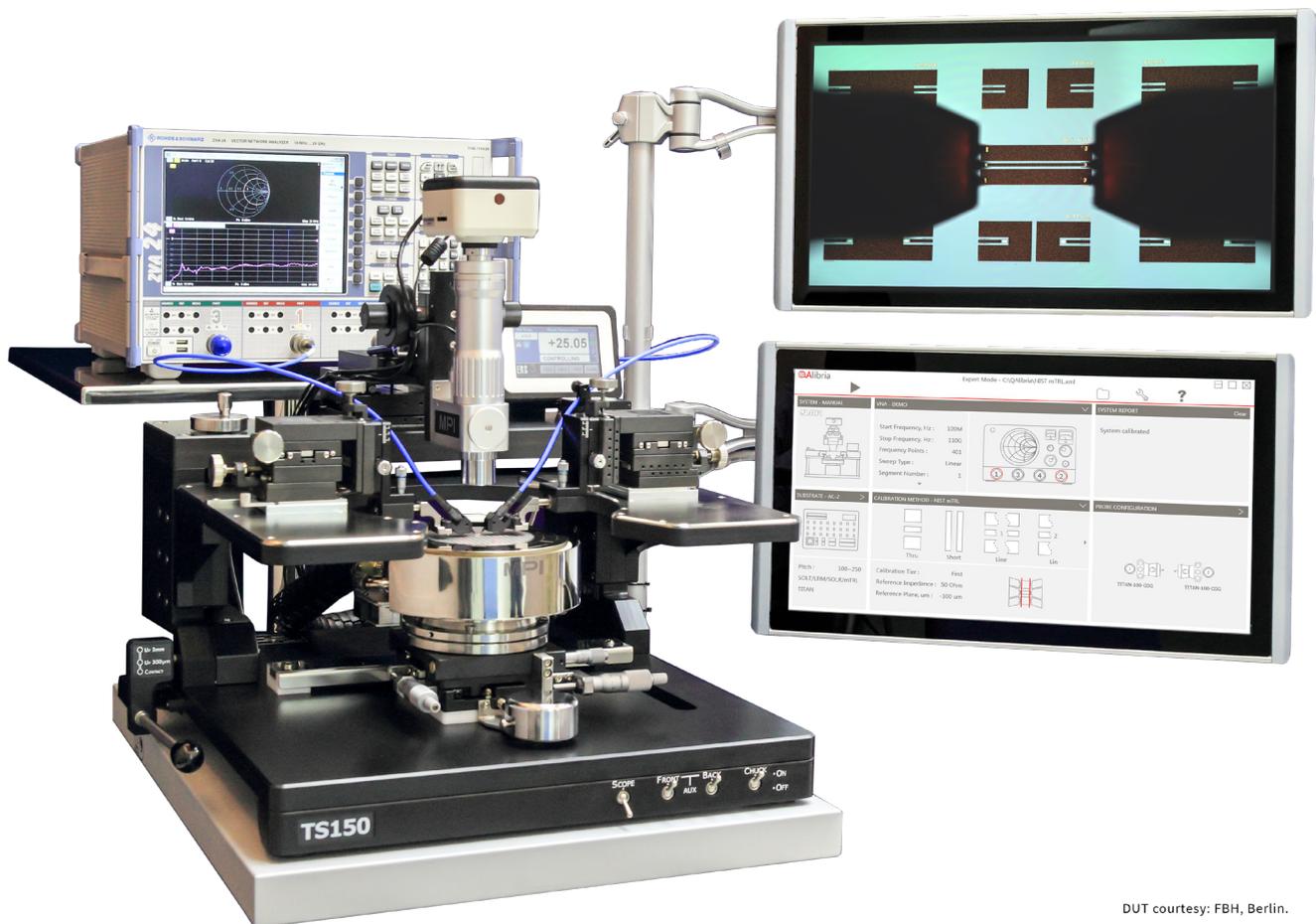


# ウェハーレベルRF測定の測定手法の動向

リニアデバイスの周波数ドメインにおける特性評価においてベクトル・ネットワーク・アナライザを使用した測定はすでに50年以上も続いております。1950年代後半に手動型で簡単なテストセットでの測定から始まり、現代では非常に広い周波数帯域での高精度な自動測定にまで発展しました。

本アプリケーション・ノートではMPIとローデ・シュワルツ社共同開発の近年のRFデバイスやICのウェハーレベルでの測定ソリューションについて考察します。



DUT courtesy: FBH, Berlin.

ベクトル・ネットワーク・アナライザを使用した測定概念はすべての周波数帯域について同じといえます：入射波 a を測定、反射波/伝送波 b を測定、i (下図の場合 I または II) ポートでの振幅変化を測定

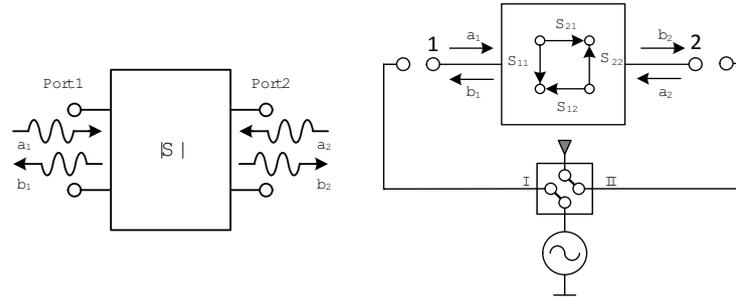


図1: 2ポートデバイスのSパラメータ定義および測定概念

通常、VNAはDUTの基準インピーダンス(通常50Ω)でSパラメータ測定/計算を行うことができます。入射信号は内部ソースで生成され、反射/伝送信号はレシーバー側で測定されます。VNAは内部スイッチを持ち入射信号の出力先を変更することができます(図1)。これによりDUTは物理的に再接続することなく、双方向の測定をすることが可能になります。DUTのSパラメータは以下のように計算されます

ここに

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0},$$

順方向 (a2=0の場合)

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}, \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$$

逆方向(a1=0の場合) (図2)

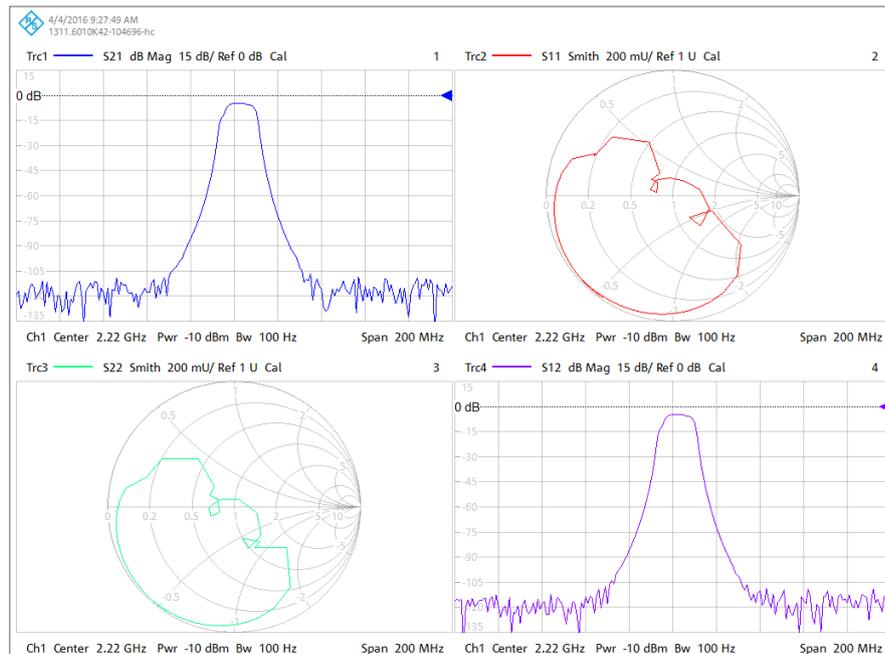


図2: 2ポートDUTのSパラメータ測定例

## ■ ベクトル・ネットワーク・アナライザ

近年のベクトル・ネットワーク・アナライザを使った測定課題

最先端のRF/ミリ波デバイスやICの正確な特性評価をおこなうことは複雑で簡単ではありません。広い周波数帯域、ダイナミックレンジ、迅速に測定結果を出さなければならないなど、ベクトル・ネットワーク・アナライザを使った測定の要求は多岐にわたります。

例えば、高除去フィルタを測定する際は広いダイナミックレンジが、パッシブ部品の製造段階での測定では掃引速度(違う掃引設定を持った複数のセグメントの場合もある)が高いスループットを実現するための重要な要素となります。

パワー増幅器(PA)、送受信機(T/R)モジュール、複雑なフロントエンド・デバイスの特性評価ではさらに要求は複雑になってまいります。VNAに複数の内蔵信号源を持たせることにより複雑なIMD(相互変調歪み)測定、周波数変換測定、真の差動信号供給、パルス条件下のRF測定、雑音指数測定などの測定を可能にします。

オンウェハーでのデバイス特性評価にも同様な要求があります。アクティブデバイスではプローブの先端での高精度パワーレベルが求められます。これらは測定に用いるパワーレベルを校正することにより実現可能です(同軸面とプローブ先端間の補正も含む)。

オンウェハー測定にRohde & Schwarz社ベクトル・ネットワーク・アナライザ

Rohde & Schwarz®社ZVA/ZNBベクトル・ネットワーク・アナライザは線形デバイスのフィルタ/アッテネータ/ケーブルあるいは非線形デバイスのアンプ、ミキサー/受信機/トランシーバの測定に最適な一台です(図3)。

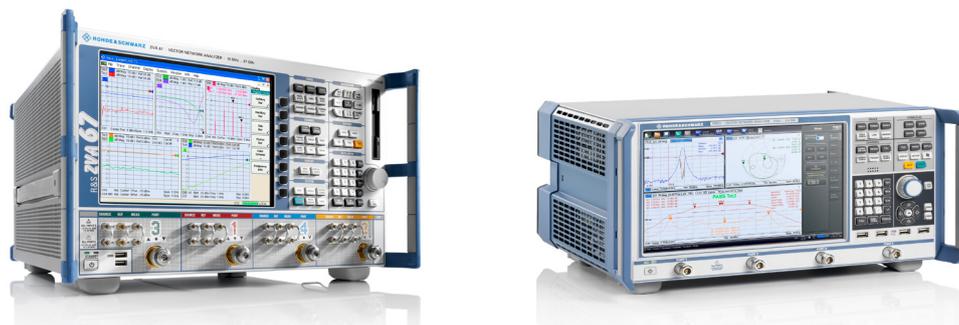


図. 3: Rohde & Schwarz®ZVA (左) and Rohde & Schwarz®ZNB (右) ベクトル・ネットワーク・アナライザ

オン・ウェハーでの測定ではさらに課題が増えます。校正に時間がかかると共に測定自体も校正が行われた後長い場合数時間にかかるため、VNAには継時的な安定度が要求されます。アクティブ・デバイスの特性評価でさらに重要なのが、ケーブル、導波管、プローブ・ヘッドの損失を補填するためのVNA自身の出力パワーになります。またオン・ウェハー測定に適している校正手法(TRLなど)に対応していなければなりません。

MPIのQAlibria®外部校正用ソフトウェアなどを使用する際は使用しているVNAがソフトウェアに対応している必要があります。Rohde & Schwarz®のZVA、ZNBベクトル・ネットワーク・アナライザはこういった要求、課題をすべて満足しております。

67 GHz以上の周波数帯域についてはミリ波コンバータをご使用いただくことにより測定いただけます(～500 GHzまで対応)。MPI社TS150-THZプローバーに搭載いただけます(図4)。

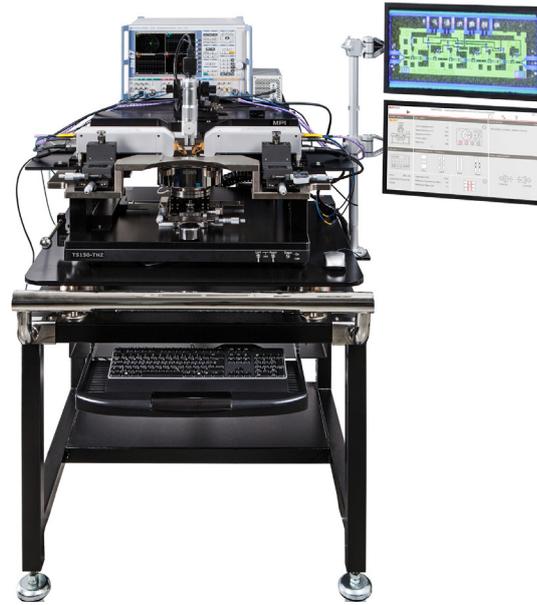


図. 4: Rohde & Schwarz社ZVA + ミリ波コンバータ + MPI社TS150-THZマニュアル・プローバ

Rohde & Schwarz社は500 GHzまでの周波数コンバータを提供するとともに、モデル ZVA110では10 MHz～110 GHzまでの連続掃引測定も可能となります。

#### 校正の必要性

RFキャリブレーションは特定の周波数において、ハードウェアで生じる系統的誤差を除去し、また測定を実行するために追加されたアクセサリの影響を除去するために行います。Sパラメータ測定においては比較的低い周波数(数百MHz帯)より校正が必要となります。テスト信号の波長はすでに測定系の長さより数オーダー短くなっております。

ウェハーレベルでの測定ではまずケーブルをVNAのフロントパネルのコネクタ(ポート)に接続し、次にプローブ・ヘッドを接続します。RFキャリブレーションを行うことにより、これらケーブル、プローブの影響を補正するとともに、VNA自体の系統的誤差を補正します。このようなことからRFキャリブレーションは「システム誤差補正(system error correction)」と呼ばれることがあります。

エラー補正手順は基準面の任意点への移動(測定信号の振幅,位相の仮想的な位置)に相当します。(図5)。

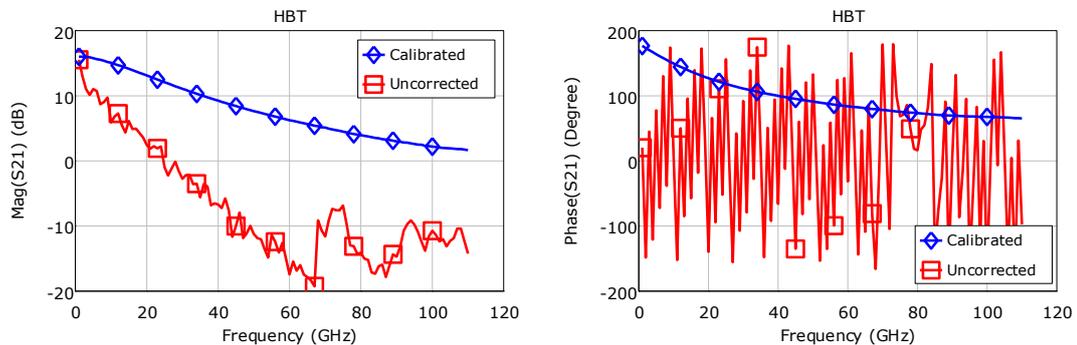


図. 5: BiCMOSプロセスを使ったヘテロ接合のバイポーラトランジスタ(HBT)の校正を行っていない場合とRF校正を行った場合の測定結果例

## ■ ウェハーレベルの測定

解析用プローバーの主な構成として、ウェハー・チャック、顕微鏡、プラテン、ポジショナがあります。更にRFのウェハー・レベルでの測定にはRFケーブル、プローブ・ヘッド、校正基板、補助チャックが必要となります。

### チャックおよびチャック・ステージ

多くのRFデバイス(Ⅲ-Vデバイス)はコプレーナ線路設計となっています。しかし特に高周波の測定ではチャックの大きな真空穴やチャック表面の真空溝(チャックを保持するための真空機構)はデバイスの接地の安定性を低減させます。そのため電気特性に影響を及ぼす可能性があります。MPIのRFプローバーではこういった影響を回避するために特殊な表面設計、真空穴を非常に小さくする設計を採用しております(図6)。

測定手順は主に次の2つの手順があります。

1. ウェハーのロードと測定エリアへのナビゲーション
2. DUTへのプローブの高精度な位置決め

MPI独自のエアベアリングステージ設計により片手で簡単にXYのポジショニングおよびウェハーのローディングを可能にしました(図7)。またXY/θマイクロメータ(25x25 mm)を搭載することによりさらなる微細なウェハーの位置調整、DUTからDUTへの微細なナビゲーションを可能にしました。

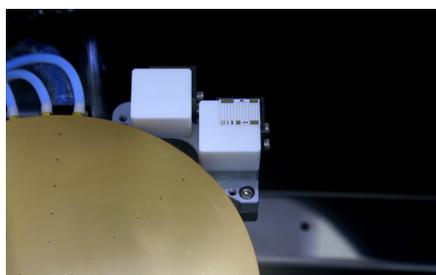


図6: 極小真空穴のRF用専用チャック および補助チャック 2台を搭載



図7: 片手で操作できるエアベアリングステージ

## 顕微鏡

RF測定における顕微鏡は次のような点を考慮する必要があります:

IC設計の複雑化のためICサイズが大きくなり、ウェハー上を素早くナビゲーションするための広い視野角(FoV)、その反面デバイスのパッドサイズが縮小していく中での高い倍率が要求されます。

倍率が高くなるほどRFプローブ・ヘッドを正確に校正基板にコンタクトすることが可能になります。正確にコンタクトする事により、校正基板の電気特性が一定でかつ予想できる結果をもたらし、高精度で再現性のあるキャリブレーションを行うことができます。

RF測定ではさらに測定用の構成機器(インピーダンスチューナー、周波数エクステンダ、カップラー、バリエイタなど)を可能な限りデバイスの近くに設置する必要があります。このような機器が顕微鏡の設置制限を増やすため、顕微鏡は薄型でかつ作動距離(対物レンズの先端から被測定物までの距離)をなるべく長くする必要があります。また頻繁なアクセサリの交換や構成の変更に対応するため、顕微鏡は簡単に測定エリアより外せるようになっていなければなりません。

上記の要素を克服できる顕微鏡は正確なRF測定の鍵となります。しかし、すべての要素を克服できる既存の顕微鏡がなかったためMPIは独自に顕微鏡メーカーと提携し、独自の単眼鏡筒(SuperZoom™ SZ10(図8)、MegaZoom™ MZ12(図9)の開発に成功しました。小型設計とともに広い視野角、高倍率、長い作動距離を実現したMPIの単眼鏡筒はRF測定に最適な顕微鏡です。



図8: SuperZoom™ SZ10単眼鏡筒 + HDMI  
カメラ



図9: MegaZoom™ MZ12単眼鏡筒 + HDMI  
カメラ

MPIの顕微鏡はテレビポートが標準でついており、1080p HDMIカメラを使いモニタにライブ映像を映し、リモコンを使って簡単に設定を変更することも可能です。内蔵SDメモリに500万画素での撮影画像を保存でき、パソコンを用意する必要はありません。

独自の90度チルトバック機構はMPIプローバの標準機能となります。ポジションナやRFプローブ・ヘッドの交換を素早く行うことができます(図10)。



図10: アクセサリの交換を手早く行うことができる顕微鏡90度チルトバック機構

## ケーブル

ウェハーレベルでのRF測定ではケーブルにも必要条件がさまざまあります。第一に利便性(長い方が使いやすい)と最少の挿入損失(短い方が低挿入損失)を実現する妥協点(長さ)を決めます。第二にケーブル自身の重さがプローブ・アームに機械的応力を与えるため、プローブのアライメントに影響を与え、ひいてはコンタクト精度、安定性に影響を与えます。

重さについても長さと同じように妥協点を見つける必要があります。位相特性、振幅の安定性の高い2重、3重構造のケーブルは分厚く重いため、測定精度の許す範囲での妥協点を見つける必要があります。

第三にRFプローブ・ヘッドのメスコネクタと接続するためのケーブルのオスコネクタが小型である必要がありますが、小型であるためケーブルとコネクタとの接合部分が数回の抜き差しで半田接合点で簡単に壊れる可能性があります。そのため、完全に接続されている測定環境では拡張、強化された接合をもったケーブルを使用します。ウェハーレベルのシステムでは独自のソリューションが必要となってきます。

第四に位相特性、振幅、温度安定性はtop-benchシステムには必要な条件となります。安定したケーブルの使用は再校正の回数を最小限に抑え、有効な長時間校正時間確保できます。逆に安価で不安定なケーブルを使用すると、校正が再度必要となり、測定結果が得られるまでに時間がかかかることがあります。

MPIでは上記の条件を考慮した上でケーブルメーカーと協力しケーブルソリューションを提供します。上位モデルのMMCシリーズとエントリーモデルのMRCモデルの2種を18 GHzよりご用意しております。要求されている測定精度、ご予算などを考慮し、最適なシステム構成を選択いただけます(図11)。

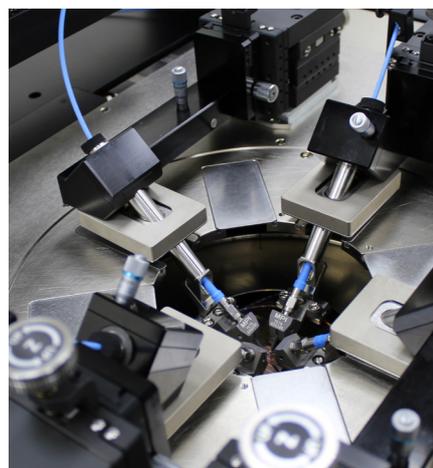


図11: ウェハーレベル専用RFケーブル

## プラテンリフト機構

RFキャリブレーションの精度はコンタクト品質と再現性に依存します。同軸コネクタによるコンタクト再現性のエラーを低減するためにトルク値を固定したトルクレンチがコネクタを使用した測定では使用されています。ウェハーレベルでの測定においてコンタクトの再現性は常に測定課題の一つで、プローバー使用経験が何年も必要な場合があります。

MPI独自のプラテンリフト機構はオートコンタクト機能と安全なオペレーションをもとに設計されています。オートコンタクト機構はオペレータの経験に関らず高い再現性(1  $\mu\text{m}$ )を保証します。コンタクト、コンタクト・セパレーション(300  $\mu\text{m}$ )、ロード(3 mm)の3つの独立したポジショニングがあり、プローブ、ウェハーの破損を防ぐセーフティー・ロック機能も持ち合わせており、RFプローブの直感的なポジショニングを可能にします(図12、13)。



図12: 3つの独立したポジショニングが可能なプラテンリフト機構:  
ウェハーロード(左)セパレーション(中)コンタクト(右)



図13: セーフティー・ロック機能 (ロック状態(左)、解除状態(右))

### プローブ・ヘッドおよび校正基板

RFプローブ・ヘッドはデバイスまでのケーブルの「last inch(最後の一步)」と呼ばれることがあります。同軸ケーブルを伝送する電磁波エネルギーをウエハ上のDUTおよびコンタクト・パッドに伝えるための変換治具です。これらの変換は最小のひずみとエネルギー損失で実行されなくてはなりません。

DUTのコンタクト・パッド材質はデバイスの半導体技術やプロセスによりアルミ、銅、金などがあります。RFプローブ・ヘッドはコンタクトに対して最小限でかつ安定したコンタクト抵抗を実現する必要があります。アルミパッドの場合、酸化アルミニウムの酸化膜が高い抵抗をもっているうえ、酸化膜を突き破るのが難しく、金パッドは柔らかく、簡単に損傷する可能性があります。さらに業界動向としてはRFデバイスやICのパッドサイズの微細化が進んでいます。DUTはさまざまな条件(温度設定、ボンディング後など)により何度もプロービングすることがあり、過大なコンタクトによるパッドのダメージはパッドが小さければ小さいほど大きくなります(コンタクト毎にプロービング/ボンディングに最適な箇所がなくなるため)。よってRFプローブ・ヘッドはパッドダメージを最小限にするためにコンタクト痕は小さく、スケート量を最小限に抑える必要があります。

RFデバイスには様々な種類があります。デスクリート型から複雑なIC、さらに動作する周波数も多岐にわたります。したがってRFプローブ・ヘッドは多様なパッドレイアウトに対応するさまざまな周波数、ピッチ(コンタクト・パッド間の距離)、構成(GSG、GS、SGなど)がサポートされている必要があります。

プローブ・ヘッドの価格と寿命はDUTのテストコストに直結するため、価格はなるべく低く抑えるのが理想的です。

TITAN™ RFプローブ・ヘッドはMPI社が持つ優れたMEMS技術を活用した正確な50Ωインピーダンス特性を持つコンタクト・チップ使用しております。プローブ自身の優れた電気性能(最小の挿入損失/クロストーク、高い反射損失)により広周波数帯域において比類ない校正/測定結果を実現します。

他社に比較して、MPIのTITAN™ RFプローブ・ヘッドは独自の突起型のチップ設計により視認性に優れています。これにより経験のないオペレータでもアライメント・マークを使わずに校正基板やパッドへの正確なポジショニングが可能です(図14)。

またプローブのスケート量が大幅に削減され、コンタクト角度を最適化することにより小さなパッシベーション・ウインドウを持つデバイスのプロービングも可能にしました。このように厳しい測定条件下でも安定した、接触抵抗の再現性のとれた測定結果を実現します。

TITAN™プローブ・シリーズはシングルおよびデュアルのチップ構成、50 μmピッチ、周波数帯域、DC-26 GHzよりご用意しています。RF/ミリ波デバイスやICのSパラメータ測定や10W(RF連続波)までのRFパワーデバイスの測定に最適なプローブとなります(図15)。



図14: TITAN™ プローブ・チップ構造



図15: TITAN™ プローブ・ヘッド RFアプリケーションのご用途に合わせて多種ご用意

TITAN™プローブ・ヘッドのさらなる特長は使用寿命を通して安定な摩耗が続くことです。プロービングを何百、何千回も行うとプローブ・チップは短くなりますが、プローブの独自の設計技術により電気特性は使い始めと変わることがありません。これにより他社のプローブ・ヘッドに比べて総合的に製品寿命が優れています。

また、TITAN™プローブ・ヘッドはお求めやすい価格帯に設定されています。

### 校正基板

通常RF校正基板はコプラナ導波路設計になっており、シグナル、グランド導体は共に誘電体(アルミナ)材質である校正基板上に形成されています。基板上にはオープン、ショート、ロード、ラインといったエレメントが形成され、これによりさまざまな校正を行うことができます。

MPI社のACシリーズ校正基板はTITAN™プローブの校正に最適な設計になっております。校正基板はプローブの校正およびピッチにより決まっております(表1)。校正標準器の等価インピーダンス・モデル(プローブ校正用等価インピーダンス、またはCal Kit)は正確に抽出され、RF校正の正確さを決定づけます。

表1: RFプローブ/校正基板対応表

TITAN™ プローブ校正	校正基板
GSG, 100 ~ 250 μm ピッチ	AC-2
GS/SG, 50 ~ 250 μm ピッチ	AC-3
GSG, GS/SG, 250 ~ 1250 μm ピッチ	AC-5

すべての校正基板は従来の校正手法(TOSM/SOLT、TRM/LRM)をサポートしています。AC-2校正基板には5本のコプラナ線路が形成されており、広帯域にわたるマルチラインTRL校正が可能です。校正基板はNIST推奨の測定法に適合しております(図16)

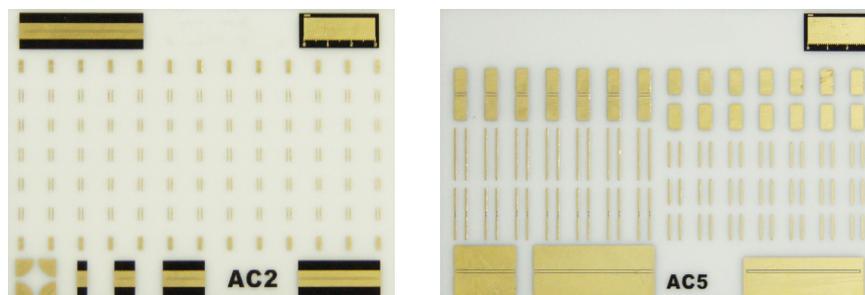


図16: AC-2 (左)、AC-5 (右) ACシリーズ 校正基板

## 校正用補助チャック

ミリ波周波数帯の測定になるといくつかの寄生効果が起こり、校正基板の電気特性に影響が出ます。例えば近くの部位とのカップリングや校正基板を通してのクロストークや、高次モードにおける励振/伝搬が起こり、その結果校正精度が劣化します。このような影響は周波数が高いほど出やすくなります。

MPIのプロバーの補助チャックは特殊なセラミックで製造されております(図6)。これにより寄生効果は劇的に低減でき、サブミリ波帯までの校正に校正基板をご使用いただくことができます(図17)。

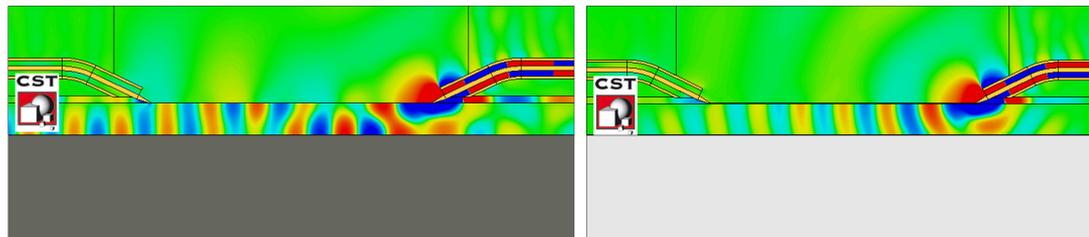


図17: ミリ波周波数帯における校正基板のコプレナ線路よりの電磁フィールドパターン  
金属上(左)、特殊セラミック製補助チャック上(右)  
(ドイツFBH社提供)

## マイクロポジショナ

マイクロポジショナの主な機能はプローブ・ヘッドを保持し、DUTのパッドに正確にプローブをポジショニングすることです。DUTやシステムの構成によりポジショナ自身にさらに追加の機能が必要となる場合があります。安定性、接触抵抗が安定で再現性があること、頻度の高いシステム構成の変更、マルチポート測定の必要性、マルチコンタクトDCやRFウエッジプローブの使用などがあります。



図18: MPI マイクロポジショナ(左から右へ): MP25, MP40, MP50, and MP60

カーボンスチール製でバックラッシュの少ないMPIのマイクロポジショナはご用途に合わせて幅広く取り揃えております(図18、表2)。直感的に操作可能なZ軸操作、一体型の磁気ベースはポジショナ全体を保持します。MPIポジショナの特長として、小型なものからRF/ミリ波アプリケーション用の高分解能なもの(図19)まで、高精度なポジショニング精度、Z軸に沿ったプローブチップまでの制限の少ない力の伝達、長寿命での安定したコンタクトなどがあげられ、優れたRF校正および測定結果を実現します。



図19: マルチラインTRL校正に最適なMPI MP80-DX デジタルXゲージオプション付きマイクロポジショナ

表2: マイクロポジショナ/プローバ 対応マトリックス

プローバ / ポジショナ	TS50	TS150	TS150-THZ	TS200 TS2000/D/DP	TS200-SE/HP TS2000-SE/HP	TS300
MP25	●	●	●	●	○	●
MP40	●	●	●	●	●	●
MP50 MP50-HR	●	●	○	●	●	●
MP60 MP60-HR	○	●	●	●	●	●
MP60-MR	○	●	●	●	●	●
MP80 MP80-DX		○	●	●	●	●

● 推奨    ○ 可

## QAlibria®

MPIのQAlibria®校正用ソフトウェアは「複雑なRF校正をなるべくシンプルに」を目的に開発されました。長年のオーナーでのRFキャリブレーションの経験とマイクロ波測定の深い理解からQAlibria®の基盤は作られています(図20)。マルチタッチのグラフィカル・ユーザ・インタフェースは操作の論理的な手順によりキャリブレーション手順が直感的に理解でき進捗をモニターすることができます。不慣れたオペレータでも間違いを最小限に正確な校正結果を短い時間で導き出すことができます。

QAlibria®は業界標準の校正手法をサポートしております。QAlibria®大きな特長としてNISTのStatisticalソフトウェアの組み込みにより、はじめてNISTの計量学レベルでの測定/不確定解析、マルチラインTRLにも対応し、他の校正手法と共に簡単にご利用いただけます。

QAlibria®内のデータベースにはTITAN™プローブ、ACシリーズ校正基板の電氣的モデルがあらかじめ保存されています。これによりプローブと校正基板を選ぶだけの数十秒の簡単な作業となり、モデルの入力などがありません。

MPI QAlibria® は使いやすい多言語GUIにより英語のわからないオペレータでも簡単にご利用いただけます(図21)。またQAlibria®はRohde & SchwarzのZVA/ZNBネットワーク・アナライザをサポートしております。

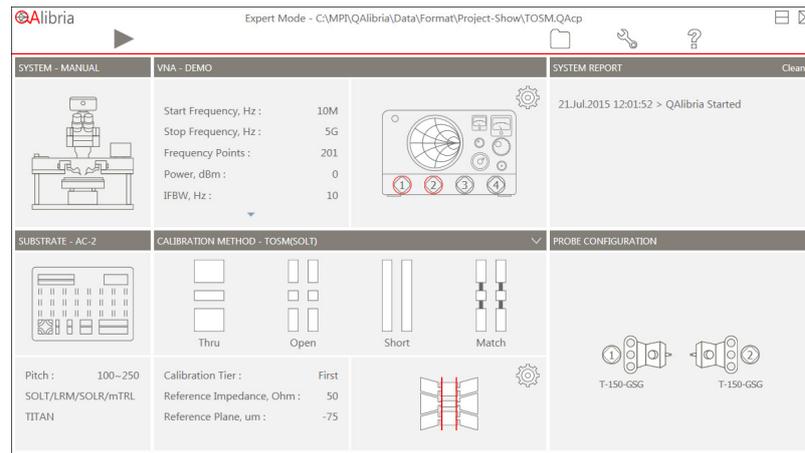


図.20: QAlibria®校正用ソフトウェアのダッシュボード画面

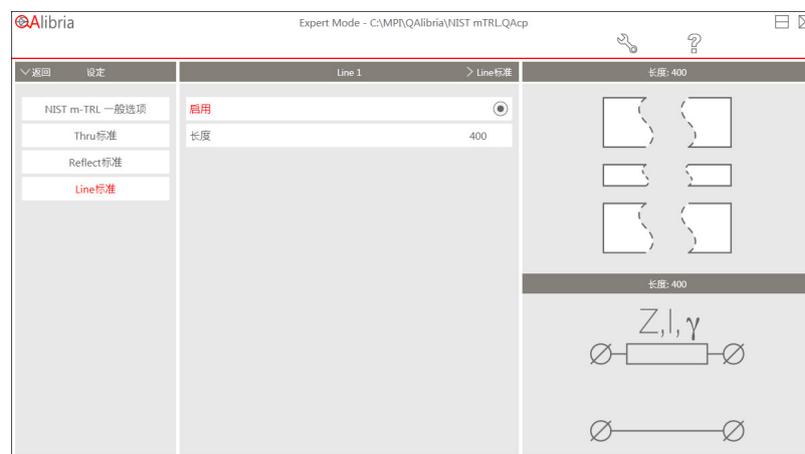


図21: 多言語対応QAlibria®ソフトウェア

## ウェハーレベルでのパワー・キャリブレーション

Rohde & Schwarz®社ZVA/ZNBネットワークアナライザはパワー・キャリブレーションに対応しており、測定基準面の校正されたパワーをウェハーレベルのプローブの先端まで正確に移動することが可能で、高周波半導体デバイスの特性評価する際の重要なポイントとなります。Rohde & Schwarz®社のNRP-Z58熱電対パワー・センサはDC~110 GHzまで対応しており、例えばZVA110ベクトル・ネットワーク・アナライザを違う周波数帯もしくは全周波数帯域でNRP-Z58と使うことで、一つの手順で校正することを可能にします。Rohde & Schwarz®NRP-Z58は校正プロセスを非常に簡単にするうえ、周波数帯域の制限のある複数のパワーセンサや、導波管から同軸へ変換するアダプタ、機器の複数回のつなぎ直し、ひいては複数回の校正の必要がなくなります。これにより、高精度で再現性の高いパワー・キャリブレーションが実現します。

## ■ 結論

現代のRFデバイスの複雑化と正確で信頼性の高い測定データの要求は、ウェハーレベルでの正確なデバイスの特性評価を困難にします。最新のベクトル・ネットワーク・アナライザとウェハー・プローバーを組み合わせることにより、高精度な測定結果、これまでになかった効率の良い測定が実現し、最適で完全な測定ソリューションが提供できます。

長年のRF/マイクロ波測定、オンウェハーのプロービングの経験から得た技術をもとに、MPIと Rohde & Schwarz社は協力し幅広い製品ラインアップの中に独自の機能を盛り込み、VNAとプローバーの校正、制御ソフト、システム構成からアクセサリまでインテグレーションを実現し他社に見られない測定ソリューションにて、厳しい測定要求を満足します。その結果、非常に精度の高いRFシステムの校正を実現し、安定して再現性のある測定結果が得られます。MPIおよび Rohde & Schwarz社により完全に統合された測定ソリューションにより直感的な測定手順で、間違いを低減し、RF測定の経験の浅いオペレーターの学習時間も低減することが可能です。

MPI Global Presence



Direct contact:  
Asia region: ast-asia@mpi-corporation.com  
EMEA region: ast-europe@mpi-corporation.com  
America region: ast-americas@mpi-corporation.com

MPI global presence: for your local support, please find the right contact here:  
[www.mpi-corporation.com/ast/support/local-support-worldwide](http://www.mpi-corporation.com/ast/support/local-support-worldwide)