

RF-DC 変換回路の変換効率に対するダイオードの接合容量の影響

山本 綱之[†] 藤森 和博[‡] 佐藤 稔[‡] 野木 茂次[‡] 真田 篤志[†]

[†] 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

[‡] 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1

E-mail: [†] {t_y, as}@yamaguchi-u.ac.jp [‡] {fujimori, sanagi, nogi}@elec.okayama-u.ac.jp

あらまし 無線電力伝送における重要な構成要素の一つに RF-DC 変換回路が挙げられる。高効率な無線電力伝送を実現するためには、高い変換効率を持つ RF-DC 変換回路の実現が必要不可欠であり、高効率化のための手法が盛んに研究されている。本稿では高効率な RF-DC 変換回路を実現するために必要なダイオードの特性を明らかにするために、マイクロ波帯で利用可能な RF-DC 変換回路の変換効率に対するダイオードの等価回路パラメータの影響について検証を行っている。

キーワード 無線電力伝送, Rectenna, RF-DC, Diode

The Influences of Junction Capacitance in Diode on Conversion Efficiency of RF-DC Conversion Circuit

Tsunayuki YAMAMOTO[†] Kazuhiro FUJIMORI[‡] Minoru SANAGI[‡]

Shigeji NOGI[‡] and Atsushi SANADA[‡]

[†] Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi, 755-8611 Japan

[‡] Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University

3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530 Japan

E-mail: [†] {t_y, as}@yamaguchi-u.ac.jp, [‡] {fujimori, sanagi, nogi}@elec.okayama-u.ac.jp

Abstract RF-DC conversion circuit is the important component in wireless power transmission technologies. For realizing highly efficient wireless power transmission, it is necessary to design the RF-DC conversion circuit with high conversion efficiency, and the designing method of the circuit is actively studied. In this paper, the influences of the diode on the conversion efficiency of the RF-DC conversion circuit are investigated to clarify the characteristic of the diode for obtaining highly efficient RF-DC conversion circuit.

Keyword Wireless Power Transmission, Rectenna, RF-DC, SPS, Diode

1. 始めに

近年、無線電力伝送に関する研究が盛んに行われている。これまでに報告されている電力伝送の方式としては、SPS (Space Power Satellite) 等の長距離を伝搬させるためにマイクロ波を用いる方式[1, 2], 比較的短距離を伝搬させるために電磁誘導や電磁界結合[3]を利用する方式等がある。

マイクロ波を用いた無線電力伝送では、マイクロ波受電用アンテナと RF-DC 変換回路とが一体となったレクテナと呼ばれる回路が利用される。高効率な無線電力伝送を実現するためには、レクテナの構成要素の一つである RF-DC 変換回路が高い RF-DC 変換効率を

持つ必要がある。我々はこれまでに、IMS バンドの一つである 5.8GHz で利用可能な RF-DC 変換回路について検討を行ってきた[4]。SPS のみならず、小型センサや RF-ID 等への応用を考え、特に小電力入力時に高い RF-DC 変換効率を実現することを目的とし、共振を利用した回路[5], ダイオードを複数個使い倍電圧回路を実現した回路[6]等を報告してきた。

小電力で高い変換効率を実現するためには、入力波をそのままダイオードに印加するのではなく、定在波を利用して大きな電圧振幅を生じさせ、その電圧をダイオードのアノード端子に印加する必要がある。また、入力ポートにおける反射電力を小さくするために、入

力ポート側と、動作状態にあるダイオード、及びフィルタや負荷抵抗を含んだ出力回路側のインピーダンスマッチングを実現する必要がある。

我々はこれまでに、LE-FDTD 法[7]を利用して最大変換効率を得るための RF-DC 変換回路の最適設計パラメータを探索し、RF-DC 変換回路の設計を行ってきた。LE-FDTD 法はマクスウェル方程式を利用した電磁界解析と等価回路解析とを結合させた解析方法であり、特にマイクロ波回路等の高周波回路設計において実測結果と極めてよく一致する解析結果が得られることから、その有効性に注目が集まっている。

小電力のマイクロ波で動作する RF-DC 変換回路においては、大電力入力時と比較してダイオードの非線形特性の影響がより顕著に表れ、また高周波であるためにダイオードやその他の回路素子の寄生パラメータが回路動作に与える影響も大きくなることから、RF-DC 変換回路の動作が複雑になる。また、基本波だけでなく高調波をも考慮した設計を行わなければ、高い変換効率をもつ RF-DC 変換回路を実現することは難しい。

より高効率な RF-DC 変換回路を実現するためには、ダイオードの構成パラメータが回路動作にどのように影響するかを把握し、ダイオードの動作に適した回路設計を行う必要がある。また、ダイオードの設計という観点から見れば、RF-DC 変換動作に適したパラメータを持つダイオードを実現する必要もある。

本稿では、我々が検討している RF-DC 変換回路における変換効率に対するダイオードの接触抵抗、及び接合容量の影響を検証し、より高効率な RF-DC 変換回路を実現するために必要なダイオード特性を示している。

2. 5.8GHz における RF-DC 変換回路

ここでは、我々がこれまでに検討を行ってきた 5.8GHz で動作する RF-DC 変換回路の構成と RF-DC 変換効率の測定結果、及び LE-FDTD 法による解析結果を示す。

2.1. 定在波利用による高効率の実現とマイクロストリップラインで構成された RF-DC 変換回路

レクテナは受電用アンテナと整流素子であるダイオード、AC カットフィルタ、負荷抵抗から構成される。レクテナはアンテナでマイクロ波を受診した後、ダイオードによって整流を行う。入力波、及びダイオードの整流動作によって生じた高調波が出力側に漏れないよう、帯域阻止フィルタのような AC カットフィルタが必要となる。そして、回路に接続された負荷により、直流電力を取り出す。

RF-DC 変換回路の変換効率は入力電力の大きさに

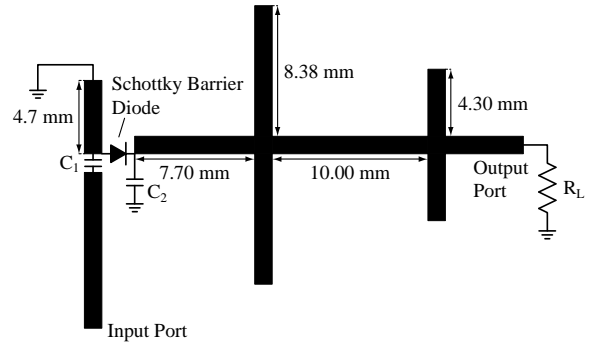


図 1: 5.8GHz 用 RF-DC 変換回路

依存することが知られている。一般的に、入力電力が小さいと入力波の振幅に対する起ち上がり電圧の影響が相対的に大きくなってしまいうため、変換効率が小さくなってしまふ。

RF-DC 変換回路の動作においてはダイオードのアノード端子とカソード端子間の電位差が非常に重要であり、高い変換効率を実現するためには、ブレイクダウンを生じさせない程度にその電位差を大きくする必要がある。これまでの検討から、電位差を大きくするには、定在波を利用することが有効であると考えられる。入力波がそのままダイオードのアノード端子に印加されるよりも、定在波により入力波振幅を大きくした方がより大きな電位差が生じると考えられる。各々の端子の電位を互いに逆相に調整した際に電位差が最大になると考えられるが、これは非常に困難である。そこで、カソード端子にキャパシタを接続して零電位とし、アノード端子の電位を大きくすることを考える。

また、回路を構成するに当たり、マイクロストリップラインを利用することとした。マイクロストリップラインは設計がし易く、ダイオードなどのチップ素子の実装も容易であることから、RF-DC 変換回路を構成するには適していると考えられる。

我々がこれまでに検討を行ってきた 5.8GHz で動作する RF-DC 変換回路を図 1 に示す。

回路は厚さ 0.5mm、比誘電率 3.4 のレジン基板上に構成されている。回路を構成しているマイクロストリップラインは 5.8GHz において特性インピーダンスが 50Ω となるように調整されている。整流素子であるダイオードは、5.8GHz という高周波に追随させること、低い起ち上がり電圧が必要なことを考慮し、ショットキーバリアダイオードとした。

図 1 で示している回路の入力ポートには、DC がアンテナ側に漏洩することを防ぐために DC カット用キャパシタ C1 が接続されている。C1 の後には一方が短絡された“short-line”と呼ばれる線路が接続されている。入力されたマイクロ波は DC カット用キャパシタを通過した後、“short-line”の短絡されている側において反射され、“short-line”上に定在波が発生する。ダイ

オードのカソード端子にはマイクロ波においてカソード端子を零電位に調整するためのキャパシタ C_2 が接続されている。出力ポートには、基本波である 5.8GHz, 及び二次高調波である 11.6GHz を出力負荷に漏洩させないための帯域阻止フィルタが設置されている。

2.2. RF-DC 変換回路の変換効率

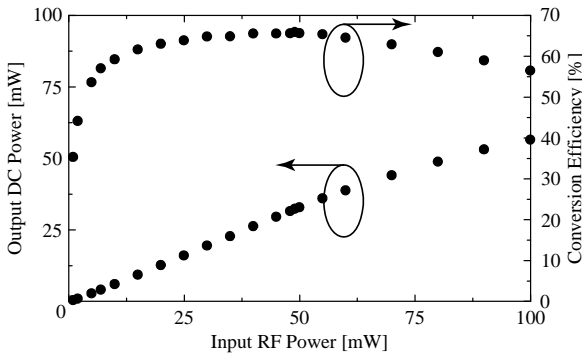


図 2: RF-DC 変換回路における入力電力特性の実測結果

図 1 に示された RF-DC 変換回路を実際を作成し、RF-DC 変換効率を測定した。なお、 C_1 と C_2 はそれぞれ 1pF, 3pF とした。

図 2 に作成した RF-DC 変換回路における入力電力特性の測定結果を示している。なお、変換効率は回路に入力された AC 電力に対する出力された DC 電力の比である。

図 2 で示されているように、変換効率は入力電力依存性があり、作成した RF-DC 変換回路は入力電力 49mW 時に最大変換効率 69% となっている。

2.3. RF-DC 変換回路解析における LE-FDTD 法の有効性

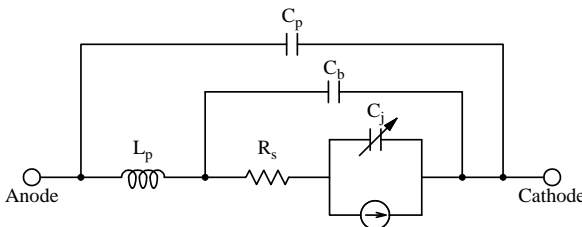


図 3: ダイオードの等価回路

我々はこれまでに LE-FDTD 法による RF-DC 変換回路の解析を行ってきた。

LE-FDTD 法はマクスウェル方程式を利用した電磁界解析と等価回路解析とを結合させた解析方法である。

表 1: ダイオードの等価回路パラメータ値

Parameters	Value	Unit
V_{bi}	0.4	V
BV	5.63	V
I_s	1.33×10^{-8}	A
N	1.05	---
TT	0.0	ns
M	0.5	---
R_s	8.04	Ω
$C_j(0)$	0.192	pF
L_p	0.164	nH
C_b	0.0913	pF
C_p	0.114	pF

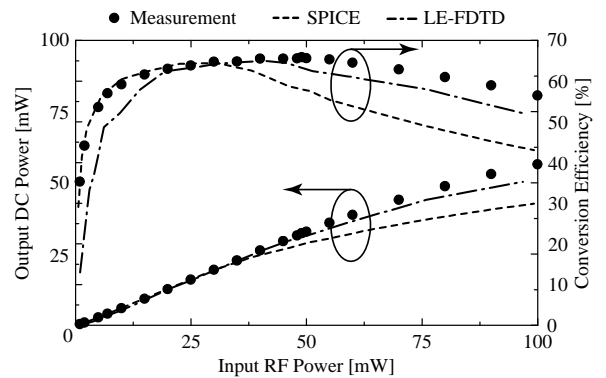


図 4: RF-DC 変換回路における入力電力特性の解析結果

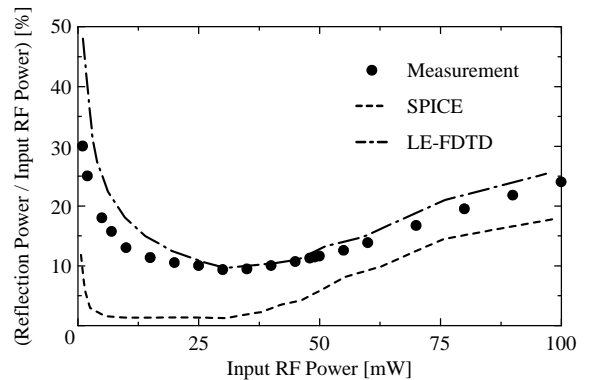


図 5: RF-DC 変換回路の入力ポートにおける反射電力の解析結果

これまでに、寄生パラメータを考慮していない回路素子の等価回路解析と FDTD 法とを結合させたもの[8]や、一つの素子のみが実装されている回路を LE-FDTD 法で解析したもの[9]が報告されているが、我々は、回路素子とマイクロストリップ線路との結合や回路素子相互の結合を含めた解析を行っており、RF-DC 変換回路解析時の LE-FDTD 法の有効性を確認している。

RF-DC 変換回路を LE-FDTD 法で解析するに当たり、ダイオードのモデルは図 3 で示す等価回路[10]を用いている。図 3 において、 R_s , C_j , L_p , C_b , C_p はそれぞれ接触抵抗, 接合容量, 寄生インダクタンス, ビームリードダイオードに起因する寄生キャパシタンス, 及

び寄生キャパシタンスである。これらの等価回路パラメータ値は、ダイオードの静特性測定、及び VNA による入力インピーダンス測定より算出した。表 1 にデータシートに記載されているダイオードの SPICE パラメータ値、及び測定結果から算出した等価回路パラメータ値を示す。

図 4 は RF-DC 変換回路の入力電力特性を LE-FDTD 法で解析した結果である。比較のために同じ回路を等価回路シミュレータである SPICE を用いて解析した結果も併記している。また、図 5 には入力ポートにおける反射電力と入力電力との比について、LE-FDTD 法と SPICE とで解析した結果を示している。

図 4 を見ると、実測結果に対して LE-FDTD 法、及び SPICE による解析結果は良好に一致しているように見える。特に、入力電力が小さい領域においては、SPICE の解析結果は実測結果と非常に良く一致しているように見える。しかし、図 5 を見ると、SPICE による解析結果、特に入力電力が小さい場合の解析結果は実測結果とは大きく異なっていることから、SPICE による解析では RF-DC 変換回路の動作を正確にはシミュレート出来ていないと考えられる。LE-FDTD 法による解析では、入力電力特性、及び反射電力の解析結果が共に実測結果とよく一致しており、その有効性を確認することが出来る。

3. ダイオードの構成要素が RF-DC 変換回路の動作に与える影響

3.1. 接触抵抗のみを変化させた場合

まず、ダイオードの接触抵抗 R_s が RF-DC 変換回路の動作に与える影響を検証した。

図 6 に、表 1 で示した R_s の値を基準として、 $[0.25R_s, 0.5R_s, 2R_s, 4R_s]$ の場合の変換効率を示す。図 6 において、横軸は入力電圧値、縦軸は負荷抵抗を表している。また、変換効率は色が白くなる程大きな値を示している。なお、接触抵抗以外のダイオードの等価回路パラメータは表 1 で示している値である。

図 6 を見ると、 R_s の値が小さい場合は最大変換効率が高くなる傾向にあるが、大きな違いは見られない。

次に、 R_s を流れる電流波形を図 7 に示す。黒の実線は $0.25R_s$ の場合、赤の実線は $4R_s$ の場合を表している。両者の波形を比べると電流値に大きな違いはない。

以上より、RF-DC 変換回路が動作している際には接触抵抗を流れる電流があまり大きくなく生じる損失が小さいことから、接触抵抗が変換効率に与える影響は大きくないと考えられる。

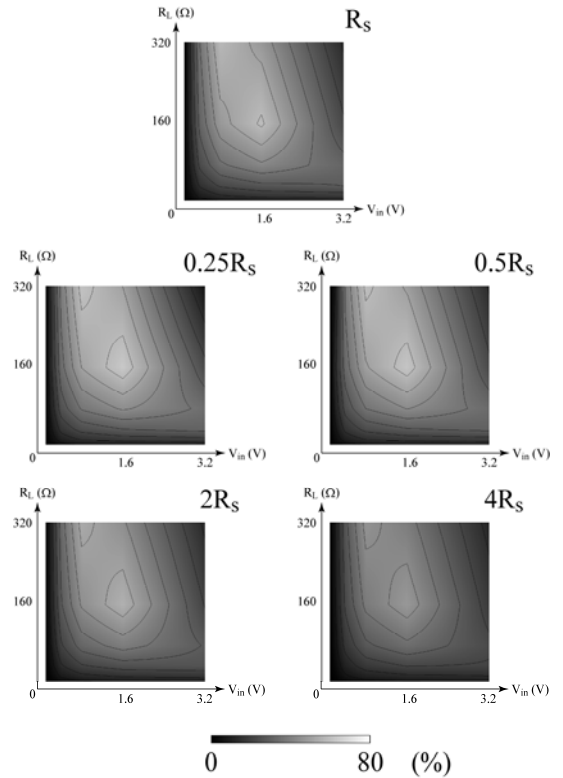


図 6: 接触抵抗を変化させた場合の変換効率

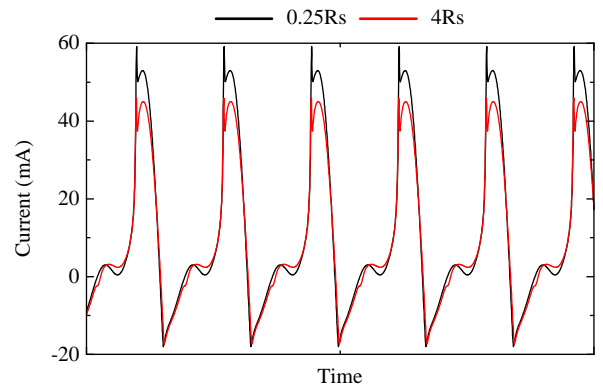


図 7: R_s を流れる電流の波形

3.2. 接合容量のみを変化させた場合

次に、ダイオードの接合容量 C_j が RF-DC 変換回路の動作に与える影響を検証した。

図 8 に、表 1 で示した C_j の値を基準として、 $[0.25C_j, 0.5C_j, 2C_j, 4C_j]$ の場合の変換効率を示す。なお、接合容量以外のダイオードの等価回路パラメータは表 1 で示している値である。

図 8 を見ると、 C_j の値が小さい程最大変換効率が大きくなっており、 $4C_j$ の場合、変換効率は零に近い値を示している。

次に、 C_j を流れる電流波形を図 9 に示す。黒の実線は $0.25C_j$ の場合、赤の実線は $4C_j$ の場合を表している。 $0.25C_j$ の場合はダイオードが ON 状態になるまでの間、

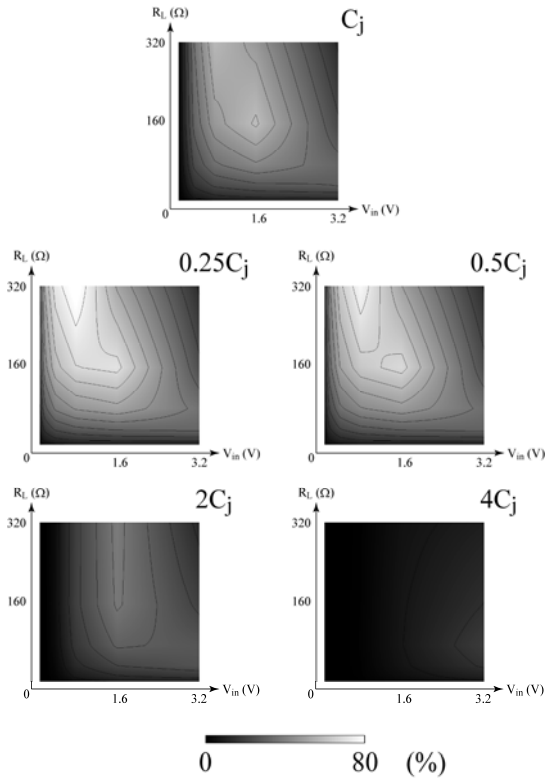


図 8: 接合容量を変化させた場合の変換効率

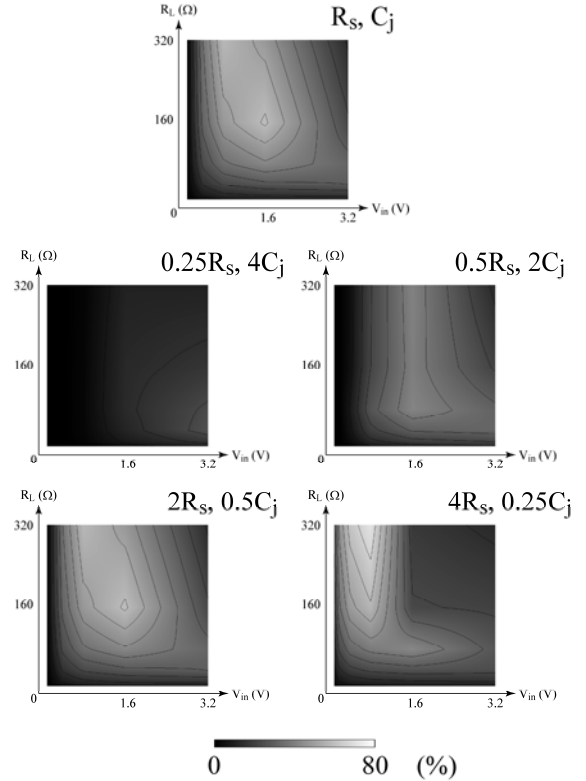


図 10: 接触抵抗と接合容量を共に変化させた場合の変換効率

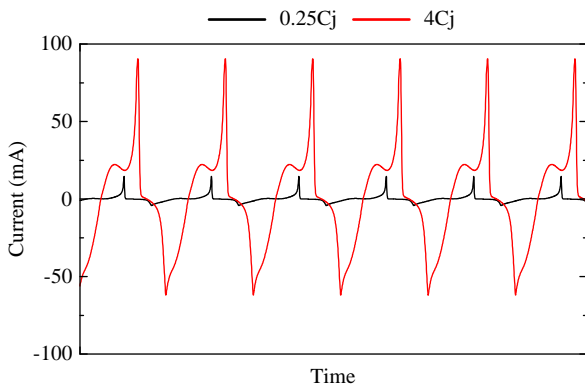


図 9: C_j を流れる電流の波形

一時的に順方向に電流が流れた後はほぼ電流が流れていない。逆方向に流れる漏洩電流もほとんどない。

一方、 $4C_j$ の場合は順方向電流、及び漏洩電流が共に大きくなっていることが分かる。

以上より、接合容量値が大きくなると漏洩電流が増加することから変換効率が大きく下がってしまうと考えられ、接合容量が変換効率に与える影響は接触抵抗と比較して大きいと言える。

3.3. 接触抵抗と接合容量を共に変化させた場合

一般的には、接触抵抗が小さい場合は接合容量は大きく、接触抵抗が大きい場合は接合容量は小さくなるため、先の検討のようにそれぞれを独立に変化させる

ことは困難である。そこで、接触抵抗と接合容量との積が一定となるように両者の値を変化させた場合の変換効率の変化を検証した。

図 10 に、表 1 で示した R_s 、 C_j の値を基準として、 $[0.25R_s \ \& \ 4C_j, 0.5R_s \ \& \ 2C_j, 2R_s \ \& \ 0.5C_j, 4R_s \ \& \ 0.25C_j]$ の場合の変換効率を示す。なお、接触抵抗、接合容量以外のダイオードの等価回路パラメータは表 1 で示している値である。

図 10 を見ると、 R_s が小さく C_j が大きい場合は変換効率が極端に低く、 C_j が小さくなるに従って最大変換効率が大きくなっていることが分かる。この結果は前の 2 つの結果と同様の傾向を示しており、変換効率に対する影響は R_s よりも C_j が大きいと言える。

4. まとめ

本稿では、ダイオードを構成している要素の一つである接触抵抗と接合容量が RF-DC 変換回路の変換効率に対してどのような影響を及ぼすかについて、LE-FDTD 法を用いて検証を行った。検証の結果、接触抵抗を通過する電流は接触抵抗値が変化してもあまり変化しないが、接合容量を通過する電流は接合容量値が変化すると大きく変化し、容量値が大きくなると漏洩電流が増大し、変換効率低下の原因となることが分かった。

これらの結果から、より高効率な RF-DC 変換回路を

実現するためには、小さな接合容量を持つダイオードを利用して RF-DC 変換回路を構成することが有効であると考えられる。

文 献

- [1] T. ITO, Y. FUJINO, and M. FUJITA, "Fundamental experiment of a rectenna array for microwave power reception," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E76-B, no.12, pp.1508-1513, Dec. 1993.
- [2] W.C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol.MTT-32, no.9, pp.1230-1242, Sept. 1984.
- [3] 小坂修平, 小森琢也, 栗井郁雄, "共鳴型ワイヤレス給電におけるスパイラル共振器の選択," *電子情報通信学会 2010 年ソサイエティ大会講演論文集*, B-1-14, p.14, Sept. 2010.
- [4] T. YAMAMOTO, K. FUJIMORI, M. SANAGI, and S. NOGI, "Design of highly efficient and compact RF-DC conversion circuit at mW-class by LE-FDTD method," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E93-C, no.8, pp.1323-1332, Aug. 2010.
- [5] T. YAMAMOTO, K. FUJIMORI, M. SANAGI, and S. NOGI, "The mW-class high efficient RF-DC conversion circuit using the resonance structure," *Proc. 2007 International Symp. Antennas & Propag.*, 3B1-4, pp.660-663, Aug. 2007.
- [6] T. YAMAMOTO, K. FUJIMORI, M. SANAGI, and S. NOGI, "The design of mW-class RF-DC conversion circuit using the full-wave rectification," *Proc. 37th European Microwave Conf., EuMC Poster02-19*, pp.905-908, Oct. 2007.
- [7] P. Ciampolini, P. Mezzanotte, L. Roselli, D. Sereni, R. Sorrentino, and P. Torti, "Simulation of HF circuits with FDTD technique including non-ideal lumped elements," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol.2, pp.3610364, May 1995.
- [8] J.-Y. Lee, J.-H. Lee, S.-H. Hwang, and H.-K. Jung, "Numerical analysis of CRLH transmission line using lumped element FDTD method," *IEEE Antennas Propag. Society Int. Symp.* 2006, pp.4615-4618, 2006.
- [9] B.P. Koh, I.J. Craddock, P. Urwin-Wright, and C.J. Railton, "Lumped device modeling with FDTD including packaging effects," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol.2, pp.1139-1142, June 2002.
- [10] G.D. Vendelin, A.M. Pavio and U.L. Rohde, "Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques," pp.51-101, Wiley-Interscience, USA., 2005.