



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2004 020 670 A1** 2005.11.24

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2004 020 670.8**

(22) Anmeldetag: **28.04.2004**

(43) Offenlegungstag: **24.11.2005**

(51) Int Cl.7: **H01P 1/18**

H01G 7/00, H01P 1/20, H03B 1/00

(71) Anmelder:

Siemens AG, 80333 München, DE

(72) Erfinder:

**Matz, Richard, Dr., 83052 Bruckmühl, DE; Wersing,
Wolfram, 83346 Bergen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 102 53 927 A1

WO 01/68 554 A1

**P. Ajayan u.a.: "Application of Carbon
Nanotubes",**

in: "Carbon Nanotubes Materials",

**Hrsg.: M.Dresselhaus u.a., Springer-Verlag (2001)
S. 391-425;**

**A. Hirsch: in "Angewandte Chemie", Bd. 114
(2002),**

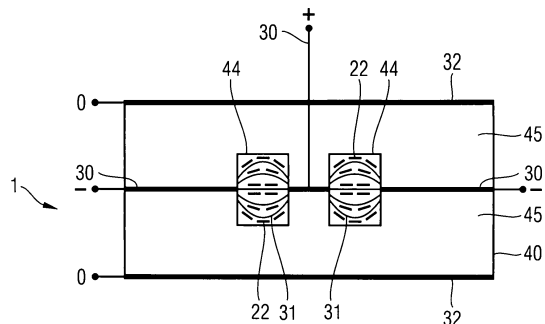
S. 1933-1939;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Elektrisches Bauelement mit elektrisch steuerbarem Dielektrikum, Verwendung des elektrischen Bauelements und Mikrowellenbauteil mit dem Bauelement**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein elektrisches Bauelement (1) mit elektrisch steuerbarem Dielektrikum (2) und Elektrodenstruktur (3) zum Steuern einer Permittivität des Dielektrikums. Daneben werden ein Mikrowellenbauteil mit dem Bauelement und eine Verwendung des Bauelements bzw. des Mikrowellenbauteils angegeben. Das Dielektrikum ist eine Mischung aus einem Fluid (20) und einem anisotropen Material (21) mit hoher geometrischer Anisotropie. Das anisotrope Material besteht vorzugsweise aus Kohlenstoff-Nanoröhren (22), die mit Hilfe von DNA-Einzelsträngen sterisch stabilisiert sind. Das Fluid ist beispielsweise Wasser. Durch die Elektrodenstruktur wird in das Dielektrikum ein Steuerfeld eingekoppelt, das zur Ausrichtung der Kohlenstoff-Nanoröhren führt. In Abhängigkeit von der Ausrichtung resultiert eine unterschiedliche Permittivität (effektive Dielektrizitätszahl). Verwendung findet das Bauelement insbesondere in einem Phasenschieber für die Mobilfunktechnologie und/oder Radartechnologie.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein elektrisches Bauelement mit elektrisch steuerbarem Dielektrikum und Elektrodenstruktur zum Steuern einer Permittivität des Dielektrikums. Daneben wird eine Verwendung des Bauelements und ein Mikrowellenbauteil mit dem Bauelement angegeben.

Stand der Technik

[0002] Ein elektrisches Bauelement der eingangs genannten Art ist beispielsweise aus der WO 01/68554 A1 bekannt. Dieses Bauelement ist ein elektrisch steuerbarer Kondensator. Das steuerbare Dielektrikum ist dort eine Glas-Keramik-Zusammensetzung. Die Glas-Keramik-Zusammensetzung ist aus einer Glasphase und einer Keramikphase zusammengesetzt. Die Keramikphase wird von einer Keramik gebildet, die auf dem System Barium-Strontium-Titanat basiert. Die Keramik ist elektrisch steuerbar. Dies bedeutet, dass sich in Abhängigkeit von einem elektrischen Feld, in dem sich die Keramik befindet, die Permittivität der Keramik und infolge davon die Permittivität der Glas-Keramik-Zusammensetzung ändert. Die Glas-Keramik-Zusammensetzung ist in der LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics)-Technologie einsetzbar. Allerdings ist eine Steuerbarkeit (Abstimmbereich) des Barium-Strontium-Titanat-Systems begrenzt.

[0003] Aus P. M. Ajayan and O. Zhou, "Application of Carbon Nanotubes", a chapter in Carbon Nanotube Materials, ed. M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P. Avouris, Springer-Verlag (Topics in Applied Physics, 80) 391-425 (2001) sind Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes, CNTs) und deren Anwendung bekannt. Aus A. Hirsch, Angewandte Chemie, 114 (2002), Seiten 1933-1939, gehen Kohlenstoff-Nanoröhren mit funktionalisierter Röhrenoberfläche hervor. Kohlenstoff-Nanoröhren haben einen Röhrendurchmesser im Nanometerbereich. Eine Röhrenlänge der Kohlenstoff-Nanoröhren ist aus dem Mikrometer- bis Millimeterbereich. Die Kohlenstoff-Nanoröhren zeichnen sich also durch eine ausgeprägte geometrische Anisotropie aus.

Aufgabenstellung

[0004] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein elektrisches Bauelement mit elektrisch steuerbarem Dielektrikum anzugeben, das einen im Vergleich zum bekannten Stand der Technik größeren Abstimmbereich aufweist.

[0005] Zur Lösung der Aufgabe wird ein elektrisches Bauelement mit elektrisch steuerbarem Dielektrikum und Elektrodenstruktur zum Steuern einer Permittivität des Dielektrikums angegeben. Das Bauelement ist dadurch gekennzeichnet, dass das Dielektrikum

ein Fluid aufweist, in dem mindestens ein anisotropes Material mit einer geometrischen Anisotropie enthalten ist, das durch ein durch die Elektrodenstruktur erzeugbares elektrisches Steuerfeld ausgerichtet werden kann.

[0006] Denkbar ist insbesondere, dass das anisotrope Material und das Fluid zusammen eine Lösung und/oder eine Dispersion bilden. Das Fluid ist ein Lösungsmittel bzw. ein Dispersionsmittel, in dem das anisotrope Material gelöst bzw. dispergiert ist. Dabei ist die Konzentration des anisotropen Materials so hoch gewählt, dass durch das Anlegen des Steuerfeldes eine Änderung der Permeabilität beobachtet werden kann. Gleichzeitig ist die Konzentration aber niedrig genug, so dass eine Orientierung des Materials weitgehend ohne sterische Behinderung einzelner Partikel des Materials erfolgen kann.

[0007] In einer besonderen Ausgestaltung weist das anisotrope Material eine elektrische Leitfähigkeit von über 10^6 S/m und insbesondere von über 10^9 S/m auf. Das anisotrope Material ist elektrisch hoch leitfähig. In einer weiteren Ausgestaltung weist das Material eine Dielektrizitätszahl von über 100 auf. Je nach Anwendung kann auch eine Dielektrizitätszahl von über 1000 und mehr vorteilhaft sein. Das Material ist hoch dielektrisch. Mit Hilfe von Steuerelektroden der Elektrodenstruktur wird in das Fluid mit dem anisotropen hoch dielektrischen oder elektrisch hoch leitfähigen Material ein elektrisches Steuerfeld (Bias-Feld) eingekoppelt. Das elektrische Steuerfeld induziert im anisotropen Material ein elektrisches Dipolmoment. Aufgrund des Dipolmoments kommt es zur Ausrichtung des anisotropen Materials im Fluid. Je nach Stärke und Richtung des elektrischen Steuerfeldes und damit je nach Ausrichtung des anisotropen Materials resultiert eine unterschiedliche, nach außen hin wirksame (effektive) Permittivität des Dielektrikums. Diese effektive Permittivität kann die elektrischen Eigenschaften weiterer Komponenten des Bauelements beeinflussen. Eine weitere Komponente ist beispielsweise ein Kondensator. Das Dielektrikum des Bauelements ist gleichzeitig das Dielektrikum des Kondensators. Durch Anlegen einer entsprechenden elektrischen Steuerspannung an die Steuerelektroden und das damit erzeugte elektrische Steuerfeld ist die Permittivität des Dielektrikums veränderbar. Durch die veränderbare Permittivität resultiert eine veränderbare Kapazität des Kondensators. Es liegt ein steuerbarer Kondensator vor.

[0008] In einer besonderen Ausgestaltung weist das anisotrope Material Nanoröhren auf. Der Röhrendurchmesser einer Nanoröhre beträgt wenige Nanometer. Die Röhrenlänge der Nanoröhre ist dagegen um ein Vielfaches größer. Die Röhrenlänge ist aus dem Bereich von 100 nm bis 1000 nm ausgewählt. Im statistischen Mittel liegt ein hohes Aspektverhältnis (mittleres Verhältnis der Röhrenlänge zum Röhren-

durchmesser) vor. Es resultiert eine hohe Steuerbarkeit. Die hohe Steuerbarkeit besteht auch bei relativ niedrigen Konzentrationen. So genügt beispielsweise ein Anteil von ca. 4 Vol%, um die Permittivität des Dielektrikums um einen Faktor von etwa 100 zu variieren.

[0009] Die Nanoröhren können aus verschiedenen Röhrenmaterialien bestehen. Denkbar sind beispielsweise Nanoröhren aus hoch dielektrischen Materialien wie Bariumtitanat (BaTiO_3), Bleizirkonattitanat ($\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$, PZT) oder andere ferroelektrische Materialien. Paraelektrische Materialien mit hoher Dielektrizitätszahl, insbesondere Mikrowellendielektrika sind ebenfalls denkbar.

[0010] In einer besonderen Ausgestaltung sind die Nanoröhren Kohlenstoff-Nanoröhren. Sie können sich durch eine hohe ballistische elektrische Leitfähigkeit auszeichnen. Ebenso können sich die Kohlenstoff-Nanoröhren durch eine hohe Dielektrizitätszahl und eine hohe Polarisierbarkeit auszeichnen. Kohlenstoff-Nanoröhren lassen sich auf elegante Weise funktionalisieren. Durch das Funktionalisieren werden die chemischen und/oder elektrischen Eigenschaften der Kohlenstoff-Nanoröhren beeinflusst (siehe unten). Als anisotropes Material kann eine Art von Nanoröhren verwendet werden. Eine Art Nanoröhre zeichnet sich durch ein bestimmtes Röhrenmaterial, durch eine bestimmte Röhrenlänge, die innerhalb festgelegter Grenzen variieren kann, und durch bestimmte elektrische Eigenschaften (elektrische Leitfähigkeit oder Dielektrizitätszahl und Polarisierbarkeit) aus. Denkbar ist auch die Verwendung von mehreren Arten von Nanoröhren. Als anisotropes Material wird eine Mischung verschiedener Arten von Nanoröhren verwendet.

[0011] Das Fluid wird beispielsweise im Hinblick auf die Verwendung des steuerbaren Dielektrikums ausgewählt. So wird beispielsweise für eine kurze Ansprechzeit der Steuerung der Permittivität ein niedrigviskoses Fluid verwendet. Dagegen kann in einem solchen Fall, in dem die Ansprechzeit eine untergeordnete Rolle spielt, ein höherviskoses Fluid verwendet werden. Weitere Auswahlkriterien sind die Mischbarkeit mit dem anisotropen Material oder die Dichte des anisotropen Materials. Ebenso können für die Auswahl die Dielektrizitätszahl des Fluids und/oder die dielektrischen Verluste des Fluids eine Rolle spielen. Für eine hohe Steuerbarkeit wird ein Fluid bevorzugt, das eine relativ niedrige Dielektrizitätszahl aufweist. Ebenso wird bevorzugt ein Fluid mit möglichst niedrigen dielektrischen Verlusten eingesetzt. Eine möglichst niedrige Dielektrizitätszahl und möglichst niedrige dielektrische Verluste ist beispielsweise für Mikrowellen- bzw. Hochfrequenzanwendungen im GHz-Bereich erwünscht.

[0012] Das Fluid ist eine beliebige Flüssigkeit. Ins-

besondere weist das Fluid zumindest eine aus der Gruppe anorganisches Lösungsmittel und/oder organisches Lösungsmittel ausgewählte Flüssigkeit auf. Dabei können reine Flüssigkeiten oder Mischungen der Flüssigkeiten verwendet werden. Das anorganische Lösungsmittel ist beispielsweise Wasser. Das organische Lösungsmittel kann polar oder unpolar sein. Das polare organische Lösungsmittel ist beispielsweise ein Alkohol. Das unpolare organische Lösungsmittel ist beispielsweise Öl. Dabei wird Öl als Sammelbezeichnung für wasserunlösliche organische Verbindungen mit relativ niedrigem Dampfdruck angesehen. Eine für Mikrowellen- bzw. Hochfrequenzanwendungen im GHz-Bereich geeignetes Fluid ist beispielsweise das organische Lösungsmittel Toluol ($\epsilon_r > 2,4$; $\tan \delta > 0,018$ bei 10 GHz).

[0013] Das anisotrope Material und das Lösungsmittel werden derart ausgewählt, dass eine möglichst homogene Mischung der beiden Komponenten des Dielektrikums resultiert. In einer besonderen Ausgestaltung weisen die Nanoröhren zur Beeinflussung einer Mischbarkeit mit einem Lösungsmittel und/oder zur sterischen Stabilisierung mindestens eine Funktionalisierung auf. Die Nanoröhren werden funktionalisiert und damit sterisch stabilisiert. Durch die sterische Stabilisierung wird dafür gesorgt, dass sich die Nanoröhren vereinzelt oder nur als wenige Nanoröhren aufweisende Bündel vorliegen. Die Nanoröhren liegen zum größten Teil voneinander beabstandet vor. Bei Kohlenstoff-Nanoröhren kann es beispielsweise ohne sterische Stabilisierung zu π - π -Stapelwechselwirkungen zwischen den Kohlenstoff-Nanoröhren kommen. Die Nanoröhren lagern sich aneinander an. Dadurch wird die geometrische Anisotropie zumindest teilweise aufgehoben und in Folge davon die Steuerbarkeit des Dielektrikums vermindert.

[0014] Die Funktionalisierung gelingt insbesondere im Zusammenhang mit Kohlenstoff-Nanoröhren. Vorzugsweise verfügt jede der Nanoröhren über viele funktionalisierte Stellen (Funktionalisierungen). An einer funktionalisierten Stelle ist die Röhrenoberfläche der Nanoröhre verändert. Durch die Veränderung der Röhrenoberfläche wird die Mischbarkeit der Nanoröhren in einem Lösungsmittel beeinflusst. Beispielsweise werden die Nanoröhren mit polaren (hydrophilen) Gruppen funktionalisiert, die dazu führen, dass die Nanoröhren in einem polaren Lösungsmittel wie Wasser sehr gut gelöst bzw. dispergiert werden können. Die polare Gruppe ist beispielsweise eine Carboxylgruppe. Das polare Lösungsmittel ist insbesondere Wasser. Organische polare Lösungsmittel, beispielsweise Alkohole, sind ebenfalls denkbar. Durch die Funktionalisierung der Röhrenoberfläche können die Nanoröhren in Wasser gelöst werden. Im Fall von Ölen, also unpolaren (hydrophoben) Lösungsmitteln, erfolgt die Funktionalisierung der Nanoröhren mit unpolaren Gruppen, die die Löslichkeit der Nanoröhren in diesen unpolaren Lösungsmitteln

ermöglichen.

[0015] Die Funktionalisierung kann chemisch und/oder physikalisch erfolgen. Die chemische Funktionalisierung unterscheidet zwischen Defekt-Funktionalisierung und Seitenwand-Funktionalisierung. Die Defekt-Funktionalisierung nutzt Defekte (Fehler) im Grundgerüst einer Nanoröhre aus. Die Nanoröhre ist beispielsweise eine Kohlenstoff-Nanoröhre, deren Grundgerüst aus Kohlenstoff-Sechsringen aufgebaut ist. Die Kohlenstoff-Nanoröhre kann Defekte in Form von Kohlenstoff-Fünfringen oder Kohlenstoff-Siebenringen aufweisen. Derartige Defekte können durch eine chemische Substanz leichter angegriffen werden, als das regelmäßige Grundgerüst der Nanoröhren aus den Kohlenstoff-Sechsringen. Gleiches gilt für ein offenes Röhrende der Kohlenstoff-Nanoröhre. Bei der Funktionalisierung reagiert eine angreifende chemische Gruppe deshalb an einem Defekt oder an einem Röhrende mit den Kohlenstoff-Nanoröhren unter Ausbildung einer kovalenten Bindung bzw. kovalenter Bindungen.

[0016] Wie bei der Defekt-Funktionalisierung werden bei der Seitenwand-Funktionalisierung zusätzliche Moleküle bzw. Molekülgruppen direkt an die Röhrenoberfläche einer Nanoröhre gebunden. Im Gegensatz zur Defekt-Funktionalisierung werden aber nicht Defekte des Grundgerüsts der Nanoröhre, sondern regelmäßige Bereiche des Grundgerüsts der Nanoröhre modifiziert. Im Fall der Kohlenstoff-Nanoröhre bedeutet das, dass Kohlenstoff-Sechsringe funktionalisiert werden. Zur Seitenwand-Funktionalisierung werden besonders reaktive chemische Substanzen eingesetzt, die die gesamte Nanoröhre in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen mit funktionalisierenden Gruppen überziehen. Die Seitenwand-Funktionalisierung hat unter anderem einen erheblichen Einfluss auf die Mischbarkeit der Nanoröhren mit einem bestimmten Lösungsmittel.

[0017] Bei der physikalischen Funktionalisierung erhalten die Nanoröhren eine zusätzliche Hülle, mit der sie lose ohne Ausbildung von kovalenten Bindungen verbunden sind. Es kommt zu einer Aggregatbildung zwischen Nanoröhre und jeweiliger Hülle. Die Hülle besteht beispielsweise aus mindestens einem langgestreckten Polymer (Makromolekül), das eine Nanoröhre "umschlingt". Ein Sonderfall dieser Art der Funktionalisierung stellt die sogenannte π -Stapelung dar. Die π -Stapelung wird auch als "Orientierte Adsorption" bezeichnet. Dabei lagert sich das umhüllende Polymer nur über bestimmte Stellen an die jeweilige Nanoröhre an, während andere Bereiche des Polymers frei in den Raum gehen.

[0018] Die Funktionalisierung der Nanoröhren beeinflusst nicht nur die Mischbarkeit der Nanoröhren mit dem Lösungsmittel bzw. mit dem Dispersionsmittel. Nachhaltig kann darüber hinaus die Dielektrizitäts-

zahl entlang des Röhrendurchmessers (quer zur Röhrenlänge) beeinflusst werden. Dies tritt insbesondere auf die Seitenwand-Funktionalisierung zu.

[0019] Insbesondere wird zur Funktionalisierung eine Funktionalisierungssubstanz eingesetzt. Die Funktionalisierungssubstanz ist bevorzugt ein Makromolekül. Ein Makromolekül (makromolekularer Stoff) besteht aus mehreren hundert kovalent gebundenen Atomen. Beispielsweise ist das Makromolekül ein künstliches oder natürliches Polymer (Biopolymer). In einer besonderen Ausgestaltung weist die Funktionalisierung mindestens ein aus der Gruppe des Desoxyribonukleinsäure und/oder Protein ausgewähltes Makromolekül auf. Eine Desoxyribonukleinsäure (Deoxyribonucleic Acid, DNA) eignet sich besonders als Funktionalisierungssubstanz, da sie gezielt an bestimmten Stellen verändert werden kann. Vorteilhaft wird als Funktionalisierungssubstanz einer Kohlenstoff-Nanoröhre ein DNA-Einzelstrang verwendet.

[0020] In einer weiteren Ausgestaltung ist ein Trägerkörper des Bauelements vorhanden, der eine Ausnehmung aufweist, in der das Fluid mit dem anisotropen Material angeordnet ist. Die Elektrodenstruktur ist dabei derart an der Ausnehmung angeordnet, dass durch elektrische Ansteuerung der Elektrodenstruktur ein elektrisches Steuerfeld erzeugt wird, das in das Dielektrikum eingekoppelt wird. Dazu ist vorzugsweise die Elektrodenstruktur unmittelbar an der Ausnehmung des Trägerkörpers angeordnet. Zu einer effizienten Einkopplung des Steuerfeldes stehen dabei die Elektrodenstruktur und das Dielektrikum in direktem Kontakt miteinander.

[0021] In einer weiteren Ausgestaltung weist der Trägerkörper einen Mehrschichtaufbau auf. Dabei ist im Volumen des Mehrschichtaufbaus des Trägerkörpers die Ausnehmung angeordnet. Vorzugsweise ist der Trägerkörper aus der Gruppe Halbleiter-Substrat und/oder Keramik-Substrat und/oder Kunststoff-Substrat ausgewählt. Bei einem Kunststoff-Substrat wird beispielsweise durch Materialabtrag eine Ausnehmung auf einer Oberfläche des Substrats erzeugt. Diese Ausnehmung kann mit dem Fluid befüllt werden. Nachfolgend wird die Ausnehmung verschlossen.

[0022] Das Keramik-Substrat ist beispielsweise ein LTCC-Substrat. Es erfolgt eine Integration in ein LTCC-Modul. Ein derartiges Modul wird als "System in Package" (SiP) bezeichnet. Dabei wird in üblicher Weise im Volumen des LTCC-Substrats eine Ausnehmung erzeugt werden, die nach dem Sintern über geeignete Öffnungen mit dem Fluid befüllt wird.

[0023] Denkbar ist darüber hinaus auch ein Halbleiter-Substrat. Es erfolgt beispielsweise eine Integration in einem Mehrschichtaufbau auf einem Halblei-

ter-Substrat mit mikromechanischen Methoden (micromachining). Ein derartiges Modul wird als "System on Chip" (SoC) bezeichnet. Dabei wird das Halbleiter-Substrat derart bearbeitet, dass ein Mehrschichtaufbau resultiert. Im Volumen des Mehrschichtaufbaus wird eine Ausnehmung erzeugt, die mit dem Fluid befüllt wird.

[0024] Verwendung findet das Bauelement insbesondere zum Verändern einer Phasenlage einer sich frei und/oder entlang einer Leitungsstruktur ausbreitenden elektromagnetischen Signalwelle, wobei durch eine elektrische Ansteuerung der Elektrodenstruktur ein elektrisches Steuerfeld in das Dielektrikum nahe der elektromagnetischen Welle eingekoppelt wird. Dadurch wird die Permittivität des Dielektrikums geändert und eine Wirkung auf die elektromagnetische Signalwelle erzielt. Die geänderte Permittivität wirkt sich auf die Wellenlänge der elektromagnetischen Signalwelle und auf die entsprechende Phasendifferenz der elektromagnetischen Signalwelle entlang der Ausbreitungsrichtung aus.

[0025] Um eine Wanderung des anisotropen Materials im Fluid zu unterbinden bzw. zu reduzieren, wird dabei vorzugsweise ein sich periodisch änderndes Steuerfeld eingekoppelt. Dies gelingt beispielsweise durch abwechselndes Anlegen betragsgleicher elektrischer Potentiale mit unterschiedlichen Vorzeichen an die Steuerelektroden eines Steuerkondensator der Elektrodenstruktur. Das Steuerfeld ändert sich dabei bevorzugt langsam.

[0026] Mit der angegebenen Verwendung des Bauelements liegt ein Phasenschieber vor. Dadurch, dass die Orientierung des anisotropen Materials in einem weiten Bereich geändert werden kann, wird die Permittivität des Dielektrikums ebenfalls in einem weiten Bereich geändert. Dies trifft insbesondere bei Verwendung von Kohlenstoff-Nanoröhren als anisotropes Material zu.

[0027] Mit dem Bauelement kann insbesondere ein Mikrowellenbauteil realisiert werden, das aus der Gruppe spannungsgesteuerter Oszillatoren und/oder Frequenzfilter und/oder Verzögerungsleitungen ausgewählt ist. Dabei ist durch die Auswahl des anisotropen Materials, insbesondere durch die Auswahl der Nanoröhren, eine individuell anpassbare, unbelastete dielektrische Güte Q_u zugänglich. Die dielektrische Güte Q_u ist der reziproke Wert des Hochfrequenzverlustfaktors $\tan \delta$. Die dielektrische Güte Q_u ist in einem weiten Bereich einstellbar. Je nach dem, welches Mikrowellenbauteil realisiert werden soll, ist die Anforderung an die dielektrische Güte Q_u unterschiedlich. Bei dem spannungsgesteuerten Oszillator (Voltage Controlled Oscillator, VCO) soll die dielektrische Güte Q_u beispielsweise zwischen 100 und 500 liegen. Bei einem Frequenzfilter kann die Güte Q_u zwischen 10 und 50 und bei der Verzögerungsleitung

zwischen 10 und 100 liegen.

[0028] Die angegebenen Mikrowellenbauteile werden insbesondere in der Mobilfunktechnik und in der Radartechnik eingesetzt. Dabei werden die Mikrowellenbauteile insbesondere zum Einstellen einer Richtcharakteristik einer Antenne zum Senden und Empfangen einer elektromagnetischen Welle verwendet.

[0029] Mit der Erfindung ergeben sich zusammenfassend folgende besonderen Vorteile:

- Es resultiert ein Bauelement, das in einem weiten Bereich elektrisch abstimmbar ist. Die Abstimbarkeit erfolgt durch Ändern der Permittivität des Dielektrikums durch Ausrichtung des anisotropen Materials. Das Verändern der Permittivität wird durch Einkoppeln unterschiedlicher elektrischer Steuerfelder in das Dielektrikum erzielt. Dabei können relativ niedrige Steuerspannungen verwendet werden.
- Durch die Kombination eines niederviskosen Fluids mit Nanoröhren ist eine schnelle Ausrichtung möglich (sehr kurze Programmierzeit bzw. sehr hohe Steuergeschwindigkeit).
- Bei Verwendung von Nanoröhren resultiert eine besonders hohe Abstimbarkeit aufgrund des hohen mittleren Aspektverhältnisses.
- Aufgrund der besonderen Eigenschaften der Nanoröhren, insbesondere der Kohlenstoff-Nanoröhren, ist eine hohe Abstimbarkeit bei gleichzeitig hoher Güte (niedrige dielektrische Verluste) möglich.
- Durch eine gezielte Funktionalisierung der Nanoröhren kann die Mischbarkeit mit dem Fluid und die sterische Stabilisierung der Nanoröhren auf einfache Weise beeinflusst werden. Die Funktionalisierung mit DNA-Einzelsträngen ist dabei besonders vorteilhaft.
- Das Bauelement kann auf einfache Weise in bekannte Mehrschichtsysteme integriert werden.

[0030] Anhand mehrerer Ausführungsbeispiele und der dazugehörigen Figuren wird die Erfindung im Folgenden näher erläutert. Die Figuren sind schematisch und stellen keine maßstabgetreuen Abbildungen dar.

[0031] [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) zeigen von der Seite und von oben ein elektrisches Bauelement, das ein steuerbares Dielektrikum aufweist.

[0032] [Fig. 2A](#) und [Fig. 2B](#) zeigen ein elektrisches Bauelement, das ein steuerbares Dielektrikum aufweist und das in einem Mehrschichtkörper integriert ist.

[0033] [Fig. 3A](#) und [Fig. 3B](#) zeigen jeweils ein Bauelement, das in ein mehrlagiges Substrat aus einem anwendungsspezifischen Material, z.B. LTCC, inte-

griert ist.

[0034] [Fig. 4A](#) und [Fig. 4B](#) zeigen Ersatzschaltbilder zu den [Fig. 3A](#) und [Fig. 3B](#).

[0035] [Fig. 5A](#) und [Fig. 5B](#) zeigen jeweils ein Bauelement, das in ein LTCC-Substrat integriert ist.

[0036] [Fig. 6A](#) und [Fig. 6B](#) zeigen Ersatzschaltbilder zu den [Fig. 4A](#) und [Fig. 4B](#).

[0037] [Fig. 7](#) zeigt ein Verfahren zum Integrieren des Bauelements in einen Mehrschichtaufbau auf einem Halbleitersubstrat.

Ausführungsbeispiel

[0038] Gegeben ist ein elektrisches Bauelement 1 mit elektrisch steuerbarem Dielektrikum 2 und Elektrodenstruktur 3 mit vier Elektroden 30 und 32 seitlich und oberhalb wie unterhalb des Dielektrikums 2 zum Steuern einer Permittivität des Dielektrikums 2. Das Dielektrikum ist eine Dispersion von Kohlenstoff-Nanoröhren 22 in Wasser (Fluid) 20. Dabei sind die Kohlenstoff-Nanoröhren 22 mit einem Anteil von 4 Vol% enthalten. Die Dispersion kann als Kontinuum mit effektiver Dielektrizitätszahl betrachtet werden. Die verwendeten Kohlenstoff-Nanoröhren 22 sind bezüglich ihrer Geometrie stark anisotrop. Entlang der jeweiligen Röhrenlänge sind die Kohlenstoff-Nanoröhren 22 elektrisch hoch leitfähig und polarisierbar. Quer zur Röhrenlänge ist dagegen die Polarisierbarkeit deutlich geringer. Zur Verbesserung der Mischbarkeit der Kohlenstoff-Nanoröhren 22 in Wasser sind die Kohlenstoff-Nanoröhren mit Hilfe von DNA-Einzelsträngen funktionalisiert.

[0039] Das Dielektrikum befindet sich in einer Ausnehmung (Kavität) 44 zwischen den Steuerelektroden 30 und 32 ([Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#)). Durch Anlegen einer Steuerspannung an die Steuerelektroden 30 und 32 wird ein elektrisches Steuerfeld 31 im Dielektrikum 2 wirksam. Aufgrund des Steuerfeldes 31 werden in den Kohlenstoff-Nanoröhren 22 elektrische Dipolmomente beeinflusst, die zu einer Ausrichtung der Kohlenstoff-Nanoröhren 22 parallel zum Steuerfeld 31 führen.

[0040] Die [Fig. 2A](#) und [Fig. 2B](#) verdeutlichen die prinzipielle Funktionsweise. Gezeigt ist ein Mehrschichtkörper mit zwei im Volumen des Mehrschichtkörpers integrierten Ausnehmungen 44. Die Ausnehmungen 44 sind in die konventionellen dielektrischen Schichten 45 des Mehrschichtkörpers integriert. Durch Anlegen entsprechender Steuerpotentiale an die Steuerelektroden, beispielsweise $\pm 2V$ (Mitte bzw. außen 30) und $0V$ (oben und unten 32), werden die Kohlenstoff-Nanoröhren 22 entlang des erzeugten elektrischen Steuerfeldes 31 horizontal orientiert ([Fig. 2A](#)). Stellt die mittlere Elektrode 30 gleichzeitig

eine senkrecht zur Bildebene verlaufende Hochfrequenzleitung dar, z.B. eine Koplanarleitung, so wird ein dort eingespeistes Signal durch die starke kapazitive Kopplung an die negativ vorgespannten äußeren Elektroden 30 kurzgeschlossen. Werden jedoch $0V$ an die Elektroden 30 und gegenpolige Spannungen an die Elektroden 32 angelegt, so sind die Kohlenstoff-Nanoröhren 22 vertikal orientiert und die seitliche kapazitive Kopplung der mittleren HF-Leitung ist infolge der geringen Dielektrizitätszahl in dieser Richtung deutlich reduziert. Somit ist die Leitung auf Durchgang geschaltet.

[0041] Das beschriebene elektrische Bauelement ist gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel in einem LTCC-Substrat 41 integriert ([Fig. 3A](#) und [Fig. 3B](#)). Die Schichtdicken der dielektrischen Schichten 45 betragen etwa $100 \mu m$. Eine Grundfläche der Ausnehmung 44 ist quadratisch mit einer Kantenlänge von etwa $100 \mu m$. Zum Herstellen des LTCC-Substrats werden keramische Grünfolie strukturiert, metallisiert, übereinander gestapelt, gemeinsam entbindert und gemeinsam gesintert. Nachfolgend wird durch feine Öffnungen (Vias) das Dielektrikum 2 in die vorgesehene Ausnehmung 44 eingefüllt und die Ausnehmung 44 bzw. die Öffnungen verschlossen.

[0042] Die Elektrodenstrukturen 3 sind aus Silber. Bei entsprechender Beschaltung können die in den [Fig. 4A](#) und [Fig. 4B](#) gezeigten Ersatzschaltbilder mit Kondensatoren 33 hoher Kapazität und Kondensatoren mit niedriger Kapazität 34 aufgestellt werden. Mit dem Bezugszeichen 35 ist jeweils eine elektrische Leitung angedeutet.

[0043] Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel ist das Bauelement ebenfalls in einem LTCC-Substrat integriert ([Fig. 5A](#) und [Fig. 5B](#)). Die Schichtdicken der dielektrischen Schichten 45 betragen etwa $50 \mu m$. Die Ausnehmung 44 ist würfelförmig mit einer Kantenlänge von etwa $100 \mu m$. Zu diesem Ausführungsbeispiel lassen sich die in den [Fig. 6A](#) und [Fig. 6B](#) gezeigten Ersatzschaltbilder aufstellen.

[0044] Alternativ zu den LTCC-Substraten werden mehrschichtige Kunststoffsubstrate verwendet.

[0045] Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel ([Fig. 7](#)) wird das elektrische Bauelement 1 in einem durch Dünnschichttechnologie hergestellten mehrlagigen Schichtaufbau 40 auf einem Halbleitersubstrat 43 realisiert. Dazu werden folgende Verfahrensschritte durchgeführt: Abscheiden von unterer Steuerelektrode 30, 71 auf dem Substrat 43, erster Abstandsschicht 72 (SiO_2), Ätzstoppschicht 73 (Si_3N_4), zweiter Abstandsschicht 74 (SiO_2), Abscheidung und Strukturierung der Signalleitung 75, Abscheidung von dritter Abstandsschicht 76 (SiO_2) und Membranschicht 77 (Si_3N_4), Öffnen der Membran 77 (700), Hohlraum-

mätzen (701), Infiltrieren des Dielektrikums 2 (702), Membranverschluss 77 (703) und Aufbringen der oberen Steuerelektrode 30, 79 (704).

[0046] Eingesetzt wird das steuerbare elektrische Bauelement in einem Mikrowellenbauteil. Das Mikrowellenbauteil ist ein spannungsgesteuerter Oszillator. Alternativ dazu ist das Mikrowellenbauteil ein Frequenzfilter und eine Verzögerungsleitung.

[0047] Verwendung finden die genannten Mikrowellenbauteil in der Mobilfunktechnik und in der Radartechnik. Dabei wird beispielsweise die Richtcharakteristik einer Antenne mit Hilfe des Mikrowellenbauteils eingestellt.

Patentansprüche

1. Elektrisches Bauelement (1) mit elektrisch steuerbarem Dielektrikum (2) und Elektrodenstruktur (3, 30, 32) zum Steuern einer Permittivität des Dielektrikums (2), **dadurch gekennzeichnet**, dass das Dielektrikum (2) ein Fluid (20) aufweist, in dem mindestens ein anisotropes Material (21) mit einer geometrischen Anisotropie enthalten ist, das durch ein durch die Elektrodenstruktur (3, 30, 32) erzeugbares elektrisches Steuerfeld (31) ausgerichtet werden kann.

2. Bauelement nach Anspruch 1, wobei das anisotrope Material (21) eine elektrische Leitfähigkeit aufweist von über 10^9 S/m aufweist.

3. Bauelement nach Anspruch 1, wobei das anisotrope Material (21) eine Dielektrizitätszahl von über 100 aufweist.

4. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das anisotrope Material (21) Nanoröhren (22) aufweist.

5. Bauelement nach Anspruch 4, wobei die Nanoröhren (22) Kohlenstoff-Nanoröhren sind.

6. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei das Fluid (20) zumindest eine aus der Gruppe anorganisches Lösungsmittel und/oder organisches Lösungsmittel ausgewählte Flüssigkeit aufweist.

7. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Nanoröhren (22) zur Beeinflussung einer Mischbarkeit mit dem Fluid (20) und/oder zur sterischen Stabilisierung mindestens eine Funktionalisierung aufweisen.

8. Bauelement nach Anspruch 7, wobei die Funktionalisierung mindestens ein aus der Gruppe Desoxyribonukleinsäure und/oder Protein ausgewähltes Makromolekül aufweist.

9. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 8, mit einem Trägerkörper (4), der eine Ausnehmung aufweist, in der das Fluid mit dem anisotropen Material angeordnet ist.

10. Bauelement nach Anspruch 9, wobei der Trägerkörper einen Mehrschichtaufbau aufweist und im Volumen des Trägerkörpers die Ausnehmung angeordnet ist.

11. Bauelement nach Anspruch 9 oder 10, wobei der Trägerkörper (4) aus der Gruppe Halbleitersubstrat (43) und/oder Keramiks substrat (41) und/oder Kunststoffsubstrat (42) ausgewählt ist.

12. Verwendung eines elektrischen Bauelements (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 11 zum Verändern einer Phasenlage einer sich frei und/oder entlang einer Leitungsstruktur ausbreitenden elektromagnetischen Signalwelle, wobei durch eine elektrische Ansteuerung der Elektrodenstruktur (3, 31, 32) ein elektrisches Steuerfeld (31) in das Dielektrikum (2) eingekoppelt wird, so dass die Permittivität des Dielektrikums (2) geändert und dadurch eine Wirkung auf die Signalwelle erzielt wird.

13. Verwendung nach Anspruch 12, wobei ein sich periodisch änderndes Steuerfeld (31) eingekoppelt wird.

14. Mikrowellenbauteil mit einem elektrischen Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei das Mikrowellenbauteil aus der Gruppe spannungsgesteuerter Oszillator und/oder Frequenzfilter und/oder Verzögerungsleitung ausgewählt ist.

15. Verwendung des Mikrowellenbauteils nach Anspruch 14 in der Mobilfunktechnik und/oder in der Radartechnik.

16. Verwendung des Mikrowellenbauteils nach Anspruch 14 oder 15, wobei eine Richtcharakteristik einer Antenne eingestellt wird.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

FIG 1A

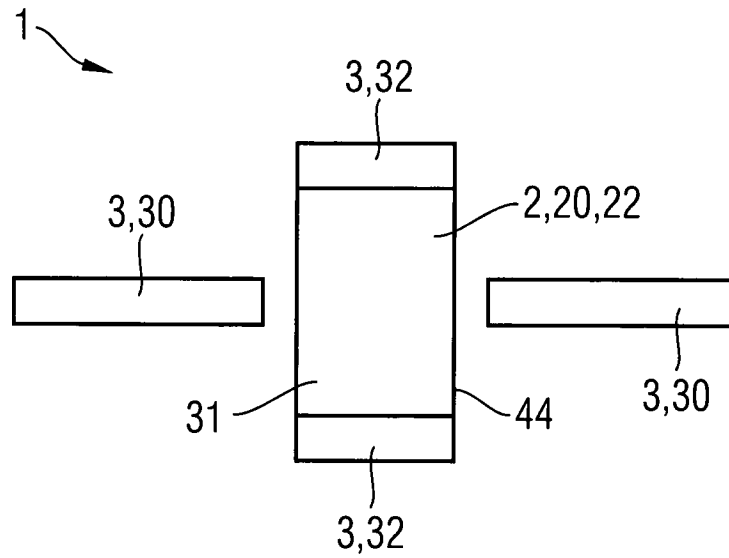


FIG 1B

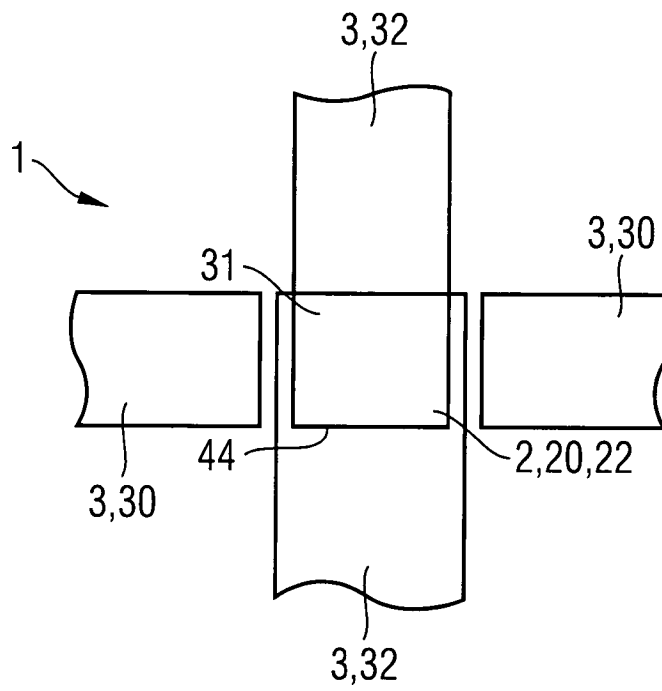


FIG 2A

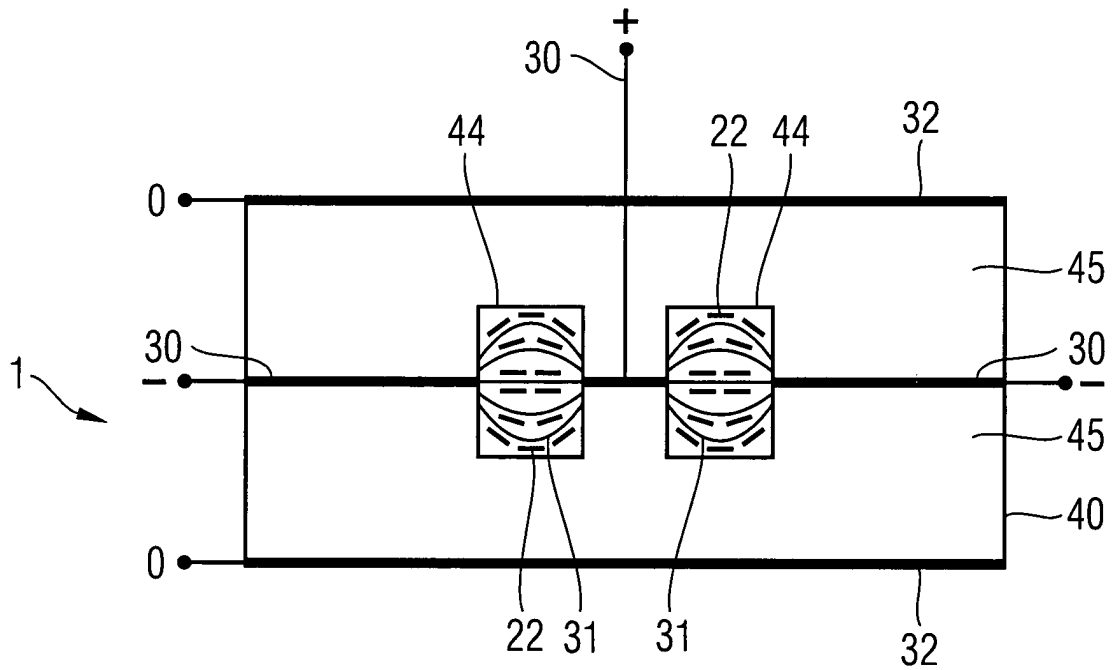


FIG 2B

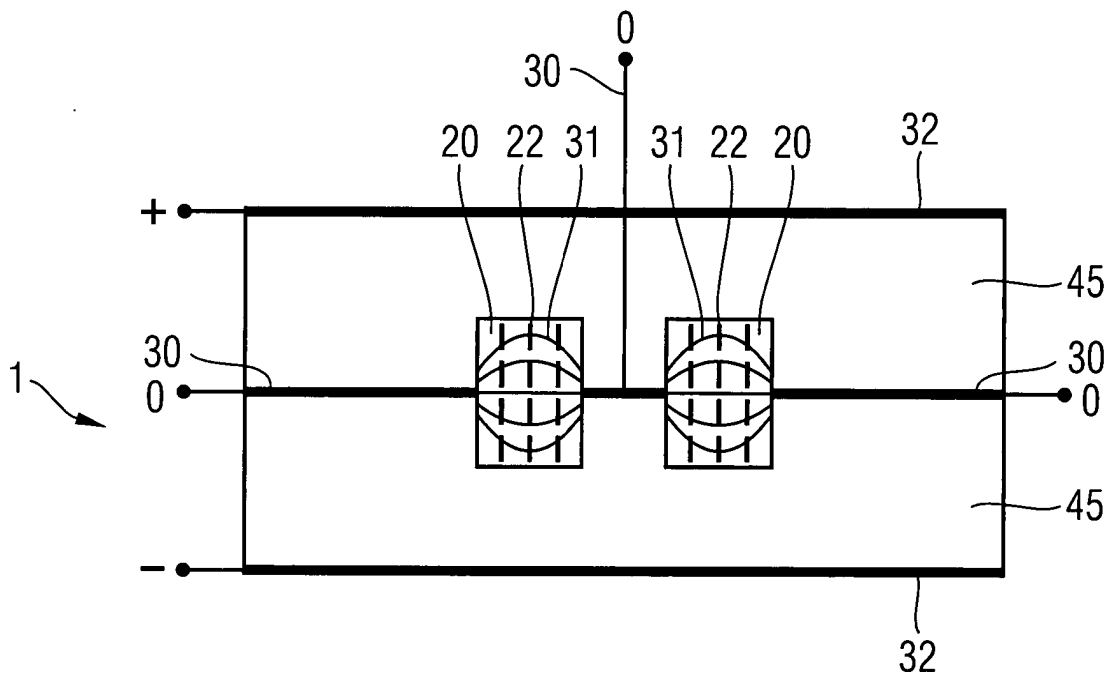


FIG 3A

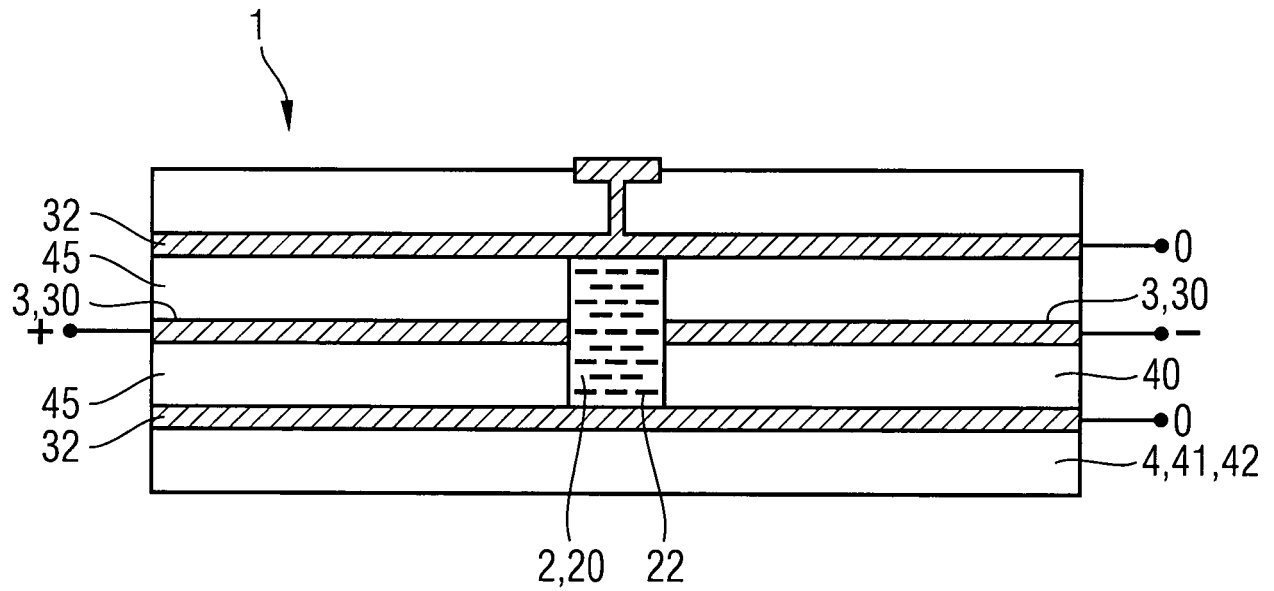


FIG 3B

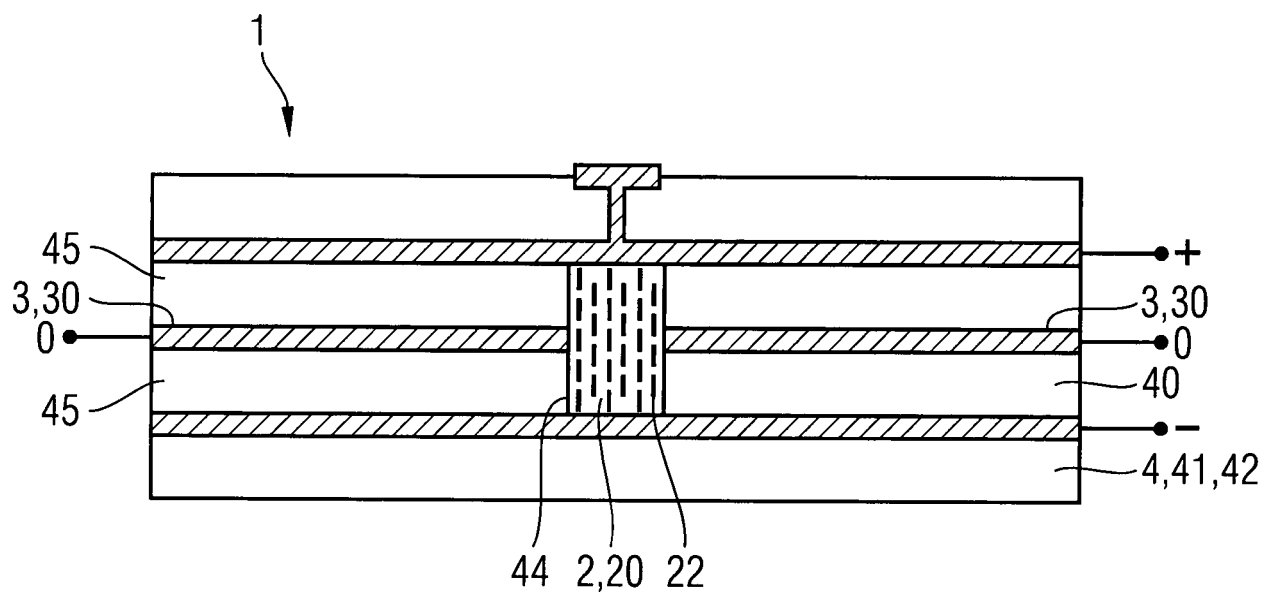


FIG 4A

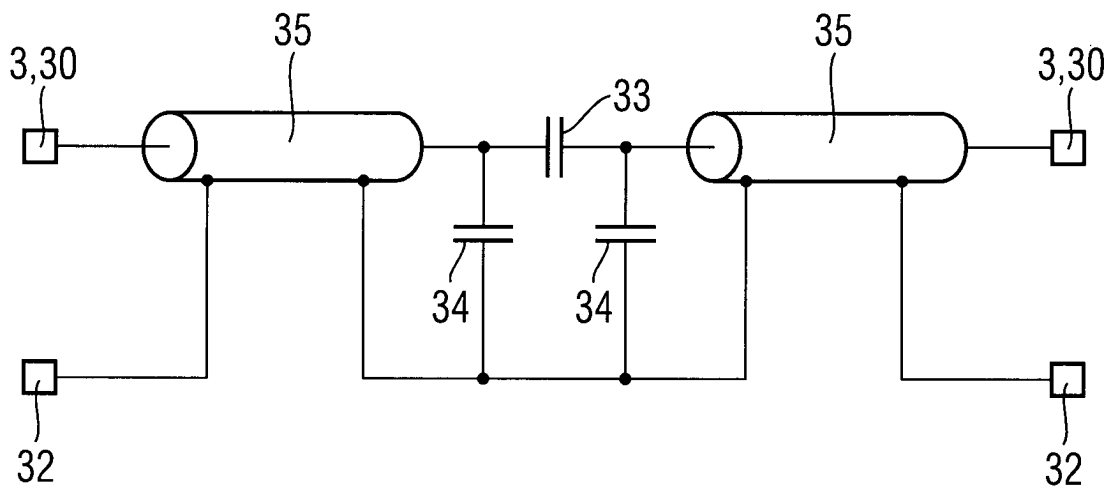


FIG 4B

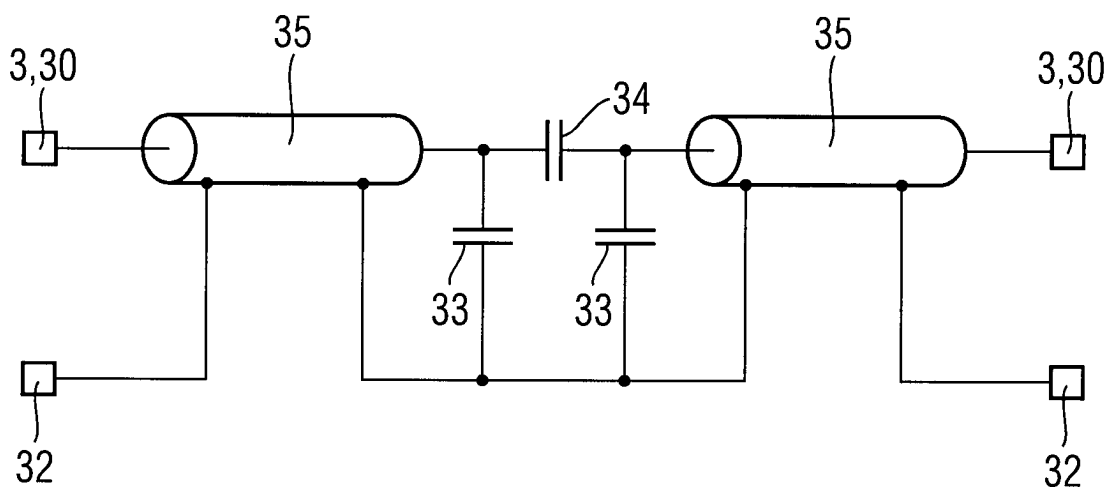


FIG 6A

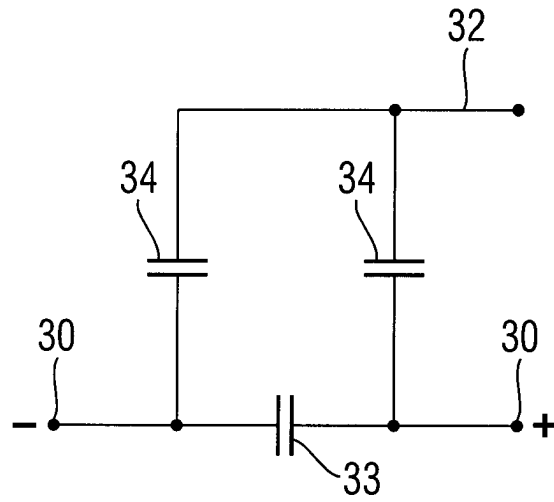


FIG 6B

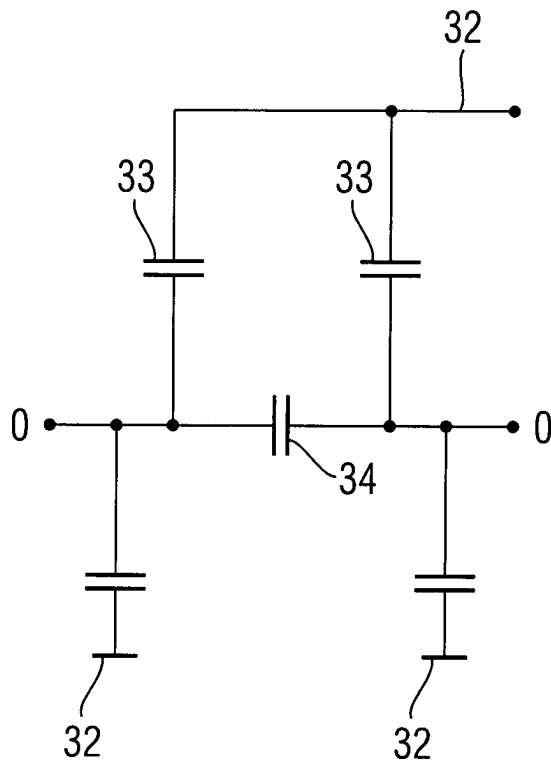


FIG 7

