

氏 名	とく みつ つね お 徳 満 恒 雄
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 1 0 年 3 月 1 3 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 5 1 年 3 月 2 5 日 広島大学大学院工学研究科電子工学専攻前期課程 修了
学 位 論 文 題 目	超小形 MMIC 機能回路および高集積 MMIC の研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 米山 務 東北大学教授 澤谷 邦男

## 論 文 内 容 要 旨

本研究では、「線路一体化 FET」および「3次元 MMIC」なる、モノリシックマイクロ波集積回路 (MMIC) に関わる二つの新しい基本構造・概念を提案し、その効果・効用による MMIC の超小形化と高集積化を明らかにした。両技術による小形化の効果を従来技術と比較して図 1 に示す。

従来の MMIC は、基本構造で大別すると、マイクロストリップ型 MMIC (図 1 の A, B) とユニプレーナ型 MMIC (図 1 の C) の 2 種類に分類することができる。前者は接地導体を半導体基板の裏面(線路導体は表面)に配置し、後者は接地導体を半導体基板の表面(線路導体と同一面)に配置する。線路一体化 FET (LUFET) および 3 次元 MMIC (3-D MMIC) は、機能回路の面積を従来に比べて大幅に小形化し集積度を数倍に向上する新しい基本構造である。線路一体化 FET では FET と平面線路とが一体の超小形マイクロ波回路を、3 次元 MMIC では低誘電率ポリイミド多層薄膜と微細高密度配線による超小形マイクロ波回路を実現している。

機能回路の超小形化は、受信機や送信機、まとまった制御機能などの 1 チップ集積化を容易にする。これは、従来から積極的に取り組まれている課題であるが、従来の基本構造とそれによる設計技術が持つ本質的な小形化の限界により集積度に限界があった。従来の MMIC の集積度  $I$  (利得 (dB) と比

帯域 (%) の積をチップ面積 ( $\text{mm}^2$ ) で除したものは、10 GHz 以上で、0.6 ないし 0.3 である ( $I\sqrt{f} = 2$ )。本研究では、先ず従来の MMIC 技術が抱える諸問題を大局的に見直すと共に、これに対応する基本的目標を設定した。基本的な実現目標は、(1) 超小形化＝高集積化、(2) 超広帯域化、(3) 設計の超簡易化である。いずれも汎用的な MMIC 技術には不可欠な項目である。これらの3目標は、目標(1)を核として前述の2つの新しい構造・概念によって相補的に達成される。両概念はその回路構成において、接地導体を含む全回路が半導体ウェハの片面のみに存在するという共通性を有する。

以上をまとめると、本研究は、「FET 機能の拡張 (FET サイズの機能回路)」および「積層構成 (伝送線路の微細化)」というキーワードを起点とし、究極の小形化を目標到達点として、「線路一体化 FET」および「3次元 MMIC」なる2つの新しい回路概念を具体化したものである。以下に本論文の構成と概要を述べる。

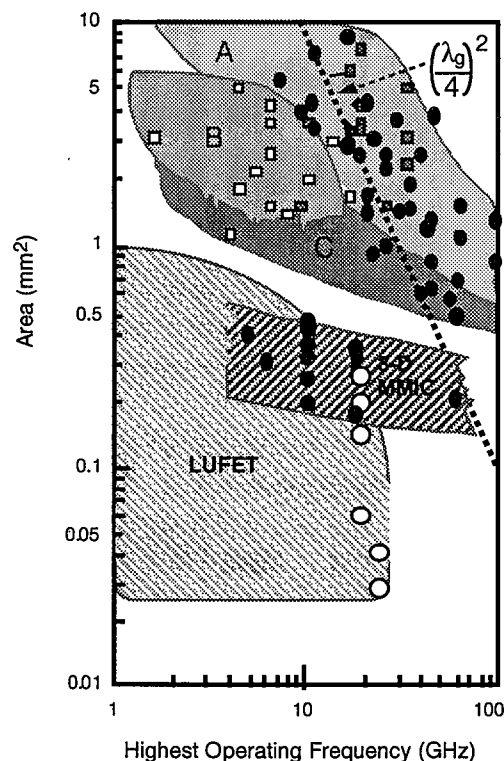


図1 MMIC 単位機能回路の面積比較

## 1. 序論

第1章「序論」では、従来の MMIC 技術を小形化・高集積化および設計性の観点で整理すると共に、ここでの課題を解決する本研究に記載の技術についてその独創性をまとめた。また、各章の概要を述べた。

## 2. 線路一体化 FET (第2章～第4章)

LUFET は、FET の電極がそれ自身同時に一体化されたコプレーナ線路およびスロット線路であり、3端子デバイスである FET がマイクロ波機能モジュールとして動作する。

## 第2章「線路一体化FET (LUFET) の提案」

では、先ず最も単純な合成・分配LUFETを整理して基本LUFETとした。次に、これらを出発点として、異なる機能の実現に適した「変形」および「組合せ」等の手法について述べた。ここで、

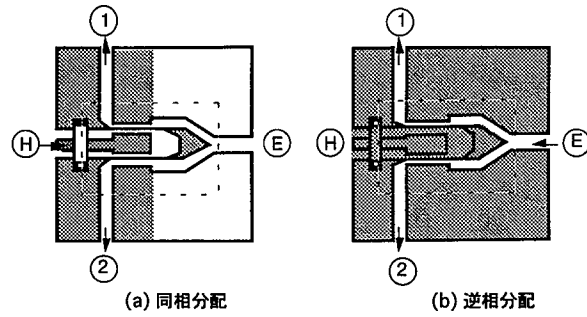


図2 FET電極と異種受動回路機能の一体化の例 (マジックT LUFET)

従来のFETサイズに近い形状・寸法で、基本的に直流からFETの遮断周波数付近まで動作する超

広帯域機能モジュールを各種示した (図2参照)。つづいて、バランスミキサ、多端子合成分配器、平衡変調器等のLUFET MMIC (LUFETを核とする超広帯域MMIC) を具体例として示した。

第3章「マジックT LUFETとその応用」では、マジックT LUFETの考案および動作の解析を行うと共に、実際に製作した素子により、その優れた超広帯域特性および端子間分離特性を示した。マジックT LUFETは、図2に示すようにFET電極配置内に同相および逆相の互いに独立な分配機能を効果的に一体化し、 $1/4$ 波長線路を一切必要としない。さらに、このマジックT LUFET ( $0.1 \text{ mm}^2$ ) を起点として、超広帯域で演算機能的な特徴を有する非可逆・多端子合成分配回路 ( $<0.5 \text{ mm}^2$ )への機能拡張を展開した。これらをシンボル化し、シンボルの組合せおよび変形による機能モジュール設計にも言及した。以上2, 3章により、LUFETが汎用性の非常に高い超小形「機能モジュール」であり、1チップ集積化に直接結び付く回路技術であることを明らかにした。

第4章「LUFET非可逆合成分配回路を用いたサブハーモニック注入同期発振器」では、LUFETのより具体的な応用として、超広帯域なLUFET非可逆多端子回路と増幅器の単純な組合せにより、図3に示す2~16の任意のサブハーモニック次数に対応できる注入同期発振器 (ILO) を初めて実現した。これは従来の受動回路の組合せでは困難であった機能回路であ

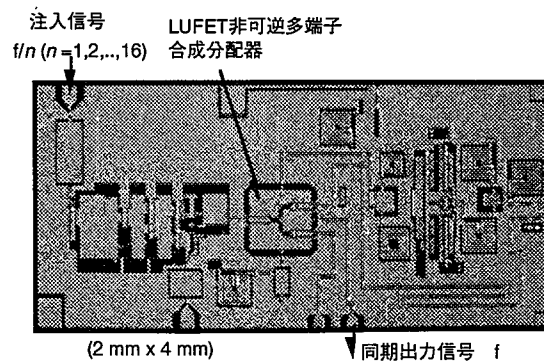


図3 16 通倍1チップ注入同期発振器

り、LUFETの実用性を示す一例である。また1チップ・小形化しているので局部発振器のシンセサイザ化等に有効な幅広い応用範囲を有している。

### 3. 3次元MMIC(第5章, 第6章)

第5章「3次元MMICによる高集積化」では、誘電体薄膜を半導体基板上に積層する3次元MMICなる新しい構造、およびこれを用いたマイクロ波集積回路の超小形化・高集積化について述べた。まず、3次元MMICの構造・製造技術、微細伝送線路と設計性、回路積層等の基本技術について述べ、次にこれらの特徴を活かした超小形受動回路および能動回路を試作し、本3次元MMICの特徴的な効果・効用を示した。ここで、増幅器の構成

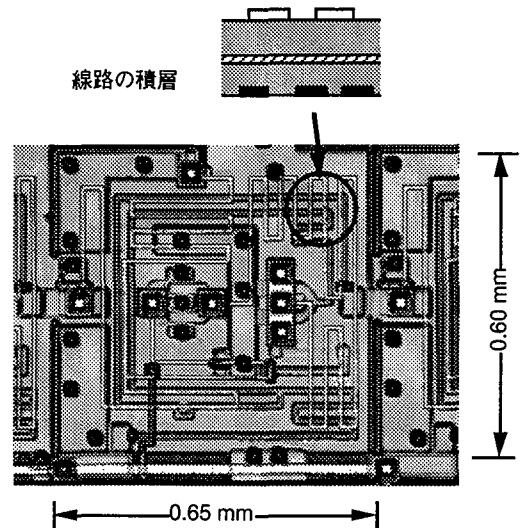


図4 3次元MMIC増幅器の例

と設計指針を明らかにして、線路微細化に起因する線路損失の増加による回路性能への影響を克服した。さらに、3次元化によって機能あたりの占有面積をほぼ任意の周波数で $0.4 \text{ mm}^2$ にまで小形化でき、1チップ受信機の大幅な集積度向上(従来に比べて約4倍)を達成した。図4は、整合回路を3次元構造内に積層した超小形増幅器の例である。このような高密度配線を活用して、各種の能動・受動機能回路を2mm角以下のチップに集積した1チップ受信機数例を示した。

第6章「マスタスライス型3次元MMICの提案」では、3次元MMICをより工業的に価値のあるものにする、つまりMMIC開発期間を1/2以下に短縮するマスタスライス型MMICを提案した。これによって、マイクロ波帯以上の周波数領域で初めてLSIのゲートアレー的な

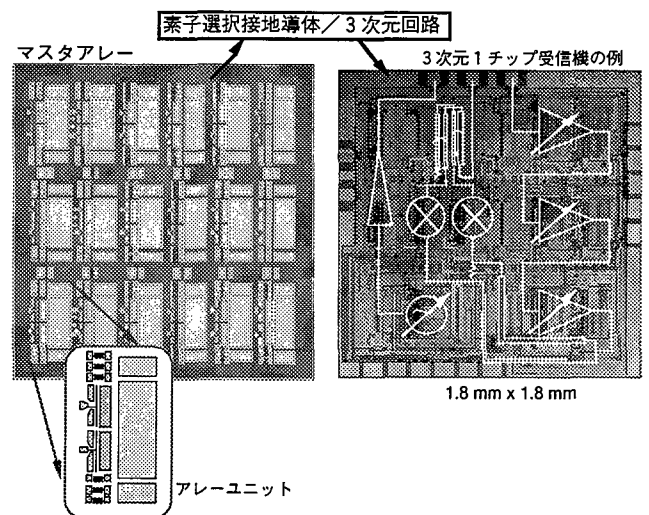


図5 マスタスライス型3次元MMIC

MMIC の開発を可能にした。図 5 に示すように、回路素子を高集積に配置した出来合いの基板を利用して高い集積度を維持し、かつ半導体ウェハの性質に依存しないという特徴を、1チップ受信機等の具体例により実証した。これらの効果・効用を基に MMIC の経済的開発の可能性を示唆した。

#### 4. 結論

第 7 章「結論」では、上記研究全体についての成果を要約して将来の MMIC 技術における本研究の位置付けを行った。本研究で行った 2 つの新しい MMIC 技術は MMIC 適用領域を大幅に拡大するものと期待できる。また、LUFET MMIC と 3 次元 MMIC の結合・融合は MMIC の一層の高機能化に役立つものと考えられる。

## 審査結果の要旨

モノリシックマイクロ波集積回路 (MMIC) は、その高い量産性と信頼性、さらに回路の小型化の能力により注目されている。本研究は、MMIC の更なる小形化、高集積化等に対して新たに次の二つの概念を提案し、それらを実用レベルまで開発した成果を纏めたものである。一つは、回路の小形化、超広帯域性を得るために、FET の電極をそのまま回路として用いる「線路一体化 FET」である。また、回路のより小形化、高集積化のために「3次元 MMIC」を提案し、更にその汎用化のためにマスタースライス型を提案し具体化している。本論文は全編 7 章よりなり、第 1 章は、序論である。

第 2 章では、FET の非可逆性を利用すると同時に、その電極配置を回路として用いる「線路一体化 FET」 (LUFET: Line-Unified-FET) の概念を提案している。まず、最も単純な合成および分配用 LUFET の構成を示し、それらの「変形」、「組み合わせ」等により、小形・超広帯域を有するマジック T、ミキサ等各種機能モジュールの構成法について述べている。続いて、具体的にその内の 4 例について試作し、その有用性を実証している。例えばバランスミキサでは、IF 増幅器込みで 0.7 mm x 1.1 mm と小型のチップで、8~20 GHz の広帯域において変換損失 8.5 dB、端子間アイソレーション 30 dB の良好な値を得ている。これらの成果は、極めて高く評価出来る。

第 3 章では、LUFET をマジック T の構成に応用し、FET の遮断周波数まで動作し得る超広帯域マジック T LUFET の試作に成功して、LUFET が汎用性の高い機能モジュールであることを示している。

第 4 章は、LUFET 非可逆合成分配回路を用いてサブハーモニック注入同期発振器を開発した結果について述べ、LUFET の実用性を明らかにしている。

第 5 章では、半導体基板上に誘電体薄膜を積層する新しい構造の「3次元 MMIC」を提案し、まずその基本構造、線路、フィルター等の設計法、また製造技術について述べている。次いで、20 GHz 帯の増幅器、1 チップ受信機等を試作し、その有効性を実証している。4 段の前置増幅器とイメージリジクションミキサで構成された K 帯受信機では、16~22 GHz の周波数帯域で、変換損失 14 dB の特性を得ている。このチップの寸法は 2 mm X 2 mm であり、従来のものに比べて約 4 倍の集積度を得ている。これは、優れた成果である。

第 6 章では、マスタースライス型 3 次元 MMIC を提案している。これは、3 次元 MMIC 構造に半導体表面の素子を選択的に覆う接地導体を導入したもので、大量生産可能なマスタースライス基板から各種の MMIC を短時間で実現し得ることを目的としたものである。実際に設計・製作したマスタースライス基板を用いて、17~24 GHz の 1 チップ受信機等を試作し、GaAs 系ウエハを用いた MMIC で 50~70% のコスト削減が期待できることを示しているが、これは実用的、工業的に有用な知見である。

第 7 章は、結論である。

以上要するに本論文は、MMIC の更なる小形化、高集積化に対して新たに二つの概念を提案し、理論的考察、実験的検討を通して、それらを実用レベルまで開発した成果を纏めたもので、マイクロ波・ミリ波工学ならびに電子デバイス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。