

PEROVSKITAS: EL NUEVO RETO EN CELDAS SOLARES

PEROVSKITES: THE NEW CHALLENGE IN SOLAR CELLS

Eulises Regalado Pérez
Evelyn B. Díaz Cruz
Francisco Enrique Cancino-Gordillo
Julio Villanueva-Cab

<https://orcid.org/0000-0002-8665-9468>
<https://orcid.org/0000-0002-3219-129X>
<https://orcid.org/0000-0001-8286-5734>
<https://orcid.org/0000-0002-6261-9197>

Año 10 No. 30

Recibido: 29/febrero/2024

Aprobado: 12/marzo/2024

Publicado: 10/septiembre/2024

Instituto de Física "Luis Rivera Terrazas", Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla, Ecocampus Valsequillo,
C.P. 72960, San Pedro Zacachimalpa, Puebla, México.
Correo: juliovc@ifuap.buap.mx
eulises@ifuap.buap.mx

Resumen

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable que se obtiene de convertir la luz solar en electricidad, utilizando celdas solares. En México contamos con condiciones óptimas para aprovechar la energía solar, debido a nuestra ubicación geográfica y clima. Sin embargo, para su mayor aprovechamiento es clave reducir el costo de la tecnología y de los materiales asociados a la fabricación de las celdas solares. Actualmente, las celdas de silicio cristalino predominan en el mercado de la energía fotovoltaica, sin embargo, científicos de todo el mundo trabajan en la búsqueda de nuevos materiales que puedan ser empleados en la fabricación de celdas solares de menor costo. Una de las tecnologías prometedoras es la celda solar de perovskita, la cual ya se desarrolla a pequeña escala en diferentes centros de investigación del mundo, incluyendo México. Las perovskitas absorben la luz solar mucho mejor que el silicio cristalino, lo cual les permite ser utilizadas en forma de capas mil veces más delgadas que las capas de silicio. Actualmente, la investigación y desarrollo de las celdas de perovskita han permitido incrementar su eficiencia en más del 600% en un tiempo récord. Además, su fabricación es relativamente simple. Sin embargo, actualmente su principal problema es la durabilidad, lo que se busca resolver para poder ver pronto a estas celdas solares en nuestra vida cotidiana. Aquí presentamos un panorama general de las celdas solares de perovskita, ventajas y desventajas, así como su potencial para llegar comercializarse.

Palabras clave: Energías Renovables, Energía Solar, Celdas Solares, Perovskitas.

Abstract

Photovoltaic solar energy is a type of renewable energy that is produced by solar cells, which convert sunlight into electricity. In Mexico, we have optimal conditions for harnessing solar energy due to our privileged geographical location and climate. However, the main aspect influencing how broadly a photovoltaic technology is employed is its cost. Currently, silicon solar cells dominate the solar photovoltaic market, however, researchers from all around the world are concentrating their efforts on looking for novel materials that can be utilized to produce lower-cost solar cells. One of the promising technologies is the perovskite solar cell, which is already being developed on a small scale in different research centers around the world, including Mexico. Perovskite materials absorb sunlight much better than crystalline silicon, allowing them to be used in very thin layers, about one thousand times thinner than silicon layers, for solar cell applications. Research and development on perovskite devices have increased their efficiency by more than 600% in record time. Despite its relatively simple manufacturing process, the main problem lies in its instability. This is the main issue that needs to be resolved to produce them on an industrial scale. In this work, we present an overview of the development of perovskite solar cells, their advantages and disadvantages, as well as their potential to enter the photovoltaic market in the short term.

Keywords: Renewable Energy, Solar Energy, Solar Cells, Perovskites.

1. ¿Qué son las perovskitas?

Las perovskitas toman su nombre del titanato de calcio (CaTiO_3 , Fig. 1a), un mineral que fue descubierto en los montes Urales en 1839 por el científico alemán Gustav Rose, quien lo nombró *perovskita* en honor al mineralogista ruso L. A. von Perovski (1792-1856) (Attfield et al., 2015). Actualmente el término perovskita no se refiere a un material en específico, sino a una familia de compuestos con fórmula general ABX_3 , que tiene el mismo arreglo ordenado de átomos (estructura cristalina) que el CaTiO_3 . Esta estructura cristalina es mostrada en la Fig. 1(b). En los últimos años, la investigación en materiales de perovskita se ha incrementado de forma significativa debido a sus importantes características. Esto ha generado un interés en las posibles aplicaciones de las perovskitas, que incluyen (Kim et al., 2018): *superconductividad*, *catálisis*, *diodos emisores de luz* (LEDs, por sus siglas en inglés), *detectores de rayos X*, *láseres*, *transistores*, por mencionar algunas. Aún así, cuando hacemos una búsqueda en internet utilizando la palabra clave "perovskita" (o perovskite, en inglés), los resultados mostraron que la aplicación de mayor relevancia son las celdas solares.

Las perovskitas han evolucionado como materiales absorbedores de luz para producir celdas solares de bajo costo y alta eficiencia. Las celdas de perovskita han tenido una acelerada evolución de su rendimiento, como ninguna otra tecnología solar fotovoltaica. El rendimiento de una celda solar se mide en términos de su eficiencia para convertir la luz solar en electricidad. La primer celda de perovskita fue reportada en el año 2009, con una eficiencia de 3.8% (Kojima et al., 2009). Actualmente, estas celdas han alcanzado una eficiencia de 25.8% en laboratorios (Min et al., 2021), lo cual se ha logrado a través de modificaciones de la composición química de la perovskita, de los solventes utilizados para prepararla, así como por modificaciones de las capas complementarias de la celda de perovskita. Esta eficiencia lograda significa que aproximadamente una cuarta parte de la luz solar que incide en la celda de perovskita es aprovechada para generar electricidad, lo que coloca a las celdas de perovskita en un nivel comparable a las celdas solares tradicionales de alta eficiencia, como las de silicio (Si), telurio de cadmio (CdTe) y arsenuro de galio (GaAs).

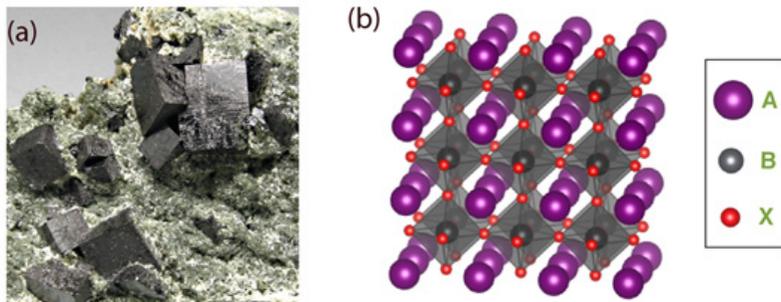


Figura. 1 (a) Cristales de perovskitas, imagen de Fabre Minerals (Fabre Minerals, 2022). (b) Estructura cristalina cúbica de la perovskita ABX_3 , donde A es un catión grande, B es un catión metálico pequeño, y X es un haluro.

2. Ventajas de las celdas solares de perovskitas frente a otras

Las perovskitas son ligeras, flexibles, eficientes, e incluso pueden ser ligeramente transparentes para poder utilizarlas como ventanas en edificios. Su proceso de fabricación para celdas solares es compatible con varias técnicas de depósito, tales como: el recubrimiento por rotación (*spin-coating*), el recubrimiento por troquel de ranura (*slot-die*), el recubrimiento con cuchilla (*blade-coating*), y la impresión por inyección de tinta (*inkjet printing*). Estos métodos de fabricación son relativamente sencillos, y sus eficiencias de celdas fabricadas son cercanas al 20% (Fig. 2a).

La celda solar de perovskita está formada de capas muy delgadas, del orden de una centésima parte del grosor de un cabello humano. Esto permite utilizar una pequeña cantidad de material de perovskita, reduciendo así los costos de fabricación. La tecnología de perovskita produce aproximadamente 30 watts por gramo de perovskita (Hutchins, 2020). El método más común utilizado en un laboratorio para fabricar celdas de perovskita es basado en soluciones químicas, lo cual se traduce también en una reducción de costo. Pensando en una producción continua a nivel industrial (*roll-to-roll*), el costo de fabricar módulos solares de perovskita podría reducirse a un precio de 0.18 dólares/Watt (Čulík et al., 2022a). Esto equivale a la mitad del costo de la celda de silicio (Smith et al., 2021). Un análisis del ciclo de vida de varias tecnologías fotovoltaicas encontró que la fabricación de las celdas de perovskita tiene una “huella de carbono” más baja que la fabricación de celdas de silicio y de celdas tándem de perovskita-silicio (Tian et al., 2020). Hoy en día, el término “*huella de carbono*” se usa a menudo como término de la cantidad de dióxido de carbono o CO₂ (generalmente en toneladas) que emite un individuo, evento, organización, servicio, lugar o producto en su fabricación. Además de esto, los paneles de perovskita resultan más fáciles de reciclar (Tian et al., 2020), lo cual también puede reducir su costo final. Otra ventaja de las celdas solares de perovskita es la de poder fabricarlas

sobre un material de soporte flexible y ligero (Fig. 2c), teniendo así un mayor rango de aplicaciones. Por ejemplo, celdas de perovskitas sobre soportes de plástico polietilentereftalato (PET) ya han probado su factibilidad (Li et al., 2016) y su posible uso en techos o superficies no necesariamente planas, como las tejas de una casa o el toldo de un vehículo, sin tener la limitante del peso. Esta cualidad es posible porque la fabricación de la celda de perovskita puede llevarse a cabo a bajas temperaturas (<150 °C). Por otra parte, los materiales y los procesos de fabricación de la celda de perovskita tienen cierto impacto ambiental, pero su alta eficiencia compensa esto, logrando reducir su impacto entre un 6% y un 18% más que un módulo de silicio (Roffeis et al., 2022).

A pesar del panorama prometedor, aún faltan por resolver algunos problemas técnicos para que las celdas solares de perovskita sean parte de nuestra vida cotidiana en un futuro próximo. Principalmente deben perfeccionarse para mejorar su estabilidad (tiempo de vida). Las perovskitas utilizadas en celdas solares experimentan cambios en su composición a altas temperaturas y en ambientes con una alta humedad. Hoy en día, las celdas solares de silicio tienen un tiempo de vida en operación de alrededor de 25 años, mientras que para las celdas solares de perovskita el mejor tiempo de vida reportado es de poco más de 5 años (Zhao et al., 2022). Definitivamente, el corto tiempo de vida de las celdas de perovskita es el principal obstáculo para su comercialización, y por ello es el principal tema en el que se trabaja en los grupos de investigación actualmente.

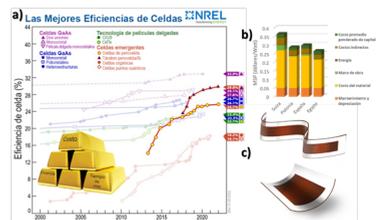


Figure. 2. (a) Evolución de la eficiencia a nivel laboratorio de las celdas solares de perovskita comparado con las celdas solares tradicionales (NREL, 2022). (b) La gráfica de columnas muestra los componentes del precio MSP para celdas de perovskita con una eficiencia de 20% en diferentes países. (c) Representación de celdas de perovskita soportadas sobre sustratos flexibles.

3. Situación actual y futuro de las perovskitas

Actualmente, las celdas solares de perovskitas se fabrican en laboratorios de muchas partes del mundo. Se construyen en un tamaño pequeño similar a una pieza de LEGO, ya que todo concepto suele probarse primero a pequeña escala para tener un mayor control de los experimentos y reducir costos. Luego se estudian en funcionamiento para probar su estabilidad en diferentes condiciones como son: humedad, iluminación prolongada y altas temperaturas (superiores a 38°C). Con estas pruebas se puede estimar su estabilidad a largo plazo. Hasta el momento, las celdas solares basadas en perovskitas tienden a deteriorarse bajo las condiciones ambientales más rápido que las celdas de silicio, así que su potencial para convertir la luz solar en energía eléctrica se reduce significativamente a largo plazo (Čulík et al., 2022b). Esto representa el mayor reto de la tecnología de perovskita para su comercialización. Sin embargo, se están realizando esfuerzos en todo el mundo en busca de *encapsulantes ligeros* que puedan proteger las celdas de perovskitas de la humedad y al mismo tiempo que sigan manteniendo su bajo peso (Ma et al., 2022; Mohammadi et al., 2021). También se prueban nuevos materiales en las fronteras de la perovskita, para protegerla y mejorar su estabilidad (Dong et al., 2021; Lira-Cantú, 2017). Además, se crean y estudian nuevas composiciones químicas de la perovskita para incrementar su estabilidad a altas temperaturas (Schwenzer et al., 2021; Zhang et al., 2022). Por consiguiente, el desarrollo de esta tecnología avanza de forma importante buscando su futura comercialización.

La tecnología fotovoltaica de perovskita que tiene mayor posibilidad de ser producida industrialmente a corto plazo es la que combina perovskita con silicio, en un arreglo conocido como celda *tándem*. Esta palabra de origen latín significa “*uno detrás del otro*”, y en las celdas solares representa la combinación de dos o más tipos de absorbedores en una misma celda. Cada uno de estos absorbedores aprovecha un rango específico de la radiación solar, que al sumarse producen eficiencias

mayores a 31%. Oxford PV es una empresa que desarrolla módulos *tándem* de perovskita-silicio con eficiencias de 29.52%. Existen también otras empresas que han mostrado intención de comercializar las celdas *tándem* de perovskita, por ejemplo, Hanwha Q Cells, con sede en Corea del Sur y quienes están trabajando en conjunto con el instituto de investigación alemán Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB). Ellos han logrado producir celdas solares *tándem* de perovskita-silicio a nivel laboratorio con una eficiencia de 28.7% (Bellini, 2022), y han anunciado recientemente la implementación de su planta piloto para fabricar módulos solares de perovskita-silicio (Fig. 3a), ubicada en Thalheim, Alemania. Ellos tienen un proyecto llamado *PEPPERONI* (Pilot line for European Production of PEROVskite-Silicon tanDem modules on Industrial scale), planeado para desarrollarse en cuatro años y que incluye a 17 socios de 12 países de Europa. Su objetivo es fabricar módulos de perovskita a escala industrial con un eficiencia de al menos 26% (pv-magazine, 2022).

Actualmente, la industria aeroespacial también realiza pruebas con celdas de perovskitas fuera de la Tierra. Dentro de nuestro planeta, las celdas solares de perovskitas reciben principalmente la radiación solar, formada de fotones. Sin embargo, fuera de la Tierra la radiación que existe tiene diferentes orígenes, como protones, electrones, neutrones, partículas alfa y rayos gamma. Esto crea un entorno vulnerable para el funcionamiento de muchos dispositivos electrónicos, incluidas las celdas solares. Por lo tanto, uno de los principales desafíos de las tecnologías espaciales es lograr que éstas puedan tener una larga vida bajo condiciones extremas de trabajo y con alta tolerancia a la radiación, asegurándose así que puedan funcionar en el espacio exterior. En el 2020, las celdas de perovskita fueron llevadas por primera vez al espacio exterior, y se instalaron en el exterior de la Estación Espacial Internacional para estudiar su operación bajo la exposición a la radiación solar (Fig. 3b). La buena noticia es que pasaron las pruebas de durabilidad, y se observó algo muy interesante: cuando un protón golpea la celda de perovskita con la cantidad correcta de energía, puede desplazar a un átomo de

su sitio y causar una caída en la eficiencia de la celda. Sin embargo, las perovskitas poseen una capacidad de “autocuración” (Hicks, 2022), lo cual se produce por el aumento de la temperatura debido a la misma radiación, lo que obliga a los átomos a regresar a sus sitios.



Figure. 3. (a) Planta piloto para la fabricación de celdas solares tándem perovskita-silicio, implementada por la empresa Hanwha Qcells (pv-magazine, 2022). (b) Celdas solares de perovskitas probadas en el espacio exterior. Imagen tomada de referencia (NREL, 2021)

4. Conclusión

Las perovskitas combinan varias características deseadas en un material absorbedor para celdas solares. Estos materiales tienen la propiedad de ser procesados por métodos simples y de bajo costo, además de tener excelentes propiedades ópticas y eléctricas. Sus características les han permitido a las celdas solares de perovskita lograr incrementos en su eficiencia de más del 600% en 12 años. Este nivel de eficiencia le llevó aproximadamente 70 años a la tecnología de silicio cristalino. La celda solar de perovskita promete la electricidad solar más económica de todos los tiempos, siempre que se pueda mejorar su estabilidad a largo plazo. Para ello, se están realizando esfuerzos importantes en investigación en todo el mundo. Es muy posible que en un corto plazo las celdas de perovskita combinadas con silicio se produzcan comercialmente, lo cual podría ser el inicio de una próxima generación de celdas solares.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

Al Proyecto Ciencia de Frontera CF-2019-848260 del CONACYT. E.B.D.C y E.R.P. agradecen al CONACYT por el apoyo otorgado para estancias posdoctorales. F.E.C.G. agradece al CONACYT por el apoyo otorgado durante el desarrollo de su tesis doctoral. A la BUAP por la infraestructura prestada para el desarrollo de proyectos de investigación.

Referencias

- Attfield, J. P., Lightfoot, P., & Morris, R. E. (2015). Perovskites. *Dalton Transactions*, 44(23), 10541–10542. <https://doi.org/10.1039/C5DT90083B>
- Bellini, E. (2022, March 7). *Hanwha Q Cells, Helmholtz-Zentrum Berlin claim 28.7% efficiency for 2T perovskite-silicon tandem solar cell*. Solisinverter.Com. <https://www.pv-magazine.com/2022/03/07/hanwha-q-cells-helmholtz-zentrum-berlin-claim-28-7-efficiency-for-2t-perovskite-silicon-tandem-solar-cell/>
- Čulík, P., Brooks, K., Momblona, C., Adams, M., Kinge, S., Maréchal, F., Dyson, P. J., & Nazeeruddin, M. K. (2022a). Design and Cost Analysis of 100 MW Perovskite Solar Panel Manufacturing Process in Different Locations. *ACS Energy Letters*, 7(9), 3039–3044. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.2c01728>
- Čulík, P., Brooks, K., Momblona, C., Adams, M., Kinge, S., Maréchal, F., Dyson, P. J., & Nazeeruddin, M. K. (2022b). Design and Cost Analysis of 100 MW Perovskite Solar Panel Manufacturing Process in Different Locations. *ACS Energy Letters*, 7(9), 3039–3044. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.2c01728>
- Dong, Q., Zhu, C., Chen, M., Jiang, C., Guo, J., Feng, Y., Dai, Z., Yadavalli, S. K., Hu, M., Cao, X., Li, Y., Huang, Y., Liu, Z., Shi, Y., Wang, L., Padture, N. P., & Zhou, Y. (2021). Interpenetrating interfaces for efficient perovskite solar cells with high operational stability and mechanical robustness. *Nature Communications*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21292-3>
- Fabre Minerals. (2022). *Reference Specimens / The Silvane Collection / Fabre Minerals*. <https://www.fabreminerals.com/specimens/RSSLV-silvane-notable-specimens.php#AF79M4>
- Hicks, W. (2022, April 18). *Scientists Decide How To Prove Out Perovskite Panels for Space Power*. <https://www.nrel.gov/news/program/2022/scientists-decide-how-to-prove-out-perovskite-panels-for-space-power.html>
- Hutchins, M. (2020, September 7). *Perovskites in space*. Pv-Magazine. <https://www.pv-magazine.com/2020/09/07/perovskites-in-space/>
- Kim, H., Han, J. S., Choi, J., Kim, S. Y., & Jang, H. W. (2018). Halide Perovskites for Applications beyond Photovoltaics. *Small Methods*, 2(3), 1700310. <https://doi.org/10.1002/smt.201700310>
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- Li, Y., Meng, L., Yang, Y. (Michael), Xu, G., Hong, Z., Chen, Q., You, J., Li, G., Yang, Y., & Li, Y. (2016). High-efficiency robust perovskite solar cells on ultrathin flexible substrates. *Nature Communications*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms10214>

- Lira-Cantú, M. (2017). Perovskite solar cells: Stability lies at interfaces. *Nature Energy*, 2(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.115>
- Ma, S., Yuan, G., Zhang, Y., Yang, N., Li, Y., & Chen, Q. (2022). Development of encapsulation strategies towards the commercialization of perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 15(1), 13–55. <https://doi.org/10.1039/D1EE02882K>
- Min, H., Lee, D. Y., Kim, J., Kim, G., Lee, K. S., Kim, J., Paik, M. J., Kim, Y. K., Kim, K. S., Kim, M. G., Shin, T. J., & Il Seok, S. (2021). Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO₂ electrodes. *Nature*, 598(7881), Article 7881. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03964-8>
- Mohammadi, M., Gholipour, S., Malekshahi Byranvand, M., Abdi, Y., Taghavinia, N., & Saliba, M. (2021). Encapsulation Strategies for Highly Stable Perovskite Solar Cells under Severe Stress Testing: Damp Heat, Freezing, and Outdoor Illumination Conditions. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(38), 45455–45464. <https://doi.org/10.1021/acsmami.1c11628>
- NREL. (2021). *Space Mission Tests NREL Perovskite Solar Cells*. <https://www.nrel.gov/news/features/2021/space-mission-tests-nrel-perovskite-solar-cells.html>
- NREL. (2022). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- pv-magazine. (2022). *Qcells, European consortium launch production line for tandem silicon-perovskite solar cells*. *Pv Magazine International*. <https://www.pv-magazine.com/2022/11/23/qcells-european-consortium-launch-production-line-for-tandem-perovskite-silicon-solar-cells/>
- Roffeis, M., Kirner, S., Goldschmidt, J.-C., Stannowski, B., Perez, L. M., Case, C., & Finkbeiner, M. (2022). New insights into the environmental performance of perovskite-on-silicon tandem solar cells – a life cycle assessment of industrially manufactured modules. *Sustainable Energy & Fuels*, 6(12), 2924–2940. <https://doi.org/10.1039/D2SE00096B>
- Schwenzer, J. A., Hellmann, T., Nejjand, B. A., Hu, H., Abzieher, T., Schackmar, F., Hossain, I. M., Fassl, P., Mayer, T., Jaegermann, W., Lemmer, U., & Paetzold, U. W. (2021). Thermal Stability and Cation Composition of Hybrid Organic–Inorganic Perovskites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(13), 15292–15304. <https://doi.org/10.1021/acsmami.1c01547>
- Smith, B., Woodhouse, M., Horowitz, K., Silverman, T., Zuboy, J., & Margolis, R. (2021). *Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results* (NREL/TP-7A40-78173, 1829459, MainId:32082; p. NREL/TP-7A40-78173, 1829459, MainId:32082). <https://doi.org/10.2172/1829459>

- Tian, X., Stranks, S. D., & You, F. (2020). Life cycle energy use and environmental implications of high-performance perovskite tandem solar cells. *Science Advances*, 6(31), eab0055. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ab0055>
- Zhang, Z., Wang, H., Jacobsson, T. J., & Luo, J. (2022). Big data driven perovskite solar cell stability analysis. *Nature Communications*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35400-4>
- Zhao, X., Liu, T., Burlingame, Q. C., Liu, T., Holley, R., Cheng, G., Yao, N., Gao, F., & Loo, Y.-L. (2022). Accelerated aging of all-inorganic, interface-stabilized perovskite solar cells. *Science*, 377(6603), 307–310. <https://doi.org/10.1126/science.abn5679>