



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 042 642 B4 2010.06.24**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 042 642.8**
 (22) Anmeldetag: **12.09.2006**
 (43) Offenlegungstag: **27.03.2008**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **24.06.2010**

(51) Int Cl.⁸: **G01J 3/42 (2006.01)**
G01J 3/06 (2006.01)
H01S 4/00 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

BATOP GmbH, 99425 Weimar, DE

(72) Erfinder:

**Hohmuth, Rico, 07745 Jena, DE; Richter,
 Wolfgang, 99425 Weimar, DE**

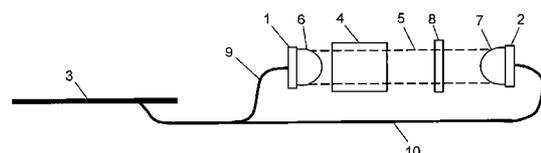
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

EP 08 28 162 A2
EP 08 64 857 A1
US 57 89 750 A
WO 2006/0 00 831 A1
US 69 57 099 B1
GB 23 80 920 A
US 67 47 736 B2
JP 2003-0 83 888 A
CA 23 96 695 A1
WO 00/79 248 A1

GB 23 72 929 A
GB 23 50 673 A
US 2005/02 53 071 A1
JP 2005-3 15 708 A
US 2004/01 96 660 A1
JP 2004-2 79 352 A
JP 2004-1 98 250 A
WO 2004/1 06 900 A1
WO 2004/1 06 905 A1
GB 24 17 554 A
US 2005/01 79 905 A1
GB 24 15 777 A
EP 16 30 542 A1
EP 08 28 162 A2
US 2005/02 58 368 A1

(54) Bezeichnung: **Terahertz Time-Domain Spektrometer**

(57) Hauptanspruch: Terahertz Time-Domain Spektrometer unter Verwendung einer photoleitenden Sendeantenne (1) und einer Empfangsantenne (2), die mit einem Puls-laser (3) getaktet werden, und mit einer variablen Verzögerungsstrecke (4), dadurch gekennzeichnet, dass sich die Verzögerungsstrecke (4) im Terahertz-Strahlengang (5) befindet.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft den Aufbau eines Terahertz Time-Domain Spektrometers zur Messung der elektromagnetischen Materialeigenschaften von Stoffen im Terahertz Spektralgebiet. Anwendung finden Terahertz Time-Domain Spektrometer beispielsweise bei der Analyse chemischer Verbindungen, der Kontrolle verpackter Gegenstände, in der Medizin zur Krebserkennung und in der Personenkontrolle.

[0002] Terahertz-Strahlung ist elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von etwa 0,1 bis 100 THz. Da es im Frequenzbereich der Terahertz-Strahlung Molekülschwingungen unterschiedlicher Substanzen gibt, kann mittels Absorptionsspektroskopie im Terahertz-Bereich die Untersuchung von Substanzen erfolgen und auch der Nachweis bestimmter chemischer Verbindungen geführt werden. So können beispielsweise Objekte im Terahertz-Bereich abgebildet werden (siehe beispielsweise EP 0 828 162 A2) oder tomographisch untersucht werden (siehe beispielsweise EP 0 864 857 A1).

[0003] Es ist bekannt, dass Terahertz-Strahlung mit photoleitenden Antennen (englisch PCA – photoconductive antenna) unter Verwendung ultrakurzer Lichtpulse eines Lasers mit Pulsdauern ≤ 1 ps sowohl erzeugt als auch nachgewiesen werden kann (US 5 789 750 A). Zum Aufbau eines Terahertz Time-Domain Spektrometers ist es erforderlich, mittels einer einstellbaren Verzögerungsleitung dafür zu sorgen, dass der zeitliche Pulsverlauf der die Probe passierenden Terahertz-Strahlung an der Empfangsantenne abgetastet werden kann, um anschließend mittels einer Fouriertransformation des gemessenen zeitlichen Verlaufs des Terahertz-Pulses das Terahertz-Spektrum berechnen zu können (siehe beispielsweise WO 2006/000831 A1).

[0004] In allen bisher bekannten Terahertz Time-Domain Spektrometern ist die Verzögerungsstrecke in einem der beiden Wege der optischen Laserpulse entweder vor der Sendeantenne oder vor der Empfangsantenne angeordnet (US 6957099 B1, GB 2380920 A, US 6747736 B2, JP 2003083888 A, CA 2396695 A1, WO 00/79248 A1, GB 2372929 A, GB 2350673 A, US 5789750 A, US 2005/0253071 A1, JP 2005315708 A, US 2004/0196660 A1, JP 2004279352 A, JP 2004 198 250 A, WO 2004/106900 A1, WO 2004/106905 A1, WO 2006/000831 A1, GB 2417554 A, US 2005/0179905 A1, GB 2415777 A, EP 1630542 A1, EP 0828162 A2, US 2005/0258368 A1). Diese Anordnung der Verzögerungsstrecke im Weg des optischen Laserpulses ist dann zweckmäßig, wenn wie bisher üblich der Puls laser ein Festkörperlaser ist und die Strahlführung des Laserpulses in Luft erfolgt. In diesem Fall werden hauptsächlich die standardmäßig in Pulslasersystemen verwendeten Verzögerungsstrecken

mit Retroreflektoren eingesetzt.

[0005] Bei der Verwendung moderner Faserlaser zur Erzeugung der optischen Pulse und der Führung der Laserpulse mittels Lichtleitfasern direkt an die photoleitenden Terahertz-Antennen besitzt jedoch der Einsatz einer Freistrah-Verzögerungsstrecke der Laserpulse den Nachteil, dass das aus der Faser kommende Laserlicht erst kollimiert und nach der Verzögerungsstrecke wieder in die Faser fokussiert werden muss. Wegen der erforderlichen hohen Justiergenauigkeit kann eine derartige Anordnung nur mit hohem technischen Aufwand mechanisch so stabil gestaltet werden, dass ein mobiler Einsatz des Terahertz Time-Domain Spektrometers möglich ist.

[0006] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Terahertz Time-Domain Spektrometer anzugeben, bei dem die mechanischen Präzisionsanforderungen an die erforderliche Verzögerungsstrecke gering sind und das deshalb robust ist und kostengünstig herzustellen ist.

[0007] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe gemäß dem Patentanspruch 1 dadurch gelöst, dass sich die Verzögerungsstrecke nicht wie bisher üblich im Lichtweg des Puls lasers, sondern im Lichtweg der Terahertz-Strahlung befindet. Da die Wellenlänge der Terahertz-Strahlung etwa um den Faktor 1000 größer ist als die Wellenlänge des Laserlichtes, sind die erforderlichen Justiergenauigkeiten für die Terahertz-Strahlung entsprechend geringer. Es ist bekannt, dass elektromagnetische Wellen nur mit einer Genauigkeit im Bereich der Wellenlänge fokussiert werden können. Entsprechend verringern sich auch die Genauigkeitsanforderungen bei der Justierung von Optiken für Wellen mit größerer Wellenlänge.

[0008] Durch die erfindungsgemäße Anordnung der Verzögerungsstrecke im Lichtweg der Terahertz-Strahlung wird erreicht, dass insbesondere bei der Verwendung eines Faserlasers und fasergekoppelten photoleitenden Antennen ein erschütterungsempfindlicheres und kostengünstigeres Terahertz Time-Domain Spektrometer gebaut werden kann. Die Terahertz-Strahlung wird von der Sendeantenne ohnehin frei abgestrahlt, so dass der Einbau der Verzögerungsstrecke an dieser Stelle keine zusätzlichen kollimierenden und fokussierenden Optiken erfordert, wie das im wellenleitenden Strahlengang der Laserpulse erforderlich ist.

[0009] Eine vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung ist im Patentanspruch 2 angegeben. Die Weiterbildung gemäß Patentanspruch 2 besteht darin, dass die Verzögerungsstrecke im kollimierten Strahlengang der Terahertz-Strahlung angeordnet ist, der mittels einer an der Sendeantenne angebrachten asphärischen kollimierenden Substratlinse erreicht wird. Eine Substratlinse wird zur Ein- und Auskopp-

lung der Terahertzstrahlung üblicherweise verwendet, um eine große Apertur zu erreichen und gleichzeitig die Terahertz-Strahlung zu führen. Wird die Substratlinse der Sendeantenne als asphärische kollimierende Linse ausgeführt, so ist bereits ein geeigneter Parallelstrahl für die Verzögerungstrecke vorhanden. Weitere optische Elemente sind zum Einsatz der Verzögerungstrecke im Terahertz-Strahlengang dann nicht erforderlich.

[0010] Die im Patentanspruch 3 angegebene Möglichkeit des Einsatzes eines Faserlasers als Puls laser vereinfacht den Aufbau des Terahertz Time-Domain Spektrometers, weil die Fasern direkt an die Antennen geführt werden können und keine Justierelemente erforderlich sind. Dadurch wird der gesamte Aufbau mechanisch sehr stabil.

[0011] Im Patentanspruch 4 wird eine weitere Vereinfachung des Aufbaus des Terahertz Time-Domain Spektrometers vorgeschlagen, indem die Sendeantenne gleichzeitig als Modelocker des Faserlasers eingesetzt ist und direkt auf das Faserende des Puls lasers montiert ist. Bei einer derartigen Anordnung entfällt die sonst erforderliche Lichtleitfaser zwischen Faserlaser und Sendeantenne, wodurch der Aufbau vereinfacht wird.

[0012] Die Ausgestaltung der Erfindung gemäß Anspruch 5 besteht darin, dass die Verzögerungstrecke aus zwei Keilen mit gleichen Keilwinkeln aus einem für die Terahertz-Strahlung transparenten Material mit einer Brechzahl n größer als Eins besteht, wobei die Keile gegeneinander verschiebbar sind und deren Oberflächen senkrecht zum Terahertz-Strahlengang orientiert sind. Beim Verschieben der Keile wird der optische Weg der Terahertz-Strahlung verändert, ohne deren Ausbreitungsrichtung zu beeinflussen. Die Verzögerungszeit τ bei einer Dickenänderung Δd der beiden Keile ergibt sich aus der Beziehung

$$\tau = (n - 1) \cdot \Delta d / c,$$

wobei c die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit und n die Brechzahl des Keilmaterials ist.

[0013] Erfindungsgemäße Anordnungen eines Terahertz Time-Domain Spektrometers sind nachfolgend an Hand von drei Ausführungsbeispielen näher erläutert. In den zugehörigen Zeichnungen zeigen

[0014] **Fig. 1** ein erstes Ausführungsbeispiel eines Terahertz Time-Domain Spektrometers.

[0015] **Fig. 2** ein zweites Ausführungsbeispiel eines Terahertz Time-Domain Spektrometers mit einer Verzögerungstrecke, die aus Retroreflektoren besteht.

[0016] **Fig. 3** ein drittes Ausführungsbeispiel eines

Terahertz Time-Domain Spektrometers mit einer Verzögerungstrecke, die aus verschiebbaren Prismen besteht.

[0017] **Fig. 1** zeigt das erste Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Terahertz Time-Domain Spektrometers entsprechend den Patentansprüchen 1, 2 und 3. Zur Erzeugung der Terahertz-Strahlung 5 ist eine photoleitende Sendeantenne 1 mit einer asphärischen Substratlinse 6 eingesetzt. Die asphärische Substratlinse 6 erzeugt einen kollimierten Strahlengang der Terahertz-Strahlung 5. Eine Verzögerungstrecke 4 ist im Terahertz-Strahlengang angebracht. Die Terahertz-Strahlung 5 wird von einer Substratlinse 7 auf die Empfangsantenne 2 fokussiert, nachdem sie das Untersuchungsobjekt 8 passiert hat. Die optischen Pulse werden vom Faserlaser 3 erzeugt und mit den Lichtleitfasern 9, 10 an die Sendeantenne 1 und die Empfangsantenne 2 geleitet. Alle optischen Pulse werden in Lichtleitfasern geführt, so dass dieser Teil des Terahertz Time-Domain Spektrometers im Betrieb nicht justiert werden muss und mechanisch sehr stabil ist.

[0018] **Fig. 2** zeigt das zweite Ausführungsbeispiel des Terahertz Time-Domain Spektrometers gemäß den Patentansprüchen 1 bis 4. Die Sendeantenne 1 fungiert gleichzeitig als Modelocker für den Faserlaser 3, wodurch keine zusätzliche optische Verbindung zwischen dem Faserlaser 3 und der Sendeantenne 1 erforderlich ist. Die Führung der Laserpulse ist damit extrem vereinfacht und stabil. Als Verzögerungstrecke 4 ist im Terahertz-Strahlengang 5 ein in der Optik üblicher Retroreflektor eingesetzt. Die mechanischen Anforderungen an die Justier- und Führungsgenauigkeit des Retroreflektors sind wegen der großen Wellenlänge der Terahertz-Strahlung wesentlich geringer als wenn sich der Retroreflektor im Strahlengang der Laserpulse befinden würde.

[0019] **Fig. 3** zeigt das dritte Ausführungsbeispiel des Terahertz Time-Domain Spektrometers gemäß den Patentansprüchen 1 bis 5. Im Unterschied zum zweiten Ausführungsbeispiel besteht die Verzögerungstrecke 4 aus zwei Prismen 11, die aus einem für die Terahertz-Strahlung transparenten Material Picarin mit der Brechzahl $n = 1,7$ bestehen. Diese Prismen 11 besitzen den gleichen Prismenwinkel $\alpha = 30^\circ$ und sind gegeneinander verschiebbar. Die Prismen 11 sind so orientiert, dass die Außenseiten ihrer Oberflächen senkrecht zum Terahertz-Strahlengang 5 stehen. Der Vorteil der Nutzung transparenter Prismen anstelle eines Retroreflektors in der Verzögerungstrecke besteht darin, dass in einer Transmissionsanordnung kleine Verkippungen gegenüber der optische Achse nur sehr geringe Auswirkungen auf die Justierung besitzen. Durch die Verwendung der Prismen 11 ist das Terahertz Time-Domain Spektrometer sehr stabil und für einen mobilen Einsatz gut geeignet.

Bezugszeichenliste

1	Sendeantenne
2	Empfangsantenne
3	Pulslaser
4	Verzögerungsstrecke
5	Terahertz-Strahlung
6	Substratlinse der Sendeanne
7	Substratlinse der Empfangsantenne
8	Probe
9	Lichtleitfaser zur Sendeanne
10	Lichtleitfaser zur Empfangsantenne
11	Prismen
α	Prismenwinkel

Patentansprüche

1. Terahertz Time-Domain Spektrometer unter Verwendung einer photoleitenden Sendeanne (1) und einer Empfangsantenne (2), die mit einem Pulslaser (3) getaktet werden, und mit einer variablen Verzögerungsstrecke (4), **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die Verzögerungsstrecke (4) im Terahertz-Strahlengang (5) befindet.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
 (a) an der Sendeanne (1) eine asphärische Substratlinse (6) angebracht ist, welche die Terahertz-Strahlung kollimiert und
 (b) die Verzögerungsstrecke (4) im kollimierten Terahertz-Strahlengang (5) angebracht ist.

3. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Pulslaser (3) ein Faserlaser ist.

4. Anordnung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Sendeanne gleichzeitig als Modelocker des Pulslasers (3) eingesetzt ist und direkt auf ein Faserende des Faserlasers montiert ist.

5. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass
 (a) die Verzögerungsstrecke (4) aus zwei Prismen (11) aus einem für die Terahertz-Strahlung transparenten Material mit einer Brechzahl größer als Eins besteht,
 (b) die Prismen (11) gegeneinander verschiebbar sind,
 (c) die Prismen (11) den gleichen Prismenwinkel (α) besitzen und
 (d) die Außenseiten der Oberflächen der Prismen (11) senkrecht zum Terahertz-Strahlengang (5) orientiert sind.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

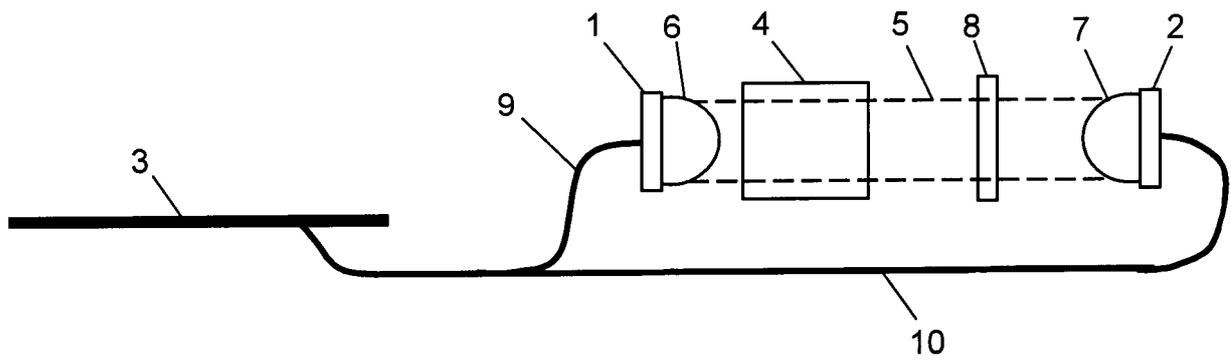


Fig. 2

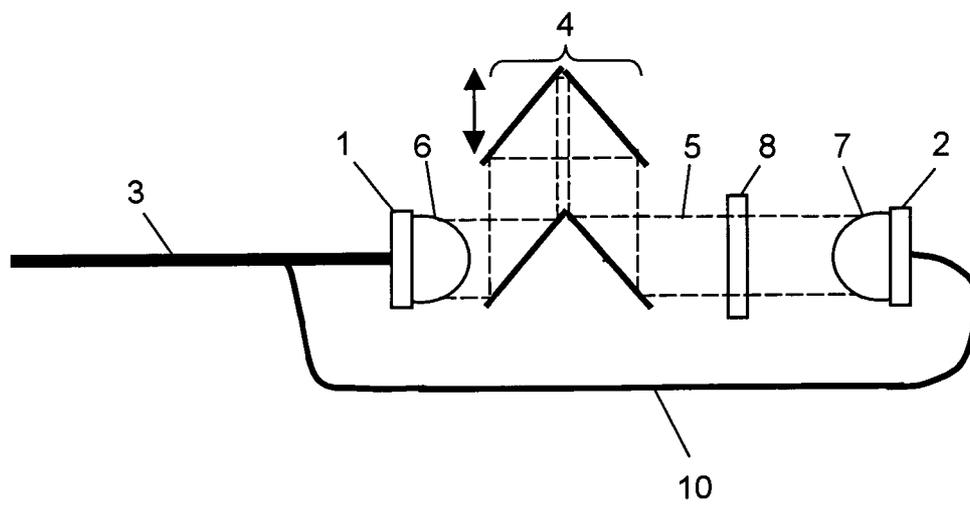


Fig. 3

