

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 784 666**

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

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.11.2016 E 18176031 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.01.2020 EP 3404717**

54 Título: **Aparato de detección de luz de alta velocidad**

30 Prioridad:

06.11.2015 US 201562251691 P

28.12.2015 US 201562271386 P

12.02.2016 US 201662294436 P

31.10.2016 US 201615338660

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

29.09.2020

73 Titular/es:

ARTILUX INC. (100.0%)

101 Jefferson Drive

Menlo Park, CA 94025, US

72 Inventor/es:

NA, YUN-CHUNG y

LIANG, CHE-FU

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 784 666 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 de detección de luz de alta velocidad

Antecedentes

La presente memoria descriptiva se refiere a la detección de luz usando un fotodiodo.

- 5 La luz se propaga en el espacio libre o se acopla un medio óptico a un fotodiodo que convierte una señal óptica en una señal eléctrica para su procesamiento.

10 El documento EP 2330637 describe un mezclador fotónico que comprende un par de una región de contacto de inyección para inyectar la corriente de portadores mayoritarios en el sustrato semiconductor y una región de detección para la recogida de la fotocorriente. La región de contacto de inyección está dopada con un dopante del primer tipo de conductividad en una concentración de dopante más alta que el sustrato semiconductor. La región de detección está dopada con un dopante de un segundo tipo de conductividad opuesto al primer tipo de conductividad y tiene una unión con el sustrato semiconductor, siendo una zona del sustrato semiconductor alrededor de dicha unión una zona de sustrato empobrecido.

15 El documento JP 2009-047658 describe un sensor de medición de distancia y un dispositivo de medición de distancia.

Sumario

La invención se define en las reivindicaciones.

20 Según un aspecto innovador de la materia objeto descrita en la presente memoria descriptiva, la luz reflejada desde un objeto tridimensional puede ser detectada por los fotodiodos de un sistema de obtención de imágenes. Los fotodiodos convierten la luz detectada en cargas eléctricas. Cada fotodiodo puede incluir dos grupos de conmutadores que recogen las cargas eléctricas. La recogida de las cargas eléctricas por los dos grupos de conmutadores puede ser alterada con el tiempo, de manera que el sistema de obtención de imágenes pueda determinar la información de fase de la luz detectada. El sistema de obtención de imágenes puede usar la información de fase para analizar las características asociadas con el objeto tridimensional, que incluyen información de profundidad o una composición material. El sistema de obtención de imágenes puede usar también la información de fase para analizar las características asociadas con el seguimiento ocular, el reconocimiento de gestos, escaneo de modelos 3-
25 dimensionales/grabación de vídeo y/o aplicaciones de realidad aumentada/virtual.

30 En general, un aparato óptico puede incluir un sustrato semiconductor; una capa de germanio-silicio acoplada al sustrato semiconductor, incluyendo la capa de germanio-silicio una región de fotodiodo configurada para absorber fotones y para generar foto-portadores a partir de los fotones absorbidos; uno o más primeros conmutadores controlados por una primera señal de control, estando configurados los uno o más primeros conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la primera señal de control; y estando controlados los uno o más segundos conmutadores por una segunda señal de control, estando configurados los uno o más segundos conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la segunda señal de control, donde la segunda señal de control es diferente de la primera señal de control. Los uno o más primeros conmutadores incluyen una primera región dopada tipo p en la capa de germanio-silicio, donde la primera región dopada tipo p es controlada por la primera señal de control; y una primera región dopada tipo n en la capa de germanio-silicio, donde la primera región dopada tipo n está acoplada a un primer circuito integrado de lectura. Los uno o más segundos conmutadores incluyen una segunda región dopada tipo p en la capa de germanio-silicio, donde la segunda región dopada tipo p es controlada por la segunda señal de control; y una segunda región dopada tipo n en la capa de germanio-silicio, donde la segunda región dopada tipo n está acoplada a un segundo circuito integrado de lectura.

45 Estas y otras implementaciones pueden incluir opcionalmente, cada una, una o más de las siguientes características. La capa de germanio-silicio puede incluir una tercera región dopada tipo n, y una cuarta región dopada tipo n, donde al menos una parte de la primera región dopada tipo p puede formarse en la tercera región dopada tipo n, y donde al menos una parte de la segunda región dopada tipo p puede formarse en la cuarta región dopada tipo n. La capa de germanio-silicio puede incluir una tercera región dopada tipo n, donde al menos una parte de la primera región dopada tipo p y una parte de la segunda región dopada tipo p pueden formarse en la tercera región dopada tipo n. El sustrato semiconductor puede incluir una tercera región dopada tipo p y una o más regiones dopadas tipo n, donde la capa de germanio-silicio puede disponerse sobre la tercera región dopada tipo p, y donde la tercera región dopada tipo p puede estar cortocircuitada eléctricamente con las una o más regiones dopadas tipo n.

50 La primera señal de control puede ser un voltaje de polarización fijo, y la segunda señal de control puede ser un voltaje de polarización variable que está polarizado con relación al voltaje fijo de la primera señal de control. Los fotones absorbidos por la capa de germanio-silicio pueden reflejarse desde una superficie de una diana tridimensional, y la

parte de los foto-portadores recogida por los uno o más primeros conmutadores y la parte de los foto-portadores recogida por los uno o más segundos conmutadores pueden ser utilizadas por un sistema de tiempo-de-vuelo para analizar la información de profundidad o una composición de material de la diana tridimensional.

5 Otro aparato óptico puede incluir un sustrato semiconductor; una capa de absorción acoplada al sustrato semiconductor, incluyendo la capa de absorción una región de fotodiodo configurada para absorber fotones y para generar foto-portadores a partir de los fotones absorbidos; uno o más primeros conmutadores controlados por una primera señal de control, estando configurados los uno o más primeros conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la primera señal de control; y estando controlados los uno o más segundos conmutadores por una segunda señal de control, estando configurados los uno o más segundos conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la segunda señal de control, donde la segunda señal de control es diferente de la primera señal de control. Los uno o más primeros conmutadores incluyen una primera región dopada tipo p en el sustrato semiconductor, donde la primera región dopada tipo p es controlada por la primera señal de control; y una primera región dopada tipo n en el sustrato semiconductor, donde la primera región dopada tipo n está acoplada a un primer circuito integrado de lectura. Los uno o más segundos conmutadores incluyen una segunda región dopada tipo p en el sustrato semiconductor, donde la segunda región dopada tipo p es controlada por la segunda señal de control; y una segunda región dopada tipo n en el sustrato semiconductor, en el que la segunda región dopada tipo n está acoplada a un segundo circuito integrado de lectura.

Estas y otras implementaciones pueden incluir opcionalmente, cada una, una o más de las siguientes características. El sustrato semiconductor puede incluir una tercera región dopada tipo n, y una cuarta región dopada tipo n, donde al menos una parte de la primera región dopada tipo p puede formarse en la tercera región dopada tipo n, y donde al menos una parte de la segunda región dopada tipo p puede formarse en la cuarta región dopada tipo n. El sustrato semiconductor puede incluir una tercera región dopada tipo n, donde al menos una parte de la primera región dopada tipo p y una parte de la segunda región dopada tipo p pueden formarse en la tercera región dopada tipo n. El sustrato semiconductor puede incluir una o más regiones p de pozo.

25 La primera señal de control puede ser un voltaje de polarización fijo, y la segunda señal de control puede ser un voltaje de polarización variable que está polarizado con relación al voltaje fijo de la primera señal de control. Los fotones absorbidos por la capa de absorción pueden reflejarse desde una superficie de una diana tridimensional, y la parte de los foto-portadores recogida por los uno o más primeros conmutadores y la parte de los foto-portadores recogida por los uno o más segundos conmutadores pueden ser utilizadas por un sistema de tiempo-de-vuelo para analizar la información de profundidad o una composición de material de la diana tridimensional.

35 Otro aparato óptico puede incluir un sustrato semiconductor; una capa de absorción acoplada al sustrato semiconductor, incluyendo la capa de absorción una región de fotodiodo configurada para absorber fotones y para generar foto-portadores a partir de los fotones absorbidos; uno o más primeros conmutadores controlados por una primera señal de control, estando configurados los uno o más primeros conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la primera señal de control; y estando controlados los uno o más segundos conmutadores por una segunda señal de control, estando configurados los uno o más segundos conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la segunda señal de control, donde la segunda señal de control es diferente de la primera señal de control. Los uno o más primeros conmutadores incluyen múltiples regiones dopadas tipo p en el sustrato semiconductor, donde las múltiples regiones dopadas tipo p son controladas por la primera señal de control; y múltiples primeras regiones dopadas tipo n en el sustrato semiconductor, donde las múltiples primeras regiones dopadas tipo n están acopladas a un primer circuito integrado de lectura. Los uno o más segundos conmutadores incluyen múltiples regiones dopadas tipo p en el sustrato semiconductor, donde las múltiples regiones dopadas tipo p son controladas por la segunda señal de control; y múltiples segundas regiones dopadas tipo n en el sustrato semiconductor, donde las múltiples segundas regiones dopadas tipo n están acopladas a un segundo circuito integrado de lectura.

45 Estas y otras implementaciones pueden incluir opcionalmente, cada una, una o más de las siguientes características. El sustrato semiconductor puede incluir una tercera región dopada tipo n, donde al menos una parte de las múltiples primeras regiones dopadas tipo p y una parte de las segundas múltiples regiones dopadas tipo p pueden formarse en la tercera región dopada tipo n. Las múltiples primeras regiones p-dopadas y las múltiples segundas regiones p-dopadas pueden disponerse en una disposición intercalada a lo largo de un primer plano en el sustrato semiconductor, donde las múltiples primeras regiones dopadas tipo n y las múltiples segundas zonas dopadas tipo n pueden disponerse en una disposición intercalada a lo largo de un segundo plano en el sustrato semiconductor que es diferente del primer plano. Cada región p-dopada de las múltiples primeras regiones p-dopadas puede disponerse sobre una región dopada tipo n respectiva de las múltiples primeras regiones dopadas tipo n, y cada región dopada tipo p de las múltiples segundas regiones dopadas tipo p puede disponerse sobre una región dopada tipo n respectiva de las múltiples segundas zonas dopadas tipo n. El sustrato semiconductor puede incluir una o más regiones p de pozo.

La primera señal de control puede ser un voltaje de polarización fijo, y la segunda señal de control puede ser un voltaje de polarización variable que está polarizado con relación al voltaje fijo de la primera señal de control. Los fotones absorbidos por la capa de absorción pueden reflejarse desde una superficie de una diana tridimensional, donde la parte de los foto-portadores recogida por los uno o más primeros conmutadores y la parte de los foto-portadores recogida por los uno o más segundos conmutadores pueden ser utilizadas por un sistema de tiempo-de-vuelo para analizar la información de profundidad o una composición de material de la diana tridimensional.

Un sistema de tiempo-de-vuelo puede incluir una fuente de luz, y un sensor de imagen que comprende múltiples píxeles fabricados sobre un sustrato semiconductor, donde cada píxel de los píxeles incluye una capa de germanio-silicio acoplada al sustrato semiconductor, incluyendo la capa de germanio-silicio una región de fotodiodo configurada para absorber fotones y para generar foto-portadores a partir de los fotones absorbidos; uno o más primeros conmutadores controlados por una primera señal de control, estando configurados los uno o más primeros conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la primera señal de control; y estando controlados los uno o más segundos conmutadores por una segunda señal de control, estando configurados los uno o más segundos conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la segunda señal de control, donde la segunda señal de control es diferente de la primera señal de control.

Estas y otras implementaciones pueden incluir opcionalmente, cada una, una o más de las siguientes características. La fuente de luz puede configurarse para emitir impulsos ópticos que tienen un ciclo de trabajo que es menor del 50%, pero manteniendo una misma cantidad de energía por impulso óptico.

Otro aparato óptico puede incluir un sustrato semiconductor; una capa de germanio-silicio acoplada al sustrato semiconductor, incluyendo la capa de germanio-silicio una región de fotodiodo configurada para absorber fotones y para generar foto-portadores a partir de los fotones absorbidos; uno o más primeros conmutadores controlados por una primera señal de control, estando configurados los uno o más primeros conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la primera señal de control; y estando controlados los uno o más segundos conmutadores por una segunda señal de control, estando configurados los uno o más segundos conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la segunda señal de control, donde la segunda señal de control es diferente de la primera señal de control. Los uno o más primeros conmutadores incluyen una primera región dopada tipo p en la capa de germanio-silicio, donde la primera región dopada tipo p es controlada por la primera señal de control; y una primera región dopada tipo n en el sustrato semiconductor, donde la primera región dopada tipo n está acoplada a un primer circuito integrado de lectura. Los uno o más segundos conmutadores incluyen una segunda región dopada tipo p en la capa de germanio-silicio, donde la segunda región dopada tipo p es controlada por la segunda señal de control; y una segunda región dopada tipo n en el sustrato semiconductor, donde la segunda región dopada tipo n está acoplada a un segundo circuito integrado de lectura.

Estas y otras implementaciones pueden incluir opcionalmente, cada una, una o más de las siguientes características. La capa de germanio-silicio puede incluir una tercera región dopada tipo n, y una cuarta región dopada tipo n, donde al menos una parte de la primera región dopada tipo p se forma en la tercera región dopada tipo n, y donde al menos una parte de la segunda región dopada tipo p puede formarse en la cuarta región dopada tipo n. La capa de germanio-silicio puede incluir una tercera región dopada tipo n, donde al menos una parte de la primera región dopada tipo p y una parte de la segunda región dopada tipo p pueden formarse en la tercera región dopada tipo n. El sustrato semiconductor puede incluir una o más regiones p de pozo.

La primera señal de control puede ser un voltaje de polarización fijo, y la segunda señal de control puede ser un voltaje de polarización variable que está polarizado con relación al voltaje fijo de la primera señal de control. Los fotones absorbidos por la capa de germanio-silicio pueden reflejarse desde una superficie de una diana tridimensional, donde la parte de los foto-portadores recogida por los uno o más primeros conmutadores y la parte de los foto-portadores recogida por los uno o más segundos conmutadores pueden ser utilizadas por un sistema de tiempo-de-vuelo para analizar la información de profundidad o una composición de material de la diana tridimensional.

Las implementaciones ventajosas pueden incluir una o más de las siguientes características. El germanio es un material de absorción eficiente para longitudes de onda del infrarrojo cercano, lo que reduce el problema de los foto-portadores lentos generados a una mayor profundidad del sustrato cuando se usa un material de absorción ineficiente, por ejemplo, silicio. Para un fotodiodo que tiene regiones dopadas tipo p y tipo n fabricadas a dos profundidades diferentes, la distancia de tránsito de foto-portador está limitada por la profundidad, y no por la anchura, del material de absorción. Por consiguiente, si se usa un material de absorción eficiente con una longitud de absorción corta, la distancia entre las regiones dopadas tipo p y tipo n puede hacerse también corta de manera que incluso una pequeña polarización pueda crear un fuerte campo que resulta en una mayor velocidad operativa. Para dicho fotodiodo, dos grupos de conmutadores pueden insertarse y disponerse lateralmente en una disposición intercalada, que puede recoger los foto-portadores en diferentes fases ópticas para un sistema de tiempo-de-vuelo. Una mayor velocidad operativa permite el uso de una frecuencia de modulación más alta en un sistema de tiempo-de-vuelo, proporcionando una mayor resolución de profundidad. En un sistema de tiempo-de-vuelo en el que se aumenta la intensidad de pico de

los impulsos ópticos mientras se reduce el ciclo de trabajo de los impulsos ópticos, la relación señal a ruido puede mejorarse mientras se mantiene el mismo consumo de energía para el sistema de tiempo-de-vuelo. Esto se hace posible cuando se aumenta la velocidad operativa de manera que el ciclo de trabajo de los impulsos ópticos puede reducirse sin distorsionar la forma del impulso.

- 5 Los detalles de una o más implementaciones se exponen en los dibujos adjuntos y en la descripción siguiente. Otras características y ventajas potenciales se harán evidentes a partir de la descripción, los dibujos y las reivindicaciones.

Breve descripción de los dibujos

Las Figs. 1A, 1B, 1C y 1D son ejemplos de un fotodiodo de doble conmutador.

Las Figs. 2A, 2B, 2C y 2D son ejemplos de un fotodiodo de doble conmutador.

- 10 Las Figs. 3A, 3B, 3C y 3D son ejemplos de un fotodiodo de doble conmutador.

Las Figs. 4A, 4B, 4C, 4D y 4E son ejemplos de un fotodiodo de doble conmutador.

La Fig. 5A es un diagrama de bloques de un ejemplo de un sistema de obtención de imágenes.

Las Figs. 5B y 5C muestran ejemplos de técnicas para determinar las características de un objeto usando un sistema de obtención de imágenes.

- 15 La Fig. 6 muestra un ejemplo de un diagrama de flujo para determinar las características de un objeto usando un sistema de obtención de imágenes.

Los números de referencia y las denominaciones similares en los diversos dibujos indican elementos similares. Debe entenderse también que las diversas realizaciones ejemplares mostradas en las figuras son meramente representaciones ilustrativas y no están dibujadas necesariamente a escala.

20 **Descripción detallada**

Los fotodiodos pueden usarse para detectar señales ópticas y convertir las señales ópticas en señales eléctricas que pueden ser procesadas adicionalmente por otra circuitería. En aplicaciones de tiempo-de-vuelo (TOF), la información de profundidad de un objeto tridimensional puede determinarse usando una diferencia de fase entre un impulso de luz transmitido y un impulso de luz detectado. Por ejemplo, puede usarse una matriz bidimensional de píxeles para reconstruir una imagen tridimensional de un objeto tridimensional, donde cada píxel puede incluir uno o más fotodiodos para derivar la información de fase del objeto tridimensional. En algunas implementaciones, las aplicaciones de tiempo-de-vuelo usan fuentes de luz que tienen longitudes de onda comprendidas en el intervalo de infrarrojo cercano (NIR). Por ejemplo, un diodo emisor de luz (LED) puede tener una longitud de onda de 850 nm, 940 nm o 1050 nm. Algunos fotodiodos pueden usar silicio como un material de absorción, pero el silicio es un material de absorción ineficiente para las longitudes de onda NIR. Específicamente, los foto-portadores pueden generarse profundamente (por ejemplo, a una profundidad mayor que 10 μm) en el sustrato de silicio, y los foto-portadores pueden derivar y/o difundirse a la unión fotodiodo lentamente, lo que resulta en una reducción en la velocidad operativa. Además, típicamente se usa una pequeña oscilación de voltaje para controlar las operaciones de los fotodiodos con el fin de minimizar el consumo de energía. Para un área de absorción grande (por ejemplo, 10 μm de diámetro), la pequeña oscilación de voltaje puede crear sólo un pequeño campo lateral/vertical a través de la zona de absorción grande, que afecta a la velocidad de deriva de los foto-portadores barridos a través del área de absorción. Por lo tanto, la velocidad operativa se limita adicionalmente. Para las aplicaciones TOF que usan longitudes de onda de NIR, un fotodiodo de doble conmutador con estructuras de diseño innovadoras y/o con el uso de germanio-silicio (GeSi) como un material de absorción aborda los problemas técnicos descritos anteriormente. En la presente memoria descriptiva, el término "fotodiodo" puede usarse indistintamente con la expresión "sensor óptico". En la presente memoria descriptiva, el término "germanio-silicio (GeSi)" se refiere a una aleación de GeSi con una composición de aleación que va desde más del 10% de germanio (Ge), es decir, menos del 90% de silicio (Si), al 100% Ge, es decir, el 0% de Si. En la presente memoria descriptiva, el material GeSi puede cultivarse usando una epitaxis general, una epitaxis selectiva u otras técnicas aplicables. Además, puede formarse una capa de absorción que comprende el material GeSi sobre una superficie plana, una superficie superior de una meseta, o una superficie de la parte inferior de una zanja rodeada al menos parcialmente por un aislante (por ejemplo: óxido, nitrito), un semiconductor (por ejemplo: Si, Ge), o sus combinaciones. Además, puede usarse una súper estructura de celosía tensa o una estructura de pozo cuántico múltiple que incluye capas alternativas, tales como capas GeSi con dos o más composiciones de aleación diferentes para la capa de absorción.

- 40 La Fig. 1A es un fotodiodo 100 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 100 de doble conmutador incluye una capa 106 de absorción fabricada sobre un sustrato 102. El sustrato 102 puede ser cualquier sustrato adecuado sobre el que pueden fabricarse los dispositivos semiconductores. Por ejemplo,

el sustrato 102 puede ser un sustrato de silicio. La capa 106 de absorción incluye un primer conmutador 108 y un segundo conmutador 110.

En general, la capa 106 de absorción recibe una señal 112 óptica y convierte la señal 112 óptica en señales eléctricas. La capa 106 de absorción se selecciona de manera que tenga un alto coeficiente de absorción en el intervalo de longitudes de onda deseado. Para las longitudes de onda de NIR, la capa 106 de absorción puede ser una meseta de GeSi, donde el GeSi absorbe los fotones en la señal 112 óptica y genera pares electrón-hueco. La composición del material de germanio y de silicio en la meseta de GeSi puede seleccionarse para procesos o aplicaciones específicas. En algunas implementaciones, la capa 106 de absorción se diseña de manera que tenga un espesor t . Por ejemplo, para una longitud de onda de 850 nm, el espesor de la meseta de GeSi puede ser de aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ para tener una eficiencia cuántica sustancial. En algunas implementaciones, la superficie de la capa 106 de absorción se diseña de manera que tenga una forma específica. Por ejemplo, la meseta de GeSi puede ser circular, cuadrada o rectangular dependiendo del perfil espacial de la señal 112 óptica en la superficie de la meseta de GeSi. En algunas implementaciones, la capa 106 de absorción se diseña de manera que tenga una dimensión d lateral para recibir la señal 112 óptica. Por ejemplo, la meseta de GeSi puede tener una forma circular, en la que d puede variar de $1\ \mu\text{m}$ a $50\ \mu\text{m}$.

Un primer conmutador 108 y un segundo conmutador 110 han sido fabricados sobre la capa 106 de absorción. El primer conmutador 108 está acoplado a una primera señal 122 de control y un primer circuito 124 de lectura. El segundo conmutador 110 está acoplado a una segunda señal 132 de control y un segundo circuito 134 de lectura. En general, la primera señal 122 de control y la segunda señal 132 de control controlan si los electrones o los huecos generados por los fotones absorbidos son recogidos por el primer circuito 124 de lectura o el segundo circuito 134 de lectura.

En algunas implementaciones, el primer conmutador 108 y el segundo conmutador 110 pueden fabricarse para recoger electrones. En este caso, el primer conmutador 108 incluye una región 128 dopada tipo p y una región 126 dopada tipo n. Por ejemplo, la región 128 dopada tipo p puede tener un dopante $p+$, donde la concentración del dopante activado puede ser tan alta como pueda conseguir un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $5 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ cuando la capa 106 de absorción es germanio y se dopa con boro. En alguna implementación, la concentración de dopante de la región 128 dopada tipo p puede ser menor de $5 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación, a expensas de una mayor resistencia de contacto. La región 126 dopada tipo n puede tener un dopante $n+$, donde la concentración del dopante activado puede ser tan alta como pueda conseguir un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ cuando la capa 106 de absorción es germanio y se dopa con fósforo. En alguna implementación, la concentración de dopante de la región 126 dopada tipo p puede ser menor de $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación, a expensas de una mayor resistencia de contacto. La distancia entre la región 128 dopada tipo p y la región 126 dopada tipo n puede diseñarse en base a reglas de diseño del proceso de fabricación. En general, cuanto menor sea la distancia entre la región 128 dopada tipo p y la región 126 dopada tipo n, mayor será la eficiencia de conmutación de los fotoportadores generados. El segundo conmutador 110 es una región 138 dopada tipo p y una región 136 dopada tipo n. La región 138 dopada tipo p es similar a la región 128 dopada tipo p, y la región 136 dopada tipo n es similar a la región 126 dopada tipo n.

En algunas implementaciones, la región 128 dopada tipo p está acoplada a la primera señal 122 de control. Por ejemplo, la región 128 dopada tipo p puede acoplarse a una fuente de voltaje, donde la primera señal 122 de control puede ser una señal de voltaje de CA desde la fuente de voltaje. En algunas implementaciones, la región 126 dopada tipo n está acoplada al circuito 124 de lectura. El circuito 124 de lectura puede estar en una configuración de tres transistores que consiste en una puerta de restablecimiento, un seguidor de fuente y una puerta de selección, o cualquier circuito adecuado para el procesamiento de cargas. En algunas implementaciones, el circuito 124 de lectura puede fabricarse sobre el sustrato 102. En algunas otras implementaciones, el circuito 124 de lectura puede fabricarse sobre otro sustrato e integrado/co-empaquetado con el fotodiodo 100 de doble conmutador mediante una unión de matriz/oblea o apilamiento.

La región 138 dopada tipo p está acoplada a la segunda señal 132 de control. Por ejemplo, la región 138 dopada tipo p puede acoplarse a una fuente de voltaje, donde la segunda señal 132 de control puede ser una señal de voltaje de CA que tiene una fase opuesta fase a la de la primera señal 122 de control. En algunas implementaciones, la región 136 dopada tipo n está acoplada al circuito 134 de lectura. El circuito 134 de lectura puede ser similar al circuito 124 de lectura.

La primera señal 122 de control y la segunda señal 132 de control se usan para controlar la recogida de los electrones generados por los fotones absorbidos. Por ejemplo, cuando se usan voltajes, si la primera señal 122 de control está polarizada con relación la segunda señal 132 de control, se crea un campo eléctrico entre la región 128 dopada tipo p y la región 138 dopada tipo p, y los electrones libres fluyen hacia la región 128 dopada tipo p o la región 138 dopada tipo p dependiendo de la dirección del campo eléctrico. En algunas implementaciones, la primera señal 122 de control

puede fijarse a un valor V_i de voltaje, y la segunda señal 132 de control puede alternar entre los valores de voltaje $V_i \pm \Delta V$. La dirección del valor de polarización determina la dirección de flujo de los electrones. Por consiguiente, cuando un conmutador (por ejemplo, el primer conmutador 108) se conmuta a "activado" (es decir, los electrones fluyen hacia la región 128 dopada tipo p), el otro conmutador (por ejemplo, el segundo conmutador 110) se conmuta a "desactivado" (es decir, los electrones están bloqueados con relación a la región 138 dopada tipo p). En algunas implementaciones, la primera señal 122 de control y la segunda señal 132 de control pueden ser voltajes que son diferenciales entre sí.

En general, una diferencia entre el nivel de Fermi de una región dopada tipo p y el nivel de Fermi de una región dopada tipo n crea un campo eléctrico entre las dos regiones. En el primer conmutador 108, se crea un campo eléctrico entre la región 128 dopada tipo p y la región 126 dopada tipo n. De manera similar, en el segundo conmutador 110, se crea un campo eléctrico entre la región 138 dopada tipo p y la región 136 dopada tipo n. Cuando el primer conmutador 108 se conmuta a "activado" y el segundo conmutador 110 se conmuta a "desactivado", los electrones son atraídos por la región 128 dopada tipo p, y el campo eléctrico entre la región 128 dopada tipo p y la región 126 dopada tipo n transporta además los electrones a la región 126 dopada tipo n. A continuación, el circuito 124 de lectura puede ser activado para procesar las cargas recogidas por la región 126 dopada tipo n. Por otra parte, cuando el segundo conmutador 110 se conmuta a "activado" y el primer conmutador 108 se conmuta a "desactivado", los electrones son recogidos por la región 138 dopada tipo p, y el campo eléctrico entre la región 138 dopada tipo p y la región 136 dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 136 dopada tipo n. A continuación, el circuito 134 de lectura puede ser activado para procesar las cargas recogidas por la región 136 dopada tipo n.

En algunas implementaciones, puede aplicarse un voltaje entre las regiones dopadas tipo p y tipo n de un conmutador para operar el conmutador en un régimen de avalancha para aumentar la sensibilidad del fotodiodo 100 de doble conmutador. Por ejemplo, cuando la distancia entre la región 128 dopada tipo p y la región 126 dopada tipo n es de aproximadamente 100 nm, es posible aplicar un voltaje que es menor de 7 V para crear una ganancia de avalancha entre la región 128 dopada tipo p y la región 126 dopada tipo n.

En algunas implementaciones, el sustrato 102 puede acoplarse a un control 116 externo. Por ejemplo, el sustrato 102 puede acoplarse a tierra. En algunas otras implementaciones, el sustrato 102 puede ser flotante y no acoplado a ningún control externo.

La Fig. 1B es un fotodiodo 160 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 160 de doble conmutador es similar al fotodiodo 100 de doble conmutador en la Fig. 1A, pero el primer conmutador 108 y el segundo conmutador 110 incluyen además una región 152 de pozo n y una región 154 de pozo n, respectivamente. Además, la capa 106 de absorción puede ser una región dopada tipo p. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de las regiones 152 y 154 de pozo n puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{17} cm^{-3} . El nivel de dopante de la capa 106 de absorción puede variar de 10^{14} cm^{-3} a 10^{16} cm^{-3} .

La disposición de la región 128 dopada tipo p, la región 152 de pozo n, la capa 106 de absorción dopada tipo p, la región 154 de pozo n y la región 138 dopada tipo p forma una estructura de unión PNPNP. En general, la estructura de unión PNPNP reduce una corriente de conducción desde la primera señal 122 de control a la segunda señal 132 de control o, de manera alternativa, desde la segunda señal 132 de control a la primera señal 122 de control. La disposición de la región 126 dopada tipo n, la capa 106 de absorción dopada tipo p y la región 136 dopada tipo n forman una estructura de unión NPN. En general, la estructura de unión NPN reduce un acoplamiento de carga desde el primer circuito 124 de lectura al segundo circuito 134 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 134 de lectura al primer circuito 124 de lectura.

En algunas implementaciones, la región 128 dopada tipo p se forma completamente en el interior de la región 152 de pozo n. En algunas otras implementaciones, la región 128 dopada tipo p se forma parcialmente en la región 152 de pozo n. Por ejemplo, una parte de la región 128 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la región 152 de pozo n, mientras que otra parte de la región 128 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la capa 106 de absorción. De manera similar, en algunas implementaciones, la región 138 dopada tipo p se forma completamente en el interior de la región 154 de pozo n. En algunas otras implementaciones, la región 138 dopada tipo p se forma parcialmente en la región 154 de pozo n.

La Fig. 1C es un ejemplo de fotodiodo 170 de doble conmutador para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 170 de doble conmutador es similar al fotodiodo 100 de doble conmutador en la Fig. 1A, pero la capa 106 de absorción incluye además una región 156 de pozo n. Además, la capa 106 de absorción puede ser una región dopada tipo p. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de la región 156 de pozo n puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{17} cm^{-3} . El nivel de dopante de la capa 106 de absorción puede variar de 10^{14} cm^{-3} a 10^{16} cm^{-3} .

La disposición de la región 128 dopada tipo p, la región 156 de pozo n y la región 138 dopada tipo p forma una estructura de unión PNP. En general, la estructura de unión PNP reduce una corriente de conducción desde la primera señal 122 de control a la segunda señal 132 de control o, de manera alternativa, desde la segunda señal 132 de control

- a la primera señal 122 de control. La disposición de la región 126 dopada tipo n, la capa 106 de absorción dopada tipo p y la región 136 dopada tipo n forma una estructura de unión NPN. En general, la estructura de unión NPN reduce un acoplamiento de carga desde el primer circuito 124 de lectura al segundo circuito 134 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 134 de lectura al primer circuito 124 de lectura. En algunas implementaciones, si la profundidad de la región 156 de pozo n es profunda, la disposición de la región 126 dopada tipo n, la capa 106 de absorción dopada tipo p, la región 156 de pozo n, la capa 106 de absorción dopada tipo p y la región 136 dopada tipo n forma una estructura de unión NPNPN, que reduce adicionalmente un acoplamiento de carga desde el primer circuito 124 de lectura al segundo circuito 134 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 134 de lectura al primer circuito 124 de lectura.
- En algunas implementaciones, las regiones 128 y 138 dopadas tipo p se forman completamente en el interior de la región 156 de pozo n. En algunas otras implementaciones, las regiones 128 y 138 dopadas tipo p se forman parcialmente en la región 156 de pozo n. Por ejemplo, una parte de la región 128 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la región 156 de pozo n, mientras que otra parte de la región 128 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la capa 106 de absorción.
- La Fig. 1D es un fotodiodo 180 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 180 de doble conmutador es similar al fotodiodo 100 de doble conmutador en la Fig. 1A, pero el fotodiodo 150 de doble conmutador incluye además una región 104 de pozo p y regiones 142 y 144 de pozo n. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de las regiones 142 y 144 de pozo n puede variar de 10^{16} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} . El nivel de dopante de la región 104 de pozo p puede variar de 10^{16} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} .
- En alguna implementación, la capa 106 de absorción puede no absorber completamente los fotones entrantes en la señal 112 óptica. Por ejemplo, si la meseta de GeSi no absorbe completamente los fotones entrantes en la señal 112 óptica de NIR, la señal 112 óptica de NIR puede penetrar en el sustrato 102 de silicio, donde el sustrato 102 de silicio puede absorber los fotones penetrados y generar foto-portadores profundamente en el sustrato que son lentos para recombinarse. Estos foto-portadores lentos afectan negativamente a la velocidad operativa del fotodiodo de doble conmutador.
- Para eliminar adicionalmente los foto-portadores lentos, el fotodiodo 150 de doble conmutador puede incluir conexiones que acortan las regiones 142 y 144 de pozo n con la región 104 de pozo p. Por ejemplo, las conexiones pueden formarse mediante un proceso de siliciuro o una almohadilla metálica depositada que conecta las regiones 142 y 144 de pozo n con la región 104 de pozo p. Un cortocircuito entre las regiones 142 y 144 de pozo n y la región 104 de pozo p permite que los foto-portadores generados en el sustrato 102 se recombinen en el nodo en corto y, por lo tanto, mejora la velocidad operativa del fotodiodo de doble conmutador. En alguna implementación, la región 104 de pozo p se usa para minimizar el campo eléctrico alrededor de los defectos interfaciales entre la capa 106 de absorción y el sustrato 102 con el fin de reducir la corriente de fuga del dispositivo.
- Aunque no se muestra en las Figs. 1A-1D, en algunas implementaciones, una señal óptica puede llegar al fotodiodo de doble conmutador desde la parte posterior del sustrato 102. Pueden fabricarse uno o más componentes ópticos en la parte posterior del sustrato 102 para enfocar, colimar, desenfocar, filtrar o si no manipular la señal óptica.
- Aunque no se muestra en las Figs. 1A-1D, en algunas otras implementaciones, el primer conmutador 108 y el segundo conmutador 110 pueden fabricarse de manera alternativa para recoger huecos en lugar de electrones. En este caso, la región 128 dopada tipo p y la región 138 dopada tipo p serían reemplazadas por regiones dopadas tipo n, y la región 126 dopada tipo n y la región 136 dopada tipo n serían reemplazadas por regiones dopadas tipo p. Las regiones 142, 144, 152, 154 y 156 de pozo n serían reemplazadas por regiones de pozo p. La región 104 de pozo p se reemplazaría por una región de pozo n.
- Aunque no se muestra en las Figs. 1A-1D, en algunas implementaciones, la capa 106 de absorción puede unirse a un sustrato después de la fabricación del fotodiodo 100, 160, 170 y 180 de doble conmutador. El sustrato puede ser cualquier material que permita la transmisión de la señal 112 óptica para que llegue al fotodiodo de doble conmutador. Por ejemplo, el sustrato puede ser polímero o vidrio. En algunas implementaciones, uno o más componentes ópticos pueden fabricarse sobre el sustrato portador para enfocar, colimar, desenfocar, filtrar o manipular la señal 112 óptica.
- Aunque no se muestra en las Figs. 1A-1D, en algunas implementaciones, el fotodiodo 100, 160, 170 y 180 de doble conmutador puede unirse (por ejemplo, unión metal a metal, unión óxido a óxido, unión híbrida) a un segundo sustrato con circuitos que incluyen señales de control, y/o circuitos de lectura y/o bucle de bloqueo de fase (PLL) y/o convertidor analógico a digital (ADC). Puede depositarse una capa de metal sobre la parte superior del fotodiodo de doble conmutador que puede usarse como reflector para reflejar la señal óptica incidente desde la parte posterior. Puede incluirse una capa de óxido entre la capa metálica y la capa absorbente para aumentar la reflectividad. La capa metálica puede usarse también como capa de unión para el proceso de unión de obleas. En algunas

implementaciones, pueden añadirse uno o más conmutadores similares a 108 y 110 para interconectar señales de control/circuitos de lectura.

5 Aunque no se muestra en la Fig. 1A-1D, en algunas implementaciones, la capa 106 de absorción puede estar parcial o completamente incluida/empotrada en el sustrato 102 para aliviar la topografía de la superficie y facilitar de esta manera el proceso de fabricación. Un ejemplo de la técnica de inclusión se describe en la solicitud de patente US N° 15/228.282 titulado "Germanium-Silicon Light Sensing Apparatus", ahora publicada como US 2017/0040362.

10 La Fig. 2A es un ejemplo de fotodiodo 200 de doble conmutador para convertir una señal óptica en una señal eléctrica, donde el primer conmutador 208 y el segundo conmutador 210 están fabricados sobre un sustrato 202. El fotodiodo 200 de doble conmutador incluye una capa 206 de absorción fabricada sobre un sustrato 202. El sustrato 202 puede ser cualquier sustrato adecuado sobre el que puedan fabricarse dispositivos semiconductores. Por ejemplo, el sustrato 202 puede ser un sustrato de silicio.

15 En general, la capa 206 de absorción recibe una señal 212 óptica y convierte la señal 212 óptica en señales eléctricas. La capa 206 de absorción es similar a la capa 106 de absorción. En algunas implementaciones, la capa 206 de absorción puede incluir una región 209 dopada tipo p. La región 209 dopada tipo p puede repeler los foto-electrones desde la capa 206 de absorción al sustrato 202 y aumentar de esta manera la velocidad operativa. Por ejemplo, la región 209 dopada tipo p puede tener un dopante p+, donde la concentración de dopante es tan alta como pueda alcanzar un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando la capa 206 de absorción es germanio y se dopa con boro. En alguna implementación, la concentración de dopante de la región 209 dopada tipo p puede ser menor de $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación a expensas de una mayor resistencia de contacto.

25 Se han fabricado un primer conmutador 208 y un segundo conmutador 210 sobre el sustrato 202. El primer conmutador 208 está acoplado a una primera señal 222 de control y un primer circuito 224 de lectura. El segundo conmutador 210 está acoplado a una segunda señal 232 de control y un segundo circuito 234 de lectura. En general, la primera señal 222 de control y la segunda señal 232 de control controlan si los electrones o los huecos generados por los fotones absorbidos son recogidos por el primer circuito 224 de lectura o el segundo circuito 234 de lectura. La primera señal 222 de control es similar a la primera señal 122 de control. La segunda señal 232 de control es similar a la segunda señal 132 de control. El primer circuito 224 de lectura es similar al primer circuito 124 de lectura. El segundo circuito 234 de lectura es similar al segundo circuito 134 de lectura.

30 En algunas implementaciones, el primer conmutador 208 y el segundo conmutador 210 pueden fabricarse para recoger los electrones generados por la capa 206 de absorción. En este caso, el primer conmutador 208 incluye una región 228 dopada tipo p y una región 226 dopada tipo n. Por ejemplo, la región 228 dopada tipo p puede tener un dopante p+, donde la concentración de dopante activado puede ser tan alta como pueda alcanzar un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando el sustrato 202 es silicio y se dopa con boro. En alguna implementación, la concentración de dopante de la región 228 dopada tipo p puede ser menor de $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación a expensas de una mayor resistencia de contacto. La región 226 dopada tipo n puede tener un dopante n+, donde la concentración de dopante activado puede ser tan alta como pueda alcanzar un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando el sustrato 202 es silicio y se dopa con fósforo. En alguna implementación, la concentración de dopante de la región 226 dopada tipo n puede ser menor de $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación a expensas de una mayor resistencia de contacto. La distancia entre la región 228 dopada tipo p y la región 226 dopada tipo n puede diseñarse en base a las reglas de diseño del proceso de fabricación. En general, cuanto menor sea la distancia entre la región 228 dopada tipo p y la región 226 dopada tipo n, mayor será la eficiencia de conmutación de los foto-portadores generados. El segundo conmutador 210 incluye una región 238 dopada tipo p y una región 236 dopada tipo n. La región 238 dopada tipo p es similar a la región 228 dopada tipo p, y la región 236 dopada tipo n es similar a la región 226 dopada tipo n.

45 En algunas implementaciones, la región 228 dopada tipo p está acoplada a la primera señal 222 de control. La región 226 dopada tipo n está acoplada al circuito 224 de lectura. La región 238 dopada tipo p está acoplada a la segunda señal 232 de control. La región 236 dopada tipo n está acoplada al circuito 234 de lectura. La primera señal 222 de control y la segunda señal 232 de control se usan para controlar la recogida de los electrones generados por los fotones absorbidos. Por ejemplo, cuando la capa 206 de absorción absorbe los fotones en la señal 212 óptica, se generan pares electrón-hueco y fluyen o se difunden en el sustrato 202. Cuando se usan voltajes, si la primera señal 222 de control está polarizada con relación a la segunda señal 232 de control, se crea un campo eléctrico entre la región 228 dopada tipo p y la región 238 dopada tipo p, y los electrones libres desde la capa 206 de absorción fluyen hacia la región 228 dopada tipo p o la región 238 dopada tipo p dependiendo de la dirección del campo eléctrico. En algunas implementaciones, la primera señal 222 de control puede fijarse a un valor V_i de voltaje, y la segunda señal 232 de control puede alternar entre los valores de voltaje $V_i \pm \Delta V$. La dirección del valor de polarización determina la dirección de flujo de los electrones. Por consiguiente, cuando un conmutador (por ejemplo, el primer conmutador 208) se "activa"

(es decir, los electrones fluyen hacia la región 228 dopada tipo p), el otro conmutador (por ejemplo, el segundo conmutador 210) se "desactiva" (es decir, los electrones están bloqueados con relación a la región 238 dopada tipo p). En algunas implementaciones, la primera señal 222 de control y la segunda señal 232 de control pueden ser voltajes que son diferenciales entre sí.

5 En el primer conmutador 208, se crea un campo eléctrico entre la región 228 dopada tipo p y la región 226 dopada tipo n. De manera similar, en el segundo conmutador 210, se crea un campo eléctrico entre la región 238 dopada tipo p y la región 236 dopada tipo n. Cuando el primer conmutador 208 se "activa" y el segundo conmutador 210 se "desactiva", los electrones son atraídos por la región 228 dopada tipo p, y el campo eléctrico entre la región 228 dopada tipo p y la región 226 dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 226 dopada tipo n. A continuación, el
10 circuito 224 de lectura puede habilitarse para procesar las cargas recogidas por la región 226 dopada tipo n. Por otra parte, cuando el segundo conmutador 210 se "activa" y el primer conmutador 208 se "desactiva", los electrones son atraídos por la región 238 dopada tipo p, y el campo eléctrico entre la región 238 dopada tipo p y la región 236 dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 236 dopada tipo n. A continuación, el circuito 234 de lectura puede habilitarse para procesar las cargas recogidas por la región 236 dopada tipo n.

15 En algunas implementaciones, puede aplicarse un voltaje entre las regiones dopadas tipo p y dopadas tipo n de un conmutador para operar el conmutador en un régimen de avalancha para aumentar la sensibilidad del fotodiodo 200 de doble conmutador. Por ejemplo, cuando la distancia entre la región 228 dopada tipo p y la región 226 dopada tipo n es de aproximadamente 100 nm, es posible aplicar un voltaje menor de 7 V para crear una ganancia de avalancha entre la región 228 dopada tipo p y la región 226 dopada tipo n.

20 En algunas implementaciones, la región 209 dopada tipo p puede acoplarse a un control 214 exterior. Por ejemplo, la región 209 dopada tipo p puede acoplarse a tierra. En algunas implementaciones, la región 209 dopada tipo p puede ser flotante y no acoplarse a ningún control externo. En algunas implementaciones, el sustrato 202 puede acoplarse a un control 216 externo. Por ejemplo, el sustrato 202 puede acoplarse a tierra. En algunas otras implementaciones, el sustrato 202 puede ser flotante y no acoplarse a ningún control externo.

25 La Fig. 2B es un fotodiodo 250 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 250 de doble conmutador es similar al fotodiodo 200 de doble conmutador en la Fig. 2A, pero el primer conmutador 208 y el segundo conmutador 210 incluyen además una región 252 de pozo n y una región 254 de pozo n, respectivamente. Además, la capa 206 de absorción puede ser una región dopada tipo p y el sustrato 202 puede ser un sustrato dopado tipo p. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de las regiones 252 y 254 de pozo n puede
30 variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{17} cm^{-3} . El nivel de dopante de la capa 206 de absorción y el sustrato 202 puede variar de 10^{14} cm^{-3} a 10^{16} cm^{-3} .

La disposición de la región 228 dopada tipo p, la región 252 de pozo n, el sustrato 202 p dopado, la región 254 de pozo n y la región 238 dopada tipo p forma una estructura de unión PNPNP. En general, la estructura de unión PNPNP reduce una corriente de conducción desde la primera señal 222 de control a la segunda señal 232 de control o, de
35 manera alternativa, desde la segunda señal 232 de control a la primera señal 222 de control. La disposición de la región 226 dopada tipo n, el sustrato 202 p dopado y la región 236 dopada tipo n forma una estructura de unión NPN. En general, la estructura de unión NPN reduce un acoplamiento de carga desde el primer circuito 224 de lectura al segundo circuito 234 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 234 de lectura al primer circuito 224 de lectura.

40 En algunas implementaciones, la región 228 dopada tipo p se forma completamente en el interior de la región 252 de pozo n. En algunas otras implementaciones, la región 228 dopada tipo p se forma parcialmente en la región 252 de pozo n. Por ejemplo, una parte de la región 228 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la región 252 de pozo n, mientras que otra parte de la región 228 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en el sustrato 202. De manera similar, en algunas implementaciones, la región 238 dopada tipo p está formada
45 completamente en el interior de la región 254 de pozo n. En algunas otras implementaciones, la región 238 dopada tipo p está parcialmente formada en la región 254 de pozo n.

La Fig. 2C es un fotodiodo 260 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 260 de doble conmutador es similar al fotodiodo 200 de doble conmutador en la Fig. 2A, pero el sustrato 202 incluye además una región 244 de pozo n. Además, la capa 206 de absorción puede ser una región dopada tipo p y el
50 sustrato 202 puede ser un sustrato p dopado. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de la región 244 de pozo n puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{17} cm^{-3} . El nivel de dopante de la capa 206 de absorción y el sustrato 202 puede variar de 10^{14} cm^{-3} a 10^{16} cm^{-3} .

La disposición de la región 228 dopada tipo p, la región 244 de pozo n y la región 238 dopada tipo p forma una estructura de unión PNP. En general, la estructura de unión PNP reduce una corriente de conducción desde la primera
55 señal 222 de control a la segunda señal 232 de control o, de manera alternativa, desde la segunda señal 232 de control

5 a la primera señal 222 de control. La disposición de la región 226 dopada tipo n, el sustrato 202 p dopado y la región 236 dopada tipo n forma una estructura de unión NPN. En general, la estructura de unión NPN reduce un acoplamiento de carga desde el primer circuito 224 de lectura al segundo circuito 234 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 234 de lectura al primer circuito 224 de lectura. En algunas implementaciones, si la profundidad del pozo 244 n es profunda, la disposición de la región 226 dopada tipo n, el sustrato 202 p dopado, la región 244 de pozo n, el sustrato 202 p dopado y la región 236 dopada tipo n forma una estructura de unión NPNPN, que reduce adicionalmente un acoplamiento de carga desde el primer circuito 224 de lectura al segundo circuito 234 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 234 de lectura al primer circuito 224 de lectura. En algunas implementaciones, la región 244 de pozo n reduce también efectivamente la barrera de energía potencial percibida por los electrones que fluyen desde la capa 206 de absorción al sustrato 202.

15 En algunas implementaciones, las regiones 228 y 238 dopadas tipo p se forman completamente en el interior de la región 244 de pozo n. En algunas otras implementaciones, las regiones 228 y 238 dopadas tipo p se forman parcialmente en la región 244 de pozo n. Por ejemplo, una parte de la región 228 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la región 244 de pozo n, mientras que otra parte de la región 228 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en el sustrato 202.

20 La Fig. 2D es un fotodiodo 270 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 270 de doble conmutador es similar al fotodiodo 200 de doble conmutador en la Fig. 2A, pero el fotodiodo 270 de doble conmutador incluye además una o más regiones 246 de pozo p y una o más regiones 248 de pozo p. En algunas implementaciones, las una o más regiones 246 de pozo p y las una o más regiones 248 de pozo p pueden ser parte de una estructura de anillo que rodea el primer conmutador 208 y el segundo conmutador 210. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de las una o más regiones 246 y 248 de pozo p puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} . Las una o más regiones 246 y 248 de pozo p pueden usarse como un aislamiento de fotoelectrones de los píxeles vecinos.

25 Aunque no se muestra en la Fig. 2A-2D, en algunas implementaciones, una señal óptica puede llegar al fotodiodo de doble conmutador desde la parte posterior del sustrato 202. Pueden fabricarse uno o más componentes ópticos sobre la parte posterior del sustrato 202 para enfocar, colimar, desenfocar, filtrar o si no manipular la señal óptica.

30 Aunque no se muestra en la Fig. 2A-2D, en algunas otras implementaciones, el primer conmutador 208 y el segundo conmutador 210 pueden fabricarse de manera alternativa para recoger huecos en lugar de electrones. En este caso, la región 228 dopada tipo p, la región 238 dopada tipo p y la región 209 dopada tipo p serían reemplazadas por regiones dopadas tipo n, y la región 226 dopada tipo n y la región 236 dopada tipo n serían reemplazadas por regiones dopadas tipo p. Las regiones 252, 254 y 244 de pozo n serían reemplazadas por regiones de pozo p. Las regiones 246 y 248 de pozo p serían reemplazadas por regiones de pozo n.

35 Aunque no se muestra en la Fig. 2A-2D, en algunas implementaciones, la capa 206 de absorción puede unirse a un sustrato después de la fabricación del fotodiodo 200, 250, 260 y 270 de doble conmutador. El sustrato portador puede ser cualquier material que permita la transmisión de la señal 212 óptica para llegar al fotodiodo de doble conmutador. Por ejemplo, el sustrato puede ser polímero o vidrio. En algunas implementaciones, uno o más componentes ópticos pueden fabricarse sobre el sustrato portador para enfocar, colimar, desenfocar, filtrar o si no manipular la señal 212 óptica.

40 Aunque no se muestra en las Figs. 2A-2D, en algunas implementaciones, el fotodiodo 200, 250, 260 y 270 de doble conmutador puede unirse (por ejemplo, unión metal a metal, unión óxido a óxido, unión híbrida) a un segundo sustrato con circuitos que incluyen señales de control, y/o circuitos de lectura y/o bucle de bloqueo de fase (PLL) y/o convertidor analógico a digital (ADC). Puede depositarse una capa de metal en la parte superior del fotodiodo de doble conmutador que puede usarse como reflector para reflejar la señal óptica incidente desde la parte posterior. Puede incluirse una capa de óxido entre la capa metálica y la capa absorbente para aumentar la reflectividad. La capa metálica puede usarse también como capa de unión para el proceso de unión de obleas. En algunas implementaciones, pueden añadirse uno o más conmutadores similares a 208 y 210 para interconectar las señales de control/los circuitos de lectura.

50 Aunque no se muestra en la Fig. 2A-2D, en algunas implementaciones, la capa 206 de absorción puede estar parcial o totalmente incluida/empotrada en el sustrato 202 para aliviar la topografía de la superficie y facilitar de esta manera el proceso de fabricación. Un ejemplo de la técnica de inserción se describe en la solicitud de patente US N° 15/228.282 titulado "Germanium-Silicon Light Sensing Apparatus", ahora publicada como US 2017/0040362.

55 La Fig. 3A es un fotodiodo 300 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica, donde los primeros conmutadores 308a y 308b, y los segundos conmutadores 310a y 310b se fabrican en una disposición vertical sobre un sustrato 302. Una característica con el fotodiodo 100 de doble conmutador o el fotodiodo 200 de doble conmutador es que cuanto mayor es el tamaño d de la ventana óptica, mayor es el tiempo de tránsito de

- los foto-electrones requerido para que un electrón fluya o se difunda desde un conmutador al otro conmutador. Por lo tanto, la velocidad operativa del fotodiodo puede verse afectada. El fotodiodo 300 de doble conmutador puede mejorar adicionalmente la velocidad operativa al disponer las regiones dopadas tipo p y las regiones dopadas tipo n de los conmutadores en una disposición vertical. Usando esta disposición vertical, la distancia de tránsito de los foto-electrones está limitada principalmente por el espesor t (por ejemplo, $\sim 1 \mu\text{m}$) de la capa de absorción en lugar de por el tamaño d de ventana (por ejemplo, $\sim 10 \mu\text{m}$) de la capa de absorción. El fotodiodo 300 de doble conmutador incluye una capa 306 de absorción fabricada sobre un sustrato 302. El sustrato 302 puede ser cualquier sustrato adecuado sobre el que puedan fabricarse dispositivos semiconductores. Por ejemplo, el sustrato 302 puede ser un sustrato de silicio.
- En general, la capa 306 de absorción recibe una señal 312 óptica y convierte la señal 312 óptica en señales eléctricas. La capa 306 de absorción es similar a la capa 206 de absorción. En algunas implementaciones, la capa 306 de absorción puede incluir una región 309 dopada tipo p. La región 309 dopada tipo p es similar a la región 209 dopada tipo p.
- Los primeros conmutadores 308a y 308b, y los segundos conmutadores 310a y 310b se han fabricado en el sustrato 302. Notablemente, aunque la Fig. 3A solo muestra dos primeros conmutadores 308a y 308b y dos segundos conmutadores 310a y 310b, el número de primeros conmutadores y segundos conmutadores puede ser mayor o menor. Los primeros conmutadores 308a y 308b están acoplados a una primera señal 322 de control y un primer circuito 324 de lectura. Los segundos conmutadores 310a y 310b están acoplados a una segunda señal 332 de control y un segundo circuito 334 de lectura.
- En general, la primera señal 322 de control y la segunda señal 332 de control controlan si los electrones o los huecos generados por los fotones absorbidos son recogidos por el primer circuito 324 de lectura o el segundo circuito 334 de lectura. La primera señal 322 de control es similar a la primera señal 122 de control. La segunda señal 332 de control es similar a la segunda señal 132 de control. El primer circuito 324 de lectura es similar al primer circuito 124 de lectura. El segundo circuito 334 de lectura es similar al segundo circuito 134 de lectura. En algunas implementaciones, los primeros conmutadores 308a y 308b y los segundos conmutadores 310a y 310b pueden fabricarse para recoger los electrones generados por la capa 306 de absorción. En este caso, los primeros conmutadores 308a y 308b incluyen regiones 328a y 328b dopadas tipo p, y regiones 326a y 326b dopadas tipo n, respectivamente. Por ejemplo, las regiones 328a y 328b dopadas tipo p pueden tener un dopante $p+$, donde la concentración de dopante activado puede ser tan alta como pueda alcanzar un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando el sustrato 302 es silicio y se dopa con boro. En alguna implementación, la concentración de dopante de las regiones 328a y 328b dopadas tipo p puede ser menor de $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación a expensas de una mayor resistencia de contacto. Las regiones 326a y 326b dopadas tipo n pueden tener un dopante $n+$, donde la concentración de dopante activado puede ser tan alta como pueda alcanzar un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando el sustrato 302 es silicio y se dopa con fósforo. En alguna implementación, la concentración de dopante de las regiones 326a y 326b dopadas tipo n puede ser menor de $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación a expensas de una mayor resistencia de contacto. La distancia entre la región 328a dopada tipo p y la dopada tipo n puede diseñarse en base a las reglas de diseño del proceso de fabricación. Por ejemplo, la distancia entre la región 328a dopada tipo p y la región 326a dopada tipo n puede controlarse mediante las energías asociadas con los implantes dopantes. En general, cuanto menor sea la distancia entre las regiones 328a/328b dopadas tipo p y las regiones 326a/326b dopadas tipo n, mayor será la eficiencia de conmutación de los foto-portadores generados. Los segundos conmutadores 310a y 310b incluyen regiones 338a y 338b dopadas tipo p y regiones 336a y 336b dopadas tipo n, respectivamente. Las regiones 338a/338b dopadas tipo p son similares a las regiones 328a/328b dopadas tipo p, y las regiones 336a/336b dopadas tipo n son similares a la región 326a/326b dopada tipo n.
- En algunas implementaciones, las regiones 328a y 328b dopadas tipo p están acopladas a la primera señal 322 de control. Las regiones 326a y 326b dopadas tipo n están acopladas al circuito 324 de lectura. Las regiones 338a y 338b dopadas tipo p están acopladas a la segunda señal 332 de control. Las regiones 336a y 336b dopadas tipo n están acopladas al circuito 334 de lectura. La primera señal 322 de control y la segunda señal 332 de control se usan para controlar la recogida de los electrones generados por los fotones absorbidos. Por ejemplo, cuando la capa 306 de absorción absorbe los fotones en la señal 312 óptica, se generan pares electrón-hueco y fluyen o se difunden en el sustrato 302. Cuando se usan voltajes, si la primera señal 322 de control está polarizada con relación la segunda señal 332 de control, se crean campos eléctricos entre la región 309 dopada tipo p y las regiones 328a/328b dopadas tipo p o las regiones 338a/338b dopadas tipo p, y los electrones libres de la capa 306 de absorción fluyen hacia las regiones 328a/328b dopadas tipo p o las regiones 338a/338b dopadas tipo p dependiendo de las direcciones de los campos eléctricos. En algunas implementaciones, la primera señal 322 de control puede fijarse a un valor V_i de voltaje, y la segunda señal 332 de control puede alternar entre valores de voltaje $V_i \pm \Delta V$. La dirección del valor de polarización determina la dirección de flujo de los electrones. Por consiguiente, cuando un grupo de conmutadores (por ejemplo, los primeros conmutadores 308a y 308b) se "activan" (es decir, los electrones fluyen hacia las regiones 328a y 328b

dopadas tipo p), el otro grupo de conmutadores (por ejemplo, los segundos conmutadores 310a y 310b) se "desactivan" (es decir, los electrones están bloqueados con relación a las regiones 338a y 338b dopadas tipo p). En algunas implementaciones, la primera señal 322 de control y la segunda señal 332 de control pueden ser voltajes que son diferenciales entre sí.

5 En cada uno de los primeros conmutadores 308a/308b, se crea un campo eléctrico entre la región 328a/328b dopada tipo p y la región 326a/326b dopada tipo n. De manera similar, en cada uno de los segundos conmutadores 310a/310b, se crea un campo eléctrico entre la región 338a/338b dopada tipo p y la región 336a/336b dopada tipo n. Cuando los primeros conmutadores 308a y 308b están "activados" y los segundos conmutadores 310a y 310b están "desactivados", los electrones son atraídos por las regiones 328a y 328b dopadas tipo p, y el campo eléctrico entre la
10 región 328a dopada tipo p y la región 326a dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 326a dopada tipo n. De manera similar, el campo eléctrico entre la región 328b dopada tipo p y la región 326b dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 326b dopada tipo n. A continuación, el circuito 324 de lectura puede habilitarse para procesar las cargas recogidas por las regiones 326a y 326b dopadas tipo n. Por otra parte, cuando los segundos conmutadores 310a y 310b están "activados" y los primeros conmutadores 308a y 308b están "desactivados", los electrones son atraídos por las regiones 338a y 338b dopadas tipo p, y el campo eléctrico entre la
15 región 338a dopada tipo p y la región 336a dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 336a dopada tipo n. De manera similar, el campo eléctrico entre la región 338b dopada tipo p y la región 336b dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 336b dopada tipo n. A continuación, el circuito 334 de lectura puede habilitarse para procesar la cantidad de cargas recogidas por las regiones 336a y 336b dopadas tipo n.

20 En algunas implementaciones, puede aplicarse un voltaje entre las regiones dopadas tipo p y dopadas tipo n de un conmutador para operar el conmutador en un régimen de avalancha para aumentar la sensibilidad del fotodiodo 300 de doble conmutador. Por ejemplo, cuando la distancia entre la región 328a dopada tipo p y la región 326a dopada tipo n es de aproximadamente 100 nm, es posible aplicar un voltaje menor de 7 V para crear una ganancia de avalancha entre la región 328a dopada tipo p y la región 326a dopada tipo n.

25 En algunas implementaciones, la región 309 dopada tipo p puede acoplarse a un control 314 exterior. Por ejemplo, la región 309 dopada tipo p puede acoplarse a tierra. En algunas implementaciones, la región 309 dopada tipo p puede ser flotante y no acoplarse a ningún control externo. En algunas implementaciones, el sustrato 302 puede acoplarse a un control 316 externo. Por ejemplo, el sustrato 302 puede acoplarse a tierra. En algunas otras implementaciones, el sustrato 302 puede ser flotante y no acoplarse a ningún control externo.

30 La Fig. 3B es un fotodiodo 360 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 360 de doble conmutador es similar al fotodiodo 300 de doble conmutador en la Fig. 3A, pero el fotodiodo 360 de doble conmutador incluye además una región 344 de pozo n. Además, la capa 360 de absorción puede ser una región dopada tipo p y el sustrato 302 puede ser un sustrato p dopado. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de la región 344 de pozo n puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{17} cm^{-3} . El nivel de dopante de la capa 360 de
35 absorción y el sustrato 302 puede variar de 10^{14} cm^{-3} a 10^{16} cm^{-3} .

La disposición de la región 328a dopada tipo p, la región 344 de pozo n y la región 338a dopada tipo p forma una estructura de unión PNP. De manera similar, la disposición de la región 328b dopada tipo p, la región 344 de pozo n y la región 338b dopada tipo p forma otra estructura de unión PNP. En general, la estructura de unión PNP reduce una corriente de conducción desde la primera señal 322 de control a la segunda señal 332 de control o, de manera
40 alternativa, desde la segunda señal 332 de control a la primera señal 322 de control. La disposición de la región 326a dopada tipo n, el sustrato 302 p dopado y la región 336a dopada tipo n forma una estructura de unión NPN. De manera similar, la disposición de la región 326b dopada tipo n, el sustrato 302 p dopado y la región 336b dopada tipo n forma una estructura de unión NPN. En general, la estructura de unión NPN reduce un acoplamiento de carga desde el primer circuito 324 de lectura al segundo circuito 334 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 334 de
45 lectura al primer circuito 324 de lectura. En algunas implementaciones, la región 344 de pozo n reduce también efectivamente la barrera de energía potencial percibida por los electrones que fluyen desde la capa 306 de absorción al sustrato 302.

En algunas implementaciones, las regiones 328a, 338a, 328b y 338b dopadas tipo p se forman completamente en el interior de la región 344 de pozo n. En algunas otras implementaciones, las regiones 328a, 338a, 328b y 338b dopadas
50 tipo p se forman parcialmente en la región 344 de pozo n. Por ejemplo, una parte de la región 328a dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la región 344 de pozo n, mientras que otra parte de la región 328a dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en el sustrato 302.

La Fig. 3C es un fotodiodo 370 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 370 de doble conmutador es similar al fotodiodo 300 de doble conmutador en la Fig. 3A, pero el fotodiodo
55 370 de doble conmutador incluye además una o más regiones 346 de pozo p y una o más regiones 348 de pozo p. En algunas implementaciones, las una o más regiones 346 de pozo p y las uno o más regiones 348 de pozo p pueden ser

parte de una estructura de anillo que rodea los primeros conmutadores 308a y 308b, y los segundos conmutadores 310a y 310b. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de las una o más regiones de pozo p puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} . Las una o más regiones 346 y 348 de pozo p pueden usarse como un aislamiento de los fotoelectrones con relación a los píxeles vecinos.

5 La Fig. 3D muestra vistas en sección transversal del fotodiodo 380 de doble conmutador ejemplar. La Fig. 3D muestra que las regiones 328a y 328b dopadas tipo p de los primeros conmutadores 308a y 308b, y las regiones 338a y 338b dopadas tipo p de los segundos conmutadores 310a y 310b pueden disponerse en un primer plano 362 del sustrato 302 en una disposición intercalada. La Fig. 3D muestra además que las regiones 326a y 326b dopadas tipo n de los primeros conmutadores 308a y 308b, y las regiones 336a y 336b dopadas tipo n de los segundos conmutadores 310a y 310b pueden disponerse sobre un segundo plano 364 del sustrato 302 en una disposición intercalada.

Aunque no se muestra en la Fig. 3A-3D, en algunas implementaciones, una señal óptica puede llegar al fotodiodo de doble conmutador desde la parte posterior del sustrato 302. Pueden fabricarse uno o más componentes ópticos sobre la parte posterior del sustrato 302 para enfocar, colimar, desenfocar, filtrar o si no manipular la señal óptica.

15 Aunque no se muestra en la Fig. 3A-3D, en algunas otras implementaciones, los primeros conmutadores 308a y 308b y los segundos conmutadores 310a y 310b pueden fabricarse de manera alternativa para recoger huecos en lugar de electrones. En este caso, las regiones 328a y 328b dopadas tipo p, las regiones 338a y 338b dopadas tipo p y la región 309 dopada tipo p serían reemplazadas por las regiones dopadas tipo n, y las regiones 326a y 326b dopadas tipo n y las regiones 336a y 336b dopadas tipo n serían reemplazadas por regiones dopadas tipo p. La región 344 de pozo n sería reemplazada por una región de pozo p. Las regiones 346 y 348 de pozo p serían reemplazadas por regiones de pozo n.

20 Aunque no se muestra en la Fig. 3A-3D, en algunas implementaciones, la capa 306 de absorción puede unirse a un sustrato después de la fabricación del fotodiodo 300, 360, 370 y 380 de doble conmutador. El sustrato puede ser cualquier material que permita la transmisión de la señal 312 óptica para llegar al fotodiodo de doble conmutador. Por ejemplo, el sustrato puede ser polímero o vidrio. En algunas implementaciones, uno o más componentes ópticos pueden fabricarse sobre el sustrato portador para enfocar, colimar, desenfocar, filtrar o si no manipular la señal 312 óptica.

25 Aunque no se muestra en las Figs. 3A-3D, en algunas implementaciones, el fotodiodo 300, 360, 370 y 380 de doble conmutador puede unirse (por ejemplo, unión metal a metal, unión óxido a óxido, unión híbrida) a un segundo sustrato con circuitos que incluyen señales de control y/o circuitos de lectura y/o bucle de bloqueo de fase (PLL) y/o convertidor analógico a digital (ADC). Puede depositarse una capa de metal en la parte superior del fotodiodo de doble conmutador que puede usarse como reflector para reflejar la señal óptica incidente desde la parte posterior. Puede incluirse una capa de óxido entre la capa metálica y la capa absorbente para aumentar la reflectividad. La capa metálica puede usarse también como la capa de unión para el proceso de unión de obleas. En algunas implementaciones, pueden añadirse uno o más conmutadores similares a 308a (o 308b) y 310a (o 310b) para interconectar las señales de control/los circuitos de lectura.

30 Aunque no se muestra en la Fig. 3A-3D, en algunas implementaciones, la capa 306 de absorción puede ser parcial o totalmente incluida/empotrada en el sustrato 302 para aliviar la topografía de la superficie y facilitar de esta manera el proceso de fabricación. Un ejemplo de la técnica de inserción se describe en la solicitud de patente US N° 15/228.282 titulada "Germanium-Silicon Light Sensing Apparatus", publicada ahora como US 2017/0040362.

35 La Fig. 4A es un fotodiodo 400 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 400 de doble conmutador incluye una capa 406 de absorción fabricada sobre un sustrato 402. El sustrato 402 puede ser cualquier sustrato adecuado sobre el cual puedan fabricarse dispositivos semiconductores. Por ejemplo, el sustrato 402 puede ser un sustrato de silicio. La capa 406 de absorción incluye un primer conmutador 408 y un segundo conmutador 410.

40 En general, la capa 406 de absorción recibe una señal 412 óptica y convierte la señal 412 óptica en señales eléctricas. La capa 406 de absorción se selecciona de manera que tenga un alto coeficiente de absorción en el intervalo de longitudes de onda deseado. Para longitudes de onda de NIR, la capa 406 de absorción puede ser una meseta de GeSi, donde el GeSi absorbe los fotones en la señal 412 óptica y genera pares electrón-hueco. La composición del material de germanio y silicio en la meseta de GeSi puede seleccionarse para procesos o aplicaciones específicos. En algunas implementaciones, la capa 406 de absorción se diseña de manera que tenga un espesor t. Por ejemplo, para una longitud de onda de 850 nm, el espesor de la meseta de GeSi puede ser de aproximadamente $1 \mu\text{m}$ para que tenga una eficiencia cuántica sustancial. En algunas implementaciones, la superficie de la capa 406 de absorción se diseña de manera que tenga una forma específica. Por ejemplo, la meseta de GeSi puede ser circular, cuadrada o rectangular dependiendo del perfil espacial de la señal 412 óptica sobre la superficie de la meseta de GeSi. En algunas implementaciones, la capa 406 de absorción se diseña de manera que tenga una dimensión d lateral para recibir la

señal 412 óptica. Por ejemplo, la meseta de GeSi puede tener una forma circular, donde se puede variar de 1 μm a 50 μm .

Se han fabricado un primer conmutador 408 y un segundo conmutador 410 en la capa 406 de absorción y el sustrato 402. El primer conmutador 408 está acoplado a una primera señal 422 de control y un primer circuito 424 de lectura. El segundo conmutador 410 está acoplado a una segunda señal 432 de control y un segundo circuito 434 de lectura. En general, la primera señal 422 de control y la segunda señal 432 de control controlan si los electrones o los huecos generados por los fotones absorbidos son recogidos por el primer circuito 424 de lectura o el segundo circuito 434 de lectura.

En algunas implementaciones, el primer conmutador 408 y el segundo conmutador 410 pueden fabricarse para recoger electrones. En este caso, el primer conmutador 408 incluye una región 428 dopada tipo p implantada en la capa 406 de absorción y una región 426 dopada tipo n implantada en el sustrato 402. Por ejemplo, la región 428 dopada tipo p puede tener un dopante p+, donde la concentración de dopante activado puede ser tan alta como pueda alcanzar un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando la capa 106 de absorción es germanio y se dopa con boro. En alguna implementación, la concentración de dopante de la región 428 dopada tipo p puede ser menor de $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación a expensas de una mayor resistencia de contacto. La región 426 dopada tipo n puede tener un dopante n+, donde la concentración de dopante activado puede ser tan alta como pueda alcanzar un proceso de fabricación, por ejemplo, la concentración máxima puede ser de aproximadamente $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ cuando el sustrato 402 es silicio y se dopa con fósforo. En alguna implementación, la concentración de dopante de la región 426 dopada tipo n puede ser menor de $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ para facilitar la complejidad de la fabricación a expensas de una mayor resistencia de contacto. La distancia entre la región 428 dopada tipo p y la región 426 dopada tipo n puede diseñarse en base a las reglas de diseño del proceso de fabricación. En general, cuanto menor sea la distancia entre la región 428 dopada tipo p y la región 426 dopada tipo n, mayor será la eficiencia de conmutación de los foto-portadores generados. El segundo conmutador 410 incluye una región 438 dopada tipo p y una región 436 dopada tipo n. La región 438 dopada tipo p es similar a la región 428 dopada tipo p, y la región 436 dopada tipo n es similar a la región 426 dopada tipo n.

En algunas implementaciones, la región 428 dopada tipo p está acoplada a la primera señal 422 de control. Por ejemplo, la región 428 dopada tipo p puede acoplarse a una fuente de voltaje, donde la primera señal 422 de control puede ser una señal de voltaje CA desde la fuente de voltaje. En algunas implementaciones, la región 426 dopada tipo n está acoplada al circuito 424 de lectura. El circuito 424 de lectura puede estar en una configuración de tres transistores que consiste en una puerta de restablecimiento, un seguidor de fuente y una puerta de selección, o cualquier circuito adecuado para el procesamiento de cargas. En algunas implementaciones, el circuito 424 de lectura puede fabricarse sobre el sustrato 402. En algunas otras implementaciones, el circuito 424 de lectura puede fabricarse sobre otro sustrato e integrarse/empaquetarse con el fotodiodo 400 de doble conmutador a través de unión o apilado de matriz/oblea.

La región 438 dopada tipo p está acoplada a la segunda señal 432 de control. Por ejemplo, la región 438 dopada tipo p puede acoplarse a una fuente de voltaje, donde la segunda señal 432 de control puede ser una señal de voltaje de CA que tiene una fase opuesta a la primera señal 422 de control. En algunas implementaciones, la región 436 dopada tipo n está acoplada al circuito 434 de lectura. El circuito 434 de lectura puede ser similar al circuito 424 de lectura.

La primera señal 422 de control y la segunda señal 432 de control se usan para controlar la recogida de los electrones generados por los fotones absorbidos. Por ejemplo, cuando se usan voltajes, si la primera señal 422 de control está polarizada con relación a la segunda señal 432 de control, se crea un campo eléctrico entre la región 428 dopada tipo p y la región 438 dopada tipo p, y los electrones libres fluyen hacia la región 428 dopada tipo p o la región 438 dopada tipo p dependiendo de la dirección del campo eléctrico. En algunas implementaciones, la primera señal 422 de control puede fijarse a un valor V_i de voltaje y la segunda señal 432 de control puede alternar entre los valores de voltaje $V_i \pm \Delta V$. La dirección del valor de polarización determina la dirección del flujo de los electrones. Por consiguiente, cuando un conmutador (por ejemplo, el primer conmutador 408) se "activa" (es decir, los electrones fluyen hacia la región 428 dopada tipo p), el otro conmutador (por ejemplo, el segundo conmutador 410) se "desactiva" (es decir, los electrones están bloqueados con relación a la región 438 dopada tipo p). En algunas implementaciones, la primera señal 422 de control y la segunda señal 432 de control pueden ser voltajes que son diferenciales entre sí.

En general, una diferencia entre el nivel de Fermi de una región dopada tipo p y el nivel de Fermi de una región dopada tipo n crea un campo eléctrico entre las dos regiones. En el primer conmutador 408, se crea un campo eléctrico entre la región 428 dopada tipo p y la región 426 dopada tipo n. De manera similar, en el segundo conmutador 410, se crea un campo eléctrico entre la región 438 dopada tipo p y la región 436 dopada tipo n. Cuando el primer conmutador 408 se "activa" y el segundo conmutador 410 se "desactiva", los electrones son atraídos por la región 428 dopada tipo p y el campo eléctrico entre la región 428 dopada tipo p y la región 426 dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 426 dopada tipo n. A continuación, el circuito 424 de lectura puede habilitarse para procesar las cargas recogidas por la región 426 dopada tipo n. Por otra parte, cuando el segundo conmutador 410 se conmuta a

“activado” y el primer conmutador 408 se conmuta a desactivado”, los electrones son atraídos por la región 438 dopada tipo p, y el campo eléctrico entre la región 438 dopada tipo p y la región 436 dopada tipo n transporta adicionalmente los electrones a la región 436 dopada tipo n. A continuación, el circuito 434 de lectura puede habilitarse para procesar las cargas recogidas por la región 436 dopada tipo n.

- 5 En algunas implementaciones, el sustrato 402 puede acoplarse a un control 416 externo. Por ejemplo, el sustrato 402 puede acoplarse a tierra. En algunas otras implementaciones, el sustrato 402 puede ser flotante y no acoplarse a ningún control externo.
- La Fig. 4B es un fotodiodo 450 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 450 de doble conmutador es similar al fotodiodo 400 de doble conmutador en la Fig. 4A, pero el primer conmutador 408 y el segundo conmutador 410 incluyen además una región 452 de pozo n y una región 454 de pozo n, respectivamente. Además, la capa 406 de absorción puede ser una capa dopada tipo p y el sustrato 402 puede ser un sustrato p dopado. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de las regiones 452 y 454 de pozo n puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{17} cm^{-3} . El nivel de dopante de la capa 406 de absorción y el sustrato 402 puede variar de 10^{14} cm^{-3} a 10^{16} cm^{-3} .
- 10
- 15 La disposición de la región 428 dopada tipo p, la región 452 de pozo n, la capa 406 de absorción, la región 454 de pozo n y la región 438 dopada tipo p forma una estructura de unión PNP. En general, la estructura de unión PNP reduce una corriente de conducción desde la primera señal 422 de control a la segunda señal 432 de control o, de manera alternativa, desde la segunda señal 432 de control a la primera señal 422 de control.
- La disposición de la región 426 dopada tipo n, el sustrato 402 p dopado y la región 436 dopada tipo n forma una estructura de unión NPN. En general, la estructura de unión NPN reduce un acoplamiento de carga desde el primer circuito 424 de lectura al segundo circuito 434 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 434 de lectura al primer circuito 424 de lectura.
- 20
- En algunas implementaciones, la región 428 dopada tipo p se forma completamente en el interior de la región 452 de pozo n. En algunas otras implementaciones, la región 428 dopada tipo p se forma parcialmente en la región 452 de pozo n. Por ejemplo, una parte de la región 428 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la región 452 de pozo n, mientras que otra parte de la región 428 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la capa 406 de absorción. De manera similar, en algunas implementaciones, la región 438 dopada tipo p se forma completamente en el interior de la región 454 de pozo n. En algunas otras implementaciones, la región 438 dopada tipo p se forma parcialmente en la región 454 de pozo n.
- 25
- 30 La Fig. 4C es un fotodiodo 460 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 460 de doble conmutador es similar al fotodiodo 400 de doble conmutador en la Fig. 4A, pero la capa 406 de absorción incluye además una región 456 de pozo n. Además, la capa 406 de absorción puede ser una región dopada tipo p y el sustrato 402 puede ser un sustrato p dopado. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de la región 456 de pozo n puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{17} cm^{-3} . El nivel de dopante de la capa 406 de absorción y el sustrato 402 puede variar de 10^{14} cm^{-3} a 10^{16} cm^{-3} .
- 35
- La disposición de la región 428 dopada tipo p, la región 456 de pozo n y la región 438 dopada tipo p forma una estructura de unión PNP. En general, la estructura de unión PNP reduce una corriente de conducción desde la primera señal 422 de control a la segunda señal 432 de control o, de manera alternativa, desde la segunda señal 432 de control a la primera señal 422 de control.
- 40
- La disposición de la región 426 dopada tipo n, la capa 406 de absorción dopada tipo p y la región 436 dopada tipo n forma una estructura de unión NPN. En general, la estructura de unión NPN reduce un acoplamiento de carga desde el primer circuito 424 de lectura al segundo circuito 434 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 434 de lectura al primer circuito 424 de lectura.
- En algunas implementaciones, las regiones 428 y 438 dopadas tipo p se forman completamente en el interior de la región 456 de pozo n. En algunas otras implementaciones, la región 428 y 438 dopada tipo p se forman parcialmente en la región 456 de pozo n. Por ejemplo, una parte de la región 428 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la región 456 de pozo n, mientras que otra parte de la región 428 dopada tipo p puede formarse implantando los dopantes p en la capa 406 de absorción.
- 45
- La Fig. 4D es un fotodiodo 470 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 470 de doble conmutador es similar al fotodiodo 460 de doble conmutador en la Fig. 4C, pero la región 458 de pozo n está formada para extenderse desde la capa 406 de absorción al sustrato 202. Además, la capa 406 de absorción puede ser una región dopada tipo p y el sustrato 402 puede ser un sustrato p dopado. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de la región 456 de pozo n puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{17} cm^{-3} . El nivel de dopante de la capa 406 de absorción y el sustrato 402 puede variar de 10^{14} cm^{-3} a 10^{16} cm^{-3} .
- 50

- La disposición de la región 428 dopada tipo p, la región 458 de pozo n y la región 438 dopada tipo p forma una estructura de unión PNP, que reduce adicionalmente una corriente de conducción desde la primera señal 422 de control a la segunda señal 432 de control, o de manera alternativa, desde la segunda señal 432 de control a la primera señal 422 de control. La disposición de la región 426 dopada tipo n, el sustrato 402 p dopado, la región 458 de pozo n, el sustrato 402 p dopado y la región 436 dopada tipo n forma una estructura de unión NPNPN, que reduce adicionalmente un acoplamiento de carga desde el primer circuito 424 de lectura al segundo circuito 434 de lectura o, de manera alternativa, desde el segundo circuito 434 de lectura al primer circuito 424 de lectura. En algunas implementaciones, la región 458 de pozo n reduce también efectivamente la barrera de energía potencial percibida por los electrones que fluyen desde la capa 406 de absorción al sustrato 402.
- La Fig. 4E es un fotodiodo 480 de doble conmutador ejemplar para convertir una señal óptica en una señal eléctrica. El fotodiodo 480 de doble conmutador es similar al fotodiodo 400 de doble conmutador en la Fig. 4A, pero el fotodiodo 480 de doble conmutador incluye además una o más regiones 446 de pozo p y una o más regiones 448 de pozo p. En algunas implementaciones, las una o más regiones 446 de pozo p y las una o más regiones 448 de pozo p pueden ser parte de una estructura de anillo que rodea el primer conmutador 408 y el segundo conmutador 410. En algunas implementaciones, el nivel de dopante de las una o más regiones 446 y 448 de pozo p puede variar de 10^{15} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} . Las una o más regiones 446 y 448 de pozo p pueden usarse como un aislamiento de fotoelectrones de los píxeles vecinos.
- Aunque no se muestra en la Fig. 4A-4E, en algunas implementaciones, una señal óptica puede llegar al fotodiodo de doble conmutador desde la parte posterior del sustrato 402. Pueden fabricarse uno o más componentes ópticos sobre la parte posterior del sustrato 402 para enfocar, colimar, desenfocar, filtrar o si no manipular la señal óptica.
- Aunque no se muestra en la Fig. 4A-4E, en algunas otras implementaciones, el primer conmutador 408 y el segundo conmutador 410 pueden fabricarse, de manera alternativa, para recoger huecos en lugar de electrones. En este caso, la región 428 dopada tipo p y la región 438 dopada tipo p serían reemplazadas por regiones dopadas tipo n, y la región 426 dopada tipo n y la región 436 dopada tipo n serían reemplazadas por regiones dopadas tipo p. Las regiones 452, 454, 456 y 458 de pozo n serían reemplazadas por regiones de pozo p. Las regiones 446 y 448 de pozo p serían reemplazadas por regiones de pozo n.
- Aunque no se muestra en la Fig. 4A-4E, en algunas implementaciones, la capa 406 de absorción puede unirse a un sustrato después de la fabricación del fotodiodo 400, 450, 460, 470 y 480 de doble conmutador. El sustrato puede ser cualquier material que permita la transmisión de la señal 412 óptica para llegar al fotodiodo de doble conmutador. Por ejemplo, el sustrato puede ser polímero o vidrio. En algunas implementaciones, pueden fabricarse uno o más componentes ópticos sobre el sustrato portador para enfocar, colimar, desenfocar, filtrar o si no manipular la señal 412 óptica.
- Aunque no se muestra en las Figs. 4A-4E, en algunas implementaciones, el fotodiodo 400, 450, 460, 470 y 480 de doble conmutador puede unirse (por ejemplo, unión metal a metal, unión óxido a óxido, unión híbrida) a un segundo sustrato con circuitos que incluyen señales de control y/o circuitos de lectura y/o bucle de bloqueo de fase (PLL) y/o convertidor analógico a digital (ADC). Puede depositarse una capa de metal en la parte superior del fotodiodo de doble conmutador que puede usarse como reflector para reflejar la señal óptica incidente desde la parte posterior. Puede incluirse una capa de óxido entre la capa metálica y la capa absorbente para aumentar la reflectividad. La capa metálica puede usarse también como la capa de unión para el proceso de unión de obleas. En algunas implementaciones, pueden añadirse uno o más conmutadores similares a 408 y 410 para interconectar las señales de control/los circuitos de lectura.
- Aunque no se muestra en la Fig. 4A-4E, en algunas implementaciones, la capa 406 de absorción puede ser parcial o totalmente incluida/empotrada en el sustrato 402 para aliviar la topografía de la superficie y facilitar de esta manera el proceso de fabricación. Un ejemplo de la técnica de inserción se describe en la solicitud de patente US N° 15/228.282 titulado "Germanium-Silicon Light Sensing Apparatus", publicada ahora como US 2017/0040362.
- La Fig. 5A muestra un sistema 500 de obtención de imágenes ejemplar para determinar las características de un objeto 510 diana. El objeto 510 diana puede ser un objeto tridimensional. El sistema 500 de obtención de imágenes puede incluir una unidad 502 de transmisión, una unidad 504 de recepción y una unidad 506 de procesamiento. En general, la unidad 502 de transmisión emite luz 512 hacia el objeto 510 diana. La unidad 502 de transmisión puede incluir una o más fuentes de luz, circuitos de control y/o elementos ópticos. Por ejemplo, la unidad 502 de transmisión puede incluir uno o más LEDs o láser NIR, donde la luz 512 emitida puede ser colimada por una lente colimadora para propagarse en el espacio libre.
- En general, la unidad 504 de recepción recibe la luz 514 reflejada que se refleja desde el objeto 510 diana. La unidad 504 de recepción puede incluir uno o más fotodiodos, circuitos de control y/o elementos ópticos. Por ejemplo, la unidad 504 de recepción 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 de doble conmutador para detectar la luz 514 reflejada, donde la luz 514 reflejada puede enfocarse a los fotodiodos de doble conmutador. Cada fotodiodo de doble conmutador puede ser un fotodiodo de doble conmutador divulgado en la presente solicitud.

5 En general, la unidad 506 de procesamiento procesa los foto-portadores generados por la unidad 504 de recepción y determina las características del objeto 510 diana. La unidad 506 de procesamiento puede incluir circuitos de control, uno o más procesadores y/o medios de almacenamiento informáticos que pueden almacenar instrucciones para determinar las características del objeto 510 diana. Por ejemplo, la unidad 506 de procesamiento puede incluir circuitos de lectura y procesadores que pueden procesar la información asociada con los foto-portadores recogidos para determinar las características del objeto 510 diana. En algunas implementaciones, las características del objeto 510
10 diana pueden ser información de profundidad del objeto 510 diana. En algunas implementaciones, las características del objeto 510 diana pueden ser composiciones materiales del objeto 510 diana.

La Fig. 5B muestra una técnica ejemplar para determinar las características del objeto 510 diana. La unidad 502 de transmisión puede emitir impulsos 512 de luz modulados a una frecuencia f_m con un ciclo de trabajo del 50%. La unidad 504 de recepción puede recibir impulsos 514 de luz reflejados que tienen un desplazamiento de fase de Φ . Los
15 fotodiodos de doble conmutador se controlan de manera que el circuito 1 de lectura lea las cargas Q_1 recogidas en una fase sincronizada con los impulsos de luz emitidos, y el circuito 2 de lectura lee las cargas Q_2 recogidas en una fase opuesta con los impulsos de luz emitidos. En algunas implementaciones, la distancia, D , entre el sistema 500 de obtención de imágenes y el objeto 510 diana puede derivarse usando la ecuación

$$D = \frac{c}{4f_m} \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2}, \quad (1)$$

20 donde c es la velocidad de la luz.

La Fig. 5C muestra otra técnica ejemplar para determinar las características del objeto 510 diana. La unidad 502 de transmisión puede emitir impulsos 512 de luz modulados a una frecuencia f_m con un ciclo de trabajo de menos del 50%. Al reducir el ciclo de trabajo de los impulsos ópticos en un factor de N , pero aumentando la intensidad de los impulsos ópticos en un factor de N al mismo tiempo, la relación señal-a-ruido de los impulsos 514 de luz reflejados recibidos
25 puede mejorarse mientras se mantiene sustancialmente el mismo consumo de energía para el sistema 500 de obtención de imágenes. Esto se hace posible cuando la anchura de banda del dispositivo se aumenta de manera que el ciclo de trabajo de los impulsos ópticos pueda reducirse sin distorsionar la forma de los impulsos. La unidad 504 de recepción puede recibir los impulsos 514 de luz reflejados que tienen un desplazamiento de fase de Φ . Los fotodiodos de puertas múltiples se controlan de manera que un circuito 1 de lectura lea las cargas Q_1' recogidas en una fase sincronizada con los impulsos de luz emitidos, y un circuito 2 de lectura lee las cargas Q_2' recogidas en una fase retrasada con los impulsos de luz emitidos. En algunas implementaciones, la distancia, D , entre el sistema 500 de obtención de imágenes y el objeto 510 diana puede derivarse usando la ecuación

$$D = \frac{c}{4Nf_m} \frac{Q_2'}{Q_1' + Q_2'}, \quad (2)$$

35 La Fig. 6 muestra un ejemplo de un diagrama 600 de flujo para determinar las características de un objeto usando un sistema de obtención de imágenes. El proceso 600 puede ser realizado por un sistema tal como el sistema 500 de obtención de imágenes.

El sistema recibe la luz reflejada (602). Por ejemplo, la unidad 502 de transmisión puede emitir impulsos 512 de luz de NIR hacia el objeto 510 diana. La unidad 504 de recepción puede recibir los impulsos 514 de luz de NIR reflejados que se reflejan desde el objeto 510 diana.

40 El sistema determina la información de fase (604). Por ejemplo, la unidad 504 de recepción 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 de doble conmutador para detectar los impulsos 514 de luz reflejados. El tipo de fotodiodos de doble conmutador puede ser un fotodiodo de doble conmutador divulgado en la presente solicitud, donde la información de fase puede determinarse usando las técnicas descritas en la referencia a la Fig. 5B o la Fig. 5C.

45 El sistema determina las características del objeto (606). Por ejemplo, la unidad 506 de procesamiento puede determinar la información de profundidad del objeto 510 en base a la información de fase usando técnicas descritas con referencia a la Fig. 5B o la Fig. 5C.

En algunas implementaciones, un sensor de imagen incluye múltiples píxeles fabricados sobre un sustrato semiconductor, donde cada píxel puede incluir uno o más fotodiodos 100, 160, 170, 180, 200, 250, 260, 270, 300, 360,

- 370, 380, 400, 450, 460, 470 y 480 de doble conmutador para detectar la luz reflejada, tal como se ilustra en las Figs. 5A y 5B. El aislamiento entre estos píxeles puede implementarse en base a un aislamiento de aislante, tal como mediante el uso de una capa de óxido o nitruro, o en base a un aislamiento de implante, tal como usando la región p+ o n+ para bloquear los electrones o huecos de la señal, o en base a una barrera de energía intrínseca incorporada, tal como mediante el uso de la interfaz de heterounión germanio-silicio.
- 5
- Se han descrito varias implementaciones. Sin embargo, se entenderá que pueden realizarse diversas modificaciones. Por ejemplo, pueden usarse diversas formas de los flujos mostrados anteriormente, con etapas reordenadas, añadidas o eliminadas.
- Varias diversas implementaciones pueden haberse descrito usando secciones transversales bidimensionales para una fácil descripción y con propósitos ilustrativos. Sin embargo, las variantes y variaciones tridimensionales deberían incluirse también dentro del alcance de la divulgación siempre que haya secciones transversales bidimensionales correspondientes en las estructuras tridimensionales.
- 10
- Aunque la presente memoria descriptiva contiene muchos detalles, estos no deberían interpretarse como limitaciones, sino como descripciones de características específicas de realizaciones particulares. Ciertas características que se describen en la presente memoria descriptiva en el contexto de realizaciones separadas pueden implementarse también en combinación en una sola realización. Por el contrario, varias características que se describen en el contexto de una única realización pueden implementarse también en múltiples realizaciones por separado o en cualquier subcombinación adecuada. Además, aunque las características pueden haberse descrito anteriormente como actuando en ciertas combinaciones e incluso pueden haberse reivindicado inicialmente como tales, en algunos casos, una o más características de una combinación reivindicada pueden eliminarse de la combinación, y la combinación reivindicada puede modificarse a una subcombinación o variación de una subcombinación
- 15
- 20
- De manera similar, aunque las operaciones se representan en los dibujos en un orden particular, esto no debería entenderse como que se requiere que dichas operaciones se realicen en el orden particular mostrado o en un orden secuencial, o que se realicen todas las operaciones ilustradas, para conseguir resultados deseables. En ciertas circunstancias, un procesamiento multitarea y paralelo puede ser ventajoso. Además, la separación de varios componentes del sistema en las realizaciones descritas anteriormente no debería entenderse que requiere dicha separación en todas las realizaciones, y debería entenderse que los componentes de programa y los sistemas descritos generalmente pueden integrarse conjuntamente en un único producto de software o empaquetarse en múltiples productos de software.
- 25
- 30

REIVINDICACIONES

1. Un aparato (200, 250, 260, 270, 300, 360, 370, 380) óptico que comprende:
 - un sustrato (202, 302) semiconductor de silicio;
 - una capa (206, 306) de absorción de silicio-germanio acoplada al sustrato semiconductor de silicio, incluyendo la capa de absorción una región de sensor óptico configurada para absorber fotones y para generar foto-portadores a partir de los fotones absorbidos;
 - uno o más primeros conmutadores (208, 210, 308, 310) controlados por una primera señal (222, 232, 322, 332) de control, estando configurados los uno o más primeros conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la primera señal de control; y
 - uno o más segundos conmutadores (208, 210, 308, 310) controlados por una segunda señal (222, 232, 322, 332) de control, estando configurados los uno o más segundos conmutadores para recoger al menos una parte de los foto-portadores en base a la segunda señal de control, en el que la segunda señal de control es diferente de la primera señal de control,
 en el que los uno o más primeros conmutadores comprenden:
 - una primera región (228, 238, 328, 338) dopada tipo p en el sustrato semiconductor de silicio, en la que la primera región dopada tipo p es controlada por la primera señal de control; y
 - una primera región (226, 236, 326, 336) dopada tipo n en el sustrato semiconductor de silicio, en la que la primera región dopada tipo n está acoplada a un primer circuito integrado de lectura;
 en el que los uno o más segundos conmutadores comprenden:
 - una segunda región (228, 238, 328, 338) dopada tipo p en el sustrato semiconductor de silicio, en la que la segunda región dopada tipo p es controlada por la segunda señal de control; y
 - una segunda región (226, 236, 326, 336) dopada tipo n en el sustrato semiconductor de silicio, en la que la segunda región dopada tipo n está acoplada a un segundo circuito integrado de lectura.
2. El aparato óptico según la reivindicación 1,
 - en el que el sustrato semiconductor de silicio incluye una tercera región (252, 254) dopada tipo n y una cuarta región (252, 254) dopada tipo n,
 - en el que al menos una parte de la primera región dopada tipo p se forma en la tercera región dopada tipo n, y
 - en el que al menos una parte de la segunda región dopada tipo p se forma en la cuarta región dopada tipo n.
3. El aparato óptico según la reivindicación 1,
 - en el que el sustrato semiconductor de silicio incluye una tercera región (244) dopada tipo n, y
 - en el que al menos una parte de la primera región dopada tipo p y una parte de la segunda región dopada tipo p se forman en la tercera región dopada tipo n.
4. El aparato óptico según la reivindicación 1, en el que:
 - los uno o más primeros conmutadores comprenden:
 - múltiples primeras regiones dopadas tipo p en el sustrato semiconductor de silicio, en el que las múltiples primeras regiones dopadas tipo p son controladas por la primera señal de control; y
 - múltiples primeras regiones dopadas tipo n en el sustrato semiconductor de silicio, en el que las múltiples primeras regiones dopadas tipo n están acopladas a un primer circuito integrado de lectura, y
 - en el que los uno o más segundos conmutadores comprenden:
 - múltiples segundas regiones dopadas tipo p en el sustrato semiconductor de silicio, en el que las múltiples segundas regiones dopadas tipo p son controladas por la segunda señal de control; y

múltiples segundas regiones dopadas tipo n en el sustrato semiconductor de silicio, en el que las múltiples segundas regiones dopadas tipo n están acopladas a un segundo circuito integrado de lectura.

5. El aparato óptico según la reivindicación 4,

5 en el que las múltiples primeras regiones dopadas tipo p y las múltiples segundas regiones dopadas tipo p están dispuestas en una disposición intercalada a lo largo de un primer plano en el sustrato semiconductor de silicio, y

en el que las múltiples primeras regiones dopadas tipo n y las múltiples segundas regiones dopadas tipo n están dispuestas en una disposición intercalada a lo largo de un segundo plano en el sustrato semiconductor de silicio que es diferente del primer plano.

6. El aparato óptico según la reivindicación 4,

10 en el que cada región dopada tipo p de las múltiples primeras regiones dopadas tipo p está dispuesta sobre una región dopada tipo n respectiva de las múltiples primeras regiones dopadas tipo n, y

en el que cada región dopada tipo p de las múltiples segundas regiones dopadas tipo p está dispuesta sobre una región dopada tipo n respectiva de las múltiples segundas regiones dopadas tipo n.

7. El aparato óptico según la reivindicación 1 o 4,

15 en el que el sustrato semiconductor de silicio comprende una o más regiones de pozo p.

8. El aparato óptico según la reivindicación 1 o 4,

en el que la primera señal de control es un voltaje de polarización fijo, y

en el que la segunda señal de control es un voltaje de polarización variable polarizado con relación al voltaje fijo de la primera señal de control.

20 9. El aparato óptico según la reivindicación 1 o 4,

en el que los fotones absorbidos por la capa de absorción se reflejan desde una superficie de una diana tridimensional, y

25 en el que la parte de los foto-portadores recogidos por los uno o más primeros conmutadores y la parte de los foto-portadores recogidos por los uno o más segundos conmutadores son utilizadas por un sistema de tiempo-de-vuelo para analizar la información de profundidad o una composición de material de la diana tridimensional.

10. El aparato óptico según la reivindicación 1 configurado como un sistema de tiempo-de-vuelo que comprende:

una fuente de luz; y

un sensor de imagen que comprende múltiples píxeles fabricados sobre el sustrato semiconductor de silicio, en el que cada píxel de los píxeles comprende:

30 la capa de absorción de silicio-germanio,

uno o más de los uno o más primeros conmutadores, y

uno o más de los uno o más segundos conmutadores.

35 11. El aparato óptico según la reivindicación 10, en el que la fuente de luz está configurada para emitir impulsos ópticos que tienen un ciclo de trabajo que es menor del 50% pero que mantienen una misma cantidad de energía por impulso óptico.

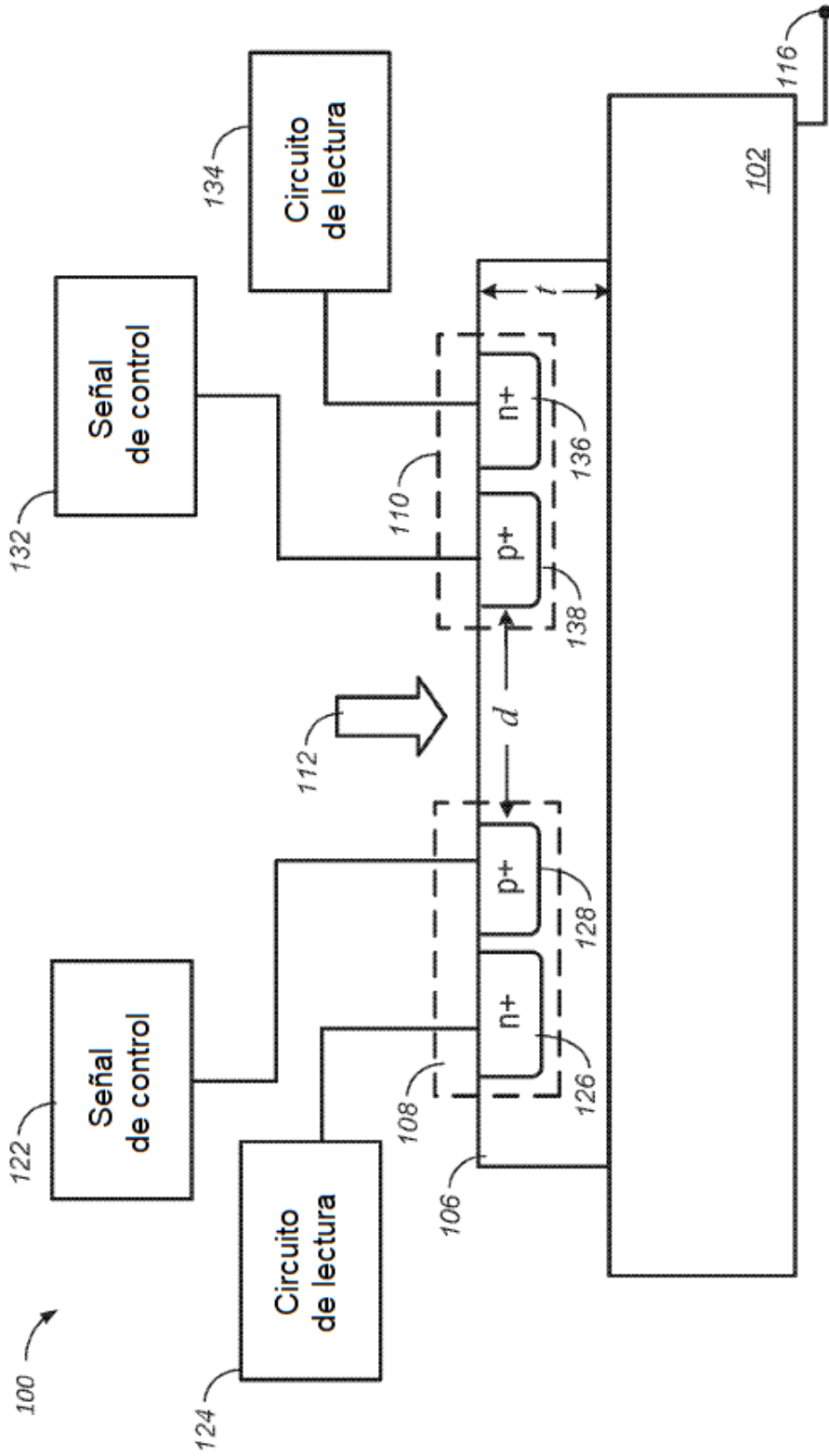


FIG. 1A

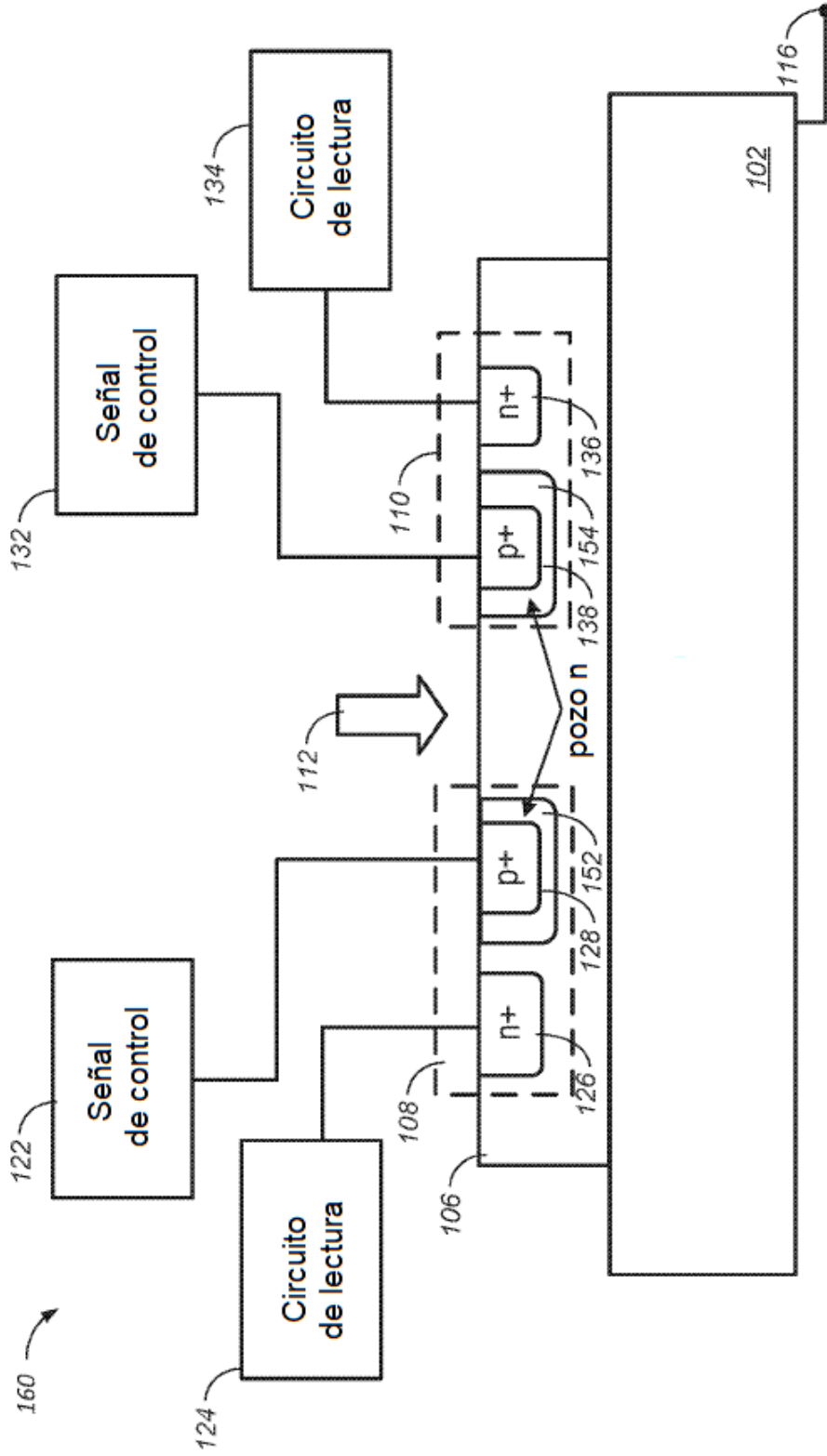


FIG. 1B

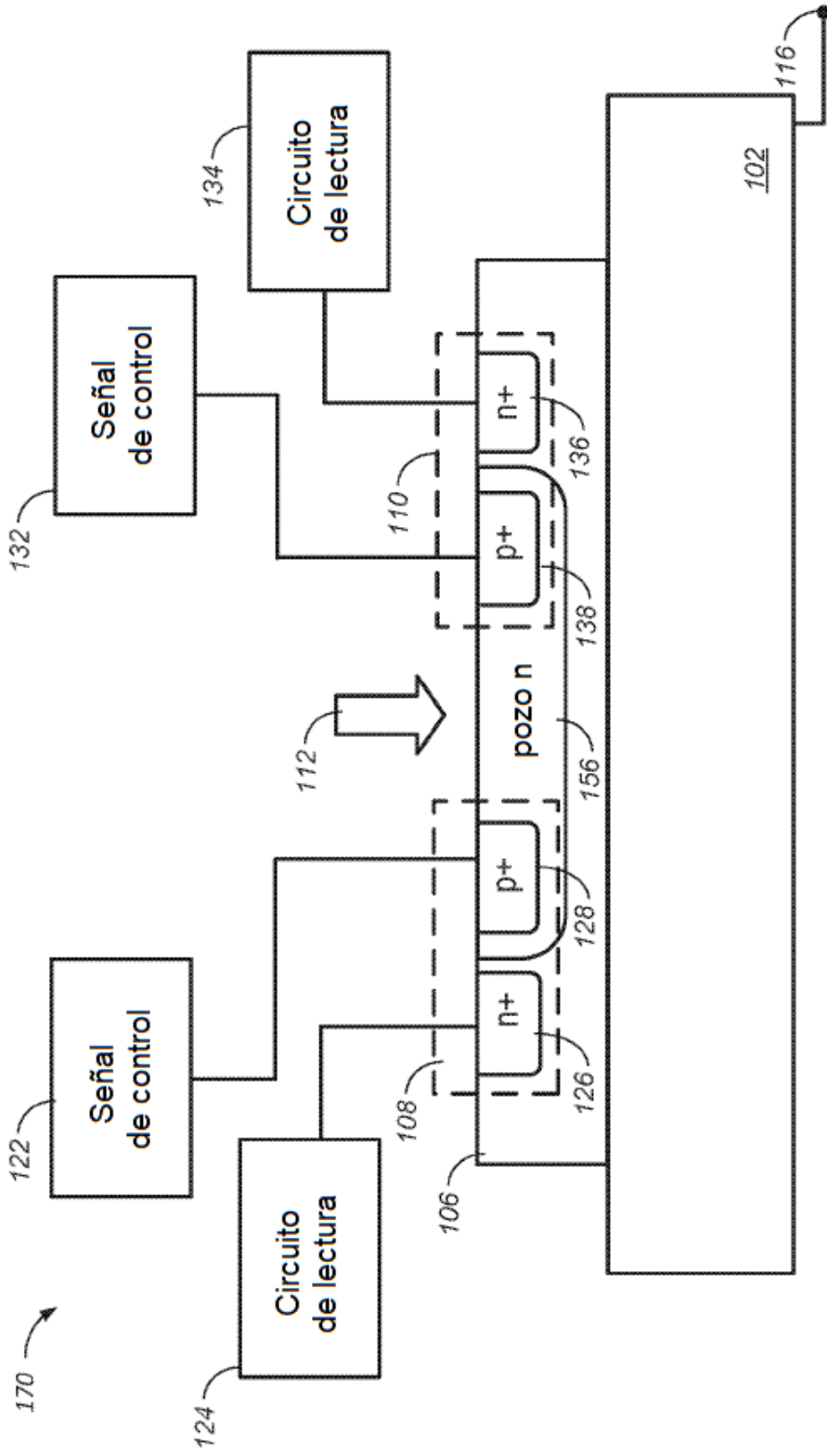


FIG. 1C

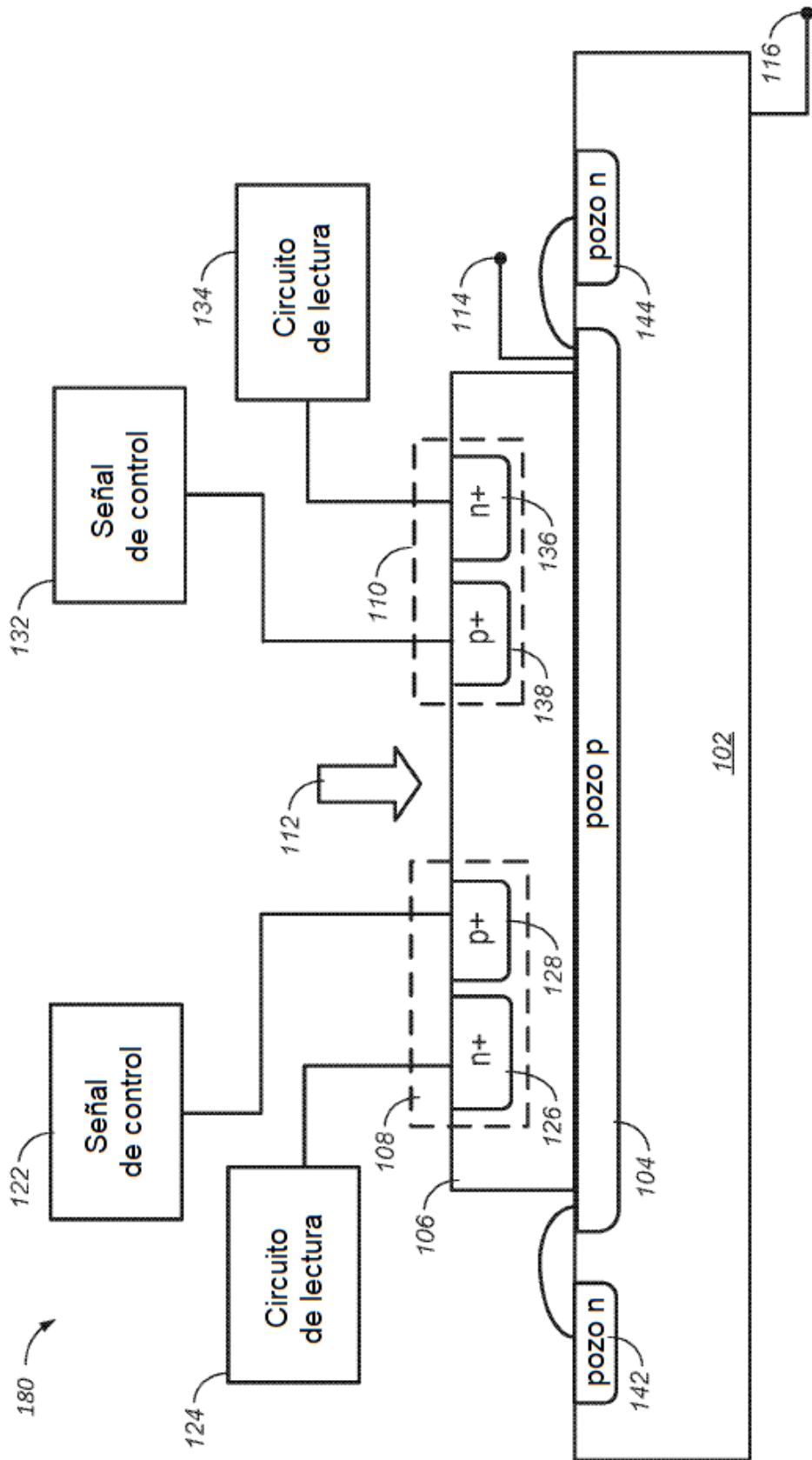


FIG. 1D

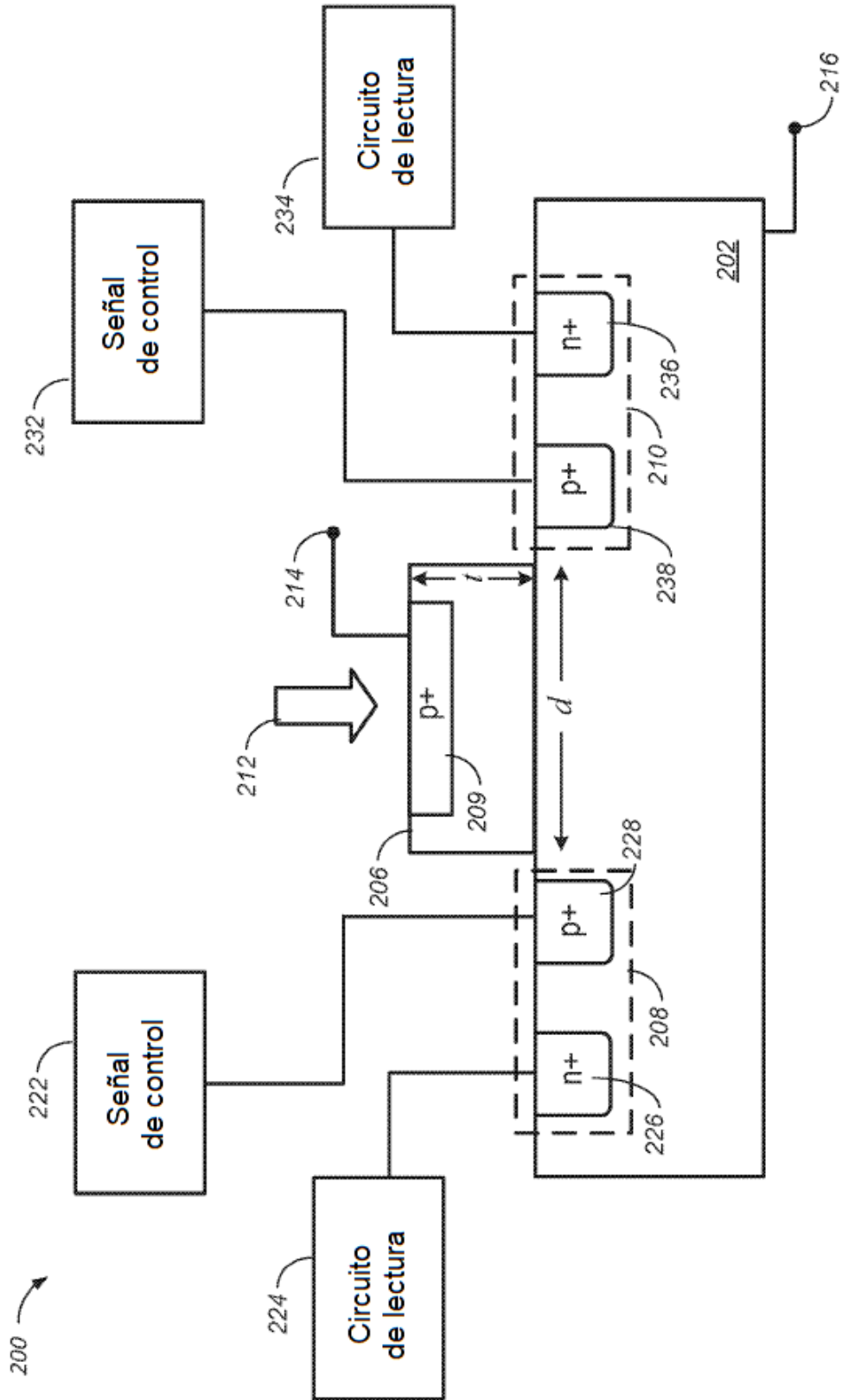


FIG. 2A

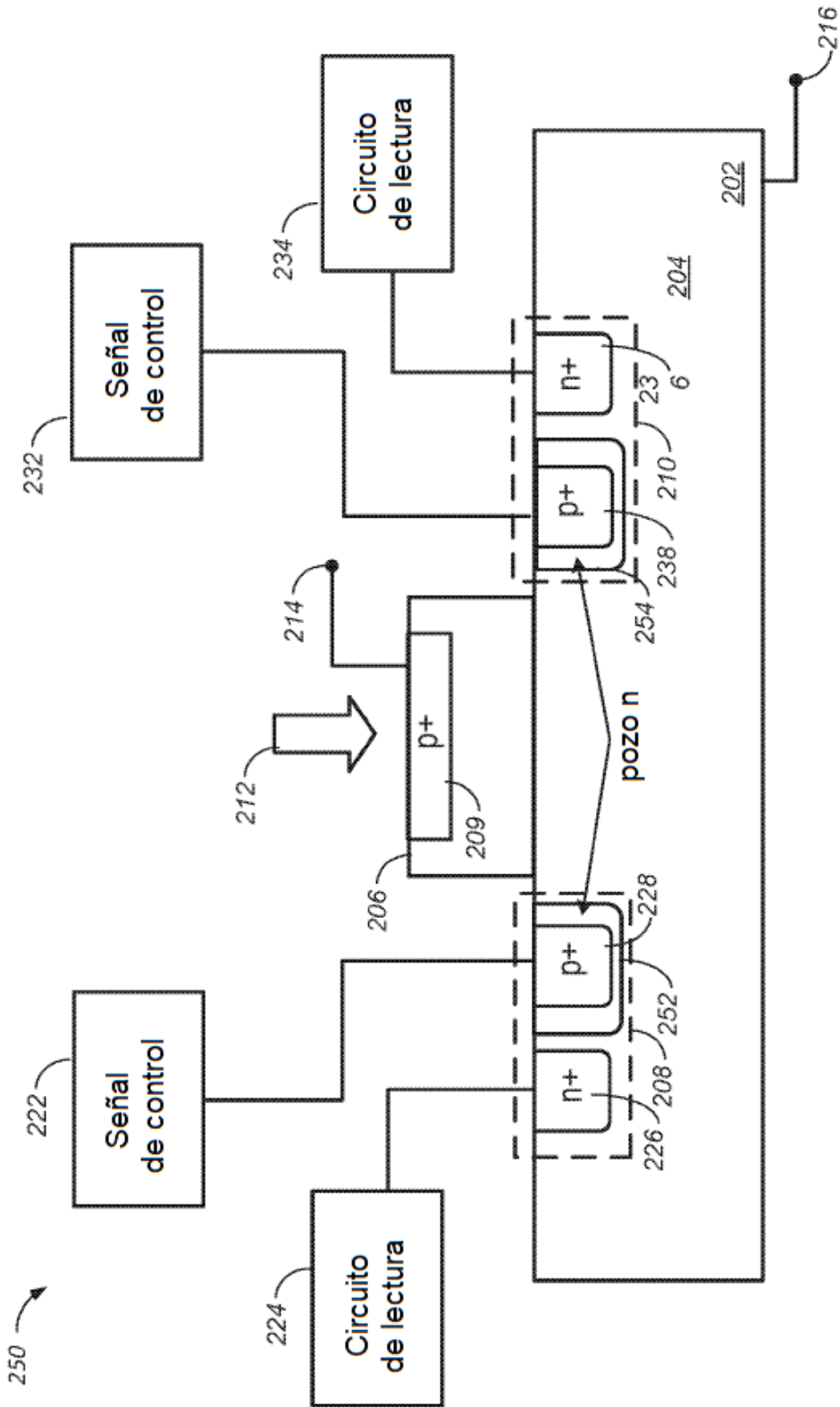


FIG. 2B

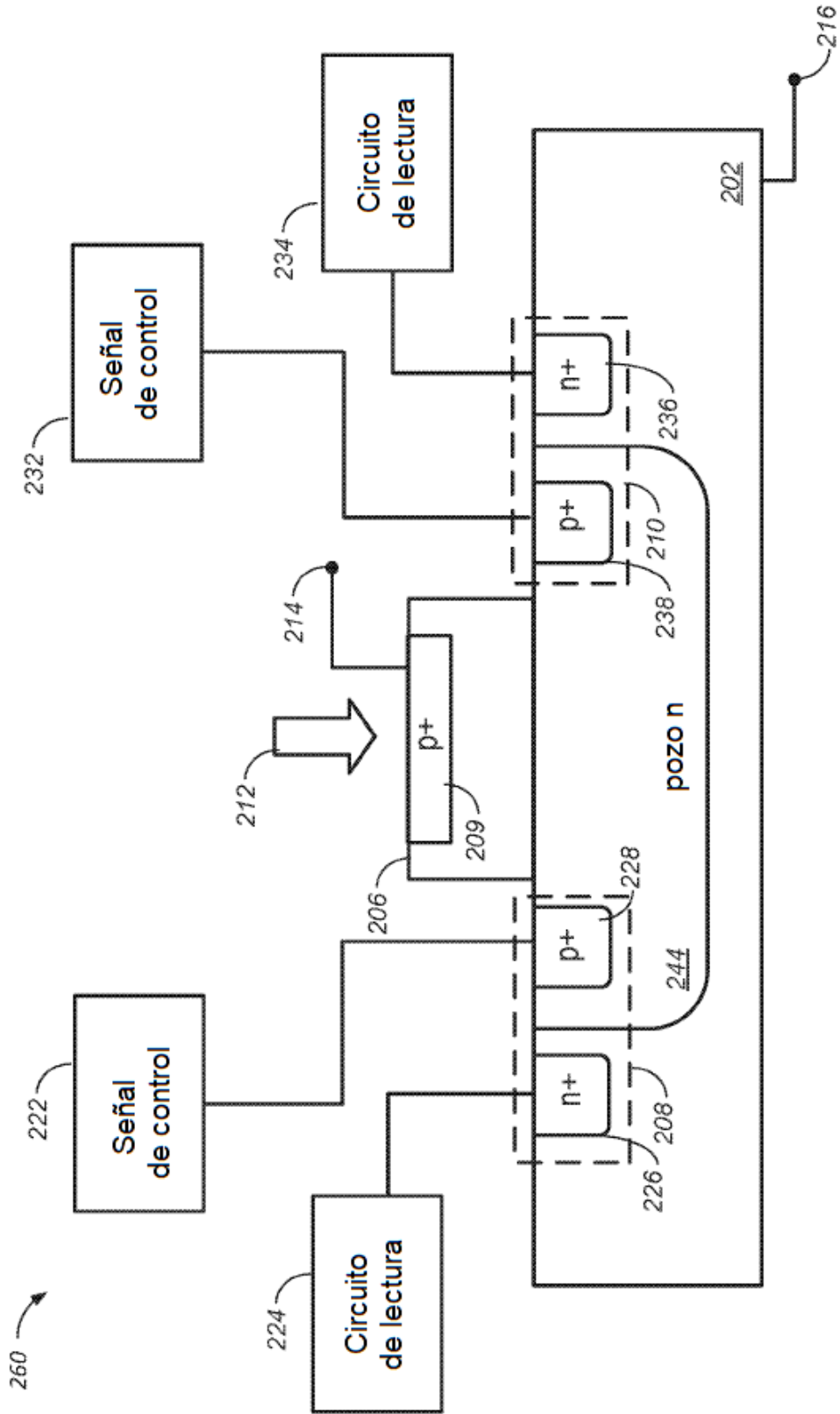


FIG. 2C

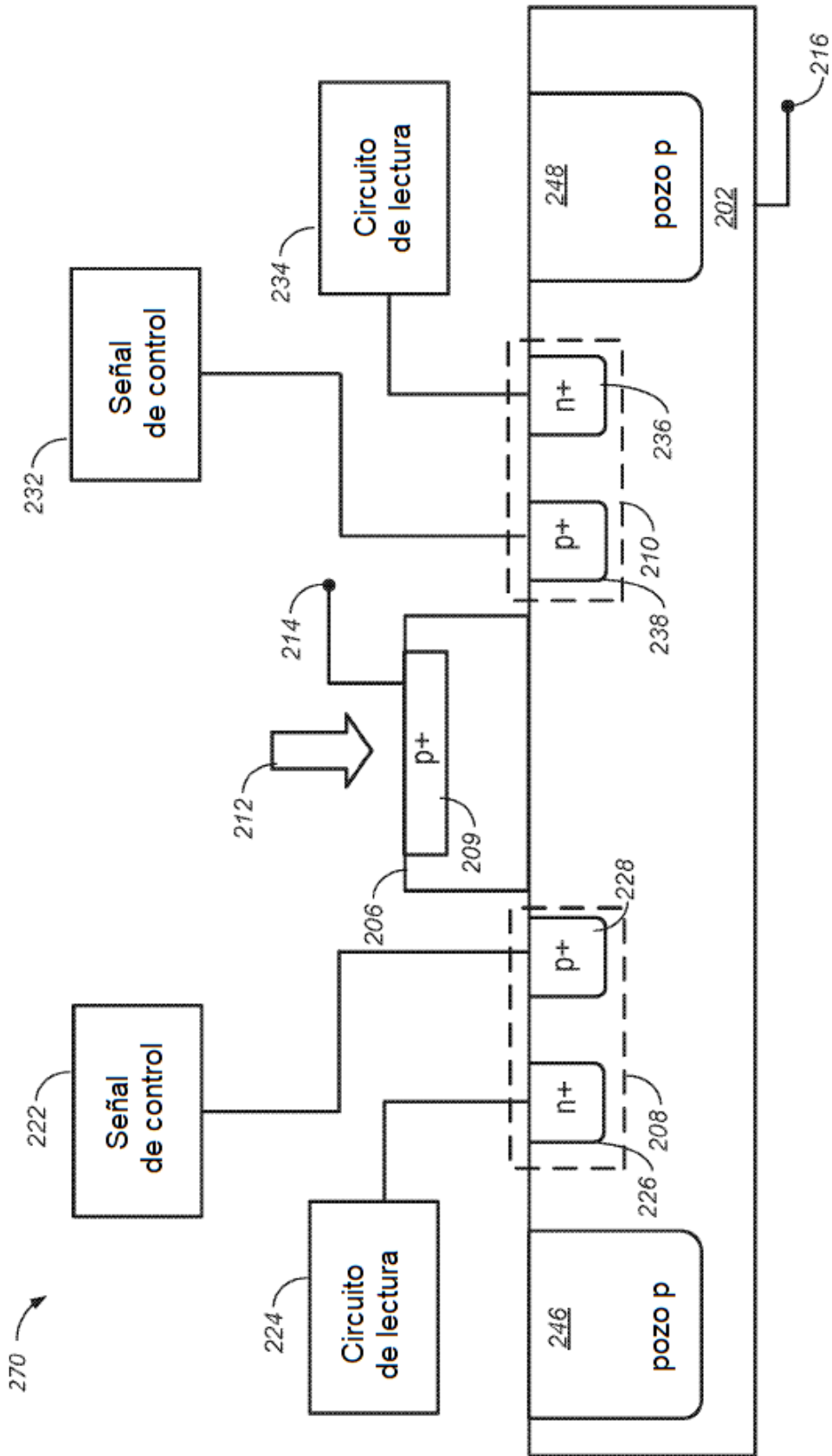


FIG. 2D

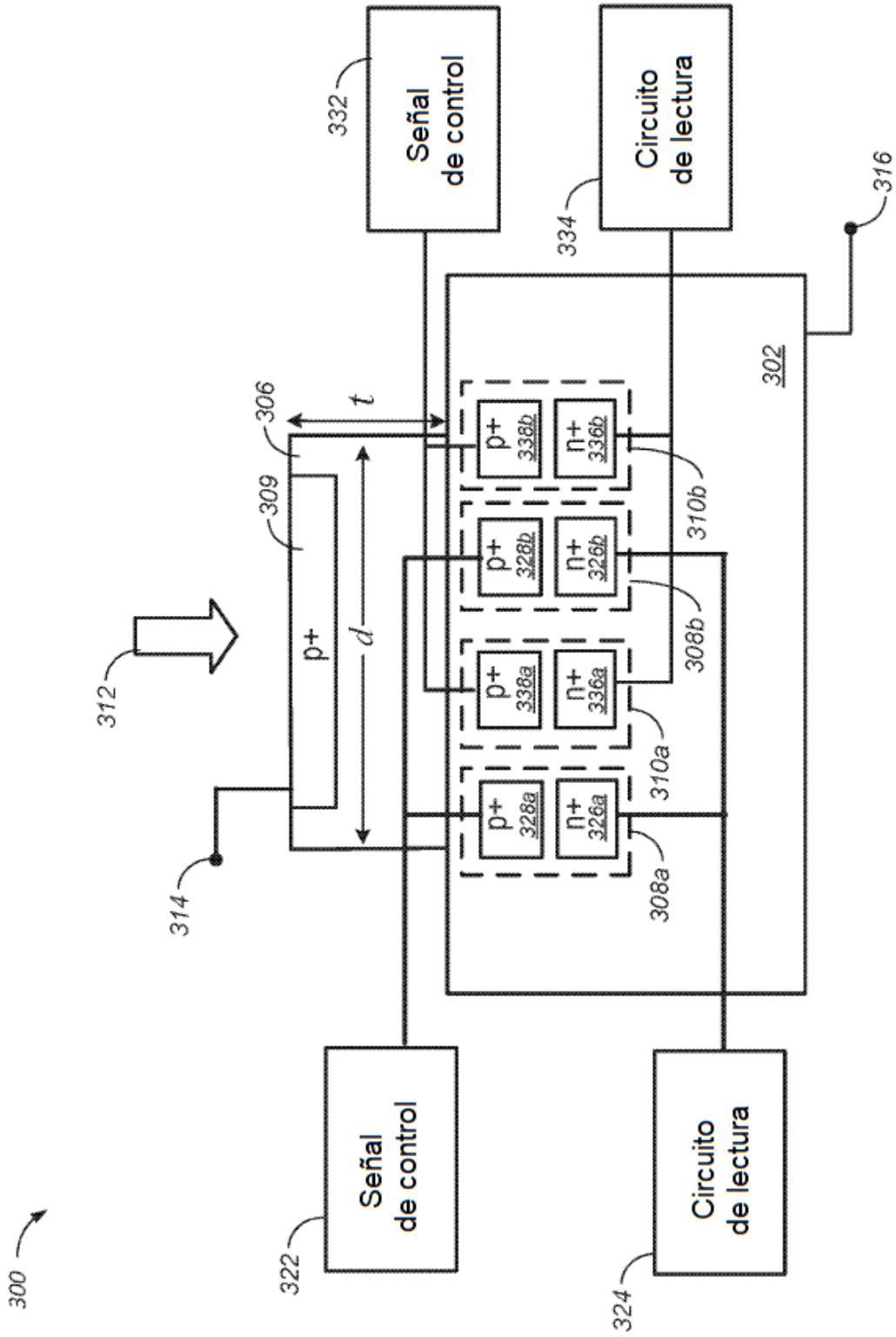


FIG. 3A

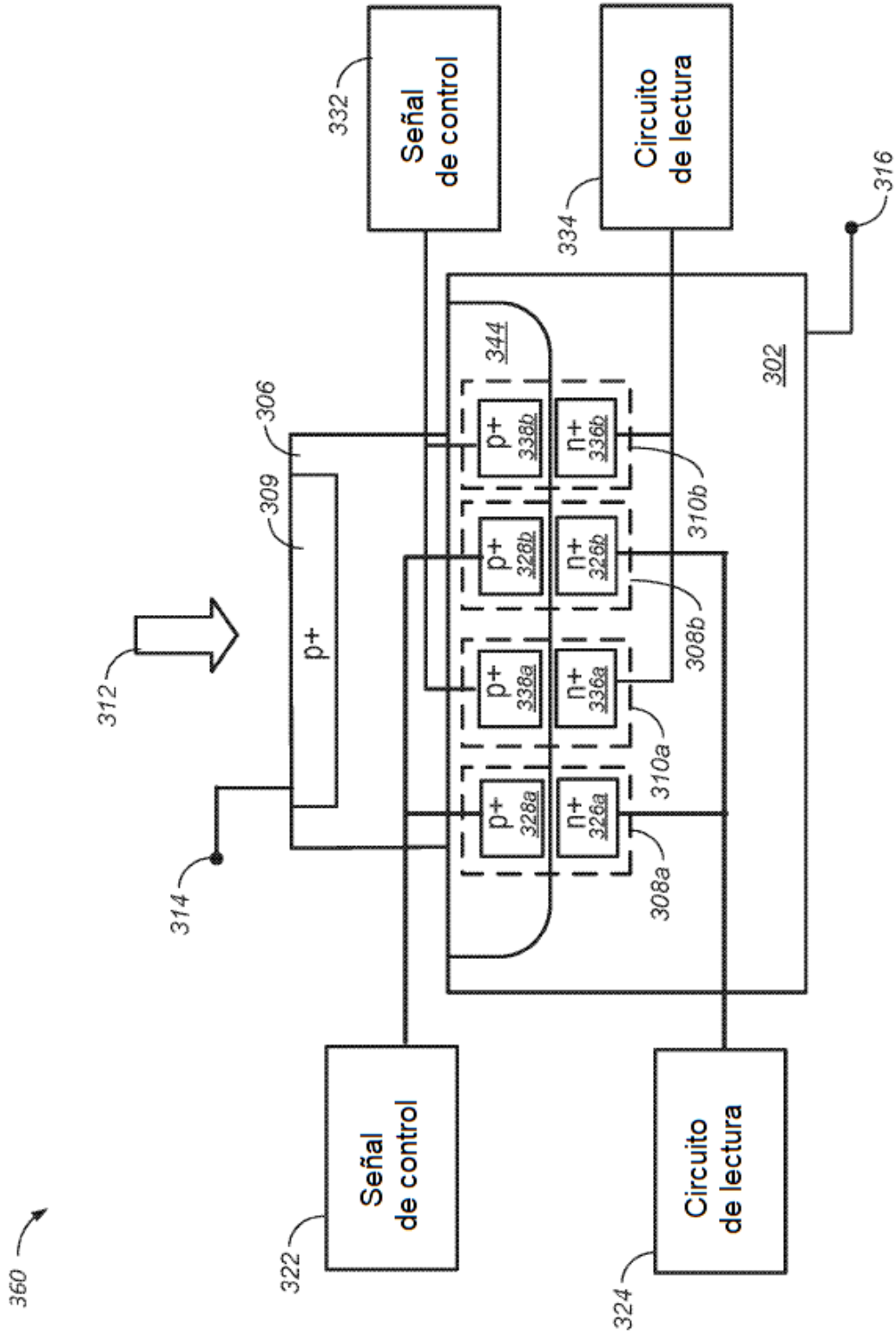


FIG. 3B

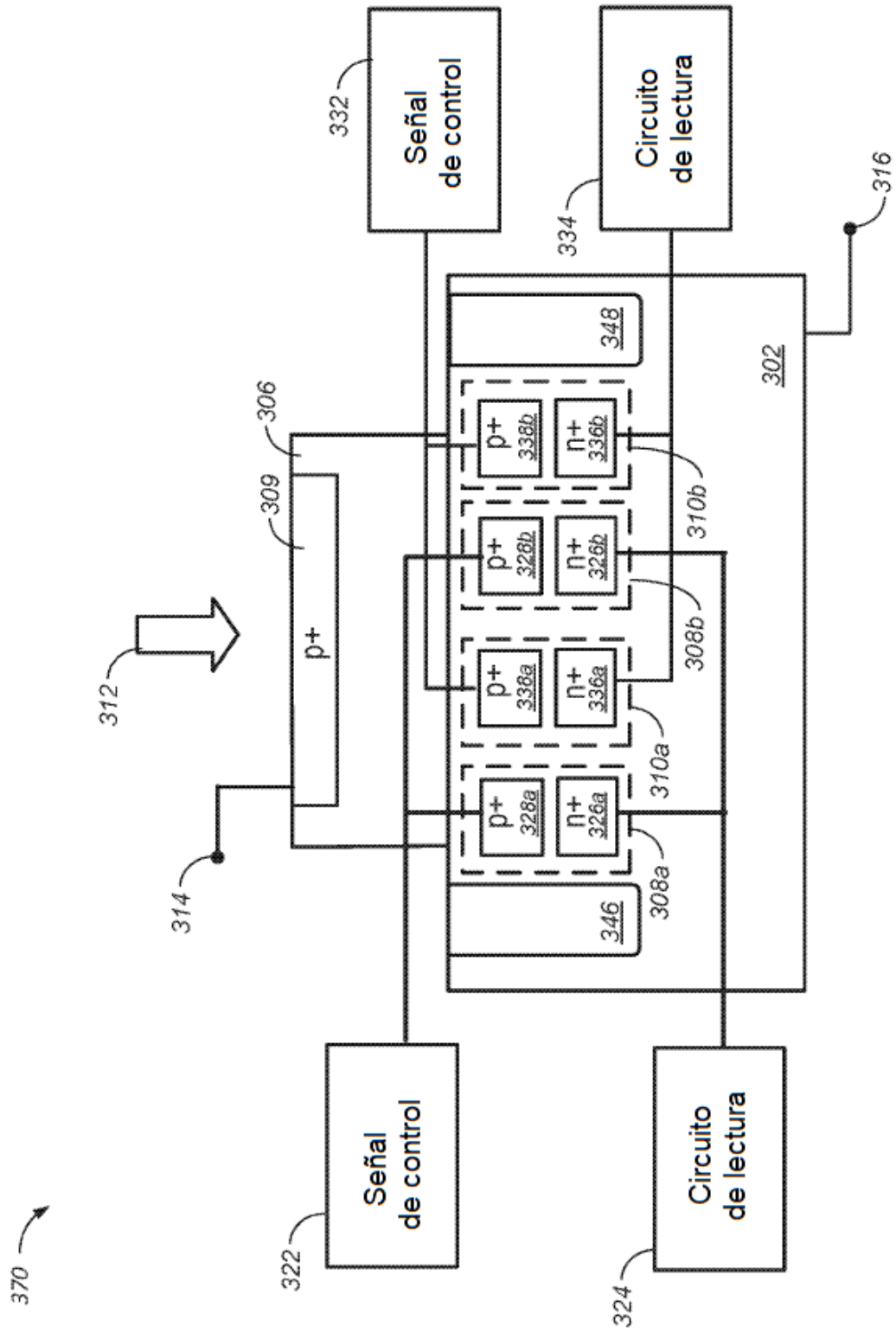


FIG. 3C

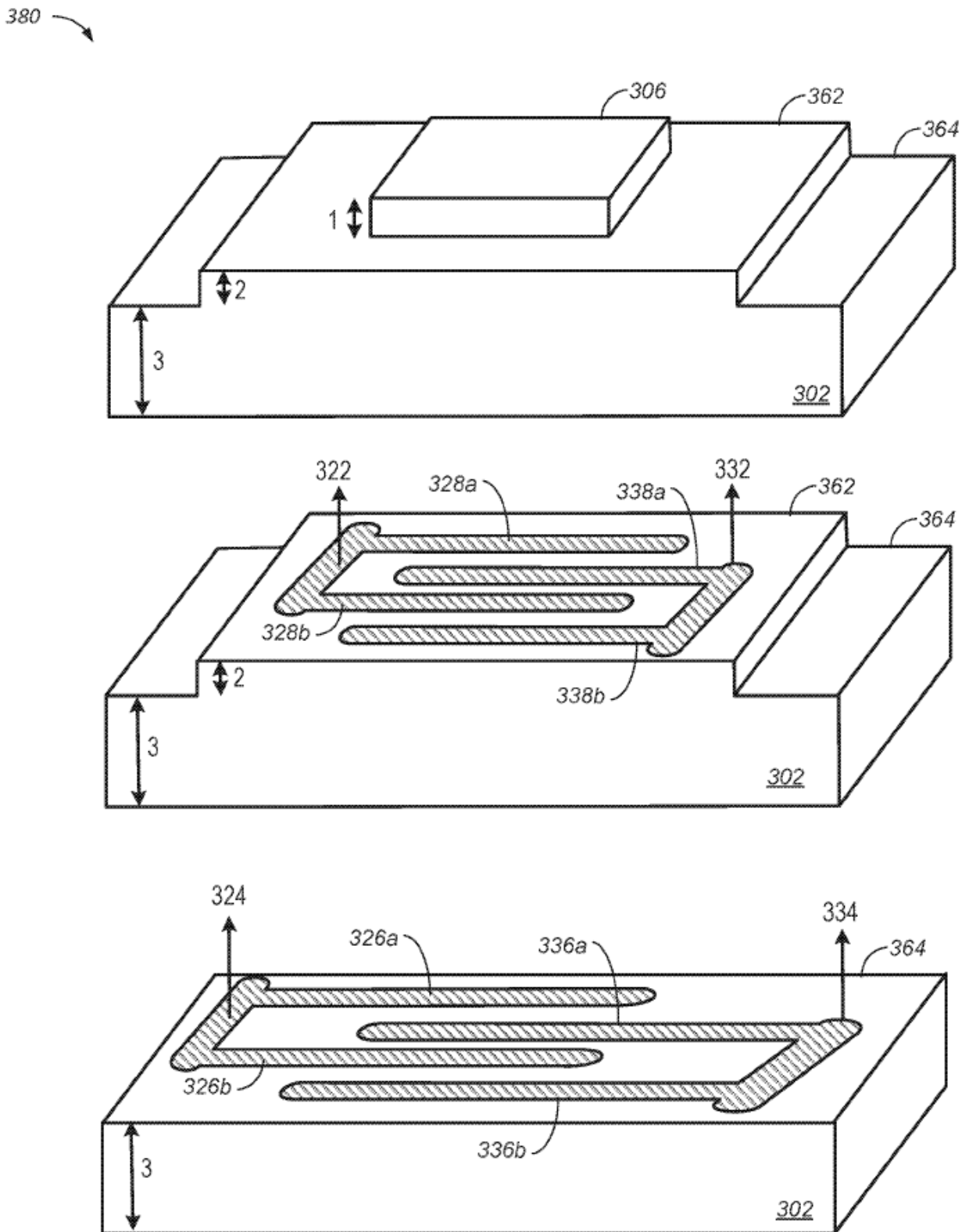


FIG. 3D

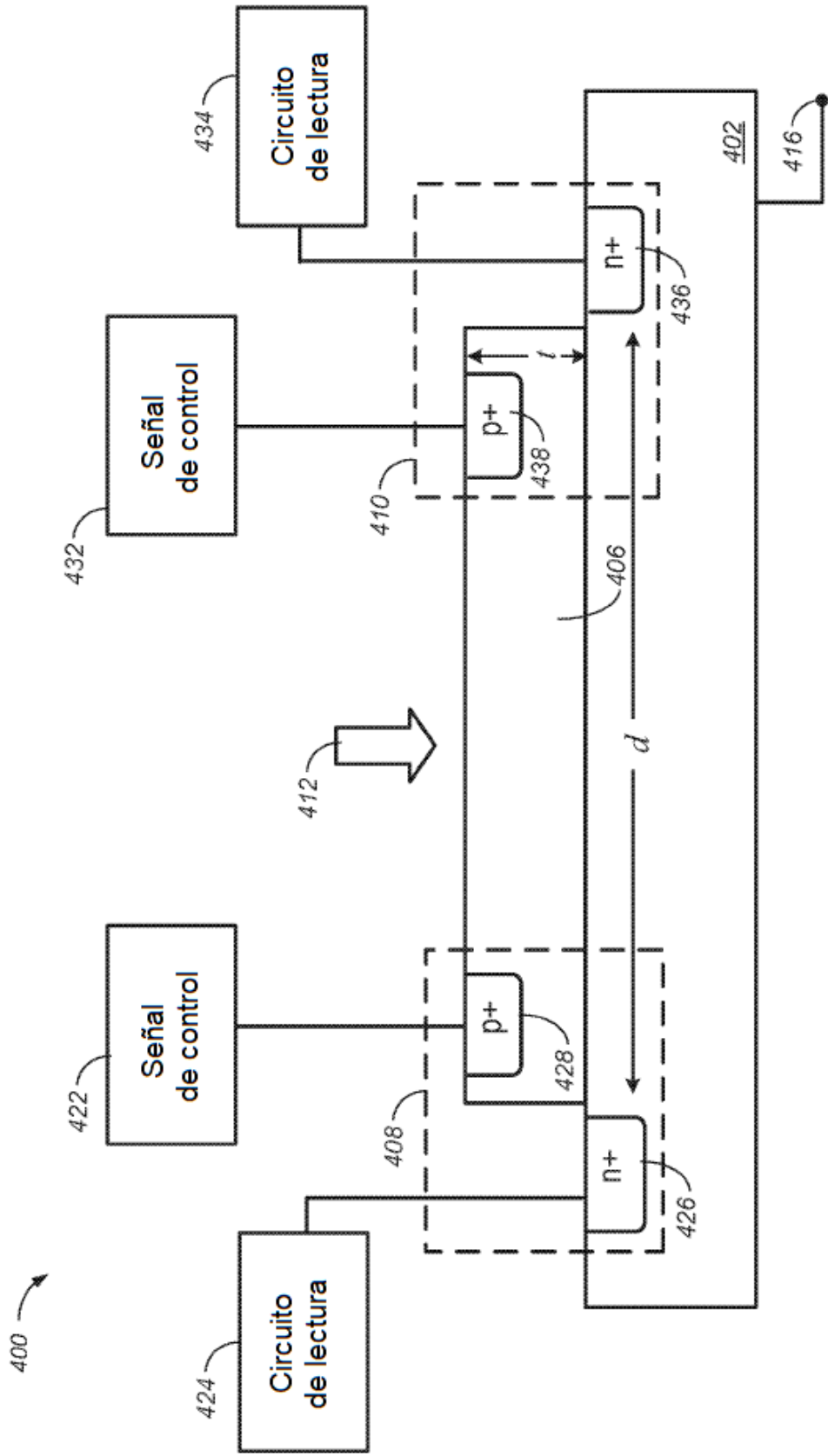


FIG. 4A

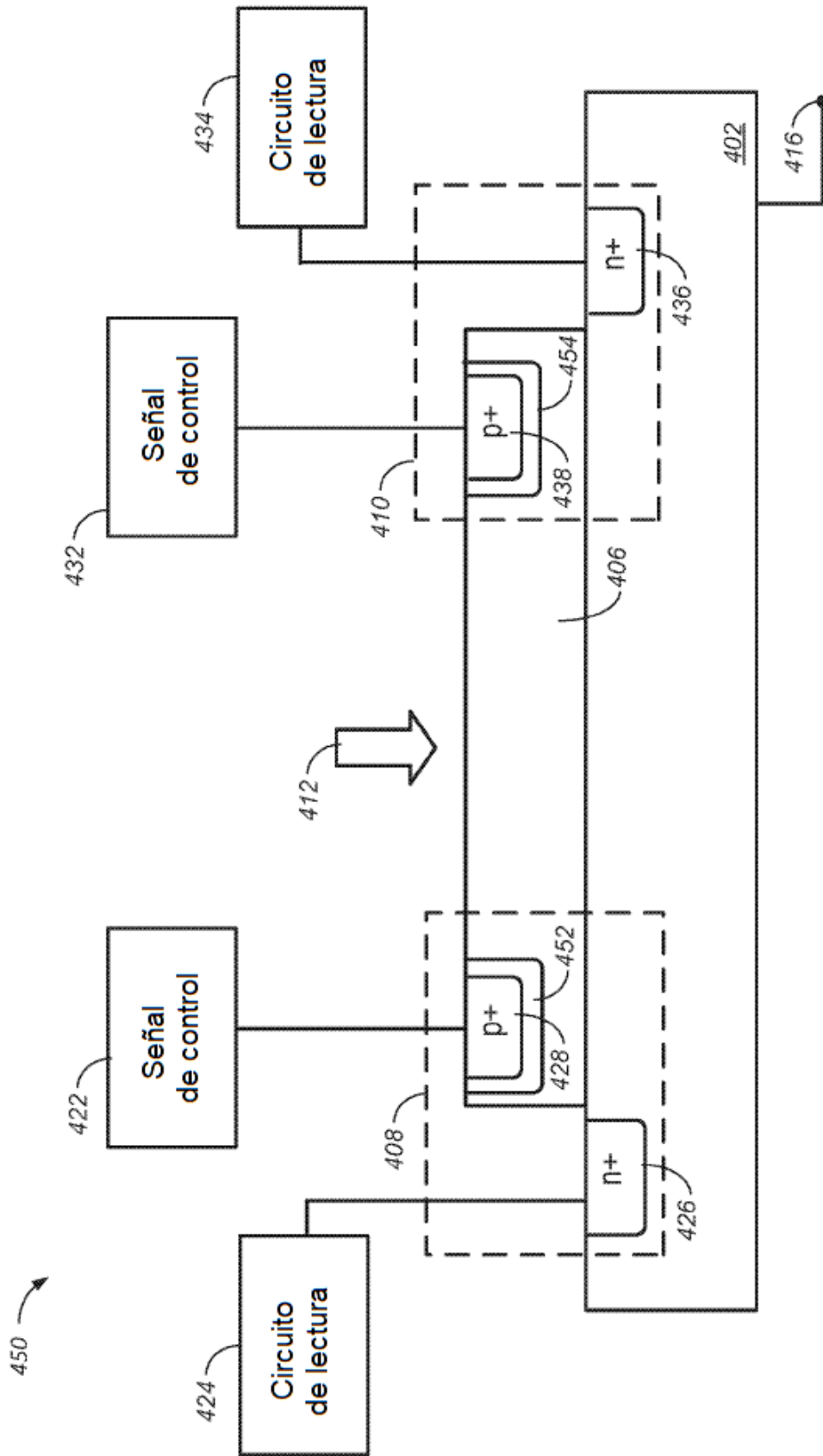


FIG. 4B

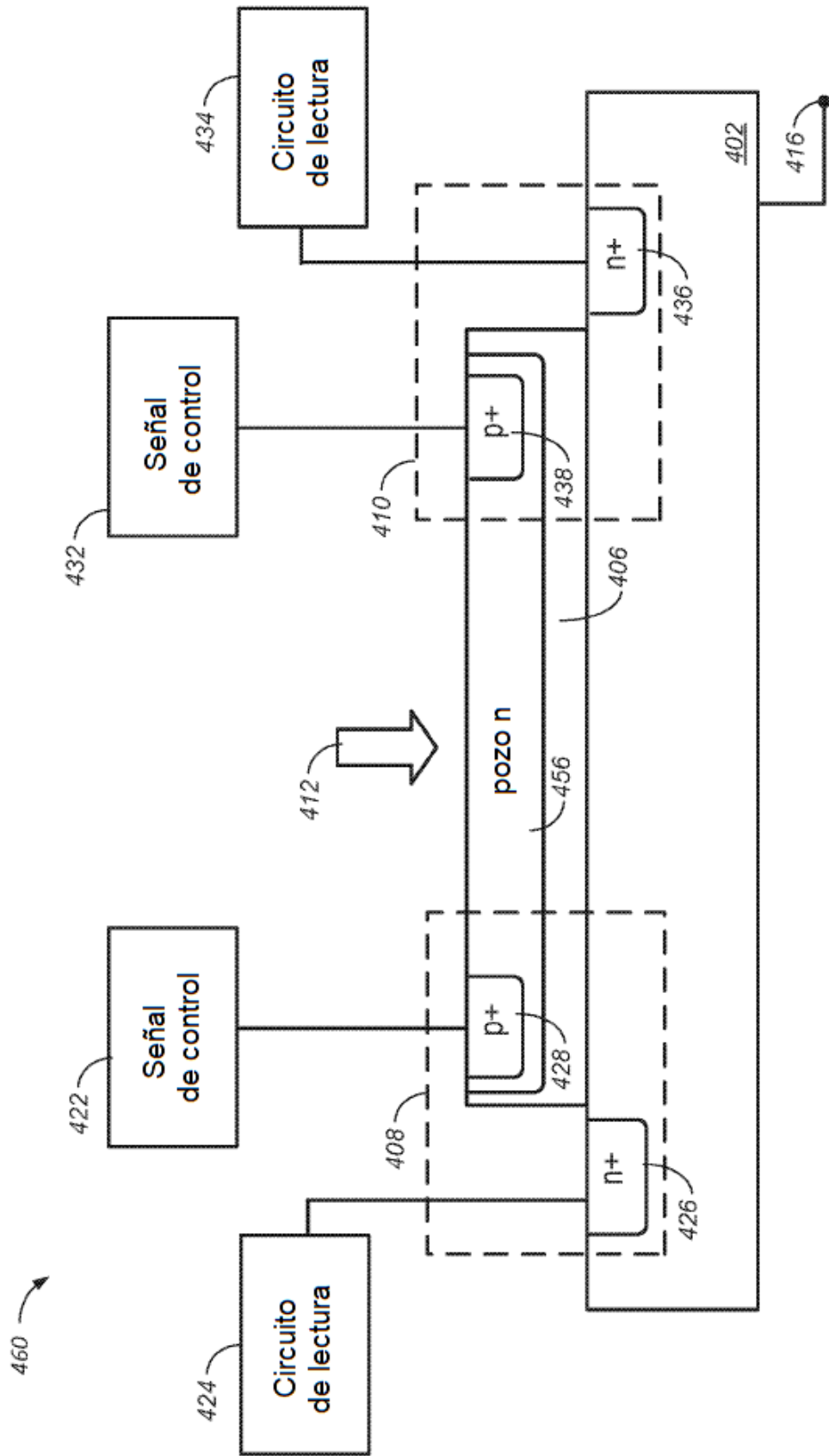


FIG. 4C

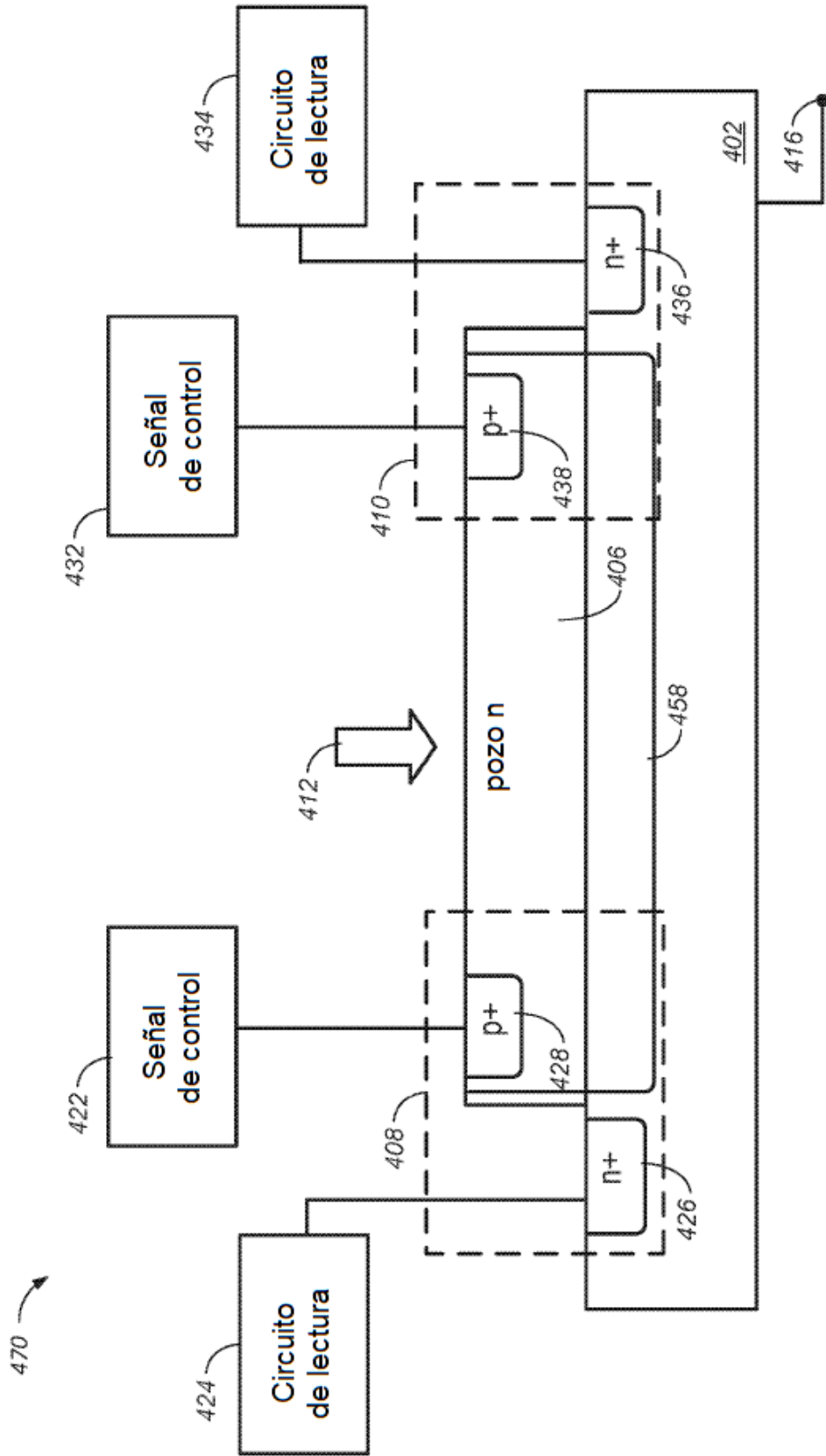


FIG. 4D

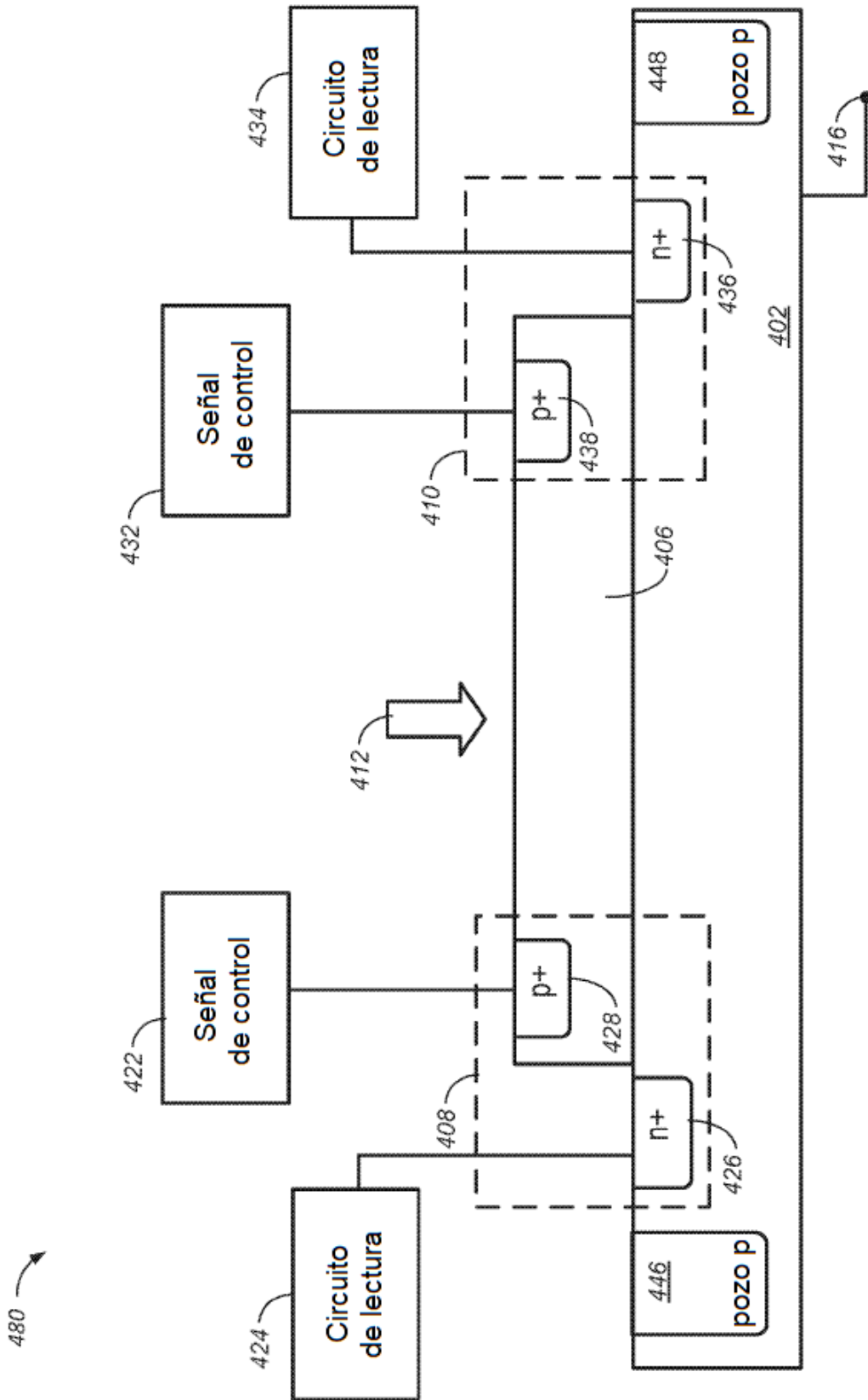


FIG. 4E

480 ↗

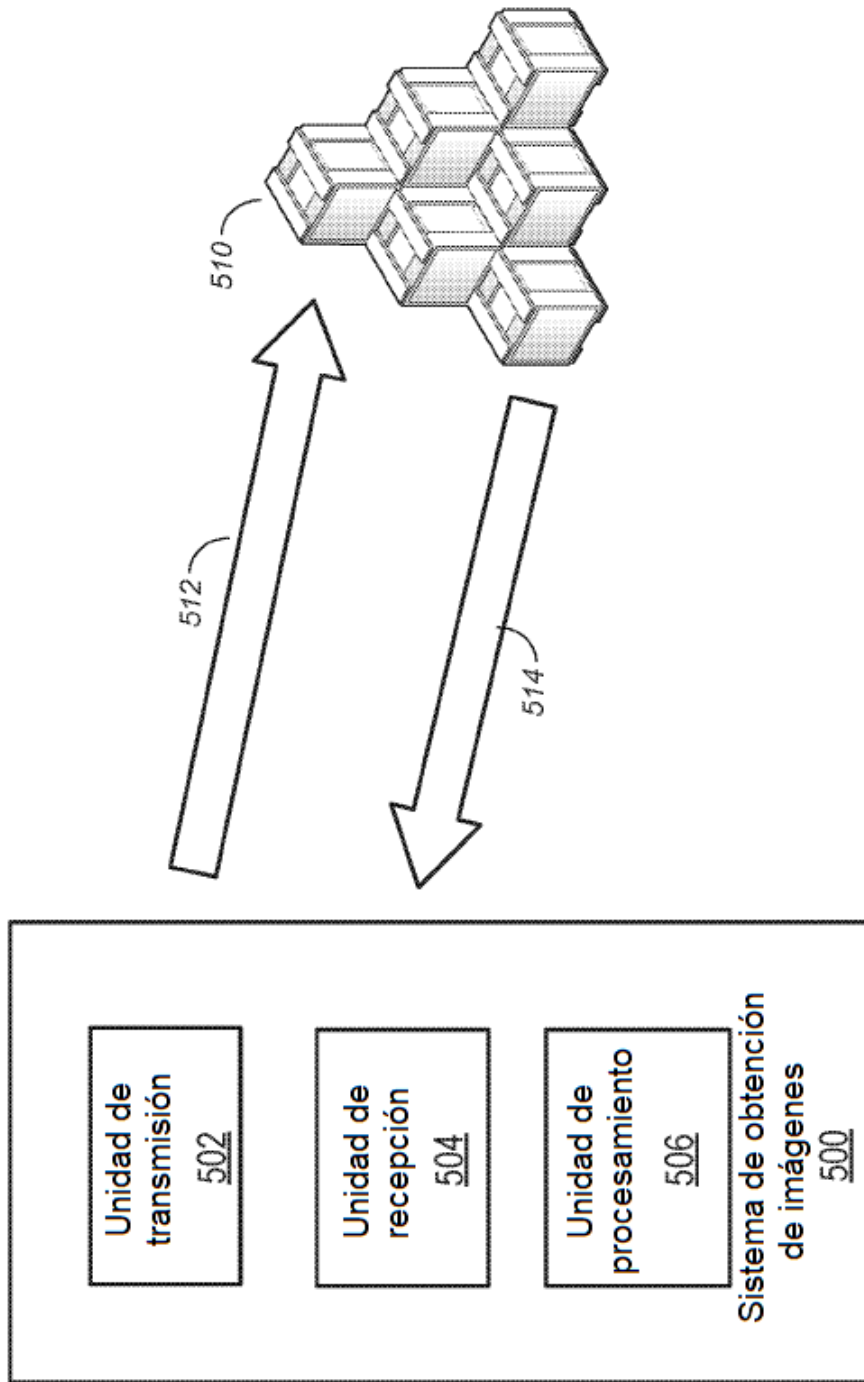


FIG. 5A

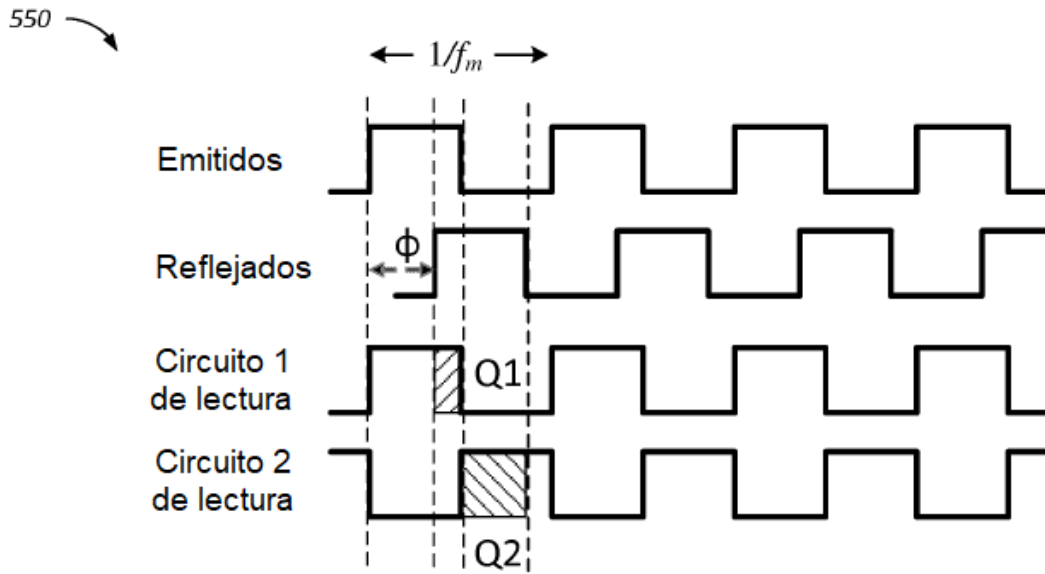


FIG. 5B

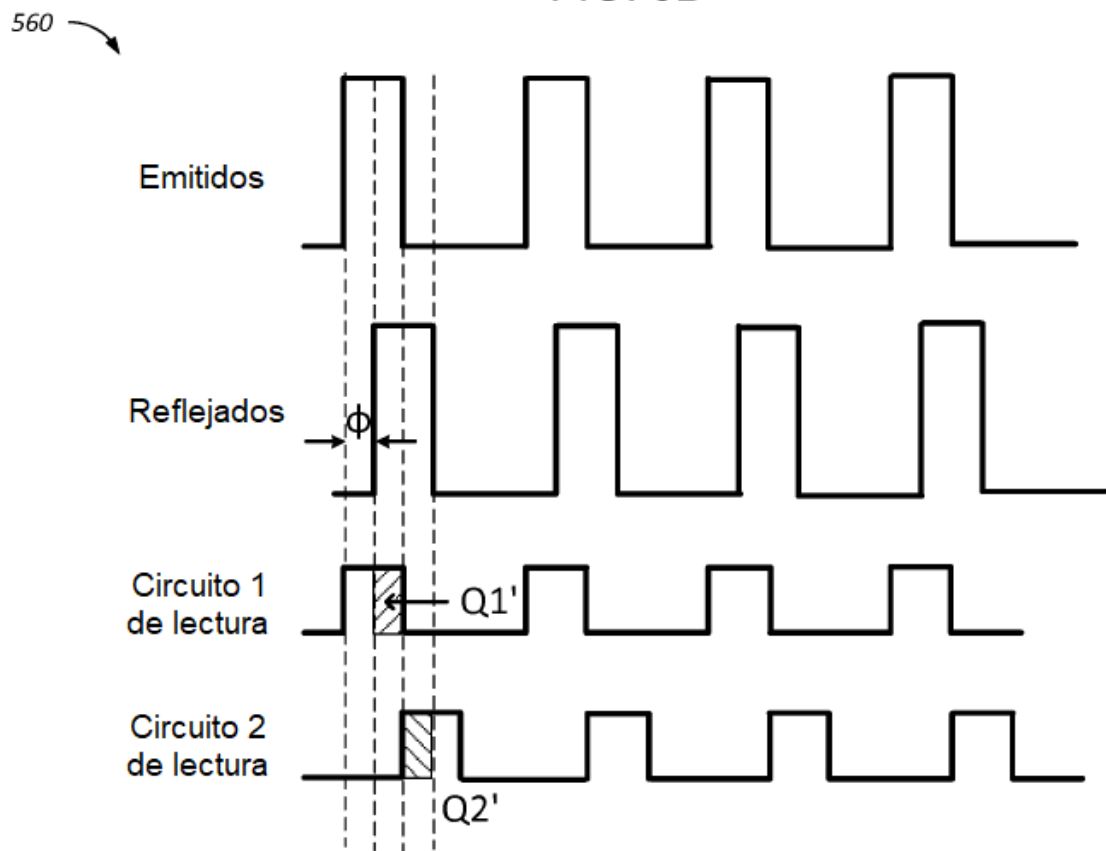


FIG. 5C

600 ↘

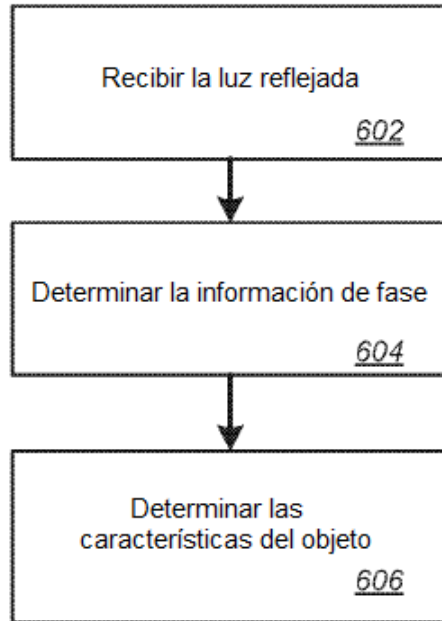


FIG. 6