



①9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

①1 Número de publicación: **2 318 237**

⑤1 Int. Cl.:
G01J 11/00 (2006.01)
G01J 1/42 (2006.01)

①2

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑨6 Número de solicitud europea: **04078460 .5**
⑨6 Fecha de presentación : **20.12.2004**
⑨7 Número de publicación de la solicitud: **1591762**
⑨7 Fecha de publicación de la solicitud: **02.11.2005**

⑤4 Título: **Sistema y procedimiento para medir y controlar la energía de un pulso ultracorto de un haz de láser.**

③0 Prioridad: **29.04.2004 US 835088**

④5 Fecha de publicación de la mención BOPI:
01.05.2009

④5 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
01.05.2009

⑦3 Titular/es:
20/10 Perfect Vision Optische Geräte GmbH
Am Taubenfeld 21/1
69123 Heidelberg, DE

⑦2 Inventor/es: **Schuhmacher, Michael y**
Schiller, Markus

⑦4 Agente: **Roeb Díaz-Álvarez, María**

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

Sistema y procedimiento para medir y controlar la energía de un pulso ultracorto de un haz de láser.

5 **Campo de la invención**

La presente invención pertenece, en general, a sistemas para medir la energía de un haz de láser. Más en particular, la presente invención pertenece a sistemas para medir la energía de un pulso ultracorto de un haz de láser, donde el haz de láser comprende una pluralidad de pulsos ultracortos. La presente invención es particularmente, pero no
10 exclusivamente, útil como un sistema y un procedimiento para medir una parte predeterminada de la energía de un pulso ultracorto de un haz de láser, para controlar la energía del haz para la cirugía refractiva por láser.

Antecedentes de la invención

En muchas de las aplicaciones actuales de los láseres de pulsos ultrarrápidos (es decir, frecuencias de repetición en el intervalo de 1 a 100 kHz) y ultracortos, es necesario o deseable medir, y en algunos casos controlar, la energía del haz de láser que incide sobre un cuerpo de destino. Por ejemplo, en la cirugía refractiva por láser, la interacción “láser-tejido” dentro de la córnea del ojo puede depender en gran medida de la energía. Por lo tanto, es preferible poder medir la energía del haz de láser antes de que el haz salga del sistema láser quirúrgico y entre en el ojo. Muchos de los medios actuales para medir la energía de haces de láser pulsados se basan en principios piroeléctricos o térmicos. Desafortunadamente, estos procedimientos no pueden medir con precisión la energía de un único pulso de láser ultracorto de un haz de láser de femtosegundo, es decir, un haz con duraciones de pulso en el intervalo de 1 fs a 100 ps aproximadamente y con frecuencias de repetición de pulso de varios kilohercios. Por tanto, se necesita un procedimiento alternativo para medir la energía de un pulso de láser ultrarrápido y ultracorto.

Una posibilidad para medir la energía de un pulso de láser ultrarrápido y ultracorto es definir la función de medición en términos de un circuito eléctrico equivalente. Usando este enfoque, sería posible integrar en el tiempo una tensión de salida del circuito para proporcionar un valor proporcional a la energía láser de entrada. Considerando este enfoque en mayor detalle, puede usarse un fotodiodo para detectar los pulsos individuales de un haz de láser. Cuando se detecta luz correspondiente a la longitud de onda operativa del fotodiodo, el fotodiodo absorbe la luz y los portadores de carga se separan dentro del fotodiodo. Generalmente se sabe que la cantidad de portadores de carga separados, que es realmente la carga, es directamente proporcional a la energía del pulso de láser incidente. Si ambos extremos del fotodiodo están conectados eléctricamente, los portadores de carga separados se igualarán y generarán una corriente. En particular, la integral en el tiempo de esta corriente es proporcional a la cantidad de portadores de carga separados. Por lo tanto, se obtiene que la integral de una tensión generada por la corriente también es proporcional a la cantidad de portadores de carga separados. Es importante señalar que el valor de esta integral es el valor de salida y es proporcional a la energía del pulso de láser incidente. Con respecto a la integración de la tensión mencionada anteriormente, se usa un integrador analógico rápido para calcular la integral. El proceso de integración puede iniciarse antes, durante o justo después de que el pulso de láser llegue al fotodiodo.

Existen varias ventajas en la utilización de un circuito de fotodiodo para definir y cuantificar la energía de pulsos en términos de la integral de la tensión. Sin embargo, debería observarse que muchos fotodiodos comprenden detectores de valores de “pico”. Desafortunadamente, este tipo de detector no puede medir pulsos ultracortos a frecuencias de repetición muy altas. No obstante, con determinados fotodiodos muy conocidos en la técnica pertinente, sería posible medir la energía de un único pulso ultracorto. En este contexto, la medición es realmente la integración de la respuesta de impulsos del fotodiodo. Una ventaja de integrar la respuesta de impulsos es que la medición no depende de la duración de pulso o del número de pulsos. Una ventaja adicional es que las fluctuaciones de la capacidad del fotodiodo no afectan a la medición final. Además, pueden conseguirse mediciones de energía pulso a pulso a altas frecuencias de repetición.

Además de cuantificar la energía de un pulso de láser, los datos de energía medidos también pueden usarse como retroalimentación en un bucle de control para controlar la energía del haz de láser. Con respecto a las aplicaciones médicas, tales como la cirugía refractiva por láser, tanto la eficacia del sistema como la seguridad del paciente hacen necesario tal control positivo.

A partir del documento US-A-5275594 se obtiene un sistema para medir energía en un pulso ultracorto de un haz de láser, que comprende un medio para dirigir el haz de láser a lo largo de una trayectoria de haz, un medio para convertir una parte de la energía del pulso en una corriente eléctrica, un medio para amplificar el pulso de tensión resultante, un medio para integrar el pulso de tensión amplificado a lo largo de un periodo de tiempo especificado con el fin de obtener una señal que sea una medida de la energía de un pulso y un circuito de sincronización láser para iniciar el proceso de integración.

El documento US-A-5225884 muestra un aparato para medir energía en un pulso ultracorto de un haz de láser que comprende una fuente láser para dirigir un haz de láser a lo largo de una trayectoria de haz, un fotodiodo para recibir una parte predeterminada de la energía de cada pulso, un amplificador para amplificar el pulso de tensión y un integrador para integrar el pulso de tensión amplificado a lo largo de un periodo de tiempo especificado.

El documento DE-A-40 29 530 también muestra un aparato para medir energía en un pulso ultracorto de un haz de láser que comprende una fuente láser y un fotodiodo para recibir una parte predeterminada de la energía de cada pulso ultracorto del haz de láser para generar una corriente con la misma, donde la corriente produce un pulso de tensión indicativo de la energía en un único pulso de láser.

Además, el documento US-A-2003/0043445 muestra un sistema de control de polarización y un estado de detectores de polarización.

En vista de lo anterior, es un objeto de la presente invención proporcionar un sistema y un procedimiento para medir la energía de un haz de láser. Otro objeto de la presente invención es proporcionar un sistema y un procedimiento para medir la energía de un único pulso ultrarrápido y ultracorto de un haz de láser, donde el haz de láser comprende una pluralidad de pulsos a frecuencias de repetición muy altas, en el intervalo de 1 a 100 kHz. Todavía otro objeto de la presente invención es proporcionar un sistema y un procedimiento para medir la energía de un pulso ultrarrápido y ultracorto de un haz de láser para controlar la energía láser que incide sobre un cuerpo de destino. Todavía otro objeto de la presente invención es proporcionar un sistema y un procedimiento para medir la energía de un pulso ultrarrápido y ultracorto de un haz de láser que sean fáciles de usar, relativamente sencillos de fabricar y relativamente económicos.

Resumen de la invención

Un sistema para medir y controlar la energía en un pulso ultracorto de un haz de láser según la reivindicación 1, en el que el haz de láser comprende una pluralidad de pulsos, incluye una fuente láser para dirigir el haz de láser a lo largo de una trayectoria de haz. Un procedimiento inventivo relacionado se obtiene a partir de la reivindicación 5. Preferentemente, el haz de láser es un haz de láser de femtosegundo que tiene pulsos con duraciones del orden de 1 femtosegundo a 100 picosegundos. Adicionalmente, el sistema de la presente invención incluye un subconjunto para reflejar selectivamente una parte de la energía del haz de láser, transmitiendo a la vez el resto del haz de láser a lo largo de la trayectoria de haz. Más específicamente, el subconjunto incluye una placa de media onda giratoria y un divisor de haz de polarización. La placa de media onda giratoria está situada en la trayectoria de haz para establecer una orientación de la polarización lineal del haz de láser. Además, el divisor de haz de polarización está alineado de manera óptica con la placa de media onda para reflejar una parte predeterminada de la energía y para transmitir el resto del haz de láser a lo largo de la trayectoria de haz.

Tal y como se contempla mediante la presente invención, un medidor de energía láser (LEM, *laser energy meter*) está colocado para recibir la parte predeterminada del haz de láser que refleja el divisor de haz de polarización. De manera estructural, el LEM incluye un fotodiodo para recibir la energía de cada pulso ultracorto y para absorber la energía para generar una corriente. Preferentemente, un filtro óptico está integrado en el LEM para controlar la energía que incide sobre el fotodiodo. Además, el LEM incluye una resistencia para aplicar la corriente para generar un pulso de tensión, y un amplificador para amplificar el pulso de tensión. Adicionalmente, un integrador está en comunicación electrónica con el amplificador para recibir e integrar el pulso de tensión amplificado a lo largo de un periodo de tiempo especificado, para obtener una señal de salida. Además del LEM, el sistema de la presente invención incluye un comparador para comparar la señal de salida del LEM con una señal de referencia conocida, para generar una señal de error. Además, el comparador está en comunicación electrónica con la placa de media onda para transmitir la señal de error a la placa de media onda. La señal de error se usa después para hacer girar la placa de media onda y para conseguir de ese modo el nivel de energía láser deseado cuando la señal de error es nula.

Además del subconjunto y del LEM descritos anteriormente, el sistema también puede incluir un divisor de haz de proporción fija situado en la trayectoria de haz aguas abajo del divisor de haz de polarización. Más en particular, el divisor de haz de proporción fija está colocado para extraer una parte fija de energía de cada pulso ultracorto del resto del haz de láser. Además, un LEM de "verificación" puede estar alineado de manera óptica con el divisor de haz de proporción fija para medir la parte fija de la energía extraída por el divisor de haz de proporción fija. Para los fines de la presente invención, el LEM de verificación tiene la misma estructura que el LEM descrito anteriormente. Además, el comparador está en comunicación electrónica con el LEM de verificación para recibir y procesar la señal de salida del resto generada por el LEM de verificación.

Durante el funcionamiento de la presente invención, la fuente láser genera un haz de láser polarizado de manera lineal que tiene un vector de campo E que define la orientación de la polarización del haz. Inicialmente, la placa de media onda gira sobre su eje de rotación para colocar el eje principal de la placa en un ángulo " θ " con respecto al vector de campo E. Cuando el haz de láser pasa por la placa de media onda, se establece una nueva orientación de la polarización del haz de láser. Específicamente, cuando el haz de láser pasa por la placa de media onda, el vector de campo E gira en un ángulo de " 2θ ". Después de pasar por la placa de media onda, el haz de láser se dirige hacia el divisor de haz de polarización. En el divisor de haz de polarización, el haz se divide en dos polarizaciones ortogonales. Más específicamente, el divisor de haz de polarización refleja una primera polarización, es decir, el divisor de haz refleja una parte predeterminada de la energía de cada pulso de láser ultracorto. Además, la segunda polarización, que es el resto del haz de láser, se transmite a lo largo de la trayectoria de haz.

Tal y como se prevé mediante la presente invención, la parte predeterminada de la energía de cada pulso, reflejada por el divisor de haz de polarización, se absorbe por el fotodiodo del LEM. En el LEM, el fotodiodo genera una corriente en la resistencia, lo que provoca un pulso de tensión en la entrada del amplificador. El pulso de tensión se amplifica en el amplificador y se transmite posteriormente al integrador, en el que el pulso de tensión se integra a lo

largo de un periodo de tiempo especificado. Por consiguiente, el integrador genera una señal de salida. Como puede apreciarse, la señal de salida es una medida de la cantidad de carga producida en el fotodiodo. A su vez, la cantidad de carga es una medida de la energía reflejada por el divisor de haz de polarización y absorbida por el fotodiodo.

- 5 Al final del proceso de integración, la señal de salida se transmite electrónicamente al comparador. En una realización de la presente invención, la señal de salida se compara con una señal de referencia conocida representativa de la energía láser requerida en el cuerpo de destino. A partir de esta comparación de las señales de salida y de referencia, se genera una señal de error. Esta señal de error se transmite después a la placa de media onda y se usa para hacer girar la placa de media onda. La rotación de la placa estabiliza una nueva orientación de la polarización del haz de láser.
- 10 Tal y como pueden apreciar los expertos en la materia, establecer una nueva orientación para la polarización del haz de láser modifica la cantidad de energía que refleja el divisor de haz de polarización. Es importante señalar que este cambio en la cantidad de energía reflejada es proporcional a un cambio en la energía del resto del haz de láser que se transmite a lo largo de la trayectoria de haz.
- 15 Con respecto al resto del haz de láser, el divisor de haz de proporción fija está situado en la trayectoria de haz para recibir el resto del haz de láser. Cuando el resto del haz de láser pasa a través del divisor de haz de proporción fija se extrae una parte fija de la energía de cada pulso ultracorto del haz de láser. Al mismo tiempo, la parte restante del haz se transmite hacia el cuerpo de destino. Preferentemente, el porcentaje de energía extraída está en el intervalo de un uno hasta un cinco por ciento (1 al 5%) de la energía total del resto del haz. Además, la parte extraída del haz
- 20 de láser se refleja hacia el LEM de verificación. En el LEM de verificación, la energía se absorbe y se genera una señal de salida del resto. Debe entenderse que la señal de salida del resto es una medida de la corriente producida en el fotodiodo del LEM de verificación. A su vez, la corriente producida es una medida de la energía extraída de cada pulso del resto del haz de láser.
- 25 Una vez que haya finalizado el proceso de integración en el LEM de verificación, el comparador recibe la señal de salida del resto y compara la señal de salida del resto con una señal de referencia conocida. Se genera entonces una señal de verificación. En la realización preferida de la presente invención, la señal de verificación se transmite directamente a la placa de media onda en lugar de la señal de error. En la placa de media onda, la señal de verificación se usa para hacer girar la placa según sea necesario para establecer una nueva orientación de la polarización del
- 30 haz. En una realización alternativa, la señal de verificación se compara con la señal de error descrita anteriormente. Cualquier variación entre la señal de verificación y la señal de error se resuelve por el comparador, y una nueva señal de verificación se transmite a la placa de media onda. Según sea necesario, la placa de media onda gira para establecer una nueva orientación de la polarización del haz de láser. Tal y como se ha expuesto anteriormente, un cambio en la orientación de la polarización del haz de láser da como resultado un cambio en la energía transmitida hacia el cuerpo
- 35 de destino en el resto del haz de láser.

Breve descripción de los dibujos

- 40 Las características novedosas de esta invención, así como la propia invención, tanto su estructura como su funcionamiento, se entenderán mejor a partir de los dibujos adjuntos, tomados junto con la siguiente descripción, en los que los mismos caracteres de referencia se refieren a las mismas partes, y en los que:

la fig. 1 es una vista esquemática de un sistema para medir y controlar la energía de un pulso ultracorto de un haz de láser, según la presente invención;

45 la fig. 2 es una vista esquemática de un medidor de energía láser para medir una parte predeterminada de la energía de un pulso ultracorto de un haz de láser;

la fig. 3 es una vista en perspectiva de un subconjunto de la presente invención, que incluye una placa de media onda para estabilizar una orientación de la polarización del haz de láser y un divisor de haz de polarización para reflejar una parte del haz hacia un medidor de energía láser transmitiendo a la vez el resto del haz a lo largo de la trayectoria de haz;

55 la fig. 4 es una vista esquemática de un bucle de control para controlar la energía de un haz de láser; y

la fig. 5 es una vista en perspectiva de un divisor de haz de proporción fija para dividir el resto del haz de láser en dos componentes y para reflejar un componente hacia un medidor de energía láser transmitiendo a la vez el segundo componente hacia el cuerpo de destino;

60 Descripción de las realizaciones preferidas

- Un sistema para medir y controlar la energía de un pulso ultracorto en un haz de láser, según la presente invención, se muestra en la fig. 1 y está designado generalmente como 10. Tal como se muestra, el sistema 10 incluye una fuente 12 láser para dirigir un haz 14 de láser hacia un cuerpo 16 de destino. Preferentemente, la fuente 12 láser es una fuente
- 65 12 de láser de femtosegundo. Más específicamente, la duración de pulso de un único pulso del haz 14 de láser está en el intervalo de 1 femtosegundo a 100 picosegundos, aproximadamente. Como puede apreciarse, el haz 14 de láser comprende una pluralidad de pulsos ultracortos, en la que cada pulso ultracorto tiene una energía. Además, el haz 14 de láser tiene un haz 14 polarizado de manera lineal. Además de la fuente 12 láser, el sistema 10 de la presente

invención incluye una placa 18 de media onda giratoria. Específicamente, la placa 18 de media onda es de un tipo ampliamente conocido en la técnica pertinente para establecer una orientación de la polarización del haz 14 de láser. Tal como se muestra, la placa 18 de media onda está situada en la trayectoria 20 de haz con un eje 22 de rotación que está orientado en paralelo a la trayectoria 20 de haz. Haciendo todavía referencia a la fig. 1, un divisor 24 de haz de polarización está situado secuencialmente en la trayectoria 20 de haz después de la placa 18 de media onda. Más en particular, el divisor 24 de haz de polarización está alineado de manera óptica con la placa 18 de media onda para reflejar una parte 26 predeterminada de la energía de cada pulso ultracorto del haz 14 de láser. Adicionalmente, el divisor 24 de haz transmite el resto 28 del haz 14 de láser a lo largo de la trayectoria 20 de haz hacia el cuerpo 16 de destino. Tal como se muestra adicionalmente en la fig. 1, un medidor 30 de energía de láser (LEM) está alineado de manera óptica con el divisor 24 de haz de polarización para recibir y medir la parte 26 predeterminada de la energía de cada pulso.

Haciendo referencia por un instante a la fig. 2, se muestra en mayor detalle el LEM 30 de la presente invención. Tal como se muestra, el LEM 30 incluye un fotodiodo 32 para recibir la parte 26 predeterminada de la energía y para generar una corriente. Preferentemente, el LEM 30 también incluye un filtro 33 óptico para controlar la energía que incide sobre el fotodiodo 32. Como resultado de poder controlar la energía incidente, el sistema 10 de la presente invención puede incluir cualquier número de fuentes 12 láser que generen haces 14 de láser que tengan diferentes energías. Además, una resistencia 34 está colocada para recibir la corriente y para producir de ese modo un pulso de tensión. Además, un amplificador 36 está colocado para recibir y amplificar el pulso de tensión. Tal como se muestra en la fig. 2, un integrador 38 está en comunicación electrónica con el amplificador 36 para integrar el pulso de tensión amplificado a lo largo de un periodo de tiempo especificado para obtener una señal de salida analógica. Preferentemente, el LEM 30 incluye un conversor 40 A/D para convertir la señal de salida analógica en una señal digital. El LEM 30 también incluye un dispositivo 42 lógico programable complejo (CPLD, *complex programmable logic device*) para controlar la sincronización del LEM 30. Tal como se muestra adicionalmente en la fig. 2, el CPLD 42 está en comunicación electrónica tanto con el integrador 38 como con el conversor 40 A/D. Además, el LEM 30 incluye un puerto 44 de conexión y un puerto 46 de conexión, en el que el puerto 44 de conexión es un puerto de interfaz COM digital. Tal y como se contempla mediante la presente invención, un circuito 48 de sincronización láser, para controlar la activación del LEM 30 primario y para iniciar el proceso de integración, está conectado al puerto 46 de conexión a través de un cable 50 eléctrico.

Volviendo a la fig. 1, un divisor 52 de haz de proporción fija está situado en la trayectoria 20 de haz. Más específicamente, el divisor 52 de haz de proporción fija está situado secuencialmente en la trayectoria 20 de haz después del divisor 24 de haz de polarización. Debe observarse que un conjunto 56 óptico (mostrado en líneas discontinuas), que aloja los dispositivos ópticos necesarios para enfocar el haz 14 de láser hacia un punto focal, está situado entre el divisor 24 de haz de polarización y el divisor 52 de haz de proporción fija. Además, un LEM 58 de verificación está alineado de manera óptica con el divisor 52 de haz de proporción fija para recibir y medir la parte 54 fija de energía extraída por el divisor 52 de haz de proporción fija. Tal y como se prevé mediante la presente invención, el LEM 58 de verificación tiene la misma estructura y funcionalidad que el LEM 30. Además, un comparador 60 está en comunicación electrónica con el LEM 30 y con el LEM 58, a través de los cables 62 y 64 eléctricos, respectivamente. Adicionalmente, el comparador 60 está en comunicación electrónica con la placa 18 de media onda a través del cable 66 eléctrico.

Durante el funcionamiento de la presente invención, la fuente 12 láser genera un haz 14 de láser que se transmite a lo largo de la trayectoria 20 de haz hacia la placa 18 de media onda. Tal como se muestra en la fig. 3, el haz 14 de láser está representado como un haz 14 polarizado de manera lineal. Más específicamente, el haz 14 de láser tiene un vector 68 E que está en un plano 70 que es perpendicular a la trayectoria 20 de haz. En este contexto, debe entenderse que el vector 68 E define la orientación de la polarización del haz 14. Haciendo aún referencia a la fig. 3, puede observarse que cuando la placa 18 de media onda gira, la orientación de la polarización del haz 14 también cambia. Más en particular, cuando la placa 18 de media onda gira alrededor del eje 22 de rotación en un ángulo " θ ", el vector 68 E gira posteriormente en un ángulo de " 2θ ". Dicho de otro modo, cuando el haz 14 de láser pasa por la placa 18 de media onda, la orientación de la polarización del haz 14 se modifica en " 2θ ".

Después de pasar por la placa 18 de media onda, el haz 14 de láser entra en el divisor 24 de haz de polarización. Tal como se muestra adicionalmente en la fig. 3, el divisor 24 de haz de polarización refleja una parte 26 predeterminada de la energía del haz 14 hacia el LEM 30. Además, el resto 28 predeterminado del haz 14 se transmite a lo largo de la trayectoria 20 de haz. Es importante señalar que la proporción de energía reflejada con respecto a la energía transmitida es una proporción conocida que depende de la orientación de la polarización del haz 14. Tal y como se ha expuesto anteriormente, la placa 18 de media onda se usa para establecer la orientación de la polarización del haz 14 de láser. Por lo tanto, los expertos en la materia pueden apreciar que la placa 18 de media onda se usa para controlar la cantidad de energía transmitida hacia el cuerpo 16 de destino en el resto 28 del haz 14 de láser.

Haciendo una referencia cruzada por un instante de la fig. 2 con la fig. 3, puede observarse que la parte 26 predeterminada de la energía reflejada por el divisor 24 de haz de polarización, se dirige hacia el LEM 30. Cuando la parte 26 predeterminada de la energía se acerca al LEM 30, el circuito 48 de sincronización láser activa el LEM 30. Específicamente, el circuito 48 de sincronización láser transmite una señal de mando al CPLD 42, a través del puerto 46 de conexión, para iniciar el funcionamiento del LEM 30. Una vez que el LEM 30 esté activo, el fotodiodo 32 absorbe la parte 26 predeterminada de la energía de cada pulso ultracorto transmitido a través del filtro 33 óptico. La absorción de la energía de pulso produce portadores de carga separados en el fotodiodo 32, lo que provoca una corriente en

la resistencia 34. A su vez, la corriente se usa para generar un pulso de tensión que se transmite al amplificador 36. En el amplificador 36, el pulso de tensión se amplifica y se transmite posteriormente al integrador 38. Tal y como se prevé mediante la presente invención, el integrador 38 integra el pulso de tensión a lo largo de un periodo de tiempo especificado para obtener una señal 72 de salida (fig. 4). Puede apreciarse que la señal 72 de salida es proporcional a la cantidad de carga producida en el fotodiodo 32. A su vez, la cantidad de carga es una medida de la parte 26 predeterminada de la energía de cada pulso ultracorto reflejada por el divisor 24 de haz de polarización. Por lo tanto, resulta que sabiendo la proporción de energía reflejada con respecto a la energía transmitida por el divisor 24 de haz de polarización, es posible cuantificar la cantidad de energía en el resto 28 del haz 14.

Haciendo todavía referencia a la fig. 2, la señal 72 de salida (fig. 4) del integrador 38 se transmite a través del conversor 40 A/D, donde la señal 72 de salida se convierte de una señal analógica a una señal digital. Además, la señal digital se transmite a través del CPLD 42 y del puerto 44 de conexión al comparador 60. Después de recibir la señal 72 de salida, el comparador 60 compara la señal 72 de salida con una señal de referencia conocida para obtener una señal 74 de error (fig. 4).

Es importante señalar que, en una realización de la presente invención, la señal 74 de error puede usarse en el control de la energía del haz 14 de láser. Haciendo referencia ahora a la fig. 4, se presenta un vista esquemática de un bucle 76 de control de la presente invención. Tal como se muestra, el comparador 60 recibe datos de entrada en la forma de un punto de ajuste (SP, *set point*), que es una señal de referencia conocida. Además, el comparador 60 recibe la señal 72 de salida del LEM 30. A partir de estas entradas, el comparador 60 calcula una señal 74 de error que se transmite a la placa 18 de media onda giratoria. Tal como puede apreciarse haciendo referencia a la fig. 3, la señal 74 de error se usa para hacer girar la placa 18 de media onda en un ángulo " $\Delta\theta$ ". Tal y como se ha expuesto anteriormente, la rotación de la placa 18 de media onda, con respecto a la orientación del vector 68 E, establece una nueva orientación de la polarización del haz 14 de láser. Específicamente, haciendo girar adicionalmente la placa 18 de media onda en un ángulo " $\Delta\theta$ ", el vector 68 E gira adicionalmente en un ángulo " $2\Delta\theta$ ", tal como se muestra en la fig. 3. Un cambio en la orientación del vector 68 E da como resultado un nuevo resto 28 del haz 14 de láser que está transmitiéndose hacia el cuerpo 16 de destino. Es importante señalar que el control de la energía del haz 14 de láser puede ser un proceso iterativo mediante el cual una señal 72 actualizada del LEM 30 se transmite periódicamente al comparador 60 para usarse en el cálculo de una nueva señal 74 de error.

Haciendo de nuevo referencia a la fig. 1, el resto 28 del haz 14 de láser se transmite a lo largo de la trayectoria 20 de haz. Más específicamente, el resto 28 pasa a través del conjunto 56 óptico, en el que el resto 28 del haz 14 de láser se enfoca hacia un punto 57 focal en el cuerpo 16 de destino. Después de pasar por el conjunto 56 óptico, el resto 28 del haz 14 de láser entra en el divisor 52 de haz de proporción fija. Haciendo a continuación una referencia cruzada de la fig. 1 y la fig. 5, puede observarse que una parte 54 fija de la energía de cada pulso ultracorto del resto 28 se extrae por el divisor 52 de haz de proporción fija. La energía 78 restante se transmite hacia el cuerpo 16 de destino. Preferentemente, la parte 54 fija de la energía representa un intervalo de un uno al cinco por ciento (1 al 5%) de la energía total del resto 28 del haz 14 de láser. Tal como se muestra tanto en la fig. 1 como en la fig. 5, la parte 54 fija de la energía entra en el LEM 58 de verificación, en donde se genera una señal 80 de salida del resto (fig. 4). Siguiendo el funcionamiento del LEM 58 de verificación, la señal 80 de salida del resto se transmite al comparador 60 a través del cable 64 eléctrico.

En el comparador 60, la señal 80 de salida del resto se compara con la señal de referencia conocida para generar una señal 81 de verificación. En la realización preferida de la presente invención, la señal 81 de verificación se transmite directamente a la placa 18 de media onda, en lugar de la señal 74 de error, para hacer girar la placa 18 y establecer una nueva orientación de la polarización del haz 14 de láser. En una realización alternativa, la señal 81 de verificación se compara con la señal 74 de error del LEM 30. Cualquier variación entre la señal 74 de error y la señal 81 de verificación se resuelve por el comparador 60, y la señal 81 de verificación vuelve a calcularse según sea necesario. Posteriormente, la señal 81 de verificación se transmite a la placa 18 de media onda para hacer girar la placa 18 y establecer una nueva orientación de la polarización del haz 14 de láser. Tal y como se ha expuesto anteriormente, una nueva orientación de la polarización da como resultado un nuevo resto 28 del haz 14 de láser, que es representativo de la energía de la parte del haz 14 que incide sobre el cuerpo 16 de destino.

Aunque con el sistema y el procedimiento particulares para medir y controlar la energía de un pulso ultracorto de un haz de láser, como los mostrados y descritos en detalle en este documento, pueden obtenerse y proporcionarse totalmente los objetos y ventajas expuestos anteriormente en este documento, debe entenderse que son meramente ilustrativos de las realizaciones actualmente preferidas de la invención y que no pretenden limitarse a los detalles de construcción o de diseño mostrados en la descripción, sino a lo descrito en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema (10) para medir energía en un pulso ultracorto de un haz (14) de láser, en el que el haz (14) de láser
5 tiene una polarización, que comprende:

un medio (12) para dirigir el haz (14) de láser a lo largo de una trayectoria (20) de haz, donde dicho haz (14) de
láser incluye una pluralidad de pulsos ultracortos y cada pulso tiene energía;

un medio (32) para convertir una parte (26) predeterminada de la energía de cada pulso ultracorto del haz (14) de
10 láser en una corriente eléctrica, donde la corriente produce un pulso de tensión indicativo de la energía en un único
pulso de láser;

un medio (36) para amplificar dicho pulso de tensión;

15 un medio (38) para integrar el pulso de tensión amplificado a lo largo de un periodo de tiempo especificado para
obtener una señal (72) de salida, donde la señal (72) de salida es una medida de la energía en un pulso ultracorto del
haz (14) de láser;

20 un circuito (48) de sincronización láser para iniciar el proceso de integración;

una placa (18) de media onda giratoria situada en la trayectoria (20) de haz para establecer una orientación de la
polarización del haz (14) de láser;

25 un divisor (24) de haz de polarización alineado de manera óptica con dicha placa (18) de media onda giratoria para
reflejar la parte (26) predeterminada de la energía de cada pulso ultracorto del haz (14) de láser hacia dicho medio (32)
de conversión, y para transmitir el resto (28) del haz (14) de láser a lo largo de la trayectoria (20) de haz;

un comparador (60) para controlar dicha placa (18) de media onda, donde dicho comparador (60) compara la señal
30 (72) de salida con una señal de referencia conocida para generar una señal (74) de error, y donde dicho comparador (60)
compara la señal (80) de salida del resto con la señal de referencia conocida para generar una señal (81) de verificación,
y donde además la señal (81) de verificación se compara con la señal (74) de error para compensar la señal (81) de
verificación según sea necesario para hacer girar dicha placa (18) de media onda y establecer la orientación de la
polarización del haz (14) de láser;

35 un dispositivo (42) lógico programable para controlar la sincronización de la medición de la energía láser;

un medio (52) para extraer un parte (54) fija de la energía de cada pulso ultracorto en el resto (28) del haz (14) de
láser; y

40 un medio (58) para medir la parte fija de la energía.

2. Un sistema (10) según la reivindicación 1, en el que el medio (12) de dirección es una fuente (12) láser, en el
que el medio (32) de conversión es un fotodiodo (32), en el que el medio (36) de amplificación es un amplificador (36)
45 y en el que el medio (38) de integración es un integrador (38).

3. Un sistema (10) según las reivindicaciones 1 ó 2, en el que dicho medio (52) de extracción es un divisor (52) de
haz de proporción fija.

4. Un sistema (10) según la reivindicación 3, en el que dicho medio (58) de medición es un medidor (58) de energía
50 láser de verificación, y en el que además dicho medidor (58) de energía láser de verificación comprende:

un fotodiodo (32) para recibir la parte fija de la energía de cada pulso ultracorto del resto (28) del haz (14) de láser
para generar una corriente del resto con la misma, donde la corriente del resto produce un pulso de tensión del resto
55 indicativo de la energía en un único pulso de láser en el resto (28) del haz (14) de láser;

un amplificador (36) para amplificar el pulso de tensión del resto; y

un integrador (38) para integrar el pulso de tensión del resto amplificado a lo largo de un periodo de tiempo
60 especificado para obtener una señal (80) de salida del resto, donde la señal (80) de salida del resto es una medida de la
energía en un pulso ultracorto del resto (28) del haz (14) de láser.

5. Un procedimiento para medir energía en un pulso ultracorto de un haz (14) de láser, en el que el haz (14) de
láser tiene una polarización, que comprende las etapas de:

65 dirigir un haz (14) de láser a lo largo de una trayectoria (20) de haz, donde el haz (14) de láser incluye una
pluralidad de pulsos ultracortos y cada pulso tiene una energía;

ES 2 318 237 T3

convertir una parte predeterminada de la energía de cada pulso ultracorto del haz (14) de láser en una corriente eléctrica, donde la corriente produce un pulso de tensión indicativo de la energía en un único pulso de láser;

amplificar dicho pulso de tensión;

5

integrar el pulso de tensión amplificado a lo largo de un periodo de tiempo especificado para obtener una señal (72) de salida, donde la señal (72) de salida es una medida de la energía de un pulso ultracorto del haz (14) de láser y donde el proceso de integración se inicia por un circuito (48) de sincronización láser;

10 hacer pasar el haz (14) de láser a través de una placa (18) de media onda giratoria situada en la trayectoria (20) de haz, donde dicha placa (18) de media onda giratoria establece una orientación de la polarización del haz (14) de láser; y

15 dividir el haz (14) de láser con un divisor (24) de haz de polarización que está alineado de manera óptica con dicha placa (18) de media onda para reflejar la parte (26) predeterminada de la energía de cada pulso ultracorto hacia dicho fotodiodo (32), y para transmitir el resto (28) del haz (14) de láser a lo largo de la trayectoria (20) de haz;

20 comparar la señal (72) de salida con una señal de referencia conocida para generar una señal (74) de error, donde dicha señal (74) de error se usa para hacer girar dicha placa (18) de media onda para establecer la orientación de la polarización del haz (14) de láser para controlar la energía que se transmite en el resto (28) del haz (14) de láser;

25 dividir el resto (28) del haz (14) de láser con un divisor (52) de haz de proporción fija, donde dicho divisor (52) de haz de proporción fija extrae una parte (54) fija de la energía de cada pulso ultracorto en el resto (28) del haz (14) de láser;

30 activar un medidor (58) de energía láser de verificación colocado para recibir la parte (54) fija de la energía de cada pulso ultracorto, para generar una señal (64) de salida del resto;

35 comparar la señal (64) de salida del resto de dicho medidor (58) de energía láser de verificación con una señal de referencia conocida para generar una señal (81) de verificación; y

40 aplicar la señal (81) de verificación para hacer girar dicha placa (18) de media onda para establecer la orientación de la polarización del haz (14) de láser para controlar la energía que se transmite en el resto (28) del haz (14) de láser.

35

40

45

50

55

60

65

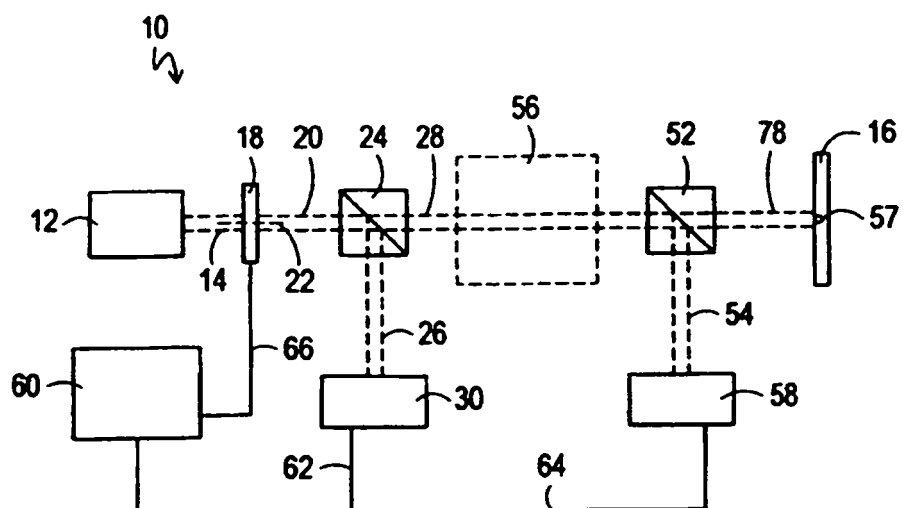


Fig. 1

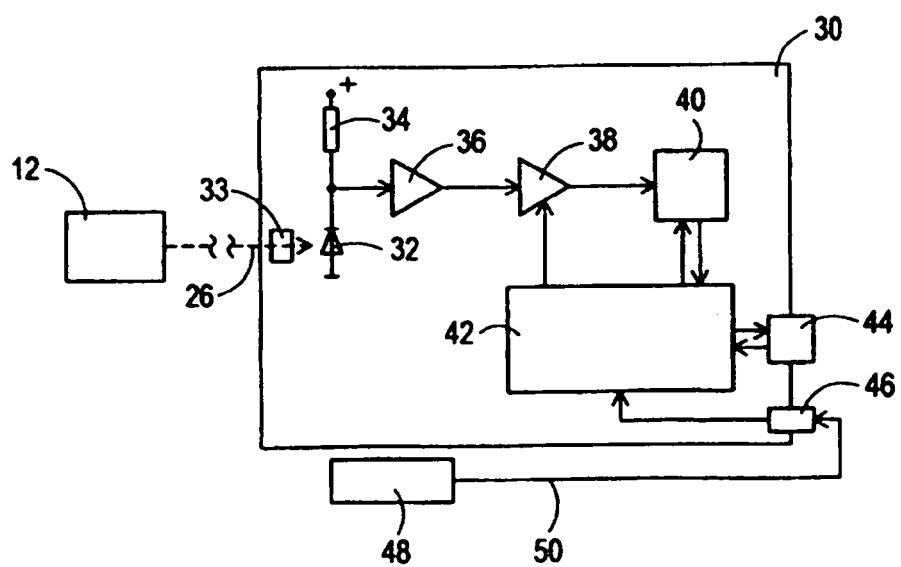


Fig. 2

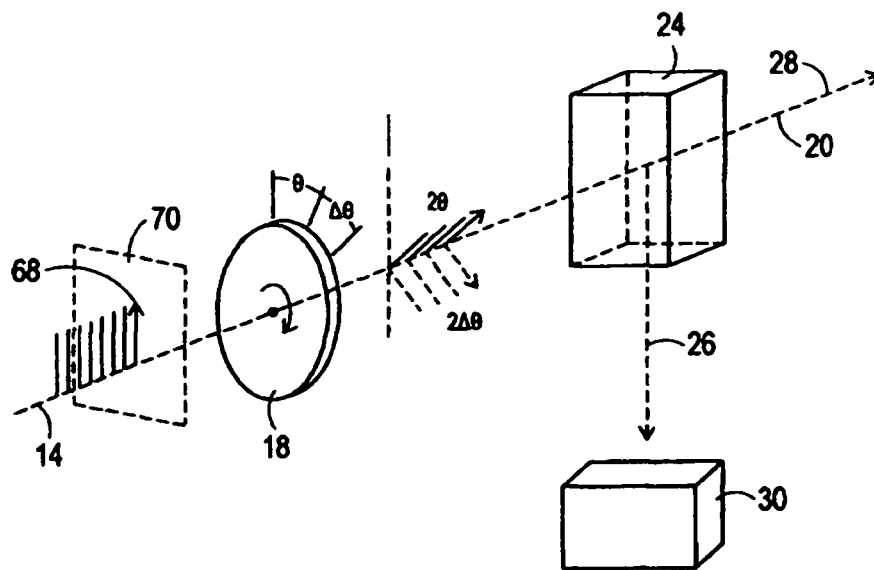


Fig. 3

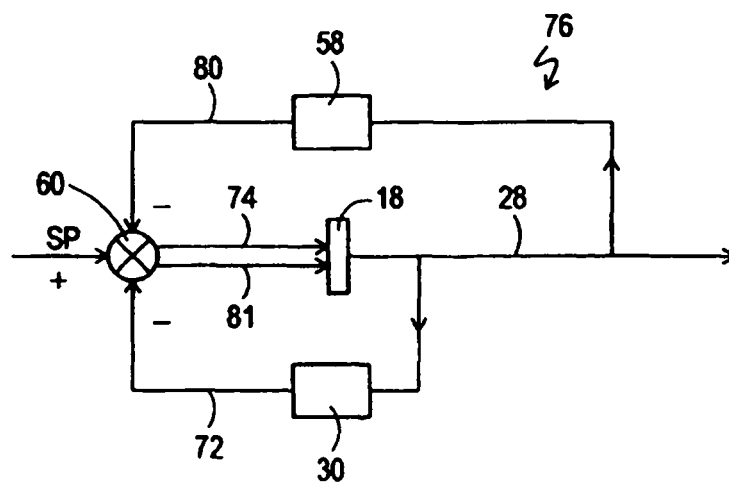


Fig. 4

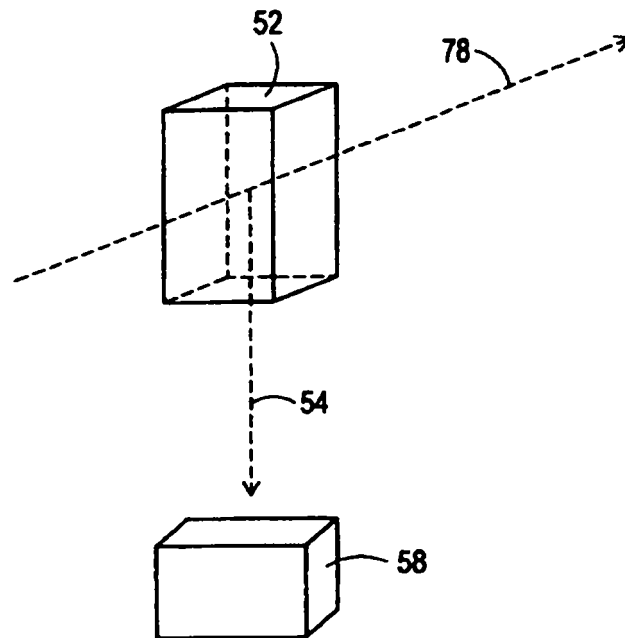


Fig. 5