de gases

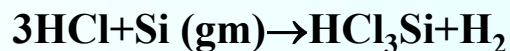
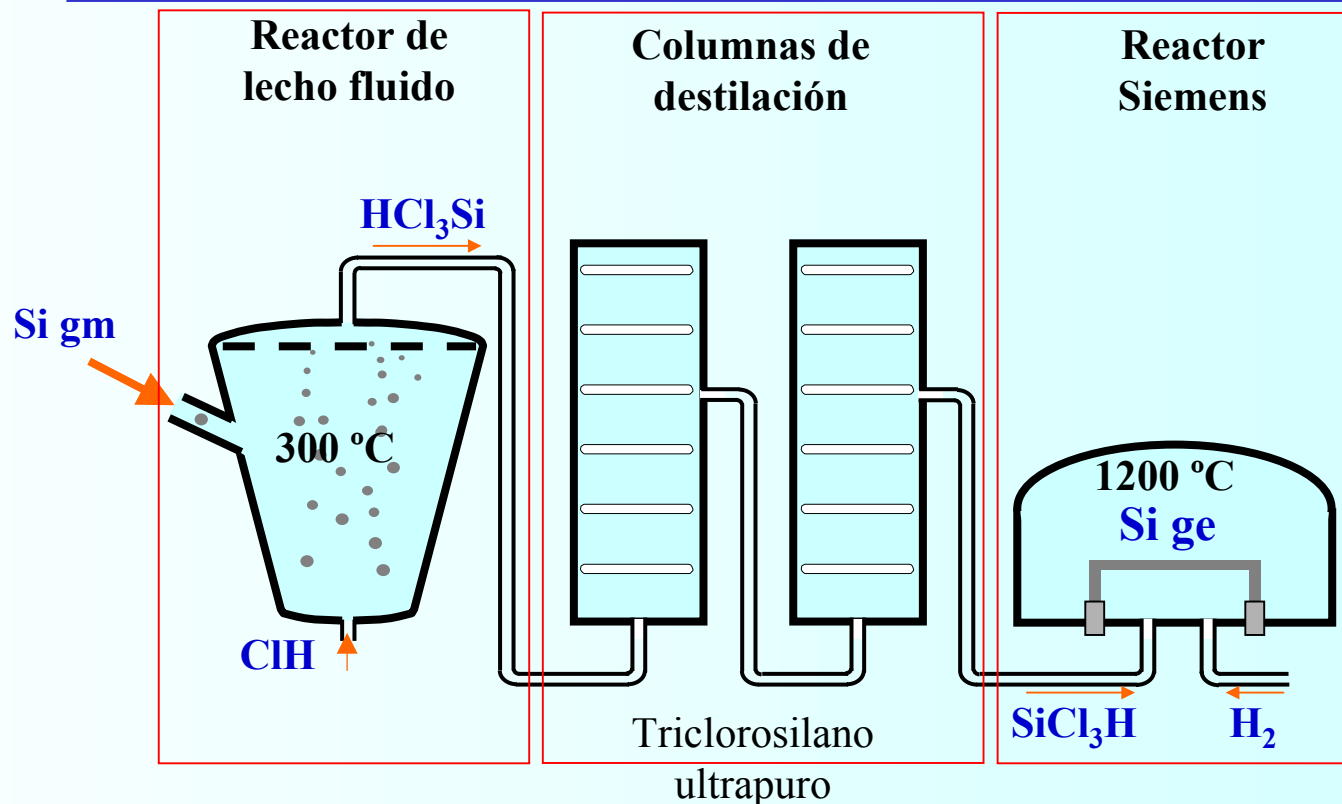


PolySilicon industry structure

Concept (data 2004)	unities	Amount	Source
PV modules	(Million US\$)	3,600	Markets: Paul Maycock, PV news. March 2005; average unitary cost estimated, 3
Electronic Semiconductors	(Million US\$)	213,027	B. Mahon and L. Gehardy, Q4 Global Technology Data Book, Morgan Stanley, 2005
Silicon (total)	(Tm)	33,520	A Ricaud, La letter du Solaire, Cytelia, 2005
Silicon for solar cells	(Tm)	14,400	at 12 g per watt
Silicon for electronics	(Tm)	19,120	the rest
Si cost for solar cells	(Million US\$)	720	at \$50/kg
Si cost for electronics	(Million US\$)	1,338	at \$70/kg
Fraction of Si cost in solar cells		20.00%	
Fraction of Si cost in electronics		0.63%	
Companies manufacturing Si		9	A Ricaud, La letter du Solaire, Cytelia, 2005
Average Si factory size	(Tm)	3,724	
Average Si factory size	(Million US\$)	229	
Si use in big electronic company	(Million US\$)	134	1/10 total revenues
Si use in big solar cells company	(Million US\$)	72	1/10 total revenues
Si use in big company of the future		360	5 times bigger than in 2004



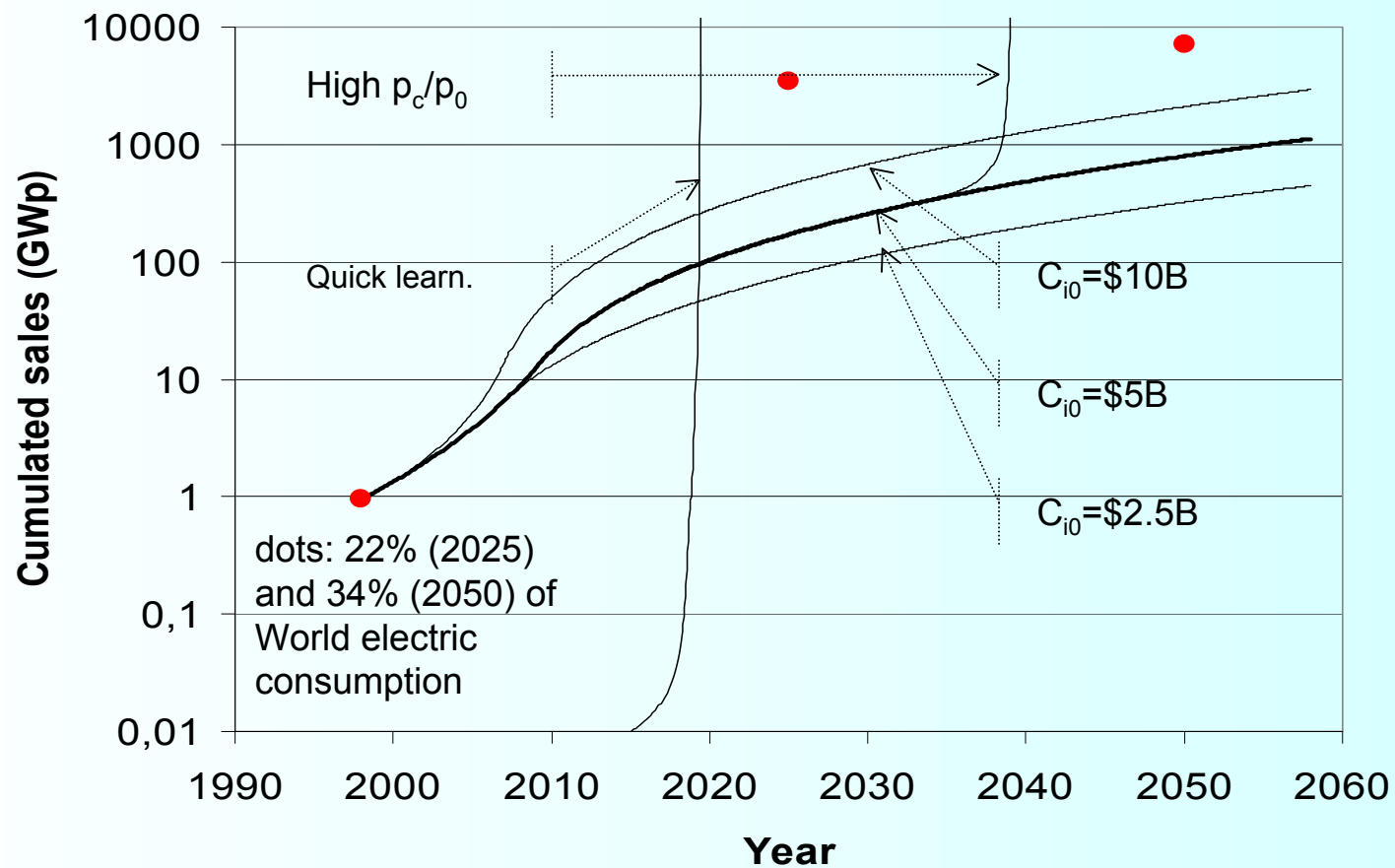
Producción de silicio de grado electrónico



- Materia prima: Si gm
- Producto: Si grado semiconductor (pureza 99.9999999%)
- De las 35.000 T/año, 20000 T se dedican al fotovoltaico.
- Consumo de gran cantidad de energía. El coste se multiplica por 50



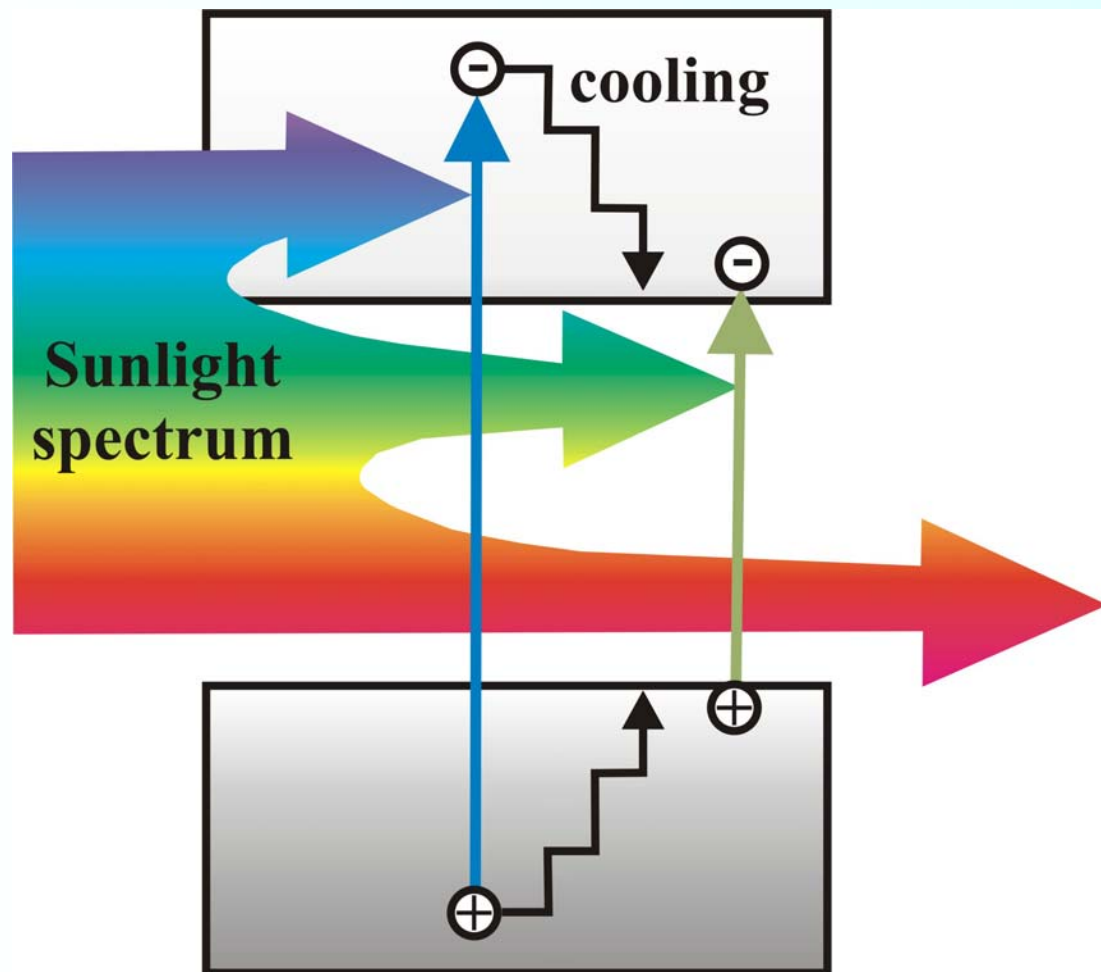
Previsiones a largo plazo



A. Luque
*Progress in
Photovoltaics 9*
(2001) 303



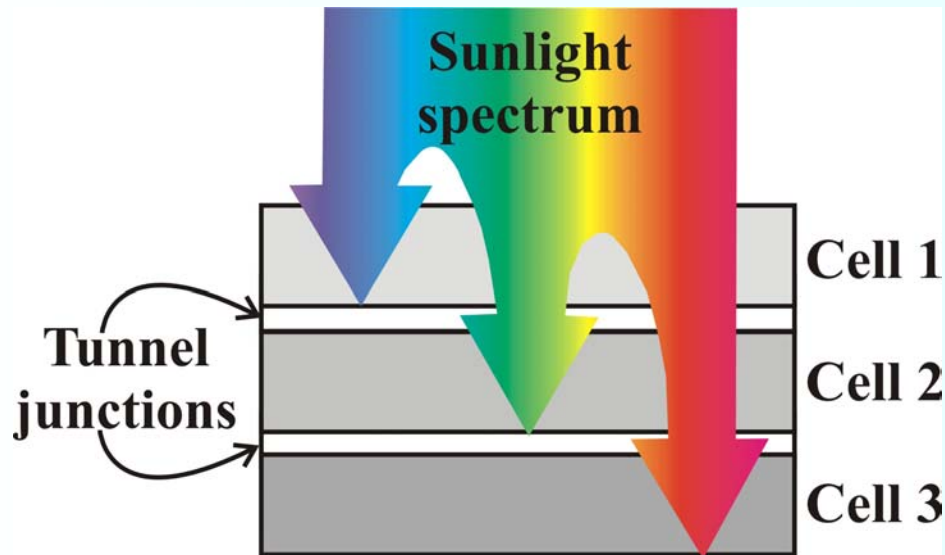
Perdidas inevitables en las células actuales



- Las células solares convencionales, de banda prohibida única, hacen un uso ineficaz del espectro solar. Por una parte los fotones de energía inferior no pueden absorberse, por otra, en los fotones más energéticos, el exceso sobre la banda prohibida se pierde por emisión de fonones.



Multi-junction solar cells

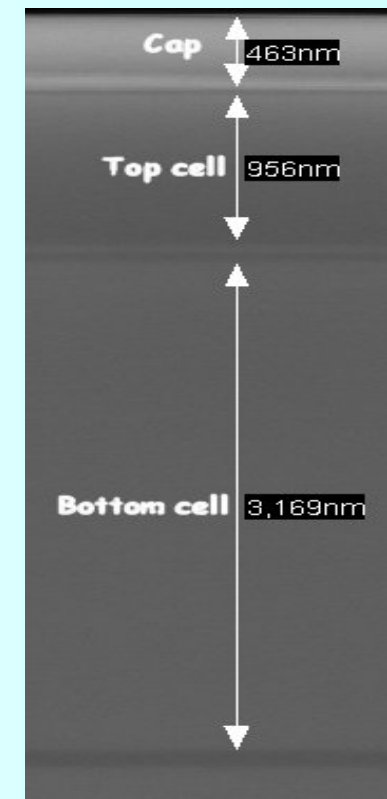


- A multijunction solar cell is a stack of single gap solar cells. Cell “1”, placed on top, has the broadest of the gaps. The rest of the cells are ordered with decreasing gaps. Each of them absorbs those photons whose energy ranges its own gap and the one of the cell in front of it.



Growth of dual junction: GaInP/GaAs (I)

Top cell	$n[\text{Te}] = 2 \cdot 10^{18}$ - GaAs	0.5 μm	Cap
	$n[\text{Te}] = 3 \cdot 10^{17}$ - AlInP	0.03 μm	TC Window
	$n[\text{Te}] = 1 \cdot 10^{18}$ - GaInP	0.2 μm	TC Emitter
Tunnel diode	$p[\text{Zn}] = 4 \cdot 10^{17}$ - GaInP	0.8 μm	TC Base
	$p+[\text{Zn}] = 3 \cdot 10^{19}$ - GaAs	0.02 μm	TJ anode
	$n+[\text{Te}] = 7 \cdot 10^{18}$ - GaAs	0.02 μm	TJ catode
Bottom cell	$n[\text{Te}] = 1 \cdot 10^{18}$ - GaInP	0.05 μm	BC Window
	$n[\text{Te}] = 1 \cdot 10^{18}$ - GaAs	0.1 μm	BC Emitter
	$n[\text{Zn}] = 5 \cdot 10^{17}$ - GaAs	3.5 μm	BC Base
	$p+[\text{Zn}] = 3 \cdot 10^{17}$ - GaInP	0.1 μm	BSF
	$p+[\text{Zn}]$ substrate		



Conservative design:

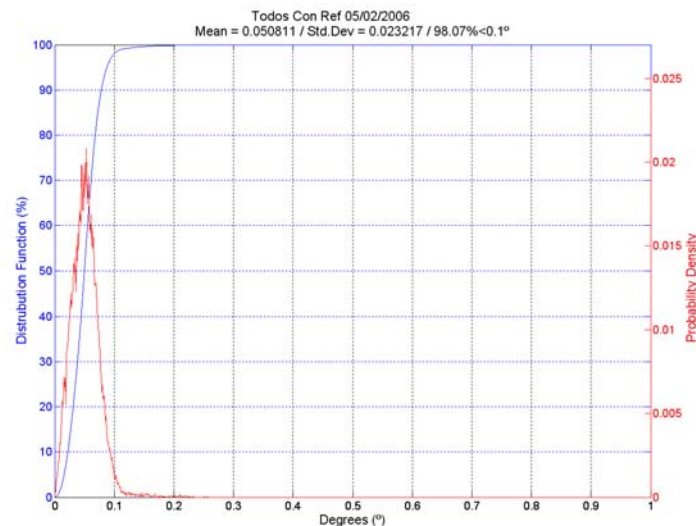
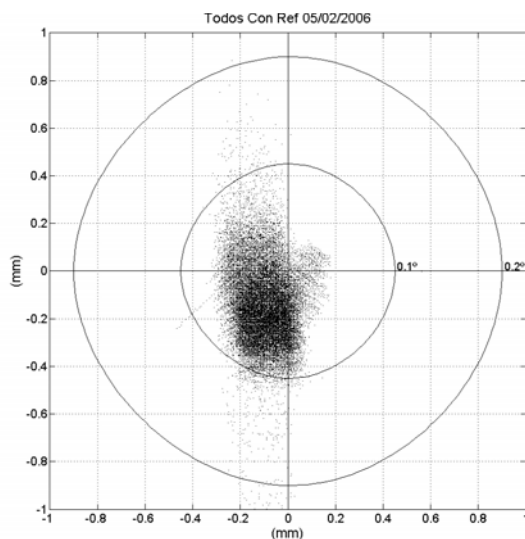
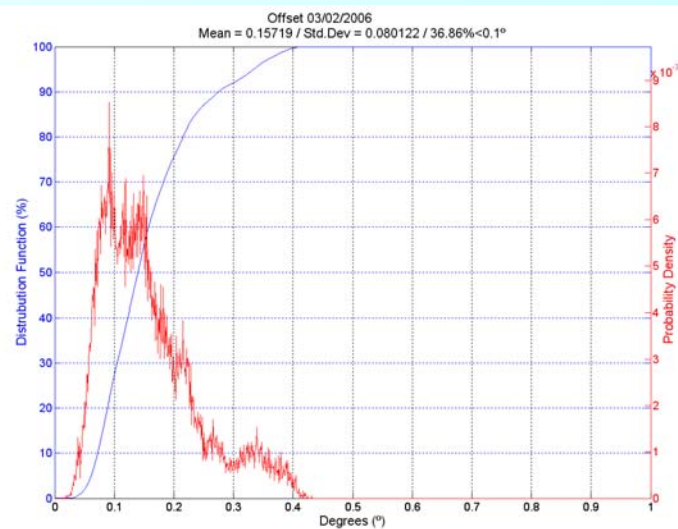
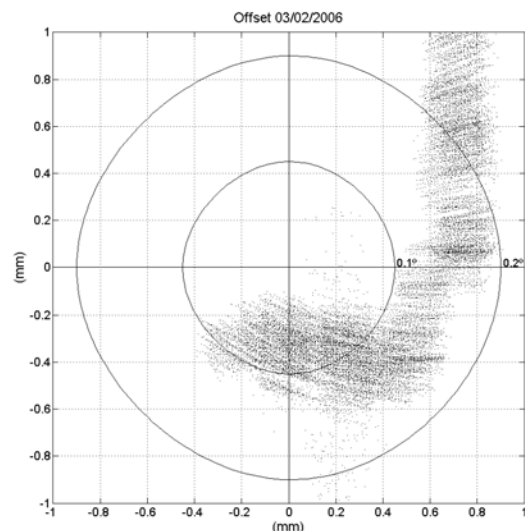
- No BSF for TC.
- TJ: Zn as dopant, no barrier layers, GaAs (absorption).



IES-UPM



Precisión de apuntamiento (Inspira SL)



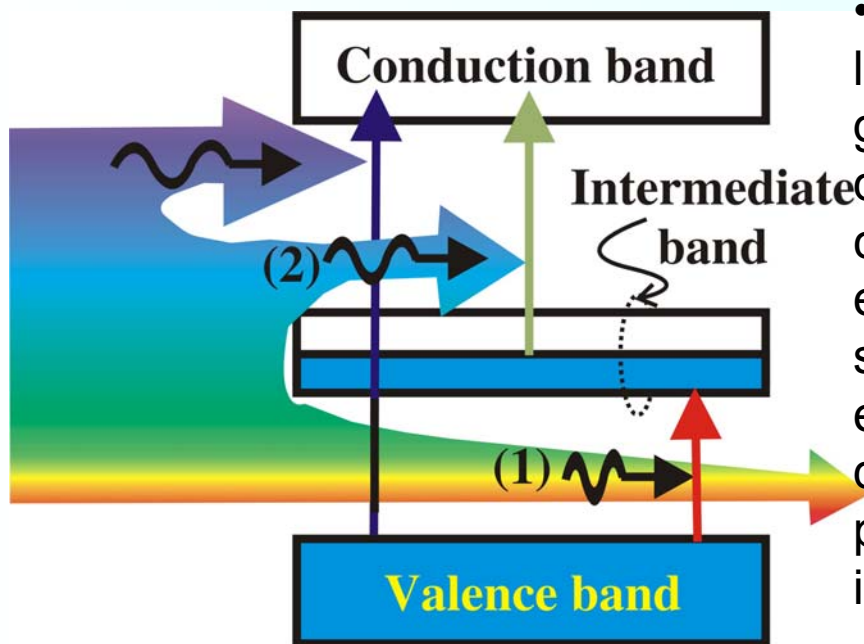


Concentradores: Situación española

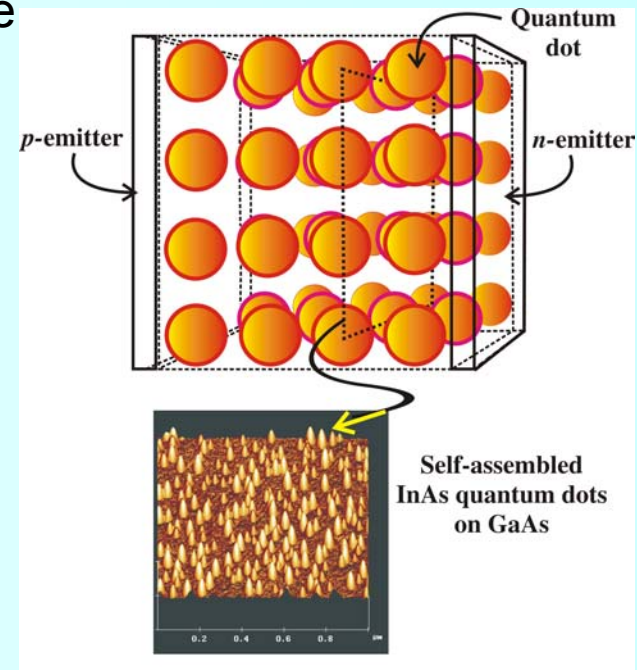
- España posee reputación en concentración fotovoltaica, en la que se trabaja desde 1976 (primer tratado internacional sobre el tema: A Luque, Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentrators, Adam Hilger, Bristol, 1989)
- Ha liderado la mayor planta de demostración experimental de concentración del mundo, EUCLIDES 1998)
- Existe industria con un producto avanzado de concentración (ISOFOTON-IES)
- Se acaba de implantar en España una fábrica con tecnología USA, (Guascar-AMONIX).
- Lidera un proyecto europeo (FULLSPECTRUM) con 19 centros para desarrollar células del alta eficiencia que usan o usarán concentradores



Células solares de banda intermedia



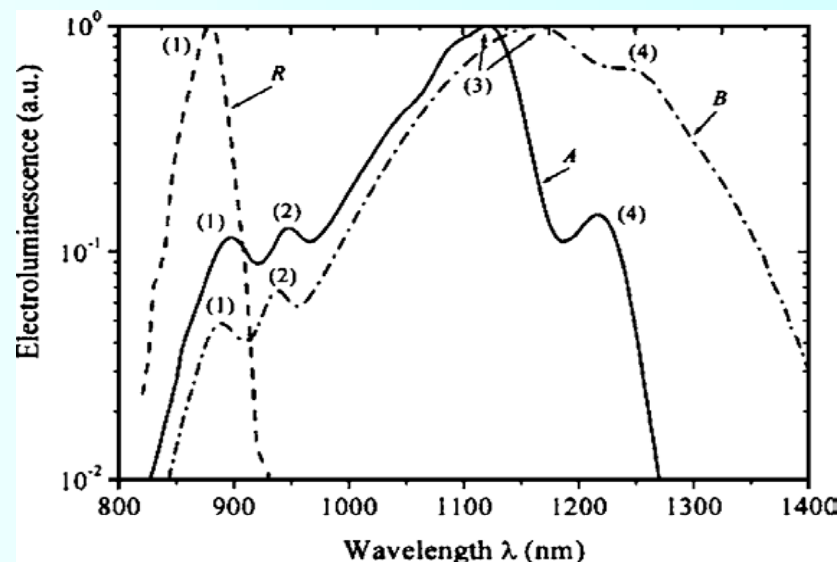
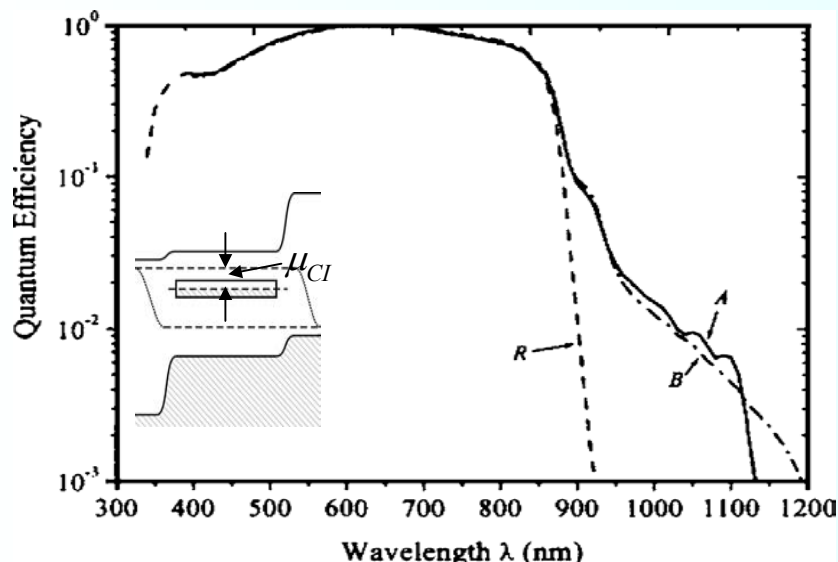
- Una realización factible de la IBC consiste en usar gotas cuánticas. Puesto que una gota cuántica es capaz de producir un nivel electrónico en el semiconductor anfitrión se espera que una superred de gotas cuánticas produzca una banda intermedia



- La célula de banda intermedia (IBC) aprovecha las absorciones de fotones de energía inferior a la banda prohibida a través de una banda intermedia medio llena colocada en ella. La absorción del fotón 1 excita un electrón desde la banda de valencia (VB) hasta la intermedia mientras que la absorción del fotón 2 bombea un electrón desde la intermedia hasta la de conducción (CB). Así, en dos pasos, se consigue trasladar un electrón de la VB a la CB



Células de BI basados en puntos cuánticos



Also
selected
for Virtual
Journal of
Nanoscale
Science &
Technology
, August
29, 2005

$$\mu_{CI} = kT \ln \left(R_{CVIV}^{ph} \frac{\varepsilon_3^2 QE(\varepsilon_3)}{\varepsilon_1^2 QE(\varepsilon_1)} \exp \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{kT} \right) \right)$$

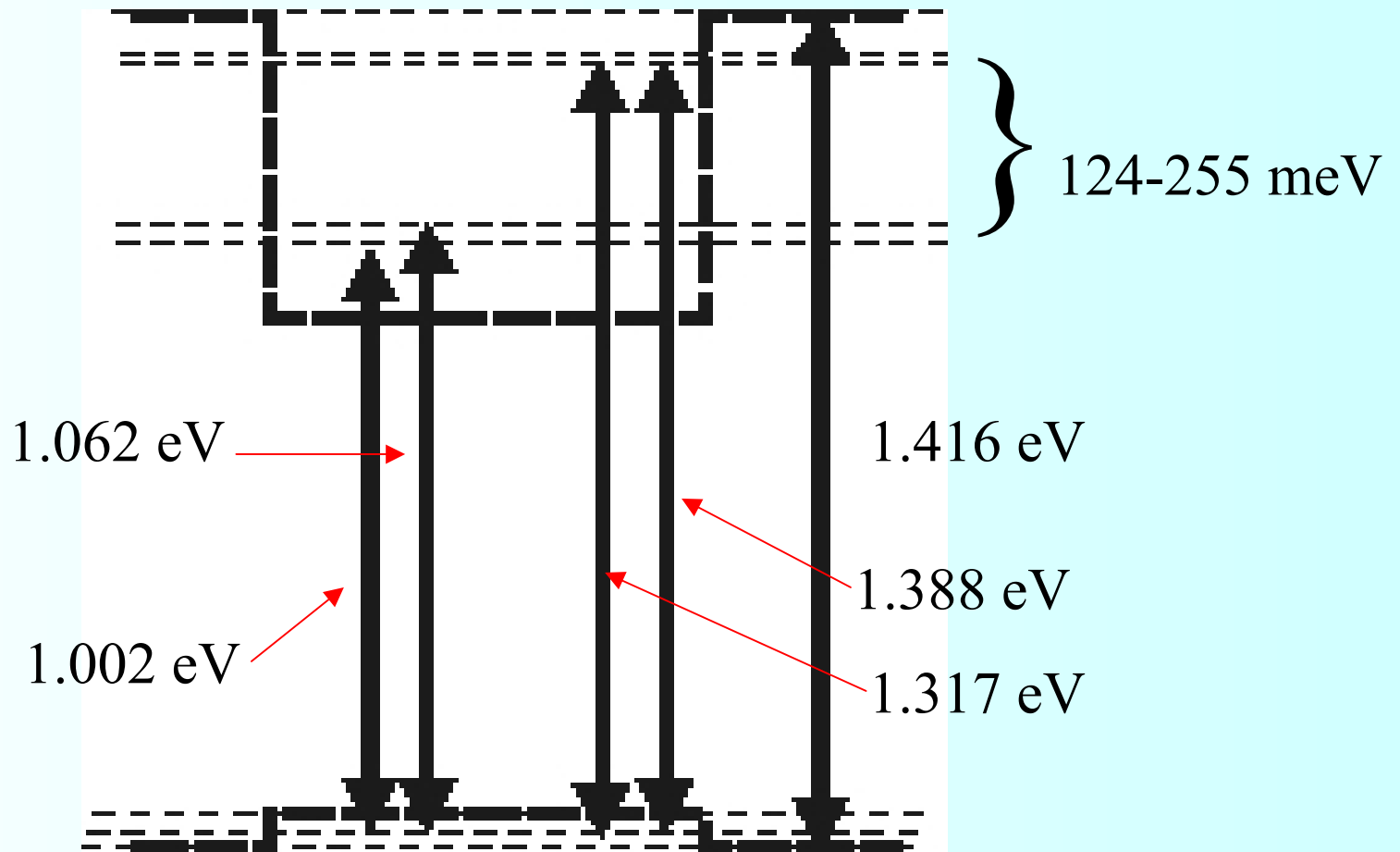
A. Luque, A. Martí, N. López, E. Antolín, E. Cánovas, C. Stanley, C Farmer, L.J. Caballero, L. Cuadra and J.L. Balenzategui.
Appl. Phys. Lett. 87, 083505 (2005).

Sample	ε_3 (nm)	ε_1 (nm)	$QE(\varepsilon_3)$ / $QE(\varepsilon_1)$	R_{CVIV}^{ph}	μ_{CI}
A	1120	900	.00267 /.00906	.115 /1	.112
B	1165	890	.00185 /.1263	.489 /1	.187



Niveles radiativos

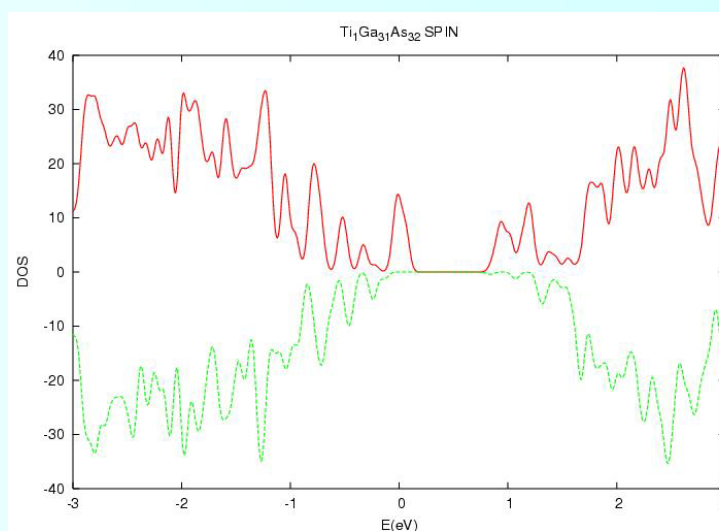
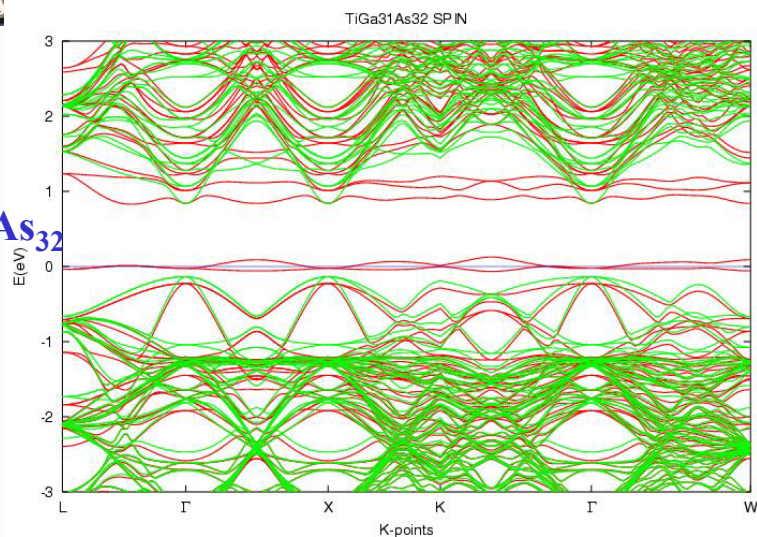
A.Martí,
N.López,
E.Antolín, E.
Cánovas,
C.Stanley,
C.Farmer,
L.Cuadra and
A.Luque, "Novel
Semiconductor
Solar Cell
Structures: the
Quantum Dot
Intermediate
Band Solar Cell",
Thin film and
nano-structured
materials for
photovoltaics,
Strasbourg
(2005), in press



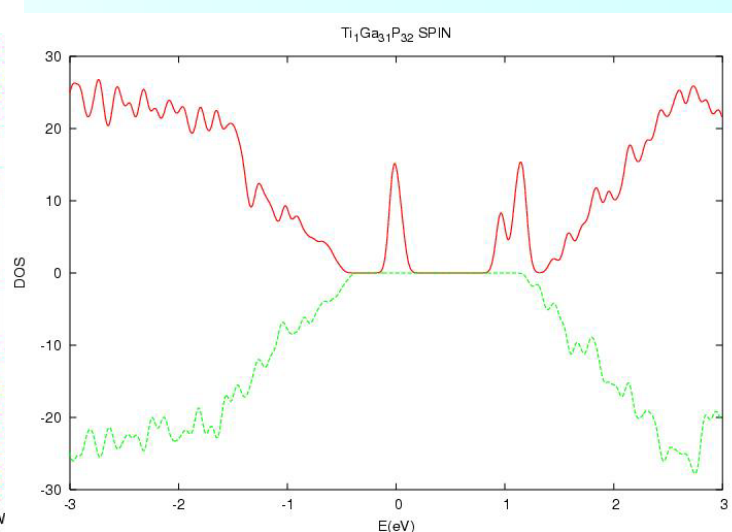
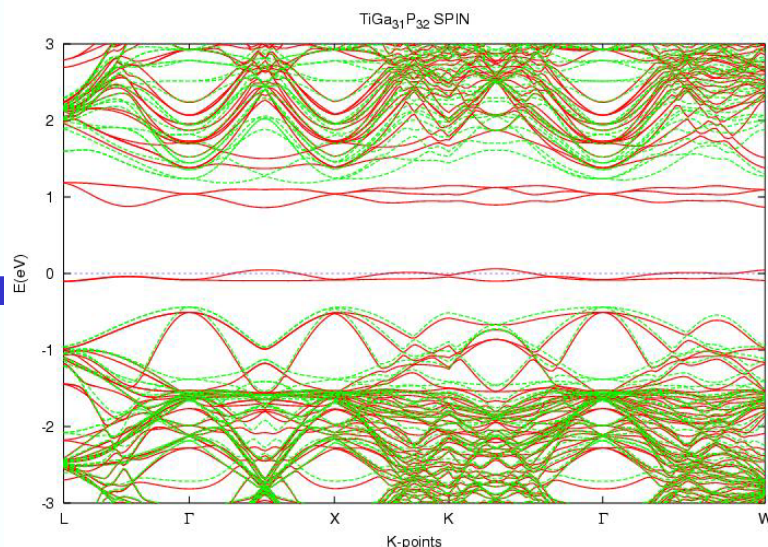


En busca de nuevos materiales de BI

$\text{TiGa}_{31}\text{As}_{32}$



TiGa_{31}I



P

Wahnón,
P. Palacios,
J.J.
Fernández
, K.
Sanchez &
J.C.
Conesa
"Quantum
Character
ization of
Isolated
Bands in
Metallic
Intermedi
ate Band
Materials
at
Different
Dilutions"
" 20th EU
PVSEC.
Barcelona,
2005,
Proc. In
the press.

Luque, Consejo Social UPM, 20-02-06



Conclusiones

- La energía fotovoltaica va a ser notable en el siglo XXI y va a originar una actividad económica muy importante.
- España tiene -como nunca en el pasado- una posición relevante en este nuevo sector económico.
- La integración de la estructura científica y la industria es ejemplar en España (a nivel mundial). La UPM ha dado lugar a un spin-off (Isofotón) de éxito singular.
- El desarrollo del mercado español está en efervescencia. Probablemente va a propiciar el desarrollo mundial de la tecnología fotovoltaica de concentración.
- En la UPM estamos en cabeza en la búsqueda de nuevos conceptos.