

პროექტი №16

არაჩვეულებრივი ტალღები ერთდერძა ანიზოტროპულ “დადებითიდან უარყოფით ინდექსზე გადამსვლელ” მეტამასალებში

“თეორიული ფიზიკის და ნანო-ოპტიკის” სამეცნიერო კვლევითი ცენტრი
პროექტის ხელმძღვანელი: პროფესორი გურამ ადამაშვილი

ტექნიკური ანგარიში

პერიოდი (01.01.2011 – 31.12.2011)

მოცემული სამუშაოს ძირითადი მიზანია: თეორიულად შევისწავლოთ არაჩვეულებრივი ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელება ერთდერძა ანიზოტროპულ “დადებითიდან უარყოფით ინდექსზე გადამსვლელ” მეტამასალებში და გამოვიკვლიოთ ტალღური პროცესების თვისებები იმ არის მახლობლად, სადაც გარდატეხის მაჩვენებელი იცვლის ნიშანს.

ეტაპობრივად შესრულებულ იქნა შემდეგი ამოცანები: ერთდერძა ანიზოტროპულ “დადებითიდან უარყოფით ინდექსზე გადამსვლელ” მეტამასალებში არსებული ლიტერატურის მიმოხილვა, კონკრეტული სისტემის შერჩევა, ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირზე სასაზღვრო პირობების დადგენა, მოსაზღვრე არეებში ტალღური განტოლებების შედგენა და მათი ამოხსნა. შესწავლილია არაჩვეულებრივი ტალღების თვისებები კონკრეტულ ერთდერძა ანიზოტროპულ მეტამასალებში რიცხვითი მეთოდების გამოყენებით.

ამოცანა 1. ჩავატარე არსებული ლიტერატურის მიმოხილვა ერთდერძა ანიზოტროპულ “დადებითიდან უარყოფით ინდექსზე გადამსვლელ” მეტამასალებში არაჩვეულებრივი ტალღების შესახებ. განხილულ იქნა შემდეგი შრომები (იხ. დანართი I).

ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელება გარემოში ხასიათდება დიელექტრიკული შეღწევადობით ϵ და მაგნიტური ამთვისებლობით μ , რომლებიც ახასიათებენ ტალღის ელექტული \mathbf{E} და მაგნიტური \mathbf{H} ველების კავშირს გარემოსთან, რომელშიც ტალღა ვრცელდება. გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელი n ($n^2 = \epsilon\mu$) ახასიათებს ელექტრომაგნიტური ტალღის დისპერსიულ თვისებებს. ჩვეულებრივ იზოტროპულ გარემოში დიელექტრიკული შეღწევადობა ϵ და მაგნიტური ამთვისებლობა μ დადებითი სკალარული სიდიდეებია და ბრყელი ტალღის ელექტული \mathbf{E} და მაგნიტური \mathbf{H} ველები ტალღურ ვექტორთან ერთად ქმნიან მარჯვენა ვექტორთა ტრიპლეტს. ასეთ გარემოში პოინტინგის ვექტორი \mathbf{S} , რომელიც ტალღის ელექტული და მაგნიტური ველების დაძაბულობათა ვექტორული ნამრავლია, მიმართულია ტალღური ვექტორ \mathbf{k} პარალელურად. ასეთ მასალებს უწოდებენ ჩვეულებრივ, ან *მარჯვენა-ტიპის მასალებს*. ასეთ მასალებში დიელექტრიკული შეღწევადობა ϵ და მაგნიტური ამთვისებლობა μ დადებითი სიდიდეებია.

1968 წელს ვესელაგომ [Veselago 1968] აჩვენა, რომ თუკი მასალას, რომელშიც ვრცელდება ელექტრომაგნიტური ტალღა, ექნება ერთდროულად უარყოფითი დიელექტრიკული შეღწევადობა $\epsilon < 0$ და მაგნიტური ამთვისებლობა $\mu < 0$, ესეთ მასალას ექნება მნიშვნელოვნად განსხვავებული ელექტრომაგნიტური თვისებები, ჩვეულებრივ მარჯვენა-ტიპის მასალებთან შედარებით. აღნიშნულ მასალებში ბრტყელი ტალღის პოინტინგის ვექტორი ემთხვევა ენერჯის ნაკადის მიმართულებას, მაგრამ \mathbf{S} ვექტორს ექნება ტალღური ვექტორის \mathbf{k} საწინააღმდეგო მიმართულება და ვექტორები \mathbf{E} , \mathbf{H} და \mathbf{k} ქმნიან მარცხენა ვექტორთა ტრიპლეტს. ასეთ მასალებს უწოდებენ *მარცხენა-ტიპის მასალებს (left-handed materials) ანუ მეტამასალებს*. ასეთი მასალები მიეკუთვნებიან ნანოსტრუქტურებს და ხასიათდებიან, ბუნებაში არსებულ მასალებთან შედარებით, უჩვეულო ფიზიკური თვისებებით. მეტამასალებს გააჩნიათ უარყოფითი გარდატეხის მაჩვენებელი და ამიტომ, მარცხენა-ტიპის მასალებს, ზოგჯერ უარყოფითი არეკვლის ინდექსის მქონე მასალებსაც (*negative-index materials*) უწოდებენ. ასეთი მასალები უნიკალურია და ბუნებაში არ მოიპოვება. ისინი ხელოვნური გზით მიიღება და ამიტომ მათ ხელოვნურ მასალებსაც (*artificial materials*) უწოდებენ [Veselago 1968, Shalaev 2007].

1999 წელს პენდრიმ [Pendry et.al. [1999] აჩვენა, რომ ე.წ. გაწყვეტილი რგოლის რეზონატორის (*split-ring resonators*) და მეტალური ძაფების (*metal*

nanowires) კომბინაციით შექმნა შეიქმნას ხელოვნური მასალები, რომელთა საშუალებითაც შესაძლებელია უარყოფითი არეკვლის რეალიზება. ასეთი მასალების შექმნისას მთავარი სირთულე მდგომარეობს უარყოფითი მაგნიტური ამთვისებლობის $\mu < 0$ მიღებაში. დაიწვეს რა მიკროტალღური დიაპაზონით [Shelby et.al. 2001], რამდენიმე წლის შემდეგ, ვერცხლის გამოყენებით (რომელიც მეტამასალების შესაქმნელად ძირითადი მასალას წარმოადგენს), ხილული სპექტრის უკიდურეს წითელ არეში (ტალღის სიგრძე 780 nm), მოხერხდა უარყოფითი გარდატეხის მაჩვენებლის მქონე მასალის პრაქტიკულად შექმნა [ოლლინგ ეტ.ალ. 2007].

მეტამასალების გამოყენებით შესაძლებელი გახდა სინათლის სხივის გავრცელების მიმართულებაზე ისეთი კონტროლის დაწესება, რომელიც საშუალებას იძლევა მეტამასალები გამოყენებულ იქნას საგნების დასამალად, ისე, რომ ადამიანის თვალისათვის გაუმჭვირვალე საგნები უჩინარი გახადოს.

მეორე, ძალიან საინტერესო ხელოვნური ობიექტია, ნახევარგამტარული კვანტური წერტილები (დოტები). უკანასკნელ წლებში, ნახევარგამტარულ კვანტური დოტების ოპტიკური თვისებების შესწავლა ნანოსტრუქტურების ფიზიკის ერთ-ერთ უმთავრეს მიმართულებას მიეკუთვნება [Bimberg and el at. 1999]. ნახევარგამტარულ კვანტური დოტები წარმოადგენენ ნულოვანი განზომილების მქონე სისტემებს. ისინი წარმოადგენენ ნანოსტრუქტურებს, რომლებშიც მუხტის გადაადგილება შეზღუდულია სამივე სივრცული მიმართულებით. ამის გამო, მათ აქვთ ატომის ტიპის დისკრეტული ენერგეტიკული სპექტრი, მკაცრად განსაზღვრული სიციცხლის ხანგრძლივობით. ასეთი თვისებების გამო კვანტური დოტები ძალიან ემსგავსებიან ატომებს და პრაქტიკულად წარმოადგენენ ხელოვნურ ატომებს. კვანტური დოტების ანსამბლის ოპტიკური კოჰერენტული მოვლენების შესწავლისას ჩვენ ვაწყდებით სპექტრალური ხაზის ძლიერ არაერთგვაროვან გაგანიერებას, რაც დაკავშირებულია დოტების ზომების ფლუქტუაციასთან. კვანტური დოტების ზომები ხშირად იცვლება 50-400 ანგსტრემის ინტერვალში. კვანტური დოტების ზომების ფლუქტუაცია იწვევს ექსიტონებისა და ბიექსიტონების სპექტრალური ხაზის არაერთგვაროვან გაგანიერებას, რომელთა სიგანე არის რამდენიმე ათეული MeV.

ამოცანა 2. შევისწავლე კონკრეტული ერთდერძა ანიზოტროპულ მეტამასალები, რომლებშიც შეიძლება გავრცელდნენ არაჩვეულებრივ ტალღები. დადგენილ იქნა, რომ ყველაზე პერსპექტულ სისტემებს წარმოადგენ შემდეგი მასალები ერთდერძა ანიზოტროპულ “დადებითიდან უარყოფით ინდექსზე გადასვლელ” მეტამასალები და გამოვიკვლიე ტალღური პროცესების თვისებები იმ არის მახლობლად, სადაც გარდატეხის მაჩვენებელი იცვლის ნიშანს.

ამოცანა 3. სასაზღვრო ამოცანების შესწავლის დროს ერთ-ერთ ძირითად საკითხს წარმოადგენს ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირზე სასაზღვრო პირობების დადგენა. (იხ. დანართი 1).

a) დადგენილ იქნა ცხადი ანალიტიკური გამოსახულებები სასაზღვრო პირობებისათვის, რომლის დროსაც შესაძლებელია არაჩვეულებრივი წრფივი ტალღების გავრცელება.

b) დადგენილ იქნა ცხადი ანალიტიკური გამოსახულებები სასაზღვრო პირობებისათვის, რომლის დროსაც შესაძლებელია არაჩვეულებრივი არაწრფივი ტალღების (სოლიტონების) გავრცელება (იხ. დანართი 3).

ამოცანა 4. მოსაზღვრე არეებში ტალღური განტოლებების შედგენა წარმოადგენს სასაზღვრო ამოცანებისათვის ერთ-ერთ ძირითად ამოცანას.

დადგენილ იქნა მაქსველის გამტოლებების ცხადი სახე 2+1 განზომილების (ორი სივრცითი კოორდინატის და დროის) სივრცეში (იხ. დანართი 4).

ამოცანა 5. დადგენილ იქნა ცხადი ანალიტიკური გამოსახულებები ზედაპირული არაჩვეულებრივი ტალღები ანიზოტროპულ მეტამასალებში ნახევარგამტარული კვანტური წერტილების შემცველი გარდამავალი შრის არსებობის პირობებში (იხ. დანართი 5).

მიღებულია შემდეგი ძირითადი შედეგები

დადგენილი იქნა კონკრეტული მრავალფენიანი სისტემები, რომლებშიც შეიძლება გავრცელდნენ ტალღები, როდესაც ერთ-ერთი მოსაზღვრე არე წარმოადგენს ანიზოტროპულ მეტამასალას, რომლის მახასიათებელი ოთხივე პარამეტრი: განივი და გასწვრივი დიელექტრიკული შეღწევადობის და განივი და

გასწავრივი მაგნიტური ამთვისებლობის ტენზორთა კომპონენტები, უარყოფითია. დადგენილ იქნა შესაბამისი სასაზღვრო პირობები და ზედაპირის ადგენებული არის ლოკალიზაციისათვის საჭირო პირობები ერთდერბა ანიზოტროპულ “დადებითიდან უარყოფით ინდექსზე გადამსვლელ” მეტამასალებში.

მიღებული იქნა ზოგადი ანალიტიკური გამოსახულებები დისპერსიული თანაფარდობებისათვის და ტალღების პარამეტრებისათვის.

მიღებული იქნა ტალღური განტოლებები ნელად ცვალებადი ამპლიტუდებისათვის.

მიღებული იქნა ნაკადის მნიშვნელობები.

მიღებული იქნა ყოველი კონკრეტული სისტემისათვის სოლიტონების პარამეტრების რიცხვითი მნიშვნელობები. (იხ. დანართი 6).

თეორიული კვლევისას გამო ენებულ იქნა შემდეგი აპროქსიმაციები და მეთოდები

პროექტში გამოყენებული იქნება აპროქსიმაციები და მათემატიკური მეთოდები, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება არაწრფივი ტალღების თეორიაში.

აპროქსიმაციები: მბრუნავი ველის მიახლოება და ნელი ცვლადების მიახლოება.

მეთოდები:

1. შებრუნებული ამოცანის მეთოდი, რომელიც წარმოადგენს არაწრფივი განტოლებების ანალიზური ამოხსნის ერთ-ერთი ყველაზე მძლავრ მეთოდს.

2. შეშფოთებათა თეორია განვითარებული შებრუნებული ამოცანის მეთოდის ბაზაზე,

3. რედუქციის პერტურბაციული მეთოდი,

4. ფაზური ფუნქციის მეთოდი

5. არაწრფივი განტოლებების ამოხსნის რიცხვითი მეთოდები. *კომპუტერული პროგრამები:* *MikTex, WinEd, C++*, "Mathematica-6" და "Maple-11".

მიღებული შედეგების ნაწილი მოხსენებულ იქნა კოლუკვიუმებზე და სემინარებზე:

1. ბერლინის ტექნიკურ უნივერსიტეტის, თეორიული ფიზიკის ინსტიტუტში.

2. მაქს-პლანკის კომპლექსური სისტემების ფიზიკის ინსტიტუტში, დრეზდენში.

პუბლიკაციები:

1. Adamashvili G. T. Influence of non-Markovian relaxation on the soliton of self-induced transparency. Pisma v Journal Technicheskoi Fiziki, **37**, #17, (2011) 82-88.
2. Adamashvili G. T. Vector Soliton of Self-induced transparency. Results in Physics, **1** (2011) 26–29. (journal homepage:www.elsevier.com/locate/rinp.
3. Adamashvili G. T. Effect of non-Markovian Relaxation on Self-Induced Transparency Soliton. Technical Physics Letters, **37**, # 9, (2011) 827–830.
4. Adamashvili G. T. Nonlinear surface plasmon polaritons at the interfaces between isotropic media and anisotropic left-handed materials. The Open Optics Journal . **5**. (2011)
5. Adamashvili G. T., Kaup D.J., Influence of relaxations on the acoustic self-induced transparency and memory function theory. Physics Letters A . (2011).

მიღებული შედეგების საფუძველზე მომზადებულია ხელნაწერი სამეცნიერო ჟურნალში გამოქვეყნებისათვის.

ლიტერატურა

- Agranovich V. M., Y. R. Shen, R. H. Baughman, and A. A. Zakhidov, Phys. Rev. B, v. 69, (2004), 165112, 1-7.
- Adamashvili G.T. Knorr A., Optics Letters, v. 31, (2006), 74-76.
- Adamashvili G.T. and Knorr A., Physics Letters A , 367 (2007) #3, 220-223.
- Adamashvili G.T., Knorr A., Weber C., Adamashvili N.T., Physical Review A, 75 (2007) 063808.
- Adamashvili G.T. and Knorr A., Preprint, Arxiv, 0709.1220v1. September 8, 2007.(a)
- Adamashvili G.T. and Knorr A. , Preprint, Arxiv, 0803. March 14, 2008.
- Adamashvili G.T., Knorr A., Weber C., The European Physical Journal D., 47 (2008) 113-117.
- Adamashvili G.T. Physics Letters A., v. 373 (2008), p.156-159.
- Allen L. and J. H. Eberly, Optical resonance and two-level atoms (Dover, New York, 1975).
- Avrutsky, Phys.Rev. B ,v.70,(2004) 155416,1-6.
- Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T. W. , Nature, v. 424, (2003) 824.

- Bimberg D., Grundmann M., Lednetsov L., Quantum Dot Heterostructures (Wiley 1999).
- Borri P. , W. Langbein, S. Schneider, U. Woggon, R. L. Sellin, D. Ouyang, and D. Bimberg, Phys. Rev.B., v.66 (2002) 081306.
- Chen L., S.He and L. Shen, Phys. Rev.Lett. v.92,(2004)107404,1-4.
- Dolling G., M. Wegener, C. M. Soukoulis, and S. Linden, Optics Letters, v. 32, 53 (2007).
- Giessen H., Knorr A., Haas S., Koch S., Linden S., Kuhl J., Hetterich M., and C. Klingshirn, Phys. Rev. Lett. V. 81, 4260 (1998).
- Hu L. and Chui S.T., Phys. Rev. B., v. 66, (2002) 085108 .
- Kildishev A.V., Shalaev V.M., Optics Letters, v. 33, (2008) 43.
- Leskova T.A., A.A.Maradudin, E.E. Garcia-Guerrere, E.R.Mendez, Metamaterials, v. 1, (2007) 19-39.
- Litchinitser N.M., Maimistov A.I., Gabitov I.R., Sagdeev R.Z., Shalaev V.M., Phys.Rev. Lett. (in press).
- McCall S.L. and E. L. Hahn, Phys. Rev. Lett., V.18 (1967) 908;Phys. Rev., V.183 (1969) 457.
- Pendry J. B. , Holden A. J. and Stewart W. J., IEEE trans. Microwave Theory Tech. v. 47, 2075 (1999).
- Raether H., Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings (Springer, Berlin, 1988)
- Schneider S., Borri P.,Woggon U., Forstner J., Knorr A., Appl. Phys. Letters V.83, (2003) 3668.
- Shalaev V. M., Nature Photonics, v. 1, 41 (2007).
- Shelby R. A., Smith D. R., and Schultz S., Science, v. 292, 77 (2001).
- Shelby R. A., D. R. Smith, S. C. Nemet-Nasser, and S. Schultz, Appl. Phys. Lett. V. 78, (2001) 489 . (a)
- Smith D. R., W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemet-Nasser, and S. Schultz, Phys. Rev. Lett. V. 84, (2000) 4184.
- Smolyaninov I.I., Y. J. Hung, and C. C. Davis, Optics Let., **33**, 1342 (2008).
- Veselago V. G., Sov. Phys.Uspekhi, v.10, 509 (1968).