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 KÝ HIỆU VIẾT TẮT

Ký hiệu	Tên đầy đủ	Tên tiếng Việt
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
СВ	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 μ , độ điện thẩm ϵ , 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

<u>Nội dung 1</u>: 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 μ, độ điện thẩm ε, 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.

<u>Nội dụng 2</u>: 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.

<u>Nội dung 3</u>: 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.
- 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:

- Nguyễn Thị Hiền, Vũ Đình Quí, Trịnh Thị Giang, Nguyễn Thanh Tùng và Vũ Đình Lãm (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 Lãm (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 Lãm (2017), "Mở rộng dải tần từ thẩm 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", *Tap 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 Lãm (2017), "Vai trò của tổn 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:

 Vũ Đình Lãm, 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:

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 μ , độ điện thẩm ϵ , 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, senso...

Ngày tháng năm 2017

Tổ chức chủ trì

Chủ nhiệm đề tài (ký, họ và tên)

(ký, họ và tên, đóng dấu)

INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

1. General information:

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

3. Creativeness and innovativeness:

- This is the first time in Vietnam, We has built a program calculates the effective parameters (permeability μ , ϵ 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 μ , permittivity ϵ , refractive index n, impedance z)
- Checked the accuracy of the program after the construction

<u>Content 2</u>: 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.
- 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.
- 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.
- 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

 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 μ , ϵ 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.

GIỚI THIỆU

Siêu vật liệu (Metamaterials – Meta) chiết suất âm được chế tạo thành công lần đầu tiên năm 2000 bởi Smith, trong khi tính chất của nó được tiên đoán về mặt lý thuyết từ năm 1968 bởi Veselago. Vật liệu Meta 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 ($\varepsilon < 0$) trên cùng một dải tần số. Từ đó dẫn đến những tính chất điện từ và quang học bất thường, trong đó có sự nghịch đảo của định luật Snell, sự nghịch đảo trong dịch chuyển Doppler, và sự nghịch đảo của phát xạ Cherenkov....

Ngoài những tính chất đặc biệt kể trên, rất nhiều ứng dụng khác nhau của vật liệu Meta đã được đề xuất và 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, sau đó đã được Zhang và các cộng sự kiểm chứng bằng thực nghiệm vào năm 2005. Một ứng dụng độc đáo khác nữa là sử dụng vật liệu Meta như là "áo choàng" để che chấn sóng điện từ (electromagnetic cloaking), được đề xuất và kiểm chứng bởi Schurig và cộng sự năm 2006. Ngoài những ứng dụng kể trên, vật liệu Meta còn tỏ ra rất tiềm năng trong các lĩnh vực khác như bộ lọc tần số, cảm biến sinh học, antenna . . . 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, làm chậm ánh sáng. Với các tính chất đặc biệt của mình, vật liệu Meta 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.

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 (cụ thể là vật liệu Meta có chiết suất âm) 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 ra da 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 b iến đổi bằng các tương tác ngoại vi hay mở rộng vùng tần số 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.

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

1.1. Giới thiệu chung về vật liệu Meta

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

Vật liệu Meta được xây dựng dựa trên những "giả nguyên tử", là những mạch cộng hưởng điện từ nhỏ hơn nhiều lần bước sóng mà tại đó các tính chất đặc biệt của vật liệu Meta xuất hiện. Bằng cách thay đổi tính chất và mạng tinh thể (quy luật sắp xếp) của các "giả nguyên tử" này một cách đồng thời, các nhà khoa học có thể thu được những tính chất bất thường không tồn tại trong vật liệu tự nhiên. Hình 1.1 đưa ra hình ảnh so sánh cấu tạo giữa vật liệu truyền thống và vật liệu Meta. Ở đây, ta thấy có sự hoàn toàn tương tự giữa hai cấu trúc này.





1.1.3. Các hướng nghiên cứu chính của vật liệu Meta

1.1.3.1. Vật liệu Meta có chiết suất âm

Vật liệu 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 và độ điện thẩm âm ($\mu < 0, \varepsilon < 0$) trên cùng một dải tần số. Nhờ vào các tính chất bất thường, vật liệu Meta có chiết suất âm hứa hẹn rất nhiều tiềm năng ứng dụng như: siêu thấu kính, antenna, senso, một trong những thành phần chế tạo "áo khoác tàng hình"...

1.1.3.2. 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 tại tần số hoạt động. Do MPA được tạo bởi các cấu trúc cộng hưởng điện từ nên nguyên lí 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.

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

Hình 1.14 trình bày một giản đồ đơn giản cho phép ta phân loại các vật liệu theo tham số vĩ mô ε và μ . Hầu hết các loại vật liệu trong tự nhiên thì đều có cả hai thành phần độ từ thẩm và độ điện thẩm dương ($\varepsilon > 0, \mu > 0$) và sóng điện từ có thể lan truyền được trong loại vật liệu này. Góc phần tư thứ hai của giản đồ ($\varepsilon < 0, \mu > 0$) thể hiện tính chất của môi trường có độ điện thẩm âm, tính chất này xuất hiện trong kim loại dưới tần số plasma. Góc phần tư thứ tư ($\varepsilon > 0, \mu < 0$) thể hiện tính chất của môi trường có độ từ thẩm âm, tính chất này tồn tại trong một số loại vật liệu từ tại tần số thấp (cỡ MHz). Trường hợp đặc biệt, độ điện thẩm và độ từ thẩm đều có giá trị âm ($\varepsilon < 0, \mu < 0$), môi trường được gọi là môi trường chiết suất âm kép (double-negative) như biểu diễn trên góc phần tư thứ ba. Các tính chất vật lý độc đáo của loại vật liệu chiết suất âm kép cho đến nay vẫn

chưa được tìm thấy trong tự nhiên. Tuy nhiên, vật liệu Meta đã được đề xuất và kiểm chứng tồn tại tính chất này. Mặt khác, khi một trong hai giá trị của độ điện thẩm hoặc độ từ thẩm có giá trị âm, chiết suất âm vẫn có thể đat được trong một số trường hợp, môi trường sẽ thể hiện tính chiết suất âm đơn (single negative). Tuy nhiên, vật liệu có chiết suất âm đơn không được quan tâm và không có tính khả thi trong các ứng dụng thực tế vì độ tổn hao của nó là rất lớn. Hiên nay, vật liêu Meta đã và đang được thiết kế và chế tao để đat được những tính chất trên đặc biệt là tính chiết suất âm kép.



Hình 1.14. Giản đồ biểu diễn mối liên hệ giữa ε và μ .

CHƯƠNG II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.2. 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.

- Mô hình vật lý được xây dựng dựa trên mô hình mạch điện LC, ứng với mỗi cấu trúc sẽ tương ứng với một mạch điện LC. Dựa theo mô hình này, các tần số cộng hưởng điện và cộng hưởng từ có thể tính toán được theo các tham số cấu trúc.
- Để mô phỏng thiết kế cấu trúc 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.
- Trong đề tài, để chế tạo mẫu hoạt động ở dải tần số sóng microwave, chúng tôi sử dụng phương pháp quang khắc.
- Để đo đạc các tính chất của vật liệu như phổ truyền qua, phổ phản xạ hay hấp thụ đề tài sử dụng hệ thiết bị Vector Network Analyzer được nối với hai ăng ten.

CHƯƠNG III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

PHÀN I. CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA CẤU TRÚC VẬT LIỆU META CÓ CHIẾT SUẤT ÂM

Trong chương III-Phần I, 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 (μ) 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 kết hợp là một cấu trúc khá đơn giản (xem hình 3.1(b)) và đặc biệt độ từ thẩm và độ điện thẩm có thể điều khiển được một cách độc lập nên dễ dàng để tạo ra vật liệu 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 đễ 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 báo cáo đề tài. 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.



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

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

Cấu trúc CWP với các tham số cấu trúc của ô cơ sở là được trình bày chi tiết trong báo cáo đề tài.

Phổ truyền qua mô phỏng của vật liệu Meta có cấu trúc CWP và nối tắt của nó được trình bày trên hình 3.4. Các kết quả nghiên cứu cho thấy, 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 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. Các nghiên cứu tiếp theo (trình bày chi tiết trong đề tài) chỉ ra vùng này sẽ được chứng minh là vùng chiết



để tài) chỉ ra vùng này sẽ được chứng mình là vùng chiết ^{Hình 3.4. Phố truyền qua của cấu trúc CWP và hốt tát CWP suất âm do chồng chập của mode cộng hưởng từ cơ bản với mode cộng hưởng từ bậc ba.}

3.3. Vật liệu Meta có chiết suất âm dựa trên cấu trúc kết hợp

Trong phần này, đề tài trình bày một số kết quả nghiên cứu tính chất của vật liệu Meta có cấu trúc dạng kết hợp (CB) để tạo ra chiết suất âm (n < 0) cũng như ảnh hưởng của các tham số cấu trúc đến tính chất này. Như đã giới thiệu ở trên cấu trúc kết hợp là cấu trúc được tạo ra từ hai thành phần, các dây kim loại liên tục dùng để cung cấp độ điện thẩm âm (ε < 0) và CWP cung cấp độ từ thẩm âm (μ < 0).

Hình 3.7(a) và (b) trình bày ô cơ sở và mẫu đã chế tạo của vật liệu Meta chiết suất âm dựa trên cấu trúc kết hợp. Các tham số cấu trúc được trình bày chi tiết trong báo cáo đề tài.. Hình

3.8(a) và (b) 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 3.8. Kết quả tính toán độ từ thẩm, độ điện thẩm và chiết suất tương ứng được trình bày trong hình 3.8 (c). Từ phổ truyền qua ta thấy, đỉnh truyền qua đầu tiên của cấu trúc CB xấp xỉ 13.8 GHz nằm trong vùng không truyền qua của CWP. Kết quả tính toán cho thấy đỉnh này thể hiện vật liệu có chiết suất âm.



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



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.

3.4. Vật liệu Meta chiết suất âm có cấu trúc dạng lưới (fishnet-FN).

Hình 3.9(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. Hình 3.10 trình bày kết quả mô phỏng và thực nghiệm so sánh phổ truyền qua của cấu trúc kết hợp và cấu trúc dạng lưới. Có thể quan quan sát trong hình 3.10(a), vẫn tồn tại hai vùng truyền qua trong phổ truyền qua của cấu trúc dạng lưới tương tự như trường hợp của cấu trúc kết hợp ở cả kết quả mô phỏng và thực nghiệm. 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 biểu thị tính chiết

suất âm, trong khi vùng thứ hai đỉnh khoảng 18 GHz là vùng truyền qua của vật liệu thông thường. Kết quả mô phỏng trùng khớp với kết quả thực nghiệm.



Hình 3.9. (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 3.10. (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 hơn 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 (Figure of Merit – FOM) ứng với vùng tần số có chiết suất âm của hai vật liệu này được đưa ra trên hình 3.10(b) - (e). Kết quả thứ nhất trên hình 3.10(b) cho thấy tần số plasma của cấu trúc FN lớn hơn CB. Điều quan trọng ở đây rõ ràng là độ dốc của đường độ điện thẩm âm phụ thuộc vào tần số của cấu trúc FN nhỏ hơn so với cấu trúc CB (xem hình 3.10(b)), vì vậy với cấu trúc FN dễ dàng xảy ra phối hợp trở kháng trong một vùng tần số rộng hơn. Ngoài điều kiện tổn hao thấp thì điều kiện phối hợp trở kháng để khử phản xạ là hai điều kiện quyết định cho 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 3.10(c) và (d). Chính vì hai yếu tố này nên tại vùng có chiết suất âm của mỗi 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 đối với mục tiêu chế tạo vật liệu chiết suất âm có cấu trúc đơn giản, hoạt động trong dãi tần số rộng và

có độ tổn 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.

3.5. 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. Tuy nhiên, vùng có từ thẩm âm do các cấu trúc này tạo ra phụ thuộc mạnh vào sự phân cực của sóng điện từ chiếu đến. 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. 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.



Hình 3.12.(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 lưới đĩa (DN), (d) Mẫu chế tạo có cấu trúc lưới đĩa.

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

Kết quả mô phỏng và thực nghiệm của cấu trúc lưới đĩa DN được trình bày trên hình 3.15(a). Quan sát hình vẽ ta thấy kết quả thực nghiệm khá trùng với kết quả thu được từ mô phỏng. Các kết quả nghiên cứu khác tính toán độ từ thẩm, điện thẩm và chiết suất trên hình 3.15 chỉ ra rằng cấu trúc DN có thể tạo ra vùng có chiết suất âm.



Hình 3.15. (a) Phổ truyền qua thực nghiệm và mô phỏng và (b) Phần thực của độ điện thẩm, độ từ thẩm 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. Các kết quả nghiên cứu tiếp theo cho thấy cấu trúc DN có $a_x = a_y = 8$ mm tạo ra vùng có chiết suất âm không phụ thuộc vào phân cực của sóng điện từ (xem hình 3.16).



Hình 3.16. (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 mm phụ thuộc vào góc phân cực.

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

Nhìn chung, dải tần thể 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 thẩm âm rộng với vùng điện thẩm âm rộng trên cùng một dải tần số. Vùng điện thẩm 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 thẩm 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 công hưởng từ riệng kế tiếp nhau. Han 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 khá 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 yêu tố cộng hưởng trên một ô cơ sở nên kích thước lớn, các điều kiên để đảm bảo lý thuyết môi trường hiệu dụng có thể bị vị 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 III-phần II, 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 thẩm 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 thẩm âm sử dụng cấu trúc CWP hai lớp dựa trên mô hình lai hóa bậc hai

Trong các nghiên tiếp theo, để tài đề xuất mô hình lai hóa để mở rộng dải tần số của vật liệu MM có độ từ thẩm âm sử dụng cấu trúc đối xứng hai chiều - cấu trúc cặp dây bị cắt (CWPs) hai lớp. Cơ sở vật lý cho phương pháp này là sử dụng tương tác mạnh giữa hai lớp CWPs liền kề theo phương truyền sóng **k** tạo ra hiện tượng hỗ cảm để tách vạch cộng hưởng, kết quả là mở rộng vùng tần số hoạt động.

Ta 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 4.1(a), 4.1(b) và (c). Ta 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.

Dựa vào giản đồ lai hóa bậc hai ta có thể thấy rằng khi hai cặp CWP (bốn CW) đặt gần nhau, các mode cộng hưởng điện $|w_+>$ và mode cộng hưởng từ $|w_->$ 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. 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 $|w_->$ cơ bản. Mode cộng hưởng từ cơ bản $|w_->$ được tách thành hai mode mới $|w_->$ và $|w_+>$ như trên hình 4.1(c).



Hình 4.1. (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 đề xuất với cấu trúc này



Hình 4.2: Phổ truyền qua, phản xạ và độ hấp thụ phụ thuộc vào khoảng cách giữa 2 CWPs.

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 từ cơ bản $|w_{..}$ 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 $|w_{..}>$ 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 hấp dẫn. 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. Dựa vào phân tích trên, 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 **H**) là $a_x = 3.5$ mm và theo trục y (phương của điện trường **E**) là $a_y = 7.0$ mm. Các lớp điện môi được làm bằng FR4 với hằng số điện môi là 4.3. Chiều dài l 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. Kết quả mô phỏng sự phụ thuộc của phổ truyền qua, phản xạ và độ hấp thụ của hệ 2 CWP biểu diễn trên hình 4.2 cho thấy, khi d giảm từ 6t_d xuống t_d, các phổ này thay đổi một cách đáng kể. Khi khoảng cách d lớn, tương tác nội tại chiếm ưu thế. Do đó, phổ truyền qua chỉ quan sát thấy 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 dần rộng ra và cuối cùng bị tách thành 2 mức riêng biệt khi d = t_d. Các kết quả tính toán tiếp theo (trình bày chi tiết trong đề tài) cho thấy sự mở rộng vùng cộng hưởng từ này chính là sự mở rộng vùng từ thẩm âm. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu của đề tài còn cho thấy sự mở rộng vùng từ thẩm âm dựa theo mô hình lai hóa còn phụ thuộc vào độ tổn hao của vật liệu.

4.4.Mở rộng vùng chiết suất âm

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

Trong các nghiên cứu tiếp theo, phát triển ý tưởng mở rộng vùng từ thẩm âm ở trên để mở rộng dải tần chiết suất âm bằng cách sử dụng cấu trúc kết hợp hai lớp, dựa trên 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.



Hình 4.7. \hat{O} cơ sở của cấu trúc CWP hai lớp với các tham số cấu trúc $a_x = 4 \text{ mm}$ và $a_y = 8$ mm, bề dày, chiều dài và chiều rộng của CW lần lượt là $t_d = 0.04 \text{ mm}, 1 = 5.5 \text{ mm}$ và $w_1 =$ $w_2 = 1.0 \text{ mm}$ và cách phân cực của sóng điện từ.

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 CWPs. 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). Hình 4.8 là phố 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 $t_d = 0.8$ mm. 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 các tham số hiệu dụng: độ điện thẩm ε và độ từ thẩm μ được tính toán và đưa ra trên hình 4.8(c). Kết quả trên hình 4.8(c) chỉ rõ rằng, vùng có đô từ thẩm âm dần dần mở rộng và tách ra thành hai đỉnh tại tần số 15.27 và 15.58 GHz khi d = 0.8 mm như là một hệ quả của mô hình lai hóa. Thật vậy, khi khoảng cách d giảm, tương tác ngoài mạnh dân 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 đô từ thẩm âm mà đô điện thẩm âm cũng là điều kiện cần thiết để tao ra vật liệu có chiết suất âm. Vì thế, chúng tôi tiếp tục khảo sát sự dịch chuyển của tần số plasma sinh ra bởi cấu trúc dây liên tục theo khoảng cách d. Với các tham số cấu trúc đã được tối ưu, trên hình 4.8(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 đưa ra trên hình 4.9 cho thấy vùng có chiết suất âm được mở rông về phía bên phải (vùng có đồng thời độ từ thẩm và điện thẩm âm) khi giảm khoảng cách d.

Sự tách đỉnh lai hóa của vật liệu Meta ngoài việc phụ thuộc vào khoảng cách hai lớp d hay chiều dày của một lớp, kết quả nghiên cứu còn chỉ ra rằng nó rất nhạy với hệ số tổn hao điện môi của lớp điện môi trong cấu trúc CWP. Sự ảnh hưởng của hệ số tổn hao điện môi lên hiệu quả mở rộng được thực hiện bằng mô phỏng và đưa ra trên hình 4.10 (khoảng cách giữa hai lớp được giữ cố định d = 0.8 mm). 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 4.8. 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 4.9. Phần thực của chiết suất phụ thuộc vào khoảng d giữa hai lớp của cấu trúc CB hai lớp



Hình 4.10. Sự phụ thuộc phổ truyền qua vào các vật liệu làm điện môi có tổn hao khác nhau

4.4.2. 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 cho việc mở rộng này được thực hiện với cấu trúc dạng lưới (fishnet-FN). Hai lớp cấu trúc được cách nhau một khoảng d, các ô cơ sở được sắp xếp tuần hoàn theo trục $x(\mathbf{H})$ và trục $y(\mathbf{E})$ với các hằng số mạng $a_x = 7$ mm và $a_y = 9.5$ mm. Lớp điện môi FR-4 có hằng số điện môi là 4.3 và hệ số tổn hao tangent bằng 0.02. Các thanh slab và các dây liên tục được làm bằng đồng với độ dẫn điện $\sigma = 5.88 \times 107 \text{ Sm}^{-1}$. Chiều rộng, chiều dài của thanh slab và chiều rộng của phần nút cổ chai lần lượt là $w_s = a_x = 7$ mm, $w_n = 1.5$ mm, $l_s = 7$ mm. Hình 4.14 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 $t_d = 0.8$ mm. Kết quả mô phỏng trùng khớp với các kết quả thực nghiệm. Kết quả cho thấy khi d giảm từ 3.2 mm về 0.8 mm, vùng truyền qua quanh tần số 12 GHz dần dần được mở rộng. Các kết quả tính toán phần thực của các tham số hiệu dụng: độ điện thẩm ε và độ từ thẩm μ được đưa ra trên hình 4.14(c). Các kết quả cho thấy 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 và 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 theo 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. Đặc biệt trong kết quả nghiên cứu đối với cấu trúc FN, 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.



Hình 4.14. 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 thẩm và độ điện thẩm

Điều này tạo điều kiện thuận lợi trong việc điều chỉnh các tham số cấu trúc để thu được hiệu ứng mở rộng vùng chiết suất âm 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 4.8(c) và hình 4.14(c)), ứng với cấu trúc CB có độ dốc lớn hơn rất nhiều. Kết quả nghiên cứu này hoàn toàn phù hợp với các công trình nghiên cứu trước đây và các kết quả ở mục 3.4 của đề tài. Điều này cũng lý giải cho kết quả nghiên cứu với cùng độ tổn hao và chiều dày lớp điện môi, nhưng độ truyền qua

trong cấu trúc FN (hình 4.14(a) và (b)) thu được cao hơn so với cấu trúc CB (hình 4.8(a) và (b)). 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 cấu trúc CB.

Ngoài ra đề tài còn nghiên cứu sụ mở rộng vùng chiết suất âm với cấu trúc đa lớp (6 lớp) hoạt động ở các vùng tần số khác nhau. 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 4.15. Kết quả cho thấy vùng chiết suất âm 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, 110 GHz – 160 GHz, 1.1 GHz – 1.6 THz. Đây là một bước quan trọng để tiến gần đến các ứng dụng dải tần chiết suất âm rộng.

PHẦN III. CÁC KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN TẦN SỐ 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 có thể điều khiển được vùng tần số hoạt động theo mong muốn.



Hình 5.1. Cấu trúc cơ bản của vật liệu Meta dạng cặp đĩa phẳng: (a) hình 3D với phân cực sóng điện từ trong đó màu xanh thể hiện phần kim loại, màu xám thể hiện phần điện môi, (b) hình chiếu mặt phẳng (E,H) và (c) hình chiếu mặt phẳng (k,E). Các tham số được sử dụng trong mô phỏng là a = 0.062 mm, r = 0.025 mm, t_s = 0.01 mm, và t_m = 0.002 mm

Trong nghiên cứu của đề tài, tác dụng nhiệt được sử dụng để điều biến vật liệu Meta có độ từ thẩm âm và chiết suất âm hoạt động ở vùng tần số 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 thẩm âm và cấu trúc dạng lưới đĩa (dishnet - DN) tạo ra vùng có chiết suất âm.

Để kiểm chứng ảnh hưởng của nhiệt độ lên tính chất điện từ của vật liệu Meta cặp đĩa phẳng, phổ truyền qua của cấu trúc cặp đĩa phẳng được mô phỏng với các nhiệt độ khác nhau của lớp InSb và biểu diễn lại trên Hình 5.6(a). Kết quả cho thấy, khi nhiệt độ của lớp InSb tăng từ 300 K lên 350 K, tần số cộng hưởng từ tăng từ 600 GHz lên 820 GHz. 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 và biểu diễn trên Hình 5.6(b). Quan sát hình cho thấy độ từ thẩm âm không chỉ đạt 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 μ tại vị trí cộng hưởng sẽ càng lớn. Nhờ đó, vùng có độ từ thẩm âm sẽ mở rộng ra.



Hình 5.6. (a) Mô phỏng phổ truyền qua và (b) phần thực của độ từ thẩm của cấu trúc vật liệu Meta cặp đĩa phẳng với nhiệt độ của lớp điện môi InSb tương ứng

Sau khi thu được các kết quả điều khiển độ từ thẩm âm bằng nhiệt độ của cấu trúc dạng cặp đĩa phẳng, các kết quả này được sử dụng để điều khiển vùng chiết suất âm cho cấu trúc dạng lưới đĩa. Hình 5.9(a) mô tả cơ bản về cấu trúc dạng lưới đĩa cùng các thông số hình học. Cấu trúc dạng lưới đĩa 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.



Hình 5.9. (a) Ô cơ cở của cấu trúc dạng lưới đĩa (b) Phổ truyền qua và (c) chiết suất của cấu trúc dạng lưới đĩa InSb theo nhiệt độ (d) tính toán vùng có chiết suất âm khi nhiệt độ tăng

Hình 5.9 (b) và (c) là phổ truyền qua mô phỏng và phần thực chiết suất của cấu trúc dạng lưới 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(b) vì nằm ngoài khoảng khảo sát trên hình]. 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 vật liệu Meta dạng lưới. Một minh chứng rõ ràng cho lời giải thích này được đưa ra trên hình 5.9(c), 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(d). Những kết quả này hoàn toàn phù hợp với việc tăng lên của cộng hưởng từ trong cấu trúc dạng cặp đĩa phẳng.

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. 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.

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 công nghệ chế tạo siêu vật liệu Meta có cấu trúc khác nhau hoạt động ở vùng tần số GHz.

2. Nghiên cứu các cấu trúc khác nhau cho chiết suất âm khi tương tác với sóng điện từ. 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. 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:

- 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.