



(10) **DE 10 2021 104 585 A1** 2022.08.25

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 104 585.1**  
(22) Anmeldetag: **25.02.2021**  
(43) Offenlegungstag: **25.08.2022**

(51) Int Cl.: **B82B 3/00** (2006.01)  
**B81C 1/00** (2006.01)  
**H01R 3/08** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 26129  
Oldenburg, DE**

(74) Vertreter:  
**Tappe, Udo, Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., 28195 Bremen,  
DE**

(72) Erfinder:  
**von Kleist-Retzow, Fabian, 26121 Oldenburg, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:  
**US 2016 / 0 317 992 A1**

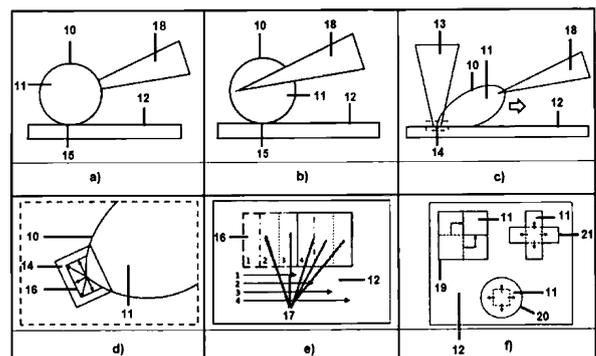
**KLEIST-RETZOW, Fabian T. von ; HAENSSLER  
, Olaf C. ; FATIKOW, Sergej: Manipulation of  
liquid metal inside an SEM by taking advantage  
of electromigration. In: JOURNAL OF  
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, Vol.  
28, 2019, No. 1, S. 88-94. - ISSN 1057-7157 (P);  
1941-0158 (E). DOI: 10.1109/  
JMEMS.2018.2878320. URL: [https://ieeexplore.  
ieee.org/stamp/stamp.jsp?  
tp=&arnumber=8525428](https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8525428) [abgerufen am 2021-07-  
21]**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Benetzung einer Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall**

(57) Zusammenfassung: Beschrieben werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Benetzung einer Substratoberfläche (12) mit einem Flüssigmetall (11). Zur Benetzung der Substratoberfläche (12) wird ein Flüssigmetall (11) bereitgestellt und ein aus dem Flüssigmetall (11) gebildeter Formkörper (10) auf die Substratoberfläche (12) aufgebracht. Die beschriebene technische Lösung zeichnet sich dadurch aus, dass der auf die Substratoberfläche (12) aufgebrachte Formkörper (10) wenigstens bereichsweise derart relativ zur Substratoberfläche (12) bewegt wird, dass zumindest ein Oberflächenbereich (14), der an eine Kontaktstelle (15), an der sich der Formkörper (10) und die Substratoberfläche (12) berühren, angrenzt, zur Aufbringung wenigstens eines Ionenstrahls (13) zugänglich wird und dass der Ionenstrahl (13) zumindest in dem Oberflächenbereich (14) auf den Formkörper (10) aufgebracht und hierdurch zumindest abschnittsweise ein Aufbrechen einer Oberflächenstruktur des Formkörpers (10) und eine zur wenigstens teilweisen Benetzung der Substratoberfläche (12) mit dem Flüssigmetall (11) führende Verformung des Formkörpers (10) bewirkt wird.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Benetzung einer Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall sowie ein Substrat, das über eine derart mit einem Flüssigmetall benetzte Substratoberfläche verfügt. Zur Benetzung der Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall wird zunächst aus dem Flüssigmetall ein Formkörper gebildet, der dann auf die Substratoberfläche aufgebracht wird.

**[0002]** Aufgrund der immer weiter fortschreitenden Entwicklung auf dem Gebiet der Elektronik werden die jeweils zur Anwendung kommenden Schaltungen mit ihren Komponenten, wie etwa Leiterbahnen, Schalter oder Kontaktstellen, immer kleiner. Insbesondere besteht ein großer Bedarf an technischen Lösungen, die die Bereitstellung von zuverlässigen, qualitativ hochwertigen Kontaktstellen auch im Nanometerbereich ermöglichen. So sind bislang für diesen Größenbereich zwar bereits Kontaktstellen bekannt, bei denen eine feste Verbindung zwischen den zu verbindenden Komponenten, also eine fest-fest-Kontaktierung, erfolgt, allerdings besteht bei derartigen Verbindungen stets die Gefahr einer Beschädigung oder eines Verschleißes der verbundenen Strukturen. Ein Problem kann sich vor allem daraus ergeben, dass ein Verschleiß der entsprechenden Anschlussstrukturen zu einer Veränderung der elektrischen Parameter der Kontaktstelle führt. Entsprechende Veränderungen der elektrischen Eigenschaften einer Kontaktstelle wurden bislang mit Hilfe einer hochgenauen Kalibration mathematisch aus dem jeweils übertragenen Signal, insbesondere einem Messsignal herausgerechnet, und sind daher von den für das übertragene Signal ursächlichen Parametern differenzierbar. Nichtsdestotrotz wird für folgende Signalübertragungen die ursprüngliche Kalibration berücksichtigt, sodass sich bei einem an der Kontaktstelle auftretenden Verschleiß Fehler bei der Signalübertragung ergeben. Aus diesem Grund besteht ein generelles Interesse an der Realisierung einer Kontaktstelle für besonders kleine Elektronikstrukturen, insbesondere im Nanometerbereich, die einem geringeren Verschleiß unterliegen. Allerdings fehlen bislang geeignete Manipulationstechniken, um auch in diesem Größenbereich Kontaktstellen mit der erforderlichen Güte und Genauigkeit herzustellen.

**[0003]** Grundsätzlich kommen für die Herstellung derartiger Kontaktstellen vor allem Flüssigmetalle infrage, wobei es sich im Sinne der folgenden Beschreibung bei einem Flüssigmetall um ein Metall oder eine Metalllegierung in flüssigem Zustand handelt. Hierbei stellt es allerdings regelmäßig, vor allem aufgrund der vergleichsweise großen Oberflächenspannung, ein Problem dar, Flüssigmetalle auf

geeignete Weise auf eine Substratoberfläche aufzubringen.

**[0004]** Generell sind drei Arten von Metalllegierungen bekannt, die bei Raumtemperatur flüssig sind. Zu diesen Metalllegierungen zählen Legierungen aus Alkalimetallen, beispielsweise Legierungen von Natrium und Kalium, Legierungen, die Gallium enthalten, und Legierungen, in denen Quecksilber enthalten ist. Da an offener Atmosphäre ausschließlich Gallium und dessen Legierungen unter bestimmten Voraussetzungen genutzt werden können, kommen in der Hauptsache Gallium enthaltende Legierungen für die Verwendung als Flüssigmetalle infrage. Bekannt ist vor allem eine Gallium enthaltende Metalllegierung, die unter der Marke Galinstan® vor allem für Thermometer eingesetzt wird. Bei dieser Legierung handelt es sich um eine eutektische Metalllegierung aus Gallium, Indium und Zinn, die bei Raumtemperatur flüssig ist und bei einer Temperatur von etwa  $-17\text{ °C}$  in den festen Zustand übergeht.

**[0005]** Im Übrigen ist aus der Veröffentlichung „von Kleist-Retzow, F. T.; Hanssler, O. C.; Fatikow, S.; Manipulation auf Liquid Metal inside a SEM by taking Advantage of Electromigration; J. Microelectromech. Syst.; 2018; DOI: 10.1109/JMEMS.2018.2878320“ ein Verfahren bekannt, um aus einem Flüssigmetall einen kugelförmigen Formkörper mit einem gewünschten Durchmesser herzustellen. Die unter Ausnutzung des Effekts der Elektromigration hergestellten Formkörper werden beispielsweise auf dem Gebiet der Mikroelektronik und Mikrorobotik eingesetzt. Zur Erzeugung der gewünschten Formkörper kommen als Manipulatorelemente bedarfsgerecht ausgewählte Spitzen zum Einsatz, wobei während der Herstellung der Formkörper ein direkter Zusammenhang zwischen dem die Elektromigration verursachenden Stromfluss und dem Massenfluss des Flüssigmetalls zu beobachten ist.

**[0006]** Nach wie vor stellt es allerdings eine bedeutende Herausforderung dar, ein Flüssigmetall derart auf eine Substratoberfläche aufzubringen, dass durch eine gezielte Benetzung der Substratoberfläche eine gewünschte Struktur, beispielsweise ein Flüssigkontaktpad für eine elektronische Schaltung, herstellbar ist. Da die bislang aus einem Flüssigmetall hergestellten Formkörper über eine vergleichsweise große Oberflächenspannung verfügen und eine Kugelform aufweisen, bildet sich zwischen den Formkörpern und der Substratoberfläche ein großer Kontaktwinkel aus und eine flächige Benetzung der Oberfläche ist zumindest nahezu ausgeschlossen. Gerade um die für elektronische Schaltungen benötigten Kontaktstellen herstellen zu können, wäre die Möglichkeit einer flächigen Benetzung von Substratoberfläche mit Flüssigmetall wünschenswert.

**[0007]** Ausgehend von den aus dem Stand der Technik bekannten technischen Lösungen sowie den zuvor geschilderten Problemen liegt der Erfindung die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Benetzung einer Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall anzugeben, durch die zumindest Teilbereiche einer Substratoberfläche über einen gezielt auswählbaren Flächenbereich mit einem Flüssigmetall benetzbar sind. Der zu benetzende Flächenbereich sollte sich hierbei hinsichtlich seiner Form deutlich von einer sich üblicherweise zwischen der Substratoberfläche und einem Formkörper aus Flüssigmetall ausbildenden, punktuellen Kontaktstelle unterscheiden. Mithilfe der anzugebenden technischen Lösungen soll es möglich sein, präzise unterschiedliche Elemente für elektronische Schaltungen, auch im Nanometerbereich, herzustellen, die im Betrieb einem vergleichsweise geringen Verschleiß unterliegen. Im Weiteren sollte sichergestellt sein, dass unterschiedliche Elemente einer elektronischen Schaltung, wie etwa Leiterbahnen, Kontaktstellen, Transistoren oder Antennen, zuverlässig, präzise und reproduzierbar herstellbar sind. Die anzugebende Vorrichtung sowie das Verfahren sollten ferner die Nutzung bekannter Flüssigmetalle, insbesondere von Flüssigmetalllegierungen, die bei Raumtemperatur flüssig sind, ermöglichen.

**[0008]** Die zuvor beschriebene Aufgabe wird mit einem Verfahren gemäß Anspruch 1 sowie einer Vorrichtung nach Anspruch 11 gelöst. Ein Substrat, das die der Erfindung zu Grunde liegende Aufgabe löst, ist in Anspruch 12 angegeben. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche und werden in der folgenden Beschreibung unter teilweiser Bezugnahme auf Figuren näher erläutert.

**[0009]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Benetzung einer Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall, bei dem ein Flüssigmetall bereitgestellt und ein wenigstens teilweise aus dem Flüssigmetall gebildeter Formkörper auf die Substratoberfläche aufgebracht wird. Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass zumindest zeitweise der auf die Substratoberfläche aufgebrachte Formkörper wenigstens bereichsweise derart relativ zur Substratoberfläche bewegt wird, dass zumindest ein Oberflächenbereich, der an eine Kontaktstelle, an der sich der Formkörper und die Substratoberfläche berühren, angrenzt, zur Aufbringung wenigstens eines Ionenstrahls zugänglich wird und dass der Ionenstrahl zumindest in dem Oberflächenbereich auf den Formkörper aufgebracht und hierdurch zumindest abschnittsweise ein Aufbrechen einer Oberflächenstruktur des Formkörpers und eine zur wenigstens teilweisen Benetzung der Substratoberfläche mit dem Flüssigmetall führende Verformung des Formkörpers bewirkt wird.

**[0010]** Bei einem Ionenstrahl im Sinne der Erfindung muss es sich dabei nicht um einen fokussierten Ionenstrahl handeln. Es können auch mittels Masken oder auf andere Weise gezielt Bereiche mit Ionen bestrahlt werden.

**[0011]** Vorzugsweise wird somit ein von einer Ionenfeinstrahlanlage oder einer Ionenstrahlkanone erzeugter Ionenstrahl wenigstens bereichsweise auf die Oberfläche des Formkörpers aufgebracht, sodass die Oberflächenstruktur des aus Flüssigmetall gebildeten Formkörpers aufgebrochen, ein Massenstrom des Flüssigmetalls bewirkt und zumindest ein Teil der Substratoberfläche mit dem Flüssigmetall benetzt wird. Der Bereich der Substratoberfläche, der hierbei von dem Flüssigmetall benetzt wird, ist größer als die ursprünglich zwischen dem Formkörper und der Substratoberfläche gebildete Kontaktstelle.

**[0012]** Um eine geeignete Bestrahlung der Oberfläche des Formkörpers mit dem Ionenstrahl zu erreichen wird der Formkörper zunächst derart relativ zur Substratoberfläche bewegt, dass ein Oberflächenbereich, der zumindest teilweise auf der Oberfläche des Formkörpers liegt, für eine Bestrahlung mit dem Ionenstrahl zugänglich ist. In Abhängigkeit der Bewegung des Formkörpers relativ zur Substratoberfläche und/oder der Dauer der Bestrahlung mit einem Ionenstrahl lässt sich die Größe und die Form des mit Flüssigmetall benetzten Teilbereichs der Substratoberfläche gezielt herstellen.

**[0013]** Zur Erzeugung eines geeigneten, fokussierten Ionenstrahls (Focused Ion Beam) wird eine Ionenfeinstrahlanlage oder Ionenstrahlkanone verwendet, die bevorzugt eine Flüssigmetallionenquelle mit flüssigem Indium oder Gallium aufweist. Das Flüssigmetall, vorzugsweise flüssiges Gallium, wird mittels einer Wolframnadel bis zum Schmelzpunkt erhitzt und der Ionenstrahl in einem Feldemissionsprozess erzeugt. Der so erzeugte Ionenstrahl wird mithilfe elektrischer und magnetischer Linsen in dem für die Bestrahlung vorgesehenen Oberflächenbereich fokussiert und zeilenweise über den Oberflächenbereich geführt. Die Beschleunigung der Ionen erfolgt vorzugsweise mit einer Spannung zwischen 80 und 120 kV, besonders bevorzugt mit einer Spannung von etwa 100 kV.

**[0014]** Auf vorteilhafte Weise wird das Verfahren zur Benetzung einer Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall mithilfe eines hochauflösenden Rasterelektronenmikroskops (REM) überwacht. Vor, während und/oder nach der Bestrahlung des Oberflächenbereichs mit einem Ionenstrahl wird in diesem Fall auch ein Elektronenstrahl wenigstens zeitweise auf den Oberflächenbereich gerichtet.

**[0015]** Gemäß einer besonderen Ausführungsform ist vorgesehen, dass mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens speziell geformte Teilbereiche einer Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall benetzt werden. Auf diese Weise lassen sich gezielt leitfähige Strukturen mit spezieller Grundfläche, zum Beispiel in Form eines Kreises, eines Rechtecks, eines Quadrats oder eines Kreuzes und/oder spezielle Strukturelemente, wie etwa Leiterbahnen, Kontaktstellen und elektronische Bauelemente, beispielsweise Transistoren oder Antennen, erzeugen. Um die gewünschte Struktur auf der Substratoberfläche zu erzeugen, wird in einem ersten Schritt mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ein erster Teilbereich der Substratoberfläche mit dem Flüssigmetall benetzt und in wenigstens einem auf den ersten Schritt folgenden weiteren Schritt der Formkörper nochmals relativ zur Substratoberfläche bewegt und der Ionenstrahl auf einen noch nicht bestrahlten Oberflächenbereich, der zumindest teilweise einen Teilbereich der Oberfläche des Formkörpers aufweist, gelenkt, sodass die Oberflächenstruktur des Formkörpers zumindest abschnittsweise aufgebrochen und hierdurch wenigstens ein weiterer Teilbereich der Substratoberfläche mit Flüssigmetall benetzt wird. Gemäß dieser speziellen Weiterbildung der Erfindung wird die Bestrahlung des Oberflächenbereichs somit fortgesetzt, bis die gewünschte Struktur fertiggestellt ist. Die Benetzung der Substratoberfläche erfolgt vorzugsweise derart, dass auf der Substratoberfläche eine weitgehend geschlossene Struktur erzeugt wird, sodass die in nacheinander durchgeführten Verfahrensschritten erzeugten Teile einer auf die Substratoberfläche aufgetragenen Flüssigmetallstruktur zumindest abschnittsweise aneinandergrenzen.

**[0016]** Aus diesem Grund wird auf vorteilhafte Weise die wenigstens zeitweise durchgeführte Bewegung des Formkörpers und die Bestrahlung der Oberfläche des Formkörpers derart ausgeführt, dass der erste und der wenigstens eine weitere Teilbereich der Substratoberfläche zumindest abschnittsweise verbunden sind.

**[0017]** Gemäß dieser Ausgestaltung der Erfindung lassen sich somit gezielt die gewünschten Bereiche der Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall benetzen, sodass elektrisch leitfähige Strukturen, insbesondere für eine Kontaktierung vorgesehene Strukturen, unterschiedlicher Form auch im Nanometerbereich herstellbar sind.

**[0018]** Vorteilhaft ist es, wenn der Vorgang der Benetzung der Substratoberfläche überwacht wird. Aufgrund einer derartigen technischen Lösung kann die Qualität einer Benetzung der Substratoberfläche überwacht und/oder die Benetzung gesteuert oder sogar geregelt erfolgen. Vorzugsweise wird daher wenigstens zeitweise während der Bestrahlung der

Oberfläche des Formkörpers mit einem Ionenstrahl auch ein Elektronenstrahl zur Durchführung einer Rasterelektronenmikroskopuntersuchung in den Oberflächenbereich gelenkt. Auf besonders bevorzugte Weise werden der Ionenstrahl und der Elektronenstrahl derart ausgerichtet, dass sich diese wenigstens zeitweise im Oberflächenbereich treffen, wobei diese im Weiteren vorzugsweise einen Winkel von zumindest nahezu 55° einschließen.

**[0019]** Gemäß einer weiteren speziellen Ausführungsform der Erfindung wird zumindest in einem Teilbereich der Substratoberfläche, der zu Benetzung mit einem Flüssigmetall bereitgestellt wird, ein Metall angeordnet. Vorzugsweise handelt es sich bei dem verwendeten Metall, das wenigstens bereichsweise mit einem Flüssigmetall benetzt wird, um Kupfer, Gold, Titan und/ oder Platin.

**[0020]** Weiterhin ist auf besondere Weise vorgesehen, dass als Flüssigmetall bevorzugt eine Metalllegierung, die Gallium, Indium und Zinn enthält, verwendet wird. In diesem Zusammenhang wird als Flüssigmetall bevorzugt eine Metalllegierung verwendet, die 65 bis 95 Gew.% Gallium, 5 bis 22 Gew.% Indium und 0 bis 11 Gew.% Zinn aufweist. Gemäß einer ganz speziellen Weiterbildung der Erfindung wird als Flüssigmetall eine Metalllegierung verwendet, die 68 bis 69 Gew.% Gallium, 21 bis 22 Gew.% Indium und 9,5 bis 10,5 Gew.% Zinn enthält.

**[0021]** Gemäß einer speziellen Weiterbildung der Erfindung ist vorgesehen, dass der Formkörper unter Ausnutzung des Effekts der Elektromigration, die auf der durch einen elektrischen Strom verursachten Bewegung von Ionen bedingten Materialtransport beruht, erzeugt wird. Vorzugsweise wird auf diese Weise ein tropfen- oder kugelförmiger Formkörper hergestellt, der daraufhin auf der Substratoberfläche abgelegt und mit einem Ionenstrahl derart bestrahlt wird, dass hierdurch der für die Benetzung der Substratoberfläche erforderliche Massenstrom des Flüssigmetalls erzeugt wird.

**[0022]** Die Bewegung bzw. Manipulation des Formkörpers relativ zur Substratoberfläche erfolgt vorzugsweise wenigstens zeitweise mittels einer Drahtspitze. Bevorzugt wird die Drahtspitze, insbesondere in einem für die Kontaktierung des Formkörpers vorgesehenen Bereich, angeätzt. Hierdurch wird sowohl eine Kontaktierung als auch ein Entfernen der Drahtspitze vom Formkörper auf bevorzugte Weise ermöglicht. Von besonderem Vorteil ist es, wenn als Drahtspitze eine Wolframdrahtspitze verwendet wird, um den Formkörper nach Aufbringung auf die Substratoberfläche zumindest zeitweise auf geeignete Weise zu bewegen bzw. zu manipulieren.

**[0023]** Neben einem Verfahren betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Benetzung einer Substratober-

fläche mit einem Flüssigmetall, die wenigstens eine Ionenstrahlquelle aufweist und eingerichtet ist, das erfindungsgemäße Verfahren gemäß zumindest einer der zuvor beschriebenen Ausführungsformen auszuführen. Bevorzugt wird als Ionenstrahlquelle eine Ionenfeinstrahlanlage mit einer Flüssiggalliumquelle verwendet.

**[0024]** Im Weiteren verfügt die Vorrichtung zur gezielten Bewegung des Formkörpers relativ zur Substratoberfläche über ein Manipulationselement, insbesondere in Form einer Drahtspitze, die zumindest zeitweise derart gegen den und/oder mit dem Formkörper bewegbar ist, sodass sich dieser bewegt und/oder verformt und hierdurch ein Oberflächenbereich der zumindest an eine Kontaktstelle, an der sich der Formkörper und die Substratoberfläche berühren, angrenzt, für die Bestrahlung mit einem Ionenstrahl zugänglich wird.

**[0025]** Aufgrund der Bestrahlung des Oberflächenbereiches mit einem Ionenstrahl wird die Oberflächenstruktur des Körpers aufgebrochen und ein Massenfluss des Flüssigmetalls bewirkt, der zu einer Benetzung der Substratoberfläche mit dem Flüssigmetall führt. Durch die geeignete Bewegung des Formkörpers vor oder bevorzugt vor und während der Bestrahlung mit einem Ionenstrahl können gezielt mit einem Flüssigmetall benetzte Teilbereiche der Substratoberfläche hergestellt werden, die hinsichtlich ihrer Form bedarfsgerecht ausgeführt sein können.

**[0026]** Auf vorteilhafte Weise verfügt die Vorrichtung über eine geeignete Steuerung, mit der eine automatisierte Aufbringung von Flüssigmetall auf eine Substratoberfläche ermöglicht wird. Im Weiteren ist es von Vorteil, wenn die Vorrichtung über ein Rasterelektronenmikroskop (REM) verfügt, mit dem zumindest zeitweise ein Elektronenstrahl auf den Formkörper, den zu benetzenden Oberflächenbereich der Substratoberfläche und/oder den benetzten Oberflächenbereich der Substratoberfläche lenkbar ist. Vorzugsweise wird ein Elektronenstrahl zur Oberflächenuntersuchung wenigstens zeitweise während der Bestrahlung mit dem Ionenstrahl in den Oberflächenbereich gelenkt. Auf diese Weise lässt sich der bestrahlte Oberflächenbereich und/oder die auf diesen aufgebrachte Flüssigmetallstruktur überwachen und weiterhin bevorzugt ein geregelter Prozess zur Benetzung der Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall realisieren. Es ist aber auch möglich, die Ionenstrahlkanone, insbesondere FIB, selbst zur Überwachung zu nutzen. Dies macht den Aufbau besonders einfach.

**[0027]** Im Übrigen bezieht sich die Erfindung auch auf ein Substrat mit einer Substratoberfläche, die wenigstens teilweise mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens und/oder einer erfindungsgemäßen Vor-

richtung nach wenigstens einer der zuvor beschriebenen Ausführungsformen mit wenigstens einem Flüssigmetall benetzt wurde. Das Substrat verfügt auf vorteilhafte Weise über eine Flüssigmetallstruktur, die eine elektrische Komponente eines elektronischen Schaltkreises bildet. Gemäß einer ganz speziellen Ausgestaltung der Erfindung verfügt ein Substrat über eine Flüssigmetallstruktur auf seiner Oberfläche über die eine fest-flüssig-fest Kontaktstelle hergestellt oder herstellbar ist.

**[0028]** Gemäß einer besonderen Ausgestaltung der Erfindung verfügt die auf die Substratoberfläche des Substrats aufgebrachte Flüssigmetallstruktur über eine kreisförmig, ovale, quadratische, rechteckige und/oder kreuzförmige Grundfläche.

**[0029]** Wesentlich für ein erfindungsgemäßes Substrat, bei dem sich beispielsweise um die für die Aufnahme einer elektronischen Schaltung vorgesehene Leiterplatte mit einer auf der Substratoberfläche angeordneten Metallisierung handeln kann, ist, dass auf der Substratoberfläche eine aus Flüssigmetall gebildete Struktur mit einer von der Punktform abweichenden Grundfläche vorgesehen ist, die für eine Kontaktierung geeignet oder den Teil eines elektrisch leitfähigen Kontakts bildet.

**[0030]** Im Folgenden wird die Erfindung ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens anhand spezieller Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die Figuren näher erläutert. Dabei zeigen:

**Fig. 1** Schematische Darstellung der Prozessschritte des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Benetzung einer Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall;

**Fig. 2** REM-Aufnahmen während der Durchführung einzelner Prozessschritte bei der Herstellung einer Flüssigmetallstruktur auf einer Substratoberfläche;

**Fig. 3** REM-Aufnahme einer Flüssigmetallstruktur mit kreuzförmiger Grundfläche auf einer Substratoberfläche sowie

**Fig. 4** REM-Aufnahme eines kugelförmigen Formkörpers aus Flüssigmetall in einem Zustand, in dem ein an die Kontaktstelle zwischen Formkörper und Substratoberfläche angrenzender Oberflächenbereich zur Bestrahlung mit einem Ionenstrahl freigelegt ist.

**[0031]** Fig. 1 zeigt in einer schematischen Darstellung die einzelnen Prozessschritte des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Benetzung einer Substratoberfläche 12 mit einem Flüssigmetall 11. Mit Hilfe des Verfahrens lässt sich insbesondere ein Flüssigmetall 11 in Form einer Metalllegierung, die Gallium, Indium und Zinn enthält, auf eine Metalloberfläche,

die Kupfer, Gold, Titan und/oder Platin aufweist, aufbringen, wobei selbst in einem Nanometerbereich gezielt die gewünschte Flüssigkeitsmetallstruktur auf der Substratoberfläche 12 herstellbar ist.

**[0032]** In einem ersten in **Fig. 1 a)** gezeigten Verfahrensschritt wird ein kugelförmiger Formkörper 10 aus dem Flüssigmetall 11 gebildet und mithilfe eines Manipulationselements 18, insbesondere einer Drahtspitze aus Wolfram, auf der zu benetzenden Substratoberfläche 12 abgelegt. Der kugelförmige Formkörper 10 wurde mit einem Verfahren unter Ausnutzung des Effekts der Elektromigration, wie es beispielsweise in der Veröffentlichung „von Kleist-Retzow, F. T.; Hanssler, O. C.; Fatikow, S.; Manipulation auf Liquid Metal inside a SEM by taking Advantage of Electromigration; J. Microelectromech. Syst.; 2018; DOI: 10.1 109/JMEMS.2018.2878320“ beschrieben wird, hergestellt.

**[0033]** Im Anschluss wird das Manipulationselement 18 von dem kugelförmigen Formkörper 10 so weit entfernt, dass kein Kontakt zwischen dem kugelförmigen Formkörper 10 und dem Manipulationselement 18 besteht. In einem nächsten, in **Fig. 1 b)** gezeigten Verfahrensschritt wird das Manipulationselement 18 erneut an der Seite des kugelförmigen Formkörpers 10 kontaktiert und eine Bewegung des Manipulationselementes 18 durchgeführt, sodass der kugelförmige Formkörper 10 gemäß der in **Fig. 1 c)** gezeigten Darstellung leicht in Pfeilrichtung gezogen wird. Aufgrund dieser Bewegung des Manipulationselementes 18 und der daraus resultierenden Bewegung des Formkörpers 10 relativ zur Substratoberfläche 12 ergibt sich die in **Fig. 1 c)** dargestellte Verformung des Formkörpers 10. Hierbei wurde der Formkörper 10 aus der Kugelform in eine ovale Form überführt, sodass ein Oberflächenbereich 14, der unmittelbar an die Kontaktstelle 15 angrenzt, an der sich der Formkörper 10 und die Substratoberfläche 12 berühren, derart freigelegt wurde, dass ein Ionenstrahl 13 in diesen Oberflächenbereich 14 eingebracht werden kann. Der für die Bestrahlung vorgesehene Ionenstrahl 13 wird bevorzugt mit einer Feinstrahlanlage, die eine Flüssiggalliumquelle aufweist, erzeugt und auf den Oberflächenbereich 14 gelenkt.

**[0034]** In **Fig. 1 d)** ist ein Zustand dargestellt, in dem die Oberflächenstruktur des Formkörpers 10 im Oberflächenbereich 14 aufgrund der Bestrahlung mit dem Ionenstrahl 13 aufgebrochen wird und ein Massenfluss des Flüssigmetalls 11 in den verschiedenen durch Pfeile dargestellten Richtungen einsetzt, sodass ein im Vergleich zur punktförmigen Kontaktstelle 15 großer Teilbereich 16 der Substratoberfläche 12 mit Flüssigmetall 11 benetzt wird.

**[0035]** Im Weiteren zeigt **Fig. 1 e)** einen Betriebszustand, bei dem die Bestrahlung des Oberflächenbe-

reichs 14 mit einem Ionenstrahl 13 derart fortgesetzt wird, dass gezielt ein weiterer Teilbereich 17 der Substratoberfläche 12 mit dem Flüssigmetall 11 benetzt wird. Die Bestrahlung des Oberflächenbereiches 14 mit dem Ionenstrahl 13 wird so lange fortgesetzt, bis nur noch ein frischbenetzter Teilbereich der Substratoberfläche 12 bestrahlt wird. Sobald die gewünschte Flüssigmetallstruktur auf der Substratoberfläche 12 erzeugt worden ist, wird die Ionenbestrahlung eingestellt und das Manipulationselement 18 vom Formkörper 10 entfernt.

**[0036]** In **Fig. 1 f)** sind drei unterschiedliche Flüssigmetallstrukturen 19, 20, 21, die mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens auf einer metallischen Substratoberfläche 12 erzeugt wurden und deren Grundflächen unterschiedlich sind, dargestellt. Von den in **Fig. 1 e)** dargestellten Flüssigmetallstrukturen 19, 20, 21 verfügt die erste Struktur 19 über eine quadratische, die zweite Struktur 20 über eine kreisförmige und die dritte Struktur 21 über eine kreuzförmige Grundfläche, wobei die nacheinander hergestellten Teilstrukturen der Teilelemente stoffschlüssig miteinander verbunden sind. Die Benetzung der Substratoberfläche 12 erfolgte jeweils derart, dass unbenetzte Stellen unterhalb des Flüssigmetalls 11, sogenannte Brücken, zuverlässig vermieden werden. Um dies sicherzustellen, erfolgt vor dem Beginn der Benetzung einer Substratoberfläche 12 eine genaue Wegplanung, aus der sich ergibt, in welcher Reihenfolge die einzelnen Benetzungsschritte erfolgen. Diese Reihenfolge der Benetzungsschritte ist für die in **Fig. 1 f)** gezeigten Strukturen 19, 20, 21 mit Hilfe von Pfeilen angegeben.

**[0037]** **Fig. 2** zeigt vier mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) erzeugte Aufnahmen eines Substrats 22 mit darauf aufgebrachtem Flüssigmetall 11. **Fig. 2 a)** zeigt einen kugelförmigen Formkörper 10 aus Flüssigmetall 11, der auf der Substratoberfläche 12 des Substrats 22 abgelegt ist. Bei dem Substrat 22 handelt es sich um einen Goldpad, das mit Titan beschichtet ist. Der Formkörper 10 ist aus einem Flüssigmetall 11 hergestellt, das als Metalllegierung aus Gallium, Indium und Zinn ausgeführt ist. Generell ist es denkbar, einen Formkörper 10 unterschiedlicher Form bereitzustellen, beispielsweise in Form einer Kugel oder eines Kissens, und diesen an der gewünschten Stelle auf der zu benetzenden Substratoberfläche 12 abzulegen. Der Formkörper 10 ist flüssig und berührt die Substratoberfläche 12 lediglich an einer Kontaktstelle 15. Wie im Zusammenhang mit **Fig. 1** erläutert wurde, wird der Formkörper 10 zur Realisierung einer geeigneten Benetzung der Substratoberfläche 12 mit einem Manipulationselement (hier nicht dargestellt) derart bewegt, dass ein an die Kontaktstelle 15 angrenzender Oberflächenbereich 14 für eine Bestrahlung mit einem Ionenstrahl 13 zugänglich wird. Aufgrund der Bestrahlung mit einem Ionenstrahl 13 wird die Ober-

flächenstruktur des flüssigen Formkörpers 10 aufgebrochen und ein Massenstrom des Flüssigmetalls 11 erzeugt, sodass die in **Fig. 2 b)** gezeigte Verformung des Formkörpers 10 und Benetzung eines Teilbereichs 16 der Substratoberfläche 12 erzeugt werden. Nach fortgesetzter Ionenbestrahlung wird die Oberfläche des Formkörpers 10 derart weiter aufgebrochen, dass sich die in **Fig. 2 c)** dargestellte Flüssigmetallstruktur und damit verbundene Benetzung der Substratoberfläche 12 einstellt. Nach Zugabe von weiterem Flüssigmetall vereinigen sich die beiden Flüssigkeitsvolumina aufgrund ihrer Oberflächenspannungen und es stellt sich schließlich die in **Fig. 2 d)** dargestellte Flüssigmetallstruktur bzw. Benetzung der Substratoberfläche 12 ein.

**[0038]** Wesentlich ist, dass der Prozess der Benetzung einer Substratoberfläche 12 generell reversibel ist. So ist es möglich, eine Flüssigmetallstruktur mit einem Ionenstrahl 13 zu bestrahlen und das Flüssigmetall 11 anschließend von der Substratoberfläche 12 abzutragen. In jedem Fall wird der Massenfluss des Flüssigmetalls 11 unmittelbar in dem Moment unterbrochen, in dem keine Bestrahlung mit einem Ionenstrahl 13 mehr erfolgt.

**[0039]** **Fig. 3** zeigt eine Flüssigmetallstruktur, die mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens aus einem aus Flüssigmetall 11 gebildeten Formkörper 10 auf einer Substratoberfläche 12 erzeugt wurde. Gemäß diesem Ausführungsbeispiel handelt es sich bei dem Substrat 22 um ein mit Titan beschichtetes Goldpad, wobei eine Flüssigmetallstruktur, die eine kreuzförmige Grundfläche aufweist, erzeugt wurde. Als Flüssigmetall 11 wurde wiederum eine Metalllegierung, die Gallium, Indium und Zinn enthält, verwendet.

**[0040]** Die **Fig. 4** zeigt die Aufnahme eines Rasterelektronenmikroskops von einem kugelförmigen Formkörper 10 aus Flüssigmetall 11 in einem Zustand, in dem ein an die Kontaktstelle 15 zwischen Formkörper 10 und Substratoberfläche 12 angrenzender Oberflächenbereich 14 zur Bestrahlung mit einem Ionenstrahl 13 freigelegt ist. Der kugelförmige Formkörper 10 ist von einem Manipulationselement 18, hier einem Wolframdrahtstück, kontaktiert, wobei der Formkörper 10 von dem Manipulationselement 18 leicht zur Seite gedrückt wird, sodass ein Oberflächenbereich 14, der unmittelbar an eine Kontaktstelle 15, an der sich der Formkörper 10 und die Substratoberfläche 12 berühren, angrenzt, für eine Bestrahlung mit einem Ionenstrahl 13 freigelegt wird. Ein Ionenstrahl 13 lässt sich nunmehr derart auf den Oberflächenbereich 14 richten, dass die Oberflächenstruktur des Formkörpers 10 in diesem Oberflächenbereich 14 aufgebrochen wird und ein Massenstrom des Flüssigmetalls 11 in Richtung der zu benetzenden Bereiche der Substratoberfläche 12 bewirkt wird.

**[0041]** Mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es somit möglich, auch im Nanometerbereich gezielt Flüssigmetallstrukturen auf einer Substratoberfläche zu erzeugen. Hierbei ist es von Bedeutung, dass das Verfahren reversibel ist, sodass nach einer abermaligen Bestrahlung eines benetzten Bereichs mithilfe eines Ionenstrahls eine aufgebrachte Flüssigmetallstruktur wieder abtragbar ist. Die Genauigkeit der Benetzung einer Substratoberfläche entspricht hierbei der Genauigkeit der Ionenstrahlquelle und kann bei Einsatz einer geeigneten Ionenstrahlquelle unter 100 nm liegen. Aus diesem Grund ist es möglich, nahezu beliebige Strukturen aus Flüssigmetall, wie etwa Leiterbahnen, Kontaktstellen, Schalter, Kondensatoren, Transistoren, Antennen oder Filter auf einer Substratoberfläche herzustellen.

**[0042]** Ein derartiges Verfahren zur gezielten Benetzung einer Substratoberfläche mit einem Flüssigmetall ist bislang nicht bekannt. Der Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht hierbei vor allem in der hochpräzisen Manipulation von Flüssigmetall auf kleinstem Raum. Neben der Erzeugung und Entfernung von Flüssigmetallstrukturen ist es bei Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahrens ferner möglich, Reparaturen an den entsprechenden Strukturen durchzuführen. Bei Einsatz eines geeigneten Flüssigmetalls, insbesondere einer Metalllegierung, die Gallium, Indium und Zinn enthält und somit bei Raumtemperatur flüssig ist, ist eine entsprechend hergestellte Flüssigmetallstrukturen, die sich unter anderem durch eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit, Biegsamkeit und Austauschbarkeit bei Materialveränderungen auszeichnet, hochresistent gegen die bei kleinskaligen elektronischen Netzwerken auftretenden größten Fehlerursachen, wie etwa thermische Effekte, Verbiegen und Elektromigration.

#### Bezugszeichenliste

10	Formkörper
11	Flüssigmetall
12	Substratoberfläche
13	Ionenstrahl
14	Oberflächenbereich
15	Kontaktstelle
16	erster Teilbereich der Substratoberfläche
17	weiterer Teilbereich der Substratoberfläche
18	Manipulationselement
19	erste Flüssigmetallstruktur
20	zweite Flüssigmetallstruktur
21	dritte Flüssigmetallstruktur

22 Substrat

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Benetzung einer Substratoberfläche (12) mit einem Flüssigmetall (11), bei dem das Flüssigmetall (11) bereitgestellt und ein wenigstens teilweise aus dem Flüssigmetall (11) gebildeter Formkörper (10) auf die Substratoberfläche (12) aufgebracht wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass der auf die Substratoberfläche (12) aufgebrachte Formkörper (10) wenigstens bereichsweise derart relativ zur Substratoberfläche (12) bewegt wird, dass zumindest ein Oberflächenbereich (14), der an eine Kontaktstelle (15), an der sich der Formkörper (10) und die Substratoberfläche (12) berühren, angrenzt, zur Aufbringung wenigstens eines Ionenstrahls (13) zugänglich wird und dass der Ionenstrahl (13) zumindest in dem Oberflächenbereich (14) auf den Formkörper (10) aufgebracht und hierdurch zumindest abschnittsweise ein Aufbrechen einer Oberflächenstruktur des Formkörpers (10) und eine zur wenigstens teilweisen Benetzung der Substratoberfläche (12) mit dem Flüssigmetall (11) führende Verformung des Formkörpers (10) bewirkt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass in einem ersten Schritt ein erster Teilbereich (16) der Substratoberfläche (12) mit dem Flüssigmetall (11) benetzt wird und in wenigstens einem auf den ersten Schritt folgenden weiteren Schritt der Formkörper (10) nochmals relativ zur Substratoberfläche (12) bewegt wird und der Ionenstrahl (13) auf einen noch nicht bestrahlten Bereich der Oberfläche des Formkörpers (10) gelenkt wird, sodass zumindest abschnittsweise die Oberflächenstruktur des Formkörpers (10) aufgebrochen und hierdurch wenigstens ein weiterer Teilbereich (17) der Substratoberfläche (12) mit Flüssigmetall (11) benetzt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Bewegung des Formkörpers (10) und die Bestrahlung der Oberfläche des Formkörpers (10) mit dem Ionenstrahl (13) derart ausgeführt werden, dass der erste und der wenigstens eine weitere Teilbereich (16, 17) der Substratoberfläche (12) zumindest abschnittsweise verbunden sind.

4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass wenigstens zeitweise während der Bestrahlung der Oberfläche des Formkörpers (10) mit einem Ionenstrahl (13) ein Elektronenstrahl in den Oberflächenbereich (14) gelenkt wird, wobei sich der Ionenstrahl (13) und der Elektronenstrahl vorzugsweise wenigstens zeitweise im Oberflächenbereich (14) treffen,

und insbesondere einem spitzen Winkel, vorzugsweise einen Winkel von 55° einschließen.

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest in einem Bereich der Substratoberfläche (12), der zur Benetzung mit einem Flüssigmetall (11) bereitgestellt wird, ein Metall angeordnet wird.

6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Flüssigmetall (11) eine Metalllegierung verwendet wird, die Gallium enthält.

7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Flüssigmetall (11) eine Metalllegierung, die Gallium, Indium und Zinn enthält, verwendet wird.

8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Flüssigmetall (11) eine Metalllegierung verwendet wird, die 65 bis 95 Gew.%, bevorzugt 68 bis 69 Gew.%, Gallium, 5 bis 22 Gew.%, bevorzugt 21 bis 22 Gew.%, Indium und 0 bis 11 Gew.%, bevorzugt 9,5 bis 10,5 Gew.%, Zinn enthält.

9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein tropfen- oder kugelförmiger Formkörper (10) erzeugt wird.

10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Formkörper (10) wenigstens zeitweise mittels eines als Drahtspitze ausgeführten Manipulationselements (18) zumindest bereichsweise relativ zur Substratoberfläche (12) bewegt wird, wobei die Drahtspitze vorzugsweise wenigstens abschnittsweise geätzt wird, und/oder als Drahtspitze eine Wolframdrahtspitze verwendet wird.

11. Vorrichtung zur Benetzung einer Substratoberfläche (12) mit einem Flüssigmetall (11), die wenigstens eine Ionenstrahlquelle aufweist und eingerichtet ist, das Verfahren nach wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche durchzuführen.

12. Substrat mit einer Substratoberfläche (12), die wenigstens teilweise mittels des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11 oder einer Vorrichtung nach Anspruch 11 mit einem Flüssigmetall (11) benetzt wurde.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

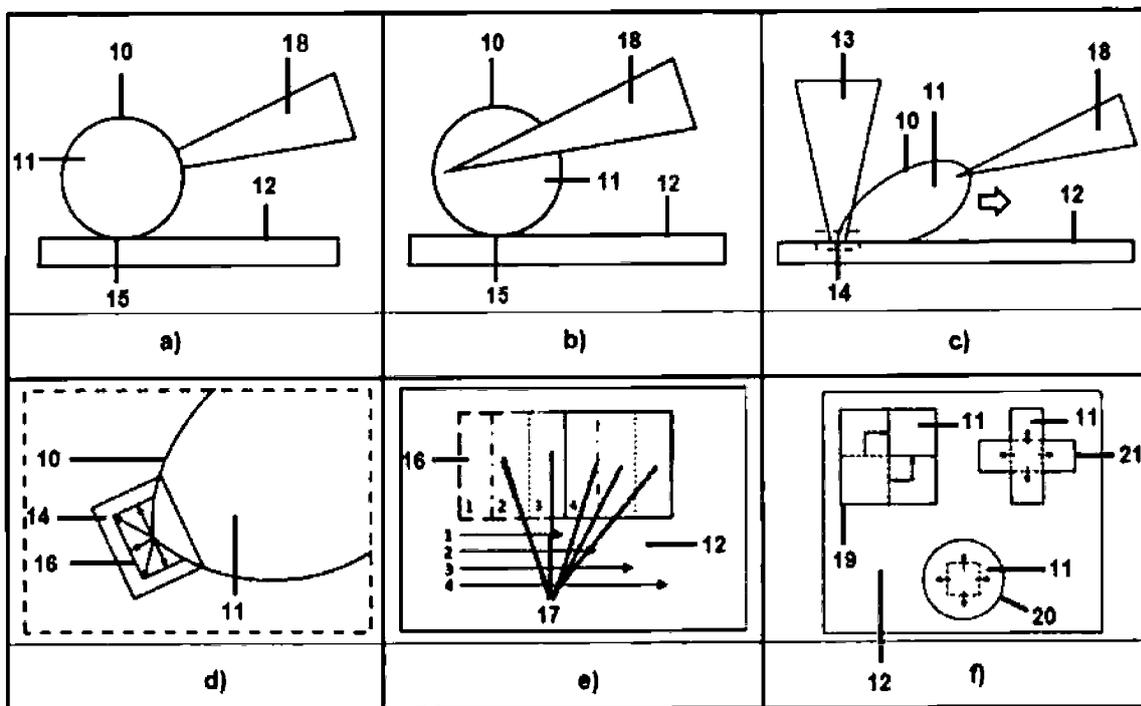


Fig. 1

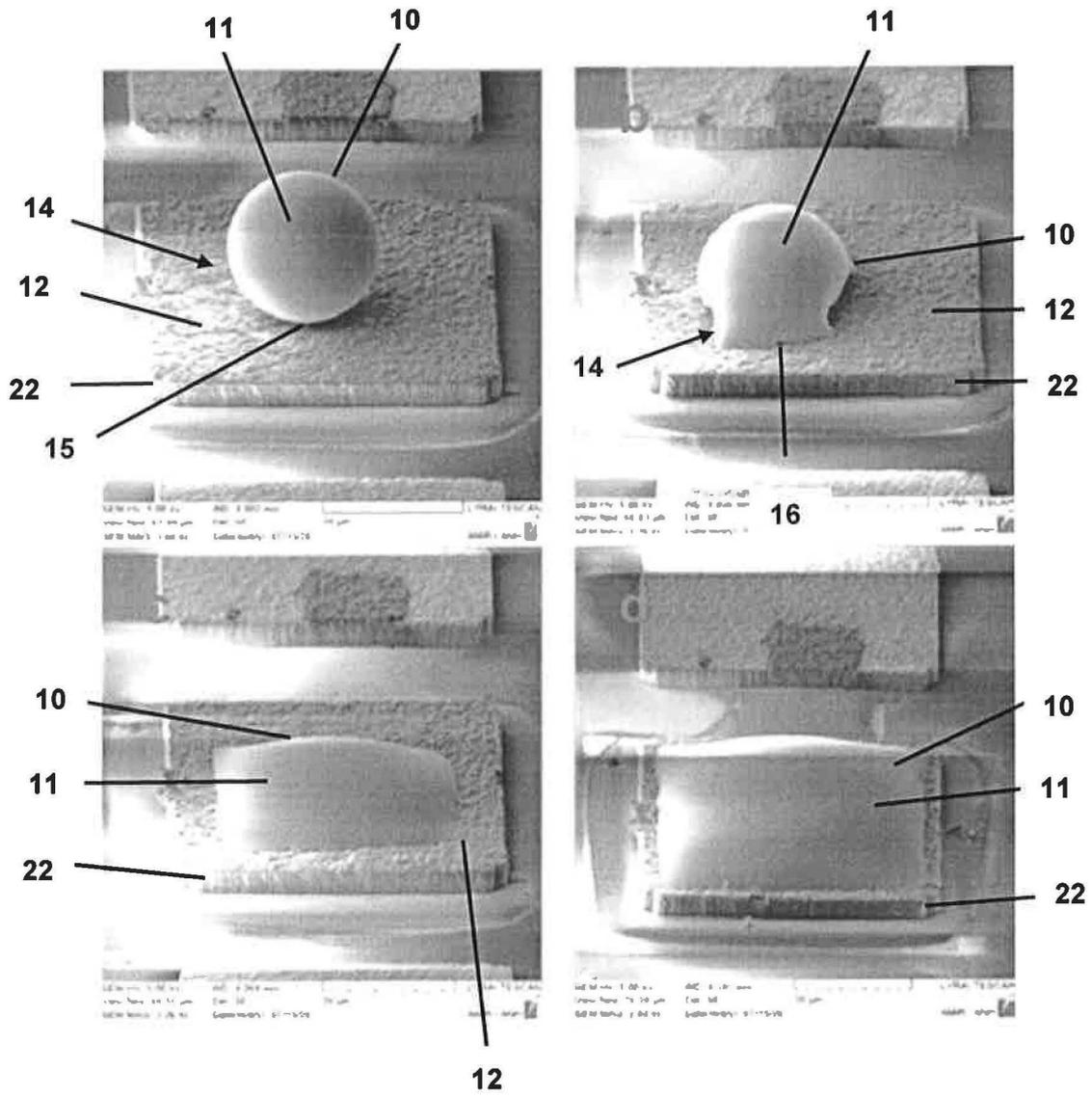


Fig. 2

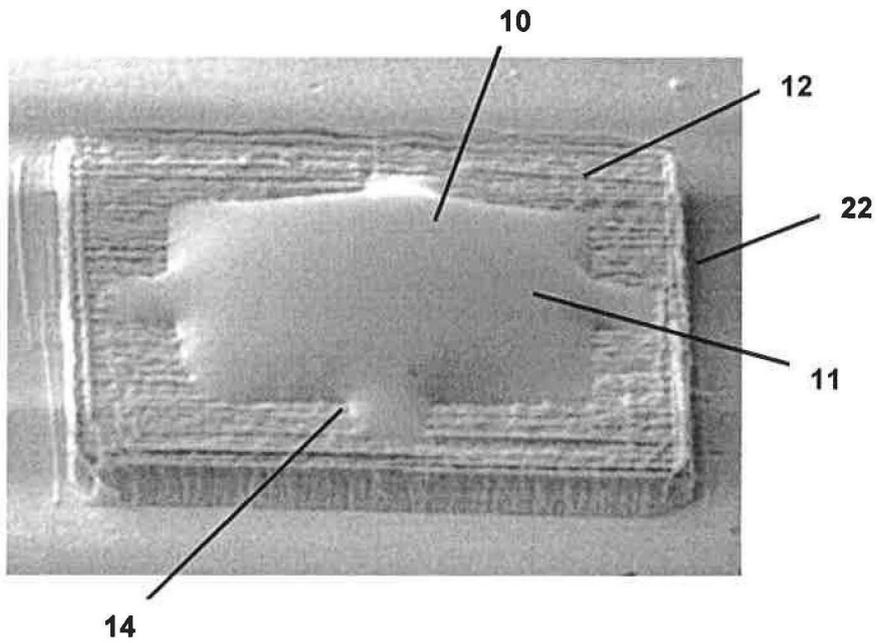


Fig. 3

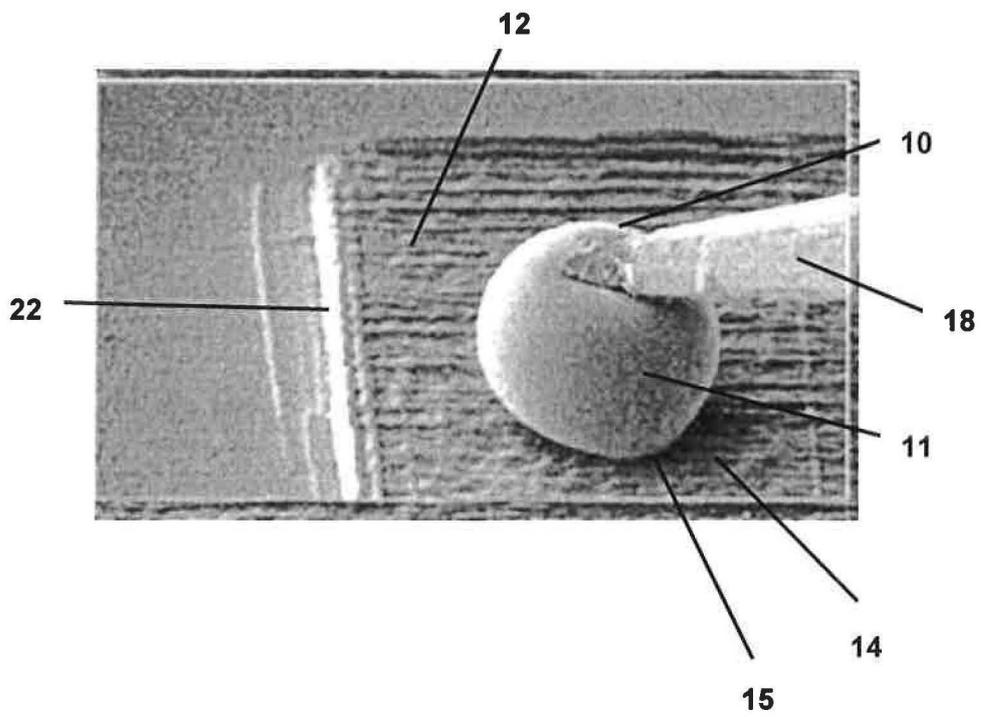


Fig. 4