



(10) **DE 10 2012 005 492 A1** 2013.09.19

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2012 005 492.0**
(22) Anmeldetag: **17.03.2012**
(43) Offenlegungstag: **19.09.2013**

(51) Int Cl.: **H01S 3/113** (2012.01)
H01S 3/10 (2012.01)
H01S 3/0941 (2012.01)

(71) Anmelder:
BATOP GmbH, 07745, Jena, DE

(72) Erfinder:
**Richter, Andreas, Dr., 99425, Weimar, DE; Richter,
Wolfgang, Dr., 99425, Weimar, DE; Hohmuth,
Rico, 07745, Jena, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 698 23 658 T2
US 7 843 978 B2
US 2003 / 0 039 274 A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

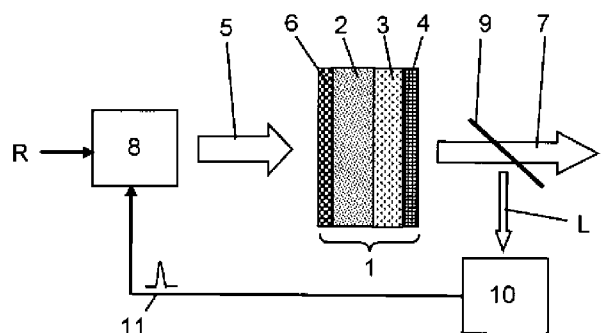
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Passiv gütegeschalteter Mikrochip-Laser mit einer Pulssteuerung**

(57) Zusammenfassung: Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen passiv gütegeschalteten Mikrochip-Laser mit einer Pulssteuerung anzugeben, die eine einstellbare Repetitionsrate der durch die Güteschaltung bewirkten kurzen optischen Laserpulse mit einem geringen Frequenzjitter ermöglicht.

Erfindungsgemäß besteht der Mikrochiplaser (1) aus einem Resonator mit einem optischen Verstärkermedium (2) und einem sättigbaren Absorber (3) zur Erzeugung kurzer optischer Pulse (4) mittels passiver Güteschaltung, einer optischen Pumpeinrichtung (8) zum Pumpen des Verstärkermediums (2) und einem optischen Sensor (10) zum Empfang der optischen Pulse und zur Steuerung der optischen Pumpeinrichtung (8). Zur Erzeugung einer bestimmten Repetitionsfrequenz der durch die Güteschaltung bewirkten kurzen Pulse (7) wird das Verstärkermedium (2) mit Pump-Pulsen der gewünschten Repetitionsfrequenz gepumpt. Die Dauer jedes Pump-Pulses wird dadurch beschränkt, dass der Pump-Puls unmittelbar nach dem Empfang einer bestimmten Anzahl Laserpulse mittels des vom optischen Sensor (10) empfangenen Signals (11) von einer Elektronik abgeschaltet wird.

Die erfindungsgemäße Anordnung kann als Pulslichtquelle mit variabler Repetitionsrate beispielsweise in der Materialbearbeitung, in der nichtlinearen Optik und für Laser-Abstandsmessungen eingesetzt werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen passiv gütegeschalteten Mikrochiplaser mit einer Pulssteuerung.

[0002] Passiv gütegeschaltete Mikrochiplaser bestehen aus einem optisch gepumpten Laserkristall und einem sättigbaren Absorber (siehe beispielsweise US Patentschrift 5394413). Solche Laser werden vorwiegend mittels Laserdioden gepumpt und erzeugen infolge des Zusammenwirkens von gepumptem Lasermedium und sättigbarem Absorber gepulste Laserstrahlung. Seit langem bekannt sind Mikrochiplaser, die aus einem Nd:YVO₄ Laserkristall und einem sättigbaren Absorber aus Cr⁴⁺:YVO₄ bestehen (siehe Optics Letters, Band 18, Seiten 511–512, 1993 oder US Patent 6373864 B1). Typische Pulsdauern solcher Mikrochiplaser liegen im Bereich von 1 ns. Die Pulsdauer wird wesentlich durch die Resonatorlänge des Mikrochiplasers bestimmt, die hauptsächlich durch die Dicke des Laserkristalls und des sättigbaren Absorbers gebildet wird.

[0003] Für viele Anwendungen in der Materialbearbeitung oder der Messtechnik werden Laserpulse kurzer Dauer von 100 ps oder weniger bei einstellbaren Repetitionsfrequenzen im Bereich von etwa 10 kHz bis 300 kHz benötigt.

[0004] Um zu kürzeren Resonatorlängen und damit zu kürzeren Pulsdauern zu kommen, wurden Mikrochiplaser mit sättigbarem Absorberspiegel (SAM – saturable absorber mirror) aus Halbleitermaterial entwickelt (siehe Optics Letters, Band 22, Seiten 381–383, 1997, Optics Letters Band 32, Seiten 2115–2117, 2007 und Applied Physics B, Band 97, Seiten 317–320, 2009). Infolge der starken Absorption direkter Halbleiter kann eine sehr dünne Absorberschicht der Dicke von etwa 1 µm verwendet werden. Wegen der Verwendung eines sättigbaren Absorberspiegels arbeitet ein solcher Mikrochiplaser in Reflexion. Dabei wird das Ausgangssignal entgegengesetzt zur Richtung des einfallenden Pumplichts abgestrahlt. In Anlehnung an die bekannten Mikrochiplaser in Transmission kann aber auch ein halbleitender sättigbarer Auskoppelspiegel (SOC – saturable output coupler) zur passiven Güteschaltung eines Mikrochiplasers verwendet werden. Mikrochiplaser mit halbleitendem sättigbarem Absorber und einem Laserkristall von 100 µm Dicke liefern passiv gütegeschaltete Pulse mit kurzen Pulsdauern von etwa 50 ps.

[0005] Mit passiv gütegeschalteten Mikrochiplasern, die mit einem dünnen Laserkristall und einem halbleitenden sättigbaren Absorber arbeiten, können demzufolge die für viele Anwendungen erforderlichen Pulse mit Pulsdauern unter 100 ps erreicht werden.

[0006] Um mit einstellbaren Repetitionsraten Laserpulse erzeugen zu können, wurden auch aktiv gütegeschaltete Mikrochiplaser entwickelt. Bei solchen Lasern wird die Resonatorgüte mittels geeigneter Methoden für die Pulserzeugung kurzzeitig erhöht. Solche Laser sind beispielsweise in den Patentschriften ER 0806065B1, US 5132977 und US 4982405 beschrieben. Mit diesen Lasern können jedoch keine kurzen Pulse im Bereich von 100 ps erzeugt werden, weil keine entsprechend schnelle Absteuerelektronik für die aktive Güteschaltung realisiert werden kann.

[0007] Ein wesentliches Problem bei passiv gütegeschalteten Lasern stellt jedoch die für die Anwendung erforderliche einstellbare und stabile Repetitionsrate der kurzen Laserpulse dar. Um eine präzise Materialbearbeitung mit Kurzpulslasern zu ermöglichen, muss die Repetitionsrate wenigstens mit einer relativen Genauigkeit von 3% eingestellt werden können. Die Repetitionsrate der Pulse steigt bei einem passiv gütegeschalteten Laser mit der optischen Pumpleistung und kann demzufolge in einem weiten Bereich durch die Wahl der Pumpleistung eingestellt werden. So lässt sich beispielsweise die Repetitionsrate eines Mikrochiplasers mit einer Laserkristalldicke von 100 µm und einem halbleitenden sättigbaren Absorber durch Variation der optischen Pumpleistung im Bereich von 10 kHz bis 3 MHz einstellen. Jedoch steigt der Jitter der Repetitionsfrequenz umgekehrt proportional zur Repetitionsfrequenz an und erreicht bei 10 kHz eine Frequenzschwankung von 100%. Die Ursache dieses Frequenzjitters liegt in der Schwankung der Laserschwelle, welche sich insbesondere bei sehr geringen Pumpleistungen stark auf den Beginn des nächsten Laserpulses auswirkt. Aus dem gleichen Grund ist es nicht möglich, sehr geringe Repetitionsraten mit dem Mikrochiplaser zu realisieren.

[0008] Es wurden auch Versuche unternommen, die Repetitionsrate der Laserpulse dadurch stabil vorzugeben, dass der Mikrochiplaser mit kurzen Pulsen einer vorgegebenen Repetitionsrate gepumpt wird. Es zeigte sich aber dabei, dass infolge der hohen Pulsfolgefrequenz des passiv gütegeschalteten Mikrochiplasers die Dauer der Pump-Pulse nicht präzise genug vorgegeben werden kann, um eine definierte Repetitionsrate der Laserpulse zu ermöglichen.

[0009] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen passiv gütegeschalteten Mikrochiplaser mit einer Pulssteuerung anzugeben, die eine einstellbare Repetitionsrate der durch die Güteschaltung bewirkten kurzen optischen Laserpulse mit einem geringen Frequenzjitter ermöglicht.

[0010] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe mit einer Kombination aus einem Mikrochiplaser, einer optischen Pumpeinrichtung zum Pumpen des Verstärkungsmediums und mit einem optischen Sensor zum Empfang der optischen Pulse und zur Steuerung der

optischen Pumpeinrichtung mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst, Den Erfindungsanspruch vorteilhaft weiterbildende Merkmale sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der Beschreibung unter Bezugnahme auf das Ausführungsbeispiel mit den zugehörigen Abbildungen.

[0011] Gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1 besteht der Mikrochiplaser aus einem Resonator mit einem optischen Verstärkermedium und einem sättigbaren Absorber zur Erzeugung kurzer optischer Pulse mittels passiver Güteschaltung, einer optischen Pumpeinrichtung zum Pumpen des Verstärkermediums und einem optischen Sensor zum Empfang der optischen Pulse und zur Steuerung der optischen Pumpeinrichtung. Zur Erzeugung einer bestimmten Repetitionsfrequenz der durch die Güteschaltung bewirkten kurzen optischen Pulse wird das Verstärkermedium mit optischen Pump-Pulsen der gewünschten Repetitionsfrequenz gepumpt. Die Dauer jedes Pump-Pulses wird dadurch beschränkt, dass der Pump-Puls unmittelbar nach dem Empfang einer bestimmten Anzahl kurzer optischer Laserpulse mittels des vom optischen Sensor empfangenen Signals von einer Elektronik abgeschaltet wird.

[0012] Durch die erfindungsgemäße Anordnung wird zunächst erreicht, dass die durch die passive Güteschaltung bewirkten Pulse sehr kurz sind. Weiterhin wird durch das optische Pumpen mit einer bestimmten Repetitionsfrequenz erreicht, dass auch bei geringen Frequenzen der Jitter der Laserpulse klein bleibt. Durch das Abschalten des Pump-Pulses unmittelbar nach dem Empfang einer bestimmten Anzahl kurzer optischer Pulse wird gewährleistet, dass die Anzahl der passiv gütegeschalteten Pulse während eines Pump-Pulses konstant ist. Der Vorteil der erfindungsgemäßen Lösung des Problems besteht darin, dass einerseits die durch die passive Güteschaltung erzeugten kurzen Laserpulse genutzt werden und andererseits die durch eine Standardelektronik realisierbare stabile Repetitionsrate der Pulse vorgegeben werden kann. Ein weiterer Vorteil der erfindungsgemäßen Lösung besteht darin, dass die Repetitionsrate des Mikrochiplasers mit der Pulssteuerung auf beliebig niedrige Werte gemäß der Anforderung der jeweiligen Anwendung eingestellt werden kann.

[0013] Eine zweckmäßige Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Anordnung besteht gemäß Unteranspruch 2 darin, dass der Pump-Puls jeweils nach dem ersten Laserpuls abgeschaltet wird. Dadurch wird erreicht, dass die Repetitionsfrequenz der Laserpulse gleich der Repetitionsfrequenz der Pump-Pulse ist.

[0014] Eine Entlastung der Pumplichtsteuerung kann gemäß Unteranspruch 3 erreicht werden, indem die optische Pumpeinrichtung zusätzlich zu den Pump-Pulsen mit der gewünschten Repetitionsfre-

quenz ein kontinuierliches Pumplicht liefert, wobei die Stärke des kontinuierlichen Pumplichts so gewählt werden kann, dass die damit erzeugte Repetitionsrate der gütegeschalteten Laserpulse geringer ist als die gewünschte Repetitionsfrequenz. Durch das konstante optische Pumpen kann die Amplitude der optischen Pump-Pulse zur Erzeugung der Laserpulse verringert werden. Dadurch werden die Anforderungen an die elektronische Pulserzeugung verringert. Wenn andererseits konstant oberhalb der Laserschwelle gepumpt wird, kann der Mikrochiplaser ohne zusätzliche Pump-Pulse freilaufend mit einer sehr hohen Repetitionsrate betrieben werden.

[0015] Gemäß den Unteransprüchen 4 und 5 kann als optischer Sensor eine Fotodiode oder ein fotoleitender Schalter eingesetzt werden.

[0016] Im Unteranspruch 6 ist eine zweckmäßige Ausgestaltung der Erfindung angegeben, wobei das optische Verstärkermedium aus dem Laserkristall Nd:YVO₄ besteht, der sättigbare Absorber ein InGaAs Halbleiter mit Auskoppelspiegel ist, die Wellenlänge der optischen Pumpeinrichtung 808 nm beträgt, die optische Pumpeinrichtung einen Diodenlaser beinhaltet, das Pumplicht linear polarisiert ist und die Polarisationsrichtung des Pumplichts parallel zur c-Achse des Laserkristalls orientiert ist.

[0017] Die Erfindung wird nachfolgend an Hand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert.

[0018] In den zugehörigen Zeichnungen zeigen die

[0019] Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Mikrochiplasers mit dem optischen Sensor und der optischen Pumpeinrichtung,

[0020] Fig. 2 den zeitlichen Verlauf der vorgegebenen Repetitionsfrequenz, der Laserpulse und der Pump-Pulse für den Fall, dass jeweils drei Laserpulse pro Pump-Puls erzeugt werden und

[0021] Fig. 3 den zeitlichen Verlauf der vorgegebenen Repetitionsfrequenz, der Laserpulse und der Pump-Pulse für den Fall, dass jeweils ein Laserpuls pro Pump-Puls erzeugt wird.

[0022] Der Mikrochiplaser **1** besteht aus einem 100 µm dicken Nd:YVO₄ Laserkristall als Verstärkermedium **2** und der sättigbare Absorber **3** besteht aus einem InGaAs Halbleiter mit einem Auskoppelspiegel **4**, der einen Auskoppelgrad von 10% besitzt. Die dem Pumplicht **5** zugewandte Seite des Verstärkermediums **2** ist für das Pumplicht **5** entspiegelt und für die Laserpulse **7** verspiegelt. Die optische Pumpeinrichtung **8** besteht aus einem Diodenlaser mit der Emissionswellenlänge von 808 nm und einer elektronischen

Ansteuerung des Diodenlasers. Die Pulsdauer der Laserpulse **7** beträgt etwa 50 ps.

[0023] Erfindungsgemäß wird die optische Pumpeinrichtung **8** von einem externen Referenzsignal **R** der Repetitionsfrequenz f_R angesteuert, so dass der Mikrochiplaser **1** von der optischen Pumpeinrichtung **8** mit Pump-Pulsen **P** dieser Repetitionsfrequenz f_R gepumpt wird. Die Laserpulse **7** verlassen den Mikrochiplaser durch den Auskoppelspiegel **4**. Mit einem Strahlteiler **9** werden etwa 5% des Laserlichts abgetrennt und auf einen optischen Sensor **10** gelenkt, der durch eine Fotodiode gebildet wird. Die von der Fotodiode erzeugten elektrischen Pulse **11** werden der optischen Pumpeinrichtung **8** zugeführt, dort gezählt und nach einer vorgegebenen Pulszahl wird der jeweilige Pump-Puls **P** abgeschaltet.

[0024] Durch die kontrollierte Abschaltung der Pump-Pulse **P** wird zuverlässig erreicht, dass die Repetitionsrate der Laserpulse **7** mit der extern vorgegebenen Repetitionsrate übereinstimmt. Da die Repetitionsrate der Pump-Pulse **P** keiner technischen Beschränkung in Richtung geringer Repetitionsraten unterliegt, können mit dem erfindungsgemäßen Mikrochiplaser auch extern getriggerte Einzelpulse mit der Pulsdauer von 50 ps erzeugt werden.

[0025] In **Fig. 2** ist der zeitliche Signalverlauf des externen Referenzsignals **R** mit der vorgegebenen Repetitionsfrequenz, die zeitliche Abfolge der Laserpulse **L** sowie der Pump-Pulse **P** für den Fall dargestellt, dass jeweils drei Laserpulse pro Pump-Puls erzeugt werden.

[0026] Der erste Pumpzyklus beginnt, wenn das externe Referenzsignal **R** von low of high geschaltet und damit der Pump-Puls **P** gestartet wird. Nach einer gewissen Pumpdauer beginnt der Mikrochiplaser mit einer hohen Repetitionsrate kurze Pulse **L** von 50 ps Dauer zu emittieren. Der zeitliche Verlauf der Laserpulse **L** wird vom optischen Sensor **10** registriert, als elektrische Pulse **11** der optischen Pumpeinrichtung **8** zugeführt und gezählt. Nach dem dritten Laserpuls **L** wird der Pump-Puls **P** abgeschaltet. Der nächste Pumpzyklus beginnt, wenn das externe Referenzsignal **R** wieder von low of high schaltet.

[0027] In **Fig. 3** ist der zeitliche Signalverlauf des externen Referenzsignals **R** mit der vorgegebenen Repetitionsfrequenz, die zeitliche Abfolge der Laserpulse **L** sowie der Pump-Pulse **P** für den Fall dargestellt, dass jeweils nur ein Laserpuls pro Pump-Puls erzeugt wird.

[0028] Der erste Pumpzyklus beginnt, wenn das externe Referenzsignal **R** von low of high geschaltet und damit der Pump-Puls **P** gestartet wird. Nach einer gewissen Pumpdauer beginnt der Mikrochiplaser einen kurzen Pulse **L** von 50 ps Dauer zu emittieren.

Der zeitliche Verlauf des Laserpulses **L** wird vom optischen Sensor **10** registriert, als elektrischer Puls **11** der optischen Pumpeinrichtung **8** zugeführt und der Pump-Puls **P** abgeschaltet. Der nächste Pumpzyklus beginnt dann, wenn das externe Referenzsignal **R** wieder von low of high schaltet.

[0029] Der Vorteil des erfindungsgemäßen Aufbaus des passiv gütegeschalteten Mikrochiplasers mit einer Pulssteuerung besteht darin, dass auch geringe Repetitionsraten der durch die passive Güteschaltung bewirkten kurzen optischen Laserpulse mit einem geringen Frequenzjitter durch ein externes Signal erzeugt werden können.

[0030] Die erfindungsgemäße Anordnung kann als Pulslichtquelle mit variabler Repetitionsrate beispielsweise in der Materialbearbeitung, in der nichtlinearen Optik, zur Erzeugung eines Superkontinuums, für zeitaufgelöste Fluoreszenzmessungen und für Laser-Abstandsmessungen eingesetzt werden.

Bezugszeichenliste

1	Mikrochiplaser
2	Verstärkermedium
3	sättigbarer Absorber
4	Auskoppelspiegel
5	Pumplicht
6	dichroitischer Spiegel
7	Laserpulse
8	optische Pumpeinrichtung
9	Strahlteiler
10	optischer Sensor
11	elektrische Pulse
R	zeitlicher Verlauf des externen Referenzsignals
L	zeitlicher Verlauf der Laserpulse
P	zeitlicher Verlauf der Pump-Pulse

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 5394413 [0002]
- US 6373864 B1 [0002]
- ER 0806065 B1 [0006]
- US 5132977 [0006]
- US 4982405 [0006]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Optics Letters, Band 18, Seiten 511–512, 1993 [0002]
- Optics Letters, Band 22, Seiten 381–383, 1997 [0004]
- Optics Letters Band 32, Seiten 2115–2117, 2007 [0004]
- Applied Physics B, Band 97, Seiten 317–320, 2009 [0004]

Patentansprüche

f) und die Polarisationsrichtung des Pumplichts (5) parallel zur c-Achse des Laserkristalls orientiert ist.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

1. Passiv gütegeschalteter Mikrochiplaser (1) mit einer Pulssteuerung, bestehend aus einem Resonator mit einem optischen Verstärkermedium (2) und einem sättigbaren Absorber (3) zur Erzeugung kurzer optischer Laserpulse (7) mittels passiver Güteschaltung, mit einer optischen Pumpeinrichtung (8) zum Pumpen des Verstärkungsmediums (2) und mit einem optischen Sensor (10) zum Empfang der optischen Laserpulse (7) und zur Steuerung der optischen Pumpeinrichtung (8),

dadurch gekennzeichnet, dass

a) zur Erzeugung einer bestimmten Repetitionsfrequenz der durch die Güteschaltung bewirkten kurzen optischen Laserpulse (7) das Verstärkermedium (2) mit optischen Pump-Pulsen (P) der gewünschten Repetitionsfrequenz gepumpt wird,
 b) und die Dauer jedes Pump-Pulses (P) dadurch beschränkt wird, dass der Pump-Puls unmittelbar nach dem Empfang einer bestimmten Anzahl kurzer optischer Laserpulse (7) mittels des vom optischen Sensor (10) empfangenen Signals von einer Elektronik abgeschaltet wird.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die bestimmte Anzahl der kurzen optischen Laserpulse (7) Eins ist.

3. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass

a) die optische Pumpeinrichtung (8) zusätzlich zu den Pump-Pulsen (P) mit der gewünschten Repetitionsfrequenz ein kontinuierliches Pumplicht (5) liefert,
 b) und die Stärke des kontinuierlichen Pumplichts (5) so gewählt werden kann, dass die damit erzeugte Repetitionsrate der gütegeschalteten Laserpulse geringer ist als die gewünschte Repetitionsfrequenz.

4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Sensor (10) eine Fotodiode ist.

5. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Sensor (10) ein fotoleitender Schalter ist.

6. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass

a) das optische Verstärkermedium (2) aus dem Laserkristall Nd:YVO₄ besteht,
 b) der sättigbare Absorber (3) ein InGaAs Halbleiter mit Auskoppelspiegel ist,
 c) die Wellenlänge der optischen Pump-Pulse (P) 808 nm beträgt,
 d) die optische Pumpeinrichtung (8) einen Diodenlaser beinhaltet,
 e) das Pumplicht (5) linear polarisiert ist

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

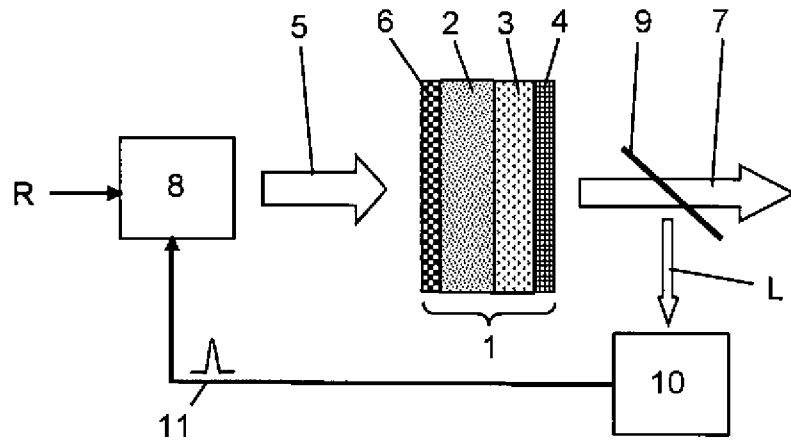


Fig. 2

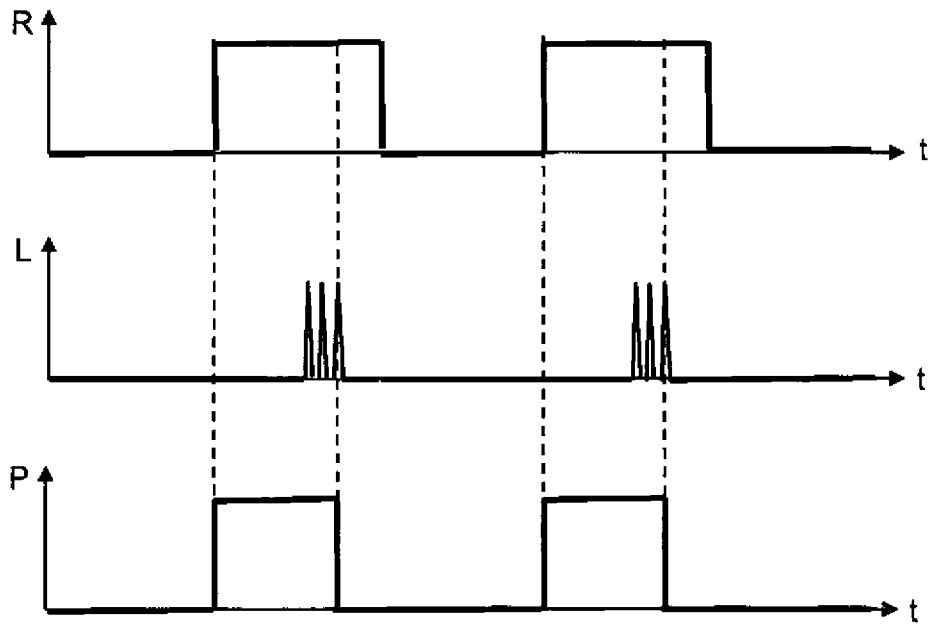


Fig. 3

