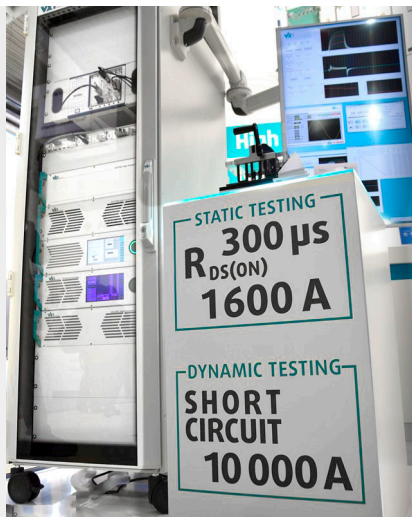


Cost down und System-Vereinfachung 1000 A High Current $R_{DS(on)}$ Static Parameter DC-Tests vs. Puls-Tests @ 300 μ s



Der Test von Hochleistungs-Halbleitern ist für Entwickler nicht immer einfach. Wir zeigen Vor- und Nachteile beim Messen des Drain-Source-Widerstands $R_{DS(on)}$ mit Gleichstromquellen und Strom-Pulsquellen.

Inhalt

Einschaltwiderstand $R_{DS(on)}$ eines MOSFETs.....	2
Gleichstrom und die Systemkomponenten.....	2
Hochstrom-Pulsquellen.....	3
Problem des Ohmschen Gesetzes.....	4
Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten und der Prüfling.....	4
Kontakt.....	6

Der Bedarf an Hochleistungs-Halbleitern wie Dioden, MOSFETs oder IGBTs wird auch in den nächsten Jahren weiter ansteigen. Treiber sind vor allem die regenerativen Energien, die Elektromobilität oder industrielle elektronische Antriebe, die leistungsfähigere Komponenten benötigen. Der Test dieser Komponenten ist für Testingenieure nicht trivial, da Ströme und Spannungen stark angestiegen sind und auch künftig auf einem hohen Niveau bleiben werden.

Für eine effiziente Serienproduktion von Halbleitern erfolgen die Tests in verschiedenen Prozessschritten. Das beginnt von der Ebene des Front-End-Wafers, dem sogenannten Bare-Die, bis zum Back-End. Bei einem Back-End handelt es sich um ein diskretes Bauteil. Schließlich reicht die Produktionskette bis zum Endgerät. Geprüft wird auf eine gleichbleibend hohe Qualität und wie zuverlässig die Bauteile und Geräte sind. Auf der anderen Seite ist es wichtig, ausgefallene Teile schnell zu erkennen. Gute Cost-Down-Ergebnisse lassen sich dann erreichen, wenn die Testspezifikationen in jedem Prozessschritt vollständig abgedeckt sind. Allerdings ist das nicht immer einfach.

Einschaltwiderstand $R_{DS(on)}$ eines MOSFETs



Bild 1:
SOT-227 MOSFET

Der folgende Text zeigt Berechnungen, um den Einschaltwiderstand $R_{DS(on)}$ eines MOSFETs zu testen. Die meisten Aussagen lassen sich für die Messung der Vf-Durchlassspannung einer Diode oder VCE, sat, der Sättigungsspannung eines IGBT, übernehmen.

Inzwischen sind MOSFETs mit einem $R_{DS(on)}$ Drain-Source-Widerstand von weniger als 1 mΩ erhältlich. Die maximalen Spannungen und Ströme, die von aktuellen IGBTs wie B2/4/6-Modulen oder MOSFETs (siehe Bild 1) geschaltet werden können, steigen weiterhin an. Die Komponenten werden gemäß den typischen Testspezifikationen für $R_{DS(on)}$ bei maximalen Nennwerten getestet, so dass Testströme von 1000 A oder mehr erforderlich sind. Jetzt geht es um die Vor- und Nachteile bei der Messung von $R_{DS(on)}$ mit Gleichstromquellen und Strom-Pulsquellen. Gleichspannungs- und Gleichstromquellen haben langsame Anstiegszeiten, um einen stabilen Strompegel zu erreichen. Deshalb sind Testzeiten von 10 ms oder höher notwendig. Die Tests erfolgen innerhalb von 100 ms. Da die 100 ms in einem typischen Prüfsystem-Setup (Erwärmen des Kontaktstifts/der Nadel) von jeder Zeitkonstante der thermisch relevanten Komponenten weit entfernt sind, nennt man die Art der Prüfung Gleichspannungsprüfung. Im Vergleich dazu helfen schnelle Strom-Pulsquellen, die Testanforderungen zu erreichen.

Gleichstrom und die Systemkomponenten

Welche Testmethode für den Testfall gewählt wird hat Einfluss auf viele Komponenten des Testsystems. Komponenten müssen entweder DC-fähig sein oder nur pulsfähig. Ein typischer Testaufbau zum Messen des Widerstands $R_{DS(on)}$ besteht aus vier verschiedenen Funktionseinheiten:

- Stromquelle
- Verkabelung
- Hochstrom-Matrix / Multiplexer und
- Prüfling (Vorrichtung/Nadeladapter/Wafer-Prober)

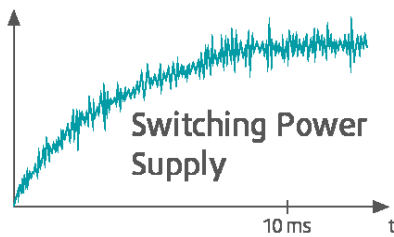


Bild 2: Ausgangsstrom mit Welligkeit.

Die verwendete Stromquelle selbst ist je nach Gleichstrom- oder Impulstest im Design sehr unterschiedlich. Hochstrom-Gleichstromquellen sind so ausgelegt, dass sie kontinuierlich Energie liefern, und verfügen daher über eine entsprechende Kühlleistung. Das führt zu einem größeren Bauraum. Da Hochstrom-Gleichstromquellen auf Schaltnetzteilen basieren, liefern diese Ausgangsströme mit einer gewissen Welligkeit (siehe Bild 2). Das sollte man bei Messungen beachten. Neben der Stromquelle erzeugen Verkabelung, die Matrix und der DUT-Adapter ohmsche und thermische Verluste bei Hochstromtests (siehe Bild 3).

Tests mit Gleichströmen sind aufwendiger bei den Systemkomponenten. Diese müssen in der Lage sein, einen Gleichstrom von 1000 A oder höher zu bestehen. Die entstehenden thermischen Verlustleistungen müssen ständig gekühlt werden. Das führt zu Geräten wie DC-fähigen Stromquellen, schweren und sehr niederohmigen Kabeln, großen Hochstrom-Schaltrelais und vielen Kontaktnadeln. Jede Komponente muss in der Lage sein, mit den Gleichstromströmen des Systems umzugehen. Daher sind sie größer, benötigen viel Rack- und Stellfläche und sind kostenintensiver.

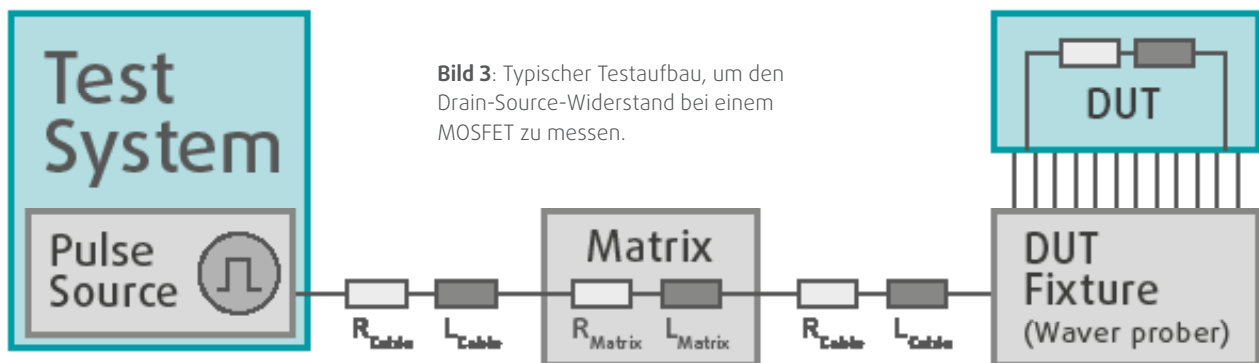


Bild 3: Typischer Testaufbau, um den Drain-Source-Widerstand bei einem MOSFET zu messen.

Hochstrom-Pulsquellen

Der zweite Weg ist effizienter. Mit sehr schnellen Hochstrom-Pulsquellen lassen sich die meisten Komponenten eines Testsystems einfacher ausführen. Der Test eines Bauteils bei einem Strom von 1000 A mit einem Impuls von 300 μ s verändert die Anforderungen an die Gesamtleistung von Systemkomponenten wie Matrix oder Verkabelung erheblich. Um ein solches Testsystem zu realisieren, müssen die parasitären Induktivitäten reduziert werden. Dazu kann der Anwender eine Strom-Pulsquelle verwenden. Damit sind kompaktere Systemkomponenten wie eine kleinere Matrix einsetzbar, welche die Systeminduktivität reduziert.

Die Entwicklung von Komponenten mit niedrigem Induktivitätsgrad, wie einer Matrix mit niedriger Induktivität, erfordert viel Anwenderwissen, ist technisch jedoch möglich. Optimiert man die Systemverkabelung, so reduzieren sich gleichzeitig parasitäre Induktivitäten. Entscheidend ist auch die Auswahl der Steckverbinder, der Typ und die Anzahl der Kontaktnadeln für das System. Als grobe Schätzung kann man sagen, dass die anfänglichen Systemhardware-Kosten eines DC-fähigen Testsystems und eines Puls-Testsystems nicht sehr

Problem des Ohmschen Gesetzes

unterschiedlich sein werden. Die großen Vorteile der Puls-Testsysteme sind ein geringerer Platzbedarf sowie aufgrund der hohen Testgeschwindigkeit ein wesentlich höherer Systemdurchsatz.

Die Größe der Systemkomponenten wird hauptsächlich durch ihre Wärmekapazität bestimmt. Deshalb ist das Ohmsche Gesetz das größte Problem. Die thermischen Verluste steigen mit steigenden Strömen exponentiell an: $P = R \times I \times I$ (Ohmsches Gesetz). Steigt der Teststrom um Faktor zwei, steigen die ohmschen Verlustleistungen in Relais, Kabeln und Nadeln um Faktor vier. Steigt der Teststrom um Faktor zehn, erhöht sich die ohmsche Verlustleistung um Faktor 100. Zusätzlich dazu bedeutet das, einen bestimmten Strom in ein Widerstands-Induktions-Netzwerk (RL-Netzwerk) einzuprägen, was eine aneinander Reihung von Kabeln, Matrizen und DUTs darstellt linear länger dauert. Aufgrund der 10-fachen Stromstärke benötigt der Test die 10-fache Zeit. $E = P \times t$. Das wirkt sich auf Relais, Kabel und Nadeln aus.

Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten und der Prüfling

Fasst man die beiden physikalischen Gesetze zusammen, kann man abschätzen, dass ein Anstieg des Teststroms um Faktor 2 von 500 auf 1000 A (was auch die Pulsdauer um Faktor 2 erhöht), die thermische Energie in den Relais, Nadeln und Kabeln ungefähr um den Faktor 8 ansteigen lässt. Ein steigender Strom um Faktor 3 erhöht die thermische Energie um Faktor 27 und bei einem um Faktor 10 höheren Strom steigt die Energie um Faktor 1000. Je nach Ausführung des Prüflings ist es nicht immer möglich, die Energie auf mehrere Komponenten zu verteilen. Insbesondere auf Wafer- und Bare-Die-Level besteht keine Chance, die Anzahl der Nadeln um diese Faktoren zu erhöhen. Notwendig ist ein Kompromiss. Die Testströme werden gesenkt, damit der Systemaufbau sie handhaben kann. Außerdem darf auf Wafer- und Bare-Die-Ebene das Silizium selbst nicht thermisch beansprucht werden. In diesem Produktionsschritt gibt es keine geeignete Möglichkeit, den Prüfling zu kühlen.

Die thermischen Leistungsverluste in einem MOSFET sind ähnlich wie in jedem anderen ohmschen Widerstand. Deshalb greifen die Regeln wie für Kabel oder Matrix. Es gibt allerdings einen wesentlichen Unterschied: Die Menge an Wärmeenergie, die in den Prüfling eingebracht werden kann, ist fest vorgegeben und wird hauptsächlich durch die Wärmekapazität des Prüflings bestimmt. Gibt es einen funktionierenden Testaufbau mit dem Teststrom von 500 A, der auf 1000 A erhöht wird, muss gemäß der angegebenen Formel die Testzeit mindestens um Faktor vier verringert werden.

Eine korrekte Einstellung vorausgesetzt, kann der Widerstand $R_{DS(on)}$ bei 1000 A unter 300 μs charakterisiert werden. Jetzt werden die Anstiegszeit der Stromquelle und die Induktivität der Verkabelung und des Matrix/Multiplexers relevant. Die Stromanstiegszeit in einem RL-Netzwerk wird durch die Gesamtinduktivität des gesamten Aufbaus und die angelegte Spannung der Stromquelle definiert. Da die Quelle den Strom beispielsweise mit 50 V in das System einprägt und

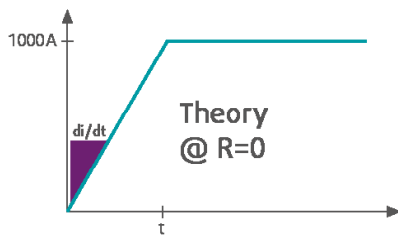


Bild 4: Idealierte Stromanstiegs-kurve.

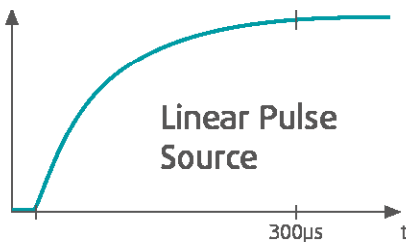


Bild 5: Reale Stromanstiegskurve.

das System eine Gesamtinduktivität von $1\mu\text{H}$ aufweist, bewirkt eine Stromanstiegsgeschwindigkeit von:
 $\frac{di}{dt} = 50\text{ V} / 1\mu\text{H} = 50\text{ A} \cdot 10^6/\text{s} = 50\,000\,000\text{ A/s} = 50\,000/\text{ms} = 50\text{ A}/\mu\text{s}$.
 Ein Strom von 1000 A würde sich innerhalb von $20\mu\text{s}$ einstellen (siehe Bild 4). Das ist nur dann realistisch, wenn nicht die folgenden Fakten vorliegen würden:

- Die Stromanstiegszeit der Quelle ist begrenzt und
- an ohmschen Widerständen fällt Spannung ab.

Ist die Anstiegszeit der Quelle die begrenzende Größe, lässt sich das lösen. Bestimmen Komponenten wie Matrix, Kabel oder DUT-Aufnahme die maximale Stromanstiegsgeschwindigkeit, muss der Gesamtwiderstand der Testaufbau berücksichtigt werden. Ein angenommener Widerstand von $40\text{ m}\Omega$ für Kabel, Matrix, Nadeln und DUT ergibt einen steigenden ohmschen Spannungsabfall mit steigenden Strömen, der bei 1000 A auf 40 V ansteigt. Das führt zur gekrümmten E-Funktion (siehe Bild 5). Diese E-Funktion führt zu einer langsameren Strom-Einschwingzeit, als dies im Idealfall bei $R=0$ sein würde.

Die folgenden Induktivitäten und Widerstände lassen sich mit einfachen Tricks erreichen:

- Stromimpulsquelle mit einer Stromanstiegsgeschwindigkeit von $50\text{ A}/\mu\text{s}$
- Verkabelung $<50\text{ nH}$ pro Meter, $1\text{ m}\Omega$ pro Meter
- Matrix $<250\text{ nH}$ und $10\text{ m}\Omega$
- Prüfling: $<100\text{ nH}$ und $1\text{ m}\Omega$ und
- DUT <5 bis 50 nH und $1\text{ m}\Omega$.



Bild 6: 1000 A Puls über eine Nadel pro Kontakt.

Der Testspezialist VX Instruments hat in einem Demo-Testsystem den Widerstand $R_{DS(on)}$ mit 1000 A bei $300\mu\text{s}$ mit nur einer Kontaktnadel für Source- und Drain-Pin des DUT getestet (siehe Bild 6).

Kontakt

VX Instruments GmbH
Roedersteinstr. 10
84034 Landshut
Germany

Telefon: +49 871 - 931555 - 0
Fax: +49 871 - 931555 - 55
E-Mail: info@vxinstruments.com
Web: www.vxinstruments.com



PXi System Alliance

VX Instruments ist einer von neun Executive Members (insgesamt über 60 Mitglieder) in der PXI System Alliance, dem Konsortium, das den PXI-Standard definiert und weiterentwickelt. Hier sind wir stimmberechtigt und haben außerdem Zugang zum technischen Komitee.



LXI Consortium

Das LXI Consortium beschäftigt sich mit der Entwicklung und Verbreitung des LXI-Standards. Dies ist ein offener, leicht zugänglicher Standard für die funktionelle Mess- Test- und Datengewinnungsindustrie.



PCI-SIG

Die PCI-SIG ist eine Vereinigung, die sich der Spezifizierung des PCI-Standards widmet.



ISO 9001:2015

Die VX Instruments GmbH wurde im Februar 2003 erstmals von der INTERNATIONAL CERT GmbH zertifiziert.