



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 059 573 B3 2008.03.06**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 059 573.4**
 (22) Anmeldetag: **16.12.2006**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **06.03.2008**

(51) Int Cl.⁸: **H01L 31/08 (2006.01)**
H01Q 21/12 (2006.01)
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).

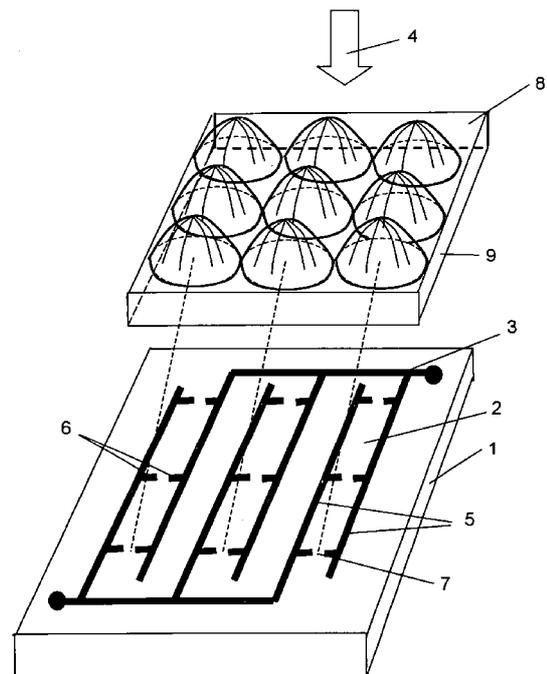
(73) Patentinhaber:
BATOP GmbH, 99425 Weimar, DE

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

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:
DE10 2004 046123 A1
US 61 57 035 A
US 57 89 750 A
US 57 29 017 A
US 54 32 374 A
EP 10 65 732 A1
EP 08 64 857 A1
EP 08 28 162 A2
EP 07 27 671 A2
WO 03/0 47 036 A1
**Dreyhaupt, A. u.a.: Optimum excitation conditions
 for the generation of high-electric-field tera-
 hertz radiation from an oscillator-driven photo-
 conductive device. In: Optics Letters, ISSN 0146-
 9592, 2006, 15. Mai, Vol. 31, No. 10, S. 1546-8;**

(54) Bezeichnung: **Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung**

(57) Zusammenfassung: Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Anordnung zur Emission oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung anzugeben, die als Sendeanenne eine höhere Terahertz-Strahlungsleistung als eine bekannte großflächige photoleitende Antenne liefert und die beim Einsatz als Empfangsantenne einen größeren Strom als die bekannten photoleitenden Antennen liefert. Die erfindungsgemäße Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung unter Verwendung einer photoleitenden Antenne 1 mit einer interdigitalen Fingerstruktur 3 besitzt eine auf der interdigitalen Fingerstruktur 3 angeordnete periodische Struktur aus einem Linienarray 8. Die Brennpunkte 7 der einzelnen Linsen des Linienarrays 8 befinden sich jeweils an der Oberfläche des Halbleitermaterials 2 zwischen jedem zweiten Finger 5 der interdigitalen Fingerstruktur 3. Die erfindungsgemäße Anordnung kann zur Materialanalyse im Terahertz-Spektralbereich eingesetzt werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung.

[0002] Als Terahertz-Strahlung wird elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von etwa 0,3 bis 100 THz bezeichnet. Da es im Frequenzbereich der Terahertz-Strahlung Molekülschwingungen unterschiedlicher Substanzen gibt, kann mittels Absorptionsspektroskopie im Terahertz Bereich die Untersuchung von Substanzen erfolgen und auch der Nachweis bestimmter chemischer Verbindungen geführt werden. So können beispielsweise Objekte im Terahertz Bereich abgebildet werden (siehe beispielsweise EP 0 828 162 A2) oder tomographisch untersucht werden (siehe beispielsweise EP 0 864 857 A1). Es gibt daher sowohl ein wissenschaftliches als auch ein sicherheitsrelevantes Interesse an kostengünstigen und effizienten Emittlern und Detektoren für Terahertz Strahlung.

[0003] Es ist bekannt, dass Terahertz Strahlung mit photoleitenden Antennen (englisch PCA – photoconductive antenna) unter Verwendung ultrakurzer Lichtpulse mit Pulsdauern ≤ 1 ps sowohl erzeugt als auch nachgewiesen werden kann (US 5 789 750). Eine photoleitende Terahertz Antenne besteht im Wesentlichen aus einer hochohmigen halbleitenden Schicht mit einer kurzen Relaxationszeit der Ladungsträger im Bereich einer Pikosekunde, die auf einem ebenfalls hochohmigen Substrat aufgebracht ist und auf der eine elektrisch leitende Antennenstruktur beispielsweise in der Form eines Dipols mit einem Gap als Unterbrechung im Zentrum des Dipols angeordnet ist. Zur Abstrahlung oder zum Nachweis von Terahertz-Strahlung wird die Halbleiterschicht im Gap der Antenne mit kurzen Laserpulsen bestrahlt. Die Photonenenergie der Laserpulse ist dabei größer als die elektronische Bandlücke der halbleitenden Schicht, so dass das Laserlicht in der halbleitenden Schicht absorbiert wird und bewegliche Ladungsträger erzeugt (US 5729017; WO 03/047036 A1).

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

ne ein elektrisches Feld der Terahertz-Strahlung angelegt und gleichzeitig der Laserpuls freie Ladungsträger erzeugt.

[0005] Zum Nachweis von Röntgenstrahlung wurde eine photoleitende interdigitale Fingerstruktur vorgeschlagen (EP 1 065 732 A1), die eine große Empfängerfläche bei geringem Elektrodenabstand besitzt. Für den Nachweis von Terahertz-Strahlung ist diese Antenne jedoch nicht geeignet, da sich Empfangsströme wegen des kohärenten Terahertz-Strahlungsfeldes in der alternierenden Fingerstruktur des Interdigitalwandlers auslöschen.

[0006] Um das Problem der Auslöschung kohärenter Signale in einer Interdigitalstruktur zu lösen, wurde zur Erhöhung der abgestrahlten Terahertz Strahlungsleistung einer photoleitenden Antenne im Patent DE 10 2004 046 123 A1 eine interdigitale Fingerstruktur vorgeschlagen, bei der jede zweite Fingerstruktur mit einer für das anregende Laserlicht undurchlässigen Schicht abgedeckt ist. Dadurch wird erreicht, dass die zwischen den Fingern der Interdigitalstruktur abgestrahlten Terahertz-Wellen eine einheitliche Polarisationsrichtung aufweisen und sich im Fernfeld konstruktiv überlagern. Die technische Herstellung einer derartigen Interdigitalstruktur mit einer darüber liegenden lichtundurchlässigen Struktur ist jedoch aufwändig. Das liegt daran, dass die lichtundurchlässige Schicht zweckmäßig aus Metall besteht. Diese Metallschicht muss aber von der darunter liegenden Interdigitalstruktur elektrisch isoliert sein. Die Vermeidung von Kurzschlüssen erfordert insbesondere bei großflächigen Antennen oder Antennenarrays einen hohen technischen Aufwand.

[0007] Obwohl bei der Verwendung einer solchen Terahertz-Strahlungsquelle mit Interdigitalstruktur erheblich größere Terahertz-Strahlungsleistungen als mit einer einfachen Dipolantenne erreichbar sind, muss ein mit einer photoleitenden Empfangsantenne ausgestattetes Time-Domain Terahertz-Spektrometer mit einem Lock-in System zur Signalerfassung ausgerüstet werden, um das für eine Messung erforderliche Signal/Rausch-Verhältnis zu erreichen. Auf der Sendeseite ist die erzeugbare Terahertz-Strahlung durch die zur Verfügung stehende Laserleistung begrenzt. Auf der Empfängerseite bildet die Empfindlichkeit der photoleitenden Dipolantenne die Begrenzung der Nachweisempfindlichkeit.

[0008] In der Patentschrift US 5 432 374 A ist in einer kombinierten Antennenanordnung für THz-Strahlung und Infrarotstrahlung mit einer Mikrolinse beschrieben, welche die nachzuweisende Infrarotstrahlung auf das Detektorelement auf der Rückseite des GaAs Wafers fokussiert. Bei dieser Anordnung handelt es sich jedoch nicht um das Problem der Erzeugung oder des Nachweises kohärenter THz-Strahlung.

[0009] Die Patentschrift EP 0 727 671 A2 beschreibt ein THz-Antennenarray, bei dem jedes Pixel aus einer Antenne mit einem photoleitenden Schalter aus einer interdigitalen Fingerstruktur besteht. Das Array der interdigitalen Fingerstrukturen kann mit einem Kurzpuls laser über ein Mikrolinsenarray bestrahlt werden. Bei dieser Antennenanordnung wird jeweils eine komplette Interdigitalstruktur durch eine Mikrolinse bestrahlt.

[0010] In der Druckschrift US 6 157 035 A ist ein Detektorarray aus einem Halbleitermaterial für optische Strahlung beschrieben, dessen Bandlücke geringer als die Photonenenergie der nachzuweisenden Strahlung ist. Um zu einer kurzen Responsezeit des Detektorarrays zu kommen, ist jedes zweite Detektorelement mit einer Schattenmaske abgedeckt, welche schachbrettartig oder auch als Fingerstruktur ausgeführt werden kann. Ein Linsenarray über der Schattenmaske beleuchtet jedes zweite Detektorelement. Gemessen werden die Ladungsträger in den jeweils unbeleuchteten Detektorelementen, die aus den beleuchteten Detektorelementen in die abgeschatteten Detektorelemente diffundieren. Dieses Detektorarray ist für hohe Modulationsfrequenzen eines optischen Signals, aber nicht für THz-Strahlung geeignet.

[0011] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine photoleitende Antenne zur Erzeugung oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung anzugeben, die als Sendeantenne eine höhere Terahertz-Strahlungsleistung als eine bekannte großflächige photoleitende Antenne liefert und die beim Einsatz als Empfangsantenne einen größeren Strom als die bekannten photoleitenden Antennen liefert.

[0012] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch die Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung unter Verwendung einer photoleitenden Antenne mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Den Erfindungsanspruch vorteilhaft weiterbildende Merkmale sind Gegenstand der Unteransprüche sowie der Beschreibung unter Bezugnahme auf die Ausführungsbeispiele mit den dazugehörigen Abbildungen.

[0013] Die Erfindung wird nachfolgend an Hand zweier Ausführungsbeispiele näher erläutert.

[0014] In den zugehörigen Zeichnungen zeigen

[0015] **Fig. 1** die schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung,

[0016] **Fig. 2** die schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung,

[0017] **Fig. 3** die schematische Darstellung eines Querschnitts durch die zweite Ausführungsform der Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung.

[0018] **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang von Terahertz-Strahlung. Die Anordnung besteht aus einer photoleitenden Antenne **1** aus einem Halbleitermaterial **2** mit einer interdigitalen Fingerstruktur **3**. Das Halbleitermaterial **2** ist für die anregende Laserstrahlung **4** absorbierend und besitzt eine geringe Relaxationszeit angeregter Ladungsträger. Die interdigitale Fingerstruktur **3** besitzt Finger **5**, die in jedem zweiten Zwischenraum der interdigitalen Fingerstruktur **3** eine Reihe sich gegenüberstehender Elektroden **6** besitzen, zwischen denen ein geringer Abstand **7** von wenigen Mikrometern vorhanden ist.

[0019] Über der photoleitenden Antenne **1** ist ein Linsenarray **8** aus Glas angeordnet, das in die Oberfläche einer für das Laserlicht **4** transparenten Platte **9** eingepreßt ist. Die Mitte der Linsen befindet sich jeweils über dem Abstand zwischen den Elektroden **6** in jedem zweiten Zwischenraum der interdigitalen Fingerstruktur **3**. Die Form der Linsen des Linsenarrays **8** ist so gewählt, dass sich bei parallel einfallendem Laserlicht **4** die Brennpunkte an der Oberfläche des Halbleitermaterials **2** in der Mitte zwischen den sich gegenüberstehenden Elektroden **6** der interdigitalen Fingerstruktur **3** befinden. Dadurch werden durch das Laserlicht **4** die Ladungsträger hauptsächlich im Halbleitermaterial **2** zwischen den sich gegenüberstehenden Elektroden **6** erzeugt.

[0020] Wird die Anordnung zur Abstrahlung von Terahertz-Strahlung eingesetzt, so ergeben sich gegenüber dem Stand der Technik folgende Vorteile: Erstens wird der Großteil der Laserstrahlung **4**, die auf den Antennenbereich zwischen den Fingern **5** mit den Elektroden **6** gerichtet ist, durch das Linsenarray **8** in den Bereich zwischen den Elektroden **6** gebrochen und damit für die Ladungsträgererzeugung genutzt. Dadurch kann man mit der gleichen Laserleistung mit der erfindungsgemäßen Antenne eine nahezu doppelt so große Antennenfläche nutzen und eine entsprechend größere kohärente Terahertz-Strahlungsleistung erzeugen.

[0021] Zweitens ergibt sich durch die Fokussierung der Laserstrahlung mit dem Linsenarray eine größere Leistungsdichte als bei einer homogenen Bestrahlung der Antenne. Da die abgestrahlte Terahertz-Leistung proportional zum Quadrat der Intensität der Laserstrahlung ist (siehe z.B. Optics Letters, Vol. 31, No 10, 2006 Seiten 1546–1548), wird die Effizienz der Erzeugung der Terahertz-Strahlung, bezogen auf die zur Verfügung stehende Laserleistung mindestens um eine Größenordnung gesteigert.

[0022] Wird die Anordnung zum Empfang von Terahertz-Strahlung eingesetzt, so ergibt sich gegenüber dem Stand der Technik mit einer photoleitenden Dipolantenne ein größeres Signal. Eine dem Stand der Technik entsprechende photoleitende Antenne besitzt eine laterale Ausdehnung l von einer halben (Vakuum)-Wellenlänge λ dividiert durch die Brechzahl n des Halbleitermaterials **2**. Die Brechzahl des Halbleitermaterials **2** beträgt $n \approx 3,5$. Der beugungsbegrenzte Fokussdurchmesser d der Terahertz-Strahlung auf der photoleitenden Antenne beträgt nach der Abbeschen Formel:

$$d \approx \lambda / (2 \cdot NA) \quad NA - \text{numerische Apertur.}$$

[0023] Bei einer typischen numerischen Apertur NA von 0,5 ergibt sich für den beugungsbegrenzten Fokussdurchmesser d der Terahertz-Strahlung etwa eine Wellenlänge λ . Für das Verhältnis V der Empfängerfläche einer photoleitenden Dipolantenne zur beugungsbegrenzten Fokussfläche der Terahertzstrahlung ergibt sich mit $n \approx 3,5$:

$$V = (l/d)^2 = (l/\lambda)^2 \approx 1/49.$$

[0024] Da der Empfängerstrom proportional zur Antennenfläche ist, empfängt die Dipolantenne nur den Bruchteil V des zur Verfügung stehenden Terahertz-Signals.

[0025] Durch den Einsatz der erfindungsgemäßen Anordnung kann die wirksame Antennenfläche der Spotgröße der Terahertz-Strahlung angepasst werden, so dass das zur Verfügung stehende Terahertz-Signal vollständig erfasst wird. In einem Terahertz-Spektrometer mit photoleitender Sende- und Empfangsantenne kann durch den Einsatz der erfindungsgemäßen Antenne sowohl auf der Sender- als auch auf der Empfängerseite jeweils etwa eine Größenordnung an Leistung gegenüber den bisher bekannten photoleitenden Antennen gewonnen werden. Dadurch kann das Signal/Rausch-Verhältnis des Terahertz-Spektrometers um etwa zwei Größenordnungen verbessert werden.

[0026] **Fig. 2** zeigt die schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung. Im Unterschied zum ersten Ausführungsbeispiel besteht das Linsenarray aus plankonvexen, parallelen Zylinderlinsen **10** und die Interdigitalstruktur **3** besteht aus einfachen Fingern **5** ohne eine weitere Strukturierung. Die Zylinderlinsen sind so auf der Interdigitalstruktur **3** angeordnet, dass sich ihre Brennlinien **11** an der Oberfläche des Halbleitermaterials **2** zwischen jedem zweiten Finger **5** befinden.

[0027] **Fig. 3** zeigt die schematische Darstellung eines Querschnitts durch die zweite Ausführungsform der Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang

von Terahertz-Strahlung. Das Array der parallelen Zylinderlinsen **10** sorgt dafür, dass in der interdigitalen Fingerstruktur **3** nur jeder zweite Zwischenraum zwischen den Fingern **5** vom Laserlicht bestrahlt wird und keine Auslöschung der Signale entsteht. Gleichzeitig wird die Intensität der Beleuchtung des Halbleitermaterials **2** infolge der Fokussierung in den Brennlinien **11** erhöht.

[0028] Gegenüber der ersten Ausführungsform besitzt diese Anordnung den Vorteil, dass das Zylinderlinsenarray **10** die Bestrahlung des Halbleitermaterials **2** zwischen jeder zweiten Fingerstruktur komplett verhindert. Die Konzentration des Laserlichtes ist jedoch geringer als im ersten Ausführungsbeispiel, weshalb diese Antenne besonders zum Nachweis von Terahertz-Strahlung geeignet ist.

[0029] Eine weitere Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung besteht aus einer Modifikation des Linsenarrays **8** in der Weise, dass das Linsenarray **8** aus plankonvexen Einzellinsen besteht, die auf der photoleitenden Antenne **1** angebracht sind. Die Einzellinsen sind dabei so angeordnet, dass nur der Bereich des Halbleitermaterials **2** zwischen jedem zweiten Finger **5** der interdigitalen Fingerstruktur **3** bestrahlt wird.

[0030] Eine weitere Ausführungsform der erfindungsgemäßen Anordnung besteht darin, dass das Linsenarray **8** aus einem organischen Material wie beispielsweise Polymer besteht, das für das Laserlicht **4** transparent ist.

[0031] Des Weiteren kann es vorteilhaft sein, dass die photoleitende Antenne **1** auf einem gut wärmeleitenden, für die Terahertz-Strahlung transparenten Träger wie beispielsweise CVD-Diamant montiert ist, der einen guten thermischen Kontakt zu einer Wärmesenke besitzt.

Aufstellung der Bezugszeichen

Bezugszeichenliste

| | |
|-----------|------------------------------|
| 1 | photoleitende Antenne |
| 2 | Halbleitermaterial |
| 3 | interdigitale Fingerstruktur |
| 4 | Laserlicht |
| 5 | Finger |
| 6 | Elektroden |
| 7 | Abstand der Elektroden |
| 8 | Linsenarray |
| 9 | transparente Platte |
| 10 | Zylinderlinsen |
| 11 | Brennlinien |

Patentansprüche

1. Anordnung zur Abstrahlung oder zum Empfang

fang von Terahertz-Strahlung unter Verwendung einer photoleitenden Antenne (1) mit einer interdigitalen Fingerstruktur (3) und einer darauf angeordneten periodischen Struktur, welche die optische Anregung von Ladungsträgern im Halbleitermaterial (2) der photoleitenden Antenne (1) auf jeden zweiten Finger (5) der interdigitalen Fingerstruktur (3) beschränkt, **dadurch gekennzeichnet**, dass

a) die periodische Struktur aus einem Linsenarray (8) besteht und dass
b) sich die Brennpunkte (7) der einzelnen Linsen des Linsenarrays (8) jeweils an der Oberfläche des Halbleitermaterials (2) zwischen jedem zweiten Finger (5) der interdigitalen Fingerstruktur (3) befinden.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass

a) das Linsenarray (8) aus plankonvexen, parallelen Zylinderlinsen (10) besteht und dass
b) sich die Brennpunkte (11) der einzelnen Zylinderlinsen (10) jeweils an der Oberfläche des Halbleitermaterials (2) zwischen jedem zweiten Finger (5) der interdigitalen Fingerstruktur (3) befinden.

3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Linsenarray (8) aus plankonvexen Einzellinsen besteht.

4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Linsenarray (8) aus einer transparenten Platte (9) besteht, in deren Oberfläche die Linsenformen eingeprägt sind.

5. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass das Linsenarray (8) aus einem Glas besteht.

6. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass das Linsenarray (8) aus einem organischen Material besteht.

7. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass

a) die photoleitende Antenne (1) auf einem gut wärmeleitfähigen, für Terahertz-Strahlung transparenten Träger angebracht ist und dass
b) der Träger einen guten thermischen Kontakt mit einer Wärmesenke besitzt.

8. Anordnung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der gut wärmeleitfähige, für Terahertz-Strahlung transparente Träger aus CVD-Diamant besteht.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

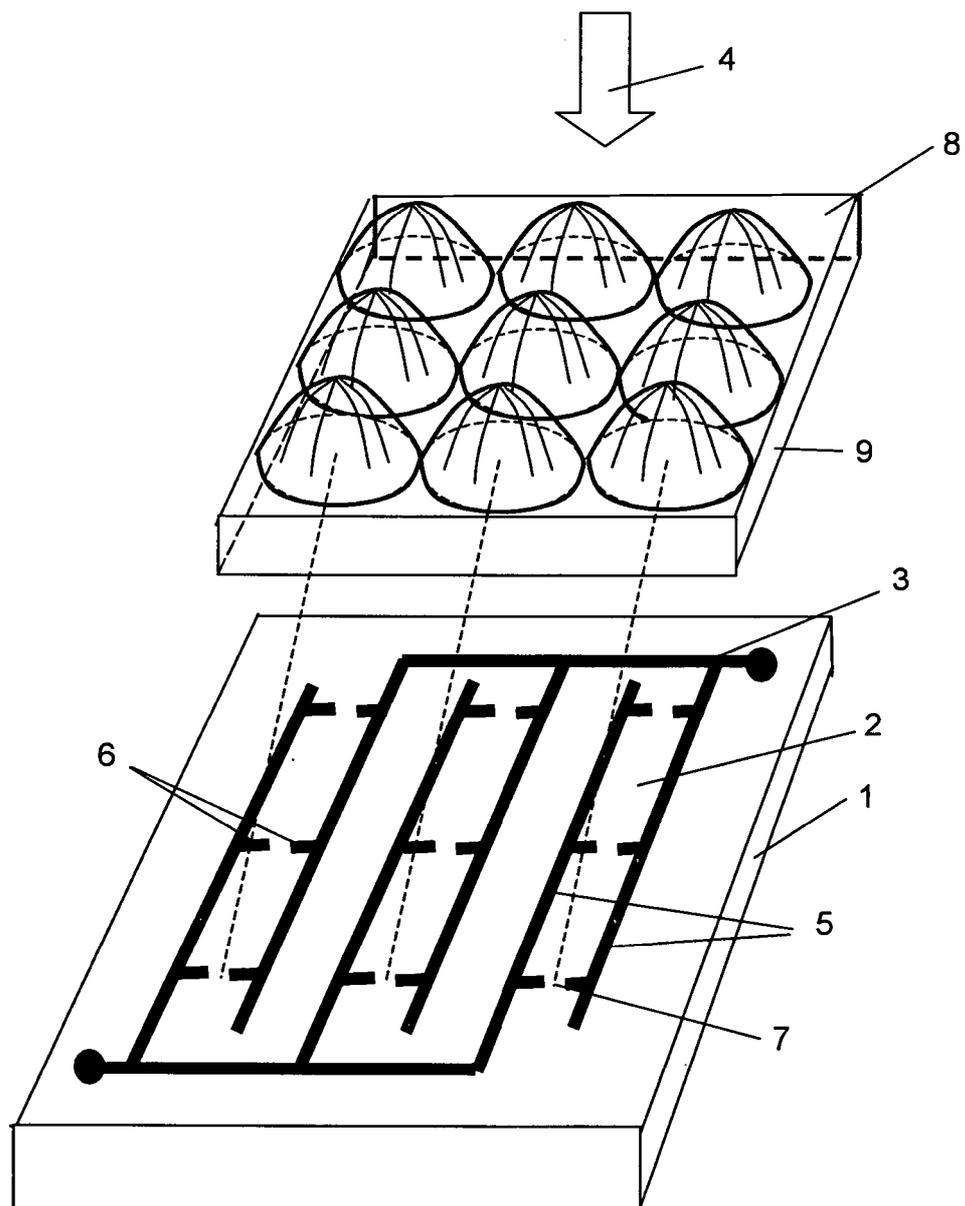


Fig. 2

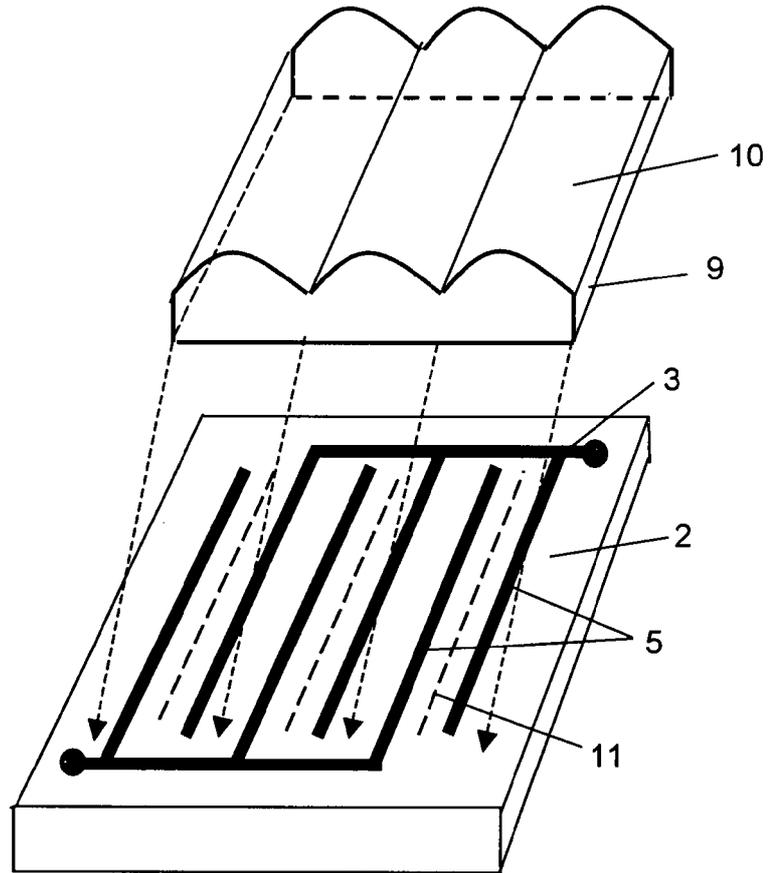


Fig. 3

