

DESIGN X-BAND TRANSITION FROM RECTANGULAR WAVEGUIDE TO SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE

Nguyen Van Bac*, Tran Viet Hung, Pham Viet Anh, Nguyen Van Duy
Military Technical Academy

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 07/01/2022	This paper presents the design of a right-angle transition from rectangular waveguide (RWG) to substrate integrated waveguide (SIW) operating in the X band frequency in order to overcome the limitation of the size of traditional rectangular waveguides. The transition is designed with a metal coupling aperture with a two-step ridge and a PCB converter, including three coupling slots, etched on the top of the PCB board. The transition is designed to be easily mounted directly onto the systems using traditional rectangular waveguides. The transition is aimed to use microstrip circuit technology to directly integrate the receiver's low noise amplifier on the same PCB board so that the system size can be reduced significantly. The design is simulated on 3D High-Frequency Simulation Software (HFSS). The simulation results show that the reflection coefficient S11 is less than -15 dB, the insertion loss S21 is less than 1dB in the frequency range from 8.3 GHz to 9.85 GHz.
Revised: 16/02/2022	
Published: 23/02/2022	
KEYWORDS	
SIW Substrate Integrated	
Waveguide Substrate Integrated	
Waveguide Transition	
Right-angle transition	
RWG Rectangular Waveguide	

THIẾT KẾ BỘ CHUYỂN ĐỔI ỨNG DẪN SÓNG HÌNH CHỮ NHẬT SANG ỨNG SÓNG SIW BĂNG TẦN X

Nguyễn Văn Bắc*, Trần Việt Hùng, Phạm Việt Anh, Nguyễn Văn Duy
Học viện Kỹ thuật quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 07/01/2022	Bài báo trình bày phương án thiết kế bộ chuyển đổi từ ống sóng hình chữ nhật RWG sang ống sóng SIW hoạt động ở băng tần X nhằm khắc phục hạn chế về kích thước của ống sóng hình chữ nhật truyền thống. Bộ chuyển đổi được thiết kế gồm phần mặt mở ghép nối bằng kim loại với gờ phối hợp hai bậc và phần chuyển đổi bằng mạch in PCB. Bộ chuyển đổi được thiết kế dễ dàng gắn trực tiếp lên các ống dẫn sóng hình chữ nhật truyền thống, hướng tới kết hợp với công nghệ mạch dải tích hợp trực tiếp khối khuếch đại tạp âm thấp của tuyến thu trên cùng một bo mạch in nhằm giảm kích thước hệ thống thu. Thiết kế được mô phỏng trên phần mềm HFSS. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ số phản xạ S11 nhỏ hơn -15dB, hệ số suy giảm S21 nhỏ hơn 1dB trong dải tần từ 8,3 GHz đến 9,85 GHz.
Ngày hoàn thiện: 16/02/2022	
Ngày đăng: 23/02/2022	
TỪ KHÓA	
Tích hợp chất nền SIW	
Ống sóng tích hợp chất nền	
Chuyển đổi ống dẫn sóng	
Chuyển đổi ống sóng vuông góc	
Ống dẫn sóng hình chữ nhật RWG	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5436>

* Corresponding author. Email: nguyenback42@gmail.com

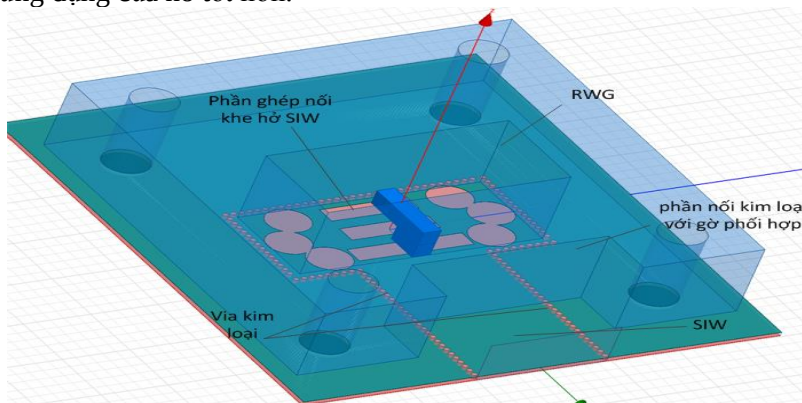
1. Mở đầu

Công nghệ ống dẫn sóng tích hợp chất nền (SIW) được quan tâm nghiên cứu nhiều trong những năm gần đây [1]-[10]. Nó là ống dẫn sóng phẳng được tích hợp trong chất nền điện môi với hai lớp kim loại và hai hàng lỗ via. Các hàng lỗ via tạo thành các thành hẹp của ống dẫn sóng. SIW có một số ưu điểm nổi bật như tổn hao nhỏ, dễ chế tạo bằng công nghệ PCB chính xác, giá thành rẻ, kích thước và khối lượng nhỏ gọn, dễ tích hợp với các thành phần khác trên cùng bo mạch in. Ngày nay, SIW đã được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống siêu cao tần. Tuy nhiên, ống dẫn sóng hình chữ nhật truyền thống (RWG) vẫn đang đóng vai trò quan trọng trong các hệ thống thực tế do tổn hao thấp, chịu được công suất lớn. Có nhiều thành phần thiết bị được thiết kế để hoạt động với RWG, chẳng hạn như bộ khuếch đại công suất hay bộ khuếch đại tạp âm thấp LNA. Ngoài ra, RWG cứng hơn, chắc chắn hơn, phù hợp để xây dựng các cấu trúc 3D phức tạp. Tuy nhiên, để kết nối, truyền/nhận tín hiệu từ bo mạch PCB, cần phải có các bộ chuyển đổi từ RWG sang giắc nối đồng trục như SMA hoặc BNC, làm tăng kích thước và giá thành của hệ thống. Để khắc phục được nhược điểm đó và tận dụng được ưu điểm của hai loại ống dẫn sóng SIW và RWG, một cấu trúc chuyển đổi giữa SIW và RWG cần phải được nghiên cứu, thiết kế để kết nối các thiết bị dựa trên cấu trúc SIW với các hệ thống sử dụng cổng giao tiếp kiểu RWG.

Có hai loại bộ chuyển đổi RWG sang SIW, loại thứ nhất là dạng thẳng, trong đó trục chính của SIW và RWG thẳng hàng với nhau [1]. Loại thứ hai là dạng vuông góc, trong đó, hai trục chính của SIW và RWG vuông góc với nhau. Dạng thẳng có kích thước lớn hơn, yêu cầu về không gian kết nối phức tạp hơn, thích hợp cho các ứng dụng hạn chế cụ thể [1]. Trong khi đó, dạng vuông góc thường nhỏ gọn, thuận tiện cho lắp đặt hơn nhưng băng thông hẹp hơn [1]. Trong nhiều tài liệu, các thiết kế bộ chuyển đổi RWG sang SIW đã được giới thiệu nhưng đều ở băng tần cao như băng V, băng Ku, Ka,... Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một thiết kế bộ chuyển đổi RWG sang SIW dạng vuông góc hoạt động ở băng tần X, băng tần được sử dụng phổ biến trong các thiết bị quân sự như radar, tên lửa và các thiết bị dân dụng khác.

2. Thiết kế bộ chuyển đổi RWG sang SIW

Bộ chuyển đổi được trình bày gồm mặt mở ghép nối bằng kim loại với gờ phối hợp hai bậc, và phần chuyển đổi SIW (hình 1). Một đầu của mặt mở ghép nối kết nối trực tiếp với ống dẫn sóng tiêu chuẩn WR90. Phần mặt mở ghép nối kim loại được chế tạo bằng nhôm có kích thước bằng với kích thước mặt bích ống dẫn sóng WR90. Mục đích của phần này là để phối hợp trở kháng giữa ống sóng RWG với SIW, nhằm mở rộng băng thông của bộ chuyển đổi. Việc sử dụng mặt mở ghép nối kim loại đã được trình bày tại các công bố [2]-[6]. Băng thông của bộ chuyển đổi RWG sang SIW khi sử dụng mặt mở ghép nối kim loại được mở rộng lên hơn 25,7% [2]-[5], có thiết kế còn đạt được trên 40% [6]. Mặc dù sử dụng mặt mở ghép nối kim loại có làm phức tạp hóa việc lắp ghép bộ chuyển đổi RWG sang SIW, tuy nhiên lợi thế về độ rộng băng thông giúp cho khả năng ứng dụng của nó tốt hơn.



Hình 1. Cấu trúc bộ chuyển đổi RWG sang SIW đề xuất

Để phối hợp trở kháng giữa ống sóng RWG với SIW, các gờ phối hợp thường được sử dụng. Kích thước các gờ phối hợp được tính toán theo phương pháp biến đổi chebyshev [7], [8]. Với mỗi một giá trị trở kháng của các phần tử phối hợp, kích thước của bậc sẽ được tính bằng công thức :

$$b_n = \frac{Z_{wg_n} \sqrt{\epsilon_r} a}{2\eta} \quad (1)$$

Trong đó, Z_{wg_n} là trở kháng của ống sóng phần tử phối hợp thứ n ;

a, b_n là kích thước dài rộng của bậc thứ n ;

ϵ_r là hằng số điện môi của môi trường;

η là trở kháng sóng trong không gian tự do có giá trị 377Ω .

Phần tử đầu tiên trong phép biến đổi chebyshev là phần ống dẫn sóng RWG và phần tử cuối cùng là ống sóng SIW. Giá trị kích thước các bậc phối hợp sau tính toán sẽ được tối ưu trong quá trình mô phỏng, vì trở kháng của phần tử ghép nối SIW tích hợp trên mạch tương đối phức tạp. Phần phối hợp trở kháng trên ống sóng SIW thường được thiết kế với mặt mở ghép nối hoặc là các khe hở khoét trên mặt kim loại của SIW. Trong thiết kế này, các khe hở được sử dụng làm đầu dò để trích dẫn năng lượng cao tần.

Việc sử dụng khe hở làm đầu dò trích dẫn năng lượng đã được trình bày trong nhiều bài báo [1], [9], [10]. Nguyên lý truyền dẫn tín hiệu cao tần của các khe hở giống như của các ăng ten khe mạch dài. Vị trí và kích thước của các khe hở được tính toán dựa trên tần số trung tâm của dải tần làm việc. Để tăng băng thông làm việc của bộ chuyển đổi, trong nhiều bài báo cũng đã trình bày việc sử dụng nhiều khe hở với kích thước khác nhau [1], [9], [10]. Mô phỏng trên HFSS cũng cho thấy rằng băng thông được mở rộng khi kết hợp các khe hở có độ rộng khác nhau (hình 3). Trong thiết kế đề xuất, bộ chuyển đổi sử dụng 3 khe hở, độ dài ban đầu của các khe hở được tính toán theo 3 tần số là tần số cắt dưới 8,2 GHz, tần số trung tâm 10,3 GHz và tần số cắt trên 12,4GHz. Độ dài L của các khe hở được chọn theo bội số của giá trị $\lambda_{ch}/4$ [9] (λ_{ch} – bước sóng tại tần số cộng hưởng). λ_{ch} được tính theo công thức:

$$\lambda_{ch} = \frac{C}{f_{ch} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

Trong đó: C là vận tốc của ánh sáng; ϵ_r là hằng số điện môi của môi trường truyền, tín hiệu truyền từ WR90 sang SIW nên ϵ_r bằng 1.

Độ rộng và vị trí của các khe hở được lựa chọn qua quá trình mô phỏng nhưng phải đảm bảo tiêu chuẩn trong quy trình sản xuất mạch in.

Phần ống sóng SIW là một ống dẫn sóng điện từ tổng hợp hình chữ nhật được tạo thành trong chất nền điện môi bằng cách đặt hai dãy trụ kim loại (hoặc lỗ VIA) giữa 2 lớp kim loại. Cấu trúc vật lý của ống sóng SIW có thể coi là ống dẫn sóng hình chữ nhật chứa đầy điện môi [7],[8]. Đối với chế độ TE₁₀, chiều cao h của ống sóng không quan trọng vì nó không ảnh hưởng đến tần số cắt của ống dẫn sóng [7], [8]. Tần số cắt f_c của ống sóng SIW chỉ phụ thuộc vào chiều rộng a_e , theo công thức [7]:

$$f_c = \frac{C}{2a_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

Việc lựa chọn thích hợp đường kính d và khoảng cách tuần hoàn p giữa các lỗ VIA có thể giảm thiểu tổn thất năng lượng cao tần rò rỉ của SIW. Để đảm bảo cấu trúc SIW có thể thực hiện được về mặt vật lý, đường kính d và khoảng cách p phải tuân thủ điều kiện sau [7]:

$$d \leq \frac{a_e}{5} \quad (4)$$

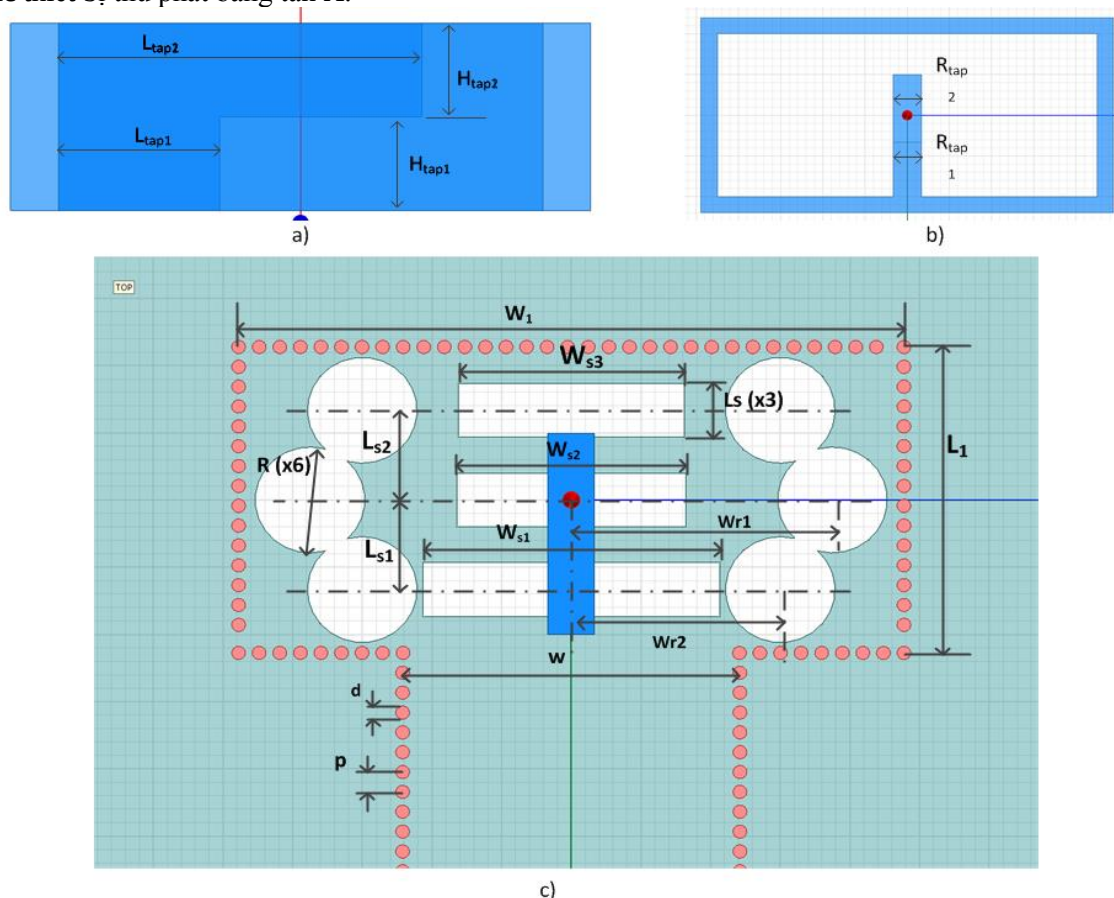
$$p \leq 2d \quad (5)$$

Sau khi xác định được d và p thì ta có thể xác định khoảng cách từ tâm đến tâm của hai hàng VIA w là [7]:

$$w = a_e + \frac{d^2}{0.95p} \quad (6)$$

3. Mô phỏng thiết kế chuyển đổi ống sóng RWG sang SIW

Cấu trúc bộ chuyển đổi được thiết kế và mô phỏng trên phần mềm mô phỏng trường điện từ Hight Frequency Structure Simulator HFSS. Phần ống sóng RWG sử dụng ống sóng tiêu chuẩn WR90. Hình 2 và bảng 1 thể hiện hình dạng, kích thước các chi tiết của bộ chuyển đổi. Hình 2.a và Hình 2.b thể hiện kích thước phần mặt mở ghép nối bằng kim loại với gờ phối hợp hai bậc. Mặt mở ghép nối với gờ phối hợp hai bậc được thiết kế bằng vật liệu nhôm. Phần ống sóng tích hợp chất điện môi SIW (hình 2.c) được thiết kế sử dụng chất điện môi ROGER4350B (TM), có hằng số điện môi $\epsilon_r = 3,66$ và hệ số tan $\delta = 0,0037$. Lớp điện môi thiết kế dày $h = 0,508$ mm, độ dày lớp đồng là $t = 35$ μm . Phần ống sóng tích hợp chất điện môi SIW sử dụng 3 khe hở để phối hợp trở kháng và trích dẫn năng lượng RF. Bộ chuyển đổi được thiết kế để sử dụng trong các thiết bị thu phát băng tần X.



Hình 2. Cấu trúc chi tiết của bộ chuyển đổi RWG sang SIW được đề xuất

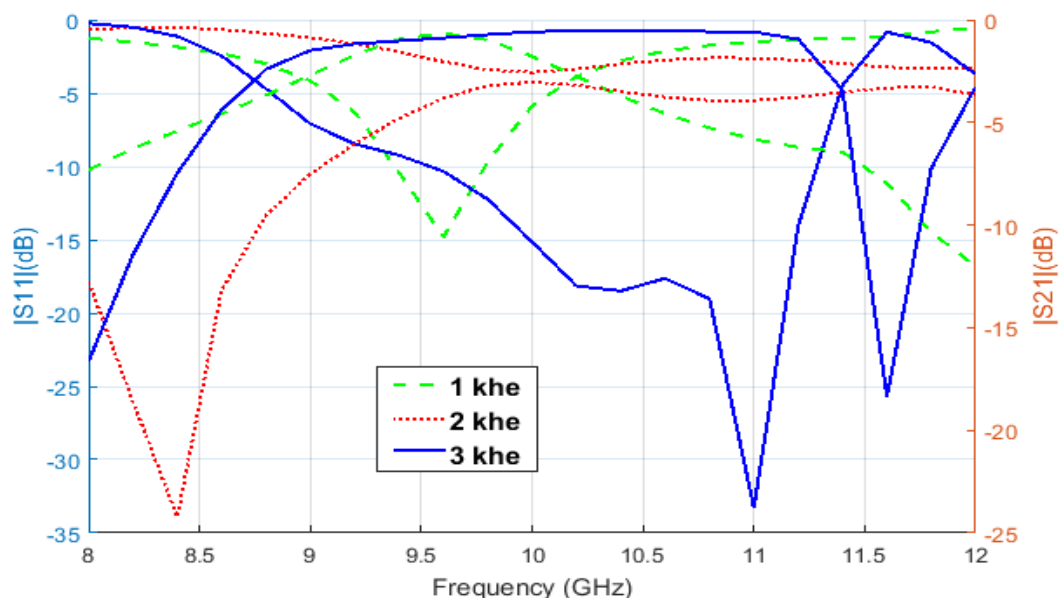
a), b) Kích thước phần ghép nối với gờ phối hợp hai bậc; c) kích thước phần chuyển đổi SIW

Bảng 1. Tham số kích thước chi tiết của bộ chuyển đổi (đơn vị: millimeter)

L_{tap1}	L_{tap2}	H_{tap1}	H_{tap2}	R_{tap1}	R_{tap2}	W_1	L_1	W	d
3,39	7,62	2	2	2	2	24,26	11,56	12,25	0,5
p	L_{s1}	L_{s2}	L_s	W_{r1}	W_{r2}	W_{s1}	W_{s2}	W_{s3}	R
0,75	3,39	3,39	2,03	9,52	7,62	8,33	10,83	8,23	2

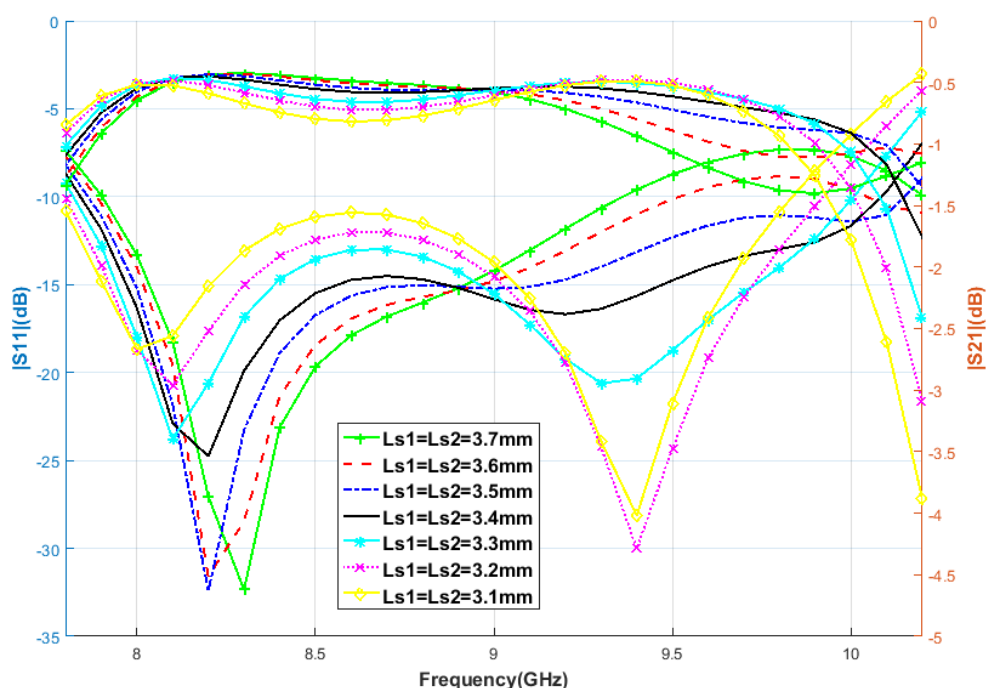
Cấu trúc bộ chuyển đổi được xây dựng ban đầu dựa trên mô phỏng đánh giá độ rộng băng thông khi sử dụng số lượng khe hở khác nhau (hình 3). Kích thước ban đầu của các khe hở được tính toán theo các công thức (2). Tương ứng với các tần số cộng hưởng đã chọn, độ dài ban đầu của các khe hở lần lượt sẽ là 9,14 mm, 7,28 mm, 6,04 mm. Từ đánh giá sơ bộ bằng mô phỏng, ta thấy rằng sử dụng 3 khe hở cho độ rộng băng thông và hệ số suy hao tốt hơn. Vị trí các khe được

bố trí bằng 1/3 kích thước cạnh ngắn của WR90. Bảng thông bộ chuyển đổi khi sử dụng 2 khe và 3 khe đạt được tương đối rộng. Tuy nhiên, việc phối hợp trở kháng khi sử dụng 2 khe bằng các thay đổi vị trí các khe hở là rất khó, nên suy hao đường truyền lớn hơn rất nhiều so với sử dụng 3 khe hở. Đó là lợi thế khi sử dụng bộ chuyển đổi sử dụng 3 khe hở.



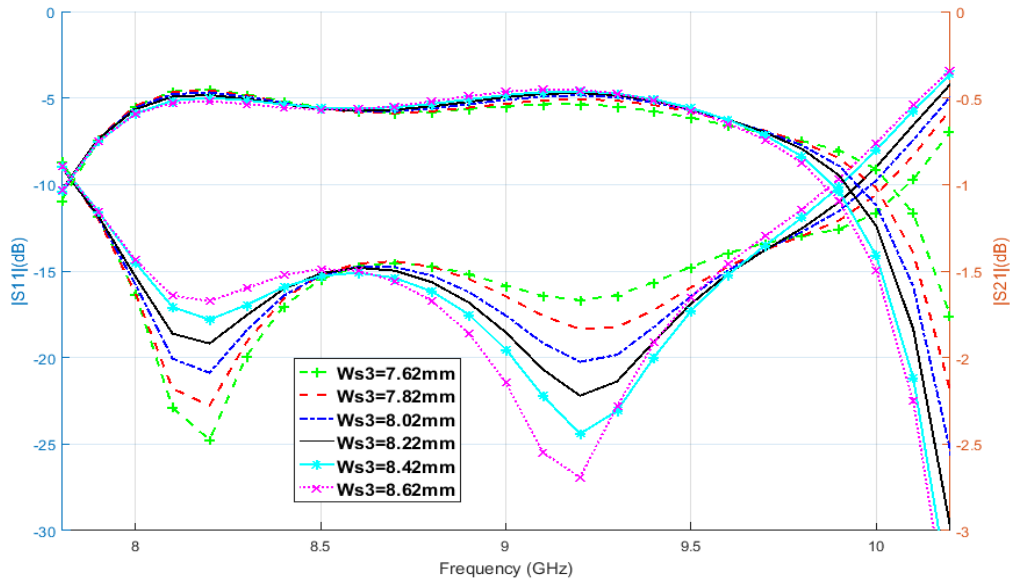
Hình 3. Khảo sát tham số S khi thay đổi số lượng khe hở

Vị trí và kích thước các khe hở là những tham số ảnh hưởng rất lớn tới phẩm chất của bộ chuyển đổi. Thông qua kết quả mô phỏng trên HFSS chúng ta sẽ thực hiện tối ưu hóa các tham số về vị trí và kích thước của các khe hở.



Hình 4. Khảo sát sự phụ thuộc của tham số S vào khoảng cách các khe hở

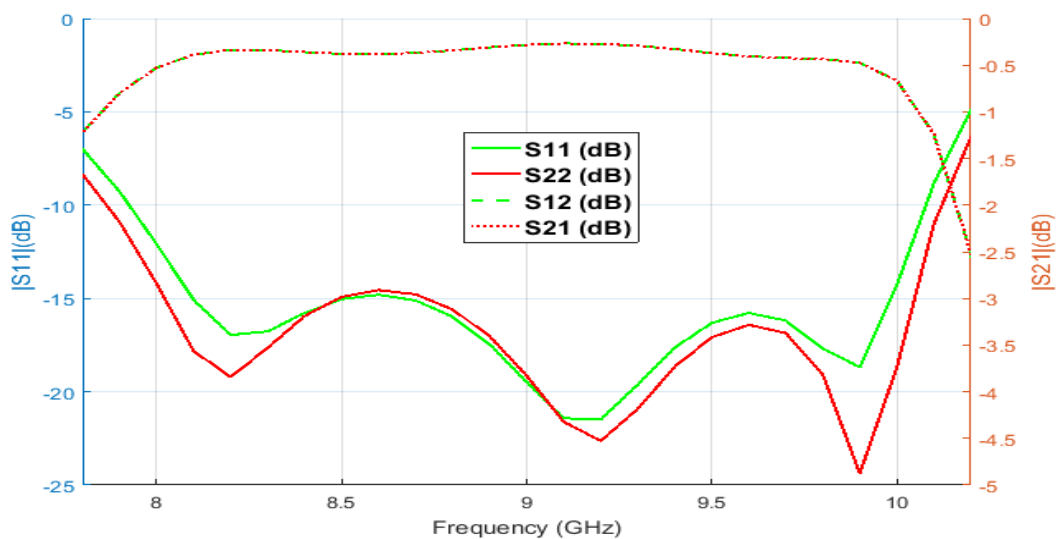
Hình 4 thể hiện sự phụ thuộc của các tham số S vào khoảng cách các khe. Khi khoảng cách các khe càng lớn, tần số thấp cộng hưởng tốt hơn và bộ chuyển đổi có hệ số suy giảm, hệ số phản xạ tốt nhất. Ngược lại, khi khoảng cách giữa các khe nhỏ, bộ chuyển đổi có hệ số suy giảm và phản xạ tốt ở tần số cao hơn.



Hình 5. Khảo sát sự phụ thuộc của tham số S vào kích thước độ dài khe số 3

Kích thước các khe được xác định ban đầu dựa trên tần số cộng hưởng mong muốn theo công thức (2). Tuy nhiên, việc sử dụng nhiều khe hở, các khe tác động vào tần số cộng hưởng lẫn nhau, nên kích thước các khe được lựa chọn sau khi tối ưu hóa bằng phần mềm mô phỏng. Hình 5 thể hiện quá trình lựa chọn kích thước của khe hở số 3. Khi độ dài của khe hở số 3 W_{s3} càng nhỏ, xu hướng dải tần làm việc của bộ chuyển đổi dịch chuyển lên tần số thấp. Ngược lại, khi độ dài của khe hở số 3 W_{s3} tăng lên, tại các tần số thấp bộ chuyển đổi kém đi rõ rệt. Việc lựa chọn kích thước khe được đặt ra để lựa chọn tham số tối ưu cho toàn dải.

Sau quá trình mô phỏng và tối ưu các tham số của bộ chuyển đổi, cấu trúc và tham số kích thước chi tiết các phần tử trong bộ chuyển đổi được thể hiện trên bảng 1 và hình 3.



Hình 6. Tham số S của bộ chuyển đổi RWG sang SIW được đề xuất.

Kết quả mô phỏng bộ chuyển đổi cuối cùng (hình 2) trên phần mềm HFSS được thể hiện trên hình 6. Kết quả cho thấy hệ số suy hao của bộ chuyển đổi xấp xỉ bằng -0,5 dB và có hệ số phản xạ dưới -15dB trong dải tần từ 8,3 GHz đến 9,85 GHz.

4. Kết luận

Trong bài báo này, bộ chuyển đổi từ ống dẫn sóng RWG sang SIW đã được đề xuất thiết kế và mô phỏng trên phần mềm HFSS. Quá trình chuyển đổi được thực hiện thông qua mặt mở ghép nối bằng kim loại với gờ phối hợp hai bậc và phần chuyển đổi SIW (hình 1). Kết quả mô phỏng phù hợp với mục tiêu của ứng dụng trong các hệ thống thu phát băng tần X. Ưu điểm của nó là khối lượng, kích thước nhỏ, dễ dàng trong bố trí hệ thống và chi phí chế tạo rẻ. Mục tiêu tiếp theo của nhóm tác giả là tích hợp mô đun khuếch đại tạp âm thấp LNA trực tiếp lên bộ chuyển đổi nhằm đưa bộ LNA đến gần ăng ten nhất, giảm suy hao cao tần và tăng hệ số tín/tạp của tuyến thu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] T. Li and W. Dou, "Simple, compact and broadband right-angle transition between substrate integrated waveguide and rectangular waveguide at Ka-band," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 27, p. e2108, 2016.
- [2] T. Li and W. Dou, "Broadband right-angle transition from substrate-integrated waveguide to rectangular waveguide," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 19, pp. 1355-1356, 2014.
- [3] T. Li and W. B. Dou, "A wideband right-angle transition between thin substrate integrated waveguide and rectangular waveguide based on multi-section structure," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 8, pp. 185-191, 2015.
- [4] R. V. Gatti, R. Rossi, and M. Dionigi, "Broadband Right-Angle Rectangular Waveguide to Substrate Integrated Waveguide Transition with Distributed Impedance Matching Network," *Applied Sciences*, vol. 9, p. 389, 2019.
- [5] I. Mohamed and A. Sebak, "Broadband Transition of Substrate-Integrated Waveguide-to-Air-Filled Rectangular Waveguide," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 10, pp. 1531-1309, 2018.
- [6] J. Dong, Z. Yang, H. Peng, and T. Yang, "Full Ka-band right-angle transition from substrate integrated waveguide to air-filled rectangular waveguide," *Electronics Letters*, vol. 51, pp. 1796-1798, 2015.
- [7] J. M. Pérez-Escudero, A. E. Torres-García, R. Gonzalo, and I. Ederra, "A simplified Design Inline Microstrip-to-Waveguide Transition," *Electronics*, vol. 7, pp. 215-226, 2018.
- [8] J. Dong, Y. Liu, H. Lin, and T. Yang, "Low Loss and Broadband Transition between Substrate Integrated Waveguide and Rectangular Waveguide," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 54-61, 2016.
- [9] D. Dousset, K. Wu, and S. Claude, "Millimetre-wave broadband transition of substrate-integrated waveguide to rectangular waveguide," *Electron Letters*, vol. 46, pp. 1610-1611, 2010.
- [9] L. Li, X. Chen, R. Khazaka, and K. Wu, "A transition from substrate integrated waveguide (SIW) to rectangular waveguide," *IEEE Asia Pacific Microwave Conference*, vol. 9, pp. 2605-2608, 2009.
- [10] R. Glogowski, J. F. Zurcher, C. Peixeiro, and J. R. Mosig, "Broadband Ka-band rectangular waveguide to substrate integrated waveguide transition," *Electron Lettes*, vol. 49, no. 9, pp. 602-604, 2013.