Samir Elias El Rai (Autor)

Periodische Transmissionsleitungen für die Mikroelektronik

https://cuvillier.de/de/shop/publications/718

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1 Einleitung

Transmissionsleitungen (TL) werden für die elektronische Signalübertragung sowohl über weite Strecken als auch innerhalb von integrierten Schaltungen verwendet. Außerdem sind Transmissionsleitungen auch die Grundbausteine für leistungsfähige Mikrowellenschaltungen wie Oszillatoren, Verstärker, Anpassungsschaltungen etc. Dabei sind TL elektrische Verbindungen, deren elektrische Länge so groß wird, dass Ausbreitungseffekte von Wellen berücksichtigt werden müssen.

Bei Oszillatoren und Verstärkern können TL zur Realisierung eines Resonators dienen, der aus einer Leitung bestimmter elektrischer Länge besteht, wobei sie an den Enden durch zwei Reflexionsstellen charakterisiert wird. Bei diesen Reflexionsstellen handelt es sich z.B. um einen Kurzschluss und einen Leerlauf bei einem $\lambda/4$-Resonator bzw. um zwei Leerläufe oder zwei Kurzschlüsse bei einem $\lambda/2$-Resonator, wobei λ die Wellenlänge der sich ausbreitenden Welle bezeichnet. TL werden ebenfalls für Anpassungsschaltungen benutzt, dabei werden Längen von ca. $\lambda/8$ bis 2λ benötigt. Allerdings übersteigen die geometrischen Abmessungen solcher TL zumindest in ihren klassischen Bauformen und bei tiefen Frequenzen (unterhalb von 20GHz) oftmals die in integrierten Schaltungen zur Verfügung stehende Fläche. Insbesondere bei Betriebsfrequenzen unterhalb von 20GHz ist eine solche Integration problematisch. In Standard-Technologien sind weiterhin die elektrische Leitfähigkeit des Trägersubstrates und die damit einhergehenden Verluste, also die Güte, problematisch [1].

Dennoch ist eine Integration der Transmissionsleitungen in der monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungstechnik (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC) aus Gründen der Schaltungsqualität und der Herstellungskosten sehr wünschenswert, sofern der Flächenbedarf durch Ausnutzung von „Slow-Wave“ Effekten akzeptabel ist.

In der Optik und der Mikrowellentechnik haben Metamaterialien in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen [2], [3]. Metamaterialien bestehen i.A. aus periodischen Anordnungen bestimmter Einheitszellen und können ein-, zwei- oder dreidimensional sein. Hier wird auch von heterogenen Materialien gesprochen.

Sie weisen elektromagnetische Eigenschaften auf, die nicht nur von ihrem Trägermaterial, sondern auch von der Struktur der Einheitszelle bestimmt werden. Auf diese Weise ist es möglich, bei bestimmten Trägersubstraten (was bei Standard-Technologien der Fall ist) unerwünschte Eigenschaften dieses Substrates zu vermeiden.

Metamaterialien lassen sich nach ihrer Funktion in drei Hauptgruppen unterteilen:

Metamaterialien mit „**P**hotonic **B**and **G**ap" (**PBG**) – oder allgemeiner mit „**E**lectromagnetic **B**and **G**ap" (**EBG**) – Eigenschaften sind periodische Strukturen, die die Ausbreitung der Lichtwelle bzw. der elektromagnetischen Welle in bestimmten Frequenzbändern verhindern [4], [5], [6], [7], [8]. In Anlehnung an das Verhalten, das die Elektronen im periodischen Halbleiter-Gitter erfahren, werden diese Materialien als PBG- bzw. EBG-Materialien bezeichnet.

Metamaterialien mit „Slow-Wave" Effekten zeigen eine höhere effektive Permittivität als das Trägermaterial selbst und werden dazu benutzt, die elektromagnetische Welle zu verlangsamen und somit Verkürzungsfaktoren in den mechanischen Abmessungen zu erreichen [9], [10], [11]. Weiterhin können „Slow-Wave" Effekte eine Erhöhung des Gütefaktors der Anordnung zeigen [12], [13].

Left-Handed-Materialien sind Metamaterialien mit einer negativen effektiven Permittivität und Permeabilität [14], [15], [16], [17], [18].

Die Eigenschaften dieser Metamaterialien könnten eine Integration von TL in MMICs auf akzeptable Flächen und damit Bauelemente mit verbesserten Daten ermöglichen. Somit liegt es nahe, das Prinzip der Metamaterialien auf MMICs zu

übertragen, um die positiven Eigenschaften auch hier nutzbar zu machen. In der Literatur wurde bisher nicht über deren Einsatz in Standard-Halbleitertechnologien und damit in der integrierten Schaltungstechnik der Mikroelektronik (z. B. BiCMOS oder CMOS) berichtet. Hier ist die Minimierung der Chipfläche vorrangiges Ziel. Allerdings versprechen die oben genannten Arbeiten auch hier Vorteile, sofern passende Realisierungsformen gefunden werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob mit Hilfe von Standard-Halbleitertechnologien Mikrowellen-TL mit Metamaterial-Eigenschaften hergestellt werden können. Dabei liegen die Schwerpunkte auf dem differentiellen MMIC-Design, der Platzersparnis sowie der Optimierung der Leitungseigenschaften. Außerdem soll der Frequenzbereich zu deutlich kleineren Frequenzen um 10GHz verschoben werden, was die Entwicklung und die monolithische Integration weiter erschwert.

Zunächst wird in Kapitel 2 der theoretische Hintergrund von symmetrischen, periodischen STL vorgestellt und nach ausbreitungsfähigen Modi klassifiziert. Es folgt die Herleitung der Ausbreitungseigenschaften der beiden gängigsten Modi. Anschließend wird das Prinzip der periodischen Strukturen erläutert und gezeigt, wie deren Nutzung infolge von magnetischen und kapazitiven Leitungskopplungen zu einer drastisch erhöhten Flächeneffizienz und einer höheren Güte führen. Anhand von Praxisbeispielen werden Verkürzungsfaktoren von bis zu 22 für unterschiedlichste TL dargestellt.

Es wird weiter gezeigt, wie sich die Eigenschaften der TL einstellen lassen. Das wiederum ermöglicht die Realisierung von Schaltungen, die in ihren wesentlichen Parametern wie Frequenz, Phasengang und Güte mit Hilfe einer Abstimmspannung eingestellt werden können. Damit ist es nicht nur möglich, Hauptparameter per Design einzustellen, sondern diese auch nachträglich abzustimmen, um z.B. Technologie-Schwankungen zu korrigieren.

Das vierte Kapitel ist den Hilfsmitteln moderner Schaltungstechnik gewidmet: den Simulatoren. Hier werden nur Simulatoren evaluiert, die einen direkten Bezug zum Thema haben: also 2,5D- und 3D-EM-Feldsimulatoren. Eingeschlossen sind Methoden, die die Simulation derartiger Strukturen ermöglichen; weiterhin wird die Einbindung der Feldsimulator-Ergebnisse in Standard-Schaltungssimulatoren wie ADS (Agilent Techn.) und Spectre-RF (Mentor) erläutert.

In Kapitel 5 werden sowohl die Technologie, die zur Realisierung der Teststrukturen benutzt wurde, als auch der Aufbau dieser Teststrukturen vorgestellt.

Kapitel 6 beschreibt zunächst detailliert die verwendete On-wafer S-Parameter Messtechnik zur Charakterisierung der TL Teststrukturen. Speziell hervorzuheben ist dabei die Verwendung eines 4-Tor Vektornetzwerkanalysators und der entsprechenden differentiellen Messspitzen, da die Strukturen als differentielle TL ausgelegt sind. Ebenso werden Fragen der Kalibrierung und des nachträglichen „Deembedding" der Messdaten diskutiert.

In Kapitel 7 wird eine Vielzahl unterschiedlicher Leitungsstrukturen – bei gleichem Flächenbedarf der Einheitszelle – verglichen. Nur so ist ein direkter Vergleich der unterschiedlich konstruierten Strukturen möglich. Die Messergebnisse der Betriebsparameter werden detailliert dargestellt und diskutiert.

Im Kapitel 8 werden schließlich die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst.