

4-1-4 高周波デバイス測定環境整備

4-1-4 High-frequency Device Measurement Environment

安島 成雄 渡邊 一世 原 紳介 齋藤 伸吾

AJIMA Naruo, WATANABE Issei, HARA Shinsuke, and SAITO Shingo

先端 ICT デバイスラボで整備している高周波デバイス測定環境について、ネットワークアナライザ、周波数エクステンダやオンウェーハ・プローブステーション、スペクトラムアナライザやテラヘルツ時間領域分光装置について概説し、ミリ波・テラヘルツ波帯 (30 GHz ~ 3 THz) で動作する高周波デバイスやテラヘルツ帯での材料特性の測定環境装置について示す。

This paper presents an overview of high-frequency device measurement environment and equipment at the Advanced ICT Device Laboratory. The equipment, such as network analyzer and its frequency extender, on-wafer probe station, spectrum analyzer and THz-TDS, has been set for measuring high-frequency device performance and material properties at millimeter- and terahertz-wave bands (30 GHz~3 THz).

1 はじめに

先端 ICT デバイスラボは、産学官連携のオープンイノベーション拠点として開かれた研究施設である。光や高周波等あらゆる周波数帯を融合して活用できる革新的な情報通信デバイス要素技術を創造すべく、デバイスの設計・試作・実装・評価等の高度ハードウェア技術を基に研究開発に活用できる各種プロセスや測定のための設備・装置群を整備している。

本稿では、材料・光・高周波の要素技術を集積することで国際競争力を強化するために整備した測定機器の中で、ミリ波・テラヘルツ波帯 (周波数 30 GHz ~ 3 THz) で動作する高周波デバイスや導波管コンポーネントなどの性能測定や特性評価を行う高周波デバイス測定機器の概要を述べるとともに、先端 ICT デバイスラボでの高周波デバイス測定環境の整備状況について紹介する。

2 高周波デバイス測定装置の概要

2.1 ネットワークアナライザ

高周波デバイスや電子部品、電気回路等の特性評価では、電流電圧特性 (IV 特性) だけでなく周波数特性を求める必要がある。ネットワークアナライザは、被測定物 (DUT: Device Under Test) に入力した入射電力に対する、反射電力と透過電力の周波数特性として測定され、Sパラメータ (散乱行列、S 行列、散乱パラメータ) として表現される [1][2]。

なお、測定は振幅の特性だけを解析するものはスカラー・ネットワークアナライザ (SNA: Scalar Network Analyzer)、振幅と位相特性を同時に解析するものはベクトル・ネットワークアナライザ (VNA: Vector Network Analyzer) と分類される。先端 ICT デバイスラボで整備しているネットワークアナライザは全て VNA で、その測定可能周波数は最大 67 GHz である。なお、VNA 本体には同軸コネクタ (1.85 mm や 2.4 mm など) があり、同軸コネクタを有する DUT の Sパラメータ測定は可能である。

VNA は信号源と受信機の両方を持ち、周波数を掃引しながら測定するものである (図 1 (a))。内部信号源からの信号 (入力波) を DUT へ入力し、DUT からの反射波及び透過波を VNA 内部の受信機で検出する。図 1 で示す 2ポート Sパラメータ測定の場合、port1 及び port2 からの信号は VNA 内部信号源からの信号がカプラ (方向性結合器) を介して基準受信機 (a1 及び a2) で検波される。一方、DUT からの反射波及び透過波も同じくカプラを介して測定受信機 (b1 及び b2) で検波される。これら a1、b1、a2、b2 から Sパラメータが計算され、例えば port1 側の反射係数 $S_{11} = b_1/a_1$ であり、port1 から port2 への伝送 (透過) 係数 $S_{21} = b_2/a_1$ となる [3][4]。

なお、次項で述べる周波数エクステンダを VNA に接続することにより測定可能周波数を拡張することが可能となる (図 1 (b)、表 1)。これは周波数エクステンダにアップコンバータ/ダウンコンバータが内蔵されているためである。

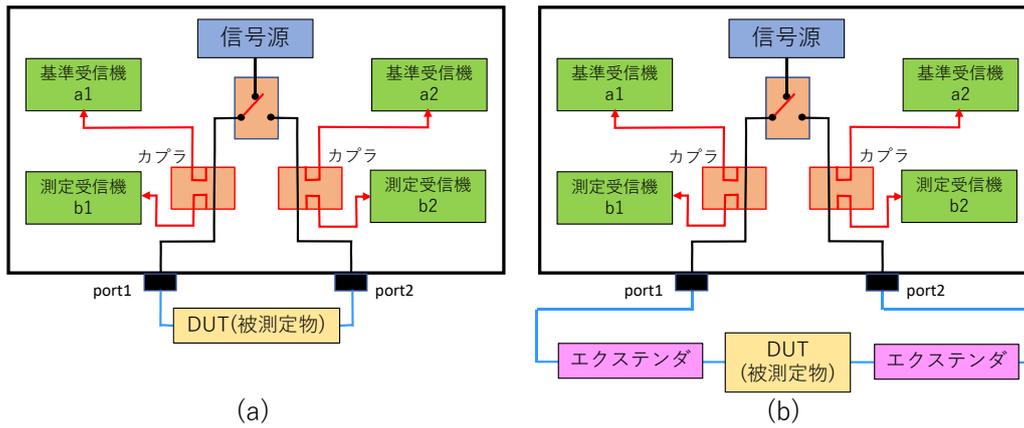


図1 2ポート・ネットワークアナライザのブロック図 [3][5]
 (a) VNA 本体のみ、(b) VNA +周波数エクステンダ

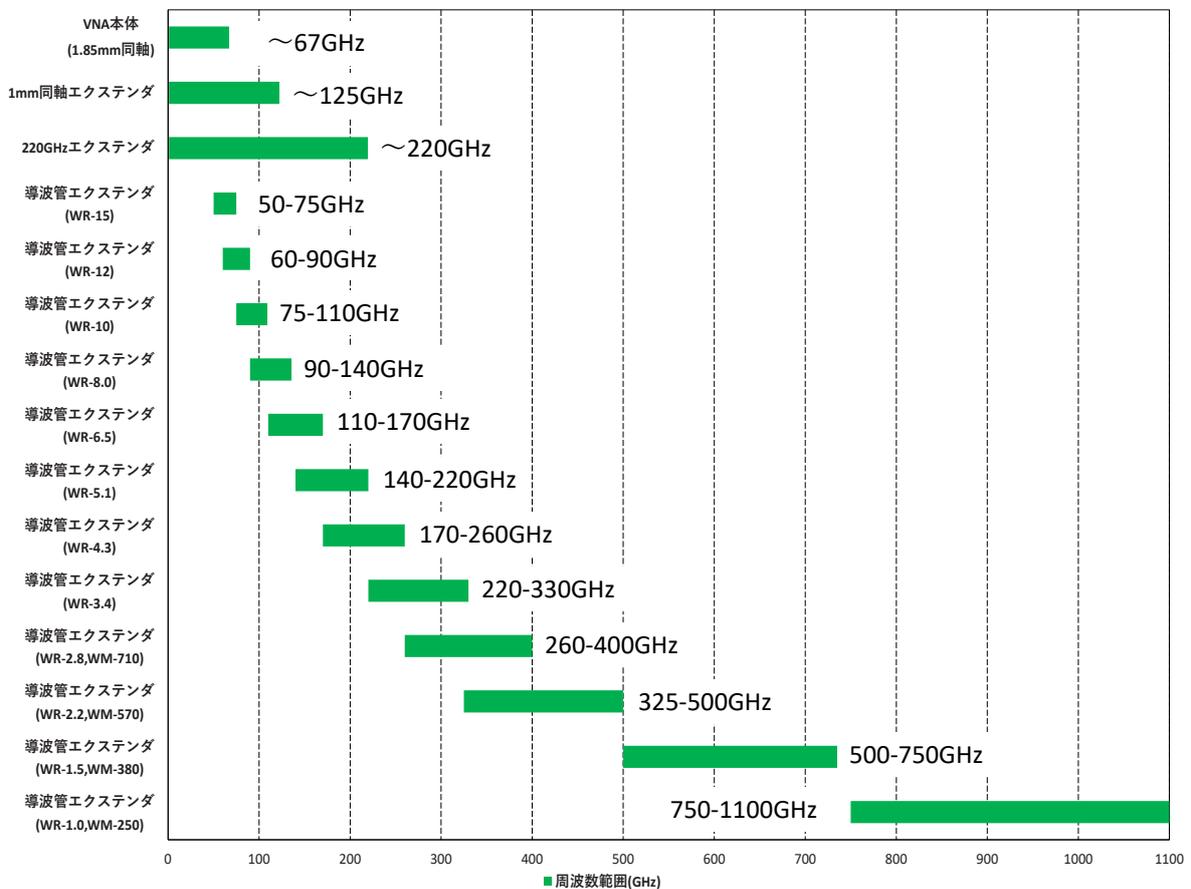


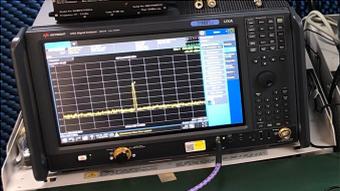
図2 先端 ICT デバイスラボで整備している VNA 及び周波数エクステンダの測定可能周波数帯 [7][8]

2.2 周波数エクステンダ

前項で述べたように、VNA 本体の測定可能周波数は最大 67 GHz などである。近年、周波数 100 GHz 以上での S パラメータ測定や 1.0 mm 同軸コネクタや導波管フランジを有する DUT の特性評価の要望も多く、VNA に周波数エクステンダを接続することにより、測定可能周波数帯を拡張させている (図2)。また後述のオンウェーハ・プローブステーションや高周波プローブと接続することによりウェーハ状もしくはチップ

状デバイスのオンウェーハ測定や、小型電波暗室内のアンテナ回転台と接続することによりアンテナ放射パターン測定が可能である。先端 ICT デバイスラボには日本国内で唯一、周波数 50 GHz から 1,100 GHz (= 1.1 THz) までをシームレスにカバーする周波数エクステンダ群を整備している。図2はその整備している VNA 及び周波数エクステンダの測定可能周波数帯を示したものである [6]。

表 1 主要な高周波デバイス測定装置一覧 [5][7][8][11][14]-[16][18]

測定装置名	型式等	メーカー	仕様・オプション等	外観写真
ベクトルネットワークアナライザ	E5247B	キーサイト・テクノロジー	ポート数：4 周波数：10 MHz ～67 GHz ダイナミックレンジ：124～129 dB 出力電力：13 dBm トレースノイズ：0.002 dB RMS オプション等：スペアナ測定、ミキサ測定、1 mm同軸モジュール	
	MS4647B	アンリツ	ポート数：2 周波数：70 kHz ～70 GHz ダイナミックレンジ：142 dB maximum 掃引速度：20 μsec/point 方向性：50 dB maximum ノイズフロア：-129 dBm minimum オプション等：手動プローバ（TS200-THZ）付き	
周波数エクステンダ	WR-15～WR-1.0	OML Inc. Virginia Diodes Inc. (VDI)	周波数：50～1100 GHz ダイナミックレンジ：95～110 dB @ BW = 10 Hz テストポート出力電力：-23～-3 dBm 安定性：±0.5 dB 方向性：30 dB 導波管フランジ規格：UG-387/U	
オンウェーブプローブステーション	EPS150	フォームファクター	ポート数：2～4 測定可能ウェーブ：150 mmΦまで チャックステージ分解能：5 μm 顕微鏡倍率：15～100 x オプション等：周波数エクステンダ搭載可能、除振台付	
シグナルアナライザ	N9041B	キーサイト・テクノロジー	周波数：2 Hz ～110 GHz 表示平均雑音レベル(DANL)：-174 dBm @ 1 GHz 最大解析帯域幅：1 GHz 最大リアルタイム帯域幅：255 MHz 位相雑音（10 kHzオフセット）：-135 dBc/Hz @ 1 GHz	
リアルタイムオシロスコープ	UXR1104A	キーサイト・テクノロジー	チャンネル数：4 帯域幅：110 GHz サンプルレート：256 Gsa/s/ch 最大2 Gpts×EUI 10ビットADC	
テラヘルツ時間領域分光装置	TAS7500SP	アドバンテスト	周波数レンジ：0.1～4 THz スキャンレート：8 ms/scan以下	
	TAS7500SU		周波数レンジ：0.5～7 THz（透過／反射モード） 0.5～6.5 THz（ATREモード） スキャンレート：8 ms/scan以下	

2.3 オンウェーハ・プローブステーション

オンウェーハ・プローブステーションはウェーハ状もしくはチップ状デバイスの電流電圧特性 (IV 特性) や S パラメータなどを高周波プローブや DC プローブ (ニードル針) と、先述のネットワークアナライザや周波数エクステンダ、半導体パラメータアナライザ等を用いて測定するための装置である。高周波プローブや DC プローブの針先は数 10 μm 程度と非常に細く、また DUT に形成されている電極部分も非常に小さいため、プローブステーションに装備されている XYZ 軸ポジショナ等を用いてコンタクト位置を高精度で制御できる。先端 ICT デバイスラボには、マニュアルプローブステーションとセミオートプローブステーションがある [9]–[11]。

2.4 スペクトラムアナライザ及びオシロスコープ

スペクトラムアナライザ (スペアナ) は DUT から出力される電気信号や高周波信号の周波数特性を表示・解析する測定器で、縦軸に電力または電圧を、横軸に周波数を表し、被測定信号に含まれる各周波数成分が、周波数軸上に対応した位置レベルの大きさとして表示される。類似した測定器であるオシロスコープは縦軸に電圧を、横軸に時間を表す。近年、スペアナにベクトルシグナルアナライザ (Vector Signal Analyzer: VSA) の機能を付与したシグナルアナライザも製品化されており、従来のスペアナでは測定できなかった単一周波数での信号振幅や位相の測定、エラーベクトル振幅 (Error Vector Magnitude: EVM) などが測定できるようになり、デジタル変調や信号解析に非常に強力な高周波デバイス測定機器である。

先端 ICT デバイスラボには、スペアナ (周波数 3 Hz ~ 50 GHz) とシグナルアナライザ (同 2 Hz ~ 110 GHz) のほか、4 チャンネル・リアルタイムオシロスコープ (帯域幅 110 GHz) や 8 チャンネル・リアルタイムオシロスコープ (同 6 GHz) も整備しており、さらに VSA を使用して変調信号の特性評価を行うことも可能である [12]–[15]。

2.5 テラヘルツ時間領域分光装置

光と電波の境界である周波数 (0.1 THz ~ 10 THz 程度) であるテラヘルツ (THz) 帯の電波を用いた分光計測装置である。THz 帯の広い周波数成分を持ったパルス信号 (入力信号) を試料に照射し、その透過信号または反射信号を時間波形として計測する。これをフーリエ変換することで、各周波数に対して、振幅情報と位相情報を同時に取得できる。これが、THz 時間領域分光方法 (Terahertz Time-Domain Spectroscopy: THz-TDS) の特徴であり、他の分光分析 (赤外分光分析、紫外可視分光分析など) とは大きく異なる点である。先端 ICT デバイスラボには、標準帯域用と広帯域用の 2 台

があり、それぞれ検出帯域は 0.1 ~ 4 THz 及び 0.5 ~ 7 THz である [16][17]。

3 主要な高周波デバイス測定装置の整備状況

先述した高周波デバイス測定装置の代表的な型式や仕様等を表 1 に示す。

4 おわりに

本稿では、先端 ICT デバイスラボで整備している高周波デバイス測定環境について、主要な高周波計測機器等の概要と整備状況について述べた。近年、従来の第 4 世代移動通信システム (4G) と比べ高速大容量通信を実現する第 5 世代移動通信システム (5G) の本格的な運用が始まっており、さらに 2030 年代に向けて次世代の移動体通信システム、(Beyond 5G/6G) の研究開発が進められている。このような Beyond 5G/6G や以降の移動通信システムが普及する時代を見据え、先端 ICT デバイスラボでは NICT の研究開発だけでなく、産学官との共同研究等に広く利用される最先端の高周波計測機等を整備するとともに測定手法の確立や高度化、さらには産学官の研究者や技術者への技術指導を含む高周波デバイス測定環境の整備を目指す。

【参考文献】

- オリックス・レンテック株式会社, “ネットワークアナライザとは,” <https://go.orixrentec.jp/rentecinsight/measure/article-31>
- シンクランド株式会社, “ネットワークアナライザとは,” <https://think-lands.co.jp/business/QA/PFDA/VNA.html>
- 桜井 昭寛, 加藤 友祐, 鈴木 和喜, 堀部 雅弘, “ネットワークアナライザによる S パラメータ測定,” Proc.MWE2015, no.WEB5B, 2015.
- 樺田 洋二郎, “〈電子計測技術〉 高周波計測の原理と実際 - ネットワークアナライザを中心として -,” 応用物理, vol.70, no.10, pp.1218-1222, 2001.
- キーサイト・テクノロジー株式会社, “テクニカルサポート (N5247B PNA-X マイクロ波ネットワーク・アナライザ, 900 Hz/10 MHz ~ 67 MHz),” <https://www.keysight.com/jp/ja/support/N5247B/pna-x-microwave-network-analyzer-900-hz-10-mhz-67-ghz.html>
- キーサイト・テクノロジー株式会社, “ミリ波・サブミリ波周波数エクステンダ Keysight X シリーズ シグナル・アナライザ用,” <https://www.keysight.com/jp/ja/assets/7018-04101/technical-overviews/5991-3162.pdf>
- Virginia Diode, Inc., “Summary of Performance Specifications VNA Frequency Extension Modules,” https://www.vadiodes.com/images/Products/VNA/Specs_Sheets/VDI-956_VNAX_Typical_Performance_2022.03.17.pdf
- Virginia Diode, Inc., “VNA Extension Modules Operational Manual,” https://www.vadiodes.com/images/Products/VNA/Product_Manual/VDI-707.1-VNAX-Product-Manual.pdf
- <https://metoree.com/categories/prober/>
- テクノダイヤ技術ブログ, “半導体製造工程に欠かせないプローブ針 (プローブニードル) とは,” <https://tecclub.com/2019/06/11/>
- FormFactor, Cascade EPS150TESLA 150 mm manual on-wafer power device characterization system, <https://www.formfactor.com/product/probe-systems/power-systems/eps150tesla/>
- アンリツ株式会社, “スペクトラムアナライザの基礎,”

- https://tm-jp.anritsu.com/rs/408-MNE-052/images/SPAkiso_webinar-2306.pdf
- 13 キーサイト・テクノロジー株式会社, “スペクトラム・アナライザーとは?”,
<https://edadocs.software.keysight.com/kkbopen/スペクトラム・アナライザとは? -589306483.html>
- 14 キーサイト・テクノロジー株式会社, “N9041B UXA シグナル・アナライザ, 2 Hz ~ 110 GHz”,
<https://www.keysight.com/jp/ja/product/N9041B/uxa-signal-analyzer-multi-touch-2-hz-110-ghz.html>
- 15 キーサイト・テクノロジー株式会社, “UXR1104A Infiniium UXR シリーズオシロスコープ: 110 GHz, 4 チャンネル”,
<https://www.keysight.com/jp/ja/product/UXR1104A/infiniium-uxr-series-oscilloscope-110-ghz-4-channels.html>
- 16 阪井 清美、谷 正彦, “テラヘルツ光エレクトロニクス,” 応用物理, vol.70, no.2, pp149-155, 2001.
- 17 株式会社アドバンテスト, “TAS7500 シリーズ: 製品仕様,”
https://www3.advantest.com/documents/11348/146157/spec_TAS7500_JP.pdf
- 18 アンリツ株式会社, “5G / Beyond-5G / 6G のデバイス評価で超広帯域シングル掃引 70 kHz ~ 220 GHz が可能な広帯域ベクトルネットワークアナライザ,”
https://mwe-online.apmc-conf.org/wp-content/uploads/2020/10/k_056.pdf



齋藤 伸吾 (さいとう しんご)

Beyond5G 研究開発推進ユニット
 テラヘルツ研究センター
 企画室
 室長
 博士(理学)
 テラヘルツ分光・光物性・超高速現象



安島 成雄 (あじま なるお)

ネットワーク研究所
 先端 ICT デバイスラボ
 研究技術員
 超高周波・化合物・光デバイスの設備技術、
 プロセス技術



渡邊 一世 (わたなべ いっせい)

未来 ICT 研究所
 小金井フロンティア研究センター
 超高周波 ICT 研究室
 室長
 博士(工学)
 超高周波電子デバイス・集積回路、高周波計測、
 半導体結晶成長

【受賞歴】

2016 Best Paper Award, IRMMW-THz2016
 2016 Best Industry Paper Award, 2016 IMS
 2009 SSDM Paper Award, SSDM 2009



原 紳介 (はら しんすけ)

未来 ICT 研究所
 小金井フロンティア研究センター
 超高周波 ICT 研究室
 主任研究員
 博士(理学)
 高周波集積回路、ナノ電子デバイス

【受賞歴】

2018 年 IEIECE 論文賞
 2017 年 RFIT2017 学会賞受賞
 2015 年 RFIT2015 学会賞受賞