

準ミリ波帯送信/受信用増幅器MMIC

Monolithic Microwave Integrated Circuits (MMICs) for Quasi-millimeter-wave Transmitter/receiver Amplifier

あらまし

準ミリ波帯で使用される送信用電力増幅器MMIC(Monolithic Microwave IC), 受信用低雑音増幅器MMICの最新技術について紹介する。送信用電力増幅器MMICにはパワーp-HEMTを採用し, 高精度の設計手法を用いて広帯域電力増幅器MMICや高効率電力増幅器MMICを開発した。一方, 受信用低雑音増幅器MMICには, DBS用の低雑音デバイスとして実績のあるローノイズHEMTを採用し, またRF, DC回路を高密度化して, 小型, 低雑音かつ高利得特性を実現した。

Abstract

This paper describes the latest technologies that were used to build a quasi-millimeter-wave power amplifier MMIC (PA MMIC) for transmitters and a quasi-millimeter-wave low-noise amplifier MMIC (LNA MMIC) for receivers. The PA MMIC operates at a high-efficiency over a wide bandwidth thanks to the use of power p-HEMT technology and precise design techniques. The LNA MMIC is based on our low-noise HEMT technology, which has been used for DBS low-noise devices. The small size, low noise, and high gain characteristics of the LNA MMIC were acquired by increasing the density of the RF and DC circuits.



佐藤 雄 (さとう とみお)

富士通カンタムデバイス(株)高速デバイス事業部第一設計部 所属
現在, 化合物半導体のデバイス・設計技術開発に従事。



平田 雅史 (ひらた まさふみ)

富士通カンタムデバイス(株)高速デバイス事業部第一設計部 所属
現在, 化合物半導体のデバイス・設計技術開発に従事。



黒田 滋 (くろだ しげる)

富士通カンタムデバイス(株)高速デバイス事業部第三設計部 所属
現在, 化合物半導体のデバイス・設計技術開発に従事。

まえがき

インターネットの普及は世界的に目覚しく、従来の静止画のほかに、音楽、動画またはゲームなどのコンテンツを配信するサービスが現実的になりつつある。このようなサービスを広く普及させるには、数十Mbpsの双方向高速データ通信システムを非常に低コストで提供する必要がある。この要求を実現する手段として、準ミリ波を使った衛星通信や無線アクセスシステム^(注1)が注目されている。衛星通信では、米国のTeledesicのように多数の低軌道衛星を用いた20 GHz/30 GHzの双方向衛星通信システムが代表的である。また無線アクセスでは、地上の基地局から半径2～3 km内の複数の加入者に双方向通信サービスを提供するLMDS(Local Multipoint Distribution System)と呼ばれるシステムが提案されている。これらのシステムに使用される周波数は国によって異なるが、主に24 GHzから32 GHzまでの準ミリ波帯である。

本稿では、上記準ミリ波帯システムの送受信部のキーデバイスである電力増幅器MMICと、低雑音増幅器MMICの最新技術について紹介する。

準ミリ波帯無線アクセスの特長

まず、準ミリ波帯無線アクセスの特長について説明する。準ミリ波帯はマイクロ波に比べて未使用の周波数帯が広く、高速データ通信が可能である。図-1は、準ミリ波帯無線アクセスの加入者側システムの一例である。加入者の無線アクセス用屋外ユニット内には、信号処理部に続いてRF送受信部が配置される。RF送受信部のキーデバイスは電力増幅器、低雑音増幅器、発振器、ミキサで、MMIC(Monolithic Microwave IC)化してデバイスの集積

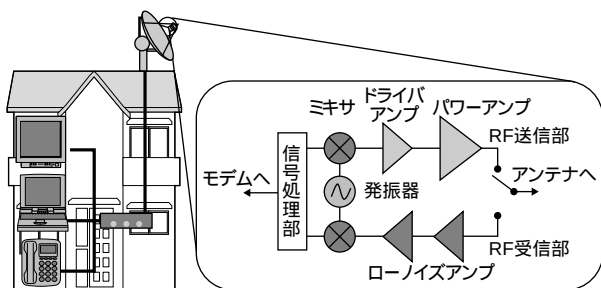


図-1 準ミリ波帯無線アクセスシステムの一例

Fig.1-Circuit diagram of quasi-millimeter-wave wireless access systems.

(注1) 光ファイバで構成された基幹ネットワーク内の基地局から加入者に直接無線で情報を配信するためのシステム。

度と量産性を上げることが非常に重要となる。

送信用電力増幅器 MMIC の開発

• パワーp-HEMTの開発

MMICの性能は増幅部に用いられるトランジスタの性能に大きく左右される。準ミリ波帯で高出力、高利得、高効率動作を実現するために、GaAs MESFETと比較して高出力電力密度、高利得特性を有するパワーp-HEMT^(注2)を開発した。パワーp-HEMTはAlGaAs/InGaAs/AlGaAsダブルヘテロ・チャネル構造を有しており、さらにはリセス構造^(注3)短ゲート化などの技術を用いて、準ミリ波帯で高出力、高利得が得られるよう設計した。図-2は、パワーp-HEMTのRF特性の一例である。図-2から分かるように、電力付加効率の最大値はおおよそ68%であり、そのときの電力は23.5 dBmである。線形電力利得は10.2 dBを実現している。この高効率性能は現在報告されているなかでは世界最高である。⁽¹⁾

• 電力増幅器MMICの設計

回路設計で重要なのはFETの等価回路モデルである。マイクロ波帯では、マルチフィンガで構成されるトランジスタを集中定数回路で表現する集中定数型等価回路モデルが一般的である。しかし、準ミリ波帯以上の周波数領域では、実際に増幅作用をする真性部分以外に寄生成分もFETのインピーダンスに影響を与えるので、従来の集中定数型等価回路モデルでは十分な精度が得られない

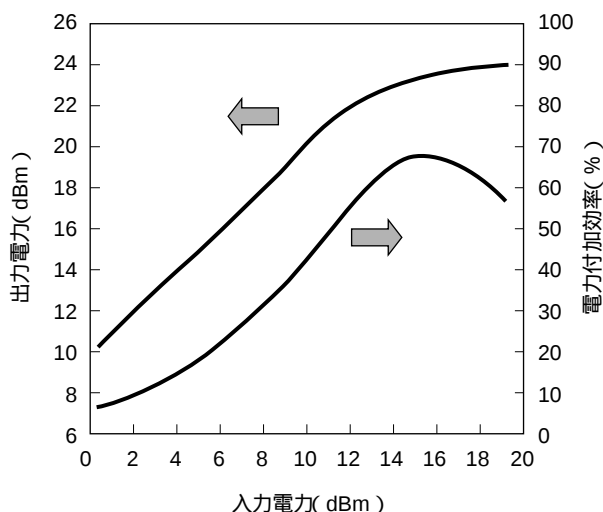


図-2 パワーp-HEMTのRF特性

Fig.2-RF characteristics of power p-HEMT.

(注2) pseudomorphic HEMT

(注3) FETのゲート近傍にくぼみを設け、半導体表面が特性に与える影響を低減するための構造。

という問題があった。著者らは、各々のフィンガ1本を集中定数回路で表し、それをチップのレイアウトに従ったマイクロ・ストリップラインで合成する分布定数型等価回路モデルを採用した。これにより、高周波帯で問題となる寄生素子成分の影響をモデルに取り入れることができ、非常に精度の高いモデル抽出が可能となった。

パワーデバイスの入出力インピーダンスは、その入力信号の大きさに伴って変化する。出力電力が大きい大信号動作状態では、入出力インピーダンスは小信号動作状態とは大きく異なる。整合回路設計の際にはどのインピーダンスに整合を取るかという選択が重要である。準ミリ波帯のMMIC設計においては基本波や高次高調波に対してアクティブ・ロードブル測定を行い、最大出力電力が得られるインピーダンスや最大効率を得られるインピーダンスを導出し、その結果に基づいて整合回路の設計を行った⁽²⁾。

パワーデバイスの場合、入出力インピーダンスが低いために整合回路が比較的大きくなる。そのため、整合回路の挿入損が無視できなくなり、結果としてMMIC全体での特性低下につながる。回路設計の際には、その整合回路の挿入損をできるだけ小さくなるよう回路の最適化を行った。さらには、実際のMMICレイアウトに従って、マイクロ・ストリップライン間のカップリングについて電磁界シミュレーションを行い、より精度の高い設計を行った。

● 電力増幅器MMICの特性

前述の手法を用いて設計した電力増幅器MMICについて述べる。

図-3は、LMDS加入者ユニット用に開発した4段広帯域電力増幅器MMIC(FMM5804X)のチップ写真である。MMICの試作に当たり、その周辺技術としては、MIM(Metal Insulator Metal)キャパシタ、イオン注入による

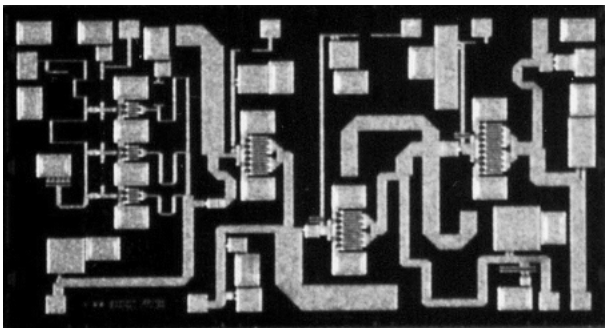


図-3 FMM5804X
Fig.3-FMM5804X.

アイソレーション、エアブリッジ、ピアホールおよびPHS(Plated Heat Sink)の技術を用いた。チップサイズは $2.61 \times 1.41 \text{ mm}^2$ であり、GaAs基板厚は低熱抵抗化を図るため $28 \mu\text{m}$ まで薄く削られている。図-4は、FMM5804XのRF特性である。FMM5804Xは18 GHzから32 GHzまでと非常に広帯域で動作し、ほとんどすべての国のLMDSシステムに対応できる。1 dB利得圧縮時の出力電力P1dBは23 dBm以上、電力利得G1dBは平均で18 dB、電力付加効率は主要周波数で15%から20%を達成した。

図-5は、衛星搭載用を目的として開発した高出力、高効率電力増幅器MMICの写真である。衛星搭載用には、その電源容量の都合上、高効率動作の要求は非常に厳しい。このMMICは、高効率動作を実現するため、ロードブル法で抽出された最大効率を得られるインピーダンスに出力回路を整合した。GaAs基板厚は、高効率動作を目指し、整合回路の損失を小さくするため $75 \mu\text{m}$ を用いた。

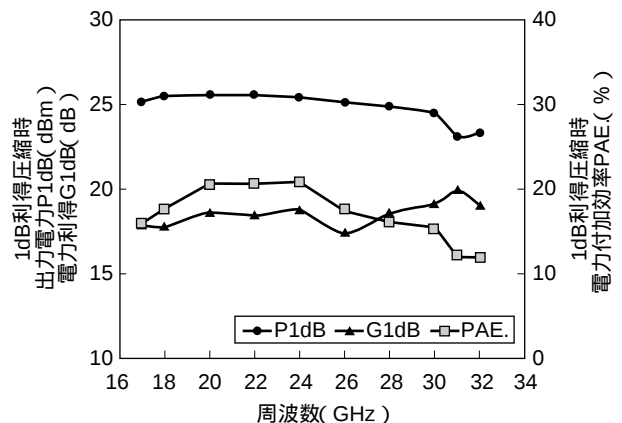


図-4 FMM5804XのRF特性
Fig.4-RF characteristics of FMM5804X.

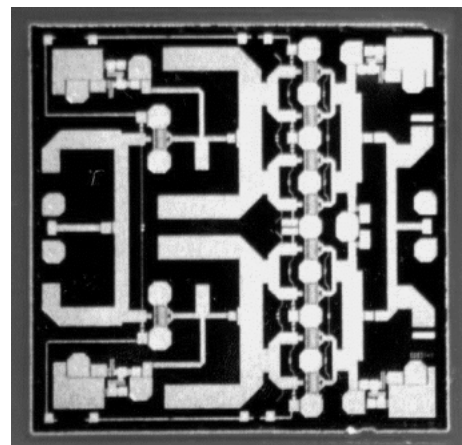


図-5 衛星搭載用高効率MMIC
Fig.5-High-efficiency MMIC for satellite communication systems.

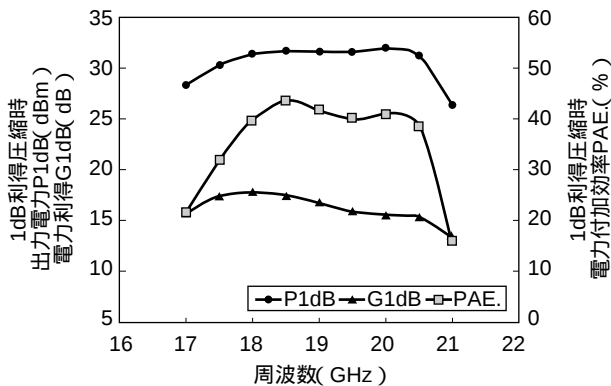


図-6 高効率MMICのRF特性
Fig.6-RF characteristics of high-efficiency MMIC.

図-6は、高効率電力増幅器MMICのRF特性である。衛星通信で主に使われる18 GHzから20 GHzまでの周波数帯において、電力付加効率は40%以上、その時の出力電力は30 dBm(1 W)以上、電力利得は15 dB以上と世界最高水準の性能を達成した。^{(3), (4)}

以上で紹介したMMICのほかにも、30 GHz帯1 W出力MMICなどを開発しており、製品化を通じて今後の多用途な準ミリ波帯への応用に対応していく予定である。

受信用低雑音増幅器 MMIC の開発

低雑音増幅器用HEMTの技術

低雑音増幅器MMICには、DBS用低雑音デバイスとして実績のあるInGaP/InGaAs HEMTの技術を採用した。HEMTの特性を向上するための手段は、伝達コンダクタンス g_m を大きくすることとゲート入力容量 C_{gs} を下げることである。InGaPを電子供給層に用いることで g_m を向上させ、ゲート長0.15 μm の短ゲート長化により C_{gs} を低減した。この結果、遮断周波数 $f_T = 75 \text{ GHz}$ 、最大発振周波数 $f_{max} = 150 \text{ GHz}$ の特性を実現した。

つぎに、18 ~ 24 GHz帯と24 ~ 32 GHz帯の受信用低雑音増幅器MMICの回路設計について述べる。

低雑音増幅器MMICの設計

MMICの低コスト化にはチップの小型化が必須である。MMICチップの大部分は、キャパシタ、マイクロ・ストリップライン、抵抗の受動素子およびボンディングパッドが占めている。したがって、チップの小型化において、これら受動素子の削減、縮小化が常に課題となっていた。

18 ~ 24 GHz帯MMICの設計には、パッケージとボンディングワイヤを入出力の整合回路の一部として使用することにより、従来チップ上に設けた受動素子で構成さ

れる整合回路を削減してチップの小型化を図った。⁽⁵⁾

24 ~ 32 GHz帯MMICでは、外部での整合は困難なので、チップ上に整合回路を設け、この整合回路を集中定数化することにより高密度化を図った。また、セルフバイアス方式を採用して単一電源化し、ボンディングパッドの削減により大幅なチップの小型化を実現した。

ソースピアホール構造により準ミリ波帯での接地インダクタンスを低減し、優れたRF特性を実現した。

低雑音増幅器MMICの特性

図-7は、18-24 GHz帯低雑音増幅器MMIC(FMM5701LG)の写真である。MMICチップは、2段の低雑音HEMTと段間の整合回路で構成される。チップサイズは0.52 × 0.45 mm^2 で従来のディスクリートHEMTチップに近いチップサイズを実現した。図-8は、FMM5701LGのRF特

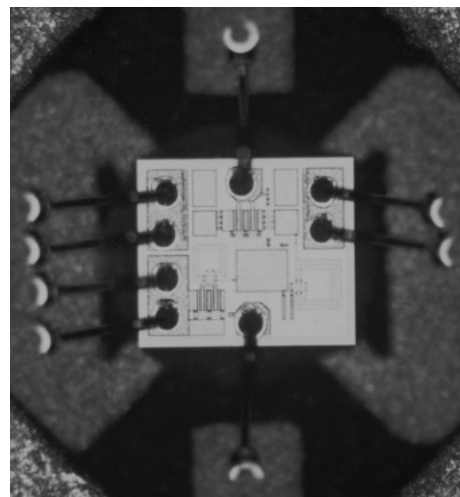


図-7 FMM5701LGの内部写真
Fig.7-Internal view of FMM5701LG.

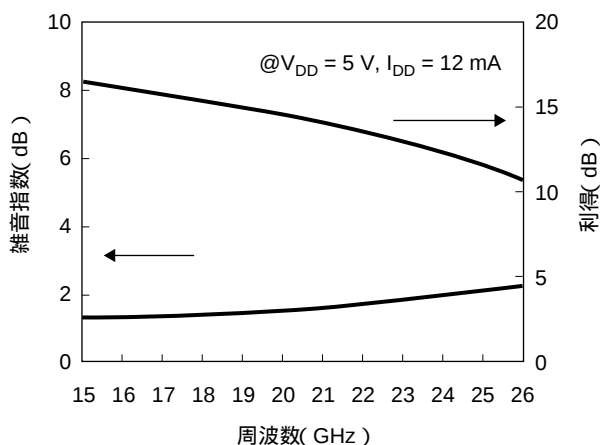


図-8 FMM5701LG雑音指数および利得の周波数特性
Fig.8-Frequency response of noise figure and gain of FMM5701LG.

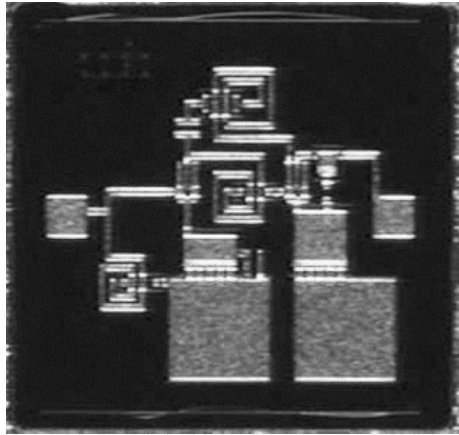


図-9 27-32 GHz低雑音増幅器MMICチップ
Fig.9-27-32 GHz LNA MMIC chip.

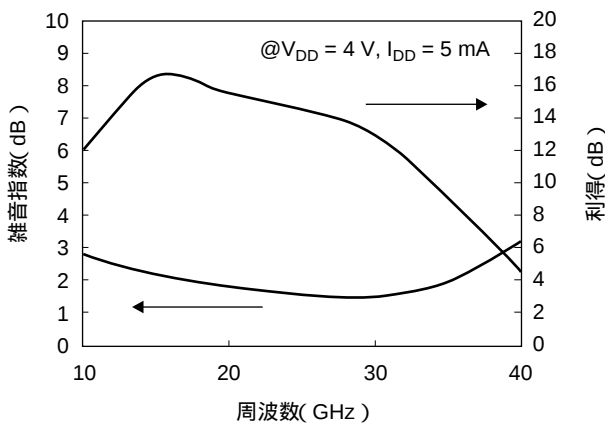


図-10 雑音指数および利得の周波数特性
Fig.10-Frequency response of noise figure and gain.

性である。周波数24 GHzで雑音指数2.0 dB，利得12 dBの特性が得られた。

図-9は，27-32 GHz帯低雑音増幅器MMICの写真である。チップサイズは $0.96 \times 0.96\text{ mm}^2$ と，入出力整合回路のあるMMICとしては大幅な小型化を達成した。図-10は，このMMICのRF特性である。周波数30 GHzにおいて，雑音指数1.6 dB，利得13 dBの特性が得られた。

これらのほかにも，衛星搭載用低雑音増幅器MMICな

どの設計を行い，前述の電力増幅器同様に製品化を進め，市場のニーズに対応していく予定である。

今後の課題

これまで述べてきたように，高速データ通信システム用に電力増幅器，低雑音増幅器を開発・製品化を進めてきた。今後，さらなる小型化，低コスト化とともに，低歪み化，高効率化などの特性改善が課題である。また，発振器，通倍器，ミキサMMICを含んだチップセットを開発し，準ミリ波帯送受信部トータルのシステムを実現するMMIC製品を実現する予定である。

む す び

ここで紹介した送信用電力増幅器MMICと受信用低雑音増幅器MMIC技術は，高速無線インターネットインフラストラクチャの実現には欠かせないものである。今後，市場要求は，さらなる高性能化，低コスト化に進んでいくと思われ，それらの要求に応えるべく技術開発を推進していきたい。

参考文献

- (1) T. Satoh et al. : A 68% PAE. Power pHEMT for K-Band Satellite Communication System. IEEE MTT-S 1999 International Microwave Symposium Digest, pp.963-966.
- (2) A. Betti-Berutto et al. : Power Amplifier Second Harmonic Manipulation : mm-Wave Application and Test Results. European Microwave Conference Digest GAAS99, pp.281-285.
- (3) C. Poledrelli et al. : High Efficiency 1.4 W Power Amplifier for K-Band Satellite Communication System. European Microwave Conference Digest GAAS99, pp.252-256.
- (4) 佐藤ほか：準ミリ波帯高効率MMICの開発．信学技報，ED99-213，pp.29-34(1999)．
- (5) Y. Mimino et al. : A X, K-Band Low-Noise P-HEMT MMIC Amplifier with Minimized Chip-Size by Using Smart Biasing and Matching Circuits. Asia Pacific Microwave Conference 1998 Digest, pp.391-394.