



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2006 037 470 A1 2008.02.21

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2006 037 470.3

(22) Anmeldetag: 10.08.2006

(43) Offenlegungstag: 21.02.2008

(51) Int Cl.⁸: H01Q 15/08 (2006.01)

(71) Anmelder:
BATOP GmbH, 99425 Weimar, DE

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

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

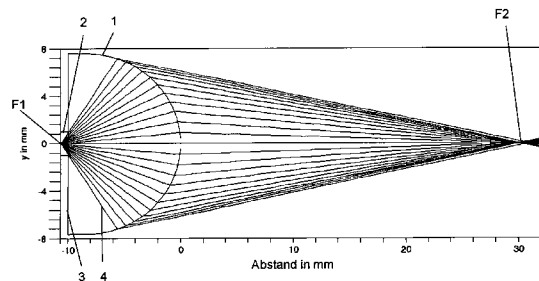
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Plankonvexe Substratlinse**

(57) Zusammenfassung: Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine plankonvexe Substratlinse aus einem hochbrechenden Halbleitermaterial für eine photoleitende Terahertz-Antenne anzugeben, die keinen durch die Totalreflexion begrenzten Öffnungswinkel des abgestrahlten Terahertz-Lichtes besitzt und das Terahertz-Licht beugungsbegrenzt fokussiert.

Erfindungsgemäß ist die plankonvexe Substratlinse (1) eine Asphäre mit einer Form, die ein vom Brennpunkt (F1) der photoleitenden Halbleiterantenne (2) auf der Planseite (3) der Substratlinse (1) ausgehendes divergentes Terahertz-Strahlenbündel (4) in einen zweiten Brennpunkt (F2) auf der konvexen Seite der Substratlinse (1) abbildet beziehungsweise umgekehrt ein vom Brennpunkt (F2) ausgehendes Terahertz-Strahlenbündel (4) im Brennpunkt (F1) der photoleitenden Halbleiterantenne (2) fokussiert.

Die Substratlinse kann zur beugungsbegrenzten Fokussierung des von einer photoleitenden Antenne ausgehenden divergenten Terahertz-Strahlenbündels beziehungsweise umgekehrt zur Fokussierung eines divergenten Terahertz-Strahlenbündels in den Brennpunkt einer photoleitenden Empfangsantenne verwendet werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine plankonvexe Substratlinse für eine photoleitende Terahertz Antenne zur Erzeugung oder zum Nachweis von Terahertz-Strahlung.

[0002] Terahertz Strahlung ist elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von etwa 0,1 bis 100 THz. Da es im Frequenzbereich der Terahertz Strahlung Molekülschwingungen unterschiedlicher Substanzen gibt, kann mittels Absorptionsspektroskopie im Terahertz Bereich die Untersuchung von Substanzen erfolgen und auch der Nachweis bestimmter chemischer Verbindungen geführt werden. So können beispielsweise Objekte im Terahertz Bereich abgebildet werden (siehe beispielsweise EP 0 828 162 A2) oder tomographisch untersucht werden (siehe beispielsweise EP 0 864 857 A1). Da Terahertz Strahlung dielektrische Stoffe wie Papier oder Textilien gut durchdringt, können auch Objekte innerhalb von Verpackungen geortet werden. Es gibt daher sowohl ein wissenschaftliches, ökonomisches und sicherheitsrelevantes Interesse an 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). Wird die photoleitende Antenne als Emitter eingesetzt, soll ein möglichst großer Teil der erzeugten Terahertz-Strahlung das Objekt erreichen. Umgekehrt ist es beim Nachweis von Terahertz-Strahlung wichtig, diese auf die photoleitende Antenne zu fokussieren, um eine hohe Nachweisempfindlichkeit zu erreichen.

[0004] Bekannt ist die Kollimation von Terahertz-Strahlung mit fokussierenden Hohlspiegeln, die beispielsweise die Form eines Rotationsparaboloids besitzen (WO 2004/086560 A2). Abgesehen von den geometrischen Problemen bei der Strahlführung mit Parabolspiegeln kann bei deren Einsatz in Kombination mit einer photoleitenden Antenne nur ein kleiner Raumwinkel genutzt werden. Der nutzbare Raumwinkel ist durch die Totalreflexion der Terahertz-Strahlung an der photoleitenden Antenne begrenzt. Entsprechend dem Brechungsgesetz beträgt der halbe Öffnungswinkel α des durch die Totalreflexion begrenzten Strahlenbündels $\alpha = \arcsin(n/n_0)$, wobei n der Brechungsindex des Materials der photoleitenden Antenne und n_0 der Brechungsindex des angrenzenden Mediums ist. Üblicherweise besteht die photoleitende Antenne aus dem hochbrechenden Halbleitermaterial GaAs mit einem Brechungsindex von etwa $n = 3,4$ für Terahertz-Wellen und das angrenzende Medium ist Luft mit einem Brechungsindex $n_0 \sim 1$. In diesem Fall können aus der Antenne nur Terahertz-Wellen mit einem halben Öffnungswinkel von $\alpha = 17,1^\circ$ austreten.

[0005] Um einen größeren Raumwinkel der erzeugten Terahertz-Strahlung zu nutzen, wird mit plankonvexen sogenannten Substratlinsen, die mit ihrer Planfläche direkt am Substrat anliegen, die Terahertz-Strahlung aus der photoleitenden Antenne extrahiert. Der Brechungsindex des Linsenmaterials n_L wird dabei so gewählt, dass er möglichst gleich dem Brechungsindex der photoleitenden Antenne ist: $n = n_L$. Dadurch wird das Terahertz-Licht an der Grenzfläche zwischen der photoleitenden Antenne und der plankonvexen Substratlinse nicht gebrochen und auch nicht total reflektiert. Welcher Anteil des Terahertz-Lichtes in das angrenzende Medium übertreten kann, wird dann durch die konvexe Linsenform bestimmt. Bekannt sind sphärische Linsen (Journal of the Optical Society of America B, Vol 19, No. 2, February 2002, p. 319–329, US 5789750, JP 2003131137 A, JP 2000352558 A) oder elliptische Linsen (GB 2405263 A), die das Terahertz-Licht divergent oder als paralleles Lichtbündel brechen.

[0006] Der Einfluss der Gestaltung von sphärischen Substratlinsen auf das abgestrahlte Terahertz-Licht einer photoleitenden Antenne ist in den Veröffentlichungen Journal of the Optical Society of America B, Vol 19, No. 2, February 2002, p. 319–329 und US 5789750 detailliert beschrieben. Es wird unter anderem erläutert, dass eine kollimierende sphärische Linse infolge der Totalreflexion nur einen Emissionskegel mit dem halben Öffnungswinkel $\alpha = (n-1)/(n^2 - 2n)$ besitzt. Für GaAs oder Si mit $n \sim 3.4$ ergibt sich ein halber Öffnungswinkel des Emissionskegels von etwa $30,2^\circ$. Diese Lösung ist zwar eine Verbesserung gegenüber der Anordnung ohne Substratlinse, aber sie ist aus zwei Gründen nicht optimal:

Erstens geht Terahertz-Energie verloren, weil der Abstrahlekegel der Antenne größer als 30° ist und zweitens ist die Strahlqualität des abgestrahlten Terahertz-Lichtes infolge des bekannten Öffnungsfehlers sphärischer Linsen schlecht. Das führt dazu, dass der Strahl nicht beugungsbegrenzt fokussiert werden kann. In den gleichen Publikationen ist auch dargelegt, dass eine hyperhemisphärische Substratlinse eingesetzt werden kann, die keine Begrenzung durch die Totalreflexion besitzt. Nachteilig ist allerdings, dass eine hyperhemisphärische Substratlinse das Licht weder kollimieren noch fokussieren, sondern lediglich divergent abstrahlen kann. Zur Kollimation oder zur Fokussierung ist deshalb eine weitere Sammellinse oder ein Hohlspiegel erforderlich, was einerseits den Aufwand erhöht und zusätzliche optische Verluste bewirkt.

[0007] In der Patentschrift GB 2405263 A wird der Einsatz einer elliptischen plankonvexen Substratlinse vorgeschlagen. Nachteilig an dieser Lösung ist der Öffnungsfehler einer elliptischen Linse. Beim Einsatz einer elliptischen Linse kann keine beugungsbegrenzte Intensität im Brennpunkt erzeugt werden. Da es jedoch bei den meisten Anwendungen von Terahertz-Messgeräten darauf ankommt, eine hohe Strahlintensität zur Erzielung eines guten Signal/Rausch-Verhältnisses zu erreichen, ist der mit einer elliptischen Linse verursachte Intensitätsverlust sehr nachteilig.

[0008] Alle vorstehend diskutierten Substratlinsen können sowohl an einer photoleitenden Emmitterantenne als auch an einer Detektorantenne zum Einsatz kommen. Die optischen Eigenschaften sind dabei wegen der Umkehrbarkeit der Lichtwege die gleichen.

[0009] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine plankonvexe Substratlinse aus einem hochbrechenden Halbleitermaterial für eine photoleitende Terahertz-Antenne anzugeben, die keinen durch die Totalreflexion begrenzten Öffnungswinkel des abgestrahlten Terahertz-Lichtes besitzt und das Terahertz-Licht beugungsbegrenzt fokussiert.

[0010] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch die plankonvexe Substratlinse gemäß Patentanspruch 1 gelöst. Die plankonvexe Substratlinse besitzt die Form einer Asphäre, welche ein von der photoleitenden Antenne auf der Planseite der Substratlinse ausgehendes divergentes Terahertz-Strahlenbündel in einen zweiten Fokus auf der konvexen Seite der Substratlinse abbildet und umgekehrt. Die Form der Asphäre ist so berechnet, dass nicht nur achsennahe Strahlen, sondern alle Strahlen eines von einem Punkt der Antenne ausgehenden Bündels in einem Punkt wieder vereinigt werden. Geometrisch-optisch ist damit die Punktabbildung fehlerfrei. Selbstverständlich bleiben noch die durch die Beugung bedingten Effekte, die aber bei der erfindungsgemäßen Asphäre infolge der großen Öffnung der Asphäre relativ gering bleiben. Im sichtbaren Spektralbereich und im nahen Infrarot sind heute Asphären für beugungsbegrenzte Abbildungen vielfältig im Einsatz. Insbesondere für die Faser- und Laseroptik werden Asphären mit Ray-Tracing Methoden berechnet und mit numerisch gesteuerten Drehmaschinen oder Schleifmaschinen oder im Falle von Plastlinsen mit entsprechenden Gießverfahren kostengünstig in großen Stückzahlen hergestellt. Die als Substratlinsen für photoleitende Terahertz-Antennen erforderlichen Asphären aus Silizium können mittels Diamant-Drehens oder mittels Schleifens auf numerisch gesteuerten Maschinen hergestellt werden.

[0011] Im Unteranspruch 2 wird vorgeschlagen, die asphärische plankonvexe Substratlinse aus hochreinem Silizium zu fertigen, da dieses Material etwa die gleiche Brechzahl wie Galliumarsenid besitzt und Terahertz-Wellen wenig absorbiert. Photoleitende Terahertz-Antennen bestehen meistens aus Galliumarsenid. Besteht die Substratlinse aus Silizium, wird das Licht an der Grenzfläche zwischen der Substratlinse und der photoleitenden Antenne nicht gebrochen, weil die Brechungsindizes beider Materialien übereinstimmen.

[0012] Eine weitere zweckmäßige Ausgestaltung der Erfindung bezüglich der Wahl des zweiten Fokus ist im Unteranspruch 3 angegeben. Dabei ist die Asphäre so gestaltet, dass sie die von der photoleitenden Antenne abgestrahlten Terahertz-Wellen kollimiert beziehungsweise umgekehrt einen Terahertz-Parallelstrahl auf die photoleitende Antenne fokussiert.

[0013] Mittels einer im Unteranspruch 4 angegebenen Entspiegelungsschicht auf der Substratlinse wird die Transmission der Grenzfläche zwischen der Substratlinse und der angrenzenden Luft für die Mitte des zu übertragenden Terahertz-Frequenzbereichs von etwa 70% erhöht und kann bei geeigneter Wahl von Brechungsindex und Dicke der Entspiegelungsschicht nahezu 100% erreichen.

[0014] Eine weitere Möglichkeit der Entspiegelung der Substratlinse ist im Unteranspruch 5 angegeben. Die konvexe Linsenoberfläche ist nicht glatt, sondern besitzt eine statistisch raue Oberfläche, deren Rautiefe und laterale Strukturgröße etwa einem Viertel der Terahertz-Wellenlänge im Linsenmaterial entspricht. Durch diese raue Oberfläche wird eine breitbandige Entspiegelung erreicht, die infolge eines graduellen Brechzahlübergangs von der Linse zur angrenzenden Luft bewirkt wird. Eine derartige entspiegelnde raue Oberfläche ist auch als Mottenaugenstruktur im sichtbaren Spektralgebiet bekannt.

[0015] Die erfindungsgemäße plankonvexe Substratlinse wird nachfolgend an Hand von drei Ausführungsbeispielen näher erläutert.

[0016] In den zugehörigen Zeichnungen zeigen

[0017] Fig. 1 den Querschnitt eines erstes Ausführungsbeispiels einer fokussierenden asphärischen plan-

konvexen Substratlinsse mit einem zweiten Fokus im Abstand von 50 Millimetern von der Linsenoberfläche,

[0018] **Fig. 2** den Querschnitt eines zweiten Ausführungsbeispiels einer kollimierenden asphärischen plankonvexen Substratlinsse.

[0019] **Fig. 3** den Querschnitt eines dritten Ausführungsbeispiels einer entspiegelten asphärischen plankonvexen Substratlinsse.

[0020] In **Fig. 1** ist das erste Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen asphärischen plankonvexen Substratlinsse **1** dargestellt. Die Substratlinsse **1** ist mit der Planseite **3** direkt mit der photoleitenden Halbleiterantenne **2** verbunden. Das vom Brennpunkt F1 der Halbleiterantenne **2** ausgehende divergente Terahertz-Strahlenbündel **4** wird an der erfindungsgemäßen asphärischen Substratlinsse **1** so gebrochen, dass das Strahlenbündel im Abstand von 30 mm von der Linsenoberfläche im Brennpunkt F2 gesammelt wird. Gezeichnet sind Terahertz-Strahlen, die mit den Winkeln $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ, \pm 30^\circ, \pm 35^\circ, \pm 40^\circ, \pm 45^\circ, \pm 50^\circ$ und $\pm 55^\circ$ vom Brennpunkt F1 ausgehen.

[0021] Die Substratlinsse **1** besteht aus hochreinem Silizium mit dem Brechungsindex $n_L = 3,4$. Die photoleitende Antenne **2** aus GaAs besitzt eine Chipdicke von $650 \mu\text{m}$ und eine Chipfläche von $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$. Die konvexe Form der asphärischen Substratlinsse **1** wurde mittels Ray-Tracings so berechnet, dass die an der asphärischen Grenzfläche zur Luft gebrochenen Strahlen im Brennpunkt F2 gesammelt werden. Die Dicke der Substratlinsse **1** beträgt auf der optischen Achse 10 mm. Ihre Form ist durch die folgende Asphären-Gleichung mit den Koeffizienten R, k und C_i gegeben:

$$y(x) = \frac{x^2}{R \left(1 + \sqrt{1 - (1+k) \frac{x^2}{R^2}} \right)} + \sum_{i=1}^m C_i x^i$$

[0022] Dabei besitzen die Koeffizienten die folgenden Werte:

Vertex Radius R = 6,126231488

Konische Konstante k = -0,4020660999

$C_2 = -0,1517500460\text{e-}1$

$C_4 = 0,2133401874\text{e-}2$

$C_6 = -0,2123901463\text{e-}3$

$C_8 = 0,8948230249\text{e-}5$

$C_{10} = -0,1690542401\text{e-}6$

$C_{12} = 0,1182354671\text{e-}8$

[0023] Der halbe Öffnungswinkel des Terahertz-Strahlenbündels **4**, das vom Brennpunkt F1 der photoleitenden Antenne **2** ausgeht, beträgt 55° . Daher besitzt die erfindungsgemäße asphärische Substratlinsse **1** einen größeren Öffnungswinkel als eine kollimierende sphärische Linse und fokussiert außerdem das Terahertz-Strahlenbündel beugungsbegrenzt im Brennpunkt F2.

[0024] In **Fig. 2** ist das zweite Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen asphärischen plankonvexen Substratlinsse **1** dargestellt. Die Substratlinsse **1** ist mit der Planseite **3** direkt mit der photoleitenden Halbleiterantenne **2** verbunden. Das vom Brennpunkt F1 der Halbleiterantenne **2** ausgehende divergente Terahertz-Strahlenbündel **4** wird an der asphärischen Substratlinsse **1** so gebrochen, dass es kollimiert wird und als Parallelstrahlbündel die Substratlinsse **1** verlässt. Gezeichnet sind Strahlen, die mit den Winkeln $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ, \pm 30^\circ, \pm 35^\circ, \pm 40^\circ, \pm 45^\circ, \pm 50^\circ$ und $\pm 55^\circ$ vom Brennpunkt F1 ausgehen.

[0025] Die Substratlinsse **1** besteht aus hochreinem Silizium mit dem Brechungsindex $n_L = 3,4$. Die photoleitende Antenne **2** aus GaAs besitzt eine Chipdicke von $650 \mu\text{m}$ und eine Chipfläche von $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$. Die Dicke der Substratlinsse **1** beträgt auf der optischen Achse 10 mm. Die asphärische Form der Substratlinsse **1** ist durch die folgenden Koeffizienten gegeben::

Vertex Radius R = 6,765882089

Konische Konstante k = -0,2996912133

$C_2 = -0,1544245486\text{e-}1$

$C_4 = 0,2238260788\text{e-}2$

$C_6 = -0,2019875400\text{e-}3$

$$C_8 = 0,7823980255e-5$$

$$C_{10} = -0,1363807485e-6$$

$$C_{12} = 0,8812472656e-9$$

[0026] Der halbe Öffnungswinkel des Terahertz-Strahlenbündels **4**, das vom Brennpunkt F1 der photoleitenden Antenne **2** ausgeht, beträgt 55°. Daher besitzt die erfindungsgemäße asphärische Substratlinse **1** einen größeren Öffnungswinkel als eine kollimierende sphärische Linse.

[0027] In Fig. 3 ist das dritte Ausführungsbeispiel einer Substratlinse **1** gemäß Unteranspruch **4** erläutert. Die im ersten Ausführungsbeispiel beschriebene Substratlinse **1** aus Silizium mit einer Brechzahl von 3,4 ist mit einer niedrigbrechenden Entspiegelungsschicht **5** überzogen. Die Entspiegelungsschicht **5** besteht aus Polyethylen mit einer Dicke von 50 µm und einer Brechzahl von etwa 1,5. Die optische Dicke, das Produkt aus Brechzahl und Dicke der Polyethylen-Entspiegelungsschicht **5** beträgt 75 µm und entspricht demzufolge einer Viertel-Wellenlänge bei der Frequenz von einem Terahertz. Damit wird durch diese Polyethylenschicht eine Teilentspiegelung der Substratlinse erreicht. Bei der Frequenz von 1 THz wird durch diese Entspiegelungsschicht **5** die Transmission von vorher 70% auf etwa 90% erhöht und die durch die Reflexion verursachten optischen Intensitätsverluste entsprechend gesenkt.

Bezugszeichenliste

1	plankonvexe Substratlinse
2	photoleitende Halbleiterantenne
3	Planseite der Substratlinse
4	Terahertz-Strahlenbündel
5	Entspiegelungsschicht
F1	Brennpunkt auf der Oberfläche der photoleitenden Antenne
F2	Brennpunkt auf der konvexen Seite der Substratlinse

Patentansprüche

1. Plankonvexe Substratlinse (**1**) aus einem hochbrechenden Halbleitermaterial zur Kollimation hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung im Terahertz Bereich, die mittels photoleitender Halbleiterantennen (**2**) erzeugt oder nachgewiesen wird und deren erster Brennpunkt (F1) auf der Oberfläche der photoleitenden Halbleiterantenne (**2**) liegt,

dadurch gekennzeichnet, dass

- a) die plankonvexe Substratlinse (**1**) eine Asphäre mit einer Form ist,
- b) die ein vom Brennpunkt (F1) der photoleitenden Halbleiterantenne (**2**) auf der Planseite (**3**) der Substratlinse (**1**) ausgehendes divergentes Terahertz-Strahlenbündel (**4**) in einen zweiten Brennpunkt (F2) auf der konvexen Seite der Substratlinse (**1**) abbildet
- c) beziehungsweise umgekehrt ein vom Brennpunkt (F2) ausgehendes Terahertz-Strahlenbündel (**4**) im Brennpunkt (F1) der photoleitenden Halbleiterantenne (**2**) fokussiert.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Substratlinse (**1**) aus hochreinem Silizium besteht.

3. Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die plankonvexe Substratlinse (**1**) auf der Seite mit dem konvexen Profil einen zweiten Brennpunkt (F2) besitzt, der im Unendlichen liegt.

4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die plankonvexe Substratlinse (**1**) auf der Seite mit dem konvexen Profil eine Entspiegelungsschicht (**5**) für die Mitte des zu übertragenden Terahertz-Frequenzbereichs besitzt.

5. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die plankonvexe Substratlinse (**1**) auf der Seite mit dem konvexen Profil eine statistische Oberflächenrauheit besitzt, deren Rautiefe und laterale Strukturgröße etwa einem Viertel der Terahertz-Wellenlänge im Linsenmaterial entspricht.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

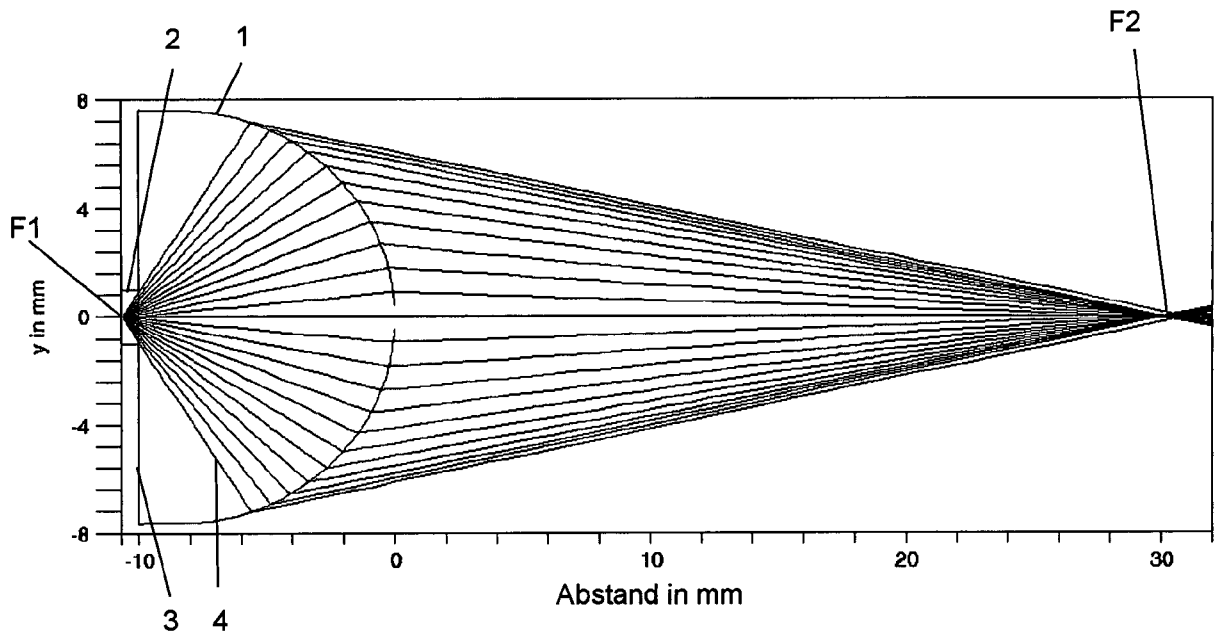


Fig. 2

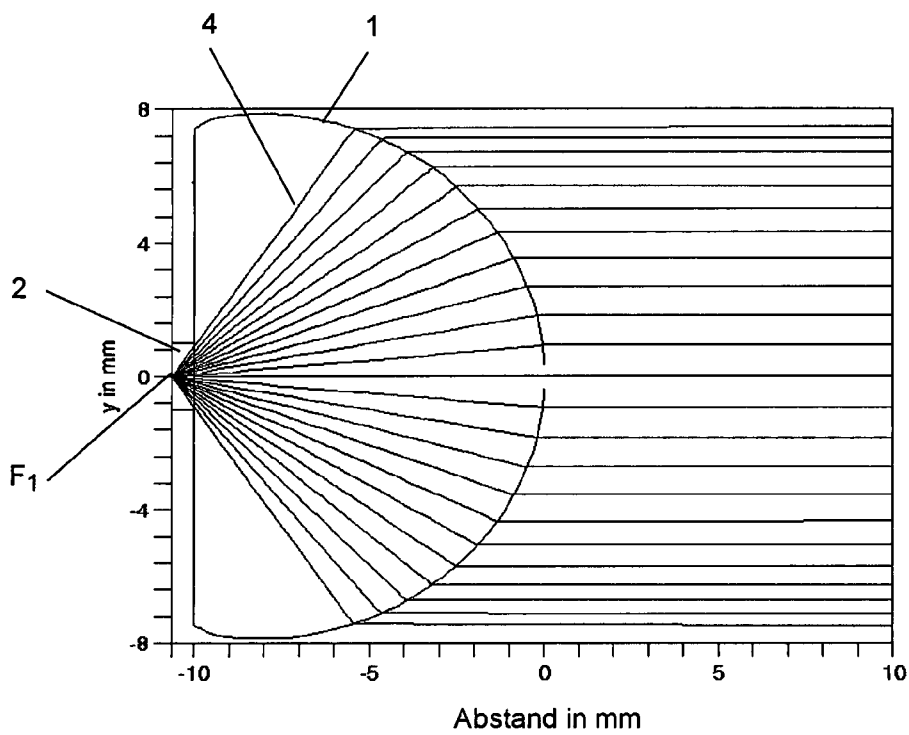


Fig. 3

