

## 4-2 ミリ波帯通信装置及び試験評価技術の研究

### 4-2 *Research on Millimeter-wave Communication Devices Including Test and Measurement Technique*

松井敏明 清川雅博 安田浩朗 李可人

Toshiaki MATSUI, Masahiro KIYOKAWA, Hiroaki YASUDA, and Keren LI

#### 要旨

将来のミリ波通信システムの構成と、その一般への普及を実現するために必要となる高性能で実用的なミリ波帯無線通信装置技術の研究開発を進めている。本計画では、並行して進める「半導体デバイス研究」の成果と連携して、ミリ波回路部品の高性能化と新しいミリ波無線装置の構成技術の研究開発とを行う。実用化に必要な小型軽量で高性能、かつ低コスト化が可能となるミリ波装置技術の開発により、ミリ波利用のための基盤技術の確立を目指している。また、本研究の遂行において必要となる、ミリ波無線装置に関わる新しい試験評価技術の研究開発を併せて行う。ここでは、ミリ波通信装置技術に関連する研究計画の全体について概説する。

The CRL Millimeter-wave Device Group undertakes research to develop technologies for creating millimeter-wave (MMW) wireless communication devices with high performance and practicality. Such devices are essential for use in future MMW communication systems and for their dissemination to the public. This research program addresses the development of high-performance MMW circuit components and innovation in MMW radio device construction. These activities are to be pursued in conjunction with the outcome of the concurrently undertaken Semiconductor Device Research program. Our research and development of MMW device technologies has the aim of establishing key technologies for widespread use of the millimeter-wave frequency spectrum and enabling the features required for practical use - compactness, lightweight, high-performance, and low cost. Testing and measurement methods are also addressed under this program as essential techniques in developing MMW communication devices. This report outlines our program on MMW communication device technologies.

#### [ キーワード ]

ミリ波帯, 通信装置, 半導体デバイス, アンテナ・回路集積化, 試験評価技術  
Millimeter-wave, Communication devices, Semiconductor devices, Antenna-circuit integration, Test and measurement techniques

### 1 はじめに

国内の家庭におけるインターネット接続利用者数は、2001年7月末に2000万台を超え、また最近のxDSLや同軸ケーブルによる方式の伸びが著しい。接続方法が多様化し競争が激化している状況の中で、広帯域無線アクセスによるインターネットのブロードバンド配信も世界的規模

で進行しつつある。国内では、1998年12月に22GHz、26GHz、38GHzの周波数帯が加入者無線アクセス用として開放されたことを受け、現在主に22GHz帯を用いたFWA(Fixed Wireless Access)サービスが都市部を初めとして展開されつつある。また総務省の情報通信審議会は、屋外で100Mbpsの伝送を可能とする準ミリ波帯広帯域移動アクセス(25GHz)の技術的条件に関す

る答申(2001年9月)を行った。このように、K/Ka帯を初めとして、ミリ波周波数を用いた通信システムが現実のものになりつつある。

ミリ波通信に対する長年の構想と注がれた多くの努力にも関わらず、50GHz帯の簡易無線技術などを除き、ミリ波周波数帯の通信への利用はこれまで進展していなかった。ミリ波帯は周波数が高いことから広帯域通信に適する性質を持ち、今日の無線通信の急速な利用の拡大と普及が進む状況において、周波数有効利用の立場から、貴重な周波数資源としてますます重要性が高まっている。これまで、ミリ波技術の通信への実用化と一般への普及を妨げてきた主な要因として、ミリ波装置が大きく重く、高価格で扱い難いことがあった。しかし、近年の半導体デバイス技術の発展と、関連する多くのミリ波要素技術の進歩により、それらの問題は解決されつつある。要素技術としての半導体デバイス、MMIC化技術、アンテナ、フィルタ等の技術に進歩がみられ、ミリ波通信システムの実現に向けた技術研究や開発努力の成果は、この数年間にも着実に蓄積された。最近、相次いで行われた60GHz帯屋内無線システムに関する技術基準の策定に象徴されるように、ミリ波通信システムの実用化が現実的になってきている。

また、CRLが中心となって進めている成層圏プラットフォーム、高度道路交通システム(ITS)や衛星通信システムは、通信の公共施策や国家的な基盤整備に類する問題であり、通信システム全体への影響は大きく、多くの応用の可能性が期待されている。新しいサービスを可能とするためには、ミリ波帯通信装置の高性能化と新機能の開発が必要である。

一方、K/Ka帯に続く将来の屋外での高速通信の可能性や衛星通信応用として、90GHz帯の利用が考えられる。この周波数帯は大気による減衰が1dB/km以下であり、これまで主に地球観測やセンシング技術に使われてきた。米国FCCは昨年92~95GHzの検討を開始し、この周波数帯を用いたサービスのルール作りを行っている<sup>[1]</sup>。日本でも90GHz帯の実利用に向けた技術開発とシステム検討を開始すべき情勢となっている。

ミリ波を含めた将来の通信システムの構成と

その実現は、半導体デバイスの性能から高周波回路部品技術、無線装置技術までを含めた、ミリ波デバイスの性能に大きく依存する。また、その普及は、小型軽量で高性能、かつ量産化による低コスト化が可能なミリ波装置技術がどのように達成されるかに掛かっている。本計画では、並行して進める「半導体デバイス研究」の成果と連携して、ミリ波回路部品の高性能化と、新しいミリ波無線装置の構成技術の研究開発を行う。実用化に必要なミリ波装置レベルでの基盤技術の確立を目指す。また、本研究の遂行に必要なミリ波無線装置に関わる試験評価技術の研究開発を行い、世界的なミリ波デバイス技術研究の拠点として貢献することを意図している。以下に研究開発計画の細目について概説する。

## 2 ミリ波RF回路技術

高性能なミリ波通信装置の実現には、構成要素であるミリ波回路部品の高性能化と、各要素部品を集積一体化し、総合的に優れた性能を実現する構成技術の開発が必要である。ミリ波帯フロントエンド装置の標準的な構成の概略を図1に示す。ミリ波無線装置は、このように多くの要素部品から構成され、個別部品の高性能化と、それに伴う解析・設計技術、試験・評価技術、さらに、電子デバイス・素材レベルでの新しい技術開発が必要になっている。増幅器、ミキサ、変倍器、発振回路などの多くの機能回路部品の高性能化を実現するために、最も基本的な電子デバイス技術としてミリ波トランジスタの技術研究が、本計画と一体化して進められている。各部品及び無線装置として高い性能を確保するために、ミリ波の半導体デバイスや、各種の回路部品相互間の接続としてのフリップチップ実装技術や、マイクロマシン技術を組み合わせた新しい積層一体化技術を開発する。このとき、デバイスの特性を損なわないための、低い挿入損失や高い反射損失特性を確保することが重要になる。

以下にミリ波帯無線装置を実現する上の重点技術課題を列挙し、簡単な説明を加える。

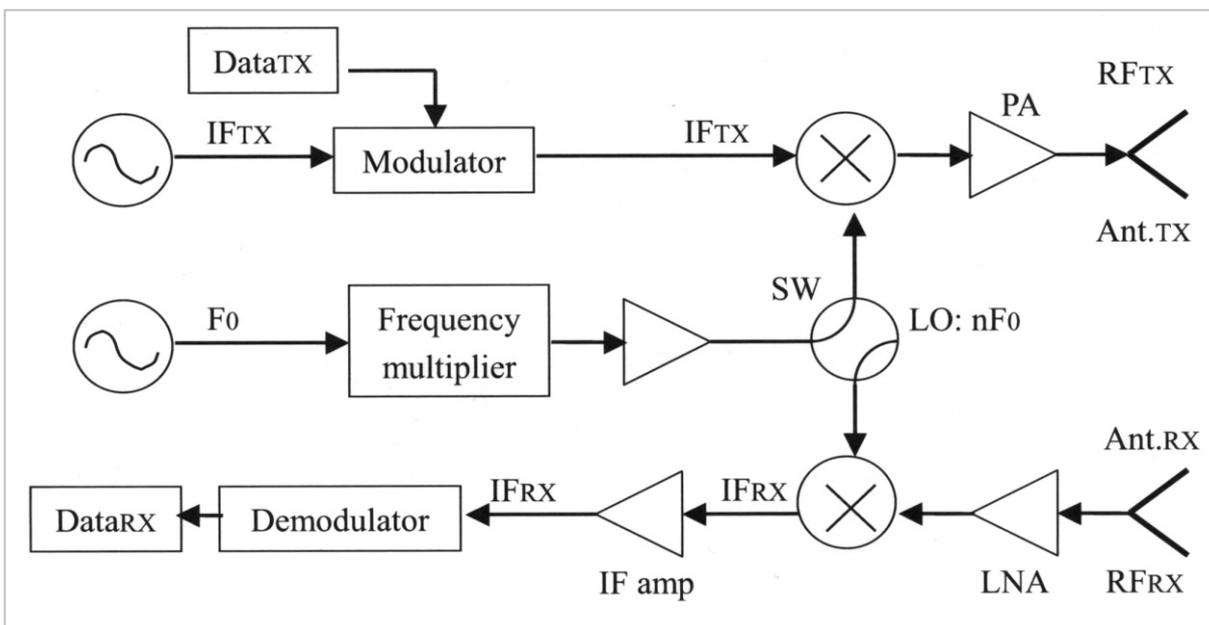


図1 ミリ波帯フロントエンド装置の標準的な構成の概略

### 2.1 ミリ波増幅器技術

増幅器は、通信装置を構成する最も基本的な要素技術である。特に60GHz以上の短ミリ波帯の増幅器の性能は、HEMT等のミリ波トランジスタの特性に強く依存する。CRLのInP系HEMTは、電流利得遮断周波数 $f_T=472\text{GHz}$ の世界最高速記録を達成している[2]。50nmゲートInP系HEMTでは、達成可能な小信号利得として、60GHzで15dB、90GHzで10dBの値が得られている[3]。このようにInP系HEMTにおいては、従来の一般的なGaAs系HEMTに比べて高周波域で高利得が得られるため、少ない段数で所望の利得の増幅器を実現することができる。また、InP系HEMTは受信機雑音特性の改善にとって極めて効果的である。受信機の雑音指標 $F_{12}$ (雑音指数 $\text{NF}[\text{dB}]=10\log F$ )は、Friisの公式により、

$$F_{12}=F_1+(F_2-1)/G_1 \quad (1)$$

で与えられる[4]。ここで $F_1$ 、 $F_2$ は各々初段増幅器の雑音指標、二段目増幅器以下の受信機の雑音指標を表し、 $G_1$ は初段増幅器の電力利得である。式(1)から明らかなように、デバイスの雑音指数が低いことだけでなく、単体デバイスの利得が高いことが受信機の低雑音化に寄与する。CRLのInP系HEMTは、デバイスの最小雑音指数( $\text{NF}_{\min}$ )として30GHzで0.7dB程度以下の値を示しており、超低雑音ミリ波受信機の実現が期

待される。InP系HEMTの研究と連携し、入力整合回路や実装に伴う損失を最小限に抑えるための最適化を行い、ミリ波低雑音増幅器技術の研究開発を行う。また、90~150GHz帯のデバイスパラメータの精密試験評価技術を開発し、将来の高性能な新しい短ミリ波帯装置技術の基礎となる増幅器技術の開発を進める。

一方、素子サイズが微細化するミリ波帯の電子デバイスでは、素子単体で扱える電力に制限が生じ、高周波化と共に増幅器の高出力化と、高能率化は重要な技術課題となっている。これに対しては、窒化物系半導体材料による高出力HEMTの開発計画と連携し、ミリ波高出力増幅器技術の研究開発と、空間電力合成技術との組み合わせによる高出力化を計画している。

### 2.2 信号源技術

近年の各種の高速デジタル通信システムは、低い位相雑音のキャリアを要求している。例えばQPSKの場合、離調周波数100kHzで-90dBc/Hz以下の位相雑音特性が必要とされる[5]。発振器の位相雑音はデバイスの低周波における $1/f$ 雑音に起因するものであり、この点でHBT(heterojunction bipolar transistor)がHEMTより優れていることが知られている。近年のHBTの特性向上と相まって、誘電体共振器等を用いたミリ波安定化発振器の位相雑音性能の向

上が見られている。

信号源を得るための他のアプローチとして、周波数逓倍を用いる方法がある。周波数逓倍による位相雑音の劣化は $20\log(N)$  ( $N$ は逓倍次数)、すなわち周波数の二乗に比例するが、これまでに報告されているマイクロ波・ミリ波帯の直接発振による位相雑音性能は、周波数の二乗以上の割合で劣化している。スプリアスの問題が回避できる限り、マイクロ波帯発振器を周波数逓倍してミリ波信号源を得る方法は有効である。

### 2.2.1 HEMT 逓倍器

ミリ波逓倍信号発生方法として、HEMTを用いる技術が知られている。HEMTを用いる場合、変換効率の高い周波数2逓倍器の多段接続により偶数次の逓倍波を発生させる方法が有効である。これまでに当グループでは、GaAs系HEMTを用いた3段の2逓倍器による28GHz帯8逓倍器の試作開発と試験評価を行い、変換利得を伴う良好な特性が得られている<sup>[6]</sup>。また、位相雑音の劣化は理論値どおり18dBであり、周波数逓倍を用いる信号源技術の有効性を裏付けた。

今後、高周波特性の優れたInP系HEMTを用い、MMIC化を含めたミリ波帯出力の周波数逓倍器の技術開発を行うと共に、高性能ミリ波信号源としてのHEMT逓倍器技術を開発する。

### 2.2.2 量子バリアバラクタ逓倍器

量子バリアバラクタは、半導体基板上に層状に形成される異なる原子の組み合わせによる薄膜結晶構造の中に、電気的なバリア層を持つダイオード(二端子素子)である。両端の電圧の増加に応じて空乏層領域の厚さが変化し、キャパシタンスが減少するバラクタダイオードとして作用する。キャパシタンスの変化は、電圧の正負に関係なく対称な特性となるため、DCバイアスを必要とせず奇数倍の周波数( $3f_0$ 、 $5f_0$ 、...)の効率の良い発生に利用できる。

このデバイスは、分子線エピタキシー(MBE)装置を用いて形成する際に、薄膜結晶構造中の電気的なバリア層を多層化して、ダイナミックレンジを大きくしたり、更に微細加工により素子インピーダンスの可変範囲を調整できる自由度がある。このことが、テラヘルツ領域の遮断周波数を可能とするため、ミリ波・サブミリ波帯の高出力信号源を実現する技術として極めて

有望である。これまでに、30GHz帯での逓倍波発生特性を調べ、逓倍効率を向上させる手法を提示した<sup>[7]</sup>。今後、デバイス構造や周辺回路の最適化を進め、ミリ波・サブミリ波帯の実用的な信号源技術として応用するための研究を行う。

### 2.2.3 ミリ波電力合成技術

従来のミリ波帯半導体発振器として、インパット発振器と、ガン発振器があげられる。いずれも効率が低いという欠点があるものの、真空管発振器に比べ低電圧で動作し、扱いやすく、特にスペクトル純度の良いガンダイオードは、準ミリ波からミリ波帯の発振素子として広く使われてきた。しかし、最近のトランジスタ技術の進歩により、DC/RF変換効率が高く扱いやすいトランジスタ発振器に置き換えられつつある。そのため、ガンダイオードの供給が停止される状態がこの1、2年の間に急速に進行した。一方で、ミリ波・サブミリ波天文学やサブミリ波分光研究のための局発信号発生の源発振に用いられてきたInPガンダイオードの供給が不可能となっており、100～140GHz帯の信号源の代替技術が求められている。このような状況から、InP系HEMTの利用、電力合成技術の開発を含め100～150GHz帯の50mW級信号源技術の開発が重要になっている。上述の逓倍器技術、トランジスタによる直接発振技術を含め、効率の良い電力合成技術によるミリ波信号源技術開発を行う。

## 2.3 周波数変換回路

HEMTを用いたミキサにより、低周波のベースバンド信号(又は中間周波信号)をミリ波信号と合成し、ミリ波帯の信号に変換させる送信機用のアップコンバータとして用いることができる。また、受信機側ではミリ波信号とミリ波局部発振信号とをHEMTに入力混合し、低周波の信号へ変換するダウンコンバータとして用いられる。高周波特性の優れたInP系HEMTを用いることで、短ミリ波帯でのミキサ性能を大幅に改善できる可能性がある。InP系HEMTを用いて、ミリ波帯ミキサ回路の最適構成条件を確立し、他の隣接する回路部品との集積化技術と併せ、ミリ波装置化技術の研究開発を行う。

## 2.4 フィルタ技術

ミリ波平面回路部品と組み合わせるフィルタ技術は、ミリ波回路部品すべてに共通する基本的な要素技術である。増幅器、ミキサ、周波数逓倍器、発振器等の構成において、低域通過フィルタ、帯域通過フィルタ、帯域阻止フィルタ、高域通過フィルタ、またこれらの組合せは、欠くことのできない基本的技術である。さらに、これらの回路部品が相互に結合される通信装置の構成では、理想的なフィルタ特性からのずれや、フィルタと回路部品との相互干渉が、無線装置としての性能を低下させる重大な要因になると考えられる。制御性の良い実装技術の開発と共に、積層構造や集積化に適した高Q値フィルタ、高性能ミリ波平面型フィルタ技術の研究開発を行う。さらに、各ミリ波部品技術の研究と組み合わせた高性能回路部品開発を行い、ミリ波装置の高性能化に役立てる。

## 2.5 高周波用マイクロマシン技術

近年、Si系素材のプロセス技術を用いて微細構造を形成するマイクロマシニングが脚光を浴び、マイクロメカニクスや薬学、医療を含む産業界の広範な分野に応用するための研究開発が進められている。マイクロマシン技術は、マイクロ波・ミリ波帯のデバイス構成技術として多くの新しい応用の可能性が考えられる。当グループでも、マイクロマシニングを用いた新しい高周波部品構成のための基礎的な研究を行っている。低挿入損失のスイッチや、可変フィルタ、低損失伝送路などのほか、短ミリ波・サブミリ波帯の高性能回路部品技術として重要になると考えられる。今後、短ミリ波帯での高性能受動回路部品技術及び半導体電子デバイスの極限性能を引き出す新しい技術を開発し、具体的な装置化技術の開発を進める。

## 3 無線通信装置技術

ミリ波無線通信システムを構成する通信装置として、もう一つの重要な技術課題は、ミリ波の空間との出入口に当たるアンテナ自体の構成技術と、アンテナとミリ波RF回路との結合部分の技術である。従来のマイクロ波・ミリ波の

通信装置では、RF回路とアンテナは独立した別個の技術分野であり、それらの相互接続には同軸コネクタや、導波管フランジが用いられていた。このような従来のアプローチで無線装置を構成する場合、(1)ミリ波帯で伝送路損失が急速に増加する状況下で、変換接続部を設けることによる実効伝送路長の増加や、変換部での整合の不完全性による特性劣化といった問題を生じさせる。さらに、(2)接続構造部分を各々に設けること自体が、通信装置自体を小型軽量化し低コスト化を図るための障害となる。

このような状況から、本計画で進めるミリ波帯無線通信装置技術研究では、RF回路部と平面型アンテナとの一体化技術が重要な技術目標である。このためには、近接して配置されるアンテナとRF回路との相互干渉を避ける工夫や、設計性と再現性の良い高性能な装置構成技術の開発が必要である。以下に、アンテナ技術を含む無線装置関連技術の研究課題について述べる。

### 3.1 ミリ波平面アンテナ技術

共平面(コプレーナ)線路に基づいたミリ波回路やフォトニクスデバイスとの集積化に適したアンテナとして、コプレーナパッチアンテナを提案した<sup>[8]</sup>。広帯域化など、アンテナの高性能化のための研究をマイクロ波帯で行い<sup>[9]</sup>、38GHz帯、60GHz帯のミリ波での研究を進めてきた<sup>[10]</sup>。また、準光学アンテナとの一体化のための60GHz帯マイクロストリップパッチアンテナの開発を行い、60GHz帯ガウシアンビームアンテナの励振素子として用いた特性試験評価を行ってきた。

今後、マイクロ波・ミリ波回路との集積一体化技術の開発に重点を置き、装置化・モジュール化技術の開発を進める。

### 3.2 準光学アンテナ装置

ミリ波帯では給電線路による損失が増加するため、高利得を得るために通常の平面アレーアンテナを用いると効率の劣化が著しくなる。スロットアレーアンテナ<sup>[11]</sup>やミリ波漏れ波アンテナ<sup>[12]</sup>など、高利得アンテナの高効率化の工夫がなされている。当グループでは高放射効率の低サイドローブアンテナとして、ファブリ・ペロ

一構造を用いたミリ波共振型アンテナ<sup>[13]</sup>や、近接配置の誘電体によるレンズ効果を用いた準光学的アンテナ<sup>[14]</sup>の研究開発を行ってきた。これらの準光学アンテナとミリ波回路との積層一体化技術の研究を進め、ミリ波帯通信装置の高性能化モジュール化技術を開発する。

### 3.3 放射型発振装置

放射型発振装置とは、高周波の発振周波数に関係する共振器に、電波の放射機能、すなわちアンテナとしての機能を持たせた無線装置である。発振のための回路とアンテナとが一体化された単純な構成を持つことから、信号伝送路やアンテナ給電線での損失が深刻な問題となるミリ波帯において、効率の良い新しい装置の構成技術、要素技術として、重要となると考えられる。位相雑音特性を向上させる手段として、ファブリ・ペロー共振器を用いる方法<sup>[15]</sup>と二次元平面アレー配置による方法<sup>[16]</sup>とについて研究開発を進めてきた。後者において、高効率な電力合成が達成されている。これらの放射型発振装置は、新しい簡易な無線装置技術として有望であり、また高効率な電力合成技術は、ミリ波帯の高効率な高出力送信源を実現する上で重要である。ミリ波通信装置として実用化すべく研究開発を進める。

### 3.4 光・ミリ波変換技術

ミリ波無線通信システムは、RF技術だけでなく、現在の広帯域通信網の根幹をなす光ファイバ系との融合によるROF(radio over fiber)技術をベースに研究開発が進められている。このシステムにおけるキーデバイスの一つが光・ミリ波変換装置である。この装置はITSの路車間通信システムや加入者無線システム(FWA)、CATVの無線分配システム等に共通に用いられ、それぞれのシステムにおいて重要な役割を果たす。当グループでは、高効率で出力の高い、高性能な光・ミリ波変換装置の研究開発を進めてきた。サブキャリアを載せた光波から、10mW以上の高いミリ波出力(60GHz, 38GHz)が実験において得られている<sup>[17]</sup>。この高出力特性結果に基づき、光・ミリ波変換装置と、空間にミリ波を放射するアンテナ装置との一体化というコンセプトを

提唱した。光・ミリ波変換装置とアンテナを一体化した装置は、ミリ波伝送による損失を回避できるだけでなく、最もシンプルで信頼性の高い光・ミリ波通信システムの構成を可能にする。一体化装置のモジュール化と、実用化のための研究開発を行う。

### 3.5 アダプティブアンテナ技術

アンテナ技術に関連する他の重要な課題として、ミリ波帯のアダプティブアンテナ技術があげられる。加入者無線系や屋内LAN、その他のミリ波帯通信システムの技術として、アンテナ指向性やビームの切り換え対応を可能とする新しいアンテナ技術を創製するための基礎的研究を行う。高速のデジタル制御技術とアナログデバイス技術、アンテナ技術及びRF回路技術の有機的な結合による新技術開発が必要とされる。

この章のまとめとして、当グループが想定しているミリ波通信装置の概観イメージを図2に示す。



図2 想定されるミリ波通信装置の概観イメージ

## 4 ミリ波帯試験評価技術

新しい電子デバイスや、従来の性能を超えるミリ波帯回路部品の開発、更に高性能ミリ波無線装置の研究開発を進める上で、各種の新しい計測手段、試験技術の開発が必要となる。新しい技術開発が必要となるミリ波帯試験評価技術の主なものについて以下に概説する。

### 4.1 デバイスパラメータ測定

デバイスの小信号特性を正確に把握し、回路設計に役立てることが重要である。高周波特性を示すSパラメータのほか、DC測定によるデー

タを併せて解析することで、HEMTや量子バリアバクタの小信号パラメータ抽出を行うことができる。パラメータによってはまだ十分な精度が達成されていないため、測定装置及び解析手法を改良することで抽出精度の向上を図る。また、将来の高性能な新しい短ミリ波帯装置技術の開発を進める上で必要となる、90～150GHz帯におけるデバイスパラメータの精密試験評価技術の開発を行う。

#### 4.2 雑音パラメータ測定

デバイスの雑音指数(NF)が最小になるような信号源インピーダンスは、入力整合を与える信号源インピーダンスとは一般に異なるため、これを測定によって直接求めることは低雑音増幅器を設計する上で有効な技術である。機械的チューナ等を用いてデバイスの信号源インピーダンスを変化させながらNFを測定し、数点のデータから、雑音指数が最小になるような雑音パラメータを導出する。校正プロセスや計算処理を経ることによるパラメータ誤差の解析の問題は重要である。また、V帯以上の高周波では、測定系の性能が不十分であることに起因する、雑音指数自体の測定誤差の問題もある。測定装置の高感度化のための改造を行い、試験評価技術の向上を図る。

#### 4.3 ロードブル測定

回路におけるデバイスの動作レベルが小信号でない場合、デバイスの振る舞いはSパラメータによるものとは異なってくる。実際の動作電力レベルにおけるデバイスの特性を把握することは、回路設計にとって重要である。機械的チューナ等を用いてデバイスの負荷インピーダンスや信号源インピーダンスを変化させながら出力電力を測定し、最適となる条件を測定によって直接求める。ミリ波帯での測定精度を改善するためにロードブル測定装置の改良を行い、得られるデバイスデータを用いて、大信号動作に基づくミリ波回路の高精度設計を行う。その結果は、高出力ミリ波装置を実現するために有効となる。

#### 4.4 誘電体素材特性試験評価

ミリ波平面回路部品やアンテナ用基板の誘電体特性は、各回路部品の設計上重要なパラメータであり、基板素材の誘電体定数や誘電損失の正確なデータを把握する必要がある。しかし、入手可能な基板材料の多くは、ミリ波帯での誘電率の精度が十分でなく、誘電損失特性にも大きなバラツキがあるのが現実である。誘電率の誤差は、回路部品のインピーダンスや共振周波数の設計値からのシフトとして表れ、誘電損失は、伝送路の損失、フィルタ性能の劣化やアンテナ効率の低下と密接に関係する。

そのため、ミリ波帯の平面回路部品の研究開発を進めるためには、誘電体基板材料の精密試験評価技術を確立する必要がある。当グループでは、ミリ波帯の精密素材計測法として標準的なファブリ・ペロー共振器法において、独自の準光学ミリ波共振器を開発し、ミリ波帯での材料測定を行ってきた<sup>18,19</sup>。現在、準光学共振器技術を用いた誘電体特性試験評価装置の操作性を改善するための改造を進めている。今後、新しい誘電体特性試験評価装置を用いて各種のミリ波誘電体基板材料の精密測定を行い、ミリ波部品技術研究開発に役立てる。また、ミリ波材料試験評価技術の標準化に貢献すべく、データの蓄積を行う。

#### 4.5 高周波表面導体損失特性評価

ミリ波帯における伝送損失に影響を及ぼす他の要因として、金属による高周波導体損失があげられる。導体損失は、伝送線路に用いられる金属膜の種類や膜厚、作製条件に依存する膜質などにより異なるため、金属膜のミリ波帯における特性の評価は重要である。これまでに、ミリ波帯における導体損失の絶対値を高精度に測定できる、独自の高周波表面導体損失特性評価システムを開発した<sup>20</sup>。より簡易な測定評価が可能となるように測定システムに改良を加え、種々の金属膜素材の特性を評価し、ミリ波回路部品の技術開発に役立てる。

## 5 まとめ

ミリ波を用いた将来の通信システムの実用化

と、普及のための基盤技術として必要となるミリ波デバイス技術の研究課題及び本研究の遂行に伴い要求されるミリ波無線装置に関わる試験評価技術の研究開発課題について述べた。

ミリ波帯の実用化のための技術開発には、要素技術である半導体デバイス技術、高周波回路部品技術、無線装置技術を含めた広範な技術の開発とそれらを統合した新しい装置技術の創製が必要である。本計画は、並行して進める「半導体デバイス研究」の世界水準にある成果と連携して、ミリ波回路部品の高性能化と新しいミリ波無線装置技術の研究開発を進めるものである。実用化に必要なミリ波装置レベルでの基盤技術の確立を目指している。多岐にわたる研究

の推進には、多くの民間企業研究者、国内外の大学関係研究者の連携と協力、大学院研修生の参加を受けて進めている。近年の市場経済の状況下、産業界におけるミリ波技術は、新たな研究開発という面で見るとむしろ停滞している。

このような状況において、ミリ波帯通信装置の研究開発を公的機関が推進する意義は大きい。特に90GHz帯以上の周波数に関しては、新しい利用形態の検討も含め、当所の果たすべき役割は大きい。今後とも、研究体制の拡充・整備を進め、世界屈指のミリ波デバイス技術研究の拠点として、ミリ波の実用化と基盤技術の確立のための技術的貢献を果たすことを目指していきたい。

#### 参考文献

- 1 M. J. Marcus, "Millimeterwave spectrum policy in the USA," in Third Topical Symposium on Millimeter Waves (TSMW2001) Tech. Dig. pp. 13-15, Yokosuka, Mar. 2001.
- 2 K. Shinohara, Y. Yamashita, A. Endoh, K. Hikosaka, T. Matsui, S. Hiyamizu, and T. Mimura, "Extremely high-speed lattice-matched InGaAs/InAlAs HEMTs with 472 GHz cutoff frequency," to be submitted to Jpn. J. Appl. Phys. in 2002.
- 3 K. Shinohara, T. Matsui, T. Mimura, and S. Hiyamizu, "Novel asymmetric gate-recess engineering for sub-millimeter-wave InP-base HEMT," in IEEE MTT-S 2001 International Microwave Symposium Digest, Vol. 3, pp. 2159-2162, 2001.
- 4 Haus, H. A. and R. B. Adler, "Optimum noise performance of linear amplifiers," Proc. Of the IRE, pp. 1517-1533, Aug. 1958.
- 5 E. Camargo, "Design of FET frequency multipliers and harmonic oscillators," Artech House Inc., Norwood MA p. 3, 1998.
- 6 M. Kiyokawa, M. G. Stubbs, and C. J. Verver, C. P. Carole, and T. Matsui, "A novel multistage active frequency multiplier," in Antennas 2000 Conference Proceedings, pp. 113-116, Jul. 2000.
- 7 H. Yasuda, M. Kiyokawa, and T. Matsui, "Quantum barrier varactor for coplanar waveguide applications," Electronics Letters, Vol. 37, pp. 1170-1171, Sep. 2001.
- 8 K. Li, C. H. Cheng, T. Matsui, and M. Izutsu, "Coplanar patch antennas: principle, simulation and experiment," in 2001 IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, Vol. 3, No. 73, pp. 402-405, Boston, USA, Jul. 2001.
- 9 K. F. Tong, K. Li, T. Matsui, and M. Izutsu, "Wideband coplanar waveguide fed coplanar patch antenna," in 2001 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 3, pp. 406-410, Jul. 2001.
- 10 K. Li, C. H. Cheng, T. Matsui, and M. Izutsu, "CPW patch antennas using ceramics substrate at millimeter-wave frequencies," 信学技報 MW2000-52, Vol. 100, No. 218, pp. 61-64, 北海道室蘭工業大学 Jul. 2000.
- 11 S. Nishi, K. Hamaguchi, T. Matsui, and H. Ogawa, "Development of millimeter-wave video transmission system II antenna development," in Third Topical Symposium on Millimeter Waves (TSMW2001) Tech. Dig., pp. 207-210.
- 12 T. Teshirogi, Y. Kawahara, A. Yamamoto, Y. Sekine, N. Baba, and M. Kobayashi, "A millimeter-wave dielec-

- tric leaky-wave antenna with low-profile and high efficiency," in Proc. Of ISAP-2000, 2A2-3, pp. 457-460, Fukuoka, Japan, Aug. 2000.
- 13 T.Matsui and M.Kiyokawa, "Gaussian beam antenna," in International Conference on MM & Sub-MM Waves and Applications, Conferece Digest SPIE Vol.2250, pp.609-700, 1994.
  - 14 A. Yamada and T. Matsui, "CPW-Fed Lens Antenna for 25 GHz-Band Wireless Communications," in 29th European Microwave Conference, Munich, Germany, Oct. 4-8, 1999, Conference Proceedings Vol.3, pp.5-8, 1999.
  - 15 M.Kiyokawa and T.Matsui, "A new quasi-optical oscillator with Gaussian output beam," IEEE Microwave and Guided Wave Letters Vol.4, pp.129-31, 1994.
  - 16 M. Murata, A. Kishi, S. Ohmori, and T. Matsui, "Planar radiating oscillator using butterfly-shaped patch element and spatial power-combining array," Int. J. of Infrared and Millimeter Waves, Vol. 21, No. 9, pp. 1529-1540, 2000.
  - 17 K. Li, J.X. Ge, T. Matsui and M. Izutsu, "Millimeter-Wave Sub-carrier Optical Modulation, Photo-detection and Integration with Antenna for Optic Fiber Link System," in 1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Anaheim, Jun. 1999, Digest pp.1015-1018, 1999.
  - 18 T.Matsui, K.Araki and M.Kiyokawa, "Gaussian-beam open resonator with highly reflective circular coupling region," IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., Vol.41, pp.1710-1714, 1993.
  - 19 Ph.Coquet, T.Matsui and M.Kiyokawa, "Dielectric Measurements in the 60GHz Band Using a High-Q Gaussian Beam Open Resonator," IEICE Trans. on Electronics, Vol.E78-C, pp.1125-1130, 1995.
  - 20 T.Matsui, M.Kiyokawa and K.Araki, "Absolute loss measurement of higly reflective samples by using a high Q Gaussian beam open resonator at short millimeter wave frequencies," in 1995 IEEE MTT-S Digest, Vol.2, pp.557-560, 1995.



まつい としあき  
**松井敏明**  
 無線通信部門 ミリ波デバイスグループリーダー  
 高周波精密計測、ミリ波要素技術  
 matsui@crl.go.jp



きよかわ まさひろ  
**清川雅博**  
 無線通信部門 ミリ波デバイスグループ主任研究員  
 ミリ波デバイス  
 kiyokawa@crl.go.jp



やすだ ひろあき  
**安田浩朗**  
 無線通信部門 ミリ波デバイスグループ研究員  
 ミリ波デバイス  
 yasuda@crl.go.jp



李 可人 (Keren Li)  
 基礎先端部門 - 光情報技術グループ主任研究員 工学博士  
 光通信、マイクロ波フォトンクス、マイクロ波工学、アンテナ  
 keren@crl.go.jp