

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



NGUYỄN THỊ KIM THU

**NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ
BẰNG RỘNG SỬ DỤNG VẬT LIỆU BIẾN HÓA TÍCH HỢP
PHẦN TỬ TỖN HAO**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT LIỆU

Hà Nội - 2024

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

NGUYỄN THỊ KIM THU

**NGHIÊN CỨU TÍNH CHẤT HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ
BẰNG RỘNG SỬ DỤNG VẬT LIỆU BIẾN HÓA TÍCH HỢP
PHẦN TỬ TỖN HAO**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT LIỆU

Mã số: 9440123

**Xác nhận của Học viện
Khoa học và Công
nghệ**

Người hướng dẫn 1
(Ký, ghi rõ họ tên)

Người hướng dẫn 2
(Ký, ghi rõ họ tên)

PGS. TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa GS. TS. Vũ Đình Lâm

Hà Nội - 2024

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi, dưới sự hướng dẫn của PGS.TS. Nguyễn Thị Quỳnh Hoa và GS.TS. Vũ Đình Lãm. Trong quá trình nghiên cứu, tác giả công bố một số kết quả trên các tạp chí khoa học của ngành và của lĩnh vực Khoa học vật liệu. Kết quả nghiên cứu của luận án này chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nghiên cứu nào khác ngoài các công trình nghiên cứu của tác giả.

Nghiên cứu sinh**Nguyễn Thị Kim Thu**

LỜI CẢM ƠN

Đầu tiên, tôi xin được gửi lời cảm ơn trân trọng nhất tới PGS.TS Nguyễn Thị Quỳnh Hoa và GS.TS Vũ Đình Lãm đã hướng dẫn về nội dung và phương pháp, định hướng và hỗ trợ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án.

Xin trân trọng cảm ơn các cán bộ, giảng viên của Viện Khoa học Vật liệu, phòng Đào tạo và các phòng ban chức năng thuộc Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã truyền dạy những kiến thức nền tảng - hiện đại, hỗ trợ các thủ tục hành chính, giới thiệu các nguồn học bổng có giá trị. Trân trọng cảm ơn PGS.TS. Lê Đắc Tuyên, TS. Bùi Xuân Khuyển, TS. Bùi Sơn Tùng đã hỗ trợ nghiên cứu sinh về kỹ thuật chế tạo và đo các thông số mẫu.

Xin trân trọng cảm ơn Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), Viện Nghiên cứu Dữ liệu lớn thuộc Tập đoàn Vingroup đã hỗ trợ nghiên cứu sinh theo Chương trình học bổng tiến sĩ trong nước năm 2021, mã số VINIF. TS.2021.059.

Xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Vinh, Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Bộ môn Điện tử - Viễn thông đã có chế độ chính sách tốt, tạo điều kiện về thời gian và công việc, giúp tôi tập trung học tập và nghiên cứu.

Hà Nội, ngày 30 tháng 01 năm 2024

Nghiên cứu sinh



Nguyễn Thị Kim Thu

DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU VIẾT TẮT

| Viết tắt | Tiếng Anh | Tiếng Việt |
|----------|--|--|
| 2D | Two-Dimensional | Hai chiều |
| 3D | Three-Dimensional | Ba chiều |
| BMPA | Broadband Metamaterials Perfect Absorber | Vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ băng rộng |
| CRR | Circular Ring Resonator | Cấu trúc cộng hưởng vòng |
| CST | Computer Simulation Technology | Công nghệ mô phỏng máy tính |
| CW | Cut Wire | Thanh kim loại bị cắt |
| CWP | Cut-Wire Pair | Cặp thanh kim loại bị cắt |
| DP | Disk Pair | Cặp đĩa |
| EM | Electromagnetic | Trường điện từ |
| EBL | Electron beam lithography | Quang khắc bằng chùm tia điện tử |
| F | Frequency Domain Solver | Phương pháp miền tần số |
| FIT | Finite Integration Technique | Kỹ thuật tích phân hữu hạn |
| FSS | Frequency Selective Surface | Bề mặt chọn lọc tần số |
| LHCP | Left-handed circularly polarization | Phân cực tròn trái |
| MMs | Metamaterials | Vật liệu biến hóa |
| MPA | Metamaterials Perfect Absorber | Vật liệu biến hóa hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ |
| MTS | Metasurface | Bề mặt vật liệu biến hóa |
| NIR | Near Infrared | Cận hồng ngoại |
| PCB | Printed Circuit Board | Bảng mạch in |
| PE | Printed Electronics | Công nghệ in điện tử |
| PCR | Polarization Converter Ration | Tỷ số chuyển đổi phân cực |
| RBW | Relative Bandwidth | Độ rộng băng thông tương đối |
| RHCP | Right-handed circularly polarization | Phân cực tròn phải |
| SA | Solar Absorption | Hấp thụ năng lượng mặt trời |
| SEM | Scanning Electron Microscopy | Kính hiển vi điện tử quét |
| SRRs | Split-Ring Resonators | Các vòng cộng hưởng có rãnh |
| T | Transient Solver | Phương pháp miền thời gian |
| UV | Ultra Violet | Tử ngoại |
| WPT | Wireless Power Transfer | Truyền năng lượng không dây |

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

| | |
|---|----|
| Hình 1.1. Siêu thấu kính đề xuất bởi Pendry [3] | 9 |
| Hình 1.2. Nguyên tắc hoạt động của siêu thấu kính dựa trên MMs [3] | 10 |
| Hình 1.3. MPA đề xuất bởi Landy (a) mặt trên (b) mặt dưới và (c) độ hấp thụ [6]. | 11 |
| Hình 1.4. Ứng dụng của MPA tương ứng với các vùng tần số khác nhau [33] | 11 |
| Hình 1.5. Hệ thí nghiệm mô hình WPT [36] | 13 |
| Hình 1.6. Ô cơ sở của mẫu MPA có cấu trúc bất đẳng hướng [38] | 14 |
| Hình 1.7. Độ hấp thụ cực đại của MPA có cấu trúc bất đẳng hướng tại các góc tới khác nhau cho phân cực TE [38] | 15 |
| Hình 1.8. Phân bố điện trường với các cấu trúc MPA có số lượng cánh hoa khác nhau ở các góc phân cực khác nhau [38] | 16 |
| Hình 1.9. Ảnh hưởng của thông số P tới độ hấp thụ của MPA hình bông hoa 8 cánh với trường hợp góc tới (a) 0^0 và (b) 70^0 [38] | 16 |
| Hình 1.10. Ảnh hưởng của độ dày lớp điện môi tới độ hấp thụ của MPA hình bông hoa 8 cánh với trường hợp góc tới (a) 0^0 và (b) 70^0 [38] | 17 |
| Hình 1.11. Độ hấp thụ của MPA hình bông hoa 8 cánh với các góc tới khác nhau cho (a) phân cực TE và (b) phân cực TM [38] | 17 |
| Hình 1.12. Một số ví dụ về cấu trúc MPA đẳng hướng [37] | 18 |
| Hình 1.13. (a) Độ hấp thụ của cấu trúc CWP với $a=14,8$ mm và $m=6$ mm, (b) phân bố dòng cảm ứng bề mặt tại các tần số cộng hưởng [39] | 18 |
| Hình 1.14. Mô hình vật liệu hấp thụ | 19 |
| Hình 1.15. (a) Biên độ và (b) pha của hệ số phản xạ và truyền qua của mô hình MPA trên hình 1.14 [40] | 20 |
| Hình 1.16. Sơ đồ mô tả tín hiệu phát và tín hiệu thu khi sóng điện từ đi qua môi trường hiệu dụng của MMs [29] | 21 |
| Hình 1.17. MPA với cơ chế lai hoá hai cộng hưởng từ và phổ hấp thụ của MPA với cơ chế lai hoá hai cộng hưởng từ (đường màu đen) [37] [20] | 23 |
| Hình 1.18. Một số cấu trúc cộng hưởng cơ bản của MPA | 24 |
| Hình 1.19. Ví dụ về MPA với cấu trúc dạng zig-zag làm tăng độ tự cảm [45] | 25 |
| Hình 1.20. Độ hấp thụ phụ thuộc vào số lần gấp khúc n của đường kim loại trong một ô cơ sở [45] | 25 |
| Hình 1.21. Kết hợp bề mặt và điện môi gấp khúc nhằm tăng độ dài điện [46] | 26 |

| | |
|--|----|
| Hình 1.22. Cấu trúc của MPA, bên trái: cấu trúc MPA quan sát ở mặt trước, bên phải: ô cơ sở quan sát ở góc xiên [50]..... | 27 |
| Hình 1.23. Độ hấp thụ theo mô phỏng, (a) và (b) cho phân cực TE, (c) và (d) cho phân cực TM tại các góc phân cực và góc tới khác nhau [50]..... | 27 |
| Hình 1.24. Cấu trúc hấp thụ với 8 sectors [51] | 28 |
| Hình 1.25. Cấu trúc 3D với sự kết hợp các cộng hưởng có hình dạng khác nhau trên các tầng khác nhau [52]..... | 28 |
| Hình 1.26. Độ hấp thụ với các góc tới khác nhau [52]..... | 29 |
| Hình 1.27. Một số thành tựu trong thiết kế MPA băng rộng từ 2008 tới 2022 [53] | 30 |
| Hình 1.29. BMPA với cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang [65] ... | 32 |
| Hình 1.30. Độ hấp thụ của BMPA với cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp ngang [65] | 32 |
| Hình 1.31. Ô cơ sở của MPA đề xuất (a) mẫu 1, (b) mẫu 2 (c) mẫu 3, (d) mẫu 4, € mẫu 5, (f) mẫu 6, và (g) mẫu 7 [66]..... | 33 |
| Hình 1.32. Phổ hấp thụ của MPA [66] | 33 |
| Hình 1.33. Cấu trúc đa cộng hưởng vòng hở và độ hấp thụ [67] | 34 |
| Hình 1.34. BMPA với cấu trúc đa tầng [14] | 35 |
| Hình 1.35. Phổ hấp thụ, phản xạ và truyền qua của BMPA [14]..... | 35 |
| Hình 1.36. BMPA đa tầng với các cấu trúc cộng hưởng giống nhau [68]..... | 36 |
| Hình 1.37. Phổ hấp thụ của BMPA đa tầng có cấu trúc cộng hưởng giống nhau [68] | 36 |
| Hình 1.38. Đáp ứng băng rộng thu được bằng cách giảm hệ số Q | 37 |
| Hình 1.39. (a) Sơ đồ mạch tương đương, (b) hình ảnh quan sát từ phía trên, cấu trúc 3D của MPA [15] | 38 |
| Hình 1.40. Độ hấp thụ với góc tới $\theta = 0^0$ và tất cả góc phân cực, độ hấp thụ trong trường hợp góc tới xiên (b) cho phân cực TE, và (c) cho phân cực TM [15]..... | 38 |
| Hình 1.41. Cấu trúc MPA sử dụng các tụ điện tạo ra hấp thụ trong vùng tần số 100 MHz [47] | 39 |
| Hình 1.42. MPA điều chỉnh bằng phương pháp cơ học [71] | 40 |
| Hình 1.43. (a) MPA có tám điện môi phụ trợ (b) Độ hấp thụ của MPA theo mô phỏng (c) Độ hấp thụ của MPA theo thực nghiệm [71]..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Hình 1.44. Các đỉnh hấp thụ mới được tạo ra khi thay đổi kích thước tấm điện môi phụ trợ (a-b) giảm $\frac{1}{2}$ diện tích theo chiều dọc, (c-d) giảm $\frac{1}{2}$ diện tích theo chiều ngang [71] | 41 |
| Hình 1.45. BMPA với tầng điện môi gồm lớp nước được đóng gói [72] | 42 |
| Hình 1.46. Độ hấp thụ BMPA với các cách ghép tầng khác nhau [72] | 42 |
| Hình 1.47. Phổ hấp thụ của BMPA thay đổi theo nhiệt độ [72] | 43 |
| Hình 1.48. MPA băng hẹp có cấu trúc cộng hưởng vòng với kim loại vàng [8] | 43 |
| Hình 1.49. MPA băng rộng có cấu trúc cộng hưởng vòng là kim loại Crom [73] | 44 |
| Hình 1.50. Sơ đồ hệ thống STPV với BMPA, bộ hấp thụ và bộ phát xạ điện hình hoạt động trên 1000 K trong khi tế bào PV hoạt động tại nhiệt độ phòng [12] | 45 |
| Hình 1.51. Cấu trúc của BMPA cho ứng dụng thu thập năng lượng mặt trời [84] | 46 |
| Hình 1.52. MPA đa cộng hưởng 2D với cấu trúc hình bánh xe [85] | 47 |
| Hình 1.53. MPA với cấu trúc vòng tròn có sửa đổi, sử dụng điện trở tập trung [91] | 47 |
| Hình 1.54. Các electron phát xạ nhiệt từ bề mặt plasmon [92] | 49 |
| Hình 1.55. (a) Cấu trúc hình học của ô cơ sở với các cộng hưởng (Au) tích hợp với bán dẫn (màu xanh), (b) phân bố trường điện của MPA với phân cực TM, (c) hệ số phản xạ, truyền qua và hấp thụ của MPA [92] | 49 |
| Hình 1.56. Một cấu trúc nhiệt kế bức xạ điện hình sử dụng BMPA [12] | 50 |
| Hình 1.57. Nhiệt kế bức xạ được thiết kế (a) quan sát theo phương ngang, (b) quan sát từ trên xuống [98] | 51 |
| Hình 2.1. (a) Mô hình MPA đề xuất và (b) sơ đồ mạch tương đương [101] | 55 |
| Hình 2.2. MPA với cấu trúc hình vuông kép sử dụng điện trở tập trung (a) mô hình 3D, (b) hình ảnh mặt trên và (c) hình ảnh mặt cắt dọc [102] | 56 |
| Hình 2.3. Mô hình tương đương của MPA [102] | 56 |
| Hình 2.4. Hệ số phản xạ của MPA trong trường hợp mô phỏng và tính toán bằng mô hình mạch [102] | 57 |
| Hình 2.5. Đường cong phần thực của tổng dẫn theo tần số [102] | 58 |
| Hình 2.6. Đường cong phần ảo của tổng dẫn theo tần số [102] | 58 |
| Hình 2.7. Giao diện chương trình mô phỏng trên CST | 59 |
| Hình 2.8. Tiến trình mô phỏng trên CST | 60 |
| Hình 2.9. Minh họa kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S_{11} và hệ số truyền qua S_{21} | 60 |

| | |
|--|----|
| Hình 2.10. Quy trình chế tạo của MMs hoạt động ở vùng GHz | 63 |
| Hình 2.11. Mô hình thiết lập đo hệ số phản xạ | 64 |
| Hình 2.12. Mô hình thiết lập đo hệ số truyền qua | 65 |
| Hình 2.13. Chuyển đổi kết quả hệ số phản xạ thành độ hấp thụ | 65 |
| Hình 3.1. MPA với cấu trúc công hưởng (a) đĩa tròn, (b) vòng tròn, (c) hình vuông | 66 |
| Hình 3.2. Độ hấp thụ của MPA (a) cấu trúc đĩa tròn, (b) cấu trúc vòng tròn (c) cấu trúc hình vuông trong trường hợp góc tới vuông góc với bề mặt cấu trúc | 67 |
| Hình 3.3. Ví dụ về cấu trúc vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ.... | 67 |
| Hình 3.4. Cấu trúc của bộ chuyển đổi phân cực đề xuất (a) Mặt trên của ô cơ sở và (b) mô hình 3D của ô cơ sở [103] | 68 |
| Hình 3.5. (a) Biên độ của hệ số phản xạ phân cực ngang và đồng phân cực và (b) Tỷ số chuyển đổi phân cực của bộ chuyển đổi phân cực đề xuất với các góc tới thay đổi từ 0 đến 45 ⁰ cho phân cực TE [103]..... | 68 |
| Hình 3.6. (a) Ảnh mẫu chế tạo và (b) Minh họa việc thiết lập mạch đo [103] | 68 |
| Hình 3.7. (a,c,e) Hệ số phản xạ đồng phân cực và hệ số phản xạ phân cực ngang và PCR và (b,d,f) PCR của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ điện từ dưới các góc tới 10 ⁰ , 30 ⁰ , và 45 ⁰ tương ứng [103]..... | 69 |
| Hình 3.8. Độ hấp thụ của thiết kế đề xuất trên hình 3.4..... | 69 |
| Hình 3.9. Hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực ngang của (a) cấu trúc cộng hưởng đối xứng qua đường chéo chính và (b) cấu trúc đối xứng qua trục y | 70 |
| Hình 3.10. Tỷ số PCR và độ hấp thụ của cấu trúc đối xứng qua trục y | 70 |
| Hình 3.11. Cấu trúc có khe cắt (a) chưa tích hợp điện trở và (b) tích hợp điện trở . | 71 |
| Hình 3.12. Cấu trúc có khe cắt khi chưa tích hợp điện trở (đường màu đen) và tích hợp điện trở (đường màu đỏ) | 72 |
| Hình 3.13. Độ hấp thụ của cấu trúc BMPA đề xuất có tích hợp điện trở ($R=150\Omega$, và $P=10,2$ mm) cho phân cực TE và TM khi góc tới vuông góc với bề mặt | 72 |
| Hình 3.14. (a) Hình ảnh 3D của ô cơ sở, (b) mô hình mạch tương đương [109]..... | 73 |
| Hình 3.15. Phổ hấp thụ của BMPA đề xuất cho các giá trị khác (a) giá trị phần tử điện trở R , và các thông số cấu trúc khác (b) h , (c) r , (d) a , cho phân cực TE với góc tới vuông góc [109] | 75 |
| Hình 3.16. Độ hấp thụ của BMPA các giá trị khác nhau của (a) P và (b) w | 76 |

| | |
|--|----|
| Hình 3.17. Độ hấp thụ của BMPA với vật liệu điện môi polyimide | 77 |
| Hình 3.18. Độ hấp thụ của BMPA với độ cao khác nhau của lớp điện môi polyimide | 77 |
| Hình 3.19. Độ hấp thụ của MPA đề xuất trong trường hợp tích hợp và không tích hợp phân tử điện trở [109]..... | 78 |
| Hình 3.20. Trở kháng vào chuẩn hóa theo mô phỏng và tính toán [109]..... | 79 |
| Hình 3.21. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc tới khác nhau (a) và (c) cho phân cực TE và (b) và (d) cho phân cực TM [109] | 80 |
| Hình 3.22. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc phân cực khác nhau (a) cho phân cực TE và (b) cho phân cực TM [109] | 80 |
| Hình 3.23. [Từ trái sang phải] Phân bố điện trường, dòng điện cảm ứng ở mặt trên và mặt dưới của BMPA tại các tần số cộng hưởng: (a)-(c) 9,1 GHz và (d)-(f) 12,2 GHz [109]..... | 81 |
| Hình 3.24. Cấu trúc MPA hình bánh xe | 82 |
| Hình 3.26. Hệ số phản xạ S_{11} của BMPA cho phân cực TE và phân cực TM..... | 84 |
| Hình 3.27. Độ hấp thụ của BMPA khi tích hợp điện trở và không tích hợp điện trở | 84 |
| Hình 3.28. Độ hấp thụ phụ thuộc góc tới cho (a) phân cực TE và (b) phân cực TM | 84 |
| Hình 3.29. Ảnh hưởng của góc phân cực đến độ hấp thụ của BMPA | 85 |
| Hình 3.30. Độ hấp thụ của BMPA khi thay đổi vị trí đặt điện trở | 85 |
| Hình 3.31. BMPA có các phần tử điện trở tập trung, với lớp không khí được chèn vào giữa hai lớp điện môi FR ₄ (a) mô hình 3D và (b) mặt trên của ô cơ sở [118]... | 86 |
| Hình 3.32. Độ hấp thụ của MPA trường hợp có và không có phần tử điện trở [118] | 86 |
| Hình 3.33. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc tới khác nhau, (a) và (c) cho phân cực TE và (b) và (d) cho phân cực TM [118] | 87 |
| Hình 3.34. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc phân cực khác nhau cho phân cực TE trong trường hợp góc tới vuông góc [118]..... | 88 |
| Hình 3.35. Mô hình mạch cho thiết kế BMPA với nhiều lớp điện môi [118] | 89 |
| Hình 3.36. (a) Độ hấp thụ và (b) độ hấp thụ trung bình của BMPA với sự thay đổi của độ dày lớp không khí [118] | 90 |

| | |
|--|-----|
| Hình 3.37. Phần thực và phần ảo của trở kháng vào chuẩn hóa của BMPA [118].. | 90 |
| Hình 3.38. Phân bố dòng điện (<i>a,b,c</i>) và dòng điện cảm ứng ở mặt trên (<i>d, e, f</i>) và mặt dưới (<i>g, h, i</i>) của BMPA tại các tần số 4,5 GHz, 11,4 GHz và 17,2 GHz [118] | 91 |
| Hình 3.39. (a) Mẫu chế tạo và (b) thiết lập đo hệ số phản xạ [118]..... | 91 |
| Hình 3.40. Kết quả đo và kết quả mô phỏng độ hấp thụ của BMPA cho (a) phân cực TE và (b) phân cực TM [118] | 92 |
| Hình 3.41. Cấu trúc BMPA (a) Hình ảnh 3D và (b) mặt trên của ô cơ sở [123] | 93 |
| Hình 3.42. Độ hấp thụ của BMPA thay đổi theo giá trị điện trở [123]..... | 94 |
| Hình 3.43. (a) Độ hấp thụ của BMPA và (b) trở kháng đầu vào chuẩn hóa [123] .. | 95 |
| Hình 3.44. [Từ trái sang phải] Phân bố điện trường (a)(d), dòng điện cảm ứng ở mặt trên (b)(e) và mặt dưới (c)(f) tại các tần số 8,9 và 17,1 GHz tương ứng [123] | 96 |
| Hình 3.45. Phổ hấp thụ của BMPA thay đổi theo góc tới (a)(c) cho phân cực TE và (b)(d) cho phân cực TM [123] | 96 |
| Hình 3.46. Phổ hấp thụ của BMPA thay đổi theo góc phân cực (a)(c) cho phân cực TE và (b)(d) cho phân cực TM [123]..... | 97 |
| Hình 3.47. Mẫu BMPA đã chế tạo hoạt động ở băng tần X và Ku[123] | 98 |
| Hình 3.48. Kết quả đo và mô phỏng của BMPA tại các góc tới khác nhau [123] ... | 98 |
| Hình 4.1. Đường cong điện môi và suy hao tiếp tuyến của nước [133]..... | 102 |
| Hình 4.2. Cấu trúc của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz | 103 |
| Hình 4.3. Hệ số phản xạ của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz với góc tới vuông góc cho phân cực TE và phân cực TM | 104 |
| Hình 4.4. Độ hấp thụ của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz cho phân cực TE và phân cực TM | 104 |
| Hình 4.5. Trở kháng Z của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz.. | 105 |
| Hình 4.6. Hằng số điện môi của nước trong vùng tần số GHz..... | 105 |
| Hình 4.7. Phân bố từ trường H tại các tần số (a) 5,8 GHz, (b) 7,3 GHz, (c) 18,6 GHz, (d) 21,21 GHz, (e) 29,1 GHz và (f) 36 GHz | 106 |
| Hình 4.8. Tổn hao trên các lớp của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng GHz | 107 |
| Hình 4.9. Ảnh hưởng của các thông số cấu trúc đến độ hấp thụ của BMPA (a) <i>P</i> , (b) <i>h</i> ₂ , (c) <i>D</i> ₁ , (d) <i>D</i> ₂ | 107 |
| Hình 4.10. Ảnh hưởng của các thông số <i>D</i> đến độ hấp thụ của BMPA..... | 108 |

| | |
|--|-----|
| Hình 4.11. Phổ hấp thụ của BMPA khi thay đổi góc tới..... | 108 |
| Hình 4.12. Phổ hấp thụ của BMPA khi thay đổi góc phân cực..... | 109 |
| Hình 4.13. Phổ hấp thụ với các mô hình khác nhau của BMPA..... | 109 |
| Hình 4.15. Hình ảnh 3D của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ đề xuất [134] | 111 |
| Hình 4.16. Độ hấp thụ của BMPA đề xuất với góc tới vuông góc cho phân cực TE và TM [134] | 111 |
| Hình 4.17. Trở kháng chuẩn hóa của BMPA [134] | 112 |
| Hình 4.18. Hằng số điện môi của nước trong vùng tần số từ 0.5 đến 10 THz..... | 112 |
| Hình 4.19. Hình dạng khác nhau của khối chứa nước | 113 |
| Hình 4.20. Độ hấp thụ của BMPA với các hình dạng khác nhau của khối chứa nước | 113 |
| Hình 4.21. [Từ trái qua phải] Phân bố điện trường của BMPA tại các tần số khác nhau (a) 1,0 THz, (b) 2,7 THz, (c) 4,8 THz and (d) 8,5 THz [134]..... | 114 |
| Hình 4.22. [Từ trái qua phải] Phân bố từ trường của BMPA tại các tần số khác nhau (a) 1,0 THz, (b) 2,7 THz, (c), 4,8 THz and (d) 8,5 THz [134] | 114 |
| Hình 4.24. Phổ hấp thụ của BMPA với góc tới khác nhau (a, c) cho phân cực TE và (b,d) cho phân cực TM [134] | 115 |
| Hình 4.25. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc phân cực khác nhau [134] | 116 |

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

| | |
|--|-----|
| Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật của hệ phân tích mạng véc tơ..... | 64 |
| Bảng 3.1. So sánh hiệu suất của BMPA đề xuất với các BMPA khác có tích hợp điện trở | 82 |
| Bảng 3.2. Các thông số tối ưu của BMPA..... | 83 |
| Bảng 3.3. Các thông số tối ưu của ô cơ sở của BMPA cho ứng dụng băng C và X 86 | |
| Bảng 3.4. So sánh độ hấp thụ của BMPA đề xuất với các BMPA khác [118]..... | 92 |
| Bảng 3.5. Các thông số kích thước của cấu trúc BMPA | 94 |
| Bảng 3.6. So sánh BMPA đề xuất với các BMPA khác tích hợp điện trở | 99 |
| Bảng 4.1. Các thông số kích thước của BMPA đề xuất | 104 |
| Bảng 4.2. So sánh BMPA tích hợp nước đề xuất với các thiết kế khác tương tự .. | 110 |
| Bảng 4.3. So sánh BMPA đề xuất với các thiết kế tương tự | 117 |

MỤC LỤC

| | |
|--|----------|
| LỜI CẢM ƠN | ii |
| DANH MỤC CÁC KÍ HIỆU VIẾT TẮT | iii |
| DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ | iv |
| DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU | xi |
| MỞ ĐẦU | 1 |
| CHƯƠNG 1 VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ BĂNG RỘNG | 6 |
| 1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa | 6 |
| 1.1.1. Giới thiệu chung | 6 |
| 1.1.2. Các ứng dụng của vật liệu biến hóa..... | 8 |
| 1.2. Phân loại vật liệu MPAs..... | 14 |
| 1.2.1. MPA có cấu trúc bất đẳng hướng | 14 |
| 1.2.2. MPA có cấu trúc đẳng hướng 2 chiều..... | 17 |
| 1.3. Cơ chế hấp thụ của MPA | 19 |
| 1.3.1. Lý thuyết giao thoa | 19 |
| 1.3.2. Nguyên lý phối hợp trở kháng và cộng hưởng | 20 |
| 1.3.3. Cơ chế chôn chặn cộng hưởng điện và cộng hưởng từ..... | 23 |
| 1.3.4. Cơ chế lai hóa cộng hưởng từ..... | 23 |
| 1.4. Các hướng nghiên cứu hiện nay về MPA bất đẳng hướng | 24 |
| 1.4.1. Tối ưu hóa cấu trúc và nâng cao đặc tính hấp thụ | 24 |
| 1.4.2. Tiểu hình hóa cấu trúc..... | 24 |
| 1.4.3. Hoạt động ở các vùng tần số khác nhau | 26 |
| 1.4.4. Tối ưu phổ hấp thụ không phụ thuộc góc phân cực sóng và góc tới của sóng điện từ | 27 |
| 1.4.5. Mở rộng băng thông hấp thụ..... | 29 |
| 1.5. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng rộng BMPA | 29 |
| 1.5.1. Cơ chế hình thành hấp thụ băng rộng của MPA..... | 30 |
| 1.5.2. Một số ứng dụng của BMPA | 44 |

| | |
|---|------------|
| 1.6. Kết luận chương | 51 |
| CHƯƠNG 2 PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU | 52 |
| 2.1. Các phương pháp nghiên cứu MPA | 52 |
| 2.1.1. Phương pháp tính toán lý thuyết | 52 |
| 2.1.2. Mô hình mạch tương đương | 54 |
| 2.1.3. Phương pháp mô phỏng | 58 |
| 2.1.4. Phương pháp thực nghiệm | 61 |
| 2.2. Quy trình chế tạo MPA hoạt động ở vùng tần số GHz | 61 |
| 2.3. Hệ đo | 64 |
| 2.4. Kết luận chương | 65 |
| CHƯƠNG 3 THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ BĂNG RỘNG TÍCH HỢP CÁC PHẦN TỬ ĐIỆN TRỞ HOẠT ĐỘNG Ở VÙNG TẦN SỐ GHz..... | 66 |
| 3.1. Cơ sở đề xuất thiết kế..... | 66 |
| 3.2. Thiết kế BIPA tích hợp các phần tử điện trở cho ứng dụng băng X..... | 73 |
| 3.3. Thiết kế BIPA tích hợp các phần tử điện trở cho ứng dụng băng S và băng C, băng C và băng X..... | 82 |
| 3.4. Thiết kế BIPA tích hợp phần tử điện trở cho ứng dụng băng X và băng Ku .. | 93 |
| 3.5. Kết luận chương | 100 |
| CHƯƠNG 4 THIẾT KẾ VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ BĂNG RỘNG TÍCH HỢP NƯỚC HOẠT ĐỘNG Ở VÙNG TẦN SỐ GHz VÀ THz | 101 |
| 4.1. Tính chất điện từ của nước..... | 101 |
| 4.2. Thiết kế BIPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz..... | 103 |
| 4.3. Thiết kế BIPA tích hợp nước hoạt động ở tần số THz | 111 |
| 4.4. Kết luận chương | 118 |
| KẾT LUẬN CHUNG | 119 |
| HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO | 120 |
| DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN..... | 121 |

MỞ ĐẦU

Vật liệu biến hóa (MMs: *Metamaterials*) đầu tiên thu hút sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học trên thế giới là loại vật liệu có chiết suất âm, kể từ khám phá của Smith và cộng sự năm 2000[1]. Với những tính chất vật lý đặc biệt chưa tìm thấy ở vật liệu tự nhiên như: đảo nghịch định luật Snell, phát xạ Cherenkov ngược..., vật liệu biến hóa được dự đoán sẽ có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các thiết bị điện tử hiện đại như: ăng-ten [2], siêu thấu kính [3], pin mặt trời [4] và hấp thụ sóng điện từ [5].

Năm 2008, Landy và cộng sự đã phát triển mô hình vật liệu có thể hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (MPAs: *Metamaterials Perfect Absorbers*) dựa trên MMs với kích thước mỏng, dễ chế tạo, giá thành thấp, và dễ dàng điều khiển tính chất hấp thụ thông qua các tham số cấu trúc [6]. Từ đó, hấp thụ tuyệt đối đã nhanh chóng được triển khai cả về lý thuyết và thực nghiệm từ vùng tần số MHz tới vùng quang học [7] [8], với nhiều tiềm năng ứng dụng trong lĩnh vực như pin năng lượng mặt trời, internet vạn vật, bộ lọc quang, phát xạ nhiệt.

Bắt kịp xu thế chung của thế giới, lĩnh vực nghiên cứu MMs nói chung tại Việt Nam được triển khai đầu tiên tại Viện Khoa học Vật liệu thuộc Viện Hàn lâm KHCN VN. Gần đây, hướng nghiên cứu này mở rộng đến Trường Đại học Sư phạm Hà Nội; Trường Đại học Vinh; Trường Đại học Khoa học Thái Nguyên; Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội; Đại học Mở Địa chất; Đại học VinUni. Về MPA, các nghiên cứu đều nhằm mục tiêu đạt được độ hấp thụ cao với sự tối ưu về cấu trúc, hấp thụ được trên nhiều dải tần, ít nhạy với sự thay đổi của góc tới và góc phân cực [9]. Ngoài ra, MPAs còn được mở rộng nghiên cứu với những vật liệu có tính năng đàn hồi [10] và khả năng hấp thụ đẳng hướng hai chiều [11] nhằm nâng cao hơn nữa khả năng ứng dụng thực tế của MPAs. Tuy nhiên, do bản chất hoạt động của vật liệu biến hóa phụ thuộc vào cấu trúc cộng hưởng nên dải tần của bộ hấp thụ khá hẹp, trong khi tính chất băng rộng được yêu cầu trong nhiều ứng dụng khác nhau, trong cả dân sự và quân sự, chẳng hạn như quang điện (PV), phát hiện quang, công nghệ tàng hình [12]. Một số các phương pháp mở rộng băng thông hấp thụ của MPAs được đề xuất bao gồm: cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang [13] hoặc cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương dọc [14] theo sự phân cực của sóng tới, cấu trúc sử dụng các thành phần tổn hao [15], cấu trúc plasmonic nanocomposites [16], cấu trúc cộng hưởng điện môi

[17], hoặc sử dụng vật liệu thay đổi pha [18].

Các kết quả nghiên cứu về MPA trong nước có thể kể đến như: Năm 2015, TS. Đỗ Thành Việt bảo vệ thành công luận án với đề tài nghiên cứu MPAs hấp thụ dải hẹp với cấu trúc hình chữ I và vòng tròn rỗng; và MPA hấp thụ dải rộng với cấu trúc 2 thanh kim loại so le và sắp xếp các cộng hưởng dạng đĩa tròn có bán kính khác nhau theo phương ngang. Các thiết kế đề xuất đều hoạt động ở vùng tần số GHz [19]. Năm 2018, TS. Đặng Hồng Lưu trình bày luận án kết hợp lý thuyết và mô phỏng để thiết kế MPAs đa đỉnh hoạt động ở vùng tần số THz [20]. Năm 2020, TS. Đinh Hồng Tiệp đã trình bày các kết quả chính của luận án nghiên cứu chế tạo MPAs dải rộng (BMPA: *Broadband Metamaterial Absorber*) hoạt động bằng cách tích hợp một phần hoặc hoàn toàn polymer có độ dẫn thấp vào cấu trúc cộng hưởng kim loại [21]. Tuy nhiên, các nghiên cứu chỉ mới thực hiện ở vùng tần số GHz từ 4 đến 22GHz. Năm 2022, TS. Trần Văn Huỳnh đề xuất và chứng minh khả năng điều khiển tính chất hấp thụ đẳng hướng hai chiều của MPA tích hợp graphene hoạt động ở vùng tần số THz theo cơ chế kết hợp cộng hưởng điện và cộng hưởng từ hoặc lai hóa các cộng hưởng từ. Cho đến nay, các nghiên cứu trong nước về MPA băng rộng mới chỉ thực hiện ở tần số GHz, trong khi ở vùng tần số THz chỉ có nghiên cứu MPA băng hẹp hoặc đa đỉnh. Như vậy, phương pháp mở rộng băng thông hấp thụ của MPA ở cả vùng tần số GHz và THz hiện đang là một chủ đề nghiên cứu hấp dẫn nhằm hướng đến ứng dụng che chắn cũng như hấp thụ và chuyển hóa năng lượng sóng điện từ. Vì vậy, nghiên cứu sinh đã lựa chọn đề tài “*Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ băng rộng sử dụng vật liệu biến hóa tích hợp phần tử tổn hao*” với cách tiếp cận hoàn toàn khác với nghiên cứu của TS. Đinh Hồng Tiệp đã thực hiện trước đây. Cụ thể, luận án thiết kế và chế tạo các BMPA hoạt động ở vùng tần số GHz tích hợp các phần tử điện trở nhằm tăng trở kháng của bề mặt cộng hưởng, giảm hệ số phẩm chất Q. Bên cạnh đó, luận án đề xuất các thiết kế mô phỏng các cấu trúc BMPA tích hợp nước nhằm tăng tổn hao lớp điện môi, hoạt động ở cả vùng tần số GHz và THz. Các thiết kế đề xuất có cấu trúc đơn giản, mỏng nhẹ và dễ chế tạo; có độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số rộng, ít nhạy với góc tới và góc phân cực.

Mục tiêu của luận án

Xây dựng và hoàn thiện cơ sở lý thuyết đầy đủ về MPA nói chung và BMPA nói riêng. Trong đó, tập trung giải quyết các vấn đề mở rộng băng thông hấp thụ của

MPA.

Thiết kế và tối ưu các cấu trúc BMPA tích hợp điện trở hoạt động ở vùng tần số GHz, và BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz và THz thông qua mô phỏng.

Làm chủ quy trình, công nghệ chế tạo và đo kiểm tính chất của các BMPA hoạt động ở vùng tần số GHz

Đối tượng nghiên cứu của luận án

Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng rộng tích hợp các phần tử điện trở hoạt động ở vùng tần số GHz.

Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng rộng với tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz và THz.

Phương pháp nghiên cứu của luận án

Luận án kết hợp các phương pháp: tính toán lý thuyết sử dụng mô hình mạch tương đương, mô phỏng bằng phần mềm CST và chế tạo với mẫu BMPA tích hợp điện trở hoạt động ở dải tần GHz nhằm phù hợp với điều kiện trang thiết bị hiện có tại phòng thí nghiệm tại Việt Nam.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Luận án đã đề xuất cải tiến một số cấu trúc BMPA dựa trên việc tích hợp với vật liệu/linh kiện điện tử ngoại vi, hoạt động ở dải tần GHz và THz. Các thiết kế BMPA đề xuất có độ hấp thụ cao ở góc tới rộng và không phụ thuộc vào góc phân cực của sóng điện từ. Ngoài ra, các BMPA thể hiện ưu thế có cấu trúc đơn giản, dễ chế tạo, tiến tới dễ dàng điều khiển biên độ và tần số hấp thụ.

Cụ thể, kế thừa và phát triển các nghiên cứu trong nước về MPA, luận án tối ưu một số cấu trúc MPAs tích hợp các phần tử điện trở nhằm tăng cường thông số tổn hao của vật liệu nhằm mở rộng băng thông hấp thụ. Đây là phương pháp được đánh giá là hiệu quả trong việc mở rộng băng thông hấp thụ của MPAs hoạt động ở dải tần GHz. Tuy nhiên, việc tích hợp số lượng lớn các phần tử điện trở trong một ô cơ sở sẽ dẫn tới những khó khăn nhất định trong chế tạo, ví dụ đối với các cấu trúc cộng hưởng dạng dây kim loại mảnh. Do đó, luận án đặt mục tiêu thiết kế mô phỏng và chế tạo BMPA sử dụng số lượng nhỏ các phần tử điện trở hoạt động phù hợp với các ứng dụng thực tế thuộc băng tần S, băng tần C, băng tần X, và băng Ku. Đây cũng là những dải tần phù hợp với điều kiện trang thiết bị hiện có tại phòng thí nghiệm

thuộc Viện Khoa học Vật liệu, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Ngoài ra, luận án đề xuất các BMPA hoạt động ở vùng tần số GHz và THz sử dụng vật liệu nước với hằng số điện môi phân tán trong dải tần số rộng. Đây có thể được xem là các kết quả nền tảng cho các nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo có thể thực hiện trong nước.

Luận án đã góp phần xây dựng hệ thống kiến thức đầy đủ hơn về BMPA, là tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu sinh, học viên cao học, sinh viên cùng hướng nghiên cứu.

Những đóng góp mới của luận án

i) Tích hợp thành công các thành phần tổn hao (điện trở và nước) trong cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ dải rộng (BMPA) hoạt động ở vùng tần số GHz và THz.

ii) Đánh giá và làm rõ ảnh hưởng của tham số cấu trúc, góc tới, và góc phân cực đến hoạt động của BMPA trong vùng tần số GHz và THz.

Cấu trúc Luận án gồm bốn chương:

Chương 1 tập trung vào khái niệm vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ, phân loại MPA theo cấu trúc đẳng hướng và bất đẳng hướng. Từ đó, làm rõ cơ chế hấp thụ của MPA theo lý thuyết môi trường hiệu dụng, phối hợp trở kháng, cơ chế chồng chập cộng hưởng. Bên cạnh đó, chương 1 cũng trình bày các phương pháp nghiên cứu MPA và các hướng nghiên cứu hiện nay về MPA. Ngoài ra, chương 1 tập trung vào BMPA và các phương pháp mở rộng băng thông hấp thụ của MPA.

Chương 2 trình bày phương pháp nghiên cứu về MPAs, được lựa chọn và sử dụng trong luận án, bao gồm phương pháp tính toán bán lý thuyết, mô phỏng bằng phần mềm CST, mô hình hóa bằng mô hình mạch tương đương và thực nghiệm chế tạo. Các phương pháp sử dụng độc lập hoặc kết hợp, có độ tin cậy cao, được công nhận bởi cộng đồng các nhà nghiên cứu trong cùng lĩnh vực MPA. Ngoài ra chương 2 cũng trình bày chi tiết quy trình chế tạo và đo tính chất hấp thụ của BMPA hoạt động ở vùng tần số GHz.

Chương 3 trình bày việc thiết kế và chế tạo các BMPA tích hợp các điện trở hoạt động ở vùng tần số GHz bao gồm các băng tần thông dụng như S (2-4 GHz), băng C (4-8 GHz), băng X (8-12 GHz), băng Ku (12-18 GHz), giải thích cơ chế hấp thụ bằng lý thuyết đường truyền và lý thuyết phối hợp trở kháng.

Chương 4 trình bày các kết quả nghiên cứu mô phỏng các BMPA tích hợp

điện môi là nước hoạt động ở vùng tần số GHz (1-40 GHz) và vùng tần số THz (1-10 THz). Khả năng hấp thụ băng rộng của các cấu trúc BMPA này được giải thích bởi nước có hằng số điện môi phân tán trên dải tần số rộng, tổn hao ở lớp nước chiếm ưu thế so với tổn hao ở các lớp khác của cấu trúc, sự phối hợp trở kháng giữa cấu trúc đề xuất và không gian tự do.

CHƯƠNG 1

VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỬ BẰNG RỘNG

Chương 1 giới thiệu tổng quan về vật liệu biến hóa và một số ứng dụng của vật liệu biến hóa trong thiết kế siêu thấu kính, bộ hấp thụ, bộ chuyển đổi phân cực sóng điện từ, truyền năng lượng không dây. Nội dung chương 1 tập trung vào cơ chế hấp thụ của MPAs và khái quát các hướng nghiên cứu hiện nay về MPAs, bao gồm: Tối ưu hóa cấu trúc, mở rộng khả năng hoạt động của MPA trên nhiều dải tần, giảm ảnh hưởng của phân cực sóng và hướng sóng tới, mở rộng băng thông hấp thụ.

1.1. Tổng quan về vật liệu biến hóa

1.1.1. Giới thiệu chung

Lịch sử của vật liệu biến hóa (MMs) bắt đầu với vật liệu nhân tạo để điều khiển sóng điện từ vào cuối thế kỷ 19. Năm 1898, Bose lần đầu tiên thực hiện thí nghiệm về vật liệu nhân tạo có cấu trúc xoắn [22]. Năm 1914, Lindman và cộng sự đã tạo ra một cấu trúc đối xứng bằng cách chèn một số dây xoắn nhỏ theo một hướng ngẫu nhiên trong môi trường [23]. Sau đó, vào năm 1948, Kock cũng thiết kế một ống kính vi ba trọng lượng nhẹ bằng cách thực hiện với các mặt cầu dẫn, các dải tần số cũng như điều chỉnh chỉ số khúc xạ của vật liệu nhân tạo [24]. Do đó, lịch sử của MMs về cơ bản là lịch sử phát triển một số loại vật liệu được chế tạo, tương tác ở tần số vô tuyến, sóng vi ba và tần số quang học sau này [11].

Năm 1968, Veselago đề xuất tính toán về sự lan truyền của sóng phẳng trong môi trường điện môi có đồng thời độ từ thẩm âm ($\mu < 0$) và độ điện thẩm âm ($\epsilon < 0$) [25]. Ông nhận thấy, véc tơ năng lượng Poynting khi đi trong môi trường chiết suất âm có thể ngược với véc tơ sóng; trong khi với vật liệu thông thường, véc tơ năng lượng Poynting luôn cùng chiều với hướng lan truyền sóng. Mặt khác, sự tán sắc phụ thuộc đáng kể vào độ điện thẩm và độ từ thẩm của môi trường vật liệu mà sóng đang lan truyền. Tuy nhiên, Veselago chưa tạo ra được vật liệu nhân tạo đồng thời có độ từ thẩm âm và điện thẩm âm trong cùng một dải tần số, nên lý thuyết này không nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Năm 1996, John B. Pendy và cộng sự tại Đại học Hoàng gia Anh, đã chế tạo thành công vật liệu có độ điện thẩm âm với cấu trúc lưới dây kim loại nhằm hạ thấp tần số plasma về vùng tần số GHz [26]. Tiếp đó, đến năm 1999 ông và cộng sự tiếp tục đưa ra mô hình vật liệu có độ từ thẩm âm

ở vùng tần số GHz gồm một dãy tuần hoàn các cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh (SRRs: *Split Ring Resonators*) sử dụng kim loại đồng (Cu) và chất điện môi FR₄ [27]. Dựa trên các kết quả này, Smith và các cộng sự tại Đại học Duke đã kết hợp cấu trúc SRR và các dây kim loại mảnh (TWs: *Thin Wires*) sắp xếp một cách tuần hoàn, kết quả là đã tạo ra vật liệu có chiết suất âm kép với đồng thời độ từ thẩm âm ($\mu < 0$) và độ điện thẩm âm ($\epsilon < 0$) [1]. Mặt khác, giả thiết của Veselago tiếp tục được mở rộng khi có thể tạo ra vật liệu nhân tạo có chiết suất âm mà không cần đạt được đồng thời độ điện thẩm âm và từ thẩm âm. Dựa trên cấu trúc đề xuất bởi Smith và cộng sự, rất nhiều cấu trúc khác nhau được cải tiến để tạo ra MMs có chiết suất âm như: cấu trúc kết hợp, cấu trúc hình xương cá, cấu trúc hình chữ Φ [28]. Về mặt bản chất vật lý, để tạo ra chiết suất âm, các cấu trúc trên được tạo thành từ hai thành phần: i) thành phần cộng hưởng từ để tạo độ từ thẩm âm và ii) thành phần cộng hưởng điện để tạo độ điện thẩm âm dưới tần số plasma [29].

Vật liệu nhân tạo có chiết suất âm kép, có thể được coi là "siêu vật liệu" hay "vật liệu biến hóa" do các đặc tính điện từ thú vị không tìm thấy trong tự nhiên. Về định nghĩa, MMs cấu thành từ các "giả nguyên tử" là các cấu trúc cộng hưởng điện - từ có kích thước nhỏ hơn nhiều lần bước sóng hoạt động, quyết định tính chất chung của cả khối vật liệu [30]. Khi sóng điện từ chiếu đến vật liệu sẽ tương tác với các thành phần vi mô cấu thành, tạo ra mômen cảm ứng điện từ và trực tiếp ảnh hưởng đến độ điện thẩm và độ từ thẩm ở cấp độ vĩ mô của MM. Vì vậy, có thể điều khiển tính chất điện từ của MM bằng cách thay đổi các tham số của thành phần cấu thành vật liệu sẽ dẫn tới một số hiệu ứng như: đảo nghịch định luật Snell, dịch chuyển Doppler ngược, phát xạ Cherenkov ngược.... Do đó, MMs có phạm vi ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như viễn thông, y tế, năng lượng, quân sự.

Các cấu trúc phẳng của MMs có độ dày nhỏ hơn bước sóng hoạt động được gọi là "bề mặt biến hóa" (MTS: *Metasurface*). Giống như các loại vật liệu khác, bề mặt MMs có thể được sử dụng để điều khiển sóng điện từ trong các dải phổ khác nhau. Các cấu trúc MTS được đề xuất giảm thiểu tổn hao không mong muốn theo phương truyền sóng. Hơn nữa, MTS cho thấy phản ứng điện và từ khác nhau bằng cách thay đổi các phân cực sóng tới, dẫn đến các chức năng và ứng dụng khác nhau cụ thể là các bề mặt chọn lọc tần số (FSS: *Frequency-selective surface*), bề mặt trở kháng cao, bề mặt phản xạ và vật liệu hấp thụ gần như tuyệt đối.

Về bản chất, MMs không phải là vật liệu đồng nhất ở cấp độ vi mô nhưng kích thước của các thành phần tạo thành cũng như khoảng cách giữa chúng là rất nhỏ so với bước sóng hoạt động. Do đó, dựa vào lý thuyết môi trường hiệu dụng, có thể coi MMs như một khối đồng nhất với thông số điện thẩm và từ thẩm đặc trưng cho toàn khối. Mặt khác, khi sóng điện từ tương tác với vật liệu, có thể phân tích thành ba thành phần: thành phần phản xạ do sự khác nhau giữa trở kháng của vật liệu và môi trường, thành phần hấp thụ do bản chất của vật liệu, và thành phần truyền qua.

Trong hơn hai thập kỷ qua, MMs thực sự thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học. Tại Việt Nam, công nghệ chế tạo MMs được xem là một trong 58 công nghệ được chính phủ ưu tiên đầu tư phát triển theo quyết định số 66/QĐ-TTG ngày 25/11/2014 của Thủ tướng chính phủ. Các nhóm nghiên cứu thuộc lĩnh vực MMs có thể kể đến bao gồm: tiên phong là nhóm nghiên cứu của GS.TS. Vũ Đình Lâm tại Viện khoa học vật liệu, cho đến nay mở rộng ra tại Trường Đại học Sư phạm Hà Nội, ĐH Thái Nguyên.... Các công trình tập trung nghiên cứu ảnh hưởng của cấu trúc MMs lên các tính chất điện từ, tối ưu hóa cấu trúc nhằm đạt được mục tiêu thiết kế. Ngoài yêu cầu về sự đơn giản của cấu trúc, việc hệ thống hoạt động ổn định với sự thay đổi của góc tới và góc phân cực cũng là những yêu cầu cần thiết khác. Hiện nay, các nghiên cứu được thực hiện trong nước thường tập trung nhiều hơn ở dải tần MHz, GHz vì công nghệ chế tạo phù hợp với thiết bị được trang bị thực tế ở phòng thí nghiệm. Đối với vùng tần số THz, sự tương tác của sóng điện từ với cấu trúc vật liệu biến hóa có kích thước kích cỡ *micro* mét và *nano* mét khá phức tạp do các hiệu ứng lượng tử mạnh hơn, do đó công nghệ chế tạo và đo đạc cũng phức tạp hơn và đang được triển khai chủ yếu về mặt lý thuyết – mô phỏng. Với sự phát triển nhanh chóng trong công nghệ chế tạo nano và công nghệ hình ảnh, các cấu trúc MMs đã trở thành một chủ đề hấp dẫn trong nghiên cứu. Số lượng các tài liệu nghiên cứu được xuất bản trong lĩnh vực MMs gia tăng rất nhanh [31].

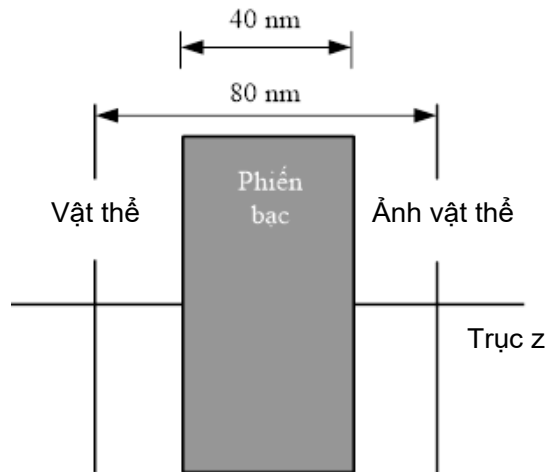
1.1.2. Các ứng dụng của vật liệu biến hóa

MMs là lĩnh vực mới trong nghiên cứu vật liệu và ngày càng nhận được nhiều hơn sự quan tâm bởi khả năng ứng dụng rộng rãi trong thực tế. Có thể kể đến một số ứng dụng nổi bật của MMs như siêu thấu kính, vật liệu tàng hình, vật liệu hấp thụ sóng điện từ....dự đoán góp phần quan trọng trong tương lai cho một số ngành công nghiệp đặc thù như hàng không vũ trụ, chống địa chấn, quốc phòng, điện tử...MMs

sẽ càng trở nên phổ biến hơn do sự quan tâm của các nhà nghiên cứu thuộc các lĩnh vực khác.

1.1.2.1. Siêu thấu kính

Độ sắc nét của hình ảnh khi qua một thấu kính thông thường bị giới hạn bởi bước sóng ánh sáng. Một thấu kính đặc biệt, như trình bày trên Hình 1.1, được đề xuất bởi Pendry [3], là một phiến bạc có chiết suất âm $\varepsilon = \mu = n = -1$.



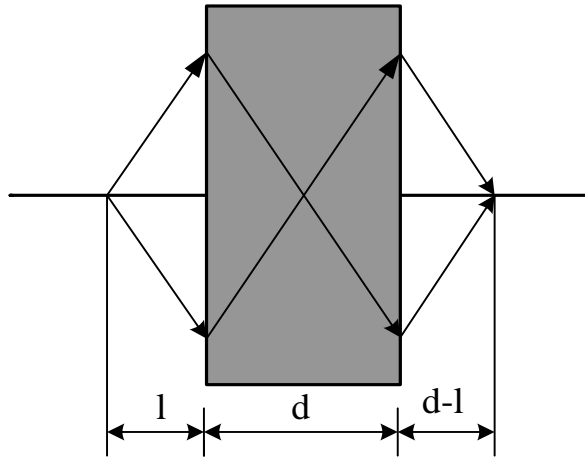
Hình 1.1. Siêu thấu kính đề xuất bởi Pendry [3]

Thấu kính này có khả năng hội tụ tất cả các thành phần Fourier của hình ảnh 2D, không loại trừ các thành phần không lan truyền theo cách bức xạ. Phiến vật liệu làm bằng bạc trở thành một siêu thấu kính hoạt động ở vùng tần số viba, có khả năng phân giải các vật thể chỉ có kích thước nm , nên hình ảnh thu được có độ sắc nét cao.

Với vật liệu có chiết suất dương, khi chiếu tia sáng tới mặt phân cách của hai môi trường, tia khúc xạ sẽ tuân theo định luật Snell. Ngược lại, với vật liệu chiết suất âm, tia khúc xạ đi ngược mặt phân cách của hai môi trường. Theo đó, ánh sáng truyền qua tấm vật liệu có độ dày d nằm cách nguồn một khoảng l , sẽ hội tụ tại tiêu điểm thứ hai cách nguồn khoảng cách $2d$ như thể hiện trên Hình 1.2.

Ngoài ra, siêu thấu kính có thể phục hồi không chỉ thành phần truyền qua mà còn phục hồi cả thành phần bị dập tắt của sóng tới, do vậy độ phân giải của thấu kính được tăng lên gấp nhiều lần. Năm 2005, Fang và cộng sự đề xuất bằng thực nghiệm siêu thấu kính quang học [32], nhưng tới nay chưa có thấu kính nào có khả năng hồi phục hoàn toàn thành phần bị dập tắt để thu được hình ảnh hoàn hảo. Mặt khác, để đưa siêu thấu kính vào ứng dụng thực tiễn, cần đối mặt với một số thách thức bao gồm việc giảm kích thước ngang của thấu kính, thấu kính hoạt động được ở vùng tần

số cao, trong dải tần số rộng và ít nhạy với góc phân cực.



Hình 1.2. Nguyên tắc hoạt động của siêu thấu kính dựa trên MMs [3]

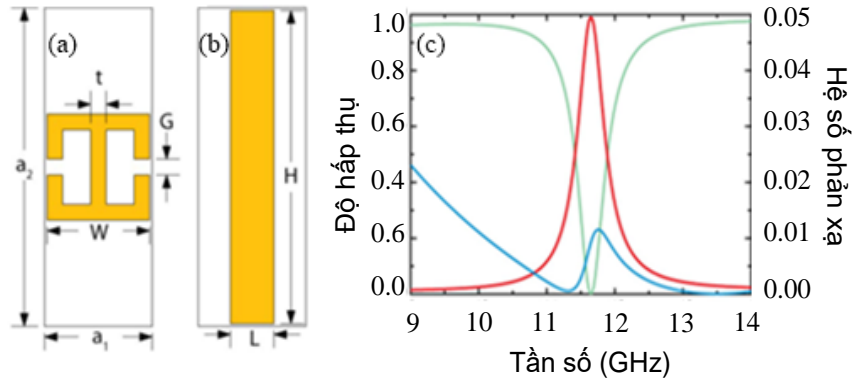
1.1.2.2. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ

Do các ứng dụng tiềm năng của vật liệu hấp thụ trong pin mặt trời, cảm biến và công nghệ tàng hình hiệu suất cao, các nghiên cứu về vật liệu hấp thụ đang gia tăng nhanh chóng. Trong số nhiều ứng dụng có giá trị, phổ biến nhất là mục đích quân sự hoặc công nghệ tàng hình. Mục tiêu của công nghệ tàng hình là che giấu máy bay phản lực khỏi radar bằng cách phủ nó bằng vật liệu hấp thụ tín hiệu radar. Vật liệu hấp thụ được sử dụng trong công nghệ này có thể làm giảm hoặc chặn tín hiệu radar phản xạ khỏi bề mặt máy bay. Một số ví dụ cổ điển về vật liệu hấp thụ sóng điện từ bao gồm vật liệu hấp thụ Dallenbach, Salisbury và Jaumann [33]. Tuy nhiên, nhược điểm của các vật liệu hấp thụ thông thường này là kích thước dày khiến chúng không phù hợp với nhiều ứng dụng thực tế. Do đó, trọng tâm nghiên cứu chuyển sang MPA để đáp ứng nhu cầu về vật liệu hấp thụ nhỏ gọn và đơn giản trong chế tạo. Bên cạnh đó, các ứng dụng hấp thụ sóng điện từ có thể phát triển trong vùng hồng ngoại dựa trên hiệu ứng bẫy hoặc hấp thụ sóng điện từ tới, sau đó là chuyển đổi năng lượng sóng điện từ thành nhiệt năng.

Năm 2008, N. I. Landy và cộng sự đề xuất và chế tạo thành công mẫu MPA đầu tiên. Cấu trúc ô cơ sở gồm vòng cộng hưởng có rãnh *SRRs* ở mặt trên và một thanh kim loại ở mặt dưới tương ứng như trên Hình 1.3 (a) và 1.3 (b). Mặt trên và dưới được ngăn cách bởi một lớp điện môi *FR₄*. Độ hấp thụ cao (88%) đã đạt được trong thực nghiệm ở dải tần số hẹp xung quanh tần số 11.5 GHz [6].

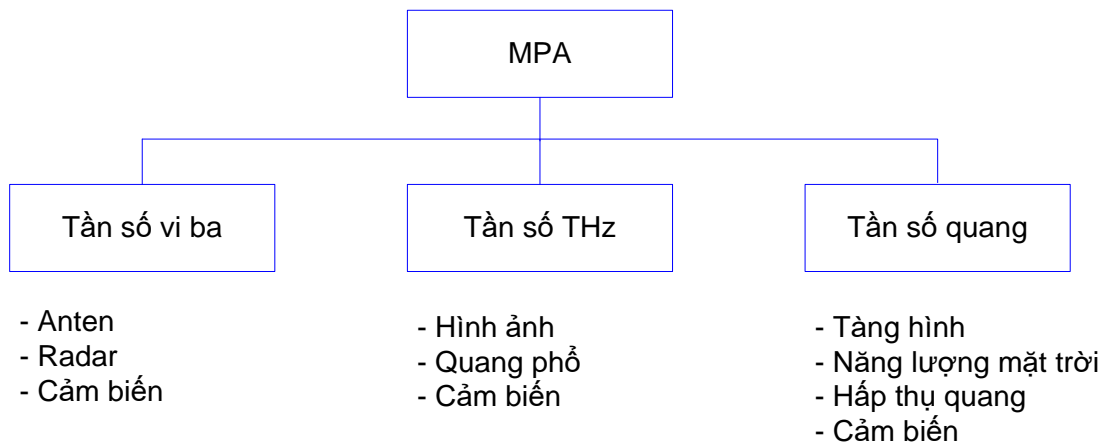
Ở dải tần GHz, kim loại là vật dẫn tuyệt đối và vì vậy toàn bộ năng lượng hấp thụ sẽ được tiêu tán trong lớp điện môi *FR₄*. Cộng hưởng được tạo ra trong thiết kế

MPA đề xuất bởi Landy là sự kết hợp cộng hưởng từ và cộng hưởng điện và thường bị suy yếu khi góc tới của sóng điện từ tăng dần (do từ trường/điện trường của sóng tới không còn tạo ra các cộng hưởng đủ mạnh cũng như không duy trì được sự phối hợp trở kháng hoàn toàn).



Hình 1.3. MPA đề xuất bởi Landy (a) mặt trên (b) mặt dưới và (c) độ hấp thụ [6]

Trải qua 15 năm kể từ đề xuất của Landy, MPA được mở rộng nghiên cứu từ dải tần vô tuyến đến dải tần quang học nhờ vào những ưu điểm nổi bật. Cụ thể, MPA có kích thước bé, mỏng, và nhẹ nên có thể tích hợp với các thiết bị khác. Bên cạnh đó, tính chất hấp thụ của MPA có thể điều khiển được bằng cách thay đổi các thông số của cấu trúc. Trong các thiết kế này, cộng hưởng từ vẫn đóng vai trò chủ đạo trong hấp thụ. Tuy nhiên, độ hấp thụ của MPA được tăng cường bằng cách sử dụng tấm kim loại liên tục ở phía dưới thay cho thanh kim loại CW. Các nghiên cứu cũng chú trọng để MPA có thể hoạt động ở băng tần rộng, hay hoạt động ở nhiều dải tần. Ngoài ra, cấu trúc của MPA cũng thay đổi từ bất đẳng hướng sang cấu trúc đẳng hướng.



Hình 1.4. Ứng dụng của MPA tương ứng với các vùng tần số khác nhau [33]

Các ứng dụng của MPA có phạm vi ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, cả dân sự và quân sự, ví dụ như thu năng lượng mặt trời, cảm biến sinh học, nhiệt

điện quang, tách quang, bộ lọc hấp thụ,...MPA được phân loại ở ba vùng tần số và ứng dụng khác nhau như trên hình 1.4 [33].

Tùy thuộc vào ứng dụng thực tế, sẽ có những yêu cầu riêng biệt cho thiết kế. Tuy nhiên, kích thước ô cơ sở, tần số làm việc, băng thông hấp thụ, khả năng làm việc ổn định với sự thay đổi của góc tới và góc phân cực là những yêu cầu thiết yếu nhất trong quá trình thiết kế.

1.1.2.3. Vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Điều khiển trạng thái phân cực của sóng điện từ hiện đang thu hút sự quan tâm của cộng đồng nghiên cứu do có khá nhiều các ứng dụng và thiết bị nhạy với phân cực. Các bộ chuyển đổi phân cực thông thường dựa trên hiệu ứng Faraday bộc lộ một số hạn chế như: cấu trúc phức tạp, cồng kềnh, và băng thông hạn chế. Do đó, chúng không phù hợp để áp dụng cho các ứng dụng thực tế. Vì vậy, việc thiết kế bộ chuyển đổi phân cực với cấu trúc đơn giản, nhỏ gọn, hiệu suất cao, với băng thông rộng và độ ổn định góc tới cao vẫn còn là vấn đề thách thức với các nhà nghiên cứu. Gần đây, nhiều bộ chuyển đổi phân cực dựa trên cấu trúc vật liệu biến hóa planar 2 chiều hay cấu trúc siêu bề mặt đã được công bố, cung cấp một cách thức tiếp cận tiềm năng để điều chỉnh trạng thái phân cực của sóng điện từ thông qua việc điều chỉnh các thông số vật liệu hoặc điều chỉnh kích thước hoặc cấu trúc của MTS. MTS chứng minh được khả năng điều chỉnh phân cực trong các dải tần khác nhau từ sóng viba, sóng THz, dải tần số không nhìn thấy [34][35]. Các thiết kế có thể có cấu trúc đơn tầng hoặc đa tầng. Chúng đạt được chuyển đổi phân cực tròn, chuyển đổi phân cực ngang tuyến tính, hoặc đạt được đồng thời cả chuyển đổi phân cực ngang và phân cực tròn.

Để đánh giá hiệu suất chuyển đổi phân cực tuyến tính sử dụng tỷ số chuyển đổi phân cực PCR. Giả sử phân cực của trường sóng tới là dọc theo trục y , PCR được tính toán dựa trên công thức 1.1.

$$PCR = \frac{|r_{xy}|^2}{|r_{xy}|^2 + |r_{yy}|^2} \quad (1.1)$$

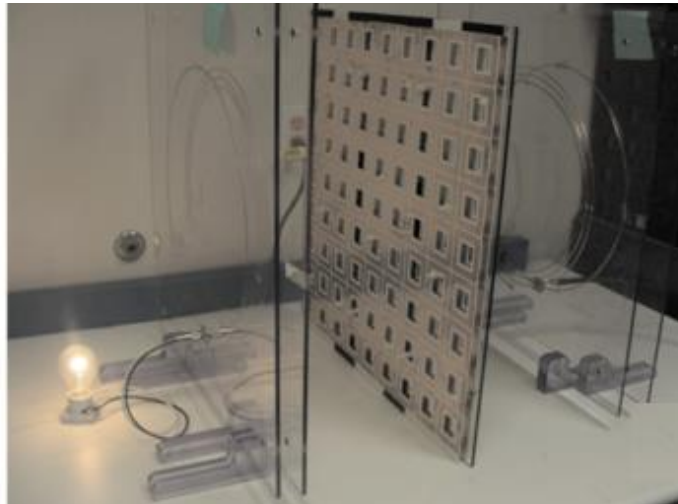
Ở đây, $r_{xy} = |E_{rx}|/|E_{iy}|$ và $r_{yy} = |E_{ry}|/|E_{iy}|$ là hệ số phản xạ phân cực ngang và hệ số phản xạ đồng phân cực tương ứng. E là trường điện trong khi chỉ số i và r tương ứng liên quan tới sóng tới và sóng phản xạ. Do sự đối xứng của cấu trúc theo đường chéo của ô cơ sở, sóng phản xạ đồng phân cực và phân cực ngang là không thay đổi về biên độ và pha dọc theo trục x và trục y .

1.1.3.4. Truyền dẫn năng lượng không dây

Vật liệu biến hóa có thể ứng dụng trong truyền dẫn năng lượng không dây (WPT: *Wireless Power Transfer*) nhờ khả năng phục hồi sóng bị suy hao. WPT sử dụng trong công nghệ sạc không dây dành cho điện thoại thông minh và các thiết bị cầm tay, các chip y sinh được gắn trong cơ thể người để theo dõi sức khỏe, xe điện.....

Các phương pháp cơ bản truyền năng lượng trong hệ thống WPT là truyền năng lượng sóng viba, tương tác cảm ứng và tương tác cộng hưởng. Truyền năng lượng với sóng viba được định hướng từ ăng-ten phát đến ăng-ten thu, sử dụng trong các hệ thống mà quãng đường truyền dẫn xa và cần năng lượng lớn như thông tin vệ tinh. Ngược lại, các ứng dụng có khoảng cách truyền dẫn ngắn, ít tiêu thụ năng lượng, thường sử dụng phương pháp tương tác cảm ứng và tương tác cộng hưởng. Trong đó, hiệu ứng cảm ứng từ giữa cuộn dây phát và thu phụ thuộc hệ số tương tác giữa hai cuộn dây và bị giới hạn bởi khoảng cách. Nếu tần số cộng hưởng giữa cuộn phát và cuộn thu là giống nhau, ta có tương tác cộng hưởng; và chất lượng hệ thống phụ thuộc phẩm chất của cuộn dây và hệ số tương tác giữa các cuộn dây.

Vì hầu hết các hệ thống WPT dựa trên tương tác từ, chỉ cần sử dụng MMs có độ từ thẩm âm. Thí nghiệm mô hình WPT với MMs đầu tiên được đề xuất bởi Wang và các cộng sự [36].



Hình 1.5. Hệ thí nghiệm mô hình WPT [36]

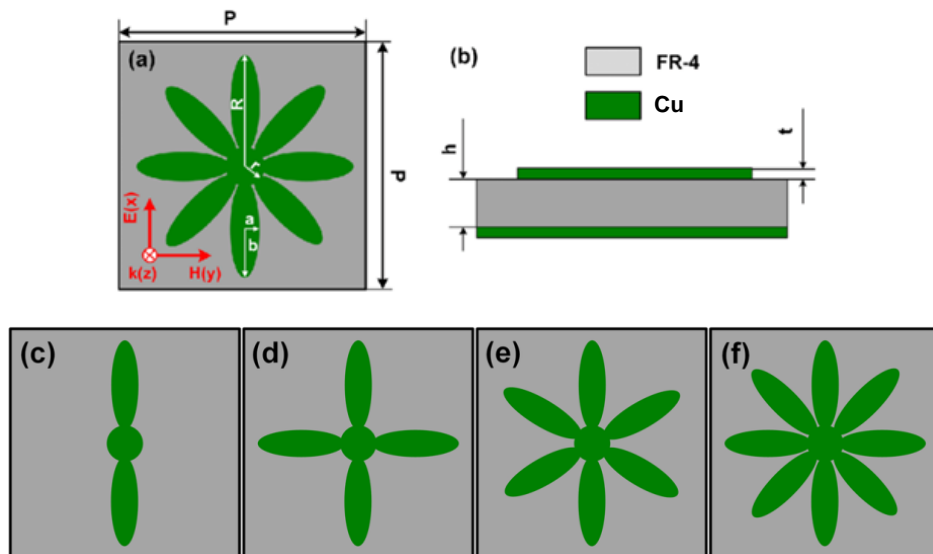
Hệ thí nghiệm gồm hai ăng-ten dạng vòng và hai cuộn cộng hưởng. Hai ăng-ten vòng được kết nối với hai cổng của máy phân tích mạng Agilent N5230A. Các ăng-ten tương tác cảm ứng với các cuộn dây cộng hưởng và năng lượng được truyền từ cuộn dây cộng hưởng bên trái sang cuộn dây cộng hưởng bên phải. Thí nghiệm

chứng minh rằng, khi sử dụng một tấm vật liệu biến hóa phẳng ở giữa hệ thí nghiệm, hiệu suất truyền năng lượng không dây tăng lên từ 17% thành 47%.

1.2. Phân loại vật liệu MPAs

1.2.1. MPA có cấu trúc bất đẳng hướng

Kể từ nghiên cứu của Landy, nhiều nghiên cứu khác nhau của MPA có cấu trúc bất đẳng hướng được đề xuất từ tần số viba (MHz, GHz) tới tần số THz và vùng ánh sáng nhìn thấy. Ô cơ sở của MPA bất đẳng hướng thường có ba lớp kim loại - điện môi - kim loại. Ý tưởng của MPA dựa trên nguyên lý phối hợp trở kháng để triệt tiêu thành phần phản xạ khi sóng điện từ chiếu tới bề mặt vật liệu. Các lớp kim loại có thể lựa chọn vật liệu dẫn điện tốt như vàng (*Au*), bạc (*Ag*) hoặc đồng (*Cu*). Lớp kim loại trên cùng thường được thiết kế có cấu trúc đặc thù và sắp xếp tuần hoàn nhằm thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng với môi trường để triệt tiêu sóng phản xạ. Lớp dưới cùng là một tấm kim loại liên tục để ngăn chặn sự truyền qua của sóng điện từ. Lớp điện môi ngăn cách hai lớp kim loại, tạo không gian để tiêu tán năng lượng. Đối với hầu hết các MPA bất đẳng hướng, hấp thụ tuyệt đối dựa trên cộng hưởng từ có thể đạt tới độ hấp thụ gần tuyệt đối khi phần ảo của chiết suất được tăng cường tại tần số cộng hưởng [29]. Các cấu trúc đơn giản của MPA bất đẳng hướng có thể là cấu trúc hình chữ I, chữ H, cấu trúc dấu cộng, cấu trúc vòng tròn rỗng, cấu trúc đĩa, cấu trúc hình bông hoa....[37].

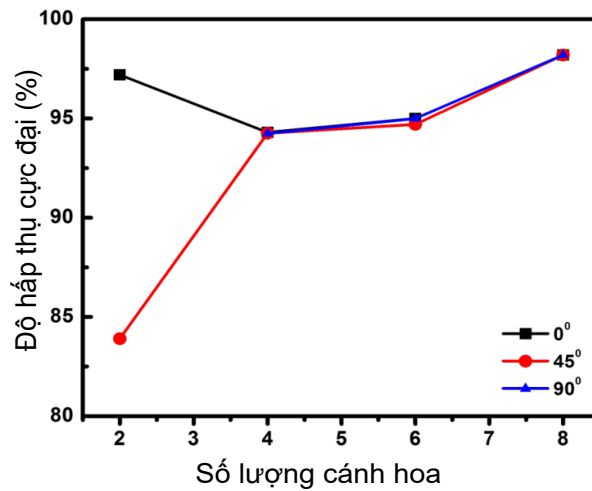


Hình 1.6. Ô cơ sở của mẫu MPA có cấu trúc bất đẳng hướng [38]

Một ví dụ về ô cơ sở của MPA có cấu trúc bất đẳng hướng [38] được cho trên Hình 1.6(a). Thiết kế gồm lớp kim loại trên cùng có hình bông hoa 8 cánh và lớp kim

loại dưới cùng liên tục, ngăn cách bởi lớp điện môi FR4. Cấu trúc được khảo sát với trường hợp số cánh hoa khác nhau như trên Hình 1.6 (c), (d), (e), (f).

Các tham số kích thước ban đầu của các ô cơ sở là $P = 14 \text{ mm}$, $h = 0,8 \text{ mm}$, $R = 3,0 \text{ mm}$, $r = 0,7 \text{ mm}$, $a = 0,5 \text{ mm}$ và $b = 1,2 \text{ mm}$. Ảnh hưởng của các tham số cấu trúc như chu kỳ P , độ dày lớp điện môi h , và số lượng cánh hoa tới đặc tính hấp thụ của MPA được mô phỏng để lựa chọn cấu trúc tối ưu.

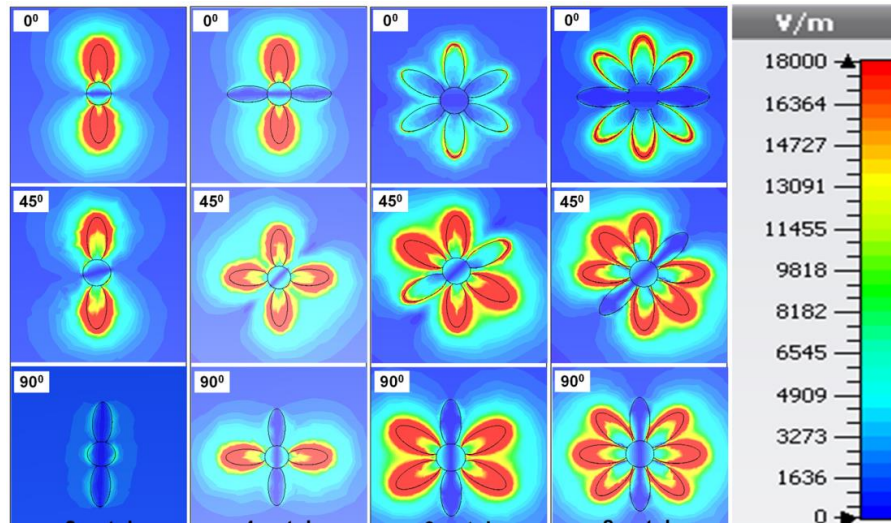


Hình 1.7. Độ hấp thụ cực đại của MPA có cấu trúc bất đẳng hướng tại các góc tới khác nhau cho phân cực TE [38]

Hình 1.7 trình bày độ hấp thụ cực đại của MPA với số cánh hoa khác nhau cho các góc phân cực khác nhau ở 0° , 45° và 90° cho phân cực TE. Kết quả cho thấy MPA với trường hợp 4 cánh, 6 cánh hay 8 cánh đều có độ hấp thụ tương đối giống nhau nhưng khác với trường hợp cấu trúc hai cánh. Có thể thấy, MPA sẽ không nhạy với phân cực khi cấu trúc cánh hoa có tính đối xứng.

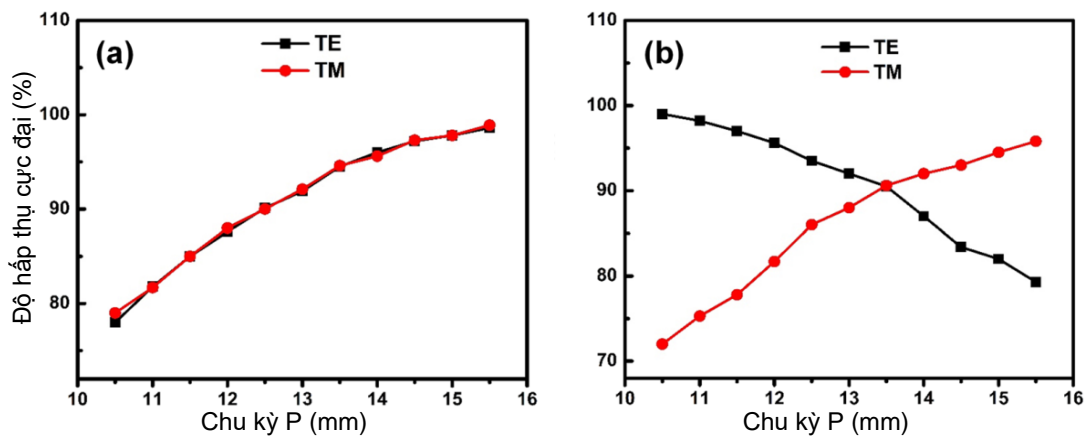
Ngoài ra, như thể hiện trên Hình 1.8, sự khác biệt của sự phân bố điện trường trở nên ít rõ rệt hơn khi số lượng cánh hoa tăng từ 2 lên 8. Đáng chú ý, với góc phân cực 90° , điện trường không được thu thập trong ô cơ sở có hai cánh hoa vì chỉ có hai cánh hoa hướng thẳng đứng. Hơn nữa, sự phân bố điện trường trong các cấu trúc có tính đối xứng cao, cụ thể là hoa 6 và 8 cánh, gần như giống nhau và khả năng hấp thụ của hoa 8 cánh cao hơn so với hình 6 cánh ở tất cả các phân cực.

Các đặc tính hấp thụ của MPA đề xuất phụ thuộc không chỉ về mức độ đối xứng của cấu trúc hoa mà còn phụ thuộc kích thước ô đơn vị hoặc các thông số hình học của nó.



Hình 1.8. Phân bố điện trường với các cấu trúc MPA có số lượng cánh hoa khác nhau ở các góc phân cực khác nhau [38]

Hình 1.9 cho thấy độ hấp thụ tối đa của MPA 8 cánh với sự thay đổi của giá trị P từ 10,5 mm đến 15,5 mm.

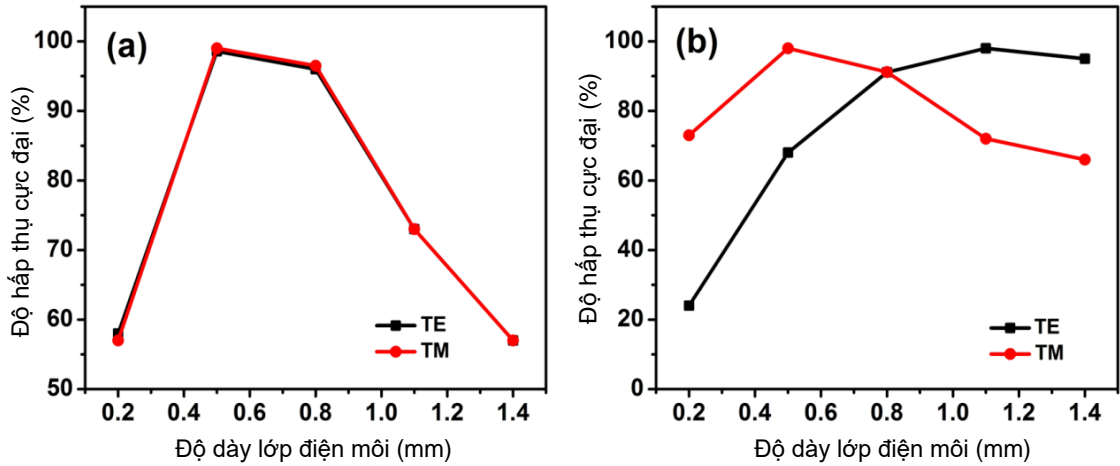


Hình 1.9. Ảnh hưởng của thông số P tới độ hấp thụ của MPA hình bông hoa 8 cánh với trường hợp góc tới (a) 0° và (b) 70° [38]

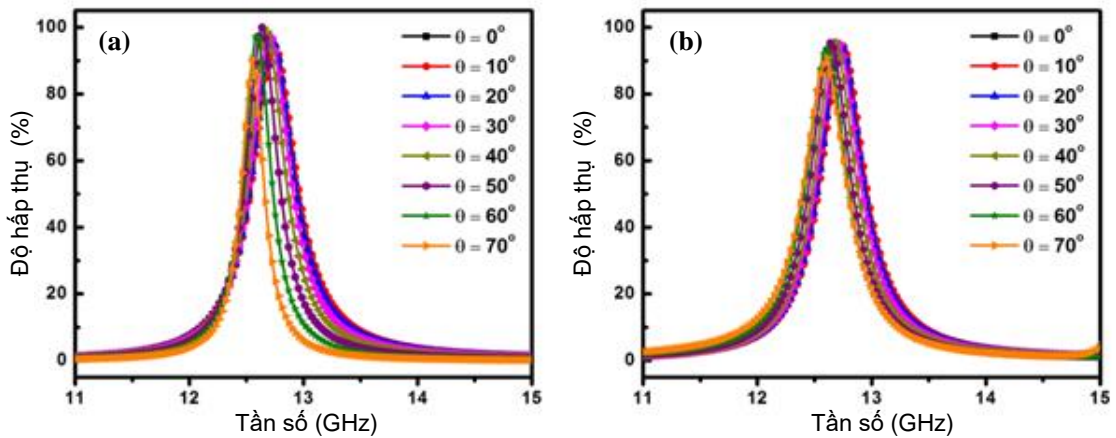
Hình 1.9 (a) cho thấy độ hấp thụ là lớn hơn 90% với trường hợp chu kỳ P lớn hơn 12,5 mm trong trường hợp góc tới bằng 0° . Mặt khác, với trường hợp góc tới 70° như trên Hình 1.9 (b), độ hấp thụ cực đại đạt được cho cả phân cực TE và TM tại $P=13,5$ mm. Điều này cho thấy MPA rất nhạy với kích thước P của ô cơ sở do sự tương tác của các ô cơ sở lân cận dẫn tới sự điều chỉnh tần số hoạt động và độ hấp thụ của MPA.

Ngoài ra, độ hấp thụ tối đa của MA với cấu trúc hoa 8 cánh dưới sự phân cực TE và TM phụ thuộc rất nhiều vào độ dày của lớp điện môi. Như thể hiện trong Hình 1.10(a), đối với góc tới bằng 0° , độ hấp thụ đạt trên 90% khi độ dày nằm trong khoảng

từ 0,4 đến 0,8 mm cho cả phân cực TE và TM. Hình 1.10 (b) cho thấy độ hấp thụ cực đại của MPA với góc tới 70° . Độ hấp thụ tăng khi độ dày lớp điện môi tăng đối với phân cực TE nhưng nó có xu hướng ngược lại đối phân cực TM. Do đó, độ dày điện môi tối ưu được tìm thấy bằng 0,8 mm để MPA đạt được độ hấp thụ trên 90% cho cả phân cực TE và TM với góc tới rộng từ 0° đến 70° .



Hình 1.10. Ảnh hưởng của độ dày lớp điện môi tới độ hấp thụ của MPA hình bông hoa 8 cánh với trường hợp góc tới (a) 0° và (b) 70° [38]



Hình 1.11. Độ hấp thụ của MPA hình bông hoa 8 cánh với các góc tới khác nhau cho (a) phân cực TE và (b) phân cực TM [38]

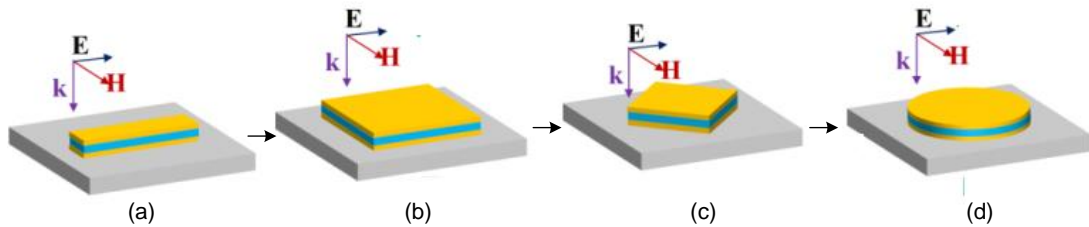
Thiết kế MPA hình bông hoa 8 cánh có cấu trúc khá đơn giản, hoạt động ở dải tần GHz với băng thông hẹp, ít nhạy với góc tới cho cả phân cực TE và TM như thể hiện trên Hình 1.11 (a) và 1.11 (b) tương ứng. Thiết kế là đối xứng vì vậy không phụ thuộc góc phân cực.

1.2.2. MPA có cấu trúc đẳng hướng 2 chiều

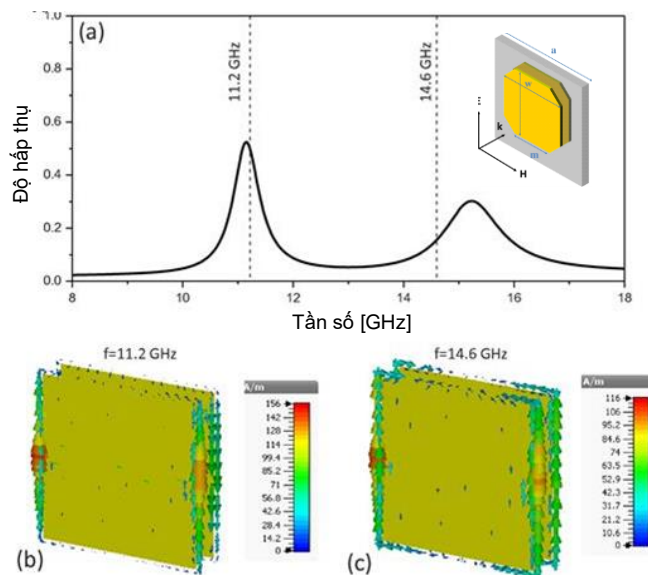
Nhược điểm của cấu trúc MPA bất đẳng hướng là chúng chỉ hấp thụ tuyệt

đôi khi sóng truyền tới bề mặt MPA theo một chiều duy nhất. Điều này làm hạn chế khả năng ứng dụng của MPA trong thực tế. Mặt khác, tấm kim loại liên tục đóng vai trò như gương phản xạ, nên tất cả các sóng tới nằm ngoài dải tần hấp thụ đều bị phản xạ trở lại, nên các ứng dụng điều khiển linh hoạt giữa hai chế độ MPA hoặc truyền qua bị giới hạn [37]. Vì vậy, tối ưu các cấu trúc MPA đẳng hướng, đối xứng ở cả mặt trước và mặt sau cũng là hướng nghiên cứu đang được triển khai cả về lý thuyết và thực nghiệm. Cơ chế hấp thụ của cấu trúc đẳng hướng là dựa vào sự “tương tác” của cộng hưởng điện và cộng hưởng từ hoặc sử dụng hiệu ứng lai hoá với sự “tương tác” của hai cộng hưởng từ.

Một ví dụ điển hình có thể xuất phát từ cấu trúc cặp dây bị cắt (CWP: *Cut Wire Pair*) với hai thanh kim loại tiếp xúc với hai mặt của lớp điện môi như trên Hình 1.12(a), các cấu trúc MPA đẳng hướng khác được cải tiến có thể gồm CWP dạng Hình chữ nhật 1.12(b), CPW dạng hình kim cương 1.12(c), CPW dạng cặp đĩa 1.12 (d) hay còn gọi là cấu trúc DP (DP: *Disk Pair*) hướng đến mục tiêu hấp thụ không phụ thuộc góc phân cực của sóng điện từ.



Hình 1.12. Một số ví dụ về cấu trúc MPA đẳng hướng [37]



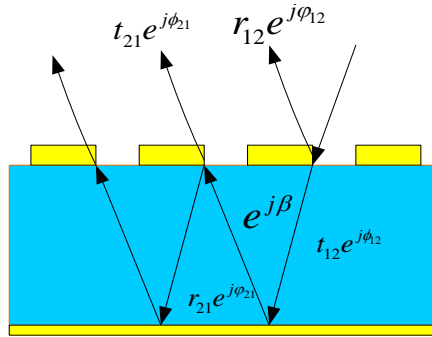
Hình 1.13. (a) Độ hấp thụ của cấu trúc CWP với $a=14,8$ mm và $m=6$ mm, (b) phân bố đồng cảm ứng bề mặt tại các tần số cộng hưởng [39]

MPA bất đẳng hướng với cấu trúc CWP được đề xuất trong [39] cộng hưởng tại tần số 11.2 GHz và 14.6 GHz. Có thể thấy rằng, tại tần số 11,2 GHz cộng hưởng được tạo ra là cộng hưởng từ do dòng cảm ứng bề mặt ở mặt trên và mặt dưới của cấu trúc là song song, ngược chiều. Ngược lại, tại tần số 14,6 GHz, cộng hưởng được tạo ra là cộng hưởng điện do dòng cảm ứng bề mặt ở mặt trên và mặt dưới của cấu trúc là song song, cùng chiều.

1.3. Cơ chế hấp thụ của MPA

1.3.1. Lý thuyết giao thoa

Lý thuyết thường được sử dụng để giải thích cơ chế hấp thụ trong vật liệu truyền thống là lý thuyết giao thoa triệt tiêu. Với lý thuyết này vật liệu hấp thụ thường có độ dày tối thiểu bằng $\frac{1}{4}$ bước sóng làm việc. Lý thuyết giao thoa là một trong các phương pháp tính toán độ hấp thụ của MPA, dựa trên hiệu ứng giao thoa triệt tiêu giữa các thành phần sóng tới và phản xạ bởi vật liệu, minh họa như Hình 1.14 [40].

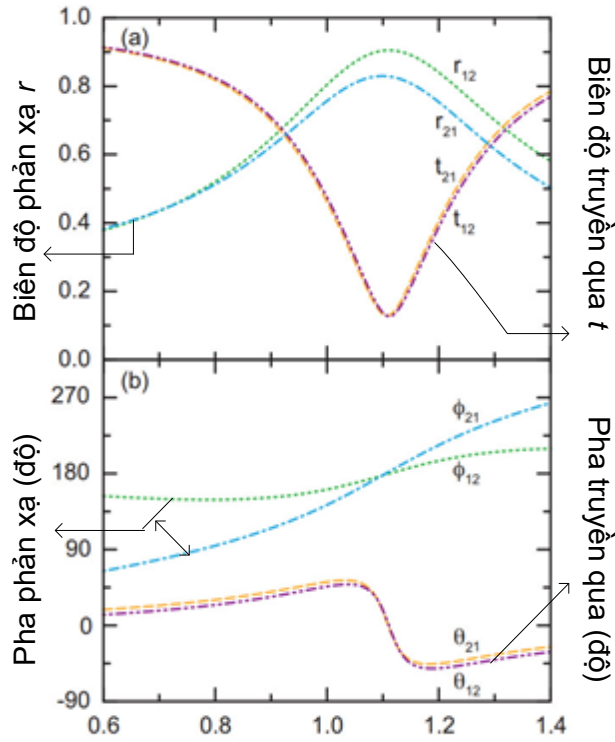


Hình 1.14. Mô hình vật liệu hấp thụ

Để nhận thấy, tại mặt phân cách, sóng điện từ tới được phản xạ một phần trở lại không khí với hệ số phản xạ $\tilde{r}_{12} = r_{12}e^{j\phi_{12}}$ và một phần được truyền vào lớp vật liệu với hệ số truyền là $\tilde{t}_{12} = t_{12}e^{j\phi_{12}}$. Sóng điện từ tiếp tục lan truyền cho đến khi chạm vào lớp kim loại liên tục, với pha lan truyền phức $\tilde{\beta} = \beta_r + j\beta_i = \sqrt{\tilde{\epsilon}_{kk}}k_0d$ trong đó k_0 là số sóng trong không gian tự do, β_r là pha truyền sóng và β_i biểu thị độ hấp thụ ở lớp điện môi.

Sau khi phản xạ tại bề mặt và thêm pha truyền khác $\tilde{\beta}$, sóng bị phản xạ một phần $\tilde{r}_{21} = r_{21}e^{j\phi_{21}}$ và một phần truyền qua $\tilde{t}_{21} = t_{21}e^{j\phi_{21}}$ xảy ra tại bề mặt tiếp xúc giữa lớp điện môi và bộ cộng hưởng. Sự phản xạ tổng thể khi đó là sự chồng chất của nhiều phản xạ.

$$\tilde{r} = \tilde{r}_{12} - \frac{\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21}e^{j2\tilde{\beta}}}{1 + \tilde{r}_{21}e^{j2\tilde{\beta}}} \quad (1.2)$$



Hình 1.15. (a) Biên độ và (b) pha của hệ số phản xạ và truyền qua của mô hình MPA trên hình 1.14 [40]

Trong đó, số hạng đầu tiên là hệ số phản xạ trực tiếp từ bề mặt cộng hưởng; và số hạng thứ hai, bao gồm cả dấu -, là hệ số phản xạ do sự chồng chất của nhiều tia phản xạ giữa bề mặt cộng hưởng và mặt đất. Nếu cấu trúc là bất đẳng hướng, độ hấp thụ được xác định theo công thức $A(\omega) = 1 - |\tilde{r}(\omega)|^2$ vì hệ số truyền qua bằng không nhờ lớp kim loại mỏng liên tục được thiết kế ở lớp dưới cùng. Nếu cấu trúc là đẳng hướng hai chiều thì độ hấp thụ $A(\omega) = 1 - |\tilde{r}(\omega)|^2 - |\tilde{t}(\omega)|^2$.

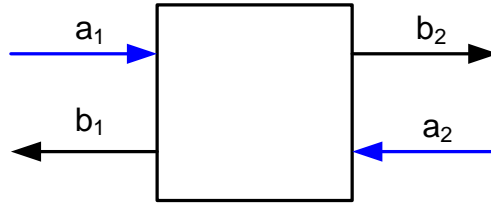
1.3.2. Nguyên lý phối hợp trở kháng và cộng hưởng

Tính chất điện từ của vật liệu MMs được đặc trưng bởi độ điện thẩm hiệu dụng ϵ_{eff} và độ từ thẩm hiệu dụng μ_{eff} . Khi sóng điện từ chiếu tới bề mặt phân cách giữa hai môi trường có chiết suất khác nhau, một phần năng lượng sóng điện từ truyền qua mặt phân cách $T(\omega)$, một phần bị phản xạ trở lại môi trường cũ $R(\omega)$ do sự khác biệt giữa giá trị trở kháng giữa môi trường hiệu dụng tạo bởi cấu trúc MMs và môi trường bên ngoài, và một phần năng lượng sóng điện từ bị MMs hấp thụ $A(\omega)$ do đặc tính hoạt động của cấu trúc. Ở đây, bỏ qua thành phần nhiễu xạ và tán xạ. Vì vậy, tổng

năng lượng của sóng truyền đến vật liệu được tính toán theo công thức 1.3.

$$R(\omega) + T(\omega) + A(\omega) = 1 \quad (1.3)$$

Do đó, khi biết được hai trong ba giá trị $R(\omega), T(\omega), A(\omega)$; có thể tính toán được giá trị còn lại [29]. Mục tiêu chính của việc thiết kế MPAs là để “giam giữ” năng lượng sóng điện từ để năng lượng hầu như tiêu tán bên trong cấu trúc, đồng nghĩa với điều kiện triệt tiêu năng lượng do phản xạ và ngăn chặn hoàn toàn sự truyền qua. Vì vậy, MPA bất đẳng hướng cần tối ưu về cấu trúc để đạt được hai điều kiện trên.



Hình 1.16. Sơ đồ mô tả tín hiệu phát và tín hiệu thu khi sóng điện từ đi qua môi trường hiệu dụng của MMs [29]

Độ hấp thụ $A(\omega)$ của MPA được tính theo công thức 1.4.

$$A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) \quad (1.4)$$

$T(\omega) = |S_{21}|^2$ và $R(\omega) = |S_{11}|^2$ tương ứng là thành phần truyền qua và phản xạ phụ thuộc tần số. Trong đó các hệ số phản xạ S_{11} và truyền qua S_{21} là hệ số biểu diễn mối liên hệ giữa tín hiệu thu b_1, b_2 và tín hiệu phát a_1, a_2 theo hệ phương trình 1.5.

$$\begin{aligned} b_1 &= a_1 S_{11} + a_2 S_{12} \\ b_2 &= a_1 S_{21} + a_2 S_{22} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Với MPA bất đẳng hướng, ánh sáng chỉ chiếu từ một phía. Nếu ánh sáng chiếu từ môi trường 1 thì $a_2 = 0$ nên có thể tính toán hệ số phản xạ và truyền qua theo công thức 1.6a. Ngược lại, có thể tính toán theo 1.6b.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}; S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (1.6a)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}; S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad (1.6b)$$

Nói cách khác, hệ số phản xạ là tỷ số giữa tín hiệu thu và tín hiệu phát ở cùng phía với nguồn phát, còn hệ số truyền qua là tỷ số giữa tín hiệu thu và tín hiệu phát ở khác phía với nguồn phát. Vì tấm kim loại liên tục của cấu trúc có thể ngăn chặn hoàn toàn sự truyền qua của sóng điện từ nên $T(\omega) = 0$. Do đó, $A(\omega) = 1 - R(\omega)$.

Nếu cấu trúc vật liệu được biểu diễn thông qua mô hình mạch tương đương thì hàm phản xạ của sóng điện từ trên bề mặt được xác định theo công thức 1.7.

$$R(\omega) = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1.7)$$

Trong đó $Z_{in} = \sqrt{\frac{\epsilon_{eff}}{\mu_{eff}}}$ là trở kháng đầu vào của vật liệu và $Z_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} = 377\Omega$

là trở kháng của không khí hoặc chân không.

Trở kháng đầu vào chuẩn hóa của MPA được tính toán theo công thức (1.8).

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (1.8)$$

$$Z(\omega) = \frac{Z_{in}}{Z_0} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (1.9)$$

Độ hấp thụ tính theo công thức 1.10.

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) \quad (1.10)$$

Trong nghiên cứu MPA hấp thụ tuyệt đối, sự phối hợp trở kháng hoàn toàn với môi trường xung quanh là một yêu cầu quan trọng cần đạt được khi thiết kế. Nếu đạt được điều kiện phối hợp trở kháng, $Z_{in} = Z_0$ hay trở kháng đầu vào chuẩn hóa bằng 1, tương đương giá trị từ thẩm bằng giá trị điện thẩm. Thông thường, phối hợp trở kháng xuất hiện tại một hoặc vài tần số đặc trưng mà tại đó $\epsilon = \mu$. Vì vậy, có thể điều khiển thành phần điện thẩm hoặc từ thẩm thông qua việc khảo sát hình dạng và kích thước cấu trúc nhằm đạt tới sự cân bằng [29].

Sau khi đi qua mặt tiếp xúc giữa môi trường và vật liệu nhờ nguyên lí phối hợp trở kháng, năng lượng điện từ bị tiêu tán bên trong vật liệu phụ thuộc vào thành phần điện và thành phần từ và được biểu diễn bằng lý thuyết Poynting.

$$q = q_e + q_m = \frac{1}{2} \epsilon_0 \omega \text{Im} \epsilon(\omega) |E|^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \text{Im} \mu(\omega) |H|^2$$

Xung quanh vị trí cộng hưởng, các cấu trúc ô cơ sở tạo ra môi trường có tổn hao lớn, thể hiện dưới dạng tổn hao Ohmic và tổn hao điện môi. Vì vậy, sóng điện từ có thể bị giam giữ và tiêu tán ngay khi truyền vào bên trong cấu trúc MPA.

Ta có, độ phản xạ $R = 0$ và sóng điện từ hoàn toàn đi vào cấu trúc vật liệu, bị chặn bởi lớp kim loại liền mạch hay độ truyền qua $T=0$ và độ hấp thụ tuyệt đối đạt

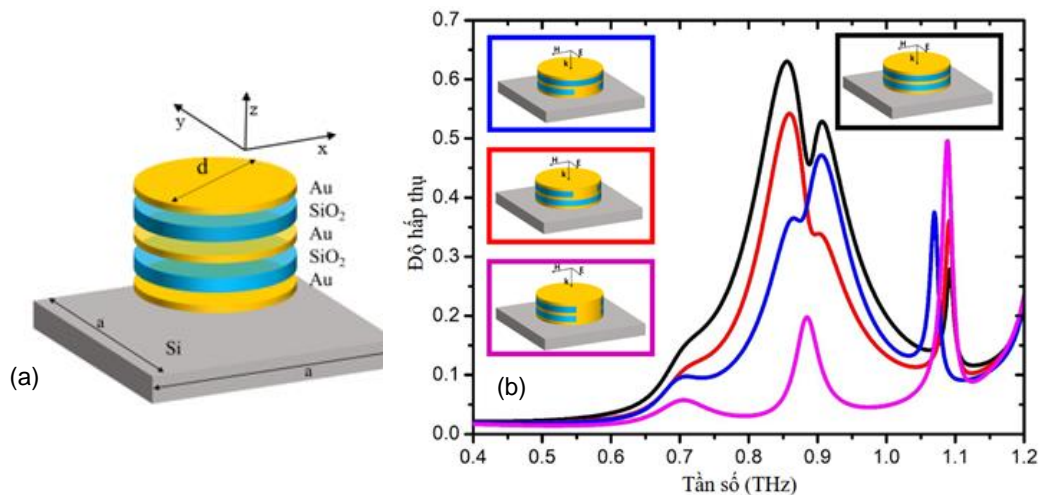
được xung quanh tần số cộng hưởng điện - từ.

1.3.3. Cơ chế chồng chập cộng hưởng điện và cộng hưởng từ

Cấu trúc cặp thanh kim loại thường tồn tại cộng hưởng điện và cộng hưởng từ. Tuy nhiên, hiệu suất hấp thụ thấp đối với cả cộng hưởng điện và cộng hưởng từ do không có mặt phẳng kim loại liền mạch đóng vai trò như gương phản xạ để giữ sóng điện từ trong lớp điện môi. Bằng cách biến đổi cấu trúc CWP thành dạng hình vuông hoặc kim cương như mô tả trên hình 1.12, cộng hưởng từ có thể chồng chập với cộng hưởng điện ở cùng một tần số. Trong đó, cộng hưởng từ do bộ cộng hưởng CWP gây ra, cộng hưởng điện do tương tác giữa các bộ cộng hưởng liền kề gây ra [41]. Các tần số cộng hưởng phụ thuộc và thông số hình học của cấu trúc, nên có thể điều chỉnh từng tần số để chúng chồng chập với nhau, tạo ra sự phối hợp trở kháng hoàn hảo đồng thời với hệ số dập tắt (hấp thụ) của môi trường vật liệu được tăng cường. MPA hấp thụ sóng điện từ bằng cách chuyển hoá năng lượng sóng điện từ, một phần thành nhiệt trên các bộ cộng hưởng kim loại (tổn hao Ohmic), một phần thành nhiệt trên lớp điện môi. Khi xảy ra chồng chập cộng hưởng thì độ hấp thụ được tăng cường [37]. Cơ chế này được phân tích chi tiết trong một số nghiên cứu gần đây áp dụng với cấu trúc MPA đẳng hướng [39], [42]–[44].

1.3.4. Cơ chế lai hóa cộng hưởng từ

MPA dựa trên cộng hưởng điện đã được chứng minh có độ hấp thụ phụ thuộc khá lớn vào góc sóng tới. Vì vậy, cơ chế lai hoá sử dụng hai cộng hưởng từ được đề xuất thay thế cách tiếp cận chồng chập cả cộng hưởng từ và cộng hưởng điện nhằm giảm sự ảnh hưởng của góc tới.



Hình 1.17. MPA với cơ chế lai hoá hai cộng hưởng từ và phổ hấp thụ của MPA với cơ chế lai hoá hai cộng hưởng từ (đường màu đen) [37]

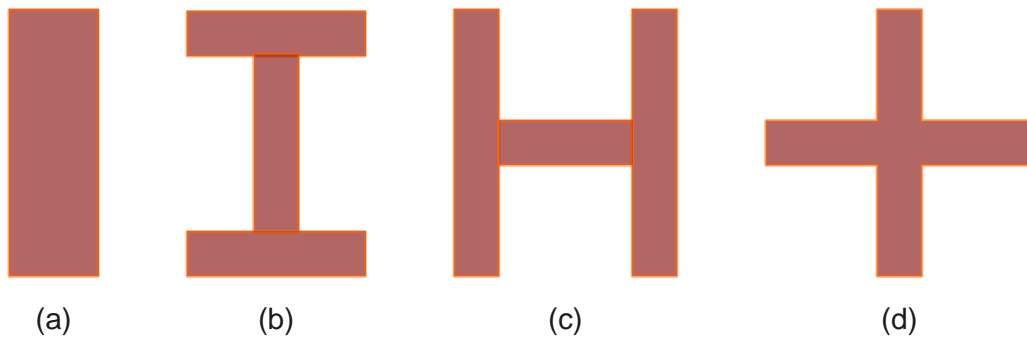
Giải pháp là kết hợp các cặp cấu trúc CWP nhằm suy giảm cộng hưởng từ ban đầu thành cộng hưởng từ lai. Huynh và cộng sự đề xuất thiết kế MPA đẳng hướng sử dụng cấu trúc cặp đĩa (DP: *Disk Pair*) đơn giản làm suy giảm cộng hưởng từ ban đầu thành cộng hưởng từ lai [20].

Phổ hấp thụ của MPA với cấu trúc cặp đĩa DP lai hoá cộng hưởng từ được chứng minh trong [37] là kết quả của sự tương tác giữa hai cộng hưởng từ hay nói cách khác là lai hóa bậc cao. Phổ hấp thụ của cấu trúc cặp DP được trình bày trong Hình 1.18 (đường màu đen) cho thấy có hai đỉnh hấp thụ chính tại tần số 0,855 THz và 0,906 THz với cường độ lần lượt là 63% và 53%.

1.4. Các hướng nghiên cứu hiện nay về MPA bất đẳng hướng

Mặc dù các MPA có hai dạng với cấu trúc bất đẳng hướng và cấu trúc đẳng hướng. Tuy nhiên trong phạm vi nghiên cứu của luận án này, chúng tôi chỉ tập trung thiết kế cấu trúc MPA bằng rộng có cấu trúc bất đẳng hướng.

1.4.1. Tối ưu hóa cấu trúc và nâng cao đặc tính hấp thụ



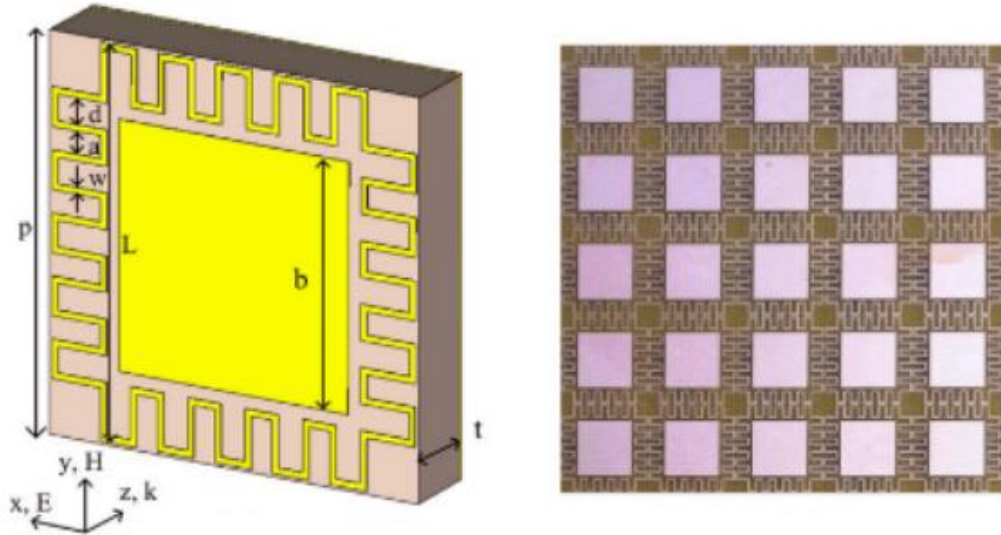
Hình 1.18. Một số cấu trúc cộng hưởng cơ bản của MPA

Một trong những xu hướng nghiên cứu quan trọng của MPA là việc đơn giản hóa cấu trúc cộng hưởng để dễ dàng chế tạo mà vẫn đạt được tính chất hấp thụ phù hợp với ứng dụng cụ thể. Ô cơ sở được thiết kế ban đầu gồm cộng hưởng vòng có khe SRR và dây mảnh bị cắt CW. Từ cấu trúc SRR hoặc CW, nhiều cấu trúc khác nhau được đề xuất như cộng hưởng dạng thanh, cấu trúc chữ I, chữ H, dấu cộng, hay dấu cộng rộng.

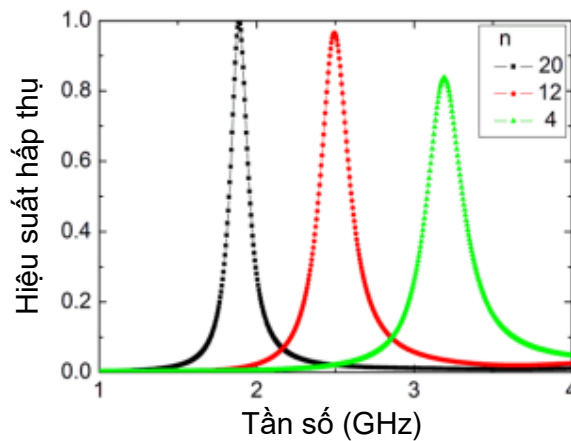
1.4.2. Tiểu hình hóa cấu trúc

Một vài cấu trúc khác có sự điều chỉnh so với cấu trúc truyền thống để đạt được những yêu cầu đặc biệt. Một trong những thách thức lớn trong việc thiết kế MPAs, đặc biệt là tại dải tần số thấp, là kích thước cấu trúc so với bước sóng hoạt động còn tương đối lớn. Các nhà nghiên cứu đã đề xuất một vài phương pháp khác

nhau để tăng chiều dài điện hiệu dụng so sánh với bước sóng làm việc. Do đó, tần số cộng hưởng tại tần số thấp hơn có thể được kích thích. Hiện tượng này có thể được giải thích bằng lý thuyết mạch đường truyền. Khi độ dài điện tăng, dẫn tới cảm kháng và dung kháng tăng, vì vậy các tần số cộng hưởng thấp hơn được kích thích. Ví dụ về phương pháp tiêu hình hóa cấu trúc mô tả trên Hình 1.19 [45]. Theo cấu trúc này, số lần gấp khúc n làm dịch chuyển phổ hấp thụ của MPA như thể hiện trên Hình 1.20.



Hình 1.19. Ví dụ về MPA với cấu trúc dạng zig-zag làm tăng độ tự cảm [45]

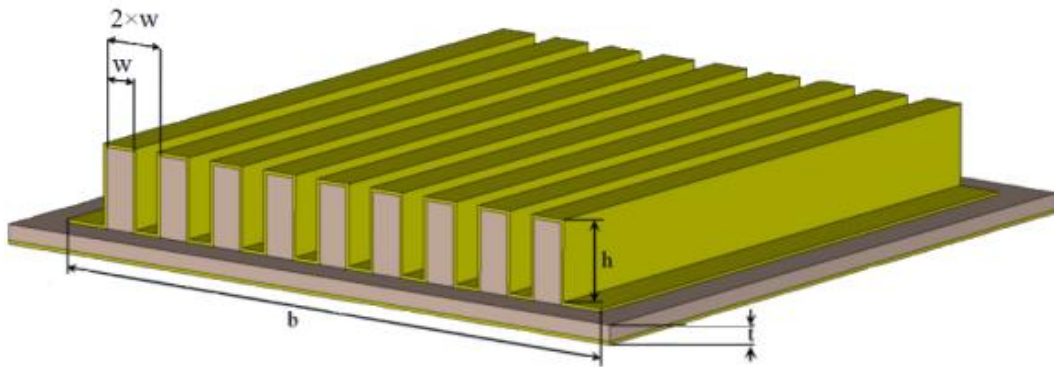


Hình 1.20. Độ hấp thụ phụ thuộc vào số lần gấp khúc n của đường kim loại trong một ô cơ sở [45]

Cấu trúc gấp khúc cũng là một giải pháp để giảm kích thước của ô cơ sở trong thiết kế bộ hấp thụ [45]. Các nhà nghiên cứu cũng đã đề xuất sử dụng đường cong Minkowski để thiết kế MPA hoạt động ở tần số thấp. Wang và cộng sự đã trình bày thiết kế MPA tối ưu hóa cấu trúc sử dụng bề mặt có nếp gấp với mảng vuông tuần [46], như trên Hình 1.21.

Khi sóng điện từ bức xạ tới bề mặt vật liệu biến hóa, điện trường và từ trường

của sóng tới tạo ra các dòng điện cảm ứng dựa trên hình dạng cấu trúc. Có nghĩa rằng cấu trúc vật liệu biến hóa có thể được mô hình hóa như một mạch điện RLC . Việc tăng độ dài của đường dẫn kim loại dẫn tới tăng hệ số phản xạ [46].

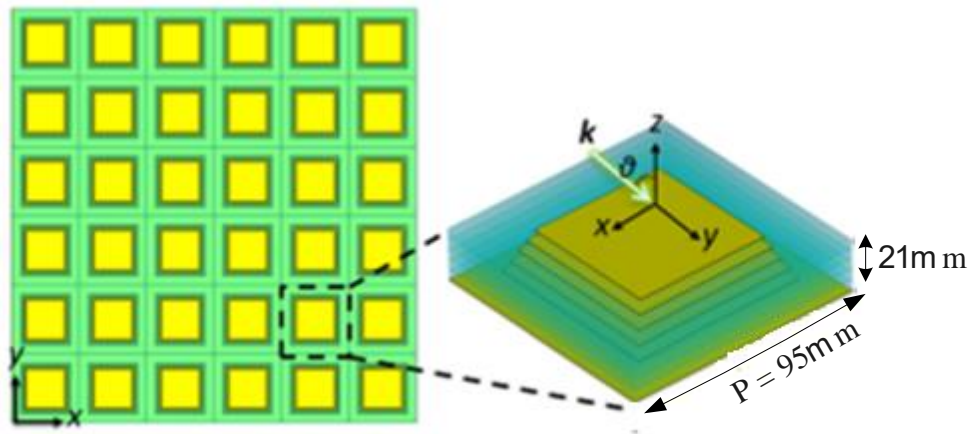


Hình 1.21. Kết hợp bề mặt và điện môi gấp khúc nhằm tăng độ dài điện [46]

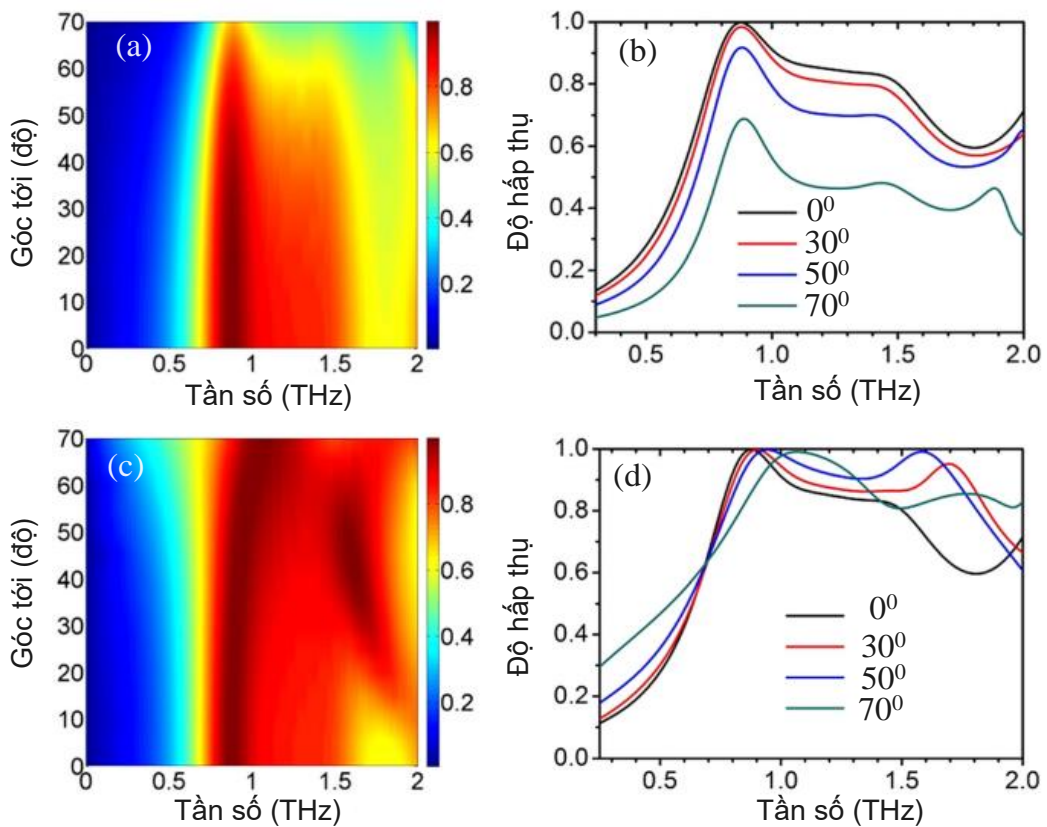
1.4.3. Hoạt động ở các vùng tần số khác nhau

Cùng với việc tối ưu hóa cấu trúc, các nghiên cứu về MPA cũng được thực hiện ở các vùng tần số khác nhau từ tần số vi ba [47], tới tần số cao [48] cho tới dải hồng ngoại, hay quang học [49]. Hiện nay, dải tần số THz được quan tâm nghiên cứu bởi những ứng dụng có tiềm năng trong an ninh quốc phòng và y sinh. Vùng sóng điện từ tần số THz nằm giữa tần số sóng vi ba và sóng hồng ngoại. Khi sóng điện từ chiếu vào vật liệu, sự tương tác của trường điện từ với các điện tử tạo ra các hiệu ứng, tính chất tạo nền móng cho phần lớn các thiết bị điện. Tuy nhiên, bản chất của sự tương tác sóng điện từ trong các loại vật liệu thay đổi theo tần số. Tại tần số vài trăm GHz và thấp hơn, thiết bị hoạt động nhờ vào sự di chuyển của các điện tử tự do. Tuy nhiên, trong vùng bước sóng hồng ngoại và ánh sáng nhìn thấy, các thiết bị hoạt động theo nguyên lý của photon. Ở giữa hai vùng này là sự tồn tại của “khoảng THz”, nơi hiệu quả trong sự ảnh hưởng của sóng điện và sóng hạt có xu hướng giảm chậm. Việc chế tạo và đo đạc mẫu MPA ở vùng tần số THz còn gặp khó khăn do sự thiếu hụt về thiết bị chế tạo và đo đạc [20].

Hình 1.22 là ví dụ về cấu trúc MPA hoạt động ở vùng tần số THz, trong đó cấu trúc mỗi ô cơ sở gồm xếp chồng của 5 tấm kim loại theo phương thẳng đứng [50]. Các tấm kim loại được bao quanh bởi chất điện môi photoresist SU-8. Cấu trúc đề xuất đạt được độ hấp thụ trên 80% trong dải tần từ 0,7-2,3 THz với góc tới tối đa 40° , ít nhạy với góc tới và góc phân cực như thể hiện trên Hình 1.23 (b,d).



Hình 1.22. Cấu trúc của MPA, bên trái: cấu trúc MPA quan sát ở mặt trước, bên phải: ô cơ sở quan sát ở góc xiên [50]



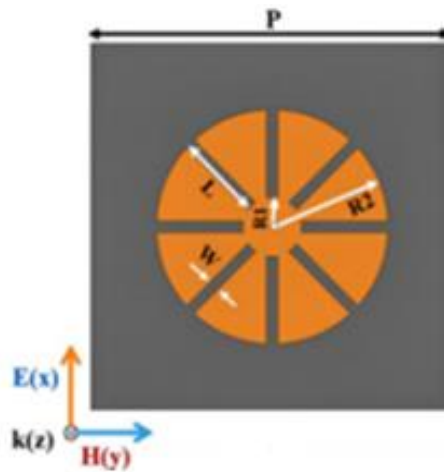
Hình 1.23. Độ hấp thụ theo mô phỏng, (a) và (b) cho phân cực TE, (c) và (d) cho phân cực TM tại các góc phân cực và góc tới khác nhau [50]

1.4.4. Tối ưu phổ hấp thụ không phụ thuộc góc phân cực sóng và góc tới của sóng điện từ

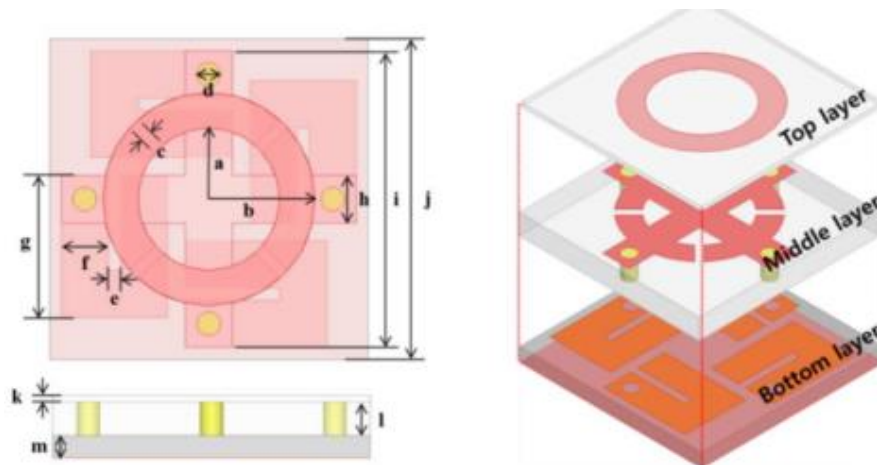
Các bộ hấp thụ sóng điện từ thường sử dụng cấu trúc đối xứng nên tính chất hấp thụ không thuộc vào góc phân cực. Tuy nhiên, sóng điện từ chiếu tới bề mặt với các góc tới khác nhau thường khiến cho các cấu trúc MPAs khó duy trì được điều

kiện phối hợp trở kháng dẫn tới độ hấp thụ giảm. Do vậy, yêu cầu quan trọng trong thiết kế các MPA hướng đến các ứng dụng thực tế là không nhạy với sự thay đổi góc tới và góc phân cực. Trong đó, hình dạng của bộ cộng hưởng là yếu tố quyết định đến đặc tính hấp thụ không phụ thuộc phân cực của MPA. Thực tế, các cấu trúc có tính đối xứng cao thường đạt được hấp thụ không phụ thuộc góc phân cực. Cho ví dụ trong [51], các tác giả đã đề xuất mô hình dẫn điện với tám cung tròn như thể hiện trên Hình 1.24. Cấu trúc đối xứng cho phép bộ hấp thụ giữ được hiệu suất cao với góc phân cực thay đổi từ 0 đến 90°. Ngoài ra, bộ cộng hưởng với 8 sector trở nên ít nhạy với góc tới.

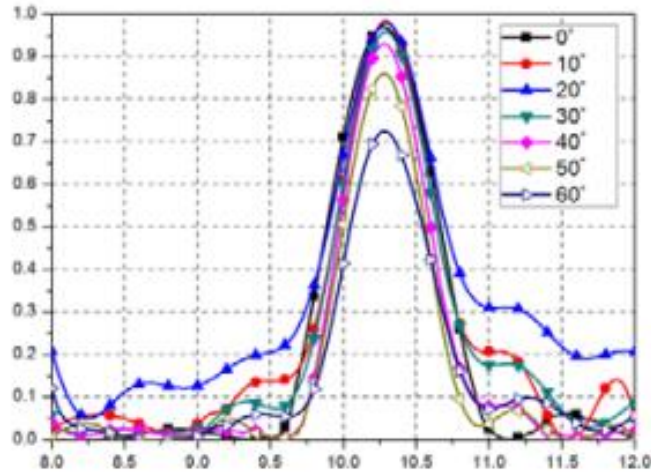
Trong một tiếp cận khác, việc kết hợp cộng hưởng hình tròn và cộng hưởng hình vuông trong một cấu trúc ba tầng để hấp thụ tín hiệu với phân cực thẳng đứng, phân cực ngang và phân cực tròn [52], như thể hiện trong Hình 1.25.



Hình 1.24. Cấu trúc hấp thụ với 8 sectors [51]



Hình 1.25. Cấu trúc 3D với sự kết hợp các cộng hưởng có hình dạng khác nhau trên các tầng khác nhau [52]



Hình 1.26. Độ hấp thụ với các góc tới khác nhau [52]

Các kết quả trên Hình 1.26 chứng minh cấu trúc hấp thụ đề xuất trên Hình 1.25 ít nhạy với góc tới và góc phân cực.

1.4.5. Mở rộng băng thông hấp thụ

Để hấp thụ tại dải tần mong muốn, thực hiện điều chỉnh các tham số cấu trúc của MPA như hình dạng, kích thước bộ cộng hưởng, độ dày lớp điện môi... Thực tế, có thể dễ dàng thực hiện cấu trúc MPA bằng tần đơn hoặc đa băng tần. Tuy nhiên, trong nhiều ứng dụng thực tế như thu thập năng lượng mặt trời, đòi hỏi MPAs hấp thụ với dải tần rộng. Do đó, hướng nghiên cứu về bộ hấp thụ sóng điện từ băng rộng thu hút nhiều hơn sự quan tâm nghiên cứu.

Để đánh giá độ rộng của BMPA, sử dụng hệ số băng thông hấp thụ tương đối RBW, được tính toán theo phương trình 1.11, trong đó f_U và f_L là giới hạn trên và giới hạn dưới của dải bước sóng có độ hấp thụ trên 90%.

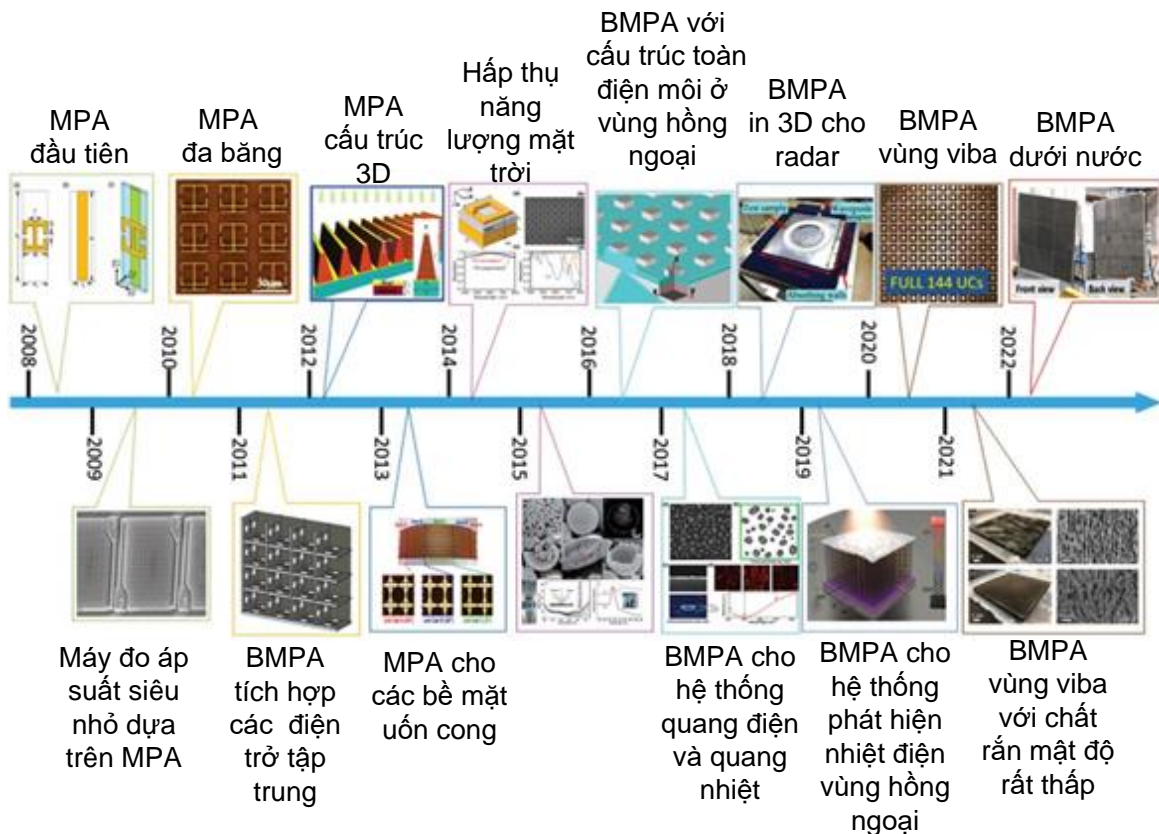
$$RBW = 2 \times \frac{f_U - f_L}{f_U + f_L} \quad (1.11)$$

1.5. Vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng rộng BMPA

Gần đây, các nghiên cứu về MPA tập trung vào việc điều khiển tính chất theo cấu trúc nhằm nhanh chóng hoàn thiện khả năng hấp thụ trên dải rộng và hấp thụ trong nhiều vùng tần số. Tuy nhiên, do bản chất hoạt động của MMs phụ thuộc vào cấu trúc cộng hưởng nên dải tần của bộ hấp thụ khá hẹp, trong khi tính chất băng rộng được yêu cầu trong nhiều ứng dụng khác nhau, trong cả dân sự và quân sự, chẳng hạn như chuyển đổi quang điện mặt trời (PV), tách sóng quang, công nghệ tàng hình che dấu radar [12]. Thực tế, có thể dễ dàng để thu được MPA đơn băng hoặc đa băng,

nhưng việc đạt được MPA băng rộng vẫn còn là vấn đề thách thức do tính chất băng hẹp của phân cực *plasmon* bề mặt hoặc cộng hưởng *palsmon* bề mặt cục bộ, được tạo ra trên bề mặt kim loại ở kích thước *nano* hoặc hệ số phẩm chất cao ở vùng GHz.

Một số thành tựu quan trọng trong lĩnh vực thiết kế MPA, đặc biệt là BMPA, từ 2008 đến hết 2022 được trình bày trên Hình 1.27 [53]. Sự xuất hiện của BMPA nhanh chóng thu hút sự chú ý của các nhà nghiên cứu và đạt được một số thành tựu đáng kể. BMPA hoạt động ở vùng tần số THz với độ hấp thụ trên 80% trong khoảng tần số từ 0,7 đến 2,3 THz, với các mảng cấu trúc ô cơ sở hình kim tự tháp xếp chồng đa lớp điện môi-kim loại [50] hoặc BMPA hoạt động trong dải tần viba, quang học và cận hồng ngoại sử dụng màng tổng hợp polyetylen (PE)[54] đã được đề xuất. Một số các thiết kế khác kết hợp các bộ cộng hưởng khác nhau và sử dụng vật liệu tổng hợp nano plasmon [55][56].



Hình 1.27. Một số thành tựu trong thiết kế MPA băng rộng từ 2008 tới 2022 [53]

Tuy nhiên, hầu hết các thiết kế BMPA có tần số làm việc, băng thông cộng hưởng, cường độ hấp thụ là cố định. Do đó, ý tưởng về các BMPA có thể điều chỉnh hoặc có thể cấu hình lại được quan tâm nghiên cứu [57][58]. Bằng cách tích hợp một số thành phần hoạt tính (hoặc vật liệu) vào các kết cấu của BMPA, tính chất hấp thụ của BMPA có thể được điều khiển hoặc điều chỉnh nhờ tác động bên ngoài như nhiệt

độ [59][60], điện trường [61], từ trường [62], và điện áp phân cực [63].

1.5.1. Cơ chế hình thành hấp thụ băng rộng của MPA

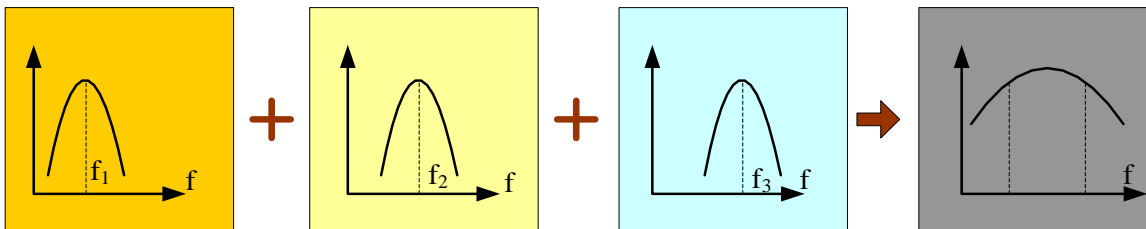
Nhìn chung, thiết kế MPA thường sử dụng phương pháp mô phỏng toàn sóng và kết quả lý thuyết được xác minh bằng thực nghiệm chế tạo MPA. Phương pháp toàn sóng chủ yếu dựa trên việc giải ma trận của các phương trình Maxwell rời rạc trong dải phổ cần thiết. Kết quả mô phỏng với độ chính xác cao có thể được sử dụng để diễn giải kết quả thực nghiệm và giúp tiết kiệm chi phí nghiên cứu. Tuy nhiên, nhược điểm của việc thiết kế các MPA sử dụng mô phỏng toàn sóng là không cho thấy được bản chất các cơ chế vật lý của MPA. Do đó, các mô hình lý thuyết vật lý đã được phát triển để làm sáng tỏ các nguyên tắc cơ bản của MPA, bao gồm: i) Lý thuyết giao thoa, ii) Nguyên lý phối hợp trở kháng; iii) Lý thuyết đường truyền [53].

Cần lưu ý rằng các lý thuyết trên là chung cho MPA băng hẹp, đơn băng, đa băng, MPA băng rộng. Phần này tập trung vào sự hình thành cơ chế hấp thụ băng rộng của MPA; bao gồm: xếp chồng các đỉnh cộng hưởng, giảm hệ số chất lượng Q và một số các cơ chế khác như điều chỉnh tầng điện môi, điều chỉnh vật liệu cộng hưởng [53].

1.5.1.1. Tích hợp các cấu trúc cộng hưởng khác nhau và giống nhau

a) Cấu trúc cộng hưởng khác nhau sắp xếp theo phương ngang (2D)

Xếp chồng các đỉnh cộng hưởng là phương pháp hoặc cơ chế chung nhất để đạt được MPA băng rộng, như thể hiện trên Hình 1.28. Rất nhiều các thiết kế BMPA đều đạt được hiệu suất cao và băng hấp thụ rộng theo cơ chế này [64]. Cơ chế xếp chồng các đỉnh cộng hưởng không chỉ sử dụng trong BMPA mà còn được sử dụng trong các ứng dụng khác nhau của siêu vật liệu băng rộng như áo choàng tàng hình, bộ lọc, bộ tán xạ, gương phản xạ [64].

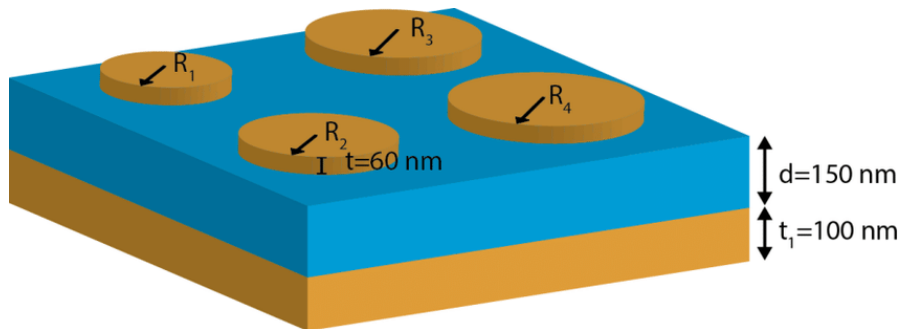


Hình 1.28. Cơ chế xếp chồng các đỉnh cộng hưởng nhằm đạt được băng rộng [64]

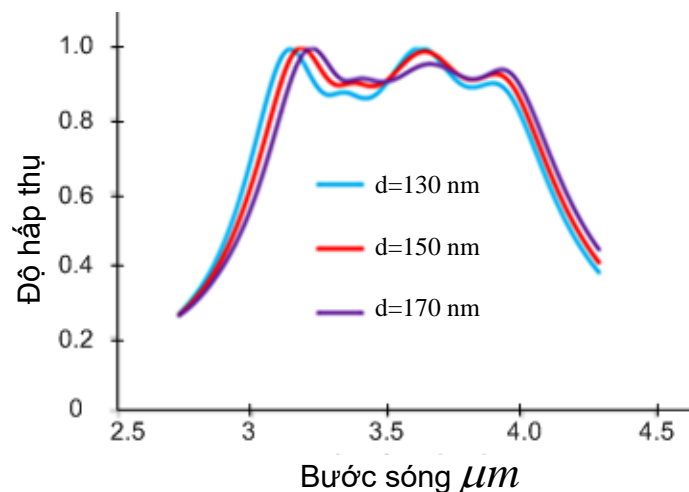
Hạn chế của phương pháp này là kích thước của ô cơ sở phải nhỏ hơn bước sóng làm việc. Do đó, phương pháp này giới hạn việc sử dụng nhiều cộng hưởng có

kích thước khác nhau trên cùng một mặt phẳng trong cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang. Với trường hợp xếp chồng các đỉnh cộng hưởng trong cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương dọc, do cộng hưởng ở lớp dưới bị kích thước bởi các cộng hưởng ở lớp trên nên số lớp xếp chồng không được quá nhiều. Hạn chế này càng thể hiện rõ hơn khi suy hao điện từ trở nên đáng kể. Để hỗ trợ bằng thông rộng, có thể sử dụng cơ chế xếp chồng kết hợp kỹ thuật *fractal* hoặc *gradient* [64].

Cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang là cấu trúc hai chiều (2D) có các đỉnh hấp thụ cộng hưởng gần nhau bằng cách điều chỉnh kích thước của các mẫu trong một ô đơn vị ở lớp trên cùng. Đặc biệt, nếu các đỉnh cộng hưởng này là đủ gần, chúng sẽ tạo thành hấp thụ băng rộng. Tuy nhiên, cấu trúc này có nhiều hạn chế trong việc mở rộng dải tần bởi vì kích thước ô cơ sở thường lớn hoặc dày dẫn tới khó ứng dụng hoặc chế tạo.



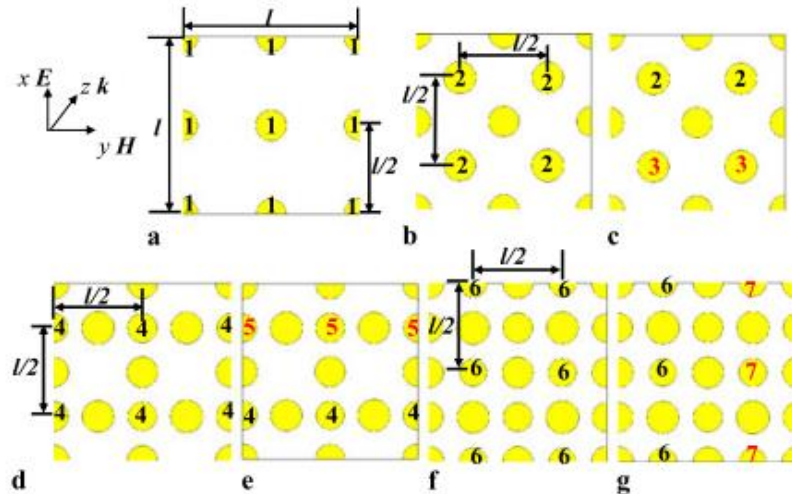
Hình 1.29. BIPA với cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang [65]



Hình 1.30. Độ hấp thụ của BIPA với cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp ngang [65]

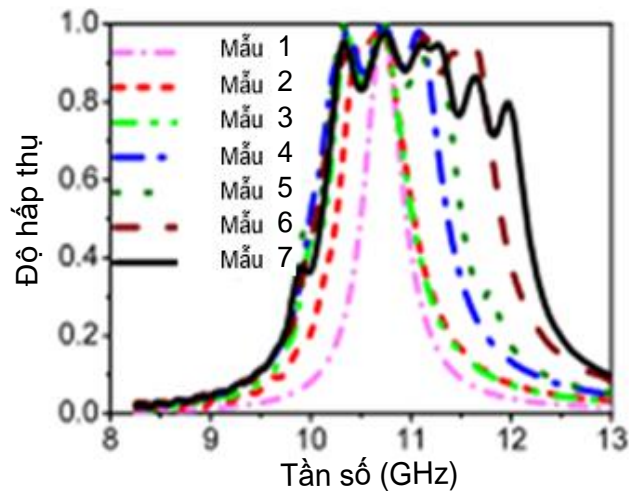
Hình 1.29 trình bày ví dụ về cấu trúc MPA đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang [65]. Cấu trúc đề xuất gồm bốn đĩa tròn bằng nhôm (Al) ở lớp trên cùng với bốn kích thước R_1 , R_2 , R_3 , R_4 khác nhau và lớp kim loại liên tục phía dưới, được ngăn

cách bởi lớp điện môi SiO_2 . Cấu trúc này được sử dụng để nâng cao băng thông hiệu dụng. Kết quả mô phỏng cho thấy có bốn đỉnh hấp thụ và các đỉnh hấp thụ kết hợp với nhau giúp mở rộng băng thông hấp thụ như mô tả trên Hình 1.30. Bộ hấp thụ hoạt động ở vùng giữa hồng ngoại.



Hình 1.31. Ô cơ sở của MPA đề xuất (a) mẫu 1, (b) mẫu 2 (c) mẫu 3, (d) mẫu 4, (e) mẫu 5, (f) mẫu 6, và (g) mẫu 7 [66]

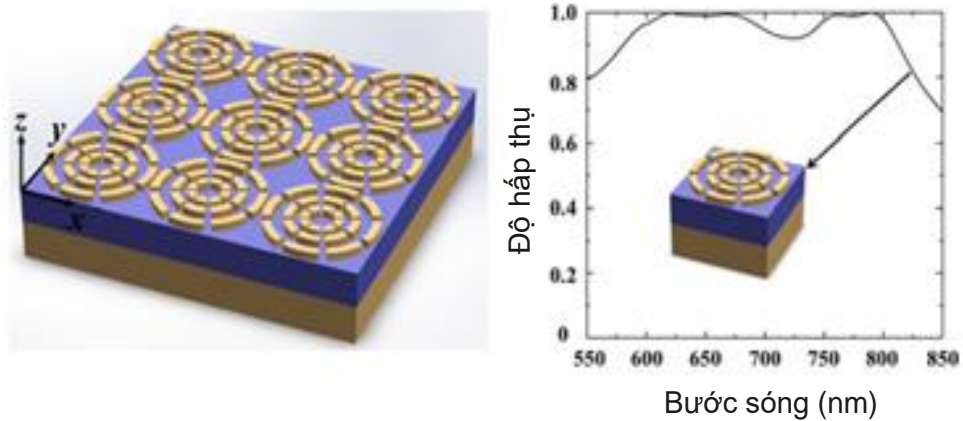
Một đĩa kim loại hình tròn với các kích thước nhau trong một ô cơ sở như thể hiện trên Hình 1.31, có thể kết hợp các đỉnh cộng hưởng để tạo thành hấp thụ băng rộng [66], như thể hiện trên Hình 1.32.



Hình 1.32. Phổ hấp thụ của MPA [66]

Hình 1.33 trình bày cấu trúc gồm nhiều vòng cộng hưởng hở có đường kính khác nhau được lồng vào nhau trong một cấu trúc ô cơ sở. BIPA được thiết kế có băng thông siêu rộng hoạt động ở vùng tần số THz, không nhạy với góc tới và góc phân cực.

Ở vùng tần số GHz, cấu trúc 2D có quá trình chế tạo khá dễ dàng và không tốn kém. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là có ít đỉnh cộng hưởng do độ dài ghép nối hạn chế. Mặt khác, đôi khi khoảng cách giữa hai tần số cộng hưởng là quá rộng để hợp nhất do bị giới hạn về không gian của cấu trúc. Ngoài ra, hiệu ứng ghép nối giữa các bộ cộng hưởng có thể làm giảm tỷ lệ hấp thụ, suy yếu phối hợp trở kháng ở nhiều tần số. Cuối cùng, ở tần số THz, kích thước là ô cơ sở là cỡ nm , sẽ rất khó để chế tạo các mẫu có kích thước khác nhau trên cùng một ô cơ sở [67].



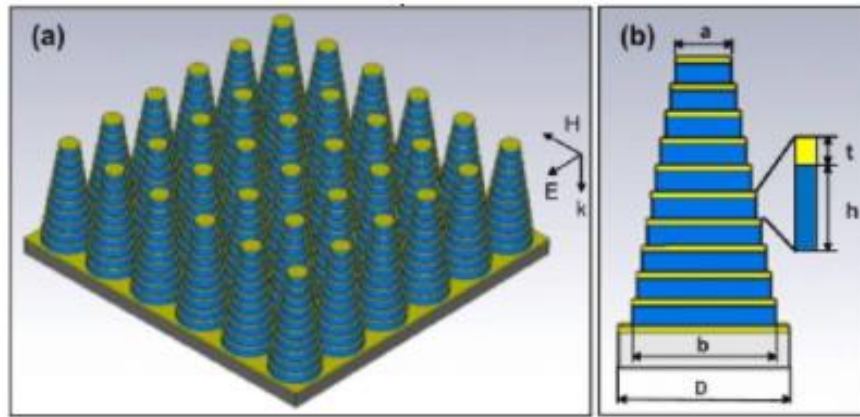
Hình 1.33. Cấu trúc đa cộng hưởng vòng hở và độ hấp thụ [67]

b) Cấu trúc cộng hưởng khác nhau sắp xếp theo phương dọc (3D)

Cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương dọc là cấu trúc ba chiều (3D) xếp xen kẽ các lớp kim loại và điện môi với kích thước khác nhau theo hướng thẳng đứng. Chúng ta có thể sử dụng mô hình đa lớp kim loại - điện môi khác nhau để tạo thành một phổ hấp thụ băng rộng. So với cấu trúc 3D, cấu trúc 2D có nhiều hạn chế trong việc mở rộng dải tần bởi vì số lượng các tần số cộng hưởng kết hợp với nhau là ít hơn. Do đó, các nghiên cứu về việc mở rộng dải tần của bộ hấp thụ vật liệu biến hóa sử dụng cấu trúc 3D đang được quan tâm nghiên cứu rộng rãi hơn. J. Zhu và cộng sự đề xuất nghiên cứu cấu trúc 3D hình kim tự tháp, kết quả cho thấy cấu trúc này có RBW lên tới 127% [50]. Tuy nhiên, các kết quả nghiên cứu này vẫn còn nhiều hạn chế như độ hấp thụ phụ thuộc góc tới (dưới 40°) và phân cực sóng.

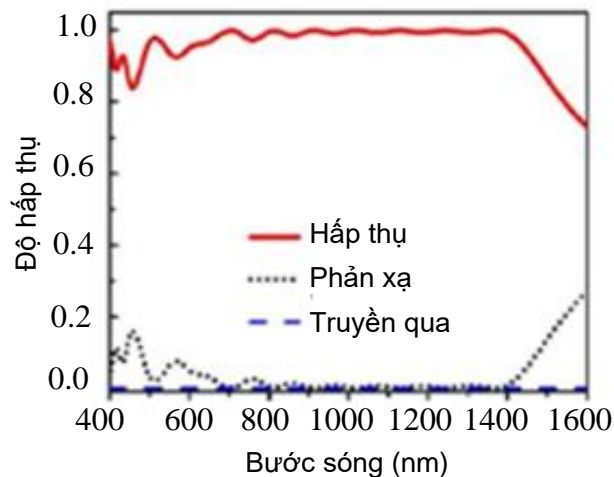
Hình 1.34 giới thiệu ô cơ sở của BMPA gồm một tấm kim loại liên tục ở dưới cùng, trên đó là 10 cặp lớp điện môi-kim loại hình đĩa tròn có kích thước khác nhau được xếp chồng lên nhau. Các tầng kim loại được chọn bằng vàng (Au) vì có thể chịu được quá nhiệt trong các ứng dụng mục tiêu, trong khi các tầng điện môi được chọn là silicon vì độ ổn định nhiệt và độ bền cơ học tốt [14]. Độ dày của lớp nền (t_g) là 50 nm vì không nhất thiết dày hơn dựa trên mô hình số. Các tham số ô đơn vị được tối

ru hóa để đạt được độ hấp thụ cao hơn. Đường kính của đĩa tròn đầu tiên b là 110 nm và giảm dần cho tới đường kính của đĩa tròn trên cùng là $42,5\text{ nm}$.



Hình 1.34. BMPA với cấu trúc đa tầng [14]

Hình 1.35 trình bày phổ hấp thụ, phản xạ và truyền qua của BMPA đề xuất, chỉ ra rằng độ hấp thụ là trên 90% trong dải băng tần rộng từ $480\text{-}1480\text{ nm}$ bao phủ hoàn toàn vùng ánh sáng nhìn thấy và vùng hồng ngoại gần. BMPA đề xuất có 10 đỉnh hấp thụ, tương ứng với 10 lớp điện môi-kim loại.

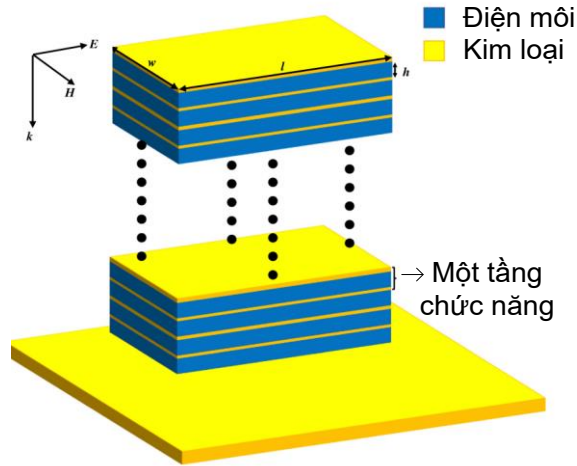


Hình 1.35. Phổ hấp thụ, phản xạ và truyền qua của BMPA [14]

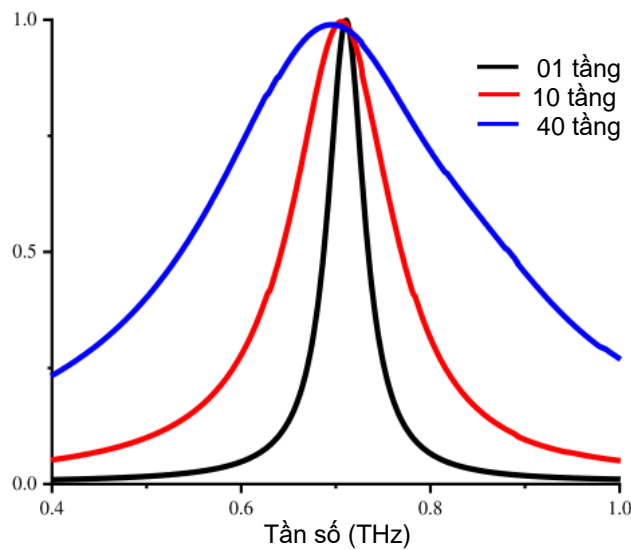
Về mặt lý thuyết, cấu trúc 3D được chứng minh có khả năng mở rộng băng tần thông qua việc mô phỏng, nhưng việc chế tạo tương đối khó khăn và giá thành cao. Ngoài ra, các kết quả nghiên cứu về MPA cấu trúc 3D với tính đối xứng không cao thường có độ hấp thụ phụ thuộc vào phân cực sóng và góc tới hẹp. Vì vậy, việc sử dụng các cấu trúc MMs có tính đối xứng cao trong chế tạo vật liệu hấp thụ là cần thiết nhằm loại bỏ được ảnh hưởng của phân cực sóng và mở rộng được góc tới của sóng điện từ, mà không ảnh hưởng đến hiệu suất hấp thụ.

c) Cấu trúc cộng hưởng giống nhau sắp xếp theo phương dọc (3D)

Một cấu trúc BMPA xếp chồng các lớp kim loại-điện môi-kim loại hình chữ nhật có cùng kích thước [68], như thể hiện trên Hình 1.36. Lớp kim loại được chọn là vàng (Au), trong khi lớp điện môi là SiO_2 .



Hình 1.36. BMPA đa tầng với các cấu trúc cộng hưởng giống nhau [68]



Hình 1.37. Phổ hấp thụ của BMPA đa tầng có cấu trúc cộng hưởng giống nhau [68]

Kết quả trên Hình 1.37 cho thấy, với cấu trúc chỉ một tầng, thiết kế đề xuất có độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần 0,012 THz. Độ rộng băng thông hấp thụ đạt được tăng gấp 10 lần (với 0,12 THz) khi xếp chồng 40 lớp kim loại-điện môi-kim loại. Mặt khác, đỉnh hấp thụ gần như dịch chuyển không đáng kể xung quanh tần số cộng hưởng 0,69 THz. So với cấu trúc nhiều lớp hình kim tự tháp, BMPA đề xuất có thể dễ dàng chế tạo do các lớp có cùng kích thước và hình dạng [68].

Nhìn chung, cấu trúc BPA đa cộng hưởng sắp xếp theo phương dọc hiệu quả hơn cấu trúc đa cộng hưởng sắp xếp theo phương ngang. Tuy nhiên, chúng khá cồng kềnh và do đó việc chế tạo phức tạp và tốn nhiều thời gian hơn. Ngoài ra, tổn hao ở các lớp trên là không thể bỏ qua, đặc biệt trong ứng dụng cảm biến, bởi vì sóng tới yếu đi khi đi qua lớp trên cùng có thể dẫn tới độ chính xác thấp hơn [47].

1.5.1.2. Giảm hệ số phẩm chất Q

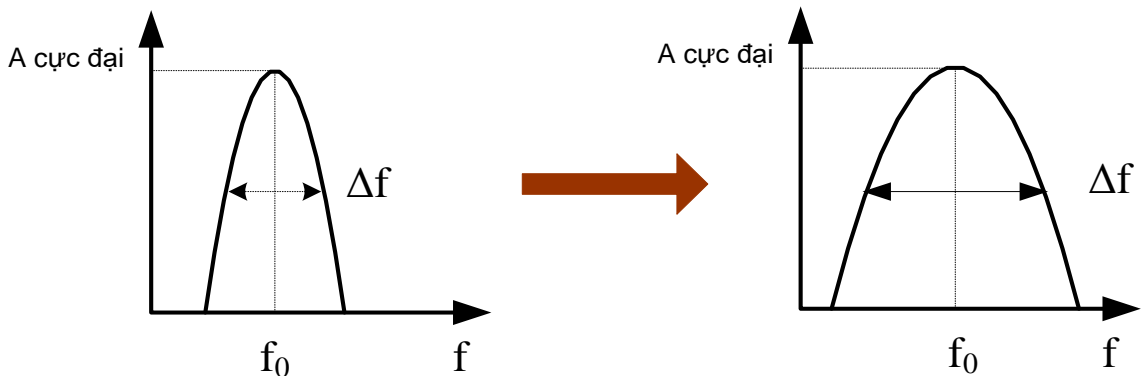
Trong các lĩnh vực như quang nano, thước đo quan trọng về hiệu suất của bộ cộng hưởng, bộ lọc, hấp thụ và các thiết bị khác là hệ số chất lượng Q . Hệ số Q mô tả mối quan hệ giữa độ rộng băng thông cộng hưởng và tần số trung tâm theo công thức (1.12) [64].

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (1.12)$$

Vì hầu hết là cộng hưởng RLC, nên hệ số Q có thể được tính theo (1.13).

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.13)$$

Ở đây R , L , C đại diện cho giá trị điện trở, độ tự cảm và điện dung tương đương của bộ cộng hưởng.

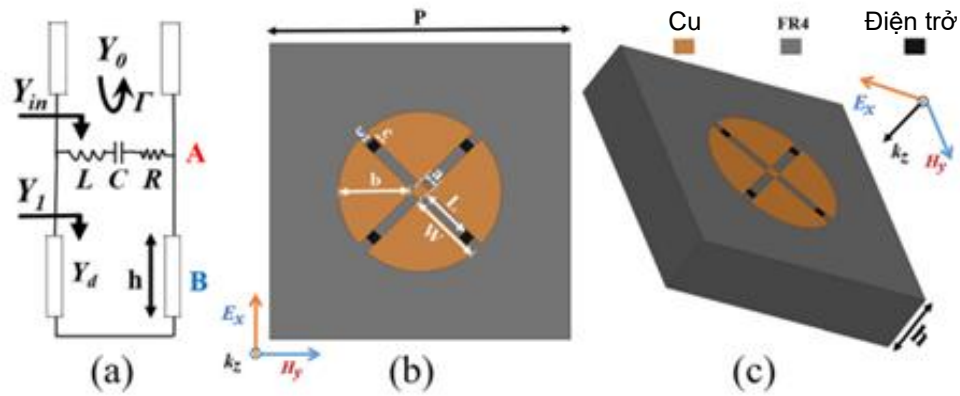


Hình 1.38. Đáp ứng băng rộng thu được bằng cách giảm hệ số Q

Tần số trung tâm của vật liệu hấp thụ có thể được tính từ phương trình (1.14).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC} \quad (1.14)$$

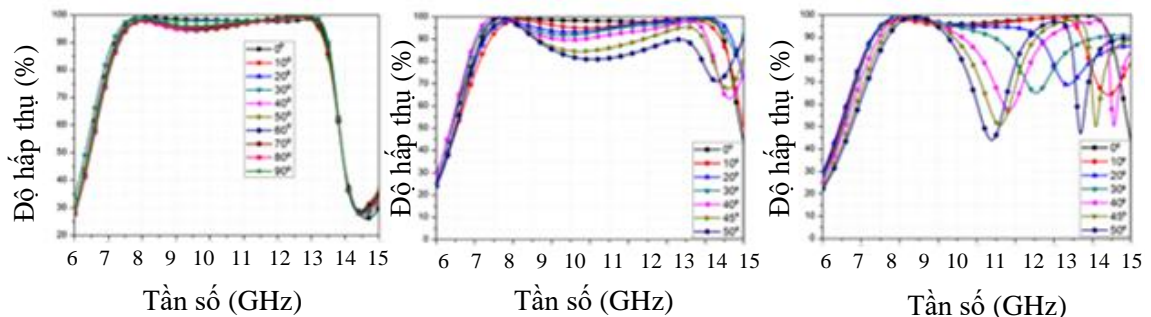
Khi L và C được xác định, tần số cộng hưởng không đổi. Chúng ta có thể điều chỉnh tham số R để làm thay đổi hệ số Q . Khi R tăng, đường cong cộng hưởng trở nên phẳng hơn, Q giảm và đạt được hấp thụ băng thông rộng. Ngược lại, khi R giảm, đường cong cộng hưởng sắc nét hơn và hệ số Q tăng [64].



Hình 1.39. (a) Sơ đồ mạch tương đương, (b) hình ảnh quan sát từ phía trên, cấu trúc 3D của MPA [15]

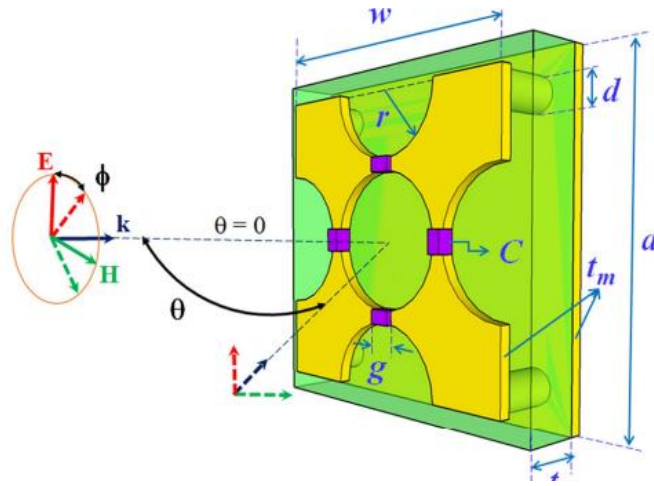
Cấu trúc điển hình của cơ chế hình thành hấp thụ băng rộng bằng cách giảm hệ số phẩm chất Q là tích hợp thành phần ngoại vi vào trong cấu trúc MPA. BMPA với cộng hưởng hình quạt có gắn các phần tử điện trở, không nhạy với góc phân cực và góc tới được đề xuất trong [15]. Hình 1.39 trình bày mô hình mạch tương đương và cấu trúc bộ hấp thụ này.

Kết quả mô phỏng cho thấy độ hấp thụ đạt trên 96% trong dải tần từ 7-12.8GHz trong trường hợp góc tới $\theta = 0^\circ$ với tất cả các góc phân cực. Độ hấp thụ vẫn giữ trên 90% trong dải tần số từ 7-12,1 GHz đối với phân cực TE, từ 7,1- 9,3 GHz đối với phân cực TM khi góc tới thay đổi từ 0 đến 45° như thể hiện trên Hình 1.40.



Hình 1.40. Độ hấp thụ với góc tới và tất cả góc phân cực, độ hấp thụ trong trường hợp góc tới xiên (b) cho phân cực TE, và (c) cho phân cực TM [15]

Nhìn chung, các phần tử điện trở được tích hợp vào các bộ cộng hưởng để giảm hệ số phẩm chất Q của MPA và do đó đạt được hấp thụ băng rộng. Tuy nhiên, phương pháp này thường giới hạn ở vùng tần số GHz với ô cơ sở có kích thước mm . Với vật liệu ở kích thước μm hoặc nm cho dải tần THz hoặc hồng ngoại, việc gắn các thành phần tập trung tương đối khó, đòi hỏi độ chính xác cao trong quá trình chế tạo.



Hình 1.41. Cấu trúc MPA sử dụng các tụ điện tạo ra hấp thụ trong vùng tần số 100 MHz [47]

Ngoài phần tử điện trở, MPAs có thể tích hợp các thành phần ngoại vi khác như tụ điện hoặc cuộn cảm. Dựa trên sơ đồ mạch, các thành phần ngoại vi được thêm vào nhằm điều chỉnh các tần số cộng hưởng bằng cách thay đổi tham số dung kháng và cảm kháng. Vì vậy, các tần số cộng hưởng có thể được điều khiển linh hoạt tại tần số thấp hơn hoặc cao hơn [69]. Tiêu biểu vào năm 2016, TS. Bùi Xuân Khuyến và cộng sự sử dụng các tụ điện nối các khe hẹp để giảm kích thước của ô cơ sở của MPA ở dải tần VHF, như thể hiện trên Hình 1.42 [70], độ hấp thụ có thể đạt tới gần tuyệt đối tại 100 MHz (kích thước ô cơ sở nhỏ hơn 816 lần bước sóng hấp thụ). Trong một báo cáo khác, Cheng và cộng sự đã tích hợp phần tử điện trở và tụ điện để đạt được MPA hoạt động ở tần số thấp với kích thước ô cơ sở nhỏ hơn [47]. Trong hướng nghiên cứu này, tụ điện hoặc cuộn cảm được tích hợp nhằm thay đổi tần số hấp thụ trong khi phần tử điện trở chủ yếu được sử dụng để mở rộng băng thông hấp thụ của MPA.

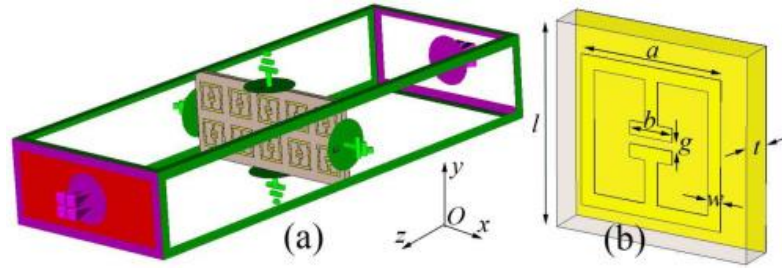
1.5.1.3. Một số các cơ chế khác

Ngoài các cơ chế hình thành hấp thụ băng rộng được trình bày ở trên, một số các phương pháp khác được chứng minh có thể đạt được hấp thụ băng rộng, bao gồm: điều chỉnh điện môi, điều chỉnh vật liệu cộng hưởng...

a) Điều chỉnh tầng điện môi

Tầng điện môi của MPA có thể điều chỉnh được bằng phương tiện cơ học [71], hoặc thay đổi nhiệt độ [17]. Zhu và cộng sự đã đề xuất MPA có thể dịch chuyển tần số trung tâm bằng cách sử dụng phương tiện cơ học như mô tả trên hình 1.42 [71]. Sự thay đổi được thực hiện bằng cách thay đổi khoảng cách giữa MM và tấm điện

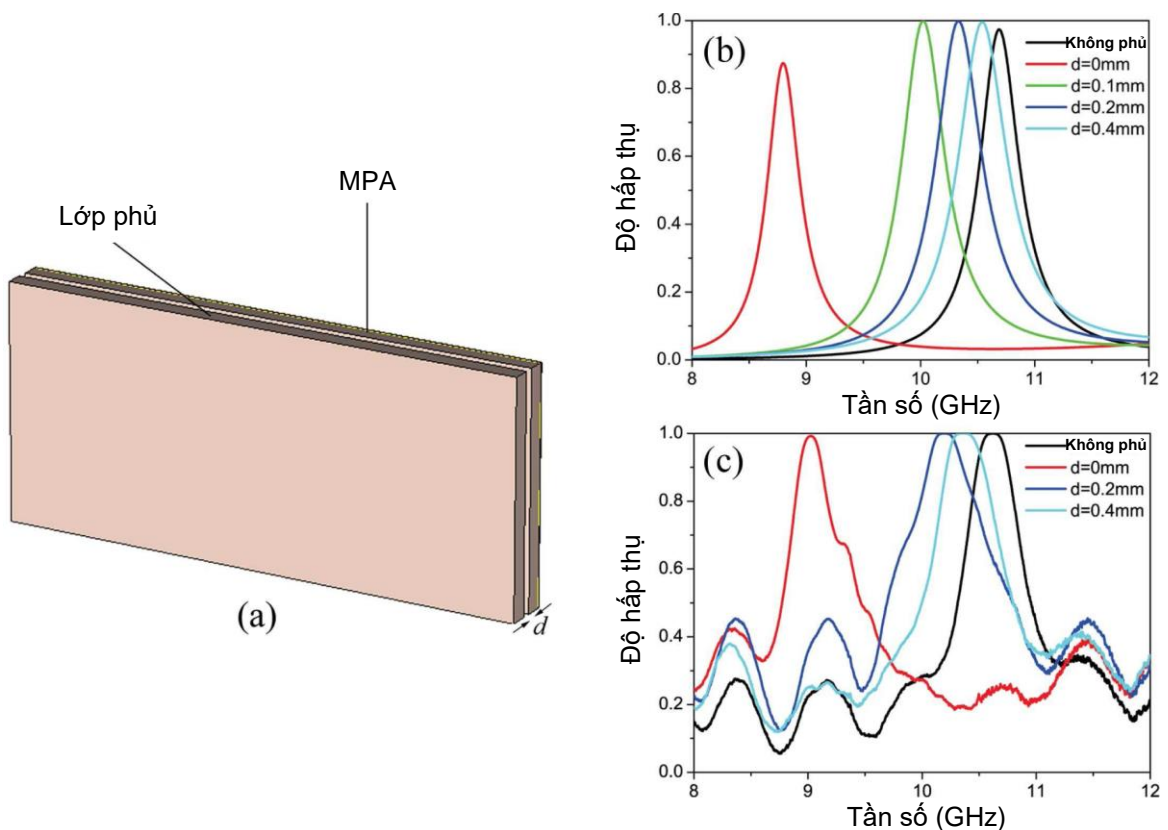
môi song song với bề mặt của nó.



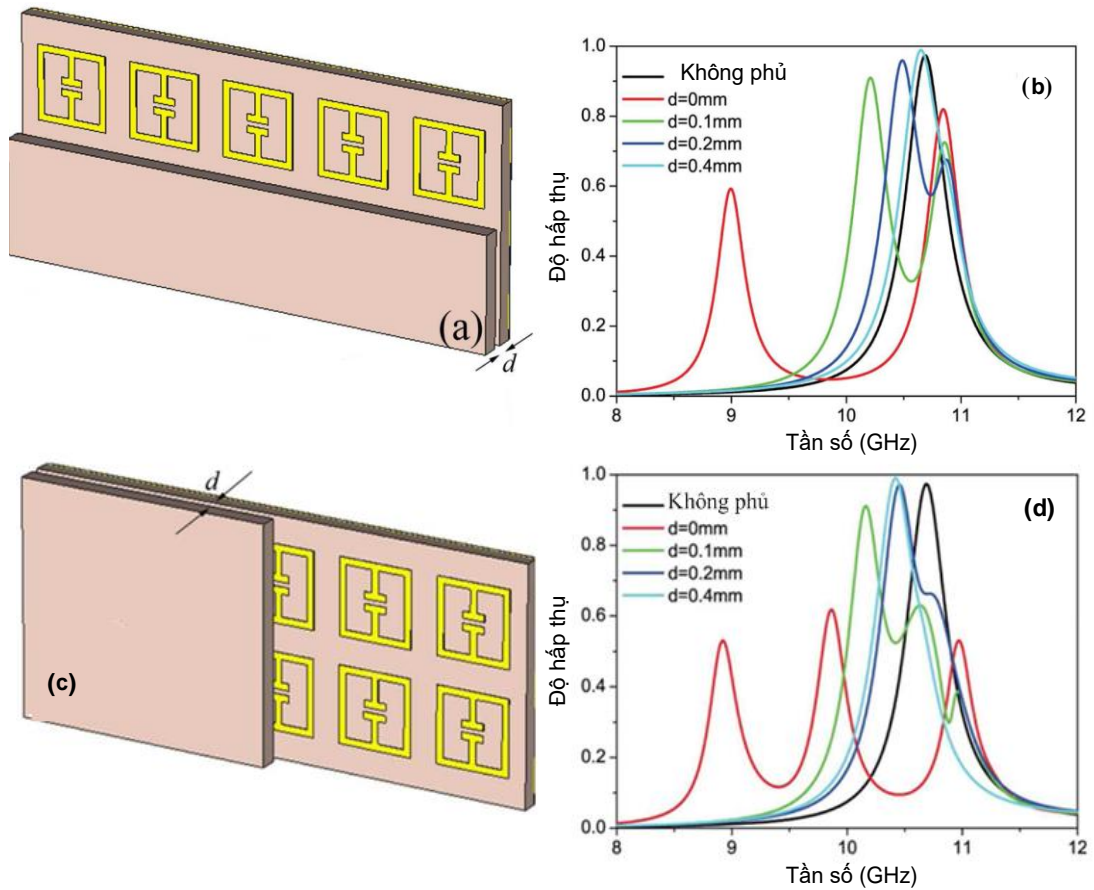
Hình 1.42. MPA điều chỉnh bằng phương pháp cơ học [71]

Để dịch đỉnh hấp thụ dọc theo trục tần số, đặt một lớp điện môi phụ trợ song song với MPA như mô tả trên Hình 1.43(a). Các đặc tính điện từ của hệ thống thay đổi khi thay đổi khoảng cách d giữa phần phụ trợ và MPA như thể hiện trên Hình 1.43(b).

Một ví dụ khác của phương pháp thay đổi điện môi được đề xuất bởi Meng và cộng sự [72]. MPA đề xuất có độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần số từ 3,65 đến 10,54THz với băng thông tương đối là 97,1%. Bằng cách lựa chọn chất điện môi là nước với khả năng phân tán trong dải tần số rộng, băng thông hấp thụ của chất hấp thụ được mở rộng một cách hiệu quả.



Hình 1.43. (a) MPA có tấm điện môi phụ trợ (b) Độ hấp thụ của MPA theo mô phỏng (c) Độ hấp thụ của MPA theo thực nghiệm [71]

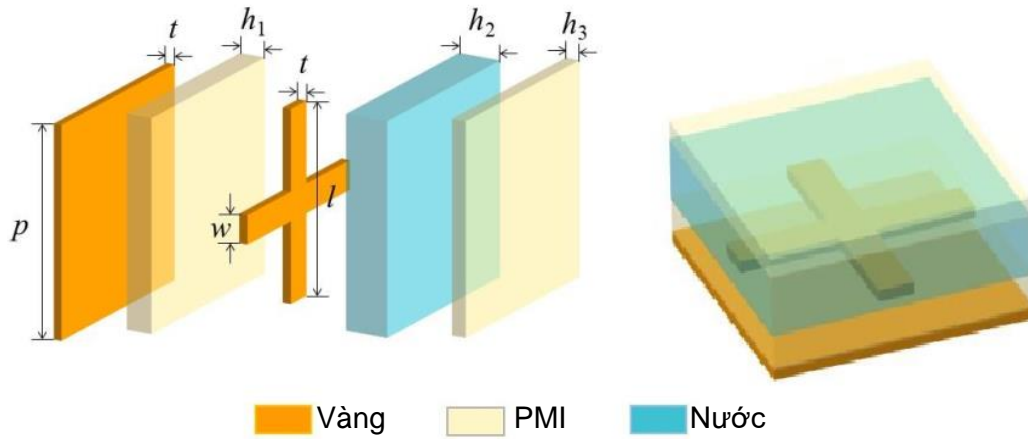


Hình 1.44. Các đỉnh hấp thụ mới được tạo ra khi thay đổi kích thước tấm điện môi phụ trợ (a-b) giảm $\frac{1}{2}$ diện tích theo chiều dọc, (c-d) giảm $\frac{1}{2}$ diện tích theo chiều ngang [71]

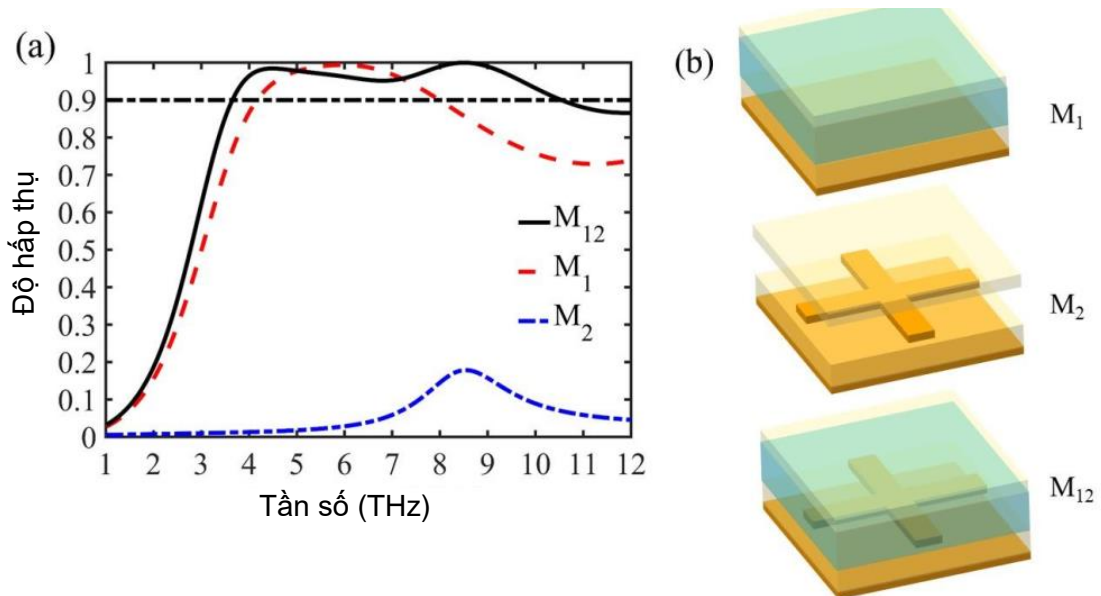
Cơ chế hấp thụ băng thông rộng được minh họa bằng cách phân tích sự phân bố điện trường và độ hấp thụ gần tuyệt đối được giải thích nhờ sử dụng lý thuyết phối hợp trở kháng. Ngoài ra, MPA đề xuất có độ hấp thụ cao hơn 90% trong khoảng tần số từ 3,92 THz đến 10,50 THz với góc tới dưới 41° [72].

Để nghiên cứu ảnh hưởng của nước đến băng thông hấp thụ, Hình 1.45 giới thiệu một ví dụ của cấu trúc MPA tích hợp nước. Như mô tả trên Hình 1.46, ta thấy với cấu trúc M_1 , chỉ có một đỉnh hấp thụ và độ hấp thụ lớn hơn 90% trong khoảng tần số từ 4,17 đến 7,99 THz với băng thông 3,82 THz. Cấu trúc M_2 với PMI (Polymethacrylimide) chỉ đạt được độ hấp thụ thấp trong dải tần số hẹp. Với sự kết hợp cấu trúc M_1 và M_2 thành cấu trúc M_{12} , MPA đạt được độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số rộng từ 3,65 đến 10,54 THz, các đỉnh hấp thụ kép nằm ở 4,49 THz và 8,50 THz với độ hấp thụ lần lượt là 98,43% và 99,97%. Ngoài ra, MPA đạt được băng thông tương đối rộng 97,1%. Lưu ý rằng, tỷ lệ hấp thụ của M_{12} giữa hai đỉnh liên kế luôn lớn hơn 95%, cho thấy sự kết hợp hiệu quả giữa lớp nước và bộ cộng hưởng

hình chữ thập, không chỉ mở rộng băng thông hấp thụ mà còn hạn chế sự tắt dần của hấp thụ. Do đó, băng thông hấp thụ có thể được mở rộng và cường độ hấp thụ tăng rõ rệt.

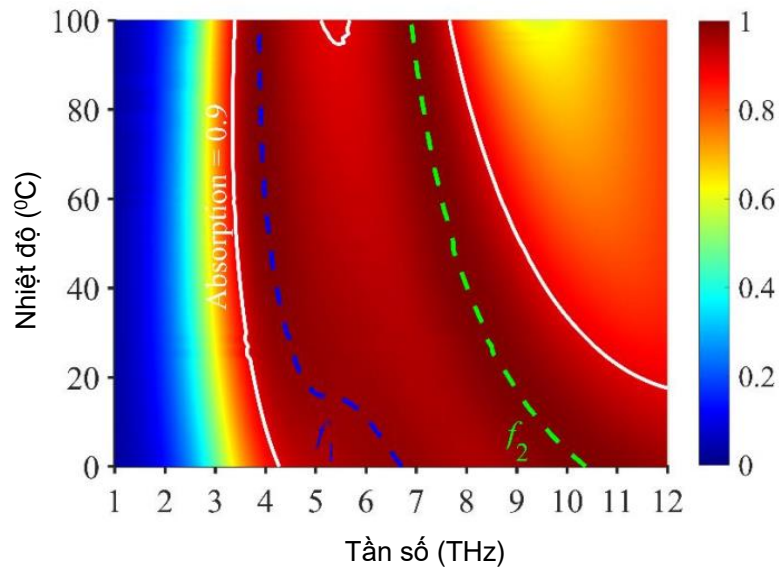


Hình 1.45. BPA với tầng điện môi gồm lớp nước được đóng gói [72]



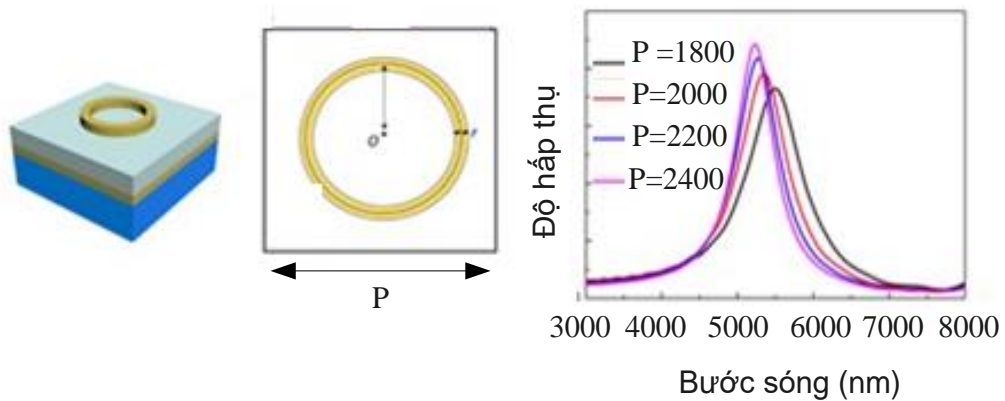
Hình 1.46. Độ hấp thụ BPA với các cách ghép tầng khác nhau [72]

Vì điện môi của nước là hàm của nhiệt độ nên phổ hấp thụ của BPA đề xuất cũng thay đổi theo nhiệt độ như mô tả trong Hình 1.47. Hình 1.47 mô tả rằng cường độ hấp thụ của hai đỉnh hấp thụ tăng dần khi nhiệt độ tăng. Ngoài ra, cả hai đỉnh hấp thụ nằm ở 6,71 THz và 10,37 THz đều bị dịch chuyển sang màu đỏ là do nhiệt độ tăng từ 0°C lên 20°C. Tuy nhiên, các đỉnh hấp thụ thể hiện sự dịch chuyển nhẹ sang màu đỏ khi nhiệt độ tăng từ 20°C lên 100°C và băng thông hấp thụ giảm nhẹ. Nghĩa là, BPA duy trì độ hấp thụ cao trong vùng 20–50°C, cho thấy độ hấp thụ của MPA đề xuất là ổn định ở nhiệt độ phòng.



Hình 1.47. Phổ hấp thụ của BIPA thay đổi theo nhiệt độ [72]

b) Điều chỉnh vật liệu cộng hưởng (Resonator Material Tailoring)

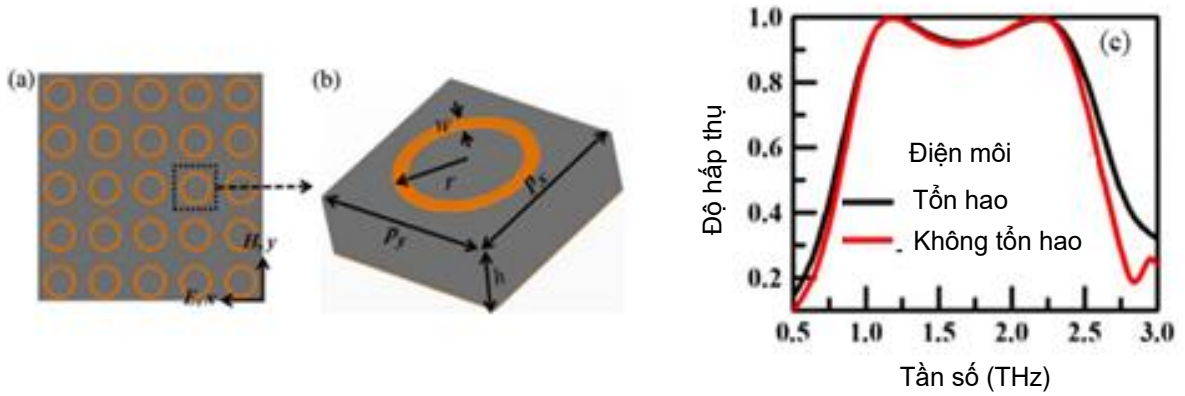


Hình 1.48. MPA băng hẹp có cấu trúc cộng hưởng vòng với kim loại vàng [8]

BMPA có thể được chế tạo với các cộng hưởng được làm từ vật liệu có vùng cấm năng lượng thấp, kim loại có tổn hao lớn, hoặc ghép cặp chúng với vật liệu có hằng số điện môi gần bằng không.

Bộ cộng hưởng trong MPA được chế tạo từ kim loại như vàng (*Au*), bạc (*Ag*), hoặc Paladi (*Pd*) thường tạo ra các đỉnh hấp thụ hẹp. Các kim loại quý trên có thể thay thế bằng kim loại có tổn hao lớn như *W*, Crom (*Cr*), *Ni* or *Ta* để đạt được hấp thụ băng rộng.

Hình 1.48 trình bày thiết kế MPA băng hẹp có cấu trúc cộng hưởng vòng làm từ vàng và phổ hấp thụ của nó, trong khi Hình 1.49 trình bày một thiết kế BMPA có cùng cấu trúc cộng hưởng vòng nhưng vật liệu chế tạo là *Crom* có tổn hao lớn và phổ hấp thụ tương ứng.



Hình 1.49. MPA băng rộng có cấu trúc cộng hưởng vòng là kim loại Crom [73]

1.5.2. Một số ứng dụng của BMPA

BMPA đã được nghiên cứu hơn 15 năm qua và có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như hấp thụ năng lượng mặt trời, tách sóng quang, điều chỉnh các cộng hưởng cơ học. So với vật liệu hấp thụ truyền thống, BMPA băng rộng có những tính chất ưu việt như khả năng hấp thụ tuyệt đối với băng thông rộng, không nhạy với góc tới và góc phân cực. Cùng với sự phát triển của công nghệ gia công tiên tiến với chi phí thấp, BMPA ngày càng phát triển và có thể sử dụng cho nhiều thiết bị dựa trên hiệu ứng quang âm (*photoacoustic*), điện quang (*photoelectric*), nhiệt quang (*photothermal*) và hiệu ứng quang từ (*photomagnetic*) [12].

1.5.2.1. Thu thập năng lượng

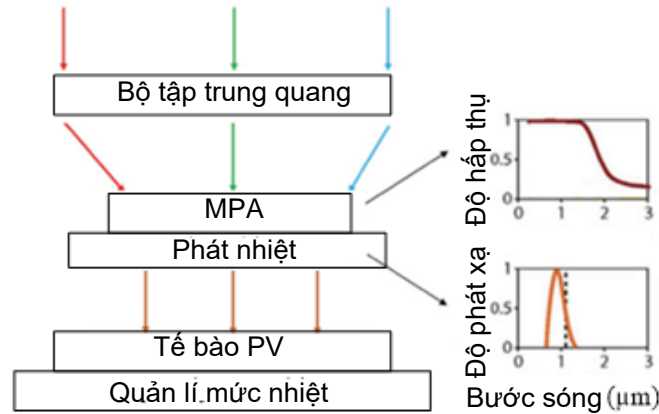
Dựa vào khả năng đạt được độ hấp thụ cao và băng thông rộng, BMPA có thể sử dụng cho ứng dụng thu thập năng lượng. Nếu sử dụng MPA băng hẹp hoặc đa băng để thu thập năng lượng thì một phần năng lượng có thể bị tổn hao, không hiệu quả về mặt kinh tế. Do đó, MPA với hiệu suất hấp thụ cao và băng rộng thích hợp với ứng dụng thu thập năng lượng mặt trời và thu thập năng lượng sóng vi ba [12].

a) Biến đổi ánh sáng mặt trời thành điện năng (*Solar Photovoltaic*)

Photovoltaic (PV) hay quang điện là sự biến đổi ánh sáng thành điện năng bằng cách sử dụng các vật liệu bán dẫn thể hiện hiệu ứng quang điện. Nghĩa là, khi bề mặt của tấm pin mặt trời được chiếu bởi bức xạ điện từ có tần số lớn hơn một tần số ngưỡng, các điện tử sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon và sinh ra năng lượng. Các thiết bị điện tử bị bật ra khỏi bề mặt kim loại sẽ phát sinh ra hiệu ứng quang điện ngoài.

Trong năm 2020 PV trở thành nguồn điện rẻ nhất ở các khu vực có tiềm năng năng lượng mặt trời cao. Vì thế, đây được coi là lĩnh vực thúc đẩy quá trình chuyển

đổi toàn cầu sang năng lượng bền vững, nhằm giảm sự nóng lên toàn cầu. Hiệu suất điện thế của một tế bào PV là một thuộc tính vật lý biểu thị lượng điện năng mà một tế bào có thể tạo ra cho một bức xạ mặt trời nhất định. Hiệu quả được đo lường trong các điều kiện của phòng thí nghiệm lý tưởng và thể hiện hiệu suất tối đa có thể đạt được của pin và mô đun PV. Để tăng hiệu suất của pin mặt trời, vật liệu bán dẫn truyền thống được chọn có độ rộng vùng cấm phù hợp với quang phổ mặt trời. Điều này làm gia tăng khả năng tích điện và quang học.



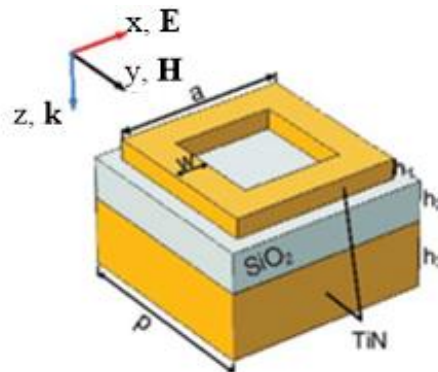
Hình 1.50. Sơ đồ hệ thống STPV với BMPA, bộ hấp thụ và bộ phát xạ điển hình hoạt động trên 1000 K trong khi tế bào PV hoạt động tại nhiệt độ phòng [12]

Hiện nay yêu cầu đối với các thiết bị pin mặt trời thương mại yêu cầu đạt hiệu suất cao, ít tiêu hao năng lượng, và hiệu quả về chi phí. Tuy nhiên, các nhược điểm nội tại của hệ thống năng lượng mặt trời là sự suy giảm điện áp hở mạch của pin mặt trời chấm lượng tử [74] hay sự tái kết hợp bề mặt của pin mặt trời dây *nano* [75]. Hiện tại hệ thống PV cần ít vật liệu hơn, nhưng độ hấp thụ giảm do tầng hấp thụ mỏng hơn. BMPA có khả năng bẫy ánh sáng có thể ứng dụng trong các thiết bị chuyển đổi năng lượng mặt trời trực tiếp từ nhiệt thành điện trong hệ thống STPV (STPV: *Solar Thermo-photovoltaic*) hay tế bào quang điện siêu mỏng. Thách thức chủ yếu trong hấp thụ cộng hưởng plasmonic của năng lượng mặt trời của dải tần số nhìn thấy là tổn hao Ohmic đáng kể và hệ quả đốt nóng của chúng. Để tránh những hậu quả bất lợi của việc quá nhiệt do hấp thụ trực tiếp là sử dụng STVP như trên Hình 1.50.

STPV là quá trình chuyển đổi từ nhiệt thành điện thông qua phát xạ quang. Nhờ khả năng hấp thụ băng rộng, BMPA được ứng dụng trong các hệ thống STVP để giải quyết nhược điểm hấp thụ nghèo của chúng. Hệ thống STPV đã được khảo sát rộng rãi với mô hình lý thuyết có thể dự đoán đạt hiệu suất 85%. Giới hạn lý thuyết của hệ thống STPV với bộ hấp thụ mặt trời hay cấu trúc phát xạ nhiệt băng hẹp cũng

được tính toán là 41%.

Mục tiêu lớn hơn trong việc tạo ra một bộ hấp thụ cho ứng dụng STPV là khả năng hấp thụ băng rộng bao phủ vùng tần số ánh sáng nhìn thấy, cận hồng ngoại (NIR: *Near Infrared*) và tử ngoại (UV: *Ultraviolet*). Lưu ý rằng cần khảo sát tính chất quang phụ thuộc nhiệt độ cho BMPA để hiểu rõ sự phụ thuộc nhiệt độ trong các hệ thống thu năng lượng mặt trời. Kim loại quý là không thể thiếu trong việc tạo ra cấu trúc BMPA nhưng chúng có nhiệt độ nóng chảy thấp trong khi hệ thống STPV thường hoạt động ở nhiệt độ 800°C hoặc cao hơn, vì vậy cần chọn vật liệu có độ nóng chảy xấp xỉ giá trị đó, ví dụ Au (1063°C), Ag (961°C), hoặc Al(660°C) [76]. Ni cũng được sử dụng rộng rãi cho các ứng dụng thu thập năng lượng mặt trời. Cho ví dụ, BMPA cấu trúc chữ V dựa trên Ni cấu trúc vòng nano [77], cấu trúc phẳng nhiều kích cỡ [78], [79] và các cấu trúc xếp chồng nhiều lớp điện môi kim loại [80] đạt được hiệu suất hấp thụ cao và băng thông rộng trong dải tần quang học và thậm chí cả vùng cận hồng ngoại NIR, hiệu quả cao đối với hệ thống thu thập năng lượng mặt trời. Tuy nhiên, nhiệt độ nóng chảy của cấu trúc kim loại có hoa văn có kích thước nano được hạ thấp xuống khá nhiều. Vì vậy, kim loại chịu lửa có độ nóng chảy cao thường được chọn để sử dụng trong các hệ thống STPV, ví dụ như *Tungsten* (W, 3422°C) [81], *Molybdenum* (Mo, 2623°C) [82] hay Tantalum (Ta, 3022°C) [83]. Tuy nhiên, *Vonfram* hay *Molyphen* không phải là những chất hấp thụ tốt trong dải nhìn thấy do chúng có trở kháng lớn không phù hợp để phối hợp trở kháng, do đó không thể bao phủ một cách hiệu quả quang phổ mặt trời. Li và cộng sự đã giới thiệu *TiN* để chế tạo BMPA với độ hấp thụ trung bình là 95% trong phạm vi bước sóng 400-800 nm ở nhiệt độ 800°C, chỉ ra rằng *TiN* là vật liệu hứa hẹn trong hệ thống STPV.

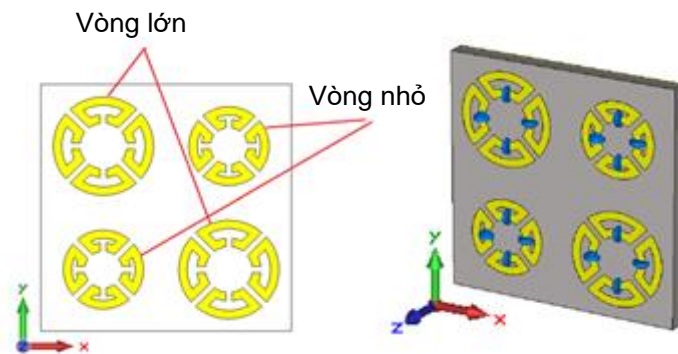


Hình 1.51. Cấu trúc của BMPA cho ứng dụng thu thập năng lượng mặt trời [84]

Mặt khác, TiN vẫn hoạt động ổn định về mặt hóa học, và giữ tính chất quang dưới ánh sáng laser $6,67W\text{ cm}^{-2}$ trong khi Au bị hư hại khi bị chiếu sáng dưới cường độ laser này. Ngoài ra, thiết kế còn đảm bảo không nhạy cảm với phân cực do cấu trúc đối xứng [84].

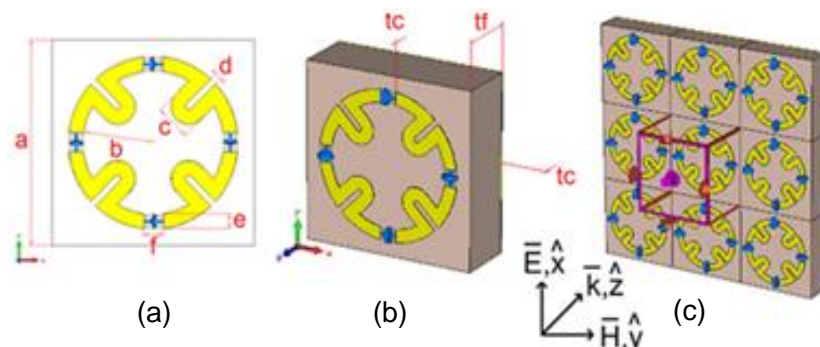
b) Thu thập năng lượng sóng vi ba

Thu thập năng lượng sóng vi ba có ý nghĩa quan trọng trong các hệ thống vô tuyến như đo lường radar hay điều khiển cảm biến [86], [87] và truyền thông dải tần vi ba [88], [89]. Do đó, BMPA xây dựng cho các hệ thống thu thập năng lượng dải tần vi ba được quan tâm nghiên cứu rộng rãi [53]. Fan và các cộng sự đã đề xuất thiết kế BMPA tích hợp điện trở cho ứng dụng thu thập năng lượng hoạt động ở dải tần từ 2,55 tới 10,07 GHz, bao phủ băng tần S và băng C [90].



Hình 1.52. MPA đa cộng hưởng 2D với cấu trúc hình bánh xe [85]

Karaaslan và cộng sự sử dụng cấu trúc đa cộng hưởng 2D hình bánh xe như trên Hình 1.52 để đạt cường độ hấp thụ trên 80% trong dải tần 2 đến 5GHz cho ứng dụng thu thập năng lượng [85]. Thiết kế là ít nhạy cảm với góc tới và góc phân cực. Một thiết kế khác của BMPA cho ứng dụng này được đề xuất bởi nhóm nghiên cứu của Bağmancı, tích hợp các điện trở tập trung như trên Hình 1.53 [91]. Thiết kế đề xuất có thể chuyển đổi 56% năng lượng sóng tới thành công suất hữu ích trong dải tần 4 đến 12 GHz với tỷ số RBW trên 100%.



Hình 1.53. MPA với cấu trúc vòng tròn có sửa đổi, tích hợp điện trở tập trung [91]

1.5.2.2. Cảm biến quang (Photodetectors)

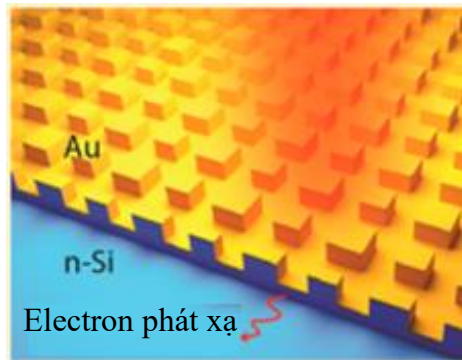
Photodetector hay cảm biến quang, còn được gọi là photosensor, là cảm biến chuyển đổi photon của ánh sáng hoặc bức xạ điện từ thành tín hiệu điện. Hiệu ứng quang điện có nghĩa là khi tiếp xúc với sóng điện từ có tần số cao hơn tần số giới hạn, các electron bên trong vật liệu có thể hấp thụ năng lượng tới và thoát ra, tạo thành một dòng điện, dẫn đến việc tạo ra các thiết bị quang điện tử, chẳng hạn như cảm biến quang. Bộ cảm biến quang hấp thụ đủ ánh sáng là điều kiện tiên quyết để chuyển đổi quang điện hiệu quả và do đó BIPA với độ hấp thụ cao có thể được sử dụng rộng rãi trong bộ cảm biến quang [92], [93].

Plasmon bề mặt (SPs) là những sóng điện từ được lan truyền dọc theo tiếp xúc kim loại-điện môi. Nó là sự dao động của điện tử tự do ở bề mặt của hạt nano với sự kích thích của ánh sáng tới. Cường độ điện trường của plasmon bề mặt giảm theo hàm mũ khi xa dần tiếp xúc kim loại-điện môi. Plasmon bề mặt là thành phần chìa khóa trong định tuyến và điều khiển ánh sáng ở thang nanomet. Vì sự tập trung trường cao và khối lượng mode sóng phụ sâu, SPs cung cấp một phương tiện để thực hiện nhiều kỹ thuật và thiết bị quang, ví dụ như ảnh nanoscale, bộ tập trung bước sóng phụ, thấu kính siêu nhỏ gọn và tấm chắn sóng, thiết bị quang nhiệt, vật liệu biến hóa và thiết bị quang điện tăng cường plasmonic.

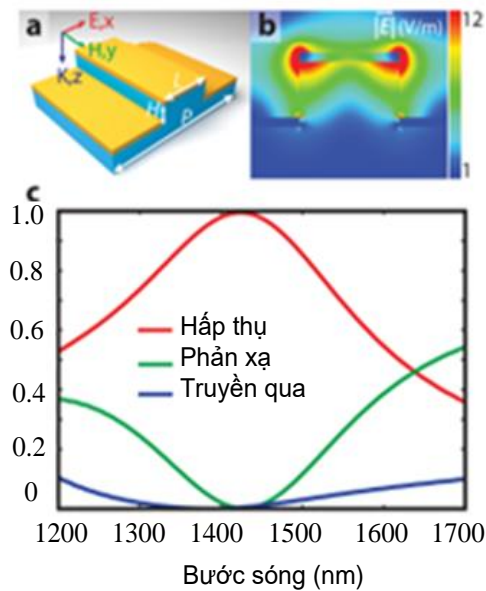
Về phương diện cảm biến quang, các thiết bị phát xạ nhiệt điện tử thường được hình thành bằng cách đặt bề mặt kim loại tiếp xúc với chất bán dẫn. Khi một kim loại được tiếp xúc trực tiếp với một chất bán dẫn, một rào cản Schottky được hình thành. Đặc điểm của rào chắn Schottky là chiều cao rào chắn, giá trị này phụ thuộc vào sự kết hợp của kim loại và chất bán dẫn. Các electron phát xạ từ SP không phát xạ phân rã có thể được vận chuyển đến tiếp xúc kim loại-bán dẫn và chúng có thể được phun vào dải của chất bán dẫn trước khi nhiệt hóa nếu chúng có đủ năng lượng, dẫn tới hiện tượng quang điện. Trong trường hợp này, băng thông của bộ cảm biến quang bị giới hạn bởi chiều cao rào cản Schottky thay vì dải tần của chất bán dẫn. Điều này cho phép một bộ cảm biến quang đạt được hấp thụ băng rộng tại mức năng lượng dưới băng tần của chất bán dẫn, cung cấp một cấu trúc plasmonic có phổ hấp thụ rộng. Bộ cảm biến quang phát xạ nhiệt điện tử dựa trên SP được chứng minh sử dụng đa dạng cấu trúc bao gồm thanh, dây nano, lưới kim loại, ống dẫn sóng. Tuy nhiên, nhược điểm chính của các bộ cảm biến phát xạ nhiệt điện tử là độ phản xạ sáng thấp,

điện hình từ vài chục đến $100 \mu A/W$. Wei Li và cộng sự trình bày một cách tiếp cận để cải thiện phản ứng quang học của bộ cảm biến phát xạ nhiệt điện tử thông qua việc sử dụng MPA [92].

Vì không yêu cầu độ dày quang học đối với lớp kim loại liên tục nên có thể tích hợp MPA với các lớp bán dẫn yêu cầu nhiệt độ cao. Kiến trúc đề xuất là tích hợp với silicon dạng n (n-Si) để thực hiện *diode Schottky* dựa trên bộ cảm biến quang phát xạ nhiệt điện tử với phản ứng quang học cao trong vùng cận hồng ngoại thấp hơn nhiều so với năng lượng dải tần Si.



Hình 1.54. Các electron phát xạ nhiệt từ bề mặt plasmon [92]



Hình 1.55. (a) Cấu trúc hình học của ô cơ sở với các cộng hưởng (Au) tích hợp với bán dẫn (màu xanh), (b) phân bố trường điện của MPA với phân cực TM, (c) hệ số phản xạ, truyền qua và hấp thụ của MPA [92]

Bằng cách tận dụng ưu thế hấp thụ quang mạnh của MPA, kết hợp với tầng kim loại siêu mỏng, nhóm tác giả trình bày một bộ cảm biến quang có băng thông

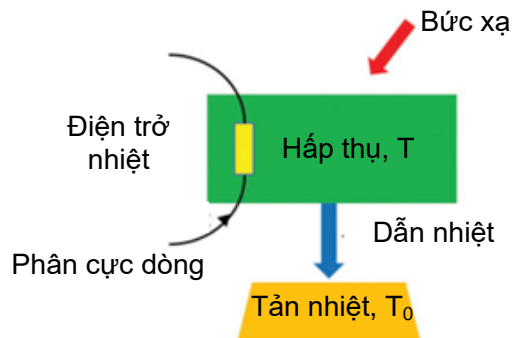
hấp thụ rộng và độ nhạy sóng lớn hơn $1,8 \text{ mA/W}$ từ 1200 đến 1500 nm như thể hiện trên Hình 1.55.

1.5.2.3. Nhiệt kế bức xạ

Nhiệt kế bức xạ là một thiết bị để đo công suất bức xạ sóng điện từ tới, thông qua việc nung nóng vật liệu có phần tử điện trở phụ thuộc nhiệt độ. Một cấu trúc nhiệt kế bức xạ bao gồm một BMPA được mô tả như trên Hình 1.56.

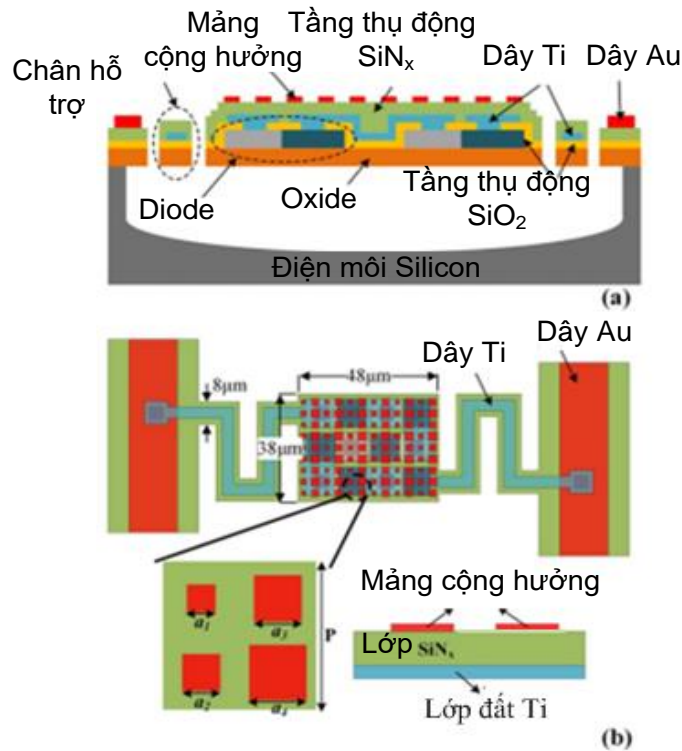
Một trong những ứng dụng điển hình của nhiệt kế bức xạ là để đo năng lượng bức xạ của nguồn sáng khả kiến [94], IR [95]. Khi nó được gắn trên tên lửa hoặc khinh khí cầu tầm cao, có thể tránh được ảnh hưởng của bầu khí quyển và quan sát được thiên văn [96]. Trong điện tử, nó đo công suất đầu ra của các nguồn sóng vi ba [97].

Tất cả những điều này đòi hỏi một máy đo đảm bảo hoạt động ổn định; do đó, sự kết hợp của băng thông rộng, độ hấp thụ cao, không nhạy với phân cực, dung sai góc rộng và các đặc tính tuyệt vời khác của BMPA để có thể tối đa hóa tiềm năng ứng dụng. Các nhiệt kế bức xạ truyền thống thường sử dụng tấm kim loại mỏng, bán dẫn hoặc siêu dẫn làm vật liệu hấp thụ nhằm đảm bảo khả năng hấp thụ cao. Ưu điểm của việc sử dụng BMPA trong các nhiệt kế bức xạ là có thể tăng cường hiệu suất và giảm đáng kể độ dày [98].



Hình 1.56. Một cấu trúc nhiệt kế bức xạ điển hình sử dụng BMPA [12]

Ma và cộng sự đã công bố một nhiệt kế bức xạ siêu nhỏ có chứa các đi-ốt silicon được kết nối như cảm biến nhiệt độ, tích hợp với BMPA như thể hiện trên Hình 1.57. Cấu trúc vật liệu biến hóa hấp thụ MPA gồm các bộ cộng hưởng hình vuông có cấu trúc khác nhau nằm trên cấu trúc silicon nitride, trong khi các dây kết nối Titanium được mở rộng giữa các diode riêng lẻ đóng vai trò lớp đất. Và BMPA đã được chứng minh là vượt trội hơn so với chất hấp thụ silicon nitride thông thường, đặc biệt là trong vùng phổ hồng ngoại [98].



Hình 1.57. Nhiệt kế bức xạ được thiết kế (a) quan sát theo phương ngang, (b) quan sát từ trên xuống [98]

1.6. Kết luận chương

Chương 1 trình bày tổng quan nghiên cứu MPA và các mô hình lý thuyết vật lý làm sáng tỏ các nguyên tắc cơ bản của MPA, gồm lý thuyết giao thoa; nguyên lý phối hợp trở kháng. Trong đó luận án tập trung vào MPA và các cơ chế hấp thụ băng rộng của MPA, như tích hợp các cấu trúc cộng hưởng giống nhau và khác nhau, giảm hệ số chất lượng Q và một số các cơ chế khác như điều chỉnh tầng điện môi, điều chỉnh vật liệu cộng hưởng [53]. Cho đến nay, các nghiên cứu trong nước về MPA băng rộng mới chỉ thực hiện ở tần số GHz, trong khi ở vùng tần số THz chỉ có nghiên cứu MPA băng hẹp hoặc đa đỉnh. Mở rộng dải tần hấp thụ bằng cách sắp xếp các cấu trúc cộng hưởng theo phương ngang có nhiều hạn chế trong mở rộng dải tần vì kích thước ô cơ sở lớn, trong khi sắp xếp theo phương dọc gặp khó khăn trong chế tạo. Mở rộng dải tần hấp thụ bằng cách điều chỉnh vật liệu cộng hưởng đã được nghiên cứu trong luận án khác. Vì vậy, nghiên cứu sinh tập trung nghiên cứu MPA băng rộng tích hợp điện trở nhằm giảm hệ số chất lượng Q , và tích hợp nước vào tầng điện môi để tăng tổn hao điện môi. Các thiết kế BMPA cần có cấu trúc đơn giản, dễ chế tạo, đạt được độ hấp thụ cao trong dải tần số rộng, ít nhạy với góc tới và góc phân cực, hoạt động ở cả vùng tần số GHz và THz.

CHƯƠNG 2

PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Luận án “Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ băng rộng sử dụng vật liệu biến hóa tích hợp phần tử tổn hao” được thực hiện sử dụng kết hợp phương pháp mô hình mạch, mô hình hóa bằng mô phỏng và chế tạo thực nghiệm.

Từ ý tưởng đề xuất, chúng tôi thiết lập mô hình vật lý để làm rõ cơ chế hấp thụ. Các cấu trúc MPA được mô phỏng bằng phần mềm CST (*Computer Science Technology*). Đồng thời, thiết lập mô hình mạch của ô cơ sở sử dụng lý thuyết đường truyền, nhằm tính toán lý thuyết và so sánh với kết quả mô phỏng. Từ đó, có thể đánh giá sự chính xác của các kết quả mô phỏng. Quá trình mô phỏng, chúng tôi tiến hành khảo sát ảnh hưởng của hình dạng, kích thước của cấu trúc, và loại vật liệu đến tính chất hấp thụ của bộ hấp thụ, nhằm tối ưu các tham số cấu trúc hoặc điều khiển tính chất hấp thụ phù hợp với yêu cầu ứng dụng ở các dải tần làm việc khác nhau. Phần mềm CST còn giúp truy xuất kết quả về sự phân bố dòng điện, phân bố cường độ điện trường và từ trường, giúp giải thích cơ chế vật lý của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ. Cấu trúc tối ưu nhất của MPA hoạt động ở vùng tần số GHz, được lựa chọn thông qua mô phỏng, được chế tạo bằng phương pháp quang khắc. Mẫu sau khi chế tạo được đo hệ số phản xạ, hệ số truyền qua và từ đó tính toán được độ hấp thụ thực nghiệm. Cuối cùng, các kết quả thực nghiệm được so sánh với kết quả tính toán và mô phỏng, đưa ra đánh giá và xu hướng phát triển hoặc cải tiến cấu trúc. Sự kết hợp đồng thời giữa tính toán, mô phỏng và thực nghiệm giúp thu được các kết quả chính xác, tin cậy, gia tăng hiệu quả công việc và rút ngắn tiến trình nghiên cứu. Với MPA hoạt động ở vùng tần số THz, do hạn chế về điều kiện thực nghiệm chế tạo, các thiết kế đề xuất trong luận án chỉ dừng lại ở kết quả mô phỏng.

2.1. Các phương pháp nghiên cứu MPA

2.1.1. Phương pháp tính toán lý thuyết

MMs được hình thành bằng cách sắp xếp các “giả nguyên tử” có tính chất điện từ để tạo ra các tính chất hiệu dụng của vật liệu. Các “giả nguyên tử” này thường là các bộ cộng hưởng điện từ và phải đủ nhỏ để vật liệu MMs được xem là đồng nhất tại tần số hoạt động. Do đó, theo lý thuyết môi trường hiệu dụng, việc thay đổi tính chất vật lý của cấu trúc và thành phần vật liệu sẽ dẫn đến những biến đổi cơ bản tính

chất của vật liệu MMs. Sóng điện từ có thể lan truyền trong môi trường vật liệu có chiết suất âm kếp với véc tơ sóng k ngược chiều với véc tơ dòng năng lượng nên việc tính toán nhằm xác định xem cấu trúc đề xuất đã đạt được đồng thời độ từ thẩm âm và độ điện thẩm âm. Tuy nhiên, việc đo đạc trực tiếp hay mô phỏng các thông số này gặp nhiều trở ngại. Nicolson đề xuất tính toán các thông số: chiết suất, trở kháng, độ điện thẩm và độ từ thẩm của vật liệu dưới dạng phức thông qua hàm phản xạ và truyền qua [99]. Vì hệ số phản xạ và truyền qua được biểu diễn bằng số phức và chứa thông tin pha nên việc tính toán vẫn còn phức tạp. Vì vậy, Chen và cộng sự [100] giới thiệu cách tính hàm phản xạ và truyền qua dựa trên chiết suất n và trở kháng chuẩn hóa Z theo biểu thức 2.1 và 2.2.

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{jk_0d})}{1 - R_{01}^2 e^{jk_0d}} \quad (2.1)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2)e^{jk_0d}}{1 - R_{01}^2 e^{jk_0d}} \quad (2.2)$$

$$e^{jk_0d} = X \pm j\sqrt{1 - X^2} \quad (2.3)$$

$$X = \frac{1}{2S_{21}(1 - S_{11}^2 - S_{21}^2)} \quad (2.4)$$

$$\text{Trong đó } R_{01} = \frac{Z - 1}{Z + 1} \quad (2.5)$$

$$\text{Suy ra: } Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \text{ và } e^{jk_0d} = X \pm j\sqrt{1 - X^2} \quad (2.6)$$

Vì sóng điện từ truyền trong các vật liệu có xu hướng tắt dần theo hàm mũ nên các đại lượng ε , μ và n đều được biểu diễn dạng hàm phức.

Giá trị của chiết suất n có dạng:

$$n = \frac{1}{k_0d} \left\{ \left[\ln(e^{jk_0d}) + 2m\pi \right] - j \left[\ln(e^{jk_0d}) \right] \right\} \quad (2.7)$$

với m là số nguyên liên quan đến chỉ số nhánh của n' .

Từ chiết suất và trở kháng của vật liệu, độ điện thẩm và độ từ thẩm được xác định theo các biểu thức 2.8 và 2.9.

$$\varepsilon'' = \frac{n''Z' - n'Z''}{|Z|^2} \quad (2.8)$$

$$\mu'' = n'Z'' + n''Z' \quad (2.9)$$

Trong đó, ε' , μ' , n' là phần thực và ε'' , μ'' , n'' là phần ảo của độ điện thẩm, độ từ thẩm và chiết suất.

Ngoài ra, dưới tác dụng của sóng điện từ, các ô cơ sở của cấu trúc MMs hoạt động như một bộ cộng hưởng. Thông thường, hình dạng và thông số hình học của ô cơ sở là khá phức tạp, vì vậy việc giải các phương trình Maxwell tổng quát với MMs tương đối khó khăn. Thực tế, có một số kỹ thuật và phần mềm giúp tính toán các phương trình Maxwell và đưa ra đặc tính của MPA như độ hấp thụ, hệ số phản xạ và truyền qua, phân bố dòng điện cảm ứng trên bề mặt và mật độ năng lượng. Tuy nhiên, dựa trên các công bố nhận thấy rằng tính chất điện từ của vật liệu được xác định nhanh chóng và trực quan khi biểu diễn cấu trúc MMs bằng một mạch tương đương. Do đó, MPAs được thiết kế và khảo sát sử dụng mô hình mạch tương đương với những tiếp cận khác nhau tùy thuộc vào hình dạng của bộ cộng hưởng.

2.1.2. Mô hình mạch tương đương

Việc thiết kế MPA nhằm mục đích tìm kiếm sự phù hợp giữa yêu cầu về băng thông hấp thụ, hệ số phản xạ qua băng tần hoạt động, và độ dày vật liệu. Mô hình mạch tương đương là giải pháp đơn giản và hiệu quả để giải quyết bài toán phối hợp trở kháng bằng cách thiết kế mô hình phần tử điện trở và điện dẫn phù hợp trong cấu trúc MPA kim loại-điện môi-kim loại. Trong phương pháp này, MPA được xem như cấu thành từ hai thành phần [69].

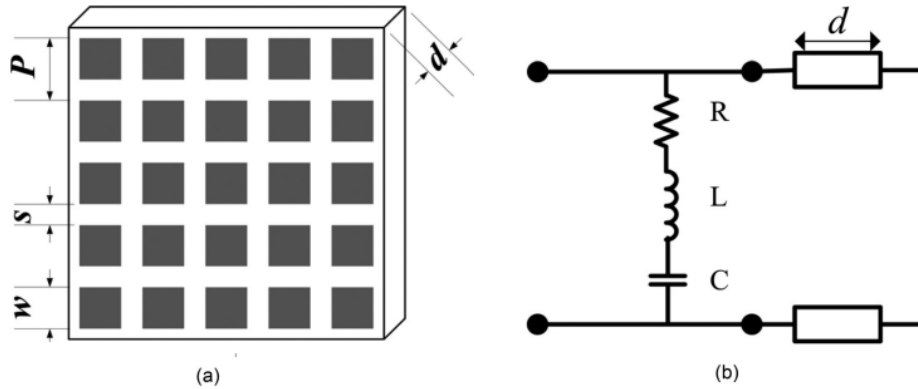
- Một mạch *RLC* nối tiếp và/hoặc mạch *RLC* song song được mô hình hóa từ các cấu trúc cộng hưởng kim loại;
- Một đường truyền ngắn mạch là kết quả của sự kết hợp giữa lớp điện môi và tấm kim loại.

Hầu hết các cấu trúc MPAs sử dụng kim loại quý như đồng (Cu), bạc (Ag) và vàng (Au). Ở vùng tần số GHz, giá trị điện trở là không đáng kể và có thể bỏ qua. Các giá trị điện cảm *L* và điện dung *C* phụ thuộc vào các tham số hình học của cấu trúc và tính chất điện từ của các vật liệu. Do đó, vật liệu MMs hoạt động tương ứng với mạch điện *LC* tại tần số cộng hưởng. Dựa vào mô hình mạch điện *LC* tương đương có thể xác định được gần như chính xác tần số cộng hưởng của MPAs [69].

Pang và cộng sự [101] đã áp dụng lý thuyết mạch điện tương đương cho MPA và làm rõ sự ảnh hưởng của phần tử điện trở bề mặt lên tần số cộng hưởng của MPA.

Kết quả chỉ ra rằng dải tần hấp thụ rộng hay hẹp có thể điều chỉnh được bằng cách thay đổi trở kháng bề mặt, phương pháp này có thể được sử dụng để thiết kế MPA nhanh chóng và hiệu quả.

Minh họa sự tối ưu trở kháng của cấu trúc của MPA, mô hình mạch điện tương đương được thể hiện trên Hình 2.1 (b), bao gồm một bề mặt “chọn lọc tần số” có thành phần tổn hao dạng hình vuông trên nền chất điện môi. Trở kháng của FSS được tính thông qua mạch RLC nối tiếp.



Hình 2.1. (a) Mô hình MPA đề xuất và (b) sơ đồ mạch tương đương [101]

$$Z_{FSS} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.10)$$

Hình dạng và kích thước của ô cơ sở ảnh hưởng tới các giá trị L, C và R trong công thức 2.10. Từ mô hình mạch tương đương trong Hình 2.1 (b), trở kháng Z_{in} của MPA gồm trở kháng bề mặt song song với trở kháng của tấm điện môi nối đất.

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_{FSS}} \quad (2.1)$$

Hệ số phản xạ tương ứng của MPA tại góc tới vuông góc với bề mặt được tính theo công thức 2.12.

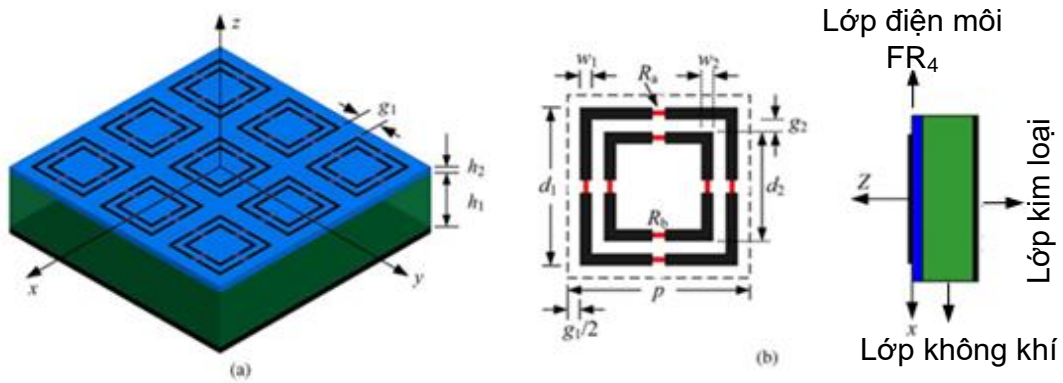
$$R(\omega) = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.12)$$

Với Z_0 là trở kháng sóng của không gian tự do và bằng 377Ω .

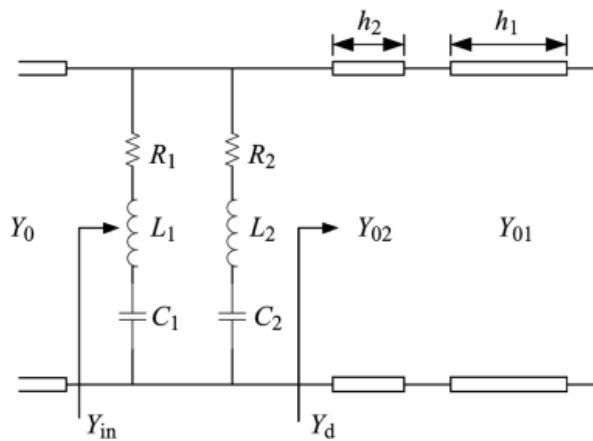
Cần lưu ý rằng Pang và cộng sự đã phân tích ảnh hưởng của phần tử điện trở bề mặt đến độ hấp thụ của MPA dựa trên việc cố định các tham số điện cảm L và điện dung C , trong khi chúng có ảnh hưởng tới hệ số phản xạ của MPA. Vì vậy, cần tính toán thêm ảnh hưởng của các tham số này đến độ hấp thụ của MPA.

Trong trường hợp cấu trúc gồm nhiều hơn một lớp điện môi như cấu trúc trên

hình 2.2, Shang và cộng sự [102] đã tính toán mô hình mạch của bề mặt chọn lựa tần số FSS có hai vòng hình vuông, gồm mạch RLC nối tiếp mắc song song với mạch đoạn đường truyền ngắn mạch như trên hình 2.3. Trong đó, đường truyền ngắn mạch h_2 biểu thị lớp không khí, trong khi đoạn đường truyền ngắn mạch h_1 biểu thị lớp điện môi FR4. Các giá trị của điện cảm và điện dung trong mô hình mạch được xác định từ kích thước DSL. Giá trị của các phần tử điện trở xác định từ đáp ứng tần số tối ưu.



Hình 2.2. MPA với cấu trúc hình vuông kép sử dụng điện trở tập trung (a) mô hình 3D, (b) hình ảnh mặt trên và (c) hình ảnh mặt cắt dọc [102]



Hình 2.3. Mô hình tương đương của MPA [102]

Từ mô hình mạch trên Hình 2.3, có thể tính toán hệ số phản xạ theo công thức:

$$R = \frac{Y_0 - Y_{in}}{Y_0 + Y_{in}} \quad (2.13)$$

$$Y_{in} = Y_{LP1} + Y_{LP2} + Y_d \quad (2.14)$$

$$Y_{LP1} = \frac{1}{R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})} = G_1 + jB_1 \quad (2.15)$$

$$Y_{LP2} = \frac{1}{R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})} = G_2 + jB_2 \quad (2.16)$$

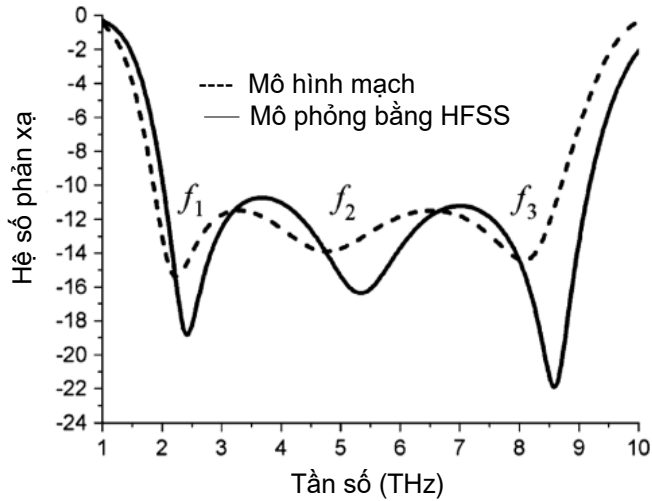
$$Y_d = j \frac{Y_{02}(Y_{02} \tan(\beta_2 h_2) - Y_{01} \cot(\beta_1 h_1))}{Y_{02} + Y_{01} \cot(\beta_1 h_1) \tan(\beta_2 h_2)} = jB_d \quad (2.17)$$

$$G_i = \frac{\omega^2 R_i C_i^2}{(1 - \omega^2 L_i C_i)^2 + \omega^2 R_i^2 C_i^2} \quad (2.18)$$

$$B_i = \frac{\omega C_i - \omega^3 L_i C_i^2}{(1 - \omega^2 L_i C_i)^2 + \omega^2 R_i^2 C_i^2} \quad (2.19)$$

Với $Y_{0i} = Y_0 \sqrt{\epsilon_{ri}}$, $\beta_i = 2\pi \sqrt{\epsilon_{ri}} / \lambda$, $i = 1, 2$; $\omega = 2\pi f$. Y_0 là dẫn nạp đặc tính của không gian tự do.

Để xác định tính chính xác của mô hình mạch tương đương trên Hình 2.3, nhóm nghiên cứu đã so sánh độ phản xạ theo mô phỏng với độ phản xạ tính theo mô hình mạch. Giá trị điện cảm và điện dung (L_1, C_1, L_2, C_2) được xác định từ các kích thước của cấu trúc bao gồm (d_1, w_1, w_2, g_1, g_2). Giá trị R_1, R_2 xác định từ đáp ứng tần số tối ưu.

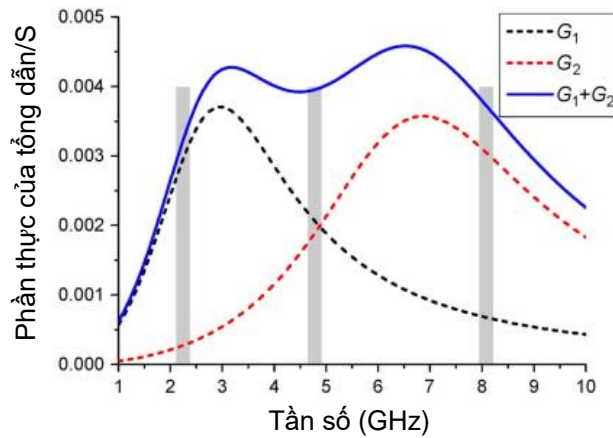


Hình 2.4. Hệ số phản xạ của MPA trong trường hợp mô phỏng và tính toán bằng mô hình mạch [102]

Các kết quả dựa trên mô hình mạch tương đương và mô phỏng có sự tương đồng tốt, như thể hiện trên Hình 2.4. Thiết kế đề xuất đạt được tỷ số RBW là 126,8% với hệ số phản xạ nhỏ hơn -10 dB từ 2 đến 9,5 GHz.

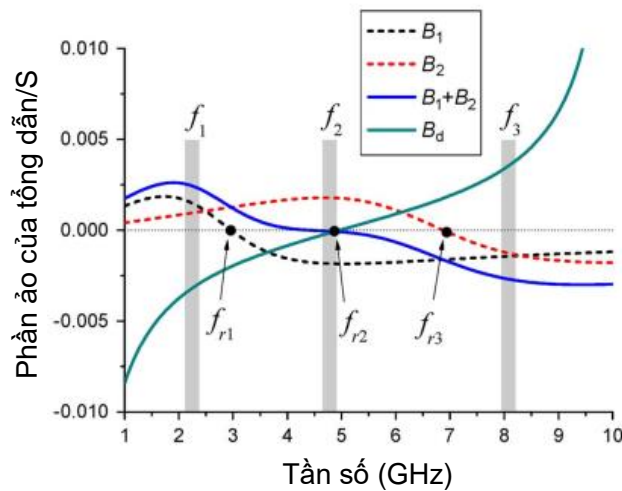
Cộng hưởng được tạo ra khi phân ảo của tổng dẫn đầu vào bằng không, nghĩa là:

$$B_1 + B_2 + B_d = 0 \quad (2.20)$$



Hình 2.5. Đường cong phần thực của tổng dẫn theo tần số [102]

Hình 2.5 và 2.6 mô tả phần thực và phần ảo của các tổng dẫn thành phần. Ta thấy có ba tần số cộng hưởng được tạo ra tương đương với hai trường hợp khi $B_1 + B_2 = -B_d$ và khi $B_1 + B_2 = B_d = 0$.



Hình 2.6. Đường cong phần ảo của tổng dẫn theo tần số [102]

2.1.3. Phương pháp mô phỏng

Quá trình nghiên cứu, phần mềm CST Microwave Studio, mua bản quyền bởi Viện Khoa học Vật liệu, được sử dụng để mô phỏng tính chất điện từ của các mẫu MPAs. Trong CST, có thể sử dụng phương pháp giải trên miền thời gian (T: *Transient Solver*) hoặc miền tần số (F: *Frequency Domain Solver*). Phương pháp miền thời gian (T) phù hợp với cấu trúc không tuần hoàn như ăng ten bằng cách giải các phương trình Maxwell trong một vùng tần số rộng. Phương pháp miền tần số (F) thích hợp hơn với các cấu trúc có tính chất tuần hoàn như MPA hay vật liệu biến hóa chuyển

đổi phân cực sóng điện từ.

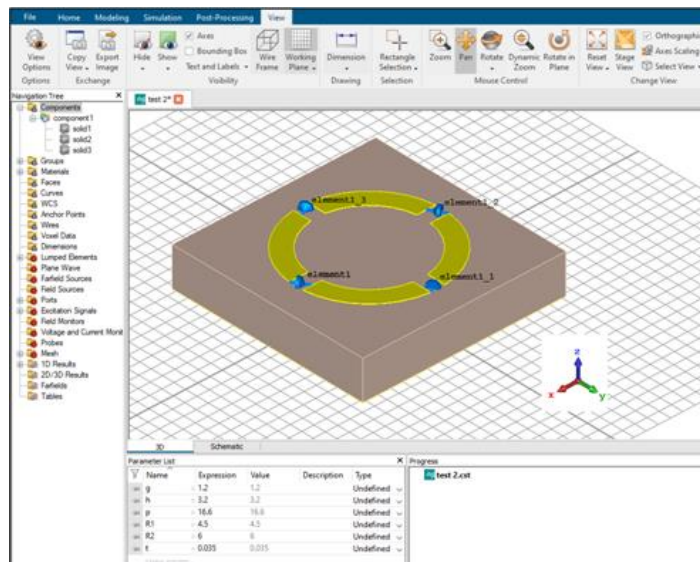
Phần mềm CST cho thấy tương tác trường điện từ với cấu trúc vật liệu dựa trên kỹ thuật phân tích hữu hạn (FIT: *Finite Integration Technique*). Nó cho phép mô hình hóa các hiện tượng điện từ và đánh giá thiết kế để đạt được độ hấp thụ tối ưu. Về bản chất, lý thuyết FIT biến đổi các phương trình Maxwell và các phương trình tán sắc của vật liệu từ không gian liên tục đến không gian rời rạc. Vì vậy, FIT tạo ra hệ phương trình lưới Maxwell từ các phương trình Maxwell. Từ đó, đảm bảo các tính chất vật lý của trường được duy trì trong không gian rời rạc và dẫn đến một nghiệm duy nhất. Với lợi thế đó, FIT giải các phương trình Maxwell dưới dạng tích phân thay vì dạng vi phân như thể hiện dưới đây [37].

$$\oint_{\partial A} \mathbf{E} ds = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dA \quad (2.21)$$

$$\oint_{\partial V} \mathbf{D} dA = - \int_V \rho dV \quad (2.22)$$

$$\oint_{\partial A} \mathbf{H} ds = - \int_A \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) dA \quad (2.23)$$

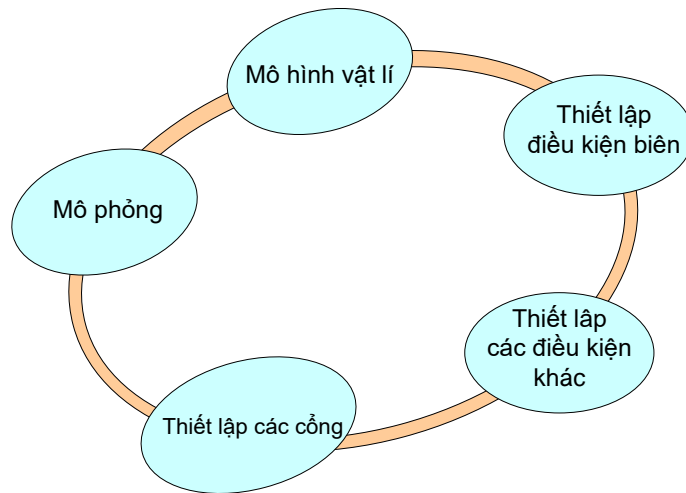
$$\oint_{\partial V} \mathbf{B} dA = 0 \quad (2.24)$$



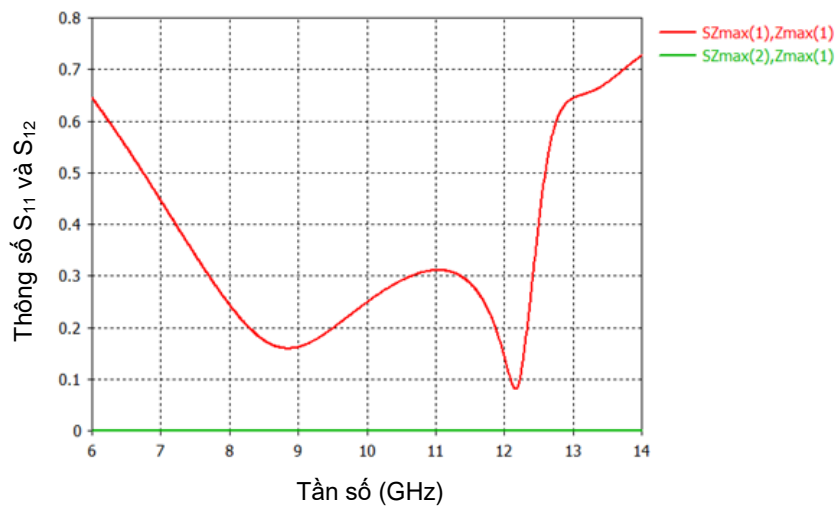
Hình 2.7. Giao diện chương trình mô phỏng trên CST

Với MPA có cấu trúc kim loại-điện môi-kim loại, việc hiểu rõ đặc tính của kim loại trong mô phỏng giúp lựa chọn chính xác vật liệu và thu được kết quả đúng. Ở dải tần thấp như MHz hoặc GHz, thường kim loại đồng (Cu) hoặc vàng (Au) được chọn cho lớp dẫn điện với độ dẫn điện riêng biệt.

Phần mềm mô phỏng giúp khảo sát nhanh chóng ảnh hưởng của các tham số cấu trúc, ảnh hưởng của việc lựa chọn vật liệu, góc tới và góc phân cực tới độ hấp thụ của MPA. Từ các kết quả khảo sát, thu được các thông số tối ưu của cấu trúc, thúc đẩy tiến trình nghiên cứu và giảm chi phí thực nghiệm. Ngoài ra, có thể tính toán độ từ thẩm hiệu dụng, độ điện thẩm hiệu dụng và trở kháng chuẩn hóa của MPA từ thông tin về pha và biên độ của các tham số S thu được từ mô phỏng, giúp kiểm chứng ngược lại quá trình tính toán. Mặt khác, cơ chế vật lý của MPA có thể được hiểu rõ thông qua việc khảo sát và phân tích phân bố điện trường, phân bố dòng bề mặt tại các tần số cộng hưởng.



Hình 2.8. Tiến trình mô phỏng trên CST



Hình 2.9. Minh họa kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S_{11} và hệ số truyền qua S_{21}

Để mô phỏng, cần vẽ mô hình vật lý của MPA, thiết lập các tham số đầu vào gồm dải tần số hoạt động, hình dạng và kích thước của ô cơ sở, lựa chọn vật liệu từ thư viện hoặc thiết lập thông số của vật liệu mới nếu chúng không được cung cấp

trong thư viện nguồn, thiết lập điều kiện biên... Kết quả mô phỏng thu được ở đầu ra là hệ số phản xạ S_{11} và hệ số truyền qua S_{21} như thể hiện trên Hình 2.9. Từ đó, tính toán được độ hấp thụ của MPA.

2.1.4. Phương pháp thực nghiệm

Quang khắc là kỹ thuật đã được phát triển từ đầu thế kỷ 20, và được sử dụng rộng rãi nhất trong công nghiệp bán dẫn để chế tạo các vi mạch điện tử. Ngoài ra, quang khắc được sử dụng trong ngành khoa học và công nghệ vật liệu để chế tạo các chi tiết vật liệu nhỏ, chế tạo các linh kiện vi cơ điện tử (MEMS). Hạn chế của quang khắc là do ánh sáng bị nhiễu xạ nên không thể hội tụ chùm sáng xuống kích cỡ nhỏ, vì thế nên không thể chế tạo các chi tiết có kích thước nano (độ phân giải của thiết bị quang khắc tốt nhất là 50 nm).

Đối với MPA hoạt động ở dải tần 1-18 GHz, thường sử dụng công nghệ quang khắc bằng ánh sáng. Vật liệu cần chuẩn bị là tấm phôi mạch in PCB (*Printed Circuit Board*). Cấu tạo của tấm PCB trong các thiết kế MPA hoạt động ở vùng tần số GHz đã thực hiện cho luận án gồm ba lớp: lớp trên và dưới là kim loại Cu được phủ sẵn một lớp cảm quang, ở giữa là lớp điện môi FR4. Ở dải tần 1-18 GHz, kích thước các tham số cấu trúc của ô cơ sở thường cỡ milimet. Quá trình quang khắc được thực hiện như sau: ép mặt nạ mang hình dạng cấu trúc cần tạo sát với bề mặt lớp cảm quang của phiến PCB có sẵn, bức xạ ánh sáng trắng được chiếu qua mặt nạ trong thời gian nhất định. Quá trình này làm thay đổi tính chất cảm quang do phản ứng quang hóa. Tiếp theo sử dụng chất tẩy rửa lớp cảm quang rửa trôi phần cảm quang bị ánh sáng tác động. Cuối cùng, hình dạng cấu trúc được tạo ra nhờ quá trình ăn mòn sử dụng hóa chất ăn mòn chuyên dụng cho mạch in.

Khi chế tạo các chi tiết nhỏ cỡ *nanomet*, tương đương với vùng tần số THz, vẫn có thể sử dụng kỹ thuật quang khắc nhưng yêu cầu kỹ thuật chế tạo có độ chính xác cao hơn. Với mẫu MPA trong vùng ánh sáng nhìn thấy với thông số kích thước cấu trúc cỡ nm thường lựa chọn kỹ thuật khắc bằng chùm tia điện tử, khắc laser hoặc chùm ion hội tụ [20].

2.2. Quy trình chế tạo MPA hoạt động ở vùng tần số GHz

Trong phạm vi nghiên cứu, chúng tôi thực hiện chế tạo các mẫu MPA hoạt động ở vùng tần số từ 1-18 GHz. Tấm PCB là bảng mạch in với điện môi FR4 (*Flame Retardant*) hai mặt có phủ đồng và có sẵn lớp cảm quang dương. Lớp đồng thường

có độ dày là 0,035mm còn lớp điện môi có các độ dày 0,8 mm hoặc 1,6 mm hoặc 2,5mm. Kích thước này là phù hợp với độ dày của tấm PCB có sẵn trên thị trường. FR_4 có hằng số điện môi là 4,3 và suy hao là 0,025 trong khi lớp đồng có độ dẫn điện là $5,96 \times 10^7$ S/m.

Ở vùng tần số GHz, quang khắc là phương pháp phù hợp để chế tạo. Quang khắc là kỹ thuật sử dụng trong công nghệ bán dẫn và công nghệ vật liệu tạo ra các chi tiết của vật liệu và linh kiện với hình dạng và kích thước xác định bằng cách sử dụng các bức xạ ánh sáng làm biến đổi các chất cảm quang phủ trên bề mặt. Hình 2.10 trình bày các bước cơ bản của công nghệ quang khắc (photolithography) với cảm quang dương.

Hệ chế tạo mẫu được lắp đặt và sử dụng tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Hệ có thể chế tạo vật liệu biến hóa có cấu trúc bất kỳ với độ chính xác là 0,1 đến 0,5 mm, giá thành tương đối thấp.

Quy trình chế tạo thực tế có thể tóm tắt trong bốn bước chính sau đây:

Bước 1: *Chiếu sáng*

- Chuẩn bị tấm phơi mạch in hai mặt phủ sẵn đồng và lớp cảm quang dương. Cảm quang là các chất hữu cơ có tác dụng bao phủ và bảo vệ vật liệu cần tạo, là các chất không bị rửa trôi hoặc ăn mòn dưới các dung môi như kiềm, axit... nhưng lại có thể bị rửa trôi trong các dung môi hữu cơ, các dung dịch tráng rửa. Lớp cảm quang có độ dày 5 μ m, đáp ứng với bước sóng từ 350-450 nm. Kích thước của mẫu đảm bảo đủ lớn để thu được đầy đủ ánh sáng tới và phản xạ, đảm bảo độ chính xác khi đo các thông số.

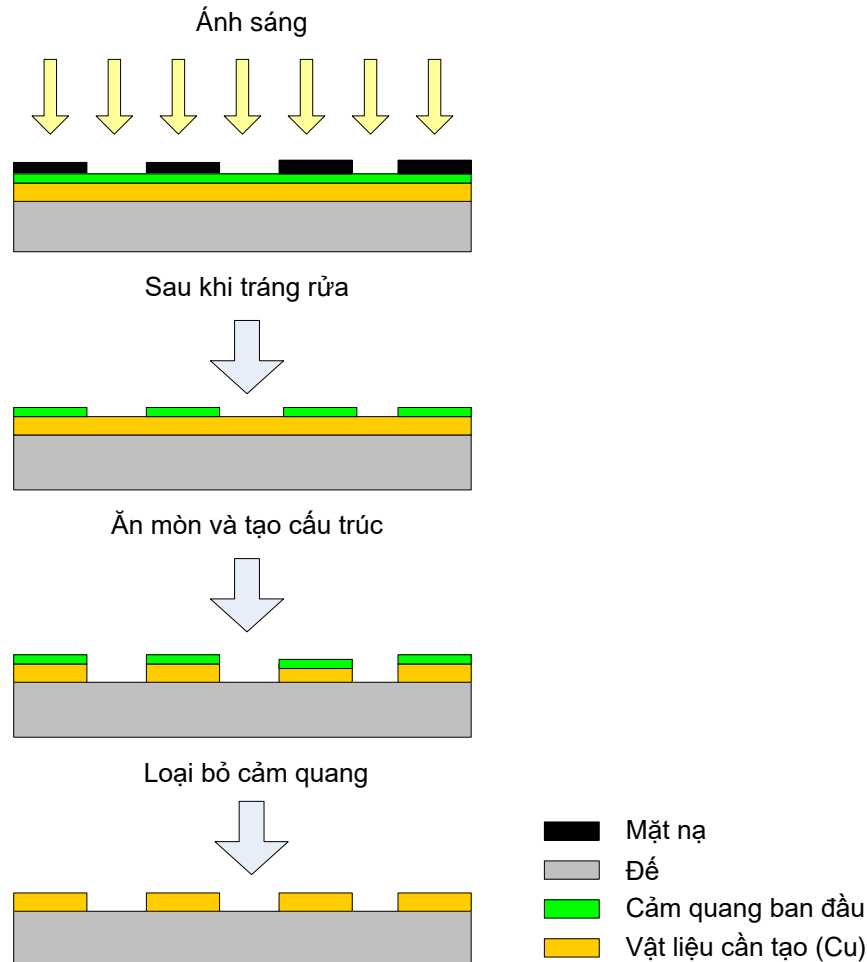
- Do tấm PCB đã phủ lớp cảm quang nên đặt trực tiếp mặt nạ lên tấm PCB. Mặt nạ để tạo ra hình ảnh của linh kiện trên cảm quang dương là tấm phim trong suốt có khắc hình của cấu trúc cần tạo. Hút chân không để ép mặt nạ sát chất cảm quang.

- Chiếu sáng vật liệu với nguồn sáng UV có cường độ chiếu sáng 50mJ/cm, thời gian chiếu sáng từ 2,5 đến 3,5 phút. Sau đó tắt đèn và tháo mặt nạ. Quá trình này làm thay đổi tính chất của lớp cảm quang do phản ứng quang hóa.

Bước 2: *Tráng rửa và hiện hình cấu trúc*

Để hiện hình cấu trúc cần trộn 50 gam bột chất hiện hình vào 1 lít nước nóng. Khoáy đều cho nó tan hết trong nước. Để thuốc hiện hình nguội đến nhiệt độ phòng và sử dụng ở nhiệt độ từ 18 đến 25°C. Để tráng rửa cần đảm bảo tấm PCB được ngâm

hoàn toàn trong dung dịch từ 1,0 đến 1,5 phút phụ thuộc vào nhiệt độ của dung dịch hiện hình. Phần cảm quang được chiếu sáng trực tiếp sẽ bị hòa tan trong dung dịch tráng rửa, còn lại hình của cấu trúc cùng với lớp cảm quang bị biến đổi do phản ứng quang hóa, là mặt nạ bảo vệ trên bảng mạch.



Hình 2.10. Quy trình chế tạo của MMs hoạt động ở vùng GHz

Bước 3: Ăn mòn và tạo cấu trúc

Kỹ thuật ăn mòn được sử dụng là ăn mòn hóa ướt, sử dụng dung dịch ferric chloride. Mẫu được đưa vào buồng ăn mòn trong 30 đến 60 s, phần vật liệu không có cảm quang bảo vệ sẽ bị ăn mòn, phần nào còn lớp cảm quang thì không bị ăn mòn.

Bước 4: Loại bỏ lớp cảm quang bị biến đổi do quang hóa

Để loại bỏ lớp cảm quang bị biến đổi do phản ứng quang hóa chúng tôi sử dụng dung dịch PC155 stripper hoặc acetone.

Sau khi chế tạo mẫu theo các bước ở trên, vì mẫu có tích hợp điện trở nên tiến hành hàn các điện trở sử dụng máy hàn nung Soldering Iron 936, điện áp làm việc

220V (50 – 60Hz), công suất 60W, có khả năng điều chỉnh nhiệt độ trong phạm vi 200-450°.

2.3. Hệ đo

Mẫu sau khi chế tạo, tiến hành đo các thông số. Ở dải tần GHz, phép đo sử dụng hệ phân tích mạng véc tơ. Để đo thông số của mẫu MPA hoạt động ở dải tần GHz, sử dụng hệ phân tích mạng véc tơ (Vector Network Analyzer) số hiệu Rohde and Schwarz ZNB20. ZNB20 có một số thông số kỹ thuật chính được cho trên Bảng 2.1. Hệ mẫu gồm hai ăng-ten dạng loa được sử dụng để phát và thu tín hiệu qua mẫu. Để đo các thông số phản xạ, đầu tiên lắp đặt hệ đo với ăng-ten phát và thu phù hợp sao cho khi chưa đặt mẫu vào ăng-ten thu được xấp xỉ 100% tín hiệu tới từ ăng-ten phát.

Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật của hệ phân tích mạng véc tơ

Sản phẩm và các thông số

| | |
|------------------|-----------------|
| Số hiệu | R&S ZNB20 |
| Nhà sản xuất | Rohde & Schwarz |
| Giới hạn dải đo | 100KHz-20GHz |
| Tốc độ đo | 4.5 ms |
| Số điểm hiển thị | 0 đến 60001 |
| Công suất ra | -30 đến 10 dBm |
| Tạp âm nền | -120dB |

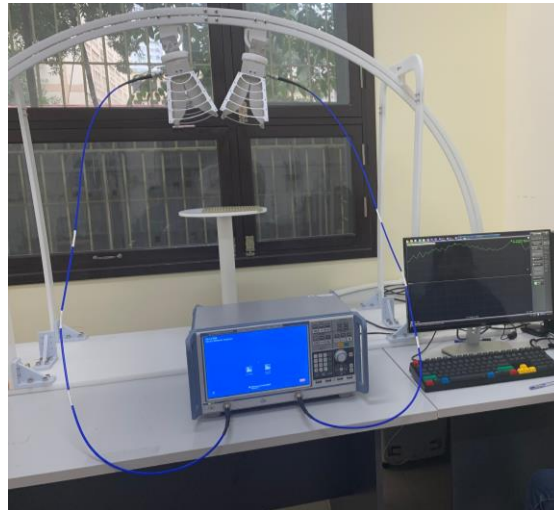


Hình 2.11. Mô hình thiết lập đo hệ số phản xạ



Hình 2.12. Mô hình thiết lập đo hệ số truyền qua

Trong phép đo hệ số phản xạ, có thể thiết lập thay đổi góc của tia tới bằng cách di chuyển ăng-ten trên vòng cung của giá đỡ như thể hiện trên hình 2.11. Cách thức thiết lập nhằm đo hệ số phản xạ và đo hệ số truyền qua và được trình bày trên Hình 2.11 và 2.12 tương ứng.



Hình 2.13. Chuyển đổi kết quả hệ số phản xạ thành độ hấp thụ

Ngoài ra, có thể quy đổi kết quả phép đo hệ số phản xạ thành kết quả độ hấp thụ của MPA như thể hiện trên Hình 2.13.

2.4. Kết luận chương

Chương 2 trình bày các phương pháp nghiên cứu MPAs bao gồm phương pháp tính toán bán lý thuyết, mô phỏng bằng phần mềm CST, mô hình mạch tương đương và chế tạo thực nghiệm. Các kết quả nghiên cứu thu được chỉ từ phương pháp mô phỏng, hay kết hợp giữa mô phỏng, tính toán bán lý thuyết và thực nghiệm phụ thuộc điều kiện thực tế. Tuy nhiên, các phương pháp nghiên cứu đều có độ chính xác và tin cậy, được sử dụng rộng rãi bởi cộng đồng các nhà nghiên cứu.

CHƯƠNG 3

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ BẰNG RỘNG TÍCH HỢP CÁC PHẦN TỬ ĐIỆN TRỞ HOẠT ĐỘNG Ở VÙNG TẦN SỐ GHz

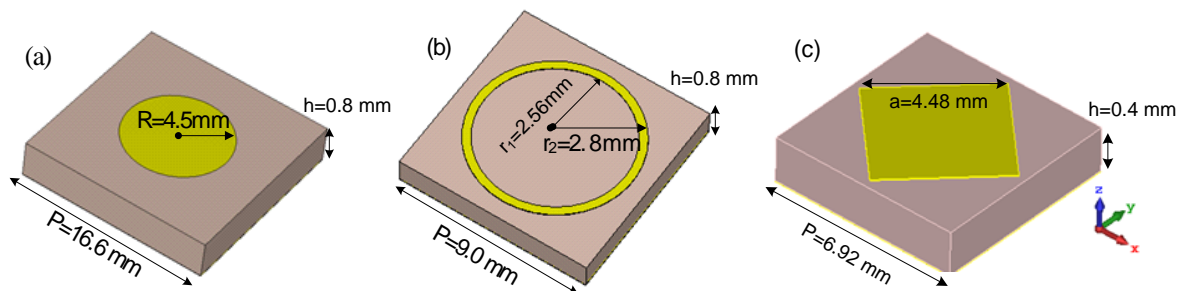
Chương 3 trình bày việc thiết kế BMPA tích hợp các phần tử điện trở. Dựa trên lý thuyết mạch tương đương, các mô hình kim loại được hiểu là các cuộn cảm và tụ điện tương đương để xác định gần đúng tần số cộng hưởng của chúng. Sau đó, các phần tử điện trở được đưa vào để kết nối các khe của mẫu cộng hưởng. So với các BMPA khác có cấu trúc tương tự gồm các lớp kim loại-điện môi-kim loại nhưng không chứa các phần tử ngoại vi, BMPA có gắn thành phần ngoại vi như phần tử điện trở, cuộn cảm, tụ điện và diode có khả năng điều chỉnh dải phổ rộng hơn và linh hoạt hơn. Các thành phần tập trung được gắn vào để kết nối các mode cộng hưởng với nhau và tiêu thụ năng lượng điện từ. Hệ số phẩm chất Q trong mạch RLC được xác định bởi công thức (3.1).

$$Q = \frac{\sqrt{LC}}{R} \quad (3.1)$$

Trong đó, L và C là cảm kháng và dung kháng của mạch LC . Việc tăng giá trị điện trở R dẫn tới hệ số Q giảm và ngược lại.

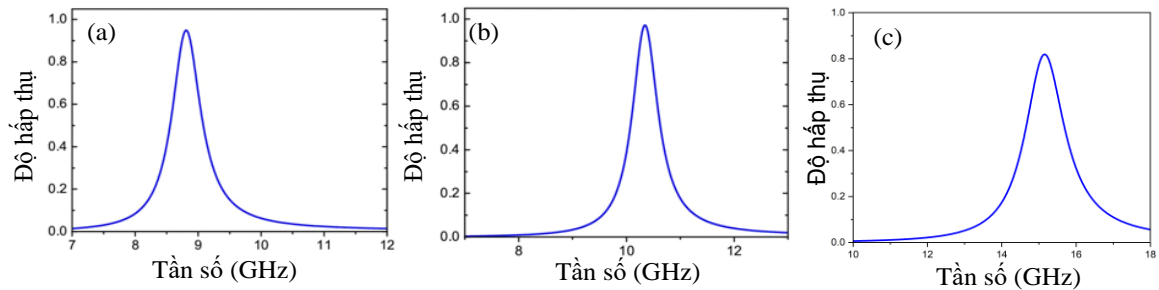
Với mục tiêu trên, chương 3 đề xuất mô hình vật lý của BMPA, phân tích cơ chế hấp thụ và các tính chất điện từ của các mẫu BMPA tích hợp các phần tử điện trở. Ngoài ra, ảnh hưởng của các tham số cấu trúc, góc tới và góc phân cực tới độ hấp thụ của BMPA cũng được khảo sát cụ thể nhằm tối ưu hóa thiết kế. BMPA yêu cầu đạt được đồng thời độ hấp thụ cao, băng thông rộng, ít chịu ảnh hưởng của góc tới và góc phân cực, làm việc tại các dải tần phù hợp ứng dụng thực tế.

3.1. Cơ sở đề xuất thiết kế

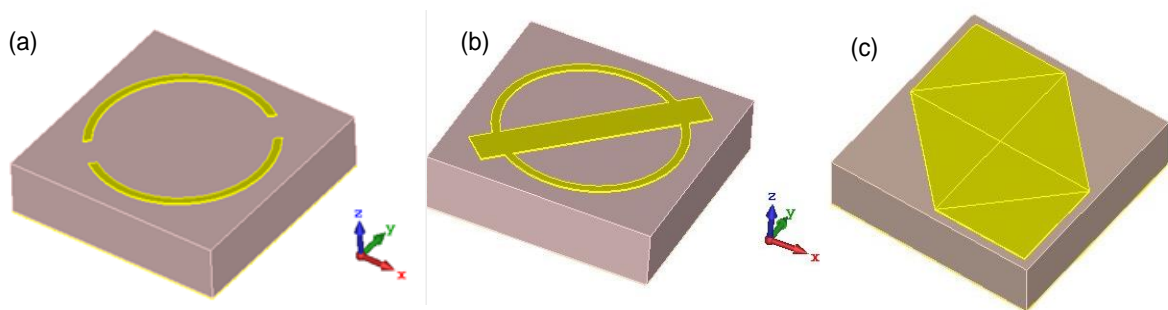


Hình 3.1. MPA với cấu trúc cộng hưởng (a) đĩa tròn, (b) vòng tròn, (c) hình vuông

Để xây dựng mô hình vật lí của MPA, bắt đầu nghiên cứu chúng tôi thực hiện mô phỏng với các cấu trúc MPA thường gặp, như cấu trúc đĩa tròn, vòng tròn, hình vuông như trên Hình 3.1. Các MPA này có thể đạt được độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số hẹp như thể hiện trên hình 3.2. Với trường hợp góc tới vuông góc với bề mặt cấu trúc, phổ hấp thụ của MPA trong trường hợp phân cực TE và phân cực TM là trùng nhau.



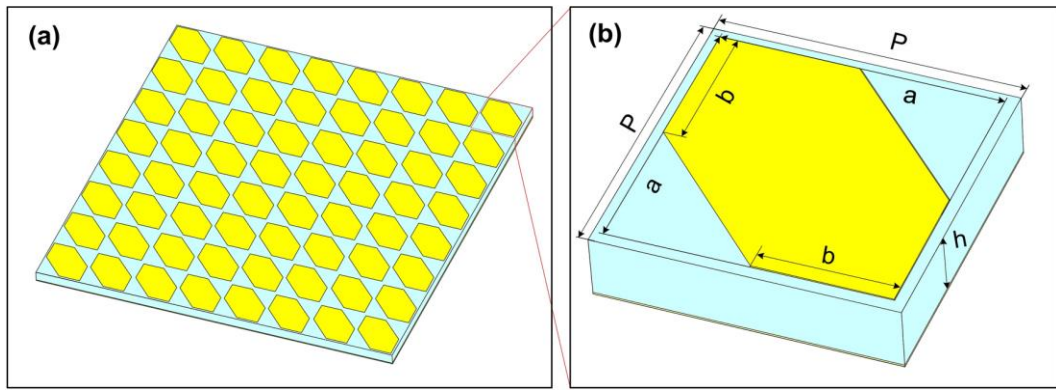
Hình 3.2. Độ hấp thụ của MPA (a) cấu trúc đĩa tròn, (b) cấu trúc vòng tròn (c) cấu trúc hình vuông trong trường hợp góc tới vuông góc với bề mặt cấu trúc



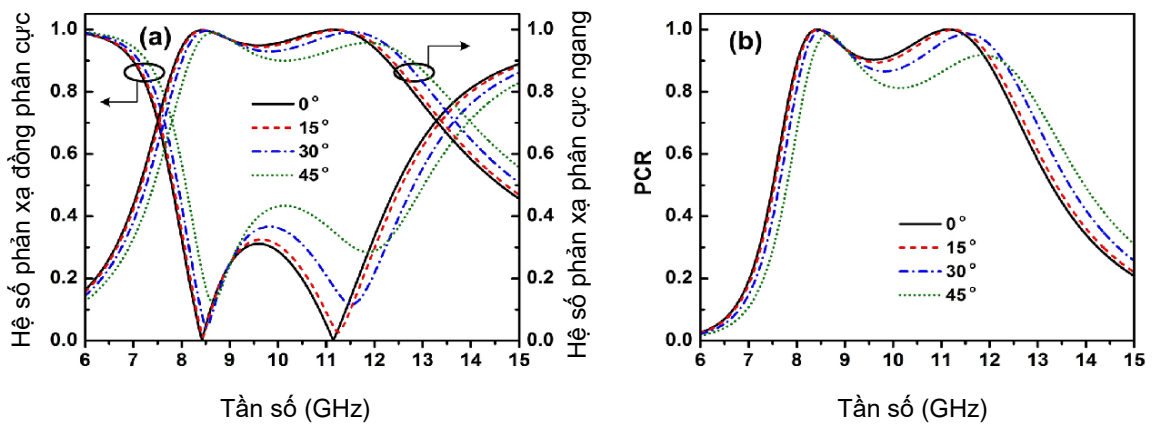
Hình 3.3. Ví dụ về cấu trúc vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ

Các cấu trúc ở trên là hoàn toàn đối xứng. Trong trường hợp cấu trúc bị biến đổi, chỉ đối xứng qua đường chéo chính như các ví dụ trên Hình 3.3, các thiết kế có thể tối ưu hóa để trở thành vật liệu chuyển đổi phân cực sóng điện từ với tỷ số chuyển đổi phân cực PCR trên 90%. Điều này được chứng minh trong báo cáo gần đây của chúng tôi [102]. Từ mô hình ô cơ sở trên Hình 3.3c chúng tôi đã tối ưu hóa để thiết kế trên Hình 3.4 trở thành vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực tuyến tính và phân cực tròn băng rộng [102].

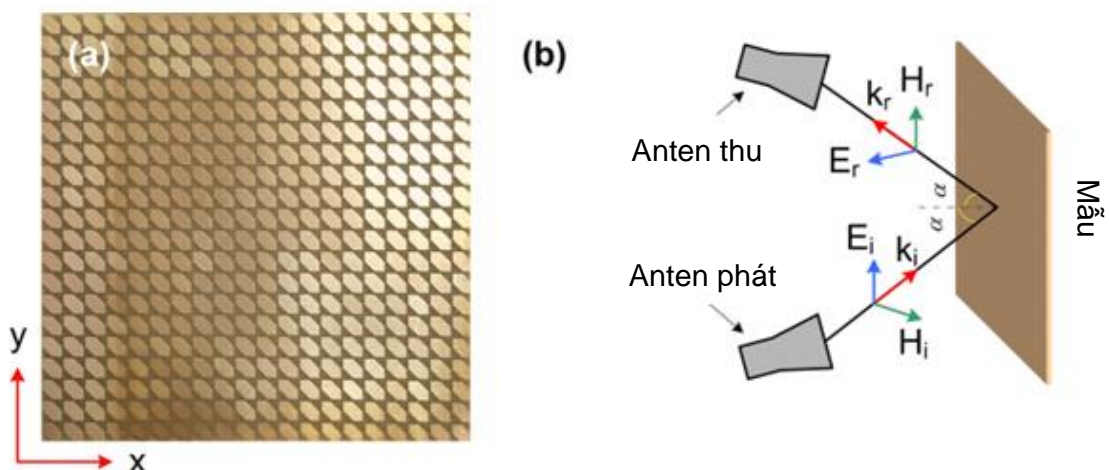
Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất chuyển đổi phân cực PCR đạt trên 90% trong dải tần từ 8-12 GHz. Mặt khác, PCR được duy trì trên 80% với góc tới nhỏ hơn 45° như thể hiện trên hình 3.5. Ngoài ra, thiết kế đạt được chuyển đổi phân cực tròn tại hai băng tần số là 7,42-7,6 GHz và 13-13,56 GHz.



Hình 3.4. Cấu trúc của bộ chuyển đổi phân cực đề xuất (a) Mặt trên của ô cơ sở và (b) mô hình 3D của ô cơ sở [103]

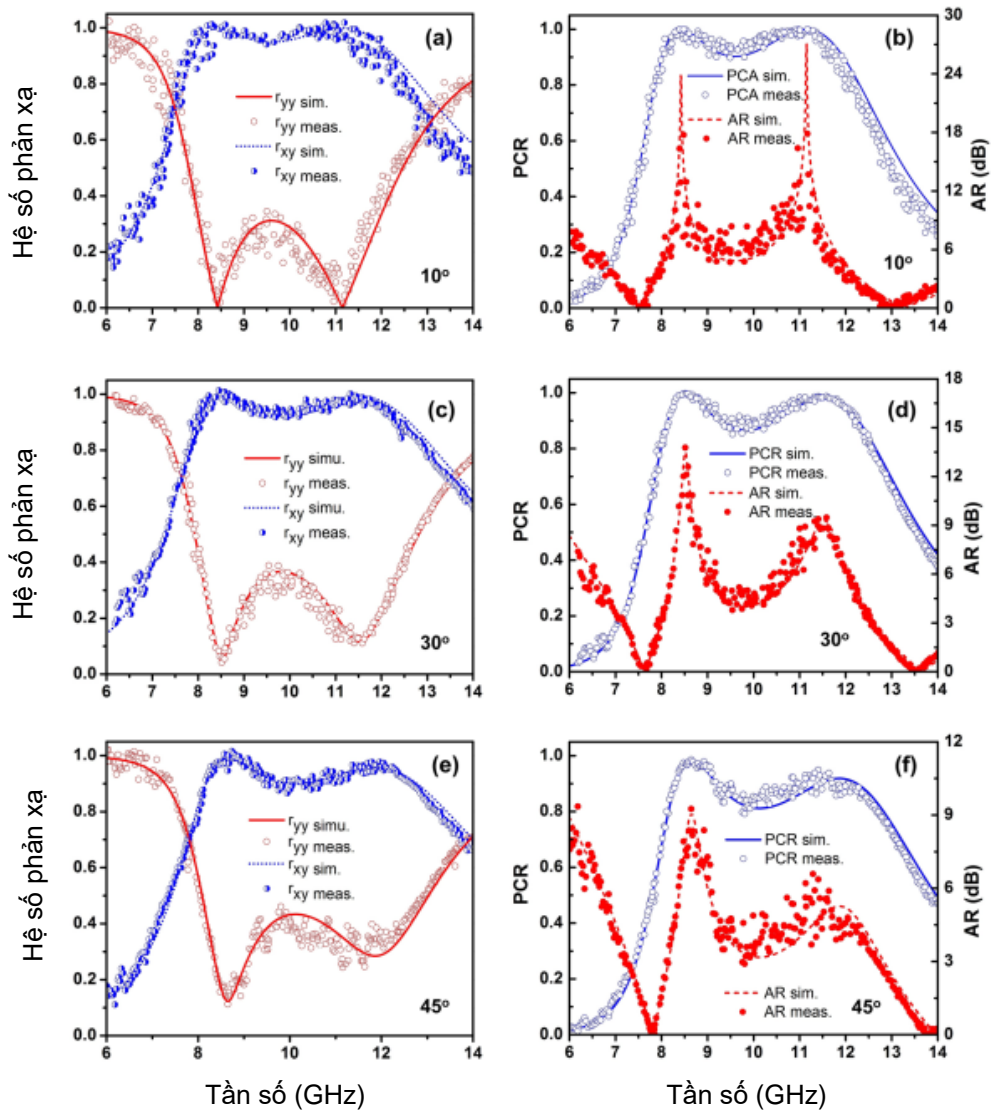


Hình 3.5. (a) Biên độ của hệ số phản xạ phân cực ngang và đồng phân cực và (b) Tỷ số chuyển đổi phân cực của bộ chuyển đổi phân cực đề xuất với các góc tới thay đổi từ 0 đến 45° cho phân cực TE [103]

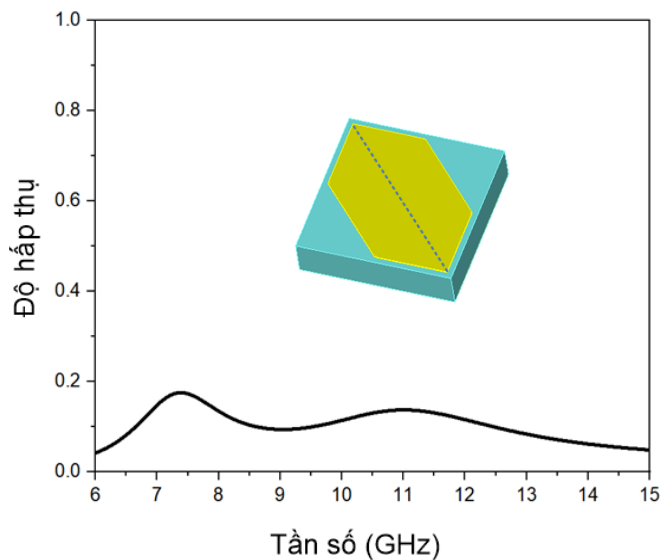


Hình 3.6. (a) Ảnh mẫu chế tạo và (b) Minh họa việc thiết lập mạch đo [103]

Hình ảnh mẫu chế tạo và cách thức thiết lập đo như trên Hình 3.6 (a) và 3.6 (b) tương ứng. Các kết quả đo tại các góc tới khác nhau, là tương đồng với kết quả mô phỏng, như thể hiện trên Hình 3.7.

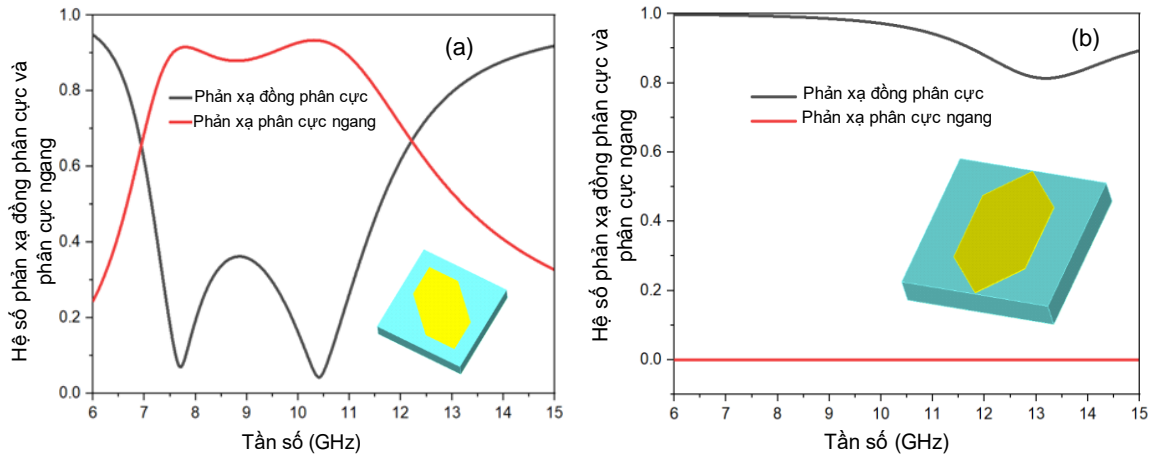


Hình 3.7. (a,c,e) Hệ số phản xạ đồng phân cực, hệ số phản xạ phân cực ngang, và PCR; (b,d,f) PCR của vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ dưới các góc tới 10°, 30°, và 45° tương ứng [103]

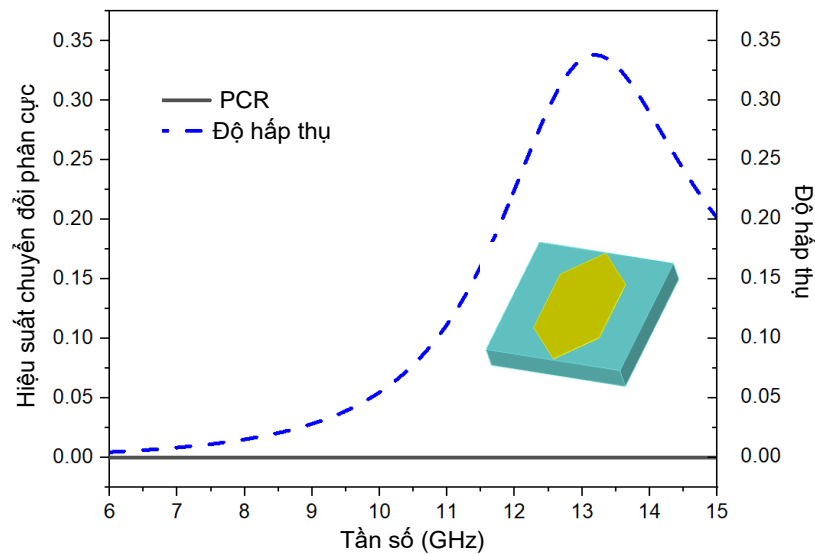


Hình 3.8. Độ hấp thụ của thiết kế đề xuất trên hình 3.4

Trong dải tần số từ 8-12 GHz, thiết kế đề xuất được xem là MPA hấp thụ nghèo trên dải tần số rộng như thể hiện trên Hình 3.8.



Hình 3.9. Hệ số phản xạ đồng phân cực và phân cực ngang của (a) cấu trúc cộng hưởng đối xứng qua đường chéo chính và (b) cấu trúc đối xứng qua trục y



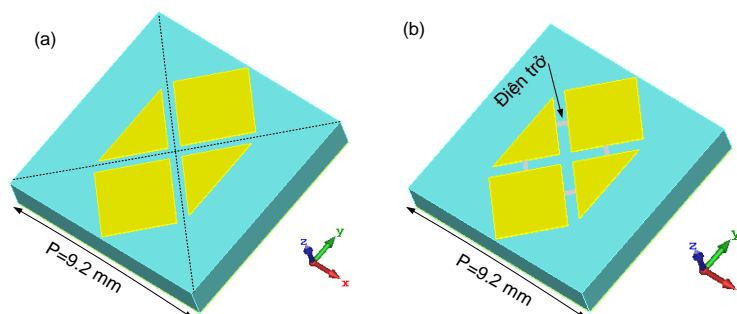
Hình 3.10. Tỷ số PCR và độ hấp thụ của cấu trúc đối xứng qua trục y

Ở đây, các thông số thiết kế khác vẫn giữ nguyên, chỉ thay đổi $P=9,2 \text{ mm}$ để phù hợp với việc xoay mặt cộng hưởng. Khi cấu trúc chỉ đối xứng theo phương dọc (trục y) hoặc theo phương ngang (trục x) thì hệ số phản xạ phân cực ngang r_{xy} giảm về giá trị 0 (đường màu đỏ) trên toàn dải tần hoạt động như thể hiện trên Hình 3.9 (b). Điều này có nghĩa cấu trúc này đã triệt tiêu khả năng chuyển đổi phân cực và tăng dần khả năng hấp thụ như thể hiện trên Hình 3.10. Thực tế, có thể tiếp tục tối ưu thiết kế trên để đạt được độ hấp thụ trên 90%, nhưng chỉ trong băng tần hẹp.

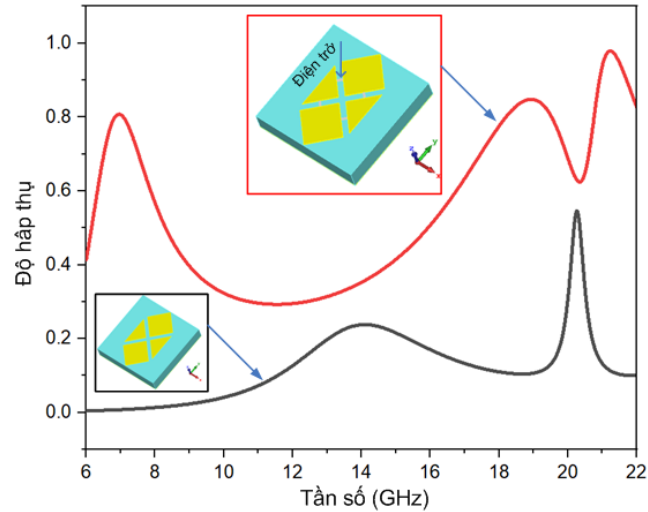
Cho mục đích hoạt động trong băng tần rộng, gần đây MPA có khe cắt tích hợp các phần tử điện trở tạo thành bề mặt trở kháng cao, làm giảm hệ số phẩm chất

Q được đề xuất. Một số các thiết kế tích hợp phần tử điện trở được báo cáo, chứng minh đây là phương pháp dễ dàng để mở rộng dải tần hấp thụ. Cụ thể: một thiết kế sử dụng hai lớp điện môi tích hợp bốn phần tử điện trở làm bề mặt chọn lọc tần số đạt được độ hấp thụ cao trong dải tần số rộng từ 7,6 GHz đến 18,3 GHz [104]. Cong và cộng sự đã đề xuất một BMPA hai lớp tích hợp bốn phần tử điện trở vào các vòng phân chia đối xứng trên lớp kim loại trên cùng, cho thấy độ hấp thụ băng siêu rộng trong dải tần từ 4 GHz đến 22 GHz [105]. Ngoài ra, Bağmancı và cộng sự đã đề xuất một cấu trúc hấp thụ nhiều lớp bao gồm ba lớp kim loại được phân tách bằng hai lớp điện môi và bốn phần tử điện trở tích hợp ở lớp kim loại trên cùng và bốn chốt ngắn nối giữa các lớp kim loại trên cùng và ở giữa, thể hiện sự hấp thụ hoàn hảo giữa 4 GHz và 16 GHz [106]. Tuy nhiên, nhược điểm chính của các cấu trúc này là độ dày tương đối lớn. Gần đây, Chen và cộng sự đã đề xuất một BMPA gồm hai vòng tròn gắn các phần tử điện trở, có thể đạt độ hấp thụ cao hơn 90% trong dải tần số từ 8,87 GHz đến 16,47 GHz [107]. Hơn nữa, Nguyen và cộng sự đã đề xuất cấu trúc BMPA với ô cơ sở gồm tám phần tử điện trở, đạt được mức hấp thụ cao hơn 95% trong dải tần 8,2–13,4 GHz cho các ứng dụng băng tần X [108]. Tuy nhiên, các cấu trúc này vẫn yêu cầu một số lượng lớn các phần tử điện trở.

Để thử nghiệm khả năng mở rộng dải tần của MPA tích hợp điện trở, từ cấu trúc ô cơ sở trên Hình 3.10 chúng tôi tiến hành tạo các khe cắt có độ rộng 0,5 mm như trên Hình 3.11 (a); và gắn 4 điện trở với $R=20\Omega$, trên đường chéo chính của ô cơ sở, cách giao điểm hai đường chéo chính của ô cơ sở 1,25 cm, như trên Hình 3.11 (b). Khi chưa tích hợp điện trở, thiết kế có hai đỉnh hấp thụ tại tần số 14 GHz và 20,3 GHz với độ hấp thụ 23% và 54% tương ứng. Trong trường hợp tích hợp điện trở với $R=20\Omega$, $P=9,2$ mm, độ hấp thụ được tăng cường và có xu hướng mở rộng dải tần với ba đỉnh hấp thụ tại 6,94 GHz, 18,9 GHz và 21,2 GHz với độ hấp thụ 80,6%, 84% và 98% tương ứng như trên Hình 3.12.

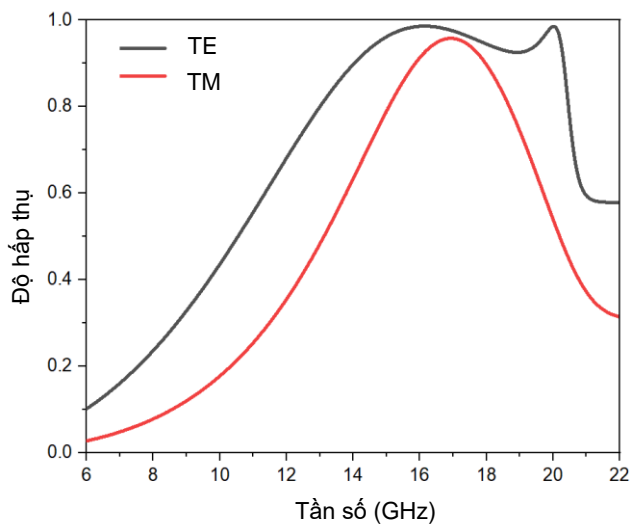


Hình 3.11. Cấu trúc có khe cắt (a) chưa tích hợp điện trở và (b) tích hợp điện trở



Hình 3.12. Cấu trúc có khe cắt khi chưa tích hợp điện trở (đường màu đen) và tích hợp điện trở (đường màu đỏ)

Mô phỏng để tối ưu hóa, BMPA tích hợp điện trở với $R=150\ \Omega$ và $P=10,2\ \text{mm}$ có thể đạt được độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số rộng từ 13,8 đến 20,3 GHz đối với phân cực TE. Đối với phân cực TM, chỉ có một đỉnh cộng hưởng được tạo ra tại tần số 16,95 GHz với độ hấp thụ 96%, băng thông hẹp. Vì cấu trúc đề xuất không đối xứng hoàn toàn theo trục x và trục y nên phổ hấp thụ cho phân cực TE và TM là khác nhau ngay cả với trường hợp góc tới chiếu vuông góc với bề mặt cấu trúc, như thể hiện trên Hình 3.13. Vì mục tiêu đặt ra là thiết kế MPA đạt được đồng thời các yêu cầu: hiệu suất hấp thụ cao trong dải băng tần rộng, ít chịu ảnh hưởng của góc tới và góc phân cực, nên chúng tôi không tiếp tục khảo sát thêm.



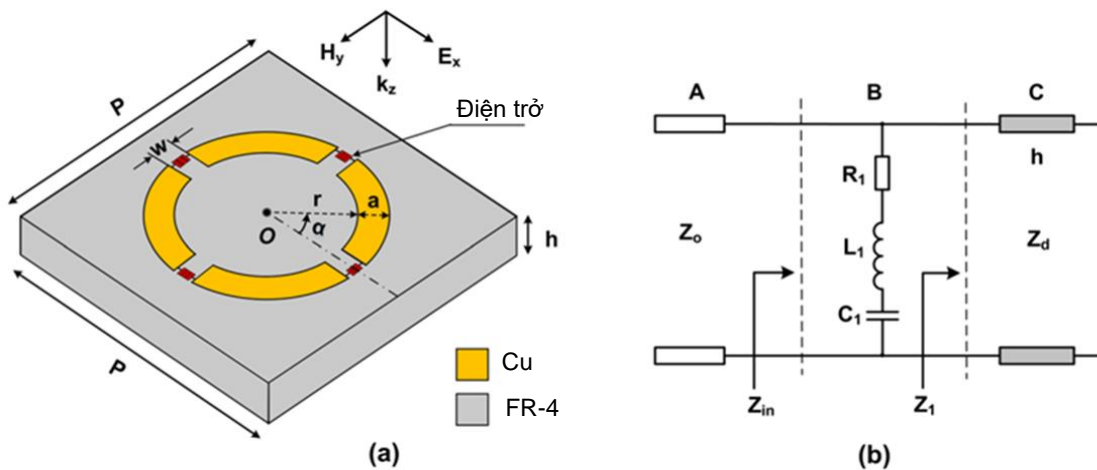
Hình 3.13. Độ hấp thụ của cấu trúc BMPA đề xuất có tích hợp điện trở ($R=150\ \Omega$, và $P=10,2\ \text{mm}$) cho phân cực TE và TM khi góc tới vuông góc với bề mặt

Các mô hình vật lí của BMPA đề xuất tiếp theo trong chương 3 của luận án sẽ có cấu trúc hoàn toàn đối xứng để không phụ thuộc vào góc phân cực, được tích hợp số điện trở ít nhất (4 điện trở). Các thiết kế được tối ưu để đạt được độ hấp thụ cao trong băng tần rộng, cho các ứng dụng băng S, C, X và Ku.

3.2. Thiết kế BMPA tích hợp các phần tử điện trở cho ứng dụng băng X

Trong phần này chúng tôi trình bày thiết kế đơn giản của BMPA với ô cơ sở gồm một vòng tròn hở được gắn bốn phần tử điện trở, cho các ứng dụng băng tần X (8-12 GHz). Từ cấu trúc vòng tròn đơn, tiến hành tạo 4 khe cắt và kết nối bằng các điện trở như thể hiện trên Hình 3.14.a. Mô hình mạch tương đương của BMPA được thể hiện trên Hình 3.14.b. Thiết kế đề xuất gồm hai lớp đồng (Cu) được ngăn cách bởi lớp điện môi FR₄. Lớp đồng có độ dẫn điện là $5,96 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$, độ dày $t = 0.035 \text{ mm}$ và lớp FR₄ có hằng số điện môi 4,3 và suy hao tiếp tuyến 0,025. Lớp đồng liên tục ở phía dưới cùng có tác dụng ngăn tia sóng tới truyền qua.

Giá trị của tổng trở $Z_m(\omega)$ phụ thuộc vào kích thước và hình dạng của cấu trúc cộng hưởng, độ dày lớp điện môi FR₄, và phần tử điện trở tập trung của ô cơ sở. Do đó, bằng cách điều chỉnh kích thước của cấu trúc cộng hưởng, độ dày FR₄ và giá trị phần tử điện trở tập trung, điều kiện phối hợp trở kháng được thỏa mãn và độ hấp thụ tuyệt đối có thể đạt được.



Hình 3.14. (a) Hình ảnh 3D của ô cơ sở, (b) mô hình mạch tương đương [109]

Theo lý thuyết mạch RLC , tần số cộng hưởng được xác định bởi công thức 3.2 [110].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.2)$$

Theo công thức 3.2, tần số cộng hưởng phụ thuộc vào giá trị điện cảm và điện

dung của mạch. Trong cấu trúc này, việc thay đổi kích thước của r và a tương ứng với tăng giá trị điện cảm; hoặc thay đổi độ rộng khe cắt w tương ứng với thay đổi giá trị điện dung, gây nên sự dịch chuyển tần số cộng hưởng.

Độ hấp thụ của BMPA đề xuất được tính theo công thức 3.3.

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - \Gamma = 1 - \left| \frac{Z_{in}(\omega) - Z_0}{Z_{in}(\omega) + Z_0} \right| \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{Z_{in}(\omega)} = \frac{1}{Z_m(\omega)} + \frac{1}{Z_d(\omega)}, \quad (3.4)$$

$$Z_m(\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}, \quad (3.5)$$

$$Z_d(\omega) = j \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \tan(k_r h), \quad (3.6)$$

$$k_r = k_0 / \sqrt{\epsilon_r \omega_r} \quad (3.7)$$

ϵ_0 và ϵ_r là hằng số điện môi tương đối, μ_0 và μ_r là độ từ thẩm tương đối, k_0 , k_r là số sóng của không gian tự do và lớp nền điện môi tương ứng. Thực hiện biến đổi, công thức (3.3) có thể viết đơn giản:

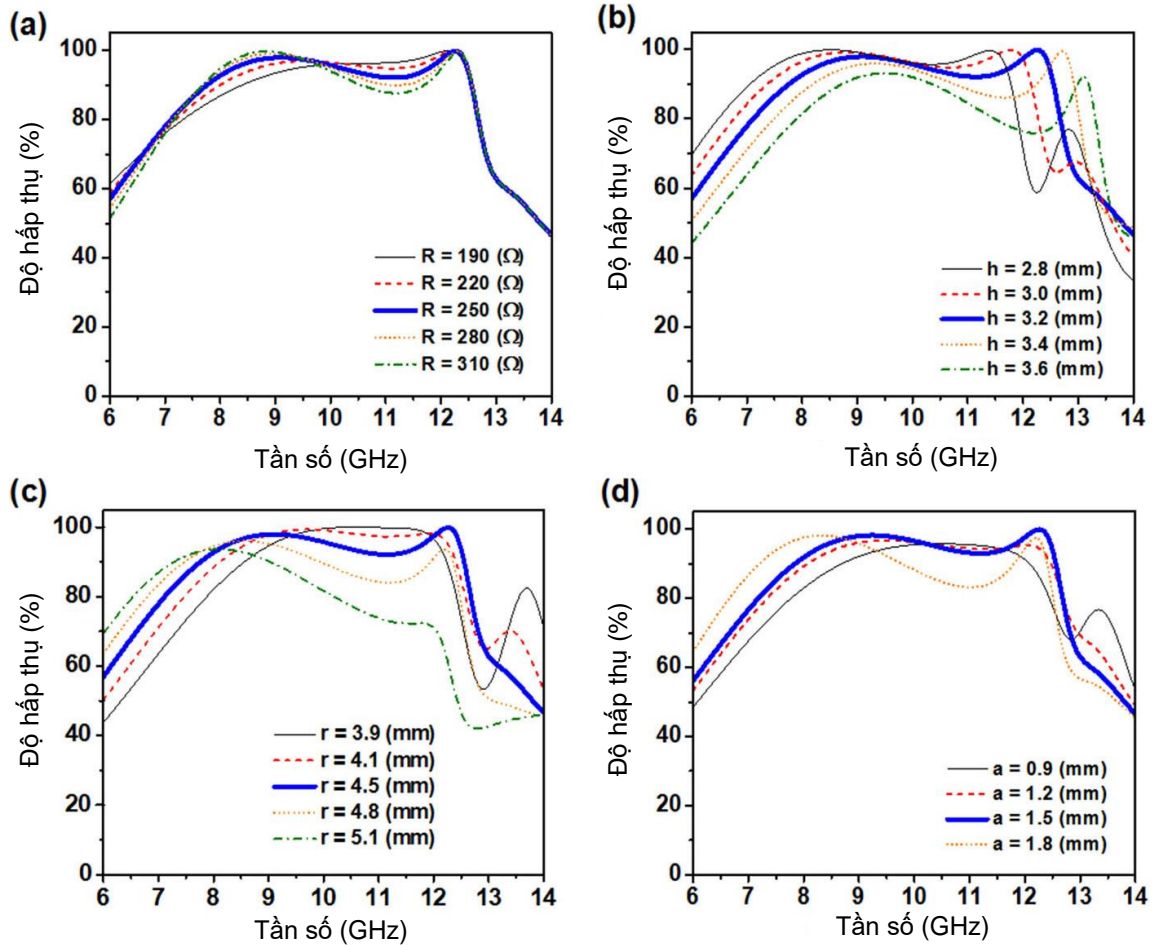
$$A(\omega) = \frac{2Z_0}{\text{Re}(Z_{in}(\omega)) + i \text{Im}(Z_{in}(\omega)) + Z_0} \quad (3.8)$$

Ở đây, $\text{Re}(Z_{in}(\omega))$ và $\text{Im}(Z_{in}(\omega))$ là phần thực và phần ảo của $(Z_{in}(\omega))$. Theo công thức (3.4) để thu được hấp thụ tuyệt đối trong toàn bộ dải tần, điều kiện phối hợp trở kháng $Z_{in} = Z_0$ cần được thỏa mãn. Điều kiện này đạt được khi $\text{Re}(Z_{in}(\omega)) = Z_0 = 377\Omega$ và $\text{Im}(Z_{in}(\omega)) = 0$.

Dựa trên phân tích của lý thuyết đường truyền, giá trị của $Z_{in}(\omega)$ phụ thuộc vào kích thước và hình dạng của cấu trúc cộng hưởng, độ dày lớp điện môi FR4 và giá trị phần tử điện trở tập trung của ô cơ sở. Do đó, bằng cách điều chỉnh kích thước của cấu trúc cộng hưởng, độ dày lớp điện môi và giá trị phần tử điện trở của ô cơ sở, có thể đạt được hấp thụ gần tuyệt đối.

Để tối ưu hóa thiết kế, phần mềm CST được sử dụng với kỹ thuật tích phân hữu hạn (FIT). Chúng tôi xác định giá trị của phần tử điện trở và kích thước của các ô cơ sở nhằm điều chỉnh dải tần hấp thụ rộng và độ hấp thụ cao hơn trong toàn bộ băng tần X.

Hình 3.15 trình bày kết quả mô phỏng ảnh hưởng của các thông số cấu trúc tới độ hấp thụ của BMPA. Đầu tiên, phổ hấp thụ của BMPA được khảo sát với các giá trị khác nhau của phần tử điện trở R trong dải từ 190 đến 310 Ω , như thể hiện trên Hình 3.15 (a). Các thông số kích thước ban đầu của ô cơ sở là $P = 16,6 \text{ mm}$, $r = 4,5 \text{ mm}$, $a = 1,5 \text{ mm}$, $h = 3,2 \text{ mm}$, and $w = 1 \text{ mm}$.

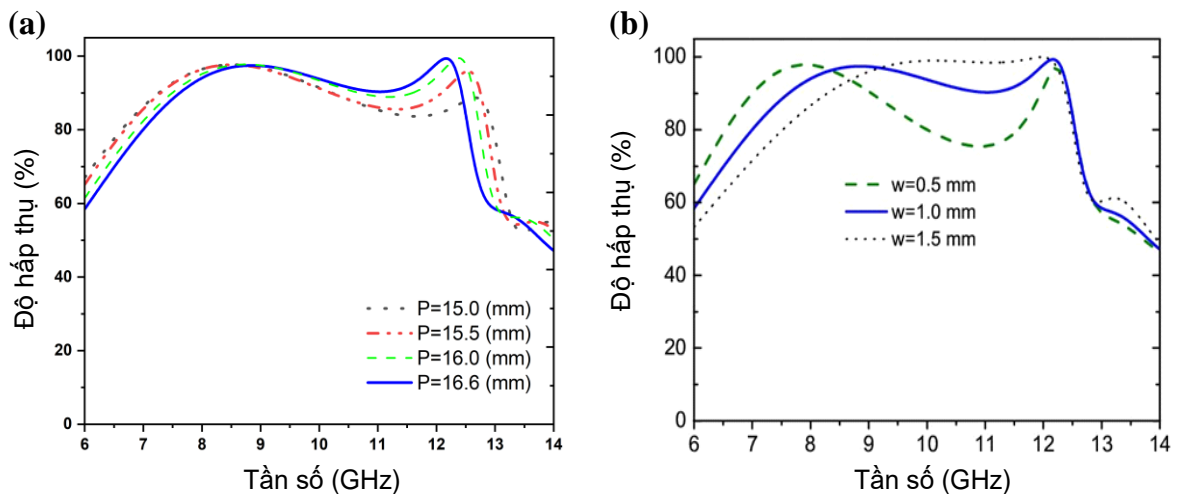


Hình 3.15. Phổ hấp thụ của BMPA đề xuất cho các giá trị khác (a) giá trị phần tử điện trở R , và các thông số cấu trúc khác (b) h , (c) r , (d) a , cho phân cực TE với góc tới vuông góc [109]

Có thể thấy rằng, độ rộng băng thông hấp thụ đạt được trên 90% khi giá trị $R=250 \Omega$. Cố định giá trị R , độ dày của lớp điện môi tiếp tục được tối ưu. Hình 3.15 (b) thể hiện phổ hấp thụ của BMPA với giá trị h thay đổi từ 2,8 mm đến 3,8 mm với bước nhảy 0,2 mm. Khi độ dày lớp điện môi tăng, dải tần số hấp thụ dịch chuyển đến băng tần cao hơn. Từ kết quả mô phỏng, giá trị $h = 3,2 \text{ mm}$ được lựa chọn vì độ hấp thụ đạt trên 90% bao phủ hoàn toàn băng tần X. Ảnh hưởng của bán kính vòng trong r và độ rộng a của cấu trúc SCR đến độ hấp thụ được khảo sát khi cố định các thông số cấu trúc khác như thể hiện trên Hình 3.15 (c) và 3.15 (d). Băng thông hấp thụ dịch

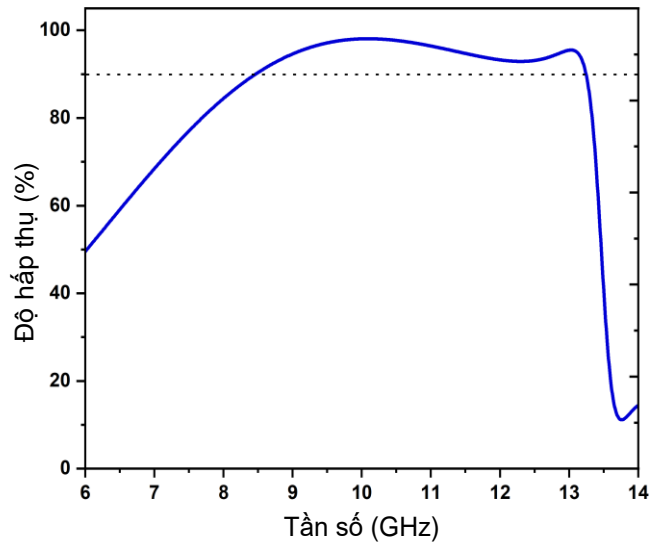
chuyển đến dải tần số thấp hơn, khi tăng r từ 3,9 đến 5,1 mm như trên Hình 3.15 (c). Ngoài ra, độ hấp thụ giảm đáng kể với sự tăng của r từ 4,5 mm đến 5,1 mm. Vì vậy, băng thông rộng nhất có thể đạt được với r bằng 4.5 mm. Tương tự, băng tần hấp thụ dịch chuyển gần tới đường đứt nét màu đỏ khi giá trị của a tăng từ 0,9 mm đến 1,8 mm như trên Hình 3.15 (d). Độ hấp thụ tăng chủ yếu do sự tăng lên của giá trị điện cảm khi kích thước a tăng [34,35]. Theo lý thuyết mạch đường truyền, tần số cộng hưởng được xác định bởi công thức 3.2. Do đó, sự tăng lên của giá trị điện cảm L tương ứng với sự gia tăng kích thước của r và a gây nên sự dịch chuyển tần số cộng hưởng. Tuy nhiên, băng thông rộng nhất với độ hấp thụ đạt trên 90% thu được với $a = 1,5$ mm.

Ngoài ra, chúng tôi cũng tiến hành khảo sát ảnh hưởng của thông số P và độ rộng khe cắt w tới độ hấp thụ của BMPA. Kết quả trên Hình 3.16 (a) cho thấy khi tăng P từ 15 mm tới 16,6 mm, độ hấp thụ có xu hướng tăng, nhưng băng thông có xu hướng hẹp lại do tần số dưới dịch sang phải trong khi tần số trên dịch dần về phía trái. Độ rộng khe cắt ảnh hưởng khá lớn tới độ hấp thụ của BMPA như thể hiện trên Hình 3.16 (b).



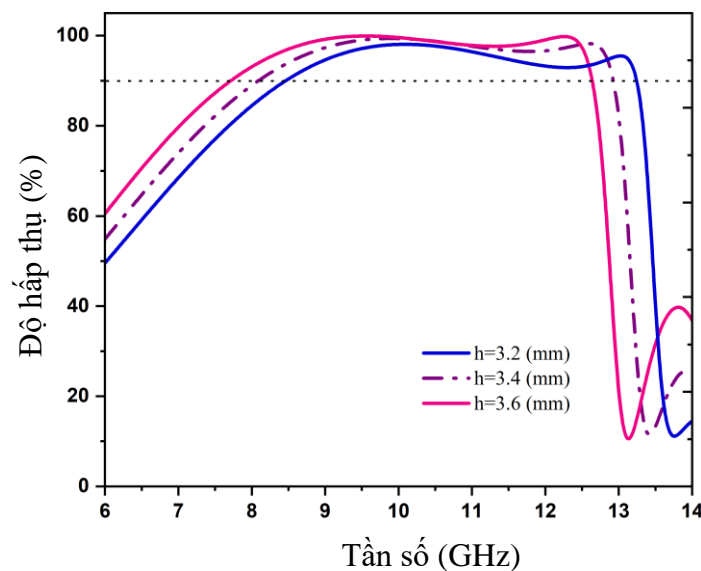
Hình 3.16. Độ hấp thụ của BMPA các giá trị khác nhau của (a) P và (b) w

Các giá trị tối ưu cho thiết kế BMPA đề xuất hoạt động ở băng tần X là $R = 250 \Omega$, $h = 3,2$ mm, $r = 4,5$ mm, $a = 1,5$ mm với $P = 16,6$ mm và $w = 1$ mm. Lưu ý rằng, có thể hiện thực hóa việc chế tạo BMPA bằng cách sử dụng kỹ thuật quang khắc ánh sáng trên vật liệu truyền thống với lớp điện môi FR₄ có độ dày 3,2 mm. Các chip phân tử điện trở có thể được hàn bằng công nghệ gắn bề mặt [111].

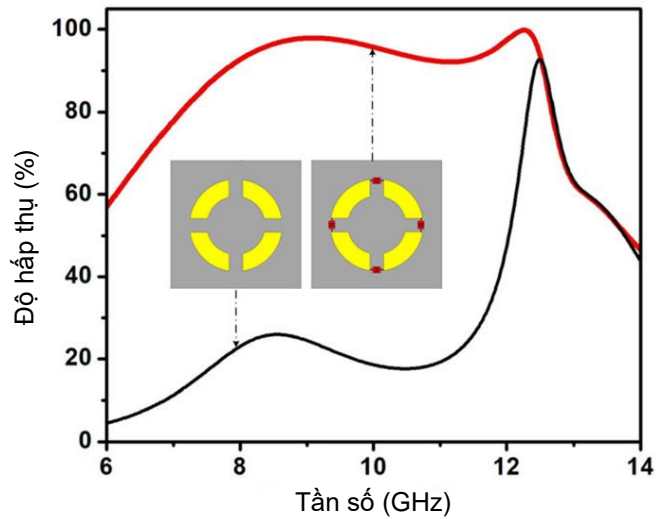


Hình 3.17. Độ hấp thụ của BMPA với vật liệu điện môi polyimide

Chúng tôi cũng tiến hành khảo sát ảnh hưởng của chất điện môi tới độ hấp thụ của BMPA đề xuất. Giữ nguyên các thông số ở trên, nhưng điện môi FR4 được thay thế bằng polyimide với chiều dày $h=3,2$ mm, là vật liệu có tính đàn hồi, dễ dàng uốn cong. Kết quả trên Hình 3.17 cho thấy độ hấp thụ đạt trên 90% trong khoảng tần số từ 8,44 đến 13,26 GHz. Thay đổi chiều dày lớp điện môi polyimide, phổ hấp thụ dịch chuyển như thể hiện trên Hình 3.18. Các khảo sát được đề xuất nhằm mục đích tối ưu thiết kế, đồng thời chứng minh rằng tính chất hấp thụ của BMPA có thể dễ dàng điều khiển được thông qua việc điều chỉnh thông số cấu trúc hoặc vật liệu. Với vật liệu FR_4 , chỉ có thể uốn cong với độ dày 0,1 mm. Tuy nhiên, vật liệu polyimide có khả năng uốn cong với độ dày vài mm nên đề xuất trên có khả năng để hiện thực hóa.



Hình 3.18. Độ hấp thụ của BMPA với độ cao khác nhau của lớp điện môi polyimide



Hình 3.19. Độ hấp thụ của MPA đề xuất trong trường hợp tích hợp và không tích hợp phần tử điện trở [109]

Để làm rõ vai trò của các phần tử điện trở trong thiết kế cấu trúc BMPA, các đặc tính hấp thụ của BMPA trong trường hợp tích hợp và không tích hợp các phần tử điện trở được khảo sát. Hình 3.19 trình bày các kết quả khảo sát này cho phân cực TE khi góc tới vuông góc bề mặt cấu trúc.

Có thể thấy rằng MPA không sử dụng phần tử điện trở có 2 đỉnh hấp thụ tại tần số 8,5 GHz và 12,5 GHz với độ hấp thụ tương ứng là 26,1% và 93,9%. Cấu trúc BMPA sử dụng bốn phần tử điện trở trong một ô cơ sở có độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số rộng từ 7,8 GHz đến 12,6 GHz, bao phủ hoàn toàn băng tần X. Hai đỉnh hấp thụ tại tần số 9,1 GHz và 12,2 GHz, tương ứng với độ hấp thụ xấp xỉ 97,9% và 99,8%. Như vậy, các phần tử điện trở đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện băng thông và độ hấp thụ của BMPA đề xuất. Điều này có thể giải thích sử dụng sơ đồ mạch tương đương RLC , với độ rộng băng thông của cấu trúc BMPA có thể tính toán sử dụng công thức 3.9.

$$BW = \frac{f_0}{Q} = \frac{R}{2\pi L} \quad (3.9)$$

Ở đây, Q là hệ số phẩm chất của vật liệu và f_0 , L , C và R tương ứng là tần số cộng hưởng, điện cảm, điện dung, và phần tử điện trở của mạch.

Từ phương trình 3.9 dễ nhận thấy rằng cấu trúc BMPA đề xuất có băng thông tỷ lệ với giá trị điện trở R . Tuy nhiên, trên Hình 3.15 (a) do trục tần số được biểu thị bằng đơn vị GHz nên sự dịch chuyển độ rộng băng thông là tương đối khó quan sát. Khi R tăng, tần số f_u hầu như không thay đổi, còn tần số f_L dịch chuyển về phía trái.

Ở đây f_U và f_L là tần số lớn nhất và tần số nhỏ nhất tương ứng với băng thông hấp thụ với độ hấp thụ đạt 90%. Các nghiên cứu gần đây cũng báo cáo rằng các đỉnh hấp thụ được kết hợp để tạo nên băng thông hấp thụ rộng của BMPA tích hợp các phần tử điện trở. Ngoài ra, sự kết hợp của các đỉnh hấp thụ giúp cải thiện độ hấp thụ [110].

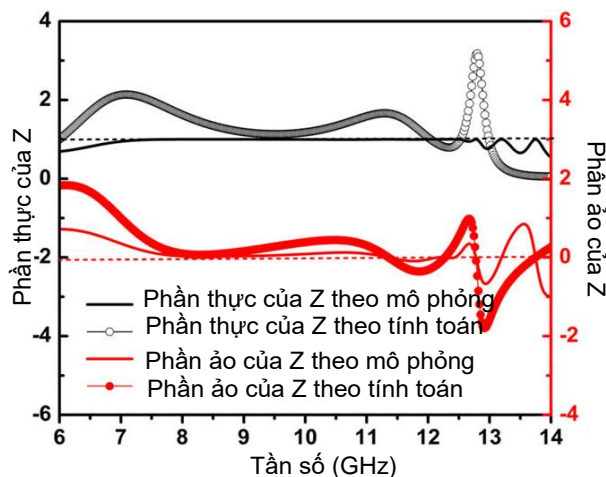
Để đánh giá độ rộng băng thông của BMPA, tỷ số băng thông hấp thụ tương đối RBW được tính toán sử dụng công thức 3.10.

$$RBW = 2 \times \frac{f_U - f_L}{f_U + f_L} \quad (3.10)$$

BMPA đạt được độ hấp thụ cao với RBW với 47%, cao hơn các báo cáo trước đây trong [47], [112].

Trong băng tần hoạt động, cần sự phối hợp trở kháng giữa BMPA và không gian tự do để đạt được độ hấp thụ gần tuyệt đối. Để xác định điều kiện phối hợp trở kháng, trở kháng đầu vào chuẩn hóa (Z) của BMPA được khảo sát.

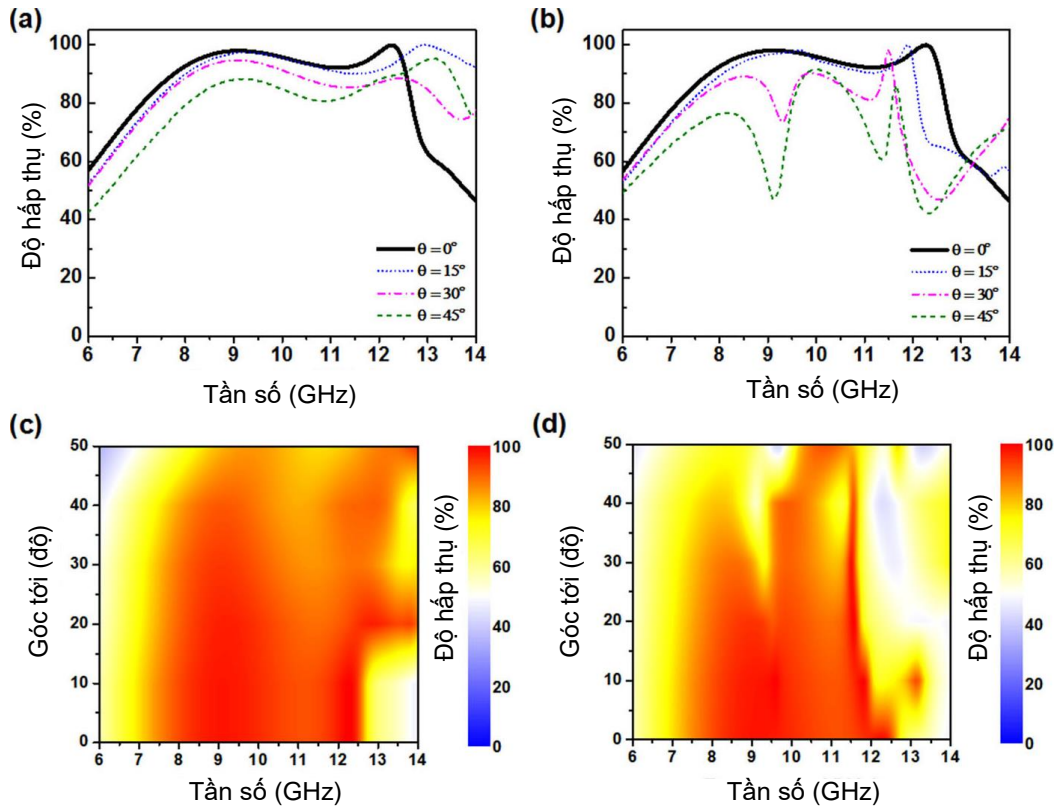
Hình 3.20 trình bày trở kháng vào chuẩn hóa (Z) của cấu trúc BMPA theo tính toán và theo mô phỏng. Trở kháng vào chuẩn hóa của BMPA có thể tính toán dựa trên lý thuyết nhiễu xạ trung bình. Có thể thấy trên Hình 3.20, kết quả tính toán phù hợp với kết quả mô phỏng. Ngoài ra, phần ảo và phần thực của trở kháng đầu vào chuẩn hóa là gần bằng 0 và bằng 1, tương ứng tại các tần số cộng hưởng, xác nhận sự phối hợp trở kháng tốt giữa cấu trúc BMPA và không gian tự do.



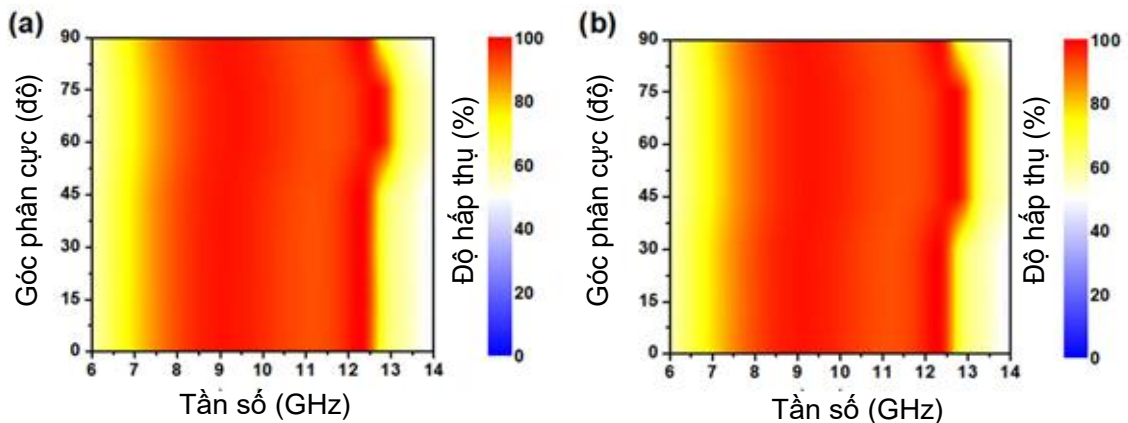
Hình 3.20. Trở kháng vào chuẩn hóa theo mô phỏng và tính toán [109]

Tiến hành khảo sát ảnh hưởng của góc tới đến độ hấp thụ của BMPA cho phân cực TE và TM. Kết quả được trình bày trên Hình 3.21 cho thấy phổ của BMPA phụ thuộc vào góc tới. Với phân cực TE, độ hấp thụ giảm nhẹ với sự tăng lên của góc tới từ 0 đến 45°. Tại góc tới 45°, độ hấp thụ cao hơn 80% trong dải tần 8,0-12,6 GHz.

Tuy nhiên, độ hấp thụ giảm đáng kể với phân cực TM, do độ lớn của thành phần điện trường tác dụng lên bề mặt cấu trúc bị giảm. Nhìn chung, độ hấp thụ duy trì trên 70% từ 6,8 đến 11,8 GHz với góc tới chỉ đạt từ 0 đến 30° cho cả phân cực TE và TM. Hình 3.22 cho thấy phổ phân cực của BMPA hầu như không thay đổi với các góc phân cực khác nhau cho cả phân cực TE và TM khi góc tới vuông góc với bề mặt mẫu. Điều này chỉ ra rằng BMPA đề xuất có đặc tính không nhạy với phân cực do đặc tính đối xứng của cấu trúc.

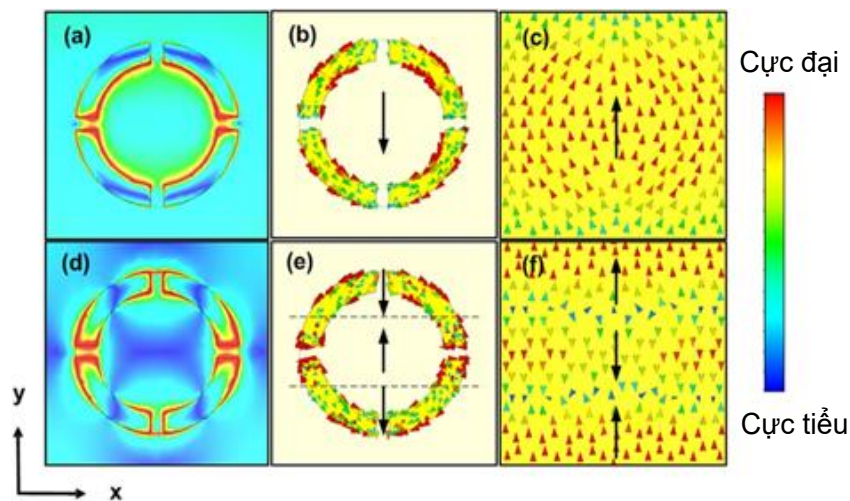


Hình 3.21. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc tới khác nhau (a) và (c) cho phân cực TE và (b) và (d) cho phân cực TM [109]



Hình 3.22. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc phân cực khác nhau (a) cho phân cực TE và (b) cho phân cực TM [109]

Để hiểu rõ cơ chế hấp thụ, có thể căn cứ vào phân bố điện trường và dòng điện cảm ứng trên bề mặt của BMPA ở phân cực TE tại các tần số cộng hưởng. Phân bố điện trường và từ trường của BMPA có thể dễ dàng thu được từ mô phỏng trong khi đây là bài toán khó trong thực nghiệm. Hình 3.23 cho thấy tại tần số cộng hưởng 9,1 GHz, hấp thụ cộng hưởng chủ yếu được tạo ra tại bờ trong của cộng hưởng vòng có rãnh. Điều này cũng có nghĩa là phân bố điện trường trên các phần tử điện trở có thể đóng góp vào tính chất hấp thụ băng rộng [15],[108]. Tại tần số 9,1 GHz dòng bề mặt ở mặt trên và mặt dưới của cấu trúc là đối song như trên hình 3.23 (b) và (c). Do đó, tần số cộng hưởng tạo ra là cộng hưởng từ. Tại tần số 12,2 GHz dòng bề mặt ở mặt trên và mặt dưới chia thành ba vùng và đối song, như thể hiện trên Hình 3.23 (e) và (f), do đó cộng hưởng tạo ra là cộng hưởng từ bậc 3.



Hình 3.23. [Từ trái sang phải] Phân bố điện trường, dòng điện cảm ứng ở mặt trên và mặt dưới của BIPA tại các tần số cộng hưởng: (a)-(c) 9,1 GHz và (d)-(f) 12,2 GHz [109]

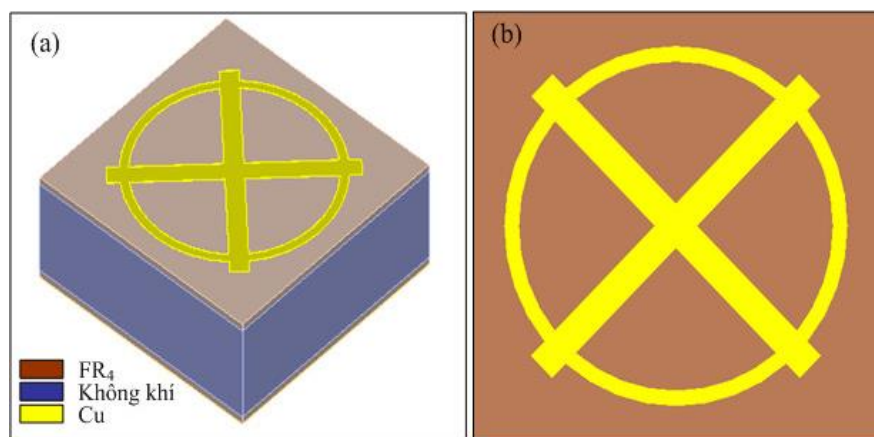
Cuối cùng, độ hấp thụ của BIPA được đề xuất được so sánh với các BIPA được báo cáo khác dựa trên phần tử điện trở. Bảng 3.1 trình bày các đặc điểm của các BIPA về số lượng lớp, số phần tử điện trở, dải tần cộng hưởng, băng thông tương đối trên mỗi phần tử điện trở và độ dày. Từ đó, có thể thấy BIPA được đề xuất có cấu trúc đơn giản và mỏng ($0,109\lambda$ tại tần số hấp thụ) với băng thông tương đối cao trên mỗi phần tử điện trở. Do đó, BIPA được đề xuất phù hợp cho các ứng dụng băng X với yêu cầu độ hấp thụ cao, cấu trúc đơn giản và mỏng nhẹ.

Bảng 3.1. So sánh hiệu suất của BMPA đề xuất với các BMPA khác có tích hợp điện trở

| Tài liệu | Số tầng | Số phần tử điện trở /ô cơ sở | Băng thông (GHz) | RBW (%) | RBW/Số phần tử điện trở | Độ dày (mm) |
|---------------------|----------|------------------------------|------------------|-----------|-------------------------|---|
| [108] | 1 | 8 | 8,2-13,5 | 48,8 | 6,1 | 3,0 (0,102 λ) |
| [113] | 1 | 8 | 7,93-17,18 | 73,7 | 9,21 | 3,0 (0,126 λ) |
| [114] | 1 | 8 | 8-18 | 76,9 | 9,6 | 10 (0,433 λ) |
| [104] | 2 | 4 | 7,6-18,3 | 82,6 | 20,65 | 3,25 (0,14 λ) |
| [115] | 3 | 6 | 6,79-14,96 | 75,1 | 12,52 | 5,6 (0,203 λ) |
| [111] | 3 | 8 | 3-8 | 90,9 | 11,36 | 7,6 (0,139 λ) |
| [116] | 3 | 12 | 5,2-18 | 110,3 | 9,19 | 4,6 (0,178 λ) |
| BMPA đề xuất | 1 | 4 | 7,8-12,6 | 47 | 11,75 | 3.2 (0,109 λ) |

3.3. Thiết kế BMPA tích hợp các phần tử điện trở cho ứng dụng băng S và băng C, băng C và băng X

Trong phần này đặt ra yêu cầu thiết kế BMPA hoạt động ở băng tần S và băng tần C. Từ thiết kế vật liệu biến hóa chuyển đổi phân cực sóng điện từ hoạt động ở băng tần S và băng tần C [117], chúng tôi đề xuất điều chỉnh hình dạng bộ cộng hưởng thành hình bánh xe để thiết kế có tính đối xứng và có chức năng hấp thụ sóng điện từ như thể hiện trên Hình 3.24. Tuy nhiên, với cấu trúc hình bánh xe, thiết kế chỉ hấp thụ trong dải tần hẹp.

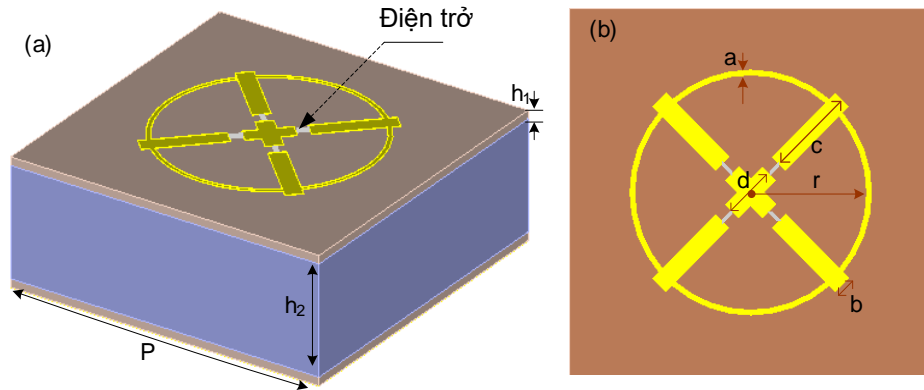


Hình 3.24. Cấu trúc MPA hình bánh xe

Để mở rộng dải tần hấp thụ, tích hợp thêm các điện trở tập trung nhằm tăng

trở kháng bề mặt và giảm hệ số Q . Mô hình 3D và mặt trên của ô cơ sở được cho trên hình (a) và (b) tương ứng.

Cấu trúc ô cơ sở cũng gồm ba lớp kim loại - điện môi - kim loại, tuy nhiên lớp điện môi ở giữa gồm một lớp không khí được chèn vào giữa hai lớp điện môi FR4. Lớp kim loại liền mạch ở phía dưới cùng đã chắn tia truyền qua, vì vậy khi có tia sóng điện từ chiếu tới độ hấp thụ phụ thuộc vào hệ số phản xạ. Chúng tôi tiến hành mô phỏng để thu được các thông số tối ưu như thể hiện trong bảng 3.2.

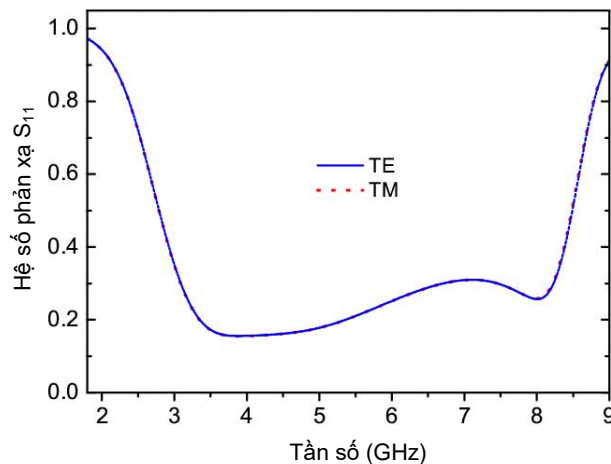


Hình 3.25. BMPA đề xuất cho băng S và băng C (a) mô hình 3D và (b) mặt trên của ô cơ sở

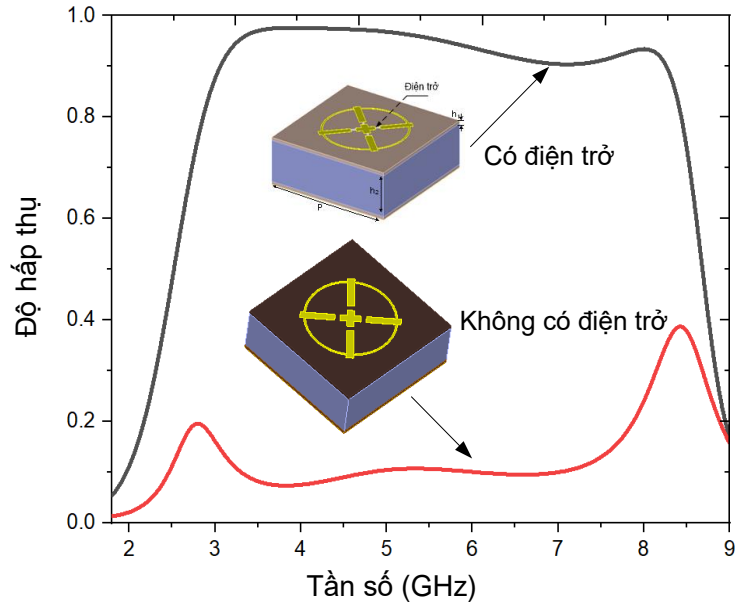
Hình 3.26 trình bày hệ số phản xạ của cấu trúc đề xuất trong trường hợp góc tới vuông góc với bề mặt cấu trúc, cho thấy hệ số phản xạ thấp hơn 0,3 trong khoảng tần số từ 3 đến 8,3 GHz. Vì vậy, độ hấp thụ đạt trên 90% trong khoảng tần số từ 3 đến 8,3 GHz, bao phủ một phần băng tần S và hoàn toàn băng tần C như thể hiện trên Hình 3.27.

Bảng 3.2. Các thông số tối ưu của BMPA

| Thông số | P | h_2 | h_1 | a | b | c | d | r |
|-----------------|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Kích thước (mm) | 31 | 10,5 | 0,8 | 0,4 | 1,6 | 7,8 | 4,0 | 9,9 |

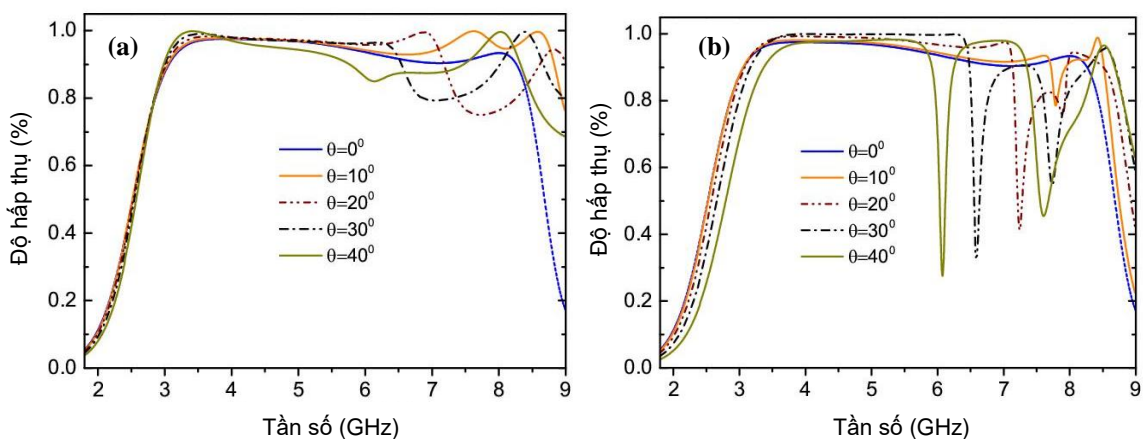


Hình 3.26. Hệ số phản xạ S_{11} của BMPA cho phân cực TE và phân cực TM



Hình 3.27. Độ hấp thụ của BMPA khi tích hợp điện trở và không tích hợp điện trở

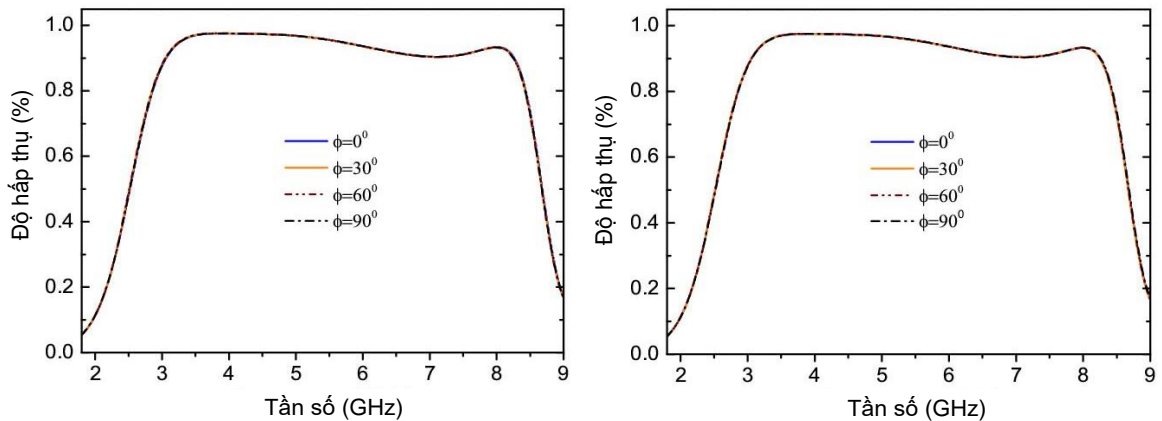
Phổ hấp thụ của BMPA trong trường hợp phân cực TE và phân cực TM là trùng nhau khi tia tới vuông góc với bề mặt cấu trúc hay $\theta = 0^\circ$. Mặt khác, có thể thấy rằng MPA không tích hợp phần tử điện trở có 2 đỉnh hấp thụ tại tần số 2,8 GHz và 8,4 GHz với độ hấp thụ tương ứng là 20% và 39,9%. Cấu trúc BMPA sử dụng bốn phần tử điện trở trong một ô cơ sở có độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số rộng từ 3 GHz đến 8,3 GHz cho thấy vai trò của phần tử điện trở trong việc nâng cao độ hấp thụ của BMPA.



Hình 3.28. Độ hấp thụ phụ thuộc góc tới cho (a) phân cực TE và (b) phân cực TM

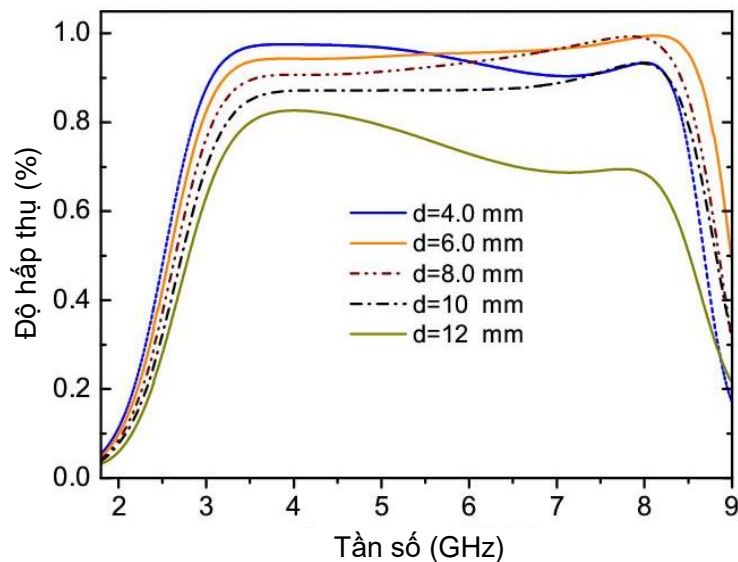
Ảnh hưởng của góc tới đến phổ hấp thụ của BMPA được khảo sát và cho kết quả trên Hình 3.28. Đối với phân cực TE, độ hấp thụ duy trì xấp xỉ 80% cho góc tới 40° . Đối với phân cực TM, phổ hấp thụ chia thành nhiều dải riêng biệt khi góc tới

tăng. Thiết kế là hoàn toàn đối xứng, vì vậy không bị ảnh hưởng bởi phân cực như thể hiện trên Hình 3.29.



Hình 3.29. Ảnh hưởng của góc phân cực đến độ hấp thụ của BMPA

Dịch chuyển vị trí đặt bốn điện trở dọc theo thanh ngang, ta có phổ độ hấp thụ thay đổi như trên Hình 3.30. Kết quả cho thấy vị trí đặt điện trở ảnh hưởng đáng kể tới độ hấp thụ của BMPA đề xuất. Vị trí tối ưu được chọn tương ứng với $d=4,0$ mm.

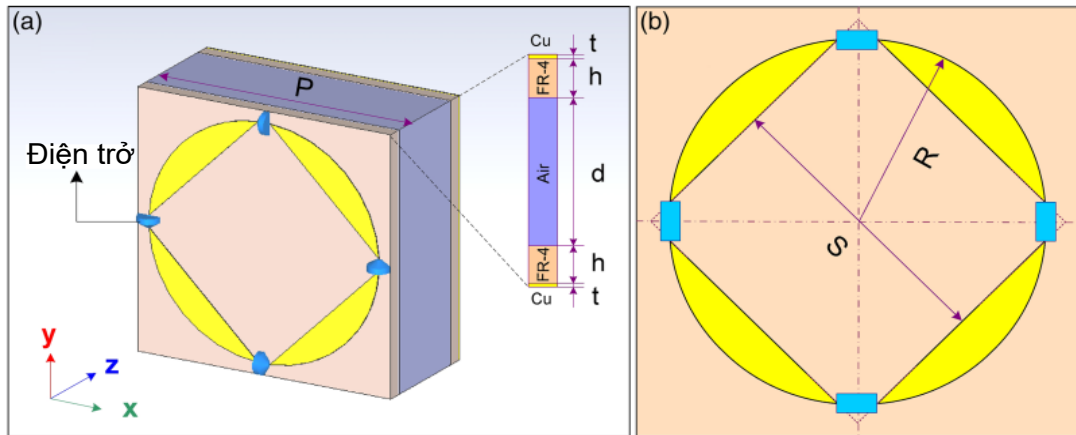


Hình 3.30. Độ hấp thụ của BMPA khi thay đổi vị trí đặt điện trở

Cho ứng dụng băng C và băng X, chúng tôi tiếp tục đề xuất cấu trúc 2D với các phần tử điện trở, chèn thêm một lớp điện môi phụ trợ là không khí giữa hai lớp điện môi FR₄, được mô tả trên Hình 3.31(a). Thiết kế BMPA trong phần này sử dụng cấu trúc “gradient” nhằm cải thiện sự ảnh hưởng của góc tới đến hiệu suất hấp thụ.

Trên Hình 3.31(b), tầng trên của ô cơ sở gồm bốn mảnh hình cung được tạo bởi một đĩa tròn có bán kính $R=6,4$ mm khắc bởi một hình vuông có cạnh $S=9,2$ mm.

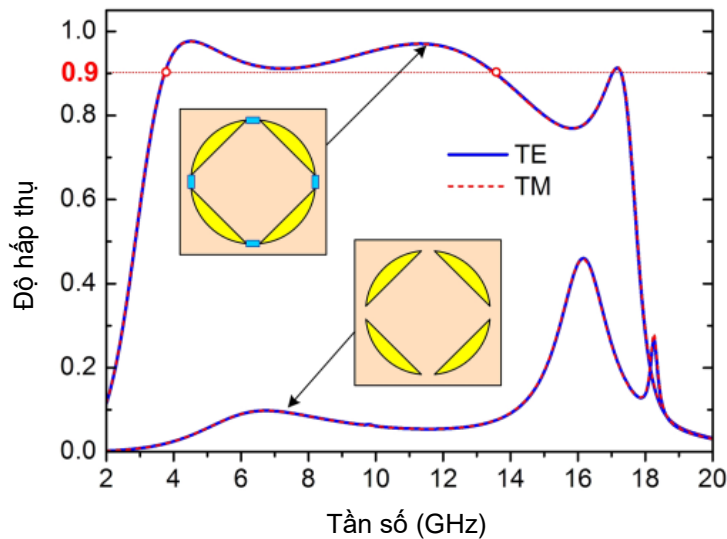
Ngoài ra, bốn phần tử điện trở có giá trị 180Ω nối các sector nhằm mở rộng băng thông hấp thụ của BMPA. Các kích thước tối ưu của BMPA được cho trên Bảng 3.3.



Hình 3.31. BMPA có các phần tử điện trở tập trung, với lớp không khí được chèn vào giữa hai lớp điện môi FR₄ (a) mô hình 3D và (b) mặt trên của ô cơ sở [118]

Bảng 3.3. Các thông số tối ưu của ô cơ sở của BMPA cho ứng dụng băng C và X

| Thông số | P | t | h | d | R | S |
|--------------|------|-------|-----|-----|-----|-----|
| Giá trị (mm) | 13,6 | 0,035 | 0,8 | 4,8 | 6,4 | 9,2 |

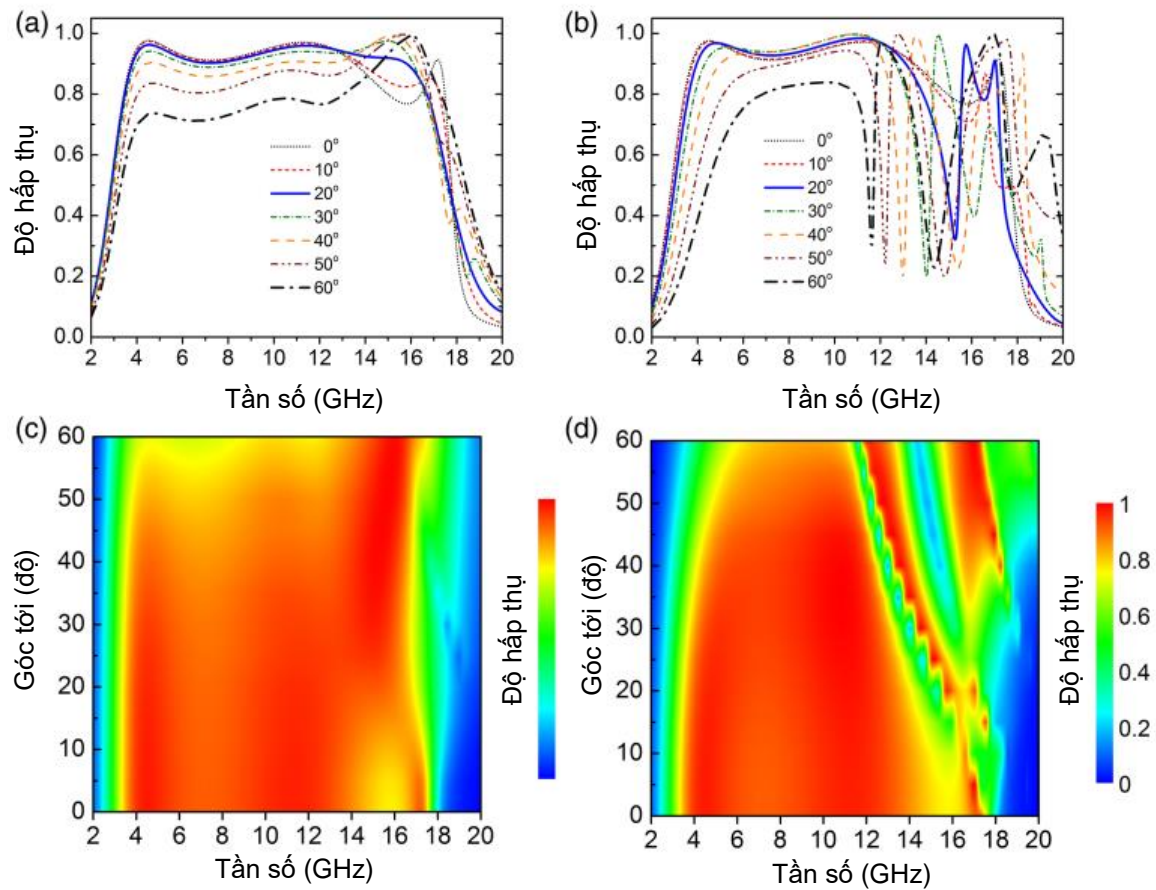


Hình 3.32. Độ hấp thụ của MPA trường hợp có và không có phần tử điện trở [118]

Hình 3.32 trình bày phổ hấp thụ theo mô phỏng của BMPA đề xuất ở phân cực TE và TM trong trường hợp góc tới vuông góc với bề mặt cấu trúc. BMPA tích hợp bốn phần tử điện trở cho độ hấp thụ cao trên 90% trong dải tần số rất rộng từ 3,7 đến 13,6 GHz cho cả phân cực TE và TM, tương ứng với băng thông tương đối RBW bằng 114,5%.

Ngoài ra, để đánh giá vai trò của các phần tử điện trở vào đặc tính băng rộng

của BMPA, chúng tôi cũng mô phỏng phổ hấp thụ khi loại bỏ các phần tử điện trở kết nối giữa các sectors. Như mô tả trên Hình 3.32, cấu trúc BMPA khi loại bỏ các phần tử điện trở cho thấy độ hấp thụ rất thấp trong dải tần từ 2 đến 20 GHz. Rõ ràng là các phần tử điện trở trên bề mặt *FSS* của BMPA đóng vai trò quan trọng nhằm thu được phối hợp trở kháng trong băng tần rộng giữa BMPA và không gian tự do, dẫn tới sự cải thiện tỷ lệ hấp thụ của BMPA. BMPA tích hợp các phần tử điện trở có hai đỉnh cộng hưởng phân biệt tại tần số 4,5 GHz và 11,4 GHz và bao phủ hoàn toàn băng tần C và băng tần X từ 4 đến 12 GHz.



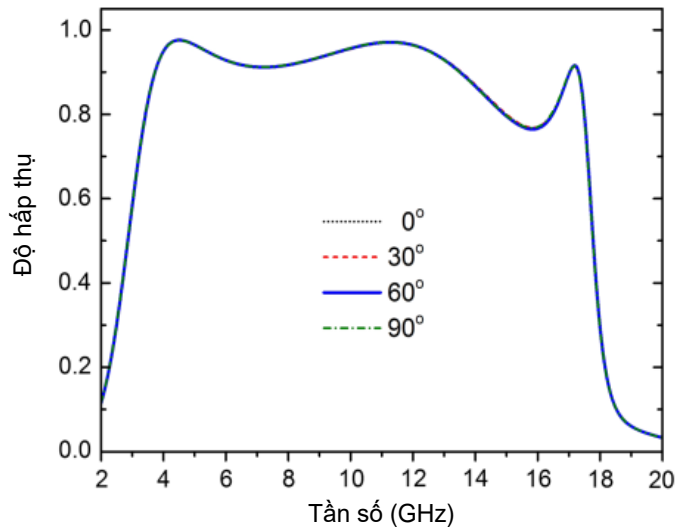
Hình 3.33. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc tới khác nhau, (a) và (c) cho phân cực TE và (b) và (d) cho phân cực TM [118]

Các kết quả mô phỏng cho trường hợp góc tới khác nhau cho phân cực TE và TM được trình bày trên Hình 3.33. Với góc tới lên đến 20°, độ hấp thụ duy trì trên 90% cho cả phân cực TE và TM trong khi độ rộng băng thông giảm nhẹ. Với phân cực TM, do hình chiếu của vector E lên phương song song với bề mặt cấu trúc giảm khi góc tới θ tăng nên cường độ điện trường giảm dẫn tới độ hấp thụ giảm theo góc tới. Giải thích này là chung cho cả hiện tượng giảm độ hấp thụ theo góc tới trong

trường hợp TE do hình chiếu theo phương song song bề mặt mẫu của từ trường giảm.

Cho trường hợp góc tới 40° , độ hấp thụ duy trì trên 85% cho toàn băng C (4-8GHz) và băng X (8-12GHz). Khi tiếp tục tăng góc tới lên 60° , cường độ hấp thụ suy giảm nhưng vẫn duy trì trên 70% trong toàn bộ băng tần hoạt động. Hình 3.33 (c)(d) cho thấy ảnh hưởng của góc tới đến độ hấp thụ của BMPA cho phân cực TE và TM, tương ứng. Các kết quả này xác nhận rằng mức hấp thụ cao vẫn duy trì trong góc tới rộng, là đặc tính hấp dẫn cho các ứng dụng BMPA.

Tính chất hoạt động không phụ thuộc phân cực của BMPA cũng được khảo sát như mô tả trên Hình 3.34. Phổ hấp thụ của BMPA trong trường hợp góc tới vuông góc đối với phân cực TE hầu như không thay đổi tại các góc phân cực khác nhau. Điều này chứng tỏ BMPA đề xuất có tính chất không nhạy với phân cực do đặc tính đối xứng của cấu trúc.

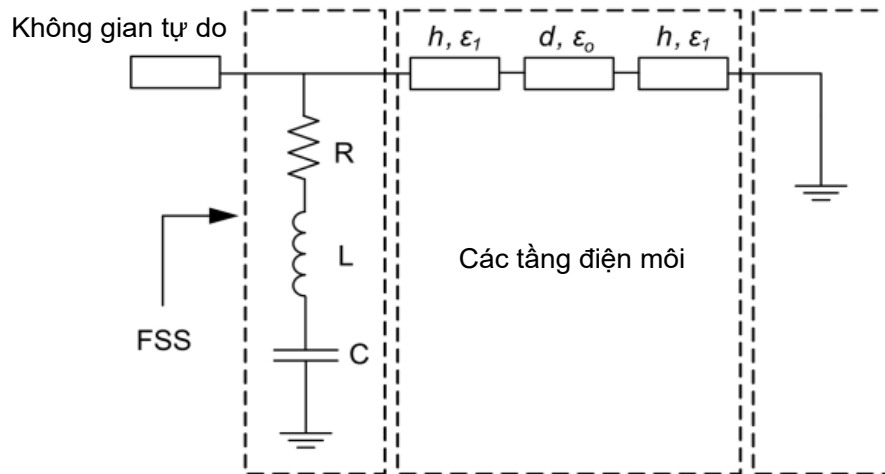


Hình 3.34. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc phân cực khác nhau cho phân cực TE trong trường hợp góc tới vuông góc [118]

Để làm rõ đóng góp của lớp không khí vào đặc tính băng rộng của BMPA, chúng tôi nghiên cứu tính chất hấp thụ của BMPA khi độ dày của lớp không khí thay đổi. Ngoài ra, vai trò của lớp không khí trong thiết kế BMPA cũng được chứng minh bằng phương pháp mạch tương đương.

Mạch tương đương của BMPA gồm một mạch *RLC* nối tiếp, mắc song song với đường truyền ngắn mạch như mô tả trên Hình 3.35. Trong đó, mạch *RLC* nối tiếp được mô hình hóa từ cấu trúc cộng hưởng ở bề mặt chọn lựa tần số FSS và đường truyền ngắn mạch cho cấu trúc điện môi đa tầng và tấm kim loại liên tục ở lớp dưới cùng. Giá trị *L* và *C* được xác định bởi hình dạng của FSS [119]. Đường truyền ngắn

mạch có độ dày h , d , h ký hiệu là tầng điện môi FR₄, lớp không khí và tầng điện môi FR₄.

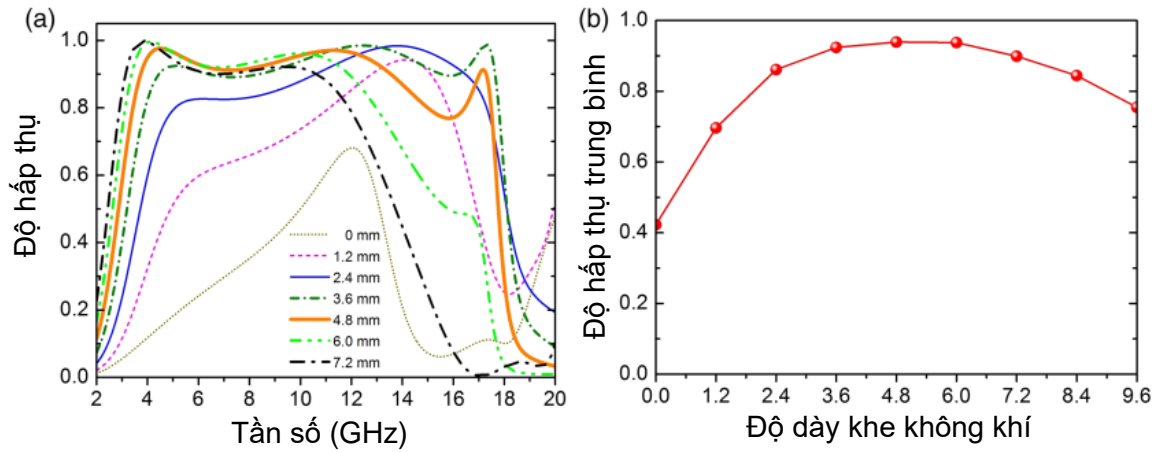


Hình 3.35. Mô hình mạch cho thiết kế BIPA với nhiều lớp điện môi [118]

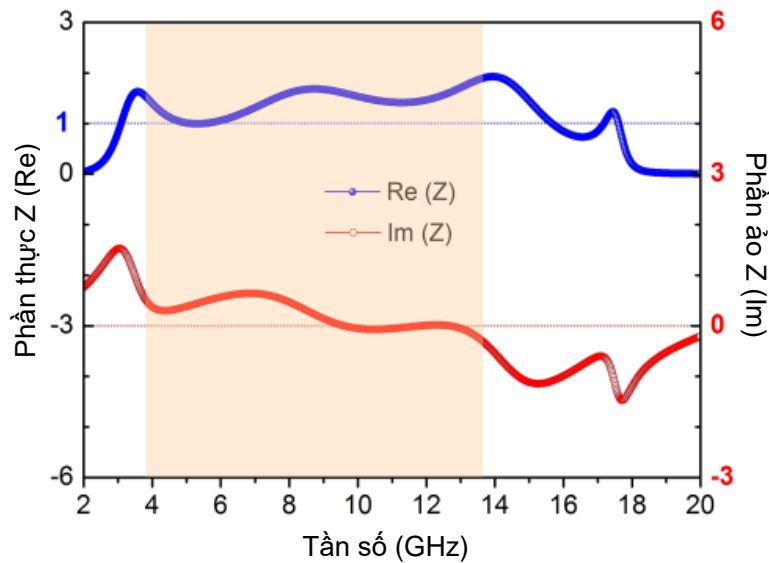
Cộng hưởng được tạo ra khi phần ảo của trở kháng đầu vào bằng không. Độ dày của lớp FR₄ được cố định là 0,8 mm nhằm thu được thiết kế có trọng lượng nhẹ. Ngoài ra, kích thước và hình dạng của FSS cũng đã được tối ưu và cố định nhằm xác định L, C . Do đó, độ dày của lớp không khí có thể được sử dụng để điều khiển các tần số cộng hưởng, trong khi phần thực của trở kháng đầu vào được đóng góp bởi các chip phân tử điện trở tác động đến điều kiện phối hợp trở kháng xung quanh các cộng hưởng. Với giá trị phần tử điện trở tập trung được cố định là $180\ \Omega$, chúng tôi tiến hành khảo sát độ hấp thụ của BIPA khi thay đổi độ dày lớp không khí. Kết quả được cho trên Hình 3.36, cho thấy độ dày tối ưu của lớp không khí là 4,8 mm, tức là tổng độ dày của các lớp điện môi là 6,4 mm, tương đương với độ dài $\frac{1}{4}$ bước sóng tại tần số 9,2 GHz.

Cơ chế hấp thụ của BIPA với độ dày lớp không khí 4,8 mm được phân tích thông qua tính toán trở kháng đầu vào, trường điện và khảo sát phân bố dòng bề mặt. Khi phối hợp trở kháng giữa cấu trúc hấp thụ và không gian tự do xuất hiện, hệ số phản xạ bằng không. Do đó, hấp thụ gần tuyệt đối có thể đạt được khi điều kiện phối hợp trở kháng xảy ra. Hình 3.37 mô tả trở kháng đầu vào chuẩn hóa của BIPA, tính toán dựa trên các tham số tán xạ. Thành phần thực và ảo của trở kháng chuẩn hóa tương ứng gần giá trị 1 và 0, tại các đỉnh cộng hưởng. Điều này chứng tỏ không có sự phản xạ giữa BIPA và không khí xung quanh các tần số này. Mặt khác, phổ hấp thụ được chồng chập dẫn tới thiết kế đạt được hấp thụ băng rộng trong dải tần số từ

3,7 đến 13,6 GHz.



Hình 3.36. (a) Độ hấp thụ và (b) độ hấp thụ trung bình của BMPA với sự thay đổi của độ dày lớp không khí [118]

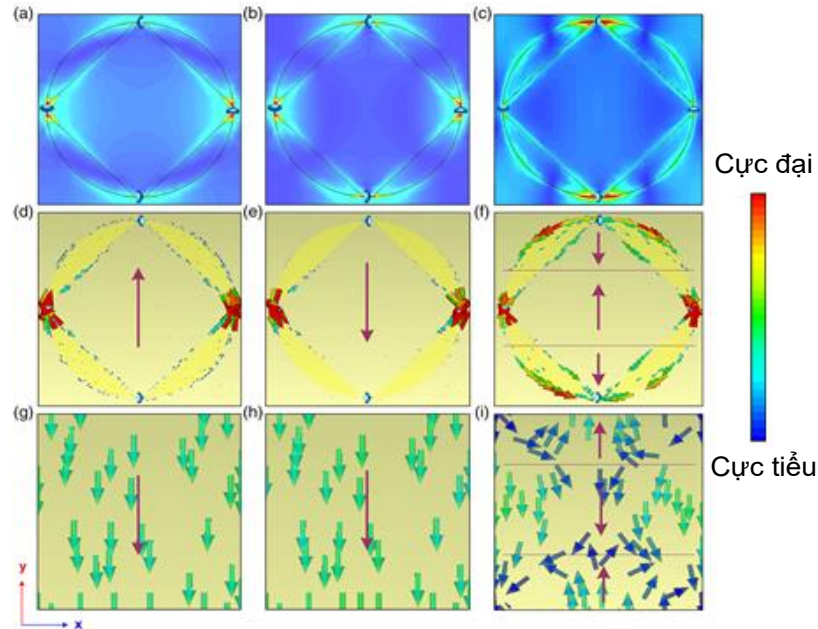


Hình 3.37. Phần thực và phần ảo của trở kháng vào chuẩn hóa của BMPA [118]

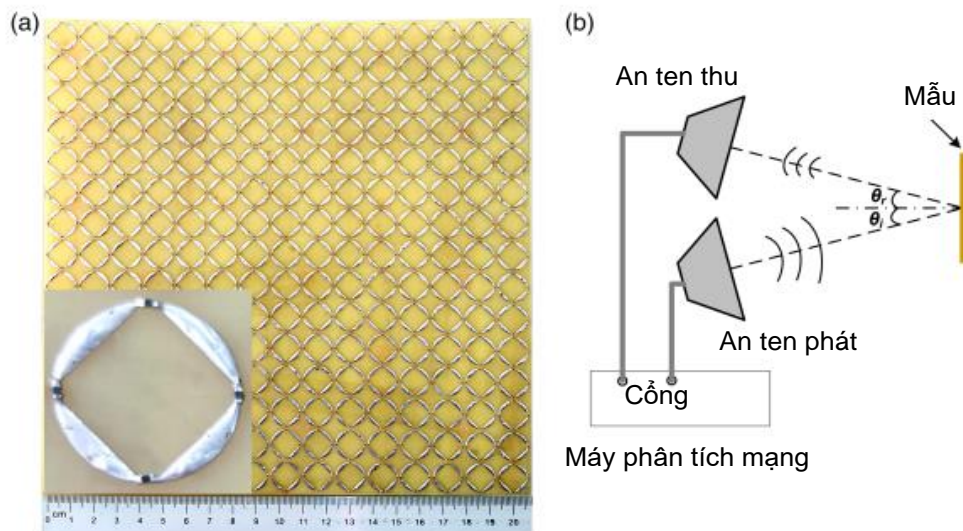
Phân bố điện trường tại các tần số cộng hưởng 4,5, 11,4 và 17,2 GHz được khảo sát và cho kết quả trên Hình 3.38. Theo đó, điện trường tập trung tại góc phía trong ở các khe cắt. Dòng điện cảm ứng ở bề mặt trên và bề mặt dưới của BMPA là song song và ngược chiều tại tần số 4,5 GHz, chỉ ra rằng tần số cộng hưởng này xuất phát từ cộng hưởng từ. Ngược lại, tại tần số 11,4 GHz, dòng bề mặt ở hai tầng này là song song cùng chiều, nên nó là cộng hưởng điện. Tại tần số 17,2 GHz, cộng hưởng gây ra bởi cộng hưởng từ bậc 3 [120].

Để đánh giá các kết quả mô phỏng, mẫu BMPA được chế tạo sử dụng phương pháp quang khắc. Các thông số cấu trúc mẫu được cố định theo thông số tối ưu của mô phỏng. Mẫu chế tạo trên vật liệu FR₄ phủ đồng hai mặt. Phần tử điện trở có số

hiệu 0402 và giá trị phần tử điện trở 180Ω với dung sai 1%. Mẫu gồm 15×15 ô cơ sở với 900 phần tử điện trở dán và kích thước tổng cộng là $20,4 \times 20,4 \text{ cm}^2$. Đây là kích thước phù hợp để mẫu nhận được đầy đủ búp sóng chính từ ăng-ten phát. Ảnh mẫu cho trên Hình 3.39(a) và thiết lập phép đo hệ số phản xạ của mẫu được mô tả trên Hình 3.39(b).



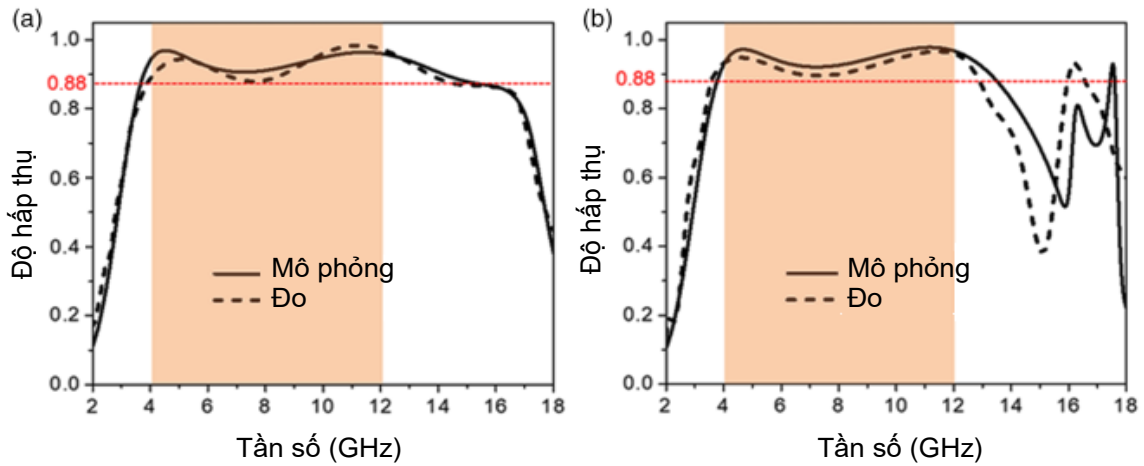
Hình 3.38. Phân bố dòng điện (*a, b, c*) và dòng điện cảm ứng ở mặt trên (*d, e, f*) và mặt dưới (*g, h, i*) của BPA tại các tần số 4,5 GHz, 11,4 GHz và 17,2 GHz [118]



Hình 3.39. (a) Mẫu chế tạo và (b) thiết lập đo hệ số phản xạ [118]

Một máy phân tích mạng số hiệu ZNB20 cùng với hai ăng-ten phân cực tuyến tính đóng vai trò như máy thu và máy phát được sử dụng để đo hệ số phản xạ. Khoảng cách từ ăng-ten tới mẫu khoảng 35 cm. Dải đo được thiết lập từ 2 đến 18 GHz.

Hình 3.40 so sánh kết quả mô phỏng và đo độ hấp thụ của BMPA trong trường hợp góc tới 20° cho cả phân cực TE và TM. Lưu ý rằng thiết lập đo cho góc tới tối thiểu là 20° do hai ăng ten không thể đặt quá gần nhau.



Hình 3.40. Kết quả đo và kết quả mô phỏng độ hấp thụ của BMPA cho (a) phân cực TE và (b) phân cực TM [118]

Có thể nhận thấy sự tương đồng tốt giữa kết quả đo và kết quả mô phỏng, ngoại trừ việc độ rộng băng thông hấp thụ trong mẫu chế tạo là hẹp hơn khi phân cực TM. Các kết quả đo xác nhận rằng độ rộng băng thông với độ hấp thụ lớn hơn 88% của BMPA bao phủ hoàn toàn băng tần C và băng tần X cho cả phân cực TE và TM. Cường độ hấp thụ đo được thấp hơn mô phỏng do sự không hoàn hảo trong chế tạo và sai số trong đo lường thực nghiệm.

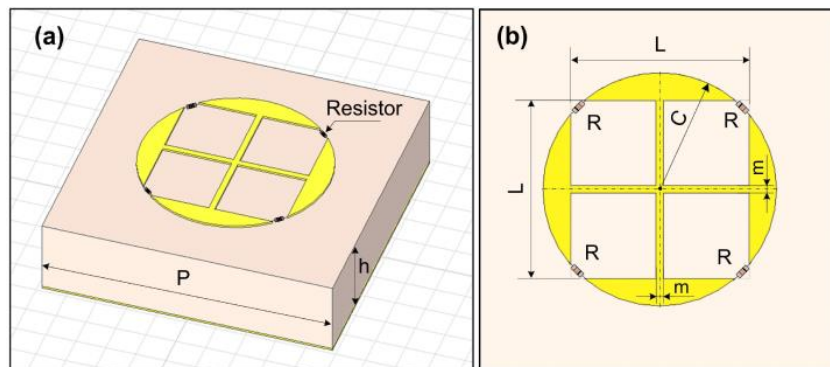
Bảng 3.4. So sánh độ hấp thụ của BMPA đề xuất với các BMPA khác [118]

| Tài liệu | Số lớp | RBW | RBW/số phần tử điện trở | Độ dày (mm) | Độ dày không gồm khe không khí | Vật liệu điện môi |
|--------------------|-----------------|--------------|-------------------------|---|--|--------------------------------------|
| [121] | 5-7 | 33,3 | Không báo cáo | 6,76 (0,113 λ) | 6,76 (0,113 λ) | PVB+glass |
| [109] | 7,8-12,6 | 47 | 11,75 | 3,2 (0,083 λ) | 3,2 (0,083 λ) | FR ₄ |
| [122] | 4-12 | 100 | Không báo cáo | 5,2 (0,069 λ) | 3,7 (0,049 λ) | FR ₄ +Đệm không khí |
| [115] | 6,79-14,96 | 75,1 | 12,5 | 5,6 (0,127 λ) | 1,6 (0,036 λ) | FR ₄ +Đệm không khí |
| [104] | 7,6-18,3 | 82,6 | 20,7 | 3,25 (0,082 λ) | 3,25 (0,082 λ) | Polymide +rubber |
| MPA đề xuất | 3,7-13,6 | 114,5 | 28,6 | 6,4 (0,079 λ) | 1,6 (0,02 λ) | FR₄+ Đệm không khí |

Để đánh giá hiệu quả của thiết kế, chúng tôi so sánh BMPA đề xuất với các công bố khác sử dụng đệm không khí và không sử dụng lớp đệm không khí, như liệt kê trong Bảng 3.4. Có thể thấy rằng BMPA đề xuất có RBW lớn nhất trong số các BMPA được báo cáo. Mặc dù không phải là thiết kế có độ dày nhỏ nhất nhưng BMPA đề xuất có tỷ số RBW trên số phần tử điện trở là cao nhất, chứng tỏ nó là thiết kế có hiệu quả nhất với việc tích hợp phần tử điện trở để mở rộng băng thông hấp thụ. Mặt khác, việc sử dụng đệm không khí là khá phổ biến trong các nghiên cứu BMPA, vì khi làm việc ở dải tần thấp kích thước và chiều dày của BMPA tăng lên. Vì vậy, để dễ điều khiển các tần số cộng hưởng, đồng thời giảm trọng lượng của mẫu, và có thể chèn lớp không khí vào giữa hai lớp điện môi, như trình bày trong một số các nghiên cứu [115,122].

3.4. Thiết kế BMPA tích hợp phần tử điện trở cho ứng dụng băng X và băng Ku

Thiết kế đề xuất trong mục 3.2 cho ứng dụng băng X có băng thông tương đối chỉ đạt 47% và khá nhạy với góc tới [109]. Cấu trúc bề mặt SRR riêng lẻ là lí do dẫn tới BMPA nhạy với góc tới. Ngoài ra, các thiết kế BMPA gần đây thường sử dụng cấu trúc bề mặt biến đổi nhằm cải thiện sự ảnh hưởng của góc tới đến hiệu suất hấp thụ. Vì vậy, trong mục này chúng tôi đề xuất một thiết kế của BMPA có cấu trúc bề mặt biến đổi, cho ứng dụng băng X và băng Ku với hệ số RBW cao và ít nhạy với góc tới [123].



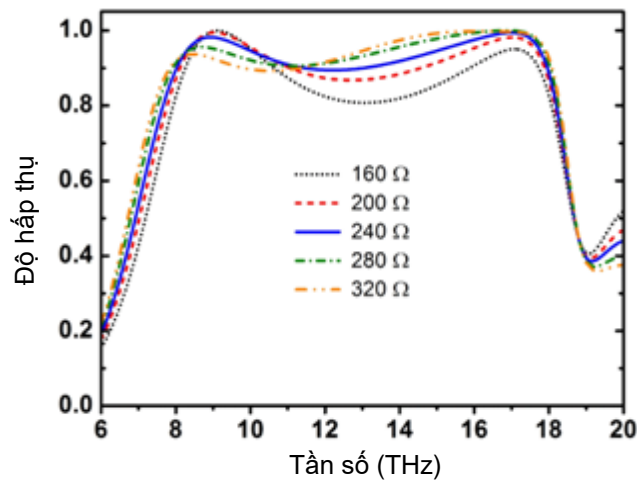
Hình 3.41. Cấu trúc BMPA (a) Hình ảnh 3D và (b) mặt trên của ô cơ sở [123]

Từ cấu trúc cộng hưởng ban đầu có dạng đĩa tròn, khắc mặt trên của cấu trúc với bốn hình vuông và nối các rãnh bằng các phần tử điện trở. Ô cơ sở của BMPA gồm cộng hưởng kim loại với bốn phần tử điện trở và một lớp kim loại liên tục ở phía dưới, ngăn cách bởi lớp điện môi FR₄ với độ dày 2,5 mm như trên Hình 3.41.

Thực hiện khảo sát ảnh hưởng của tham số cấu trúc tới độ hấp thụ của BMPA, với h thay đổi trong dải từ 1,9 đến 3,1 mm, P thay đổi trong dải từ 8,7-10,7 mm, C thay đổi trong khoảng từ 2,75 đến 3,35 mm, L trong dải từ 2,3 đến 2,6 mm, m trong dải từ 0,1 đến 0,5 mm, và R thay đổi trong dải từ 160 đến 320 Ω . Dựa trên đánh giá kết quả mô phỏng nhằm đạt được độ hấp thụ cao nhất và băng thông hấp thụ rộng nhất, các thông số tối ưu của cấu trúc MPA được cho trên Bảng 3.5.

Bảng 3.5. Các thông số kích thước của cấu trúc BMPA

| Thông số | P | h | L | C | m | R |
|----------|--------|--------|--------|---------|--------|--------------|
| Giá trị | 9,7 mm | 2,5 mm | 4,8 mm | 3,15 mm | 0,2 mm | 240 Ω |

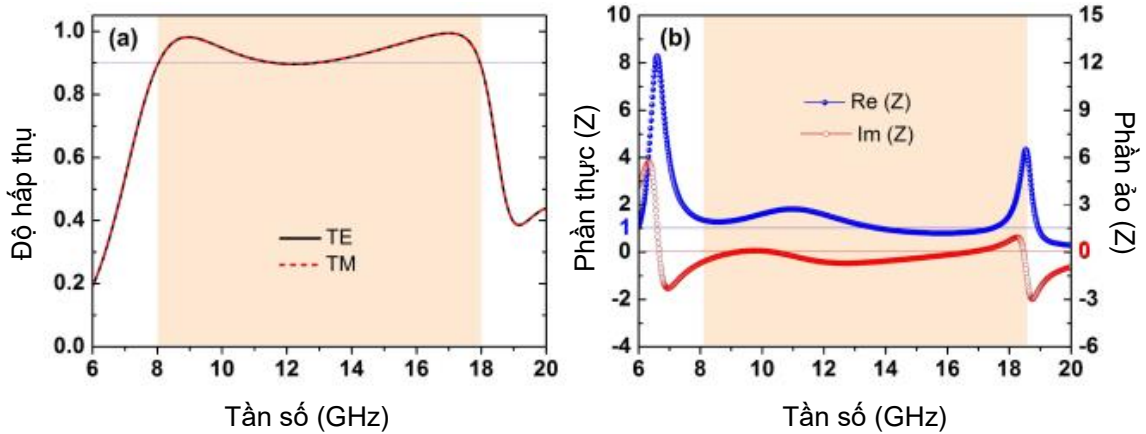


Hình 3.42. Độ hấp thụ của BMPA thay đổi theo giá trị điện trở [123]

Với giá trị R thay đổi từ 160 đến 320 Ω phổ hấp thụ thay đổi như thể hiện trên Hình 3.42. Điều này là do cộng hưởng được tạo ra khi phần ảo của trở kháng đầu vào chuẩn hóa bằng không và phần thực của trở kháng đầu vào chuẩn hóa bằng 1. Phần ảo của trở kháng đầu vào chuẩn hóa phụ thuộc vào tham số điện cảm và điện dung xác định bởi hình dạng của bộ cộng hưởng kim loại và không phụ thuộc vào giá trị phần tử điện trở R . Tuy nhiên, tham số R xác định trở kháng đầu vào cấu trúc, dẫn tới khi R thay đổi thì độ hấp thụ của BMPA thay đổi như thể hiện trên Hình 3.42. Độ hấp thụ đạt trên 90% trong toàn bộ dải tần số từ 8-18 GHz khi R thay đổi từ 240 đến 280 Ω . Do đó, trong thiết kế này R được lựa chọn là 240 Ω để thu được đỉnh cộng hưởng mạnh nhất.

Hình 3.43(a) cho thấy phổ hấp thụ của BMPA đề xuất cho phân cực (TE) và phân cực (TM). Theo đó, độ hấp thụ đạt trên 90% trong dải tần số rộng từ 8-18 GHz

bao phủ hoàn toàn băng X và băng Ku. Ngoài ra, hai đỉnh hấp thụ phân biệt được tìm thấy tại 8,9 GHz và 17,1 GHz với độ hấp thụ tương ứng là 98,2 % và 99,4 % tương ứng. Độ rộng băng thông tương đối là 76,92% chỉ ra rằng BMPA đạt được tính chất hấp thụ băng rộng trong dải tần số khảo sát.

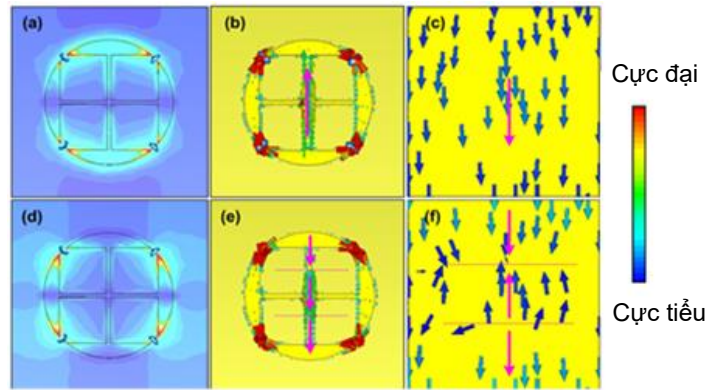


Hình 3.43. (a) Độ hấp thụ của BMPA và (b) trở kháng đầu vào chuẩn hóa [123]

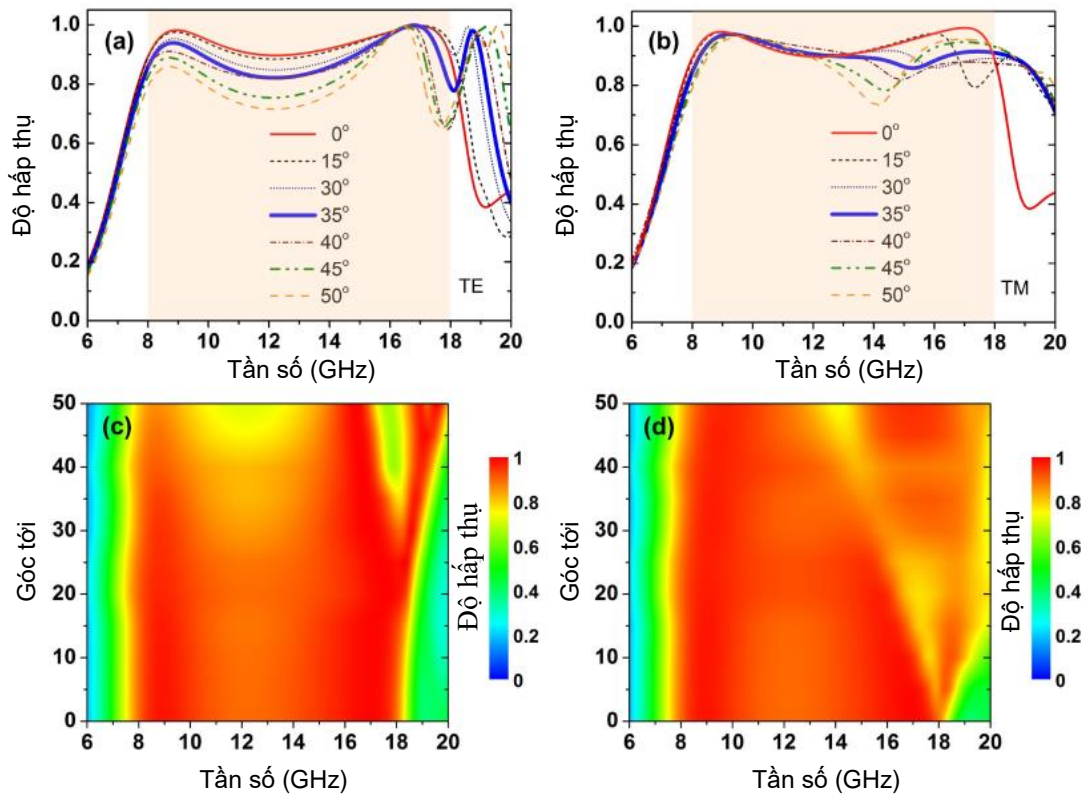
Cơ chế hấp thụ của BMPA có thể được giải thích bởi sự phối hợp trở kháng giữa cấu trúc BMPA và không gian tự do. Trở kháng chuẩn hóa của BMPA đề xuất được cho trên Hình 3.43(b), cho thấy phần thực xấp xỉ giá trị 1 và phần ảo xấp xỉ giá trị 0 xung quanh hai tần số cộng hưởng, xác nhận không có sóng điện từ phản xạ ngược trở lại môi trường khi truyền đến cấu trúc BMPA. Phổ hấp thụ dải rộng đạt được là sự kết hợp đồng thời giữa sự phối hợp trở kháng của cấu trúc với môi trường xung quanh và sự chồng chập của hai tần số cộng hưởng.

Để giải thích cơ chế vật lý của cấu trúc, chúng tôi tiến hành mô phỏng phân bố dòng điện cảm ứng bề mặt của BMPA tại các tần số cộng hưởng 8,9 và 17,1 GHz trong mặt phẳng XOY, như trình bày trên hình 3.44. Như trên hình 3.44(a) và 3.44(d) điện trường tập trung tại một số khu vực của BMPA tương ứng với một tần số cụ thể. Tại tần số cộng hưởng 8,9 GHz, điện trường tập trung xung quanh khe cắt và ở thanh ngang của cấu trúc. Mặt khác, dòng cảm ứng bề mặt ở tầng kim loại phía trên là ngược chiều với dòng bề mặt ở lớp kim loại phía dưới, chứng tỏ rằng cộng hưởng từ được tạo ra. Tại tần số 17,1 GHz, phân bố điện trường tập trung chủ yếu tại rãnh và thanh dọc của cấu trúc cộng hưởng. Dòng điện cảm ứng ở mặt dưới của cấu trúc chia thành ba vùng như trên hình 3.44(f), trong khi dòng điện cảm ứng mặt trên của cấu trúc có chiều giống nhau như trên hình 3.44(e). Hiệu ứng này gây bởi bậc giống nhau của chu kỳ cấu trúc. Do đó, các mẫu kim loại định kỳ của MA được đề xuất có thể được

coi là cách tử kim loại hai chiều, tạo ra cộng hưởng mode dẫn sóng (GMRs: *Guide Mode Resonances*). Nhiều báo cáo chỉ ra rằng cộng hưởng từ được kích thích khiến BMPA hoạt động với góc tới rộng cho cả phân cực TE và phân cực TM. Điều này là do sự hình thành cảm ứng từ bên trong cấu trúc, có thể bẫy từ trường tới một cách hiệu quả đối với góc tới rộng. Ngoài ra, băng thông và góc tới rộng là kết quả của cộng hưởng từ và GMRs [59].



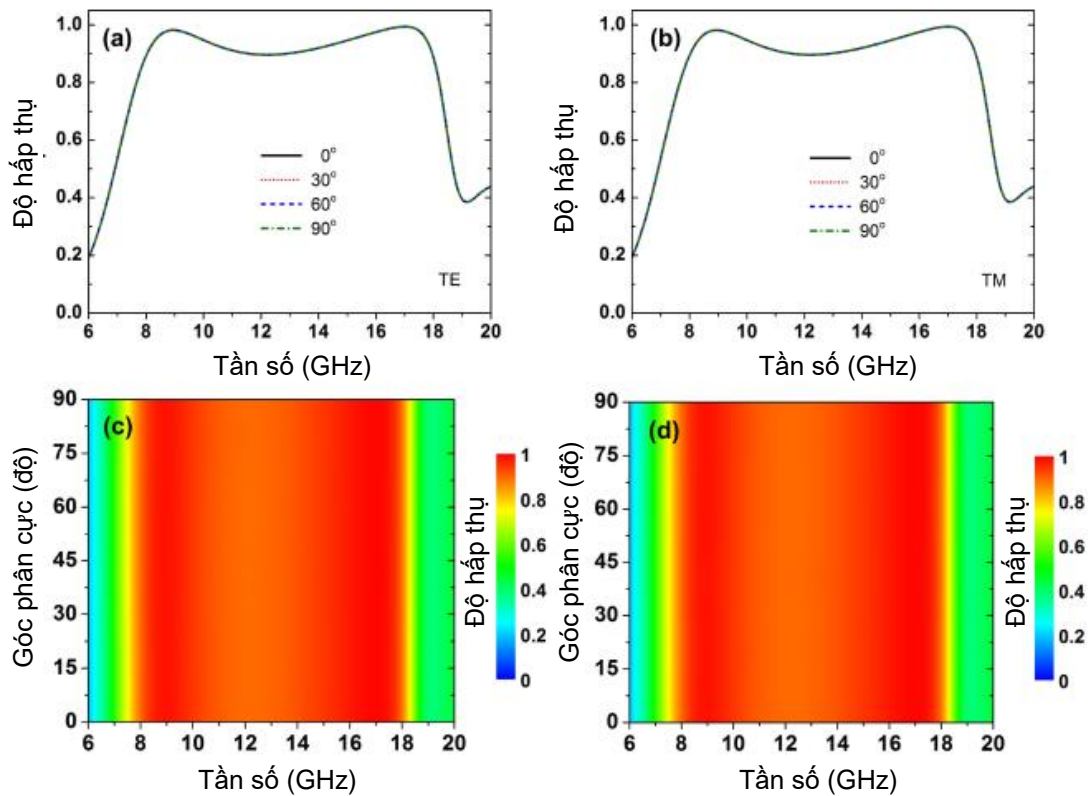
Hình 3.44. [Từ trái sang phải] Phân bố điện trường (a)(d), dòng điện cảm ứng ở mặt trên (b)(e) và mặt dưới (c)(f) tại các tần số 8,9 và 17,1 GHz tương ứng [123]



Hình 3.45. Phổ hấp thụ của BMPA thay đổi theo góc tới (a)(c) cho phân cực TE và (b)(d) cho phân cực TM [123]

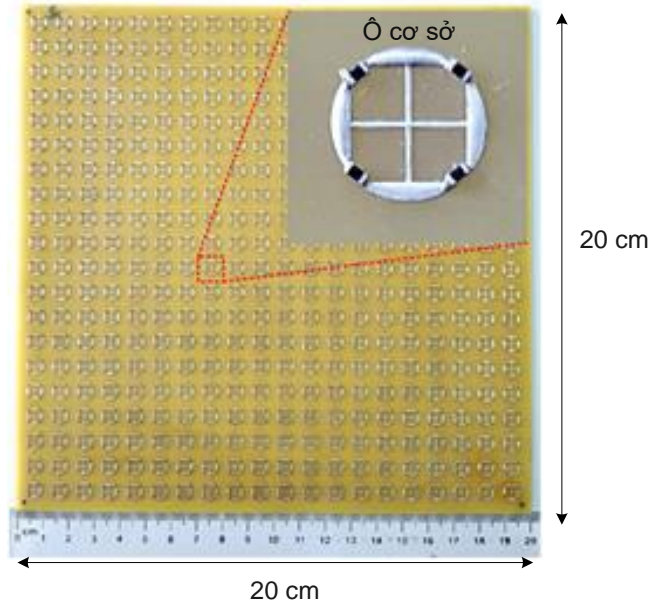
Ngoài ra, sự phụ thuộc của độ hấp thụ vào góc sóng điện từ chiếu tới được khảo

sát và thể hiện trên Hình 3.45. Theo đó, cho cả hai phân cực TE và TM, độ hấp thụ giảm khi góc tới tăng lên. Tuy nhiên, độ hấp thụ vẫn duy trì trên 70% trong toàn dải băng tần hoạt động khi góc tới tăng lên tới 50° . Điều này chứng tỏ BMPA có khả năng hấp thụ băng rộng với góc tới rộng. Chúng tôi cũng tiến hành khảo sát ảnh hưởng của góc phân cực tới độ hấp thụ của BMPA cho phân cực TE và phân cực TM. Kết quả trên Hình 3.46 cho thấy độ hấp thụ là không thay đổi trong toàn bộ dải tần hoạt động khi góc phân cực thay đổi từ 0° đến 90° cho cả phân cực TE và TM. Điều này được giải thích bởi sự đối xứng của cấu trúc.

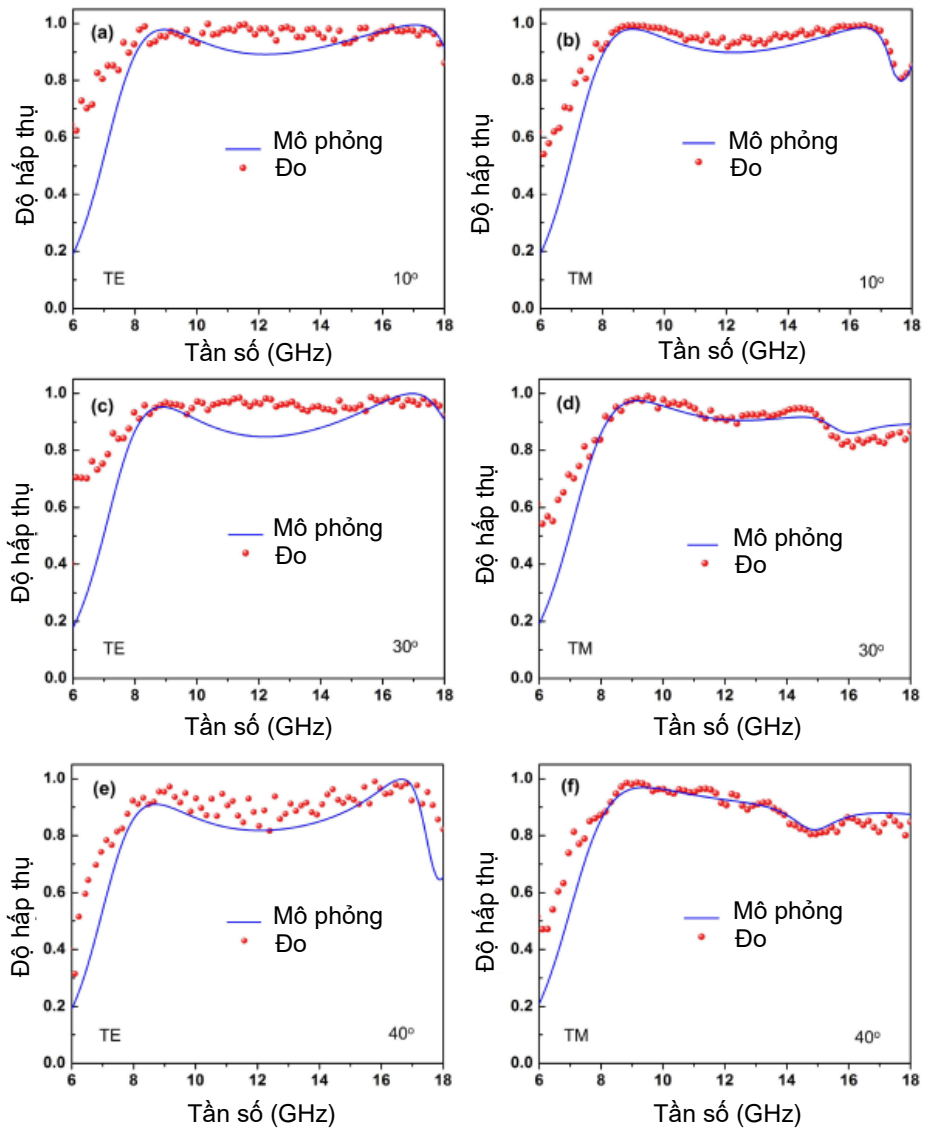


Hình 3.46. Phổ hấp thụ của BMPA thay đổi theo góc phân cực (a)(c) cho phân cực TE và (b)(d) cho phân cực TM [123]

Để xác định hiệu suất thực tế, mẫu BMPA được chế tạo sử dụng kỹ thuật quang khắc truyền thống. Các thông số cấu trúc của mẫu được chọn như mô phỏng. Vật liệu sử dụng là tấm điện môi FR₄ phủ đồng hai mặt. Lớp đồng có độ dày 0,035 mm, lớp điện môi có độ dày 2,5 mm và hằng số điện môi 4,3. Phần tử điện trở dán bề mặt có mã kích thước 0402 và giá trị phần tử điện trở 240Ω với dung sai là 1%. Ảnh mẫu chế tạo được trình bày trên Hình 3.37, gồm 20×20 ô cơ sở và 1600 phần tử điện trở dán, có kích thước tổng cộng là $194 \text{ mm} \times 194 \text{ mm}$.



Hình 3.47. Mẫu BIPA đã chế tạo hoạt động ở băng tần X và Ku[123]



Hình 3.48. Kết quả đo và mô phỏng của BIPA tại các góc tới khác nhau [123]

Để đánh giá độ hấp thụ của mẫu BMPA, đo hệ số phản xạ sử dụng máy phân tích mạng số hiệu ZNB20 và hai ăng-ten phân cực tuyến tính đóng vai trò là máy thu và máy phát. Dữ liệu đo được thu thập trong dải tần từ 6-18 GHz.

Hình 3.48 mô tả phổ hấp thụ đo được của mẫu MPA với các góc tới khác nhau là 10° , 30° , và 40° cho phân cực TE và TM. Có thể thấy rằng các kết quả đo có sự tương đồng tốt với các kết quả mô phỏng. Độ hấp thụ duy trì trên 80% trong dải tần 8-18 GHz với góc tới 40° cho cả phân cực TE và TM. Điều này xác nhận rằng BMPA làm việc trong dải tần số rộng và ít nhạy với góc tới.

Cuối cùng, chúng tôi tiến hành so sánh cấu trúc BMPA đề xuất với các BMPA tích hợp phần tử điện trở được công bố trước đây, về dải tần hoạt động, chu kỳ của ô cơ sở, độ dày tương ứng với bước sóng tại tần số hấp thụ thấp nhất, đặc tính ô cơ sở, số lớp, và số điện trở trong một ô cơ sở. Kết quả trình bày trên Bảng 3.6 cho thấy, thiết kế đề xuất có cấu trúc đơn giản với độ dày thấp nhất, đặc tính hiệu suất tốt nhất thể hiện qua tỷ số RBW/số tầng là cao nhất.

Bảng 3.6. So sánh BMPA đề xuất với các BMPA khác tích hợp điện trở

| Tài liệu | Dải tần hoạt động (GHz) | Kích thước ô cơ sở (mm) | Độ dày (mm) | RBW (%) | Số tầng | Số R trên một ô cơ sở |
|---------------------|-------------------------|--|---|--------------|----------|-----------------------|
| [115] | 7,2-12,5 | 12,8×12,8 (0,31 λ_L) | 5,2 (0,125 λ_L) | 53,81 | 3 | 6 |
| [116] | 5,2-18 | 13×13 (0,23 λ_L) | 4,8 (0,083 λ_L) | 110,35 | 3 | 12 |
| [104] | 7,6-18,3 | 10×10 (0,25 λ_L) | 3,25 (0,082 λ_L) | 82,63 | 2 | 4 |
| [124] | 3,9-10,5 | 12,5×12,5 (0,16 λ_L) | 7,57 (0,098 λ_L) | 91,67 | 2 | 4 |
| [108] | 8,2-13,4 | 15,5×15,5 (0,42 λ_L) | 3,0 (0,082 λ_L) | 48,15 | 1 | 8 |
| [114] | 8-18 | 13×13 (0,36 λ_L) | 3,175 (0,085 λ_L) | 76,92 | 1 | 8 |
| [15] | 7-12,8 | 14×14 (0,33 λ_L) | 3,4 (0,079 λ_L) | 58,59 | 1 | 4 |
| BMPA đề xuất | 8-18 | 9,7×,7(0,26 λ_L) | 2,5 (0,067 λ_L) | 76,92 | 1 | 4 |

Để nhận thấy độ dày của BMPA tương đối nhỏ so với bước sóng hoạt động, chỉ $0,067 \lambda_L$ với λ_L là bước sóng tại tần số thấp nhất mà độ hấp thụ đạt trên 90%. Giá trị độ dày trên là nhỏ hơn so sánh với các công bố trước đó, như trình bày trên Bảng 3.6.

Như vậy, chúng tôi đã đề xuất một thiết kế BMPA có độ hấp thụ cao, hoạt động ở băng X và băng Ku, không nhạy với góc tới và góc phân cực. Thiết kế có cấu trúc đối xứng, tích hợp 4 phần tử điện trở trên một ô cơ sở. Độ hấp thụ của BMPA được phân tích bằng mô phỏng và thực nghiệm chế tạo. Kết quả đo thực nghiệm cho thấy độ hấp thụ duy trì trên 80% trong dải tần số từ 8-18 GHz cho góc tới lên đến 40° cho cả phân cực TE và phân cực TM. Ngoài ra, thiết kế đề xuất là không nhạy với phân cực do cấu trúc đối xứng. Cơ chế vật lý của BMPA được giải thích dựa trên việc phân tích trở kháng và phân phối dòng điện cảm ứng bề mặt. So sánh với các thiết kế khác tích hợp điện trở, thiết kế của chúng tôi có cấu trúc đơn giản, hệ số *RBW* cao, ít nhạy với góc tới và góc phân cực. Do đó, thiết kế đề xuất là ứng viên hứa hẹn cho các ứng dụng băng X và băng Ku.

3.5. Kết luận chương

Chương 3 đã trình bày ý tưởng, mô hình vật lý, các kết quả mô phỏng, khảo sát, chế tạo thực nghiệm các BMPA tích hợp phần tử điện trở hoạt động ở các băng tần X; băng tần C và băng X; băng tần X và băng tần Ku. BMPA hoạt động ở băng tần X (8-12GHz) là khởi nguồn cho ý tưởng nghiên cứu tiếp theo trong chương 3 của luận án. Mẫu BMPA hoạt động ở băng S và băng C, có hiệu suất hấp thụ trên 90% trong băng tần từ 3 đến 8,5 GHz. Mẫu BMPA hoạt động ở băng tần C và băng X, có hiệu suất hấp thụ trên 90% trong dải tần số từ 3,7 đến 13,6 GHz. Tuy nhiên cả ba mẫu trên đều chịu ảnh hưởng góc tới, đặc biệt với phân cực TM. Mẫu BMPA hoạt động ở băng tần X và băng tần Ku, có độ hấp thụ duy trì trên 80% với góc tới 50° cho phân cực TE. Tuy nhiên, với phân cực TM, băng thông có xu hướng hẹp lại khi góc tới tăng. Các mẫu BMPA (băng C và băng X, băng X và băng Ku) đã tối ưu thông số, được tiến hành chế tạo theo quy trình mẫu MPA ở dải tần GHz. Các mẫu thực nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm trọng điểm thuộc Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Các kết quả đo và mô phỏng có sự tương đồng tốt. Các kết quả nghiên cứu trong chương ba được đăng tải 03 bài trên tạp chí ISI, trong “Danh mục các công trình công bố của luận án” là các công trình 1, 2 và 3.

CHƯƠNG 4

THIẾT KẾ VẬT LIỆU BIẾN HÓA HẤP THỤ SÓNG ĐIỆN TỪ BĂNG RỘNG TÍCH HỢP NƯỚC HOẠT ĐỘNG Ở VÙNG TẦN SỐ GHz VÀ THz

BMPA thu hút sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học bởi nhiều ứng dụng thực tế yêu cầu băng thông hấp thụ rộng như tách sóng quang, công nghệ tàng hình.... Tuy nhiên, thiết kế BMPA vẫn gặp nhiều thách thức, đặc biệt trong vùng tần số từ 0,1 đến 10 THz, là vùng tần số có khá nhiều ứng dụng thực tế [125]. Trong khi phần lớn BMPA phát triển trước đây đều dựa trên cộng hưởng kim loại, MPA tích hợp vật liệu mới đã được đề xuất nhằm mở rộng băng thông hấp thụ cho BMPA như sử dụng graphene [126],[127], hoặc MoS₂ [128], vật liệu thay đổi pha VO₂ (Vanadium Dioxide) [129], [130], vật liệu có tổn hao điện môi lớn (thường là nước) [131][132][133].

Trong đó, graphene sử dụng trong thiết kế MPA băng rộng hấp thụ một chiều và cả hai chiều ở dải tần THz đã được nghiên cứu bởi NCS Trần Văn Huỳnh [37]. Còn VO₂ được NCS Đặng Hồng Lưu sử dụng trong thiết kế MPA băng hẹp, với cấu trúc cộng hưởng là đĩa tròn kim loại được khoét đi một phần và thay thế bằng vật liệu VO₂ có khả năng thay đổi độ dẫn dựa vào nhiệt độ [20]. BMPA tích hợp vật liệu mới là nước với điện môi phân tán trong khoảng tần số rộng, mở ra một cách thức đơn giản mà tiềm năng để đạt được hấp thụ băng rộng không nhạy với cả góc tới và góc phân cực. Phương pháp được xem là mới hiện nay đối với các nghiên cứu sinh cùng lĩnh vực thiết kế BMPA. Vì vậy, trong chương này, nghiên cứu sinh đề xuất thiết kế BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz (1-50 GHz) và THz (1-10 THz) [134].

4.1. Tính chất điện từ của nước

Nước là vật liệu có giá thành rẻ và có sẵn trong tự nhiên. Ngoài ra, nước có hằng số điện môi phân tán trong dải tần số rộng, nên tổn hao tương đối lớn. Dựa vào những ưu điểm trên, nước được đề xuất trong các thiết kế anten, vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng rộng. Kể từ báo cáo đầu tiên vào năm 2015 của thiết kế BMPA dựa vào nước [131], nước trở thành lựa chọn tiềm năng trong thiết kế BMPA. Sau đó, nhiều cấu trúc BMPA dựa trên nước được báo cáo [132][135][136][137] [138], nhưng hầu hết các thiết kế đề xuất hoạt động ở vùng tần số GHz. Gần đây,

BMPA dựa trên nước làm việc ở vùng tần số THz trở thành chủ đề nghiên cứu được quan tâm. Tuy nhiên, trong dải tần số từ 0,1-10 THz, dải tần được quan tâm nghiên cứu đặc biệt, số lượng các BMPA dựa trên nước được đề xuất là khá hạn chế.

Nước tồn tại dưới dạng chất lỏng từ 0 đến 100° C tại áp suất khí quyển. Điện môi phân tán của nước phụ thuộc vào tần số và nhiệt độ, từ 0 đến 25 THz, được mô tả bởi công thức Debye[133].

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty}(T) + \frac{\varepsilon_s(T) - \varepsilon_{\infty}(T)}{1 - j\omega\tau(T)} \quad (4.1)$$

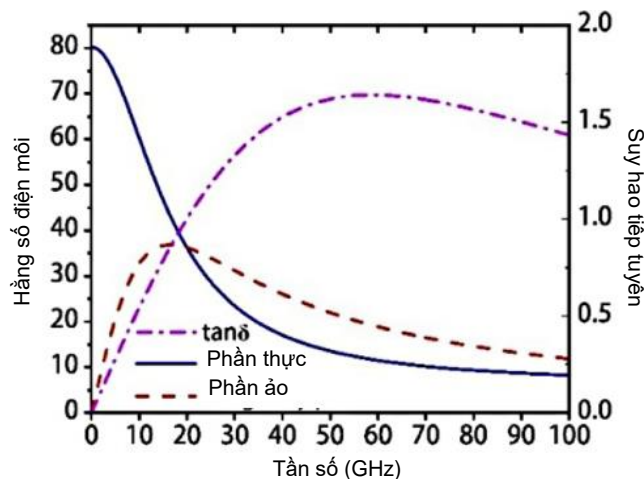
Ở đây, $\varepsilon_s(T)$ and $\varepsilon_{\infty}(T)$ tương ứng là hằng số điện môi tĩnh và hằng số điện môi quang học. Trong khi τ là hằng số thời gian phục hồi (rotational relaxation time) and T là nhiệt độ của nước.

Tại nhiệt độ phòng $T=20^{\circ}$ C, quan hệ giữa tần số góc và hằng số điện môi là:

$$\varepsilon = \varepsilon_R + j\varepsilon_i = \varepsilon_R(1 - j \tan \delta) \quad (4.2)$$

Chú ý rằng các khảo sát dưới đây được thực hiện ở nhiệt độ phòng tương ứng với $\varepsilon_{\infty}(T) = 3.1$, $\varepsilon_s(T) = 78.4$, và $\tau = 8.27 \times 10^{-12}$ s.

Hình 4.1 vẽ đường cong điện môi và suy hao tiếp tuyến của nước ở vùng tần số GHz tại nhiệt độ phòng. Kết quả cho thấy nước có tổn thất cực cao trong một dải tần số sóng viba nhất định, do sự tiêu tán năng lượng của quá trình phân cực phân tử.



Hình 4.1. Đường cong điện môi và suy hao tiếp tuyến của nước [133]

Coi BMPA có độ dày d như một lớp vật liệu đồng nhất, trở kháng chuẩn hóa được tính toán theo công thức 4.3.

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (4.3)$$

Và $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$, nên ta có độ hấp thụ cao đồng nghĩa với S_{11} và S_{21} được tối thiểu hóa.

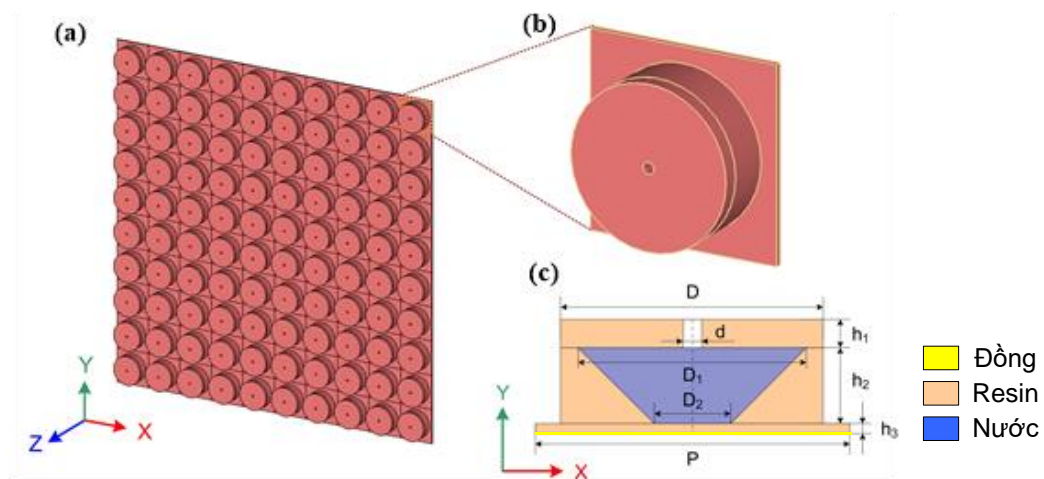
Ngoài ra, điều kiện phối hợp trở kháng cần được thỏa mãn $Z = 1$. Tương ứng với hệ số phản xạ từ bề mặt của BMPA cần tối thiểu hóa và điện môi phân tán bên trong nên đủ lớn để làm suy giảm năng lượng của sóng tới. Vì vectơ sóng tỷ lệ với tần số nên cần có độ dày lớn hơn để đạt được mức hấp thụ tương tự ở tần số thấp hơn. Về mặt lý thuyết, độ dày d của chất hấp thụ không được nhỏ hơn giới hạn được tính bởi phổ hệ số phản xạ $R(\lambda)$ theo công thức 4.4.

$$\left| \int_0^\infty \ln |R(\lambda)| d\lambda \right| \leq 2\pi^2 d \quad (4.4)$$

Để độ dày thực tế gần nhất có thể với giới hạn lý thuyết, chất hấp thụ phải có các tham số phân tán trong dải tần số rộng.

Đối với vật liệu điện môi phân tán, vì phần thực của hằng số điện môi tỉ lệ nghịch với bình phương bước sóng tới vuông góc λ^2 , nên sẽ dễ dàng để đạt được nhiều mode cộng hưởng trong các dải tần liên kề nhằm điều chỉnh độ phân tán. So với cấu trúc kim loại, vật liệu điện môi phân tán có tiềm năng hơn để đạt được hấp thụ băng thông rộng chỉ với cấu trúc đơn giản.

4.2. Thiết kế BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz



Hình 4.2. Cấu trúc của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz

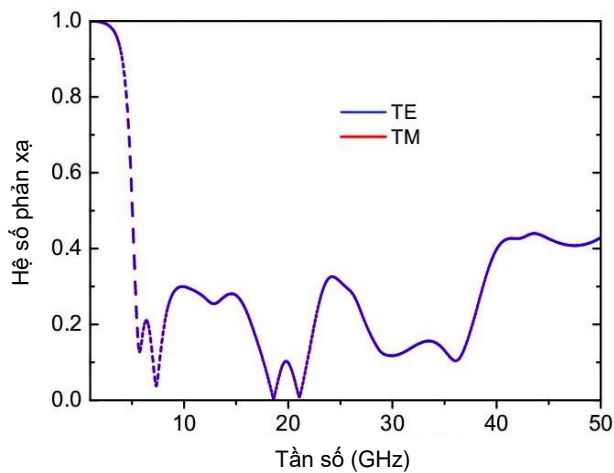
Hình 4.2 trình bày cấu trúc đề xuất của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz. Ô cơ sở của BMPA gồm ba lớp điện môi resin có hằng số điện môi $\epsilon = 4$ và một lớp đồng liên tục ở mặt sau của cấu trúc, như mô tả trên hình 4.2(b). Lớp điện môi thứ nhất có dạng hình lập phương có kích thước $P \times P \times h_3$ mm³; lớp thứ 2 có

dạng hình trụ tròn bán kính $D/2$ và chiều cao h_2 , trong đó chứa khối chất lỏng (nước) dạng hình nón cụt với bán kính đáy bé là $D_2/2$ và bán kính đáy lớn là $D_1/2$; lớp thứ 3 có dạng hình trụ tròn với bán kính $D/2$ và chiều cao h_1 . Các thông số kích thước của ô cơ sở được thể hiện trên Hình 4.2(c) và được cho trong Bảng 4.1.

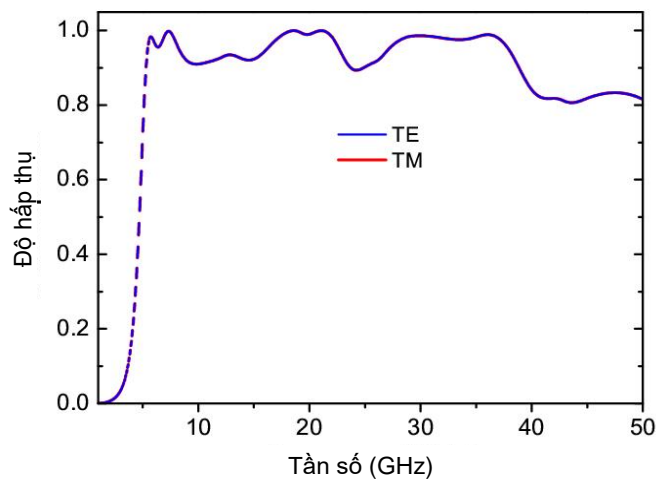
Bảng 4.1. Các thông số kích thước của BMPA đề xuất

| Thông số | P | D | D_1 | D_2 | d | h_1 | h_2 | h_3 | t |
|-----------------|------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Kích thước (mm) | 16,8 | 14 | 12 | 8 | 1 | 1,5 | 4,5 | 1,5 | 0,035 |

Trên Hình 4.3 là kết quả mô phỏng hệ số phản xạ của BMPA đề xuất cho cả phân cực TE và TM trong trường hợp góc tới chiếu vuông góc với bề mặt cấu trúc. Kết quả cho thấy hệ số phản xạ S_{11} nhỏ hơn 0,3 trong dải tần số từ 5 đến 40 GHz.



Hình 4.3. Hệ số phản xạ của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz với góc tới vuông góc cho phân cực TE và phân cực TM

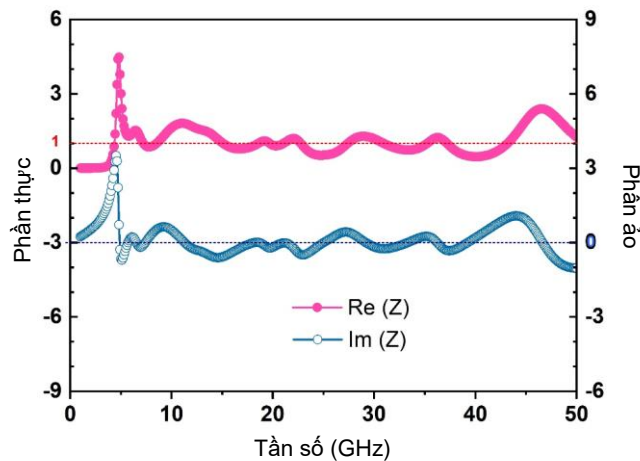


Hình 4.4. Độ hấp thụ của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz cho phân cực TE và phân cực TM

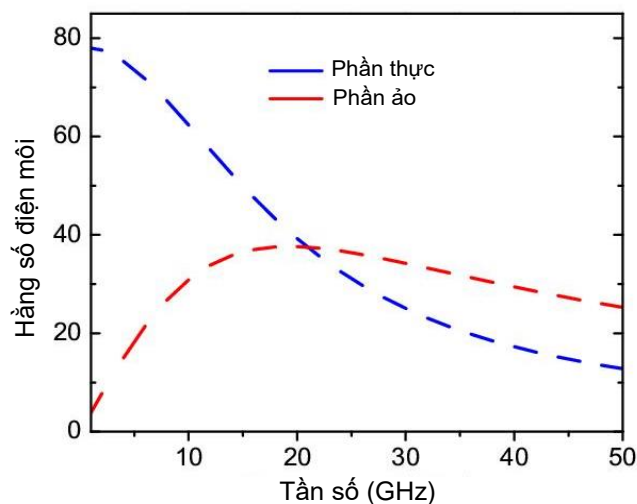
Hiệu suất hấp thụ đạt xấp xỉ 90% trong dải tần số rộng từ 5 đến 40 GHz cho cả phân cực TE và TM. Thiết kế đề xuất đạt được độ hấp thụ cao do phối hợp trở kháng giữa BMPA và không gian tự do. Ngoài ra, dải tần hấp thụ rộng do nước điện môi của nước phân tán trong dải tần số rộng.

Trở kháng vào chuẩn hóa được tính toán từ hệ số phản xạ ($S_{11}(\omega)$), độ hấp thụ còn được tính thông qua trở kháng vào chuẩn hóa như công thức 4.5. Khi $Z=1$, nghĩa là có sự phối hợp trở kháng tuyệt đối giữa trở kháng vào của cấu trúc và trở kháng của không gian tự do, độ hấp thụ đạt giá trị tối ưu. Có thể dễ dàng nhận thấy trên Hình 4.5, phần thực của trở kháng chuẩn hóa xấp xỉ bằng 1 trong khi phần ảo của trở kháng chuẩn hóa xấp xỉ bằng 0 trong dải tần từ 5 đến 40 GHz. Điều này đồng nghĩa với việc cấu trúc BMPA đề xuất đạt được hấp thụ gần tuyệt đối trong dải tần số này.

$$A = 1 - \frac{|Z - 1|}{|Z + 1|} \quad (4.5)$$



Hình 4.5. Trở kháng Z của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số GHz

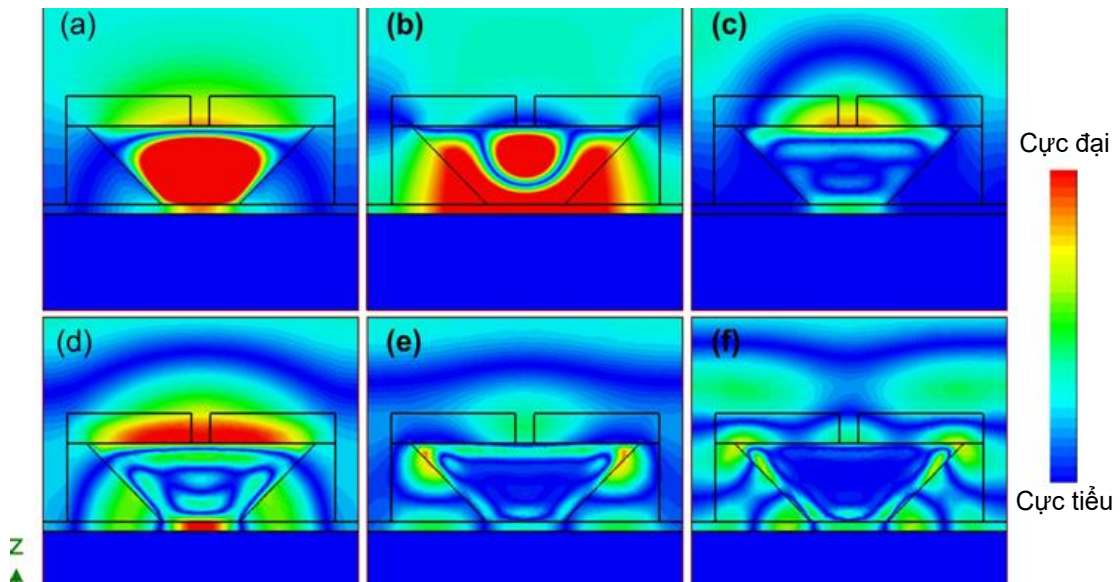


Hình 4.6. Hằng số điện môi của nước trong vùng tần số GHz

Ngoài ra, Hình 4.6 cho thấy hằng số điện môi của nước phân tán trong khoảng tần số rộng, phù hợp với kết quả được cho trong Hình 4.1, là lí do BMPA có băng thông hấp thụ rộng.

Để làm rõ cơ chế vật lý của cấu trúc BMPA, chúng tôi khảo sát phân bố từ trường trong ô cơ sở của BMPA trên mặt phẳng XOY tại các tần số cộng hưởng 5,8 GHz, 7,3 GHz, 18,6 GHz, 21,21 GHz, 29,1 GHz và 36 GHz. Hình 4.7 cho thấy, tại tần số 5.8 GHz, từ trường tập trung chủ yếu trong phần hình nón cụt chứa nước và phần tiếp giáp phía trên hình nón cụt. Tại tần số 7,3 GHz, từ trường H tập trung ở khối nước và khu vực xung quanh tiếp giáp với lớp điện môi thứ 2. Trong khi ở tần số 21,21 GHz, từ trường tập trung ở đáy hình nón cụt và lớp điện môi thứ ba nằm trên hình nón cụt. Ở các tần số còn lại như 18,6 GHz; 29,1 GHz và 36 GHz từ trường H có cường độ yếu hơn và tập trung ở các vị trí khác nhau xung quanh tiếp giáp của hình nón cụt.

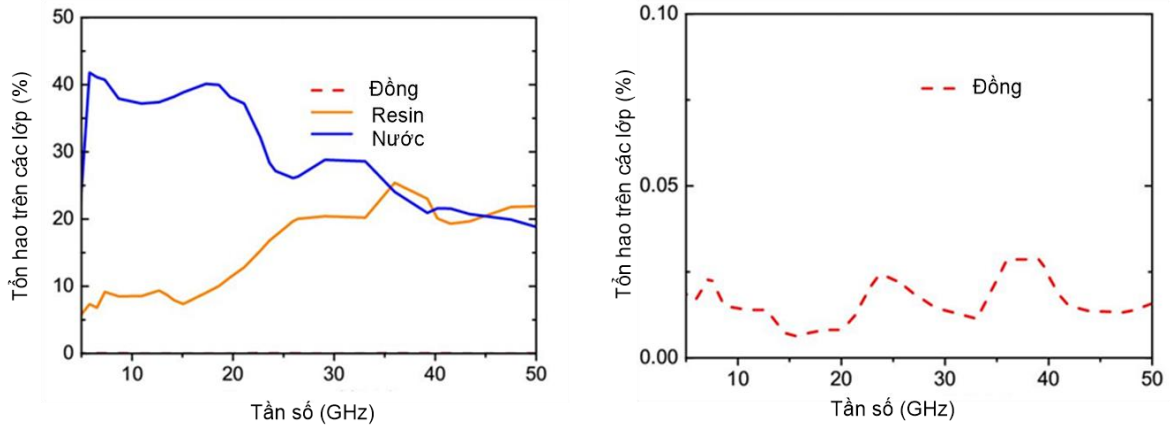
Phân bố này là phù hợp với tổn hao trên các lớp điện môi thu được từ mô phỏng, như thể hiện trên Hình 4.8. Theo đó, ở tần số thấp từ 0 đến 20GHz, tổn hao ở lớp nước chiếm ưu thế. Khi tần số tăng hơn 20GHz, tổn hao ở lớp nước giảm dần trong khi tổn hao ở lớp điện môi resin tăng lên.



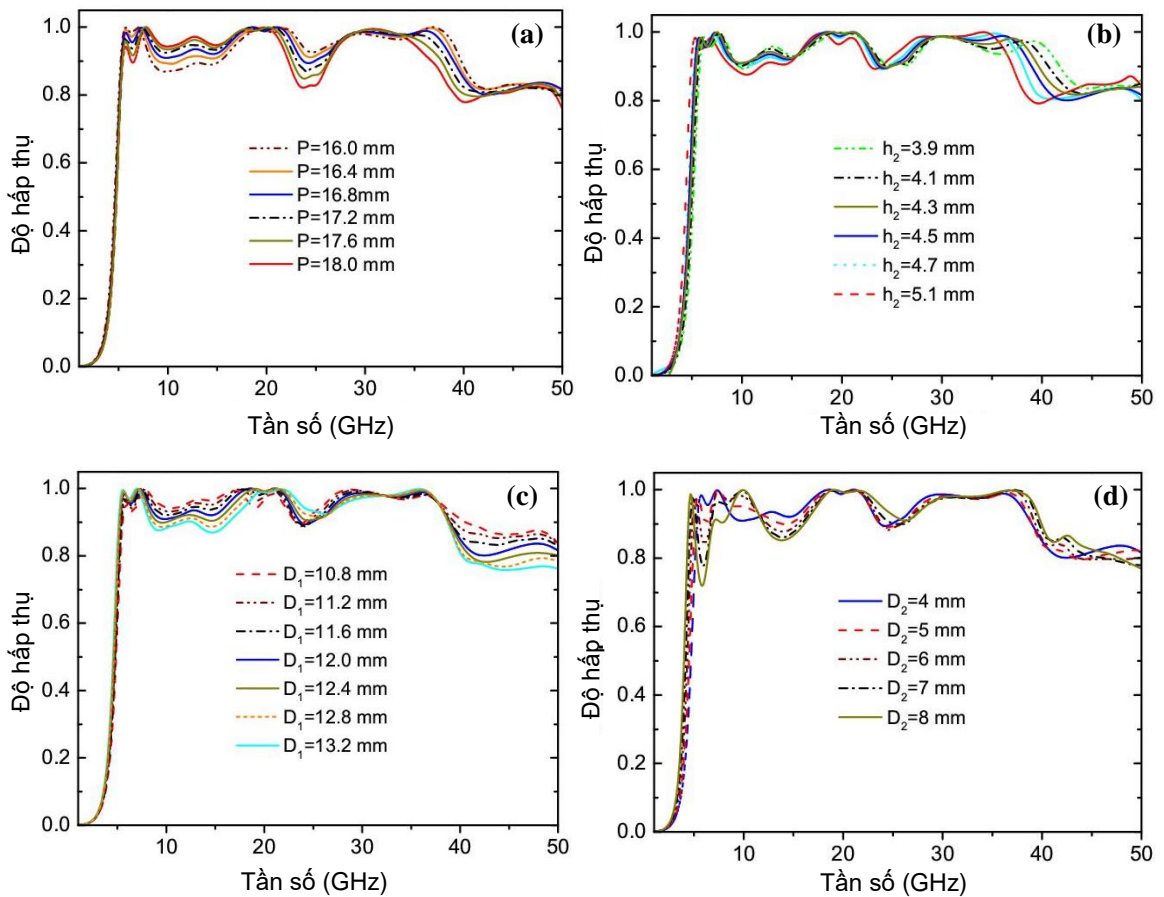
Hình 4.7. Phân bố từ trường H tại các tần số (a) 5,8 GHz, (b) 7,3 GHz, (c) 18,6 GHz, (d) 21,21 GHz, (e) 29,1 GHz và (f) 36 GHz

Để đánh giá ảnh hưởng của các thông số cấu trúc tới độ hấp thụ của BMPA, chúng tôi tiến hành mô phỏng với các giá trị khác nhau của P , h_2 , D_1 , D_2 , và D . Kết quả mô phỏng thể hiện trên các Hình 4.9 và 4.10 cho thấy những sự thay đổi nhỏ của

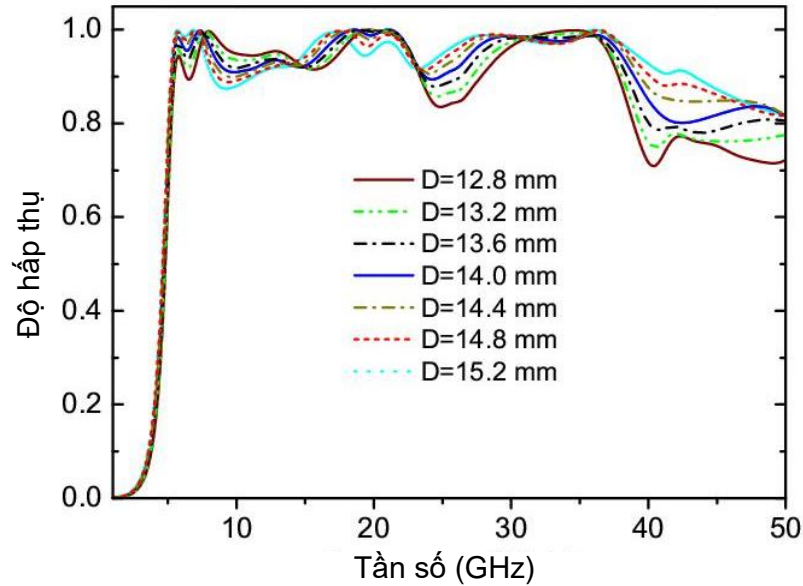
P , h_2 , D_1 , D_2 , và D ảnh hưởng không đáng kể đến đường cong hấp thụ. Dải tần có xu hướng hẹp hơn khi tăng P và h_2 trong khi độ hấp thụ lúc giảm nhẹ lúc tăng nhẹ trong một khoảng tần số nào đó với sự tăng lên của D_1 , D_2 và D . Các giá trị thông số tối ưu được chọn khi độ hấp thụ xấp xỉ 90% trong dải tần từ 5 đến 40 GHz.



Hình 4.8. Tôn hao trên các lớp của BMPA tích hợp nước hoạt động ở vùng GHz

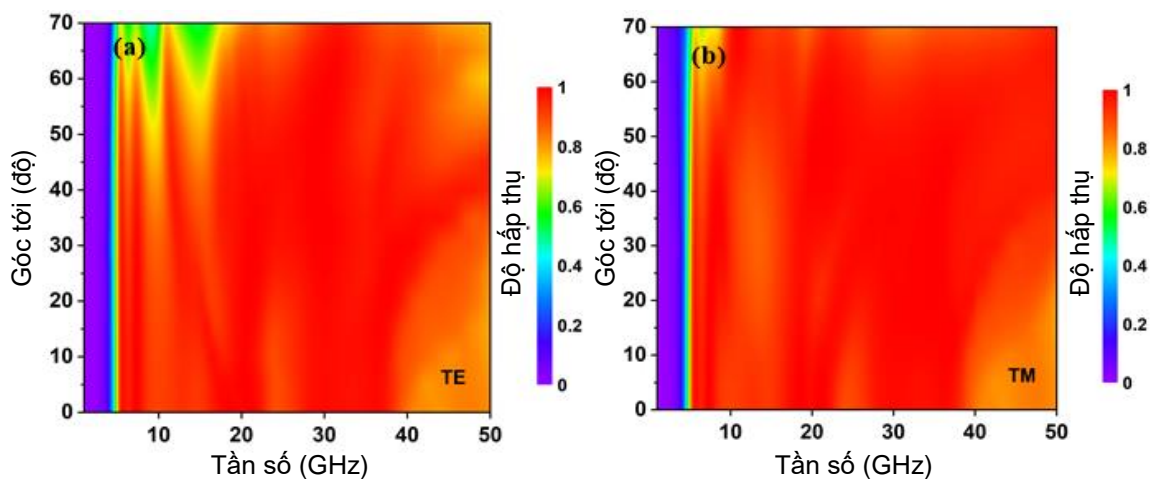


Hình 4.9. Ảnh hưởng của các thông số cấu trúc đến độ hấp thụ của BMPA (a) P , (b) h_2 , (c) D_1 , (d) D_2



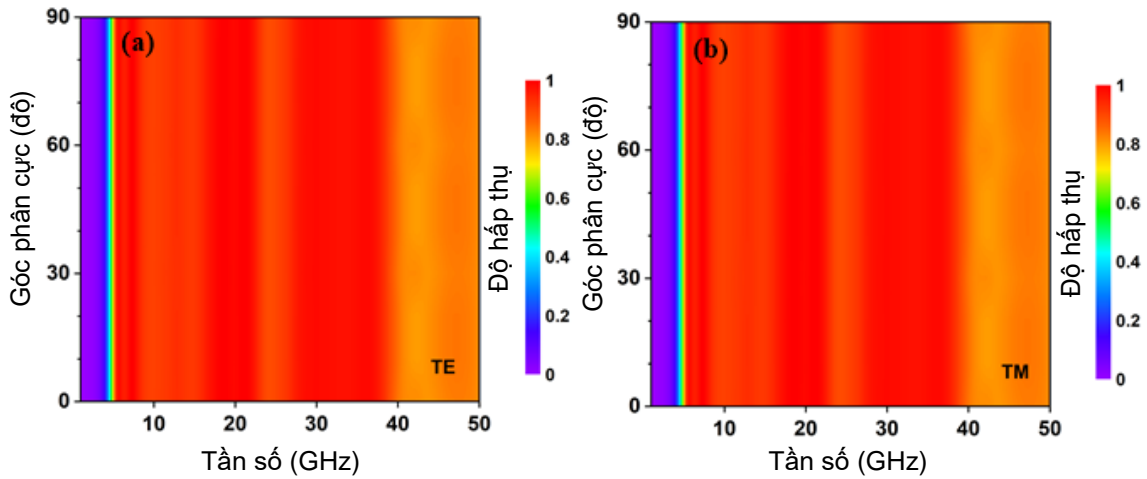
Hình 4.10. Ảnh hưởng của các thông số D đến độ hấp thụ của BMPA

Trong thực tế, sóng điện từ chiếu tới bề mặt BMPA với các góc tới khác nhau. Do đó, độ hấp thụ của BMPA tại các góc tới khác nhau được khảo sát. Kết quả trên Hình 4.11 cho thấy BMPA đề xuất làm việc với góc tới rộng. Ở phân cực TE, độ hấp thụ giảm xuống xung quanh 80% ở dải tần số thấp (từ 5 đến 18GHz) khi góc tới tăng lên 50° và xuất hiện các đỉnh phổ riêng biệt, tuy nhiên độ hấp thụ vẫn duy trì trên 90% ở dải tần số từ 18 đến 40 GHz. Với phân cực TM, độ hấp thụ duy trì trên 90% trong toàn dải tần số từ 5 đến 40 GHz khi góc tới tăng đến 70° .



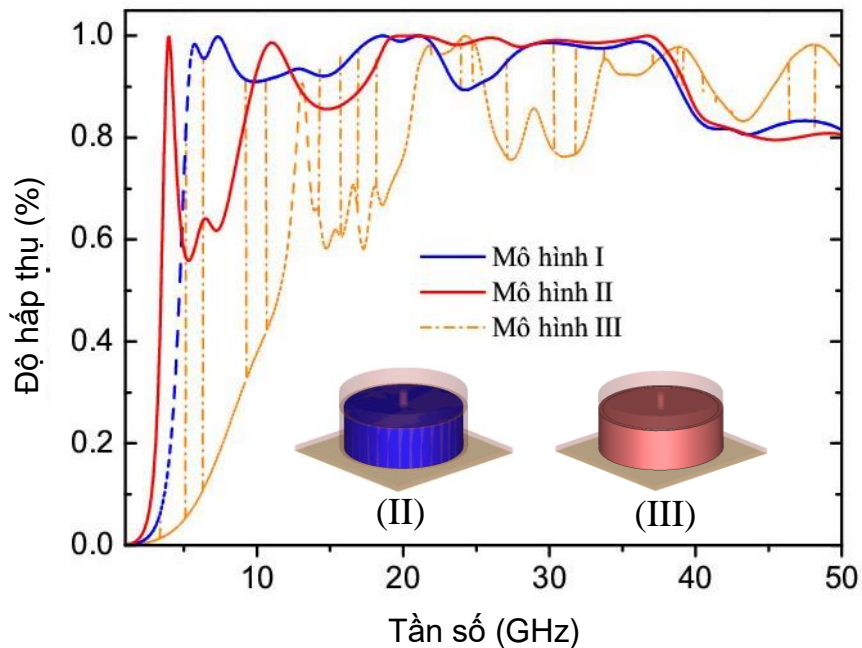
Hình 4.11. Phổ hấp thụ của BMPA khi thay đổi góc tới

Tiến hành khảo sát với trường hợp góc phân cực thay đổi từ 0 đến 90° , có thể thấy phổ hấp thụ của BMPA tích hợp khối nước hình nón cụt hầu như không thay đổi khi góc phân cực thay đổi. Điều này đạt được là do sự đối xứng của cấu trúc đề xuất.



Hình 4.12. Phổ hấp thụ của BMPA khi thay đổi góc phân cực

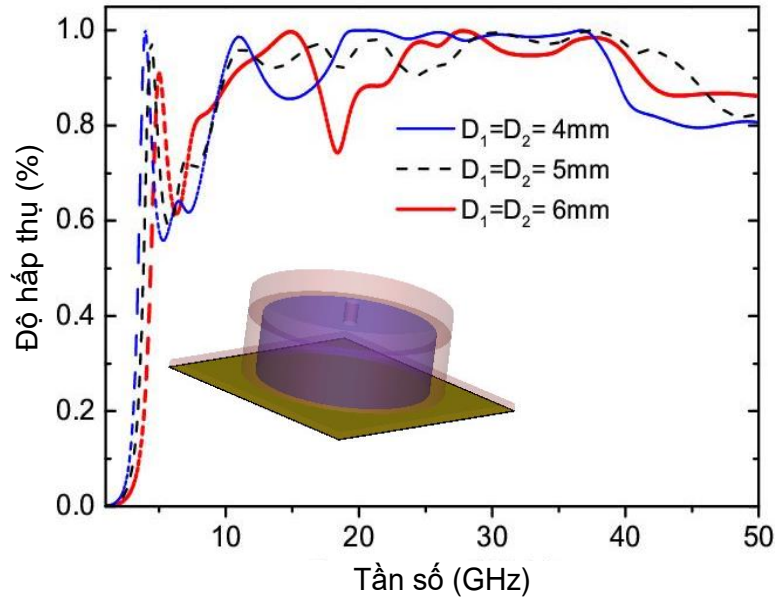
Để làm rõ hơn vai trò của khối nước hình nón cụt tới độ hấp thụ của BMPA, chúng tôi cũng tiến hành khảo sát với các mô hình khác nhau của cấu trúc, trong đó (I) là mô hình đề xuất ở hình 4.2, II là mô hình với khối nước hình trụ tròn chiếm phần lớn thể tích được bao bọc với lớp resin mỏng, và III là mô hình hoàn toàn vật liệu điện môi resin. Kết quả thể hiện trên Hình 4.13 cho thấy mô hình I đạt được hiệu suất hấp thụ tốt nhất với băng tần rộng nhất. Với mô hình II, sự thay đổi đường kính khối nước hình trụ tròn có ảnh hưởng tới phổ hấp thụ của BMPA, tuy nhiên kết quả tối ưu nhất với $D_1=D_2=5$ mm trên Hình 4.14 vẫn không so sánh được với mô hình (I).



Hình 4.13. Phổ hấp thụ với các mô hình khác nhau của BMPA

Để đánh giá độ tin cậy của thiết kế, chúng tôi tiến hành so sánh BMPA tích hợp nước đề xuất trên đây với các thiết kế tương tự hoạt động ở vùng tần số GHz,

như thể hiện trên Bảng 4.2. Có thể thấy rằng BIPA tích hợp nước đề xuất trên đây có độ hấp thụ trên 90% trong dải tần số rộng nhất với tỷ số *RBW* lớn nhất. Ngoài ra, BIPA đề xuất cũng làm việc ổn định với góc tới rộng nhất.



Hình 4.14. Độ hấp thụ của BIPA (II) khi thay đổi đường kính hình trụ tròn

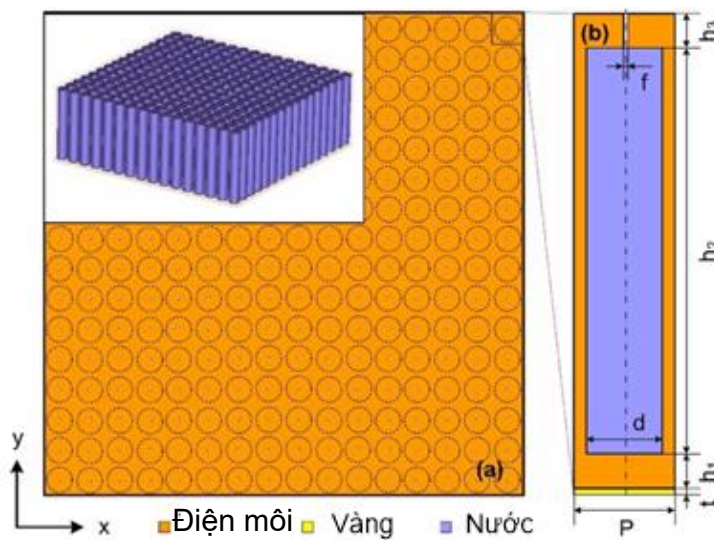
Bảng 4.2. So sánh BIPA tích hợp nước đề xuất với các thiết kế khác tương tự

| Tài liệu | Dải tần hoạt động với độ hấp thụ đạt 90% (GHz) | Kích thước ô cơ sở (mm) | Độ dày (mm) | RBW (%) | Vật liệu điện môi | Góc tới (độ) | Chế tạo |
|---------------------|--|---|------------------------------------|---------------|---|---|--------------|
| [138] | 6,5-21,4 | 10×10 (0,22 λ_L) | 10,6 (0,23 λ_L) | 106,8 | Điện môi +Nước | 45° TE và 45° TM | Không |
| [135] | 7,9-21,7 | 14×14 (0,37 λ_L) | 5,8 (0,153 λ_L) | 93,2 | Điện môi + Nước | 30° TE và 45° TM | Không |
| [139] | 12-29,6 | 18×18 (0,72 λ_L) | 5,8 (0,232 λ_L) | 84,62 | Resin +Nước + Đồng | 45° TE và 60° TM | Có |
| BIPA đề xuất | 5-40 | 16,8×16,8 (0,28 λ_L) | 7,5 (0,125 λ_L) | 155,56 | Resin +Nước + Đồng | 50° TE và 70° TM | Không |

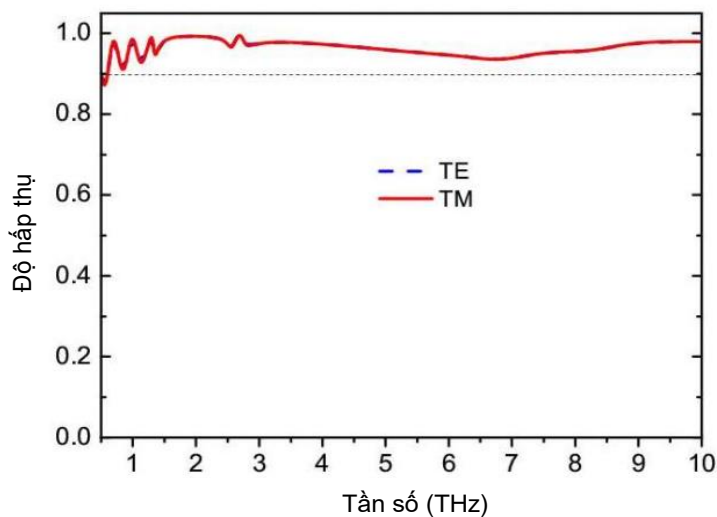
4.3. Thiết kế BIPA tích hợp nước hoạt động ở tần số THz

Trong phần này chúng tôi đề xuất thiết kế BIPA tích hợp nước hoạt động ở vùng tần số THz [134]. Các ô cơ sở được sắp xếp theo trục x và trục y với chu kỳ P như thể hiện trong Hình 4.15. Ô cơ sở gồm một hình khối chữ nhật trong đó chứa đựng một bộ cộng hưởng nước hình trụ tròn. Hình khối chữ nhật được làm từ vật liệu Teflon có hằng số điện môi 2,1. Cộng hưởng nước hình trụ tròn có đường kính d và chiều cao h_2 .

Mục đích nghiên cứu là đạt được độ hấp thụ trên 90% với băng thông rộng trong vùng tần số THz. Do đó, phương pháp mô phỏng được lựa chọn để tối ưu các thông số cấu trúc. Các thông số hình học của cấu trúc được tối ưu tại $P = 56 \mu\text{m}$, $h_1 = h_3 = 15 \mu\text{m}$, $h_2 = 300 \mu\text{m}$, $d = 46 \mu\text{m}$, and $t = 0,02 \mu\text{m}$.



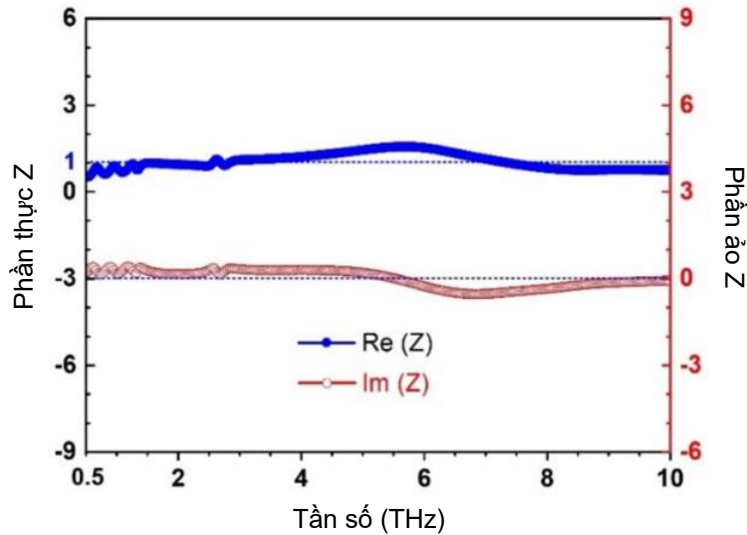
Hình 4.15. Hình ảnh 3D của vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ đề xuất [134]



Hình 4.16. Độ hấp thụ của BIPA đề xuất với góc tới vuông góc cho phân cực TE và TM [134]

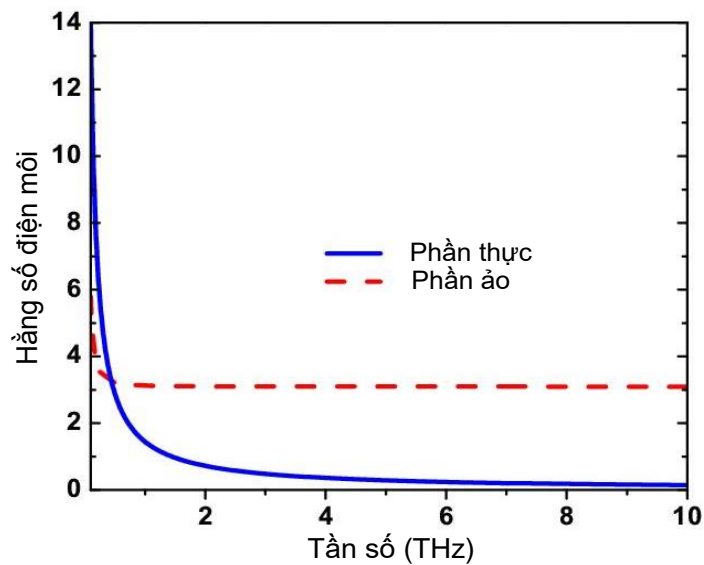
Kết quả mô phỏng cho thấy BMPA dựa trên nước được đề xuất có độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số rộng 0,6 đến 10 THz như thể hiện trên Hình 4.16.

Hình 4.17 mô tả trở kháng vào chuẩn hóa của BMPA, cho thấy phần thực của trở kháng vào là gần bằng 1, trong khi phần ảo gần bằng 0 trong dải tần số từ 0,6 THz to 10 THz. Điều này chỉ ra rằng thiết kế đạt được độ hấp thụ gần tuyệt đối trong dải tần số rộng.



Hình 4.17. Trở kháng chuẩn hóa của BMPA [134]

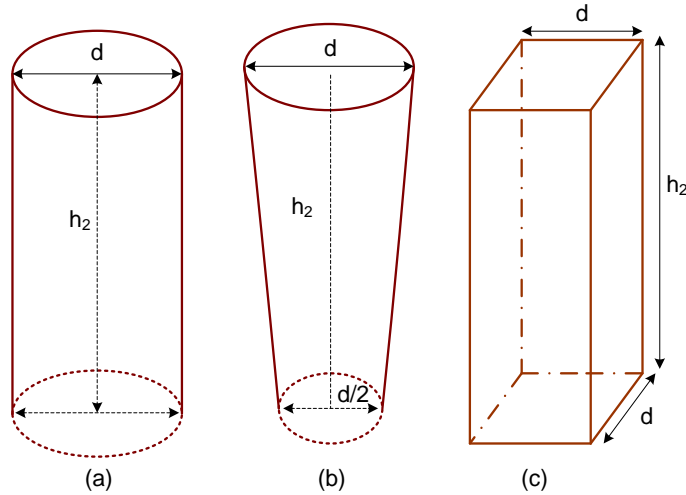
Kết quả mô phỏng hằng số điện môi của nước trong vùng tần số từ 0,5 đến 10 THz được cho trên Hình 4.18, cho thấy hằng số điện môi phân tán trong dải tần số rộng.



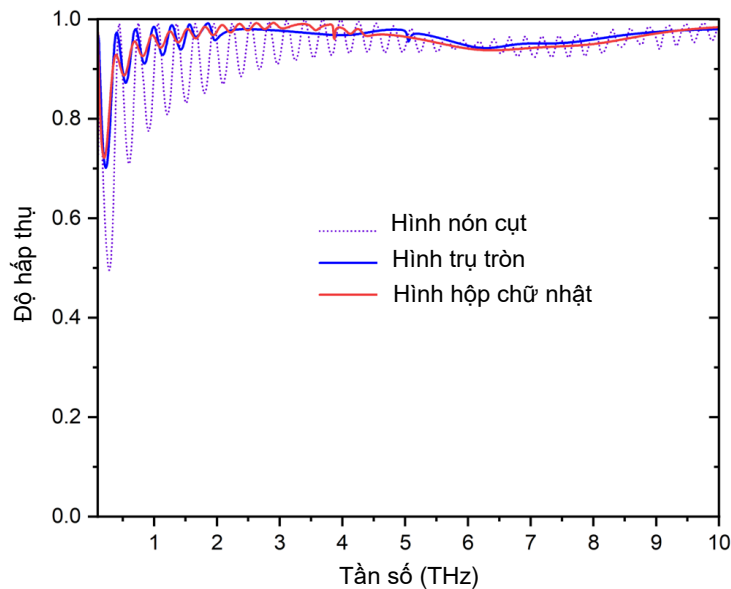
Hình 4.18. Hằng số điện môi của nước trong vùng tần số từ 0,5 đến 10 THz

Thay đổi hình dạng của khối chứa nước, với các thông số kích thước như thể hiện trên Hình 4.19. Kết quả mô phỏng cho thấy, với khối chứa nước hình trụ tròn và

hình chữ nhật, phổ hấp thụ tương đối giống nhau. Khi thay đổi hình dạng khối chứa nước thành hình nón cụt, đường cong độ hấp thụ (theo tần số) biến thiên liên tục xung quanh 90% với chênh lệch biên độ khá lớn, đặc biệt là ở vùng tần số thấp hơn 4 THz như thể hiện trên Hình 4.20. Do vậy, chúng tôi lựa chọn khối chứa nước trong cấu trúc BMPA đề xuất có dạng hình trụ tròn, và tiếp tục thực hiện các phân tích và khảo sát tiếp theo.



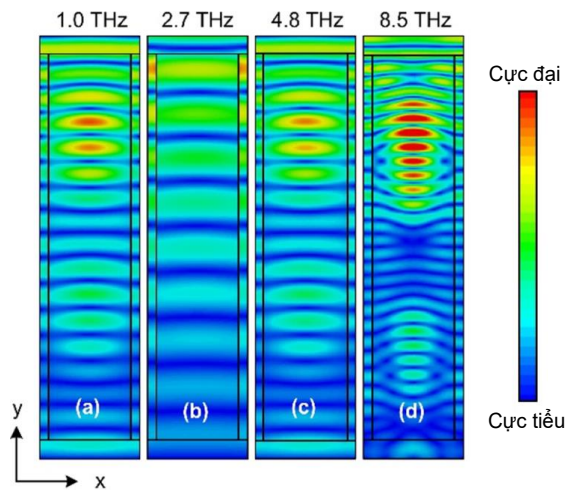
Hình 4.19. Hình dạng khác nhau của khối chứa nước



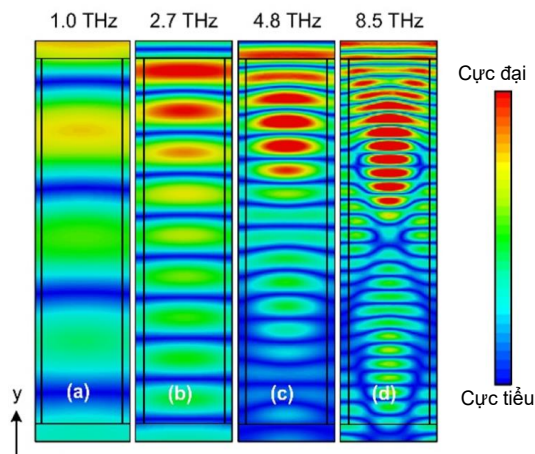
Hình 4.20. Độ hấp thụ của BMPA với các hình dạng khác nhau của khối chứa nước

Tương tự như trong mục 4.2, chúng tôi khảo sát phân bố điện trường và phân bố từ trường trong ô cơ sở của BMPA trên mặt phẳng XOY tại các tần số khác nhau 1 THz; 2,7 THz; 4,8 THz, và 8,5 THz. Các kết quả khảo sát được trình bày trên các Hình 4.22 và 4.23, tương ứng. Tại các tần số 1 THz; 4,8 THz and 8,5 THz, phân bố điện trường và từ trường chủ yếu tập trung tại nửa trên của cộng hưởng nước hình trụ

và ở đường biên giữa nước và lớp điện môi. Tại tần số 2,7 THz, điện trường chủ yếu nằm ở đường biên phía trên giữa nước và lớp điện môi, và hầu như rất yếu ở phía dưới, trong khi từ trường tập trung ở nửa trên của cộng hưởng nước hình trụ và cả ở đường biên phía trên giữa nước và lớp điện môi. Vì vậy, có thể kết luận rằng tương tác hóa học giữa nước và lớp điện môi tạo ra các cộng hưởng điện từ [72]. Ngoài ra, cộng hưởng điện và cộng hưởng từ đều góp phần tạo nên các đỉnh hấp thụ. Nhiều báo cáo chỉ ra rằng cộng hưởng từ góp phần chủ yếu vào việc mở rộng băng thông hấp thụ [133][136] trong BMPA dựa trên nước. Điều này là do sự ghép cặp của nước và lớp điện môi tại biên phía trên [133].



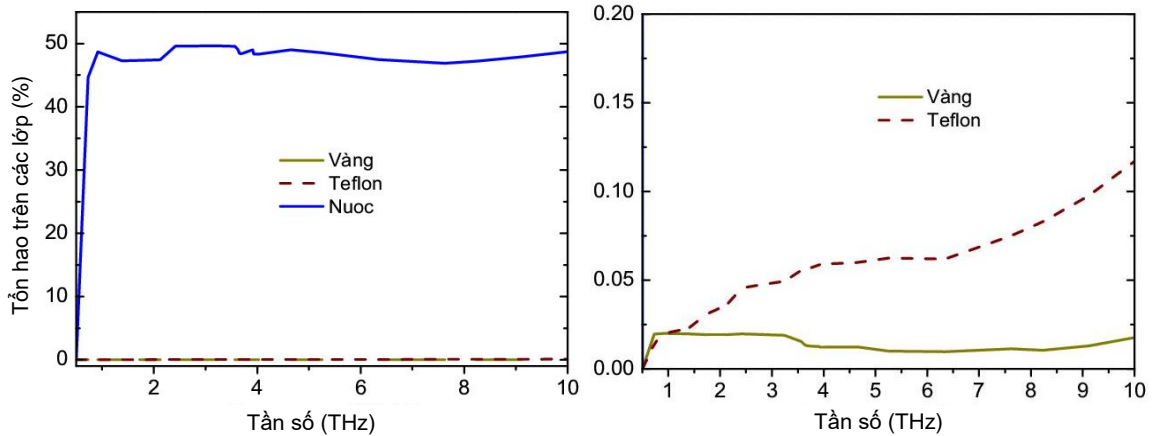
Hình 4.21. [Từ trái qua phải] Phân bố điện trường của BIPA tại các tần số khác nhau (a) 1,0 THz, (b) 2,7 THz, (c) 4,8 THz and (d) 8,5 THz [134]



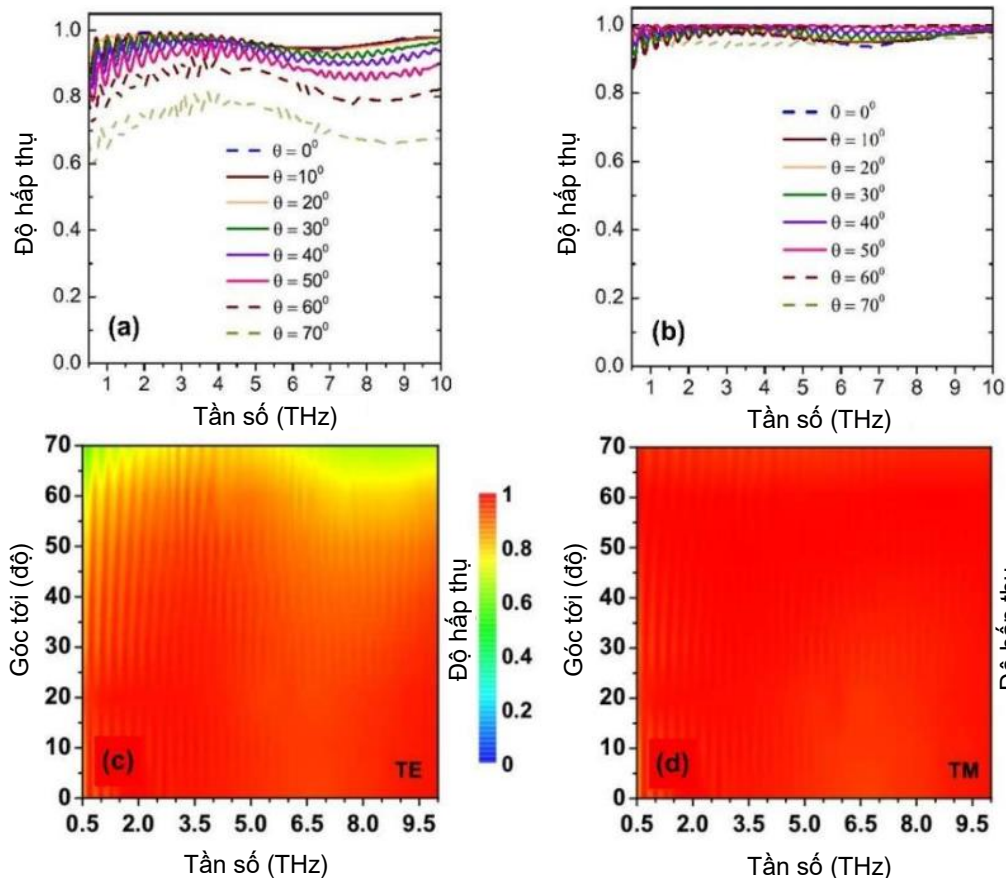
Hình 4.22. [Từ trái qua phải] Phân bố từ trường của BIPA tại các tần số khác nhau (a) 1,0 THz, (b) 2,7 THz, (c), 4,8 THz and (d) 8,5 THz [134]

Xem xét tổn hao trên các lớp của cấu trúc BIPA, nhận thấy tổn hao chủ yếu ở lớp nước trong khi tổn hao ở lớp điện môi và lớp vàng là không đáng kể như thế

hiện trên Hình 4.23. Điều này là hoàn toàn phù hợp với lý thuyết khi từ vài THz trở xuống kim loại được xem là vật dẫn tuyệt đối và tổn hao trong các lớp kim loại chiếm tỷ lệ nhỏ so với tổn hao trong lớp điện môi. Các tổn hao này dẫn tới sự chuyển hóa thành nhiệt bên trong BMPA. Vì vậy, các BMPA được thiết kế có khả năng ứng dụng tốt nhất trong lĩnh vực hấp thụ và chuyển hóa năng lượng.



Hình 4.23. Tổn hao trên các lớp của BMPA

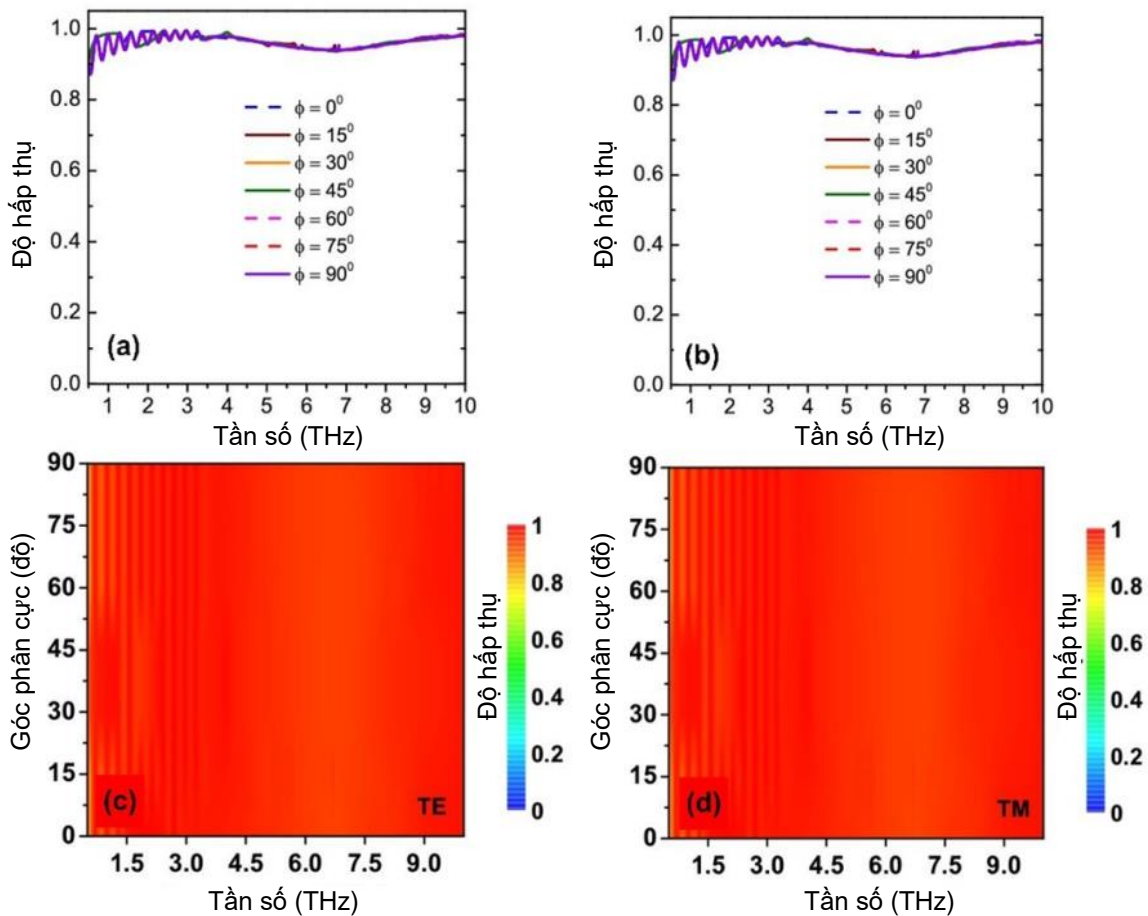


Hình 4.24. Phổ hấp thụ của BMPA với góc tới khác nhau (a, c) cho phân cực TE và (b,d) cho phân cực TM [134]

Trong thực tế, sóng điện từ chiếu tới bề mặt BMPA với các góc tới khác nhau. Do đó, độ hấp thụ của BMPA tại các góc tới khác nhau được khảo sát. Kết quả trên

Hình 4.24(a) và (c) cho thấy độ hấp thụ giảm xuống 80% với góc tới 60° cho phân cực TE. Trong khi độ hấp thụ chỉ giảm nhẹ và vẫn duy trì trên 90% trong toàn dải tần số hoạt động với góc tới 70° cho phân cực TE, như thể hiện trên Hình 4.24(b) và (d). Từ kết quả thu được, có thể kết luận rằng thiết kế đề xuất đạt độ hấp thụ cao và không nhạy với góc tới cho cả phân cực TE và TM.

Độ hấp thụ của BMPA cũng được khảo sát trong trường hợp thay đổi góc phân cực từ 0 đến 90° . Hình 4.25 là kết quả mô phỏng độ hấp thụ với trường hợp góc tới chiếu vuông góc với bề mặt hấp thụ. Độ hấp thụ lớn hơn 90% trong dải tần số từ 0,6 đến 10THz cho cả phân cực TE và TM. Băng thông hấp thụ rộng do suy hao điện môi cao và hằng số điện môi phân tán trong dải tần số rộng. Ngoài ra, phổ hấp thụ của TE và TM là trùng nhau, chứng tỏ rằng vật liệu biến hóa hấp thụ đề xuất không nhạy với phân cực.



Hình 4.25. Phổ hấp thụ của BMPA với các góc phân cực khác nhau [134]

Như vậy, một thiết kế đơn giản của BMPA dựa trên nước hoạt động ở vùng tần số THz được đề xuất và nghiên cứu bằng mô phỏng. Thiết kế đạt độ hấp thụ cao trên 90% trong dải tần số rộng từ 0,6 tới 10 THz. Ngoài ra, độ hấp thụ được duy trì

trên 90% cho góc tới 40° cho phân cực TE và 70° cho phân cực TM. Cơ chế vật lý của BMPA được khảo sát thông qua phân bố điện trường và từ trường, chỉ ra rằng cả cộng hưởng điện và cộng hưởng từ đều góp phần để mở rộng băng thông hấp thụ. Do độ hấp thụ cao, thiết kế đơn giản, BMPA đề xuất là tiềm năng cho các ứng dụng tại vùng tần số THz.

Bảng 4.3. So sánh BMPA đề xuất với các thiết kế tương tự

| Tài liệu | BW với $A > 90\%$ (THz) | Kích thước ô cơ sở (mm) | Độ dày (mm) | RBW (%) | Vật liệu điện môi | Góc tới (độ) | Chế tạo |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------|--|---|--------------|
| [133] | 0,3-1,5 | 0,5×0,5 (0,5 λ_L) | 1,0 (1,0 λ_L) | 133,33 | Teflon (PTFE) +Nước | 40° TE và 60° TM | Không |
| [72] | 0,114-1,0 | 0,8×0,8 (0,304 λ_L) | 0,3 (0,114 λ_L) | 159,07 | Polydimethylsiloxane +Nước+ Vàng | 50° TE và 60° TM | Không |
| [137] | 4,52-9,02 | 0,006×0,006 (0,09 λ_L) | 0,008 (0,12 λ_L) | 66,5 | Graphene +Nước+ PTFE +Vàng | 36° | Không |
| [140] | 3,65-10,54 | 0,019×0,019 (0,23 λ_L) | 0,01 (0,122 λ_L) | 97,11 | PMI +Nước+ Vàng | <41° | Không |
| BMPA đề xuất | 0,6-10 | 0,056×0,056 (0,112 λ_L) | 0,3 (0,66 λ_L) | 177,36 | Teflon +Nước+ Vàng | 40° TE và 70° TM | Không |

Bị giới hạn bởi các điều kiện đo, hầu hết các thiết kế BMPA tích hợp nước hoạt động ở tần số cao chưa được báo cáo với kết quả đo [133]. Để bù đắp cho sự thiếu hụt kết quả thực nghiệm, chúng tôi tiến hành so sánh kết quả với các công bố khác gần đây về BMPA tích hợp nước, như thể hiện trên Bảng 4.3, trong đó λ_L là bước sóng tại tần số thấp nhất f_L mà độ hấp thụ đạt trên 90%. Kết quả cho thấy, đề xuất của chúng tôi về BMPA tích hợp nước đạt được độ hấp thụ cao, làm việc ổn định với góc tới rộng, trong dải tần số từ 0,6 đến 10 THz với tỷ số RBW lớn nhất lên tới 177,36%.

Hạn chế của thiết kế đề xuất trên đây là nhiều tranh luận hiện nay cho rằng *Teflon* không thể in được bằng công nghệ 3D truyền thống do tính chất trơ và không hòa tan. Tuy nhiên, có một báo cáo về in 3D của *Teflon* (hay PTFE) vào năm 2020 [132][141]. Nếu công nghệ phát triển hoàn thiện, quy trình chế tạo tiềm năng cho BMPA đề xuất được giới thiệu như sau: Đầu tiên khuôn không có nắp phía trên được chế tạo bằng công nghệ in 3D với vật liệu *Teflon*. Sau đó nước được đưa vào khoang hình trụ tròn bằng đầu phun nano [137]. Phần nắp được đóng gói với phương pháp tương tự như ở bước đầu tiên [132][137][141].

4.4. Kết luận chương

Bằng phương pháp mô phỏng, chúng tôi đã xây dựng mô hình và nghiên cứu tính chất hấp thụ của BMPA hoạt động trong vùng tần số GHz và THz sử dụng vật liệu có tổn hao điện môi lớn (nước). Mẫu BMPA tích hợp nước đề xuất cho vùng tần số GHz, có độ hấp thụ trên 90% với góc tới 70° cho cả phân cực TE và TM, trong dải tần số từ 5 đến 40 GHz. Mẫu BMPA tích hợp nước đề xuất cho vùng tần số THz, có độ hấp thụ trên 90% với góc tới 70° cho cả phân cực TE và TM làm việc trong dải tần số từ 0,6 đến 10 THz. Cơ chế vật lý của các BMPA đề xuất được giải thích sử dụng lý thuyết phối hợp trở kháng kết hợp với việc xem xét tổn hao trên các lớp vật liệu của cấu trúc. Các kết quả được thảo luận và so sánh với các nghiên cứu được công bố trước đó trong vùng tần số GHz và THz, cho thấy một số đặc tính hiệu suất vượt trội trong các BMPA đề xuất của chúng tôi.

Các kết quả nghiên cứu trong chương 4 chỉ dừng lại ở mô phỏng, chưa thực hiện thực nghiệm chế tạo. Các kết quả nghiên cứu gồm 01 bài đăng trên tạp chí chuyên ngành trong nước thuộc danh mục HĐGSNN, trong “Danh mục các công trình công bố của luận án” là công trình 5. 01 kết quả nghiên cứu ở dải tần GHz đang viết bài và dự kiến gửi đăng trên tạp chí quốc tế.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án “*Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ băng rộng sử dụng vật liệu biến hóa tích hợp phần tử tổn hao*” được thực hiện tại Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. Các kết quả có liên quan đến ứng dụng của MMs được công bố gồm 01 bài trên tạp chí SCI-E. Những kết quả chính của luận án liên quan tới BMPA đã được công bố bao gồm: 02 bài trên tạp chí SCI-E; 01 bài trên tạp chí trong nước trong danh mục tính điểm của HĐGSNN.

Luận án đã thực hiện đầy đủ các mục tiêu đặt ra, và có những đóng góp nhất định cho nghiên cứu MMs nói chung và BMPAs nói riêng, bao gồm:

1. Luận án đã đề xuất mô hình vật lí, mô phỏng, khảo sát và tối ưu các thông số cấu trúc của BMPA tích hợp các phần tử điện trở cho các ứng dụng vùng tần số GHz. Từ đó, chế tạo thành công các mẫu BMPA tích hợp các phần tử điện trở hoạt động ở vùng tần số GHz như băng S (2-4GHz), băng C (4-8GHz), băng X (8-12 GHz) và băng Ku (12-18 GHz) và hoàn thiện quy trình chế tạo BMPA ở vùng tần số GHz. Kết quả nghiên cứu chứng minh rằng tích hợp các phần tử điện trở vào cấu trúc cộng hưởng của MPA là phương pháp dễ dàng để mở rộng băng thông hấp thụ của MPA. Các BMPA có tích hợp điện trở giúp cường độ hấp thụ tại các đỉnh cộng hưởng đạt trên 90% so sánh với khoảng 30% khi loại bỏ các điện trở ra khỏi cấu trúc đó.

2. Luận án đã đề xuất mô hình vật lí, mô phỏng và khảo sát tối ưu các thông số cấu trúc của BMPA tích hợp chất lỏng (nước), hoạt động ở vùng tần số GHz (1-40 THz) và THz (1-10 THz). Kết quả nghiên cứu cho thấy các BMPA tích hợp nước có cấu trúc đơn giản, dễ dàng mở rộng băng thông hấp thụ do nước có điện môi phân tán trong dải tần số rộng với tổn hao điện môi tương đối cao.

Các cấu trúc BMPA được đề xuất có độ hấp thụ cao, trong dải băng tần rộng, ít nhạy với góc tới và góc phân cực. Các kết quả nghiên cứu của luận án được đăng tải trên các tạp chí khoa học trong nước và quốc tế uy tín.

HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. Hợp tác với nhóm nghiên cứu ở Hàn Quốc nghiên cứu chế tạo và đo thực nghiệm BMPA tích hợp chất lỏng nước hoạt động ở vùng tần số GHz (5-40 GHz) và THz (0.6-10 THz) đã được tối ưu trong chương 4. Tiếp tục đề xuất và tối ưu cấu trúc BMPA tích hợp nước hấp thụ đẳng hướng hai chiều.

2. Tiếp tục nghiên cứu thử nghiệm các mẫu BMPA sử dụng vật liệu có tính chất đàn hồi, BMPA hấp thụ hai chiều nhằm tăng khả năng ứng dụng thực tế.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

1. Thi Kim Thu Nguyen, Thi Minh Nguyen, Hong Quang Nguyen, Thanh Nghia Cao, Dac Tuyen Le, Xuan Khuyen Bui, Son Tung Bui, Chi Lam Truong, Dinh Lam Vu, Nguyen Thi Quynh Hoa, 2021, Simple design of efficient broadband multifunctional polarization converter for X-band application , *Scientific reports*, 11, 2032.

2. Thi Kim Thu Nguyen, Cao Thanh Nghia, Ngoc Hieu Nguyen, Dac Tuyen Le, Xuan Khuyen Bui, Chi Lam Truong, Thi Quynh Hoa Nguyen, 2021, Simple Design of a Wideband and Wide-Angle Insensitive Metamaterial Absorber Using Lumped Resistors for X- and Ku-Bands, in *IEEE Photonics Journal*, 13 (3), 1-10.

3. Duy Tung Phan, Thi Kim Thu Nguyen, Ngoc Hieu Nguyen, Dac Tuyen Le, Xuan Khuyen Bui, Dinh Lam Vu, Chi Lam Truong, Thi Quynh Hoa Nguyen, 2021, Lightweight, Ultra-Wideband, and polarization-Insensitive Metamaterial Absorber Using a Multilayer Dielectric Structure for C- and X-Band Applications, *Physica Status Solidi B: Basic solid state Physics*, 258, 2100175.

4. Thu Nguyen Thi Kim, Minh Nguyen Thi, Quang Nguyen Hong, Tam Nguyen Thi Minh, Thuong Ho Thi Huyen, My Pham Tra, Lam Vu Dinh, 2023, A simple design of water-based broadband metamaterial absorber for THz”, *Communications in Physics*, 33 (1).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Anh

- [1] D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire, 2004, Metamaterials and negative refractive index, *Science*, 305 (5685), 788–792.
- [2] M. M. Islam, M. T. Islam, M. Samsuzzaman, M. R. I. Faruque, N. Misran, and M. F. Mansor, 2015, A miniaturized antenna with negative index metamaterial based on modified SRR and CLS unit cell for UWB microwave imaging applications, *Materials (Basel)*, 8 (2), 392–407.
- [3] J. B. Pendry, 2000, Negative refraction makes a perfect lens, *Phys. Rev. Lett.*, 85 (18), 3966.
- [4] J. Hendrickson, J. Guo, B. Zhang, W. Buchwald, and R. Soref, 2012, Wideband perfect light absorber at midwave infrared using multiplexed metal structures, *Opt. Lett.*, 37, (3), 371–373.
- [5] Y. Cui, K. H. Fung, J. Xu, H. Ma, Y. Jin, S. He, N. X. Fang, 2012, Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab, *Nano Lett.*, 12 (3), 1443–1447.
- [6] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, 2008, Perfect metamaterial absorber, *Phys. Rev. Lett.*, 100 (20), 207402.
- [7] B. Edwards, A. Alù, M. E. Young, M. Silveirinha, and N. Engheta, 2008, Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide, *Phys. Rev. Lett.*, 100 (3), 33903.
- [8] P. Yu, J. Wu, E. Ashalley, A. Govorov, and Z. Wang, 2016, Dual-band absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared photodetection, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 49 (36), 365101.
- [9] M. H. Nam, B. S. Tung, B. X. Khuyen, D. T. Ha, N. V. Ngoc, T. M. Cuong, L. D. Tuyen, V. D. Lam, L. Chen, H. Zheng, and Y. P. Lee, 2022, Graphene-Integrated Plasmonic Metamaterial for Manipulation of Multi-Band Absorption, Based on Near-Field Coupled Resonators, *Crystals*, 12 (4), 525.
- [10] D. T. Ha, B. S. Tung, B. X. Khuyen, P. T. Son, N. T. Tung, N. T. Hoa, V. D. Lam, H. Zheng, L. Chen, and Y. P. Lee, 2021, Dual-band, polarization-insensitive, ultrathin and flexible metamaterial absorber based on high-order

magnetic resonance, in *Photonics*, MDPI, 574.

- [11] N. T. Tung, B. S. Tung, E. Janssens, P. Lievens, and V. D. Lam, 2014, Broadband negative permeability using hybridized metamaterials: Characterization, multiple hybridization, and terahertz response, *J. Appl. Phys.*, 116 (8), 83104.
- [12] P. Yu, L. V. Besteiro, Y. Huang, J. Wu, L. Fu, H. H. Tan, C. Jagdish, G. P. Wiederrecht, A. O. Govorov, Z. Wang, 2019, Broadband metamaterial absorbers, *Adv. Opt. Mater.*, 7 (3) 1800995.
- [13] Y. P. Lee, P. V. Tuong, H. Y. Zheng, J. Y. Rhee, and W. H. Jang, 2012, An application of metamaterials: Perfect absorbers,” *J. Korean Phys. Soc.*, 60, 1203–1206.
- [14] N. T. Q. Hoa, P. H. Lam, P. D. Tung, T. S. Tuan, and H. Nguyen, 2019, Numerical study of a wide-angle and polarization-insensitive ultrabroadband metamaterial absorber in visible and near-infrared region, *IEEE Photonics J.*, 11 (1), 1–8.
- [15] T. T. Nguyen and S. Lim, 2018, Angle-and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber using resistive fan-shaped resonators, *Appl. Phys. Lett.*, 112 (2), 21605.
- [16] M. K. Hedayati, A. U. Zillohu, T. Strunskus, F. Faupel, and M. Elbahri, 2014, Plasmonic tunable metamaterial absorber as ultraviolet protection film, *Appl. Phys. Lett.*, 104 (4), 41103.
- [17] Y. Pang, J. Wang, Q. Cheng, S. Xia, X. Y. Zhou, Z. Xu, T. J. Cui, S. Qu, 2017, Thermally tunable water-substrate broadband metamaterial absorbers, *Appl. Phys. Lett.*, 110 (10), 104103.
- [18] Z. Song, K. Wang, J. Li, and Q. H. Liu, 2018, Broadband tunable terahertz absorber based on vanadium dioxide metamaterials, *Opt. Express*, 26(6), 7148–7154.
- [22] J. C. Bose, 1898, On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure, *Proc. R. Soc. London*, 63, (389–400), 146–152.
- [23] I. V Lindell, A. H. Sihvola, and J. Kurkijarvi, Karl F. Lindman, 1992, The last Hertzian, and a harbinger of electromagnetic chirality, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 34 (3), 24–30.

- [24] W. E. Kock, 1948, Metallic delay lenses, *Bell Syst. Tech. J.*, 27(1), 58–82.
- [25] V. Vesselago, 1968, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Sov. Phys. Uspekhi*, 10 (4).
- [26] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, 1996, Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures, *Phys. Rev. Lett.*, 76 (25), 4773.
- [27] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, 1999, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 47 (11), 2075–2084.
- [28] M. Kafesaki, I. Tsiapa, N. Katsarakis, T. Koschny, C. M. Soukoulis, and E. N. Economou, “Left-handed metamaterials: The fishnet structure and its variations,” *Phys. Rev. B*, vol. 75, no. 23, p. 235114, 2007.
- [30] N. V. Dung, P. V. Tuong, Y. J. Yoo, B. S. Tung, V. D. Lam, J. Y. Rhee, K. W. Kim, Y. H. Kim, L. Y. Chen and Y. P. Lee, 2015, Perfect and broad absorption by the active control of electric resonance in metamaterial, *J. Opt.*, 17(4), 45105.
- [31] R. Kumar, M. Kumar, J. S. Chohan, and S. Kumar, 2022, *Overview on metamaterial: History, types and applications*, *Mater. Today Proc.*, 56, 3016–3024.
- [32] N. Fang, H. Lee, C. Sun, and X. Zhang, “Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens,” *Science (80-.)*, vol. 308, no. 5721, pp. 534–537, 2005.
- [33] Y. I. Abdulkarim. A. Mohanty, O. P. Acharya, B. Appasani, M. S. Khan, S. K. Mohapatra, F. F. Muhammadsharif, J. Dong, 2022, A review on metamaterial absorbers: Microwave to optical, *Front. Phys.*, 359.
- [34] J. Lončar, A. Grbic, and S. Hrabar, 2018, A Reflective Polarization Converting Metasurface at X and S-Band Frequencies, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 66 (6), 3213–3218.
- [35] X. Ni, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, 2013, Metasurface holograms for visible light, *Nat. Commun.*, 4 (1), 2807.
- [36] B. Wang, K. H. Teo, T. Nishino, W. Yezauris, J. Barnwell, and J. Zhang, 2011, Experiments on wireless power transfer with metamaterials, *Appl. Phys. Lett.*, 98 (25), 254101.

- [38] N. T. Q. Hoa, P. D. Tung, N. D. Dung, H. Nguyen, and T. S. Tuan, 2019, Numerical study of a wide incident angle-and polarisation-insensitive microwave metamaterial absorber based on a symmetric flower structure, *AIP Adv.*, 9 (6), 65318.
- [39] D. T. Anh, D. T. Viet, P. T. Trang, N. M. Thang, H. Q. Quy, N. V. Hieu, V. D. Lam, N. T. Tung, 2015, Taming electromagnetic metamaterials for isotropic perfect absorbers, *AIP Adv.*, 5 (7), 2015.
- [40] H. T. Chen, 2012, Interference theory of metamaterial perfect absorbers, *Opt. Express*, 20 (7), 7165–7172.
- [42] T. V. Huynh, B. S. Tung, B. X. Khuyen, S. T. Ngo, V. D. Lam, and N. T. Tung, 2019, Controlling the absorption strength in bidirectional terahertz metamaterial absorbers with patterned graphene, *Comput. Mater. Sci.* 166, 276–281.
- [43] M. Q. Dinh, M. Thuy Le, S. Tung Ngo, T. Van Huynh, and N. Thanh Tung, 2021, Terahertz cut-wire-pair metamaterial absorber, *J. Appl. Phys.*, 130 (1).
- [44] L. N. Le, N. M. Thang, and N. T. Tung, 2017, Hybrid semiconductor–dielectric metamaterial modulation for switchable bi-directional THz absorbers, *Opt. Commun.*, 383, 244–249.
- [45] L. F. Yao, M. H. Li, X. M. Zhai, H. B. Wang, and J. F. Dong, 2016, On the miniaturization of polarization insensitive wide angle metamaterial absorber, *Appl. Phys. A*, 122, 1–6.
- [46] N. Wang, X. Dong, W. Zhou, C. He, W. Jiang, and S. Hu, 2016, Low-frequency metamaterial absorber with small-size unit cell based on corrugated surface, *AIP Adv.*, 6 (2), 25205.
- [47] Y. Zhi Cheng, Y. Wang, Y. Nie, R. Zhou Gong, X. Xiong, and X. Wang, 2012, Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements, *J. Appl. Phys.*, 111 (4), 44902.
- [48] M. Jiang, F. Hu, Y. Qian, L. Zhang, W. Zhang, and J. Han, 2019, Tunable terahertz band-pass filter based on MEMS reconfigurable metamaterials, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 53 (6), 65107.
- [49] S. J. Park and J. Cunningham, 2020, Determination of permittivity of dielectric

- analytes in the Terahertz frequency range using split ring resonator elements integrated with on-chip waveguide, *Sensors*, 20 (15), 4264.
- [50] J. Zhu, Z. Ma, W. Sung, F. Ding, Q. He, L. Zhou, Y. Ma, 2014, Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber, *Appl. Phys. Lett.*, 105 (2), 21102.
- [51] T. T. Nguyen and S. Lim, 2017, Wide Incidence Angle-Insensitive Metamaterial Absorber for Both TE and TM Polarization using Eight-Circular-Sector, *Sci. Rep.*, 7 (1), 1–11.
- [52] M. Yoo, H. K. Kim, and S. Lim, 2015, Angular-and polarization-insensitive metamaterial absorber using subwavelength unit cell in multilayer technology, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 15, 414–417.
- [53] B. Wang, C. Xu, G. Duan, W. Xu, and F. Pi, 2023, Review of broadband metamaterial absorbers: from principles, design strategies, and tunable properties to functional applications, *Adv. Funct. Mater.*, 2213818.
- [54] M. Li, B. Muneer, Z. Yi, and Q. Zhu, 2018, A Broadband Compatible Multispectral Metamaterial Absorber for Visible, Near-Infrared, and Microwave Bands, *Adv. Opt. Mater.*, 6 (9), 1701238.
- [55] H. Deng, L. Stan, D. A. Czaplewski, J. Gao, and X. Yang, 2017, Broadband infrared absorbers with stacked double chromium ring resonators, *Opt. Express*, 25 (23), 28295–28304.
- [56] D. Hu, J. Cao, W. Li, C. Zhang, T. Wu, Q. Li, Z. Chen, Y. Wang, J. Guan, 2017, Optically transparent broadband microwave absorption metamaterial by standing-up closed-ring resonators, *Adv. Opt. Mater.*, 5 (13), 1700109.
- [57] Y. Cai and K. D. Xu, 2018, Tunable broadband terahertz absorber based on multilayer graphene-sandwiched plasmonic structure, *Opt. Express*, 26 (24), 31693–31705.
- [58] J. Song, C. Huang, J. Yang, X. Zhang, J. Peng, and X. Luo, 2018, Broadband and tunable radar absorber based on graphene capacitor integrated with resistive frequency-selective surface, *IEEE Trans. Antennas Propag*, 68 (3), 2446–2450.
- [59] H. Zhang, M. Luo, Y. Zhou, Y. Ji, and L. Chen, 2020, Ultra-broadband, polarization-independent, wide-angle near-perfect absorber incorporating a one-dimensional meta-surface with refractory materials from UV to the near-

- infrared region,” *Opt. Mater. Express*, 10 (2), 484–491.
- [60] J. Chen, F. Tang, X. Wang, J. Wu, Y. Wu, X. Ye, Y. Wang, L. Yang, 2021, High efficiency broadband near-infrared absorbers based on tunable SiO₂-VO₂-MoS₂ multilayer metamaterials, *Results Phys.*, 26, 104404.
- [61] L. Ye, X. Chen, G. Cai, J. Zhu, N. Liu, and Q. H. Liu, 2018, Electrically tunable broadband terahertz absorption with hybrid-patterned graphene metasurfaces, *Nanomaterials*, 8 (8), 562.
- [62] W. Wang, C. Xu, M. Yan, A. Wang, J. Wang, M. Feng, J. Wang, S. Qu, 2019, Broadband tunable metamaterial absorber based on U-shaped ferrite structure, *IEEE Access*, 7, 150969–150975.
- [63] C. Yuan, R. Yang, J. Wang, and J. Tian, 2020, Tunable enhanced bandwidth all-graphene-dielectric terahertz metamaterial absorber/reflector, *Optik (Stuttg)*, 224, 165517.
- [64] R. Fan, B. Xiong, R. Peng, and M. Wang, 2020, Constructing metastructures with broadband electromagnetic functionality, *Adv. Mater.*, 32 (27), 1904646.
- [65] E. K. Shahmarvandi, M. Ghaderi, and R. F. Wolffenbuttel, 2016, CMOS-compatible fabrication of metamaterial-based absorbers for the mid-IR spectral range, in *Journal of Physics: Conference Series*, 12033.
- [66] Y. Liu, S. Gu, C. Luo, and X. Zhao, 2012, Ultra-thin broadband metamaterial absorber,” *Appl. Phys. A*, 108, 19–24.
- [67] B. Tang, Y. Zhu, X. Zhou, L. Huang, and X. Lang, 2017, Wide-angle polarization-independent broadband absorbers based on concentric multisplit ring arrays, *IEEE Photonics J.*, 9 (6), 1–7.
- [68] M. Q. Dinh, M. T. Le, S. T. Ngo, and N. T. Tung, 2021, Unifying approach to multilayer metamaterials absorber for bandwidth enhancement, *Opt. Commun.*, 485, 126725.
- [69] M. Amiri, F. Tofigh, N. Shariati, J. Lipman, and M. Abolhasan, 2020, Review on metamaterial perfect absorbers and their applications to IoT, *IEEE Internet Things J.*, 8 (6), 4105–4131.
- [70] B. X. Khuyen, B. S. Tung, Y. J. Yoo, Y. Ju. Kim, K. W. Kim, L. Y. Chen, V. D. Lam, Y. P. Lee, 2017, Miniaturization for ultrathin metamaterial perfect absorber in the VHF band, *Sci. Rep.*, 7, 1–7.

- [71] W. Zhu, Y. Huang, I. D. Rukhlenko, G. Wen, and M. Premaratne, 2012, Configurable metamaterial absorber with pseudo wideband spectrum, *Opt. Express*, 20 (6), 6616–6621.
- [72] Z. F. Meng, Z. Tao, J. F. Ruan, R. Z. Zou, and S. W. Ji, 2022, Broadband-absorption mechanism in a water-based metamaterial absorber, *Phys. Lett. A*, 445, 128269.
- [73] D. Hu, H. Wang, Z. Tang, and X. Zhang, 2016, Investigation of a broadband refractory metal metamaterial absorber at terahertz frequencies, *Appl. Opt.*, 55 (19), 5257–5262.
- [74] J. Wu, 2015, Broadband efficiency enhancement in quantum dot solar cells coupled with multispiked plasmonic nanostars, *Nano Energy*, 13, 827–835.
- [75] P. Yu, J. Wu, S. Liu, J. Xiong, C. Jagadish, and Z. M. Wang, 2016, Design and fabrication of silicon nanowires towards efficient solar cells, *Nano Today*, 11 (6), 704–737.
- [76] E. Rephaeli and S. Fan, 2009, Absorber and emitter for solar thermophotovoltaic systems to achieve efficiency exceeding the Shockley-Queisser limit, *Opt. Express*, 17 (17), 15145–15159.
- [77] Z. Wang, Z. Liu, C. Zhang, D. Yang, P. Cheng, and Y. Shuai, 2022, Notched nanoring wideband absorber for total solar energy harvesting, *Sol. Energy*, 243, 153–162.
- [78] M. Bagmanci, M. Karaaslan, E. Unal, O. Akgol, M. Bakır, and C. Sabah, 2019, Solar energy harvesting with ultra-broadband metamaterial absorber, *Int. J. Mod. Phys. B*, 33 (8), 1950056.
- [79] M. Bağmancı, M. Karaaslan, E. Ünal, O. Akgol, F. Karadağ, and C. Sabah, 2017, Broad-band polarization-independent metamaterial absorber for solar energy harvesting applications, *Phys. E low-dimensional Syst. nanostructures*, 90, 1–6.
- [80] H. Liu, M. Xie, Q. Ai, and Z. Yu, 2021, Ultra-broadband selective absorber for near-perfect harvesting of solar energy, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 266, 10757.
- [81] J. H. Park, S. E. Han, P. Nagpal, and D. J. Norris, 2016, Observation of thermal beaming from tungsten and molybdenum bull’s eyes, *ACS Photonics*, 3 (3),

494–500.

- [82] A. Kohiyama, M. Shimizu, and H. Yugami, 2016, Unidirectional radiative heat transfer with a spectrally selective planar absorber/emitter for high-efficiency solar thermophotovoltaic systems, *Appl. Phys. Express*, 9 (11) 11, 112302.
- [83] Y. Nam, A. Lenert, Y. X. Yeng, P. Bermel, M. Soljačić, and E. N. Wang, 2013, Solar thermophotovoltaic energy conversion systems with tantalum photonic crystal absorbers and emitters, in *2013 Transducers & Euroensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, IEEE, 1372–1375.
- [84] W. Li, U. Guler, N. Kinsey, G. V. Naik, A. Boltaseva, J. Guan, V. M. Shalaev, A. V. Kildishew, 2014, Refractory plasmonics with titanium nitride: broadband metamaterial absorber, *Adv. Mater.*, 26 (47), 7959–7965.
- [85] M. Karaaslan, M. Bağmancı, E. Ünal, O. Akgol, O. Altıntaş, and C. Sabah, 2018, Broad band metamaterial absorber based on wheel resonators with lumped elements for microwave energy harvesting, *Opt. Quantum Electron.*, 50, 1–18.
- [86] S. Paloscia, P. Pampaloni, and E. Santi, 2018, Radiometric microwave indices for remote sensing of land surfaces, *Remote Sens.*, 10 (12), 1859.
- [87] A. Royer, A. Roy, B. Montpetit, R. J. S. Olivier, G. Picard, L. Brucker, A. Langlois, 2017, Comparison of commonly-used microwave radiative transfer models for snow remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 190, 247–259.
- [88] R. Di Candia, H. Yiğitler, G. S. Paraoanu, and R. Jäntti, 2021, Two-way covert quantum communication in the microwave regime, *PRX Quantum*, 2 (2), 20316.
- [89] R. Jantti, R. Duan, J. Lietzen, H. Khalifa, and L. Hanzo, 2020, Quantum-enhanced microwave backscattering communications, *IEEE Commun. Mag.*, 58 (1), 80–85.
- [90] S. Fan and Y. Song, 2020, Ultra-wideband flexible absorber in microwave frequency band, *Materials (Basel)*, 13 (21), 4883.
- [91] M. Bağmancı, M. Karaaslan, E. Unal, M. Özaktürk, O. Akgol, F. Karadağ, A. Bhadauria, 2019, Wide band fractal-based perfect energy absorber and power

- harvester, *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, 29 (7), 21597.
- [92] W. Li and J. Valentine, 2014, Metamaterial perfect absorber based hot electron photodetection, *Nano Lett.*, 14 (6), 3510–3514.
- [93] K. T. Lin, C. J. Chan, Y. S. Lai, L. T. Shiu, C. C. Lin, and H. L. Chen, 2019, Silicon-based embedded trenches of active antennas for high-responsivity omnidirectional photodetection at telecommunication wavelengths, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11 (3), 3150–3159.
- [94] D. Razansky, P. D. Einziger, D. R. Adam, and T. Tamir, 2006, Optimized microbolometers with higher sensitivity for visible and infrared imaging, *Opt. Express*, 14 (22), 10426–10434.
- [95] A. Varpula, K. Tappura, J. Tiira, K. Grigoras, O. P. Kilpi, K. Sovanto, J. Ahopelto, M. Prunnila, 2021, Nano-thermoelectric infrared bolometers, *APL Photonics*, 6 (3), 36111.
- [96] M. F. Rashman, I. A. Steele, S. D. Bates, and J. H. Knapen, 2021, A low-cost chopping system and uncooled microbolometer array for ground-based astronomy, *Exp. Astron.*, 51 (2), 273–286.
- [97] A. A. Kuzmin, A. D. Semenov, A. V. Shitov, M. Merker, S. H. Wuensch, A. V. Ustinov, M. Siegel, 2017, Superconducting noise bolometer with microwave bias and readout for array applications, *Appl. Phys. Lett.*, 111 (4), 42601.
- [98] W. Ma, D. Jia, Y. Wen, X. Yu, Y. Feng, and Y. Zhao, 2016, Diode-based microbolometer with performance enhanced by broadband metamaterial absorber, *Opt. Lett.*, 41 (13), 2974–2977.
- [99] A. M. Nicolson and G. F. Ross, 1970, Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 19 (4), 377–382.
- [100] X. Chen, T. M. Grzegorzczak, B. I. Wu, J. Pacheco Jr, and J. A. Kong, 2004, Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials, *Phys. Rev. E*, 70 (1), 16608.
- [101] Y. Pang, Y. Zhou, and J. Wang, 2011, Equivalent circuit method analysis of the influence of frequency selective surface resistance on the frequency response of metamaterial absorbers, *J. Appl. Phys.*, 110 (2), 23704.

- [102] Y. Shang, Z. Shen, and S. Xiao, 2013, On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 61 (12), 6022–6029.
- [103] T. K. T. Nguyen, T. M. Nguyen, H. Q. Nguyen, T. N. Cao, D. T. Le, X. K. Bui, S. T. Bui, C. L. Truong, D. L. Vu, T. Q. H. Nguyen, 2021, Simple design of efficient broadband multifunctional polarization converter for X-band applications, *Sci. Rep.*, 11 (11), 2032.
- [104] H. Chen, X. Yang, S. Wu, D. Zhang, H. Xiao, K. Huang, Z. Zhu, and J. Yuan, 2018, Flexible and conformable broadband metamaterial absorber with wide-angle and polarization stability for radar application, *Mater. Res. Express*, 5 (1), 2053-1591.
- [105] L. L. Cong, X. Y. Cao, T. Song, J. Gao, and J. X. Lan, 2018, Angular-and polarization-insensitive ultrathin double-layered metamaterial absorber for ultra-wideband application,” *Sci. Rep.*, 8 (1), 9627.
- [106] M. Bağmancı, O. Akgöl, M. Özaktürk, M. Karaaslan, E. Ünal, and M. Bakır, 2019, Polarization independent broadband metamaterial absorber for microwave applications,” *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, 29 (1), e21630.
- [107] J. Chen, X. Huang, G. Zerihun, Z. Hu, S. Wang, G. Wang, X. Hu, M. Liu, 2015, Polarization-independent, thin, broadband metamaterial absorber using double-circle rings loaded with lumped resistances, *J. Electron. Mater.*, 44, 4269–4274.
- [108] T. T. Nguyen and S. Lim, “Design of Metamaterial Absorber using Eight-Resistive-Arm Cell for Simultaneous Broadband and Wide-Incidence-Angle Absorption,” *Sci. Rep.*, 8 (1), 1–10.
- [109] T. Q. H. Nguyen, T. K. T. Nguyen, T. N. Cao, H. Nguyen, and L. G. Bach, 2020, Numerical study of a broadband metamaterial absorber using a single split circle ring and lumped resistors for X-band applications,” *AIP Adv.*, 10 (3), 35326.
- [110] Y. J. Kim, J. S. Hwang, Y. J. Yoo, B. X. Khuyen, J. Y. Rhee, X. Chen, and Y. P. Lee, 2017, Ultrathin microwave metamaterial absorber utilizing embedded resistors, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 50 (40), 405110.
- [111] S. Zhong, W. Jiang, P. Xu, T. Liu, J. Huang, and Y. Ma, 2017, A radar-infrared

- bi-stealth structure based on metasurfaces, *Appl. Phys. Lett.*, 110 (6), 6–11.
- [112] S. Ghosh, S. Bhattacharyya, D. Chaurasiya, and K. V. Srivastava, 2015, An ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 14, 1172–1175.
- [113] S. Li, J. Gao, X. Cao, W. Li, Z. Zhang, and D. Zhang, 2014, Wideband, thin, and polarization-insensitive perfect absorber based the double octagonal rings metamaterials and lumped resistances, *J. Appl. Phys.*, 116 (4) 43710.
- [114] J. Yang and Z. Shen, 2007, A thin and broadband absorber using double-square loops, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 6, 388–391.
- [115] M. Yoo and S. Lim, 2014, Polarization-independent and ultrawideband metamaterial absorber using a hexagonal artificial impedance surface and a resistor-capacitor layer, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 62 (5), 2652–2658.
- [116] S. Ghosh, S. Bhattacharyya, and K. V. Srivastava, 2016, Design, characterisation and fabrication of a broadband polarisation-insensitive multi-layer circuit analogue absorber, *IET Microwaves, Antennas Propag.*, 10 (8), 850–855.
- [117] T. M. Nguyen, T. K. T. Nguyen, D. T. Phan, D. T. Le, D. L. Vu, T. Q. H. Nguyen, J. M. Kim, 2022, Ultra-wideband and lightweight electromagnetic polarization converter based on multiresonant metasurface, *IEEE Access*, 10, 92097–92104.
- [118] D. T. Phan, T. K. T. Nguyen, N. H. Nguyen, D. T. Le, X. K. Bui, D. L. Vu, C. L. Truong, T. Q. H. Nguyen, 2021, Lightweight, Ultra-Wideband, and Polarization-Insensitive Metamaterial Absorber Using a Multilayer Dielectric Structure for C-and X-Band Applications, *Phys. status solidi*, 258 (10), 2100175.
- [119] F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara, 2010, Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 58 (5), 1551–1558.
- [120] N. T. Q. Hoa, P. D. Tung, P. H. Lam, N. D. Dung, and N. H. Quang, 2018, Numerical study of an ultrabroadband, wide-angle, polarization-insensitivity metamaterial absorber in the visible region, *J. Electron. Mater.*, 47, 2634–2639.
- [121] L. Zhu and L. Dong, 2022, Electromagnetically induced transparency

- metamaterials: theories, designs and applications, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 55 (26), 263003.
- [122] T. Beeharry, R. Yahiaoui, K. Selemeni, and H. H. Ouslimani, 2018, A dual layer broadband radar absorber to minimize electromagnetic interference in radomes, *Sci. Rep.*, 8 (1), 1–9.
- [123] T. K. T. Nguyen *et al.*, 2021, Simple design of a wideband and wide-angle insensitive metamaterial absorber using lumped resistors for X-and Ku-bands,” *IEEE Photonics J.*, 13 (3), 1–10.
- [124] S. Kalraiya, R. K. Chaudhary, and M. A. Abdalla, 2019, Design and analysis of polarization independent conformal wideband metamaterial absorber using resistor loaded sector shaped resonators,” *J. Appl. Phys.*, 125 (13), 134904.
- [125] R. Zhou *et al.*, 2021, Tunable broadband terahertz absorber based on graphene metamaterials and VO₂, *Opt. Mater. (Amst.)*, 114, 110915.
- [126] Y. Q. Ye, Y. Jin, and S. He, 2010, Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime,” *JOSA B*, 27 (3), 498–504.
- [127] R. Gao, Z. Xu, C. Ding, L. Wu, and J. Yao, 2015, Graphene metamaterial for multiband and broadband terahertz absorber, *Opt. Commun.*, 356, 400–404.
- [128] Y. Zhong, Y. Huang, S. Zhong, T. Lin, M. Luo, Y. Shen, J. Ding, 2021, Tunable terahertz broadband absorber based on MoS₂ ring-cross array structure, *Opt. Mater. (Amst.)*, 114, 110996.
- [129] S. Wang, C. Cai, M. You, F. Liu, M. Wu, S. Li, H. Bao, L. Kang, and D. H. Werner, 2019, Vanadium dioxide based broadband THz metamaterial absorbers with high tunability: simulation study, *Opt. Express*, 27(14), 19436–19447.
- [130] J. Huang, J. Li, Y. Yuang, J. Li, Y. Zhang, and J. Yao, 2020, Broadband terahertz absorber with a flexible, reconfigurable performance based on hybrid-patterned vanadium dioxide metasurfaces, *Opt. Express*, 28 (12), 17832–17840.
- [131] Y. J. Yoo, S. Ju, S. Y. Park, Y. J. Kim, J. Bong, T. Lim, K. W. Kim, J. Y. Rhee, and Y. P. Lee, 2015, Metamaterial absorber for electromagnetic waves in periodic water droplets, *Sci. Rep.*, 5 (1), 1–8.

- [132] X. Huang, H. Yang, Z. Shen, J. Chen, H. Lin, and Z. Yu, 2017, Water-injected all-dielectric ultra-wideband and prominent oblique incidence metamaterial absorber in microwave regime, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 50 (38), 385304.
- [133] F. Lan, Z. F. Meng, J. F. Ruan, R. Z. Zou, and S. W. Ji, 2021, All-dielectric water-based metamaterial absorber in terahertz domain, *Opt. Mater. (Amst)*, 121, 111572.
- [134] T. K. Thu, N. T. Minh, N. H. Quang, N. T. M. Tam, H. T. H. Thuong, P. T. My, V. D. Lam, and N. T. Q. Hoa, 2023, A simple design of water-based broadband metamaterial absorber for THz applications, *Commun. Phys.*, 33 (1) 93.
- [135] Y. Zhou, Z. Shen, X. Huang, J. Wu, Y. Li, S. Huang, H. Yang, 2019, Ultra-wideband water-based metamaterial absorber with temperature insensitivity, *Phys. Lett. A*, 383 (23), 2739–2743.
- [136] M. Zhang, F. Zhang, Y. Ou, J. Cai, and H. Yu, 2018, Broadband terahertz absorber based on dispersion-engineered catenary coupling in dual metasurface, *Nanophotonics*, 8 (1) 117–125, 2018.
- [137] H. Zhang, F. Ling, H. Wang, Y. Zhang, and B. Zhang, 2020, A water hybrid graphene metamaterial absorber with broadband absorption, *Opt. Commun.*, 463, 125394.
- [138] S. Li, Z. Shen, H. Yang, Y. Liu, Y. Yang, and L. Hua, 2021, Ultra-wideband transmissive water-based metamaterial absorber with wide angle incidence and polarization insensitivity, *Plasmonics*, 16, 1269–1275.
- [139] J. Xie, W. Zhu, I. D. Rukhlenko, F. Xiao, C. He, J. Geng, X. Liang, R. Jin, and M. Premaratne, 2018, Water metamaterial for ultra-broadband and wide-angle absorption, *Opt. Express*, 26 (4) , 5052–5059.
- [140] Q. Wu, F. Ling, C. Zhang, Z. Zhong, and B. Zhang, 2023, Water-based metamaterials absorber with broadband absorption in terahertz region, *Opt. Commun.*, 526, 128874.
- [141] Y. Zhang, M. J. Yin, X. Ouyang, A. P. Zhang, and H. Y. Tam, 2020, 3D μ -printing of polytetrafluoroethylene microstructures: A route to superhydrophobic surfaces and devices, *Appl. Mater. Today*, 19, 100580.

- [19] Đỗ Thành Việt, 2015, *Nghiên cứu chế tạo và tính chất hấp thụ tuyệt đối sóng vi ba của vật liệu meta (metamaterial)*, Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [20] Đặng Hồng Lưu, 2018, *Nghiên cứu vật liệu biến hóa (metamaterials) hấp thụ sóng điện từ ở vùng tần số THz*, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [21] Đinh Hồng Tiệp, 2020, *Nghiên cứu chế tạo vật liệu biến hóa hấp thụ sóng điện từ băng tần rộng vùng GHz trên cơ sở vật liệu biến hóa*, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [29] V. Đ. Lãm, 2018, *Vật liệu biến hóa có chiết suất âm: công nghệ chế tạo, tính chất và ứng dụng*, Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội.
- [37] Trần Văn Huỳnh, 2022, *Nghiên cứu tính chất hấp thụ sóng điện từ đẳng hướng của vật liệu biến hóa trên cơ sở kết hợp graphene*, Luận án Tiến sĩ, Học viện Khoa học và Công nghệ.
- [41] T. V. Huỳnh, V. Đ. Lãm, L. Thị, H. Hiệp, and N. T. Tùng, 2022, *Nghiên cứu thiết kế siêu vật liệu hấp thụ hai chiều hoạt động ở vùng tần số THz và ứng dụng trong cảm biến chiết suất*, *Journal of Military Science and Technology*, 78, 140–150.