



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 007 378 B3** 2008.04.17

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 007 378.1**
 (22) Anmeldetag: **12.02.2007**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **17.04.2008**

(51) Int Cl.⁸: **G01N 21/35** (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:
**Genesis Adaptive Systeme DEUTSCHLAND
 GmbH, 73463 Westhausen, DE**

(74) Vertreter:
Dr. Weitzel & Partner, 89522 Heidenheim

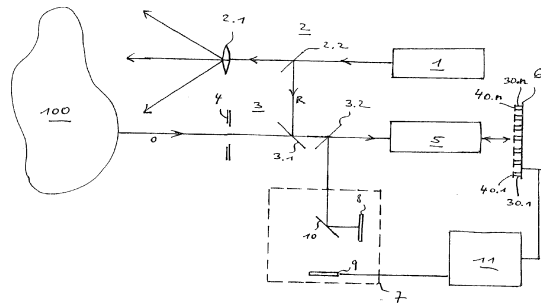
(72) Erfinder:
**Möller, Timo, Dr., 73463 Westhausen, DE; Hausner,
 Franz, 73457 Essingen, DE; Brock, Axel, Dr., 73447
 Oberkochen, DE; Beigang, René, Prof. Dr., 67705
 Trippstadt, DE; Jonuscheit, Joachim, Dr., 67269
 Grünstadt, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
US2006/01 53 262 A1
US2005/01 35 815 A1
US2005/00 58 166 A1
US 57 29 017 A
EP 09 03 566 B1
EP 07 62 565 B1
WO 2006/1 29 113 A1
WO 2004/0 38 854 A2
**Tyson, R.: Principles of Adaptive Optics, Academic
 Press Inc., U.S., Mai 1991, ISBN 0-12-705900-8;**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Erfassung eines Objekts mit Terahertz-Strahlung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Terahertz-Messanordnung, umfassend

- eine Terahertz-Strahlungsquelle;
- einen Beleuchtungsstrahlengang, dem von der Terahertz-Strahlungsquelle Terahertz-Strahlung zugeführt wird,
- einen Objektstrahlengang mit einem Verschlusselement;
- ein im Objektstrahlengang dem Verschlusselement nachfolgender optischer Verstärker mit adaptiver Phasenkongjugationseinrichtung;
- eine im Objektstrahlengang dem optischen Verstärker nachfolgende Messeinrichtung mit einem Terahertz-Detektor, einem Wellenfrontsensor und einem Schaltelement zur wahlweisen Strahlungszuführung zum Terahertz-Detektor oder dem Wellenfrontsensor;
- einer Regelungseinrichtung für die adaptive Phasenkongjugationseinrichtung, wobei die Regelungseinrichtung Messsignale des Wellenfrontsensors verarbeitet;
- Mittel zur Zuführung einer Referenzstrahlung vom Beleuchtungsstrahlengang zum optischen Verstärker.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erfassung eines Objekts mit Terahertz-Strahlung, insbesondere zur Erzeugung einer Abbildung eines Objekts im Terahertz-Spektralbereich. Auf US 2005 0 135 815 A1 wird verwiesen. Hieraus ist eine Terahertz-Messanordnung mit Phasenregelung unter Einsatz von Wellenfrontsensoren bekannt geworden.

[0002] Terahertz-Strahlung in einem Frequenzband um 10^{12} Hertz entspricht elektromagnetischen Wellen mit einer Wellenlänge im Submillimeterbereich und ist folglich im Spektralbereich zwischen dem fernen Infrarot und hochenergetischen Mikrowellenstrahlen angesiedelt. Charakteristisch für Terahertz-Strahlung ist ihre Eigenschaft, die meisten dielektrischen Materialien ohne wesentliche Abschwächung zu durchdringen. Demnach ist Kleidung, Papier, Plastik und Leder im Wesentlichen für Terahertz-Strahlung transparent. Im Gegensatz hierzu reflektieren elektrisch leitfähige Gegenstände und insbesondere Metalle Terahertz-Strahlung. Hieraus lässt sich ableiten, dass Terahertz-Strahlung besonders für sicherheitstechnische Anwendungen und die Personenkontrolle eingesetzt werden kann.

[0003] Darüber hinaus ist Terahertz-Strahlung aufgrund der geringen Photonenenergie im Bereich von weniger Millielektronenvolt nicht ionisierend, sodass sie für biologisches Gewebe unschädlich ist. Ferner können mittels Terahertz-Strahlung aufgrund selektiver Reflektions- und Absorptionseigenschaften unterschiedliche Materialien unterschieden werden. Demnach besteht eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten im Sicherheitsbereich, etwa zum Aufspüren von Sprengstoff, aber auch im medizinisch-diagnostischen Bereich. Beispielhaft wird bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten von Terahertz-Strahlen auf die EP 0 903 566 B1 und die WO 2006/129113 A1 verwiesen.

[0004] Zur Erzeugung von Terahertz-Strahlung kann ein elektrisch vorgespannter Halbleiter mit einem kurzen Laserimpuls bestrahlt werden, wodurch die so freigesetzten und im elektrischen Feld beschleunigten Ladungsträger zu einer Emission von Terahertz-Strahlung führen. Solchermaßen generierte Terahertz-Strahlungspulse sind durch eine Kopplung zur Phase des angeregten Laserpulses definiert, demnach ist die Strahlung kohärent, allerdings weist ein solcher Terahertz-Strahlungsimpuls ein breitbandiges Frequenzspektrum im Bereich von 10 GHz bis 50 THz auf. Hierzu wird beispielhaft auf die US 5.729.017 verwiesen. Allerdings sind auch monochromatische Terahertz-Quellen beispielsweise aus der EP 0 762 565 B1 bekannt. Ferner können Laser zur Erzeugung von Terahertz-Strahlen verwendet werden. Ein solcher Terahertz-Laser, realisiert mittels

einer Quantenkaskade, wird in der US 2006/0153262 A1 und der US 2005/0058166 A1 offenbart.

[0005] Als Detektoren für Terahertz-Strahlung können antennengekoppelte Bolometer verwendet werden, die wiederum zur Herstellung eines Sensorfelds matrixartig angeordnet sein können. Hierzu wird auf die EP 0 903 566 B1 verwiesen. Eine weitere Kamera für das Terahertz-Spektrum ist in der WO 2004/038854 angegeben. Ferner wird durch die WO 2006/129113 A1 eine Anordnung von Heterodyn-Detektoren offenbart, die ein größeres Bildfeld abstrahieren. Weitere sensorische Systeme für das Terahertz-Spektrum verwenden photonische Kristalle, die als Mikrostrukturen hergestellt sind. Derartige Sensoren können die auf natürliche Weise von einem nicht beleuchteten Objekt ausgesandte Terahertz-Strahlung erfassen, sodass sich vollständig passive Überwachungssysteme realisieren lassen.

[0006] Terahertz-basierte Messsysteme weisen jedoch auch Grenzen auf, die daraus resultieren, dass Terahertz-Strahlung durch Wasser absorbiert wird und somit der in der Luft befindliche Wassergehalt zu einer Abschwächung von Terahertz-Strahlung führt. Neben dem Effekt der Abschwächung wird Terahertz-Strahlung durch Brechzahländerungen, die in der Luft aufgrund von Temperaturschwankungen vorliegen, phasendefiniert. Demnach kann eine Messung mit Terahertz-Strahlung nur über einen Abstand von wenigen Metern ausgeführt werden.

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Messsystem anzugeben, das im Spektralbereich der Terahertz-Strahlung arbeitet und das dazu geeignet ist, abgeschwächte, vom zu messenden Objekt stammende Terahertz-Strahlung zu erfassen und sowohl präzise Messungen als auch Messungen über größere Distanzen, beispielsweise 10 m oder mehr, durchführen zu können. Entsprechend wird ein Verfahren gesucht, das die voranstehend genannten Ziele erfüllt.

[0008] Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst.

[0009] Die Erfinder haben erkannt, dass die von einem zu vermessenden Objekt ausgesandten Terahertz-Strahlen vor deren Erfassung verstärkt werden müssen, sodass diese zunächst durch ein optisches Verstärkermedium für den vorliegenden Spektralbereich geleitet werden. Allerdings führt ein solcher optischer Verstärker zur weiteren Verschlechterung der Strahlqualität. Diese resultieren im Wesentlichen aus einer räumlichen Variation des Brechungsindex im aktiven Medium des optischen Verstärkers, die wiederum auf Temperaturschwankungen zurückzuführen ist. Zum Ausgleich der so indizierten Phasenstörungen kann eine Phasenkonjugationseinrichtung

verwendet werden. Hierunter wird ein Spiegel verstanden, der einen Strahl auf sich selbst zurückfaltet, das heißt die Strahlung breitet sich aus, wie wenn sie in der Zeit rückwärts laufen würde. Wird die Phasenfront durch eine ebene Welle angenähert, so kann die Phasenkonjugation auch im Sinne einer Wellenfrontumkehr angesehen werden, das heißt es erfolgt an jeder Stelle eine Umkehr der Ausbreitungsrichtung.

[0010] Aufgrund der Phasenkonjugationseinrichtung ergibt sich ein weiterer Durchtritt durch den optischen Verstärker, wobei aufgrund des umgekehrten Verzeichnisses in der Zeit im Verhältnis zur ursprünglichen Welle die durch die optischen Verstärker beim ersten Durchlauf erzeugten Phasenstörungen wieder ausgeglichen werden und eine doppelt verstärkte Ausgangsstrahlung resultiert, deren Wellenfront gegenüber dem Eintritt keiner weiteren Deformation unterliegt.

[0011] Die bekannten nichtlinearen Effekte zur Realisierung einer Phasenkonjugationseinrichtung, beispielsweise eine 4-Wellen-Mischung aufgrund nichtlinearer Polarisierung dritter Ordnung oder aufgrund stimulierter Brillouin-Streuung, sind für Strahlungsenergien, die auch nach dem Durchtritt durch den optischen Verstärker klein sind, deshalb schwierig zu verwenden, da Nichtlinearitäten nur im Bereich hoher Feldstärken zutage treten. Daher wird für die Erfindung bevorzugt zur Realisierung einer Phasenkonjugationseinrichtung auf einen passend geformten, konventionellen Spiegel zurückgegriffen, dessen Oberflächenverlauf so an die Ausbreitungsrichtung der Welle angepasst wird, dass diese an jeder Stelle senkrecht zur Spiegeloberfläche steht. Demnach muss der Spiegelverlauf möglichst gut an die Form der Phasenfront angepasst werden, sodass es gelingt, die Ausbreitungsrichtung in jedem Punkt umzukehren und eine Phasenkonjugation zu bewirken. Erfindungsgemäß wird hierzu ein mehrteiliger, segmentierter Spiegel verwendet, wobei dessen Einzelsegmente adaptive optische Elemente darstellen. Besonders bevorzugt werden hierzu Membranspiegel, die eine dünne, hochflexible Membran verwenden. Diese kann beispielsweise mit den Verfahren der Mikrostrukturtechnik hergestellt sein und aus Silizium, Quarz oder einer Mylar-Folie bestehen. Die Formeinstellung des Membranspiegels erfolgt durch eine Vielzahl von Aktuatoren, die beispielsweise piezoelektrische, elektrostatische oder magnetische Kräfte zur Ausführung einer Stellbewegung verwenden. Alternativ kann die Membran selbst aus bimorphen Piezoelementen bestehen. Zusätzlich ist es denkbar, auf den Spiegelflächen zusätzliche Materialien, beispielsweise Stapelsysteme mit alternierendem Brechungsindex zur Erhöhung der Reflexion aufzubringen. Insbesondere für das Material Mylar ist dies notwendig, da dies im Terahertz-Bereich durchsichtig ist.

[0012] Erfindungsgemäß kann mit Hilfe der adapti-

ven Phasenkonjugationseinrichtung die Qualität der Phasenkonjugation eingestellt werden. Beachtlich ist, dass es von der Qualität des phasenkonjugierten Spiegels abhängt, ob die im optischen Verstärker erzeugten Phasenstörungen beseitigt werden können. Gerade die Qualität des phasenkonjugierten Spiegels lässt jedoch insbesondere für optisch aktive Medien, deren Eigenschaften zeitlich variabel sind, nicht hinreichend exakt bestimmen.

[0013] Darüber hinaus kann aufgrund der thermischen Linsenwirkung eine Änderung der Divergenz des Strahlungsfeldes auftreten, wobei die Notwendigkeit für Anpassungen am optischen Verstärker bestehen. Daher wird entsprechend der Erfindung zwischen einem Justagemodus und einem Messmodus gewechselt. Besonders vorteilhaft ist ein regelmäßiger, insbesondere periodischer Wechsel, sodass im Justagemodus über die Anpassung der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung eine möglichst hohe Strahlqualität eingestellt wird, die dann im nächsten nachfolgenden Zyklus des Messmodus für die vom Objekt kommende Strahlung beibehalten wird.

[0014] Zur Realisierung des Justagemodus wird Terahertz-Strahlung mit bekannter Strahlcharakteristik durch den optischen Verstärker mit der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung geleitet und sodann einem Wellenfrontsensor zugeführt. Aus den Messdaten des Wellenfrontsensors wird mittels einer Regelungseinrichtung eine Nachführung der Stellelemente der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung ausgeführt, falls dies notwendig ist. Besonders bevorzugt wird für den Justagemodus Strahlung aus dem Beleuchtungsstrahlengang beziehungsweise unmittelbar von der Terahertz-Strahlungsquelle ausgekoppelt und dem Objektstrahlengang vor dem optischen Verstärker zugeleitet. Gleichzeitig wird der Objektstrahlengang mittels eines Verschlusselements eingangsseitig verschlossen. Demnach wird für die Zeitdauer der Justage kein Zutritt von Objektstrahlung durch die Eingangspupille in den Objektstrahlengang erlaubt. Demnach tritt ausschließlich Referenzstrahlung mit bekannter Charakteristik durch den optischen Verstärker hindurch und das erhaltene verstärkte Signal kann unmittelbar zur Charakterisierung der Qualität der Einstellung der Phasenkonjugationseinrichtung verwendet werden.

[0015] Zur Messung der Strahlqualität wird für die Erfindung eine zweiteilige Messeinrichtung verwendet. Der erste Teil enthält den Terahertz-Detektor, der nur für den Messmodus verwendet wird, während der zweite Teil einen Wellenfrontsensor umfasst, der für den vorliegenden Justagemodus Anwendung findet. Zusätzlich umfasst die Messeinrichtung ein Schaltelement, um die Strahlführung wahlweise auf dem Terahertz-Detektor oder den Wellenfrontsensor zu leiten.

[0016] Im Messmodus ist das Verschlusselement im Objektstrahlengang geöffnet, sodass Strahlung vom Objekt in den optischen Verstärker eintreten kann und von dort weiter zur Messeinrichtung geführt wird. In der Messeinrichtung ist für den Messmodus das Schaltelement so gestellt, dass der Terahertz-Detektor die eintreffende Strahlung empfängt. Gemäß einer Weitergestaltung der Erfindung wird auch für den Messmodus der unmittelbar von der Terahertz-Quelle beziehungsweise dem Beleuchtungsstrahlengang kommende Referenzstrahl in den Objektstrahlengang eingekoppelt. Demnach wird sowohl der Objektstrahl wie auch der Referenzstrahl zum Terahertz-Detektor geführt, auf dem dann eine Interferenz auftritt, falls die Terahertz-Strahlung hinreichend kohärent ist. Demnach wird bevorzugt wenigstens eine teilkohärente Terahertz-Strahlungsquelle, besonders bevorzugt eine kohärente Strahlungsquelle in der Form eines Terahertz-Lasers, verwendet. Aus dem sich bei einem kohärenten Referenz- und Objektstrahl ergebenden Interferenzmuster kann ein holographisches Bild des Objekts aufgenommen werden, wobei mittels FFT unmittelbar das Projekt rekonstruiert werden kann. Zur Realisierung des holographischen Aufbaus wird bevorzugt ein Strahlteiler im Beleuchtungsstrahlengang zur Auskoppelung des Referenzstrahls verwendet. Zusätzlich ist im Objektstrahlengang ein teildurchlässiger Spiegel vorgesehen, der die parallele Strahlführung des Objektstrahls und des Referenzstrahls zum optischen Verstärker ermöglicht.

[0017] Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung ist das Schaltelement in der Messeinrichtung, durch das ein Umschalten vom Terahertz-Detektor auf den Wellenfrontsensor und damit der Übergang vom Messmodus auf den Justagemodus ermöglicht wird, so ausgebildet, dass der Übergang zwischen diesen beiden Modi regelmäßig und insbesondere periodisch erfolgt. Dies kann so realisiert werden, dass das Schaltelement ein Chopperrad umfasst, an dem sich eine hochreflektive Beschichtung mit einer halbdurchlässigen Beschichtung segmentweise abwechseln. Demnach wird bei der Drehung des Chopperrads die auftreffende Strahlung entweder reflektiert und zum Terahertz-Detektor geführt oder zum Wellenfrontsensor durchgeleitet. Diese regelmäßige Abfolge zwischen dem Messmodus und dem Justagemodus erlaubt eine ständige Kontrolle der Qualität der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung und ermöglicht über die Koppelung zur Regelungseinrichtung für die Stellelemente der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung eine ständige Nachführung zum Optimalpunkt.

[0018] Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung wird die Synchronisierung der Einstellung für das Verschlusselement und der Stellung des Schaltelements in der Messeinrichtung dadurch bewirkt, dass beide Elemente durch ein Bauelement

ausgeführt sind, welches beispielsweise wiederum durch ein Chopperrad realisiert werden kann. Wird die drehende Scheibe des Chopperrads so unterteilt, dass wenigstens ein hochreflektives erstes Segment und wenigstens ein teildurchlässiges zweites Segment in Umfangsrichtung aufeinander folgen und das Chopperrad so positioniert, das es sowohl in den Objektstrahlengang wie auch in den Strahlengang der Messeinrichtung eingreift, so kann in einer ersten Stellung des Chopperrads das hochreflektive erste Element das Verschlusselement im Objektstrahl bilden, das heißt die Objektstrahlung wird auf der einen Seite abgeblockt, und kann ferner dazu dienen, die vom Beleuchtungsstrahlengang kommende Referenzstrahlung in dem Objektstrahlengang einzukoppeln und dem optischen Verstärker zuzuleiten. Gleichzeitig kann für diese erste Stellung des Chopperrads das teilweise durchlässige zweite Segment in der Messeinrichtung die Funktion des Schaltelements übernehmen und Strahlung zum Wellenfrontsensor durchlassen. Entsprechend liegt bei einer Weiterdrehung des Chopperrads eine zweite Stellung vor, bei der das teilweise durchlässige zweite Segment sich im Objektstrahlengang befindet und demnach die vom Objekt kommende Strahlung durchgeleitet wird, das heißt das Verschlusselement ist geöffnet. Gleichzeitig befindet sich das hochreflektive erste Segment in der Messeinrichtung und reflektiert Strahlung zum Terahertz-Detektor. Auch für diese Ausgestaltung kann eine holographische Messung ausgeführt werden, da in der zweiten Stellung das Chopperrad das teilweise durchlässige zweite Segment in den Objektstrahlengang dreht und über eine wenigstens teilweise Reflexion auf dessen Rückseite zusätzlich zum Objektstrahl auch der Referenzstrahl eingekoppelt werden kann.

[0019] Nachfolgend wird die Erfindung anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels und im Zusammenhang mit Figuren erläutert, welche Folgendes darstellen:

[0020] [Fig. 1](#) zeigt eine erfindungsgemäße Ausgestaltung einer Terahertz-Messanordnung im Messmodus.

[0021] [Fig. 2](#) zeigt eine erfindungsgemäße Ausgestaltung einer Terahertz-Messanordnung im Justagemodus.

[0022] [Fig. 3](#) zeigt eine Ausgestaltung eines Bauteils zur Realisierung des Umschaltens vom Messmodus auf den Justagemodus in der Stellung für den Justagemodus.

[0023] [Fig. 4](#) zeigt eine Ausgestaltung des Bauteils aus [Fig. 3](#) in der Einstellung für den Messmodus.

[0024] In [Fig. 1](#) ist eine Messanordnung dargestellt, die zur Abbildung eines Messobjekts **100** mittels

Terahertz-Strahlen dient. Zur Ausleuchtung des Messobjekts **100** mit Terahertz-Strahlung wird bevorzugt eine kohärente Terahertz-Strahlungsquelle **1** verwendet. Diese kann beispielsweise als Terahertz-Quantenkaskaden-Laser ausgebildet sein, für die im Leitungsband eine Abfolge von Unterbändern vorliegt. Die emittierte Strahlungsfrequenz hängt wiederum von den Abständen dieser Unterbänder ab und kann beispielsweise im Bereich von 1 THz bis 10 THz eingestellt werden.

[0025] Das im Terahertz-Spektrum emittierte Laserlicht wird in einem Beleuchtungsstrahlengang **2** eingekoppelt. Dieser ist schematisch vereinfacht dargestellt, wobei lediglich eine Linse **2.1** skizzenhaft dargestellt ist, die zur Ausleuchtung des Objekts **100** dient. Darüber hinaus sind im Sinne der Übersichtlichkeit lediglich die Mittenstrahlen, welche die Strahlführung repräsentieren, schematisiert dargestellt. Durch die Bestrahlung mit kohärenter Terahertz-Strahlung resultiert eine Abstrahlung vom Objekt **100**. Hierzu ist schematisch vereinfacht die Objektstrahlung **O** dargestellt. Die vom Objekt kommende Strahlung wird in den Objektstrahlengang **3** eingeführt. Dabei ist es notwendig, ein dem Objektstrahlengang **3** zugeordnetes Verschlusselement **4** zu durchqueren. Dies kann beispielsweise als mechanisches Verschlusselement ausgebildet sein, das im Bereich der Eintrittspupille des Objektstrahlengangs **3** vorliegt. Alternative Ausgestaltungen des Verschlusselements verwenden ein Element mit einer elektrisch schaltbaren Reflektivität.

[0026] Im Objektstrahlengang **3** wird die Objektstrahlung einem optischen Verstärker **5** zugeführt. Dieser kann beispielsweise als optischer parameterischer Oszillator ausgebildet sein oder ein aktives Medium aufweisen, in dem durch Energiezufuhr (Pumpen) eine Besetzungsinversion vorliegt und durch stimulierte Emission eine Strahlungsverstärkung eintritt. Für den Bereich von 1 bis 10 THz wird beispielsweise durch die US 2005/0058166 A1 ein Verstärker für Terahertz-Strahlung offenbart, in dessen aktive Region in Form einer Heterostruktur durch die alternierende Abfolge von GaAs und $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ gebildet wird.

[0027] Beim Durchlaufen des optischen Verstärkermediums soll die Terahertz-Strahlung amplitudenverstärkt und lediglich ein konstanter Phasenversatz erzeugt werden. Die letzte Bedingung kann insbesondere beim Auftreten von Temperaturschwankungen im aktiven Medium nur unzureichend erfüllt werden, sodass als Folge Phasenvariationen und damit eine Verschlechterung der Strahlqualität resultiert. Zur Umgehung dieser Problematik wird eine Phasenkonjugationseinrichtung vorgesehen, welche erfindungsgemäß adaptiv ausgebildet ist und die dazu dient, eine Wellenfrontumkehr zu realisieren und damit eine konjugierte, scheinbar in der Zeit zurücklaufende

Welle zu erzeugen, die auf sich selbst zurückgefaltet das aktive Medium des optischen Verstärkers nochmals durchquert und gleichzeitig die entstandenen Phasenvariationen zurückführt.

[0028] Vorzugsweise umfasst die adaptive Phasenkonjugationseinrichtung **6** einen adaptiven Spiegel, der wiederum bevorzugt als monolithischer Spiegel, als segmentierter Spiegel, als Membranspiegel oder durch mikromechanische Korrektoren realisiert werden kann. In den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) sind die Spiegelkomponenten des adaptiven Spiegels schematisch dargestellt und mit den Bezugszeichen **40.1**, ..., **40.n** versehen. Den Spiegelkomponenten **40.1**, ..., **40.n** wird bevorzugt eine Vielzahl von Aktoren **30.1**, ..., **30.n** zugeordnet, die zur Einstellung der Spiegelfläche des adaptiven Spiegels mit einer Genauigkeit im Nanometerbereich dienen, beispielsweise wird für einen Membranspiegel eine aus Silizium, Quarz oder Mylar bestehende dünne, hochflexible Membran durch die Aktoren **30.1**, ..., **30.n** elastisch verformt. Demnach wird durch die Stellbewegung der Aktoren **30.1**, ..., **30.n** die Reflektionsfläche des adaptiven Spiegels so angepasst, dass diese möglichst der Form der Phasenfront der auftreffenden Strahlung entspricht, sodass die Ausbreitungsrichtung der einfallenden Welle überall senkrecht zur Spiegeloberfläche steht und somit eine konjugierte Welle den Spiegel verlässt.

[0029] Die Aktoren **30.1**, ..., **30.n** können durch unterschiedliche Antriebskräfte bewegt werden, beispielsweise piezoelektrisch oder magneto- oder elektrostatisch. Eine mögliche Ausführungsform kann bionomorphe Aktoren umfassen, für die eine Verbindung zwischen einer Piezokeramik (zum Beispiel Blei-Zirkonat-Titanat, PZT) und einem Substrat (z. B. amorphes SiO_2) mittels einer Kleberschicht hergestellt wird. Alternativ kann die Piezokeramik als Sol-Gel-Schlicker mittels eines Siebdruckprozesses flüssig aufgebracht werden, wobei ein Sinterschritt und die Polarisierung der Schicht nachfolgen. Ferner kann zwischen der piezokeramischen Schicht und dem Substrat eine Barrierschicht, etwa eine Gold umfassende Schicht, vorgesehen sein.

[0030] Die Phasenkonjugationseinrichtung **6** mit dem die Aktoren **30.1**, ..., **30.n** umfassenden adaptiven Spiegel kann im Einzelnen vom Fachmann modifiziert werden, wobei für derartige adaptive Optiken beispielhaft auf die Monographie „Principles of Adaptive Optics“, Robert K. Tyson, Academic Press. Inc., 1991, ISBN 0-12-705900-8 verwiesen wird, deren Offenbarungsgehalt voll umfänglich in die vorliegende Anmeldung aufgenommen wird.

[0031] Der verstärkte und in seiner Strahlqualität wiederhergestellte Objektstrahl wird nun im Objektstrahlengang **3** beispielsweise über einen teildurchlässigen Spiegel **3.2** einer Messeinrichtung **7** zugelei-

tet, in der sich ein Terahertz-Detektor **8** befindet. Ein weiteres sensorisches Element in der Messeinrichtung **7** bildet einen Wellenfrontsensor **9**, wobei mittels eines Schaltelements **10** eine wahlweise Strahlungszuführung entweder zum Terahertz-Detektor **8** oder zum Wellenfrontsensor **9** erfolgt. Das Schaltelement **10** kann als bewegliches reflektives Element, und damit mechanisch, ausgeführt sein. Denkbar ist jedoch auch die Verwendung eines elektrisch schaltbaren Spiegels.

[0032] Durch dieses Schaltelement **10** erfolgt die Umschaltung vom Messmodus in den Justagemodus. Zusätzlich wird für den Justagemodus der Zutritt von Objektstrahlung **O** zum Objektstrahlengang **3** verschlossen, indem das Verschlusselement **4** entsprechend betätigt wird. Verstärkt und gemessen wird stattdessen eine Referenzstrahlung **R**, die vom Beleuchtungsstrahlengang **2** in den Objektstrahlengang **3** eingekoppelt wird. Hierzu kann beispielsweise im Beleuchtungsstrahlengang **2** ein mechanisch bewegtes, reflektives Element oder ein elektrisch schaltbares reflektives Element verwendet werden. Ein entsprechendes Element liegt dann im Objektstrahlengang **3** vor. Gemäß einer Weitergestaltung wird jedoch die Referenzstrahlung zur Erzeugung eines holographischen Abbilds des Objekts **100** während des Messmodus dauerhaft in den Objektstrahlengang **3** eingekoppelt, sodass für den Justagemodus ständige Aus- und Einkopplungselemente verwendet werden können. Dies ist in [Fig. 2](#) anhand der teildurchlässigen Spiegel **2.2** und **3.1** dargestellt, die jeweils dem Beleuchtungsstrahlengang **2** und dem Objektstrahlengang **3** zugeordnet sind.

[0033] Während des Justagemodus erfolgt der Durchtritt der Referenzstrahlung **R** durch den optischen Verstärker **5** und ein Zurückfalten über die Phasenkonjugationseinrichtung **6**. Entsprechend zum Messmodus wird die verstärkte und phasenkorrigierte Referenzstrahlung der Messeinrichtung **7** zugeführt und aufgrund der Justagestellung des Schaltelements **10** dem Wellenfrontsensor **9** zugeleitet. Im einfachsten Fall wird der Wellenfrontsensor **9** eine Vermessung des Strahlprofils ausführen, beispielsweise soll für den Fall, dass die Terahertz-Strahlungsquelle **1** ein TEM₀₀-Strahlprofil abstrahlt, dies auch vom Wellenfrontsensor **9** gemessen werden. Zur eigentlichen Bestimmung der Wellenfront selbst kann der Wellenfrontsensor **9** alternativ eine regelmäßige Matrix von Mikrolinsen übereinstimmender Brechweite umfassen, denen jeweils ein sensorisches Element zugeordnet ist. Nach dem Shack-Hartmann-Prinzip kann dann die laterale Abweichung des Beleuchtungsschwerpunkts für jede der Mikrolinsen bestimmt werden und aufgrund der Abweichung von der erwarteten Solllage die mittlere Neigung der Wellenfront und damit deren Gradient über der Mikrolinse gemessen werden. Aus dieser Messung der Subapertur kann auf die Wellenfront

selbst zurückgerechnet werden. Als Alternative wird die Wellenfront mittels interferometrischer Messung bestimmt.

[0034] Ausgehend von den Wellenfrontdaten kann über eine Regelungseinrichtung **11** eine solche Anpassung der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung **6** erfolgen, dass am Wellenfrontsensor **9** im vorliegenden Justagemodus die Deformation der Wellenfronten minimiert wird. Hierzu werden die Aktuatoren **30.1**, ..., **30.n** des adaptiven Spiegels entsprechend angesteuert. Diese während des Justagemodus erzielte Einstellung wird dann für den nachfolgenden Messmodus beibehalten, bei dem die Objektstrahlung **O** und die Referenzstrahlung **R** durch den optischen Verstärker **5** mit der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung **6** geführt werden.

[0035] Gemäß einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung werden das Verschlusselement **4** und das Schaltelement **10** zu einer Baueinheit in Form eines Chopperrad **20s** vereinigt, was in den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) dargestellt ist. Das Chopperrad **20** umfasst wenigstens zwei Segmente, ein erstes hochreflektives Segment **20.1** (mit vorzugsweise $R > 95\%$) und wenigstens ein zweites teildurchlässiges Segment **20.2**, wobei mehrere dieser Segmente in einer alternierenden Abfolge von hochreflektiven, ersten Segmenten **20.1** und teildurchlässigen zweiten Segmenten **20.2** am Chopperrad **20** angeordnet sein können. Das Bauelement ist so dimensioniert und so positioniert, dass es sowohl in den Objektstrahlengang **2** eingreift, als auch in den Bereich der Messeinrichtung **7** eindringen kann, sodass je nach Stellung des Chopperrad **20s** Strahlung entweder dem Terahertz-Detektor **8** oder dem Wellenfrontsensor **9** zugeleitet wird und somit die Funktion des Schaltelements **10** realisiert werden kann. Folglich kann für eine in [Fig. 3](#) dargestellte erste Stellung des Chopperrad **20s** das hochreflektive erste Segment **20.1** die Objektstrahlung **O** abblocken, sodass diese nicht in den Objektstrahlengang **3** eintritt. Stattdessen wird die Einkopplung der Referenzstrahlung **R** ermöglichen. Für diese Stellung des Chopperrad **20s** trifft die vom optischen Verstärker **5** verstärkte und vom Strahlteiler **3.2** umgelenkte Referenzstrahlung **R** auf das teildurchlässige zweite Segment **20.2** und wird somit wenigstens teilweise durch das Chopperrad **20** hindurchgeleitet und trifft zur Vermessung auf den Wellenfrontsensor **9**. Folglich wird diese erste Stellung des Bauteils für den Justagemodus eingesetzt.

[0036] In einer zweiten Stellung für den Messmodus wird das hochreflektive erste Segment **20.1** in den Bereich der Messeinrichtung **7** gebracht, sodass eine Reflexion der einfallenden Strahlung ausschließlich auf dem Terahertz-Strahlungsdetektor **8** erfolgt. Gleichzeitig befindet sich das teildurchlässige zweite Segment **20.2** im Bereich des Objektstrahlengangs **3** und ermöglicht den Durchtritt der Objektstrahlung **O**.

Zusätzlich wird für die vorteilhafte Ausgestaltung eines holographischen Messsystems weiterhin die Referenzstrahlung R dem Beleuchtungsstrahlengang 2 zugeführt, wobei die Einkopplung durch eine Teilreflexion am teildurchlässigen zweiten Segment 20.2 bewirkt wird.

[0037] Das Bauteil kann mittels einer im Einzelnen nicht dargestellten motorischen Vorrichtung gedreht werden, sodass ein ständiger Wechsel und bevorzugter periodischer Wechsel zwischen dem Justagemodus und dem Messmodus erfolgen kann.

Bezugszeichenliste

1	Terahertz-Strahlungsquelle
2	Beleuchtungsstrahlengang
2.1	Linse
2.2	Strahlteiler
3.1	teildurchlässiger Spiegel
3	Objektstrahlengang
4	Verschlusselement
5	optischer Verstärker
6	adaptive Phasenkonjugationseinrichtung
7	Messeinrichtung
8	Terahertz-Detektor
9	Wellenfrontsensor
10	Schaltelement
11	Regelungseinrichtung
20	Chopperrad
20.1	hochreflektives erstes Segment
20.2	teildurchlässiges zweites Segment
30.1–30.n	Aktuatoren
40.1–40.n	Spiegelkomponenten des adaptiven Spiegels
100	Objekt
R	Referenzstrahlung
O	Objektstrahlung

Patentansprüche

1. Terahertz-Messanordnung, umfassend
 1.1 eine Terahertz-Strahlungsquelle (1);
 1.2 einen Beleuchtungsstrahlengang (2), dem von der Terahertz-Strahlungsquelle (1) Terahertz-Strahlung zugeführt wird,
 1.3 einen Objektstrahlengang (3) mit einem Verschlusselement (4);
 1.4 ein im Objektstrahlengang (3) dem Verschlusselement nachfolgender optischer Verstärker (5) mit adaptiver Phasenkonjugationseinrichtung (6);
 1.5 eine im Objektstrahlengang (3) dem optischen Verstärker (5) nachfolgende Messeinrichtung (7) mit einem Terahertz-Detektor (8), einem Wellenfrontsensor (9) und einem Schaltelement (10) zur wahlweisen Strahlungszuführung zum Terahertz-Detektor (8) oder dem Wellenfrontsensor (9);
 1.6 einer Regelungseinrichtung (11) für die adaptive Phasenkonjugationseinrichtung (6), wobei die Rege-

lungseinrichtung (11) Messsignale (11) des Wellenfrontsensors (9) verarbeitet;
 1.7 Mittel zur Zuführung einer Referenzstrahlung (R) vom Beleuchtungsstrahlengang (2) zum optischen Verstärker (15).

2. Terahertz-Messanordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Terahertz-Strahlungsquelle (1) teilkohärent oder kohärent ist.

3. Terahertz-Messanordnung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Terahertz-Strahlungsquelle (1) ein Terahertz-Laser ist.

4. Terahertz-Messanordnung nach wenigstens einem der vorausgehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die adaptive Phasenkonjugationseinrichtung (6) einen adaptiven Spiegel umfasst.

5. Terahertz-Messanordnung nach wenigstens einem der vorausgehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Schaltelement (10) einen periodischen Wechsel der Strahlungszuführung zum Terahertz-Detektor (8) oder zum Wellenfrontsensor (9) ermöglicht.

6. Terahertz-Messanordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Schaltelement (10) in der Messeinrichtung (7) ein Chopperrad mit einer örtlich variierenden Reflektivität aufweist.

7. Terahertz-Messanordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Terahertz-Messanordnung ferner Mittel zur Synchronisation des Verschlusselements (4) und des Schaltelements (10) in der Messeinrichtung (7) umfasst.

8. Terahertz-Messanordnung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Terahertz-Messanordnung ein Chopperrad umfasst, das wenigstens ein hochreflektives erstes Segment (20.1) und wenigstens ein teildurchlässiges zweites Segment (20.2) umfasst, wobei in einer ersten Stellung des Chopperrads das hochreflektive erste Segment (20.1) das Verschlusselement (4) im Objektstrahlengang (3) bildet und Referenzstrahlung (R) vom Beleuchtungsstrahlengang (2) zum optischen Verstärker reflektiert (5) wird und das teilweise durchlässige zweite Segment (20.2) gleichzeitig das Schaltelement (10) in der Messeinrichtung (7) bildet und Strahlung zum Wellenfrontsensor (9) durchlässt und wobei in einer zweiten Stellung des Chopperrads das teilweise durchlässige zweite Segment (20.2) Strahlung im Objektstrahlengang (3) zum optischen Verstärker (5) durchlässt und gleichzeitig das hochreflektive erste Segment (20.1) das Schaltelement (10) in der Messeinrichtung (7) bildet und Strahlung zum Terahertz-Detektor (8) reflektiert wird.

9. Terahertz-Messanordnung nach wenigstens einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Zuführung einer Referenzstrahlung (R) einen Strahlteiler (2.2) im Beleuchtungsstrahlengang (2) und einen halbdurchlässigen Spiegel (3.2) im Objektstrahlengang (3) umfassen.

10. Terahertz-Messanordnung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Terahertz-Messanordnung ein Holographiesystem bildet.

11. Verfahren zur Erfassung eines Objekts (100) mit Terahertz-Strahlung, dadurch gekennzeichnet, dass eine Terahertz-Messanordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 10 verwendet wird und zwischen einem Justagemodus zur Einstellung der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung (6) und einem Messmodus zur Abbildung des Objekts (100) hin- und hergeschaltet wird, wobei im Justagemodus das Verschlusselement (4) im Objektstrahlengang (3) geschlossen ist und das Schaltelement (10) in der Messeinrichtung (7) so eingestellt ist, dass die durch den optischen Verstärker (5) verstärkte Referenzstrahlung (R) dem Wellenfrontsensor (9) zugeführt wird und aus dem Messsignal des Wellenfrontsensors (9) mittels der Regelungseinrichtung (11) die Einstellung der adaptiven Phasenkonjugationseinrichtung (6) bestimmt und an dieser vorgenommen wird und im Messmodus das Verschlusselement (4) im Objektstrahlengang (3) geöffnet ist und das Schaltelement (10) in der Messeinrichtung (7) die vom optischen Verstärker (5) eintreffende Terahertz-Strahlung dem Terahertz-Detektor (8) zuführt.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Objekt (100) mit einer kohärenten Terahertz-Strahlungsquelle (1) bestrahlt wird und beim Messmodus die Objektstrahlung (O) und die Referenzstrahlung (R) in den Objektstrahlengang (3) eingekoppelt werden und durch deren Interferenz auf den Terahertz-Detektor (8) ein holographisches Bild des Objekts (100) erzeugt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das holographische Bild auf dem Terahertz-Detektor (8) mittels FFT rekonstruiert wird.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

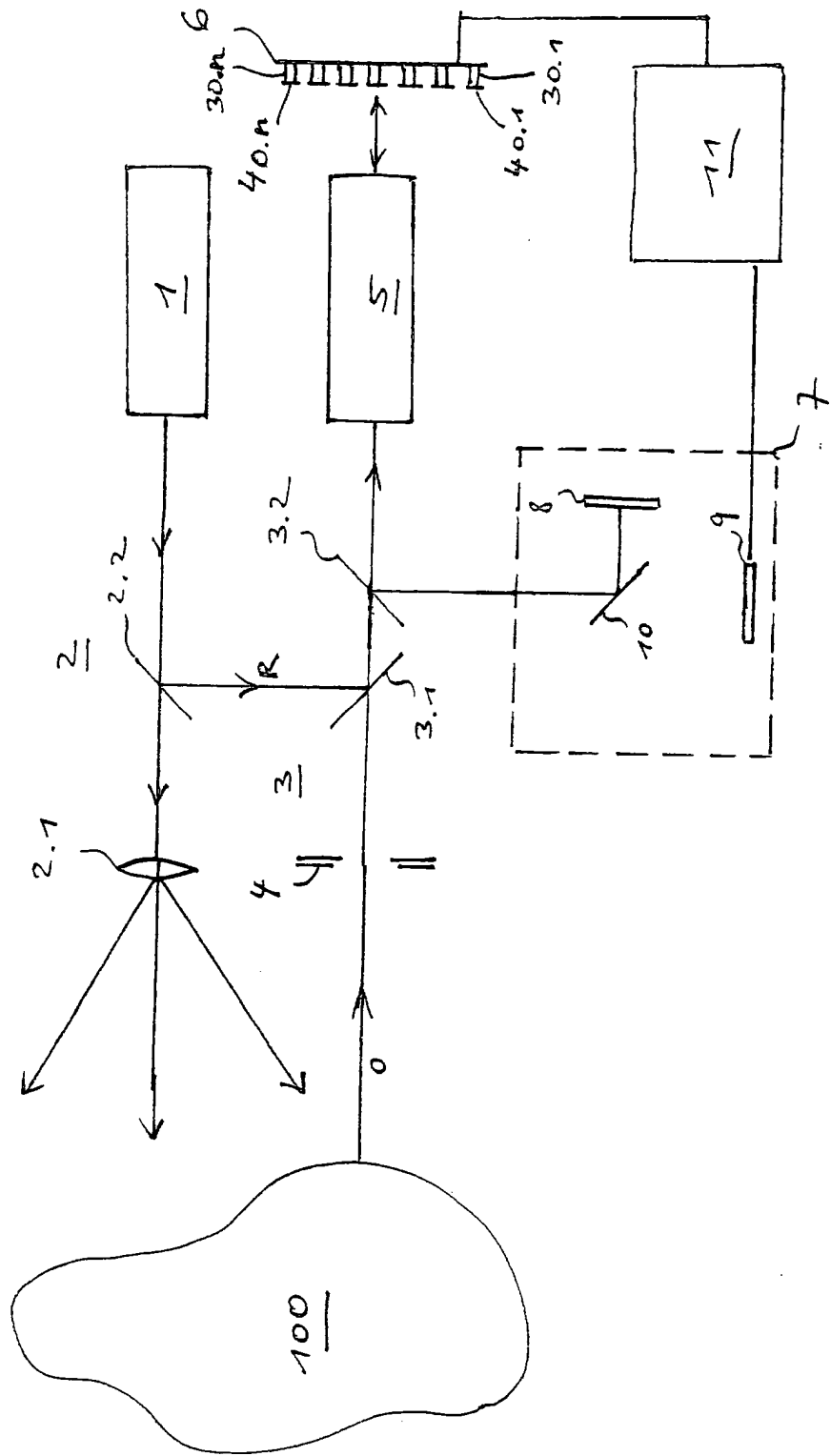


Fig. 2

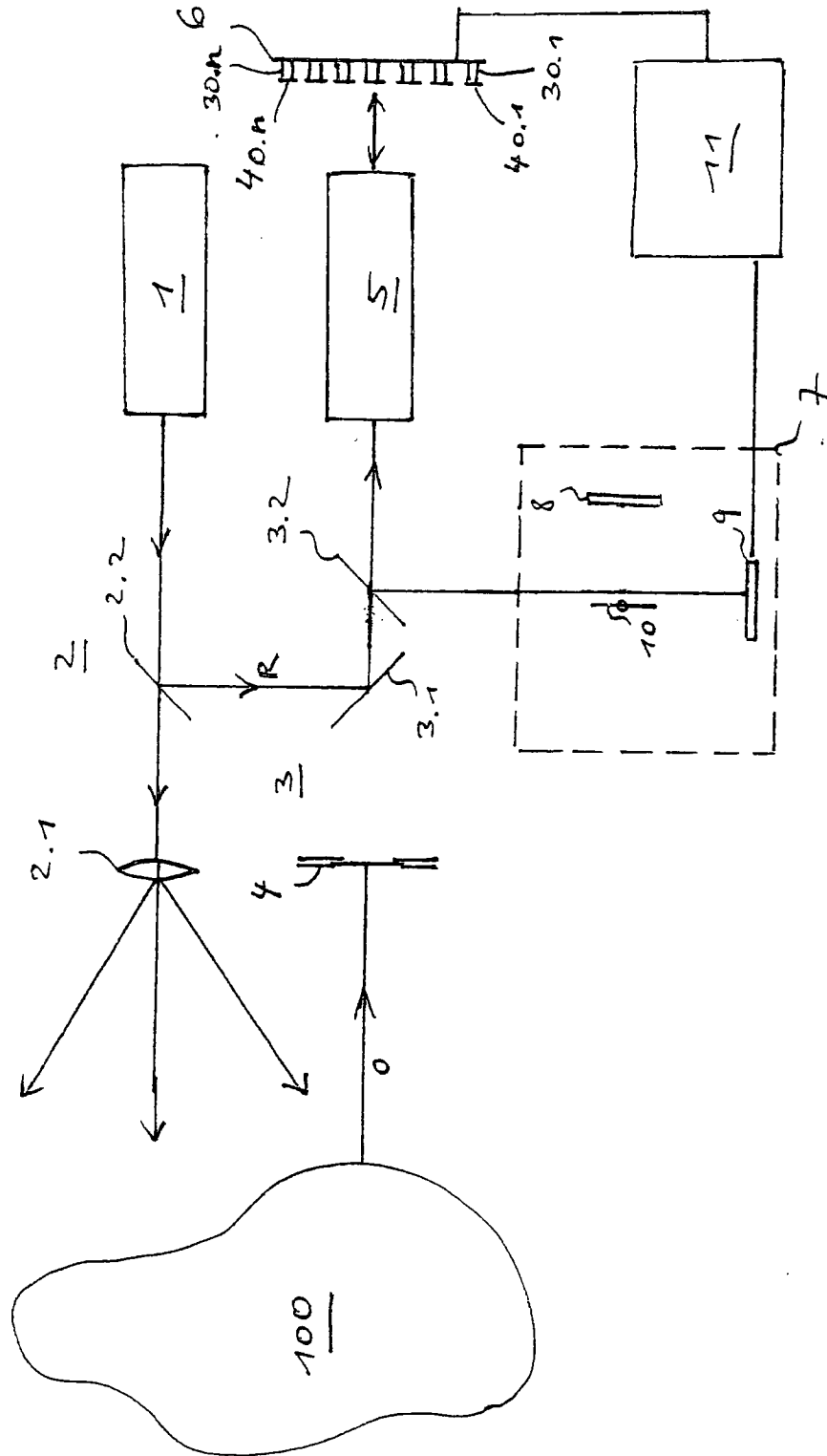


Fig. 3

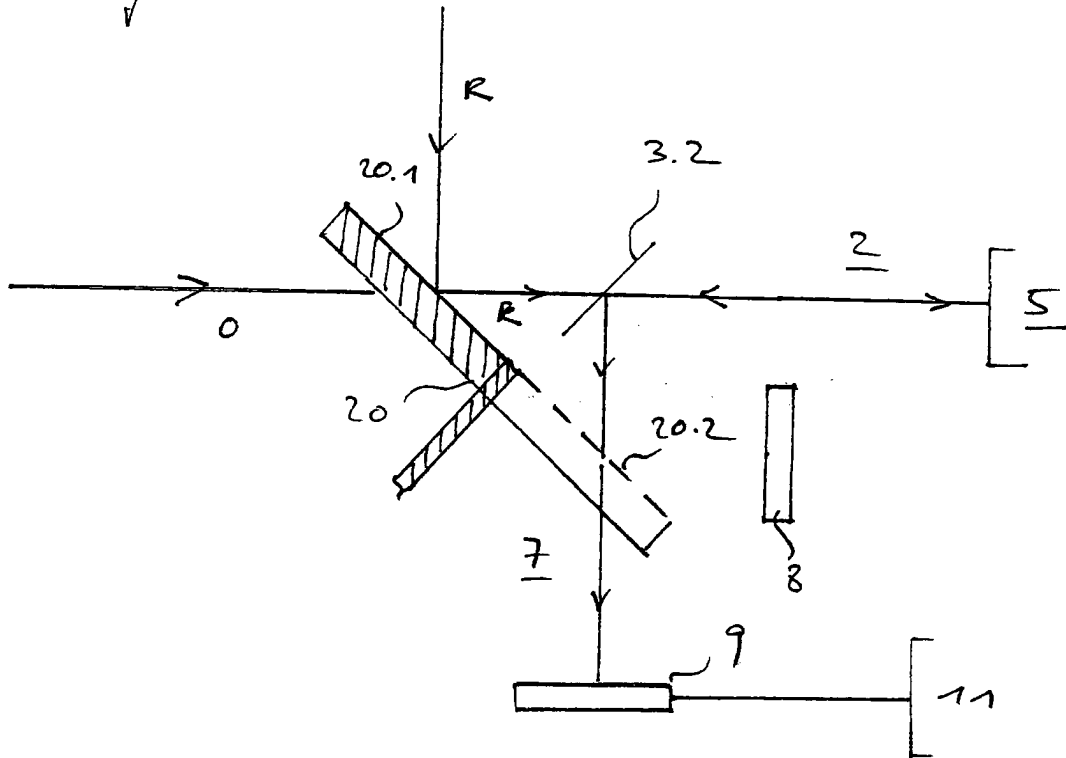


Fig. 4

