



(10) **DE 10 2011 015 384 B4** 2014.03.06

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2011 015 384.5**  
(22) Anmeldetag: **29.03.2011**  
(43) Offenlegungstag: **04.10.2012**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **06.03.2014**

(51) Int Cl.: **H01S 4/00 (2006.01)**

Innerhalb von neun 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, 07745, Jena, DE**

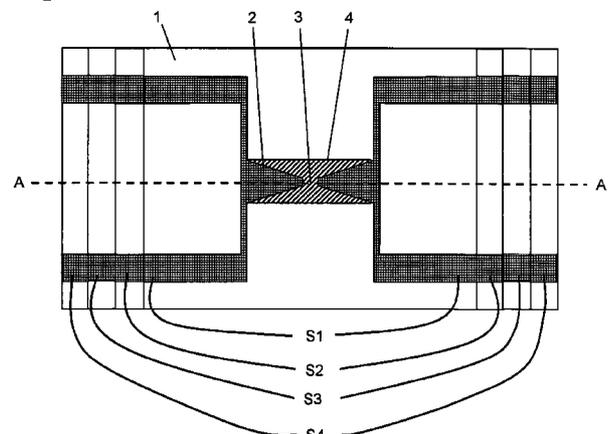
(72) Erfinder:  
**Richter, Wolfgang, Dr., 99425, Weimar, DE;**  
**Hohmuth, Rico, 07745, Jena, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

<b>DE</b>	<b>10 2006 010 297</b>	<b>B3</b>
<b>DE</b>	<b>10 2006 059 573</b>	<b>B3</b>
<b>US</b>	<b>2010 / 0 276 594</b>	<b>A1</b>
<b>EP</b>	<b>0 828 162</b>	<b>A2</b>

(54) Bezeichnung: **Photoleitendes Antennenarray zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung**

(57) Hauptanspruch: Photoleitendes Antennenarray (1) zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung (6), bestehend aus mehreren metallischen Empfangsdipolen (2) mit jeweils einer Lücke (3), in der sich ein Halbleitermaterial (4) mit einer Relaxationszeit im Femtosekundenbereich befindet, wobei die Empfangsdipole (2) in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung (6) gestaffelt angeordnet sind, so dass die gepulste Terahertzstrahlung (6) die Lücken (3) der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole (2) zeitlich nacheinander trifft und unter Verwendung gepulster Laserstrahlung (5) mit einer Photonenenergie, die größer ist als die energetische Bandlücke des Halbleitermaterials (4) in den Lücken der Empfangsdipole (2), und deren Ausbreitungsrichtung entgegengesetzt zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Terahertzstrahlung (6) ist, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Absorption des Halbleitermaterials (4) in der Lücke der Empfangsdipole (2) so gering bemessen ist, dass die gepulste Laserstrahlung (5) auch das Halbleitermaterial (4) in der Lücke (3) des zuletzt erreichten Empfangsdipols (7) elektrisch leitfähig schalten kann und dass die Ausgangssignale (S1, S2, ...) der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole (2) einzeln verstärkt werden, so dass die verstärkten Ausgangssignale (S1, S2, ...) ein Maß für den zeitlichen Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung (6) bilden.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein photoleitendes Antennenarray zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung.

**[0002]** Als Terahertzstrahlung wird elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von etwa 0,1 bis 10 THz bezeichnet. Da es im Frequenzbereich der Terahertzstrahlung 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). Da Terahertzstrahlung dielektrische Stoffe wie Papier oder Textilien gut durchdringt, können auch Objekte innerhalb von Verpackungen geortet werden. Es gibt daher sowohl ein wissenschaftliches, ein ökonomisches und auch ein sicherheitsrelevantes Interesse an kostengünstigen und effizienten Empfängern für Terahertzstrahlung.

**[0003]** Es ist bekannt, dass Terahertzstrahlung mit photoleitenden Antennen (englisch PCA – photoconductive antenna) unter Verwendung ultrakurzer Lichtpulse mit Pulsdauern  $\leq 1$  ps sowohl erzeugt als auch nachgewiesen werden kann (US 5 789 750). Eine photoleitende Empfangsantenne für Terahertzstrahlung besteht im Wesentlichen aus einer hochohmigen halbleitenden Schicht mit einer kurzen Relaxationszeit der Ladungsträger im Bereich weniger hundert Femtosekunden, die auf einem ebenfalls hochohmigen Substrat aufgebracht ist und auf der eine elektrisch leitende Antennenstruktur beispielsweise in der Form eines Dipols mit einer Lücke als Unterbrechung im Zentrum des Dipols angeordnet ist. Zum Nachweis gepulster Terahertzstrahlung wird die Halbleiterschicht in der Lücke 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. Als photoleitfähiges Material können Halbleiter wie GaAs und Si verwendet werden (Patentschriften US 5 729 017, DE 10 2006 010 297 B3). Es werden photoleitfähige Schichten mit einer geringen Rekombinationszeit der Ladungsträger möglichst im Femtosekunden-Bereich benötigt, um eine schnelle Response der Antenne zu gewährleisten. Diese kurze Rekombinationszeit wird beispielsweise durch das Aufwachsen einer GaAs oder InGaAs Schicht auf einem für die Terahertzstrahlung transparenten Substrat bei niedrigen Temperaturen im Bereich von 200°C bis 300°C erreicht. In der Patentschrift GB 2 393 037 A wurde gezeigt, dass es nach der Niedrigtemperatur Epitaxie

von GaAs Schichten zweckmäßig ist, die photoleitfähige Schicht bei einer Temperatur von etwa 450°C nachzutempeln, um einerseits einen hohen elektrischen Schichtwiderstand und andererseits eine hohe Ladungsträgerbeweglichkeit zu erreichen.

**[0004]** Auf der photoleitfähigen Schicht wird eine elektrisch leitfähige Antennenstruktur mit einer Lücke von typischerweise 5  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  Länge aufgebracht, die im Moment der Bestrahlung mit Laserlicht elektrisch leitfähig wird und in dieser Zeit den Dipol empfangsbereit schaltet. Als Material für die elektrisch leitfähige Antennenstruktur können Metalle wie Gold, Silber, Kupfer oder deren Legierungen sowie metallische Schichtsysteme wie Ti-Pd-Au, Ti-Pt-Au oder Ti-Ni-Ag verwendet werden.

**[0005]** Um ein gutes Signal/Rausch-Verhältnis der zu messenden Terahertzstrahlung zu erreichen, wurden auch Antennenarrays vorgeschlagen, bei denen sich die von der Terahertzstrahlung erzeugten Signale in mehreren Empfangsdipolen addieren. In der Patentschrift DE 10 2006 059 573 B3 wird dazu ein Array von Empfangsantennen elektrisch zusammengeschaltet, wobei die Empfangsantennen in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung angeordnet sind und deshalb alle die gleiche Phase der Terahertzstrahlung registrieren. In der Patentschrift US 2010/0276594 A1 sind Antennenarrays beschrieben, deren Empfangsdipole ebenfalls elektrisch zusammengeschaltet sind, aber in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung hintereinander angeordnet sind. Bei dieser Anordnung integrieren die Empfangsdipole über die Phase der sich ausbreitenden Terahertzstrahlung und bilden einen Mittelwert über alle registrierten Signale.

**[0006]** In der Patentschrift EP 0 828 162 A2 ist ein zweidimensionales Array von Empfangsantennen beschrieben, die in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung angeordnet sind und zur Erzeugung eines Terahertz-Bildes genutzt werden. Dazu werden die Signalausgänge der Empfangsdipole mit einem digitalen Signalprozessor verbunden, der über Analog-Digital-Konverter die Ansteuerung eines Displays ermöglicht.

**[0007]** Ein wesentlicher Nachteil photoleitender Empfangsantennen für gepulste Terahertzstrahlung besteht darin, dass zur Messung des zeitlichen Verlaufs des Terahertz-Pulses eine Verzögerungsstrecke im Strahlengang des gepulsten Laserlichts erforderlich ist, um die Laserpulse zeitlich gestaffelt auf die Empfangsantenne richten zu können. Üblicherweise werden mechanisch verschiebbare Verzögerungsstrecken eingesetzt. Durch die erforderliche mechanische Verschiebung ergeben sich folgende Nachteile:

- Die mechanische Verschiebungsstrecke benötigt relativ viel Platz im Terahertzspektrometer
- Eine schnelle mechanische Verschiebung, die die Erfassung des zeitlichen Pulsspektrums mit Videofrequenz ermöglicht, ist sehr aufwändig,
- Da die Messwerte für die Bestimmung der Terahertzamplitude zeitlich nacheinander entsprechend den Verschiebungsschritten erfasst werden müssen, ist das Messsignal insbesondere bei einer schnellen Messung wegen der kurzen Messzeit stark verrauscht.

**[0008]** Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen photoleitenden Terahertzempfänger für gepulste Terahertzstrahlung anzugeben, der zur Ansteuerung keine oder nur eine kurze Verzögerungsstrecke im Strahlengang des gepulsten Laserlichts benötigt und auch bei der schnellen Messwerterfassung mit Videofrequenz ein gutes Signal/Rauschverhältnis besitzt.

**[0009]** Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch den photoleitenden Terahertzempfänger gemäß den Patentansprüchen 1 oder 2 und den Unteransprüchen gelöst. Der photoleitende Terahertzempfänger besteht gemäß dem Stand der Technik aus einem photoleitenden Antennenarray mit mehreren metallischen Empfangsdipolen mit jeweils einer Lücke, in der sich ein Halbleitermaterial mit kurzer Relaxationszeit befindet. Das Antennenarray wird mit gepulster Laserstrahlung mit einer Photonenenergie bestrahlt, die größer ist als die energetische Bandlücke des Halbleitermaterials in der Lücke der Empfangsdipole. Die Empfangsdipole sind in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung gestaffelt angeordnet und die optische Absorption des Halbleitermaterials in den Lücken der Empfangsdipole ist so gering, dass die Laserstrahlung auch das Halbleitermaterial in der Lücke des zuletzt erreichten Empfangsdipols elektrisch leitfähig schalten kann. Die Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung ist der Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung entgegen gerichtet.

**[0010]** Die erste erfindungsgemäße Lösung des Problems besteht darin, dass die Ausgangssignale der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole einzeln verstärkt werden, so dass die verstärkten Ausgangssignale ein Maß für den zeitlichen Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung bilden.

**[0011]** Das erfindungsgemäße Antennenarray liefert nach jedem Terahertzpuls von jedem Empfangsdipol ein Signal, das einem bestimmten Zeitabschnitt des Terahertzpulses entspricht. Daher ist zur Aufnahme des zeitlichen Verlaufs eines Terahertzpulses keine zusätzliche Verzögerungsstrecke erforderlich, wenn die Anzahl der durch das Antennenarray gelieferten Signale für den jeweiligen Messzweck ausreichend gewählt ist. Die Laufstrecken des Terahertzpulses und des gegenläufigen Laserpulses zwischen zwei

benachbarten Empfangsdipolen mit einem Abstand  $a$  verursachen eine zeitliche Differenz  $T_2$  der Signale benachbarter Empfangsdipole, die mit folgender Beziehung berechnet werden kann:  $T_2 = a/(c_T + c_L)$ . Dabei ist  $c_T$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Terahertzstrahlung und  $c_L$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Laserstrahlung im Detektormaterial. Geht man näherungsweise davon aus, dass beide Ausbreitungsgeschwindigkeiten etwa gleich sind und durch eine gemeinsame Brechzahl  $n$  bestimmt werden, so erhält man für die Zeitdifferenz  $T_2 = a \cdot n / (2 \cdot c)$ , Dabei ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Besteht das Antennenarray beispielsweise aus  $z$  äquidistant angeordneten Empfangsdipolen, so erhält man  $z$  zeitlich gestaffelte Ausgangssignale über ein gesamtes Zeitintervall  $T = (z - 1)T_2 = a \cdot n \cdot (z - 1) / (2 \cdot c)$ .

**[0012]** Die zweite erfindungsgemäße Lösung des Problems besteht darin, dass die gepulste Laserstrahlung zur Terahertzstrahlung senkrecht gerichtet ist und die Lücken der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole gleichzeitig trifft.

**[0013]** Die Ausgangssignale der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole werden einzeln verstärkt, so dass die verstärkten Ausgangssignale ein Maß für den zeitlichen Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung bilden.

**[0014]** Das erfindungsgemäße Antennenarray liefert nach jedem Terahertzpuls von jedem Empfangsdipol ein Signal, das einem bestimmten Zeitabschnitt des Terahertzpulses entspricht. Daher ist zur Aufnahme des zeitlichen Verlaufs eines Terahertzpulses keine zusätzliche Verzögerungsstrecke erforderlich, wenn die Anzahl der durch das Antennenarray gelieferten Signale für den jeweiligen Messzweck ausreichend gewählt ist. Die Laufstrecken des Terahertzpulses zwischen zwei benachbarten Empfangsdipolen mit einem Abstand  $a$  verursachen eine zeitliche Differenz  $T_1$  der Signale benachbarter Empfangsdipole, die mit folgender Beziehung berechnet werden kann:  $T_1 = a/c_T$ . Dabei ist  $c_T$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Terahertzstrahlung im Detektormaterial. Somit erhält man für die Zeitdifferenz  $T_1 = a/c_T$ . Besteht das Antennenarray beispielsweise aus  $z$  äquidistant angeordneten Empfangsdipolen, so erhält man  $z$  zeitlich gestaffelte Ausgangssignale über ein gesamtes Zeitintervall  $T = (z - 1)T_1 = a \cdot (z - 1) / c_T$ .

**[0015]** Aus technischen Gründen kann die Zahl  $z$  der Empfangsdipole des Antennenarrays nicht beliebig vergrößert werden. Wenn jedoch mit der praktisch realisierbaren Zahl der Empfangsdipole nicht die für den Messzweck erforderliche zeitliche Auflösung des Terahertzpulses erreicht wird, kann gemäß Unteranspruch 3 das gesamte photoleitende Antennenarray mit äquidistant angeordneten Empfangsdipolen in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrah-

lung in definierten Schritten bis zum Maximalbetrag des Abstands  $a$  benachbarter Empfangsdipole verschoben werden. Nach jeder schrittweisen Verschiebung des Antennenarrays werden die Ausgangssignale aller Empfangsdipole in einem Rechner abgespeichert, so dass anschließend nach der Verschiebung um den Maximalbetrag des Abstands  $a$  benachbarter Empfangsdipole der zeitliche Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung mit einer um die Anzahl der Verschiebungsschritte erhöhten zeitlichen Auflösung bestimmt werden kann. Wird das Antennenarray um  $v$  Verschiebungsschritte verschoben, so wird der zeitliche Messpunkt Abstand zur Erfassung des Terahertzpulses um den Faktor  $v + 1$  auf  $T1/(v + 1)$  verringert. Mit modernen Linearmotoren kann die Anzahl  $v$  der Verschiebungsschritte nahezu beliebig gewählt werden, so dass auf diese Weise in jedem Fall die dem Messzweck angepasste zeitliche Auflösung der Terahertz-Pulsmessung erreicht werden kann. Der Vorteil des erfindungsgemäßen Antennenarrays gemäß den Patentansprüchen 1 und 2 gegenüber bekannten photoleitenden Empfangsantennen besteht demzufolge darin, dass das Antennenarray instantan ohne Strahlverschiebung eine grobe Abtastung des zu messenden Terahertzpulses ermöglicht, wie es beispielsweise für eine Justage des Strahlengangs oder für eine Überblicksmessung erforderlich ist. Für eine präzise Messung mit hoher zeitlicher Auflösung kann gemäß Unteranspruch 3 mit einem Linearmotor zusätzlich eine Interpolation der Messpunkte erfolgen. Weil dabei der erforderliche Verfahrensweg des Linearmotors nur gleich dem Abstand  $a$  benachbarter Empfangsdipole ist, kann die Messung sehr schnell erfolgen. Der Gewinn an Messgeschwindigkeit ist proportional zur Zahl  $z$  der Empfangsdipole.

**[0016]** Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen photoleitenden Terahertz Empfängers nach Anspruch 3 besteht darin, dass zum Betrieb dieses Empfängers nur eine kurze Verzögerungstrecke erforderlich ist, die einen kompakten Aufbau eines Terahertz-Spektrometers ermöglicht.

**[0017]** Gemäß Patentanspruch 4 ist es zweckmäßig, die Empfangsdipole jeweils auf einem Substrat anzuordnen, das sowohl für die Laserstrahlung als auch für die Terahertzstrahlung transparent ist. Um die zu messende Terahertzstrahlung durch das Substrat an den Empfangsdipol heranführen zu können, wird entsprechend dem Stand der Technik ein für die Terahertzstrahlung transparentes Substrat verwendet. In vielen Fällen wird GaAs oder InP als Substrat verwendet. Durch die Verwendung eines Substrats, das auch für die Laserstrahlung transparent ist, können die Empfangsdipole direkt übereinander gestapelt werden. Wenn die Wellenlänge der Laserstrahlung beispielsweise 800 nm beträgt, kann gemäß Patentanspruch 3 kein GaAs als Substratmaterial verwendet werden, weil dessen Absorptionskante bei einer Wellenlänge von 870 nm liegt. Dagegen kann

aber beispielsweise Quarz als Substratmaterial bei dieser Wellenlänge verwendet werden.

**[0018]** Eine weitere Möglichkeit der Realisierung des erfindungsgemäßen photoleitenden Antennenarrays zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung besteht gemäß Patentanspruch 5 darin, dass die gepulste Laserstrahlung in einem Streifenwellenleiter geführt wird und dass sich die Lücken der metallischen Empfangsdipole mit dem Halbleitermaterial mit kurzer Relaxationszeit im Femtosekundenbereich direkt über oder unter dem streifenförmigen Wellenleiter befinden. Infolge des direkten optischen Kontaktes zwischen dem streifenförmigen Wellenleiter und dem absorbierendem Halbleitermaterial gelangt jeweils ein Teil der Laserstrahlung vom streifenförmigen Wellenleiter in das Halbleitermaterial in der Lücke der Empfangsdipole. Die Laserstrahlung wird im Halbleitermaterial absorbiert und der entsprechende Empfangsdipol wird elektrisch leitfähig und liefert ein Signal, das der Terahertzamplitude proportional ist.

**[0019]** Erfindungsgemäß ist die Breite der Empfangsdipole in der Nähe der Lücke wesentlich geringer als deren Abstand  $a$  in Richtung des streifenförmigen Wellenleiters. Da der im streifenförmigen Wellenleiter geführte Laserpuls eine Laufzeit benötigt, um die Breite der Empfangsdipole in der Nähe der Lücke zu durchlaufen, wird bei der Messung der Terahertz-Amplitude über diese Laufzeit gemittelt. Bei der Einhaltung der erfindungsgemäßen Bedingung einer geringen Breite kann der Einfluss dieser Mittelung auf das Messergebnis vernachlässigt werden. Eine genügend geringe Breite liegt vor, wenn diese gleich der Laufstrecke des Laserpulses im streifenförmigen Wellenleiter ist, die während der Pulsdauer der Laserstrahlung zurückgelegt wird. Beträgt die Pulsdauer beispielsweise 100 fs und die Ausbreitungsgeschwindigkeit im streifenförmigen Wellenleiter  $10^8$  m/s, so soll die Breite der Empfangsdipole in der Nähe der Lücke höchstens 10  $\mu$ m betragen. Der Vorteil dieses Antennenarrays besteht darin, dass keine aufwändige optische Justage des Laserstrahls erforderlich ist, um alle Empfangsdipole in der Lücke zu beleuchten, weil dies bereits durch die Konstruktion des streifenförmigen Wellenleiter und die Lage der Empfangsdipole garantiert ist.

**[0020]** Gemäß Anspruch 6 ist es bei der Ausführung der Erfindung nach dem Unteranspruch 5 zweckmäßig, wenn der streifenförmige Wellenleiter aus GaAs oder AlGaAs besteht, das Halbleitermaterial in den Lücken der metallischen Empfangsdipole aus GaAs oder InGaAs besteht, das photoleitende Antennenarray auf einem semiisolierenden GaAs Substrat angeordnet ist und sich zwischen dem GaAs Substrat und dem streifenförmigen Wellenleiter eine Mantelschicht aus AlAs befindet. Die genannten III-V-Halbleitermaterialien werden bei der Herstellung verschiedener optoelektronischer Bauelemente wie zum Bei-

spiel Laserdioden eingesetzt. Die zur Herstellung solcher Bauelemente entwickelte Technologie der Herstellung einkristalliner Schichten und deren Mikrostrukturierung kann für die Realisierung des erfindungsgemäßen Antennenarrays mit dem streifenförmigen Wellenleiter übernommen werden.

**[0021]** Im Anspruch 7 ist eine weitere zweckmäßige Ausgestaltung des in den Ansprüchen 1 und 3 beschriebenen Antennenarrays angegeben. Hierbei sind sowohl die Laserstrahlung als auch die Terahertzstrahlung senkrecht zur Strahlrichtung räumlich aufgeweitet. Das Antennenarray ist in einer Ebene angeordnet, wobei die Normalenrichtung dieser Ebene gegen die Strahlrichtung um einen Winkel gekippt ist, der zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  liegt. Die Normalenrichtung der Ebene der Empfangsdipole liegt zusammen mit der Richtung der Laserstrahlung und der Verbindungslinie der Lücken der Empfangsdipole in einer Ebene.

**[0022]** Dieses Antennenarray besitzt den Vorteil, dass es leicht herzustellen ist, weil die Empfangsdipole in einer Ebene angeordnet sind und daher mit einem photolithographischen Standardverfahren gefertigt werden können. Damit die Empfangsdipole des Arrays gemäß Anspruch 1 von der Laserstrahlung zeitlich nacheinander getroffen werden, ist die Normalenrichtung der Ebene, in der sich die Empfangsdipole befinden, gegen die Strahlrichtung verkippt, wobei der Kippwinkel in der Richtung der Verbindungslinie der Lücken der Empfangsdipole liegt. Mit wachsendem Kippwinkel vergrößert sich der Abstand  $a$  benachbarter Empfangsdipole in Strahlrichtung. Da die Empfangsdipole in diesem Fall in Strahlrichtung nicht exakt hintereinander liegen, muss sowohl die Laserstrahlung als auch die Terahertzstrahlung senkrecht zur Strahlrichtung räumlich aufgeweitet werden, damit alle Empfangsdipole von beiden Strahlungen getroffen werden. Die erforderliche Aufweitung der Strahlungen richtet sich nach der Größe des Antennenarrays und dem Winkel zwischen der Normalenrichtung der Ebene der Antennen und der Strahlrichtung. Zweckmäßig wird die Laserstrahlung nur so weit aufgeweitet, dass sie alle Lücken der Empfangsdipole trifft. Da die Strahlaufweitung nur in Kipprichtung erforderlich ist, können Zylinderlinsen für die Strahlformung eingesetzt werden.

**[0023]** Das erfindungsgemäße photoleitendes Antennenarray zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung wird nachfolgend an Hand von vier Ausführungsbeispielen näher erläutert.

**[0024]** In den zugehörigen Zeichnungen zeigen

**[0025]** Fig. 1a die Aufsicht auf ein erstes Ausführungsbeispiel des photoleitenden Antennenarrays

**[0026]** Fig. 1b den Schnitt A-A in Fig. 1a zu dem ersten Ausführungsbeispiel des photoleitenden Antennenarrays

**[0027]** Fig. 2a die Aufsicht auf das zweite Ausführungsbeispiel des photoleitenden Antennenarray

**[0028]** Fig. 2b den Schnitt A-A in Fig. 2a zum zweiten Ausführungsbeispiel des photoleitenden Antennenarrays

**[0029]** Fig. 3a die Aufsicht auf ein drittes Ausführungsbeispiel des photoleitenden Antennenarrays

**[0030]** Fig. 3b die Seitenansicht auf das dritte Ausführungsbeispiel des photoleitenden Antennenarrays

**[0031]** Fig. 4 die Aufsicht auf das vierte Ausführungsbeispiel des photoleitenden Antennenarrays.

**[0032]** In Fig. 1a und Fig. 1b ist das erste Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen photoleitenden Antennenarray zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung dargestellt. Das photoleitende Antennenarray **1** zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung **6** besteht aus vier übereinander angeordneten Empfangsdipolen **2**, die jeweils in der Mitte eine Lücke **3** besitzen und auf Substraten **8** aus 0,4 mm dickem Quarzglas angeordnet sind. Unter den Lücken **3** der Empfangsdipole **2** aus einer Ti/Au-Schicht befindet sich eine Schicht aus Halbleitermaterial **4** mit einer kurzen Relaxationszeit von 200 fs. Zur Ladungsträgererzeugung im Halbleitermaterial **4** wird ein gepulster Laser mit einer Pulsdauer von 100 fs und einer Wellenlänge von 1040 nm verwendet, was einer Photonenenergie von etwa 1,2 eV entspricht. Das Halbleitermaterial **4** besteht aus InGaAs mit einem In-Anteil von 31% und einer Bandlücke von 1 eV. Die Dicke der InGaAs Schicht beträgt 100 nm. Durch diese geringe Dicke ist gewährleistet, dass in der Schicht nur etwa 15% der gepulsten Laserstrahlung **5** absorbiert wird. Dadurch wird durch die Laserstrahlung **5** auch der letzte Empfangsdipol **7** elektrisch leitfähig geschaltet. Die gepulste Laserstrahlung **5** schaltet die gestaffelt angeordneten Empfangsdipole **2** zeitlich nacheinander, so dass die Ausgangssignale S1, S2, S3 und S4 der Empfangsdipole **2** ein Maß für den zeitlichen Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung **6** bilden. Die Terahertzstrahlung **6** wird an einem Sender durch die gleiche gepulste Laserstrahlung erzeugt und breitet sich im Antennenarray gegenläufig zur Laserstrahlung **5** aus. Die Zeitdifferenz zwischen den Ausgangssignalen S1 und S2 benachbarter Empfangsdipole **2** ergibt sich aus der oben angegebenen Beziehung  $T_2 = a \cdot n / (2 \cdot c)$  und beträgt bei einem Abstand  $a = 0,4$  mm zwischen den gestaffelt angeordneten Empfangsdipolen **2**  $T_2 = 1$  ps. Die gesamte Zeitdifferenz zwischen den Ausgangssignalen S1 und S4 beträgt entsprechend 3 ps. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde das in Fig. 1a

und b dargestellte Ausführungsbeispiel nur mit vier gestaffelt angeordneten Empfangsdipolen **2** gezeichnet. Um eine genauere Abtastung des Terahertzpulses **6** zu erreichen, kann das Antennenarray **1** jedoch auch mit wesentlich mehr Empfangsdipolen **2** ausgestattet werden.

**[0033]** Das in **Fig. 1a** und **b** dargestellte photoleitende Antennenarray **1** kann mit einem Linearmotor in Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlung **5** in neun Schritten von jeweils  $100\ \mu\text{m}$  verschoben werden. Bei einer Verschiebung des Antennenarrays **1** um einen Schritt verändert sich der Abtastzeitpunkt jedes Empfangsdipols um  $100\ \text{fs}$ . Die Ausgangssignale **S1** bis **S4** aller Dipole werden nach jeder Verschiebung des Antennenarrays **1** in einem Rechner gespeichert, so dass nach neun Verschiebungsschritten im Rechner insgesamt 40 Signale vorliegen, die den zeitlichen Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung **6** mit einem Messpunktabstand von  $100\ \text{fs}$  wiedergeben. Würde das Antennenarray beispielsweise 10 Empfangsdipole besitzen, so wären nach neun Verschiebungsschritten entsprechend 100 Messwerte für die gepulste Terahertzstrahlung **6** vorhanden. Durch das nahezu gleichzeitige Abtasten der gepulsten Terahertzstrahlung **6** im Antennenarray **1** kann der zeitliche Verlauf des Terahertzpulses sehr schnell gemessen werden. Für eine genauere Abtastung in kleinen Zeitschritten muss das Antennenarray nur um den geringen Abstand  $a = 0,4\ \text{mm}$  der Empfangsdipole verschoben werden, was einen geringen technischen Aufwand erfordert und eine schnelle Messung ermöglicht.

**[0034]** In den **Fig. 2a** und **Fig. 2b** ist das zweite Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen photoleitenden Antennenarrays zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung entsprechend den Unteransprüchen 5 und 7 dargestellt. Die gepulste Laserstrahlung **5** mit der Wellenlänge von  $1060\ \text{nm}$  wird in einem streifenförmigen Wellenleiter **9** aus GaAs geführt. Zwischen dem Substrat **8** aus semiisolierendem GaAs und dem streifenförmigen Wellenleiter **9** ist eine niedrigbrechende Mantelschicht **11** aus AlAs angebracht. Diese Mantelschicht verhindert, dass die im streifenförmigen Wellenleiter **9** geführte Laserstrahlung **5** in das Substrat gelangt. Fünf Empfangsdipole **2** sind in einem Abstand  $a = 1\ \text{mm}$  über dem Halbleitermaterial **4** aus InGaAs mit einem In-Gehalt von 31% angebracht. Das Halbleitermaterial **4** füllt die Lücken **3** der Empfangsdipole **2** aus und absorbiert jeweils einen Teil der im streifenförmigen Wellenleiter **9** geführten Laserstrahlung. Die Breite **10** der Empfangsdipole **2** in der Nähe der Lücken **3** beträgt  $5\ \mu\text{m}$  und ist damit wesentlich geringer als der Abstand  $a = 1\ \text{mm}$  der Empfangsdipole **2**. Die gepulste Terahertzstrahlung **6** läuft entgegen der Richtung der gepulsten Laserstrahlung **5** durch das Antennenarray **1**. Um eine gute Führung der Terahertzstrahlung **6** zu erreichen, kann das Antennenarray **1** gemäß Anspruch

**8** mit einem semiisolierenden Waferstück aus GaAs abgedeckt werden.

**[0035]** Die fünf Ausgangssignale **S1–5** der Empfangsantennen beinhalten die zeitlich gestaffelte Amplitudeninformation der gepulsten Terahertzstrahlung **6** mit einem Messpunktabstand von jeweils  $\Delta t = 5\ \text{ps}$ . Dieses Zeitintervall ergibt sich aus dem Dipolabstand  $a$  von  $1\ \text{mm}$  und einer Ausbreitungsgeschwindigkeit beider Strahlungen von ungefähr  $10^8\ \text{m/s}$ .

**[0036]** Gemäß Anspruch 3 kann das Antennenarray **1** in Richtung der gepulsten Laserstrahlung **5** in Schritten von  $10\ \mu\text{m}$  bis zu einem Maximalbetrag von  $1\ \text{mm}$  verschoben werden. Alle fünf Ausgangssignale **S1–5** der Empfangsdipole **2** werden nach jedem Verschiebungsschritt in einem Rechner gespeichert. Nach einer Verschiebung des Antennenarrays **1** um den Maximalbetrag von  $a = 1\ \text{mm}$  liegt die Information über den Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung **6** in einem Zeitbereich von  $20\ \text{ps}$  mit einer zeitlichen Auflösung von  $50\ \text{fs}$  vor.

**[0037]** Aus Gründen der Übersichtlichkeit bei der zeichnerischen Darstellung des zweiten Ausführungsbeispiels wurde die Zahl der Empfangsdipole **2** auf fünf beschränkt. Selbstverständlich kann mit bekannten photolithographischen Verfahren auch ein Antennenarray **1** mit einer größeren Zahl von Empfangsdipolen **2** hergestellt und eingesetzt werden.

**[0038]** In den **Fig. 3a** und **Fig. 3b** ist ein drittes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen photoleitenden Antennenarrays entsprechend dem Patentanspruch 7 dargestellt. **Fig. 3a** zeigt die Aufsicht auf das Antennenarray **1** mit fünf Empfangsdipolen **2**, die in einer Ebene **12** mit einem lateralen Abstand von  $1\ \text{mm}$  angeordnet sind. Die Empfangsdipole **2** besitzen jeweils eine Lücke **3**, in der sich das absorbierende Halbleitermaterial **4** befindet. In **Fig. 3b** ist zu sehen, dass die Normalenrichtung **13** der Ebene des Antennenarrays **12** um einen Winkel **14** gegen die Richtung der Laserstrahlung **5** gekippt ist. Dabei liegen die Normalenrichtung **13**, die Richtung der Laserstrahlung **5** und die Verbindungslinie **15** der Lücken **3** der Empfangsdipole **2** in einer Ebene. Der Winkel **14** beträgt  $89^\circ$ . Damit die Laserstrahlung **5** alle Lücken der fünf Empfangsdipole **2** des Antennenarrays **1** trifft, ist sie auf eine Strahlbreite von  $70\ \mu\text{m}$  aufgeweitet. Der Abstand  $a$  der Empfangsdipole **2** in Richtung der Laserstrahlung **5** beträgt nahezu  $1\ \text{mm}$ , weil der Winkel **14** fast  $90^\circ$  beträgt. Der zeitliche Messpunktabstand der Signale benachbarter Empfangsdipole ergibt sich mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa  $3 \times 10^8\ \text{m/s}$  für die Laserstrahlung **5** und die Terahertzstrahlung **6** zu  $T_2 = 1,7\ \text{ps}$ , wenn die Dicke des Substrats **8** mit  $0,4\ \text{mm}$  gegen die Gesamtlänge des Antennenarrays von  $4\ \text{mm}$  außer Acht gelassen wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit bei der zeichnerischen Darstellung des dritten Ausführungsbeispiels wurde

die Zahl der Empfangsdipole **2** auf fünf beschränkt. Selbstverständlich kann mit bekannten photolithographischen Verfahren auch ein Antennenarray **1** mit einer größeren Zahl von Empfangsdipolen **2** hergestellt und eingesetzt werden. Der Vorteil dieses Antennenarrays **1** besteht darin, dass ein mit photolithographischen Methoden einfach herstellbares Array mit vielen Empfangsdipolen **2** die Messung des zeitlichen Verlaufs der gepulsten Terahertzstrahlung **6** ohne eine Verzögerungsstrecke im Laserstrahlengang in extrem kurzer Zeit ermöglicht. Durch die Wahl des Winkels **14** zwischen der Normalenrichtung **13** und der Richtung der Laserstrahlung **5** kann der zeitliche Messpunkt Abstand geeignet eingestellt werden. In der **Fig. 4** ist das vierte Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen photoleitenden Antennenarrays zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung entsprechend dem Anspruch 2 dargestellt. Die gepulste Terahertzstrahlung **6** wird von einer Terahertzlinse **16** aus hochreinem Silizium auf die Stirnfläche des Substrats **8** aus semiisolierendem GaAs fokussiert, so dass die Terahertzstrahlung **6** durch Totalreflexion im Inneren des Substrats **8** geführt wird. Fünf Empfangsdipole **2** sind auf dem Substrat **8** in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung **6** in äquidistanten Abständen von 0,5 mm angebracht. Die im Inneren des Substrats **8** geführte Terahertzstrahlung **6** trifft die Empfangsdipole **2** zeitlich nacheinander. Die gepulste Laserstrahlung wird im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung **6** in der Form eines Linienfokus an die Empfangsdipole **2** herangeführt, so dass alle auf der Verbindungslinie **15** liegenden Lücken **3** der Empfangsdipole von der Laserstrahlung gleichzeitig getroffen werden. Die Breite der Empfangsdipole in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung **6** beträgt nur 5  $\mu\text{m}$ , so dass keine nennenswerte zeitliche Mittelung über die Terahertzfeldstärke während der Beleuchtung der Lücken **3** der Empfangsdipole **2** entsteht. Die fünf Ausgangssignale S1–5 der Empfangsantennen beinhalten die zeitlich gestaffelte Amplitudeninformation der gepulsten Terahertzstrahlung **6** mit einem Messpunkt Abstand von jeweils  $T_1 = 5 \text{ ps}$ . Dieses Zeitintervall ergibt sich aus dem Dipolabstand  $a$  von 0,5 mm und einer Ausbreitungsgeschwindigkeit der Terahertzstrahlung im GaAs-Substrat **8** von ungefähr  $10^8 \text{ m/s}$ . Aus Gründen der Übersichtlichkeit bei der zeichnerischen Darstellung des vierten Ausführungsbeispiels wurde die Zahl der Empfangsdipole **2** auf fünf beschränkt. Selbstverständlich kann mit bekannten photolithographischen Verfahren auch ein Antennenarray **1** mit einer größeren Zahl von Empfangsdipolen **2** hergestellt und eingesetzt werden. Die Vorteile dieses Ausführungsbeispiels sind die einfache Herstellbarkeit des Antennenarrays mit photolithographischen Verfahren und die einfache optische Heranführung der Laserstrahlung an die Lücken **3** der Empfangsdipole **2** beispielsweise unter Verwendung einer Zylinderlinse.

#### Bezugszeichenliste

<b>1</b>	photoleitendes Antennenarray
<b>2</b>	Empfangsdipol
<b>3</b>	Lücke
<b>4</b>	Halbleitermaterial
<b>5</b>	Laserstrahlung
<b>6</b>	Terahertzstrahlung
<b>7</b>	letzter Empfangsdipol
<b>8</b>	Substrat
<b>9</b>	streifenförmiger Wellenleiter
<b>10</b>	Breite des Dipols in der Nähe der Lücke
<b>11</b>	Mantelschicht
<b>12</b>	Ebene des Antennenarrays
<b>13</b>	Normalenrichtung zur Ebene des Antennenarrays
<b>14</b>	Winkel zwischen Normalenrichtung und Richtung der Laserstrahlung
<b>15</b>	Verbindungsline der Lücken der Empfangsdipole
<b>16</b>	Terahertzlinse
<b>a</b>	Abstand benachbarter Empfangsdipole
<b>S1, S2, ...</b>	Ausgangssignale der Empfangsdipole

#### Patentansprüche

1. Photoleitendes Antennenarray (**1**) zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung (**6**), bestehend aus mehreren metallischen Empfangsdipolen (**2**) mit jeweils einer Lücke (**3**), in der sich ein Halbleitermaterial (**4**) mit einer Relaxationszeit im Femtosekundenbereich befindet, wobei die Empfangsdipole (**2**) in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung (**6**) gestaffelt angeordnet sind, so dass die gepulste Terahertzstrahlung (**6**) die Lücken (**3**) der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole (**2**) zeitlich nacheinander trifft und unter Verwendung gepulster Laserstrahlung (**5**) mit einer Photonenenergie, die größer ist als die energetische Bandlücke des Halbleitermaterials (**4**) in den Lücken der Empfangsdipole (**2**), und deren Ausbreitungsrichtung entgegengesetzt zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Terahertzstrahlung (**6**) ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die optische Absorption des Halbleitermaterials (**4**) in der Lücke der Empfangsdipole (**2**) so gering bemessen ist, dass die gepulste Laserstrahlung (**5**) auch das Halbleitermaterial (**4**) in der Lücke (**3**) des zuletzt erreichten Empfangsdipols (**7**) elektrisch leitfähig schalten kann und dass die Ausgangssignale (S1, S2, ...) der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole (**2**) einzeln verstärkt werden, so dass die verstärkten Ausgangssignale (S1, S2, ...) ein Maß für den zeitlichen Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung (**6**) bilden.

2. Photoleitendes Antennenarray (**1**) zum Empfang gepulster Terahertzstrahlung (**6**), bestehend aus

mehreren metallischen Empfangsdipolen (2) mit jeweils einer Lücke (3), in der sich ein Halbleitermaterial (4) mit einer Relaxationszeit im Femtosekundenbereich befindet, wobei die Empfangsdipole (2) in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung (6) gestaffelt angeordnet sind und unter Verwendung gepulster Laserstrahlung (5) mit einer Photonenenergie, die größer ist als die energetische Bandlücke des Halbleitermaterials (4) in den Lücken der Empfangsdipole (2),

**dadurch gekennzeichnet,**

- a) dass die Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung (5) senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Terahertzstrahlung (6) ist,
- b) dass die gepulste Laserstrahlung (5) die Lücken (3) der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole (2) gleichzeitig trifft,
- c) und dass die Ausgangssignale (S1, S2, ...) der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole (2) einzeln verstärkt werden, so dass die verstärkten Ausgangssignale (S1, S2, ...) ein Maß für den zeitlichen Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung (6) bilden.

3. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2,

**dadurch gekennzeichnet,**

- a) dass die in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung (6) gestaffelt angeordneten Empfangsdipole (2) in einem äquidistanten Abstand  $a$  angeordnet sind,
- b) dass das gesamte photoleitende Antennenarray (1) in Ausbreitungsrichtung der Terahertzstrahlung (6) in definierten Schritten bis zum Maximalbetrag des Abstands  $a$  benachbarter Empfangsdipole (2) verschoben werden kann
- c) und dass nach jeder schrittweisen Verschiebung des Antennenarrays (1) die Ausgangssignale (S1, S2, ...) aller Empfangsdipole (2) in einem Rechner gespeichert werden, so dass anschließend nach der Verschiebung um den Maximalbetrag des Abstands  $a$  benachbarter Empfangsdipole (2) der zeitliche Verlauf der gepulsten Terahertzstrahlung (6) mit einer um die Anzahl der Verschiebungsschritte erhöhten zeitlichen Auflösung bestimmt werden kann.

4. Anordnung nach einem Ansprüche 1 oder 3,

**dadurch gekennzeichnet,** dass die Empfangsdipole (2) jeweils auf einem Substrat (8) angeordnet sind, das sowohl für die Laserstrahlung (5) als auch für die Terahertzstrahlung (6) transparent ist.

5. Anordnung nach Anspruch 1 oder 3,

**dadurch gekennzeichnet,**

- a) dass die gepulste Laserstrahlung (5) in einem Streifenwellenleiter (9) geführt wird,
- b) dass sich die Lücken (3) der metallischen Empfangsdipole (2) mit dem Halbleitermaterial (4) mit einer Relaxationszeit im Femtosekundenbereich direkt über oder unter dem Streifenwellenleiter (9) befinden, so dass jeweils ein Teil der Laserstrahlung (5) vom

Streifenwellenleiter (9) in das Halbleitermaterial (4) in die Lücken (3) der Empfangsdipole (2) gelangt c) und dass die Breite (10) der Empfangsdipole (2) in der Nähe der Lücken (3) wesentlich geringer ist als deren Abstand  $a$  in Richtung des Streifenwellenleiters (9).

6. Anordnung nach Anspruch 5,

**dadurch gekennzeichnet,** dass

- a) der Streifenwellenleiter (9) aus GaAs oder AlGaAs besteht,
- b) das Halbleitermaterial (4) in den Lücken (3) der metallischen Empfangsdipole (2) aus GaAs oder InGaAs besteht
- c) das photoleitende Antennenarray (1) auf einem semiisolierenden GaAs Substrat (8) angeordnet ist und
- d) sich zwischen dem GaAs Substrat (8) und dem Streifenwellenleiter (9) eine Claddingschicht (11) aus AlAs befindet, die verhindert, dass die im Streifenwellenleiter (9) geführte Laserstrahlung (5) in das Substrat gelangt.

7. Anordnung nach Anspruch 1 oder 3,

**dadurch gekennzeichnet,** dass

- a) sowohl die Laserstrahlung (5) als auch die Terahertzstrahlung (6) senkrecht zur Strahlrichtung räumlich aufgeweitet sind,
- b) das Antennenarray (1) in einer Ebene (12) angeordnet ist,
- c) die Normalenrichtung (13) dieser Ebene gegen die Richtung der Laserstrahlung (5) um einen Winkel (14) gekippt ist, der zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  liegt,
- d) und die Normalenrichtung (13) zusammen mit der Richtung der Laserstrahlung (5) und der Verbindungslinie (15) der Lücken (3) der Empfangsdipole (2) in einer Ebene liegt.

8. Anordnung nach Anspruch 5 oder 6, **dadurch**

**gekennzeichnet,** dass das Antennenarray (1) mit einem semiisolierenden Waferstück aus GaAs abgedeckt ist.

9. Anordnung nach Anspruch 2 und 3, **dadurch ge-**

**kennzeichnet,** dass die gepulste Laserstrahlung (5) in der Ebene der Empfangsdipole (2) einen Linienfokus bildet, wobei alle Lücken (3) der gestaffelt angeordneten Empfangsdipole (2) auf der Fokuslinie liegen,

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1a

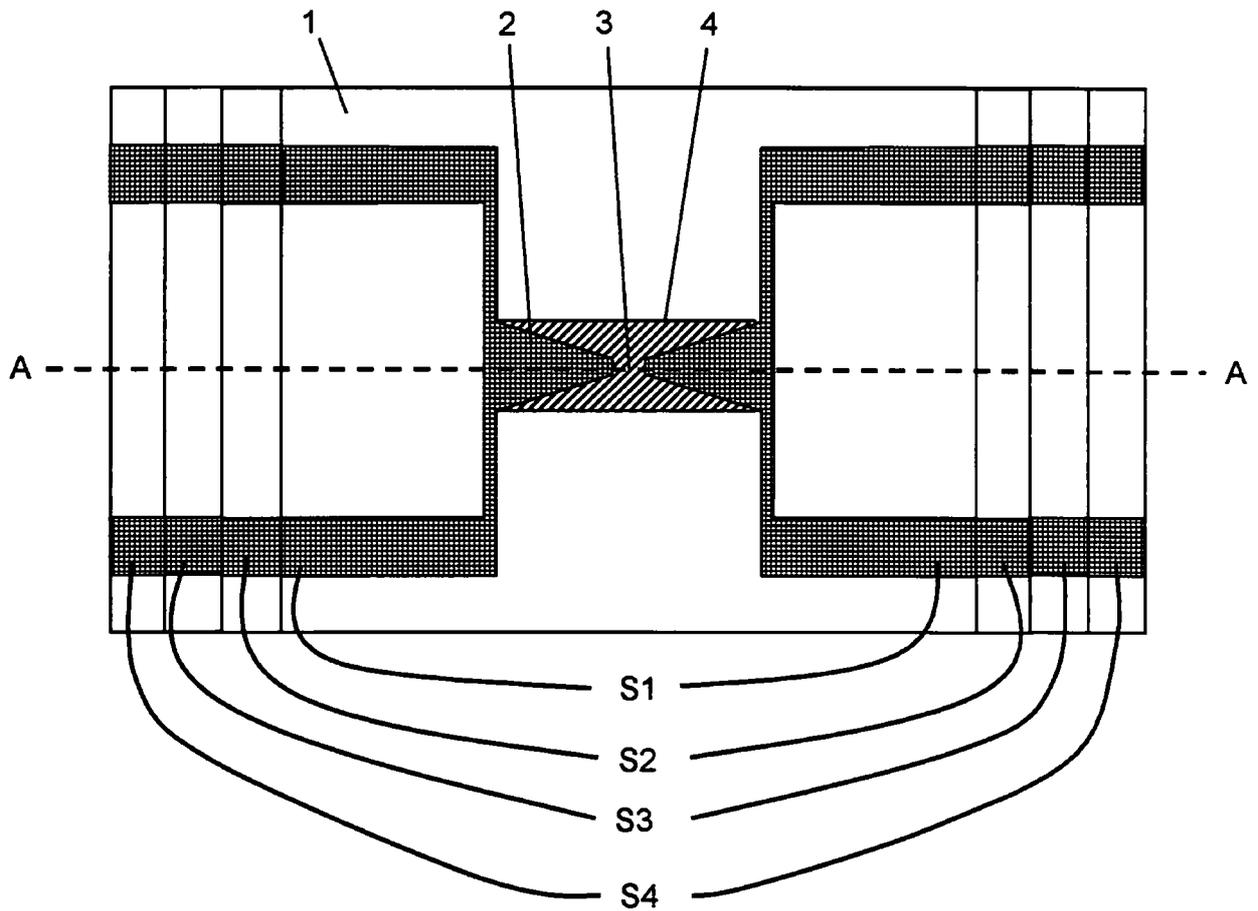
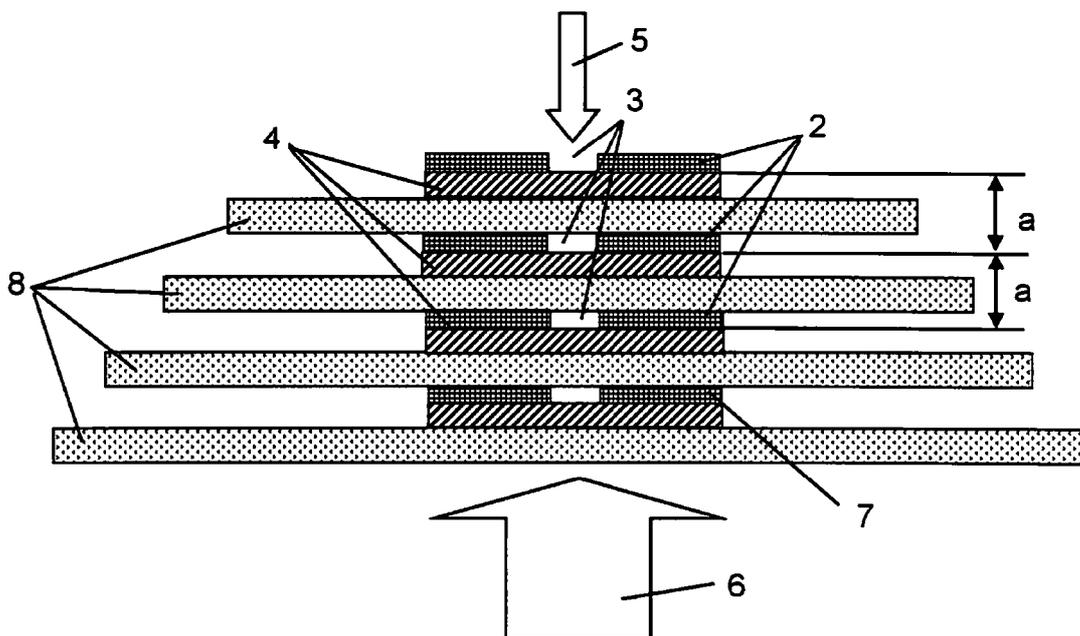
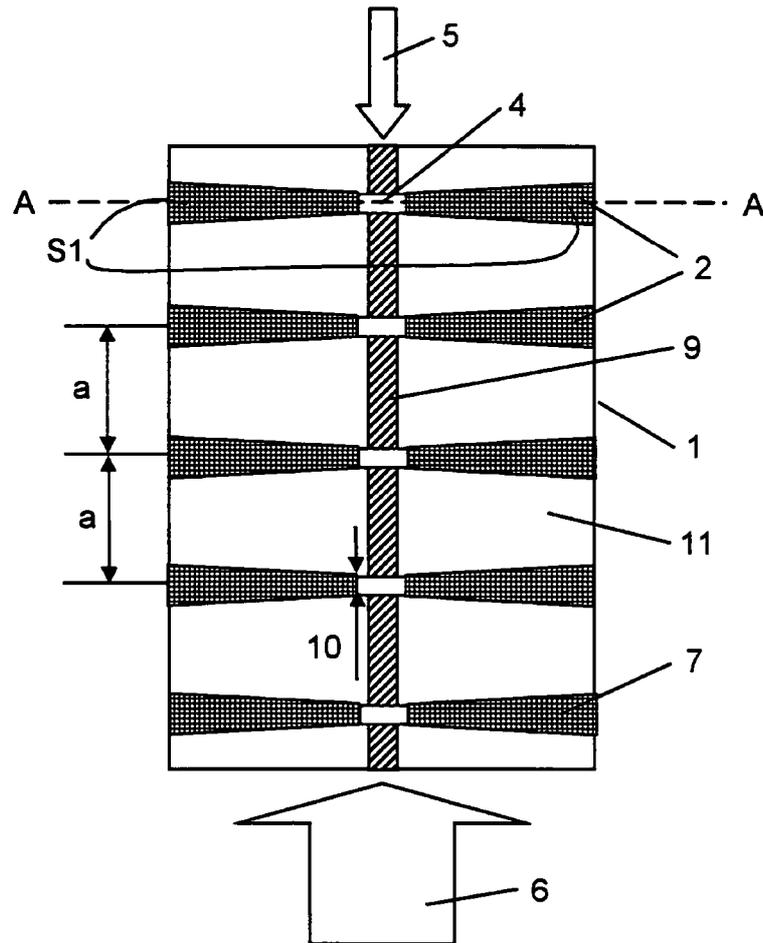


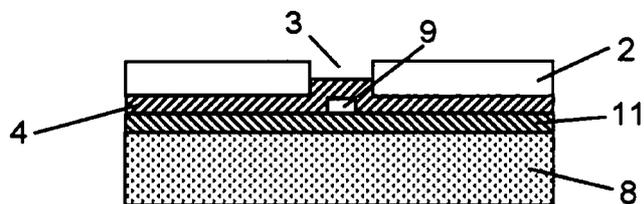
Fig. 1b



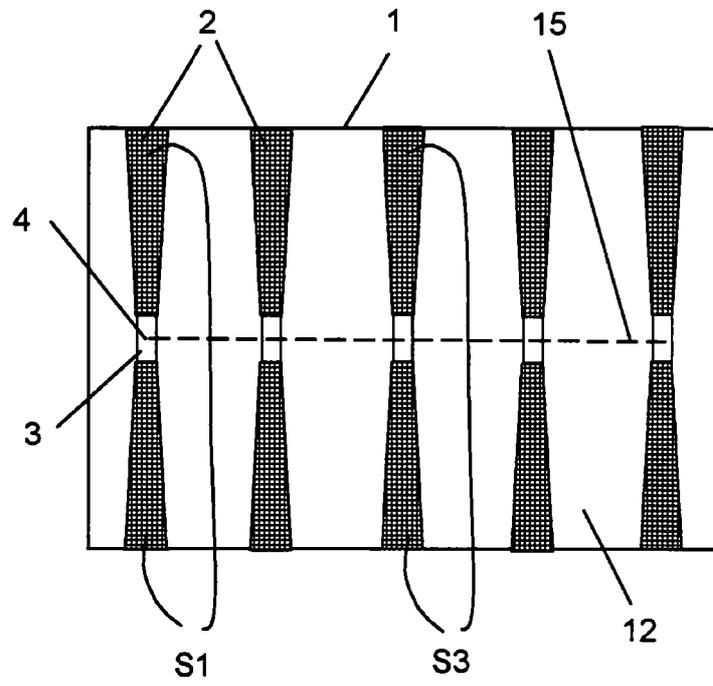
**Fig. 2a**



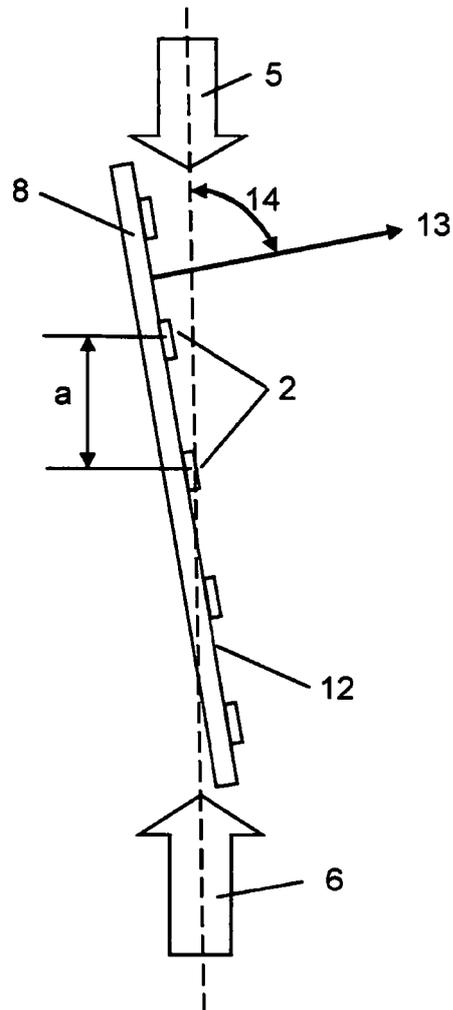
**Fig. 2b**



**Fig. 3a**



**Fig. 3b**



**Fig. 4**

