



通信用GaAs MMICの高機能化・低消費電力化に関する研究

吉増, 敏彦

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1999-03-10

(Date of Publication)

2008-03-19

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2302

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3156452>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002302>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



| | | |
|------------|----------------------------------|-------|
| 氏名・(本籍) | よし ます とし ひこ 吉 増 敏 彦 | (京都府) |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士(学術) | |
| 学位記番号 | 博ろ第80号 | |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第2項該当 | |
| 学位授与の日付 | 平成11年3月10日 | |
| 学位論文題目 | 通信用 GaAs MMIC の高機能化・低消費電力化に関する研究 | |

| | | |
|------|-------------|---------|
| 審査委員 | 主査 教授 山本 恵一 | |
| | 教授 西野 種夫 | 教授 林 眞至 |
| | 教授 金田 悠紀夫 | |

論文内容の要旨

モノリシックマイクロ波集積回路 (Monolithic Microwave Integrated Circuit: 略して **MMIC**) は, GaAs や Si 基板上にトランジスタ等の能動素子と受動素子である抵抗, 容量, インダクタや伝送線路等を, 半導体製造プロセスを用いて一体的に作成するマイクロ波回路であり, 小型・軽量・高信頼の特徴を有している。従って, **MMIC** は, 通信機器の無線部を飛躍的に小型化する有効な手段として各所で盛んに研究が進められている。また, 近年著しい発展を遂げている携帯電話・PHS (Personal Handyphone System) 等の移動体通信用携帯端末では, 長時間通話化のために, 無線部の低消費電力化が極めて重要である。このような背景から, 通信機器無線部の性能を決める重要な回路機能を取り上げ, その小型・低消費電力化のための高機能 **MMIC** を回路技術の見地から提案することを目的として行なった。本論文は6章から構成されており, 以下の各章の内容と得られた結果について述べる。

第1章では, 本論文の序論として, 1960年代後半から始まった **MMIC** と GaAs マイクロ波トランジスタの研究とその通信機器への応用の歴史を紐解くことにより, 通信機器無線部の送信系と受信系それぞれの課題を明らかにし, 本研究の目的とするところ, 及びその意義について述べた。

第2章から第4章は無線部送信系の高機能化・低消費電力化を主眼においた研究である。

まず, 第2章においては, PHS(1.9GHz帯)規格の $\pi/4$ シフト QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 変調波を線形・高効率増幅するための設計手法を提案し, AlGaAs/GaAs HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) を用いた電力増幅器 **MMIC** を実現した。

単一周波数(無変調)入力時の HBT の振幅歪み・位相歪みと, $\pi/4$ シフト QPSK 変調波入力時の隣接チャネル漏洩電力を, 種々の負荷線(完全 A 級から B 級に近い AB 級まで)について測定し, 両者の関連について考察を行った。その結果, HBT の振幅歪みと位相歪みの両方が隣接チャネル漏洩電力の悪化につながる事が明確になった。また, トランジスタの振幅歪みにのみ注目した従来の設計手法に対して, 本研究では, 位相歪みを小さく抑えることが電力増幅器の高効率化に有効であることを見出した。さらに, 本手法を用いて 3V で動作する PHS 用 HBT 電力増幅器 **MMIC** を実現した。また, HBT の位相歪みの解析を行い, ベース・コレクタ容量が最も位相歪みに影響を与えるこ

とを示した。

第3章では、PHS用HBT電力増幅器MMICの更なる低歪み化を目指して、歪み補償回路の提案とMMICへの応用を行った。

従来の歪み補償技術としては、プリディストーション技術やフィードフォワード技術が報告されているが、補償回路にかなりの電流を要したり、あるいは補償回路のサイズが大きといった課題があり、携帯機には適さない。本研究で考案した歪み補償回路は、ダイオード1個と抵抗1個で構成し、それらを信号増幅用HBTのベースに直列に接続する回路である。従って、本補償回路は、HBTのベースバイアス回路としても動作する。HBTのベースバイアス電流は、電源から抵抗、ダイオードを通りHBTのベースに流れ込むため、補償回路は余分な電流を消費しないという特徴を有している。また、直流電圧は、抵抗、ダイオードとHBTベース・エミッタ間に分圧される。本回路に高周波信号が入力すると、その電流が増加するにつれて、ダイオードに整流電流が流れ始める（ダイオードが歪み始める）ため、ダイオード両端の直流電圧が徐々に低下し始め、逆に、信号増幅器HBTのベース・エミッタ電圧が徐々に上昇する。この効果で、大信号時HBTのトランスコンダクタンスの低下が改善され、振幅歪みが補償できる。また、入力電力の増加とともにダイオードの容量成分が減少することを用いて、電力増幅器の位相歪みを補償する。本補償回路をPHS用HBT電力増幅器MMICに応用し、HBTの位相歪み・振幅歪みが同時に補償できることを実証した。また、本MMICは、2.7V動作でPHS規格を十分満足する低歪み特性を達成した。

第4章では、GaAs MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) を用いたPHS用送受切り替えスイッチMMICを実現した。本スイッチは、アンテナと電力増幅器・低雑音増幅器の間にある3端子対回路である。PHSではアンテナ出力が規格により定められているので、電力増幅器はスイッチの挿入損失を見込んで、規格値以上の電力を出力しなければならない。従って、スイッチの低損失化は電力増幅器の出力低減、延いて携帯機の低消費電力化につながる重要な課題である。また、第3章で実現した電力増幅器は2.7Vで動作するため、本スイッチも2.7V以下で電力増幅器の出力電力21bBm (125mW) を歪みなく伝送しなければならない。しかし、従来のスイッチ回路は、2.7Vでは無歪みで伝送できる電力は17bBm (50mW) 程度である。本研究で提案したスイッチ回路は、送信・受信系ともにFETを直列と並列に接続する方式を用い、耐電力性が必要なFETを2段縦積み構造とすることで、FETにかかる高周波電圧を分圧し、耐電力性を向上した。また、スイッチ送信系の直列FETは、挿入損失増大を防ぐためシングルゲートFETを用いた。これらにより、本スイッチMMICは、1.8Vの低動作電圧においても、 $\pi/4$ シフトQPSK変調波電力21bBmを良好な線形性と低挿入損失で伝送できることを実証した。

次に、第5章は受信系の高機能化・小型化・低消費電力化を主眼においた研究で、GaAs MESFETを用いて衛星放送受信用(10~12GHz帯)の周波数ダウンコンバータMMICを実現した。まず、低雑音増幅器、イメージ抑制フィルタ、ミキサと中間周波増幅器をそれぞれ設計・試作し、次に、これらの回路すべてを集積した1チップ周波数ダウンコンバータMMICを実現した。

低雑音増幅器設計においては、雑音整合とインピーダンス整合を両立する手法である、インダクタによる直列フィードバックの効果を解析的に示した。本手法を用いて低雑音増幅器MMICは、低雑音特性と良好な入出力インピーダンス整合の両立を実現した。

イメージ抑圧フィルタは、従来、半波長側結合ストリップ線路を用いて誘導体基板(比誘電率=2~4)上にハイブリッド回路で構成されており、その面積は実に約300mm²である。GaAs基板(比誘電率~13)上においても12GHzの半波長は約3.5mmもあるので、半波長側結合フィルタは面積が大

きくなりすぎるため、MMIC化は実現していない。そこで本研究では、MMIC化に適した全く新しい小型フィルタ回路を考案した。本フィルタ回路は、

(i) 2個の容量を縦続接続し、その容量の間に先端短絡の短い伝送線路を接続したT型の2端子対回路を構成し、

(ii) その2端子対回路の入出力に短い伝送線路を縦続接続、

(iii) (ii)の回路の入出力端子に並列に伝送線路を接続、

して構成した。GaAs基板上に作成した本フィルタは面積わずか 0.5mm^2 で、イメージ抑圧比27Bb以上を実現した。

ミキサは、受信信号をFETのゲートに投入し、局部発振器信号をドレインに注入し、両信号をミキシング(周波数変換)して発生した中間周波の信号をドレインから取り出す方式を採用した。本研究においては、FETのドレインにバイアス電圧を印加せずにミキシングを行うことで、直流電力を消費しないミキサを実現した。

中間周波増幅器においては、必要な利得を確保しつつ消費電流を低減するため、FETのドレイン電流(I_{ds})当たりの利得(G)を性能指数($=G/I_{ds}$)に用いて、バイアス条件を決定した。この結果、従来に比べて消費電流を半分に低減することができた。

次に、これらの回路をすべて集積した周波数ダウンコンバータMMICを設計・試作した。本MMICは、欧州Astra、米国FSS(Fixed Satellite System)と日本の衛生放送の全システムの周波数帯にわたり良好な雑音特性と高い利得、さらに、衛生放送受信に必要なイメージ抑圧特性を有する。世界で初めての周波数ダウンコンバータMMICである。本MMICは、ハイブリッド回路で構成した従来回路の約400分の1の小型化と消費電流半減を実現した。

最後に、第6章は本論文の総括として、その成果を要約し、さらに今後の展望について述べた。

以上、本研究は通信機器無線部の性能を決める重要な回路機能を取り上げ、その小型・低消費電力化のための高機能MMICを、回路技術の見地から提案することを目的として行い、新しい回路の提案と試作による実証結果を集積したものである。本研究は、PHS携帯端末と衛生放送受信機を例に取り行なったものであるが、本研究の成果は、21世紀に向けて検討されている種々の通信システムに応用展開できる有用な技術であると考えられる。

論文審査の結果の要旨

本研究は、通信用GaAs MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)の高機能化・低消費電力化に関するものである。

本論文は6章から成り、第1章では、1960年代後半から始まったGaAsマイクロ波トランジスタ・GaAs MMICの研究とその通信機器への応用について、現在に至るまでの背景と課題を明らかにし、本研究の目的と意義を明確にしている。

第2章は、AlGaAs/GaAs HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)を用いた1.9GHz帯PHS(Personal Handyphone System)用電力増幅器MMICの低消費電力化に関する研究である。PHS規格の $\pi/4$ シフトQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)変調波を線形・高効率増幅するため、変調波入力時のHBTの隣接チャネル漏洩電力と、単一周波数(無変調)入力時のHBTの歪み(振幅歪みと位相歪み)を測定し、両者の関連について考察を行っている。その結果、トランジスタの新幅歪みにのみ注目した従来の設計手法に対して、大信号動作時にHBTの位相歪みを小さく抑えることが隣接チャネル漏洩

電力の低減と低消費電力化に有効であることを明らかにしている。さらに、3V動作のHBT電力増幅器MMICを設計・評価し、本設計手法の有効性を実証している。

第3章では、電力増幅器の更なる低歪み化・低消費電力化のため、ダイオードを用いた歪み補償回路の研究を行っている。本補償回路は、信号増幅器HBTのベースバイアス回路にダイオードを用いており、直流的にはHBTとダイオードの縦積み回路であり、高周波的にはHBTとダイオードの並列回路である。本回路への入力電力が増加するにつれてダイオードが歪み、整流電流が流れるためにダイオード両端の直流電圧が低下し、逆にHBTのベース電圧は上昇する。この効果により、HBTの振幅歪みが改善される。また、ダイオードの容量が入力電力の増加とともに減少することを用いて、HBTの位相歪みを改善している。さらに、本補償回路を用いて、2.7V動作PHS用HBT電力増幅器MMICを設計・評価し、低歪み化と低消費電力化に有効であることを実証している。

第4章は、GaAs MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) を用いたPHS用送受切り替えスイッチMMICの低動作電圧化・低歪み化に関する研究である。本スイッチMMICは、送信・受信系ともに直列と並列にFETを接続する方式を採用しており、低動作電圧で低歪み特性を実現するため、耐電力性が必要なFETを2段縦積み構造としている。また、送信系の直列FETは、挿入損失を低減するためシングルゲートFETを用いている。これらにより、本スイッチMMICは、1.8Vの低動作電圧においても極めて低歪み、かつ低挿入損失の特性を有することが実証されている。

第5章は、GaAs MESFETを用いた衛星放送受信用(10~12GHz帯)の周波数ダウンコンバータの高機能化・低消費電力化に関する研究である。周波数ダウンコンバータは、低雑音増幅器、イメージ抑圧フィルタ、ミキサと中間周波増幅器を集積している。

低雑音増幅器は、FETのソースにインダクタによる直列フィードバックを行い、雑音整合とインピーダンス整合の両立を実現している。

フィルタ回路は、従来用いられていた半波長側結合フィルタにかわり、短い伝送線路と容量を橋路T型に接続する全く新しい回路を提案している。本フィルタ回路は、わずか面積0.5mm²で衛星放送受信に必要なイメージ抑圧比を達成している。

ミキサ回路は、局部発振器信号をドレインに注入する方式を採用し、FETのドレインにバイアス電圧を印加せずにミキシングを行うことで、直流電力を消費しないミキサを実現している。

中間周波増幅器では、必要な利得を確保しつつ消費電流を低減するため、FETのドレイン電流当たりの利得を性能指数に用いて、FETのバイアス条件を決定している。この結果、従来の手法に比べて消費電流を半分以下に低減している。

さらに、これら個々の回路を集積し、欧州Astra、米国と日本の衛星放送の全システムで動作する、広帯域・小型周波数ダウンコンバータMMICを実現している。本MMICは、十分なイメージ抑圧比を有するフィルタを集積した、世界で初めての広帯域周波数ダウンコンバータMMICであり、ハイブリッド回路で構成した従来の受信機の面積の約400分の1の小型化と消費電流半分を実現している。

第6章は、本論文の総括として、その成果を要約し、さらに今後の展望について述べている。

以上のように、本研究は、通信機器無線部の性能を決める重要な回路について、その高機能・小型・低消費電力化のためのCaAs MMICを回路技術の見地から研究したものであり、PHS携帯端末と衛星放送受信機のみならず広く通信機器無線部を高機能化・低消費電力化できる重要な知見を得たものとして、価値ある集積であると認める。

よって学位申請者 吉増 敏彦 は、博士(学術)の学位を得る資格があると認める。