

数十Gbpsの高速無線通信に向けた テラヘルツ波帯小型受信機

Compact Terahertz Receiver for Short-range Wireless Communications of Tens of Gbps

● 中舎安宏 ● 芝 祥一 ● 川野陽一 ● 高橋 剛

あらまし

あらゆる機器がネットに接続され、大量のデータが行き来するハイパーコネクテッド・ワールドの形成を迎えようとしている。それを支えるキーテクノロジーの一つである無線通信には、大量のデータを高速に伝送することが要求される。無線通信システムの伝送速度は年々上昇しているが、近い将来、現在の携帯端末の100倍以上となる数十Gbpsから数百Gbpsに達すると予想される。周波数が100 GHzを超える電波はテラヘルツ波と呼ばれ、現在の携帯端末が利用する電波に比べて100倍以上広い周波数帯域が利用できる。テラヘルツ波の利用が実現すれば、100 Gbpsに迫る高速無線通信が可能となり、例えば4Kや8Kといった高精細映像の瞬時伝送、携帯端末間のデータ交換、携帯端末－サーバ間のバックアップなどへの応用が期待されている。

本稿では、テラヘルツ波通信の実現を目指して富士通と富士通研究所が取り組んでいる、インジウムリン系高電子移動度トランジスタ(HEMT: High Electron Mobility Transistor)技術と、それをを用いた超高周波回路、および実装技術を紹介する。また、これらの技術を適用して、世界最小サイズとなる300 GHz帯20 Gbps受信機を試作した結果についても報告する。

Abstract

In the near future, trillions of things such as mobile smart devices, machine-to-machine (M2M) platforms, and sensors will be connected to networks and a huge amount of data will be flooded to cloud networks. A “hyper connected world” is dawning. Wireless communication systems that support this trend are required to be able to send a huge amount of data instantaneously. The transmission speed of the wireless communication systems has been increasing year by year and is anticipated to reach tens of Gbps and beyond. Radio signals with a frequency greater than 100 GHz are called terahertz (THz) waves, and they offer a usable frequency band that is more than 100 times wider than that used by current mobile systems. Such systems that use the THz-wave band will be able to increase the speed of communications up to 100 Gbps or more. Therefore, THz-wave communication systems are expected to be used in such applications as front haul systems in cellular networks, rack-to-rack or inter-rack communications in data centers, instant data downloading systems for 4K or 8K HD video, and so on. This paper describes our indium phosphide (InP)-based high electron mobility transistor (HEMT) technology, THz circuit design techniques, and packaging techniques for constructing compact apparatus, which are being developed by Fujitsu and Fujitsu Laboratories to realize THz-wave communication systems. This paper also reports on a compact 300 GHz receiver capable of receiving a 20 Gbps data stream and its application demo.

まえがき

スマートフォンやタブレットなどの携帯端末では、動画や音楽の配信などに高速な無線データ通信が幅広く利用されている。今後は、4Kや8Kといった超高精細映像やハイレゾリューション・オーディオ音源に代表される大容量のデータをダウンロードするために、更に高速な無線通信が求められる。図-1に示すように、携帯電話や無線LANなどの各種無線通信システムの伝送速度は年々上昇し、最近では数Gbpsに達しており、今後は数十～数百Gbpsに達すると予想される。伝送速度を向上させるために、広い周波数帯域が確保できる高い周波数の電波が利用される傾向にあり、60 GHz帯やE-band（80 GHz帯）のミリ波帯を利用する通信サービスも商用化されてきた。

100 GHzを超える電波はテラヘルツ波と呼ばれ、分光・分析、イメージング、通信など多くの分野の関心を集めている⁽¹⁾。特に、275 GHz以上の電波は用途が特定されておらず、未利用の状態にある⁽²⁾。通信応用の観点では、テラヘルツ波は周波数が高く、現在の携帯端末が利用している電波に比べ100倍以上広い帯域幅を確保できることから、これまでの無線通信ではなし得ない100 Gbpsに迫る高速無線通信が実現する可能性がある。ただし、テラヘルツ波は大気減衰の影響を強く受けるため、主に携帯電話システムのフロントホール、データセンター内通信、高速ダウンロードなどの近距離通信への応用が検討されている⁽³⁾。

テラヘルツ波通信の研究は、フォトダイオードなどを用いるフォトリニア空間の技術が先行し

てきた⁽⁴⁾。近年、トランジスタなど半導体デバイス技術が進歩し、エレクトロニクスベースの技術の開発が始まり、伝送実験についても報告されるようになってきた⁽⁵⁾。

富士通と富士通研究所では、1979年の発明以来アナログ・デジタル両分野で成果を蓄積している高電子移動度トランジスタ（HEMT：High Electron Mobility Transistor）⁽⁶⁾をベースに、テラヘルツ波応用の実現に向けたデバイス、回路、実装といった要素技術の開発を進めている。

本稿では、総務省委託研究の一環として日本電信電話株式会社（NTT）、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）と共同で行ったものの中から、富士通と富士通研究所が担当した300 GHz帯テラヘルツ波の受信技術を中心に、デバイス技術、受信用回路技術、実装技術の順に報告し、最後に、高速ダウンロードをユースケースと想定して開発した、容積1 cc以下の小型受信機を紹介する。

超高周波用インジウムリンHEMT技術

化合物半導体を用いたHEMTは高速性、低雑音性に優れており、衝突防止用車載レーダー⁽⁷⁾や衛星放送用受信機など、身近なところで今日のセンシングや通信技術を支えている。

インジウムリン（InP）を用いたHEMT（InP HEMT）は、InP基板上にチャネル層（電子走行層）となるインジウムガリウムヒ素（InGaAs）と電子供給層となるインジウムアルミニウムヒ素（InAlAs）を積層した構造を有する。チャネル層にInGaAsを用いると優れた電子走行特性が得られるという特長がある。このため、従来のGaAs HEMTや近年注目を集める窒化ガリウム（GaN）HEMTと比べ、高周波・低雑音の点で優位であり、微細シリコンデバイスの性能を大きく上回る。筆者らはこれまでに、InP HEMTを用いて94 GHz帯パッシブイメージセンサー⁽⁸⁾や70-100 GHz帯インパルス無線通信機⁽⁹⁾などを開発し、100 GHzまでの動作能力を実証した。しかし、テラヘルツ波通信を実現するには更なる性能向上が必要となる。

無線通信デバイスとして重要な性能指標は、最大動作周波数（ $f_{\max}$ 、最大発振周波数）である。無線周波数に対し、2～3倍の $f_{\max}$ が必要とされる。上述したInP HEMTの $f_{\max}$ は約300 GHzであったた

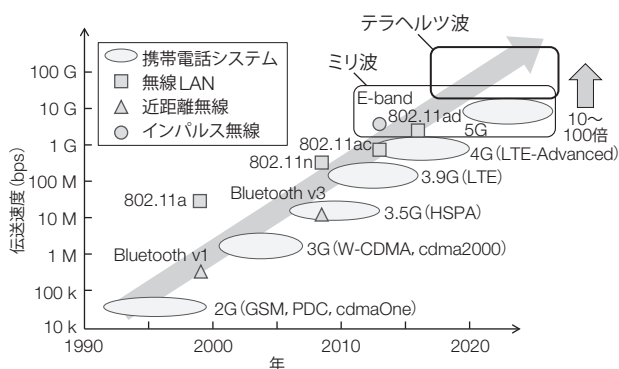


図-1 無線システムの伝送速度推移

め、300 GHz帯テラヘルツ波を無線周波数として利用するには、デバイス性能を2倍以上引き上げる必要があった。

筆者らは高 $f_{\max}$ 化に向け、以下に示す三つの施策を行った⁽¹⁰⁾

(1) ゲート長短縮とゲートソース間距離短縮

高性能電子線描画装置を導入し、InP HEMTのゲート長を従来の130 nmから75 nmへと短縮した。また、ゲート電極とソース領域との距離を20%短縮して寄生抵抗を低減し、高周波化を図った。

(2) ゲート電極周辺の空洞構造化

ゲート電極周辺部の層間絶縁膜を除去し空洞構造とすることで、ゲートドレイン間容量(C_{gd})を約30%低減した。

(3) チャンネル層InGaAsの組成最適化

チャンネル層InGaAsは通常、InP基板に格子整合する組成(Inの組成比が53%)が用いられる。電子走行性能を上げるには、In組成比を53%より高くすることが望ましいが、格子歪みが大きくなってデバイス性能が不安定になる上、ドレインコンダクタンス g_d が増大する。これらのトレードオフを考慮し、本開発ではIn組成比を63%とした。これにより、電子走行性能が従来に比べて約15%向上した。

以上の施策により開発したテラヘルツ波通信用InP HEMTの断面写真と高周波特性の一例を図-2に示す。このデバイスの $f_{\max}$ は660 GHzに向上し、300 GHz帯での動作に十分な性能が得られた。

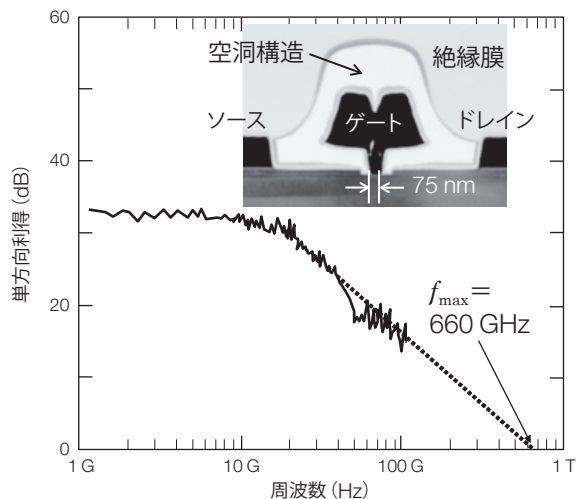


図-2 開発した75 nm InP HEMTとその高周波特性

超高周波回路技術

前章で述べたInP HEMT技術を用いて、300 GHz帯受信用集積回路(受信IC)を開発した。デバイス性能を十分に引き出すためには、超高周波に対応した回路設計技術の確立が不可欠である。開発した受信ICは、まず受信したOOK (On-Off Keying) 信号を低雑音増幅器(LNA: Low Noise Amplifier)で増幅し、後段に配置した検波器(DET: Detector)とそれに続くポストアンプでデータ信号として復調する。伝送速度が数十GbpsのOOK信号は数十GHzに及ぶ非常に広帯域な周波数成分を含む。このため、LNA、DETともに広帯域特性の確保がポイントとなる。加えてLNAには、受信感度の点で高利得、低雑音が要求される。

LNAの開発に際し、筆者らはゲート接地型を採用した。一般的なソース接地型はトランジスタのソース端子を接地するが、ゲート端子を接地するゲート接地型は、後述のように、特に高周波において高利得特性と広帯域特性に優れている。

ゲート接地型トランジスタの入力インピーダンスは、相互コンダクタンス g_m の逆数とほぼ一致する。 g_m はトランジスタサイズに比例するため、サイズ(ゲート幅)を適切に設定することで広帯域なインピーダンス整合が可能である。一方、出力インピーダンスは、トランジスタの出力容量(ゲートドレイン間容量 C_{gd})でほぼ決まるため、それを補償する直列インダクタを配置すればインピーダンス整合が取れる。このように、ゲート接地型増幅器においては、整合回路が簡素化できるので損失が低減する。このため、高利得・広帯域性能が得られる。

300 GHz帯では、これに加え C_{gd} とゲートソース間容量 C_{gs} を介した正帰還作用と、出力インダクタによる負帰還作用を、ゲートのインダクタと出力インダクタを調整することによって、更なる高利得・広帯域特性を得る工夫を施した。

もう一つ、超高周波増幅器の開発で難しいのは、回路の安定性である。300 GHz帯テラヘルツ波の波長は、空気中で1 mm、半導体基板中ではわずか0.3 mm程度と短い。このためチップサイズが数mmになると、増幅信号の一部が波として基板内部を伝搬し、入力端子に達する。この不要な戻り

信号の位相が入力信号の位相と一致すると正帰還がかかって増幅器が発振し、正常な増幅動作ができなくなる。この対策として、多層配線技術を用いて、最下層をグラウンド面、上層を信号線とするマイクロストリップ線路構成を採用した。入力端子については、下層のグラウンド面との間に容量が生じるため、並列にショートスタブ（インダクタ）を形成して補償し、高周波特性の劣化を抑止した。

図-3は、試作したLNAのチップ写真と周波数特性である。このLNAは、ゲート接地型増幅器のユニットを6段並べた構成である。240 GHzから320 GHzの広い周波数帯域にわたって安定して20 dB以上の利得が得られており、数十GbpsのOOK信号を歪ませることなく増幅できる。⁽¹¹⁾ 300 GHzにおける雑音指数（NF：Noise Figure）は9.8 dBと、低雑音性能も得られている。

図-4は、試作したLNAとポストアンプ（AMP）付きDETを1チップに集積した受信ICのチップ写真とその検波特性である。DETには、InP HEMTのゲートショットキーダイオードを用いた。ポストアンプはInP HEMTによる3段の差動増幅回路としており、利得20 dB、帯域幅20 GHz以上を確保している。試作した受信ICの検波特性としては、最大感度として100 kV/Wが、更に310 GHzまでの広い周波数帯域で50 kV/Wの感度が得られている。これは、300 GHz帯20 GbpsのOOK信号を正常に

復調可能な性能と考えられる。

超高周波実装技術

本章では、前章で述べた受信ICの実装技術について述べる。テラヘルツ波通信のユースケースとして高速ダウンロードを想定するため、受信ICを実装するモジュールは、スマートフォンなどの携帯端末への搭載を想定し、容積1 cc以下の小型化を目標とした。

従来のテラヘルツ波通信用受信機は、LNAや復調器を実装したモジュールや、アンテナモジュールなどの個別部品を導波管で接続するため、サイズが大きく携帯機器への組み込みには適していなかった。

受信モジュールの小型化には、導波管部をなくすことが有効である。そこで、受信ICを実装するモジュールにアンテナも内蔵し、導波管による接続をなくした。モジュール内部は、プリント基板を介して受信ICとアンテナを接続する構成を検討した。しかし、従来の高周波向けプリント基板はテラヘルツ波帯での信号減衰が大きく、受信感度が悪くなることが課題となった。

このため、以下に示す二つの施策を行った。

(1) 微細加工可能なポリイミド基板の採用

アンテナで受信したテラヘルツ信号は、接続配線を経由して受信ICに伝達される。接続配線を低損失かつ安定に伝搬させるため、プリント基板の表面と裏面にグラウンド面が形成され、それらは貫通ビアで接続される。この際、貫通ビアは波長の1/10以下、つまりテラヘルツ波の場合には数十 μm 以下の間隔で配置される必要がある。間隔

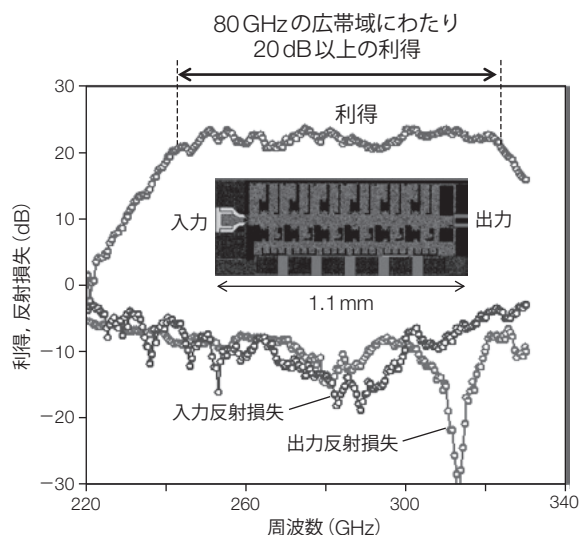


図-3 試作したLNAとその周波数特性

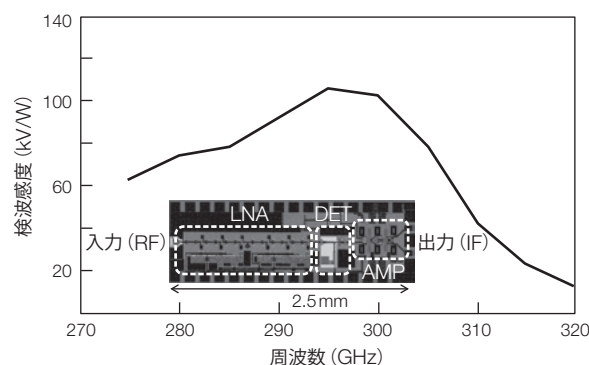


図-4 300 GHz帯受信ICとその検波特性

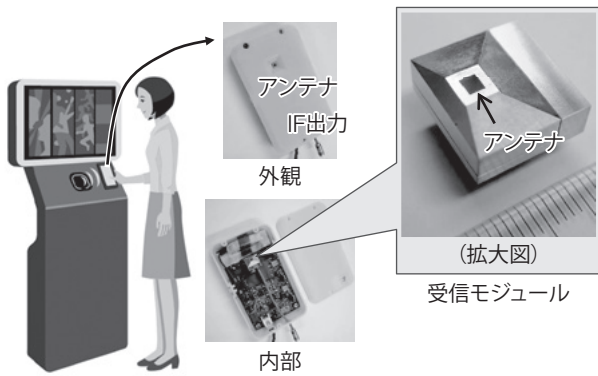


図-5 高速ダウンローダ用小型受信機

がこれよりも長くなると、不要伝搬モードが発生し信号は正常に伝搬しない。ポリイミドは石英より10%ほど誘電損失が大きいものの加工精度が4倍以上高く、高い密度で貫通ビアを形成できる。結果として、石英基板上の接続配線と比べて損失は半減することが分かった。

(2) テラヘルツ波で初のフリップチップ実装を採用

チップの回路形成面をプリント基板に対向（フリップ）させ、微小なピラーやバンプを用いて実装基板に接続するフリップチップ実装は、従来のワイヤー実装と比較して低損失性に優れることから、衝突防止レーダー用チップなど、ミリ波帯の実装では既に実用化されている。今回、ポリイミド基板の低損失伝搬特性を利用することで、フリップチップ実装の適用可能な周波数をテラヘルツ波帯まで拡張することに初めて成功した。

これら施策の結果、テラヘルツ波用アンテナと受信ICチップを低損失で接続し、容積1 cc以下のアンテナ内蔵300 GHz帯小型受信モジュールを開発できた。このモジュールを評価したところ、伝送速度20 Gbpsにおいて良好なアイ開口が得られ、正常に受信できることが確認できた。⁽¹²⁾

300 GHz帯高速ダウンローダ用小型受信機

図-5は、高速ダウンローダのイメージと、スマートフォンを模した筐体に上述の小型受信モジュールを搭載した受信機を示している。この受信機は外部電源で駆動され、復調信号は同軸ケーブルを介し外部信号処理装置に送られる。

この受信機と、共同研究を行っているNTTが開

発した送信機および送受信信号処理装置を用いて、コンテンツのダウンロード実験を行った。その結果、システムスループットとして毎秒2 Gバイト（DVD1枚分のデータを3秒以内にダウンロード可能な速度に相当）での転送に成功した。⁽¹³⁾

む す び

本稿では、受信技術を中心に、テラヘルツ波通信に向けたデバイス、回路、実装など要素技術について述べた。プロトタイプとして試作した高速ダウンローダ用受信端末は、300 GHz帯において20 Gbpsの伝送速度を有し、広帯域を利用した大容量通信へのテラヘルツ波適用の有用性を実証した。今後、要素技術の更なる改良を進め、ほかの様々なユースケースを検討し、テラヘルツ波通信の実用化への一役を担いたい。

本研究の一部は総務省「電波資源拡大のための研究開発」による委託研究「超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開発」の一環として実施したものである。

参考文献

- (1) 永妻忠夫：実用化に向けて加速するテラヘルツ技術. 電子情報通信学会誌, Vol.97, No.11, p.918-923 (Nov. 2014).
- (2) 総務省：電波利用ホームページ.
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/index.htm>
- (3) IEEE 802.15.WPAN Task Group 3d 100 Gbit/s Wireless.
<http://www.ieee802.org/15/pub/SG100G.html>
- (4) T. Nagatsuma et al. : Recent Progress and Future Prospect of Photonics-Enabled Terahertz Communications Research. IEICE Trans. Electronics, Vol.E98-C, No.12, p.1060-1070 (Dec. 2015).
- (5) I. Kallfass et al. : Towards MMIC-Based 300 GHz Indoor Wireless Communication Systems. IEICE Trans. Electronics, Vol.E98-C, No.12, p.1081-1090 (Dec. 2015).
- (6) 三村高志ほか：HEMT－開発経緯と現状. FUJITSU, Vol.36, No.4, p.346-354 (1985).
- (7) 大橋洋二ほか：76 GHzシングルチップMMIC高周波ユニットの開発. 富士通テン技報, Vol.20, No.1,

p.23-31 (2002).

(8) 中舎安宏ほか:超高速・超低雑音InP HEMT IC技術.
FUJITSU, Vol.58, No.3, p.260-266 (2007).

[http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol58-3/
paper17.pdf](http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol58-3/paper17.pdf)

(9) 林 洋輝ほか:大容量ミリ波帯インパルス無線技術.
FUJITSU, Vol.63, No.6, p.706-711 (2012).

[http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol63-6/
paper05.pdf](http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol63-6/paper05.pdf)

(10) 高橋 剛ほか:テラヘルツIC用InP HEMTの高 $f_{\max}$ 化.
信学技報, Vol.115, No.402, ED2015-118, p.37-41
(2016).

(11) Y. Kawano et al. : InP-HEMT Based Sub-
millimeter Waveband Amplifier Designs.
TWHM2015 Final Program and Abstracts, p.61-62
(2015).

(12) Y. Kawano et al. : A 20 Gbit/s, 280 GHz wireless
transmission in InPHEMT based receiver module
using flip-chip assembly. EuMC2015 Digest, p.562-
565 (2015).

(13) NTT, 富士通, NICT: 毎秒数十ギガビットの伝送
速度を有する300 GHz帯を用いたテラヘルツ無線用小
型送受信機を世界で初めて開発し、高速データ伝送実
験に成功.

<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2016/05/26.html>



川野陽一 (かわの よういち)

デバイス&マテリアル研究所
デバイスイノベーションプロジェクト
兼ネットワークプロダクト事業本部
ワイヤレスシステム事業部
超高周波回路に関する研究開発に従事。



高橋 剛 (たかはし つよし)

デバイス&マテリアル研究所
先端デバイスプロジェクト
超高周波デバイスのプロセス開発に
従事。

著者紹介



中舎安宏 (なかしゃ やすひろ)

デバイス&マテリアル研究所
デバイスイノベーションプロジェクト
兼ネットワークプロダクト事業本部
ワイヤレスシステム事業部
超高周波応用関連の研究に従事。



芝 祥一 (しば しょういち)

デバイス&マテリアル研究所
デバイスイノベーションプロジェクト
超高周波モノリシック集積回路および
実装技術の研究に従事。