

クロスカップル RF-DC チャージポンプ出力電圧電流特性の非線形性について On Nonlinearity in Output Voltage-Current Characteristics of Cross-Coupled RF-DC Charge Pumps

小坪 稜麻 Ryoma Kotsubo

丹沢 徹 Toru Tanzawa

静岡大学 Shizuoka univ.

1. まえがき 近年 IoT デバイスへの電力供給手段としてマイクロ波による無線電力伝送技術が注目されている [1]. 低入力電力でも高い直流電圧を発生させるために RF-DC チャージポンプ (CP) が使用される (図 1). CP に用いられる整流回路として, これまでに NMOS をダイオード接続した回路 (Single 型) (図 2a) やクロスカップル型回路 (Latch 型) (図 2b) が提案されている [2]. それぞれの整流回路を用いて回路定数・面積を同一にした CP を設計して [3], 両者の出力電圧電流特性を SPICE, 実測データを用いて比較した (図 3). 一般的に CP の出力抵抗 (R_o) は周波数 f , 段数 N , 容量 C の関数で表され整流回路によらないが, Latch 型を用いた CP の出力抵抗が Single 型を用いた CP のそれより 3 倍以上高い結果となることを先の研究で示した [4]. また, Latch 型において出力電圧が低い領域では R_o が高く, 高い領域では R_o が低くなるという非線形性を持っていることがわかった. 本稿では境界条件を報告する

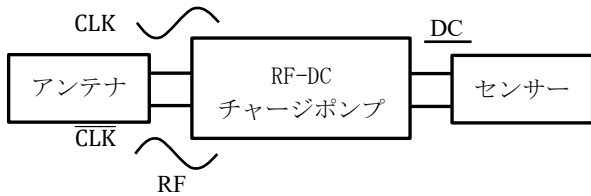


図 1 無線電力伝送のシステム

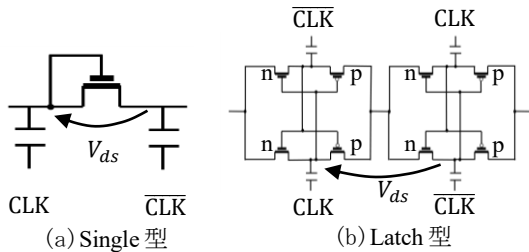


図 2 整流回路

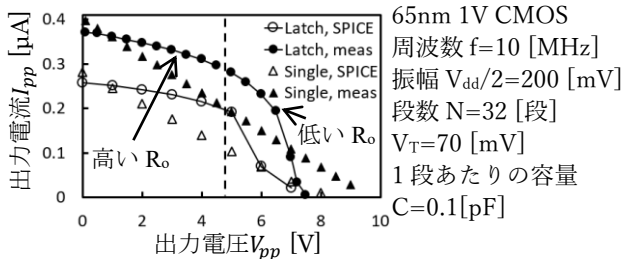


図 3 I_{pp} - V_{pp} 特性

2. Latch 型 CP 本研究では初めて SPICE と実測データを用いて Latch 型と Single 型の出力特性の比較を行った (図 3). このグラフの傾きは出力抵抗 R_o を表しており, Latch 型は破線の左側では Single 型と比較して高い R_o , 右側では低い R_o となる非線形性を示している. 図 1 のようなシステムでセンサーなどへと電力を供給する際, デバイスのインピーダン

スが増加した場合それに応じて CP の出力も変化するため低 R_o の場合, 出力電流の変動が大きくなり安定した電力供給を行うことができない. そのため, 今回の比較においては低出力電圧の領域では Latch 型, 高出力電圧領域では Single 型の方が優れているといえる. 以下で二領域の境界条件を調べる. (1) はサブスレッショルド動作でのトランジスタの電流の式である. ドレインソース間電圧が高い領域では (2) で表すことができる.

$$I_d = I_s e^{\frac{V_{gs}}{V_T}} \left(1 - e^{-\frac{V_{ds}}{V_T}} \right) \quad (1)$$

$$I_d = I_s e^{\frac{V_{gs}}{V_T}} (V_{ds} \gg V_T) \quad (2)$$

また, 図 2 に示す V_{ds} は (3) で表され [5], 出力電圧が大きくなるにつれて小さくなり V_T と同程度の大きさになった時に電流が急激に減少する. Latch 型では NMOS と PMOS が直列に接続されており, ドレインソース間電圧が Single 型の半分になるためその影響を受けやすくなる. ここでは (4) を Latch 型の境界条件とする.

$$V_{ds} = V_{dd} - \frac{2I_{pp}}{fC} - \frac{V_{pp}}{N+1} \quad (3)$$

$$V_{dd} - \frac{2I_{pp}}{fC} - \frac{V_{pp}}{N+1} \leq 2V_T \quad (4)$$

図 4 は Latch 型の出力特性を示しており Model1 [4] が (2), Model2 が (1) を使用した式となっている. また, 回路パラメータは周波数を 1 [GHz] とし, それ以外を図 3 と同様の条件としている.

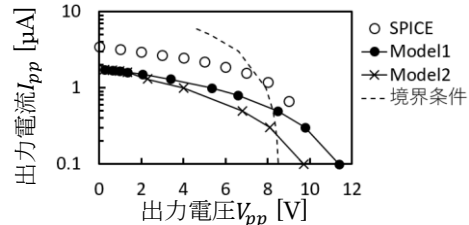


図 4 I_{pp} - V_{pp} 特性 (II)

3. まとめ 本研究では初めて Latch 型と Single 型の比較を spice と計測で行った. Latch 型 CP では低出力電圧では高い R_o , 高出力電圧では低い R_o となることを示した. R_o が変化するときの境界条件を示した.

参考文献

- [1] 総務省, 空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班の審議会資料 (第 7 回) (2020 年 1 月 31 日開催)
- [2] R. Gariboldi and F. Pulvirenti, JSSC, 1996.
- [3] T. Hashimoto et al., Electronics, 12(6), 400, 2023
- [4] 小坪, 丹沢, 信学会ソサイエティ大会, 2022
- [5] T. Tanzawa, IEICE, TE, 2016

謝辞 本研究を進めるにあたり多大なサポートを頂きました. dlab-vdec, ケイデンス, シノプシスに感謝申し上げます.