

氏名	いとう じゅんじ 伊藤 順治
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成14年10月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成2年3月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程前期課程修了
学位論文題目	A study on improvement of RFIC for mobile communication equipment. (移動体通信機器における RFIC の性能向上に関する研究)
論文審査委員	主査 東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 室田 淳一 東北大学教授 坪内 和夫

論文内容要旨

第1章 緒論

携帯電話に代表される移動体通信機器の発展は 1990 年のマイクロタック (マイクロタック) の発売、それに対抗した NTT のムーバの開発によって大きく進展した。それまで一部のマニア、特定用途向けとして少量生産されていた無線機が一挙に一般的な家電製品と同じように月産数百万台という大量生産されるようになったのである。これらの発展に伴い RF 部分に求められる技術も、高価格・高性能から高性能を維持したまま小型、低消費電力・低電圧・低価格化が求められるようになった。これらの技術は一見すると高性能を追い求めることから後退するようと思われるが実は技術的に非常に高い総合力が要求されるのである。無調整で月百万個を生産できる技術、IC による集積化技術、半導体デバイスのモデリング技術、回路シミュレーション技術、無線システムのシミュレーション技術、また大量に生産するための計測、検査技術などである。本研究の第1の目的は、受信用 LNA とミキサの高性能化によって移動体通信機器の小型化を実現することである。移動体通信機器の性能を決める大きな要因は感度である。これは受信アンテナの性能と LNA の性能に大きく依存する。そこで高性能 GaAsMESFET デバイスを LNA とミキサに使用するとともに、これらを集積化することにより携帯機器の高性能化・小型化を実現する。また IC の低電圧化を行い低消費電力化も実現する。第2の目的は、IC をモジュール化することによって小型化することであり、具体的にはセラミック基板を使ったハイブリット化技術を適用する。第3の目的は GaAs デバイスを使い今まで実現できなかった低歪な直交変調器 IC を実現することである。これは 2001 年から日本でサービスが開始されている W-CDMA 方式に対応した変調器 IC であり、実際の基地局用として使用することによってこのデバイス、ならびに IC の有効性を実証する。第4の目的は更なる集積化を実現するため SiGe パイポーラトランジスタを使った高集積 RFIC を開発し、前述の GaAs デバイスを用いた IC よりもさらに集積化が可能となることを実証することである。

第2章 GaAs デバイスによる受信フロントエンド IC の研究

携帯電話などの移動体通信機器ハンドセットに必要な小型低消費電力 RF 受信フロントエンド IC の研究；著者らは LNA とダウンミキサの構成に着目し、これを 1チップ化した IC を実現した。GaAsMESFET を使用して、Dual Gate 型 LNA と MIXER を使用してローノイズ、低消費電流を実現した。さらに、FET の入出力インピーダンスが非常に高いことから、LNA とミキサの段間整合についてタンク回路を用いた急峻な整合をとることと入力整合の周波数特性によって、希望波とイメージ周波数とのゲイン差を 20 dB 以上取ることに成功し、結果的に、従来用いられて

いた LNA とミキサの間に挿入されているイメージフィルタを無くすことを可能にした。この技術は現在、アナログ方式の携帯電話に採用され、その後 PHS 用フロントエンド IC として採用され、現在も使われている。また、GaAsMESFET の場合、ショットキーゲートを使用していることからゲートバイアスに負電圧が必要であった。従来はソース抵抗とバイパスコンデンサを使用するソースバイアス方法が用いられていたが、この方法ではバイパスコンデンサとして外付けチップが必要であった。そこで著者らは高誘電率材料 (BST・STO) を IC に集積化する技術の研究開発を行い、化合物半導体 IC 上に世界で初めて高誘電体材料を使った MIM キャパシタンスを集積化するプロセスを開発し、バイパスコンデンサを内蔵した小型フロントエンド IC の研究開発をおこなった。この結果、従来の IC よりも半分以下の小型化を実現することができた。

従来携帯電話に用いる IC の電源電圧は年と共に低下してきている。おおよそ 10 年前には 5V であったものが現在では 2.8~3.3V になっている。今後も IC の低電圧化は進むと考えられ、最終的には 1.0V が予想される。そこで著者はこの最終ターゲットである 1.0V でも駆動できる低消費電力フロントエンド IC の研究開発を行った。GaAsMESFET を使った回路の場合、単体デバイスでは十分に電源電圧が 1V においても動作可能であるが、本研究において用いている DualGate FET の場合、縦積み構造を採っているために単純には 1V 駆動はできない。そこで新たにエンハンスメント型 GaAsMESFE の開発を行い、これと従来のデプレッション型 FET を組み合わせてほぼ同じ回路トポロジー、ほぼ同じ高周波特性を維持したまま 1.0V 駆動の LNA とミキサを実現することができた。

第3章 薄膜セラミック基板を用いた受信フロントエンド IC の小型化研究

移動体通信機器の小型化を行うためには外付け部品の削減も IC の小型化と共に重要な課題である。著者らは高誘電体材料を使ったキャパシタを使用することにより IC の小型化を実現した。しかしそれ以上の集積化には限界があった。特に RF フロントエンドの場合、外付けインダクタを無くすことが最も効果的であるが L 帯で用いる L の値が数 nH と比較的大きくこれを IC に内蔵することは IC のチップ面積を増大させるだけでなく内蔵インダクタのロスにより高周波性能を劣化させてしまう。そこで著者は性能劣化なしに小型化する方法としてスパイラルインダクタを形成したセラミック基板上に IC を実装することによりモジュールとして小型化する研究を行った。具体的には IC の実装方法、セラミック基板の検討、通常多層基板による小型化の研究を行った。まず、薄膜セラミック基板上にチップ部品、IC をスタッドバンプ方式のフリップチップ実装方式を用いて一体化したフロントエンドハイブリット IC (HIC) の検討を行った。ハーモニックバランスシミュレーションと薄膜基板のマイクロストリップ線路の線路シミュレーションを使用し、実験結果と良好な一致をみた。また電磁界シミュレータによりバンプ部分の寄生成分を見積もり、十分問題ないレベルであることも確認した。さらに MBB と呼ばれるフリップチップ実装方式を取り入れ、半田レス化した超小型フロントエンド HIC を実現した。

第4章 移動体通信機器における超低歪み直交変調器 IC に関する研究

前章までで述べた小型化技術をさらに発展させるためには回路方式においても更なる研究が必要である。そこで本研究では現在試験運用が開始されている第3世代移動体通信技術である W-CDMA 方式に着目し、基地局用の GaAs 低歪み直交変調器 IC について研究開発を行った。W-CDMA 用基地局の送信直交変調器には今までにない超低歪みが必要とされる。具体的には隣接チャンネル漏洩電力として 60dBc 以上の特性が必要とされる。この値は最も高性能な計測器でも実現することがやっとというレベルである。この歪を実現するために従来の技術の延長線上で考えるのであれば、ダイオードを使ったパッシブミキサが妥当な選択肢と考えられる。しかしながらダイオードミキサの場合、ローカル入力レベルが 10 dBm ぐらいの非常に高いレベルが必要であり、ダブルバランス構成で回路上 LO リークが発生しないようにしても実際の LO の出力レベルが高いことから、LO 信号発生ブロック等をシールドしなければ RF 側に漏れる LO 信号を抑えられないという問題があった。さらにノイズフロアがアクティブミキサに比べて高いことも問題であった。そこで本研究では世界で初め GaAsMESFET を使用して、低 LO 入力レベル、低歪み、低ノイズフロアの基地局用直交変調器 IC を開発した。研究のコンセプトは直交変調に必要な 90 度位相差を持った

4つの LO 信号を発生させるために SCFL 回路を使ったフリップフロップ型 1/2 分周回路を使用すること。さらにこのことによって LO 入力から RF のリークを根本的に無くするである。また通常変調器回路では変調器+RF バッファアンプの構成をとることが多いが、低歪みを実現するために大きなサイズの FET を用いてギルバートセル型 DBM を構成し、その出力を IC の出力とすることである。実際の研究では、このようなコンセプトに基づき、超低歪みな 500MHz 帯の IC とダイレクト変調を実現する 2.1GHz の IC の研究開発を行った。500MHz 帯直交変調器 IC は現在 W-CDMA 基地局用として実際に使われている。

第5章 SiGe デバイスによる受信フロントエンド IC の研究

前章までは GaAs デバイスを用いた IC の研究であったが、この第5章では近年盛んに研究がされている SiGe BiCMOS プロセスを用いた移動体通信用 MMIC の研究について述べる。SiGeHBT は微細化 Si プロセス技術においてトランジスタのベース層を SiGe 化することによって GaAs などの化合物半導体でしか実現できなかった低 NF、高周波特性を実現している。本研究では同プロセスを使い携帯電話用受信フロントエンド IC の研究開発を行った。具体的な研究内容は MOS をスルースイッチとして使用したハイダイナミックレンジ LNA の研究であり、携帯機の受信状態によって、LNA のゲインを切り替えることによってより効率的な動作を行うことを検討した。LNA 電流を必要に応じて増減させることによって IC の消費電流を削減した。本研究では LNA の動作を 3 モードとし CMOS ロジックを使いコントロールすることを試み、さらに最も電流が少なく済むバイパスモードでは使用するスルースイッチに独自のバイアスを施したトリプルウェル構造の低ロス MOS を使用することによって低ロスでおかつ消費電流ゼロを実現出来ることを示した。

第6章 総括

本論文では 1990 年代における GaAs デバイスを中心とした研究内容について述べた。この時期は携帯電話の普及発展時期であり、これによって GaAsIC の進歩が加速されたといつて過言ではない。世界市場を考えると今後も携帯電話の普及は進むと考えられるが、一方で、日本市場ではすでに成長期から買い替えを中心とした成熟期に移行しており加速度的な発展は起こらないと言える。しかしながら技術的にみると 2003 年から W-CDMA の普及が本格化することから、RF 技術開発は依然として必要であり、本研究で提示した低消費電力化、小型化が進むものと考えられる。特に第3章で述べたハイブリット IC 化は無線部の SAW フィルタや LC フィルタと IC を組み合わせたモジュールがいくつか商品化されており、今後も RF 設計能力のないセットメーカー向けに開発が進むだろう。また第4章で示した直接直交変調器のような RF とベースバンド信号を直接変換するデバイスの開発も進み、RF の 1 チップ化が進むものと思われる。

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	伊藤順治
論文題目	移動体通信機器における RFIC の性能向上に関する研究
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 水野皓司 教授 教授 室田淳一 教授 坪内和夫

論文審査結果の要旨

携帯電話に代表される移動体通信機器の発展に伴い、その高周波 (RF) 部分には高性能で小型、低消費電力、低電圧化が求められるようになった。本論文は、その要求を満たすべく行った RFIC の研究、また W-CDMA 方式に対応した低歪み変調器 IC に関する研究などの成果を纏めたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は、緒論である。

第 2 章では、GaAs MESFET デバイスを用いた RF 受信フロントエンド IC の研究成果について述べている。著者は、デュアルゲート型 MESFET を使用して低雑音増幅器 (LNA) とミキサを開発し、小型・低消費電力の 1 チップ IC を実現した。さらに、周波数特性の急峻な整合回路を用いることにより、従来用いられていたイメージフィルタを無くすことを可能にした。これらの技術は現在、アナログ方式の携帯電話に採用され、PHS 用フロントエンド IC として使用されている。

第 3 章では、移動体通信機器の小型化を行うために必須な、外付け部品の削減に関する研究について述べている。著者はスパイラルインダクタを形成したセラミック基板上に RFIC を実装するモジュールを提案し、詳細な電磁界解析とフリップチップ実装方式を取り入れることにより、超小型フロントエンド HIC を実現した。これは、移動体通信機器の実用上重要な貢献である。

第 4 章では、第 3 世代移動体通信技術である W-CDMA 方式に着目し、基地局用の低歪み直交変調器用 IC を開発した経緯について述べている。W-CDMA 用送信直交変調器には隣接チャンネル漏洩電力として 60 dBc 以上の超低歪み特性が必要とされる。そこで本研究では GaAs MESFET を使用し、直交変調に必要な 90 度位相差を持った 4 つの局部発振器 (LO) 信号を発生させるためにフリップフロップ型 1/2 分周回路を使用し、さらに低歪みを実現するためにギルバートセル型 DBM (Double Balanced Mixer) を構成するなどにより 500 MHz 帯直交変調器 IC を開発した。この変調器は W-CDMA 基地局用として実用に供されている。

第 5 章では、SiGe Bi CMOS プロセスを用いた移動体通信用 MMIC の研究について述べている。MOSFET をスルースイッチとして使い、HBT LNA と組み合わせて、900 MHz 帯において 13 dB 以上の利得、1.6 dB 以下の雑音指数 (NF) を得、SiGe Bi CMOS プロセスが高周波 MMIC 開発に対して有効な解であることを示している。

第 6 章は結論であり、全体を総括している。

以上要するに本論文は、移動体通信機器用 RFIC の開発を目指し、受信フロントエンド、基地局用変調器などを実用に供するまで行った研究をまとめたもので、通信工学および電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。

学力確認結果の要旨

平成 14 年 7 月 17 日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は電子工学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力からみて、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

審査結果の要旨

携帯電話に代表される移動体通信機器の発展に伴い、その高周波 (RF) 部分には高性能で小型、低消費電力、低電圧化が求められるようになった。本論文は、その要求を満たすべく行った RFIC の研究、また W-CDMA 方式に対応した低歪み変調器 IC に関する研究などの成果を纏めたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は、緒論である。

第 2 章では、GaAs MESFET デバイスを用いた RF 受信フロントエンド IC の研究成果について述べている。著者は、デュアルゲート型 MESFET を使用して低雑音増幅器 (LNA) とミキサを開発し、小型・低消費電力の 1 チップ IC を実現した。さらに、周波数特性の急峻な整合回路を用いることにより、従来用いられていたイメージフィルタを無くすことを可能にした。これらの技術は現在、アナログ方式の携帯電話に採用され、PHS 用フロントエンド IC として使用されている。

第 3 章では、移動体通信機器の小型化を行うために必須な、外付け部品の削減に関する研究について述べている。著者はスパイラルインダクタを形成したセラミック基板上に RFIC を実装するモジュールを提案し、詳細な電磁界解析とフリップチップ実装方式を取り入れることにより、超小型フロントエンド HIC を実現した。これは、移動体通信機器の実用上重要な貢献である。

第 4 章では、第 3 世代移動体通信技術である W-CDMA 方式に着目し、基地局用の低歪み直交変調器用 IC を開発した経緯について述べている。W-CDMA 用送信直交変調器には隣接チャンネル漏洩電力として 60 dBc 以上の超低歪み特性が必要とされる。そこで本研究では GaAs MESFET を使用し、直交変調に必要な 90 度位相差を持った 4 つの局部発振器 (LO) 信号を発生させるためにフリップフロップ型 1/2 分周回路を使用し、さらに低歪みを実現するためにギルバートセル型 DBM (Double Balanced Mixer) を構成するなどにより 500 MHz 帯直交変調器 IC を開発した。この変調器は W-CDMA 基地局用として実用に供されている。

第 5 章では、SiGe Bi CMOS プロセスを用いた移動体通信用 MMIC の研究について述べている。MOSFET をスルースイッチとして使い、HBT LNA と組み合わせて、900 MHz 帯において 13 dB 以上の利得、1.6 dB 以下の雑音指数 (NF) を得、SiGe Bi CMOS プロセスが高周波 MMIC 開発に対して有効な解であることを示している。

第 6 章は結論であり、全体を総括している。

以上要するに本論文は、移動体通信機器用 RFIC の開発を目指し、受信フロントエンド、基地局用変調器などを実用に供するまで行った研究をまとめたもので、通信工学および電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。