

学 位 論 文 題 名

モノリシックマイクロ波集積回路の回路設計に関する研究

学位論文内容の要旨

今日、通信機器は我々の生活あるいは世界の経済活動に深くかかわり、その基盤を支えている。あらゆる通信機器は信頼性の向上、小型化等の要求があり、マイクロ波回路もこれらの要求を満たすべく多くの試みがなされてきた。

GaAs FET の出現により、それまで立体回路で構成されていたマイクロ波帯の回路を平面へ集積化し、マイクロ波集積回路 (MIC) として構成することにより、小型化、高信頼化が実現された。さらにモノリシック MIC (MMIC) によって、従来考えられなかった新しい通信システムが実現する可能性があった。しかし、MMIC の実現には多くの技術的問題を解決していかなければならない。すなわち、GaAs FET を均一に大量に作製する技術の開発、また MMIC に適した新しい回路形式と設計手法が必要であった。

本研究はこのような MMIC の回路設計手法の確立、特に非線形な GaAs FET 素子を含む回路の設計方法、および MMIC 化に適した回路形式の提案と、これらの回路の解析手法の確立を行ったものである。これらを達成するため、汎用的な回路が適する部分と、専用の回路が必要な部分に分けて論じる。

汎用的な使用が適する回路は、従来のマイクロ波で行われていた分布定数を使用した回路形式では実用化に不十分である。このため、デジタル型の回路を使用し、チップ面積の有効利用と広帯域化を実現する方法を提案した。新たに提案し、実験した回路は直結型帰還増幅器、非安定マルチバイブレータ型発振器、分周器、さらにこれらを組み合わせた回路等である。さらにデジタル型回路と分布定数回路との融合も検討した。また、これらの回路設計に必要な FET の非線形等価回路モデルを提案した。このモデルはキャリア濃度がガウス分布していると仮定したモデルとスパイスシミュレーション用に $-1/2$ 乗と直線近似を取り入れたモデルである。

直結型増幅器の回路構成モデルについてはデジタル IC の回路で使用されるバッファド FET ロジック回路を基本にアナログ増幅器として改良した。さらに、より広帯域化するため、マイクロ波回路の整合を高周波側で行い、低周波側ではデジタル回路を応用した回路として広

帯域化を図る方法を提案し、DC~6.4GHzの可変利得増幅器を実現した。

より小型化を目指し、MMICに適した発振器として非安定マルチバイブレータ型発振器に関する検討を行い、現在でも最も高い17GHzの発振を実現した。また、素子性能が同じ場合、スタティック型より高速化できる回路としてダイナミック分周器の検討を行い、差動増幅器を使用したダブルループ型ダイナミック分周器を提案した。これにより安定に、従来形式に比べて50%の高速化が図れるようになった。さらに、この分周器を利用し、初めて位相雑音をSi分周器とGaAs分周器を同一条件で比較し、GaAs分周器は無線システムに使用可能な位相雑音をもっていることを明らかにした。また、アナログ分周器を用いた新しい概念による可変分周器を提案し、基本的動作を確認するため、 $1/3$ 、 $1/4$ 分周器を試作した。この結果、奇数分周できる可変分周器として最高の6GHzの動作を確認した。これらのMMICを使用して、ループ帯域を1MHzと、従来にない広い帯域とした位相同期発振器を構成し、低いQしかもたないMMIC発振器でも実用に耐えうる回路が構成できることを示した。複合機能をもったMMICにも取り組み、チップサイズ1mm角に4GHzまで動作する直結型のコンバータをわが国で初めて実現した。

論文の後半部分は汎用化できない部分の回路について論述している。まず、少量多品種のマイクロ波回路のMMIC化に適した回路として、マスタースライス型MMICの提案を行い、Ku帯増幅器の試作により実用性を確認した。さらに、ミリ波帯のMMICにも取り組み、技術試験衛星VI型に搭載する目的で回路開発を行った。これは衛星搭載用として世界初のミリ波帯MMIC増幅器である。ミリ波という高い周波数におけるパラメータの測定方法とそれを利用した設計手法の研究を行った。ミリ波帯では測定困難な大信号インピーダンスをMMICインピーダンス変換器を用いて測定する方法を提案し、実験により正確に測定できることを実証した。搭載用として信頼度管理を確実なものとするため、ミリ波帯のパッケージを開発した。また、衛星搭載用のスクリーニングにおいて38GHz帯で全数チップのRF検査を行うという手法を使った。

以上のように、本研究では、MMICにどのような回路を用い、どのような手法によって設計を行えばよいかを提案し、実際に試作することにより検証した。この結果、多くの新しい回路構成、測定方法、MMIC回路の設計概念を明確にした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 柴 正 則
副 査 教 授 伊 藤 精 彦
副 査 教 授 小 川 吉 彦
副 査 教 授 長谷川 英 機

半導体の進歩により、従来立体回路で作られていたマイクロ波回路は半導体素子を使用した平面回路（MIC）によって構成されるようになり、さらに、モノリシック化（MMIC）するため研究が開始された。MMIC 化には従来の MIC にはない新しい回路形式、設計精度が要求されていた。

本論文はこのような状況の中で、MMIC の回路設計手法の確立、特に非線形な GaAs FET 素子を含む回路の設計方法、および MMIC 化に適した回路形式の提案と、これらの回路の解析手法の確立を行ったものである。

まず、設計に必要な FET の非線形等価回路モデルを提案しているが、これは FET の能動層のキャリア濃度がガウス分布していると仮定したモデルである。また、従来のマイクロ波回路で用いられていたアナログ回路方式ではなく、デジタル回路で使用されていた回路形式をマイクロ波帯で用い、より小型で、汎用性の高い MMIC の実現を目指している。新たに提案し、実験している回路は直結型帰還増幅器、非安定マルチバイブレータ型発振器、分周器、これらを組み合わせた回路等である。さらに、デジタル型回路と分布定数回路との融合を検討するとともに、直結型増幅器の回路構成はデジタル IC の回路で使用されるバッファド FET ロジック回路を基本にアナログ増幅器として改良している。分布定数回路による整合を高周波側で行い、低周波側ではデジタル回路を応用した回路とすることにより広帯域化を図る方法を提案し、DC～6.4 GHz の可変利得増幅器を実現している。

より小型化を目指し、MMIC に適した発振器として非安定マルチバイブレータ型発振器の研究を行い、現在でも最も高い17GHzの発振を実現している。また、素子性能が同じ場合、スタティック型より高速化ができる回路としてダイナミック分周器の研究を行い、差動増幅器を使用したダブルループ型ダイナミック分周器を提案している。これにより従来形式に比べ50%の高速化が図れるようになっている。さらに、この分周器を利用して、初めて Si 分周器と GaAs 分周器の位相雑音を同一条件で比較し、GaAs 分周器は無線システムに使用可能な位相雑音を持つ

ていることを明らかにしている。また、アナログ分周器を用いたまったく新しい概念による可変分周器を提案している。この基本的動作を確認するため、 $1/3$ 、 $1/4$ 分周器を試作している。この結果、奇数分周できる可変分周器としては最高の6 GHzの動作を確認している。これらのMMICを組み合わせることにより、ループ帯域を1 MHzと従来にない広い帯域とした位相同期発振器を構成し、低いQしか持たないMMIC発振器でも実用に耐えうる回路が構成できることを示している。複合機能を持ったMMICにも取り組み、チップサイズ1 mm角に4 GHzの直結型のコンバータをわが国で初めて実現している。少量多品種のマイクロ波回路のMMIC化に適した回路として、マスタースライス型MMICの提案を行い、Ku帯増幅器の試作により、その実現性を確認している。

ミリ波帯のMMICにも取り組み、技術試験衛星VI号に搭載する目的で回路開発を行っている。これは衛星搭載用として世界初のミリ波帯MMIC増幅器である。この開発の中でミリ波という高い周波数におけるパラメータの測定方法と、それを利用した設計手法の研究を行っている。すなわち、ミリ波帯では測定困難な大信号インピーダンスをMMICインピーダンス変換器を用いて測定する方法を提案し、実験により正確に測定できることを実証している。

以上のように本論文は、MMIC回路設計法に関して、デジタル回路を融合した回路形式、およびマスタースライス型の回路を使用した方法を提案するとともに、各種のモノリシックマイクロ波回路を開発し、新しい回路構成法と設計法を確立したもので、マイクロ波回路工学の進歩に寄与するところが大きい。

よって、著者は博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。