

Reihe 20

Rechnerunter-
stützte Verfahren

Axel Hald,
Herrenberg

Nr. 473

Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in mikro- elektromechanischen Systemen



Technische Universität Dresden
Institut für Feinwerktechnik
und Elektronik-Design
Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

ifte

Technische Universität Dresden

Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in mikroelektromechanischen Systemen

Axel Hald

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Scheible
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach

Tag der Einreichung: Dresden, den 2. Dezember 2019

Tag der Verteidigung: Dresden, den 17. März 2020

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 20

Rechnerunterstützte
Verfahren

Axel Hald,
Herrenberg

Nr. 473

Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in mikro- elektromechanischen Systemen



Technische Universität Dresden
Institut für Feinwerktechnik
und Elektronik-Design
Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

ifte

Hald, Axel

Methoden zur Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in mikroelektromechanischen Systemen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 20 Nr. 473. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

176 Seiten, 107 Bilder, 10 Tabellen.

ISBN 978-3-18-347320-5, ISSN 0178-9473,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

Für die Dokumentation: MEMS-Sensoren – Parasiten-Extraktion – Elektrostatik-Analyse – MEMS-Entwurf – Field-Solver – polygonbasierter Entwurf – parasitäre Kapazität – Prozess-Simulation – Quasistatische Analyse – regelbasierte Struktureerkennung

Im Entwurf von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) gewinnen die parasitären elektrostatischen Effekte immer mehr an Einfluss. Auslöser hierfür ist der wirtschaftlich bedingte Zwang zur Minimierung von Chipfläche, der neben einer ständigen Strukturverkleinerung auch dazu führt, dass die Anschlussleitungen in sehr enger Nachbarschaft zu den mechanisch aktiven MEMS-Strukturen geführt werden. Dies erfordert eine hochgenaue Analyse der elektrostatischen Verhältnisse.

Die vorliegende Arbeit liefert hierzu mehrere Beiträge. Eine 2.5D-Prozess-Simulation ermöglicht eine effiziente und präzise Extraktion von Kapazitätswerten auf Basis von Analyse-Werkzeugen aus dem IC-Entwurf. Mit einem neuartigen Verfahren zur Struktureerkennung lassen sich diese Werte, vergleichbar zu einem LVS bei ICs, erstmals lokal zuordnen, wodurch gezielte Layoutoptimierungen möglich werden. Eine weitere Neuerung ist die Berücksichtigung bewegungsabhängiger Parasiten..

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9473

ISBN 978-3-18-347320-5

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Scheible für die sehr gute Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Danken möchte ich auch Herrn Johannes Seelhorst für die sehr gute Betreuung und Führung während meiner Arbeit, die ich in seiner Fachgruppe für das Layout von mikroelektromechanischen Sensoren (MEMS) bei der Robert Bosch GmbH in Reutlingen durchführen durfte. Herrn Pekka Herzogenrath (Bosch) und Herrn Hartmut Marquardt (Mentor Graphics) möchte ich für die fachliche Unterstützung und Diskussionen herzlich danken. Ebenfalls gilt mein Dank allen Mitdoktoranden und Kollegen aus den MEMS-Entwicklungsbereichen der Robert Bosch GmbH für die Unterstützung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach danke ich für die Übernahme eines der Gutachten.

Weiter möchte ich meinen KorrekturleserInnen (Karen Kauselmann, Lisa Karl, Andreas Kauselmann und Hermann Hald) danken, die wesentlich zur Steigerung von Form, Stil und Rechtschreibung der Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Sabrina, die mich jederzeit unterstützt und zum Durchhalten motiviert hat.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) | 1 |
| 1.2 | Entwurfsprozess für MEMS | 2 |
| 1.3 | Ziele der Arbeit | 7 |
| 2 | Kapazitive MEMS-Inertialsensoren | 10 |
| 2.1 | Basis-Prozesstechnologie für Oberflächenmikromechanik | 11 |
| 2.2 | Aufbau kapazitiver MEMS-Inertialsensoren | 15 |
| 2.2.1 | Beschleunigungssensor: Aufbau und Funktionsprinzip | 16 |
| 2.2.2 | Drehratensensor: Aufbau und Funktionsprinzip | 18 |
| 2.2.3 | Statische und dynamische Kapazitäten | 19 |
| 2.3 | Zusammenfassung | 24 |
| 3 | MEMS-Entwurf | 25 |
| 3.1 | Entwurf der mikromechanischen Strukturen | 25 |
| 3.2 | Entwurf der Chip-Geometrie | 31 |
| 3.3 | Aktueller Stand der Elektrostatik-Analyse | 31 |
| 3.4 | MEMS-Entwurfsprozesse | 35 |
| 3.4.1 | Bibliotheksbasierter Entwurfsprozess ausgehend von einer Geometrie-Beschreibung | 38 |
| 3.4.2 | Bibliotheksbasierter Entwurfsprozess ausgehend von einer Schaltplan-Beschreibung | 40 |
| 3.4.3 | Polygonbasierter Entwurfsprozess | 41 |
| 3.4.4 | Vergleichende Betrachtung der Entwurfsprozesse | 43 |
| 3.4.5 | Bewertung der Entwurfsprozesse hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit | 45 |
| 3.5 | Zusammenfassung | 46 |
| 4 | Präzisierung der Aufgabenstellung | 48 |
| 5 | Methoden zur Modellierung von MEMS-Prozessen für eine auf 3D-Field-Solvern basierenden Elektrostatik-Analyse | 51 |
| 5.1 | MEMS-spezifische Elektrostatik-Analyse basierend auf 3D-Field-Solvern | 52 |
| 5.2 | 2,5D-Prozess-Simulation | 54 |
| 5.2.1 | Modellierung: Reaktives Ionentieftiefenätzen | 54 |
| 5.2.2 | Modellierung: Gas-Phasen-Ätzen | 57 |
| 5.2.3 | Modellierung: Topographie im Schichtaufbau | 59 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3 | Demonstration | 66 |
| 5.4 | Verifikation der Extraktions-Ergebnisse | 68 |
| 5.5 | Zusammenfassung | 70 |
| 6 | Methode zur polygonbasierten Schaltplan-Extraktion mit einer regelbasierten Strukturerkennung | 71 |
| 6.1 | Grundlegende Idee und Einordnung in den Extraktions-Fluss | 73 |
| 6.2 | Regelbasierter Strukturerkennungs-Algorithmus | 80 |
| 6.2.1 | Eingabe | 81 |
| 6.2.2 | Architektur-Analyse | 82 |
| 6.2.3 | Definition der Topologie-Elemente mit ihren zugehörigen Regeln | 83 |
| 6.2.4 | Ableitung der Topologie-Elemente und Regeln bezüglich einer spezifischen Architektur | 88 |
| 6.2.5 | Segmentierung der Chip-Geometrie in Topologie-Elemente durch Anwenden der abgeleiteten Regeln | 96 |
| 6.2.6 | Ausgabe | 96 |
| 6.3 | Elektrostatistische RC-Analyse und Ersatzschaltplan-Synthese | 97 |
| 6.4 | Demonstration | 100 |
| 6.5 | Verifikation der Extraktions-Ergebnisse | 109 |
| 6.6 | Zusammenfassung | 111 |
| 6.7 | Anhang zu Kapitel 6 | 112 |
| 7 | Methode zur Analyse bewegungsabhängiger elektrostatischer Effekte bei lateraler Auslenkung | 115 |
| 7.1 | Grundlegende Idee und Einordnung in den Extraktions-Fluss | 116 |
| 7.2 | Auslenkungs-Algorithmus | 118 |
| 7.3 | Demonstration | 126 |
| 7.4 | Verifikation | 128 |
| 7.5 | Zusammenfassung | 131 |
| 8 | Kombination der Methoden zur Analyse bewegungsabhängiger elektrostatischer Effekte bei lateraler Auslenkung mit der regelbasierten Strukturerkennung | 132 |
| 8.1 | Demonstration | 133 |
| 8.2 | Zusammenfassende Bewertung | 136 |
| 9 | Gesamtzusammenfassung und weiterführende Aufgaben | 138 |
| | Glossar | 141 |
| | Literaturverzeichnis | 145 |

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden neue Methoden zur Analyse elektrostatischer parasitärer Effekte in mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) beschrieben.

In der Regel entwickelt man hoch optimierte MEMS immer noch in einem polygonbasierten Entwurfsprozess, aus dem nur eine reine 2D-Polygon-Beschreibung der MEMS-Strukturen resultiert. Auf dieser Basis wird eine 2,5D-Prozess-Simulation erarbeitet, die ein Modell für eine hochgenaue 3D-Field-Solver-basierte Elektrostatik-Analyse mit einer kommerziellen Software aus dem Elektronik-Entwurf ermöglicht.

Aufgrund der Polygon-Beschreibung der MEMS-Strukturen lassen sich bei der Elektrostatik-Analyse mit den bislang verfügbaren Werkzeugen immer nur die Kapazitäten zwischen den einzelnen Netzen extrahieren. Damit können insbesondere die extrahierten Werte keinen Komponenten zugeordnet und damit in der Geometrie nicht lokalisiert werden.

Die vorliegende Arbeit erweitert die Elektrostatik-Analyse um eine regelbasierte Strukturerkennung, die diese Schwachstelle beseitigt. Diese Strukturerkennung ermöglicht die Erkennung für den Entwickler relevanter Funktionselemente wie Federn, Elektroden oder seismische Massen, denen sich die extrahierten Werte nun zuordnen lassen.

Neben den elektrostatischen parasitären Effekten in der Ruhelage können in MEMS-Elementen aufgrund der beweglichen Strukturen auch bewegungsabhängige parasitäre Kapazitäten entstehen. Für die Analyse dieser Kapazitäten wird die entwickelte Elektrostatik-Analyse um eine Methode zur quasi-statischen Analyse ergänzt. Diese kann man zudem auch in Kombination mit der Strukturerkennung einsetzen.

Die neu entwickelten Methoden ermöglichen die präzise Analyse parasitärer elektrostatischer Effekte in MEMS-Elementen, die in einem polygonbasierten Entwurfsprozess entwickelt werden. Damit ermöglichen diese neuen Methoden, den Einfluss der elektrostatischen parasitären Effekte durch gezielte Layout-Anpassungen zu minimieren und die Elemente des Gesamtsystems schon während des Entwurfs besser aufeinander abzustimmen.

Abstract

In this thesis, new methods for the analysis of parasitic electrostatic effects in micro-electromechanical systems (MEMS) are presented.

Due to the lack of sophisticated component libraries for MEMS, highly optimized MEMS sensors are currently designed using a polygon-driven design flow. Hence, the resulting sensor structure is only given as plain 2D polygon data. Based on this polygon model a 2.5D fabrication-process simulation is developed, which enables the usage of commercial 3D field-solvers for a satisfactory analysis of the electrostatic parasitic effects.

Due to the plain polygon model of the MEMS structures, the extracted parasitic capacitances can be only analyzed between the nets of the MEMS. Particularly, the extracted capacitances cannot be associated with any functional components of the MEMS element, which hinders the localization of the parasitics in the geometry.

In order to solve this problem, the electrostatic analysis is extended by a rule-based recognition algorithm. This algorithm allows the identification of MEMS components such as springs, electrodes, or the seismic masses. Based on this data, the algorithm maps the extracted capacitances to these identified elements.

Beside the MEMS' parasitic capacitance in resting position, there can be additional changing parasitics arising from movements/deflections of the MEMS structures. To enable the analysis of such dynamic capacitances, the developed electrostatic analysis is extended by a method for the quasi-static analysis. This supplemental method can also be combined with the structure recognition approach.

The developed new methods allow the precise analysis of electrostatic parasitic effects in MEMS, which are designed using a polygon-driven design flow. All in all, the new methods enable specific optimization steps in the polygon structures in order to effectively minimize the impact of electrostatic parasitic effects. This also facilitates the tuning of the MEMS parts and their synchronisation within the entire system in early design stages.