

V-Ramp法/J-Ramp法による 酸化膜の信頼性評価

Agilent 4155C/4156C
半導体パラメータ・アナライザ

アプリケーション・ノート 4156-8



Agilent Technologies
Innovating the HP Way

はじめに

LSIの微細化が進むにつれ、ゲート酸化膜の面積や厚さも縮小する傾向にあり、信頼度の高い薄い酸化膜形成がより一層重要になります。MOSデバイスの酸化膜の欠陥をいかに少なくするかは、LSI全体の信頼性に大きな影響を与えます。このため、酸化膜の評価は非常に重要です。V-Ramp法、J-Ramp法は酸化膜の信頼性を評価する試験方法で、TDB法に比べ製造工程に素早いフィードバックを与えられます。このアプリケーション・ノートでは、JEDEC Standard No. 35に基づき、Agilent 4155C/4156C 半導体パラメータ・アナライザを使用したV-Ramp法とJ-Ramp法の測定方法をご紹介します。

V-Ramp法、J-Ramp法とは

V-Ramp法、J-Ramp法はいずれもWafer Level Reliability (WLR) テストと呼ばれる試験法の1つです。V-Ramp法では、酸化膜が破壊されるまで印加する電圧を時間に対して直線的に増加させていきます。これに対して、J-Ramp法では酸化膜に電流を印加し、その電流を時間に対して対数的に増やしていきます。これらの試験では、破壊までに酸化膜に流れた総電荷量(Q_{bd})と破壊電圧(V_{bd})が結果として求まります。

通常は多量の試料からこれらのパラメータを抽出し、累積破壊電圧分布および累積破壊電荷量分布として確率紙にプロットします。この分布が理想的な形に近づくように、製造工程を改善していく必要があります。

一般的にV-Ramp法は比較的低めの破壊電圧を検出するのに適し、半導体集積回路全体のような広い酸化膜に使用されます。例として、ロジック、MPUなどのデバイスに使用される酸化膜の評価に用いられます。一方、J-Ramp法は比較的高めの破壊電圧を検出するのに適し、スクライプ・ラインに作り込まれた小面積の酸化膜に使用されます。例として、EPROM、フラッシュ・メモリなどのデバイスに使用される酸化膜の評価に用いられます。

V-Ramp法の手順

図1にV-Ramp法の手順をフローチャートで示します。

はじめに実使用時の電圧(V_{use})を試料に印加してリーク電流を測り、酸化膜が初期不良でないか調べます。

次に、階段波またはランプ波状の電圧を試料に印加し、電流を測定しま

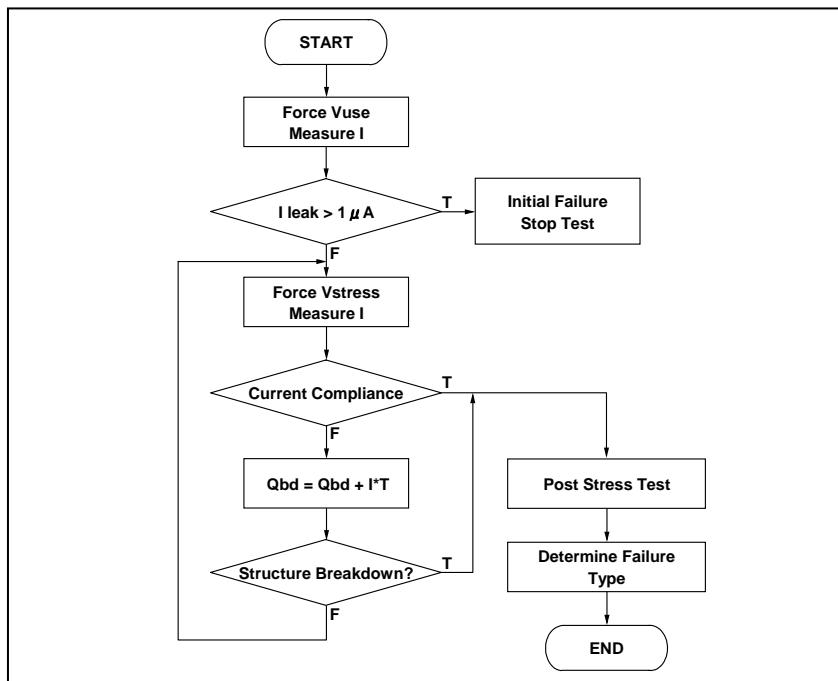


図 1. V-Ramp 法のフローチャート

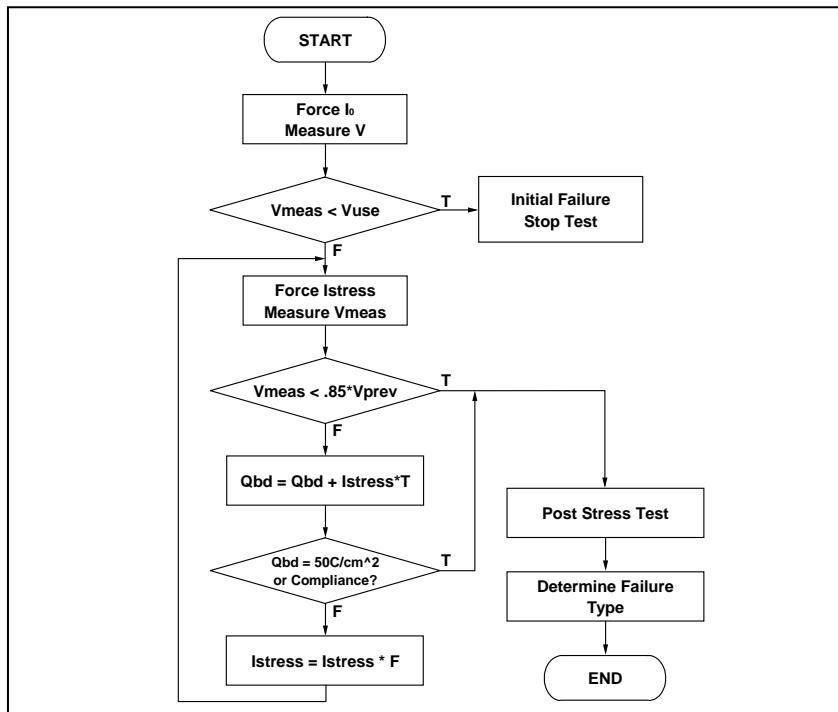


図 2. J-Ramp 法のフローチャート

す。これを次の条件のうちのひとつを満たすまで続けます。

- 酸化膜が破壊する
- 電流値がコンプライアンスに達する
- 指定してある上限を電圧が越える

このランプ・ストレス・テストはMOSキヤパシタが蓄積状態になるように行います。

ランプ・ストレス・テスト終了後、リーク電流の測定をもう一度行い、破壊のステータスを分類します。

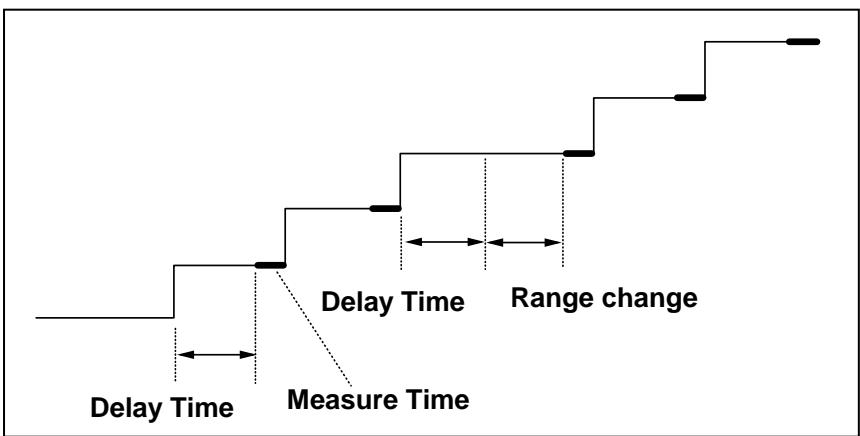


図 3. レンジ変更、不均一な測定時間によるステップ時間のばらつき

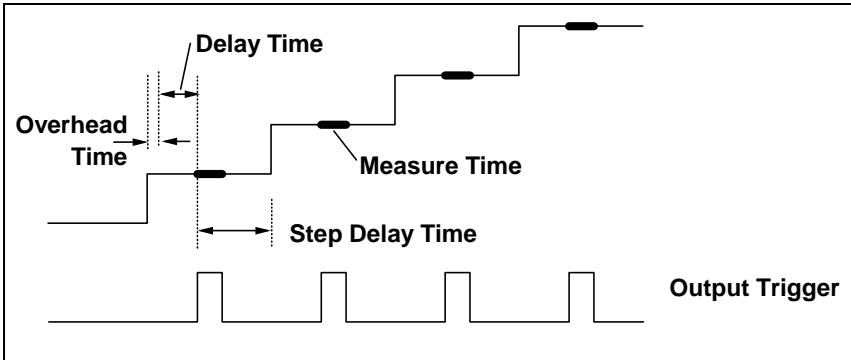


図 4. 外部トリガ機能の使用による均一なステップ時間

J-Ramp法の手順

図2にJ-Ramp法の手順をフローチャートで示します。

はじめに電流(通常 $1\mu A$)を試料に印加して電圧をモニタし、MOS酸化膜が初期不良でないか調べます。モニタしている電圧が使用時の電圧値(V_{use})に指定した時間内に達しない場合は初期不良です。

次に、階段波状の電流を試料に印加し電圧を測定します。

これを次の条件のうちのひとつを満たすまで続けます。

■酸化膜が破壊する

■総電荷量が指定された上限を越える

電流は、直前のステップのストレス電流に、ある決められたファクタ(F)をかけて増加させます。

JEDEC No. 35では F の値を $\sqrt{10}$ 以下になるように指定しています。

このランプ・ストレス・テストはMOSキャパシタが蓄積状態になるようにして行います。

ランプ・ストレス・テスト終了後、

リーク度を測るテストをもう一度行い破壊のステータスを分類します。

V-Ramp、J-Ramp測定上の問題点

酸化膜は急速に破壊するため、信頼性の高い測定結果を得るために、ストレス印加値の変更や、電流／電圧のモニタ、破壊の検出を迅速に行う必要があります。したがってどちらのテストもコンピュータによる計測器のコントロールを必要とします。しかし、JEDEC No. 35で定義されているテスト方法は複雑で、テスト・プログラム作成には時間がかかります。

また、正確なQbdを得るために、ランプ・ストレス・テストの階段波のステップ時間をできるだけ一定に保つことが望されます。しかし、これまでの測定器ではランプ・ストレス・テストの最中にステップ時間を一定に保つことは困難でした。外部コンピュータ内蔵の時計の分解能や確度は不十分で、短い一定のステップ時間を保つことはできません。計測器の階段掃引機能を利用しディレイ時間を設定しても、レンジ変更や測定

時間のバラツキなどによりステップ時間を一定に保つことは困難でした(図3)。

Agilent 4155C/4156Cによる評価

Agilent 4155C/4156Cは内部に計測器コントロールと科学的計算に最適なHP Instrument BASICを備えています。V-RampテストあるいはJ-Rampテストの手順のすべては、このHP Instrument BASICを使用して自動化できます。したがって、外部コンピュータを使う必要はありません。

最初のストレス・テスト、ランプ・ストレス・テスト、ランプ・ストレス後のテストは、あらかじめセーブしてある測定設定ファイルを呼び出して行えます。これらの設定ファイルは、フロント・パネルからファイル・イン・ザ・ブランク方式で簡単に作成できます。プログラミング上の最も困難な部分のひとつである“計測器の制御”はこの方法で非常に簡略化できます。この際、計算を必要とする入力パラメータの変更は後でプログラムから変更できます。

VbdやQbdのような結果のパラメータを抽出するには、4155C/4156Cの持つ解析機能を利用できます。Vbdの抽出とQbdの計算はUSER FUNCTIONを設定しておけば、マーカをブレーカダウン・ポイントに移動するだけで自動的に行われます。

ランプ・ストレス・テスト中にステップ時間を正確に一定に保つことは、固定レンジと、外部トリガ機能を使用することで可能です(図4)。外部トリガ機能は、4155C/4156Cと外部測定器を同期させるための機能で、ステップ・ディレイ時間は、外部測定器が測定を実行するのに十分な時間を供給するための時間です。この機能は、ランプ・ストレス・テスト中にステップ時間を一律に保つ目的にも使用できます。正確なQbdの値は、この機能を利用してステップ時間を $100\mu s$ の分解能で一定に設定することができます。

MEASURE: SWEEP SETUP
Voltage Ramp Sweep Measurement

*VARIABLE	VAR1	VAR2
UNIT	SMU1:MP	
NAME	Vg	
SWEEP MODE	SINGLE	
LIN/LOG	LINEAR	
START	-5.000 V	
STOP	-40.000 V	
STEP	-50.0mV	
NO OF STEP	701	
COMPLIANCE	50.00mA	
POWER COMP	OFF	

*TIMING

HOLD TIME	0.0000 s
DELAY TIME	40.0ms

*SWEEP STOP AT COMPLIANCE Status

UNIT	SMU4:MP	VSU1	VSU2	
NAME	Vsub	V	V	
MODE	V	V	V	
SOURCE	0.0000 V	0.0000 V	0.0000 V	-----
COMPLIANCE	100.00mA	-----	-----	-----

図 5. SWEEP SETUP ページの設定例

MEASURE: MEASURE SETUP
Voltage Ramp Sweep Measurement

*MEASUREMENT RANGE

UNIT	NAME	RANGE
SMU1:MP	Ig	FIXED 100mA
SMU4:MP	Isub	FIXED 100mA
VMU1	VMU1	AUTO -----
VMU2	VMU2	AUTO -----

ZERO CANCEL	OFF
OFF [1nA]	OFF
OFF [1nA]	OFF
OFF	OFF
OFF	OFF

(*: Old data is used.)

*INTEGRATION TIME

TIME	NPLC
SHORT@	640us 0.032
MED	20.0ms 1
LONG	320.ms 16

*WAIT TIME

0	(DEFAULT WAIT TIME)
---	---------------------

図 6. MEASURE SETUP ページの設定例

MEASURE: OUTPUT SEQUENCE
Voltage Ramp Sweep Measurement

*OUTPUT SEQUENCE

UNIT	NAME	MODE
1 SMU4:MP	Vsub	V
2 SMU1:MP	Vg	V
3 SMU2:MP		
4 SMU3:MP		
5 VSU1	VSU1	V
6 VSU2	VSU2	V
7 SMU5:MP		
8 SMU6:MP		
9 PGU1		
10 PGU2		

*TRIGGER SETUP

ENABLE/DISABLE FUNCTION	ENABLE TRIG OUT
STEP DELAY	21.4ms
POLARITY	POSITIVE

図 7. OUTPUT SEQUENCE ページの設定例

Agilent 4155C/4156Cによる V-Ramp評価

V-Rampテスト

以下に述べられているテストは、Agilent 4155C/4156Cの内部機能であるHP Instrument BASICにより完全に自動化できます。

最初にVuseを試料に印加したときのリーキ電流を測定します。スポット測定を行うために4155C/4156Cをサンプリング・モードに設定し、NO OF STEPを“1”にします。一番最後に行われるランプ・ストレス後のテストは、最初に行うリーキ電流のテストと同じです。

どちらのテストも、あらかじめセーブしてある測定設定ファイルを呼び出して行います。設定ファイルは、フロントパネルから簡単に作成/変更できます。

次にランプ・ストレス・テストを掃引機能を用いて行います。図5、図6、図7にそれぞれSWEEP SETUPページ、MEASURE SETUPページ、OUTPUT SEQUENCEページの設定例を示します。ステップ時間を一定にする事が理想的ですが、以下に示す手順によりそれが可能です。

1. SWEEP SETUPページで DELAY TIME を設定する。
2. MEASURE SETUPページで 固定レンジを選択する。
3. MEASURE SETUPページで WAIT TIMEをゼロにする。
4. OUTPUT SEQUENCEページで外部トリガ機能を“ENABLE”にする。
5. OUTPUT SEQUENCEページで トリガのSTEP DELAY時間を設定する。

JEDEC No. 35ではランプ・レート(Ramp rate)を0.1~1.0MV/cm²と定義しています。ステップ電圧(Vstep)を決めるに、各ステップ時間は以下の式で計算されます。

$$\text{Duration} = \text{Vstep} / (\text{Ramp rate} \times \text{Tox})$$

[sec.]

Tox : 酸化膜厚

ディレイ時間とステップ・ディレイ時間は、以下の式を満足するように決定します。

$$\text{Duration} = 1.1\text{ms} + \text{DELAY TIME}$$

+ STEP DELAY

1.1msは測定オーバーヘッドで常に一定です。

尚、測定開始直後の1ステップのみオーバーヘッドは36.8msになります。(図8)

測定が各ステップの終わりに近いところで行われるよう、ディレイ時間は、上述の式を満足する範囲でできるだけ大きい値に設定するのが理想的です。また、ステップ・ディレイ時間は、測定積分時間(INTEG TIME)と測定オーバーヘッドの和よりも大きくとる必要があります。

ステップ時間を一定に保つためには、これら以外に、測定中のUSER FUNCTIONの使用を避けた方が良い場合があります。これはCPUに余分な負荷をかけないためです。USER FUNCTIONを使用する解析は、ランプ・ストレス・テストが終了した後で行います。

コンプライアンス発生時に掃引を直ちに止めるために、SWEEP SETUP ページでSWEEP STOP AT COMPLIANCE Statusを選択してください。

Q_{bd} は、次の式で求められます。

$$Qbd = \int i(t)dt$$

この計算は、4155C/4156CのUSER FUNCTIONを図9のように設定することで、自動的に行われます。(ただし、USER FUNCTIONの設定は掃引終了後に行います。) 時間は、測定点のインデックス(@INDEX)とステップ時間の積で得られます。マーカがブレークダウンのポイントに移動されると、QbdがGRAPHICSページ上に表示されます(図10)。

ブレークダウン電圧の検出は、HP Instrument BASICにより行います。JEDEC No. 35では電流が、予測される電流値の10倍になる点の電圧、または電流の増分の傾斜($\log \Delta I_g / \Delta V_g$)が1.5から3の範囲まで増えた点の電圧と定義しています。予想電流は、あらかじめ測ってあった電流特性もしくは理論値で得られます。理論上の電流は、Fowler-Nordheim電流と呼ばれ、以下の式で表されます。

$$J \equiv A \times E^2 \times e^{(-B/E)}$$

A, B: 実効質量とバリアの高さに関する定数

簡便な方法として、酸化膜が破壊した直後から電流は急激に流れることから、ゲート電流がコンプライアンスに達する直前の電圧を破壊電圧としても良いでしょう。

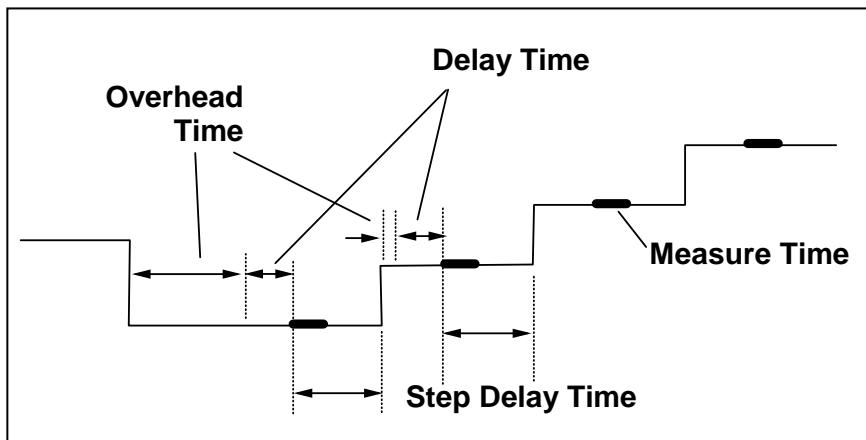


図 8. 1ステップ目のオーバーヘッド時間

CHANNELS : USER FUNCTION DEFINITION 94 JUN 18 10:57 AM
Voltage Ramp Sweep Measurement

*USER FUNCTION

NAME	UNIT	DEFINITION
Time	sec	@INDEX*.0625+.0368
Vbd	V	@MY2
Qbd	C	INTEG(Ig, Time)

図 9. USER FUNCTION DEFINITION ページの設定例

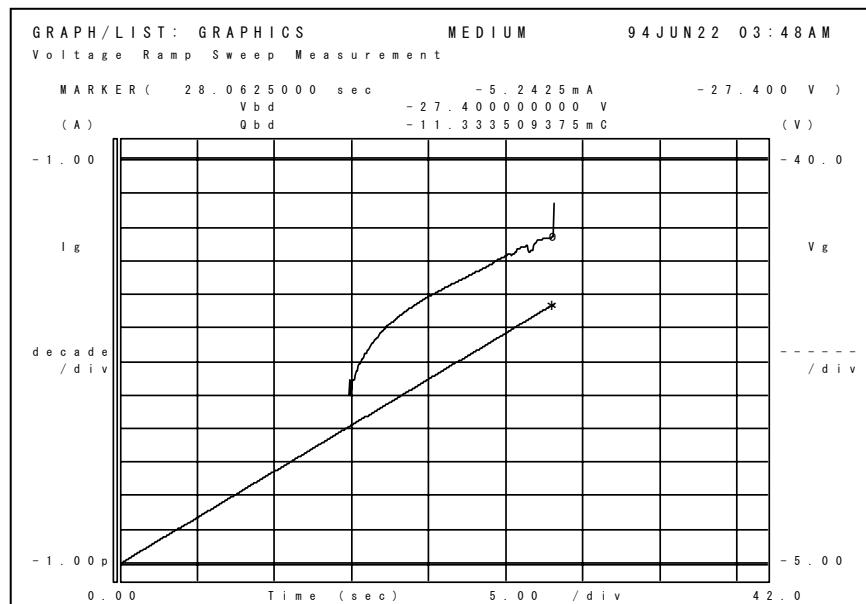


図 10. 測定結果と Qbd の計算結果例

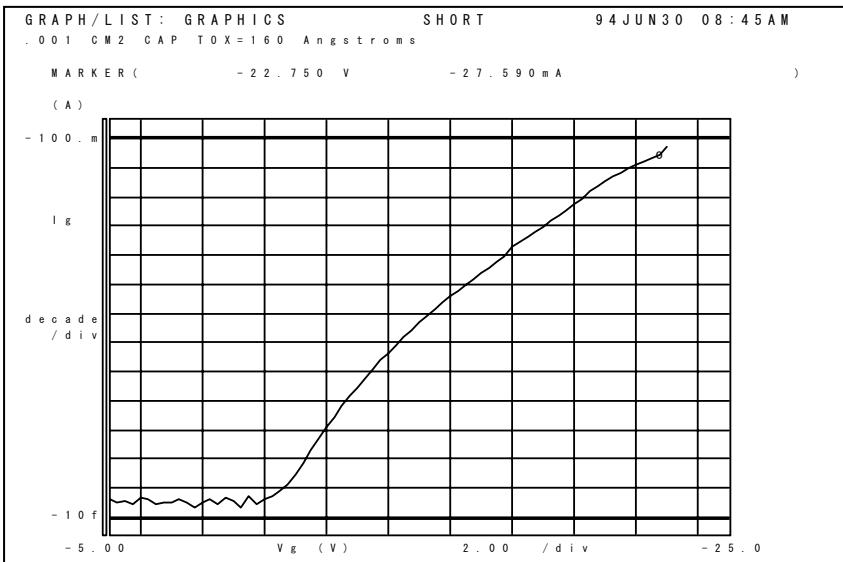


図 11. オートレンジ使用による微小レベル I_g - V_g 特性測定結果例

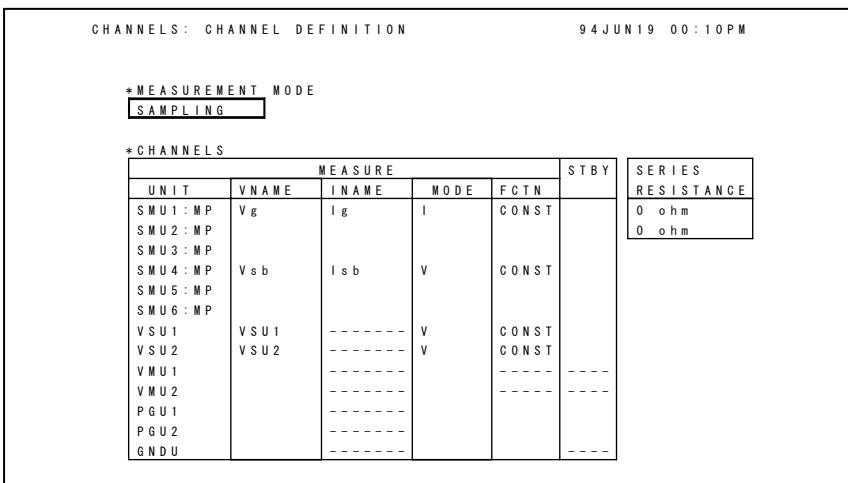


図 12. CHANNEL DEFINITION ページ(初期テスト)の設定例

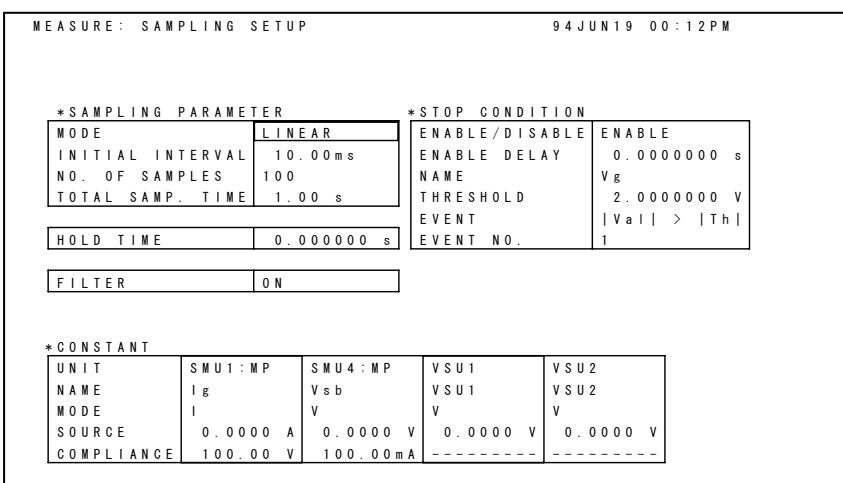


図 13. SAMPLING SETUP ページ(初期テスト)の設定例

極めて薄い酸化膜の評価法

V-Ramp法のようなWLRテストの目的は、測定値を統計的に処理し、その傾向からプロセスの評価を定性的に行うことです。

一定のステップ時間で高速掃引して得られるQbd、Vbdのようなパラメータは、プロセスに素早いフィードバックを与えられます。しかし、薄い酸化膜(100オングストローム以下)では、低電圧でのダイレクト・トンネリング電流のばらつきと、Vbd、Qbdの相関が無いことがあります。このため、酸化膜の性質を評価するには、Vbd、Qbdのみならず、低電圧印加領域でのダイレクト・トンネリング電流を正確に評価する必要があります。4156Cは、fAレベルの電流を高速に測れるのでこの目的には最適です。測定精度をあげるためにオートレンジを使用してください。

印加電圧がゼロ以外の値から掃引する時やプローブが完全にガードされてない時はホールド時間を加えてください。

4156Cと針先まで完全にガードされたプローブ・ステーションを使用することにより、図11にみられるような掃引特性を1分以下で測定できます。オートレンジを使用するため、一定のステップ時間を保つことはできませんが、Vbd、Qbdに加えてダイレクト・トンネリング電流特性も、一度に得ることができます。

Agilent 4155C/4156Cによる J-Ramp評価

J-Rampテスト

V-Ramp評価同様、以下に述べられているテストは、HP Instrument BASICにより完全に自動化できます。

初期テストは、サンプリングモードで行います。指定した値の電流を印加し、一定の時間間隔で電圧を繰り返しモニタします。電圧が指定したしきい値電圧に達すると測定は終了します。図12と図13はそれぞれ CHANNEL DEFINITION と SAMPLING SETUP ページの設定例を示しています。

初期テスト後に、掃引機能を使い、ランプ・ストレス・テストが行われます。図14と図15はそれぞれ SWEEP SETUP と MEASURE SETUP / OUTPUT SEQUENCEページの設定例です。

ランプ・ストレス・テスト中はストレス電流を $I \times F^n$ (nは整数)で増加させます。この式を満たしながら電流を増やすには Agilent 4155C/4156Cの

LOG掃引機能を使用します。 $10^{(1/10)}$ 、 $10^{(1/25)}$ 、 $10^{(1/50)}$ の3種類のFの値が選べます。

LOG掃引機能では、ストップ電流値は以下の式を解くことにより得られます。

$$\int_0^n I \times F^n \geq \text{MaxQ} \times \text{Area}$$

MaxQ: 最大電荷密度

Area: 酸化膜面積

J-Ramp法においても、ランプ・ストレス・テスト中はステップ時間は一定にするのが理想です。V-Ramp法の場合と同じように、外部トリガ機能を使用し、ディレイ時間、ステップ・ディレイ時間を指定し、WAIT TIMEをゼロに設定することで、ステップ時間は一定になります。各ステップ時間は、V-Rampテストの時と同じ式で計算されます。ディレイ時間とステップ・ディレイ時間は、以下の式を満足するように決定します。

$$\text{Duration} = 3.7\text{ms} + \text{DELAY TIME} + \text{STEP DELAY}$$

3.7msは設定オーバーヘッドですが、V-Ramp法と同じく、測定開始直後の1ステップのみ36.8msになります。

J-Ramp法では、LOG掃引機能を使うために、出力電流Rangeの変更が発生し、Step時間が延びる時があります。この時間はRangeによって決まっており、以下の表のようになります。

変更前 Range	変更後 Range	Range変更時間
10 pA	100 pA	15.0 ms
100 pA	1 nA	27.0 ms
1 nA	10 nA	25.1 ms
10 nA	100 nA	8.6 ms
100 nA	1 uA	5.9 ms
1 uA	10 uA	8.4 ms
10 uA	100 uA	5.9 ms
100 uA	1 mA	8.9 ms
1 mA	10 mA	6.7 ms
10 mA	100 mA	8.9 ms
100 mA	1 A	8.8 ms

表 1 Range 変更の時間

Range変更は、そのRangeの最大値を超える出力をしようとする時に発生しますが、時間が延びるのはその直前のステップになります（図16）。

MEASURE: SWEEP SETUP		94 JUN 18 11:08 AM	
*VARIABLE	VAR1	VAR2	
UNIT	SMU1:MP		
NAME	Ig		
SWEEP MODE	SINGLE		
LIN/LOG	LOG 10		
START	-1.000 uA		
STOP	-50.00 mA		
STEP	-----		
NO OF STEP	47		
COMPLIANCE	40.000 V		
POWER COMP	OFF		
*TIMING			
HOLD TIME	0.000		
DELAY TIME	25.0 ms		
*SWEEP STOP AT COMPLIANCE Status			
*CONSTANT			
UNIT	SMU4:MP	VSU1	VSU2
NAME	Vsb	V	V
MODE	V	V	V
SOURCE	0.0000 V	0.0000 V	0.0000 V
COMPLIANCE	100.00 mA	-----	-----

図 14. SWEEP SETUP ページの設定例

MEASURE: MEASURE SETUP		94 JUN 30 09:07 AM	
*MEASUREMENT RANGE			
UNIT	NAME	RANGE	ZERO CANCEL OFF
SMU1:MP	Vg	FIXED 40V	OFF
SMU4:MP	Isb	FIXED 100mA	OFF [1nA]
*IN SH MELO			
*WA			
MEASURE: OUTPUT SEQUENCE			
Voltage Ramp Sweep Measurement 94 JUN 30 09:13 AM			
*OUTPUT SEQUENCE		*TRIGGER SETUP	
UNIT	NAME	MODE	ENABLE/DISABLE FUNCTION
1 SMU4:MP	Vsub	V	TRIG 25.0 ms
2 SMU1:MP	Vg	V	POSITIVE
3 SMU2:MP			
4 SMU3:MP			
5 VSU1	VSU1	V	
6 VSU2	VSU2	V	
7 SMU5:MP			
8 SMU6:MP			
9 PGU1			
10 PGU2			

図 15. MEASURE SETUP / OUTPUT SEQUENCE ページの設定例

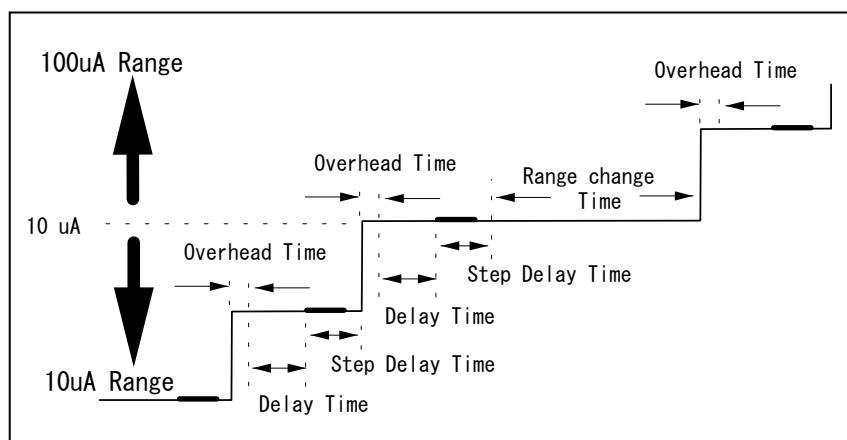


図 16. 設定 Range 変更によるステップ時間の変動

Qbdの計算は、出力電流値を時間で積分します。この積分は、各ステップの時間が一定の場合にはUSER FUNCTIONで簡単にできますが、Range変更があるなどして時間が変わった場合にはUSER FUNCTIONだけでは無理です。そこで、このRange変更の時間に出力電流値を掛けた値を内蔵のHP Instrument BASICで求めUSER FUNCTIONに渡すようにする必要があります。その設定例を図17、図18に示します。

図17はHP Instrument BASICの例です。890行目のFNCompen()は、Rangeが変わるステップを掃引範囲から求め、補正值を計算するサブプログラムです。ここで求めた補正值にUSER FUNCTIONで計算した電荷量(Qbd_o)を加えた物を910行目でQbdにセットしてグラフページで表示できるようにしています。

図17のプログラムを実行するとUSER FUNCTIONは図18のようになります。Qbdに値が直接設定されます。こうすること

```

870 OUTPUT @Agt4155;"PAGE:GLIS:LIST:MARK:DIR? 'Qbd_o'"
880 ENTER @Agt4155;Qbd_o
890 Qbd=ABS(Qbd_o+FNCompen(Start,Stop,Index,Mode))
900 OUTPUT @Agt4155;"PAGE:CHAN:UFUN"
910 OUTPUT @Agt4155;"PAGE:CHAN:UFUN:DEF 'Qbd', 'C',
    "&VAL$(Qbd)&""
```

図 17. Range 変更時間の補正の BASIC program 例

* USER FUNCTION

NAME	UNIT	DEFINITION
Time	sec	@ INDEX*.0500+.0368
Vbd	V	@ MY2
Qbd_o	C	INTEG(Ig, Time)
Qbd	C	.00416681075

図 18. USER FUNCTIONへの設定の例

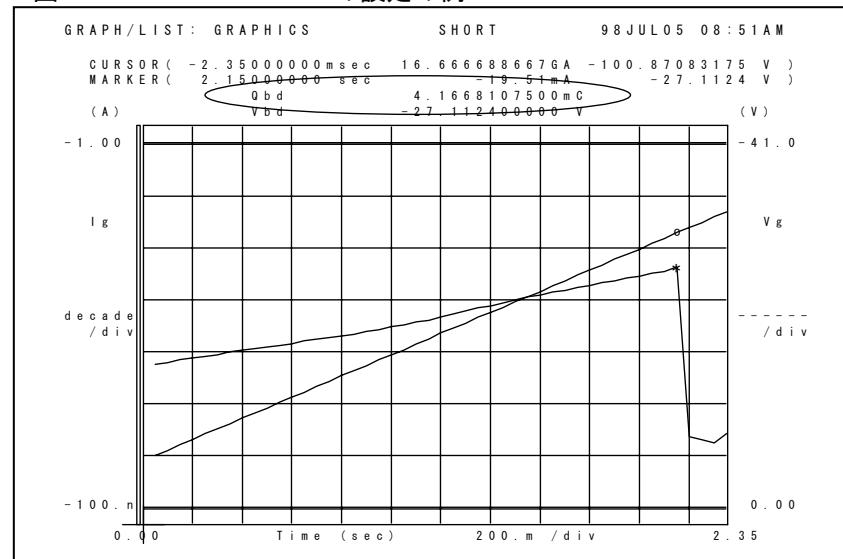


図 19. 測定結果例

で図19のように画面上に正確なQbdを表示することができます。

4155C/4156Cを使用する場合は、破壊が起きた後、すぐには掃引が終らないという制限があります。指定した範囲の掃引が終了するまで掃引を続け、その後にブレークダウン・ポイントを探します。

おわりに

Agilent 4155C/4156Cを用いて、測定の設定ファイルとグラフ表示ならびに解析機能を使用することにより、V-Ramp/J-Ramp評価に必要な複雑な計測器のコントロールから、データの表示解析が大幅に簡略化できます。

設定ファイル作成も簡単な操作で行なえますので、測定プログラムも短時間で作成できます。また、ランプ・ストレス・テスト中のステップ時間を一定に保つことができるため、正確なQbdを得ることができます。

さらに内蔵 HP Instrument BASIC の使用により、外部コントローラを使用する必要がなく、一台でV-Ramp/J-Ramp評価が行なえます。

アジレント・テクノロジー株式会社
本社 〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1



TEL ☎ 0120-421-345
(0426-56-7832)

FAX ☎ 0120-421-678
(0426-56-7840)

E-mail:mac_support@agilent.com

電子計測ホームページ
<http://www.agilent.co.jp/find/tm>

●記載事項は変更になる場合があります。
ご発注の際はご確認ください。

Copyright 2000
アジレント・テクノロジー株式会社
2000年11月発行

Agilent Technologies
Innovating the HP Way

00-0153
110001304-H

