

5G/6G に向けたミリ波帯オンウェハ計測技術

On-wafer Measurement at Millimeter-wave Frequency for 5G/6G Application

堀部 雅弘 坂巻 亮

Masahiro HORIBE and Ryo SAKAMAKI

国立研究開発法人産業技術総合研究所

概要

5G/6G 無線通信技術の商用化や研究開発の開始に加え、自動走行運転などでミリ波衝突防止レーダの普及が加速するなど、エレクトロニクス分野におけるミリ波帯の計測が重要度を増している。そして、その評価はミリ波帯オンウェハ回路評価が不可欠となっている。そこで、300 GHz を超える超高精度オンウェハ回路評価技術について紹介する。

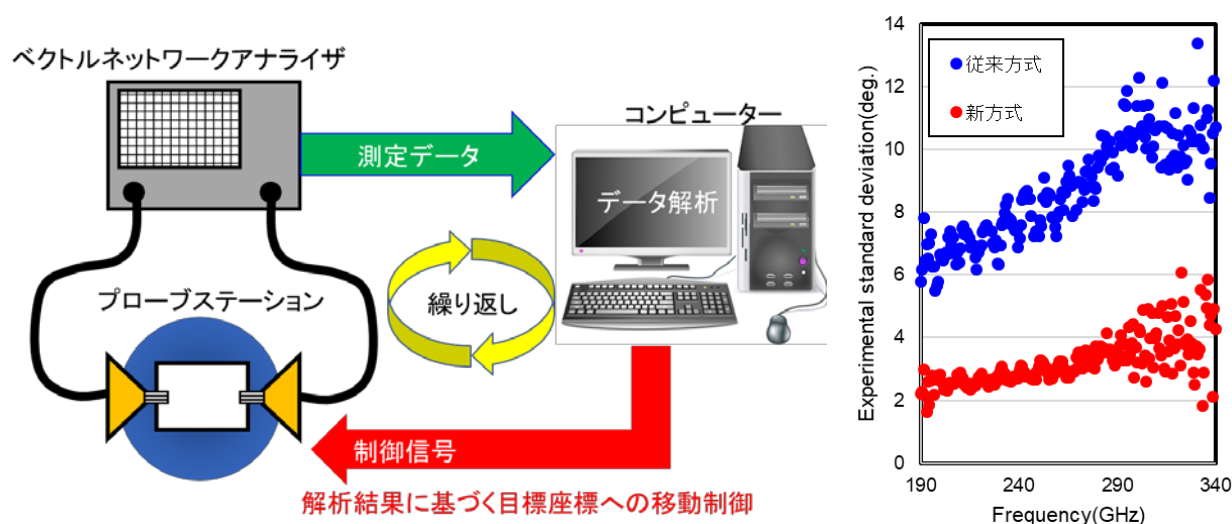


図1 (左)高精度オンウェハシステム概要と(右)300 GHz 超オンウェハ回路計測における校正の再現性 (従来方式(目視)と新方式(信号センシング方式))

Abstract

The research and development, additionally commercialization of 5G / 6G wireless communication technology and the spread of millimeter-wave collision prevention radar has accelerated important of research and development of millimeter-wave measurement technologies. For the evaluation, evaluation of circuit properties is indispensable. Therefore, the paper presents the latest on-wafer circuit measurement technique in millimeter wave frequency band, especially 100 GHz.

1. はじめに

第5世代無線通信のサービス開始に伴い、あらゆるモノがインターネット、センサでのモニタリングだけでなく、高精細4Kな医療用画像データなどを活用した遠隔医療診断などの本格的なIoT社会が到来しつつある。その一方で、通信トラフィック量の爆発的な増大が予測されていることから、5Gの普及に期待されている。そのため、無線としての利用は28GHz（米国では39GHz）、バックボーンの通信網としての光通信網向けの光変調器ではアナログ帯域で60GHz、120GHz等、高精細データのクラウドサーバー向け次世代データケーブル・コネクタでは、アナログ帯域で150GHzに達する可能性もあり、基板材料、デバイスや実装の各技術において高周波化が求められる可能性が高まっている。さらに、第6世代無線通信の議論も開始されている。ここでは、140GHz、220GHzおよび340GHzの周波数帯の利用も検討されており[1]、2030年代のサービスの開始も話題となっている。

このような背景において、評価技術は最終製品の性能評価だけではなく、回路、デバイス、基材さらにそれらの素材に至るあらゆる分野で電磁波特性の評価に対応する必要がある。さらに、それぞれの技術は個別に研究開発を進めることはできず、例えば、回路の実現にあたってはシミュレーションを行うが、そこには、測定結果からステイされたデバイスモデルの利用(2や、基板材料の誘電率を基にシミュレーションなど、それぞれの技術は深く関りあっている。

産総研では、このような高周波化、かつ、技術分野の連携や融合が重要となる中、それぞれの計測技術を高度化する研究に取り組むと同時に、複数の計測技術をシームレスに活用した評価や設計の支援を行える体制を整えている[2-4]。

2. ミリ波帯デバイス・回路計測の課題

オンウェハ計測の測定結果は、デバイスのベンチマークやデバイスプロセス・設計へのフィードバックに用いられてきた。近年、5Gやミリ波衝突防止レーダなどの普及により、化合物半導体やシリコンデバイスの高速化が進み、それに伴ってオンウェハ計測の高周波化も不可欠となっている。そして、通信システムも高度化する中で、回路設計・システム設計においても、デバイスの特性を利用した回路シミュレーションを利用する場面が増えてきている。以前は、比較的単純なデバイスモデルに基づき、デバイスの等価回路のパラメーターを抽出していたが、昨今では、非線形性やメモリ効果など、様々な現象を反省したモデルが考案されており、測定結果の精度と確度が

重要となっている。

一方で、ミリ波帯、100GHzを超える周波数においては、高周波プローブのコンタクト位置の僅かなずれから、測定結果が大きく異なることとなり、デバイスモデルパラメーターの抽出結果に直接影響し、精度の高いデバイスモデルを構築できない課題がある。この結果、回路やシステムの設計の仕様に耐えうるデバイスモデルを提供できないこととなる。

3. 目視に寄らない新たなプロービング技術

オンウェハ測定では、デバイスウェハをチップに切り出すことやコネクタを実装することなく、高周波プローブを対象のデバイスに直接、押し当てる事でデバイスや回路の電気特性を測定することができる。オンウェハ計測は、基本的な測定原理は従来のマイクロ波帯のオンウェハ計測と変わらない一方で、ミリ波帯では回路の小型化、ジグ等の小型化や微細化に伴い、これまでの測定方法では必要な測定精度を実現することが困難となってきている。

これまでのオンウェハ測定では、簡便な校正方法として、Short-Open-Load-Thru(SOLT)校正が広く用いられてきた。オンウェハ測定における校正では、基準器に押し付ける高周波プローブの押し込み量によって、高周波プローブと基準器の間の距離やパターンとプローブ付近電極の結合度が変化するため、校正の際には目視等でプローブの押し付け位置を調整する必要がある。おおむね50GHz以下の周波数帯域では、この位置合わせ精度による測定結果のばらつきは測定器のノイズフロア特性に比べて同程度以下であることが多いため、オンウェハ計測においては重大な課題とはならなかった。

しかし、ミリ波帯では、SOLT校正用のLoad基準器の不完全さ（反射が大きくなる）から、Short-Open-Load-Thru(SOLT)校正による高精度な評価が難しい。そこで、複数本の異なる長さの伝送線路基準器を用いたMultiline Thru-Reflect-Line(TRL)校正を適用することが推奨される。しかし、校正の際には、複数本の異なる長さの伝送線路基準器を測定するため、高周波プローブ間の距離を変えて測定する必要がある。現在、このプローブの位置合わせは、顕微鏡やカメラなどを用いた目視（あるいは、画像判定）で行われており、各標準伝送線路へのプローブの当たり方（厳密な位置や押さえ圧）が異なり、また、同じ基準伝送線路による校正を再度行った場合にも、再現よくプローブを同じ位置に充てることが困難である。そのため、ミリ波帯では測定結果のばらつきが増大することになる。

この測定結果のばらつき要因としては、目視による

人の操作が主な原因である。そこで、高周波プローブの接触位置の決定を目視やカメラで行わず、実際の高周波プローブで測定される S パラメーターの解析に基づいてプローブの位置を決定する技術を開発した。

開発した位置制御技術では、まずは高周波プローブと電極パッドとの位置関係を再現よく決定することができる。つまり、再現よく高周波プローブの原点出しを行うことができる。まず、高周波プローブの高さ方向の原点としての電極の表面を検出する必要がある。高周波プローブを電極上に配置してコンピューターによりプローブステーションを制御、プローブを徐々に（例えば $1\ \mu\text{m}$ ごと）、下げながら電気特性を測定する。高周波プローブが電極表面に接触しない限り、高周波プローブの先端は解放状態であるため反射特性はほぼ 1.0 で測定される。高周波プローブが電極表面に接触することで、プローブ先端が短絡状態になり、反射特性が大幅に変化し、ほぼ -1.0 で測定される。この変化を検出することで高周波プローブの高さ方向の原点、つまり電極表面との位置関係を再現良く決定することができる。

高周波プローブを電極のない基板上に接触させ、反射特性を測定する。この場合、高周波プローブ先端は解放状態であるため、反射特性はほぼ 1.0 として測定される。その後、高周波プローブを上げ下げ繰り返しながら接触させ、徐々に電極方向に近づけ、その都度、反射特性を測定する。高周波プローブの先端が電極端に接触すると、反射特性が変化し、ほぼ -1.0 で測

定される。この変化を検出することにより、電極端を原点として、高周波プローブ先端の位置関係を再現良く決定することができる。伝送線路の幅方向についても、同様に決定することができる。

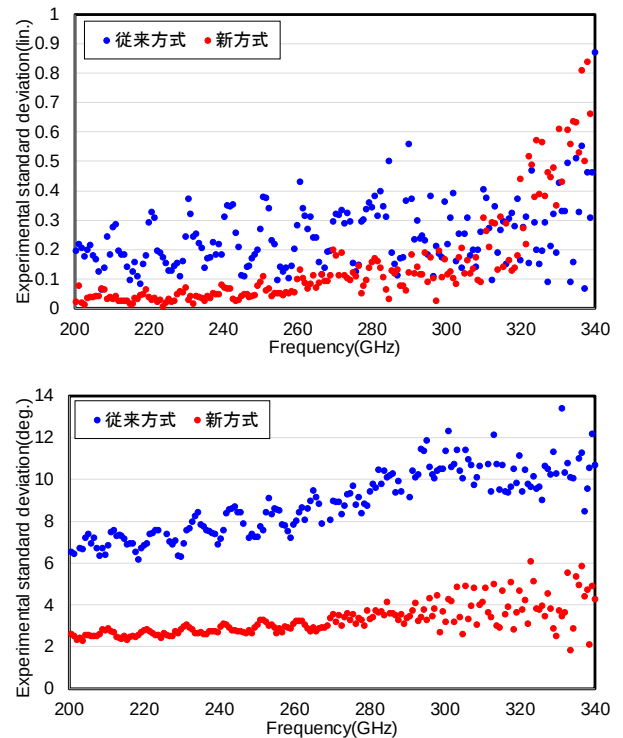


図3 マルチライン TRL 校正の再現性(4 回の校正の再現性) (上) 振幅、(下) 位相

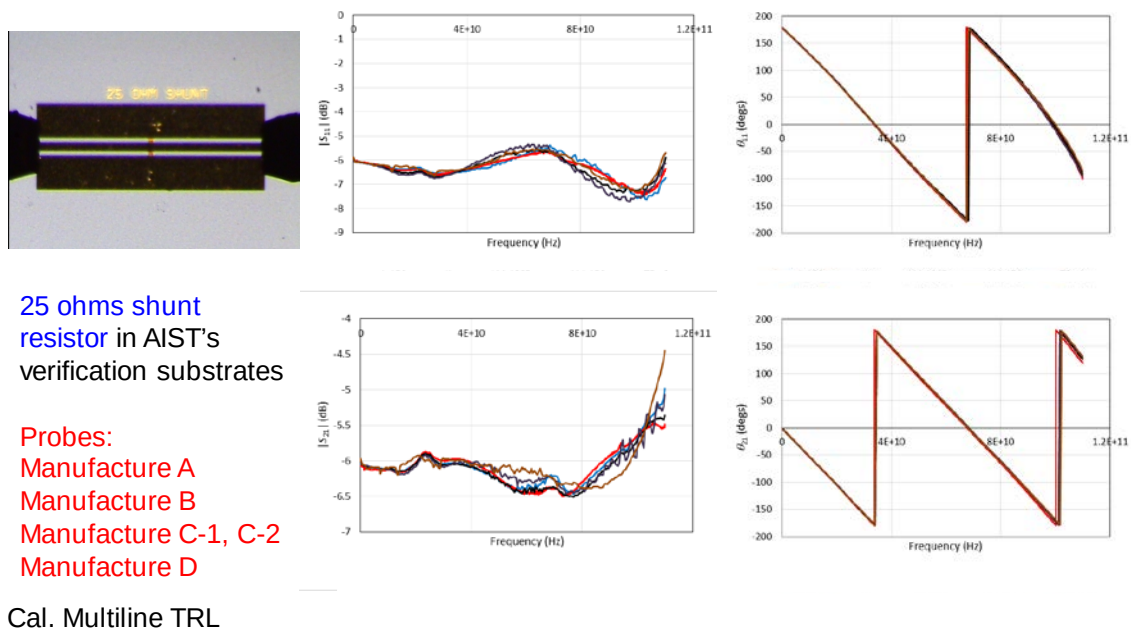


図4 新方式を採用した場合の異なる高周波プローブを用いた際の測定結果

4. 新方式の効果

4.1. 300 GHz 帯での測定・校正で世界一の再現性

ベクトルネットワークアナライザを用いたプローブ位置決め技術を用いることにより、従来の目視やカメラなどの接触位置の制御に比べ、高精度なプローブ位置制御が実現でき、340 GHz まで再現性の良い測定を実証した。例えば、300 GHz では、従来方式に比べて、4 回の校正の標準偏差は、伝送特性では振幅で約 50 %、位相で約 70 %の改善を実現している（図 3）。

4.2. 高周波プローブの種類に寄らない測定結果

従来の目視合わせでは、プローブの先端で位置合わせを行うが、プローブの種類ごとに、針先と実際のコンタクト部との距離が異なる。そのため、プローブの種類が異なることで異なることで、コンタクト位置がプローブごとに異なることとなり、その結果、測定結果もプローブの種類に依存することとなる。

一方、新方式ではプローブのコンタクト位置でプローブの位置決めを行っているため、プローブの種類による測定結果の影響を受けずに、測定を行うことができる。図 4 に 25 Ω シャント抵抗ラインの 110 GHz まで測定した結果を示す。5 種類の異なるプローブで測定した結果、反射および伝送の位相、振幅ともに、すべての測定結果が不確かさの範囲内で一致した。つまり、プローブのコンタクト位置を厳密に再現よく決めることができれば、プローブの種類による差はほとんど生じないといえる。

5. まとめ

ベクトルネットワークアナライザの測定結果に基づくプローブ位置制御技術を開発した。これにより、300 GHz 帯で高い再現性を実現するとともに、プローブの種類に寄らず同等の測定結果を得ることも確認した。今後は、デュアルプローブやさらなる高周波化に対応する予定である。

文 献

- [1] “It’s Never Too Early to Think About 6G Companies have barely begun deploying 5G networks, but that just means researchers are thinking about what comes next,” IEEE Spectrum 22 May 2018.
- [2] （国研）産業技術総合研究所プレスリリース：“窒化ガリウム／シリコンハイブリッド整流回路の動作を実証－宇宙機内でのセンサネットワークの無線給電を可能に－” 2018 年 11 月 6 日
- [3] （国研）産業技術総合研究所プレスリリース：“超高精度平面回路計測技術により 300 GHz 帯で印刷配線の性

能を評価－未開拓周波数領域を利用した通信やセンサの利用を加速－” 2019 年 5 月 17 日

- [4] （国研）産業技術総合研究所プレスリリース：“ミリ波帯高速無線通信の拡大を牽引する材料計測技術を開発－170 GHz までの超広帯域で高精度な誘電率測定を実現－” 2019 年 1 月 17 日
- [5] Masahiro Horibe, “Precision and Reproducible On-Wafer Measurement at Millimeter-wave and THz frequency,” International Microwave Symposium 2017 Workshop MWG-4.

著者紹介

堀部 雅弘

国立研究開発法人産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 電磁気計測研究グループ長, masahiro-horibe@aist.go.jp

坂巻 亮

国立研究開発法人産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 電磁気計測研究グループ, 研究員, ryo.sakamaki@aist.go.jp