

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO VÀ THỬ NGHIỆM HỆ THỐNG TRUYỀN NĂNG LƯỢNG DÙNG SÓNG SIÊU CAO TẦN

TS. Đoàn Hữu Chức^{1*}, Nguyễn Văn Vương²

¹Trường Đại học Thủy lợi

*Email: chucdh@tlu.edu.vn

²Viện Kỹ thuật Hải quân

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về thiết kế, chế tạo và thử nghiệm hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng sóng siêu cao tần. Nó khám phá việc sử dụng sóng vô tuyến từ 300MHz đến 300GHz để truyền năng lượng, một ý tưởng có từ thời Nikola Tesla. Các Tác giả đã phát triển anten, mạch chỉnh lưu nhân áp và thử nghiệm mảng rectenna, đạt hiệu suất chuyển đổi năng lượng đáng kể. Công trình này mở ra hướng mới cho truyền năng lượng không dây, hứa hẹn ứng dụng trong khai thác năng lượng mặt trời và cung cấp năng lượng cho thiết bị IoT và y tế.

Từ khóa: Truyền năng lượng không dây; sóng siêu cao tần; vệ tinh truyền năng lượng mặt trời; mạch tách sóng và chỉnh lưu.

ABSTRACT

The article discusses the design, fabrication, and testing of a wireless power transmission system using microwave frequency. It explores the use of radio waves from 300MHz to 300GHz for energy transmission, an idea originating from Nikola Tesla's time. Scientists have developed antennas, voltage multiplier rectifying circuits, and tested rectenna arrays, achieving significant energy conversion efficiency. This work opens new directions for wireless energy transmission, promising applications in solar energy harvesting and powering IoT and medical devices.

Kywords: WPT - Wireless Power Transmission; MPT - Microwave Power Transmission; SPS - Space Power Satellite; Rectenna.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Năng lượng siêu cao tần thường dùng để chỉ các dạng năng lượng liên quan đến sóng điện từ có tần số rất cao. Trong vật lý và kỹ thuật, "sóng siêu cao tần" (Microwave) thường dùng để chỉ dải tần số sóng vô tuyến từ 300MHz đến 300GHz. Một trong những ứng dụng của sóng siêu cao tần là dùng truyền năng lượng không dây WPT (Wireless Power Transmission) đó là việc truyền một năng lượng lớn dùng sóng điện từ truyền từ nơi này đến nơi khác mà không sử dụng dây dẫn. Khi đó ta gọi là

truyền năng lượng sóng siêu cao tần MPT (Microwave Power Transmission).

Khai thác năng lượng siêu cao tần là một ý tưởng xuất hiện từ lâu. Nikola Tesla là người phát minh ra radio, ông được coi là cha đẻ của truyền dẫn không dây. Ông là một trong những người đầu tiên đưa ra ý tưởng truyền năng lượng không dây và ông đã chứng minh cũng như rất tin tưởng vào việc truyền năng lượng điện không dây từ rất sớm vào năm 1891. Năm 1893, Nikola Tesla đã biểu diễn sự thấp sáng không dây cho

các bóng đèn huỳnh quang tại triển lãm Chicago. Tháp Wardencliff được ông thiết kế chủ yếu phục vụ cho việc truyền năng lượng điện không dây hơn là truyền điện tín. Năm 1961 Brown đã đăng bài báo đầu tiên đề xuất việc truyền năng lượng bằng sóng siêu cao tần và năm 1964 ông đã trình diễn mô hình máy bay trực thăng thu năng lượng từ chùm tia siêu cao tần để bay ở tần số 2,45GHz trong dải tần dành cho các ứng dụng về công nghiệp, nghiên cứu khoa học và y tế, gọi là băng tần ISM (Industry, Science, and Medical). Năm 1968 tiến sĩ Peter Glaser của Công ty Arthur D. Little đưa ra ý tưởng dùng MPT cho hệ thống vệ tinh truyền năng lượng mặt trời SPS (Space Power Satellite) do ông đề xuất. Theo đó SPS bao gồm một hệ thống truyền năng lượng siêu cao tần MPT với các tấm pin mặt trời và các bộ sóng siêu cao tần. Shigeo Kawasaki thực hiện truyền năng lượng siêu cao tần công suất 10W cho một thiết bị di động với phần phát công suất siêu cao tần sử dụng linh kiện GaAs FET. Đồng thời tác giả cũng truyền thông tin điều khiển chùm tia dạng điều chế MSK với tỷ lệ lỗi bit BER=10⁻⁶ [1], [2].

Vừa qua, các nhà khoa học Trung Quốc đã xây dựng nguyên mẫu vệ tinh SSPS khai thác năng lượng mặt trời truyền tải về trái đất bằng sóng siêu cao tần. Nhóm do viện sĩ Duan Baoyan cùng các cộng sự thuộc Viện hàn lâm kỹ thuật Trung Quốc thực hiện [3].

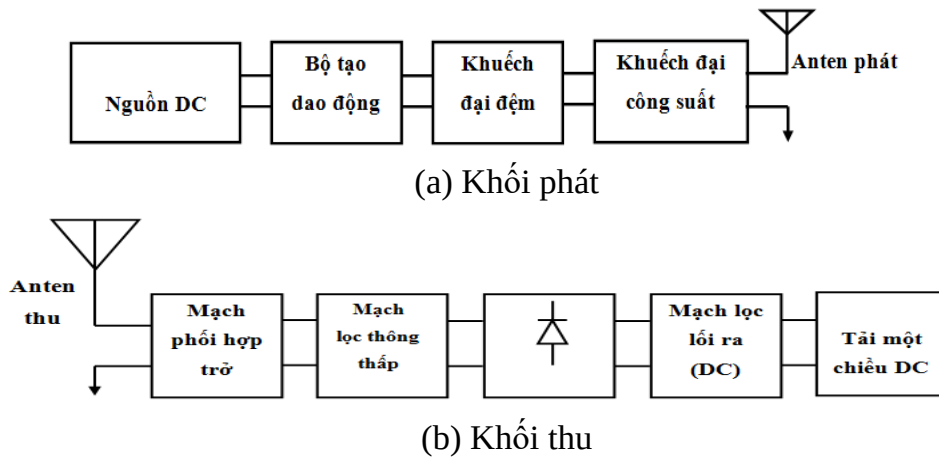
Ngoài việc khai thác nguồn năng lượng với các bộ thu phát được xây dựng có chủ đích, một số nghiên cứu đã thực

hiện việc thu gom năng lượng sóng vô tuyến cho các thiết bị sử dụng mức năng lượng thấp, đặc biệt là các thiết bị IoT và thiết bị y tế đeo theo người [4], [5].

2. SƠ ĐỒ HỆ THỐNG THU PHÁT NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY

Truyền năng lượng không dây WPT là việc truyền một năng lượng lớn dùng sóng điện từ từ nơi này đến nơi khác mà không sử dụng dây dẫn. Như đã biết năng lượng điện từ luôn gắn liền với sự tồn tại và lan truyền của sóng. Chúng ta có thể sử dụng tất cả các lý thuyết về sóng điện từ khi nghiên cứu về truyền năng lượng không dây WPT. Sự khác nhau giữa WPT và các hệ thống truyền thông tin chỉ ở hiệu suất. Hệ phương trình Maxwell chỉ ra rằng trường điện từ và năng lượng của nó tồn tại theo tất cả các hướng. Mặc dù trong hệ thống truyền dẫn thông tin chúng ta cũng truyền năng lượng nhưng theo tất cả các hướng. Năng lượng bộ thu nhận được đủ cho việc truyền dẫn thông tin nhưng hiệu suất thì lại rất thấp. Do đó, chúng ta không gọi các hệ thống đó là hệ thống truyền năng lượng không dây WPT.

Một hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng sóng ở dải siêu cao tần được gọi là MPT (Microwave Power Transmission). Sơ đồ khối của hệ thống truyền năng lượng sử dụng sóng siêu cao tần (MPT) được cho ở hình 1. Hệ thống bao gồm ba phần là khối phát (hình a), khối thu năng lượng siêu cao tần (hình b) và không gian truyền sóng siêu cao tần.



Hình 1. Sơ đồ khối hệ thống truyền năng lượng siêu cao tần.

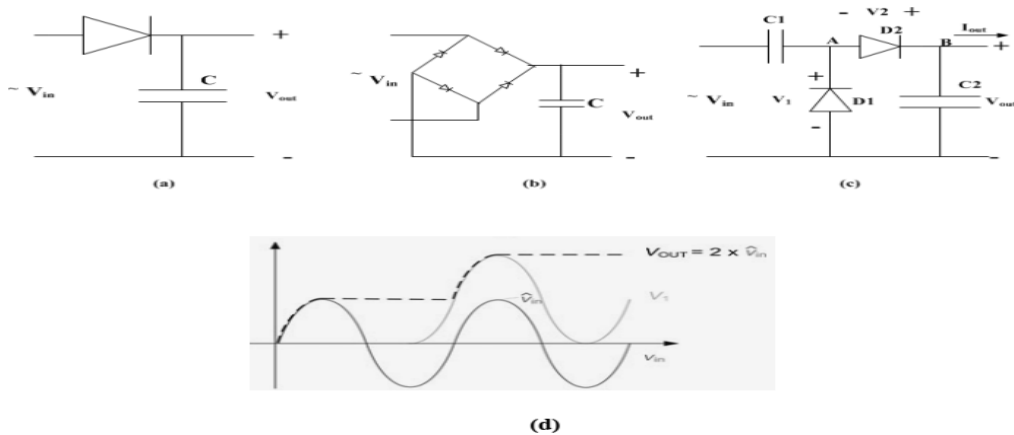
3. RECTENNA

Với hệ thống thu gom năng lượng cho thiết bị IoT và thiết bị y tế đeo theo người thì chúng ta chỉ quan tâm thiết kế các rectenna. Sơ đồ khối của một rectenna như hình 3.b ở trên. Việc thiết kế các rectenna cần chú ý nhỏ gọn và có độ nhạy cao, do tín hiệu thu gom được ở mức rất thấp. Tùy từng thiết kế lấy năng lượng từ các tín hiệu khác nhau mà ta có mật độ công suất thu được. Tuy nhiên, mật độ thường chỉ vài mW/cm^2 [5].

Trong thực tế chúng ta có thể áp dụng nhiều loại anten và mạch tách sóng khác nhau. Việc lựa chọn phụ thuộc vào các đòi hỏi của hệ thống và của chính người dùng. Khi sử dụng cấu trúc mảng

rectenna thì các anten trong các rectenna có thể hấp thụ 100% năng lượng sóng siêu cao tần tới. Vì hệ thống WPT sử dụng cho việc truyền năng lượng nên cần sử dụng các mạch tách sóng có hiệu suất cao. Theo lý thuyết thì có nhiều mạch tách sóng có thể đạt hiệu suất chuyển đổi RF-DC gần tới 100%. Có nhiều cấu trúc mạch chỉnh lưu trong các rectenna khác nhau. Hình 2 đưa ra một số cấu trúc mạch chỉnh lưu sử dụng cho mục đích thu nhận năng lượng không dây.

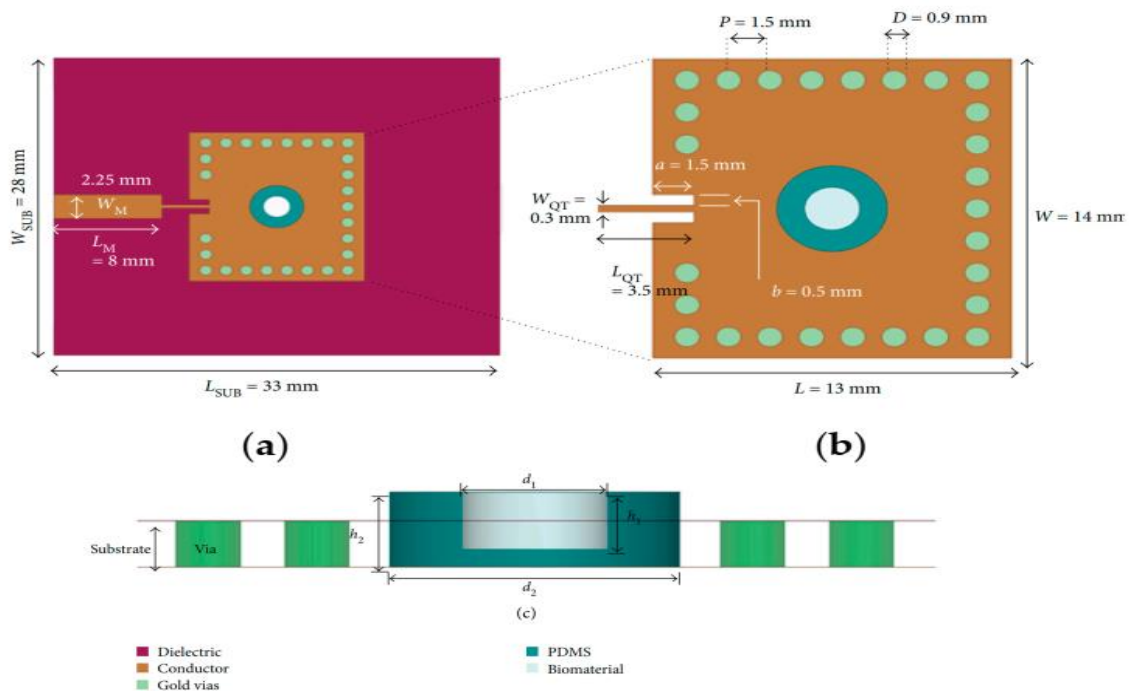
Đối với anten thu cho các mạch chỉnh lưu, người ta cũng thường thiết kế các anten mạch dải. Một số loại anten thường dùng như hình 3 dưới đây [5].



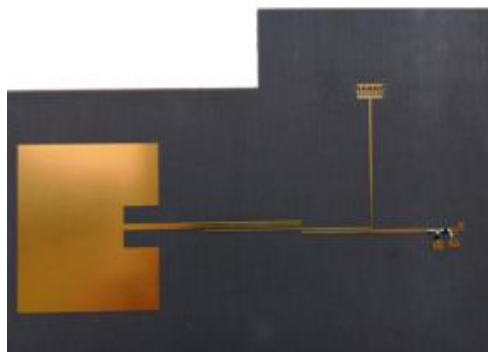
Hình 2. Một số cấu trúc mạch chỉnh lưu: (a) chỉnh lưu nửa chu kỳ. (b) chỉnh lưu toàn sóng. (c) mạch chỉnh lưu nhân áp. (d) các dạng sóng lõi ra.

Ví dụ cho các thiết bị IoT và thiết bị y tế.

Năng lượng thu được sẽ cấp nguồn nuôi một rectenna gắn lên cơ thể người như hình 3.



Hình 3. Anten mạch dải cho rectenna.



Hình 4. Rectenna gắn lên tay người.

4. XÂY DỰNG THỬ NGHIỆM HỆ THỐNG WPT

4.1. Thiết kế và chế tạo anten thu phát

Như đã trình bày ở trên, thông thường chúng ta thường sử dụng kiểu anten mạch dải để ứng dụng trong hệ thống WPT.

Trong phần này tác giả sẽ trình bày việc thiết kế chế tạo một anten mảng mạch dải kiểu 2 x 4 chân tử. Trong đó các miếng patch được tiếp điện bằng các

đoạn dây chêm qua rãnh được khoét sâu vào trong nó [6].

Chiều dài đoạn ăn sâu vào miếng patch của anten y được tính bởi:

$$y = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{50}{Z_0}} \quad (1)$$

Chiều rộng của phần mảng bị cắt này có thể được xấp xỉ theo công thức:

$$g = \frac{v}{\sqrt{2\varepsilon_{eff}}} \frac{4,65 \cdot 10^{-12}}{f} \quad (2)$$

Với v là vận tốc sóng điện từ.

Việc phối hợp trở kháng và phân chia công suất cho hệ anten mảng 8 phần tử này được thực hiện theo nguyên tắc chia đôi. Giá trị của các đường được tính theo công thức:

$$Z' = Z_0 \sqrt{n} \quad (3)$$

Với n là số đường nhánh được chia từ một đường Z_0 :

Ở đây, đường Z_0 có giá trị 50Ω và được chia đôi thành hai đường nhánh như nhau. Vì vậy giá trị của mỗi đường nhánh sẽ là $50\sqrt{2} = 70.71 \Omega$. Các đoạn 50Ω có độ dài tùy ý nhưng trên thực tế, giá trị độ dài này nên càng ngắn càng tốt vì như vậy sẽ giảm được suy hao trong quá trình phân phối năng lượng đến các

phần tử phát xạ. Các đường 70.71Ω ở đây cũng đóng vai trò là đoạn phối hợp trở kháng theo phương thức đoạn $\lambda/4$, độ dài của nó được tính theo công thức:

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{eff} \approx \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12h/W}} \quad (5)$$

Trong đó

Và W được xác định theo công thức:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right) \quad (6)$$

Để thiết kế anten cho mạch Rectenna ta chọn các thông số theo bảng 1 dưới đây.

Sử dụng công cụ LineCalc của ADS đạt được các thông số của các đoạn phối hợp trở kháng như bảng 2 sau:

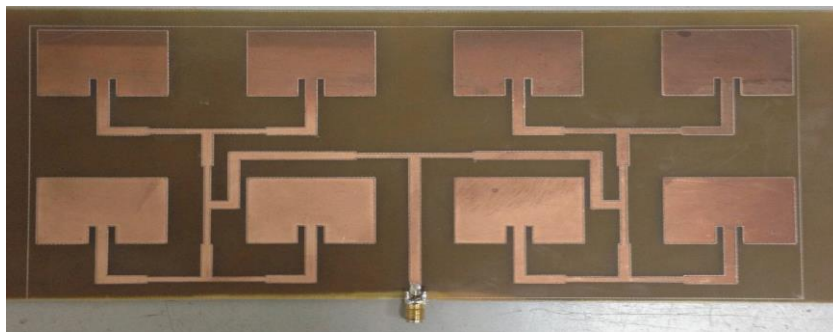
Bảng 1. Thông số thiết kế anten mảng 2x4.

THAM SỐ	GIÁ TRỊ YÊU CẦU
Tần số hoạt động	2.45 GHz
Lớp nền (substrate)	FR-4 epoxy
Trở kháng lối vào	50Ω
Băng thông -10 dB	$> 50 \text{ MHz}$
Suy hao phản hồi (RL) tại 2.45 GHz	$< -10 \text{ dB}$
Hướng tính (Directivity)	$> 13 \text{ dBi}$
Độ lợi (Gain)	$> 10 \text{ dB}$
Băng thông 3-dB	$< 30^\circ$
Hệ số sóng đứng VSWR	< 2

Bảng 2. Kích thước anten 2x4.

THAM SỐ		GIÁ TRỊ
Phần tử mảng (patch)	Chiều rộng W (mm)	37.5
	Chiều dài L (mm)	29.1
	Phần khoét sâu (mm)	7.7
Đoạn dây chêm $50\ \Omega$	Chiều rộng (mm)	3.09
	Chiều dài (mm)	không yêu cầu
Đoạn $\lambda/4$ ($70.71\ \Omega$)	Chiều rộng (mm)	1.64
	Chiều dài (mm)	17.28

(a)



(b)

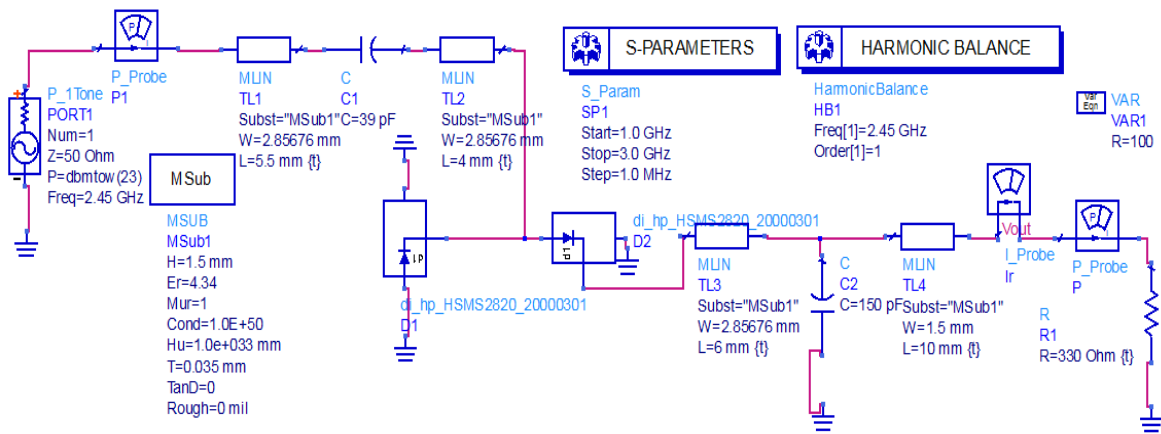
Hình 5. Sơ đồ mạch in (a) và sản phẩm thực tế (b).

4.2. Thiết kế và chế tạo mạch chỉnh lưu nhân áp

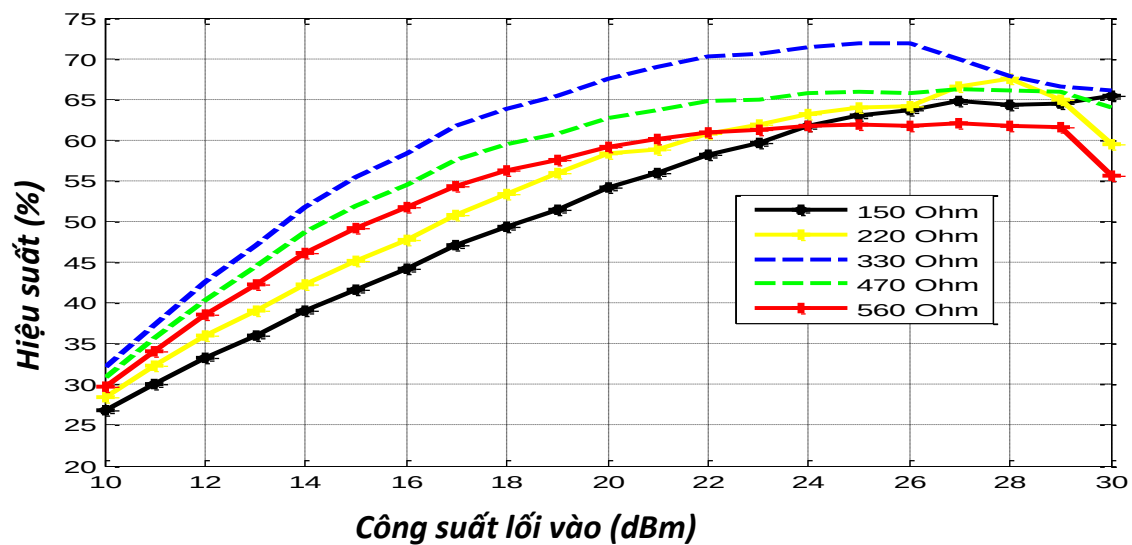
Mạch chỉnh lưu nhân áp là một mạch khuếch đại biên độ trong đó sử dụng hai điốt. Một mạch nhân đôi điện áp Villard khi thiết kế mô phỏng bằng phần mềm ADS2009 được đưa ra ở hình 6. Theo đó mạch bao gồm điốt D1 và C1 làm nhiệm vụ tách sóng đỉnh trong khi đó D2 và C2 làm nhiệm vụ ghim giữ điện áp. Trong thiết kế này thì HSMS2820 vẫn được lựa chọn. Các đoạn mạch dài TL2 dùng cho mạch phối hợp trở kháng lối vào và TL3 dùng cho mạch phối hợp trở kháng lối ra. Mạch đã được thiết kế và tối ưu bằng phần mềm ADS sau đó mô phỏng sử dụng

phép đồng FR4. Sơ đồ mạch in và hình ảnh sản phẩm chế tạo được đưa ra ở hình 8. Kích thước của mạch là 4 cm x 1,4 cm. Mạch được thực hiện trên phíp đồng FR4. So sánh với mạch nối tiếp thì mạch nhân đôi điện áp có kích thước nhỏ hơn.

Kết quả mô phỏng của mạch được đưa ra ở hình 7. Trong đó, trở tải tối ưu trong khoảng 330 Ω . Hiệu suất chuyển đổi RF-DC lớn nhất đạt 72% với mức công suất lối vào là 26 dBm. Cũng theo hình 7 thì hiệu suất chuyển đổi RF-DC tăng khi công suất vào tăng cho tất cả các trở tải. Khi công suất vào quá lớn hiệu suất giảm mạnh bởi khi đó diode rơi vào trạng thái bão hoà.



Hình 6. Sơ đồ nguyên lý mạch nhân áp Villard.



Hình 7. Kết quả mô phỏng hiệu suất chuyển đổi RF-DC của mạch chỉnh lưu nhân áp kiểu Villard.



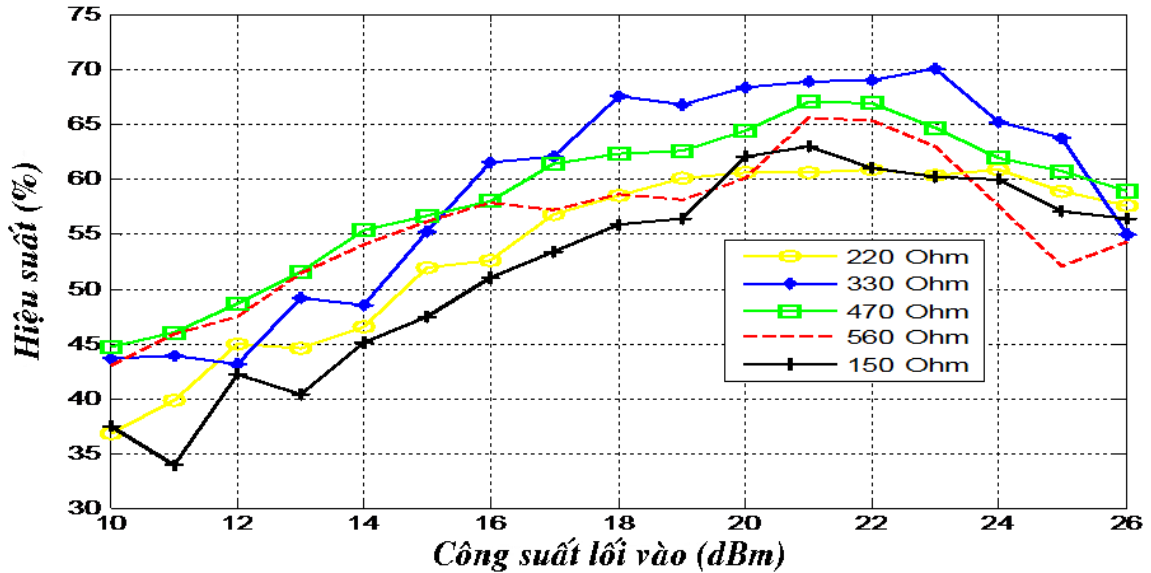
Hình 8. Sơ đồ mạch in và sản phẩm mạch tách sóng kiểu nhân áp Villard.

Bảng 3. Điện áp lồi ra (V) theo các mức công suất trên các trở tải khác nhau của mạch tách sóng nhân áp Villard.

$P_{in}(dBm) \backslash R(\Omega)$	10	13	14	17	19	20	21	22	23	24	25	26
150	0,75	1,1	1,3	1,75	2,6	3,05	3,45	3,8	4,25	4,75	5,2	5,8
220	0,9	1,4	1,6	2,5	3,25	3,65	4,1	4,6	5,15	5,8	6,4	7,1
330	1,2	1,8	2,0	3,2	4,2	4,75	5,35	6,0	6,8	7,35	8,15	8,5
470	1,45	2,2	2,55	3,8	4,85	5,5	6,3	7,05	7,8	8,55	9,5	10,5
560	1,55	2,4	2,75	4,0	5,1	5,8	6,8	7,6	8,4	9,0	9,6	11

Giá trị điện áp đo được với các điện trở tiêu thụ khác nhau được đưa ra ở bảng 3. Từ kết quả đo lường này sẽ tính được hiệu suất chuyển đổi RF-DC tương ứng của mạch. Hình 9 đưa ra giá trị hiệu suất chuyển đổi RF-DC của mạch chỉnh lưu nhân áp. Theo hình 9 thì

hiệu suất chuyển đổi RF-DC của mạch tách sóng đạt giá trị lớn nhất với trở tải là $330\ \Omega$ tại giá trị công suất lỗi vào là 23 dBm và đạt giá trị là 70,06%. Giá trị hiệu suất này gần đạt giá trị mô phỏng. Điện áp ra khi đó đo được là 6,8 V.



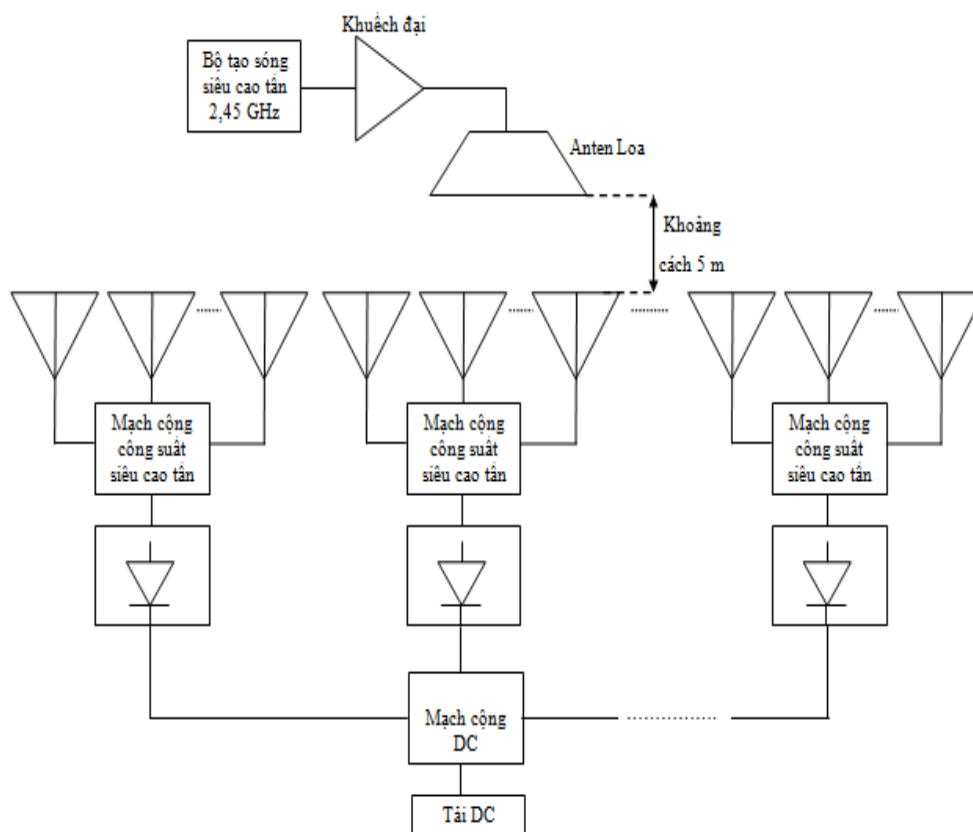
Hình 9. Hiệu suất chuyển đổi RF-DC theo công suất vào của trở tải.

Từ hình 9 cũng nhận xét rằng khi công suất nhận được nhỏ hơn 24 dBm thì hiệu suất chuyển đổi RF-DC của mạch chỉnh lưu sẽ tăng khi công suất nhận được tăng lên. Tuy nhiên khi công suất lỗi vào lớn hơn 24 dBm thì hiệu suất giảm nhanh. Điều này được giải thích bởi vì khi đó điện áp một chiều sau tách sóng gần đạt tới giá trị bão hòa của điốt nên hiệu suất giảm. Trong khoảng công suất lỗi vào từ 18 dBm đến 24 dBm thì hiệu suất đạt giá trị lớn hơn 55% với tất cả các điện trở tải khảo sát. Trong các điện trở tải khảo sát với điện trở tải $330\ \Omega$ mạch chỉnh lưu cho giá trị hiệu suất tối ưu. Điện áp lỗi ra đạt 4,75 V khi mức công suất vào là 20 dBm, 6,8 V khi mức công suất vào là 23 dBm và 8,7 V khi mức công suất vào là 26 dBm.

4.3. Một thử nghiệm mảng rectenna

Hệ thống thử nghiệm gồm phần phát với công suất phát 4W; phần thu gồm một ma trận 2×2 Rectenna, khoảng

cách giữa giữa các thành phần phát và thu là 5 mét. Khoảng cách này hoàn toàn đảm bảo rằng hệ thống truyền năng lượng không dây hoạt động ứng với trường xa của bức xạ sóng điện từ. Số lượng các Rectenna này là khá nhỏ bởi để có thể thu nhận được nhiều năng lượng hơn cần một số lượng lớn các Rectenna. Mặc dù hạn chế về số lượng song với 4 phần tử tác giả vẫn đánh giá được khả năng cộng công suất ở phía thu. Các Rectenna thử nghiệm này sử dụng anten mảng 2×4 và mạch chỉnh lưu siêu cao tần nhân áp phối hợp trở kháng kiểu dây chêm đơn. Như vậy, mỗi Rectenna đều thể hiện được giải pháp cộng năng lượng sóng siêu cao tần ở lỗi vào và việc kết nối thành mảng thể hiện được giải pháp cộng năng lượng điện một chiều DC ở lỗi ra. Mảng Rectenna được kết nối theo mảng theo cấu trúc song song. Hệ thống được minh họa ở hình 10 dưới đây.



Hình 10. Mô hình nguyên lý thử nghiệm MPT.



Hình 11. Hệ thống thử nghiệm MPT.

5. KẾT LUẬN

Một hệ thống truyền năng lượng không dây đã được xây dựng, thiết kế, chế tạo và chạy thử nghiệm thành công với các thành phần cơ bản đạt các thông số quan trọng như: hiệu suất chuyển đổi DC - RF đạt 54%, hiệu suất chuyển đổi RF - DC đạt 71,5%. Các mạch Rectenna

được chế tạo theo phương pháp mạch giải do đó giúp dễ dàng thực hiện kết nối số lượng lớn các mạch chuyển đổi năng lượng RF-DC. Điều đó giúp có thể xây dựng được các hệ thống thu và chuyển đổi năng lượng không dây với công suất lớn phục vụ cho khai thác năng lượng mặt trời.

TÀI LIỆU TRÍCH DẪN

- [1] Đào Khắc An,Trần Mạnh Tuấn (2011), *Vấn đề an ninh năng lượng và các giải pháp khai thác năng lượng mặt trời từ vũ trụ truyền về trái đất*, Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội.
- [2] A. Massa,G. Oliveri, F. Viani, and P. Rocca (2013), “Array designs for long – distance wireless power transmission: State – of- the – Art and Innovative solutions”, *Proc. IEEE*, Vol.101(6), pp.1464-1481.
- [3] <https://vnexpress.net/trung-quoc-xay-nguyen-mau-tram-dien-mat-troi-vu-tru-4681930.html> (2023).
- [4] Alessandra Costanzo and etc, “Microwave Devices for Wearable Sensors and IoT”, *Sensors* 2023, 23, 4356. <https://doi.org/10.3390/s23094356>.
- [5] Hadi Heidari, Oluwakayode Onireti, Rupam Das, and Muhammad Imran (2021), “Energy Harvesting and Power Management for IoT Devices in the 5G era “, *IEEE Communications Magazine*, 59(9), pp. 91-97. (doi: 10.1109/MCOM.101.2100487).
- [6] M. Biswas, Umama Zobayer, J. Hossain, Ashiquzzaman, and Saleh (2012), “Design a Prototype of Wireless Power Transmission System Using RF/Microwave and Performance Analysis of Implementation”, *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol.4(1),pp.61-66.