

24GHz 帯整流回路の MMIC 化

波多野 健[†] 篠原 真毅[†] 三谷 友彦[†] 関 智弘[‡] 川島 宗也[‡]

[†] 京大大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

[‡] NTT 未来ねっと研究所 〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

E-mail: [†] {k-hatano, shino, mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp

[‡] {seki.tomohiro, kawashima.munenari}@lab.ntt.co.jp

あらまし マイクロ波無線電力伝送技術の地上システムへの応用範囲を広げるためには、マイクロ波無線電力伝送の高周波化が必要である。本研究ではこれまでに、ディスクリート回路での 24GHz 帯整流回路の開発を行ってきた。本稿では更なる小型化を目指して 24GHz 帯整流回路の MMIC 化を行った。出力フィルタに F 級負荷回路を採用し、回路面積 2.3mm^2 の小型整流回路を実現した。入力電力 194mW、負荷抵抗 120Ω のとき最大変換効率 48.0% が得られた。さらにテフロン基板を用いてパッチアンテナを製作し、MMIC 実装レクテナを開発した。 2×2 並列の MMIC 実装レクテナアレイを用いた 24GHz 無線電力伝送実験を行い、負荷に使用したモーターの駆動に成功した。

キーワード マイクロ波無線電力伝送、整流回路、MMIC

Development of 24GHz-Band MMIC Rectenna

Ken HATANO[†] Naoki SHINOHARA[†] Tomohiko MITANI[†]

Tomohiro SEKI[‡] Munenari KAWASHIMA[‡]

[†] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011 Japan

[‡] NTT Network Innovation Laboratories, NTT corporation 1-1Hikarinooka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-0847 Japan

E-mail: [†] {k-hatano, shino, mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp

[‡] {seki.tomohiro, kawashima.munenari}@lab.ntt.co.jp

Abstract Microwave Power Transmission (MPT) in high frequency is essential to broaden a range of MPT applications. Our research group has developed discrete 24GHz-band rectifier. In this paper, we developed small-sized MMIC 24GHz-band rectifier. We adopted class-F load as an output filter, and the area of the MMIC rectifier was 2.3mm^2 . We obtained the RF-dc conversion efficiency of 48.0% when the input power was 194mW and the resistive load was 140Ω . We fabricated patch antenna with the Teflon substrate and developed an MMIC-mounted rectenna. We conducted a 24GHz MPT experiment with a 2×2 MMIC-mounted rectenna array, and succeeded motor drive by 24GHz MPT.

Keyword Microwave Power Transmission, rectifier, MMIC

1. 研究背景と目的

近年、無線電力伝送技術が多くの注目を集めている。無線電力伝送技術は大きく分けて電磁誘導方式、磁気共鳴方式、マイクロ波方式の 3 つに分けられる。本研究では長距離電力伝送が可能という利点をもつ、マイクロ波方式に関する研究を行っている。我々のグループが提案する、マイクロ波無線電力伝送と無線通信を同時に行うワイヤレスシステムのイメージ図を図 1 に示す。室内に置かれたゲートウェイから、中継措置を介して隣接する部屋へ無線通信を行う。その際に必要な中継装置を駆動させる電力を、ゲートウェイからのマイクロ波無線電力伝送によって供給するというシステムであり、無線通信と無線電力伝送をサブミリ波/

ミリ波帯で行うことを目標としている。サブミリ波/ミリ波帯で通信と電力伝送を実現することにより、広帯域な通信やシステムの小型化を達成できる。そこで、本研究ではターゲットとする周波数を 2.4GHz、5.8GHz よりも高い ISM バンドである 24GHz とし、24GHz 帯無線電力伝送に必要なシングルシャント型整流回路の開発に取り組んでいる。シングルシャント型整流回路とは高調波処理を行うことにより、ダイオード一つで理論上 100% の変換効率を実現できる全波整流回路である [1][2]。本研究ではこれまでに、高周波においても高い変換効率を実現するため、出力フィルタに F 級負荷回路を用いたディスクリート回路での F 級負荷整流回路の開発を行ってきた [3][4]。整流回路の高

周波化により回路の小型化には成功したが、ディスクリット回路では小型化に限界がある。そこで本稿では高誘電率な半導体基板を使用した 24GHz 帯整流回路の MMIC 化を行った。将来的には通信回路も同様に MMIC で実現することで、無線電力伝送と無線通信を同時に行うモジュールを小型化されたワンチップで実現することが可能となる。

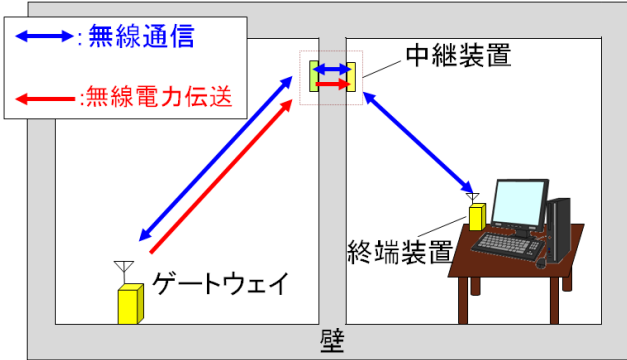


図 1：無線電力伝送と無線通信を同時に行う無線システム

2. MMIC 整流回路の設計と製作

回路解析シミュレータ ADS を使用して 24GHz 帯 F 級負荷装荷整流回路の設計および製作を行った。

2.1. F 級負荷回路の設計

高調波処理を行うシングルシャント型整流回路においては、出力フィルタの入カインピーダンスを基本波および奇高調波に対しては ∞ 、偶高調波に対しては 0 にする必要がある。しかし現実の整流回路においては 3 次高調波までの処理が必要であり、それ以上の高調波処理は変換効率に影響しないということが分かっている [3]。ADS を用いて設計した、F 級負荷回路のシミュレーションモデルを図 2 に示す。図 2 に示す F 級負荷回路は、基本波と 2 次高調波における $\lambda/4$ 線路により構成されている。このシミュレーションモデルで計算した S パラメータを図 3 に示す。基本波と 2 次高調波では、それぞれ $|S_{21}| = -35.7\text{dB}$ 、 $|S_{21}| = -37.0\text{dB}$ となり、基本波および 2 次高調波が共振周波数となっていることが分かる。しかし 69GHz で強い共振が発生しているため、3 次高調波である 72GHz においては $|S_{21}| = -8.96\text{dB}$ となり、基本波、2 次高調波と比べると $|S_{21}|$ が大きくなった。これは波長短縮による影響であると考えられる。次に図 2 で設計した F 級負荷回路のポート 1 からみた入カインピーダンス Z_{in} の大きさを図 4 に示す。基本波においては $\text{mag}(Z_{in}) = 3.54 \times 10^3 \Omega$ と大きくなり、2 次高調波においては $\text{mag}(Z_{in}) = 7.65 \Omega$ と小さくなった。それに対して 3 次高調波においては $\text{mag}(Z_{in}) = 269 \Omega$ となり、基本波に比べて小さい。3 次高調波に対する $\lambda/4$ の長さを有するスタブを追加するこ

とで、72GHz における $|S_{21}|$ および $\text{mag}(Z_{in})$ が改善されることが予想されるが、回路面積の増加を防ぐため、図 2 に示す F 級負荷回路モデルを採用して整流回路を設計した。

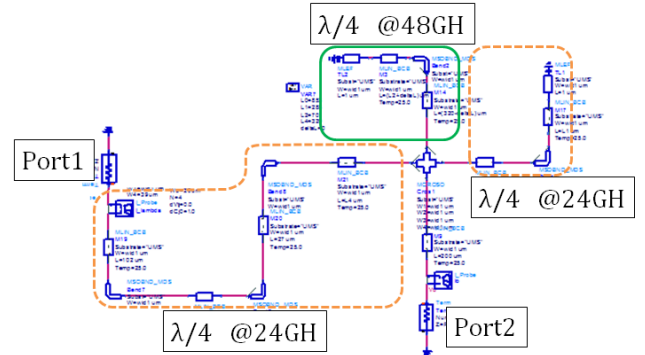


図 2：F 級負荷回路シミュレーションモデル

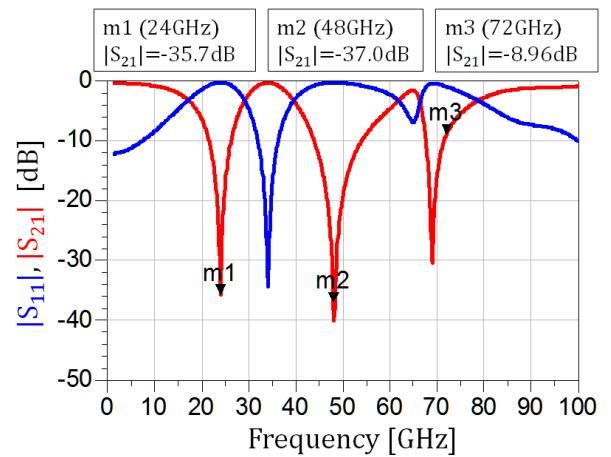


図 3：F 級負荷回路の S パラメータ

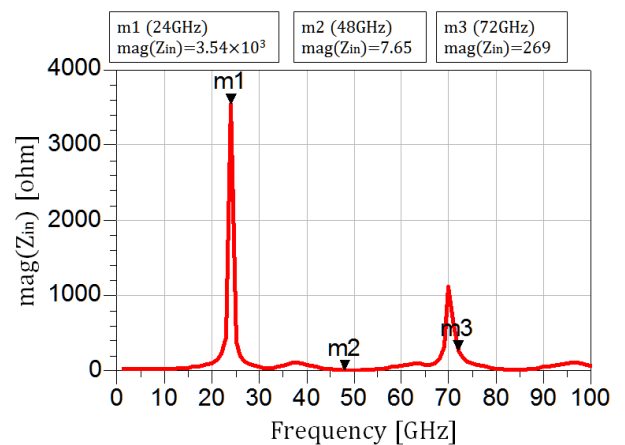


図 4：F 級負荷回路の入カインピーダンス

2.2. 整流回路のレイアウトとその製作

2.1 節で設計した F 級負荷回路を採用した MMIC 整流回路のレイアウトを図 5 に示す。設計した整流回路は整合回路、カップリングコンデンサ、ダイオード、

F 級負荷回路から構成されており、ポート 1 が入力ポート、ポート 2 が出力ポートである。ダイオードは 2 並列とした。このレイアウトで製作した整流回路の写真を図 6 に示す。回路面積は 2.3mm^2 である。

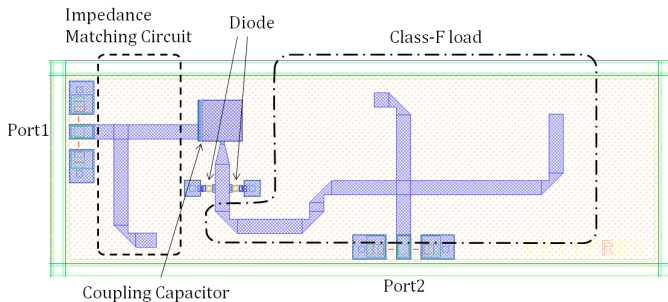


図 5 : MMIC 整流回路のレイアウト

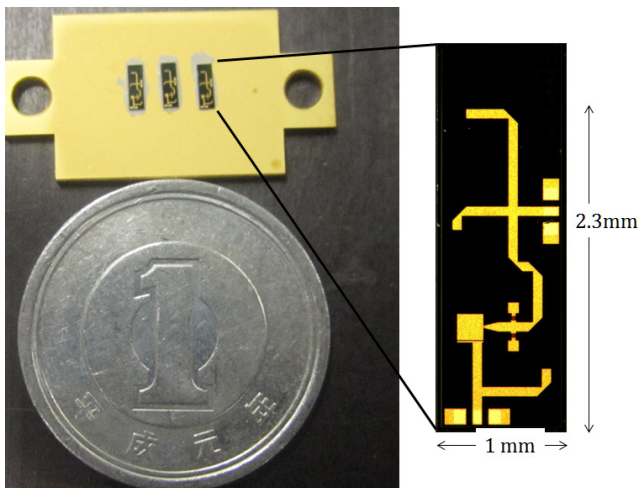


図 6 : 製作した MMIC 整流回路

3. MMIC 整流回路の変換効率および反射率の計測実験

製作した整流回路の変換効率及び反射率を計測した。入力電力を 30mW で一定としたときの負荷抵抗に対する変換効率および反射率の変化を図 7 に示す。図 7 には実験結果と、ADS によるシミュレーション結果を同時に示した。変換効率に関しては実験とシミュレーションで良く一致した結果となったが、反射率に関しては誤差が大きくなった。次に負荷抵抗を 120Ω としたときの入力電力に対する変換効率および反射率の変化を図 8 に示す。図 7 と同様に変換効率に関してはシミュレーションと実験が良く一致した。入力電力 194mW のときに最大変換効率 48.0% が得られた。次に 5 つの同種類の回路の実験結果を図 9 に示す。図 9 には負荷抵抗を 120Ω としたときの入力電力に対する変換効率と反射率の変化を示した。回路のバラつきが非常に小さく安定した変換効率を実現できていることが分かる。

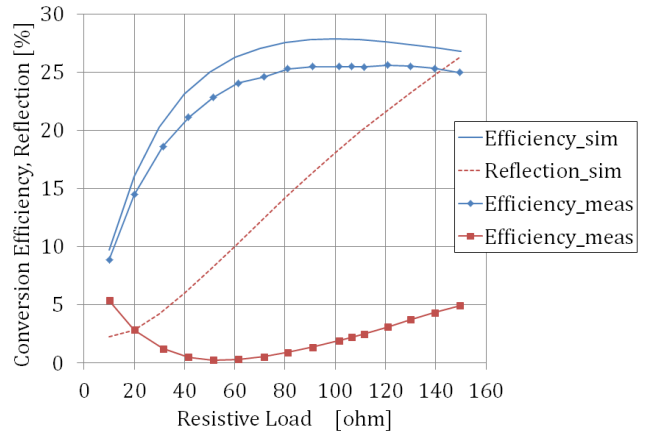


図 7 : 入力電力を 30mW としたときの負荷抵抗に対する変換効率および反射率の変化

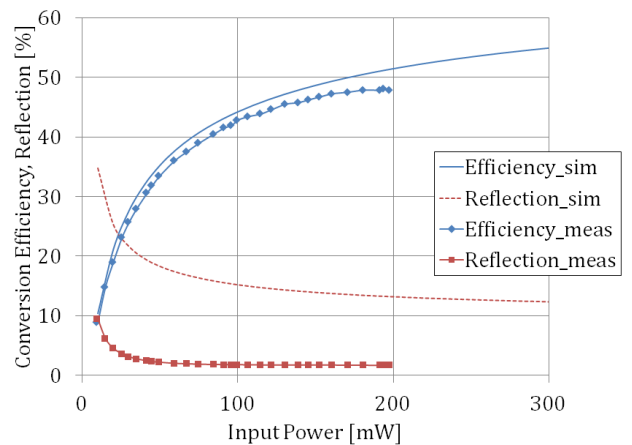


図 8 : 負荷抵抗 120Ω としたときの入力電力に対する変換効率および反射率の変化

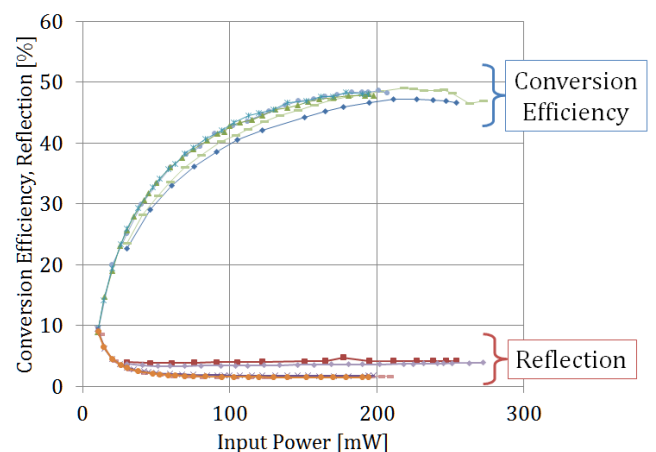


図 9 : 5 つの同種類の回路の実験結果

4. MMIC 実装レクテナによる 24GHz 無線電力伝送実験

製作した MMIC 整流回路を実装した MMIC 実装レクテナを開発し、 24GHz 無線電力伝送実験を行った。

4.1. MMIC 実装レクテナの製作

基板厚 0.2mm、比誘電率 2.6、 $\tan \delta = 0.002$ のテフロン基板 (NPC-F260A) を使用してパッチアンテナを製作し、MMIC を実装した。製作した MMIC 実装レクテナを図 10 に示す。MMIC とテフロン基板は銀ペーストによって固定し、整流回路の入力ポートと出力ポートは、ボンディングワイヤによってテフロン基板と接続した。また MMIC とパッチアンテナのグラウンドを導通するためにヴィアグラウンドを 5 つ用意した。

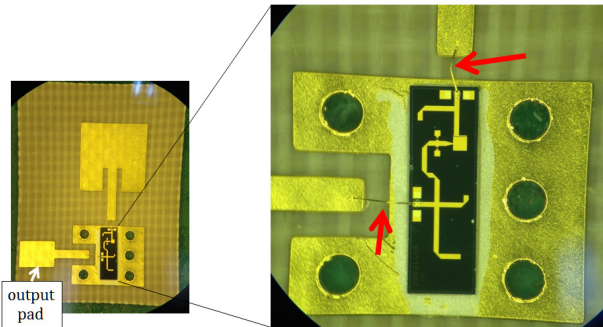


図 10 : MMIC 実装レクテナ

4.2. 24GHz 無線電力伝送実験

MMIC 実装レクテナを用いて図 11 に示すような 2×2 レクテナアレイを製作した。レクテナの出力パッドとグラウンド面にワイヤをはんだ付けし、4 並列として負荷に接続した。負荷にはタミヤ社のソーラーモーター 02MABUCHI RF-500TB を使用した。送信アンテナには ATM 社のホーンアンテナ (Model No.42-442-6) を使用した。ホーンアンテナから 790mW の電力を放射したところ、出力直流電力は 2.47mW であり、自力ではモーターは始動しなかった。モーターの停止時は入力インピーダンスが低く、入力インピーダンスが低いと図 7 より整流回路の変換効率が下がる。したがって始動させるために十分な電力を供給できなかったと考えられる。しかし、手動でモーターを始動させるとその後はレクテナによって整流した電力で回転を維持することができた。モーター回転時におけるアンテナ周辺の実験系の写真を図 12 に示した。モーター回転時の出力直流電力は 4.86mW であった。

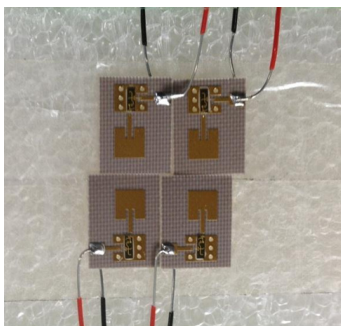


図 11 : MMIC 実装レクテナを用いたレクテナアレイ

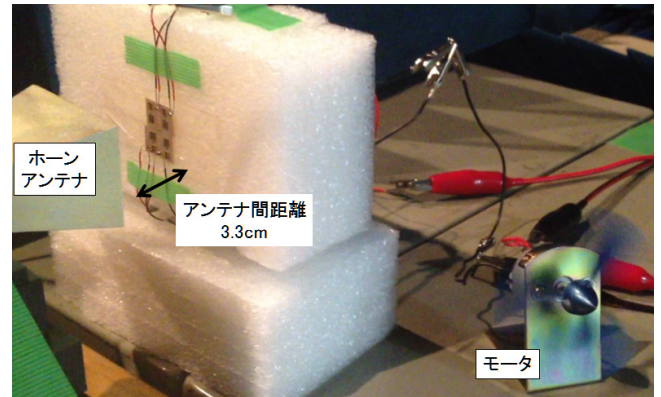


図 12 : 無線電力伝送実験の実験系写真

5. まとめ

提案する電力伝送と通信を同時に行う無線システムにおいて、通信回路との MMIC によるワンチップ化を目指して 24GHz 帯 F 級負荷装荷整流回路の MMIC 化を行った。回路面積 2.3mm^2 の小型整流回路の開発に成功し、最大変換効率は入力電力 194mW、負荷抵抗 120Ω の時 48.0% となった。また方形パッチアンテナを設計し MMIC 整流回路を実装した MMIC 実装レクテナを製作した。4 並列の MMIC 実装レクテナを使用した 24GHz 無線電力伝送実験を行い、モーターを駆動させることに成功した。今後は無線システムに使用する通信回路の駆動を想定した整流回路の開発を行う。

文 献

- [1] R. J. Gutmann and J. M. Borrego, "Power Combining in an Array of Microwave Power Rectifier," IEEE Trans. MTT, Vol. 27, No. 12 pp. 958-968, 1979.
- [2] 伊藤精彦, "太陽発電衛星受電用地球基地局端末素子「レクテナ」に関する基礎的研究," 昭和 58 年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書, pp. 27-38, Nov. 1984.
- [3] K. Hatano, N. Shinohara, T. Mitani, T. Seki, M. Kawashima, Development of Improved 24GHz-band Class-F Load Rectennas, Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS), 2012 IEEE MTT-S International, pp163-166, May 2012.
- [4] 波多野健, 篠原真毅, 三谷友彦, "24GHz 帯整流回路のためのコネクタおよびダイオードのモデル化検討," 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 信学技報 MW2012-131, pp.25-30, Dec. 2012.