



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: **2 349 913**

② Número de solicitud: 200802933

⑤ Int. Cl.:

G01T 1/24 (2006.01)

H01L 39/22 (2006.01)

H01L 27/18 (2006.01)

G06N 99/00 (2000.01)

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

⑫ Fecha de presentación: **17.10.2008**

⑬ Fecha de publicación de la solicitud: **12.01.2011**

⑭ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:
12.01.2011

① Solicitante/s: **Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)**
c/ Serrano, 117
28006 Madrid, ES
Universidad del País Vasco y
Universidad de Santiago de Chile

② Inventor/es: **Solano, Enrique;**
Romero, Guillermo y
García Ripoll, Juan José

④ Agente: **Pons Ariño, Ángel**

⑤ Título: **Detector de fotones en el rango de microondas y método de detección.**

⑦ Resumen:

Detector de fotones en el rango de microondas y método de detección.

Diseño de un dispositivo detector y contador de fotones basado en una guía de onda (1) unidimensional acoplada a un número de elementos absorbentes (2) biestables que realizan la detección, siendo dicho dispositivo aplicado a la detección y caracterización de radiación de microondas (3). Dicha detección se realiza mediante qubits cuyos estados quedan irreversiblemente cambiados al paso de los fotones absorbidos procedentes de la radiación inducida.

ES 2 349 913 A1

DESCRIPCIÓN

Detector de fotones en el rango de microondas y método de detección.

5 Objeto de la invención

El objeto principal de la presente invención es el diseño de un dispositivo detector y contador de fotones basado en una guía de onda (1) unidimensional acoplada a un número de elementos absorbentes (2) biestables que realizan la detección, aplicado a la detección y caracterización de microondas.

Otro objeto de la invención es un método de detección y cuantificación de fotones en microondas utilizando los elementos anteriormente citados.

Antecedentes de la invención

El campo de los circuitos cuánticos y sus posibles aplicaciones ha sufrido un desarrollo notable en los últimos años; básicamente un circuito cuántico es un elemento formado por, entre otras cosas, elementos superconductores funcionando en régimen de degeneración cuántico. Este tipo de elementos ya conocidos como las uniones Josephson, SQUID's, islas de pares de Cooper, guías de onda y cavidades todos enfriados a muy bajas temperaturas (20 mK) y funcionando en el régimen de degeneración cuántico.

Entre las numerosas aplicaciones de estos circuitos, cabe destacar la creación de átomos artificiales: circuitos con niveles de energía discretos y con grados de carga, flujo o fase cuantizados. Estos circuitos elementales se utilizan para almacenar bits cuánticos (qubits) para el procesado cuántico de la información. Entre las múltiples variantes encontramos qubits de carga, qubits de flujo y qubits de fase.

Una segunda aplicación más reciente pero muy relevante es la manipulación de radiación de microondas en el régimen cuántico donde se resuelven los cuantos de energía que componen el campo electromagnético. Entre los experimentos más relevantes cabe destacar el intercambio de fotones de microondas entre campos estacionarios de cavidades resonantes y qubits superconductores, la generación de fotones bajo demanda y los efectos no lineales que surgen al colocar qubits en resonadores y líneas de transmisión. Todas estas aplicaciones proceden de una integración de los campos de la óptica cuántica y la física mesoscópica.

En la actualidad, tanto para las aplicaciones en información cuántica como en tecnología de microondas, uno de los mayores obstáculos es la inexistencia actual de detectores de fotones en el rango de 1-100 GHz.

Las principales dificultades que presenta el construir semejante dispositivo son las siguientes:

- Los amplificadores lineales criogénicos no pueden distinguir fotones individuales o el número de fotones en una señal muy débil.
- La sección eficaz de la interacción entre campos de microondas y elementos materiales o incluso qubits superconductores es pequeña.
- El uso de cavidades para aumentar el acoplo radiación-materia introduce nuevas dificultades, como alcanzar un compromiso entre una alta calidad del resonador (y por tanto un gran acoplo) y la reflectividad de los espejos del resonador (que dificulta la entrada de los fotones).
- Dado que el objetivo es estudiar señales de microondas con pocos fotones y por tanto en el régimen cuántico, no es posible realizar medidas continuas sin alterar la señal. Para evitar medidas continuas se hace necesario un mecanismo de sincronización entre la llegada de la señal y la activación del detector, que es igualmente difícil.

Actualmente existen numerosos grupos experimentales y teóricos trabajando en el problema de la detección de fotones de microondas.

Los esfuerzos se centran en torno a propuestas que tratan el sistema qubit-fotón de forma coherente, empleando los efectos no lineales dispersivos o efectos tipo bifurcación que amplificarían la señal de entrada.

Sin embargo hasta el momento no se encuentra en la literatura una realización experimental o teórica que solucione todos los problemas anteriormente identificados.

Dado que los sistemas coherentes basados en el control o en efectos no lineales no han dado fruto, se propone emplear procesos incoherentes e irreversibles, donde los fotones den lugar a cambios mesoscópicos en el circuito y que puedan ser detectados *a posteriori*. Los experimentos actuales con circuitos superconductores buscan aplicaciones en el procesado cuántico de la información y los efectos incoherentes se ven como perniciosos. Una excepción importante es el campo de la bolometría, donde existen aplicaciones de circuitos superconductores metaestables para medir temperaturas de forma muy precisa.

Descripción de la invención

El objetivo de la invención es el desarrollo de un dispositivo de detección que realice dicha función de manera similar a los fotodetectores utilizados en el rango óptico visible; esto implica la detección de los fotones uno a uno y dando lugar a procesos irreversibles o cambios de estado en el material que puedan ser detectados fácilmente y con gran precisión. El dispositivo detector y contador de fotones de microondas consta de una guía de onda unidimensional que transporta la radiación de microondas por el interior de un conjunto de elementos absorbedores encargados de capturar los fotones. Dichos elementos absorbedores son circuitos cuánticos biestables similares a los qubits utilizados en información cuántica.

Un qubit es el análogo cuántico al binario utilizado en computación; pero en éste caso, en el de la computación cuántica, el qubit como unidad de información es capaz de representar 0 ó 1, o ambos 0 y 1. Dichos elementos que se encuentran en un principio en estado metaestable $|0\rangle$, pueden realizar una transición irreversible a estado estable $|g\rangle$ una vez haya absorbido un fotón al paso de la radiación de microondas; este proceso irreversible constituye la medición que se busca con el dispositivo diseñado. Como este cambio inducido es irreversible y dado que el estado final de los elementos biestables se puede comprobar *a posteriori*, se evita cualquier efecto de retroceso inducido por medidas continuas; con lo que única dificultad del diseño del dispositivo es encontrar una disposición y unas propiedades de dicho elementos que proporcione la mayor eficiencia posible en la absorción de fotones.

Para conseguir dicha eficiencia en la absorción de fotones el dispositivo detector y contador de fotones de microondas consta de una guía de onda que será la encargada de transportar los fotones; se utiliza una guía coaxial encerrada entre dos planos conductores conectados a tierra.

Dichos planos conductores están separados entre sí por una distancia mucho menor que la longitud de onda λ de la radiación transmitida, la propagación del campo electromagnético en la guía de onda se realiza mediante ondas de densidad de carga de forma aproximadamente unidimensional. La guía de onda (1) tiene una relación de dispersión ω

(k) que relaciona la frecuencia de los fotones con su longitud de onda y momento, $\lambda = \frac{2\pi}{k}$. El detector utiliza una

frecuencia principal ω_0 , esta relación se puede aproximar por una recta $\omega \cong v_g k \left(\omega_k \cong \omega_0 \right)$ cuya pendiente es la velocidad de grupo de la microonda. Supondremos que el material conductor se encuentra a muy baja temperatura y que por ésta y otras razones las pérdidas y distorsiones son irrelevantes.

El segundo elemento lo constituyen los elementos absorbedores o qubits responsables de la detección. Se tratará de circuitos con un tamaño mucho menor que la longitud de onda de la radiación de microondas que por tanto se pueden tratar como elementos puntuales. Cada circuito trabaja en el régimen cuántico a una temperatura lo bastante baja como para que sólo tengamos que considerar dos niveles de energía.

El primero es el $|0\rangle$, un estado metaestable en el que se preparan todos los qubits antes de realizar la detección. Se trata de un estado con una vida media mucho más larga que el proceso de detección y que está separado del nivel excitado $|1\rangle$ por una energía $\hbar\omega \cong \hbar\omega_0$. Este último nivel tiene una vida media mucho más corta y decae con velocidad $\Gamma \ll \omega$ a otro nivel $|g\rangle$ macroscópicamente distinguible de los demás.

El funcionamiento del detector es el siguiente; en primer lugar se preparan todos los qubits en un estado $|0\rangle$. A continuación se inyecta la señal a medir en un extremo de la línea de transmisión. Al cabo de un tiempo se mide el estado de los qubits. Si alguno de los qubits, elementos absorbentes (2) se encuentra en el estado $|g\rangle$ podemos asegurar que la guía de onda (1) ha transportado al menos un fotón con una probabilidad igual o superior a la eficiencia del detector.

Si el número de los qubits que se encuentran en el estado $|g\rangle$ es N_g se puede afirmar que la señal transportaba al menos N_g con una confianza proporcional a la eficiencia $1 - (1 - \alpha)^{N_g}$.

El cálculo de la eficiencia del detector requiere una modelización matemática del problema que se puede hacer simplemente conociendo los requisitos anteriores. Esta modelización puede realizarse mediante una ecuación de Schrödinger no conservativa,

Se puede optimizar la eficiencia de detección para un dispositivo con un número de elementos detectores N prefijado. La máxima detección se obtiene para qubits resonantes (con $\delta = 0$ u $\omega = \omega_0$) de forma que para un qubit o muchos qubits próximos entre sí, la eficiencia de detección está limitada al 50%. Cuando se implementan dos qubits separados $\lambda/2$ media longitud de onda se obtiene una eficiencia del 80% que se incrementa arbitrariamente según se van añadiendo más elementos detectores.

Descripción de los dibujos

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.a.- Muestra un esquema de una guía de onda coaxial y plana (1) que lleva acoplados un número de elementos absorbentes (2) coplanares. La radiación de microondas (3) a través de la guía de onda (1).

Figura 1.b.- Muestra un circuito cuántico equivalente.

Figura 1.c.- Muestra un como cada elemento qubit tiene dos niveles metaestables $|0\rangle$ y $|1\rangle$ El elemento absorbente (2) o qubit puede por tanto absorber un fotón y realizar una transición irreversible $0 \rightarrow 1 \rightarrow g$.

Realización preferente de la invención

En esta sección se explica una implementación modelo del diseño usando los elementos y circuitos disponibles hoy en día. Para el transporte de la radiación de microondas (3) se utiliza una guía de onda (1) coaxial coplanar con los elementos absorbentes (2) que actúan como detectores, siguiendo los experimentos recientes. Cabe destacar que, al contrario que en estos experimentos, no se corta la guía de onda (1) en los extremos para formar un resonador, sino que queda libre para que los fotones se propaguen libremente a través de ella.

La guía de onda (1) viene caracterizada por dos cantidades intensivas: la inductancia por unidad de longitud, l , y la capacitancia por unidad de longitud, c . En base a estas dos cantidades, de acuerdo con los modelos LC habituales, se obtiene la relación de dispersión $\omega_0 = v_g |k|$, con una velocidad de grupo independiente de la frecuencia

$$v_g = \frac{1}{\sqrt{lc}} .$$

Como elementos absorbentes (2) de detección se utiliza lo que se conoce como qubits de fase o “current-biased Josephson junction”, esto es, una unión Josephson atravesada por una corriente I con valores muy próximos a los de la corriente crítica de la unión I_0 . Este elemento circuital viene caracterizado por dos cantidades. En primer, lugar la

energía de Josephson $E_J = I_0 \phi_0$, producto de la corriente crítica por la unidad de flujo $\phi_0 = \frac{\hbar}{2e}$. En segundo

lugar, la energía de carga $E_c = \frac{2e^2}{C_j}$, función de la capacitancia de la unión, C_j .

El acoplo entre el elemento absorbente (2), esto es el qubit de fase, y la guía de onda (1) se puede hacer capacitivamente. En ese caso la constante de acoplo V del diseño viene dada por la fórmula:

$$V = \frac{C_g}{C_j + C_g} \frac{e}{\alpha} \sqrt{\frac{\hbar \omega_0}{c}} .$$

Aquí aparece la capacitancia entre el qubit de fase y la línea de transmisión, C_g , y un número $\alpha^2 = \frac{E_c}{\hbar \omega}$ que

depende de la energía de carga y de la diferencia de energía entre los dos niveles metaestables de menor energía, $|0\rangle$ y $|1\rangle$ de nuestro qubit de fase.

El parámetro adimensional que determina la eficiencia del detector, sigue la fórmula: $\gamma = \frac{\alpha^2}{c_{12}^2} \frac{\hbar}{e^2 Z_0} \frac{\Gamma}{\omega_0}$,

donde $Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}$ es la impedancia de la línea de transmisión y $C_{12} = \frac{C_g}{C_g + C_j}$. En esta fórmula es evidente

ES 2 349 913 A1

que hay suficientes parámetros libres, $Z_0, \Gamma, C_{12}, E_C, \omega_0$, como para conseguir una aproximación al régimen de máxima eficiencia.

5 Como ejemplo, para un sólo qubit o elemento detector, se puede usar directamente los parámetros del experimento de Berkley *et al.* donde obtenemos $C_J = 4,8$ pF, $C_{12} = 0,13$, $\alpha^2 = 0,02$. Dado que para un sólo qubit se necesita $\gamma \cong 1$, usando impedancias realistas $Z_0 = 10-100 \Omega$, obtenemos que la velocidad de decaimiento del qubit debe de estar en el rango $\Gamma = 10-100$ MHz. Incrementando el acoplo entre la guía y el qubit a $C_{12} = 0,26$ supone incrementar esta velocidad a 30-300 MHz.

10 Todos estos valores y requisitos están dentro de los rangos experimentalmente accesibles.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo detector y contador de fotones de microondas de alta eficiencia **caracterizado** porque comprende:

- una guía de onda (1) destinada a portar unos fotones de una radiación de microondas en la que al menos uno de los extremos queda libre para que los fotones se propaguen libremente a través de ella, y
- unos elementos absorbentes (2) definidos por unos circuitos cuánticos biestables que se encuentran acoplados capacitivamente a la guía de onda (1) separados entre sí por una distancia igual a media longitud de onda λ de la radiación de microondas.

2. Dispositivo detector y contador de fotones de microondas según la reivindicación 1 en el que la guía de onda (1) portadora de la radiación es del tipo plana coaxial encerrada entre dos planos conductores conectados a tierra.

3. Dispositivo detector y contador de fotones de microondas según la reivindicación 1 en el que los elementos absorbentes (2) biestables responsables de la detección tienen un tamaño menor que la longitud de onda λ .

4. Dispositivo detector y contador de fotones de microondas según la reivindicación 1 en el que la guía de onda (1) plana lleva embebidos los elementos absorbentes (2) contruidos a partir de uniones Josephson atravesados por una corriente continua.

5. Método de detección de fotones de microondas utilizando el dispositivo detector descrito en las reivindicaciones 1 a 4 **caracterizado** porque comprende los siguientes pasos:

- establecer cada elemento absorbente (2) en un estado inicial metaestable $|0\rangle$,
- acoplar capacitivamente cada elemento absorbente (2) a la guía de onda (1) donde cada elemento absorbente (2) se separa entre sí a una distancia correspondiente a media longitud de onda λ de la radiación de microondas,
- hacer pasar por el interior de la guía de onda (1) la radiación de microondas desde un extremo de la misma,
- determinar el estado estable $|>0\rangle$ o metaestable $|9\rangle$ de los elementos absorbentes (2) un vez ha terminado de pasar la radiación de microondas a través del interior de la guía de onda (1), y
- cuantificar la cantidad de elementos absorbentes (2) que se encuentran en un estado estable $|g\rangle$ a consecuencia del paso de la radiación hace que el estado del elemento absorbente (2) pase del estado un estado metaestable $|0\rangle$ inicialmente establecido a un estado estable $|g\rangle$ al incidir un fotón de la radiación de microondas sobre dicho elemento absorbente (2).

6. Elemento absorbente (2) **caracterizado** porque comprende al menos un qubit de fase definido por al menos una unión de Josephson atravesado por una corriente continua adaptado para cambiar su estado metaestable $|0\rangle$ a estable $|g\rangle$ como consecuencia de la incidencia de un fotón de una radiación.

7. Uso del elemento absorbente (2) descrito en la reivindicación 6 para su aplicación como detector de fotones.

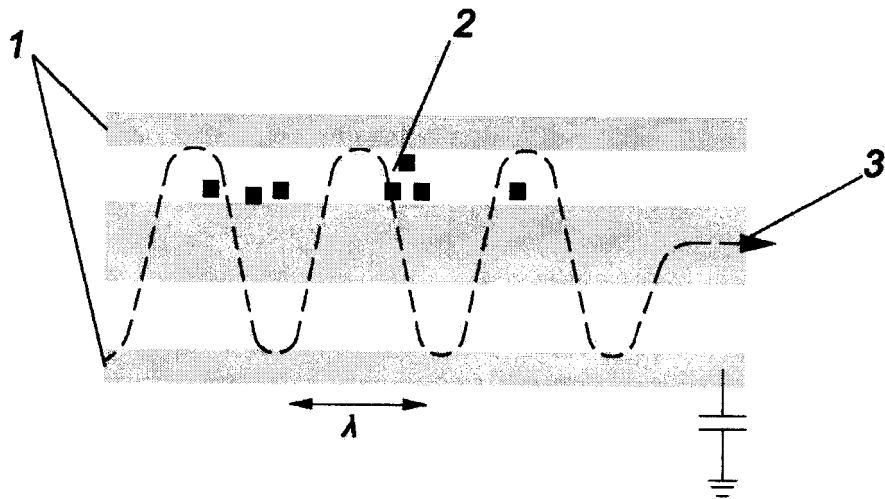


FIG. 1a

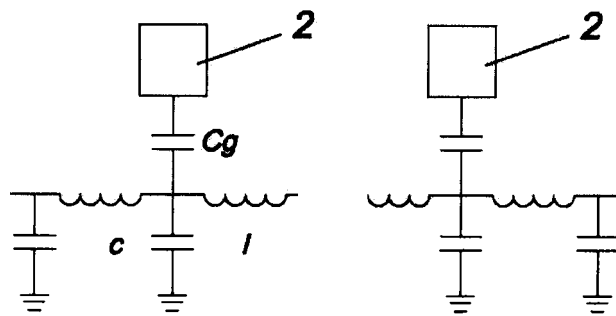


FIG. 1b

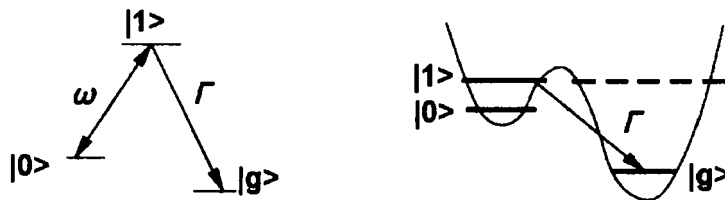


FIG. 1c



OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud:200802933

②② Fecha de presentación de la solicitud: 17.10.2008

③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X A	WALLRAFF et al.: "Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics" in NATURE, vol.431, pages 162-167 (Nature Publishing Group, UK) 09.09.2004	6,7 1-5
A	METCALFE et al.: "Measuring the decoherence of a quantronium qubit with the cavity bifurcation amplifier" in Physical Review B, vol. 76, nº. 17, id. 174516 (American Physical Society, USA) 01.11.2007	1-7
A	SHWETANK et al.: "Temperature dependence of the frequency and noise of superconducting coplanar waveguide resonators" in Applied Physics Letters, vol. 92, nº 12, pages 123503(1)-123503(3) (AIP, USA) 25.03.2008	1-7
A	SIMMONDS: "Quantum information with superconducting quantum bits and cavities". Conference Lasers and Electro-Optics, 2008. CLEO 2008 in Piscataway, NJ, USA. 04.05.2008	1-7

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
02.12.2010

Examinador
F. Olalde Sánchez

Página
1/4

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

G01T1/24 (2006.01)
H01L39/22 (2006.01)
H01L27/18 (2006.01)
G06N99/00 (2010.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01T 1, H01L 39/22, H01L 27/18, G06N 99

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

EPODOC, INSPEC, IEEE, EMBASE, COMPENDEX

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 02.12.2010

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-5	SI
	Reivindicaciones 6,7	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones 1-5	SI
	Reivindicaciones 6,7	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	"Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics"	09.09.2004

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

De acuerdo con el artículo 29.6 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/86 de Patentes, se establece en esta opinión escrita que la solicitud parece cumplir con los requisitos exigidos en los Artículos 6.1 y 8.1 de la Ley 11/86 de Patentes, en relación con el estado de la técnica establecido por el artículo 6.2 de dicha ley, por hacerlo los objetos de protección definidos por las reivindicaciones 1-5 y parece no cumplir dichos requisitos en lo que se refiere a los objetos de protección definidos en las reivindicaciones 6 y 7; en concreto:

D01 divulga un dispositivo adecuado para la detección de fotones (página 162, resumen; página 166, párrafo 3) de microondas que comprende una guía de onda portadora de la radiación (página 163, párrafo 2; figura 1) y elementos absorbentes definidos por unos circuitos cuánticos biestables (página 163, párrafo 1) acoplados capacitivamente a la guía de onda (página 163, párrafo 5; figura 2).

No parece derivar del estado de la técnica definido por D01 que la guía de onda se configure con al menos uno de sus extremos libre para permitir la propagación libre de los fotones a través de ella, por lo que parece que el objeto definido por la reivindicación 1 es nueva y con actividad inventiva. Por tanto, los objetos de protección definidos por las reivindicaciones dependientes (2-4) y el método de detección de fotones utilizando el dispositivo detector definido por la reivindicación 5 también parecen ser nuevos y con actividad inventiva.

Por otro lado, D01 divulgó elementos absorbentes que comprenden qubits de fase definidos por uniones Josephson atravesados por una corriente continua (figura 3), así como su aplicación en la detección de fotones, por lo que los objetos definidos por las reivindicaciones 6 y 7 parecen carecer de novedad. Por propia definición, al carecer de novedad en el sentido del artículo 6.1 de la Ley 11/86, también carecen de actividad inventiva.