NÂNG CAO HIỆU SUẤT TRUYỀN DẪN CHO HỆ THỐNG TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY CỘNG HƯỞNG TỪ VỚI VẬT LIỆU BIẾN HÓA

ENHANCED THE POWER TRANSMISSION EFFICIENCY FOR MAGNETIC RESONANCE WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM WITH METAMATERIAL

Hà Thị Kim Duyên[1], Nguyễn Thảo Duy[2], Phạm Thanh Sơn[2,*]

DOI: https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.140

TÓM TẮT

Truyền năng lượng không dây (Wireless Power Transfer - WPT) đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực của cuộc sống hiện đại, bao gồm sạc không dây cho các thiết bị điện tử cầm tay, xe điện và cấp nguồn cho các thiết bị y sinh được cấy ghép trong cơ thể người. Tuy nhiên, hiệu suất truyền tải của hệ thống WPT giảm mạnh do sự suy giảm của từ trường theo khoảng cách. Vật liệu biến hóa (Metamaterial - MM) có khả năng khuếch đại sóng dập tắt (Evanescent wave) trong trường gần đã được sử dụng để cải thiện hiệu suất của hệ thống WPT. Trong báo cáo này, tấm vật liệu biến hóa đã được thiết kế để tăng cường hiệu suất truyền dẫn cho hệ thống WPT tại 6,5MHz. Hệ thống WPT được nghiên cứu về mặt lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm. Sự cải thiện hiệu suất đạt được tương đối cao từ 38% lên đến 57% và phạm vi truyền điện hiệu quả có thể được mở rộng đáng kể. Cấu trúc MM được đề xuất có kích thước rất nhỏ gọn và khá mỏng do đó có thể dễ dàng tích hợp vào hệ thống WPT.

Từ khóa: *Truyền năng lượng không dây, cộng hưởng từ, vật liệu biến hóa.*

ABSTRACT

Magnetic resonance wireless power transfer (WPT) has been used in various applications, including wireless charging for portable electronic devices, electric vehicles, and powering implanted biomedical devices. However, the transmission efficiency decreased sharply due to the degradation of the magnetic field. Metamaterial (MM), which can enhance the evanescent wave in the near field, is used to improve the WPT efficiency. In this paper, a MM slab is designed for improving the power transfer efficiency (PTE) of the 6.5MHz WPT system. The WPT system is studied in terms of theory, simulation and experiment. The relative efficiency of WPT system improved from 38% to 57%. Therefore, the effective power transmission range can be significantly expanded. The proposed MM structure is compact and thin, thus it can be easily integrated into electronic systems.

Keywords: *Wireless power transfer, magnetic resonance, metamaterial.*

[1]Khoa Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

[2]Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

[*]Email: sonpt@ims.vast.ac.vn

Ngày nhận bài: 15/01/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/5/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/8/2023

CHỮ VIẾT TẮT

WPT	Wireless power transfer
MM	Metamaterial
PTE	Power Transfer Efficiency
PCB	Printed Circuit Board
EM	Electromagnetic

1. GIỚI THIỆU

Gần đây, việc nghiên cứu và phát triển hệ thống truyền tải điện không dây (WPT) đã được thực hiện tích cực trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Phương pháp truyền năng lượng này có thể thay đổi cách sử dụng năng lượng truyền thống của chúng ta trong các ứng dụng đa dạng, chẳng hạn như thiết bị cấy ghép, thiết bị điện tử di động, máy bay không người lái, xe điện, vệ tinh vũ trụ,... Nhờ có tính di động, tính khả dụng, tính độc lập về vị trí và tính phổ biến, công nghệ WPT đã là một giải pháp lý tưởng để cấp nguồn cho các thiết bị điện tử [1]. Công nghệ WPT có thể được chia thành hai loại, cụ thể là WPT trường gần và trường xa [2, 3]. Tuy nhiên, trong ứng dụng thông thường WPT dựa trên trường gần phổ biến hơn do khả năng truyền công suất cao và hiệu quả tốt [4]. Có hai loại WPT gần tương ứng: (i) Trong phạm vi ngắn (Short-range), truyền năng lượng dựa trên cảm ứng từ được sử dụng rộng rãi nhất [5]; (ii) ở khoảng cách tầm trung (Mid-range), WPT dựa trên cộng hưởng từ thông qua các cuộn dây cộng hưởng không bức xạ mang lại nhiều ưu điểm [6, 7]. Trong hệ thống WPT dựa trên cộng hưởng từ năng lượng có thể được truyền tải hiệu quả với các bộ cộng hưởng có hệ số phẩm chất cao (Quality factor - *Q*-factor) [8].

Một số kỹ thuật để cải thiện hiệu suất truyền tải của hệ thống WPT đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây [13-18]. Hệ số ghép nối giữa cuộn dây nguồn cấp và bộ cộng hưởng được điều chỉnh để tối đa hóa hiệu suất truyền công suất [13, 14]. Việc điều chỉnh tần số được sử dụng để tối ưu

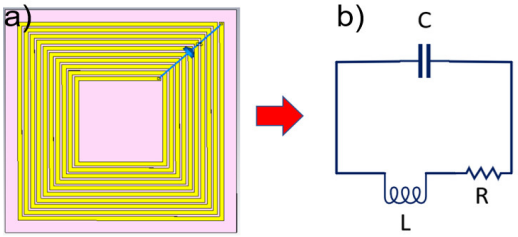
hóa hiệu suất truyền khi WPT được thực hiện trong vùng quá tải ghép cặp [15]. Trong [16], kỹ thuật kết hợp trở kháng tự động được thực hiện để cải thiện hiệu suất truyền tải điện. Phạm vi hoạt động của WPT đã được mở rộng bằng cách sử dụng cuộn dây trung gian [17] hoặc sử dụng một dãy bộ cộng hưởng [18].

Vật liệu biến hóa (MM) là những vật liệu được thiết kế nhân tạo có các đặc tính điện từ đặc biệt, chẳng hạn như chiết suất âm và khuếch đại sóng tắt dần (Evanescent wave) [19]. MM có thể điều khiển sóng điện từ, âm thanh, cơ học để đạt được đặc tính mong muốn [20-23]. MM từ trường là một nhánh của MM, hoạt động ở dải tần số MHz, đã đóng góp một số ứng dụng thương mại và nghiên cứu quan trọng [24-26]. MM từ trường thích hợp cho các ứng dụng WPT tầm trung [27-28]. Từ những ưu điểm này, MM từ trường được sử dụng để nâng cao hiệu suất của hệ thống WPT [29, 30].

Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu một cấu trúc MM mới để nâng cao hiệu quả của hệ thống WPT dựa trên cộng hưởng từ. Một tế bào đơn vị MM từ trường nhỏ gọn hoạt động ở vùng tần số MHz thấp được phân tích bằng phần mềm mô phỏng và chế tạo bằng công nghệ PCB (Printed Circuit Board). Các kết quả đo đạc tham số tán xạ (S-parameter) cho biết tần số cộng hưởng, cũng như hệ số truyền qua của hệ thống WPT. Tấm MM được xây dựng bởi 3 × 3 ô đơn vị đặt ở giữa cuộn cộng hưởng phát và cuộn cộng hưởng thu của hệ thống WPT. Ở khoảng cách 60cm, chúng tôi đạt được mức truyền tải lên 57% trong hệ thống WPT được bổ sung một tấm MM.

2. THIẾT KẾ TẤM VẬT LIỆU BIẾN HÓA

Một số cách tiếp cận đã được nghiên cứu để chế tạo cấu trúc MM. Trong số đó, sự kết hợp của bộ cộng hưởng xoắn ốc (Spiral Resonator - SR) với phần tử mạch R, L, C có thể điều chỉnh, được coi là một cách tiếp cận phù hợp để áp dụng cấu trúc MM cho WPT. Trong dải tần số thấp, tần số cộng hưởng tự nhiên của SR cao hơn nhiều so với tần số mong muốn của hệ thống WPT. Do đó, một tụ điện được thêm vào để giảm tần số cộng hưởng của SR. Mặt khác, tần số cộng hưởng thấp dẫn đến giảm Q-factor của SR, do đó làm tăng suy hao. Bởi vậy, thiết kế một cấu trúc MM để có hiệu suất truyền dẫn cao là một nhiệm vụ đầy thách thức.



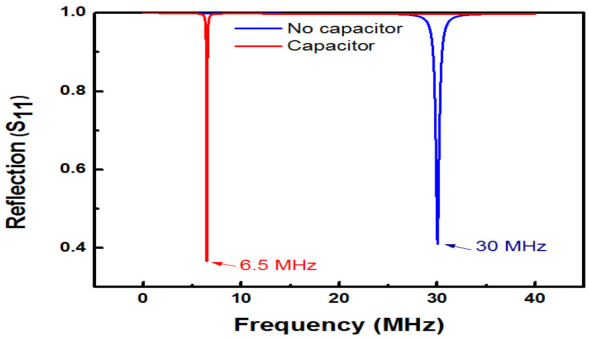
Hình 1. a) Ô cơ sở của tấm MM, b) Sơ đồ tương đương

Hình 1 (a) cho thấy một tế bào đơn vị của MM nhỏ gọn và mạch điện tương đương của nó. Cấu trúc này bao gồm một SR mười vòng được ghép với một tụ điện. Tấm vật liệu này có cấu trúc phẳng, dạng hình vuông với chiều dài bên ngoài là 10cm, chiều rộng dải là 2mm và khoảng cách giữa các dải là 1mm. Đế FR-4 có độ dày 1,6mm có hằng số điện môi là 4,3 và độ dày của lớp đồng là 0,035mm. Một mô hình điện đơn giản của tấm vật liệu được thể hiện trong hình 1 (b). Với độ tự cảm L = 9,05μH, tụ điện C thể hiện cho dung kháng của bản thân SR (C_0) và tụ điện gắn ngoài (C_{ext}). Có thể chọn điện dung thích hợp của tụ điện gắn ngoài để điều chỉnh tần số cộng hưởng của tế bào đơn vị. Trong quá trình thiết kế độ rộng của tấm vật liệu biến hóa đã được cố định tùy vào mỗi ứng dụng (trong trường hợp này là 10cm). Sau đó số vòng dây và độ rộng mỗi vòng dây sẽ được lựa chọn. Một lưu ý ở đây là hệ số phẩm chất của một bộ cộng hưởng dạng vòng dây (quality factor - Q-factor) sẽ tỷ lệ thuận với số vòng dây và độ rộng của mỗi vòng dây. Một số cấu hình khác nhau của cuộn cộng hưởng sẽ được mô phỏng bằng phần mềm mô phỏng CST Studio Suite (phần mềm mô phỏng và phân tích 3D EM) để tìm được cấu hình tối ưu nhất. Bước cuối cùng để điều chỉnh chính xác tần số cộng hưởng của tấm vật liệu biến hóa một tụ điện với giá trị phù hợp sẽ được lựa chọn.

Tần số cộng hưởng của ô đơn vị MM sẽ được cho bởi:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_{ext})}}$$

Các đặc tính của một ô cở sở MM được nghiên cứu bằng mô phỏng được thực hiện bởi phần mềm CST Studio Suite. Để mô phỏng ô cơ sở MM, chúng tôi kích thích ăng ten vòng có đường kính 8cm, nhỏ hơn một chút so với kích thước của ô cơ sở. Hình 2 cho thấy tần số cộng hưởng của tấm vật liệu có và không có tụ điện bên ngoài. Giá trị của tụ điện bên ngoài là 68pF, nó là tụ dán có kích thước nhỏ 2 × 1,25mm. Ban đầu ô cơ sở MM hoạt động ở tần số 30MHz. Khi thêm tụ điện, tần số cộng hưởng của ô cơ sở MM giảm xuống còn 6,5MHz, được biểu diễn lần lượt bằng các đường cong màu xanh nước biển và màu đỏ. Ở tần số cộng hưởng, chúng ta có thể thấy đường S_{11} xuất hiện một vùng đáy sâu. Nhờ việc giảm tần số cộng hưởng, cấu trúc MM được đề xuất phù hợp với hệ thống WPT dựa trên cộng hưởng từ.

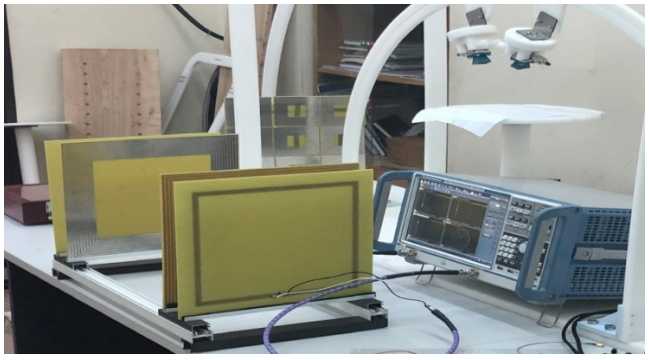


Hình 2. Tần số cộng hưởng của ô cơ sở MM thay đổi với tụ điện gắn ngoài

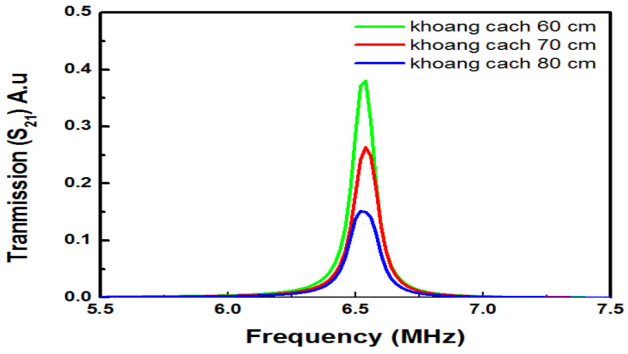
3. VẬT LIỆU BIẾN HÓA ỨNG DỤNG CHO TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY

Hình 3 mô tả sơ đồ của hệ thống WPT được đề xuất với một tấm MM. Trong mô hình này tấm MM bao gồm 3 × 3 ô đơn vị trong một mặt phẳng với tổng kích thước là 30 × 30cm. Phần phát gồm một vòng nguồn có đường kính 20cm, một cuộn dây cộng hưởng Tx có đường kính ngoài

30cm. Bộ cộng hưởng Tx được thiết kế trong hệ thống WPT có hình vuông với chiều dài cạnh là 30cm, chiều rộng vòng dây là 5mm và khoảng cách giữa các vòng dây là 1mm. Đế FR-4 có độ dày 1,2mm có hằng số điện môi là 4,3 và độ dày của đồng là 0,07mm. Do hệ thống WPT hoạt động ở 6,5MHz, nên tần số cộng hưởng của bộ cộng hưởng Tx và Rx cần thiết kế ở mức 6,5MHz. Phương pháp thiết kế bộ cộng hưởng Tx và Rx tương tự như thiết kế tấm vật liệu biến hóa. Tuy nhiên trong trường hợp này, tụ điện không được sử dụng nên số vòng dây sẽ được thay đổi để điều khiển tần số cộng hưởng. Sau quá trình tính toán, chúng tôi nhận thấy rằng Tx có mười vòng dây đồng với thông số trên sẽ thỏa mãn điều kiện về tần số cộng hưởng. Do tính đối xứng, phần thu có cùng kích thước với phần phát. Khoảng cách của bộ cộng hưởng Tx với tấm MM là $d_{Tx\text{-}MM}$ = 30cm. Khoảng cách giữa tấm MM tới bộ cộng hưởng Rx là $d_{Rx\text{-}MM}$ = 30cm.

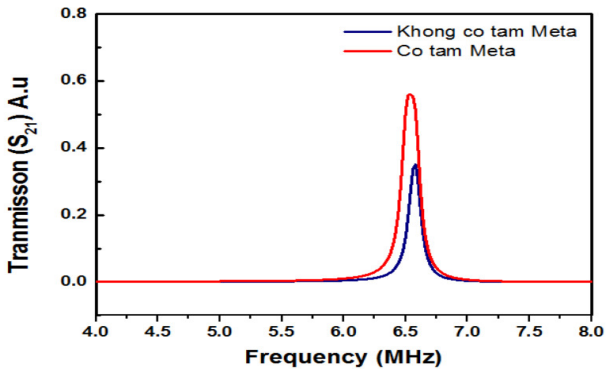


Hình 3. Hệ thống WPT cộng hưởng từ



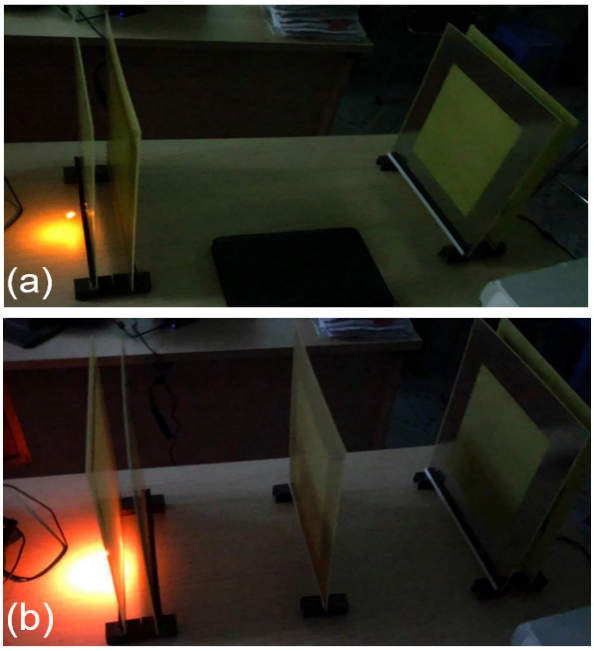
Hình 4. Hệ số truyền của hệ thống WPT theo khoảng cách

Ảnh hưởng của khoảng cách đến hiệu quả của hệ thống WPT đã được nghiên cứu và đo đạc. Chúng tôi khảo sát đáp ứng truyền qua của hệ thống WPT ở các độ dài khác nhau 60, 70 và 80cm. Hình 4 trình bày hệ số truyền của hệ thống WPT như một hàm của tần số trong đó đường cong màu xanh lam, đỏ và xanh nước biển tương ứng. Hệ số truyền qua giảm từ 0,38 - 0,16 khi tăng khoảng cách từ 60cm đến 80cm. Sự suy giảm này xuất hiện do khi khoảng cách giữa Tx và Rx tăng sẽ làm giảm hệ số ghép cặp của Tx và Rx. Chúng ta biết rằng, hai thông số chính ảnh hưởng đến hiệu suất của hệ thống WPT là; hệ số phẩm chất (*Q*-factor) và hệ số cặp (k). Trong trường hợp này, Q-factor của cả Tx và Rx không thay đổi vì vật liệu và cấu trúc của Tx và Rx là cố định, khi đó sự giảm hệ số ghép cặp có thể được giải thích cho sự suy giảm của hệ truyền qua.



Hình 5. Đáp ứng truyền dẫn của hệ thống WPT có và không có tấm vật liệu biến hóa

Hình 5 so sánh hệ số truyền qua của hệ thống WPT có và không có tấm vật liệu biến hóa ở khoảng cách giữa Tx và Rx là 60cm. Hệ số truyền của hệ thống WPT ban đầu là 0,38 được thể hiện bằng đường màu xanh nước biển. Trong khi xuất hiện tấm MM, hệ số truyền dẫn cải thiện lên 0,57 được hiển thị bằng đường màu đỏ. Các kết quả thu được chứng tỏ sự cải tiến của hệ thống WPT khi có tấm MM. Sử dụng một thiết bị thụ động được đặt giữa Tx và Rx có thể nâng cao hiệu quả của hệ thống. Tấm MM có thể được sử dụng để mở rộng cả hiệu quả và phạm vi truyền dẫn của hệ thống WPT.



Hình 6. Hệ thống WPT cộng hưởng từ (a) không có tấm vật liệu biến hóa, (b) với tấm vật liệu biến hóa

Hình 6 trình bày hệ thống WPT dựa trên cộng hưởng từ với một bóng đèn. Khoảng cách giữa Tx và Rx là 60cm. Chúng ta có thể thấy rằng năng lượng có thể truyền từ Tx sang Rx của hệ thống WPT và thắp sáng đèn. Nhưng độ sáng của đèn thấp vì hệ số truyền ở khoảng cách xa là nhỏ. Khi đặt tấm MM vào giữa Tx và Rx đèn sáng hơn khá nhiều trong khi giữ nguyên khoảng cách từ Tx đến Rx là 60cm. Thí nghiệm này chứng minh rằng hiệu suất của hệ thống WPT có thể được tăng cường đáng kể bằng cách sử dụng một tấm MM.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một tấm MM nhỏ gọn để cải thiện hiệu suất của hệ thống WPT dựa trên cộng hưởng từ. Tấm MM được xây dựng với 3 × 3 ô cơ sở. Một số cấu hình mô phỏng của hệ thống WPT cộng hưởng từ bao gồm cả tấm MM đã được tiến hành. So sánh với trường hợp không có tấm MM, chúng tôi quan sát thấy sự cải thiện của hệ số truyền từ 0,38 đến 0,57, tương ứng với 46%, ở khoảng cách 60 cm. Kết quả chứng minh rằng tấm MM được thiết kế có hiệu quả trong việc nâng cao khả năng truyền tải điện của hệ thống WPT dựa trên cộng hưởng từ. Tấm MM có hình dạng mỏng và phương pháp chế tạo tiêu chuẩn nên có thể giảm chi phí và không gian cần thiết cho hệ thống WPT.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam trong đề tài mã số VAST03.01/21-22.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. W. Lee, Y. K. Yoon, 2020. *Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review*. IEEE Access Volume 8.

[2]. X. Dang, P. Jayathurathnage, S. A. Tretyakov, C. R. Simovski, 2020. *Self-Tuning Multi-Transmitter Wireless Power Transfer to Freely Positioned Receivers*. IEEE Access Volume 8.

[3]. T. Arai, H. Hirayama, 2020. *Folded Spiral Resonator with Double-Layered Structure for Near-Field Wireless Power Transferi*. Energies 13(7).

[4]. M. Song, K. Baryshnikova, A. Markvart, P. Belov, E. Nenasheva, C. Simovski, P. Kapitanova, 2019. *Smart Table Based on a Metasurface for Wireless Power Transfer*. Phys. Rev. Applied 11.

[5]. R. Hasaba, K. Okamoto, S. Kawata, K. Eguchi, Y. Koyanagi, 2019. *Magnetic Resonance Wireless Power Transfer Over 10 m With Multiple Coils Immersed in Seawater*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Volume 67, Issue 11.

[6]. A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljačić, 2007. *Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances*.Science Vol. 317, Issue 5834, pp. 83-86.

[7]. T. P. Duong, J. W. Lee, 2011. *Experimental Results of High-Efficiency Resonant Coupling Wireless Power Transfer Using a Variable Coupling Method*. IEEE Microwave and Wireless Components Letters Volume 21, Issue 8.

[8]. N. Y. Kim, K. Y. Kim, C. W. Kim, 2012. *Automated Frequency Tracking System For Efficient Mid-Range Magnetic Resonant Wireless Power Transfer*. Microwave and Optical Technology Letters.

[9]. A. P. Sample, B. H. Waters, S. T. Wisdom, J. R. Smith, 2013. *Enabling Seamless Wireless Power Delivery in Dynamic Environments*. Proceedings of the IEEE Volume 101, Issue 6.

[10]. J. W. Kim, H. C. Son, K. H. Kim, Y. J. Park, 2011. *Efficiency Analysis of Magnetic Resonance Wireless Power Transfer With Intermediate Resonant Coil*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters Volume 10.

[11]. T. S. Pham, H. N. Bui, J. W. Lee, 2019. *Wave propagation control and switching for wireless power transfer using tunable 2-D magnetic metamaterials*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials Volume 485, p 126-135.

[12]. J. Garnica, R. A. Chinga, J. Lin, 2013. *Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field*. Proceedings of the IEEE Volume 101, Issue 6.

[13]. M. Xia, S. Aïssa, 2015. *On the Efficiency of Far-Field Wireless Power Transfer*. IEEE Transactions on Signal Processing Volume 63, Issue 11.

[14]. A. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, H. M. Jawad, M. Ismail, 2017. *Opportunities and Challenges for Near-Field Wireless Power Transfer: A Review*. Energies 10(7).

[15]. F. van der Pijl, P. Bauer, M. Castilla, 2013. *Control Method for Wireless Inductive Energy Transfer Systems With Relatively Large Air Gap*. IEEE Transactions on Industrial Electronics Volume 60, Issue 1.

[16]. H. H. Lee, S. H. Kang, C. W. Jung, 2018. *MR-WPT With Reconfigurable Resonator and round for Laptop Application*. IEEE Microwave and Wireless Components Letters.

[17]. S. Assawaworrarit, X. Yu, S. Fan, 2017. *Robust wireless power transfer using a nonlinear parity–time-symmetric circuit*. Nature Volume 546, p. 387–390.

[18]. S. Y. R. Hui, W. Zhong, C. K. Lee, 2014. *A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer*. IEEE Transactions on Power Electronics Volume 29, Issue 9.

[19]. W. J. Padilla, D. N. Basov, D. R. Smith, 2006. *Negative refractive index metamaterial*. Materials Today Volume 9, Issues 7–8, p 28-35.

[20]. J. B. Pendry, L. Martín-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, 2004. *Mimicking Surface Plasmons with Structured Surfaces*. Science Vol. 305, Issue 5685, pp. 847-848.

[21]. C. M. Soukoulis, M. Wegener, 2011. *Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials*. Nature Photonics volume 5, p 523–530.

[22]. S. A. Cummer, J. Christensen, A. Alu, 2016. *Controlling sound with acoustic metamaterials*. Nature Reviews Materials volume 1.

[23]. A. L. A. K. Ranaweera, T. S. Pham, H. N. Bui, V. Ngo, J. W. Lee, 2019. *An active metasurface for field-localizing wireless power transfer using dynamically reconfigurable cavities*. Scientific Reports volume 9.

[24]. A. Radkovskaya, P. Petrov, S. Kiriushechkina, A. Satskiy, M. Ivanyukovich, A. Vakulenko, V. Prudnikov, O. Kotelnikova, A. Korolev, P. Zakharov, 2018. *Magnetic metamaterials: Coupling and permeability*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials Volume 459, p187-190.

[25]. H. N. Bui, T. S. Pham, J. S. Kim, J. W. Lee, 2019. *Field-focused reconfigurable magnetic metamaterial for wireless power transfer and propulsion of an untethered microrobot*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 494:165778.

[26]. T. S. Pham, B. X. Khuyen, B. S. Tung, T. T. H., V. D. Pham, Q. M. Ngo, V. D. Lam, 2020. *Enhanced Efficiency of Asymmetric Wireless Power*. Journal of Electronic Materials volume 50, p443–449.

[27]. T. S. Pham, A. K. Ranaweera, V. D. Lam, J. W. Lee, 2016. *Experiments on localized wireless power transmission using a magneto-inductive wave two-dimensional metamaterial cavity*. Applied Physics Express, Volume 9, Number 4.

[28]. W. Yang, S. L. Ho, W. Fu, 2020. *Numerical and Experimental Study on Design Optimization of Hybrid Metamaterial Slab for Wireless Power Transmission*.IEEE Access Volume 8.

[29]. B. Wang, K. H. Teo, T. Nishino, W. Yerazunis, J. Barnwell, J. Zhang, 2011. *Experiment on wireless power transfer with metamaterial*. Appl. Phys. Lett. 98, 254101.

[30]. A. L. A. K. Ranaweera, T. P. Duong, J. W. Lee, 2014. *Experiment investigation of compact metamaterial for high efficiency mid-range wireless power transfer applications*. Journal of Applied Physics 116, 043914.

AUTHORS INFORMATION

Ha Thi Kim Duyen[1], Nguyen Thao Duy[2], Pham Thanh Son[2]

[1]Faculty of Electronic Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

[2]Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam