

マイクロ波帯 RF-DC 変換用ダイオードの動作インピーダンス測定

Operation Impedance Measurement of Diodes for Microwave RF-DC Conversion

笠原 崇志[†]

藤森 和博[†]

Takashi Kasahara[†]

Kazuhiro Fujimori[†]

[†]岡山大学 大学院 自然科学研究科

1 研究背景

近年、身の回りのセンサ・IoT デバイスが増加しており、これらをバッテリーレスで動作させるための研究開発が盛んに行われている。電子機器は直流電源を必要とするため、周囲空間の電磁気的エネルギーを利用しようとしたとき、受電デバイスにはアンテナと RF-DC 変換回路を集積したレクテナが必要となる。しかし、ダイオードが非線形性を有することから、RF-DC 変換回路が高効率動作する回路条件は、理想ダイオードを仮定したものが示されているに過ぎない。

我々の先行研究において、RF-DC 変換回路が高効率で動作しているとき、ダイオードの動作インピーダンスとダイオードに接続された回路の合成インピーダンスは概ね複素共役の関係にあることを示唆する解析結果が得られている^[1]。本研究ではその結果を実証すべく、RF-DC 変換回路の整流素子であるダイオードが単体で有する RF-DC 変換性能を実測し、高効率動作時におけるインピーダンスを測定したので報告する。

2 RF-DC 変換回路の動作原理

RF-DC 変換回路の構造を図 1 に示す。RF-DC 変換回路は入力フィルタ、ダイオード、出力フィルタからなる。入力されたマイクロ波はダイオードで整流され、ローパスフィルタを通すことで直流成分だけが負荷から取り出される。入力フィルタは電源と RF-DC 変換回路のインピーダンス整合と、電源側への直流漏洩を防いでいる。負荷で生ずる直流電圧はダイオードに対する逆バイアスとなる。よって、RF-DC 変換回路の変換効率は入力電力、負荷に依存することになる。

3 測定における諸条件

検討した周波数は 5.8GHz、回路基板には Rogers 社の RO4350B を使用し、特性インピーダンス 50Ω の線路で回路を構成した。ダイオードには Avago 社の HSMS-282B, HSMS-2850, HSMS-2860 (以下, 282B, 2850, 2860) の 3 種を用いた。各ダイオードの SPICE パラメータのうち、立ち上がり電圧 V_{th} 、ブレイクダウン電圧 B_V 、直列抵抗 R_s 、ゼロバイアス接合容量 C_{j0} 、飽和電流 I_s を表 1 に示す。これらのダイオードパラメータは RF-DC 変換回路の変換効率に特に影響する^[2]。具体的には、 V_{th} が

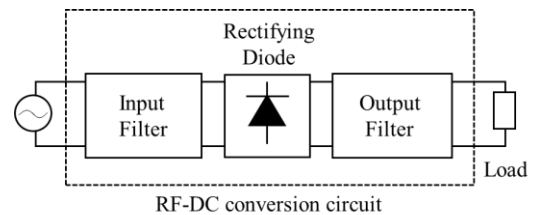


図 1: RF-DC 変換回路の構造

表 1: 各ダイオードの SPICE パラメータ (抜粋)

Parameter	Unit	282B	2850	2860
立ち上がり電圧 V_{th}	[V]	0.65	0.35	0.65
逆方向ブレイクダウン電圧 B_V	[V]	15	3.8	7
直列抵抗 R_s	[Ω]	6	25	6
ゼロバイアス接合容量 C_{j0}	[pF]	0.7	0.18	0.18
飽和電流 I_s	[A]	2.2E-8	3E-6	5E-8

小さいほど、小さな入力電力で高い変換効率が期待できる。 B_V が小さいほど、小さな入力電力で変換効率のピークを示し、 R_s が大きいほど、変換効率の最大値が小さくなる。また、接合容量が大きいほど、それを介して流れる、飽和電流 I_s に依存した逆方向電流が大きくなるため、やはり変換効率の最大値は低下する。

4 ダイオードの RF-DC 変換効率測定

ダイオードの RF-DC 変換効率測定系を図 2 に示す。シグナルジェネレータ(SG)からのマイクロ波は増幅器、減衰器によって調整される。調整されたマイクロ波はサーキュレータ、スタブチューナ、方向性結合器、バイアスティーを通り、アノードが接地されたダイオードに印加される。ダイオードの整流によって生じた直流はバイアスティーの DC ポートから負荷へと伝わり、負荷の両端電圧がダイオードの逆バイアスとなる。ダイオードからの交流成分は入力側へと伝わり、サーキュレータに接続された 50Ω 負荷で吸収される。方向性結合器はバイアスティーを含む整流部への入力電力を正確に知るために使用し、スタブチューナは電源と方向性結合器、バイアスティーを含めた整流部とのインピーダンス整合を行っている。この測定系で入力電力、負荷抵抗およびスタブチューナを調節することで最高効

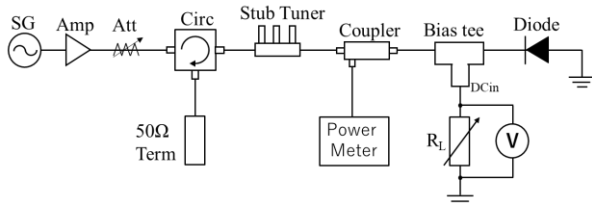


図 2：ダイオードの RF-DC 変換効率測定系

表 2：各ダイオードの最高効率および諸条件

	最高効率[%]	入力電力[dBm]	負荷抵抗[Ω]
282B	64.4	19.2	300
2850	51.9	10.6	450
2860	69.4	15.8	200

率を調べた。このときの結果を表 2 に示す。ただし、機器の限界のため、入力電力の上限は 20dBm とした。また、変換効率 η の算出には以下の式(1)を用い、ここで、 p_{in} はダイオードの入力電力、 V_{DC} は可変抵抗で発生した直流電圧、 R_L は可変抵抗の値である。

$$\eta[\%] = \frac{V_{DC}^2 / R_L}{p_{in}} \times 100 \quad (1)$$

表 2 より、2850 は負荷 450Ω、入力電力 10.6dBm と最も小さい入力電力で最高効率を示すが、値は 52%程度と最も低い。2860 は負荷 200Ω、最高効率 69.4%で、282B の 300Ω、64.4% よりも高い変換効率となっている。これらは、表 1 で示したダイオードパラメータからの予測と一致し、さらにこれまで我々が試行錯誤的に設計してきた RF-DC 変換回路の最大効率とほぼ同等である。

5 ダイオードの動作インピーダンス測定

ダイオードの動作インピーダンス測定系を図 3 に示す。ベクトルネットワークアナライザ(VNA)の信号源では十分な電力が得られないため、外部信号源として SG を用いた。SG からの信号は電力調整され、方向性結合器、サーキュレータ、バイアスティーを通り、アノードが接地されたダイオードのカソードに印加、整流される。このとき、入力信号の一部は方向性結合器を介して VNA の基準信号入力ポート R_{in} に入力される。バイアスティーの DC ポートに直流電圧源を接続し、ダイオードに逆バイアスを印加することで、出力電圧による逆バイアスを模擬している。ダイオードからの反射波はバイアスティー、サーキュレータを通じて VNA のテストポートに入力され、インピーダンスが測定される。VNA の校正には S₁₁-1port (SOL) 校正を用いた。

表 2 の結果が得られた条件下における各ダイオードのインピーダンスを図 4 に示す。282B は誘導性、2850・2860 は容量性のリアクタンスとなっている。282B の C_{j0} は 0.7pF であるのに対して、2850、2860 は 0.18pF と小さく、ダイオードのリアクタンスの誘導性、あるいは容量性を決定づける要因になっていると考えられる。

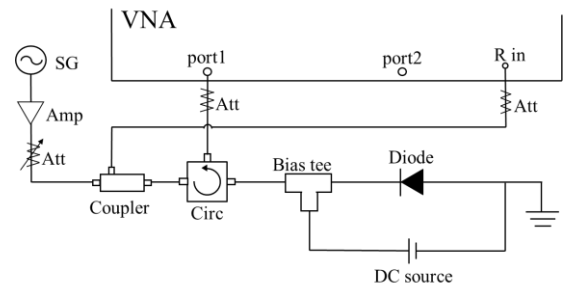


図 3：ダイオードの動作インピーダンス測定系

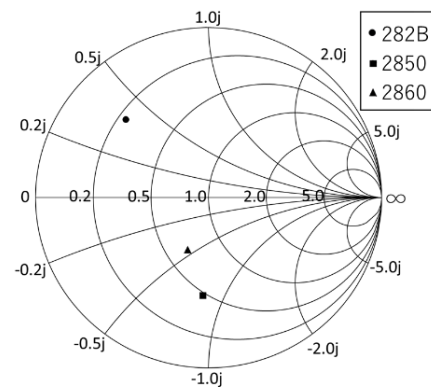


図 4：測定したダイオードの動作インピーダンス

6 結論

RF-DC 変換回路が高効率動作時、ダイオードの動作インピーダンスと、ダイオードに接続された回路の合成インピーダンスが概ね複素共役の関係にあることを示唆する解析結果が得られていた。その結果の実証するため、RF-DC 変換回路の整流素子であるダイオードについて、異なる 3 種のダイオードが単体で有する RF-DC 変換性能を実測した。得られた結果は、実験的に RF-DC 変換回路を設計して得られた最高効率とほぼ同等で、ダイオード単体の測定により、回路を構成したときに得られる最大効率を知ることができると結論付けられる。また、ダイオードの動作インピーダンスの測定系について検討し、各ダイオードの最大効率におけるインピーダンスを得るに至った。

今後は、ダイオードから見た回路側のインピーダンスが今回測定したダイオードインピーダンスと複素共役となる RF-DC 変換回路を設計し、先行研究における解析結果の実証実験を行う予定である。

参考文献

- [1] 赤田拓磨, 藤森和博, “遺伝的アルゴリズムを用いた自動設計手法による RF-DC 変換回路の高効率動作条件の探索,” 信学技報, vol. 119, no. 74, WPT2019-18, pp. 41-46, 2019 年 6 月
- [2] 笠原崇志, 藤森和博, “5.8Hz 帯 RF-DC 変換回路の変換効率における SPICE ダイオードパラメータの影響,” 電気・情報関連学会中国支部連合大会, R17-10-01, Oct.2017