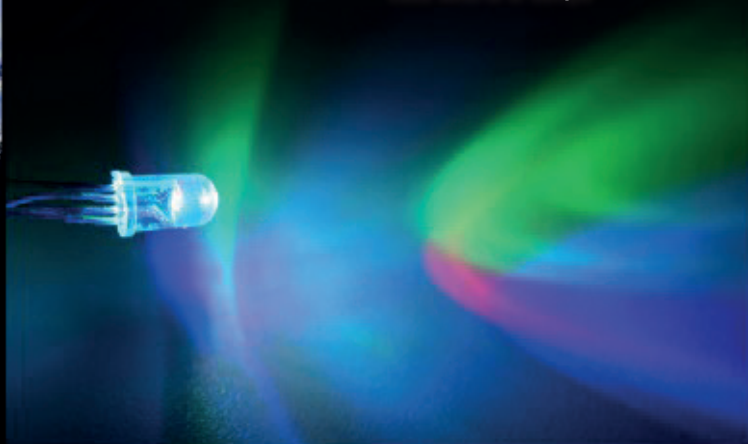
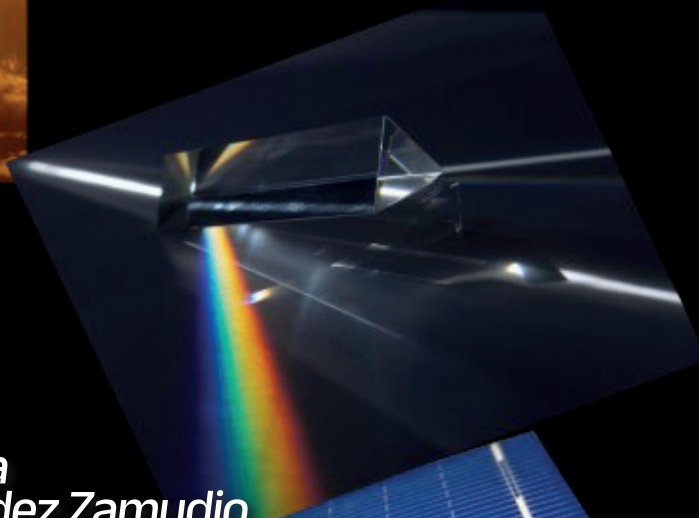




Acondicionamiento de luz a través de materiales luminiscentes

*Rosalba Carrera Peralta
Rubén Alfredo Hernández Zamudio
Federico González García*
Área de Ingeniería en Recursos Energéticos
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Iztapalapa



Abstract

Light is energy, and due to this fact, it may be transformed into different useful manifestations of energy such as thermal and electrical. However, another possibility is to transform light into light. In this regard, inorganic luminescent materials are of paramount importance since they allow to tailor the features of light according to specific needs. Among the salient applications, there are the artificial lighting based on a LED plus a luminescent material, and photon downconversion for increasing the efficiency of a silicon crystalline photovoltaic solar cell.

Keywords: light, energy, luminescent material, downconversion

Resumen

La luz es energía y debido a este hecho puede ser transformada en distintas manifestaciones útiles de ésta como térmica y eléctrica. Sin embargo, otra posibilidad es la transformación de luz en luz. En este sentido, los materiales luminiscentes inorgánicos son de primera importancia pues a través de ellos la luz puede adecuarse a fines específicos. Entre las aplicaciones de interés están la producción de luz artificial a base de un LED y un material lumi-

niscente y la conversión descendente para incrementar la eficiencia de una celda solar fotovoltaica de silicio cristalino.

Palabras clave: luz, energía, material luminiscente, conversión descendente

1.- Luz y energía

La experiencia cotidiana de la gran mayoría de los seres humanos incluye la percepción de la luz. A esta cualidad se le denomina sentido de la vista y es el resultado de la interpretación que el cerebro da, a través del ojo, al estímulo de la energía que posee la luz. Vale la pena mencionar que en la física la palabra luz se usa para referirse tanto al espectro electromagnético de todas las longitudes de onda como a la región de éste que produce una respuesta a través del sentido de la vista (Fig. 1). A lo largo de este texto la palabra se empleará en ambos sentidos.

A diferencia de los objetos que poseen masa, en la que una parte de la energía es inaccesible, la luz no la posee y es toda ella energía. De hecho, como cualidad de la naturaleza, la energía es una propiedad inherente de ésta, pero que por ser en cierto modo inasible es conceptualizada como potencial, cinética, nuclear, térmica, química, luminosa, y un largo etcétera.

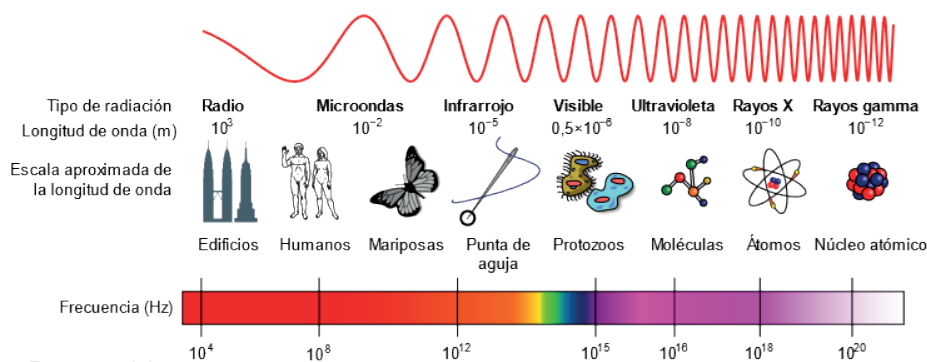


Fig. 1. Diagrama del espectro electromagnético. Se muestran propiedades como la longitud de onda con elementos que corresponden a su escala y la frecuencia.

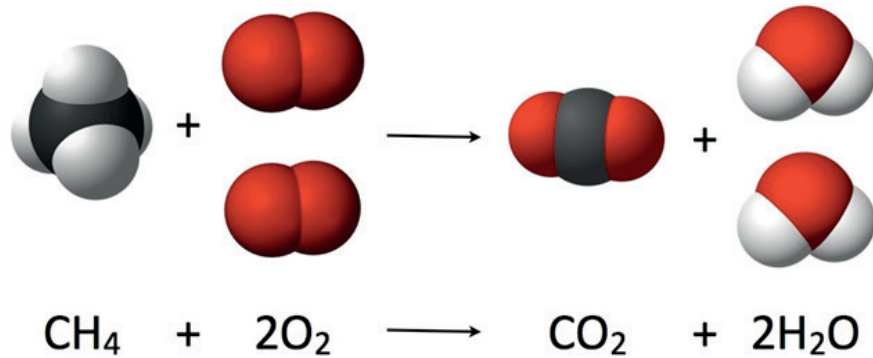


Fig.2. Diagrama estequiométrico de la reacción de combustión del metano.

Otro hecho significativo en relación con la energía es que se conserva. Este principio abstracto de base matemática dice que hay una cantidad numérica que no cambia cuando la naturaleza hace de las suyas en su complejo devenir. Para fines prácticos, la relevancia de este principio es el efecto que la energía tiene cuando adopta una de sus formas particulares. Para aclarar el sentido de lo dicho, se puede considerar a la cocción de un alimento, una tortilla, por ejemplo. Sin importar cual sea su origen, es necesaria una fuente de calor, es decir, la forma en que la energía se encuentra almacenada en el gas o la leña tiene que transformarse en energía térmica y luminosa. En este caso, la energía química almacenada en las moléculas de los que están hechos el gas y la leña. Visto a un nivel microscópico, se trataría de la ruptura de los enlaces (entre electrones) de esas moléculas y la formación de otros nuevos que cobran forma en compuestos distintos a los originales. A estos procesos se les denomina reacciones químicas. En la Fig. 2, se muestran en forma esquemática la molécula de metano, el componente mayoritario del gas natural, la de oxígeno, presente en el aire, y las de los productos de la reacción: dióxido de carbono y agua, así como la reacción respectiva.

La energía que se libera en la combustión de la leña o el gas induce también algunos cambios fisicoquímicos en la masa de maíz hecha tortilla. Sin embargo, de toda la energía liberada, una parte significativa no se aprovecha; simplemente se dispersa en el espacio circundante a la zona de cocción, sea un comal o una máquina tortilladora. Así, para que la energía tenga un efecto útil, parte de ésta se perderá en forma inexorable.

La luz es descrita como una onda electromagnética de modo que puede caracterizarse por su longitud de onda, su frecuencia o su energía. En forma sencilla, a cada valor dado de estas tres cantidades le corresponde un color. La rapidez de la luz en el vacío es una constante universal y en esta condición la rapidez de la luz, su frecuencia y su longitud de onda están relacionadas a través de la siguiente expresión

$$c = \lambda \nu$$

en donde c es la rapidez de la luz en el vacío, λ es la longitud de onda y ν es la frecuencia.

Como se señaló, la luz es pura energía. Una forma útil para determinar la energía asociada a la luz está dada por la ecuación

$$E=h\nu$$

en donde E es la energía y h es la constante universal de Planck.

De las ecuaciones anteriores, se puede decir, por ejemplo, que, en la región visible (ver Fig. 1), la luz roja es la que posee las longitudes de onda más grandes, y las frecuencias y energías más pequeñas. Por el contrario, la luz violeta y azul poseen las longitudes de onda más pequeñas, y las frecuencias y energías más grandes.

La luz puede ser transformada en otras manifestaciones de la energía. La más simple, es su transformación en energía térmica. Una superficie expuesta a los rayos del sol aumenta su temperatura evidenciando dos hechos: la energía de la luz proveniente del sol se almacena en la superficie y la energía se transforma en energía térmica. Este mismo fenómeno se emplea para mantener calientes algunos alimentos a través de su iluminación con focos de cierta potencia. La luz puede transformarse también directamente en energía eléctrica. A este fenómeno se le denomina efecto fotovoltaico. No obstante, para que ocurra es preciso emplear un intermediario. Este intermediario es un material semiconductor; el más empleado es el elemento químico silicio, en el que por la forma en que los electrones ganan la energía de la luz, es posible disponer de energía eléctrica.

La luz tiene otra posibilidad de transformación: su transmutación en luz con otra cualidad, es decir, con otra frecuencia, longitud de onda, energía o color. Este proceso ocurre en las lámparas de

LED. Aplicaciones más sofisticadas de esta transformación podrían dar lugar al incremento en la eficiencia de celdas fotovoltaicas de silicio cristalino. En lo sucesivo se presentarán algunos ejemplos de acondicionamiento de luz para fines específicos y la importancia que en ellos tienen algunos materiales inorgánicos.

En la Fig. 3 se muestran esquemáticamente los procesos de transformación de la luz que se han descrito en forma sencilla. Debe enfatizarse que, para que éstos ocurran, es imprescindible la presencia de algún tipo de material.

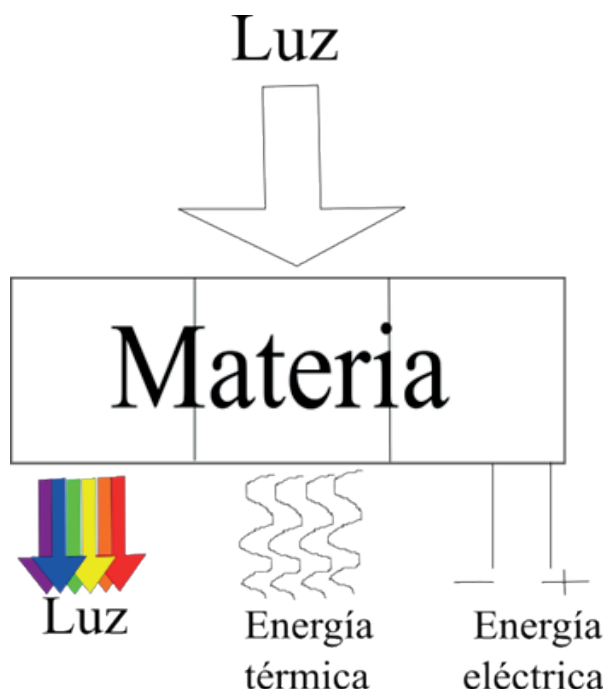


Fig. 3. Esquema de los procesos de transformación de la luz, en los que un material media el proceso.

Un elemento fundamental para transformar la luz en luz son los materiales luminiscentes. En éstos, la luz que se absorbe incrementa la energía de sus electrones, pero en un hecho poco común, una parte de esa energía absorbida es

devuelta al entorno también en forma de luz. El resto de la energía absorbida sólo incrementa la agitación de los átomos que constituyen el material. A partir de este hecho, y en consonancia con el principio de conservación de la energía, lo que se observa es el corrimiento hacia el rojo de la luz emitida, es decir, hacia longitudes de onda mayor (menor energía / menor frecuencia) en relación con el color de la luz absorbida. Este hecho puede ser comprendido a partir de la Fig. 1, al notar que el color de la luz emitida por un cuerpo estaría a la izquierda, desplazada hacia el rojo, en relación con el de la luz absorbida.

**2., Luz para consumo humano:
iluminación artificial
a base de un LED y
un material luminiscente**

La luminiscencia es un fenómeno en el que un sistema físico emite luz cuando es estimulado por una fuente de energía, pero no necesariamente térmica. De hecho, el proceso en el que, por virtud del aumento en la temperatura un sistema emite luz, se denomina, en el caso ideal, emisión de cuerpo negro. En las aplicaciones que se presentan, la fuente de energía que induce la luminiscencia es luz, de ahí que suela emplearse el término de fotoluminiscencia para designar al proceso. En la Fig. 4 se presenta un ejemplo de luminiscencia que por la duración durante la cual se mantiene la emisión se llama luminiscencia persistente. En este caso el material es un óxido de aluminio y estroncio al cual se le ha agregado pequeñas cantidades de un par de iones lantanoides de europio y disprosio, y que al ser iluminado por la luz del sol u otra fuente de luz con componentes ultravioleta o azul emite en el verde.



Fig. 4. Luminiscencia de un material colocado en algunas partes de la carátula de un reloj de pulsera.

Un hito en la producción de luz artificial lo representó el descubrimiento del LED azul que produce luz de ese color de manera muy eficiente. La luz azul corresponde a la de mayor energía de entre las tres que una fuente de iluminación debe emitir para resultar apropiada al ojo humano. Las otras dos son la luz verde y roja que pueden, en términos energéticos, ser producidas a partir de la azul. Es en este contexto que los materiales luminiscentes, que son capaces de absorber luz azul y transformarla en forma eficiente en verde y roja, resultan cruciales. Adicionalmente a una conversión eficiente, la síntesis de estos materiales debe consumir poca energía, es decir, que la temperatura de fabricación de los materiales sea lo más baja posible y que el entorno no necesite de gases distintos al aire ni presiones mayores a las del ambiente. La producción de materiales en estas condiciones tiene como premisa abatir el impacto al ambiente. Otro aspecto importante a nivel de investigación en

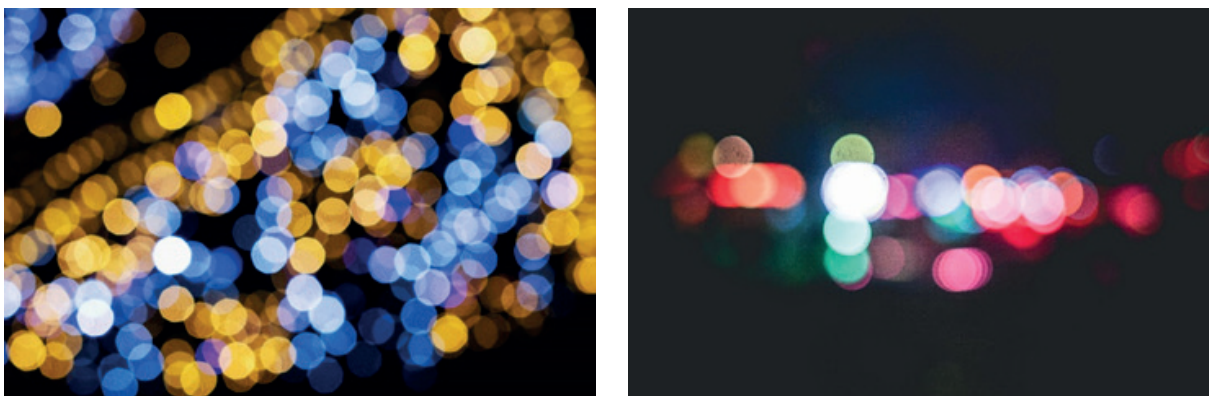


Fig. 5. A la izquierda se muestra esquemáticamente la combinación de la luz generada por un LED azul con luz amarilla que resulta de la conversión de la luz azul en amarilla. El resultado es luz blanca fría. A la derecha se aprecia la modificación de la luz hacia colores más cálidos por la adición de luz roja.

la iluminación artificial es desarrollar materiales que transformen eficientemente la luz azul en roja, pues ello permitiría la producción de luz más cálida, cuya calidad es más próxima a la ideal y que corresponde a la que produce el sol. En la Fig. 5 se evidencia la importancia del rojo en la producción de luz blanca de calidad.

Como un apunte adicional, es preciso comentar que en México el consumo de energía eléctrica para iluminación artificial a nivel residencial y comercial representa casi el 35% del consumo de energía eléctrica [1,2]. En este sentido el desarrollo de nuevos materiales puede permitir la disminución en la demanda de energía eléctrica.

3.- Aumento de la eficiencia de celdas fotovoltaicas de silicio cristalino: materiales luminiscentes con efecto de conversión descendente de fotones

La crisis ambiental provocada por la acción humana demanda, entre otras acciones, la búsqueda de estrategias que limiten la necesidad del consumo de combustibles fósiles. La generación de energía a través de tecnologías solares fotovoltaicas

se enmarca en esas estrategias y es clave para diseminar el aprovechamiento de la energía solar, coadyuvando a mitigar los efectos del cambio climático.

Actualmente, las celdas solares fotovoltaicas basadas en silicio cristalino, policristalino y amorfo representan más del 95% de la producción mundial de este tipo de tecnologías [3]. El uso del silicio cristalino ha permitido a los sistemas fotovoltaicos de unión simple tener una eficiencia máxima teórica de conversión de luz a electricidad de aproximadamente 30%, de modo que aproximarse a este límite es de particular interés. El principal reto para mejorar la eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas hechas a base de un semiconductor de unión simple, es resolver el problema de la discrepancia espectral entre la distribución de la energía de la luz solar y aquella que hace óptima su conversión a través del semiconductor en energía eléctrica. El silicio cristalino solo puede aprovechar eficientemente la luz roja e infrarroja que poseen menores energías que la luz visible de otros colores y la luz ultravioleta [4]. En la Fig. 6 se muestran

esquemáticamente la respuesta espectral de una celda solar fotovoltaica de Si-c, es decir, la contribución a la producción de energía eléctrica de la luz de cada color, y el espectro de irradiancia solar estándar AM1.5G (correspondiente al que se obtiene en condiciones de cielo despejado con el sol a aproximadamente 48° respecto al cenit), equivalente a 1000 W/m^2 . En la Fig. 6 se observa que la respuesta espectral de la celda solar de Si-c en la zona de alta energía del espectro solar (entre 325 nm (UV) y 550 nm (verde)) es deficiente. De ahí que el desarrollo de materiales luminiscentes que transformen eficientemente la luz de ese intervalo del espectro en luz roja o infrarroja es un tópico de investigación de especial importancia, pues al acoplarse a las celdas solares fotovoltaicas de silicio mono y policristalino, mejoraría en ellas el aprovechamiento de la luz asociada a la región más energética del espectro solar. A diferencia de las estrategias más socorridas en las que se adapta a la celda fotovoltaica al espectro solar, en el caso del uso de materiales luminiscentes con las cualidades descritas previamente, lo que se adapta es el espectro solar a la celda fotovoltaica, específicamente, a las hechas de Si-c.

El tipo más eficiente de conversión de luz de mayor energía en luz de menor energía se denomina conversión descendente. Se trata de duplicar la intensidad de la luz de menor energía respecto de la de mayor energía. Dicho de manera simple y en el contexto de una celda solar, cuando este tipo de conversión opera, la corriente que produce la celda se duplica. En el caso de una celda fotovoltaica de Si-c, en el intervalo que va de los 325 nm a los 550 nm [5]. En términos más técnicos, la conversión descendente de energía se refiere a la

conversión de un fotón de alta energía, es decir, con longitudes de onda en el ultravioleta (UV), el violeta, el azul y el verde, en dos o más fotones de baja energía con longitudes de onda en el cercano infrarrojo (NIR, por sus siglas en inglés) y que puedan ser absorbidos de forma eficiente por una celda solar. En la Fig. 7, se muestra el esquema de un sistema de conversión descendente de energía adaptado a una celda solar fotovoltaica de silicio cristalino.

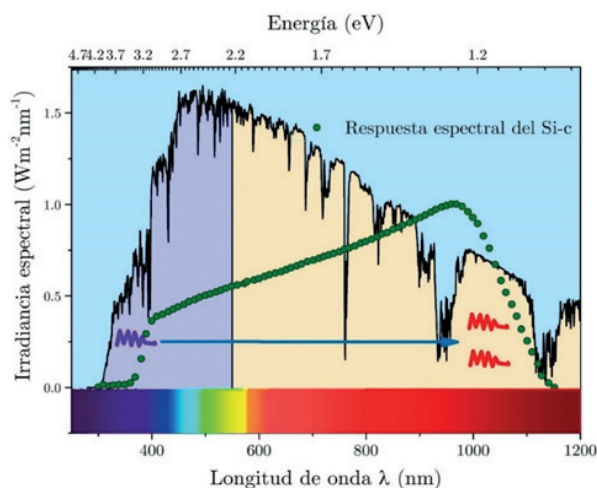


Fig. 6. Esquema del espectro de irradiancia solar estándar (AM1.5 G 1000 W/m^2) junto con la respuesta espectral de una celda solar de Si-c. Las franjas de colores en la parte inferior de la figura indican el color al que corresponde cada longitud de onda de la luz visible. En el caso de la luz infrarroja, el color solo es una referencia dado que el ojo humano es incapaz de detectarla.

La realización práctica de estos materiales luminiscentes pasa por la incorporación de los iones lantanoides trivalentes de Pr e Yb (o de otra pareja de este tipo de iones) a un material inorgánico anfitrión como el óxido de itrio (Y_2O_3). El Pr^{3+} y el Yb^{3+} , a partir del alineamiento de sus niveles de energía, como se ilustra en la Fig. 8, permiten generar una respuesta luminiscen-

te que da lugar a la conversión descendente de fotones [6]. Con el empleo de este tipo de materiales, en principio, sería posible mejorar la eficiencia de transformación de la energía solar (luz) en energía eléctrica a través de una celda fotovoltaica [7].

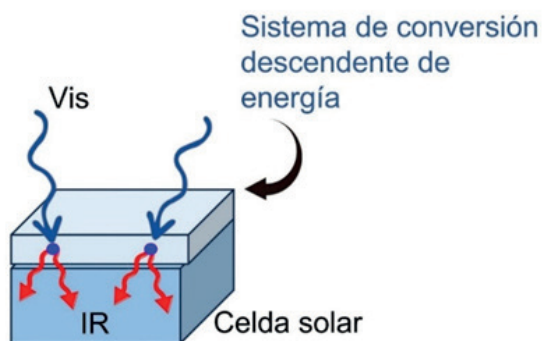


Fig. 7. Sistema de conversión descendente de energía adaptado a una celda solar fotovoltaica de Si-c, en el que se esquematiza la transformación de un fotón de luz visible (Vis) en dos fotones en el infrarrojo (IR).

4.- Epílogo

La luz es una de las manifestaciones de la energía. Su transformación y aprovechamiento requiere de materiales con propiedades que responden a necesidades específicas. Aplicaciones relevantes que involucran la transformación de luz en luz requieren de materiales luminiscentes en los que la luz en primera instancia es absorbida y luego devuelta al medio, pero ya con características particulares. La iluminación artificial a base de un LED azul y un material luminiscente que es capaz de transformar la luz producida por el LED en luz verde y roja ha dado lugar a una revolución en la forma en que se produce luz para consumo humano. Lo trascendental de este hecho está en el ahorro de energía y la consecuente disminución de la emisión de gases que provocan el calentamiento

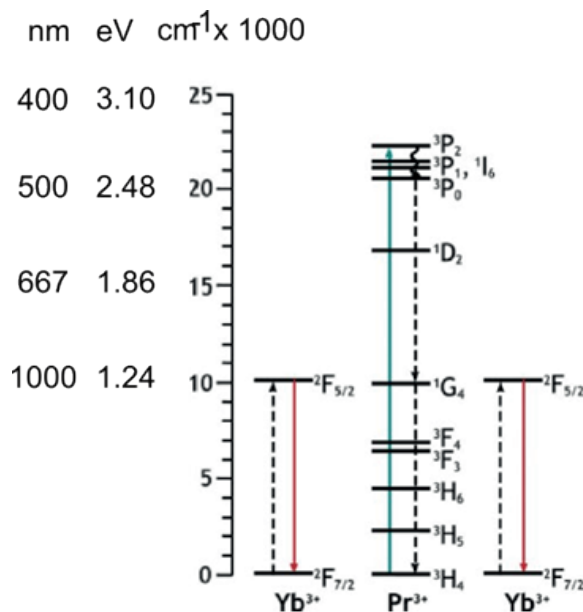


Fig. 8. La pareja de iones lantanoides trivalentes Pr e Yb, en principio permite la realización práctica de la conversión descendente de fotones. En este caso la flecha vertical que apunta hacia arriba en el diagrama de energía del Pr^{3+} equivale a la luz (de alta energía) absorbida. El Pr^{3+} para regresar a su estado de mínima energía, y en presencia de dos Yb^{3+} , se relaja en dos pasos (flechas quebradas que apuntan hacia abajo).

Los dos pasos descendentes dan lugar a la transferencia de energía hacia los Yb^{3+} (flechas quebradas que apuntan hacia arriba) de donde finalmente dos fotones infrarrojos son emitidos (flechas sólidas que apuntan hacia abajo). Los valores en el eje vertical en eV y cm^{-1} corresponden a energía. También se presentan algunos valores representativos de la longitud de onda como referencia (escala no lineal).

global, gracias a la alta eficiencia en que la luz se produce de esta manera. Una posibilidad en ciernes es el aumento de la eficiencia de las celdas solares fotovoltaicas de Si-c a través de materiales luminiscentes que sean capaces de duplicar la intensidad luminosa de la luz en la

región espectral donde la transformación de energía solar en eléctrica es más eficiente. Este proceso se basa en la conversión descendente de fotones en la que un fotón de alta energía es dividido en dos que poseen la mitad de energía respecto del original.

Referencias

[1] INEGI, Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares ENCEVI, [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>. [Último acceso: 2024 mayo 29].

[2] SENER, Balance general energía, 27 noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>. [Último acceso: 29 mayo 2024].

[3] A. Jäger-Waldau, PV Status report 2019, publications Office of the European Union, pp. 7-94, 2019.

[4] B. M. van der Ende, L. Aarts, A. Meijerink, Near-infrared quantum cutting for photovoltaics, *Advanced Materials*, vol. 21, n° 30, pp. 3073-3077, 2009.

[5] B. Richards, Luminescent layers for enhanced silicon solar cell performance: Down-conversion, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, n° 9, pp. 1189-1207, 2006.

[6] C. Strümpel, M. McCann, G. Beaucarne, V. Arkhipov, A. Slaoui, V. Švrček, C. del Cañizo, I. Tobias, Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency—An overview of available materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, n° 4, pp. 238-249, 2007.

[7] T. Trupke, M. A. Green y P. Würfel, Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons, *Journal of Applied Physics*, vol. 92, pp. 1668-1674, 2002.