

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	11
Vorwort	17
1 Einleitung	19
1.1 <i>Wafer-Level-Packaging</i> – Schlüssel zur industriellen Massenfertigung von Mikrosystemen	19
1.2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	20
2 Verfahren zur Verkappung von oberflächennahen Mikrostrukturen	23
2.1 Grundlagen des Packagings von Mikroelektromechanischen Systemen	23
2.1.1 MEMS- versus Mikroelektronik-Packaging	23
2.1.2 Funktionen des Packagings	25
2.1.2.1 Mechanischer Träger	27
2.1.2.2 Interaktion mit der Umwelt	28
2.1.2.3 Wärmeabführung	29
2.1.2.4 Schutz vor Umwelteinflüssen	29
2.1.3 Methoden des MEMS Packaging	32
2.2 Technologien zur Fertigung oberflächennaher Mikrostrukturen	34
2.2.1 Opferschichttechnologien	36
2.2.2 Opferschichtfreie Technologien	38
2.3 Anforderungen an das Verkappungsverfahren	42
2.4 Verkappung mittels Waferbondprozessen	44

2.4.1	Direkte Waferbondprozesse	45
2.4.2	Waferbondprozesse mit Zwischenschichten	47
2.5	Integrierte Verkappungsverfahren	52
2.5.1	Dünnschichtverkappung mittels Gasphasenabscheidung	53
2.5.2	Dünnschichtverkappung mittels galvanischer Abscheidung	58
2.5.3	Polymerbasierte Dünnschichtkappen	59
3	Konzeption der integrierten Verkappungstechnologie	61
3.1	Zusammenfassung der Rahmenbedingungen	61
3.2	Grundkonzept der neuen Verkappungstechnologie	63
3.3	Anforderungen an die Funktionsschichten	65
3.3.1	Anforderungen an die Opferschicht	65
3.3.2	Anforderungen an die Membranschicht	66
3.3.3	Anforderungen an die Verschlusschicht	67
3.4	Realisierte Technologievarianten	67
3.4.1	Technologievariante A auf Basis von PECVD-Prozessen	68
3.4.2	Technologievariante B mit elektrochemischer Abscheidung der <i>Membranschicht</i>	70
4	Mechanischer Entwurf der Dünnschichtkappe	73
4.1	Grundlagen der Plattentheorie	75
4.2	Analytische Näherungslösung für die Dünnschichtkappe	81
4.3	Modellierung der Dünnschichtkappe mittels FEM	85
4.4	Kopplung des FEM-Modells mit der analytischen Näherungslösung	90
5	Technologieentwicklung	95
5.1	Experimentelle Voraussetzungen	95
5.1.1	Probenpräparation und Anlagentechnik	95
5.1.2	Messverfahren und Messtechnik	99
5.2	Werkstoffuntersuchungen	102

5.2.1	Mechanische Eigenspannungen im Schichtstapel der Dünnschichtkappe	104
5.2.1.1	Schichtspannungen in den PECVD-Schichten	106
5.2.1.2	Spannungsrelaxation und thermomechanisches Verhalten der gesputterten Aluminiumschicht	111
5.2.1.3	Thermomechanisches Verhalten des Schichtstapels	113
5.2.1.4	Schichtspannungen im galvanisch abgeschiedenen Nickel	116
5.2.2	Bestimmung des E-Moduls der Kappenmaterialien	119
5.2.3	Haftfestigkeit der Kappenmaterialien	120
5.2.4	Zusammenfassung	122
5.3	Opferschichttechnik mittels CF-Polymer	122
5.3.1	PECVD von Fluorkohlenstoff-Polymeren	123
5.3.2	Abscheideprozess und Eigenschaften der verwendeten CF-Schicht	124
5.3.3	Abscheidung von CF-Polymer zur Planarisierung von Mikrostruk- turen	126
5.3.4	Ätzung von CF-Polymeren mittels Plasmaprozessen	131
5.3.5	Anisotrope Strukturierung des CF-Polymers	133
5.3.6	Isotrope Entfernung des CF-Polymers	141
5.3.7	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	146
5.4	Realisierung der Membranschicht mittels $\text{SiO}_x:\text{H}_y$	147
5.4.1	Abscheidung der Membranschicht	147
5.4.2	Strukturierung der Ätzöffnungen	150
5.4.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	153
5.5	Verschluss der Dünnschichtkappe	154
5.5.1	Verschluss der Ätzöffnungen durch Schichtabscheidung aus der Dampfphase	154
5.5.2	Prüfung des dichten Verschlusses der Ätzöffnungen	158
5.5.3	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	162
6	Herstellung eines Beschleunigungssensors mit Dünnschichtkappe	165

6.1	Entwurf des Beschleunigungssensors	165
6.1.1	Das Feder-Masse-Dämpfer-System	166
6.1.2	Kapazitive Signaldetektion	168
6.1.3	Luftdämpfung in lateral bewegten Mikrostrukturen	170
6.1.4	Design und Dimensionierung	171
6.2	Herstellung der verkapselten Mikrostruktur	173
6.3	Experimentelle Charakterisierung	174
6.3.1	Messaufbau	175
6.3.2	Ergebnisse	177
6.4	Ausblick auf weitere Untersuchungen	180
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	181
7	Zusammenfassung und Ausblick	183
A	Bestimmung der Haftfestigkeit von Schichten nach ASTM D3359	187
B	Realisierte Dünnschichtkappen aus Nickel	189
C	Teststrukturen	191
	Literaturverzeichnis	193
	Abbildungsverzeichnis	209
	Tabellenverzeichnis	219