

Number 3140

4200-SCS 型半導体特性評価システムを用いた、 高インピーダンスデバイスの超低周波 CV 測定

イントロダクション

半導体デバイスのキャパシタンス測定は、通常、ブ リッジ式計器による AC 技術を用います。こういっ た AC 計器は、たいていは、メガヘルツから低くて も数十ヘルツの周波数範囲でキャパシタンスおよ びインピーダンス測定を行います。しかし、低周波 のキャパシタンス測定であっても、MOS キャパシタ、 薄膜トランジスタ(TFT)、MEMS 構造といったデバイ スに特有の試験パラメータを導入する必要がある ことがしばしばです。低周波 C-V 測定は、材料の低 速トラップおよびデトラップ現象の特性評価にも 用いられます。準静的(あるいは、ほぼDCの)C-V 測定が可能な計器は、しばしばこういった低周波イ ンピーダンス測定に用いられます。しかし、 4200-SCS 型半導体特性評価システムは、統合ソース メジャーユニット(SMU)の低電流測定能力を活か した新しいナローバンド技術を用いて、10mHz ~ 10Hzの範囲の指定した低周波数でC-V測定を行いま す。この新しい手法を、超低周波 C-V (Verv Low Frequency C-V, VLF C-V) 技術と呼びます。

超低周波 C-V 技術により、正確な低い試験周波数 で非常に小さなキャパシタンスを測定できます。こ の特許出願中のナローバンド正弦波技術により、イ ンピーダンスが非常に高い 1E15 Ω までのデバイス の低周波 C-V 測定を行うことができます。他の AC インピーダンス計器は、たいていはインピーダンス が 1E6 ~ 1E9 Ω までに制限されています。また、VLF C-V アプローチは、従来の準静的 C-V 測定時に発生 する恐れのあるノイズを低減します。

4200-SCS 型半導体特性評価システムには、予め設定 されている試験とユーザライブラリがあり、この超低 周波技術を用いて自動でインピーダンス測定を行いま す。このアプローチでは 4200-SCS 型の SMU を用いる ため、低電流 I-V 特性評価の要望が既にある場合に は、ハードウェアもソフトウェアも追加不要です。 このアプリケーションノートには VLF C-V 技術の説 明、DUT との接続方法、提供されるソフトウェアの 使用方法、4200-SCS 型を用いた VLF C-V 測定の最適 化について記載されています。

超低周波 C-V 技術

図1に低周波インピーダンス測定に用いるSMU構成 の簡略図を示します。この構成では、4200-SCS型シ ステムに2台のSMUを備え、4200-PA型シリーズの プリアンプをそれぞれ試験するデバイスの片側に 接続する必要があります。SMU1はAC信号を重ね合 わせたDCバイアスを出力し、電圧を測定します。 SMU2 は DC OV を供給しつつ、結果として得られる AC 電 流を測定します。



Figure 1. Connections for very low frequency C-V measurements.

基本的に、電圧を印加している間、電圧と電流の測定 が数サイクルにわたり同時に行われます。DUT のインピ ーダンスの大きさと位相は、結果として生じる電圧と 電流の正弦波の比率から、離散フーリエ変換(DFT)に より抽出します。このナローバンドの情報は周波数を 10mHz から 10Hz の間で変化させて収集し、DUT の複雑 な多素子モデルを作成します。結果として得られるパ ラメータには、インピーダンス(Z)、位相角(θ)、キ ャパシタンス(C)、伝導度(G)、抵抗(R)、リアクタ ンス(X)、誘電正接(D) があります。

超低周波法は限られた周波数範囲しか利用できないため、試験デバイス(DUT)のキャパシタンスは1pFから10nFである必要があります。表1にVLF C-Vの仕様をまとめます(全仕様については付録 A を参照してください)。

Table 1. Very Low Frequency C-V specifications.

	•
Measurement Parameters:	Cp, Gp, F, Z, θ, R, X, Cs, Rs, D, time
Frequency Range:	10mHz to 10Hz
Measurement Range:	1pF to 10nF
Typical Resolution:	3.5 digits, minimum typical 10fF
AC Signal:	10mV to 3V RMS
DC Bias:	$\pm 20V$ on the High terminal, minus the AC signal, $1\mu A$ maximum

VLF C-V 測定に必要なハードウェア

超低周波インピーダンス測定を行うには、次のハ ードウェアが必要です。

- . 4200-SCS型、ソフトウェアは KTEI 8.2 以降
- . 4200 用 SMU 2 台(4200-SMU 型または 4210-SMU 型)
- . 4200-PA 型プリアンプ2台
- . オプション: 4210-CVU型容量電圧測定ユニット (高周波 C-V 測定用)

デバイスへの接続

デバイスの VLF C-V 測定を行うには、4200-PA 型 プリアンプを備えた2台のSMU(4200-SMU型また は 4210-SMU 型)の Force HI 端子の間に DUT を接 続します(図 1、2)。非常に高いインピーダンス を測定するには非常に小さい電流を測定する必 要があるため、プリアンプのオプションが必要で す。4200-PA 型を用いると 1e12A 以下の電流が測 定できます。VLF C-V 法には小さな電流の測定が 必要であるため、SMU 付属の Triax ケーブルを用 いて接続するのが一番です。この方法では、SMU プリアンプと試験デバイス (DTU) の間にスイッ チング機器を使用することはできません。一方の SMU は DC 電圧と AC 電圧の両方を出力し(図 1、 図 2 の SMU1)、AC 電圧を測定します。もう一方の SMU は、AC 電流を測定します(図 1、図 2 の SMU2)。 AC 電流の測定に用いる SMU は、デバイスの高イン ピーダンス端子に接続します(図2)。

VLF C-V 測定に用いる MOS キャパシタ回路の例 を図2に示します。MOS キャパシタの多くは、ウ ェーハの上面にある単一のパッドしか備えてお らず、ウェーハの裏面は全ての MOS キャパシタに 対する共通接点として用います。



Figure 2. VLF C-V measurement setup for a MOScap on wafer.

SMU1 は AC+DC 電圧を出力し、チャックに接続します。 電圧を出力する SMU は、システムに含まれているソフ トウェアにおいて「smu_src」と呼ばれます。MOS キャ パシタの高インピーダンス端子はゲートであり、ソフ トウェア上で「smu_sense」と呼ばれる SMU2 に接続し ます。

KTEI ソフトウェアを使用した VLF C-V 測定

本システムのソフトウェアには、超低周波 C-V 測定を 行うために5つのユーザモジュールと1つのプロジェ クトが含まれています。表2に挙げるユーザモジュー ルは VLowFreqCV ユーザライブラリにあります。モジ ュールはプロジェクト内のユーザ試験モジュール (User Test Module, UTM) として開くことができま す。 KTEI 8.2 には、試験と結果の含まれた *VLF_CV_Examples* プロジェクトがあります(C:¥sModel 4200¥kiuser¥Projects¥_CV project)。このプロジェ クト(図 4) は、MOSFET、キャパシタ、MOS キャパシ タ、並列 RC 回路を構成する試験デバイスの試験とデ ータを表しています。プロジェクトの試験を実行する には「VLF C-V によるデバイスの試験」を参照してく ださい。

Table	2.	User	Modules	in	the	VLowFreqCV	User	Library.
-------	----	------	---------	----	-----	------------	------	----------

User Module	Description	
vlfcv_measure	Measures C, G, Z, theta, R+jX at a fixed DC bias	
vlfcv_measure_sweep_bias	Measures C, G, Z, theta, R+jX, time while sweeping the DC voltage	
vlfcv_measure_sweep_bias_fixed_range	Measures C, G, Z, theta, R+jX, time while sweeping the DC voltage. Measurements are made on a fixed current range which is determined by the expected_C, expected_R and maximum DC voltage.	
vlfcv_measure_sweep_freq	Measures C, G, Z, theta, R+jX, time at multiple user-specified test frequencies	
vlfcv_measure_sweep_time	Measures C, G, Z, theta, R+jX, time as a function of time	

新しいモジュールをプロジェクトに追加すると、いく つかのパラメータを入力する必要があります。パラメ ータの多くは4つの全てのモジュールで共通していま すが、モジュールごとに固有のパラメータもありま す。図3に、全てのユーザ定義パラメータを表示した *vlfcv_measure_sweep_bias* ユーザモジュールの Definition タブを示します。全てのモジュールに対し て調整可能なパラメータを表 3~6 にまとめます。

Formula	tor User Libraries	VLowFreqCV			2
Dulput V	shies User Modules	vilov_measure	_seeep_biac_fac	ed_range	2
1	Name	In/Out	Туре	Value	
1	smu_src	Input	CHAR P	SMU1	
2	smu_sense	Input	CHAR P	SMU2	
3	frequency	Input	DOUBLE	1	
4	expected_C	Input	DOUBLE	0.000000++000	
5	expected_R	Input	DOUBLE	1.000000e+012	
6	acv_RMS	Input	DOUBLE	3.000000e-001	
1	dov_bias_start	input	DOUBLE	-4.000000e+000	
8	dcv_bias_stop	Input	DOUBLE	4.000000e+000	
9	dev_bias_step	Input.	DOUBLE	2.000000e-001	
10	status	Output	INT P		

Figure 3. Definition tab of vlfcv_measure_sweep_bias user module.

電流レンジを決定する予測されるキャパシタンス (expected_C) と予測される 並列抵抗 (expected_R)の値が測定に用いられます。ただ し、通常は特定の値を選択する必要はなく、 expected_C = 0 と設定することで、使用する C と R を試験ルーチンが見積もります。

最も単純なモジュールは vlfcv_measure で、 VLF_CV_Examples プロジェクトのキャパシタ試験 VLF_cap_one_point で用いられます。この試験は単 ーの測定を行います。このモジュールではスイー プをしませんが、全ての試験パラメータを制御で きます (表 3)。ただし、可能な最大電圧は AC 電圧 と DC 電圧の両方を組み合わせたものです。負の最 大 DC バイアス電圧 = $-20 + (acv_RMS * \sqrt{2})$ 、 正の最大 DC バイアス電圧 = $+20 - (acv_RMS * \sqrt{2})$ 、 正の最大 DC バイアス電圧 = $+20 - (acv_RMS * \sqrt{2})$ 、 この見積もり値を自動検出させます。

Table 3. Adjustable paramet	ers in vlfcv	measure U	ser Module
-----------------------------	--------------	-----------	------------

Parameter	Range	Description
smu_src	SMUn	SMU to source DC + AC voltage waveform and measure AC volts: SMU1, SMU2, SMU3
smu_sense	SMUn	SMU to measure AC current: SMU1, SMU2, SMU3
frequency	0.01 to 10	Test frequency in hertz, from 0.01 to 10.
Expected_C	1e-12 to 1e-8	Estimate of DUT capacitance in Farads, use 0 for auto-detect of DUT C and R.
Expected_R 1e6 to 1e14		Estimate of resistance parallel to DUT, in ohms
acv_RMS	30e-3 to 3	AC drive voltage in volts RMS
dcv_bias	± 20 less (acv_RMS * $\sqrt{2}$)	The DC voltage applied to the device

Table 4. Adjustable parameters in the vlfcv_measure_sweep_bias_fixed_ range User Modules.

Parameter	Range	Description
smu_src	SMUn	SMU to source DC + AC voltage waveform and measure AC volts: SMU1, SMU2, SMU3
smu_sense	SMUn	SMU to measure AC current: SMU1, SMU2, SMU3
frequency	0.01 to 10	Test frequency in hertz, from 0.01 to 10.
Expected_C	1e-12 to 1e-8	Estimate of DUT capacitance in Farads, use 0 for auto-detect of DUT C and R.
Expected_R	1еб то 1е14	Estimate of resistance parallel to DUT, in ohms
acv_RMS	30e-3 to 3	AC drive voltage in volts RMS
dcv_start	± 20 less (acv_RMS * $\sqrt{2}$)	Starting DC voltage of the sweep
dcv_stop	± 20 less (acv_RMS * $\sqrt{2}$)	Stop DC voltage of the sweep
dcv_step	± 20 less (acv_RMS * $\sqrt{2}$)	Step size of the DC voltage. Number of steps limited to 512.

Table 5. Adjustable parameters in the *vlfcv_measure_sweep_freq* User Module.

Parameter	Range	Description
smu_src	SMUn	SMU to source DC + AC voltage waveform and measure AC volts: SMU1, SMU2, SMU3
smu_sense	SMUn	SMU to measure AC current: SMU1, SMU2, SMU3
frequency	0.01 to 10	Array of Test frequencies in Hertz. Maximum number of entries limited to 512, from 0.01 to 10.
Expected_C	1e-12 to 1e-8	Estimate of DUT capacitance in Farads, use 0 for auto-detect of DUT C and R.
Expected_R	1e6 to 1e14	Estimate of resistance parallel to DUT, in ohms
acv_RMS	30e-3 to 3	AC drive voltage in volts RMS
dcv_bias	± 20 less (acv_RMS * $\sqrt{2}$)	The DC Voltage applied to the device

Table 6. Adjustable parameters in the *vlfcv_measure_sweep_time* User Module.

Parameter	Range	Description
smu_src	SMUn	SMU to source DC + AC voltage waveform and measure AC volts: SMU1, SMU2, SMU3
smu_sense	SMUn	SMU to measure AC current: : SMU1, SMU2, SMU3
frequency	0.01 to 10	Test frequency in Hertz, from 0.01 to 10.
expected_C	1e-12 to 1e-8	Estimate of DUT capacitance in Farads, use 0 for auto-detect of DUT C and R.
expected_R	1e6 to 1e14	Estimate of resistance parallel to DUT, in ohms
acv_RMS	30e-3 to 3	AC drive voltage in volts RMS
dcv_bias	± 20 less (acv_RMS * $\sqrt{2}$)	The DC Voltage applied to the device
num_points	1 to 512	Number of points to take as a function of time

試験を実行すると、いくつかの試験パラメータが Sheet タブに返され、それらは. xls ファイルとして保 存できます。これらの試験パラメータは、Graph タブ にもプロットできます。表7に、返される試験パラメ ータとその説明をまとめます。これら試験パラメータ の戻り値から、Formulatorの数学関数を用いて、デバ イスの特性をさらに抽出できます。ただし、試験は代 表的な全ての C-V 測定パラメータを返します。例えば、 試験デバイスの応答が並列モデル(Cp-Gp)にのみ当 てはまる場合でも、Cp-Gp と Cs-Rs の両方は必ず返さ れます。

Table 7. Measurements returned for the modules in the VLowFreqCV library.

Returned Test		
Parameters	Description	
Status	Error code from test module execution. Definitions of the returned errors are listed at the bottom of the Definition tab in the UTM Description.	
times	Calculated time difference between readings.	
dcv_bias	Programmed DC voltage applied to the device.	
meas_Cp Measured capacitance in parallel model (Cp-Gp).		
meas_Gp Measured conductance in parallel model (Cp-Gp)		
meas_freq	Measured test frequency.	
meas_Z	Measured impedance (Z-theta).	
meas_Theta	Measured phase angle in degrees (Z-theta).	
meas_R	Real component of the impedance (R + jX).	
meas_X Imaginary component of the impedance (R + jX).		
meas_Cs	Measured AC capacitance in series model (Cs-Rs).	
meas_Rs	Measured resistance in series model (Cs-Rs).	
meas_D	Calculated dissipation factor, D.	
meas_irange	as_irange The SMU current range that the measurement was taken.	

VLF_CV_Examples プロジェクトの使用

KTEI 8.2 に含まれている VLF_CV_Examples プロ ジェクトには、さまざまなデバイスの VLF C-V 測 定の用例があります。このプロジェクトは、4200 プロジェクトのディレクトリの「_CV」フォルダに あります (c:¥S4200¥projects¥_CV)。プロジェク トには、VLowFreqCV ライブラリのユーザモジュー ルを利用する UTM がいくつかあります。図 4 に VLF_CV_Examples プロジェクトのプロジェクトツ リーを示します。プロジェクトには、VLF C-V 技術 を用いた低周波 C-V 測定と 4210-CVU 型容量電圧測 定ユニットを用いた高周波 C-V 測定の両方の試験 が含まれます。また、特性が未知の試験デバイス に対してリーク電流の初期スクリーニングを行う ための I-V 試験が 1 つあります。



Figure 4. Project tree of VLF_CV_Examples project

プロジェクトには特定のデバイス向けの試験もあ りますが、VLF C-V のユーザモジュールはさまざま なデバイスに使用できます。このプロジェクトで 測定する特有のデバイスには、n型 MOSFET (ゲー トからソース/ドレイン/バルク)、キャパシタ、MOS キャパシタ、並列 RC 回路があります。

MOSFET

 $VLF_CV_Examples$ プロジェクトにはn型FETデバイス 用の試験が3つあり、UTMが2つとITMが1つです。図 6に、ゲート端子とドレイン/ソース/バルク端子を結合 した点との間で測定するn型MOSFET(図5)に対して、 超低周波 C-V スイープを発生させた結果を示します。 このC-V スイープは $VLF_nmosfet_Vsweep$ UTM にありま す。プロジェクトには、周波数の関数としてキャパシ タンスを測定する試験($VLF_nmostfet_freq_sweep$)に 加え、高周波 C-V 試験($CVU_nmostfet_freq_sweep$ 、 4210-CVU型と共に使用)が含まれています。



Figure 5. Connection for MOSFET, with the drain-source-bulk tied together and connected to SMU2 (smu_sense).



Figure 6. VLF C-V Sweep of an n-MOSFET measured between the gate to drain/source/bulk. This graph is from the VLF_nmosfet_Vsweep test (user module vlfcv_measure_sweep_bias_fixed_range).

キャパシタ

VLF C-V 法を用いると、1pF から 10nF の範囲でキャ パシタを測定できます。プロジェクトには 4 つの UTM があります (図 7)。プロジェクトの *VLF_cap_time* UTM の用例では、時間の関数として 1pF のリファレンスキ ャパシタのキャパシタンスを測定しています (図 10)。 電圧バイアスをスイープさせて 1pF のキャパシタを測 定した結果を図 9 に示します。キャパシタンス測定/ イズレベルを±5e-15F 未満に抑えて、1Hz の試験周波 数で小さなキャパシタンスを測定しました。ノイズと 平均キャパシタンスの読み取りを容易にするために Formulator を使用できます。



Figure 7. Capacitor tests in the VLF_CV_Examples project.



Figure 8. VLF C-V connections for the capacitor. If the test device is on wafer, see the MOSCap diagram (Figure 2) for connections.



capacitor. This graph is from the VLF_cap_Vsweep UTM (vlfcv_measure_ sweep_bias_fixed_range user module).

MOS キャパシタ

MOS キャパシタデバイスには 2 つの試験があり ます。両者ともDC バイアススイープですが、一方 は VLF C-V 試験 DC バイアス電圧スイープ (*VLF_moscap_Vsweep*)のSMUを用い、もう一方は 高周波試験 (CVU_moscap_Vsweep) に 4210-CVU 型 を用います。1Hz の試験周波数で発生させた MOS キャパシタの VLF C-F スイープの例を図 11 に示し ます。この試験は室温のチャック上で行いました。 このスイープは、プロジェクトの VLF_ *moscap_Vsweep* UTM を実行した結果です。低周波 C-V データから MOS キャパシタの特性を判断でき ます。ビルトインされた数学関数は、C-V データか らこれらデバイスの解析を行うのに便利です。図2 に MOS キャパシタの接続図を示します。ここで、 低電流を測定する SMU はチャックに接続されてい ません。感度の高い(つまり低電流測定の)計器 をチャックに接続すると、測定にノイズが多くの る結果となります。



Figure 10. Results of C-t measurements of nominal 1pF reference capacitor, using VLF capacitance technique at a test frequency of 1Hz. This graph is from the VLF_cap_time UTM (user module vlfcv_measure_sweep_time).



Figure 11. A VLF C-V sweep of a MOScap at 1Hz created using the VLF_CV_ Examples project. This graph is from the VLF_moscap_Vsweep UTM (vlfcv_ measure_sweep_bias_fixed_range user module).

MOS キャパシタの VLF C-V 測定を行う UTM に加え、プロ ジェクトには MOS キャパシタの高周波 C-V を測定する ITM が含まれています。高周波 C-V の測定には 4210-CVU 型を使用します。4210-CVU 型は試験周波数範囲が 1kHz ~ 10MHz であり、データの例は 100kHz で取得したもの です。

低周波と高周波の両方の C-V 測定結果を 1 つのグラ フ上で比較するために、一方の試験モジュールからも うー方へデータをコピーできます。一方の試験モジュ ールの Sheet で C-V 測定値を選択してコピーし、もう 一方の試験モジュールの CALC Sheet の列にペーストし てください。CALC Sheet のデータは、グラフ上のプロ ットから選択できます。そのためには必ず、Graph Definition ウィンドウの「Enable Multiple Xs」ボッ クスにチェックを入れてください。低周波および高周 波 C-V 測定値の両方を 1 つのグラフに表した例を図 12 に示します。



Figure 12. High and low frequency C-V curves on one graph. 並列 RC デバイス

デバイスのいくつかは、並列 RC 回路(接続図は 図13を参照)としてモデル化できます。2素子モ デルでは、並列抵抗はデバイスの DC 電流リークを 表します。ただし、非線形デバイスはこの単純2 素子モデルでは表すことができません。その場合、 非線形デバイスの DC 抵抗は AC 抵抗と大きく異な ります。RC デバイスの試験は、VLF C-V の DC バイ アススイープ用 UTM (VLF 1nf 1gohm) と ITM Vス イープ (SMU_Vsweep) の2つがあります。図14に、 1.5nF と 1GΩの並列回路を低周波スイープした結 果を示します。過度のリーク電流があり、電流が その特定の RC 回路の最大電流範囲を超えると、誤 差を多く含む結果となります。未知の DUT の DC リ ーク電流を求めるには、「VLF C-V によるデバイス の試験」のセクションに説明されているように、 ITM の SMU_Vsweep を用います。最適な結果を得る ためには、本アプリケーションノートの次のセク ションに記述されている情報を参照してくださ い。



Figure 13. Connection diagram for parallel RC test device.



Figure 14. Results of measuring parallel RC combination of 1.5nF capacitor and $1G\Omega$ resistor. This graph is from the VLF_InF_Igohm UTM (vlfcv_measure_sweep_bias_fixed_range user module).

VLF C-V によるデバイスの試験

誘電正接

試験するデバイスの並列抵抗は、DC 電流を付加的に 流して測定精度を損なうものであるため、キャパシタ ンスの測定品質を決定付ける重要な要素です。与えら れた周波数での並列抵抗は、特に表記のない限り D、 つまり誘電正接で表されます。ここに単純な並列モデ ルでの関係式を示します。

D = リアクタンス/抵抗 = $1/\omega RC = 1/2\pi RC$

- ここで、
- F: 試験周波数、Hz
- R: 試験デバイスの並列抵抗、Ω
- C: 試験デバイスのキャパシタンス、F

ー連の D 値における測定性能の目安を表 8 に示しま す。表に示すように、D 値が高くなるほど得られる C 測定の精度が損なわれます。

Table 8. VLF C-V typical accuracy vs. D and current measure range for the sense SMU.

	0.01 D	0.1 D	1 D	10 D
1 µA	0.6 %	1.6 %	Not Recommended	Not Recommended
100 nA	1.4 %	10 %	Not Recommended	Not Recommended
10 nA	0.7 %	4 %	6 %	Not Recommended
1 nA	0.4 %	2 %	2.6 %	3 %
100 pA	0.8 %	0.6 %	0.6 %	2 %

「非推奨」は、誤差の代表値が>10%であることを意味 します。特定のキャパシタンスおよび周波数の値につ いての詳細は、付録 A の「VLF C-V の代表的仕様」を 参照してください。

デバイスが純粋な容量性を有している場合(リーク電流が非常に低くほぼゼロ、D<0.1)、図 8(あるいは DUT がウェーハ上にある場合は図 2)に示すように DUT をそのまま接続します。接続後に希望する試験を実行 します。ただし、デバイスが新しいタイプである場合 や電気的特性が未知である場合は、次の手順に従いま す。この手順には、並列モデル(図 13)を用いて未知 の試験デバイスに妥当なパラメータ値を決定するガ イドラインが示されています。 また、結果を評価する目安も含まれています。

セットアップと接続

- 図2に示すようにDUTを接続します。同梱の Triax ケーブルを直接接続しなければなりま せん。スイッチングや4225-RPMを、SMUプリ アンプからDUTへのケーブル経路に配置する ことができません。VLF C-V 法では低電流測 定を利用しますので、適切なシールドとガー ドを使用するようにしてください。Triax ケ ーブルを使用し、シールドやガードの施され ていないケーブルの引き回しは最小限とし、 可能であれば排除します。ウェーハ上で測定 する場合は、Triax プローブマニピュレータ とガードしたプローブアームを使用します。 測定にノイズがのらないよう、電流測定 SMU はチャックに接続しません。
- VLF_CV_Examples プロジェクトを開きます (c:¥S4200¥projects¥_CV)。File | Save Project As メニューオプションから、名前を 変えてそのプロジェクトを保存し、新しいバ ージョンを作成します。

DUT 特性の初期スクリーニング

- RCdevice ノードにある SMU の I-V スイープ、 SMU_Vsweep を選択します。VLF C-V 試験で希 望する最小、最大 DC バイアス電圧に合うよ う、電圧スイープの開始値と終了値を選択し ます。この試験は、再現性のある高精度の結 果を得るのにDUT のリークが大きすぎないか どうかを決定するのに役立ちます。
- 4. SMU_Vsweep試験を実行します。グラフまたは Sheet で結果を確認します。最適な結果を得 るために、最大電流は<±1µAとすべきです。 電流が>±1µAである場合は、電流が<±1µA となるまでバイアス電圧を下げます。以降の 試験のために、これらの引き下げた電圧値を メモしてください。この手順で後述します が、これらの電圧値は再調整が必要となる場 合があります。
- 次に、プロジェクトツリーのキャパシタデバ イスから、VLF_cap_freq_sweep 試験を選択し ます。希望する試験周波数を入力します。ち ょうど5~10点で希望する周波数範囲を区分 するようにしてください。試験周波数が1つ だけである場合は、代わりに単一点での試験 VLF_cap_one_pointを使用します。デフォル トの expected_C = 0 と expected_R = 1e12 を使用します。acv_RMS = 0.3V、dcv_bias = 0.0V とします。この試験は、DUT の誘電正接 Dを求めるのに役立ちます。

6. VLF_cap_freq_sweep 試験を実行します。結果を Sheet で確認します。meas_D 列の値を確認しま す。|meas_D| <1 の場合は、SMU_Vsweep 試験 で<±1µA となった試験周波数と DC バイアス値 に対して、結果が妥当です。|meas_D| <10 の場合 は、dcv_bias = 0V に対して結果が妥当であるは ずです。|meas_D| >10 の場合、この現在の VLF C-V を実施しても許容できる結果が得られないか、か なり誤差の大きい結果となる恐れがあります(表 8 を参照)。dcv_bias = 0 にて D 値が小さく値が 妥当である場合は、DC バイアスを増すに従って誤 差が大きくなる恐れがあります。

DUT の VLF C-V 特性評価

- 希望する試験を設定します。例えば、バイアスス イープ VLF_cap_Vsweep(表 4)または周波数スイ ープ VLF_cap_freq_sweep(表 5)です。前ステッ プで決定した電圧値を使用します。前述のとお り、expected_C = 0とすることでCとRの両方の 値を自動検出できます。他のパラメータについて は、対応する試験の表(表 3~6)の説明に従って ください。
- 試験を実行または追加します。試験を実行すると (緑色の三角形)、それまでの試験データは破棄 されます。追加ボタン(緑色の実行アイコンの右 隣にある黄色の三角形)は古いデータを保持しま すので、複数の試験を比較できます。各追加試験 で使用した試験パラメータは Sheet の Settings タブにあります。未知または新規デバイスについ ては、測定値を確認します。Sheet にあるデータ とプロットされた値を評価し、結果が妥当である ことを確認してください。
 - a. プロットされたデータを確認し、全体的な形 と Y 軸の値に注目します。
 - b. 試験から返されたステータスをチェックします。Status = 0 はルーチンで何のエラーも検出されなかったことを意味しますが、それでもデータの妥当性は評価しなければなりませんので、次のステップに進んでください。ゼロ以外のステータス値があった場合には、「表9 エラーコード」を参照して内容とトラブルシューティングの推奨策を確認します。

- Sheet にて、使用された電流測定レンジを c. チェックします。Sheet の右側にある meas_irange 列には、各点に使用した電 流測定レンジを表示しています。このレ ンジが 1e-6 (1uA)以下である場合は、次 のステップに進んでください。測定レン ジ値のいずれかが 10e-6 (10µA)以上であ る場合は、その行の結果は疑わしいです。 DC バイアス電圧を変更して、試験に使用 する電流測定レンジを小さくします。例 えば、電圧バイアススイープを実行する 場合は、使用する開始電圧と終了電圧を 下げ (例えば±5Vから±2Vに)、そして試 験を再実行します。新しい試験で使用し た meas_irange が 1e-6 (1µA)以下である ことを確認してから、前回の 10µA のレ ンジで取得した結果と比較します。一般 に、1µA レンジの結果のほうが、より正 確です。
- d. Y 軸スケールの最大が 7E22 または 70E21 である場合、試験の測定値の 1 つ以上が オーバーフローしています。Sheet の meas_Cp 列のデータを確認し、70E21 また は 7E22 のエントリを探します。オーバー フローの原因は、いくつかあります。
- i. オーバーフロー値が試験の開始時と終了 時だけであるなら、スイープ値の範囲を狭 めてオーバーフロー値を生じるスイープ 点を除外します。もうひとつの選択肢とし て、expected_Cと expected_R に適当な値 を指定します。expected_C と expected_R の値を選択する前に、これらの値が試験に どのように影響するかを簡単に説明させ てください。meas Cp 列のほとんどまたは 全てがオーバーフロー値である場合、その 試験に不適切な測定レンジが使用されて いた可能性があります。これは、試験に使 用した電流測定レンジが、試験パラメータ と DUT に対して小さすぎたことを意味し ます。試験に使用した測定レンジは、Sheet の meas irange に表示されています。 sense SMU の電流測定レンジは、 expected_Cと expected_Rの値を基にして います。
- ii.試験の電流測定レンジを変更するには、 meas_Cp値より大きい expected_C を与えま す。meas_Cp列の値を確認し、オーバーフロ ーしていない代表的な値を選んで expected_C = 2 * (選択した meas_Cp)の計 算に使用します。expected_R の値を選択す るには、meas_Gp列を確認して代表値を選 び、expected_R = 1/(2* (選択した meas_Gp)) を設定します。

- e. 1 つ以上の meas_Cp 値が負である場合、
 - i. DUT の接続が適切であることを確認します。
 - D が大きすぎるかもしれません。あるいは、DC 電流リークがキャパシタンスと比較して大きす ぎます。
 - Sheet の meas_D 値と meas_irange 値を確認します。D > ~10 であったり、meas_irange ≥ 10nA であったりする場合は、結果に大きな誤差が含まれる恐れがあります。
 - 「表 8」を見てください。meas_irange 列の電流 測定レンジを表 8 の対応する行と比較します。D 値が大きいほど試験が困難です。
 - 次の調整を1つ以上試してください。 a) DC バ イアス電圧を下げる。 b) acv_RMS = 0.3V の値 を増加する。 c) 試験周波数を下げる。
 - meas_Cp 値にノイズがのっているか一貫性がな いように思われる場合は、同一のパラメータ値 で何回か試験を追加し、データを確認します。
 各実行回で結果が異なる場合は、システムがノ イズフロアで、またはそれに近いところで動作 していることを示しています。それは、試験デ バイスのキャパシタンス値が小さいか、試験デ バイスのD値が大きいという意味です「(表 8)」。
 - 5. これらのどの調整をしても妥当な結果が出ない 場合は、可能であれば 4210- CVU を用いてより 高い周波数で C-V 試験を試みてください。
- さらに試験を行います。例えば、キャパシタンスの時間変化(VLF_cap_time 試験)や付加的な試験周波数における DC バイアスのスイープなどです。データは、Sheet の Save As ボタン、あるいは Graph タブの右上角にある Graph Settings ボタンをクリックして Save As を選択することにより、.xls または.csv のファイル形式で保存できることを覚えておいてください。

Table 9. VLF C-V error codes and descriptions.

Error Code	Description	Explanation and Troubleshooting Recommendation	
0	Test executed with no errors	No software or operational errors were detected.	
-16001	smu_src is out of range	Specified SMU is not available in the chassis. For example, if SMU5 is entered, but there are only four SMUs in the 4200 chassis, then this error will occur. Modify SMU string to an available SMU number: SMU1, SMU2, SMU3	
-16002	smu_sense is out of range	Specified SMU is not available in the chassis. For example, if SMU5 is entered, but there are only four SMUs in the 4200 chassis, then this error will occur. Modify SMU1 string to an available SMU number: SMU1, SMU2, SMU3	
-16003	Frequency is out of range.	Ensure that the test frequency is within the range of 10mHz to 10Hz, inclusive	
-16004	acv_RMS is out of range	Make sure that the RMS voltage is within the range of 0.01V to 3.0V, inclusive	
-16005	dcv_bias is out of range	Modify the DC or AC voltage bias to ensure that the $\pm 20V$ maximum is not exceeded. Maximum negative voltage $= -20 + (AC \text{ voltage } *)$ Maximum positive bias voltage $= 20 - (AC \text{ voltage } \sqrt{2})$	
-16006	hold_time is out of range	This error is unused for the VLowFreqCV routines.	
-16007	delay_time is out of range	This error is unused for the VLowFreqCV routines.	
-16008	Too few points per period	This error indicates that the test was aborted by the operator.	
-16009	Output array sizes are not equal, or are larger than 4096.	Make sure all output array sizes are the same value and are not greater than 4096.	
-16010	Over range indication detected.	Current measurement over-range occurred and returned values are set to 7E22 (70E21). Troubleshooting: Review the value in the meas_CP column of the Sheet, looking for the overflow values (7E22 or 70E21). Follow the process given in <u>step 8d</u> .	
-16011	Results array size is less than the number of points in the sweep.	Increase the size of all output arrays to be equal to the number of points in the sweep.	
-16012	Could not collect enough data to perform measurement.	Cannot estimate expected_C or expected_R. This error occurs only when expected_C = 0. Input a estimated non-zero value for expected_C. Review the meas_Cp values in the Sheet for non-overflow values. Set estimated_C = $2 *$ non- overflow meas_Cp	
-16013	Unable to allocate memory.	This error is unused for the VLowFreqCV routines.	
-16014	Current range is out of range.	This error is unused for the VLowFreqCV routines.	
-16015	Irange_sense and expected_C cannot be 0 at the same time	This error is unused for the VLowFreqCV routines.	
-16016	Expected_C is out of range	Expected_C must be 0 (auto-detect C) or between 1E-15 and 1E-3, inclusive.	
-16017	This test requires preamp is connected to smu_sense	Make sure preamp is connected to each SMU used in the test. If reconnecting preamps, run run KCON and choose "Update PreAmp and RPM Configuration" in the Tools menu.	
-16018	Invalid start, stop, step DC bias sweep values.	Correct the values for the voltage bias sweep. dcv_bias_step cannot be 0, unless dcv_bias_start = dcv_bias_stop. If dcv_bias_start = dcv_bias_ stop, then dcv_bias_step must = 0.	
-16019	Output array sizes are less than number of points in sweep.	Increase the size of all output arrays to be equal to the number of points in the sweep.	
-16020	Invalid combination of start, stop, step dc bias sweep values.	Correct the values for the voltage bias sweep. dv_{bias} step cannot be 0, unless dv_{bias} start $= dv_{bias}$ stop. If dv_{bias} start $= dv_{bias}$ u_{top} then dv_{tbias} stap $u_{tbas} = 0$.	

最適な測定を行うためのガイドラインと、トラブルシ ューティングのテクニック

SMUを用いて高インピーダンスの超低周波C-V測定を 行うには、測定精度を最大限にするためにさまざまな テクニックを用いなければなりません。これらのテク ニックには、低電流測定のプラクティスを実践するこ とや、ソフトウェアで適切な設定を選択することなど が挙げられます。

低電流測定技術の実践

超低周波インピーダンス測定法にはピコアンペアからフェムトアンペアの電流レベルの測定が含まれるため、低電流測定技術を実践しなければなりません。 4200-SCS型に同梱されているTriaxケーブルを使用します。このTriaxケーブルはシールドされ、必要に応じてガードして測定することができます。静電干渉によるノイズを低減するため、デバイスは必ず金属筐体の中に置いてシールドし、シールドは4200-SCSのForce L0 端子に接続します。低電流測定技術の詳細情報は、 KeithleyのLow Level Measurements Handbookから得られます。また、TriaxケーブルはDUTまたはプローブ ピンに直接接続するようにし、SMU信号経路にはスイッ チングマトリックスや4225-RPMは一切使用してはなりません。

適切な「expected_C」と「expected_R」の値の選択

ほとんどの場合で、expected_Cを0とすべきで、 expected R = 1E12 とします(両者ともデフォルト値)。 expected_C = 0 のとき、VLF C-V ルーチンは試験する デバイスのCとRの両方の見積もり値を求めます。見 積もったRとCの値は、SMUの測定レンジを決定します。 これらの値の選択が不適切であると、測定誤差あるい は測定レンジのオーバーフローが生じる結果となる場 合があります(詳細は表9のエラーコード-16010を参 照)。しかし、Dの大きいデバイスやDCバイアスの大き い試験では、expected_C にゼロ以外のキャパシタンス 見積もり値を入力することで、より良い結果をもたら す場合もあります。expected_Cの値を計算するには、 meas_Cp 列のオーバーフローしていない値に2を乗じ、 この値を試験で定義する expected_C に入力します。 デバイスに現在の VLF C-V アプローチを適用できるか どうかを判断するには、DUT の DC 抵抗を測定し、 VLF CV Examples プロジェクトのプロジェクトツリー の RCdevice にある SMU_Vsweep 試験を用いて I-V 試験 を行います。インピーダンス測定に使用する予定の I-V スイープと同じ試験電圧を用いてください。加えて、 単一測定 (VLF cap one point 試験) または周波数スイ ープ (VLF cap freq sweep 試験)を 0Vの DC バイアス で行うことにより、デバイスの D を求めます。詳細は 「VLF C-V によるデバイスの試験」と表8を参照してく ださい。

結論

4200-SCS 型には、SMU とプリアンプを用いた超低 周波 C-V 測定を行うツールがあります。この手法 により、10mHz から 10Hz の範囲の正確な試験周波 数で低キャパシタンス測定を行うことができま す。システムに含まれている KTEI 8.2 ソフトウェ アを用いると、低インピーダンス測定を容易に実 行でき、DUT に関する重要なパラメータを抽出でき ます。4210-CVU 型容量電圧測定ユニットと 4200-SCS 型を組み合わせると、単一のシステムで 高周波と低周波の両方のインピーダンス測定を行 えます。

付録 A

超低周波 C-V の代表的仕様

測定機能

測定パラメータ: Cp+Gp、Cp+D、Cs、Rs+Cs、R+jX、 Z、θ、周波数、電圧、時間 **コネクタタイプ**: Triax (メス) コネクタ x2

試験信号

周波数範囲: 10mHz~10Hz 最小分解能: 10mHz 信号出力レベル範囲: 10mV RMS ~ 3V RMS

- DC バイアス機能
 - DC 電圧バイアス: 範囲: ±20V1 分解能: 0.5mV 精度: ±(0.02% + 1.5mV) 最大 DC 電流: 1 µ A

スイープ特性:

利用可能な試験タイプ:線形バイアス電圧スイー プ(増加または減少)、周波数リストスイープ、サ ンプリング(時間)、単一点 最大測定点数: 512.

含まれているライブラリ

- . C-V、C-t、C-fモジュール
- 含まれているプロジェクトには、次の測定があります。
- キャパシタ
- MOS キャパシタ
- n型 MOSFET

必要なハードウェアとソフトウェア . 4200-SCS

- . SMU 2 台 (4200-SMU または 4210-SMU)、 プリアンプ (4200-PA) 付き
- . KTEI 8.2 以降

TYPICAL MEASUREMENT ACCURACY²

Frequency	Measured Capacitance	C Accuracy @ 300 mV rms ¹	C Accuracy @ 30 mV rms ¹
10 Hz	1 pF	10%	13%
	10 pF	10%	10%
	100 pF	5%	5%
	1 nF	5%	9%
	10 nF	5%	5%
1 Hz	1 pF	2%	2%
	10 pF	1%	2%
	100 pF	2%	1%
	1 nF	2%	1%
	10 nF	2%	2%
100 mHz	1 pF	2%	3%
	10 pF	2%	2%
	100 pF	2%	2%
	1 nF	1%	2%
	10 nF	2%	1%
10 mHz	1 pF	5%	10%
	10 pF	1%	2%
	100 pF	1%	1%
	1 nF	1%	1%
	10 nF	2%	2%

注記

- ±20Vの最大値には、DCバイアスとAC試験信号のピーク電圧を含みます。負の最大バイアス電圧
 = -20 + (AC電圧 * √_2)、正の最大バイアス 電圧 = 20 - (AC電圧 * √_2)
- 試験デバイスは、誘電正接 DX <0.1 でなければなりません。全てのデータは、DC バイアス電圧 = 0Vの場合です。

全ての仕様は、23°C±5°C、校正後1年以内、相対 湿度5%~60%、30分の暖機運転後の条件で適用するも のです。



ケースレーインスツルメンツ ■〒108-6106 ■東京都港区港南2-15-2 ■ 品川インターシティB棟6階 ■TEL:03-6714-3070 ■ FAX:03-6714-3080

Web site: www.keithley.jp Email : info.jp@keithley.com

© Copyright 2011 Keithley Instruments, Inc