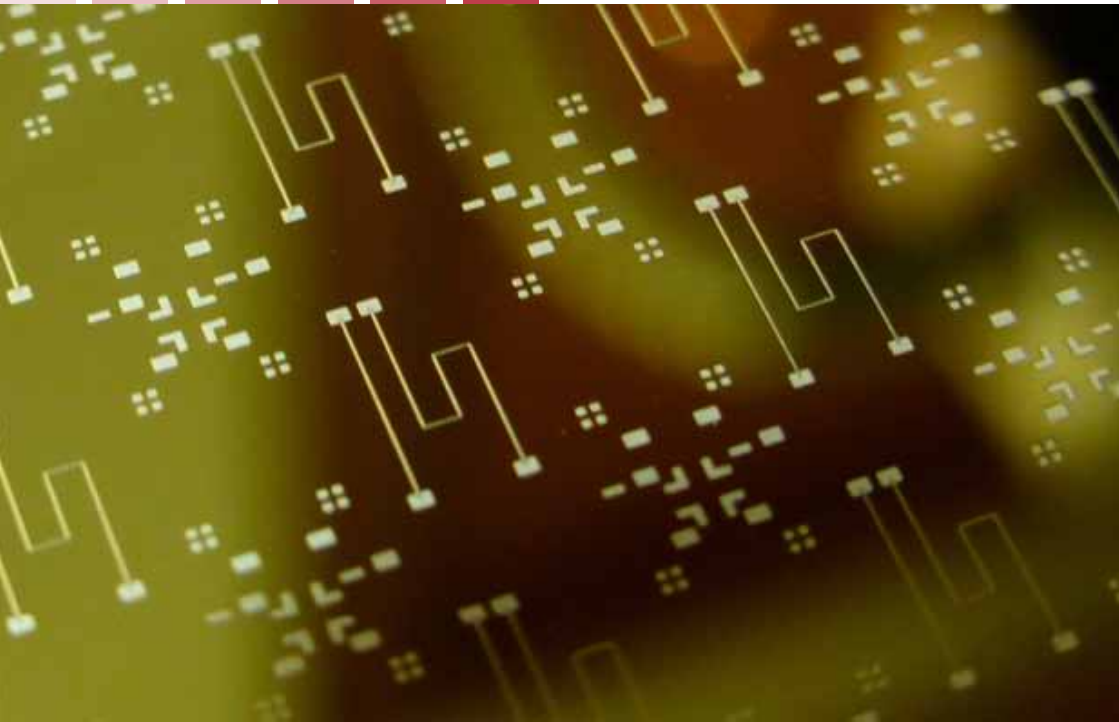


Liquid Crystal Mixed Beam-Switching and Beam-Steering Network in Hybrid Metallic and Dielectric Waveguide Technology

Matthias Jost



Liquid Crystal Mixed Beam-Switching and Beam-Steering Network in Hybrid Metallic and Dielectric Waveguide Technology

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Phys.

Matthias Jost

geboren am 10.07.1985
in Birkenfeld (Nahe), Deutschland

Referent: Prof. Dr.-Ing. Rolf Jakoby
Korreferent: Prof. Dr. Philippe Ferrari

Tag der Einreichung: 02.02.2018
Tag der mündlichen Prüfung: 26.04.2018

D17
Darmstadt 2018

Berichte aus der Hochfrequenztechnik

Matthias Jost

**Liquid Crystal Mixed Beam-Switching and
Beam-Steering Network in Hybrid Metallic
and Dielectric Waveguide Technology**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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 978-3-8440-6042-3

ISSN 0945-0793

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

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

Erklärung laut § 9 der Promotionsordnung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 02.02.2018

Preface

This thesis presents my research results performed as a Ph.D. candidate in the Institute for Microwave Engineering and Photonics (IMP) at Technische Universität Darmstadt. At this point, I would like to acknowledge all the people who supported me on the long way to my doctorate.

First, I want to sincerely thank my supervisor Prof. Dr.-Ing. Rolf Jakoby for his trustful and patient guidance throughout my complete Ph.D. time. The high degree of freedom he offered for my research activities together with the responsibilities he assigned me within our team allowed me to improve myself in the scientific, personal and cultural point of view. Mahalo!

A special thanks goes to Prof. Dr. Philippe Ferrari from the Institut de Microélectronique Electromagnétisme et Photonique and Laboratoire d'Hyperfréquences et de Caractérisation (IMEP-LaHC) for evaluating this dissertation, for the fruitful cooperation throughout the years and for always providing me a different perspective on certain challenges.

Many thanks also go to:

- Dr.-Ing. Carsten Fritsch, Dr. Herbert Plach and Dr. Michael Wittek from Merck KGaA
- Prof. Dr. Gustavo P. Rehder, Prof. Dr. Ariana L. C. Serrano and Leonardo G. Gomes from the Laboratório de Microeletrônica at Universidade de São Paulo
- Bärbel Schulz, Andreas Heunisch and Dr. Torsten Rabe from the Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
- Dr. Rüdiger Follmann and Matthias Quibeldey from IMST GmbH
- Dr. Anke Pagels-Kerp from Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Special thanks go to Dr. Martin Letz from Schott AG. His "golden rules" have proven to be very useful and have always inspired me. Also, I want to thank my former fellow students Dr. Julian Lingner and Dr. Hubertus P. Braun.

I am very grateful for having the opportunity to interact with so many great personalities during my time at the IMP. Specifically I want to name Dr.-Ing. Alex Wiens for always offering a helping hand and for sharing the same sense of humor, Sönke Schmidt for a great time and all the "fruitful" discussions in 417, as well as Roland Reese, without whom this work would not have been as successful as it became. Further, I would like to express my appreciation to Dr.-Ing. Christian Weickhmann, Dr.-Ing. Sebastian Strunck, Dr.-Ing. Matthias Maasch, Christian Schuster, Ersin Polat, Matthias Nickel, Dr.-Ing. Holger Maune and Prof. Dr.-Ing. Christian Damm for their support, as well as Dr.-Ing. Martin Schüßler, Dr.-Ing. Matthias Hansli and Henning Tesmer for the musical after work program.

The technical staff from IMP and EMK are highly acknowledged, since most components within this thesis were only realisable due to their high expertise: Peter Kießlich, Andreas Semrad, Karin Boye, Silke Schober, Walter Albrecht, Corinna Harsche, Viktor Fröse and Tom Schildknecht.

Last but not least I want to thank my family, friends and especially my wife Alexandra. Without their unconditional motivation and support, this thesis would not have been possible!

Mainz, June 2018

Matthias Jost

Kurzfassung

Zukünftige Kommunikationssysteme im W-Band erfordern nicht nur direktive, sondern zur Strahlführung ebenso rekonfigurierbare Antennensysteme. Für die Realisierung solcher adaptiven Systeme sind speziell für den Mikrowellenbereich synthetisierte Flüssigkristalle (engl.: Liquid Crystal, LC) bestens geeignet. Durch die Integration in geeignete Komponenten mit entsprechenden Ansteuerkonzepten, kann die Orientierung der Flüssigkristalle und damit die effektive Permittivität kontinuierlich gesteuert werden. Zudem weisen diese Flüssigkristalle oberhalb von 10 GHz geringe dielektrische Verluste auf, welche mit steigender Frequenz sogar sinken. Um diese einzigartigen Eigenschaften des Materials auszunutzen, liegt der Fokus der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit erstmals auf der Untersuchung eines LC-basierten Antennennetzwerks im W-Band, welches auf einer Kombination aus einer diskreten Strahlumschaltung und einer kontinuierlichen Strahlsteuerung zwischen den umgeschalteten Zuständen beruht. Dieses Netzwerk basiert auf einer Butler-Matrix, welche mit kontinuierlich steuerbaren LC-Phasenschiebern erweitert wird. Für die Auswahl der Butler-Matrix Eingänge wird ein neuartiger, interferenzbasierter HF-Schalter verwendet. Das Interferenzprinzip dieses speziellen Schalters erlaubt ein stufenlos einstellbares Verhältnis der Ausgangsleistungen, welches für die zeitgleiche Anregung mehrerer Signale erforderlich ist und mit dem somit gleichzeitig mehrere Antennenkeulen generiert werden.

Für die Realisierung des gemischten strahlumschaltenden und strahlsteuernden Netzwerks werden verschiedene Technologien untersucht. Aufgrund der hohen Integrationsfähigkeit und kompakten Bauweise wird die Niedertemperatur-Einbrand-Keramik-Technologie für einen ersten Machbarkeitsnachweis, allerdings nur im Ka-Band, untersucht. Für das W-Band werden verlustarme Technologien in Form von metallischen Rechteckhohlleitern und dielektrischen Wellenleitern untersucht. Während sich Hohlleiter exzellent für die Realisierung der nicht steuerbaren Verteilernetzwerke eignen, sind dielektrische Wellenleiter eine sehr vielversprechende Alternative zur Realisierung der steuerbaren LC-Komponenten, da keine metallischen Berandungen die Integration von Steuerelektroden limitiert. Als nicht steuerbare Kernkomponente des angestrebten Netzwerks wird eine Butler-Matrix mit einem Einfügeverlust von im Mittel 3,5 dB bei 102 GHz präsentiert. Diese basiert

auf einer neuartigen, multifunktionellen Hohlleiterkreuzung, welche zudem eine miniaturisierte Realisierung des gesamten Netzwerks in einer einzigen Ebene erlaubt. Als Schlüsselkomponente für die Steuerbarkeit des Netzwerks wird ein kontinuierlich steuerbarer Stufenindex-LC-Phasenschieber realisiert. Mit einer Phasenschiebergüte von $100^\circ/\text{dB}$ bei 102 GHz übertrifft dieser elektrisch steuerbare Phasenschieber deutlich den heutigen Stand der Technik für elektrisch steuerbare W-Band-Phasenschieber.

Um vom Eingangsport bis hin zu den Antennenelementen eine Realisierung in einer Ebene gewährleisten zu können, wird auf der gleichen technologischen Plattform die hybride Integration aus verlustarmen metallischen Hohlleitern und steuerbaren dielektrischen Wellenleitern hoher Güte am Beispiel des interferenzbasierten HF Schalters untersucht. Der vorgestellte Demonstrator weist eine Einfügedämpfung von 3 dB auf, während eine Isolation von 27 dB erreicht wird. Die hybride Integration von nicht-steuerbaren metallischen Hohlleitern und hochperformanten steuerbaren dielektrischen Wellenleitern weist somit ein hohes Potenzial auf, nicht nur für die Realisierung des angestrebten LC-basierten Antennennetzwerks, sondern allgemein für die Realisierung LC-basierter, steuerbarer Antennensysteme oberhalb von 100 GHz.

Abstract

Future communication systems at *W*-band are demanding highly directive antenna systems with beam-steering capability. For the hardware implementation of analogue beam-steering at millimetre waves, the microwave liquid crystal (LC) technology is ideally suited. It takes advantage of specifically synthesised LCs for microwaves in combination with appropriate device and biasing concepts, where the orientation of the LC, and therefore, its effective permittivity can be continuously tuned. It has low dielectric losses above 10 GHz with a decreasing trend with increasing frequency. To exploit these unique characteristics, the focus of this scientific work is set for the first time on the investigation of an LC-based network with mixed discrete beam-switching and continuous beam-steering capability between the switching states for high-gain antennas at *W*-band. It consists of a Butler matrix combined with continuously tuneable phase shifters and a novel type of RF switch, an interference-based Single-Pole *n*-Throw (SPnT). The interference principle of the SPnT allows a continuously adjustable power splitting ratio, and hence, the generation of multiple beams.

Different technologies are investigated for the realisation of this mixed network. Due to its high level of integrability and compact designs, the standard low temperature co-fired ceramic technology is examined, however, for a first proof-of-concept at *Ka*-band only. For *W*-band, two low-loss technologies are investigated: tuneable metallic and dielectric waveguides. While metallic waveguides are well suited for the realisation of low-loss non-tuneable feeding networks, dielectric waveguides are better suited for the realisation of tuneable LC components at (sub)millimetre waves, since no metallic boundaries are limiting the integration of an electrical biasing network. As non-tuneable core part, a Butler matrix with an average insertion loss of 3.5 dB at 102 GHz is realised, which is based on a novel multifunctional crossover design, allowing a miniaturised in-plane realisation of the overall mixed network. As key component for tuning of the mixed beam-switching and beam-steering network, a step-index dielectric waveguide phase shifter is presented. With a phase shifter figure-of-merit of 100 °/dB at 102 GHz, this fully electrically biased phase shifter is going far beyond the state-of-the-art for electrically tuneable *W*-band phase shifter.

To stay on the same technology platform and to allow an in-plane realisation from the input port up to the radiating elements, the interference-based SPnTs are additionally investigated by a hybrid implementation of metallic and dielectric waveguides. It exhibits an insertion loss of 3 dB, while providing an isolation of 27 dB. Hence, this hybrid metallic and dielectric waveguide technology reveals a high potential not only for the presented LC-based mixed beam-switching and beam-steering network, but also for LC-tuned continuous beam-steering networks at frequencies above 100 GHz, since low-loss metallic waveguide feeding networks can be generally combined with high-performance tuneable dielectric waveguides.

Contents

1	Introduction	11
2	Fundamentals of Liquid Crystal	15
2.1	Nematic Liquid Crystal	16
2.2	Magnetic Properties	20
2.3	Dielectric Properties	22
2.4	Biasing Schemes	23
2.5	Micro- and Millimetre Wave Characterisation	29
3	Mixed Beam-Switching and Beam-Steering Network	32
3.1	Butler Matrix	32
3.2	Tuneable Phase Shifter	34
3.3	Interference-Based Single-Pole Double-Throw	38
4	Planar LTCC Integrated SPDT at Ka-Band	43
4.1	Stripline Phase Shifter	46
4.2	Single-Pole Double-Throws	57
4.2.1	Impedance-Dependent Designs	58
4.2.2	Demonstrator Realisation	62
4.2.3	RF and Surface Roughness Characterisation	64
5	Low-Loss Waveguide-Integrated Butler Matrix and SPDT at W-Band	72
5.1	In-Plane Realisation of a Butler Matrix	73
5.1.1	In-Plane Crossover with Dielectric Inset	74
5.1.2	Waveguide-Based In-Plane Butler Matrix	79
5.2	Tuneable Low-Loss Phase Shifter	88
5.2.1	Magnetically Biased Phase Shifter	88
5.2.2	Biasing Electrode Design	93
5.3	Low-Loss Single-Pole Double-Throw	96

6	Tuneable Dielectric Waveguides and SPDT at W-Band	104
6.1	Design Criteria	105
6.1.1	Geometrical Optics Approach	105
6.1.2	Approximation Method of Marcatili	108
6.2	Material Evaluation	113
6.2.1	WR10-to-sWL fibre transition	114
6.2.2	Qualitative Material Evaluation	117
6.3	Non-Tuneable Components	119
6.3.1	Multimode Interference Power Divider	119
6.3.2	Multimode Interference Coupler	124
6.4	Tuneable Phase Shifter Topologies	126
6.4.1	Subwavelength Topology	127
6.4.2	Step-Index Topology	131
6.5	Continuously tuneable SPDT	135
6.6	SPDT in Hybrid Metallic and Dielectric Waveguide Topology	142
6.7	Comparison of Tuneable SPDTs at W-Band	145
7	Conclusion and Outlook	147
A	Appendix	154
	Symbols and Abbreviations	158
	Bibliography	163
	Contributions	179
	Curriculum Vitae	186