

Einsatz von Kupfer und Kupferlegierungen in der Mikrosystemtechnik

Wurz, M. C.; Rissing, L. (1)

Für die Entwicklung und Fertigung von elektromagnetischen Mikrosystemen ist Kupfer als Leitermaterial ein wichtiger Werkstoff. Der Werkstoff zeichnet sich durch eine hohe Strombelastbarkeit und einen niedrigen spezifischen Widerstand auch bei kleinen Leiterquerschnitten aus.

Durch die Möglichkeit, dieses Material galvanisch mit feinsten Strukturauflösungen im Bereich weniger Mikrometer abzuscheiden, ist es in besonderem Maß zur Integration in Mikrosystemen geeignet. Am Institut für Mikroproduktionstechnik (IMPT) wird galvanisches Kupfer für die Herstellung von elektrischen Leitern eingesetzt. Je nach Anwendungsfall und den spezifischen Anforderungen werden die Leiter als Spiral-, Mäander- oder auch Helixspulen ausgelegt. Darüber hinaus ist es möglich, auch Kupferlegierungen mittels Galvanik in Mikroformen abzuscheiden. In diesem Bereich wurden Untersuchungen zum Abscheiden von Kupfer-Wolfram durchgeführt, um hier einen Alternativprozess zum klassischen Sintern für die Herstellung von Elektroden für die Mikrofonkenerosion zu entwickeln.

Ausführungsformen und Anwendungen von Mikrospulen

Für den Aufbau von elektro-magnetischen Mikrosystemen, wie bspw. Positionssensoren oder Mikromotoren, werden Spulen sowohl für die Messung von Signalen als auch für die Erzeugung magnetischer Felder benötigt. Verglichen mit feinwerktechnisch hergestellten Spulen weisen die

dünnschichttechnisch gefertigten Spulen entscheidende Vorteile auf: Die Spulengeometrie kann wesentlich verringert werden, die Fertigung beinhaltet geringe Toleranzen, und es ist eine einfache Integration in Mikrosysteme möglich.

Ein sehr weit verbreitetes und kostengünstiges Verfahren ist die galvanische Abscheidung von Kupfer. Dabei wird das Kupfer in eine Galvanoform abgeschieden, die durch einen Lithografieprozess in einem fotosensitiven Lack hergestellt wird. Durch diesen Prozess lassen sich die Spulen in einem Fertigungsschritt simultan auf einem ganzen Substrat (Wafer) herstellen. Dabei werden drei grundsätzliche Geometrien unterschieden: Spiral-, Mäander- und auch Helixspulen (Bild 1).

Die Form der Spule wird durch die Anwendung bzw. durch die Richtung bestimmt, in der das magnetische Feld erforderlich ist. Bei einer Spiral- oder auch Mäanderspule tritt das entstehende magnetische Feld aus der Ebene heraus. Der Vorteil dieser Planarspulen ist die Herstellung in einem Fertigungsschritt. Durch die Verwendung einer Helixspule kann ein Magnetfeld in der Substratebene erzeugt werden. Für die Herstellung eines solchen Spulensystems sind allerdings drei Lithografieschritte erforderlich. Hinsichtlich der notwendigen Ströme, die zur Erzeugung eines mag-

netischen Feldes nötig sind, können durch Spiralspulen geringere bzw. durch Mäanderspulen höhere Ströme geführt werden. Auch hier ist eine Entscheidung in Abhängigkeit von der Anwendung zu treffen.

Prozessablauf zur galvanischen Abscheidung von Kupfer in Mikroformen

Die Herstellung von Mikrospulen umfasst zwei Prozessschritte: Zum einen die Formgebung durch die Lithografie und zum anderen die galvanische Abscheidung des Materials. Ausgehend von der Halbleitertechnik werden Mikrosysteme klassisch auf nicht elektrisch leitfähigen Substraten, meist Silizium, gefertigt. Für die galvanische Beschichtung ist ein elektrischer Kontakt eine notwendige Voraussetzung. Für das Aufbringen dieser Kontaktschicht wird das Verfahren der Kathodenzerstäubung verwendet. Damit ist es möglich, in der Regel nur 200 nm dünne Kontaktschichten gleichmäßig aufzubringen. Für die Herstellung der Spulen werden Fotolacke eingesetzt, in die durch eine Lithografiemaske die gewünschten Strukturen übertragen werden. Die Strukturgröße ist dabei abhängig vom verwendeten Belichtungsverfahren. Für Strukturen von einigen zehn Nanometern eignet sich die Elektronenstrahlolithografie. Hingegen kann durch die Kontaktbelichtung eine Strukturauflösung in den Millimeterbereich reichen.

Der fotosensitive Lack wird nach der Belichtung entwickelt. Dabei werden definierte Bereiche freigelegt, so dass eine galvanische Abscheidung an diesen Stellen erfolgen kann. Diese Strukturen werden als Galvanoform bezeichnet. Nach dem das Abbild der gewünschten Struktur erzeugt wurde, erfolgt dann die eigentliche Abscheidung des Materials. Hierfür werden Galvaniszellen verwendet, wie in Bild 2 schematisch gezeigt ist. Das mit der Kontaktschicht versehene und mit einem strukturierten Fotolack maskierte Substrat wird in dieser Zelle als Kathode kontaktiert. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich eine Kupferanode, die für die Nachlieferung der Kupferionen in den Kupferelektrolyten dient. Für die Abscheidung von Mikrostrukturen kann ein schwefelsäurebasierter Elektrolyt verwendet werden. Dabei ist auf ein geeignetes Verhältnis zwischen der Anoden- und der zu beschichtenden Kathodenfläche zu achten. Da die zu beschichtenden Flächen im

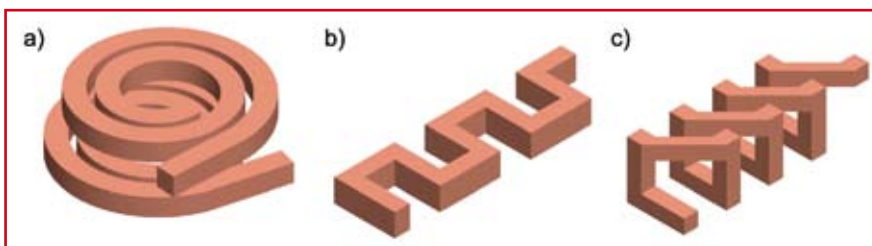


Bild 1: Ausführungsformen von Mikrospulen, a) Spiralspule, b) Mäanderspule, c) Helixspule

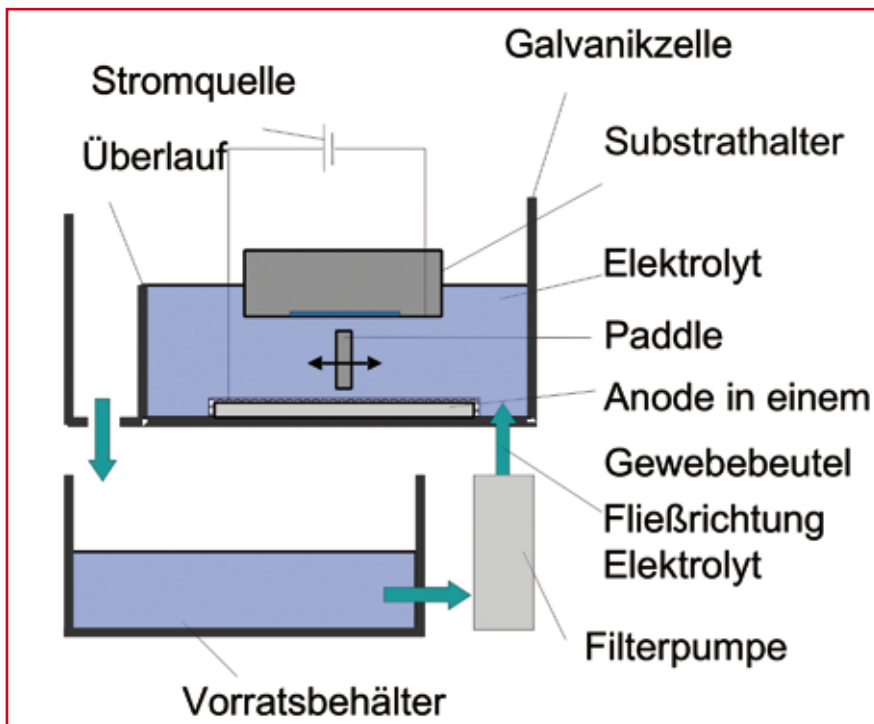


Bild 2: Schematischer Aufbau einer Paddle-Cell

Vergleich zu der verwendeten Anode relativ klein sind, müssen zusätzliche Flächen vorgesehen werden, auf denen sich galvanisches Material abscheiden kann. Dies wird durch den Einsatz eines Kontaktbleches zur Vergrößerung der beschichtbaren Flächen erreicht. Das Flächenverhältnis von Anode zu Kathode sollte dabei zwischen 1,5:1 und 2,5:1 liegen. Die Abscheidung findet mittels Gleichstrom statt. Um eine gleichmäßige Konzentration im Elektrolyt zu garantieren, wird eine Durchmischung mittels Paddle erzielt. Daher ergibt sich auch der Name dieses Zelltyps: Paddle-Cell.

Einsatz von galvanischen Kupfer-Spulen in Mikrosystemen

Spulen mit nur einer Ebene sind mit wenigen Schritten herzustellen. Meistens sind aber mehrlagige Systeme erforderlich, um ein ausreichend starkes elektromagnetisches Feld zu erzeugen.

Eine Variante von doppellagigen Spulensystemen ist die Kombination von Mess- und Erregerspule. Dabei wird meist in der unteren Ebene die Erregerspule mit einem größeren und in der zweiten Ebene die Messspule mit einem kleineren Leiterquerschnitt gefertigt. Hierfür verfügt das IMPT über die Kompetenz, Systeme mit bis zu vier Leiterebenen aufzubauen, deren Zwischenisolationsschichten kleiner als ein Mikrometer ausgeführt werden können. Nachfolgend wer-

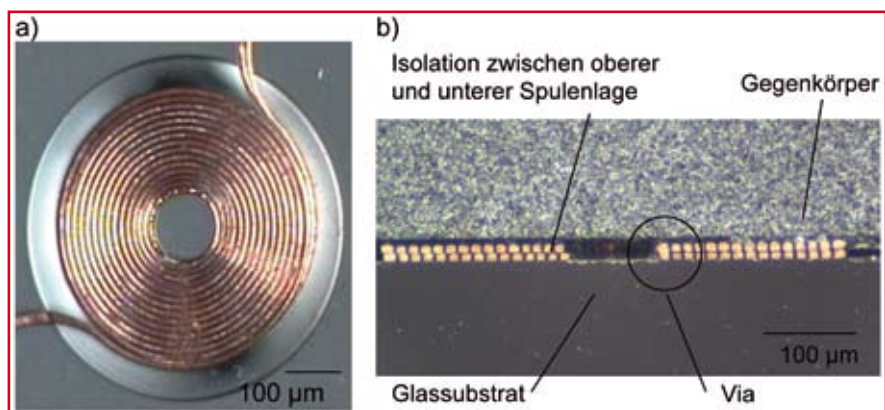


Bild 3: Mikroskopaufnahme des magneto-optischen Schreibkopfes, a) Aufsicht, b) Schliiffbild [WUR09]

den Anwendungsbeispiele für die verschiedenen Spulenausführungsformen vorgestellt.

Einsatzmöglichkeiten für Spiralspulen

Für den Einsatz als magneto-optischer Speicherkopf wurde eine doppellagige Spiralspule entwickelt [WUR06]. Die Spule selbst wurde auf einem 100 Mikrometer dünnen Glassubstrat gefertigt. Die Herausforderung bei diesem System bestand darin, die Spule möglichst nah zu einem Speichermedium positionieren zu können. Dazu wurden die elektrischen Kontakte auf der Rückseite des Systems ausgeführt. Für das Einprägen

von Informationen werden beim magneto-optischen Speicherverfahren schnell-schaltende Elektromagnete verwendet, die eine Magnetisierung in die speicheraktive Schicht bewirken. In diesem Fall wird dieses unterstützt durch einen Laserstrahl, der durch die Mitte der Spule auf das Speichermedium fokussiert wird und dort lokal das magnetische Speichermedium auf die Curie-Temperatur aufheizt. Dies hat den Vorteil, dass nur ein kleines magnetisches Feld, wie es durch die Mikrospule erzeugt werden kann, notwendig ist, um eine Information zu speichern. In Bild 3 ist die gefertigte Mikrospule zu sehen. Deutlich erkennbar ist der Isolationsring zwischen den beiden Leiterebenen, welcher aus SU-8™ realisiert wurde. Typischerweise sind solche Isolationsschichten ca. 3 µm. Neben SU-8™ als Isolationswerkstoff können auch anorganische Isolationsschichten für den Aufbau von mehrlagigen Spulensystemen verwendet werden [GAT09]. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung einer elektromagnetischen Führung, in der eine

vierlagige Spiralspule realisiert wurde (Bild 4). Als Werkstoff für die Zwischenisolation wurde Si₃N₄ genutzt. Die Schichten lassen

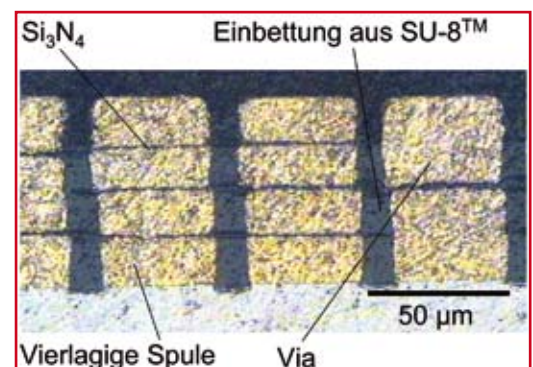


Bild 4: Schliiffbild der elektromagnetischen Führung [RUF08]

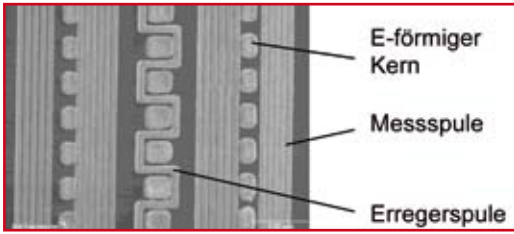


Bild 5: REM-Aufnahme eines Stators des Mikropositionsmessensors [GAT09]

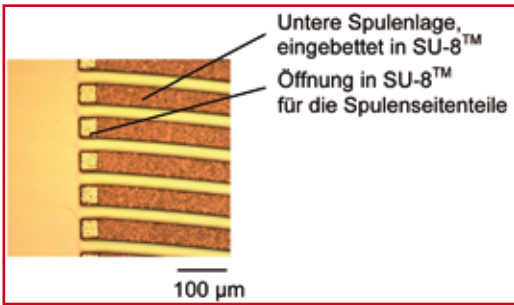


Bild 6: Untere Spulenlage nach Si₃N₄-Strukturierung und SU-8TM Einbettung [PAP09]

sich im Vergleich zu SU-8TM um den Faktor zehn dünner ausführen.

Kombination von Mäander- und Spiralspulen

In einem System zur messtechnischen Positionserfassung wurde eine Kombination aus Mäander- und Spiralspule verwendet. Das System besteht dabei aus einem Stator und einem Läufer [GAT09]. Der Sensor generiert zwei Ausgangssignale, deren Phasenverschiebung 90° beträgt. Dies ermöglicht die Detektion der Bewegungsrichtung. Der Stator ist als E-förmiger Kern mit doppellagiger Mäanderspule als Erregersystem und einer doppellagigen spiralförmigen Messspule ausgeführt. Der bewegliche Läufer fungiert als Teilungsträger und verfügt über weichmagnetische flussführende Elemente, die in Abhängigkeit von ihrer jeweili-

gen Position den durch das Erregersystem generierten magnetischen Fluss zwischen Erreger- und Messspulen schließen. Bild 5 zeigt eine REM-Aufnahme des gefertigten Stators.

Helixspule als Erregersystem in einem rotierenden Synchronmotor

Für die Erzeugung des elektromagnetischen Feldes in einem rotierenden Aktor wurden vier Helixspulen als Erregersystem verwendet [PAP09]. Die Auswahl fiel auf diesen Spulentyp, da ein magnetisches Feld in der Ebene für die Funktion dieses Aktorprinzips erforderlich ist. In diesem Fall wurde der magnetische Fluss zusätzlich durch eine weichmagnetische Flussführung gebündelt. Der Aufbau erfolgt dabei in drei Schritten. Zuerst wird der untere Teil der Spule gefertigt und anschließend die vertikalen Spulenelemente. Diese dienen der Verbindung des unteren mit dem im letzten Schritt gefertigten oberen Leiter. In Bild 6 ist eine Mikroskopaufnahme der unteren Spulenlage zu sehen.

Abscheidung von Kupferlegierungen

Neben der Verwendung von Kupfer als Leiterwerkstoff sind auch Sonderanwendungen denkbar. Wenn es erforderlich ist, können auch kupferbasierte Legierungen galvanisch abgeschieden werden. Bei diesen findet die Abscheidung meist durch Pulsstrom statt. In einem DFG-geförderten Forschungsvorhaben wurde die Möglichkeit untersucht, Mikroelektroden für die Funkenerosion herzustellen [TRA10]. Konventionell werden solche Elektroden aus gesintertem Kupfer-Wolfram (CuW) hergestellt. Ziel war es, dieses Material durch einen galvanischen Prozess in eine lithografisch strukturierte Mikrogalvanoform abzuscheiden. Der verwendete Elekt-

rolyt hat einen Arbeitsbereich von pH=6,5 bis 9,3. Die Abscheidung erfolgt durch Pulsbestromung. Bei den Abscheidungsversuchen konnte der Anteil von W in der Legierung zwischen 1,5 %at und 27 %at variiert werden. Für die ersten Untersuchungen wurde eine AZ-Lackmaske mit einer Höhe von 90 µm verwendet. In Bild 7 sind die hergestellten Strukturen aus CuW zu sehen.

Schlussfolgerung

Durch die einfache Prozessführung bei der Abscheidung von galvanischem Kupfer ist Kupfer in der Mikrosystemtechnik als Leitermaterial zurzeit nicht zu ersetzen. Aufgrund der hohen Kosten ist zudem die Verwendung von Edelmetallen wie Silber und Gold nicht wirtschaftlich und der Galvanikprozess zur Abscheidung von Aluminium kann nur aus nicht-wässrigen Medien erfolgen. Auch zeigt sich ein großes Potential dieses Werkstoffs als Grundmaterial für Legierungen und der damit verbundenen Einsatzmöglichkeit auf der Mikroskala.

Literatur:

[WUR06] M. C. Wurz, C. Ruffert, Z. Mrowka, S. Knappmann, H.H. Gatzten: Fabrication of a Micro Coil for Magneto-optical Data Storage. IEEE Trans. on Magn., Vol. 42, No. 10, pp. 2468-2470, 2006
 [WUR09] M. C. Wurz: Fertigung eines magneto-optischen Schreib-/Lesekopfes, Dissertation, 2009
 [GAT09] H.H. Gatzten, C. Ruffert, M. C. Wurz, E. Flick: Magnetische Mikrosysteme für Wandleranwendungen. Magnetic Micro Electro-mechanical Systems (MEMS) for Transducer Applications. Proc. MST-Kongress 2009, Berlin, Deutschland, S.425-428, 2009
 [RUF08] C. Ruffert, H.H. Gatzten: Fabrication and Test of Multilayer Microcoils with a High Packaging Density. Microsystem Technologies, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Vol. 14, No. 9-11, pp. 1589-1592, 2008
 [PAP09] F. Pape, T. Creutzburg, O. Traisigkhachol, H.H. Gatzten: Dünnschichttechnische Herstellung eines rotierenden Synchronmotors. Thin-film Fabrication of a Rotating Synchronous Motor. Proc. MST-Kongress 2009, Berlin, Deutschland, S. 828-831, 2009
 [TRA10] O. Traisigkhachol, H.H. Gatzten: High Aspect Ratio Micromolds for the Electroplating of Micro Electro Discharge Machining Tools. Microsystem Technologies, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Vol. 16, No. 8-9, pp. 1377-1383, 2010

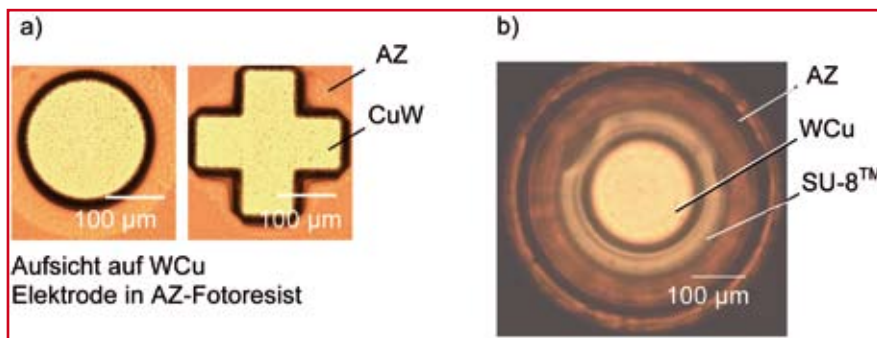


Bild 7: CuW-Mikroelektroden: a) Galvanoform in AZ-Fotoresist; b) Galvanoform in SU-8TM

(1) Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz, Prof. Dr.-Ing. Lutz Rissing, Leibniz Universität Hannover, Produktionstechnisches Zentrum Hannover, Institut für Mikroproduktionstechnik IMPT