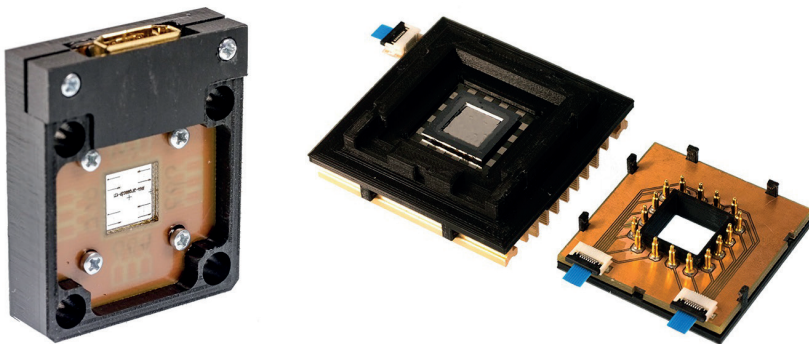


Individually tunable micromirror arrays



IMTEK, Universität Freiburg

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der
Technischen Fakultät der
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

Individually tunable micromirror arrays

Binal Poyyathuruthy Bruno

February 2021



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau
Technische Fakultät
Institut für Mikrosystemtechnik

Address: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK)
Professur für Mikroaktorik
Georges-Köhler-Allee 102
79110 Freiburg

Dean: Prof. Dr. Rolf Backofen

Referees: Prof. Dr. Ulrike Wallrabe
Prof. Dr. Peter Woias

Date of submission: 04 February 2021

Date of disputation: 08 July 2021

Cover figure: Array of piezoelectrically tunable Fresnel mirrors
(left) and individually tunable thermal mirror array
(right) developed in this thesis.

Microactuators – Design and Technology
edited by Prof. Dr. Ulrike Wallrabe

Volume 20

Binal Poyyathuruthy Bruno

Individually tunable micromirror arrays

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2021,

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8170-1

ISSN 2567-0921

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

‘Standing on the shoulders of giants’,
and there are giants all the way down.

Abstract

Research aims for a miniaturized, mechanically robust, and scalable array of diffraction free mirrors that can be controlled individually. In this thesis, two of the most common actuator concepts in MEMS technology are therefore investigated for forming an individually tunable array of micromirrors. An array of micro Fresnel mirrors with an individual aperture of 2 mm was realized using piezoelectric actuation. Also, thermally tunable free-form mirrors with atypical surface profiles and apertures in the sub-millimeter scale were accomplished along with an auxiliary heater capable of individual control and sensing.

Miniaturizing the piezoelectric actuator meant a reduction in the achievable strain. To drive the piezo-actuators towards their limits, the non-linear behaviour and the operating limitations in terms of the electric field applied to the PZT ceramics were studied. By measuring the non-linear transverse charge coefficient while operating the materials at large electric field strengths, it was observed that most materials show much higher strains than what was expected from the material datasheet. The PZT materials were able to handle electric fields up to 50 % of their coercive field strength against the direction of polarization without losing the inherent polarization of the material. This limit was extended to 85 % of the coercive field strength by using a long-term stable quick-repoling method. With regard to the maximum operating temperature of the material, it was shown that the temperature at which the material loses its polarization does not coincide with the Curie temperature of the material. While some materials lost their polarization at the Curie temperature, the coercive field strength of most materials vanished at much lower temperatures.

In the tunable Fresnel mirror concept, the spherical deflection of a bending piezo transducer was converted into a wedge-shaped mirror surface. In this design, the rigid mirror segments were connected by elastic hinges made of silicone, which facilitated the tilting movement of the mirrors. The miniaturized Fresnel mirror with an edge length of 2 mm was implemented in a 2×2 array. The mirror array shared a single silicon frame with minimal cross-talk between the mirrors. Each mirror in the array achieved a maximum angle of 19 mrad and can be operated with a single control signal up to a frequency of 28 kHz.

In thermally tunable free-form mirrors, the surface profile of the mirror was defined by the underlying three-dimensional mold cavity. By filling the cavity with an elastic polymer, the shape of the mold gets transferred through to the mirror layer deposited on top of the polymer. The deflection of the mirror changes linearly due to the thermal expansion of the polymer as the chip temperature increases. By optimizing the design with the help of FEM simulations, and also the structuring process for manufacturing the mold cavity, free-form tunable mirrors were fabricated

with apertures as small as 200 μm .

An auxiliary heater was developed that consists of an array of resistive heaters, temperature sensors, and thermoelectric coolers. The resistive heaters and the sensors were realized by depositing platinum structures embedded between layers of polyimide. The local temperature in the array was governed by a closed-loop control of the heater chip. With the combination of the resistive heater and the thermoelectric cooler, it was able to generate a temperature difference of 90 $^{\circ}\text{C}$ between array elements that were 4 mm apart.

Zusammenfassung

Miniaturisierte, mechanisch robuste und skalierbare Arrays von beugungsfreien Spiegeln, die individuell ansteuerbar sind, sind Gegenstand der modernen Forschung. In dieser Arbeit werden zwei der gängigsten Aktorkonzepte in der MEMS-Technologie untersucht, um ein Array von individuell abstimmbaren Mikrospiegeln zu realisieren. So wurde ein Array von Mikro-Fresnel-Spiegeln mit Aperturen von jeweils 2 mm mit Hilfe von piezoelektrischen Aktoren umgesetzt. Weiterhin wurden thermisch abstimmbare Freiformspiegel mit atypischen Oberflächenprofilen und Aperturen im Submillimeterbereich realisiert. Sie verfügen über individuell ansteuerbare Heizelemente mit integrierten Temperatursensoren.

Die Miniaturisierung des piezoelektrischen Aktors bedingt eine Reduzierung der erreichbaren Dehnung. Um die Piezoaktoren an ihre Grenzen zu treiben, wurden das nichtlineare Verhalten und die Betriebsgrenzen in Bezug auf das an die PZT-Keramiken angelegte elektrische Feld untersucht. Dafür wurde der nichtlineare transversale Ladungskoeffizient während des Betriebs der Materialien bei großen elektrischen Feldstärken gemessen. Die meisten Materialien zeigten deutlich höhere Dehnungen, als aus den Materialdatenblättern zu erwarten war. Die PZT-Materialien konnten mit elektrischen Feldern bis zu 50 % ihrer Koerzitivfeldstärke entgegen der Polarisationsrichtung betrieben werden, ohne die inhärente Polarisation des Materials zu verlieren. Diese Grenze wurde durch ein langzeitstabiles Schnellopolarisationsverfahren auf 85 % der Koerzitivfeldstärke erweitert. Im Hinblick auf die maximale Betriebstemperatur des Materials wurde gezeigt, dass die Temperatur, bei der das Material seine Polarisation verliert, nicht mit der Curie-Temperatur des Materials übereinstimmt. Während einige Materialien ihre Polarisation bei der Curie-Temperatur verloren, verschwand die Koerzitivfeldstärke der meisten Materialien bei viel niedrigeren Temperaturen.

Beim Konzept des abstimmbaren Fresnel-Spiegels wurde die sphärische Auslenkung eines Piezo-Biegewandlers in eine keilförmige Deformation einer Spiegelfläche umgewandelt. Hierfür wurden die starren Spiegelsegmente durch elastische Gelenke aus Silikon verbunden, um die Kippbewegung der Spiegel zu erleichtern. Diese miniaturisierten Fresnel-Spiegel mit einer Kantenlänge von 2 mm wurden in einem 2×2 -Array in einem zusammenhängenden Siliziumrahmen angeordnet und hinsichtlich minimalem Übersprechen optimiert. Jeder Spiegel im Array erreichte einen maximalen Winkel von 19 mrad und konnte mit einem einzigen Steuersignal bis zu einer Frequenz von 28 kHz betrieben werden.

Im Falle der thermisch durchstimmbaren Freiformspiegel wurde das Oberflächenprofil des Spiegels durch den darunterliegenden dreidimensionalen Formhohlraum definiert. Durch das Füllen des Hohlraums mit einem elastischen Polymer wurde

die Form auf eine Spiegelschicht übertragen, die auf dem Polymer aufgebracht war. Aufgrund der thermischen Ausdehnung des Polymers in Abhängigkeit der Chiptemperatur konnte dann die Auslenkung des Spiegels linear eingestellt werden. Durch Optimierung des Designs mittels FEM-Simulation als auch des Strukturierungsprozesses für die Herstellung der Formkavität konnten durchstimmbare Freiform-Spiegel mit Aperturen von bis zu $200\text{ }\mu\text{m}$ hergestellt werden. Zum gezielten und individuellen Heizen der einzelnen Spiegel wurde eine Heizvorrichtung bestehend aus Widerstandsheizern, Temperatursensoren und thermoelektrischen Kühlern entwickelt. Die Widerstandsheizern und die Sensoren wurden durch Aufbringen von Platinstrukturen realisiert, die zwischen Polyimidschichten eingebettet waren. Die lokale Temperatur im Array wurde durch einen geschlossenen Regelkreis des Heizerchips gesteuert. Mit der Kombination aus dem Widerstandsheizer und dem thermoelektrischen Kühler konnte eine Temperaturdifferenz von $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ zwischen den 4 mm voneinander entfernten Arrayelementen erzeugt werden.

Contents

Abstract	v
Zusammenfassung	vii
1 Introduction	1
1.1 Tunable MEMS mirrors	1
1.1.1 Actuation principles	2
1.2 Tunable mirrors as diffraction-free optical elements	3
1.3 Structure of the work	4
I Piezoelectrically tunable MEMS mirrors	5
2 Material study	7
2.1 Introduction to piezoceramics	7
2.1.1 Working principle	9
2.1.2 Hysteresis, creep, and nonlinearity	13
2.1.3 Important material parameters	15
2.2 Materials in the study	16
2.2.1 Sample preparation	17
2.3 Piezoelectric charge coefficient	19
2.3.1 Density	19
2.3.2 Relative permittivity	20
2.3.3 Young's modulus	20
2.3.4 Transverse charge coefficient	23
2.4 Safe operating region of PZT ceramics	27
2.4.1 Curie temperature	28
2.4.2 Effect of temperature on Young's modulus	29
2.4.3 Coercive field strength	30
2.4.4 Electrical operating region	32
2.5 Discussion	36
3 Tunable Fresnel mirror array	43
3.1 Introduction	43
3.1.1 Fresnel mirrors in MEMS	43
3.1.2 Piezoelectrically actuated Fresnel mirror	44

3.2	Miniaturization	46
3.2.1	Constraints in the old design	47
3.2.2	Design optimization using FEM simulation	49
3.3	Fabrication of Fresnel mirror array (FMA)	52
3.3.1	Fabrication of the mirror hinges	53
3.3.2	Actuator fabrication	55
3.3.3	Mirror assembly	57
3.4	Prototype I with synchronous mirror control	59
3.5	Prototype II with improved mirror angle	61
3.5.1	Gain in mirror angle by changing the piezo material	61
3.5.2	Negative pre-deflection using remanent strain	62
3.5.3	Pre-deflection using thermally prestressed hinges	62
3.5.4	Individual mirror control	63
3.6	Dynamic characterization of FMA	67
3.7	Optical Characterization	70
3.8	Discussion and outlook	71

II Thermally tunable devices 75

4 Thermal actuation 77

4.1	Thermally tunable diffraction-free optical elements	78
4.1.1	Fabrication principle	80

5 Free-form mirrors 85

5.1	Process optimization	85
5.1.1	Optimization of mold profile	85
5.1.2	Optimization of the laser structuring process	88
5.2	Fabrication of free-form mirrors	89
5.2.1	Thermal tunability	92
5.2.2	Optical characterization	92
5.3	Process limitations	92

6 Individually tunable thermal mirror array 95

6.1	Motivation	95
6.2	Design and simulation	95
6.2.1	Heater substrate	95
6.2.2	Mirror mold	96
6.2.3	Array design	99
6.3	Fabrication of heater array	100
6.4	Characterization and control	101
6.4.1	Sensor Calibration	102
6.4.2	Heater characterization	103
6.4.3	Temperature gradient	104

6.4.4	Control circuit	107
6.5	Discussion	108
7	Conclusion and outlook	111
A	Appendix	115
A.1	Laser parameters	115
A.2	Surface profile measurements	115
A.3	Soft vs. hard ceramics	116
A.4	Analytical model to evaluate Young's modulus	117
A.5	Resonance and anti-resonance	118
A.6	Thermal depolarization effects in piezoceramics	120
A.7	Using photoresist to protect the mirror layer	120
A.8	Mirror driver circuit for individual control of the Fresnel mirror array	121
A.9	Mechanical designs	122
	Own publications	131
	Bibliography	133
	Nomenclature	151