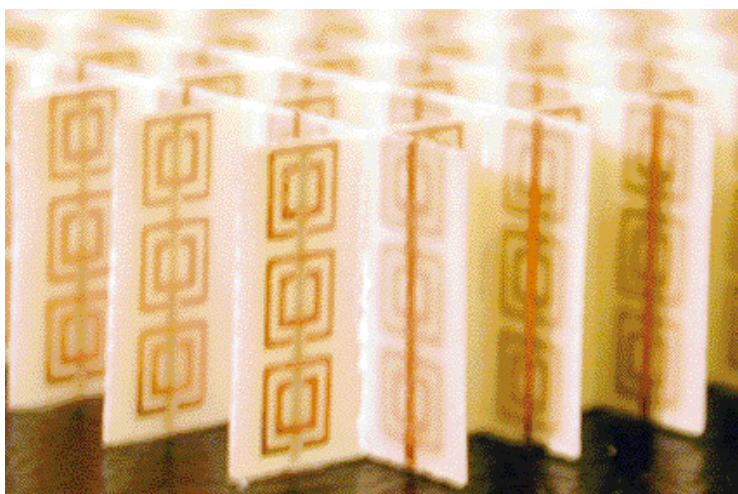


# Beheersen van diffractie met linkshandige materialen

Philippe Tassin • Guy Van der Sande • Irina Veretennicoff • Vrije Universiteit Brussel

Fotonische toepassingen hebben het laatste decennium meer en meer aan belang gewonnen. Een van de drijvende krachten achter deze ontwikkeling van de fotonica is ongetwijfeld de introductie van nieuwe - en betere - optische materialen. Recente doorbraken in het materiaalonderzoek hebben geleid tot materialen met negatieve brekingsindex. Het gebruik van deze materialen kan leiden tot verbeterde fotonische componenten waarin men diffractie naar believen kan aanpassen.



Figuur 1. Een linkshandig materiaal voor microgolven. Copyright 2001 AAAS. Reprinted with permission from [2].

Fotonica is niet meer weg te denken uit onze huidige maatschappij. Dankzij de unieke eigenschappen van licht is het immers mogelijk om nieuwe functionaliteiten en componenten te ontwikkelen die zonder het gebruik van licht niet mogelijk zouden zijn. Tijdens de laatste decennia hebben we dan ook een groot aantal fotonische toepassingen leren kennen, zoals lcd-schermen, optische vezeltelecommunicatie, dvd-spelers, projectoren en laserscalpels. Een van de stuwende krachten achter al deze recente ontwikkelingen is de snelle evolutie van de optische materialen die gebruikt worden in de fotonica. Enerzijds hebben geoptimaliseerde productieprocessen gezorgd voor spectaculaire verbeteringen van hun optische eigenschappen, zoals transparantie en zuiverheid. Zo is

de kwaliteit van het glas dat gebruikt wordt voor lenzen gevoelig verhoogd sinds de eerste telescopen van Galilei. De doorgedreven zuivering van glas heeft het ook mogelijk gemaakt om optische vezels met voldoende kleine verliezen te ontwikkelen, waardoor de capaciteit en het bereik van telecommunicatienetwerken enorm zijn gestegen. Anderzijds werden ook een groot aantal nieuwe materialen geïntroduceerd. De halfgeleiders die gebruikt worden voor optische bronnen en detectoren zijn hiervan waarschijnlijk de bekendste voorbeelden. Door het maken van legeringen van onder andere gallium, indium, fosfor, arseen en aluminium kan men tegenwoordig lasers ontwerpen met een grote waaier aan kleuren.



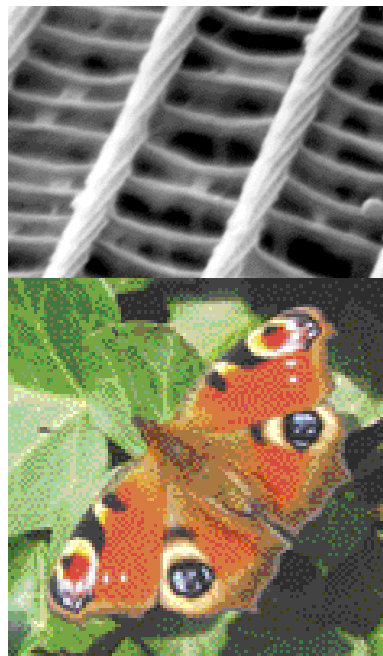
Philippe Tassin behaalde in 2005 het diploma van Burgerlijk Elektrotechnisch Ingenieur aan de Vrije Universiteit Brussel. Met zijn afstudeerwerk 'Diffractieaangepaste Resonatoren' won hij de V.Ir.Br.-prijs voor het beste afstudeerwerk van de faculteit en de Wetenschappelijke Prijs van de Belgische Natuurkundige Vereniging. Hij was ook laureaat van de K.V.I.V.-Ingenieursprijzen (tweede prijs en publieksprijs). Sinds oktober is Philippe als Aspirant van het Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek - Vlaanderen verbonden aan de Vakgroep Toegepaste Natuurkunde en Fotonica van de Vrije Universiteit Brussel, waar hij onderzoek verricht naar het gebruik van nieuwe optische (meta)materialen, waaronder linkshandige materialen en kwantumstippen, voor fotonische toepassingen.

E-mail: [philippe.tassin@vub.ac.be](mailto:philippe.tassin@vub.ac.be)

### Materiaaleigenschappen door structuur

Niet alleen de scheikundige samenstelling, maar ook de interne structuur van een stof kan de materiaaleigenschappen bepalen. In de bouwkunde weet men bijvoorbeeld allang dat gewapend beton zijn unieke sterkte bezit omwille van de specifieke combinatie van metalen wapening en beton. Het is echter pas sinds de opkomst van de fotonische kristallen dat het belang van structuur ook in de fotonica werd onderkend. Dergelijke fotonische kristallen bestaan uit verschillende diëlektrica die op een periodieke manier zijn gerangschikt. Onder bepaalde voorwaarden zal zo'n kristal licht volledig kunnen reflecteren, net zoals een spiegel. Op deze manier zorgt de structuur van een fotonisch kristal ervoor dat met behulp van diëlektrica hetzelfde optische gedrag kan bekomen worden als voor een metaal. Dikwijls worden alleen bepaalde kleuren sterk gereflecteerd door een fotonisch kristal; dit is bijvoorbeeld de reden voor de heldere kleuren van vele vlinders (zie Figuur 2).

Figuur 2. (boven) Een elektronenmicroscopie opname van een vlinder vleugel. We zien duidelijk de periodieke structuur van een diëlektricum en lucht. [Copyright Kevin Mackenzie; Gebruikt met toestemming]. (onder) De kleurafhangelijke reflectie van licht aan een dergelijk fotonisch kristal zorgt voor de mooie kleuren van de vlinder. [Copyright Kurt De Smet - Vzw De Buizerd; Gebruikt met toestemming].

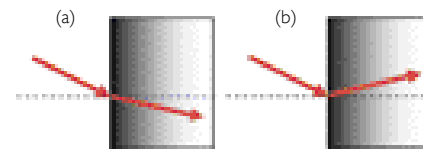


Niet alleen in de fotonica maar ook in vele andere ingenieursdisciplines probeert men tegenwoordig materialen met interne structuur te ontwikkelen, waardoor men materiaaleigenschappen kan ontwerpen of zelfs nieuw materiaalgedrag kan bekomen. Men spreekt dan over artificiële materialen of metamaterialen. Nanobuizen en composietmaterialen zijn hiervan ongetwijfeld de bekendste voorbeelden.

### Linkshandige materialen

Een bijzondere klasse van metamaterialen in de fotonica zijn de zogenaamde linkshandige materialen. Het was de Russische wetenschapper Victor Veselago die in 1968 voor het eerst het optische gedrag van deze materialen bestudeerde [1].

Hij kwam tot het besluit dat ze een aantal opmerkelijke eigenschappen vertonen, waaronder negatieve breking van licht. Het verschil tussen breking aan een gewoon en aan een linkshandig materiaal is voorgesteld in Figuur 3. Bij breking tussen twee traditionele materialen, zoals in Figuur 3(a), ligt de gebroken lichtstraal altijd aan de andere kant dan de invallende straal ten opzichte van een loodrechte op het oppervlak. Bij breking van een lichtstraal tussen een linkshandig materiaal en een traditioneel materiaal gaat dit laatste echter niet meer op. In Figuur 3(b) zien we dat in dit geval de gebroken lichtstraal aan dezelfde kant ligt ten opzichte van de loodrechte. Dit effect noemen we negatieve breking.



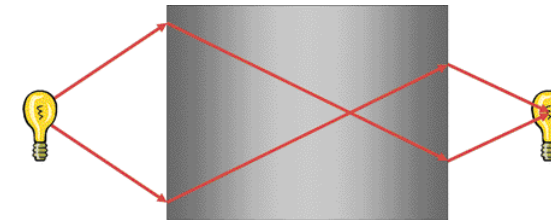
Figuur 3. Breking van een lichtstraal aan het oppervlak tussen twee materialen. (a) Tussen twee traditionele materialen. (b) Tussen een traditioneel en een linkshandig materiaal.

De grootte van de hoekverandering die bij de breking van een lichtstraal optreedt wordt bepaald door de brekingsindex van het materiaal. De waarde van de brekingsindex ligt voor de meeste materialen ergens tussen één en drie en is in elk geval een positief getal voor alle bekende materialen. Positieve brekingsindices leiden echter automatisch tot normale breking. Op deze manier toonde Veselago aan dat linkshandige materialen gekarakteriseerd moeten worden door een negatieve brekingsindex.

### Het eerste materiaal met negatieve brekingsindex

Toen Veselago veertig jaar geleden het concept van negatieve brekingsindex bedacht, beschikte hij niet over een linkshandig materiaal en kon hij zijn theorie dus niet experimenteel toetsen. Materialen met negatieve brekingsindex komen immers niet voor in de natuur. Men heeft dan ook lang gedacht dat het niet mogelijk zou zijn om negatieve breking waar te nemen. Tot wetenschappers van de Universiteit van Californië in San Diego er in 2001 in slaagden om een linkshandig materiaal te ontwerpen voor microgolven en om met dit materiaal negatieve breking experimenteel aan te tonen [2]. Het materiaal dat zij hebben ontwikkeld is afgebeeld in Figuur 1 en bestaat uit een groot aantal koperen baantjes die op een klassieke elektronische printplaat zijn gedrukt. Het is de samenwerking van de koperen baantjes met de elektromagnetische straling die hier instaat voor de negatieve brekingsindex. De golflengte van de straling waarbij dit materiaal gebruikt wordt is altijd groter dan de lengte van de cellen (ongeveer 5 mm).

Daardoor "ziet" de straling de individuele koperen baantjes niet en lijkt het voor de microgolven alsof dit een homogeen materiaal is. Onlangs werden ook linkshandige materialen bij optische frequenties gefabriceerd.



Figuur 4. Pendry's lens: een stuk linkshandig materiaal met twee evenwijdige zijden.

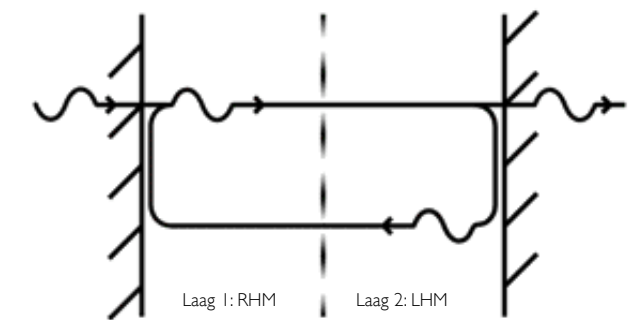
### Een lens met onbeperkte resolutie

De eigenlijke hype rond linkshandige materialen ontstond in 2000 op aangeven van John Pendry [3]. Deze natuurkundige van het Londense Imperial College stelde toen dat materialen met negatieve brekingsindex gebruikt kunnen worden voor de constructie van een ideale lens. Klassieke lenzen, zoals de ze gebruikt in brillen en microscopen, vertonen allemaal een beperkte resolutie. Dit betekent dat het beeld dat door de lens wordt gevormd geen perfecte kopie is van het voorwerp, maar dat het beeld iets waziger is. Dit is het gevolg van diffractie: de spectrale componenten die de details kleiner dan de golflengte van het licht bevatten gaan verloren. Dit betekent dat de fijne details van het voorwerp zullen worden uitgeveegd. Dit is natuurlijk de diffractielimiet van Rayleigh waardoor we met lichtmicroscopen nog net de organellen van een cel kunnen waarnemen, maar geen afzonderlijke atomen.

Pendry's lens, die heel eenvoudig bestaat uit een stuk linkshandig materiaal met twee evenwijdige zijden (zie Figuur 4), is wel in staat om de componenten met kleine golflengte af te beelden. Dit betekent ook dat we niet langer een elektronenmicroscopie nodig hebben om submicroscopische details te vergroten, maar dat dit ook met licht zou kunnen. Het zal de lezer niet verwonderen dat er in de jaren na Pendry's publicatie een polemiek ontstond tussen wetenschappers die in het idee geloofden en zij die superresolutie verwierpen. Sommigen vergelijken superresolutie zelfs met koude fusie. Ondertussen hebben talloze simulaties en experimenten echter bevestigd dat het wel degelijk mogelijk is om details kleiner dan de golflengte van de gebruikte straling weer te geven [4]. Omwille van deze superresolutie werden linkshandige materialen door het hoog aangeschreven tijdschrift Science zelfs uitgeroepen tot een van de tien wetenschappelijke doorbraken van het jaar 2003.

### Een nieuwe component: de dubbelgelaagde resonator

In het kader van een samenwerkingsverband met de Universiteit Libre de Bruxelles hebben we aan de vakgroep Toegepaste Natuurkunde en Fotonica van de Vrije Universiteit Brussel nagegaan wat de invloed is van linkshandige materialen wanneer we ze gebruiken in traditionele niet-lineaire fotonische componenten. Eerder onderzoek wees uit dat het gedrag van licht in linkshandige materialen maar weinig verschilt van dat in traditionele materialen. Het is pas wanneer beide materialen in één component samengebracht worden dat nieuwe effecten optreden. Dit is ook het geval voor de eerder besproken negatieve breking, die enkel optreedt aan het oppervlak tussen een linkshandig en een traditioneel materiaal. Deze beschouwingen hebben geleid tot het ontwerp van een dubbelgelaagde resonator, waarvan een doorsnede weergegeven is in Figuur 5.



Figuur 5. Lichtvoortplanting in de dubbelgelaagde Fabry-Perot resonator gevuld met een traditioneel materiaal (RHM) en een linkshandig materiaal (LHM). De pijlen geven de voortplanting van het licht weer.

De component die we bestudeerd hebben is eigenlijk niets anders dan een klassieke Fabry-Perot resonator gevuld met twee lagen die uit verschillende materialen bestaan: één laag bestaat uit een traditioneel materiaal, de andere laag uit een linkshandig materiaal. In Figuur 5 kunnen we het pad volgen waarlangs licht zich voortplant in de resonator. De fotonen, die via de linkse halfdoorlatende spiegel in de resonator worden gekoppeld, zullen doorheen beide materiaal-lagen propageren. Aan het rechter uiteinde van de resonator wordt een klein deel van het licht doorgelaten, maar het grootste gedeelte wordt gereflecteerd door de spiegel. Op die manier maakt het licht rondgangen in de resonator.

### Een merkwaardig resultaat: aanpasbare diffractie

Onze studie van de dubbelgelaagde resonator leverde een merkwaardig resultaat op. We stelden namelijk vast dat de sterkte van diffractie negatief is in linkshandige materialen. Een lichtbundel zal hierdoor eerst verbreden tengevolge van diffractie in de eerste laag van de resonator, maar zal daarna terug inkrimpen in de tweede laag, zoals geïllustreerd in Figuur 6(b). Er zijn nu drie mogelijkheden:

1. De laag met traditioneel materiaal is veel dikker dan de andere laag. In dit geval heeft de normale diffractie de bovenhand en de dubbelgelaagde resonator vertoont hetzelfde optische gedrag als een klassieke Fabry-Perot resonator.
2. De negatieve diffractie in de tweede laag heft de normale diffractie in de eerste laag juist op. In dit geval hebben we diffractie uitgeschakeld. We noemen dit het regime van diffractiecompensatie.
3. De laag met linkshandig materiaal is veel dikker dan de eerste laag, zodat de negatieve diffractie het haalt van de gewone diffractie. We spreken dan logischerwijze van het regime van negatieve diffractie.

Door de lengte van beide lagen goed te kiezen kunnen we op die manier bepalen hoe breed de bundel is aan de uitgangsspiegel van de resonator. De dubbelgelaagde resonator stelt ons dus in staat om de sterkte van het diffractie-effect aan te passen of zelfs uit te schakelen (diffractie-engineering), en dit terwijl men tot voor kort nog dacht dat diffractie een fundamentele beperking van fotonische componenten was.

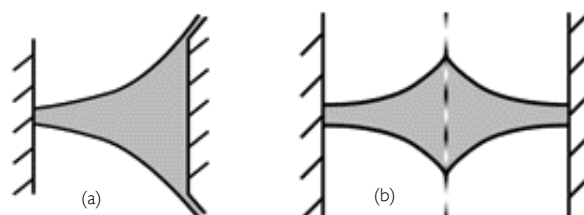
### Tal van nieuwe toepassingen

De nieuwe dubbelgelaagde Fabry-Perot resonator met linkshandig materiaal is van fundamenteel wetenschappelijk belang, omdat voor het eerst werd aangetoond dat diffractie uitgeschakeld kan worden of zelfs negatief kan zijn. Het toevoegen van een laag met linkshandig materiaal aan een Fabry-Perot resonator maakt ook een aantal interessante toepassingen mogelijk.

### Kleinere verliezen

In de eerste plaats kunnen we door volledige compensatie diffractie in optische resonatoren uitschakelen. Dit is interessant, want diffractie zorgt immers voor verliezen. Inderdaad, bij een gewone Fabry-Perot resonator zal de lichtbundel als gevolg van diffractie steeds verbreden en uiteindelijk breder worden dan de spiegels (zie Figuur 6(a)). Bij elke doorgang van het licht zal lichtenergie op die manier over de randen van de spiegels weglekken. Dit lichtverlies vermindert de werking van de resonator; de kwaliteitsfactor van de resonator

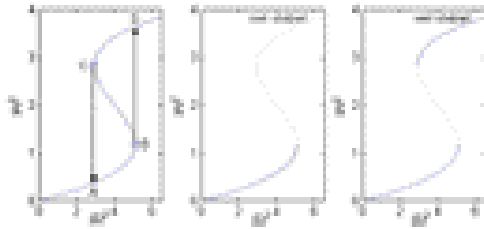
wordt verkleind door diffractie. De diffractiegecompenseerde resonator lost dit probleem op. In Figuur 6(b) zien we beter wat er juist gebeurt met een lichtbundel. Eerst zal de lichtbundel verbreden als gevolg van diffractie. Maar in het linkshandig materiaal zal de bundel terug inkrimpen. Beschouwen we de gehele resonator nu als een zwarte doos (we kijken enkel naar de bundeldiameter op de in- en uitgangsspiegel), dan lijkt het alsof er geen diffractie is opgetreden. Wanneer de bundeldiameter aan de eindspiegel dezelfde is als de diameter aan de eerste spiegel, dan zal er geen licht meer over de rand kunnen weglekken.



Figuur 6: (a) In een gewone optische resonator zal een lichtbundel bij elke doorgang verbreden als gevolg van diffractie. Hierdoor loopt een deel van de bundel weg over de randen van de spiegels. (b) In de diffractiegecompenseerde resonator krimpt de bundel door negatieve diffractie terug in.

### Stabilisatie van fotonische componenten

De dubbelgelaagde resonator kan in bepaalde gevallen ook een stabiliserende werking hebben. Laten we hiervoor eens kijken naar de werking van een optisch geheugenelementje gebaseerd op de niet-lineaire Fabry-Perot resonator. In Figuur 7(a) zien we dat de transferkarakteristiek van een dergelijk element een hysteresislus vertoont, die we kunnen gebruiken voor dataopslag. Dit doet men als volgt. Men stelt eerst een constante houdbundel in die tussen de schakelpunten B en C ligt. De uitgang van de resonator kan nu één van twee toestanden aannemen. Deze bistabiliteit gaan we aanwenden om digitale informatie op te slaan. Verhogen we gedurende korte tijd de intensiteit van de ingangsbundel tot boven het schakelpunt B, dan zal de uitgang van de resonator hoog worden. We hebben een digitale 1 in het geheugen geschreven. Op dezelfde manier kunnen we een digitale 0 schrijven door de intensiteit even te verlagen onder punt C. Wanneer men nu klassieke Fabry-Perot resonatoren gebruikt voor dergelijke geheugenelementjes, dan blijken de toestanden op het bovenste deel van de karakteristiek instabiel te zijn (zie Figuur 7(b)). Dit betekent dat er bij het wegschrijven van een "1" geschakeld wordt naar een instabiele toestand. Het geheugenelementje zal daarom na een bepaalde tijd zijn informatie zal verliezen. Stellen we de resonator echter in het negatieve diffractieregime in, dan wordt het bovenste deel van de transferkarakteristiek wel stabiel (zie Figuur 7(c)), waardoor de werking van dergelijke geheugenelementjes wordt verbeterd.



Figuur 7: (links) Vermogenskarakteristiek van een optisch geheugenelementje gebaseerd op de Fabry-Perot resonator; (midden) Het bovenste deel van de karakteristiek is niet stabiel (streepjeslijn) bij een klassieke Fabry-Perot resonator; (c) Door gebruik te maken van het negatieve diffractieregime kunnen we het bovenste gedeelte van de karakteristiek stabiel (volle lijn) maken.

#### Ultradunne lichtbundels in DVD's en medische beeldvorming

In het laatste deel van het onderzoek naar de dubbelgelaagde resonator hebben we tenslotte aangetoond dat het mogelijk is om ultradunne stralingsbundels te produceren, waarvan de diameter kleiner is dan de golflengte van de gebruikte straling, iets wat tot nu toe niet mogelijk werd geacht. Deze ultradunne lichtbundels hebben eveneens een aantal belangrijke toepassingen. In dvd-systemen laten ze bijvoorbeeld toe informatie op een veel kleinere oppervlakte op te slaan en dus om de opslagcapaciteit van dvd's gevoelig te verhogen. Op een analoge manier laten ultradunne bundels ook toe om met een veel hogere resolutie aan lithografie te doen, waardoor een mogelijkheid wordt geboden om het aantal transistoren per oppervlakte-eenheid te verhogen. Tenslotte merken we op dat we de voorgestelde resonator ook kunnen realiseren voor microgolven. Opnieuw is het concentreren van straling op een oppervlakte met diameter kleiner dan de golflengte hier zeer nuttig. Denk maar aan medische behandelingen waarbij de patiënt met microgolven bestraald wordt. Met de huidige technieken is men verplicht om steeds de volledige patiënt te bestralen, aangezien de golflengte van microgolven verschillend decimeters bedraagt. Met de ultradunne bundels gegenereerd door de dubbelgelaagde resonator bestaat de mogelijkheid om een enkel orgaan van de patiënt te bestralen.

#### Besluit

Linkshandige materialen vormen een nieuwe groep optische materialen met veelbelovende toepassingen. Aan de Vrije Universiteit Brussel hebben we een dubbelgelaagde optische resonator ontworpen die de voordelen van deze materialen combineert met die van traditionele niet-lineaire optische materialen. Deze nieuwe component maakt het mogelijk om de sterkte van diffractie naar believen aan te passen (diffractie-engineering). Het is zelfs mogelijk om diffractie volledig uit te schakelen en om een regime van negatieve diffractie in te stellen. Hierdoor kan de dubbelgelaagde resonator aangewend worden voor het elimineren van diffractieverliezen en voor het stabiliseren van Fabry-Perot resonatoren gebruikt in optische dataopslag en -verwerking. Bovendien stelt de dubbelgelaagde resonator ons mogelijk in staat om lichtbundels te genereren met een diameter kleiner dan de golflengte van licht. ♦

#### Referenties

- [1] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ", *Sov. Phys. Usp.* **10**, 509-514 (1968)
- [2] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", *Science* **292**, 77-79 (2001)
- [3] J. B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966-3969 (2000)
- [4] N. Fang, H. Lee, C. Sun, X. Zhang, "Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens", *Science* **308**, 534-537 (2005)
- [5] L. A. Lugiato, R. Lefever, "Spatial Dissipative Structures in Passive Optical Systems", *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2209-2211 (1987)
- [6] P. Tassin, G. Van der Sande, I. Veretennicoff, M. Tlidi, P. Kockaert, "Analytical model for the optical propagation in a nonlinear left-handed material", *Proc. SPIE* **5955**, 59550X (2005)
- [7] P. Kockaert, P. Tassin, G. Van der Sande, I. Veretennicoff, M. Tlidi, "Spatial dissipative structures in a Fabry-Perot cavity with a negative refractive index", *Proc. SPIE* **5955**, 595510 (2005)