GaAs MMICの実装技術の現状

The Current Technology of GaAs MMIC Packaging

青木 芳雄*

1. はじめに

携帯電話やPHSなどの準マイクロ波を使った移動体通信は今たいへんなブームになっている。DBSやCSデジタル多チャンネル放送などマイクロ波を使った放送システムは、今年から新規システムが立ち上がることをトリガーにして、これまた急速な普及が予想される。さらにミリ波レーダなど新規なシステムが構想されており、今まで工業通信用途でしか利用されていなかったミリ波の民生応用がはじまることになる。

マイクロ波帯の信号を扱う上で、GaAs半導体はなくてはならないものである。さらに、機器の小型化に 대응するためにGaAsチップ上にマイクロ波回路を集積化したMMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) が広く使われるようになってきている。MMICチップの開発とともに、それを実装するパッケージングも重要な技術開発アイテムである。

移動体通信端末機に使われるGaAs MMICのパッケージングについては、すでにいくつかのレビューがあるので、ここでは簡単に高周波用途のための技術に絞って説明する。さらに、比較的周波数の高いX-, Ku-帯BS/CSコンバータ用MMICの一次実装技術、ミリ波MMICの実装技術を取り上げて、現状技術を紹介する。技術的ポイントとしては、高周波信号のフィールドスルー構造とMMICチップの安定動作技術に注目する。

2. 移動体通信用MMICの実装技術

携帯電話などの移動体通信では、準マイクロ波信号処理にGaAs MMICが広く使われている。現在使われているMMICのパッケージは、Si (シリコン) デバイスで用いられているプラスチックモールドである。これらモールドの外形ないしリードフレームは高周波を意識して設計されたものではないため、Siデバイスにとっての高周波である準マイクロ波領域においては、パッケージとしては特性は必ずしもよくない。低コストと小型化の強い要求から、特性に不満を残しながらもモールド・パッケージを使っているのが実際である。

しかしながら、GaAsデバイスはSiデバイスに比べ利得が高いため、既存のモールドではどうしても動作させられない場合がある。こうした例として、GaAs MMIC用に新たに開発したモールド・パッケージを紹介する。搭載されているMMICは、PHS用電力増幅器である。これは、1.9GHzにアップコンバートされた信号を無線として送信するための信号増幅を行うMMICである。

主な特性は、1.9GHzにおいて出力電力21dBm、電力利得42dB、隣接チャネル電力漏洩比-60dB (21dBm出力時)、直流バイアス3.3V-160mA (いずれも標準値) である。1.9GHzという周波数で利得42dBの増幅動作を安定して行い、100mW以上の出力電力を確保するためには、パッケージの高周波接地がとれていることが極めて必要となる。中のMMICは4段のFET増幅器で、最終段のFETの入力インピーダンスは1.9GHzでは10Ω以下

*Yoshio Aoki

富士通(株)化合物半導体事業部 第二技術部/Compound Semiconductor Group, Fujitsu Limited.

Fig.1 Outline drawing and outer view of MMIC amplifier for PHS.

に小さくなる。仮にモールド・パッケージのリードインダクタンスを 0.1nH と見積もっても、 1.9GHz でのリアクタンスは 1Ω 以上になる。さらにボンディングワイヤのインダクタンスが加わるので、FETのインピーダンスに対し十分な接地（接地 $=0\Omega$ ）とはいえなくなる。このためMMICの接地となる回路部分がリアクタンス分フローティングされてしまい、帰還がかかったり、回

路の安定性を低下させたりする。

高周波接地はパッケージの重要な要件であり、ここで説明するパッケージでは、このための工夫がなされている。Fig.1にはこのパッケージの外形図および外観を示す。外形は通常のSSOP-16と同一になっているが、実装面に接地用金属板を露出させた構造となっている。以前より、パワートランジスタの放熱構造として、こうしたヒートシンクがとられているが、ここではヒートシンクとしてよりも高周波接地の役割を果たしている。

モールド・パッケージの場合、MMICのボンディングパッドからリードのパッドまでの距離は意外に長く、

Fig.2 Functional block diagram of DBS downconverter.

Fig.3 Block diagram of MMIC converter.

時に1.0mm以上にもなる。MMICチップ搭載金属部より接地をとるこの構造では、接地用ワイヤはチップ搭載ステージに対して打ち落とすので、ワイヤ長さはせいぜいチップ厚みの1.5~2.0倍程度ですむ。複数本のワイヤを打つことで、接地インダクタンスは0.1nH以下に抑えることができ、MMICは安定に動作する。

また増幅器MMICの利得が42dBもあるので、入力と出力の端子間アイソレーションもそれ以上の50dB以上は必要となる。このパッケージでは、実装時に接地金属

板の接地をとれば、接地金属板を挟む2つのリード間のアイソレーションは1.9GHzで50dB以上確保できる。

3. X帯コンバータMMICの実装技術

衛星放送については今さら説明をするまでもない。HEMTを有名にしたのもコンバータであろう。さてBSコンバータの機能ブロックダイアグラムは、Fig.2のようなものが一般的である。低雑音増幅器にはディスクリートHEMTが使われる。その後段にあるミキサ以降の部分には、MMICが使われるようになってきている。ここでは、コンバータMMICと発振器MMICを例にとり上げてパッケージングを説明する。

X帯ダウンコンバータMMICは、Fig.3に示すように、シングルバランス型ミキサとIFアンプを1つにしたMMICである。衛星から送られてくる電波は、12GHzほどの周波数である。これは一般家庭で扱う最も高い周波数である。ミキサ部は、局所発振器で発生する10.5GHzほどの基準信号とミックスして差の周波数である1.5GHzほどのIF信号に変換する。IF信号はIFアンプによ

Fig.4 Outline drawing and outer view of MMIC converter.

り増幅され、BSチューナに送られる。MMIC全体の総合変換利得は35dB (Typ.) である。

10GHzを超える高周波信号を扱うMMICを、家庭用に廉価に製造する必要から、このMMICでは、チップのほかパッケージにも以下のような要求が課せられる。

- ①12GHzの信号を低損失・低反射に通過させるフィードスルーとすること。
- ②MMIC安定動作のための高周波での接地をとれる構造となっていること。
- ③MMICの利得以上のパッケージ端子間アイソレーションがとれること。
- ④表面実装対応であること。
- ⑤低コストであること。

こうした要求から開発されたパッケージの構造をFig. 4に示す。

このパッケージは、棒状のセラミックにリードフレームを接着させただけの単純な構造を持つ表面実装タイプである。MMICチップ搭載部はリード部分と同じフレームで作られる。セラミックは板状ではなく棒状として、中にMMICを落とし入れる構造である。このためMMIC表面のパッドよりパッケージの端子部への距離が短く、ワイヤによるインダクタンスを小さく抑えている。

接地用の端子は広いメタライズパターンになっており、セラミック棒のキャビティの内側の側面のメタライズを通して、MMICチップ搭載部に通じる。表面実装構造であるため、パッケージ裏面の接地を容易にとることができ、かつパッケージ内での接地端子よりの経路が最短になっているため、先のPHS用MMICと同様に、高周波での接地は充分である。

また、機能端子と接地端子を交互に配置しており、機能端子間のアイソレーションは12GHzで40dBである。セラミックベースのメタライズパターンは、軸対称性を破って、2回の回転対称性を持たせている。これにより、セラミックベース作製時のメタライズパターンをすべて連結させることができ、コストダウンが可能となっている。

信号のフィードスルー部は、チップ近傍でコプレーナ線路となるように設計されている。全体のパターンは、リード部が実装基板上でマイクロストリップ線路を構成することを想定して、マイクロストリップ線路からコプレーナ線路への変換として反射と損失を抑えた設計をしている。

パッケージに50Ωのマイクロストリップ線路基板を挿入して測定した結果から、フィードスルー部の挿入損失は0.2dB (@12GHz)、反射損は-20dB (@12GHz)以下に抑えられている。

MMICチップはキャビティ内に落としこまれるようにして金属ベースにロー付けされ、ワイヤボンディングされたあと、樹脂材により保護される。マイクロ波領域では、組立時のワイヤ長さ、封止樹脂特性がMMIC全体の特性に大きく影響する。したがって、MMIC回路設計時に既に実装状態を考慮して、ワイヤのインダクタンス成分、パッケージ容量、封止樹脂材による寄生容量成分を折り込んでシミュレーションを行う。さらにはチップ搭載位置やワイヤ長さバラツキによるインダクタンスのバラツキを許容できるだけの設計余裕度をとっている。

こうしたことは、コンバータ用発振器MMICについてもあてはまる。このMMICは、EIAJでSC-47の外形コードをもつミニ6ピンの樹脂モールド・パッケージに入れられている。先にも述べたが、モールド・パッケージはマイクロ波デバイスのために設計された訳ではない。したがって、マイクロ波で使用するとMMICチップのもつ特性を引き出すことが難しい。

Fig. 5 Outer view of MMIC oscillator and equivalent circuit of its package.

Fig. 6 Inner view of millimeter-wave radar front-end.

Fig. 5にはこのパッケージの外観と等価回路例を示してある（パッケージ・リードフレームの回路はフレームの形状に依存するので、ここに示したものは一例と考えていただきたい）。MMICチップの設計では、パッケージの寄生効果を考慮することはとりわけ重要である。設計に際しては、まずパッケージの等価回路と各定数を把握する。このMMICは誘電体共振型発振器であり、FETを発振素子としている。発振周波数は、誘電体共振器側の反射利得を最大とする周波数として決まる。反射利得は接地のインダクタンスとキャパシタンスに依存する。すなわち、これらを正確に把握してMMICの回路設計にのぞむ必要がある。発振器といえども高周波接地が悪いと、自己発振を起こしてしまう。MMIC全体の設計では、パッケージ、チップ、アセンブリ（ワイヤなど）、2次実装環境を全て取り込んだ設計を行っている。

このように低コストを要求されるMMICでは、新規にパッケージを開発する必要があるのか否かを見極めることも設計者の重要な選択ポイントである。既存のモールド・パッケージを使用することを選択する場合には、寄生容量とインダクタンスなどを正確に見積もり、使用可否を検討する。ここでとり上げたように、既存のパッケージであっても設計によってX帯で使用することもできる。これも広義の実装技術と言えよう。

4. ミリ波MMIC

ミリ波MMICのパッケージングはまだオープンプロブレムである。ここでは、1つの提案としての60GHz用パッケージと、今後の動向を述べることにする。

日本では、60GHz帯がレーダ、通信などを始めとする新しいシステム用に割り当てられている。MMICチッ

Fig. 7 Block diagram of 60GHz front end module.

プの開発と、それを搭載したシステムの報告が最近の数年に多数なされている。代表的なものは、文献1)を参照されたい。特に自動車に搭載されるレーダセンサは、車の安全性向上に役立つシステムとして期待される用途である。レーダの試作開発も報告されており²⁾、実用化に向けて動き出している。

ミリ波MMICは、デバイスの性能の限界との戦いである。たとえば、アクティブデバイスとして f_{max} （最大発振周波数）=120GHzのFETを使用するとしよう。 f_{max} とは、そのFETを使って理想的な整合回路を付けた増幅器を作った時に利得が0 dBとなる周波数である。 f_{max} 付近の周波数では、利得は周波数に対し、おおむね6 dB/Oct. の変化をする。つまり、周波数が倍（半分）になると利得は6 dB減少（増加）する。 f_{max} =120GHzのFETを使ったMMICでは、60GHzで1段当たり最大6 dBの利得を得ることができる。実際には回路の損失や増幅器の帯域幅を考慮すると、せいぜい4～5 dB程度が得られる最大利得と言える。こうなるとパッケージの損失やインピーダンスの不整合をいかに抑えるかが重要となる。

ミリ波帯のMMIC搭載方法として一般的に使われているのは、チップキャリアである。これはMMICとその周囲の伝送線路パターンをもつ誘電体基板とを金属ベース板に並べたものである。MMIC自体は剥き出しの状態であるため、R&Dとしては使えるが実用とはならない。特に車載用途を考えると気密封止は必須である。ミリ波気密封止パッケージでは、ミリ波の信号フィードスルー部分の構造がポイントとなる。

Fig. 6には文献2)で紹介されているミリ波レーダフロントエンドの内部写真を示す。内部にはFig. 7に示す

Fig.8 Inner view of 38GHz-band MMIC amplifier.

ブロックダイアグラムに示す3つのMMICが実装されている。ここで使われているパッケージは、文献3)で報告されている衛星搭載用38GHz帯増幅器用のミリ波パッケージ (Fig.8) をベースにして、使用周波数を60GHzに上げるよう設計されたものである。メタル-セラミックの気密パッケージで、全体は金属で成形され、信号とバイアスのフィードスルー部分にセラミック片が使われている。金属ベースであるためにミリ波でも接地は問題ない。フィードスルー部のメタライズパターンはマイクロストリップライン-サスペンデッドラインとして、電磁界シミュレーションによって詳細設計している。フィードスルー部の60GHzでの損失は0.3dB、リターンロス -20dB を確保している。

内部にキャビティ空間をもつパッケージでは、共振を抑える構造とすることも重要である。パッケージの共振についてのモードの説明は文献4)にていねいな説明があるので参照されたい。たとえば60GHzで共振が起こらないようにするには、キャビティを2.5mm以下の辺の長さで構成する必要があるが、これはMMICのサイズと同程度であり、実際には共振の全く起こらないキャビティを実現することは難しい。文献5)でもとり上げられているが、こうしたキャビティ共振を抑えるには、キャビティ内部に電波吸収体を配置するなどの方法が採られることが多い。

ミリ波のパッケージングの技術については、文献5)、6)に技術的問題点とそれを解決する技術が説明されており、詳細はこれらの文献を参照されたい。マイクロ波と同じくミリ波においても低コストのパッケージや実装

技術、試験技術が求められている。またレーダ用途など信頼性も必要である。MMICチップ開発の技術的展望が開けた現段階では、実装と試験に関する技術開発が大きなテーマである。今後のパッケージの開発の方向も明らかではないが、個人的には、電磁界結合などの技術による非接触フィードスルー構造とチップサイズキャビティやフリップチップなどによる共振防止構造が有望に思われる。

5. ま と め

マイクロ波・ミリ波MMICのパッケージの現状をいくつかの例を中心に説明した。MMICは基本的には民生市場で応用されるデバイスといえる。したがって、パッケージも低コストでありながらマイクロ波でも使用できる高性能が求められている。このため、既存のアセンブリ技術を使いながらも、高周波接地や高周波フィードのための構造を設けたり、既存のパッケージであっても、回路設計時にパッケージのモデルを取り入れることでマイクロ波で使用できるようにしている。

ミリ波のパッケージは、ミリ波特有の共振などの問題解決が今後の開発の大きなテーマとして残されている。

参 考 文 献

- 1) 滝本幸男：「ミリ波利用と応用システムの展望」，電気学会研究会資料，電子デバイス研究会 EDD-95-45 (1995)
- 2) N. Okubo: "Millimeter-Wave Automotive Radar", MWE'96 Microwave Workshop Digest, WS13-4(1996)
- 3) 永友和雄，小池章一，大久保尚史，高橋英徳，五十嵐 勉，中谷哲二，志垣雅文：「38GHz帯MMIC増幅器」，1990年電子情報通信学会春季全国大会 SC-2-1 (1990)
- 4) 宮川文雄，宮本隆春，永田欣司：「ビア工法を用いた伝送線路の高周波特性」，SHM会誌，Vol.12, No.3 (1996)
- 5) 石塚文則：「超高速／高周波実装技術の現状と課題」，SHM特別セミナー「次世代実装技術を探る—21世紀に向けた変革—」(1997)
- 6) 石塚文則，岩崎 登：「ミリ波回路の実装—端子間接続技術およびパッケージ技術」，電気学会研究会資料，電子デバイス研究会 EDD-95-59 (1995)

〔執筆 者 紹 介〕

青木芳雄 (あおき よしお)

1983年，東北大学大学院・理学研究科修了。同年，富士通㈱入社。以来，GaAsFET，HEMT，MMICの開発に従事。現在，化合物半導体事業部第二技術部。理学博士。