

DIREKT-LIGA-VERFAHREN

Mikrobauteile präzise produzieren

In Mikrobauteilen müssen viele Funktionen auf kleinstem Raum untergebracht werden. Die komplexen Geometrien lassen sich durch spanende Techniken nicht mehr darstellen. Deshalb werden neue Verfahren, wie das Direkt-LIGA-Verfahren, entwickelt, bei dem die Mikrostrukturen lithographisch vorgegeben und galvanisch abgeformt werden.

Die Weiterentwicklung der Technik und die steigenden Anforderungen des Marktes an die Hersteller von elektronischen Geräten führen zu immer kompakteren Bauweisen. Es müssen zunehmend mehr Funktionen in immer kleineren Bauräumen integriert werden, um die Leistungsdichte weiter zu steigern. Ein Paradebeispiel dafür sind die Mobiltelefone, mit denen heute nicht nur telefoniert, sondern im Internet gesurft und Fotos beziehungsweise Filme aufgenommen werden können.

Doch bei der fortschreitenden Miniaturisierung von Bauteilen tritt ein Problem auf: Die herkömmlichen spanenden Techniken stoßen bei der Herstellung von winzigen filigranen Bauteilen mit komplexen Funktionsflächen an ihre Grenzen. Derartige Komponenten besitzen Außenabmessungen von wenigen Millimetern, haben dabei Strukturdetails im Mikrometerbereich und müssen mit einer glatten Oberfläche ohne störenden Grat oder Riefen gefertigt werden. Durch den höheren Integrationsgrad an Funktionalitäten der einzelnen Komponenten müssen

in der Mikrotechnik neue Verfahren eingesetzt werden, die es ermöglichen, gezielt die gewünschten beziehungsweise geforderten Eigenschaften herzustellen. Das Direkt-LIGA-Verfahren, das von der Micromotion GmbH in Mainz entwickelt und patentiert wurde, ist ein solches Verfahren, mit dem unter anderem Mikrogetriebe, die so genannten Micro Harmonic Drive Getriebe, hergestellt werden.

Layout mit Hilfe der Lithografie erstellt

Das Direkt-LIGA-Verfahren umfasst den Lithografie-Prozess und den Galvanoformungsprozess (Bild 1) [1]. Im Lithografie-Prozess werden mit Hilfe von Röntgenstrahlen zweidimensionale Layouts sehr genau durch Schattenprojektion von einer Arbeitsmaske in einen fotoempfindlichen Kunststoff, auch Resist genannt, kopiert. In Bild 2

wird eine derartige Arbeitsmaske aus Graphit mit den Zahnradabsorberstrukturen aus Gold für SU8-Resist gezeigt.

Die Übertragung des Designs erfolgt bei Micromotion durch Synchrotronstrahlung. Die hierbei verwendete Strahlung besteht hauptsächlich aus energiereichem Röntgenlicht, welches durch sehr geringe Divergenz, hohe Intensität und Homogenität charakterisiert ist. Diese Eigenschaften sind notwendig, um über die gesamte zu belichtende Fläche des Resists einen homogenen Energieeintrag zu gewährleisten. Denn an den von den Synchrotronstrahlen getroffenen Stellen wird der Resist, je nach verwendetem



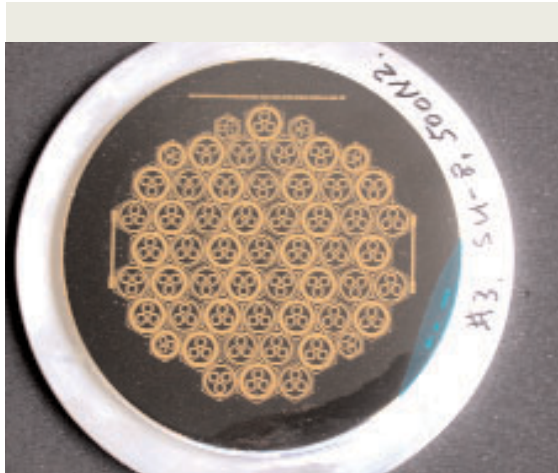
Typ, für Lösungsmittel entweder löslich oder unlöslich.

Nach der Entwicklung des löslichen Resistanteils dienen die frei entwickelten Strukturen als Negativformen für den Galvanoformungsprozess. Zur Herstellung der Zahnradformen werden hier die beiden Fotoresiste PMMA (Polymethylmethacrylat) und SU8 (ein Epoxid-Harz) für die anschließende Galvanik verwendet. Die Resisthöhen betragen jeweils $550\ \mu\text{m}$ ($\pm 25\ \mu\text{m}$) beziehungsweise $1050\ \mu\text{m}$ ($\pm 25\ \mu\text{m}$). Diese Resiste sind auf 4-Zoll-Wafer aufgebracht, die zuvor mit einer Metallschicht besputtert wurden (Bild 3). Die Metallschicht dient zur elektrischen Kontaktierung, damit die Galvanoformung am Boden der Gräben im Resist starten kann.

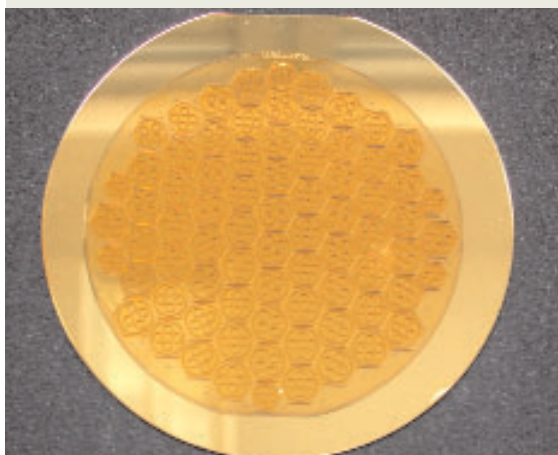
Galvanoformung liefert präzise Strukturen

Beim Galvanoformungsprozess werden die Zahnradstrukturen durch die galvanische Abscheidung einer Nickel-Eisen-Legierung (Eisenanteil größer 10 At%) hochpräzise abgeformt (Bild 4). Mit der galvanischen Abformung steht ein Verfahren zur Verfügung, das Strukturen bis in den Submikrometerbereich genau in galvanisch abgeschiedenem Metall abbilden kann. Dadurch sind dem Designer kaum Grenzen in der Gestaltung seiner Strukturen gesetzt. So sind zum Beispiel Hinterschnitte oder sehr spitze und filigrane Strukturen möglich, wie sie für Zahnräder des Micro Harmonic Drive Getriebes erforderlich sind (Bild 5 und 6).

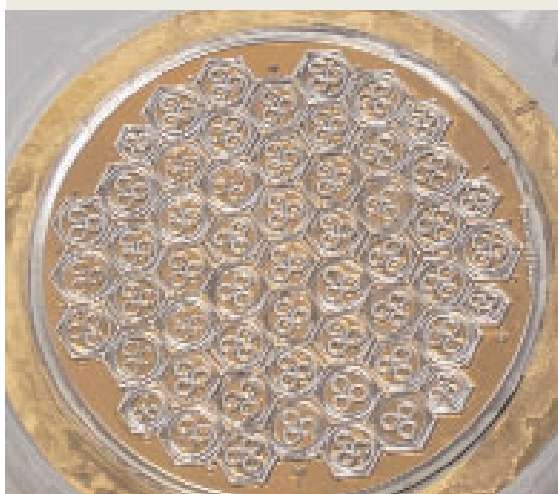
Diese Strukturen wurden fotolithografisch in einen Resist (PMMA oder SU8) übertragen und danach galvanisch als Nickel-Eisen-Legierung (mit 10 At% - 15 At% Eisen) abgeformt. Die Besonderheiten, die diese



▲ Bild 2: Von der Arbeitsmaske aus Grafit mit Goldabsorberstrukturen wird das Layout kopiert



▲ Bild 3: Ein Wafer mit dem frei entwickelten, strukturierten SU8-Resist



▲ Bild 4: Ein galvanisierter Wafer mit dem strukturierten SU8-Resist und den mit der Nickel-Eisen-Legierung aufgefüllten Zahnradstrukturen

Bilder zeigen, sind zum einen die filigrane Struktur des so genannten Flexspline, eines gleichzeitig innen- und außenverzahnten Zahnrades (Bild 5). Die dünnen Stege zwischen den Zähnen sind bis zu $26\ \mu\text{m}$ dünn und werden über eine Höhe von $1050\ \mu\text{m}$ galvanisch perfekt abgeformt. Zum anderen wird hier ein Beispiel für die angesprochene Designfreiheit gezeigt (Bild 6). Das dargestellte Zahnrad ist ein Planetenrad des Micro Harmonic Drive Getriebes mit einer speziellen Verzahnung. Durch die besondere pilzförmige Zahngeometrie wird die Leistungsdichte dieses Mikrogetriebes gegenüber konventionellen Verzahnungsgeometrien verdoppelt. Die Hinterschnitte sind notwendig, damit dieses Zahnrad trotz seiner großen Zahndicke in radialer Richtung flexibel bleibt. Derartige Zahngeometrien, insbesondere mit Hinterschnitten, die eine Breite von $10\ \mu\text{m}$ und eine Bauteilhöhe von $1000\ \mu\text{m}$ besitzen, stellen für das Direkt-LIGA-Verfahren kein Problem dar.

In Bild 5 ist eine komplette Getriebeeinheit der Bauart MHD-10-160-P zu sehen, die mit einem Rasterelektronenmikroskop aufgenommen wurde. In dieser Abbildung ist die kompakte Bauweise des Getriebes erkennbar. Der Durchmesser des Getriebeeinbausatzes beträgt gerade einmal $8\ \text{mm}$ und seine axiale Länge nur $1\ \text{mm}$. Ebenfalls ist das gleichzeitig innen- und außenverzahnte Zahnrad, der so genannte Flexspline, zu erkennen.

Der Flexspline wird durch die beiden Planetenräder elastisch verformt, so dass es in den Bereichen der Planetenräder Zahneingriff mit den beiden Hohlrädern Circular Spline und Dynamic Spline erhält. Die elas-

Material	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Härte HRC	Härte HV0,1
Nickel-Eisen	1800	135 000	55	550

Tabelle 1: Optimale Materialeigenschaften der Zahnräder für die Anforderungen im Getriebe



◀ Bild 5:
Die kompakte Bauweise wird an der kompletten Getriebeeinheit deutlich (Raster-elektronenmikroskop-Aufnahme)



◀ Bild 6:
Hinterschnitte sind notwendig, damit das Zahnrad in radialer Richtung flexibel bleibt

abscheidungen der Zahnräder durch einen Läppprozess eingeebnet und auf das endgültige Maß von 500 µm beziehungsweise 1000 µm (±50 µm) abgearbeitet. Die Entfernung der Zahnräder aus dem Resist erfolgt mechanisch oder chemisch. Nach einem abschließenden Reinigungsschritt können die Zahnräder zu Getrieben verbaut werden. Diese spielfreien Mikrogetriebe können mit unterschiedlichen Mikromotoren kombiniert und zu kompletten Antriebssystemen zusammengestellt werden.

Bis zu 1000 Zahnräder pro Wafer

Die maximale Anzahl an Zahnrädern variiert je nach Größe der Zahnräder zwischen 30 und 1000 Stück pro Wafer. Die Galvanik bei Micromotion bietet Platz, um maximal acht 4-Zoll-Wafer abscheiden zu können. Daraus ist leicht ersichtlich, dass bei einer hohen Anzahl an Bauteilen pro Wafer im Batch-Betrieb eine starke Reduzierung der Kosten erreicht werden kann, so dass sich bei entsprechenden Anforderungen auch der Einsatz der Synchrotronstrahlung rechnet.

Micromotion bietet das oben beschriebene Direkt-LIGA-Verfahren auch als Dienstleistung an. Die Dienstleistung erstreckt sich hierbei von der Konstruktion über die Lithografie, die Galvanoformung bis zur Fertigung von kompletten Bauteilen. Die Bauteile beziehungsweise kompletten Antriebssysteme können mit kundenspezifischen elektronischen und mechanischen Schnittstellen ausgerüstet werden, so dass ein auf die Anforderungen des Kunden abgestimmtes Produkt entsteht.

Literatur

[1] Menz, W.; Mohr, J.: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*, Weinheim, VCH, 2. Aufl., 1997.

>> tische Verformbarkeit von einzelnen Zahnrädern ist ein Grundprinzip des Getriebes, weshalb die Zahnräder als Nickel-Eisen-Legierung galvanisch abgeformt werden.

Nickel-Eisen-Legierung liefert Verformbarkeit

Die verwendete Nickel-Eisen-Legierung ist aufgrund ihrer hohen Zugfestigkeit, der hohen Härte und ihrer Dauerschwingfestigkeitseigenschaften ideal für den Einsatz als Zahnradwerkstoff geeignet. In Tabelle 1 sind einige der Materialeigenschaften wie Mikrohärtigkeit,

E-Modul und Zugfestigkeit zusammengestellt. Diese Eigenschaften werden zum einen durch die Zusammensetzung der Nickel-Eisen-Legierung und zum anderen durch die Abscheidebedingungen während der Galvanoformung erreicht und müssen bei den Galvanoformungsbedingungen berücksichtigt werden, so dass ein optimales Zahnradmaterial abgeschieden wird. Die Materialeigenschaften werden für jeden Getriebetyp durch Anpassung der Galvanikparameter optimiert.

Nach der Galvanoformung werden die aus dem Resist überstehenden Metall-

Die Autoren:

Dr. Udo Kirsch, Dr.-Ing. Reinhard Degen,
Micromotion GmbH, Mainz, Tel. 06 131 669270,
info@micromotion-gmbh.de