

HACIA EL 50% DE EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA EN CELDAS SOLARES

Autores principales: Luis M. Hernández García, Julio C. Rimada Herrera, Carlos I. Cabrera Perdomo y Maykel Courel Piedrahita

Colaboradores: James P. Connolly y David A. Contreras-Solorio

Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE) y la Facultad de Física, Universidad de La Habana (UH)

Autor para la correspondencia: Dr. Luis M. Hernández García, Facultad de Física - Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de La Habana. San Lázaro y L, Vedado, Plaza de la Revolución, La Habana 10400.

Correo electrónico: luisman@fisica.uh.cu

Dr. Luis M. Hernández García (30%). El aporte del Dr. Luis Hernández consistió en la dirección científica de la investigación, que incluyó la propuesta de las nuevas ideas, la discusión y concreción de los resultados así como la escritura de los artículos científicos.

Dr. Julio C. Rimada Herrera (30%). El Dr. Julio C. Rimada participó en la discusión de las nuevas propuestas. Su participación fue decisiva para la obtención de los resultados al elaborar los programas de cálculo. Igualmente participó en la elaboración de los artículos científicos.

MSc. Carlos I. Cabrera Perdomo (20%). El MSc. Carlos I. Cabrera Perdomo realizó todos los cálculos en el trabajo de las celdas solares tensionadas GaAsP/InGaAs/GaAs, al mismo tiempo participó activamente en la discusión científica de los resultados.

MSc. Maikel Courel Piedrahita (20%). El MSc. Maikel Courel Piedrahita realizó todos los cálculos en el trabajo de las celdas solares con múltiples pozos cuánticos y superredes GaAs/GaInNAs, al mismo tiempo participó activamente en la discusión científica de los resultados.

RESUMEN

El resultado que se someta a consideración consiste en la formulación de una nueva celda solar en base a múltiples pozos cuánticos y superredes utilizando como material el GaAs/GaInNAs que logra la mayor eficiencia de conversión para una celda solar de una sola unión. Por primera vez, nosotros estudiamos la viabilidad de celdas solares en base a superredes y mostramos la superioridad sobre las basadas en múltiples pozos cuánticos.

Igualmente se estudió una celda solar de GaAsP/InGaAs/GaAs con múltiples pozos cuánticos y balance de tensiones que permitió optimizar la estructura fotovoltaica para alcanzar máxima eficiencia de conversión.

Basados en estos estudios propusimos una celda solar tipo "tándem" donde la celda intermedia sería de GaAsP/InGaAs/GaAs y la de base de GaAs/GaInNAs. Esta estrategia tiene la gran ventaja que los ajustes de las corrientes se realizan por la profundidad, ancho y número de los pozos cuánticos; de manera tal que existen un mayor posibilidad para ajustar la tecnología. Después de publicarse nuestro trabajo en *Applied Physics Letters* esta estructura fue construida alcanzando la celda tándem el récord absoluto de eficiencia de conversión.

COMUNICACIÓN CORTA

Introducción

La introducción de nanoestructuras, como los pozos cuánticos, en las celdas solares ha sido motivo de investigaciones tanto en el campo teórico como en el experimental debido a su potencial para obtener eficiencias de conversión mayores a la celda tradicional de homounión [1]. La incorporación de pozos cuánticos permite incrementar la absorción de fotones, pero contribuye al mismo tiempo a un aumento de la probabilidad de recombinación de los portadores. Es decir, por una parte se incrementa la corriente generada por la luz o fotocorriente, aspecto beneficioso, pero contrariamente disminuye el voltaje a circuito abierto, algo perjudicial. De ahí que varios trabajos han estado encaminados a optimizar la eficiencia de estos novedosos dispositivos.

Las celdas de GaAs son las que presentan el récord absoluto de eficiencia de conversión en dispositivos de una sola unión, por lo tanto una propuesta para superar el récord de eficiencia, es mediante la inclusión de nanoestructuras dentro de una celda solar de GaAs como material volumétrico. Los materiales usados para la formación de los pozos cuántico son diversos y deben cumplir con la condición de no sólo tener una menor brecha energética sino que tengan también un perfecto acople reticular. Sin embargo la condición de la compatibilidad reticular con el GaAs es difícil de obtener en la práctica con los materiales existentes, por lo que otras soluciones pueden ser aplicadas para estos casos.

Estudios recientes del compuesto InGaAs han mostrado que al incorporar una concentración de indio igual a 2.85 veces la de nitrógeno, se logra una disminución del ancho de la banda prohibida, manteniendo la constante de red idéntica a la del GaAs [2]. Esta propiedad lo convierte en un compuesto muy atractivo para ser empleado como pozo cuántico en celdas solares de GaAs con confinamiento cuántico.

Nuestra obra presenta por primera vez un estudio teórico del comportamiento y viabilidad de las celdas solares con múltiples pozos cuánticos (MQWSC, siglas en inglés) y superredes (SLSC) de GaAs/GaInAs. Nuestros resultados demuestran que es posible alcanzar eficiencias de conversión nunca antes obtenidas para celdas solares de una sola unión.

Otra vía para emplear GaAs como material volumétrico es crecer pozos cuánticos tensionados donde las tensiones compresivas a las cuales se encuentra sometido el material de pozo cuántico son balanceadas mediante el uso de un tercer material usado para las barreras entre los pozos, de manera que se pueden obtener estructuras libres de defectos en las interfaces [3]. De esta manera, sin llegar a cumplir la condición del perfecto acople reticular, es posible obtener buenos dispositivos. Para ello se modelaron pozos cuánticos de InGaAs con barreras de GaAsP en la región intrínseca de una celda p-i-n de GaAs. En nuestros trabajos se optimizaron este tipo de celdas, estudiándose su comportamiento.

II. MQWSC

La celda solar con pozos cuánticos no es más que una estructura p-i-n en la que se introducen pozos cuánticos idénticos e independientes en la región intrínseca fabricados con un material de menor ancho de banda prohibida y espesor nanométrico. El comportamiento de la densidad de corriente en función del voltaje para una MQWSC, fue encontrada por nosotros [4, 5] y se expresa como:

$$J = J_0 \left(1 + r_R \beta \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] + \alpha r_{NR} \left[\exp \left(\frac{qV}{2kT} \right) - 1 \right] - J_{PH} \quad (1)$$

Donde r_R y r_{NR} representan las razones de incremento de la recombinación radiativa, y no radiativa, respectivamente provocadas por la inclusión de los pozos cuánticos, α y β son parámetros definidos que se encuentran en la literatura. La fotocorriente J_{PH} puede ser determinada a partir de la integración de la eficiencia cuántica interna $QE_{total}(\lambda)$ mediante la expresión:

$$J_{PH} = q \int F(\lambda) QE_{TOTAL}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Donde $F(\lambda)$ es el número de fotones por longitud de onda correspondientes al espectro AM1.5, λ_1 y λ_2 son los límites de integración determinados por el rango del espectro de luminoso que absorbe la celda. La eficiencia cuántica interna total de la celda puede ser determinada una vez conocidas las contribuciones de cada región a través la expresión:

$$QE_{total}(\lambda) = QE_n(\lambda) + QE_p(\lambda) + QE_{int}(\lambda) \quad (3)$$

De esta forma, mediante la ec. (1) y considerando las ec. (2-3) es posible estudiar el rendimiento de la MQWSC.

III. SLSC

En una MQWSC los pozos cuánticos se encuentran desacoplados, debido a que el campo eléctrico desalinea los niveles energéticos entre los pozos contiguos. Para lograr el acoplamiento entre pozos contiguos en una región donde se encuentra aplicado un campo eléctrico, la región intrínseca en nuestro caso, fue propuesto insertar pozos de anchos variables [6]. Con este proceder fue posible alinear los niveles energéticos de los pozos cuánticos contiguos y obtener una minibanda para el transporte de los portadores fotogenerados tanto en la banda de conducción como de valencia, teniéndose por tanto una SLSC. Desde el punto de vista teórico, las principales ventajas que ofrecen las SLSC frente a las MQWSC, es que al existir una minibanda la absorción de fotones puede ser mejorada, el transporte a través de la superred creada es maximizado al mismo tiempo que los portadores podrán escapar de los pozos de forma más efectiva, disminuyendo por tanto la probabilidad de recombinación electrón-hueco, al encontrarse delocalizados. Nuestro grupo fue el primero que propuso y estudió este tipo de celdas.

Para extender la ec. (1) a que describa el comportamiento de una SLSC, fue necesario encontrar la densidad estados efectivos para electrones, huecos ligeros y huecos pesados en función del ancho de la minibanda. Haciendo uso de la regla de oro de Fermi, considerando la aproximación dipolar de la función de onda envolvente y asumiendo la de banda coseno, se encontró una expresión para determinar el coeficiente de absorción para la transición hueco ligero (hueco pesado)-minibanda de conducción en función de la energía. Por primera vez, estas expresiones fueron reportadas en la literatura [6]. Se demostró que la minibanda, originada por la interacción entre los pozos cuánticos vecinos en una estructura en base a superredes disminuye la recombinación radiativa y no-radiativa en una SLSC. Para alcanzar altos rendimientos es necesario incrementar el ancho de la minibanda en la SLSC y desplazar su absorción a regiones donde la absorción de fotones sea mayor.

IV. MQWSC y SLSC de GaAs/GaInNAs

Para investigar la eficiencia de conversión de MQWSC en base a GaAs/Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}, pequeñas fracciones de Nitrógeno fueron consideradas para modificar la profundidad del pozo cuántico. También, la condición $x = 2.85y$ fue satisfecha tal que existiera un perfecto acoplamiento reticular entre Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y} y el GaAs. Altos valores de eficiencia de conversión se alcanzaron para composiciones de Nitrógeno de hasta el 3%, tal como se muestra en la figura 1. Los máximos valores de eficiencia son obtenidos para una estrecha región alrededor del 1% de N y pozos cuánticos estrechos. Estas composiciones de N corresponden a pozos cuánticos poco profundos, donde la recombinación del par electrón-hueco es muy pequeña. Cuando los pozos cuánticos son más profundos (la concentración de N se incrementa) la recombinación aumenta y la eficiencia de conversión disminuye. La figura 1 también muestra la dependencia de la eficiencia de conversión en función del ancho de los pozos cuánticos. Para 1% de composición de N, la eficiencia varía poco con el ancho del pozo cuántico. Este resultado puede explicarse ya que existe un compromiso entre el ancho del pozo cuántico y su número. Para pozos cuánticos más anchos la absorción de fotones es mayor pero el número de pozos cuánticos insertados en una región intrínseca de ancho constante, es menor. Por otra parte, pozos cuánticos más estrechos absorben menos fotones pero es posible insertar un mayor número de ellos. Para cualquier concentración de N mayor 1% la eficiencia cae al incrementar la profundidad de los pozos y con ello la probabilidad de recombinación.

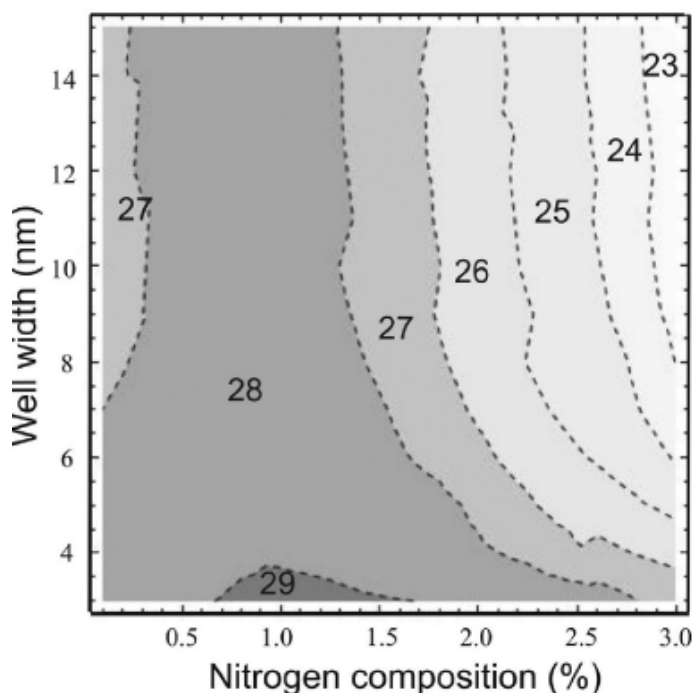


Figura 1: Gráfica de contorno de la eficiencia de conversión de una MQWSC en función del ancho del pozo y de la composición de N.

Para investigar el rendimiento de la SLSC en base a GaAs/GaInNAs se optimizó un arreglo de 10 pozos cuánticos con espesor variable de manera de obtener las condiciones de resonancia entre pozos vecinos. Estos clústeres están compuestos por pozos cuánticos de 1% de composición de N y barreras de 1 nm de ancho. Una serie de clústeres fueron insertados en la región intrínseca, independientes unos de otros, de forma tal que no exista acoplamiento entre clústeres vecinos. Nuestros resultados resaltan que es posible alcanzar eficiencias nunca antes obtenidas para celdas solares de homounión y que el incremento de la eficiencia en la SLSC sobrepasa en un 3% a la MQWSC. Obtuvimos que mientras el ancho y el número de clústeres incrementan, la eficiencia de conversión también aumenta. Por esta razón, es recomendable insertar clústeres de pequeña longitud en la región intrínseca, manteniendo pozos anchos, de manera de acrecentar la eficiencia.

Podría pensarse que es posible incrementar la eficiencia de conversión insertando más clústeres en la región intrínseca pero esto no es cierto, porque mientras más clústeres son insertados el proceso de recombinación aumenta también, siendo necesario obtener un balance entre la generación y la recombinación. Además, con la incorporación de más clústeres en la región intrínseca, menor número de fotones arriban a los últimos clústeres y su función pierde sentido. Por ello, la incorporación indefinida de clústeres no significa que la fotocorriente se incremente, sino que aparece una saturación y el voltaje a circuito abierto disminuye producto del aumento de la recombinación. Este comportamiento es mostrado en la figura 2 donde se muestra la eficiencia de conversión en función de la concentración de la radiación solar para una SLSC de GaAs/GaInNAs sin considerar la resistencia en serie. Nótese los altos valores de eficiencia de conversión que se obtienen a 1000 soles. Nosotros fuimos los primeros en proponer este tipo de celdas [7, 8, 9].

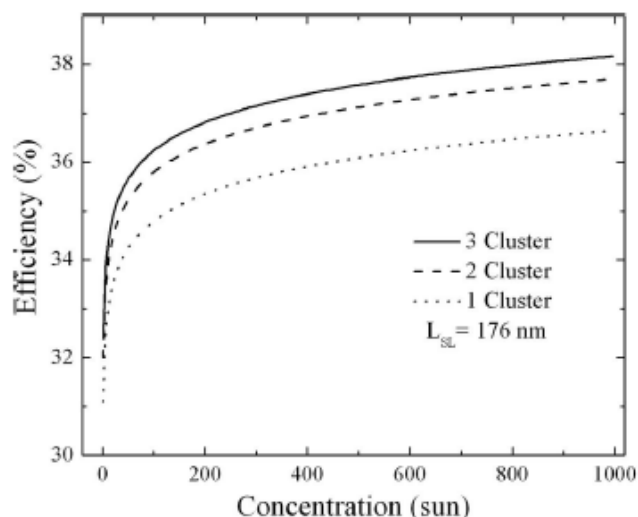


Figura 2. Eficiencia de una SLSC de GaAs/GaInNAs como función de la concentración solar empleando diferente número de clústeres de 147 nm de ancho.

V. MQWSC tensionadas de GaAs/InGaAs/GaAsP

Las celdas solares de GaAs con múltiples pozos cuánticos de celdas solares y tensiones balanceadas fueron propuestas para incrementar la eficiencia de conversión de celdas solares de alto rendimiento, sin la necesidad de encontrar materiales que posean un perfecto acople reticular con el GaAs. La fotocorriente se incrementa cuando pozos cuánticos tensionados de InGaAs son agregados en una celda p-i-n GaAs. Sin embargo, el desacople reticular entre InGaAs y GaAs impide la incorporación de varios pozos cuánticos al ocurrir la relajación producto de las tensiones compresivas. Las tensiones compresivas de los pozos cuánticos de InGaAs pueden ser compensadas con las tensiones expansivas de las barreras de GaAsP, y de esta forma se ha demostrado experimentalmente que hasta 65 pozos cuánticos pueden incorporarse en la región intrínseca y obtener una estructura total libre de defectos por la relajación. Nosotros diseñamos celdas solares de GaAsP/InGaAs/GaAs con elevados rendimientos [10, 11, 12]. Los niveles de energía de electrones y huecos en los pozos cuánticos fueron computados considerando el efecto de las tensiones y el campo eléctrico. Se estudió el efecto de las tensiones biaxiales (compresiva y expansiva) en la estructura de banda, obteniéndose la relación de dispersión $E(k)$ para electrones y huecos en la banda de conducción y de valencia. Con el objetivo de evaluar la eficiencia cuántica interna y la fotocorriente se calculó el coeficiente de absorción para pozos y barreras teniendo en cuenta el efecto de las tensiones. Una gráfica de contorno muestra la dependencia de la eficiencia de conversión en función de la composición de In (los pozos cuánticos) y P (barreras).

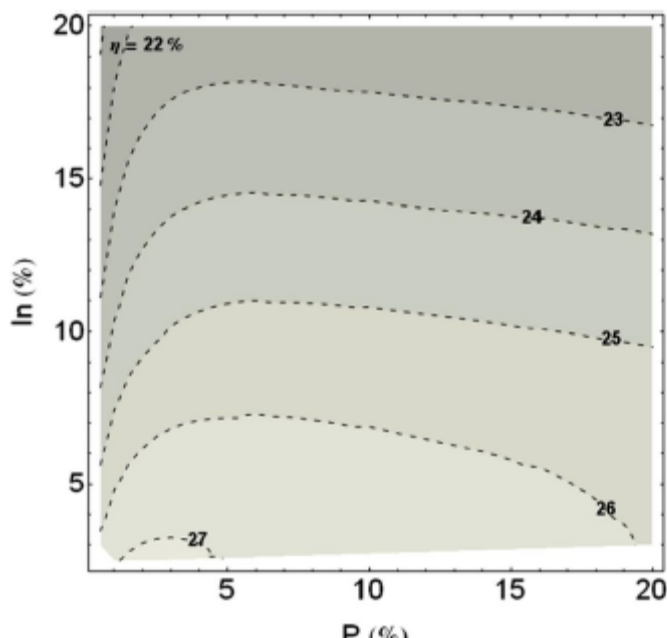


Figura 3. Gráfica de contorno de eficiencia de conversión en función de la composición de In y P .

VI. Conclusiones

Nosotros hemos reportado un nuevo tipo de dispositivo fotovoltaico basado en múltiples pozos cuánticos o superredes de GaAs/GaInNAs insertados en la región intrínseca de una celda solar de GaAs. Un estudio de la eficiencia de conversión como función de la composición de N, del ancho de los pozos cuánticos, del ancho de los clústeres y el número de clústeres fue elaborado, que permite determinar el rango de estos parámetros donde se alcanzan eficiencias elevadas para una MQWSC o SLSC. Los pronósticos de eficiencia de conversión de estos dispositivos nunca han sido alcanzados para una celda solar de homounión.

Para las MQWSC con tensiones balanceadas hemos desarrollado un modelo que considera los efectos de las tensiones y el campo eléctrico en la absorción de los fotones en la región intrínseca, permitiendo optimizar el rendimiento de estas celdas.

Una celda solar “tandem” en donde se utilicen MQWSC o SLSC de GaAs/GaInNAs como celda base y MQWSC de GaAs/InGaAs/GaAsP como celda intermedia unión abre las perspectivas de obtener por primera vez celdas solares que sobrepasen el 50% de eficiencia de conversión.

Referencias

- [1] K. W. J. Barnham and C. Duggan, J. Appl. Phys. **67**, 3490 (1990)

- [2] S. R. Kurtz, A. A. Allerman, E. D. Jones, J. M. Gee, J. J. Banas, and B. E. Hammons, Appl. Phys Lett. **74**(5), 729 (1999)
- [3] Ekins-Daukes, N. J.; Barnham, K. W. J.; Connolly, J. P.; Roberts, J. S.; Clark, J. C.; Hill, G.; Mazzer, M. Appl. Phys. Lett., **75**, 4195 (1999)
- [4] J.C. Rimada, L. Hernández, Microelectronics Journal, **32**(9), 719-723 (2001)
- [5] CI Cabrera, JC Rimada, M.Courel, L Hernandez, J.P. Connolly, A. Enciso, D.A. Contreras-Solorio, Natural Resources, **4**, 235-245, (2013), doi: 10.4236/nr.2013.
- [6] M. Courel, J. C. Rimada, L. Hernández. AlGaAs/GaAs superlattice solar cells. Prog. Photovolt: Res. Appl (2012). doi: 10.1002/pip.1178.
- [7] M.Courel, J.C.Rimada, L.Hernández, Revista Cubana de Física, **28-1 E**, 71-75 (2011).
- [8] M.Courel, J.C.Rimada, L.Hernández, Appl. Phys. Lett. **100**(7), 073508-073508-4 (2012)
- [9] M.Courel, J.C.Rimada, L.Hernández,. J. Appl. Phys. **112**(5), 054511-054511-7 (2012).
- [10] CI Cabrera, JC Rimada, L Hernández, D.A. Contreras-Solorio, Superficies y Vacío **25**(4), 234-239 (2012).
- [11] C.I. Cabrera, J.C.Rimada, L.Hernández, Revista Cubana de Física, **28-1 E**, 66-70, (2011).
- [12] CI Cabrera, JC Rimada, JP Connolly, L Hernández, Journal of Applied Physics **113**(2), 024512-024512-7, (2013).

