



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 010 301 B3 2007.06.06**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 010 301.7**
 (22) Anmeldetag: **07.03.2006**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **06.06.2007**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 21/35 (2006.01)**
G01N 21/31 (2006.01)
H01S 3/098 (2006.01)
H01S 3/10 (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. 2 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:

GB 24 09 337 A
GB 23 93 037 A
GB 23 92 779 A
US 67 78 565 B2
US 58 94 125 A
US 57 89 750 A
US 57 29 017 A
EP 08 64 857 A1
EP 08 28 162 A2
EP 06 06 776 A2
WO 2004/0 86 560 A2
WO 03/0 73 563 A2

WO 02/0 60 017 A1

WO 02/11 256 A1

WO 01/43 242 A1

Keller, U.: Recent developments in compact ultrafast lasers. Nature, Vol. 424, No. 6950, 831-838 (2003);

Jung, I.D. et al.: Semiconductor saturable absorber mirrors supporting sub-10-fs-pulses. Applied Physics B, Vol. 65, 137-150 (1997);
Paunescu, G. et al.: 100-fs diode-pumped Yb:KGW mode-locked laser. Applied Physics B, Vol. 79, 555-558 (2004);

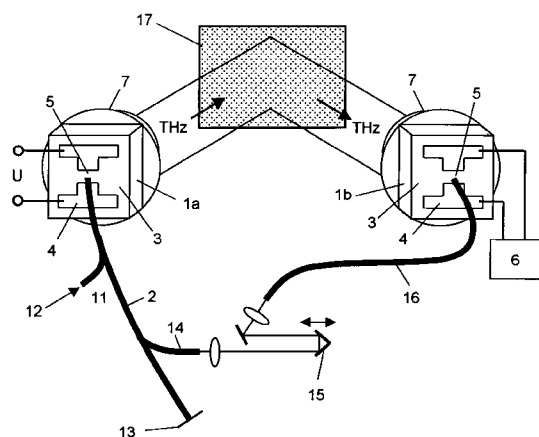
Spühler, G.J. et al.: Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers. Journal of the Optical Society of America B, Vol. 16, No. 3, 376-388 (1999);
Nielsen, C.K. et al.: Self-starting self-similar all-polarization maintaining Yb-doped fiber laser. Optics Express, Vol. 13, No. 23, 9346-9351 (2005);

(54) Bezeichnung: **Anordnung zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung**

(57) Zusammenfassung: Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Anordnung zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung unter Verwendung photoleitender Antennen anzugeben, die mit einem gepulsten Faserlaser geringer Leistung auskommt.

Die erfindungsgemäße Anordnung kombiniert die bekannte Funktion einer photoleitenden Antenne 1a, 1b mit dem zum passiven Modellocken eines Faserlasers 2 erforderlichen sättigbaren Absorberspiegel mit einer starken Absorption im Bereich von 30% bis 80% bei der Wellenlänge des Lasers innerhalb des Laser-Resonators. Infolge der hohen Verstärkung eines Faserlasers 2 kann ein großer Teil der optischen Laserleistung für die Erzeugung von Ladungsträgern durch optische Absorption in der als Modenkoppler wirkenden Terahertz-Antenne 1a genutzt werden. An die Antenne wird entweder eine Spannung U angelegt, um Terahertz Strahlung zu erzeugen oder es wird ein Stromverstärker (oder Spannungsverstärker) 6 angeschlossen, um Terahertz Strahlung nachzuweisen.

Die erfindungsgemäße Anordnung kann zur Materialanalyse im Terahertz Spektralbereich eingesetzt werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung.

[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). Es gibt daher sowohl ein wissenschaftliches als auch ein sicherheitsrelevantes Interesse an kostengünstigen und effizienten Emittlern und Detektoren für Terahertz Strahlung.

[0003] Es ist bekannt, dass Terahertz Strahlung mit photoleitenden Antennen (englisch PCA – photoconductive antenna) unter Verwendung ultrakurzer Lichtpulse mit Pulsdauern ≤ 1 ps sowohl erzeugt als auch nachgewiesen werden kann (US 5 789 750). Eine photoleitende Terahertz Antenne besteht im Wesentlichen aus einer hochohmigen halbleitenden Schicht mit einer kurzen Relaxationszeit der Ladungsträger im Bereich einer Pikosekunde, die auf einem ebenfalls hochohmigen Substrat aufgebracht ist und auf der eine elektrisch leitende Antennenstruktur beispielsweise in der Form eines Dipols mit einem Gap als Unterbrechung im Zentrum des Dipols angeordnet ist. Zur Emission oder zum Nachweis von Terahertz Strahlung wird die Halbleiterschicht im Gap der Antenne mit kurzen Laserpulsen bestrahlt. Die Photonenenergie der Laserpulse ist dabei größer als die elektronische Bandlücke der halbleitenden Schicht, so dass das Laserlicht in der halbleitenden Schicht absorbiert wird und bewegliche Ladungsträger erzeugt.

[0004] Zur Emission von Terahertz Strahlung wird an der Dipol Antenne eine Spannung angelegt. Dadurch entsteht im Gap der Antenne ein elektrisches Feld, dem die durch den optischen Puls erzeugten freien Ladungsträger folgen. In der Beschleunigungsphase der Ladungsträger wird elektromagnetische Strahlung im Terahertz Bereich emittiert. Wegen der geringen Relaxationszeit der Ladungsträger wird der entstandene elektrische Strom anschließend sehr schnell wieder gestoppt, was dazu führt, dass unerwünschte niederfrequente Strahlung im Gigahertz Bereich nur in sehr geringem Maße entsteht.

[0005] Zum Nachweis von Terahertz Strahlung wird beispielsweise an die Dipol Antenne ein Stromverstärker angeschlossen. Ein Strom ist dann messbar, wenn an der Antenne ein elektrisches Feld der Tera-

hertz Strahlung anliegt und gleichzeitig der Laserpuls freie Ladungsträger erzeugt.

[0006] Um die zeitliche Korrelation zwischen Erzeugung und Nachweis der Terahertz Strahlung zu gewährleisten, werden die vom Laser erzeugten Pulse jeweils in zwei Pulse aufgeteilt. Der erste Puls wird auf die als Emittor mit einer Betriebsspannung versehene Antenne gerichtet und der zweite Puls wird über eine einstellbare Verzögerungsleitung auf die mit dem Stromverstärker versehene Antenne gerichtet. Mit der Verzögerung kann die Laufzeit der Terahertz Impulse zwischen beiden Antennen berücksichtigt werden und außerdem können die empfangenen Terahertz Pulse im Zeitbereich abgetastet werden. Um ein möglichst großes Signal/Rausch Verhältnis der gesamten Anordnung zu erreichen, werden die Laserpulse so geteilt, dass eine größere Intensität auf die Sendeantenne und demzufolge eine geringere Intensität auf die Empfangsantenne fällt. Die Intensität der erzeugten Terahertz Strahlung ist in einem gewissen Bereich der Intensität der Laserpulse und damit der erzeugten Ladungsträgerdichte proportional. Der nachweisbare Strom in der Empfangsantenne ist wegen der geringen Feldstärke der Terahertz Strahlung dagegen sehr gering. Deshalb ergibt eine Erhöhung der Intensität des Laserpulses an der Empfangsantenne keinen nennenswerten Signalgewinn.

[0007] Um breitbandige Messungen mit Terahertz Strahlung im Zeitbereich durchführen zu können, werden außer den Strahlführungssystemen für die Terahertz Strahlung ein leistungsstarker Femtosekunden Laser, ein Strahlteiler, eine optische Verzögerungsleitung, eine Sendeantenne und eine Empfangsantenne benötigt. Entsprechend dem Stand der Technik können, wie bereits oben erwähnt, als Sende- und Empfangsantennen photoleitenden Antennen eingesetzt werden.

[0008] Derartige, mit Femtosekunden Lasern bestrahlte Antennen sind beispielsweise in folgenden Patentschriften näher beschrieben: US 5 729 017, US 5 789 750, WO 2004/086560 A2, GB 2 393 037 A, GB 2 392 779 A, GB 2 409 337 A, WO 02/060017 A1 und EP 0606776 A2.

[0009] In der Patentschrift US 5894125 A ist ein Teil eines THz Messsystems beschrieben, bei dem die zu messende Probe in unmittelbarer Nähe der photoleitenden Antenne positioniert ist, so dass sie sich im Nahfeld der Terahertz Antenne befindet. Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass keine Intensitätsverluste durch optische Elemente wie Linsen oder Spiegel zur Führung der Terahertz Strahlung zwischen Antenne und Probe entstehen. Eine solche Anordnung ist jedoch nicht zur Ausleuchtung makroskopischer Objekte mit Terahertz Strahlung geeignet.

[0010] Leistungsstarke Femtosekunden Laser ar-

beiten im modengekoppelten Betrieb. Am weitesten verbreitet sind Ti:Saphir Laser wegen ihrer großen Verstärkungs-Bandbreite und der damit verbundenen Möglichkeit, sehr kurze Femtosekunden Pulse zu erzeugen. Neben Kerr-Lens-modelocking werden auch sättigbare Absorberspiegel aus Halbleitern zur Realisierung des modengekoppelten Betriebs eingesetzt. Einen Überblick über den Stand der Technik zu Femtosekunden Lasern finden man beispielsweise in folgenden Publikationen: WO 01/43242 A1, WO 02/11256 A1, US 6 778 565 B2, Applied Physics B 65, Seiten 137–150 (1997), Nature 424, Seiten 831–837 (2003), Applied Physics B 79, Seiten 555–558 (2004), Journal of the Optical Society of America B 16, Seiten 376–388 (1999).

[0011] In der Patentschrift WO 03/073563 A2 ist ein modengekoppelter Kurzpuls laser zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung beschrieben, bei dem ein Resonatorspiegel aus einem Halbleiterbauelement besteht, das einerseits Modenkopplung bewirkt und gleichzeitig durch das Anlegen einer Spannung an zwei Elektroden als Terahertz-Sendeantenne dient. Der Vorteil einer solchen integrierten Anordnung besteht darin, dass für die Erzeugung der Terahertz Strahlung die optische Leistungsdichte innerhalb des Laserresonators eingesetzt wird. Diese ist wegen des geringen Auskoppelgrades wesentlich höher als außerhalb des Lasers. Allerdings kann in der photoleitenden Antenne nur ein geringer Bruchteil der optischen Leistung innerhalb des Laserresonators absorbiert und zur Ladungsträgererzeugung in der photoleitenden Antenne genutzt werden, weil andernfalls der Resonator zu große optische Verluste bekäme und der Laser nicht anschwingen würde. Weil die Absorptionsverluste nicht größer als die üblichen Transmissionsverluste des Auskoppelspiegels sein dürfen, ist die für die Terahertz Strahlungserzeugung zur Verfügung stehende optische Leistung bei dieser Anordnung nicht größer als bei einer konventionellen Anordnung, bei der sich die photoleitende Terahertz Antenne außerhalb des Laserresonators befindet.

[0012] Modengekoppelte Femtosekunden Faserlaser werden gegenwärtig entwickelt. Sie besitzen den Vorteil geringerer Justieranforderungen im Betrieb. Nachteilig ist aber noch die meist geringere Ausgangsleistung im Vergleich zu Femtosekunden Stab- oder Scheibenlasern. Ein Femtosekunden Faserlaser mit einer mittleren Ausgangsleistung von 17 mW ist in Optics Express 13, Seiten 9346–9351 (2005) beschrieben.

[0013] Ein wesentliches Problem beim Aufbau von Terahertz Messanordnungen mittels photoleitender Antennen stellt der erforderliche Femtosekunden Laser dar. Wegen der insbesondere für den Betrieb der Sendeantenne notwendigen großen mittleren Leistung des Lasers im Bereich von 1W oder mehr ist der Laser einerseits sehr teuer und andererseits ist der

Betrieb eines solchen Lasers nicht einfach, so dass eine hochqualifizierte Person auf dem Gebiet der Laseroptik zur Bedienung benötigt wird. Dieser Umstand erschwert den Einsatz von Terahertz Messsystemen zur Materialuntersuchung oder in Sicherheitskontrollen in sensiblen Bereichen wie Flughäfen.

[0014] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Anordnung zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung unter Verwendung photoleitender Antennen anzugeben, die mit einem Puls laser geringer Leistung und damit einem kostengünstigeren und einfacher zu bedienenden Laser auskommt.

[0015] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch die Anordnung zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung unter Verwendung photoleitender Antennen nach Patentanspruch 1 gelöst. Die erfindungsgemäße Anordnung kombiniert die bekannte Funktion einer photoleitenden Antenne mit dem zum passiven modengekoppelten Betrieb erforderlichen sättigbaren Absorberspiegel innerhalb des Resonators eines Faserlasers. Faserlaser besitzen meist eine hohe Verstärkung, weil die Länge des aktiven Mediums wesentlich größer ist als bei anderen Festkörperlasern. Sie können deshalb mit Auskoppelspiegeln betrieben werden, die einen großen Auskoppelgrad im Bereich von 30% bis 80% besitzen. Entsprechend kann auch die sättigbare Absorption der photoleitenden Antenne im Bereich von 30% bis 80% gewählt werden, so dass hierbei ein Großteil der im Resonator zur Verfügung stehenden optischen Leistung für die Erzeugung der Terahertz Strahlung genutzt werden kann.

[0016] Wird an das Gap der photoleitenden Antenne eine Spannung angelegt, dient die Anordnung zur Erzeugung von Terahertz Strahlung. Umgekehrt kann auch ein Strom- oder Spannungsverstärker an das Gap der Antenne angeschlossen werden. In diesem Falle ist die Anordnung zum Nachweis von Terahertz Strahlung einsetzbar, die auf die photoleitende Antenne trifft.

[0017] Die Nutzung eines sättigbaren Absorberspiegels mit einer starken Absorption wird durch den Einsatz eines Faserlasers ermöglicht. Deshalb ist die im Patentanspruch 1 beschriebene Kombination eines Faserlasers zusammen mit einer photoleitenden Antenne starker Absorption besonders vorteilhaft, wenn es um eine hohe Effizienz der Umwandlung der optischen Laserleistung in Terahertz Strahlung geht.

[0018] Die im Patentanspruch 2 angegebene Möglichkeit der direkten Montage der photoleitenden Antenne auf das nicht gepumpte Ende des Faserlasers vereinfacht den Aufbau des Terahertz Systems, weil keine optischen Strahlführungssysteme zwischen dem aktiven Lasermedium und der Antenne erforder-

lich sind und weil keine Strahljustierung erforderlich ist.

[0019] Im Anspruch 3 ist beschrieben, dass durch das Anlegen einer Spannung U an die Antennenstruktur die Anordnung als Terahertz Emitter eingesetzt werden kann.

[0020] Durch den Anschluss eines Strom- oder Spannungsverstärkers entsprechend Anspruch 4 kann die Anordnung zum Nachweis von Terahertz Strahlung eingesetzt werden.

[0021] Es ist weiterhin zweckmäßig, entsprechend Anspruch 5 auf der Rückseite der photoleitenden Antenne eine Sammellinse aus einem Halbleitermaterial mit etwa dem gleichen Brechungsindex wie dem der photoleitenden Antenne aufzubringen, um die von der Sendeantenne emittierte Terahertz Strahlung zu kollimieren beziehungsweise die empfangene Terahertz Strahlung auf das Gap der Empfangsantenne zu konzentrieren.

[0022] Eine erfindungsgemäße Anordnung zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung wird nachfolgend an Hand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert. In der zugehörigen Zeichnung zeigt

[0023] Fig. 1 ein Ausführungsbeispiel einer Anordnung zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung unter Verwendung eines Ytterbium dotierten Faserlasers mit einer Emissionswellenlänge von 1040 nm.

[0024] Zur Erzeugung der Terahertz Strahlung ist die photoleitende Antenne **1a** mit dem sättigbaren Absorberspiegel **3** sowie der darauf befindlichen Antennenstruktur **4** direkt auf ein Ende des Faserlasers **2** montiert. Der Faserlaser **2** wird über einen Koppler **11** mit Pumplicht **12** gepumpt. Das andere Ende des Faserlasers **2** ist mit einem hochreflektierenden Spiegel **13** abgeschlossen. Das für den Betrieb der Empfangsantenne **1b** erforderliche Laserlicht wird über einen Auskoppler **14** aus dem Laser ausgekoppelt. Es wird über eine einstellbare Verzögerungsleitung **15** und eine Lichtleitfaser **16** auf das Gap **5** der Empfangsantenne **1b** geführt, um dort die erforderlichen Ladungsträger zum richtigen Zeitpunkt zu erzeugen.

[0025] An der Antennenstruktur **4** der Sendeantenne **1a** ist eine Gleichspannung U von 20 V angelegt. Die Antennenstruktur besteht aus einem Schichtsystem aus Ti/Pt/Au mit einer Gesamtdicke von 300 nm. Das Gap **5** der Antennenstruktur besitzt eine Breite von 5 μm . Der sättigbare Absorberspiegel **3** unter der elektrisch leitenden Antennenstruktur **4** erfüllt zwei Funktionen. Er sorgt einerseits durch seine nichtlinear-optischen Eigenschaft für ein stabiles Pulsen des Lasers und andererseits infolge der Ladungsträger-

erzeugung während der Absorption des Laserlichtes zusammen mit der am Gap **5** angelegten Spannung U für den kurzen Pulsstrom, der zur Erzeugung der Terahertz Strahlung führt. Um diese beiden Funktionen zu erfüllen, besteht der sättigbare Absorberspiegel **3** aus einem Schichtsystem von **26** InGaAs/GaAs Quantum Wells, welche auf einem Bragg-Spiegel mit **27** Doppelschichten aus AlAs/GaAs auf einem semi-isolierenden GaAs Substrat aufgewachsen sind. Die InGaAs Wells besitzen bei einer Dicke von 10 nm einen In-Gehalt von 28%. Die Quantum Wells wurden bei einer Temperatur von 300 °C gewachsen, wodurch sie eine sehr geringe Ladungsträger Rekombinationszeit unterhalb einer Pikosekunde besitzen. Die InGaAs Quantum Wells sind jeweils um die Feldstärkemaxima des elektrischen Stehwellenfeldes vor dem Bragg-Spiegel gruppiert, um mit einer geringen InGaAs Gesamtschichtdicke eine große Absorption zu erreichen. Auf diese Weise wird erreicht, dass der elektrische Widerstand des Absorberspiegels groß ist.

[0026] Die durch den Pulsstrom unter dem Gap **5** der Antennenstruktur **4** erzeugte Terahertz Strahlung wird von einer Sammellinse **7** aus Si auf der Rückseite der photoleitenden Antenne **1a** kollimiert und auf ein zu untersuchendes Messobjekt **17** gerichtet. Die am Messobjekt **17** beeinflusste und reflektierte Terahertz Strahlung wird auf der Empfängerseite von einer Sammellinse **7** aus Si auf der Rückseite der photoleitenden Antenne **1b** auf das Gap **5** der Antennenstruktur **4** fokussiert.

[0027] Die Verzögerungsleitung **15** der Laserpulse wird so eingestellt, dass die vom Faserlaser **2** ausgekoppelten Pulse im Gap **5** der Empfangsantenne **1b** zu dem Zeitpunkt Ladungsträger erzeugen, zu dem die Terahertz Strahlung die Antenne erreicht. Die Empfangsantenne **1b** besitzt den gleichen Aufbau wie die Sendeantenne **1a**. Die Ladungsträger in der Empfangsantenne **1b** werden durch das ankommende Terahertz Feld beschleunigt und mit einem an die Antennenstruktur **4** angeschlossenen Stromverstärker **6** nachgewiesen.

[0028] In dem angegebenen Ausführungsbeispiel ist für die Sendeantenne und die Empfangsantenne der gleich Aufbau verwendet worden. Da die Aufgabe des Modenkoppels aber nur von einer der beiden Antennen erfüllt werden muss, kann es von Vorteil sein, dass die zweite, nicht zum Modenkoppeln verwendete Antenne einen anderen Aufbau besitzt.

[0029] Welche der beiden Antennen, die Sende- oder die Empfangsantenne zum Modenkoppeln des Lasers verwendet wird, ist an sich unerheblich. Es ist jedoch zweckmäßig, das Modenkoppeln mit der Sendeantenne zu realisieren, weil diese eine höhere optische Pulsleistung benötigt.

Aufstellung der verwendeten Bezugszeichen

Bezugszeichenliste

1a	photoleitende Antenne (Sendeantenne)
1b	photoleitende Antenne (Empfangsantenne)
2	Laser
3	sättigbarer Absorberspiegel
4	elektrisch leitfähige Antennenstruktur
5	Gap
6	Strom- oder Spannungsverstärker
7	Sammellinse
11	Koppler
12	Pumplicht
13	hochreflektierender Spiegel
14	Auskoppler
15	optische Verzögerungsleitung
16	Lichtleitfaser
17	Messobjekt

Patentansprüche

1. Anordnung zur Emission und zum Empfang von Terahertz Strahlung unter Verwendung photoleitender Antennen (1) mit einem Gap (5) und eines Pulslasers (2), der mittels der als sättigbarer Absorberspiegel (3) wirkenden photoleitenden Antenne (1) im mode locking Betrieb arbeitet, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- a) der sättigbare Absorberspiegel (3) aus einer Multi Quantum Well Struktur besteht, die eine starke Absorption im Bereich von 30% bis 80% bei der Wellenlänge des Lasers (2) besitzt und
- b) der Pulslaser (2) ein Faserlaser ist.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die photoleitende Antenne (1) mit dem sättigbaren Absorberspiegel (3) und der darauf befindlichen Antennenstruktur (4) direkt auf ein Ende des Lasers (2) montiert ist.

3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass an die Antennenstruktur (4) eine Spannung U angelegt ist, um Terahertz Strahlung zu erzeugen.

4. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass an die Antennenstruktur (4) ein Strom- oder Spannungsverstärker (6) angeschlossen ist, um Terahertz Strahlung nachzuweisen.

5. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass auf der Rückseite der photoleitenden Antenne (1) eine Sammellinse (7) aus einem Halbleitermaterial mit etwa dem gleichen Brechungsindex wie dem der photoleitenden Antenne (1) aufgebracht ist.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Fig. 1

