

300GHz 帯フェーズドアレイの高集積化に向けた CMOS 設計技術 CMOS Design Techniques for Highly Integrated Phased Arrays in the 300-GHz Band

藤島 実

Minoru FUJISHIMA

広島大学

Hiroshima University

概要

テラヘルツ帯通信は Beyond 5G/6G における超大容量伝送を実現する有力候補である。RF CMOS 回路では、トランジスタそのものよりも電源配線、デカップリングキャパシタ、制御配線、さらには制御・電源パッドといった周辺要素が大きな面積を占めるのが一般的である。しかし数 GHz~数十 GHz 帯ではこの特性は致命的制約とはならず、スマートフォンをはじめとする多くの集積 RF 回路に広く用いられてきた。

一方、300GHz 帯でフェーズドアレイを構成する場合には事情が異なる。大気中の波長は約 1mm であり、グレーティングローブを避けるためにはアンテナを 0.5mm 間隔で配置する必要がある。これに対応するトランシーバ回路も 0.5mm 角以内に収めなければならず、周辺要素が占める面積が深刻な制約となる。従来の設計手法では高密度アレイの実現が困難である。

さらに、CMOS トランジスタの世代進化もこの問題を際立たせている。バルク CMOS の時代は微細化によりトランジスタ性能と集積密度の向上が並行して進展していた。しかし FinFET 以降は、多ゲート構造 (FinFET、GAAFET など) による集積密度の向上が主流となり、デジタル回路はトランジスタレベルでの高集積度を活かして並列演算規模を拡大し、システム性能を伸ばしてきた。これに対し、RF 回路は寄生容量や熱の影響により高周波特性が劣化するため、この流れに乗ることが困難である。したがって、RF 回路にはプロセス依存の集積度向上ではなく、回路アーキテクチャや周辺要素の設計最適化による高集積密度化が求められる。

本研究ではこの課題を解決するため、電源配線・デカップリングキャパシタ・制御配線を垂直方向に統合した多層構造「電源パネル (Power Panel)」を提案する。さらに制御・電源パッドにも適用し、RF 入出力部を除くチップ全体を一体化する構造とした。40nm CMOS において、上層に低抵抗電源配線、中層に高密度 MOM キャパシタ、下層に制御配線と ESD 保護を配置し、10 μ m ピッチで全チップに展開することで高集積を実現した。

試作チップでは 220GHz まで高アイソレーション (隣接ライン間 32dB 以上、離隔ライン間 50dB 以上) を確認した。また、31-69GHz の可変利得増幅器 (VGA) を同アーキテクチャで設計し、ピーク利得 20.4dB、利得可変幅 12.2dB を達成し、コア面積を従来比 78%削減した。

電源パネル技術は、300GHz フェーズドアレイの厳しい寸法制約を契機に生まれた設計手法である。シリコン面積は製造コストに直結するため、周辺要素の削減は経済的な意義を持つ。その波及効果は Beyond 5G/6G のテラヘルツ通信にとどまらず、RF/アナログ CMOS 全般のコスト削減や車載レーダ、高分解能イメージングなどの応用へと広がることが期待される。すなわち本研究は、従来の微細化依存とは異なる RF 回路の新しい設計指針を提示するものである。

Abstract

In the 300-GHz band, phased arrays require half-wavelength antenna spacing (0.5 mm), forcing each transceiver block into an extremely small area. While RF CMOS circuits are dominated by peripheral elements such as power distribution, decoupling capacitors, control wiring, and pads, this limitation becomes critical at 300 GHz. We propose a "Power Panel" structure integrating these elements vertically, including control and power pads, enabling dense integration. Prototypes demonstrate high isolation up to 220 GHz and 78% area reduction in a VGA.