

準ミリ波／ミリ波帯 デバイスの開発

Development of quasi-millimeter-wave/millimeter-wave MMICs

足立 誠 幸 谷 口 徹 城 崎 俊 文
Nobuyuki Adachi Toru Taniguchi Toshifumi Shirosaki

永 嶺 真 治 小 林 純
Shinji Nagamine Jun Kobayashi

要 旨

近年、スマートフォンに代表される携帯無線通信端末の急速な普及に対応する大容量インフラ機器の開発が急務となっている。準ミリ波／ミリ波の高い周波数領域の電波は、その広帯域性や高速性を活かして多くの情報を高速に伝送する性質を備えている。これら情報機器の小型軽量化をめざして、準ミリ波／ミリ波帯アナログキーデバイスとなる高密度モノリシック集積回路 (MMIC) の開発に着手した。ここで紹介するMMICは、従来のマイクロストリップ線路型MMICと比較するとその面積は、コプレーナ型MMICが2/3、3次元構造MMICは1/3程度のサイズを実現した。低損失小型パッケージに当社独自開発のフェイスダウン実装技術で収められたMMICは、屋外用途に十分な信頼性を確保した。光ファイバーネットワークにシームレスに接続できる大容量FWA装置として昨年秋リリースした「25GHz帯小電力データ通信装置」に採用の準ミリ波帯MMIC、将来のさらなる大容量化に対応する「38GHz帯ミリ波大容量無線アクセスシステム」に搭載するミリ波帯高集積MMICを開発した。

Abstract

Recently, with the rapid spread of portable wireless communication terminals represented by smartphones, there is an increasing demand for large-capacity wireless infrastructure equipment. Quasi-millimeter-waves/ millimeter-waves are suited for this purpose because of their broadband and high speed properties. JRC has developed multi-function millimeter-wave monolithic microwave integrated circuits (MMICs) in order to smaller volume and lighter weight of these broadband wireless communication equipments. Compared with the conventional MMIC using microstrip lines, the chip areas of the MMIC using coplanar lines and the MMIC with a 3-dimensional structure are reduced to 2/3 and 1/3, respectively. The developed MMICs, housed in small and low loss packages assembled by JRC proprietary face-down chip technology, have sufficient reliability for outdoor applications. The quasi-millimeter-band MMIC is used in a 25GHz broadband wireless point-to-point communication system and the millimeter-band MMIC is used in a 38GHz ultra broad band wireless communication system. These systems are seamlessly connected to the fiber optic network.

1. ま え が き

携帯無線通信端末の急速な普及に伴い、大容量インフラ機器の整備が加速されることは誰もが想像できる。

また、自動車・船舶・航空機等の安全性向上を目的とするセンシング技術開発など、現代社会においては準ミリ波／ミリ波を用いた高周波アナログ回路に対する期待は益々大きくなっている。小型で低価格な高周波アナログ回路といえば平面回路が主流であるが、その平面回路は1970年頃提案されて以来、高周波の回路技術として大きく発展してきた。現時点でこれらのインフラ機器および情報端末の要求を最も満足させられる平面回路技術は、モノリシック集積回路 (MMIC) である。

我々は、 $0.4\mu\text{mGaAs-pHEMT}$ を用いた準ミリ波帯複合機能MMICを開発し、これを小型面実装パッケージ (CSP) と組み合わせる形で、「25GHz小電力データ通信装置」に搭載した。

さらに、近い将来のさらなる大容量化時代に向けた、

「38GHz帯ミリ波大容量無線アクセスシステム」の実運用評価を目的に、 $0.15\mu\text{mGaAs-pHEMT}$ を用いたミリ波帯多機能3次元構造MMICを開発したので報告する。

2. 設計技術

2.1 回路設計に用いる素子モデル

集積回路は、量産時の回路特性が均一で無調整化が実現できる反面、性能を詰めるまでの試作回数が多くなってしまふと膨大な開発費が必要となる。少ない試作回数で回路の性能を確保するため、特にミリ波領域では、設計に用いる素子モデルの精度が極めて重要となる。

・能動素子モデル (非線形モデル)

実測とシミュレーションの結果との差は受動素子や能動素子のモデル精度に起因するケースが多いが、特に非線形なふるまいをする能動素子の場合には、その回路の性質に見合ったモデルを使用する必要がある。高い運用電力で動作する周波数増倍器やバッファアンプ、飽和動作する発振回

路など回路に適した非線形モデルを用いなければならない。ファウンドリー供給される非線形モデルは比較的万能なものが多いが、マイクロ波/ミリ波領域においてはそれらの性質や精度を理解した上でこれを利用しなければならない。

・受動素子 (L, C, R)

スパイラルインダクタ, MIMキャパシタ, 抵抗といった基本素子は, 実際に使用されるMMICの実装形態にてTEG測定を行いモデル化する必要がある。すなわち, 引き出し配線層や接地配線間距離などを同構造としたTEGを作成し正確な高周波特性を取得し, 設計に必要なモデルを準備する。

・機能回路

装置の無線部に用いる高周波回路では, 電力を分波/合成しながら不要な信号を抑圧したり, 必要な電力だけを抽出するなど機能回路を利用するケースが多く発生する。ラットレース回路やブランチラインカップラ, ウィルキンソンディバイダーなどがその代表的な回路であるが, こうした機能回路をいかに上手に使うかが回路のトータル性能を引き出す大きなポイントとなる。

2.2 小型化に適したMMICの配線構造

小型軽量, 低価格化を合理的に解決する手段としてMMIC技術を駆使する方法が考えられる。MMICは同一平面上に回路を構成すること自体は何ら従来のディスクリート回路と変わりはないが, 物理的寸法が圧倒的に小さいという高周波回路にとって大きな利点がある。

MMICを構成する代表的な構造を図1に示す。

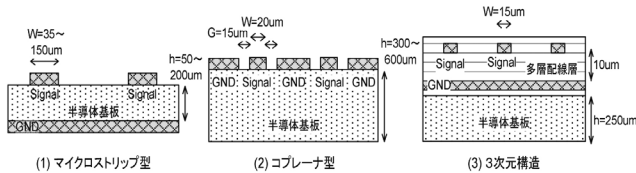


図1 MMIC配線構造

Fig.1 Cross-sectional structure of the MMIC

・マイクロストリップ型

半導体基板表面に形成した回路導体と裏面接地導体で構成され, 導体間接続はバイアホールにより行われる。伝送線路の特性インピーダンスは接続線路の幅と接地導体までの距離に依存するため, 特性インピーダンスを保持しながら回路面積を小さくするには基板厚を薄くする必要がある。

・コプレーナ型

回路導体と接地導体が同一平面上に構成される。伝送線路の特性インピーダンスは接続線路の幅と同一面接地導体までの距離に依存するため専有面積が小さく, 線路間の干渉が少ない為回路サイズを小さくできる。

・3次元構造

半導体基板上に誘電体薄膜を多層に積層し, その積層膜上にマイクロストリップ線路などの伝送線路を形成できる。接続線路の特性インピーダンスは線路幅と多層誘電体の膜厚に依存するため, 大幅な小型化が実現できる構成といえ

る。また, 回路の積層化も容易に実現できるため高集積化に適している。

今回開発したMMICは, 回路規模と価格の要求から25GHz帯FWA用は, ゲート長 $0.4\mu\text{m}$ の2層配線プロセスを用いたコプレーナ型, 38GHz帯FWA用は, ゲート長 $0.15\mu\text{m}$ の6層配線プロセスを用いた3次元構造を採用した。

3. 配線構造を利用した特徴的な回路例 (3次元構造)

3.1 スタック型スパイラルインダクタ

2.4GHz帯IF信号の処理は, 市販されている汎用部品(アンプやバランなど面実装部品)でも実現できるが, 究極の小型・低価格無線装置をめざすには, これらも集積化する必要がある。

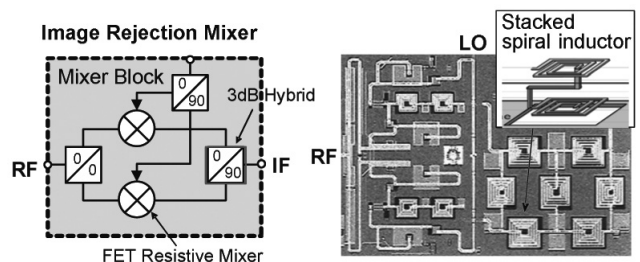


図2 スタック型スパイラルインダクタの例
Fig.2 Examples of Spiral Inductors

図2は, IF帯で使用するインダクタを少ない面積で実現可能とするため縦積み構造にしたスパイラルインダクタを用いて構成した90度ハイブリッド回路の例である。

3.2 90度ハイブリッドカップラ

送信ミキサではLO信号抑圧を実現するためサイドウォール結合型カップラを採用した。平面回路では3dBの振幅バランスおよび90度位相差を実現しながらポートインピーダンス特性のバランスを確保することが困難である。

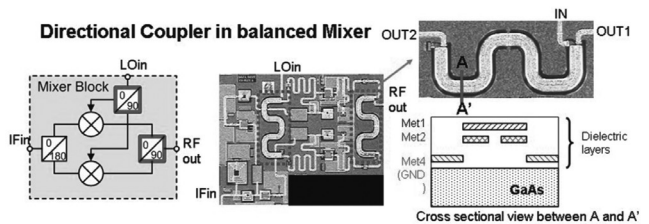


図3 サイドウォール結合型90度カップラの例
Fig.3 Examples of sidewall coupled 90° hybrid coupler

図3は, サイドウォール結合線路を利用したカップラでバランスミキサを構成した例であるが, この構造によればポートインピーダンス制御性に優れており容易にバランス確保できるため, 大きな抑圧効果が得られる。また, ブランチライン型と比較すると広帯域で専有面積が小さい。

3.3 90度ハイブリッドカップラ

受信ミキサではイメージ抑圧を実現するためブロードサイド結合型カップラを採用した。通常ブロードサイドカップラは出力ポートが上配線層と下配線層に分かれるためインピーダンス特性のアンバランスとなって現れる。このことがイメージ抑圧量の劣化に繋がる。

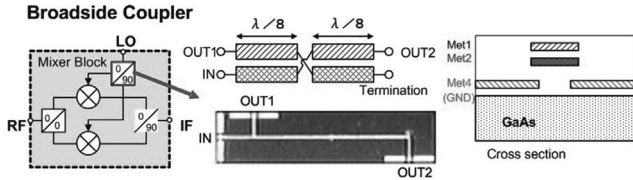


図4 ブロードサイド結合型90度カップラの例

Fig.4 Examples of Broadside coupled 90° hybrid coupler

図4は試作したブロードサイド結合型カップラである。結合線路中央で上層配線と下層配線を入れ替える工夫によりこの問題を回避した。

4. 開発した複合機能MMIC

4.1 25GHz帯コプレーナ型

25GHz小電力データ通信装置用に開発したMMICは、小型化に適したコプレーナ構造により、複合機能を備えた高集積MMICとした。3品種のMMICは、送受周波数変換に必要な局発信号通倍用の周波数通倍器 (x4), 送信電力制御用の可変利得アンプ, 受信利得制御用のステップアッテネータである。図5に回路構成, 図6にMMICのチップ写真を示す。

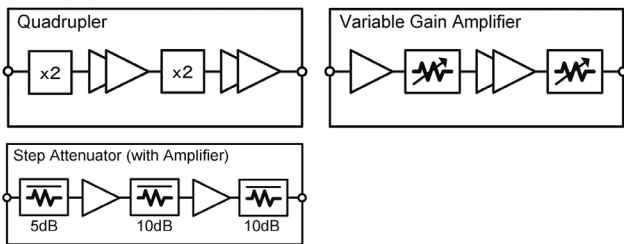


図5 25GHz帯MMIC回路構成

Fig.5 25GHz-band MMIC configuration.



図6 25GHz帯MMIC

Fig.6 25GHz-band MMIC

表1に主要諸元を示す。

- ・周波数通倍器 (Quadrupler)

バッファアンプを備えた2通倍回路をカスコードに接続することで4通倍器とした。基本波抑圧型通倍回路と不要波除去効果を有するアンプにより、スプリアス抑圧特性に優れている。

- ・可変利得アンプ (VGA)

連続可変減衰器とアンプの組み合わせにより35dBのダイナミックレンジと+7dBmの高出力化を実現。

- ・ステップアッテネータ (Step Attenuator)

切替式減衰器とアンプを組み合わせることにより、25dB可変幅 (5dBstep), 帯域内平坦度±1dBを実現。

表1 25GHz帯MMIC主要諸元

Table 1 25GHz-band MMIC specifications.

項目	Quadrupler仕様	項目	VGA仕様
入力周波数	2~3GHz	周波数帯域	24~28GHz
出力周波数	8~12GHz	利得可変範囲	-20~15dB
入力電力	+5dB	帯域内平坦度	+1dB
出力電力	+10dB	OUTPUT P1dB	+7dBm
スプリアス抑圧度	-20dBc	制御電圧	-1~0V
消費電力	270mW	消費電力	180mW

項目	Step ATT仕様
周波数帯域	24~28GHz
利得可変範囲	-13~12dB
帯域内平坦度	+1dB
OUTPUT P1dB	+7dB
制御電圧	-1/0V
消費電力	120mW

4.2 38GHz帯3次元構造

大容量データ通信用に開発した38GHz帯周波数変換MMICでは、3次元構造ならではの長を活かし送信周波数変換部および受信周波数変換部を可能な限り高密度に集積化した。図7に回路構成を図8にMMICチップ写真を示す。

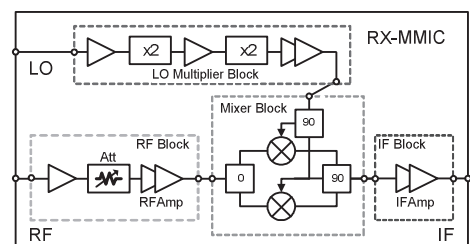
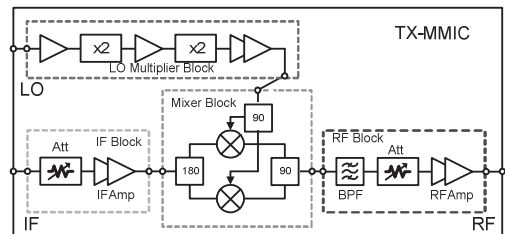


図7 38GHz帯MMIC回路構成

Fig.7 38GHz-band MMIC configuration.

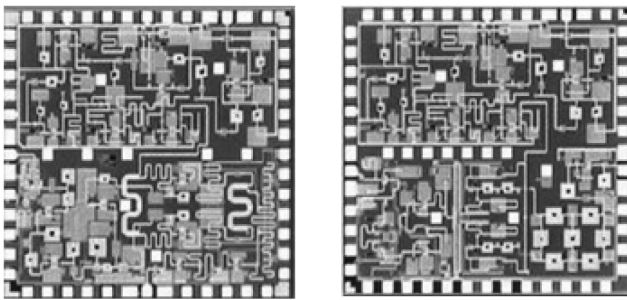


図8 38GHz帯MMIC
Fig.8 38GHz-band MMIC

表2に主要諸元を示す。

- ・送信アップコンバータ (Up Converter)
IF可変利得アンプ, LO抑圧ミキサ, RFバンドパスフィルター, RF可変利得アンプおよびLO用4通倍器を内蔵する。
- ・受信ダウンコンバータ (Down Converter)
受信用MMICは, RF可変利得アンプ, イメージ抑圧ミキサ, IFアンプおよびLO用4通倍器を内蔵する。

表2 38GHz帯MMIC主要諸元
Table 2 38GHz-band MMIC specifications

項目	共通仕様
中間周波数 (IF)	2.4GHz
無線周波数 (RF)	38.0~39.5GHz
ローカル周波数	8.9~9.275GHz
ローカル入力レベル	+6dB
電源電圧	+3.0V
パッケージサイズ	5.0×5.0mm

項目	Up Mixer仕様	項目	Down Mixer仕様
変換利得	>28dB	変換利得	>25dB
ローカル抑圧	20dBc	イメージ抑圧	31dBc
内蔵ステップ減衰器	10+10+5dB	内蔵ステップ減衰器	15dB
消費電力	420mW	消費電力	400mW

5. 実装技術

5.1 表面実装パッケージ

セラミック基板は、比較的熱伝導が良く寸法精度も良いためMMICの実装に適している。しかしながら従来のセラミックパッケージの多くは多層構造であり高周波特性が劣化する問題があった。本開発では、ミリ波領域での特性を極力劣化させることのないようパッケージ基板には単層セラミックを用いると同時に、キャップ封止には安価な樹脂を使用した。

5.2 フリップチップ実装方法

MMICの回路面をCSPキャリアに対向して実装するフリップチップ実装 (フェイスダウン実装) は、位置精度、接合高さにはばらつきが無く特性が安定であり、歩留まり向上が期待できる。また、ボンディングワイヤーによる接続方法と比べて寄生インダクタンスが小さいため高周波特性に優れていることからミリ波帯MMICの実装に好適である。本開発ではスタッドバンプを用いた超音波接合方法によりフリップチップ実装すると共にタクト時間を短縮し量産性を向上した。その製造工程を図9に、実装されたMMICとキャップ封止された完成写真を図10に示す。

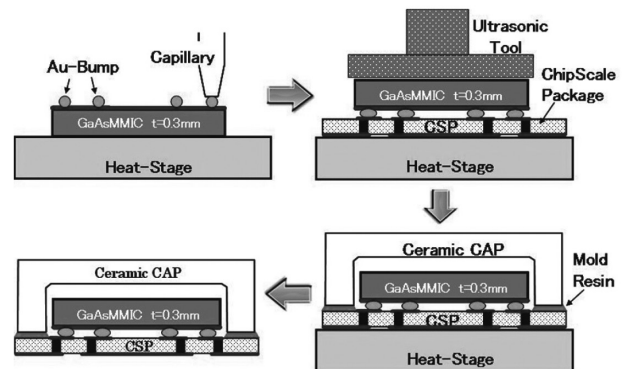


図9 フリップチップ実装 製造工程
Fig.9 Manufacturing process of Flip-Chip Bonding

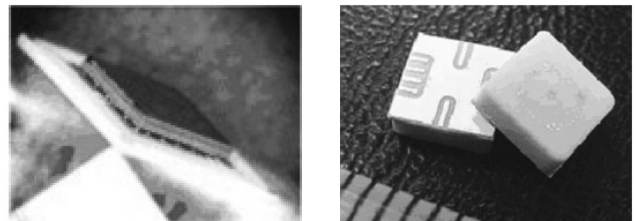


図10 表面実装MMIC (5x5mm)
Fig.10 MMIC in Surface Mount Package

6. 開発した無線装置の例

開発した多機能MMICは、無線基板搭載時の配置を事前に検討し、局部発振器からの入力線、電源部からの給電線、制御回路からの制御線、デジタル部とのインタフェースなど、無線基板上での3次元配線を極力不要とする設計に徹することで、図11に示すシンプルな無線基板を可能とした。

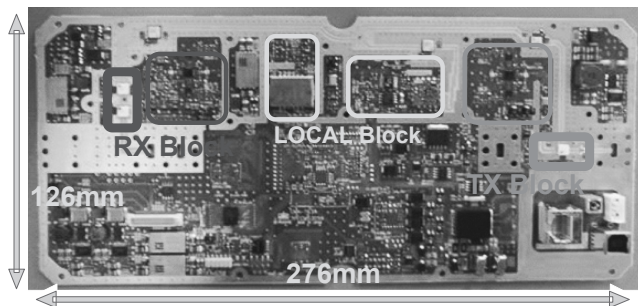


図11 多機能MMIC搭載ミリ波帯無線基板

Fig.11 Millimeter-wave band radio board with MMIC

7. むすび

準ミリ波、ミリ波の周波数領域は、その広帯域性を活かして多くの情報を高速に伝送できる通信手段として期待されている。しかし高い周波数がゆえに装置を実現する為の技術的なハードルは高く、用いるデバイスも単機能で高価であった。開発したMMICは、いずれも小型化に適した半導体プロセスと機能回路小型設計手法により複数の機能回路を高密度に集積することに成功した。従来のマイクロストリップ線路型MMICと比較するとその面積は、25GHz帯コプレーナ型MMICが2/3、38GHz帯3次元構造MMICは1/3程度のサイズである。

38GHz帯MMICの研究開発については、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として実施された。

参考文献

- (1) S. Nagamine, F. Ozawa, T. Shirosaki, T. Taniguchi, K. Okada, "Multifunctional frequency converter MMIC for 38GHz band 600Mbps multi-level QAM wireless system," IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT) 2009, Singapore, pp. 229-232, 9th to 11th Dec., 2009.
- (2) F. Ozawa, T. Shirosaki, Y. Toriyama, "Effective Throughput 1Gbps-class Millimeter-wave Wireless system," IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS) 2011, Beirut, pp. 323-326, 16th to 19th Jan., 2011.
- (3) Rajesh Mongia, "RF and Microwave Coupled-Line Circuits", Artech House, Norwood, MA, 1999
- (4) Stephen A. Maas, "Microwave Mixers" Second Edition, Artech House, Norwood, MA, 1993.

用語一覧

- CSP: Chip Size Package (小型チップサイズパッケージ)
- FWA: Fixed Wireless Access (固定無線アクセス)
- foundry: 半導体チップの製造を請け負うサービス
- GaAs: Gallium Arsenide (ヒ化ガリウム)
- LO: Local Oscillator (局部発振器)
- MIM: Metal Insulation Metal (金属-絶縁体-金属)
- MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit (モノリシックマイクロ波集積回路)
- pHEMT: Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor (疑似格子整合高電子移動度トランジスタ)
- TEG: Test Element Group (評価用素子)