

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 380 784**

51 Int. Cl.:

**H03K 5/15** (2006.01)

**H03K 5/13** (2006.01)

**H01S 3/23** (2006.01)

**G21B 1/11** (2006.01)

12

### TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06123660 .0**

96 Fecha de presentación: **08.11.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1786104**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **16.05.2007**

54 Título: **Dispositivo de generación de señales de sincronización con fluctuación de fase muy reducida**

30 Prioridad:  
**15.11.2005 FR 0553472**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**18.05.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**18.05.2012**

73 Titular/es:  
**COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET  
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES  
BATIMENT D "LE PONANT" 25, RUE LEBLANC  
75015 PARIS, FR**

72 Inventor/es:  
**Pastor, Jean-François y  
Prat, Michel**

74 Agente/Representante:  
**Linage González, Rafael**

**ES 2 380 784 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

Dispositivo de generación de señales de sincronización con fluctuación de fase muy reducida

5 **Campo técnico**

La invención se refiere a un dispositivo de generación de señales de sincronización con fluctuación de fase muy reducida.

10 La invención se aplica en particular a la sincronización de la activación de pulsos láser en un sistema de fusión termonuclear por confinamiento inercial.

15 Convencionalmente, en dicho sistema, una diana, en forma de microperla que comprende una mezcla de deuterio y de tritio, se somete a irradiación conjunta y simultánea de un número elevado de rayos láser durante un lapso de tiempo muy corto. Bajo el efecto de esta irradiación, las capas superficiales se consumen por ablación y el material de la perla se transforma en plasma a alta temperatura. La volatilización de las capas superficiales, genera según el principio de la conservación de la cantidad de movimiento, una onda de choque centrípeta que confinará violentamente el plasma. El proceso de fusión termonuclear se origina cuando el producto del tiempo de confinamiento por la temperatura alcanza un valor umbral (ley de Lawson).

20 **Estado de la técnica anterior**

25 El proyecto estadounidense NIF (National Ignition Facility), del que se encontrará una descripción en la revista ICF Quaterly report, Vol. 9, No. 1, oct.-dic. 1998, así como el proyecto francés LMJ (Laser Méga Joule) prevén un gran número de rayos (192 en el sistema NIF, 240 en el sistema LMJ) convergentes hacia una diana D-T capaces de suministrar conjuntamente una potencia de casi 2 MJ durante un periodo de 10-20 ns.

30 Una condición crítica del confinamiento inercial es la llegada simultánea de los frentes de onda a la diana del láser. Esto es tanto más cierto que para obtener una ganancia energética elevada (proporción de energía termonuclear liberada respecto a energía luminosa inyectada) hay que iluminar solamente el centro de la microperla (principio de iluminación por punto caliente central). La simultaneidad de llegada de los pulsos láser a la microperla también es necesaria para obtener un confinamiento isótropo, traducándose cualquier defecto de simultaneidad en una pérdida de esfericidad del punto caliente.

35 Para dar un orden de magnitud de la limitación de simultaneidad, el pliego de condiciones del sistema NIF indica una tolerancia máxima de 12 ps.

40 Esta limitación de simultaneidad supone que se sabe suministrar, a los láseres de inyección, señales de sincronización con una precisión y una estabilidad temporales elevadas.

45 Un dispositivo de generación de dichas señales de sincronización se conoce del documento mencionado anteriormente y se ilustra en la figura 1. Un generador de pulsos eléctricos 110 proporciona un pulso de 100 ps de duración a un modulador electro-óptico 120. El pulso óptico correspondiente es amplificado a continuación mediante el paso por un amplificador 130 constituido por una serie de fibras bombeadas antes de dividirlo por medio de un divisor óptico 135 conectado a una pluralidad de fibras  $140_1, \dots, 140_M$ , que desempeñan el papel de líneas de retardo. Los pulsos ópticos procedentes de estas fibras son transformados en pulsos eléctricos por fotodetectores  $150_1, \dots, 150_M$ , controlando a continuación las señales de salida de estos fotodetectores los diferentes conjuntos de generación de pulsos láser  $160_1, \dots, 160_M$ .

50 Este dispositivo presenta, sin embargo, cierto número de limitaciones debidas a las disparidades y a las fluctuaciones de los tiempos de respuesta de los fotodetectores PD.

55 Suponiendo incluso que se pudieran compensar, de media, las disparidades de tiempos de respuesta de estos fotodetectores, las fluctuaciones temporales introducen una fluctuación de fase relativa de las señales de sincronización, perjudicial para la condición de simultaneidad mencionada anteriormente. Se denominará fluctuación de fase relativa de dos señales a la fluctuación de su separación temporal.

Más exactamente, si las dos señales de sincronización se expresan en forma de funciones aleatorias:

$$60 \quad S_1(t) = S(t_0 + t - \tau_1 - g_1(\tau_1))$$

$$S_2(t) = S(t_0 + t - \tau_2 - g_2(\tau_2))$$

65 donde  $t_0$  es un instante de referencia,  $S(t)$  una señal determinista que ha servido para generar las señales de sincronización,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  son los retardos que afectan respectivamente a las dos señales con respecto al instante de referencia y  $g_1(\tau_1)$ ,  $g_2(\tau_2)$  variables aleatorias que representan las fluctuaciones de fase respectivas de las dos

señales. Se denominará fluctuación de fase relativa de las señales de sincronización, a la variable aleatoria  $g_{21}=g_2(\tau_2)-g_1(\tau_1)$ . Esta variable aleatoria  $g_{21}$  es de media nula como  $g_1(\tau_1)$  y  $g_2(\tau_2)$  y de varianza  $\sigma_{12}$ . El valor  $\sigma_{12}$  da una medida del valor cuadrático medio de la fluctuación de fase y también se denomina fluctuación de fase RMS (root-mean-square). Por comodidad de lenguaje la llamaremos también "fluctuación de fase", quedando la ambigüedad eliminada por el contexto.

Generalmente la densidad de probabilidad de la variable aleatoria  $g_{21}$  es gaussiana y se expresa entonces de la forma:

$$p(g_{21} = g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{12}^2}} \exp\left(-\frac{g^2}{\sigma_{12}^2}\right)$$

Un objetivo de la presente invención es prever un dispositivo de generación de señales de sincronización con fluctuación de fase muy reducida, en el sentido definido anteriormente, particularmente para la sincronización de la activación de pulsos láser en un sistema de fusión termonuclear por confinamiento inercial.

**Exposición de la invención**

Con este fin, la invención se define mediante un dispositivo de generación de señales de sincronización con fluctuación de fase muy reducida según la reivindicación 1.

Ventajosamente, los elementos eléctricos pasivos son líneas coaxiales adaptadas.

**Breve descripción de los dibujos**

La invención se entenderá mejor mediante la descripción de realizaciones con ayuda de las siguientes figuras:

- la figura 1 ilustra un sistema de generación de señales de sincronización conocido del estado de la técnica;
- la figura 2 ilustra un sistema de generación de señales de sincronización conocido del estado de la técnica;
- la figura 3 ilustra un sistema de generación de señales de sincronización según una primera realización de la invención;
- la figura 4 ilustra un elemento eléctrico activo que permite generar un retardo de gran precisión.

**Exposición detallada de realizaciones particulares**

La idea en la base de la invención es librarse de las conversiones electro-óptica y opto-eléctrica perjudiciales en términos de fluctuación de fase. Para ello, se propone generar las señales de sincronización a partir de una señal eléctrica única o señal maestra, retardada a través de un conjunto de retardos distribuidos de manera arborescente, estando los retardos constituidos por elementos eléctricos pasivos.

La figura 2 ilustra dicho sistema. El generador 210 produce una señal eléctrica maestra de la que se obtendrán las señales de sincronización. Esta señal es, preferentemente, un pulso de gran amplitud pero también puede, por ejemplo, asumir la forma de un escalón ascendente. De manera general, bastará con que esta señal contenga un motivo susceptible, directa o indirectamente por medio de un tratamiento apropiado, lineal (por ejemplo derivación) o no lineal (por ejemplo umbralado), de definir de forma precisa un tiempo de referencia.

Esta señal eléctrica, después de la eventual amplificación, es retardada a continuación por una serie de retardos

$DL_1^1 ; DL_2^1, \dots, DL_2^{k_2} ; DL_3^1, \dots, DL_3^{k_3} ; \dots ; DL_N^1, \dots, DL_N^{k_N}$  organizados según un árbol cuyos nodos

están constituidos por divisores: la señal retardada por el retardo de primer rango  $DL_1^1$  es inyectada por medio del

divisor  $SP_1^1$  en  $k_2$  retardos de segundo rango  $DL_2^1, \dots, DL_2^{k_2}$ , estando las señales procedentes de estos retardos, a su vez, divididas y así sucesivamente. Las señales procedentes de los  $k_N$  retardos de último rango N, es decir,

$DL_N^1, \dots, DL_N^{k_N}$ , forman las diferentes vías de sincronización.

El árbol puede ser de orden 2 (cada nodo alimentando entonces a dos ramas), en cuyo caso los divisores pueden estar constituidos por acopladores 6 dB, o de orden superior. El número de ramas alimentadas por un nodo puede variar de un nodo a otro. Los divisores no presentan, necesariamente, una ganancia idéntica en los diferentes puertos de salida, esto para tener en cuenta, por ejemplo, los diferentes tamaños de los sub-árboles conectados a estos puertos, o para equilibrar las ganancias de las señales de sincronización.

Los retardos están constituidos por elementos eléctricos pasivos, es decir no alimentados por una fuente de energía eléctrica y que, por consiguiente, poseen características no dependientes de variaciones de tensión o de corriente de dicha fuente.

Los retardos pasivos estarán constituidos, por ejemplo, por líneas de propagación. Se puede demostrar matemáticamente de manera sencilla, utilizando la ley de los grandes números, que la fluctuación de fase a la salida de una línea de propagación presenta una distribución de probabilidad gaussiana. La varianza (fluctuación de fase RMS) será tanto más elevada cuanto más larga sea la línea de propagación, siendo la ley de variación teóricamente lineal.

El documento Hsue, E.W.: "Clock signal distribution network for high speed testers", Proceedings of the international test conference, Washington, IEEE, vol. 20, p. 199-207, 29.08.1989 divulga dicho circuito.

De manera preferente, los retardos pasivos se realizarán por medio de líneas coaxiales. Además de que las líneas coaxiales presentan una buena inmunidad contra el ruido y la diafonía, éstas poseen la notable propiedad de no generar fluctuación de fase y esto incluso en longitudes importantes. Como ejemplo, una línea coaxial de 200 m posee una fluctuación de fase no detectable por los aparatos de medición actuales y, por consiguiente, muy inferior a 5 ps.

Las líneas coaxiales están ventajosamente adaptadas, por ejemplo, a una impedancia característica de 50 Ω.

Sin embargo, es difícil realizar retardos con un alto grado de resolución por medio de líneas coaxiales. En la práctica, puede obtenerse una resolución con una longitud de 5 mm a 10 mm, es decir una resolución temporal del orden de 25 ps. De manera más general, la realización de retardos pasivos que presenten una resolución temporal elevada ha demostrado ser delicada.

Según una primera realización de la invención, la resolución de los retardos aumenta al precio de una ligera pérdida de rendimiento en términos de fluctuación de fase relativa. Para ello, el sistema de sincronización comprende, además de un árbol de retardos pasivos, ventajosamente realizados mediante líneas coaxiales, un segundo tipo de retardos, regulables, ventajosamente colocados en las ramas extremas, es decir las ramas que terminan en un extremo del árbol.

La figura 3 ilustra la primera realización en la que los elementos idénticos a los de la figura 2 se indican de manera idéntica. Los retardos de segundo tipo, denominados  $RDL_N^1, \dots, RDL_N^{k_N}$  están presentes en las ramas extremas, en serie con los retardos de primer tipo  $DL_N^1, \dots, DL_N^{k_N}$ . La señal maestra generada por el generador 310 es retardada en el árbol de retardos del primer tipo y, a continuación, por los retardos regulables  $RDL_N^1, \dots, RDL_N^{k_N}$ .

Los retardos  $RDL_N^1, \dots, RDL_N^{k_N}$  son susceptibles de ajuste fino, con una resolución más fina que la de obtención de los retardos del primer tipo. Un ejemplo de retardo de segundo tipo según la invención se ilustra esquemáticamente en la figura 4. Éste está constituido por un circuito electrónico activo que comprende un detector de pulsos 400, un generador de rampa de tensión de alta precisión 410, un comparador de tensión 420 y un generador de pulsos 430. Cuando un pulso entrante es detectado por el detector de pulsos 400, una primera señal de activación es transmitida al generador de rampa. La tensión a la salida de este último se compara con una tensión umbral  $V_{th}$  por medio del comparador 420. El comparador puede estar realizado a partir de un amplificador operacional, un espejo de corriente o cualquier sistema análogo bien conocido por el experto en la materia. Cuando la tensión de rampa alcanza la tensión umbral, una segunda señal de activación es transmitida al generador de pulsos 430. El generador de rampa puede estar constituido por un integrador de pendiente muy reducida. El ajuste se realiza, por ejemplo, modificando la tensión umbral. Este tipo de dispositivo permite alcanzar una resolución de retardo del orden de 2 a 3 ps.

Supongamos ahora que se desea realizar un retardo de valor dado  $\Delta T$  y que se dispone de un conjunto de N retardos del primer tipo, es decir N valores discretos crecientes  $\Delta t_0, \Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_{N-1}$ . Se seleccionará ventajosamente una serie geométrica de razón 2, a saber  $\Delta t_{N-1} = 2\Delta t_{N-2} = \dots = 2\Delta t_1 = 2\Delta t_0$ . Para  $\Delta t \leq (2^N - 1) \Delta t_0$  será posible entonces encontrar valores binarios  $a_0, a_1, \dots, a_{N-1}$  tales que  $a_0\Delta t_0 + a_1\Delta t_1 + \dots + a_{N-1}\Delta t_{N-1}$  aproxima  $\Delta T$  lo mejor posible a

aproximadamente  $\Delta t_0/2$ . El retardo  $\Delta T$  se realizará mediante la puesta en serie de los retardos discretos  $\Delta t_i$  para los cuales  $a_i = 1$ .

5 Utilizando un retardo con ajuste fino y de desviación reducida (sin embargo, superior o igual a  $\Delta t_0/2$ ), en serie con dichos retardos discretos, es posible entonces aproximar  $\Delta T$  a  $\delta t$  aproximadamente, donde  $\delta t$  es la resolución de retardo  $\delta t \ll \Delta t_0/2$ .

10 La inserción de estos retardos se realiza, no obstante, al precio de un aumento de fluctuación de fase relativa. En efecto, siendo dos señales de sincronización  $S_p, S_q$  su fluctuación de fase relativa se escribe, por supuesto:  $g_{pq} + r_{pq}$  donde  $g_{pq}$  es la fluctuación de fase relativa introducida por los retardos del primer tipo y  $r_{pq}$  es la fluctuación de fase relativa introducida por los retardos del segundo tipo. Siendo  $g_{pq}$  y  $r_{pq}$  variables aleatorias independientes, si se indica  $\gamma_{pq}$  y  $\rho_{pq}$  sus densidades de probabilidad respectivas,  $g_{pq} + r_{pq}$  posee una densidad de probabilidad  $\gamma_{pq} \otimes \rho_{pq}$  y, por lo tanto, de varianza más elevada que la varianza  $\sigma_{pq}$  de  $g_{pq}$ .

15 Si se desea disponer de un ajuste independiente de las señales de sincronización, los retardos del segundo tipo solamente estarán colocados en las ramas extremas, es decir en las ramas conectadas a los extremos del árbol. La adición de un retardo del segundo tipo, no compartido por todas las vías de sincronización, añadiría una fluctuación de fase suplementaria a la ya mencionada. Por el contrario, si basta con un ajuste común a una pluralidad de señales de sincronización, un retardo de segundo tipo regulable se colocará en la raíz del sub-árbol más pequeño que las suministra.

20

Es conveniente observar que las variaciones de retardos debidas a las variaciones de temperatura pueden compensarse automáticamente por medio de uno o varios retardos de segundo tipo, controlados por uno o varios sensores de temperatura. Esta compensación será tanto más fácil en cuanto la variación de retardo inducida por la variación de temperatura de una línea coaxial sea esencialmente determinista.

25

Las señales de sincronización con fluctuación de fase reducida generadas por el sistema según la invención pueden utilizarse para la activación de pulsos láser o servir de referencia temporal (marcador temporal) para aparatos de medición. De manera más general, el sistema de sincronización según la invención permite distribuir una información temporal precisa a sistemas remotos al tiempo que es particularmente robusta. A este respecto, la presente invención es aplicable también a la sincronización de sistemas sincrónicos distribuidos, particularmente en las redes de telecomunicaciones.

30

El sistema descrito puede hacerse cargo de la totalidad de la función de sincronización o integrarse en un sistema de sincronización ya existente.

35

**REIVINDICACIONES**

1. Dispositivo de generación de señales de sincronización con fluctuación de fase muy reducida, particularmente para la sincronización de la activación de pulsos láser en un sistema de fusión termonuclear de confinamiento inercial, que comprende:
- 5
- un generador (310) de señal eléctrica maestra,
  - una pluralidad de primeros retardos (DL) realizados en forma de elementos eléctricos pasivos, estando dichos primeros retardos organizados según una estructura de árbol, comprendiendo los nodos de dicho árbol divisores de señal, estando dicho árbol alimentado en su raíz por la señal eléctrica maestra y suministrando en sus extremos dichas señales de sincronización,
- 10
- caracterizado porque comprende además:
- 15
- segundos retardos regulables (RDL), realizados en forma de elementos eléctricos activos, estando dichos segundos retardos dispuestos en serie con dichos primeros retardos y presentando una resolución temporal más fina que la resolución temporal de estos;
- 20
- comprendiendo cada circuito activo (RDL) un detector de pulsos (400), un generador de rampa de tensión (410), un comparador de tensión (420) con respecto a una tensión umbral ( $V_{th}$ ) y un generador de pulsos (430), dispuestos en serie.
- 25
2. Dispositivo según la reivindicación 1, caracterizado porque los elementos eléctricos pasivos (DL) son líneas coaxiales adaptadas.
3. Dispositivo según la reivindicación 1 ó 2, caracterizado porque los valores de dichos primeros retardos (DL) pertenecen a una serie geométrica de razón 2.
- 30
4. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dichos segundos retardos (RDL) están colocados en las ramas extremas del árbol.

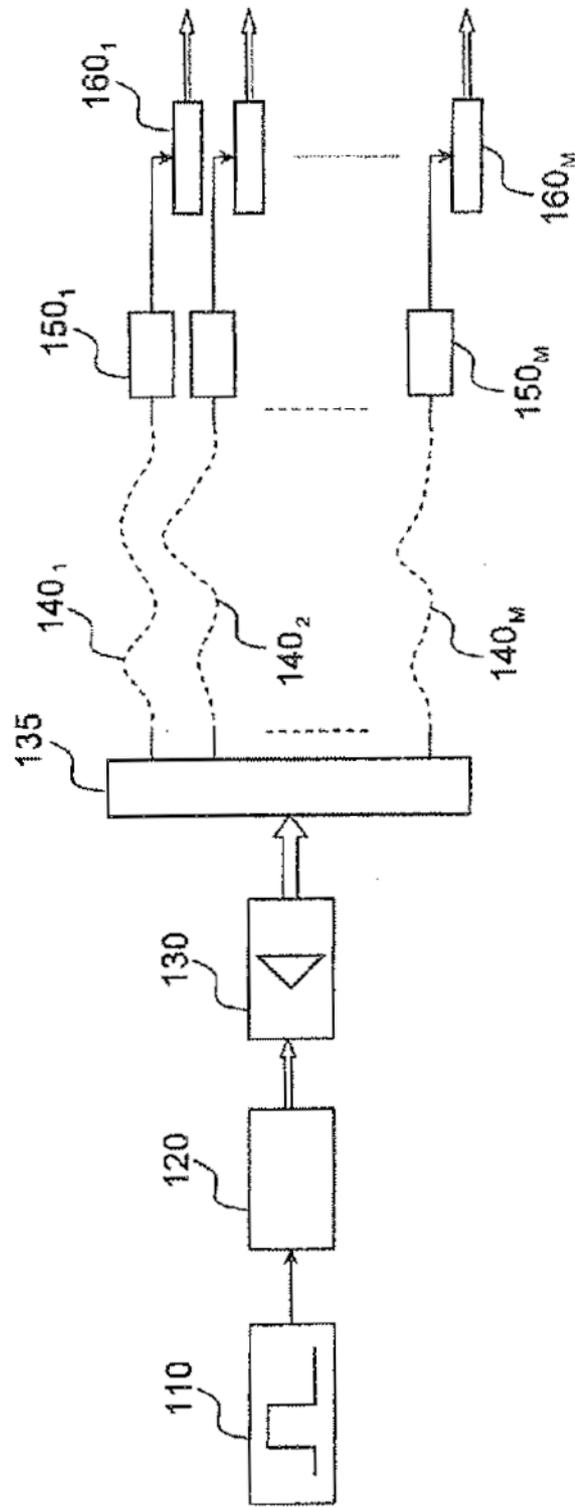


FIG. 1





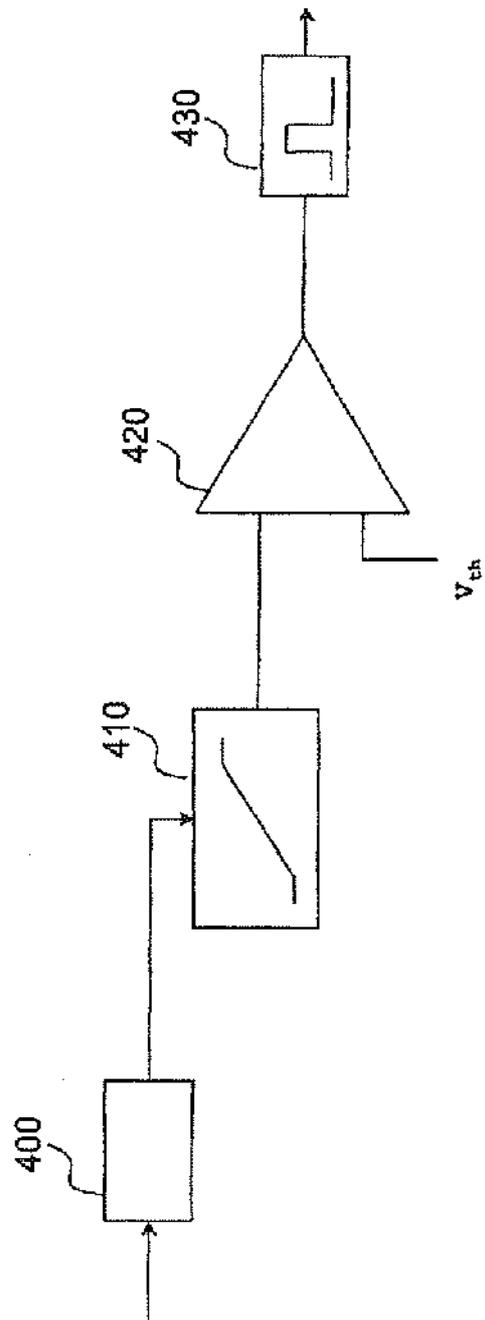


FIG. 4