DESIGN AND SIMULATION OF ULTRA NARROW PULSE GENERATION CIRCUIT USING STEP RECOVERY DIODE AND DIODE SCHOTTKY

Nguyen Tien Thai*, Vo Van Toan
Le Quy Don University of Technology

ARTICLE INFO

Received: 07/02/2025
Revised: 27/02/2025
Published: 27/02/2025

KEYWORDS

Step recovery diode
Diode Schottky
Ultra narrow pulse
Pulse radar
Ultra wide-band

ABSTRACT

The paper presents the design and simulation of an ultra-narrow pulse generator circuit using Step Recovery Diode and Schottky diode for applications such as ultra-wideband radar and high-speed radio communications. The circuit was designed at low cost, using components commonly available on the market. The research method included studying the structure and characteristics of each type of diode, designing and simulating the circuit using Multisim software to test the pulse width and signal amplitude. The results show that the circuit using Step Recovery Diode MA44769 generates pulses with a width of about 690 ps, while the Schottky diode BAT15-04 generates pulses of about 730 ps, meeting the requirements of low-power UWB systems. Simulation results reveal that Step Recovery Diode has outstanding advantages in pulse width and stability compared to Schottky diode, and is a potential solution for modern radar and communications systems.

THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG MẠCH TẠO XUNG SIÊU HẸP SỬ DỤNG STEP RECOVERY DIODE VÀ DIODE SCHOTTKY

Nguyễn Tiến Thái*, Võ Văn Toàn
Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 07/02/2025
Ngày hoàn thiện: 27/02/2025
Ngày đăng: 27/02/2025

TỪ KHÓA

Đi-ốt phục hồi bước
Đi-ốt Schottky
Xung siêu hẹp
Xung ra-đa
Băng siêu rộng

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế và mô phỏng mạch tạo xung siêu hẹp sử dụng Step Recovery Diode và diode Schottky cho các ứng dụng như radar băng siêu rộng và thông tin vô tuyến tốc độ cao. Mạch được thiết kế với chi phí thấp, sử dụng các linh kiện phổ biến trên thị trường. Phương pháp nghiên cứu bao gồm nghiên cứu cấu trúc, đặc điểm của từng loại diode, thiết kế và mô phỏng mạch bằng phần mềm Multisim để kiểm tra độ rộng xung và biên độ tín hiệu. Kết quả cho thấy mạch sử dụng Step Recovery Diode MA44769 tạo xung với độ rộng khoảng 690 ps, trong khi diode Schottky BAT15-04 tạo xung khoảng 730 ps, đáp ứng yêu cầu của hệ thống UWB công suất thấp. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng Step Recovery Diode có ưu điểm vượt trội về độ rộng xung và độ ổn định so với diode Schottky, là giải pháp tiềm năng cho các hệ thống radar và thông tin hiện đại.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11999

* Corresponding author. *Email: thairti@gmail.com*

1. Giới thiệu

Trong lĩnh vực y học hiện đại, nhu cầu giám sát bệnh nhân từ xa ngày càng trở nên quan trọng, đặc biệt đối với người cao tuổi, bệnh nhân mắc bệnh mãn tính và các trường hợp chăm sóc đặc biệt. Hệ thống giám sát nhịp tim và phát hiện sự sống từ xa giúp giảm sự phụ thuộc vào các phương pháp tiếp xúc trực tiếp như điện tâm đồ, đồng thời cho phép theo dõi liên tục với chi phí sản xuất thấp, tiêu thụ công suất nhỏ và đơn giản trong thiết kế. Một trong những yếu tố quan trọng để thực hiện các hệ thống này là khả năng tạo ra các xung siêu hẹp, phục vụ cho việc thu nhận và xử lý tín hiệu sinh học một cách chính xác và hiệu quả. Dạng xung siêu hẹp có đặc điểm là độ rộng xung (τ) cỡ pico giây đến nano giây, bao phủ dải tần rộng mà không cần sóng mang liên tục. Xung siêu hẹp nổi bật nhờ khả năng tối ưu hóa năng lượng, độ phân giải thời gian cao [1] – [3]. Hiện nay, có nhiều phương pháp tạo xung siêu hẹp, mỗi phương pháp đều có những ưu điểm và nhược điểm riêng.

Phương pháp sử dụng mạch giữ chậm: Mạch giữ chậm sử dụng đường truyền dẫn tín hiệu để tạo ra độ trễ và xén biên của tín hiệu đầu vào. Phương pháp này đơn giản trong thiết kế nhưng hạn chế ở việc điều chỉnh độ rộng xung và thường bị suy hao tín hiệu trên đường truyền dài [4], [5].

Phương pháp sử dụng mạch cộng hưởng LC: Mạch cộng hưởng LC có thể tạo ra xung siêu hẹp bằng cách cộng hưởng tại một tần số xác định. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của phương pháp này là sự phức tạp trong việc thiết kế mạch và độ nhạy cao đối với các yếu tố môi trường như nhiệt độ và tần số dao động [6].

Phương pháp tạo xung bằng diode Schottky: Nhờ cấu trúc tiếp xúc kim loại-bán dẫn mà diode Schotkky có tốc độ chuyển mạch nhanh và điện dung thấp. Nguyên lý hoạt động dựa trên việc dẫn dòng điện qua lớp tiếp xúc kim loại và bán dẫn với điện dung rất thấp, cho phép tạo ra các xung sắc nét, ổn định. Tuy nhiên, diode Schottky bị giới hạn về khả năng tạo xung siêu hẹp và phổ tín hiệu không quá rộng, khiến nó chưa thực sự tối ưu trong các ứng dụng băng siêu rộng [7].

Phương pháp tạo xung bằng Step Recovery Diode (SRD): SRD hoạt động dựa trên nguyên lý tích tụ và giải phóng nhanh năng lượng trong vùng chuyển tiếp. Khi diode chuyển từ trạng thái dẫn sang trạng thái ngắt, năng lượng tích tụ trong vùng chuyển tiếp được giải phóng nhanh chóng, tạo ra xung siêu hẹp. SRD có ưu điểm vượt trội ở khả năng tạo xung hẹp và sắc nét với phổ tín hiệu mở rộng đến hàng chục GHz. Tuy nhiên, công nghệ tạo xung siêu hẹp bằng SRD chủ yếu sử dụng mạch dải trên chất nền Roger, nguồn cấp dao động kích thích cho mạch tạo xung siêu hẹp có tần số dao động cao lấy từ nguồn nuôi bên ngoài, dẫn đến giá thành sản phẩm cao [8] – [11]. Bài báo này đề xuất một thiết kế mạch tạo xung hoàn chỉnh từ xung kích thích đầu vào đến tạo xung siêu hẹp sử dụng SRD hoặc diode Schottky. Mạch kích thích sử dụng linh kiện thông dụng là transistor loại BC847B và IC 74HC04 giúp giảm kích thước, giá thành của sản phẩm.

Phương pháp sử dụng Laser Mode-Locking: Phương pháp này sử dụng hiện tượng mode-locking trong các laser, trong đó nhiều mode dao động riêng lẻ của laser được đồng bộ hóa pha để tạo ra các xung quang siêu hẹp. Ưu điểm của phương pháp này là độ rộng xung τ nhỏ hơn 1 ps. Phổ tín hiệu siêu rộng, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao như đo khoảng cách và thông tin quang tốc độ cao. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm lớn là phức tạp và chi phí cao, yêu cầu môi trường hoạt động ổn định và phải bảo trì thường xuyên [12].

Trong số các phương pháp tạo xung siêu hẹp, việc sử dụng diode Schottky và Step Recovery Diode được đánh giá là phù hợp với các ứng dụng công suất thấp và phổ biến nhờ vào những ưu điểm vượt trội của chúng [8], [10], [11] hoặc kết hợp giữa 2 loại trên [13]. Hiện tại, chưa có nghiên cứu nào công bố mạch tạo xung siêu hẹp hoàn chỉnh từ tạo xung kích thích đầu vào đến tạo hình xung siêu hẹp đầu ra với tối ưu về số lượng linh kiện và giá thành sản phẩm. Việc sử dụng Step Recovery Diode và diode Schottky trong thiết kế giúp dễ dàng triển khai trong các ứng dụng thực tế. So với các phương pháp truyền thống, các mạch này không chỉ giảm độ phức tạp trong thiết kế mà còn tối ưu hóa chi phí, phù hợp cho việc sản xuất hàng loạt và ứng dụng trong các thiết bị y tế giám sát nhịp tim và phát hiện sự sống từ xa.

Bài báo này trình bày thiết kế, phân tích và mô phỏng mạch tạo xung siêu hẹp giá thành thấp, sử dụng các linh kiện điện tử phổ biến hiện có trên thị trường Việt Nam áp dụng cho cả diode Schottky và Step Recovery Diode.

2. Thiết kế và đánh giá mạch

2.1. Cấu trúc, đặc điểm của SRD và diode Schotkky

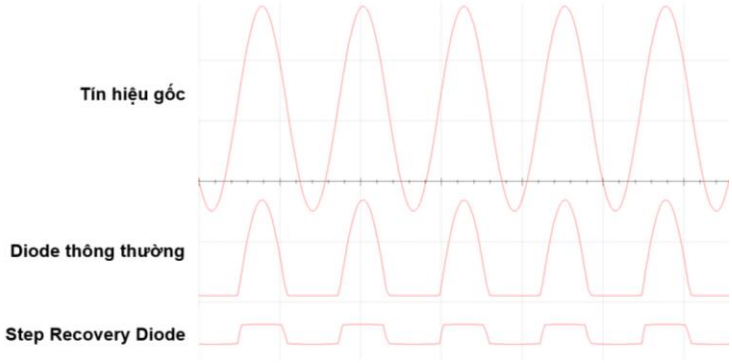
2.1.1. Cấu trúc, đặc điểm của SRD

Hoạt động của SRD tập trung vào hiệu ứng chuyển đổi nhanh từ trạng thái dẫn sang trạng thái ngắt, giúp giải phóng năng lượng tích tụ trong vùng chuyển tiếp. Cơ chế này tạo ra các xung tín hiệu có điện áp cao và độ rộng xung siêu hẹp. Các mô hình toán học liên quan đến tốc độ tích tụ và giải phóng năng lượng được áp dụng để mô phỏng khả năng tạo xung siêu hẹp của diode [8], [10].

SRD là một loại diode mà tạp chất của nó có sự phân bố bất thường, được thể hiện trên Hình 1. Giữa lớp p^+, lớp n^+ pha tạp cao là một lớp loại n pha tạp thấp. Lớp này có cấu trúc tiếp giáp thay đổi chậm.

Hình 1. *Cấu hình Step Recovery Diode và diode thông thường* [8]

Hình 2 mô tả đặc tính dẫn điện thuận và nghịch của diode thông thường và SRD đối với kích thích đầu vào là tín hiệu hình sin [8]. Khi SRD chuyển đổi từ điện áp kích thích dương sang điện áp kích thích âm, một dòng điện ngược mạnh liên tục chảy cho đến khi kết thúc tại một thời điểm, do đó tạo thành một điện áp sụt dốc, xung hẹp có thể được tạo ra theo cách này [8]. Quá trình nạp và xả hạt thiểu số của SRD tương tự tụ điện nhưng khác biệt ở chỗ: tụ điện dựa trên điện trường, còn SRD dựa vào sự tích tụ và phóng thích hạt thiểu số (lỗ trống).



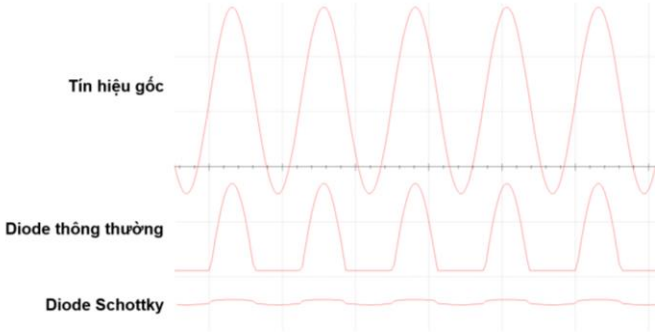
Hình 2. *Đặc tính điện áp của diode thông thường và Step Recovery Diode* [8]

2.1.2. Cấu trúc, đặc điểm của diode Schotkky

Diode Schottky đặt theo tên một nhà vật lý người Đức Walter H.Schottky, được tạo từ một mối nối giữa kim loại và bán dẫn N thay vì mối nối P-N như trong các diode thông thường. Loại kim loại thường là vàng (Au), nhôm (Al) hoặc bạch kim (Pt). Tại mối nối kim loại-bán dẫn, một rào thế Schottky có độ rộng nhỏ hơn so với rào thế trong mối nối PN như thể hiện trên Hình 3 [14]. Điều này giúp dòng điện dễ dàng đi qua khi phân cực thuận. Cấu hình vật lý của diode Schottky giúp diode có khả năng chuyển mạch nhanh mà không cần thời gian phục hồi.

Hình 4 mô tả điện áp rơi của diode Schottky khoảng 0,15-0,45 V so với điện áp rơi khoảng 0,7-1,7 V được tạo ra bởi diode thông thường khi dòng điện chạy qua. Do đó, sử dụng diode Schottky có thể nâng cao tốc độ chuyển mạch của hệ thống [7].

Hình 3. *Cấu hình diode Schottky và diode thông thường* [14]

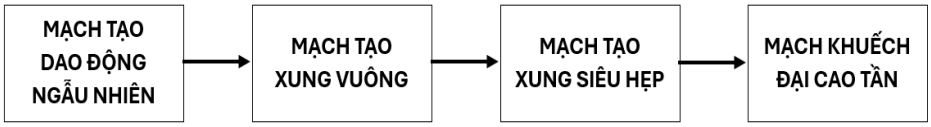


Hình 4. *Đặc tính điện áp của diode thông thường và diode Schottky* [7]

Nhược điểm lớn nhất của diode Schottky là độ lệch ngược của nó tương đối thấp và dòng rò ngược quá lớn. Đối với diode Schottky, điện áp chịu được định mức phân cực ngược tối đa chỉ là 50-200V và dòng rò ngược dễ tăng nhanh khi nhiệt độ tăng. Loại diode này không có lợi thế trong các ứng dụng ngoại trừ khi yêu cầu tốc độ chuyển mạch cao [7].

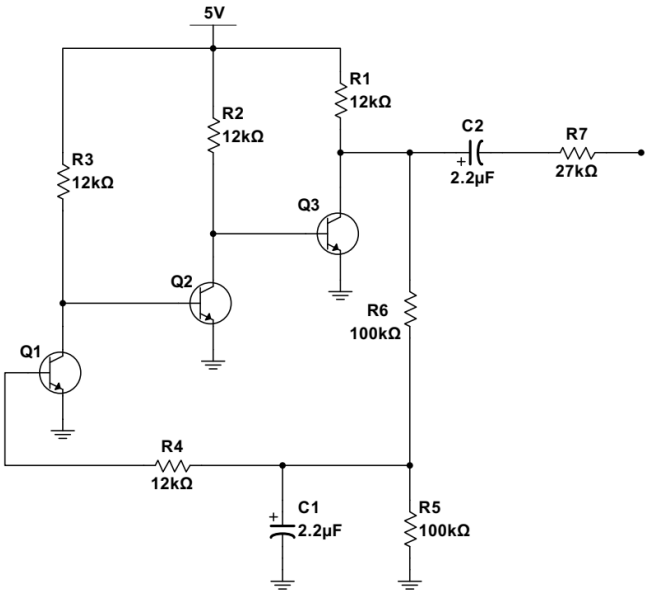
2.2. Mạch tạo xung siêu hẹp công suất thấp

Mạch tạo xung được thiết kế bao gồm các thành phần chính được thể hiện trên sơ đồ cấu trúc Hình 5 dựa trên việc cải tiến thiết kế mạch sử dụng trong các công trình [8], [10], [11], [13], bổ sung mạch tạo dao động ngẫu nhiên và mạch tạo xung vuông, mạch tạo sung siêu hẹp và khuếch đại cao tần sử dụng transitor BJT, 2 diode SRD hoặc 2 diode Schottky. Trong đó, *mạch tạo dao động ngẫu nhiên* (Hình 6)*:* tạo dao động ngẫu nhiên, cung cấp tín hiệu đầu vào của khối tạo xung vuông, đây là nguồn xung ban đầu cho khối. Ba transistor loại BC847B đóng vai trò là chuyển mạch điện tử chuyển đổi giữa hai trạng thái dẫn và ngắt để tạo dao động. BC847B có khả năng chuyển mạch nhanh, phù hợp cho mạch dao động tần số cao. Các điện trở R1, R2, R3 định áp; R5, R6 điều chỉnh dòng cho các transistor; R7 giúp ổn định tín hiệu. Hai tụ điện C1, C2 nạp và phóng điện tạo ra sự thay đổi điện áp để kích hoạt các transistor.

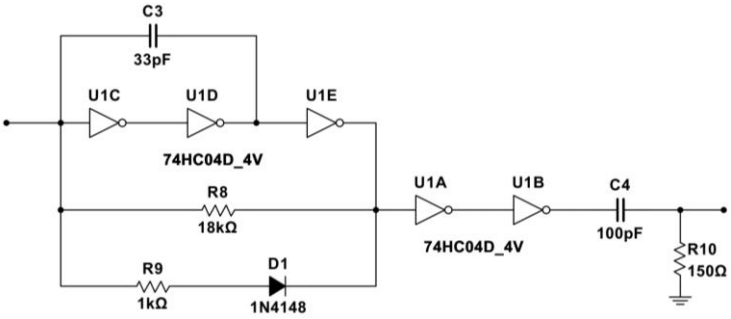


Hình 5. *Sơ đồ cấu trúc mạch tạo xung siêu hẹp*

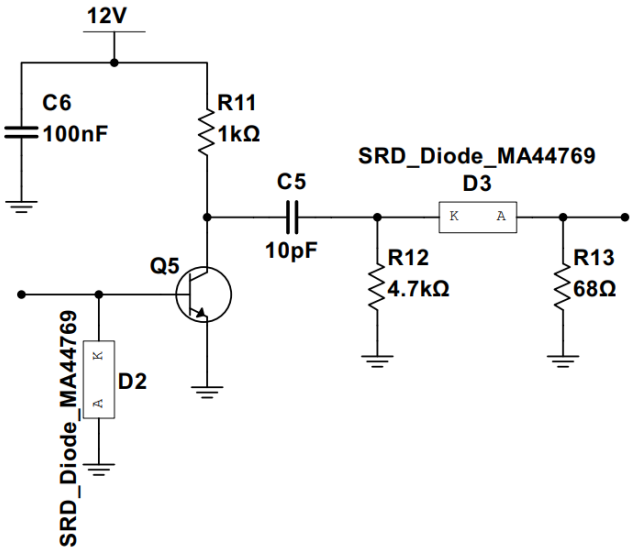
Mạch tạo xung vuông (Hình 7)*:* tạo chuỗi xung vuông có biên độ ổn định và tần số lặp xác định đảm bảo tham số cự ly cho radar UWB sử dụng IC 74HC04. Giá trị của tụ điện C3 và điện trở R8 xác định giá trị tần số lặp xung. Diode 1N4148 và điện trở R9 để hạn chế điện áp ngược bảo vệ mạch. Tụ C4, điện trở R10 là mạch vi phân.



Hình 6. *Mạch tạo dao động ngẫu nhiên*



Hình 7. *Mạch tạo xung vuông*



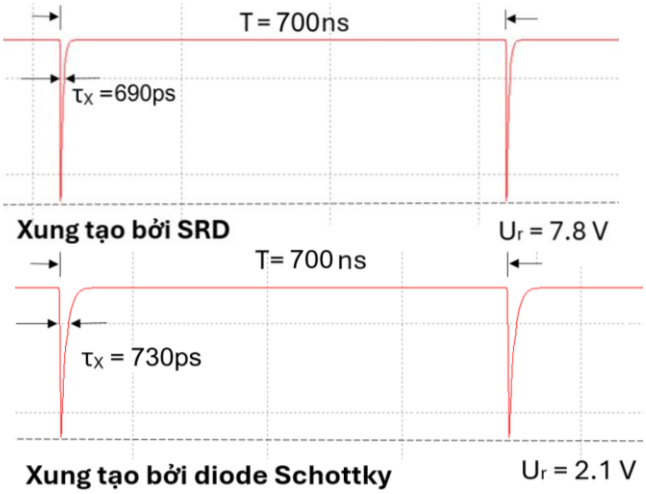
Hình 8. *Mạch tạo xung siêu hẹp và khuếch đại cao tần*

Mạch tạo xung siêu hẹp và khuếch đại cao tần (Hình 8): rút ngắn độ rộng xung tạo thành các xung siêu hẹp với độ chính xác cao, đồng thời khuếch đại chuỗi xung siêu hẹp lên mức cần thiết.

Trên mạch: transistor BFG135A là transistor khuếch đại tín hiệu; các diode D2, D3 là diode SRD MA44769 đóng vai trò chính trong tạo xung siêu hẹp (ở đây có thể thay thế bằng diode Schottky, trong bài báo sử dụng diode BAT15-04 để so sánh); tụ C6 lọc nhiễu nguồn, đảm bảo điện áp nguồn ổn định cho mạch; tụ C5 ghép tín hiệu giữa các tầng; R10 hạn chế dòng qua D2; R11 định dòng cho Q5; R12 tạo thành phần hồi tiếp, định hình xung ra; R13 hạn chế dòng qua D3 đảm bảo xung đầu ra sắc nét.

3. Kết quả và thảo luận

Kết quả thu được bằng việc mô phỏng sử dụng phần mềm Multisim để kiểm tra hoạt động của mạch trước khi thực hiện trên phần cứng. Các thông số quan trọng được đo lường trong mô phỏng bao gồm độ rộng xung, chu kỳ lặp, phổ tần số và biên độ tín hiệu. Mô phỏng được tiến hành để đánh giá hiệu năng của mạch tạo xung sử dụng SRD loại MA44769, diode Schottky BAT15-04. Các kết quả dưới đây cho thấy khả năng tạo ra các xung siêu hẹp và sự ổn định của tín hiệu đầu ra.



Hình 9. *Tín hiệu xung siêu hẹp ở đầu ra tạo bởi SRD MA44769 so với diode Schottky BAT15-04*

Độ rộng xung: Hình 9 trình bày kết quả đầu ra của mạch tạo xung siêu hẹp sử dụng SRD MA44769 và diode Schottky BAT15-04 với chu kỳ lặp 700 ns. Xung tín hiệu được tạo ra có độ rộng khoảng 690 ps đối với diode SRD MA44769, khoảng 730 ps đối với diode Schottky BAT15-04. Đo đạc này được thực hiện bằng máy hiện sóng với độ phân giải thời gian 10 ps. Kết quả cho thấy rằng phương pháp sử dụng SRD có khả năng tạo ra các xung siêu hẹp đáp ứng yêu cầu của các hệ thống UWB và các ứng dụng cần tín hiệu có độ rộng rất nhỏ. Đặc biệt, SRD MA44769 cho phép điều chỉnh độ rộng xung qua việc thay đổi các thông số trong mạch khuếch đại và mạch điều chỉnh với độ chính xác cao.

Độ rộng phổ: Phổ của xung tín hiệu đầu ra được đo bằng máy phân tích phổ trong công cụ mô phỏng. Kết quả cho thấy phổ tần số mở rộng đến 1,4 GHz, phù hợp với yêu cầu của các hệ thống radar UWB. Mạch sử dụng SRD có thể duy trì độ rộng phổ ổn định trong suốt thời gian thử nghiệm, điều này chứng tỏ sự ổn định của xung trong các ứng dụng yêu cầu băng thông rộng.

Biên độ xung: Biên độ của xung tín hiệu dao động khi sử dụng diode BAT15-04 trong khoảng từ 2,1 V đến 3,7 V; MA44769 cho giá trị ổn định từ 7,8 V đến 8,3 V với sự ổn định cao. Việc duy trì biên độ này là yếu tố quan trọng để đảm bảo tín hiệu đủ mạnh để được phát hiện trong các ứng dụng radar và truyền thông.

Bảng 1. *So sánh các tham số xung tạo bởi diode Schottky và SRD*

Tham số	Độ rộng xung	Phổ tần số	Biên độ xung
Schotkky BAT15-04	730 ps	~1,4 GHz	2,1-3,7 V
SRD MA44769	690 ps	~1,4 GHz	7,8-8,3 V

Bảng 1 tổng hợp so sánh các tham số xung đầu ra khi mô phỏng giữa mạch sử dụng diode Schottky BAT15-04 và SRD MA44769. Cả hai loại mạch đều có phổ tần số khoảng 10 GHz, phù hợp cho các ứng dụng băng rộng. Mạch sử dụng SRD MA44769 cho độ rộng xung nhỏ hơn (690 ps) và biên độ cao (7,8-8,3 V), vượt trội so với mạch sử dụng diode Schottky BAT15-04 với độ rộng xung 730 ps và biên độ trong khoảng (2,1-3,7 V). Qua mô phỏng, nhận thấy rằng, tạo xung siêu hẹp bằng SRD MA44769 có độ rộng xung nhỏ hơn khi sử dụng diode Schotkky BAT15-04. Sử dụng SRD có ưu điểm vượt trội về độ ổn định, mức tín hiệu cao, đơn giản trong thiết kế mạch, chi phí thấp và khả năng tích hợp cao vào các cảm biến radar UWB, thiết bị thông tin vô tuyến tốc độ cao. Tín hiệu tạo ra cũng ít bị ảnh hưởng bởi các yếu tố môi trường so với các phương pháp quang học.

So với các nghiên cứu trước đây, mạch tạo xung siêu hẹp được đề xuất có ưu điểm về thiết kế đơn giản, chi phí thấp. Trong nghiên cứu của Marco Mütze [8], một mạch tạo xung siêu hẹp sử dụng SRD cho ứng dụng y tế được thiết kế với độ rộng xung đạt khoảng 112 ps, nhưng yêu cầu linh kiện chi phí cao. Tương tự, nghiên cứu của MuhibUr Rahman [10] đã đề xuất một mạch tạo xung dựa trên cấu trúc SRD và Nonlinear Transmission Line, giúp cải thiện độ rộng xung nhưng lại làm tăng độ phức tạp của trong thiết kế. Trong khi đó, nghiên cứu của Guancong Liu [11] cũng sử dụng SRD để tạo xung sub-nanosecond nhưng yêu cầu các tầng khuếch đại bổ sung để duy trì biên độ xung. So với các công trình trên, mạch đề xuất trong bài viết này có thiết kế đơn giản, không yêu cầu các tầng khuếch đại phức tạp, nhưng vẫn đạt độ rộng xung khoảng 690 ps với phổ tín hiệu mở rộng đến 1,4 GHz. Điều này cho thấy mạch có thể đáp ứng yêu cầu của các hệ thống radar băng siêu rộng và giám sát y tế với chi phí giảm trong khi vẫn đảm bảo tính năng kỹ thuật.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày khái quát các phương pháp tạo xung siêu hẹp, trong đó tập trung trình bày phương pháp tạo xung siêu hẹp bằng SRD với mạch đơn giản, chi phí thấp, công suất nhỏ và so sánh với phương pháp tạo xung siêu hẹp sử dụng diode Schottky. Thông qua nghiên cứu này, nhận thấy SRD có ưu điểm như khả năng tạo xung siêu hẹp nhờ thời gian chuyển mạch nhanh. So với diode Schottky, SRD khắc phục được các hạn chế về độ rộng xung và biên độ xung lớn hơn, từ đó mở ra tiềm năng lớn cho các ứng dụng trong radar, thông tin.

Ngoài ra, bài báo cũng thảo luận về nguyên lý hoạt động của từng loại diode, từ đó làm rõ sự khác biệt trong hiệu quả tạo xung siêu hẹp. Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng SRD là một phương pháp hiệu quả, hướng đến sự tối ưu hóa hệ thống điện tử vô tuyến hiện đại.

Một hướng nghiên cứu tiềm năng là kết hợp mạch sử dụng SRD với các công nghệ FPGA và vi điều khiển, giúp tối ưu hóa thiết kế mạch, khả năng điều chỉnh mềm các tham số xung. Từ đó nâng cao hiệu suất trong các ứng dụng thực tiễn. Nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào việc phát triển các mạch khuếch đại và điều chỉnh tham số xung thông qua FPGA hoặc vi điều khiển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] M. Malajner, D. Šipoš, and D. Gleich, "Design of a Low-Cost Ultra-Wide-Band Radar Platform," *Sensor*, vol. 20, no. 10, pp. 1-2, 2020.

[2] F. Abushakra, N. Jeong, D. N. Elluru, *et al.*, "A Miniaturized Ultra-Wideband Radar for UAV Remote Sensing Applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 3, pp. 2-3, 2021.

[3] M. Cheraghinia, A. Shahid, S. Luchie, G. Gordebeke, *et al.*, "A Comprehensive Overview on UWB Radar: Applications, Standards, Signal Processing Techniques, Datasets, Radio Chips, Trends and Future Research Directions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 2024, pp. 1-42, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2402.05649.

[4] S. Kropotukhin, Y. Patrakov, V. Popovtsev, *et al.*, "Wave Transients Study in Physical Models of Transmission Lines with Pulse Voltage Generator on the Base of Delay Lines," *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, Yekaterinburg, Russia, 2020, pp. 68-70.

[5] P. Lu, C. Song, and K. M. Huang, "Ultra-Wideband Rectenna Using Complementary Resonant Structure for Microwave Power Transmission and Energy Harvesting," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 7, pp. 1058-1062, 2021.

[6] H. Zhao, X. Wang, Y. Zheng, *et al.*, "Research on LC series resonant high voltage capacitor charging power supply," *2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, Nangjing, China, 2022, pp. 551-556.

[7] R. Feghhi, R. Winter, and K. Rambabu, "A High-Performance UWB Gaussian Pulse Generator: Analysis and Design," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 6, pp. 1254-1266, 2022.

[8] M. Mütze, A. Bakkal, P. Schaffer, *et al.*, "A Compact 112 ps Step Recovery Diode Based Pulse Generator for Medical Applications," *2024 15th German Microwave Conference (GeMiC)*, Duisburg, Germany, 2024, pp. 128-131.

[9] R. Sun, K. Zhang, W. Chen, Y. Xia, J. Tan, *et al.*, "10-kV 4H-SiC Drift Step Recovery Diodes (DSRDs) for Compact High-repetition Rate Nanosecond HV Pulse Generator," *2020 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Vienna, Austria, 2020, pp. 62-65.

[10] M. Rahman and K. Wu, "A Fine Picosecond Pulse Generator Based on Novel SRD Topology and Tapered NLTL," *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Los Angeles, CA, USA, 2020, pp. 301-304.

[11] G. Liu, X. Xiao, Min Lu, *et al.*, "A compact ultra-wideband sub-nanosecond pulse generator with step recovery diodes," *Measurement Science and Technology*, vol. 34, no. 8, pp. 23-27, 2023.

[12] T. Bartulevičius, M. Lipnickas, K. Madeikis, *et al.*, "Versatile Ultrashort Pulse Laser Tunable up to Nanosecond Range," *2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), Munich, Germany*, 2023, pp. 3-5.

[13] J. Zhou**,** X. Yang, Q. Lu, *et al.*, "A Novel Low-Ringing Monocycle Picosecond Pulse Generator Based on Step Recovery Diode," *PLoS ONE*, vol. 10, no. 8, pp. 1-9, 2015, doi:10.1371/journal.pone.0136287.

[14] S. M. Sze and M. K. Lee, *et al.*, *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012, pp. 101-104.