

Errefrakzio-indize negatibodun materialak

N. Zabala

Elektrizitatea eta Elektronika Saila
Euskal Herriko Unibertsitatea / Zientzia eta Teknologia Fakultatea
P.K. 644, 48080 BILBAO

eta
Centro de Física de Materiales CFM, Centro Mixto CSIC-UPV/EHU
Donostia International Physics Center,
P.K. 1072, 20080 DONOSTIA

Laburpena: Azkeneko hamarkadan, material artifizialen garapenari esker, posible bilakatu da errefrakzio-indize negatibodun materialak (EINM) sortzea. Material hauek batera izan behar dituzte permitibitate elektriko negatiboa eta iragazkortasun magnetiko negatiboa, maiztasun tarte batean. Era naturalean agertzen diren materialek errefrakzio-indize positiboa dute, baina V.G. Veselago fisikariak errefrakzio-indize negatiboaren posibilitatea eta haren ondorio fisiko interesgarriak aztertu zituen aurreko mendearen 60. hamarkadan. Dena den, posibilitate hori baztertua egon zen 2000. urtera bitartean. Orduan J.B. Pendry fisikariak lehenengo EINM materiala proposatu zuen eta interesa berpiztu zuen, konturatu baitzen horrelako materialaz egindako leiarraren bereizmena handia izango litzatekeela —argiaren uhin-luzeraren azpikoa— eta horregatik superleiarra deritzo horrelako materialaz egindako leiarrari. Azkeneko hamarkadan errefrakzio-indize negatibodun material batzuk —metamaterialak— diseinatu eta eraiki dira eta agerian jarri dira propietate optiko bitxiak ere. Gainera, fotonikaren munduan leihor berriak zabaldu dira material hauekin.

Abstract: In the last decade new developments in artificially engineered materials have given rise to negative refractive index materials (NIMs). To have negative refractive index, materials should have negative dielectric permittivity and negative magnetic permeability at the same time in some frequency range. Naturally appearing materials have positive refractive index, but in the sixties (last century) the physicist V.G. Veselago envisaged the possibility of having negative refractive index materials and discussed their interesting physical consequences. Anyway this possibility was ignored until 2000. This year the physicist J.B. Pendry proposed the first negative refraction index material and interest was recovered because he postulated that a lens of a NIM material would have a high —subwavelength— resolution. Such a lens was called a superlens. In the last decade different NIM materials —metamaterials— have been designed and realised and exotic optical properties have been proved. Furthermore, the development of these materials has opened new directions in the field of photonics.

1. SARRERA

Materialen oinarrizko propietatea da errefrakzio-indizea, argiarekiko duten elkarrekintza deskribatzen duena. Adibidez, propietate honen azpian dago argiak material horretan zehar duen hedatze-abiadura edo zenbat islatzen duen argia haren azalak. Hutsa oinarrizko ingurunea da, eta haren errefrakzio-indizearen balioa, bat da.

Argiak erasotuta gertatzen direnean, materialen atomoek eta elektroiek elkarrekintza bat pairatzen dute argiaren eremu elektromagnetikoarekin, material horren ezaugarritzko errefrakzio-indizea emanik.

Errefrakzio-indizea aldatzen da argiaren maiztasunarekin, baina Optikako eta Elektromagnetismoko liburuetan edozein materialen errefrakzio-indizea magnitude positibotzat hartzen da eta material orotan unitatea baino handiagoa dela onartzen da. Dena den, ez dago inolako lege fisikorik errefrakzio-indizeak positibo izan behar duela esaten duenik. Izan ere, 1968an Veselago [1] fisikari errusiarrek teorikoki aztertu zuen posibilitate hau eta beraren teoria sinplearen arabera, iragazkortasun magnetiko eta permitibitate elektriko negatiboko materialak errefrakzio-indize negatiboa izan beharko luke eta horren ondorioz horrelako materialak propietate bixiak izango lituzke: alderantzizko Doppler efektua, alderantzizko Cherenkov efektua edo agian optikaren aldetik interesgarriagoa dena, leiarretan alderantzizko fokalizazioa sortuko luke. Dena den ahaztuta geratu ziren, irudimen teorikoen modura, 2000 urtera bitartean. Orduan Pendry, Londoneko Imperial Collegeko fisikariak, artikulu batean [2] material hauen inguruko ikerketa berpiztu zuen mundu guztian zehar. Lan horretan Pendryk aurrean zuen EINM material batekin egindako leiar batek (superleiarrek) aukera izan behar zuela argia oso puntu txikian fokalizatzeke.

Gaur egun, nanoteknologian egin diren aurrerapenek, posible egin dute errefrakzio-indize negatiboa duten egitura artifizialak diseinatzea eta erakitzea. Horri esker, errefrakzio-indize negatibodun materialak errealitate kitzigarri bilakatu dira eta gainera fenomeno berriak aurkitzeko eta gailu berriak garatzeko aukerak zabaldu dituzte.

Lan honetan, lehenik errefrakzio-indize negatiboaren inguruko oinarrizko fisika azalduko dugu. Ondoren, superleiarren ideian sakonduko dugu. Azkenik errefrakzio-indize negatibodun materialetarako egin diren azkeneko proposamenak deskribatu eta etorkizunerako erronkak aipatuko ditugu.

2. ERREFRAKZIO-INDIZE NEGATIBOAREN FISIKA

Errefrakzio-indizeak material batek uhin elektromagnetikoen (argiaren) aurrean duen erantzuna adierazten du, eta honela definitzen ohi da:

$$n = c/v \quad (1)$$

Alegia, argiak hutsean duen abiaduraren ($c = 3 \times 10^8$ m/s) eta uhin elektromagnetiko lau batek ingurune horretan duen abiaduraren arteko zatidura modura definitzen da. Errefrakzio-indizeak mugatzen du, adibidez, nola desbideratzen den argia ingurune batetik (n_1 errefrakzio-indizearekin) bestera (n_2 errefrakzio-indizearekin) igarotzean (Snellen legea):

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (2)$$

Ekuazio honetan argi-izpiak muga-azalaren normalarekin osotzen dituen angeluak dira θ_1 eta θ_2 (ikus 3. irudia).

Maxwellen ekuazioetatik lortzen den uhin-ekuazioan oinarrituz, errefrakzio-indizea material baten permitibitatearekin (ϵ) eta iragazkortasun magnetikoarekin (μ) uztartzen da ondoko moduan:

$$n^2 = \epsilon\mu \quad (3)$$

non ϵ eta μ magnitudeek hurrenez hurren eremu elektrikoekiko eta magnetikoekiko erantzuna adierazten duten; gainera, eremuen arteko erlazio osagarrien bidez definituak daude:

$$\mathbf{D} = \epsilon\epsilon_0\mathbf{E} \quad (4)$$

eta

$$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H} \quad (5)$$

Aurreko bi ekuazioetan \mathbf{D} eta \mathbf{E} desplazamendu bektorea eta eremu elektrikoa dira, \mathbf{B} eta \mathbf{H} eremu magnetikoa eta eremu magnetizatzailea, eta ϵ_0 eta μ_0 hutsaren permitibitatea eta iragazkortasuna, hurrenez hurren.

Dena den, orohar, ϵ eta μ maiztasunaren funtzioak dira eta gainera, magnitude konplexuak:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega) \quad (6)$$

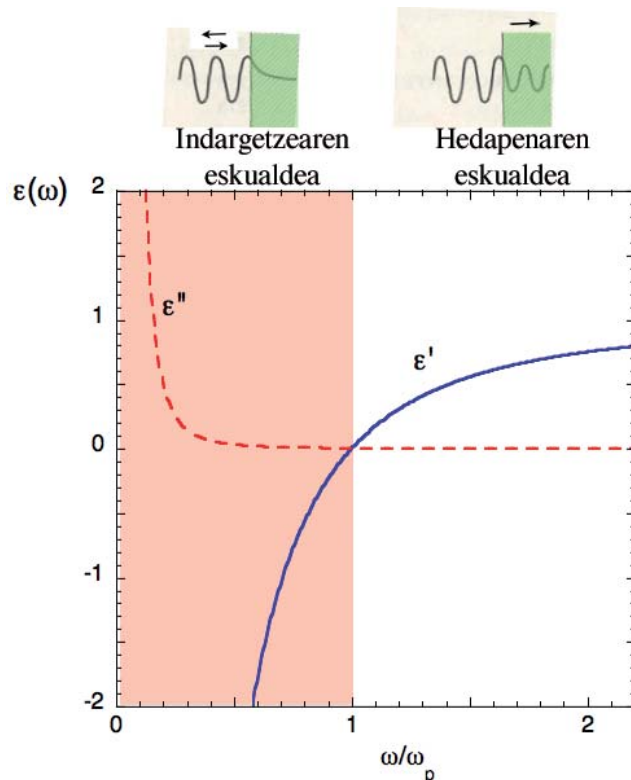
eta

$$\mu(\omega) = \mu'(\omega) + i\mu''(\omega). \quad (7)$$

Aurrekoetan alde errealak eta irudikariak bat eta bi komatxo bidez adierazi ditugu. Metalaren elektroi askeen gasaren edo Druderen ereduarekin, permitibitatea honelako funtzioaren bidez deskribatzen da:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2/\omega(\omega + i\gamma) \quad (8)$$

non ω_p materialaren *ezaugarritzko plasmaren* maiztasuna den eta elektro-dentsitatearekin (n_e) erlazionatuta dagoen, eta γ indargetze-faktorea den eta materialaren eroankortasunarekin erlazionatuta dagoen. Alegia, $\omega_p^2 = n_e e^2 / (\epsilon_0 m_e)$ da, non e eta m_e elektroien karga eta masa dira hurrenez hurren. Adibidez, aluminioaren kasuan, oso egokia gertatzen da eredu hau eta beraren plasma maiztasuna 15 eV ingurukoa da.



1. irudia: Elektroien askeen gasaren funtzio dielektrikoa (Druderen funtzioa, (8) ekuazioa) plasmaren maiztasunaren unitateetan adierazia. Alde erreala, ϵ' , lehen urdin jarraituaz eta alde irudikaria lehen gorri etenaz adierazi dira. Uhin elektromagnetikoak hedatu egiten dira indargetu gabe $\epsilon' > 0$ denean, plasma-maiztasunetik gora eta suntsitu egiten dira $\epsilon' < 0$ denean, plasma-maiztasunetik behera.

Naturan agertzen diren material gehienetan ϵ eta μ unitatearen balioak edo handiagoak direnez, orokorki onartzen da errefrakzio-indizean $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ biderkaduraren erro positiboa eginez lortzen dela, hau da:

$$n = (\epsilon\mu)^{1/2} \tag{9}$$

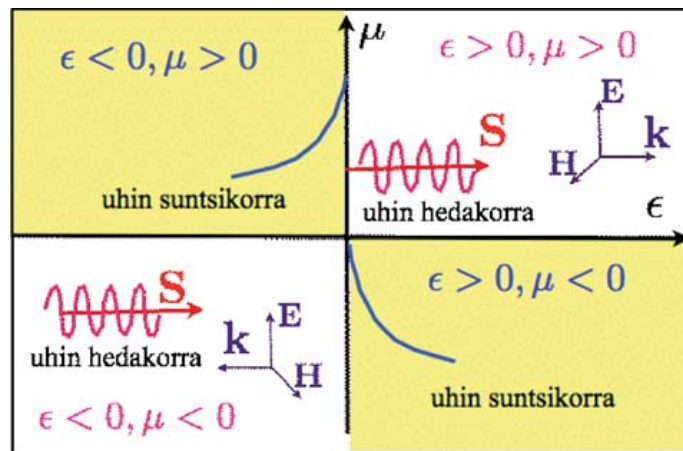
Dena den, metalen kasua dugu lege honen salbuespen aipagarria. Metalak ϵ negatiboa eta μ positiboa dute haien *plasma maiztasunetik* behera

—*plasma maiztasunean* metalak garden bilakatzen dira—. Hori normalean espektro elektromagnetikoaren ikusgaian —uhin-luzera $\lambda = 400\text{-}700\text{ nm}$ — eta maiztasun txikiagoetan gertatzen da. Horren azalpena hauxe da: metalen erantzun optikoa haien elektroiek sortzen dute. Elektroiei hauek kargaturiko partikula askeen plasma osotzen dute, eta elektroien masa finitua denez, eremu elektrikoarekiko azaltzen duten erantzuna ez da bapatekoa, 90 graduko desfasekoa baizik.

Jokaera hau ondo uler daiteke 1. irudiari erreparatuz. Funtzio dielektrikoa negatibo izateak n errefrakzio-indize konplexu hutsa dakar (irudikaria), (3) adierazpenaren arabera, eta horrek uhin elektromagnetikoen jaitsiera esponentziala sortzen du.

Horrelako moteldura duten uhinei *uhin ebaneszte* edo *suntsikor* deritze. Honek azaltzen du zergatik diren metal gehienak opakoak eta ez, adibidez, gardenak.

Bietako bat negatiboa denean, uhin suntsikorak ditugu. Biak positibo edo biak negatiboak direnean berriz, uhin hedakorak ditugu, baina lehenengo kasuan \mathbf{E} , \mathbf{H} eta \mathbf{k} bektoreek triedro zuzena osatzen dute, eta bigarrenean berriz, alderantzizko triedroa (ikus 2. irudia).



2. irudia: Permittibitatearen eta iragazkortasun magnetikoaren lau konbinazio bideragarriak.

1968.ean Veselagok materialek ϵ eta μ batera negatiboak izatearen posibilidadateaz hausnartu zuen [1]. Material batek ϵ negatiboa izan dezan erresonantzia-fenomeno bat behar da, eta era berean μ negatiboak erresonantzia magnetiko indartsua eskatzen du. ϵ eta μ batera negatiboak direnean errefrakzio-indizea erreala da, eta beraz materialak uhin elektromagnetiko hedakorak onartuko lituzke.

Demagun horrelako material batean uhin elektromagnetiko lau bat daukagula. Orduan eremuak $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)}$ eta $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)}$ itxurakoak dira $-\mathbf{k}$ uhin-bektorea da eta ω uhinaren maiztasuna—; Maxwellenen ekuazioak honela idatz daitezke:

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad (10)$$

eta

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega \epsilon_0 \epsilon \vec{\mathbf{E}}. \quad (11)$$

Ekuazio hauen arabera, errefrakzio-indize positiboa duten materialetan, ϵ eta μ positiboak direlarik, uhin-bektoreak eta uhinaren \mathbf{E} eta \mathbf{H} eremuek triedro zuzena osatzen dute. Errefrakzio-indize negatiboa duten materialetan, ϵ eta μ negatiboak direlarik berriz, \mathbf{k} , \mathbf{E} eta \mathbf{H} bektoreek triedro inbertsoa osatzen dute (ikus 2. irudia). Kasu horretan, norabide berekoak eta aurkako noranzkokoak dira \mathbf{k} uhin-bektorea, fase-fronteen hedapenaren norabidea adierazten duena, eta \mathbf{S} Poynting bektorea, energiaren hedapena adierazten duena:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (12)$$

Beraz, energiaren hedapenaren norabidea hedapenerako erreferentzia modura hartzen badugu, errefrakzio-indizeak negatiboa izan behar du, \mathbf{k} uhin-bektorea energiaren hedapenaren aurkako noranzkoan egon dadin.

Une honetan komeni da energiaren hedapen-abiaduraren eta uhin-fronteen hedapen-abiaduren arteko ezberdintasuna azpimarratzea. Energiaren hedapena uhin elektromagnetikoaren \mathbf{v}_g talde-abiadurarekin lotuta dago. Uhin lauen gainezarmenak uhin-paketea osatzen duenean, 3(b) irudikoa izango litzateke pakete horren inguratzailearen hedapen-abiadura.

Bestalde, \mathbf{v}_p fase-abiadurak uhin-fronteen hedapen-abiadura adierazten du eta maiztasunaren eta uhin-bektorearen arteko zatiduraren bidez lortzen da:

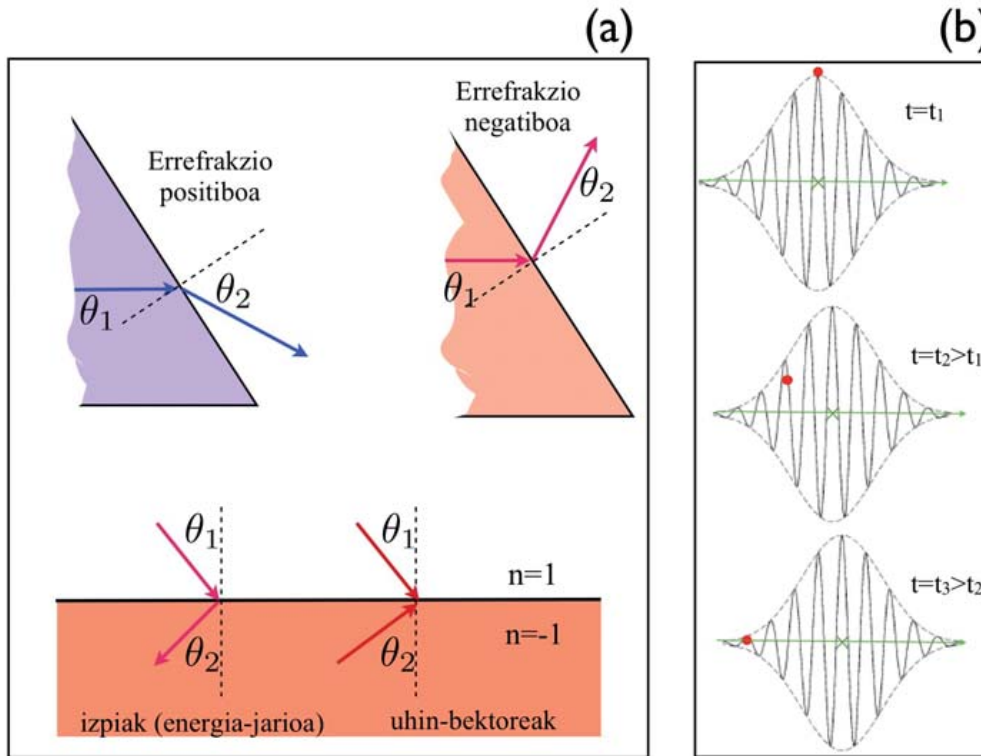
$$v_p = \omega/k = c/n \quad (13)$$

Beraz, errefrakzio-indize negatibodun materialetan fase-abiadurak eta talde-abiadurak aurkako zeinua dute eta uhin-fronteak atzera mugitzen dira energiaren hedapenarekiko. Egoera hau 3(b) irudian adierazten da.

3(a) irudian errefrakzioko Snellen legeak, hau da (2) ekuazioak, material arruntaren gainazalean eta EINM material batean dituen jokamoldeak erkatu dira.

Irudi horren beheko aldean adierazi dira argi-izpiak (energiaren jarioa) eta uhin bektoreak (uhin-fronteen hedapena) material arrunt batetik (hutsa)

EINM material batera ($n = -1$) pasatzerakoan. Lehenengoan biok noranzko berean daude baina, bigarrean alderantzizkoak dira.

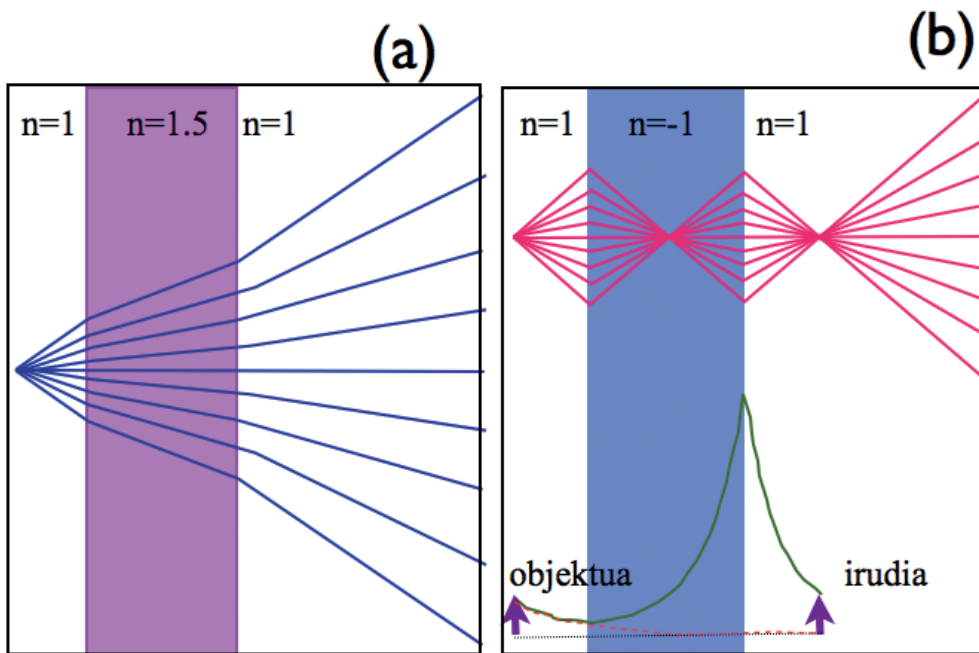


3. irudia: (a) Errefrakzio positiboa eta errefrakzio negatiboa prisma batean (goiko aldean). Errefrakzio negatiboaren jokabidea (beheko aldean); ezkerrean, argi-izpiak EINM materialean sartzean normalarekiko okerreko aldera egiten du. Uhin-bektoreak berriz, energiaren hedapenaren kontra doa, talde-abiadura negatiboa delako. (b) Uhin-pakete gaussiar baten hedapena errefrakzio-indize negatibodun material batean, eta t_1 , t_2 , t_3 , hiru aldiuneetan. Paketearen inguratzailea eskumarantz hedatzen da, eta uhin-fronteak ezkererantz hedatzen dira. Hau hobeto ikusteko puntu gorri bat irudikatu da.

3. SUPERLEIARRA

2000.ean Pendryk auresan zuen EINM material batez egindako xaflak argia fokalizatuko zuela bai uhin hedakorrek bai uhin suntsikorrek erabiliz, eta era horretan bereizmen espaziala uhin-luzeraren azpitik egongo litzatekeela [2]. Optika arruntean irudiak uhin hedakorrek bilduz eraikitzen dira. Uhin suntsikorren anplitudea esponentzialki jaisten denez, garraiatzen duten informazioa galdu egiten da. Fourier analisiaren bidez frogatu daitekeenez, uhin suntsikorrek informazioa garraiatzen dute argiaren uhin-luzera

baino luzera-eskala txikiagoan. Beraz, optika arruntean argiarekin eraikitako irudietan uhin-luzera azpiko zehaztapenak galdu egiten dira. Efektu honi difrakzioaren limitea deritzo eta irudiak lortzeko gailu optikoen oinarriko limitea dela onartzen da. Pendry konturatu zen EINM material batez egindako xafla esponentzialki jaisten den uhin suntsikorra esponentzialki handitzen den uhin bilakatzen dela. Transmisioan gertatzen den uhin suntsikorraren handipen horren jatorri fisikoa hauxe da: argiak materialen azalera elektroi-dentsitatearen oszilazioak sortzen ditu eta hauek EINM materialaren eta indize positibodun materialaren mugan akoplatu egiten dira eta oszilazio-modo berezi bat sortzen dute. Horren ondorioz uhin suntsikorren anplitude nahiko handia geratzen da irudiaren posizioan, eta irudiaren erai-kipenean parte hartzen dute uhin hauek ere (ikus 4. irudia). Hauxe da hain zuzen ere EINM leiarren «*super-bereizmenaren*» oinarria eta horregatik, «*superleiarrak*» deritze.



4. irudia: (a) Kristalezko xafla lau arrunta argi-iturri puntualarekin argiztatua. Argi-izpiak azalean errefraktatzen dira, eta elkarren artean banandu egiten dira, Snellen legeari jarraituz. (b) EINM material batez egindako xafla lauaren argi-iturri puntualeko izpiak errefraktatzen dira Snellen legeari jarraituz, baina orain $n = -1$. Beheko aldean argi-iturriaren osagai suntsikorra irudikatzen da, bai eta leiar horren bidez fokalizatzen dena ere —lerro berde jarraitua—. Lerro gorri eten baten bidez adierazi da material positiboan gertatuko litzatekeena.

Eremu hurbilaren limite edo limite kuasiestatistiko izenekoan, uhin-luzera baino askoz txikiagoak dira irudia lortzeko sisteman parte hartzen du-

ten luzera-eskala guztiak, eta islapenerako eta transmisiorako ekuazioak permitibitatearekiko independente bilakatzen dira s -polarizaziorako eta iragazkortasunarekiko independente p -polarizaziorako, s eta p zeharkako elektrikoa eta zeharkako magnetikoa direlarik hurrenez hurren. Beraz, p -polarizazioko argirako, permitibitate negatiboa eta iragazkortasun positiboa duen materialaz egindako xaflak superleiar modura jokatuko du haren permitibitatearen eraginez. Printzipio honetan oinarrituz, *superbereizmena* egon badagoela frogatu zen zilarrezko xafla oso mehea erabiliz [3,4], argi ultramorearekin ($\lambda = 365$ nm) eta bai silizio karburozko xafla erabiliz ere, kasu honetan argi infragorriarekin (~ 11 μm) [5].

Superleiarren ideiak, oso interesgarri dirudien arren, orokorki eremu hurbileko eskualdera mugatua du lan-esparrua: bai objektuak eta bai irudiak superleiarretik oso gertu egon behar dute. Dena den, eremu hurbilaren aplikazio berriak eta oso interesgarriak bideratzen ditu, adibidez ukipen-litografian.

Hala eta guztiz ere, eremu urrunean eragingo balu, askoz ere zabala-goak izango lirake superleiarren aplikazioak. Eremu hurbilerako murrizpena uhin suntsikorren izaerarekin lotuta dago. Hauek esponentzialki jaisten dira superleiarretik kanpo eta beraz ezin eman dezakete bereizmen handiko informaziorik, uhin-luzera baino harago. Beraz, eremu urrunean lan egiteko mekanismoren bat aurkitu beharko litzateke bereizmen handiko informazioa galdu gabe uhin suntsikorrek uhin hedakor bilakatzeko.

Hori lortzen duen mekanismo bat *sare akoplatzailea* dugu [6]. Sareak, modu egokian diseinatzen bada behintzat, uhin hedakor bilaka ditzake tarte jakin bateko uhin suntsikorrek, eta horrela, eremu urruneko eskualdean zehar heda daitezke. Behin uhinak eremu urruneko eskualdean detektatuta, Fourierren formatua eginez, jatorrizko Fourier osagaiak lor daitezke eta horrela irudia era egokian berreraiki daiteke. Diseinu berri honi eremu urruneko superleiarra deritza; lehenengoz dimentsio bakarreko zilarrezko egitura eraiki zuten Californiako Unibertsitatean eta 50 nm azpiko bereizmena lortu zuten.

Geruza anitzeko superleiarra geometria zilindrikoarekin erabiltzea da beste posibilitate bat. Kasu honetan, uhin suntsikorrek uhin hedakor bilakatzen dira leiar zilindrikoaren barruko azalean, kanpoko azalera iristen direnerako. Horrelako leiarrak, «*hiperleiarra*» deiturikoak, gainera, irudiaren barruko eta kanpoko erradioen araberako handitzea sortzen du. Zilarrezko geruza makur anitzez eta aluminio oxidoz egindako hiperleiarrekin frogatu zen jokabide hau, orain dela bi urte [8]. Difrakzio-limitearen azpiko erresoluzioa lortu zuten, 130 nm-koa. Hiperleiar optikoekin posibilitate berriak zabaltzen dira erabilera desberdinetan, adibidez biomolekulen irudiak denboran zuzenean lortzeko.

4. DISEINU BERRIAK: METAMATERIALAK

Veselagok aurrean zuten bezala, errefrakzio-indize negatiboa izateko, permitibitateak eta iragazkortasun magnetikoak negatiboak izan behar dute, biak batera. Esan dugunez, permitibitate negatiboa duten materialak era naturalean aurki daitezke, adibidez metalak haien plasma-maiztasunaren azpiko maiztasunetan. Zilarra aukera ona da maiztasun optikoetan permitibitate negatiboa lortzeko, erresistibitate txikia eta alde irudikari oso txikia baititu. Bestalde, iragazkortasun negatiboko materialak askoz ere zailagoak dira aurkitzen, bereziki GHz (10^9 Hz) maiztasun tartetik gora. Beraz, maiztasun handietan erantzun magnetikoa lortzeko egitura artifizialak eraiki behar dira, halaberrez.

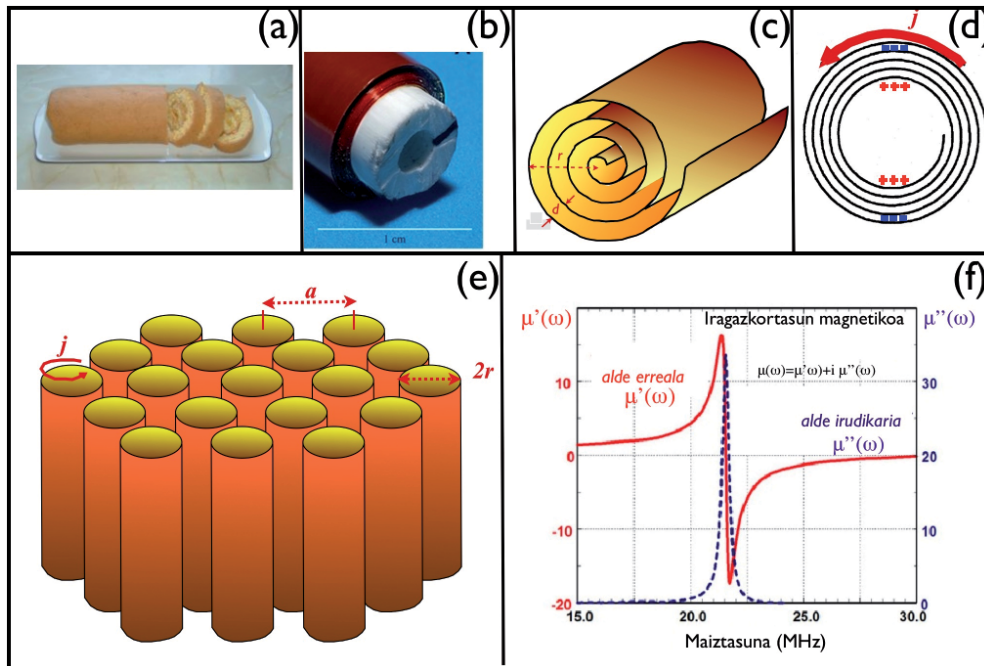
Pendryk eta bere lankideek egitura bereziak proposatu zituzten horretarako: «*eraztun irekiak*» eta «*bilkariak*», hain zuzen ere [9]. 5. irudian daude bilkariak, «*ijito-besoak*» deituriko pastelen itxura dutenak (ingelesez, «*swiss rolls*»). Sistema hauen barne kapazitateak eta barne inductantziak erantzun magnetiko nabarmena sortzen dute, 5(f) irudian ikus daitekeenez.

«Eraztun irekiak» metalezko hari-sare batekin konbinatu ziren, μ_e permitibitate eraginkor negatiboa sortzeko ere, eta horrela lortu zen errefrakzio negatiboaren lehenengo froga esperimentalak mikrouhin-maiztasun tartean ($\sim 10^9$ Hz = 1 GHz) [10]; sistema hori laster iritsi zen erresonantzia magnetikorako sistema erabiliena izatera.

Azpimarratzekoa da nola material ez-magnetikoak erabiliz, hau da, permitibitate modura hutsarena duten materialak erabiliz, mikroegitura jakin batzuk eragin magnetikoa eduki dezaketen maila makroskopikoan. Hots, iragazkortasun magnetiko eraginkorra hutsarena baino askoz handiagoa bilakatzen da eta, zenbait maiztasun tartetan negatiboa izan daiteke, kasu honetan bezalaxe. Era berean, esan beharra dago, mikroegitura, erradiazioaren uhin-luzera baino eskala askoz txikiagoan eraiki behar dela, hau da $a \ll \lambda = 2\pi c/\omega$, non a materialaren oinarritzko gelaxkaren dimentsioa den (ikus 5(e) irudia). Baldintza hau beteko ez balitz, ingurunearen barne egiturak argia difraktatu eta errefraktatuko luke eta ondorioz mekanismo guztia apurtu egingo litzateke. Uhin-luzera handietarako, berriz, barne egitura ez da zehatz-mehatz detektatzen eta materialak mikroegitura baten modura jokatzen du ϵ_e eta μ_e deituriko permitibitate eta iragazkortasun eraginkorren. Gainera, material artifizial hauek metal-dentsitate txikia dute eta ondorioz, nahiko material arinak dira.

Material artifizialen edo metamaterialen jokabidea oso bitxia da. Izan ere, metal arruntak, kobrea edo zilarra bezalako material ezmagnetikoak erabiliz eragin magnetikoa duten materialak lortzen dira mikroingeniaritzaren bidez!

Eraztun irekietako erresonantzailearen diseinurik arruntena metalezko bi eraztun zentrokidez egiten da, normalean kobrez. Eraztun biak irekita



5. irudia: *Ijito-besoak* deituriko egiturak. (a) Ijito-besoa deituriko pastela. (b) Bilduriko xafla metalikoa ijito-beso itxurako bilkarian. (c) Bilkariaren geometria. (d) Bilkarietan sortutako korronteak eremu magnetikoak ezartzen direnean. Korronteak sortzen dira xaflen arteko kapazitate dela medio. (e) Bilkariekin egin dako sarea. (f) Bilkari-sarearen μ_e iragazkortasun magnetiko eraginkorra maiztasunaren funtzioan.

daude, eta irekidura tartek aurkako aldeetan kokatuta daude bi eraztunetan. Eraztunen arteko aldea, haien erradioa baino askoz txikiagoa da.

6. irudian ikus daitezke eraztun karratu irekiak, Shelbyk eta lankideek [11] EINM materialaren diseinuan erabili zituztenak. Irudi horretan ageri da lorturiko material artifiziala, eraztunak eta hari metalikoak konbinatzen dituen.

Bilkarien edo eraztun irekien jokabidearen oinarri fisikoa antzerakoa da [9]. Argi erasotzailearen eremu magnetikoak korronteak eragiten ditu eraztunetan edo bilkarietan zehar, haien barruan sartzen denean. Hala ere, eraztunen ebakidura tartek direla medio, korronteak ezin du aurrera egin eraztun batean zehar, baina eraztun bat bestearekin akoplatuta dago kapazitatearen bidez. Hau da, induzituriko korronteek xafla metalikoak kargatzen dituzte barneko eta kanpoko eraztunen artean eta kapazitate bat sortzen dute. Gainera, energia elektromagnetikoa ez da era uniforme banatzen sistema hauetan, eraztunen arteko tartetean sortzen diren eremu elektrikoetan metatzen baita hein handi batean.

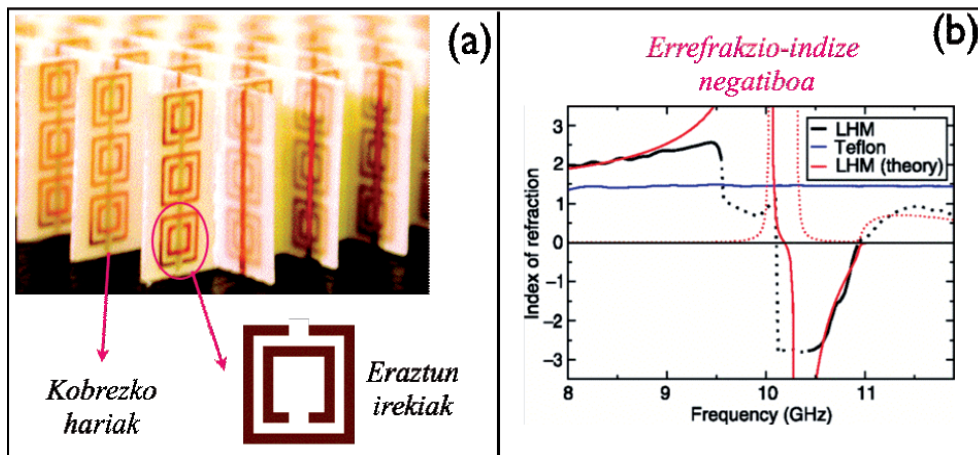
Orduan, sistema hau LC zirkuitu modura azter daiteke eta badu erresonantzia-maiztasuna, haren L autoindukzioak eta C kapazitateak mugatuta dagoena, $\omega_0 \sim 1/(LC)^{1/2}$ hain zuzen ere. Horrela, erresonantzia fenomeno gertatzen da iragazkortasun eraginkorrean. Induktantziaren jatorria korrontek eraztunetan (edo bilkarietan) egiten duen ibilbidetik dator. Kanpoko eremu magnetikoaren aldaketa-erritmoa (ω maiztasuna) handitzen denean, korrontek ezin diote jarraitu, atzeratzen hasten dira, eta fasez kanpoko erantzuna edo erantzun negatiboa sortzen da. Eraztun irekietako erresonantzailearen iragazkortasun eraginkorra honela adieraz daiteke:

$$\mu_e(\omega) = 1 + F \omega^2 / (\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega) \quad (14)$$

non F parametro geometrikoa den, ω_0 erresonantzia-maiztasuna eta γ erresistibitateko indargetze-faktorea. Permitibitatea bezala, hau ere konplexua da. Haren alde erreala eta irudikariak 5(f) irudian ageri dira, bilkari-sare baterako. Erresonantzia indartsua bada eta indargetzea txikia, sistemak erantzun magnetiko negatiboa eduki dezake, kasu honetan bezala.

Arestian esan dugu erantzun irekietako sarea hari-sare batekin konbinatu zela EINM material baten lehenengo diseinuan [10], 6. irudian ikus daitekeenez. Horren arrazoia permitibitate negatiboa lortzea da, baina nahi dugun maiztasun tartean. Esan dugunez, metalek permitibitate negatiboa dute plasma-maiztasunetik behera, (8) ekuazioak deskribatzen duen bezala. Hari metalikoz egindako sareek ere badute permitibitate eraginkorraren alde erreal negatiboa, $\epsilon'_e < 0$, eta gainera, sare-parametroa aldatuz, egokitu daiteke maiztasun tartea. Honelako sisteman, orain,

$$\epsilon_e(\omega) = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega) \quad (15)$$



6. irudia: (a) Lehen EINM material artifiziala eraztun irekietako sareaz eta hari-az osaturik dago. Hauek litografiaren bidez eraiki dira. Egituraren altuera 1 cm-koa da [10]. (b) Material honetan neurtutako errefrakzio-indizea.

$\omega_p^2 = n_e e^2 / \epsilon_0 m^*$ izanik. Metamaterialen kasuan n_e eta m^* sarearen geometriarekin lotuta daude eta horrela, parametro horretaz balia gaitzke ω_0 erresonantzia-maiztasuna finkatzeko eta $\epsilon'_e < 0$ duen ingurunea lortzeko.

Lehenengo diseinuaren ostean [11], eraztun irekietako sistema desberdinak aztertu dira, eta haiek deskribatzeko eredu analitikoak eta numerikoak garatu dira. Azpimarratu behar da, puntu honetan, eraztun irekietako inguruneak oro har akoplamendu magnetoelektiko handia duela [10]. Ondorioz, eraztun irekietako egituretan eremu magnetikoek (elektrikoek) erresonantzia elektroikoak (magnetikoak) sortzen dituzte, eta horrek zeharkako polarizazio efektu konplexuak sortzen ditu. Horrelakoak ekiditeko, eraztun irekietako erresonantziailea aldatu zen, ebakidura tarteak aurkako aldeetan dituzten bi eraztunak xafla dielektiko mehe batez bananduz [11].

Eraztun irekietako erresonantziailearen erresonantzia-maiztasuna eraztunen luzeraren alderantzizko proportzionala da. Beraz, eraztunen tamaina gutxituz, zuzenean handituko da erresonantzia-maiztasuna. Horrela, ikusi da eraztun irekietako egituren aktibitate magnetikoa handitzen dela terahertz erdiko infragorrian eta infragorri gertuko maiztasun-tarteetan. Dena den, proportzionaltasun horrek huts egiten du ikusgaiaren maiztasun-tarteetan, eta metal gehienek galera handiak pairatzen dituzte ikusgaiaren, erresonantzia magnetikoa ahuldu egiten delarik. Beraz, ikusgaiako maiztasunetan lan egiteko diseinu berriak behar dira.

Diseinurik arrakastatsuen metalezko nanohagaxka bikotearena dugu. Sistema honetan plasmoi antiparaleloen erresonantziak (elektroi dentsitatearen oszilazioak) direla medio, momentu magnetiko bat sortzen da. Horrela, elektroien litografia erabiliz, urrezko nanohagaxka bikoteez osaturiko sare batean -0.3 balioko errefrakzio-indize negatiboa lortu zen [13]. Nanohagaxka bikoteak metalezko hari luzeekin konbinatzen direnean ere, errefrakzio-indize negatibodun materialak sortzen dira [14]. Kasu horretan nanohagaxkek erantzun magnetikoa sortzen dute eta hari metalikoek erantzun elektroikoa. Egitura hori ulertzeko har dezagun burbuila pare bat ingurune metaliko batean. Babineten printzipioaren arabera, sistema horren propietate optikoak eta nanohagaxka bikotearenak antzekoak dira. Babineten printzipioak esaten du zirrikitu borobil batek eta disko batek difrakzio-patroi berdinak sortzen dituztela. Egitura horrekin errefrakzio-indize negatiboa lortu zen infragorri hurbilean eta bai 780 nm-an ere [15].

Aurreko kasuetan bi erresonantziaile mota behar dira, magnetikoak eta elektroikoak, aldi berean iragazkortasun magnetikoa eta permitibitatea negatiboak izateko. Baina horrek asko zailtzen du material hauen fabrikazioa. Dena den, posible da era berean EINM materialak lortzea mota bakarreko erresonantziaileak erabiliz. Errefrakzio negatiboa lor daiteke, adibidez, erresonantziaile elektroikoak ingurune kiral batean sartuz, bi polarizazio zirkular ortogonalek errefrakzio-indizearen balio desberdinak dituztenean. Ki-

ralitateak $\omega(k)$ dispersio-kurbak desplazatzen ditu eta eskualde berezi bat agertzen da; bertan talde-abiadura eta fase-abiadura aurkakoak dira, hau da errefrakzio-indize negatiboa dago [16].

Material oso anisotropoak erabiltzea da errefrakzio-indize negatiboa lortzeko beste bide bat. Material oso anisotropoetan permitibitatea desberdina da hedapen-norabide desberdinetan zehar. Horren ondorioz, \mathbf{E} eta \mathbf{D} eremuak ez dira paraleloak, eta \mathbf{S} Poynting bektorea ez dago \mathbf{k} uhin-bektorearen norabidean. \mathbf{S} eta \mathbf{k} bektoreen arteko norabideak oso desberdinak direnean, gerta daiteke \mathbf{S} eta \mathbf{k} bektore hauek aurkakoak izatea, hau da, norabide berdinekoak baina aurkako noranzkodunak izatea; hau ere errefrakzio negatiboaren seinale da. Horrela lortu zen, orain dela bi urte, multixafla erdieroaleak pilatuz, ardatz optikoan zehar permitibitate negatiboa eta ardatz optikoarekiko norabide perpendikularrean permitibitate positiboa dituen materiala, errefrakzio negatiboa egon daitekeela frogatu zelarik [17].

Bragg erresonantzia da errefrakzio negatiboa lortzeko aztertu den beste mekanismo bat, kristal fotonikoetako, hain zuzen ere. Kristal fotonikoak errefrakzio-indizearen profil periodikoa duten materialak dira. Kristal arruntan antzekoak dira periodikotasunaren aldetik, baina periodikoki errepikatzen den motiboa handiagoa dago eskalan kristal arruntena baino. Periodizitateak modulazio bat sortzen du argi erasotzailearen islapen anitzetan eta ondorioz, propietate optiko bereziak sortzen dira: bandak eta banda tarte debekatuak eta errefrakzio negatiboa, besteak beste.

Kristal fotonikoek bi mekanismoei esker eduki dezakete errefrakzio-indize negatiboa. Lehenengoaren arabera, μ_e errefrakzio-indize eraginkor positiboa dute baina errefrakzio negatiboa azaltzen dute, dispersio-gainazalaren kurbatura negatiboaren ondorioz. Kasu honetan \mathbf{S} eta \mathbf{k} oso bektore desberdinak dira eta kristal fotonikoek lehen deskribatu ditugun material anisotropikoen modura jokatzen dute.

Hau da beste posibilitate bat: dispersio-gainazal isotropikoa izatea baina gradiente negatiboarekin. Bi kasuetan posible da superleiarra sortzea.

Errefrakzio-indize negatiboa duten kristal fotonikoak erabiliz, errefrakzio-indize negatiboko irudiak lortu ziren mikrouhinen maiztasun tartean, eta beranduago infragorri gertuan ere [18]. Silizioz egindako kristal fotonikoak egin eta integra daitezke silizioz egindako beste gailu optiko eta elektronikoenekin. Bide honek etorkizun handikoa dirudi errefrakzio negatibodun materialak sortzeko.

Gaur egun, gailu optikoetan erabiltzeko, EINM materialen fabrikazioan datza erronkarik handiena. Kasu gehienetan uhin-luzeraren azpiko sako-nera duten motiboak grabatu behar dira, nanometroaren eskalakoak, aplikazioak maiztasun optikoetan nahi badira behintzat. Izan ere, gogoratu behar

da $a \ll \lambda$ izan behar dela, eta beraz λ txikiagoak oinarritzko egitura (a) txikiagoak eskatzen dituela. Orain arte EINM materialekin egin diren froga esperimental guztietan nanometro eskalako fabrikazioa egin behar izan da aurretik, elektroien sortako litografiarekin, hain zuzen ere. Horrek esan nahi du oraindik ezin direla era masiboan fabrikatu horrelako gailuak. Gainera, era horretan bi dimentsioko egiturak egin daitezke soilik, ezin baita hiru dimentsioko bolumeneko EINM materialik eraiki. Dena den, hiru dimentsioko EINM materialen fabrikazioan ere aurrerapen nabarmenak egiten ari dira.

5. ONDORIOAK ETA ETORKIZUNA

Diseinuz sortutako materialek (metamaterialek) aukera berriak eskaintzen dituzte aplikazio deberdinak dituzten materialak eta gailuak sortzeko. Nolabait, material hauekin gailuen eta materialen arteko muga ez dago hain argi. Materialak ez dira gailuak eraikitze osagaiak bakarrik, hain sofisticatuak izanik funtzio desberdinak bete ditzaketelako. Azkeneko joera EINM materialen ikerketan errefrakzio-indize negatiboaren lorpena baino harago doa. Helburua ez da errefrakzio indize negatiboa lortzea bakarrik; material artifizialen bidez edozein errefrakzio-indize lortu nahi da: indize oso handiak, zero ingurukoak eta errefrakzio-indizeak profil ez-homogeneoekin ere, adibidez ikustezintasuna lortzeko eta eremu berri bat zabaltzeko: transformazioaren optika deiturikoa. Horrelako material gehienak optikaren arloan eta fotonikan erabiltzen dira, baina baita akustikan lan egiteko ere, erresonantzaile mekanikoekin egindako metamaterialak garatu dira azkeneko urteotan [19].

BIBLIOGRAFIA

- [1] V.G. VESELAGO: *Sov. Phys. Usp.* **10**, 509 (1968).
- [2] J.B. PENDRY: *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966 (2000).
- [3] N. FANG, H. LEE, C. SUN, X. ZHANG: *Science* **308**, 534 (2005).
- [4] D.O.S. MELVILLE, R.J. BALIKIE: *Optic. Express* **13**, 2127 (2005).
- [5] T. TAUBNER, D. KOROBKIN, Y. URZHUMOV, G. SHVETS, R. HILLENBRAND: *Science* **313**, 1595 (2007).
- [6] Z. LIU, S. DURANT, H. LEE, Y. PIKUS, Y. XIONG, C. SUN, X. ZHANG: *Opt. Express* **15**, 6947 (2007).
- [7] Z. JACOB, L.V. ALEKSEYEV, E. NARIMANOV: *Opt. Express* **14**, 8247 (2006).
- [8] Z. LIU, H. LEE, Y. XIONG, C. SUN, X. ZHANG: *Science* **315**, 1686 (2007).
- [9] J.B. PENDRY, A.J. HOLDEN, D.J. ROBBINS, W.J. STEWART: *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.* **47**, 2075 (1999).
- [10] R.A. SHELBY, D.R. SMITH, S. SCHULTZ: *Science* **292**, 77 (2001).

- [11] R. MARQUÉS, F. MEDINA, R. RAFII-EL-IDRISSI: *Phys. Rev. B* **65**, 144440 (2002).
- [12] T.J. YEN, W.J. PADILLA, N. FANG, D.C. VIER, D.R. SMITH, J.B. PENDRY, N.N. BASOV, X. ZHANG: *Science* 303, 1494 (2004); S. LINDEN, C. ENKRICH, M. WEGENER, S. LINDEN, S. BURGER, L. ZSCHIEDRICH, F. SCHNIDT, J.F. ZHOU, Th. KOSCHNY, C.M. SOUKOULIS: *Phys. Rev. Lett.* 95, 203901 (2005); C. ENKRICH, M. WEGENER, S. LINDEN, S. BURGER, L. ZSCHIEDRICH, F. SCHNIDT, J.F. ZHOU, Th. KOSCHNY, C.M. SOUKOULIS: *Phys. Rev. Lett.* 95, 203901 (2005).
- [13] V.A. PODOLSKI, A.K. SARYCHEV, V.M. SHALAEV, J. NONLINEAR: *Opt. Phys. Mater.* 11, 65 (2002); V.M. SHALAEV, W. CAI, U.K. CHETTIAR, H.K. YUAN, A.K. SARYCHEV, V.P. DRACHEV, A.V. KILDISHEV: *Opt. Lett.* 30, 3356 (2005).
- [14] S. ZHANG, W. FAN, N.C. PANOIU, K.J. MALLOY, R.M. OSGOOD, S.R.J. BRUEK: *Phys. Rev. Lett.* 95, 137404 (2005).
- [15] G. DOLLING, M. WEGENER, C.M. SOUKOULIS, S. LINDEN: *Opt. Lett.* 32, 53 (2007).
- [16] J.B. PENDRY: *Science* 306, 1353 (2004).
- [17] L.A. ANTHONY, A.J. HOFFMAN, L. ALEKSEYEV, S.S. HOWARD, K.J. FRANZ, D. WASSERMAN, V.A. PODOLSKIY, E.E. NARIMANOV, D.L. SIVCO, C. GMACHI: *Nat. Mater.* 6, 946 (2007).
- [18] E. CUBUKCU, K. AYDIN, E. OZBAY, S. FOTEINOPOULOU, C.M. SOUKOULIS: *Nature* 423, 604 (2003); E. SCHONBRUN, T. YAMASHITA, W. PARK, C.J. SUMMERS: *Phys. Rev. B* 73, 195117 (2006).
- [19] N. FANG, D. XI, J. XU, M. AMBATI, W. SRITURAVANICH, C. SUN, X. ZHANG: *Nat. Mater.* 5, 452 (2006).