

¿DESTRONANDO AL REY?: NUEVOS MATERIALES PARA LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA

DETHRONING THE KING?: NEW MATERIALS FOR PHOTOVOLTAICS

L. VAILLANT-ROCA^{a†}

Laboratorio de Investigaciones Fotovoltaicas (LIFV), IMRE - Facultad de Física, Universidad de La Habana. vaillant@imre.uh.cu[†]

Una noticia recorre el mundo. Investigadores en Arabia Saudita han logrado eficiencias superiores al 33 % en un nuevo tipo dispositivo para celdas fotovoltaicas, que amenaza con destronar al “rey” de este competitivo campo: el silicio.

El silicio ha sido, durante varias décadas, el material dominante en el fondo fotovoltaico. Con un valor de ancho de banda prohibida óptimo alrededor de 1.1 eV, una estructura cristalina cúbica monoatómica, la posibilidad de fabricar una homounión p-n con una mínima cantidad de defectos a partir del proceso de difusión y mucha información acumulada sobre este material durante la expansión de las aplicaciones de las microelectrónica, el Si tiene muchas ventajas. Además, es muy abundante en la corteza terrestre, de modo que puede satisfacer la alta demanda de los procesos industriales. Sin embargo, el ancho de banda prohibida del silicio es indirecto, lo que implica un coeficiente de absorción bajo, lo que obliga a utilizar porciones del material entre 150 y 200 micras [1]. A esta desventaja debe añadirse que la obtención del Si a partir de los productos de la minería requiere altos valores de energía.

Buscando destronar al Si, se han investigado diversos materiales absorbentes como las capas delgadas de a-Si:H, CIGS y CdTe. Estos materiales son capaces de absorber la luz de un modo más eficiente, por lo que bastan pocas micras de espesor. Además, pueden ser obtenidos por una diversidad de técnicas de crecimiento, incluyendo algunas de bajo costo. En los años 1990's, aparecen los llamados dispositivos emergentes, con nuevas arquitecturas para las celdas solares e innovadoras propuestas de materiales absorbentes como los orgánicos, los colorantes, los puntos cuánticos, las kesteritas y las perovskitas. Cada tecnología de celdas solares surgió con el supuesto potencial de terminar el reinado del Si, que mientras tanto continuó, lentamente, mejorando su eficiencia récord de conversión para celdas solares de laboratorio y consolidando, innovación tras innovación, la fabricación de módulos fotovoltaicos comerciales.

Hoy la industria fotovoltaica está compuesta en un 95 % de módulos de silicio, mientras que solo un 5 % está ocupado por los módulos basados en capas delgadas. Por demás, los módulos fotovoltaicos de Si se ofertan con garantías que pueden llegar a los 25 años de duración. El fenomenal escalado industrial que ha visto esta tecnología tiene como consecuencia la producción de poco más de 180 GWp anuales a nivel mundial y ha permitido disminuir el costo ponderado del kWh de electricidad (LCoE), generado con fotovoltaica de 31.5 centavos de Euro en el 2010 a 4.1 centavos de Euro en el

2021 [2].

Mejorar la eficiencia de una celda solar ha sido históricamente una tarea de titanes de la ciencia. Las curvas que muestran los récords de eficiencia de cada tecnología en función del tiempo poseen pendientes muy bajas, representativas del enorme esfuerzo involucrado en optimizar una celda solar. Quien mejor cuenta esta historia es el gráfico de celdas solares de laboratorio con eficiencias récord elaborado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) [3], mostrado en la Fig. 1. Cada celda récord, una detrás de otra, muestra orgullosamente modestos pero importantes avances a lo largo de los años, que se hicieron décadas. Por ejemplo, el propio silicio solo pudo incrementar su eficiencia récord de conversión de 24.2 % en 1990 hasta el 26.7 % que ostenta en la actualidad, lo que significa un 2.5 % de incremento en 33 años. Y así fue hasta que llegaron las perovskitas, que consiguieron lo que ningún otro material en la historia de la fotovoltaica: aumentaron su récord de eficiencia de conversión de 14.1 a 26%; casi 12 % en solo 10 años. Con este comportamiento, las perovskitas parecen destinadas a ganar la vieja carrera por superar al silicio y apoderarse del futuro de la energía solar.

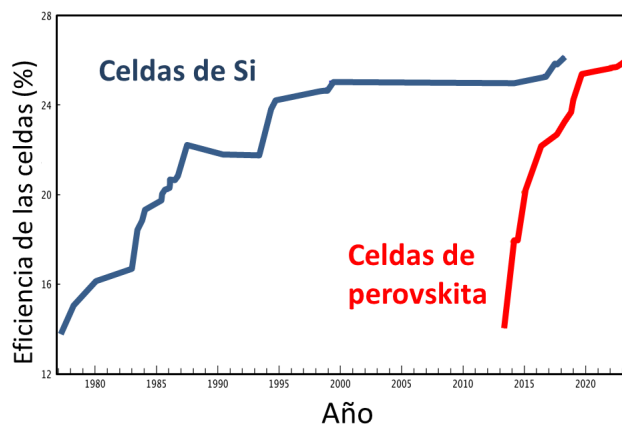


Figura 1. Evolución en el tiempo de la eficiencia récord de la celda solar de silicio y de perovskita (modificado de [3]).

Perovskita es la denominación de una amplia familia de materiales con la fórmula general ABX_3 y una estructura cuyo paradigma es el titanato de calcio ($CaTiO_3$) [4]. Las perovskitas han sido utilizadas para múltiples aplicaciones como ferroeléctricos, piezoelectricos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos, superconductores de

alta temperatura crítica, termoeléctricos y catalizadores. Sin embargo, no fue hasta 2006 cuando la aplicación fotovoltaica fue reportada por primera vez por Miyasaka y colaboradores para dispositivos con perovskitas de haluro de plomo de metilamonio $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{I}_3, \text{Br}_3)$ como material absorbente, demostrando menos del 1% de PCE [5]. Estos primeros trabajos y optimizaciones adicionales por parte de Park y colaboradores [6] resultaron en el desencadenante del "fenómeno de las perovskitas", cuando en 2012 se sobrepasó el 10% de eficiencia con dispositivos completamente de estado sólido.

Desde el punto de vista tecnológico, las celdas solares basadas en perovskitas ofrecen ventajas inmejorables. Se obtienen por métodos de deposición extremadamente económicos, lo que unido a sus altos valores de eficiencia lograron atraer a mucho del talento mundial en busca de una tecnología capaz de dar respuesta al gran problema de la energía. Sin embargo, al mismo tiempo han tenido que batallar con grandes dificultades de estabilidad. Esta molesta debilidad las hacía poco confiables, a pesar de su fabulosa pendiente de crecimiento de eficiencia récord (Fig. 1) y de su simplicidad tecnológica.

Pero algo aún más interesante estaba aún por ocurrir. Para las celdas de silicio, se han desarrollado inmensas capacidades industriales de fabricación. Así, la idea de complementar al silicio, en vez de suplantarlo, surge en forma de una celda *tándem* Si-perovskita, donde ambas se apilan, una sobre la otra, para aprovechar diferentes regiones del espectro solar. Esta complementariedad espectral es la primera condición importante a cumplir para una celda *tándem*. La celda de Si se encarga de convertir eficientemente los fotones provenientes de la región del infrarrojo, mientras que las perovskitas utilizan la región visible del espectro. De este modo, es obvio que se pueden obtener valores de eficiencia de conversión superiores a los de cada celda por separado.

Además, teniendo en cuenta los bajos costos de obtención de las perovskitas, se puede suponer que la adición de una secuencia de crecimiento a las capacidades para fabricar celdas de Si ya existentes permite obtener dispositivos capaces de generar energía suficiente como para compensar y superar los costos añadidos. Sin embargo, es importante acoplar las corrientes entre ambos dispositivos y lograr que la celda de perovskita se adapte a la superficie texturada de la celda de Si, compuesta por pirámides, que permiten la optimización del atrapamiento de luz y que forman parte del proceso de fabricación de estos dispositivos.

Todos estos retos fueron enfrentados en los últimos 5 años, hasta que en el 2021, el Helmholtz-Zentrum de Berlin (HZB) consigue un impresionante 29.8% de eficiencia, optimizando capas de interfaz entre el electrodo y la perovskita [7]. En el 2022 la eficiencia récord de la celda *tándem* Si-perovskita supera el deseado umbral del 30%, con valores de 31.3 y 32.5% [3] y en este año 2023, investigadores del King Abdullah University of Science and Technology de Arabia Saudita (KAUST) logran valores del 33.2 y 33.7%, con apenas dos meses de diferencia, en marzo y mayo respectivamente [3, 8]. Estos resultados no se obtienen solo a nivel de laboratorio, sino que se observan "start-ups" surgidas para la explotación comercial de estos dispositivos, como por ejemplo la renombrada Oxford-PV [9]. Además, se avanza en la estabilización de los dispositivos y en las pruebas en condiciones reales [10].

El notable comportamiento de esta tecnología *tándem* combina la robustez del silicio con el esplendor de la perovskita, complementados en un dispositivo capaz de ofrecer un 10% más de eficiencia que los existentes en el mercado, utilizando las capacidades industriales ya implementadas y añadiendo procesos de bajo costo.

El silicio, rey indiscutible de la fotovoltaica, seguirá reinando, pero ahora acompañado de las perovskitas, la fascinante tecnología de conversión de energía solar de crecimiento tecnológico nunca antes visto.

REFERENCES

- [1] <https://www.pveducation.org/>.
- [2] ISE Photovoltaic Report (Febrero 2023) <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.
- [3] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [4] O. Almora, L. Vaillant and G. García-Belmonte, *Rev. Cubana. Fis.* **34**, 58 (2017).
- [5] H. J. Snaith, *J. Phys. Chem. Lett.* **4**, 3623 (2013).
- [6] J. H. Im, C. R. Lee, J. W. Lee, S. W. Park, and N. G. Park, *Nanoscale* **3**, 4088 (2011).
- [7] Al-Ashouri et al., *Science* **370**, 1300 (2020).
- [8] <https://www.pvtime.org/33-7-kaust-team-sets-efficiency-record-for-tandem-solar-cell/>.
- [9] <https://www.oxfordpv.com/perovskite-pv-transform-global-solar-market>.
- [10] Aydin, E., Allen, T. G., De Bastiani, M. et al. *Nat Energy* **5**, 851 (2020).