

第 1 章では、マイクロ波・ミリ波発振器技術、及びその応用システムの歴史を俯瞰し、本研究の歴史的な位置付けを明確化する。また、それを踏まえた上で本論文の目的と意義を示す。

第 2 章では、マイクロ波・ミリ波発振器技術を概観し、発振器技術全体の中での本研究の位置付けを明確化する。また本論である第 4 章から第 7 章における議論で必要となる発振器技術に関する基礎事項についても述べる。特に本研究で焦点を当てる共振回路に関しては、その特性指標について通常用いられる定義の問題点を指摘した上で本研究において採用した定義を示す。

第 3 章では、発振器の位相雑音が無線・有線通信及びレーダシステムへ与える影響について議論し、本研究の重要性を改めて提示する。また定量的な解析を行うことで、各システムにおける所要位相雑音性能を明示し、本研究における目標性能を明確化する。

第 4 章では、マイクロ波・ミリ波発振器における位相雑音と共振器結合強度の関係を、特に設計上重要となる結合強度の小さな領域における位相雑音の複雑な振る舞いを含めて理論的に明らかにする。従来標準的な位相雑音モデルとして用いられてきた Leeson のモデルは、そのような結合強度の小さな領域における複雑な位相雑音特性については一切記述しておらず、結合強度の設計指針を与えて来なかった。本研究では発振方程式に立脚した Kurokawa の位相雑音理論に基づき、これをマイクロ波・ミリ波負性抵抗発振器へと適用することにより位相雑音と共振器結合強度の関係式を解析的に導出する。得られた解析式は、結合強度が非常に小さくなったときに、位相雑音の急激な劣化、発振出力急減、発振停止等の現象が起こることを示しており、この結果に基づき結合強度の設計指針を初めて明確化する。また結合強度を設計指針で示した最適な値に高精度に制御することが重要であることを併せて指摘する。

本章の結果は、マイクロ波・ミリ波発振器における位相雑音と共振器結合強度の関係を初めて理論的に明確化したものであり、続く第 5 章から第 7 章における研究の基盤ともなるとともに、今後広く結合強度の設計指針としての利用が期待されるものである。

第 5 章では、第 4 章で得られた結果の平面回路発振器への展開を行う。近年本格的普及が望まれる超高周波システムには、ミリ波車載レーダや加入者系無線アクセス (FWA: Fixed Wireless Access) 等高周波モジュールの小型・低コスト化が市場拡大の鍵となっているものが多い。本章の研究はこれらコンシューマ用途を想定したものであり、小型・低コスト化に適する一方、低い無負荷 Q 値のために低位相雑音化が従来困難だった平面回路発振器において、第 4 章の理論解析結果に基づく新しい結合強度制御技術の提案により低雑音化を実現するものである。まず、従来の平面回路共振器と集中定数素子、間隙、直結等による結合技術では第 4 章で明確化した最適結合強度の実現が困難であることを示す。その上で、最適結合強度を実現可能な平面回路共振器として $(\lambda/4 \pm \delta)$ 長先端開放スタブ共振器の提案を行う。本共振器は結合部を内在した共振器と解釈可能であり、その結合強度を結合素子ではなくリソグラフィ技術により高

精度に制御可能な量 δ により広範囲に制御可能という従来の共振器にない特徴を有する。これらの特徴は、第 4 章で導いた低位相雑音発振器用共振器に求められる特徴とまさに合致するものである。本共振器を 38GHz 帯 GaAs (砒化ガリウム) 系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT: Heterojunction Bipolar Transistor) MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuit) 発振器に適用し、世界最高の位相雑音性能 (-114 dBc/Hz @ 1 MHz 離調) を実証する。

本章の成果は、最適結合強度を実現可能な平面回路共振器の提案によって、従来の平面回路発振器では到達不可能だった低位相雑音特性の実現を可能とするものであり、今後小型・低コスト化と低位相雑音化の両立が求められるシステムへの適用が期待されるものである。

第 6 章及び第 7 章では、第 4 章で得られた結果の立体回路発振器への展開を図る。これは低位相雑音化が困難な超高周波帯 (ミリ波帯) において極限の位相雑音特性を追求するものであり、ハイエンド用途を想定したものである。立体回路発振器として、高い無負荷 Q 値、外部回路との結合容易性、空洞共振器に対する小型性等の利点を有する誘電体共振器 (DR: Dielectric Resonator) を装荷することにより、マイクロ波帯における代表的な超低位相雑音周波数源として実用化されている誘電体共振発振器 (DRO: Dielectric Resonator Oscillator) を採用し研究対象とする。DR はミリ波帯においても高い無負荷 Q 値を維持し、周波数上昇に従い更に小型化されることから、DRO はミリ波帯においても有望な低位相雑音周波数源として期待されてきたが、これまで実用化可能な特性は実現されていない。本研究では先ずミリ波 DRO の実現を阻んできた複数の技術障壁を分析し、それらに対するブレークスルー技術を提案することにより世界最高性能のミリ波 DRO の実現を目指す。その結果、この二章は最大要因である立体回路における共振器結合制御を中心的な課題としながらも、その一方でデバイス・プロセス技術から、モデリング技術、回路設計技術までを含む総合的な研究開発の性格を有する。

先ず第 6 章では、従来マイクロ波帯で用いられてきた DR とマイクロストリップ線路 (MSL: Microstrip Line) の結合形態では第 4 章で明確化した最適結合強度の実現がミリ波帯においては困難であることを示し、DR と MSL を交差させる新しい結合形態の提案を行う。理論解析と実験により、提案結合技術の有効性を検証するとともに DR-MSL 交差量の最適化を行う。更に、第 7 章において提案する DRO 高精度設計・解析手法を実現するための、温度・構造パラメータに依存した DR 共振系等価回路モデルの提案・構築も行う。

続く第 7 章では、第 6 章の結果を基盤としミリ波帯 (60 GHz 帯) DRO の研究開発を行う。先ず、ミリ波帯動作可能な GaAs 歪系高電子移動度トランジスタ (PHEMT: Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) 及びその MMIC プロセスの開発を行うとともに、PHEMT の温度依存大信号モデルを提案する。この PHEMT 温度依存大信号モデルと第 6 章の温度・構造パラメータ依存 DR 共振系モデルを回路解析プログラムへ組み込むことにより、世界で初めて DRO 特性の温度・構造パラメータ依存性を予測可能な設計・解析手法の構築を行う。以上述べ

た、DR-MSL 結合技術、DRO 設計・解析技術、デバイス・プロセス技術を統合し、世界最高性能 (位相雑音 -90 dBc/Hz @100 kHz 離調、出力 10.0 dBm、温度安定性 $+1.6$ ppm/ $^{\circ}$ C) の 60 GHz 帯 MMIC DRO を実現する。

第 6 章及び第 7 章の中心的な成果は、ミリ波帯立体回路において最適結合強度を実現する結合技術を提案することにより、今後開拓が期待される超高周波帯において低雑音周波数源を実現する方法を提示したことにある。

最後に第 8 章で、本論文全体及び各章の要旨と得られた主要な結論を纏める。また今後の課題と展望についても述べる。

以上述べたように本研究は、今後開拓が期待される超高周波帯を用いた無線・有線通信及びレーダシステムのキーデバイスである発振器について、先ず共振器の結合強度の設計論を理論解析により確立し、そこで得られた結論に基づき平面回路及び立体回路における新しい結合強度制御技術の提案を行い、それらを適用した発振器の試作実験を通して従来技術では到達不可能だった低位相雑音特性の実証を行ったものであって、今後多方面への適用が期待されるものである。