

Deutsches Patent- und Markenamt



⁽¹⁰⁾ DE 10 2016 009 132 A1 2018.02.01

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2016 009 132.0

(22) Anmeldetag: 28.07.2016

(43) Offenlegungstag: 01.02.2018

(51) Int CI.:

G01N 21/3586 (2014.01) G01N 21/3581 (2014.01)

(71) Anmelder: BATOP GmbH, 07745 Jena, DE (72) Erfinder: Richter, Wolfgang, 99425 Weimar, DE; Richter, Andreas, 07749 Jena, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: Time-Domain Terahertz-Spektrometer zur ortsaufgelösten Messung der Transmission oder Reflexion von Objekten

(57) Zusammenfassung: Time-Domain Terahertz Spektrometer zur ortsaufgelösten Messung der Transmission oder Reflexion von Objekten.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Time-Domain Terahertz Spektrometer zur ortsaufgelösten Messung der Transmission oder Reflexion von Objekten anzugeben, welches eine hohe Ortsauflösung gewährleistet, ohne dass ein kleiner Detektor oder eine Lochblende in geringem Abstand über der zu messenden Probe positioniert werden muss.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass im Strahlengang (1) des Terahertz Spektrometers vor oder nach dem fokussierenden Element (3) ein Hochpass-Filter (4) angeordnet ist, welches nur Frequenzen oberhalb einer Eckfrequenz des Messstrahl-Spektrums passieren lässt, wobei diese Eckfrequenz mindestens ein THz, vorzugsweise mehr als 2 THz beträgt. Der Erfindungsgedanke besteht darin, dass anstelle einer räumlichen Beschränkung des THz Strahls durch eine Lochblende oder einen kleinen Detektor in der Objektebene eine entsprechende spektrale Beschränkung des THz-Messstrahls auf hohe Frequenzen im kollimierten THz-Strahlengang eingesetzt wird.

Das erfindungsgemäße Time-Domain Terahertz Spektrometer kann zur ortsaufgelösten Messung der Transmission oder Reflexion von Objekten im Terahertz-Spektralbereich eingesetzt werden.

Zeichnung

Fig. 1 der Patentbeschreibung

THz-Strahlengang eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Time-Domain Terahertz-Spektrometers zur ortsaufgelösten Messung der Transmission von Objekten.



Beschreibung

[0001] Da Terahertz (THz) Strahlung im Frequenzbereich von 0,1–10 THz dielektrische Stoffe mit geringen Absorptionsverlusten durchdringt, kann diese Strahlung zur Untersuchung von Objekten genutzt werden, die in solchen dielektrischen Stoffen verpackt sind. Beispiele für transparente Stoffe im THz-Spektralbereich sind Papier, Pappe und eine große Zahl verschiedener Plaste, die zur Verpackung genutzt werden.

[0002] Da die Wellenlänge der THz-Strahlung wesentlich größer ist als Lichtwellenlängen, ist infolge der Beugung die Ortsauflösung bei der Aufnahme von THz-Bildern durch diese Wellenlänge begrenzt. Die Vakuum-Wellenlänge der Strahlung von 1 THz beträgt etwa 300 µm. Time-Domain THz-Spektrometer sind die am weitesten verbreiteten THz-Spektrometer, weil sie mit vertretbarem technischen Aufwand einen relativ großen Spektralbereich zwischen 0,1–5 THz mit einem für die weitere Signal-Auswertung nutzbaren Signal/Rausch-Verhältnis ermöglichen. Die Messung der lateral abhängigen Transmission oder Reflexion von THz-Strahlung von Objekten wird auch als THz Imaging bezeichnet.

[0003] Eine bekannte Methode für das THz-Imaging besteht darin, mittels Linsen oder Spiegeln am Ort des zu untersuchenden Objekts einen THz-Fokus mit kleinem Durchmesser zu erzeugen. Die aus dem Fokus divergierende transmittierte oder reflektierte THz-Strahlung wird wiederum mittel Linsen oder Spiegeln kollimiert und auf den Detektor fokussiert. Um ein THz-Bild zu erzeugen, wird das Objekt schrittweise durch den THz-Fokus geschoben. Dieses Verfahren des THz-Imagings wird beispielsweise in den Patentschriften US5623145 und EP0727671 erläutert. Das Problem bei diesen Anordungen besteht darin, dass das THz-Spektrum, bedingt durch die übliche Erzeugung mittels photoleitender Antennen, bei niedrigen Frequenzen < 1 THz die größte Signalamplitude besitzt und die Signalamplitude bei höheren Frequenzen rapide abnimmt. Selbst bei Verwendung fokussierender Linsen oder Spiegel mit großer numerischer Apertur (NA) wird deshalb die Ortauflösung beim THz Imaging durch die Wellenlänge des Maximums der THz-Strahlung bestimmt, wenn zum Erreichen einer hohen Messgeschwindigkeit nur die Pulsamplitude als Funktion des Ortes gemessen wird. Bei einem üblichen Maximum der THz-Strahlung von 500 GHz mit einer Wellenlänge von 600 µm ist deshalb der Durchmesser des erreichbaren THz-Fokus und damit die laterale Ortsauflösung beim THz-Imaging auf etwa 1 mm beschränkt.

[0004] Mit wachsender numerischer Apertur der fokussierenden THz Optik erhöht sich einerseits die erreichbare Ortsauflösung beim THz-Imaging, andererseits verkürzt sich aber auch die Tiefenschärfe, die durch die Rayleigh-Länge des fokussierten THz Strahls bestimmt wird. Das kann zu Problemen bei dickeren Objekten führen, wenn nicht genügend Platz für das Objekt vor der fokussierenden Linse vorhanden ist. Zur Vergrößerung der Tiefenschärfe beim THz-Imaging wurde deshalb in den Patentschriften KR101392311 und WO2014178514 vorgeschlagen, anstelle eines fokussierten Gauss-Strahls einen Bessel-Strahl zu verwenden. Dieses Vorgehen würde zwar eine größere Tiefenschärfe beim THz-Imaging ermöglichen, die laterale Auflösung würde jedoch noch schlechter als bei der Verwendung eines Gauss-Strahls.

[0005] Um das Problem des beugungsbegrenzten Fokusdurchmessers zu umgehen und eine höhere Ortsauflösung zu erreichen, wurden so genannte Nahfeld-Methoden für das THz-Imaging entwickelt. Eine Methode des Nahfeld-Imagings wird in den Patentschriften DE 10 2009 000 823 B3 und DE 10 2010 018 812 sowie in der Publikation "Tapered photoconductive terahertz field probe Tipp with subwavelength spatial resolution" in Applied Physics Letters 95, 041112 vom 29. Juli 2009 erläutert. Dabei wird das zu untersuchende Objekt mit einem fokussierten Gauss-Strahl beleuchtet und in unmittelbarer Nähe der Objektoberfläche wird die durch das Objekt beeinflusste THz-Strahlung mit einer sehr kleinen Empfangsantenne gemessen. Die erreichbare Ortsauflösung an der Objektoberfläche wird dabei durch die Ausdehnung der Empfangsantenne und den Abstand dieser Antenne vom Objekt bestimmt. Bei Verringerung der Abmessung der Empfangsantenne muss deren Abstand von der Objektoberfläche im gleichen Maße reduziert werden. Eine ähnliche Nahfeldmethode wurde in der Patentschrift US8148688 vorgeschlagen. Hierbei wird vor dem THz-Detektor eine metallische Blende mit einem kleinen Loch gesetzt, so dass die erreichbare Ortsauflösung wie in dem oben beschriebenen Nahfeldverfahren durch den Lochdurchmesser und den Abstand des THz-Detektors von der Probenoberfläche bestimmt wird.

[0006] Eine weitere Nahfeldmethode wird in der Patentschrift CN 103884422 vorgeschlagen. Hier wird eine metallische Blende mit einem kleinen Loch verwendet, um den THz-Strahl lateral einzuschränken. Auch in diesem Fall muss diese Lochblende ganz nah an der Objektoberfläche positioniert werden, um die der Lochgröße entsprechende Ortsauflösung nutzen zu können. Das durch die Lochblende gelangte THz-Signal wird mit einer Linse auf den Detektor fokussiert. Zusammenfassende Betrachtungen zur Leistungsfähigkeit von THz-Nahfeldmethoden und deren erreichbarer Ortsauflösung sowie des Zusammenhangs zwischen Ortsauflösung und Signalamplitude sind in den Artikeln "Recent advances in terahertz imaging" in der Zeitschrift Applied Phyics B, Lasers and Optics, Vol 68, 1085-1094 (1999)/DOI 10.1007/ s003409900011 sowie "Imaging with terahertz radiation" in Reports an Progress in Physics, Vol. 70 (2007) 1325–1379 angegeben.

[0007] Der wesentliche Nachteil der Nahfeld Methoden besteht darin, dass der Empfänger oder die Lochblende sehr dicht über der Objektoberfläche gehalten werden muss, was bei einem Objekt mit rauer Oberfläche insbesondere beim Scannen ein aufwändiges mechanisches Nachführproblem darstellt. Außerdem verringert sich die erreichbare Ortsauflösung, wenn die zu messenden Objektstrukturen in einem größeren Abstand unter der Objektoberfläche liegen, weil in diesem Fall der Abstand zum Empfänger beziehungsweise zur Lochblende größer sein muss.

[0008] Über eine Anordnung mit einer Blende in der Fourier-Ebene vor dem Detektor wird in der Publikation "Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval" in der Zeitschrift Optics Letters Vol. 33, Issue 9, pp. 974-976 (2008) berichtet. Hierbei wird das Objekt im parallelen THz Strahlengang beleuchtet. Anschließend wird der durch das Objekt beeinflusste Parallelstrahl mit einer Linse auf den Detektor fokussiert, wobei der Detektor in der Brennebene der Linse lateral verschoben wird. Aus den beim Scannen erfassten Messwerten kann die Struktur des Objektes anschließend berechnet werden. Die erreichbare laterale Auflösung der Objektstruktur wird bei diesem Verfahren hauptsächlich durch den verwendeten THz-Frequenzbereich sowie die Streckenlänge des lateralen Scans bestimmt. Diese Anordnung besitzt gegenüber den direkten Nahfeldmethoden den Vorteil, dass nicht in unmittelbarer Nähe der Objektoberfläche gescannt wird und daher das Annäherungsproblem einer kleinen Blende oder eines kleinen Detektors am Objekt entfällt. Nachteilig an diesem Verfahren ist jedoch, dass der Detektor beim Scannen bewegt werden muss. Deshalb kann dabei nur eine Detektorantenne mit einer optischen Faserkopplung genutzt werden. Außerdem ist die Rückrechnung der gescannten Fourier-Daten zur Bestimmung der Objektstruktur aufwändig.

[0009] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Time-Domain Terahertz Spektrometer zur ortsaufgelösten Messung der Transmission oder Reflexion von Objekten im Terahertz-Spektralbereich unter Verwendung fokussierender Elemente wie Linsen oder Spiegel anzugeben, welches eine hohe Ortsauflösung gewährleistet, ohne dass ein kleiner Detektor oder eine Lochblende in geringem Abstand über der zu messenden Probe positioniert werden muss. Weiterhin soll mit der erfindungsgemäßen Lösung die bei Nahfeldmethoden erreichbare Ortsauflösung auch im Inneren von Objekten, also unterhalb der Objektoberfläche erreicht werden. Außerdem soll das erfindungsgemäße Verfahren mit fest justierten THz-Antennen funktionieren und ohne aufwändige Berechnungen der eigentlichen Objektstruktur aus Fourier-Daten auskommen.

[0010] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, dass im Strahlengang des THz-Spektrometers vor oder nach dem fokussierenden Element ein Hochpass-Filter angeordnet ist, welches nur Frequenzen oberhalb einer Eckfrequenz des Messstrahl-Spektrums passieren lässt, wobei diese Eckfrequenz mindestens ein THz, vorzugsweise mehr als 2 THz beträgt.

[0011] Der wesentliche Erfindungsgedanke besteht darin, dass anstelle einer räumlichen Beschränkung des THz-Strahls durch eine Lochblende oder einen kleinen Detektor in der Objektebene eine entsprechende spektrale Beschränkung des THz-Messstrahls auf hohe Frequenzen und damit kleine Wellenlängen in der Fourier-Ebene im kollimierten THz-Strahlengang eingesetzt wird. Der Intensitätsverlust ist in beiden Fallen der gleiche, weil zur Erzielung einer bestimmten lateralen Auflösung die Beschränkung auf entsprechend kurze Wellenlängen erforderlich ist. Demzufolge muss zur Erreichung einer bestimmten lateralen Auflösung der Lochdurchmesser oder die Ausdehnung eines Detektors in der Objektebene genau so groß sein wie die Maschenweite eines metallischen Hochpass-Filters im kollimierten Strahlengang. In beiden Fallen ist die maximale Wellenlänge der nutzbaren THz-Strahlung gleich dem doppelten Durchmesser des Lochs D beziehungsweise gleich der doppelten Maschenweite D des Hochpassfilters. Die zugehörige Eckfrequenz f des Spektralfilters ergibt sich mit der Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum zu f = $c/(2 \cdot D)$.

[0012] Der mit der Erfindung erreichte Vorteil gegenüber dem bekannten Stand der Technik besteht darin, dass mit einem Hochpass-Filter im kollimierten Strahlengang die gleiche Ortsauflösung wie mit Nahfeldmethoden erreicht werden kann ohne dabei eine Blende oder einen kleinen Detektor unmittelbar über der Objektoberfläche positionieren zu müssen. Darüber hinaus kann die hohe Ortsauflösung auch bei verpackten Objekten erreicht werden, bei denen eine Nahfeldmethode nicht eingesetzt werden kann. Die hohe Ortsauflösung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist außerdem nicht an einen bestimmten Scan-Bereich gebunden und ist am Detektorsignal direkt erkennbar.

[0013] Um die infolge des Hochpass-Filters erreichbare laterale Ortsauflösung tatsächlich realisieren zu können, ist es zweckmäßig, gemäß Patentanspruch 2 zur Fokussierung des THz-Messstrahls auf das Objekt sowie zur Erfassung des vom Objekt beeinflussten Messstrahls asphärische Linsen mit korrigiertem Öffnungsfehler zu verwenden.

DE 10 2016 009 132 A1 2018.02.01

[0014] Eine weitere Ausgestaltung der Erfindung ist im Patentanspruch 3 erläutert. Dabei besteht das Hochpass-Filter aus einer elektrisch leitfähigen Platte mit dicht aneinander angeordneten Löchern gleichen Durchmessers, wobei der Lochdurchmesser eine halbe Wellenlänge der Eckfrequenz beträgt.

[0015] Eine kostengünstige Ausführungsform des Hochpassfilters wird im Patentanspruch 4 vorgeschlagen. Dabei besteht das Hochpassfilter aus einem Drahtgitternetz mit einer Maschenweite, die gleich der halben Wellenlänge der Eckfrequenz ist.

[0016] Eine weitere Ausführungsform des Hochpass-Filters ist im Patentanspruch 5 angegeben. In diesem Fall besteht das Hochpass-Filter aus einer strukturierten Metallschicht, die auf einer nur wenige Mikrometer dicken Polymerfolie aufgebracht ist, wobei die Metallschicht die Struktur eines Siebes mit gleich großen Löchern besitzt und der Lochdurchmesser gleich der halben Wellenlänge der Eckfrequenz ist.

[0017] Die Erfindung wird nachstehend anhand zweier Ausführungsbeispiele erläutert. Die zugehörigen Zeichnungen zeigen in

[0018] Fig. 1 die schematische Darstellung des THz-Strahlengangs sowie der optischen Komponenten des erfindungsgemäßen THz-Spektrometers zur ortsaufgelösten Messung der Transmission eines Objekts.

[0019] Fig. 2 die schematische Darstellung einer Ausführungsform eines Hochpassfilters in der Form eines Drahtgitternetzes

[0020] Fig. 3 die Wirkung eines Drahtgitters mit 100 µm Maschenweite auf die spektrale Verteilung der THz-Pulsamplitude

[0021] Fig. 4 die frequenzabhängige Transmission eines Hochpass-Filters aus einem Drahtgitters mit 100 µm Maschenweite.

[0022] Fig. 5 die schematische Darstellung des THz-Strahlengangs sowie der optischen Komponenten des erfindungsgemäßen THz-Spektrometers zur ortsaufgelösten Messung der Reflexion eines Objekts

[0023] Fig. 6 die schematische Darstellung einer weiteren Ausführungsform eines Hochpass-Filters in der Form einer mit Löchern versehenen Metallschicht auf einer dünnen Polymerfolie.

[0024] Fig. 1 zeigt schematisch der THz-Strahlengang **1** eines ersten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Time-Domain THz-Spektrometers zur ortsaufgelösten Messung der Transmission von

Objekten. Der THz-Puls wird in einer als Sender 2 arbeitenden Antenne erzeugt und kollimiert. Im kollimierten THz-Strahlengang 1 befindet sich vor der fokussierenden Linse 3 ein Hochpass-Filter 4 aus einem Edelstahl-Gitternetz mit einer Maschenweite D = 100 µm. Entsprechend der oben angegebenen Beziehung zwischen der Maschenweite D und der Eckfrequenz f des Messstrahl-Spektrums ergibt sich für das Hochpass-Filter eine Eckfrequenz f = $c/(2 \cdot D) = 1$, 5 THz. Das gefilterte THz-Signal wird mit einer asphärischen Linse 3 gemäß Patentanspruch 2 auf das zu untersuchende Objekt 5 fokussiert. Das vom Objekt nicht aus dem regulären Strahlengang herausgestreute THz Signal wird von einer weiteren asphärischen Linse 6 kollimiert und auf den Detektor 7 gerichtet.

[0025] Fig. 2 zeigt schematisch das im ersten Ausführungsbeispiel verwendete Hochpass-Filter aus einem Edelstahl-Drahtgitternetz mit einer Maschenweite von D = 100 μ m. Die Verwendung von Edelstahl-Draht hat gegenüber besser elektrisch leitenden Materialien wie Kupfer oder Aluminium den Vorteil, dass das auf die Gitterdrähte treffende THz-Signal weniger reflektiert und mehr absorbiert wird.

[0026] Fig. 3 zeigt die Messergebnisse der Filterwirkung des im ersten Ausführungsbeispiel verwendeten Hochpass-Filters mit einer Maschenweite von 100 μ m. Die mit Referenz bezeichnet Messkurve zeigt die spektrale Verteilung der THz-Amplitude vor dem Hochpass-Filter, während die "mit Filter 100 μ m" bezeichnete Kurve die entsprechende Verteilung der THz-Amplitude nach dem Hochpass-Filter zeigt.

[0027] In **Fig.** 4 ist die aus **Fig.** 3 berechnete Amplitudentransmission des verwendeten Hochpass-Filters als Funktion der Frequenz dargestellt. Die gemessene Eckfrequenz des Hochpass-Filters beträgt 1,4 THz und entspricht damit etwa dem aus der Maschenweite D = 100 μ m berechneten Wert.

[0028] Der Fokusdurchmesser d der Linse **3** am Objekt **5** in **Fig.** 1 wird durch die niedrigste Frequenz des THz-Messstrahls bestimmt und kann mit der Eckfrequenz f des Hochpass-Filters, der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit c und der numerischen Apertur NA = 0, 77 der fokussierenden Linse **3** wie folgt abgeschätzt werden: d = $0,61 \cdot c/(f \cdot NA) \approx 170 \mu m$.

[0029] Ohne das Hochpass-Filter **4** würde der Fokusdurchmesser der fokussierenden Linse **3** durch das Maximum der THz-Amplitude bei der Frequenz von ca. 0,7 THz bestimmt (siehe **Fig.** 3) und etwa 340 µm betragen.

[0030] Beim THz Imaging werden vor allem die an Kanten des zu untersuchenden Objekts **4** gestreuten Wellen aus dem regulären THz-Strahlengang **1** heraus gebeugt. Wegen der mit wachsender Frequenz

abnehmenden THz-Spektralamplitude in **Fig.** 3 steht für eine Messung mit solch einem Spektralfilter **4** eine geringere Signalamplitude zur Verfügung. Dieser Signalabfall mit wachsender Ortsauflösung ist auch bei den Nahfeldmethoden unvermeidlich und kann lediglich durch eine längere Messzeit zur Wahrung eines bestimmten Signal/Rausch-Verhältnisses ausgeglichen werden.

[0031] Die beim THz-Imaging erreichbare Ortsauflösung ist nicht auf den mit der fokussierenden Linse 3 erreichbaren Fokusdurchmesser d begrenzt. Vielmehr erzeugt die Beugung an den Objektkanten Intensitätsverluste im regulären THz-Strahlengang 1, die beim Scannen des Objekts 5 einen Intensitätskontrast verursachen. Die erreichbare Ortsauflösung hängt demzufolge ganz wesentlich vom Anteil des gestreuten Lichts an den Objektkanten zur Gesamtintensität des THz-Lichtes ab. Die gestreute Lichtintensität wächst mit dem Verhältnis (I/λ)^x, wobei I die streuende Strukturgröße des Messobjekts, λ die Wellenlänge der THz-Strahlung und der Exponent x einen Wert zwischen 2 und 4 bedeuten. Die Intensität der gestreuten THz-Strahlung steigt also rapide mit sinkender Wellenlänge beziehungsweise wachsender Frequenz. Um ein gut messbares Signal/Rausch-Verhältnis durch die Streuung an Objektkanten und damit eine gute Ortsauflösung beim THz-Imaging zu erreichen, ist die Nutzung hoher Frequenzen ganz wesentlich. Die Übertragung niedriger Frequenzen, die am Objekt 5 nur schwach gestreut werden, würde dagegen das Auflösungsvermögen wegen des geringeren Kontrasts verschlechtern. Darin liegt der wesentliche Nutzen des erfindungsgemäßen Hochpass-Filters im parallelen THz-Strahlengang.

[0032] Ein zweites Ausführungsbeispiel ist in Fig. 5 schematisch dargestellt. Gezeigt sind der THz-Strahlengang 1 sowie die optischen Komponenten des erfindungsgemäßen THz-Spektrometers zur ortsaufgelösten Messung der Reflexion eines Objekts 5. Der vom Emitter 2 parallel abgestrahlte Terahertz-Strahl 1 wird mittels des erfindungsgemäßen Hochpass-Filters 4 so beeinflusst, dass im weiteren THz-Strahlengang 1 nur Frequenzen oberhalb der Eckfrequenz des Hochpass-Filters 4 zur Verfügung stehen. Der gefilterte THz Strahl passiert einen halbdurchlässigen Teilerspiegel 8 und wird mit der asphärischen fokussierenden Linse 3 auf das Objekt 5 fokussiert. Dort wird er reflektiert, durch die gleiche Linse 3 wieder kollimiert und über den halbdurchlässigen Teilerspiegel 8 auf den THz-Detektor 7 gerichtet. Das Spektralfilter 4 ist in Fig. 6 schematisch dargestellt. Es besteht aus einer Metallschicht, die auf einer 10 µm dicken Polymerfolie aufgebracht ist. In der Metallschicht sind Löcher mit einem Durchmesser von D = 50 µm in regelmäßigem Abstand wie bei einem Sieb angeordnet. Der Lochdurchmesser bestimmt die Eckfrequenz von 2.8 THz. Der mit dieser eingeschränkten THz Bandbreite erreichbare Fokusdurchmesser der asphärischen fokussierenden Linse **3** beträgt ca. 85 µm. Das erfindungsgemäße Time-Domain THz-Spektrometer kann zur ortsaufgelösten Messung der Transmission oder Reflexion von Objekten im THz-Spektralbereich eingesetzt werden. Da die THz-Strahlung auch undurchsichtige Verpackungen aus Plastik oder Papier durchdringt, können mit der Anordnung beispielsweise verpackte Objekte zur Qualitätskontrolle gescannt werden.

ZITATE ENTHALTEN 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 5623145 [0003]
- EP 0727671 [0003]
- KR 101392311 [0004]
- WO 2014178514 [0004]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Publikation "Tapered photoconductive terahertz field probe Tipp with subwavelength spatial resolution" in Applied Physics Letters 95, 041112 vom 29. Juli 2009 [0005]
- Artikeln "Recent advances in terahertz imaging" in der Zeitschrift Applied Phyics B, Lasers and Optics, Vol 68, 1085–1094 (1999)/ DOI 10.1007/s003409900011 sowie "Imaging with terahertz radiation" in Reports an Progress in Physics, Vol. 70 (2007) 1325–1379 [0006]
- Publikation "Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval" in der Zeitschrift Optics Letters Vol. 33, Issue 9, pp. 974–976 (2008) [0008]

- DE 102009000823 B3 [0005]
- DE 102010018812 [0005]
- US 8148688 [0005]
- CN 103884422 [0006]

Patentansprüche

1. Time-Domain Terahertz-Spektrometer zur ortsaufgelösten Messung der Transmission oder Reflexion von Objekten im Terahertz (THz) Spektralbereich unter Verwendung fokussierender Elemente wie Linsen oder Spiegel, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Strahlengang (1) vor oder nach dem fokussierenden Element (3) ein Hochpass-Filter (4) angeordnet ist, welches nur Frequenzen oberhalb einer Eckfrequenz des Messstrahl-Spektrums passieren lässt, wobei diese Eckfrequenz mindestens ein THz, vorzugsweise mehr als zwei THz beträgt.

2. Time-Domain THz-Spektrometer nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Fokussierung des THz-Messstrahls (1) auf das Objekt (5) sowie zur Erfassung des vom Objekt (5) beeinflussten Messstrahls (1) asphärische Linsen (3, 6) mit korrigiertem Öffnungsfehler eingesetzt werden.

3. Time-Domain THz-Spektrometer nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Hochpass-Filter (**4**) aus einer elektrisch leitfähigen Platte mit dicht aneinander angeordneten Löchern gleichen Durchmessers besteht, wobei der Lochdurchmesser (D) eine halbe Wellenlänge der Eckfrequenz beträgt.

4. Time-Domain THz-Spektrometer nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Hochpass-Filter (**4**) aus einem Drahtgitternetz mit einer Maschenweite (D) besteht, die gleich der halben Wellenlänge der Eckfrequenz ist.

5. Time-Domain THz-Spektrometer nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Hochpass-Filter (**4**) aus einer strukturierten Metallschicht besteht, die auf einer nur wenige Mikrometer dicken Polymerfolie aufgebracht ist, wobei die Metallschicht die Struktur eines Siebes mit gleich großen Löchern besitzt und der Lochdurchmesser (D) gleich der halben Wellenlänge der Eckfrequenz ist.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3







Fig. 5



Fig. 6

