マイクロ波とハイブリッド技術

木村 貴則* 堀 重和**

1. まえがき

今日の装置、部品に対する要求として「軽薄短小」が叫ばれており、その実現方策として「モジュール化、ハイブリッド化」が試みられ民生機器のあらゆる分野に普及していると言っても過言ではない。この傾向は、マイクロ波帯の回路・部品に対しても例外ではなく、この実現の手法としてマイクロ波集積回路(以下 MIC と略す)が注目され、高性能、高信頼性の他に量産性に富むことから、低価格化も併せて実現すべく種々の試みがなされている。MIC では、比誘電率 (ϵ_r) の高い基板の上に回路を構成するので、軽薄短小が基板の ϵ_r の値に応じて実現できる反面、従来の導波管や立体回路に比べて伝送損失が大きく大電力が扱えないという欠点がある。また、最良の特性を引き出すためにはトリミング等の調整時間が必要となる場合があるが、この点は、CAD による回路設計の最適化と効率化で克服しつつある。

MIC 開発の当初は、従来の立体回路部品を MIC 化することに努力が払われてきたが、せっかく小型・軽量化した個々の MIC 部品を、依然としてコネクタやケーブルで接続するのでは MIC 化のメリットが半減するので、最近では構成密度を増やす方策が種々試みられており、受信機の高周波部全体を一体化した航海用レーダの「フロントエンドモジュール」や、電子的にアンテナのビーム方向を制御する電子走査アンテナを構成する「送受信モジュール」などが実用化されている。特に航空機搭載用や衛星積載用装置のように、体積、質量の制約が大きいもの、または電子走査アンテナや衛星放送 (DBS) 受

信機のように、同種のものを多数使用して多機能を持たせる装置には最適である。

現在の開発の関心は、化合物半導体の GaAs 基板の上に半導体素子や抵抗、コンデンサ、伝送線路などを一体で構成するモノリシック MIC (以下 MMIC と略す)に移りつつある。そこで本稿では、MMIC を重点にして MIC と対比しながら、マイクロ波のハイブリッド技術のいくつかの実例と用途、将来動向などについて述べてみたい。

2. MIC と MMIC の回路構成の比較

MIC が誘電体基板上に整合回路を形成し、個別半導体素子と受動部品を接続するハイブリッド構成技術であるのに対して、MMIC は、Fig.1 に示すように能動素子と整合回路、キャパシタ、抵抗等を同一の GaAs 基板上に形

Fig.1 Schematic Structure of GaAs MMICs.

*Yoshinori Kimura / 東芝

**Shigekazu Hori / 東芝

Tab.1 MIC と MMIC の回路構成の比較

	M I C	M M I C
基 板	誘電体(アルミナ, サファイア)	半絶縁性 GaAs
半 導 体 素 子	各種半導体素子 (Si, GaAs), (ダイオード, トランジスタ)	GaAs デバイス FET, ダイオード
回路パターン	分布定数線路	(半)集中定数素子
抵 抗	チップ抵抗 薄膜抵抗(NiCr, TaNx)	GaAs(FET) 薄膜抵抗
インダクタ	高インピーダンス線路 ボンディングワイヤ	スパイラルインダクタ 高インピーダンス線路
キャパシタ	チップキャパシタ	MIM キャパシタ くし形キャパシタ

成する技術であり、基本的機能は MIC と同じである。

Tab.1 に MIC と MMIC の回路構成の比較を示す。GaAs は Si に比べて比抵抗の大きな半絶縁性基板が得られるため誘電体損 ($\tan \delta$) が小さく、マイクロストリップ線路の伝搬損失は小さい。また MMIC に用いる FET (電界効果トランジスタ), ダイオード等の半導体素子は平面(プレーナ)構造で形成できるため、他の回路素子との相互接続が容易である。

MMIC の回路設計手法は、FET 等の S パラメータを測定し最適な入出力整合回路を計算する従来の MIC の設計と同様である。ただし、MIC では組み込んだ半導体素子の最適特性を得るために整合回路の調整が可能であるのに対して、MMIC ではこれらの調整作業は行えない。従って、MMIC の設計では半導体素子や構成回路のばらつきを考慮し複数個の平均的な値を用いる必要があり、特性的には MIC より少し劣ることになる。また、GaAs 基板は誘電体基板に比べて高価なので、1 枚の基板から取れる MMIC の数を多くして量産時の低価格化を図るためには、MMIC チップの寸法を小さくするための回路設計の工夫が重要である。

MIC では個別半導体を使用するため使用する素子の制約はないが、MMIC では GaAs 基板を用いるため、FET, ダイオードに限られている。

整合回路パターンとしては、MIC ではマイクロストリップ線路による分布定数回路を用いるが、MMIC では小形化を図ってチップ寸法を小さくするために、集中定数素子あるいは分布定数と集中定数を組合せた半集中定数回路を用いる。

抵抗としては、MIC ではチップ抵抗や TaNx, NiCr 等の薄膜抵抗を用いている。MMIC でも薄膜抵抗を用いるが、主として GaAs の動作層を抵抗として用いることが多い。GaAs の抵抗はゲート電極を除いた FET と考えられるが、FET の静特性から明らかのように、所定の電圧以上を印加すると電流飽和を起す。従って薄膜抵抗のように面抵抗を用いてパターンを設計することはできず、電

流飽和が起る電圧以下で使用するよう設計する必要がある。

インダクタとしては、MMIC では高インピーダンス線路やスパイラルインダクタを用いることが多い。ただしスパイラルインダクタでは、自己インダクタンスとスパイラル部の結合容量とで自己共振を起こすため、この自己共振周波数以下で使用する必要がある。

キャパシタとしては、MIC ではチップキャパシタを用いることが多いが、MMIC では、基板上に下部電極 (Metal), 誘電体 (Insulator), 対向電極 (Metal) をサンドイッチ構造に形成する MIM 構造やくし形キャパシタが用いられる。くし形キャパシタの容量は、くし形電極部の間隔と長さで決定されるため大きな容量は得られないが、平面の対向電極だけで構成されるので製造プロセスが簡単である。また GaAs 基板の面積度は誘電体基板に比べて優れており、電極形成では FET 等の電極形成と同様に寸法精度の高いプロセスを用いるため、MIC の場合に比べて小形で容量ばらつきを小さくすることができる。一方、MIM キャパシタは、くし形に比べて容量のばらつきは大きい、小面積で大容量が得られるのが特徴である。

3. MMIC の特徴

Tab.2 に、MIC と比較した MMIC の長所と短所をまとめた。長所としては、(1)各種マイクロ波回路の大幅な小形化が可能になり、これにより装置やシステムの小形・軽量化が実現できること、(2)半導体素子と受動回路をすべて GaAs 基板上に一体化するため、部品点数を大幅に削減できること、(3)MIC では個々の部品を半田付けやボンディングワイヤ等で接続するのに対して、MMIC ではこれらの接続が不要で単に入出力端子、接地端子、電源供給端子のみを接続すればよいこと、(4)従って相互接合部での断線による故障発生が減少するため高信頼性が実現できること、(5)組立、接続などの加工時間が少なく、同

Tab. 2 MMIC の長所, 短所

長 所	短 所
① 小形, 軽量化が可能	① 開発に時間がかかる
② 部品数が少ない	② 開発コストが高い
③ 相互接続部が少ない	③ 特性は MIC に比べて劣る。(調整不可のため)
④ 低価格化が可能	
⑤ 信頼性に優れている	
⑥ 多機能化が可能	

一回路を量産した場合は低価格化が可能で、(6)小形・軽量化と部品点数の削減および高信頼化が図れることから、同一チップ上に単機能回路をいくつか組合せて集積度を増し多機能化が実現しやすいことなどがあげられる。

一方、短所としては、回路設計手法でも述べたように、(1)FET 等の使用する半導体素子のばらつき、回路設計時での誤差等を考慮すると、MMIC のパターン最適化に至るまでには、設計—試作—評価のサイクルを何度か繰り返すことがあり、またこの 1 サイクルの期間は MIC に比べて長いため全開発期間は大幅に長くなること、(2)従って開発コストも相対的に高くなること、また(3)MMIC では回路ができあがってから、半導体素子の最適性能が得られるように回路を調整することが不可能なので、性能は MIC に比べて少し劣ることなどがあげられる。ただし今後の製造プロセス改善により FET 等の均一性は向上するため、性能のギャップは縮まるとともに、短所とされた他の項目も改善されると期待される。

4. MMIC の実例

MMIC に関して学会等で報告されている回路としては、低雑音増幅器や高出力増幅器の例が多いが、その他ミキサ回路、発振器、スイッチ、移相器など多岐にわたっている。周波数範囲は UHF 帯から 30GHz 程度までをカバーしているが、これは FET の性能に依存しているので、最近の FET の高性能化の開発ペースからすると、まもなく 60GHz 程度までの低雑音増幅器が出現するものと期待される。

Fig. 2 と Fig. 3 に、3 段構成の 12GHz 帯 MMIC 低雑音増幅器のチップの写真と等価回路を示した¹⁾。チップの寸法は 1.5×3.0mm で、MIC で構成した増幅器と比べると面積比で 1/10 以下に小形化されている。基板の厚さは 0.15mm で、MIC が通常 0.635mm 厚のアルミナ基板を用いるのに比べ薄くなっており、このため同じ特性インピーダンスを得るための線路幅を細くできるので回路を小形化できる。この増幅器では、FET のソースと接地面にキャパ

Fig. 2 12 GHz-band 3 stage MMIC Amplifier Chip.

$$R_s: 100\Omega, C_s: 15\text{pF}, C_b: 8\text{pF}, C_c: 4\text{pF}$$

Fig. 3 Equivalent Circuit of 3 stage MMIC Amplifier.

Fig. 4 Noise Figure and Gain Performance for MMIC Amplifier.

シタ (C_s) と抵抗 (R_s) を接続することで一電源動作を可能とした。キャパシタは比較的大きな容量を必要とするが、容量の精度は必要ないため SiN_x による MIM 構造を採用した。抵抗はすべて GaAs の動作層を用いている。Fig. 4 に、この増幅器の雑音指数 (NF) と利得 (GAIN) の周波数特性を示した。12GHz で $\text{NF}=2.8\text{dB}$, $G=25\text{dB}$ の性能が得られている。

Fig. 5 と Fig. 6 に、1 GHz 帯で広帯域特性を得るよう設計した MMIC 増幅器のチップ写真と等価回路を示した²⁾。チップ寸法は 1.5×1.5mm で、GaAs 基板の厚さは 0.3mm である。増幅器は 3 段構成で、利得の平坦性を得るために抵抗負帰還 (R_F) 方式を採用している。回路にはすべて集中定数素子を用い、キャパシタは MIM 構造、抵

抗は GaAs の動作層を採用している。Fig. 7 にこの MMIC の NF と GAIN の周波数特性を示した。0.3～2.0GHz の帯域で、 $NF \leq 4.0\text{dB}$ 、 $G \geq 20\text{dB}$ であり非常に平坦な周波数特性が得られている。

Fig. 8 と Fig. 9 に、2 段構成の 1～11GHz 帯広帯域 MMIC 増幅器のチップ写真と等価回路を示した³⁾。チップ寸法は1.8×1.8mm で基板の厚さは0.15mm である。回路は抵抗整合形の 2 段構成で、少ない回路要素によりチップの小形化を図っている。キャパシタは MIM 構造、抵抗は選択イオン注入法により形成した GaAs の動作層を採用している。Fig.10 に、この MMIC の NF と GAIN の周波数特性を示した。1～11.5GHz の広帯域において $GAIN = 7.7 \pm 1.0\text{dB}$ 、 $NF \leq 7\text{dB}$ の特性が得られている。

この他にミキサ回路、発振器、スイッチ等の実例があるが、これらは回路構成としては増幅器より単純であることと紙数の都合上割愛する。

Fig. 5 1 GHz MMIC Amplifier Chip.

Fig. 6 Equivalent Circuit of 1 GHz MMIC Amplifier.

5 . MMIC の用途

MMIC の用途としては、前述の MMIC の特徴を踏まえた用途が望ましいわけで、大きく分けて、低価格化の要求にもとづくものと、高信頼化、多機能化の要求にもとづくものであり、小形・軽量化は前提とされている。

量産により低価格化が期待できる用途例として、衛星放送(DBS)用地上受信機がある⁴⁾。Fig.11 に、DBS 受信器の BS コンバータの構成を示す。このコンバータは、各家庭のアンテナで放送衛星から受信した12GHzの信号を1 GHz帯に変換する装置で、低雑音増幅器、バンドパスフィルタ、ミキサ回路、局部発振器、中間周波増幅器から構成されている。衛星放送は、日本以外にも米国、欧州で実用化が計画されており、大きなマーケットが期待できる。その他、CATV、移動無線、光通信等の分野

Fig. 7 Noise Figure and Gain Performance of 1 GHz MMIC Amplifier.

Fig. 8 1～11 GHz band MMIC Amplifier Chip.

Fig. 9 Equivalent Circuit of 1~11 GHz band MMIC Amplifier.

Fig. 10 Noise Figure and Gain Performance of 1~11 GHz band MMIC Amplifier.

でも MHz~数GHz帯の広帯域増幅器等が必要となり、MMICの需要が増えるものと期待される。

Fig.12に、能動電子走査アンテナを構成する送受信モジュールの例を示す。このアンテナでは、一つの装置で数百~数千個のモジュールを使用するので、各モジュールを構成する移相器、スイッチ、送信信号増幅器(HPA)受信信号増幅器(LNA)の特性のばらつきが少ないことと低価格化、小型・軽量化が要求されるので、MMICの研究開発が国内外で精力的に進められている。

一方、一度に使われる数は少ないが、高度の信頼性と小形・軽量化、多機能化が要求される用途として、衛星搭載用の増幅器、コンバータ、スイッチモジュール等がある。この場合、価格は高くなるがMMIC化によるメリットを生かした使い方と言える。

その他、高周波回路で特性劣化をもたらす浮遊キャパシタやインダクタンスの影響を少なくできることや、回路の寸法精度がよいことのMMICのメリットを生かして、準ミリ波やミリ波帯での応用が、半導体素子の特性向上を待って普及するものと思われる。

Fig. 11 Block Diagram of an Outdoor Unit for DBS Receiver.

Fig.12 Block Diagram of Active Phased Array Radar Modules.

6. まとめ

将来、マイクロ波回路がすべてMMIC化されるかと言えば、そうはならないだろう。それは、MMICでは要求される特性や回路を実現するに要する費用や開発期間がMICに比べて非常に大きく、またできあがったMMICは、後から調整して特性を最適化するということができないからである。逆にMICは、少量多品種の生産規模で

半導体素子のぎりぎりの性能を引き出すのに適している。したがって、今後とも MIC と MMIC とは、それぞれの特長を活かした使い方で共存していくであろう。ハイブリッド技術については、同じ GaAs 基板の上にデジタルや光 IC と MMIC との一体化を図るなどの試みや、MMIC と MIC、デジタル IC などとの混載による回路の高集積度化がますます進展すると思われるので、解決すべき課題は種々発生すると予想され、今後とも注目を続けていく必要のある分野である。

参 考 文 献

- 1) 柴田, 他: イオン注入12GHz帯 GaAs MMIC低雑音増幅器, 信学全大, No.911, (1984)
- 2) 柴田, 他: 1 GHz帯モノリシックIC増幅器, 信学全大, No.857, (1983)
- 3) 渡辺, 他: 1-11GHz帯広帯域 GaAs MMIC増幅器, 信学全大, No.805, (1986)
- 4) S. Hori, et al: GaAs Monolithic MICs for Direct Broadcast Satellite Receiver, IEEE MTT-S, pp. 90-95, (1983)