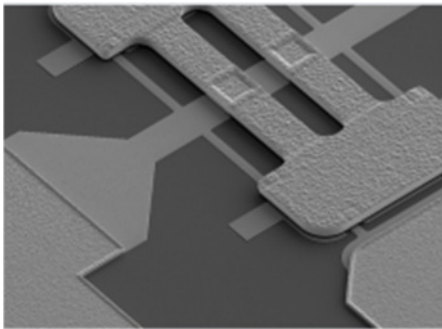


Passive Intermodulation und Power Handling  
24.03.2020  
Hochleistungs-HF-MEMS-Schalter

## Passive Intermodulation und Power Handling

Der Beitrag beschreibt die Theorie von auf Silizium-Substrat basierender HF-MEMS-Technologie und demonstriert die Machbarkeit der Implementierung eines HF-Schalters mit hoher Leistung, geringem Verlust und hoher Linearität. Kommerzielle Zwei-Ton-Intermodulationstests zeigen ein  $IMD_3$  von 90 bis 110 dBm bei 850 MHz und von 90 dBm bei 3,6 GHz.

Fachartikel von Ian Burke, Darryl Evans, Chris Keimel, Marten Seth, Xu Zhu



Ideal-Switch-Einheitszelle. Menlo Micro

Schlüsselparameter von HF- und Mikrowellenschaltern sind geringe Einfügungsdämpfung, hohe Linearität, hohe Isolation und hohe Belastbarkeit. In den letzten Jahrzehnten wurden mehrere wichtige Halbleitertechnologien entwickelt. Unter ihnen sind Gallium Arsenid (GaAs) und LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) die ausgereiftesten Technologien, insbesondere für niedrige Frequenz und hohe Leistung. In den letzten Jahren hat Gallium Nitrid (GaN) seinen Weg in verschiedene sehr anspruchsvolle Anwendungen gefunden, und Silizium-on-Isolator (SOI) oder Silizium-on-Saphir (SOS) haben sich in mobilen Antennenschalterapplikationen sehr erfolgreich durchgesetzt.

### Eck-Daten

Wie in diesem Beitrag vorgestellt, vermeidet ein MEMS-Schalter mit ohmschem Kontakt viele nichtlineare Effekte beim Schalten in Komponenten mit hoher Leistung. Die mechanisch nichtlinearen Effekte muss der Designer aber kennen, um die Vorteile des MEMS-Schalters mit ohmschen Kontakten voll auszunutzen.

Die elektrischen Leitungsmechanismen aller hier genannten Technologien basieren jedoch auf Minoritätsträgern in Halbleitern, was einem Design für hohe Leistung, hohe Frequenz und hohe Isolation nicht entgegenkommt. Die Weiterentwicklung der Prozesstechnologien (für kleinere Geometrien), der Halbleitermaterialien (für hohe Elektronenmobilität und hohe Spannung) und des Substratmaterials (zum Beispiel Saphir, um die Leckströme zu reduzieren und somit eine höhere Isolation zu erreichen) kann nur einen oder zwei Aspekte der Halbleiterperformance verbessern, aber nicht alle.

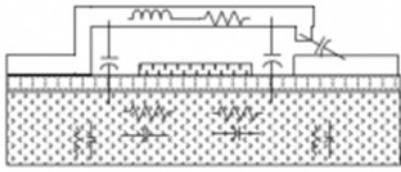


Bild 1: Die parasitären Elemente um das MEMS-Substrat und im Substrat selbst. Menlo Micro

Ab Ende der 90er Jahre begann die Forschung sich mit der Technologie der Mikro-Elektro-Mechanischen-Systeme (MEMS) zu befassen, um miniaturisierte mechanische Schalter zu bauen, die bis zu Millimeterwellenfrequenzen arbeiten können. Die hohe Leitfähigkeit der Metallkontakte sorgt für eine wesentlich geringere Einfügungsdämpfung, geringere Wärmeentwicklung und höhere Belastbarkeit als bei den entsprechenden Halbleiter-Pendants.

Es gibt zwei Haupttypen von MEMS-Schalterarchitekturen, solche mit kapazitiven und solche mit ohmschen Metallkontakten. Der kapazitiv geschaltete Kontakt gewinnt in Antennenabstimmungs-Applikationen mit geringer Leistung aufgrund seiner geringen Einfügungsdämpfung und hohen Isolation an Zugkraft. Allerdings fehlen ihm die breitbandige HF-Belastbarkeit und Linearität der HF-MEMS-Schalter mit ohmschem Kontakt. Um die bestmögliche Off-State-Isolation und hohe Linearität zu erreichen, haben die MEMS-Forscher die Erkenntnisse ihrer Kollegen aus der Halbleiterindustrie genutzt und begonnen, ohmsche Schaltkontakte aus normalen Silizium durch solche aus Keramik sowie hochohmige (HiRes) Si- und Glassubstrate zu ersetzen. In diesem Beitrag werden Analyse- und Charakterisierungsergebnisse sowie die guten Linearitätseigenschaften von HF-MEMS-Schaltern vorgestellt, die auf einem Fused-Silizium-Substrat (Quarzglas) hergestellt werden.

### Quellen der Nichtlinearität bei Transistor, PIN-Diode und MEMS-Schalter

Bei einem Halbleiterschalter ergeben sich die wichtigsten nichtlinearen Effekte aus der Sättigung des On-Widerstandes und der Modulation der Off-Kapazität durch Signale hoher Leistung. Wenn Transistoren für eine Schaltfunktion verwendet werden, werden mehrere Transistoren in Reihe geschaltet, um sie für Hochspannungsanwendung, zum Beispiel an der Antenne, geeignet zu machen. Die Anzahl der in Reihe geschalteten Transistoren wird durch die Drain-Source-Durchbruchspannung ( $V_{DS}$ ) jedes Transistors relativ zum maximalen Spannungshub am Antennenanschluss bestimmt. Wenn ein Transistor voll eingeschaltet ist, wird die Nichtlinearität hauptsächlich durch dessen On-Widerstand bestimmt. Ist der Transistor ausgeschaltet, wird die Linearität nicht nur durch die Off-Kapazität, sondern auch durch andere parasitäre Mechanismen, die bei Halbleitern üblich sind, beeinflusst. Ein sekundärer Effekt tritt auf, wenn höhere Leistungen einen hohen Spannungshub am Antennenanschluss erzeugen. Dieser hohe Spannungshub kann die dem Antennenport am nächsten liegenden Off-State-Transistoren (über den  $V_{DS}$ -Durchbruch hinaus) durch starken Spannungsunterschied beeinflussen, das heißt der Spannungsabfall ist nicht gleichmäßig über jeden Transistor in der Reihenschaltungskette verteilt.

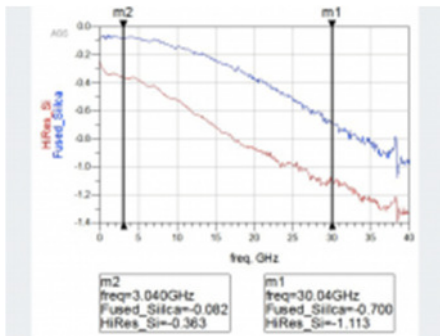


Bild 2: Messergebnisse des gleichen Schalter-Layouts, einmal aufgebaut auf Quarzglas (Blau). und einmal auf 3000 Ωcm Si-Substrat (Rot). Menlo Micro

Bei der Verwendung von PIN-Dioden für die Schaltfunktion gibt es Parameter, die dafür sorgen, dass die Schaltung den Spannungsspitzen an der Antenne standhalten kann. Die Nennspannung und der thermische Widerstand sind wichtige Parameter bei Dioden-Schaltern. Weitere Dioden-Parameter wie Serienwiderstand, Sperrschichtkapazität und die Stärke der Intrinsic-Schicht bestimmen auch die maximale Belastbarkeit und die Linearität.

MEMS-Schalter unterscheiden sich grundlegend von Halbleiterschaltern in der Art und Weise, wie sie auf nichtlineare Energie reagieren. Die Nichtlinearitäten von MEMS-Schaltern entstehen durch eine Kombination von mechanischen und elektrischen nichtlinearen Effekten. Diese Effekte übertragen Energie aus dem Grundsignal in andere Frequenzbänder, wo sie mit anderen Signalen interferieren. Ein reales Beispiel ist, wenn sich zwei In-Band-Sendesignale mischen und Energie in das benachbarte Empfangsband übertragen, wo sie mit den empfangenen Signalen interferieren.

Beim ohmschen MEMS-Schaltkontakt existieren die traditionellen Verlustmechanismen, die mit Halbleitern verbunden sind, wegen der MEMS-Struktur nicht. Die limitierenden Faktoren bei der Linearität von MEMS-Schaltern hängen von den Materialeigenschaften des Substrats, den metallurgischen Grenzflächen und den strukturellen mechanischen Eigenschaften ab, wie in Bild 1 dargestellt. Der Substratwiderstand und die Koppelkapazität bestimmen die Performance des HF-Kleinsignals. Die resultierende Kleinsignalleistung einer ohmschen Kontaktteststruktur aus Quarzglas im Vergleich zu 3000 Ωcm HiRes-Silizium ist in Bild 2 dargestellt. Bei 20 GHz weist der auf Quarzglas aufgebaute Schalter eine um 0,2 dB geringere Einfügungsdämpfung und eine um 6 dB höhere Isolation auf. Für Hochleistungsanwendungen weist Quarzglas weniger Nichtlinearitätseffekte auf als HiRes-Silizium.

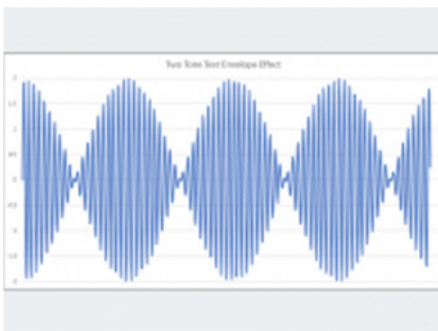


Bild 3: Der Hüllkurveneffekt, der durch die Addition zweier hochfrequenter Signale entsteht, generiert eine niederfrequente Komponente oder Überlagerungsfrequenz. Menlo Micro

Bei einem MEMS-Schalter im geschlossenen Zustand entstehen durch die Gleichrichtereffekte, bei denen die Signalspannung die Kontaktkraft moduliert, hauptsächlich Produkte der zweiten Harmonischen. Wenn sowohl positive als auch negative Spannung zu einer erhöhten Kontaktkraft führen, entsteht eine Kontaktkraft, die mit der doppelten Rate des Eingangssignals variiert. Bei Frequenzen oberhalb der mechanischen MEMS-Resonanzfrequenzen ist diese Quelle der Nichtlinearität im Allgemeinen sehr klein, da die Masse des MEMS-Schaltbalkens als Tiefpassfilter wirkt und eine mechanische Dämpfung bewirkt.

Ähnlich verhält es sich bei einem MEMS-Schalter im geöffneten Zustand: Diese Gleichrichtereffekte bewegen den MEMS-Schaltbalken mit der doppelten Rate des Eingangssignals. Die geringe Kapazitätsänderung während dieser Verschiebung ist ein Grund für die Nichtlinearität im offenen Zustand des Schalters.

Ein weiterer Beitrag zur Nichtlinearität sind Effekte, die durch die in das Substrat eindringenden elektrischen und magnetischen Felder entstehen. Dies führt zur zweiten und dritten Harmonischen. Für einen MEMS-Schalter ist das Substrat oft der limitierende Faktor bei der Linearität. Als Basissubstratmaterial für den ohmschen MEMS-Schalter wurde Quarzglas gewählt, um die nichtlinearen Beiträge deutlich zu begrenzen.

Während die meisten mechanischen Nichtlinearitätseffekte bei niedrigen Frequenzen auftreten, ist bei mehreren Hochfrequenzträgern mit engem Frequenzabstand Vorsicht geboten. Dies kann zu Hüllkurveneffekten führen, die, wenn sie stark genug sind, die niederfrequenten mechanischen Nichtlinearitäten anregen können. Dies äußert sich in der Regel als Verschlechterung des Intermodulationsprodukts dritter Ordnung (IM3) oder bei anderen Mehr-Ton-Linearitätsmessungen. Die gleichen nichtlinearen Effekte können auch durch amplitudenmodulierte Signale ausgelöst werden. Bild 3 veranschaulicht dieses Phänomen.

### **Harmonischen-Test**

Das Signal-Rausch-Verhältnis der Harmonischen ist ein Maß für die Signalverzerrung des Gesamtsystems. Als eine etablierte Methode zur Linearitätsprüfung, werden die 2. und 3. Harmonische normalerweise zur Bewertung der Linearität des Systems herangezogen. Dieser Wert ist sehr wichtig für das Systemdesign, um die Signalintegrität zu gewährleisten. Traditionell werden Oberwellenspitzen durch Filterung gemildert. Aufgrund der überlegenen harmonischen Performance des MEMS-Schalters können mehrere Systemvorteile realisiert werden: Wegfall von Filtern, Reduzierung von Pfadverlusten, erhöhte Systemeffizienz und geringere Komponentenzahl.

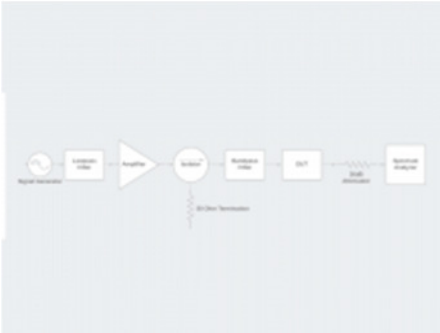


Bild 4: Blockschaltbild des Prüfaufbaus für die Harmonischen-Messung. Menlo Micro

Bild 4 zeigt den generellen Testaufbau für Harmonischen-Messungen. Ein Signalgenerator liefert das gewünschte Eingangssignal, ein Tiefpassfilter entfernt Harmonische am Signaleingang des Verstärkers. Der Ausgang des Verstärkers gelangt dann über Isolator und Bandpassfilter zum Testobjekt /Device Under Test (DUT). Der Isolator stellt sicher, dass Reflexionen keine Mischprodukte am Verstärkerausgang verursachen, und der Bandpassfilter stellt die Reinheit des Signaleingangs von Harmonischen zum Testobjekt sicher. Ein 30-dB-Dämpfungsglied wird am Ausgang des Testobjekts verwendet, um die Signalleistung am Eingang des Spektrumanalysators auf einen akzeptablen Pegel zu reduzieren. Für die Oberwellen-/Spannungs-Stehwellenverhältnis (VSWR) -Messungen wird ein programmierbarer Tuner zwischen dem Testobjekt und dem Abschwächer verwendet. Damit kann das VSWR von 1:1 bis 5:1 modifiziert und die Phase über 0 bis 360° gesteuert werden. Den gemessenen Oberwellenverlauf im Verhältnis zur Eingangsleistung des MEMS-Schalters zeigt Bild 5 zusammen mit Daten von anderen Geräten. Die gemessenen Oberschwingungs- vs. VSWR-Daten für den MEMS Schalter sind in Bild 6 dargestellt. Sie sind eine Worst-Case-Messung bei jedem VSWR, da die Phase um 360° durchlaufen wird.

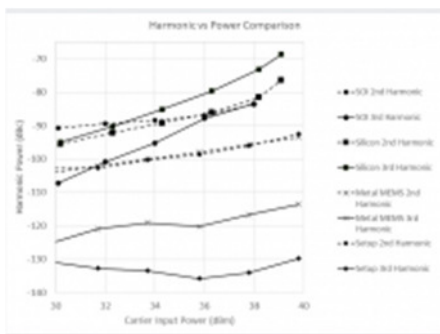


Bild 5: Harmonische relativ zum Träger in Abhängigkeit vom Eingangsleistungspegel. Menlo Micro

Wie in Bild 5 dargestellt, wird die Messung der 2. Harmonischen der Metallkontakt-MEMS durch die Grenzen des Prüfsystems begrenzt. Die Harmonischen-Performance des Metallkontakt MEMS 2 zeigt bei 30 dBm Eingangsleistung eine Verbesserung von 8 bis 10 dB gegenüber dem Halbleiter-Schalter. Die Harmonischen-Performance des Metallkontakt-MEMS 3 zeigt bei 30 dBm Eingangsleistung eine Verbesserung von 18 dB gegenüber dem Halbleiterschalter.

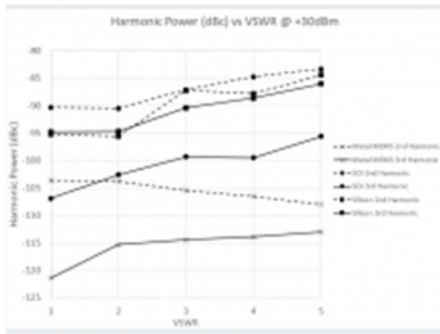


Bild 6: Harmonische relativ zum Träger in Abhängigkeit vom VSWR. Menlo Micro

Eine Eigenschaft, die bei der Messung des ohmschen Schalters beobachtet wurde, sind die geringen harmonischen Verzerrungen bei höheren Eingangsleistungen. Dieses Ergebnis ermöglicht eine einfachere Skalierung des HF-MEMS-Schalter gegenüber anderen Festkörper-Technologien über das gesamte Leistungsspektrum. Dieses Phänomen ist ausgeprägter beim Vergleich der 3. Harmonischen. Dieses Performanceverhalten ergibt sich durch die Kombination der grundlegenden Vorteile des Metall-Metall-Kontakts mit denen des Quarzglas-Substrats.

### Passive-Intermodulation-Prüfung (PIM)

Die Intermodulation zwischen den Frequenzkomponenten bildet zusätzliche Komponenten bei Frequenzen, nicht nur bei harmonische Frequenzen (ganzzahlige Vielfache) von beiden, wie harmonische Verzerrung, sondern auch bei Summen- und Differenz-Frequenzen der ursprünglichen Frequenzen und bei Summen und Differenzen von Vielfachen dieser Frequenzen. Intermodulation ist unerwünscht, da sie unerwünschte Signale, oft in Form von Seitenbändern, erzeugt. Bei Funksystemen erhöht sich dadurch die belegte Bandbreite, was zu Nachbarkanalstörungen führt.

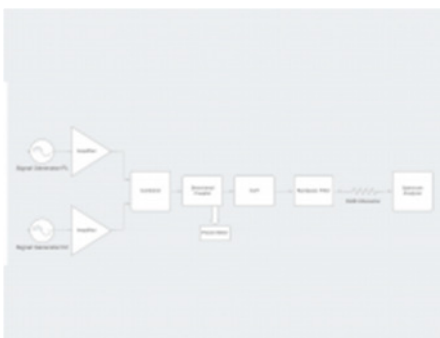


Bild 7: Blockschaltbild des Testaufbaus für die passive Intermodulation. Menlo Micro

Bild 7 zeigt den Testaufbau für den  $IMD_3$ . Es ist ein Zwei-Ton-Test mit einer Signalgenerator- und Verstärkerkette für jedes Signal. Die Signale werden kombiniert und gefiltert, um ausreichende Isolation zwischen ihnen zu gewährleisten. Das Kombi-Signal gelangt zum Testobjekt über einen Richtkoppler und einen Leistungsmesser zur Steuerung der Leistung. Ein Bandpassfilter zur Unterdrückung der beiden Signale und zum Durchlassen des  $IMD$ -Signals sowie ein 30-dB-Dämpfungsglied werden am Ausgang des Prüflings verwendet, um die Leistung auf einen akzeptablen Pegel am Eingang des Spektrumanalysators zu senken.



Bild 8: IP3 für MEMS und andere Technologien. Menlo Micro

$IP3 \text{ (dBm)} = PIN - 0,5 \text{ IMD}_3 \text{ (dBc)}$ , Formel (1)

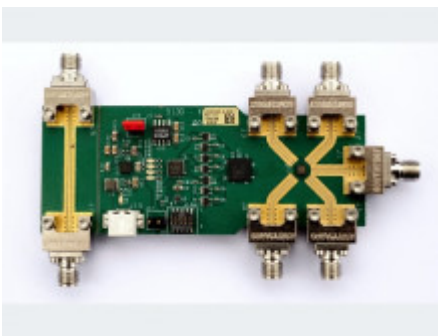


Bild 9: Der Hochleistungs-HF-Schalter MM5130 von Menlo Micro bietet vier Hochleistungskanäle (SP4T) in einem Formfaktor von 2,5 mm x 2,5 mm mit sehr geringer Einfügedämpfung bis 20 GHz. Menlo Micro

Die in Bild 8 dargestellten IP3-Daten werden aus den in der Formel (1) präzise beschriebenen Messungen des  $IMD_3$  gewonnen. Die Träger betragen +30 dBm bei 1764 MHz und 1834 MHz. Die Daten der Metall-MEMS-Struktur liegen nahe an den Grenzwerten des Prüfsystems und sind 10 dB und 15 dB besser als der IP3 bei Silizium beziehungsweise SOI. Die MEMS-Schalter wurde auch im 800 MHz-Band mit +43 dBm gemessen, sie ergaben einen IP3 von +94 dBm. Ein verbesserter IP3 ermöglicht Modulationsverfahren höherer Ordnung zur Unterstützung der zunehmenden Bandbelegung in aktuellen und zukünftigen Kommunikationssysteme.