

THIẾT KẾ CẤU TRÚC VẬT LIỆU BIẾN HÓA CÓ Ô CƠ SỞ ĐƯỢC ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ CỘNG HƯỞNG BẰNG ÁNH SÁNG KHẢ KIẾN

Phạm Thanh Sơn^{1,*}, Lê Thị Hồng Hiệp², Bùi Xuân Khuyến³, Nguyễn Hải Anh³, Bùi Hữu Nguyên⁴,
Bùi Sơn Tùng⁵, Vũ Đình Lãm⁵

¹Trường Điện - Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Số 298 Cầu Diễn, Tây Tựu, Hà Nội

²Khoa Cơ sở ngành Phòng cháy chữa cháy, Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy,
Số 243 Khuất Duy Tiến, Đại Mỗ, Hà Nội

³Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
Số 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội

⁴Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Số 18 Phố Viên, Đông Ngạc, Hà Nội

⁵Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,
Số 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Hà Nội

*Email: sonpt@hau.edu.vn

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một cấu trúc vật liệu biến hóa từ tính có khả năng điều khiển vùng tần số hoạt động bằng ánh sáng của laser diode ở bước sóng 650 nm. Một mạch điện tích hợp với photodiode được gắn vào mặt sau của ô cơ sở vật liệu biến hóa, từ đó mạch điện này có thể thay đổi điện dung theo cường độ của ánh sáng chiếu tới. Sự thay đổi điện dung này có thể được sử dụng để điều khiển tần số hoạt động của ô cơ sở vật liệu biến hóa. Ở chế độ không chiếu sáng, ô cơ sở vật liệu biến hóa có tần số cộng hưởng tại 13,56 MHz. Khi có ánh sáng chiếu tới, tần số cộng hưởng này dịch chuyển về tần số 13 MHz. Cấu trúc vật liệu biến hóa với tần số cộng hưởng được điều khiển bằng ánh sáng này có thể được ứng dụng trong việc xây dựng các hệ thống truyền năng lượng không dây trường gần. Hệ thống truyền năng lượng không dây này có thể hoạt động ở hai vùng tần số 13 MHz và 13,56 MHz và cũng có thể chuyển mạch hoạt động bằng ánh sáng.

Từ khóa: Truyền năng lượng không dây, vật liệu biến hóa, chuyển mạch bằng ánh sáng, điều khiển tần số, laser diode.

GIỚI THIỆU

Vật liệu biến hóa ngày nay đã là một hướng nghiên cứu rộng lớn với nhiều tiềm năng ứng dụng trong các lĩnh vực như quân sự quốc phòng, y sinh, viễn thông, cảm biến và nhiều ngành công nghiệp khác. Vật liệu biến hóa có thể được chế tạo để hoạt động trong các dải tần số khác nhau từ kHz tới vùng ánh sáng nhìn thấy. Nó cũng có thể hoạt động với nhiều loại sóng khác nhau từ sóng điện từ, sóng âm, sóng nước và trong nhiều môi trường khác nhau [1, 2].

Một trong những hướng nghiên cứu về vật liệu biến hóa đang thu hút được nhiều sự chú ý là ứng dụng vật liệu biến hóa trong hệ thống truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer - WPT) trường gần. Hệ thống truyền năng lượng không dây này hoạt động ở vùng tần số MHz. Do đó các cấu trúc vật liệu biến hóa này cũng cần được thiết kế trong vùng tần số này. Trong vùng tần số MHz này thì vùng tần số 13,56 MHz thuộc dải tần cho công nghiệp, khoa học và y tế (Industrial, Scientific, and Medical - ISM) được sử dụng nhiều nhất cho các hệ thống WPT [3-6].

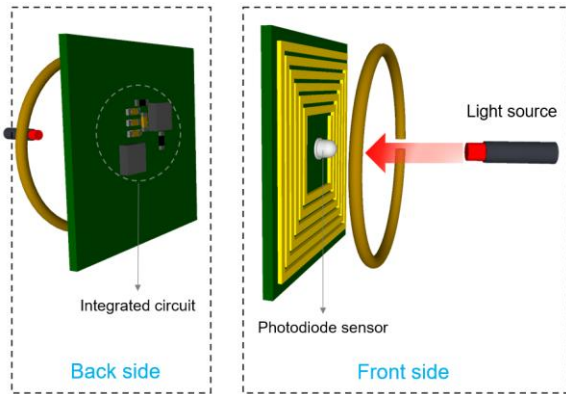
Các hệ thống WPT thường được thiết kế để hoạt động trong một chế độ cố định với tần số hoạt động đã được tính toán cụ thể với các linh kiện của hệ thống. Tuy nhiên điều này làm giới hạn khả năng ứng dụng của các hệ thống WPT. Do đó, một số nghiên cứu đã được triển khai để tạo ra các hệ thống WPT có dải tần số hoạt động linh hoạt, đáp ứng nhiều ứng dụng thực tiễn khác nhau. Tương ứng với các hệ thống WPT có thể thay đổi vùng tần số hoạt động thì chúng ta cũng cần thiết kế các cấu trúc vật liệu biến hóa có khả năng hoạt động ở vùng tần số tương tự để có thể tích hợp vào hệ thống [7-10].

Trong nghiên cứu này chúng tôi trình bày một cấu trúc vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển tần số hoạt động bằng ánh sáng khả kiến. Ô cơ sở vật liệu biến hóa được thiết kế trên bảng mạch in (Printed Circuit Board - PCB) có tần số cộng hưởng riêng là 50 MHz. Tần số cộng hưởng của ô cơ sở được dịch về 13,56 MHz với sự có mặt của một tổ hợp tụ điện ở mặt sau của nó. Các tụ điện này là một phần của mạch điện tích hợp bao gồm tụ điện, cuộn cảm, điện trở, diode biến dung, nguồn điện một chiều, photodiode và laser diode để có thể dịch tần số cộng

hưởng của ô cơ sở từ 13,56 MHz về 13 MHz khi có ánh sáng từ laser diode chiếu tới photodiode.

THIẾT KẾ Ô CƠ SỞ VẬT LIỆU BIẾN HÓA

Hình 1 trình bày hình ảnh của ô cơ sở vật liệu biến hóa được tích hợp mạch chuyển đổi tần số và một nguồn sáng. Ánh sáng sử dụng ở đây được lấy từ một laser diode với bước sóng 650 nm. Ánh sáng này sẽ được chiếu thẳng vào photodiode ở mặt trước của ô cơ sở, điều này sẽ kích thích mạch chuyển đổi tần số ở phía sau của ô cơ sở hoạt động. Với thiết kế ô cơ sở này, tần số hoạt động của vật liệu biến hóa có thể điều khiển từ xa bằng ánh sáng, không nhất thiết phải có kết nối cơ học giữa ô cơ sở và bộ phận điều khiển. Thiết kế này rất hữu ích trong những tình huống đặc biệt, hoặc trong các vị trí nhạy với ánh sáng.



Hình 1: Ô cơ sở của vật liệu biến hóa với mạch tích hợp và laser để điều khiển tần số

Hình 2 trình bày mạch tích hợp ở mặt sau của ô cơ sở vật liệu biến hóa. Mạch tích hợp này bao gồm các thành phần như sau: cấu trúc xoắn ốc bằng đồng trên PCB của vật liệu biến hóa được mô hình hóa bằng các thành phần điện cảm, điện dung và điện trở (L_s , C_s , R_s), tụ điện C_0 để dịch tần số cộng hưởng của ô cơ sở từ 50 MHz về 13,56 MHz, diode biến dung C_v để điều khiển tần số của ô cơ sở từ 13,56 MHz về 13 MHz khi có ánh sáng chiếu tới photodiode D_1 , các tụ điện C_1 , C_2 để ngăn dòng một chiều chạy từ nguồn V_{MOD} tới phần cấu trúc xoắn ốc của ô cơ sở, cuộn cảm L_1 , L_2 để ngăn dòng xoay chiều từ phần cấu trúc xoắn ốc khi ô cơ sở hoạt động tác động lên phần mạch điện tích hợp, điện trở R_1 để chia điện áp tác dụng lên diode biến dung C_v trong các trường hợp photodiode D_1 được chiếu sáng và không được chiếu sáng.

Mạch tích hợp có thể làm thay đổi điện dung của diode biến dung C_v trong các trường hợp photodiode được chiếu sáng và không được chiếu sáng, từ đó

làm thay đổi tần số hoạt động của ô cơ sở vật liệu biến hóa. Khi photodiode không được chiếu sáng, do L_1 và L_2 hoạt động như dây dẫn và C_1 , C_2 không cho dòng một chiều chạy qua nên điện áp rơi trên diode biến dung C_v bằng giá trị của $V_{MOD} = 5$ V. Với điện áp này giá trị điện dung của diode biến dung C_v sẽ là 10 pF, tương ứng với tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu biến hóa là 13,56 MHz. Trong trường hợp ánh sáng chiếu tới photodiode làm cho nó dẫn điện với điện trở là 200 Ω . Để tạo được điện áp rơi trên C_v là 1,67 V, R_1 được lựa chọn với giá trị là 400 Ω . Với giá trị điện áp này diode biến dung sẽ cho giá trị điện dung là 18 pF. Với giá trị điện dung này, ô cơ sở của vật liệu biến hóa sẽ có tần số cộng hưởng tương ứng là 13 MHz.

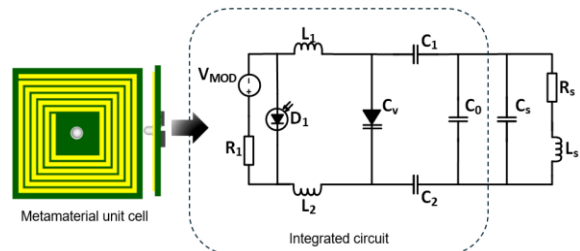
Để làm rõ hơn sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng vào giá trị điện dung của diode biến dung, chúng ta có công thức tính tần số cộng hưởng của ô cơ sở như sau:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_{total}}} \quad (1)$$

Trong đó, C_{total} là tổng điện dung của mạch tích hợp được tính toán như sau:

$$C_{total} = C_s + C_0 + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_v} \right)^{-1} \quad (2)$$

Từ Công thức 2 chúng ta có thể thấy khi giá trị của C_v thay đổi sẽ ảnh hưởng đến giá trị C_{total} và từ đó làm thay đổi tần số cộng hưởng của ô cơ sở. Khi C_v tăng lên sẽ làm cho C_{total} tăng lên và làm giảm tần số cộng hưởng của ô cơ sở.

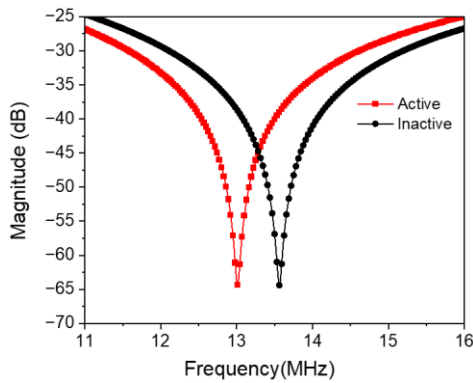


Hình 2: Mạch tích hợp điều khiển tần số của ô cơ sở vật liệu biến hóa

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

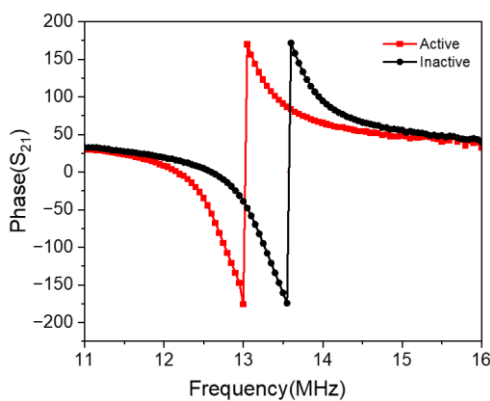
Hình 3 trình bày kết quả mô phỏng mạch của ô cơ sở vật liệu biến hóa được gắn với mạch tích hợp điều khiển tần số. Trong điều kiện bình thường không có ánh sáng chiếu tới, ô cơ sở của vật liệu biến hóa cộng hưởng ở tần số 13,56 MHz (đường màu đen). Khi photodiode được chiếu sáng, điện áp trên diode biến dung giảm xuống còn 1,67 V, làm

cho giá trị điện dung của diode biến dung tăng lên 18 pF. Kết quả là tần số cộng hưởng của ô cơ sở giảm về 13 MHz (đường màu đỏ).

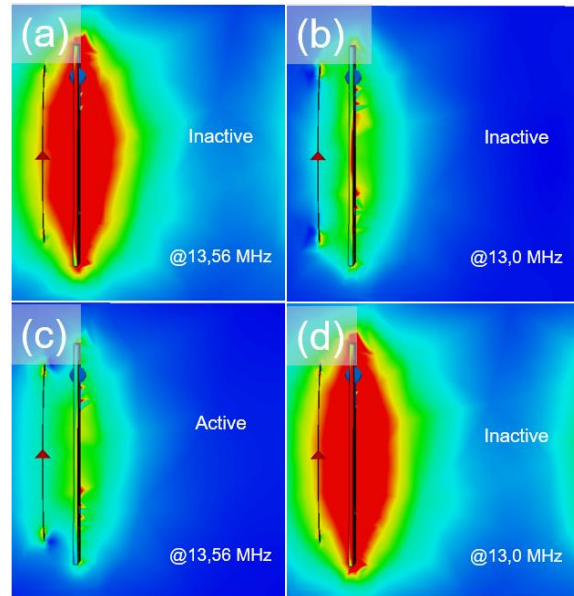


Hình 3: Tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu biến hóa với điều kiện chiếu sáng và không chiếu sáng

Tiếp theo, chúng ta quan sát đáp ứng pha của ô cơ sở vật liệu biến hóa trong hai trường hợp được chiếu sáng và không được chiếu sáng. Chúng ta nhận thấy rằng đáp ứng pha của ô cơ sở vật liệu biến hóa có sự thay đổi 360° tại tần số cộng hưởng. Trong trường hợp không được chiếu sáng sự chuyển pha này xảy ra tại tần số 13,56 MHz. Ngược lại khi được chiếu sáng sự chuyển pha này xảy ra tại tần số 13 MHz. Các kết quả mô phỏng trong Hình 3 và Hình 4 cho thấy ô cơ sở của vật liệu biến hóa khi được tích hợp mạch điều khiển tần số có gắn diode biến dung và photodiode nhận quang có khả năng chuyển mạch giữa hai tần số hoạt động là 13,56 MHz khi không được chiếu sáng và 13 MHz khi được chiếu sáng. Việc chuyển mạch này diễn ra hoàn toàn tự động khi có kích thích của ánh sáng chiếu tới. Cả hai tần số này đều rất thích hợp cho các hệ thống WPT trường gần. Do hệ thống WPT hoạt động trong vùng trường gần của từ trường nên ánh sáng đỏ dùng để điều khiển mạch tích hợp sẽ không gây ra bất cứ can nhiễu nào cho hệ thống.



Hình 4: Đáp ứng pha của ô cơ sở vật liệu biến hóa với điều kiện chiếu sáng và không chiếu sáng

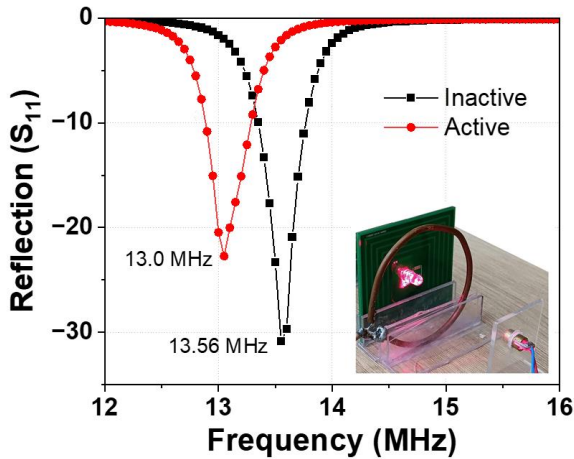


Hình 5: Phân bố từ trường xung quanh ô cơ sở vật liệu biến hóa với các cấu hình khác nhau (a) không có chiếu sáng tại tần số 13,56 MHz, (b) không có chiếu sáng tại tần số 13 MHz, (c) chiếu sáng tại tần số 13,56 MHz, (d) chiếu sáng tại tần số 13 MHz

Để phân tích kỹ hơn hoạt động của ô cơ sở vật liệu biến hóa khi chuyển đổi giữa các tần số, các mô phỏng sử dụng phần mềm CST đã được tiến hành để quan sát phân bố từ trường xung quanh ô cơ sở ở các tần số hoạt động khác nhau. Hình 5(a) trình bày phân bố từ trường xung quanh ô cơ sở vật liệu biến hóa tại tần số 13,56 MHz trong điều kiện không được chiếu sáng. Như đã trình bày trong các phần trước, khi không được chiếu sáng thì ô cơ sở vật liệu biến hóa cộng hưởng tại tần số 13,56 MHz do đó trong trường hợp này chúng ta quan sát thấy từ trường rất mạnh xung quanh ô cơ sở của vật liệu biến hóa. Hình 5(b) biểu diễn phân bố từ trường với cấu hình giống như Hình 5(a) nhưng ở tần số 13 MHz. Đây không phải tần số cộng hưởng của ô cơ sở khi không được chiếu sáng, do đó từ trường xung quanh ô cơ sở yếu hơn rất nhiều so với tại tần số 13,56 MHz. Hình 5(c, d) biểu diễn phân bố từ trường xung quanh ô cơ sở vật liệu biến hóa ở hai tần số 13,56 MHz và 13 MHz giống như Hình 5(a, b) nhưng trong trường hợp có ánh sáng từ laser diode chiếu vào photodiode để làm giảm tần số hoạt động của ô cơ sở về 13 MHz. Các kết quả thu được cũng cho thấy từ trường mạnh tại tần số 13 MHz trong khi đó bị suy giảm đi nhiều tại tần số 13,56 MHz. Kết quả mô phỏng này phù hợp với các tính toán lý thuyết đã trình bày ở phần trên.

Sau khi tính toán lý thuyết và mô phỏng chúng tôi tiến hành chế tạo ô cơ sở vật liệu biến hóa hoạt động tại hai tần số 13 MHz và 13,56 MHz. Hình 6 trình

bày ô cơ sở vật liệu biến hóa và đáp ứng tần số của nó khi được chiếu sáng và không được chiếu sáng. Các kết quả đo đạc cho thấy ô cơ sở vật liệu biến hóa có đáp ứng tốt với ánh sáng laser chiếu tới và có thể hoạt động ở hai dải tần số 13 MHz và 13,56 MHz.



Hình 6: Đo đặc tần số hoạt động của ô cơ sở vật liệu biến hóa

KẾT LUẬN

Báo cáo này trình bày một thiết kế ô cơ sở vật liệu biến hóa có khả năng thay đổi tần số cộng hưởng khi có ánh sáng chiếu tới. Một mạch điện có khả năng điều khiển điện dung bằng ánh sáng được tích hợp vào ô cơ sở vật liệu biến hóa. Từ đó tần số cộng hưởng của ô cơ sở có thể được thay đổi dựa trên ánh sáng chiếu tới. Ánh sáng từ laser diode có bước sóng 650 nm được sử dụng trong nghiên cứu này có thể kích thích photodiode chuyển từ chế độ cách điện sang dẫn điện từ đó thay đổi tần số cộng hưởng của ô cơ sở từ 13,56 MHz về 13 MHz. Việc điều khiển tần số hoạt động của ô cơ sở bằng cách sử dụng ánh sáng laser mang lại khả năng điều khiển ở

khoảng cách xa, giúp cấu trúc vật liệu biến hóa này có nhiều tiềm năng ứng dụng trong nhiều tình huống, đặc biệt trong truyền năng lượng không dây trường gần.

Tài liệu tham khảo

1. X. Fu, H. Liang, J. Li, Front. Optoelectron, 14, 2, 170-186 (2021).
2. S. Tian, X. Zhang, X. Wang, J. Han, L. Li, Nanophotonics, 11, 9, 1697-1723 (2022).
3. D. Wang, J. Zhang, S. Cui, Z. Bie, F. Chen, C. Zhu, Renew. Sustain. Energy Rev., 189, 113910 (2024).
4. W. Li, Q. Yu, J. H. Qiu, J. Qi, Nat. Comm., 15, 2807 (2024).
5. N.N. Linh, L.T.H. Hiep, N.K. Viet, H.N. Bui, H.A. Nguyen, B.S. Tung, B.X. Khuyen, T.S. Pham, V.D. Lam, Phys. Scr., 100, 065550 (2025).
6. S. Chu, M.S. Luloff, J. Yan, P. Petrov, C.J. Stevens, E. Shamonina, Sci. Rep., 11, 7679 (2021).
7. B.H. Nguyen, P.T. Son, L.T.H. Hiep, N.H. Anh, D.K. Tung, B.X. Khuyen, B.S. Tung, V.D. Lam, H. Zheng, L. Chen, Y. Lee, Crystals, 14, 999 (2024).
8. L.T.H. Hiep, H.N. Bui, B.S. Tung, V.D. Lam, B.X. Khuyen, T.S. Pham, Appl. Phys. A, 130, 521 (2024).
9. R. Lin, H.J. Kim, S. Achavananthadith, S.A. Kurt, S.C.C. Tan, H. Yao, B.C.K. Tee, J.K.W. Lee, J.S. Ho, Nat. Comm., 11, 444 (2020).
10. T.S. Pham, B.X. Khuyen, B.S. Tung, T.T. Hoang, V.D. Pham, Q.M. Ngo, V.D. Lam, J. Electron. Mater., 50, 02, 443-449 (2021).