

Table of contents

| | |
|---|----|
| Streszczenie | 7 |
| Summary | 9 |
| Table of symbols and designations | 11 |
| 1. Introduction | 15 |
| 2. Modelling of hot deformation behaviour | 20 |
| 2.1. Deformation mechanism map based upon Frost and Asby | 21 |
| 2.2. Raj maps – atomistic model..... | 23 |
| 2.3. Polar reciprocity model..... | 23 |
| 2.4. Kinetic analysis – the Zener–Hollomon parameter | 24 |
| 3. Dynamic Material Model | 27 |
| 3.1. Prasad’s criterion | 31 |
| 3.2. Murty’s criterion | 32 |
| 3.3. Gegel’s criterion | 33 |
| 3.4. Alexander/ Malas criterion | 35 |
| 3.5. Semiatin and Lahoti criterion | 35 |
| 3.6. Activation energy map | 36 |
| 3.7. Modelling of material behaviour – process modelling | 37 |
| 4. Genesis, objective and thesis of the work | 46 |
| 5. Methodology and programme of research | 50 |
| 6. Characteristics of the investigated materials | 54 |
| 6.1. Mechanical properties | 58 |
| 6.2. Dilatometric analysis | 58 |
| 6.3. Plastometric testing | 60 |
| 7. Processing maps in accordance with the Prasad’s criterion | 63 |

Published by AGH University of Science and Technology Press

Editor-in-Chief: *Jan Sas*

Editorial Committee:

Tomasz Szmuc (Chairman),

Marek Capiński,

Jerzy Klich,

Witold K. Krajewski,

Tadeusz Sawik,

Mariusz Ziółko

Reviewers: *Prof. dr hab. inż. Krzysztof M. Abramski*

Prof. dr hab. inż. Stanisław Kuta

Author of the present monograph is an employee of the Department of Electronics, Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronics, AGH University of Science and Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland.

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2011

ISSN 0867-6631

ISBN 978-83-7464-408-2

Desktop Publishing: „Andre”, tel. 12 422 83 23

Publishers Office

Redakcja Wydawnictw AGH

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel. 12 617 32 28, tel./faks 12 636 40 38

e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl

<http://www.wydawnictwa.agh.edu.pl>

Contents

| | |
|--|----|
| Streszczenie | 7 |
| Summary | 9 |
| List of symbols | 11 |
| 1. Introduction | 13 |
| 2. Microwave directional couplers, power dividers and phase shifters | 21 |
| 2.1. Directional couplers and power dividers with directly connected transmission lines | 22 |
| 2.2. Directional couplers and phase shifters utilizing coupled transmission lines | 29 |
| 2.2.1. Single-section coupled-line directional couplers | 29 |
| 2.2.2. Multisection coupled-line directional couplers | 34 |
| 2.2.3. Broadband phase shifters | 35 |
| 2.2.4. Design of coupled-strip-transmission-line directional couplers and phase shifters with improved frequency response | 38 |
| 2.3. Summary | 42 |
| 3. Directional couplers in application to balanced and n-way microwave circuits | 43 |
| 3.1. Balanced and n -way microwave circuits | 44 |
| 3.2. Large signal characterization of solid-state devices | 51 |
| 3.3. Asymmetric coupled-line directional couplers as impedance transformers in balanced and n -way power amplifiers | 58 |
| 3.4. Approach to the design of asymmetric coupled-line impedance transforming directional couplers | 70 |
| 3.5. Broadband asymmetric coupled-line impedance transforming directional couplers | 81 |
| 3.6. Summary | 86 |

| | |
|---|-----|
| 4. Broadband Butler matrices utilizing coupled-line directional couplers | 88 |
| 4.1. Butler matrices utilizing single-section coupled-line directional couplers | 92 |
| 4.1.1. 4×4 Butler matrix | 92 |
| 4.1.2. 8×8 Butler matrix | 96 |
| 4.2. Butler matrices utilizing multisection coupled-line directional couplers | 102 |
| 4.3. Butler matrices with the use of $0/180^\circ$ directional couplers | 129 |
| 4.4. Summary | 136 |
| 5. Design of miniaturized broadband directional couplers | 139 |
| 5.1. Miniaturization techniques in the design of microwave directional couplers | 139 |
| 5.2. Design of broadband quasi-lumped directional couplers | 145 |
| 5.3. Summary | 161 |
| 6. Final remarks | 163 |
| References | 165 |

KRZYSZTOF WINCZA

Projektowanie układów mikrofalowych wykorzystujących szerokopasmowe sprzęgacze kierunkowe

Streszczenie

W niniejszej monografii przedstawione zostały zagadnienia związane z projektowaniem złożonych sieci mikrofalowych wykorzystujących szerokopasmowe sprzęgacze kierunkowe. Przedstawione zostały następujące trzy różne aspekty projektowania i zastosowań szerokopasmowych sprzęgaczy o liniach sprzężonych:

1. Projektowanie sprzęgaczy o liniach sprzężonych transformujących impedancję.
2. Projektowanie szerokopasmowych macierzy Butlera wykorzystujących sprzęgacze o liniach sprzężonych.
3. Projektowanie zminiaturyzowanych szerokopasmowych sprzęgaczy kierunkowych z wykorzystaniem techniki elementów quasi-skupionych.

Wymienione obszary zostały dogłębnie przeanalizowane przez Autora monografii na przestrzeni ostatnich kilku lat. W szczególności przeanalizowana została możliwość zastosowania asymetrycznych sprzęgaczy kierunkowych w zrównoważonych wzmacniaczach mocy mikrofalowej oraz w układach z sumowaniem mocy, biorąc pod uwagę możliwy do pozyskania stosunek impedancji obciążenia we wrotach wejściowych i wyjściowych. Główną zaletą zaproponowanych rozwiązań jest możliwość jednoczesnej realizacji funkcji podziału mocy i dopasowania impedancyjnego w jednym układzie. Przeanalizowane zostały zarówno układy jednosekcyjnych jak i wielosekcyjnych asymetrycznych sprzęgaczy kierunkowych i wyprowadzone zostały zależności opisujące możliwy do pozyskania w tych układach stosunek impedancji.

Kolejnym przedstawionym w pracy zagadnieniem jest projektowanie szerokopasmowych macierzy Butlera. Opisana została metoda projektowania takich układów z wykorzystaniem wielosekcyjnych sprzęgaczy kierunkowych o liniach sprzężonych. Zaprezentowana została także, opracowana przez Autora, metoda realizacji szerokopasmowych przesuwników fazy o stałym różnicowym przesunięciu fazy wykorzystywanych w układach macierzy Butlera. Przeprowadzone analizy wykazały, że projektowanie szerokopasmowych macierzy Butlera wykorzystujących wielosekcyjne sprzęgacze o liniach sprzężonych wymaga zastosowania sekcji 'C' przesuwników fazy Schiffmana w celu minimalizacji rozrównoważenia charakterystyk fazy różnicowej. Dodatkowo, w pracy zaproponowane zostało nowe rozwiązanie układowe pozwalające na realizację w pełni planarnej, zintegrowanej macierzy Butlera 8×8 .

Ostatnim zagadnieniem przedstawionym w monografii jest metoda projektowania szerokopasmowych zminiaturyzowanych sprzęgaczy kierunkowych, zaproponowana przez Autora, w której znaczne zmniejszenie rozmiaru realizowanych układów uzyskuje się poprzez zastosowanie techniki elementów quasi skupionych. Opracowana metoda pozwala na realizację miniaturowych sprzęgaczy kierunkowych cechujących się parametrami porównywalnymi ze sprzęgaczami zrealizowanymi w technice sprzężonych linii transmisyjnych. Ponadto, metoda ta umożliwia pozyskanie szerokiego pasa pracy, ze względu na fakt, że pozwala na projektowanie wielosekcyjnych, zminiaturyzowanych sprzęgaczy kierunkowych.

Przedstawione w pracy analizy teoretyczne zostały potwierdzone poprzez pomiary wykonanych modeli zaprojektowanych i wykonanych układów mikrofalowych.

KRZYSZTOF WINCZA

Design of Microwave Networks with Broadband Directional Couplers

Summary

The monograph focuses on the design of complex microwave networks with the use of broadband coupled-line directional couplers. Three different areas of the design and application of such couplers have been addressed, which are:

1. Design of coupled-line impedance transforming directional couplers.
2. Design of broadband Butler matrices utilizing coupled-line directional couplers.
3. Design of miniaturized directional couplers with the use of quasi-lumped-element technique.

All aspects have been comprehensively researched by the Author over the recent years. In particular, the application of asymmetric coupled-line directional couplers in balanced and n -way power amplifiers has been described, and the design of such circuits has been shown with the emphasis on their impedance transforming capability. The major advantage of the proposed approach is that it allows to realize both power dividing and impedance matching within a single component. Single-section and multi-section impedance transforming directional couplers are analyzed and the achievable impedance transformation ratio for such couplers is derived.

The second issue presented in the monograph concerns the design of broadband Butler matrices. A method for the design of broadband Butler matrices utilizing coupled-line directional couplers is presented, in which multisection symmetrical coupled-line directional couplers are used. The method proposed by the Author of broadband differential phase shifters' realization for applications in such networks, is outlined. It is shown, that the design of broadband Butler matrices with the use of multisection directional couplers requires applying of Schiffman 'C'-sections in order to minimize the phase imbalance of the resulting network. Moreover, a novel arrangement of an 8×8 Butler matrix is proposed, that allows for planar fully integrated realization.

Finally, the design method of miniaturized broadband directional couplers, developed by the Author, is described, in which a quasi-lumped-element technique is used. The proposed approach allows for achieving the frequency response of miniaturized

couplers comparable to the response of their distributed counterparts. Moreover, the method allows for achieving broad bandwidths, due to its suitability for the design of multisection miniaturized directional couplers.

The presented theoretical analyses have been confirmed by the measurements of a number of manufactured coupled-line networks.

List of symbols

- β – phase constant
- Γ – reflection coefficient
- ϵ_0 – permittivity of free space
- μ_0 – permeability of free space
- λ_0 – free space wavelength
- λ_g – guided wavelength
- θ_0 – electrical length
- v_{pe}, v_{po} – even, odd mode phase velocity
- ϵ_r – dielectric constant (relative permittivity)
- $\epsilon_{ree}, \epsilon_{reo}$ – effective dielectric constant (relative permittivity) for even, odd mode
- BW – operational bandwidth
- C – capacitance matrix
- c – free space light velocity
- C – coupling
- $C_{1,2}$ – per unit length capacitance of line 1, 2
- C_e, C_o – per unit length even, odd mode capacitance of coupled lines
- C_m – per unit length mutual capacitance of coupled lines
- D – directivity
- I – isolation
- IL – insertion losses
- k – coupling coefficient
- k_L, k_C – inductive, capacitive coupling coefficient
- L – inductance matrix

- l – length of a coupled-line section
- $L_{1,2}$ – per unit length self inductance of line 1, 2
- L_m – per unit length mutual inductance of coupled lines
- R – impedance ratio of the transformer
- RL – return losses
- S – scattering matrix
- $S^{e,o}$ – scattering matrix for even and mode excitation
- T – transmission
- Z_0 – characteristic impedance
- Z_{0e}, Z_{0o} – even, odd mode characteristic impedance
- $Z_{T1,2}$ – 1st, 2nd line terminating impedance
- $VSWR$ – voltage standing wave ratio