

Entwurfsverfahren für passive
hochintegrierte Multimode-Schaltungen
der Hochfrequenztechnik
in mehrlagigen Herstellungsprozessen

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

von
Arash Sadeghfam
aus Teheran, Iran

Referent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Solbach
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ingo Wolff
Tag der mündlichen Prüfung: 3. April 2008

Für Snjezana und Mia

Vorwort

Im Bereich der kommerziellen Telekommunikationstechnik ist der Trend nach kleineren und günstigeren Endgeräten mit erhöhter Funktionalität seit Jahren ununterbrochen. Die Realisierung neuer Endgeräte erfolgt vermehrt auf Basis von kompakten Halbleiterschaltungen in einer differentiellen Schaltungstechnik. Hierbei schränken die Güten der realisierbaren integrierten Spulen die elektrischen Eigenschaften der eingesetzten Komponenten. Die zahlreichen verfügbaren Publikationen zur Reduzierung des Platzbedarfs und Erhöhung der Güte von integrierten Spulen über die vergangenen Jahrzehnte belegen das hierbei noch vorhandene Verbesserungspotential.

Basierend auf neuartigen, im Rahmen dieser Arbeit eingeführten, induktiven Komponenten wird eine Entwurfsmethodik für differentielle Schaltungen mit sowohl verbesserten elektrischen Eigenschaften und als auch einem reduzierten Platzbedarf vorgestellt. Weiterhin wird ein Konzept zum Entwurf von äußerst kompakten Symmetriergliedern mit einer erweiterten Funktionalität und einer so genannten Rondellspule als Kernelemente präsentiert. Diese von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen als Dissertation genehmigte Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fachhochschule Aachen im Rahmen eines Forschungsauftrags von Infineon Technologies AG in München.

Mein besonderer dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Solbach, Leiter des Fachgebiets Hochfrequenztechnik an der Universität Duisburg-Essen, für die Übernahme des Referats und die freie Entfaltungsmöglichkeiten bei der Durchführung der Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Wolff möchte ich für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen Anregungen danken.

Dem Leiter des Lehrgebiets für Hoch- und Höchsthfrequenztechnik der Fachhochschule Aachen, Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Heuermann, gilt mein herzlicher Dank für die zahlreichen anregenden Diskussionen und dafür, dass er mich nicht nur bei fachlichen Belangen stets bestens förderte. Den Kollegen im Labor für Mikrowellentechnik danke ich für die fruchtbare Arbeitsatmosphäre und Diskussionsbeiträge.

Die Herren Reinhard Losehand, Dr.-Ing. Harald Böhm, Herbert Kebinger, Dr.-Ing. Wolfgang

Riedl und Dr.-Ing. Wolfgang Klein von Infineon Technologies AG gilt mein Dank für die vielfältigen Anregungen, die zum Gelingen der Arbeit maßgeblich beigetragen haben, sowie für die Realisierung und messtechnische Charakterisierung der Halbleiter-Schaltungen. Weiterhin möchte ich Gerhard Lohninger für die Forderung dieses Forschungsprojekts danken.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts danke ich Prof. Dr.-Ing. Holger Heuermann und Dr.-Ing. Andreas John sowie Sven Zellmeier und Cornelia Seifert.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich alle die Jahre unterstützt und auf ihre Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Aachen, im April 2008

Arash Sadeghfam

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Vorwort | iii |
| Abkürzungen und Formelzeichen | ix |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Multimode-Schaltungen in der modernen Nachrichtentechnik | 3 |
| 1.2 Ziele und Gliederung dieser Arbeit | 5 |
| 2 Herstellung von passiven mehrlagigen Schaltungen | 9 |
| 2.1 Mikrowellenlaminat-Prozesse | 10 |
| 2.2 Keramische Herstellungsprozesse | 11 |
| 2.2.1 Der LTCC-Prozess | 12 |
| 2.2.1.1 Schaltungseigenschaften | 14 |
| 2.3 Halbleiterprozesse | 16 |
| 2.3.1 Der P7MI-Halbleiterprozess | 18 |
| 2.3.1.1 Technologiedaten des P7MI-Prozesses | 19 |
| 2.3.1.2 Schaltungseigenschaften beim P7MI-Prozess | 20 |
| 3 Induktive Schaltungselemente | 23 |
| 3.1 Charakteristische Eigenschaften von Spulen | 24 |
| 3.2 Geometrieparameter von integrierten Spulen | 32 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3 | Realisierbare Spulengüten | 36 |
| 3.3.1 | Verlustmechanismen bei integrierten Spulen | 36 |
| 3.3.2 | Möglichkeiten zur Optimierung der Spulengüte | 39 |
| 3.4 | Entwurfsmethodik für optimierte integrierte Spulen | 47 |
| 4 | Neuartige induktive Bauelemente für Multimode-Schaltungen | 53 |
| 4.1 | Transformatorschaltungen | 53 |
| 4.2 | Die Differentielle Spule | 55 |
| 4.3 | Die Balancierte Spule | 58 |
| 4.3.1 | Theoretische Betrachtungen | 59 |
| 4.3.2 | Weitere wesentliche Charakteristiken der Balancierten Spule | 63 |
| 4.4 | Die Rondellspule | 67 |
| 4.4.1 | Theoretische Grundlagen | 69 |
| 4.5 | Entwurf von optimierten Multimode-Induktivitäten | 73 |
| 5 | Entwurf von Multimode-Schaltungen | 77 |
| 5.1 | Theoretische Systembetrachtungen | 78 |
| 5.1.1 | Allgemeine Modenkversionsparameter eines Dreileitersystems | 79 |
| 5.1.2 | Modenkversionsparameter eines Symmetrierglieds | 81 |
| 5.2 | Konventioneller Entwurf von differentiellen Schaltungen | 83 |
| 5.3 | Schaltungsentwurf mit neuen Multimode-Elementen | 86 |
| 6 | Verifikationsschaltungen | 91 |
| 6.1 | Ein differentieller Phasenschieber | 91 |
| 6.1.1 | Aufbau des differentiellen 90°-Phasenschiebers | 92 |
| 6.1.2 | Messergebnisse und Auswertung des differentiellen Phasenschiebers | 92 |
| 6.2 | GSM-Multimode-Filter mit Impedanztransformation | 96 |
| 6.2.1 | Schematische Betrachtung des GSM-Filters | 96 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.2.2 | Layouterstellung für das GSM-Filter | 99 |
| 6.2.3 | Messergebnisse und Diskussion der GSM-Filterschaltung | 100 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 103 |
| | Literaturverzeichnis | 105 |

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

| | |
|---------------|---|
| <i>Balun</i> | Balanced-Unbalanced (Symmetrierglied) |
| <i>FR4</i> | Fire Resistant, class 4 (Epoxyharz-basiertes Trägerlaminat für Schaltungen der Hochfrequenztechnik) |
| <i>HSDPA</i> | High Speed Downlink Packet Access |
| <i>HTCC</i> | High Temperature Co-Fired Ceramic |
| <i>IC</i> | Integrated Circuit |
| <i>LTCC</i> | Low Temperature Co-Fired Ceramic |
| <i>MIM</i> | Metal Insulator Metal |
| <i>(M)MIC</i> | (Monolithic) Microwave Integrated Circuit |
| <i>RFID</i> | Radio Frequency Identification |
| <i>SMD</i> | Surface Mounted Device |
| <i>UMTS</i> | Universal Mobile Telephony Standard |

Formelzeichen

| | |
|------------|---|
| a_i, b_i | komplexe hin- und rücklaufende Wellengrößen |
| A | Fläche |
| B | magnetische Flussdichte |
| c_0 | Lichtgeschwindigkeit |

| | |
|------------|--|
| D | elektrische Flussdichte |
| E | elektrische Feldstärke |
| f | Frequenz, Streuungsfaktor |
| H | magnetische Feldstärke |
| i, j | Laufindizes für Matrix- und Vektorelemente, die von $n=1$ bis zur jeweiligen Dimension reichen |
| $i(t)$ | Strom im Zeitbereich |
| I | komplexer Stromzeiger |
| J | Stromdichte |
| k | Kopplungsfaktor |
| ℓ | Leitungslänge |
| L | Induktivität |
| M | Gegeninduktivität |
| n | Laufindex, Anzahl der Windungen einer Spule |
| R, R_M | Widerstand, magnetischer Widerstand |
| S_{ij} | Streuparametergrößen |
| t | Zeitvariabel, Metallisierungshöhe |
| $u(t)$ | Spannung im Zeitbereich |
| U | komplexer Spannungszeiger |
| \ddot{u} | Übersetzungsverhältnis der Ströme und Spannungen eines Transformators |
| w | Leiterbahnbreite |
| W_m | magnetische Energie |
| Q | Güte eines Bauelementes |
| Z | Impedanz, Scheinwiderstand |
| Z_0 | Wellenwiderstand (i.d.R. $50\ \Omega$) |
| Z^-, Z^+ | Bezugsimpedanz eines Leitersystems für den Gegentaktmode bzw. für den Gleichtaktmode |

| | |
|--------------------------|---|
| α | Dämpfungs-konstante oder -belag einer Leitung |
| β | Phasenkonstante oder -belag einer Leitung |
| γ | komplexe Ausbreitungs- oder Fortpflanzungskonstante einer Leitung |
| $\gamma \ell$ | komplexe elektrische Länge |
| δ | äquivalente Leiterdicke aufgrund des Skin-Effekts |
| ϵ_0, ϵ_r | absolute und relative Dielektrizitätskonstante |
| Θ | magnetische Durchflutung |
| λ, λ_0 | Wellenlänge, Wellenlänge bei der Betriebsfrequenz |
| μ_0, μ_r | absolute und relative Permeabilitätskonstante |
| σ | elektrische Leitfähigkeit |
| φ | Phase |
| Φ | magnetischer Fluss |
| Ψ | verketteter magnetischer Fluss |
| ω | Kreisfrequenz, Frequenz |