



SPMRS
2023

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, 5 – 7/11/2023

HỘI NGHỊ VẬT LÝ CHẤT RẮN VÀ KHOA HỌC VẬT LIỆU TOÀN QUỐC LẦN THỨ XIII

TUYỂN TẬP BÁO CÁO

QUYỂN 1



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

MÔ PHÒNG ĐIỀU KHIỂN TÍNH CHẤT CỘNG HƯỞNG TỪ CỦA VẬT LIỆU BIẾN HÓA NHẪM NÂNG CAO HIỆU SUẤT TRUYỀN NĂNG LƯỢNG KHÔNG DÂY

Bùi Hữu Nguyên^{1*}, Lê Đắc Tuyên¹, Tống Bá Tuấn¹, Nguyễn Thị Diệu Thu¹, Hồ Quỳnh Anh¹, Ngô Như Việt^{2,3}, Bùi Xuân Khuyển⁴, Vũ Đình Lãm²

¹Bộ môn Vật lý, Trường Đại học Mỏ-Địa chất, 18 Phố Viên, Hà Nội;

²Học viện Khoa học và Công nghệ, VAST, 18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội;

³Khoa Kỹ thuật hình sự, Học viện Cảnh sát nhân dân, P. Cổ Nhuế 2, Q. Bắc Từ Liêm, Hà Nội;

⁴Viện Khoa học vật liệu, VAST, 18 Hoàng Quốc Việt, Hà Nội.

*Email: buihuonguyen@humg.edu.vn

Tóm tắt:

Công nghệ truyền năng lượng không dây (WPT) là công nghệ mới, tiện lợi, giúp việc sạc điện cho các thiết bị trở nên dễ dàng và an toàn thông qua quá trình truyền năng lượng không dùng đến dây dẫn và công kết nối. Tuy nhiên, công nghệ này vẫn còn tồn tại một thực trạng là hiệu suất của hệ thống giảm nhanh khi khoảng cách truyền dẫn tăng lên hoặc kích thước cuộn thu (Tx) và cuộn phát (Rx) khác nhau. Do đó, vấn đề nâng cao hiệu suất và khoảng cách truyền dẫn là yếu tố quan trọng để đưa công nghệ WPT ứng dụng trong các lĩnh vực đời sống. Trong báo cáo này chúng tôi đề xuất nghiên cứu sử dụng tấm vật liệu biến hóa (MMs) nhằm nâng cao hiệu suất WPT. Tấm MMs được cấu tạo từ 25 ô cơ sở với kích thước mỗi ô cơ sở là $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Tần số cộng hưởng của ô cơ sở được điều khiển hoạt động từ 8,2 MHz tới 10 MHz thông qua mạch điều khiển ngoại vi. Kết quả mô phỏng hệ thống truyền năng lượng không dây sử dụng tấm MMs có hốc cộng hưởng trên phần mềm CST STUDIO SUITE 2019 đạt hiệu suất 51,8% so với không sử dụng MMs là 6,8% tại tần số 10 MHz với khoảng cách truyền dẫn 15 cm và tỉ lệ cuộn Tx-resonator:Rx-resonator là 13:1.

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

GIỚI THIỆU

Ngày nay, công nghệ truyền năng lượng không dây (WPT) được biết đến như một công nghệ tiên tiến, tiện lợi, an toàn, do không sử dụng các dây dẫn và công kết nối. Công nghệ này được ứng dụng nhiều trong lĩnh vực sạc điện cho các thiết bị cầm tay như: Điện thoại, đồng hồ thông minh, tai nghe bluetooth,... Công nghệ truyền năng lượng không dây được đề xuất thử nghiệm lần đầu tiên bởi Tesla vào năm 1890 [1]. Thông qua sử dụng dòng điện xoay chiều cao tần chạy trong cuộn dây cộng hưởng phát, Tesla đã chứng minh năng lượng điện có khả năng truyền qua lớp không khí tới cuộn thu mà không cần dây dẫn. Gần đây, WPT trường gần có khoảng cách truyền năng lượng nhỏ hơn nhiều so với bước sóng tần số hoạt động được nhiều nhóm nghiên cứu quan tâm và phát triển do có hiệu suất truyền dẫn lớn hơn nhiều so với công nghệ truyền dẫn trường xa.

Công nghệ WPT trường gần cho hiệu quả truyền năng lượng tốt ở khoảng cách ngắn (~ cm), tuy nhiên, hiệu suất của hệ thống WPT giảm đi nhanh chóng khi khoảng cách truyền dẫn tăng

lên hoặc kích thước cuộn thu và phát khác biệt lớn về kích thước [2-3]. Nhược điểm này đã giới hạn ứng dụng WPT trong thực tiễn.

Để tăng cường hiệu suất WPT nhiều nghiên cứu đã sử dụng thêm hai cuộn dây cộng hưởng vào trước cuộn thu và phát để tăng cường cộng hưởng từ [4]. Ngoài ra sử dụng cuộn phát có kích thước lớn và hình dạng đặc biệt cũng được nghiên cứu ứng dụng nâng cao hiệu suất và khoảng cách [5]. Tuy nhiên, các đề xuất vẫn tồn tại nhược điểm hiệu suất WPT giảm đi nhanh chóng, khi kích thước cuộn thu nhỏ hơn nhiều so với cuộn phát.

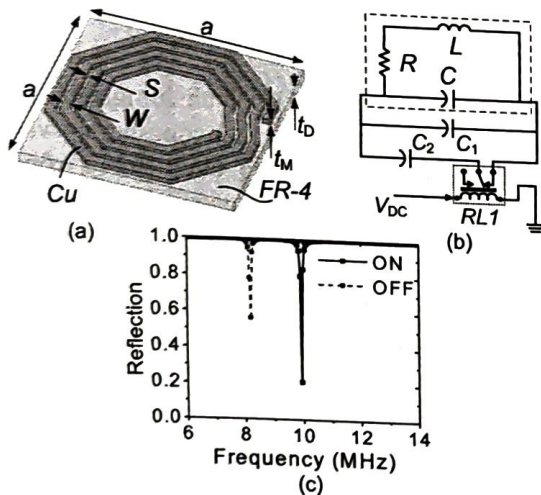
Những năm gần đây, vật liệu biến hóa (MMs-Metamaterials) với những tính chất mới lạ như có độ từ thẩm âm với khả năng phục hồi và tăng cường sóng tắt dần đã được ứng dụng vào đề nâng cao hiệu suất WPT. Nghiên cứu sử dụng vật liệu biến hóa đã được đề xuất bởi B Wang năm 2011 [6], thông qua tấm vật liệu biến hóa hiệu suất WPT đã được tăng thêm 30% so với hệ thống bốn cuộn truyền thống. Năm 2022, nhóm Dongyoung Shan và cộng sự cũng ứng dụng MMs nhằm nâng cao hiệu suất hệ thống WPT [7]. Tuy nhiên các tấm vật liệu có tính chất tĩnh

không có khả năng điều khiển để phù hợp với các điều kiện môi trường và kích thước và vị trí cuộn thu khác nhau, dẫn tới những tổn hao không cần thiết khi tất cả các ô cơ sở cùng hoạt động để truyền năng lượng. Vì vậy vấn đề điều khiển ô cơ sở nhằm định xứ vùng năng lượng trên tấm vật liệu là cần thiết để nâng cao hiệu suất WPT.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất nghiên cứu sử dụng vật liệu biến hóa có khả năng điều khiển độc lập tính chất cộng hưởng từ của ô cơ sở MMs thông qua mạch điều khiển ngoại vi nhằm nâng cao hiệu suất WPT.

THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG

Hình 1(a) mô tả cấu trúc ô cơ sở vật liệu biến hóa. Ô cơ sở có kích thước $5 \times 5 \text{ cm}^2$, được cấu tạo từ hai lớp vật liệu. Lớp thứ nhất là cuộn dây cộng hưởng có 4 vòng được làm bằng kim loại đồng (Cu) có độ dày $d_m = 0,1 \text{ mm}$, bề rộng của dây $W = 3 \text{ mm}$, khoảng cách giữa hai vòng dây $S = 1 \text{ mm}$. Lớp thứ hai là lớp đế điện môi FR4 có kích thước $a = 5 \text{ cm}$, bề dày $d_t = 1 \text{ mm}$ và hằng số điện môi $\epsilon = 4,4$. Để điều khiển tần số cộng hưởng của ô cơ sở vật liệu biến hóa, một mạch điện điều khiển giá trị điện dung của các tụ điện nối giữa hai điểm đầu cuối của vòng dây cộng hưởng.

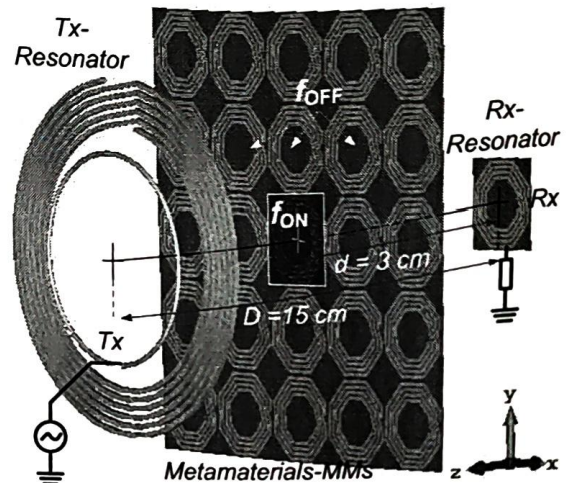


Hình 1 : (a) Ô cơ sở MMs, (b) sơ đồ mạch điện tương đương, (c) phổ phản xạ của ô cơ sở MMs tương ứng với $V_{DC} = 0$ và $V_{DC} = 5 \text{ V}$.

Hình 1(b) mô tả mạch điện tương đương của ô cơ sở MMs kết hợp với mạch điều khiển tần số cộng hưởng từ. Ô cơ sở được mô hình hóa bằng mạch điện có giá trị cuộn cảm L , tụ điện C và điện trở R . Tần số dao động riêng của ô cơ sở MMs được xác định theo công thức $f =$

$1/(2\pi(LC)^{0.5})$. Mạch điều khiển tần số bao gồm một tụ điện $C_1 = 324 \text{ pF}$ được hàn trên hai đầu dây lớp kim loại của ô cơ sở. Một tụ điện $C_2 = 156 \text{ pF}$ được kết nối song song với C_1 thông qua tiếp điểm thường đóng của micro-rolle $RL1$. Điện áp V_{DC} chưa được cấp cho mạch điều khiển, $RL1$ ở trạng thái OFF, giá trị điện dung của ô cơ sở ở trạng thái OFF là $C_{OFF} \approx C_1 + C_2$ ($C \ll C_1, C_2$). $RL1$ ở trạng thái ON, giá trị điện dung ô cơ sở ở trạng thái ON là $C_{ON} \approx C_1$.

Hình 1(c) mô tả phổ phản xạ của ô cơ sở tương ứng với trạng thái tắt (OFF) và trạng thái hoạt động (ON) của ô cơ sở. Tại trạng thái hoạt động, mạch điều khiển ô cơ sở được cấp điện áp điều khiển $V_{DC} = 5 \text{ V}$. Tụ điện C_2 được ngắt kết nối với C_1 và có tần số cộng hưởng của ô cơ sở thu được tại $f_{ON} = 10 \text{ MHz}$. Ở trạng thái tắt ô cơ sở có tần số cộng hưởng $f_{OFF} = 8.2 \text{ MHz}$.



Hình 2: (a) Mô hình mô phỏng hệ thống WPT tích hợp MMs.

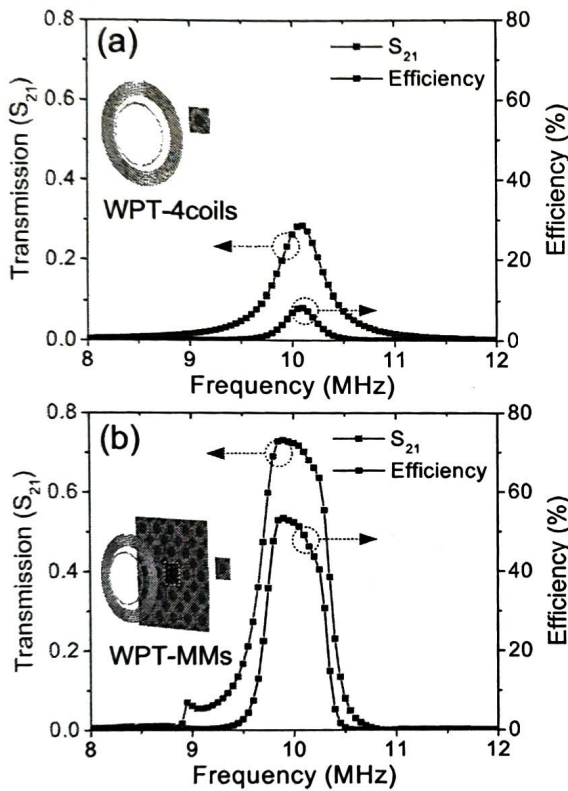
Hình 2 mô tả thiết lập mô phỏng hệ thống WPT tích hợp tấm vật liệu biến hóa (WPT-MMs) trên phần mềm CST STUDIO SUITE 2019. Hệ thống bao gồm cuộn phát Tx có 1 vòng và đường kính $d_{Tx} = 12 \text{ cm}$, cuộn cộng hưởng TX-resonator có 6 vòng, đường kính ngoài $d_{Tx-res} = 20 \text{ cm}$ và tần số hoạt động $f_{Tx} = 10 \text{ MHz}$, MMs, cuộn cộng hưởng Rx-resonator có kích thước giống với kích thước ô cơ sở MMs và hoạt động ở tần số $f_{Rx} = 10 \text{ MHz}$, cuộn thu Rx có 1 vòng và đường kính $d_{Rx} = 4,5 \text{ cm}$. Khoảng cách truyền được xác định từ cuộn Tx-resonator đến cuộn Rx-resonator $D = 15 \text{ cm}$. Khoảng cách từ vị trí đặt tấm MMs tới cuộn Rx là $d = 3 \text{ cm}$.

Tấm vật liệu biến hóa được ghép bởi 25 ô cơ sở. Tần số cộng hưởng của mỗi ô cơ sở có thể điều khiển độc lập thông qua mạch điều khiển. Khi

mạch điều khiển được kích hoạt hoặc tắt, ô cơ sở hoạt động ở tần số f_{ON} , f_{OFF} tương ứng.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

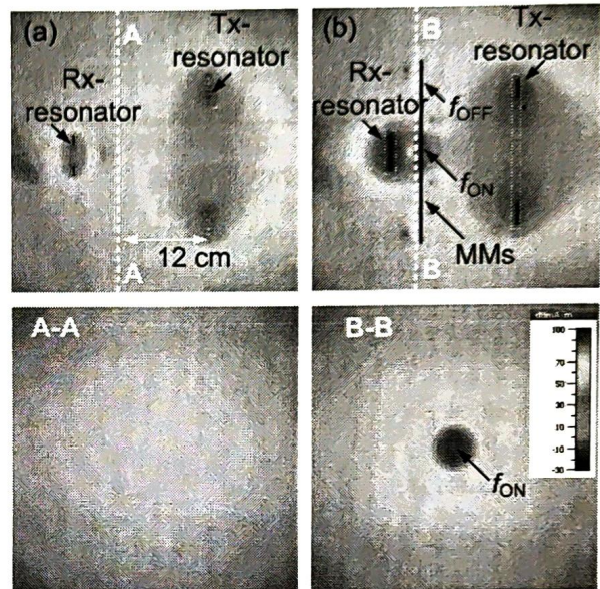
Hình 3(a) mô tả phổ truyền qua (S_{21}) của hệ thống WPT sử dụng 4 cuộn dây. Kết quả cho thấy phổ truyền qua của hệ thống thấp đạt 0.26 tương ứng với hiệu suất truyền đạt 6,8% tại tần số 10 MHz và khoảng cách truyền $D = 15$ cm. Nguyên nhân do kích thước của cuộn thu rất nhỏ so với cuộn cộng hưởng phát (tỉ lệ diện tích cuộn Tx-resonator:Rx-resonator = 13:1), từ thông phát ra từ cuộn cộng hưởng Tx-resonator quét qua một phần nhỏ diện tích cuộn cộng hưởng thu Rx-resonator và cuộn thu Rx. Đồng thời do kích thước các cuộn khác nhau dẫn tới hệ số kết nối giữa cuộn Tx-resonator và cuộn Rx-resonator nhỏ dẫn tới hiệu suất của hệ thống WPT 4 cuộn dây thấp.



Hình 3: Phổ truyền qua (S_{21}) và hiệu suất của các hệ thống. (a) hệ thống WPT 4 cuộn dây, (b) hệ thống WPT-MMs.

Hình 3(b) mô tả phổ truyền qua của hệ thống WPT-MMs, trong đó tám MMs có ô cơ sở trung tâm được điều khiển hoạt động ở $f_{ON} = 10$ MHz còn các ô cơ sở khác hoạt động ở $f_{OFF} = 8,2$ MHz. Kết quả cho thấy phổ truyền qua $S_{21} = 0,72$, tương ứng với hiệu suất truyền năng lượng hệ thống đạt tới 51,8% tại tần số 10 MHz và $D = 15$ cm. Hiệu suất hệ thống WPT-MMs tăng lên 45% so với hệ thống WPT 4 cuộn dây.

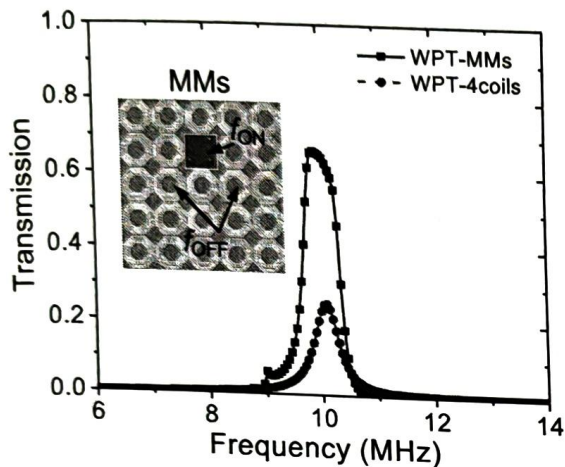
Phổ truyền qua của hệ thống WPT-MMs tăng lên đáng kể được giải thích dựa trên cộng hưởng giao thoa tăng cường Fano (constructive Fano-interference) tại ô cơ sở có tần số hoạt động $f_{ON} = 10$ MHz bao quanh bởi các ô cơ sở hoạt động tại $f_{OFF} = 8,2$ MHz. Trong điều kiện giao thoa tăng cường, năng lượng cộng hưởng của ô cơ sở hoạt động tại f_{ON} gia tăng do nhận được năng lượng tương tác trực tiếp từ cuộn Tx-resonator và tương tác gián tiếp từ các ô cơ sở xung quanh. Kết quả từ trường được tăng cường và định xứ tại vùng ô cơ sở hoạt động với tần số f_{ON} tạo thành hốc cộng hưởng có kích thước giống với cuộn Rx-resonator như trên hình 4(b).



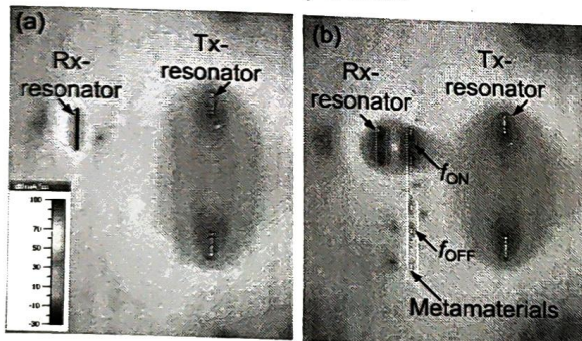
Hình 4: Phân bố từ trường: (a) hệ thống WPT 4 cuộn dây, (b) hệ thống WPT-MMs.

Hình 4(a) mô tả phân bố cường độ từ trường trên mặt phẳng x-z với $y = 0$, và mặt cắt A-A vuông góc với trục z cách cuộn Tx-resonator 12 cm của hệ thống WPT 4 cuộn dây tại tần số 10 MHz. Hình 4(b) mô tả phân bố cường độ từ trường tại mặt phẳng x-z với $y = 0$ và mặt cắt B-B của hệ thống WPT-MMs có cùng vị trí và khoảng cách với Tx của hệ thống WPT 4 cuộn dây. Kết quả cho thấy phân bố từ trường tại điểm đang xét trên hệ thống WPT-MMs cao hơn so với hệ thống WPT sử dụng 4 cuộn dây. Đối với hệ thống WPT-MMs, từ trường phát ra từ cuộn Tx-resonator được định xứ tại hốc cộng hưởng trên tấm vật liệu biến hóa dựa trên giao thoa tăng cường Fano. Từ trường tại hốc cộng hưởng này được gửi tới cuộn Rx, do đó giảm đáng kể tổn hao năng lượng từ trường ra môi trường xung quanh. Dựa trên cơ chế này việc tích hợp tám MMs góp phần vào nâng cao hiệu suất của hệ thống WPT.

Hình 5 mô tả phổ truyền qua của hệ thống WPT-MMs có ô cơ sở được điều khiển tạo hốc cộng hưởng tại vị trí Rx lệch trục với Tx. Kết quả cho thấy $S_{21} = 0,66$, tương ứng hiệu suất của hệ thống thu được đạt 43,6% cao hơn 38,4% so với hệ thống WPT 4 cuộn dây.



Hình 5: Phổ S_{21} của hai hệ thống WPT 4 cuộn dây và WPT-MMs khi cuộn Tx-resonator và Rx resonator lệch nhau.



Hình 6: Phân bố từ trường khi hai cuộn Rx-resonator và Tx-resonator lệch nhau: (a) hệ thống WPT 4 cuộn dây, (b) hệ thống WPT-MMs.

Hình 6 mô tả sự so sánh phân bố từ trường tại vị trí hốc cộng hưởng trên bề mặt MMs khi kích hoạt ô cơ sở tại vị trí như trên hình 5 và hệ WPT 4 cuộn dây. Kết quả mô phỏng cho thấy tại vị trí hốc cộng hưởng được kích hoạt, cường độ phân bố từ trường được tăng cường đáng kể so với hệ thống WPT 4 cuộn dây. Như vậy thông qua sử

dụng tích hợp tấm MMs trong hệ thống WPT vẫn đảm bảo được hiệu suất cao khi thay đổi vị trí cuộn thu Rx.

KẾT LUẬN

Trong bài báo này chúng tôi nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng hệ thống WPT sử dụng tấm vật liệu biến hóa có khả năng thay đổi được tính chất cộng hưởng từ nhằm nâng cao hiệu suất WPT. Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu suất WPT đạt 51,8% khi sử dụng tấm vật liệu biến hóa có điều chỉnh tần số cộng hưởng từ, tăng 45% so với hệ thống WPT sử dụng 4 cuộn dây tại tần số 10 MHz và khoảng cách truyền 15 cm. Dựa trên khả năng nâng cao đáng kể hiệu suất WPT khi tích hợp MMs sẽ hứa hẹn tiềm năng mở rộng ứng dụng công nghệ WPT trong các lĩnh vực đời sống.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Mở - Địa chất trong đề tài mã số T23-13.

Tài liệu tham khảo

1. N. Tesla, *Electrical World and Engineer*, 1, 21-24 (1904).
2. M. Song, P. Jayathurathnage, E. Zanganeh, M. Krasikova, P. Smirnov, P. Belov, P. Kapitanova, C. Simovski, S. Tretyakov, and A. Krasnok, *Nature Electronics*, 4, 707-716 (2021).
3. D. Kim, J. Park, H. H. Park, and S. Ahn, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51, 1-4 (2015).
4. C. J. Chen, T.H. Chu, C. L. Lin, and Z. C. Jou, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 57, 536-540 (2010).
5. C. Park, S. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, *IEEE transactions on power electronics*, 30, 817-827 (2014).
6. B. Wang, et al., *Applied Physics Letters*, 98, 254101 (2011).
7. D. Shan, et al., *Scientific Reports*, 12, 1-11 (2022).

ISBN: 978-604-471-702-9



9 786044 717029

SÁCH KHÔNG BÁN