

2600シリーズシステムソースメータを使用して、マルチピンデバイスの生産スループットを向上する

はじめに

電子部品メーカーは、製品のコストを最小限に抑えるというプレッシャーに常にさらされています。デバイス仕様や公差が厳しくなり、そのプレッシャーもますます大きくなってきています。従来の試験測定機器では、厳しい規格に対する部品評価が困難です。多くの測定器やモジュラーシステムでは、目標とするスループット達成に要求される短いサイクルタイムや柔軟性に完全に対応することができません。多くのシステム本体には、制御・試験シーケンス機能がないため、ほとんどの測定器ではPC制御での通信のやりとりが絶えず必要です。短いサイクルでより高い精度が求められる複雑な試験手順を実行するには、再現性の高い測定性能を備え、バスのトラフィックを最小限に抑える試験・測定装置が理想的です。

多くの試験・測定装置は、絶えず制御PCと通信しています。測定器のセットアップ、レンジの変更、印加設定値がパッケージ化され、1回につき1個のコマンドが通信バスを介して測定器に届けられます。同様に、測定データがPCに戻されます。PCから測定器へパッケージ化された各コマンドを送信するには、RS-232 通信の場合は数百ミリ秒、GPIBの場合は数十ミリ秒ほどかかります。100 Base-Tイーサネットインターフェースなどの高速バスを使用しても、試験時間はかなりかかります。データ評価、算出、ハンドラ制御を行う場合はさらに試験時間がかかります。

PCと測定器との間の通信プロセスを効率化する方法はほかになのでしょうか？

このアプリケーションノートでは、ケースレーの2600シリーズソースメータを生産環境に使用し、試験のパフォーマンスとスループットを向上する利点について解説します。特に、通信時間を削減し、スループットを向上するように、2600シリーズ内蔵の Test Script Processor (TSP) とオンザフライでの合否判定機能がどのように実行され、最適化されているかについて、実際のBJTデバイス生産試験の例をあげて解説します。

試験の概要:トランジスタ試験

BJTトランジスタは、コレクタ、エミッタ、ベースの3つのセクションで構成されるマルチピンデバイスです。図1は、BJTの一般的な試験構成を示しています。特性評価では、2個のチャンネル、すなわちベース/エミッタ(B/E)チャンネルとコレクタ/エミッタ(C/E)チャンネルを制御する必要があります。ソースメジャーユニット(SMU)は、この構成をとる場合に便利です。

SMUは、印加と測定を一台で実行できる強力な装置で、電流/電圧の印加、測定、制御の連携が必要なアプリケーションに理想的です。ケースレーは、2400 シリーズソースメータなどのSMUを開発、販売してきました。これらの測定器は、強力な生産試験ツールとして、電源とDMMを別々に使用していた数々の従来型システムを置き換えてきました。2600シリーズは、このコンセプトを拡張し、最新の制御/試験シーケンスと、先進のSMUアーキテクチャを採用しています。

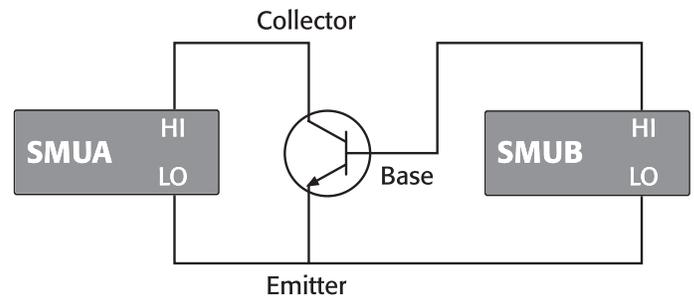


図1. SMU と NPN トランジスタの回路図

2602型は、2つのSMUを1個のハーフラック筐体に集約し、BJTなどの3端子デバイスの試験に便利な測定器です。図2は、2602型をトランジスタに接続する方法を示しています。この構成では、SMUAはコントローラ/エミッタ(C/E)の印加測定、SMUBはベース/エミッタチャンネル(B/E)の印加測定を処理します。

以下の試験シーケンスは、トランジスタの基本的な測定ステップです。レンジと印加は、一般的な2N3904 NPN BJT 用の値です。異なるタイプのトランジスタを使用したり、より多くの試験を実行したりすることもできますが、中核となる試験要求は、B/EチャンネルおよびC/Eチャンネルへの既知の値の印加および基本的な電圧/電流測定です。デバイス試験を行う前に、必ず、2600シリーズのマニュアルを参照し、レンジと印加の設定値が適切であることを確認してください。

試験シーケンス – 測定器のセットアップ

基本的な印加/測定機能

セットアップステップでは、デフォルトの状態から、アプリケーションに最適な状態に測定器を設定します。試験シーケンスのセットアップでは、通常、測定器の印加と測定のレンジ、印加出力モード、コンプライアンス/リミットを設定します。セットアップシーケンスの最適化により、試験スピードが劇的に向上できます。たとえば、印加/測定に適切な固定レンジを設定し、ビープ音と画面表示をオフにすることにより、試験時間が大幅に短縮できます。

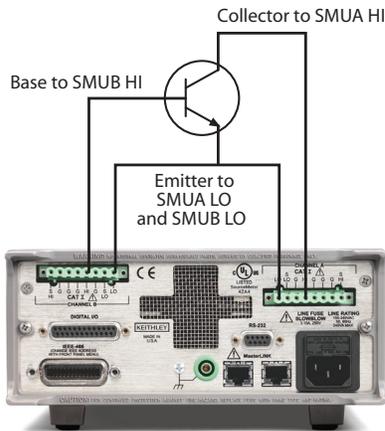


図2. NPN トランジスタ (2N3904)への2602型の接続

以下のコードの抜粋は、26xxシステムソースメータに実際に送信するコマンドの抜粋です。コメントは「--」で区別しています。

2602型セットアップ用TSP コード

```
function setup() --Define function "setup"
  smub.reset() -- Reset SMUB (base)
  smua.reset() -- Reset SMUA (collector)

  smub.source.func = smub.OUTPUT_DCVOLTS -- Set to source voltage
  smub.measure.autozero = smub.AUTOZERO_ALWAYS
  smub.measure.nplc = 1 -- Set integration rate

  smub.source.rangei = 0.01 -- Set source range
  smub.source.levelv = 0 -- Set source value
  smub.source.output = smub.OUTPUT_ON -- Enable SMUB

  smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS -- Set to source voltage
  smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO --Set Autozero to Auto
  smua.measure.nplc = 1 -- Set integration rate

  smua.source.rangev = 40 -- Set source range
  smua.source.levelv = 0 -- Set source value
  smua.source.output = smua.OUTPUT_ON -- Enable SMUA
end --end function "setup"
```

試験1: VCEO (Open Base)

基本的な印加/測定機能

VCEO ステップは、トランジスタのオープンベース電圧の試験に使用します。これはC/E接合がダメージを受けずに耐える最大電圧レベルを示す性能指数です。

SMUA: C/E チャンネルに指定された電流値を印加。電圧を測定し、合否基準を評価。

SMUB: ベースオープン- B/Eチャンネルに 0mA を印加。

2602型でのVCEO 測定用TSPコード

```
function VCEO() -- Start function "VCEO"
  VCEOLimit = 40 -- Local variable for VCEO limit

  smub.source.func = smub.OUTPUT_DCAMPS -- Set to source current

  smub.measure.rangev = 40 -- Set measurement range
  smub.source.limitv = 40 -- Set source limit (compliance)
  smub.source.rangei = 100E-9 -- Set current range
  smub.source.leveli = 0 -- Set source value

  smua.source.func = smua.OUTPUT_DCAMPS -- Set to source current
  smua.source.leveli = 0.01 -- Set source level
  smua.measure.rangev = 40 -- Set measurement range
```

```

smua.source.limitv = 40 -- Set source limit (compliance)

VCEO_data = smua.measure.v() -- Measure VCEO

if (VCEO_data > VCEOlimit) then -- Evaluate Pass/Fail criterion
    Pass = 1 --Pass is True
else
    Pass = 0 --Reinitialize Pass
end

end --End function "VCEO"

```

試験2: VCEsat/VBEsat

VCEsatおよびVBEsatは、トランジスタが「ON」になり相当な電流(Ic)が通電したときに、B/EチャンネルおよびC/Eチャンネルの電圧を試験します。これらの試験は、特にスイッチとして使用される場合にアクティブになったとき、デバイスによって消費される必要電圧を示す性能指数です。

基本的な印加/測定機能

SMUA: C/Eチャンネルに電流を印加。電圧(VCEsat)を測定し、合否基準を評価。

SMUB: C/Eチャンネルに電流を印加。電圧(VCEsat)を測定し、合否基準を評価。

2602型でのVCEsat/VBEsat測定用のTSP コード

```

function VCEsat() --Define function "VCEsat"
    smua.measure.rangev = 100E-3 -- Set measurement range
    smub.measure.rangev = 100E-3 -- Set measurement range

    smua.source.level1 = 10E-3 -- Set source range
    smub.source.level1 = 1E-3 -- Set source range

    VCEsat_data = smua.measure.v() -- Measure VCEsat
    VBEsat_data = smub.measure.v() -- Measure VBEsat

    if (VCEsat_data < limitVCEsat) then -- Evaluate Pass/Fail criterion
        Pass = 1 --Pass is True
    else
        Pass = 0
    end

    if (VBEsat_data < limitVBEsat) then -- Evaluate Pass/Fail criterion
        Pass = 1 --Pass is True
    else
        Pass = 0
    end

end --End function "VCEsat"

```

試験3: hFE(Beta)*

トランジスタはアンプとしても使用されます。BJTのhFEまたはBetaは、特定の駆動条件下でのトランジスタの増幅率を示します。この性能指数は、主に、アプリケーションに適した増幅率を備えたデバイスを選択する場合に使用されます。

基本的な印加/測定機能

SMUA: C/Eチャンネルに電流を印加。電流を測定。

SMUB: C/E電流が合否リミット内に収まるようにB/Eで電流印加値をバイナリサーチ。

バイナリサーチは、Beta判定の最も一般的なテクニックとして知られています。このテクニックは、一定の電圧値をC/Eチャンネルに印加し、B/EチャンネルはHiとLoのリミット値の中間電流値を印加します。このB/E印加値で、C/E電流ドロー(Ic)が測定されます。C/E電流測定(Ic)はセットターゲット値より上で、電流B/E印加値は新しいHiリミット値になり、Loと新しいHiリミット値の間の新しいB/E電流値が、印加されます。このプロセスは、ターゲットIc電流が測定されるまで繰り返されます。

* hFE (Beta)は次の式で定義される、アンプゲインの算出値:

$$\text{Beta} = I_c / I_b$$

Ic = C/Eを流れる電流、Ib = B/Eを流れる電流

バイナリサーチを使用した、2602型でのBeta用TSPコード

```
function searchBinary() --Defines the start of a function. Function can then be called at any
time.

k = 0 -- Variable to count loops in search
VCESource = 1 -- Variable for source value
HIGHib = 10e-7 -- Variable for High source limit on B/E channel
LOWib = 1e-9 -- Variable for Lo source limit on B/E channel
HFEllimit = 40 -- Variable for hFE limit
TARGETIc = 100e-6 -- Variable for target current measurement on C/E channel

smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS -- Set to source voltage
smua.source.rangev = 6 -- Set to source range
smua.source.limiti = (5 * TARGETIc) -- Set source limit
smua.measure.rangei = 10e-3 --Set measure range

smub.source.func = smub.OUTPUT_DCAMPS -- Set to source current
smub.measure.rangei = 100e-6 -- Set measurement range
smub.source.rangev = 6 -- Set source range
smub.measure.rangev = 6 -- Set measurement range
smub.source.limitv = 6 -- Set voltage source compliance

--Start binary search
smua.source.levelv = VCESource -- Set source value
smub.source.leveli = 0 -- Set source value

repeat -- Repeat following code until conditions are met
  k = k + 1 -- Increment
  Ib = ((HIGHib-LOWib)/2) + LOWib -- Establish source current value
  smub.source.leveli = Ib -- Source new current value for B/E channel
  delay(0.001) -- Source delay
  IcMeas = smua.measure.i() -- Measure C/E current

  if (TARGETIc < IcMeas) then -- Evaluate measurement vs. target
    HIGHib = Ib -- If measurement is greater than target, new source value equals hi limit
  else
    LOWib = Ib -- Else new source value equals lo limit
  end

until ((math.abs(IcMeas - TARGETIc) < (0.05*TARGETIc))or(k>10)) -- Conditions to continue loop

BETA1_data = IcMeas/Ib -- Calculate Beta (hFE)

if BETA1_data > HFEllimit then --Evaluate Pass/Fail criterion
  Pass = 1 --Pass is True
else
  Pass = 0
end
end -- End of function
```

スクリプトのダウンロードとデータの検索

2602へのスクリプトのダウンロードは簡単です。無償添付のソフトウェアTest Script Builderを使用するか、またはVisual Basic®、C、LabVIEW®などの別の言語環境で作成したスクリプトを測定器に転送するだけです。スクリプトの管理と最適化の詳細は、2602型の「User's Guide」、および、Test Script Builderの「Help Files Associated」を参照ください。

次のガイドラインは、テストスクリプトの体系化、コードのトラブルシューティングに有用です。

1. すべての試験に共通で使用する2602型のパラメータを設定する (autozero、data format など)。
2. 試験の各ステップを関数として定義する。これにより、読みやすいだけでなく、コードの再利用が容易になります。
3. リミット値と、各合否結果のデジタル出力ビットパターンを設定します。2602型が判断を制御するため、通信オーバーヘッドを激減できます。

関数は再利用がいつでも可能です。効率的にプログラムを記述するには、再利用可能な関数をできる限り多く作成することをお勧めします。

上の例では、テストシーケンスのそれぞれの部分に1つに関数名を命名できます。関数を呼び出すコードの例を次に示します。

```
setup() --Call function "setup"
VCEO() --Call function "VCEO"
VCEsat() --Call function "VCEsat"
searchBinary()--Call function "searchBinary"
```

26xxによりスループットが向上する理由

前述のとおり、これらの試験の印加/測定動作には、通常、SMUを使用します。試験を自動化し、スループットを向上する場合、従来の方法では、PCと2台のSMUを、Ethernet、GPIC、USBなどの接続を介してリモート通信させます。この構成では、PCが試験のマスターであり、試験シーケンスの実行、合否判定基準の評価、利用可能なピンング/ソートを実行します。試験シーケンスは、印加値、レンジ設定などの構成情報を含む場合があります。図3はBJTの試験シーケンスとその各種エレメントを示しています。図4は、大半のPC制御が、測定器との一定の通信である、試験の標準実装を示しています。

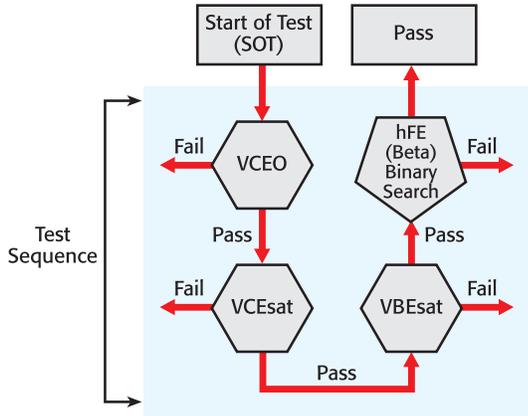


図3. BJT試験サンプルで使用し、シーケンスに組み込まれたエレメント

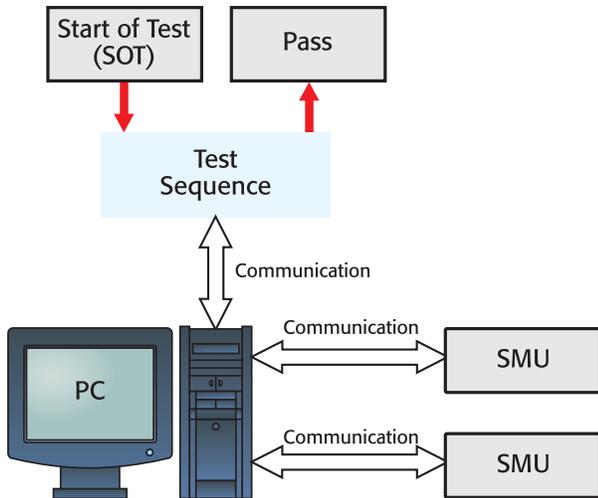


図4: 従来型のPC制御でのテストシーケンス。通信トラフィックレベルが高い。

テストシーケンスの各エレメントで、各測定器を各試験用に設定し、試験を実行してデータを制御PCに戻す必要があります。その後、制御PCは合否基準を評価し、被測定デバイスに対し適切なピンングを実行しなければなりません。コマンドの送信と実行は貴重な生産時間を消費し、スループットを低下させます。明らかに、PCとの間の通信情報が、この試験シーケンスの大部分を占めています。これは、スループットを改善する重要なチャンスを示しています。このテストシーケンスを2602 TSPに移行させれば、ラックシステムと比較して2~10倍以上のスループットゲインが得られることを示しています。

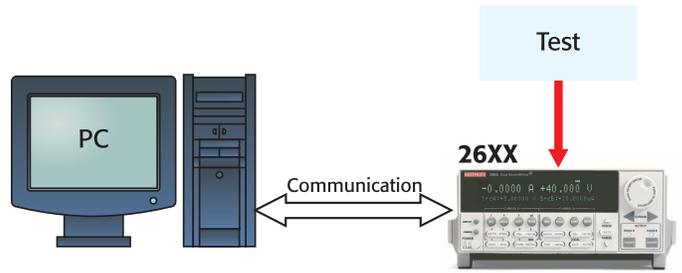


図5: 2602型内蔵のTest Script Processor (TSP)を使用して試験シーケンスを格納。通信トラフィックが減少する。

2600シリーズは、通信バスのトラフィックを激減させ、複雑な試験シーケンスのスループットを劇的に改善するユニークな機能を備えています。2600シリーズでは、大部分の試験シーケンスが、強力で柔軟性の高いオンボードTest Script Processor (TSP)に格納されます。TSPはフル機能の試験シーケンスエンジンで、合否判定基準、演算、数式、デジタルI/O制御などかつてない試験シーケンス制御を実現します(図5の試験シーケンスを参照)。TSPは、ユーザ定義の試験シーケンスをメモリに格納し、コマンド1つで実行できます。これにより、試験シーケンスの各ステップのセットアップと構成にかかる時間を節約し、通信時間を削減することでスループットを改善します。

2600シリーズのTSPを使用すれば、その他にもスループットに関するメリットがあります。オンボードプロセッサは、試験結果をリアルタイムに評価できます。

このBJT試験シーケンスでは、合否判定基準の評価に次のコードセットが使用されています。

Evaluation of measurement vs. Pass/Fail Criterion

```
if (VCEO_data > VCEO_limit) then --Evaluate
Pass/Fail criterion
    pass = 1 --Pass is True
else (pass == 0)
end
```

このケースでは、測定器がリアルタイムにデータを評価して、デバイスの合否を判定します。単純なデジタルI/O制御に加え、2600シリーズではハンドラインタフェースを直接操作できます。

Evaluation of measurement vs. Pass/Fail Criterion

```
if (VCEO_data > VCEO_limit) then --Evaluate
Pass/Fail criterion
    pass = 1 --Pass is True
    write Handler(1) -- Write "pass" to handler1
else
    writeHandler(0) -- Write "fail" to handler1
end
```

また、2600シリーズは大規模なバッファを備えているため、収集したデータの統計処理だけでなく、読み取り値の格納、演算処理、合否リミットが可能です。

¹ 各ハンドラのインタフェースはそれぞれ異なります。詳細は、ハンドラの製造元にご確認ください。

結論

2600シリーズシステムソースメータは柔軟性の高い試験プラットフォームであり、部品試験の実行方法に革命をもたらします。BJTの試験では、2600シリーズは、テストシーケンス機能を持つメインフレームシステムを含む競合製品と比較して2-3倍のスループットを実現します。

2600シリーズの利点

- 内蔵のTest Script Processor (TSP)により、PCではなく測定器側で大半の試験制御を行えるため、通信ラグを削減し、スループットを改善。
- 完全版のスク립ト言語により、オンボードプロセッサで計算や複雑な演算可。
- 大規模バッファにより、PCとの通信時間を最小限に抑えることが可。
- 14ビットデジタルI/Oはオンザフライでアクセス可。PCの介入なしで測定器やハンドラなどのピンニング装置を制御でき、スループットを改善。

エラーの原因

リード抵抗

電圧測定エラーの共通の原因は、測定器とダイオード間のテストリードの抵抗値です。この抵抗値は2線式接続(図6を参照)を行った場合に、測定値に影響を及ぼします。リード抵抗の影響は、特に、長い接続ケーブルに大電流を流すときに深刻です。これはリード抵抗間の電圧降下が、電圧測定値と比較して著しく大きいからです。

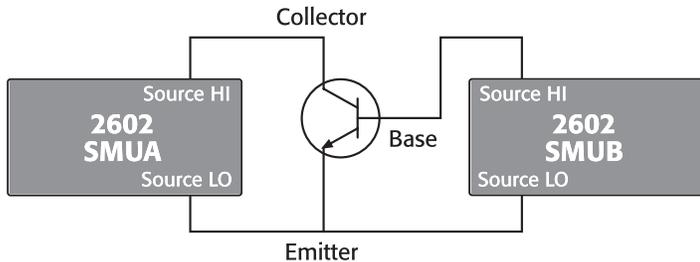


図6. 2602チャンネルローカルセンス(2線式)接続

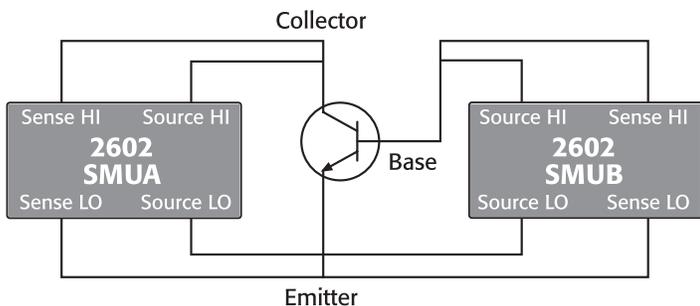


図7. 2602チャンネルSMUリモートセンス(ケルビン)接続

この問題を回避するには、2線式ではなく、4線式リモートセンスを使用します。4線式(図7)を使用すると、電流が1組のリードを使ってDUTに流れ、DUTにかかる電圧がもう一組のリードを使って測定されます。その結果、ダイオード間の電圧降下のみが測定されます。

漏れ電流

漏れ電流など、ケーブルとフィクスチャからのリークは、超微小電流測定におけるエラーの原因となり得ます。この問題を最小限におさえるためには、テストフィクスチャを高抵抗素材で製作してください。

漏れ電流を最小限にする別の方法に、ソースメータ内蔵のガードの使用があります。ガードは、回路における低インピーダンスポイントで、ガードされる高インピーダンスポイントとほぼ同じ電位を持ちます。これを例(図8)に示します。

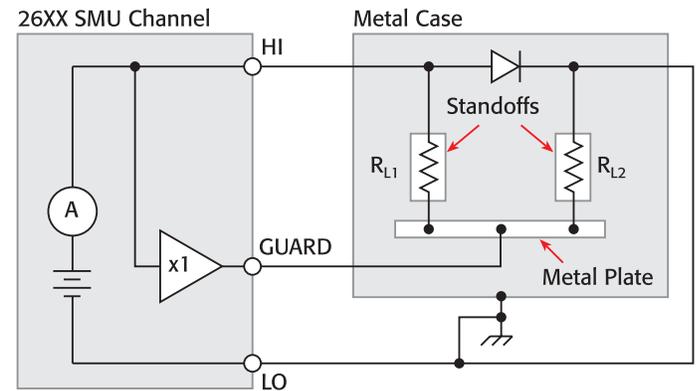


図8. 2600シリーズのガードテクニック

この例では、測定対象のダイオードが2つの絶縁スタンドオフ(RL)にマウントされています。この回路にガードを使用すると、すべての電流がダイオードに流れ、スタンドオフに流れないことが保証されます。一般的に、印加/測定電流が $1\mu\text{A}$ の場合に、ケーブルガードの使用を推奨します。この回路は、測定器のガード端子を金属板に接続することによってガードされています。これにより、絶縁体RL1の下端が、上端とほぼ同じ電位になります。絶縁体の両端がほぼ同じ電位となるため、ここに電流が流れることはほぼありません。希望どおり、電流がダイオードに流れます。

警告: ガードは、出力HIと同じ電位です。このため、出力HIに危険電圧が生じる場合、ガード端子にも生じます。

静電障害

高抵抗測定では、静電障害の影響を受ける場合があります。これは、帯電したオブジェクトが、帯電していないオブジェクトの近傍に移動したときに発生します。静電場の影響を減らすには、シールドを作成して測定対象の回路を囲みます。図8に示されているとおり、試験対象のダイオードを囲むように金属シールドがグランドに接続されています。コモンモードや他の干渉によるノイズを回避するには、ソースメータのLOは金属シールドに接続されなければなりません。また、金属板がガード電位であるため、安全シールドとしても機能します。

サンプルスクリプト

ケースレーが開発したTSPサンプルスクリプトは、完全なBJTテストスイートのデモンストレーションです。試験の最後に試験電圧、電流、合否ステータスが記載された出力レポートが生成されます。このプログラムを実際に使用する際は、修正が必要です。特に、パーツのピンニング試験に使用する場合は、ハンドラとの通信が正しく記述されていることを確認してください。このスクリプトの電子ファイルは、<http://www.keithley.com>からダウンロードできます。

装置リスト

BJT生産試験システムを構築し、Keithley提供のサンプルプログラムを実行するには、以下の装置が必要です。

1. ケースレー2602型2チャンネルシステムソースメータ
2. PC、およびKPC-488.2インタフェースカードまたはKUSB-488 USB-GPIBアダプタ
3. 2N3904 BJT
4. テストフィクスチャ付部品ハンドラ
5. ケースレー7007 IEEE-488インタフェースケーブル
6. カスタムDB-9デジタルI/Oハンドラ・インタフェースケーブル(ソースメータとハンドラのインタフェース用)
7. テストリード(ソースメータとテストフィクスチャの接続用)

テストシステムの安全性

多くの電気試験システムは、危険電圧と電力レベルの印加または測定機能を備えています。また、単一の故障状態(プログラミングエラーや測定器の不具合など)では、ハザードが存在しないとシステムが示している場合でもハザードレベルの出力が可能です。これらの電圧や電力レベルは高いため、常にハザードからオペレーターを保護する必要があります。保護の方法には、以下があります。

- オペレーターが危険な回路に接触しないようにテストフィクスチャを設計する。
- 破片の飛散からオペレーターを保護するため、被測定デバイスを確実に囲む。たとえば、コンデンサや半導体に過電圧、過電力を適用すると、爆発する可能性がある。
- オペレーターが接触できる電気接続をすべて2重に絶縁する。2重に絶縁することで、1個の絶縁レイヤが破損した場合でもオペレーターは保護される。
- テストフィクスチャのカバーが開いた場合は、信頼性の高いフェールセーフ・インターロック・スイッチが電源を切るようにする。
- オペレーターが、テストフィクスチャの内部にアクセスしたりガードをオープンしたりする必要がない場所で自動ハンドラを使用する。
- システムのすべてのユーザーにトレーニングを実施し、潜在的な危険性、および事故から身を守る方法について理解させる。

試験システムの設計者、インテグレーター、敷設者は、かならずオペレーター、保守管理者の保護対策を確実に実施しなければなりません。

本資料の内容は予告なく変更されることがあります。

All Keithley trademarks and trade names are the property of Keithley Instruments, Inc.

All other trademarks and trade names are the property of their respective companies.

KEITHLEY

ケースレーインストルメンツ株式会社 本社：105-0022 東京都港区海岸1-11-1 ニューピア竹芝ノースタワー13F •03-5733-7555 • Fax: 03-5733-7556
大阪：540-6107 大阪市中央区城見2-1-61 MIDIタワー7F •06-6946-7790 • Fax:06-6946-7791
Web: www.keithley.jp Email: info.jp@keithley.com

© Copyright 2004 Keithley Instruments, Inc.
Printed in Japan.

No. 2608
03055KGW