Rauschparameter schnell und reproduzierbar messen

Für Forschung, Entwicklung oder Produktion von Halbleiterkomponenten müssen die Streu- und Rauschparameter bekannt sein. Wir zeigen einen Messaufbau für Rauschparameter mit einem Wafeprober.

GABRIEL LOATA *

Für die Prozesse der Forschung und Entwicklung oder in der Produktion von Halbleiterkomponenten ist es notwendig, die Streu- und Rauschparameter zu ermitteln.

Außerdem müssen bei der Entwicklung von Schaltkreisen für Kommunikationstechnik oder Sensorik viele Bauelemente direkt auf dem Wafer untersucht werden. Für einen effizienten Ablauf müssen die Messungen schnell und reproduzierbar sein. Hinzu kommt, dass der Messaufbau Benutzerfreundlich sein sollte.

*** Dr. Gabriel Loata**
... ist Vertriebsspezialist bei bsw TestSystems & Consulting in SIndelfingen.

Messen von Rauschzahl und Rauschparameter

Die HF-Rauscheigenschaften eines sogenannten elektrischen Zwei-Tor-Bauteils wird durch die Rauschzahl definiert bzw. durch die Verschlechterung der Signal- zur Rauschleistung (Signal-to-Noise Ratio), die durch das Eigenrauschen des Bauteils verursacht wird.

Mathematisch wird die Rauschzahl als das Verhältnis zwischen der Signal-/Rauschleistung am Eingang und der Signal-/Rauschleistung am Ausgang des Systems dargestellt:

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} \qquad \text{Formel 1}$$

Bei den Rauscheigenschaften von Zwei-Tor-Systemen wird angenommen, dass das sich das System in einem linearen Betriebsbereich befindet. Das Bild 1 zeigt die Rauschleistung am Ausgang (Leistung) mit einer linearen Abhängigkeit zur Rauschleistung am Eingang (Temperatur). Somit ist die Rauschzahl weder vom Eingangspegel noch von der Verstärkung des Systems abhängig. Mit der genannten Y-Faktormethode lässt sich die Rauschzahl bestimmen. Hier wird der Eingang des Zwei-Tor Systems an eine Rauschmessnormale (oder Rauschquelle) angeschlossen. Die Rauschleistung wird am Ausgang für zwei unterschiedliche Zustände (hot und cold) bzw. Rauschleistungen am Eingang, aufgenommen. Das Verhältnis der beiden Ausgangsrauschpegel wird als Y-Faktor definiert.

Die unterschiedlichen Eingangsrauschleistungen lassen sich mit einer Rauschquelle der Serie SNS von Keysight erzeugen. Die Quelle besteht aus einer Diode, die in angeschaltetem Zustand (hot) in Sperrrichtung betrieben wird, sogar fast im Lawinendurchbruch, was viel Rauschen verursacht. Im anderen Zustand ist die Rauschdiode ausgeschaltet (cold) und liefert kein zusätzliches Rauschen jenseits des normalen Rauschens, das durch den Quellenwiderstand bei einer gewissen Temperatur erzeugt wird. Ihre Präzision mit nachgeschalteten Dämpfungsglied sorgt dafür, dass sie an die 50-Ohm Messumgebung angepasst ist. Zusätzliches Rauschen im angeschalteten Zustand durch den Lawinendurchbruch bezeichnet man als Überschuss-Rausch-Verhältnis (Excess-Noise-Ratio). Das ENR für verschiedene Frequenzen wird als Kalibrierinformation bei jeder Rauschquelle individuell geliefert. Mit Hilfe des ENRs und des Y-Faktors kann jetzt die Steigung der Rauschleistungsgerade für die

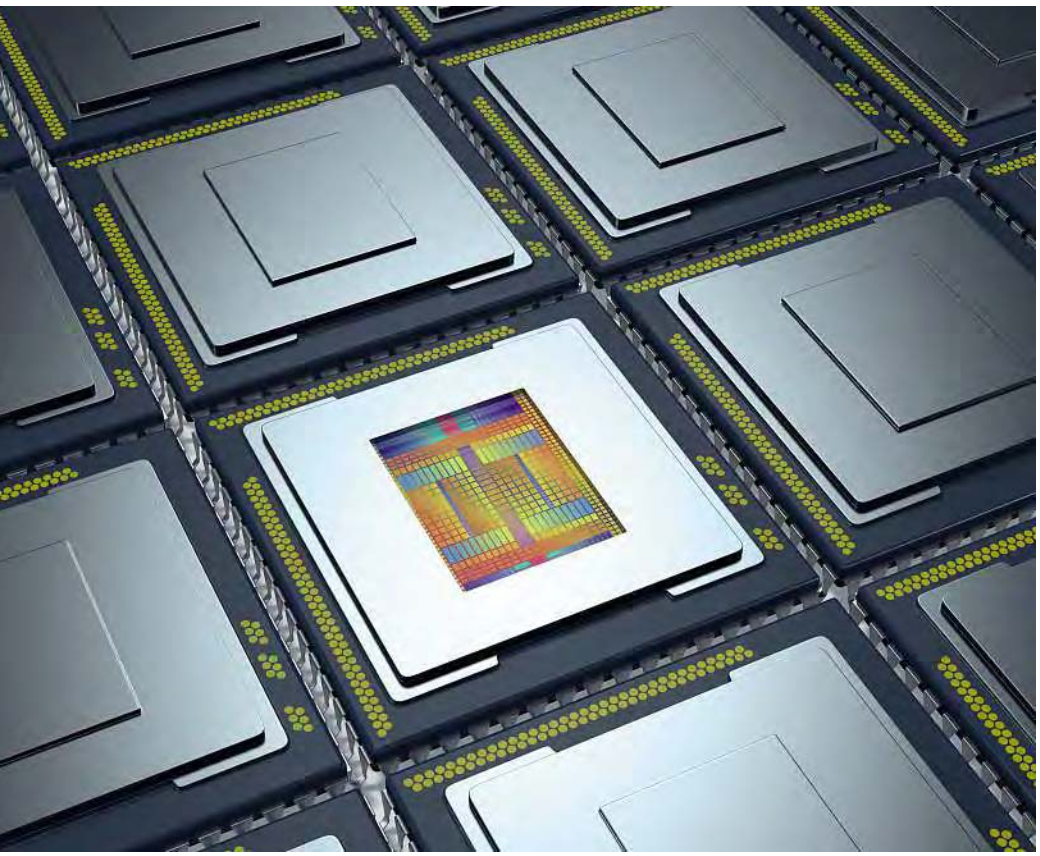

Bild: ©lucadp - stock.adobe.com

Entwicklung von Schaltkreisen: *Die meisten Bauelemente werden direkt auf dem Wafer untersucht.*

Bild: bsw

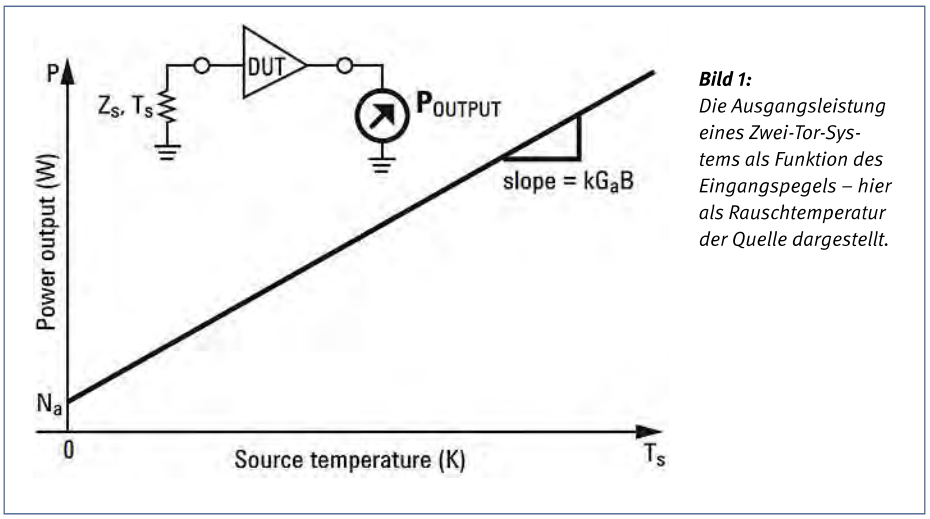

Bild 1: *Die Ausgangsleistung eines Zwei-Tor-Systems als Funktion des Eingangspegels – hier als Rauschtemperatur der Quelle dargestellt.*

an- und ausgeschaltete Rauschquelle berechnet werden: F = ENR / (Y-1) (Formel 2).

Y-Faktor versus Cold-Only-Technik

Bei der erwähnten Annahme geht man von Raumtemperatur (T = 290 K) und einer Messumgebung von 50 Ohm aus. Bei der Y-Faktor-Messmethode sind die Reflexionsfaktoren der Rauschquelle für „An“ und „Aus“ unterschiedlich, was zu Messungenauigkeiten bei der Rauschzahlauswertung führt. Deshalb greift man zusätzlich auf die Cold-Only-Methode zurück: Die Rauschdiode wird so selten wie möglich angeschaltet. Der Referenzpunkt auf der Y-Achse wird aus einer einzigen Cold-Messung bestimmt und die Steigerung oder Verstärkung wird anders bestimmt: beispielsweise aus einer Messung mit normalen sinusförmigen Signalen (S-Parameter). Transistoren oder Verstärker enthalten unterschiedliche und sehr komplexe Rauschmechanismen. Es zeigt sich, dass diese sehr stark von der Quellenimpedanz beeinflusst werden. Das wiederum ruft einen funktionalen Zusammenhang zwischen Quellenimpedanz (Quellereflexionsfaktor Γ_S) und Rauschzahl hervor. Die Rauschzahl erreicht nur für einen optimalen Wert der Quellenimpedanz ein Minimum.

$$F = F_{\min} + \frac{4R_n}{Z_L} \frac{\left|\Gamma_S - \Gamma_{opt}\right|^2}{(1-\left|\Gamma_S\right|^2)\left|1+\Gamma_{opt}\right|^2} \qquad \text{Formel 3}$$

Hier sind die Impedanzen der Quelle und die optimale als Reflektionsfaktoren (Γ=(Z-Z0)/(Z+Z0)) dargestellt. Für eine vollständige Charakterisierung der Rauscheigenschaften eines zwei-Tor Systems bei einer bestimmten Frequenz sind vier Parameter notwendig. Rauschparameter: die minimale Rauschzahl F_{min}, der Rauschwiderstand R_n, der Betrag des optimalen Quellreflexionsfaktor $|\Gamma_{opt}|$ sowie der Phasenwinkel von Γ_{opt}. Das Bild 3 zeigt die graphische Darstellung der Formel 3. Hier ist die Abhängigkeit der Rauschzahl von der Quellenimpedanz (Quellenreflexionsfaktor) in Form der Kreise konstanter Rauschzahl sichtbar, die auf verschiedene Quellenimpedanzen zentriert sind. Gleicht die Quellenimpedanz Γ_S der optima-

Bild: Keysight

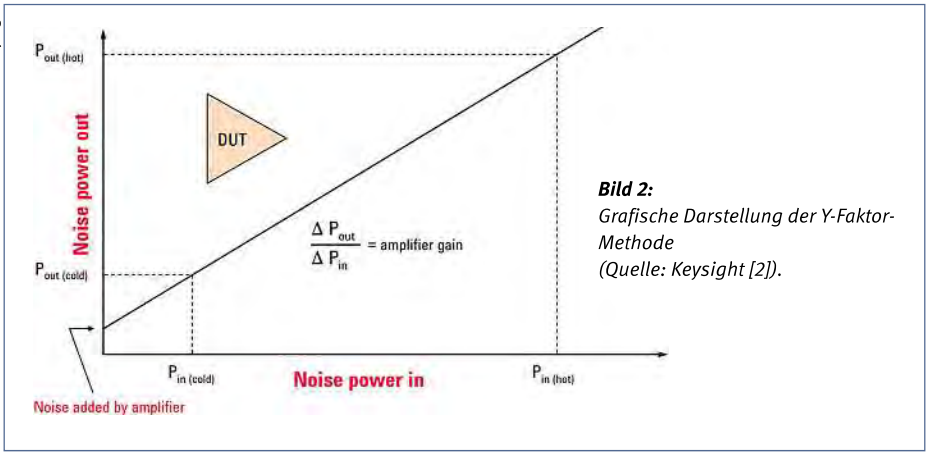

Bild 2: *Grafische Darstellung der Y-Faktor-Methode (Quelle: Keysight [2]).*

Von Analog-Experten für Analog-Experten

- Toolsammlung
- Schaltungstipps
- Referenz-Designs
- Automotive
- Kommunikation
- Lighting
- Messtechnik
- Sensorik

---> www.analog-praxis.de

analog-praxis.de
Der Blog für Analog-Entwickler.

Vogel Business Media www.vogel.de

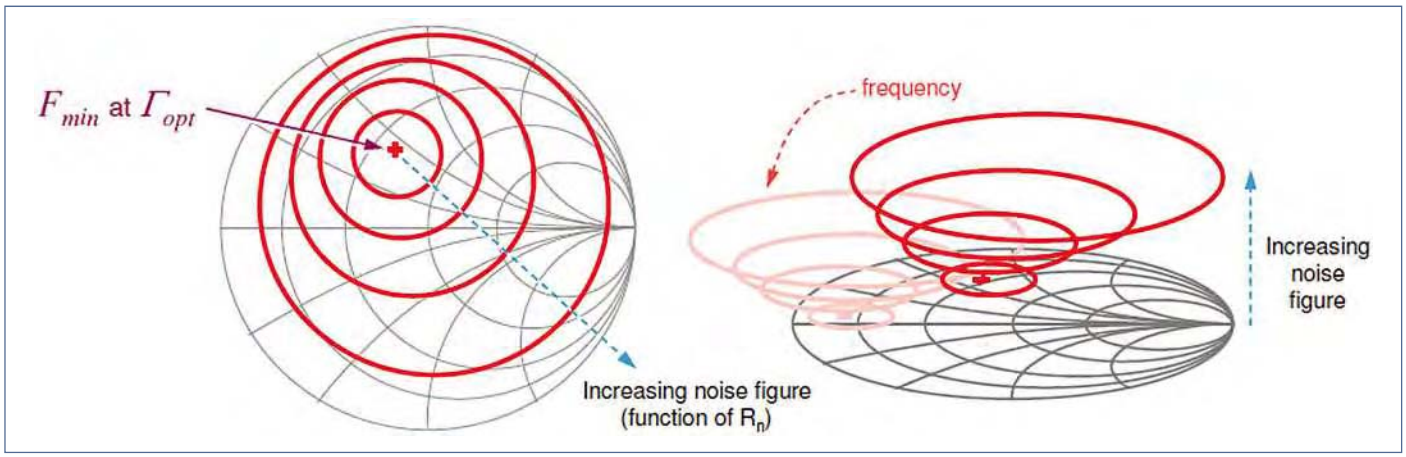

Bild: Maury Microwave

Bild 3: *Die Rauschparameter für unterschiedliche Frequenzen dargestellt als Rauschzahlkreise mit steigendem Radius (Maury Microwave [3]).*

len Γ_{opt}, nimmt die Rauschzahl seinen minimalen Wert (F_{min}) und der Rauschkreis wird auf einen Punkt reduziert. Weicht die Quellenimpedanz vom optimalen Wert ab, steigt die Rauschzahl mit einer Geschwindigkeit/Stärke an, die zum Rauschwiderstand R_n proportional ist.

Der Entwurf rauscharmer Bauteile und was zu beachten ist

Beim Entwurf rauscharmer Bauteile wie CMOS oder LNAs entsprechen die Werte der Quellimpedanzen, die eine minimale Rauschzahl ergeben, nicht unbedingt den Werten der Quellimpedanzen, bei der die Verstärkung des Messobjekts maximal ist. Deshalb wird neben den vier Rauschparametern oft noch die verfügbare Verstärkung bei Rauschanpassung ermittelt. Sie berechnet sich aus den S-Parametern und der Quellenimpedanz (Reflexionsfaktor). Die Rauschparameter eines Zwei-Tor-Systems bestimmen sich dadurch, dass zwischen die Rauschquelle und das Messobjekt ein Impedanztuner eingesetzt wird. Damit ist eine variable Quellenimpedanz garantiert, die durch eine entsprechende Anpassung die minimale Rauschzahl ergeben soll. Mit einem dedizierten Rauschzahlanalysator oder einem Spektrumanalysator misst man die Rauschleistung am Ausgang des Messobjektes. Dabei wird bei mehreren Quellenimpedanzen die Rauschleistung am Ausgang des Messobjekts gemessen und die Rauschparameter aus Formel 3 gefittet. Aus der Formel 3 ist ersichtlich, dass man mindestens vier Rauschzahlmessungen bei unterschiedlichen Quellimpedanzen benötigt, um die vier Rauschparameter zu ermitteln. Für eine erhöhte Messgenauigkeit ist aber eine größere Anzahl an Durchgängen nötig.

Bei einem typischen Messablauf werden pro Frequenz 10 bis 20 Quellenimpedanzen mit Hilfe des Tuners eingestellt. Der Entwickler misst die Rauschausgangsleistung und berechnet die Rauschparameter. Problematisch ist, dass die Kontakte bei On-Wafer-Messungen stabil sein müssen. Auch die Temperaturveränderung im Messraum ist problematisch. Viele Anschlüsse und Komponenten verursachen Ungenauigkeiten im Messsystem, die aufwendig kalibriert werden müssen. Jeder Messempfänger oder Signalanalysator erzeugt selbst ein gewisses Eigenrauschen. Es beeinflusst den gesamten Betrag der Rauschleistung einer Messkette. Als notwendige Korrektur wird deshalb das Rauschen der Zweiten Stufe subtrahiert.

Ein Messaufbau für die Rauschparameter

Ein Beispiel für ein Rauschmesssystem ist der PNA-X-Netzwerkanalysator von Keyisght bis 67 GHz. Mit der Option 029 (Source-Corrected Noise Figure Measurements) lässt sich das Messgerät aufrüsten: Neben dem herkömmlichen Messempfänger für S-Parameter verfügt es über einen speziellen Messempfänger mit kleiner Rauschzahl und hoher Empfindlichkeit. Somit lassen sich S-Parameter bis 67 GHz und Rauschen bis 50 GHz messen. Zur Streu- und Rauschparametercharakterisierung wird das Messobjekt auf dem Wafer über Messspitzen mit Koaxialanschluss direkt mit dem Messaufbau verbunden. Die Strom- und Spannungsversorgung für das Messobjekt wird über zwei Bias-T_s realisiert. Für Bauelemente mit einer Rauschzahl <1 dB und höheren Frequenzen kann in der Rauschmessungskonfiguration ein rauscharmer Breitbandverstärker (LNA) zwischen den DUT und den Rauschempfänger (PNA-X) geschaltet werden. Da FET- oder CMOS-Bauelemente typ. Werte für Γ_{opt} aufweisen, die weit vom Mittelpunkt des Smith Charts (Anpassung 50 Ohm) sein können, müssen die eingesetzten Komponenten extrem verlustarm und alle Kabel oder Anschlüsse kurz sein.

Die Impedanztuner von Maury Microwave (Slide-Screw Tuner) verwenden die Slab-Line. Das ist eine offene Übertragungsleitung, die aus einem Innenleiter und zwei parallelen Metallplatten als Außenleitung umgeben ist, sowie eine metallische Reflektorsonde. Diese wird in die Übertragungsleitung eingeführt. Der Betrag des Reflektionskoeffizienten ändert sich mit der Änderung des Abstands zwischen Probenende des Tuners und Innenleitung des Tuners, während die Phase des Reflektionskoeffizienten durch die Verschiebung der Tunerprobe entlang der Leitung eingestellt wird. Durch die reduzierte Anzahl der langsamen Tunerbewegungen und die schnelle Frequenzdurchlauffähigkeit des PNA-X wird die Messzeit im Vergleich zu konventionellen Methoden um den Faktor 200 kürzer. Mit einem rechnergesteuerten Tuner-System lassen sich Rauschparameter zwischen 8 und 50 GHz messen und aufzeichnen. Um auf tiefere Frequenzen zu gelangen, sollte der Nutzer den Tuner austauschen. Damit sind Messungen von 0,8 bis 8 GHz möglich. // **HEH**

bsw TestSystems & Consulting

Referenzen

[1] *Agilent Technologies App. Note „Fundamentals of RF and Microwave Noise Figure Measurements“.*

[2] *Keysight Technologies App. Note „High-Accuracy Noise Figure Measurements Using the PNA-X Series Network Analyzer“.*

[3] *Maury Microwave & Agilent Technologies Web-Ex. “New Ultra-Fast Noise Parameter System – Opening a New Realm of Possibilities in Noise Characterization”.*

[4] *Maury Microwave App. Note “A New Noise Parameter Measurement Method Results in More than 100x Speed Improvement and Enhanced Measurement Accuracy”*