



(10) **DE 10 2017 103 687 B3** 2018.04.26

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 103 687.3**
(22) Anmeldetag: **23.02.2017**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **26.04.2018**

(51) Int Cl.: **H01L 27/144 (2006.01)**
H01L 29/78 (2006.01)
H01Q 23/00 (2006.01)
G01N 21/3581 (2014.01)

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:
Forschungsverbund Berlin e.V., 12489 Berlin, DE

(72) Erfinder:
**Rämer, Adam, 12051 Berlin, DE; Shevchenko,
Sergey, 12489 Berlin, DE**

(74) Vertreter:
**Gulde & Partner Patent- und
Rechtsanwaltskanzlei mbB, 10179 Berlin, DE**

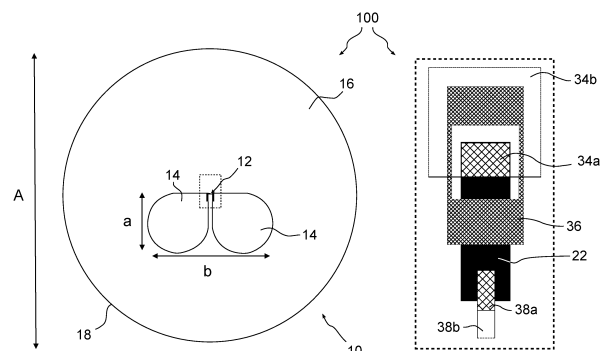
(56) Ermittelter Stand der Technik:
WO 2010/ 028 966 A2

(54) Bezeichnung: **Strahlungsdetektor und Verfahren zu dessen Herstellung**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft einen Strahlungsdetektor und ein Verfahren zu dessen Herstellung.

Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung einen Strahlungsdetektor zur Detektion von THz-Strahlung basierend auf einem Feldeffekttransistor (FET) mit einer an die FET-Struktur monolithisch integrierten Antennenstruktur und ein Verfahren zur Herstellung einer solchen monolithisch integrierten Detektoranordnung.

Ein erfindungsgemäßer Strahlungsdetektor (100) umfasst eine Antennenstruktur (10); und eine Feldeffekttransistor-, FET-, Struktur (20) mit einem Source-Bereich (24), einem Gate-Bereich (26), und einem Drain-Bereich (28), wobei diese Bereiche (24, 26, 28) auf einem Substrat (70) angeordnet sind und durch Metallisierung voneinander unabhängige elektrisch leitfähige Elektrodenstrukturen (34, 36, 38) ausbilden, wobei die Gate-Elektrodenstruktur (36) die Source-Elektrodenstruktur (34) oder die Drain-Elektrodenstruktur (38) in einer ersten Ebene (E1) vollständig umschließt; sich die umschlossene Elektrodenstruktur (34, 38) bis oberhalb der Gate-Elektrodenstruktur (36) erstreckt und dort die Umschließung in einer zweiten Ebene (E2) oberhalb der ersten Ebene (E1) zumindest abschnittsweise flächig überdeckt; wobei zwischen den von der umschlossenen Elektrodenstruktur (34, 38) überdeckten Bereichen der Gate-Elektrodenstruktur (36) ein elektrisch isolierender Bereich (42) zur Ausbildung eines Kondensators (40) mit einer Metall-Isolator-Metall-, MIM-, Struktur ...



Beschreibung

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Strahlungsdetektor und ein Verfahren zu dessen Herstellung. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung einen Strahlungsdetektor zur Detektion von THz-Strahlung basierend auf einem Feldeffekttransistor (FET) mit einer an die FET-Struktur monolithisch integrierten Antennenstruktur und ein Verfahren zur Herstellung einer solchen monolithisch integrierten Detektoranordnung.

Stand der Technik

[0002] Unter dem Begriff „Terahertz-Frequenzbereich“ versteht man grob den Frequenzbereich von etwa 100 GHz bis 30 THz. Dieser Bereich umspannt die Freiraumwellenlängen von $\lambda = 3$ mm bis $\lambda = 10$ μ m, weswegen er auch Submillimeterwellenlängenbereich genannt wird. In diesem Bereich ist die Energie der Photonen gering, sie liegt zwischen 0,1 meV und 100 meV.

[0003] Dieser Bereich des elektromagnetischen Spektrums wird auch als THz-Lücke bezeichnet, da der Bereich für kommerzielle Anwendungen bisher kaum erschlossen ist. Dieses rührt u.a. daher, dass bei rein elektronischen Systemen die erzeugten Signale in der Größenordnung des Rauschens liegen. Für rein photonische Ansätze ist die Energie der Photonen jedoch zu gering.

[0004] In den letzten Jahrzehnten wurden immer wieder hochkomplexe Systeme entwickelt, die im Submillimeterwellenlängenbereich arbeiten. Das Einsatzgebiet dieser Systeme ist bisher aber ausschließlich der experimentelle Bereich in Forschung und Entwicklung, wie z.B. in der Radioastronomie, der Atmosphärenforschung oder der Langzeitspektroskopie von Gasen. Für den Durchbruch in den kommerziellen Massenmarkt sind diese Systeme nicht geeignet. Das liegt vor allem an der fehlenden Verfügbarkeit von kostengünstigen Quellen und Detektoren für den THz-Bereich und an deren Betrieb zumeist bei Temperaturen unterhalb von 77 K.

[0005] Es besteht ein großes Interesse den THz-Frequenzbereich zu erschließen, da er gegenüber anderen Frequenzbereichen einige Vorteile und Einzigartigkeit aufweist. THz-Strahlung ist nicht ionisierend und wird daher im biomedizinischen Bereich als sicher angesehen. Mit THz-Strahlung können Informationen über die Ladungsträgedynamik in Nanostrukturen gewonnen werden. Viele Materialien, die im optischen Frequenzbereich undurchsichtig sind, sind im THz-Frequenzbereich transparent. Bestimmte Molekülgruppen zeigen einen eindeutigen spektralen Fingerabdruck im THz-Frequenzbereich. Dieser Finger-

abdruck ist gerade für die Detektion von Gefahrenstoffen von Interesse. Weiterhin zeigt THz-Strahlung eine geringere Streuung verglichen mit optischen Frequenzen und ist dadurch gerade für die Verwendung in staubiger Umgebung geeignet. Für die Anwendung in Kommunikationssystemen spricht die zu erzielende hohe Übertragungsbandbreite. Die geringe Wellenlänge von THz-Strahlung ermöglicht hohe Strukturauflösungen bei radargestützten Verfahren sowie der Be- bzw. Durchleuchtung von Proben, was beispielsweise für In-situ-Messungen in Produktionsprozessen zur Qualitätskontrolle von besonderem Interesse ist.

[0006] Zur Detektion von THz-Strahlung im unteren THz-Frequenzbereich (bis ca. 1 THz) eignen sich rein elektrische Systeme basierend auf GaAs-, SiGe-, CMOS- und InP-Halbleitertechnologien, meist mit Vervielfacher-Konzepten. Weiterhin können zur Detektion von THz-Strahlung Schottky-Diodenmischer und photokonduktive Detektoren verwendet werden. Als Leistungsdetektoren kommen photovoltaische Detektoren, Golay-Zellen und Bolometer zum Einsatz. Zur Erzeugung von THz-Strahlung oberhalb weniger THz werden zumeist Quantenkaskadenlasersysteme, optoelektronische Systeme basierend auf Femtosekunden-Kurzpulslaser oder die Mischung zweier Dauerstrichlaser genutzt.

[0007] In den letzten Jahren wurde gezeigt, dass sich auch Transistoren aus dem Hochfrequenzbereich (1-80 GHz) für die Detektion von THz-Strahlung eignen (T. Otsuji and M. Shur, „Terahertz Plasmonics: Good Results and Great Expectations,“ in IEEE Microwave Magazine, vol. 15, no. 7, pp. 43-50, Nov.-Dec. 2014). Insbesondere zwei Mechanismen führen dazu, dass solche Transistoren im THz-Spektrum eingesetzt werden können. Dabei handelt es sich zum einen um eine resistive Mischung im aktiven Gebiet des Transistors und zum anderen um plasmone Effekte im aktiven Gebiet des Transistors, welche durch die Dyakonov-Shur-Theorie (M. Dyakonov and M. Shur, „Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid,“ IEEE Trans. Electron Devices, vol. 43, no. 3, pp. 380-387, Mar. 1996) beschrieben werden können.

[0008] Für diese Art der Detektion von THz-Strahlung eignen sich vorrangig Feldeffekttransistoren (FETs) in CMOS- (M. Bauer et al., „Real-time CMOS terahertz camera employing plane-to-plane imaging with a focal-plane array of field-effect transistors,“ 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Mainz, 2013, pp. 1-2) und GaN-Halbleitertechnologie (M. Bauer et al., „High-sensitivity wideband THz detectors based on GaN HEMTs with integrated bowtie antennas,“ Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2015 10th European, Paris, 2015, pp. 1-4).

[0009] Um die THz-Strahlung erfassen und empfangen zu können, werden verschiedene Antennentypen verwendet. Insbesondere kommen hierbei Bowtie-Antennen, Spiralantennen und Patchantennen zum Einsatz.

[0010] In DE 10 2007 062 562 B4 und DE 10 2011 076 840 B4 wird gezeigt, dass es bei THz-Frequenzen notwendig ist, die Antenne und den Transistor auf dem gleichen Substrat integriert aufzubauen. Der Transistor und die Antenne sind dabei durch elektrische Zuleitungen miteinander verbunden, wodurch Leitungsverluste auftreten und die Antenne an den Transistor angepasst werden muss. Dadurch arbeiten die Detektoren schmalbandig und erzielen nur eine suboptimale Performance.

[0011] Die WO 2010/028966 A2 offenbart einen resistiven Mischer mit einer Leitung, die einen ersten und einen zweiten elektrischen Leiter mit je einem Anschlusskontakt aufweist, so dass ein elektrisches Hochfrequenzsignal in die Leitung einkoppelbar ist, wobei der erste Leiter eine Vielzahl von in Reihe geschalteten spannungsabhängigen Widerstandselementen aufweist, und wobei zwischen dem ersten und dem zweiten Leiter mindestens ein kapazitives Element angeordnet ist.

Offenbarung der Erfindung

[0012] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine monolithisch integrierbare Struktur zur Erfassung der Leistung und/oder der Phase elektromagnetischer Strahlung im THz-Frequenzbereich anzugeben. Weiterhin soll sich eine solche Strahlungsdetektor-Anordnung dadurch auszeichnen, dass sie eine abgeschlossene, definierte THz-Umgebung bereitstellt, in der sich monolithisch eingebettet ein Frequenzumsetzer befindet, welcher die THz-Strahlung in einen niedrigen Frequenzbereich bis hinab zu Gleichstrom umsetzt. Durch eine monolithisch integrierbare Struktur soll insbesondere auf elektrische Zuleitungen verzichtet werden können, so dass Leitungsverluste vermindert werden und die Antenne in Bezug auf die fehlenden Zuleitungen nicht an den Transistor angepasst werden muss. Dadurch sollen eine große Bandbreite mit hoher Empfindlichkeit, gepaart mit einer hohen Integrationsdichte ermöglicht werden.

[0013] Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 sowie des Patentanspruchs 13 gelöst. Zweckmäßige Ausgestaltungen der Erfindung sind in den jeweiligen Unteransprüchen enthalten.

[0014] Ein erfindungsgemäßer Strahlungsdetektor umfasst eine Antennenstruktur und eine Feldeffekttransistor-Struktur (FET-Struktur) mit einem Source-Bereich, einem Gate-Bereich, und einem Drain-Bereich,

wobei diese Bereiche auf einem Substrat angeordnet sind und durch Metallisierung voneinander unabhängige elektrisch leitfähige Elektrodenstrukturen ausbilden, wobei die Gate-Elektrodenstruktur die Source-Elektrodenstruktur oder die Drain-Elektrodenstruktur in einer ersten Ebene vollständig umschließt; sich die umschlossene Elektrodenstruktur bis oberhalb der Gate-Elektrodenstruktur erstreckt und dort die Umschließung in einer zweiten Ebene oberhalb der ersten Ebene zumindest abschnittsweise flächig überdeckt; wobei zwischen den von der umschlossenen Elektrodenstruktur überdeckten Bereichen der Gate-Elektrodenstruktur ein elektrisch isolierender Bereich zur Ausbildung eines Kondensators mit einer Metall-Isolator-Metall-Struktur (MIM-Struktur) angeordnet ist.

[0015] Als Strahlungsdetektor werden im Allgemeinen technische Anordnungen bezeichnet, welche dazu ausgebildet sind, elektromagnetische Strahlung zu empfangen und ein entsprechendes, zu Eigenschaften der empfangenen Strahlung in Beziehung stehendes, Detektionssignal auszugeben.

[0016] Die Antenne einer Detektionseinrichtung für elektromagnetische Strahlung hat im Allgemeinen die Aufgabe, auf die Antenne auftreffende elektromagnetische Freiraumwellen zu empfangen und in geführte Leiterwellen zu überführen. Dazu weist eine Antenne i.d.R. mehrere Empfangselemente auf (z.B. die beiden Arme einer klassischen Dipolantenne). Ein Abgreifen der empfangenen Leiterwelle kann im sogenannten Antennenfußpunkt (auch als zentraler Speisepunkt bezeichnet) erfolgen. Der Begriff „Antennenstruktur“ berücksichtigt dabei die äußere Geometrie der Gesamtheit aller Empfangselemente, deren gegenseitige Anordnung sowie deren intrinsischen Aufbau (z.B. mehrlagiger Schichtaufbau) vom äußeren Rand der Antenne bis zum Antennenfußpunkt.

[0017] Die elektrische Ansteuerung der unterschiedlichen Bereiche eines FET erfolgt typischerweise über drei voneinander unabhängige metallische Elektroden, wobei der Begriff „FET-Struktur“ den intrinsischen Aufbau des FET mit den elementaren Elektrodenstrukturen, d.h. ohne eine Antennenstruktur, erfasst. Die Elektroden werden dabei zumeist durch Abscheidung oder Auftragung von Metallen oder metallhaltigen Verbindungen oberhalb der einzelnen Bereiche des FET (d.h. oberhalb der FET-Struktur) angeordnet.

[0018] Der Begriff „Elektrodenstruktur“ berücksichtigt dabei sowohl die äußere Geometrie der Elektroden als auch deren intrinsischen Aufbau (z.B. Aufbau der Elektrode aus verschiedenen Schichten oder Elektroden-elementen). Elektrisch unmittelbar miteinander verbundene Bereiche können dabei eine zusammenhängende Elektrodenstruktur ausbilden. Vorzugsweise kann die Source-Elektrodenstruktur ei-

nen ohmschen Source-Kontakt und eine Source-Metallisierung umfassen. Vorzugsweise kann die Drain-Elektrodenstruktur einen ohmschen Drain-Kontakt und eine Drain-Metallisierung umfassen. Die Gate-Elektrodenstruktur kann unterschiedliche Metallisierungsebenen und eine Gate-Metallisierung umfassen. Bevorzugt wird die Gate-Elektrodenstruktur vollständig von einer Gate-Metallisierung ausgebildet. Eine Metallisierung kann dabei insbesondere durch das Aufbringen von reinen Metallen, Verbindungsmetallen oder sonstigen elektrisch leitfähigen metallischen Verbindungen erfolgen.

[0019] Ein Kondensator besteht im Allgemeinen aus zwei gegeneinander elektrisch isolierten Flächenelementen (z.B. beim Plattenkondensator) auf denen elektrische Ladungen gespeichert werden können. Diese Flächen werden auch als Kondensatorelektroden bezeichnet. Als Metall-Isolator-Metall-Struktur (MIM-Struktur) werden im Bereich der Halbleitertechnik vor allem flächig ausgebildete kapazitive metallische Schichtstapel mit einer zwischenliegenden Isolationsschicht (elektrisch isolierender Bereich) bezeichnet. Dabei kann es sich bei der Isolationsschicht beispielsweise um ein Siliziumoxid, Silizium-Nitrid oder ein sonstiges elektrisch isolierendes Material oder Medium handeln. Erfindungsgemäß wird zwischen den von der umschlossenen Elektrodenstruktur überdeckten Bereichen der Gate-Elektrodenstruktur ein elektrisch isolierender Bereich zur Ausbildung eines Kondensators mit einer MIM-Struktur angeordnet.

[0020] Vorzugsweise ist die Antennenstruktur auf dem Substrat aufliegend unmittelbar von Elektrodenstrukturen ausgebildet. Dies bedeutet, dass die Antennenstruktur eine im Wesentlichen planare Antennenausführung darstellt, wobei die Elektrodenstrukturen des FET selbst als Empfangselemente der Antennenstruktur ausgebildet sein können. Vorzugsweise ist zwischen der Antennenstruktur und dem Substrat eine Epitaxiestruktur angeordnet. Die Antennenstruktur kann jedoch zumindest abschnittsweise auch unmittelbar auf dem Substrat aufliegend ausgebildet sein.

[0021] Besonders bevorzugt wird die Antennenstruktur unmittelbar von der Source-Elektrodenstruktur und der Drain-Elektrodenstruktur ausgebildet. Vorzugsweise wird der MIM-Kondensator von zumindest einem Teil der Gate-Elektrodenstruktur durch einen sich zumindest mit einem Teil der Source-Elektrodenstruktur oder zumindest einem Teil der Drain-Elektrodenstruktur überdeckenden Bereich ausgebildet. Die Antennenstruktur kann jedoch zumindest abschnittsweise auch über die Gate-Elektrodenstruktur ausgebildet sein.

[0022] Die Idee der vorliegenden Erfindung besteht somit darin, die Antennenstruktur in unmittelbare Nä-

he zum Transistor anzuordnen, wobei auf elektrische Zuleitungen und den mit ihnen verbundenen Nachteilen vollständig verzichtet werden kann. Insbesondere kann die Antennenstruktur zur maximalen Abstandsminimierung auch unmittelbar aus den entsprechenden Elektrodenstrukturen des Transistors ausgebildet sein. Durch die ebenfalls mögliche Integration eines Kondensators in die Antennen- bzw. FET-Struktur kann eine gemeinsame HF-Umgebung ausgebildet werden, die dazu eingerichtet werden kann, den Strahlungsdetektor auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen. Dadurch, dass die Gate-Elektrodenstruktur die Source-Elektrodenstruktur oder die Drain-Elektrodenstruktur in einer ersten Ebene vollständig umschließt, lässt sich ein breitbandigerer Kurzschluss als bei einseitigen Elektrodenstrukturausführungen realisieren. Durch eine besonders kurze Umschließungsstrecke erfolgt bei hohen Frequenzen keine Transformation des Kurzschlusses zu hohen Impedanzwerten. Weiterhin führt ein Umschließen zu einer besonders hohen RF-Entkopplung der Drain- und Source-Bereiche. Insbesondere stellt der Gate-Bereich dabei das RF-Bezugspotenzial der Anordnung dar. Da die zum Gate-Bereich fließenden hochfrequenten Ströme vorwiegend ringförmig an den Kanten der Umschließung auftreten (Skin-Effekt) wird zudem das Fernfeld der Antenne auch bei hohen Frequenzen nicht wesentlich durch den Stromfluss in der Umschließung gestört.

[0023] Da ein solcher erfindungsgemäßer Strahlungsdetektor sowohl Empfangselement als auch Detektorelement ist, ermöglicht dieses Konzept eine große Bandbreite mit hoher Empfindlichkeit, gepaart mit einer hohen Integrationsdichte. Da die Struktur in einem Standard-Halbleiterprozess gefertigt werden kann, ist sie zudem relativ leicht herstellbar und kostengünstig. Dadurch ermöglicht das zugrundeliegende Konzept den Aufbau der Strukturen für Anwendungen für den Massenmarkt im Bereich THz-Strahlung. Die Grundlage eines erfindungsgemäßen Strahlungsdetektors bildet daher ein Feldeffekttransistor (FET) mit seinen drei Elektroden Source, Gate und Drain, wobei die Elektroden so geformt werden können, dass sie eine genau definierte HF-Umgebung erzeugen.

[0024] Vorzugsweise haben der ohmsche Source-Kontakt und der ohmsche Drain-Kontakt eine Höhe zwischen 0,1 μm und 0,5 μm . Bevorzugter ist eine Höhe von etwa 0,25 μm . Eine bevorzugte Länge des ohmschen Source-Kontaktes liegt bei größer als 3 μm . Bevorzugter ist eine Länge zwischen 4 μm und 6 μm . Vorzugsweise haben der ohmsche Source-Kontakt und der ohmsche Drain-Kontakt eine Breite größer als 1 μm . Bevorzugter ist eine Breite zwischen 3 μm und 4 μm .

[0025] In einigen Ausführungsformen kann im Bereich der FET-Struktur 20 die Breite des ohmschen Source-Kontaktes 34a und des ohmschen Drain-Kontaktes 38a voneinander abweichen. Vorzugsweise hat der ohmsche Source-Kontakt eine Breite von etwa $4\ \mu\text{m}$ und der ohmsche Drain-Kontakt eine Breite etwa $1\ \mu\text{m}$. Weiterhin bevorzugt sind Ausführungsformen bei denen der ohmsche Source-Kontakt eine Breite von etwa $10\ \mu\text{m}$ und der ohmsche Drain-Kontakt eine Breite von etwa $1\ \mu\text{m}$ aufweisen. Bevorzugter sind bei solchen asymmetrischen Ausführungsformen Asymmetrie-Verhältnisse (Breite des ohmschen Source-Kontaktes zur Breite des ohmschen Drain-Kontaktes) von zwischen 1:2 und 1:10, bevorzugter zwischen 1:4 und 1:10, noch bevorzugter zwischen 1:6 und 1:10.

[0026] Vorzugsweise hat die Gate-Elektrodenstruktur eine Höhe zwischen $0,3\ \mu\text{m}$ und $0,5\ \mu\text{m}$. Bevorzugter ist eine Höhe von etwa $0,35\ \mu\text{m}$. Vorzugsweise hat die Source-Metallisierung im Bereich des Kondensators eine Höhe zwischen $0,5\ \mu\text{m}$ und $1,2\ \mu\text{m}$. Bevorzugter ist eine Höhe von etwa $0,65\ \mu\text{m}$. Vorzugsweise haben die Source-Metallisierung und die Drain-Metallisierung im Bereich des Kondensators eine Breite größer als $3\ \mu\text{m}$. Bevorzugter ist eine Breite zwischen $4\ \mu\text{m}$ und $6\ \mu\text{m}$.

[0027] Vorzugsweise hat der elektrisch isolierende Bereich eine Höhe zwischen $0,01\ \mu\text{m}$ und $0,5\ \mu\text{m}$. Bevorzugter ist eine Höhe von etwa $0,2\ \mu\text{m}$.

[0028] Vorzugsweise überdecken sich die Gate-Elektrodenstruktur in der ersten Ebene und die umschließende Elektrodenstruktur in der zweiten Ebene im Wesentlichen als rechteckige Flächenelemente. Die den MIM-Kondensator ausbildende Überdeckung, wobei mit Überdeckung der sich bei einer senkrechten Projektion der einander zugewandten Oberflächen der Gate-Elektrodenstruktur und der umschließenden Elektrodenstruktur ergebende gemeinsame Flächenbereich gemeint ist, kann dabei in Analogie zu den beiden (parallel zueinander angeordneten) Kondensatorelektroden eines klassischen Plattenkondensators angesehen werden. Der Ausdruck „im Wesentlichen“ bezieht sich dabei auf eine allgemein rechteckige Form der sich überdeckenden Flächenelemente. Die einzelnen Elektrodenstrukturen an sich können in ihrer Formung davon abweichen.

[0029] Vorzugsweise ist die FET-Struktur auf der Basis von Silizium oder einem III-V-Halbleiter aufgebaut. Entsprechend ist es bevorzugt, dass die FET-Struktur in Si-basierter Technologie ausgeführt ist (z.B. CMOS). Weiterhin ist es bevorzugt, dass die FET-Struktur in III-V-Technologie ausgeführt ist. Besonders bevorzugte Technologien zum Aufbau der FET-Struktur bzw. eines erfindungsgemäßen Strahlungsdetektors können auf GaN, Graphen oder auf

Hochtemperatur-Supraleitern (auch als HTC-Supraleitern bezeichnet) basieren. Vorzugsweise bildet das zum Aufbau der genannten Strukturen verwendete Substrat keine Massefläche gegenüber dem Antennenelement aus. Insbesondere hochleitendes Silizium kann hierbei als Substratmaterial eingesetzt werden.

[0030] Vorzugsweise ist der Fußpunkt der Antennenstruktur zwischen dem Gate-Bereich und dem Source-Bereich oder zwischen dem Gate-Bereich und dem Drain-Bereich angeordnet ist. Bevorzugter ist, dass der Fußpunkt der Antennenstruktur zwischen dem Gate-Bereich und dem Source- bzw. Drain-Bereich der nicht umschlossenen Elektrodenstruktur angeordnet ist. Insbesondere kann der Fußpunkt der Antennenstruktur genau mittig zwischen diesen beiden Bereichen angeordnet sein. Dadurch kann erreicht werden, dass eine von der Antennenstruktur empfangene elektromagnetische Welle (z.B. eine Freiraumwelle) unmittelbar am Antennenfußpunkt in den FET eingekoppelt werden kann. Auf zusätzliche Leiterstrecken, in denen empfangene Strahlungswellen im Stand der Technik als Leitungswellen in Antennenzuleitungen geführt werden müssten, kann somit verzichtet werden. Eine Detektion der von der Antennenstruktur empfangenen Strahlung kann daher ohne zusätzliche Leitungsverluste unmittelbar am Fußpunkt der Antennenstruktur erfolgen.

[0031] Vorzugsweise bildet die Antennenstruktur eine Schlitzantenne aus, wobei die Antennenstruktur mindestens eine strahlende Öffnung innerhalb einer Metallfläche aufweist (solche Antennenstrukturen werden unabhängig von der spezifischen Formgebung der strahlenden Öffnung ganz allgemein als Schlitz- oder Slot-Antenne bezeichnet). Bei Schlitzantennen handelt es sich um Antennen, bei denen das strahlende Element der Antenne im Wesentlichen durch eine Öffnung (allgemein als strahlende Öffnung bezeichnet) in einer leitenden Ebene ausgebildet wird. Einer solchen strahlenden Öffnung kann entsprechend dem babinetschen Theorem im Fernfeld die Abstrahl- bzw. Empfangscharakteristik eines klassischen Dipols zugeordnet werden (komplementärer Dipol mit gleicher Intensitätsverteilung). Die durch ein anregendes elektromagnetisches Feld induzierten Ströme fließen dabei im Wesentlichen entlang des metallischen Randes der Öffnung. Unter dem Ausdruck „strahlende Öffnung“ ist somit insbesondere eine Öffnung innerhalb einer zugeordneten Antennenstruktur zu verstehen, die für diese Antennenstruktur gemäß dem babinetschen Theorem einen komplementären Dipol als empfangendes Element darstellt. Eine Einkopplung von zu empfangenden elektromagnetischen Signalen in die Antennenstruktur kann dabei vorzugsweise über das Substrat erfolgen.

[0032] Bei der Metallfläche kann es sich um eine einzelne metallische Fläche oder eine aus Einzelelementen bestehende, zusammengesetzte metallische Fläche handeln. Die Einzelelemente können dabei galvanisch voneinander getrennt sein, wobei die Trennung durch zusätzliche MIM-Kondensatoren zwischen Einzelelementen ausgebildet sein kann. Vorzugsweise führen MIM-Kondensatoren zwischen Einzelelementen zu einer galvanischen Trennung, bei der eine HF-mäßige Verbindung zwischen den jeweils über einen MIM-Kondensator getrennten Einzelelementen erhalten bleibt. Insbesondere ist bevorzugt, dass als empfangendes Element der Antenne eine strahlende Öffnung in den Metallisierungen der Elektrodenstrukturen verwendet wird und die Gesamtstruktur von einer hochfrequenzmäßig verbundenen Masse umschlossen ist. Dabei ist es besonders bevorzugt, dass auf dem äußeren Rand der Antennenstruktur Hochfrequenz-Ströme (HF-Ströme) mit Frequenzen größer als 100 GHz kurzgeschlossenen sind. Dadurch können die Strukturen einerseits als Array angeordnet werden, ohne ihre Nachbarn zu stören. Andererseits können dadurch auch die HF-Signale auf den (nach außen führenden) Anschlussleitungen des Strahlungsdetektors unterdrückt werden. Bei einer Schlitzantenne ergibt sich durch das Invertieren von Luft und Metall ein größerer Gestaltungsspielraum für die Realisierung des Kurzschlusses und bei der Ausgestaltung der unterschiedlichen Elektrodenanordnungen.

[0033] Insbesondere ist bevorzugt, dass die Antennenstruktur einen HF-Kurzschluss zwischen 2 der 3 Bereiche der FET-Struktur realisiert. Dabei werden besonders bevorzugt die Gate- und Source-Elektrodenstrukturen (bzw. die Gate- und Drain-Elektrodenstrukturen) in einer, in Bezug zu den räumlichen Abmessungen der FET-Struktur, großen Fläche als MIM-Struktur übereinander angeordnet, um einen möglichst idealen HF-Kurzschluss zwischen dem intrinsischen Gate- und Source-Bereichen (bzw. den Gate- und Drain-Bereichen) zu realisieren. Vorzugsweise übersteigt die von der MIM-Struktur auf dem Substrat überdeckte Fläche die vom 2DEG der FET-Struktur auf dem Substrat überdeckte Fläche um den Faktor 100, bevorzugter um den Faktor 1.000, noch bevorzugter um den Faktor 10.000.

[0034] Besonders bevorzugte Ausführungsformen einer Antennenstruktur sind resonante Hole-Antennen, Teardrop-Antennen, Schlitz-Patch-Antennen, Schlitz-Bowtie-Antennen sowie Schlitz-log-Spiral-Antennen. Eine Antennenstruktur kann dabei vorzugsweise 2-armig oder 4-armig ausgebildet sein. Bei einer 4-armig ausgebildeten Antennenstruktur können insbesondere zwei voneinander unabhängige FET-Strukturen eine gemeinsame Antennenstruktur als Empfangselement nutzen oder ein erfindungsgemäßer Strahlungsdetektor umfasst zwei parallel

geschaltete FET-Strukturen auf einem gemeinsamen Substrat, wobei in beiden Fällen jede FET-Struktur mit je 2 Armen der 4-armig ausgebildeten Antennenstruktur verbunden ist. Allgemein kann bei mehrarmigen Antennenstrukturen eine Vielzahl von einzelnen oder parallel geschalteten FET-Strukturen zum Einsatz kommen. Weiterhin können gemischte Formen vorliegen, bei dem bei einer mehrarmigen Antennenstruktur einzelne Arme individuellen FET Strukturen zugeordnete sind und andere Arme zu parallel geschalteten FET Strukturen führen.

[0035] Vorzugsweise bilden der Kondensator und die Antennenstruktur eine gemeinsame HF-Umgebung aus, dazu eingerichtet, den Strahlungsdetektor auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen. Insbesondere können über eine entsprechende Dimensionierung der Antennenstruktur und durch eine Einstellung der Kapazität des Kondensators die Empfangseigenschaften (Empfindlichkeit, spektrale Bandbreite, Signalverstärkung) eines erfindungsgemäßen Strahlungsdetektors abgestimmt bzw. eingestellt werden. Dadurch kann im Rahmen der vorliegenden Offenbarung ein erfindungsgemäßer Strahlungsdetektor auf eine Vielzahl von Anwendungsfällen hin optimiert werden. Diese Anwendungen sind jedoch nicht auf den Bereich der THz-Strahlung eingeschränkt.

[0036] Vorzugsweise umfasst ein erfindungsgemäßer Strahlungsdetektor weiterhin einen Frequenzumsetzer, wobei der Frequenzumsetzer die empfangene Strahlung in ein niederfrequentes Detektionssignal umsetzt. Die Auswertung des erfindungsgemäßen Strahlungsdetektors erfolgt dabei vorzugsweise durch eine niederfrequente Auswertung der Ströme bzw. Spannungen zwischen der Source- und Drain-Elektrode. Insbesondere kann sich innerhalb des erfindungsgemäßen Strahlungsdetektors monolithisch eingebettet ein aktiver Halbleiter befinden, welcher die THz-Strahlung in einen niedrigen Frequenzbereich bis hinab zu Gleichstrom umsetzt.

[0037] Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen eines Strahlungsdetektors. Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst das Bereitstellen einer auf einem Substrat angeordneten Feldeffekttransistor-Struktur (FET-Struktur) mit einem Gate-Bereich, einem Source-Bereich und einem Drain-Bereich; die Metallisierung des Gate-Bereichs, des Source-Bereichs und des Drain-Bereichs, wobei voneinander unabhängige, elektrisch leitfähige Elektrodenstrukturen ausgebildet werden, wobei durch die Gate-Elektrodenstruktur entweder die Source-Elektrodenstruktur oder die Drain-Elektrodenstruktur in einer ersten Ebene vollständig umschlossen wird, wobei die umschlossene Elektrodenstruktur bis oberhalb der Gate-Elektrodenstruktur erstreckt wird und durch die umschlossene Elektrodenstruktur die Umschließung in einer zwei-

ten Ebene oberhalb der ersten Ebene zumindest abschnittsweise flächig überdeckt wird, wobei zwischen den von der umschlossenen Elektrodenstruktur überdeckten Bereichen der Gate-Elektrodenstruktur ein elektrisch isolierender Bereich zur Ausbildung eines Kondensators mit einer Metall-Isolator-Metall-, MIM-, Struktur angeordnet wird; und Strukturierung einer auf dem Substrat angeordneten Antennenstruktur, wobei die Antennenstruktur auf dem Substrat aufliegend unmittelbar von den Elektrodenstrukturen ausgebildet wird, wobei eine strahlende Öffnung innerhalb einer Metallfläche der Antennenstruktur ausgebildet wird und wobei der Fußpunkt der Antennenstruktur zwischen dem Gate-Bereich (26) und dem Source-Bereich (24) oder zwischen dem Gate-Bereich (26) und dem Drain-Bereich (28) angeordnet wird. Vorzugsweise wird der Fußpunkt der Antennenstruktur zwischen dem Gate-Bereich und dem Source- bzw. Drain-Bereich nicht umschlossenen Elektrodenstruktur angeordnet.

[0038] Das erfindungsgemäße Verfahren ist dazu geeignet, besonders bevorzugte Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Strahlungsdetektors zur Verfügung zu stellen. Zweckmäßige Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen enthalten.

[0039] Vorzugsweise wird die Antennenstruktur 2-armig oder 4-armig strukturiert ausgebildet. Ebenfalls nur vorzugsweise können der Kondensator und die Antennenstruktur in ihren Resonanzfrequenzen zur Ausbildung einer gemeinsamen HF-Umgebung auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich aufeinander abgestimmt werden.

Figurenliste

[0040] Die Erfindung wird nachfolgend in Ausführungsbeispielen anhand der zugehörigen Zeichnung erläutert. Es zeigen:

Fig. 1a einen schematischen Aufbau einer exemplarischen Ausführungsform einer erfindungsgemäßen FET-Struktur in der Seitenansicht,

Fig. 1b einen abstrakten schematischen Aufbau einer erfindungsgemäßen FET-Struktur in der Seitenansicht,

Fig. 2a, Fig. 2b einen abstrakten schematischen Aufbau einer erfindungsgemäßen FET-Struktur nach **Fig. 1b** in der Seitenansicht (a) und in der Aufsicht (b),

Fig. 3 einen schematischen Aufbau einer ersten Ausführungsform der Erfindung (Hole-Antenne),

Fig. 4 einen schematischen Aufbau einer zweiten Ausführungsform der Erfindung (Teardrop-Antenne),

Fig. 5 einen schematischen Aufbau einer dritten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Patch-Antenne),

Fig. 6 einen schematischen Aufbau einer vierten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Bowtie-Antenne, Variante 1),

Fig. 7 einen schematischen Aufbau einer fünften Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Bowtie-Antenne, Variante 2),

Fig. 8 einen schematischen Aufbau einer sechsten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-log-Spiral-Antenne),

Fig. 9 einen schematischen Aufbau einer siebenten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Bowtie-Antenne, 4-armig), und

Fig. 10 einen schematischen Aufbau einer achten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-log-Spiral-Antenne, 4-armig).

Ausführliche Beschreibung der Zeichnungen

[0041] **Fig. 1a** zeigt einen schematischen Aufbau einer exemplarischen Ausführungsform einer erfindungsgemäßen FET-Struktur **20** in der Seitenansicht. Bei anderen Ausführungsformen der Erfindung können insbesondere die konkrete Ausformung sowie die gegenseitige Anordnung der dargestellten Elemente von der hier gezeigten Struktur abweichen. Ebenfalls werden durch die gezeigte Darstellung kein konkreter Schichtaufbau oder ein bestimmtes Verfahren zur Herstellung des entsprechenden Schichtaufbaus nahegelegt. Die erfindungsgemäße FET-Struktur **20** kann im Rahmen dieser Offenbarung beliebig variiert werden und wird durch die gezeigte Darstellung in keiner Weise eingeschränkt.

[0042] Die gezeigte Ausführungsform basiert auf einer zur Herstellung von FETs geeigneten Epitaxialstruktur und weist ein Substrat **70** (z.B. aus SiC) mit einer darauf angeordneten Pufferschicht **72** (z.B. eine GaN-Pufferschicht) auf. Auf der Pufferschicht **72** ist ein aktives Gebiet **74** (z.B. aus AlGaN) angeordnet. Das aktive Gebiet **74** wird seitlich durch eine Isolationsschicht **76** begrenzt. Bei einem FET erfolgt eine Steuerung des Stromflusses innerhalb des aktiven Gebiets **74**. Dabei bildet sich im Betrieb des FET im Allgemeinen im Grenzbereich zwischen dem aktiven Gebiet **74** und der Pufferschicht **72** ein 2-dimensionales Elektronengas aus, welches als 2DEG **22** bezeichnet wird. Eine elektronische Ansteuerung des aktiven Gebiets **74** erfolgt von oberhalb des aktiven Gebietes **74** über drei voneinander unabhängige, elektrisch leitfähige Elektroden, welche typischerweise als Gate, Source und Drain bezeichnet werden. Diese Elektroden weisen entsprechend eine Source-Elektrodenstruktur **34**, eine Gate-Elektrodenstruktur **36** und eine Drain-Elektrodenstruktur **38** auf. Durch die Elektroden wird im aktiven Gebiet **72** bzw. inner-

halb des 2DEG 22 ein Source-Bereich **24**, ein Gate-Bereich **26** und ein Drain-Bereich **28** definiert. Ein typischer Wert für die Länge des Gate-Bereichs **26** liegt etwa bei 100 nm, wobei die Gate-Elektrodenstruktur **36** im Bereich oberhalb des Gate-Bereichs **26** typischerweise eine Länge von etwa 200 nm aufweist. Typische Längen für den Abstand zwischen der Gate-Metallisierung **36** und dem ohmschen Source-Kontakt **34a** bzw. zwischen der Gate-Metallisierung **36** und dem ohmschen Drain-Kontakt **38a** liegen zwischen 0,1 µm und 1 µm. Dabei können sowohl symmetrische als auch asymmetrische Ausführungsformen realisiert werden.

[0043] Die einzelnen Elektrodenstrukturen **34**, **36**, **38** können aus einer einzigen Schicht bzw. einem einheitlichen Material (vorzugsweise einem elektrisch leitfähigen metallischen Material) bestehen oder aus einer Schichtung bzw. Kombination unterschiedlicher Materialien aufgebaut sein. Insbesondere zeigt die Darstellung eine aus einem einheitlichen Material bestehende Gate-Elektrode **36** (z.B. aus einer Legierung aus unterschiedlichen Metallen). Die Source-Elektrodenstruktur **34** sowie die Drain-Elektrodenstruktur **38** sind hingegen schichtweise aufeinanderliegend aufgebaut. Die Source-Elektrodenstruktur **34** setzt sich dabei aus einem unmittelbar auf dem aktiven Gebiet **74** aufliegenden ohmschen Source-Kontakt **34a** und einer unmittelbar darüber angeordneten Source-Metallisierung **34b** (z.B. durch Aufdampfen oder Abscheiden insbesondere von Au) zusammen. Entsprechend ist die Drain-Elektrodenstruktur **38** aus einem unmittelbar auf dem aktiven Gebiet **74** aufliegenden ohmschen Drain-Kontakt **38a** und einer unmittelbar darüber angeordneten Drain-Metallisierung **38b** zusammengesetzt. Um die einzelnen Elektrodenstrukturen **34**, **36**, **38** elektrisch voneinander zu isolieren bzw. zu schützen, sind im oberen Bereich der Darstellung die Elektrodenstrukturen **34**, **36**, **38** von mehreren Passivierungsschichten **77**, **78**, **79** eingefasst bzw. gegeneinander abgegrenzt.

[0044] Unterhalb der Source-Metallisierung **34b** ist erfindungsgemäß ein elektrisch isolierender Bereich **42** (Dielektrikum) angeordnet. Bei dem isolierenden Bereich **42** kann es sich beispielsweise um eine Isolationsschicht oder einen Freibereich (z.B. einen Luftspalt) handeln. Unterhalb des eingezeichneten isolierenden Bereichs **42** befindet sich eine Fortsetzung der Gate-Elektrodenstruktur **36**. Es handelt sich hierbei um Abschnitte ein- und derselben Gate-Elektrodenstruktur **36**. Insbesondere sind die beiden Abschnitte elektrisch leitend miteinander verbunden, wobei diese Verbindung der gezeigten Seitenansicht nicht zu entnehmen ist.

[0045] Zwischen dem von der Source-Metallisierung **34b** überdeckten Bereichen der Gate-Elektrodenstruktur **36**, d.h. dem links in der Darstellung befindlichen Abschnitt der Gate-Elektrodenstruktur **36**, ist

somit ein elektrisch isolierender Bereich **42** angeordnet. Die hierdurch erzeugte Metall-Isolator-Metall-Schichtung (MIM-Schichtung) bildet einen Kondensator **40** mit einer entsprechenden MIM-Struktur aus. Zur Verdeutlichung der strukturellen Zusammenhänge ist an der entsprechenden Stelle das übliche technische Schaltzeichen für einen Kondensator in den schematischen Aufbau mit eingezeichnet.

[0046] Fig. 1b zeigt einen abstrakten schematischen Aufbau einer erfindungsgemäßen FET-Struktur **20** in der Seitenansicht. Im Gegensatz zur Fig. 1a handelt es sich um eine auf die wesentlichen Elemente der FET-Struktur **20** reduzierte Darstellung mit erhöhtem Abstraktionsgrad. Auf eine explizite Darstellung von etwaigen Isolations-, Träger- und Zwischenschichten wurde verzichtet. Bei dem gezeigten Aufbau kann es sich insbesondere um eine abstrakte Darstellung der in Fig. 1a gezeigten exemplarischen Ausführungsform einer erfindungsgemäßen FET-Struktur **20** in der Seitenansicht handeln. Die jeweiligen Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten daher entsprechend.

[0047] Fig. 2a zeigt einen abstrakten schematischen Aufbau einer erfindungsgemäßen FET-Struktur **20** nach Fig. 1b in der Seitenansicht. Die jeweiligen Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten entsprechend. Weiterhin eingezeichnet sind eine erste Ebene **E1** und eine zweite Ebene **E2**, wobei die zweite Ebene **E2** oberhalb der ersten Ebene **E1** angeordnet ist.

[0048] Fig. 2b zeigt einen abstrakten schematischen Aufbau einer exemplarischen Ausführungsform einer erfindungsgemäßen FET-Struktur **20** nach Fig. 2a in der Aufsicht. Die in Fig. 2b eingezeichnete Strichpunktlinie gibt dabei eine Schnittgerade an, die zu einer in Fig. 2a gezeigten Seitenansicht führt.

[0049] Die Fig. 2a und Fig. 2b zeigen somit eine FET-Struktur **20** mit einem Source-Bereich **24**, einem Gate-Bereich **26**, und einem Drain-Bereich **28**, wobei diese Bereiche **24**, **26**, **28** durch Metallisierung voneinander unabhängige elektrisch leitfähige Elektrodenstrukturen **34**, **36**, **38** ausbilden; wobei die Gate-Elektrodenstruktur **36** die Source-Elektrodenstruktur **34** in einer ersten Ebene **E1** vollständig umschließt; sich die umschlossene Source-Elektrodenstruktur **34** bis oberhalb der Gate-Elektrodenstruktur **36** erstreckt und dort die Umschließung in einer zweiten Ebene **E2** oberhalb der ersten Ebene **E1** zumindest abschnittsweise flächig überdeckt (im schraffiert umrandet eingezeichneten Bereich der Source-Metallisierung **34b**); wobei zwischen den von der umschlossenen Source-Elektrodenstruktur **34** überdeckten Bereichen der Gate-Elektrodenstruktur **36** (im Wesentlichen der vom schraffiert umrandet eingezeichneten Bereich der Source-Metallisierung **34b** überdeckte Bereich der Gate-Elektrodenstruktur **36**) ein elek-

trisch isolierender Bereich **42** zur Ausbildung eines Kondensators **40** mit einer MIM-Struktur angeordnet ist.

[0050] Die Gate-Elektrodenstruktur **36** in der ersten Ebene **E1** und die umschlossene Source-Elektrodenstruktur **34** in der zweiten Ebene **E2** überdecken sich in der gezeigten Darstellung im Wesentlichen als rechteckige Flächenelemente (linksseitiger rechteckiger Abschnitt der zweiteilig verbundenen Gate-Elektrodenstruktur **36**). Durch gestrichelte Umrandungen, insbesondere bei der Source-Metallisierung **34b**, soll jedoch angedeutet werden, dass sich diese Bereiche auch weiter als eingezeichnet erstrecken können. Bei anderen Ausführungsformen können zur Ausbildung einer angepassten HF-Umgebung oder zur Anpassung der HF-Umgebung an eine bestimmte Antennenstruktur **10** die geometrischen Abmessungen (Längen, Höhen und/oder Breiten) der Source-Elektrodenstruktur **34** und der Gate-Elektrodenstruktur **38** einzeln und in Bezug zueinander variiert werden. Insbesondere können der ohmsche Source-Kontakt **34a** und der ohmsche Drain-Kontakt **38a** jeweils unterschiedliche Breiten aufweisen, wobei die Breite der nur in einer Aufsicht ersichtlichen Dimension entspricht (die Höhe entspricht der Höhe in einer Seitenansicht).

[0051] Im Übrigen kann erfindungsgemäß anstelle der Source-Elektrodenstruktur **34** alternativ auch die Drain-Elektrodenstruktur **38** umschlossen sein.

[0052] Fig. 3 zeigt einen schematischen Aufbau einer ersten Ausführungsform der Erfindung (Hole-Antenne). Insbesondere zeigt die Darstellung eine bevorzugte Antennenstruktur **10** eines erfindungsgemäßen Strahlungsdetektors **100**. Die Antennenstruktur **10** kann auf einem Substrat **70** aufliegend unmittelbar von Elektrodenstrukturen **34**, **36**, **38** ausgebildet werden. Vorzugsweise ist zwischen der Antennenstruktur und dem Substrat eine Epitaxiestruktur (z.B. die in Fig. 1a gezeigte Epitaxiestruktur) angeordnet. Vorzugsweise wird die Antennenstruktur **10** unmittelbar von der Source-Elektrodenstruktur **34** und/oder der Drain-Elektrodenstruktur **38** ausgebildet.

[0053] Der Fußpunkt **12** der Antennenstruktur **10** kann zwischen dem Gate-Bereich **26** der Gate-Elektrodenstruktur **36** und dem Drain-Bereich **28** der Drain-Elektrodenstruktur **38** angeordnet sein. Die Antennenstruktur **10** weist zwei annähernd kreisrunde Öffnungen **14** innerhalb einer Metallfläche **16** auf, wobei sich im Bereich zwischen den beiden Öffnungen **14** ein schmaler Streifen erstreckt. Wie in der nebenstehenden abstrakt-schematischen Darstellung der aus dem inneren Bereich der Antennenstruktur **10** vergrößerten FET-Struktur **20** gezeigt, wird dieser Teil der Metallfläche **16** unmittelbar von der Drain-Metallisierung **38b** ausgebildet und ist somit zur Drain-Elektrodenstruktur **38** gehörig. Der ober-

halbkreisförmige Teilbereich der Metallfläche **16** wird hingegen unmittelbar von der Source-Metallisierung **34b** ausgebildet und ist somit zur Source-Elektrodenstruktur **34** gehörig. Wie der gezeigten Darstellung ebenfalls entnommen werden kann, weichen im Bereich der FET-Struktur **20** die Breite des ohmschen Source-Kontaktes **34a** und des ohmschen Drain-Kontaktes **38a** voneinander ab.

[0054] Vorzugsweise haben der ohmsche Source-Kontakt **34a** und der ohmsche Drain-Kontakt **38a** eine Höhe zwischen 0,1 µm und 0,5 µm. Bevorzugter ist eine Höhe von etwa 0,25 µm. Eine bevorzugte Länge des ohmschen Source-Kontaktes **34a** liegt bei größer als 3 µm. Bevorzugter ist eine Länge zwischen 4 µm und 6 µm. Vorzugsweise haben der ohmsche Source-Kontakt **34a** und der ohmsche Drain-Kontakt **38a** eine Breite größer als 1 µm. Bevorzugter ist eine Breite zwischen 3 µm und 4 µm.

[0055] Vorzugsweise hat die Gate-Elektrodenstruktur **36** eine Höhe zwischen 0,3 µm und 0,5 µm. Bevorzugter ist eine Höhe von etwa 0,35 µm. Vorzugsweise hat die Source-Metallisierung **34a** im Bereich des Kondensators **40** eine Höhe zwischen 0,5 µm und 1,2 µm. Bevorzugter ist eine Höhe von etwa 0,65 µm. Vorzugsweise haben die Source-Metallisierung **34b** und die Drain-Metallisierung **38b** im Bereich des Kondensators **40** eine Breite größer als 3 µm. Bevorzugter ist eine Breite zwischen 4 µm und 6 µm.

[0056] Vorzugsweise hat der elektrisch isolierende Bereich **42** eine Höhe zwischen 0,01 µm und 0,5 µm. Bevorzugter ist eine Höhe von etwa 0,2 µm.

[0057] Die gezeigte Antennenstruktur **10** zeichnet sich insbesondere durch eine zirkulare Formgebung der Öffnungen **14** aus. Der Kondensator **40** und die Antennenstruktur **10** können eine gemeinsame HF-Umgebung ausbilden, die dazu eingerichtet ist, den erfindungsgemäßen Strahlungsdetektor **100** auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen. Insbesondere kann bei der gezeigten Antennenstruktur **10** mit einer Au-Metallfläche **16**, einem ersten Öffnungsabschnitt **a** von etwa 14,6 µm, einem zweiten Öffnungsabschnitt **b** von etwa 30 µm und einem variablen Antennenabschnitt **A** eine Abstimmung der Empfangseigenschaften auf den spektralen Bereich um etwa 1 THz erfolgen. Vorzugsweise werden dabei auf dem äußeren Rand **18** der Antennenstruktur **10** HF-Ströme mit Frequenzen größer als 100 GHz kurzgeschlossen. Durch die Antennenstruktur **10** wird somit ein HF-Kurzschluss zwischen 2 der 3 Bereiche **24**, **26**, **28** der FET-Struktur **20** realisiert. Insbesondere kann durch die Antennenstruktur **10** ein HF-Kurzschluss zwischen dem Source-Bereich **24** und dem Drain-Bereich **28** der FET-Struktur **20** realisiert werden.

[0058] Fig. 4 zeigt einen schematischen Aufbau einer zweiten Ausführungsform der Erfindung (Teardrop-Antenne). Die gezeigte Darstellung entspricht bis auf den Antennentyp im Wesentlichen der in Fig. 3 gezeigten Darstellung. Die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten entsprechend. Auf eine abstrakt-schematische Darstellung der aus dem inneren Bereich der Antennenstruktur 10 vergrößerten FET-Struktur 20 wurde verzichtet; diese kann der Fig. 3 analog entnommen werden.

[0059] Die gezeigte Antennenstruktur 10 zeichnet sich insbesondere durch eine elliptische Formgebung des äußeren Randes 18 und eine tränenförmige Formgebung der Öffnungen 14 aus. Der Kondensator 40 und die Antennenstruktur 10 können eine gemeinsame HF-Umgebung ausbilden, die dazu eingerichtet ist, den erfindungsgemäßen Strahlungsdetektor 100 auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen. Insbesondere kann bei der gezeigten Antennenstruktur 10 mit einer Au-Metallfläche 16, einem ersten Öffnungsabschnitt a von etwa 60 µm, einem zweiten Öffnungsabschnitt b von etwa 195 µm, einem ersten Antennenabschnitt A von etwa 125 µm und einem zweiten Antennenabschnitt B von etwa 275 µm eine breitbandige Abstimmung der Empfangseigenschaften auf den spektralen Bereich zwischen etwa 400 GHz und 2 THz erfolgen.

[0060] Fig. 5 zeigt einen schematischen Aufbau einer dritten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Patch-Antenne). Die gezeigte Darstellung entspricht bis auf den Antennentyp im Wesentlichen der in Fig. 3 gezeigten Darstellung. Die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten entsprechend. Auf eine abstrakt-schematische Darstellung der aus dem inneren Bereich der Antennenstruktur 10 vergrößerten FET-Struktur 20 wurde verzichtet; diese kann der Fig. 3 analog entnommen werden.

[0061] Die gezeigte Antennenstruktur 10 zeichnet sich insbesondere durch eine gestreckte Formgebung der Öffnungen 14 aus. Der Kondensator 40 und die Antennenstruktur 10 können eine gemeinsame HF-Umgebung ausbilden, die dazu eingerichtet ist, den erfindungsgemäßen Strahlungsdetektor 100 auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen. Insbesondere kann bei der gezeigten Antennenstruktur 10 mit einer Au-Metallfläche 16, einem zweiten Öffnungsabschnitt b von etwa 94 µm und einem ersten Antennenabschnitt A von etwa 155 µm und einem zweiten Antennenabschnitt B von etwa 275 µm eine Abstimmung der Empfangseigenschaften auf den spektralen Bereich um etwa 600 GHz erfolgen.

[0062] Fig. 6 zeigt einen schematischen Aufbau einer vierten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Bowtie-Antenne, Variante 1). Die gezeigte Darstel-

lung entspricht bis auf den Antennentyp im Wesentlichen der in Fig. 3 gezeigten Darstellung. Die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten entsprechend. Auf eine abstrakt-schematische Darstellung der aus dem inneren Bereich der Antennenstruktur 10 vergrößerten FET-Struktur 20 wurde verzichtet; diese kann der Fig. 3 analog entnommen werden.

[0063] Die gezeigte Antennenstruktur 10 zeichnet sich insbesondere durch eine gestreckte, sich in zwei Richtungen erweiternde Formgebung der Öffnungen 14 aus. Der Kondensator 40 und die Antennenstruktur 10 können eine gemeinsame HF-Umgebung ausbilden, die dazu eingerichtet ist, den erfindungsgemäßen Strahlungsdetektor 100 auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen. Insbesondere kann bei der gezeigten Antennenstruktur 10 mit einer Au-Metallfläche 16, einem ersten Öffnungsabschnitt a von etwa 146 µm, einem ersten Antennenabschnitt A von etwa 90 µm und einem zweiten Antennenabschnitt B von etwa 210 µm eine breitbandige Abstimmung der Empfangseigenschaften auf den spektralen Bereich zwischen etwa 500 GHz und 2 THz erfolgen.

[0064] Fig. 7 zeigt einen schematischen Aufbau einer fünften Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Bowtie-Antenne, Variante 2). Die gezeigte Darstellung entspricht bis auf den Antennentyp im Wesentlichen der in Fig. 3 gezeigten Darstellung. Die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten entsprechend. Auf eine abstrakt-schematische Darstellung der aus dem inneren Bereich der Antennenstruktur 10 vergrößerten FET-Struktur 20 wurde verzichtet; diese kann der Fig. 3 analog entnommen werden.

[0065] Die gezeigte Antennenstruktur 10 zeichnet sich insbesondere durch eine partiell zirkuläre, sich in zwei Richtungen erweiternde Formgebung der Öffnungen 14 aus. Der Kondensator 40 und die Antennenstruktur 10 können eine gemeinsame HF-Umgebung ausbilden, die dazu eingerichtet ist, den erfindungsgemäßen Strahlungsdetektor 100 auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen. Insbesondere kann bei der gezeigten Antennenstruktur 10 mit einer Au-Metallfläche 16, einem ersten Öffnungsabschnitt a von etwa 140 µm und einem ersten Antennenabschnitt A von etwa 360 µm eine breitbandige Abstimmung der Empfangseigenschaften auf den spektralen Bereich zwischen etwa 400 GHz und 2 THz erfolgen.

[0066] Fig. 8 zeigt einen schematischen Aufbau einer sechsten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-log-Spiral-Antenne). Die gezeigte Darstellung entspricht bis auf den Antennentyp im Wesentlichen der in Fig. 3 gezeigten Darstellung. Die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten entsprechend. Auf die abstrakt-schematische Darstellung der aus dem inneren Bereich der Antennenstruktur 10 vergrößerten FET-Struktur 20 wurde verzichtet; diese kann der Fig. 3 analog entnommen werden.

ßerten FET-Struktur **20** wurde verzichtet; diese kann der **Fig. 3** analog entnommen werden. Für eine bessere Sichtbarkeit der Spiralstruktur ist der Bereich der Öffnungen **14** schraffiert dargestellt.

[0067] Die gezeigte Antennenstruktur **10** zeichnet sich insbesondere durch eine sich spiralförmig um den Fußpunkt **12** der Antennenstruktur **10** erweiternde Formgebung der Öffnungen **14** aus. Der Kondensator **40** und die Antennenstruktur **10** können eine gemeinsame HF-Umgebung ausbilden, die dazu eingerichtet ist, den erfindungsgemäßen Strahlungsdetektor **100** auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen. Insbesondere kann bei der gezeigten Antennenstruktur **10** mit einer Au-Metallfläche **16** und einem ersten Antennenabschnitt **A** von etwa 610 µm eine breitbandige Abstimmung der Empfangseigenschaften auf den spektralen Bereich zwischen etwa 300 GHz und 3 THz erfolgen.

[0068] **Fig. 9** zeigt einen schematischen Aufbau einer siebenten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Bowtie-Antenne, 4-armig). Der grundlegende Aufbau der gezeigten Antennenstruktur **10** entspricht im Wesentlichen dem in **Fig. 7** dargestellten Antennentyp. Die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten entsprechend. Im Unterschied zur **Fig. 7** handelt es sich bei dieser Ausführungsform jedoch nicht um eine 2-armige Antennenstruktur (zwei Öffnungen **14** sind symmetrisch um den Fußpunkt **12** der Antennenstruktur **10** angeordnet), vielmehr liegt hier eine 4-armige Anordnung der Strukturelemente vor (vier Öffnungen **14** sind symmetrisch um den Fußpunkt **12** der Antennenstruktur **10** angeordnet). Für eine bessere Sichtbarkeit der Struktur ist der Bereich der Öffnungen **14** schraffiert dargestellt. Die ebenfalls eingezeichnete abstrakt-schematische Darstellung der aus dem inneren Bereich der Antennenstruktur **10** vergrößerten FET-Strukturen **20**, **20'** stellt eine bevorzugte Ausführungsform für eine entsprechende Anordnung von zwei parallel geschalteten FET-Strukturen **20**, **20'** dar. Beide FET-Strukturen **20**, **20'** können insbesondere auf einem gemeinsamen Substrat **70** angeordnet sein, wobei die Antennenstruktur **10** unmittelbar von den Elektrodenstrukturen **34**, **34'**, **38**, **38'** ausgebildet wird. Vorzugsweise ist zwischen der Antennenstruktur und dem Substrat eine Epitaxiestruktur (z.B. die in **Fig. 1a** gezeigte Epitaxiestruktur) angeordnet.

[0069] In der gezeigten Ausführungsform bilden die beiden FET-Strukturen **20**, **20'** ein gemeinsames 2DEG **22** aus. Zudem weisen beide FET-Strukturen **20**, **20'** eine gemeinsame Source-Elektrodenstruktur **34**, **34'** (d.h. gemeinsame ohmsche Source-Kontakte **34a**, **34a'** und Source-Metallisierungen **34b**, **34b'**) auf. Jeweils an den Enden des 2DEG **22** sind die Drain-Elektrodenstruktur **38** (umfassend einen ohmschen Drain-Kontakt **38a** und eine Drain-

Metallisierung **38b**) der ersten FET-Struktur **20** sowie die Drain-Elektrodenstruktur **38'** (umfassend einen ohmschen Drain-Kontakt **38a'** und eine Drain-Metallisierung **38b'**) angeordnet. Die jeweiligen Gate-Bereiche **26**, **26'** der beiden FET-Strukturen **20**, **20'** sind über eine gemeinsame Gate-Elektrodenstruktur **36**, **36'** elektrisch leitend miteinander verbunden.

[0070] Dabei umschließen erfindungsgemäß die Gates der beiden FET-Strukturen **20**, **20'** über eine gemeinsame Gate-Elektrodenstruktur **36**, **36'** die gemeinsame Source-Elektrodenstruktur **34**, **34'** in einer ersten Ebene **E1** vollständig (doppelte Umschließung), wobei sich die umschlossene gemeinsame Source-Elektrodenstruktur **34**, **34'** bis oberhalb der (die beiden Gate-Bereiche **26**, **26'** der beiden FET-Strukturen **20**, **20'** elektrisch leitend miteinander verbindenden) Gate-Elektrodenstruktur **36**, **36'** erstreckt und dort die (doppelte) Umschließung in einer zweiten Ebene **E2** oberhalb der ersten Ebene **E1** zumindest abschnittsweise flächig überdeckt, wobei zwischen den von der gemeinsame Source-Elektrodenstruktur **34**, **34'** überdeckten Bereichen besagter Gate-Elektrodenstruktur **36**, **36'** ein elektrisch isolierender Bereich **42** zur Ausbildung eines Kondensators **40** mit einer MIM-Struktur angeordnet ist.

[0071] **Fig. 10** zeigt einen schematischen Aufbau einer achten Ausführungsform der Erfindung (Schlitz-Spiral-Antenne, 4-armig). Der grundlegende Aufbau der gezeigten Antennenstruktur **10** entspricht im Wesentlichen dem in **Fig. 8** dargestellten Antennentyp. Die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten entsprechend. Im Unterschied zur **Fig. 8** handelt es sich bei dieser Ausführungsform jedoch nicht um eine 2-armige Antennenstruktur (zwei Öffnungen **14** sind symmetrisch um den Fußpunkt **12** der Antennenstruktur **10** angeordnet), vielmehr liegt hier eine 4-armige Anordnung der Antennenelemente vor (vier Öffnungen **14** sind symmetrisch um den Fußpunkt **12** der Antennenstruktur **10** angeordnet). Für eine bessere Sichtbarkeit der Spiralstruktur ist der Bereich der Öffnungen **14** schraffiert dargestellt. Die ebenfalls eingezeichnete abstrakt-schematische Darstellung der aus dem inneren Bereich der Antennenstruktur **10** vergrößerten FET-Strukturen **20**, **20'** stellt eine bevorzugte Ausführungsform für eine entsprechende Anordnung von zwei parallel geschalteten FET-Strukturen **20**, **20'** dar. Beide FET-Strukturen **20**, **20'** können insbesondere auf einem gemeinsamen Substrat **70** angeordnet sein, wobei die Antennenstruktur **10** unmittelbar von den Elektrodenstrukturen **34**, **34'**, **38**, **38'** ausgebildet wird. Vorzugsweise ist zwischen der Antennenstruktur und dem Substrat eine Epitaxiestruktur (z.B. die in **Fig. 1a** gezeigte Epitaxiestruktur) angeordnet.

[0072] In der gezeigten Ausführungsform sind die beiden FET-Strukturen **20**, **20'** unmittelbar nebeneinander liegend angeordnet. Es handelt sich hier-

bei um voneinander unabhängige FET-Strukturen **20**, **20'**, wobei die Gate-Bereiche **26**, **26'** der beiden FET-Strukturen **20**, **20'** über eine gemeinsame Gate-Metallisierung **36**, **36'** elektrisch leitend miteinander verbunden sind. MIM-Kondensatoren **40** werden in beiden FET-Strukturen **20**, **20'** jeweils von einem Teil der Gate-Elektrodenstruktur **36**, **36'** durch einen sich mit einem Teil der Source-Elektrodenstruktur **34**, **34'** überdeckenden Bereich ausgebildet.

Bezugszeichenliste

10	Antennenstruktur
12	Fußpunkt
14	Öffnung
16	Metallfläche
18	äußerer Rand
20	FET-Struktur
22	2DEG
24	Source-Bereich
26	Gate-Bereich
28	Drain-Bereich
34	Source-Elektrodenstruktur
34a	ohmscher Source-Kontakt
34b	Source-Metallisierung
36	Gate-Elektrodenstruktur
38	Drain-Elektrodenstruktur
38a	ohmscher Drain-Kontakt
38b	Drain-Metallisierung
40	Kondensator
42	elektrisch isolierender Bereich
70	Substrat
72	Pufferschicht
74	aktives Gebiet
76	Isolationsschicht
77, 78, 79	Passivierungsschichten
100	Strahlungsdetektor
A, B	Antennenabschnitte
a, b	Öffnungsabschnitte
E1	erste Ebene
E2	zweite Ebene

Patentansprüche

1. Strahlungsdetektor (100) umfassend:
a) eine Antennenstruktur (10); und

b) eine Feldeffekttransistor-, FET-, Struktur (20) mit einem Source-Bereich (24), einem Gate-Bereich (26), und einem Drain-Bereich (28),

c) wobei diese Bereiche (24, 26, 28) auf einem Substrat (70) angeordnet sind und durch Metallisierung voneinander unabhängige elektrisch leitfähige Elektrodenstrukturen (34, 36, 38) ausbilden; **dadurch gekennzeichnet**, dass

d) die Gate-Elektrodenstruktur (36) die Source-Elektrodenstruktur (34) oder die Drain-Elektrodenstruktur (38) in einer ersten Ebene (E1) vollständig umschließt;

e) sich die umschlossene Elektrodenstruktur (34, 38) bis oberhalb der Gate-Elektrodenstruktur (36) erstreckt und dort die Umschließung in einer zweiten Ebene (E2) oberhalb der ersten Ebene (E1) zumindest abschnittsweise flächig überdeckt;

f) wobei zwischen den von der umschlossenen Elektrodenstruktur (34, 38) überdeckten Bereichen der Gate-Elektrodenstruktur (36) ein elektrisch isolierender Bereich (42) zur Ausbildung eines Kondensators (40) mit einer Metall-Isolator-Metall-, MIM-, Struktur angeordnet ist.

2. Strahlungsdetektor (100) nach Anspruch 1, wobei die Antennenstruktur (10) auf dem Substrat (70) aufliegend unmittelbar von Elektrodenstrukturen (34, 36, 38) ausgebildet ist.

3. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei sich die Gate-Elektrodenstruktur (36) in der ersten Ebene (E1) und die umschließende Elektrodenstruktur (34, 38) in der zweiten Ebene (E2) als rechteckige Flächenelemente überdecken.

4. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die FET-Struktur (20) auf der Basis von Silizium oder einem III-V-Halbleiter aufgebaut ist.

5. Strahlungsdetektor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Fußpunkt (12) der Antennenstruktur (10) zwischen dem Gate-Bereich (26) und dem Source-Bereich (24) oder zwischen dem Gate-Bereich (26) und dem Drain-Bereich (28) angeordnet ist.

6. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Antennenstruktur (10) eine Schlitzantenne ausbildet, wobei die Antennenstruktur (10) mindestens eine strahlende Öffnung (14) innerhalb einer Metallfläche (16) aufweist.

7. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei auf dem äußeren Rand (18) der Antennenstruktur (10) Hochfrequenz-, HF-, Ströme mit Frequenzen größer als 100 GHz kurzgeschlossen sind.

8. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Antennenstruktur (10) einen HF-Kurzschluss zwischen 2 der 3 Bereiche (24, 26, 28) der FET-Struktur (20) realisiert.

9. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Antennenstruktur (10) 2-armig oder 4-armig ausgebildet ist.

10. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mindestens zwei parallel geschaltete FET-Strukturen (20) auf einem gemeinsamen Substrat (70) umfassend.

11. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Kondensator (40) und die Antennenstruktur (10) eine gemeinsame HF-Umgebung ausbilden, dazu eingerichtet, den Strahlungsdetektor (100) auf den Empfang von elektromagnetischen Wellen im THz-Bereich abzustimmen.

12. Strahlungsdetektor (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiterhin umfassend einen Frequenzumsetzer, wobei der Frequenzumsetzer die empfangene Strahlung in ein niederfrequentes Detektionssignal umsetzt.

13. Verfahren zum Herstellung eines Strahlungsdetektors (100), die folgenden Schritte umfassend:

- Bereitstellen einer auf einem Substrat (70) angeordneten Feldeffekttransistor-, FET-, Struktur (20) mit einem Gate-Bereich (26), einem Source-Bereich (24), und einem Drain-Bereich (28);
- Metallisierung des Gate-Bereichs (26), des Source-Bereichs (24) und des Drain-Bereichs (38), wobei voneinander unabhängige elektrisch leitfähige Elektrodenstrukturen (34, 36, 38) ausgebildet werden, wobei durch die Gate-Elektrodenstruktur (36) entweder die Source-Elektrodenstruktur (34) oder die Drain-Elektrodenstruktur (38) in einer ersten Ebene (E1) vollständig umschlossen wird, wobei die umschlossene Elektrodenstruktur (34, 38) bis oberhalb der Gate-Elektrodenstruktur (36) erstreckt wird und durch die umschlossene Elektrodenstruktur (34, 38) die Umschließung in einer zweiten Ebene (E2) oberhalb der ersten Ebene (E1) zumindest abschnittsweise flächig überdeckt wird, wobei zwischen den von der umschlossenen Elektrodenstruktur (34, 38) überdeckten Bereichen der Gate-Elektrodenstruktur (36) ein elektrisch isolierender Bereich (42) zur Ausbildung eines Kondensators (40) mit einer Metall-Isolator-Metall-, MIM-, Struktur angeordnet wird; und
- Strukturierung einer auf dem Substrat (70) angeordneten Antennenstruktur (10), wobei die Antennenstruktur (10) auf dem Substrat (70) aufliegend unmittelbar von den Elektrodenstrukturen (34, 36, 38) ausgebildet wird, wobei eine strahlende Öffnung (14) innerhalb einer Metallfläche (16) der Antennenstruktur (10) ausgebildet wird und wobei der Fußpunkt (12)

der Antennenstruktur (10) zwischen dem Gate-Bereich (26) und dem Source-Bereich (24) oder zwischen dem Gate-Bereich (26) und dem Drain-Bereich (28) angeordnet wird.

14. Verfahren zum Herstellung eines Strahlungsdetektors (100) nach Anspruch 13, wobei die Antennenstruktur 2-armig oder 4-armig strukturiert ausgebildet wird.

Es folgen 10 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

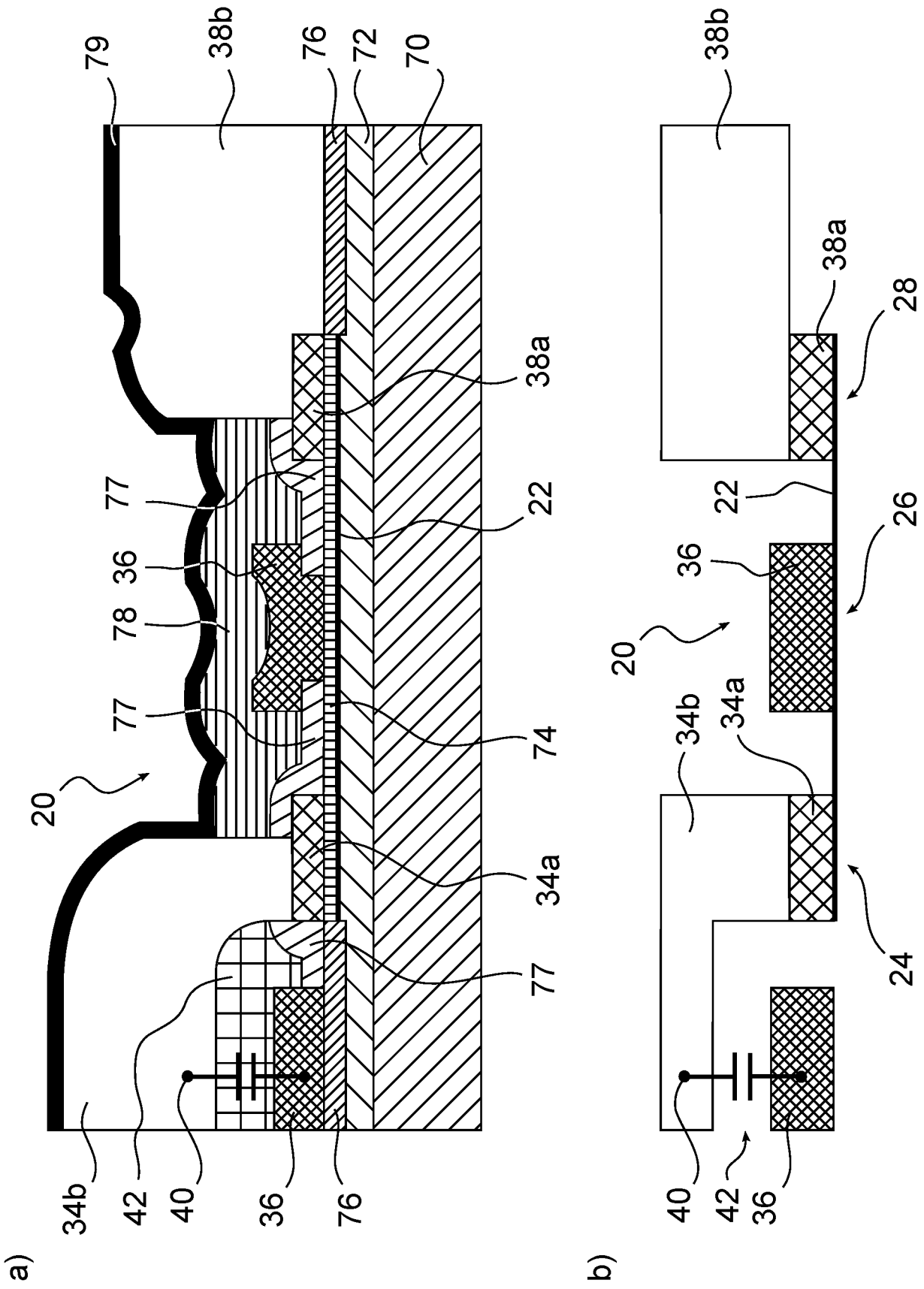


FIG. 1

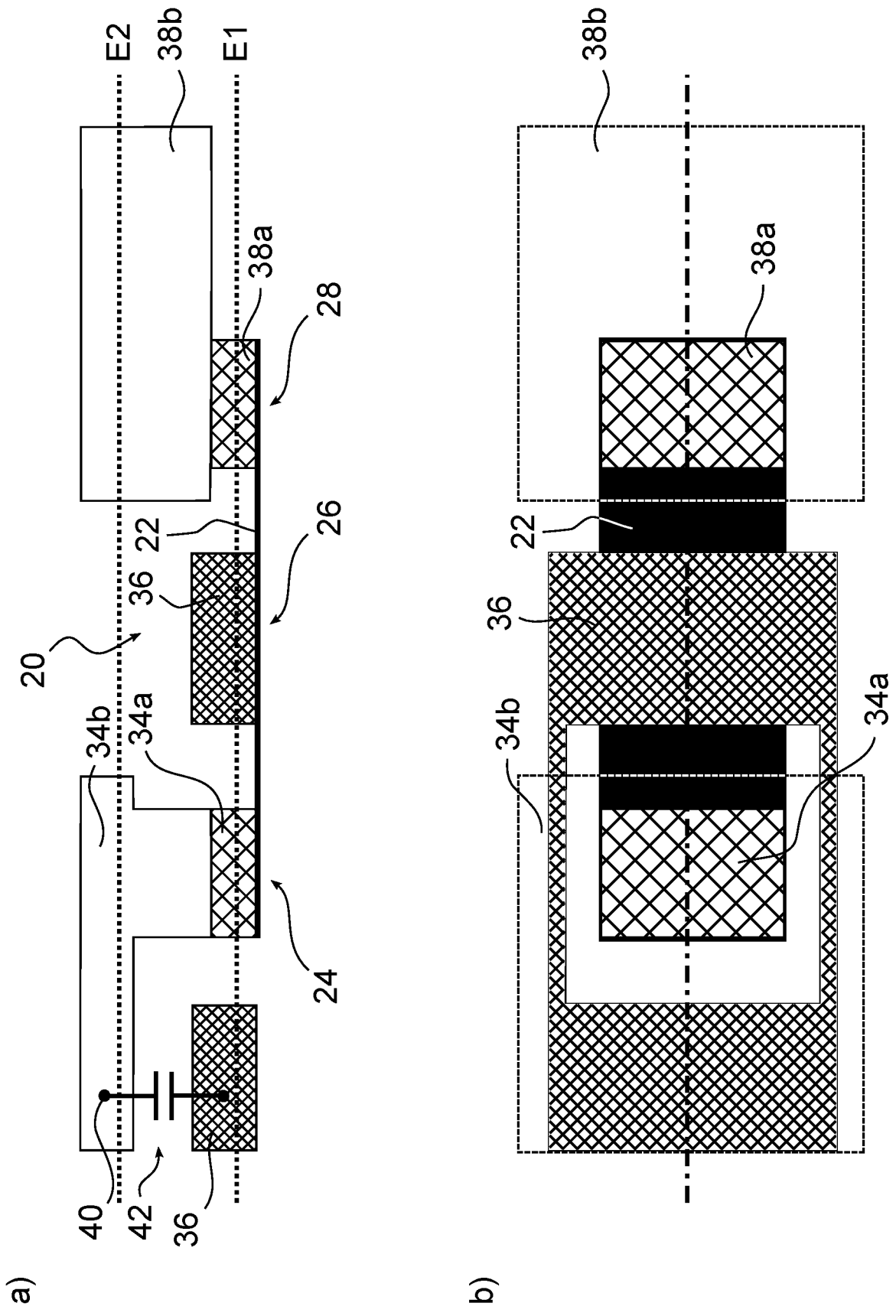


FIG. 2

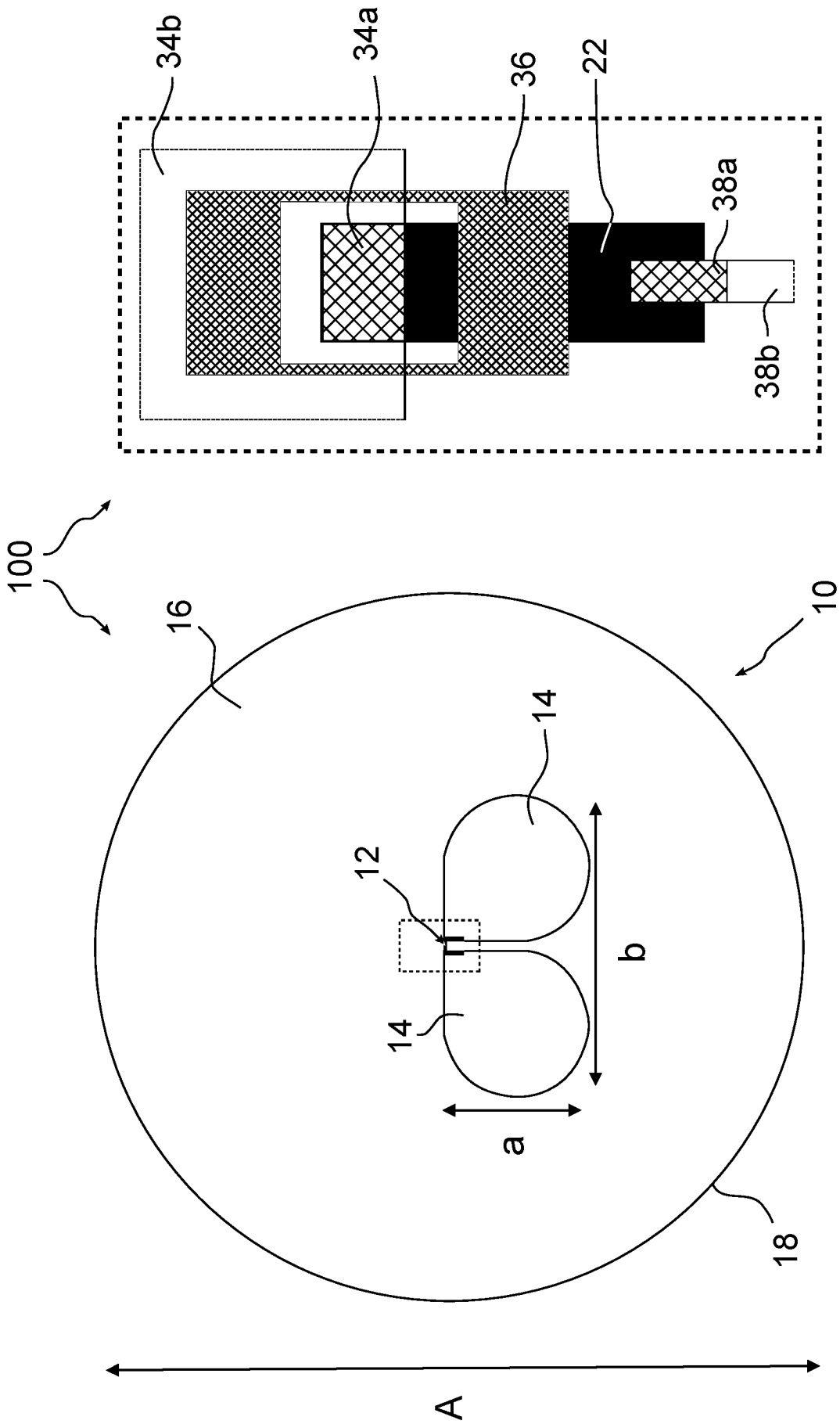


FIG. 3

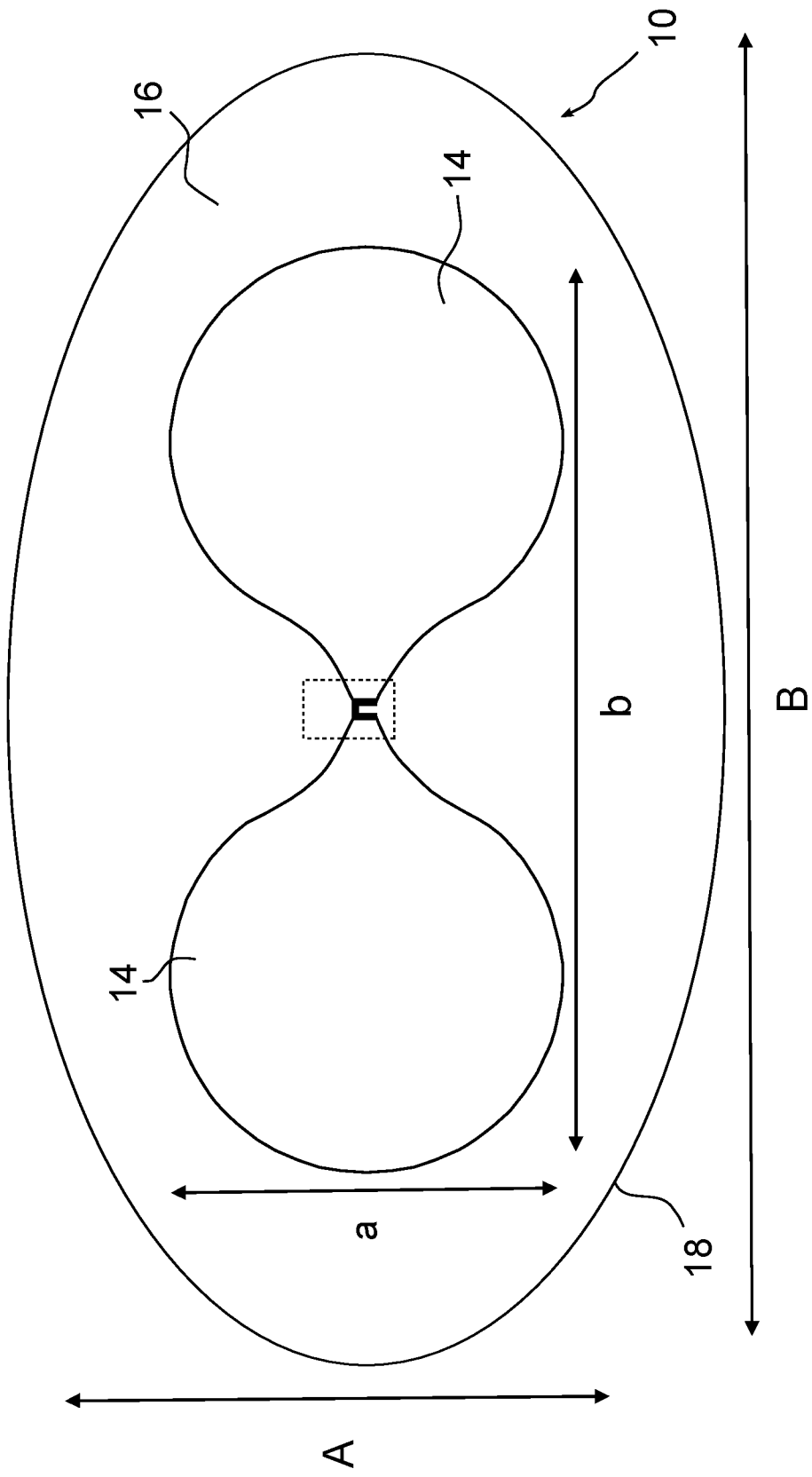


FIG. 4

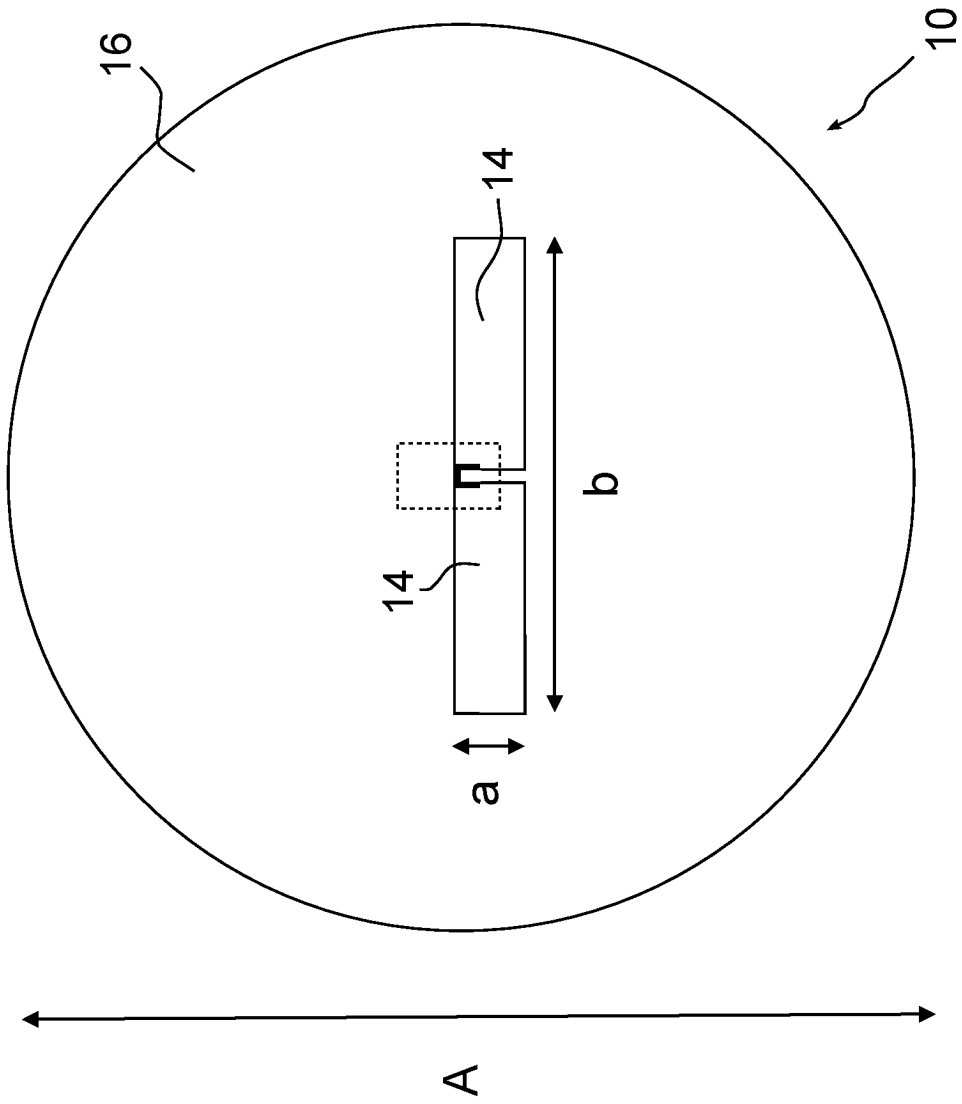


FIG. 5

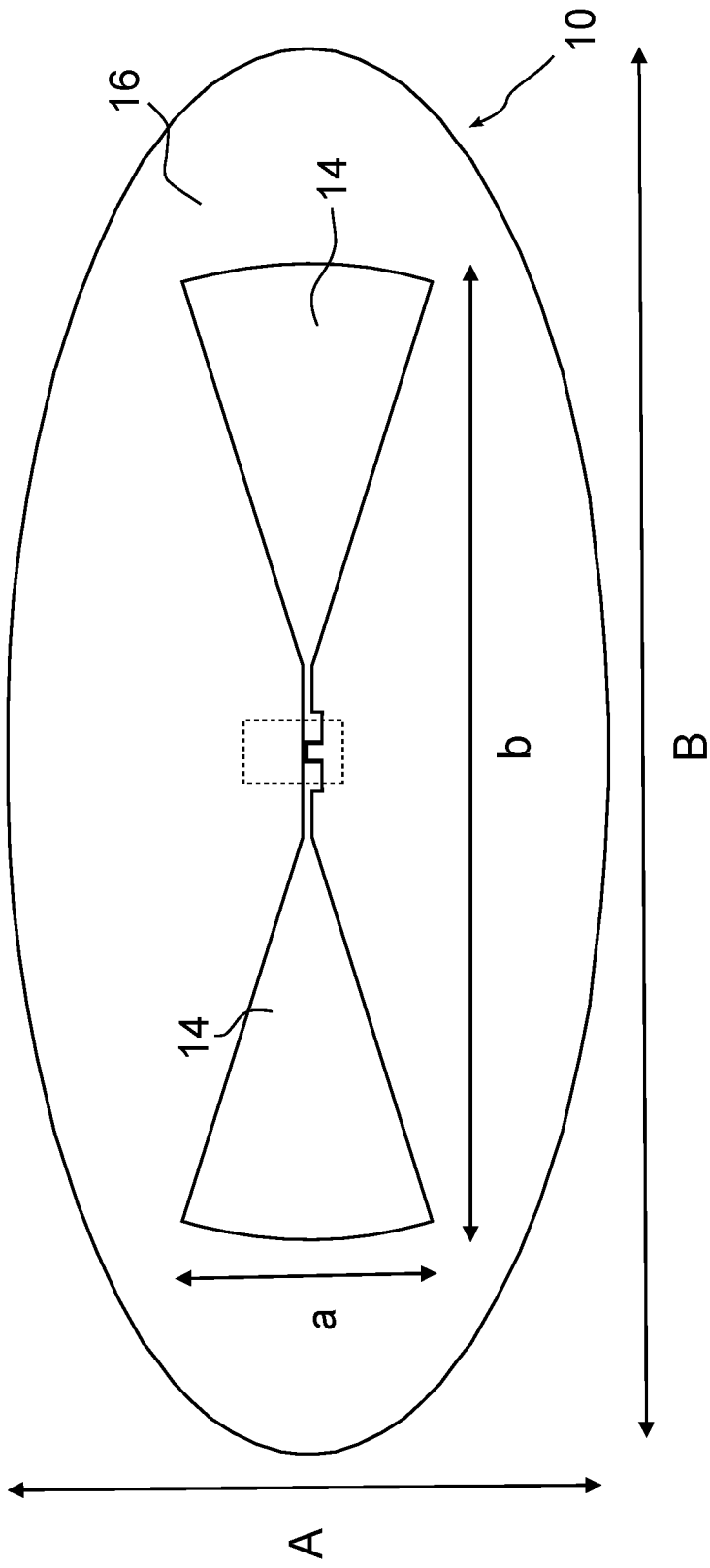


FIG. 6

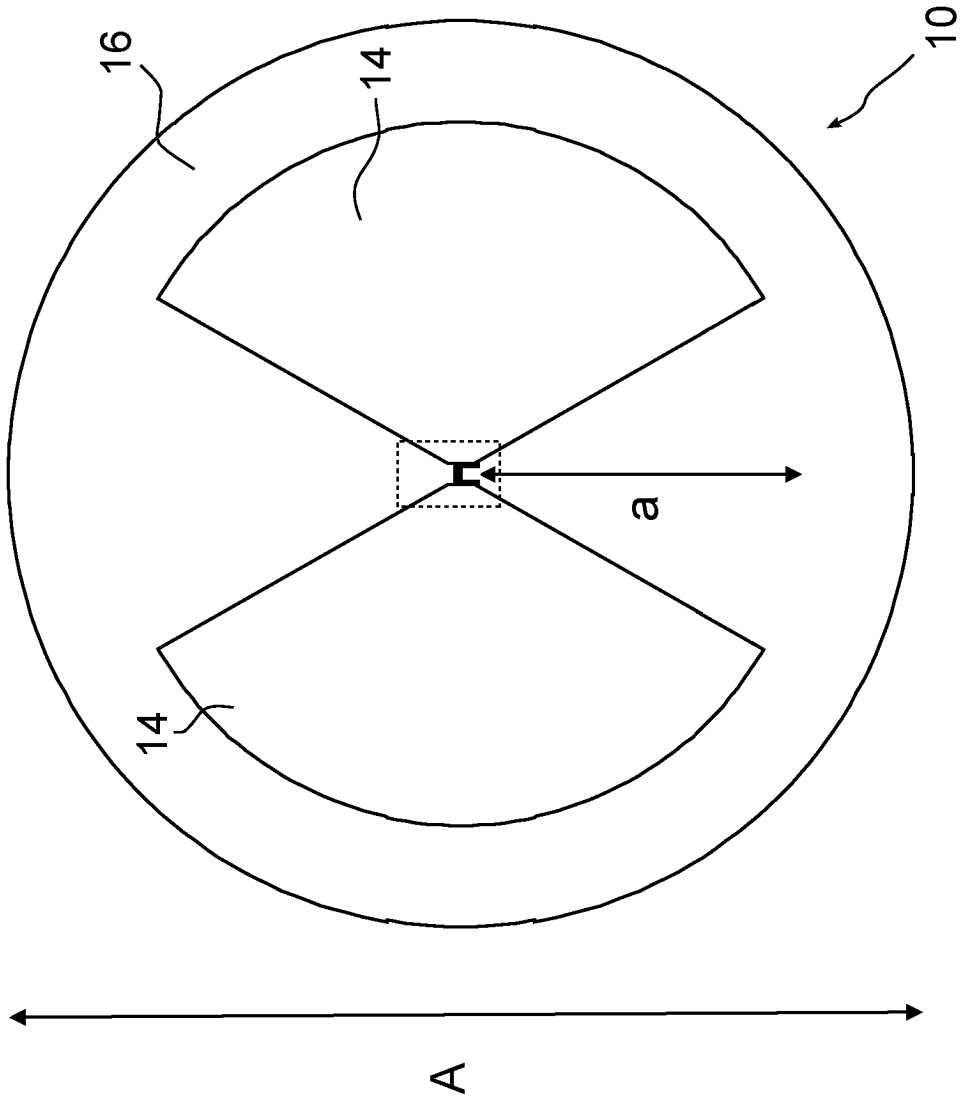


FIG. 7

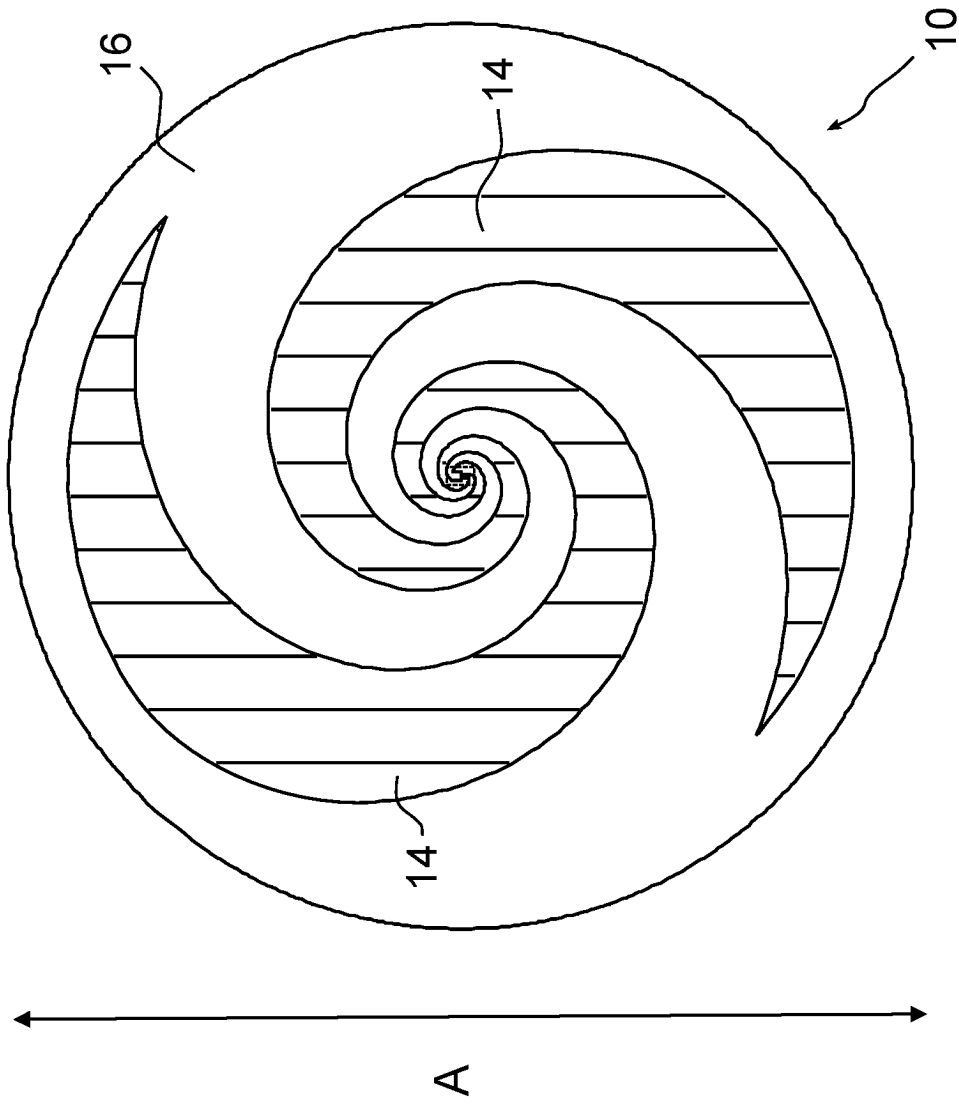


FIG. 8

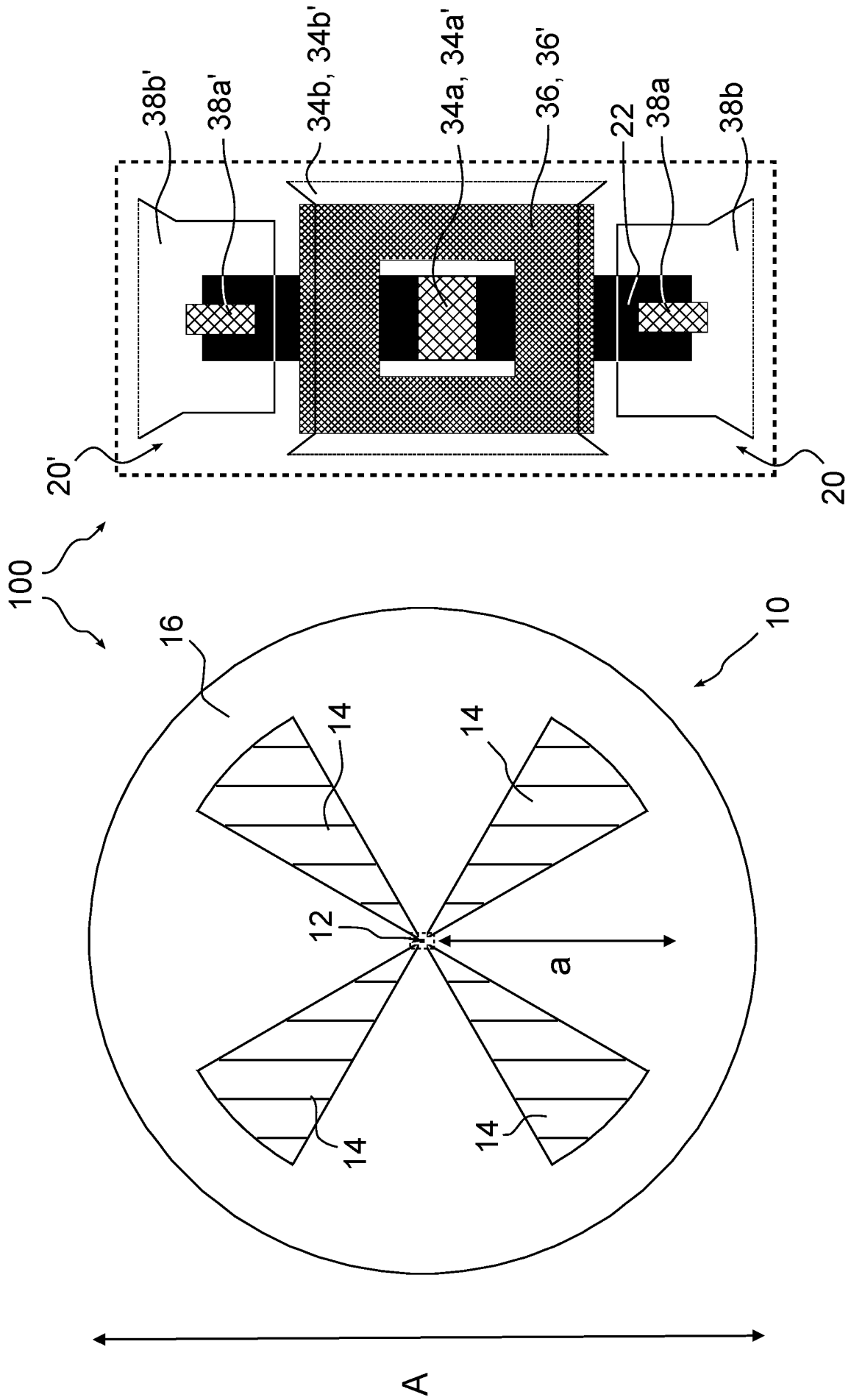


FIG. 9

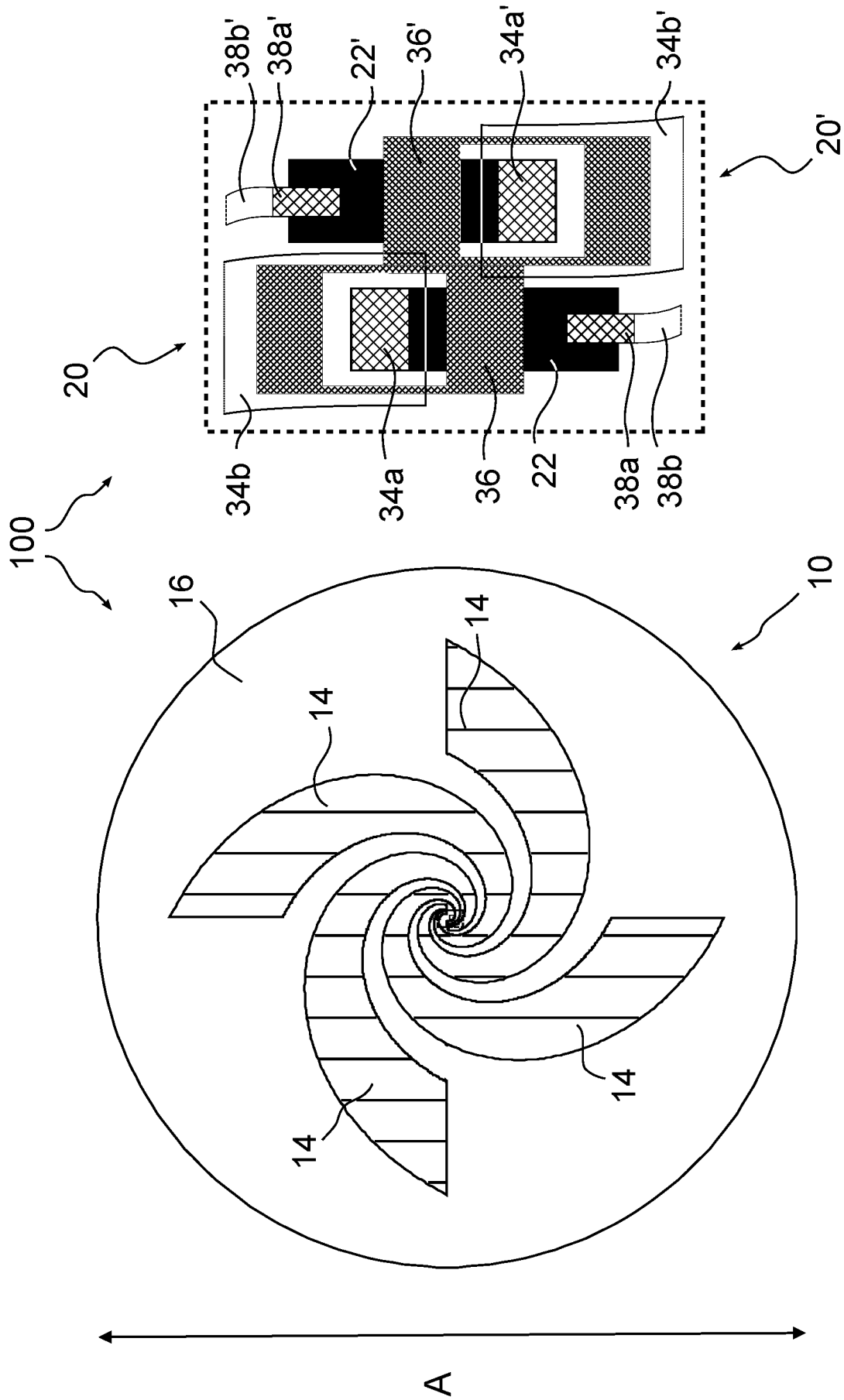


FIG. 10