



(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

- (43) Veröffentlichungstag:
04.09.2024 Patentblatt 2024/36

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
C25D 17/12 (2006.01) C25D 21/12 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: 24161027.8

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
C25D 21/12; C25D 17/12

(22) Anmeldetag: 01.03.2024

- | | |
|--|--|
| <div>(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA
Benannte Validierungsstaaten:
GE KH MA MD TN</div> <div>(30) Priorität: 02.03.2023 DE 102023105206</div> | <div>(71) Anmelder: Fraunhofer-Gesellschaft zur
Förderung
der angewandten Forschung e.V.
80686 München (DE)</div> <div>(72) Erfinder: Kahle, Ruben
13355 Berlin (DE)</div> <div>(74) Vertreter: Pfenning, Meinig & Partner mbB
Patent- und Rechtsanwälte
Joachimsthaler Straße 10-12
10719 Berlin (DE)</div> |
|--|--|

(54)

VERFAHREN UND SYSTEM ZUM HERSTELLEN EINES SUBSTRATS MITTELS KUPFERABSCHEIDUNG UND ENTSPRECHENDES SUBSTRAT

(57) Die vorliegende Offenbarung betrifft ein Verfahren sowie ein System zum Herstellen eines Substrats mittels Kupferabscheidung sowie ein entsprechendes Substrat.

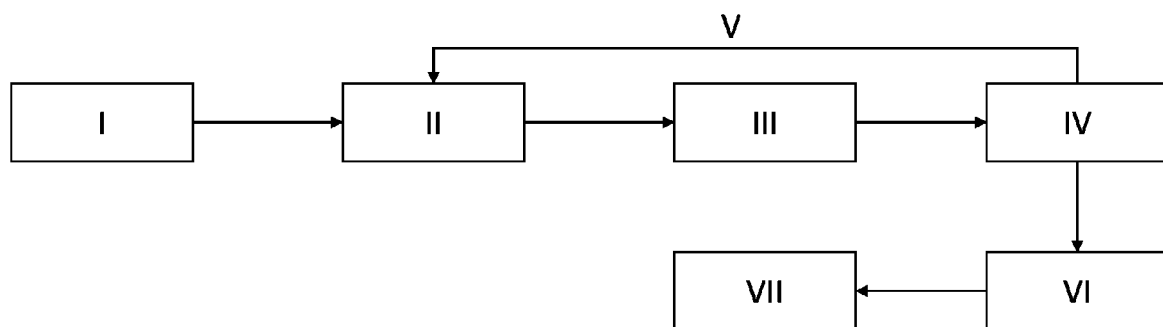


Fig. 1

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Offenbarung betrifft ein Verfahren sowie ein System zum Herstellen eines Substrats mittels Kupferabscheidung sowie ein entsprechendes Substrat.

[0002] Eine Voraussetzung zur Herstellung leistungsfähiger elektrischer Systeme, beispielsweise zur Realisierung von KI- Funktionen in Smartphones und Tablets, sind miniaturisierte Schaltungsträger (IC Substrate), die mit modernsten Bauteilen bestückt sind. Ein Kernprozess zur Herstellung von IC Substraten im Semi-Additiv Prozess (SAP) ist die galvanische Kupferabscheidung von Leiterzügen und Kontakten.

[0003] Zur galvanischen Abscheidung von Kupfer aus einem Elektrolyten fließt Strom zwischen einer unlöslichen Anode und der zu beschichtenden strukturierten Oberfläche als Kathode. Als Anode werden u. a. plane Metallgitter aus gestrecktem Titan mit Inert-Überzügen wie Platin und Iridium verwendet. Werden plane, großformatige Leiterplattennutzen beschichtet, so kommt es je nach Anlagenkonfiguration, Blendenkonstruktion oder Wahl der Stromquelle z.B. in den Randbereichen zur lokalen Erhöhung der Stromdichte. Des Weiteren bedingen Halterungskonzepte und die Anlagentechnik zur Filtrierung und Anströmung Strömungsunterschiede an den Kanten und an der Oberfläche. Im Ergebnis unterscheidet sich die abgeschiedene Kupferstärke in der Mitte des Leiterplattennutzens vom Rand und den Ecken.

[0004] Eine gleichmäßige Schichtstärke hat einen direkten Einfluss auf die Qualität (Ausbeute) des Leiterplattennutzens, da überhöhte Kupferschichten zu Defekten in Folgeprozessen führen.

[0005] Der vorliegenden Offenbarung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren und/oder System vorzuschlagen, das insbesondere ein verbessertes Substrat mittels Kupferabscheidung erzeugt, insbesondere ein Substrat erzeugt, das eine im Wesentlichen homogene Kupferoberfläche aufweist. Ferner kann es Aufgabe sein, ein verbessertes Substrat vorzuschlagen.

[0006] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1 und/oder ein System gemäß einem nebengeordneten Anspruch und/oder ein Substrat gemäß einem nebengeordneten Anspruch. Vorteilhafte oder beispielhafte Ausführungen werden durch die Unteransprüche sowie die beigefügten Figuren näher erläutert.

[0007] Das vorgeschlagene Verfahren zum Herstellen eines Substrats mittels Kupferabscheidung umfasst die folgenden Schritte

I. Bereitstellen eines Steuermoduls, eines Speichermoduls sowie eines galvanischen System zur Kupferabscheidung auf einem Substrat, das galvanische System aufweisend eine segmentierte Anode, die eine Vielzahl von Anodensegmenten aufweist, die jeweils ausgebildet sind, durch Anlegen eines Stroms auf einem korrespondierenden Substratsegment Kupfer abzuscheiden; wobei die Anodensegmente über eine zwischen eine Stromquelle und die Anode geschaltete elektrische Schaltung unabhängig voneinander mit Gleichstrom oder gepulstem Wechselstrom beaufschlagbar sind,

II. Beaufschlagen der segmentierten Anode mit einem Strom gemäß einem vordefinierten Lernmuster, sodass Kupfer auf dem Substrat abgeschieden wird,

III. Messen der resultierenden Kupferhöhe auf dem Substrat ,

IV. Erstellen eines Datensatzes aus den gemessenen Kupferhöhen und einer zugeordneten Steuerung der Anodensegmente gemäß dem Lernmuster und Speichern des Datensatzes im Speichermodul,

V. Wiederholen der Schritte II bis IV mit einem sich vom vorherigen Lernmuster unterscheidenden Lernmuster,

VI. Erstellen eines Gewichtungmodells, das eine Gewichtung der Anodensegmentsteuerung auf die Kupferhöhe des Substrats prognostiziert, unter Verwendung der gespeicherten Datensätze,

VII. Steuern der segmentierten Anode derart, dass zumindest gemäß dem ermittelten Gewichtungmodell eine homogene Kupferhöhe auf dem Substrat erreicht wird.

[0008] Das vorgeschlagene Verfahren kann somit ein Modell generieren, das darlegt, wie die segmentierte Anode angesteuert werden kann, damit eine im Wesentlichen homogene Kupferhöhe auf dem Substrat generiert wird.

[0009] Das Steuermodul kann beispielsweise ein Computer oder Laptop sein. Das Speichermodul kann beispielsweise eine Festplatte sein und kann im Computer und/oder Laptop integriert sein.

[0010] Für einen einmaligen Durchlauf der Schritte II bis IV kann jeweils dasselbe Substrat verwendet werden. Bei Wiederholung der Schritte II bis IV kann ein neues Substrat verwendet werden. Für den Schritt VII kann wiederum ein neues Substrat verwendet werden. So kann gewährleistet werden, das vorherige Bearbeitung des Substrats Folgeschritte

nicht beeinflussen kann. Insbesondere kann das im Schritt VII hergestellte Substrat eine homogene Kupferhöhe aufweisen.

[0011] Die elektrische Schaltung kann beispielsweise als Relais- und/oder MOSFET- und/oder DualMosfet- und/oder TRIAC-Schaltung ausgebildet sein.

[0012] In einer Ausführung kann in Schritt VI das Gewichtungsmodell unter Verwendung eines Modells basierend auf künstlicher Intelligenz angepasst werden.

[0013] In der Vergangenheit musste die Regelung meist weniger Anodensegmente anhand von Vorerfahrung und eine Vielzahl an Versuchen von Menschen eruiert werden. Auf einfache und vergleichsweise schnelle Weise kann das Modell das auf künstlicher Intelligenz (KI) basiert auf bekanntes Wissen zurückgreifen und dieses Wissen mit neuen Erkenntnissen vorzugsweise automatisiert kombinieren.

[0014] In einer Ausführung kann das vordefinierte Lernmuster und/oder eine Sammlung von vordefinierten Lernmustern eine Gewichtung der Anodensegmente vorgeben. Insbesondere kann zumindest eines der vordefinierten Lernmuster einen mathematisch modellierten Verlauf umfassen und/oder eine gruppierte Abstufung umfassen. Der mathematisch modellierte Verlauf kann beispielsweise ein linearer Verlauf und/oder ein radialer Verlauf und/oder ein Polynom sein oder einen oder mehrere dieser in Kombination umfassen. Die gruppierte Abstufung kann beispielsweise als Schachbrett und/oder als regelmäßige und/oder unregelmäßige Gruppierung und/oder als Schraffierung ausgebildet sein oder eine oder mehrere dieser Abstufungen, bspw. in Kombination, umfassen.

[0015] Insbesondere kann es vorteilhaft sein, dass zunächst aussagekräftige Lernmuster verwendet werden, d.h. insbesondere Lernmuster, die eindeutige Beziehungen in den Modellen des maschinellen Lernens schaffen. Eindeutige Beziehungen können beispielsweise in einem Lernmuster darlegen, dass ein Input, beispielsweise Parameter bezüglich des Segments und des Stroms, mit dem die segmentierte Anode gesteuert wird, einen bestimmten Output, beispielsweise eine daraus resultierende Kupferhöhe an einem bestimmten Ort des Substrats, als Ergebnis liefert. Beispielsweise kann ein Schachbrettmuster oder Gruppierung ein aussagekräftiges Muster sein. Es kann vorteilhaft sein, Lernmuster, die diffuse, uneffektive Ergebnisse liefern, z.B. ein gleichmäßiges Rauschen, zu vermeiden oder erst dann zu verwenden, nachdem zumindest drei, vorzugsweise zumindest fünf aussagekräftige Lernmuster verwendet wurden. Insbesondere können aussagekräftige Muster vorteilhaft sein, da diese schnelle Ergebnisse erzielen können.

[0016] In einer Ausführung des Verfahrens können die Schritte II und III zusätzlich mit einer nicht segmentierten Anode durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Kupferhöhe auf dem Substrat mit einer solchen Anode können als Vergleich dienen. Die Ergebnisse können beispielsweise in Schritt VI in die Erstellung des Gewichtungsmodells einfließen. Insbesondere kann die KI das Gewichtungsmodell unter Verwendung dieses Vergleichs anpassen. Eine Durchführung der Schritte II und III mit einer nicht segmentierten Anode sind vergleichsweise einfach und kostengünstig durchzuführen.

[0017] In einer Ausführung des Verfahrens können in Schritt VI, insbesondere zum Zwecke eines bidirektionalen Lernens, die Daten der gespeicherten Datensätze auf einen Sollwert interpoliert, normiert und statistisch modifiziert werden. Dies kann den Vorteil haben, dass die Daten miteinander auf einfache Weise verglichen werden können.

[0018] In einer Ausführungsform des Verfahrens können die Daten in ein digitales Array, beispielsweise ein Numpy Array, gespeichert werden. Auch andere bekannte Array-Formen können anwendbar sein.

[0019] Insbesondere kann das Gewichtungsmodell der Anodensegmente angepasst werden, indem es bidirektional, insbesondere unter Verwendung der gespeicherten Datensätze, trainiert wird. Dabei kann unter bidirektional trainiert werden verstanden werden, dass ein Input einen Output vorgibt sowie ein Output einen Input vorgibt. Dies ist beispielsweise bekannt als "Reverse Machine Learning". Beispielsweise kann das Modell in der einen Richtung lernen, wie die Höhenverteilung bei gegebenen Anodengewichtung aussieht und kann in der anderen Richtung lernen, wie bei gegebener Höhenverteilung die Anodengewichtung aussieht. So kann bei Eingabe einer homogenen Kupferverteilung über das Substrat als Zielwert von dem Modell eine dafür nötige Anodensegmentengewichtung ermittelt werden.

[0020] In Schritt VI kann ein Modell zum maschinellen Lernen unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze und/oder statistischer Regressionsmodelle erzeugt werden. Das Modell zum maschinellen Lernen kann unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze und/oder statistischer Regressionsmodelle trainiert werden. Das Modell zum maschinellen Lernen kann unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze und/oder statistischer Regressionsmodelle verwendet werden um das Gewichtungsmodell der Anodensegmente zu erstellen. Insbesondere kann das statistische Regressionsmodell der linearen und nicht linearen Regression mit Multi-Output fähigen Modellen wie "Decision Tree Regression" und/oder "k-nearest neighbours Regression" und/oder "Multi Output Regression" verwendet werden.

[0021] Die Datensätze können in Schritt IV in Form von Tabellen und/oder als Konturdiagramme und/oder Histogramme gespeichert und/oder visualisiert werden. Eine Visualisierung in einem Konturendiagramm kann vorteilhaft sein, um eine Höhenverteilung bestimmten Bereichen zuordnen zu können. In einem Konturendiagramm kann beispielsweise eine Güte des Substrats vergleichsweise schnell und einfach abgeschätzt werden.

[0022] Die Schritte II bis IV können für zumindest eines, insbesondere für zumindest zwei oder zumindest drei, insbesondere zumindest fünf oder zumindest sechs, bevorzugt zumindest neun Lernmuster durchgeführt werden. Dabei kann eine Genauigkeit des Gewichtungsmodells ansteigen, je mehr Lernmuster verwendet werden.

[0023] Das Verfahren kann den Vorteil haben, dass der Prozessentwickler die optimalen Steuerungsparameter der

segmentierten Anode mit wesentlich weniger Versuchsreihen entwickeln kann, um Leiterstrukturen prozesssicher herzustellen.

[0024] Die vorliegende Offenbarung betrifft ferner ein System zum Herstellen eines Substrats mittels Kupferabscheidung. Das System umfasst ein galvanisches System zur Kupferabscheidung auf einem Substrat. Das galvanische System aufweisend eine segmentierte Anode, die eine Vielzahl von Anodensegmenten aufweist. Die Anodensegmente sind jeweils ausgebildet, durch Anlegen eines Stroms auf einem korrespondierenden Substratsegment Kupfer abzuscheiden; wobei die Anodensegmente über eine zwischen eine Stromquelle und die Anode geschaltete elektrische Schaltung unabhängig voneinander mit Gleichstrom oder gepulstem Wechselstrom beaufschlagbar sind. Das galvanische System kann eine Kammer oder ein Kammersystem umfassen. In der Kammer oder dem Kammersystem kann eine Lösung zum Zwecke der galvanischen Abscheidung von Metallen angeordnet sein. In der Kammer oder in dem Kammersystem kann eine Substrathalterung zur Aufnahme des Substrats angeordnet sein. Ein Substrat kann in der Aufnahme angeordnet sein.

[0025] Das System umfasst ferner ein Speichermodul, auf dem eine Mehrzahl von Datensätzen gespeichert ist. Die Datensätze umfassen jeweils Informationen zu Kupferhöhen auf einem Substrat und einer zugeordneten Steuerung der Anodensegmente.

[0026] Das System umfasst ferner eine mit dem Speichermodul zumindest temporär verbundene oder integrierte Steuereinheit, die ausgebildet und eingerichtet ist, die Datensätze aus dem Speichermodul abzurufen und ein Gewichtungsmodell zu erstellen oder abzurufen, das eine Wirkung der Gewichtung der Anodensegmente auf die Kupferhöhe des Substrats prognostiziert. Die Steuereinheit kann mit der elektrischen Schaltung verbunden sein und kann ausgebildet und eingerichtet sein, die elektrische Schaltung unter Verwendung des Gewichtungsmodells derart zu steuern, dass zumindest gemäß dem ermittelten Gewichtungsmodell eine homogene Kupferhöhe auf dem Substrat erreicht wird.

[0027] Die Steuereinheit kann lediglich temporär oder dauerhaft mit dem Speichermodul verbunden sein. Es kann vorgesehen sein, dass ein Gewichtungsmodell erzeugt wird, beispielsweise mit einem Laptop oder PC. Die Steuereinheit kann das Gewichtungsmodell abrufen und die elektrische Schaltung nach den Vorgaben des Gewichtungsmodells steuern. Dafür muss die Steuereinheit nicht zwingend dauerhaft mit dem Laptop oder PC verbunden sein.

[0028] Die Steuereinheit kann ausgebildet und eingerichtet sein, das Gewichtungsmodell unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze und/oder statistischer Regressionsmodelle anzupassen.

[0029] Die oben in Bezug zum Verfahren beschriebenen Merkmale können analog auf das System angewandt werden. Das System ist insbesondere ausgebildet und eingerichtet, dass das oben beschriebene Verfahren mittels des Systems durchgeführt werden kann.

[0030] Das System kann also ein Elektroplattierungssystem mit einer multi-segmentierten Anode beliebiger Form und mit zellgenauem Auslastungsgrad sein, das mit Hilfe einer getakteten Steuerung, auf Basis eines maschinell erlernten Musters ein verbessertes Substrat generieren kann.

[0031] Das Gewichtungsmodell kann neben der Steuerung der segmentierten Anode weitere Parameter berücksichtigen, die Einfluss auf eine resultierende Kupferhöhe des Substrats haben. Zum Beispiel kann eine Justage der Blenden und/oder eine Regelung des Durchflusses von Düsenstöcken und/oder eine Bewegung/Agitation der Kathode und/oder Anode und/oder der Düsenstöcke berücksichtigen. Das Modell kann Steuerparameter für eine Steuerung Justage der Blenden und/oder eine Regelung des Durchflusses von Düsenstöcken und/oder eine Bewegung/Agitation der Kathode und/oder Anode und/oder der Düsenstöcke ausgeben, die zu einer verbesserten, insbesondere homogenen, Kupferverteilung führen.

[0032] Die vorliegende Offenbarung umfasst ferner ein Substrat. Das Substrat kann durch das oben beschriebene Verfahren hergestellt werden. Das Substrat kann mit einem oben beschriebenen System hergestellt werden. Das Substrat kann eine homogene Kupferoberfläche aufweisen. Dabei kann eine Toleranzabweichung gleich oder kleiner als 20% oder gleich oder kleiner als 15% oder gleich oder kleiner als 10% oder gleich oder kleiner als 5% Uniformität bezogen auf den Mittelwert unter Verwendung der dreifachen im Stichversuch erfassten Standardabweichung ein.

[0033] Beispielhafte Ausführungen der Erfindung werden anhand der nachfolgenden Beschreibung insbesondere in Zusammenhang mit den beigefügten Figuren näher erläutert. Die nachstehenden Ausführungen sind daher beispielhaft und nicht einschränkend zu verstehen.

[0034] Es zeigen

Figur 1 ein schematisches Flussdiagramm eines Verfahren zum Herstellen eines Substrats mittels Kupferabscheidung unter Verwendung eines Modells basierend auf künstlicher Intelligenz,

Fig. 2a ein galvanisches System,

Fig. 2b eine Streckmetallanode auf Basis von Titan mit einer MMOX Beschichtung

Fig. 2c eine 130fach segmentierte Anode,

- Fig. 3a eine schematische Draufsicht auf ein beispielhaftes Substrat von 303 x 227 mm²,
- Fig. 3b eine schematische Draufsicht auf ein Einzelnutzen zur Kontaktierung zweier Siliziumkomponenten,
- 5 Fig. 3c eine schematische Draufsicht eines Details der Leiterbahnen der Figuren 3a und 3b Draufsicht mit 10 µm L/S zwischen den Pads,
- Fig. 4a eine schematische Konstruktionsansicht des Anodenhalters von hinten mit Sicht auf eine Schaltung der segmentierten Anode gemäß Fig. 2c,
- 10 Fig. 4b eine schematische Konstruktionsansicht des Anodenhalters von vorne mit Sicht auf die segmentierte Anode,
- Fig. 4c eine Übersicht des Systems zur Herstellung Substrats mittels Kupferabscheidung unter Verwendung eines Modells basierend auf künstlicher Intelligenz,
- 15 Fig. 5a eine beispielhafte Visualisierung von Rohdaten einer XYZ Punktwolke, die einer Messung der Kupferhöhe auf einem Substrat entsprechen,
- Fig. 5b gefilterte, nivellierte Daten der Fig. 5a,
- 20 Fig. 5c einen gemittelten Messwert Z der Kupferhöhe auf dem Substrat der Figuren 5a und b,
- Fig. 6a eine grafische Darstellung eines beispielhaften Lernmusters eines an der Kante erzeugten, Sinus gewichteten, radialen Keils,
- 25 Fig. 6b ein Konturendiagramm, das eine aus der Schaltung des Lernmusters nach Fig. 6a resultierende Kupferabscheidungshöhe zeigt,
- Fig. 7 ein System, mit dem ein Verfahren nach Fig. 1 durchgeführt werden kann,
- 30 Fig. 8a zeigt ein beispielhaftes Konturdiagramm bei Verwendung einer einteiligen Streckmetallanode,
- Fig. 8b ein Histogramm einer Kupferabscheidung bei der einteiligen Streckmetallanode gemäß Fig. 8a,
- 35 Fig. 9 Ergebnisse von Trainingsdatensätzen für ein Machine Learning (ML),
- Fig. 10 Ergebnisse zur Kupferverteilung auf dem Substrat basierend auf den unterschiedlichen ML Modellen,
- Fig. 11a ein Detail 10 µm L/S des Substrats bei einer Kupferabscheidung unter Verwendung einer einteiligen Anode,
- 40 Fig. 11b eine Übersicht 10 µm L/S des Substrats bei einer Kupferabscheidung unter Verwendung einer einteiligen Anode,
- Fig. 11c ein Detail 10 µm L/S des Substrats unter Verwendung einer segmentierten Anode bei einem Verfahren nach Fig. 1,
- 45 Fig. 11d eine Übersicht 10 µm L/S des Substrats unter Verwendung einer segmentierten Anode bei einem Verfahren nach Fig. 1.
- 50 **[0035]** Figur 1 zeigt als schematisches Flussdiagramm ein Verfahren zum Herstellen eines Substrats mittels Kupferabscheidung.
- [0036]** In einem ersten Schritt I werden ein Steuermodul, ein Speichermodul sowie ein galvanisches System zur Kupferabscheidung auf einem Substrat bereitgestellt. Das galvanische System umfasst eine segmentierte Anode, die eine Vielzahl Anodensegmente hat, die jeweils ausgebildet sind, durch Anlegen eines Stroms auf einem korrespondierenden Substratsegment Kupfer abzuscheiden. Die Anodensegmente sind über eine zwischen eine Stromquelle und die Anode geschaltete elektrische Schaltung unabhängig voneinander mit Gleichstrom oder gepulstem Wechselstrom beaufschlagbar.
- 55 **[0037]** In einem zweiten Schritt II wird die segmentierte Anode mit einem Strom gemäß einem vordefinierten Lernmuster

beaufschlagt, sodass Kupfer auf dem Substrat abgeschieden wird.

[0038] In einem dritten Schritt III wird eine resultierende Kupferhöhe auf dem Substrat gemessen.

[0039] In einem vierten Schritt IV wird ein Datensatz aus den gemessenen Kupferhöhen und einer zugeordneten Steuerung der Anodensegmente gemäß dem Lernmuster erstellt. Ferner wird im vierten Schritt IV der Datensatzes im Speichermodul gespeichert.

[0040] Die Schritte II bis IV werden, bezeichnet als Schritt V, mit einem sich vom vorherigen Lernmuster unterscheidenden Lernmuster wiederholt.

[0041] Dieser Schritt V kann mehrere Male wiederholt werden. Je öfter er mit einem anderen Lernmuster wiederholt wird, desto genauer wird ein Gewichtungsmodell im Schritt VI und desto homogener wird die Kupferverteilung in Schritt VII.

[0042] In Schritt VI wird ein Gewichtungsmodells, das eine Gewichtung der Anodensegmentsteuerung auf die Kupferhöhe des Substrats prognostiziert, unter Verwendung der gespeicherten Datensätze erstellt.

[0043] Im Schritt VII wird die segmentierte Anode derart gesteuert, dass zumindest gemäß dem ermittelten Gewichtungsmodell eine homogene Kupferhöhe auf dem Substrat erreicht wird.

[0044] Das galvanische System ist beispielsweise in Figur 2a dargestellt. Das galvanische System kann beispielsweise ein vertikal arbeitendes Galvanikbecken 1 in einer manuellen Versuchsanlage mit 100 l Fassungsvermögen umfassen. Ein rückseitig stabilisierter, vollständig passivierter Halter 2 ist beispielsweise für dünne Substrate ($t < 100 \mu\text{m}$) der Größe $303 \times 227 \text{ mm}^2$ ausgelegt und kontaktiert die Kupferstartschicht der Substrate mit Federkontakten. Das Galvanikbecken ist vorliegend mit einer Pumpe, Heizung (1kW) und Filtereinheit ausgerüstet. An den Halter 2 kann beispielsweise eine Streckmetallanode 3' (vgl. Fig. 2b)) oder eine segmentierte Anode 3 (vergleiche Fig. 2c)) mit Segmenten 31 montiert sein.

[0045] Der semi-additive Prozess kann beispielsweise auf einer Substratgröße von $303 \times 227 \text{ mm}^2$ realisiert werden. Als Mehrfachnutzen kann das Substrat beispielsweise 240 Einzelplatinen der Größe $18 \times 12 \text{ mm}^2$ mit einem X/Y-Abstand von $250 \mu\text{m}$ umfassen. Die Leiterbahnbreiten und Abstände können beispielsweise $10 \mu\text{m}$ L/S sein. Siliziumchips können mit einem Pitch von unter $100 \mu\text{m}$ kontaktiert werden.

[0046] Das Substrat der Fig. 3a ist vorliegend $303 \times 227 \text{ mm}^2$. Dies ist nicht einschränkend zu verstehen. Das Substrat kann auch andere Dimensionen aufweisen. Beispielsweise kann das Substrat deutlich größer sein, beispielsweise $610 \text{ mm} \times 457 \text{ mm}$.

[0047] Das Substrat 4 weist eine durchgängige Startschicht mit Kupfer auf, die teilweise von einem Fotoresist beliebiger Art und Dicke abgedeckt ist, um Leiterzüge/Strukturen aufzubauen. Beispielsweise kann das Substrat 4 einen $100 \mu\text{m}$ dünnen Leiterplattenkern mit beidseitig $18 \mu\text{m}$ Cu aufweisen. Auf diesen Kern kann doppelseitig eine $10 \mu\text{m}$ dünne glasfaserfreie Dielektrikumsschicht ABF mittels Vakuumlamination appliziert werden. Als Kupferstartlage kann eine mittels Sputtern (physical vapor deposition, PVD) abgeschiedene Metallkombination von 50 nm Titan und 75 nm Kupfer eingesetzt werden. Das Substrat 4 kann anschließend mit einem hochauflösenden Trockenfilm vom Typ RY5107UT laminiert (Lackhöhe beispielsweise $7 \mu\text{m}$) werden und von einer Orbotech LDI Ultra lithographisch strukturiert ($P = 300 \text{ mJ/cm}^2$) werden. Nach der Entwicklung in einer Durchlaufanlage kann eine Plasmareinigung durchgeführt werden. Die Prozessparameter können beispielsweise sein: Sprühdruk $1,6 \text{ bar}$; 30°C ; $0,9 \%$ Karbonat Lösung. Die Plasmareinigung mit Sauerstoff/CF₄/Argon kann die Oberfläche des Fotofilmes (optimale Benetzung) modifizieren und kann organische Rückstände von der Kupferfläche ätzen. Die Figuren 3 a, 3b und 3c zeigen links beginnend das Substrat 4 in der Übersicht mit einem 15 mm breiten Randbereich 42 und Details der kritischen Stellen mit $10 \mu\text{m}$ L/S (line/space). Figur 3b zeigt einen Einzelnutzen zur Kontaktierung zweier Siliziumkomponenten. Figur 3c zeigt Leiterbahnen 411 in Detaildarstellung. Die hier aufgezeigten Materialien, Dimensionen und Herstellungsprozesse sind nicht einschränkend zu verstehen und dienen lediglich einer beispielhaften Erläuterung.

[0048] In Figur 4c ist eine Fotografie eines beispielhaften Aufbaus dargestellt, umfassend das Galvanikbecken 1, die Anodenhalterung 2, ein Steuermodul 6, eine Luftereinbläsung 7 und Zuleitungen 8. Eine segmentierte Anode 3 (nicht sichtbar) ist an der Anodenhalterung 2 montiert und in das Galvanikbecken in den Elektrolyt eingetaucht. Das Substrat ist ebenfalls im Galvanikbecken in den Elektrolyt eingetaucht angeordnet. Das Steuermodul 6, das die segmentierte Anode ansteuert, kann Teil der Schaltung sein oder ein externes Modul sein oder beispielsweise in einem Laptop/PC integriert sein. Beispielsweise kann das Steuermodul ein Laptop umfassend eine Festplatte sein. Das Steuermodul 6 selbst kann das Machine Learning / Modellieren ausführen. Alternativ kann das Machine Learning/ Modellieren auf einem Laptop/PC ausgeführt werden. Ein aus dem Modell resultierendes Steuerungsprogramm kann auf das Steuermodul übertragen werden, sodass das Steuermodul 6 die Anodensegmente autark steuern kann. Das Steuermodul 6 ist über die Zuleitungen 8 mit den Anodensegmenten 31 verbunden und kann diese unabhängig voneinander ansteuern.

[0049] Die steuerbare, segmentierte Anode 3 umfasst ein aus Polypropylen konstruiertes, zweiteiliges Gehäuse mit Ringdichtungen aus Viton®, 130 in der Größe variierte Anodensegmente auf der Vorderseite, die zum Substrat zentriert sind und eine pulsfeste, variabel ansteuerbare Relaischaltung (vergleiche Figuren 2c, 4a, 4b).

[0050] Die Relaissteuerung 4 zur Anbindung jeder einzelnen der 130 Anodensegmente, an die Zuleitung einer Pulsstromquelle, kann beispielsweise auf Basis eines Arduino UNOs realisiert werden. Ein Mikrokontroller kann per I2C mit

zwei Erweiterungsplatinen kommunizieren. Auf den Erweiterungsplatinen können insgesamt 8 Bausteine vom Typ MCP23017 montiert sein. Die Erweiterungsplatinen können galvanisch getrennt 16 Stück 8-Kanal-Relaiskarten steuern. Zwei weitere Einzel-Relaiskarten können direkt über das Arduino UNO Board angesteuert werden. Mit dieser Schaltung können alle 130 Anodensegmente unabhängig voneinander geschaltet werden.

[0051] Die mechanische Aufnahme der Baugruppen und Verteilung der Spannungsversorgung (12 V, max. 10 A) wurde mit einer zweilagigen Leiterplatte realisiert. Die Programmierung des Arduino UNOs und der Start der Abscheidungssequenz kann beispielsweise an einem Notebook mittels USB Schnittstelle erfolgen.

[0052] Die Software auf dem Arduino kann einen Algorithmus zur Änderung der An/Ausschaltzustände für jedes Anodensegment pro definierten Schaltzyklus ausführen. Die Schaltzustände können von 0 bis 1 normiert mit zwei Nachkommastellen mittels USB auf den Arduino übertragen werden. Das Programm kann starten und die Prozessdauer loggen. Es kann, bei einer Taktzeit von 5 Sekunden, das, auf die gesamte Kupferabscheidendauer bezogene, Tastverhältnis vergleichen. Das Programm kann das Segment 5 s lang anschalten, wenn es unter dem geforderten Tastverhältnis liegt, oder kann es entsprechend ausschalten, wenn es darüber liegt. Im Ergebnis sind bei einer Abscheidendauer von 50 min = 3000 s beispielsweise maximal 600 An/Aus-Wechsel möglich und der Verschleiß der Relaiskontakte kann begrenzt werden.

[0053] Der Fotolack auf den Substraten kann nach der Kupferabscheidung in einer Durchlaufanlage entfernt werden (beispielsweise mit einer aminhaltigen Lösung, $T = 40^{\circ}\text{C}$, p Sprühdruk = 3 bar). Die Titan-/Kupferstartschicht kann anschließend nicht abgeätzt werden, um möglichst sichere Daten der Kupferabscheidung zu messen. Im nächsten Schritt kann an jeweils zwei Punkten der Einzelnutzen zu insg. 480 Punkten pro Substrat XYZ-Messdaten der Kupferoberfläche (Messfläche ca. $150\text{ }\mu\text{m} \times 220\text{ }\mu\text{m}$) mittels Weißlichtinterferometer auf einer IMPEX Koordinatenmessmaschine gemessen werden.

[0054] Figur 5 zeigt beispielhaft eine Visualisierung von Rohdaten einer XYZ Punktwolke. Figur 5b zeigt gefilterte nivellierte Daten und Figur 5c einen gemittelten Messwert Z der Kupferhöhe auf dem Substrat.

[0055] Die Auswertung der Daten kann in dem Programm Mountains Map[®] erfolgen. Die gesamte Versuchsreihe hinweg können vordefinierte Einstellungen für 1. die Nivellierung 2. die Filterung der Messdaten an den Kanten und 3. die Ausgabe der mittleren Höhendifferenz der Kupferstartlage (grün) und Leiterbahn (rot) verwendet werden (siehe Figuren % a bis 5c). Die Messdatei mit X, Y, und Z Werten kann in eine .CSV basierte Datenbank zusammen mit dem Werten der Gewichtung der Anodensegmente abgespeichert werden.

[0056] Farben sind in den Figuren durch Abkürzungen dargestellt, wobei r für rot, or für orange, ge für gelb, gr für grün, hbl für hellblau, bl für blau steht.

[0057] Mit der Software Python wurde ein Programm geschrieben, das zuerst die Daten der Konturdiagramme importiert, alle Werte auf einen Mittelwert von $5\text{ }\mu\text{m}$ interpoliert, auf 1 normiert und in ein Numpy Array speichert. Die Interpolierung der im Mittel abgeschiedenen Kupferschichtdicke ermöglicht, die Versuchsreihe aus Testdaten, Prognosen und Folgeversuchen miteinander vergleichen zu können, da eine Schwankung der mittleren Schichtdicke die 3-fache Standardabweichung (3 sigma) als Qualitätsmerkmal beeinflusst. Die Normierung der Eingabe/Ausgabewerte ist eine Voraussetzung der Scikit-learn Modelle. Im nächsten Schritt können die Daten der Gewichtungen (Tastverhältnis) der Anodensegmente importiert und in ein Numpy Array gespeichert werden.

[0058] Nach dem Import der Datenbank in Numpy Arrays kann ein Modell aus der Scikit-learn Bibliothek erzeugt werden und anhand von Trainingsdaten angepasst werden. Es kann eine Vorauswahl der umfangreichen Möglichkeiten zur Modellierung aus der scikit-learn Bibliothek zu überwachtem / supervised Machine Learning durchgeführt werden. Die Vorauswahl besteht vorliegend aus Modellen, die grundsätzlich Regression beherrschen und multiple, zueinander ab-/wie unabhängige Kombinationen aus Ein- wie Ausgaben (Input / Output) abbilden können. Folgende Modelle können beispielsweise vorausgewählt werden: "Decision Tree Regression" und/oder "k-nearest neighbours Regression" und/oder "Multi Output Regression" und/oder "Linear Regression" und/oder "Random Forest Regressor".

[0059] Unter Anwendung möglichst weniger Datensätze und entsprechender Versuche, können Modelle erzeugt werden, die einen Zusammenhang der Anoden Steuerung und der resultierender Kupferabscheidung widerspiegeln. Zu diesem Zwecke kann zunächst ein Vergleich zu einer nicht segmentierten Anode durchgeführt werden. Dafür kann das galvanische System anstelle von mit einer segmentierten Anode mit einer nicht segmentierten Anode betrieben werden. Daraufhin kann die Anode umgebaut werden und eine segmentierte Anode in den Halter 2 eingesetzt werden. Anschließend können beispielsweise fünf Datensätze aus Gewichtungen der Anodensegmente und einem entsprechenden Ergebnis der Kupferabscheidung erzeugt werden. Ein sechster Datensatz kann beispielsweise eine Nulllinie darstellen.

[0060] Die Muster zur Gewichtung der Anodensegmente zwischen 0 und 1 können in Form von geeigneten "Lernmustern" realisiert werden. Die Lernmuster können das Ziel haben, dem Modell möglichst effektiv Gradienten, Randeffekte, Verschiebungen und die Strömungseffekte wie Lufteinblasung und Umwälzung aufzuzeigen. Als Lernmuster können beispielsweise doppelt schiefe Ebenen und nicht lineare, zum Beispiel Sinus-gewichtete Radian auf der Anodenfläche verteilt sein. Ein Beispiel dafür ist in den Figuren 6a und b abgebildet. Hier ist als Lernmuster ein an der Kante erzeugter, Sinus gewichteter, radialer Keil verwendet worden. In Figur 6a ist ein Lernmuster mit 130 Segment-Gewichten dargestellt. Davon sind in rot = 1 dargestellt diejenigen Segmente, die 100 % geschaltet sind. In grün = 0 sind diejenigen

Segmente dargestellt, die 0 % geschaltet sind. In Figur 6b sind 480 XYZ Punkte dargestellt, wobei Z-Höhen einer auf dem Substrat abgeschiedenen Kupferhöhe entspricht. Die Figur 6b ist ein geglättetes XYZ Konturdiagramm. Beide Informationen, d.h. die Informationen der Figur 6a und 6b in Kombination ergeben ein beispielhaftes Trainingsdatenset.

[0061] Ein erzeugtes Gewichtungsmodell kann bidirektional trainiert werden, um die Gewichtung der Anodensegmente zu prognostizieren (Reverse Machine Learning). Vereinfacht ausgedrückt "lernt" das Modell in der einen Richtung, wie die Höhenverteilung bei gegebenen Anodengewichtung aussieht bzw. "lernt" in der anderen Richtung wie bei gegebener Höhenverteilung die Anodengewichtung aussieht. Figur 7 zeigt ein System zur Durchführung des oben beschriebenen Verfahrens. Die Doppelpfeile in Figur 7 verdeutlichen das bidirektionale Trainieren. Das System und/oder das entsprechende Verfahren kann ermöglichen, dass bei Eingabe einer perfekt homogenen Verteilung ein Modell generiert wird, das die dafür nötige Anodengewichtung bestimmt. Dies kann experimentell verifiziert werden.

[0062] Figur 7 visualisiert die Zusammenhänge des Systems, das zur Durchführung der Verfahrensschritte nach Figur 1 ausgebildet ist.

[0063] In einem Beispiel kann eine Kupferabscheidung zunächst mit einer einteiligen Anode durchgeführten werden. Ein Ergebnis für eine initial verbaute, einteilige Anode kann beispielsweise betragen: normiert auf den Mittelwert von $\mu = 5 \mu\text{m}$, $3\sigma = 1.79 \mu\text{m}$ und die Uniformität $U = 36 \%$. Das ist der Quotient aus statistisch einseitiger Schwankungsbreite von 3σ und dem Mittelwert. Die Abscheidung mit der einteiligen Anode kann eine ausgeprägte Randerhöhung $t_{cu} > 7 \mu\text{m}$ und eine Senke der Kupferschichtdicke in der Mitte $t_{cu} < 4 \mu\text{m}$ zeigen. Zudem kann sich trotz geometrisch zentrierter Anordnung die Kupferabscheidung als nicht mitten-symmetrisch zeigen. Dies ist beispielsweise in Figuren 8a und 8b gezeigt.

[0064] Daraufhin kann eine segmentierte Anode verwendet werden, um weitere Lernmuster manuell zu generieren. Die Ergebnisse der Versuchsreihe mit manuell erzeugten Lernmustern zur Ansteuerung der Anode und die zugehörigen, in Versuchen erzeugten Konturdiagramme zur Kupferverteilung, können zusammen mit der "Nulllinie" Trainingsdaten für das Machine Learning bilden. Beispielhafte, manuell erzeugte Lernmuster sind (ausgenommen des 6. Datensatzes der "Nulllinie") mit der Nummer 1 bis 5 in Figur 9 dargestellt. Die Skalierung der Segment-Gewichte ist rot = 1 = 100%; grün = 0 = 0% geschaltet, die Skalierung der Konturdiagramme ist $0 \mu\text{m}$ (dunkelblau) bis $10 \mu\text{m}$ (rot).

[0065] Auf Basis einer derartig eingeschränkten Datenbasis können unterschiedliche Machine Learning Modelle trainiert und in einem ersten Schritt digital evaluiert werden. Zu diesem Zweck kann in einer vorgegebenen Anzahl von Schleifen (beispielsweise $N > 10$) ein Testdatensatz von den fünf zuvor erzeugten Trainingsdaten abgespalten und eine Prognose des Modelles gegen einen real erzeugten Testdatensatz verglichen werden. Als Kriterium kann der mittlere absolute Fehler (MAE) und dessen Standardabweichung (STD) von der Trainings- gegen das Testdatenset verwendet werden. Beispielhafte Ergebnisse dieser Berechnungen sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Ergebnisse der Trainings/Testphase verschiedener Scikit-learn Modelle

LinearRegression		DecisionTreeRegression		KNeighbors Regression		MultiOutput Regression	
MAE	STD	MAE	STD	MAE	STD	MAE	STD
0.694	0.335	0.467	0.151	0.38	0.157	0.411	0.169

[0066] Beispielsweise unter Verwendung der Modelle aus Tabelle 1 können mit dem in Figur 1 beschriebenen Verfahren Ergebnisse mittels (Reverse) Machine Learning zur Gewichtung der Anodensegmente, sowie die dazu gehörigen Konturdiagramme zur Kupferverteilung erzeugt werden. Beispielhafte Ergebnisse daraus sind Figur 10 dargestellt. Die Histogramme und Konturdiagramme wurden verwendet, um die Modelle anhand der erreichten Uniformität in % zu vergleichen und die Veränderungen visuell darzustellen. Die Skalierung der Segment-Gewichte ist rot = 1 = 100%; grün = 0 = 0% geschaltet; die Skalierung der Konturdiagramme ist: $0 \mu\text{m}$ (dunkelblau) bis $10 \mu\text{m}$ (rot).

[0067] Zu den Trainingsdaten (beispielsweise die oben beschriebenen 6 Datensätze) können die oben gezeigt drei weiteren Datensätze aus 130 Gewichtungen der einzelnen Anodensegmente und 480 Z Konturdaten hinzugefügt werden. Zur Reduktion der Versuchsanzahl kann beispielsweise eines, beispielsweise nur das beste, beispielsweise das Ergebnis "LinearRegression V2" mit 9 statt zuvor 6 Datensätzen trainiert werden. Zudem kann das Delta der normierten Gewichtung der segmentierten Anode für das Lineare Regressions-modell von V1 zu V2 aufgezeigt werden, um zu visualisieren, welche Änderung das Modell mit den zusätzlichen Informationen der 3 ergänzenden Datensätze berechnet hat.

[0068] Parallel zu den Höhenmessungen kann die Oberfläche der Kupferabscheidung mit einem Lichtmikroskop dokumentiert werden, um den Einfluss der Anode auf die Abscheidung darzustellen und/oder zu bewerten. Figur 11a zeigt ein Detail $10 \mu\text{m}$ L/S des Substrats unter Verwendung einer einteiligen Anode. Figur 11b zeigt eine Übersicht $10 \mu\text{m}$ L/S des Substrats unter Verwendung einer einteiligen Anode. Figur 11c zeigt ein Detail $10 \mu\text{m}$ L/S des Substrats unter Verwendung einer segmentierten Anode, Fig. 11d zeigt eine Übersicht $10 \mu\text{m}$ L/S des Substrats unter Verwendung einer segmentierten Anode.

[0069] Das oben beschriebene initiale Ergebnis der einteiligen Anode kann beispielsweise den deutlichen Einfluss der seitlichen, inhomogenen Anströmung der Substratoberfläche mit hohen Abweichungen in der Kupferabscheidung

von $U > 30\%$ bestätigen.

[0070] Werden in der Auswertung die Daten der Kupferabscheidung digital, auf die Mitte geschoben, können noch immer Randerhöhungen und ein ausgeprägtes "Tal" in der Substrat-Mitte erkennbar sein, so dass die Uniformität dadurch nicht signifikant verbessert wird. Diese Effekte lassen sich, wenn überhaupt, nur mit weiteren Einbauten wie z.B. Blendenkfigurationen beheben. Der Aufwand dafür ist als hoch anzusehen, denn jede Veränderung muss mit einer Testabscheidung verifiziert werden. Eine intuitive Richtung zur Problembehebung ist hier nicht gegeben.

[0071] Die hier entwickelte segmentierte, individuell ansteuerbare Anode zeigt einen alternativen Lösungsweg auf. Zur Programmierung bzw. Steuerung der Segmente wurde der Einfluss eines Operators weitgehend minimiert. Die Machine Learning Modelle können das wahrscheinliche Konturdiagramm darstellen und mittels Reverse Machine Learning auch die Ansteuerung der Segmente zur Erzeugung einer möglichst uniformen Abscheidung berechnen. Dabei kann es sinnvoll sein, Trainingsdaten zu erzeugen und eine Vorauswahl der Modelle zu treffen.

[0072] Die in Fig. 9 dargestellten Datensätze mit Lernmustern können bereits bei drei von vier Modellen bereits mit 6 Datensätzen logisch nachvollziehbare Vorschläge zur Ansteuerung der Segmente erzeugen.

[0073] In dieser Versuchskonfiguration mit nur 6 Trainingsdaten kann sich das Modell "linearRegression" durchsetzen. Die dabei berechnete Ansteuerung der Anode erzielte im Versuch eine Uniformität der Kupferabscheidung von 20 %. Auf Basis der Daten die während der Folgeversuche gewonnen wurden, konnte als Auswahl das Modell "linearRegression" erneut trainiert und in Version 2 eine Verbesserung der Uniformität zu 15 % erreichen.

[0074] Die Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung der Kupferoberfläche könne zeigen, dass die Elemente fehlerfrei plattiert wurden. Es konnte optisch eine Verrundung an der Oberseite der Bahnfläche dokumentiert werden. Die Oberfläche selbst wurde glänzend und gleichmäßig über das Substrat abgeschieden. Der Effekt der Verrundung ist sehr gering ($< 0,5 \mu\text{m}$) und kann im Zusammenhang mit der kostengünstigen Plattenkonstruktion der Anodensegmente erklärt werden.

[0075] Die beispielhaften Ergebnisse zeigen, dass eine steuerbare, segmentierte Anode eine Uniformität von 15 % erreichen kann und in der hier dargestellten Konfiguration deutlich besser als die einteilige Anode arbeitet. Die 3 σ Abweichungen von knapp $2 \mu\text{m}$ auf deutlich unter $1 \mu\text{m}$ zu senken ist bei dem Ziel eine $5 \mu\text{m}$ hohe Abscheidung zu erzeugen eine signifikante Verbesserung des Initialzustandes.

[0076] Bemerkenswert ist, dass der Algorithmus zur linearen Regression schon mit nur 6 Datensätzen mathematisch erkennen kann, dass die Bestromung der Ecken Vorteile gegenüber anderen Gewichtungs-Mustern hat und mittig zentrierte Muster nicht verfolgt hat. Dies geschah in der Versuchsreihe entgegen der intuitiv richtig erscheinenden Annahme einer zentriert symmetrischen Gewichtung, was zeigt, dass modellierende Software-Werkzeuge eine sinnvolle Hilfestellung für Prozessingenieure bieten kann.

[0077] Auch die alternativen Modelle können innovative, künstliche Muster zur Ansteuerung der Anoden Segmente erzeugen, die darauf hinweisen, dass in dieser Konstruktion sehr wahrscheinlich eine ringförmige Anode Vorteile gegenüber einer großflächigen Anode aufweist.

[0078] Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ältere und oft günstige Anlagentechnik bei inhomogener Anströmung und Lufteinblasung mit einer segmentierten Anode und Machine Learning betrieben werden können, um die anspruchsvollen Toleranzen bei der Verkupferung von Leiterzügen auf IC Substraten einzuhalten.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines Substrats mittels Kupferabscheidung umfassend die folgenden Schritte

I. Bereitstellen eines Steuermoduls, eines Speichermoduls sowie eines galvanischen System zur Kupferabscheidung auf einem Substrat, das galvanische System aufweisend eine segmentierte Anode, die eine Vielzahl von Anodensegmenten aufweist, die jeweils ausgebildet sind, durch Anlegen eines Stroms auf einem korrespondierenden Substratsegment Kupfer abzuscheiden; wobei die Anodensegmente über eine zwischen eine Stromquelle und die Anode geschaltete elektrische Schaltung unabhängig voneinander mit Gleichstrom oder gepulstem Wechselstrom beaufschlagbar sind,

II. Beaufschlagen der segmentierten Anode mit einem Strom gemäß einem vordefinierten Lernmuster, sodass Kupfer auf dem Substrat abgeschieden wird,

III. Messen der resultierenden Kupferhöhe auf dem Substrat ,

IV. Erstellen eines Datensatzes aus den gemessenen Kupferhöhen und einer zugeordneten Steuerung der Anodensegmente gemäß dem Lernmuster und Speichern des Datensatzes im Speichermodul,

V. Wiederholen der Schritte II bis IV mit einem sich vom vorherigen Lernmuster unterscheidenden Lernmuster, VI. Erstellen eines Gewichtungsmodells, das eine Gewichtung der Anodensegmentsteuerung auf die Kupferhöhe des Substrats prognostiziert, unter Verwendung der gespeicherten Datensätze,

VII. Steuern der segmentierten Anode derart, dass zumindest gemäß dem ermittelten Gewichtungsmodell eine

homogene Kupferhöhe auf dem Substrat erreicht wird.

2. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei in Schritt VI das Gewichtungsmodell unter Verwendung eines Modells basierend auf künstlicher Intelligenz angepasst wird.

3. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei das vordefinierte Lernmuster und/oder eine Sammlung von vordefinierten Lernmustern eine Gewichtung der Anodensegmente vorgibt, insbesondere kann zumindest eines der vordefinierten Lernmuster einen mathematisch modellierten Verlauf umfassen und/oder eine gruppierte Abstufung umfassen.

4. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Schritte II und III zusätzlich mit einer nicht segmentierten Anode durchgeführt werden.

5. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei in Schritt VI zum Zwecke des bidirektionalen Lernens die Daten der gespeicherten Datensätze auf einen Sollwert interpoliert, zudem normiert und statistisch modifiziert werden.

6. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Daten in ein digitales Array, beispielsweise ein Numpy Array, gespeichert werden.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Gewichtungsmodell der Anodensegmente angepasst wird, indem es bidirektional, insbesondere unter Verwendung der gespeicherten Datensätze, trainiert wird.

8. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei in Schritt VI ein Modell zum maschinellen Lernen unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze und/oder statistischer Regressionsmodelle erzeugt, trainiert und verwendet wird.

9. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Datensätze in Schritt IV in Form von Tabellen und/oder Konturdiagramme und/oder Histogrammen visualisiert und gespeichert werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Schritte II bis IV für zumindest eines, insbesondere für zumindest zwei oder zumindest drei, insbesondere zumindest fünf oder zumindest sechs, bevorzugt zumindest neun Lernmuster durchgeführt werden.

11. System zum Herstellen eines Substrats mittels Kupferabscheidung umfassend

- ein galvanisches System zur Kupferabscheidung auf einem Substrat, aufweisend eine segmentierte Anode, die eine Vielzahl Anodensegmenten aufweist, die jeweils ausgebildet sind, durch Anlegen eines Stroms auf einem korrespondierenden Substratsegment Kupfer abzuscheiden; wobei die Anodensegmente über eine zwischen eine Stromquelle und die Anode geschaltete elektrische Schaltung unabhängig voneinander mit Gleichstrom oder gepulstem Wechselstrom beaufschlagbar sind,

- ein Speichermodul, auf dem eine Mehrzahl von Datensätzen gespeichert ist, die Datensätze jeweils umfassend Informationen zu Kupferhöhen auf einem Substrat und einer zugeordneten Steuerung der Anodensegmente,

- eine mit dem Speichermodul zumindest temporär verbundene oder integrierte Steuereinheit, die ausgebildet und eingerichtet ist, die Datensätze aus dem Speichermodul abzurufen und ein Gewichtungsmodell zu erstellen oder abzurufen, das eine Wirkung der Gewichtung der Anodensegmente auf die Kupferhöhe des Substrats prognostiziert, wobei die Steuereinheit ferner mit der elektrischen Schaltung verbunden und ausgebildet und eingerichtet ist, die elektrische Schaltung unter Verwendung des Gewichtungsmodells derart zu steuern, dass zumindest gemäß dem ermittelten Gewichtungsmodell eine homogene Kupferhöhe auf dem Substrat erreicht wird.

12. System nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei die Steuereinheit ausgebildet und eingerichtet ist, das Gewichtungsmodell unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze und/oder statistischer Regressionsmodelle anzupassen.

13. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das galvanische System umfasst

- eine Kammer oder Kammersystem mit einer Lösung zum Zwecke der galvanischen Abscheidung von Metallen;

EP 4 424 886 A2

- eine in der Kammer angeordnete Substrathalterung zur Aufnahme des Substrats.

14. Substrat, hergestellt nach dem Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10 und/oder mit einem System gemäß Anspruch 11 oder 12, wobei das Substrat eine homogene Kupferoberfläche aufweist.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

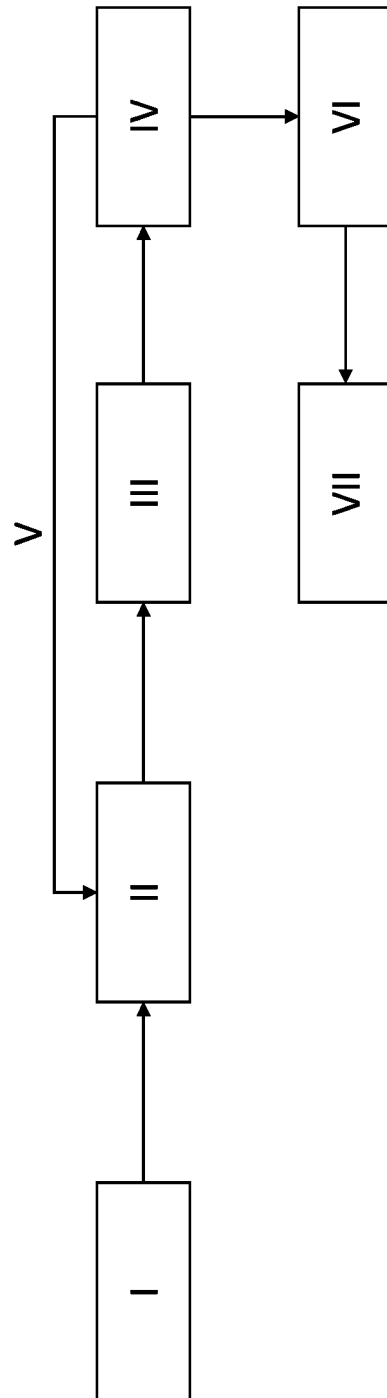


Fig. 1

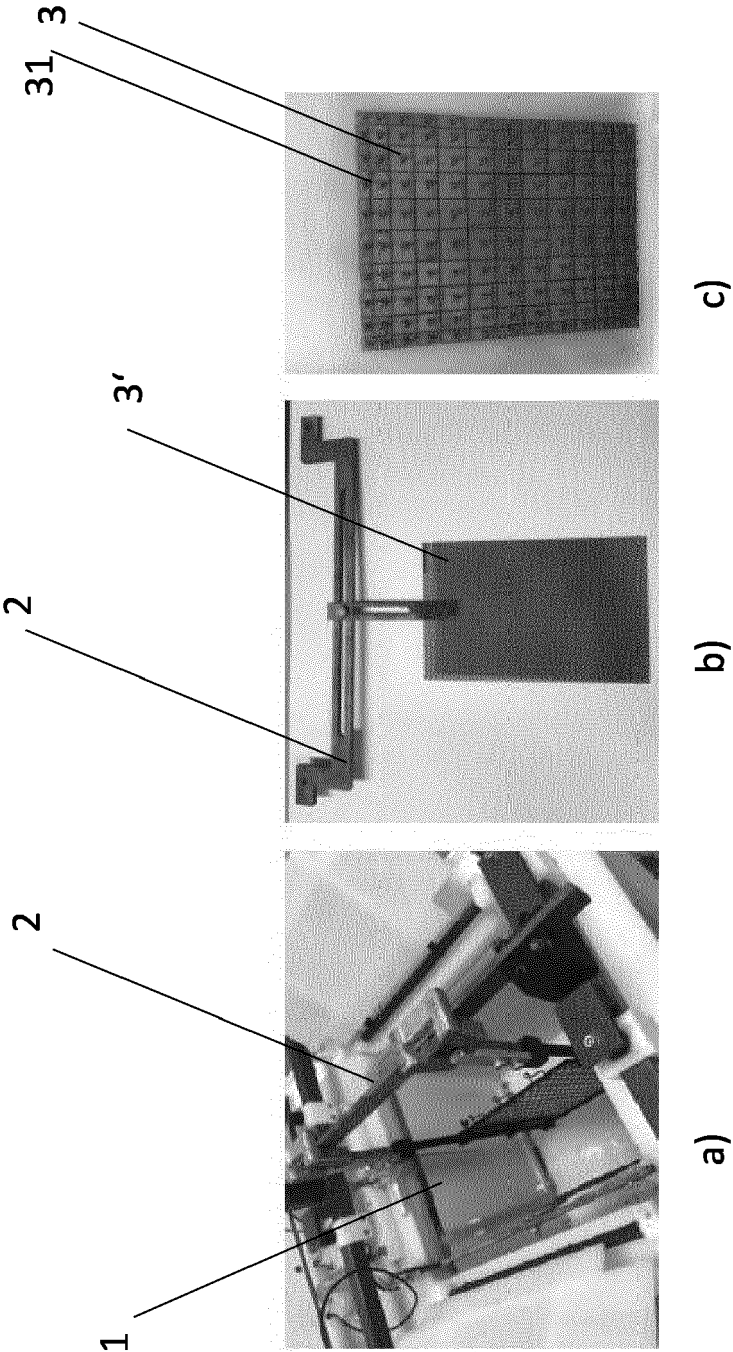


Fig. 2

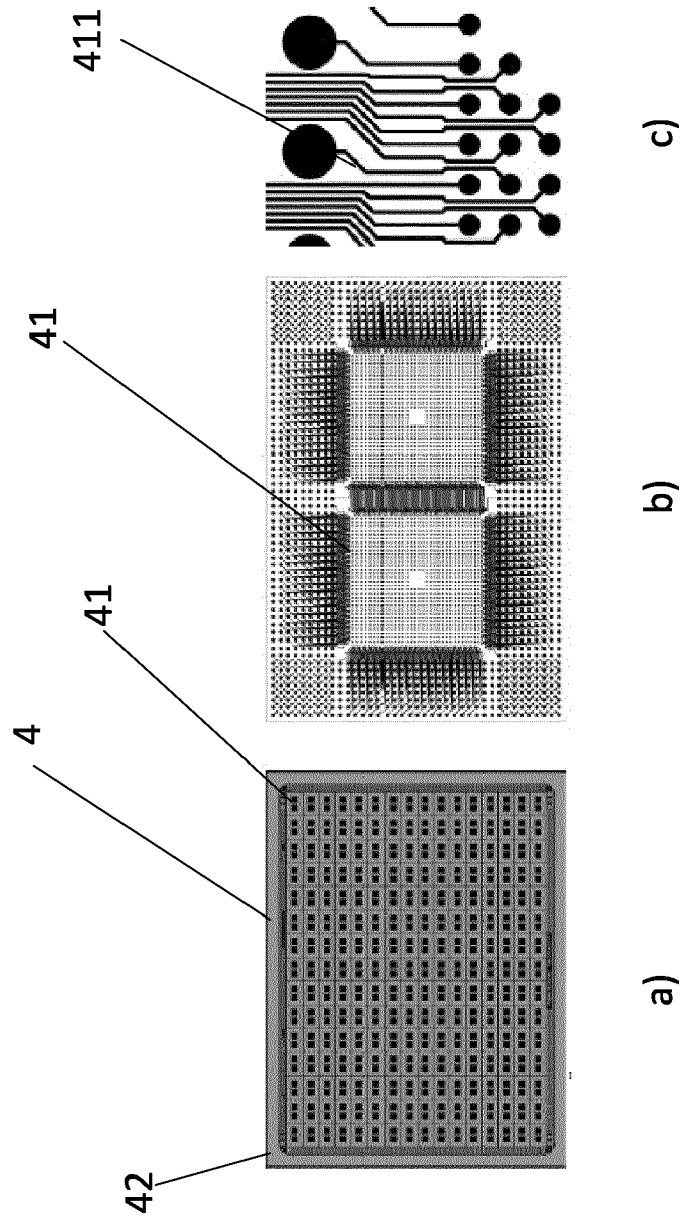


Fig. 3

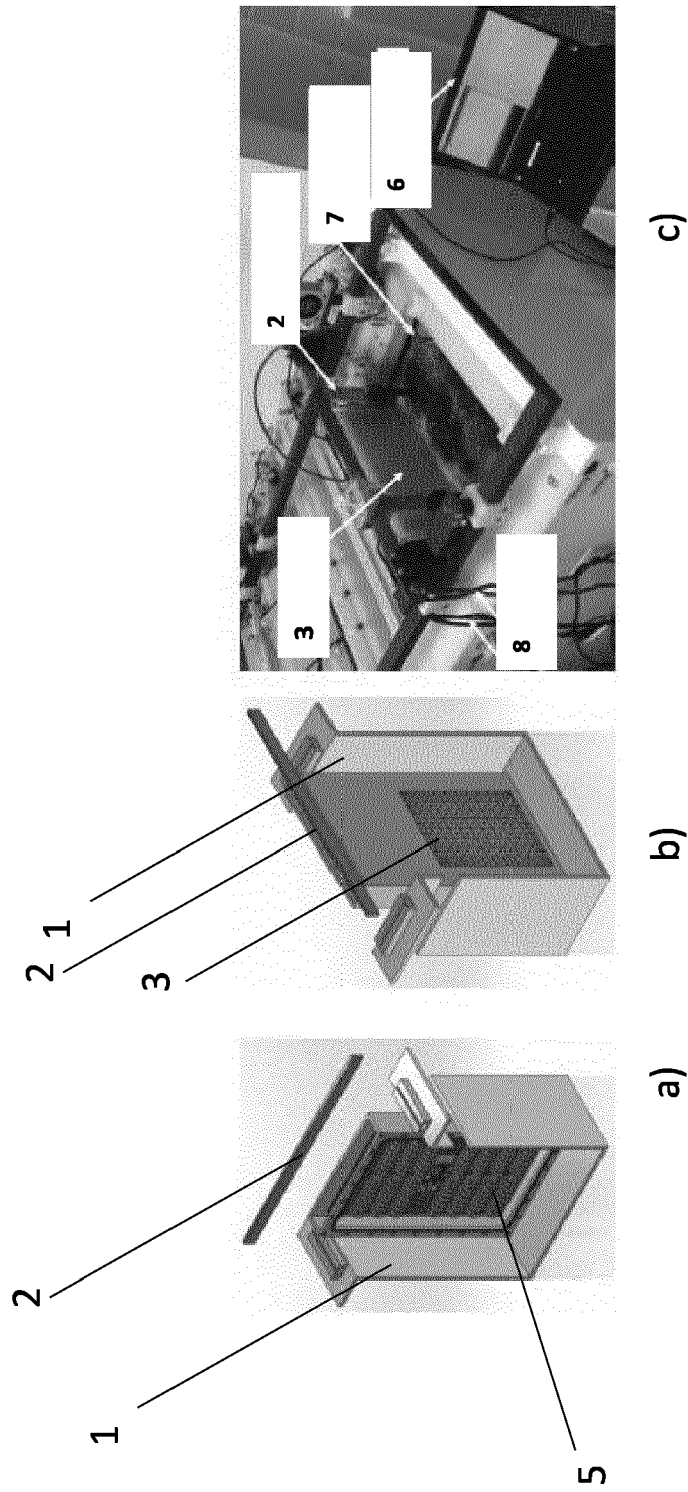


Fig. 4

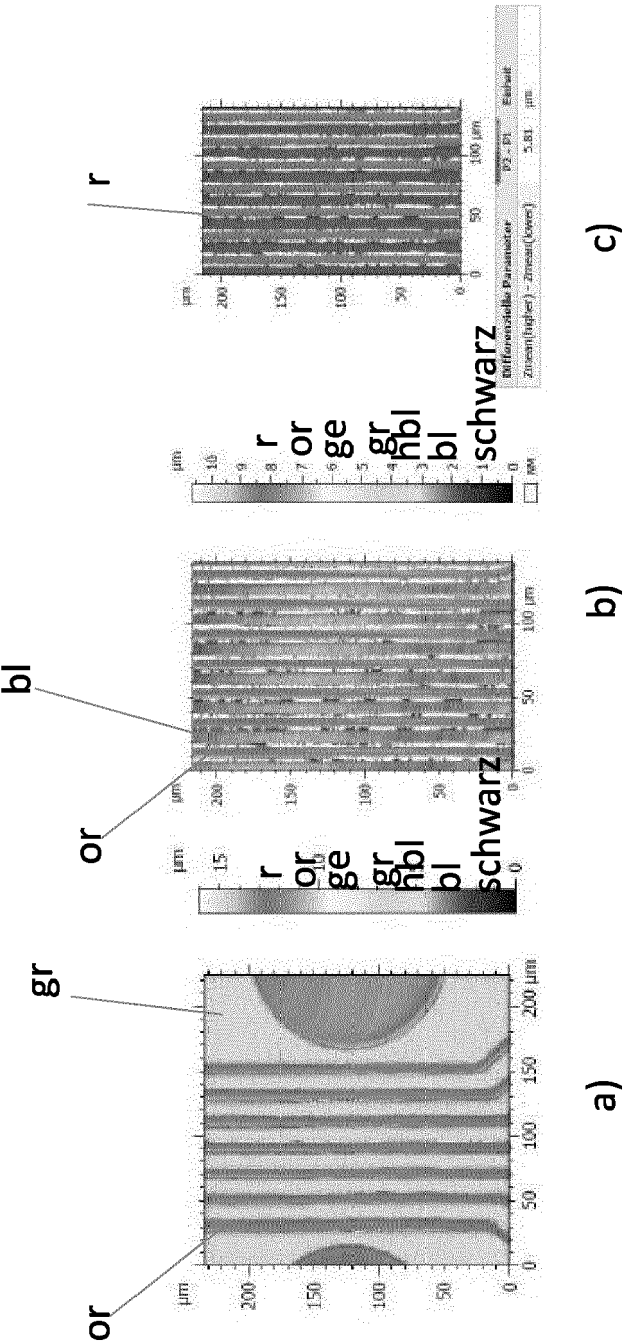


Fig. 5

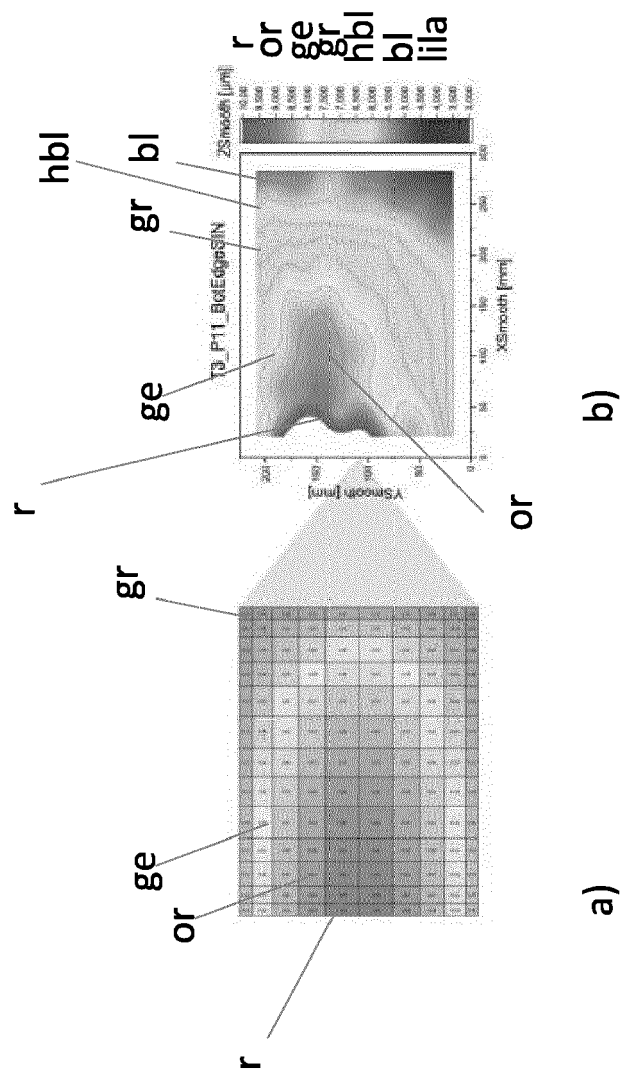


Fig. 6

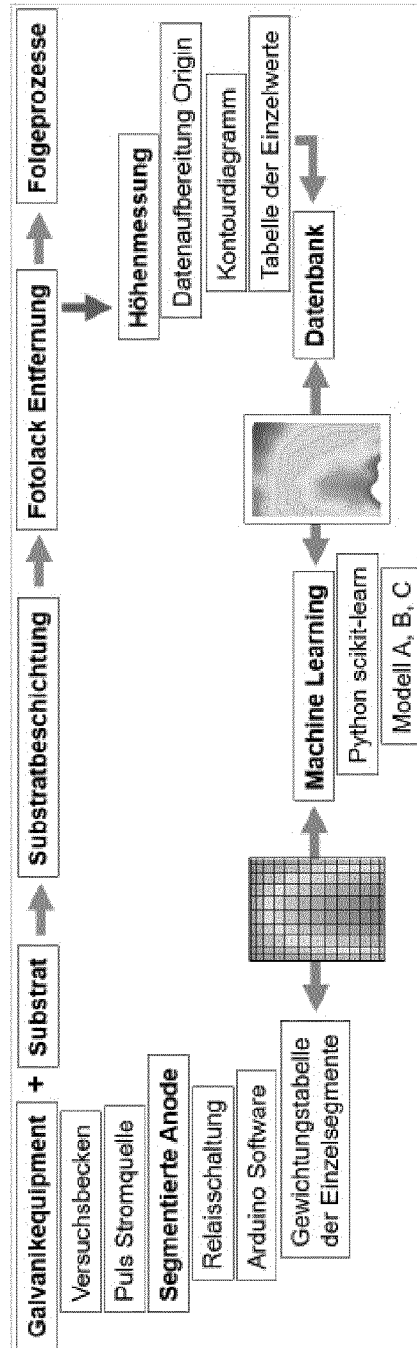


Fig. 7

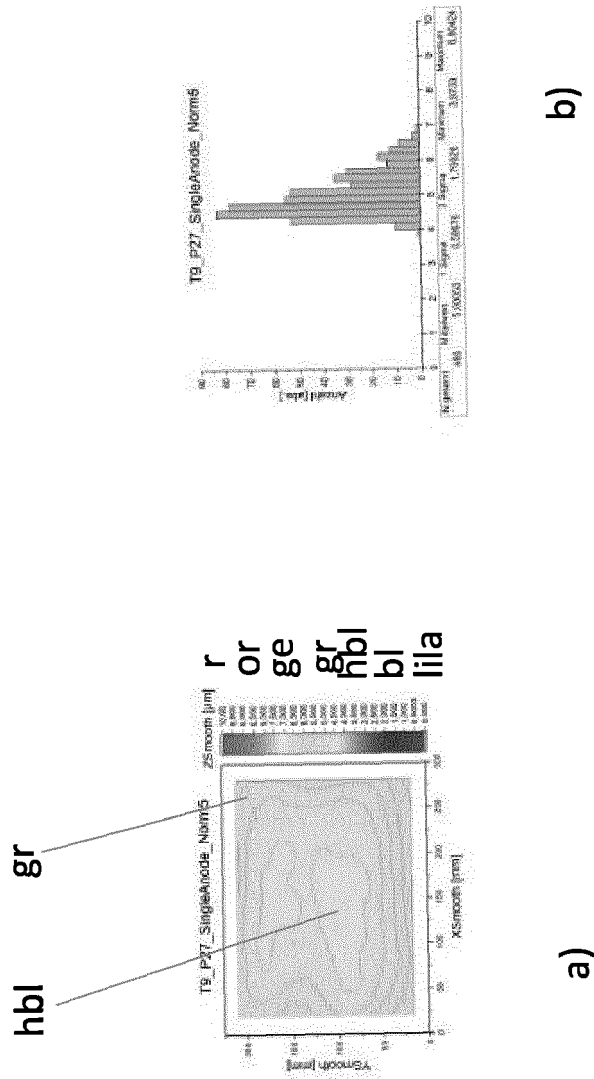


Fig. 8

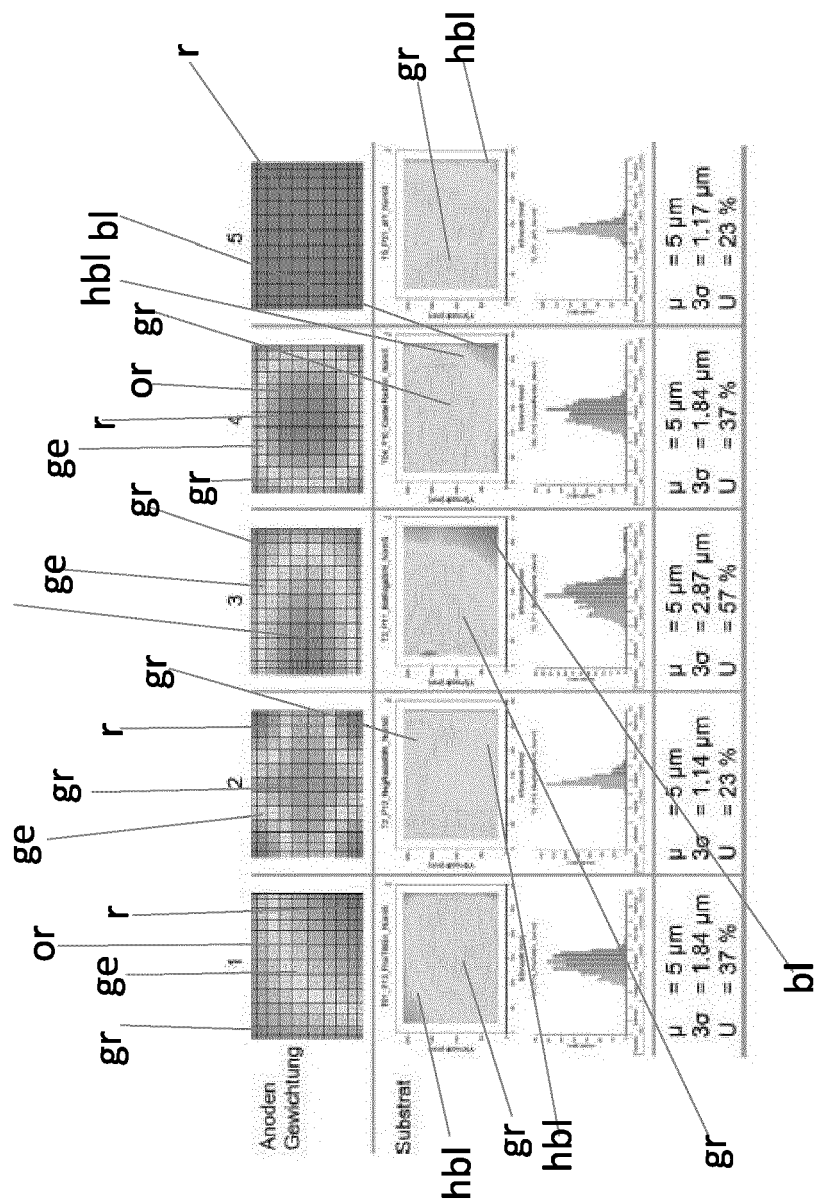


Fig. 9

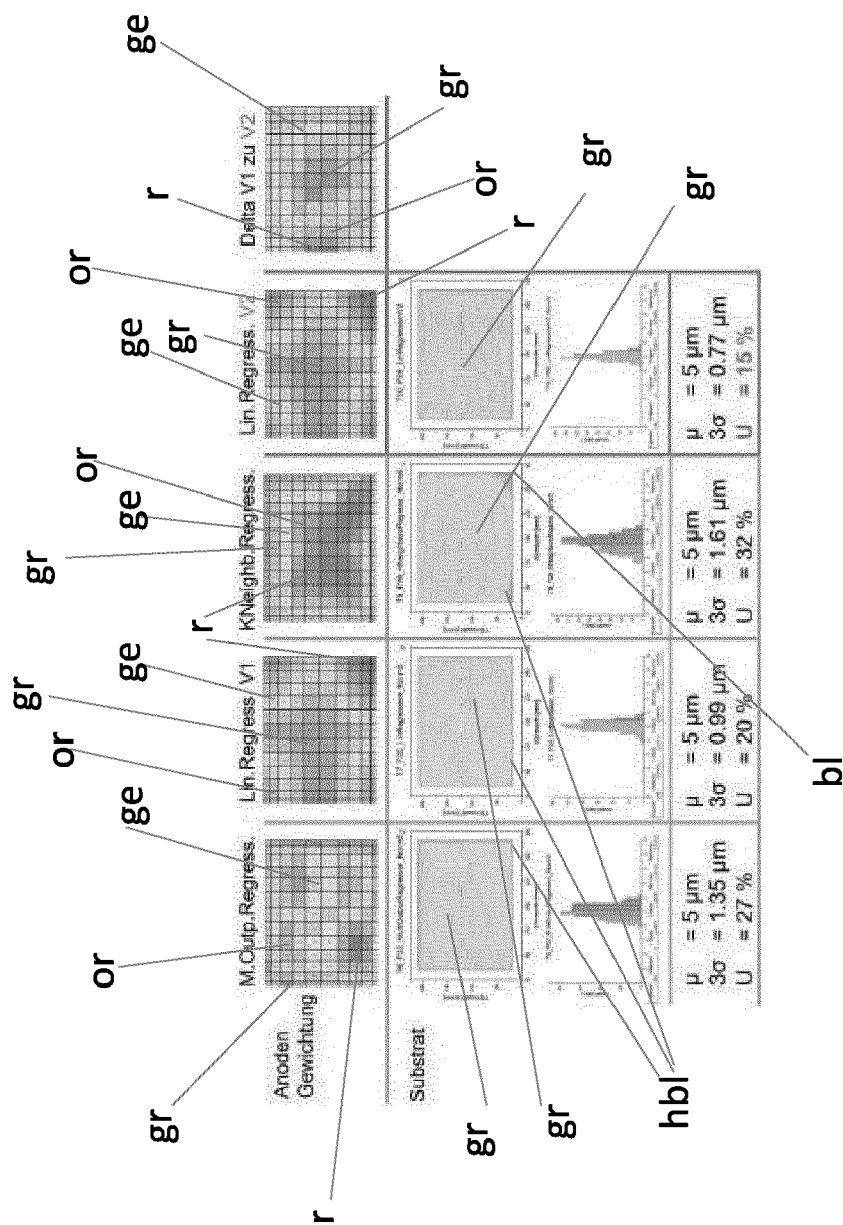


Fig. 10

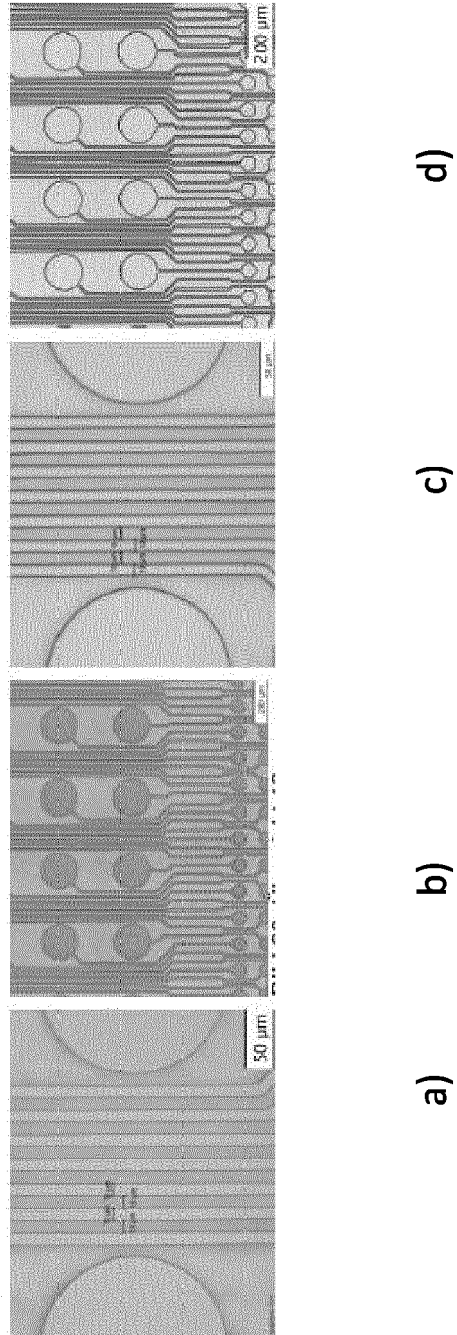


Fig. 11