

Trocknung im Modell

Das Trocknungsverhalten dicker Photoresistschichten lässt sich mit einem einfachen Modell theoretisch beschreiben.

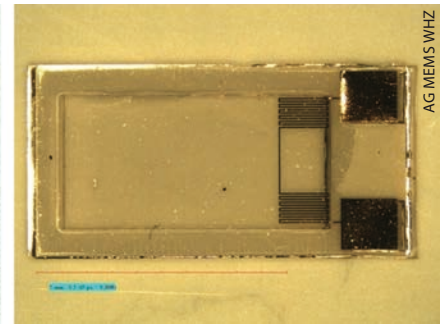
Maik Schönfeld

Ein analytisches Modell ist in der Lage, den komplizierten Trocknungsvorgang von photosensitiven Epoxidharzen erstaunlich gut zu beschreiben und grundsätzliche Aussagen über die Trocknungskinetik unterschiedlich dicker Resistschichten zu treffen. Demnach trocknen dicke Resistschichten überwiegend diffusionsgesteuert.

Seit über 65 Jahren ist die Mikrosystemtechnik aus vielen Bereichen des Alltags, der Industrie und der Wissenschaft nicht mehr wegzudenken. Dabei geht es neben elektronischen Bauteilen wie Transistoren auch um aktorische, mikromechanische Komponenten wie Mikroantilever. Die bekanntesten und geläufigsten Werkstoffe in der Mikrosystemtechnik waren lange Zeit Silizium und Germanium. In den vergangenen Jahren gab es allerdings Bemühungen, speziell für mikromechanische Komponenten photostrukturierbare Epoxidharze (kurz: Photoresists) zu etablieren [1]. Diese zeichnen sich durch viel niedrigere Prozesstemperaturen bei der Herstellung aus. Beispiele sind Chipträger für pyroelektrische Sensoren, die u. a. in medizinischen Apparaten zur Atemluftüberwachung zum Einsatz kommen, und mikromechanische Cantileverstrukturen für die Rasterkraftmikroskopie.

Bei der Verwendung von Photoresiststrukturen als mechanische Bauelemente spielt es eine wichtige Rolle, dass Form und Größe der fertigen Strukturen stabil sind und sich ihre mechanischen Eigenschaften und der Fertigungsprozess gut reproduzieren lassen. Veränderungen in der Prozessierung beeinflussen die mechanischen Parameter der Strukturen erheblich. So kann verbleibendes Lösungsmittel im Resist zu Schichtspannungen und bei Cantilevern zu einer funktionsmindernden Krümmung führen. Daher ist es wichtig, die Resistschichten definiert zu trocknen (Softbake). Weit verbreitet ist der Negativ-Photoresist SU-8, der als fertige Lösung aus Grundstoff (SU-8) und Lösungsmittel (meist γ -Butyrolacton, GBL) erhältlich ist. Die Zugabe von GBL stellt die Viskosität bei jeder Charge neu ein. Daher ist meist unklar, wie viel Lösungsmittel enthalten ist.

Die Herstellung mikromechanischer Komponenten beginnt mit einem präparierten Substrat (z. B. einem Siliziumwafer, Abb. 1), auf das die Resistlösung aufgebracht wird. Vor der weiteren Prozessierung muss diese Schicht definiert getrocknet (d. h. vom Lösungs-



mittel befreit) werden, um die Reproduzierbarkeit der resultierenden Strukturen zu gewährleisten. Dies ist aufgrund der wechselnden Lösungsmittelgehalte des Resists schwierig. Daher war eine einfache, modellhafte Beschreibung der Trocknung wünschenswert.

Standardmäßig kommt zur Trocknung der Resistschichten eine so genannte Hotplate zum Einsatz. Dabei ist die Photoresisttrocknung vor allem durch die Kontaktfläche zwischen Substrat und Hotplate und durch die Wärmeleitung des Resistschichtsystems bestimmt. Dadurch kann der Energieeintrag in die Resistschicht inhomogen sein. Zudem ist es schwierig, die verbleibende Lösungsmittelmasse während der Trocknung zu überwachen. Dafür wäre es erforderlich, den Kontakt zwischen Substrat und Hotplate zu unterbrechen. Um verlässliche Messdaten zur Trocknung während des Prozesses zu erhalten, wurde ein alternatives Trocknungsverfahren erarbeitet, getestet und erfolgreich eingesetzt [2]. Dabei wird Infrarot-Strahlung zwischen 2 und 10 μm (Wellenzahlen 5000 bis 1000 cm^{-1}) in die Resistschicht eingestrahlt. Untersuchungen der Transmissionsspektren zeigten, dass die Infrarot-Strahlung im Lösungsmittel sowie im Resist absorbiert wird. Die Siliziumsubstrate sind dagegen in diesem Wellenlängenbereich weitgehend transparent.

Chipträger für pyroelektrische Sensoren (links) oder Basiselemente zum Aufbau einer künstlichen Nase (rechts) lassen sich direkt aus Photoresist herstellen.

KOMPAKT

- Epoxidharze bieten viele Vorteile bei der Herstellung mikromechanischer Komponenten. Erhältlich sind diese sog. Photoresists als fertige Lösung aus Grundstoff und Lösungsmittel.
- Bei der Trocknung bewirken Diffusionsprozesse den Transport des Lösungsmittels an die Oberfläche.
- Ein einfaches Modell erlaubt es, diese Vorgänge sehr gut zu beschreiben und den Einfluss verschiedener Parameter gezielt zu untersuchen.

Dipl.-Ing. (FH) M. Eng. Maik Schönfeld, Fakultät für Automobil- und Maschinenbau, Äußere Schneeberger Str. 15, 08056 Zwickau – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2015 auf der Jahrestagung der DPG in Berlin

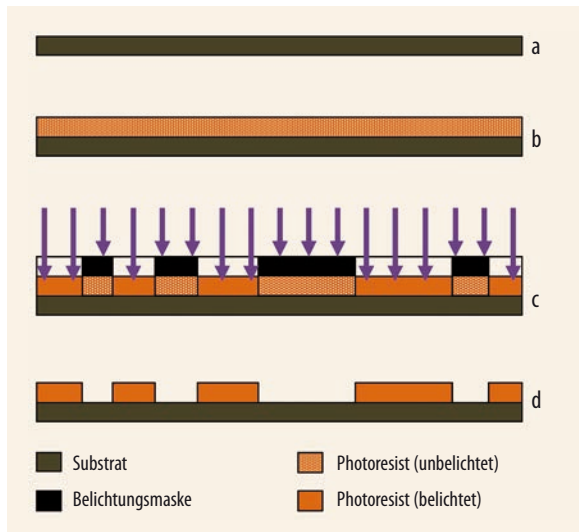


Abb. 1 Auf das Substrat (a) wird die Resistenzschicht aufgebracht (b). Nach der Trocknung wird die Resistenzschicht mit einer strukturierten Belichtungsmaske abgedeckt und mit UV-Strahlung belichtet (c). Dies beeinflusst in definierten Bereichen die Löslichkeit. Beim Negativ-Photoresist (z. B. SU-8) werden die unbelichteten Bereiche im Entwickler gelöst (d).

Somit lässt sich der Strahlungsanteil, der durch Resistenzschicht und Substrat ohne Absorption hindurchtritt, mit einem Reflektorblech in die Resistenzschicht zurückreflektieren und die Trocknungseffizienz steigern. Zudem heizen sich durch den direkten Energieeintrag auch sehr dicke Resistenzschichten ($> 500 \mu\text{m}$) signifikant höher auf und trocknen viel schneller.

Das neue Trocknungssystem ermöglicht es, den Gewichtsverlust der Resistenzschicht durch das Austreiben des Lösungsmittels während der Trocknung, also in-situ, mittels Wiegen zu bestimmen. Zu Beginn der Trocknung heizen sich Substrat und Resistenzschicht auf. In dieser Phase nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit annähernd exponentiell zu. In der anschließenden Verdunstungsphase haben Substrat und Resistenzschicht die Endtemperatur erreicht. Die Kinematik der Lösungsmittelverdampfung von der „nassen“ Resistenzoberfläche gleicht der einer reinen Lösungsmitteloberfläche. Die Länge des Kurvenabschnitts hängt von der Ausgangskonzentration des Lösungsmittels ab, die Steigung vom Abtransport des gesättigten Lösungsmitteldampfes über der Resistenzschicht. Nach einer Übergangsphase beginnt die Diffusionsphase, in welcher der Resistenzfestig ist, aber noch größere Mengen Lösungsmittel

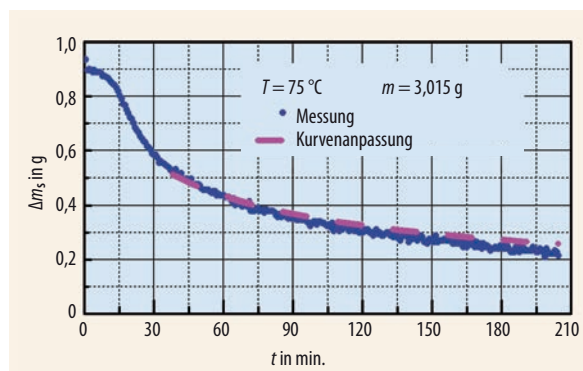


Abb. 2 Trocknungsverlauf einer Resistenzschicht inklusive angepasster, analytischer Beschreibung

enthält. Diffusionsprozesse bewirken den Transport des Lösungsmittels zur Oberfläche. An dieser Stelle soll die analytische Modellierung ansetzen.

Schwieriger Prozess einfach beschrieben

Zunächst gehen wir von der einfachsten Form der Fickschen Diffusionsgleichung aus. Diese besteht aus einem eindimensionalen Ansatz mit konstantem Diffusionskoeffizienten D für die Konzentration C über die Zeit t entlang der Koordinate x :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

Nach einiger Rechnung ergibt sich unter Beachtung der entsprechenden Randbedingungen der Ausdruck

$$CI(t) = C_0 \cdot \left[h \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{D \cdot t}} \right) + \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} \cdot \left(e^{-\frac{h^2}{D \cdot t}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

für den Lösungsmittelgehalt CI in einer Resistenzschicht mit der Ausgangslösungsmittelkonzentration C_0 und der Dicke h sowie der Gaußschen Fehlerfunktion erf. Der gefundene Ansatz lässt sich in Datenanpassungstools und Softwarepakete implementieren. Nach Anpassung des Modells an die Messdaten des Infrarot-Trocknungssystems wird der Trocknungsverlauf sehr gut beschrieben (Abb. 2). Zudem ergeben sich sofort Werte für den Diffusionskoeffizienten D , für GBL in SU-8 z. B.: $D = (11,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, was sehr gut mit Literaturwerten übereinstimmt, die mit deutlich höherem experimentellen Aufwand gewonnen wurden.

Insgesamt ist es möglich, den Einfluss verschiedener Prozessparameter (Temperaturen, Resistchargen etc.) auf die Diffusionskoeffizienten und den Trocknungsverlauf effizient zu untersuchen. Auf bestimmte Resistchargen abgestimmte Modelle können dazu dienen, wichtige Hinweise zum erwarteten Trocknungsverlauf und zu den optimalen Prozessparametern zu liefern.

Literatur

- [1] M. Schönfeld et al., Analytisches Fundament zur Berechnung beladungsinduzierter Frequenzshifts an Mikrocantilevern aus photosensitivem Resist für den Einsatz in olfaktorischen Mikrosystemen, 13. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz, Görlitz (2012)
- [2] M. Schönfeld et al., Gravimetric Controlled Infrared Drying System for Thick Photoresist Layers, 12th European Congress on Advanced Materials and Processes EUROMAT, Montpellier (2011)

DER AUTOR

Maik Schönfeld ist Mitarbeiter an der Westsächsischen Hochschule Zwickau, die hier vorgestellten Arbeiten führte er in der AG MEMS durch. Er interessiert sich seit jeher für technisch-physikalische Zusammenhänge und ihre Beschreibung. Privat widmet er sich dem Kampfsport und einer Laientheatergruppe.



Jan Röhl