

Development of 94 GHz millimeter wave rectifier

Kohei Shimamura, Waku Hatakeyama, Kosumo Matsui, Yuki Okamoto, Ayako Mizushima,
Kohei Fujiwara, Hidehiko Okamoto, Masatoshi Suzuki, Shunsuke Minakawa, Kimiya Komurasaki

¹Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki,
305-8573 Japan

²Graduate school of Engineering, the University of Tokyo 7-3-1 Hongo, bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033 Japan

³Tokyo Metropolitan industrial technology research institute, 2-4-10, Aomi, Koto-ku, Tokyo 135-0064, Japan

E-mail: shimamura@kz.tsukuba.ac.jp

Abstract Research on RF energy wireless power transfer (WPT) is actively carried out. Now, microwave is used mainly as RF energy, since it is hard to be attenuated by atmosphere. Microwave WPT system is used to like Space Solar Power System (SSPS). Millimeter wave is higher frequency than microwave. It has such a high straightness that transmitted beam is not spread and receiving elements can be small. Currently, 94GHz is used as, for example, anti-collision radars and weather satellites. However, due to the lack of high power transfer circuit between oscillator which has waveguide interface and rectifying circuit which usually consists of planar waveguide, high power millimeter wave rectifying antenna (rectenna) has not been developed. In this research, a microstrip antenna (MSA) and rectifier for 94GHz WPT was developed using MEMS process. MSA can be easily manufactured by putting a metal patch on a printed board. Also, considering insert loss of DC block, diode series insertion rectifier was used as rectifier. For performance evaluation finline is used to connect waveguide and microstrip line (MSL).

We developed a rectifier circuit of 94GHz by MEMS, and got $38 \pm 8\%$ of rectification efficiency at the time of 104 mW, load resistance 120 Ω . In addition, the output electricity achieved a maximum of 39 mW and succeeded in the development of the rectifier circuit which worked with the electricity that was higher than the precedent study of the other millimeter-wave rectifier circuit.

94 GHz ミリ波整流回路の試作

嶋村耕平¹ 畠山湧² 松井宇宙² 岡本 有貴² 水島彩子² 藤原康平³ 山岡英彦³
鈴木雅敏¹ 皆川俊介¹ 小紫公也²

1 筑波大学システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台1丁目1-1

2 東京大学工学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

3 東京都立産業技術研究センター 〒135-0064 東京都江東区青海2丁目4-10

E-mail: shimamura@kz.tsukuba.ac.jp

あらまし 94 GHz の整流回路を MEMS により製作し、入力電力が 104 mW、負荷抵抗が 120 Ω のとき、整流効率 38±8% を得た。また、出力電力は最高 39 mW を達成し、他のミリ波帯整流回路の先行研究よりも高い電力で動作する整流回路の製作に成功した。

キーワード MEMS, ミリ波, 整流回路, フィンライン, CPW

1. 緒言

近年、無人飛行体の導入が盛んになっている。例えばドローンなどであるがそのミッションはバッテリーの問題で制約されているのが現状である。そこで非接触および、長距離に電力を送るために、マイクロ波による電力の無線伝送技術の研究が行われている[1]。本研究では、マイクロ波の中でも周波数の高いミリ波での伝送に着目する。マイクロ波の特徴として、周波数が高いとビーム散逸が少ないということがある。これにより受信面積の削減が図れ、重量の制限があるドローン等には有効なアプローチだと考えられる。ミリ波で送られた電力は交流であるため、直流で用いられるモータなどを負荷とするときは整流させる必要がある。過去の研究で一般的に用いられている整流回路は誘電体基板上に貼り付けた導体とダイオードなどの回路素子で構成される。マイクロ波回路の特性上、その大きさは波長に比例するため、ミリ波回路では非常に微小になることが考えられる。Lorenz ら[2]は、ミリ波帯である 94 GHz において整流回路を製作している。しかしこれは出力電力値が 0.65 mW と低電力向けである。過去の研究ではミリ波帯における大電力向けの整流回路はまだ無い。

したがって、本研究ではミリ波帯である 94 GHz において大電力用整流回路の製作を目的とする。微小な伝送線路に対し Micro Electro Mechanical Systems(以下 MEMS) を用いることで製作した。整流回路の入力電力が 104 mW、負荷抵抗が 120 Ω のとき、整流効率 38±8% を得た。また、出力電力は最高 39 mW を達成し、過去の研究よりもミリ波帯において、大電力向けの整流回路を製作できたといえる。

2. MEMS による回路製作

本研究で使用している 94 GHz 帯の波長は真空中において約 3.2 mm であり、従来の回路製作方法では製造公差などを満たすことが難しいために、本研究では MEMS を用いて回路製作を行っている。表面に Al を 500 nm 程度蒸着させたシリコンウェーハを用意し、感光性のレジストを塗布したのち高速電子線描画装置でパターンを描く。その後 TMAH 液で現像し、混酸アルミ液で Al を溶かしシリコンを露出させる。その後シリコン露出装置でシリコンを削り、穴を開け、マスクを完成させる。マスクを完成させたのち、誘電体基板(NPC-F220, 日本ピラー工業製)を重ね高真空蒸着装置にて Al を基板に蒸着させる。蒸着する Al の厚みは、94 GHz における表皮厚さの 4 倍以上を基準とする。本研究では使用した基板が柔らかく基板に直接電子線描画をすることが難しいため、まずマスクを製作してから蒸着を行うという手法を用いている。

3. フィンラインによる変換効率計測

本研究では回路と導波管の接続にミリ波集積回路用に提案されているフィンラインを採用した[3][4]。これはミリ波回路が微小なため、SMA コネクタ等の変換器では接続が難しいこと及び回路上のパターンのみで実現できるため、導入コストが SMA コネクタ等よりも安く済むことが利点として挙げられる。

このフィンラインによる導波管-マイクロストリップライン（以下 MSL）変換効率は、試験用フィンライン（導波管-MSL-導波管の構造を有する）を用いて測定される。測定には 94 GHz の発振器とヘテロダイン検波器（TR-10/94/x, ELVA-1 社製）を用いた。発振器から導波管形状で送られた波は -13 dB の減衰器を通り、試験用フィンラインを通ったのち 15 dBi のホーンアンテナから空間中に放射される。その後 30 cm 離れた 4.2 dBi のスロットアンテナで受信し、検波器へと入り電力を測定する。フィンラインを直接検波器へつなぐと検波器へ入る電力が大きくなりすぎることが、アンテナを介している理由である。減衰器から直接ホーンアンテナにつないだ場合の受信電力と比較することでフィンラインによる透過効率を見積もることができ、測定より 26.4 % であるとわかった。

4. 整流回路効率計測

本研究では、ミリ波帯での DC ブロック挿入損失が大きいことを考慮し、DC ブロックを使わないダイオード直列挿入型の整流回路を使用した。入力側のバンドパスフィルタは、ダイオードで発生する高調波がフィンライン部へ戻り損失となるのを防ぐ。出力側のバンドパスフィルタは、直流成分を通すことでダイオードでの変換効率を上昇させる [5]。バンドパスフィルタにはともにスタブが用いられている。また本研究では、比較的高耐電力使用可能なダイオード（MA4E1310, MACOM 社製）を用いて高入力電力で整流を行っている。計測にはフィンラインでの変換効率測定と同じ発振器及び検波器を用いた。図 1 に入力電力と整流効率の関係を示す。入力電力が 104 mW、負荷抵抗が 120 Ω のとき、整流効率 38±8% を得た。本研究で得られた整流回路の出力電力と周波数の関係及び整流効率と周波数の関係を先行研究と比較すると、効率・出力とも現時点で最高性能を達成した。 [2][6-13].

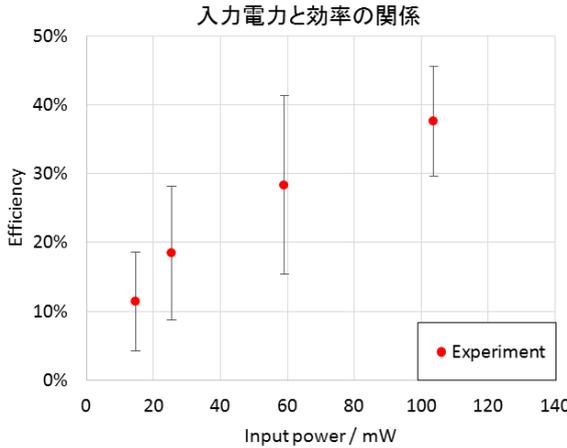


Fig. 1 入力電力と整流効率の関係

5. 結言

94 GHz の整流回路を MEMS により製作し評価を行った。

- ・導波管との接続のためにフィンラインを製作した。この透過率は 26.4 % であった。
- ・製作した整流回路は入力電力が 104 mW、負荷抵抗が 120 Ω のとき、整流効率 38±8 % を得た。また出力電力は最高 39 mW を達成し、他のミリ波帯整流回路の先行研究よりも高い電力で動作する整流回路の製作に成功した。

文 献

[1] 名古ら, 2 周波共用フレキシブルアンテナを用いた電力情報同時無線伝送, 東京大学修士論文 (2014)

[2] S. Hemour, C. H. P. Lorenz, and K. Wu, "Small-footprint wideband 94GHz rectifier for swarm micro-robotics," 2015 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. IMS 2015, no. I, pp. 5–8, 2015.

[3] K. Fujiwara, "Low-cost W-band frequency converter with broad-band waveguide-to-microstrip transducer," pp. 4–7, 2016.

[4] 日本国特許出願 No. 2016-243600, 2016.

- [5] 波多野健, 篠原真毅, and 三谷友彦, “24GHz 帯 F 級負荷装荷レクテナの改良,” *Ieice 信学技報*, vol. WPT2011, pp. 3-6, 2012.
- [6] Y. H. Suh and K. Chang, “A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 7, pp. 1784-1789, 2002.
- [7] T. W. Yoo and K. Chang, “Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 40, no. 6, pp. 1259-1266, 1992.
- [8] S. Ladan, S. Hemour, and K. Wu, “Towards millimeter-wave high-efficiency rectification for wireless energy harvesting,” *2013 IEEE Int. Wirel. Symp. IWS 2013*, pp. 7-10, 2013.
- [9] K. Hatano, “Development of 24GHz-Band MMIC Rectenna,” *Radio and Wireless Symposium (RWS). IEEE 2013*, vol. 50, pp. 199-201, 2013.
- [10] M. J. C. Kai, and P. A D, “Microwave Power Transmission Research at Texas A&M University,” *Sp. Energy Transp.*, vol. 1, no. 4, pp. 368-393, 1996.
- [11] H. Gao, U. Johannsen, M. K. Matters-Kammerer, D. Milosevic, A. B. Smolders, A. Van Roermund, and P. Baltus, “A 60-GHz rectenna for monolithic wireless sensor tags,” *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 2796-2799, 2013.
- [12] H. Gao, M. K. Matters-Kamrnerer, P. Harpe, D. Milosevic, U. Johannsen, A. Van Roermund, and P. Baltus, “A 71GHz RF energy harvesting tag with 8% efficiency for wireless temperature sensors in 65nm CMOS,” *Dig. Pap. - IEEE Radio Freq. Integr. Circuits Symp.*, pp. 403-406, 2013.
- [13] N. Weissman, S. Jameson, and E. Socher, “W-Band CMOS on-chip energy harvester and rectenna,” *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1-3, 2014.
- [14] Comparing Microstrip and CPW Performance *Microwave Journal*, July 2012, pp.74 – 86
- [15] Ville S. Motton, Wideband Coplanar Waveguide-to-Rectangular Waveguide Transition Using Fin-Line Taper, *IEEE*, Vol. 15, No. 2, pp. 119-121 (2005)