



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Patentschrift
10 DE 198 32 273 C 1

51 Int. Cl.⁶:
H 01 L 39/16
H 01 L 39/24

21 Aktenzeichen: 198 32 273.9-33
22 Anmeldetag: 17. 7. 98
43 Offenlegungstag: -
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 11. 11. 99

DE 198 32 273 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

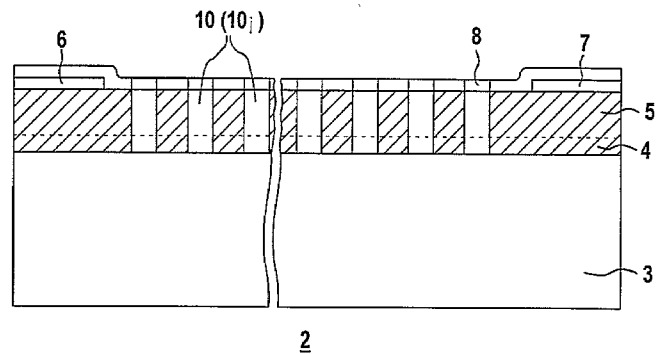
73 Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:
Heismann, Björn, 91052 Erlangen, DE; Ries, Günter,
Dr., 91056 Erlangen, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
DE 195 20 205 A1
DE 41 19 984 A1

54 Resistiver Strombegrenzer mit Hoch-T_c-Supraleitermaterial sowie Verfahren zur Herstellung des Strombegrenzers

57 Der resistive Strombegrenzer (2) enthält mindestens eine schichtartige Leiterbahn (5) mit Hoch-T_c-Supraleitermaterial auf einem Substrat (3). In der Schicht der Leiterbahn (5) sollen in vorbestimmter, insbesondere regelmäßiger oder zumindest weitgehend stochastischer Anordnung, Aussparungen (10, 10_i) vorgesehen werden. Die Aussparungen (10, 10_i) werden vorzugsweise nachträglich in die Schicht der Leiterbahn (5) eingearbeitet.



DE 198 32 273 C 1

Die Erfindung bezieht sich auf einen resistiven Strombegrenzer mit mindestens einer für einen vorgegebenen Nennstrom ausgelegten schichtartigen Leiterbahn, die ein metalloxidisches Hoch- T_c -Supraleitermaterial enthält, auf einem Substrat angeordnet ist und an ihren Enden kontaktierbar ist. Ein derartiger Strombegrenzer geht aus der DE 195 20 205 A1 hervor. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Strombegrenzers.

In elektrischen Wechselstromversorgungsnetzen können Kurzschlüsse und elektrische Überschläge nicht mit Sicherheit vermieden werden. Dabei steigt der Wechselstrom im betroffenen Stromkreis sehr schnell, d. h. in der ersten Halbwelle, auf ein Vielfaches seines Nennwertes an, bis er durch geeignete Sicherungs- oder Schaltmittel unterbrochen wird. Als Folge davon treten in allen betroffenen Netzkomponenten, wie Leitungen und Sammelschienen, Schaltern oder Transformatoren, erhebliche thermische sowie mechanische Belastungen durch Stromkräfte auf. Da diese kurzzeitigen Lasten mit dem Quadrat des Stromes zunehmen, kann eine sichere Begrenzung des Kurzschlußstromes auf einen niedrigeren Spitzenwert die Anforderungen an die Belastungsfähigkeit dieser Netzkomponenten erheblich reduzieren. Dadurch lassen sich Kostenvorteile erzielen, etwa beim Aufbau neuer als auch beim Ausbau bestehender Netze, indem durch einen Einbau von Strombegrenzern ein Austausch von Netzkomponenten gegen höher belastbare Ausführungsformen vermieden werden kann.

Mit supraleitenden Strombegrenzern vom resistiven Typ kann der Stromanstieg nach einem Kurzschluß auf einen Wert von wenigen Vielfachen des Nennstromes begrenzt werden; darüber hinaus ist ein solcher Begrenzer kurze Zeit nach Abschaltung wieder betriebsbereit. Er wirkt also wie eine schnelle, selbstheilende Sicherung. Dabei gewährleistet er eine hohe Betriebssicherheit, da er passiv wirkt, d. h. autonom ohne vorherige Detektion des Kurzschlusses und aktiver Auslösung durch ein Schaltsignal arbeitet.

Resistive supraleitende Strombegrenzer der eingangs genannten Art bilden eine seriell in einen Stromkreis einzufügende supraleitende Schaltstrecke. Dabei wird der Übergang einer supraleitenden Leiterbahn vom praktisch widerstandslosen kalten Betriebszustand unterhalb der Sprungtemperatur T_c des Supraleitermaterials in den normalleitenden Zustand über T_c hinaus ausgenutzt, wobei der nun vorhandene elektrische Widerstand R_n der Leiterbahn den Strom auf eine akzeptable Höhe $R = U/R_n$ begrenzt. Die Erwärmung über die Sprungtemperatur T_c geschieht durch Joule'sche Wärme in dem Supraleiter der Leiterbahn selbst, wenn nach Kurzschluß die Stromdichte j über den kritischen Wert j_c des Supraleitermaterials ansteigt, wobei das Material auch unterhalb der Sprungtemperatur T_c bereits einen endlichen elektrischen Widerstand aufweist. Im begrenzenden Zustand oberhalb der Sprungtemperatur T_c fließt in dem Stromkreis ein Reststrom weiter, bis ein zusätzlicher mechanischer Trennschalter den Stromkreis völlig unterbricht.

Supraleitende Strombegrenzer mit bekannten metalloxydischen Hoch- T_c -Supraleitermaterialien, deren Sprungtemperatur T_c so hoch liegt, daß sie mit flüssigem Stickstoff von 77 K im supraleitenden Betriebszustand zu halten sind, zeigen eine schnelle Zunahme des elektrischen Widerstandes beim Überschreiten der kritischen Stromdichte j_c . Die Erwärmung in den normalleitenden Zustand und somit die Strombegrenzung geschieht dabei in verhältnismäßig kurzer Zeit, so daß der Spitzenwert des Kurzschlußstromes auf einen Bruchteil des unbegrenzten Stromes, etwa auf den 3- bis 10-fachen Nennstrom begrenzt werden kann. Der supraleitende Strompfad ist dabei in Kontakt mit einem Kühlmittel,

das ihn in verhältnismäßig kurzer Zeit nach einer Überschreitung der kritischen Stromdichte j_c in den supraleitenden Betriebszustand wieder zurückzuführen vermag.

Mit dem aus der eingangs genannten DE-A-Schrift zu entnehmenden Strombegrenzer sind entsprechende Anforderungen weitgehend zu erfüllen. Der bekannte Strombegrenzer weist ein Substrat aus einem elektrisch isolierenden Material wie z. B. aus Y-stabilisiertem ZrO_2 oder aus Glas auf, auf dem ein metalloxydisches Hoch- T_c -Supraleitermaterial (Abkürzung: HTS-Material) in Form einer zu mindestens einer Leiterbahn strukturierten Schicht aufgebracht ist. Die Leiterbahn kann z. B. als Mäander gestaltet sein (vgl. DE 41 19 984 A1). An ihren Enden ist die Leiterbahn mit weiteren Leitern zur Einspeisung bzw. Abnahme des zu bezugnehmenden Stromes kontaktierbar.

Es wurde festgestellt, daß in den Leiterbahnen dieser bekannten Strombegrenzer die räumliche Verteilung der kritischen Stromdichte j_c in dem Supraleitermaterial inhomogen ist. Die Folge davon ist, daß beim Einsatz des Strombegrenzers nicht die gesamte Leiterfläche gleichmäßig geschaltet und belastet wird. Daraus resultieren geringere maximale Schaltleistungen und/oder eine reduzierte Betriebssicherheit durch die Gefahr einer verfrühten lokalen Zerstörung der Leiterbahn aufgrund von unerwünschten Überhitzungen an einer Phasengrenze.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, den Strombegrenzer mit den eingangs genannten Merkmalen dahingehend auszugestalten, daß dieses Problem bezüglich einer inhomogenen räumlichen Verteilung der kritischen Stromdichte j_c gemildert ist. Weiterhin soll hierzu ein spezielles Verfahren zur Ausbildung eines entsprechenden Strombegrenzers angegeben werden.

Diese Aufgabe bezüglich des Strombegrenzers wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß in der Schicht der Leiterbahn in vorbestimmter Anordnung Aussparungen vorgesehen sind. Unter einer Aussparung der Leiterbahn wird dabei ein Bereich innerhalb der supraleitenden Schicht der Leiterbahn verstanden, der sich durch die gesamte Schichtdicke der Leiterbahn senkrecht hindurch erstreckt und selbst nicht-supraleitend ist. Eine entsprechende Aussparung kann dabei in Form eines Loches vorliegen oder durch einen entsprechenden, inselförmigen nicht-supraleitenden Bereich innerhalb der Schicht der Leiterbahn ausgebildet sein. Solche inselförmigen, nicht-supraleitenden Bereiche haben dieselbe Wirkung wie entsprechende Löcher.

Die Erfindung geht dabei von der Erkenntnis aus, daß derartige Aussparungen im Schaltbetrieb des Strombegrenzers die räumliche Verteilung des Eigenmagnetfeldes bzw. der abschirmenden Stromverteilung in der Leiterbahn verändern: Das Eindringen des magnetischen Flusses als mikroskopische Ursache eines Phasenüberganges findet folglich nicht nur primär am Seitenrand der Leiterbahn, sondern nun vermehrt auch in davon beabstandeten, weiter innen liegenden Bereichen der Leiterbahn statt. Die Schaltleistung des erfindungsgemäßen Strombegrenzers ist dementsprechend erhöht.

Besonders vorteilhaft ist eine zumindest weitgehend hexagonale oder stochastische Verteilung/Anordnung der einzelnen Aussparungen über die Oberfläche der Leiterbahn gesehen. Denn damit wird eine Ausbreitung des Phasenüberganges vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand auch in Längsrichtung forciert.

Ein vorteilhaftes Verfahren zur Herstellung eines erfindungsgemäßen Strombegrenzers ist dadurch gekennzeichnet, daß die Aussparungen nachträglich, insbesondere auf mechanischem oder chemischem Wege in die Schicht der Leiterbahn eingearbeitet werden. Ein derartiges Verfahren ist verhältnismäßig einfach durchzuführen. Als hierfür ein-

setzbares Mittel zum mechanischen Einarbeiten solcher Aussparungen ist insbesondere ein Laser geeignet, mit dem vorteilhaft scharf umrissene Bereiche definiert werden können.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Strombegrenzers sowie des Verfahrens zu seiner Herstellung gehen aus den jeweiligen abhängigen Unteransprüchen hervor.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnung noch weiter erläutert. Dabei zeigen jeweils schematisch

deren **Fig. 1** einen Querschnitt durch einen erfindungsgemäßen Strombegrenzer in Längsrichtung sowie

deren **Fig. 2 bis 4** jeweils als Aufsicht Anordnungsmöglichkeiten für Aussparungen in der Leiterbahn dieses Strombegrenzers.

Bei der Gestaltung des Strombegrenzers nach der Erfindung wird von an sich bekannten Ausführungsformen (vgl. DE 195 20 205 A oder DE 41 19 984 A1) ausgegangen. Der Strombegrenzer umfaßt deshalb mindestens einen auch als Substrat zubezeichnenden Trägerkörper, gegebenenfalls wenigstens eine darauf abgeschiedene, auch als Puffer- oder Haftschicht anzusehende Zwischenschicht sowie eine auf dieser Zwischenschicht aufgebraute Schicht aus einem HTS-Material. Für den Trägerkörper wird eine Platte oder ein Band oder eine sonstige Struktur aus einem metallischen oder elektrisch isolierenden Material mit einer an sich beliebigen Dicke und den für den jeweiligen Anwendungsfall geforderten Abmessungen verwendet. Als metallische Materialien kommen hier alle als Träger für HTS-Materialien bekannten elementaren Metalle oder Legierungen dieser Metalle in Frage. Beispielsweise sind Cu, Al oder Ag oder deren Legierungen mit einem der Elemente als Hauptkomponente oder Stähle wie spezielle NiMo-Legierungen, insbesondere mit dem Handelsnamen "Hastelloy", geeignet. Als nicht-metallisches, elektrisch isolierendes Material für den Trägerkörper kommen Keramiken wie mit Y stabilisiertes ZrO_2 (Abkürzung: "YSZ"), MgO, $SrTiO_3$ oder Glasmaterialien in Frage. Die Zwischenschicht kann insbesondere zur Förderung eines texturierten Wachstums des HTS-Material dienen. Deshalb sind beispielsweise als Zwischenschichtmaterial YSZ, CeO_2 , YSZ + CeO_2 (als Doppelschicht), Pr_6O_{11} , MgO, YSZ + Sn-dotiertes In_2O_3 (als Doppelschicht), $SrTiO_3$ oder $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ geeignet.

Als HTS-Materialien kommen alle bekannten metalloxidischen Hoch- T_c -Supraleitermaterialien in Frage, die insbesondere eine Kühltechnik mit flüssigem Stickstoff erlauben. Entsprechende Materialien sind beispielsweise $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ bzw. $RBa_2Cu_3O_{7-x}$ (mit R = Seltenes Erdmetall), $HgBa_2CaCu_2O_{6+x}$, $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ oder $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$. Die HTS-Schicht ist insbesondere zu der Leiterbahn strukturiert. Außerdem kann sie mit mindestens einer weiteren Schicht wie z. B. einer Schutzschicht oder einer als Shuntwiderstand dienenden, elektrisch leitenden Schicht aus Metall abgedeckt sein.

Einen entsprechenden Aufbau eines Strombegrenzers oder eines Teils von demselben zeigt **Fig. 1**. Dieser allgemein mit **2** bezeichnete Strombegrenzer enthält deshalb ein Substrat **3**, eine gegebenenfalls darauf angeordnete, in der Figur nur angedeutete Zwischenschicht **4** sowie eine darauf aufgebraute, aus einer HTS-Schicht gebildete Leiterbahn **5**. An ihren Enden ist die Leiterbahn mit Kontaktflächen **6** und **7** versehen, an denen weitere Leiter zum Einspeisen bzw. Abführen eines zu begrenzenden Stromes anzuschließen sind. Eine auf der Leiterbahn aufgebraute Schutz- oder Shuntwiderstandsschicht ist mit **8** bezeichnet.

Gemäß der Erfindung sollen in der Leiterbahn **5** Aussparungen **10** in vorbestimmter Anordnung vorgesehen sein, um so den Einfluß von Schwankungen der kritischen Strom-

dichte j_c auf das Schaltverhalten des Strombegrenzers zu reduzieren und einen homogeneren Phasenübergang zwischen der supraleitenden und der normalleitenden Phase (bzw. Zustand) zu gewährleisten. Die Anordnung der einzelnen Aussparungen ist dabei so vorzunehmen, daß weder die Stromtragfähigkeit der gesamten Leiterbahn noch ihre thermische oder mechanische Stabilität negativ beeinflusst werden.

Eine entsprechende Strukturierung der Leiterbahn **5** mit Aussparungen **10** in zumindest annähernd rechteckiger oder auch quadratischer Anordnung ist aus der Aufsicht der **Fig. 2** näher ersichtlich. Die Strukturierung kann dabei durch senkrecht in die Schicht eingebrachte, die Schicht vollständig durchdringende Löcher **10_i** realisiert sein. Solche Löcher lassen sich z. B. auf physikalischem, insbesondere mechanischem, oder auf chemischem Wege einarbeiten. Beispielsweise können die Löcher mittels eines Lasers erzeugt werden. Gemäß dem dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Löcher **10_i** als kreisförmig angenommen. Sie können aber auch eine andere Form ihrer Querschnittsfläche besitzen, z. B. in Form einer Ellipse, eines Rechtecks oder in der Gestalt eines Polygons.

Der (effektive) Durchmesser d zumindest der Mehrzahl der Löcher **10_i** sollte dabei vorteilhaft zwischen $10\ \mu\text{m}$ und $2\ \text{mm}$ liegen. Sind Löcher mit von der Kreisform abweichender Gestalt vorgesehen, so soll die von ihnen jeweils eingenommene Fläche der eines Kreises mit einem Durchmesser in der genannten Größenordnung entsprechen. Demgegenüber wird für den mittleren Abstand a zwischen zwei benachbarten Löchern vorteilhaft ein Wert zwischen $a = 2 \cdot d$ und $a = 100 \cdot d$ gewählt. Darüber hinaus sollte ein entsprechender Abstand auch zwischen den randnahen Löchern und dem jeweiligen Seitenrand der Leiterbahn eingehalten werden.

Gemäß einem konkreten Ausführungsbeispiel für eine Verteilung der Löcher **10_i** entsprechend einer quadratischen oder rechteckigen Anordnung in einem kubischen Gitter beträgt der Abstand a_x zwischen zwei Löchern **10_i** in x -Richtung (= Längsrichtung) der Leiterbahn $800\ \mu\text{m}$, der Abstand a_y in y -Richtung (= Querrichtung dazu) $500\ \mu\text{m}$, so daß sich ein mittlerer Abstand von $796,7\ \mu\text{m}$ ergibt. Der Durchmesser d der Lochfläche beträgt dabei $200\ \mu\text{m}$.

Fig. 3 zeigt eine Verteilung von Löchern **10_i** entsprechend einer zumindest annähernten Anordnung in einem hexagonalen Gitter. Die Gitterkonstante a bestimmt dabei den mittleren Abstand zwischen benachbarten Löchern. Als Ausführungsbeispiel sind hier ein Lochdurchmesser $d = 110\ \mu\text{m}$ und eine Gitterkonstante $a = 212\ \mu\text{m}$ angenommen.

Neben solchen zumindest weitgehend regelmäßigen Verteilungen der Löcher **10_i** gemäß den **Fig. 2** und **3** sind auch zumindest weitgehend stochastische Lochanordnungen möglich. **Fig. 4** zeigt ein entsprechendes Ausführungsbeispiel, bei dem der mittlere Abstand a zwischen benachbarten Löchern **10_i** etwa $250\ \mu\text{m}$ beträgt bei einem Lochdurchmesser d von etwa $100\ \mu\text{m}$.

Gemäß den dargestellten Ausführungsbeispielen wurden als Aussparungen durch die Schicht der Leiterbahn hindurchgehende Löcher angenommen. Diese Löcher werden zweckmäßig nachträglich in die Leiterbahn eingearbeitet oder zugleich mit der Strukturierung der Leiterbahn aus einer HTS-Schicht ausgebildet. Da es jedoch bei dem erfindungsgemäßen Strombegrenzer nicht auf die Lochform, sondern nur auf die Veränderung der räumlichen Verteilung des Eigenmagnetfeldes bzw. der abschirmenden Stromverteilung der Leiterbahn anordnung im Schaltbetrieb ankommt, wird eine entsprechende Funktion auch durch den Löchern **10_i** entsprechende Bereiche der Leiterbahn erfüllt, die von vornherein nicht-supraleitend sind oder nachträglich so gemacht sind. So können beispielsweise in einer HTS-

Schicht einer Leiterbahn nachträglich den Löchern entsprechende Bereiche quasi inselartig geschaffen werden, in denen die supraleitenden Eigenschaften wieder zerstört worden sind. Dies kann in bekannter Weise wie z. B. durch einen Laserstrahl erfolgen.

5

Patentansprüche

1. Resistiver Strombegrenzer mit mindestens einer für einen vorgegebenen Nennstrom ausgelegten schichtartigen Leiterbahn, die ein metalloxidisches Hoch-T_c-Supraleitermaterial enthält, auf einem Substrat angeordnet ist und an ihren Enden kontaktierbar ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß in der Schicht der Leiterbahn (5) in vorbestimmter Anordnung Aussparungen (10, 10_i) vorgesehen sind. 10
2. Strombegrenzer nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch nicht-supraleitende Bereiche als Aussparungen in der Schicht der Leiterbahn (5).
3. Strombegrenzer nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch eine zumindest weitgehend regelmäßige Verteilung der Aussparungen (10, 10_i) in der Leiterbahn (5). 20
4. Strombegrenzer nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Verteilung der Aussparungen (10_i) der einer Anordnung in einem rechteckigen oder quadratischen oder hexagonalen Gitter entspricht. 25
5. Strombegrenzer nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch eine zumindest weitgehend stochastische Verteilung der Aussparungen (10_i) in der Leiterbahn (5). 30
6. Strombegrenzer nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest die Mehrzahl der Aussparungen (10, 10_i) jeweils eine Fläche der Leiterbahn (5) einnehmen, die der eines Kreises mit einem Durchmesser d zwischen 10 µm und 2 mm entspricht. 35
7. Strombegrenzer nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der mittlere Abstand a zwischen zwei benachbarten Aussparungen (10, 10_i) und/oder von einem Seitenrand der Leiterbahn (5) zwischen $a = 2 \cdot d$ und $a = 100 \cdot d$ liegt. 40
8. Strombegrenzer nach einem der Ansprüche 1 bis 7, gekennzeichnet durch Aussparungen (10, 10_i) mit Querschnittsflächen in Form von Kreisen oder Rechtecken oder von Polygonen. 45
9. Verfahren zur Herstellung eines Strombegrenzers nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Aussparungen (10, 10_i) nachträglich in die Schicht der Leiterbahn (5) eingearbeitet werden.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Aussparungen (10, 10_i) auf physikalischem, insbesondere mechanischem Wege oder auf chemischem Wege in die Schicht der Leiterbahn (5) eingearbeitet werden. 50
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß zur Einarbeitung der Aussparungen (10, 10_i) auf physikalischem Wege ein Laser verwendet wird. 55

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

60

65

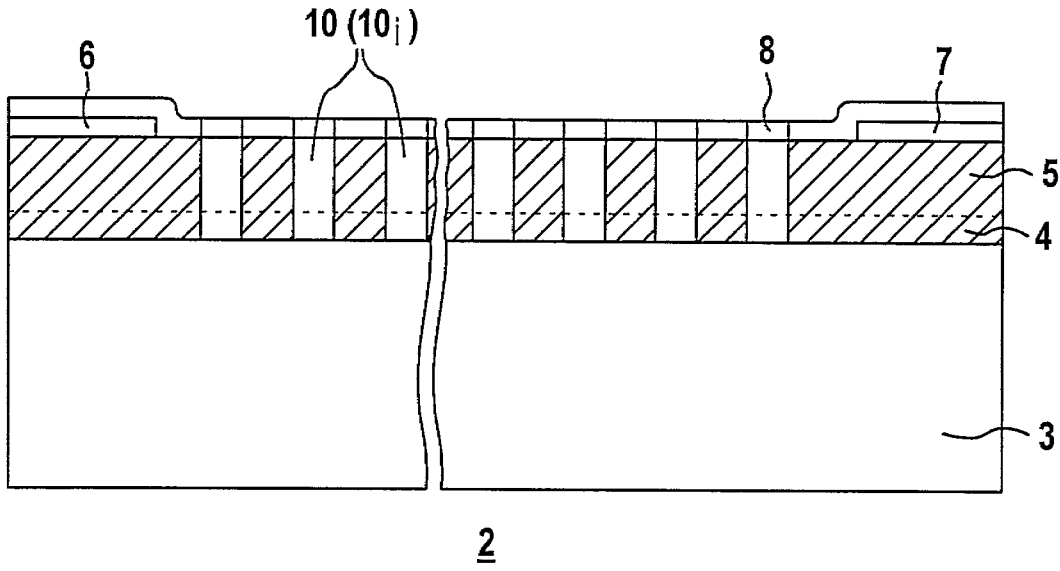


FIG 1

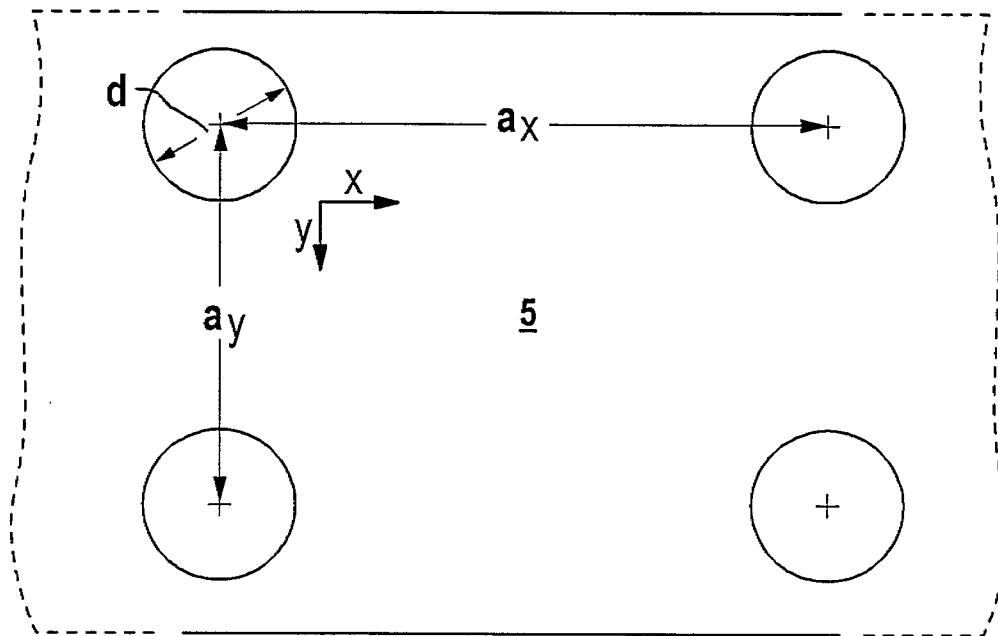


FIG 2



FIG 3

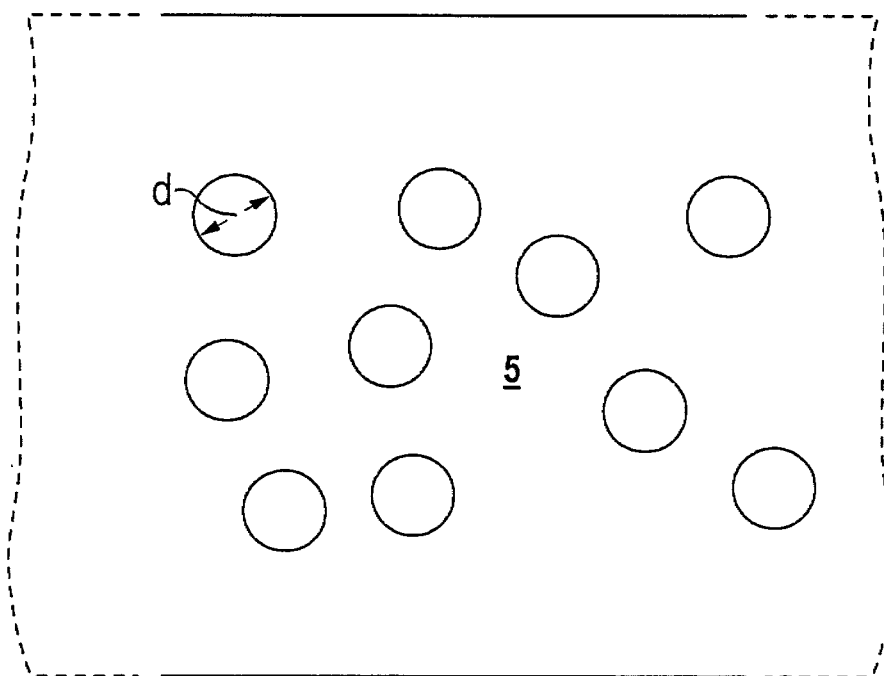


FIG 4