ミリ波回路のフリップチップ実装

大橋 洋二*

Flip-Chip Assembly for Millimeter-Wave Circuits

Yoji OHASHI*

*株式会社富士通研究所（〒211-8588 神奈川県川崎市中原区上小田中4-1-1）

*Fujitsu Laboratories Ltd. (4-1-1 Kamikodanaka, Nakahara-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211-8588)

1. はじめに

ミリ波は、波長が10 mm～1 mmとなる周波数30 GHz～300 GHzの電波である。これは携帯電話等で使われている800 MHz帯～2 GHz帯や衛星放送等に使われている11 GHz帯に比べても非常に高い周波数である。その波長の短さから、回折の影響が小さく直進性に優れており、レーダー等のセンサに応用することで、空間分解能の高い検知が可能になる。また周波数の高さから、そこに多くの情報をのせることができ、通信に応用することで大容量のデータの伝送が可能になる。

最近になり自動車の安全・安心をサポートするものとして、ミリ波を使ったレーダーが一般の乗用車に搭載されるようになり、ミリ波の実用化が始まったと言ってよい。

自動車用ミリ波レーダーは、ミリ波信号を送信し、他の自動車などの障害物から反射してきた信号を受信することで、障害物までの距離・相対速度・方位を検知するセンサである（図1）。この情報を利用し、自動車周辺の状況に応じて车速制御を行うアダプティブクルーズコントロールや、必要に応じてブレーキをかけたり、シートベルトにテンションをかけたりして乗員の安全を確保するようなシステムに適用されている。

また高速な伝送が必要となる非圧縮画像伝送等に使用する60 GHz帯のシステムの研究開発が進められる等、ミリ波の通信応用についても実用化が目前に迫っていると言える。

ミリ波の通信応用は半世紀ほど前から研究開発が行われてきた。ある限られた分野では早くから使われていたが、ミリ波で動作する半導体デバイスが限られていたり、ミリ波回路を低コストに実現する実装技術が不十分であったりして、ミリ波回路を安く作ることができず、最近になるまで広く実用化することが困難であった。

ミリ波で動作するデバイスとしてはGaAs（ガリウム砒素）系ダイオード等があったが、1980年に発明されたGaAs系のHEMT（High Electron Mobility Transistor: 高電子移動度トランジスタ）の登場によって、ミリ波でも有用なトラ

ンジスタとして実用が可能になった。最近実用化された自動車用ミリ波レーダーでは、これらのGaAs系のダイオードやHEMTが使われている。また最近ではSiGeバイポーラやCMOS等のSi系デバイスも高性能化が進み、これらもミリ波帯で使用することも可能になりつつある。

しかし半導体デバイスの高周波化だけでなく、ミリ波の低コスト実装技術実用化が達成できなければ、ミリ波回路を使ったシステムの実用化は現実のものにはならなかった。本稿では、自動車用ミリ波レーダーの実用化で非常に重要な役割を占めているミリ波回路の実装技術を中心に述べる。

2. ミリ波回路の実装

2.1 分布定数回路とミリ波回路の特性

ミリ波のように周波数の高い領域では、電気信号は電流・電圧という概念よりは、電力を運ぶ波として考えるのが普通である。ある電力の信号をダイオードやトランジスタ等の半導体デバイス入力したときに、ある割合では半導体デバイスに入っていくが、残りの電力は反射してしまうような特性となる。高周波回路の設計では、この余計な反射を抑えて、できるだけ効率よく半導体との間で電力をやりとりできるようにすることが求められる。

簡単に言うと、半導体デバイスにつながる入出力部の信

図1. 周辺の障害物の距離・相対速度・方位を検知する自動車用ミリ波レーダー

号線路の途中にわざと反射がおきるような回路を付加する。そしてこの反射量と反射位相が、半導体デバイスで発生する反射量と同じで反射位相が逆になるような、複素共役の関係になるようにすると、この反射がうまく打ち消しあって、半導体デバイスと効率よく電力のやりとりができるようになる。このような手法の考え方を複素共役整合と呼んでいる。

ここで適切な反射量と反射位相を持つ回路を作るには、抵抗やコンデンサやコイル等のいわゆる集中定数回路ではなく、ある長さをもった伝送線路や、伝送線路に分岐回路を形成したスタブというものを組み合わせた、分布定数回路という形式で実現する。ここで重要となるのは、伝送線路の特性インピーダンスと、半導体デバイスとスタブまでの電氣的位相長、スタブ自身の電氣的位相長である。これらは、伝送線路の長さや太さ、形状等で決まるものである。つまりミリ波等の高周波回路では、半導体デバイスにつながる信号線路の形状やサイズそのものが、回路の特性を決める重要なパラメータになっているのである。

ミリ波は自由空間での波長が10mm~1mmであるが、誘電体等の内部では波長が短くなり、導波管の内部では逆に波長が長くなる。いずれにせよ、ミリ波では、半導体デバイスやその周辺回路のサイズが、信号の波長と同程度のサイズになる。例えば自動車用ミリ波レーダーで使用している77GHz帯の周波数においては、自由空間の波長が約3.9mmである。例えば半導体デバイスの実装位置が0.1mmずれると、空間の電氣的位相では9度程度のずれになる。GaAs基板にワイヤボンディングする場合でも、ボンディング位置が0.05mmずれるだけで、20度程度の位相ずれとなる。複素共役整合において、このような位相ずれは問題であり、特性劣化を引き起こす。つまり分布定数回路で形成されたミリ波回路の場合、その実装の形態が回路特性に大きな影響を与えるのである。

2.2 ミリ波回路の実装技術の歴史

前述の通り、ミリ波回路の研究開発の歴史は非常に古く、1950年代~70年代にまで遡る。以前には、ミリ波で回路を構成するには、Gunnダイオードやショットキーバリアダイオードなどのダイオードを導波管等の立体回路の中に実装するという方法によっていた。

導波管とはその内部に電波を通すことのできる金属の管であり、例えば60~90GHz帯の信号を通す方形導波管は、短辺約1.5mm、長辺約3mmの長方形という非常に小さな寸法のものである。この導波管で分布定数回路を構成するので、導波管にはかなり高い加工精度が必要になる。またダイオード等の半導体デバイス自体の特性にもばらつきがあり、半導体デバイスの実装にもある程度のばらつきが避けられない。そこでこれを保障するために、調整機構を付ける必要があった。この方法では、導波管等の立体回路の加工コストが高く、また特性のばらつきの調整コストも必

要となる問題があった。

まず導波管などの立体回路を、セラミックや樹脂等の誘電体基板上に形成したマイクロストリップ線路などの平面回路で形成した分布定数回路に置き換えるMIC (Microwave Integrated Circuit)という手法がとられた。ミリ波で使用する誘電体材料としては、誘電正接の小さいものが望まれる。当初は石英やサファイヤ等が使用されたが、その後アルミナセラミックが使われるようになってきた。アルミナセラミックは、取り扱いが比較的容易で、ミリ波帯でも誘電体損失が小さく、エッチングによるパターン加工も高精度にできるので、ミリ波帯でも十分使える回路技術として期待された。

また半導体デバイスもそれまではダイオード等に限られていたが、ミリ波帯でも利得の出せるトランジスタとして、HEMT (High Electron Mobility Transistor) が1980年に発明されたことにより、これを利用する方向に変化してきた。

実際ミリ波よりも周波数の低いマイクロ波帯ではこのMICの手法で比較的低コストに回路を作ることができるようになった。1980年代後半に急速に普及した衛星放送用の受信アンプには、このHEMTとMICの手法が使われている。

しかしながら、MICでは、HEMT等の半導体素子とアルミナセラミック等の上に形成した分布定数回路を接続するボンディングワイヤのインダクタンスによって、回路特性が影響を受けて、回路特性が劣化したり、特性ばらつきが大きくなったりする問題が起きる。ミリ波帯より周波数の低いマイクロ波帯では、この影響があまり大きくないが、ミリ波帯では顕著に現れてくる。例えば、77GHzの回路で、直径20 μ m長さ500 μ mのワイヤを使用すると、この部分で約3dBの反射損失が発生する。つまり約半分の信号は反射してしまうことになる。これを回避するには、ワイヤをより短くする、太いワイヤやリボン等を使う、反射をキャンセルするようなマッチングスタブを形成する、ワイヤそのものをなくす実装方法にする等の方法をとることになる。

ワイヤの影響をなくす手法として、HEMTなどを構成する半導体基板上にマイクロストリップ線路を作り込んでしまうMMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits)が開発された。MMICであれば、回路内部にはボンディングワイヤなどの製造ばらつきが大きくなる要素が少ないので、ミリ波でも製造性の良いICができると期待される。同時にこれらの回路を高精度に設計する回路シミュレータや電磁界シミュレータ等のソフトウェアツールも充実してきたことで、多くのミリ波MMICの研究開発が進んだ。

しかしながら、このMMICと外部の回路を接続するボンディングワイヤやパッケージによる特性劣化が、ミリ波回路の性能を制限したり、コストを上昇させたりする原因になってしまい、実際にはなかなかミリ波回路の低コスト化

図2. フリップチップボンディングの種類

が実現できなかった。

近年になって、デジタル回路等で実装面積を小さくする手法として使われるフリップチップ実装を、ボンディングワイヤによる特性劣化を回避する手法としてミリ波回路に適用することが提案された¹⁾。もちろんデジタル回路の手法をそのまま適用すると、ミリ波回路特性に影響が出てしまうので、ミリ波に適したやり方が必要だが、ミリ波でも高性能かつ低コスト実装ができる技術として注目されている。

2.3 ミリ波フリップチップ実装

フリップチップを実現するにもいろいろな方法が考えられている。デジタルIC等で最も一般的に使われている方法として、IC上にはんだバンブを配置し、基板の上に載せた後、リフローによってはんだを溶かして共晶結合を形成する方法がある(図2(a))。一般には樹脂のアンダーフィル材とともに使用して接合強度を確保している。しかしこれをミリ波回路に適用するには注意が必要である。まずバンブ径がミリ波の波長に対して十分に小さくしなければならない。バンブ径がミリ波の1/4波長に対して有意なサイズになると、そこで信号が大きく反射してしまう。77 GHzの空間での1/4波長は約1 mmだが、GaAs基板内では約0.27 mmとなる。実装後のバンブ径が0.2 mmより大きくなるようなサイズのバンブでは、77 GHz帯の回路では実用的に使うことができないと言ってよい。0.2 mm以下なら何でもよいというわけではなく、できるだけ小さいことが望ましい。具体的には1/20波長である0.05 mm以下が望ましい。最近でははんだバンブでもかなり小さいものが実現可能になってきているので、これをミリ波MMICに適用することも不可能ではない。

またアンダーフィル材として使う樹脂が、ミリ波の回路特性に影響を与えることにも注意が必要である。まず樹脂の誘電率によって、ミリ波回路中の伝送線の電氣的位相やインピーダンスに影響を与えるために、あらかじめそれを考慮した設計をしておく必要がある。また樹脂の誘電体損失が大きいと、これが回路損失になる。同じ物理長に対

図3. フリップチップMMIC。右上と左下にある柱状のものがめっきバンブ(ピラー)

する損失が、信号の波長が短くなればなるほど大きくなるため、ミリ波では誘電体損失の影響が大きくなる。伝送線の形式にもよるが、樹脂の誘電正接が0.005程度より大きくなると、急激に誘電体損失による影響が大きくなると考えてよい。

またフリップチップ実装の別の手法として、金バンブを熱圧着等によって接合する方法(図2(b))がある。金バンブは、めっきによって形成するめっきバンブ(ピラー)²⁾や、ワイヤをボンディング・加工して形成するスタッドバンブを使用する方法等がある。ミリ波におけるフリップチップ実装では、バンブ高さがばらつくと、MMIC内部の伝送線路の特性インピーダンスが変化してしまい、本来の特性が出せない可能性がある。その点めっきバンブでは、小さいバンブ径のものを、バンブ径や高さのコントロールが比較的精度よく制御できるので、ミリ波で使用するには都合がよい。

図3³⁾は自動車用ミリ波レーダーに使用しているMMICである。通常のワイヤボンディングで接続するMMICの伝送線路にはマイクロストリップ線路を使うことが多いが、フリップチップMMICの場合は図3の例のように伝送線路とグラウンド面が同一平面にあるコプレーナウエーブガイド線路を使うことが多い。ここで使用しているバンブ径は40 μm 、接合後のバンブ高さは約20 μm である。またこの場合アンダーフィル材は使用していないが、車載用として十分な信頼性を確保できている。

フリップチップMMICでは、MMIC上の回路と実装する基板側が近くに面しているために、実装によって回路特性が変化する。実装時の特性変化をできるだけ小さくするために、バンブ高さを高くしたり、実装基板上の金属、特にグラウンド面をできるだけMMICに面する部分からなくしたりするか、あるいはあらかじめ実装時の影響を考慮して回路設計を行うことで、初めて高精度な回路設計が可能になる。

2.4 フリップチップ実装に伴う不要伝搬モード

ミリ波回路特性を考える上で、不要伝搬モードの抑圧も重要な項目である。不要伝搬モードは、信号線路上を信号が伝搬するモードの他に、空間等を経由して伝搬することで信号のエネルギーが伝搬するモードを指し、キャビティ共振や平行平板モード等がこれにあたる。これが特定の周波数で共振となって、メインの信号からみると損失に見えてしまうことになる。

フリップチップMMICでは、MMIC上のグラウンド面と実装基板や筐体等のグラウンド面との間に平行平板モードという伝搬モードが発生して、これが回路特性に悪い影響を及ぼすことが多い。これはMMICのチップサイズが1/2波長を超える場合に顕著に現れる。実際にミリ波回路ではチップサイズが1/2波長を超えることが多い。MMICに面した実装基板側の表面のグラウンドをなくした場合でも、基板裏面や筐体のグラウンドとの間に平行平板モードが発生する可能性があり、利得の高い回路がある場合にはその影響が無視できない。

この平行平板モードの発生を抑えるには、グラウンドのサイズを1/2波長よりも小さくするか、平行するグラウンド間を1/2波長よりも十分短い間隔でバンプ接続するようにする。例えば77GHzの場合、自由空間の1/2波長は約2mmだが、MMICの多くは1~3mm程度の大きさをもっており、グラウンドのサイズも1/2波長よりも大きくなるが多い。その場合には実装基板の表面をグラウンドとして、MMICのグラウンドと実装基板のグラウンドをバンプで1/2波長よりも十分狭い間隔で接続すればよい。このようにすることで、平行平板モードに起因する共振を避けることが可能になる(図4)⁴⁾。

他にチップの厚みが信号の1/4波長よりも厚くなると、ここでも不要伝搬モードが発生する。77GHz帯では、GaAsの基板厚が0.27mmを超えると発生する。あまり薄いと機械的強度が低下する等の問題もあるので、ミリ波帯のフリップチップ実装では、チップの厚みも十分に考慮して決める必要がある。

2.5 ミリ波パッケージ

パッケージはMMICやボンディングワイヤ等を物理的な接触から守ったり、水等による劣化等を防いだりする役目を持っている。MMICをパッケージに実装する場合、パッケージフィードスルー部の損失と、各種不要伝搬モードや共振の発生による特性劣化が問題となる。

一般にはパッケージのキャビティサイズが1/2波長以上になると、この問題が顕著に見えてくる。すでに述べた通り、MMICのサイズそのものが1/2波長を超えてしまう状況では、パッケージのキャビティサイズも1/2波長を超えることは避けられない。特に利得の高いMMICが内部にある場合には、これらの共振が拡大されるように見えるので、問題が大きくなる。この問題を回避するには、発生する不

図4. バンプ径40 μm、高さ20 μm、周波数76 GHzの場合のバンプピッチと平行平板モード抑圧比の関係

要伝搬モードを吸収するような構造が必要になる。具体的には電波吸収体を使用することが1つの手段としてあげられる。別の手段としては、不要伝搬モードに対してうまく共振を起こすような周期的構造をパッケージ内部に設ける手法⁵⁾がある。

また外部と内部を接続するフィードスルー部は、高周波信号を通しつつ、水などの進入を防ぐ役割がある。ミリ波で通常用いられるのは、ストリップ線路を用いる方法で、2層のセラミック基板の間にタングステンで形成したストリップ線路をセラミックと線路を同時焼成することでフィードスルーを形成している。アルミナセラミック基板内の1/2波長は77GHz帯では約0.65mmで、この部分での不要伝搬モード発生を抑えるには、セラミック基板の厚さや幅をこれよりも小さくしなければならず、信号線路も細いものを使うことになる。そうするとミリ波帯での挿入損失がどうしても大きくなってしまう問題がある。

フリップチップMMICに適したパッケージの一例として、図5のようなフィルドビアを使用したパッケージ⁶⁾がある。フリップチップMMICは、信号線路とグラウンドが同一面にあるコプレーナウェーブガイド線路で構成されるので、これを実装するパッケージ側の信号のインタフェース部分も同様に、信号線路とグラウンド線路が同一面にあるコプレーナウェーブガイド線路で構成している。次にコプレーナウェーブガイド線路の部分はできるだけ短くなるように、基板の表と裏をビアホールで接続し、すぐにマイクロストリップ線路に変換している。この場合マイクロストリップ線路のグラウンド面とコプレーナウェーブガイド線路のグラウンドが同一面になるので、高周波信号のモード変換がスムーズに行われる。またこの形式だとDCから高い周波数まで、非常に広帯域にわたって反射損失の小さいものを作ることができる。また挿入損失についても細いタングステンで形成したストリップ線路のフィードスルーに比べる

図5. フィールドビアを使用したセラミックパッケージの外観と断面図

と、高周波でも低損失な特性となる。

またこの形式の場合、セラミック基板の両面板でパッケージが構成できるので、非常に簡単にパッケージを作ることができる。

2.6 パッケージ間接続による特性劣化

複数のパッケージやミリ波コンポーネントでシステムを構成する場合に、各パッケージ間を接続部で特性劣化が発生する場合がある。1つには、MMICで問題になったのと同様に、高周波信号を接続するボンディングワイヤ等による特性劣化がある。また信号線の接続だけでなく、グラウンドの接続も問題になる点に注意が必要である。グラウンドに不連続があると、ここでも信号の反射が発生して、特性が劣化してしまう。

図5のようなパッケージの場合、パッケージグラウンド面を筐体のメタル部に接着することで2次実装を行う。外部の回路のグラウンド面も同じ筐体のメタル部に接着することで、グラウンドの不連続は発生しない。したがってこの形式のパッケージでは、接続部での反射や損失が非常に小さいという特徴がある。

3. 最後に

ミリ波回路の低コスト化や量産技術の研究がいろいろな研究機関で行われてきており、その成果でミリ波レーダーを始めとした製品が次々とリリースされている。その中身を見ると、ワイヤボンディング等の従来技術を使って実現しているものもあれば、フリップチップ実装等の新しい技術に挑戦しているメーカーもあるのが現状であり、ミリ波に適用可能な技術は1つではない。その中でもミリ波フリップチップ技術について、今後より多くの製品への適用が広がっていくのではないかとと思われる。従来のマイクロストリップ線路を中心とした回路設計とは異なる注意点もあるが、それを克服すれば良好な特性の回路を実現できる。今後より多くの安価な製品への適用が進むことを期待したい。

(2005.10.14-受理)

文 献

- 1) H. Sakai, Y. Ota, K. Inoue, T. Yoshida, K. Takahashi, S. Fujita and M. Sagawa: "A Novel Millimeter-Wave IC on Si Substrate Using Flip-Chip Bonding Technology", IEEE MTT-S Digest, pp. 1763-1766, 1994
- 2) S. Aoki, H. Someta, S. Yokokawa, K. Ono, T. Hirose and Y. Ohashi: "A Flip Chip Bonding Technology Using Gold Pillars for Millimeter-Wave Applications", MTT-S Intl. Microwave Symp. Digest, pp. 731-734, 1997
- 3) Y. Watanabe and N. Okubo: "HEMT Millimeter-wave Monolithic IC Technology for 76-GHz Automotive Radar", FUJITSU Sci. Tech. J., 34,2, pp. 153-161, December, 1998
- 4) T. Shimura and Y. Ohashi: "A Single-chip Transceiver Module for 76-GHz Automotive Radar Sensors", Proc. 31th European Microwave Conf., London, Vol. 3, pp. 153-156, 2001
- 5) H. Kondoh, K. Sekine, S. Takatani, K. Takano, H. Kuroda and R. Dabkowski: "77 GHz Fully-MMIC Automotive Forward-Looking Radar", GaAs IC Symposium, pp. 211-214, 1999
- 6) Y. Ohashi, T. Shimura, Y. Kawasaki, S. Aoki, H. Someta, T. Shimura, T. Hirose and Y. Aoki: "76 GHz Flip-chip MMICs in Through-hole Packages", Proc. 28th European Microwave Conf., Amsterdam, Vol. 2, pp. 443-436, 1998