

# Hochvakuum für die Mikrowelt

Mikroelektronische Aktoren und Sensoren ermöglichen ein Hochvakuumpackage für mikroelektromechanische Systeme.

Moritz Kopetzki

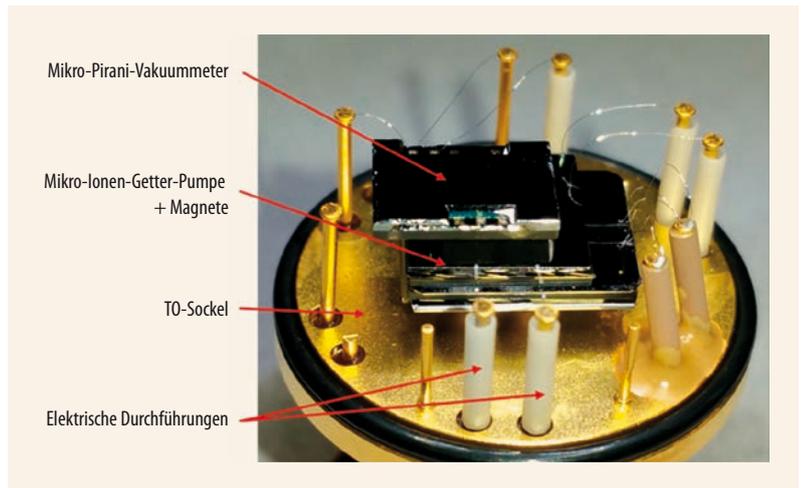
Ein miniaturisiertes Hochvakuumpackage eröffnet vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten für Mikrosysteme. Ein solches Package entsteht mittels eines hermetisch verschlossenen Gehäuses und einer Mikro-Vakuumpumpe. Ein Mikro-Vakuumsensor ermöglicht die Analyse.

Die Miniaturisierung von Vakuumanwendungen gewinnt immer mehr an Bedeutung, da kleinere Bauformen komfortabler, schneller und vielfältiger einsetzbar sind. Die Realisierung von Vakuum auf Chipebene würde viele neue Möglichkeiten eröffnen, beispielsweise für Mikroresonatoren höherer Güte, tragbare Systeme für Massenspektrometrie oder portable Feldemissionselektronenquellen [1].

Ein übliches TO-Package (TO steht für Transistor Outline) mit einem Volumen von 4,5 Kubikzentimetern besteht aus einem Sockel für die Stromversorgung der gekapselten Bauteile sowie einer aufgelöteten Kappe, um das Gehäuse hermetisch zu verschließen. Mit klassischen Methoden ist es äußerst schwierig, ein Hochvakuum in einem TO-Package zu erzeugen und zu charakterisieren. Diese Thematik stand daher im Mittelpunkt meiner Masterarbeit und ist weiterhin Gegenstand intensiver Untersuchungen bei der Firma KETEK.

Zunächst ging es darum, den Druck im vakuumverschlossenen miniaturisierten TO-Package direkt und ohne Beeinflussung zu bestimmen. Als Drucksensor diente dafür ein an der Technischen Hochschule Regensburg entwickeltes Mikro-Pirani-Vakuummeter (Abb. 1) [2]. Dieses spezielle Wärmeleitungs-Vakuummeter erlaubt es, den Druck im Hochvakuum unabhängig von störenden thermischen Einflüssen und ohne Beeinflussung des Restgasdrucks zu messen.

Das Mikro-Pirani-Vakuummeter basiert auf der druckabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Gas und bestimmt den Druck indirekt über die Teilchenanzahl-dichte. Dazu wird der frei tragende gasumspülte Widerstand  $R_F$  auf eine erhöhte Temperatur geregelt. Die umgebenden Restgasteilchen nehmen von diesem so genannten Filamentwiderstand Wärme auf und führen diese zum kälteren Substrat ab. Je mehr Restgasteilchen vorhanden sind, umso mehr elektrische Leistung ist nötig, um den Filamentwiderstand  $R_F$  auf eine konstante erhöhte Temperatur zu regeln. Als Druckmesssignal dient somit die elektrische Leistung,



Der hier geöffnete miniaturisierte Vakuumaufbau besteht aus einem vergoldeten TO-Sockel mit elektrischen Durchführungen. Darauf sind die Mikro-Ionen-Getter-Pumpe mit Magneten sowie das Mikro-Pirani-Vakuummeter aufgebaut.

die am Filamentwiderstand umgesetzt wird. Ein Referenzwiderstand  $R_R$  und eine Wheatstonesche Messbrücke kompensieren störende thermische Einflüsse, beispielsweise durch Abwärme der Mikro-Vakuumpumpe.

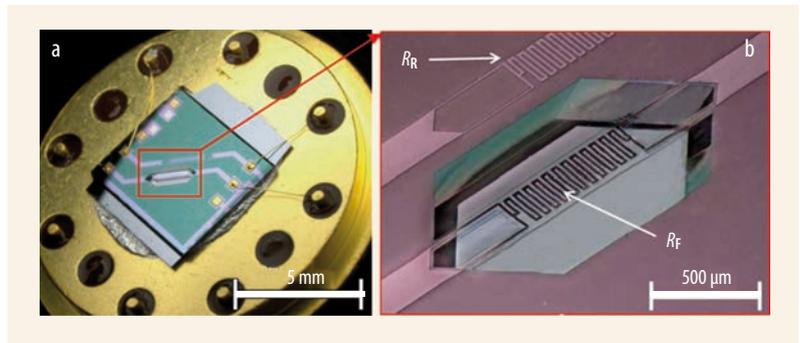
Die Druckauflösungsgrenze des Mikro-Pirani-Vakuummeters beträgt  $5 \cdot 10^{-5}$  mbar. Es wurde in ein TO-Package integriert und anschließend unter Vakuumatmosphäre ( $10^{-5}$  mbar) mit einem Lötprozess verkapselt. Die nun erstmals mögliche Druckmessung im TO-Package ergab nach dem Löten einen erreichten Druck von rund  $10^{-2}$  mbar. Die deutliche Druckzunahme, im Vergleich zum Verschlussdruck, ist auf das Ausgasen der Komponenten zurückzuführen. Demnach reicht der Vakuum-Lötverschluss alleine nicht aus, um ein Hochvakuumpackage zu realisieren.

## KOMPAKT

- Das miniaturisierte Hochvakuumpackage besteht aus einem hermetisch vakuum-verkapselten Gehäuse mit einem Volumen von  $4,5 \text{ cm}^3$ , einer integrierten Mikro-Ionen-Getter-Pumpe und einem Mikro-Pirani-Vakuummeter.
- Der Druck im Vakuumpackage wird mit der Mikro-Ionen-Getter-Pumpe soweit wie möglich reduziert und mittels eines Mikro-Pirani-Vakuummeters gemessen.
- Der erreichte Druck im Vakuumpackage liegt im unteren Hochvakuumbereich und beträgt  $p < 5 \cdot 10^{-5}$  mbar.

Moritz Kopetzki, M.Sc., Hochschule München, Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik, Lothstr. 34, 80335 München – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2017 auf der Jahrestagung der DPG in Münster

**Abb. 1** Das Mikro-Pirani-Vakuummeter wurde im TO-Gehäuse integriert und ist hier geöffnet auf einem TO-Sockel zu sehen (a). Hervorgehoben sind der frei tragende gasumspülte Filamentwiderstand  $R_F$  sowie der zur Kompensation von störenden thermischen Einflüssen verwendete Referenzwiderstand  $R_R$  direkt auf dem Substrat (b) [2].



Zusätzlich wurde in das TO-Package eine miniaturisierte Hochvakuumpumpe eingebaut (Abb. auf Seite 71). Dazu kam der weltweit einzige verfügbare Typ einer Mikro-Ionen-Getter-Pumpe – entwickelt an der Universität Breslau – zum Einsatz [3]. Das Funktionsprinzip dieser Pumpe basiert auf einer Gasentladung (Abb. 2). In der miniaturisierten Vakuumpumpe entstehen durch kosmische und radioaktive Strahlung freie Elektronen und positiv geladene Restgasionen. Ein angelegtes elektrisches Feld beschleunigt die geladenen Teilchen entsprechend ihrer Ladung in Richtung Anode oder Kathode. Auf dem Beschleunigungsweg werden weitere Restgasteilchen über Stöße ionisiert. Dadurch entsteht eine lawinenartige Gasentladung.

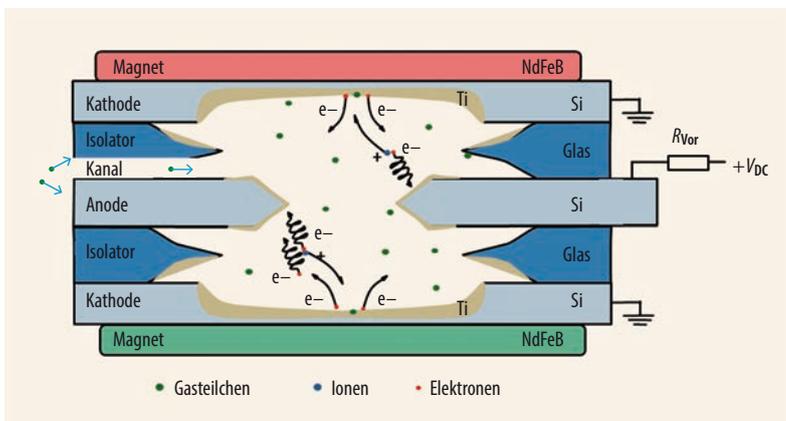
Die beschleunigten Restgasionen werden beim Auftreffen auf die reaktive Titanoberfläche implantiert bzw. physikalisch oder chemisch gebunden. Durch die Sorption an der Oberfläche sinkt der Druck im Rezipienten und somit auch im Vakuumpackage, das mit dem Pumpvolumen durch einen Kanal verbunden ist. Mit einem zusätzlichen extern angelegten magnetischen Feld verlängert sich die Flugbahn der Elektronen spiralförmig. Dadurch steigt die Stoßwahrscheinlichkeit der Elektronen mit den Restgasteilchen und somit die Ionisationswahrscheinlichkeit. Dies führt vor allem bei niedrigen Drücken unterhalb von  $10^{-1}$  mbar zu einer erhöhten Pumpwirkung und hilft, die Gasentladung aufrechtzuerhalten. Der erreichbare Enddruck im TO-Package hängt von der Saugleistung der Mikro-

Ionen-Getter-Pumpe sowie der Leckrate des gesamten Aufbaus ab. Die Lebensdauer der Mikro-Ionen-Getter-Pumpe hängt dagegen von der begrenzten Sorptionskapazität der Titanschicht ab. Diese Titanschicht ist nach einer gewissen Betriebszeit vollständig verdampft bzw. mit Restgasteilchen gesättigt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit gelang es zum ersten Mal, die Funktionalität der Mikro-Ionen-Getter-Pumpe in einem verkapselten TO-Package zu zeigen und die Druckreduzierung mittels eines Mikro-Pirani-Vakuummeters nachzuweisen. Das erreichte Druckniveau  $p$  im TO-Package lag unterhalb von  $5 \cdot 10^{-5}$  mbar und liegt damit jenseits der unteren Auflösungs-grenze des Mikro-Pirani-Vakuummeters. Für kommerzielle Anwendungen ist es jedoch notwendig, den Systemaufbau hinsichtlich Kühlung der Mikro-Ionen-Getter-Pumpe sowie deren Abpumpzeit, die derzeit drei Minuten beträgt, zu optimieren.

#### Literatur

- [1] M. Bachmann et al., Stability, investigation of high aspect ratio n-type silicon field emitter arrays. In: Vacuum Nanoelectronics Conference (2015), S. 204, doi:10.1109/IVNC.2015.7225584
- [2] F. Dams und R. Schreiner, A high thermal resistance MEMS-based Pirani vacuum sensor chip, Proc. SPIE 8763, Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI, 87630P (2013), doi:10.1117/12.2017345
- [3] T. Grzebyk und A. Gorecka-Drzazga, Sensors and Actuators A: Physical 208, 113 (2014)



**Abb. 2** Die Mikro-Ionen-Getter-Pumpe ist schichtartig aus zwei Si-Kathoden mit Ti-Bekken, einer Si-Anode, Glasisolatoren, Neodym-Magneten und einem Pumpkanal aufgebaut. Zudem ist die an-

gelegte Hochspannung dargestellt. Die während einer Entladung ionisierten Restgasteilchen werden an der reaktiven Titanschicht gebunden. Dies reduziert die Teilchenanzahl im Rezipienten.

#### DER AUTOR

**Moritz Kopetzki** studierte an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München mit den Schwerpunkten Mikro- und Nanotechnik. Seine Masterarbeit (2016) „Mikroelektronische Systeme zur Erzeugung und Charakterisierung eines Hochvakuums in einem verkapselten TO-Gehäuse“ fertigte er bei der Firma KETEK GmbH in München an.

