

外 3 ~ 16

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

基本回路機能の能動化による
マイクロ波回路小型化の研究

申 請 者

原 信 二

Shinji HARA

平成 3 年 7 月

理 1517 (1779)

MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) は、分布定数線路等の受動素子と電界効果トランジスタ (FET) 等の能動素子を半導体基板上に一体的に構成するマイクロ波集積回路 (IC) であり、従来のハイブリッドマイクロ波 IC (MIC) と比較して、①小型・軽量化、②調整・組み立て・実装の簡単化による信頼性の向上、③大量生産による価格の低減、等の特徴を有し、内外の研究機関で研究開発が盛んに行われている。1960年代に開始されたMMICの研究は、当初は高周波デバイスとそのMMIC化のプロセスの研究が主であり、回路技術的にはMICとまったく同一であった。1980年代に入り、FETの性能向上やマイクロ波帯での各種モデリング技術の進歩等、MMIC全般の技術の向上によって、分布型増幅器等のMMICに適した回路構成や、スパイラルインダクタを多用する集中定数化設計による回路構成等、MMICの小型化・高機能化の動きが急速に進んできた。

しかしながら、現在のMMIC設計法は、FET等の能動素子は各種回路機能のうち、主として能動素子を用いなければ実現できなかった増幅・混合等の機能実現のみを受け持ち、他の大部分の回路機能は、金属と誘電体からなる受動回路素子によって実現し、それらを半導体基板上で接続するという、従来のMICと同様の回路設計法から基本的には抜け出していない。そのような設計法においては、受動回路素子、特に寸法が波長に依存する伝送線路やインダクタンス値が巻き数に比例するスパイラルインダクタはチップ上で占める面積が非常に大きく、MMICのチップ面積は波長の制約を受けて小型化が困難であった。また、サーキュレータや高Qのフィルタ等はMMIC化が非常に困難であり、マイクロ波回路全体の小型化を妨げていた。

本研究の目的は、従来分布定数線路を中心とする受動素子で構成されていた基本的な回路機能を、能動素子を用いて実現することであり、回路の小型化・高機能化を可能とした。すなわち、従来分布定数線路で実現していたインダクタを初めとして、信号の合成、分配、分離等の基本的な回路機能をFETを用いて実現することにより、回路の小型化とともに可変特性等の高機能化を可能とした。さらに、能動素子を用いることにより、従来実現が困難であったサーキュレータのMMIC化を可能とした。

本論文は、第1章から第5章で構成されており、以下各章の概要を述べる。

第1章は序論であり、本研究に関連する分野におけるこれまでの研究の歴史的背景と現状を概説し、本研究を行うに至った動機、目的を明らかにし、最後に本論文の構成と概要を示した。

第2章「アクティブインダクタ」では、現在MMICの小型化に用いられているスパイラルインダクタと比較して、小型・広帯域性を有するアクティブインダクタを提案・実現し、その広帯域増幅器への応用を示す。提案するアクティブインダクタの高周波化の基本原理は共同研究者である徳満によって示されたもので、筆者は

その詳細な特性検討および可変インダクタへの応用等を行うとともに、高Q化を可能とするマイクロ波アクティブインダクタの構成を新たに提案した。

従来、マイクロ波回路においては、インダクタは伝送線路を用いて実現されており、MMICにおいては小型化が重要であるため、スパイラルインダクタを形成し小型化をはかっていた。しかしながら、スパイラルインダクタにおいても、抵抗や容量等の他の回路素子と比較すると占有面積は依然として大きく、特に大きなインダクタンス値が必要となる比較的低い周波数においては、その占有面積が問題となっていた。一方、能動素子を用いて実現されるアクティブインダクタはモノリシック化に適し、インダクタの超小型化を可能とするものであるが、マイクロ波帯で動作するアクティブインダクタは実現されていなかった。筆者らは、カスコードFETを用いて浮遊容量を抑圧することにより、マイクロ波帯で動作するアクティブインダクタを初めて実現した。

提案したアクティブインダクタはその帰還素子によって、抵抗帰還型、FET帰還型、カスコードFET帰還型、の3種類に分類される。まず最初にアクティブインダクタの高周波動作を可能とした浮遊容量抑圧の原理を示し、最大動作周波数がFETの遮断周波数の約 $1/2$ であることを示した。また、これらのアクティブインダクタの等価回路が近似的に以下のように記述できることを示した。抵抗帰還型は相互コンダクタンスの逆数で表される抵抗とインダクタの直列回路、FET帰還型は純インダクタ、カスコードFET帰還型はインダクタと負性抵抗の並列回路である。次に、スパイラルインダクタとの特性比較、用いる帰還素子やゲート幅の違いによる特性の比較を、Q値、チップ面積、消費電力等の観点から行った。回路への適用の際にはそれらのトレードオフが必要である。試作の結果、シミュレーションとよく一致する特性が得られ、その広帯域、小型特性を実証した。抵抗帰還型アクティブインダクタは、スパイラルインダクタの $1/5$ 以下の面積で2倍以上の広帯域性、FET帰還型アクティブインダクタは、小型・広帯域性ととともに、スパイラルインダクタと同程度のQ値、カスコードFET帰還型アクティブインダクタは、消費電力は増大するが、原理的に無限大のQ値を有することができる。さらに、10倍程度のインダクタンス値の変化が可能な可変インダクタも実現した。本モジュールの応用として(可変)アクティブフィルタ、小型発振器等を提案するとともに、提案したアクティブインダクタを用いて、小型・広帯域増幅器を試作し、本能動インダクタモジュールの有効性を確認した。

第3章「アクティブサーキュレータ」では、MMICのプロセスに適した、能動素子を用いたサーキュレータの構成法とともに、その基本要素となる、準アクティブサーキュレータモジュール (Quasi-Circulator Module=QCM) を提案・実現する。

サーキュレータはマイクロ波回路において信号分離の機能を有する基本的かつ重

要な回路素子である。しかしながら、従来のサーキュレータはフェライト等の磁性体を用いているので、現在のMMICのプロセスには適さず、回路の全モノリシック化による超小型化をはかる上で障害となっていた。また、動作帯域が狭い等の問題があった。筆者は、逆相／同相の直交モードとFETの単方向性を組み合わせることによって、サーキュレータの基本機能を有し、かつ超小型・広帯域化の可能なQCMを提案・実現し、アクティブサーキュレータの試作を行った。

簡単なモデルによるQCMの設計手法を示し、QCMの試作をおこなった。試作した一つのQCMにおいては、チップサイズ $1\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 、帯域 $1\text{GHz} \sim 18\text{GHz}$ で挿入損失約 4dB 、アイソレーション 18dB 以上の特性が得られ、その超小型・広帯域性を実証した。また、QCMの特性改善手法やその実現方法の多様性も示した。さらに、上記モジュールを用いてサーキュレータと同様の動作を行う方向性回路を試作した。試作した回路においては、許容電力の観点から、アンテナ共用器等への適用は困難であるが、反射型移相器等への適用は可能である。最後にQCMを用いた3端子サーキュレータの構成法と、その特性計算値を示した。

第4章「超小型平衡変調回路」では、線路一体化FETの概念を用いて、FETと同程度の大きさで、スイッチングや位相反転等の、各種制御回路に応用できる超小型制御回路機能モジュールを提案・実現する。

線路一体化FETは、徳満によって提案されたもので、FETの電極配置内に共平面マイクロ波伝送線路を機能的に一体化することにより、FETサイズで各種の分配・合成機能が広帯域に実現できるという特徴がある。

筆者は、上記線路一体化FETの特徴に着目し、FETにスイッチング動作や双ゲートFETによる利得制御機能を付加することにより、FETサイズの各種基本回路機能モジュールを提案・実現した。スイッチングディバイダモジュールは、超広帯域な信号通路切り替え、入出力端子間アイソレーション、出力端子間アイソレーション機能を有する。位相反転回路モジュールは、逆相スイッチングディバイダモジュールの2出力を同相合成することによって実現できる。試作の結果、チップサイズ $0.6\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ で、 17GHz までの超広帯域にわたり、挿入損失 2dB 、アイソレーション 15dB 以上、出力端子での反射損失 10dB 以上の良好な特性を得た。超小型平衡変調回路は、ソース電極を共通とする2個の双ゲートFETの電極構造内に、スロット線路を用いた逆相分配とコプラナ線路による同相合成の機能を一体化し、超小型のバランス型回路を実現したものである。試作したモジュールにおいては、チップサイズ $0.6\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ で、 18GHz までの超広帯域にわたり、 0.7 から -0.7 までの連続的かつ直線的かつ周波数特性が平坦な利得制御が実現できた。しかも、制御電圧による入出力インピーダンスの変化はなく、入出力アイソレーションは制御電圧、周波数によらず 35dB 以上と極めて良好な特性が得られた。

第5章は結論であり、本研究の内容をまとめた。