

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 674 879**

51 Int. Cl.:

**C01B 19/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.08.2011 PCT/US2011/049755**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.04.2012 WO12044428**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.08.2011 E 11758005 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.03.2018 EP 2621854**

54 Título: **Nanomaterial que tiene características de absorción infrarroja ajustable y método asociado de fabricación**

30 Prioridad:

**08.02.2011 US 201113022705  
01.10.2010 US 388750 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**04.07.2018**

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)  
100 North Riverside Plaza  
Chicago, IL 60606-1596, US**

72 Inventor/es:

**EULISS, LARKEN ELIZABETH;  
GROSS, ADAM FRANKLIN;  
DAVIS, KEITH JOHN y  
ABUEG, NICOLE L.**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

ES 2 674 879 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Nanomaterial que tiene características de absorción infrarroja ajustable y método asociado de fabricación

Campo técnico

5 Las realizaciones de la presente divulgación se refieren en general a nanomateriales y, más particularmente, a nanomateriales que tienen características de absorción de infrarrojos (IR) ajustables así como a métodos asociados para la fabricación de tales nanomateriales.

Antecedentes

10 En una serie de aplicaciones, es deseable poder detectar señales IR. Como tal, se han desarrollado una variedad de sensores IR y recubrimientos para recoger y detectar radiación IR. Típicamente, estos sensores IR o recubrimientos están diseñados para detectar radiación IR dentro de un ancho de banda específico, por ejemplo, dentro de todo o una parte del ancho de banda infrarrojo cercano (NIR) definido como 0.75-1.4  $\mu\text{m}$  en longitud de onda, el infrarrojo de longitud de onda corta (SWIR) con ancho de banda definido como 1.4-3  $\mu\text{m}$  en longitud de onda, el infrarrojo de ancho de banda de longitud de onda media (MWIR) definido como 3-5  $\mu\text{m}$  en longitud de onda, o el infrarrojo de ancho de banda de onda larga (LWIR) definido como 5-15  $\mu\text{m}$  en longitud de onda.

15 Algunos detectores de IR están formados por materiales semiconductores a granel. Los materiales semiconductores a granel absorben la radiación infrarroja en su brecha de banda. Es deseable en al menos algunas aplicaciones poder sintonizar el detector IR para detectar un ancho de banda particular de radiación IR. Sin embargo, el ancho de banda de la radiación IR que es absorbida por los materiales semiconductores a granel solo puede ajustarse cambiando la composición de los materiales semiconductores. Como tales, los detectores IR que están formados a partir de  
20 materiales semiconductores a granel se han utilizado típicamente para detectar los anchos de banda NIR y SWIR con pocos detectores IR formados por materiales semiconductores a granel construidos para detectar radiación IR en los anchos de banda MWIR y/o LWIR. Sin embargo, los detectores de IR formados de un material  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  a granel se han utilizado para detectar la radiación IR a lo largo de las regiones MWIR y LWIR como resultado de su intervalo de banda relativamente bajo. Desafortunadamente, el  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  tiene un nivel de toxicidad relativamente alto y puede  
25 ser bastante caro, lo que lo hace inadecuado para una serie de aplicaciones y, en cualquier caso, plantea al menos algunos desafíos durante su fabricación y escalabilidad.

30 Como una alternativa al uso de materiales semiconductores a granel para detectores de IR, se han desarrollado nanomateriales cuánticos, tales como puntos cuánticos, barras cuánticas y nanotetrápodos, que también son capaces de absorber la radiación IR. Como tal, los detectores IR pueden incorporar nanomateriales cuánticos, como puntos cuánticos, barras cuánticas y nanotetrápodos, que se han desarrollado que también son capaces de absorber la radiación IR. Como tales, los detectores de IR pueden incorporar nanomateriales cuánticos, es decir, puntos, barras cuánticas o nanotetrápodos, o estos materiales pueden incorporarse en pinturas u otros recubrimientos de manera que las pinturas u otros recubrimientos resultantes sean sensibles y capaces de absorber la radiación IR incidente. Los puntos cuánticos, barras cuánticas y nanotetrápodos tienen una brecha de banda que puede ajustarse al alterar  
35 el tamaño y la morfología de los puntos cuánticos, barras cuánticas y nanotetrápodos para alterar de manera correspondiente la región dentro del espectro IR a la cual los nanomateriales cuánticos son sensibles. Sin embargo, gran parte del desarrollo anterior de nanomateriales como puntos cuánticos, barras cuánticas y nanotetrápodos que exhiben confinamiento cuántico se ha centrado en lograr un rendimiento cuántico relativamente alto (QY) en donde el nanomaterial absorbe y reemite eficientemente a través de la brecha de banda ajustable con el sistema de  
40 nanomateriales. Por lo tanto, los puntos cuánticos, las barras cuánticas y los nanotetrápodos están generalmente configurados para absorber la luz visible, así como la radiación IR en las regiones NIR y SWIR y, en algunos casos, una parte de la región MWIR, pero generalmente no han sido capaces de absorber la porción de longitud de onda más larga de la región MWIR o la región LWIR de radiación IR.

45 Salavati-Niasari M. et al.: "Simple routes to synthesis and characterization of nanosized tin telluride compounds", Applied Surface Science, Elsevier, Amsterdam, NL, vol. 257, no. 3, 24 de julio de 2010, páginas 781-785, describe la síntesis de SnTe de tamaño nanométrico, en la que se agrega gota a gota una solución acuosa mixta de  $\text{SnCl}_2$  y  $\text{TeCl}_4$  a una solución de  $\text{KBH}_4$  bajo agitación a temperatura ambiente.

Como tal, puede ser deseable proporcionar técnicas mejoradas para detectar radiación IR que incluyen, por ejemplo, técnicas mejoradas para detectar radiación IR en toda la región MWIR y en la región LWIR.

50 Breve resumen

Se proporciona un método de fabricación de nanomaterial que se puede sintonizar para absorber radiación IR en regiones seleccionadas, tal como en toda la región MWIR y en la región LWIR, de acuerdo con una realización. Se proporciona un nanomaterial cuántico que tiene un margen de banda que puede ajustarse para permitir que el

nanomaterial cuántico absorba la radiación IR en regiones seleccionadas que incluyen toda la región MWIR y en la región LWIR de acuerdo con otra realización.

5 Un nanomaterial cuántico de una realización incluye al menos un nanocrystal de telurio de plomo y estaño ( $Pb_xSn_{1-x}Te$ ) en donde  $x$  es un valor entre 0.1 y 0.6. El nanocrystal  $Pb_xSn_{1-x}Te$  de esta realización tiene una dimensión de sección transversal de al menos 7.5 nm. El nanocrystal  $Pb_xSn_{1-x}Te$  también tiene una brecha de banda de entre 0 eV y 0.35 eV, que depende, al menos parcialmente, de las dimensiones de la sección transversal del nanocrystal  $Pb_xSn_{1-x}Te$  y/o del valor de  $x$ . El nanocrystal  $Pb_xSn_{1-x}Te$  también tiene una absorción pico para señales que tienen una longitud de onda de al menos 3.5  $\mu m$ . En una realización, el nanocrystal  $Pb_xSn_{1-x}Te$  tiene una absorción pico para señales que tienen una longitud de onda de al menos 4.4  $\mu m$  y, en una realización adicional, para señales que tienen una longitud de onda de al menos 8  $\mu m$ .

15 Se proporciona un nanomaterial de telurio de estaño (SnTe) mediante el presente método de acuerdo con otra realización. El nanomaterial de telurio de estaño (SnTe) incluye al menos un nanocrystal de telurio de estaño (SnTe) que tiene una dimensión de sección transversal de entre 15 nm y 50 nm. El nanocrystal de SnTe de esta realización tiene una brecha de banda entre 0 eV y 0.35 eV, que depende, al menos parcialmente, de las dimensiones de la sección transversal del nanocrystal de SnTe. El nanocrystal de SnTe de esta realización también tiene una absorción pico para señales que tienen una longitud de onda de al menos 3.5  $\mu m$ . En una realización, el nanocrystal de SnTe tiene una absorción pico para señales que tienen una longitud de onda de al menos 4.2  $\mu m$  y, en una realización adicional, para señales que tienen una longitud de onda de al menos 8  $\mu m$ .

20 De acuerdo con otra realización, un método de fabricación de un nanomaterial de telurio de estaño (SnTe) comprende mezclar una solución precursora de estaño (Sn) y una solución de telurio (Te) para formar una solución. La solución se mantiene luego a una temperatura elevada durante un período de tiempo. De acuerdo con esta realización, cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te se inyectan repetidamente en la solución en diferentes momentos después de la mezcla inicial de la solución precursora de Sn y la solución de Te. Además, la solución se mantiene a una temperatura elevada durante un período de tiempo después de la inyección posterior de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te en la solución antes de la inyección posterior de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te. La temperatura elevada es una temperatura mayor que la ambiental o la temperatura ambiente y las inyecciones se producen en incrementos de tiempo entre 5 y 30 minutos.

30 En una realización, la solución se enfría a una temperatura ambiente después de una inyección final de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te. En esta realización, la inyección final puede producirse al menos 30 minutos después de la mezcla inicial de la solución precursora de Sn y la solución de Te. En una realización, por ejemplo, la inyección final de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te ocurre al menos 90 minutos después de la mezcla inicial de la solución precursora de Sn y la solución de Te. Al inyectar la solución precursora de Sn y la solución de Te a lo largo del tiempo, se puede cultivar un nanomaterial más grande para permitir que las características de absorción del nanomaterial se sintonicen para absorber longitudes de onda IR más largas.

40 La inyección de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te también incluye, en una realización de ejemplo, inyectar una solución de plomo (Pb) junto con las cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te en al menos un punto en el tiempo. En una realización, por ejemplo, la mezcla inicial de la solución precursora de Sn y la solución de Te incluye mezclar la solución precursora de Sn y la solución de Te junto con una solución de Pb. En esta realización, la inyección de cantidades adicionales de solución precursora de Sn y la solución de Te también puede incluir inyectar las cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te junto con la solución de Pb. Al incorporar Pb en los nanomateriales, el ancho de banda que el nanomaterial resultante está configurado para absorber también puede ajustarse para detectar longitudes de onda de radiación IR más largas.

50 El método de una realización también puede mantener la solución a una temperatura elevada durante un tiempo de permanencia tal como un tiempo de permanencia de al menos 15 minutos, después de una inyección final de las cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te. Con respecto al mantenimiento de la mezcla a una temperatura elevada, la mezcla puede mantenerse de acuerdo con una realización a una temperatura de al menos 140°C durante y después de la inyección de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te. La temperatura elevada y la incorporación de un tiempo de permanencia también pueden facilitar el ajuste de las características de absorción del nanomaterial para detectar longitudes de onda de IR más largas.

55 De acuerdo con otra realización, un método para fabricar un nanomaterial de telurio de plomo y estaño ( $Pb_xSn_{1-x}Te$ ) incluye introducir el plomo en un recipiente, por ejemplo introduciendo una solución de cloruro de plomo seco en el recipiente. El método de esta realización también agrega una solución precursora de estaño (Sn) y una solución de telurio (Te) al cable PARR14 dentro del contenedor para formar una solución y luego mantiene la solución a una temperatura elevada durante un período de tiempo antes de enfriar a una temperatura ambiente para formar el nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$ .

5 Mientras se agrega la solución precursora de Sn y la solución de Te de acuerdo con una realización, el plomo se mantiene a la primera temperatura elevada. En esta realización, la solución se puede mantener a una segunda temperatura elevada, inferior a la primera temperatura elevada, durante un período de tiempo después de añadir la solución precursora de Sn y la solución de Te. En una realización, mantener la solución a una temperatura elevada incluye mantener la mezcla a por lo menos 120°C durante el período de tiempo después de añadir la solución precursora de Sn y la solución de Te. En una realización, mantener la solución a una temperatura elevada incluye mantener la solución a una temperatura elevada durante al menos 90 segundos antes de enfriar a la temperatura ambiente para formar el nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$ .

10 De acuerdo con las realizaciones de los nanomateriales cuánticos y el método de fabricación de nanomateriales, los nanomateriales cuánticos que tienen brecha de banda que se pueden ajustar para permitir la detección de longitudes de onda de radiación IR más altas que incluyen, por ejemplo, radiación IR en toda la región MWIR y en la región LWIR previsto. Sin embargo, las características, funciones y ventajas que se han discutido se pueden lograr independientemente en diversas realizaciones de la presente descripción y se pueden combinar en otras realizaciones más, cuyos detalles adicionales se pueden ver con referencia a la siguiente descripción y dibujos.

15 Breve descripción de las varias vistas de los dibujos

Habiendo descrito de este modo las realizaciones de la presente descripción en términos generales, ahora se hará referencia a los dibujos adjuntos, que no están necesariamente dibujados a escala, y en los que:

La Figura 1 es una vista en perspectiva de una superficie que tiene un recubrimiento que incluye nanomateriales cuánticos de acuerdo con una realización de la presente descripción;

20 La Figura 2 es un diagrama de flujo que ilustra las operaciones realizadas de acuerdo con un método de una realización de la presente divulgación;

La Figura 3 es una representación gráfica del espectro de absorción de un nanomaterial de SnTe fabricado con diferentes números de inyecciones repetidas de cantidades adicionales de una solución precursora de Sn y una solución de Te según una realización de la presente divulgación;

25 La Figura 4 es una representación gráfica del espectro de absorción de un nanomaterial de SnTe no dopado y un nanomaterial de SnTe dopado con Pb de acuerdo con una realización de ejemplo de la presente descripción;

La Figura 5 es una representación gráfica del espectro de difracción de rayos X (XRD) de un nanomaterial de SnTe dopado con Pb de acuerdo con una realización de ejemplo de la presente descripción;

30 La Figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra las operaciones realizadas de acuerdo con un método de otra realización de la presente divulgación;

La Figura 7 es una representación gráfica de la absorción del nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  fabricado de acuerdo con un proceso que tiene diferentes tiempos de permanencia de acuerdo con una realización de ejemplo de la presente descripción;

35 La Figura 8 es una representación gráfica del espectro de absorción de un nanomaterial de SnTe en comparación con un nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  que tiene diferentes relaciones de Pb a Sn de acuerdo con una realización de ejemplo de la presente descripción;

La Figura 9 es un diagrama de flujo que ilustra las operaciones realizadas de acuerdo con un método de una realización adicional de la presente descripción;

40 La Figura 10 es una representación gráfica del espectro de absorción de un nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  que tiene diferentes relaciones de Pb a Sn y diferentes tiempos de permanencia de acuerdo con una realización de la presente descripción; y

La Figura 11 es una representación gráfica de un espectro XRD de un nanomaterial de SnTe dopado con Pb de acuerdo con la realización de la Figura 8.

Descripción detallada

45 La presente divulgación se describirá ahora más completamente a continuación con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se muestran algunas, pero no todas las realizaciones. De hecho, estas realizaciones pueden incorporarse de muchas formas diferentes y no deben interpretarse como limitadas a las realizaciones expuestas en este

documento; más bien, estas formas de realización se proporcionan de modo que esta divulgación satisfaga los requisitos legales aplicables. Números similares se refieren a elementos similares en todo el texto.

Se divulgan un nanomaterial cuántico y un proceso de fabricación asociado según las realizaciones de la presente divulgación. Los nanomateriales cuánticos se pueden utilizar para una variedad de propósitos que incluyen la absorción de radiación IR. Como tales, los nanomateriales cuánticos se pueden incluir dentro de un detector, dispositivo u otro sensor óptico para detectar radiación IR o al menos un ancho de banda predefinido del espectro IR. Alternativamente, el nanomaterial cuántico se puede formar en una solución y se puede incorporar en pinturas u otros recubrimientos. A este respecto, la Figura 1 ilustra una superficie 10 y un recubrimiento 12 depositado sobre la superficie. El recubrimiento 12 de esta realización de ejemplo incluye nanomaterial cuántico que responde a un ancho de banda predefinido del espectro IR. Por lo tanto, el recubrimiento 12 puede absorber eficazmente el ancho de banda predefinido del espectro de IR como resultado de la incorporación de los nanomateriales cuánticos en su interior.

El nanomaterial cuántico puede tomar la forma de un punto cuántico. Los puntos cuánticos forman un pozo potencial que confina a los portadores en tres dimensiones y produce estados de energía discretos y cuantificados que se asemejan a los de un átomo. Cambiar el tamaño y la forma de un punto cuántico altera el espaciado de los niveles de energía y, por lo tanto, afecta las interacciones entre el punto cuántico y la radiación incidente. Por ejemplo, una disminución en el tamaño del punto cuántico aumenta el confinamiento cuántico y proporciona un intervalo de banda más pequeño. Los puntos cuánticos se pueden sintetizar utilizando una síntesis de solución escalable. Como parte del proceso de fabricación, una superficie y una cubierta o dopante de otro material pueden recubrirse sobre o sobre el punto cuántico para alterar las propiedades de interacción de la luz y mejorar la estabilidad ambiental. Como los puntos cuánticos son solubles en la solución, los puntos cuánticos pueden procesarse en un recubrimiento 12 que utiliza un proceso de solución de coste relativamente bajo.

De acuerdo con una realización de la presente divulgación, los nanomateriales cuánticos pueden fabricarse de manera que el ancho de banda de la radiación IR a la que responde el nanomaterial cuántico puede ajustarse ventajosamente, tal como anchos de banda en toda la región MWIR y, en una realización, en la región LWIR. En una realización, el nanomaterial cuántico está formado de telururo de estaño (SnTe), mientras que en otra realización, el nanomaterial cuántico está formado por telururo de estaño y plomo ( $Pb_xSn_{1-x}Te$ ) en donde x tiene un valor entre 0.1 y 0.6.

Con respecto a un nanomaterial de SnTe, el nanomaterial de SnTe se puede fabricar como se muestra, por ejemplo, en la Figura 2. A este respecto, una solución precursora de estaño (Sn) y una solución de telurio (Te) pueden mezclarse inicialmente para formar una solución. Véase la operación 20 de la Figura 2. Mientras la solución se mantiene a una temperatura elevada, es decir, a una temperatura superior a la temperatura ambiente o del entorno, se pueden inyectar en la solución cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te en un subsiguiente punto en el tiempo. Véanse las operaciones 22-30 de la Figura 2. Después de un tiempo de espera y enfriamiento a una temperatura ambiente como se muestra en la operación 32, la solución puede procesarse para extraer el nanomaterial de SnTe. Como resultado de la inyección de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te, así como el resultado de la temperatura a la que se mantiene la solución y el momento en donde se mezclan las inyecciones de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y de la solución de Te, el ancho de banda dentro del espectro IR que el nanomaterial de SnTe resultante está configurado para absorberse puede ajustarse incluyendo, por ejemplo, anchos de banda dentro de la región MWIR y en la región LWIR.

Aunque el nanomaterial de SnTe puede formarse de diversas maneras, en la Figura 2 se muestra un método de fabricación del nanomaterial de SnTe de acuerdo con una realización. En esta realización, una solución precursora de Sn y una solución de Te se mezclan en el tiempo 0 y a una primera temperatura elevada predefinida, como 180°C. Véase la operación 20. Una vez que la solución precursora de estaño y la solución de Te se han mezclado, la temperatura de la solución se puede reducir a una segunda temperatura elevada, como a 140°C, y la solución inicial se puede mantener a esta segunda temperatura predefinida durante un primer período de tiempo predeterminado, como 10 minutos. Posteriormente, se puede inyectar una cantidad adicional de la solución precursora de estaño y la solución de Te en la solución inicial. Véase la operación 22. La solución resultante puede mantenerse entonces a la segunda temperatura predeterminada durante un segundo período de tiempo, tal como 20 minutos. Una pluralidad de inyecciones adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te pueden luego introducirse en diferentes puntos en el tiempo para producir nanomaterial de SnTe con un ancho de banda suficientemente amplio, tal como un intervalo de banda entre 0 eV y 0.35 eV. Con referencia a la Figura 2 a modo de ejemplo, 30 minutos después de la mezcla inicial, se puede inyectar en la solución otra cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te. Véase la operación 24. Como se muestra en la Figura 2, esta inyección repetida de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te puede realizarse en diferentes momentos, como a los 45 minutos, 60 minutos y 90 minutos después de la mezcla inicial. Véase la operación 30. En este sentido, se observa que las referencias de tiempo en la Figura 2 y los otros diagramas de flujo son el tiempo transcurrido desde la mezcla inicial. Después de la adición final de la solución precursora de Sn y la solución de Te, la solución se mantiene a la segunda temperatura elevada durante un tiempo de permanencia predefinido, tal como 30 minutos, antes de dejar que la solución se enfríe a temperatura ambiente. Véase la operación 32. La solución resultante puede procesarse adicionalmente para obtener el nanomaterial de SnTe.

En la realización ilustrada, se realizan cinco inyecciones adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te siguiendo la solución inicial de la solución precursora de Sn y la solución de Te. Sin embargo, cualquier cantidad de inyecciones adicionales de la solución precursora de estaño y la solución de Te puede incluir cuatro o menos inyecciones de cantidades adicionales de la solución precursora de estaño y la solución de Te, o seis o más inyecciones de cantidades adicionales de la solución precursora de estaño y la solución de Te. Además, aunque las inyecciones se producen con incrementos de tiempo de 15 y 20 minutos en la realización descrita anteriormente, se pueden establecer otros incrementos, tales como entre 5 y 30 minutos, entre las inyecciones en otras realizaciones. Como se describirá a continuación junto con la Figura 3, la inyección de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te provoca que la longitud de onda a la que el nanomaterial de SnTe resultante tiene su pico de absorción aumente, tal como a través del rango MWIR y en el rango LWIR en algunas realizaciones.

La solución inicial de la solución precursora de Sn y la solución de Te (operación 20) puede estar en la misma proporción que todas las inyecciones posteriores de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te (operaciones 22-30). Sin embargo, en una realización, la solución inicial de la solución precursora de Sn y la solución de Te tiene un volumen mayor que cualquiera de las cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te que se inyectan a continuación en la solución. A este respecto, el método de una realización inyecta la misma cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te en cada uno de los diferentes puntos en el tiempo. Por ejemplo, las cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te inyectadas en las operaciones 22-30 pueden ser entre 40% y 60%, como el 50%, de las cantidades de la solución precursora de SnPARR25 y la solución de Te que fueron mezcladas inicialmente en la operación 20. Sin embargo, otras proporciones de la solución precursora de Sn y la solución de Te pueden utilizarse en otras realizaciones.

Para absorber longitudes de onda más largas dentro del espectro IR, el nanomaterial de SnTe se puede fabricar ventajosamente para tener partículas más grandes que las proporcionadas por procesos convencionales, tales como nanocristales que tienen dimensiones de sección transversal, tales como diámetros, de al menos 15 nm y, en algunas realizaciones, hasta al menos 50 nm. Para hacer crecer nanomateriales de SnTe más grandes, el método de fabricación de acuerdo con una realización utiliza múltiples inyecciones de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te durante un período de tiempo más largo y, en una realización, a una temperatura más alta, tales como se ejemplifica por la realización de la Figura 2, que las técnicas convencionales.

Aunque el método para fabricar el nanomaterial de SnTe se puede realizar de una variedad de maneras diferentes, se describe a continuación una realización de ejemplo del método con fines de ilustración, pero no de limitación. En este método de ejemplo, un solvente, tal como 1-octadeceno (ODE) que tiene una pureza del 90%, se secó al vacío a 140°C durante dos horas y se almacenó en una cabina con guantes llena de argón con bis[bis(trimetilsilil)amino]estaño (II), trioctilfosfina (TOP) que tiene una pureza de al menos 90% y polvo de Te que tiene una pureza de aproximadamente 99.99%. Al 10% en peso, la solución de Te y TOP puede prepararse en una cabina con guantes disolviendo Te elemental en TOP a 200°C durante seis horas. Al utilizar TOP que tiene una pureza de aproximadamente 90% en oposición a una mayor pureza, los puntos cuánticos SnTe resultantes se monodispersaron más que si se hubiera utilizado TOP con una pureza de aproximadamente 99%.

Entonces se puede formar una solución precursora de Sn en una cabina con guantes disolviendo 0.48 mL (1.2 mmol) de bis[bis(trimetilsilil)amino]estaño (II) en 9 mL de ODE seca y 9 mL de oleilamina seca (OLA) que tiene una pureza de aproximadamente 70%. Esta solución se puede dividir luego en 5 jeringas separadas que contienen 6 mL, 3 mL, 3 mL, 3 mL y 3 mL (0.8 mmol de Sn para la jeringa de 6 mL y 0.4 mmol de Sn para la jeringa de 3 mL). Además, se pueden cargar 5 jeringas individuales con 1 mL, 0.5 mL, 0.5 mL, 0.5 mL y 0.5 mL de Te en solución en TOP al 90% (0.73 mmol de Te para la jeringa de 1 mL y 0.37 mmol de Te para la jeringa de 0.5 mL). A continuación, se sellaron pares de jeringas que contienen la solución precursora de Sn y la solución de Te en botellas de Nalgene de 1L para evitar la oxidación y se retiraron de la cabina con guantes. Como tal, un frasco de Nalgene contiene una jeringa de 6 mL de solución precursora de Sn y una jeringa de 1 mL de la solución de Te, mientras que las otras cuatro botellas contienen una jeringa de 3 mL de solución precursora de Sn y una jeringa de 0.5 mL de la solución de Te.

De acuerdo con esta realización, un matraz de tres bocas de 100 mL con una columna de condensador y tabiques en los cuellos laterales se puede unir luego a una línea Schlenk de vacío/gas argón. Luego se pueden colocar 14 mL de una solución de OLA en el matraz y secar al vacío a 100°C durante una hora. El matraz se puede rellenar con argón y luego se puede inyectar la jeringa con 1 mL de la solución de Te. Una vez que la temperatura de reacción se eleva a una primera temperatura elevada, tal como entre aproximadamente 150°C y 180°C, la jeringa que contiene 6 mL de la solución precursora de Sn puede retirarse de la botella de Nalgene e inyectarse en el matraz mientras se agita rápidamente la mezcla dentro del matraz. Se considera que esta inyección inicial en el matraz ocurre en el tiempo 0. Luego, se puede dejar que la temperatura del matraz disminuya a una segunda temperatura elevada, por ejemplo, al dejar que descienda entre 30°C y 40°C después de la inyección de manera que la temperatura de reacción se reduce a aproximadamente 140°C en una realización. Como se muestra en las operaciones 22, 24, 26 y 28 de la Figura 2, las inyecciones posteriores de la solución precursora de Sn de 3 mL y la solución de Te de 0.5 mL pueden realizarse en diferentes puntos en el tiempo después de la inyección inicial, por ejemplo, a los 10 minutos, 30 minutos, 45 minutos y 60 minutos después de la inyección inicial. Como se muestra en la operación 30 en la Figura 2, se puede hacer una inyección adicional a los 90 minutos, sin embargo, otras realizaciones pueden tener solo cuatro inyecciones

adicionales de manera que se puede eliminar la operación 30 de la Figura 2. Después de la inyección final, la solución resultante puede dejarse en reposo durante un tiempo de permanencia, tal como 30 minutos, a la segunda temperatura elevada, tal como 140°C. A continuación, se puede eliminar el calor del matraz, por ejemplo retirando una manta calefactora que estaba calentando previamente el matraz, y se puede dejar enfriar la solución a temperatura ambiente. Véase operación 32.

A partir de ese momento, el nanomaterial de SnTe puede precipitarse. En una realización, se pueden inyectar 3 mL de ácido oleico (OA) en el matraz y luego se pueden añadir al matraz 10 mL de una mezcla de cloroformo/acetona 1:1 seguido de acetona adicional para provocar la precipitación del nanomaterial cuántico. La solución resultante se puede centrifugar para separar los nanocristales de SnTe y el sobrenadante se puede verter con los nanocristales de SnTe que se redisuelven en cloroformo. La precipitación, centrifugación y redisolución de los nanocristales de SnTe se puede realizar una pluralidad de veces, tal como 3 veces, para aumentar la pureza de los nanocristales de SnTe resultantes.

Como se muestra en la Figura 3, el espectro de absorción del nanomaterial de SnTe resultante varía en función de la longitud de onda de la radiación IR incidente. En la realización descrita anteriormente y con cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te inyectadas 10 y 30 minutos después de la mezcla inicial como se muestra en las operaciones 22 y 24 de la Figura 2, la absorción pico del espectro 36 de absorción del nanomaterial de SnTe es aproximadamente 3.7  $\mu\text{m}$  como se muestra en la Figura 3. En este sentido, el aumento en la absorción pico con una inyección adicional está representado por la Figura 3 en la que la absorción pico de 3.1  $\mu\text{m}$  es ocasionada por una inyección única a los 0 minutos (es decir, durante la mezcla inicial) se muestra por el espectro 34 de absorción con respecto a la absorción pico de 3.7  $\mu\text{m}$  para el espectro 36 de absorción que es atribuible a las inyecciones a los 10 y 30 minutos después de la mezcla inicial.

La longitud de onda a la que el nanocristal de SnTe resultante tiene una absorción pico puede aumentarse o desplazarse hacia la derecha en relación con la representación gráfica de la Figura 3 mediante inyecciones adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te en la solución a lo largo del tiempo, tal como a los 45, 60 y 90 minutos después de la mezcla inicial. Véanse las operaciones 26, 28 y 30 de la figura 2. En este caso, el espectro 42 de absorción del nanomaterial de SnTe resultante que se formó con cinco inyecciones adicionales a los 10, 30, 45, 60 y 90 minutos tiene una absorción pico de radiación IR que tiene una longitud de onda de aproximadamente 4.4  $\mu\text{m}$ , mayor que la absorción pico de los espectros 34, 36 y 40 de absorción del nanomaterial de SnTe que se formó con cero, dos y cuatro inyecciones adicionales, respectivamente. Como ilustra este ejemplo, las inyecciones adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te a lo largo del tiempo pueden desplazar adicionalmente la longitud de onda a la que el nanomaterial de SnTe resultante tiene una absorción pico incluso a longitudes de onda mayores, tales como a través de la región MWIR y, en algunas realizaciones, la región LWIR.

Como se indicó anteriormente, el aumento en la longitud de onda a la cual el nanomaterial de SnTe tiene su pico de absorción se basa, al menos en parte, en el crecimiento de nanopartículas de SnTe más grandes. Para permitir que las nanopartículas de SnTe resultantes crezcan, el método de fabricación puede incluir un período de crecimiento, por ejemplo, un período de permanencia, después de la inyección final de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te a una temperatura elevada, tales como la segunda temperatura elevada. A este respecto, el método de la realización de ejemplo descrita anteriormente mantuvo la solución a la segunda temperatura elevada de 140°C durante un tiempo de permanencia de 30 minutos. Sin embargo, el método de otras realizaciones puede tener un tiempo de crecimiento de otras longitudes después de la inyección final de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te. En una realización, el tiempo de crecimiento es superior a 10 minutos, tal como al menos 30 minutos en una realización que ventajosamente conduce a nanomateriales ajustables MWIR desplazados en rojo que tienen un tamaño cristalino mayor. Durante el tiempo de crecimiento, a las nanopartículas de SnTe se les permite una maduración de Oswald en nanopartículas SnTe más grandes. Sin embargo, el tiempo de crecimiento no debe ser tan largo, tal como más de 120 minutos, de modo que se pierde la distribución de tamaño de las nanopartículas de SnTe más grandes.

El espectro de absorción del nanomaterial de SnTe también se puede modificar dopando el nanomaterial de SnTe con plomo (Pb). En este sentido, dopando el nanomaterial de SnTe con Pb también causará que la longitud de onda a la cual el nanomaterial resultante tenga un pico de absorción aumente, tal como a mayores longitudes de onda en toda la región MWIR o en la región LWIR. Para absorber longitudes de onda más largas dentro del espectro IR, el nanomaterial de PbSnTe se puede fabricar ventajosamente para tener partículas más grandes que las proporcionadas por procesos convencionales, tales como nanocristales que tienen dimensiones de sección transversal, tales como diámetros, de al menos 7.5 nm. El nanomaterial de SnTe puede ser dopado con plomo haciendo crecer el nanomaterial de SnTe y luego dopando las nanopartículas resultantes con Pb o dopando el nanomaterial de SnTe con Pb durante el crecimiento del nanomaterial. En una realización en la que primero se cultiva el nanomaterial de SnTe y luego se dopa con Pb después de su síntesis, el nanomaterial de SnTe se puede hacer crecer como se describió anteriormente. Sin embargo, durante el tiempo de permanencia, concurrente o posterior a la inyección final de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te, se puede agregar Pb a la mezcla, por ejemplo inyectando una solución de cloruro de plomo ( $\text{PbCl}_2$ ) en la solución y luego manteniendo la solución a una temperatura elevada, tal como a la segunda temperatura elevada de, por ejemplo, 140°C, durante un período de tiempo, tal como 30 minutos.

En la realización de ejemplo descrita anteriormente, se puede añadir a la solución una solución de 56 mg de  $\text{PbCl}_2$  en OLA que da como resultado una relación en moles 1:4 de precursores de  $\text{Pb}:\text{Sn}$ , manteniéndose la solución a la segunda temperatura elevada de  $140^\circ\text{C}$  por al menos 10 minutos. Manteniendo la solución a una temperatura elevada durante un período de tiempo después de la adición del  $\text{Pb}$ , el  $\text{Pb}$  se reasociará parcialmente en el sistema de material de  $\text{SnTe}$  para desplazar el espectro de absorción a una longitud de onda más larga de forma controlada. A este respecto, la Figura 4 ilustra el espectro 50 de absorción de un material de  $\text{SnTe}$  no dopado sin  $\text{Pb}$  y el espectro 52 de absorción de un material de  $\text{SnTe}$  correspondiente que está dopado con  $\text{Pb}$ . A este respecto, la Figura 4 ilustra el espectro de absorción de un material de  $\text{SnTe}$  no dopado sin  $\text{Pb}$  y un material de  $\text{SnTe}$  correspondiente que está dopado con  $\text{Pb}$ . Como se verá, la absorción pico del nanomaterial de  $\text{SnTe}$  resultante se desplaza de 4.2 micrómetros para el nanomaterial de  $\text{SnTe}$  no dopado sin  $\text{Pb}$  a 4.4 micrómetros para el nanomaterial de  $\text{SnTe}$  que está dopado con  $\text{Pb}$ . Además, el espectro de difracción de rayos X del material de  $\text{SnTe}$  dopado con  $\text{Pb}$  se muestra en la Figura 5. Los picos designados por un asterisco (\*) indican reflexiones que coinciden con un patrón de referencia  $\text{Pb}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{Te}$ , y son indicativos de la incorporación de  $\text{Pb}$  en el punto cuántico  $\text{SnTe}$ , por ejemplo por sustitución parcial. Los picos designados por Q son indicativos de la reflexión del portamuestras de cuarzo.

En una realización alternativa, los nanomateriales de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  pueden sintetizarse a través de una reacción de sustitución parcial in situ durante la síntesis. A este respecto, el  $\text{Pb}$  se puede introducir inicialmente en un recipiente, tal como un matraz, y se puede añadir una solución precursora de  $\text{Sn}$  y una solución de  $\text{Te}$  al  $\text{Pb}$  para formar una solución. Véanse las operaciones 60 y 62 de la Figura 6. La solución resultante puede mantenerse entonces a una temperatura elevada durante un período de tiempo, por ejemplo, un tiempo de permanencia, antes de enfriar la solución a una temperatura ambiente para formar el nanomaterial de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ . Véase operación 64.

En una realización, el OLA que tiene una pureza de aproximadamente 70% puede secarse al vacío a  $140^\circ\text{C}$  durante dos horas y luego almacenarse en una cabina con guantes llena de argón junto con bis[bis(trimetilsilil)amino]estaño (II) superior que tiene una pureza de aproximadamente 90%, cloruro de plomo que tiene una pureza de aproximadamente 99.9% y  $\text{Te}$ . Inicialmente, la solución precursora de  $\text{Sn}$  se puede formar en una cabina con guantes disolviendo 0.16 mL (0.14 mmol) de bis[bis(trimetilsilil)amino]estaño (II) en 6 mL de ODE seca. Esta solución puede cargarse en una jeringa de 20 mL con una aguja de calibre 18. Además, se puede cargar 1 mL de  $\text{Te}$  en una solución en TOP (0.73 mmol) en una jeringa. Ambas jeringas pueden ser selladas en una botella Nalgene de 1L para prevenir la oxidación cuando las jeringas se mueven desde la cabina con guantes.

Un matraz de tres bocas de 100 mL con una columna de condensador y tabiques en los cuellos laterales se puede unir a una línea Schlenk de vacío/gas argón. Se pueden colocar en el matraz 14 mL de la solución compuesta de OLA y 0.05-0.2 mmol de  $\text{PbCl}_2$  y secar a vacío a  $100^\circ\text{C}$  durante una hora, introduciendo así plomo en el matraz como se muestra en la operación 60 de la Figura 6. El matraz puede llenarse de nuevo con argón y la temperatura puede elevarse a una primera temperatura elevada, tal como  $180^\circ\text{C}$ . La jeringa con precursora de  $\text{Sn}$  y la jeringa con precursora de  $\text{Te}$  pueden retirarse luego de la botella Nalgene e inyectarse en el matraz mientras se agita rápidamente el contenido del matraz. La temperatura del matraz se puede reducir luego a una segunda temperatura elevada, tal como  $120^\circ\text{C}$ , después de la inyección de la solución precursora de  $\text{Sn}$  y la solución de  $\text{Te}$ , y la solución se puede mantener a la segunda temperatura elevada durante un período predefinido de tiempo (designado X en la Figura 6). Por ejemplo, la mezcla se puede mantener a la segunda temperatura elevada durante al menos 90 segundos, tal como al menos 11.5 minutos en una realización y al menos 40 minutos en otra realización.

Después de mantener la solución a la segunda temperatura elevada durante un período de tiempo predefinido, la solución se puede dejar enfriar a temperatura ambiente, por ejemplo retirando la manta calefactora que estaba calentando previamente la mezcla. Véase la operación 64. Posteriormente, se pueden inyectar 3 mL de OA seguido de la adición de 10 mL de una mezcla de cloroformo/acetona 1:1 seguida de la adición de acetona adicional para provocar la precipitación de los puntos cuánticos de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ . La solución puede luego centrifugarse para separar los nanocristales de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  y el sobrenadante puede verse con los nanocristales después redisolverse en cloroformo. La precipitación, centrifugación y redisolución de los nanomateriales de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  se puede realizar una pluralidad de veces, tal como tres veces, para aumentar la pureza de los nanocristales resultantes.

Como se indicó anteriormente, la absorbancia de un nanomaterial de  $\text{SnTe}$  puede ajustarse inyectando repetidamente cantidades adicionales de la solución precursora de  $\text{Sn}$  y la solución de  $\text{Te}$  a lo largo del tiempo y mediante el dopaje del nanomaterial de  $\text{SnTe}$  con  $\text{Pb}$ . La absorbancia también puede ajustarse controlando la duración del tiempo de permanencia con una absorbancia incrementada a longitudes de onda mayores atribuibles al mayor crecimiento de partículas asociado con tiempos de permanencia más largos, tales como desde 1 minuto hasta 60 minutos. A este respecto, la figura 7 proporciona una representación gráfica de la absorbancia de varias longitudes de onda dentro del espectro IR de nanomateriales de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  que se fabricaron con tiempos de permanencia de 1.5 minutos, 11.5 minutos y 40 minutos (espectros 70, 72 y 74 de absorbancia, respectivamente). Como se muestra, el pico de excitón del nanomaterial de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  se puede cambiar a longitudes de onda mayores ya que el nanomaterial de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  se fabrica con tiempos de permanencia más largos y se reasocia durante períodos de tiempo más largos. A este respecto, el pico de excitón para el nanomaterial de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  que tenía un tiempo de permanencia de 1.5 minutos es de aproximadamente 4.55 micras, el pico de excitón para el nanomaterial de  $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$  que tenía un tiempo de

permanencia de 11.5 minutos es de aproximadamente 5.4 micras, y el pico de excitón para el nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  que tenía un tiempo de permanencia de 40 minutos es de aproximadamente 5.9 micras.

El pico de excitón también puede reposicionarse mediante el espectro 82 de absorbancia para variar de forma controlable el contenido de Pb en una solución de reacción, tal como a partir de una relación molar de la solución de síntesis de Pb:Sn 1:2 a una molécula de relación de síntesis de Pb:Sn 1:12 o mayor. Como se muestra, por ejemplo en la Figura 8, el espectro 82 de absorbancia para nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  que tiene una relación molar de solución de síntesis Pb:Sn 1:8 tiene un pico de excitón de longitud de onda más corto que el espectro 80 de absorbancia para nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  realizado con una relación molar de solución de síntesis de 1:4 Pb:Sn, por ejemplo, 3.5 micras en comparación con 4.55 micras. Adicionalmente, el pico de excitón de cualquier tipo de nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  tiene un pico de excitón a una longitud de onda mayor que el de un material de SnTe comparable que tiene un espectro 84 de absorbancia con un pico de excitón a 3.15 micrómetros.

Como se describió anteriormente, la longitud de onda a la que se produce la absorción pico puede aumentarse mediante el dopaje de un nanomaterial de SnTe con Pb durante la introducción inicial de la solución precursora de Sn y la solución de Te siguiendo el crecimiento del nanomaterial de SnTe. Sin embargo, incluso pueden fabricarse nanomateriales de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  más grandes introduciendo Pb en una o más instancias a lo largo del proceso de fabricación, tales como concurrentes con una pluralidad de inyecciones de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te, o cada una de ellas, así como, en una realización, junto con la combinación inicial de la solución precursora de estaño y la solución de Te. En algunas realizaciones, una sola inyección adicional de una solución de Pb, la solución precursora de Sn y la solución de Te puede ser suficiente para obtener nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  con una brecha de banda lo suficientemente amplia como para absorber señales IR en la región MWIR y en la región LWIR. En otras realizaciones, sin embargo, el método puede incluir una pluralidad de inyecciones de la solución de Pb, la solución precursora de Sn y la solución de Te en diferentes puntos en el tiempo después del mezclado inicial para obtener nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  con un intervalo de banda suficientemente amplio, tal como un intervalo de banda entre 0 eV y 0.35 eV. De hecho, la pluralidad de inyecciones de la solución de Pb, la solución precursora de Sn y la solución de Te en diferentes momentos en el tiempo de acuerdo con un método de una realización de la presente invención provocan un intercambio catiónico parcial de Sn a Pb, en oposición a un intercambio iónico total, con el intercambio catiónico parcial que conduce a nanomateriales más grandes y, a su vez, a un desplazamiento hacia el extremo rojo de la banda más allá del MWIR. A este respecto, la operación 90 de la Figura 9 ilustra un método en donde la solución precursora de Sn y la solución de Te se mezclan inicialmente junto con una solución de Pb en el tiempo 0 y a una primera temperatura elevada, tal como 180°C. En la realización ilustrada, se mezclan 0.8 mmol de bis[bis(trimetilsilil)amino]estaño (II) y 0.73 mmol de Te y 0.2 mmol de  $PbCl_2$  a una primera temperatura elevada de 180°C. La temperatura de la mezcla puede reducirse luego a una segunda temperatura elevada, tal como 140°C. La solución inicial puede mantenerse a la segunda temperatura elevada durante un período de tiempo predefinido, tal como diez minutos, antes de inyectar cantidades adicionales de la solución precursora de Sn, la solución de Te y la solución de Pb, tal como se muestra en la operación 92 de la Figura 9. Este proceso puede repetirse en una pluralidad de puntos diferentes en el tiempo, tal como a los 20 minutos y 30 minutos después de la mezcla inicial como se muestra en las operaciones 94 y 96, respectivamente. La solución final puede mantenerse entonces a la segunda temperatura elevada durante un tiempo de permanencia predefinido, tal como 15 minutos en la realización ilustrada. Después de esto, la solución se puede enfriar a temperatura ambiente como se muestra en la operación 98 y el nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  se puede precipitar, centrifugar y redissolver de la manera descrita anteriormente para extraer los nanomateriales de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  de una pureza suficiente.

Como se muestra en la Figura 10, se proporciona una representación gráfica del espectro 100 de absorción de un nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  realizado de acuerdo con el proceso anterior de la Figura 9 para tener un pico de excitón de al menos 8 micrómetros, tal como a 8.8 micrómetros. Este espectro 100 de absorción puede compararse con los espectros 102 y 104 de absorción del nanomaterial de  $Pb_xSn_{1-x}Te$  realizado de una manera descrita junto con la Figura 6 con una relación de precursor Pb:Sn de 1:8 con respecto al espectro 102 y una relación de precursor de Pb:Sn de 1:4 con respecto al espectro 104 y tiempos de permanencia de 1.5 minutos y 11.5 minutos, respectivamente, y que tienen picos de excitón correspondientes a 3.5 micras y 5.4 micras, respectivamente.

La figura 11 proporciona los espectros de difracción de rayos X de un nanomaterial de SnTe que ha sido dopado con Pb inyectado en una pluralidad de puntos diferentes en el tiempo, tal como se muestra en la figura 9. En la figura 11, los picos designados con un asterisco (\*) indican reflexiones que coinciden con un patrón de referencia de  $Pb_{0.5}Sn_{0.5}Te$ , y los picos marcados con una Q representan las reflexiones del soporte de muestra de cuarzo. Estos datos de difracción de rayos X son indicativos de la incorporación de Pb en el nanomaterial de SnTe. Adicionalmente, el ensanchamiento de Scherrer del pico de difracción de  $23.2^\circ 2\theta$  da un tamaño de cristalito promedio de 21.4 nm.

Como se describió anteriormente, el borde de la banda del nanomaterial de SnTe resultante puede ajustarse a diversas longitudes de onda dentro del espectro IR, incluyendo toda la región MWIR y, en algunas realizaciones, en la región LWIR como resultado de inyectar repetidamente la materia prima en diversos puntos de tiempo y controlando el tiempo y la temperatura del proceso de fabricación. Como tales, se pueden fabricar nanomateriales de SnTe que son capaces de absorber regiones diferentes o adicionales dentro del espectro IR, facilitando así el desarrollo de sensores IR adicionales, detectores, recubrimientos 12 o similares para diversas aplicaciones.

Muchas modificaciones y otras formas de realización surgirán para un experto en la materia a la que pertenece esta divulgación que tiene el beneficio de las enseñanzas presentadas en las descripciones anteriores y los dibujos asociados. Por lo tanto, debe entenderse que la divulgación no está limitada a las realizaciones específicas descritas y se pretende que otras realizaciones estén destinadas sean incluidas dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

5

**REIVINDICACIONES**

1. Un método de fabricación de un nanomaterial de telururo de estaño (SnTe) que comprende:
  - mezclar una solución precursora de estaño (Sn) y una solución de telurio (Te) para formar una solución;
  - mantener la solución a una temperatura elevada durante un período de tiempo;
- 5 inyectar repetidamente cantidades adicionales de la solución precursora de estaño y la solución de Te en la solución en diferentes puntos en el tiempo; y
  - mantener la solución a una temperatura elevada durante un período de tiempo después de cada inyección de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te en la solución antes de una inyección posterior de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te;
- 10 en donde la temperatura elevada es una temperatura superior a la temperatura ambiente o del entorno y en donde las inyecciones se producen en incrementos de tiempo entre 5 y 30 minutos.
  2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además enfriar la solución a temperatura ambiente después de una inyección final de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te que se produce al menos 30 minutos después de mezclar inicialmente la solución precursora de Sn y la solución de Te.
  - 15 3. Un método de acuerdo con la reivindicación 2, en donde la inyección final de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te ocurre al menos 90 minutos después de mezclar inicialmente la solución precursora de Sn y la solución de Te.
  4. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde la inyección repetida de cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te comprende además inyectar las cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te junto con una solución de plomo (Pb) en al menos uno de los puntos en el tiempo.
  - 20 5. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4 en donde mezclar la solución precursora de Sn y la solución de Te comprende mezclar la solución precursora de Sn y la solución de Te junto con una solución de Pb, y en la que se inyectan repetidamente cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te junto con la solución de Pb en cada uno de los diferentes puntos en el tiempo.
  - 25 6. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-5, en donde mantener la solución a una temperatura elevada durante un período de tiempo después de cada inyección de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te comprende mantener la solución a una temperatura de al menos 140°C durante y después de cada inyección de una cantidad adicional de la solución precursora de Sn y la solución de Te.
  - 30 7. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-6 que comprende además mantener la solución a una temperatura elevada durante un tiempo de permanencia de al menos 15 minutos después de una inyección final de las cantidades adicionales de la solución precursora de Sn y la solución de Te.
  - 35 8. Un nanomaterial de telururo de estaño (SnTe) obtenible por el método de las reivindicaciones 1-7, comprendiendo el nanomaterial de telururo de estaño (SnTe):
    - al menos un nanocristal de telururo de estaño (SnTe) que tiene una dimensión de sección transversal de entre 15 nm y 50 nm, teniendo dicho nanocristal de SnTe un intervalo de banda entre 0 eV y 0.35 eV dependiente, al menos parcialmente, de la dimensión de la sección transversal del nanocristal de SnTe, teniendo también dicho nanocristal de SnTe una absorción pico para señales que tienen una longitud de onda de al menos 3.5  $\mu\text{m}$ .
  - 40 9. El nanomaterial de telururo de estaño (SnTe) de la reivindicación 8, en donde dicho nanocristal de SnTe tiene una absorción pico para señales que tienen una longitud de onda de al menos 4.2  $\mu\text{m}$ .
  10. El nanomaterial de telururo de estaño (SnTe) de la reivindicación 8, en donde dicho nanocristal de SnTe tiene una absorción pico para señales que tienen una longitud de onda de al menos 8  $\mu\text{m}$ .

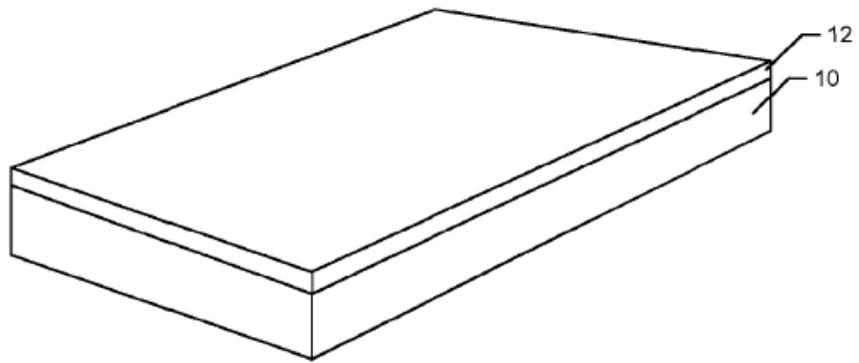
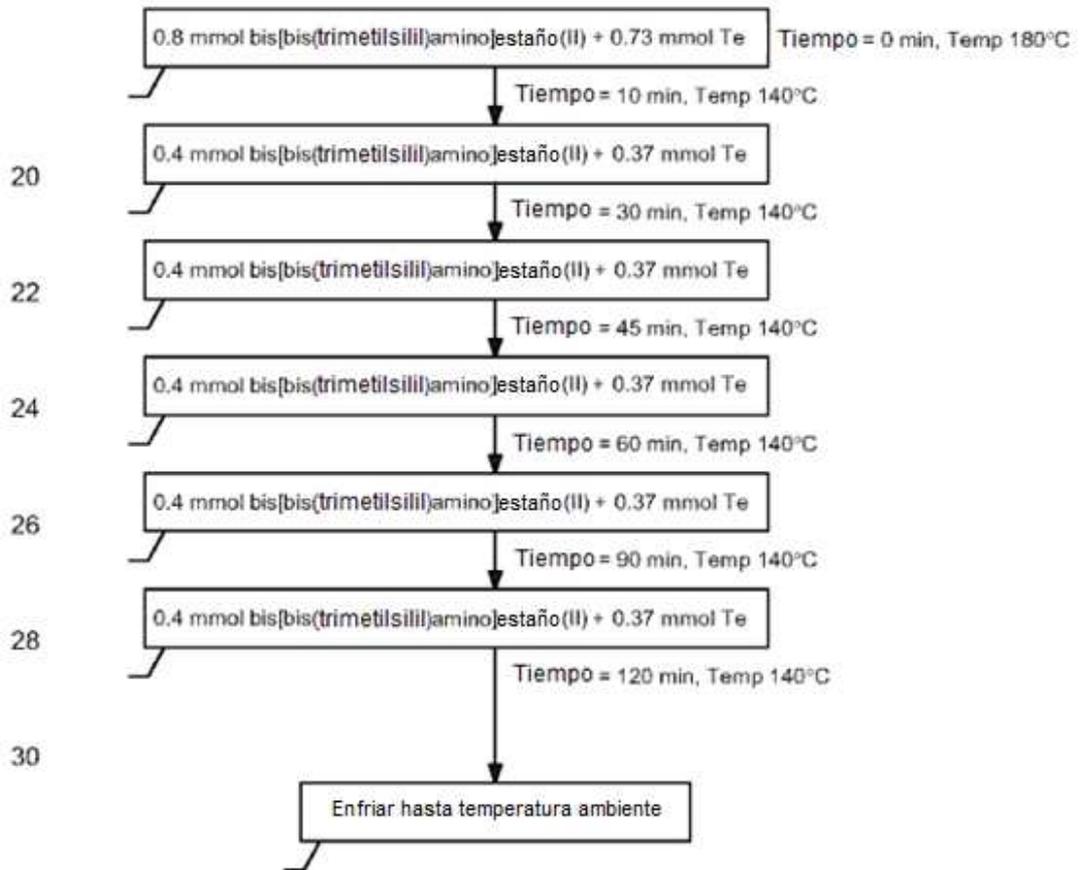


FIG. 1



32

FIG. 2

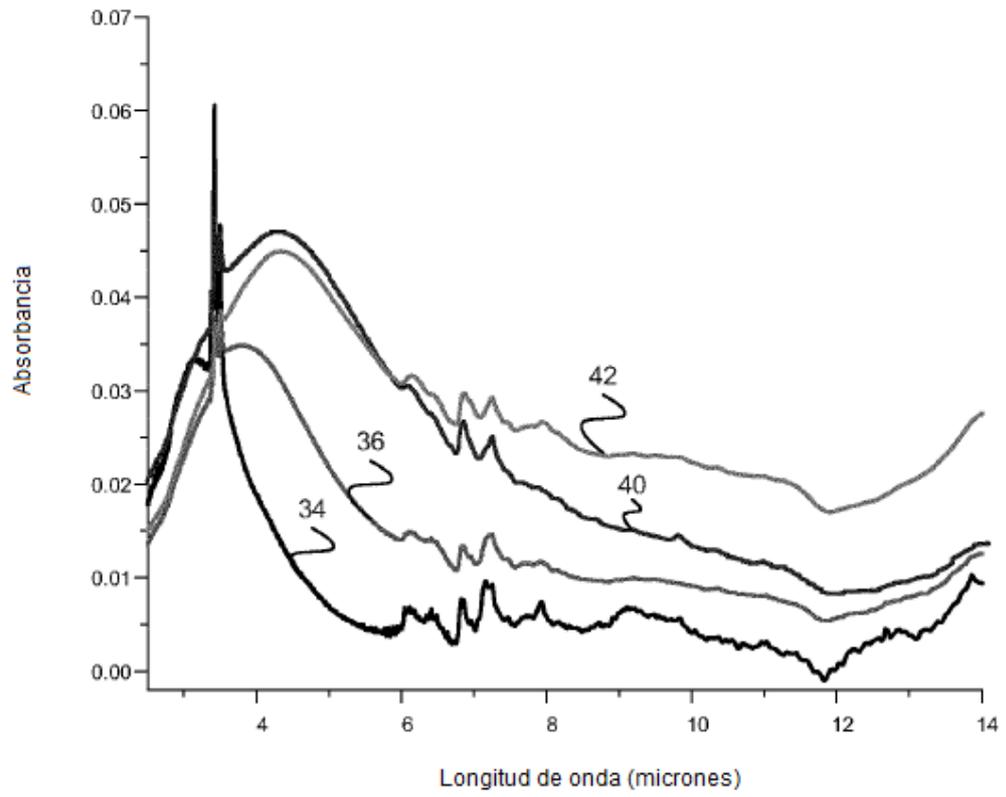


FIG. 3

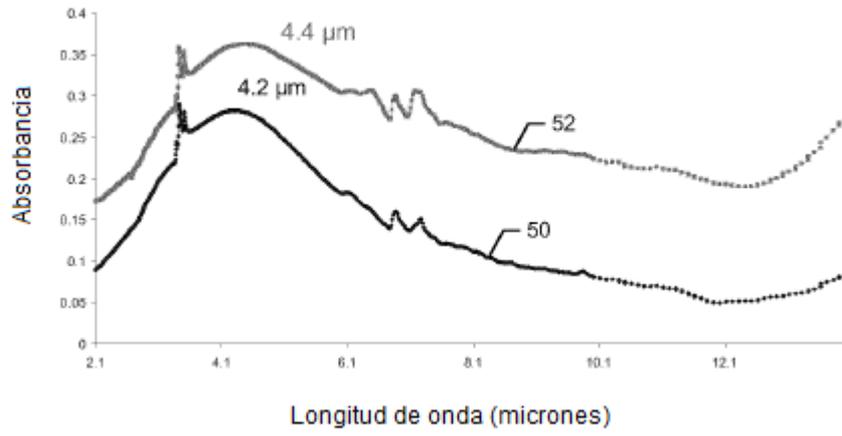


FIG. 4

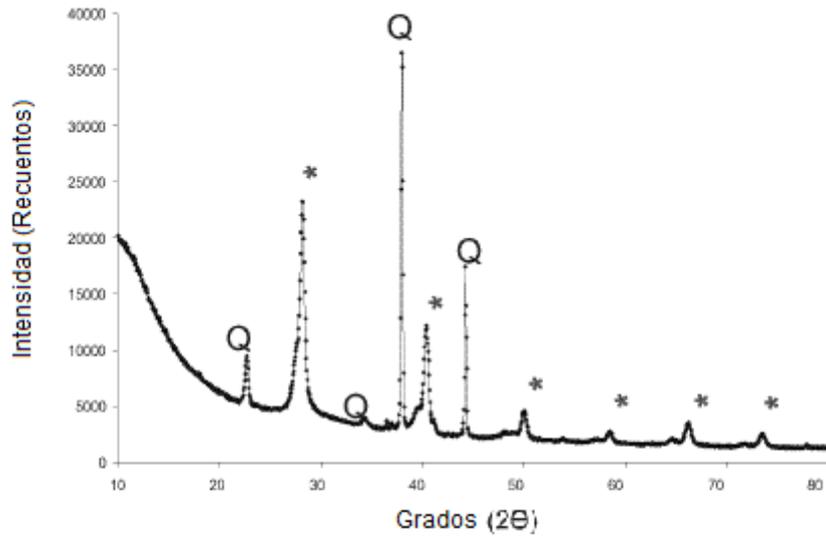


FIG. 5

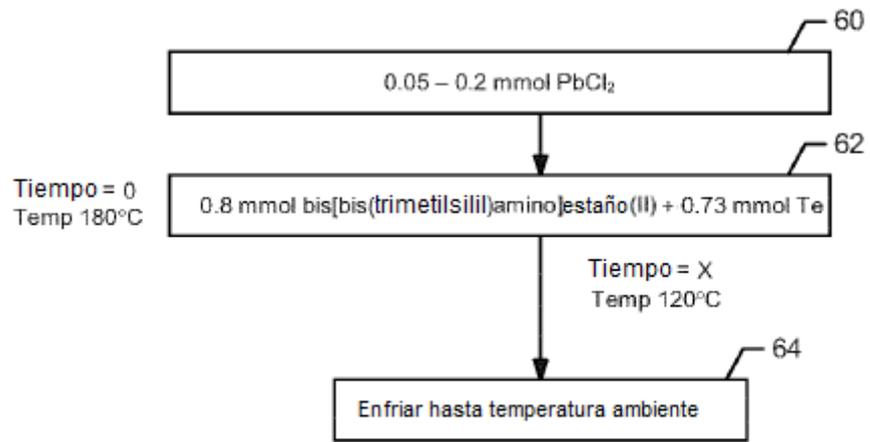


FIG. 6

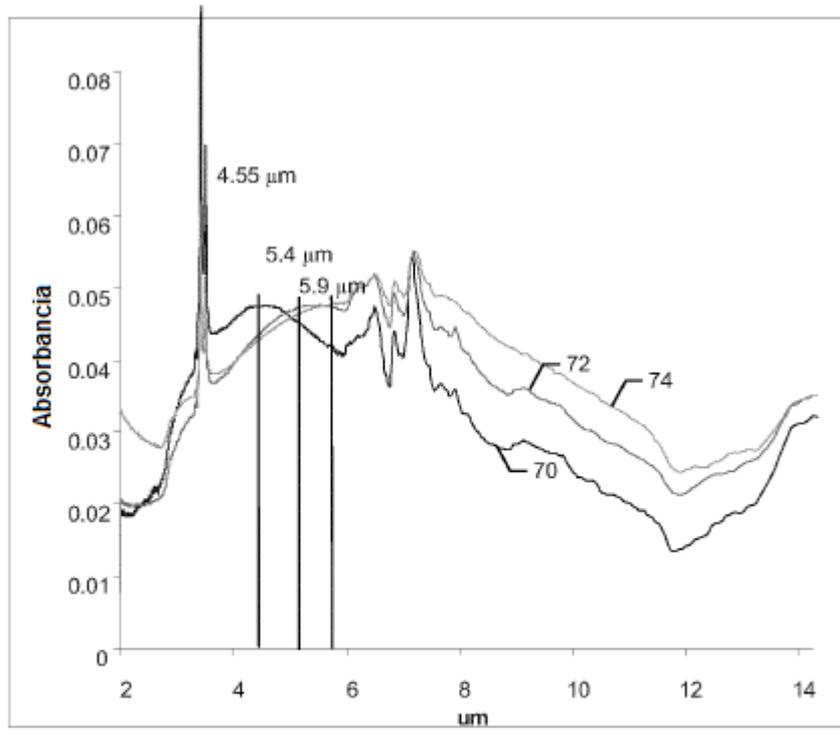


FIG. 7

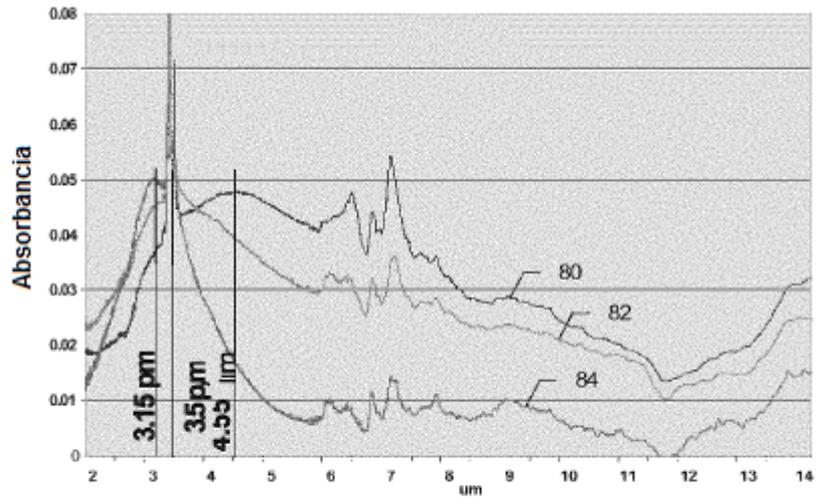


FIG. 8

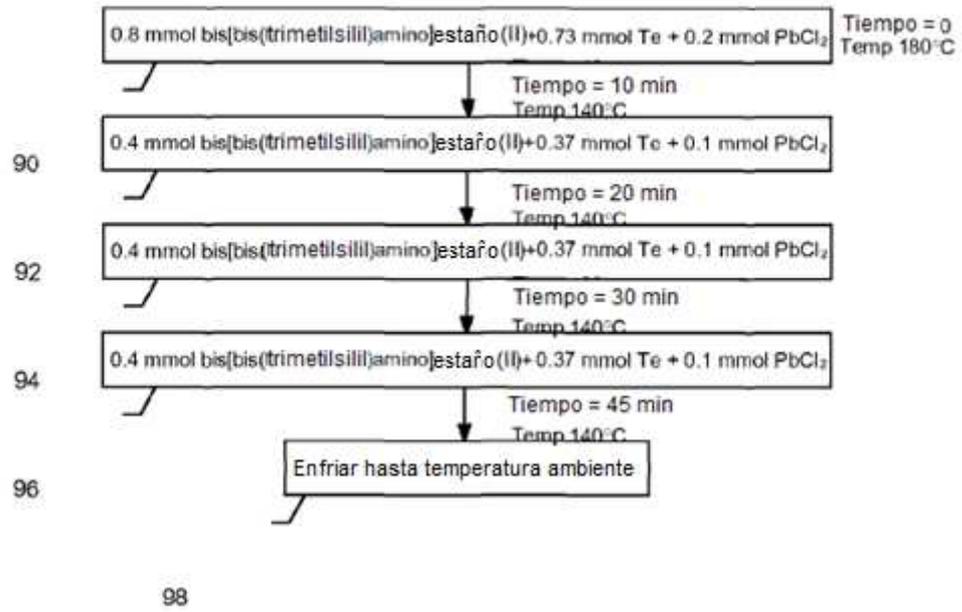


FIG. 9

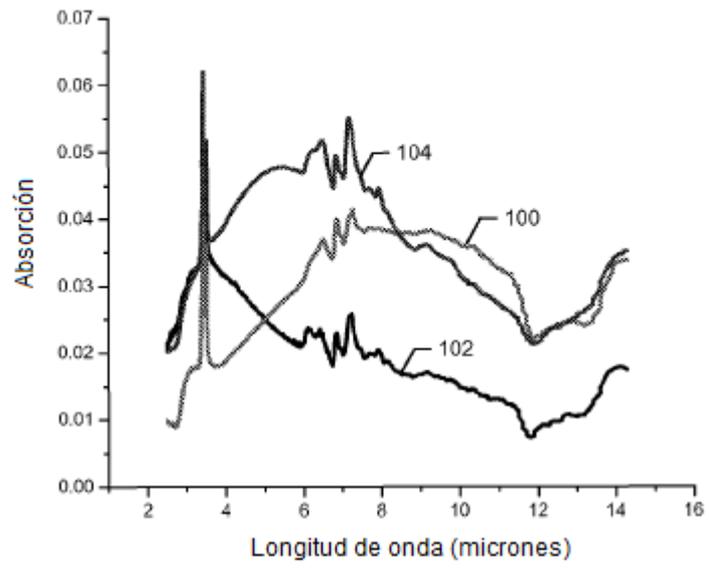


FIG. 10

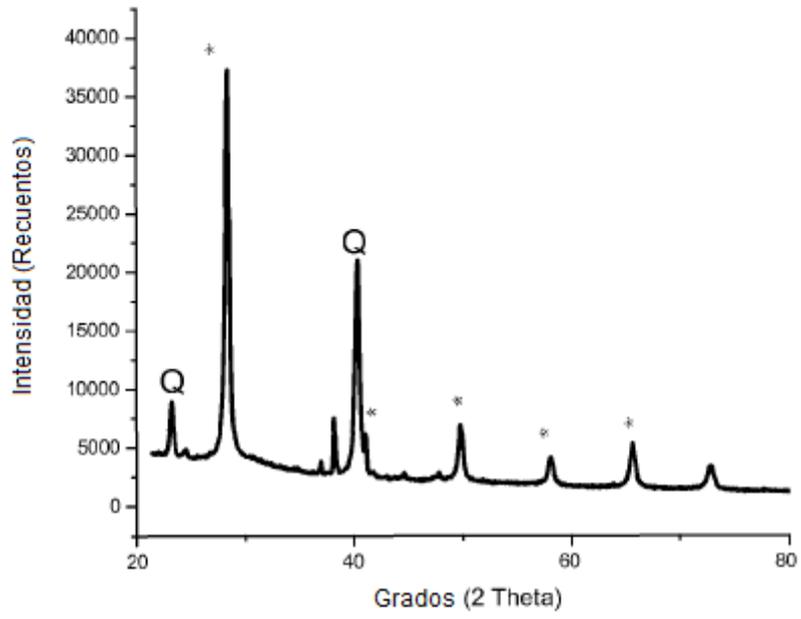


FIG. 11