

Halbleitertechnologie von A bis Z

Analog-/Mixed-Signal-Design

Rauschen in Halbleiterbauelementen	3
<i>Thermisches Rauschen</i>	<i>3</i>
<i>Schrotrauschen (Shot Noise)</i>	<i>3</i>
<i>1/f-Rauschen (Funkelrauschen)</i>	<i>3</i>

Rauschen in Halbleiterbauelementen

Thermisches Rauschen

Thermisches Rauschen, auch Johnson-Nyquist-Rauschen genannt, entsteht durch die zufällige thermische Bewegung der Ladungsträger in jedem Widerstand und ist unabhängig vom fließenden Strom bereits im thermischen Gleichgewicht vorhanden. Die spektrale Rauschspannungsdichte eines Widerstands R bei der absoluten Temperatur T beträgt $v_n^2/\Delta f = 4kTR$, wobei k die Boltzmann-Konstante ist; für einen $1\text{ k}\Omega$ -Widerstand bei Raumtemperatur (300 K) ergibt sich daraus eine Rauschspannungsdichte von etwa $4\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$. Das Rauschen ist über einen weiten Frequenzbereich konstant (weißes Rauschen) und lässt sich nur durch eine niedrigere Temperatur oder einen kleineren Widerstandswert verringern.

In MOS-Transistoren tritt thermisches Rauschen vor allem im leitenden Kanal auf und wird häufig durch einen äquivalenten Rauschstrom am Drain-Anschluss modelliert, dessen Größe von der Transkonduktanz des Transistors abhängt und bei typischen analogen Verstärkerstufen einen wesentlichen Anteil der Eingangsrauschspannung eines Operationsverstärkers von einigen $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ bestimmt.

Schrotrauschen (Shot Noise)

Schrotrauschen entsteht, weil ein elektrischer Strom nicht kontinuierlich, sondern als Folge diskreter, statistisch unabhängig ankommender Ladungsträger fließt, etwa beim Überqueren einer Potentialbarriere wie dem pn-Übergang einer Diode. Die spektrale Rauschstromdichte ist ebenfalls frequenzunabhängig (weiß) und beträgt $i_n^2/\Delta f = 2qI$, wobei q die Elementarladung und I der mittlere Gleichstrom durch die Barriere ist; für einen Diodenstrom von 1 mA ergibt sich daraus eine Rauschstromdichte von rund $18\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Anders als thermisches Rauschen, das auch ohne fließenden Strom existiert, tritt Schrotrauschen nur bei tatsächlichem Stromfluss über eine Potentialbarriere auf und ist deshalb in Bipolartransistoren und Dioden von besonderer Bedeutung, während es im Kanal eines MOSFET ohne echte Potentialbarriere eine untergeordnete Rolle spielt.

1/f-Rauschen (Funkelrauschen)

1/f-Rauschen, auch Funkelrauschen oder Flicker-Rauschen genannt, hat eine

spektrale Leistungsdichte, die umgekehrt proportional zur Frequenz ansteigt und daher bei niedrigen Frequenzen dominiert. In MOS-Transistoren gilt es als Folge von Ladungsträgern, die zeitweise in Traps an der Grenzfläche zwischen Silicium und Gate-Oxid eingefangen und wieder freigesetzt werden und dadurch die Kanalladung und damit den Drainstrom fluktuieren lassen; PMOS-Transistoren zeigen dabei aufgrund der weiter vom Gate-Oxid entfernten Löcherleitung im vergrabenen Kanal oft ein deutlich, teils um eine Größenordnung, geringeres $1/f$ -Rauschen als vergleichbare NMOS-Transistoren.

Die Frequenz, bei der die spektrale Leistungsdichte des $1/f$ -Rauschens gleich der des weißen thermischen Rauschens ist, wird als Eckfrequenz bezeichnet und liegt bei typischen CMOS-Prozessen im Bereich einiger Kilohertz bis weniger Megahertz. Da $1/f$ -Rauschen besonders die Präzision niederfrequenter und Gleichspannungs-naher Messungen begrenzt, setzen rauscharme Verstärker Techniken wie Chopper-Stabilisierung ein, bei der das Nutzsignal vor der Verstärkung typischerweise in den Bereich einiger zehn Kilohertz bis wenige Megahertz moduliert und erst danach wieder zurückgemischt wird, um es außerhalb des dominanten $1/f$ -Rauschbereichs zu verarbeiten.