Entwurf und Simulation von RFIC Spulen

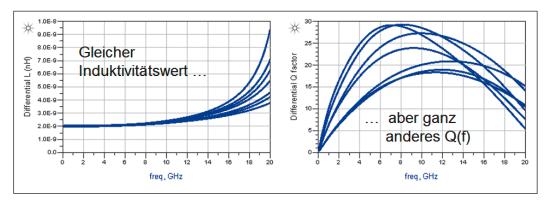


Bild 1: Sehr unterschiedliche Güteverläufe bei gleichem L-Wert

lige Zielfrequenz, mit minimalen Abmessungen.

Verlustmechanismen

Zur Optimierung der Spule ist ein Verständnis der Verlustmechanismen unabdingbar. Bei tiefen Frequenzen ist die Güte der Spule zunächst durch die Leiterverluste begrenzt, und die Güte steigt linear mit der Frequenz an, hier gilt zunächst $Q = \omega L/R$. Durch den Skineffekt steigt der Widerstand je nach Leiterquer-

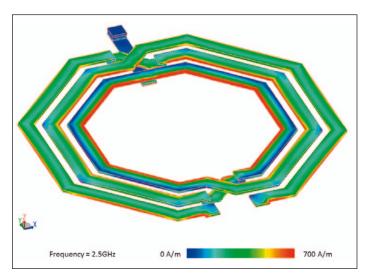


Bild 2: Stromdichte einer RFIC Spule in 130-nm-BiCMOS-SiGe-Technologie bei 2.5 GHz

Integrierte Hochfrequenzschaltungen werden immer komplexer und unterstützen eine immer größere Anzahl unterschiedlicher Frequenzbänder. Auf dem Chip integrierte Spulen sind dabei eine kritische Komponente: einerseits bestimmen sie das erzielbare Phasenrauschen von Oszillatoren und andererseits benötigen sie viel Chipfläche, was sie zu einem Kostenfaktor macht. Dem Entwurf von Spulen in RFIC-Designs kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

Autor: Dr.-Ing. Volker Mühlhaus Consultant RF EDA & RFIC EM workflow www.muehlhaus.com Das Auswahlkriterium für eine Spule ist - neben der Induktivität - der Gütefaktor Q, also das Verhältnis aus Gesamtenergie zu den Verlusten in der Spule. Das Ziel ist ein hoher Q-Faktor, also geringe Verluste bei gegebener Induktivität, unter Berücksichtigung der verfügbaren Chipfläche.

Traditionell wurde eine Palette an Induktivitätswerten vom Anbieter einer RFIC-Technologie in Bibliotheken bereitgestellt, mit festem Layout und auf Messwerten basierenden Modellen. Anders als bei GaAs-Technologien gibt es bei Siliziumbasierten-Technologien jedoch - neben den Leiterverlusten - auch zusätzliche Hochfrequenzverluste im leitfähigen Siliziumsubstrat. Dies führt dazu, dass die

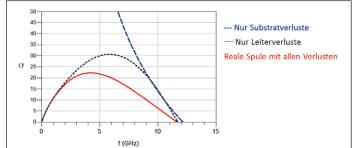


Bild 3: Güte der Spule mit Leiter- und Substratverlusten

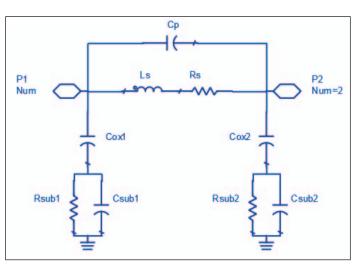


Bild 4: Einfaches Ersatzschaltbild einer Spule

Spulen nur in einem recht engen Frequenzbereich ihre optimale Güte zeigen.

Eine 2-nH-Spule, deren Güte für 5 GHz optimiert ist, kann zwar auch bei 2 GHz eingesetzt werden, hat aber keinesfalls die optimale Performance. Das Ziel ist also die richtige Dimensionierung des Layouts für die jeweischnitt ab etwa 0,1 GHz ... 1 GHz stetig an, wodurch sich die Gütekurve abflacht.

Durch unvermeidbare parasitäre Kapazitäten hat die Spule bei hohen Frequenzen eine Serienresonanzfrequenz (SRF), bei der die Güte auf 0 sinkt. Die entsprechende Gütekurve einer Spule, die nur durch die Leiter-

42 hf-praxis 3/2015

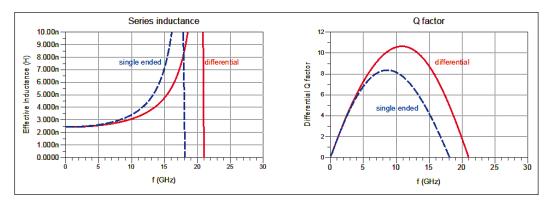


Bild 5: Identische Spule, unterschiedlich beschaltet

verluste bestimmt wird, ist in Bild 3 schwarz dargestellt. Bei realen RFIC-Spulen kommt es außerdem mit steigender Frequenz zu Verlusten im Siliziumsubstrat. Hier dominiert bei Sub-

Term1
Z=50 Ohm

differential configuration

Cp

Cox1

Cox2

Rsub1

Rsub2

Csub2

substrate node

Bild 6: Differentielle Beschaltung der Spule

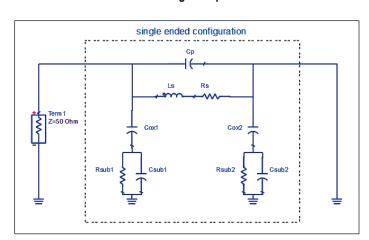


Bild 7: Single-ended-Beschaltung der Spule

stratleitfähigkeiten von 10-100 Ω^* cm eine kapazitive Ankopplung vom Spulenmetall zu dem darunter liegenden Substrat. Bei sehr niederohmigen Substraten kann es zusätzlich auch induzierte Wirbelströme im Substrate geben, die zu weiteren Verlusten führen. Die Güte einer realen Spule auf Siliziumsubstrat mit Leiter- und Substratverlusten ist in Bild 3 rot dargestellt. Die blaue Kurve zeigt den Beitrag der Substratverluste.

Ein weiterer Einfluss, die Verkopplung der Spulenwindungen untereinander und die daraus resultierende Stromverdrängung ("proximity effect") soll hier zunächst nicht betrachtet werden.

Ersatzschaltbild

Hilfreich zum Verständnis des Spulenverhaltens ist eine Ersatzschaltbilddarstellung. Bild 4 zeigt ein solches einfaches Ersatzschaltbild mit Induktivität und Serienwiderstand sowie den Shuntpfaden, bestehend aus Oxidkapazität und Substratelementen Rsub||Csub.

Bei tiefen Frequenzen ist das Verhalten der Spule bestimmt durch die Serienelemente Ls und Rs. Bei höheren Frequenzen wird die Oxidkapazität wirksam, und es fließt Strom durch den verlustreichen Shuntpfad. Weiterhin erkennt man die Kapazität Cp zwischen den Spulenwindungen.

Die Beschaltung entscheidet

Für die Spulengüte Q ergeben sich unterschiedliche Werte, je nachdem, welcher Massebezug gewählt wird. Die Spule wird üblicherweise in differentieller Beschaltung betrieben, aber auch eine "single ended"-Konfiguration mit einem Spulenknoten auf Substratmasse ist möglich. In Bild 2 sind Induktivität und Güte für beide Konfigurationen beispielhaft gegenübergestellt. Sinnvoll ist deshalb, bei der Spezifikation einer Güte anzugeben, auf welche Beschaltung sich dieser Wert bezieht.

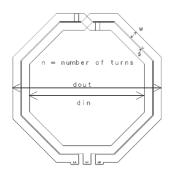
Der Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse ist leicht erkennbar, wenn man sich das Ersatzschaltbild in Bild 6 anschaut. In der differentiellen Konfiguration gibt es keine Verbindung zur Substratmasse und dadurch liegt parallel zur Induktivität die Serienschaltung aus den beiden Oxid/Substratpfaden, was die Auswirkung dieser parasitären Elemente verringert.

Bei der Single-ended-Konfiguration in Bild 7 ist durch die anderen Masseverbindungen die wirksame Shuntimpedanz nur halb so groß (Cox1 in Serie mit Rsub1||Csub1). Dadurch steigen die Verluste und auch die Eigenresonanz /SRF der Spule sinkt.

Im weiteren Verlauf dieses Beitrags werden nur differentielle Parameter verwendet, sofern nicht ausdrücklich anders angegeben.

Induktivitätsberechnung

Wie also werden nun Spulen dimensioniert? Hierzu betrachten wir zunächst die Abhängigkeit der Induktivität von der Spulengeometrie.



In Referenz [1] findet man recht genaue Berechnungsformeln,

hf-praxis 3/2015 43

u.a. die modifizierte Wheeler-Formel

$$L_{mw} = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{avg}}{1 + K_2 \rho}$$

Formel 1: modifizierte Wheelerformel

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}}$$

Formel 2: Füllfaktor

und den von der Grundform der Spule abhängigen Konstanten:

Form	K ₁	K ₂
Quadrat	2.34	2.75
Oktagon	2.25	3.55

Tabelle 1: Geometriekonstanten

Hiermit ist es möglich, die Induktivität bei niedrigen Frequenzen (weit unterhalb der Eigenresonanz) mit einer Genauigkeit von typisch 5% zu berech-

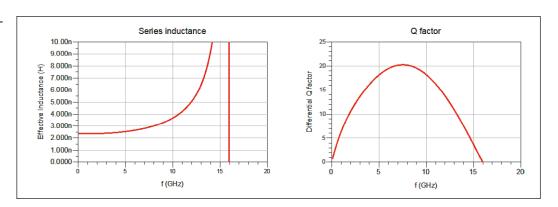


Bild 8: Ergebnisse für N=3, w=10 μm, s=2 μm, dout=209.5 μm

nen. Eine Voraussetzung ist, dass die Spule frei ist von störenden Metallflächen: keine Massefläche direkt unterhalb der Spule, keine geschlossenen Leiterschleifen direkt um die Spule.

Die effektive Induktivität bei hohen Frequenzen erhöht sich in Abhängigkeit von den parasitären Elementen und wird sinnvollerweise mit einer elektromagnetischen Simulation (Momentum, Sonnet usw.) bestimmt.

Spulenentwurf

Durch Umstellen von Formel 1 ist es möglich, für vorgegebene Windungsanzahl und vorgegebene Leiterbreite und Abstand den Durchmesser zu berechnen, der erforderlich ist, um einen gewünschten Induktivitätswert zu erreichen. Entsprechende

Berechnungen gibt es auch bereits automatisiert mit den passenden skalierbaren Spulenlayouts [2]. Für einen gewünschten Induktivitätswert sind zunächst viele unterschiedliche Layouts mit unterschiedlichen Kombinationen aus Windungszahl N, Leiterbreite w und Leiterabstand s möglich, die alle bei niedrigen Frequenzen denselben Induktivitätswert erreichen. Hier gilt es nun, die geometrisch mög-

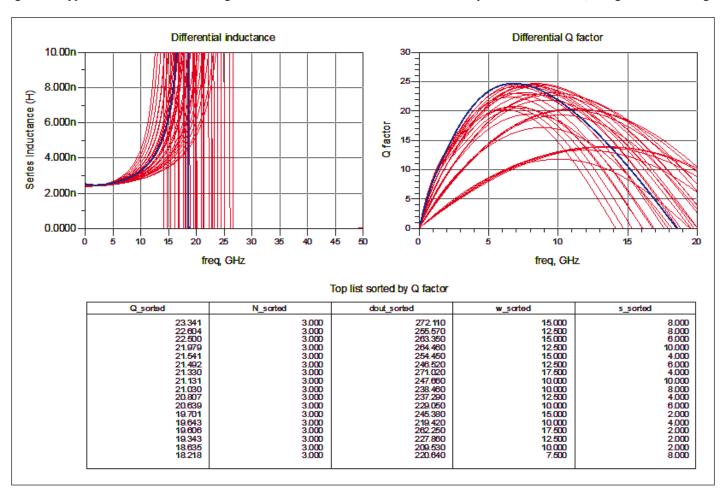


Bild 9: Variation von w und s mit jeweils angepasstem Durchmesser für gleiche Induktivität, N=3

44 hf-praxis 3/2015

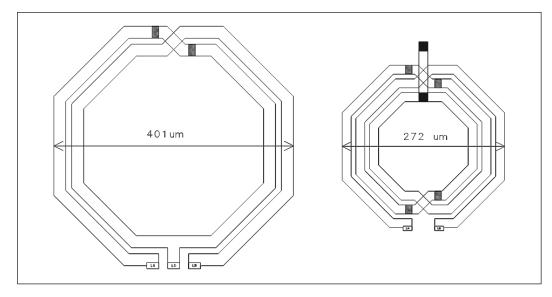


Bild 10: Größenvergleich der beiden Layouts für 2.5 nH mit N=2 und N=3 Windungen

lichen Layouts bezüglich ihres Hochfrequenzverhaltens zu untersuchen.

Beginnen wir mit einer mittleren Windungszahl, z.B. N=3 Windungen, einer mittleren Leiterbreite, z.B. w=10 μ m, und dem minimal zulässigen Windungsabstand, z.B. 2 μ m. Mit diesen Daten ergibt sich für eine Zielinduktivität von 2.5 nH ein erforderlicher Außendurchmesser von 209.5 μ m. Dieses Spulenlayout wird nun im EM-Simulator berechnet, und die differentiellen Parameter ausgewertet.

Man erkennt, dass die Induktivität bei niedrigen Frequenzen mit 2.4 nH recht genau dem Zielwert von 2.5 nH entspricht. Die Dimensionierung mit der modifizierten Wheeler-Formel hat also funktioniert. Bei höheren Frequenzen steigt die effektive Induktivität an und erreicht bei der Serienresonanzfrequenz SRF ihren Maximalwert. Die differentielle Güte der Spule hat ihr Maximum bei ca. 7 GHz mit einem Wert von 20.

Die weitere Vorgehensweise hängt nun ab von der Zielfrequenz, bei der die Spule verwendet werden soll. Wenn die Zielfrequenz unterhalb von 7 GHz liegt, also unterhalb des Gütemaximums, so kann man die Leiterbreite vergrößern, um die Leiterverluste zu minimieren. Wenn dies nicht möglich ist, weil die Leiterbreite bereits den

maximalen Wert gemäß Designrules erreicht hat, oder weil eine größere Leiterbreite geometrisch nicht möglich ist, so wird man möglicherweise ein Layout mit gestapelten Metallen auf mehreren Ebenen wählen.

Durch beide Maßnahmen wird sich aber nicht nur der Serienwiderstand verringern, sondern gleichzeitig auch die Kapazität zum Substrat erhöhen. Dies wiederum verschiebt die Frequenz maximaler Güte zu niedrigeren Frequenzen und reduziert auch die Serienresonanzfrequenz.

Damit wird deutlich, welche Änderungen nötig sind, um die Spule für Frequenzen oberhalb von 7 GHz zu modifizieren: hier würde man die Leiterbreite reduzieren, um die Kapazität zum Substrat und damit die Substratverluste zu verringern.

Einen weiteren Freiheitsgrad eröffnet der Leiterabstand s: durch einen größeren Abstand kann die Kapazität zwischen den Leitern reduziert werden, was zu einer etwas höheren Resonanzfrequenz und damit auch zu einer höheren Güte in dem Frequenzbereich führt, der durch Substratverluste bestimmt wird. Der Effekt ist allerdings begrenzt, denn neben dem Leiterabstand wird die Resonanzfrequenz auch von der Kapazität der Leiter zum Substrat bestimmt. Bei breiten Leitern dominiert dieser zweite Effekt und ein größerer Leiterabstand hat nur wenig Auswirkung.

Optimierung der Güte

Bild 9 zeigt ein Beispiel, bei dem unterschiedliche Breiten und Abstände verglichen werden mit jeweils angepasstem Durchmesser für gleiche resultierende Induktivität. Die Tabelle neben der Gütekurve zeigt die besten Ergebnisse, sortiert nach Güte bei f=5 GHz. Die Anzahl der Windungen in diesem Beispiel war mit N=3 fest vorgegeben.

Die Tabelle mit den unterschiedlichen Spulenparametern zeigt anschaulich die Schwierigkeit bei der Optimierung des Spulenlayouts: bei jeder Änderung von Leiterbreite oder Abstand muss der Spulendurchmesser angepasst werden, um die Induktivität konstant zu halten. Nur so sind die Spulen sinnvoll vergleichbar. Die von den Designrules maximal zulässige Breite von 20 um erscheint in der Topliste gar nicht, weil dieses Lavout bei N=3 Windungen geometrisch zu groß würde und die Zielinduktivität von 2.5 nH gar nicht erreichbar ist. Dies macht deutlich, dass eine einfache automatische Optimierung durch den Simulator wegen der vielfältigen Abhängigkeiten und der für bestimmte Parameterkombinationen möglichen Layouts schwierig ist. Für das gezeigte Beispiel besteht eine Optimierungsmöglichkeit einerseits darin, durch Parallelschaltung mehrerer Layer doch noch einen größeren Leiterquerschnitt zu realisieren, ohne den Spulendurchmesser deutlich zu verändern. Andererseits besteht die Möglichkeit, mit einer geringeren Windungszahl bei insgesamt dann größeren Abmessungen auch eine größere Leiterbreite einsetzen zu können.

In unserem Beispiel bringt der Schritt von N=3 Windungen zu N=2 Windungen eine Steigerung der Güte bei 5 GHz von Q=23.3 auf Q=26.5, bei einem Außendurchmesser von 401 μ m anstatt 272 μ m. Die Abwägung hierbei ist, wieviel Chipfläche zur Verfügung steht und welche Spulengüte gefordert wird.

Zusammenfassung

Ein optimales Spulenlavout mit bester Güte O bei der Zielfrequenz, bei zugleich geringen Abmessungen, erfordert eine sorgfältige Abwägung von Leiterverlusten und Substratverlusten. Mögliche Layouts können mit Lehrbuchformeln [1] vordimensioniert werden. Ein vereinfachtes Ersatzschaltbild erleichtert das Verständnis der grundlegenden Effekte. Im zweiten Schritt erfolgt dann die Berechnung in einem EM Simulator, um alle relevanten Technologieeffekte zu berücksichtigen. Es wurde gezeigt, wie das Layout modifiziert werden kann, um die Güte für die Zielfrequenz zu optimieren.

Referenzen

- [1] Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances, S. Mohan, M. Hershenson, S. Boyd, and T. Lee, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 34(10):1419-1424, October 1999
- [2] http://muehlhaus.com/products/rfic-inductor-toolkit-for-ads
- [3] "Integrated Inductors and Transformers: Characterization, Design and Modeling for RF and MM-Wave Applications", A. Scuderi et al, Auerbach Publications, 2010, ISBN 978-1-4200-8844-1

hf-praxis 3/2015 45