

P.- 19078

RCA 46831

255309



255309

MEMORIA DESCRIPTIVA

para solicitar

P A T E N T E D E I N V E N C I O N

en

E S P A Ñ A

por VEINTE años

a nombre de RADIO CORPORATION OF AMERICA, entidad norteamericana, establecida en 30 Rockefeller Plaza, Nueva York, N.Y., Estados Unidos de América, por:

"UN DISPOSITIVO SEMICONDUCTOR"

La presente invención se refiere a dispositivos semiconductores perfeccionados, y particularmente a diodos perfeccionados, del tipo de unión delgada o brusca, que presenta una resistencia negativa en toda una región de reducidas tensiones de polarización en sentido directo; y a métodos de preparación de tales dispositivos.

En el sentido en que aquí se emplea, el término "unión brusca" se refiere a una unión p-n muy delgada: esto es, en que la dimensión de la región de transición de p a n, es menor de



200 Å. Debido a la pequeñez de esta dimensión en los dispositivos mencionados, y también a que la concentración de portadores de carga libres a ambos lados de la unión es muy elevada, muchas de las características ordinarias de las uniones p-n parecen haber cambiado.

Las expresiones "banda de valencias" y "banda de conducción" se utilizan aquí en el sentido usual e incluyen también un margen continuo de estados en el intervalo energético o entre bandas del semiconductor cerca de cada una de estas bandas, así como un margen continuo de estados en la superficie del semiconductor. En las definiciones se tiene la intención de incluir aquellas regiones del intervalo entre bandas que se comportan en muchos aspectos como una de las bandas.

Leo Esaki (Physical Review, vol. 109, pág. 603, 1958) expone que se observó una característica de resistencia negativa a tensiones directas reducidas, esto es, menores de 0,3 voltios, con una unión p-n brusca, en germanio. Este diodo se preparó a base de un semiconductor dotado de una concentración de portadores de carga libres mayor, en varios órdenes de magnitud, que la utilizada en diodos usuales. Específicamente, la unión se preparó mediante un procedimiento de aleación, y tenía en el lado de tipo p una concentración aceptora, y, por tanto, de agujeros libres, de $1,6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, y en el lado de tipo n una concentración donadora y, por tanto, de electrones libres, de $1,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. No teniendo polarización alguna aplicada, el nivel energético de Fermi en el lado p de la unión p-n se encuentra en la banda de valencias, mientras que el nivel de Fermi en el lado n de la unión p-n está en la banda de conducción. El diodo conduce corriente eléctrica en el sentido directo mediante dos procesos: por horadación mecánica cuántica efectua-

255309



da por los portadores de carga a través de la región de agotamiento de la unión p-n; y por el paso de portadores de carga al otro lado de la barrera de la unión p-n.

Al aumentar el potencial de polarización desde cero en el
5 sentido directo, la corriente que pasa a través del dispositivo
debida a la horadación, sube hasta un máximo y cae después a ce-
ro. Este ascenso y descenso de la corriente debida a la horada-
ción se produce en un corto margen de tensiones de polarización
directa; en general en menos de un voltio, y proporciona al dis-
10 positivo una característica de resistencia negativa. La corrien-
te en sentido directo debida a los portadores de carga que pasan
al otro lado de la barrera de la unión p-n es insignificante a
las tensiones para las cuales se produce la conducción de corrien-
te por horadación. Para mayores tensiones de polarización direc-
15 ta, a las que la conducción de corriente por horadación queda sen-
siblemente detenida, adquiere importancia la conducción de co-
rriente por sobre la barrera.

Un objeto de esta invención es el de habilitar dispositi-
vos semiconductores de unión brusca perfeccionados, dotados de
20 una característica de resistencia negativa, así como métodos per-
feccionados de preparación de los mismos.

Hemos descubierto que la característica de resistencia ne-
gativa debida a horadación mecánica cuántica puede producirse en
semiconductores distintos del germanio, lo cual permite un alto
25 grado de flexibilidad de proyecto. Así, mediante una adecuada
selección del semiconductor, pueden proyectarse diodos que fun-
cionen en un margen de temperaturas comprendido entre la del he-
lio líquido y unos 500°C. Otras características que se pueden
adaptar son: frecuencia de corte, producto de ganancia por anchu-
30 ra de banda, y velocidad de respuesta.

255309



La característica de resistencia negativa se produce --
cuando el diodo tiene una variedad de valores mayores de 10^{-16}
para el factor

$$\exp. (- a V_{cd} [\epsilon m^+ / n]^{1/2}),$$

5 en el que V_{cd} es el intervalo entre bandas del material, en elec-
tronvoltios (eV),

m^+ es la razón o cociente entre la masa efectiva del
portador de carga libre más ligero del semiconduc-
tor y la masa de un electrón libre (sin dimensiones),

10 n es el número de portadores de carga libres por cm^3 en
el lado de la unión que tiene menor concentración de
portadores de carga libres,

ϵ es la razón o cociente entre la constante dieléctri-
ca del semiconductor y la constante dieléctrica del
vacío, y

15 a es 7×10^{10} .

Existen razones para creer que los límites inferiores de
concentración de portadores de carga libres, en el lado de la
unión que tiene menor concentración de portadores de carga li-
20 bres, de los diodos que presentan la característica de resisten-
cia negativa son menores que

0,8 $\times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ para el germanio

2,8 $\times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ para el silicio

0,5 $\times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ para el arseniuro de galio

25 0,005 $\times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ para el antimonio de indio

Hemos descubierto, inesperadamente, que cuando la concen-
tración de portadores de carga libres, del lado de la unión que
presenta menor concentración de portadores de carga libres, se
aumenta hasta sobrepasar los valores arriba mencionados, de mo-
30 do que el dispositivo de diodo tiene un valor comprendido entre

255309



10^{-2} y 10^{-12} para el factor $\exp. (-a V_{cd} [\epsilon m^+ / n]^{1/2})$, se obtiene una apreciable mejora en la velocidad de respuesta y en el producto de ganancia por anchura de banda del dispositivo. Así, cuando el aumento es de varias veces más allá de los límites inferiores antes mencionados, la velocidad de respuesta y el producto de ganancia por anchura de banda se mejoran en varios órdenes de magnitud, de modo que los dispositivos pueden funcionar a frecuencia ultralevadas como, por ejemplo, superiores a 10 megaciclos por segundo. En muchos casos, el dispositivo puede funcionar a un valor de 1 a 1000 veces dicha frecuencia, o más. En la práctica, el límite de concentración de portadores de carga libres es el punto en que el semiconductor se convierte en policristalino.

Los semiconductores preferidos y el margen de concentración de portadores de carga libres, conforme a la invención, para frecuencias ultralevadas, son:

| | | |
|----|--|----------------------------|
| | 2,0 a 10,0 x 10^{19} cm^{-3} | para el germanio |
| | 7,0 a 35,0 x 10^{19} cm^{-3} | para el silicio |
| | 3,5 a 17,5 x 10^{19} cm^{-3} | para el arseniuro de galio |
| 20 | 0,03 a 10,0 x 10^{19} cm^{-3} | para el fosfuro de indio |

En las formas preferidas de ejecución del invento, los semiconductores tienen un moderado intervalo entre bandas, sus portadores de carga libres tienen pequeña masa efectiva, y ambos lados de la unión están activados (esto es, contienen impurezas determinativas del tipo de conductividad) casi hasta el punto en que el semiconductor se convierte en policristalino. El alto contenido de impurezas es necesario para poder obtener una elevadísima concentración de portadores de carga libres.

Los métodos de la invención comprenden los usuales de fabricación de uniones p-n por aleación con cristales semicon-



ductores, exceptuando que los tiempos de caldeo y enfriamiento para la aleación son lo más breves posible, y la temperatura de aleación lo más baja posible, con el fin de lograr una unión lo más brusca posible. De preferencia, el caldeo se realiza a 5 temperaturas comprendidas entre 200°C y 550°C durante períodos inferiores a cinco minutos.

Con referencia a los dibujos adjuntos:

- las figuras 1A y 1B son unos gráficos comparativos de la característica tensión corriente de un diodo de unión dotado de una característica de resistencia negativa, con la de unos 10 diodos de unión usuales;

- las figuras 2A a 2D, son unos diagramas de niveles energéticos que ayudan a presentar una teoría explicativa de la resistencia negativa del dispositivo a que aquí se hace referencia; 15

- la figura 3, es una vista en sección de un dispositivo típico de la invención; y

- la figura 4, es un circuito equivalente propuesto del dispositivo del ejemplo.

20 Ejemplo - El dispositivo de la figura 3, puede fabricarse del modo siguiente: Se activa con arsénico una barra monocristalina de germanio tipo n, hasta darle una concentración donadora de $4,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, mediante adaptaciones de métodos usuales en el ramo de los semiconductores. Esto puede lograrse, por ejemplo, extrayendo un cristal procedente de germanio 25 fundido con la necesaria concentración de arsénico. De la barra se obtiene una galleta 31, por corte según el plano III, esto es, según un plano perpendicular al eje cristalográfico III del cristal. La galleta 31, se reduce a un espesor de aproximadamente 30 0,05 mm atacándola con una solución corrosiva usual.

235309



Una cara principal de esta galleta 31, se suelda a una tira 35, de níquel, con soldadura usual de plomo-estaño-arsénico, para obtener un contacto no rectificador entre la galleta 31 y la tira 35. La tira de níquel 35, sirve eventualmente de conductor de base. Sobre la superficie libre 33, de la galleta de germanio 31, se coloca, con una pequeña cantidad de un fundente comercial, un punto 37, de 0,13 mm de diámetro, de 99% en peso de indio, 0,5% en peso de cinc y 0,5% en peso de galio, caldeándolo luego a 450° C durante un minuto en una atmósfera de hidrógeno seco, para alear una parte del punto a la superficie libre 33, de la galleta 31, y enfriándolo después rápidamente. En la etapa de aleación, el conjunto unitario o dispositivo se caldea y enfría lo más rápidamente posible, para obtener una unión p-n brusca. Al conjunto unitario se le da luego un baño corrosivo final durante 5 segundos en una solución de yoduro de acción lenta, seguido de aclarado en agua destilada. Un baño corrosivo de yoduro adecuado, de acción lenta, se prepara mezclando una gota de una solución que contiene 0,55 g de yoduro potásico y 100 cm³ de agua con 10 cm³ de una solución que comprende 600 cm³ de ácido nítrico concentrado, 300 cm³ de ácido acético concentrado y 100 cm³ de ácido fluorhídrico concentrado. Al punto puede soldarsele un rabo de conexión cuando el dispositivo haya de ser utilizado a frecuencias ordinarias. Cuando el dispositivo haya de utilizarse a frecuencias elevadas, se puede hacer el contacto con el punto mediante un conductor de baja impedancia.

El dispositivo preparado conforme al ejemplo presenta las características siguientes:

$$\bar{R} = 10 \text{ ohmios } (\Omega)$$

$$C = 50 \text{ picofaradios (pF)}$$

$$\tau_{RC} = 0,5 \text{ milimicrosegundos (m}\mu\text{s)}$$

De estos datos se calcula que el producto de ganancia por an-



chura de banda, $G_v Af$, es de alrededor de 300 Mc/s, y la frecuencia fundamental más elevada a la cual oscila el circuito equivalente de parámetros acumulados es de 180 megaciclos por segundo (mc/s). En una línea de 50 ohmios, el dispositivo puede conmutarse del estado de baja tensión al de alta tensión, o del de alta al de baja tensión, en menos de 2 milimicrosegundos ($m\mu s$). La disipación de energía es aproximadamente de 1,5 milivatios (mW) ya en la modalidad de baja tensión o en la de alta tensión. La resistencia del conductor de base era de menos de 0,2 ohmios. Envasado en una montura de diodo perfeccionada, como se describe con respecto a la figura 5, la inductancia en serie es aproximadamente de 0,01 microhenrios (μH).

Parámetros de fabricación - Un parámetro que determina marcadamente la utilidad final de los diodos aquí expuestos es la concentración de portadores de carga libres, en el cuerpo semiconductor. Un aumento en la concentración de portadores de carga libres, hasta sobrepasar el valor indicado por Esaki, proporciona mejoramientos en la velocidad de respuesta, inesperados a la luz de anteriores experiencias con dispositivos semiconductores. Así, aumentando la concentración de portadores de carga en el germanio, desde la utilizada por Esaki hasta los $2,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, se extiende la región de trabajo desde la correspondiente a las frecuencias normales de radio-difusión (onda media) a la de las ondas métricas. Aumentando aún más la concentración de portadores de carga, esto es, hasta la de $4,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, se extiende la región de trabajo hasta las frecuencias correspondientes a ondas centimétricas. Cuando la deseada concentración se logra mediante incorporación de impurezas determinativas del tipo de conductividad, el límite superior para la concentración de portadores de carga libres está en el punto en que el semiconductor se hace policristalino.



253

Para el logro de tan altas velocidades es importante que ambos lados de la unión tengan elevadas concentraciones de portadores de carga libres. Se ha de sobrentender en toda esta solicitud que siempre que se da una concentración de portadores
5 libres se hace referencia al lado de la unión que posee la menor concentración de portadores de carga libres.

Otro parámetro que influye en la utilidad de los dispositivos aquí indicados es la masa efectiva de los portadores en el cuerpo semiconductor. Un material semiconductor con una menor masa efectiva de uno u otro de sus portadores proporciona una
10 mayor velocidad de funcionamiento para una concentración equivalente de portadores libres, o una velocidad equivalente para una menor concentración de portadores de carga libres. La masa efectiva de los portadores es diferente en distintas direcciones del cristal. La apropiada selección de ejes del cristal,
15 de modo que se alinee la unión en la dirección en que se obtenga mayor ventaja de esta diferencia, contribuye también a incrementar la velocidad de respuesta del dispositivo.

Una pequeña constante dieléctrica y un pequeño intervalo
20 entre bandas, en el material del cuerpo semiconductor, tienen ambos por efecto incrementar la velocidad, para una misma concentración de portadores de carga libres.

En el germanio, la concentración de portadores de carga libres en el cuerpo semiconductor, del lado de la unión que posea la menor concentración, ha de ser mayor de $2,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$;
25 por ejemplo, entre $2,0$ y $10,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Puede formarse un monocristal adecuado de germanio tipo n, de manera usual, utilizando arsénico o fósforo como impureza para la activación del cuerpo semiconductor. Con una u otra impureza se pueden lograr
30 concentraciones de portadores de carga libres de más de $2,0 \times$



255309

10^{19} cm^{-3} .

Al unir un punto al semiconductor, por aleación, las impurezas de un tipo de conductividad opuesto al del cuerpo semiconductor se alean al cuerpo habilitando en éste una unión p-n. Además, se produce junto a la unión una región que presenta una elevadísima concentración de portadores de carga libres, de tipo opuesto al de los del cuerpo. La ulterior aleación proporciona un contacto de baja impedancia a esta región. La brusquedad o delgadez de la unión y la elevada concentración de portadores de carga libres en ambos lados de la unión tienen importancia, para alcanzar la característica de resistencia negativa de los dispositivos aquí expuestos.

Las uniones bruscas de los diodos aquí indicados tienen, según se calcula, un espesor menor de 200 \AA . Cuando más brusca es la unión mayor es la densidad de corriente debida a la irradiación y, por tanto, mayor la frecuencia de corte del dispositivo. Además, cuanto más brusca es la unión, mayor es la corriente debida a irradiación, para el mismo tamaño de punto. Y, cuanto más brusca es la unión mayor es la capacitancia del dispositivo.

Un compuesto adecuado de punto de aleación para hacer la unión rectificadora con germanio tipo n es el de 99% de indio, 0,5% de cinc y 0,5% de galio. Este compuesto de aleación puede modificarse sin que por ello cambie materialmente la velocidad de funcionamiento. Por ejemplo, el contenido de cinc puede aumentarse u omitirse, o bien puede aumentarse el contenido de galio. Otros compuestos de aleación adecuados para el germanio tipo n pueden hacerse sustituyendo el cinc por el germanio en el punto de aleación. Esto tiene la ventaja de mejorar las cualidades mecánicas del punto, y reducir la densi-

255309



dad de impurezas de tipo n en la región recristalizada. En lugar de galio puede ponerse aluminio.

El germanio tipo n puede ser sustituido por germanio tipo p. Un monocristal adecuado de germanio tipo p puede formarse de manera usual empleando aluminio, galio o indio como impureza para activar el cuerpo semiconductor. Cuando se utiliza un cristal de germanio tipo p, el compuesto del punto de aleación ha de incluir una impureza donadora tal como fósforo o arsénico. Un compuesto adecuado para el punto de aleación es el constituido por una aleación de plomo, estaño y arsénico.

En lugar del germanio pueden emplearse otros semiconductores, como se indica más adelante, particularmente silicio y compuestos III-V. Un compuesto III-V es un compuesto formado por elemento del grupo III y otro del grupo V de la Tabla periódica de los elementos químicos, tal como el arseniuro de galio, el arseniuro de indio y el antimoniuro de indio. Cuando se utilizan compuestos III-V, las impurezas de tipo p y n ordinariamente empleadas en aquellos compuestos se emplean también para aquellos fines en esta invención. Así; el azufre es una impureza de tipo n adecuada, y el cinc una impureza de tipo p adecuada, que también son apropiadas para la aleación.

Se preparó un diodo con un monocristal de arseniuro de galio que contenía azufre, como impureza tipo n. La concentración de electrones libres era de $0,8 \times 10^{19}$ electron. cm^{-1} . Se produjo una unión brusca con un punto de cinc de 0,25 mm. El producto de ganancia por anchura de banda se midió a unos 20 Mc/s. La frecuencia fundamental más alta a la cual oscila el circuito equivalente de parámetros acumulados es de unos 20 Mc/s. La disipación de potencia es de unos 50 microvatios tanto en la modalidad de baja tensión como en la de alta tensión.

255302



5 Con el germanio, la temperatura de fusión (operación de unir o alear por fusión) puede hacerse variar entre 300 y 500°C, con tiempos de fusión de pocos minutos. Para reducir el ensanchamiento de la unión debido a la difusión, el tiempo y la temperatura de fusión han de mantenerse a un valor reducido. El caldeo y el enfriamiento han de hacerse, por razones semejantes, con gran rapidez. Se ha visto que resulta adecuado el empleo de atmósferas de hidrogeno seco y nitrogeno seco.

10 La aleación puede hacerse directamente en una fusión, o bien puede colocarse previamente el punto de aleación con una fusión a temperatura reducida y efectuarse luego la aleación en una segunda fusión. El punto de aleación puede aplicarse en seco o con cualquiera de varios fundentes de tipo comercial. Para reducir la extensión del punto durante la aleación, puede aplicarse el punto a una superficie de germanio oxidada. Para hacer más facil que el punto de aleación sobrecompense la concentración de impurezas en el cuerpo semiconductor, la superficie del cuerpo puede someterse a extracción de
15 difusión durante un breve tiempo, por ejemplo, por caldeo al vacío durante cinco minutos a 700° C.

20 La aleación según una dirección preferida con respecto a los ejes cristalográficos puede mejorar la constante de tiempo del dispositivo, debido a la anisotropia de la masa efectiva de los portadores. Así, las uniones de aleación en germanio a lo largo de la cara 110 son, según se ha visto, más rápidas desde el punto de vista de la aplicación a circuitos, que las correspondientes uniones a lo largo de la cara 100.

25 Las características fundamentales son independientes de la forma y del área de la unión. El área de la unión deter

255309



mina el nivel de potencia y la impedancia, pero no la velocidad final del dispositivo. Para frecuencias muy elevadas hay otras disposiciones geométricas, tales como la anular, que pueden contribuir a reducir el efecto pelicular. Para fabricación en grupos o formaciones, hay otras formas, tales como las de puntos cuadrados, que se prestan mejor al montaje mediante procedimientos de circuitos impresos.

El cuerpo semiconductor ha de ser delgado, para reducir, la resistencia disipativa en serie. Es preciso también tener cuidado para efectuar un contacto óhmico con el cuerpo semiconductor y con el punto. La conexión de la base puede hacerse soldando el germanio a un material adecuado como conductor de salida, bien en la operación de fusión de aleación o bien antes o después de la fusión. Puede efectuarse asimismo una conexión adecuada de otras diversas maneras, tales como por depósito electrolítico, evaporación, o adherencia por comprensión térmica.

Características eléctricas. - En la figura 1A se muestra la curva 21, característica de I-V de un diodo típico de los aquí expuestos, estando indicado mediante la línea recta 23 el valor medio de la pendiente negativa. Para comparación, en la figura 1B se da una curva 25 de un diodo similar, excepto en que la unión es amplia en lugar de brusca. Las escalas de intensidad de corriente dependen del área y de la activación de la unión, pero las intensidades representativas se hallan dentro del orden de los miliamperios.

La característica de resistencia negativa puede describirse como un cambio, con la tensión de polarización, de la corriente de efecto Zener que pasa a través de la barrera. Con referencia a la figura 2, las partes de las subfiguras A, B, C



23300

y D, señaladas con rayado cruzado representan en cada caso la
región prohibida, estando un lado de la unión representado por
la parte izquierda de la figura, y el otro lado de la unión
por la parte derecha. Así, en la parte izquierda de cada figu
5 ra y por encima de la región prohibida se representa la banda
de conducción, y en el lado derecho de cada figura y por deba
jo de la región prohibida está representada la banda de valen
cias. En la figura 2A se verá que para diodos suficientemente
degenerados (de más de 10^{19} portadores cm^{-3} en germanio) habrá
10 un copioso suministro de portadores libres al nivel de Fermi
h, tanto en la región p como en la n. Por tanto, para una unión
brusca se tendrá la gran intensidad de corriente de Zener (indi
cada por las flechas) que pasa en ambos sentidos a través de
la barrera, representada por la región i entre las líneas verti
15 cales, aun cuando no se haya aplicado potencial alguno. Debido
al equilibrio detallado, la corriente total será, naturalmente
cero (punto a, fig. 1).

La fig. 2B, representa la condición para el caso de un
pequeño potencial en sentido inverso. El desplazamiento del
20 nivel h de Fermi al cruzar la unión incrementa la corriente
inversa de electrones, sin modificar la corriente directa. Es
to es así porque el número de electrones del lado derecho de
la unión que ven estados equienérgicos en el izquierdo, a
los cuales pueden pasar por horadación, es incrementado por el
25 potencial inverso de polarización, mientras que los estados ac
cesibles en el lado derecho a los electrones procedentes del
izquierdo han cambiado poco o nada. La característica se encuen
tra ahora en la región b de la figura 1, para una pequeña pola
rización directa ($\ll E_{\text{Z}}/e$), la característica es simétrica (fi
30 gura 1, región c), aun cuando los detalles del mecanismo difie

235309



ren (Fig. 20). La corriente directa se produce ahora porque el número de electrones de la derecha que pueden abrirse camino por horadación en sentido inverso disminuye debido al desplazamiento del nivel de Fermi, mientras la horadación en sentido directo sigue siendo poco más o menos constante.

Para polarizaciones directas más altas, la corriente inversa se hace pequeña, y la corriente directa resultante alcanza un máximo (d, fig. 1) Decae luego, si se sigue aumentando el potencial, al acercarse y llegar el nivel de Fermi del lado izquierdo hasta el nivel de la región prohibida de la derecha, lo que hace disminuir la horadación en el sentido directo (fig. 2D). Esta caída continúa (e, fig. 1) hasta que eventualmente la inyección normal por sobre la barrera adquiere su importancia y la característica vuelve a seguir la marcha directa usual (sección f, fig. 1).

Circuito equivalente e índice de mérito - En primera aproximación, el dispositivo unitario puede representarse por C, la capacidad de transición de la unión, en paralelo con -R, la resistencia negativa. Esto se ilustra en la fig. 4. Tal dispositivo, utilizado como amplificador, tiene un producto de ganancia por anchura de banda que viene dado aproximadamente por

$$G_v \Delta f = 1 / (2\pi RC) \quad (1)$$

donde G_v es la ganancia de tensión y $2\Delta f$ es la anchura de banda para la mitad de ganancia de tensión. La frecuencia máxima a la cual puede oscilar es

$$F_m = (R/r)^{1/2} / 2\pi RC \quad (2)$$

Aquí r es la resistencia disipativa del circuito. Ambas expresiones indican que el índice de mérito en alta frecuencia del dispositivo viene limitado por una constante de tiempo característica $1/RC$.



255309

Parámetros del material. Como la constante de tiempo principal que limita el funcionamiento de estos diodos en alta frecuencia es $1/RC$ (RC no depende del área de la unión), una adecuada, selección de los materiales permite obtener dispositivos de óptimo funcionamiento. La capacidad C es la de la región de transición, debida a la capa de agotamiento. Puede representarse por un condensador de placas paralelas con una separación de aproximadamente 80 \AA , rellena esta distancia con un material de la misma constante dieléctrica del semiconductor.

5

10 Como ésta variará solamente con una raíz fraccionaria de la densidad de portadores, en primera aproximación puede considerarse constante.

Por contraste, R , la resistencia negativa, viene determinada por la facilidad con que los portadores penetran en la barrera por el efecto de Zener, y puede variar en muchos órdenes de magnitud. La presente teoría, que está simplificada, muestra que la probabilidad de que un portador que se aproxima a la región de agotamiento aparezca por el otro lado es proporcional al factor.

15

20
$$\exp. (-a V_{cd} [\epsilon m^+/n]^{1/2}), \quad (3)$$

Esto es lo mismo que e , base de los logaritmos naturales, elevado a la potencia indicada entre los paréntesis. A esta aproximación se puede tomar V_{cd} como intervalo entre bandas, m^+ como relación efectiva entre la masa del portador de carga libre más ligero y la masa de un electrón libre, y n como número de portadores de carga libres, por unidad de volumen, en el lado de la unión que tenga menor concentración de portadores de carga libre, siendo ϵ la relación entre la constante dieléctrica del semiconductor y la constante dieléctrica del vacío, y a una constante numérica que depende de las unidades. Estando V_{cd} en electron-voltios y n en portadores por cm^3 , a vale 7×10^{10} . En los dispositivos aquí expuestos, el valor de este factor está com

25

30



2551

prendido entre 10^{-2} y 10^{-12} , para estas unidades. Así, el empleo en altas frecuencias favorece un material de cuerpo que tenga un intervalo entre bandas moderado ($<2,0$ eV) y una pequeña masa efectiva de portadores.

5

TABLA 1

| Material semicon- ductor | V _{cd} | ε | m ⁺ | V _{cd} (εm ⁺) ^{1/2} | n |
|-----------------------------|-----------------|----|----------------|---|---|
| Ge | 0,65 | 16 | 0,15 | 1,0 | 4,0 x 10 ¹⁹ cm ⁻³ |
| Si | 1,1 | 12 | 0,27 | 1,9 | 1,4 x 10 ²⁰ cm ⁻³ |
| GaAs | 1,35 | 13 | 0,06 | 1,3 | 7 x 10 ¹⁹ cm ⁻³ |
| InSb | 0,18 | 11 | 0,04 | 0,12 | 6 x 10 ¹⁷ cm ⁻³ |

10

La tabla 1 da los parámetros de los materiales más prometedoros para los diodos aquí expuestos. Estos parámetros indican que el InSb es el material más prometedor para empleo en altas frecuencias. Para elevadas temperaturas, el GaAs parece atractivo, y ha de ser mejor que el silicio. En la última columna se indica la activación necesaria para hacer que cada material tenga trabajando en altas frecuencias, un comportamiento equivalente al de dispositivos de germanio de unos $4,0 \times 10^{19}$ portadores/cm³.

15

20

TABLA 2

| Material semicon- ductor. | Valores inferiores de concentración de portadores de carga libres para que se presente resistencia negativa. | Margen de concentración de portadores de carga libres, para velocidades ultraelevadas. |
|------------------------------|--|--|
| | Todos x 10 ¹⁹ cm ⁻³ | Todos x 10 ¹⁹ cm ⁻³ |
| Germanio | 0,5 | 2,0 a 10,0 |
| Silicio | 1,7 | 7,0 a 35,0 |
| Arseniuro de galio | 0,5 | 3,5 a 17,5 |
| Antimoniuro de indio | 0,005 | 0,03 a 0,15 |

25

30

255369



La tabla 2 expone unos datos que permiten comparar fácilmente los valores inferiores de concentración de portadores de carga libres, para semiconductores prometedores, suficientes para obtener una característica de resistencia negativa, con aquellas concentraciones más altas que han de darse para obtener conmutación a velocidades ultraelevadas y un buen funcionamiento en altas frecuencias, en estos mismos semiconductores.

En general, cuanto más alta sea la concentración de portadores de carga libres, mayor será la velocidad. En general, la concentración de portadores de carga libres en los dispositivos preferidos corresponde a la concentración de un exceso de impurezas determinativas del tipo de conductividad en los semiconductores. En la mayoría de los casos, la concentración existe a temperaturas aproximadamente iguales a la del ambiente. Ahora bien, si es necesario, la concentración precisa puede obtenerse a temperaturas inferiores, como, por ejemplo, a la temperatura del helio líquido, o a temperaturas superiores hasta llegar a los 500° C. La característica de resistencia negativa se logra cuando la concentración de portadores de carga libres está comprendida entre los límites indicados en la tabla 2, independientemente de la temperatura máxima por encima de la cual no es posible ya que se produzca acción normal de transistor en el material particular.

Funcionamiento. El comportamiento de un dispositivo en funcionamiento puede medirse por un estudio, bien del índice de mérito del conjunto unitario, es decir, de la constante de tiempo RC, o bien de su comportamiento en un circuito. Se han utilizado ambas maneras de enfocar la cuestión. Los aumentos de concentración de portadores libres, según se ha visto, afectan

255309



tan a la constante de tiempo en grado sorprendente. En el caso del germanio tipo n, y con la concentración de portadores de carga libres medida en cada caso por $N \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, se observó que, cuando el factor K era de 2,5, se obtenían unas constantes de tiempo típicas de aproximadamente 400 a 700 μs . Aumentando el factor K a 3,6, se obtenían constantes de tiempo comprendidas entre 6 y 13 μs . Al seguir aumentando el factor N sólo ligeramente, hasta un valor de 4, se observó que se producía un importante descenso de la constante de tiempo, hasta que
5
10 dar en 0,5 μs o menos.

Asimismo, en un experimento particular realizado con el propósito de obtener una comparación, y utilizando germanio tipo n, con concentraciones de portadores de carga libres de 2,5 y 3,6 veces 10^{19} cm^{-3} , se vió que el producto de ganancia por anchura de banda $G \Delta f$ era respectivamente de 0,23 y 32 Mc/s. Las frecuencias fundamentales más altas para las cuales un circuito equivalente de parámetros acumulados, con un diodo dotado de la concentración de portadores de carga mencionada en cada caso, se vió que oscilaba eran respectivamente de 21 y 170
15
20 Mc/s.

Los diodos aquí descritos ofrecen la posibilidad de hacer dispositivos baratos y de pequeña potencia que puedan funcionar a altas frecuencias tener una ganancia no lineal y almacenar datos. Por ejemplo, parecen muy adecuados para osciladores de resistencia negativa en la región de las frecuencias ultraelevadas (f.u.e.). En el campo de los calculadores muy rápidos pueden ejecutar operaciones de lógica binaria, tienen ganancia suficiente para excitar varios estados en paralelo, y pueden utilizarse para dispositivos de memoria de acceso rápido y baja potencia. Su sencilla construcción ofrece la posi-
25
30



bilidad de ser dispuestos en formaciones bidimensionales, y su pequeño tamaño los hace atractivos para la microminiaturización.

Para aprovechar el potencial de alta velocidad de los diodos aquí descritos, es preciso cuidar la manera en que se monta el dispositivo y se conecta a su circuito. La elevada capacidad por unidad de superficie que poseen estos diodos, del orden de 1 microfaradio por cm^2 y mayor, les hace presentar muy bajas impedancias a frecuencias elevadas, y la montura debe ser apropiada para estas bajas impedancias.

Esta solicitud que corresponde a la presentada en E.U.A. el 27 de Enero de 1959, bajo el número 789.286, se acoge a los beneficios del artículo 51, del vigente Estatuto sobre Propiedad Industrial.



NOTAS

Los puntos de invención propia y nueva que se presentan para que sean objeto de esta solicitud de Patente de Invención en España, por VEINTE años, son los siguientes:

1º.- Un dispositivo que comprende un cuerpo monocristalino de material semiconductor y una brusca unión p-n en relación operativa con aquél, teniendo dicho dispositivo un valor comprendido entre 10^{-2} y 10^{-12} para el factor

$$\exp. \left(-\frac{V_{cd}}{kT} \left[\frac{m^+}{n} \right]^{1/2} \right)$$

en el que: V_{cd} es el intervalo entre bandas del material, en electron.voltios;

m^+ es la razón o cociente entre la masa efectiva del



255008

portador de carga libre más ligero del semiconductor y la masa de un electrón libre;

5 n es el número de portadores de carga libres por cm^3 en el lado de la unión que tiene menor concentración de portadores de carga libres;

ϵ es la razón o cociente entre la constante dieléctrica del semiconductor y la constante dieléctrica del vacío; y

10 a es 7×10^{10} ;

presentando dicho dispositivo, cuando se le polariza a bajas tensiones en sentido directo, una característica de resistencia negativa debida a horadación mecánica cuántica efectuada por los portadores de carga libres a través de dicha unión p-n.

15 2º.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que dicho material semiconductor es germanio.

 3º.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que dicho material semiconductor es arseniuro de galio.

20 4º.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que dicho material semiconductor es antimonio de indio.

 5º.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que dicho material semiconductor es silicio.

25 6º.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que un lado de dicha unión es germanio dotado de una concentración de portadores de carga libres comprendida entre 2,0 y $10,0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, y en el que el otro lado de dicha unión es el mismo material de dicho primer lado pero de un tipo de conductividad opuesto y dotado de una concentración de portadores de carga libres al menos tan elevada como la de dicho
30 primer lado.



255309

7^a.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que un lado de dicha unión es silicio dotado de una concentración de portadores de carga libres comprendida entre 7,0 y 35,0 x 10¹⁹ cm⁻³, y en el que el otro lado de dicha unión es el mismo material de dicho primer lado pero de un tipo de conductividad opuesto y dotado de una concentración de portadores de carga libres al menos tan elevada como la de dicho primer lado.

8^a.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que un lado de dicha unión es arseniuro de galio dotado de una concentración de portadores libres comprendida entre 3,5 y 17,5 x 10¹⁹ cm⁻³, y en el que el otro lado de dicha unión es el mismo material de dicho primer lado pero de un tipo de conductividad opuesto y dotado de una concentración de portadores de carga libres al menos tan elevada como la de dicho primer lado.

9^a.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que un lado de dicha unión es antimoniuro de indio dotado de una concentración de portadores libres comprendida entre 0,03 y 0,15 x 10¹⁹ cm⁻³, y en el que el otro lado de dicha unión es el mismo material de dicho primer lado pero de un tipo de conductividad opuesto y dotado de una concentración de portadores de carga libres al menos tan elevada como la de dicho primer lado.

10^a.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 1, en el que el cuerpo monocristalino es de germanio dotado de una concentración de portadores de carga libres comprendida entre 2,0 y 4,0 x 10¹⁹ cm⁻³, estando la brusca unión p-n aleada a una superficie de dicho cuerpo de germanio, y habiendo unas conexiones no rectificadoras fijas a cada lado de dicha unión, teniendo el semiconductor del lado aleado de dicha unión una concen-



255309

tración de portadores de carga libres al menos tan elevada como la de dicho cuerpo.

11º.- Un dispositivo conforme a la reivindicación 10, en el que el cuerpo de germanio semiconductor tiene una concentración de impurezas donadoras comprendida entre 2,0 y 4,0 x 10¹⁹ cm⁻³, y el semiconductor del lado aleado de dicha unión tiene una concentración aceptora al menos tan elevada como la de dicho cuerpo.

12º.- "Un dispositivo semiconductor".

10 Tal y como se ha descrito en la Memoria que antecede, representado en los dibujos que se acompañan y con los fines que se han especificado.

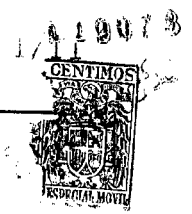
Esta Memoria consta de veintitres hojas, escritas por una sola de sus caras.

15

Madrid,

18 JUN 1960

P.A.



28 3 1913

Fig. 1.

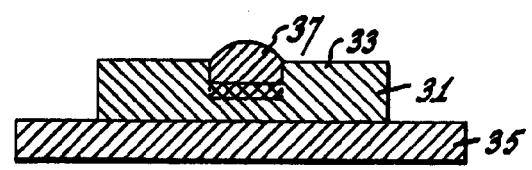
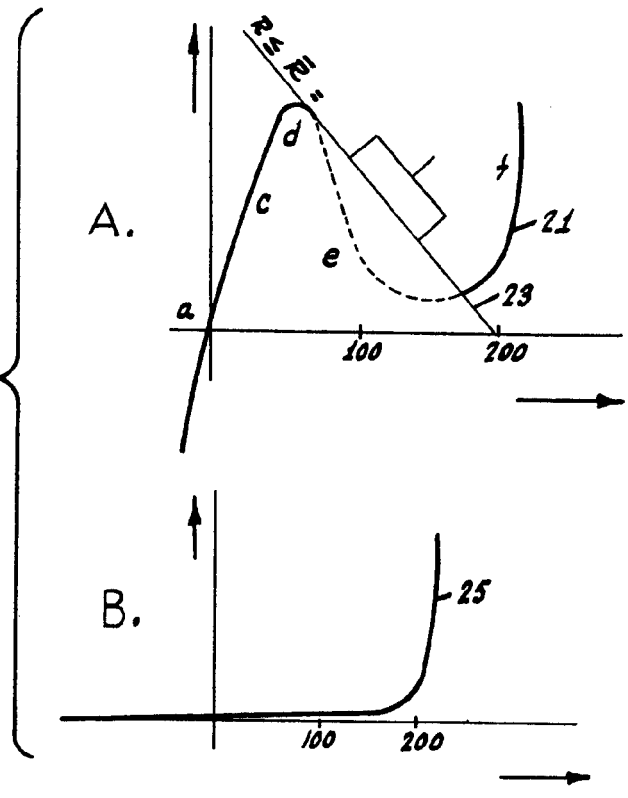


Fig. 3.

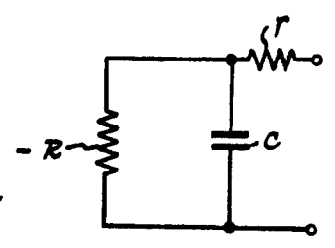


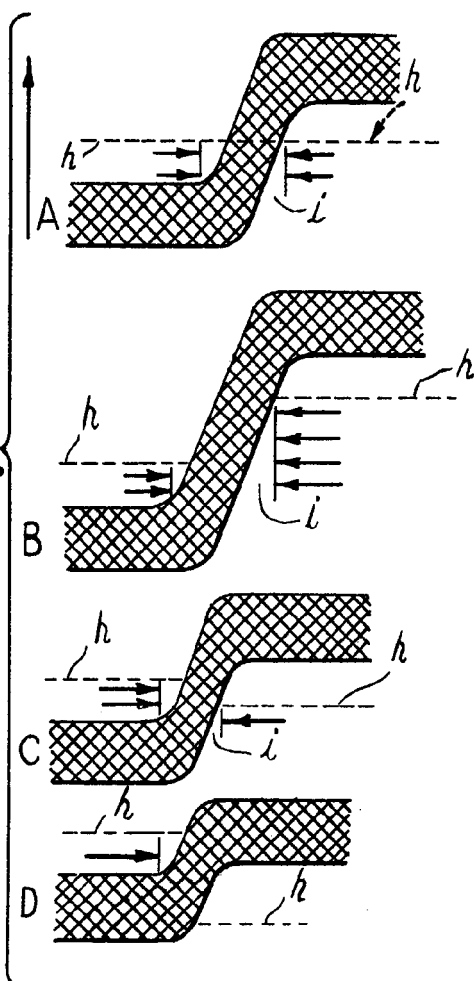
Fig. 4.

desarrollado por el Sr. Pizalari
1913



258300

Fig. 2.



Escuela de Ingenieros
P.O. Box 1000