

## DANH SÁCH CÁC THÀNH VIÊN THAM GIA VÀ ĐƠN VỊ PHỐI HỢP CHÍNH

- I. Chủ nhiệm đề tài: TS. Nguyễn Thị Hiền-Trường Đại Học Khoa học Thái Nguyên
- II. Thành viên đề tài:
  - 2.1. TS. Nguyễn Xuân Ca - Trường Đại Học Khoa học Thái Nguyên
  - 2.2. ThS. Phan Thị Duyên - Viện Khoa học Vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
  - 2.3. TS. Nguyễn Thanh Tùng - Viện Khoa học Vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
  - 2.4. TS. Phạm Minh Tân – Trường Đại Học Công nghiệp Thái Nguyên
  - 2.5. TS. Đỗ Thành Việt - Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự.
- III. Đơn vị phối hợp chính: Viện Khoa học Vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

**DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU**

Bảng 4.1	Hệ số tổn hao điện môi và phần thực hằng số điện môi của một số vật liệu điện môi ở nhiệt độ phòng và quanh tần số 10GHz	97
Bảng 5.1	Các kết quả tính toán nồng độ hạt tải N, độ tự cảm động, tần số cộng hưởng từ và tần số plasma tổng cộng của cấu trúc dạng lưới phụ thuộc vào nhiệt độ	122

### **DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VIẾT TẮT**

<b>Ký hiệu</b>	<b>Tên đầy đủ</b>	<b>Tên tiếng Việt</b>
DP	Dish-pair	Cặp đĩa
DN	Dish-net	Lưới đĩa
CW	Cut - wire	Dây kim loại bị cắt
CWP	Cut - wire Pair	Cặp dây bị cắt
CB	Combined Structure	Cấu trúc kết hợp
EMT	Effective Medium Theory	Lý thuyết môi trường hiệu dụng
FDTD	Finite Difference Time Domain	Đạo hàm hữu hạn - trong miền thời gian
FOM	Figure of Merit	Hệ số phẩm chất
FN	Fishnet	Dạng lưới
Meta	Metamaterial	Siêu vật liệu
NRI	Negative Refractive Index	Chiết suất âm
SRR	Split - Ring Resonator	Vòng cộng hưởng
TMM	Transfer Matrix Method	Phương pháp ma trận truyền qua

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO****ĐƠN VỊ: ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN****THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU****1. Thông tin chung:**

- **Tên đề tài:** Thiết kế và chế tạo siêu vật liệu metamaterials có dải tần số làm việc rộng ở vùng sóng Rada;
- **Mã số:** B2015-TN05-01
- **Chủ nhiệm đề tài:** TS. Nguyễn Thị Hiền
- **Cơ quan chủ trì đề tài:** Đại Học Thái Nguyên
- **Thời gian thực hiện:** Từ tháng 01/2015 đến 12/2017.

**2. Mục tiêu:**

Thiết kế và chế tạo được siêu vật liệu metamaterials có dải tần số làm việc rộng ở vùng sóng Rada

**3. Tính mới và sáng tạo:**

- Lần đầu tiên tại Việt Nam đã xây dựng được một chương trình tính toán các tham số hiệu dụng (độ từ thẩm  $\mu$ , độ điện thẩm  $\epsilon$ , chiết suất  $n$ , trở kháng  $z$ ) dựa trên thuật toán đề xuất bởi Chen.
- Tìm kiếm được cấu trúc siêu vật liệu metamaterials (Meta) đơn giản và có vùng tần số hoạt động rộng ở vùng GHz góp phần sớm đưa vật liệu Meta vào ứng dụng thực tế. Các mẫu này đã được chế tạo và kết quả nghiên cứu của chúng tôi cho thấy vùng hoạt động rộng hơn một số kết quả nghiên cứu gần đây của các nhóm khác trên thế giới cộng với cấu trúc đơn giản hơn.

**4. Kết quả nghiên cứu:**

Đã hoàn thành 03 nội dung nghiên cứu đã đưa ra trong thuyết minh đề tài

**Nội dung 1: Đã Xây dựng chương trình tính toán các tham số hiệu dụng**

- Đã tìm hiểu thuật toán đề xuất bởi Chen và cộng sự.
- Dựa trên thuật toán của Chen đã xây dựng chương trình tính toán các tham số hiệu dụng (độ từ thẩm  $\mu$ , độ điện thẩm  $\epsilon$ , chiết suất  $n$ , trở kháng  $z$ ) (xây

dựng được 01 bộ code trên chương trình matlab để tính toán các tham số hiệu dụng)

- Đã kiểm tra độ chính xác của chương trình sau khi xây dựng được.

### **Nội dung 2: Đã nghiên cứu ảnh hưởng của cấu trúc và các tham số cấu trúc lên tính chất điện từ của vật liệu**

- Đã nghiên cứu ảnh hưởng của các dạng cấu trúc khác nhau lên tính chất điện từ của vật liệu.
- Đã tìm kiếm vật liệu MMs có cấu trúc đơn giản, đối xứng cao.
- Đã nghiên cứu ảnh hưởng của tham số cấu trúc lên tính chất của vật liệu.

### **Nội dung 3: Đã tối ưu hóa cấu trúc nhằm mở rộng dải tần số hoạt động của siêu vật liệu**

- Đã tìm kiếm cấu trúc có vùng tần số làm việc rộng (broadband).
- Đã nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số cấu trúc đến việc mở rộng vùng tần số hoạt động của MMs.
- Đã tối ưu hóa các tham số cấu trúc để thu được dải tần hoạt động là rộng nhất.

## **5. Sản phẩm:**

### **5.1. Sản phẩm khoa học:**

**Có 02 bài ISI:**

1. Hien N. T., Tung B. S., Sen Y., Guy A. E.V., Peter L., Lam V. D., and Ewald J. (2016), “Broadband negative refractive index obtained by plasmonic hybridization in metamaterials”, Applied Physics Letters, 109, pp. 2219021-2219025.
2. Hien N. T., Le L. N., Trang P. T., Tung B. S., Viet N. D, Duyen P. T., Thang N. M., Viet D. T., Lee Y. P., Lam V. D, Tung N. T. (2015), “Characterizations of a thermo-tunable broadband fishnet metamaterial at THz frequencies”, Computational Materials Science, 103, pp. 189-193.

**Có 05 bài đăng trên tạp chí trong nước:**

1. Nguyễn Thị Hiền, Vũ Đình Quý, Trịnh Thị Giang, Nguyễn Thành Tùng và Vũ Đình Lâm (2016), “Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo siêu vật liệu không

phụ thuộc vào phân cực sóng điện từ”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ*, 54 (02), tr. 258-265.

2. **Nguyễn Thị Hiền**, Nguyễn Thị Hương Liên, Nguyễn Thị Hải và Vũ Đình Lâm (2016), “Nghiên cứu mở rộng dải hấp thụ hoàn hảo sóng điện từ dựa trên siêu vật liệu”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Thái Nguyên (số đặc biệt chào mừng 86 năm thành lập hội liên hiệp phụ nữ Việt Nam)*, tr. 173-176.
3. **Nguyễn Thị Hiền**, Nguyễn Xuân Ca, Phạm Minh Tân, Nguyễn Trung Kiên, Nguyễn Thị Mây, Vũ Đình Lâm (2017), “Mở rộng dải tần từ thầm âm dựa trên mô hình lai hóa bậc hai cho cấu trúc đối xứng bằng phương pháp mô phỏng”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Đại học Thái Nguyên 172 (số đặc biệt chào mừng 87 năm thành lập hội liên hiệp phụ nữ Việt Nam)*, tr. 3-8.
4. Duyen P. T., Hien N. T., Viet N. D, Tung N. T., and Lam V. D. (2015), “Decisive role of the dielectric spacer on metamaterial hybridization”, *Tạp chí nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, 35 (02), tr. 106-111.
5. **Nguyễn Thị Hiền**, Nguyễn Xuân Ca, Nguyễn Thị Mây, Phạm Minh Tân, Nguyễn Thanh Tùng và Vũ Đình Lâm (2017), “Vai trò của tốn hao lớp điện môi lên sự mở rộng vùng có chiết suất âm sử dụng mô hình lai hóa bậc hai”, *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Sư Phạm Hà Nội 2*, số 51, tr. 40-50.

#### **Có 01 bài đăng trên kỷ yếu hội nghị:**

1. Vũ Đình Lâm, Nguyễn Thanh Tùng, **Nguyễn Thị Hiền**, Đỗ Thành Việt, Phạm Thị Trang và Lê Văn Hồng (2015), “Một số kết quả nghiên cứu về siêu vật liệu Metamaterial tại Viện Khoa học Vật liệu”, *Tuyển tập báo cáo – 40 năm thành lập Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, tr. 195-214.

#### **5.2. Sản phẩm đào tạo:**

**Có 01 luận văn thạc sĩ, 01 đề tài sinh viên nghiên cứu khoa học, 02 khóa luận tốt nghiệp đã bảo vệ:**

1. **Phan Thị Duyên (2016)**, Study of the broadband metamaterial absorber based on ring – structure, Luận văn thạc sĩ Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội (thành viên của đề tài).

2. **Nguyễn Thị Hải (2015-2016)**, *Nghiên cứu tính chất của siêu vật liệu có chiết suất âm*, Đề tài sinh viên nghiên cứu Khoa học trường Đại học Khoa học Thái Nguyên.
3. **Nguyễn Thị Hương Liên (2015-2016)**, *Tối ưu hóa cấu trúc vật liệu Meta*, Khóa luận tốt nghiệp trường Đại học Khoa học Thái Nguyên.
4. **Nguyễn Thị Hải (2016-2017)**, *Nghiên cứu mở rộng dải tần số hoạt động của siêu vật liệu có độ từ thẩm âm*, Khóa luận tốt nghiệp trường Đại học Khoa học Thái Nguyên.

### **5.3. Sản phẩm khác**

1. 01 Phần mềm (code) tính toán đúng các tham số hiệu dụng (độ từ thẩm  $\mu$ , độ điện thẩm  $\epsilon$ , chiết suất  $n$ , trở kháng  $z$ ).
2. Qui trình công nghệ chế tạo siêu vật liệu metamaterials ở vùng sóng Rada.
3. 10 mẫu siêu vật liệu metamaterials có kích thước 15cmx15cm.

### **6. Phương thức chuyển giao, địa chỉ ứng dụng, tác động và lợi ích của kết quả nghiên cứu:**

- Đề tài là một phần kết quả quan trọng trong luận án NCS của chủ nhiệm đề tài
- Kết quả nghiên cứu của đề tài tạo điều kiện để sinh viên và các cán bộ giảng dạy trong khoa VL&CN trường Đại học Khoa học Thái Nguyên được cập nhật với các vấn đề khoa học thời sự hiện nay trên thế giới.
- Việc nghiên cứu và chế tạo siêu vật liệu Metamaterials mở ra một hướng nghiên cứu một loại vật liệu mới có những ứng dụng có ý nghĩa rất quan trọng trong đời sống và đặc biệt trong quân sự như: tàng hình, ảnh nhiệt, siêu thấu kính, antennas, sensor...

Ngày tháng năm 2017

<b>Tổ chức chủ trì</b>	<b>Chủ nhiệm đề tài</b>
(ký, họ và tên, đóng dấu)	(ký, họ và tên)

## **INFORMATION ON RESEARCH RESULTS**

### **1. General information:**

Project title: Design and fabricate of broadband metamaterials operating in Radar frequency

Code number: B2015-TN05-01

Coordinator: Dr. **Nguyen Thi Hien**

Implementing institution: Thai Nguyen University

Duration: from 01/2015 to 12/2017

### **2. Objective(s):**

- Design and fabricate of broadband metamaterials operating in Radar frequency

### **3. Creativeness and innovativeness:**

- This is the first time in Vietnam, We has built a program calculates the effective parameters (permeability  $\mu$ ,  $\epsilon$  evaluation of power, refractive index  $n$ , impedance  $z$ ) based on the algorithm proposed by Chen.

- We have found simple structure base on metamaterials and they can activity in the region GHz frequency. Our contributions brings metamaterials closer practical application.

### **4. Research results:**

Completed 03 research contents:

Content 1: Developed a program for calculating effective parameters

- Research the algorithms proposed by Chen et al.
- Based on the algorithm of Chen, We has built a program to calculate the effective parameters (permeability  $\mu$ , permittivity  $\epsilon$ , refractive index  $n$ , impedance  $z$ )
- Checked the accuracy of the program after the construction

Content 2: The effect of structure and structural parameters on the electromagnetic properties of materials was investigated

- The effect of different types of structures on the electromagnetic properties of materials has been studied.
- Simple, highly symmetrical metamaterials were found.
- The influence of structural parameters on the properties of materials has been studied.

**Content 3:** Optimized structure to broadband metamaterials

- The structural broadband metamaterials were found.
- The influence of structural parameters on the expansion of the operating frequency range of Metamaterials has been investigated.
- Optimized structural parameters to achieve the widest operating band.

**5. Products:**

**5.1. Scientific publications:**

**There are 02 articles published in international journal (ISI):**

1. **Hien N. T.**, Tung B. S., Sen Y., Guy A. E.V., Peter L., Lam V. D., and Ewald J. (2016), “Broadband negative refractive index obtained by plasmonic hybridization in metamaterials”, Applied Physics Letters, 109, pp. 2219021-2219025.
2. **Hien N. T.**, Le L. N., Trang P. T., Tung B. S., Viet N. D, Duyen P. T., Thang N. M., Viet D. T., Lee Y. P., Lam V. D, Tung N. T. (2015), “Characterizations of a thermo-tunable broadband fishnet metamaterial at THz frequencies”, Computational Materials Science, 103, pp. 189-193.

**There are 05 articles published in national journal:**

1. **Hien N. T.**, Qui V. D, Giang T. T., Tung N. T. and Lam V. D., “Study, design and fabricate metamaterials independent on the polarization of electromagnetic waves, Journal of Science and Technology, 54 (02), pp. 258-265.
2. **Hien N. T.**, Lien N. T. H., Hai N. T. and Lam V. D. (2016), “Study of broadband perfect absorber base on metamaterials”, Journal of Science and Technology of Thai Nguyen University (Special number to celebrate the 86th anniversary of the founding of the Vietnam Women's Union), pp. 173-176.

3. **Hien N. T.**, Ca N. X., Tan P. M., Kien N. T., May N. T. and Lam V. D. (2017), “Broadband Negative Permeability by Hybridized symmetric structure Metamaterials used to simulated method”, Journal of Science and Technology of Thai Nguyen University 172 (Special number to celebrate the 87th anniversary of the founding of the Vietnam Women's Union), tr. 3-8.
4. Duyen P. T., **Hien N. T.**, Viet N. D, Tung N. T., and Lam V. D. (2015), “Decisive role of the dielectric spacer on metamaterial hybridization”, Journal Science Research and Military Technology, 35 (02), pp. 106-111.
5. **Hien N. T.**, Ca N. X., May N. T., Tan P. M., Tung N. T. and Lam V. D (2017), “Role of the dielectric loss on broadband negative refraction metamaterial hybridization”, Journal of Science , HaNoi Pedagogical University 2 , 51, pp. 40-50.

#### **There are 01 articles published in proceeding conference**

1. Lam V. D., Tung N. T., **Hien N. T**, Viet D. T., Trang P. T. and Hong L. V. (2015), “Some results of research on metamaterials at the Institute of Materials Science”, Proceedings Report - 40th Vietnam Academy of Science and Technology, pp 195-214.

#### **5.2. Training results:**

There are 01 Master Thesis, 01 topic research and 02 Bachelor Thesis:

- 1. Phan Thi Duyen (2016)**, Study of the broadband metamaterial absorber based on ring – structure, Master Thesis, University of Science and Technology of Ha Noi.
- 2. Nguyen Thi Hai (2015-2016)**, Study negative refractive metamaterials, Student topic research, Thainguyen University of Science.
- 3. Nguyen Thi Huong Lien (2015-2016)**, Optimize structure of Metamaterial, Bachelor Thesis, Thainguyen University of Science.
- 4. Nguyen Thi Hai (2016-2017)**, Study broadband negative permeability of metamaterials, Bachelor Thesis, Thainguyen University of Science.

#### **5.4. Other results:**

1. 01 code for extract effective parameters (permeability  $\mu$ ,  $\epsilon$  evaluation of power, refractive index  $n$ , impedance  $z$ ).

2. Process technology for fabricate metamaterials in Rada frequency.
3. 10 sample of metamaterials with size 15cmx15cm.

**6. Transfer alternatives, application institutions, impacts and benefits of reserach results:**

- It is a important part of coordinator's my doctoral thesis.
- The results of there search subject help students and teachers of the physics and technology faculty are up dated with the currents cientific issues in the world today.
- The study of materials and fabrication metamaterials are search study of new materials applications extremely exciting and magical as "invisibility cloak" superlens, filter frequency, sensobiology....There is a very important meaning in life and especially inmilitary.

## MỞ ĐẦU

Những tiến bộ gần đây trong lĩnh vực chế tạo vật liệu micro và nano cho phép con người có thể tạo ra những vật liệu nhân tạo vượt ra ngoài giới hạn thông thường của vật liệu truyền thống, can thiệp sâu vào thành phần của vật liệu, tạo ra các bảng tuần hoàn hóa học “đa chiều” và những vật liệu phức hợp mới. Một trong những động lực quan trọng khác để nghiên cứu các vật liệu nhân tạo, đó là triển vọng tạo ra các tính chất vĩ mô mới lạ bằng cách sắp xếp và quy luật hóa trật tự, hình dạng và kích thước của các vi cấu trúc tạo nên vật liệu. Trong lĩnh vực quang tử điều này đã trở thành hiện thực với sự ra đời của siêu vật liệu (Metamaterials - Meta). Hiện nay có nhiều hướng nghiên cứu khác nhau về vật liệu Meta. Một trong các hướng nghiên cứu về vật liệu Meta đã và đang được sự tập trung đông đảo các nhà khoa học, sự đầu tư rất lớn về kinh phí và có số lượng các công trình công bố lớn đó là hướng nghiên cứu vật liệu Meta có chiết suất âm (negative refractive metamaterial). Vật liệu Meta có chiết suất âm được chế tạo thành công lần đầu tiên năm 2000 bởi Smith [106], trong khi tính chất của nó được tiên đoán về mặt lý thuyết từ năm 1968 bởi Veselago [119]. Vật liệu Meta có chiết suất âm là sự kết hợp hoàn hảo của hai thành phần điện và từ tạo nên vật liệu đồng thời có độ từ thẩm âm ( $\mu < 0$ ) và độ điện thẩm âm ( $\epsilon < 0$ ) trên cùng một dải tần số. Do vậy, vật liệu Meta có chiết suất âm có những tính chất điện từ và quang học bất thường, trong đó có sự nghịch đảo của định luật Snell [142], sự nghịch đảo trong dịch chuyển Doppler [13], và sự nghịch đảo của phát xạ Cherenkov [25]....

Ngoài những tính chất đặc biệt kể trên, rất nhiều ứng dụng khác nhau của vật liệu Meta đã được đề xuất và được kiểm chứng bằng thực nghiệm. Một trong những ứng dụng nổi bật nhất của vật liệu này là siêu thấu kính được đề xuất bởi Pendry vào năm 2000 [93], sau đó đã được Zhang và các cộng sự kiểm chứng bằng thực nghiệm vào năm 2005 [31]. Một ứng dụng độc đáo khác nữa là sử dụng vật liệu Meta như là “áo choàng” để che chắn sóng điện từ (electromagnetic cloaking), được đề xuất và kiểm chứng bởi Schurig và cộng sự năm 2006 [92]. Bằng việc điều chỉnh các tham số hiệu dụng  $\mu$  và  $\epsilon$  một cách hợp lý, đường đi của các tia sáng bị uốn cong khi truyền trong vật liệu Meta và đồng thời không bị phản xạ cũng như tán xạ. Do vậy, vật liệu này hứa hẹn sẽ được dùng để chế tạo lớp vỏ tang hình. Ngoài những ứng dụng kể trên, vật liệu Meta còn có tiềm năng trong các lĩnh vực khác như bộ lọc tần số [7], cảm biến sinh học [65], . . . Gần đây, một vài ứng dụng nổi

bật khác có thể kể đến như là vật liệu hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ không phản xạ [64], làm chậm ánh sáng [135]. Với các tính chất đặc biệt này, siêu vật liệu hứa hẹn sẽ có thêm nhiều ứng dụng khác nữa trong thực tế như thiết bị khoa học, y tế, pin năng lượng và đặc biệt trong lĩnh vực quân sự.

Với những tính chất đặc biệt và khả năng ứng dụng to lớn này, vật liệu Meta ngày càng được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu một cách mạnh mẽ. Trong những năm gần đây, nghiên cứu về vật liệu Meta trên thế giới cực kì sôi động và đã thu được nhiều kết quả thú vị. Ở Việt Nam, nhóm nghiên cứu do PGS. TS. Vũ Đình Lãm, Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam là một trong những nhóm nghiên cứu chuyên sâu về lĩnh vực này và đã có nhiều công trình đăng trên các tạp chí có uy tín [56], [57], [120], [121]. Trong đó chủ nhiệm đề tài là một thành viên của nhóm nghiên cứu này. Ngoài ra, nhóm nghiên cứu của PGS. TS. Vũ Văn Yêm, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, nhóm nghiên cứu của TS. Nguyễn Huỳnh Tuấn Anh, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, nhóm nghiên cứu của TS. Trần Mạnh Cường thuộc Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội cũng quan tâm và nghiên cứu về lĩnh vực này [20], [132], [133].

Vật liệu Meta nói chung và vật liệu Meta có chiết suất âm nói riêng đều hoạt động dựa trên các cộng hưởng điện từ khi tương tác với các thành phần điện **E** và thành phần từ **H** của sóng điện từ chiếu đến. Chính vì vậy, vùng hoạt động có các tính chất đặc biệt của vật liệu này thường rất hẹp và phụ thuộc vào sự phân cực của sóng điện từ. Do đó, trước khi đưa vật liệu Meta vào ứng dụng thực tế thì cần phải nghiên cứu giải quyết một số vấn đề sau: tìm kiếm vật liệu có cấu trúc đơn giản để dễ dàng trong việc chế tạo, đặc biệt là vùng tần số THz hoặc cao hơn vì kích thước của ô cơ sở cấu thành lên vật liệu rất nhỏ (cỡ vài trăm µm đến vài nm), hay việc tìm kiếm vật liệu đẳng hướng không phụ thuộc vào sự phân cực của sóng điện từ, vật liệu có vùng tần số làm việc rộng. Ngoài ra, việc thiết kế và chế tạo vật liệu có tính chất thay đổi một cách linh hoạt bằng các tác động ngoại vi, hay tối ưu hóa cấu trúc để giảm độ tổn hao điện từ của vật liệu khi hoạt động cũng đang được quan tâm sâu sắc.

Với lý do đó, **mục tiêu của đề tài là**: Thiết kế và chế tạo được siêu vật liệu metamaterials có dải tần số làm việc rộng ở vùng sóng Rada

**Đối tượng nghiên cứu:** Nghiên cứu siêu vật liệu metamaterials có dải tần số làm việc rộng ở vùng sóng Rada (cụ thể là siêu vật liệu có chiết suất âm).

**Nội dung và phương pháp nghiên cứu:** Đề tài được thực hiện dựa trên việc kết hợp giữa xây dựng mô hình vật lý, mô phỏng thiết kế cấu trúc, chế tạo mẫu và kiểm chứng bằng các phép đo thực nghiệm.

**Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài:** Đề tài là một công trình nghiên cứu cơ bản. Các nghiên cứu cho thấy công nghệ thiết kế chế tạo vật liệu Meta với tính chất và tần số hoạt động theo ý muốn trong vùng sóng rada đã được làm chủ hoàn toàn. Các kết quả chỉ ra khả năng điều khiển các tính chất của vật liệu Meta một cách hệ thống, khoa học, thậm chí cải tiến với nhiều ưu điểm nổi trội so với vật liệu thông thường như vật liệu Meta biến đổi bằng các tương tác ngoại vi hay mở rộng vùng hoạt động. Đây là tiền đề cho những nghiên cứu tiếp theo ở vùng tần số cao, tiến tới làm chủ hoàn toàn công nghệ thiết kế chế tạo siêu vật liệu hoạt động ở vùng hồng ngoại và nhìn thấy, với nhiều ứng dụng thú vị trong thực tiễn.

### **Đề tài được chia thành 5 chương như sau:**

Chương I: Tổng quan về siêu vật liệu (Metamaterial – Meta)

Chương II: Phương pháp nghiên cứu

Chương III: Kết quả và thảo luận

Phần 1: Tối ưu hóa cấu trúc vật liệu Meta có chiết suất âm

Phần 2: Mở rộng dải tần làm việc của vật liệu Meta có chiết suất âm

Phần 3: Điều khiển tần số vật liệu Meta bằng nhiệt độ

## CHƯƠNG I. TỔNG QUAN SIÊU VẬT LIỆU (METAMATERIAL – META)

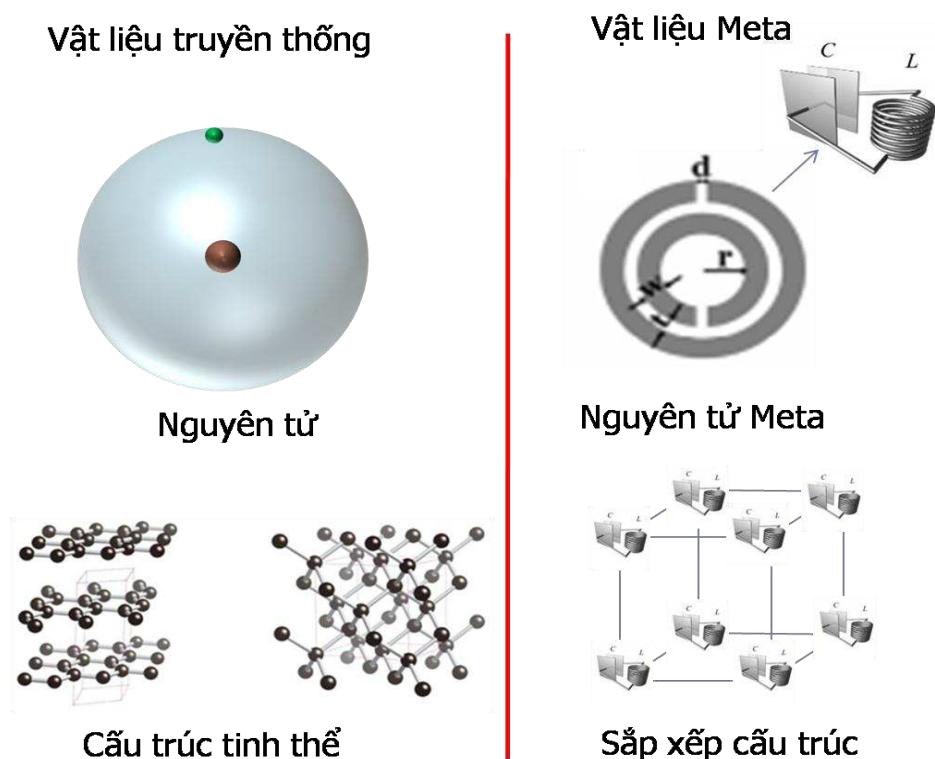
Trong chương này, để có bức tranh tổng quát về vật liệu Meta, đầu tiên đề tài sẽ trình bày về định nghĩa, các nguyên tắc cơ bản để tạo ra vật liệu Meta, lịch sử hình thành và phát triển và các hướng nghiên cứu chính của vật liệu Meta. Đặc biệt, tổng quan về vật liệu Meta có chiết suất âm sẽ được trình bày rất cụ thể và chi tiết vì đây là đối tượng nghiên cứu chính của đề tài. Tiếp theo là các vấn đề liên quan đến mô hình lai hóa để nghiên cứu mở rộng dải tần hoạt động của vật liệu Meta cũng được trình bày. Cuối cùng, một số phương pháp nghiên cứu vật liệu Meta được trình bày ở cuối chương như: phương pháp mô hình mạch LC, phương pháp mô phỏng và thực nghiệm.

### **1.1. Giới thiệu chung về vật liệu Meta**

#### **1.1.1. Định nghĩa, nguyên lý cơ bản để tạo ra vật liệu Meta**

Trong tự nhiên, các tính chất vật lý của vật liệu thường được quyết định bởi tính chất của các nguyên tử và cấu trúc mạng tinh thể của vật liệu [3]. Ý tưởng về sự tồn tại của những nguyên tử nhân tạo được sắp xếp trong các mạng tinh thể nhân tạo, cho phép con người có thể tạo ra những tính chất mới lạ không tồn tại trong tự nhiên, từ lâu đã thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học. Với sự phát triển của khoa học công nghệ, những “siêu nguyên tử” có những tính chất đặc biệt, được tạo ra bằng cách sắp xếp có chủ ý nhiều nguyên tử cùng hoặc khác loại trong một ô cơ sở, đã ra đời từ đầu những năm 80 của thế kỷ trước [53]. Một trong những ví dụ điển hình về sự thành công trong việc tạo ra các tính chất mới của vật liệu bằng cách can thiệp nhân tạo vào mạng tinh thể có thể kể đến ống nano các bon và gần đây là graphene [85]. Tuy nhiên, thú vị hơn cả là sự ra đời của vật liệu có cấu trúc nhân tạo, được gọi là vật liệu Meta. Vật liệu Meta được xây dựng dựa trên những ô cơ sở có cấu trúc nhất định và được coi như “giả nguyên tử” (meta – atom). Những “giả nguyên tử” này nhỏ hơn nhiều lần bước sóng mà tại đó các tính chất đặc biệt của vật liệu Meta xuất hiện [98]. Bằng cách thay đổi tính chất hoặc quy luật sắp xếp của các “giả nguyên tử” chúng ta có thể thu được vật liệu Meta có tính chất mong muốn trong đó có cả các tính chất bất thường chưa được tìm thấy trong tự nhiên như tính chiết suất âm [119], nghịch đảo định luật Snell [142], nghịch đảo định luật Doppler [13].... Hình 1.1 trình bày cấu trúc của vật liệu truyền thống và vật liệu

Meta. Ở đây, chúng ta thấy rằng có sự tương tự giống nhau giữa hai cấu trúc này. Vật liệu truyền thống được hình thành từ những nguyên tử, giữa là hạt nhân, xung quanh là các điện tử. Tính chất của vật liệu này chủ yếu được quyết định bởi lớp điện tử ngoài cùng và sự sắp xếp của các nguyên tử trong mạng tinh thể. Còn đối với vật liệu Meta, được cấu tạo từ các ô cơ sở (thường được mô hình hóa bởi mạch điện LC) tương tự như một “nguyên tử” trong vật liệu truyền thống và được gọi là “giả nguyên tử”. Tính chất của vật liệu Meta được quyết định chủ yếu bởi hình dạng, cấu trúc của “giả nguyên tử” và trật tự sắp xếp của các “giả nguyên tử” này.



**Hình 1.1.** Hình ảnh so sánh giữa cấu trúc vật liệu truyền thống và vật liệu Meta. Vật liệu truyền thống được cấu tạo từ nguyên tử trong khi vật liệu Meta cấu tạo từ các ô cơ sở giống như nguyên tử.

Nguyên tắc cơ bản để tạo ra vật liệu Meta là dựa vào lý thuyết môi trường hiệu dụng (effective medium theory - EMT). Để hiểu được nguyên tắc này, trước hết chúng ta xem xét sự tương tác giữa ánh sáng với một vật liệu bất kỳ. Một trong các đại lượng đặc trưng cho sóng điện từ là tần số hoặc bước sóng. Bước sóng của ánh sáng thường có kích thước lớn gấp hàng trăm lần kích thước của các nguyên tử cấu thành vật liệu cũng như khoảng cách giữa chúng. Vì thế, ánh sáng khó có thể phân giải được chi tiết hình ảnh của từng nguyên tử độc lập. Nhờ đó, ta có thể tính trung bình tất cả các nguyên tử và coi vật liệu như là một khối đồng nhất được đặc trưng

bởi các tham số điện từ đó là độ điện thẩm (hay còn được gọi là hằng số điện môi)  $\epsilon$  và độ từ thẩm  $\mu$ . Trên thực tế, điều này không bị giới hạn ở các nguyên tử hay phân tử. Lý thuyết môi trường hiệu dụng, cho phép bất kỳ vật chất không đồng nhất nào mà kích thước và khoảng cách giữa các vật chất này nhỏ hơn rất nhiều lần so với bước sóng của sóng điện từ đều có thể được mô tả thông qua các tham số  $\epsilon$  và  $\mu$  hiệu dụng. Có hai mô hình sử dụng lý thuyết môi trường hiệu dụng do Bruggeman và Maxwell-Garnett đề xuất. Trong mô hình Bruggeman, độ điện thẩm hiệu dụng  $\epsilon_{\text{eff}}$  của môi trường được cấu thành từ  $m$  môi trường nhỏ được tính từ công thức [8]:

$$\sum_{i=1}^m f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_i + 2\epsilon_{\text{eff}}} = 0 \quad (1.1)$$

Trong đó  $f_i$  và  $\epsilon_i$  lần lượt là tỷ phần thể tích ( $f_i = \frac{V_i}{V}$ :  $V_i$  là thể tích của môi trường nhỏ thứ  $i$  và  $V$  là thể tích toàn phần) và độ điện thẩm của môi trường nhỏ thứ  $i$ . Trong đó  $\sum_{i=1}^m f_i = 1$ .

Trong mô hình Maxwell-Garnett, độ điện thẩm hiệu dụng  $\epsilon_{\text{eff}}$  của môi trường gồm:  $m$  môi trường hình cầu có độ điện thẩm của từng môi trường là  $\epsilon_i$  được bao quanh bởi môi trường khác có độ điện thẩm  $\epsilon_m$  có thể được xác định từ điều kiện [32]:

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_m}{\epsilon_{\text{eff}} + 2\epsilon_m} = f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m} \quad (1.2)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_m \frac{2(1-f_i)\epsilon_m + (1+2f_i)\epsilon_i}{(2+f_i)\epsilon_m + (1-f_i)\epsilon_i} \quad (1.3)$$

Tùy vào cấu trúc của một vật liệu cụ thể mà ta có thể áp dụng một trong hai mô hình này một cách thích hợp, trong lĩnh vực nghiên cứu vật liệu Meta thì mô hình Maxwell-Garnett được sử dụng nhiều hơn [98].

Lý thuyết môi trường hiệu dụng áp dụng cho vật liệu Meta được đề cập đầu tiên bởi Koschny, với cấu trúc là các sợi dây kim loại và các vòng cộng hưởng có rãnh (split-ring resonator - SRR), được sắp xếp một cách tuần hoàn với kích thước ô cơ sở nhỏ hơn nhiều lần bước sóng hoạt động [55]. Độ từ thẩm hiệu dụng và độ điện thẩm hiệu dụng tuân theo các phương trình:

$$\mathbf{D}_{\text{ave}} = \epsilon_{\text{eff}} \epsilon_0 \mathbf{E}_{\text{ave}} \quad (1.4)$$

$$\mathbf{B}_{ave} = \mu_{eff} \mu_0 \mathbf{H}_{ave} \quad (1.5)$$

Trong đó  $\mathbf{D}_{ave}$ ,  $\mathbf{E}_{ave}$ ,  $\mathbf{B}_{ave}$ ,  $\mathbf{H}_{ave}$  lần lượt là vectơ cảm ứng điện, vectơ cường độ điện trường, vectơ cảm ứng từ và vectơ cường độ từ trường trung bình,  $\epsilon_{eff}$  và  $\mu_{eff}$  lần lượt là độ điện thâm và độ từ thâm hiệu dụng cho toàn bộ vật liệu Meta,  $\epsilon_0$  và  $\mu_0$  lần lượt là độ điện thâm và từ thâm trong chân không.

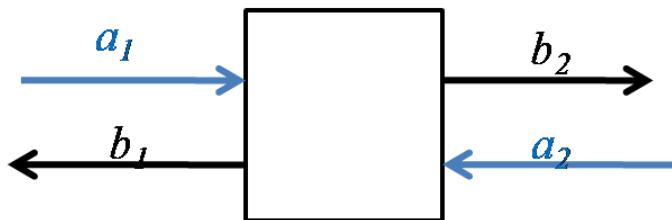
Dựa trên lý thuyết môi trường hiệu dụng, vật liệu Meta thường được định nghĩa như sau: Vật liệu Meta là vật liệu có cấu trúc nhân tạo, bao gồm các cấu trúc cơ bản được sắp xếp một cách tuần hoàn (hoặc có thể không tuần hoàn), mà tính chất của nó phụ thuộc vào cấu trúc ô cơ sở hơn là các vật liệu cấu thành nên nó. Về cơ bản, cấu trúc của vật liệu Meta không phải là đồng nhất, bao gồm rất nhiều các “giả nguyên tử”, các “giả nguyên tử” này có kích thước nhỏ hơn rất nhiều lần bước sóng hoạt động nên tính chất điện từ của vật liệu Meta có thể được biểu diễn thông qua các tham số hiệu dụng. Tuy nhiên, giới hạn bước sóng để có thể áp dụng được lý thuyết môi trường hiệu dụng đối với vật liệu Meta cho đến nay vẫn còn là một vấn đề còn nhiều tranh cãi. Một số nghiên cứu gần đây [130], [105] cho thấy bằng việc sử dụng cấu trúc lõi vỏ dạng cầu với điều kiện sóng điện từ chiếu đến không bị tán xạ, lý thuyết môi trường hiệu dụng có thể được áp dụng khi sóng điện từ chiếu đến có bước sóng chỉ lớn hơn 1.3 lần hằng số mạng.

Có một điều cần lưu ý rằng, do vật liệu Meta có kích thước ô cơ sở nhỏ hơn nhiều lần bước sóng hoạt động nên khi sóng điện từ chiếu đến vật liệu sẽ tách thành ba thành phần: thành phần phản xạ (reflection - R) do không phù hợp trở kháng của vật liệu với môi trường, thành phần hấp thụ (absorption - A) do bản chất của vật liệu và thành phần truyền qua (T), bỏ qua các thành phần nhiễu xạ và tán xạ. Như vậy, ta dễ dàng có thể nhận thấy tổng năng lượng của ba tín hiệu phản xạ, truyền qua và hấp thụ phải bằng tổng năng lượng của tín hiệu sóng truyền đến vật liệu theo công thức:  $R + T + A = 1$  (100%) [63], [126]. Như vậy, khi biết được hai trong ba giá trị này thì có thể suy ra được giá trị còn lại. Trong thực tế việc xác định độ phản xạ (R) và truyền qua (T) rất dễ dàng thông qua các hệ số phản xạ  $S_{11}$  và truyền qua  $S_{21}$  bằng cách sử dụng các ăngten ghi nhận tín hiệu đặt ở các vị trí thích hợp (với  $R = (S_{11})^2$  và  $T = (S_{21})^2$ ), còn độ hấp thụ được tính toán qua công thức:  $A = 1 - R - T = 1 - (S_{11})^2 - (S_{21})^2$ . Các hệ số phản xạ  $S_{11}$  và truyền qua  $S_{21}$  là các hệ số biểu diễn mối liên hệ giữa các tín hiệu ghi nhận được với tín hiệu phát ra theo ma trận sau:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Nên:  $b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2$  (1.7)  
 $b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$

Trong đó  $b_1$  và  $b_2$  ứng với các tín hiệu ghi nhận được ở ăng ten thu,  $a_1$  và  $a_2$  là các tín hiệu phát ra. Chỉ số 1 và 2 trong công thức ứng với hai phía môi trường tương ứng như trong hình 1.2.



Hình 1.2. Sơ đồ mô tả các tín hiệu phát (a) và tín hiệu thu (b) từ hai phía môi trường.

Thông thường để khảo sát sự tương tác của sóng điện từ với vật liệu thì sóng điện từ chỉ được chiếu đến từ một phía (giả sử chỉ chiếu từ phía môi trường 1 nên  $a_2 = 0$ ) nên ta có phương trình (1.7) trở thành:

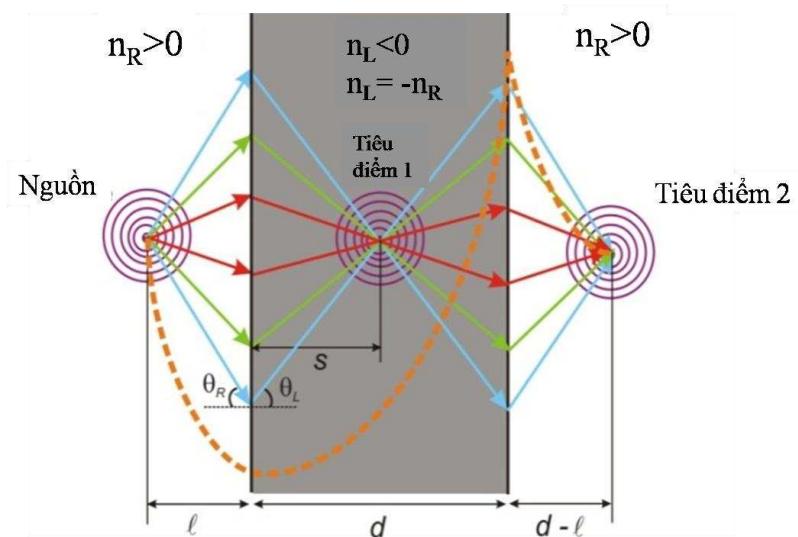
$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}; S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (1.8)$$

Như vậy hệ số phản xạ và truyền qua là tỷ số giữa tín hiệu thu được trên toàn bộ tín hiệu phát ra lần lượt ở cùng phía và khác phía với nguồn phát. Dễ dàng nhận thấy đơn vị đo của các hệ số này là tỷ lệ phần trăm (hay còn gọi là thang tuyến tính và nhận giá trị từ 0 đến 1). Ngoài ra người ta còn dùng thang decibel (dB) để đo các giá trị này khi thực hiện phép chuyển đổi sử dụng hàm logarit ( $20\lg(b/a)$  (dB) và nhận giá trị từ 0 đến  $-\infty$ ). Như vậy, thang đo dB sẽ được sử dụng khi so sánh hai đối tượng nghiên cứu có độ sai khác nhỏ.

### 1.1.2. Lịch sử hình thành và phát triển của vật liệu Meta

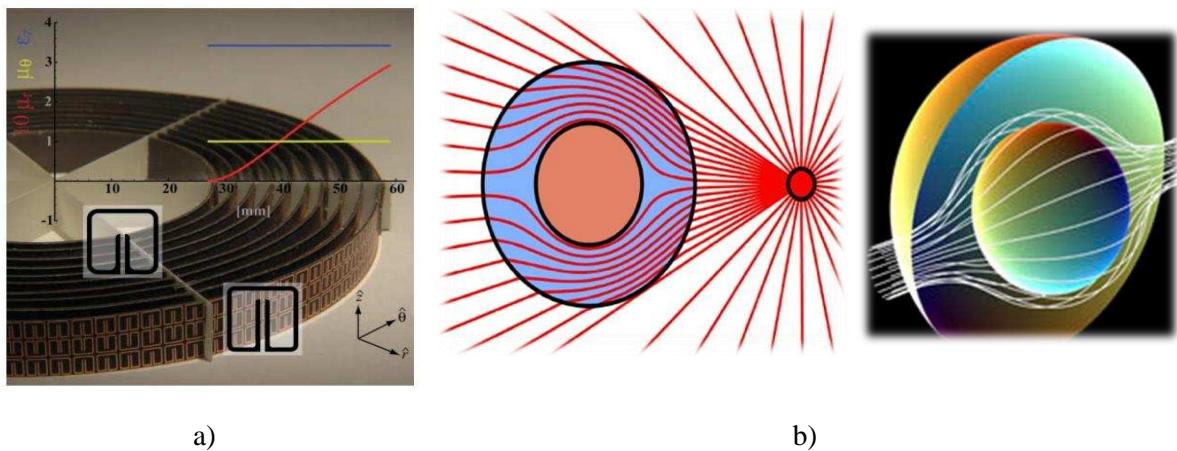
Một trong những tính chất đầu tiên được tìm kiếm của vật liệu Meta là tính chất chiết suất âm của vật liệu. Về mặt lý thuyết, sự tồn tại của vật liệu có chiết suất âm đã được đề xuất vào năm 1968 bởi Veselago [119], dựa trên sự kết hợp đồng thời của vật liệu có độ từ thẩm âm ( $\mu < 0$ ) và độ điện thẩm âm ( $\epsilon < 0$ ). Trong nhiều thế kỷ con người đã tin rằng chỉ số khúc xạ chỉ có thể là dương, nhưng trong công

trình công bố của Veselago cho rằng chỉ số khúc xạ cũng có thể mang giá trị âm. Điều này đã khiến cho mọi người nghi ngờ về sự tồn tại của nó. Tuy nhiên, sau hơn 30 năm kể từ đề xuất của Veselago, năm 1996, Pendry đã đưa ra mô hình lưới dây kim loại để hạ thấp tần số plasma về vùng tần số GHz [94]. Tiếp theo, năm 1999, Pendry tiếp tục đưa ra mô hình vật liệu có độ từ thẩm âm đầu tiên dựa trên cấu trúc SRR ở tần số GHz [95]. Với hai mô hình này của Pendry, khả năng chế tạo được vật liệu chiết suất âm đã được mở ra. Ngay sau đó, năm 2000, Smith và cộng sự lần đầu tiên chứng minh bằng thực nghiệm sự tồn tại của vật liệu chiết suất âm ( $n < 0$ ) dựa trên hai mô hình của Pendry đề xuất [106]. Những tính chất khác thường của vật liệu Meta không dừng lại ở đó. Nhờ khả năng tùy biến của những “giả nguyên tử”, vật liệu Meta có thể được thiết kế để thay đổi tính chất truyền sóng điện từ của môi trường. Cũng vào năm 2000, Pendry đã chứng minh có thể sử dụng vật liệu Meta có chiết suất âm để chế tạo siêu thấu kính [93]. Điểm khác biệt cơ bản giữa siêu thấu kính và thấu kính thông thường ở chỗ nó là thấu kính phẳng và nhờ vào chiết suất âm nên nó hoạt động giống như một thấu kính hội tụ. Đặc biệt cũng nhờ vào tính chiết suất âm, siêu thấu kính có thể phục hồi không chỉ thành phần truyền qua mà cả thành phần dập tắt (evanescent wave) của sóng tới (hình 1.3). Vì thế, độ phân giải sẽ được nâng lên gấp nhiều lần so với các thấu kính quang học truyền thống. Năm 2005, siêu thấu kính quang học dựa trên vật liệu Meta có chiết suất âm đã được Zhang và các cộng sự chứng minh thành công bằng thực nghiệm [30].



**Hình 1.3.** Nguyên tắc hoạt động của siêu thấu kính dựa trên vật liệu Meta có chiết suất âm, nó hoạt động như một thấu kính hội tụ và có khả năng khôi phục không chỉ thành phần truyền qua mà cả thành phần dập tắt nên độ phân giải tăng lên rất nhiều so với thấu kính thông thường [93].

Năm 2006, Pendry một lần nữa làm cho cộng đồng khoa học bất ngờ khi đưa ra mô hình và chứng minh bằng thực nghiệm sự tồn tại của lớp vỏ tàng hình sóng điện từ bằng vật liệu Meta có tần số hoạt động tại vùng GHz [92]. Trong nghiên cứu này, vật liệu Meta có thể thay đổi chiết suất nhờ vào thay đổi các tham số cấu trúc của ô cơ sở nên có thể làm uốn cong đường đi của sóng điện từ xung quanh một vật thể. Vì không có sự phản xạ sóng từ vật nên đối với người quan sát vật này là “tàng hình” (hình 1.4). Như vậy, vật liệu Meta không những có thể có chiết suất âm mà còn là một tập hợp của những mảnh khám (mosaic) quang học có giá trị chiết suất khác nhau làm uốn cong đường đi sóng điện từ.



**Hình 1.4.** Nguyên lý hoạt động của áo choàng tàng hình, nhờ cách sắp xếp các lớp vật liệu Meta có chiết suất khác nhau (hình a) một cách hợp lý xung quanh vật thể cần giấu, ánh sáng có thể bị bẻ cong không phản xạ (hình b) vì vậy vật thể được “tàng hình” [92].

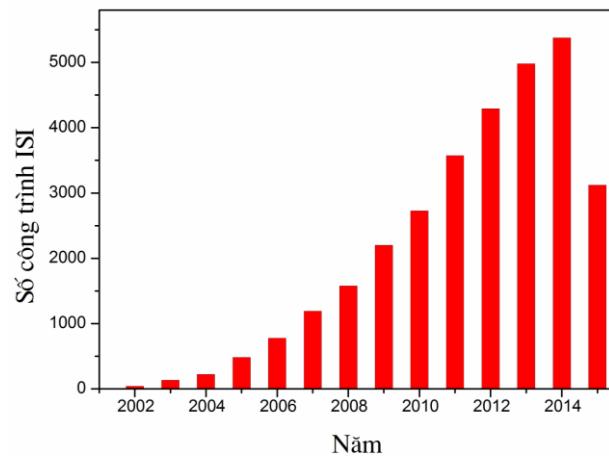
Ngay sau khi các nghiên cứu đề xuất ứng dụng sử dụng vật liệu Meta làm “áo choàng tàng hình”, rất nhiều các đề xuất ứng dụng khác được công bố. Gần đây nhất, năm 2008, vật liệu Meta hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (metamaterial perfect absorber - MPA) đầu tiên đã được đề xuất bởi I. Landy [64]. Cũng vào năm 2008, Shuang Zhang cùng các cộng sự đã chứng minh có thể tạo ra vật liệu trong suốt cảm ứng điện từ (Electromagnetically Induced Transparency - EIT) dựa trên vật liệu Meta có khả năng làm chậm hay dừng ánh sáng [135].

Từ đó đến nay, đã có rất nhiều công trình nghiên cứu vật liệu Meta đi sâu giải thích các cơ chế vật lý cũng như hoàn thiện và phát triển thêm các ứng dụng. Các kết quả nghiên cứu này cho thấy nghiên cứu vật liệu Meta đã đạt được những tiến bộ vượt bậc và càng gần hơn các ứng dụng thực tế: có thể tạo ra được vật liệu Meta đẳng hướng (2D, 3D), ít hoặc không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ [33], vật liệu Meta

hoạt động ở vùng tần số cao (thậm chí đã đạt tới vùng quang học) và trên một dải tần rộng [89] hay có thể điều khiển bằng các tác động ngoại vi [39] ....

### **1.1.3. Các hướng nghiên cứu chính của vật liệu Meta**

Sau các công bố [106], [92], [91] về vật liệu Meta, rất nhiều nhóm đã đi sâu nghiên cứu lĩnh vực mới lạ và đầy hứa hẹn này. Thực tế, số lượng các nhà khoa học nghiên cứu về vật liệu Meta và số lượng các công trình nghiên cứu khoa học được công bố liên quan đến vật liệu này đã tăng lên một cách đột biến. Hơn 10 năm sau khi thí nghiệm đầu tiên kiểm chứng về sự tồn tại vật liệu chiết suất âm của Smith và cộng sự, tính đến thời điểm hiện tại số lượng nghiên cứu về vật liệu Meta đã lên đến trên 30.000 công trình (trên Scopus.org) trong đó số bài đăng trên tạp chí Science và Nature khoảng trên 100 (các số liệu thống kê được đưa ra trên hình 1.5 – cập nhật đến tháng 7 năm 2015). Có nhiều phương pháp tiếp cận và các hướng nghiên cứu khác nhau đã xuất hiện, tuy nhiên có hai hướng nghiên cứu đặc biệt được quan tâm đó là: i) vật liệu Meta có chiết suất âm, ii) vật liệu Meta hấp thụ tuyệt đối vì những tính chất và ứng dụng hứa hẹn mà nó mang lại.



**Hình 1.5.** Số công trình ISI công bố theo năm.

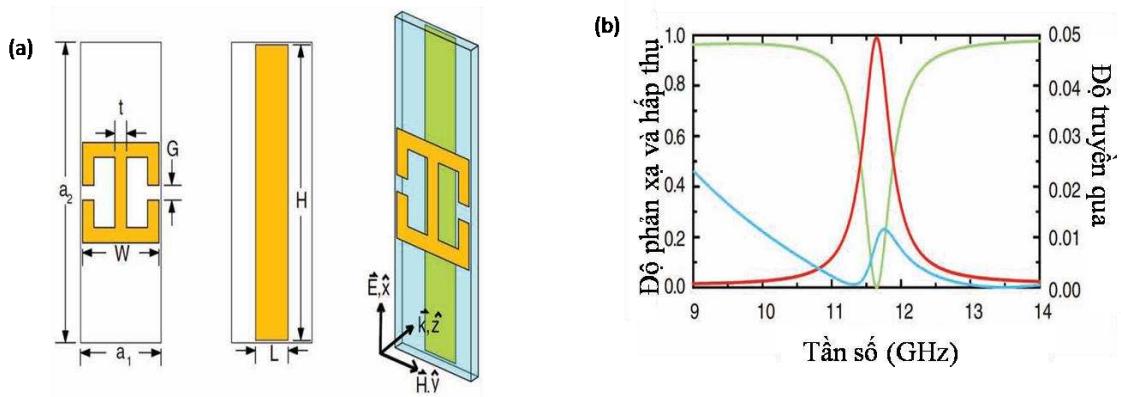
#### *1.1.3.1. Vật liệu Meta hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ*

Vật liệu Meta hấp thụ tuyệt đối sóng điện từ (metamaterial perfect absorber - MPA) là vật liệu có khả năng hấp thụ hoàn toàn năng lượng của sóng điện từ chiếu tới. Do MPA được tạo bởi các cấu trúc cộng hưởng điện từ nên nguyên lý hoạt động của MPA là hấp thụ cộng hưởng. Tại tần số cộng hưởng, các đại lượng truyền qua, phản xạ đều bị triệt tiêu [65]. Hấp thụ sóng điện từ của vật liệu Meta có thể được phân chia thành hai loại: hấp thụ cộng hưởng (resonant absorbers) và hấp thụ trên

một vùng tần số rộng (broadband absorbers). Hấp thụ cộng hưởng dựa trên sự tương tác giữa vật liệu với sóng điện từ có cộng hưởng tại tần số xác định  $\omega_0$ , ở đây bước sóng điện từ tương ứng với tần số  $\omega_0$  là  $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0$  với  $c$  là vận tốc ánh sáng trong chân không. Hấp thụ có dải tần rộng có tính chất hấp thụ không phụ thuộc vào tần số cụ thể và do đó có thể hấp thụ sóng điện từ trên một dải rộng lớn.

MPA thường được cấu tạo gồm 3 lớp: hai lớp kim loại thường được tạo bởi các kim loại dẫn điện tốt như vàng, bạc, đồng và xen kẽ là lớp điện môi. Tại tần số xác định, MPA hấp thụ sóng điện từ tốt hơn nhiều so với các vật liệu được nghiên cứu trước đây (màn Salisbury, lớp Dällenbach ...). Ngoài ra, một trong những tính chất hết sức thú vị của MPA là có khả năng điều chỉnh được vùng tần số hoạt động mong muốn thông qua thay đổi kích thước và với lợi thế độ dày nhỏ như đã được chứng minh là  $\lambda_0/40$  [67],  $\lambda_0/69$  [68].

Tuy nhiên, trước khi đưa vật liệu MPA trở thành những ứng dụng thực tế, vẫn còn những vấn đề cơ bản cần được giải quyết. Một trong những hướng nghiên cứu được các nhà khoa học tập trung giải quyết đó là tìm kiếm những cấu trúc MPA đơn giản. Cấu trúc MPA đầu tiên do Landy đề xuất [64] có độ hấp thụ tốt ( $A \approx 99\%$  tại tần số 11.65 GHz) (xem hình 1.6), nhưng đòi hỏi kỹ thuật chế tạo rất tinh vi, với độ chính xác về kích thước dưới 1%. Khi áp dụng cấu trúc Landy cho vùng tần số cao, kích thước mẫu nhỏ dần, việc chế tạo mẫu với độ chính xác cao càng trở nên khó khăn. Thực tế đã có nhiều đề xuất khác nhau để cải tiến cấu trúc của Landy. Một trong những cấu trúc có thể kể đến là cấu trúc dâu cộng kết hợp với mạch cộng hưởng điện do chính Landy đề xuất 01 năm sau đó [65]. Cấu trúc này tuy có đơn giản và dễ chế tạo hơn, nhưng độ hấp thụ lại giảm mạnh từ 99% xuống còn 78%. Cấu trúc này sau đó được cải tiến bằng mạch cộng hưởng điện có dạng vòng hở kết hợp với tám kim loại phẳng do nhóm Soukoulis ở đại học Iowa đề xuất [123]. Cấu trúc do Soukoulis đề xuất cho độ hấp thụ cao, không bị ảnh hưởng bởi phân cực sóng, có khả năng hấp thụ với nhiều góc tới khác nhau, tuy nhiên vẫn đòi hỏi kỹ thuật chế tạo phức tạp. Vì thế cho tới nay, quá trình tìm kiếm một cấu trúc MPA tối ưu vẫn đang tiếp tục diễn ra một cách mạnh mẽ trên mọi dải tần số [53], [82], [46], [69], [101], [37].



**Hình 1.6.** a) Ô cơ sở và b) Phổ phản xạ (xanh lục), phổ truyền qua (xanh lam) và phổ hấp thụ (màu đỏ) của MPA đầu tiên được tìm ra bởi Landy năm 2008. Độ hấp thụ  $A$  được tính toán từ độ phản xạ  $R$  và độ truyền qua  $T$  ( $A = 1 - T - R$ ) [64].

Song song với việc tối ưu hóa cấu trúc, việc mở rộng dải tần hấp thụ của các cấu trúc MPA cũng rất được quan tâm [70], [23]. Cơ chế chủ yếu để mở rộng dải hấp thụ của các cấu trúc MPA là kết hợp nhiều cấu trúc hấp thụ đơn lẻ tại các tần số khác nhau trong một ô cơ sở. Một trong những kết quả tiêu biểu có thể kể đến là vật liệu MPA gồm nhiều cấu trúc vòng cộng hưởng tại các tần số khác nhau do nhóm của Cummer đề xuất năm 2010 [34]. Mô hình của Cummer cho độ hấp thụ 99.9% tại tần số 2.4 GHz với độ rộng dải tần hấp thụ lên tới 30%. Một hướng tiếp cận khác là từ các cấu trúc dẫn sóng, nhóm của Luo đã đề xuất sử dụng cấu trúc MPA dạng dải phủ hình vuông cũng cho độ rộng hấp thụ tương đương [79]. Ngoài ra, kỹ thuật sử dụng phần tử mạch tập trung (lumped circuit element) cũng được áp dụng để thay đổi trở kháng của mạch cộng hưởng, dẫn tới thay đổi tần số của mạch cộng hưởng để mở rộng dải hấp thụ [17].

Một trong những nhược điểm của vật liệu MPA khi đưa vào ứng dụng đó là tần số hấp thụ không thể thay đổi sau khi chế tạo. Các thiết bị sử dụng vật liệu MPA sẽ trở nên linh hoạt hơn khi tần số hấp thụ có thể điều khiển bằng các yếu tố ngoại vi như từ trường, điện trường, ánh sáng, nhiệt độ ..v..v... Do đó, trong thời gian gần đây, việc tích hợp các vật liệu biến đổi vào cấu trúc hấp thụ và nghiên cứu các tính chất phi tuyến của vật liệu MPA tích hợp này cũng được các nhà khoa học đặc biệt quan tâm [78], [122].

Việc nghiên cứu tính chất hấp thụ của vật liệu Meta sẽ là tiền đề cho hàng loạt ứng tiêm năng trong công nghiệp (như chế tạo vi nhiệt kế, các phòng chấn bức xạ công

nghiệp, pin mặt trời hiệu suất cao...) mà đặc biệt trong lĩnh vực quốc phòng (thay đổi hướng đi của sóng điện từ, tàng hình ảnh nhiệt, tác chiến ban đêm...).

### 1.1.3.2. Vật liệu Meta có chiết suất âm

Loại vật liệu Meta được nghiên cứu đầu tiên và nhiều nhất là vật liệu Meta có chiết suất âm. Dựa trên ý tưởng ban đầu của Veselago [119]. Một trong những tính chất thú vị nữa của vật liệu có chiết suất âm là 3 vectơ của sóng điện từ  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{k}$  tuân theo quy tắc bàn tay trái (left-handed set). Do vậy, vật liệu có chiết suất âm còn được gọi là vật liệu left-handed metamaterials -LHMs. Nhờ vào các tính chất kỳ diệu này, vật liệu Meta có chiết suất âm hứa hẹn rất nhiều tiềm năng ứng dụng như: siêu thấu kính [93], antenna [143], [49], một trong những thành phần chế tạo “áo khoác tàng hình” [91]... Chính vì vật liệu Meta có chiết suất âm có các tính chất đặc biệt và khả năng ứng dụng thực tế kể trên, đè tài đã lựa chọn vật liệu này làm đối tượng nghiên cứu chính.

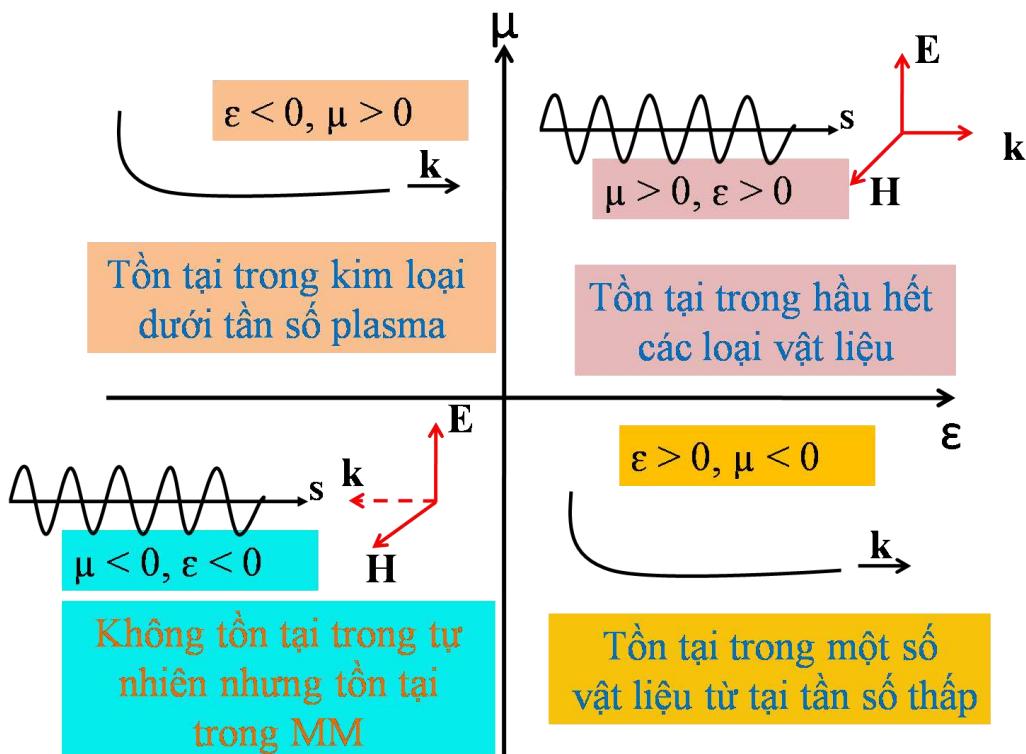
Để đưa vật liệu Meta có chiết suất âm vào những ứng dụng trong thực tế, còn rất nhiều vấn đề cần được làm rõ và cần nghiên cứu một cách thỏa đáng. Cũng như vật liệu Meta khác, vật liệu Meta có chiết suất âm đều được tạo ra dựa trên các cộng hưởng điện, từ khi tương tác với các thành phần điện  $\mathbf{E}$  và từ  $\mathbf{H}$  của sóng điện từ trường chiếu đến. Kết quả là vùng có chiết suất âm thường rất hẹp và phụ thuộc vào sự phân cực của sóng điện từ. Vì vậy, vấn đề cần giải quyết trước tiên là bằng cách nào để chế tạo vật liệu Meta có chiết suất âm có cấu trúc đơn giản dễ dàng chế tạo và đặc biệt đối xứng cao để tạo ra tính đẳng hướng cho vật liệu. Tiếp theo là mở rộng dải tần hoạt động của vật liệu. Bên cạnh đó, việc điều khiển tính chất của vật liệu bằng các tác động ngoại vi (quang, nhiệt, điện, từ...) cũng đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu vì những ứng dụng thực tế mà nó mang lại. Ba vấn đề cần giải quyết này cũng là ba mục tiêu của đè tài, các kết quả nghiên cứu đạt được trình bày trong phần kết quả và thảo luận (chương III, chương IV và chương V).

Với đối tượng nghiên cứu chính là vật liệu Meta có chiết suất âm, việc tìm hiểu cặn kẽ tổng quan về vật liệu này là điều rất cần thiết và được chúng tôi trình bày ngay trong phần tiếp theo.

## 1.2. Tổng quan về vật liệu Meta có chiết suất âm

Hình 1.7 trình bày một giản đồ đơn giản cho phép ta phân loại các vật liệu theo tham số điện từ: độ điện thẩm  $\epsilon$  và độ từ thẩm  $\mu$ . Hầu hết các loại vật liệu trong

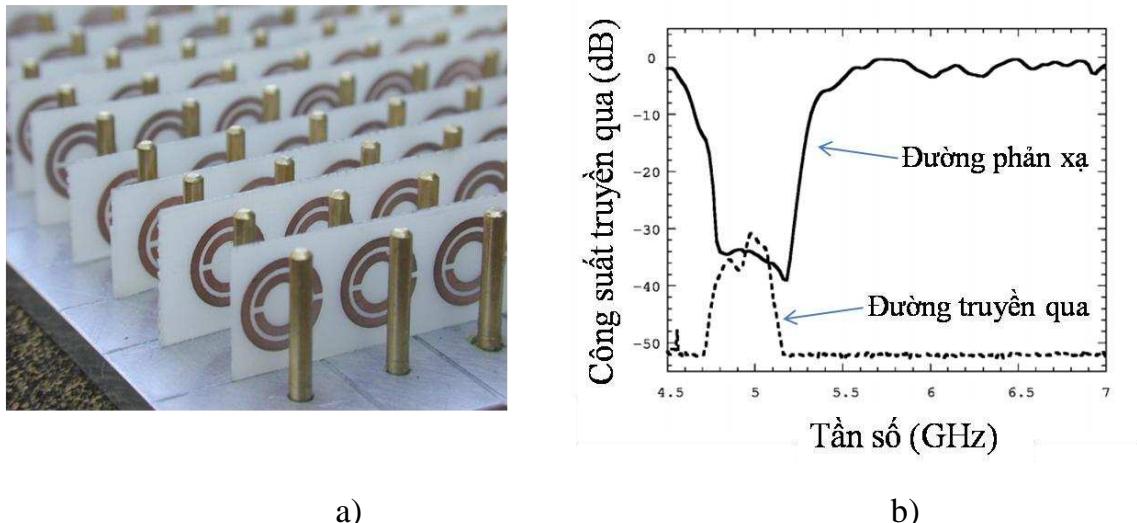
tự nhiên đều có cả hai thành phần độ từ thâm và độ điện thâm dương ( $\epsilon > 0, \mu > 0$ ) và sóng điện từ có thể lan truyền được trong loại vật liệu này và có tổn hao. Góc phản xạ thứ hai của gián đồ ( $\epsilon < 0, \mu > 0$ ) thể hiện tính chất của môi trường có độ điện thâm âm, tính chất này xuất hiện trong kim loại dưới tần số plasma. Góc phản xạ thứ tư ( $\epsilon > 0, \mu < 0$ ) thể hiện tính chất của môi trường có độ từ thâm âm, tính chất này tồn tại trong một số loại vật liệu từ tại tần số thấp (cỡ MHz). Trong hai trường hợp môi trường chỉ có một trong hai giá trị độ từ thâm hoặc độ điện thâm âm, giá trị còn lại dương sóng điện từ nhanh chóng bị dập tắt khi truyền vào loại vật liệu này. Trường hợp đặc biệt, độ điện thâm và độ từ thâm đều có giá trị âm ( $\epsilon < 0, \mu < 0$ ), môi trường được gọi là môi trường chiết suất âm kép (double-negative hay LHMs) như biểu diễn trên góc phản xạ thứ ba. Giống như vật liệu chiết suất dương, sóng điện từ cũng có thể truyền vào vật liệu này và có tổn hao. Tuy nhiên có một điểm khác biệt là hướng truyền sóng và hướng truyền năng lượng ngược chiều nhau trong môi trường có chiết suất âm.



**Hình 1.7.** Giản đồ biểu diễn mối liên hệ giữa  $\epsilon$  và  $\mu$  [98]

Vật liệu Meta có chiết suất âm hiện vẫn chưa được tìm thấy tồn tại trong tự nhiên nhưng đã được chế tạo và kiểm chứng đầu tiên bởi nhóm của Smith [106] dựa trên mô hình lưới dây kim loại (thành phần điện) và vòng cộng hưởng có rãnh (thành phần từ) được đề xuất bởi Pendry [93], [94]. Hình 1.8 là mẫu chế tạo và phô

truyền qua thực nghiệm của mẫu ở vùng tần số GHz. Kết quả cho thấy khi lưới dây kim loại (tạo ra  $\epsilon < 0$ ) được thêm vào, vùng không truyền qua của SRR (tạo ra  $\mu < 0$ ) chuyển thành vùng truyền qua. Mô hình trên đã chứng minh cho giả thuyết của Veselago về sự tồn tại của môi trường có đồng thời độ điện thẩm và từ thẩm âm. Tuy nhiên, giả thuyết này sau đó được mở rộng khi chúng ta hoàn toàn có thể tạo ra vật liệu chiết suất âm mà không cần đồng thời điện thẩm và từ thẩm âm. Chi tiết việc giải thích và tính toán để đạt được vùng có chiết suất âm sẽ được trình bày chi tiết trong mục 1.2.4.



**Hình 1.8.** a) Vật liệu có chiết suất âm hoạt động ở tần số GHz; b) Phổ phản xạ và truyền qua của vật liệu có cấu trúc ở hình (a). Tính chất chiết suất âm ( $n < 0$ ) của vật liệu thể hiện ở vùng tần số 4.7 đến 5.2 GHz [106].

Kể từ năm 2000 cho đến nay, dựa trên cấu trúc của Smith và công sự [106] đã có rất nhiều cấu trúc biến đổi khác được đề xuất và kiểm chứng có thể tạo ra vật liệu Meta có chiết suất âm. Có thể kể tên một trong các cấu trúc đó là: cấu trúc kết hợp, cấu trúc fishnet, cấu trúc chữ  $\Phi$  [51]. Để tạo ra chiết suất âm, các cấu trúc trên đều được cấu tạo từ hai thành phần: i) thành phần từ để tạo ra độ từ thẩm âm ( $\mu < 0$ ), ii) thành phần điện để tạo ra độ điện thẩm âm ( $\epsilon < 0$ ) dưới tần số plasma.

### 1.2.1. Vật liệu có độ điện thẩm âm ( $\epsilon < 0$ )

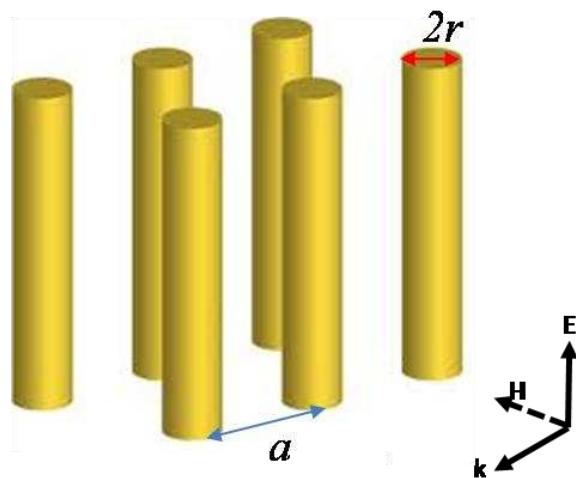
Trong tự nhiên, chúng ta có thể thu được độ điện thẩm âm của kim loại ở dưới tần số plasma. Hàm số độ điện thẩm  $\epsilon$  của vật liệu kim loại phụ thuộc vào tần số  $\omega$  của sóng chiếu tới được biểu diễn theo mô hình Drude có phương trình như sau [98]:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (1.9)$$

Với  $\gamma$  là tần số dập tắt,  $\omega_p$  là tần số plasma được xác định bởi công thức:

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e} \quad (1.10)$$

Trong đó,  $N$  là mật độ điện tử,  $e$  là giá trị điện tích,  $\epsilon_0$  là độ điện thẩm của chân không và  $m_e$  là khối lượng của điện tử. Tần số plasma của các kim loại thường ở vùng khả kiến hoặc tử ngoại, ví dụ như nhôm có tần số plasma vào cỡ 3,6 PHz (15 eV) [94]. Tuy nhiên, tại các tần số ở vùng hồng ngoại gần và thấp hơn, hàm số điện môi hoàn toàn là ảo do sự tổn hao rất lớn. Để có thể thu được độ điện thẩm âm ở vùng tần số thấp, ví dụ như vùng sóng vi ba, Pendry đã đề xuất mô hình lưới dây kim loại mỏng như ở hình 1.9 [94]. Mô hình này bao gồm một dãy các dây kim loại mỏng, dài vô hạn, được đặt song song và cách đều nhau. Môi trường lưới dây kim loại này có khả năng hạ thấp đáng kể tần số plasma bởi hai lý do chính. Thứ nhất, mật độ điện tử hiệu dụng loãng bớt vì các điện tử bị giới hạn bên trong các dây kim loại mỏng nằm trong một ô cơ sở.



**Hình 1.9.** Cấu trúc lưới dây kim loại mỏng sắp xếp tuần hoàn [94].

Lý do thứ hai là khối lượng hiệu dụng của điện tử được tăng lên một cách đáng kể. Hiện tượng này được giải thích là kết quả của dòng cảm ứng trong dây kim loại và từ trường được kích thích. Các dây kim loại trong mô hình trên có độ tự cảm rất lớn. Theo định luật Lenz, độ tự cảm này sẽ chống lại tốc độ biến thiên của dòng điện. Hệ quả là các điện tử giống như được tăng thêm một khối lượng cực lớn. Tần

số plasma hiệu dụng mới tạo bởi lưới dây kim loại mỏng được tính như trong tài liệu tham khảo [94] có dạng:

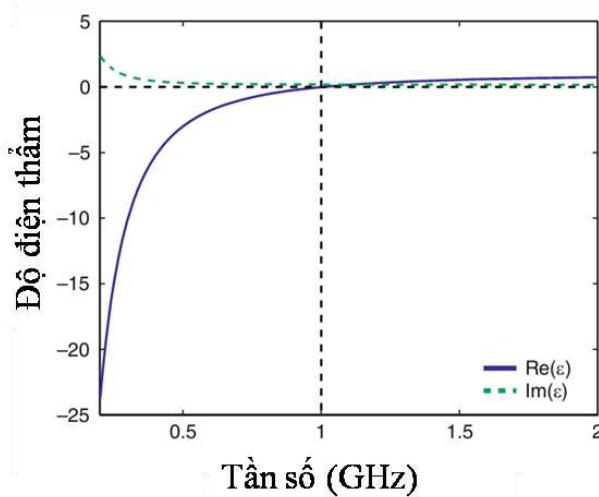
$$\omega_p^2(\text{eff}) = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)} \quad (1.11)$$

Trong đó,  $c_0$  là vận tốc ánh sáng trong chân không,  $a$  là khoảng cách giữa các dây,  $r$  là bán kính của dây kim loại.

Độ điện thẩm hiệu dụng của mô hình lưới dây kim loại được tính như công thức dưới đây:

$$\epsilon_{\text{eff}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\epsilon_0 a^2 \omega_p^2 / \pi r^2 \sigma)} \quad (1.12)$$

Với  $\sigma$  là độ dẫn của kim loại, góp phần đặc trưng cho tính chất tổn hao trong kim loại.



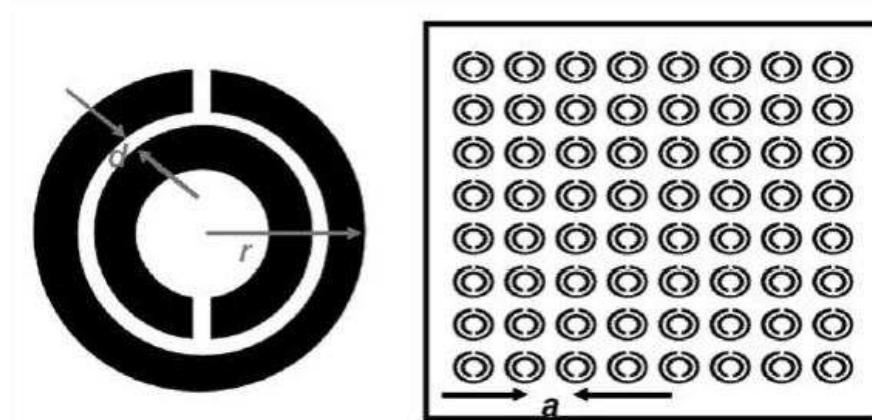
**Hình 1.10.** Độ điện thẩm hiệu dụng của lưới dây bạc theo tần số với  $r = 5 \mu\text{m}$ ,  $a = 40 \text{ mm}$  và độ dẫn của bạc là  $\sigma = 6,3 \times 10^7 \text{ Sm-1}$  (trong hình ký hiệu:  $\text{Re}(\epsilon)$  là phần thực và  $\text{Im}(\epsilon)$  là phần ảo của độ điện thẩm) [10].

Trong trường hợp các dây kim loại được nhúng trong môi trường khác không khí với độ điện thẩm là  $\epsilon_h$ , số hạng đầu tiên trong vế phải của phương trình (1.6) sẽ được thay bởi  $\epsilon_h$ .

Trên hình 1.10 là một trong các kết quả sử dụng mô hình lưới dây kim loại (ở đây sử dụng dây bạc có bán kính  $r = 55 \mu\text{m}$ ,  $a = 40 \text{ mm}$ ) đã hạ thấp được tần số Plasma về vùng GHz (1GHz).

### 1.2.2. Vật liệu có độ từ thẩm âm

Hầu hết các vật liệu thông thường trong tự nhiên đều có độ từ thẩm dương, chỉ có một số ít vật liệu tồn tại độ từ thẩm âm. Bên cạnh đó, tính chất từ của các vật liệu đó thường chỉ tồn tại ở tần số thấp, và hầu hết bị dập tắt ở vùng tần số lớn hơn GHz. Đặc biệt trong lĩnh vực quang học, theo như quan điểm của Landau và Lifshitz việc đề cập đến tính chất từ được coi là không có ý nghĩa vật lý [63]. Điều này được giải thích là do thành phần từ của sóng điện từ tương tác với nguyên tử yếu hơn rất nhiều so với thành phần điện tại tần số quang học [85]. Tương tác từ với nguyên tử tỉ lệ thuận với từ trường Bohr  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} = \alpha e a_0$ , trong khi tương tác điện là  $e a_0$  với  $\alpha \approx 1/137$ . Xét tổng cộng, hiệu ứng của sóng điện từ lên độ từ thẩm yếu hơn  $\alpha^2$  lần so với thành phần điện. Một lý do quan trọng khác là các dịch chuyển lưỡng cực từ chỉ được phép giữa các trạng thái với cùng chỉ số không gian trong hàm sóng [109]. Hiệu năng lượng giữa hai trạng thái như vậy lại nhỏ hơn rất nhiều so với năng lượng của photon. Ngoài ra, vì các đơn cực từ không tồn tại trong tự nhiên nên ta cũng không thể tạo ra được plasma từ giống như mô hình plasma điện áp dụng cho các điện tử trong kim loại.

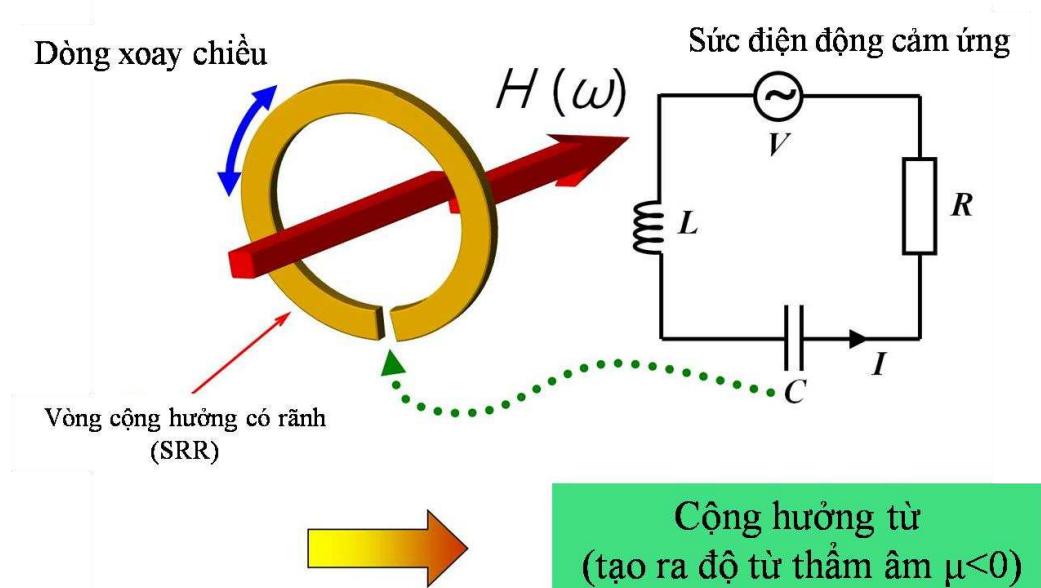


**Hình 1.11.** Sơ đồ cấu trúc của SRR và các cấu trúc SRR trong dãy tuần hoàn [95].

Mặc dù vậy, hiện tượng từ cũng có thể thu được từ các vật liệu phi từ bằng cách kích thích các dòng điện tròn nhằm tạo ra một moment lưỡng cực. Dựa trên nguyên lý này, vào năm 1999, Pendry đã đề xuất mô hình đầu tiên tạo ra độ từ thẩm âm ở vùng tần số GHz [95] gồm một dãy tuần hoàn của 2 cấu trúc SRR đơn lồng vào nhau (hình 1.11).

Hình 1.12 trình bày nguyên lý hoạt động của SRR để tạo ra độ từ thẩm âm. Khi đặt một từ trường biến thiên hướng theo trục của SRR, vòng cộng hưởng sẽ

sinh ra một dòng điện. Đồng thời dòng điện này bắn thân nó lại cảm ứng ra một lưỡng cực từ. Dưới tần số cộng hưởng  $\omega_0$ , cường độ của lưỡng cực từ tăng dần theo tần số và cùng pha với trường kích thích. Cấu trúc SRR biểu hiện đặc trưng thuận từ. Khi tần số tiệm cận  $\omega_0$ , dòng điện sinh ra trong vòng không thể theo kịp trường ngoài và bắt đầu bị trễ. Trên tần số cộng hưởng, lưỡng cực từ càng trễ hơn cho đến khi nó hoàn toàn ngược pha so với trường kích thích. Cấu trúc SRR lúc này mang tính chất nghịch từ. Trường hợp sau được sử dụng để tạo ra độ từ thẩm âm, do tại lân cận tần số cộng hưởng, tính nghịch từ được tăng cường một cách đáng kể đủ để tạo ra được độ từ thẩm nhỏ hơn không ( $\mu < 0$ ).



**Hình 1.12.** Nguyên lý hoạt động của SRR để tạo ra  $\mu < 0$  [95].

Lưu ý rằng, kích thước của SRR cũng như độ tuần hoàn của chúng nhỏ hơn rất nhiều lần bước sóng của vùng tần số hoạt động và điều đó cho phép ta miêu tả mô hình này bằng tham số hiệu dụng  $\mu_{\text{eff}}$  (tương tự như độ điện thẩm hiệu dụng đã được đề cập ở mục trước). Độ từ thẩm hiệu dụng của mô hình SRR được tính như sau:

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega\mu_0} - \frac{3}{\pi^2\mu_0\omega^2 C r^3}} \quad (1.13)$$

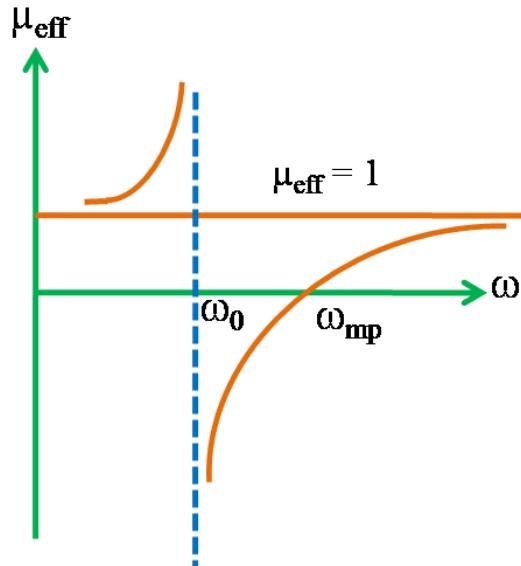
$$F = \frac{\pi r^2}{a^2} \quad (1.14)$$

$$C = \frac{\epsilon_0}{d} = \frac{1}{dc_0^2 \mu_0} \quad (1.15)$$

do đó

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega r \mu_0} - \frac{3dc_0^2}{\pi^2 \omega^2 r^3}} \quad (1.16)$$

ở đó, d là khoảng cách giữa 2 vòng đơn, r là bán kính của vòng ngoài và a là khoảng cách giữa hai SRR liên tiếp,  $c_0$  là vận tốc ánh sáng trong chân không.



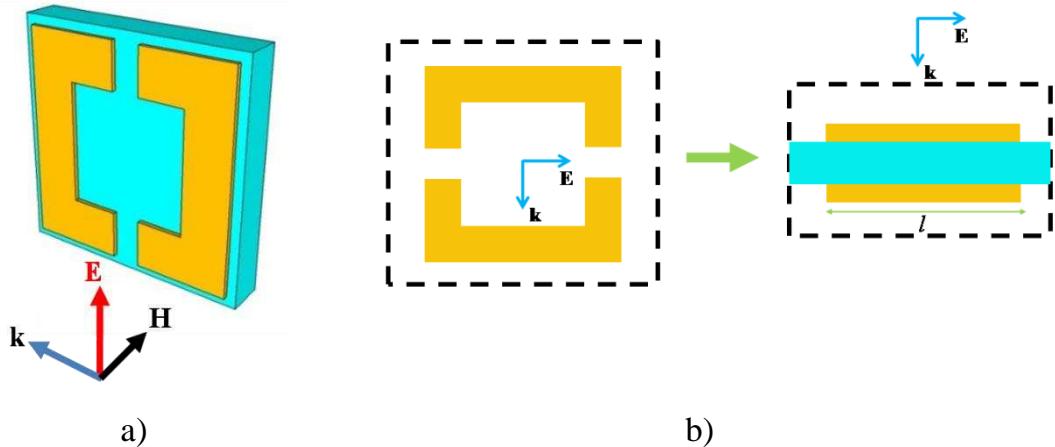
**Hình 1.13.** Dạng tổng quát của độ từ thẩm hiệu dụng cho mô hình SRR với giả thiết là vật liệu không có tổn hao [95].

Mô hình cấu trúc SRR do Pendry đề xuất khác biệt ở chỗ tính chất từ không hề dựa trên các moment từ vĩnh cửu như các vật liệu thông thường. Không những thế, mô hình này còn tạo ra được tần số "plasma từ" tương tự như thành phần điện mà không cần đến các đơn cực từ. Vùng tần số có  $\mu < 0$  sẽ nằm giữa tần số cộng hưởng  $\omega_0$  và tần số plasma từ  $\omega_{\text{mp}}$  như được biểu diễn trên hình 1.13, ở đó:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3}{\pi^2 \mu_0 C r^3}} = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3}} \quad (1.17)$$

$$\omega_{\text{pm}} = \sqrt{\frac{3}{\pi^2 \mu_0 C r^3 (1 - F)}} = \sqrt{\frac{3dc_0^2}{\pi^2 r^3 (1 - \frac{\pi r^2}{a^2})}} \quad (1.18)$$

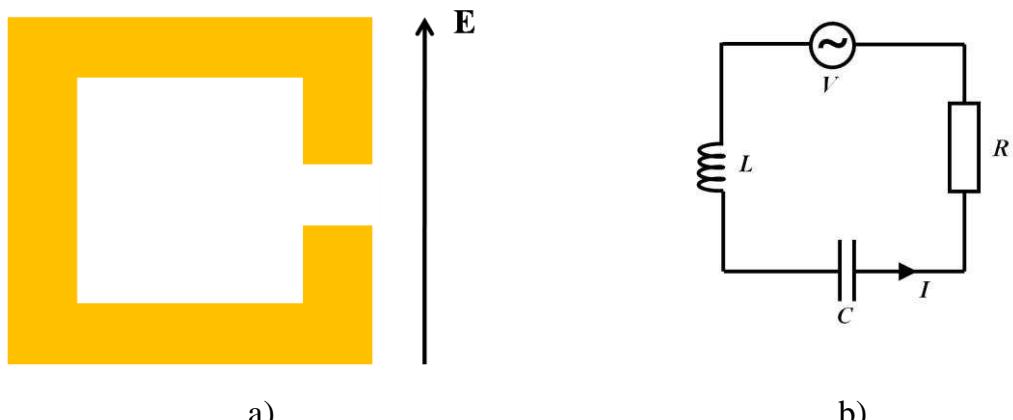
Dễ thấy rằng, công thức (1.17) và (1.18) chỉ phụ thuộc vào các tham số hình học của cấu trúc SRR. Do đó, ta có thể tùy biến các tham số này để thu được tần số cộng hưởng và tần số plasma từ như ý muốn. Điều này cho thấy tính linh hoạt của vật liệu Meta khi nó không hề bị giới hạn ở bất kỳ dải tần số nào.



**Hình 1.14.** a) Cấu trúc SRR và phân cực của sóng điện từ. b) Sự biến đổi từ cấu trúc SRR thành cấu trúc CWP [137].

Trong những năm gần đây, cấu trúc cặp dây bị cắt (cut-wire pair - CWP), thu hút được nhiều sự chú ý của các nhà nghiên cứu. Đây là một cấu trúc rất đơn giản, trong một ô cơ sở cấu trúc này gồm: giữa là lớp điện môi hai bên là hai thanh kim loại. Cấu trúc CWP thực chất được biến đổi từ cấu trúc SRR như được thể hiện trên hình 1.14 và do đó nó cũng thể hiện tính chất từ và cho phép tạo ra độ từ thẩm âm.

Thực ra, cấu trúc SRR được đề xuất đầu tiên bởi Pendry và cấu trúc CWP là để tạo ra độ từ thẩm âm. Tuy nhiên, cấu trúc này cũng có thể được sử dụng để tạo ra độ điện từ thẩm âm. Khi điện trường ngoài đặt vào song song với cạnh chừa rãnh, dòng điện được cảm ứng trên mạch (hình 1.15). Tại tần số cộng hưởng, ta sẽ thu được  $\epsilon < 0$ . Điểm khác biệt cơ bản giữa các yếu tố cộng hưởng này với mô hình lưới dây kim loại được đề xuất ở trên nằm ở độ rộng của vùng điện từ thẩm âm. Do bản chất cộng hưởng, các cấu trúc cộng hưởng chỉ có thể tạo ra được  $\epsilon < 0$  trong một dải tần số rất hẹp. Trong một số trường hợp, điều này sẽ gây khó khăn trong việc tạo ra  $n < 0$ , bởi yêu cầu vùng  $\epsilon < 0$  và  $\mu < 0$  phải trùng lê nhau.



**Hình 1.15.** a) Cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh (SRR) và định hướng của điện trường ngoài. b) Mô hình mạch điện LC tương đương.

### 1.2.3. Một số lý thuyết trong vật liệu chiết suất âm

Để hiểu các tính chất liên quan đến sự truyền sóng điện từ, chúng ta sẽ xuất phát từ hệ phương trình Maxwell. Hệ phương trình Maxwell (trong hệ CGS) viết cho các loại vật liệu có dạng:

## Định luật Faraday

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.19)$$

## Định luật Ampere

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \quad (1.20)$$

## Định luật Gauss

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho \quad (1.21)$$

Và sự không tồn tại đơn cực từ ta có phương trình:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.22)$$

Vói:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.23)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.24)$$

Trong đó,  $\mathbf{D}$  và  $\mathbf{B}$  là độ cảm ứng điện và cảm ứng từ. Các đại lượng  $\rho$  và  $j$  tương ứng với mật độ điện tích và mật độ dòng điện. Hằng số  $c$  là ký hiệu của vận tốc ánh sáng (trong chân không). Xét với trường hợp sóng điện từ, vì đây là trường

điện từ tự do ở cách xa điện tích và dòng điện nên ( $\mathbf{j} = 0$ ) và ( $\rho = 0$ ), hệ phương trình Maxwell có thể được rút gọn thành:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.25)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.26)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1.27)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.28)$$

Điện trường và từ trường được biểu diễn dưới dạng sóng phẳng:

$$\mathbf{E}(r, t) = \mathbf{E}_0 e^{i[kr - \omega t]}, \quad \mathbf{H}(r, t) = \mathbf{H}_0 e^{i[kr - \omega t]} \quad (1.29)$$

Thay phương trình (1.23), (1.24) vào các phương trình (1.25-1.28) và sử dụng biểu diễn (1.29), ta nhận được kết quả sau:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\frac{\omega}{c} \epsilon \mathbf{E} \quad (1.30)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \frac{\omega}{c} \mu \mathbf{H} \quad (1.31)$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.32)$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.33)$$

Biểu thức (1.30), (1.31) rất quan trọng, nó giúp chúng ta hiểu rõ nguồn gốc bản chất của vật liệu LHM. Nếu cả  $\epsilon$  và  $\mu$  cùng dương, ba vector  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{k}$  tạo thành một tam diện thuận (tuân theo quy tắc bàn tay phải). Trong trường hợp  $\epsilon$  và  $\mu$  đồng thời âm, ba vector  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{k}$  sẽ tạo thành một tam diện nghịch (tuân theo quy tắc bàn tay trái). Cùng lúc đó, hướng của dòng năng lượng được xác định bởi vector Poynting  $\mathbf{S}$  không phụ thuộc vào dấu của  $\epsilon$  và  $\mu$ :

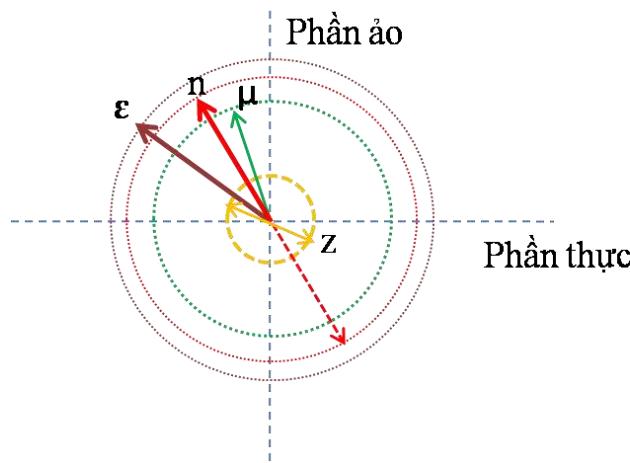
$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.34)$$

Vector Poynting  $\mathbf{S}$  luôn hướng ra ngoài nguồn phát xạ. Đối với vật liệu có  $\epsilon$  và  $\mu$  cùng dương, vector sóng  $\mathbf{k}$  hướng ra từ nguồn phát xạ (tức là hai vector  $\mathbf{S}$  và  $\mathbf{k}$  song song với nhau). Tuy nhiên trong trường hợp vật liệu có  $\epsilon$  và  $\mu$  cùng âm, khi đó vector sóng  $\mathbf{k}$  hướng vào nguồn phát xạ (hai vector  $\mathbf{k}$  và  $\mathbf{S}$  đối song), hiện tượng này còn được gọi là sóng ngược (backward wave). Đây là một trong những điểm khác

biệt chính giữa trường hợp vật liệu có  $\epsilon$  và  $\mu$  cùng âm với trường hợp vật liệu có hai giá trị  $\epsilon$  và  $\mu$  cùng dương.

#### 1.2.4. Vật liệu Meta có chiết suất âm đơn và kép

Ta có thể thấy rằng, chiết suất của một môi trường được tính theo công thức  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ . Nếu chỉ dựa vào công thức này, giá trị của chiết suất dường như vẫn là dương khi  $\epsilon < 0$  và  $\mu < 0$ . Mặc dù vậy, ta phải rất thận trọng trong việc xác định dấu khi thực hiện căn bậc hai. Để xác định chính xác dấu của  $n$ , ta cần phải dựa vào ý nghĩa vật lý của vật liệu. Các vật liệu thường thể hiện tính chất thụ động, có nghĩa là sóng điện từ truyền trong vật liệu có xu hướng tắt dần theo hàm mũ nên các đại lượng  $\epsilon$ ,  $\mu$  và  $n$  đều được biểu diễn bởi các hàm phức. Như quan sát trên giản đồ tạo ra chiết suất âm trong hình 1.16, các giá trị  $\epsilon$ ,  $\mu$  và  $n$  đều nằm trong góc phần tư thứ hai của giản đồ. Hay nói cách khác, phần thực của chiết suất thực sự âm (chiết suất âm kép) khi độ từ thẩm và điện thẩm đồng thời có giá trị âm.



**Hình 1.16.** Giản đồ giải thích phần thực âm của chiết suất. Các mũi tên cho thấy vị trí của độ điện thẩm  $\epsilon$  và độ từ thẩm  $\mu$  trong mặt phẳng phức.

Bây giờ, các câu hỏi đặt ra là xác định điều kiện tổng quát để đạt được chiết suất âm là gì? Để trả lời câu hỏi đó, chúng ta sẽ xét cụ thể dấu của chiết suất thông qua việc biểu diễn các giá trị độ điện thẩm ( $\epsilon$ ), độ từ thẩm ( $\mu$ ) và chiết suất ( $n$ ) dưới dạng phức.

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' = \sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} e^{i\phi_\epsilon} \quad (1.35)$$

$$\mu = \mu' + i\mu'' = \sqrt{\mu'^2 + \mu''^2} e^{i\phi_\mu} \quad (1.36)$$

$$n = n' + i n'' = \sqrt{n'^2 + n''^2} e^{i\phi_n} = \sqrt{n'^2 + n''^2} e^{i(\phi_M + \phi_E)/2} \quad (1.37)$$

Trở kháng của môi trường:

$$z = z' + iz'' = \sqrt{z'^2 + z''^2} e^{i\phi_z} = \sqrt{z'^2 + z''^2} e^{i(\phi_M - \phi_E)/2} \quad (1.38)$$

Ta có mối quan hệ giữa các đại lượng trên như sau:

$$\varepsilon = \frac{n}{z}; \quad \mu = nz; \quad n = \sqrt{\varepsilon\mu}; \quad z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{n}{\varepsilon} \quad (1.39)$$

Ở đây  $\varepsilon'$ ,  $\mu'$ ,  $n'$  là phần thực và  $\varepsilon''$ ,  $\mu''$ ,  $n''$  là phần ảo lần lượt của độ điện thâm, độ từ thâm và chiết suất,  $\phi_M$ ,  $\phi_E$  là pha của từ trường và điện trường tương ứng, chúng thỏa mãn điều kiện  $0 < \phi_M, \phi_E < \pi$  để tổn hao là dương. Do đó:

$$n = \sqrt{\mu\varepsilon} = \sqrt{(\varepsilon' + i\varepsilon'')(\mu' + i\mu'')} = e^{(i\phi_n/2)} \sqrt{(\mu'\varepsilon' - \mu''\varepsilon'')^2 + (\mu'\varepsilon'' + \mu''\varepsilon')^2} \quad (1.40)$$

Hoặc có thể viết biểu thức của chiết suất dưới dạng khác:

$$n = \sqrt{r(\cos\phi_n + i\sin\phi_n)} \quad (1.41)$$

Với  $\phi_n$  là pha của chiết suất  $n$  và:

$$r = \sqrt{(\mu'\varepsilon' - \mu''\varepsilon'')^2 + (\mu'\varepsilon'' + \mu''\varepsilon')^2} \quad (1.42)$$

Pha của  $n$  được cho bởi công thức:

$$\cos\phi_n = \left[ \frac{(\mu'\varepsilon' - \mu''\varepsilon'')}{(\mu'\varepsilon' - \mu''\varepsilon'')^2 + (\mu'\varepsilon'' + \mu''\varepsilon')^2} \right] \quad (1.43)$$

$$\sin\phi_n = \left[ \frac{(\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu')}{(\mu'\varepsilon' - \mu''\varepsilon'')^2 + (\mu'\varepsilon'' + \mu''\varepsilon')^2} \right] \quad (1.44)$$

Hệ quả là, ta thu được phần thực và phần ảo của chiết suất tương ứng theo công thức:

$$n' = \sqrt{r} \cos\left(\frac{\phi_n}{2} + k\pi\right); \quad n'' = \sqrt{r} \sin\left(\frac{\phi_n}{2} + k\pi\right) \quad (k \in \mathbb{Z}) \quad (1.45)$$

Điều kiện đại số tổng quát để đạt được chiết suất âm ( $n' < 0$ ) trong môi trường đó là:  $\cos\left(\frac{\phi_n}{2} + k\pi\right) < 0$  và  $\sin\left(\frac{\phi_n}{2} + k\pi\right) > 0$  ( $k \in \mathbb{Z}$ ). Hay nói cách khác :

$$\mu' \varepsilon'' + \mu'' \varepsilon' < 0 \quad (1.46)$$

Chi tiết tính toán được trình bày cụ thể trong tài liệu [22]. Công thức (1.46) cho thấy, chúng ta có thể phân chia vùng tàn số có chiết suất âm thành hai vùng: chiết suất âm đơn và chiết suất âm kép. Trong vùng chiết suất âm kép, cả hai giá trị phần thực  $\varepsilon'$  và  $\mu'$  đều có giá trị âm còn các giá trị phần ảo ( $\varepsilon'', \mu''$ ) luôn là dương. Vùng chiết suất âm đơn đạt được khi chỉ có một trong hai giá trị âm của  $\varepsilon'$  hoặc  $\mu'$ , các giá trị phần ảo ( $\varepsilon'', \mu''$ ) trong trường hợp này cần có giá trị dương rất lớn để thỏa mãn điều kiện (1.46). Tuy nhiên, trong vùng chiết suất âm đơn, chiết suất âm có thể đạt được nhưng các giá trị lớn của  $\varepsilon''$  và  $\mu''$  dẫn tới một tổn hao đáng kể. Do đó, các vật liệu chiết suất âm đơn là không khả thi trong các ứng dụng liên quan đến sự truyền qua.

Để đánh giá hiệu quả của một loại vật liệu chiết suất âm, người ta sử dụng hệ số phẩm chất (figure of merit – FOM). Hệ số FOM được định nghĩa là tỉ số của phần thực và phần ảo của chiết suất.

$$FOM = \left| \frac{n'}{n''} \right| = \frac{|\mu| \varepsilon' + |\varepsilon| \mu'}{|\mu| \varepsilon'' + |\varepsilon| \mu''} \quad (1.47)$$

Từ phương trình (1.47) có thể suy ra rằng vật liệu Meta có chiết suất âm kép sẽ có hệ số phẩm chất FOM cao hơn so với vật liệu chiết suất âm đơn khi cùng giá trị phần thực  $n'$ .

Thật vậy, sử dụng công thức  $\varepsilon = |\varepsilon| \exp(i\phi_E)$  và  $\mu = |\mu| \exp(i\phi_M)$  thì FOM và  $n''$  được biểu diễn như sau:

$$FOM = |\cot[(\phi_E + \phi_M)/2]| = |\cot \phi_n| \quad (1.48)$$

$$n'' = \frac{n'}{\cot[(\phi_E + \phi_M)/2]} = \frac{n'}{\cot \phi_n} \quad (1.49)$$

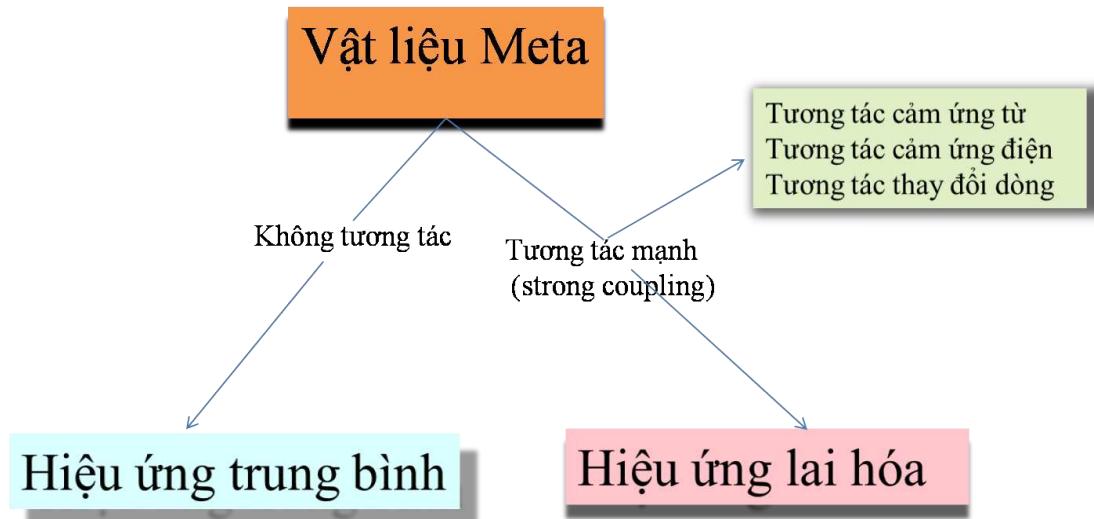
Đối với vật liệu Meta có chiết suất âm kép góc  $\phi_n = \phi_{DN(double negative)}$  nằm trong khoảng  $\pi/2$  đến  $\pi$  nên trị tuyệt đối  $|\cot \phi_n|$  lớn hơn đối với vật liệu Meta có chiết suất đơn ( $\phi_n = \phi_{SN(single negative)}$ ). Do đó  $n''_{DN} < n''_{SN}$  nên hệ số FOM của vật liệu chiết suất âm kép lớn hơn của vật liệu chiết suất âm đơn.

### 1.3. Mô hình lai hóa trong vật liệu Meta

Một trong các kết quả nghiên cứu chính của đề tài là sử dụng mô hình lai hóa để mở rộng dải tần hoạt động của vật liệu có độ từ thẩm âm và vật liệu chiết suất âm, chính vì vậy tiếp theo đề tài sẽ trình bày lý thuyết tổng quan và một số kết quả đã nghiên cứu sử dụng mô hình này.

Hình 1.17 miêu tả hai hướng tiếp cận trong nghiên cứu vật liệu Meta. Ban đầu, vật liệu Meta có ý tưởng thiết kế về cơ bản khá đơn giản. Đó là tạo ra một môi trường đồng nhất dựa trên lý thuyết môi trường hiệu dụng, trong đó các ô cơ sở thường có kích thước nhỏ hơn rất nhiều bước sóng hoạt động. Trong cách tiếp cận này, sự tương tác giữa các ô cơ sở lân cận nhau thường được coi là không đáng kể và cả hệ được miêu tả thông qua hiệu ứng trung bình. Tuy nhiên, sự tương tác này luôn tồn tại khi các ô cơ sở được sắp xếp để tạo nên vật liệu Meta. Đặc biệt là khi chúng rất gần nhau, hiệu ứng kết cặp (coupling) không phải là không đáng kể mà có một tác động rất lớn lên tính chất của vật liệu Meta. Trong những trường hợp như vậy, các mô hình không kết cặp (uncoupling) không còn giá trị, và các thuộc tính hiệu dụng của vật liệu Meta không thể được coi là kết quả của hiệu ứng trung bình của một phần tử duy nhất. Nhiều câu hỏi mới nảy sinh: Làm thế nào để chúng ta mô hình hóa sự kết cặp trong vật liệu Meta? Những hiện tượng mới gì sẽ được giới thiệu bởi hiệu ứng kết cặp này? Chúng ta có thể tìm thấy các ứng dụng thú vị mới nào trong các hệ thống kết cặp?

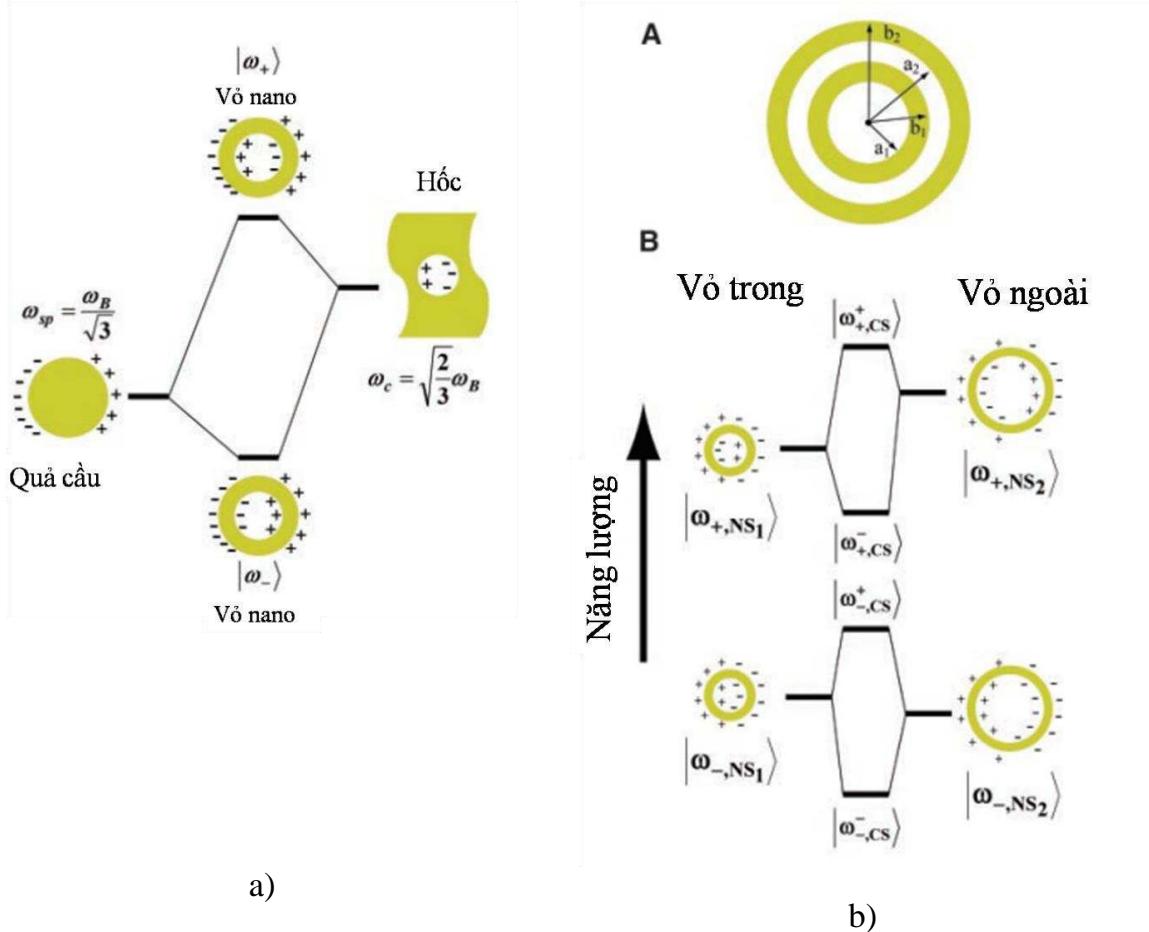
Nghiên cứu vật liệu Meta bao gồm các yếu tố cộng hưởng tương tác mạnh với nhau đã phát triển thành một hướng nghiên cứu quan trọng. Hiệu ứng miêu tả sự tương tác giữa các cộng hưởng trong vật liệu Meta làm các mode cộng hưởng cơ bản bị suy biến và tách thành các mode cộng hưởng mới được gọi là hiệu ứng lai hóa (hybridization). Đã có rất nhiều công trình công bố về chế độ cộng hưởng nhiều mode được tách ra do kết quả của hiệu ứng lai hóa [9], [73], [87], [110]. Rất nhiều hiện tượng mới lạ và các tính chất khác nhau đã được khám phá, dẫn đến triển vọng ứng dụng thú vị mới đã được tìm thấy mà không tồn tại trong vật liệu Meta đồng nhất.



**Hình 1.17.** Hai hướng tiếp cận trong nghiên cứu vật liệu Meta [73].

Năm 2003, Halas và các đồng nghiệp [96] đã giới thiệu một mô hình lai hóa để mô tả phản ứng plasmon của cấu trúc nano phức hợp (hình 1.17). Đây có thể coi như công trình đầu tiên nghiên cứu về mô hình lai hóa dựa vào lý thuyết orbital phân tử. Mô hình này đã chứng minh rằng chế độ cộng hưởng của một hệ thống kim loại kích thước nanô phức hợp có thể được hiểu như là sự tương tác hoặc lai hóa của các yếu tố cơ bản với nhau. Trong kết quả nghiên cứu này cho thấy các tần số cộng hưởng Plasmon mới của hệ phức hợp được tạo ra ( $|\omega\rangle$ ,  $|\omega_+\rangle$ ,  $|\omega_{+,CS}^+\rangle$ ,  $|\omega_{+,CS}^-\rangle$ ...) từ sự suy biến dẫn đến tách các mức năng lượng cộng hưởng Plasmon cơ bản ( $\omega_{sp} = \frac{\omega_B}{\sqrt{3}}$ ,  $\omega_{sp} = \sqrt{\frac{2}{3}}\omega_B, \dots$ ) như trên hình 1.18.

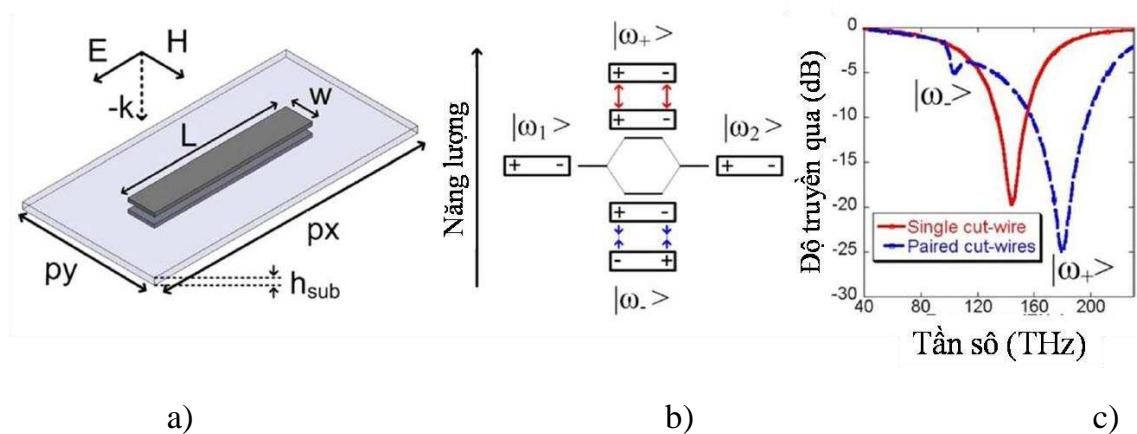
Cho đến nay, các nhà nghiên cứu đã chứng minh được rằng mô hình lai hóa ở trên cũng có thể áp dụng được cho vật liệu Meta vì vật liệu này được cấu thành từ rất nhiều yếu tố cộng hưởng. Một trong những ví dụ cơ bản về việc sử dụng mô hình lai hóa cho vật liệu Meta là áp dụng mô hình này để mô tả sự tương tác của cấu trúc cặp dây bị cắt CWP với sóng điện từ đề xuất bởi Kante [52]. Ngoài ra, cũng có khá nhiều công trình sử dụng mô hình lai hóa áp dụng cho các cấu trúc khác như cấu trúc vòng cộng hưởng có rãnh truyền thông SRR [66], [71], [74,], ba thanh (tri-rods) [12], [124] và các hạt nano kẹp (nanosandwiches) trong các tinh thể quang tử khuyết tật. Trong mục này, sẽ đi sâu tìm hiểu mô hình lai hóa cho cấu trúc CWP, cấu trúc chủ yếu sử dụng cho các kết quả nghiên cứu của đề tài.



**Hình 1.18.** Giản đồ mức năng lượng. a) Sự lai hóa trong vỏ nano kim loại là kết quả của sự tương tác giữa các plasmon ứng với quả cầu và hốc. b) Sơ đồ mô tả: (A) hình học lớp vỏ nano được mô tả bởi các bán kính tâm của lõi ( $a_1$ ), bên trong vỏ ( $b_1$ ), lớp đệm ( $a_2$ ), và lớp vỏ bên ngoài ( $b_2$ ) và (B) sơ đồ mức năng lượng mô tả sự tương tác plasmon giữa bên trong và bên ngoài nanoshell, dẫn đến sự cộng hưởng plasmon lai hóa của lớp vỏ nano (nanoshell) [96].

### 1.3.1. Mô hình lai hoá bậc một ứng với cấu trúc CWP

Cấu trúc CWP được biết đến như là một “nguyên tử meta từ” (magnetic meta-atom) dùng để tạo ra độ từ thẩm âm. Mặc dù vậy, bên cạnh cộng hưởng từ, các cấu trúc CWP cũng thể hiện một cộng hưởng điện nằm ở tần số khác.

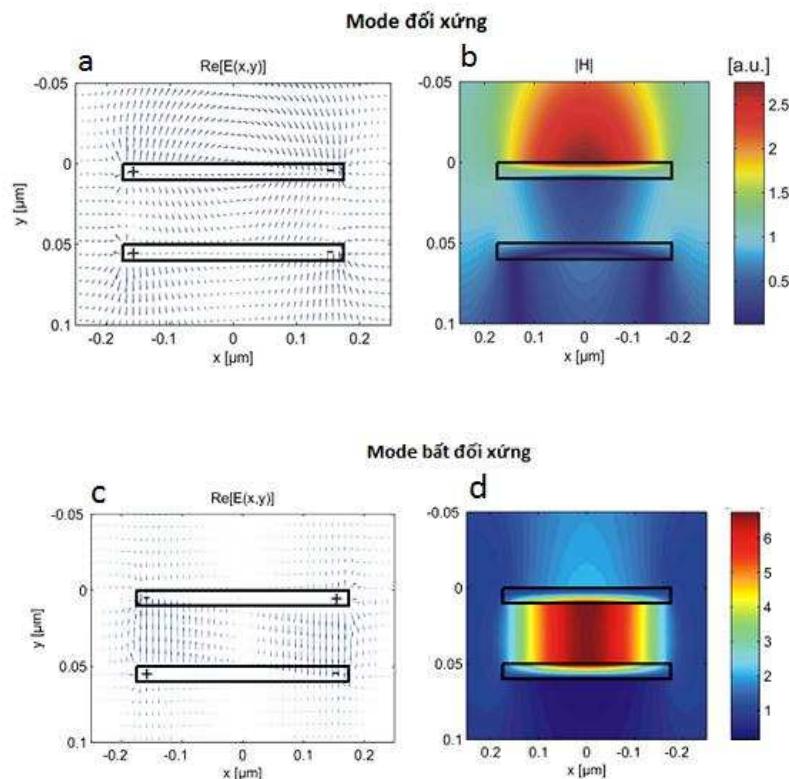


**Hình 1.19.** a) Cấu trúc CWP, b) giản đồ lai hóa và c) phổ truyền qua của cấu trúc một CW và một cặp CW (CWP) [52].

Trên quan điểm mô hình lai hóa, hai công hưởng trên là kết quả của sự lai hóa giữa hai cấu trúc công hưởng trên hai thanh CW đơn lẻ và được đưa ra trên hình 1.19. Trong trường hợp này, cấu trúc CWP bao gồm hai thanh CW kim loại cách nhau bởi một lớp điện môi. Mỗi thanh CW có một mode công hưởng plasmon với tần số riêng  $|\omega_1\rangle$  và  $|\omega_2\rangle$ , chúng bằng nhau trong trường hợp hai thanh hoàn toàn giống nhau về tham số hình học và điều kiện phân cực của sóng điện từ chiếu đến. Trong một hệ CWP gồm hai thanh kim loại ở khoảng cách gần, sự tương tác plasmon giữa hai thanh sẽ mạnh hơn dẫn tới sự suy biến của các mode công hưởng riêng và tách thành 2 mode công hưởng plasmon mới. Mode ứng với sự phân bố trường đối xứng trong không gian gọi là mode đối xứng, có một tần số riêng  $|\omega_+\rangle$ . Ngược lại, mode bất đối xứng ứng với sự phân bố bất đối xứng của trường có tần số riêng  $|\omega_-\rangle$ . Mode bất đối xứng  $|\omega_-\rangle$  được cảm ứng bởi lực hút sinh ra do các dao động ngược pha của các điện tích nên nó sẽ nằm ở mức năng lượng thấp hơn, còn các mode đối xứng  $|\omega_+\rangle$  ứng với lực đẩy do các dao động cùng pha và nó sẽ nằm ở mức năng lượng cao hơn. Sự tách tần số riêng trong hệ của hai thanh kim loại có thể quan sát trong phổ truyền qua của một đơn lõp CWP nơi có hai cực tiêu tương ứng với sự kích thích của mode đối xứng  $|\omega_+\rangle$  và mode bất đối xứng  $|\omega_-\rangle$  (Quan sát hình 1.19(c) có hai đỉnh ứng với đường màu xanh). Ngược lại, phổ của một thanh kim loại được trình bày trong hình 1.19(c), đường màu đỏ tương ứng với một cực tiêu của mode công hưởng riêng.

Để hiểu rõ hơn bản chất của hai mode này, sự phân bố của điện trường và từ trường tại các tần số của công hưởng đối xứng và bất đối xứng hai thanh được trình bày trong hình 1.20(a)-(d) [97]. Trong công hưởng đối xứng, điện trường phân

bó (hình 1.20(a)) tương ứng với hai dao động lưỡng cực cùng pha. Do đó, mode đối xứng liên quan với một momen lưỡng cực điện mạnh, ngoài ra momen từ tại tâm của hệ bằng 0 (hình 1.20(b)). Như vậy, có thể thấy rằng mode đối xứng chính là cộng hưởng điện có thể tạo ra độ điện thâm âm. Ngược lại, sự phân bố của điện trường trong cộng hưởng bất đối xứng tương ứng với một dao động lưỡng cực ngược pha (hình 1.20(c)). Từ giản đồ cho từ trường, chúng ta có thể quan sát từ trường tập trung tại tâm của hệ trong cộng hưởng bất đối xứng (hình 1.20(d)). Do đó, mode bất đối xứng là cộng hưởng từ có thể tạo ra độ từ thâm âm.

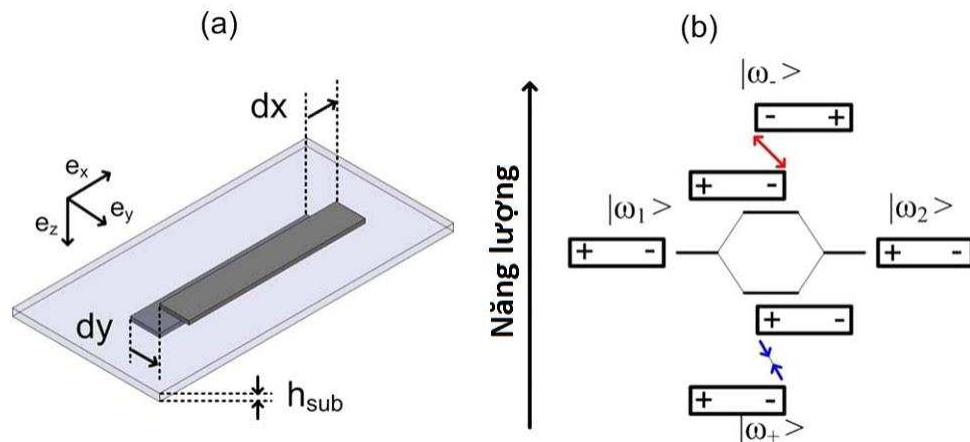


**Hình 1.20.** Phân bố của điện trường và từ trường tương ứng với cộng hưởng a), b) đối xứng và c), d) bất đối xứng của cấu trúc CWP có hai thanh bằng vàng chiều dài 300 nm bì dày 10 nm, và cách nhau 40 nm [97].

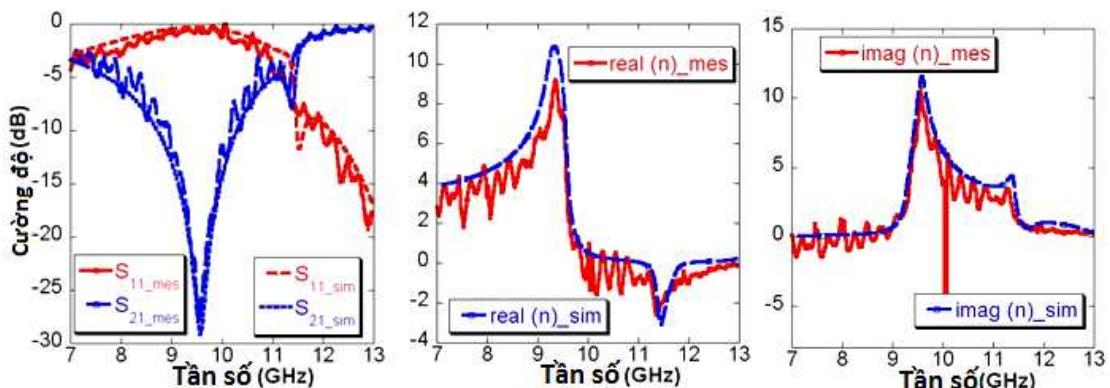
### 1.3.2. Một số kết quả sử dụng mô hình lai hóa bậc một

Dựa trên mô hình lai hóa Kanté đã tạo ra được chiết suất âm chỉ với một cấu trúc CWP mà không phải thêm vào các lưới dây kim loại như thông thường [67, 70]. Bằng cách dịch chuyển tương đối vị trí giữa hai thanh CW (hình 1.21), cộng hưởng điện và cộng hưởng từ sẽ tiến lại gần nhau và đến lúc nào đó giản đồ lai hóa sẽ bị nghịch đảo khi mà mode  $|\omega_-\rangle$  nằm ở mức năng lượng cao và mode  $|\omega_+\rangle$  sẽ nằm ở mức có mức năng lượng thấp (hình 1.21(b)). Hình 1.22 cho thấy, giá trị của

chiết suất âm đã đạt được khi dịch chuyển vị trí các thanh ứng với giản đồ nghịch đảo. Sự nghịch đảo của các mức năng lượng này có thể giải thích đơn giản là do sự hoán đổi lực phục hồi (hút và đẩy) giữa hai thanh CW trước khi dịch chuyển và sau khi dịch chuyển (hình 1.21(b)). Ngoài ra, sự nghịch đảo này còn có thể được giải thích dựa vào mô hình mạch điện LC của Zhou [137] (xem mục 1.4). Trong nghiên cứu này của Kante [52], thực nghiệm chứng minh đã tạo được chiết suất âm khi sử dụng mô hình nghịch đảo giản đồ lai hóa ở vùng sóng vi ba. Độ phâm chất (FOM) trong kết quả nghiên cứu đạt được là 42, lớn hơn rất nhiều công trình nghiên cứu sử dụng các cấu trúc khác để tạo ra chiết suất âm ở vùng GHz. Vì vậy, nó được đề xuất sử dụng để tạo ra vật liệu chiết suất âm ở vùng quang học khi tổn hao lớn. Tuy nhiên, phương pháp này có hạn chế là rất khó để thực hiện việc mở rộng vùng tần số có chiết suất âm.

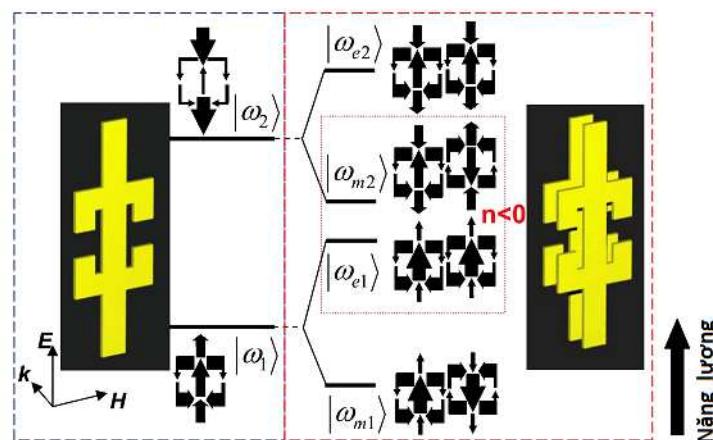


**Hình 1.21.** a) Cấu trúc bất đối xứng của cặp dây bị cắt, b) Giản đồ lai hoá tương ứng [52].



**Hình 1.22.** Từ trái sang phải lần lượt là kết quả mô phỏng và thực nghiệm phổ truyền qua, phản xạ, phản thực của chiết suất và phản ảo của chiết suất [52].

Gần đây, một hướng khác để tạo ra chiết suất âm mà không cần sử dụng đến lưới dây kim loại cũng đang được tập trung nghiên cứu đó là dựa trên mô hình lai hóa nhưng không cần phá vỡ tính đối xứng của cấu trúc như phương pháp của Kanté. Bên cạnh mode bất đối xứng cơ bản (bậc nhất) như trình bày ở trên, cộng hưởng từ có thể được tạo ra bởi mode bất đối xứng bậc cao. Sự chồng chập giữa mode này và mode đối xứng điện cơ bản dễ hơn rất nhiều so với sự chồng chập của hai mode điện và từ cơ bản. Hình 1.23 trình bày mô hình lai hóa dùng để tạo ra chiết suất âm sử dụng cấu trúc bất đối xứng một mặt là thanh kim loại, mặt đối diện là vòng SRR ngăn cách nhau bởi lớp điện môi [103]. Dựa trên ý tưởng này, một trong những kết quả quan trọng của đè tài là tạo ra vật liệu chiết suất âm nhờ cộng hưởng từ bậc ba sử dụng cấu trúc đối xứng CWP (chương III, phần I của đè tài). Mặc dù có thể tạo ra chiết suất âm nhưng phương pháp sử dụng mode cộng hưởng bậc cao này có nhược điểm là tần số mà tại đó có  $n < 0$  lớn hơn nhiều so với cộng hưởng thông thường. Do vậy, lý thuyết mô trường hiệu dụng có thể sẽ không được thỏa mãn. Mặt khác, cũng giống như phương pháp sử dụng cấu trúc bất đối xứng theo đè xuất của Kante ở trên, phương pháp sử dụng cộng hưởng bậc cao này cũng có hạn chế trong việc thực hiện mở rộng vùng tần số có chiết suất âm. Chính vì vậy, để mở rộng vùng tần số có chiết suất âm, đè tài đã sử dụng cấu trúc kết hợp và cấu trúc dạng lưới hai lớp dựa trên mô hình lai hóa bậc cao (hai, ba..) (xem chương III, phần II).

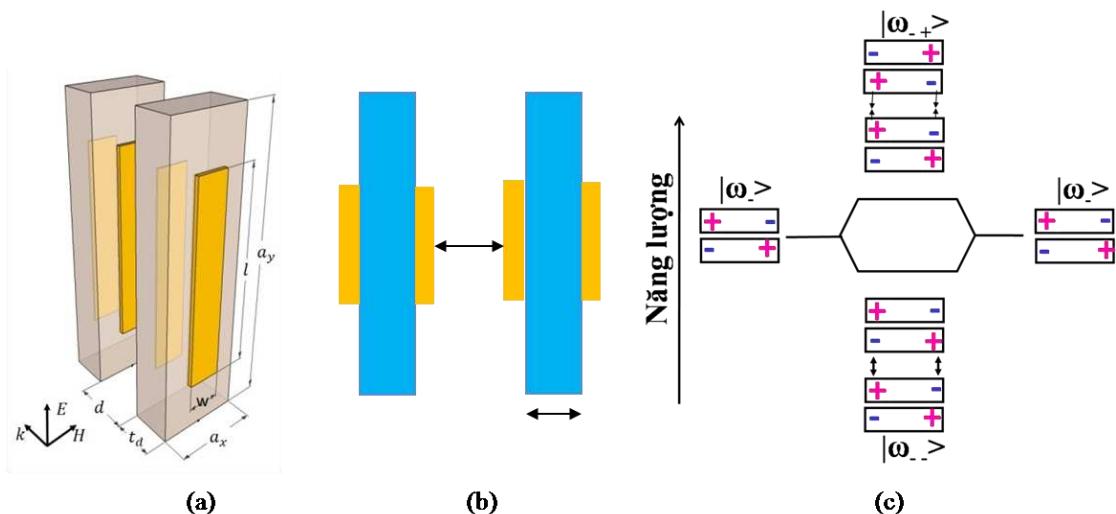


**Hình 1.23.** Giản đồ lai hóa của cấu trúc do nhóm Soukoulis đề xuất [103] có thể tạo ra chiết suất âm  $n < 0$  do sự chồng chập của mode bất đối xứng bậc nhất với mode đối xứng bậc hai.

### 1.3.3. Mô hình lai hóa bậc hai ứng với cấu trúc CWP hai lớp

Trong đề tài có sử dụng mô hình lai hóa để mở rộng dải tần số của vật liệu Meta có độ từ thẩm âm sử dụng cấu trúc đối xứng hai chiều - cấu trúc cặp dây bị cắt (CWPs) hai lớp. Sau đây chúng tôi xin được trình bày sơ lược cơ sở vật lý của phương pháp này. Cơ sở vật lý của phương pháp này là sử dụng tương tác mạnh giữa hai lớp CWPs liền kề theo phương truyền sóng  $\mathbf{k}$  tạo ra hiện tượng hô cảm để tách vạch cộng hưởng, kết quả là mở rộng vùng tần số hoạt động.

Xét một hệ vật liệu Meta gồm 2 tấm CWP dọc theo phương truyền sóng  $\mathbf{k}$ . Ô cơ sở mặt cắt theo phương truyền sóng  $\mathbf{k}$  của hệ và giản đồ lai hóa bậc 2 được biểu diễn như trên hình 1.24. Có thể hình dung rằng, ngoài tương tác giữa các điện tích bên trong mỗi CWP, hai CWP cũng sẽ tương tác lẫn nhau ở khoảng cách thích hợp.



**Hình 1.24.** a) Ô cơ sở của cấu trúc CWP hai lớp b) mặt cắt của cấu trúc CWP hai lớp và c) mô hình lai hóa bậc hai để xuất với cấu trúc này

Dựa vào giản đồ lai hóa bậc hai ta có thể thấy rằng khi hai cặp CWP (bốn CWS) đặt gần nhau, các mode cộng hưởng điện  $|\omega_+>$  và mode cộng hưởng từ  $|\omega_->$  cơ bản trong giản đồ lai hóa bậc một của từng CWP sẽ bị suy biến và mỗi mode này tách thành hai mode mới riêng biệt [74]. Tuy nhiên, với mục đích mở rộng vùng có độ từ thẩm âm phục vụ cho các nghiên cứu mở rộng vùng chiết suất âm nên trong nghiên cứu này chỉ quan tâm đến sự tách của mode cộng hưởng từ  $|\omega_->$  cơ bản. Mode cộng hưởng từ cơ bản  $|\omega_->$  được tách thành hai mode mới  $|\omega_{-+}>$  và  $|\omega_{--}>$  khi hai lớp CWP ở gần nhau với khoảng cách thích hợp như trên hình 1.24(c). Để dễ dàng nhận thấy hai mode này là hai mode cộng hưởng từ có thể tạo ra độ từ thẩm âm vì nó được tách ra

từ mode cộng hưởng từ cơ bản  $|\omega\rangle$ . Lực Coulomb sinh ra giữa các CWP sẽ góp phần vào việc xác định các mức năng lượng tổng cộng của giản đồ lai hóa bậc hai. Mode  $|\omega\rangle$  có năng lượng thấp hơn vì sự dao động của các điện tích bên trong mỗi CW trong trường hợp này là ngược pha tính với tất cả các CWs liền kề nhau và do đó các lực hồi phục giữa các CW liền kề đều là lực hút. Về mặt bản chất, khoảng cách giữa hai CW  $t_d$  (hay chiều dày lớp điện môi) trong một lớp CWP sẽ đặc trưng cho tương tác nội trong mỗi CWP. Trong khi đó, khoảng cách giữa hai cặp CWP d sẽ chi phối tương tác bên ngoài giữa chúng. Như vậy, cường độ kết cặp hay sự tách các mode lai hóa theo giản đồ này sẽ phụ thuộc mạnh vào tỷ số  $d/t_d$ .

Dựa trên mô hình mạch điện tương đương LC, tần số của các đỉnh bị tách có thể tính toán được dựa vào việc giải phương trình Euler Lagrange [116]. Gọi  $Q$  là điện tích tổng cộng tập trung ở cuối mỗi bản tụ thì phương trình Lagrangian cho một lớp CWP sẽ là:

$$\mathfrak{I} = L \dot{Q}^2 / 2 - Q^2 / 2C \quad (1.50)$$

Trong đó  $Q$  là dòng cảm ứng, số hạng thứ nhất về phải  $L \dot{Q}^2 / 2$  là động năng của dao động, số hạng thứ hai  $Q^2 / 2C = L\omega_0^2 Q^2 / 2$  là năng lượng điện tích trữ ở không gian giới hạn bởi hai thanh CW. Tương tự trong trường hợp hai cặp CWP, hàm Lagrange là đóng góp tổng cộng của từng CWP cộng thêm thành phần tương tác giữa hai CWP và được biểu diễn như sau:

$$\mathfrak{I} = \frac{L}{2} (\dot{Q}_1^2 - \omega_0^2 Q_1^2) + \frac{L}{2} (\dot{Q}_2^2 - \omega_0^2 Q_2^2) + M \dot{Q}_1 \dot{Q}_2 \quad (1.51)$$

trong đó  $Q_1, Q_2$  là điện tích dao động trên mỗi CWP.

Độ tự cảm  $L$  của CWP được xác định bởi công thức [140]:

$$L = 2L_0 = 2 \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2l}{w} \right) + 0.5 + \frac{w}{3l} - \frac{w^2}{24l^2} \right] \quad (1.52)$$

Trong đó  $l$  và  $w$  là chiều dài và độ rộng của CW,  $\mu_0$  độ từ thẩm trong chân không.

Theo tài liệu tham khảo [107], độ hô cảm của hai CWP là  $M$  theo phương  $k$  có thể được tính xấp xỉ:

$$M = -\frac{\mu_0 (t_d l)^2}{4\pi r^3} (1 + jk_0 r - k_0^2 r^2) e^{-jk_0 r} \quad (1.53)$$

Trong đó  $k_0$  là số sóng tại tần số cộng hưởng của một CWP đơn,  $t_d$  là chiều dày lớp điện môi giữa hai CW, và  $r = 3t_d + d$  là khoảng cách giữa hai lưỡng cực từ hiệu ứng tạo bởi hai CWP (với  $d$  là khoảng cách giữa hai lớp CWP).

Thay  $\Im$  vào phương trình Euler Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Im}{\partial \dot{Q}_i} \right) = \frac{\partial \Im}{\partial Q_i} \quad (i=1,2) \quad (1.54)$$

- Nếu  $Q_1 = Q_2$  thì phương trình (1.54) trở thành: (ứng với trường hợp tách mode  $|\omega_{..}\rangle$ )

$$(1+k)\ddot{Q}_i + \omega_0^2 Q_i = 0$$

$$\rightarrow |\omega_{..}\rangle = \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} \text{ trong đó } k = \frac{M}{L} \text{ là hệ số kết cặp} \quad (1.55)$$

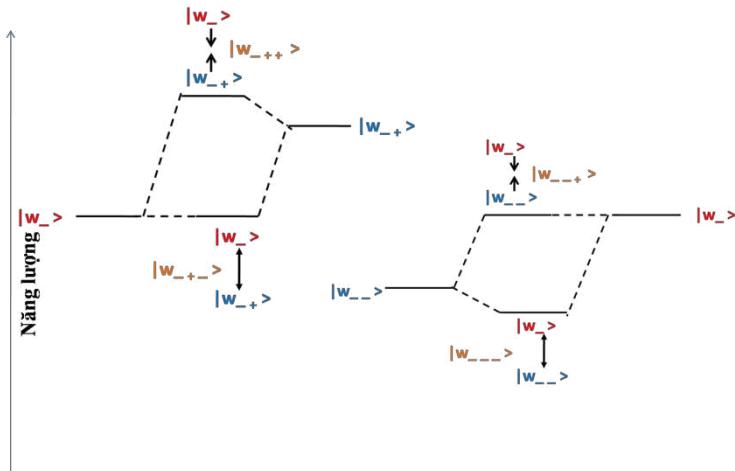
- Nếu  $Q_1 = -Q_2$  thì phương trình (1.54) trở thành: (ứng với trường hợp tách mode  $|\omega_{-+}\rangle$ )

$$(1-k)\ddot{Q}_i + \omega_0^2 Q_i = 0$$

$$\rightarrow |\omega_{-+}\rangle = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} \quad (1.56)$$

Theo tính toán, độ rộng khoảng cách hai mode được tách ra  $\Delta\omega = |\omega_{-+}\rangle - |\omega_{..}\rangle \approx k\omega_0$  tỉ lệ với cường độ kết cặp nên sẽ phụ thuộc vào khoảng cách hai lớp  $d$  của hai CWP cũng như chiều dày lớp điện môi  $t_d$  của một lớp CWP.

#### 1.3.4. Mô hình lai hóa bậc cao



**Hình 1.25.** Giản đồ lai hóa cho cấu trúc CWP ba lớp

Đầu tiên, chúng tôi xin trình bày giản đồ lai hóa bậc ba cho cấu trúc CWP ba lớp. Tính chất truyền qua của hệ CWP ba lớp có thể được giải thích bằng giản đồ lai hóa bậc ba được mô tả trong hình 1.25. Mode cộng hưởng từ cơ bản  $|\omega_->$  của một lớp tương tác với hai mode của hệ CWP hai lớp,  $|\omega_{-+}>$ , và  $|\omega_{--}>$ , tạo ra bốn mode kích thích ( $|\omega_{-++}>$ ,  $|\omega_{-+-}>$ ,  $|\omega_{--+}>$ , và  $|\omega_{---}>$ ). Trong đó hai mode  $|\omega_{-+-}>$ ,  $|\omega_{--+}>$  có cùng mức năng lượng và gần như là bằng mode  $|\omega_->$ , nên thường chỉ có thể quan sát được ba đỉnh cộng hưởng khác nhau trong phổ truyền qua của hệ CWP ba lớp [110]. Cũng cần lưu ý rằng, các cộng hưởng tần số thấp yếu hơn do sự lấn át của vùng từ thâm dương của các cộng hưởng tần số thấp hơn. Như vậy, một cách tương tự bằng cách sử dụng một hệ thống CWP gồm N lớp, các hưởng ứng điện từ có thể được giải thích như là sự lai hóa của một lớp với (N-1) lớp, vùng có độ từ thâm âm do đó có thể càng rộng thêm.

Nhìn chung, mô hình lai hóa đang được xem như là một hướng nghiên cứu quan trọng của vật liệu Meta. Thông qua đó vật liệu chiết suất âm có thể thu được dựa vào các nguyên tử từ cơ bản như CWP hoặc các SRR. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc chế tạo vật liệu Meta ở vùng tần số cao.

Ngoài ra, việc chứng minh tồn tại các tương tác hay lai hóa giữa các phần tử lân cận, đồng thời giải thích được việc xuất hiện các vùng cộng hưởng mới qua giản đồ lai hóa còn góp phần rất quan trọng trong việc nghiên cứu mở rộng vùng hoạt động hay điều biến tính chất của vật liệu Meta.

#### **1.4. Một số phương pháp nghiên cứu vật liệu Meta**

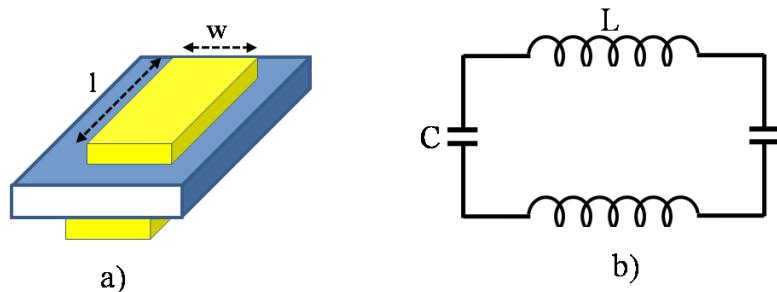
Các nghiên cứu tương tác của sóng điện từ với vật liệu Meta nói chung thường được thực hiện dựa trên việc kết hợp giữa tính toán thông qua mô hình mạch điện LC, mô hình hóa bằng mô phỏng và chế tạo cùng các phép đo thực nghiệm. Sau đây đề tài sẽ trình bày một số phương pháp chính mà các nhà nghiên cứu vật liệu Meta đã và đang thực hiện.

##### **1.4.1. Phương pháp tính toán dựa trên mô hình mạch điện LC tương đương**

Các tính chất của vật liệu Meta xuất hiện là do sự tương tác của vật liệu với sóng điện từ. Sự tương tác này sẽ xuất hiện các cộng hưởng điện từ. Do vậy các tính chất của vật liệu Meta có thể được giải thích dựa trên mô hình mạch điện tương đương LC. Mỗi một cấu trúc hình học sẽ có mạch điện LC tương ứng.

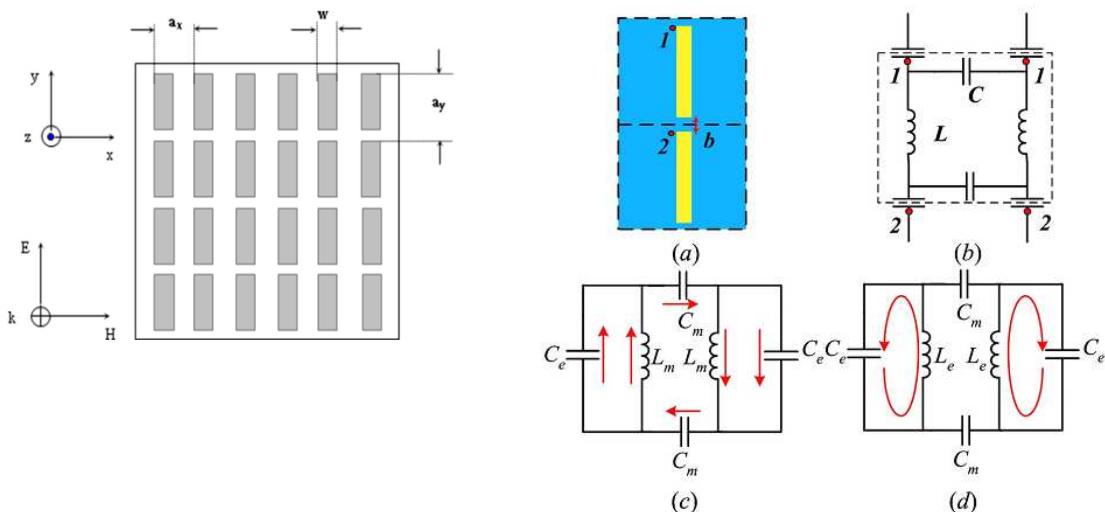
###### **1.4.1.1. Mô hình mạch điện LC cho cấu trúc có độ từ thâm âm ( $\mu < 0$ )**

Cấu trúc đầu tiên được đề cập đến là cấu trúc CWP. Sự tương tác của cấu trúc này với sóng điện từ được giải thích dựa trên mô hình mạch điện LC đề xuất bởi Zhou và cộng sự [137]. Dựa vào mô hình này, tần số mà tại đó xảy ra cộng hưởng điện, cộng hưởng từ hay chiết suất âm có thể dễ dàng được tính toán.



**Hình 1.26.** a) Ô cơ sở của vật liệu Meta có cấu trúc cặt dây bị cắt, gồm 3 lớp: hai lớp kim loại hai bên và lớp điện môi ở giữa, b) mạch tương đương LC.

Hình 1.26 trình bày cấu trúc ô cơ sở của vật liệu Meta có cấu trúc CWP (giữa là lớp điện môi, hai bên là hai thanh kim loại CW). Sơ đồ mạch điện tương đương được trình bày trên hình 1.26(b). Ở đây, tụ điện C xuất hiện ở hai đầu của CWP, cuộn cảm  $L_m$  tương ứng với mỗi thanh CW.



**Hình 1.27.** Mô hình mạch LC cho một ô cơ sở của cấu trúc CWP [137].

Trong trường hợp tổng quát, khi các ô cơ sở của cấu trúc CWP được sắp xếp tuần hoàn tạo thành vật liệu Meta, sẽ xảy ra sự tương tác giữa các ô cơ sở trong vật liệu (xem hình 1.27). Mô hình mạch điện LC tại tần số cộng hưởng điện và cộng hưởng từ được biến đổi cho phù hợp như trên hình vẽ 1.27 (c) và 1.27 (d). Chi tiết giải thích cho các mô hình biến đổi này được trình bày trong tài liệu [137].

\* Trong trường hợp cộng hưởng từ:

Độ tự cảm tổng cộng của CWP được xác định từ năng lượng từ trường có công thức:

$$L = 2L_m \approx \mu(t_s/w)l \quad (1.57)$$

Trong đó l là chiều dài của CW,  $t_s$  là chiều dày lớp điện môi, w là độ rộng của thanh CW. Chú ý rằng, khi hoạt động ở vùng tần số cao (THz) kích thước của ô cơ sở cỡ 10 μm đến 100 nm thì động năng của các điện tử cuốn (điện tử chuyển động dưới tác dụng của điện trường ngoài) trở nên đáng kể so với năng lượng từ. Vì vậy, khi đó vế phải của phương trình (1.57) phải được cộng thêm thành phần độ tự cảm động  $L_k$ .

Điện dung của mỗi tụ  $C_m$  (hình thành ở hai đầu của CW) được bởi công thức:

$$C_m = \epsilon w l' / t_s \quad (1.58)$$

do các điện tích phân bố không đều trên toàn bộ thanh CW mà chủ yếu tập trung ở cuối mỗi bản tụ với chiều dài trên thanh có chứa điện tích là  $l'$  với  $l' = c_1 l$ , hệ số  $c_1$  thường nằm trong khoảng 0.2 - 0.3.

$C_e$  là điện dung được sinh ra do hai cặp dây liên tiếp theo phuong E và được xác định bằng công thức:

$$C_e = \pi \epsilon w / \ln(b/t_m) \quad (1.59)$$

Trong đó  $t_m$  là chiều dày của thanh kim loại CW, b là khoảng cách giữa hai thanh CW liên tiếp theo chiều điện trường E.

Trở kháng tương đương của mạch điện:

$$Z = iL_m \omega / (l - L_m C_e \omega^2) \quad (1.60)$$

Khi có cộng hưởng từ Z cực tiểu nên:

$$\omega_m = 1 / \sqrt{L_m (C_m + C_e)} \cong 1 / \sqrt{L_m C_m} \quad (1.61)$$

Thay các giá trị  $C_m, L_m$  vào phương trình (1.61) ta được:

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = \frac{1}{2\pi l \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{c_1/2}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{c_1 \epsilon_r / 2}} \frac{c}{l} \quad (1.62)$$

Từ công thức (1.62) ta thấy tần số cộng hưởng từ tỉ lệ nghịch với chiều dài của thanh CW.

Tuy nhiên, một nghiên cứu khác cũng đã chỉ ra rằng chiều rộng w của CWP cũng ảnh hưởng đến tần số cộng hưởng từ [143], [58]. Một cách định tính, tần số cộng hưởng từ phụ thuộc vào các tham số cấu trúc như trong biểu thức dưới đây:

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \propto \frac{c_0}{\pi wl\sqrt{\epsilon}} \quad (1.63)$$

Từ biểu thức (1.63) chúng ta thấy rằng tần số cộng hưởng từ phụ thuộc mạnh vào các tham số cấu trúc như là: chiều dài thanh kim loại (l), chiều rộng thanh (w), độ điện thẩm ( $\epsilon$ ).

\* *Trường hợp cộng hưởng điện:*

Một cách tương tự tần số cộng hưởng điện được xác định:

$$f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_e L_e}} = \frac{c\sqrt{\ln(b/t_s)}}{2\pi\sqrt{wg(w/l)}} \quad (1.64)$$

Trong đó  $L_e$  là độ tự cảm được sinh ra bởi thanh có chiều dài tương ứng với độ rộng của thanh và được xác định bằng công thức:

$$L_e = (\mu/\pi)g(w/l) \quad (1.65)$$

Từ công thức (1.65) ta thấy tần số cộng hưởng điện phụ thuộc mạnh vào khoảng cách giữa hai CWP theo phương E (nói cách khác là hằng số mạng  $a_y$ ). Sự ảnh hưởng này cũng liên quan đến tần số cộng hưởng từ vì khi  $a_y$  tăng làm cho khoảng cách giữa cộng hưởng điện và cộng hưởng từ thay đổi. Khi tần số cộng hưởng điện tiến gần cộng hưởng từ, nó sẽ lấn át cộng hưởng từ và cộng hưởng từ có thể bị lu mờ thậm chí bị triệt tiêu [59].

Như vậy, từ các công thức tính toán tần số cộng hưởng điện, cộng hưởng từ phụ thuộc vào các tham số cấu trúc ở trên chúng ta có thể tính toán sơ bộ và thiết kế để chế tạo vật liệu hoạt động ở vùng tần số mong muốn khác nhau.

#### 1.4.1.2. Mô hình mạch điện LC cho cấu trúc có chiết suất âm ( $n < 0$ )

Để tạo ra vật liệu Meta có chiết suất âm, người ta thường kết hợp hai thành phần: thành phần từ dùng để tạo ra và điều khiển vùng có độ từ thẩm âm ( $\mu < 0$ ), còn thành phần điện tạo ra và điều khiển vùng có độ điện thẩm ( $\epsilon < 0$ ). Với thành phần điện, người ta chủ yếu sử dụng các thanh kim loại liên tục theo đề xuất của Pendy [94] vì vùng có độ điện thẩm âm thu được rất rộng nên dễ dàng trong việc kết hợp để tạo ra vật liệu có chiết suất âm. Tuy nhiên, để tạo ra vùng có độ từ thẩm âm khó hơn nhiều so với việc tạo ra vùng có độ điện thẩm âm. Kể từ cấu trúc đầu

tiên SRR tạo ra độ từ thâm âm được đề xuất bởi Pendy 1999 [95], cho đến nay đã có rất nhiều các cấu trúc biến đổi khác nhằm khắc phục các hạn chế của cấu trúc SRR, CWP là một trong các cấu trúc đó. Cấu trúc này có ưu điểm nổi trội hơn nhiều so với SRR. Đây cũng chính là lý do mà đề tài sử dụng cấu trúc CWP và một số cấu trúc biến đổi của nó làm thành phần từ tạo ra độ từ thâm âm trong các nghiên cứu tạo ra chiết suất âm.

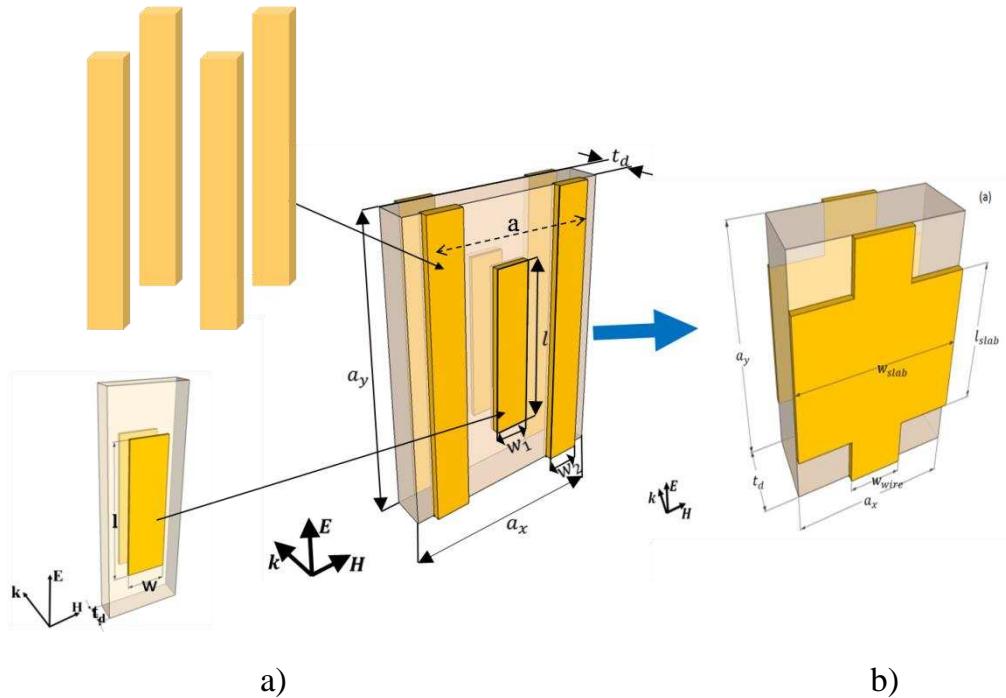
Khi đưa các thanh kim loại liên tục thêm vào trong cấu trúc CWP, cấu trúc mới thu được có tên gọi: cấu trúc kết hợp (Combined structure - CB) (hình 1.28 (a)). Trong cấu trúc CB, thành phần CWP đóng vai trò tạo ra vùng có độ từ thâm âm dựa trên cộng hưởng từ được mô hình hóa bởi mạch điện LC như đã trình bày ở trên. Vì vậy, tần số cộng hưởng từ cũng được xác định và phụ thuộc vào các tham số cấu trúc theo công thức (1.64). Còn các thanh kim loại liên tục đóng vai trò tạo ra độ điện thâm âm dưới tần số plasma theo mô hình Drude. Theo Pendy [94], tần số plasma hiệu dụng của các thanh kim loại liên tục được xác định bằng công thức:

$$f_p^2 = \frac{c_0^2}{2\pi a^2 \ln(a/w_2)} \quad (1.66)$$

trong đó  $a$  là khoảng cách giữa hai tâm thanh kim loại liên tục tiếp và  $w_2$  là độ rộng của thanh kim loại liên tục (hình 1.28(a)).

Tuy nhiên, trong thực tế tần số plasma của cả cấu trúc CB có thay đổi một chút so với công thức (1.66) do sự đóng góp của các thanh kim loại ngắn (cut-wire - CW) trong CWP hưởng ứng với điện trường ngoài [51].

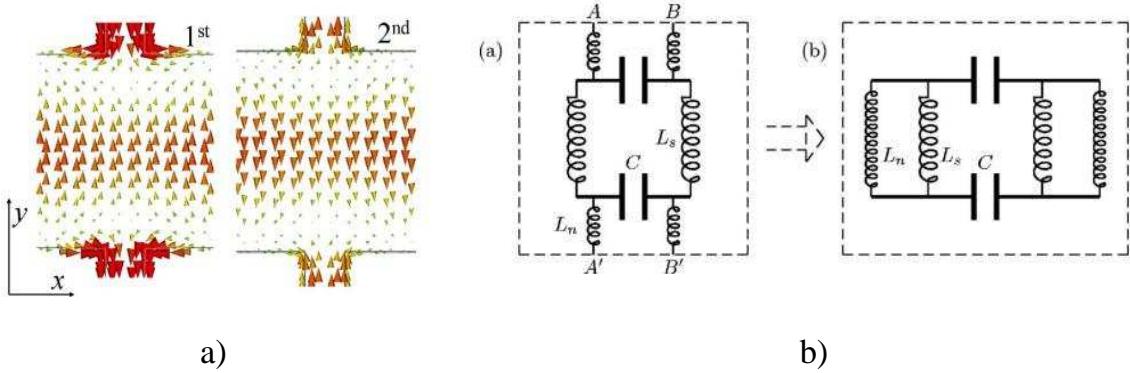
Từ công thức (1.63) và (1.66) cho thấy, bằng cách điều khiển các tham số cấu trúc thích hợp trong cấu trúc CB, ta có thể tạo ra được vùng đồng thời có độ từ thâm âm và điện thâm âm hay vùng có chiết suất âm.



**Hình 1.28.** a) Sự kết hợp giữa thanh kim loại liên tục và CWP tạo ra cấu trúc kết hợp cho  $n < 0$ , b) Cấu trúc dạng lưới (fishnet-FN) một cấu trúc biến đổi của cấu trúc kết hợp.

Khi tăng độ rộng  $w_1$  của thanh CW trong CWP cho đến khi nó chạm vào các thanh kim loại liên tục, cấu trúc mới thu được có tên là cấu trúc dạng lưới (fishnet – FN) (hình 1.28(b)). Cấu trúc này đơn giản, ít tham số cấu trúc hơn CB, đặc biệt có thể tạo ra chiết suất âm với độ tổn hao thấp trên một vùng rộng các tham số cấu trúc do dễ dàng đạt được điều kiện phối hợp trở kháng với môi trường bên ngoài ( $\varepsilon = \mu$ ). Điều này có thể được giải thích do đường biểu diễn độ điện thẩm phụ thuộc vào tần số đối với cấu trúc này có độ dốc bé hơn đối với cấu trúc CB [51].

Một cách tương tự CB, thành phần tạo ra độ điện thẩm âm là các thanh kim loại liên tục, thành phần tạo ra độ từ thẩm âm là các cặp dây bị cắt (slab) giống như CWP nhưng chỉ khác ở chỗ nó được nối liền với các thanh kim loại liên tục và tạo ra các đoạn giống như nút cổ chai (neck). Chính vì sự đóng góp của các nút cổ chai, mô hình mạch điện LC so với CWP có sự thay đổi [51]. Phân bố dòng điện và mô hình mạch điện LC tại tần số cộng hưởng từ được đưa ra trên hình 1.29. Như vậy, ngoài độ tự cảm  $L_s$  do thành phần thanh kim loại giống như CW tạo ra, trong cấu trúc này thêm độ tự cảm  $L_n$  do các nút cổ chai tạo ra. Chú ý rằng, dòng điện trong thanh và ở nút cổ chai ngược chiều nhau nên hai thành phần độ tự cảm này trong mạch điện LC tương đương mắc song song như trong hình 1.29(b).



**Hình 1.29.** a) Phân bố dòng điện mặt trước và mặt sau của cấu trúc FN và b) mô hình mạch điện LC tại tần số cộng hưởng từ của cấu trúc FN [51].

Tần số cộng hưởng từ của cấu trúc FN được tính toán bởi biểu thức sau:

$$\omega_m^2 = \frac{1}{LC} = \frac{1}{L_s C} + \frac{1}{L_h C} \approx \omega_{m(\text{short-slabs})}^2 + \frac{1}{L_h C} \quad (1.67)$$

Trong đó số hạng thứ nhất  $\omega_m^2$  (short-slabs) giống với tần số cộng hưởng từ của CWP, số hạng thứ hai là do đóng góp của nút cổ chai và làm cho tần số cộng hưởng từ tăng lên so với cấu trúc CWP.

Bằng cách tính toán điện dung C, độ tự cảm  $L_n$  và  $L_s$ , tần số cộng hưởng từ phụ thuộc vào các tham số cấu trúc theo biểu thức sau [51]:

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} \square \sqrt{\frac{1}{l_{\text{slab}}^2} + \frac{1}{l_{\text{slab}} l_n} \frac{w_n}{w_{\text{slab}}}} \quad (1.68)$$

trong đó  $l_{\text{slab}}$ ,  $w_{\text{slab}}$  lần lượt là chiều dài và chiều rộng của thanh;  $l_n = a_y$ ,  $w_n = w_{\text{wire}}$  lần lượt là chiều dài và chiều rộng của phần nút cỗ chai như biểu diễn trên hình 1.28(b).

Như vậy tần số cộng hưởng từ của cấu trúc FN phụ thuộc vào các tham số chiều dài của thanh và nút cỗ chai. Đặc biệt, từ phương trình (1.68) cho thấy tần số cộng hưởng từ phụ thuộc vào tỉ số chiều rộng của phần nút cỗ chai trên độ rộng của thanh nên có một số điểm đáng lưu ý: khi giảm độ rộng của thanh  $w_{slab}$  thì tần số cộng hưởng từ sẽ tăng, khi độ rộng của phần nút cỗ chai bằng không  $w_n = 0$  thì độ rộng của thanh sẽ không ảnh hưởng đến tần số cộng hưởng từ, điều này trùng khớp với kết quả nghiên cứu trong tài liệu [137]. Nếu  $w_s \rightarrow w_n$  thì cộng hưởng từ sẽ giảm dần và biến mất.

### **1.4.2. Phương pháp mô phỏng vật lý**

Vật liệu Meta có chiết suất âm, tương tự như các vật liệu Meta khác, thường được tạo từ các ô cơ sở giống nhau được sắp xếp tuần hoàn 2 hoặc 3 chiều. Cấu trúc tuần hoàn có thể được mô hình hóa chính xác bằng cách mô phỏng một ô cơ sở với tham số hình học, đặc tính vật liệu, cách bố trí nguồn phát, nguồn thu và các điều kiện biên. Nhờ sự phát triển nhanh chóng của công nghệ trong lĩnh vực tin học, các công cụ tính toán được sử dụng để mô hình hóa tương tác giữa sóng điện từ với vật liệu có cấu trúc phức tạp trở nên rất chi tiết. Vì vậy, việc sử dụng những công cụ này có thể cung cấp các thông tin khá chính xác về các tính chất của vật liệu Meta. Để có được công cụ mô phỏng, các nhà nghiên cứu thường sử dụng hai cách: xây dựng phần mềm dựa trên bộ mã nguồn của Pendry bằng cách sử dụng ngôn ngữ Fortran, Pascal hay C hoặc sử dụng các chương trình mô phỏng thương mại. Việc tự xây dựng các chương trình để mô phỏng có ưu điểm là chủ động và dễ dàng kiểm soát các thông số đưa vào trong quá trình tính toán. Tuy nhiên, nó đòi hỏi người nghiên cứu am hiểu không chỉ về kiến thức vật lý mà cả các kiến thức trong lĩnh vực toán và tin học. Chính vì vậy, có rất nhiều nhà nghiên cứu thuộc lĩnh vực vật liệu Meta chọn phần mềm mô phỏng thương mại bởi sự đơn giản trong sử dụng và có độ chính xác cao để dự đoán đặc tính của các cấu trúc trước khi tiến hành chế tạo. Một ưu điểm của mô phỏng vật liệu Meta là cấu trúc được hiệu chỉnh một cách dễ dàng và nhanh chóng để thu được kết quả tối ưu trước khi đưa vào chế tạo. Vì vậy, nó sẽ tiết kiệm được thời gian và chi phí sản xuất, chế tạo. Hơn nữa, nếu nắm bắt tốt các đặc tính vật liệu với độ chính xác cao của các kỹ thuật mô phỏng hiện nay thì có thể thu được sự phù hợp tốt giữa các kết quả mô phỏng và thực nghiệm. Hiện nay ba chương trình mô phỏng thương mại thông dụng nhất là: CST Microwave studio, HFSS, và Comsol. Trong mô phỏng, một điều rất quan trọng là ta phải thiết lập các thông số đặc trưng điện từ cho các vật liệu để tạo nên cấu trúc, chủ yếu là kim loại và chất điện môi. Sự phù hợp giữa mô phỏng và thực nghiệm phụ thuộc rất lớn vào độ chính xác so với thực tế của các thông số đặc trưng điện từ của vật liệu đưa vào mô phỏng. Đầu tiên phải kể đến kim loại, nó có vai trò quan trọng trong vật liệu Meta vì ảnh hưởng rất lớn tới các trạng thái công hưởng, trạng thái mà tại đó hầu hết các tính chất bất thường của vật liệu Meta đạt được. Vì vậy, hiểu biết rõ về các đặc tính của kim loại trong mô phỏng là rất quan trọng để đạt được các kết quả đúng. Ở các tần số thấp, như dải tần GHz, các kim loại như vàng và đồng được coi như các chất dẫn điện tốt với các giá trị không đổi cho độ dẫn điện.

Tuy nhiên, khi mô phỏng vật liệu Meta ở các tần số cao, như ở vùng hồng ngoại hay quang học, sự tổn hao của kim loại sẽ lớn và mô hình Drude thường được dùng để mô phỏng lại tần số của chúng phụ thuộc các đặc tính quang học. Hàm số điện môi theo mô hình Drude theo công thức (1.3) và tần số plasma được xác định bởi công thức (1.4).

Độ tổn hao của vật liệu chiết suất âm tỉ lệ nghịch với chỉ số hệ số phẩm chất (figure of merit- FOM). Như đã giới thiệu ở trên, hệ số FOM được định nghĩa là tỉ số của phần thực trên phần ảo của chiết suất. Khi xem xét năng lượng còn lại của nguồn sóng điện từ đi qua một cấu trúc của vật liệu chiết suất âm, tổn hao năng lượng được chia làm hai phần. Phần thứ nhất do sự phản xạ ánh sáng, ánh sáng bị chặn lại có nguyên nhân từ sự không phù hợp trở kháng giữa hai môi trường. Phần thứ hai do hấp thụ, điều này do đặc tính của vật liệu. Để làm giảm tổn hao năng lượng trong quá trình sóng điện từ tương tác với vật liệu thì phải làm giảm hai thành phần trên.

Trước tiên giảm tổn hao do phản xạ, để triệt tiêu phản xạ thì trở kháng của vật liệu phải phù hợp với trở kháng của môi trường tới. Trở kháng và chiết suất của vật liệu lần lượt được xác định bằng công thức (1.39) ( $z = \sqrt{\mu/\epsilon}$ ) và công thức (1.40) ( $n = \sqrt{\mu/\epsilon}$ ). Như vậy để có trở kháng của vật liệu phù hợp với môi trường chứa tia tới thì phải thay đổi  $\mu$  và  $\epsilon$  một cách thích hợp. Độ từ thẩm và độ điện thẩm đều phụ thuộc vào các tham số cấu trúc [111], như vậy khi thay đổi các tham số cấu trúc thì  $\mu$  và  $\epsilon$  sẽ dẫn đến chiết suất  $n$  thay đổi. Từ định nghĩa ta thấy độ tổn hao cũng thay đổi hay nói cách khác phụ thuộc vào các tham số cấu trúc.

Tiếp theo là làm cách nào để giảm tổn hao do hấp thụ. Như đã nói ở trên thành phần hấp thụ là do đặc tính của vật liệu chiết suất âm. Vì là vật liệu nhân tạo nên các đặc tính của vật liệu chiết suất âm phần lớn đều do các tham số cấu trúc và tính chất của lớp vật liệu quyết định. Như vậy, sự tổn hao do thành phần hấp thụ phải phụ thuộc vào các tham số cấu trúc và tính chất của vật liệu cấu thành.

Việc hiểu rõ các đặc điểm hai thành phần điện và từ rất quan trọng trong việc thiết kế, mô phỏng và chế tạo vật liệu Meta.

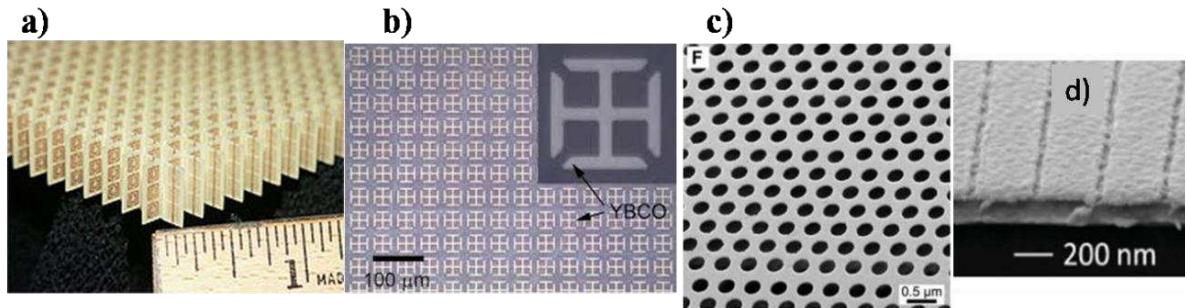
### **1.4.3. Phương pháp thực nghiệm**

#### *1.4.3.1. Chế tạo mẫu*

Để chế tạo vật liệu Meta nói chung và vật liệu Meta có chiết suất âm nói riêng hoạt động ở dải tần số GHz người ta thường sử dụng công nghệ quang khắc.

Sau khi vật liệu Meta có chiết suất âm đầu tiên được đề xuất và kiểm chứng hoạt động ở vùng GHz [106], một số phòng thí nghiệm trên thế giới đã thiết kế, chế tạo vật liệu Meta hoạt động trên các dải tần số mong muốn khác nhau, từ vùng GHz tới vùng ánh sáng nhìn thấy [136], [24], [108]. Từ công thức 1.56, chúng ta có thể tính được gần đúng các tham số cấu trúc hoạt động ở các tần số mong muốn. Ví dụ, để có vật liệu Meta hoạt động ở dải tần THz, kích thước của các tham số cấu trúc khoảng vài  $\mu\text{m}$  đến vài chục  $\mu\text{m}$ . Với kích thước này, công nghệ quang khắc vẫn có thể đáp ứng được nhưng với yêu cầu độ chính xác cao hơn. Quy trình đó bao gồm: phủ một phần hoặc các lớp liên tục kim loại trên để phù hợp (như là silic), sau đó phủ một lớp vật liệu cách điện, bên trên vật liệu cách điện này quang khắc chuẩn được dùng để tạo hình lớp kim loại trên cùng. Trên hình 1.28(b) là một số vật liệu Meta điển hình hoạt động ở tần số THz được chế tạo bằng công nghệ quang khắc này [19].

Tương tự, để thu được vật liệu Meta hoạt động ở tần số cao hơn nữa như vùng hồng ngoại hoặc vùng khả kiến, kích thước của các tham số cấu trúc chỉ cỡ nm. Vì vậy, công nghệ quang khắc sẽ vượt ngoài khả năng vì sự hạn chế phân giải của công nghệ này. Các công trình đã công bố về vật liệu Meta hoạt động từ vùng hồng ngoại lên vùng khả kiến thường dùng các kỹ thuật như khắc bằng chùm tia điện tử (e-beam lithography) [76], và hoặc chùm ion hội tụ (focused-ion-beam - FIB) [49]. Các phương pháp này có khả năng tạo ra các cấu trúc có kích thước cỡ hàng chục nano mét. Tuy nhiên, so với phương pháp quang khắc, quy trình chiếu sáng và ăn mòn xảy ra đồng thời, mẫu được tạo từng điểm một, vì thế đây là một quy trình nối tiếp chậm, đòi hỏi kỹ thuật cao và mất nhiều thời gian. Do đó, kỹ thuật này thường được dùng để chế tạo các mẫu có diện tích nhỏ. Một vài ví dụ các mẫu được chế tạo bằng công nghệ này được đưa ra trong hình 1.30(c). Để tạo các vật liệu Meta hoạt động ở tần số cao có diện tích lớn, một số phương pháp khác đã được đề xuất để thay thế. Đầu tiên là phương pháp dùng tia cực tím (EUV) khắc ở bước sóng 193nm [77]. Phương pháp này tương tự như quang khắc thường, sử dụng bước sóng ngắn của ánh sáng UV sâu, vì vậy có độ phân giải cao hơn. Một phương pháp khác là khắc bằng công nghệ in nano (nanoimprint lithography) [131]. Hình 1.30(d) là mẫu chế tạo được sử dụng phương pháp này.



**Hình 1.30.** Hình ảnh một số vật liệu Meta điển hình chế tạo bằng các công nghệ khác nhau: a) Vật liệu Meta hoạt động ở vùng GHz và b) Vật liệu Meta hoạt động ở vùng THz được chế tạo bằng công nghệ quang khắc; Vật liệu Meta hoạt động ở vùng quang học được chế tạo bằng công nghệ: c) FIB, d) in nano độ phân giải cao ( nano-imprint lithography) [88-92].

#### 1.4.3.2. Phương pháp đo đặc

Các kỹ thuật đo đặc khác nhau đã được dùng để đo các tính chất của vật liệu Meta như: phổ phản xạ, truyền qua và các pha của nó ở các tần số khác nhau.

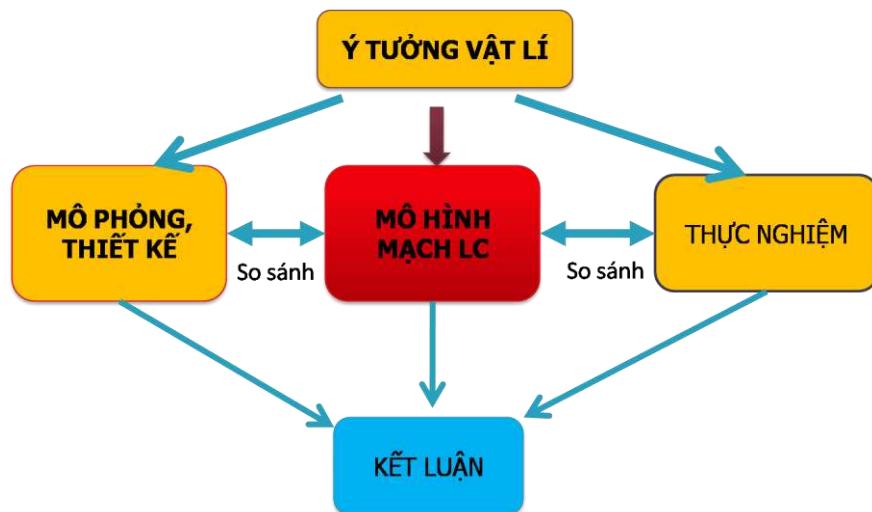
- Để đo dải tần hoạt động vùng GHz, phép đo thường được thực hiện trên hệ phân tích mạng vectơ (vector network analyzer). Hệ mẫu được đặt trong buồng hấp thụ sóng GHz, hai ăngten dạng loa được sử dụng để phát và thu tín hiệu qua mẫu.

- Terahertz time domain spectroscopy (TDS) là một công cụ mạnh khác để khảo sát đặc tính của vật liệu Meta, đặc biệt ở các tần số THz. Bằng biến đổi Fourier xung thời gian từ mẫu và chuẩn, cả thông tin biên độ và pha đều có thể thu được.

- Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy là phương pháp được dùng nhiều nhất để khảo sát vùng làm việc của vật liệu Meta trong các dải tần cao hơn GHz, bao gồm một dải phổ cực rộng từ THz đến vùng ánh sáng nhìn thấy. Các sự kết hợp khác của nguồn, các bộ chia tia, và các đầu thu được dùng để vận hành hệ đo hiệu quả hơn trong một dải tần số nhất định.

## CHƯƠNG II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Đề tài được tiến hành dựa trên sự kết hợp giữa tính toán, mô phỏng và thực nghiệm. Sơ đồ phương pháp nghiên cứu của đề tài được trình bày trên hình 2.1. Xuất phát từ các ý tưởng vật lý, cấu trúc của vật liệu Meta được thiết kế, mô phỏng để thu được các đặc tính của sóng điện từ khi đi qua vật liệu như: phổ truyền qua, phản xạ, pha... Ngoài ra, thông qua các phổ này, vị trí các tần số cộng hưởng điện từ (nơi mà các tính chất đặc biệt của vật liệu Meta xuất hiện) hoàn toàn có thể xác định được. Song song với quá trình mô phỏng, quá trình tính toán lý thuyết thông qua mô hình mạch điện LC được thực hiện cũng nhằm mục đích là thu được các vị trí tần số cộng hưởng điện từ nhưng độc lập với quá trình mô phỏng. Thông thường, để tiết kiệm chi phí chế tạo, trước tiên kết quả của hai phương pháp này được so sánh với nhau, từ đó tìm ra các mẫu tối ưu để đưa vào chế tạo và đo đạc. Cuối cùng, các kết quả của cả ba phương pháp này sẽ được so sánh với nhau từ đó đánh giá và đi đến kết luận.

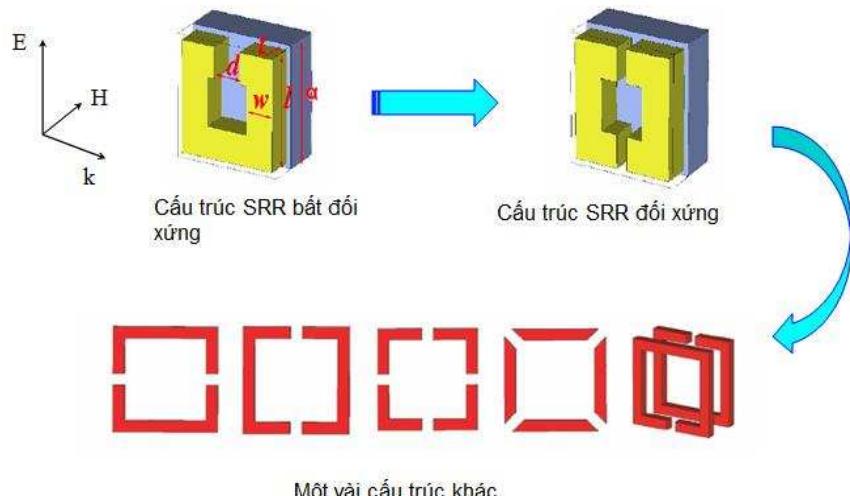


**Hình 2.1.** Sơ đồ tiến trình nghiên cứu

### 2.1. Lựa chọn cấu trúc và vật liệu

Để thu được vật liệu Meta có chiết suất âm, hầu hết các nhóm nghiên cứu ban đầu đều sử dụng cấu trúc SRR để tạo ra độ tử thâm âm  $\mu < 0$  kết hợp với môi trường có độ điện thâm âm  $\varepsilon < 0$ . Để thu được vật liệu có  $\varepsilon < 0$ , các nhà nghiên cứu thường sử dụng cấu trúc truyền thống gồm các dây kim loại được sắp xếp một cách tuần hoàn. Ở tần số nhỏ hơn tần số plasma khi đó ta thu được  $\varepsilon < 0$ . Cấu trúc vật liệu có  $\varepsilon < 0$  này đơn giản trong chế tạo và được áp dụng một cách rộng rãi và phổ biến trong việc chế tạo vật liệu có chiết suất âm.

Tuy nhiên, để tạo ra vật liệu có  $\mu < 0$ , vẫn đang là một thách thức của các nhà nghiên cứu vì nó chỉ xảy ra trong những khoảng tần số rất hẹp và phụ thuộc vào mạnh phân cực của sóng điện từ. Hơn thế, để tạo ra cộng hưởng từ có  $\mu < 0$  đối với cấu trúc SRR truyền thống, một trong những điều kiện quan trọng là véc tơ từ trường  $\mathbf{H}$  phải vuông góc với mặt phẳng của SRR (mặt phẳng mẫu). Do vậy, mẫu chế tạo đòi hỏi phải là đa lớp để có thể bao phủ được toàn bộ chùm ánh sáng tới khi tiến hành đo đạc. Đây là một trong những hạn chế của cấu trúc SRR, đặc biệt là khi chế tạo vật liệu Meta có chiết suất âm hoạt động ở vùng tần số quang học có kích thước nhỏ khi xem xét tới khả năng công nghệ nanô hiện nay.



**Hình 2.2.** Các cấu trúc biến đổi từ SRR.

Với mục đích lựa chọn tìm ra cấu trúc tối ưu nhất để tạo ra môi trường có  $\mu < 0$  một cách đơn giản và thuận lợi, ngoài cấu trúc SRR, một số cấu trúc cộng hưởng từ khác đã được đề xuất như các cấu trúc biến đổi từ SRR (hình 2.2), cấu trúc có hình chữ S, chữ  $\Omega$ , chữ  $\pi$ , sau đó là cấu trúc CWP. Như đã trình bày trong chương I, cấu trúc CWP thực chất được biến đổi từ cấu trúc SRR (như trên hình 1.14). Tuy nhiên, cấu trúc CWP có ưu điểm là đơn giản trong chế tạo và thuận lợi khi đo đạc, đặc biệt là khi chế tạo mẫu có kích thước ô cơ sở bé để hoạt động ở vùng tần số cao. Một điểm khác biệt quan trọng giữa cấu trúc này với cấu trúc SRR truyền thống là sự phân cực của sóng tới để có thể thu được độ từ thẩm âm. Để thu được hiệu ứng, cấu trúc CWP cho phép sóng điện từ chiếu tới có vectơ sóng  $\mathbf{k}$  vuông góc với mặt bên của CWP. Chính vì vậy cấu trúc CWP có thể sinh ra cộng hưởng từ rất mạnh ngay cả khi sử dụng đơn lớp. Do vậy cấu trúc CWP đang là một trong những cấu trúc được quan tâm nhiều nhất. Đây cũng là một trong những lý do

quan trọng để đề tài lựa chọn cấu trúc CWP và cấu trúc biến đổi của CWP để tạo ra độ từ thẩm âm.

Về mặt lựa chọn vật liệu để tạo mẫu, trong các nghiên cứu chế tạo vật liệu Meta hoạt động ở vùng tần số GHz, lớp kim loại được sử dụng là đồng (Cu) và lớp điện môi thường sử dụng là vật liệu FR4. Lý do chọn Cu vì trong vùng GHz ảnh hưởng của các kim loại khác nhau lên tính chất điện từ của vật liệu Meta không đáng kể, trong khi đó Cu là kim loại rẻ tiền so với các kim loại quý hiếm khác, đặc biệt phù hợp điều kiện chế tạo sẵn có. Với điện môi FR4 tuy tổn hao khá lớn nên có hạn chế trong việc nghiên cứu hiện tượng lai hóa (một trong những đổi tượng nghiên cứu của đề tài) nhưng nó vẫn đáp ứng được hầu hết các điều kiện nghiên cứu trong vùng GHz, giá thành rẻ và đặc biệt phù hợp với điều kiện chế tạo ở Việt Nam.

Trong vùng tần số THz để phù hợp với mục đích biến bằng tác động ngoại vi (ở đây sử dụng nhiệt độ), vật liệu kim loại được thay thế bằng chất bán dẫn InSb. Vật liệu điện môi được lựa chọn là thủy tinh Pyrex glass vì nó bền với nhiệt. Lý do lựa chọn các loại vật liệu này sẽ được phân tích kỹ hơn ở phần kết quả và thảo luận trong chương V của đề tài.

## 2.2. Phương pháp mô phỏng

Để mô hình hóa tính chất của vật liệu, đề tài sử dụng phần mềm mô phỏng thương mại CST Microwave Studio (Computer Simulation Technology) vì tính hiệu quả và độ chính xác đã được chứng minh bởi nhiều kết quả được công bố. Chương trình CST nhằm mục đích chung là mô phỏng tương tác trường điện từ với vật liệu dựa trên các kỹ thuật tích phân hữu hạn (finite integration technique - FIT), được đề xuất lần đầu tiên bởi Weiland [129]. Kỹ thuật tích phân hữu hạn (finite integration technique - 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 bằng cách đặt áp điện trên cạnh của một lưới và áp từ trên cạnh của một lưới kép. FIT tạo ra hệ phương trình lưới Maxwell (Maxwell's Grid equations) 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. Không giống như các phương pháp khác, FIT giải các phương trình Maxwell dưới dạng tích phân hơn là dưới dạng vi phân, cụ thể các phương trình Maxwell này có dạng như sau:

$$\oint_l \mathbf{E} dl = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dS \quad (2.1)$$

$$\oint_s \mathbf{D} dS = \int_v \rho dV \quad (2.2)$$

$$\oint_l \mathbf{H} dl = \int_s \left( \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) dS \quad (2.3)$$

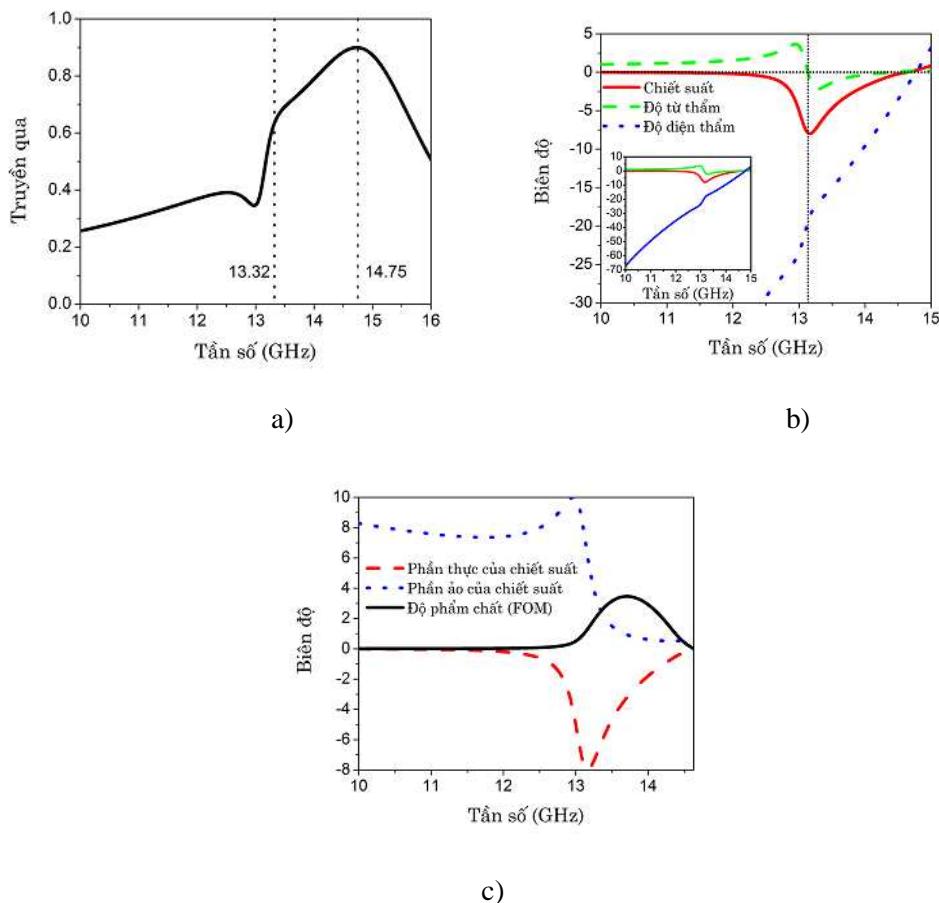
$$\oint_s \mathbf{B} dS = 0 \quad (2.4)$$

Để giải các phương trình này, ta phải vi phân cấu trúc không đồng nhất thành các vi cấu trúc đồng nhất. Điều này được thực hiện bằng cách tạo ra một hệ thống lưới phù hợp từ chia tách miền lớn ra thành nhiều phần nhỏ, hoặc các lưới. Chi tiết việc chia lưới và tính toán được trình bày trong phần mềm CST tại thư mục Online Help/Advanced.

CST cung cấp cho người sử dụng hai cách giải: Transient Solver (T) và Frequency Domain Solver (F). Theo cách giải (T) cho phép mô phỏng các hành vi của cấu trúc bằng cách giải các phương trình Maxwell trong một vùng tần số rộng với chỉ một lần tính toán duy nhất. Vì vậy, thời gian giải là ngắn và ít tốn dung lượng của máy tính. Tuy nhiên, phương pháp này chỉ hiệu quả với các vật liệu có điều kiện biên mở hay kích thước lớn. Trong khi đó, khi sử dụng (F) thì thích hợp hơn với bài toán xảy ra trong vùng tần số hẹp, cấu trúc nhỏ có tính tuần hoàn. Trong đề tài, các kết quả mô phỏng chủ yếu sử dụng phương pháp (F) vì những thuận tiện của nó phù hợp với các bài toán nghiên cứu.

Để mô phỏng tính chất của vật liệu bằng chương trình CST, các tham số đầu vào gồm: vật liệu (có thể lấy từ ngân hàng vật liệu có sẵn hoặc đưa các thông số của vật liệu mới không có sẵn trong chương trình mô phỏng), hình dạng, kích thước và các tham số cấu trúc của ô cơ sở, điều kiện biên, môi trường xung quanh vật liệu. Các tham số đầu ra thu được bao gồm: các tham số tán xạ dưới dạng phức, như hệ số truyền qua  $S_{21}$ , và hệ số phản xạ  $S_{11}$ , từ đó độ phản xạ  $R(\omega)$  và độ truyền qua  $T(\omega)$  có thể thu được tương ứng từ  $T(\omega) = |S_{21}|^2$  và  $R(\omega) = |S_{11}|^2$  và các pha của sóng điện từ khi đi qua cấu trúc vật liệu Meta. Hai công đóng vai trò như một ăng-ten phát và một ăng-ten thu, giữa là một ô cơ sở của MM được thiết lập trong chương trình mô phỏng. Với các cấu trúc sử dụng trong các nghiên cứu của đề tài để thu được các hiệu ứng mong muốn, sóng điện từ chiếu tới theo hướng z thường vuông góc với bề mặt của mẫu, điện trường theo hướng y và từ trường theo hướng

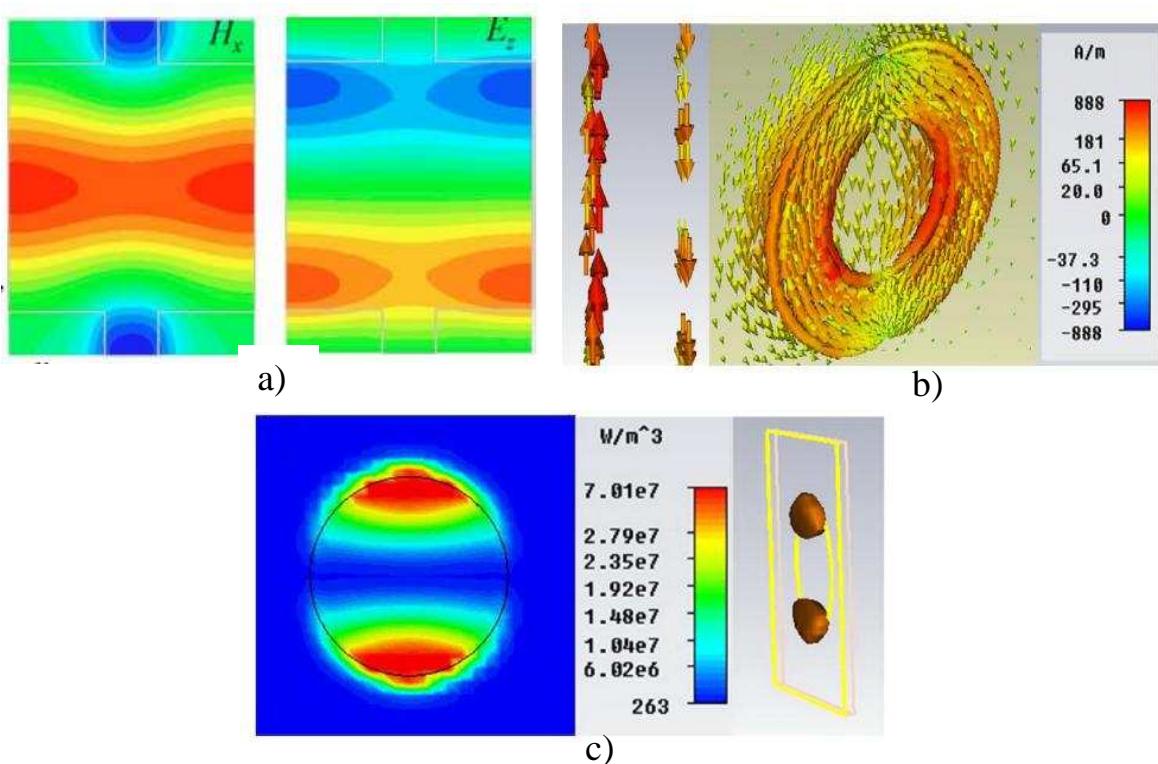
x. Điều kiện biên tuần hoàn được thiết lập trong mặt phẳng ( $x, y$ ) trong khi điều kiện biên theo hướng  $z$  là mở. Bộ giải theo miền tần số được sử dụng để mô phỏng sự tương tác sóng điện từ với vật liệu Meta do tính chất nhỏ bé và tuần hoàn của chúng. Sau khi mô phỏng, các tham số tán xạ  $S$  gồm cả cường độ và pha kết hợp với kết quả thực nghiệm, sẽ được sử dụng để tính toán các thông số độ từ thẩm và độ điện thẩm dựa trên phương pháp của Chen [14]. Hình 2.3 là một trong các kết quả điển hình tính toán các tham số hiệu dụng (độ từ thẩm, điện thẩm, chiết suất) của trường điện từ cho vật liệu Meta. Các tham số này được tính toán khi coi vật liệu là đồng nhất hiệu dụng. Các tham số này được định lượng hóa và dựa vào đó các cơ chế bên trong của vật liệu có thể được hiểu rõ hơn.



**Hình 2.3.** a) Mô phỏng phổ truyền qua của một vật liệu Meta có chiết suất âm; b) các tham số điện từ; c) phản thực, phản ảo của chiết suất và chỉ số FOM [112].

Trong nghiên cứu vật liệu Meta có một số đặc tính rất khó kiểm chứng và quan sát bằng thực nghiệm nhưng có thể dễ dàng quan sát bằng mô phỏng, đặc biệt khi sử dụng phần mềm mô phỏng CST. Ví dụ, phân bố điện và từ trường bên trong và bên ngoài vật liệu Meta sẽ cho biết trường điện từ của sóng tới tương tác với cấu

trúc như thế nào. Từ đó cung cấp thông tin về các cơ chế chính trong vật liệu Meta. Ngoài ra còn phải kể đến đặc tính khác thường sử dụng như dòng bè mặt, có thể được dùng để chỉ ra đặc tính cộng hưởng của phần kim loại của vật liệu Meta. Mô phỏng cũng cho phép nghiên cứu và đánh giá sự phân bố của năng lượng tiêu tán và một số đặc tính khác trong vật liệu Meta. Các đặc tính này có thể thu được trong hầu hết các chương trình mô phỏng bằng cách chèn các bộ theo dõi trường tương ứng ở tần số quan tâm. Cả thông tin 2D và 3D có thể được tính toán và số liệu có thể được xuất ra cho các phân tích sâu hơn. Bằng cách thay đổi đặc tính măt măt của các vật liệu điện môi, độ măt măt phụ thuộc vào phần ảo của độ điện thăm cũng có thể được nghiên cứu [43]. Một vài ví dụ về theo dõi trường điện, trường từ, dòng bè mặt và phân bố măt măt khi sử dụng chương trình CST được trình bày trong hình 2.4 [70], [50], [39].



**Hình 2.4.** a) Thành phần từ trường và điện trường trong cấu trúc măt lưới (fishnet) tại tần số cộng hưởng b) Dòng điện trong hai thanh kim loại chứng tỏ vị trí cộng hưởng là cộng hưởng từ c) Phân bố tiêu tán năng lượng trong cấu trúc đĩa tròn hấp thụ sóng điện từ ở bước sóng cộng hưởng [70], [50], [39].

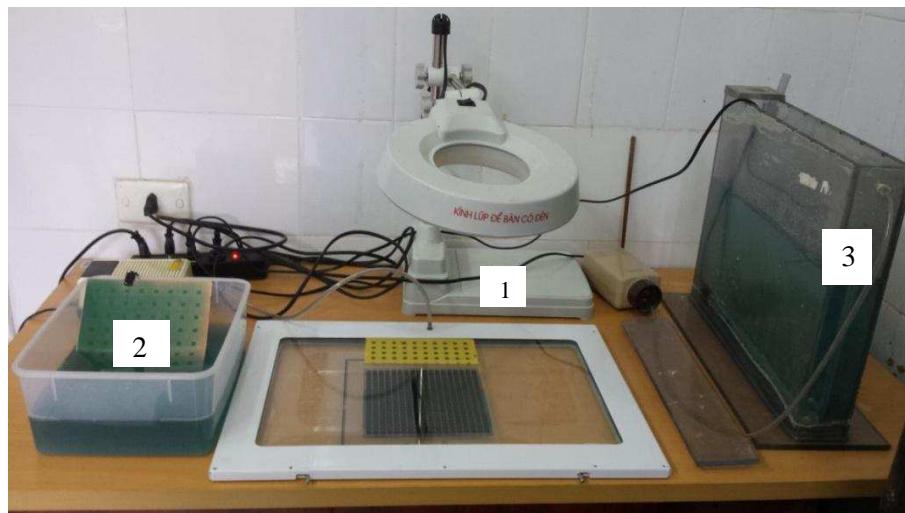
## 2.3. Phương pháp thực nghiệm

### 2.3.1. Xây dựng hệ thiết bị chế tạo mẫu

Trong đề tài, để chế tạo mẫu hoạt động ở dải tần số sóng viba, chúng tôi sử dụng phương pháp quang khắc. Hình 2.5 trình bày hệ chế tạo mẫu. Đây là hệ thiết bị khá đơn giản nhưng rất hiệu quả trong việc chế tạo mẫu vật liệu Meta hoạt động ở dải tần viba. Phương pháp này có thể chế tạo vật liệu Meta có cấu trúc bất kỳ với độ phân giải  $\pm 0.01$  mm, có độ lặp lại cao. Hệ thiết bị này gồm 03 bộ phận chính:

1. Bộ phận phơi sáng (exposure)
2. Bộ phận ăn mòn (etching)
3. Bộ phận hiển thị cấu trúc (developer)

Ngoài ra còn có hệ gia nhiệt (heating system), gá mẫu (sample holder), hút chân không...



**Hình 2.5.** Hệ thiết bị chế tạo vật liệu Metamaterials.

### 2.3.2. Quy trình chế tạo mẫu

Để chế tạo vật liệu Meta hoạt động ở dải tần viba, vật liệu ban đầu là tấm mạch in gồm một lớp điện môi có độ điện thẩm khoảng  $\varepsilon = 4$ , độ dày lớp điện môi có thể thay đổi  $t_d = 0.4$  mm  $\div 1.6$  mm, lớp điện môi thường là FR4. Hai mặt được phủ kim loại đồng (Cu), có độ dày khoảng 0.036 mm. Quy trình chế tạo vật liệu Meta được trình bày trên hình 2.6. Các tấm mạch in, chất ăn mòn và rửa lõp cảm quang đều do công ty Cheme Muse Execute (SME) của Hàn Quốc sản xuất.

**Bước 1:** Chiếu sáng, nguồn ánh sáng là đèn halogel công suất 45W

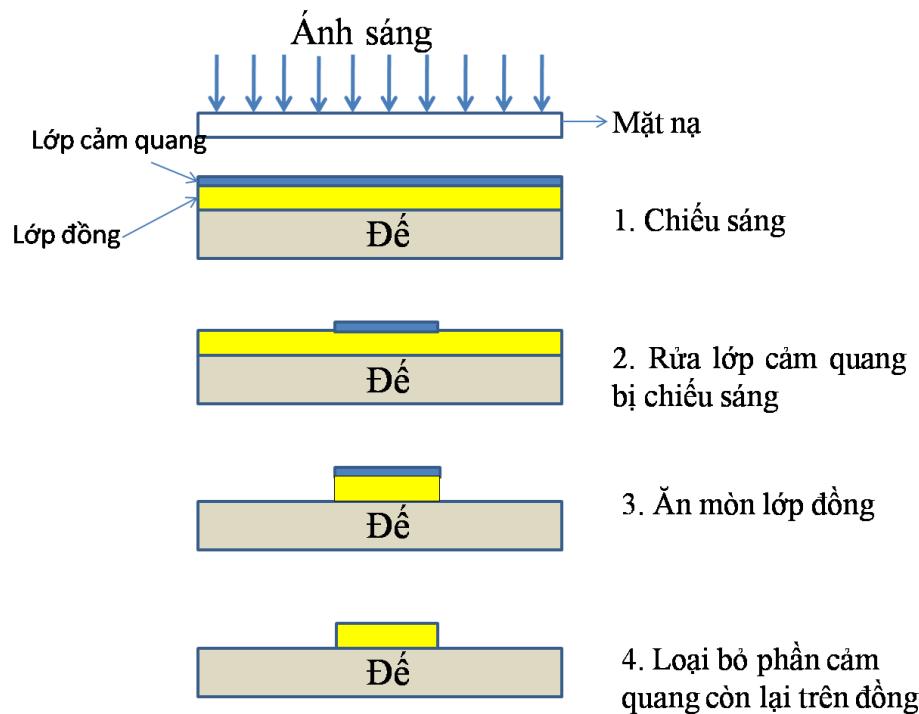
- Mặt nạ được đặt sát mẫu,
- Khoảng cách giữa mặt nạ và nguồn sáng là 10 cm (đây là khoảng cách mà ánh sáng tới mẫu là đồng đều nhất),
  - Thời gian chiếu sáng khoảng 15 phút (tương ứng với khoảng cách chiếu sáng ở trên, thời gian có thể là ngắn hơn hoặc dài hơn tùy thuộc vào khoảng cách chiếu sáng cũng như công suất của đèn)

**Lưu ý:** Không dùng các loại đèn có bức xạ nhiệt vì nhiệt độ sẽ ảnh hưởng rất nhiều đến chất lượng mẫu.

**Bước 2:** Hiện hình cấu trúc: Sử dụng chất rửa cảm quang SME, với một gói hóa chất rửa cảm quang 200g, lượng nước pha thích hợp là 1 lít và dùng được cho khoảng 20 mẫu có kích thước (100x150mm).

- Thời gian: 2 phút
- Nhiệt độ: 40-50°C

**Lưu ý:** Thời gian chiếu sáng và nhiệt độ, nồng độ của dung dịch hiện hình ảnh hưởng rất lớn đến thời gian hiện hình cấu trúc cũng như chất lượng của mẫu. Nếu chiếu sáng với thời lượng ít thì thời gian hiện hình sẽ chậm, các phần cấu trúc muốn giữ lại ngâm lâu trong hóa chất sẽ bị ảnh hưởng mạnh trong quá trình ăn mòn. Ngược lại, nếu chiếu sáng với thời gian dài thì phần muốn giữ lại (che chắn bằng phần mặt nạ có màu đen) cũng sẽ nhận được lượng bức xạ đáng kể nên khi đem hiện hình thì rất khó để giữ lại được. Đối với nồng độ và nhiệt độ của dung dịch nếu quá cao thì toàn bộ phần cảm quang muốn giữ lại để tạo hình sẽ nhanh chóng bị rửa trôi cùng với phần muốn loại bỏ.



**Hình 2.6.** Quy trình chế tạo vật liệu Meta hoạt động ở vùng GHz

**Bước 3:** Ăn mòn, tạo cấu trúc: Sử dụng chất ăn mòn SME, với một gói hóa chất rửa cảm quang 300g, lượng nước pha thích hợp là 2 lít và dùng được cho khoảng 20 đến 30 mẫu có kích thước (100x150mm).

- Thời gian: 10-15 phút
- Nhiệt độ: 30-40°C

Lưu ý: Nguyên tắc ăn mòn ở đây là dùng phản ứng hóa học để khử đồng vì vậy thời gian ăn mòn phụ thuộc rất nhiều vào nồng độ hóa chất và nhiệt độ nên thời gian đưa ra ở trên là áp dụng cho các mẫu ban đầu, thời gian này sẽ dài hơn với các mẫu tiếp theo và sẽ phải thay dung dịch khi chế tạo được một lượng mẫu nhất định.

**Bước 4:** Tẩy rửa lớp cảm quang còn lại: tương tự bước 2

Bằng công nghệ này, chúng tôi đã chế tạo thành công vật liệu Meta có các cấu trúc mong muốn khác nhau. Các cấu trúc chế tạo được cùng các tham số cụ thể phục vụ cho các nghiên cứu của đè tài sẽ được trình bày trong từng phần cụ thể của kết quả và thảo luận ở chương III và IV.

#### 2.3.4. Thiết kế hệ đo

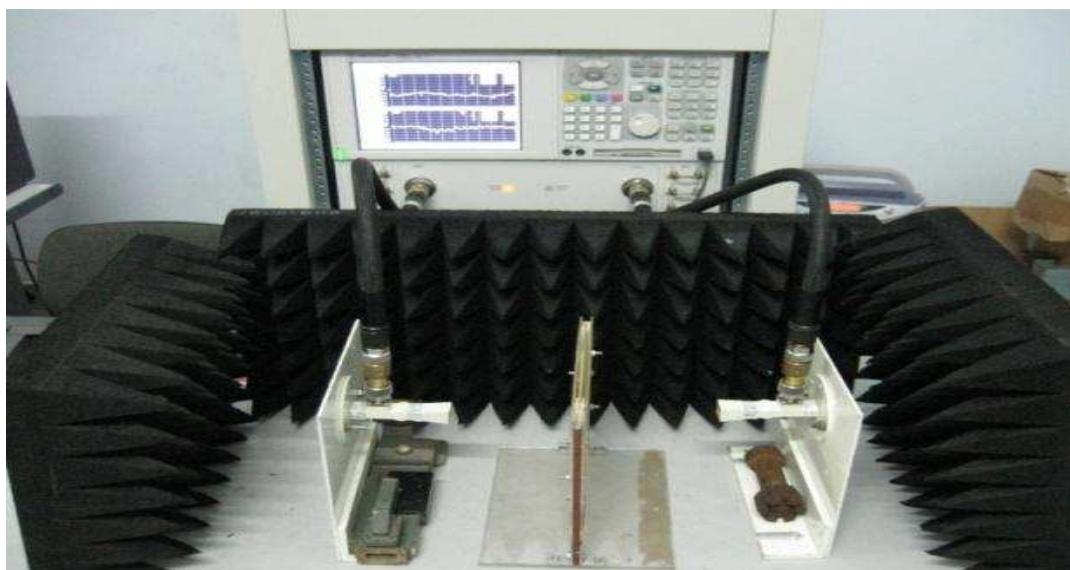
Đè đo đặc các tính chất của vật liệu như phổ truyền qua, phổ phản xạ hay hấp thụ, đè tài sử dụng hệ đo thiết bị Vector Network Analyzer đặt tại Viện Khoa

học và Kỹ thuật Quân sự - Việt Nam. Hệ đo đặc và cách bố trí phép đo được chỉ ra trên hình 2.7.

Hệ thiết bị gồm hai ăng ten, một ăng ten có vai trò phát đồng thời thu tín hiệu phản xạ, ăng ten còn lại có vai trò thu tín hiệu truyền qua. Các kết quả được hiển thị trên màn hình chính. Khoảng cách giữa hai ăng ten khoảng 20 cm đến 25 cm tùy vào tần số sóng đo. Mẫu được đặt giữa hai ăng ten. Hệ thiết bị đo được đặt trong buồng chống nhiễu sóng điện từ. Vùng tần số hoạt động của vật liệu đã được tính toán dựa trên thiết kế mô phỏng trước đó.

Để đo phổ phản xạ và truyền qua của các mẫu trên hệ đo Vector Network Analyzer, tiến hành các bước như sau:

+ Để tránh nhiễu xạ trường gần khoảng cách giữa hai ăngten tối thiểu phải lớn hơn 6 đến 7 lần bước sóng hoạt động, đồng thời khoảng cách này phải đủ gần để ăngten thu nhận được lượng tín hiệu đủ lớn từ ăngten phát. Qua quá trình khảo sát, khoảng cách giữa hai ăngten cỡ 20 - 25 cm được lựa chọn cho vùng tần số khảo sát từ 2-18 GHz trong các nghiên cứu của đề tài.



a)

b)

**Hình 2.7. Hệ thiết bị Vector Network Analyzer đặt tại Viện Khoa học và Kỹ thuật Quân sự - Việt Nam**

+ Chuẩn hóa tín hiệu truyền qua: đặt giá mẫu vào vị trí giữa hai ăngten để đo tín hiệu phản xạ  $R_f$  và truyền qua  $T_f$  khi chỉ có giá đo. Về mặt lý thuyết nếu loa thu đặt ở vị trí thích hợp và độ rộng của loa thu đủ lớn thì  $R_f = 0$  và  $T_f = 1$  trên mọi

vùng tần số. Nhưng do vị trí và độ rộng của loa thu không thể thu hết 100% các tín hiệu từ loa phát cũng như ảnh hưởng của giá đỡ và môi trường xung quanh nên các giá trị ghi nhận thực tế sai khác so với các giá trị lý thuyết và cho kết quả là  $R_f \neq 0$  và  $T_f \neq 1$ . Kết quả đo đạc sẽ càng chính xác khi  $R_f$  và  $T_f$  càng gần giá trị lý thuyết. Muốn đạt được điều này cần có một số lưu ý sau: tìm vị trí đặt và độ lớn hai loa phải thích hợp, giá để mẫu phải trong suốt hạn chế tối đa phản xạ cũng như hấp thụ sóng điện từ, tránh nhiễu từ môi trường xung quanh. Nhằm mục đích đạt được những yêu cầu trên, vật liệu mica được lựa chọn để làm giá mẫu và đặt hệ đo trong buồng chống nhiễu bằng cách đặt các tấm hấp thụ xung quanh hệ đo.

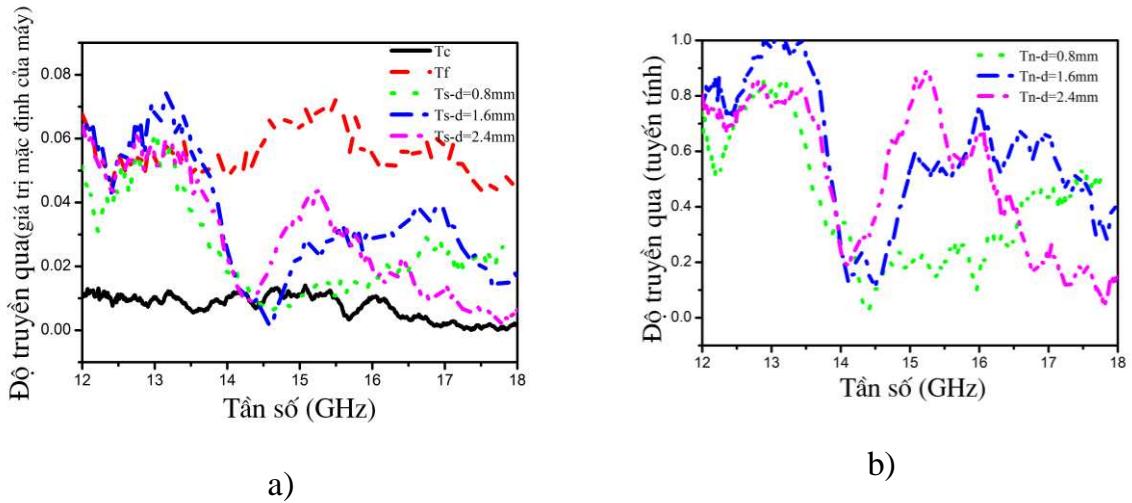
+ Chuẩn hóa tín hiệu phản xạ bằng tâm đồng có kích thước bằng kích thước của mẫu: Để thực hiện điều này một tâm đồng có kích thước đúng bằng kích thước của mẫu cần đo và đặt vào vị trí giữa hai ăng ten để đo tín hiệu phản xạ  $R_c$  và truyền qua  $T_c$ . Về mặt lý thuyết nếu tâm đồng đủ lớn và đủ dày thì  $R_c = 1$  và  $T_c = 0$ . Nhưng có thể do vật liệu chế tạo có kích thước chưa đủ lớn và chưa đủ dày để che phủ hết ăng ten nên vẫn có một phần truyền qua nào đó nên các giá trị đo được sẽ sai khác các giá trị trên và cho kết quả là  $R_c \neq 1$  và  $T_c \neq 0$ . Kết quả đo đạc sẽ càng chính xác khi các giá trị đo được phải càng gần với các giá trị lý thuyết trên. Chính vì vậy mẫu chế tạo phải có kích thước đủ lớn.

+ Cuối cùng mẫu cần đo được để lên giá và đặt ở giữa vị trí hai ăng ten. Các kết quả phản xạ và truyền qua thu được là  $R_s$  và  $T_s$ .

Các kết quả phản xạ  $R_n$  và truyền qua  $T_n$  của sóng điện từ tương tác với mẫu thực tế được tính toán dựa vào công thức sau:

$$T_n = \frac{T_s - T_c}{T_f - T_c}; R_n = \frac{R_s - R_f}{R_c - R_f} \quad (2.5)$$

Trên hình 2.8 là một trong các kết quả đo đạc đã được thực hiện, tính toán và xử lý theo các bước trên.



**Hình 2.8.** a) Các kết quả đo đặc ban đầu và b) kết quả cuối cùng được xử lý qua công thức (2.5).

Kết quả thu được từ các phép đo là các phổ truyền qua, phản xạ và pha. Kết quả này được so sánh với các kết quả thu được từ phương pháp mô phỏng. Để tính toán các tham số của vật liệu như  $\mu$ ,  $\epsilon$ , n và z, sử dụng phương pháp của X.D. Chen và cộng sự.

#### 2.4. Xử lý và phân tích số liệu

Vì vật liệu Meta nghiên cứu trong đề tài có cấu trúc dạng một chiều (1D) (theo phân cực của sóng điện từ) làm việc ở dải tần số GHz và THz. Do vậy, việc đo đặc trực tiếp các tham số hiệu dụng của vật liệu như độ từ thẩm, độ điện thẩm và chiết suất là một công việc rất phức tạp và khó khăn.

Năm 1970 phương pháp Nicolson – Ross – Weir [84] thường được sử dụng để tính toán các thông số (chiết suất, trở kháng, hệ số điện môi và độ từ thẩm) của một vật liệu dưới dạng phức thông qua dữ liệu phản xạ và truyền qua đo được. Năm 2004, trên cơ sở đó, nhóm của X.D. Chen [15] đã đề xuất một phương pháp tốt hơn để tính được các thông số hiệu dụng áp dụng cho vật liệu Meta. Trước khi đi vào chi tiết phương pháp tính toán, một vài điểm quan trọng cần được lưu ý.

Thứ nhất, thường các tham số có dạng phức nhằm phản ánh bản chất vốn có của môi trường. Trong quá trình tính, ta phải đảm bảo rằng các tham số này sẽ không vi phạm bất kỳ định luật vật lý nào. Trên thực tế, việc sử dụng các điều kiện vật lý sẽ cho phép ta giới hạn kết quả về 1 nghiệm duy nhất.

Thứ hai, các tham số này phụ thuộc vào tần số và có thể nhận giá trị rất lớn khi gần vị trí cộng hưởng. Đặc điểm này của vật liệu Meta sẽ khiến cho việc xác

định chỉ số nhánh (giá trị cho biết số lượng các bước sóng truyền bên trong 1 bänder vật liệu) trở nên phức tạp hơn.

Dựa vào các nhận định trên, trước tiên ta sẽ viết biểu thức của các thông số phản xạ, truyền qua S liên hệ với chiết suất n và trở kháng z bởi các công thức:

$$S_{11} = \frac{R_{01}(1 - e^{i2nk_0d})}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0d}} \quad (2.6)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2)e^{ink_0d}}{1 - R_{01}^2 e^{i2nk_0d}} \quad (2.7)$$

trong đó:  $R_{01} = (z-1)/(z+1)$ .

Từ đó, ta tính được:

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2.8)$$

$$e^{ink_0d} = X \pm i\sqrt{1 - X^2} \quad (2.9)$$

với  $X = 1/2S_{21}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2)$ .

Khi coi vật liệu Meta là môi trường thụ động, dấu của phương trình (2.8) và (2.9) được xác định bởi điều kiện sau:

$$z' \geq 0 \quad (2.10)$$

$$n'' \geq 0 \quad (2.11)$$

ở đó,  $z'$  và  $n''$  tương ứng là ký hiệu phần thực và phần ảo của toán tử.

Giá trị của chiết suất n được tính từ phương trình (2.9) có dạng:

$$n = \frac{1}{k_0 d} \left\{ \left[ \ln(e^{ink_0d}) \right]'' + 2m\pi \right\} - i \left[ \ln(e^{ink_0d}) \right]' \quad (2.12)$$

với m là số nguyên liên quan đến chỉ số nhánh của  $n'$  và có giá trị nguyên. Dưới đây ta sẽ chỉ ra một số vấn đề của các phương trình trên và cách giải quyết chúng.

**1.** Chiết suất n và trở kháng z có thể được xác định nhờ phương trình (2.8), (2.9) và các điều kiện biên (2.10), (2.11). Tuy nhiên, cách tính toán này có một nhược điểm là cả mô phỏng và thực nghiệm đều có thể cho ra các thông số tán xạ có sai số và sẽ dẫn đến các sai số của n và z. Các giá trị sai số này tuy nhỏ nhưng sẽ gây ra sự đổi

dấu tại những vị trí mà các tham số có giá trị xấp xỉ 0. Vấn đề này có thể được xử lý bằng cách đưa vào các giá trị ngưỡng cho các điều kiện (2.10) và (2.11). Cụ thể, khi giá trị tuyệt đối của  $z'$  lớn hơn giá trị ngưỡng, điều kiện (2.10) có thể được áp dụng. Với các trường hợp còn lại, dấu của trở kháng sẽ tương ứng với giá trị của chiết suất có phần ảo không âm. Điều kiện này tương đương với  $|e^{ink_0d}| \leq 1$  với:

$$e^{ink_0d} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{z-1}{z+1}} \quad (2.13)$$

2. Việc xác định chỉ số nhánh  $m$  của vật liệu Meta tương đối phức tạp. Thông thường, bằng cách chọn mẫu ngắn, ta có thể đảm bảo rằng mẫu nhỏ hơn 1 bước sóng và do đó có thể mặc định chọn  $m = 0$  là nghiệm. Kỹ thuật này được áp dụng phù hợp cho các điện môi thông thường mà ở đó các tham số có giá trị rất nhỏ trong vùng tần số đang xét và sự biến đổi của chúng theo tần số cũng là rất nhỏ. Tuy nhiên, trong trường hợp của vật liệu Meta, các tham số có thể nhận các giá trị rất lớn tại các vùng tần số cao ứng với mô hình Drude hoặc tại lân cận vị trí cộng hưởng ứng với mô hình Lorentz. Vì thế, việc chọn mẫu có độ dày nhỏ sẽ không thể đảm bảo được nó nhỏ hơn 1 bước sóng.

Để có thể xác định dấu của  $n$  chính xác, ta sẽ tiến hành hai bước. Thứ nhất, nhánh ứng với tần số ban đầu là xác định. Phần ảo của độ từ thẩm và độ điện thẩm được biểu diễn như sau:

$$\mu'' = n' z'' + n'' z' \quad (2.14)$$

$$\varepsilon'' = (n'' z' - n' z'') / |z|^2 \quad (2.15)$$

Điều kiện thu động dẫn đến

$$|n' z''| \leq n'' z' \quad (2.16)$$

Tại các tần số thấp,  $n''$  thường gần với 0 và do đó  $n'' z'$  là nhỏ. Vì giá trị của  $z''$  có thể không nhỏ nên  $n'$  sẽ phải nhỏ và giá trị  $m$  có thể xác định dựa trên điều kiện (2.16) cũng phải được thỏa mãn ở tất cả các tần số tiếp theo. Quá trình này sẽ cho ta nghiệm duy nhất thỏa mãn.

Bước thứ hai là xác định nhánh chính xác ứng với tất cả các tần số tiếp theo. Điều này có thể được thực hiện bằng cách lợi dụng tính liên tục của độ điện thẩm và độ từ thẩm, đồng thời bổ sung thêm mô hình lặp dựa trên các tham số đã xác định được tại tần số đầu tiên. Cụ thể, ta sẽ tiến hành khai triển Taylor

$$e^{in(f_1)k_0(f_1)d} \approx e^{in(f_0)k_0(f_0)d} \left(1 + \Delta + \frac{1}{2}\Delta^2\right) \quad (2.17)$$

ở đó  $\Delta = in(f_1)k_0(f_1)d - in(f_0)k_0(f_0)d$ ,  $k_0$  là số sóng trong chân không,  $f_0$  là tần số ban đầu mà các tham số đã được xác định,  $f_1$  là tần số kế tiếp. Vì vé trái đã được xác định từ (2.13), phương trình (2.17) là phương trình bậc 2 ứng với biến  $n(f_1)$  và do đó sẽ có hai nghiệm. Nghiệm được chọn bằng cách so sánh phần ảo của chúng với giá trị  $n''(f_1)$  thu được từ công thức (2.12). Nghiệm nào gần nhất sẽ được chọn và ký hiệu là  $n_0$ . Chỉ số nhánh  $m$  trong (2.12) được xác định sao cho  $n'(f_1)$  gần với  $n'_0$  nhất.

**3.** Các tham số thường rất nhạy với nhiễu. Sự nhạy cảm này chủ yếu xảy ra ở hai trường hợp, khi giá trị truyền qua gần với 0 hoặc 1. Ở trường hợp đầu,  $|S_{21}|$  gần với 0 sẽ gây ra sự biến đổi lớn trong giá trị của chiết suất (các vạch thẳng đứng quan sát được trong phổ giá trị). Vấn đề này có thể tránh được bằng cách giải giá trị  $z$  trước. Trường hợp sau lại ngược lại, giá trị của  $n$  là ổn định và giá trị của  $z$  là không ổn định. Do đó, ta sẽ tính giá trị của  $n$  trước trong trường hợp này.

**4.** Vấn đề cuối cùng là ta phải xác định chính xác vị trí các biên của môi trường hiệu dụng. Vấn đề này có thể giải quyết dựa trên điều kiện môi trường đồng nhất có nghĩa là các tham số hiệu dụng thu được phải không đối ứng với các bản vật liệu có độ dày khác nhau. Phương pháp được các tác giả đưa ra là giải bài toán cực tiểu hóa sai khác giữa các trở kháng ứng với độ dày khác nhau. Các biên nào thỏa mãn điều kiện này sẽ là biên của môi trường hiệu dụng. Cuối cùng, các tác giả cũng đã chỉ ra rằng trong trường hợp cấu trúc là đối xứng, các biên hiệu dụng sẽ trùng với các biên của ô cơ sở của vật liệu Meta.

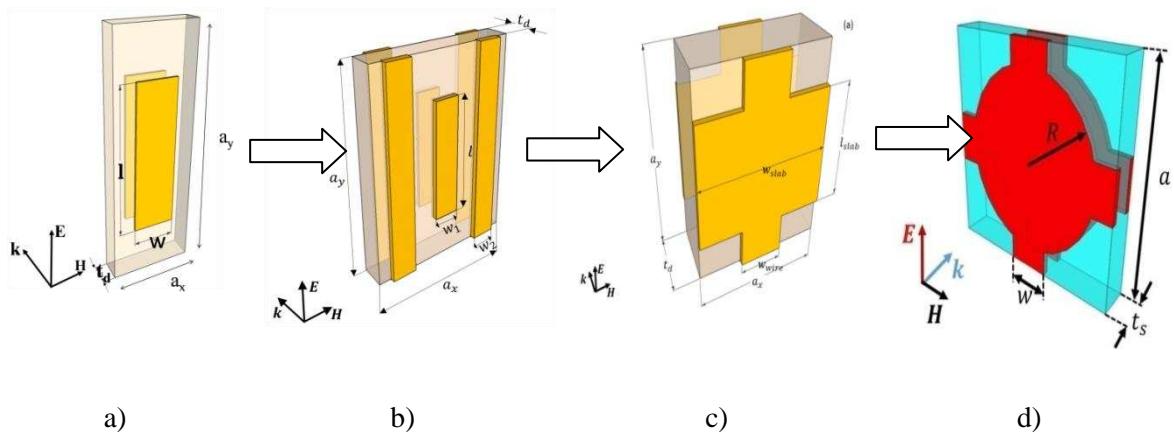
Trong đề tài để thu được các tham số hiệu dụng của trường điện từ như chiết suất, độ từ thẩm, độ điện thẩm đều sử dụng phương pháp của Chen thông qua các số liệu truyền qua và phản xạ cùng các pha của nó từ mô phỏng hoặc đo đạc. Để có thể thu được các giá trị này, dựa trên các thuật toán trình bày ở trên, chúng tôi đã viết chương trình (code) trên phần mềm mablab. Chi tiết của code này được trình bày cụ thể trong phần phụ lục của đề tài.

### **CHƯƠNG III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

Theo như thuyết minh của đề tài, đề tài đi giải quyết 03 nội dung nghiên cứu là: i) xây dựng chương trình tính toán các tham số hiệu dụng; ii) nghiên cứu ảnh hưởng của cấu trúc và các tham số cấu trúc lên tính chất điện từ của vật liệu; iii) tối ưu hóa cấu trúc nhằm mở rộng dải tần số hoạt động của siêu vật liệu. Trong chương kết quả và thảo luận đề tài sẽ trình bày các kết quả để đạt được sau khi thực hiện các nghiên cứu theo các nội dung này. Đầu tiên với nội dung nghiên cứu 1, dựa trên thuật toán của Chen, chương trình tính toán các tham số hiệu dụng (độ điện thẩm, từ thẩm, chiết suất) được chúng tôi xây dựng trên phần mềm matlab. Chương trình tính toán này (bộ code) được đưa ra ở phụ lục phần cuối của báo cáo. Các kết quả tính toán sử dụng chương trình này được đưa ra trong các kết quả nghiên cứu của chương III, phần I, II, II (kết quả thảo luận). Để kiểm tra tính chính xác của chương trình, các kết quả này đều được chúng tôi so sánh với các công bố trong và ngoài nước, ngoài ra được kiểm tra với các kết quả mô phỏng và đo đạc thực tế. Với nội dung nghiên cứu 2, các kết quả nghiên cứu được chúng tôi trình bày trong chương III, phần I (Tối ưu hóa cấu trúc vật liệu Meta có chiết suất âm). Trong phần này, các tham số cấu trúc, các loại cấu trúc khác nhau được nghiên cứu để tìm ảnh hưởng của nó lên tính chất điện từ của vật liệu để từ đó tìm ra cấu trúc tối ưu nhất (đơn giản, không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ..). Nội dung nghiên cứu 3 được thực hiện và trình bày trong chương III, phần II. Ngoài các nội dung nghiên cứu đề ra trong thuyết minh, đề tài cũng bước đầu tìm hiểu các tác động ngoại vi ảnh hưởng đến tính chất điện từ của siêu vật liệu có chiết suất âm (đặc biệt là khả năng mở rộng vùng tần số hoạt động) và được trình bày trong chương III, phần III.

## PHẦN I. CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU TỐI UU HÓA CẤU TRÚC VẬT LIỆU META CÓ CHIẾT SUẤT ÂM

Trong phần I này, đề tài sẽ trình bày quá trình tối ưu hóa cấu trúc để tìm được cấu trúc Meta đơn giản có chiết suất âm, đặc biệt là thu được vật liệu Meta có chiết suất âm không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ. Trước tiên đề tài sẽ trình bày nghiên cứu sự tương tác của sóng điện từ với vật liệu Meta có cấu trúc CWP. Đây là một trong những cấu trúc đơn giản được sử dụng để điều khiển các tính chất từ ( $\mu$ ) trong vật liệu chiết suất âm ( $n < 0$ ). Cấu trúc CWP có vai trò rất quan trọng và là thành phần quyết định đến tính chất chiết suất âm của vật liệu. Tiếp theo, đề tài sẽ nghiên cứu tính chất chiết suất âm của vật liệu Meta dựa trên cộng hưởng từ bậc cao của cấu trúc CWP. Tiếp đến là cấu trúc kết hợp (combined structure – CB), cấu trúc được tạo nên từ việc kết hợp giữa cấu trúc CWP sinh ra độ từ thâm âm ( $\mu < 0$ ) và các dây liên tục sinh ra độ điện thâm âm ( $\epsilon < 0$ ). Cấu trúc kết hợp là một cấu trúc khá đơn giản (xem hình 3.1(b)) và đặc biệt độ từ thâm và độ điện thâm có thể điều khiển được một cách độc lập nên dễ dàng để tạo ra vật liệu



**Hình 3.1.** Quá trình tối ưu hóa vật liệu Meta có chiết suất âm: a) Cấu trúc CWP, b) cấu trúc kết hợp, c) cấu trúc dạng lưới, d) cấu trúc dạng lưới đĩa

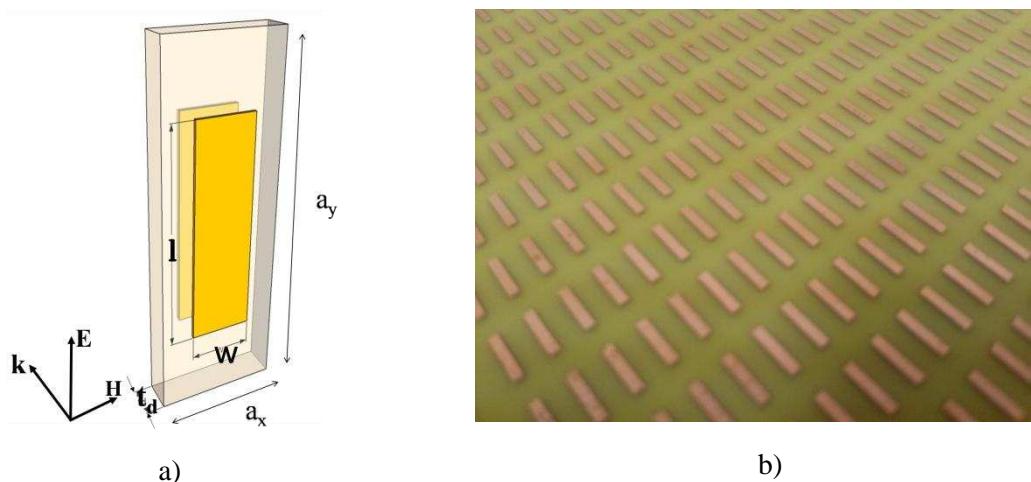
Meta có chiết suất âm. Bên cạnh đó, việc điều chỉnh một cách độc lập này còn tạo điều kiện thuận lợi trong các nghiên cứu cơ bản vì có thể dễ dàng tìm hiểu và nắm được các cơ chế vật lý bên trong của vật liệu. Cuối cùng, các nghiên cứu tính chất của vật liệu Meta có chiết suất âm dựa trên cấu trúc dạng lưới (fishnet - FN) - một cấu trúc biến đổi và có nhiều ưu điểm hơn cấu trúc kết hợp được trình bày. Ngoài ra ảnh hưởng của các tham số cấu trúc đến tính chất chiết suất âm của hai cấu trúc CB và FN cũng được nghiên cứu và trình bày chi tiết trong chương này. Tuy nhiên, với các cấu trúc CWP, CB và FN có thể tạo ra chiết suất âm nhưng đều gặp hạn chế là vùng chiết suất âm này phụ thuộc vào sự phân cực của sóng điện từ nên khó khăn

trong việc đưa vào các ứng dụng thực tế. Để khắc phục hạn chế này, cấu trúc cặp đĩa (dish pair – DP) và lưới đĩa (dishnet – DN) được đề xuất. Các cấu trúc tối ưu DP và DN không phụ thuộc phân cực là nhờ vào tính đối xứng cao. Cấu trúc này sẽ được đề tài dùng trong nghiên cứu sử dụng tác động ngoại vi (cụ thể ở đây sử dụng nhiệt) để điều khiển các tính chất điện từ của vật liệu Meta và trình bày trong chương V. Quá trình tối ưu hóa cấu trúc vật liệu Meta có chiết suất âm được thực hiện theo các bước như trình bày trong hình 3.1.

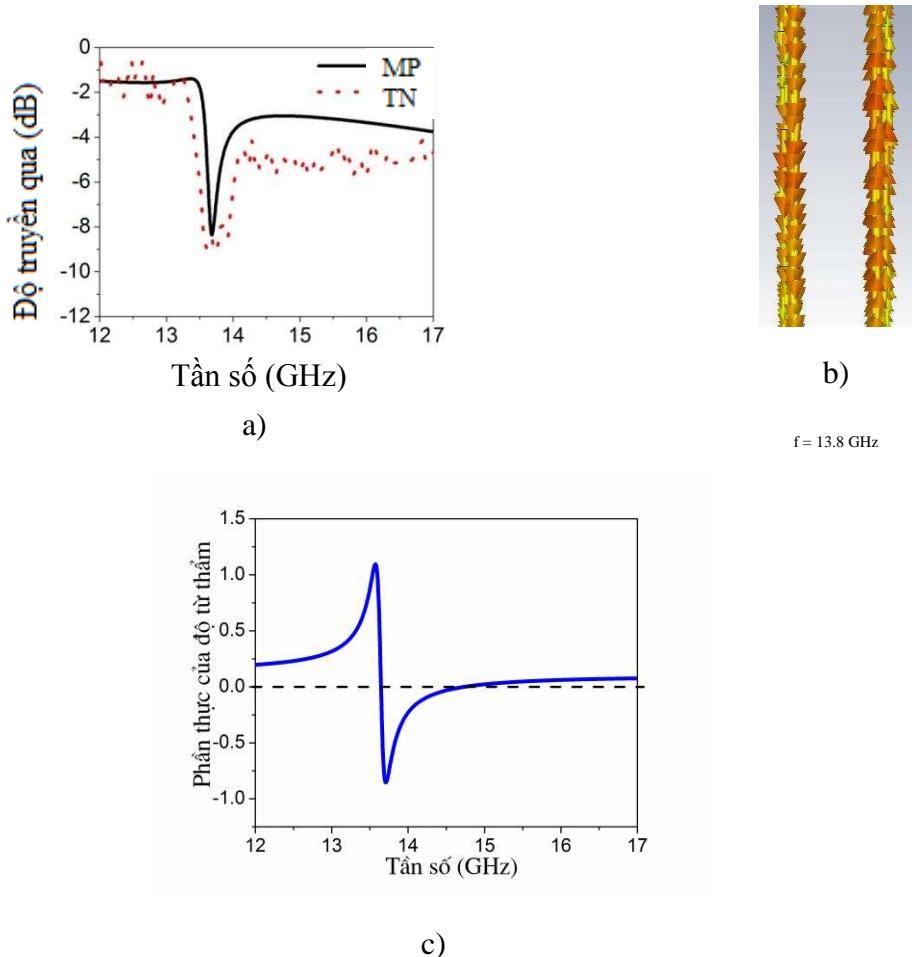
### 3.1. Nghiên cứu vật liệu Meta có độ từ thẩm âm dựa trên cấu trúc CWP

Các nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng, khi vật liệu Meta tương tác với sóng điện từ sẽ sinh ra hai loại cộng hưởng khác nhau: cộng hưởng từ và cộng hưởng điện [137], [60]. Nguyên nhân xuất hiện các cộng hưởng này có thể được giải thích dựa theo mô hình lai hóa như trình bày ở chương I của đề tài. Với mục đích tập trung nghiên cứu cộng hưởng từ trong cấu trúc CWP để tạo ra vật liệu chiết suất âm trong các nghiên cứu tiếp theo, nên kết quả nghiên cứu đầu tiên là đi chứng minh đã tạo ra được cộng hưởng từ và thu được độ từ thẩm âm trong khoảng tần từ 12 GHz - 18 GHz (dải tần phù hợp với các điều kiện tiến hành thực nghiệm).

Hình 3.2(a) trình bày cấu trúc ô cơ sở vật liệu Meta có cấu trúc CWP với các tham số cấu trúc: chiều dài và độ rộng của thanh CW lần lượt là  $l = 5.0$  mm,  $w = 1$  mm, hằng số mạng theo các trục x (phương của  $\mathbf{H}$ )  $a_x = 3.5$  mm và trục y (phương của  $\mathbf{E}$ )  $a_y = 7.0$  mm. Độ dày của lớp điện môi là  $t_d = 0.4$  mm, lớp đồng là  $t_m = 0.36 \mu\text{m}$ . Mẫu chế tạo được trình bày trên hình 3.2(b).



**Hình 3.2.** a) Cấu trúc ô cơ sở:  $a_x = 3.5$  mm,  $a_y = 7.0$  mm,  $l = 5.0$  mm,  $w = 1$  mm, b) Độ dày lớp đồng là  $0.36 \mu\text{m}$ , lớp điện môi  $t_d = 0.4$  mm, b) Vật liệu Meta chế tạo được có  $\mu < 0$  dựa trên cấu trúc CWP.



**Hình 3.3.** a) Phổ truyền qua của vật liệu Meta có cấu trúc CWP mô phỏng và thực nghiệm, b) Phân bố dòng tại tần số cộng hưởng  $f_m = 13.8 \text{ GHz}$ , c) Sự phụ thuộc của độ từ thẩm vào tần số.

Kết quả phổ truyền qua của vật liệu được trình bày trên hình 3.3(a). Từ hình 3.3(a) ta thấy, quanh tần số 13.8 GHz xuất hiện một vùng tại đó sóng điện từ không truyền qua. Kết quả thực nghiệm khá trùng với kết quả thu được từ tính toán mô phỏng. Để xác định nguyên nhân gây ra hiệu ứng không truyền qua tại tần số này, có nhiều phương pháp khác nhau để kiểm chứng. Một trong những phương pháp hữu hiệu và chính xác đó là xác định phân bố dòng tại tần số này (xem hình 3.3(b)). Từ hình 3.3(b) ta thấy, tại tần số 13.8 GHz dòng điện chạy trong hai dây là ngược chiều. Điều này có nghĩa là xuất hiện dòng điện kín chạy trong cặp dây. Dòng điện này sinh ra là do từ trường ngoài  $\mathbf{H}$  của sóng điện từ được phân cực như chỉ ra trên hình 3.2(a) và dẫn đến cộng hưởng từ. Để kiểm chứng lại lập luận này chúng tôi dùng phương pháp Robust method của Chen [15] để tính toán tham số  $\mu$  tại tần số xảy ra cộng hưởng (xem hình 3.3(c)). Kết quả cho thấy tại tần số 13.8 GHz, độ từ

thẩm có giá trị âm. Điều này có thể khẳng định cộng hưởng tại tần số này là cộng hưởng từ.

Như đã trình bày ở trên, vật liệu Meta là vật liệu có cấu trúc nhân tạo, tính chất của nó phụ thuộc mạnh vào các tham số và hình dạng cấu trúc nhiều hơn là các thành phần vật liệu. Các kết quả nghiên cứu trong tài liệu [137], [58], [113], cho thấy tần số cộng hưởng từ này phụ thuộc vào các tham số cấu trúc như chiều dài  $l$ , chiều rộng  $w$ , chiều dày lớp điện môi  $t_d$  và độ điện thẩm  $\varepsilon$ . Cụ thể là tần số cộng hưởng từ giảm khi tăng chiều dài, chiều rộng, độ điện thẩm và giảm khi tăng độ dày lớp điện môi.

Theo mô hình lai hóa, ngoài cộng hưởng từ  $|\omega|$  đã khảo sát ở trên còn tồn tại cộng hưởng điện  $|\omega_+|$  ở tần số cao hơn cộng hưởng từ [52]. Các kết quả nghiên cứu trong tài liệu [137, 113] cho thấy, tần số cộng hưởng điện tỉ lệ thuận với chiều dài thanh CW, tỷ lệ nghịch với độ rộng thanh CW và chiều dày lớp điện môi. Đặc biệt, tần số cộng hưởng này phụ thuộc mạnh vào khoảng cách hai lớp theo phương điện trường **E** (hay hằng số mạng  $a_y$ ).

Ảnh hưởng của hằng số mạng  $a_x$  theo phương của từ trường **H** và  $a_y$  theo phương của điện trường **E** lên tính chất của vật liệu Meta có cấu trúc CWP cũng đã được khảo sát trong một số tài liệu [61], kết quả đều chỉ ra rằng: khi  $a_x$  thay đổi thì vị trí cộng hưởng điện và vị trí cộng hưởng từ hầu như không thay đổi. Tuy nhiên khi thay đổi  $a_y$ , vị trí cộng hưởng từ không thay đổi nhưng vị trí cộng hưởng điện thay đổi mạnh. Điều này cho thấy vị trí cộng hưởng điện phụ thuộc đáng kể vào sự thay đổi của hằng số mạng  $a_y$ .

Một số nỗ lực đã nghiên cứu bằng cách điều khiển các tham số cấu trúc nhằm đẩy cộng hưởng từ chòng chập lên cộng hưởng điện trong cấu trúc CWP để tạo ra vùng có đồng thời độ từ thẩm âm và điện thẩm âm (hay vùng có chiết suất âm) đã được thực hiện. Tuy nhiên, các nghiên cứu này cũng cho thấy rằng, khi tần số cộng hưởng điện tiến gần đến cộng hưởng từ, nó sẽ lấn át cộng hưởng từ, làm cộng hưởng từ bị lu mờ thậm chí bị triệt tiêu [59], [60]. Vì vậy, một số giải pháp khác đã được đề xuất và thực hiện để tạo ra vật liệu chiết suất âm như: sử dụng cộng hưởng bậc cao hay bằng cách đưa thêm thanh kim loại liên tục vào trong cấu trúc CWP để tạo ra cấu trúc kết hợp và các cấu trúc biến đổi của cấu trúc kết hợp.

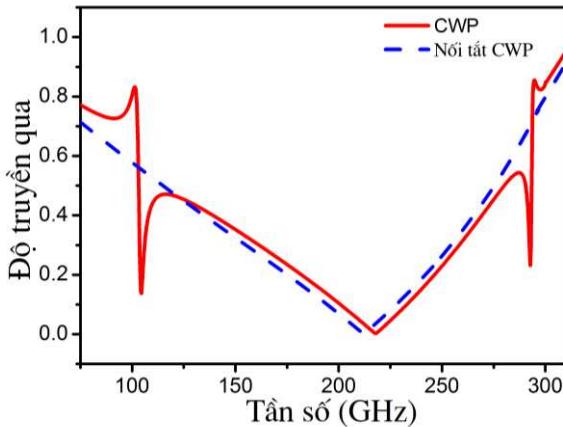
### **3.2. Sử dụng cộng hưởng bậc cao để tạo ra chiết suất âm trong cấu trúc CWP**

Như đã giới thiệu trong chương I, gần đây một hướng nghiên cứu vật liệu có chiết suất âm sử dụng cộng hưởng bậc cao đang được tập trung nghiên cứu [103]. Cách tiếp cận này dựa trên mô hình lai hóa cho cấu trúc đối xứng nên không

cần phải phá vỡ tính đối xứng của cấu trúc như phương pháp của Kanté [52]. Bên cạnh mode cơ bản, cộng hưởng từ có thể được tạo ra bởi mode bậc cao. Sự chồng chập giữa mode này và mode điện cơ bản dễ hơn rất nhiều so với sự chồng chập của hai mode điện và từ cơ bản. Bằng cách này, Soukoulis và cộng sự [103] đã tạo ra chiết suất âm ở vùng tần số 15.5 GHz. Tuy nhiên, nhóm của Soukoulis đã sử dụng cấu trúc dựa trên vòng cộng hưởng có rãnh và thanh kim loại (xem hình 1.23). Đây là một cấu trúc phức tạp và mật độ kim loại trên bề mặt cao vì vậy khó khăn trong việc chế tạo và sẽ gây ra tổn hao lớn đặc biệt là chế tạo vật liệu Meta hoạt động ở vùng tần số cao. Vì vậy, để khắc phục nhược điểm này, đề tài sử dụng cấu trúc CWP đơn giản hơn để tạo chiết suất âm mà vẫn dựa trên nguyên tắc kết hợp cộng hưởng từ bậc cao chồng chập với cộng hưởng điện cơ bản. Ô cơ sở của CWP có các tham số cấu trúc: độ rộng và chiều dài của thanh CW là 0.14 mm và 0.78 mm, hằng số mạng  $a_x = 0.5$  mm,  $a_y = 1.0$  mm,  $a_z = 0.28$  mm, chiều dày của lớp kim loại và điện môi là 0.005 mm và 0.057 mm, chất điện môi vẫn sử dụng RO4003 giống như nhóm của Soukoulis nhưng có độ điện thẩm 3.7, độ tổn hao là 0.005 lớn hơn do hoạt động ở vùng tần số cao hơn. Với các tham số cấu trúc này, chúng tôi có thể chế tạo được vật liệu Meta có chiết suất âm ở vùng tần số 300 GHz (xem hình 3.6), lớn hơn cấu trúc SRR mà Soukoulis đề xuất nhưng vẫn đạt được độ truyền qua là tương đương.

Phổ truyền qua mô phỏng của vật liệu Meta có cấu trúc CWP và nối tắt của nó được trình bày trên hình 3.5. Trong nghiên cứu của Kante [52], vùng chiết suất âm có thể thu được nhờ sự điều chỉnh các mode cộng hưởng điện và từ cơ bản sao cho hai mode này chồng chập lên nhau bằng cách phá vỡ sự đối xứng của cấu trúc. Trong khi đó, kết quả nghiên cứu của đề tài có thể thu được vùng chiết suất âm trong cấu trúc đối xứng CWP với việc sử dụng mode cộng hưởng từ cơ bản và mode cộng hưởng từ bậc ba. Thực tế cho thấy, bên cạnh mode cơ bản, các mode cộng hưởng bậc cao cũng được kích thích dưới tác dụng của sóng điện từ chiếu tới [48]. Vì vậy, bằng cách điều chỉnh độc lập tần số cộng hưởng điện [114], vùng truyền qua với đồng thời độ từ thẩm âm và điện thẩm âm trong cấu trúc đối xứng đơn giản CWP có thể đạt được. Để xác định được đâu là cộng hưởng điện cho độ điện thẩm âm và đâu là cộng hưởng từ cho độ từ thẩm âm ngoài hai cách xem phân bố dòng và sử dụng lý thuyết môi trường hiệu dụng để tính toán các tham số hiệu dụng như đã trình bày trong mục 3.1, một phương pháp rất phổ biến khác là nối tắt hai đầu CWP [115]. Khi nối tắt hai đầu cặp dây, tụ điện sẽ bị triệt tiêu. Kết quả là cộng hưởng từ bị triệt tiêu nhưng ảnh hưởng không đáng kể đến cộng hưởng điện. Kết quả nghiên cứu trên hình 3.4 cho

thấy, có ba cộng hưởng ở 104 GHz, 220 GHz và 300 GHz trong phô truyền qua của CWP, trong khi chỉ cộng hưởng thứ hai ở 220 GHz là còn giữ lại khi nối tắt hai đầu CWP.

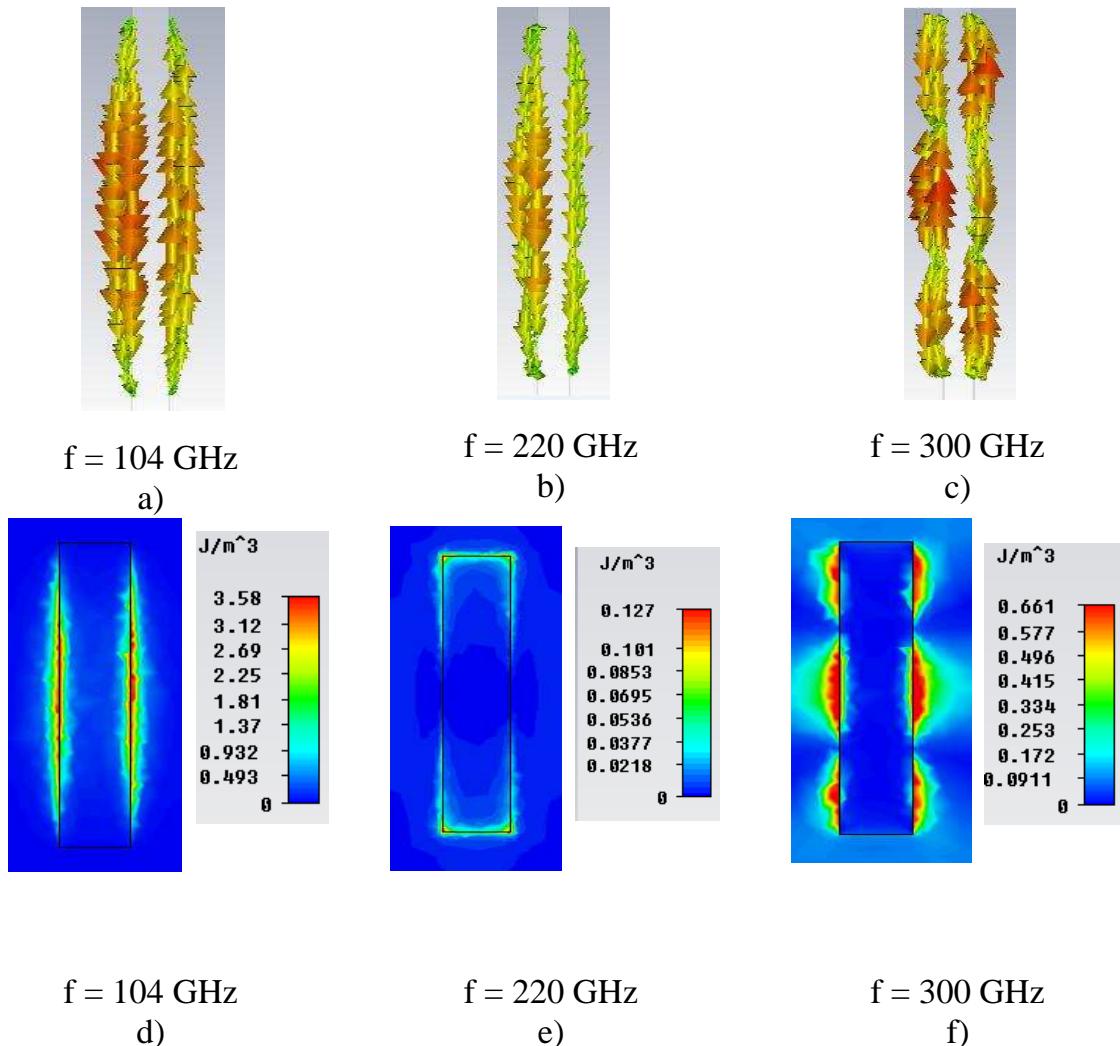


**Hình 3.4.** Phô truyền qua mô phỏng của cấu trúc CWP và nối tắt CWP.

Quan sát này đưa đến kết luận: cộng hưởng thứ nhất tại tần số 104 GHz và cộng hưởng thứ ba tại tần số 300 GHz là cộng hưởng từ, còn cộng hưởng thứ hai ở tần số 220 GHz là cộng hưởng điện. Đặc biệt hơn, cùng tính chất là cộng hưởng từ nhưng thay vì vùng không truyền qua như ở cộng hưởng thứ nhất thì xuất hiện một vùng truyền qua của CWP ở cộng hưởng thứ ba.

Để làm sáng tỏ bản chất của vùng truyền qua ở 300 GHz này và lý giải tại sao nó có tính chất chiết suất âm. Hình 3.5 là kết quả mô phỏng phân bố dòng cảm ứng và mật độ năng lượng tại ba tần số cộng hưởng 104 GHz, 220 GHz và 300 GHz. Cả hai kết quả phân bố dòng và phân bố năng lượng đều cho thấy tại cộng hưởng thứ nhất và thứ ba là cộng hưởng từ do tương tác với từ trường ngoài, còn mode thứ hai là cộng hưởng điện do tương tác với điện trường ngoài. Điều đặc biệt là ở mode thứ ba, hưởng ứng từ không đơn giản như ở mode cơ bản thứ nhất. Moment từ cảm ứng tập trung chủ yếu ở tâm ba dòng điện đối song nhưng ba dòng này lại có hướng ngược nhau, cụ thể là dòng ở giữa ngược hướng với hai dòng còn lại. Vì vậy, cộng hưởng từ bậc ba sẽ yếu hơn cộng hưởng từ cơ bản. Ngoài ra, các kết quả mô phỏng khi mở rộng vùng khảo sát lên các tần số cao hơn (không chỉ ra ở đây) còn cho thấy tồn tại thêm cả các mode lẻ bậc cao hơn (bậc 5, 7..). Các mode chẵn không tồn tại có thể giải thích vì từ trường của các dòng ngược chiều nhau nên triệt tiêu nhau. Mặt khác, với mode cộng hưởng điện cơ bản ở 220 GHz, dòng cảm ứng được phân bố dọc theo các CWs cùng chiều nhau và theo chiều của điện trường như trên hình 3.5(b). Có một điều rất thú vị, cả hai mode cộng hưởng từ cơ bản 104

GHz và mode cộng hưởng từ bậc ba ở 300 GHz ở bên phải và bên trái của mode cộng hưởng điện cơ bản 220 GHz.



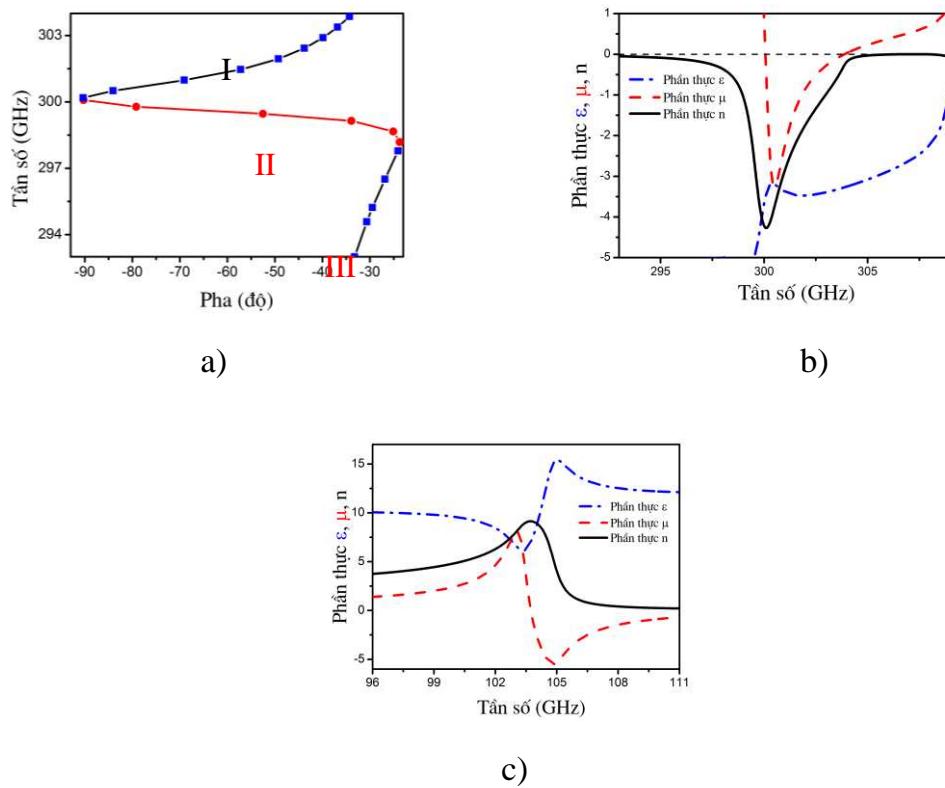
**Hình 3.5. a), b), c) Phân bố dòng tại các tần số cộng hưởng và d), e), f) phân bố năng lượng từ tại tần số cộng hưởng thứ nhất ( $f = 104 \text{ GHz}$ ) và thứ ba ( $f = 300 \text{ GHz}$ ) và phân bố năng lượng điện tại tần số cộng hưởng thứ hai ( $f = 220 \text{ GHz}$ ).**

Vì vậy, thay vì đỉnh không truyền qua ở vị trí cộng hưởng từ bậc ba, tại vị trí này xuất hiện một đỉnh truyền qua như thấy trên hình 3.4. Để trả lời cho câu hỏi này, ta nên lưu ý rằng, ở cộng hưởng điện, vùng điện thẩm âm chỉ xuất hiện bên phia phải (tần số cao hơn) của tần số cộng hưởng trung tâm. Vì vậy, đỉnh truyền qua ở 300 GHz là do chiết suất âm, kết quả của sự chòng chập vùng độ điện thẩm âm (do cộng hưởng điện cơ bản tạo ra) và từ thẩm âm (do cộng hưởng từ bậc ba tạo ra).

Nhằm khẳng định lại đỉnh truyền qua tại tần số 300 GHz là do tính chất chiết suất âm, giản đồ pha của các cấu trúc CWP với điện trường dọc theo trục y và từ trường dọc theo trục x được trình bày trên hình 3.6(a). Rõ ràng rằng, có ba nhánh

lan truyền sóng trong vùng tần số khảo sát. Nhánh thứ nhất (I) và thứ ba (III) lan truyền với pha dương, trong khi đó nhánh thứ hai (II) ở quanh 300 GHz có độ dốc âm, đây là bằng chứng cho thấy vận tốc nhóm và pha ngược nhau. Điều mà chỉ xảy ra trong môi trường chiết suất âm. Hơn nữa các kết quả tính toán sử dụng thuật toán của Chen đưa ra trên hình 3.6(b) và 3.6(c) khẳng định thêm vùng quanh 300 GHz có chiết suất âm còn vùng quanh 104 GHz có độ từ thẩm âm (nhưng chiết suất là dương).

Có thể nhận thấy rằng, phương pháp sử dụng cộng hưởng bậc cao để tạo ra chiết suất âm dựa trên cấu trúc CWP có một số ưu điểm sau: thứ nhất, theo quan sát trên hình 3.4, độ truyền qua đạt được ở vùng có chiết suất âm là khá cao (trên 80%). Điều này thể hiện ưu điểm của cấu trúc CWP so với cấu trúc của nhóm Soukoulis lựa chọn vì trong nghiên cứu này sử dụng vật liệu điện môi tổn hao lớn hơn, hoạt động ở vùng tần số cao hơn nhưng độ truyền qua thu được trong hai cấu trúc là tương đương nhau. Thứ hai, do sử dụng cộng hưởng từ bậc cao nên kích thước các tham số cấu trúc của vật liệu Meta sẽ lớn hơn thông thường vì vậy việc chế tạo mẫu hoạt động ở vùng tần số cao trở nên dễ dàng hơn.



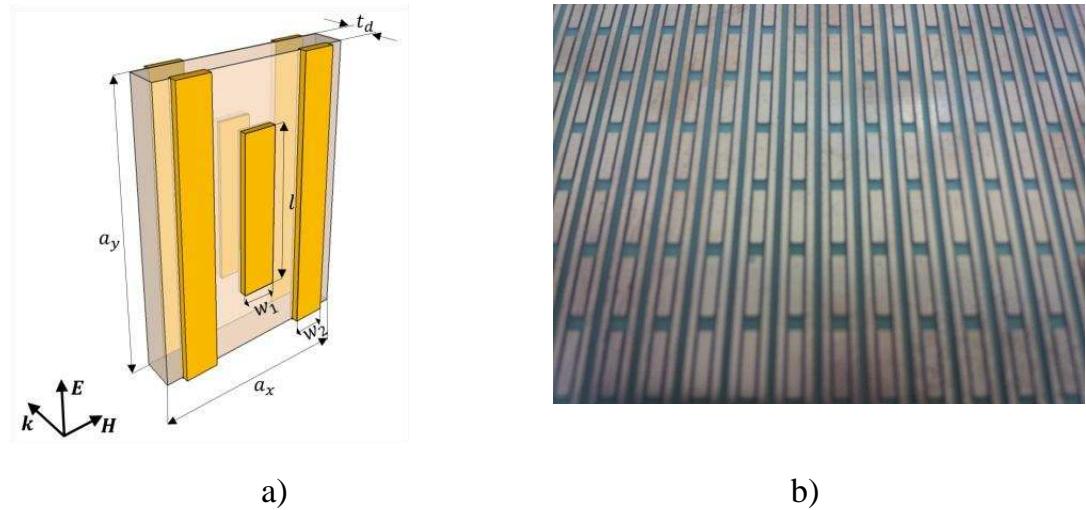
**Hình 3.6.** a) *Giản đồ pha quanh vùng cộng hưởng thứ ba (tần số 300 GHz), Phân thực của các tham số hiệu dụng trường điện từ cho thấy b) chiết suất âm quanh vùng tần số 300 GHz và c) độ từ thẩm âm quanh vùng tần số 104 GHz.*

Tuy nhiên, phương pháp sử dụng mode cộng hưởng bậc cao này cũng có một số hạn chế như: tần số có chiết suất âm ở vị trí cao hơn thông thường nên trong một phạm vi nào đó lý thuyết môi trường hiệu dụng có thể bị vi phạm, tính chính xác của các kết quả tính toán phần lớn đều dựa trên lý thuyết này nhằm phục vụ cho các nghiên cứu chuyên sâu khó được đảm bảo. Quan trọng hơn là rất khó điều khiển hay mở rộng tần số làm việc khi sử dụng phương pháp này vì độ từ thẩm và điện thẩm không được điều khiển độc lập. Vì vậy, các kết quả nghiên cứu tiếp theo, đề tài sẽ sử dụng cấu trúc kết hợp để tạo ra vật liệu chiết suất âm bằng cách đưa thêm dây kim loại liên tục vào cấu trúc CWP.

### **3.3. Vật liệu Meta có chiết suất âm dựa trên cấu trúc kết hợp (combined structure – CB)**

#### **3.3.1. Vùng chiết suất âm, chiết suất dương khi sóng điện từ tương tác với cấu trúc kết hợp (combined structure – CB)**

Hình 3.7(a) và (b) trình bày ô cơ sở cùng với sự phân cực của sóng điện từ và mẫu đã chế tạo của vật liệu Meta có chiết suất âm dựa trên cấu trúc kết hợp. Trong đó, lớp đồng có độ dẫn  $\sigma = 5.88 \times 10^7$  S/m, độ dày 0.036 mm. Lớp điện môi ở giữa có độ dày  $t_d = 0.4$  mm với độ điện thẩm  $\epsilon = 4.3$ . Chiều dài của thanh kim loại CW là  $l = 5.5$  mm, chiều rộng của CW và thanh kim loại dài liên tục bằng nhau  $w_1 = w_2 = 1$  mm. Kích thước của ô cơ sở theo hướng **H** và **E** của cấu trúc kết hợp lần lượt là  $a_x = 6.5$  mm và  $a_y = 7.0$  mm. Khoảng cách giữa tâm của hai thanh kim loại liên tục được giữ ở  $a = 3.5$  mm. Với các tham số cấu trúc này, tính chất chiết suất âm của cấu trúc kết hợp có thể xuất hiện ở vùng tần số từ 12 GHz đến 18 GHz, vùng tần số phù hợp với điều kiện thực nghiệm. Ở đây, tính chất chiết suất âm được nghiên cứu chi tiết và cụ thể dựa trên việc đánh giá độc lập tương tác điện và từ của cấu trúc kết hợp. Để kiểm tra sự xuất hiện của tính chiết suất âm trong cấu trúc kết hợp, một trong những cách đó là xem xét phổ truyền qua của riêng CWP và CB. Thuận lợi của phương pháp này là giúp chúng ta hiểu sự đóng góp tương tác giữa hai thành phần riêng biệt để tạo ra chiết suất âm. Một cách khác đó là xác định tính chất chiết suất âm dựa vào phương pháp tính toán của Chen được áp dụng để tính toán độ từ thẩm, độ điện thẩm và chiết suất hiệu dụng.



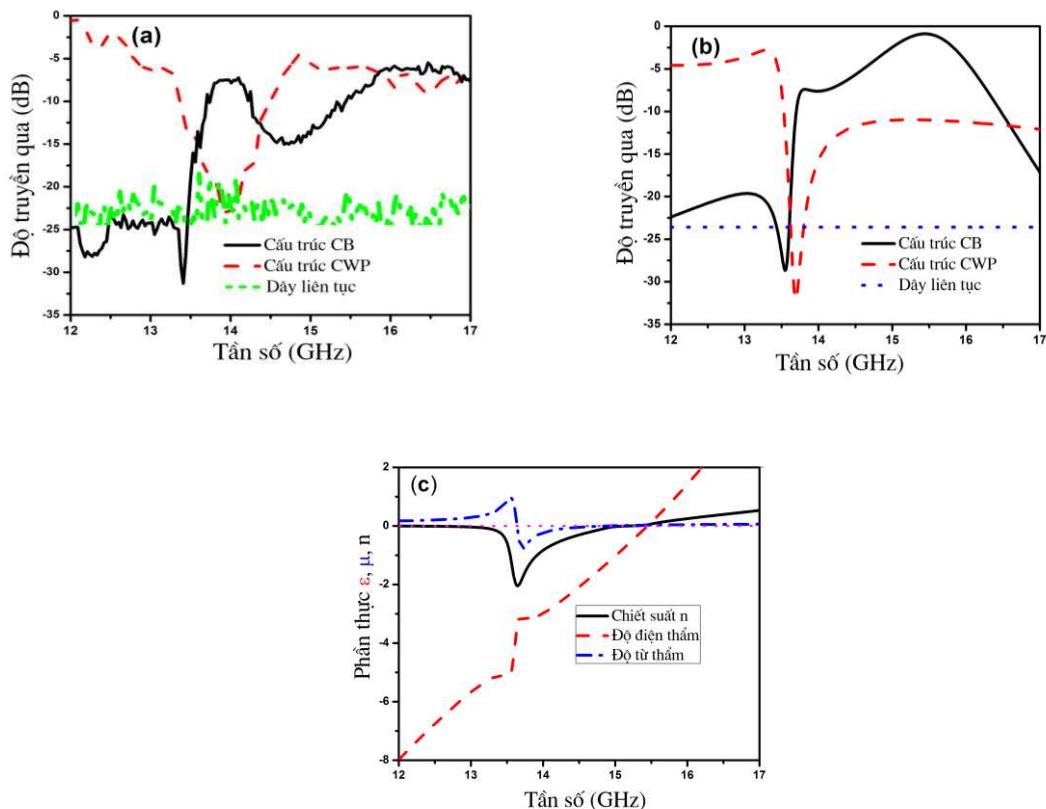
**Hình 3.7. a)** Ô cơ sở cấu trúc kết hợp và **b)** mẫu chế tạo với:

$$w_1 = w_2 = 1 \text{ mm}, l = 5.5 \text{ mm}, a_x = 6.5 \text{ mm}, a_y = 7.0 \text{ mm}.$$

Hình 3.8(a) và (b) là lần lượt trình bày phổ truyền qua thực nghiệm và mô phỏng của cấu trúc CWP, thanh kim loại liên tục và cấu trúc kết hợp tương ứng với các tham số đưa ra trong hình 3.7. Kết quả tính toán độ từ thẩm, độ điện thẩm và chiết suất tương ứng được trình bày trong hình 3.8(c). Quan sát phổ truyền qua thực nghiệm và mô phỏng cho thấy, đỉnh truyền qua thứ nhất của cấu trúc CB xấp xỉ tần số 13.8 GHz, vùng tần số này trùng với vùng không truyền qua của cấu trúc CWP. Tuy nhiên, vùng truyền qua trong kết quả thực nghiệm rộng hơn so với kết quả mô phỏng. Điều này có thể được giải thích do sai số khi chế tạo mẫu và đo đạc. Việc quan sát thấy đỉnh truyền qua quanh 13.8 GHz hoàn toàn phù hợp với những kết quả nghiên cứu trước đó, và đỉnh này thể hiện vật liệu có chiết suất âm [113], [114]. Để khẳng định lại kết quả trên, phương pháp tính toán của Chen được sử dụng để tính các tham số của vật liệu và được trình bày trên hình 3.8(c). Kết quả tính toán cho thấy, chiết suất âm đạt được trong tần số cộng hưởng từ 13.4 GHz - 14.8 GHz. Kết quả này có thể được giải thích là do các thanh kim loại liên tục tạo ra độ điện thẩm âm được kết hợp với độ từ thẩm âm của cấu trúc CWP trên cùng một dải tần số (quan sát hình 3.8(c)). Ngoài ra, ta thấy tồn tại đỉnh truyền qua thứ hai nằm trong vùng tần số 15.3 GHz - 17.3 GHz. Tại vùng này, độ từ thẩm và độ điện thẩm đều dương do vậy đây là một vùng truyền qua của vật liệu thông thường.

Cần chú ý rằng, sự kết hợp giữa cấu trúc CWP và các thanh kim loại liên tục không đảm bảo rằng luôn tạo ra được vùng có chiết suất âm. Nguyên nhân là do tính chất cộng hưởng nên vùng có độ từ thẩm âm chỉ tồn tại trên một dải tần số hẹp. Muốn tạo ra được vùng có chiết suất âm phải điều chỉnh các tham số một cách thích hợp sao cho hai vùng từ thẩm và điện thẩm âm chồng chập lên nhau. Koschny [55]

đã chỉ ra rằng, trong cấu trúc kết hợp, độ từ thẩm âm chỉ có nguồn gốc từ các cộng hưởng từ do thành phần CWP tạo ra, trong khi độ điện thẩm âm được tạo ra bởi sự tương tác điện tổng cộng của cả các thanh kim loại liên tục và các CWs. Do đó, việc hiểu rõ các đặc điểm cũng như tối ưu hóa các thông số cấu trúc của vật liệu rất quan trọng trong việc tạo ra vật liệu chiết suất âm cũng như tạo ra những tính chất thú vị khi vật liệu Meta tương tác với sóng điện từ. Vì thế, sự ảnh hưởng của các tham số cấu trúc lên tính chất của siêu vật liệu có cấu trúc CB, đặc biệt là tính chiết suất âm sẽ được khảo sát cụ thể và được trình bày trong phần tiếp theo.



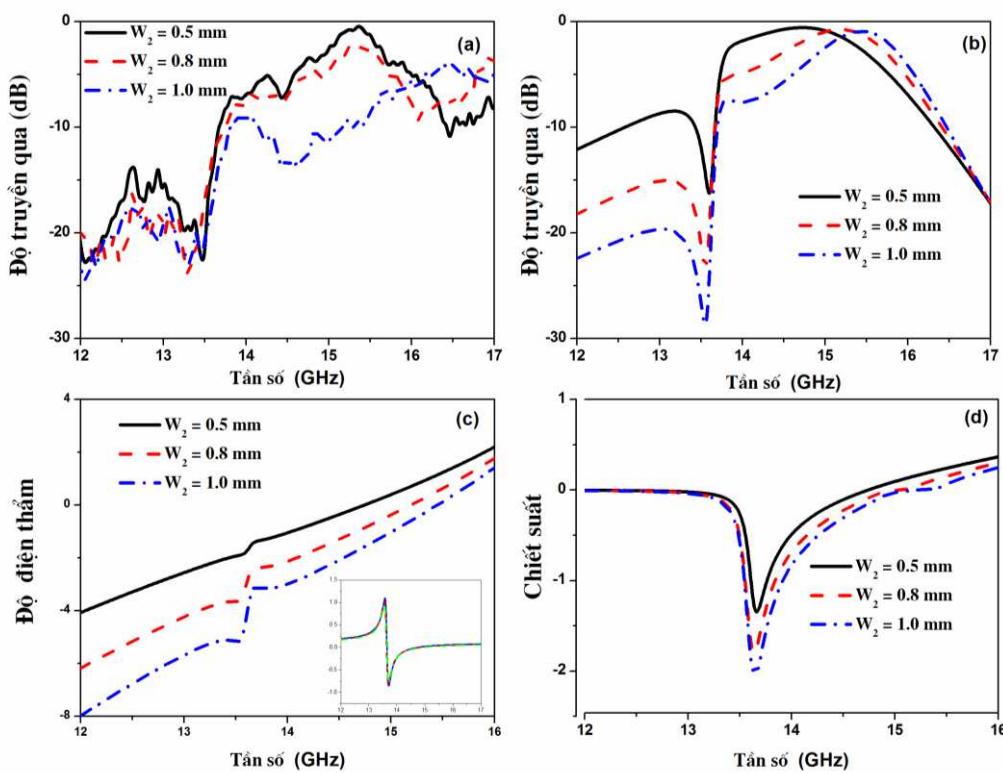
**Hình 3.8.** a) Phổ truyền qua thực nghiệm và b) mô phỏng của cấu trúc CWP, CB và các dây kim loại liên tục. (c) Tính toán độ điện thẩm, độ từ thẩm và chiết suất từ dữ liệu mô phỏng của cấu trúc CB tương ứng.

### 3.3.2. Ảnh hưởng của các tham số cấu trúc đến tính chiết suất âm trong cấu trúc kết hợp

#### 3.3.2.1. Ảnh hưởng của độ rộng thanh kim loại liên tục lên tính chiết suất âm trong cấu trúc kết hợp

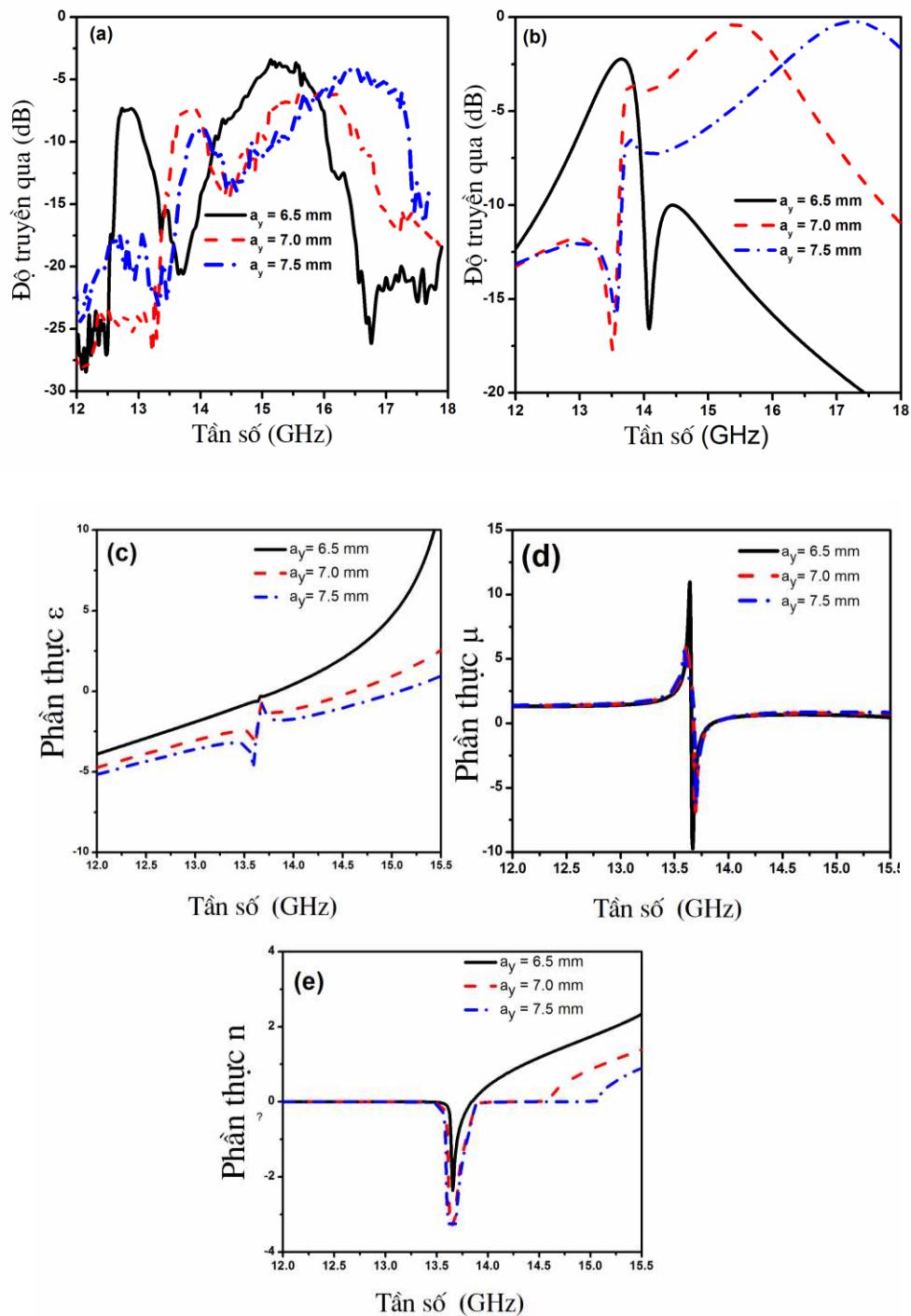
Hình 3.9 trình bày kết quả thực nghiệm và mô phỏng về sự ảnh hưởng của độ rộng của dây kim loại liên tục lên tính chất của vật liệu. Đối với nghiên cứu này, chiều rộng của thanh CW được giữ ở 1.0 mm trong khi chiều rộng của thanh kim

loại liên tục  $w_2$  giảm từ 1.0 đến 0.5 mm. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm đều cho thấy đỉnh thứ nhất ( $n < 0$ ) hầu như không thay đổi (~ 13.8 GHz), đỉnh thứ hai ( $n > 0 - RH$ ) dịch dần về phía tần số thấp, đồng thời, đỉnh truyền qua thể hiện tính chiết suất âm được nâng lên đáng kể khi giảm độ rộng của dây. Để quan sát rõ hiện tượng này, các tham số hiệu dụng  $\varepsilon$ ,  $\mu$  và  $n$  được tính toán và trình bày trên [hình 3.9\(c\)](#) và [\(d\)](#). Để thấy, tần số plasma điện bị dịch chuyển tới tần số thấp hơn khi giảm chiều rộng của thanh kim loại liên tục, trong khi tương tác từ gần như là không thay đổi [hình nhỏ trong [hình 3.9\(c\)](#) cho thấy độ từ thẩm không thay đổi khi  $w_2$  thay đổi]. Đây chính là nguyên nhân giải thích hiện tượng đỉnh RH lại dịch về phía tần số thấp, hệ quả là vùng tần số có chiết suất âm bị hẹp đi như trong [hình 3.9\(d\)](#). Sự nâng lên của đỉnh thể hiện tính chiết suất âm được giải thích bởi sự phối hợp trở kháng của môi trường cấu trúc CB với nền chân không. Dựa vào kết quả [hình 3.9](#) có thể dự đoán rằng, khi độ rộng của dây giảm đến một giá trị nào đó, tính chất chiết suất âm của vật liệu sẽ bị triệt tiêu hoàn toàn.



**Hình 3.9.** (a) Kết quả thực nghiệm và (b) kết quả mô phỏng phổ truyền qua của cấu trúc kết hợp khi chiều rộng của thanh kim loại liên tục thay đổi. (c), (d) phần thực độ điện thẩm và chiết suất tương ứng. Độ từ thẩm hiệu dụng được vẽ trong hình nhỏ bên cạnh.

**3.3.2. Ảnh hưởng của hằng số mạng theo phương của điện trường  $E$  (phương  $y$ ) lên tính chiết suất âm trong cấu trúc kết hợp**



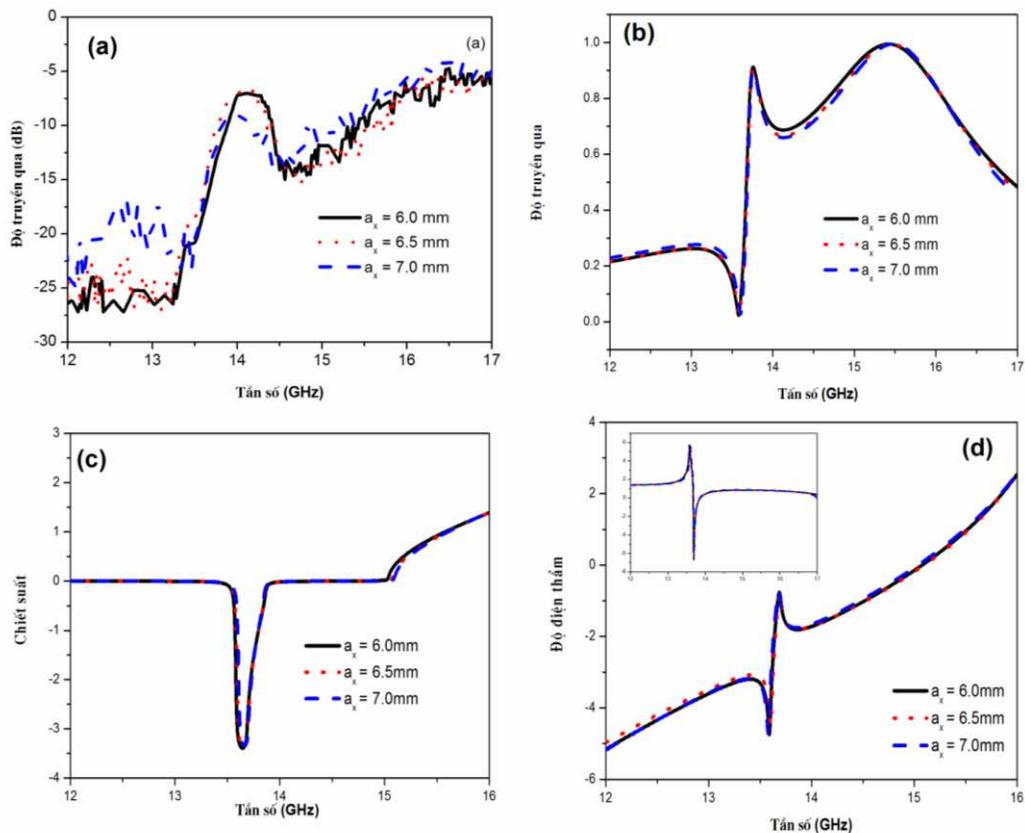
**Hình 3.10.** Phổ truyền qua (a) thực nghiệm và (b) mô phỏng của cấu trúc kết hợp với hằng số mạng  $a_x = 6.5 \text{ mm}$  trong khi đó  $a_y$  thay đổi từ 6.5 mm đến 7.5 mm. Phân thực của các tham số hiệu dụng (c) độ điện thẩm, (d) độ từ thẩm và (e) chiết suất.

**Hình 3.10** trình bày kết quả nghiên cứu sự ảnh hưởng của hằng số mạng  $a_y$  theo hướng **E** đến tính chất chiết suất âm của cấu trúc kết hợp. Trong trường hợp này, hằng số mạng theo hướng **H** được giữ tại  $a_x = 6.5$  mm, trong khi theo hướng **E** hằng số mạng  $a_y$  thay đổi từ 6.5 mm đến 7.5 mm. **Hình 3.10(a) và (b)** lần lượt là kết quả thực nghiệm và mô phỏng phổ truyền qua phụ thuộc vào hằng số mạng  $a_y$  của cấu trúc CB đều cho thấy tại  $a_y = 7.5$  mm tồn tại hai đỉnh chiết suất âm (13.8 GHz) và chiết suất dương (16.5 GHz). Tuy nhiên khi  $a_y$  giảm, vùng truyền qua có chiết suất dương dần tiến lại gần vùng chiết suất âm, sau đó tiếp tục phủ lên nhau, và hoàn toàn biến mất. Kết quả quan sát được có thể được giải thích bởi sự giảm của tần số plasma hiệu dụng trong cấu trúc kết hợp.

Các kết quả tính toán phản ánh các tham số hiệu dụng của độ điện thẩm, độ từ thẩm và chiết suất được đưa ra lần lượt trên **hình 3.10(c-e)**. Để thấy, tần số plasma điện dịch chuyển tới tần số thấp hơn khi  $a_y$  giảm trong khi tương tác từ gần như là không thay đổi [**hình 3.10(d)** cho thấy độ từ thẩm không thay đổi khi  $a_y$  thay đổi]. Tương tự như giảm  $w_2$ , khi giảm  $a_y$  đỉnh RH cũng dịch về phía tần số thấp, hệ quả là vùng tần số có chiết suất âm bị hẹp đi thậm chí có thể sẽ biến mất [**hình 3.10(a) và (b)**].

### 3.3.2.3. Ảnh hưởng của hằng số mạng theo phương của từ trường **H** (phương x) lên tính chiết suất âm trong cấu trúc kết hợp

Sự ảnh hưởng của hằng số mạng  $a_x$  (theo hướng **H**) trong tương tác điện từ của cấu trúc kết hợp cũng được khảo sát chi tiết. Trong trường hợp này,  $a_x$  được thay đổi từ 6.0 mm đến 7.0 mm, trong khi đó  $a_y = 7.5$  mm, khoảng cách giữa tâm của hai thanh kim loại liên tục vẫn được giữ tại giá trị  $d = 3.5$  mm. Phổ truyền qua thực nghiệm và mô phỏng của cấu trúc kết hợp khi  $a_x$  thay đổi được quan sát trong **hình 3.11 (a) và (b)**. Kết quả thực nghiệm trùng khớp với kết quả mô phỏng và cho thấy vùng truyền qua đầu tiên thể hiện tính chất chiết suất âm của vật liệu cũng như khoảng cách giữa vùng  $n < 0$  và  $n > 0$  gần như không thay đổi khi  $a_x$  tăng. Hiện tượng này có thể được giải thích do khi thay đổi  $a_x$ , mật độ điện tích hiệu dụng biến đổi không đáng kể dẫn tới tần số plasma hầu như không bị dịch đi. Sự giải thích này được củng cố bởi kết quả tính toán độ từ thẩm, điện thẩm và chiết suất hiệu dụng như trình bày trong **hình 3.11(c) và (d)**. Kết quả cho thấy, chiết suất âm hầu như không bị ảnh hưởng bởi việc thay đổi kích thước ô cơ sở theo hướng **H**.



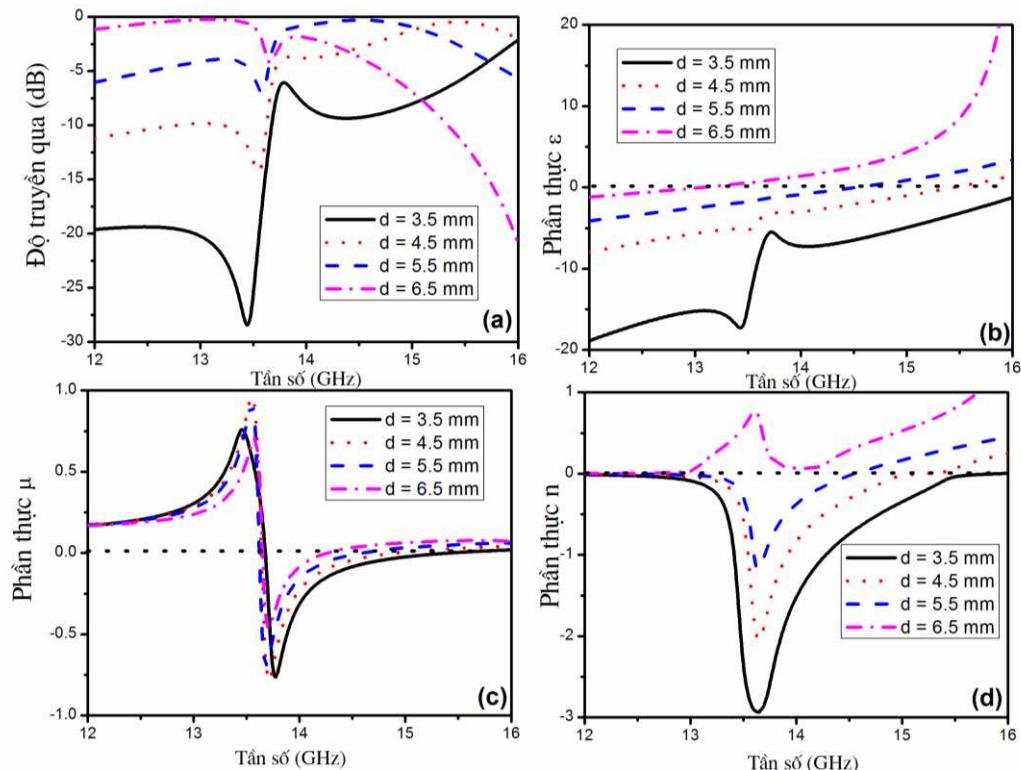
**Hình 3.11.** Phổ truyền qua (a) thực nghiệm và (b)mô phỏng của cấu trúc kết hợp phụ thuộc vào hằng số mạng theo hướng **H** với sự thay đổi của  $a_x$  từ 6.0 tới 7.0 mm. Kết quả tính toán phần thực của (c) Chiết suất, d) độ điện thẩm và độ từ thẩm tương ứng.

### 3.3.2.4. Ảnh hưởng của khoảng cách hai tâm thanh kim loại liên tục d lên tính chiết suất âm trong cấu trúc kết hợp

Hình 3.12 minh họa kết quả mô phỏng sự ảnh hưởng của khoảng cách giữa hai tâm của dây liên tục d đến tính chất chiết suất âm của cấu trúc CB. Trong trường hợp này, hằng số mạng theo hướng **H** được giữ tại  $a_x = 6.5$  mm, theo hướng **E** được giữ tại  $a_y = 7.5$  mm. Quan sát hình 3.12(a) tại  $d = 3.5$  mm, phổ truyền qua tồn tại hai đỉnh:chiết suất âm (13.8 GHz) và chiết suất dương (16.5 GHz). Tuy nhiên khi d tăng, vùng truyền qua có chiết suất dương dần tiến lại gần vùng chiết suất âm , sau đó tiếp tục phủ lên nhau, và hoàn toàn biến mất khi  $d = 6.5$  mm.

Hiện tượng trên có thể được giải thích dựa trên sự biến đổi của độ điện thẩm, độ từ thẩm và chiết suất trên hình 3.12(b-d). Dễ thấy, tần số plasma điện dịch chuyển tới tần số thấp hơn khi d tăng trong khi tương tác từ gần như là không thay đổi. Tương tự như giảm  $w_2$  và giảm  $a_y$ , đỉnh RH cũng dịch về phía tần số thấp, hệ

quả là vùng tần số có chiết suất âm bị hẹp đi và biến mất khi  $d = 6.5$  mm [hình 3.12(d)].



**Hình 3.12.**(a) Phổ truyền qua mô phỏng của cấu trúc kết hợp với  $d$  thay đổi theo từ 3.5 mm đến 6.5 mm. Phần thực của các tham số hiệu dụng (b) độ điện thẩm, (c) độ từ thẩm và (d) chiết suất.

Dựa trên kết quả do sự ảnh hưởng của các tham số cấu trúc lên tính chiết suất âm của cấu trúc CB, một số kết luận cần chú ý như sau:

1. Tần số plasma của cấu trúc kết hợp bị giảm đáng kể khi chiều rộng của thanh kim loại liên tục giảm hoặc khoảng cách giữa hai thanh đó tăng, trong khi cộng hưởng từ gần như không thay đổi. Hệ quả là ảnh hưởng rất mạnh đến tính chất chiết suất âm của cấu trúc CB. Trong trường hợp đặc biệt, tính chiết suất âm hoàn toàn có thể bị triệt tiêu.

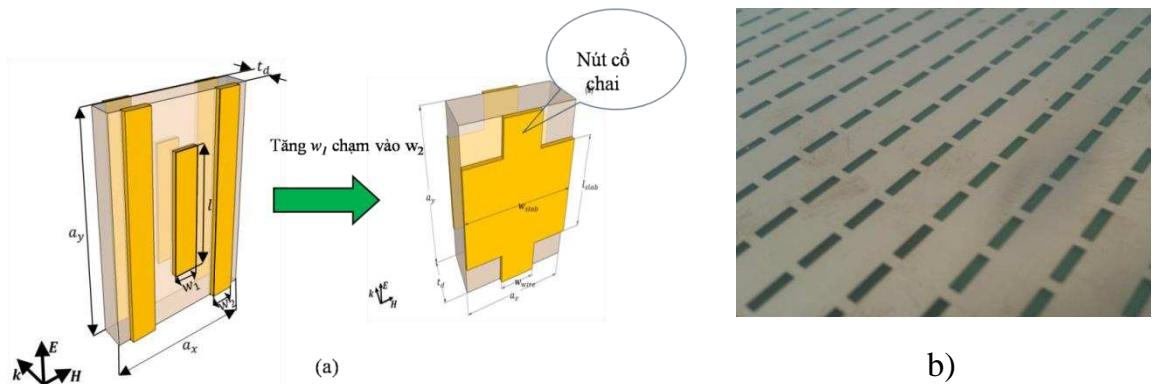
2. Tương tác điện của CB phụ thuộc mạnh vào hằng số mạng theo hướng **E**, không thay đổi theo hằng số mạng theo hướng **H**. Trong khi, tương tác từ của CB không phụ thuộc vào các tham số này. Các kết quả đạt được đều cho thấy sự phù hợp tốt giữa thực nghiệm và tính toán mô phỏng. Các kết quả này là tiền đề quan trọng cho việc tối ưu hóa các tham số hiệu dụng để tránh những sai lầm trong thiết

kế, chế tạo và là cơ sở để thiết kế vật liệu chiết suất âm hoạt động trong dải tần rộng sẽ trình bày ở phần sau.

### 3.4. Vật liệu Meta chiết suất âm có cấu trúc dạng lưới (Fish-net).

#### 3.4.1. Ưu điểm của cấu trúc dạng lưới so với cấu trúc kết hợp

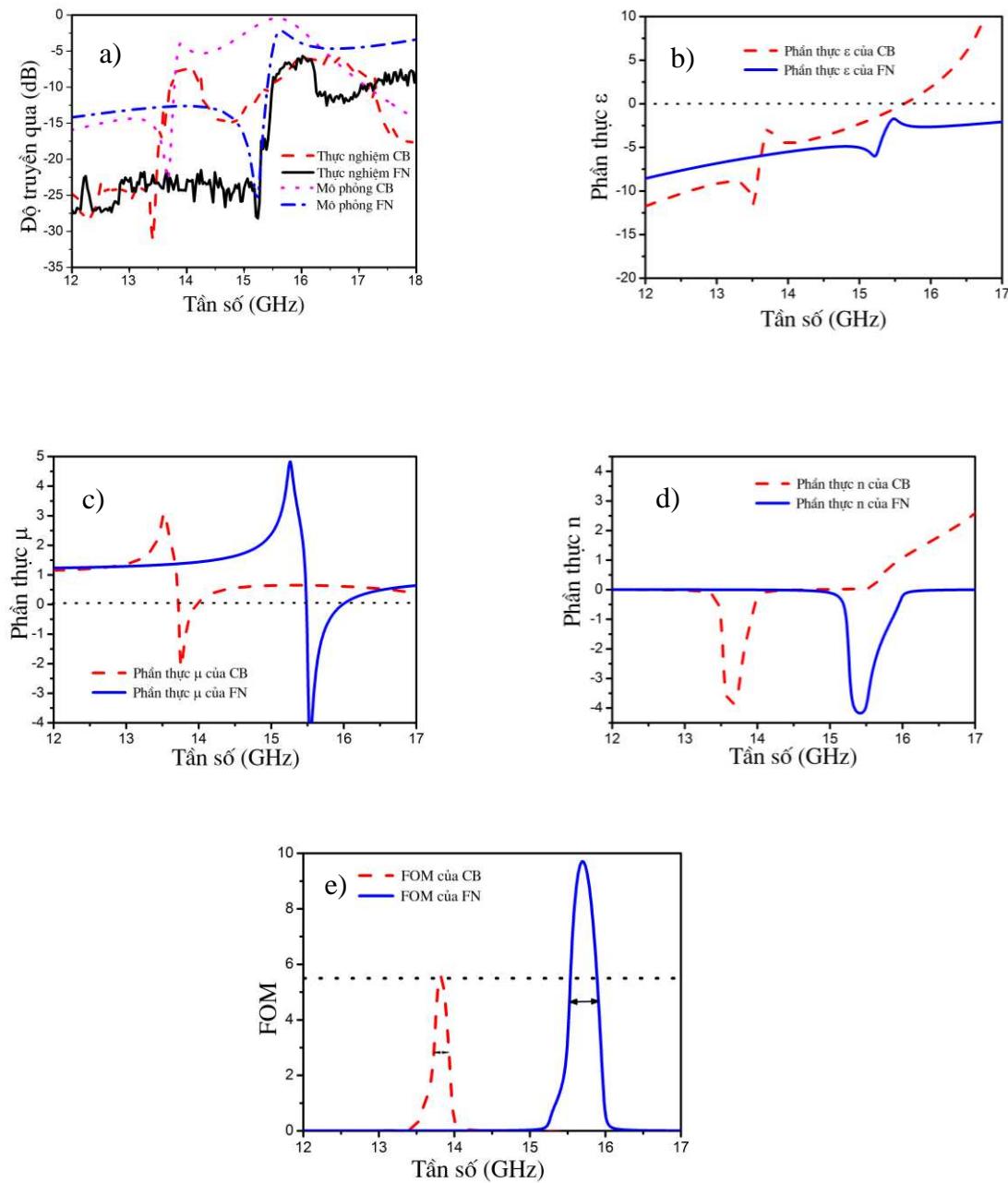
Trong quá trình khảo sát, kết quả cho thấy nếu giữ nguyên thanh kim loại liên tục, tăng chiều rộng của thanh CW trong cấu trúc CWP đến khi tiếp xúc với thanh kim loại liên tục thì chúng ta thu được cấu trúc mới vẫn thể hiện tính chất chiết suất âm. Cấu trúc mới này gọi là cấu trúc dạng lưới (fishnet - FN). Hình 3.13(a) và (b) lần lượt trình bày sự biến đổi của cấu trúc CB thành cấu trúc FN và mẫu vật liệu Meta có cấu trúc FN chế tạo được. Về bản chất vật lý, hai cấu trúc này tương tự nhau về tương tác điện từ. Tuy nhiên, cấu trúc FN có nhiều ưu điểm hơn so với cấu trúc kết hợp bởi tính đơn giản trong thiết kế cũng như chế tạo và cho tương tác điện và từ mạnh trên cùng một dải tần số hoạt động [51]. Sự tương tác của cấu trúc này với sóng điện từ được giải thích dựa trên mô hình mạch LC tương ứng, đã được trình bày trong hình 1.26(b) của chương I.



**Hình 3.13.** a) Sự biến đổi cấu trúc kết hợp thành cấu trúc dạng lưới, b) Mẫu chế tạo vật liệu Meta có cấu trúc FN

**Hình 3.14** trình bày kết quả mô phỏng và thực nghiệm phổ truyền qua của cấu trúc kết hợp và cấu trúc dạng lưới. Trong nghiên cứu này cấu trúc kết hợp có thông số như trong mục 3.3. Trong cấu trúc FN, chiều dài  $l_{slab}$  và chiều rộng tấm kim loại  $w_{wire}$  tương ứng là 5.5 mm và 1.0 mm. Kích thước ô cơ sở theo hướng **H** và **E** lần lượt là  $w_{slab} = 6.5$  mm,  $a_y = 7.0$  mm. Quan sát trên **hình 3.14(a)**, ta thấy vẫn tồn tại hai vùng truyền qua phổ truyền qua của cấu trúc dạng lưới giống như trường hợp của cấu trúc kết hợp. Hai vùng truyền qua cách nhau bởi một dải tần số hẹp, ở đó vùng truyền qua thứ nhất có đỉnh ở 15.9 GHz thể hiện tính chiết suất âm, trong khi vùng thứ hai có đỉnh quanh 18 GHz là vùng truyền qua thể hiện tính chất

chiết suất dương [51]. Kết quả mô phỏng trùng khớp với kết quả thực nghiệm. Ngoài ra, kết quả còn cho thấy đỉnh thể hiện tính chiết suất âm của cấu trúc FN bị dịch về phía tần số cao hơn so với cấu trúc CB. Điều này hoàn toàn được giải thích do sự đóng góp của dòng điện tích đi qua nút cỗ chai làm dịch tần số cộng hưởng từ theo công thức (1.57) như đã phân tích trong chương I.

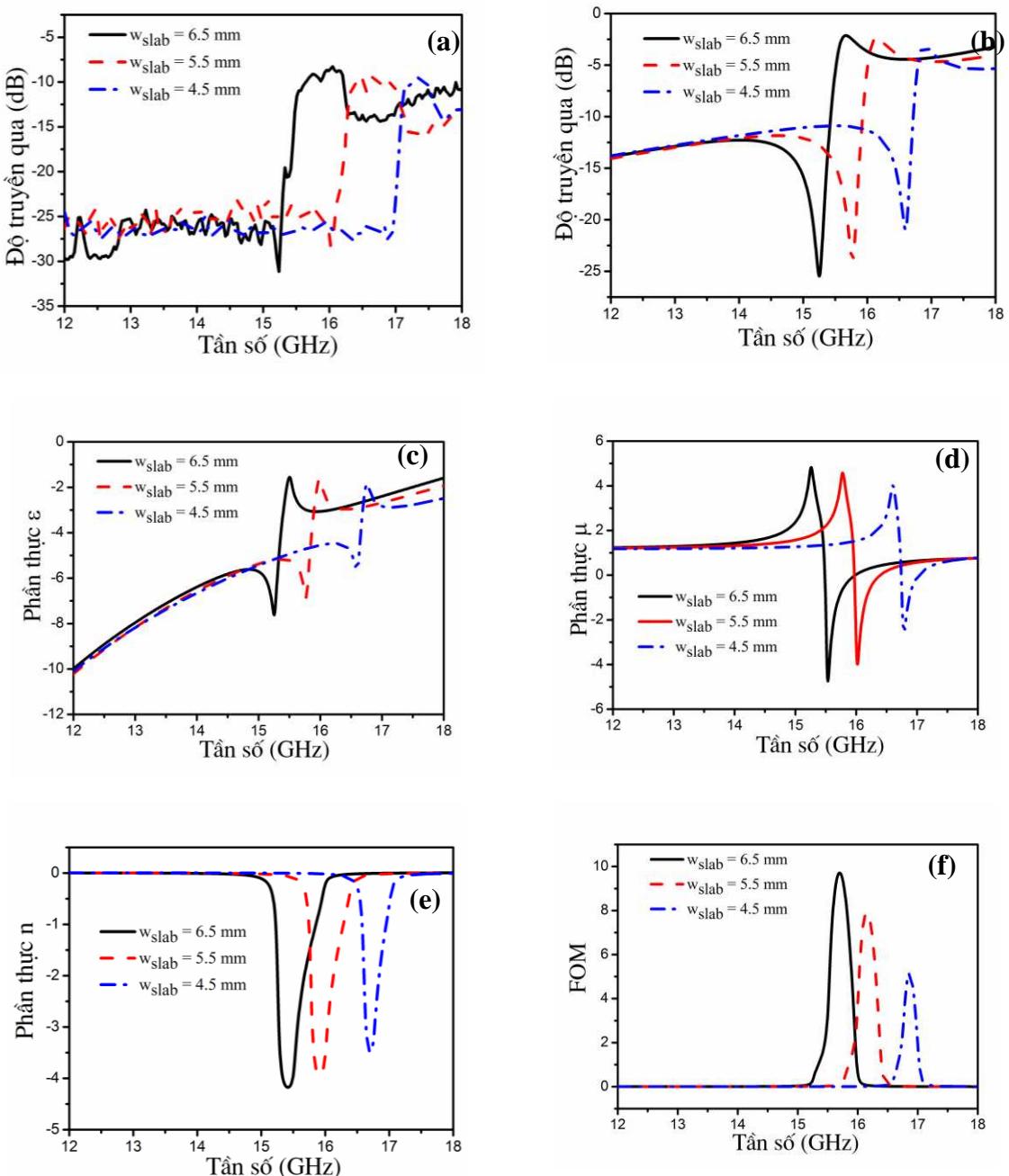


**Hình 3.14.** a) *Phổ truyền qua thực nghiệm và mô phỏng của cấu trúc CB và FN, Kết quả tính toán phần thực của b) độ điện thẩm, c) độ từ thẩm d) chiết suất và e) hệ số phẩm chất FOM*

Để so sánh và khẳng định những ưu điểm của cấu trúc dạng lưới so với cấu trúc kết hợp, các kết quả tính toán phần thực của độ điện thẩm, từ thẩm, chiết suất và hệ số phẩm chất FOM ứng với vùng tần số có chiết suất âm của hai cấu trúc này được trình bày trên [hình 3.14](#). Kết quả trên [hình 3.14\(b\)](#) cho thấy tần số plasma của cấu trúc FN lớn hơn CB. Quan trọng hơn ở đây là độ dốc của đường biểu diễn độ điện thẩm âm phụ thuộc vào tần số của cấu trúc FN nhỏ hơn so với cấu trúc CB (xem [hình 3.14\(b\)](#)). Do vậy với cấu trúc FN, có thể dễ dàng đạt được điều kiện phối hợp trở kháng trong vùng tần số rộng hơn. Ngoài điều kiện tốn hao thấp thì điều kiện phối hợp trở kháng của vật liệu với môi trường xung quanh để khử phản xạ đóng vai trò quan trọng để thu được vật liệu Meta có độ truyền qua cao. Thứ hai, cường độ tương tác từ với cấu trúc FN mạnh hơn và cho vùng từ thẩm âm rộng hơn so với cấu trúc CB như quan sát trên [hình 3.14\(c\) và \(d\)](#). Chính vì hai yếu tố này nên hệ số phẩm chất của cấu trúc FN đạt được ( $FOM \approx 10$ ) có giá trị cao hơn so với của cấu trúc kết hợp ( $FOM = 5.5$ ). Đồng thời, vùng tần số cho hệ số phẩm chất cao của cấu trúc FN tồn tại rộng hơn (độ bán rộng 0.4 GHz) so với cấu trúc CB (độ bán rộng 0.2 GHz). Điều này rất quan trọng trong việc chế tạo vật liệu chiết suất âm có cấu trúc đơn giản, hoạt động trong dải tần số rộng và có độ tốn hao thấp. Chính vì vậy, cấu trúc này được đề tài sử dụng trong nghiên cứu mở rộng dải tần có chiết suất âm trong chương IV như là một cấu trúc tối ưu hơn so với cấu trúc CB đề xuất ban đầu.

### **3.4.2. Ảnh hưởng của các tham số cấu trúc đến tính chiết suất âm của cấu trúc FN và tối ưu hóa cấu trúc có hệ số phẩm chất cao**

[Hình 3.15\(a\) và \(b\)](#) biểu diễn kết quả phô truyền qua thực nghiệm và mô phỏng của cấu trúc FN có độ rộng thanh slab thay đổi từ 4.5 mm đến 6.5 mm. Trong đó, chiều dài ( $l_{slab}$ ) và chiều rộng tấm kim loại ( $w_{wire}$ ) tương ứng là 5.5 mm và 1.0 mm. Kích thước ô cơ sở theo hướng  $\mathbf{E}$  là  $a_y = 7.5$  mm. Kết quả cho thấy khi  $w_{slab}$  tăng từ 4.5 mm đến 6.5 mm, đỉnh LH và vùng tần số có chiết suất âm bị dịch đến tần số thấp. Kết quả tính toán phần thực độ điện thẩm và từ thẩm đưa ra trên [hình 3.15\(c\) và \(d\)](#) cho thấy vùng điện thẩm âm hầu như không đổi trong khi đó tần số cộng hưởng từ dịch về phía tần số thấp, vì vậy dẫn đến sự dịch vùng chiết suất âm về phía tần số thấp như quan sát trên phô truyền qua [hình 3.15\(a\) và \(b\)](#). Sự dịch đỉnh này hoàn toàn được giải thích phù hợp theo tính toán sử dụng mô hình mạch LC đã trình bày trong chương I. Ở đó, tần số cộng hưởng từ tỷ lệ nghịch với chiều rộng  $w_{slab}$  của tấm, khi  $w_{slab}$  tăng dẫn tới tần số cộng hưởng từ giảm, hệ quả là vùng



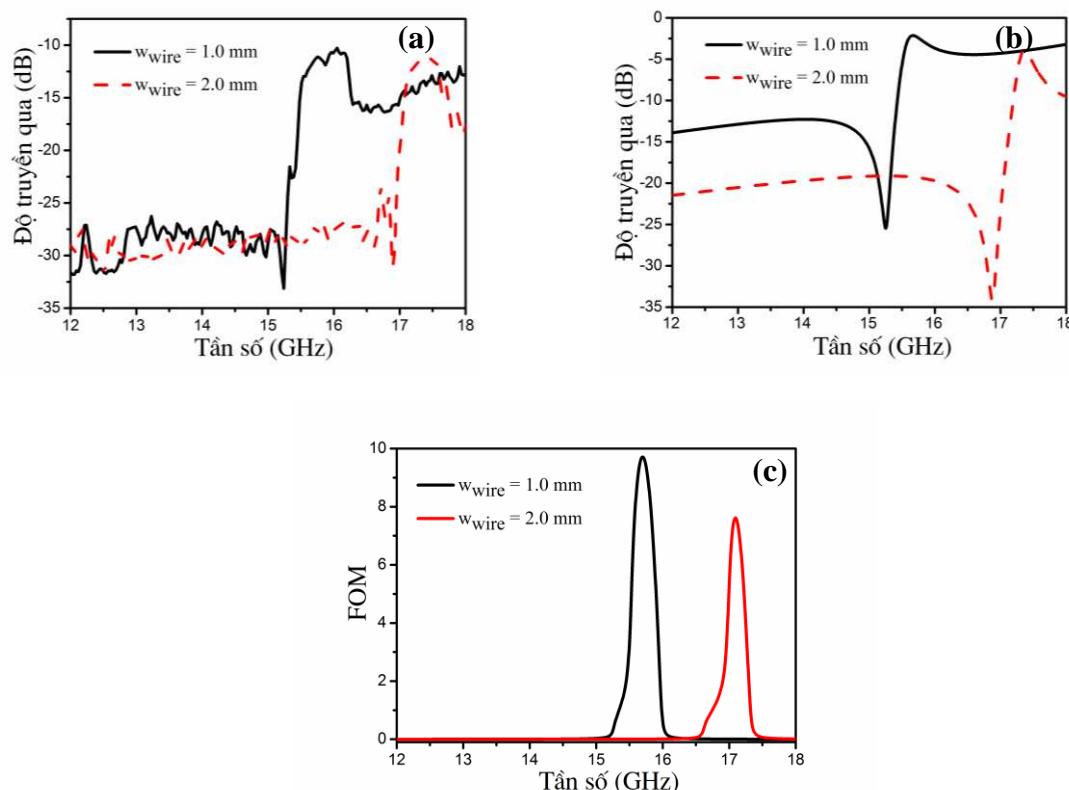
**Hình 3.15.** Phổ truyền qua (a) thực nghiệm (b) mô phỏng và các kết quả tính toán (c)độ điện thẩm (d) độ từ thẩm (e) chiết suất và hệ số phẩm chất (FOM) của cấu trúc FN có  $w_{\text{wire}} = 1.0 \text{ mm}$ ,  $l_{\text{slab}} = 5.5 \text{ mm}$ ,  $w_{\text{slab}}$  thay đổi từ 4.5 đến 6.5 mm.

tần số có chiết suất âm dịch về phía tần số thấp. Sự ảnh hưởng của độ tổn hao phụ thuộc vào tham số này được đánh giá thông qua hệ số phẩm chất (FOM) từ các kết quả tính toán phần thực và phần ảo của chiết suất  $n$ . **Hình 3.15(f)** minh họa kết quả nghiên cứu sự phụ thuộc FOM vào chiều rộng  $w_{\text{slab}}$  của tấm. Kết quả thể hiện tại giá trị  $w_{\text{slab}} = 6.5 \text{ mm}$ , hệ số FOM có giá trị xấp xỉ 10 và độ bán rộng lớn nhất. Điều này

có được là do hưởng ứng từ mạnh nhất ở giá trị  $w_{\text{slab}} = 6.5 \text{ mm}$  [quan sát trên [đồ thị 3.15 \(d\)](#)].

Để tiếp tục tối ưu hóa cấu trúc cho hệ số phẩm chất cao, chiều rộng được giữ cố định  $w_{\text{slab}} = 6.5 \text{ mm}$ , độ rộng  $w_{\text{wire}}$  thay đổi từ 1.0 mm đến 2.0 mm. [Hình 3.16\(a\) và \(b\)](#) lần lượt là phô truyền qua thực nghiệm và mô phỏng của cấu trúc dạng lưới phụ thuộc vào độ rộng  $w_{\text{wire}}$ . Kết quả quan sát cho thấy, đỉnh thể hiện tính chiết suất âm của cấu trúc FN phụ thuộc rất mạnh vào chiều rộng của thanh kim loại liên tục và đỉnh LH dịch tới tần số cao khi tăng  $w_{\text{wire}}$ . Điều này có thể được giải thích dựa trên mô hình mạch LC với tần số cộng hưởng từ của cấu trúc FN trình bày trong chương I. [Hình 3.16\(c\)](#) xác nhận tại giá trị  $w_{\text{wire}} = 1.0 \text{ mm}$ , hệ số FOM lớn nhất xấp xỉ 10 và có xu hướng giảm khi  $w_{\text{wire}}$  tăng.

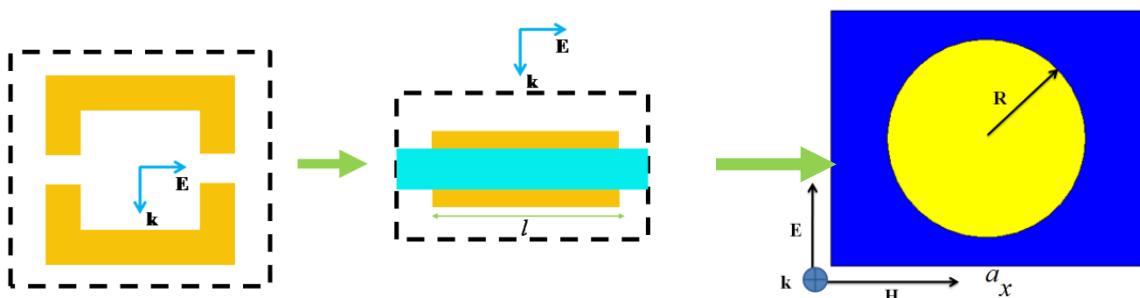
Như vậy, các kết quả trên cho thấy mối liên quan giữa chiều rộng của tẩm kim loại ( $w_{\text{slab}}$ ) và chiều rộng của dây kim loại liên tục ( $w_{\text{wire}}$ ) đóng vai trò rất quan trọng để đạt được tính chiết suất âm với độ truyền qua cao. Độ phẩm chất FOM = 10 là giá trị cao nhất trong các mẫu đã chế tạo được sử dụng cấu trúc FN.



**Hình 3.16.** Phô truyền qua (a) thực nghiệm (b) mô phỏng và (c) hệ số phẩm chất (FOM) của cấu trúc FN có  $w_{\text{slab}} = 6.5 \text{ mm}$ ,  $l_{\text{slab}} = 5.5 \text{ mm}$ ,  $w_{\text{wire}}$  thay đổi từ 1.0 đến 2.0 mm.

### 3.5. Vật liệu Meta có chiết suất âm không phụ thuộc vào phân cực

Có hai cấu trúc rất quen thuộc được sử dụng để tạo ra độ từ thẩm âm, đó là cấu trúc SRR và cấu trúc CWP. Trong đó, cấu trúc CWP có một số ưu điểm rõ rệt so với cấu trúc SRR truyền thống. Hình dạng của cấu trúc CWP đơn giản hơn rất nhiều so với SRR, đặc biệt trong trường hợp vectơ sóng điện từ  $\mathbf{k}$  chiếu vuông góc với mặt phẳng mẫu và từ trường  $\mathbf{H}$  vuông góc với mặt bên của CW. Với phân cực như vậy chỉ cần một lớp cấu trúc là có thể thu được độ từ thẩm âm. Tuy nhiên, vùng có từ thẩm âm do cấu trúc này tạo ra phụ thuộc mạnh vào sự phân cực của sóng điện từ chiếu đến [28]. Để khắc phục nhược điểm này, dựa trên cấu trúc CWP, với biến đổi nhỏ, cấu trúc cặp đĩa (dish pair – DP) được thiết kế.

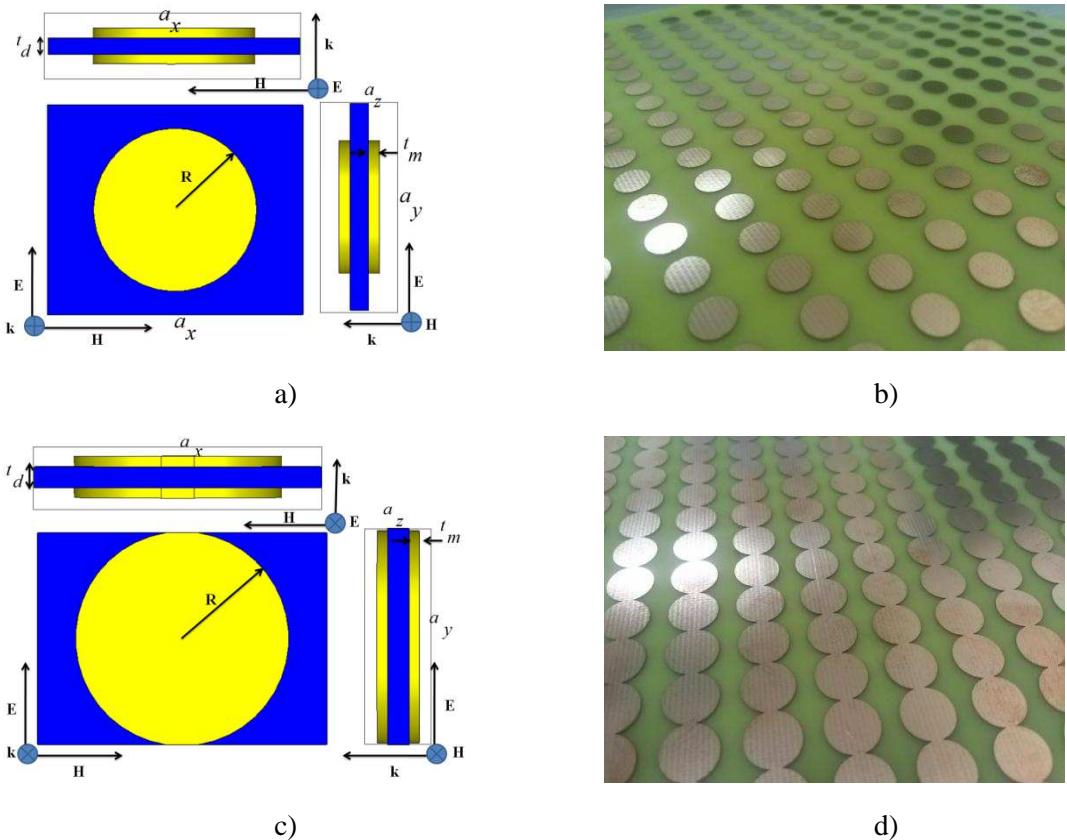


**Hình 3.17.** Quá trình biến đổi vật liệu Meta từ cấu trúc SRR sang CWP

và đến DP

Các mẫu có cấu trúc DP và DN được chế tạo sử dụng tẩm mạch in với lớp đồng (có chiều dày  $t_m = 0.036$  mm) được phủ ở hai mặt, giữa là lớp điện môi có chiều dày  $t_d = 0.4$  mm, độ điện thẩm  $\epsilon = 4.1$ . Hằng số mạng theo các trục  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  và bán kính hình tròn lần lượt là  $a_x = 11$  mm,  $a_y = 8$  mm,  $R = 3$  mm. Hình 3.18(b) và 3.18(d) lần lượt là mẫu DP và DN chế tạo được.

Quá trình biến đổi cấu trúc từ SRR đến cấu trúc DP được trình bày trên [hình 3.17](#). Mục đích cải tiến của cấu trúc DP là sử dụng tính đối xứng của hình tròn để tạo ra sự đẳng hướng (không phụ thuộc vào phân cực) đối với sóng điện từ chiếu đến. Đặc biệt hơn, trong nghiên cứu này, sử dụng những ưu điểm về tính đối xứng của cấu trúc DP, kết hợp với các dây liên tục được tạo ra đơn giản bằng cách mở rộng bán kính hình tròn cho đến khi các hình tròn liên tiếp chạm vào nhau, để tạo ra cấu trúc lưới đĩa (dishnet – DN) có chiết suất âm. Ô cơ sở và các tham số cấu trúc của vật liệu Meta có cấu trúc cặp đĩa và lưới đĩa được chỉ ra lần lượt trên [hình 3.18\(a\)](#) và [3.18\(c\)](#).

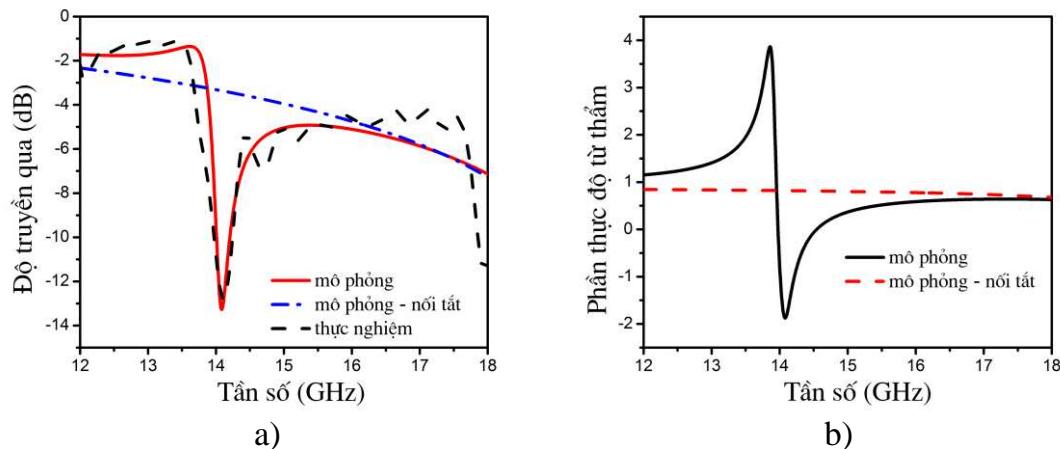


**Hình 3.18.** a) Ô cơ sở của cấu trúc cặp đĩa (DP), b) Mẫu chế tạo có cấu trúc cặp đĩa, c) Ô cơ sở của cấu trúc lưỡi đĩa (DN), d) Mẫu chế tạo có cấu trúc lưỡi đĩa. Các tham số cấu trúc  $a_x = 11$  mm,  $a_y = 8$  mm,  $t_d = 0.4$  mm,  $t_m = 0.036$  mm,  $R=3$  mm đối với cấu trúc DP và  $R = 4.05$  mm đối với cấu trúc DN.

### 3.5.1. Vật liệu Meta có độ từ thẩm âm dựa trên cấu trúc cặp đĩa

Các kết quả nghiên cứu trước đây với cấu trúc SRR và CWP cho thấy khi chúng tương tác với sóng điện từ đều xảy ra hai cộng hưởng khác nhau: cộng hưởng từ và cộng hưởng điện như đã trình bày ở trên. Do DP là một cấu trúc biến đổi của CWP nên hoàn toàn có khả năng thu được các vùng có độ từ thẩm âm và điện thẩm âm khi tương tác với sóng điện từ. Tuy nhiên, do việc tạo ra vùng có độ từ thẩm âm còn rất nhiều hạn chế và khó khăn so với việc tạo ra vùng có độ điện thẩm âm nên nó được quan tâm nghiên cứu nhiều hơn. Cũng chính vì lý do đó nên trong nghiên cứu này, giống với cấu trúc CWP, đề tài tập trung đi sâu nghiên cứu vùng có độ từ thẩm âm của cấu trúc DP trong dải tần 12 GHz – 18 GHz với mục đích chế tạo vật liệu chiết suất âm không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ. Trên [hình 3.19\(a\)](#) là kết quả mô phỏng và thực nghiệm phổ truyền qua của cấu trúc cặp đĩa. Dễ dàng có thể nhận thấy rằng, kết quả mô phỏng rất khớp với kết quả thực nghiệm, và có một vùng không truyền qua ở tần số 14.2 GHz. Để xác định vùng không

truyền qua này là cộng hưởng từ ( $\mu < 0$ ), hai đầu cặp đĩa đã được nối tắt (connected dish pair – CDP) để loại bỏ tụ điện C. Kết quả cho thấy vùng không truyền qua do cộng hưởng trong cấu trúc DP được thay bằng đường truyền qua trong cấu trúc nối tắt (hình 3.19(a)). Theo các kết quả nghiên cứu đã trình bày ở trên, có thể khẳng định vùng không truyền qua này của DP là do cộng hưởng từ. Mặt khác, kết quả tính toán phần thực độ từ thẩm thông qua các giá trị mô phỏng đối với cấu trúc DP và CDP trình bày trên hình 3.19(b) đã khẳng định lại cộng hưởng tại 14.2 GHz là cộng hưởng từ.



**Hình 3.19.** a) Phổ truyền qua thực nghiệm, mô phỏng của cấu trúc DP và cấu trúc DP bị nối tắt.b) Phần thực độ từ thẩm của cấu trúc DP và DP bị nối tắt tính toán từ các số liệu mô phỏng

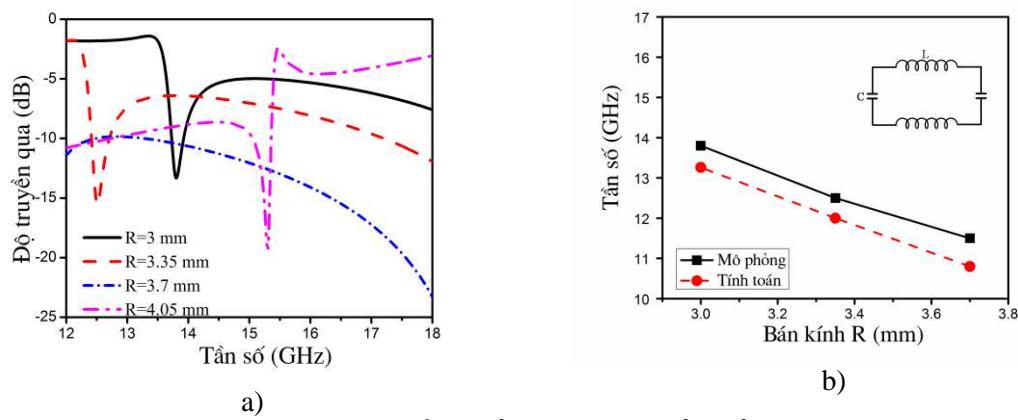
Do cấu trúc DP là cấu trúc biến đổi của cấu trúc CWP nên mô hình mạch điện LC cho hai cấu trúc này giống nhau và được biểu diễn như trên hình 1.24. Sự khác nhau ở đây chỉ ở dạng hình học của thành phần kim loại cấu thành lên vật liệu với một bên là hình chữ nhật và một bên là đĩa tròn. Chính vì vậy, bằng cách biến đổi và tính toán tương tự như cấu trúc CWP, chúng tôi đã tính toán tần số cộng hưởng từ cho cấu trúc DP phụ thuộc vào các tham số cấu trúc như sau:

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} = \frac{\sqrt{t_d}}{\pi^2 R \sqrt{c_1 \epsilon \mu (t_d + 2t_m)}} \quad (3.1)$$

Công thức (3.1) cho thấy, tần số cộng hưởng từ phụ thuộc vào các tham số cấu trúc như chiều dày lớp điện môi  $t_d$  và kim loại  $t_m$ , độ điện thẩm của lớp điện môi  $\epsilon$ , tỉ số diện tích có điện tích phân bố trên diện tích toàn bộ của đĩa  $c_1$ , bán kính  $R$  của đĩa. Các kết quả khảo sát sử dụng hai phương pháp mô phỏng và tính toán (dựa

theo công thức 3.1) để tìm sự phụ thuộc của tần số này vào bán kính R được đưa ra trên [hình 3.20\(b\)](#). Các kết quả mô phỏng khá trùng khớp với các kết quả tính toán và đều cho thấy tần số cộng hưởng từ giảm khi bán kính R tăng. Kết quả này gợi ý rằng, bằng cách điều khiển các tham số cấu trúc, đặc biệt là bán kính R ta có thể thu được vùng có độ từ thẩm âm mong muốn.

Ngoài ra, kết quả nghiên cứu phổ truyền qua mô phỏng của cấu trúc DP phụ thuộc vào R trên [hình 3.20\(a\)](#) còn cho thấy khi bán kính R tăng từ 3 mm đến 4.05 mm, tại vị trí  $R = 4.05$  mm đường truyền qua có dáng điệu khác hẳn so với các đường còn lại. Cụ thể là xuất hiện một vùng truyền qua quanh tần số 15.3 GHz. Sự xuất hiện của vùng truyền qua này sẽ được giải thích trong phần 3.5.2.

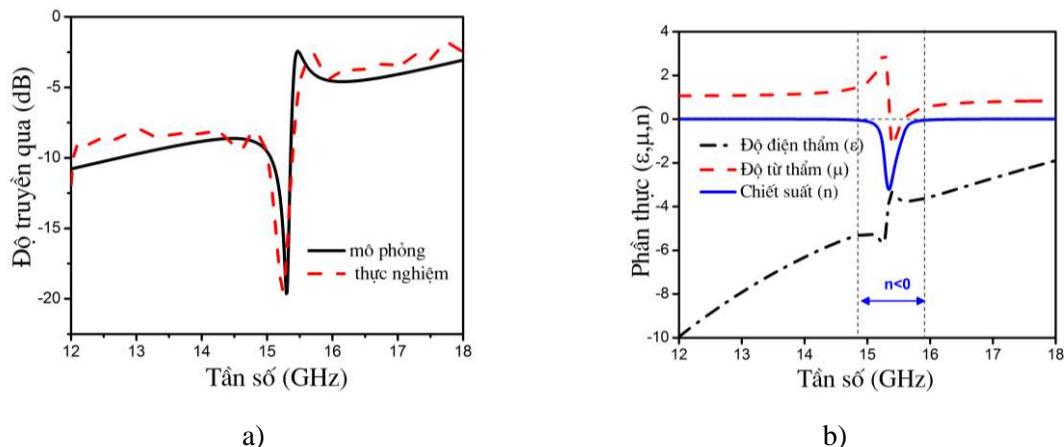


**Hình 3.20.** Sự phụ thuộc a) phổ truyền qua và b) tần số cộng hưởng từ qua mô phỏng và tính toán vào bán kính R của đĩa trong cấu trúc cặp đĩa  $a_x = 11$  mm,  $a_y = 8$  mm (hình nhỏ nằm trong hình b) là mô hình mạch điện LC của cấu trúc DP)

### 3.5.2. Vật liệu Meta có chiết suất âm dựa trên cấu trúc lưới đĩa

Để biết rõ nguyên nhân xuất hiện đỉnh truyền qua tại tần số 15.3 GHz khi  $R = 4.05$  mm như nói ở trên, trước tiên chúng ta tìm hiểu sự thay đổi về mặt cấu trúc tại vị trí R này. Để dàng nhận thấy rằng, khi  $R = 4.05$  mm, hai đĩa tròn liên tiếp sẽ chạm vào nhau theo phương E của điện trường. Cấu trúc cặp đĩa DP tạo ra độ từ thẩm âm ([hình 3.20\(a\)](#)) khi R thay đổi từ 3 mm đến 3.7 mm) sẽ được chuyển thành cấu trúc lưới đĩa DN ([hình 3.18\(c\)](#)) khi  $R = 4.05$  mm). Khi các đĩa tròn chạm vào nhau, ngoài đĩa tròn, cấu trúc DN còn tạo ra các dây kim loại liên tục dọc theo trục y(E). Các dây kim loại này đóng vai trò là thành phần điện tạo ra độ điện từ. Dải tần có độ điện từ thẩm âm này trùng với dải tần độ từ thẩm âm do thành phần từ DP sinh ra, kết quả là thu được một vùng chiết suất âm. Các kết quả tính toán các tham số hiệu dụng: độ điện từ thẩm, từ thẩm và chiết suất của cấu trúc DN này được trình bày trên [hình 3.21\(b\)](#). [Hình 3.21\(b\)](#) cho thấy, các kết quả tính toán hoàn toàn

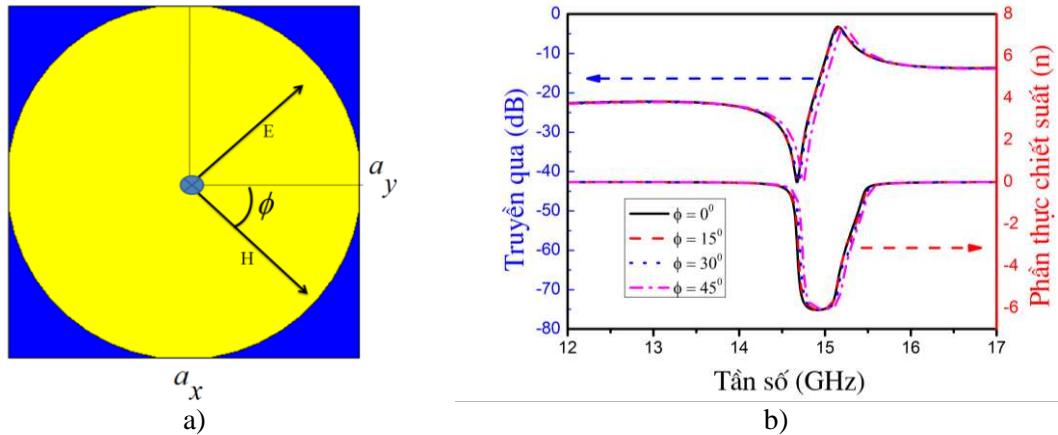
phù hợp với các nhận định trên. Quanh tần số 15.3 GHz độ từ thâm và điện thâm đều có giá trị âm nên chiết suất thu được là âm. Điều này giải thích cho việc quan sát thấy một vùng truyền qua có đỉnh ở 15.3 GHz trong phô truyền qua của cấu trúc DN ( $R = 4.05$  mm) như đã nói ở trên. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm của cấu trúc DN này được trình bày trên [hình 3.21\(a\)](#). Quan sát hình vẽ ta thấy kết quả thực nghiệm khá trùng với kết quả thu được từ mô phỏng.



**Hình 3.21.** a) Phô truyền qua thực nghiệm và mô phỏng và b) Phản thực của độ điện thâm, độ từ thâm và chiết suất tính toán qua số liệu mô phỏng của cấu trúc DN có  $a_x = 11$  mm,  $a_y = 8$  mm,  $R = 4.05$  mm.

Tuy nhiên, cấu trúc DN được trình bày và khảo sát ở trên chưa tối ưu để đạt được chiết suất âm với mọi góc phân cực của sóng điện từ. Hằng số mạng theo các trục  $a_x$  và  $a_y$  khác nhau nên sự đối xứng chỉ thỏa mãn với thành phần từ (các đĩa tròn), còn thành phần điện (các dây liên tục do các hình tròn tiếp xúc nhau tạo ra) chưa được đáp ứng. Để tạo ra cấu trúc không phụ thuộc vào phân cực, thì cả hai thành phần này đều phải đối xứng với các thành phần của sóng điện từ ( $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ). Điều này được thực hiện đơn giản khi cho các hằng số mạng bằng nhau  $a_x = a_y$ . [Hình 3.22\(a\)](#) là ô cơ sở của cấu trúc DN có  $a_x = a_y$ . Các kết quả nghiên cứu sự phụ thuộc vào phân cực sóng điện từ của phô truyền qua và phản thực của chiết suất với mẫu DN có  $a_x = a_y = 8$  mm được trình bày trên [hình 3.22\(b\)](#). Kết quả cho thấy, tính chất chiết suất âm đạt được quanh vùng 15 GHz và phô truyền qua của cấu trúc DN không thay đổi khi góc phân cực khi thay đổi từ  $0^\circ$  đến  $45^\circ$ . Do tính chất đối xứng nên kết quả này không thay đổi với mọi góc phân cực của thành phần  $\mathbf{E}$  và  $\mathbf{H}$  của sóng điện từ chiếu tới. Đây là một kết quả quan trọng để tiến gần đến các ứng dụng thực tế của hiện tượng chiết suất âm khi không phụ thuộc phân cực. Nhờ ưu điểm này mà cấu trúc DP và DN được sử dụng trong nghiên cứu điều

khiến tần số làm việc của vật liệu Meta bằng tác động ngoại vi, được trình bày trong chương V của đề tài.



**Hình 3.22.** a) Ô cơ sở của cấu trúc DN  $a_x = a_y$  và góc quay phân cực. b) Phổ truyền qua mô phỏng của cấu trúc DN  $a_x = a_y = 8\text{ mm}$  phụ thuộc vào góc phân cực.

Như vậy, trong chương này đề tài đã nghiên cứu và phân tích tìm ra ưu nhược điểm của một số cấu trúc Meta có chiết suất âm như CWP, CB, FN và DN. Các nghiên cứu trong chương này rất quan trọng cho việc lựa chọn các cấu trúc phù hợp cho từng nghiên cứu tiếp theo của đề tài.

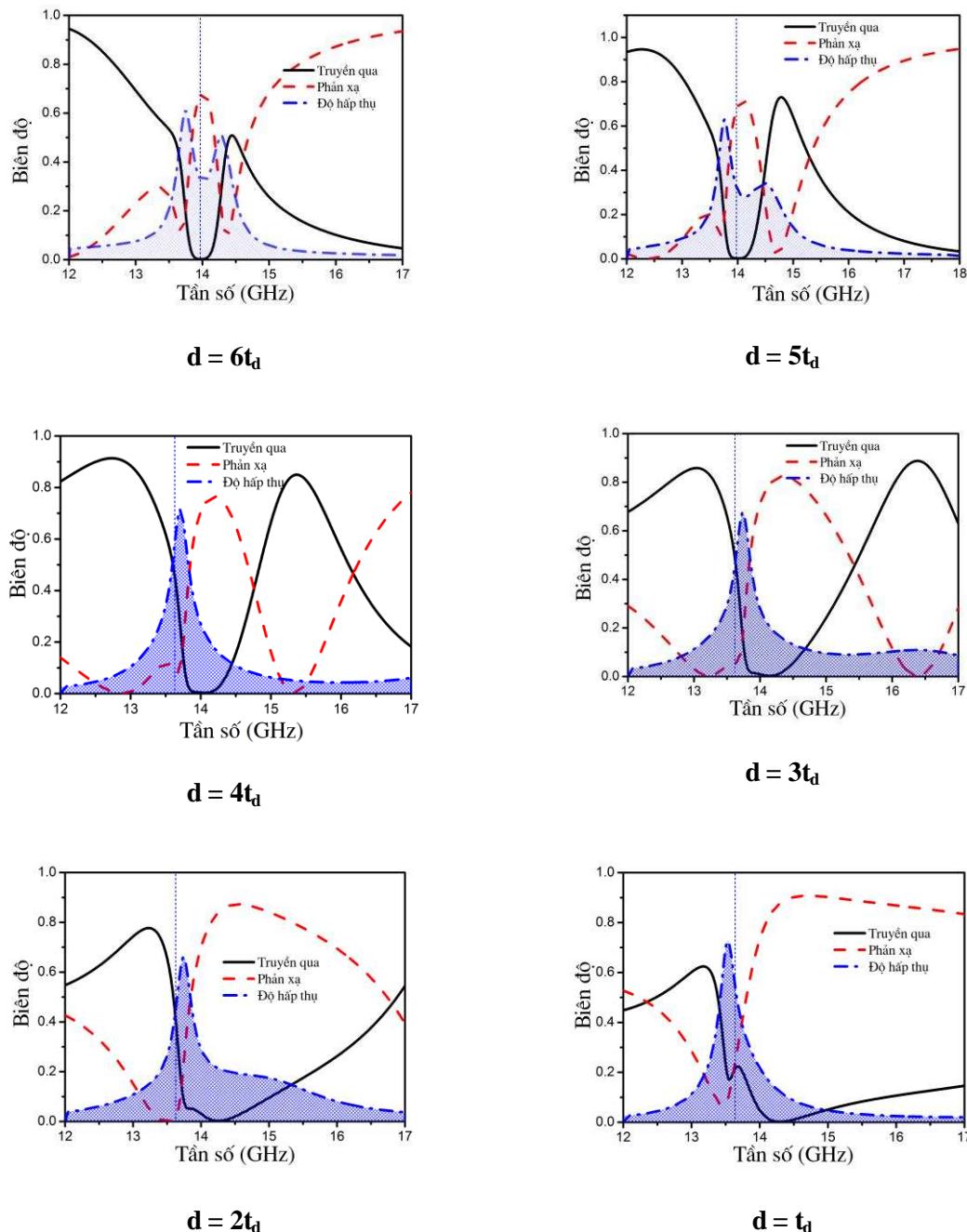
## PHẦN II. CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU MỞ RỘNG TẦN SỐ LÀM VIỆC CỦA VẬT LIỆU META CÓ CHIẾT SUẤT ÂM

Nhìn chung, dải tần số hiện chiết suất âm của vật liệu Meta thường rất hẹp vì dựa trên tính chất cộng hưởng của vật liệu. Để có thể ứng dụng vật liệu Meta có chiết suất âm một cách rộng rãi trong thực tế, việc nghiên cứu mở rộng vùng tần số hoạt động đóng vai trò rất quan trọng. Để mở rộng dải tần số làm việc của vật liệu, một trong những cách hiệu quả đó là kết hợp vùng từ thấm âm rộng với vùng điện thấm âm rộng trên cùng một dải tần số. Vùng điện thấm âm rộng dễ dàng đạt được bằng cách sử dụng tần số plasma thấp của môi trường gồm các lưới dây kim loại. Trong khi đó vùng từ thấm âm rộng được xây dựng chủ yếu bằng cách tích hợp các cấu trúc cộng hưởng đơn lẻ trong một ô cơ sở, từ đó sẽ thu được vùng cộng hưởng từ riêng kẽ tiếp nhau [35], [11], [27], [43], [127]. Hạn chế lớn nhất của phương pháp này là phá vỡ tính đối xứng trong cấu trúc, sự tương tác mạnh mẽ giữa các cộng hưởng liền kề và đòi hỏi sự điều chỉnh khắt khe về các tham số cấu trúc nên rất khó chế tạo mẫu hoạt động ở vùng tần số cao. Hơn nữa, do sự tích hợp của nhiều yếu tố cộng hưởng trên một ô cơ sở nên kích thước lớn, các điều kiện để đảm bảo lý thuyết môi trường hiệu dụng có thể bị vi phạm và các hiệu ứng này sẽ rất khó để đánh giá, kiểm nghiệm tính xác thực của nó. Gần đây, một hiệu ứng thú vị được các nhà nghiên cứu tìm thấy trong vật liệu Meta là sự lai hóa plasmon. Sự lai hóa plasmon có thể áp dụng để thiết kế và chế tạo Meta có tần số làm việc rộng và có thể khắc phục các hạn chế vừa nêu. Trong các kết quả nghiên cứu của chương này, giản đồ lai hóa bậc một, bậc hai áp dụng cho cấu trúc CWP một lớp, hai lớp để mở rộng vùng cộng hưởng từ cho vùng có độ từ thấm âm rộng được nghiên cứu. Sau đó, kết hợp kết quả mở rộng vùng từ thấm âm với vùng điện thấm âm nằm dưới tần số plasma của lưới dây kim loại để mở rộng vùng chiết suất âm.

### **4.1. Mở rộng vùng độ từ thấm âm sử dụng cấu trúc CWP hai lớp**

Dựa vào mô hình lai hóa bậc hai như đã giới thiệu ở phần tổng quan, các kết quả khảo sát sự phụ thuộc của phổ truyền qua, phản xạ và độ hấp thụ của hệ CWP hai lớp được thực hiện. Trong nghiên cứu này, các hằng số mạng theo các trục tọa độ x (phương từ trường  $\mathbf{H}$ ) là  $a_x = 3.5$  mm và theo trục y (phương của điện trường  $\mathbf{E}$ ) là  $a_y = 7.0$  mm. Lớp điện môi được làm bằng FR4 với độ điện thấm là 4.3. Chiều dài 1 và chiều rộng của các CWs lần lượt là 5.5 và 1,0 mm. Độ dày lớp điện môi giữa hai CWs của CWPs và khoảng cách giữa hai lớp CWP lần lượt là  $t_d$  và d. Điều kiện biên tuần hoàn được áp dụng theo trục x và y. Sự phân cực của sóng điện từ giống như

miêu tả trên hình 1.24. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phô truyền qua, phản xạ và độ hấp thụ của hệ 2 CWP biểu diễn trên hình 4.1. Kết quả cho thấy, khi  $d$  giảm từ  $6t_d$  xuống  $t_d$ , các phô này thay đổi một cách đáng kể. Khi khoảng cách  $d$  lớn, tương tác nội tại chiếm ưu thế. Do đó, phô truyền qua chỉ quan sát thấy



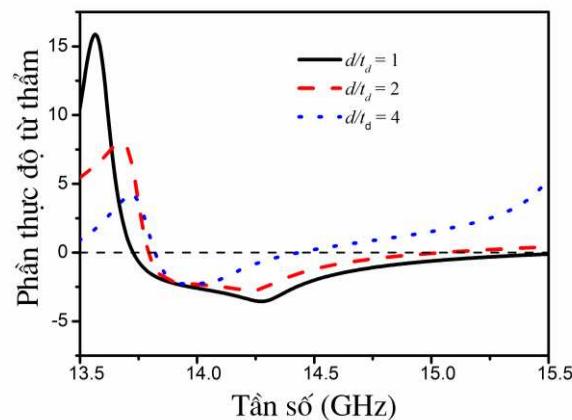
**Hình 4.1.** Phô truyền qua, phản xạ và độ hấp thụ phụ thuộc vào khoảng cách giữa 2 CWP.

1 đỉnh cộng hưởng tương ứng với mode từ thông thường ở 13.8 GHz. Khi khoảng cách  $d$  giảm dần, tương tác ngoài mạnh dần lên và mode cộng hưởng từ ban đầu dần

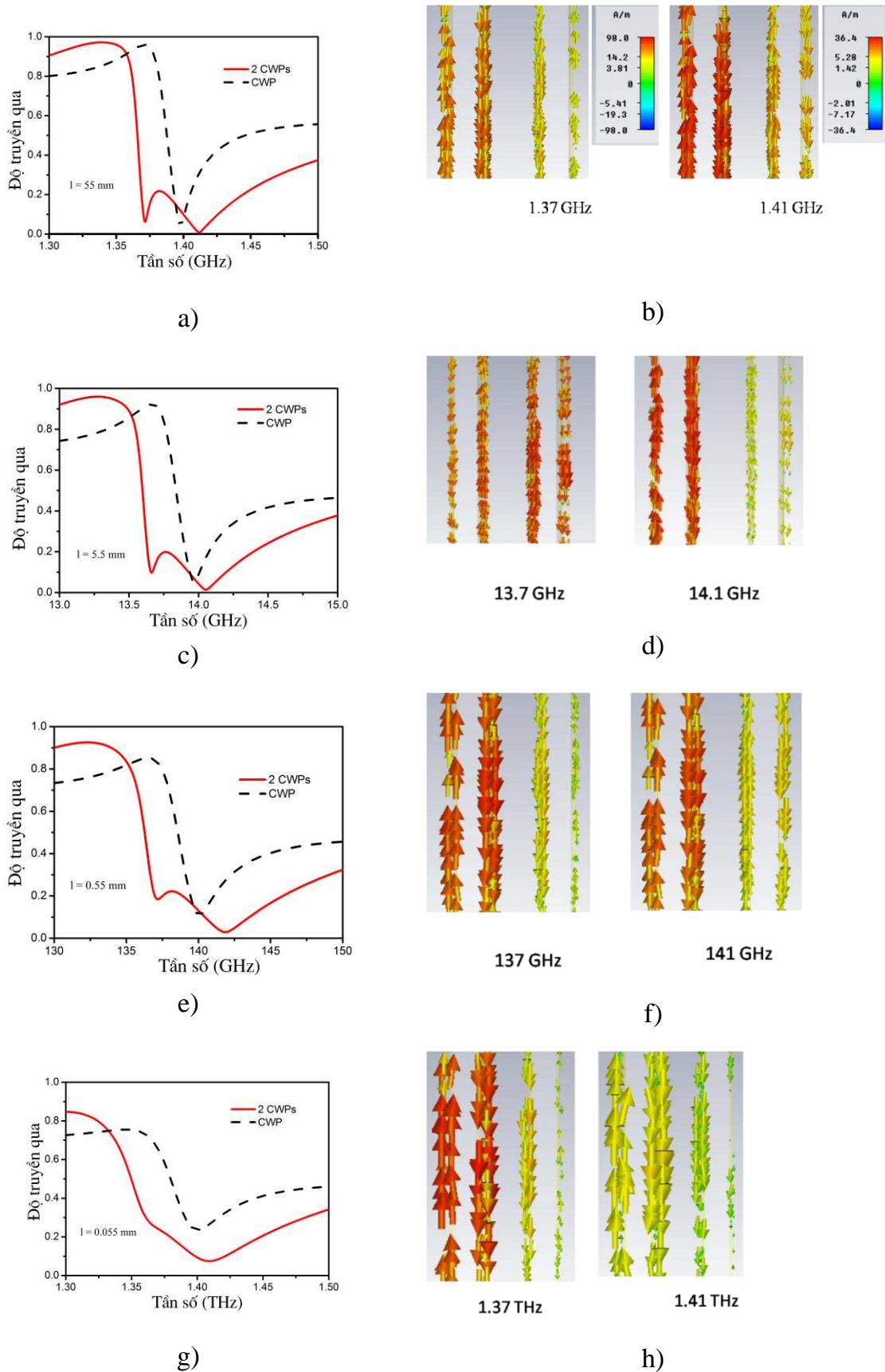
dàn rộng ra và cuối cùng bị tách thành 2 mức riêng biệt khi  $d = t_d$ . Hình 4.1 cũng cho thấy độ hấp thụ đạt giá trị lớn nhất tại  $d = 4t_d$ . Hiện tượng này có thể được giải thích là tại  $d = 4t_d$ , hiệu ứng tách tần số cộng hưởng trở nên đáng kể và bắt đầu xảy ra. Vị trí này là vị trí chòng chập của 2 cộng hưởng và do đó độ tổn hao có thể được xem như là tổng của các mất mát ở hai đỉnh cộng hưởng.

Do 2 mode cộng hưởng mới có nguồn gốc là mode từ ban đầu, hai đỉnh cộng hưởng đều có khả năng tạo ra độ từ thâm âm. Kết quả tính toán giá trị của độ từ thâm trên hình 4.2 đã xác nhận nhận định này. Kết quả cho thấy khi  $d$  giảm từ  $4t_d$  xuống  $t_d$ , độ rộng vùng từ thâm âm tăng từ 0.59 GHz lên thành 1.7 GHz. Các kết quả này phù hợp với các kết quả đã công bố trong tài liệu [116]. Tuy nhiên, trong tài liệu [116] không khảo sát ở một dải tần cụ thể nào, ở đây chúng tôi khảo sát quanh vùng tần số 12 GHz - 18 GHz, tương ứng với vùng tần số dùng kết quả mở rộng vùng từ thâm âm này để mở rộng vùng chiết suất âm.

Ngoài ra, các kết quả nghiên cứu sự mở rộng vùng từ thâm âm phụ thuộc vào khoảng cách hai lớp  $d$  và chiều dày lớp điện môi  $t_d$  cũng đã được nghiên cứu rất chi tiết bằng mô phỏng và thực nghiệm trong tài liệu [117]. Tương tự các kết quả nghiên cứu ở trên, tỉ số  $d/t_d$  là yếu tố quyết định cường độ lai hóa trong hệ CWP hai lớp. Các hướng ứng điện từ của cấu trúc CWP hai lớp được thể hiện qua tương tác nội (tương tác giữa hai CW trong một lớp) và ngoại (tương tác giữa hai lớp CWP). Độ từ thâm rộng chỉ được kích hoạt khi hai tương tác này có năng lượng có thể so sánh với nhau. Cụ thể, vùng có từ thâm được mở rộng ra khi giảm  $d$  hay tăng  $t_d$ .



**Hình 4.2.** Sự phụ thuộc của độ từ thâm vào tỉ số  $d/t_d$  của 2 CWP.



**Hình 4.3.** Phô truyền qua và phân bố năng lượng từ mô phỏng của cấu trúc CWP hai lớp hoạt động ở các vùng tần số khác nhau.

Ngoài khả năng ứng dụng trong vùng GHz, vật liệu Meta có dải tần hoạt động rộng ở vùng tần số THz cũng thu hút rất nhiều sự quan tâm nghiên cứu [140], [107], [117]. Tuy nhiên ở thời điểm hiện tại điều này vẫn còn là một thách thức lớn. Một cách tiếp cận chung để thu được hiệu ứng tương tự ở vùng vi sóng với cấu trúc CWP hai lớp cho vùng quang học đó là giảm kích thước của tất cả các thông số hình học so với thiết kế ban đầu. Phổ truyền qua và phân bố năng lượng từ mô phỏng của cấu trúc CWP đơn lớp và hai lớp theo các vùng tần số khác nhau được trình bày trong hình 4.3. Trong các kết quả mô phỏng này, toàn bộ các kích thước các tham số của cấu trúc CWP hai lớp ban đầu (bao gồm cả các hằng số mạng ax, ay, chiều dài, chiều rộng của CW và chiều dày lớp điện môi) được tăng lên 10 lần hoặc giảm 10 lần và 100 lần để có thể thu được các vùng tần số giảm đi 10 lần hoặc tăng lên 10 lần và 100 lần tương ứng. Để đơn giản, ta bỏ qua ảnh hưởng của lớp đế và độ điện thẩm của lớp điện môi là không thay đổi. Đối với tất cả các hệ số kích thước lựa chọn, sự lai hóa vẫn được quan sát thấy rõ ràng trên hình 4.3 và vùng cộng hưởng của CWP hai lớp mở rộng đáng kể so với CWP đơn lớp. Dòng điện cảm ứng trong hai lớp cấu trúc đều là các dòng đối song, xác minh tính chất từ của cộng hưởng. Mặt khác, các quan sát cho thấy hiệu ứng tách vạch kém hiệu quả hơn khi đưa lên vùng tần số cao, điều này được giải thích do động năng của electron tự do lớn ở vùng tần số cao [128], [55] gây ra tổn hao lớn hơn. Chính vì vậy hiệu quả tách vạch càng kém rõ rệt khi tăng vùng tần số hoạt động. Như vậy, ngoài việc phụ thuộc vào tỷ số  $d/t_d$ , như đã khảo sát ở trên, thì cường độ lai hóa và sự tách vạch còn phụ thuộc vào sự tổn hao của vật liệu. Chi tiết việc nghiên cứu sự phụ thuộc này sẽ được trình bày trong mục 4.2. Như vậy, các nghiên cứu cộng hưởng ở tần số cao có nhiều thách thức không chỉ vì do kích thước của các tham số hình học giảm nên đòi hỏi công nghệ cao (công nghệ nano) mà còn do tổn hao lớn ở vùng quang học.

#### **4.2. Ảnh hưởng của độ tổn hao lên sự tách đỉnh cộng hưởng từ lai hóa trong cấu trúc CWP 2 lớp.**

Trong nghiên cứu tách cộng hưởng từ để mở rộng vùng từ thẩm âm ở trên, một điều quan trọng là việc tách cộng hưởng từ  $|\omega\rangle$  chỉ xuất hiện khi năng lượng

tương tác ngoài (tương tác giữa hai lớp CWP) mạnh và có thể so sánh với năng lượng tương nội (tương tác của hai CWs trong một lớp). Điều kiện này thỏa mãn khi khoảng cách giữa hai lớp CWP có giá trị phù hợp. Trong các kết quả nghiên cứu ở trên cho thấy giá trị này thường nhỏ hơn hoặc bằng với độ dày lớp điện môi. Tuy nhiên, trong kết quả nghiên cứu tiếp theo của đề tài cho thấy sự tách cộng hưởng từ này còn phụ thuộc vào sự tổn hao của các vật liệu cấu thành lên vật liệu Meta. Khi các yếu tố mất mát trong cộng hưởng từ nhỏ thì sự tách mức sẽ xảy ra mạnh hơn.

Như chúng ta đã biết, nguyên nhân mất mát năng lượng trong vật liệu nói chung có thể được chia thành hai phần chính: phần mất mát ohmic và mất mát điện môi. Trong vật liệu Meta hoạt động ở vùng GHz, các kết quả nghiên cứu [1] cho thấy, mất mát chủ yếu thường là các vật liệu điện môi trong khi mất mát ohmic hầu như không có ảnh hưởng lên sự cộng hưởng. Vì vậy, chìa khóa để vật liệu Meta có độ tổn hao thấp là lớp điện môi. Bằng cách nghiên cứu đóng góp tổn hao của lớp điện môi, ta có thể ước tính ngưỡng mất mát nơi mà không tồn tại sự tách cộng hưởng từ. Đây cũng là mục đích nghiên cứu tiếp theo của đề tài.

Cấu trúc CWP hai lớp lựa chọn trong nghiên cứu này có các thông số hình học như trong phần 4.1 và sự phân cực điện từ như trong hình 1.24. Trong một ô cơ sở của một lớp CWP, các thanh CWs bằng đồng có chiều dày  $t_m = 0.036$  mm đặt ở hai bên, giữa là lớp điện môi có chiều dày  $t_d = 0.4$  mm. Chiều dài và chiều rộng của CWs lần lượt là  $l = 5.5$  và  $w = 1.0$  mm. Các hằng số mạng theo các hướng **H**, **E** là  $a_x, a_y$  được chọn là 3.5 mm và 7.0 mm, tương ứng.

Vật liệu điện môi có độ điện thẩm với các thành phần thực và ảo được biểu diễn như phương trình ( $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ ), trong đó  $\epsilon''$  là phần ảo của độ điện thẩm đặc trưng cho sự tổn hao trong vật liệu. Sự tổn hao này có thể giải thích do các điện tích bị giam giữ và sự phân cực của các lưỡng cực điện, dẫn đến sự mất mát năng lượng trong vật liệu. Thành phần  $\epsilon'$  là phần thực của độ điện thẩm. Hệ số tổn hao điện môi tang  $\delta$  được xác định bằng công thức:

$$\tan g\delta = (\omega\epsilon'' + \sigma) / \omega\epsilon' \quad (4.1)$$

Trong đó  $\omega$  là tần số sóng kích thích,  $\sigma$  là độ dẫn của vật liệu. Đối với vật liệu điện môi thì  $\sigma \approx 0$  nên phương trình (4.1) trở thành:

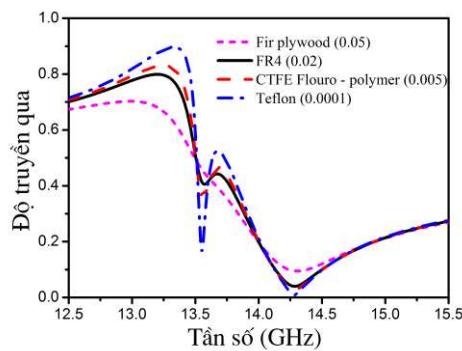
$$\tan g\delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (4.2)$$

Dựa trên cơ sở đó, chúng tôi thực hiện mô phỏng để nghiên cứu sự phụ thuộc của cường độ lai hóa vào hệ số tổn hao tang $\delta$  của lớp điện môi. Bảng 4.1 đưa ra hệ số tổn hao của các vật liệu điện môi phổ biến và phần thực độ điện thâm tương ứng của chúng.

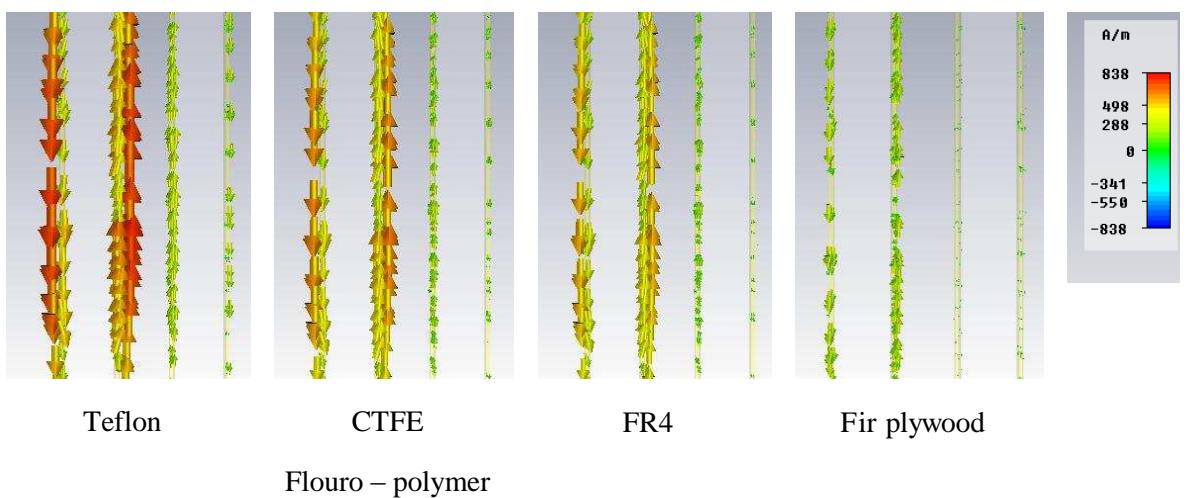
*Bảng 4.1. Hệ số tổn hao điện môi và phần thực độ điện thâm của một số vật liệu điện môi ở nhiệt độ phòng và quanh tần số 10 GHz [44],[90].*

Vật liệu	Hệ số tổn hao điện môi (tang $\delta$ )	Phần thực độ điện thâm
Teflon	0.0001	2.1
CTFE Floro-polymer	0.005	2.3
FR4	0.02	4.3
Fir plywood	0.05	1.5

Hình 4.4 trình bày phổ truyền qua mô phỏng của cấu trúc CWP hai lớp lai hóa theo các hệ số tổn hao điện môi của các vật liệu đề xuất trong bảng 4.1. Vì giá trị phần thực của các độ điện thâm không làm thay đổi sự đóng góp tổn hao ngoại trừ việc thay đổi tần số cộng hưởng do vậy để thuận lợi cho việc so sánh, tất cả các tính toán được thực hiện bằng cách lấy giá trị phần thực độ điện thâm là 4.3 (giá trị ứng với điện môi FR4 – vật liệu sử dụng làm lớp điện môi trong nghiên cứu mô phỏng và thực nghiệm của đề tài). Trong trường hợp vật liệu tổn hao thấp (Teflon), hai cộng hưởng từ bắt nguồn từ phép lai hóa plasmon được quan sát rõ ràng. Tuy nhiên, cường độ cộng hưởng giảm nhanh chóng khi hệ số tổn hao điện môi tăng từ 0.006 - 0.05 (từ CTFE Floro-polymer đến Fir plywood). Như có thể thấy, sự tách cộng hưởng gần như biến mất khi hệ số tổn hao điện môi là 0.05 (Fir plywood). Điều này có thể giải thích là khi tổn hao tăng lên, một lượng lớn năng lượng cộng hưởng sẽ chuyển thành các mất mát điện môi. Trong khi tổng năng lượng hấp thụ ở các tần số cộng hưởng là không thay đổi, nên việc tăng tổn hao điện môi đồng nghĩa với việc làm giảm năng lượng cộng hưởng.



**Hình 4.4.** Phổ truyền qua lai hóa của hai lớp CWP phụ thuộc vào các vật liệu điện môi có hệ số tổn hao khác nhau



**Hình 4.5.** Phân bố dòng bề mặt của cấu trúc lai hóa CWP hai lớp ở tần số  $|\omega_->$

( $f = 13.39 \text{ GHz}$ ) với các vật liệu điện môi khác nhau

Các năng lượng cộng hưởng có thể được hiểu một cách định tính thông qua cường độ của mật độ dòng bề mặt. Với mục đích này, mô phỏng phân bố của dòng bề mặt tại mode cộng hưởng thứ nhất  $|\omega_->$  ứng với các vật liệu điện môi khác nhau, được đưa ra trong hình 4.5. Có hai điểm chúng ta có thể nhận được từ mô phỏng trong hình 4.5. Thứ nhất, với tất cả các vật liệu điện môi được sử dụng, phân bố dòng bề mặt đều là đối song, điều này chỉ rõ cộng hưởng là cộng hưởng từ. Điểm thứ hai, quan trọng hơn, đó là cường độ của dòng bề mặt giảm đáng kể khi tăng hệ số tổn hao điện môi từ 0.001 (Teflon) đến 0.05 (Fir plywood). Với mật độ dòng bề mặt yếu hơn, sự cộng hưởng trở nên kém rõ rệt hơn. Hiện tượng tương tự (không chỉ ra ở đây) cũng được quan sát đối với mode cộng hưởng thứ hai  $|\omega_+>$ . Những kết quả này hoàn toàn phù hợp với lập luận của chúng tôi đã thảo luận trong hình 4.4.

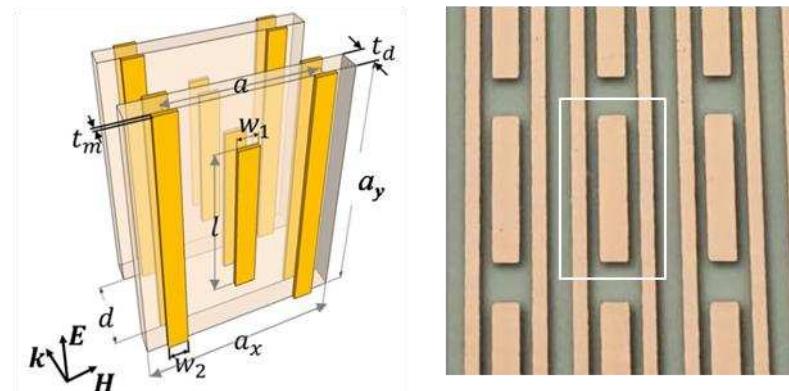
Các kết quả nghiên cứu này cho thấy, tính chất mở rộng vùng lai hóa của vật liệu Meta ngoài việc phụ thuộc vào tỷ số  $d/t_d$  còn rất nhạy với tổn hao điện môi của vật liệu sử dụng làm lớp đệm. Những kết quả này rất hữu ích cho việc tiến hành các thực nghiệm để thu được các hiệu ứng lai hóa của vật liệu Meta và các ứng dụng.

### 4.3. Mở rộng vùng chiết suất âm

#### 4.3.1. Mở rộng vùng chiết suất âm sử dụng cấu trúc kết hợp hai lớp

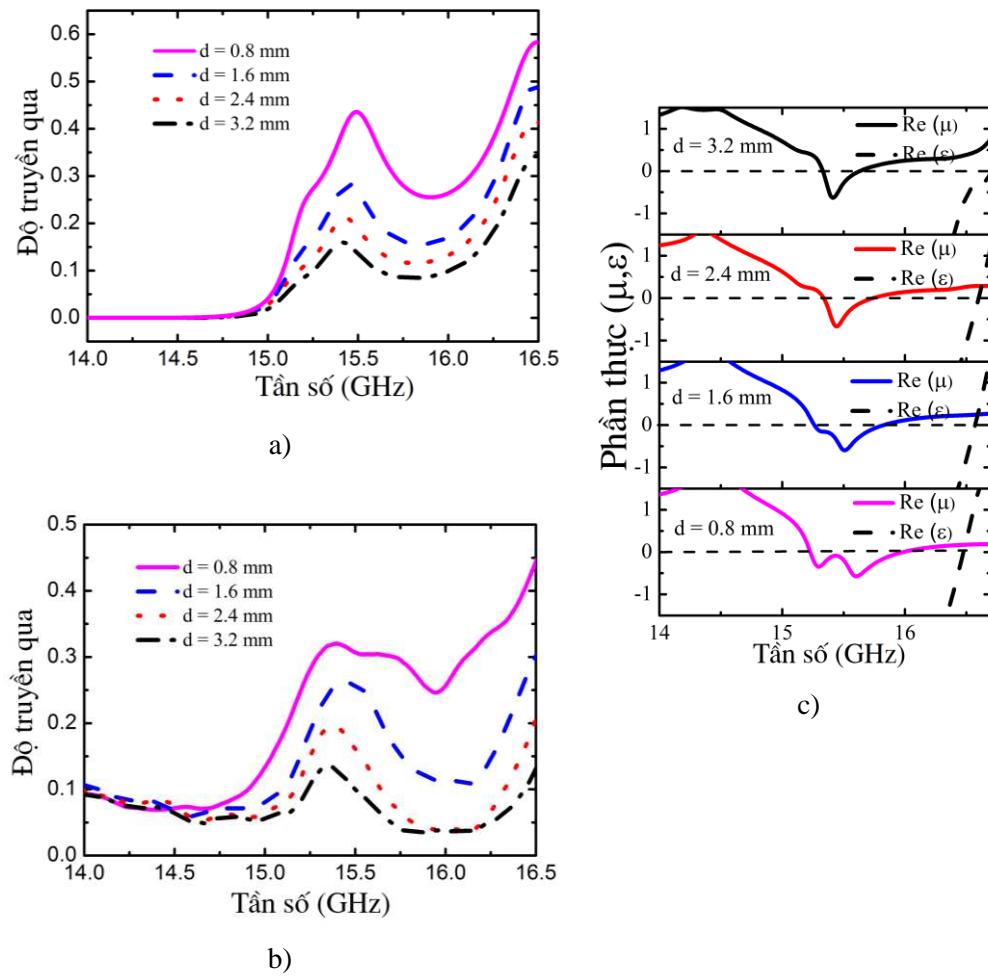
Trong các kết quả nghiên cứu ở trên, một phương pháp đơn giản nhưng hiệu quả để tạo ra vùng độ từ thẩm âm rộng đã được đề xuất bằng cách sử dụng cấu trúc đối xứng - cấu trúc CWP hai lớp. Trong các nghiên cứu tiếp theo, phát triển ý tưởng trên để mở rộng dải tần chiết suất âm bằng cách sử dụng cấu trúc kết hợp hai lớp, dựa trên sự kết hợp cấu trúc CWP hai lớp để mở rộng vùng từ thẩm âm và các dây kim loại liên tục tạo ra đặc trưng plasma nhân tạo.

Như vậy, vùng tần số có chiết suất âm có thể được mở rộng dựa trên sự kết hợp dải có điện thẩm âm và từ thẩm âm trong một vùng tần số rộng. Hình 4.6(a) minh họa cấu trúc kết hợp hai lớp. Với cấu trúc hai lớp này, dải tần có độ từ thẩm âm rộng thu được từ việc mở rộng do lai hóa hai lớp CWP. Tần số plasma trong dải tần này có thể điều chỉnh bằng các tham số cấu trúc của các dây liên tục. Các mode lai hóa được điều chỉnh để thu được dải độ từ thẩm âm rộng nhất và nằm dưới tần số plasma.



**Hình 4.6. a)** Ô cơ sở của cấu trúc CB hai lớp và cách phân cực của sóng điện từ b) Mặt cắt theo mặt phẳng ( $\mathbf{E}, \mathbf{H}$ ) của mẫu CB chế tạo được với các tham số cấu trúc  $a_x = 4$  mm và  $a_y = 8$  mm, bề dày, chiều dài và chiều rộng của CW lần lượt là  $t_m = 0.036$  mm,  $l = 5.5$  mm và  $w_1 = w_2 = 1.0$  mm. Chiều dày lớp điện môi là  $t_d = 0.8$  mm.

Để mở rộng dải tần có chiết suất âm, ngoài việc mở rộng dải tần có độ từ thẩm âm thì việc điều chỉnh vị trí tần số plasma  $f_p$  thích hợp cũng rất quan trọng. Ở trong cấu trúc kết hợp hai lớp, tần số plasma được điều chỉnh bởi độ rộng dây liên tục  $w_2$  và khoảng cách giữa tâm của hai dây liên tục liền kề a mà không ảnh hưởng đến kết quả mở rộng dải từ thẩm âm [90].



**Hình 4.7.** Ảnh hưởng của khoảng cách hai lớp CB lên a) Phổ truyền qua mô phỏng, b) Phổ truyền qua thực nghiệm và c) Phần thực của độ từ thẩm và độ điện thẩm

Hình 4.6(a) là ô cơ sở của cấu trúc kết hợp hai lớp ứng với phân cực của sóng điện từ. Hình 4.6(b) là mẫu kết hợp hai lớp chế tạo được. Để có được mẫu hai lớp, chúng ta có thể ghép hai mẫu đơn lớp được ngăn cách nhau bởi lớp vật liệu trong suốt có độ dày xác định. Hai lớp cấu trúc được cách nhau một khoảng  $d$ , các ô cơ sở được sắp xếp tuần hoàn theo trục x (**H**) và trục y (**E**) với các hằng số mạng  $a_x = 4$  mm và  $a_y = 8$  mm. Lớp điện môi FR-4 có độ điện thẩm là 4.3 và hệ số tổn hao điện môi bằng 0.02. Các thanh CWS và các dây liên tục được làm bằng đồng với độ

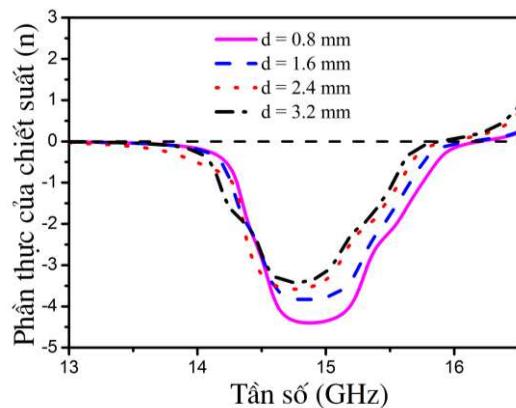
dẫn điện  $\sigma = 5.88 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$ . Bề dày  $t_m$ , chiều dài 1 và chiều rộng  $w_1 = w_2$  của CW lần lượt là 0.036 mm, 5.5 mm và 1.0 mm.

Như đã đề cập ở trên, theo mô hình lai hóa bậc hai sự mở rộng dải tần có độ từ thẩm âm phụ thuộc rất nhiều vào khoảng cách  $d$  giữa hai lớp CWP. Vì thế, trong phần nghiên cứu này chúng tôi tập trung khảo sát ảnh hưởng của tham số  $d$  đến việc mở rộng dải tần có chiết suất âm ( $n < 0$ ). Bên cạnh đó, sự dịch chuyển của tần số plasma theo  $d$  cũng được khảo sát để đánh giá hiệu quả của sự mở rộng dải tần chiết suất âm sử dụng mô hình hai lớp của cấu trúc kết hợp.

Hình 4.7(a) và (b) lần lượt là phô truyền qua mô phỏng và thực nghiệm phụ thuộc vào khoảng cách hai lớp cấu trúc  $d$  với độ dày lớp điện môi được cố định  $t_d = 0.8 \text{ mm}$ . Trong nghiên cứu này,  $t_d$  được chọn bằng 0.8 mm vì trong các kết quả nghiên cứu bằng mô phỏng cho thấy:  $t_d = 0.8 \text{ mm}$  là tham số tối ưu vì vừa đảm bảo sự lai hóa xảy ra tương đối mạnh đồng thời tạo ra khoảng cách giữa hai vùng chiết suất âm và dương khá xa nhau nên thuận lợi cho việc điều chỉnh  $d$  để mở rộng vùng chiết suất âm. Kết quả cho thấy khi  $d$  giảm từ 3.2 mm về 0.8 mm, vùng truyền qua quanh tần số 15.4 GHz dần dần được mở rộng. Để tìm hiểu rõ nguyên nhân của việc mở rộng này, phần thực của độ điện thẩm  $\epsilon$  và độ từ thẩm  $\mu$  được tính toán và trình bày trên hình 4.7(c). Kết quả cho thấy, vùng có độ từ thẩm âm được mở rộng và tách ra thành hai đỉnh tại tần số 15.27 và 15.58 GHz khi  $d = 0.8 \text{ mm}$ . Kết quả này là do hiệu ứng lai hóa gây lên. Thật vậy, khi khoảng cách  $d$  giảm, tương tác ngoài mạnh dần lên, mode cộng hưởng từ ban đầu rộng ra và sau đó bị tách thành hai mức riêng biệt. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng không chỉ độ từ thẩm âm mà độ điện thẩm âm cũng là điều kiện cần thiết để tạo ra vật liệu có chiết suất âm. Với lý do đó sự thay đổi tần số plasma theo khoảng cách  $d$  được trình bày trên hình 4.7(c) (đường nét đứt, màu đen). Với các tham số cấu trúc đã được tối ưu, trên hình 4.7(c) chỉ rõ tần số plasma  $f_p$  hầu như không bị ảnh hưởng theo khoảng cách  $d$  và đều lớn hơn dải từ thẩm âm. Như vậy, dải tần số đồng thời có độ điện thẩm âm và từ thẩm âm (vùng chiết suất âm kép) rộng được tạo ra bằng cách khai thác mô hình lai hóa bậc hai thông qua việc điều chỉnh khoảng cách hai lớp  $d$ . Để khẳng định thêm nhận định này, các kết quả tính toán phần thực của chiết suất phụ thuộc vào khoảng cách  $d$  được trình bày trên hình 4.8. Kết quả cho thấy vùng có chiết suất âm được mở rộng về phía bên phải khi giảm khoảng cách  $d$ . Các kết quả này hoàn toàn phù hợp với các phân tích trên và lý giải sự mở rộng vùng chiết suất âm trong phô truyền qua được quan sát thấy trên hình 4.7(a) và (b). Tuy nhiên, sự tách đỉnh không được quan sát rõ ràng trong các kết quả này. Điều này có thể được giải thích là do vật liệu điện

môi FR4 lựa chọn có độ tổn hao khá lớn đối với hiệu ứng tách vạch do lai hóa theo kết quả nghiên cứu ở mục 4.2.

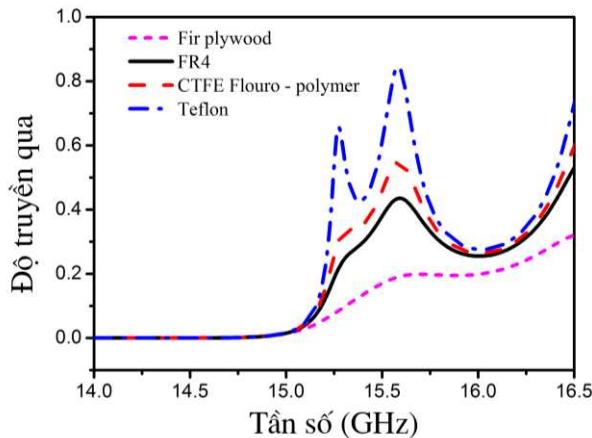
Quan sát hình 4.7(c), một kết luận quan trọng khác đó là sự mở rộng vùng từ thâm âm dựa trên giản đồ lai hóa bậc hai của CWP hai lớp được điều khiển một cách độc lập với tần số plasma thông qua điều chỉnh khoảng cách  $d$ . Nói cách khác, vùng từ thâm âm có thể được mở rộng và điều chỉnh sao cho vùng tần số đó dưới tần số plasma bằng cách điều chỉnh  $d$ . Còn vùng điện thâm âm lại có thể điều chỉnh bằng các tham số của dây liên tục  $w_2$  và  $a$ . Như vậy, vùng điện thâm âm và từ thâm âm có thể điều chỉnh độc lập với nhau bằng các thông số cấu trúc. Điều này có nghĩa là việc mở rộng dải tần chiết suất âm có thể đạt được dễ dàng khi sử dụng cấu trúc CB hai lớp. Như vậy có thể nói rằng, việc điều chỉnh khoảng cách  $d$  như là một chìa khóa cho việc mở rộng vùng chiết suất âm bằng cách mở rộng dải tần có độ từ thâm âm dựa theo mô hình lai hóa bậc hai.



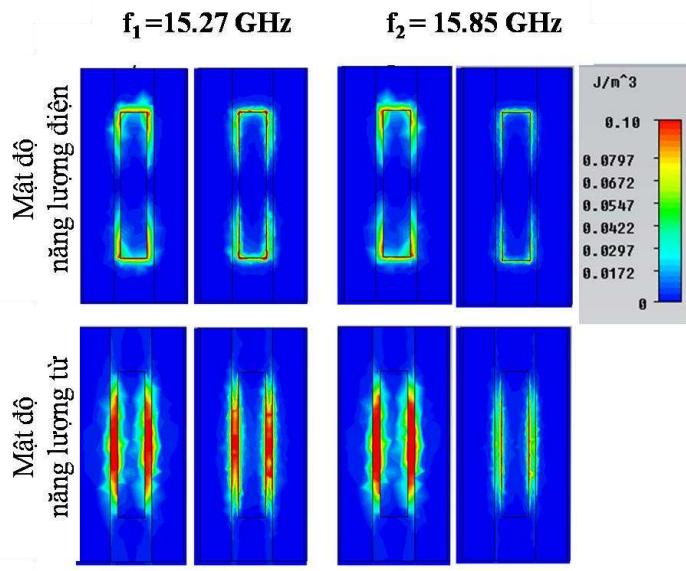
**Hình 4.8.** Phản ứng thực của chiết suất phụ thuộc vào khoảng  $d$  giữa hai lớp của cấu trúc CB hai lớp

Theo các kết quả nghiên cứu ở mục 4.2, sự tách đinh lai hóa của vật liệu Meta rất nhạy với hệ số tổn hao điện môi của lớp điện môi trong cấu trúc CWP. Nhằm mục đích tối ưu hóa cho việc mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên mô hình lai hóa bậc hai, các nghiên cứu tiếp theo sẽ khảo sát sự ảnh hưởng của hệ số tổn hao điện môi lên hiệu quả mở rộng vùng chiết suất âm (xem hình 4.9). Trong nghiên cứu này, khoảng cách giữa hai lớp được giữ cố định  $d = 0.8\text{ mm}$ . Giống như trong nghiên cứu đối với việc mở rộng vùng từ thâm âm, giá trị phản ứng thực của độ điện thâm được giữ không đổi là 4.3. Đúng như dự đoán, kết quả cho thấy khi tổn hao điện môi thấp hiệu ứng tách vạch trở nên càng rõ rệt và độ truyền qua tăng lên. Kết quả này cho thấy việc sử dụng vật liệu điện môi rất quan trọng trong việc mở rộng vùng có chiết suất âm ở dải tần GHz. Các vật liệu lựa chọn càng có độ tổn hao thấp

càng tốt cho hiệu quả của việc mở rộng dựa trên mô hình lai hóa. Với các vật liệu có hệ số tổn hao điện môi lớn hơn 0.05 hiệu ứng gần như bị dập tắt.



**Hình 4.9.** Sự phụ thuộc phổ truyền qua vào các vật liệu làm điện môi có tổn hao khác nhau

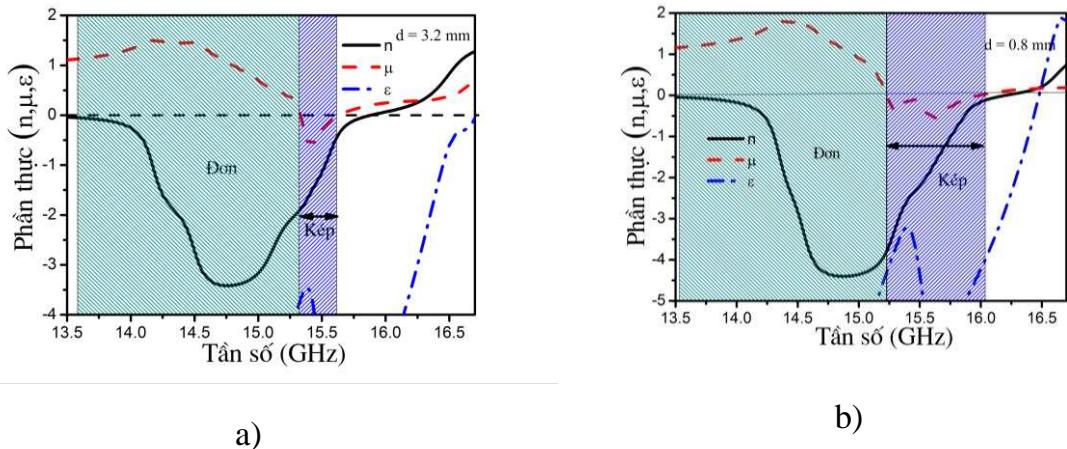


**Hình 4.10.** Mật độ năng lượng tại 15.27 GHz (cột bên trái) và 15.85 GHz (cột bên phải) khi khoảng cách hai lớp  $d = 0.8$  mm (lai hóa xảy ra mạnh), năng lượng điện ở phía trên và từ ở phía dưới. Trong mỗi tần số, lớp thứ nhất của cấu trúc CB hai lớp ở bên trái và lớp thứ hai ở bên phải.

Với mục đích làm sáng tỏ hơn nữa tính chất điện từ của vùng chiết suất âm được mở rộng dựa trên mô hình lai hóa, hình 4.10 đưa ra mật độ năng lượng điện từ tại hai tần số cộng hưởng (15.27 GHz và 15.58 GHz) được tách ra khi  $d = 0.8$  mm. Quan sát hình vẽ cho thấy, năng lượng từ được tập trung ở tâm của hai CW trong một lớp CWP trong khi năng lượng điện tử trung ở cuối các CW. Điều này chứng

tô thêm tính chất cộng hưởng từ của hai mode này. Ngoài ra, trên hình vẽ còn cho thấy hưởng ứng từ đều xuất hiện trong cả hai lớp của vật liệu. Tuy nhiên, tại tần số 15.27 GHz (mode thứ nhất) năng lượng từ cảm ứng mạnh trong cả hai lớp CWP, trong khi tại tần số 15.58 GHz (mode cộng hưởng thứ hai) năng lượng từ chủ yếu chỉ tập trung ở lớp thứ nhất. Kết quả này cho thấy tổn hao lớn hơn ở tần số thấp (mode thứ nhất) của cộng hưởng từ. Chính vì vậy độ truyền qua tại 15.27 GHz thấp hơn tại tần số 15.58 GHz như quan sát trên hình 4.9. Tuy nhiên trong kết quả thực nghiệm không quan sát được điều này và được giải thích do ảnh hưởng của nhiễu khi đo đặc.

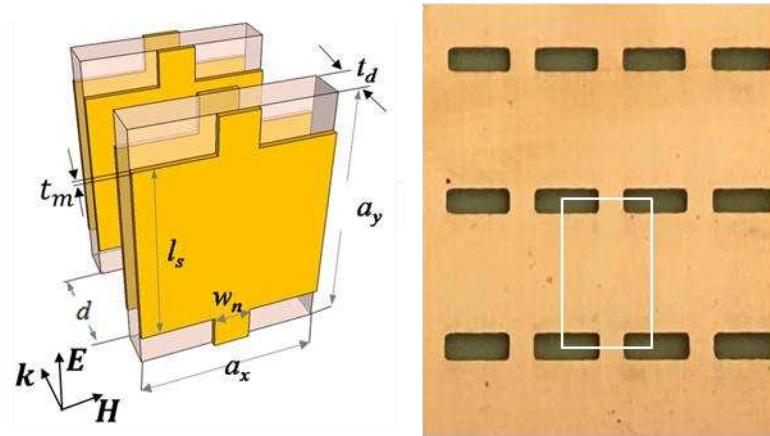
Để đánh giá chi tiết về hiệu quả của việc mở rộng vùng có chiết suất âm sử dụng hiệu ứng lai hóa, chúng tôi sẽ phân tích và đánh giá sự mở rộng vùng tần số có chiết suất âm kép vì vùng chiết suất âm đơn không sinh ra bởi hiệu ứng này. Vùng chiết suất âm kép là vùng cả độ điện thẩm và từ thẩm đều âm, trong khi đó vùng chiết suất âm đơn là vùng chỉ cần một trong hai giá trị này âm (chi tiết xem phần tổng quan). Hình 4.11 trình bày các kết quả tính toán các tham số  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $n$  của hai mẫu vật liệu Meta điển hình. Hình 4.11(a) ứng với khoảng cách hai lớp lớn ( $d = 3.2$  mm) khi hiện tượng lai hóa plasmon gần như chưa xảy ra. Hình 4.11(b) khoảng cách  $d = 0.8$  mm ứng với trường hợp cho ra dải tần có độ từ thẩm âm rộng nhất và độ truyền qua lớn nhất khai thác lai hóa plasmon. Kết quả so sánh cho thấy, khi  $d$  thay đổi từ 3.2 mm đến 0.8 mm, thì độ rộng vùng từ thẩm âm tăng từ 0.29 GHz lên 0.83 GHz (gấp 2.86 lần khi lai hóa chưa xảy ra). Do tần số  $f_p$  luôn lớn hơn vùng từ thẩm âm nên vùng chiết suất âm kép cũng mở rộng đáng kể so với khi chưa có lai hóa. Trong kết quả mở rộng vùng chiết suất âm sử dụng mô hình lai hóa cho cấu trúc CB hai lớp vùng chiết suất âm kép đạt được là 5.3% và vùng chiết suất âm đơn là 20% (tỉ lệ này được tính bằng tỉ số độ rộng dải tần đạt được chiết suất âm và tần số trung tâm). Kết quả này tương đương với các công trình công bố trước đây [40], và hẹp hơn các kết quả trong các tài liệu [125], [89]. Tuy nhiên, vẫn dựa trên mô hình lai hóa này nhưng áp dụng cho cấu trúc dạng lưới nhiều lớp (sẽ được trình bày chi tiết ngay sau đây), độ rộng dải tần có chiết suất âm được mở rộng ra đáng kể và có thể so sánh được với các công trình gần đây nhất và nhưng có ưu thế hơn về khả năng tiến hành thực nghiệm do cấu trúc đơn giản (xem mục 4.4.2).



**Hình 4.11.** Kết quả tính toán phản thực của chiết suất  $n$ , độ điện thẩm  $\epsilon$ , độ từ thẩm  $\mu$  khi khoảng cách hai lớp kết hợp là: a)  $d = 3.2 \text{ mm}$  b)  $d = 0.8 \text{ mm}$ .

#### 4.3.2. Mở rộng vùng chiết suất âm sử dụng cấu trúc dạng lưới hai lớp

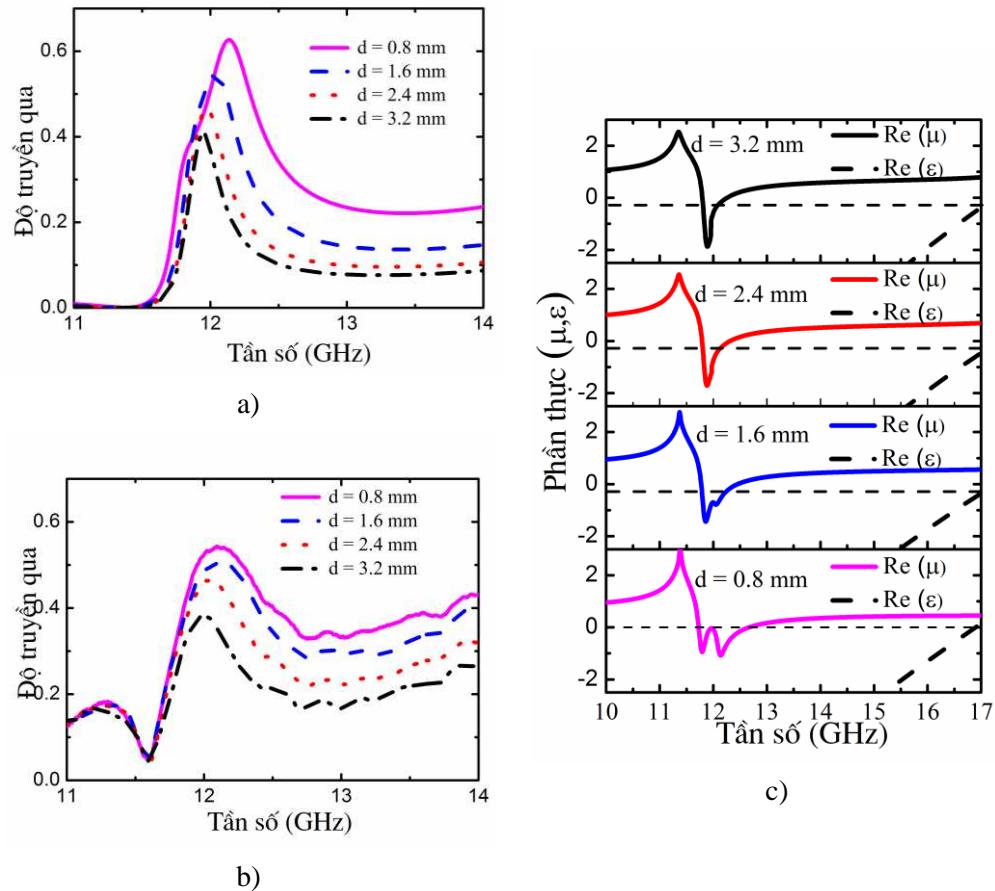
Nhằm tối ưu hóa cấu trúc cho việc mở rộng vùng có chiết suất âm dựa trên mô hình lai hóa bậc hai. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ được nghiên cứu trên cấu trúc dạng lưới (fishnet-FN). Như đã giới thiệu trong phần tổng quan và các kết quả nghiên cứu ở chương III, FN là cấu trúc biến đổi của CB. Cấu trúc này đơn giản, ít tham số cấu trúc hơn CB, đặc biệt có thể tạo ra chiết suất âm với độ tổn hao thấp trên một vùng rộng các tham số cấu trúc. Điều này giải thích do dễ dàng đạt được điều kiện phối hợp trở kháng với môi trường bên ngoài ( $\epsilon = \mu$ ). Hình 4.12(a) và (b) lần lượt là ô cơ sở của cấu trúc FN hai lớp ứng với phân cực của sóng điện từ và mặt cắt theo mặt phẳng ( $E, H$ ) của mẫu FN hai lớp chế tạo được. Hai lớp cấu trúc được cách nhau một khoảng  $d$ , các ô cơ sở được sắp xếp tuần hoàn theo trục  $x(H)$  và trục  $y(E)$  với các hằng số mạng  $a_x = 7 \text{ mm}$  và  $a_y = 9.5 \text{ mm}$ . Lớp điện môi FR-4 có độ điện thẩm là 4.3 và hệ số tổn hao tangent bằng 0.02. Các thanh kim loại và các dây liên tục được làm bằng đồng với độ dẫn điện  $\sigma = 5.88 \times 10^7 \text{ Sm}^{-1}$ . Chiều rộng, chiều dài của thanh kim loại và chiều rộng của phần nút cỗ chai lần lượt là  $w_s = a_x = 7 \text{ mm}$ ,  $l_s = 7 \text{ mm}$ ,  $w_n = 1.5 \text{ mm}$ . Hình 4.13 là phổ truyền qua (a) mô phỏng và (b) thực nghiệm phụ thuộc vào khoảng cách hai lớp cấu trúc  $d$  với độ dày lớp điện môi được cố định  $t_d = 0.8 \text{ mm}$ .



**Hình 4.12. a)** Ô cơ sở cùng các tham số cấu trúc và cách phân cực của cấu trúc FN; **b)** Mặt cắt theo mặt phẳng ( $\mathbf{E}, \mathbf{H}$ ) của mẫu FN chế tạo được với các tham số cấu trúc  $a_x = 7\text{ mm}$  và  $a_y = 9.5\text{ mm}$ , chiều dài và chiều rộng của thanh slab và chiều rộng của phần nút cỗ chai lần lượt là  $l_s = 7\text{mm}$ ,  $w_s = 7\text{ mm}$ ,  $mm$  và  $w_n = 1.5\text{mm}$ .

Kết quả mô phỏng trùng với các kết quả thực nghiệm. Kết quả cho thấy khi  $d$  giảm từ  $3.2\text{ mm}$  về  $0.8\text{ mm}$ , vùng truyền qua quanh tần số  $12\text{ GHz}$  dần dần được mở rộng. Để tìm hiểu nguyên nhân của mở rộng này, các kết quả tính toán phần thực của các tham số hiệu dụng: độ điện thẩm  $\varepsilon$  và độ từ thẩm  $\mu$  được thực hiện và đưa ra trên hình 4.13(c). Có một sự tương tự so với cấu trúc CB, vùng có độ từ thẩm âm dần dần mở rộng và tách ra thành hai đỉnh rõ rệt, kết quả này cũng được giải thích do hệ quả của mô hình lai hóa bậc hai. Bên cạnh đó, tần số plasma  $f_p$  hầu như không bị ảnh hưởng bởi khoảng cách hai lớp  $d$  và đều lớn hơn dải từ thẩm âm. Như vậy, việc mở rộng vùng truyền qua trong kết quả mô phỏng và thực nghiệm cũng được giải thích do sự mở rộng dải tần đồng thời có độ điện thẩm âm và từ thẩm âm (vùng chiết suất âm kép) khi giảm khoảng cách hai lớp  $d$ . Ngoài ra, trong kết quả nghiên cứu đối với cấu trúc FN cho thấy, tần số plasma  $f_p$  cách khá xa vùng chiết suất âm nên khoảng cách giữa đỉnh vùng chiết suất âm và đỉnh vùng chiết suất dương xa nhau hơn so với cấu trúc CB. Điều này tạo điều kiện thuận lợi trong việc điều chỉnh các tham số cấu trúc để thu được vùng chiết suất âm rộng do ít có khả năng bị vùng chiết suất dương lấn át. Hơn thế, khi so sánh đường biểu diễn độ điện thẩm vào tần số của cấu trúc CB và FN (hình 4.7(c) và hình 4.13(c)), ta thấy cấu trúc CB có độ dốc lớn hơn rất nhiều so với cấu trúc FN. Kết quả nghiên cứu này hoàn toàn phù hợp với các công trình nghiên cứu trước đây [51] và các kết quả ở mục 3.4 của đề tài. Điều này tạo điều kiện dễ dàng thỏa mãn điều kiện phối hợp trở kháng ( $\varepsilon = \mu$ ) để khử phản xạ đối với cấu trúc FN trên một dải tần số rộng. Kết quả này cũng lý giải tại sao với cùng các tham số độ tổn hao và chiều dày lớp điện môi, nhưng độ

truyền qua trong cấu trúc FN (hình 4.13(a) và (b)) thu được cao hơn so với cấu trúc CB (hình 4.7 (a) và (b)).



**Hình 4.13.** Ảnh hưởng của khoảng cách hai lớp  $d$  giữa hai lớp cấu trúc dạng lưới (fishnet structure – FN) lên a) Phổ truyền qua mô phỏng, b) Phổ truyền qua thực nghiệm và c) Phần thực của độ từ thấm và độ điện thấm

Như vậy, có thể khẳng định việc sử dụng cấu trúc FN hai lớp để mở rộng vùng chiết suất âm dựa trên mô hình lai hóa bậc hai tỏ ra ưu thế hơn so với cấu trúc CB. Sự ưu thế này không những chỉ thể hiện ở việc cấu trúc đơn giản ít tham số cấu trúc, dễ chế tạo mà còn ưu thế cả trong việc điều chỉnh các tham số cấu trúc để thu được vùng chiết suất âm rộng (vùng chiết suất âm kép tăng từ 5.3% với CB lên 10% với FN) và độ truyền qua cao (độ truyền qua tăng từ 40% với CB lên 60% với FN).

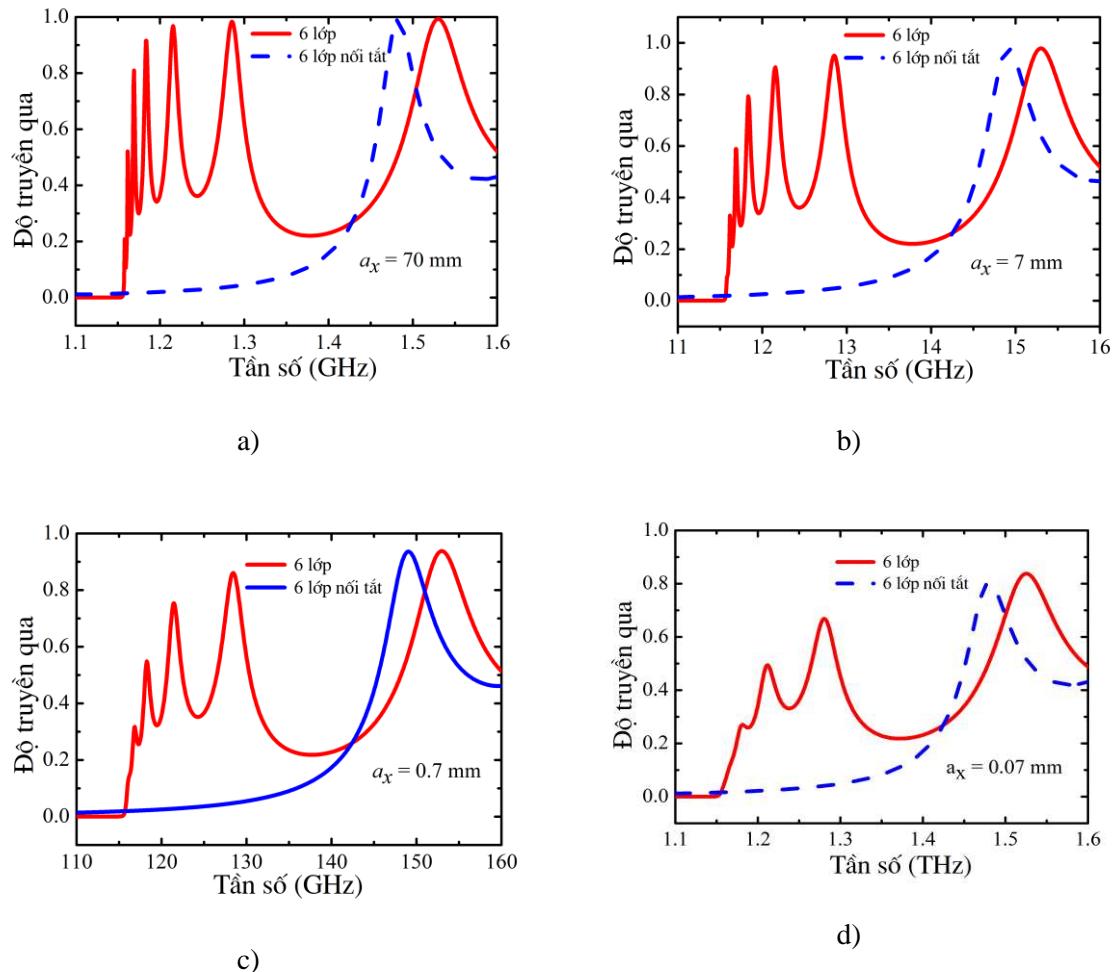
Các kết quả nghiên cứu đều cho thấy việc mở rộng vùng chiết suất âm là dựa trên hệ quả mở rộng vùng từ thấm âm từ mô hình lai hóa bậc hai. Chính vì vậy các kết quả nghiên cứu trong việc mở rộng vùng từ thấm âm như: sử dụng cấu trúc đa lớp để tăng thêm độ rộng [117] hay hoạt động ở các vùng tần số khác nhau bằng

cách điều chỉnh tham số cấu trúc, hoàn toàn có thể áp dụng cho việc mở rộng vùng có chiết suất âm. Để làm sáng tỏ hơn các nhận định này, các kết quả nghiên cứu tiếp theo được thực hiện đối với cấu trúc FN có nhiều lớp. Phổ truyền qua mô phỏng của cấu trúc FN sáu lớp và FN được nối tắt cả 6 lớp theo các vùng tần số khác nhau được trình bày trong hình 4.14 Để đơn giản, các lớp đê không được xem xét đến trong mô phỏng, ngoài ra để quan sát hiện tượng lai hóa rõ hơn và đánh giá sự tổn hao của lớp kim loại ở các vùng tần số khác nhau, vật liệu điện môi được lựa chọn là vật liệu không tổn hao trong các nghiên cứu này. Các kết quả trên hình 4.14 đều cho thấy, phổ truyền qua của cấu trúc FN 6 lớp xuất hiện hai vùng truyền qua. Vùng truyền qua thứ nhất là vùng có chiết suất âm vì nó bị dập tắt trong phổ truyền qua của cấu trúc nối tắt. Vùng truyền qua thứ hai là vùng có chiết suất dương. Quan trọng hơn, khi hệ số kích thước tăng 10 lần hay giảm 10 lần và 100 lần sự lai hóa để mở rộng vùng chiết suất âm vẫn được quan sát thấy rõ và được mở rộng hơn khi sử dụng 6 lớp cấu trúc so với hai lớp cấu trúc như đê xuất ban đầu (tăng từ 10% với hai lớp lên từ 14.5% đến 15% với cấu trúc 6 lớp). Việc mở rộng hơn này hoàn toàn phù hợp với mô hình lai hóa đê xuất cho nhiều lớp cấu trúc đưa ra trong tài liệu [117]. Bằng việc sử dụng lớp điện môi không tổn hao, các kết quả nghiên cứu cho thấy ở vùng tần số thấp (1 đến 10 GHz) tổn hao trên lớp kim loại là không đáng kể nên vùng truyền qua ở dải tần này đạt gần như 100%. Tuy nhiên, khi dịch chuyển lên vùng tần số cao hơn thì vùng truyền qua giảm dần, tức là sự tổn hao này tăng lên. Điều này giải thích do sự tăng của động năng của electron tự do ở vùng tần số cao làm các cộng hưởng yếu dần đi. Như vậy, bên cạnh việc giảm độ truyền qua ở vùng tần số cao, kết quả còn cho thấy sự mở rộng do lai hóa cũng kém hiệu quả. Điều này hoàn toàn phù hợp với các kết quả nghiên cứu ở mục 4.2.

Như vậy, một phương pháp đơn giản nhưng hiệu quả đã được nghiên cứu để mở rộng vùng có từ thẩm âm và chiết suất âm đó là sử dụng mô hình lai hóa bậc hai. Các kết quả cho thấy, hiệu ứng lai hóa đê mở rộng tần số làm việc phụ thuộc mạnh vào tỉ số  $d/t_d$  và độ tổn hao của lớp điện môi ở vùng GHz. Ngoài ra, các kết quả nghiên cứu cho thấy cấu trúc FN có nhiều ưu điểm hơn cấu trúc CB khi sử dụng mô hình lai hóa để mở rộng vùng có chiết suất âm.

Hơn nữa, việc nghiên cứu sự lai hóa ở các vùng tần số cho thấy với cấu trúc FN 6 lớp cho độ rộng lớn hơn 2 lớp (vùng chiết suất âm kép tăng từ 10% lên 15%) và hiệu ứng lai hóa được quan sát ở các vùng tần số khác nhau: 1.1 GHz – 1.6 GHz, 11 GHz – 16 GHz, 110 GHz – 160 GHz, 1.1 GHz – 1.6 THz. Với vùng chiết suất âm đạt được khi sử dụng cấu trúc 6 lớp FN (vùng chiết suất kép đạt được là 15%), kết quả này

tương tự với kết quả thu được trong công bố gần đây [125], [89]. Các kết quả nghiên cứu này có thể mở rộng cho hệ vật liệu Meta nhiều lớp và mở ra cho việc chế tạo vật liệu có chiết suất âm hoạt động trên dải rộng từ vùng vi sóng đến vùng quang học. Đây là một bước quan trọng để tiến gần đến các ứng dụng dải tần chiết suất âm rộng.



**Hình 4.14.** Phổ truyền qua mô phỏng cấu trúc FN 6 lớp và FN 6 lớp nối tắt hoạt động ở các vùng tần số khác nhau tương ứng với hằng số mạng là  $a_x$  là a) 70 mm, b) 7 mm, c) 0.7 mm và d) 0.07 mm.

### **PHẦN III. CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ LÀM VIỆC CỦA VẬT LIỆU META BẰNG NHIỆT ĐỘ**

Kể từ thí nghiệm đầu tiên kiểm chứng tồn tại vật liệu Meta có chiết suất âm, đến nay dải tần hoạt động đã được mở rộng từ vùng GHz đến vùng hồng ngoại và thậm chí đến vùng ánh sáng nhìn thấy. Tuy nhiên, các cấu trúc Meta truyền thống ứng với các tham số xác định chỉ có thể hoạt động ở một vùng tần số nhất định nên hạn chế rất nhiều trong ứng dụng thực tế. Vì vậy, một trong các hướng thu hút rất nhiều sự quan tâm nghiên cứu là dùng các tác động ngoại vi (như nhiệt, điện, quang, từ..) để điều khiển các tính chất điện từ của vật liệu Meta. Do đó, phương pháp này có thể điều khiển được vùng tần số của vật liệu Meta hoạt động theo mong muốn. Có thể kể ra một số ví dụ điều khiển vật liệu Meta bằng tác động ngoại vi như: điều khiển bằng tác động quang [134], tác động nhiệt [80], tác động điện [16], và tác động từ [21]. Để thực hiện được việc điều khiển này, một số vật liệu tự nhiên có tính chất đặc biệt được đưa vào trong các cấu trúc của vật liệu Meta. Ví dụ như sử dụng vật liệu tự nhiên bát đắng hướng, vật liệu chuyển pha, vật liệu có khả năng thay đổi độ từ thầm, điện thầm... phụ thuộc vào các tác động ngoại vi. Trong đó, các thuộc tính nội tại của các chất bán dẫn đầy hứa hẹn cho việc thực hiện các biến đổi dưới nhiều loại tác động bên ngoài khác nhau, bao gồm cả nhiệt, điện và quang học.

Như đã giới thiệu trong phần mở đầu và tổng quan, do kích thước của vật liệu Meta nhỏ hơn nhiều so với bước sóng hoạt động nên khi chế tạo vật liệu Meta ở vùng tần số cao thường gấp rất nhiều khó khăn. Hơn thế, các cơ chế vật lý ở trong vùng tần số hoạt động này thường phức tạp hơn trong vùng tần số thấp. Hiện nay, các nghiên cứu ở vùng tần số cao hầu hết đều tập trung đi tìm các cấu trúc đơn giản, dễ chế tạo và nghiên cứu giải thích hiện tượng và cơ chế vật lý hay nghiên cứu ảnh hưởng của các tác động ngoại vi ở vùng tần số cao này. Với mục đích đây vùng nghiên cứu sát với vùng ánh sáng nhìn thấy (vùng có rất nhiều ứng dụng mà vật liệu Meta có thể triển khai), thay vì nghiên cứu trong dải tần GHz như ở chương III và IV trong chương này để tài nghiên cứu tác động ngoại vi (nhiệt) đến cấu trúc dạng cặp đĩa và lưới đĩa đơn giản không phụ thuộc phân cực để điều biến vật liệu Meta có độ từ thầm âm và chiết suất âm hoạt động ở vùng tần số THz (từ 0 đến 1.5 THz). Việc điều biến được thực hiện thông qua vật liệu bán dẫn Indium antimonide (InSb) thay thế cho thành phần kim loại trong cấu trúc cặp đĩa (dish pair – DP) tạo ra vùng có độ từ thầm âm và cấu trúc dạng lưới đĩa (dishnet - DN) tạo ra vùng có chiết suất âm. Việc sử dụng bán dẫn InSb trong nghiên cứu này vì đây là loại bán dẫn mà các tính chất của nó đã được khảo sát rất kỹ lưỡng trong các tài liệu có uy tín [134],

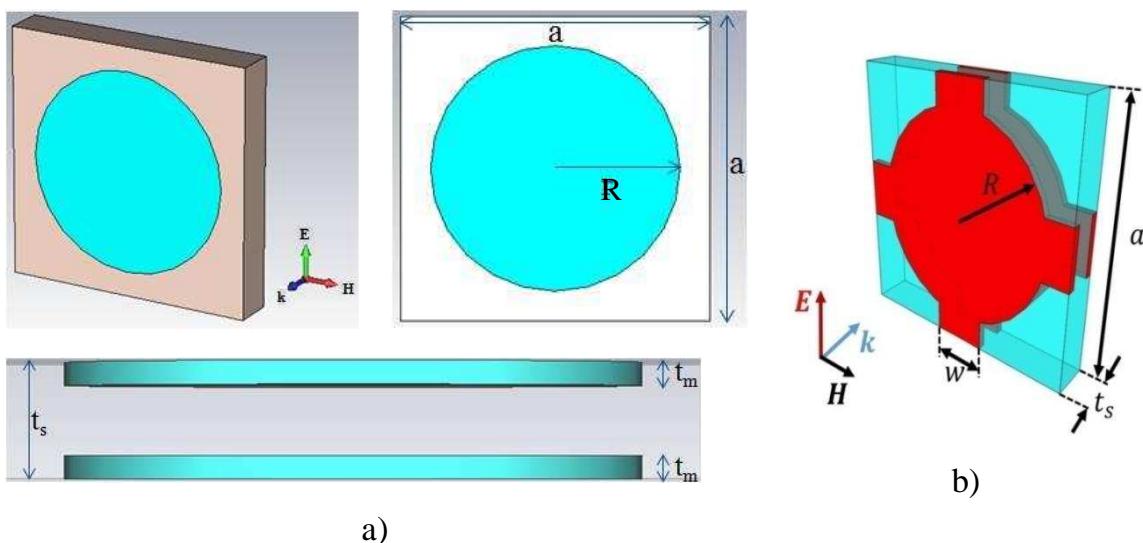
[79], đặc biệt là hàm của độ điện thẩm phụ thuộc nhiệt độ thông qua nồng độ hạt tải, nhân tố chính để điều biến vật liệu Meta có độ từ thẩm và chiết suất âm (một trong những mục đích chính của đề tài). Hơn nữa vật liệu InSb cũng đã được một số nhóm tác giả sử dụng để điều biến vật liệu Meta bằng thực nghiệm [15], [21] nên việc sử dụng vật liệu này của đề tài hướng tới việc chế tạo có tính khả thi cao.

Theo các kết quả NCS tìm kiếm, cho đến nay trên thế giới chưa có một công trình nào đã nghiên cứu sử dụng InSb để điều biến vật liệu Meta có cấu trúc DP và DN không phụ thuộc vào phân cực. Vì vậy, các kết quả nghiên cứu này góp phần hiểu rõ chiều hướng thay đổi theo các tác động ngoại vi (ở đây là nhiệt độ) đến các tính chất của vật liệu Meta (đặc biệt là tính độ từ thẩm âm và chiết suất âm) sử dụng các cấu trúc này.

## 5.1. Phân tích mô hình và thiết lập mô phỏng

### 5.1.1. Thiết kế cấu trúc ô cơ sở

Ô cơ sở của cấu trúc DP và DN được trình bày trên hình 5.1(a) và 5.1(b). Ô cơ sở có hằng số mạng  $a = 62\mu\text{m}$ , độ dày của lớp điện môi và bán dẫn InSb lần lượt là  $t_s = 10\mu\text{m}$  và  $t_m = 2\mu\text{m}$ , bán kính của đĩa  $R = 25\mu\text{m}$  và chiều rộng của dây liên tục  $w = 14\mu\text{m}$ .



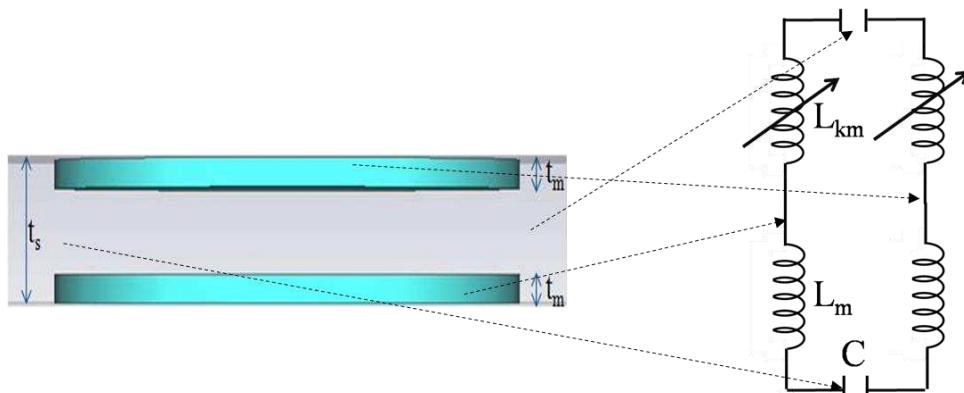
**Hình 5.1.** Ô cơ sở của vật liệu Meta có cấu trúc a) dạng cặp đĩa b) lưới đĩa.  $R$  là bán kính của đĩa,  $w$  là độ rộng của dây liên tục. Chiều dày của lớp điện môi là  $t_s$  và chiều dày của lớp InSb là  $t_m$ . Điều kiện tuần hoàn theo phương  $\mathbf{E}$  và  $\mathbf{H}$  là bằng nhau và bằng  $a$ . (với  $a = 62\mu\text{m}$ ,  $R = 25\mu\text{m}$ ,  $t_s = 10\mu\text{m}$ ,  $t_m = 2\mu\text{m}$  và  $w = 14\mu\text{m}$ ).

Như đã giới thiệu ở chương III-phần I, cấu trúc cặp đĩa là cấu trúc biến đổi của cấu trúc CWP khi thay thế các CWs bằng các đĩa nhằm sử dụng tính đối xứng

để tạo ra sự đẳng hướng (không phụ thuộc vào phân cực) đối với sóng điện từ chiếu đến. Khi thêm các dây liên tục theo hai trục tọa độ x và y vào cấu trúc cặp đĩa, cấu trúc dạng lưỡi đĩa được hình thành nhằm tạo ra vật liệu có chiết suất âm. Trong cấu trúc lưỡi đĩa, thành phần cặp đĩa sinh ra độ từ thẩm âm và hai dây liên tục sinh ra độ điện thẩm âm được làm bằng chất bán dẫn InSb đặt ở hai bên và ngăn cách bởi lớp điện môi. Thủy tinh Pyrex được lựa chọn làm lớp điện môi vì nó bền với nhiệt và có độ tổn hao thấp ở vùng khảo sát. Độ điện thẩm và độ tổn hao của thủy tinh Pyrex trong vùng tần số và nhiệt độ khảo sát tương ứng là 4.82 và 0.0054 [29].

Ở vùng tần số khảo sát THz, do điều kiện chế tạo và đo đạc còn hạn chế ở Việt Nam do vậy nghiên cứu này đều tiến hành bằng mô phỏng sử dụng phần mềm CST Microwave Studio kết hợp với các tính toán dựa trên mô hình mạch điện LC.

### 5.1.2. Mô hình mạch điện LC ứng với cấu trúc cặp đĩa cho độ từ thẩm âm



**Hình 5.2.** Mô hình mạch điện LC cho cấu trúc cặp đĩa.

Mô hình mạch điện LC cho cấu trúc cặp đĩa tương tự cấu trúc CWP với tụ điện C xuất hiện ở hai đầu của cặp đĩa theo chiều điện trường  $\mathbf{E}$ , hai đĩa tương ứng với mỗi cuộn cảm  $L_m$ . Tuy nhiên do đặc trưng của hạt tải mang điện trong bán dẫn ở tần số cao, ngoài thành phần độ cảm ứng  $L_m$  như thông thường, thành phần độ cảm ứng động lượng  $L_{mk}$  được thêm vào trong mạch điện và được xem như mắc nối tiếp với  $L_m$  (thành phần điện trở được bỏ qua vì trong tính toán điện trở  $R$  nhỏ hơn rất nhiều so với cảm kháng  $Z_L$  và dung kháng  $Z_C$ ). Mô hình mạch điện LC của cấu trúc cặp đĩa được đưa ra trên hình 5.2.

Độ cảm ứng tổng cộng của mạch được xác định bởi công thức:

$$L = (L_m + L_{mk}) \quad (5.1)$$

Trong đó độ cảm ứng của đĩa là:

$$L_m = \frac{\mu\pi(t_s + 2t_m)}{4} \quad (5.2)$$

Độ cảm ứng động lượng (kinetic inductance) của đĩa:

$$L_{mk} = \frac{\pi m^*}{2t_m N e^2} \quad (5.3)$$

với  $m^*$  là khối lượng của hạt tải,  $N$  là nồng độ hạt tải,  $e$  là điện tích và  $t_m$  là chiều dày của lớp InSb.

### 5.1.3. Mô hình mạch điện LC ứng với cấu trúc lưới đĩa cho chiết suất âm

So với mô hình mạch điện LC của cấu trúc cặp đĩa, mô hình mạch điện LC của cấu trúc lưới đĩa có thêm thành phần  $L_n$  là do đóng góp của phần giống nút cỗ chai tạo ra. Điều này được giải thích tương tự như cấu trúc FN (hình 1.27) theo đề xuất của Kafesaki [51] như đã đề cập ở phần tổng quan. Ngoài ra, độ cảm ứng động lượng  $L_{kn}$  ứng với phần nút cỗ chai, và  $L_{km}$  ứng với thành phần đĩa cũng được thêm vào khi nghiên cứu ở vùng tần số THz. Mô hình mạch điện LC của cấu trúc lưới đĩa DN được đưa ra trên hình 5.3.

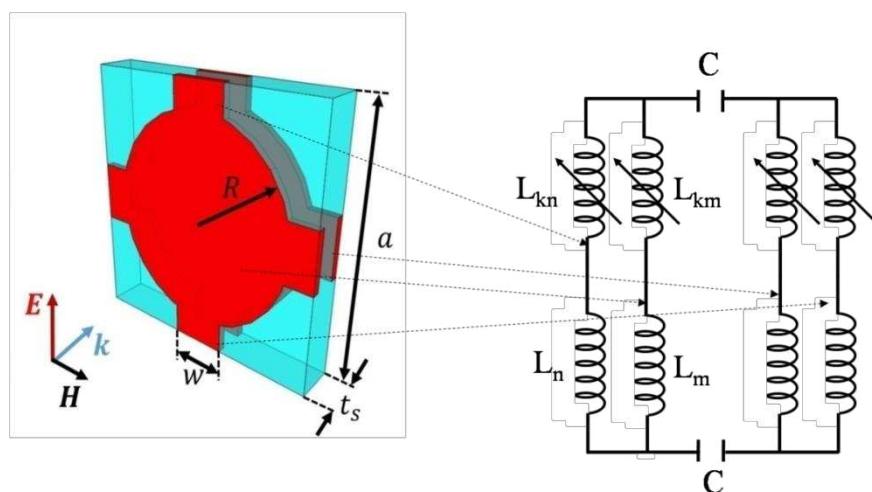
Độ cảm ứng tổng cộng là:

$$L = (L_m + L_{km})(L_n + L_{kn}) / (L_m + L_n + L_{km} + L_{kn}) \quad (5.4)$$

trong đó  $L_m$  và  $L_{mk}$  được xác định từ công thức (5.2) và (5.3).

Độ cảm ứng của phần như nút cỗ chai là:

$$L_n = \frac{\mu(t_s + 2t_m)(a - 2R)}{2w} \quad (5.5)$$



**Hình 5.3. Mô hình mạch điện LC cho cấu trúc lưới đĩa**

Và độ cảm ứng động lượng của phần nút cỗ chai là:

$$L_{kn} = \frac{(a - 2R)m^*}{wt_m Ne^2} \quad (5.6)$$

Tụ điện C ở cả hai cấu trúc DP và DN giống nhau là các tụ phẳng có diện tích là các hình tròn nên điện dung C được xác định bởi công thức:

$$C = \varepsilon \frac{c_1 \pi R^2}{t_s} \quad (5.7)$$

trong đó  $\varepsilon$  là độ điện thẩm của Pyrex và  $c_1$  là tham số hình học phụ thuộc vào tỉ lệ diện tích có diện tích phân bố trên toàn bộ diện tích của đĩa. Tuy nhiên, lưu ý rằng, giá trị của  $c_1$  trong cấu trúc lưỡi đĩa DN này hơi khác so với những cấu trúc cặp đĩa DP do biến dạng của các phân bố diện tích nhờ vào các dây liên tục thêm vào [2].

#### 5.1.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ lên tính chất điện của vật liệu InSb

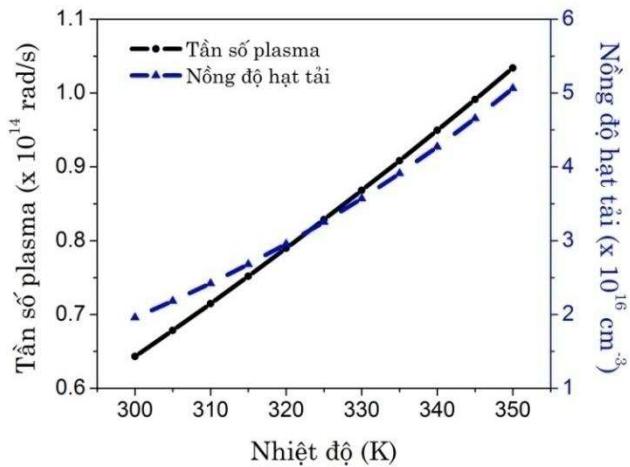
Trước khi nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ lên tính chất của vật liệu Meta dựa trên vật liệu InSb, đề tài tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ lên nồng độ hạt tải và tần số plasma của vật liệu InSb.

Trong vùng hồng ngoại xa, độ điện thẩm của InSb có thể được xác định theo các mô hình Drude theo phương trình (1.9) ( $\varepsilon = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$ ). Tần số plasma được xác định bằng công thức (1.10) ( $\omega_p = \left( \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m^*} \right)^{1/2}$ ) [99], [28] Trong thực tế, hệ số dập tắt  $\gamma$  của InSb phụ thuộc vào độ linh động  $\mu$  của các electron theo công thức  $\gamma = \frac{em^*}{\mu}$  và do đó tính chất hấp thụ của InSb cũng có thể bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi nhiệt độ. Trong phạm vi vùng nhiệt độ khảo sát từ 300K và 350 K và vùng tần số 0.1 - 1.5 THz, độ linh động của điện tử hầu như không phụ thuộc nhiệt độ [138, 139]. Vì lý do này, sự ảnh hưởng của nhiệt độ lên  $\gamma$  có thể được bỏ qua. Các tham số của vật liệu InSb là  $\varepsilon_\infty = 15.68$ ,  $\gamma = 5 \times 10^{10} \text{ Hz}$  và  $m^* = 1.37 \times 10^{-32} \text{ kg}$  [6].

Mật độ hạt tải của bán dẫn InSb phụ thuộc vào nhiệt độ theo công thức:

$$N = 5.76 \times 10^{14} T^{3/2} e^{-0.26/2k_B T} \quad (5.8)$$

ở đây,  $T$  là nhiệt độ tuyệt đối,  $k_B$  là hằng Bolzmann [6].

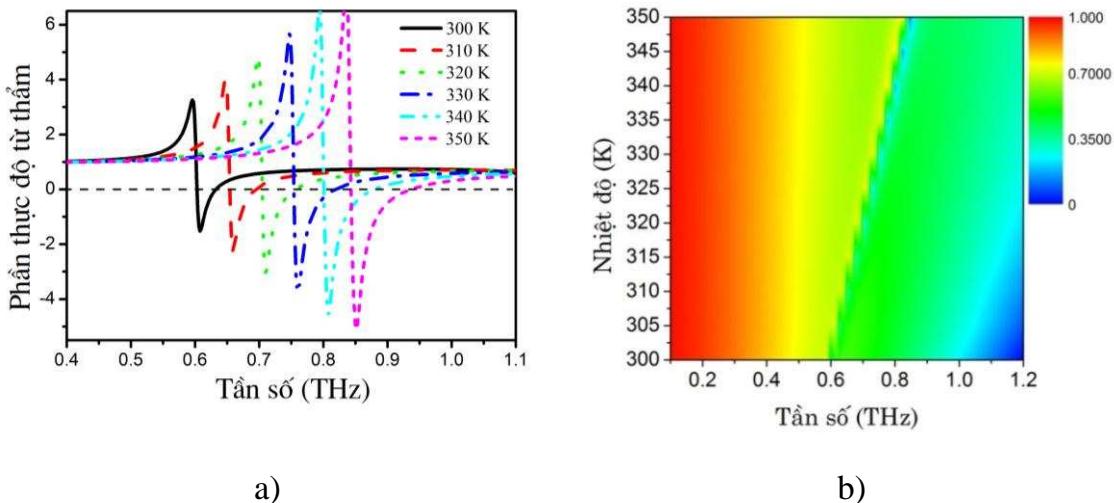


**Hình 5.4.** Tần số plasma và nồng độ hạt tải phụ thuộc vào nhiệt độ.

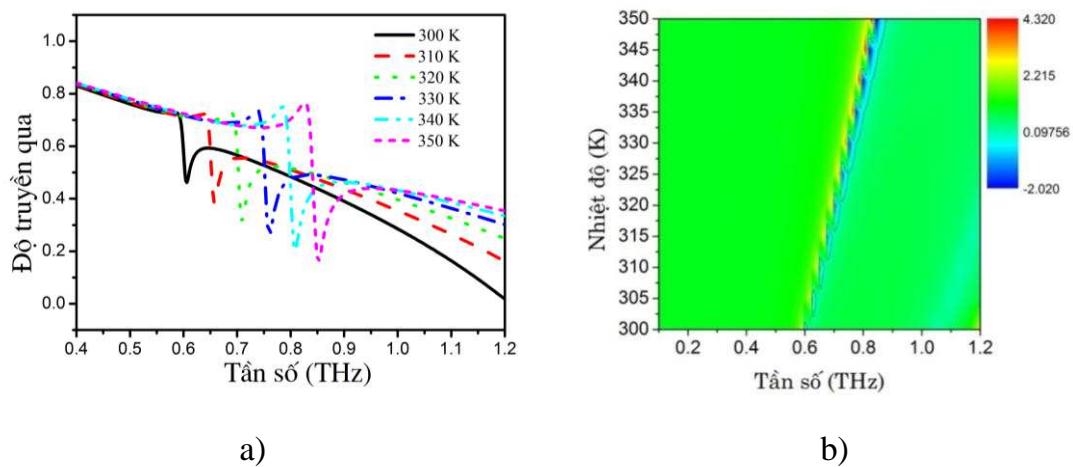
Thay nhiệt độ cần khảo sát (300 - 350 K) vào phương trình (5.8), ta tính được nồng độ hạt tải  $N$ , tiếp tục thay  $N$  vào công thức (1.4) tần số plasma hoàn toàn được xác định. Hình 5.4 biểu diễn sự phụ thuộc của nồng độ hạt tải và tần số plasma vào nhiệt độ. Quan sát hình 5.4 ta thấy, khi tăng nhiệt độ khiến cho nồng độ hạt tải và tần số plasma cũng tăng theo, điều đó khẳng định bán dẫn InSb thể hiện tính chất kim loại càng rõ rệt ở nhiệt độ cao. Ở đây sử dụng bán dẫn tinh khiết nên nồng độ điện tử và lỗ trống tự do bằng nhau. Tuy nhiên độ linh động của lỗ trống nhỏ hơn rất nhiều so với điện tử, do đó trong các nghiên cứu này chủ yếu xét sự dịch chuyển của các điện tử tự do và bài toán trở về gần giống với kim loại.

Mặc dù theo công thức (5.8) nồng độ hạt tải  $N$  của bán dẫn InSb càng tăng khi nhiệt độ càng cao nhưng trong nghiên cứu này bước đầu chỉ khảo sát ở quanh nhiệt độ phòng từ 300K đến 350K. Vì ngoài việc xem xét chất bán dẫn ra thì vật liệu điện môi cũng đóng góp không nhỏ quyết định đến tính chất của vật liệu Meta. Các vật liệu điện môi nói chung và vật liệu thủy tinh Pyrex nói riêng phần thực của độ điện thẩm và độ tổn hao đều phụ thuộc vào nhiệt độ và tần số khảo sát. Trong khoảng nhiệt độ từ 300K đến 350K và vùng tần số khảo sát, các giá trị này của thủy tinh Pyrex không đổi [29]. Hơn thế, do vùng nhiệt độ khảo sát này quanh nhiệt độ phòng và khoảng thay đổi là không nhiều nên các tính chất khác của vật liệu như độ dãn, biến dạng... hầu như không thay đổi nên có thể bỏ qua. Như vậy, trong nghiên cứu bước đầu này, bài toán sẽ trở nên đơn giản hơn khi chỉ cần xem xét đến sự thay đổi nồng độ hạt tải của bán dẫn InSb theo nhiệt độ. Có thể các nghiên cứu trong thời gian tới, chúng tôi sẽ giải quyết bài toán phức tạp hơn khi đưa vùng khảo sát nhiệt độ lên cao hơn.

## 5.2. Điều khiển độ từ thâm âm sử dụng cấu trúc cặp đĩa (DN)



**Hình 5.5.** a) Phổ truyền qua tại nhiệt độ từ 300 K đến 350 K và b) Phổ truyền qua theo nhiệt độ tổng quát hóa (theo nhiều giá trị nhiệt độ)



**Hình 5.6:** a) Độ từ thâm tại nhiệt độ 300 K đến 350 K và b) Độ từ thâm theo nhiệt độ tổng quát hóa (theo nhiều giá trị nhiệt độ). Đường nét liền ứng với các vị trí có  $\mu=0$

Bằng cách, thay các giá trị tần số plasma trên vào hàm số điện môi InSb ở công thức (1.3), sự phụ thuộc vào nhiệt độ của phổ truyền qua của vật liệu Meta có cấu trúc cặp đĩa được mô phỏng như trên hình 5.5(a) và được tổng quát hóa như trên hình 5.5(b). Các kết quả cho thấy tương ứng với sự tăng dần của nhiệt độ, phổ truyền qua của vật liệu Meta có cấu trúc cặp đĩa dịch chuyển về phía tần số cao. Khi nhiệt độ tăng từ 300 lên 350 K, vị trí của đỉnh cộng hưởng cũng dịch chuyển từ 0.6 lên 0.85 THz. Xu hướng dịch chuyển về phía tần số cao của đỉnh cộng hưởng từ có thể được giải thích thông qua mô hình mạch LC, với tần số cộng hưởng được cho bởi công

thúc  $f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ . Như đã đề cập ở trên, theo công thức (5.8) nhiệt độ tăng khiến cho nồng độ hạt tải trong InSb tăng theo. Sự tăng cường nồng độ hạt tải sẽ làm giảm bớt giá trị của độ cảm ứng động lượng cho bởi công thức (5.3). Kết quả làm giảm độ cảm ứng tổng cộng nên tần số cộng hưởng từ sẽ dịch về phía tần số cao.

Để kiểm chứng sự tồn tại của độ từ thẩm âm, giá trị của độ từ thẩm phụ thuộc vào nhiệt độ đã được tính toán. Hình 5.6(a) và 5.6(b) cho thấy độ từ thẩm âm không chỉ thu được trong khoảng nhiệt độ và tần số đã khảo sát mà vùng tần số có độ từ thẩm âm còn có xu hướng rộng ra khi nhiệt độ tăng thêm. Điều này được giải thích do sự tăng nồng độ hạt tải khi nhiệt độ tăng. Khi đó, nồng độ hạt tải tăng trong khi cấu trúc hình học của vật liệu Meta là không đổi, cường độ dòng đối song trên bề mặt sẽ càng lớn. Vì thế, cộng hưởng từ sẽ càng mạnh và dẫn đến biên độ của  $\mu$  tại vị trí cộng hưởng sẽ càng lớn. Nhờ đó, vùng có độ từ thẩm âm sẽ mở rộng hơn.

### 5.3. Điều khiển chiết suất âm sử dụng cấu trúc lưới đĩa (DN)

Sau khi thu được các kết quả điều khiển độ từ thẩm âm bằng nhiệt độ của cấu trúc DP, các kết quả này được sử dụng để điều khiển vùng chiết suất âm cho cấu trúc DN. Như đã giới thiệu ở trên, cấu trúc DN gồm hai thành phần: một cặp đĩa tạo ra độ từ thẩm âm và các thanh liên tục tạo ra độ điện thẩm âm, các thành phần này đều sử dụng chất bán dẫn InSb. Tuy nhiên, để đạt được vùng chiết suất âm, các nghiên cứu cần chi tiết để sao cho các thiết kế có thể tạo ra được vùng có độ từ thẩm âm chồng chập với vùng có độ điện thẩm âm. Cụ thể, để đạt tính chất chiết suất âm, tần số plasma của cấu trúc phải cao hơn so với tần số cộng hưởng từ. Một trong những vấn đề quan trọng của vật liệu Meta là hướng ứng điện và từ của chúng có thể được điều khiển một cách độc lập bởi các thành phần khác nhau của cấu trúc. Trong khi tần số cộng hưởng từ chỉ được xác định bởi các dòng đối song giữa các cặp đĩa, thì tần số plasma tổng cộng chủ yếu là kết quả của các dao động tập thể của các điện tử trong các dây liên tục [91], [111]. Nếu mật độ electron trong InSb là  $N$ , mật độ hiệu dụng của các electron tích cực trong các dây liên tục InSb tỷ lệ với phần không gian bị chiếm bởi các dây:

$$N_{\text{eff}} = N \frac{t_m w}{a^2} \quad (5.9)$$

Dựa vào công thức tính mật độ điện tử  $N$  và các thông số hình học của cấu trúc dạng lưới đĩa, mật độ hạt tải  $N$ , độ cảm ứng động lượng, tần số cộng hưởng từ và tần số plasma của cấu trúc theo hàm của nhiệt độ được tính toán và đưa ra trong bảng 5.1. Rõ

ràng là InSb mang đặc tính kim loại hơn ở nhiệt độ cao hơn. Sự gia tăng về mật độ hạt tải trong InSb dẫn đến việc giảm các độ cảm ứng động lượng, sẽ đóng một vai trò quan trọng trong việc dùng nhiệt độ điều chỉnh tần số cộng hưởng từ và các tính chất plasma của cấu trúc dạng lưới đĩa đề xuất.

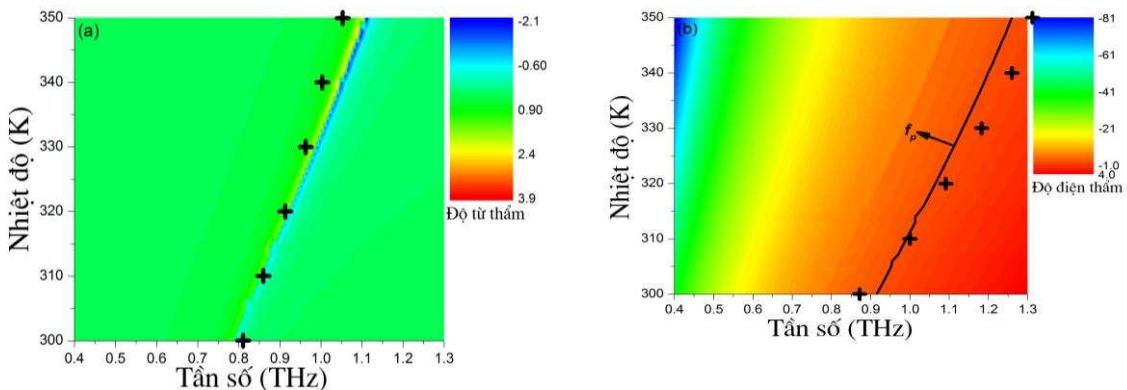
*Bảng 5.1.Các kết quả tính toán nồng độ hạt tải N, độ tự cảm động, tần số cộng hưởng từ và tần số plasma tổng cộng của cấu trúc tương tự DN phụ thuộc vào nhiệt độ.*

T (K)	N ( $10^{22} \text{ m}^{-3}$ )	L <sub>km</sub> ( $10^{-11} \text{ H}$ )	L <sub>kn</sub> ( $10^{-11} \text{ H}$ )	f <sub>m</sub> (THz)	f <sub>p</sub> (THz)
300	1.96	2.14	1.17	0.83	0.87
310	2.42	1.73	0.94	0.88	0.97
320	2.96	1.42	0.77	0.93	1.07
330	3.57	1.17	0.64	0.97	1.18
340	4.27	0.98	0.53	1.02	1.29
350	5.06	0.82	0.45	1.05	1.41

Bên cạnh việc tính toán đưa ra các tham số trong bảng 5.1, thay mật độ hạt tải N vào phương trình (1.4 và 1.3) ta tính được độ điện thẩm và tần số plasma của InSb. Các tham số này được sử dụng để mô phỏng các tính chất của vật liệu Meta bằng phần mềm mô phỏng CST. Ứng với một nhiệt độ nhất định, bằng phương pháp mô phỏng ta sẽ thu được các hưởng ứng điện từ của cấu trúc bao gồm phổ truyền qua, phản xạ và các pha của chúng. Dựa vào các kết quả mô phỏng này, độ điện thẩm và từ thẩm của cấu trúc dạng lưới đĩa InSb được tính toán theo nhiệt độ từ 300 K đến 350 K được trình bày trên hình 5.7. Dấu '+' trên hình 5.7 chỉ các giá trị tính toán của tần số cộng hưởng từ f<sub>m</sub> và tần số plasma f<sub>p</sub> (trong bảng 5.1) sử dụng mô hình LC tương đương.

Qua các dữ liệu mô phỏng và tính toán trên hình 5.7 cho thấy, tồn tại một vùng tần số có độ từ thẩm âm được giải thích do bản chất của cộng hưởng từ của cặp đĩa sinh ra. Bên cạnh đó, tần số plasma tổng cộng cao hơn so với vùng tần số có độ từ thẩm âm này nên chắc chắn sẽ tồn tại một vùng tần số có chiết suất âm. Một điểm thú vị ở đây là sự dịch chuyển đồng thời của vùng từ thẩm âm và tần số plasma tổng cộng của mẫu khi nhiệt độ tăng lên. Cụ thể, cộng hưởng từ chuyển 0.8-1.1 THz trong khi tần số plasma dịch chuyển từ 0.9-1.3 THz ứng với nhiệt độ tăng từ 300-350 K. Như vậy các tính chất từ và điện đều được điều chỉnh bằng nhiệt độ thông qua chất bán dẫn InSb. Như đã trình bày ở trên, mật độ hạt tải của InSb tăng

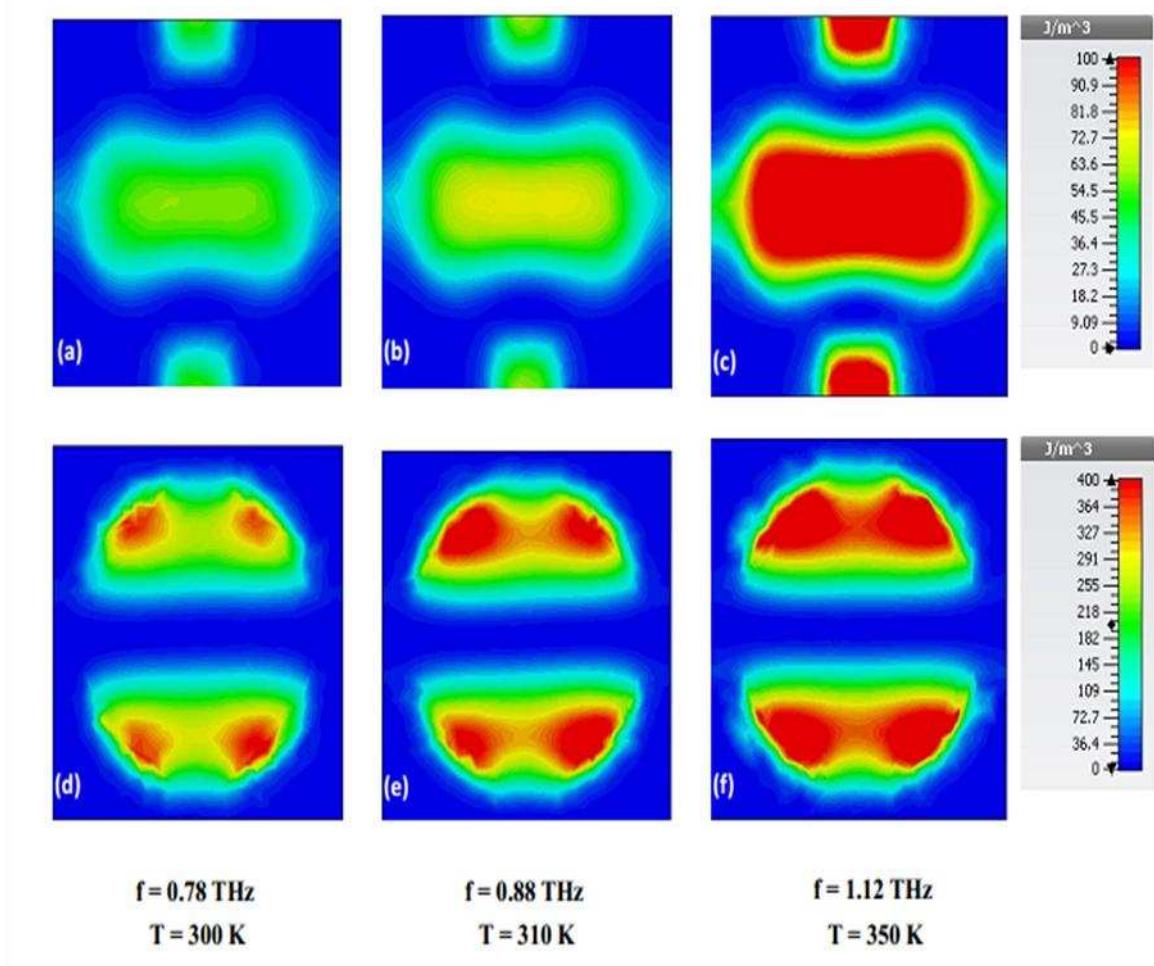
lên theo sự tăng của nhiệt độ, đẩy tần số cộng hưởng từ  $f_m$  và tần số plasma  $f_p$  đồng thời về vùng tần số cao hơn. Điều này đảm bảo sự chồng chập đồng thời của độ từ thẩm và điện thẩm âm của cấu trúc đĩa xuất trên vùng nhiệt độ quan tâm. Hình 5.7 cho thấy có sự phù hợp tốt giữa kết quả mô phỏng và tính toán dựa trên mô hình mạch LC đã phân tích.



**Hình 5.7.** Giá trị mô phỏng của a) Độ từ thẩm và b) độ điện thẩm của cấu trúc dạng lưỡi đĩa InSb phụ thuộc vào nhiệt độ. Dấu '+' trên hình là các giá trị tính toán theo mô hình mạch LC a) tần số cộng hưởng từ và b) tần số cộng hưởng điện

Bên cạnh sự dịch chuyển tần số, một điểm thú vị khác nữa được quan sát thấy trong hình 5.7 (a) đó là sự tăng cường độ cộng hưởng từ khi nhiệt độ tăng. Điều này giải thích hoàn toàn tương tự với các kết quả nghiên cứu điều khiển độ từ thẩm cho cấu trúc DP ở trên. Cộng hưởng từ mạnh hơn ở nhiệt độ cao hơn có thể được hiểu là do mật độ hạt tải tăng. Trong khi thể tích ô cơ sở là không thay đổi, nồng độ hạt tải tăng dẫn đến các dòng đối song mạnh hơn, và do đó mômen từ cảm ứng mạnh hơn.

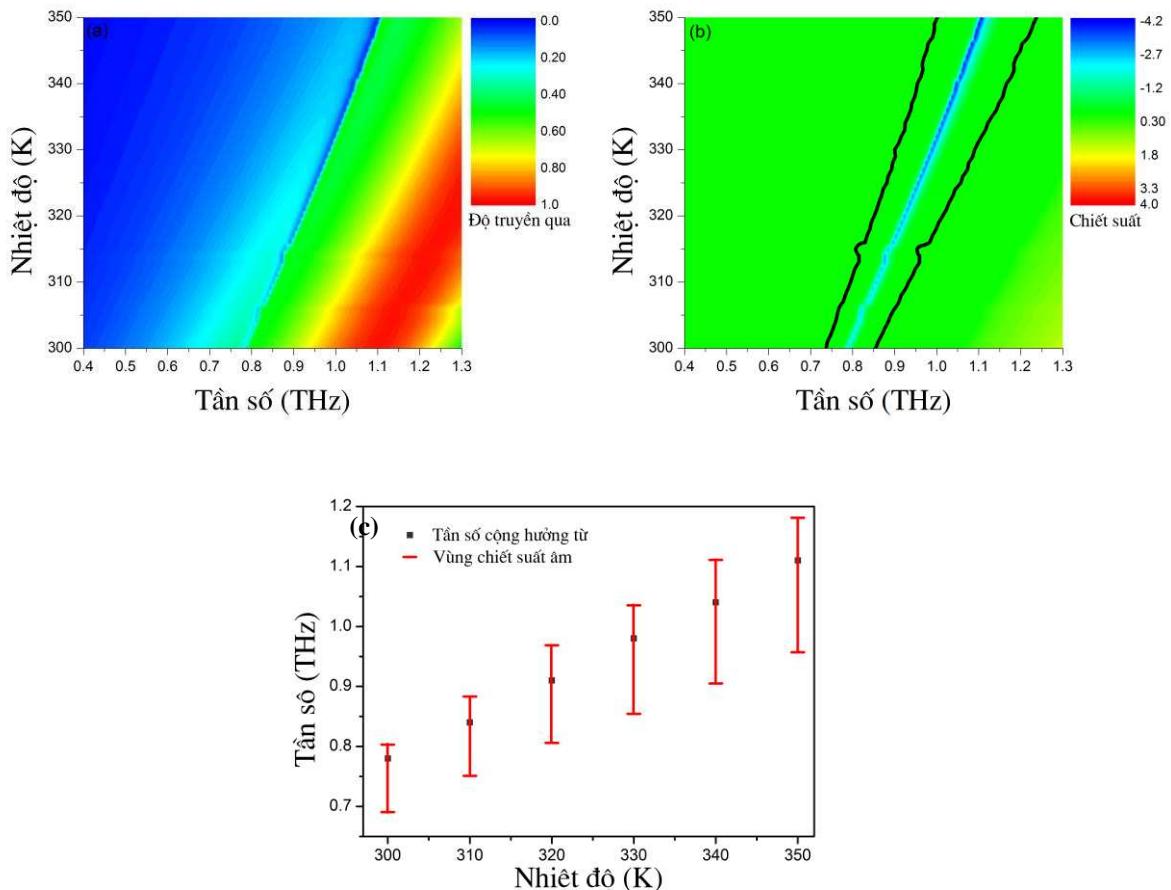
Để có được cái nhìn sâu sắc hơn nữa về cộng hưởng từ, sự phân bố năng lượng từ và điện cảm ứng ở các nhiệt độ khác nhau: 300, 310 và 350 K được mô phỏng tương ứng tại các tần số cộng hưởng (xem hình 5.8). Kết quả cho thấy năng lượng từ cảm ứng tăng khi nhiệt độ của InSb tăng, điều này xác nhận sự tăng của cộng hưởng từ, hoàn toàn phù hợp với Meta có cấu trúc DP. Quan sát này khẳng định tính chất từ của cộng hưởng tạo ra bởi dòng đối song trên bề mặt của các cặp đĩa theo theo phương của điện trường  $\mathbf{E}$ . Tuy nhiên, một điều có thể nhận thấy rằng sự phân bố năng lượng từ của cấu trúc dạng lưỡi đĩa này không đồng đều dọc theo các cạnh trên và dưới của các đĩa, khác với những gì quan sát trong các cấu trúc cặp đĩa trong tài liệu [118].



**Hình 5.8.** Mô phỏng phân bố (a-c) năng lượng từ trường cảm ứng và (d-f) năng lượng điện trường cảm ứng tại các tần số cộng hưởng theo nhiệt độ 300K, 310K và 350K.

Hơn nữa, sự phân bố điện trường cũng bị biến dạng ở hai đầu của đĩa theo hướng điện trường **E**, tập trung chủ yếu ở các mép đĩa theo hướng **H**. Điều này liên quan đến sự phân bố từ trường. Kết quả này được giải thích là do dòng đi vào đoạn giống nút cỗ chai của dây liên tục dao động trái dấu với dòng qua các đĩa, do đó tạo ra sự phân bố không đồng nhất ở khu vực nơi hai dòng đối lập gặp nhau [51]. Vì vậy, có thể nói rằng sự đóng góp của các phần giống nút cỗ chai của dây liên tục trong cấu trúc dạng lưới đĩa làm dịch chuyển tần số cộng hưởng từ lên tần số cao hơn so với cấu trúc chỉ có các cặp đĩa (ví dụ cùng ở nhiệt độ 300K cấu trúc DP cho cộng hưởng từ ở tần số 0.6 THz trong khi đó với cấu trúc DN cho cộng hưởng từ ở tần số 0.78 THz). Sự dịch chuyển này chủ yếu là do sự gia tăng của độ cảm ứng của các đoạn giống như cỗ chai  $L_n$  như thể hiện trong biểu thức (5.5). Ở nhiệt độ cao hơn, sẽ có nhiều điện tích cảm ứng hơn tập trung ở các cạnh của các đĩa, dẫn đến

cộng hưởng từ mạnh hơn. Kết quả này dẫn đến vùng có độ từ thẩm âm rộng ra đáng kể như đã trình bày trong nghiên cứu trên.



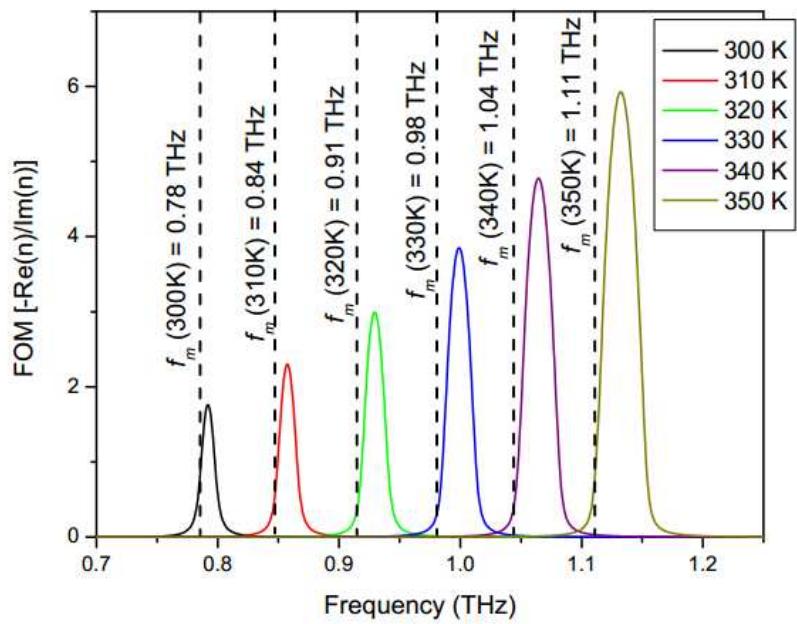
**Hình 5.9.** a) Phổ truyền qua và b) chiết suất của cấu trúc dạng lưỡi đĩa InSb theo nhiệt độ c) tính toán vùng có chiết suất âm khi nhiệt độ tăng

Mặc dù tần số plasma tổng cộng và tần số cộng hưởng từ được bố trí khá hợp lý trong thiết kế của nghiên cứu này. Tuy nhiên, việc xác định sự tồn tại của vùng chiết suất âm cần được tính toán cụ thể. Hình 5.9 (a) và (b) là phổ truyền qua mô phỏng và phần thực chiết suất của cấu trúc dạng lưỡi đĩa InSb thay đổi theo nhiệt độ. Có thể thấy rằng ở nhiệt độ phòng có hai đỉnh truyền quan sát được: một ở 0.8 THz với một dải thông hẹp và một rộng hơn ở 1.1 THz. Khi tăng nhiệt độ lên đến 350 K, hai đỉnh này dịch về phía tần số cao. Đỉnh có tần số thấp hơn dịch từ 0.8 THz đến 1.1 THz trong khi đỉnh kia dịch từ 1.1 THz đến 1.5 THz [không quan sát thấy trong hình 5.9(a)]. Với hình ảnh quan sát được này, đỉnh truyền qua thứ nhất có thể là do tính chất chiết suất âm, trong khi đỉnh truyền qua thứ hai là do tính chiết suất dương đã được biết đến của các cấu trúc Meta dạng lưỡi [62]. Một minh chứng rõ ràng cho lời giải thích này được đưa ra trên hình 5.9 (b), nơi mà chiết suất được tính toán từ các tham số tán xạ được đưa ra.

Kết quả cho thấy vùng truyền qua thứ nhất do chiết suất âm và vùng truyền qua thứ hai bắt nguồn từ chiết suất dương. Đặc biệt, dải tần có chiết suất âm mở rộng đáng kể khi nhiệt độ tăng lên. Đặc biệt, nó đi từ 14% đến 22% khi nhiệt độ tăng từ 300 K đến 350 K như trong hình 5.9(c). Những kết quả này hoàn toàn phù hợp với việc tăng lên của công hưởng từ như đã nói ở trên. Tuy độ rộng vùng có chiết suất đạt được nhỏ hơn so với công trình công bố gần đây [139], tuy nhiên trong đề tài sử dụng cấu trúc đơn giản hơn rất nhiều, đặc biệt có thể điều biến bằng tác động ngoại vi.

Các đặc tính của cấu trúc dạng lưới đĩa InSb có thể được nghiên cứu chi tiết thêm thông qua hệ số phẩm chất FOM. Hình 5.10 trình bày kết quả tính toán hệ số phẩm chất theo nhiệt độ. Kết quả cho thấy, khi nhiệt độ tăng lên, không chỉ vùng chiết suất âm dịch chuyển mà hệ số phẩm chất FOM cũng tăng. Nó đạt được giá trị cao nhất là 6.0 khi nhiệt độ bằng 350 K. Điều này hoàn toàn phù hợp với sự tăng của công hưởng từ và vùng chiết suất âm quan sát thấy trong hình 5.7(a) và 5.9(b), tương ứng. Một điểm quan trọng là tần số có giá trị FOM cực đại cao hơn một chút so với tần số cộng hưởng từ. Điều này được xem xét cùng với thực tế là tần số cộng hưởng từ chia vùng chiết suất âm hai vùng: phía vùng tần số thấp hơn và tần số cao hơn [hình 5.9(c)]. Vùng tần số thấp hơn được gọi là chiết suất âm đơn trong đó chỉ có độ điện thẩm âm còn từ thẩm có giá trị dương, vùng này có tổn hao rất lớn. Vì thế nên phần ảo của các chỉ số khúc xạ  $Im(n)$  có giá trị lớn ở phía dưới của tần số cộng hưởng. Ngược lại ở phía tần số cao hơn tần số cộng hưởng, được gọi là vùng chiết suất kép, giá trị này giảm. Điều này cũng giải thích lý do tại sao các vùng truyền qua (ứng với  $n < 0$ ) và giá trị FOM tối đa luôn nằm ở vùng tần số cao hơn tần số cộng hưởng từ.

Như vậy trong nghiên cứu này, chúng tôi đã thiết kế và nghiên cứu vật liệu Meta có cấu trúc dạng cặp đĩa và lưới đĩa có thể điều chỉnh bằng nhiệt hoạt động ở tần số THz dựa trên chất bán dẫn InSb. Sử dụng mô hình mạch điện tương đương LC và phương pháp mô phỏng để mô tả các tính chất điện tử của vật liệu Meta đề xuất này. Các kết quả tính toán phù hợp với các kết quả nghiên cứu bằng mô phỏng. Việc điều biến vùng có độ từ thẩm âm và chiết suất âm được thể hiện bằng cách dùng nhiệt để thay đổi mật độ hạt tải của InSb. Kết quả cho thấy rằng, không chỉ tần số vùng chiết suất âm được điều chỉnh mà còn được mở rộng đáng kể khi nhiệt độ tăng. Kết quả này sẽ mở đường cho việc triển khai áp dụng chất bán dẫn trong việc điều biến vật liệu Meta ở vùng THz.



**Hình 5.10.** Sự phụ thuộc của hệ số phảm chất vào nhiệt độ

## KẾT LUẬN CHUNG

Qua các kết quả nghiên cứu của đề tài được trình bày ở trên, đề tài đã đóng góp được những kết quả nghiên cứu mới, có thể tóm lược trong một số kết luận sau đây:

1. Đã xây dựng được qui trình chế tạo siêu vật liệu Meta có cấu trúc khác nhau hoạt động ở vùng tần số GHz: Vật liệu Meta có độ từ thẩm âm ( $\mu < 0$ ) dựa trên cấu trúc cặp dây bị cắt, cấu trúc dạng đĩa; vật liệu Meta có chiết suất âm ( $n < 0$ ) dựa trên cấu trúc kết hợp, cấu trúc lưới cá và cấu trúc lưới đĩa. Qui trình công nghệ ổn định và có độ lặp lại cao.
2. Nghiên cứu các cấu trúc khác nhau cho chiết suất âm khi tương tác với sóng điện tử. Đặc biệt đã tìm ảnh hưởng của các tham số cấu trúc và từ đó tìm ra cấu trúc ưu việt nhất: đơn giản, không phụ thuộc phân cực
3. Dựa trên mô hình lai hóa bậc hai, đã thiết kế và chế tạo vật liệu Meta có độ từ thẩm âm và chiết suất âm có dải tần số làm việc rộng. Kết quả nghiên cứu cho thấy độ rộng dải tần số làm việc của vật liệu Meta tỉ lệ nghịch với khoảng cách giữa hai lớp vật liệu, cụ thể là khi khoảng cách giữa hai lớp giảm độ rộng của dải tần số làm việc tăng lên. Kết quả thực nghiệm trùng khớp với kết quả tính toán lý thuyết và mô phỏng. Mô hình này không những đúng cho vật liệu Meta hoạt động ở vùng tần số GHz mà còn có thể áp dụng tốt cho vùng tần số THz hoặc cao hơn và có thể mở rộng áp dụng cho vật liệu Meta nhiều lớp.
4. Đã đề xuất và thiết kế vật liệu Meta có độ từ thẩm âm và chiết suất âm phụ thuộc vào nhiệt độ hoạt động ở tần số THz dựa trên vật liệu bán dẫn InSb. Kết quả cho thấy khi nhiệt độ tăng từ 300K đến 350K, tần số cộng hưởng từ của cấu trúc cặp đĩa tăng từ 0.6 THz đến 0.85 THz, trong khi đó tần số cộng hưởng từ của cấu trúc lưới đĩa tăng từ 0.8THz đến 1.1 THz và độ rộng của dải tần số có chiết suất âm tăng gấp gần 2 lần. Kết quả mô phỏng phù hợp với kết quả thu được từ tính toán. Kết quả này gợi ý tốt cho việc sử dụng vật liệu bán dẫn để điều khiển các tính chất của vật liệu Meta bằng các tác động ngoại vi như nhiệt, điện, quang ở vùng tần số cao.

**KIẾN NGHỊ**

**Được tiếp tục hỗ trợ kinh phí để thực hiện các hướng nghiên cứu tiếp theo như:**

1. Tiếp tục nghiên cứu để tìm ra cấu trúc tối ưu áp dụng để chế tạo vật liệu Meta có cấu trúc 2D, 3D.
2. Nghiên cứu công nghệ chế tạo vật liệu Meta hoạt động ở vùng tần số THz và cao hơn.
3. Nghiên cứu công nghệ chế tạo một số loại vật liệu Meta có thể điều khiển được tính chất bằng các tác động ngoại vi như nhiệt, điện, quang hoạt động ở vùng tần số THz.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### I. TIẾNG VIỆT

- [1] Lê Thị Quỳnh (2012), *Nghiên cứu công nghệ chế tạo và tính chất của giả vật liệu Metamaterial*, Luận văn tốt nghiệp Thạc sĩ, Trường Đại học Quốc Gia Hà Nội.

### II. TIẾNG ANH

- [2] Alici K. B., Ozbay E. (2008), “A planar metamaterial: Polarization independent fishnet structure”, Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Application, 6, pp. 102-107.
- [3] Ashcroft N. W., Mermin N. D. (1976), Solid State Physics, Holt, Rinehart and Winston.
- [4] Atre A. C., García-Etxarri A., Alaeian H., and Dionne J. A. (2013), A broadband negative index metamaterial at optical frequencies, Advanced Optical Materials, 1, pp. 327-333.
- [5] Atre A. C., Garcia-Etxarri A., Alaeian H., and Dionne J. A. (2013), “A Broadband Negative Index Metamaterial at Optical Frequencies” Advanced Optical Materials, 1, pp. 327-332.
- [6] Bai Q., Liu C., Chen J., Cheng C., Kang M. and Wang H. T. (2010), “Tunable slow light in semiconductor metamaterial in a broad terahertz regime”, Journal of Applied Physics, 107, pp. 093104-093109.
- [7] Bonache J., Gil I., Garcia-Garcia J., and Martin F. (2006), "Novel microstrip bandpass filters based on complementary split-ring resonators", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54, pp. 265-269.
- [8] Bruggeman V. D. (1935), “Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen”, Annals of Physics (Leipzig), 24, pp. 636-642.
- [9] Burokur S. N., Sellier A., Kanté B., and Lustrac A. (2009), “Symmetry breaking in metallic cut wire pairs metamaterials for negative refractive index”, Applied Physics Letters, 94, pp. 201111-201118.
- [10] Cai W., and Shalaev V. (2010), Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications, Springer, New York.

- [11] Cakmak A. O., Guven K., and Ozbay E. (2007), "Planar bilayer metamaterial with left-handed transmission and negative refraction at GHz frequencies", *Physical Status Solidi B*, 244, pp. 1188-1194.
- [12] Cao J. X., Liu H., Li T., Wang S. M., Li T. Q., Zhu S. N., and Zhang X. (2009), "Steering polarization of infrared light through hybridization effect in a tri-rod structure", *Journal of the Optical Society of America B*, 26, pp. 96-103.
- [13] Chen J., Wang Y., Jia B., Geng T., Li X., Feng L., Qian W., Liang B., Zhang X., and Gu M. (2011), "Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies", *Nature Photonics*, 5, pp. 239-243.
- [14] Cheng Y. Z., Niea Y., and Gong R. Z. (2012), "Broadband 3D isotropic negative-index metamaterial based on fishnet structure", *The European Physical Journal B*, 85, pp. 62-68.
- [15] Chen X., Grzegorczyk T. M., Wu B. I., Pacheco J., and Kong J. A. (2004), "Ro-bust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials", *Physical Review E*, 70, pp. 016608- 016612.
- [16] Chen H. T., Padilla W. J., Zide J. M. O., Gossard A. C., Taylor A. J., Averitt R. D. (2006), "Active terahertz metamaterial devices", *Nature*, 444, pp. 597-603.
- [17] Cheng Y. Z., Wang Y., Nie Y., Gong R. Z., Xiong X., Wang X. (2012), "Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements", *Journal of Applied Physics*, 111, pp. 044902-044909.
- [18] Cheng Y. Z., Niea Y., and Gong R. Z. (2012), "Broadband 3D isotropic negative-index metamaterial based on fishnet structure", *The European Physical Journal B*, 85, pp. 62-68.
- [19] Choi M., Lee S. H., Kim Y., Kang S. B., Shin J., Kwak M. H., Kang K. Y., Lee Y. H., Min N. P. & B. (2011), "A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index", *Nature*, 470, pp. 369-376.
- [20] Cunningham R. W. and Gruber J. B. (1970), "Intrinsic Concentration and Heavy Hole Mass in InSb", *Journal Applied Physics*, 41, pp. 1804-1809.

- [21] Cuong T. M. (2012), "Electromagnetic Coupling Reduction between Millimeter Microstrip Antennas using High Impedance Surface", International Journal of Scientific & Engineering Research, 3, pp. 1-10.
- [22] Deng T., Huang R., Tang M. C., and Tan P. K. (2014), "Tunable reflector with active magnetic metamaterials", Optics Express, 22, pp. 6287-6291.
- [23] Depine R. A., and Lakhtakia A. (2004), "A new condition to identify isotropic dielectric-magnetic materials displaying negative phase velocity", Microwave and Optical Technology Letters, 41, pp. 315-321.
- [24] Ding F., Cui Y., Ge X., Jin Y., He S. (2012), "Ultra-broadband GHz metamaterial absorber", Applied Physics Letters, 100, pp. 103506-103513.
- [25] Dolling G., Wegener M., Soukoulis C. M. and Linden S. (2006), "Negative-index metamaterial at 780nm wavelength", Optics Letter, 32, pp. 53-59.
- [26] Dolling G., Enkrich C., Wegener M., Soukoulis C. M., and Linden S. (2006), "Low-loss negative-index metamaterial at telecommunication wavelengths", Optics Letter, 31, pp. 1800-1802.
- [27] Duan Z. Y. (2009), "Research progress in reversed Cherenkov radiation in double-negative Metamaterials", Progress In Electromagnetics Research, PIER, 90, pp. 75-81.
- [28] Dung N. V., Yoo Y. J., Lee Y. P., Tung N. T., Tung B. S. and Lam V. D. (2014), "Polarization Dependence of the Metamagnetic Resonance of Cut-wire-pair Structure by Using Plasmon Hybridization", Journal of the Korean Physical Society, 65, pp. 70-76.
- [29] Espe W. (1968), Materials of High Vacuum Technology, Pergamon Press, London.
- [30] Friedman R., Atkins P., (2005), In Molecular Quantum Mechanics, 4th. ed., Oxford University Press, Oxford.
- [31] Fang N., Lee H., Sun C., Zhang X. (2005), "Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens", Science, 308, pp. 534-537.
- [32] Garcia-Meca C., Hurtado J., Marti J., Martinez A., Dickson W., and Zayats A. V. (2011), "Low-Loss Multilayered Metamaterial Exhibiting a Negative Index of Refraction at Visible Wavelengths", Physical Review Letters, 106, pp. 067402-067409.

- [33] Garnett J. (1904), "Colours in metal glasses and in metallic films", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 203, pp. 636-642.
- [34] George K., Aggelos X., Alexandros S., Vamvakaki M., Farsari M., Kafesaki M., Soukoulis C. M., Economou E. N. (2015), "Three-Dimensional Infrared Metamaterial with Asymmetric Transmission", ACS Photonics, 2, pp. 287-291.
- [35] Gu S., Barrett J. P., Hand T. H., Popa B. I., Cummer S. A. (2010), "A broadband low-reflection metamaterial absorber", Journal of Applied Physics, 108, pp. 064913-064922.
- [36] Guven K., Caliskan M. D., and Ozbay E. (2006), "Experimental observation of left-handed transmission in a bilayer metamaterial under normal-to-plane propagation", Optics Express, 14, pp. 8685-8691 .
- [37] Han J., Lakhtakia A. (2009), "Semiconductor split-ring resonators for thermally tunable terahertz metamaterials", Journal of Modern Optics, 56, pp. 554-560.
- [38] Holloway C. L., Keuster E. F., J. Baker-Jarvis, and Kabos P. (2003), "A double negative (DNG) composite medium composed of magnetodielectric spherical particles embedded in a matrix" IEEE Antennas and Propagation Magazine, 51, pp. 2596-2603.
- [39] Hedayati M. K., Javaherihim M., Mozooni B., Abdelaziz R., Tavassolizadeh A., Chakravadhanula V. S. K., Zaporjtchenko V., Strunkus T., Faupel F., Elbahri M. (2011), "Design of a Perfect Black Absorber at Visible Frequencies Using Plasmonic Metamaterials", Advanced Materials, 23, pp. 5410-5418.
- [40] Hien N. T., Tung B. S., Tuan N. T., Tung N. T., Lee Y. P., An N. M. and Lam V. D. (2014), "Metamaterial-based perfect absorber:polarization insensitivity and broadband", Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 5, pp. 025013-025019.
- [41] Hoekstra P. and Delaney A. (1974), "Dielectric properties of soils at UHF and GHz frequencies", Journal of Geophysical Research, 79, pp. 1699-1702.
- [42] Howells S. C. and Schlie L. A. (1996), "Transient terahertz reflection spectroscopy of undoped InSb from 0.1 to 1.1 THz" Applied Physics Letters, 69, pp. 550-558.

- [43] Hu C. G., Li X., Feng Q., Chen X. N., and Luo X. G. (2010), "Investigation on the role of the dielectric loss in metamaterial absorber," *Optics Express*, 18, pp. 6598-6603.
- [44] Hu C., Liu L., Chen X. N., and Luo X. G. (2008), Expanding the band of negative permeability of a composite structure with dual-band negative permeability, *Optics Express*, 16, pp. 21544-21549.
- [45] Hui Xia, S. J. Sharpe, A. J. Merriam, and S. E. Harris (1997), "Electromagnetically induced transparency in atoms with hyperfine structure", *Physical Review A*, 56(5), pp. 3362-3365.
- [46] Huang C., Zhao Z., Feng Q., Cui J., and Luo X. (2010), Metamaterial composed of wire pairs exhibiting dual band negative refraction, *Applied Physics B*, 98, pp. 365-371.
- [47] Ishikawa A., Tanaka T. (2013), "Three-Dimensional Plasmonic Metamaterials and Their Fabrication Techniques", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 19, pp. 4700110-4700119.
- [48] Jackson J. D. (1999), *Classical Electrodynamics*, 3rd ed. Wiley & Sons, New York.
- [49] Jiang Z. H., Yun S., Toor F., Werner D. H., and Mayer T. S. (2011), "Conformal dual-band near-perfectly absorbing mid-infrared metamaterial coating", *ACS nano*, 5, pp. 4641-4648.
- [50] Johnson M., Bily A., and Kundtz N. (2014), "Predictive Modeling of Far-Field Pattern of a Metamaterial Antenna", 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics - Metamaterials 2014, Copenhagen, Denmark, 25-30 August 2014, pp. 352-359.
- [51] Kafesaki M., Tsiapa I., Katsarakis N., Koschny T., Soukoulis C. M., and Economou E. N. (2007), "Left-handed metamaterials: The fishnet structure and its variations", *Physical Review B*, 75, pp. 235114-235121.
- [52] Kanté B., Burokur S. N., Sellier A., Lustrac A., and Lourtioz J. M. (2009), "Controlling plasmon hybridization for negative refraction metamaterials", *Physical Review B*, 79, pp. 075121-075127.
- [53] Khanna S. N., Jena P. (1992), "Assembling crystals from clusters", *Physical Review Letters*, 69, pp. 1664–1667.

- [54] Kim Y. J., Yoo Y. J., Kim K. W., Rhee J. Y., Kim Y. H., and Lee Y. P. (2015), "Dual broadband metamaterial absorber", *Optics Express*, 23, pp. 3861-3869.
- [55] Koschny T., Kafesaki M., Economou E. N., and Soukoulis C. M. (2004), "Effective Medium Theory of Left-Handed Materials", *Physical Review Letters*, 93, pp. 107402-107409.
- [56] Kwon D. H., Werner D. H., Kildishev A. V., and Shalaev V. M. (2007), "Near-infrared metamaterials with dual-band negative-index characteristics", *Optics Express*, 15, pp. 1647-1652.
- [57] Lam V. D., Tung N. T., Cho M. H., Park J. W., Rhee J. Y., Lee Y. P. (2009), "Influence of lattice parameters on the resonance frequencies of a cut-wire-pair medium", *Journal of Applied Physics*, 105, pp. 113102-113108.
- [58] Lam V. D., Kim J. B., Lee S. J., and Lee Y. P. (2008), "Left-handed behavior of combined and fishnet structures", *Journal of Applied Physics*, 103, pp. 033107-033113.
- [59] Lam V. D., Kim J. B., Lee Y. P., and Rhee J. Y. (2007), "Dependence of the magnetic-resonance frequency on the cut-wire width of cut-wire pair medium", *Optics Express*, 15, pp. 16651-16658.
- [60] Lam V. D., Kim J. B., Tung N. T., Lee S. J., Lee Y. P., Rhee J. Y. (2008), "Dependence of the distance between cut-wire-pair layers on resonance frequencies", *Optics Express*, 16, pp. 5934- 5939.
- [61] Lam V. D., Tung N. T., Cho M. H., Park J. W., Rhee J. Y., Lee Y. P. (2009), "Influence of lattice parameters on the resonance frequencies of a cut-wire-pair medium", *Journal of Applied Physics*, 105, pp. 113102-113109.
- [62] Lam V. D., Kim J. B., Lee S. J., Lee Y. P. (2008), "Left-handed behavior of combined and fishnet structures", *Journal of Applied Physics*, 103, pp. 033107-033114.
- [63] Landau L. D., Lifshitz E. M., Pitaevskii L. P. (1984), *Electrodynamics of continuous media*, Pergamon, New York.
- [64] Landy N., Sajuyigbe S., Mock J., Smith D., Padilla W. (2008), "Perfect metamaterial absorber", *Physical Review Letters*, 100, pp. 207402-207408.

- [65] Landy N. I., Bingham C. M., Tyler T., Jokerst N., Smith D. R., and Padilla W. J. (2009), "Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging", *Physical Review B*, 79, pp. 125104-125109.
- [66] Lee H. J., and Yook J. G. (2008), "Biosensing using split-ring resonators at microwave regime", *Applied Physics Letters*, 92, pp. 254103-254108.
- [67] Li T. Q., Liu H., Li T., Wang S. M., Cao J. X., Zhu Z. H., Dong Z. G., Zhu S. N., and Zhang X. (2009), "Suppression of radiation loss by hybridization effect in two coupled split-ring resonators", *Physical Review B*, 80, pp. 115113-115118.
- [68] Li H., Yuan L. H., Zhou B., Shen X. P., Cheng Q., Cui T. J. (2011), "Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers", *Journal of Applied Physics*, 110, pp. 014909-014914.
- [69] Li L., Yang Y., Liang C. (2011), "A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin metamaterial absorber with three resonant modes", *Journal of Applied Physics*, 110, pp. 063702-063708.
- [70] Li L., Wang J., Du H., Wang J., Qu S., and Xu Z. (2015), "A band enhanced metamaterial absorber basedon E-shaped all-dielectric resonators", *Aip Advances*, 5, pp. 017147-017154.
- [71] Li S., Gao J., Cao X., Zhang Z., Zheng Y., and Zhang C. (2014), "Multiband and broadband polarization - insensitive perfect absorber devices based on a tunable and thin double split-ring metamaterial ", *Optics Express*, 23, pp. 3523-3529.
- [72] Li T. Q., Liu H., Li T., Wang S. M., Wang F. M., Wu R. X., Chen, Zhu S. N., and Zhang X. (2008), "Magnetic resonance hybridization and optical activity of GHzs in a chiral metamaterial", *Applied Physics Letters*, 92, pp. 131111-131119.
- [73] Liu H., Liu Y. M., Li T., Wang S. M., Zhu S. N., and Zhang X. (2009), "Coupled magnetic plasmons in metamaterials", *Physica Status Solidi (b)*, 246, pp. 1397-11400.
- [74] Liu N., Guo H., Fu L., Kaiser S., Schweizer H., and Giessen H. (2007), "Plasmon Hybridization in Stacked Cut-Wire Metamaterials", *Advanced Materials*, 19, pp. 3628-3633.

- [75] Liu H., Genov D. A., Wu D. M., Liu Y. M., Liu Z. W., Sun C., Zhu S. N., and Zhang X. (2007), “Magnetic plasmon hybridization and optical activity at optical frequencies in metallic nanostructures”, *Physical Review B*, 76, pp. 073101-073109.
- [76] Liu N., Mesch M., Weiss T., Hentschel M., and Giessen H. (2010), “Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor”, *Nano Letters*, 10, pp. 2342-2349.
- [77] Liu X., Tyler T., Starr T., Starr A. F., Jokerst N. M., and Padilla W. J. (2011), “Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters”, *Physical Review Letters*, 107, pp. 45901-45908.
- [78] Lu D. Y., Liu H., Li T., Wang S. M., Wang F. M., Zhu S. N., and Zhang X. (2008), “Creation of a magnetic plasmon polariton through strong coupling between an artificial magnetic atom and the defect state in a defective multilayer microcavity”, *Physical Review B*, 77, pp. 214302-214308.
- [79] Luo H., Cheng Y. Z., Gong R. Z. (2011), "Numerical study of metamaterial absorber and extending absorbance bandwidth based on multi-square patches", *The European Physical Journal B*, 81, pp. 387-391.
- [80] Maragkou M. (2015), “Thermally tunable”, *Nature Materials*, 14, pp. 463-470.
- [81] Madelung O. (1991), *Semiconductors: Group IV Elements and III-V Compounds*, Springer - New York
- [82] Mintmire J. W., Dunlap B. I., White C. T. (1992), “Are fullerene tubules metallic?”, *Physical Review Letters*, 68, pp. 631–634.
- [83] Ni B., Chen X. S., Ding J. Y., Li G. H., Lu W. (2013), "Impact of resonator rotational symmetry on infrared metamaterial absorber", In 2013 13th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), pp. 37-42.
- [84] Nicolson A. M., Ross G. F. (1970), “Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques”, *IEEE Xplore: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 19, pp. 377–382.

- [85] Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. (2004), "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *Science*, 306, pp. 666–669.
- [86] Oktel M. O., and Mustecaplioglu O. E. (2004), "Electromagnetically induced left-handedness in a dense gas of three-level atoms", *Physical Review A*, 70, pp. 053806-053812.
- [87] Oszwaldowski M. and Zimpel M. (1988), "Temperature dependence of intrinsic carrier concentration and density of states effective mass of heavy holes in InSb", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 49, pp. 1179-1185.
- [88] Ourir A. and Ouslimani H. H. (2011), "Negative refractive index in symmetric cut-wire pair metamaterial", *Applied Physics Letters*, 98, pp. 113505- 113511.
- [89] Parke L., Hooper I. R., Edwards E., Cole N., Youngs I. J., Hibbins A. P. and Sambles J. R. (2015), "Independently controlling permittivity and diamagnetism in broadband, low-loss, isotropic metamaterials at GHz frequencies", *Applied Physics Letters*, 106, pp. 101908-101913.
- [90] Park J. W., Tung N. T., Thuy V. T. T., Lam V. D., Lee Y. P. (2011), "Strong tie between cut-wire pair and continuous wire in combined structure metamaterials", *Optics Communications*, 284, pp. 919-924.
- [91] Penciu R. S., Kafesaki M., Koschny T., Economou E. N., and Soukoulis C. M. (2010), "Magnetic response of nanoscale left-handed metamaterial", *Physical Review B*, 81, pp. 235111-235118.
- [92] Pendry J. B., Schurig D., Smith D. R. (2006), "Controlling electromagnetic fields", *Science*, 312, pp. 1780-1787.
- [93] Pendry J. B. (2000), "Negative refraction makes a perfect lens", *Physical Review Letters*, 85, pp. 3966-3970.
- [94] Pendry J. B., Holden A. J., Steward W. J., and Youngs I. (1996), "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures", *Physical Review Letters*, 76, pp. 4773-4778.
- [95] Pendry J., Holden A., Robbins D., and Stewart W. (1999), "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *GHz Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 47, pp. 2075-2081.

- [96] Prodan E., Radloff C., Halas N. J., and Nordlander P. (2003), “A hybridization model for the plasmon response of complex nanostructures”, *Science*, 302, pp. 419-424.
- [97] Pshenay-Severin E. (2011), Design, realization, and characterization of optical negative index metamaterials, Dissertation.
- [98] Ramakrishna S. A., Grzegorczyk T. M. (2009), *Physics and Applications of Negative refractive index Materials*, Taylor & Francis Group, LLC.
- [99] Ramakrishna S. A., Grzegorczyk T. M. (2009), *Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials*, CRC Press, New York.
- [100] Rivas J. G., Janke C., Bolivar P. H. and Kurz H. (2005), “Transmission of THz radiation through InSb gratings of subwavelength apertures”, *Optics Express*, 13, pp. 847-852.
- [101] Rode D. L. (1971), “Electron Transport in InSb, InAs, and InP”, *Physical Review B*, 3, pp. 3287-3292.
- [102] Sabah C., Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., Demirel E. (2014), “Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application”, *Optics Communications*, 322, pp. 137-142.
- [103] Shen N. H., Zhang L., Koschny T., Dastmalchi B., Kafesaki M., and Soukoulis C.M. (2012), “Discontinuous design of negative index metamaterials based on mode hybridization”, *Applied Physics Letters*, 101, pp. 081913-081919.
- [104] Shrekenhamer D., Chen W. C., and Padilla W. J. (2013), “Liquid Crystal Tunable Metamaterial Absorber”, *Physical Review Letters*, 110, pp. 177403-177409.
- [105] Slovick B. A., Yu Z. G., Krishnamurthy S. (2014), “Generalized effective-medium theory for metamaterials”, *Physical Review B*, 89, pp. 155118-155124.
- [106] Smith D., Padilla W. J., Vier D., Nemat-Nasser S. C., and Schultz S. (2000), “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity”, *Physical Review Letters*, 84, pp. 4184-4189.
- [107] Solymar L. and Shamoina E. (2009), *Waves in metamaterials*, Oxford University.

- [108] Soukoulis C. M. and Wegener M. (2010), "Optical Metamaterials-More Bulky and Less Lossy", *Science*, 330, pp. 1633-1640.
- [109] Sucher J. (1978), "Magnetic dipole transitions in atomic and particle physics: ions and psions", *Reports on Progress in Physics*, 41, pp. 1781-1788.
- [110] Tung N. T., Tung B. S., Janssens E., Lievens P., and Lam V. D. (2014), "Broadband negative permeability using hybridized metamaterials: Characterization, multiple hybridization, and terahertz response", *Journal of Applied Physics*, 116, pp. 083104-083111.
- [111] Tung N. T., Lam V. D., Park J. W., Thuy V. T., and Lee Y. P. (2010), "Perfect impedance-matched left-handed behavior in combined metamaterial", *The European Physical Journal B*, 74, pp. 47-54.
- [112] Tung N. T., Lam V. D., Park J. W., Cho M. H., Rhee J. Y., Jang W. H., and Lee Y. P. (2009), "Single-and double-negative refractive indices of combined structure", *Journal of Applied Physics*, 106, pp. 053109-053115.
- [113] Tung N. T. and Lee Y. P., Hoai T. X. and Lam V. D. (2009), "Impact of geometrical parameters on transmission properties of cut-wire pair structures", *Journal of nonlinear optical physics & materials*, 18, pp. 489-494.
- [114] Tung N. T., Lam V. D., Cho M. H., Park J. W., Lee S. J., Jang W. H. and Lee Y. P. (2009), "Effects of the electric component on combined metamaterial structure", *IEEE Xplore: IEEE Transactions on Magnetics*, 45, pp. 4310-4316.
- [115] Tung N. T., Lievens P., Lee Y. P. and Lam V. D. (2011), "Computational studies of a cut-wire pair and combined metamaterials", *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2, pp. 033001-033009.
- [116] Tung N. T., Viet D. T., Tung B. S., Hieu N. V., Lievens P., and Lam V. D. (2012), Broadband negative permeability by hybridized cut-wire pair metamaterials, *Applied Physics Express*, 5, pp. 112001-112008.
- [117] Tung N. T., Tung B. S., Janssens E., Lievens P., and Lam V. D. (2014), Broadband negative permeability using hybridized metamaterials: Characterization, multiple hybridization, and terahertz response, *Journal of Applied Physics*, 116, pp. 083104-083110.

- [118] Tung B. S., Dung N. V., Khuyen B. X., Tung N. T., Lievens P., Lee Y. P. and Lam V. D. (2013), “Thermally tunable magnetic metamaterials at THz frequencies”, *Journal of Optics*, 15, pp. 075101- 075108.
- [119] Veselago V. G. (1968), “The electrodynamics of substances with negative  $\epsilon$  and  $\mu$ ”, *Soviet Physics Uspekhi*, 10, pp. 509-512.
- [120] Viet D. T., Hieu N. V., Lam V. D., and Tung N. T. (2015), “Isotropic metamaterial absorbers using cut-wire-pair structures”, *Applied Physics Express*, 8, pp. 032001-032009.
- [121] Viet D. T., Hien N. T., Tuong P. V., Minh N. Q., Trang P. T., Le L. N., Lee Y. P., Lam V. D. (2014), “Perfect absorber metamaterials: Peak, multi-peak and broadband absorption”, *Optics Communications*, 322, pp. 209-215.
- [122] Vu D. L., Pham V. T., Do T. V., Nguyen T. T., Vu T. T. T., Le V. H., Lee Y. P. (2010), "The electromagnetic response of different metamaterial structures", *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 1, pp. 045016-045023.
- [123] Wang B., Koschny T., Soukoulis C. M. (2009), “Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber”, *Physical Review B*, 80, pp. 033108-033114.
- [124] Wang F. M., Liu H., Li T., Zhu S. N., and Zhang X. (2007), “Omnidirectional negative refraction with wide bandwidth introduced by magnetic coupling in a tri-rod structure”, *Physical Review B*, 76, pp. 075110-075117.
- [125] Wangsness K. (1986), *Electromagnetic Fields*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, 383, Eq. (24-42) and (24-43).
- [126] Watts C. M., Liu X., and Padilla W. J. (2012), “Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers”, *Advanced Materials*, 24, pp. 98-104.
- [127] Wei Z., Cao Y., Han J., Wu C., Fan Y., and Li H. (2010), Broadband negative refraction in stacked fishnet metamaterial, *Applied Physics Letters*, 97, pp. 141901-141909.
- [128] Wei Z., Cao Y., Han J., Wu C., Fan Y., and Li H. (2010), “Broadband negative refraction in stacked fishnet metamaterial”, *Applied Physics Letters*, 97, pp. 141901-141909.

- [129] Weiland T. (1977), “A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields”, International journal of electronics and communications, 31, pp. 116-123.
- [130] Wu Y., Li J., Zhang Z. Q., Chan C. T. (2006), “Effective medium theory for magnetodielectric composites: beyond the long-wavelength limit”, Physical Review B, 74, pp. 085111- 085119.
- [131] Wu C., Burton Neuner I. I. I., Shvets G., John J., Milder A., Zollars B., and Savoy S. (2011), “Large-area wide-angle spectrally selective plasmonic absorber”, Physical Review B, 84, pp. 075102- 075109.
- [132] Yem V. V. and Phuong T. T. (2010), “Ultra-Wide Band Low-profile Spiral Antennas Using An EBG Ground Plane”, The 2010 International Conference on Advanced Technologies for Communications, pp. 89-93.
- [133] Yem V. V., Journet B., Chi P. V., Tu V. T., Duc N. V., Tien P. V. and Duc N. T. (2013), “Novel High Gain and Broadband CPW-Fed Antennas with EBG for ITS Applications”, The 2013 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC'13), pp. 151-156.
- [134] Zhao X., Fan K., Zhang J., Seren H. R., Metcalfe G. D., Wraback M., Averitt R. D., Zhang X. (2015), “Optically tunable metamaterial perfect absorber on highly flexible substrate”, Sensors and Actuators A: Physical, 231, pp. 74-79.
- [135] Zhang S., Genov D. A., Wang Y., Liu M., and Zhang X. (2008), “Plasmon-Induced Transparency in Metamaterials”, Physical Review Letter, 101, pp. 047401-047409.
- [136] Zhang S., Fan W., Panoiu N., Malloy K. J., Osgood R. M., and Bruech S. R. J. (2005), “Experimental Demonstration of Near-Infrared Negative-Index Metamaterials”, Physical Review Letters, 95, pp. 137404-137409.
- [137] Zhou J., Economou E. N., Koschny T., and Soukoulis C. M. (2006), “Unifying approach to left-handed material design”, Optics Letters, 31, pp. 3620-3629.
- [138] Zhou J., Koschny T., Kafesaki M., Economou E. N., Pendry J. B., and Soukoulis C. M. (2005), “Saturation of the Magnetic Response of Split-Ring Resonators at Optical Frequencies”, Physical Review Letters, 95, pp. 223902-223909.

- [139] Zhou S., Townsend S., Xie Y. X., Huang X., Shen J., and Li Q. (2014), "Design of fishnet metamaterials with broadband negative refractive index in the visible spectrum", *Optics Letter*, 39, pp. 2415-2421.
- [140] Zhu L., Meng F. Y., Fu J. H., Wu Q., and Hua J. (2012), "Multi-band slow light metamaterial," *Optics Express*, 20, pp. 4494-4499.
- [141] Zhu J., Han J., Tian Z., Gu J., Chen Z., Zhang W. (2011), "Thermal broadband tunable Terahertz metamaterials", *Optics Communications*, 284, pp. 3129-3135.
- [142] Ziolkowski R. W. (2003), "Pulsed and CWGaussian beam interactions with dou-ble negative metamaterial slabs", *Optics Express*, 11, pp. 662-669.
- [143] Ziolkowski R.W. and Kipple A. D. (2005), "Reciprocity between the effects of resonant scattering and enhanced radiated power by electrically small antennas in the presence of nested metamaterial shells," *Physical Review E*, 72, pp. 036602-036609.

**Bộ code tính toán các đặc tính điện từ (độ từ thẩm, độ điện thẩm, chiết suất) từ phổ truyền qua, phản xạ và pha dựa trên phương pháp truy hồi của X. D. Chen.**

```

d=5.244*10^(-3);

load s11linear.txt;
load s21linear.txt;
load s11arg.txt;      %load file
load s21arg.txt;
f=s11linear(:,1);
f=f*10^9;           %nhap f
%Tinh ham phan xa va truyen qua

for k=1:length(f)
    s11(k)= s11linear(k,2)*exp((-s11arg(k,2)/180)*i*pi);
    s21(k)= s21linear(k,2)*exp((-s21arg(k,2)/180)*i*pi);
end
c = 299792458;
k0 = 2*pi*f/c;
delta=0.01;
%Tinh z va imag(n)
for J=1:length(s11)
    z_cong(J) = sqrt(((1+s11(J))^2-s21(J)^2)/((1-s11(J))^2-s21(J)^2));
    %exp(ink0d)
    expo(J)= s21(J)/(1-s11(J).*((z_cong(J)-1)/(z_cong(J)+1)));
    %Xet dk z
    if (abs(real(z_cong(J))) >= delta)&&(real ((z_cong(J)))>0)...
        ||(abs(real(z_cong(J)))<delta)&&(abs(expo(J))<=1)
        z(J) = z_cong(J);
    end
end

```

```

else
    z(J) = -z_cong(J);
end

%ln(exp(ink0d))

nn(J)=log(s21(J)/(1-s11(J)*((z(J)-1)/(z(J)+1))));

nIm(J)=(-1/(k0(J)*d)).*real(nn(J));%imag(n)
nImzRe(J)=nIm(J).*real(z(J));
end

for J=1:length(s11)
v=0;
tt=linspace(-10,10,11); %Cho gia tri m tu -10->10
for t=1:length(tt)
    nRe(t)=(1/(k0(J)*d)).*(imag(nn(J))+2*(t-11)*pi);
    nRezIm(t)=nRe(t).*imag(z(J));
    % Xet dieu kien xuat phat tu imag(epxilon, muy)>0
    if abs(nRezIm(t)) <= (nImzRe(J))
        % Chi so dem dung de phan biet khi nao khong ton tai nghiem m
        v=v+1;
        % Gia tri cua m
        mm(v)=t-11;
    end
end
if v==0 % khong ton tai nghiem m
    vv(J)=v;
end

```

```

m(J)=round((-1/(2*pi)).*(imag(nn(J))));

elseif (v==1) % ton tai 1 nghiem m
    vv(J)=v;
    m(J)=mm(v);
else
    vv(J)=2; %ton tai nhieu nghiem m

for l=1:v
    %gia tri n ung voi moi nghiem m
    y(l)=(1/(k0(J)*d)).*((imag(nn(J))+2*mm(l)*pi)-i*real(nn(J)))

syms zzz ;
%Khai trien Talyor cho tan so ke tiep va giao phuong trinh
h=exp(nn(J))*(1+(i*zzz*k0(J+1)*d-i*y(l)*k0(J)*d)+0.5*(i*zzz*k0(J+1)*d-
i*y(l)*k0(J)*d).^2)-exp(nn(J+1));
h=inline(char(h),'zzz');

x1=solve(h);%Thu duoc 2 nghiem o buoc nay
x2=double(x1);

%Chon nghiem co phan ao gan nhat voi phan ao cua n
%tinh tu buoc tren
bbb=abs(imag(x2(2))-nIm(J+1))-abs(imag(x2(1))-nIm(J+1));
if bbb<0
    xx=x2(2);
else
    xx=x2(1);
    %xx la n0(good approximation cua n tai tan so J+1)
end;

```

```

%Chon m sao cho real(n(J+1)) gan voi real(n0)
mm(l)=abs(round((real(xx).*(k0(J+1)*d)-imag(nn(J+1)))/(2*pi)));
%Lai xet dieu kien xuat phat tu imag(epxilon, muy)>0
%cho tan so f(J+1) ung voi m vua tim duoc
m(J)=round((-1/(2*pi)).*(imag(nn(J))));
if abs(1/(k0(J)*d).*(imag(nn(J+1))+2*mm(l)*pi).*imag(z(J+1)))<=
((1/(k0(J)*d).*(-1*real(nn(J))).*real(z(J+1)))
m(J)=mm(l);
end

end
end

n(J)=1/(k0(J)*d).*((imag(nn(J))+2*(m(J))*pi)-i*real(nn(J)));
end
epsilon=n./z;
mue=n.*z;
zi=imag(z);
ni=imag(n);
ei=imag(epsilon);
mi=imag(mue);
fid = fopen('data_abs.txt','w');
fidz = fopen('data z_abs.txt','w');
fidn = fopen('data n_abs.txt','w');
fide = fopen('data eps_abs.txt','w');
fidm = fopen('data mue_abs.txt','w');
fidzi = fopen('data z_imag.txt','w');
fidni = fopen('data n_imag.txt','w');

```

```
fidei = fopen('data eps_imag.txt','w');
fidmi = fopen('data mue_imag.txt','w');
for k=1:length(f)
    fprintf(fid,' %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f
    %12.8f\n',f(k),z(k),n(k),epsilon(k),mue(k));
    fprintf(fidz,' %12.8f %12.8f\n',f(k),z(k));
    fprintf(fidzi,' %12.8f %12.8f\n',f(k),zi(k));
    fprintf(fidn,' %12.8f %12.8f\n',f(k),n(k));
    fprintf(fidni,' %12.8f %12.8f\n',f(k),ni(k));
    fprintf(fide,' %12.8f %12.8f\n',f(k),epsilon(k));
    fprintf(fidei,' %12.8f %12.8f\n',f(k),ei(k));
    fprintf(fidm,' %12.8f %12.8f\n',f(k),mue(k));
    fprintf(fidmi,' %12.8f %12.8f\n',f(k),mi(k));
end
fclose(fid);
figure(1);
subplot 221;
plot(f,z);
hold on
plot(f,imag(z),'r');
xlabel('Frequency')
ylabel('Impedance');
grid on
subplot 222
plot(f,n,'b');
hold on
plot(f,imag(n),'r');
```

```
xlabel('Frequency');  
ylabel('Refractive Index');  
grid on  
subplot 223  
plot (f, mue);  
hold on  
plot(f,imag(mue),'r');  
xlabel('Frequency');  
ylabel('Permeability');  
grid on  
subplot 224  
plot(f,epsilon);  
hold on  
plot(f,imag(epsilon),'r');  
xlabel('Frequency');  
ylabel('Permittivity');  
grid on  
JJ=0;  
for J=1:length(s11)  
    if vv(J)== 0  
        JJ=JJ+1;  
        fff(JJ)=f(J);  
        nnn(JJ)=n(J);  
    end  
end  
figure(2);  
plot(fff,nnn,'k+');
```

```
grid on  
figure(3);  
plot(f,n);  
grid on
```