

# Durchlaufzeit bei Gattern

## Der Ringoszillator gehört zu den wichtigsten Teststrukturen für

**Parametertests von CMOS-Wafern.** Mit den damit gewonnenen Testdaten lässt sich beispielsweise überprüfen, ob die Logikgatter die im Design vorgesehenen Geschwindigkeitskriterien erfüllen.

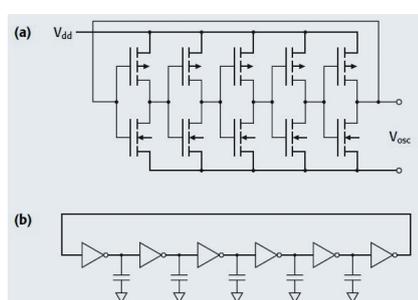


Bild 1: Schaltplan (a) und Blockdiagramm (b) eines CMOS-Ringoszillators (ohne Trigger oder Treiberstufe).

Dave Rose

■ Immer mehr Halbleiter-Fabs integrieren Ringoszillatoren für die Prozessüberwachung in ihre Teststrukturen. Mithilfe von Frequenzmessungen an Ringoszillatoren lässt sich die Durchlaufzeit bei Gattern bestimmen. Dies ist einer der entscheidenden Parameter, um feststellen zu können, wie schnell eine digitale Schaltung arbeiten kann. Jedes Logikgatter hat eine Eingangskapazität. Da diese die Schaltgeschwindigkeit des Gatters beschränkt, kann kein Bauteil ohne Zeitverzögerung schalten. Allerdings ist diese Gatterdurchlaufverzögerung so kurz, dass sie sich mit den meisten Testsystemen nicht direkt messen lässt. Deshalb wird mit den Testsystemen eine Schwingungsfrequenz anstatt der Gatterdurchlaufzeit gemessen und die Laufzeit aus der Frequenzmessung anschließend berechnet.

Bei einem CMOS-Fertigungsprozess wird die Ringoszillator-Teststruktur normalerweise aus einer ungeraden Anzahl von Inverterstufen realisiert. Um eine genaue Messung der Parameter sicherzustellen, wird der Ringoszillator anstatt aus Zellbi-

bliotheken oder Gattern üblicherweise aus Transistoren aufgebaut. Die Struktur wird so kompakt wie möglich ausgeführt, um zu gewährleisten, dass das Verhalten von den Transistoren und nicht von den Verbindungen dominiert wird. Die Bauteil-Kanallänge der Transistoren ist normalerweise die minimale Länge, welche die Designregeln des Prozesses unterstützen. Bild 1a zeigt den Schaltplan einer typischen Ringoszillator-Schaltung; Bild 1b zeigt ein Blockdiagramm eines Ringoszillators.

Der in Bild 1a dargestellte Ringoszillator besteht, wie alle Ringoszillatoren aus einer ungeraden Anzahl von Inverterstufen. Der Eingang kann aus einem NAND-Gatter mit zwei Eingängen bestehen, das als ein extern gesteuerter Trigger arbeitet. Sobald der Trigger ausgelöst wurde, läuft der Ringoszillator frei mit einer Frequenz, die von der Durchlaufverzögerung zwischen den Stufen abhängig ist. Die erzeugte Frequenz übersteigt normalerweise den Frequenzmessbereich eines typischen Parametertestsystems. Daher wird der Ausgang der Teststruktur üblicherweise mit einem Treiber isoliert um einen Einfluss der Testsystemkapazität zu vermeiden und das Ausgangssignal mit einem D-Flip-Flop durch einen Faktor 256 geteilt (oder durch 1024 für Prozesse unter  $0,25 \mu\text{m}$ ). Die zu messende Frequenz liegt dann meist im Bereich von 1 bis 50 MHz. Es wird zwar die Schwingungsfrequenz gemessen, der eigentlich interessierende Parameter ist aber die Durchlaufverzögerung. Daher muss im nächsten Schritt die Durchlaufverzögerung mithilfe der folgenden Gleichung aus dem Ergebnis der Frequenzmessung berechnet werden:

$$t_{\text{delay}} = \frac{1}{2nf_{\text{osc}}}$$

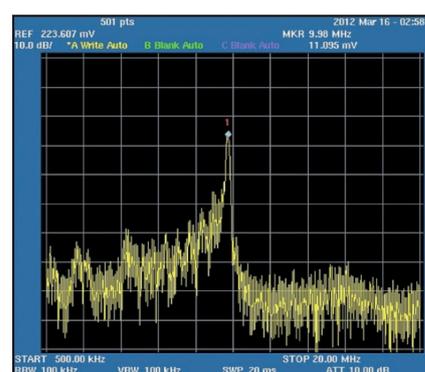


Bild 2: Signalspektrum eines Ringoszillators durch die S530-Schaltmatrix.

Dabei steht  $n$  für die Anzahl der Inverterstufen und  $f_{\text{osc}}$  für die gemessene Schwingungsfrequenz.

## Messüberlegungen

Parameter-Testsysteme sind für die genaue Messung von sehr kleinen DC-Signalen optimiert. Allerdings ist bei diesen Systemen auch das AC-Verhalten wichtig, um C-V-Messungen, die Pulsgenerierung und die Frequenzanalyse von Ringoszillatorstrukturen messen zu können. Das Parametertestsystem Modell S530 zum Beispiel wurde entwickelt, um hoch genaue DC-

## KONTAKT

Tektronix GmbH  
Keithley Instruments  
Landsberger Strasse 65  
82110 Germering  
Tel: 49-89-849307-40  
Fax: 49-89-84930787  
E-mail: info@keithley.de  
www.keithley.de

Messungen über einen breiten Dynamikbereich und mit einer AC-Signal-Bandbreite von 20 bis 30 MHz zu ermöglichen.

Oft wird ein Frequenzzähler als das am besten geeignete Instrument für die Messung der Frequenz angesehen. Allerdings misst der Frequenzzähler nur Durchgänge zum Beispiel durch den Nullwert, was bei Signalen in einer rauschbehafteten AC-Umgebung oft zu fehlerhaften Messwerten führen kann. Deshalb werden diese Frequenzmessungen idealerweise mit einem Spektrumanalysator oder einem Oszilloskop mit Spektrumanalyseverfahren ausgeführt. Spektrumanalysatoren wandeln das zu messende Signal mithilfe einer Fourier-Analyse vom Zeitbereich in den Frequenzbereich um. Jede Frequenz im Spektrum des Signals wird in Form seiner Signalamplitude dargestellt (Bild 2). Dies bedeutet, dass das interessierende Signal in einer rauschbehafteten Signalumgebung oft das Signal mit der höchsten Amplitude ist. Natürlich funktioniert in einigen Fällen auch die Spektrumanalyse nicht problemlos, wenn beispielsweise die Amplitude des interessierenden Signals im Grundrauschen des Systems untergeht.

Der Testsystementwickler muss außerhalb der Parametertestumgebung sicherstellen, dass die Impedanzen des Testobjekts (DUT), der Übertragungsleitungen und Messgeräte aufeinander abgestimmt sind, und dass es keine offenen Signalpfade gibt. Dadurch lassen sich die wichtigsten Ursachen für AC-Signalverzerrungen minimieren: Einfügedämpfung und Reflexionen. Allerdings ist dies in einer DC-Parametertestumgebung nicht immer möglich. Auch hier liefert ein Spektrumanalysator

### UNTERSTÜTZTE BEFEHLE

ring_max	Sucht die Frequenz mit der höchsten Amplitude.
ring_ref	Sucht die Frequenz, die der vorgegebenen Referenzfrequenz am nächsten ist.
ring_lcc	Sucht die 5 Frequenzen, deren Amplituden größer sind als der vorgegebene Grenzwert.
ring_meas	Bestimmt die Frequenz und Amplitude des Ringoszillators.
freq_init	Initialisiert die Oszilloskop-Karte entsprechend den Voreinstellungen.
freq_setup	Einstellung der Anfangs- und Endfrequenz der Messung und der Auflösungsbreite.
freq_measure	Messung der Frequenz und Amplitude des stärksten Signals.
freq_measure_next	Messung der Frequenz und Amplitude des nächsten stärksten Signals im Vergleich zu dem mit dem freq_measure Befehl gelieferten Messwert.
freq_detect_peaks	Liefert die Frequenzen und Amplituden der angegebenen Anzahl von Spitzenwerten.
freq_selftest	Löst einen Selbsttest der Oszilloskop-Karte aus und liefert den Status.

Tabelle 1

### PRINZIP EINES CMOS-RINGOSZILLATORS

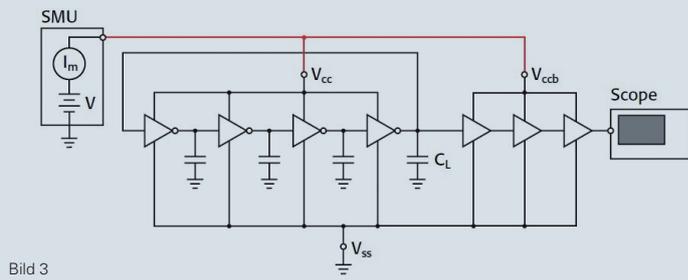


Bild 3

genauere Messwerte als ein Frequenzzähler, weil die Amplitude der Schwingungsfrequenz üblicherweise trotz dieser Verzerrungen deutlich hervortritt.

### Frequenzmesshardware

Einige Parametertester, wie das Parametertestsystem S530, unterstützen eine Charakterisierung von Ringoszillatoren mit einer Frequenzmessoption. Beim S530 ist diese Messoption Oszilloskop basierend und mit einem Instrumenteneingang der Schaltmatrix des Systems verbunden. Dies gilt ebenso für die SMUs (Source Measurement Unit) des Systems, die C-V-Einheit, den Pulsgenerator und das Digitalmultimeter (DMM). Da alle diese Instrumente mit der Schaltmatrix verbunden sind, können

die Frequenzmessungen an jedem an die Matrix angeschlossenen DUT-Pin durchgeführt werden.

Der Instrumententreiber für die Frequenzmessoption misst die Frequenz eines Ringoszillator-Signals mithilfe einer Fourier-Analyse und wandelt das Signal vom Zeitbereich in den Frequenzbereich um. Die verschiedenen Software-Befehle liefern immer zwei Messergebnisse, jeweils die Frequenz und Amplitude des stärksten Signals. Die Frequenz-Messoption kann AC-Signale mit Signalpegeln über 25 mVp-p und Frequenzen bis 20 MHz genau messen.

### Frequenzmesssoftware

Wie viele andere Frequenz-Messlösungen unterstützt die Frequenz-Messoption des S530 verschiedene Befehle (Tabelle 1).

Der Prozess einer Ringoszillatormessung wird an dem in Bild 3 dargestellten Ringoszillator verdeutlicht. Die Befehle freq\_init, freq\_setup und freq\_measure wurden bereits beschrieben und ermöglichen die Messung der Ringoszillatorfrequenz und der Signalamplitude. Bei diesem Beispiel wird angenommen, dass die Ringoszillatorfrequenz bei 10 MHz liegt, und dass die Vss, Vcc, Vccb und Ausgangs-Pads mit den Pins 1, 2, 3 und 4 verbunden sind. Zudem wird angenommen, dass dieses Bauteil eine Versorgungsspannung von 5 V und einen Trigger-Pegel von 5 V benötigt, um die Schwingung auszulösen. Bei diesem Beispiel sind für die S530-Testfolge die folgenden sieben Befehle erforderlich, um diese Messung auszuführen (Tabelle 2). (sc) ■

### BEISPIEL FÜR MESSBEFEHLE

vss_pin = 1 vcc_pin = 2 vccb_pin = 3 output_pin = 4	Definiert die DUT-Pins.
vcc = 5.0 conpin(SMU1, vcc_pin, vccb_pin, 0) conpin(vss_pin, GND, 0) conpin(SCP1A, output_pin, 0)	Definiert die Spannungen zur Versorgung und Triggerung des Ringoszillators. Stellt die Verbindungen mit dem DUT her.
forcev(SMU1, vcc)	Versorgt das Bauteil mit Spannung und triggert die Schwingung.
init_status = freq_init()	Initialisiert die Oszilloskop-Karte. Dieser Befehl ist immer erforderlich, wenn die Oszilloskop-Karte benutzt werden soll!
setup_status = freq_setup(0e6, 15e6, 1e6)	Definiert den Frequenz-Scan und die Auflösungsbreite. Da die Oszillatorfrequenz 10 MHz beträgt, ist sicherzustellen, dass diese innerhalb der Scan-Grenzen liegt. In diesem Fall wird die Anfangsfrequenz auf 0 Hz gesetzt, die Endfrequenz auf 15 MHz und die Auflösungsbreite (oder Scan-Auflösung) auf 1 MHz. Dies erlaubt eine Frequenzmessung, die auf 1 MHz genau ist.
meas_status = freq_measure(frequency, level)	Dieser Befehl führt die Messung aus und liefert die Frequenz (in Hz) und Amplitude (in Vp-p) des stärksten gefundenen Signals.

Tabelle 2

### Autor

Dave Rose ist Senior Staff Applications Engineer bei Keithley Instruments, Inc. in Cleveland, Ohio.