

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 765 280**

51 Int. Cl.:

H01L 27/146 (2006.01)

G01J 1/02 (2006.01)

H01L 31/10 (2006.01)

H04N 5/369 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.08.2016 PCT/US2016/045526**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.02.2017 WO17024121**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.08.2016 E 16833863 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.10.2019 EP 3332426**

54 Título: **Aparato sensor de luz de germanio-silicio**

30 Prioridad:

04.08.2015 US 201562200652 P

25.08.2015 US 201562209349 P

27.08.2015 US 201562210946 P

28.08.2015 US 201562210991 P

28.08.2015 US 201562211004 P

11.09.2015 US 201562217031 P

06.11.2015 US 201562251691 P

28.12.2015 US 201562271386 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.06.2020

73 Titular/es:

**ARTILUX INC. (100.0%)
101 Jefferson Drive
Menlo Park, CA 94025, US**

72 Inventor/es:

**LIU, HAN-DIN;
NA, YUN-CHUNG;
CHENG, SZU-LIN;
CHEN, SHU-LU;
CHEN, HUI-WEN y
LIANG, CHE-FU**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 765 280 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

Aparato sensor de luz de germanio-silicio

Antecedentes

Esta memoria descriptiva se refiere a detección de luz usando un fotodiodo.

- 5 La luz se propaga en el espacio o se acopla un medio óptico a un fotodiodo que convierte una señal óptica en una señal eléctrica para procesamiento. En la Patente Estadounidense US 2013/0062506 se describe un dispositivo fotosensible multispectro en el que los píxeles sensores de materiales compuestos en disponen en capas.

Sumario

10 Puede usarse un fotodiodo para detectar señales ópticas y convertirlas en señales eléctricas que puedan procesarse además por otro sistema de circuitos. Los fotodiodos se pueden usar en productos electrónicos de consumo, sensores de imagen, comunicaciones de datos, aplicaciones de tiempo de vuelo (TOF, por sus siglas en inglés), productos sanitarios y otras muchas aplicaciones adecuadas. Convencionalmente, se usa silicio como material sensor de imagen, pero el silicio presenta poca eficacia de absorción óptica para longitudes de onda en el espectro infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) o más largas. Otros materiales u aleaciones de materiales como
 15 germanio y germanio-silicio pueden usarse como materiales sensores de imagen con el diseño innovador de la estructura del dispositivo óptico descrito en esta memoria descriptiva. Según un aspecto innovador del contenido descrito en esta memoria descriptiva, un fotodiodo se forma usando materiales como germanio o germanio-silicio para aumentar la velocidad o la sensibilidad o el intervalo dinámico o el intervalo de longitudes de onda de operación del dispositivo. En una realización, los fotodiodos formados usando germanio o germanio-silicio y los fotodiodos
 20 formados usando silicio pueden integrarse en un sustrato común para proporcionar un conjunto de fotodiodos con un intervalo de longitudes de onda de operación mayor.

Según otro aspecto innovador del contenido descrito en esta memoria descriptiva, puede detectarse la luz reflejada de un objeto tridimensional por fotodiodos de un sistema de imágenes. Los fotodiodos convierten la luz detectada en
 25 cargas eléctricas. Cada fotodiodo puede incluir múltiples puertos que se controlen para recoger las cargas eléctricas. La recogida de cargas eléctricas controlada por los múltiples puertos puede modificarse con el tiempo, de manera que el sistema de imágenes pueda determinar la fase y otra información de la luz detectada. El sistema de imágenes puede usar la información de la fase para analizar las características asociadas al objeto tridimensional incluyendo información de profundidad o la composición del material. El sistema de imágenes puede usar también la
 30 información de la fase para analizar las características asociadas al reconocimiento de un gesto visual, reconocimiento de un gesto corporal, exploración de modelo tridimensional/grabación en vídeo o aplicaciones de realidad aumentada/virtual.

En general, un aspecto innovador del contenido descrito en esta memoria descriptiva puede incorporarse en un conjunto de sensores de imagen que incluya un sustrato portador; un primer grupo de fotodiodos acoplados al
 35 sustrato portador, donde el primer grupo de fotodiodos incluye un primer fotodiodo, y donde el primer fotodiodo incluye una capa semiconductor configurada para absorber fotones de longitudes de onda del visible y para generar fotoportadores a partir de los fotones absorbidos y un segundo grupo de fotodiodos acoplados al sustrato portador, en donde el segundo grupo de fotodiodos comprende un segundo fotodiodo y en donde el segundo
 40 fotodiodo comprende una región de germanio-silicio fabricada en la capa semiconductor, configurada la región germanio-silicio para absorber fotones de las longitudes de onda del infrarrojo o del infrarrojo cercano y para generar fotoportadores de los fotones absorbidos.

Esta y otras implantaciones pueden incluir cada una opcionalmente uno o más de los siguientes elementos. El primer y el segundo grupos de fotodiodos pueden disponerse en un conjunto bidimensional. Cada fotodiodo del
 45 primer grupo de fotodiodos y el segundo grupo de fotodiodos puede incluir un filtro de longitudes de onda, respectivo, configurado para transmitir una porción de la luz recibida y un elemento de lente, respectivo, configurado para enfocar la luz recibida.

El primer fotodiodo puede incluir una primera región de recogida de portadores configurada para recoger una porción de los fotoportadores generados por la capa semiconductor; una primera región de lectura acoplada a un primer sistema de circuitos de lectura, configurada la primera región de lectura para proporcionar los fotoportadores
 50 recogidos por la primera región de recogida de portadores al primer sistema de circuitos de lectura y un primer puerto acoplado a una primera señal de control que controla un transporte de portadores entre la primera región de recogida de portadores y la primera región de lectura. El segundo fotodiodo puede incluir una segunda región de recogida de portadores configurada para recoger una porción de los fotoportadores generados por la región germanio-silicio; una segunda región de lectura acoplada a un segundo sistema de circuitos de lectura, la segunda
 55 región de lectura configurada para proporcionar los fotoportadores recogidos por la segunda región de recogida de portadores al segundo sistema de circuitos de lectura y un segundo puerto acoplado a una segunda señal de control que controla un transporte de portadores entre la segunda región de recogida de portadores y la segunda región de

lectura.

El segundo fotodiodo puede incluir una tercera región de lectura acoplada a un tercer sistema de circuitos de lectura, configurada la tercera región de lectura para proporcionar los fotoportadores recogidos por la segunda región de recogida de portadores al tercer sistema de circuitos de lectura y un tercer puerto acoplado a una tercera señal de control que controla un transporte de portadores entre la segunda región de recogida de portadores y la tercera región de lectura. El segundo fotodiodo puede incluir una cuarta región de lectura acoplada a un cuarto sistema de circuitos de lectura, configurada la cuarta región de lectura para proporcionar los fotoportadores recogidos por la segunda región de recogida de portadores al cuarto sistema de circuitos de lectura y un cuarto puerto acoplado a una cuarta señal de control que controla un transporte de portadores entre la segunda región de recogida de portadores y la cuarta región de lectura. El segundo fotodiodo puede incluir una quinta región de lectura acoplada a un quinto sistema de circuitos de lectura, configurada la quinta región de lectura para proporcionar los fotoportadores recogidos por la segunda región de recogida de portadores al quinto sistema de circuitos de lectura y un quinto puerto acoplado a una quinta señal de control que controla un transporte de portadores entre la segunda región de recogida de portadores y la quinta región de lectura. El primer puerto puede ser para una aplicación sensora de imágenes y al menos dos puertos del segundo, tercer, cuarto y quinto puerto pueden ser para una aplicación de tiempo de vuelo.

La primera región de recogida de portadores puede incluir una unión p-n y la segunda región de recogida de portadores puede incluir una unión p-i-n configurada para recoger electrones. La primera y segunda región de lectura pueden ser regiones n-dopadas.

El conjunto de sensores de imagen puede incluir una capa de óxido planarizada por el primer y segundo grupo de fotodiodos, donde la región germanio-silicio está embebida en la capa de óxido. El primer fotodiodo puede configurarse para recoger electrones y el segundo fotodiodo puede configurarse para recoger huecos.

Otro aspecto innovador del contenido descrito en esta memoria descriptiva puede plasmarse en un método para fabricar un conjunto de sensores de imagen con un primer grupo de fotodiodos para detectar luz en las longitudes de onda del visible, un segundo grupo de fotodiodos para detectar luz de longitudes de onda del infrarrojo o del infrarrojo cercano, incluyendo el método hacer crecer una capa de germanio-silicio en una oblea donadora de semiconductor; definir píxeles del conjunto de sensores de imagen en la capa de germanio-silicio; definir después los píxeles del conjunto de sensores de imagen, definir una primera capa de interconexión en la capa de germanio-silicio, donde la capa de interconexión incluye una pluralidad de interconexiones acopladas al primer grupo de fotodiodos y el segundo grupo de fotodiodos; definir un sistema de circuitos integrados para controlar los píxeles del conjunto de sensores de imagen en una oblea portadora de semiconductor; definir después el sistema de circuitos integrado, definir una segunda capa de interconexión en la oblea portadora de semiconductor, donde la segunda capa de interconexión incluye una pluralidad de interconexiones acopladas al sistema de circuitos integrado y enlazar la primera capa de interconexión con la segunda capa de interconexión, de manera que el primer y segundo grupo de fotodiodos se acoplan al sistema de circuitos integrado.

Esta y otras implantaciones pueden incluir cada una opcionalmente uno o más de los siguientes elementos. El método puede incluir retirar al menos una porción de la oblea donadora de semiconductor por pulido. El método puede incluir formar elementos de lente en la oblea donadora de semiconductor, donde cada uno de los elementos de lente puede disponerse para guiar la luz a un respectivo fotodiodo del conjunto de sensores de imagen. El método puede incluir formar filtros de longitudes de onda en el conjunto de sensores de imagen, donde cada uno de los filtros de longitudes de onda puede formarse para un respectivo fotodiodo del conjunto de sensores de imagen.

Otro aspecto innovador del contenido descrito en esta memoria descriptiva puede plasmarse en un método para fabricar un conjunto de sensores de imagen con un primer grupo de fotodiodos para detectar luz de las longitudes de onda del visible, un segundo grupo de fotodiodos para detectar luz de longitudes de onda del infrarrojo o del infrarrojo cercano, incluyendo el método definir píxeles de un conjunto de sensores de imagen en una oblea donadora de semiconductor; depositar una capa aislante en la oblea donadora de semiconductor; definir, en la capa aislante, regiones para el segundo grupo de fotodiodos; hacer crecer una capa de germanio-silicio en las regiones para el segundo grupo de fotodiodos; hacer crecer después la capa de germanio-silicio, definir una primera capa de interconexión, en donde la capa de interconexión incluye una pluralidad de interconexiones acopladas al primer grupo de fotodiodos y el segundo grupo de fotodiodos; definir un sistema de circuitos integrados para controlar los píxeles del conjunto de sensores de imagen en una oblea portadora de semiconductor; definir después el sistema de circuitos integrado, definir una segunda capa de interconexión en la oblea portadora de semiconductor, donde la segunda capa de interconexión incluye una pluralidad de interconexiones acopladas al sistema de circuitos integrado y enlazar la primera capa de interconexión con la segunda capa de interconexión, de manera que el primer y segundo grupo de fotodiodos se acoplan al sistema de circuitos integrado.

Esta y otras implantaciones pueden incluir cada una opcionalmente uno o más de los siguientes elementos. Para hacer crecer la capa de germanio-silicio en las regiones para el segundo grupo de fotodiodos, la capa de germanio-silicio puede formarse por crecimiento epitaxial selectivo, de manera que la capa de germanio-silicio se embebe en la capa aislante y la capa de germanio-silicio puede pulirse para planarizar la capa aislante y la capa de germanio-

silicio. El método puede incluir retirar al menos una porción de la oblea donadora de semiconductor por pulido.

El método puede incluir además formar elementos de lente en la oblea donadora de semiconductor, donde cada uno de los elementos de lente se dispone para guiar la luz a un respectivo fotodiodo del conjunto de sensores de imagen y formar filtros de longitudes de onda en el conjunto de sensores de imagen, formado cada uno de los filtros de longitudes de onda para un respectivo fotodiodo del conjunto de sensores de imagen.

Otro aspecto innovador del contenido descrito en esta memoria descriptiva puede plasmarse en un método para fabricar un conjunto de sensores de imagen con un primer grupo de fotodiodos para detectar luz de las longitudes de onda del visible, un segundo grupo de fotodiodos para detectar luz de longitudes de onda del infrarrojo o del infrarrojo cercano, incluyendo el método formar una capa de germanio-silicio para el segundo grupo de fotodiodos en una primera oblea donadora de semiconductor; definir una primera capa de interconexión en la capa de germanio-silicio, donde la capa de interconexión incluye una pluralidad de interconexiones acopladas al primer grupo de fotodiodos y el segundo grupo de fotodiodos; definir un sistema de circuitos integrados para controlar los píxeles del conjunto de sensores de imagen en una oblea portadora de semiconductor; definir después el sistema de circuitos integrado, que define una segunda capa de interconexión en la oblea portadora de semiconductor, en donde la segunda capa de interconexión incluye una pluralidad de interconexiones acopladas al sistema de circuitos integrado; enlazar la primera capa de interconexión con la segunda capa de interconexión; definir los píxeles de un conjunto de sensores de imagen en una segunda oblea donadora de semiconductor; definir después los píxeles de un conjunto de sensores de imagen, que define una tercera capa de interconexión en el conjunto de sensores de imagen y que enlaza la tercera capa de interconexión con la capa de germanio-silicio, de manera que el primer grupo de fotodiodos y el segundo grupo de fotodiodos se acoplen al sistema de circuitos integrado.

Esta y otras implantaciones pueden incluir cada una opcionalmente uno o más de los siguientes elementos. El método puede incluir además después enlazar la primera capa de interconexión con la segunda capa de interconexión, retirar la primera oblea donadora de semiconductor. Para formar la capa de germanio-silicio para el segundo grupo de fotodiodos en la primera oblea donadora de semiconductor puede hacerse crecer una capa protegida de germanio-silicio en la primera oblea donadora de semiconductor. El método puede incluir después enlazar la primera capa de interconexión con la segunda capa de interconexión, definir regiones para al menos el segundo grupo de fotodiodos en la capa de germanio-silicio.

Para formar la capa de germanio-silicio para el segundo grupo de fotodiodos en la primera oblea donadora de semiconductor, puede depositarse una capa aislante en la oblea donadora de semiconductor. Las regiones para el segundo grupo de fotodiodos pueden definirse en la capa aislante. La capa de germanio-silicio puede hacerse crecer en las regiones para el segundo grupo de fotodiodos.

Las implantaciones ventajosas pueden incluir uno o más de los siguientes elementos. El germanio es un material de absorción eficaz para longitudes de onda del infrarrojo cercano, que reduce el problema de los fotoportadores lentos generados a una profundidad mayor del sustrato cuando se usa un material de absorción ineficaz, por ejemplo, silicio. Un ancho de banda aumentado del dispositivo permite el uso de una frecuencia de modulación mayor en un sistema sensor óptico, proporcionando ventajas como una mayor resolución en profundidad. Un material de aleación de germanio-silicio como capa de absorción óptica con diseño innovador proporciona mayor eficacia de absorción óptica sobre el material de Si convencional, que puede proporcionar un sensor más sensible en los espectros visible e infrarrojo cercano, puede reducir interferencias entre píxeles próximos y puede permitir una reducción de los tamaños de píxel. Un diseño de sensor híbrido puede soportar sensores de imagen de tiempo de vuelo (TOF), del infrarrojo cercano y del visible en el mismo conjunto de sensores. Un ancho de banda aumentado del dispositivo permite el uso de una frecuencia de modulación mayor en un sistema de tiempo de vuelo, proporcionando una mayor resolución en profundidad. En un sistema de tiempo de vuelo donde la intensidad máxima de los pulsos ópticos aumenta mientras el ciclo de servicio de los pulsos ópticos disminuye, puede mejorarse la relación señal a ruido mientras se mantiene sustancialmente el mismo consumo de energía para el sistema de tiempo de vuelo. Esto se hace posible cuando el ancho de banda del dispositivo aumenta de manera que el ciclo de servicio de los pulsos ópticos pueda disminuir sin que se distorsione la forma del pulso.

Los detalles de una o más implantaciones se explican en los dibujos adjuntos y en la descripción a continuación. Otros elementos y ventajas potenciales serán evidentes a partir de la descripción, los dibujos y las reivindicaciones.

Breve descripción de los dibujos

La fig. 1 es un ejemplo de un conjunto de fotodiodos.

La fig. 2 es un ejemplo de un conjunto de fotodiodos.

La fig. 3 es un ejemplo de un conjunto de fotodiodos.

Las figs. 4A y 4B son ejemplos de un fotodiodo para detectar luz visible e infrarroja.

La fig. 5 es un ejemplo de un fotodiodo para detectar la luz visible e infrarroja.

La fig. 6 es un ejemplo de un fotodiodo para detectar la luz visible e infrarroja.

La fig. 7 es un ejemplo de un fotodiodo multipuerto.

La fig. 8 es un ejemplo de un fotodiodo multipuerto.

5 La fig. 9 es un ejemplo de un fotodiodo para detectar la luz visible o infrarroja.

La fig. 10 es un ejemplo de un conjunto de fotodiodos integrado para detectar la luz visible o infrarroja.

La fig. 11 es un ejemplo de un conjunto de fotodiodos integrado para detectar la luz visible o infrarroja.

La fig. 12 es un ejemplo de un conjunto de fotodiodos integrado para detectar la luz visible o infrarroja.

La fig. 13 es un ejemplo de un conjunto de fotodiodos integrado para detectar la luz visible o infrarroja.

10 Las figs. 14A-14D ilustran un ejemplo de un diseño para fabricar un conjunto de fotodiodos.

Las figs. 15A-15D ilustran un ejemplo de un diseño para formar germanio-silicio.

Las figs. 16A-16D ilustran un ejemplo de un diseño con fabricación ejemplar de un conjunto de fotodiodos.

Las figs. 17A-17F ilustran un ejemplo de un diseño con fabricación ejemplar de un conjunto de fotodiodos.

La fig. 18A es un diagrama de bloques de un ejemplo de un sistema de imágenes.

15 Las figs. 18B y 18C muestran ejemplos de técnicas para determinar las características de un objeto usando un sistema de imágenes.

La fig. 19 muestra un ejemplo de un diagrama de flujo para determinar las características de un objeto usando un sistema de imágenes.

20 Los números de referencia y las denominaciones similares en los diversos dibujos indican elementos similares. También se tiene que entender que las diversas realizaciones ejemplares mostradas en las figuras son representaciones meramente ilustrativas y no están dibujadas necesariamente a escala.

Descripción detallada

25 Pueden usarse fotodiodos para detectar señales ópticas y convertir las señales ópticas en señales eléctricas que puedan procesarse además mediante otro sistema de circuitos. En general, un material absorbe luz a varias longitudes de onda para generar portadores libres dependiendo de un ancho de banda prohibida asociado al material. Por ejemplo, a temperatura ambiente, el silicio puede tener un ancho de banda prohibida de 1,12 eV, el germanio puede tener un ancho de banda prohibida de 0,66 eV y una aleación germanio-silicio puede tener un ancho de banda prohibida entre 0,66 eV y 1,12 eV dependiendo de la composición. En general, un material que

30 tiene un ancho de banda prohibida menor presenta un coeficiente de absorción mayor a una longitud de onda particular. Si el coeficiente de absorción de un material es demasiado bajo, puede que la señal óptica no se convierta en señal eléctrica eficazmente. Sin embargo, si el coeficiente de absorción de un material es demasiado alto, se generarán portadores libres cerca de la superficie del material, que puede recombinarse para reducir la eficacia. El silicio no es un material sensor eficaz para longitudes de onda del NIR debido a su gran ancho de banda prohibida. Por otra parte, el germanio presenta un coeficiente de absorción que puede ser demasiado alto para

35 longitudes de onda más cortas (por ej. del azul), donde los portadores libres pueden recombinarse en la superficie. Un conjunto de fotodiodos que integre silicio y germanio/germanio-silicio en un sustrato común, donde un conjunto de fotodiodos usa silicio para detectar luz visible y usa germanio o germanio-silicio para detectar luz NIR, permitiría que el conjunto de fotodiodos tuviera un espectro de detección amplio. En esta solicitud, el término «fotodiodo» puede usarse indistintamente que el término «sensor óptico». En esta solicitud, los términos «germanio-silicio

40 (GeSi)», «silicio-germanio (SiGe)» pueden usarse indistintamente y ambos incluyen todas las combinaciones adecuadas de la composición SiGe desde el 100 % de germanio (Ge) a más del 90 % de silicio (Si). En esta solicitud, la capa de GeSi puede formarse usando epitaxia protegida, epitaxia selectiva u otra técnica aplicable. Además, puede usarse una superestructura de red acotada que incluya múltiples capas de manera que alterne una capa de SiGe con diferentes composiciones para la absorción o la formación de una estructura de pozo cuántico.

45 La fig. 1 es un ejemplo de conjunto 100 de fotodiodos donde se integran fotodiodos de germanio o de germanio-silicio con fotodiodos de silicio. Un conjunto de sensores ópticos de imagen es un ejemplo de un conjunto de fotodiodos. El conjunto 100 de fotodiodos incluye un sustrato 102, una capa 104 de circuito integrado, una capa 106 de interconexión, una capa 108 sensora, una capa 110 de filtro y una capa 112 de lente. En general, la luz de una única longitud de onda o de múltiples longitudes de onda entra en la capa 112 de lente, donde la luz puede

enfocarse, colimarse, expandirse o procesarse según el diseño de la lente. La luz entra entonces en la capa 110 de filtro, donde la capa 110 de filtro puede configurarse para que pase la luz de un intervalo de longitudes de onda específico. Los fotodiodos en la capa 108 sensora convierten la luz incidente en portadores libres. La capa 104 de circuito integrado recoge los portadores libres por la capa 106 de interconexión y se procesan los portadores libres según la aplicación específica.

En general, el sustrato 102 puede ser un sustrato de silicio, un sustrato de silicio sobre aislante (SOI, en inglés) o cualquier otro material de sustrato portador adecuado. Los circuitos integrados de la capa 104 de circuitos integrados y las interconexiones de la capa 106 de interconexión pueden fabricarse usando técnicas de procesamiento CMOS. Por ejemplo, las interconexiones pueden formarse atacando químicamente un hueco de contacto por una capa de dieléctrico y rellenando el hueco de contacto mediante cobre usando deposición química de vapor (CVD). Además, la forma de las lentes podía ser cóncava, convexa, plana con estructura superficial, u otras formas, y sus formas no deberían limitarse por los dibujos ejemplares en la presente memoria.

La capa 108 de sensores incluye múltiples grupos de fotodiodos para detectar luz de diferentes intervalos de longitudes de onda. Por ejemplo, se puede configurar un grupo de fotodiodos que incluya fotodiodos 122a, 122b y otros no mostrados en esta figura para detectar la luz de un intervalo de longitudes de onda del azul (por ejemplo, $460 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$). Como otro ejemplo, se puede configurar un grupo de fotodiodos que incluya fotodiodos 124a, 124b y otros no mostrados en esta figura para detectar la luz de un intervalo de longitudes de onda del verde (por ejemplo, $540 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$). Como otro ejemplo, se puede configurar un grupo de fotodiodos que incluya fotodiodos 126a, 126b y otros no mostrados en esta figura para detectar la luz de un intervalo de longitudes de onda del rojo (por ejemplo, $620 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$). Como otro ejemplo, se puede configurar un grupo de fotodiodos que incluya los fotodiodos 128a y otros no mostrados en esta figura para detectar la luz de un intervalo de longitudes de onda del NIR (por ejemplo, $850 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$, $940 \text{ nm} \pm 40 \text{ nm}$ o $>1 \mu\text{m}$). Cada fotodiodo puede aislarse por aislamiento de espaciadores de la pared lateral, hoyos u otras estructuras de aislamiento adecuadas.

En algunas implantaciones, el intervalo de longitudes de onda en que se configura un fotodiodo para detección puede controlarse por un filtro óptico en la capa 110 de filtro. Por ejemplo, el fotodiodo 126a se configura para recibir un intervalo de longitudes de onda del rojo, donde la longitud de onda del centro y los límites del intervalo de longitudes de onda se controlan por las características del filtro por encima del fotodiodo 126a. Se puede formar un filtro depositando capas de materiales dieléctricos, de manera que la luz con una longitud de onda dentro de un intervalo de longitudes de onda específico pase por el filtro y la luz con una longitud de onda fuera del intervalo de longitudes de onda específico se refleje por el filtro. Un filtro también puede formarse formando una capa de un material en el fotodiodo, de manera que la luz con una longitud de onda dentro de un intervalo de longitudes de onda específico pase por el filtro y luz con una longitud de onda fuera del intervalo de longitudes de onda específico se absorba por el filtro. Por ejemplo, puede formarse una capa de silicio en un fotodiodo de germanio-silicio, donde la capa de silicio absorba luz visible, pero sea transparente a la luz NIR.

En algunas implantaciones, el intervalo de longitudes de onda en que se configura un fotodiodo para detección puede controlarse por una composición de material del fotodiodo. Por ejemplo, un aumento en la composición de germanio en una aleación de germanio-silicio puede aumentar la sensibilidad del fotodiodo a longitudes de onda más largas. En algunas implantaciones, el intervalo de longitudes de onda en que se configura un fotodiodo para detección puede controlarse por una combinación del filtro óptico y la composición del material del fotodiodo.

En algunas implantaciones, los grupos de fotodiodos que se configuran para detectar luz visible (por ejemplo, del rojo, el verde y el azul) pueden ser fotodiodos de silicio, mientras que el grupo de fotodiodos que se configuran para detectar luz del NIR pueden ser fotodiodos de germanio o fotodiodos de germanio-silicio.

En algunas otras implantaciones, uno o más grupos de fotodiodos que se configuran para detectar la luz visible (por ejemplo, del verde y el azul) pueden ser fotodiodos de silicio, mientras que otro u otros grupos más de fotodiodos que se configuran para detectar luz visible (por ejemplo, del rojo) y el grupo de fotodiodos que se configuran para detectar luz del NIR pueden ser fotodiodos de germanio o fotodiodos de germanio-silicio. Por ejemplo, el grupo de fotodiodos que detecta luz roja pueden ser fotodiodos de germanio-silicio con una concentración de germanio menor que los fotodiodos de germanio-silicio en el grupo de fotodiodos que detectan luz del NIR. En algunas implantaciones, la concentración de germanio puede variar entre el 10 % y el 100 %. Como otro ejemplo, el grupo de fotodiodos que detecta luz roja pueden ser fotodiodos de germanio-silicio con un espesor diferente del de los fotodiodos de germanio-silicio en el grupo de los fotodiodos que detectan la luz del NIR.

La fig. 2 es un ejemplo de conjunto 200 de fotodiodos de ejemplo que muestra una vista desde arriba de un conjunto de fotodiodos bidimensional, donde los fotodiodos de germanio o de germanio-silicio están integrados con fotodiodos de silicio. Los fotodiodos en el conjunto 200 de fotodiodos son similares a los fotodiodos descritos en el conjunto 100 de fotodiodos. Los fotodiodos del conjunto 200 de fotodiodos se disponen como píxeles. En algunas implantaciones, se forman fotodiodos de silicio como píxeles para detectar luz visible y los fotodiodos de germanio o de germanio-silicio se embeben en el silicio como píxeles para detectar luz del NIR. En algunas otras implantaciones, se forman fotodiodos de silicio como píxeles para detectar luz del azul y el verde y los fotodiodos de germanio o de germanio-silicio se embeben en el silicio como píxeles para detectar luz del rojo o del NIR.

La fig. 3 es un conjunto 300 de fotodiodos de ejemplo, donde se integran los fotodiodos de germanio o de germanio-silicio con fotodiodos de silicio. Los fotodiodos en el conjunto 300 de fotodiodos son similares a los fotodiodos descritos en el conjunto 100 de fotodiodos. Además, el conjunto 300 de fotodiodos incluye un grupo de fotodiodos 302a, 302b y otros no mostrados en esta figura que se configuran para detectar la luz de un intervalo de longitudes de onda del blanco (por ejemplo, de 420 nm a 660 nm). En algunas implementaciones, los fotodiodos 302a y 302b pueden ser fotodiodos de silicio. En algunas otras implementaciones, los fotodiodos 302a y 302b pueden ser fotodiodos de germanio o de germanio-silicio para mejorar la absorción total de la luz de los diodos. Por ejemplo, el grupo de fotodiodos que detecta luz blanca pueden ser fotodiodos de germanio-silicio con una concentración de germanio menor que la de los fotodiodos de germanio-silicio en el grupo de fotodiodos que detectan luz del NIR. Como otro ejemplo, el grupo de fotodiodos que detecta luz blanca pueden ser fotodiodos de germanio-silicio con un espesor diferente del de los fotodiodos de germanio-silicio en el grupo de los fotodiodos que detectan la luz del NIR.

La fig. 4A ilustra fotodiodos 400 de ejemplo para detectar señales ópticas del visible y del infrarrojo. Los fotodiodos 400 de ejemplo incluyen un píxel 402 del NIR y un píxel 404 del visible que se forman en un sustrato común. El píxel 402 del NIR y el píxel 404 del visible se separan mediante una estructura 406 de aislamiento. El píxel 402 del NIR se configura para detectar una señal óptica con una longitud de onda en el intervalo del NIR. El píxel 404 del visible se configura para detectar una señal óptica con una longitud de onda en el intervalo del visible (por ejemplo, el azul o el verde o el rojo). El píxel 402 del NIR y el píxel 404 del visible pueden ser fotodiodos en la capa 108 sensora como se describe en referencia a la fig. 1, por ejemplo.

El píxel 404 del visible incluye una región 412 n-Si, una región 413 p+ Si, una región 414 p-Si, una región 415 n+ Si, un primer puerto 416, una primera señal 417 de control acoplada al primer puerto 416 y un circuito 418 de lectura acoplado a la región 415 n+ Si. La región 412 n-Si puede doparse ligeramente con un dopante n, por ejemplo, aproximadamente 10^{16} cm^{-3} con fósforo. La región 413 p+ Si puede tener un dopaje p+, donde la concentración de dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con boro. La región 414 p-Si puede doparse ligeramente con un dopante p, por ejemplo, aproximadamente 10^{15} cm^{-3} con boro. La región 415 n+ Si puede tener un dopaje n+, donde la concentración de dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con fósforo.

En general, la capa 412 de n-Si recibe una señal 408 óptica y convierte la señal 408 óptica en señales eléctricas. La señal 408 óptica entra en la región 412 n-Si, donde la región 412 n-Si absorbe la señal 408 óptica y se convierte la luz absorbida en portadores libres. En algunas implantaciones, la señal 408 óptica puede filtrarse mediante un filtro de longitudes de onda no mostrado en esta figura, como un filtro en la capa 110 de filtro como se describe en referencia a la fig. 1. En algunas implantaciones, un perfil de rayo de la señal 408 óptica puede conformarse por una lente, no mostrada en esta figura, como una lente en la capa 112 de lente como se describe en referencia a la fig. 1.

En general, una diferencia entre el nivel de Fermi de la región 413 p+ Si y el nivel de Fermi de la región 412 n-Si crea un campo eléctrico entre las dos regiones, donde los electrones libres generados por la región 412 n-Si se desvían a una región por debajo de la región 413 p+ Si por el campo eléctrico. El primer puerto 416 puede estar acoplado a la primera señal 417 de control. Por ejemplo, el primer puerto 416 puede estar acoplado a una fuente de tensión, donde la primera señal 417 de control puede ser una señal de tensión de CC de la fuente de tensión. La primera señal 417 de control controla un flujo de electrones libres de la región por debajo de la región 413 p+ Si a la región 415 n+ Si. Por ejemplo, si un voltaje de la señal 417 de control excede de un voltaje umbral, los electrones libres acumulados en la región por debajo de la región 413 p+ Si se desviarán a la región 415 n+ Si.

La región 415 n+ Si puede acoplarse al primer circuito 418 de lectura. El primer circuito 418 de lectura puede estar en una configuración de tres transistores que consiste en un puerto de reinicio, un seguidor de fuente y un puerto de selección o cualquier sistema de circuitos adecuado para procesar portadores libres. En algunas implantaciones, el primer circuito 418 de lectura puede fabricarse sobre un sustrato que sea común al píxel 404 del visible. Por ejemplo, el primer circuito 418 de lectura puede fabricarse sobre la capa 104 de circuito integrado como se describe con referencia a la fig. 1. En algunas otras implantaciones, el primer circuito 418 de lectura puede fabricarse sobre otro sustrato y coempaquetarse con el píxel 404 del visible vía el enlace o apilamiento matriz/oblea.

El píxel 402 del NIR incluye una región 422 n-Si, una región 423 p+ Si, una región 424 p-Si, una región 425 n+ Si, un segundo puerto 426, una segunda señal 427 de control acoplada al segundo puerto 426, un segundo circuito 428 de lectura acoplado a la región 425 n+ Si, una región 431 p+ GeSi y una región 433 GeSi intrínseca. La región 422 n-Si puede doparse ligeramente con un dopante n, por ejemplo, aproximadamente 10^{16} cm^{-3} con fósforo. La región 423 p+ Si puede tener un dopaje p+, donde la concentración de dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con boro. La región 424 p-Si puede doparse ligeramente con un dopante p, por ejemplo, aproximadamente 10^{15} cm^{-3} con boro. La región 425 n+ Si puede tener un dopaje n+, donde la concentración de dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con fósforo.

En general, la región 433 de GeSi intrínseca recibe una señal 406 óptica y convierte la señal 406 óptica en señales

eléctricas. En algunas implantaciones, la señal 406 óptica puede filtrarse mediante un filtro de longitudes de onda, no mostrado en esta figura, como un filtro de NIR en la capa 110 de filtro como se describe en referencia a la fig. 1. En algunas implantaciones, un perfil de rayo de la señal 406 óptica puede conformarse por una lente, no mostrada en esta figura, como una lente en la capa 112 de lente como se describe en referencia a la fig. 1.

- 5 En algunas implantaciones, un espesor de la región 433 GeSi intrínseca puede estar entre 0,05 μm y 2 μm . En algunas implantaciones, una región 433 GeSi intrínseca puede incluir una región 431 p+ GeSi. La región 431 p+ GeSi puede repeler los fotoelectrones lejos de la región 433 GeSi intrínseca para evitar la recombinación superficial y de ese modo se puede aumentar la eficacia de la recogida de portadores. Por ejemplo, la región 431 p+ GeSi puede presentar un dopaje p+, donde la concentración de dopante es tan alta como pueda lograr un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando la región 433 GeSi intrínseca es germanio y se dopa con boro.

10 Los portadores libres generados en la región 433 GeSi intrínseca pueden desviarse o difundirse en la región 422 n-Si. En general, una diferencia entre el nivel de Fermi de la región 423 p+ Si y el nivel de Fermi de la región 422 n-Si crea un campo eléctrico entre las dos regiones, donde los electrones libres generados de la región 433 GeSi intrínseca por la región 422 n-Si se desvían a una región por debajo de la región 423 p+ Si por el campo eléctrico. El segundo puerto 426 puede estar acoplado a la segunda señal 427 de control. Por ejemplo, el segundo puerto 426 puede estar acoplado a una fuente de tensión, donde la segunda señal 427 de control puede ser una señal de tensión de CC de la fuente de tensión. La segunda señal 427 de control controla un flujo de electrones libres de la región por debajo de la región 423 p+ Si a la región 425 n+ Si. Por ejemplo, si un voltaje de la segunda señal 427 de control excede de un voltaje umbral, los electrones libres acumulados en la región por debajo de la región 423 p+ Si se desviarán a la región 425 n+ Si. La región 425 n+ Si puede acoplarse al segundo circuito 428 de lectura. El segundo circuito 428 de lectura puede ser similar al primer circuito 418 de lectura.

15 Aunque no se muestra en la fig. 4A, en algunas otras implantaciones, el píxel 404 del visible y el píxel 402 del NIR pueden fabricarse alternativamente para recoger huecos en vez de electrones. En este caso, las regiones 413 y 423 p+ Si se reemplazarían por regiones n+ Si, las regiones 412 y 413 n-Si se reemplazarían por regiones p-Si, las regiones 414 y 424 p-Si se reemplazarían por regiones n-Si y las regiones 415 y 425 n+ Si se reemplazarían por regiones p+ Si. Obsérvese que los dibujos mostrados en la presente memoria son para ilustración y para fines de aclaración de los principios del trabajo.

20 La fig. 4B ilustra fotodiodos 450 de ejemplo para detectar señales ópticas del visible y del infrarrojo. Los fotodiodos 450 incluyen un píxel 454 del visible y un píxel 452 del NIR. El píxel 454 del visible es similar al píxel 404 del visible como se describe en referencia a la fig. 4A. El píxel 452 del NIR es similar al píxel 402 del NIR como se describe en referencia a la fig. 4A. En la presente memoria, la superficie del píxel 454 del visible y el píxel 452 del NIR que reciben las señales 458 y 460 ópticas es una superficie planarizada, donde la región 462 GeSi intrínseca y la región 464 p+ GeSi están embebidas en una capa 456 de óxido. Por ejemplo, la capa 456 de óxido puede formarse en la región 466 p-Si. Un espesor de la capa 456 de óxido puede seleccionarse para que sea el espesor de la región 462 GeSi intrínseca. Puede formarse una región sensora en la capa 456 de óxido por ataque químico o cualquier otra técnica adecuada. Se puede hacer crecer selectivamente germano-silicio en la región sensora para formar la región 462 GeSi intrínseca. Una superficie planarizada entre el píxel 454 del visible y el píxel 452 del NIR permite el procesamiento adicional en la superficie del fotodiodo o el enlace con dispositivos fabricados en un sustrato aparte.

25 La fig. 5 ilustra fotodiodos 500 de ejemplo para detectar señales ópticas del visible y del infrarrojo. Los fotodiodos 500 de ejemplo incluyen un píxel 502 del NIR y un píxel 504 del visible que se forman en un sustrato común. El píxel 502 del NIR y el píxel 504 del visible se separan mediante una estructura 506 de aislamiento. El píxel 502 del NIR se configura para detectar una señal óptica con una longitud de onda en el intervalo del NIR. El píxel 504 del visible se configura para detectar una señal óptica con una longitud de onda en el intervalo del visible (por ejemplo, el azul o el verde o el rojo). El píxel 502 del NIR y el píxel 504 del visible pueden ser fotodiodos en la capa 108 sensora como se describe en referencia a la fig. 1, por ejemplo.

30 El píxel 504 del visible incluye una región 512 n-Si, una región 513 p+ Si, una región 514 p-Si, una región 515 n+ Si, un primer puerto 516, una primera señal 517 de control acoplada al primer puerto 516 y un circuito 518 de lectura acoplado a la región 515 n+ Si. La región 512 n-Si puede doparse ligeramente con un dopante n, por ejemplo, aproximadamente 10^{16} cm^{-3} con fósforo. La región 513 p+ Si puede tener un dopaje p+, donde la concentración de dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con boro. La región 514 p-Si puede doparse ligeramente con un dopante p, por ejemplo, aproximadamente 10^{15} cm^{-3} con boro. La región 515 n+ Si puede tener un dopaje n+, donde la concentración de dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con fósforo.

35 En general, la capa 513 p+ Si recibe una señal 508 óptica. Puesto que el espesor de la capa 513 p+ Si es generalmente delgada (por ejemplo, 100 nm), la señal 508 óptica se propaga en la región 512 n-Si, donde la región 512 n-Si absorbe la señal 508 óptica y se convierte la señal 508 óptica en portadores libres. En algunas implantaciones, la señal 508 óptica puede filtrarse mediante un filtro de longitudes de onda, no mostrado en esta

figura, como un filtro en la capa 110 de filtro como se describe en referencia a la fig. 1. En algunas implantaciones, un perfil de rayo de la señal 508 óptica puede conformarse por una lente, no mostrada en esta figura, como una lente en la capa 112 de lente como se describe en referencia a la fig. 1.

5 En general, una diferencia entre el nivel de Fermi de la región 513 p+ Si y el nivel de Fermi de la región 512 n-Si crea un campo eléctrico entre las dos regiones, donde los electrones libres generados por la región 512 n-Si se desvían a una región por debajo de la región 513 p+ Si por el campo eléctrico. El primer puerto 516 puede estar acoplado a la primera señal 517 de control. Por ejemplo, el primer puerto 516 puede estar acoplado a una fuente de tensión, donde la primera señal 517 de control puede ser una señal de tensión de CC de la fuente de tensión. La primera señal 517 de control controla un flujo de electrones libres de la región por debajo de la región 513 p+ Si a la
10 región 515 n+ Si. Por ejemplo, si un voltaje de la señal 517 de control excede de un voltaje umbral, los electrones libres acumulados en la región por debajo de la región 513 p+ Si se desviarán a la región 515 n+ Si para su recogida. La región 515 n+ Si puede acoplarse al primer circuito 518 de lectura que procesa la señal eléctrica recogida. El primer circuito 518 de lectura puede ser similar al primer circuito 418 de lectura como se describe en referencia a la fig. 4A.

15 El píxel 502 del NIR incluye una región 522 n-Si, una región 524 p-Si, una región 525 n+ Si, un segundo puerto 526, una segunda señal 527 de control acoplada al segundo puerto 526, un segundo circuito 528 de lectura acoplado a la región 525 n+ Si, una región 531 p+ GeSi y una región 533 GeSi intrínseca. La región 522 n-Si puede doparse ligeramente con un dopante n, por ejemplo, aproximadamente 10^{16} cm^{-3} con fósforo. La región 524 p-Si puede doparse ligeramente con un dopante p, por ejemplo, aproximadamente 10^{15} cm^{-3} con boro. La región 525 n+ Si
20 puede tener un dopaje n+, donde la concentración de dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con fósforo.

La región 531 p+ GeSi recibe una señal 535 óptica y convierte la señal 406 óptica en señales eléctricas. Puesto que el espesor de la capa 531 p+ GeSi es generalmente delgada (por ejemplo, 100 nm), la señal 535 óptica se propaga en la región 533 GeSi intrínseca, donde la región 533 GeSi intrínseca absorbe la señal 535 óptica y se convierte la
25 señal 535 óptica en portadores libres. En algunas implantaciones, la señal 535 óptica puede filtrarse mediante un filtro de longitudes de onda, no mostrado en esta figura, como un filtro de NIR en la capa 110 de filtro como se describe en referencia a la fig. 1. En algunas implantaciones, un perfil de rayo de la señal 535 óptica puede conformarse por una lente, no mostrada en esta figura, como una lente en la capa 112 de lente como se describe en referencia a la fig. 1.

30 En algunas implantaciones, un espesor de la región 533 GeSi intrínseca puede estar entre $0,05 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$. En algunas implantaciones, la región 531 p+ GeSi puede repeler los fotoelectrones lejos de la región 533 GeSi intrínseca para evitar la recombinación superficial y de ese modo se puede aumentar la eficacia de la recogida de portadores. Por ejemplo, la región 531 p+ GeSi puede presentar un dopaje p+, donde la concentración de dopante es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando
35 la región 533 GeSi intrínseca es germanio y se dopa con boro.

Los portadores libres generados en la región 533 GeSi intrínseca pueden desviarse o difundirse en la región 522 n-Si. En algunas implantaciones, se puede aplicar una tensión V_{SS} de alimentación al píxel 502 del NIR para crear un campo eléctrico entre la región 531 p+ GeSi y la región 522 n-Si, de manera que los electrones libres puedan desviarse a la región 522 n-Si mientras los huecos libres pueden desviarse a la región 531 p+ GeSi.

40 El segundo puerto 526 puede estar acoplado a la segunda señal 527 de control. Por ejemplo, el segundo puerto 526 puede estar acoplado a una fuente de tensión, donde la segunda señal 527 de control puede ser una señal de tensión de CC de la fuente de tensión. La segunda señal 527 de control controla un flujo de electrones libres de la región 522 n-Si a la región 525 n+ Si. Por ejemplo, si un voltaje de la segunda señal 527 de control excede de un voltaje umbral, los electrones libres acumulados en la región 522 n-Si se desviarán a la región 525 n+ Si. La región
45 525 n+ Si puede acoplarse al segundo circuito 528 de lectura para procesamiento adicional de la señal eléctrica recogida. El segundo circuito 528 de lectura puede ser similar al primer circuito 418 de lectura como se describe en referencia a la fig. 4A.

Aunque no se muestra en la fig. 5, en algunas otras implantaciones, el píxel 504 del visible y el píxel 502 del NIR pueden fabricarse alternativamente para recoger huecos en vez de electrones. En este caso, la región 513 p+ Si se reemplazaría por una región n+ Si, las regiones 512 y 522 n-Si se reemplazarían por regiones p-Si, las regiones 514 y 524 p-Si se reemplazarían por regiones n-Si y las regiones 515 y 525 n+ Si se reemplazarían por regiones p+ Si.

La fig. 6 ilustra fotodiodos 600 de ejemplo para detectar señales ópticas del visible y del infrarrojo. Los fotodiodos 600 incluyen un píxel 654 del visible y un píxel 652 del NIR. El píxel 654 del visible es similar al píxel 504 del visible como se describe en referencia a la fig. 5. El píxel 652 del NIR es similar al píxel 502 del NIR como se describe en referencia a la fig. 5. En la presente memoria, la superficie del píxel 654 del visible y el píxel 652 del NIR que reciben las señales 660 y 658 ópticas es una superficie planarizada, donde la región 662 GeSi intrínseca y la región 664 p+ GeSi están embebidas en una capa 656 de óxido. Una superficie planarizada entre el píxel 654 del visible y el píxel
55 652 del NIR permite el procesamiento adicional en la superficie del fotodiodo o el enlace con dispositivos fabricados

en un sustrato separado.

En aplicaciones de tiempo de vuelo (TOF), puede determinarse información de profundidad de un objeto tridimensional usando una diferencia de fase entre un pulso de luz transmitida y un pulso de luz detectada. Por ejemplo, puede usarse una disposición bidimensional de píxeles para reconstruir una imagen tridimensional de un objeto tridimensional, donde cada píxel puede incluir uno o más fotodiodos para derivar información de fase del objeto tridimensional. En algunas implantaciones, en las aplicaciones de tiempo de vuelo se usan fuentes de luz con longitudes de onda en el intervalo del infrarrojo cercano (NIR). Por ejemplo, un diodo emisor de luz (LED) puede presentar una longitud de onda de 850 nm, 940 nm, 1050 nm o 1310 nm. En algunos fotodiodos se puede usar silicio como material de absorción, pero el silicio es un material de absorción ineficaz para longitudes de onda del NIR. Específicamente, pueden generarse fotoportadores profundamente (por ejemplo, profundidad mayor que 10 μm) en el sustrato de silicio y esos fotoportadores pueden desviarse o difundirse a la unión del fotodiodo lentamente, que da como resultado una disminución en el ancho de banda del dispositivo. Además, típicamente se usa una pequeña oscilación del voltaje para controlar las operaciones del fotodiodo para minimizar el consumo de energía. Para un área de absorción grande (por ejemplo, diámetro de 10 μm), la pequeña oscilación del voltaje solo puede crear un pequeño campo lateral/vertical por la gran área de absorción, lo que afecta a la velocidad de deriva de los fotoportadores que se barren por el área de absorción. El ancho de banda del dispositivo está, por lo tanto, más limitado. Para aplicaciones TOF usando longitudes de onda del NIR, un fotodiodo multipuerto en que se use germanio-silicio (GeSi) como material de absorción resuelve los problemas técnicos comentados anteriormente.

La fig. 7 es un fotodiodo 700 multipuerto de ejemplo para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 700 multipuerto incluye una capa 706 de absorción fabricada en un sustrato 702. El sustrato 702 puede ser cualquier sustrato adecuado en donde puedan fabricarse dispositivos semiconductores. Por ejemplo, el sustrato 702 puede ser un sustrato de silicio. El acoplamiento entre la capa 706 de absorción y una primera región 712 n+ Si se controla mediante un primer puerto 708. El acoplamiento entre la capa 706 de absorción y una segunda región 714 n+ Si se controla mediante un segundo puerto 710.

En general, la capa 706 de absorción recibe una señal 712 óptica y convierte la señal 712 óptica en señales eléctricas. La capa 706 de absorción se selecciona de modo que tenga un coeficiente de absorción alto en el intervalo de longitudes de onda deseado. Para longitudes de onda del NIR, la capa 706 de absorción puede ser mesa GeSi, donde el GeSi absorbe fotones en la señal 712 óptica y genera pares electrón-hueco. La composición del material de germanio y silicio en el mesa GeSi puede seleccionarse para procesos o aplicaciones específicos. En algunas implantaciones, la capa 706 de absorción se diseña para que tenga un espesor t . Por ejemplo, para longitud de onda de 850 nm, el espesor del diodo mesa GeSi puede ser aproximadamente 1 μm para que tenga una eficiencia cuántica sustancial. En algunas implantaciones, la superficie de la capa 706 de absorción se diseña para que tenga una forma específica. Por ejemplo, el mesa GeSi puede ser circular, cuadrado o rectangular dependiendo del perfil espacial de la señal 712 óptica en la superficie del mesa GeSi. En algunas implantaciones, la capa 706 de absorción se diseña para que tenga una dimensión d lateral para recibir la señal 712 óptica. Por ejemplo, el mesa GeSi puede tener forma circular, donde d puede variar de 1 μm a 50 μm .

En algunas implantaciones, la capa 706 de absorción puede incluir una región 731 p+ GeSi. La región 731 p+ GeSi puede repeler los fotoelectrones de la superficie de la región 706 de absorción y puede aumentar, de ese modo, el ancho de banda del dispositivo. Por ejemplo, la región 731 p+ GeSi puede presentar un dopaje p+, donde la concentración dopante es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando la región 706 de absorción sea germanio y se dope con boro.

El fotodiodo 700 multipuerto incluye una región 704 del pozo n implantada en el sustrato 702. Por ejemplo, el nivel de dopaje de la región 704 del pozo n puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} . En general, la región 704 del pozo n se usa para recoger electrones generados por la región 706 de absorción.

El primer puerto 708 se acopla a la primera señal 722 de control y un primer circuito 724 de lectura. Por ejemplo, el primer puerto 708 puede estar acoplado a una fuente de tensión, donde la primera señal 722 de control puede ser una señal de tensión multinivel variable con el tiempo de la fuente de tensión. El primer circuito 724 de lectura puede estar en una configuración de tres transistores que consiste en un puerto de reinicio, un seguidor de fuente y un puerto de selección o cualquier sistema de circuitos adecuado para procesar portadores libres. En algunas implantaciones, el primer circuito 724 de lectura puede fabricarse sobre el sustrato 702. En algunas otras implantaciones, el primer circuito 724 de lectura puede fabricarse sobre otro sustrato y coempaquetarse con el fotodiodo 700 multipuerto vía el enlace o apilamiento matriz/oblea. El segundo puerto 710 se acopla a una segunda señal 732 de control y a un segundo circuito 734 de lectura. La segunda señal 732 de control es similar a la primera señal 722 de control y el segundo circuito 734 de lectura es similar al primer circuito 724 de lectura.

La primera señal 722 de control y la segunda señal 732 de control se usan para controlar la recogida de electrones generados por los fotones absorbidos. Por ejemplo, cuando se «abre» el primer puerto 708 y se «cierra» el segundo puerto, los electrones se desviarían de la región 704 del pozo n a la región 712 n+ Si. En cambio, cuando se «cierra» el primer puerto 708 y se «abre» el segundo puerto, los electrones se desviarían de la región 704 del pozo n a la región 714 n+ Si. En algunas implementaciones, se puede aplicar una tensión entre la región 731 p+ GeSi y la 704

del pozo n para aumentar el campo eléctrico dentro de la capa 706 de absorción para desviar los electrones a la región 704 del pozo n.

5 La fig. 8 es un fotodiodo 800 multipuerto de ejemplo para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 800 multipuerto incluye una capa 806 de absorción fabricada en un sustrato 802. El sustrato 802 puede ser cualquier sustrato adecuado en donde puedan fabricarse dispositivos semiconductores. Por ejemplo, el sustrato 802 puede ser un sustrato de silicio. El acoplamiento entre la capa 806 de absorción y una primera región 812 p+ Si se controla mediante un primer puerto 808. El acoplamiento entre la capa 806 de absorción y una segunda región 814 p+ Si se controla mediante un segundo puerto 810.

10 En general, la capa 806 de absorción recibe una señal 812 óptica y convierte la señal 812 óptica en señales eléctricas. La capa 806 de absorción es similar a la capa 706 de absorción como se describe en referencia a la fig. 7. En algunas implantaciones, la capa 806 de absorción puede incluir una región 831 de n+ GeSi. La región 831 n+ GeSi puede repeler los huecos de la superficie de la región 806 de absorción y puede aumentar, de ese modo, el ancho de banda del dispositivo. Por ejemplo, la región 831 n+ GeSi puede presentar un dopaje n+, donde la concentración dopante es tan alta como pueda lograr un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando la región 806 de absorción es germanio y se dopa con fósforo.

15 El fotodiodo 800 multipuerto incluye una región 804 del pozo p implantada en el sustrato 802. Por ejemplo, el nivel de dopaje de la región 804 del pozo p puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} . En general, la región 804 del pozo p se usa para recoger huecos generados por la región 806 de absorción.

20 El primer puerto 808 se acopla a una primera señal 822 de control y a un primer circuito 824 de lectura. El primer circuito 808, la primera señal 822 de control y el primer circuito 824 de lectura son similares al primer puerto 708, la primera señal 722 de control y el primer circuito 724 de lectura como se describe en referencia a la fig. 7. El segundo puerto 810 se acopla a una segunda señal 832 de control y a un segundo circuito 834 de lectura. El segundo puerto 810, la segunda señal 832 de control y el segundo circuito 834 de lectura son similares al segundo puerto 710, la segunda señal 732 de control y el segundo circuito 734 de lectura como se describe en referencia a la fig. 7.

25 La primera señal 822 de control y la segunda señal 832 de control se usan para controlar la recogida de huecos generados por los fotones absorbidos. Por ejemplo, cuando se «abre» el primer puerto 808 y se «cierra» el segundo puerto 810, los huecos se desviarían de la región 804 del pozo p a la región 812 p+ Si. En cambio, cuando se «cierra» el primer puerto 808 y se «abre» el segundo puerto 810, los huecos se desviarían de la región 804 del pozo p a la región 814 p+ Si. En algunas implementaciones, se puede aplicar una tensión entre la región 831 n+ GeSi y la 804 del pozo p para aumentar el campo eléctrico dentro de la capa 806 de absorción para desviar los huecos a la región 804 del pozo p.

30 La fig. 9 ilustra fotodiodos 900 de ejemplo para detectar señales ópticas del visible y del infrarrojo. Los fotodiodos 900 de ejemplo incluyen un píxel 902 del NIR para recoger huecos y un píxel 904 del visible para recoger electrones, donde el píxel 902 del NIR y el píxel 904 del visible se forman en un sustrato común. El píxel 902 del NIR y el píxel 904 del visible no se separan mediante una estructura de aislamiento. El píxel 902 del NIR se configura para detectar una señal óptica con una longitud de onda en el intervalo del NIR. El píxel 904 del visible se configura para detectar una señal óptica con una longitud de onda en el intervalo del visible (por ejemplo, el azul o el verde o el rojo). El píxel 902 del NIR y el píxel 904 del visible pueden ser fotodiodos en la capa 108 sensora como se describe en referencia a la fig. 1, por ejemplo.

40 El píxel 904 del visible se configura para que recoja electrones libres generados a partir de portadores fotogenerados e incluye una región 912 n-Si, una región 914 n+ Si, una región 920 p-Si, un primer puerto 916, una primera señal 917 de control acoplada al primer puerto 916 y un primer circuito 918 de lectura acoplado a la región 914 n+ Si. La región 912 n-Si puede doparse ligeramente con un dopante n, por ejemplo, aproximadamente 10^{16} cm^{-3} con fósforo. La región 914 n+ Si puede tener un dopaje n+, donde la concentración de dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con fósforo. La región 920 p-Si puede doparse ligeramente con un dopante p, por ejemplo, aproximadamente 10^{16} cm^{-3} con boro.

45 En general, la capa 920 de p-Si recibe una señal 922 óptica. Puesto que el espesor de la capa 920 p-Si es generalmente delgada (por ejemplo, de 50 nm a aproximadamente 100 nm), la señal 922 óptica se propaga en la región 912 n-Si, donde la región 912 n-Si absorbe la señal 922 óptica y se convierte la señal 922 óptica en portadores libres. En algunas implantaciones, la señal 922 óptica puede filtrarse mediante un filtro de longitudes de onda, no mostrado en esta figura, como un filtro en la capa 110 de filtro como se describe en referencia a la fig. 1. En algunas implantaciones, un perfil de rayo de la señal 922 óptica puede conformarse por una lente, no mostrada en esta figura, como una lente en la capa 112 de lente como se describe en referencia a la fig. 1.

50 En general, una diferencia entre el nivel de Fermi de la región 920 p-Si y el nivel de Fermi de la región 912 n-Si crea un campo eléctrico entre las dos regiones, donde los electrones libres generados por la región 912 n-Si se desvían a la región por debajo de la región 920 p-Si por el campo eléctrico. El primer puerto 916 puede estar acoplado a la primera señal 917 de control. Por ejemplo, el primer puerto 916 puede estar acoplado a una fuente de tensión,

donde la primera señal 917 de control puede ser una señal de tensión de CC de la fuente de tensión. La primera señal 917 de control controla un flujo de electrones libres de la región por debajo de la región 920 p-Si a la región 914 n+ Si. Por ejemplo, si una tensión de la señal 917 de control excede de una tensión umbral, los electrones libres acumulados en la región por debajo de la región 920 p-Si se desviarán a la región 914 n+ Si para su recogida. La región 914 n+ Si puede acoplarse al primer circuito 918 de lectura que procesa la señal eléctrica recogida. El primer circuito 918 de lectura puede ser similar al primer circuito 418 de lectura como se describe en referencia a la fig. 4A.

El píxel 902 del NIR se configura para recoger huecos libres generados a partir de portadores fotogenerados e incluye una región 942 n-Si, una región 944 p+ Si, un segundo puerto 946, una segunda señal 947 de control acoplada al segundo puerto 946, un segundo circuito 948 de lectura acoplado a la región 944 p+ Si, una región 950 n+ GeSi, una región 952 GeSi intrínseca, una región 954 p-Ge y una región 956 de óxido. Además, el píxel 902 del NIR comparte la región 920 p-Si con el píxel 904 del VIS.

La región 942 n-Si puede doparse ligeramente con un dopante n, por ejemplo, aproximadamente 10^{15} cm^{-3} con fósforo. La región 944 p+ Si puede tener un dopaje p+, donde la concentración dopante activada es tan alta como se pueda lograr en un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ con boro. La región 950 n+ GeSi recibe una señal 960 óptica y convierte la señal 960 óptica en señales eléctricas. Puesto que el espesor de la capa 950 n+ GeSi es generalmente delgada (por ejemplo, de 50 nm a aproximadamente 100 nm), la señal 960 óptica se propaga en la región 952 GeSi intrínseca, donde la región 952 GeSi intrínseca absorbe la señal 960 óptica y se convierte la señal 960 óptica en portadores libres. En algunas implantaciones, la señal 960 óptica puede filtrarse mediante un filtro de longitudes de onda, no mostrado en esta figura, como un filtro de NIR en la capa 110 de filtro como se describe en referencia a la fig. 1. En algunas implantaciones, un perfil de rayo de la señal 960 óptica puede conformarse por una lente, no mostrada en esta figura, como una lente en la capa 112 de lente como se describe en referencia a la fig. 1.

En algunas implantaciones, un espesor de la región 952 GeSi intrínseca puede estar entre $0,05 \mu\text{m}$ y $2 \mu\text{m}$. En algunas implantaciones, la región 950 n+ GeSi puede repeler los huecos generados lejos de la región 952 GeSi intrínseca para evitar la recombinación superficial y de ese modo se puede aumentar la eficacia de la recogida de portadores. Por ejemplo, la región 950 n+ GeSi puede presentar un dopaje n+, donde la concentración dopante es tan alta como pueda lograr un proceso de fabricación, por ejemplo, aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando la región 950 de GeSi intrínseca es germanio y se dopa con fósforo.

Los huecos libres fotogenerados en la región 952 GeSi intrínseca pueden desviarse o difundirse en la región 920 p-Si. Los electrones libres fotogenerados en la región 952 GeSi intrínseca pueden ser repelidos por la región 954 p-GeSi, que evita que los electrones libres entren en la región 920 p-Si. En algunas implantaciones, se puede aplicar una tensión V_{DD} de alimentación de drenaje al píxel 902 del NIR para crear un campo eléctrico entre la región 950 n+ GeSi y la región 920 p-Si, de manera que los huecos libres puedan desviarse a la región 920 p-Si mientras los electrones libres puedan desviarse a la región 950 n+ GeSi.

El segundo puerto 946 puede estar acoplado a la segunda señal 947 de control. Por ejemplo, el segundo puerto 946 puede estar acoplado a una fuente de tensión, donde la segunda señal 947 de control puede ser una señal de tensión de CC de la fuente de tensión. La segunda señal 947 de control controla un flujo de huecos libres de la región 920 p-Si a la región 944 p+ Si. Por ejemplo, si la tensión de la segunda señal 947 de control excede de un voltaje umbral, los huecos libres acumulados en la región 920 p-Si se desviarán a la región 944 p+ Si. La región 944 p+ Si debe acoplarse al segundo circuito 948 de lectura para procesamiento adicional de la señal eléctrica recogida.

Aunque no se muestra en la fig. 9, en algunas otras implantaciones, el píxel 904 del visible puede fabricarse alternativamente para recoger huecos en vez de electrones y el píxel 902 del NIR puede fabricarse alternativamente para recoger electrones en vez de huecos. En este caso, la región 920 p-Si se reemplazaría por una región n-Si, las regiones 942 y 912 n-Si se reemplazarían por regiones p-Si, la región 944 p+ Si se reemplazaría por una región n+ Si, la región 914 n+ Si se reemplazaría por una región p+ Si, la región 950 n+ GeSi se reemplazaría por una región p+ GeSi y la región 954 p-GeSi se reemplazaría por una región n-GeSi.

En algunas implantaciones, la dirección de la señal de la luz mostrada en la fig. 4A, 4B, 5, 6, 7, 8 y 9 pueden invertirse dependiendo de los diseños, del empaquetado y de las aplicaciones. Por ejemplo, con referencia a la fig. 4A, la señal 406 óptica puede entrar el píxel 402 del NIR por la región 423 p+ Si, propagarse por la región 422 n-Si y después absorberse por la región 433 GeSi intrínseca.

La fig. 10 muestra una vista desde arriba de un conjunto 1000 de fotodiodos integrados de ejemplo para detectar luz visible y del NIR así como para una aplicación TOF. El conjunto 1000 de fotodiodos incluye un píxel 1002 NIR/TOF y un píxel 1004 VIS. El píxel 1002 NIR/TOF incluye un puerto 1006 NIR, un primer puerto 1012 TOF y un segundo puerto 1014 TOF. El píxel 1004 VIS incluye un puerto 1008 VIS. El píxel 1002 NIR/TOF y el píxel 1004 VIS no están aislados por una estructura de aislamiento. Los controles de la lectura de carga usando el puerto 1006 NIR y el puerto 1008 VIS son similares a los del fotodiodo 900 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 9. Los controles de la lectura de carga usando los puertos 1012 y 1014 TOF son similares a los del fotodiodo 700 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 7, o el fotodiodo 800 multipuerto como se describe en referencia

a la fig. 8. Los circuitos de lectura acoplados al puerto 1006 NIR y los puertos 1012 y 1014 TOF recogerían el mismo tipo de portadores y el circuito de lectura acoplado al puerto 1008 VIS recogería al tipo opuesto de portadores. Por ejemplo, si los circuitos de lectura del puerto 1006 NIR y los puertos 1012 y 1014 TOF se configuran para recoger electrones, el circuito de lectura acoplado al puerto 1008 VIS se configuraría para recoger huecos. En cambio, si los circuitos de lectura del puerto 1006 NIR y los puertos 1012 y 1014 TOF se configuran para recoger huecos, el circuito de lectura acoplado al puerto 1008 VIS se configuraría para recoger electrones.

La fig. 11 muestra una vista desde arriba de un conjunto 1100 de fotodiodos integrados de ejemplo para detectar luz visible y para una aplicación TOF. El conjunto 1100 de fotodiodos incluye un píxel 1102 NIR/TOF y un píxel 1104 VIS. El píxel 1102 NIR/TOF incluye un primer puerto 1112 TOF y un segundo puerto 1114 TOF. El píxel 1104 VIS incluye un puerto 1108 VIS. El píxel 1102 NIR/TOF y el píxel 1104 VIS no están aislados por una estructura de aislamiento. Los controles de la lectura de carga usando el puerto 1108 VIS son similares a los del fotodiodo 900 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 9. Los controles de la lectura de carga usando los puertos 1112 y 1114 TOF son similares a los del fotodiodo 700 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 7, o el fotodiodo 800 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 8. Los circuitos de lectura acoplados a los puertos 1112 y 1114 TOF recogerían el mismo tipo de portadores y el circuito de lectura acoplado al puerto 1108 VIS recogería al tipo opuesto de portadores. Por ejemplo, si los circuitos de lectura de los puertos 1112 y 1114 TOF se configuran para recoger electrones, el circuito de lectura acoplado al puerto 1108 VIS se configuraría para recoger huecos. En cambio, si los circuitos de lectura de los puertos 1112 y 1114 TOF se configuran para recoger huecos, el circuito de lectura acoplado al puerto 1108 VIS se configuraría para recoger electrones.

La fig. 12 muestra una vista desde arriba de un conjunto 1200 de fotodiodos integrados de ejemplo para detectar luz visible y del NIR así como para una aplicación TOF. El conjunto 1200 de fotodiodos incluye un píxel 1202 NIR/TOF y un píxel 1204 VIS. El píxel 1202 NIR/TOF incluye un puerto 1206 NIR, un primer puerto 1212 TOF y un segundo puerto 1214 TOF. El píxel 1204 VIS incluye un puerto 1208 VIS. El píxel 1202 NIR/TOF y el píxel 1204 VIS están aislados por una estructura de aislamiento. Los controles de la lectura de carga usando el puerto 1206 NIR y el puerto 1208 VIS son similares a los de los fotodiodos 400 como se describe en referencia a la fig. 4A, o los fotodiodos 450 como se describe en referencia a la fig. 4B, o los fotodiodos 500 como se describe en referencia a la fig. 5, o los fotodiodos 600 como se describe en referencia a la fig. 6. Los controles de la lectura de carga usando los puertos 1206 y 1208 TOF son similares a los del fotodiodo 700 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 7, o el fotodiodo 800 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 8. Los circuitos de lectura acoplados al puerto 1206 del NIR y los puertos 1212 y 1214 TOF recogerían el mismo tipo de portadores y el circuito de lectura acoplado al puerto 1208 del VIS recogería o no al mismo tipo de portadores. Por ejemplo, si los circuitos de lectura del puerto 1206 del NIR y los puertos 1212 y 1214 TOF se configuran para recoger electrones, el circuito de lectura acoplado al puerto 1208 del VIS se puede configurar para recoger huecos o electrones dependiendo del diseño porque se aíslan el píxel 1202 NIR/TOF y el píxel 1204 VIS. De manera similar, si los circuitos de lectura del puerto 1206 NIR y los puertos 1212 y 1214 TOF se configuran para recoger huecos, el circuito de lectura acoplado al puerto 1208 VIS se puede configurar para recoger huecos o electrones.

La fig. 13 muestra una vista desde arriba de un conjunto 1300 de fotodiodos integrados de ejemplo para detectar luz visible así como para una aplicación TOF. El conjunto 1300 de fotodiodos incluye un píxel 1302 de NIR/TOF y un píxel 1304 del VIS. El píxel 1302 de NIR/TOF incluye un primer puerto 1306 TOF, un segundo puerto 1312 TOF, un tercer puerto 1314 TOF y un cuarto puerto 1316 TOF. Los cuatro puertos TOF pueden usarse para extraer información adicional de la fase acerca de la señal recogida. El píxel 1304 del VIS incluye un puerto 1308 de VIS. El píxel 1302 de NIR/TOF y el píxel 1304 del VIS están aislados por una estructura de aislamiento. Los controles de la lectura de carga usando el puerto 1308 del VIS son similares a los de los fotodiodos 400 como se describe en referencia a la fig. 4A, o los fotodiodos 450 como se describe en referencia a la fig. 4B, o los fotodiodos 500 como se describe en referencia a la fig. 5, o los fotodiodos 600 como se describe en referencia a la fig. 6. Los controles de la lectura de carga usando los puertos 1306, 1312, 1314 y 1316 TOF son similares a los del fotodiodo 700 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 7, o el fotodiodo 800 multipuerto como se describe en referencia a la fig. 8. Los circuitos de lectura acoplados a los puertos 1306, 1312, 1314 y 1316 TOF recogerían el mismo tipo de portadores y el circuito de lectura acoplado al puerto 1308 del VIS recogería o no al mismo tipo de portadores. Por ejemplo, si los circuitos de lectura de los puertos 1306, 1312, 1314 y 1316 TOF se configuran para recoger electrones, el circuito de lectura acoplado al puerto 1308 del VIS se puede configurar para recoger huecos o electrones dependiendo del diseño porque se aíslan el píxel 1302 de NIR/TOF y el píxel 1304 del VIS. De manera similar, si los circuitos de lectura de los puertos 1306, 1312, 1314 y 1316 TOF se configuran para recoger huecos, el circuito de lectura acoplado al puerto 1308 del VIS se puede configurar para recoger huecos o electrones.

Las figs. 14A-14D ilustran un diseño 1400 de ejemplo para fabricar un conjunto de fotodiodos. Con referencia a la fig. 14A, se formó una capa 1402 de germanio-silicio en una oblea 1404 donadora. La oblea 1404 donadora puede ser una oblea de silicio. La capa 1402 de germanio-silicio puede formarse usando crecimiento epitaxial por un sistema de deposición química de vapor (CVD).

Con referencia a la fig. 14B, las estructuras 1408 de aislamiento se forman en la capa 1402 de germanio-silicio para definir las regiones de los fotodiodos. Las estructuras 1408 de aislamiento se pueden formar por ataque químico en

seco de los patrones de estructura de aislamiento seguido por una deposición de materiales aislantes como óxido o por implantaciones para formar una unión de dopaje o cualquier otra técnica adecuada. Aunque no se muestra en la figura, puede haber una o más etapas de procesamiento en las que procesen además los fotodiodos. Por ejemplo, puede haber una etapa de dopaje para definir una región p+ GeSi en la superficie de una región GeSi intrínseca. Se forma después una capa 1406 de interconexión en la capa 1402 de germanio-silicio, donde se forman múltiples interconexiones en una capa dieléctrica para establecer conexiones eléctricas con la capa 1402 de germanio-silicio y donde se formen marcas de alineación para el alineamiento de los enlaces.

Con referencia a la fig. 14C, una capa 1416 de interconexión de un sustrato 1414 portador se enlaza a la capa 1406 de interconexión de la oblea 1404 donadora. Obsérvese que la capa de interconexión referida en la presente memoria puede incluir una ruta eléctrica conductora (por ejemplo, una capa metálica) y una capa dieléctrica para aislar la ruta eléctrica conductora individual. El sustrato 1414 portador puede ser un sustrato de silicio, donde se puede formar una o más capas 1418 del sistema de circuitos sobre el sustrato de silicio. El sistema de circuitos puede ser un sistema de circuitos de control, un sistema de circuitos de lectura o cualquier otro sistema de circuitos adecuado para el conjunto de fotodiodos. Pueden formarse marcas de alineamiento en ambas capas 1406 y 1416 por cualquier técnica adecuada. El enlace entre las capas 1406 y 1416 puede hacerse por cualquier técnica adecuada como enlace térmico o enlace híbrido incluyendo enlace metal-metal y enlace óxido-óxido.

Con referencia a la fig. 14D, se forman una capa 1420 de filtro y una capa 1422 de lente en la capa 1402 de germanio-silicio para formar un conjunto de fotodiodos. Aunque no se muestra, la oblea 1404 donadora puede retirarse por pulido u otra técnica adecuada después del enlace y antes de que se forme la capa 1420 de filtro. En algunas otras implantaciones, aunque no se muestra en estas figuras, el germanio puede reemplazar germanio-silicio como material sensor en las descripciones relacionadas con las figs. 14A-14D.

Las figs. 15A-15D ilustran un diseño 1500 de ejemplo para formar selectivamente germanio-silicio sobre un sustrato. El diseño 1500 puede usarse para fabricar el conjunto 100, 200 o 300, de fotodiodos, por ejemplo. Con referencia a la fig. 15A, se forma un espacio vacío 1504 en un sustrato 1502. El espacio vacío 1504 puede definir el área del fotodiodo para un píxel NIR. El espacio vacío puede formarse usando litografía seguido de un ataque químico en seco del sustrato 1502. La forma del espacio vacío puede corresponder a la del píxel, como un cuadrado, un círculo u otras formas adecuadas.

Con referencia a la fig. 15B, se puede depositar una capa dieléctrica sobre el sustrato y puede llevarse a cabo un ataque químico direccional para formar un espaciador 1506 de la pared lateral. El ataque químico direccional puede ser un ataque químico en seco anisotrópico. Con referencia a la fig. 15C, una región 1508 de germanio o germanio-silicio crece selectivamente desde el sustrato 1502. Por ejemplo, la región 1508 de germanio-silicio puede formarse usando crecimiento epitaxial por un sistema de deposición química de vapor (CVD, en inglés).

Con referencia a la fig. 15D, la región 1508 de germanio o germanio-silicio se planariza con el sustrato 1502. La región 1508 de germanio o germanio-silicio se puede planarizar usando pulido químico-mecánico (CMP, en inglés) o cualquier otra técnica adecuada. En algunas otras implantaciones, aunque no se muestra en estas figuras, el germanio puede reemplazar al germanio-silicio como material sensor en las descripciones relacionadas con las figs. 15A-15D.

Las figs. 16A-16D ilustran un diseño 1600 de ejemplo para fabricar un conjunto de fotodiodos. El diseño 1600 puede usarse para fabricar los fotodiodos 400, 450, 500, 600, 700, 800 y 900 como se describe respectivamente en referencia a las figs. 4A, 4B, 5, 6, 7, 8 y 9, por ejemplo. Con referencia a la fig. 16A, se forman fotodiodos 1602 de silicio en una oblea 1604 donadora y un fotodiodo 1606 de germanio-silicio se hace crecer selectivamente en la oblea 1604 donadora. El píxel 454 del visible puede ser un ejemplo de un diodo de los fotodiodos 1602 de silicio y el píxel 452 del NIR puede ser un ejemplo de un diodo de los fotodiodos 1606 de GeSi. El crecimiento selectivo del fotodiodo germanio-silicio puede hacerse usando el diseño 1500 como se describe con referencia a las figs. 15A-15D o cualquier otro diseño o procedimiento adecuados.

Con referencia a la fig. 16B, se forma una capa 1610 de interconexión en el fotodiodo 1606 de germanio-silicio, donde se forman múltiples interconexiones en una capa dieléctrica para establecer conexiones eléctricas con el fotodiodo 1606 de germanio-silicio y los fotodiodos 1602 de silicio y donde se forman marcas de alineación para el alineamiento de los enlaces.

Con referencia a la fig. 16C, una capa 1616 de interconexión de un sustrato 1614 portador se enlaza a la capa 1610 de interconexión de la oblea 1604 donadora. El sustrato 1614 portador puede ser un sustrato de silicio, donde se puede formar una o más capas 1618 del sistema de circuitos sobre el sustrato de silicio. El sistema de circuitos puede ser un sistema de circuitos de control, un sistema de circuitos de lectura o cualquier otro sistema de circuitos adecuado para el conjunto de fotodiodos. Pueden formarse marcas de alineamiento en ambas capas 1610 y 1616 por cualquier técnica adecuada. El enlace entre las capas 1610 y 1616 puede hacerse por cualquier técnica adecuada como enlace térmico o enlace híbrido incluyendo enlace metal-metal y enlace óxido-óxido.

Con referencia a la fig. 16D, se forman una capa 1620 de filtro y una capa 1622 de lente en el fotodiodo 1602 de

silicio para formar el conjunto de fotodiodos. Aunque no se muestra, la oblea 1604 donadora puede retirarse por pulido u otras técnicas adecuadas después del enlace y antes de que se forme la capa 1620 de filtro. En algunas otras implantaciones, aunque no se muestra en estas figuras, el germanio puede reemplazar germanio-silicio como material sensor en las descripciones relacionadas con las figs. 16A-16D.

5 Las figs. 17A-17E ilustran un diseño 1700 de ejemplo para fabricar un conjunto de fotodiodos. El diseño 1700 puede usarse para fabricar los fotodiodos 400, 450, 500, 600, 700, 800 y 900 como se describe respectivamente en referencia a las figs. 4A, 4B, 5, 6, 7, 8 y 9, por ejemplo. Con referencia a la fig. 17A, se formó una capa 1702 de germanio-silicio en una primera oblea 1704 donadora. Se forma una primera capa 1706 de interconexión en la capa 1702 de germanio-silicio con múltiples interconexiones y marcas de alineamiento.

10 Con referencia a la fig. 17B, una capa 1716 de interconexión de un sustrato 1714 portador se enlaza a la capa 1706 de interconexión de la primera oblea 1704 donadora. El sustrato 1714 portador puede ser un sustrato de silicio, donde se puede formar una o más capas 1718 del sistema de circuitos sobre el sustrato de silicio. El sistema de circuitos puede ser un sistema de circuitos de control, un sistema de circuitos de lectura o cualquier otro sistema de circuitos adecuado para el conjunto de fotodiodos. El enlace entre las capas 1706 y 1716 puede hacerse por cualquier técnica adecuada como enlace térmico o enlace híbrido incluyendo enlace metal-metal y enlace óxido-óxido.

Con referencia a la fig. 17C, la primera oblea 1704 donadora se retira por pulido u otra técnica adecuada después del enlace. Con referencia a la fig. 17D, se forma un primer fotodiodo 1720 de germanio-silicio. El primer fotodiodo 1720 de germanio-silicio puede formarse usando un patrón y ataque químico de la capa 1702 de germanio-silicio, seguido por deposición de una capa de pasivación como una capa de dieléctrico. La capa de dieléctrico puede planarizarse por CMP u otras técnicas adecuadas. Puede formarse una vía 1722 por ataque químico anisotrópico seguido de deposición de materiales conductores como cobre.

20

Con referencia a la fig. 17E, la capa 1744 de dieléctrico del sustrato 1714 portador se enlaza a la capa 1732 de interconexión de una segunda oblea 1734 donadora. Se forma un conjunto 1736 de fotodiodos de germanio-silicio en la segunda oblea 1734 donadora. La vía 1738 se enlaza con la vía 1722 para establecer conexiones eléctricas entre el primer fotodiodo 1720 de germanio-silicio, el conjunto 1736 de fotodiodos de germanio-silicio y los circuitos 1718 integrados.

25

Con referencia a la fig. 17F, se forman una capa 1740 de filtro y una capa 1742 de lente sobre el conjunto 1736 de fotodiodos de germanio-silicio para formar el conjunto de fotodiodos. Aunque no se muestra, la segunda oblea 1734 donadora puede retirarse por pulido u otra técnica adecuada después del enlace y antes de que se forme la capa 1740 de filtro. En algunas otras implantaciones, aunque no se muestra en estas figuras, el germanio puede reemplazar al germanio-silicio como material sensor en las descripciones relacionadas con las figs. 17A-17F.

30

La fig. 18A muestra un sistema 1800 de imágenes de ejemplo para determinar las características de un objeto 1810 objetivo. El objeto 1810 objetivo puede ser un objeto tridimensional. El sistema 1800 de imágenes puede incluir una unidad 1802 transmisora, una unidad 1804 receptora y una unidad 1806 de procesamiento. En general, la unidad 1802 transmisora emite luz 1812 hacia el objeto 1810 objetivo. La unidad 1802 transmisora puede incluir una o más fuentes de luz, sistema de circuitos de control o elementos ópticos. Por ejemplo, la unidad 1802 transmisora puede incluir uno o más LED del NIR o del visible, donde la luz 1812 emitida puede colimarse mediante una lente colimadora para propagarse en el espacio.

35

En general, la unidad 1804 receptora recibe la luz 1814 reflejada que se refleja del objeto 1810 objetivo. La unidad 1804 receptora puede incluir uno o más fotodiodos, sistema de circuitos de control o elementos ópticos. Por ejemplo, la unidad 1804 receptora puede incluir un sensor de imagen, donde el sensor de imagen incluye múltiples píxeles fabricados sobre un sustrato semiconductor. Cada píxel puede incluir uno o más fotodiodos multipuerto para detectar la luz 1814 reflejada, donde la luz 1814 reflejada puede enfocarse a los fotodiodos. Cada fotodiodo puede ser el fotodiodo multipuerto descrito en esta Solicitud de Patente.

40

En general, la unidad 1806 de procesamiento procesa los fotoportadores generados por la unidad 1804 receptora y determina las características del objeto 1810 objetivo. La unidad 1806 de procesamiento puede incluir un sistema de circuitos de control, uno o más procesadores o un medio de almacenamiento en ordenador que pueda almacenar instrucciones para determinar las características del objeto 1810 objetivo. Por ejemplo, la unidad 1806 de procesamiento puede incluir circuitos de lectura y procesadores que puedan procesar la información asociada a los fotoportadores recogidos para determinar las características del objeto 1810 objetivo. En algunas implantaciones, las características del objeto 1810 objetivo pueden ser información de profundidad del objeto 1810 objetivo. En algunas implantaciones, las características del objeto 1810 objetivo pueden ser composiciones del material del objeto 1810 objetivo.

45

La fig. 18B muestra una técnica de ejemplo para determinar las características del objeto 1810 objetivo. La unidad 1802 transmisora puede emitir pulsos 1812 de luz modulados a una frecuencia f_m con un ciclo de servicio del 50 % como un ejemplo. La unidad 1804 receptora puede recibir pulsos 1814 de luz reflejada con un desplazamiento de

50

fases de Φ . Los fotodiodos multipuerto se controlan de manera que un circuito 1 de lectura lea las cargas Q_1 recogidas en una fase sincronizada con los pulsos de luz emitidos y un circuito 2 de lectura lea las cargas Q_2 recogidas en una fase opuesta con los pulsos de luz emitidos. En algunas implantaciones, la distancia, D , entre el sistema 1800 de imágenes y el objeto 1810 objetivo puede derivarse usando la ecuación

$$5 \quad D = \frac{c}{4f_m} \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2},$$

donde c es la velocidad de la luz.

La fig. 18C muestra otra técnica de ejemplo para determinar las características del objeto 1810 objetivo. La unidad 1802 transmisora puede emitir pulsos 1812 de luz modulados a una frecuencia f_m con un ciclo de servicio menor que el 50 %. Reduciendo el ciclo de servicio de los pulsos ópticos por un factor N , pero aumentando la intensidad de los pulsos ópticos por un factor N al mismo tiempo, la relación señal a ruido de los pulsos 1814 de luz reflejada recibidos puede mejorarse mientras se mantenga sustancialmente el mismo consumo de energía para el sistema 1800 de imágenes. Esto se hace posible cuando el ancho de banda del dispositivo aumenta de manera que el ciclo de servicio de los pulsos ópticos pueda disminuir sin que se distorsione la forma del pulso. La unidad 1804 receptora puede recibir pulsos 1814 de luz reflejada con un desplazamiento de fases de Φ . Los fotodiodos multipuerto se controlan de manera que un circuito 1 de lectura lea las cargas Q_1' recogidas en una fase sincronizada con los pulsos de luz emitidos y un circuito 2 de lectura lea las cargas Q_2' recogidas en una fase retardada con los pulsos de luz emitidos. En algunas implantaciones, la distancia, D , entre el sistema 1800 de imágenes y el objeto 1810 objetivo puede derivarse usando la ecuación

$$D = \frac{c}{4Nf_m} \frac{Q_2'}{Q_1' + Q_2'}$$

20 La fig. 19 muestra un ejemplo de un diagrama 1900 de flujo para determinar las características de un objeto usando un sistema de imágenes. El proceso 1900 puede llevarse a cabo por un sistema como el sistema 1800 de imágenes.

El sistema recibe luz reflejada (1902). Por ejemplo, la unidad 1802 transmisora puede emitir pulsos 1812 de luz del NIR al objeto 1810 objetivo. La unidad 1804 receptora puede recibir pulsos 1814 de luz del NIR reflejada que se refleja del objeto 1810 objetivo.

25 El sistema determina información de la fase (1904). Por ejemplo, la unidad 1804 receptora puede incluir un sensor de imagen, donde el sensor de imagen incluye múltiples píxeles fabricados sobre un sustrato semiconductor. Cada píxel puede incluir uno o más fotodiodos para detectar los pulsos 1814 de luz reflejada. El tipo de fotodiodo puede ser el fotodiodo multipuerto descrito en esta Solicitud de Patente, donde la información de la fase puede determinarse usando técnicas descritas con referencia a la fig. 18B o la fig. 18C.

30 El sistema determina características de los objetos (1906). Por ejemplo, la unidad 1806 de procesamiento puede determinar información de profundidad del objeto 1810 basándose en la información de la fase usando técnicas descritas en referencia a la fig. 18B o la fig. 18C.

35 Se han descrito una serie de implantaciones. No obstante, se debe entender que pueden hacerse varias modificaciones sin apartarse del alcance de la descripción. Por ejemplo, pueden usarse varias formas de los flujos mostrados anteriormente, reordenando, añadiendo o eliminando etapas.

Se han podido analizar varias implantaciones usando secciones transversales bidimensionales para una descripción fácil y para fines de ilustración. No obstante, también deberían estar incluidas las variaciones y derivaciones tridimensionales dentro del alcance de la descripción siempre que haya las correspondientes secciones transversales bidimensionales en las estructuras tridimensionales.

40 Si bien esta memoria descriptiva contiene muchas especificidades, estas no deberían interpretarse como limitaciones, sino más bien como descripciones de elementos específicos para realizaciones particulares. Algunos elementos que se describen en esta memoria descriptiva en el contexto de realizaciones separadas también pueden implementarse junto con una realización sola. En cambio, algunos elementos que se describen en el contexto de una realización sola también pueden implementarse en múltiples realizaciones por separado o en cualquier subcombinación adecuada.

45 De manera similar, si bien las operaciones se representan en los dibujos en un orden particular, esto no debe interpretarse como que se requiere que tales operaciones se lleven a cabo en el orden particular mostrado o en orden secuencial o que todas las operaciones ilustradas se lleven a cabo para lograr los resultados deseables. En algunas circunstancias, puede ser ventajoso el procesamiento multitarea y paralelo. Además, no debe interpretarse que la separación de varios componentes del sistema en las realizaciones descritas anteriormente se requiera en

todas las realizaciones y debe entenderse que los componentes del programa y los sistemas descritos pueden integrarse generalmente en un solo producto de *software* o empaquetarse en múltiples productos de *software*.

Así, se han descrito realizaciones particulares. Otras realizaciones están dentro del alcance de las reivindicaciones siguientes. Por ejemplo, las acciones citadas en las reivindicaciones pueden llevarse a cabo en un orden diferente y aún lograrse resultados deseables.

5

REIVINDICACIONES

1. Un conjunto de sensores de imagen (100, 300, 400, 1000, 1100, 1200, 1300) que comprende:
 - un sustrato portador (102, 702, 1414, 1614, 1714);
 - 5 un primer grupo de fotodiodos (122, 124, 302, 404, 454, 504, 654, 1004, 1104, 1204, 1304, 1602, 1802) acoplados al sustrato portador, en donde el primer grupo de fotodiodos comprende un primer fotodiodo y en donde el primer fotodiodo comprende una capa semiconductor configurada para absorber fotones de las longitudes de onda del visible y generar fotoportadores a partir de los fotones absorbidos y
 - 10 un segundo grupo de fotodiodos (126, 128, 302, 402, 452, 502, 652, 1002, 1102, 1202, 1302, 1606, 1806, 1720) acoplados al sustrato portador, en donde el segundo grupo de fotodiodos comprende un segundo fotodiodo y en donde el segundo fotodiodo comprende una región de germanio-silicio fabricada en la capa semiconductor, configurada la región germanio-silicio para absorber fotones a las longitudes de onda del infrarrojo o del infrarrojo cercano y generar fotoportadores a partir de los fotones absorbidos;
 - en donde el primer y el segundo fotodiodos no se superponen en la dirección de la señal de la luz.
2. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 1, en donde el primer y el segundo grupo de fotodiodos se ordenan en una disposición bidimensional.
3. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 1, en donde cada fotodiodo del primer y del segundo grupo de fotodiodos incluye un filtro de longitudes de onda, respectivo, configurado para transmitir una porción de la luz recibida y un elemento de lente respectivo configurado para enfocar la luz recibida.
4. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 1, en donde el primer fotodiodo comprende además:
 - 20 una primera región de recogida de portador configurada para recoger una porción de los fotoportadores generados por la capa semiconductor;
 - una primera región de lectura acoplada a un primer sistema de circuitos de lectura, configurada la primera región de lectura para proporcionar los fotoportadores recogidos por la primera región de recogida de portadores al primer sistema de circuitos de lectura y
 - 25 un primer puerto acoplado a una primera señal de control que controla un transporte de portadores entre la primera región de recogida de portadores y la primera región de lectura y
 - en donde el segundo fotodiodo comprende además:
 - una segunda región de recogida de portador configurada para recoger una porción de los fotoportadores generados por la región germanio-silicio;
 - 30 una segunda región de lectura acoplada a un segundo sistema de circuitos de lectura, configurada la segunda región de lectura para proporcionar los fotoportadores recogidos por la segunda región de recogida de portadores al segundo sistema de circuitos de lectura y
 - un segundo puerto acoplado a una segunda señal de control que controla un transporte de portadores entre la segunda región de recogida de portadores y la segunda región de lectura.
- 35 5. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 4, en donde el segundo fotodiodo comprende además:
 - una tercera región de lectura acoplada a un tercer sistema de circuitos de lectura, configurada la tercera región de lectura para proporcionar los fotoportadores recogidos por la segunda región de recogida de portadores al tercer sistema de circuitos de lectura y
 - 40 un tercer puerto acoplado a una tercera señal de control que controla un transporte de portadores entre la segunda región de recogida de portadores y la tercera región de lectura.
6. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 5, en donde el segundo fotodiodo comprende además:
 - una cuarta región de lectura acoplada a un cuarto sistema de circuitos de lectura, configurada la cuarta región de lectura para proporcionar los fotoportadores recogidos por la segunda región de recogida de portadores al cuarto sistema de circuitos de lectura y
 - 45 un cuarto puerto acoplado a una cuarta señal de control que controla un transporte de portadores entre la segunda región de recogida de portadores y la cuarta región de lectura.

7. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 6, en donde el segundo fotodiodo comprende además:
una quinta región de lectura acoplada a un quinto sistema de circuitos de lectura, configurada la quinta región de lectura para proporcionar los fotoportadores recogidos por la segunda región de recogida de portadores al quinto sistema de circuitos de lectura y
- 5 un quinto puerto acoplado a una quinta señal de control que controla un transporte de portadores entre la segunda región de recogida de portadores y la quinta región de lectura.
8. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 7, en donde el primer puerto es para una aplicación sensora de imágenes y en donde al menos dos puertos del segundo, tercer, cuarto y quinto puerto son para una aplicación de tiempo de vuelo.
- 10 9. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 4, en donde la primera región de recogida de portadores comprende una unión p-n y la segunda región de recolección de portadores comprende una unión p-i-n configurada para recoger electrones y en donde la primera y la segunda región de lectura son regiones n-dopadas.
10. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 1, que comprende además una capa de óxido planarizada por el primer y el segundo grupo de fotodiodos, en donde la región germanio-silicio está embebida en la capa de óxido.
- 15 11. El conjunto de sensores de imagen de la reivindicación 1, en donde el primer fotodiodo se configura para recoger electrones y el segundo fotodiodo se configura para recoger huecos.
12. El conjunto de sensores de imagen de cualquier reivindicación precedente, en donde el primer y el segundo fotodiodo están separados por una estructura de aislamiento.
- 20 13. El conjunto de sensores de imagen de cualquier reivindicación precedente, en donde:
el primer grupo de fotodiodos son fotodiodos de silicio;
cada fotodiodo del primer grupo se forma como los primeros píxeles del conjunto y
cada fotodiodo del segundo grupo se forma como los segundos píxeles del conjunto.

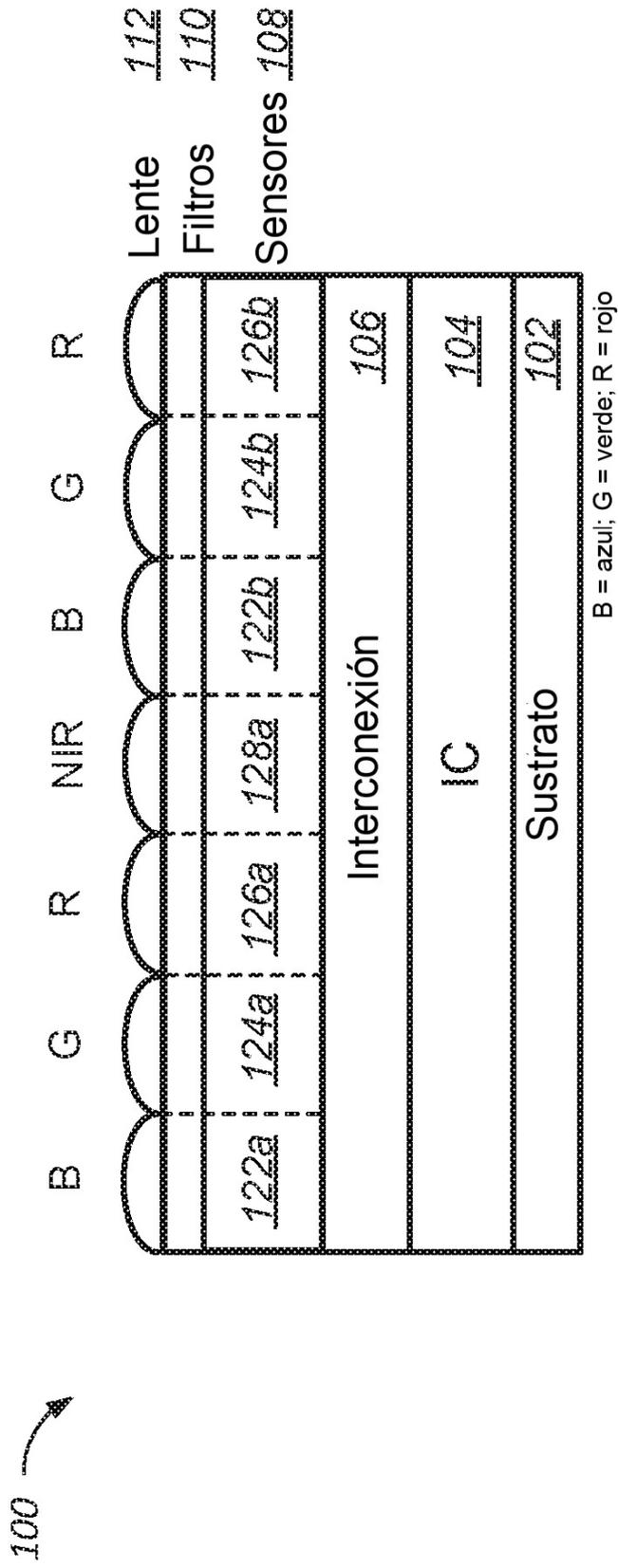


FIG. 1

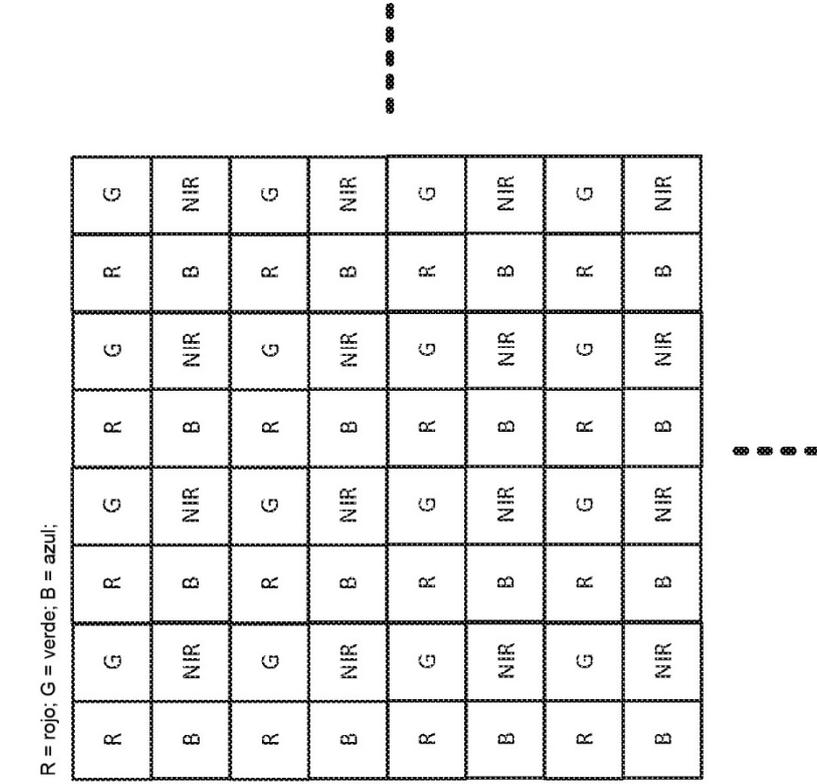
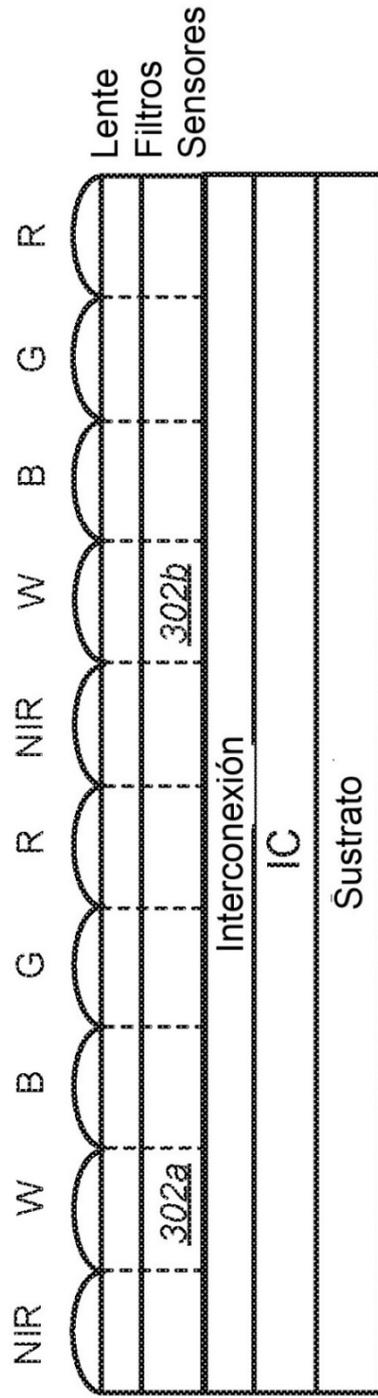


FIG. 2

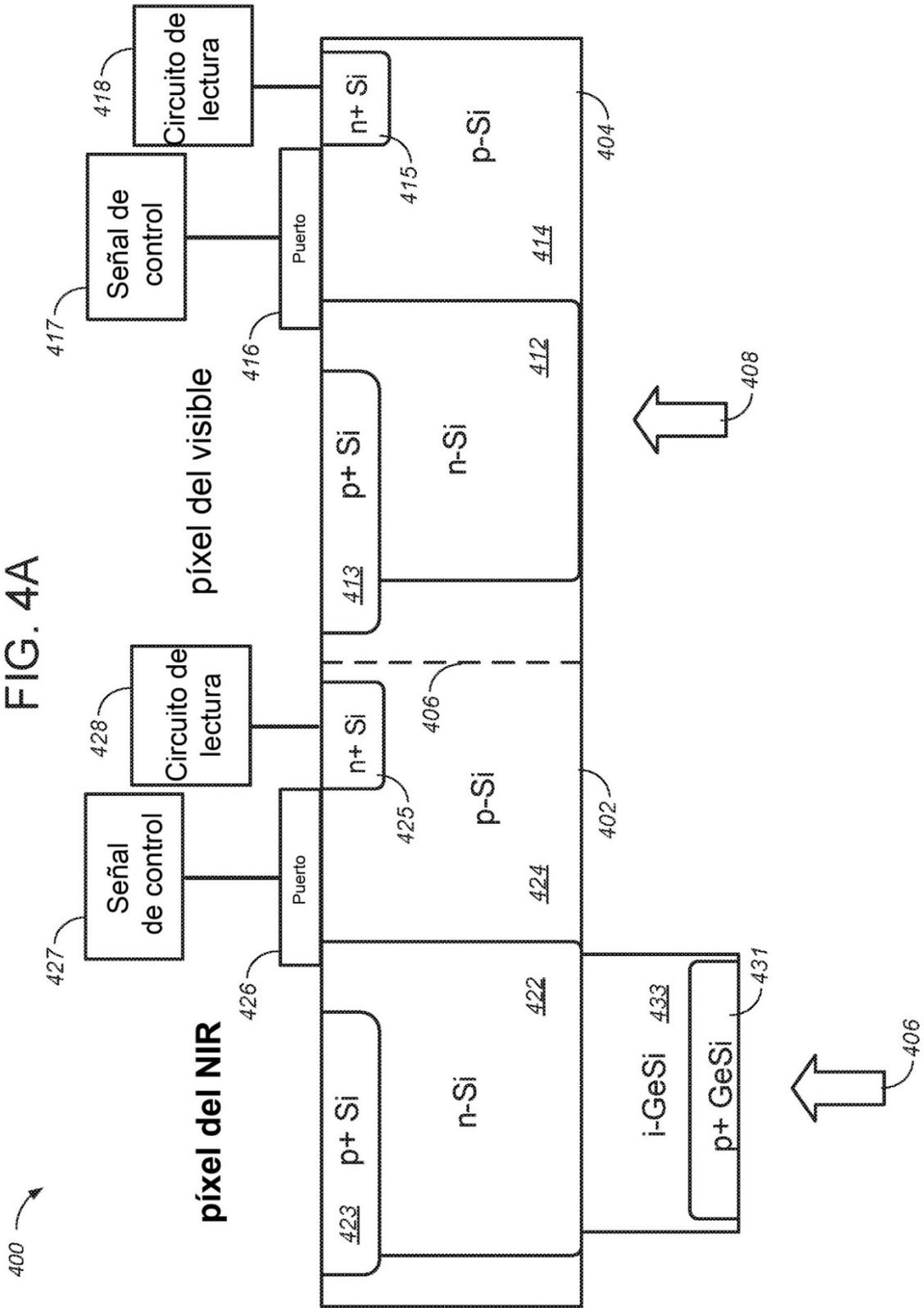
300 ↗



W = blanco; B = azul; G = verde; R = rojo

FIG. 3

FIG. 4A



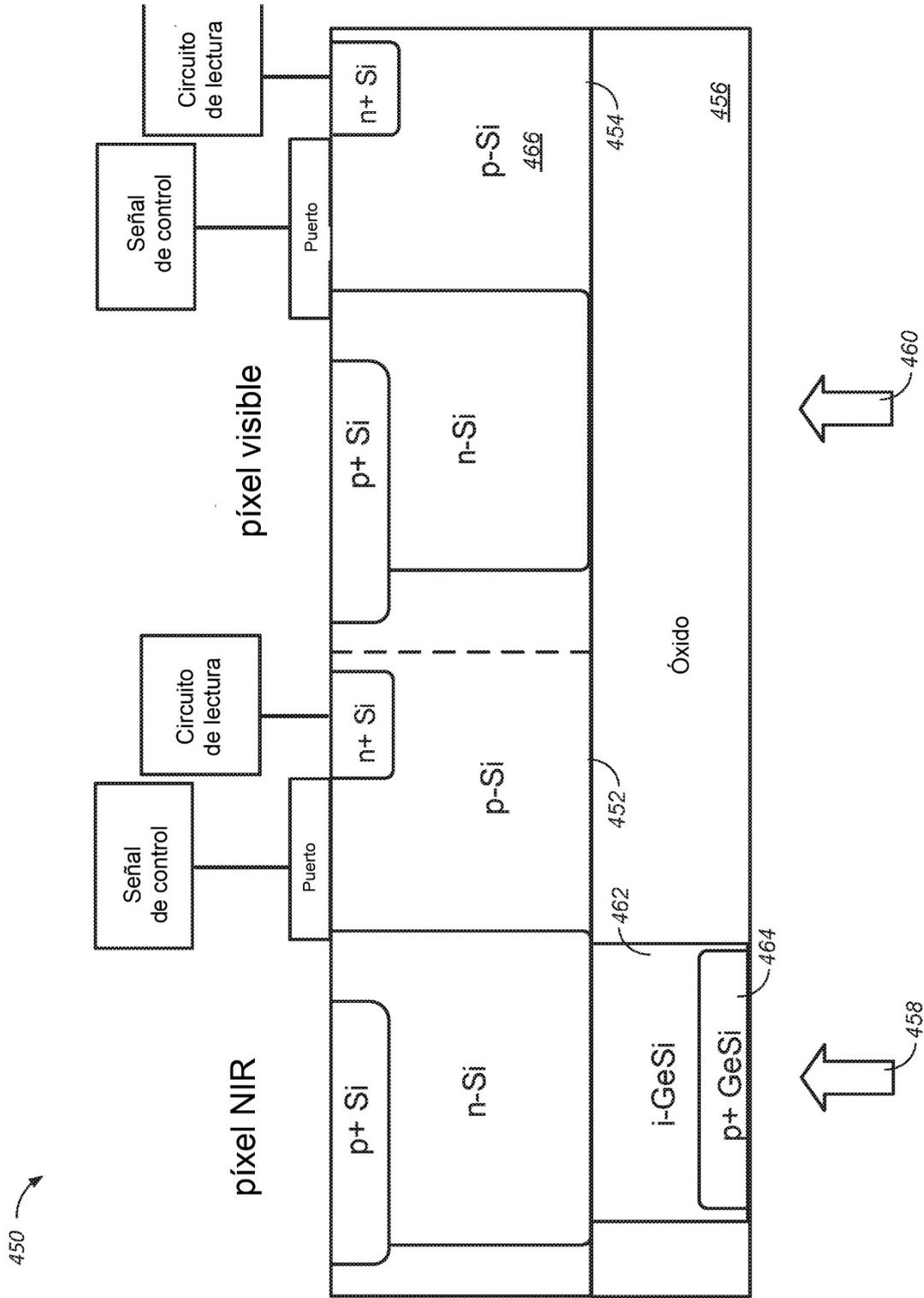


FIG. 4B

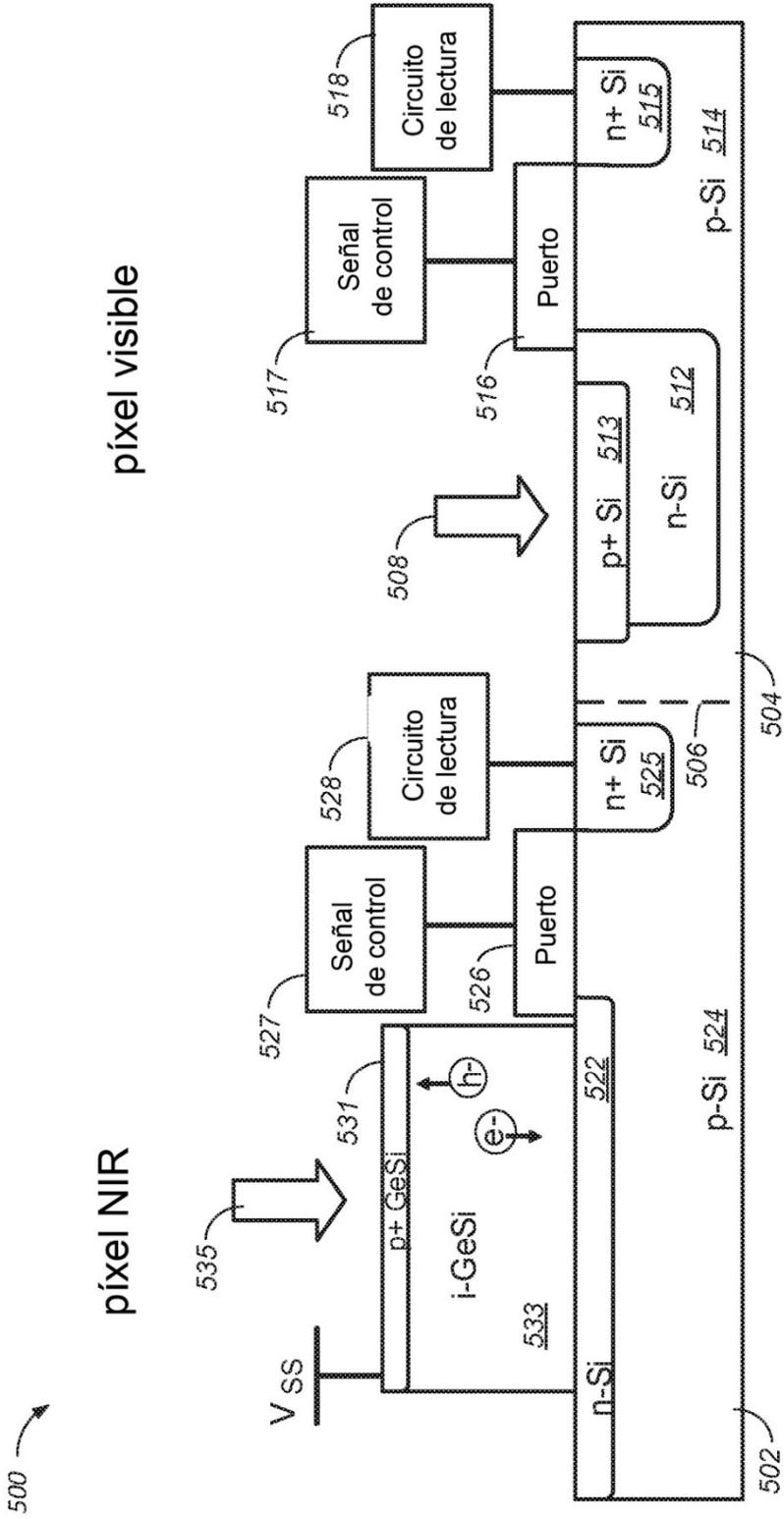


FIG. 5

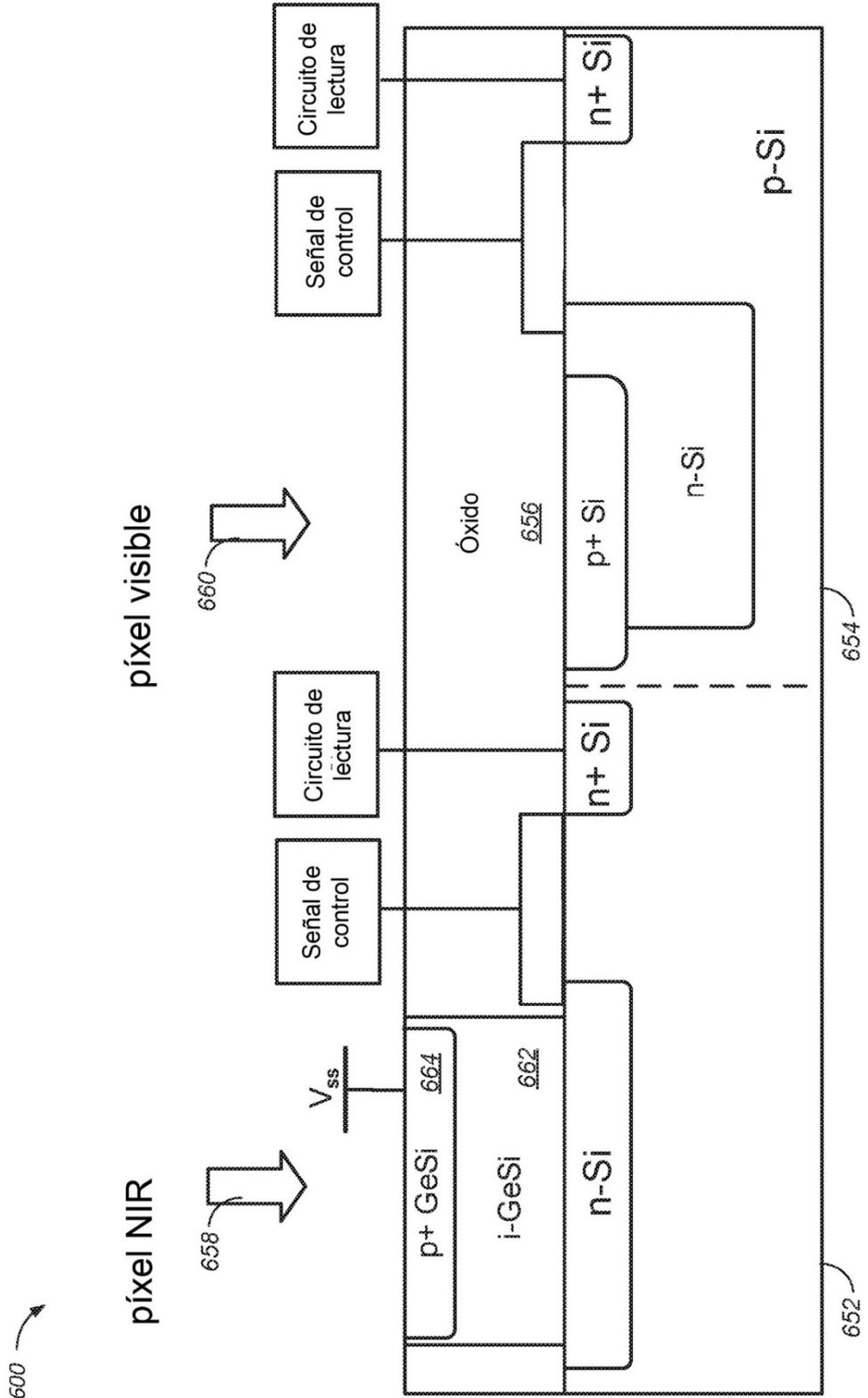


FIG. 6

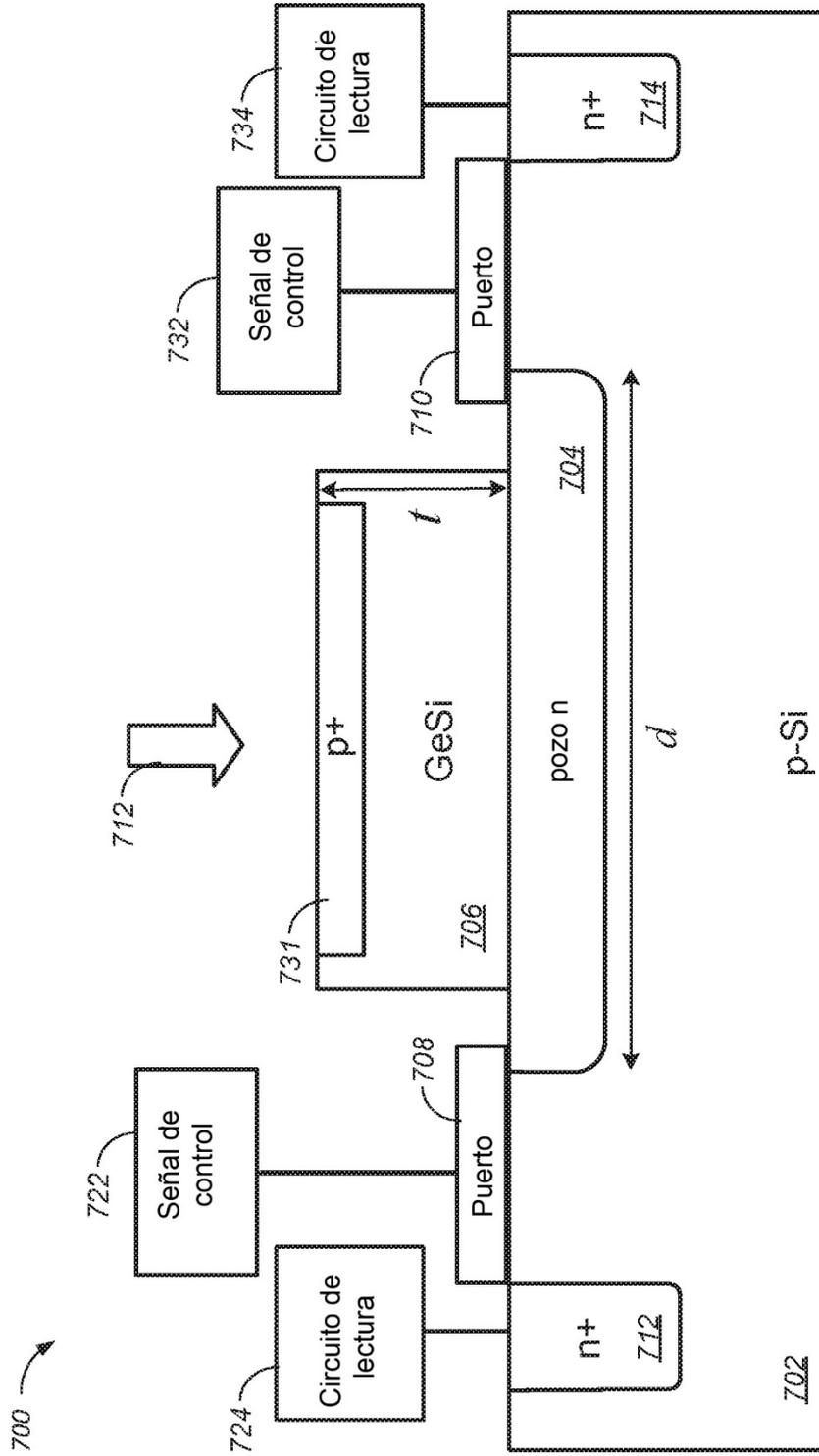


FIG. 7

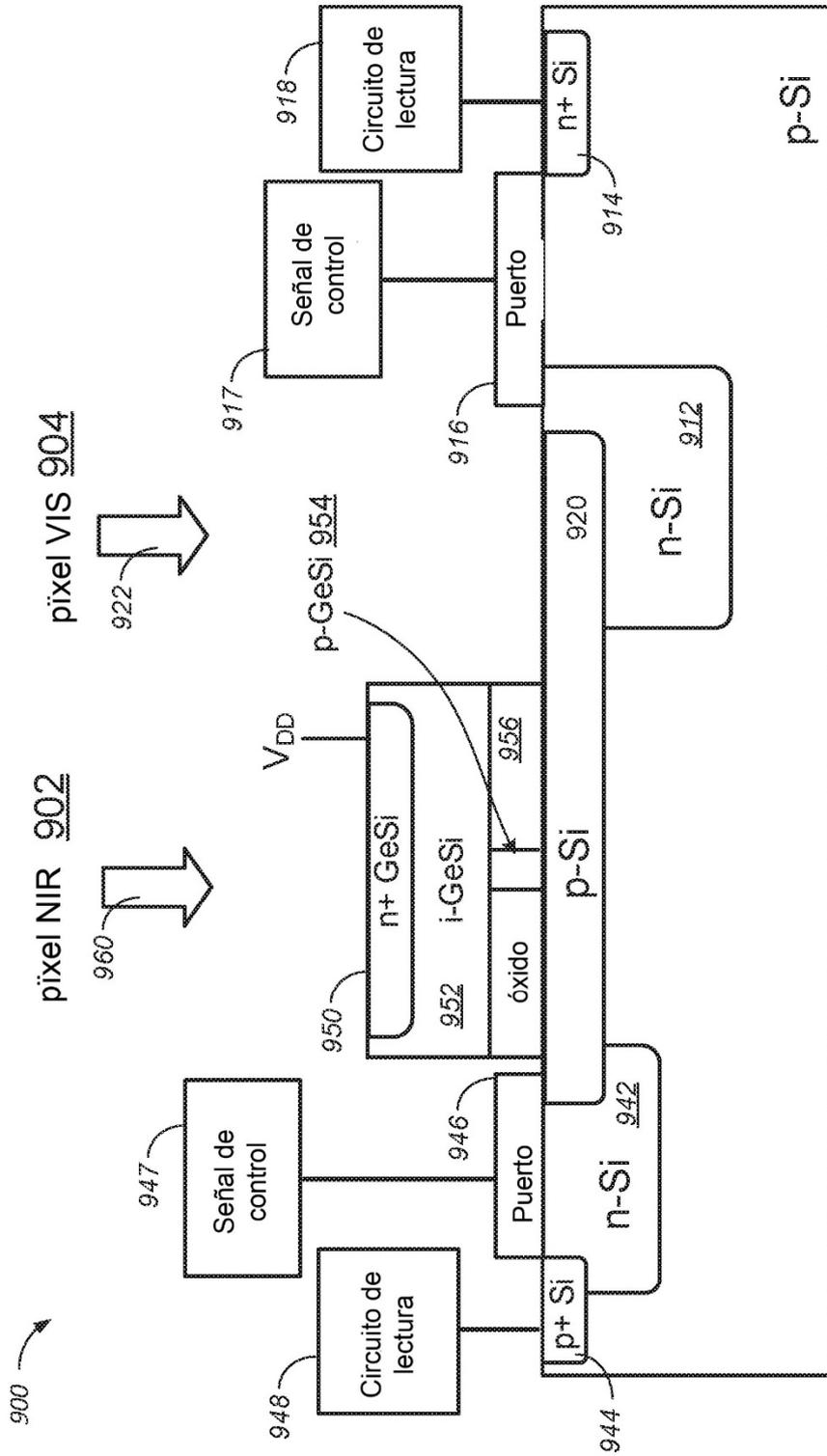


FIG. 9

1000 ↗

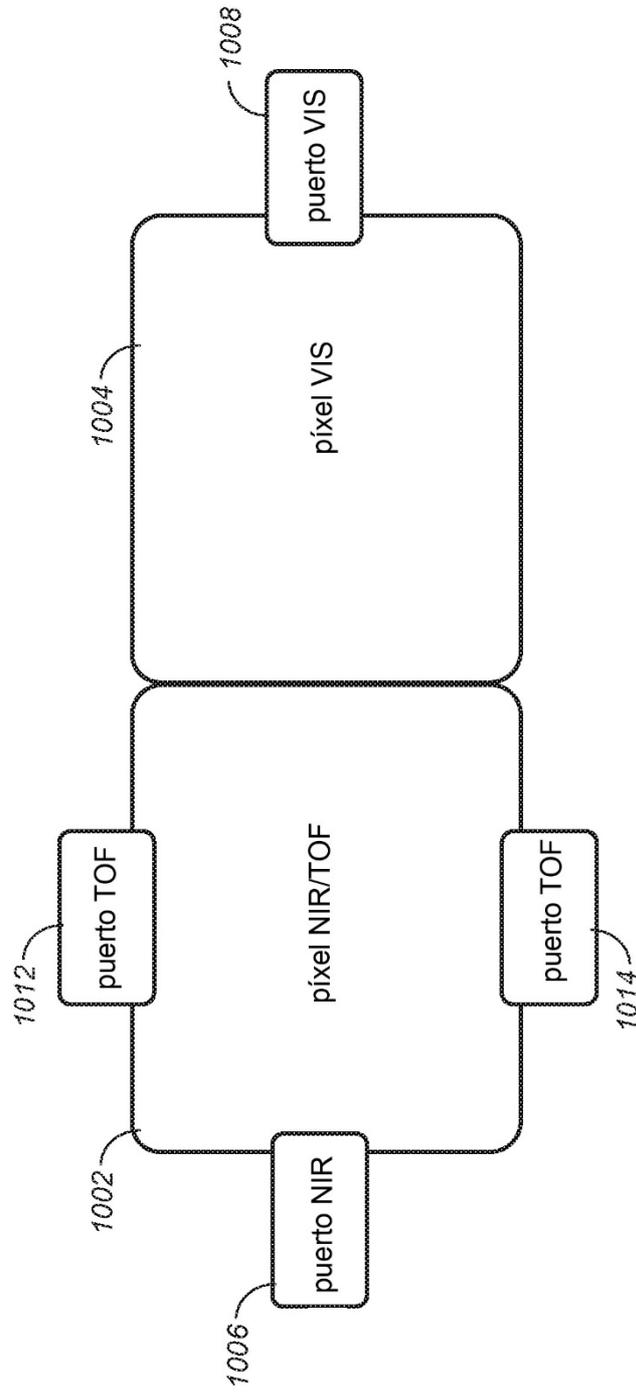


FIG. 10

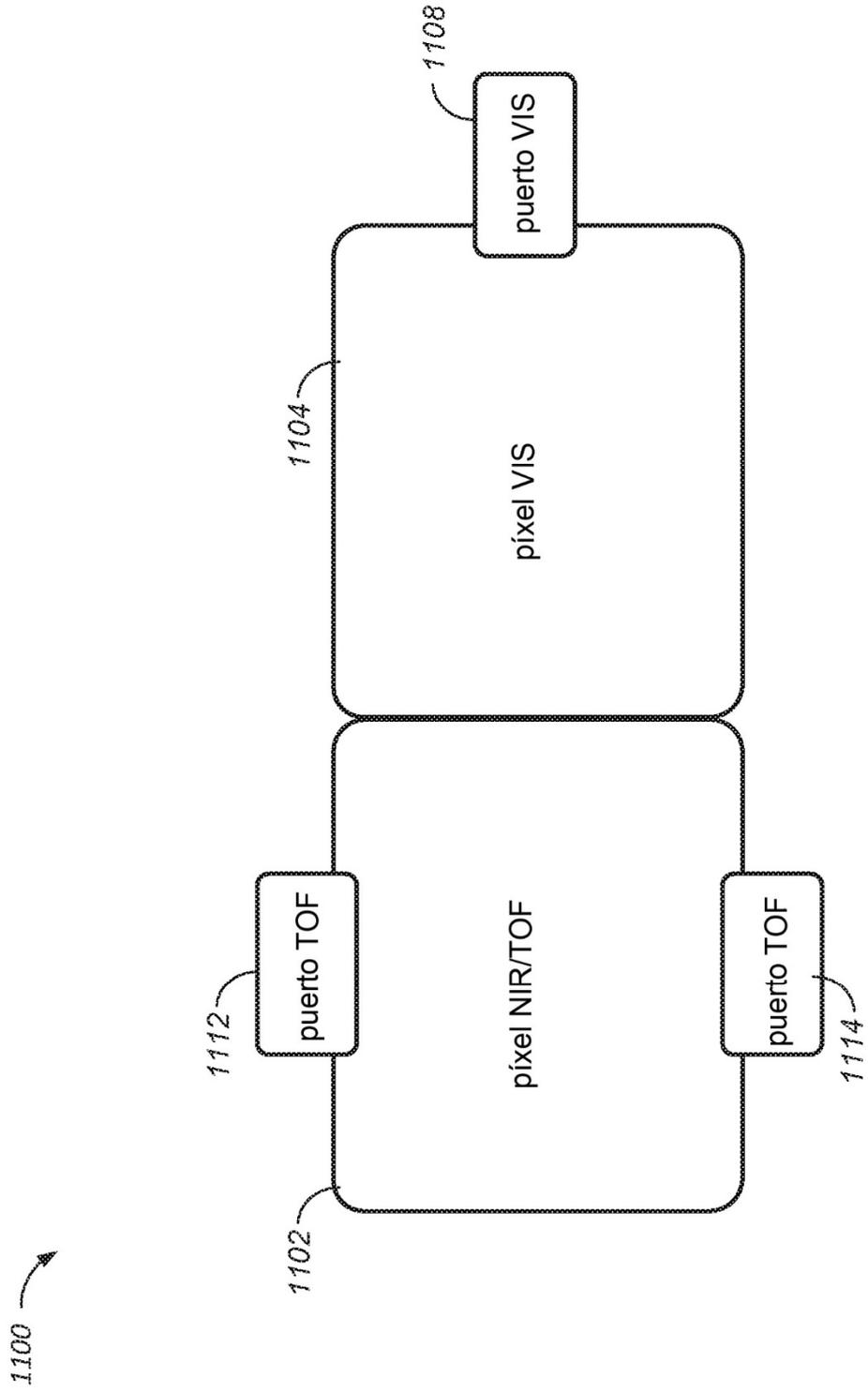


FIG. 11

1200 ↗

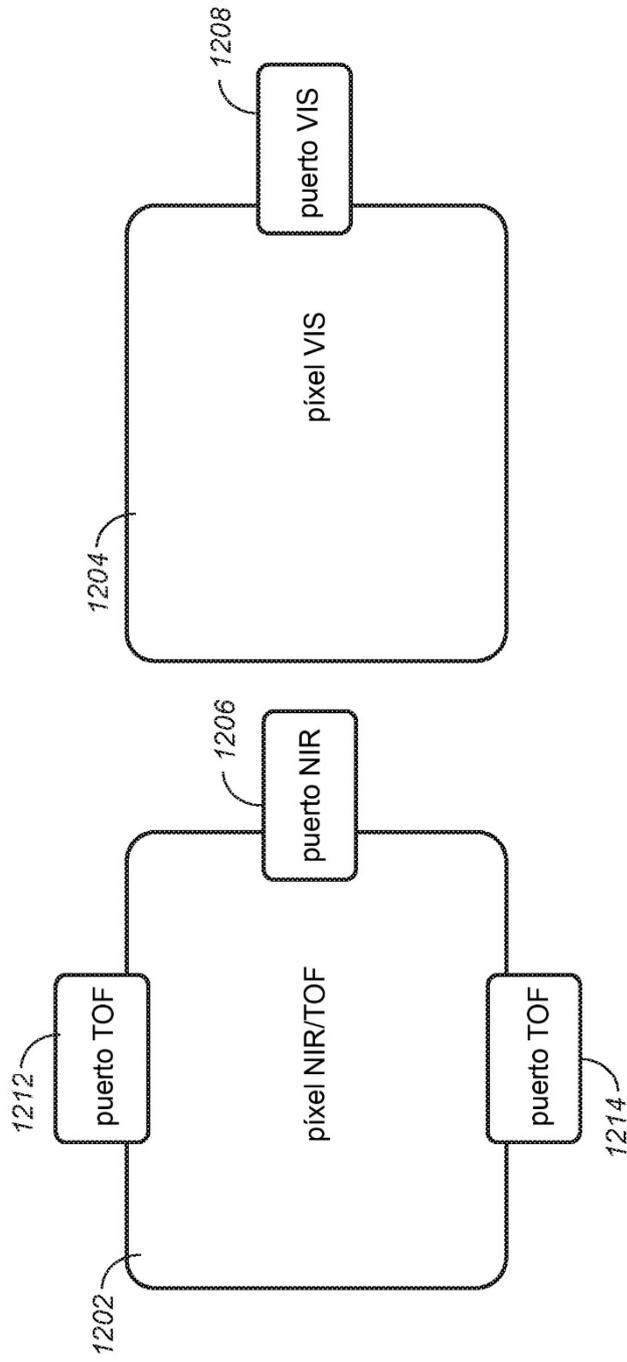


FIG. 12

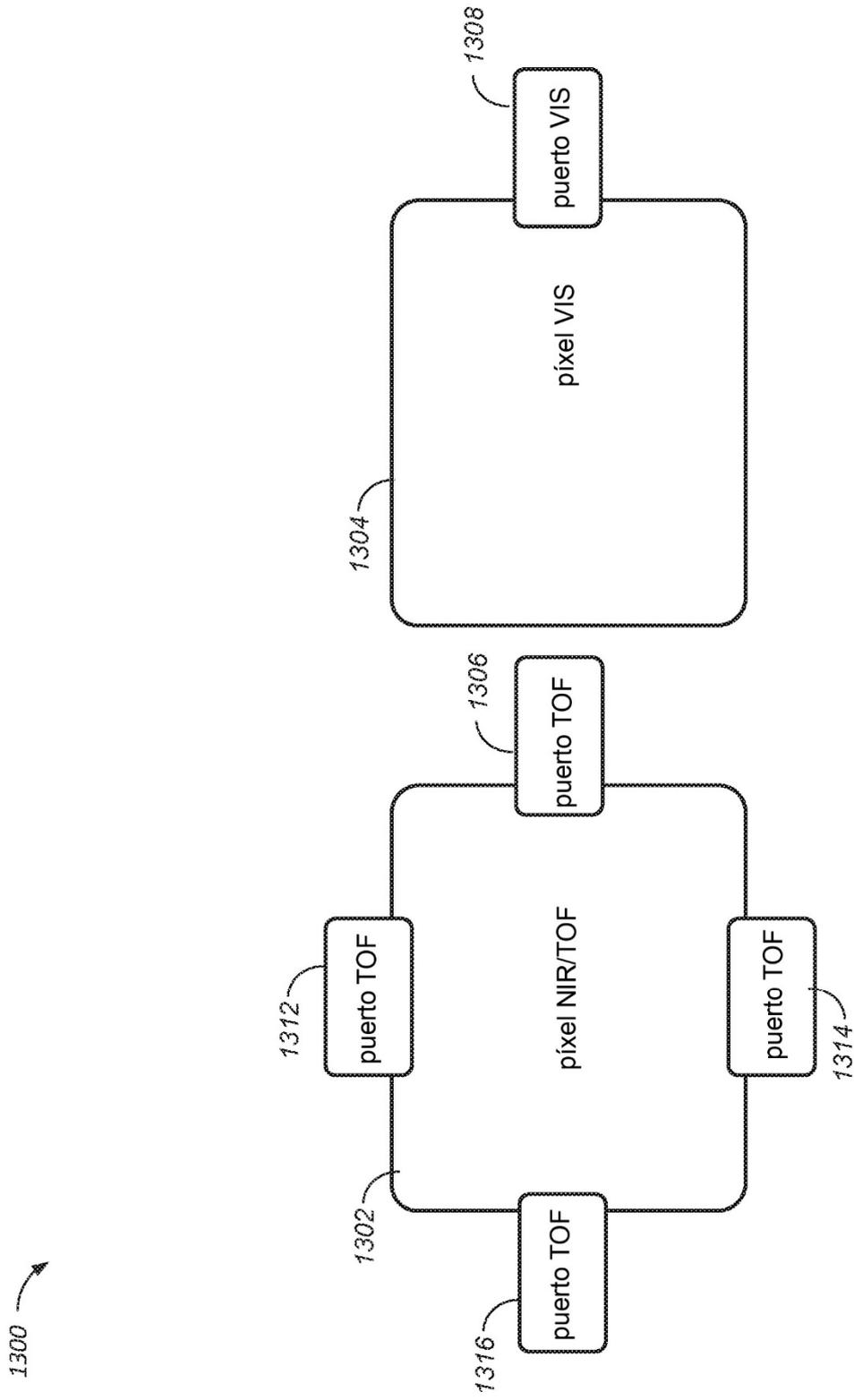


FIG. 13

1400

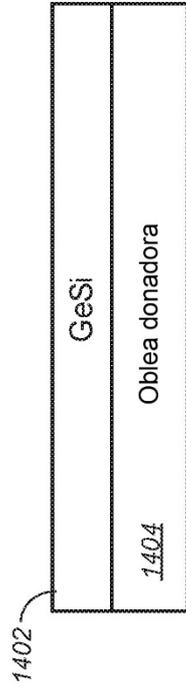


FIG. 14A

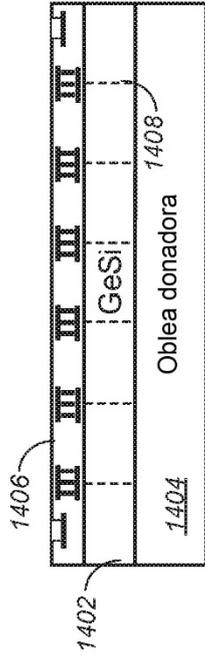


FIG. 14B

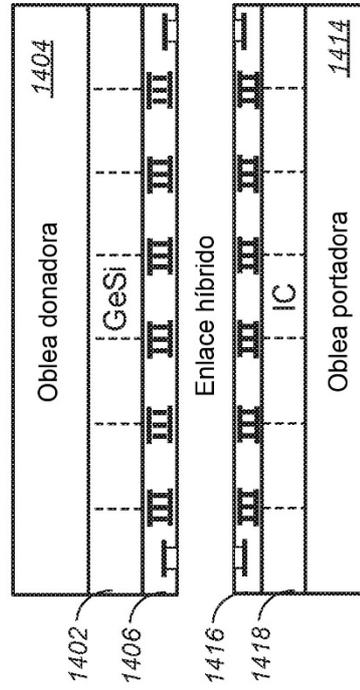


FIG. 14C

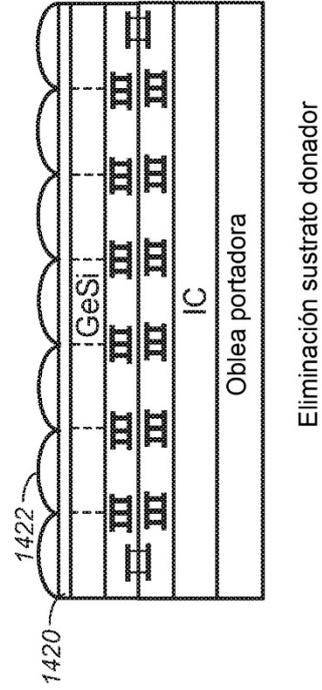


FIG. 14D

1500 ↗

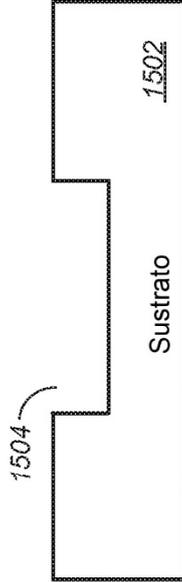


FIG. 15A

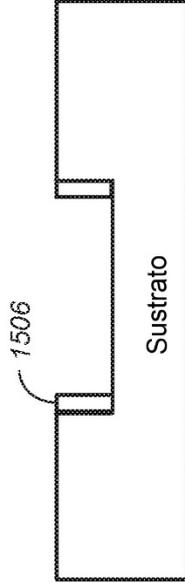


FIG. 15B

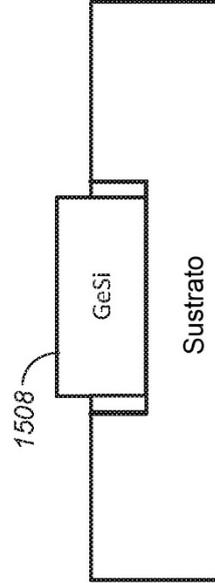


FIG. 15C



FIG. 15D

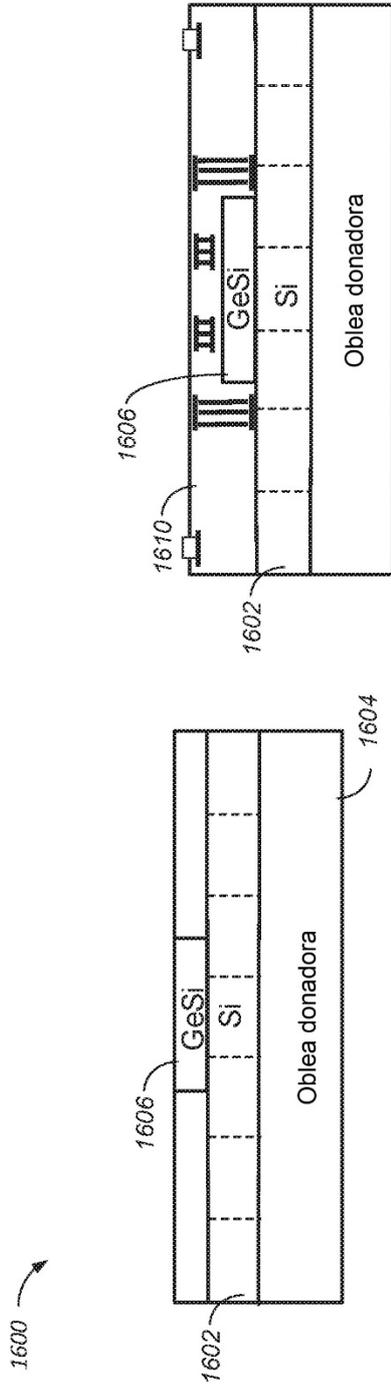


FIG. 16A

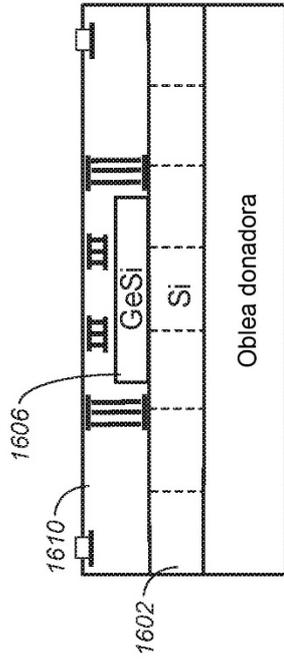


FIG. 16B

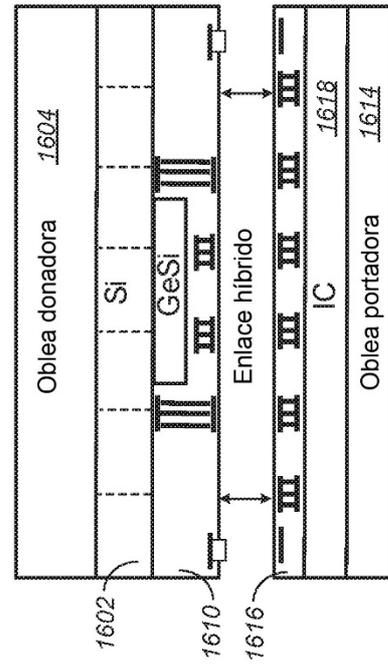


FIG. 16C

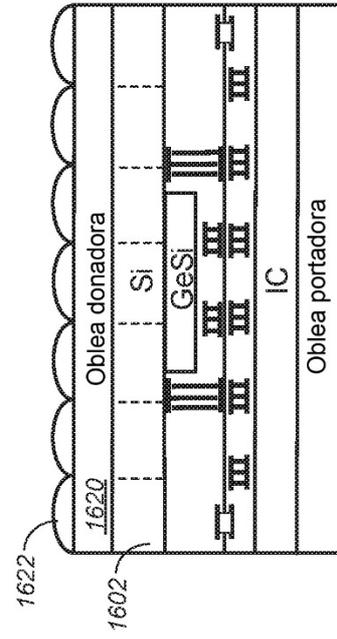


FIG. 16D

1700 ↗

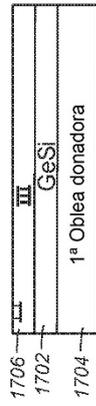


FIG. 17A

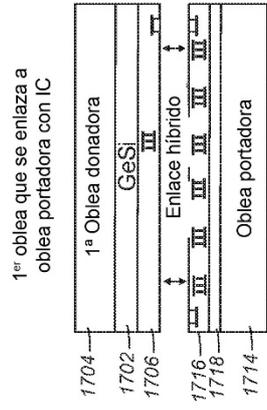


FIG. 17B

Eliminación sustrato donador

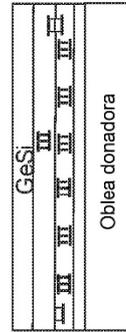


FIG. 17C

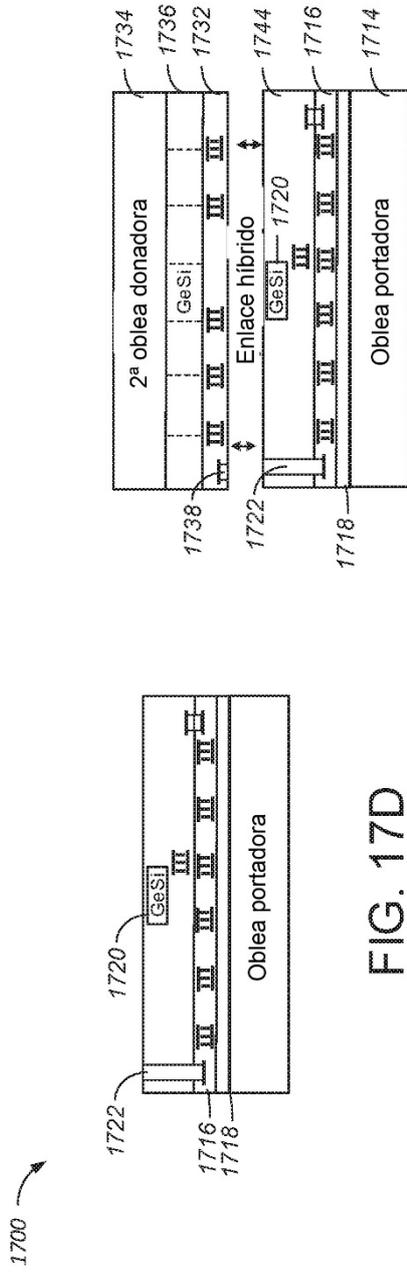


FIG. 17E

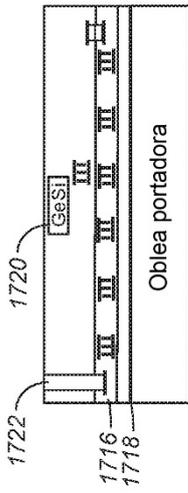


FIG. 17D

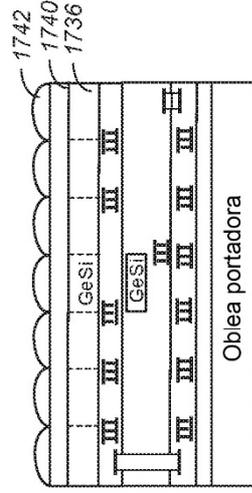


FIG. 17F

1700 —

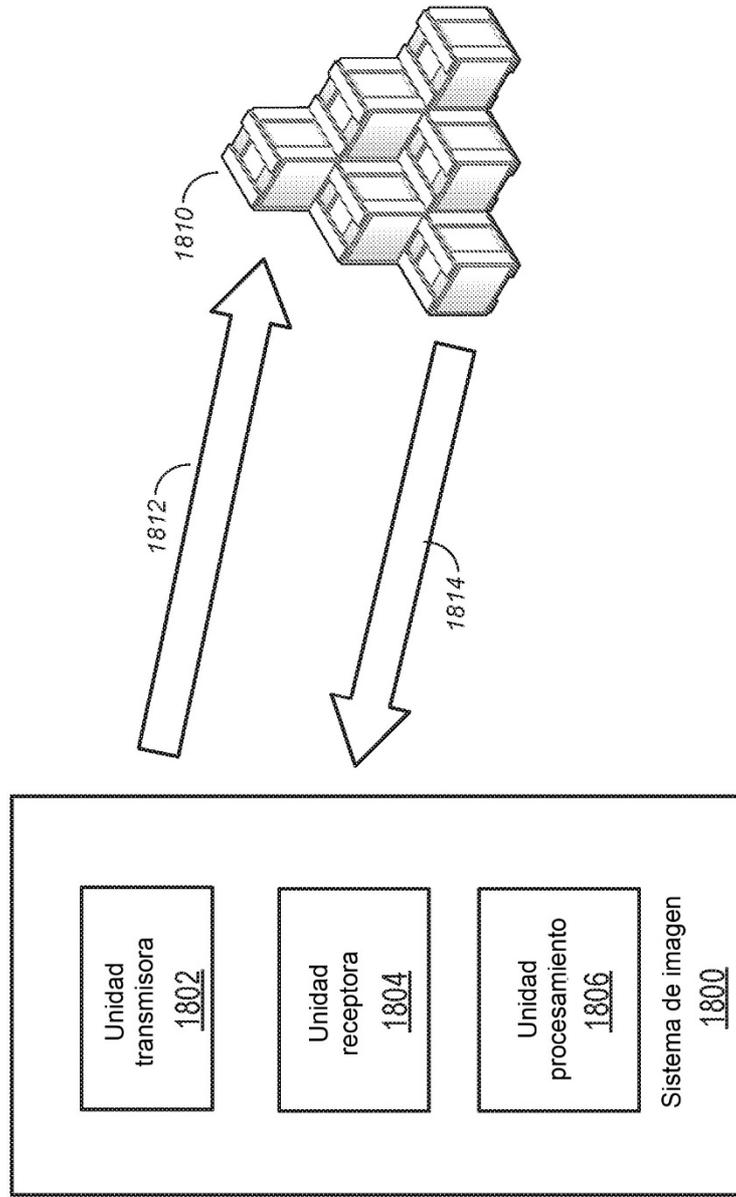


FIG. 18A

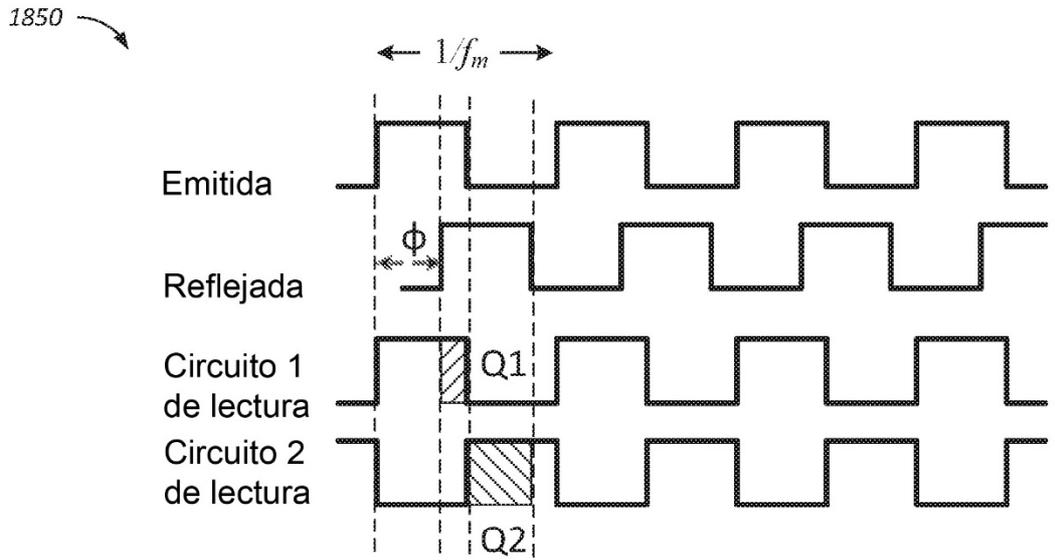


FIG. 18B

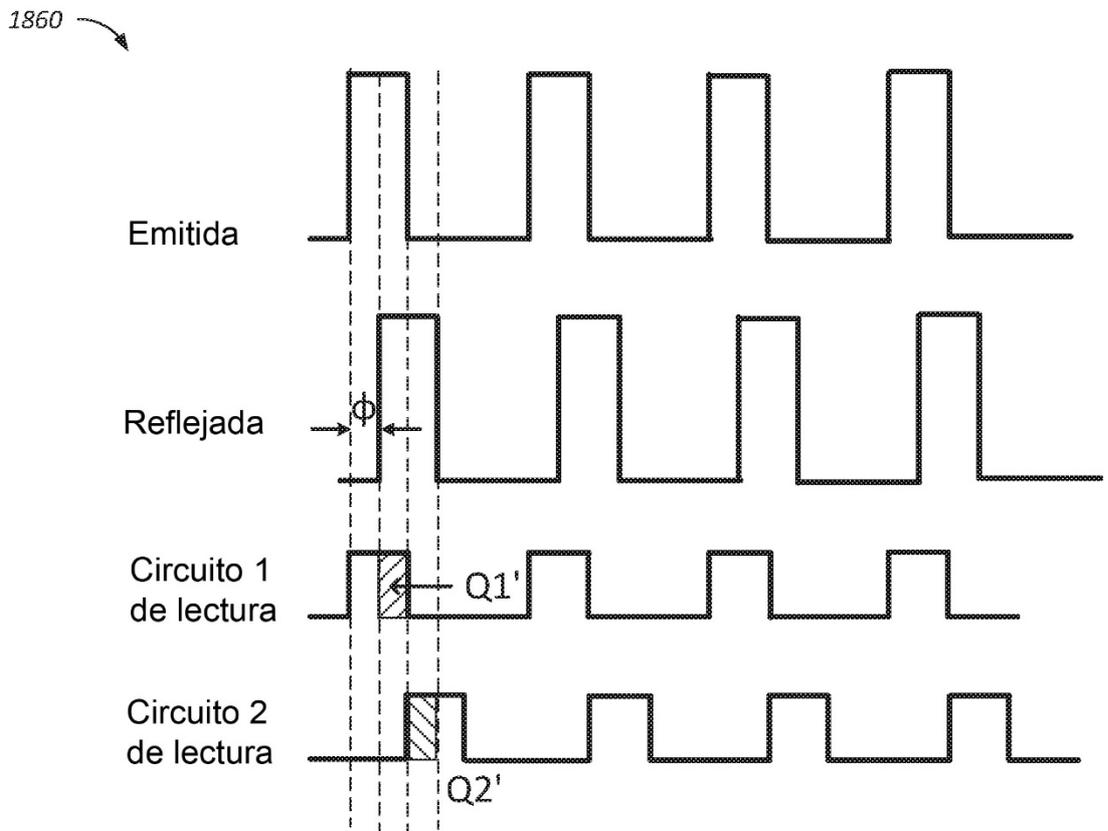


FIG. 18C

1900 ↘

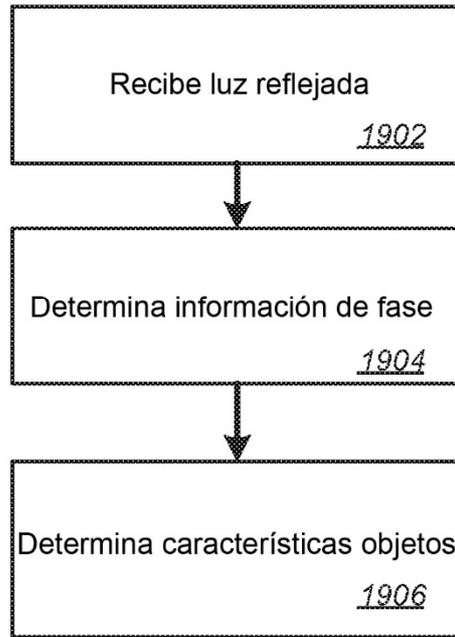


FIG. 19