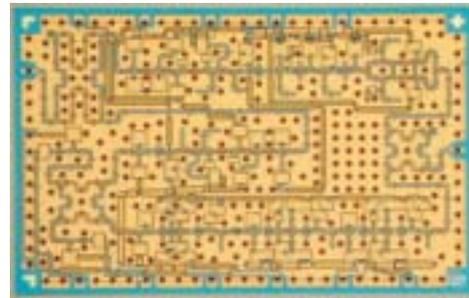


76GHzシングルチップMMIC高周波ユニットの開発

Development of 76 GHz Single Chip MMIC High Frequency Unit

大橋	洋二	Yoji Ohashi
長谷川	裕一	Yuichi Hasegawa
元二	直樹	Naoki Motoni
矢木	秀和	Hidekazu Yagi
山野	眞市	Shinichi Yamano



要旨

近年車載用ミリ波レーダは、各自動車メーカーからACC (Adaptive Cruise Control System=車間制御付クルーズ) のキーパーツとして注目されている。

当社としても76GHz帯のミリ波レーダを2000年に開発しているが、さらに魅力ある商品にすべく新たにレーダの心臓部であるミリ波ユニットの開発を行った。

このミリ波ユニットは、従来5つのMMIC (Monolithic Microwave IC) モジュールから構成されていたものから、5つのうち4つをシングルチップMMICに統合した2モジュール構成となり、小型化、低コスト、高量産性を実現できたものとなっている。

本論では、このシングルチップMMICを使用した2モジュールユニットについて述べる。

In recent years, various automotive manufacturers have focused attention on in-vehicle millimeter wave radar as a key component for ACC (adaptive cruise control) systems.

We have developed the millimeter wave unit core-component of the radar system to make the product more attractive, following on 76 GHz millimeter wave radar development in 2000.

Specifically the unit is composed of 2 MMIC (monolithic microwave IC) modules one of which integrates into a single chip MMIC 4 out of the previous 5 MMIC modules, thus rendering the unit more compact, lower cost and better suited to mass production.

This paper discusses this 2 module millimeter wave unit incorporating the single chip MMIC unit.

1

はじめに

近年、自動車用ミリ波レーダは、測位精度の高さに加え霧、雨、雪などの自然現象の影響を受けにくいという利点から、衝突警報や車間維持制御システムのキーパーツとして注目を浴びている。又車両搭載という条件から、より低コスト・小型化が要求されている。

当社においても富士通グループ一丸となって、低コスト・小型化を狙いミリ波レーダの開発を行っており、1997年に60GHz、2000年には76GHz帯の1アンテナタイプのミリ波レーダを開発している。

今回新たに開発したレーダの心臓部とも言えるミリ波ユニットは、さらなる魅力ある製品とすべく、複数のMMIC (Monolithic Microwave IC) モジュールを1チップに統合し、小型化・低コスト化をめざした。以下に統合MMICモジュールを使ったミリ波ユニットの特徴と主要技術について述べる。

2

ミリ波レーダ製品の概要

ミリ波とは、一般に30GHz～300GHz (波長10mm～1mm) の周波数帯であり、波長が非常に短い電波である。

当社ミリ波レーダがミリ波帯の76GHzを採用しているのは、主要な市場である日米欧の電波行政において周波数割当が決められている為である。

現行のミリ波レーダシステムはFM-CW (Frequency - Modulated Continuous Waves) レーダ方式を採用したレーダシステムであり、簡易な構成でターゲットまでの距離と相対速度を計測する事を可能としている。

2.1 システム構成

ミリ波レーダシステムの構成図を図-1に示す。

本ミリ波レーダは、アンテナ部、ミリ波ユニット部、スキャナー部、アナログ回路部、デジタル信号処理部から構成されている。

レーダシステムの外観を図-2に、主要諸元を表-1に示す。



図-2 76GHzミリ波レーダ
Fig.2 76 GHz millimeter wave radar

表-1 ミリ波レーダ主要諸元
Table 1 Major data of millimeter wave radar

項目	諸元
レーダ方式	FM-CW
中心周波数	76～77GHz
送信電力	10mW以下
アンテナ偏波特性	45 直線偏波
ビーム幅	水平2.7° 垂直3.9°
最大検知距離	約120m
速度計測範囲	±200km/h
処理速度	100msec
重量	700g以下
サイズ	110(W)×89(H)×90(D)mm

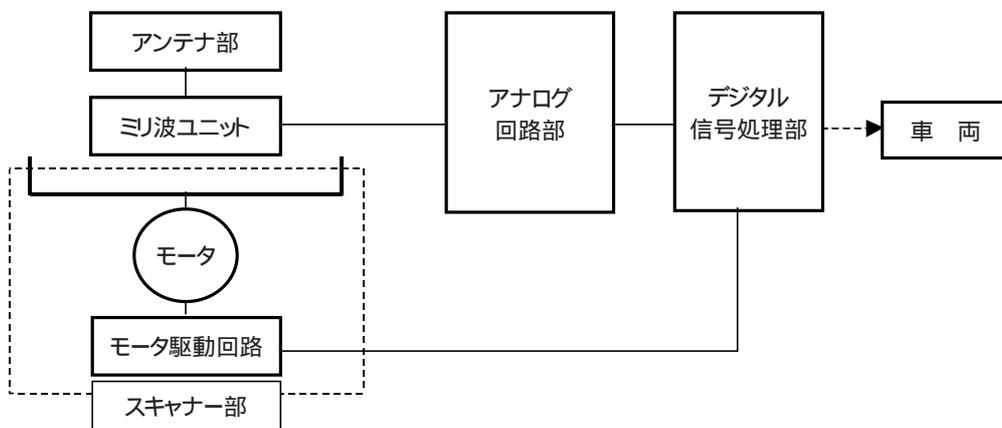


図-1 レーダシステムブロック図
Fig.1 Block diagram of radar system

本ミリ波レーダシステムは、平面アンテナとミリ波ユニットを導波管接続し、アクチュエータにて左右にスキャンを行う。そして信号処理部では、レーダのビート信号をAD変換しDSP回路にて周波数分析を行い、距離、相対速度、角度情報を演算する事により障害物の位置を検出する。

センサには、小型バイクから大型車両まで種々の物体を時間帯及び気象条件によらず、瞬時に位置、速度を検出できる性能が要求される。そのために、アンテナ、ミリ波ユニットには、大小の障害物をとらえる事のできるダイナミックレンジ及び車両搭載性、スキャンの負荷を減らす為の小型化が求められている。

2.2 現行ミリ波ユニット概要

現行ミリ波ユニットの構成を図-3に示す。ユニットは、5つのMMICモジュールとハイブリット及びアンテナ基板、IF信号増幅部及びMMIC駆動回路からなるプリント基板部から構成される。

現行ユニットに搭載するMMICモジュールは、気密パッケージに封止され信頼性を確保しており、発振器（VCO：Voltage Controlled Oscillator）、周波数逡倍器（MULT）、ミキサ（MIX）、増幅器（AMP）の4種5台（送受信でAMP各1台計2台使用）で構成されている。

三角波状の変調信号が入力されたVCOモジュールは、FM変調された信号を出力する。さらに、その信号は、MULTモジュールにて76GHz帯に逡倍され、AMPモジュールにて増幅される。

MULTモジュールからのローカル信号と、AMPモジュールにより増幅されたターゲットからの微弱な反射信号は、MIXモジュールに入力され、その二信号をミキシングする事によりIF信号を出力する。

また、1アンテナ方式のため、送受の切替は、送受信それぞれの増幅器をオンオフしてスイッチングし、ハイブリット基板の回路で送受信の切り分けを行う。

現行ユニットは、5つのMMICモジュールで構成されているが、新たに統合MMICモジュールを開発する事で、モジュール数の削減を行い、MMICモジュールの実装面積の低減による小型化、部品コスト低減だけでなく、実装工程数削減の効果も得る事ができる。

3

開発ミリ波ユニット概要

今回開発したユニットは、2モジュール構成とし、VCOを除く4つのMMIC（MULT、MIX、AMP×2）モジュールとハイブリット基板を1チップのMMIC内に収める事に成功した。

開発したミリ波ユニットの構成を図-4に示す。

ユニットの仕組みとしては現行品と同じであるが、1チップ統合MMICモジュールにする事で、現行品と比較して、ユニット体積比75%、重量比75%を達成した。また、モジュール間接続数やMMICモジュール駆動用のバイアス接続数も削減する事が可能となり、製作の簡略化、性能の安定化も実現できた。

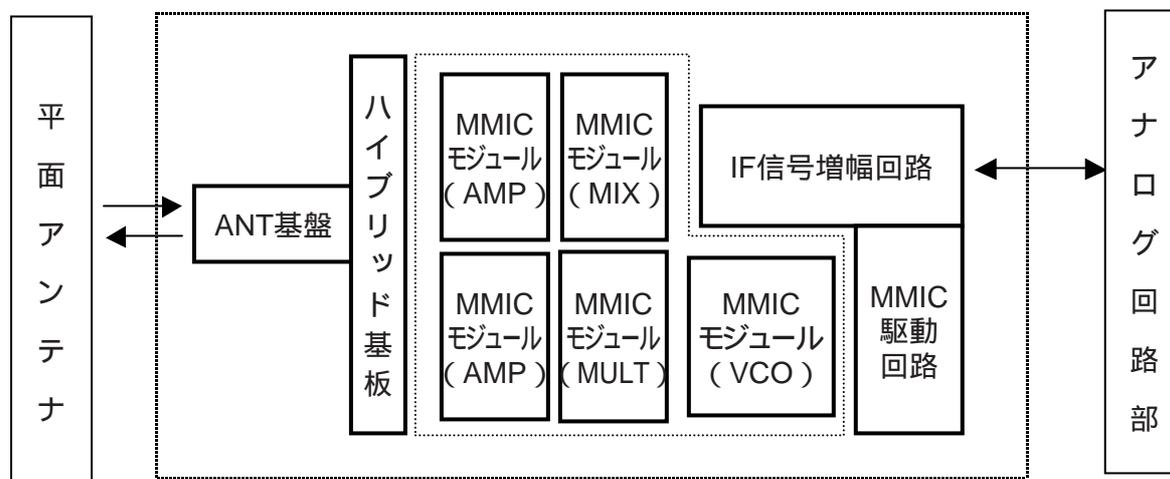


図-3 現行ミリ波ユニットブロック図

Fig.3 Block diagram of current millimeter wave unit

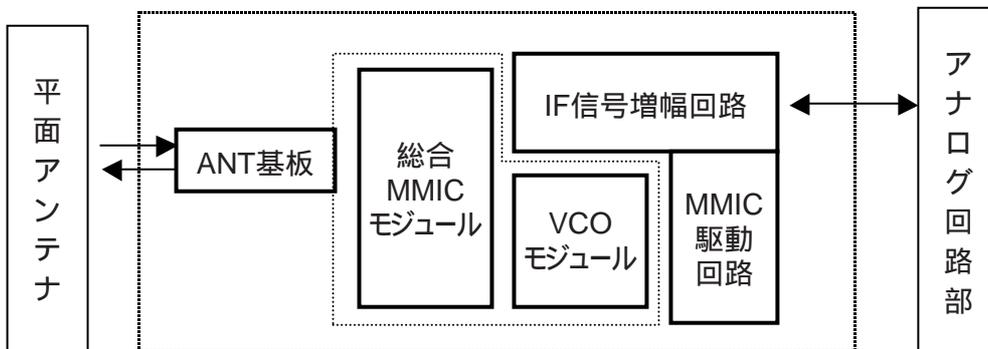


図-4 開発品ミリ波ユニットブロック図
Fig.4 Block diagram of newly-developed millimeter wave unit

4 MMICモジュールの構造

MMICモジュールの断面を図-5に示す。注目すべき開発要素としては、次の事が挙げられる。

- MMICチップとセラミック基板の接合
(フリップチップ実装)
- ハーメチックシール
- RFプローブによる直接測定
- HEMT(High Electron Mobility Transistor)プロセスを使用したMMICチップ

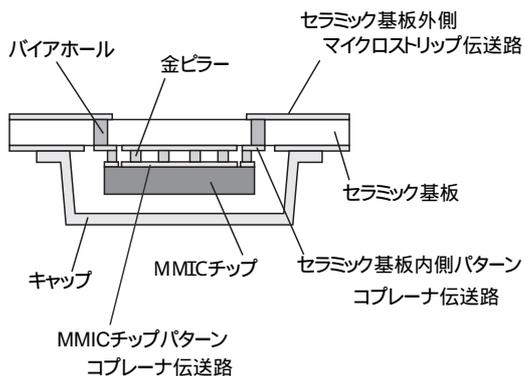


図-5 MMICモジュール構造
Fig.5 Construction of MMIC module

4.1 MMICチップとセラミック基板の接合法

4.1.1 フリップチップ実装

MMICチップはフリップチップと呼ばれる実装方法にて0.2mm厚のセラミック基板にボンディングした。一般

的なチップの実装方法は、ダイボンディングしたチップ上にワイヤボンディング接続という構造をとる。しかし、76GHzという超高周波で動作する素子の実装では、ワイヤのループ形状や長さばらつきにより特性が著しく異なり、安定した特性が得られない。ワイヤボンディングを制御するためには、数十 μm 以内の高い精度が必要となる。そこでワイヤボンディングに替わる実装手段として、金ピラーによるフリップチップ実装技術を採用した。

一般的にフリップチップ実装は、LSIなど多端子チップ実装で広く用いられている。通常は、転写はんだパンプにより、はんだの表面張力を利用して、位置合わせ・接続・形成を行う。

しかし、超高周波で高い性能を得るためには、接続部のインピーダンスの不整合をなくし、伝送損失を抑えることが必要となる。したがって、はんだパンプによる接続より高い位置合わせ精度が要求される。また、高周波特性をシミュレートできる構造と、製造での再現性のよい構造も必要となる。このために、金ピラー (Pillar : 柱) と呼ぶ直径 $40\mu\text{m}$ 、高さ $20\mu\text{m}$ の円柱状のAuをMMICチップのパターン側の随所に形成して、MMICチップをセラミック基板の内側にフリップチップ実装する構造とした。

金ピラーでフリップチップ接続されるMMICチップ上のパターンとセラミック基板内側のパターンは、コプレーナ伝送路を使用した。図-6にコプレーナ伝送路の構造を、図-7にマイクロストリップ伝送路の構造を示す。コプレーナ伝送路は信号ラインとグラウンドラインが隣同士に配置

される線路で、信号ラインとグランドラインが基板を挟んで上下に存在するマイクロストリップ(MSW)伝送路と同じように、高周波回路では代表的な回路である。通常の準ミリ波MMICチップでは、実績のあるマイクロストリップ伝送路を採用しているものが多く、パターン幅を細くするためにチップを薄型にしたり、チップパターン面とチップの底面のグランド面とをビアホールにより接続する必要がある。反面、今回採用しているコプレーナ伝送路では、チップパターン面のみに信号ラインとグランドラインが存在するため、チップの厚さ方向が特性に影響を与えず、また、チップパターン面のグランドとチップの底面のグランド面とを接続する必要がない。したがって、通常の準ミリ波MMICチップの製作時に必要な裏面削り工程やビアホール工程を削除できるため、全体としてのプロセス工程は少なく済む。

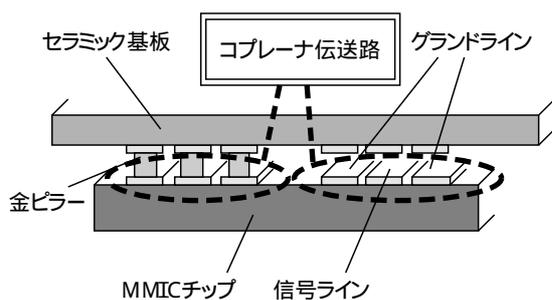


図-6 コプレーナ伝送路
Fig.6 Coplanar waveguide

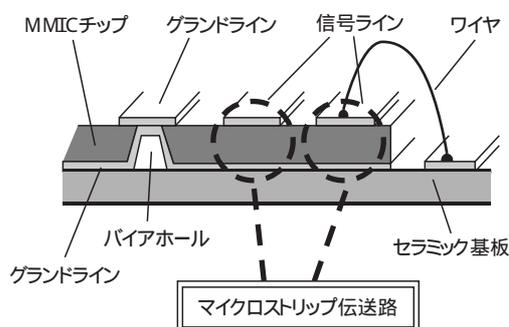


図-7 マイクロストリップ伝送路
Fig.7 Microstrip line

また、信号ラインとグランドラインが同一面に存在するため、MMICチップパターン面とセラミック基板内側パターン面を最小限の長さの金ピラーで接続することに

より、インピーダンスの差を小さくすることが可能になり、安定した特性が得られた。また、HEMTなどの能動デバイスの接地もピラーを通じてとられるため、寄生インダクタンス成分が、通常のビアホールによる接地より少なくなる利点もある。高さモニタを入れたメッキ工程により、設計上要求されるピラー高さの範囲内の製造制御が実現している。

セラミック基板とMMICチップの接続部(金ピラー部)の高周波特性を図-8に示す。設計どおりの構造が維持されているため、77GHzでの通過損失(S_{21})0.3dB、反射損失(S_{11})15dBという値を達成している。これは、通常のワイヤ接続の場合に想定される値(通過損失0.6dB、反射損失10dB)に比べ優れている。フリップチップ接続後の高さばらつきも $\pm 2\mu\text{m}$ 程度に抑えられており、接続部での特性ばらつきも小さい。

ちなみに、 $20\mu\text{m}$ 高のピラーが $\pm 5\mu\text{m}$ の高さばらつきを持っていても、MMICチップ上のコプレーナ伝送線路の特性インピーダンスは ± 2 変化するにすぎない。したがって、MMIC全体の特性は、製造上生じるウエハプロセス、組立てのばらつきに対し、十分な余裕度を確保して設計されている。

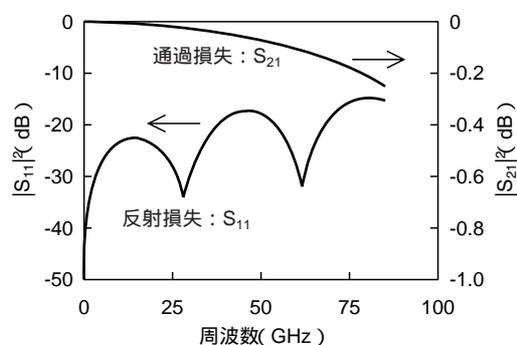


図-8 金ピラー部 高周波特性
Fig.8 High frequency characteristics of gold pillar portions

4.1.2 パラレルプレートモード

ここでは、4つのMMICチップを1つのMMICチップに統合する際に発生した現象と対策方法について説明する。

MMICチップは、76GHzの高周波を取り扱うため、数10mAの電流が流れる。MMICチップが発生させる熱を放射させるために、チップの下はグランドメタルを備えたセラミック基板を使用し、MMICチップとセラミック基板はできるだけ接近させておく必要がある。しかし、MMICチップとセラミック基板を近接すると、平行プレートモードと呼ばれる伝達が発生し、MMICチップ

上に形成された各々の回路に不要輻射して利得低減などの現象を引き起こす。我々は、パラレルプレートモードの励起を回避するために、多数のアースされた金ピラーをMMICチップ上に配置した。金ピラーの数とパラレルプレートモードの励起の関係は3D電磁シミュレーションにて分析した。

3Dシミュレーション結果を図-9に示す。シミュレーションは20 μm 離れに置かれた2枚の金属板と、波の方向に直角に配置された直径40 μm の金ピラーの列から成る。シミュレーションから、金ピラーの本数が多くなると(金ピラーの間隔が狭くなると)パラレルプレートモードが抑制されることがわかる。最大10dBの利得を得るために18dBパラレルプレートモードを抑える必要があることから、最大300 μm のピラー間隔を決定し、MMICチップの全エリア様に配置した。

また、コプレーナ伝送路の基本設計値は、幅20 μm ・間隔20 μm であるが、コプレーナ伝送路の幅・間隔が狭くなると減衰が増加する。反面、電磁界がMMICチップや大気の方に拡散するのを防ぐことができるため、我々は、ロスの増加にもかかわらず、幅10 μm ・間隔10 μm のコプレーナ伝送路を使用した。セラミック基板をMMICチップに接近させている影響でインピーダンスの変化が起こるが、設計値より狭いライン・小さい間隔のコプレーナ伝送路を使用することで電磁界の拡散を回避している。

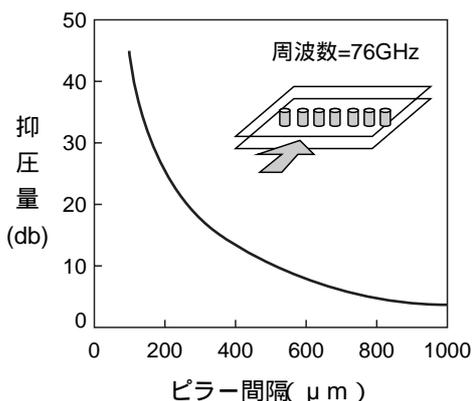


図-9 パラレルプレートモード電磁界シミュレーション
Fig.9 Simulation of parallel plate mode electromagnetic field

4.2 ハーメチックシール

MMICの信頼性確保のため、セラミック基板にフリップチップ接続されたMMICチップは、キャップでハーメチックシールされる(図-10)。セラミック基板のチップ搭載

面のほとんどが接地金属でメタライズされているため、MMICチップを蔽い隠すような金属キャップをロー付けすることで、電磁遮蔽構造を実現した。セラミック基板のコプレーナ伝送路は、バイヤホール経由で、反対側のマイクロストリップ伝送路に接続される。バイヤホール部も気密を保ち、かつ、76GHzという超高周波を効率よく伝送させるようなメタライズ構成となっている。また、セラミック基板の内側をコプレーナ伝送路に、外側をマイクロストリップ伝送路にすることで、接地面を共有化して伝送モードの変化を最小限に抑えている。又0.2mm厚の薄いセラミック基板を用いることで、バイヤホールでの損失を抑え、マイクロストリップ伝送路の遮断周波数を80GHz以上にすることが可能とした。

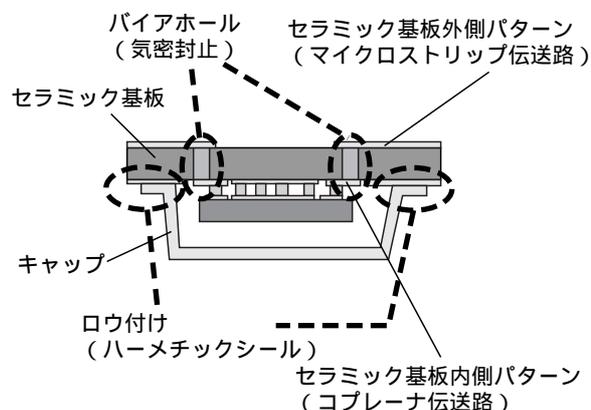


図-10 ハーメチックシール
Fig.10 Hermetic seal

4.3 RFプローブパッド

今回開発した1チップ統合MMICを図-11に示す。今回の統合MMICモジュールはセラミック基板の両端に2つのRFプローブパッド構造を持ち、一つは38GHz入力信号のポートで、他方は76GHzの入出力信号のポートである。プローブパッドの拡大図を図-12に示す。従来のRF信号の入出力ポートはマイクロストリップ構造であり、MMICモジュールをマイクロストリップ伝送路からコプレーナ伝送路に変換した後、検査を実施していた(図-13)。今回開発したプローブパッドは、マイクロストリップ伝送路とコプレーナ伝送路の特徴を同時に持つ。この構造にすることにより、MMICモジュールを伝送路変換器具を経由することなく直接RFプローブにて検査することが可能となり、検査工数の低減が実現できた。また、従来どおり、他の回路に接続する時は、ワイヤリボンを使用することも可能な構造となっている。

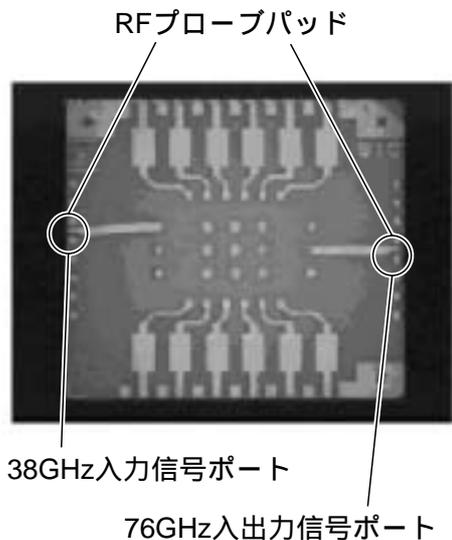


図-11 MMICモジュール外観
Fig.11 Exterior view of MMIC module

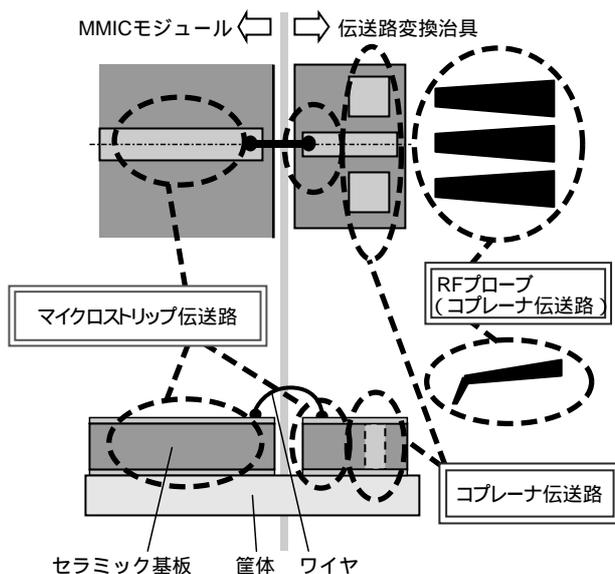


図-13 従来の検査方法
Fig.13 Former inspection method

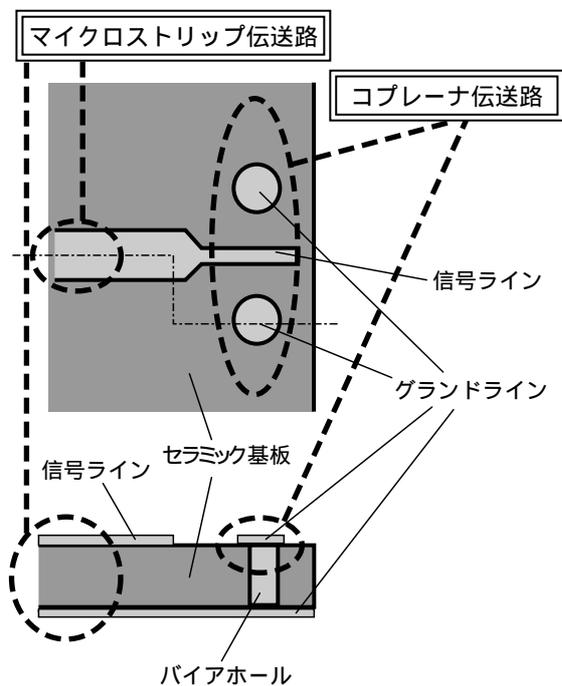


図-12 プローブパッド拡大図
Fig.12 Enlarged view of probe pad

4.4 統合MMICの回路動作

1チップ統合MMICモジュールのブロックダイアグラムを図-14に示す。前章で説明したように、4つのMMICチップを1つのチップに統合した。

統合MMICモジュールは、外部から38GHzのVCO信号を入力するポートと76GHzの信号の入出力ポート、および2つのIF信号出力ポートを持つ。信号の経路は、おおきく、ローカル信号の経路、送信信号の経路、受信信号の経路に分かれる。送信モード時には受信部はOFFされ、受信モード時には送信部はOFFされる。送信・受信の切替は、送信部のアンプと受信部のアンプのドレインバイアス電圧を順番に変化する。

外部のVCOからの信号は38GHzブランチラインハイブリット回路により2つに分離される。分離した信号のうち1つはローカル信号として、38GHzアンプで増幅後、通倍器に入り、1段アンプにより再度増幅され、76GHzミキサのローカルポートに供給される。

また、別の分離した信号は、38GHzアンプにより増幅後、通倍器に入り、アンプにより増幅され、76GHzブランチラインハイブリットを通して、76GHz入出力ポートより送信信号として出力される。

受信信号は、76GHz入出力ポートから76GHzブランチラインハイブリットを通して、アンプにより増幅され、0 - 180度ハイブリット回路から1対のシングルエンドミキサによりダウンコンバートされ、IF信号出力ポートより出力される。

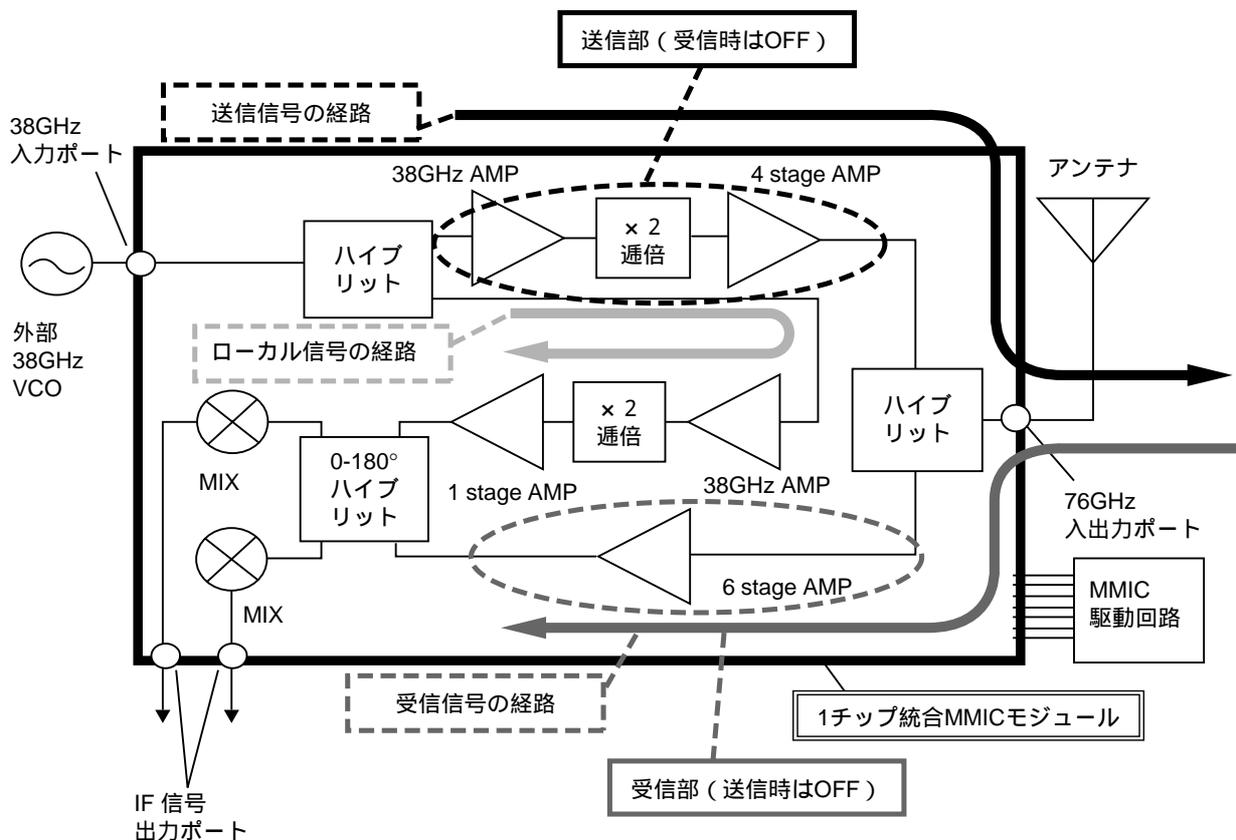


図-14 1チップ統合MMICブロックダイアグラム
Fig.14 Block diagram of the integrated single chip MMIC module

今回の1チップ化においては、現行ユニットと同等特性を持つよう、レベルダイヤを設定した。また、ハイブリットもチップ内に構成し、コストダウン・小型化をめざした。また、MMICを駆動するのに必要なバイアス電圧も必要最小限の数に絞り、かつ、特性をコントロールできるように、外部より印加電圧を可変できるようにした。

実際製作した統合MMICチップの写真を図-15に示す。用いたプロセスはInGaP/InGaAsヘテロ接合を持つP-HEMT (Pseudomorphic HEMT) をベースにしており、P-HEMTはゲート長0.15 μ m、遷移周波数(transition frequency) $f_t=90$ GHz、最高発振周波数(maximum frequency of oscillation) $f_{max}=170$ GHzの性能である。キャパシタは、SiNを用いたMIM (Metal-Insulator-Metal) 構造である。抵抗はエピタキシャル活性層を用いる。統合MMICのチップ面積は8.46mm²であり、現行のMMICチップの総計面積の3分の1に収める事ができた。また、図-15のチップ写真に示すように、回路間の干渉を防止するために、250本以上の金ピラーを配置した。

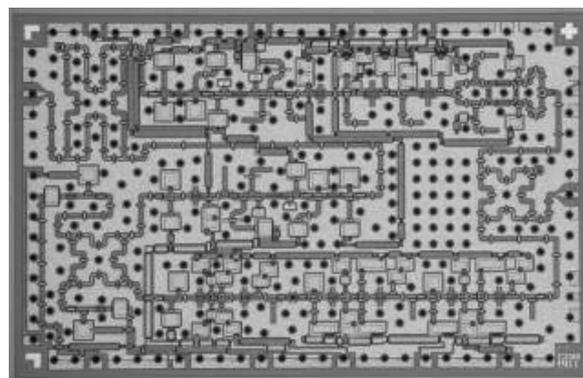


図-15 1チップ統合MMIC写真
Fig.15 Photograph of single chip integrated MMIC

4.6 統合MMICモジュールの性能

表-2に今回製作した1チップ統合MMICモジュールの性能を示す。また、送信性能を図-16に、受信性能を図-17に示す。現行のMMICモジュールを使ったユニットと比較して、同等の性能が得られた。

表-2 1チップ統合MMICの性能

Table 2 Performance of single chip integrated MMIC

項目	送信性能	受信性能
高周波特性	送信電力 7.3dBm (0dBm@38GHz in)	利得 30.8dB (0dBm@38GHz in)
		雑音指数 11dB (@IF 1MHz)
消費電力	0.54W _{DC}	0.30W _{DC}

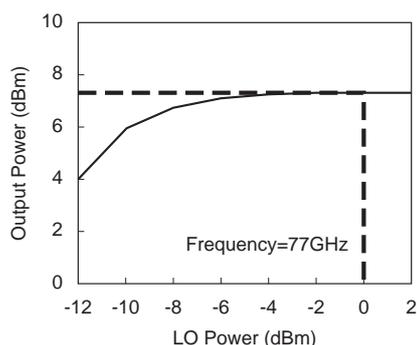


図-16 1チップ統合MMIC出力電力

Fig.16 Output power of the integrated single chip MMIC module

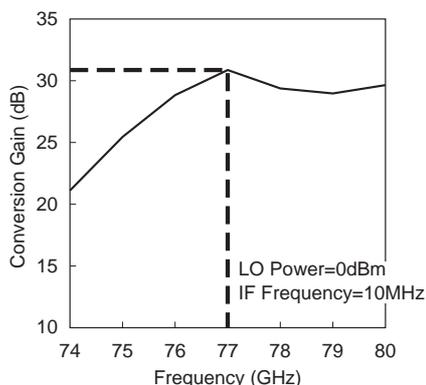


図-17 1チップ統合MMIC変換利得

Fig.17 Conversion gain of single chip integrated MMIC

5

おわりに

76GHzミリ波の市場が拡大していくにつれ、小型化・コストダウンが要求される。我々は、その期待に応えられるであろうミリ波ユニットが開発できた。今後、量産化に向けた活動を通じて、一刻も早く製品化していきたい。

参考文献

- 1) 山脇, 山野: 60GHz帯自動車用ミリ波レーダ. 富士通テン技報, Vol.15 No.2
- 2) 山脇, 山野, 加藤木, 田村, 大平: 障害物検知用ミリ波レーダ装置. 富士通テン技報, Vol.18 No.1
- 3) 青木, 渡邊, 大久保: 76GHz車載レーダ用HEMT MMIC. FUJITSU, Vol.51, No.3
- 4) T. Shimura et al: A Single-chip Transceiver Module for 76-GHz Automotive Radar Sensors. 31st European Microwave Conference Proceedings, vol.3, pp.153-156, 2001.

社外執筆者紹介

大橋 洋二
(おはし ようじ)

1986年(株)富士通研究所入社。以来、ミリ波集積回路の設計技術の研究、ミリ波実装技術の開発に従事。超高周波システム研究部主任研究員。

長谷川 裕一
(はせがわ ゆういち)

1985年富士通(株)入社。以来、マイクロ波通信用ガリウム砒素FETの開発に従事。現在、富士通カンタムデバイス(株)技術統括部 第四技術部長。

筆者紹介

元二 直樹
(もとに なおき)

1986年入社。以来、自動車用電装製品の開発に従事。1995年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在ITS事業推進本部技術部在籍。

矢木 秀和
(やぎ ひでたか)

1992年入社。以来、自動車用電装製品の構造開発に従事。1996年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在ITS事業推進本部技術部在籍。

山野 眞市
(やまの しんいち)

1980年入社。以来、自動車用電装製品のハード設計に従事。1996年よりミリ波レーダシステムの設計に従事。現在ITS事業推進本部技術部担当部長。