

NANOTEHNOLOGIILE ȘI LUMEA MIRACULOASĂ A METAMATERIALELOR

Membru corespondent al AȘM

Anatolie SIDORENKO

*Institutul de Inginerie Electronică
și Nanotehnologii „D. Ghițu” al AȘM*

NANOTEHNOLOGY AND WONDERFUL WORLD OF METAMATERIALS

Summary. In Institute of Electronic Engineering and Nanotechnologies of Moldavian Academy of Sciences is developing a novel research direction – technologies of nanostructures and metamaterials preparation and investigation of their unusual properties. Why such materials attract a rising interest all over the world? What is the main reason to take part in this „racing on the atomic scale”? The article highlights the history of discovery and some of main peculiarities of the metamaterials, making them very promising for technical applications.

Keywords: metamaterials, nanotechnologies, photonics.

Rezumat. În Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu” al Academiei de Științe a Moldovei este în curs de dezvoltare o nouă direcție de cercetare – tehnologii de elaborare a nanostructurilor și metamaterialelor, precum și studierea proprietăților lor neobișnuite. De ce interesul pentru astfel de materiale este în creștere în lumea întreagă? Care este motivul principal pentru a lua parte la această „cursă la scară atomică”? Articolul scoate în evidență istoria descoperirii și unele dintre principalele particularități ale metamaterialelor care le conferă un viitor promițător pentru aplicații tehnice.

Cuvinte-cheie: metamateriale, nanotehnologii, fotonică.

În Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu” se dezvoltă câteva direcții științifice noi și extrem de promițătoare:

- elaborarea tehnologiilor de producere a nanostructurilor și metamaterialelor, precum și cercetarea proprietăților lor neobișnuite;

- nanostructurile stratificate de tipul supraconductor-feromagnet, în care a fost depistată așa-numita stare triplet supraconductoare, importantă pentru aplicații în electronica de frecvență înaltă;

- membrane suspendate de GaN nanoperforate și nanoparticule de GaP cu proprietăți de luminescență intensă;

- nanostructuri unidimensionale de ZnO:Cu pentru senzori cu parametri performanți;

- metamateriale din structuri poroase de InP cu retroreflexia luminii și radiație electromagnetică în diapazonul Terahertz.

Conceptul de „nanostructuri” în ultimul deceniu a devenit o noțiune destul de obișnuită, desemnând obiecte cu dimensiuni caracteristice: câteva unități sau zeci de nanometri. Însă noțiunea de „metamateriale” este mai puțin cunoscută și obiectele cu așa denumire sunt mai puțin investigate.

Ce prezintă aceste materiale și de ce crește interesul față de ele în lumea întreagă?

Metamaterialele (din engleză „metamaterial”) sunt niște compozite structurate în mod deosebit, în care elementele de același tip – nanostructuri sau microstructuri – sunt amplasate periodic la suprafață sau în interior. Proprietățile optice, magnetice, acustice ale unui asemenea mediu se deosebesc esențial de proprietățile matricei și ale componentelor care formează metamaterialul, fiind determinate de o anumită ordonare și structură a componentelor.

O adevărată revoluție în știință au declanșat lucrările care au demonstrat posibilitatea creării metamaterialelor cu proprietăți pe care nu le posedă materialele obișnuite. Printre cele mai cunoscute sunt metamaterialele cu indicele de refracție negativ, care manifestă simultan permeabilitate magnetică negativă și permitivitate dielectrică negativă. În cazul în care periodicitatea amplasării nanoelementelor metamaterialului este comensurabilă sau multiplă lungimii de undă a radiației electromagnetice, asemenea material a fost numit cristal fonic. În funcție de numărul de direcții spațiale, de-a lungul cărora indicele de refracție se schimbă periodic, cristalele fonice pot fi unidimensionale, bidimensionale și tridimensionale: CF 1D, CF 2D și CF 3D [1].

În Institutul de Nanotehnologii al Centrului de Cercetare din Karlsruhe (Germania) se efectuează cercetări avansate în vederea creării metamaterialelor, nanostructurilor funcționale și nanocompozitelor utilizate în microsisteme, în biologie, medicină, industria aerospațială, construcții auto și navale, precum și în multe alte domenii [2-5]. Se elaborează compozite pentru asamblarea metamaterialelor radio-absorbante cu permitivitatea dielectrică negativă și permeabilitatea magnetică negativă.

Importanța practică a metamaterialelor impresionează mai ales la rezolvarea problemelor de radiolocație (de exemplu, tehnologiile „Stells”), atunci când se construiesc ținte false pentru a masca obiectele reale și a le ascunde de un eventual observator.

Astfel, un obiect poate lesne deveni invizibil, doar într-o gamă anumită de frecvențe [6,7]. Într-adevăr, posibilitatea de a dirija indicele de

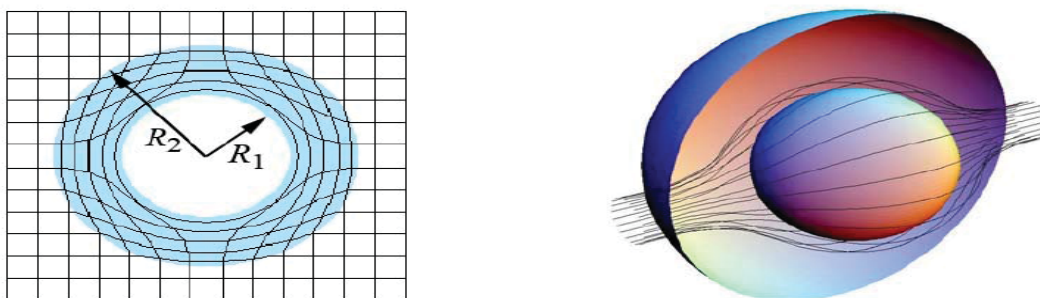


Fig. 1. *Stânga:* reprezentarea schematică a mantei în sistemul de coordonate bidimensional, care asigură invizibilitatea obiectului (manta de invizibilitate). *Dreapta:* traiectoriile razelor, ce ocolesc manta invizibilă, care este proiectată în așa fel, încât să satisfacă trei cerințe contradictorii: 1) manta nu va dispersa radiația incidentă; 2) nu trebuie să arunce umbre; 3) nu trebuie să permită pătrunderea radiației la obiectul ascuns în interiorul mantei de invizibilitate. Pentru a satisface aceste trei condiții, structura mantei de invizibilitate, sau metamaterialele utilizate trebuie să asigure o curbură a razelor de lumină incidente, astfel încât acestea să ocolească obiectul ascuns în interiorul mantei invizibile. Eficacitatea unei astfel de acoperiri a fost demonstrată inițial prin intermediul unor simulări la calculator și recent s-a dovedit experimental că obiectul într-adevăr dispăre de pe ecranul radarului [7].

refracție al unui metamaterial, așa încât lumina să ocolească obiectul, îl face „invizibil” (vezi Fig. 1). Pentru a se obține un astfel de efect, indicele de refracție al metamaterialului trebuie să fie negativ!

Metamaterialele au fost prezise teoretic în lucrările fizicianului rus Victor Veselago [8]. În anul 1967, el pentru prima dată a arătat că aceste materiale ar trebui să aibă proprietăți optice neobișnuite, cum ar fi indicele de refracție negativ și efectul Doppler invers. Metamaterialele par a fi atât de ciudate că inițial aplicarea lor practică a fost considerată imposibilă. Cu toate acestea, în ultimul deceniu, metamaterialele au fost obținute în mai multe laboratoare de cercetări științifice, fapt care a necesitat modificări semnificative în manualele de optică clasică.

Lucrările de pionierat ale profesorului John Pendry, publicate în anul 2000 [9], au servit drept impuls pentru creșterea exponențială a numărului de publicații dedicate metamaterialelor. Iată cum descrie procesul acestei descoperiri profesorul John Pendry în articolul său din revista „Nature”, publicat în anul 2003: „Lumina străbate frontiera dintre diferite materiale. La intrarea în multe materiale, lumina este reflectată sub un unghi pozitiv de deviere... Însă acum câțiva ani, Veselago a înaintat ipoteza, cum că unele materiale ar putea produce o „reflexie negativă”. În 2001 s-a anunțat că un asemenea proces de refracție negativă a fost înregistrat într-un material creat în mod artificial... Veselago a constatat că materialele cu indicele de refracție negativ focalizează lumina ca o lentilă... Hook și alții au reușit să verifice unele dintre particularitățile de focalizare ale acestor materiale. Este un domeniu în care, după cum era de așteptat, cercetările vor continua” [10].

Profesorul David Smith și colaboratorii săi au creat un metamaterial cu indicele de refracție negativ care constă din elemente identice amplasate periodic (vezi Fig. 2). Într-un material obișnuit replica la radiația electromagnetică este determinată de atomii sau moleculele din care acesta este compus, iar în cazul metamaterialului, replica la radiația electromagnetică este determinată de un număr sporit de unități structurale mai voluminoase – „metamoleculă” – incluziuni artificiale ale căror dimensiuni sunt mult mai mari decât dimensiunea atomului, dar mai mici decât lungimea undei electromagnetice incidente [11,12].

Experimentele realizate de către cercetătorii nominalizați, precum și altele, efectuate de echipe de cercetători independenți, au demonstrat justetea concluziilor teoretice ale fizicianului Veselago. Mai mult decât atât, în prezent sunt multe oferte pentru elaborarea dispozitivelor bazate pe fenomenul de refracție negativă, o parte dintre care au și fost deja realizate [6].

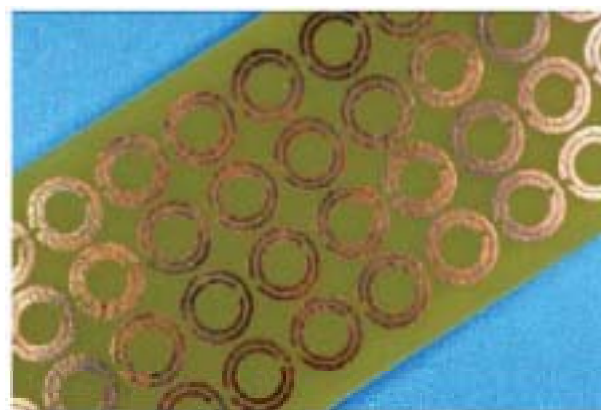


Fig. 2. Metamaterial eficace în gama de radiofrecvențe a radiației electromagnetice [12].

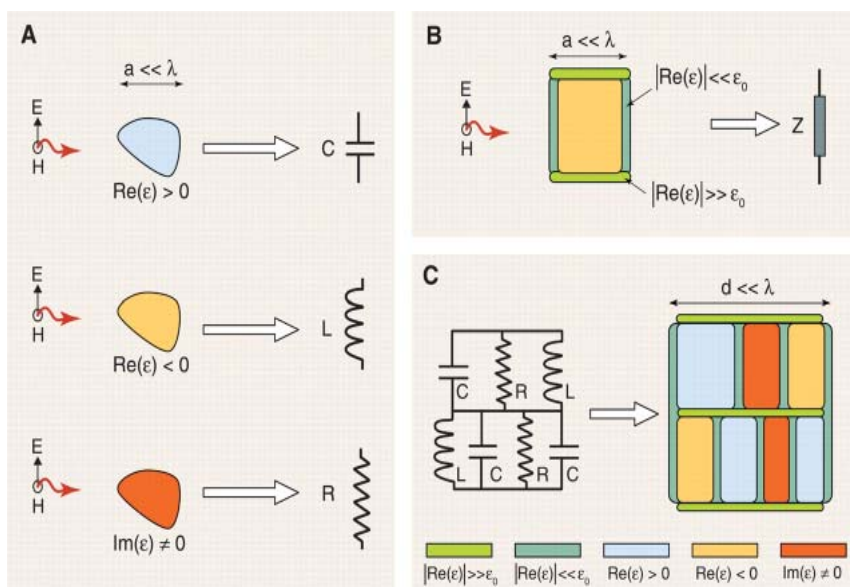


Fig. 3. Nanoparticule (elementele metamaterialului), având dimensiuni mai mici decât lungimea de undă ($a \ll \lambda$), drept componente concentrate pasive cu frecvențe optice și blocuri constituite din astfel de nanoparticule [13].

A apărut posibilitatea înlocuirii elementelor tradiționale ale circuitelor electronice cu elemente elaborate din metamateriale, care creează posibilitatea de miniaturizare în continuare a acestor sisteme, concomitent cu accelerarea proceselor de prelucrare a informației.

Metamaterialele de acest tip sunt ilustrate în Fig. 3: (A) Nanoparticule cu dimensiuni mai mici decât lungimea de undă. După iluminarea lor cu semnal monocromatic pot acționa eficient ca elemente concentrate ale circuitului optic în func-

ție de permitivitatea dielectrică a materialului din care sunt formate. (B) Modulul optic, constituit din nanoparticule, executat în formă de nanoelement optic izolat. (C) Bloc, compus din mai multe nanomodule optice (B), conectate între ele. În cazul în care un astfel de sistem este excitat de un semnal optic, câmpul electric și curentul de deplasare în aceste elemente sunt alese și structurate astfel, încât blocul respectiv într-o anumită gamă de frecvențe se poate comporta ca și circuitul electronic, indicat în figura (C) la stânga [13].

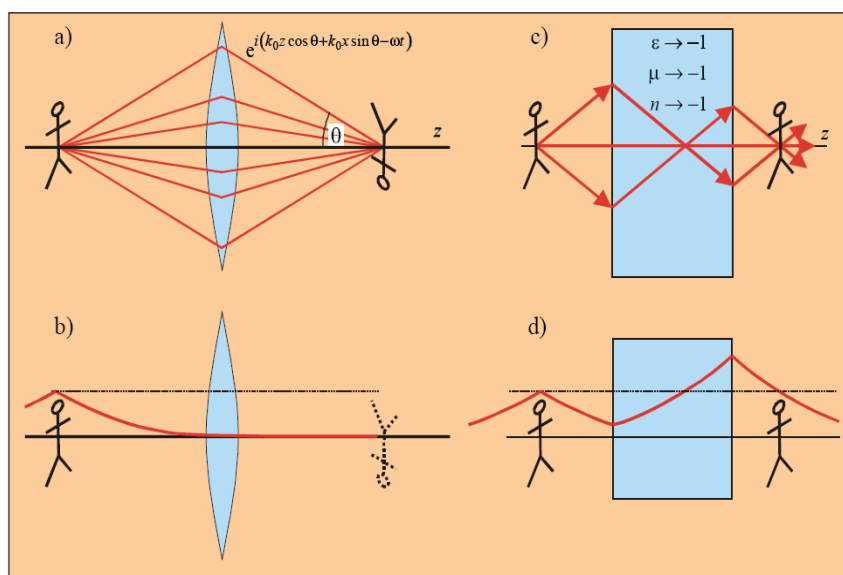


Fig. 4. a) Lentilele obișnuite necesită o apertură mare pentru a obține o rezoluție bună, dar chiar și în acest caz, există limitări în rezoluție în raport cu lungimea de undă utilizată; b) Atenuarea semnalului de la obiectul de observație, care-i mai mic decât lungimea de undă a luminii într-o lentilă obișnuită; c) Lentila Veselago, spre deosebire de lentila optică obișnuită, transferă fără distorsiuni imaginea din spațiul obiectelor în spațiu imaginilor; d) Atenuarea semnalului de la obiectul de observație, care-i mai mic decât lungimea de undă a luminii, într-o lentilă Veselago.

În acest caz, unul dintre aspectele cheie în crearea nanoschemelor în gama undelor optice constă în combinarea nanoelementelor între ele, care poate fi realizată prin tehnologii de pelicule multistrat [13-16].

În ultimul timp tot mai insistent se vorbește despre necesitatea eficientizării științei, despre importanța cercetărilor aplicative în raport cu cele fundamentale, despre reducerea cheltuielilor pentru știință, în general, și pentru domeniile ei fundamentale, în special, în vederea autorecuperării cercetărilor științifice pe seama implementării și aplicării rezultatelor ei în practică, trecerea instituțiilor științifice la autofinanțare, comercializarea procesului științific. În special, acest mesaj este promovat de către funcționarii care nu au o experiență personală de cercetare științifică.

Cu toate acestea, cercetătorii implicați activ în procesul de cunoaștere subscriu unanim la ideea că fără dezvoltarea cercetării fundamentale și teoretice nu se poate aștepta la un rezultat aplicativ, deși noile elaborări, de regulă, au tendința să apară cu o oarecare întârziere față de cercetarea teoretică. Pe de altă parte, este, de asemenea, absolut clar că niciun rezultat semnificativ în domeniul științei și tehnologiei nu poate fi obținut fără o argumentare preliminară și o interpretare teoretică ulterioară.

În acest articol prezentăm un exemplu spectaculos din trecutul recent, care demonstrează nu numai valoarea euristică a științei fundamentale, dar și importanța acesteia pentru dezvoltarea tehnologiilor avansate noi. O ilustrare pregnantă a acestei teze este prezicerea și descoperirea metamaterialelor cu indice de refracție negativ. Argumentarea teoretică a posibilității creării unei asemenea clase de materiale, realizată de către Veselago în 1967, și-a găsit nu doar o confirmare strălucită, ci și aplicații tehnologice importante treizeci de ani mai târziu, în lucrările inginerilor și oamenilor de știință americani.

Cel mai bine această situație savantul o descrie într-un interviu: „În primul meu articol am arătat că indicele de refracție, care până atunci întotdeauna a fost considerat pozitiv, poate fi de fapt și negativ. Aceasta se întâmplă atunci când permeabilitatea electrică și cea magnetică sunt negative. Predicția pe care am făcut-o s-a adeverit peste 33 de ani, odată cu elaborarea de către profesorul Smith, a unui material compozit cu indice de refracție negativ și cu dovezile prezentate de profesorul Pendry cum că lentila plată, confecționată dintr-un material cu refracție negativă, poate avea o rezoluție mai înaltă. Trebuie de menționat, că semnificația acestor rezul-

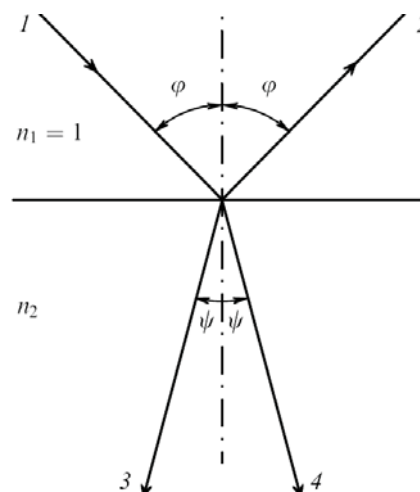


Fig. 5. Trecerea fasciculului prin frontiera a două medii. 1 - fasciculul incident, 2 - fasciculul reflectat, 3 - fasciculul refractat, în cazul în care al doilea mediu este „de stânga”, 4 - fasciculul refractat, în cazul în care al doilea mediu este „de dreapta” [17].

tate constă nu doar în faptul că se poate obține un indice de refracție negativă, dar mai ales în faptul, că în prezent este posibil de a obține materiale compozite cu valori arbitrare, nu neapărat negative, ale ambelor permeabilități” [17].

Lentila Veselago este un dispozitiv optic care focalizează într-un punct radiația de la o sursă punctiformă, dar nu focalizează într-un punct un fascicul de raze paralele (Fig. 4). În articolul publicat în anul 1967, Veselago sugerează posibilitatea de existență a permitivității dielectrice negative și permeabilității magnetice negative și existența sau posibilitatea, în principiu, creării unui mediu cu astfel de indicatori. Lumina vizibilă este un caz special al undelor electromagnetice ce oferă oportunități de a crea acoperiri care fac obiectele invizibile (dar numai pentru o anumită gamă de frecvențe ale undelor).

Explicația poate fi reprodușă grafic (vezi Fig. 5). Când raza trece hotarul dintre cele două medii, în funcție de proprietățile materialului ea poate să se abată în altă direcție și, de regulă, se observă raza reflectată și raza refractată. Cu toate acestea, în anumite condiții (în cazul substanțelor cu un indice de refracție negativ) fasciculul reflectat poate să lipsească și atunci un asemenea obiect va dispărea din câmpul de vedere al radarului. Aceste substanțe au mai fost numite „de stânga”, deoarece au direcția de propagare a energiei opusă vitezei de fază a undelor electromagnetice, în timp ce în materialele „de dreapta” ele coincid. „Utilizarea substanțelor de stânga, scria Veselago, ar permite, în principiu, crearea sistemelor de refracție cu

totul neobișnuite” [17]. Drept exemplu el aduce o placă din material „de stânga” (vezi Fig. 4), care se află în vacuum. În cazul în care sursa de radiație este situată la o distanță mică de la suprafața plăcii (mai mică decât grosimea ei), aceasta poate focaliza un fascicul de raze de la o sursă punctiformă. Astfel, stratul de material cu permitivitatea dielectrică $\epsilon = -1$ și permeabilitatea magnetică $\mu = -1$ servește drept lentilă, care transferă imaginea unui obiect dintr-un segment al spațiului în altul. Cu toate că unei asemenea lentile îi lipsește planul focal, ea creează imaginea reală tridimensională a obiectului. În acest caz, așa cum se arată în figura 4, se formează două imagini reale ale obiectului: una în interiorul plăcii, iar a doua în partea opusă a plăcii, în raport cu obiectul de observație.

În articolul său, publicat în anul 2003, Veselago a scris: „Faptul focalizării unei surse punctiforme de lumină într-un punct, situat în partea opusă a plăcii, nu înseamnă că această placă este o lentilă. O asemenea placă reprezintă un dispozitiv optic perfect, care transferă fără distorsiuni imaginea obiectului din spațiul obiectelor în spațiu imaginilor. Dar un astfel de transfer este posibil doar pentru obiectele, care sunt amplasate în apropierea plăcii, la o distanță nu mai mare decât grosimea ei” [17]. Mediul cu un indice de refracție negativ încovoie fasciculul de lumină sub un unghi negativ în raport cu suprafața. Lumina emisă de o sursă punctiformă se rotește în planul obiectului în direcție opusă, după care iar converge într-un punct. Ieșind din acest mediu, o rază de lumină este focalizată a doua oară în planul imaginii [18].

O particularitate importantă a „lentilei Veselago” constă în capacitatea ei de a transfera imaginea obiectului cu o precizie, care nu este limitată de așa-numita limită de undă. De exemplu, utilizând un sistem optic obișnuit, este imposibil să se facă distincție între două obiecte, în cazul în care ele se află la o distanță mai mică decât lungimea unde electromagnetice, de aceea, în studiul microcosmosului și crearea de microobiecte, specialiștii trebuie să utilizeze lungimi de undă tot mai mici. În plus, undele cu amplitudini amortizate nu ajung la receptor și o parte din informația de la obiectul de observație permanent se pierde. John Pendry a atras atenția asupra faptului că placa cu valori negative ale permeabilității magnetice și permitivității dielectrice poate să amplifice undele amortizate exponențial. El a sugerat, de asemenea, să se folosească pelicule de argint în acest scop. „Un strat plat începe să lucreze ca un rezonator pentru undele atenuate, în cazul în care nu există pierderi în strat.” Aceas-

tă particularitate a metamaterialului este foarte valoroasă, deoarece poate îmbunătăți în mod semnificativ rezoluția fotolitografiei, care constituie una dintre cele mai importante metode de construire a nanosistemelor [18].

În cazul dat, predicțiile teoretice s-au adeverit nu doar prin dovezi experimentale, dar și printr-o gamă largă de aplicații practice. Mai mult decât atât, fără investigațiile teoretice fundamentale ale profesorului Veselago este greu de spus, dacă ar fi fost posibilă o explicație satisfăcătoare a proprietăților metamaterialelor noi, obținute cu ajutorul nanotehnologiilor.

Anume descoperirea lui Veselago și dezvoltarea nanotehnologiilor dovedește rolul semnificativ al cercetărilor fundamentale, fără de care nu există nici nanosistemotehnică, nici nanoproducție. Cercetările aplicative, dezvoltarea tehnologiilor noi și chiar producerea în domeniile nano, a devenit imposibilă fără investigații fundamentale simultane. Aici, experimentul științific însuși se contopește cu elaborările ingineresti, iar nanotehnologiile sunt inseparabile de cercetările teoretice și de experimentul științific, conferind în mod natural un nivel înalt teoretico-științific nanotehnologiilor de tipul „nanotehnoștiință”.

Bibliografie

1. Sakoda Kazuaki. S. Optical Properties of Photonic Crystals. Berlin: Springer, 2005, 267 p.
2. Soukoulis C.M. and Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials. Nature Photon. 5, 523 (2011).
3. Soukoulis C.M., Wegener M. Optical Metamaterials – More Bulky and Less Lossy. Science 330, p.1633-1634, 2010.
4. Ledermann A., Wegener M., G. von Freymann. Rhombicuboctahedral Three-Dimensional Photonic Quasicrystals. Advanced Materials, Volume 22, p. 2363-2366, 2010.
5. Thiel M., Rill M.S., G. von Freymann, Wegener M. Three-Dimensional Bi-Chiral Photonic Crystals. Advanced Materials, Volume 21, pp. 4680-4682, 009.
6. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения. Вестник РАН, 2008, т. 78, № 5, с. 438-457.
7. Smith D.R. and Pendry J.B. Homogenization of metamaterials by field averaging. În: Journal of Optical Society of America B, Vol. 23, pp. 391-403, 2006.
8. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ . Успехи физических наук, т. 92, вып. 3, с. 517-525, 1967.

9. Pendry J.B. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.* 85, p. 3966-3969, 2000.
10. Pendry J.B. Positively negative. *Nature*, vol. 423, p. 22-23, 2003.
11. Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*, Vol. 292, p. 77, 2001.
12. Smith D.R., Pendry J.B. and Wiltshire M.C.K. Metamaterials and negative refractive index. *Science* 305, p.788-792, 2004.
13. Engheta N. Circuits with Light at Nanoscales: Optical Nanocircuits Inspired by Metamaterials. *Science*, Vol. 317, pp.1698-1702, 2007.
14. Alu A. and Engheta N. Three-Dimensional Nano-transmission Lines at Optical Frequencies: a Recipe for Broadband Negative-Refraction Optical Metamaterials. *Physical Review B*, Vol. 75, p. 024304 -024324, 2007.
15. Au A., Salandrino A. and Engheta N. Coupling of Optical Lumped Nanocircuit Elements and Effects of Substrates. *Optics Express*, Vol. 15, Issue 21, p. 13865-13876, 2007.
16. Engheta N., Salandrino A. and A. Alu. Circuit Elements at Optical Frequencies: Nano-Inductors, Nano-Capacitors and Nano-Resistors, *Physical Review Letters*, Vol. 95, p. 095504-095508, 2005.
17. Веселого В. Г. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления, *Успехи физических наук*, т. 173 № 7, с. 790-794, 2003.
18. Michio Kaku. *Physics of the Impossible*. New York: Doubleday, 2008, 329 p.



Petru Jireghea. *Luxuranță*, u/p 600×690 mm, 1985. Din colecțiile UAP RM