

平面回路評価の高精度化を実現するプローブの制御技術

坂巻 亮^{†,††a)} 堀部 雅弘[†]

Realization of Accurate Evaluation of Planer-Circuits Using Precision Probing Technique

Ryo SAKAMAKI^{†,††a)} and Masahiro HORIBE[†]

あらまし 5G 通信に代表される通信技術の発展から、平面回路のミリ波帯利用が進んでいる。従来のマイクロ波帯と比べ、ミリ波帯では波長が短くなるため、十分な測定再現性を得るためには、より高度な評価技術が求められる。平面回路の評価にはプローブを用いた測定手法が用いられる。本論文では、平面回路の評価における測定再現性を高める測定技術を提案する。当該測定系の測定不確かさの解析を行い、その解析結果を踏まえて高精度なプローブ位置の制御技術を開発した。本論文ではその技術の概要と 190 GHz~340 GHz での実証実験について述べる。開発したプローブ位置の制御技術により、測定再現性はおおむね 2~10 倍改善した。

キーワード オンウエハ計測, S パラメータ, 高周波プローブ, 不確かさ, 測定技術

1. ま え が き

Internet of Thing (IoT) 技術の進展に代表されるように、通信技術は今日めざましく発展している。あらゆる電子機器がインターネットに接続される環境では膨大な通信が発生する事が予想される。従来の通信技術は主にマイクロ波以下の周波数帯を利用してきた。しかしながら、通信量が増大し、帯域の混雑が発生しており、通信品質の低下が懸念されている。また、通信の割り当ても行われているため、利用可能な帯域が残っていない。そのため、昨今では通信の高周波化が進んでおりミリ波帯に近づいている。例えば 5 世代 (5G) 通信技術では 28 GHz での通信技術が検討されている [1], [2]。通信周波数の高周波化が進むと、電波の直進性や大気減衰が大きくなるといった問題が発生する。これらの対策として、Massive-Multi-In Multi-Out (MIMO) やビームフォーミング技術の開発が盛んである [3], [4]。特に Massive-MIMO はアン

テナのアレー化が必要であり、これに伴ってアンテナの高集積化 (例えば、A4 サイズの領域に 128 個のアンテナが配される [5]) が見込まれる。アンテナには増幅器や AD・DA コンバータといった各種デバイス (約数 mm 角) も含まれ、消費電力の増大や、より精密に多数のデバイスを同期させるための制御技術も必要となる。そのため、これに対応するための低電力低ノイズ増幅器や位相器の開発も行われている [6], [7]。また、大容量高速通信手法である Wireless-Gigabit の利用周波数は 60 GHz である。他にも、車載レーダも実用化されており、76 GHz が利用されている [8]。様々な形で 100 GHz 以下で動作するデバイスが実用化されているが、研究レベルではサブミリ波帯に至る周波数帯で適用できる伝送理論やデバイス技術の開発も行われている [9]~[15]。特に 5G 通信の後継の次世代通信として 300 GHz 以下の周波数帯の利用が検討されており [16]、ミリ波帯~サブミリ波帯での通信技術は、産業及び研究分野で大きなトレンドとなっている。

これらの通信機器で利用されるデバイスには高集積化や小型化の観点からマイクロストリップ線路やコプレーナ線路といった平面回路が採用されている。平面回路は線路幅や線路長の他にも基板及び導体材料、基板厚みなど、設計における選択肢が極めて広い。そのため、より反射・伝送特性の優れた線路を得るためにも設計の最適化は欠かせない。しかしながら、測定装置

[†] 産業技術総合研究所, つくば市

Research Institute of Physical Measurement, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, 305-8563 Japan

^{††} 東京工業大学, 東京都

School of Materials and Chemical Technology, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Tokyo, 152-8550 Japan

a) E-mail: ryo.sakamaki@aist.go.jp

を含めて多くの機器は同軸線路を基準に作られているため、平面回路を利用するにあたっては構造を変換する箇所が必要となる。そして、構造の不連続点では電磁界が乱れるため、望まない反射や電磁波モードの信号が生じやすい。また、平面回路は同軸線路のように幾何的な対称性の高い構造ではないため、その厳密なモデリングも議論の余地がある [17]。特に高周波化すると正確なモデリングが困難になり、シミュレーションも困難になる。以上のように、平面回路の設計は同軸線路よりも多く課題を抱えているのが現状である。そのため、測定・評価技術を向上させることで正しいフィードバックを設計に与えることが重要である [6]。

平面回路の評価手法として、高周波プローブを用いたオンウエハ測定が広く利用されている。オンウエハ測定ではプローブを測定対象のデバイス (DUT) に直接押し当てる事で DUT の電気特性を評価する。オンウエハ測定ではコネクタを利用した平面回路—同軸の変換は不要であるため、より簡便に回路の評価を行う事ができる。これまでオンウエハ測定は高精度な校正基準器の定義について広く議論をされてきた。例えば Load 基準器を例にすると、プローブの押付量によって、プローブと基準器間の相互誘導インダクタンスが変化するため、Load 基準器の定義 (L_{term}) もプローブ押付量によって変化する [18]~[20]。更にミリ波帯では、 L_{term} は高次の周波数依存性を有するようになる。そのため、Short-Open-Load-Thru (SOLT) 校正に代表される Load 基準器を利用した校正手法は、測定の不確かさが増大する。Thru-Reflect-Line (TRL) 校正は二つのラインの差分をインピーダンスの基準として校正を行う。同軸では高精度な校正手法として TRL 校正が広く利用される。しかしながら、オンウエハ測定においては TRL 校正を実施するためには校正作業中にプローブ間の距離を変更する必要がある、作業量が増大するため測定再現性が劣化する [19]。この観点から、オンウエハ測定における測定再現性の向上は重要な開発要素である。

本論文ではオンウエハ測定における測定再現性を向上させる技術について議論をする。2. と 3. ではオンウエハ測定システムと 10 MHz~110 GHz (100 GHz 帯) における測定不確かさの解析について議論する。4. では測定再現性を向上させる高精度なプローブ制御技術を 190 GHz~340 GHz (300 GHz 帯) で実証する。5. では本論文を総括する。

2. 評価装置

本章では本論文中で利用した測定システムについて述べる。測定システムはベクトルネットワークアナライザ (VNA) に同軸ケーブルを介して高周波プローブを接続した構造になっている。プローブは精密ステージにより位置調整ができる。VNA 及び各ステージは matlab によるプログラムによって制御した。

本論文では 100 GHz 帯及び 300 GHz 帯の二つの周波数帯を取り扱う。3. では 100 GHz 帯のシステムを利用し、4. では 300 GHz 帯のシステムを利用した。各システムの構成を表 1 にまとめた。IF バンドワイドは 100 Hz, 測定点は 201 点とした。

3. 不確かさ解析

測定再現性を高める手法を検討するため、まずオンウエハ測定における不確かさ要因の解析を行った。本章における不確かさ解析手法は文献 [21] に詳細な記述がされている。

3.1 これまでの研究動向

同軸の VNA 測定系について、様々な不確かさ解析の報告がある [22]~[24]。従来はリップル法を用いた解析手法が利用されていたが [25]、昨今はコンピュータの処理技術が向上したため、モンテカルロ法による解析手法が盛んに利用されている [26]。オンウエハ測定に関しては、コプレーナ線路の製造誤差について調査されている [27], [28]。しかしながら、プローブ位置に関する不確かさを含めて解析した報告はなかった。そこで、まず不確かさ解析手法の開発を行った。

3.2 不確かさ解析

3.2.1 解析手法

モンテカルロ法に基づいた不確かさ解析アルゴリズムの開発を行った。乱数によって各基準器の測定値にバラつきを与え、VNA 校正アルゴリズムを通して最終的なデバイスの測定値のバラつきを得ることで解析する。本論文では、校正アルゴリズムとして TRL 校

表 1 装置構成

帯域名称	100 GHz 帯	300 GHz 帯
周波数	10 MHz~110 GHz	190 GHz~340 GHz
VNA	E8361A	N5222B
周波数拡張 ユニット	N5250A	V03VNA2-T/R
プローブ	infinity-GSG-150	infinity-GSG-75

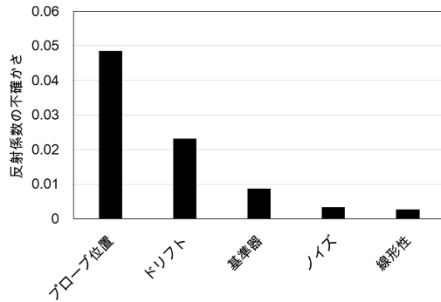


図1 100 GHzにおける反射係数の測定不確かさ解析

正を採用した。基準器の定義、ノイズ、線形性、システムドリフト、プローブの影響を評価した。プローブの位置については、ステージのX, Y, Z方向、プローブ間距離、ステージ回転軸方向の影響を含む。各不確かさ要因について基準器の測定値に対する寄与度をあらかじめ評価した。DUTとして2mm長の75Ω伝送線路を用いた。モンテカルロ計算は1000回繰り返した。

3.2.2 解析結果

図1に100GHzにおける75Ωの2mm長伝送線路の測定不確かさ解析結果を示す。図に示されたとおり、プローブの位置が最も大きな不確かさ要因であることが分かる。このことから、プローブ位置の再現性を高めることでオンウエハ測定における測定再現性を高めることができると考えられる。

4. プローブ位置の再現性の向上

前章で述べたとおり、プローブのコンタクト位置の再現性の向上が、オンウエハ測定の測定再現性の向上に効果的だと考えられる。そこで、本章ではプローブのコンタクト位置の再現性を高めるプローブの制御技術について述べ、300GHz帯での実証実験の結果について報告する。

4.1 これまでの研究動向

図2に顕微鏡で得たプローブの観察像の一例を示す[29]。プローブ位置を調整するときは、プローブの影を観察してその凸部の位置を決定する事になる。一般的に凸部の先端にプローブの先端が存在すると仮定して、プローブをDUTにコンタクトさせる。しかしながら、凸部の先端とプローブの先端が一致しているとは限らない。更に通常の使用によってプローブの先端位置は繰返し疲労により変化する。そのため、プローブ位置の再現性を高めるためには、測定の前にあ

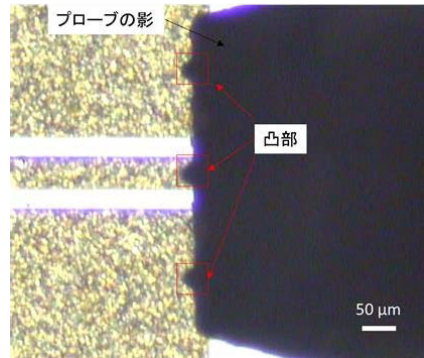


図2 プローブの観察像[29]

らかじめプローブをダミーパッドの上にコンタクトさせて、圧痕を観察する事でプローブの影に対するプローブ先端の相対位置を把握する必要がある[30]。しかしながら、これを実現するにはオペレータは相当の修練を積む必要がある。また修練を積んだオペレータでさえ、個人の癖があるため、オペレータ依存性は避けられない[31]。プローブ位置の再現性を高める手法として、画像解析によるプロービングが既に実用化されている[32]。しかしながら画像解析法では、顕微鏡を介して得たイメージを利用するため、凸部の先端とプローブ先端の不一致に起因する上述の問題を解決できない。こうした観点から、顕微鏡やオペレータに依らない新しいプローブの位置決め機構が必要であった。

4.2 プローブの位置決め手法

上述の観点から、筆者は顕微鏡を利用しない全自動のプローブ位置決め機構の開発をしてきた。そして、Sパラメータを解析することで、一般的な測定設備でプローブのX, Y, Z方向の位置を再現性高く制御できる手法を開発した[21], [29], [30], [33]。本論文ではY方向の位置の制御は行わないため、X方向及びZ方向の制御手法を図3に示す。まずプローブをおおまかにコンタクトパッド上に配する。これがオペレータに要求される最後の作業であり、以降の動作は測定システムによって自動的に制御される。また、この作業は最終的なプローブ位置に影響を与えない。次に、図3(a)に示されるように測定システムは反射係数をモニタリングしながらプローブを徐々に降下する。プローブがコンタクトパッドに接触すると反射係数が急しゅんに変わる。この急しゅんな変化を検出する事でプローブのコンタクトを検知する。このときのプローブのZ方向の座標を基準Z座標として記録する。次に、図3(b)

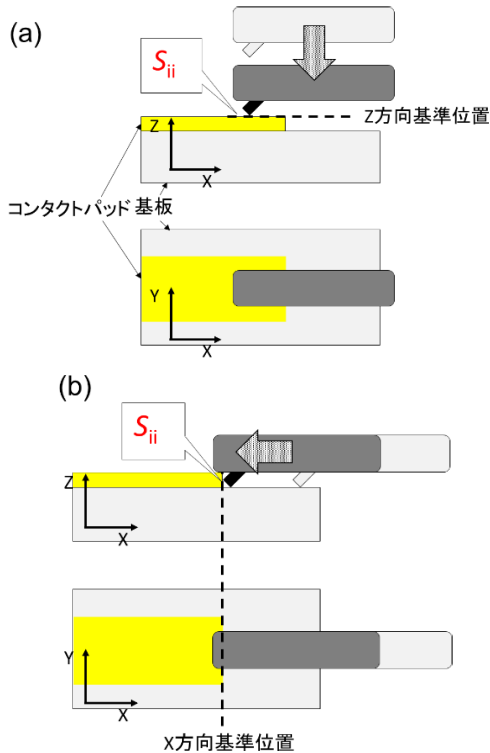


図3 プローブ位置決め動作 (a) Z方向, (b) X方向

に示されるように X 方向にプローブを移動し、プローブをコンタクトパッド外に配する。その後、基準 Z 座標より少々プローブを押付け方向に移動させる。例えば $10\ \mu\text{m}$ 程度押付ける。その後、コンタクトとリリースを繰り返しながらプローブをコンタクトパッドの方向に少しずつ移動させる。Z 方向と同様に、反射係数の急しゅんな変化を検出する事でプローブがコンタクトパッドに接触したことを検知し、そのときのプローブ位置を基準 X 座標として記録する。このようにして X, Z 方向の基準座標を定義することでプローブ位置の再現性を高めることができる。Y 方向についても同様に基準座標を定義する事ができる。従来の顕微手法では $10\ \mu\text{m}$ 程度バラついていたが、当手法を用いることで数 μm 程度まで改善した [29], [30], [33]。しかしながら、Y 方向については、コンタクトパッド端の間の距離がプローブ先の幅よりも十分に大きい必要がある。そのため、汎用的なコプレーナ線路を用いての調整は難しい場合がある。Y 方向のプローブ位置決めを確実に実施するためには、文献 [24] に示したような位置決め用基準器を用いる必要がある。

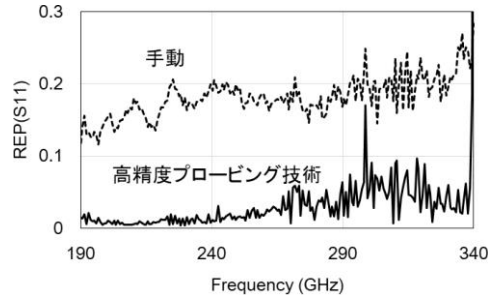


図4 300 GHz 帯における Thru 基準器の反射係数の測定再現性の比較

4.3 測定再現性の向上

文献 [30] と [33] では、4.2 に示したプローブ位置決め技術を用いて 100 GHz 帯で測定再現性が向上する事を実証した。本論文では 300 GHz 帯でも同手法が適用可能か検証した。フォームファクター製のインピーダンス基準基板 (ISS) のモデル 138-356 を用いてマルチライン TRL で 1 回校正した後、校正時に使用していない Thru 基準器の測定を 4 回実施した。各測定の間、ステージの X, Y, Z 座標の初期化を行った。得られた四つの S パラメータのデータセットから、式 (1) により測定再現性を評価した。式中で『std』は標準偏差を示す。

$$\text{REP}(S_{11}) = \sqrt{\text{std}(\text{Re}(S_{11}))^2 + \text{std}(\text{Im}(S_{11}))^2} \quad (1)$$

使用した ISS のスリット (シグナルとグランドパターンの間) 幅は約 $20\ \mu\text{m}$ であり、プローブ先の幅とほぼ同等であったため、Y 方向の調整は実施しなかった。手動でプロービングを行ったときと 4.2 の手法を適用したときの測定再現性を比較した。

まず、文献 [33] と同様の手法を用いて、プローブステージの機械座標からプローブ位置の再現性を評価した。その結果、プローブ位置の再現性は $1.9\ \mu\text{m}$ であり、文献 [33] と同等の水準であった。このように、プローブ位置の制御技術は 300 GHz 帯においても動作する事を実証できた。

次に、図 4 に測定再現性の比較結果を示す。全周波数帯にわたって、2~10 倍程度、測定再現性が改善している事がわかる。300 GHz 帯において、プローブ制御技術を用いることによって測定再現性を改善する事ができた。Thru 基準器の測定再現性が向上するという事は、すなわち当技術を利用することで校正再現

性を向上させることができる事を示唆する。一方でおよそ 260 GHz 以上ではノイズが大きくなってしまいう傾向があった。今後は 260 GHz 以上での測定再現性の劣化の原因を究明し、当該帯域での測定再現性を更に向上させる。

5. む す び

本論文ではオンウエハ測定における測定再現性を高めるプローブの制御技術について議論をした。3. ではオンウエハ測定においてはプローブ位置が測定結果に最も大きな影響を与えることを述べた。そこで 4. ではプローブ位置の再現性を高めるプローブ制御技術について述べた。当技術は S パラメータを解析する事によって、プローブ位置決めを行う。顕微鏡を利用せず、かつ全自動での測定を実現できるため、顕微鏡の性能やオペレータの影響を受けない。300 GHz 帯において当技術を実施したところ、プローブ位置の再現性は $1.9 \mu\text{m}$ であり、100 GHz 帯における制御精度と同等であった。開発したプローブ制御技術を用いることによって、100 GHz 帯だけではなく、300 GHz 帯においてもオンウエハ測定における測定再現性が向上した。一方で、約 260 GHz 以上の帯域ではノイズが大きくなった。今後は、約 260 GHz 以上の帯域において測定再現性を向上させる手法の検討を進める。

謝辞 本研究に関してご討論頂いた東京工業大学教授鶴見敬章先生に感謝する。

文 献

- [1] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol.49, no.6, pp.101–107, June 2011.
- [2] 奥村幸彦, 一瀬正則, 松永 彰, 山田雅也, 吉野 仁, 石津健太郎, "第 5 世代移動通信システム 5G の実現に向けた総合実証試験," *MWE2017 Microwave Workshop Dig.*, pp.13–18, Nov. 2017.
- [3] E.G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T.L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol.52, no.2, pp.186–195, Feb. 2014.
- [4] A.K. Hassan, M. Moinuddin, and U.M. Al-Saggaf, "Beamforming in massive MU-MIMO cellular networks: A stochastic geometry approach," 2016 6th ICIAS, Aug. 2016.
- [5] Wisdom, "5G 実現に向けた, NTT ドコモとの「Massive MIMO」技術の検証実験に迫る," NEC 株式会社, <https://wisdom.nec.com/ja/technology/2017031701/index.html>, 参照 Dec. 2018.
- [6] R. Minami, C. Han, K. Matsushita, K. Okada, and A. Matsuzawa, "Effect of transmission line modeling using different de-embedding methods," 41th Proc. Euro. Micro. Conf., pp.381–384, Manchester, UK, Oct. 2011.
- [7] A. Sethi, P. Aikio, R.A. Shaheen, R. Akbar, T. Rahkonen, and A. Parssinen, "A 10-bit active RF phase shifter for 5G wireless systems," 2017 NOR-CAS, Oct. 2017.
- [8] M. Kucharski, D. Kissinger, and H.J. Ng, "A Monostatic E-Band Radar Transceiver with a tunable TX-to-RX leakage canceler for automotive applications," *IMS2018 Dig.*, We1F-2, June 2018.
- [9] S. Fregonese, M.D. Matos, M. Deng, M. Potereau, C. Ayela, K. Aufinger, and T. Zimmer, "On-wafer characterization of silicon transistors up to 500 GHz and analysis of measurement discontinuities between the frequency bands," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.66, no.7, pp.3332–3341, May 2018.
- [10] S. Amakawa, A. Orii, K. Katayama, K. Takano, M. Motoyoshi, T. Yoshida, and M. Fujishima, "Process parameter calibration for millimeter-wave CMOS back-end device design with electromagnetic field analysis," 2014 IEEE Conf. Microelectronic Test Structures, pp.182–187, Udine, Italy, March 2014.
- [11] D.F. Williams, A.C. Young, and M. Urteaga, "A prescription for sub-millimeter-wave transistor characterization," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol.3, no.4, pp.433–439, July 2013.
- [12] F. Schnieder, T. Tischler, and W. Heinrich, "Modeling dispersion and radiation characteristics of conductor-backed CPW with finite ground width," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.51, no.1, pp.137–143, Jan. 2003.
- [13] M.Y. Frankel, S. Gupta, J.A. Valdmanis, and G.A. Mourou, "Terahertz attenuation and dispersion characteristics of coplanar transmission lines," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.39, no.6, pp.910–916, June 1991.
- [14] H.M. Heiliger, M. Nagel, H.G. Roskos, and H. Kurz, "Thin-film microstrip lines for mm and sub-mm-wave on-chip interconnects," *IEEE MTT-S IMS Dig.*, WE1B-7, pp.421–424, Aug. 1997.
- [15] C.D. Martino, E.S. Malotau, L. Galatro, and M. Spirito, "Direct mm-wave on-wafer calibration employing CMOS as a transfer device," 91th ARFTG Conference Dig., pp.1–4, Philadelphia, USA, June 2018.
- [16] Microwave journal, "DOCOMO, R&S Pioneering Beyond 5G with Frequency Bands Up to 150 GHz," *IEEE*, <http://www.microwavejournal.com/articles/31413-docomo-rs-pioneering-beyond-5g-with-frequency-bands-up-to-150-ghz>, 参照 Dec. 2018.
- [17] L. Galato, F. Mubarak, and M. Spirito, "On the definition of reference planes in probe-level calibrations," 87th ARFTG Conference Dig., pp.1–3, San Francisco, USA, June 2016.

- [18] A. Davidson, K. Jones, and E. Strid, "LRM and LRRM calibrations with automatic determination of load inductance," 36th ARFTG Conference Dig., pp.1-3, Nov. 1990.
- [19] A. Davidson, E. Strid, and K. Jones, "Achieving greater on-wafer S-parameter accuracy with the LRM calibration technique," 34th ARFTG Conference Dig., pp.1-3, Ft. Lauderdale, USA, Nov. 1989.
- [20] J.E. Pence, "Verification of LRRM Calibrations with Load Inductance Compensation for CPW Measurements on GaAs Substrates," 42nd ARFTG Conference Dig., pp.1-3, Dec. 1993.
- [21] R. Sakamaki and M. Horibe, "Improvement of on-wafer measurement accuracy with RF signal detection technique at millimeter-wave frequencies," IET Microwave, Antennas & Propagation, vol.11, no.13, pp.1892-1897, April 2017.
- [22] M. Garelli and A. Ferrero, "A unified theory for S-parameter uncertainty evaluation," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.60, no.12, pp.3844-3855, Nov. 2012.
- [23] A. Arsenovic, L. Chen, M.F. Bauwens, H. Li, N.S. Baker, and R.M. Weikle, "An experimental technique for calibration uncertainty analysis," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.61, no.1, pp.263-269, Nov. 2012.
- [24] R.A. Ginley, "Establishing traceability for SOLT calibration kits," 90th ARFTG Conference Dig., pp.1-3, Boulder, USA, Nov. 2017.
- [25] Guidelines on the evaluation of vector network analysers version 3.0, European Association of National Metrology Institutes, Bundesallee, Germany, 2016.
- [26] J.P. Hoffman, P. Leuchtmann, J. Schaub, and R. Vahldiech, "Computing uncertainties of S-parameters by means of Monte Carlo simulation," 69th ARFTG Conference Dig., pp.1-7, Honolulu, USA, June 2007.
- [27] A.A. Savin, V.G. Guba, and O.N. Bykova, "Uncertainty analysis in coplanar waveguide with unscented transformation," 86th ARFTG Conference Dig., pp.1-4, Atlanta, USA, Dec. 2015.
- [28] J. Leinhos and U. Artz, "Monte-Carlo analysis of measurement uncertainties for on-wafer thru-reflect-line calibrations," 71st ARFTG Conference Dig., pp.1-4, Atlanta, USA, June 2008.
- [29] 坂巻 亮, 堀部雅弘, "ミリ波デバイス評価技術の最新動向," MWE2017 Microwave Workshop Dig., pp.233-236, Nov. 2017.
- [30] R. Sakamaki and M. Horibe, "Realization of accurate on-wafer measurement using precision probing technique at millimeter-wave frequency," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.67, no.8, pp.1940-1945, March 2018.
- [31] T. Probst, R. Doerner, M. Ohlrogge, R. Lozar, and U. Arz, "110 GHz on-wafer measurement comparison on alumina substrate," 90th ARFTG Conference Dig., pp.1-4, Boulder, USA, Nov. 2017.
- [32] F.T.K. Retzow, T. Tiemerding, P. Elfert, O.C. Haessler, and S. Fatikow, "Automated calibration of RF on-wafer probing and evaluation of probe misalignment effects using a desktop micro-factory," J. Comput. Commun., vol.4, no.3, pp.61-67, March 2016.
- [33] R. Sakamaki and M. Horibe, "Accuracy improvement of on-wafer measurement at millimeter-wave frequency by a full-automatic RF probe-tip alignment technique," 91st ARFTG Conference Dig., pp.1-4, Philadelphia, USA, June 2018.

(2018年6月22日受付, 12月19日再受付,
2019年5月17日公開)



坂巻 亮 (正員)

2007 東京工業大学・工卒。2009 清華大学(中国)大学院修士課程了。2010 東京工業大学大学院修士課程了。2010 株式会社フジクラ入社。2014 産業技術総合研究所入所。現在、東京工業大学大学院博士課程在籍。ミリ波計測分野の研究に従事。



堀部 雅弘 (正員)

1996 名大工卒, 1998 名大博士前期課程修了, 2001 名大博士後期課程了, 工学博士。1991-2001 日本学術振興会特別研究員。2001-2003 (株)富士通研究所及び(財)国際超電導産業技術研究センター超電導工学研究所にて高温超電導エレクトロニクス応用研究, 2003-2004 (株)富士通研究所にてカーボンナノチューブエレクトロニクス応用研究に従事。現在, (独)産業技術総合研究所にて, Sパラメータ国家計量標準及び高周波誘電率・透磁率測定技術の研究開発に従事。IEEE, ARFTG, ANAMET, 電子情報通信学会, 電気学会, 応用物理学会会員。IEEE MTT-11 技術委員会, IEEE P287, IEEE P1785, IEC/TC46, IEC/SC46F, IEC/TC113 標準化委員, IEC/SC46F NW4 主査, URSI Commission A 国内委員会委員, 日本学術振興会メタマテリアル第187委員会委員, 日本電磁波エネルギー応用学会(JEMEA)誘電率透磁率データベース化ワーキンググループ委員, 電子情報技術産業協会(JEITA)接続部品標準化専門委員会コネクタグループリエゾン, ISO/IEC17025 試験所認定審査員。