

NUOVI MATERIALI DALLE SORPRENDENTI PROPRIETÀ OTTICHE

VITO MOCELLA

Istituto per la Microelettronica e Microsistemi, CNR, Napoli, Italia

Le proprietà ottiche acquisite dai metamateriali sono, oltre che inconsuete, anche straordinarie, se si pensa alla possibilità di ottenere un indice di rifrazione negativo. Per questo motivo sono stati definiti come "antimateria ottica", per quanto da un punto di vista più fondamentale il comportamento della materia resti ordinario, poiché le modifiche avvengono ad una scala grande rispetto a quella interatomica. In contrapposizione ai materiali disponibili in natura, che hanno sempre indice di rifrazione positivo, l'antimateria ottica viene realizzata grazie all'ausilio delle nanotecnologie mostrando la sorprendente proprietà di annullare otticamente una porzione equivalente di materia ordinaria.

1 Introduzione: indice di rifrazione negativo e metamateriali

Alcune grandezze fisiche sono abitualmente considerate come positive, anche se tale proprietà non discende in modo stringente da alcun principio fondamentale.

Una di queste grandezze è l'indice di rifrazione che normalmente consideriamo come una grandezza positiva e che, nonostante la grande varietà dei materiali disponibili in natura, è generalmente superiore ad 1, valore convenzionalmente attribuito al vuoto. Nonostante l'indice di rifrazione sia una quantità fondamentale nella descrizione della propagazione della luce nei mezzi continui, è bene sottolineare che esso non entra direttamente nelle equazioni di Maxwell. Da un punto di vista formale l'equazione delle onde elettromagnetiche è ottenuta combinando opportunamente le equazioni di Maxwell con le relazioni costitutive del mezzo in cui avviene la propagazione: $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$ dove in modo del tutto generale ϵ e μ possono essere quantità tensoriali che

dipendono dalla frequenza, per quanto nel seguito le considereremo semplicemente come delle quantità scalari limitandoci al caso di un'onda piana monocromatica. Nella soluzione dell'equazione delle onde che se ne ricava appare il quadrato dell'indice di rifrazione: $n^2 = \epsilon\mu$. A prima vista si potrebbe quindi ritenere che il segno dell'indice di rifrazione sia poco interessante poiché nella propagazione delle onde interviene solo attraverso il suo modulo quadro. Per capire l'importanza del segno dell'indice di rifrazione basta pensare all'interpretazione che si ricava immediatamente dall'equazione delle onde, $n = c/v$: l'indice di rifrazione può esser visto come la densità ottica del mezzo, il rapporto cioè fra la velocità della luce nel vuoto c e la velocità di propagazione v (la velocità di fase) di un'onda piana e monocromatica nel mezzo in questione. D'altra parte basta guardare la legge di Snell-Descartes per comprendere che la deviazione ottenuta basandosi su di essa cambia la direzione del raggio rifratto se assumiamo il segno negativo

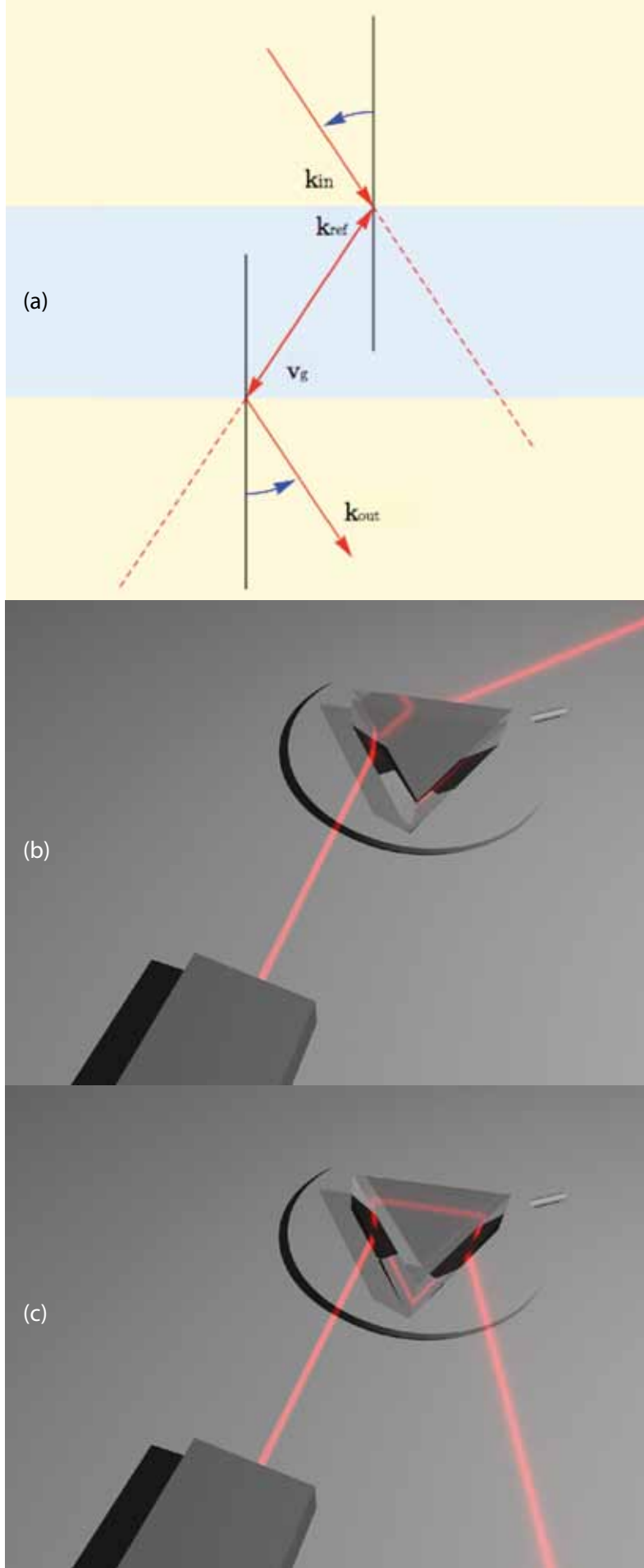


Fig. 1 La rifrazione di un raggio proveniente dal vuoto, $n = 1$, in un mezzo con indice $n = -1$, all'interno del quale il vettore d'onda e la velocità di gruppo hanno la stessa direzione e verso opposto (a). La rifrazione di un fascio collimato nel passaggio in un prisma di vetro con indice di rifrazione $n = 1,5$ (b) e l'equivalente rifrazione che si otterrebbe con un prisma con indice $n = -1,5$ (c).

nella determinazione della radice quadrata: $n = \pm \sqrt{\epsilon\mu}$, fig. 1a. La fig. 1b illustra invece la classica deviazione di una luce collimata, come quella proveniente da un laser, all'interno di un prisma di vetro con indice di rifrazione $n = 1,5$ considerando la sola rifrazione e trascurando la riflessione alle interfacce.

Il segno della radice quadrata va determinato sulla base di considerazioni fisiche ed è abbastanza agevole mostrare che nel caso abituale, cioè quando ϵ e μ sono entrambi positivi, occorre scegliere il segno positivo nella precedente relazione. D'altra parte se uno solo dei termini della radice è negativo, come ad esempio il valore di ϵ nel caso di un metallo vicino ad una risonanza plasmonica, l'indice di rifrazione che ne risulta è puramente immaginario e questo corrisponde ad una rapida attenuazione della radiazione elettromagnetica all'interno del mezzo.

Va ricordato inoltre che l'indice di rifrazione di un materiale è una grandezza macroscopica che descrive proprietà di propagazione della luce ed è proprio la lunghezza d'onda che determina a quale scala un mezzo può esser visto come un materiale omogeneo, la cui composizione discreta è ad una scala molto più piccola della lunghezza d'onda. In ultima analisi tali proprietà derivano comunque dalla struttura microscopica del mezzo in questione che, nel caso della radiazione luminosa (nell'intorno di mezzo micrometro), è di circa tre ordini di grandezza superiore alle distanze atomiche. D'altra parte, quando le lunghezze d'onda diventano confrontabili con le distanze interatomiche, parlare di indice di rifrazione perde il significato usuale per diventare più correttamente l'ordine zero di un processo di diffrazione in cui la visione usuale della rifrazione è vista come un caso particolare. Occorre sottolineare inoltre che, a livello microscopico, l'onda elettromagnetica rifratta in un mezzo non può esser vista come l'onda incidente che ha subito una deviazione nella sua direzione né tantomeno un rallentamento nella sua velocità rispetto al vuoto. Cosa avviene a livello microscopico alla radiazione incidente è ben spiegato dal teorema d'estinzione: l'onda incidente in un mezzo si estingue in una regione più o meno

estesa vicino all'interfaccia mentre l'onda che si propaga nel mezzo, cioè l'onda rifratta, è una nuova onda riemessa all'interno del mezzo ed in grado di autosostenersi all'interno di esso.

Cosa accade quindi se ϵ e μ sono entrambi negativi ed il termine sotto la radice $n = \pm \sqrt{\epsilon\mu}$ è pertanto positivo? Come rilevato da Veselago nel 1967 [1], nella determinazione della radice quadrata occorre in tal caso scegliere il segno negativo e quindi l'indice di rifrazione cambia di segno. La prima immediata conseguenza è quella che la deviazione ad un'interfaccia, determinata dalla legge di Snell-Descartes, cambia di segno ed è quindi dal lato opposto rispetto alla normale all'interfaccia, fig. 1a. La fig. 1c illustra il comportamento di un fascio collimato in un prisma di caratteristiche uguali ed opposte a quelle del prisma in fig. 1b. Come si nota la deviazione è in direzione opposta rispetto alla normale e questo comporta una deviazione finale del prisma completamente invertita in confronto al fascio deviato nel prisma con indice positivo di fig. 1b.

Tenendo conto anche della dispersione cromatica, cioè della dipendenza dalla frequenza di ϵ e μ , per tali materiali più correttamente occorre parlare di velocità di gruppo ($\vec{v}_g \equiv d\omega / d\vec{k}$) negativa, orientata cioè nella stessa direzione ma in verso opposto rispetto alla velocità di fase ($\vec{v} \equiv \omega / \vec{k}$) che ha il verso del vettore d'onda: $\vec{k} \cdot \vec{v}_g < 0$ è dunque la proprietà che in generale è verificata nel caso di un mezzo con rifrazione negativa, come illustrato in fig. 1a dove va notata anche la conservazione della componente tangente del vettore d'onda.

È facile comprendere come un materiale con indice di rifrazione negativo richieda una revisione dei risultati noti e comunemente utilizzati nel progetto degli elementi ottici, a partire dalle proprietà di una lente biconvessa che defocalizza piuttosto che focalizzare un fronte d'onda, come illustrato in fig. 2a e fig. 2b.

L'inversione della rifrazione ha però un'altra conseguenza sorprendente: uno strato di indice di rifrazione negativo è in grado di focalizzare un fascio divergente senza bisogno di alcuna curvatura. La semplice applicazione della legge di Snell-Descartes mostra come un fascio divergente emesso – o riflesso – da un oggetto focalizza una prima volta all'interno

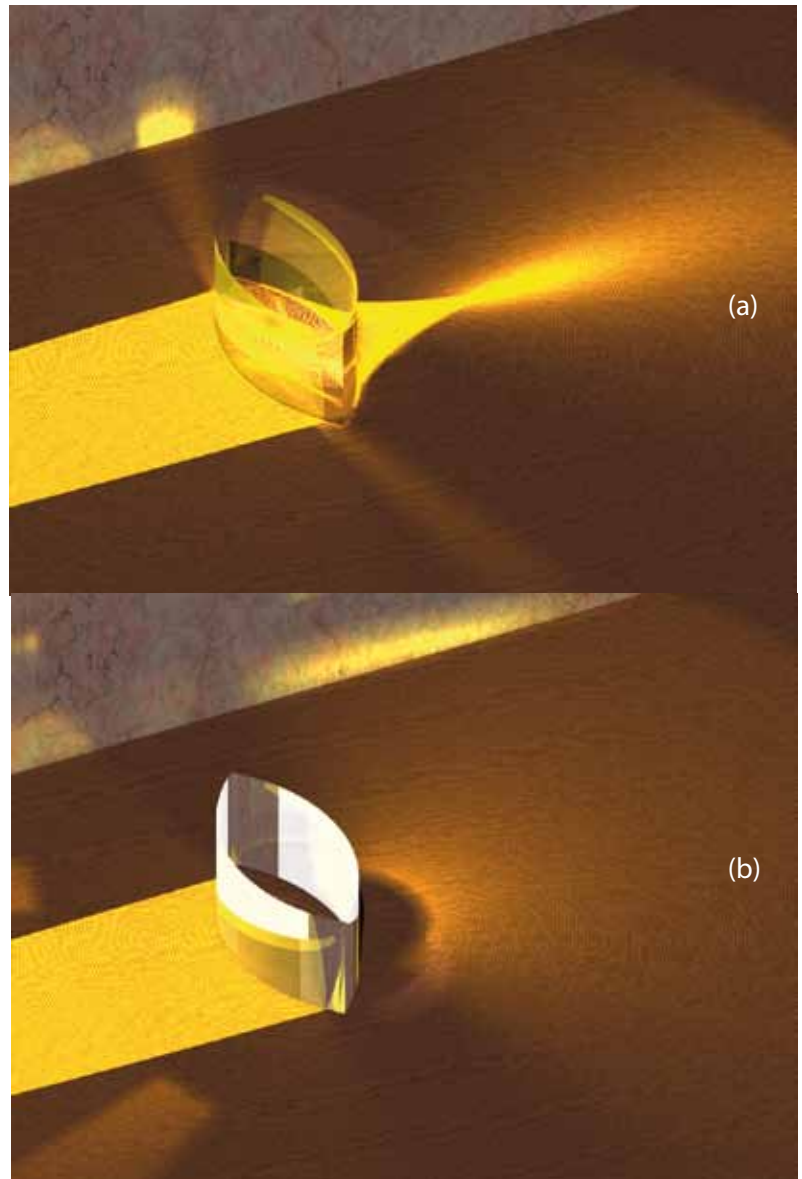


Fig. 2 Il comportamento di una lente biconvessa in vetro con indice $n = 1,5$, che focalizza un fronte d'onda piano ed in cui è ben visibile la caustica di rifrazione che accompagna le classiche aberrazioni sferiche (a) e l'equivalente comportamento di una lente biconvessa con indice $n = -1,5$ che causa la divergenza di un fronte d'onda piano (b), in un certo senso equivalente al caso di una lente biconcava con indice positivo.

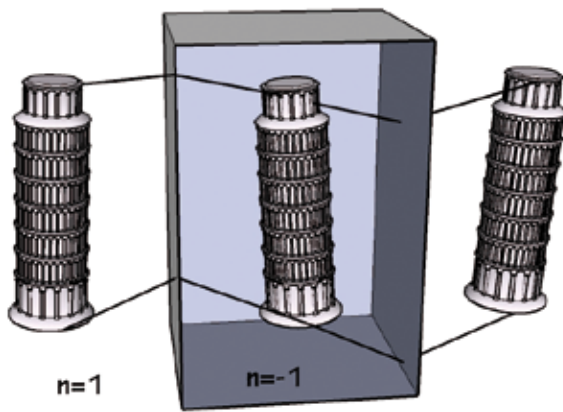


Fig. 3 Il comportamento di una regione ad indice di rifrazione negativo pari a -1 , priva di ogni curvatura sulla base dell'applicazione della legge di Snell-Descartes. L'immagine dell'oggetto posto innanzi si forma dapprima, invertita, all'interno della regione ad indice negativo per poi formarsi all'uscita identica all'ingresso, priva di aberrazioni.

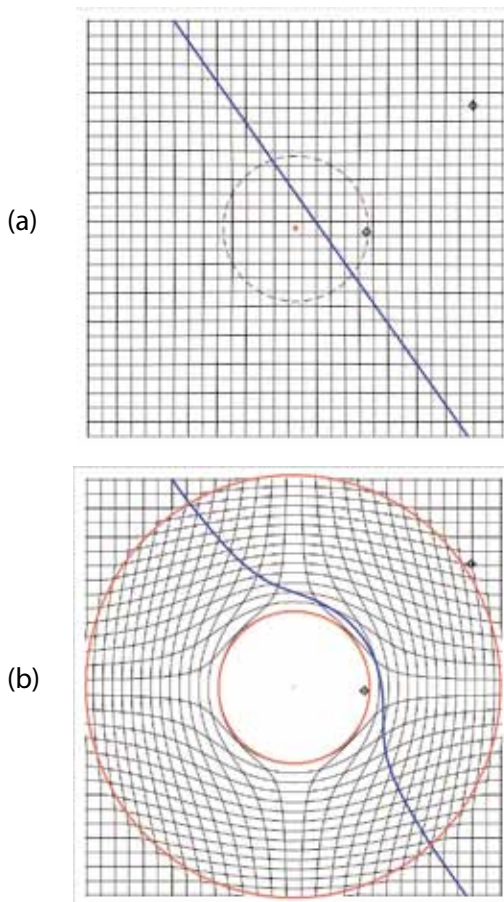


Fig. 4 L'applicazione di una trasformazione di coordinate fra uno spazio cartesiano in cui è presente il vuoto (spazio elettromagnetico) ed in cui la luce si propaga seguendo traiettorie rettilinee, la linea blu in (a), ed il percorso della luce che segue le traiettorie dello spazio trasformato (b) accomodandosi attorno alla regione interna al cerchio rosso di raggio R_1 . Nella regione compresa fra i due cerchi, di raggio R_1 e R_2 , nello spazio fisico in (b), è stato introdotto un materiale in accordo con l'eq. (1) e pertanto la luce fuoriesce da essa in modo del tutto inalterato rispetto al percorso del raggio in (a). La regione inclusa dal cerchio interno risulta pertanto invisibile dall'esterno.

del materiale ad indice di rifrazione pari a -1 fornendo una prima immagine invertita specularmente all'interno ed una seconda volta all'esterno della regione di indice negativo, formando un'immagine identica alla sorgente, come mostrato in fig. 3.

Per questo motivo tale lente è definita ideale: essa possiede la proprietà notevole di essere l'unico elemento ottico, insieme allo specchio piano, che fornisce un'immagine priva di aberrazioni ottiche, a parte quelle dovute alla sua dimensione finita, che possono essere rese piccole a piacere aumentandone la taglia.

Difatti le lenti classiche possiedono sempre una curvatura, convessa nel caso di una lente convergente, tale da formare l'immagine nel piano focale. La curvatura della lente introduce la presenza di un asse ottico e ad esempio, nel caso di lenti sferiche, è responsabile dell'aberrazione sferica che pone una limitazione alla qualità dell'immagine dei sistemi ottici classici. Il sistema ottico illustrato nella fig. 3 è invece privo di asse ottico e quindi un materiale ad indice di rifrazione negativo, uguale ed opposto a quello del mezzo che lo circonda, riproducendo un'immagine a valle di una lente piana non soffre delle limitazioni imposte dall'aberrazione ottica: l'immagine prodotta è priva di distorsioni ad essa legata e può pertanto essere vista come una lente ideale.

Ma questa lente ideale nasconde altre sorprese: una limitazione stringente alla risoluzione delle ottiche classiche è imposta dal cosiddetto limite di diffrazione che limita a circa la metà della lunghezza d'onda il più piccolo dettaglio che può essere risolto da un'ottica classica. Il limite è determinato dal fatto che le componenti spettrali, che contengono l'informazione dei dettagli inferiori alla metà della lunghezza d'onda, sono associate a componenti evanescenti del vettore d'onda e pertanto esse decrescono esponenzialmente con la distanza, restando confinate in prossimità della sorgente. La derivazione effettuata da Pendry [2] sulla lente ideale di Veselago [1] mostra il ruolo di un mezzo ad indice negativo sulle componenti evanescenti che vengono amplificate mentre si propagano nella lente piana con indice negativo, cosicché all'uscita esse

possono essere focalizzate partecipando alla ricostruzione "perfetta" dell'immagine. Per questo motivo tale lente viene definita non semplicemente ideale ma *perfetta* una vera e propria *superlente*, il termine affermatosi nel settore dei metamateriali.

Ma tali sorprendenti proprietà, legate all'indice di rifrazione negativo, sono davvero realizzabili ed in qual misura esse non si scontrano con principi fisici fondamentali? Per quanto riguarda l'indice di rifrazione ricordiamo come da tempo sia stato chiarito che nessun principio è violato da un indice di rifrazione inferiore ad 1, proprietà che a piccola lunghezza d'onda (è il caso dei raggi X duri, ad esempio) è propria di tutti i materiali. Analogamente il fatto che un mezzo possa avere un indice di rifrazione non semplicemente inferiore ad 1 ma addirittura negativo, almeno in una certa regione spettrale, è una proprietà certo inusuale ma che non viola alcunché in quanto occorre considerare l'indice di rifrazione sull'intero spettro di frequenze. Come prevedibile tali aspetti sono stati a lungo dibattuti quando il concetto di metamateriale ha cominciato ad affacciarsi nel consesso scientifico. L'inevitabile dispersione spettrale presente in ogni mezzo ed in particolare nei metamateriali i quali, in un modo o nell'altro, legano le peculiari proprietà alla presenza di risonanze (di tipo metallo-dielettrico o di tipo puramente dielettrico) risolve il problema teorico della presenza di una singolarità non eliminabile che altrimenti inficerebbe la derivazione nel concetto di superlente, capace di ricostruire un'immagine senza alcun deterioramento, con il contributo di tutte le componenti evanescenti [3].

2 Antimateria ottica e trasformazioni ottiche

Le proprietà sopra illustrate sono riconducibili al più generale concetto di antimateria ottica che a sua volta è strettamente connesso all'interpretazione della superlente in termini di trasformazioni ottiche, in particolare alle trasformazioni relative alla piegatura dello spazio ottico.

Di cosa si tratta? Le trasformate ottiche sono un interessante strumento di analisi e di sintesi per l'elettromagnetismo che consentono di ridisegnare lo spazio in cui si muove la radiazione elettromagnetica [4]. Il concetto sotteso dalle trasformate ottiche è l'equivalenza fra le proprietà del materiale in cui l'onda elettromagnetica si propaga (ϵ e μ e quindi l'indice di rifrazione) ed una corrispondente trasformazione delle coordinate, per cui le equazioni di Maxwell mantengono la stessa forma nei due sistemi di coordinate, se le proprietà del mezzo sono modificate in modo adeguato.

Il collegamento fra geometria ed ottica in sé non è nulla di nuovo e l'idea è già insita nel principio di Fermat (1662), se non si vuol rimontare all'arabo Ibn al-Haytham intorno all'anno mille: la luce segue percorsi estremi, stazionari per

esser corretti (il più lungo o il più corto, in genere il più corto) all'interno di un materiale e la misura della lunghezza ottica è determinata dall'indice di rifrazione del mezzo. Un mezzo materiale determina dunque, attraverso l'indice di rifrazione, la geometria della luce: questo è il caso del vetro di una lente o dell'aria che crea l'effetto miraggio nel deserto (o altrove, non è infrequente vederne su un'autostrada, ad esempio).

Nel caso delle trasformazioni ottiche i mezzi materiali, spesso utilizzando la libertà offerta dai metamateriali di realizzare indici di rifrazione di valore arbitrario, sono progettati in modo tale da realizzare una trasformazione di coordinate da uno spazio fisico ad uno spazio elettromagnetico virtuale.

Non è sorprendente il fatto che, dal punto di vista matematico, si stabilisca un'equivalenza fra un sistema di partenza, in genere un sistema di coordinate cartesiane nel vuoto, ed un sistema di coordinate trasformato in cui è possibile analizzare le equazioni di Maxwell come se fossero ancora in un sistema di coordinate cartesiane di partenza ma in un mezzo opportuno con ϵ e μ determinati dalla trasformazione di coordinate. Questa proprietà in precedenza era vista essenzialmente come una metodologia utile nella soluzione numerica di problemi espressi in sistemi di coordinate complesse, per i quali è più agevole trovare la soluzione in un sistema di coordinate cartesiane avendo – come puro artificio matematico – introdotto in esso opportuni ϵ e μ legati dalla trasformazione fra i sistemi di coordinate $\vec{x} \rightarrow \vec{x}'$:

$$(1) \quad \epsilon^{i'j'} = \frac{\Lambda_i^{i'} \Lambda_j^{j'}}{|\det(\Lambda_i^{i'})|},$$

dove $\Lambda_\alpha^{i'} = \partial x^{i'} / \partial x^\alpha$ è la matrice jacobiana della trasformazione.

Il punto di vista affacciatosi con l'avvento dei metamateriali è invece radicalmente diverso: non semplicemente uno strumento numerico ma una vera e propria metodologia per disegnare lo spazio in cui la luce si propaga. Ciò è possibile sfruttando la libertà offerta dai metamateriali che permettono di progettare materiali con indici di rifrazione arbitrari, inclusi quelli negativi. Il risultato pratico di questo approccio, che prima era un mero artificio matematico, è che nello spazio fisico, dove è presente un mezzo il cui indice di rifrazione è scelto in accordo con la trasformazione di coordinate, eq. (1), la luce si propaga seguendo i percorsi del sistema di coordinate dello spazio elettromagnetico, in virtù dell'equivalenza sopra ricordata.

Per capire come nella pratica funziona questo approccio riferiamoci alla fig. 4, in cui vediamo due spazi distinti e due diversi sistemi di coordinate, r' (a) ed r (b). Nel primo spazio, fig. 4a, che denominiamo spazio elettromagnetico non vi è alcun mezzo ed in esso scriviamo le equazioni di

Maxwell nel vuoto in un sistema cartesiano. Effettuiamo poi la trasformazione di coordinate fra i due spazi: $r = R_1 + r'(R_2 - R_1)/R_2$ dove R_1 ed R_2 sono il raggio del cerchio interno e di quello esterno in fig. 4b, ed utilizzando la (1) otteniamo le caratteristiche del mezzo. Grazie all'equivalenza fra trasformazione di coordinate e proprietà ottiche del mezzo, interpretiamo la trasformazione della griglia cartesiana di fig. 4a nella griglia deformata dello spazio fisico di fig. 4b come la trasformazione delle traiettorie della luce nello spazio vuoto, che sono delle linee dritte, nelle traiettorie lungo la griglia trasformata che la luce segue quindi nello spazio fisico.

La metodologia illustrata mostra il primo degli spettacolari risultati proposti seguendo questo approccio: quello della realizzazione di una regione di invisibilità, operando una trasformazione di coordinate tale da espandere un singolo punto in una sfera di dimensione finita. Tutto quel che è contenuto all'interno della sfera di raggio R_1 è inaccessibile alla luce e pertanto invisibile dall'esterno poiché la luce viene guidata nella regione fra R_1 ed R_2 emergendo da essa senza esserne disturbata. D'altra parte poiché è infinitesima la radiazione che penetra un punto nello spazio elettromagnetico, nello spazio fisico sarà infinitesima la radiazione che penetra all'interno della sfera ottenuta dalla trasformazione di coordinate e pertanto tale regione risulterà invisibile alla luce, così come illustrato in fig. 4.

Va notato che – come nel caso della superlente – anche questo risultato ideale resta tale in quanto la perfetta invisibilità richiede che i raggi di luce posti sulla frontiera interna della regione, R_1 , attraversino la stessa nello stesso tempo in cui essi attraversano il punto dell'origine dello spazio elettromagnetico, fig. 4a. Poiché un punto è attraversato in un tempo nullo questo richiede una velocità di fase che tende ad infinito nell'avvicinarsi alla regione di invisibilità posta ad $r = R_1$ nello spazio fisico, fig. 4b. Alla dimostrazione sperimentale di una visibilità molto ridotta nel dominio delle microonde, si accompagna una difficoltà a realizzare lo stesso risultato nel campo del visibile e del vicino infrarosso. Senza soffermarci sui dettagli di queste derivazioni, va sottolineato il fatto che sono state proposte una serie di approssimazioni ed in particolare è stata mostrata sperimentalmente la possibilità di rendere "poco visibile" per radiazioni nel vicino infrarosso ed in una regione relativamente ampia di lunghezza d'onda, un oggetto posto sotto un tappetino, il cosiddetto "carpet-cloak". Vale la pena notare che, nella misura in cui nessun raggio penetra all'interno della regione di invisibilità, da essa nessun raggio può fuoriuscire e pertanto dal suo interno non è possibile guardare, stabilendo una "fondamentale" differenza con il cosiddetto "mantello di Harry Potter", la cui analogia ha attratto la curiosità dei media verso tale tipo di ricerca.

Il concetto di antimateria ottica, come proposto da Pendry-

Ramakrishna [5], non fa direttamente ricorso alle trasformate ottiche, ma esse permettono di reinterpretare il risultato all'interno di un unico approccio fisico-matematico che dà una visione d'insieme ai fenomeni correlati alla libertà progettuale offerta dai metamateriali. Riveniamo quindi alla definizione originaria secondo cui vengono denominati in ottica come materia ed antimateria due materiali con proprietà ottiche (ϵ e μ) esattamente uguali ed opposte. Si mostra analiticamente [5] che, indipendentemente dalla geometria che hanno materia ed antimateria ottiche, essi si annullano a vicenda ed il risultato finale è quello di rendere inesistente – otticamente – un'intera porzione dello spazio. In termini di trasformate ottiche questo si traduce in una trasformazione del tipo ripiegamento dello spazio, piuttosto che di espansione dello stesso come nel caso dell'invisibilità del tipo "mantello di Harry Potter" illustrato in fig. 4. In fig. 5a è illustrato il funzionamento della superlente in termini della trasformazione $\vec{x} \rightarrow \vec{x}'$: in questo caso lo spazio elettromagnetico si ripiega su se stesso ed è per questo motivo che un'intera porzione di spazio è otticamente rimossa dall'esperimento, fig. 5b. Una sorgente posta all'ingresso dello spazio ripiegato si ritrova quindi riportata a valle del ripiegamento e pertanto l'immagine che ne risulta è perfetta. Il concetto di antimateria ottica permette di comprendere tale funzionamento in modo molto più diretto rispetto alla derivazione matematica di Pendry basata sull'amplificazione delle componenti evanescenti in presenza di un indice di rifrazione negativo, derivazione per altro non priva di insidie legate alla presenza di singolarità. L'immagine è restituita nella sua interezza, poiché la porzione di spazio fra l'oggetto e la sua immagine è rimossa e quindi l'oggetto è semplicemente trasferito a valle laddove è posta la sua immagine, come illustrato in fig. 6, mentre lo spazio che è frapposto fra oggetto ed immagine è come se fosse ripiegato su se stesso, quantomeno dal punto di vista elettromagnetico.

3 Alcuni esperimenti sull'antimateria ottica

Una delle difficoltà incontrate inizialmente nella realizzazione di metamateriali funzionanti nel dominio del visibile, o nel vicino infrarosso, è stata quella della loro difficoltà realizzativa poiché essi richiedono la fabbricazione di oggetti con un passo piccolo rispetto alla lunghezza d'onda. L'affacciarsi delle nanotecnologie, in particolare con l'utilizzo di litografie a fascio elettronico, ha consentito di risolvere questo limite quantomeno per le geometrie planari. Esse infatti rendono disponibili con una certa flessibilità e con grande precisione, litografie su una vasta gamma di materiali a dimensioni sempre più ridotte ed in particolare su scale confrontabili, e più piccole, della lunghezza d'onda in oggetto, raggiungendo quindi le risoluzioni necessarie per

la realizzazione dei metamateriali anche in questa regione di frequenze.

L'altro limite essenziale all'utilizzo pratico dei metamateriali è il forte assorbimento che invariabilmente accompagna materiali e strutture di tipo metallo-dielettrico nella regione del visibile e del vicino infrarosso, in particolare in prossimità delle risonanze di tipo plasmonico che spesso sono utilizzate per la realizzazione di ε negativa. È, infatti, possibile mostrare che l'assorbimento, oltre a ridurre l'intensità della radiazione nel piano immagine, riduce drasticamente la risoluzione ottenibile fino ad annullare completamente il vantaggio potenziale della superlente.

Una delle strade alternative alla realizzazione di metamateriali, che si è presentata parallelamente alle strutture metallo-dielettriche, è quella dell'utilizzo delle proprietà dei cristalli fotonici. Si tratta di strutture artificiali ordinate come i cristalli ordinari ma con un passo reticolare vicino alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica, che storicamente hanno preceduto lo sviluppo dei metamateriali. In un certo qual senso i metamateriali possono esser visti come un concetto più esteso, di cui i cristalli fotonici possono essere considerati come un sottoinsieme. Nel caso dei cristalli fotonici è relativamente agevole ragionare in termini di indice di rifrazione, laddove ha meno senso parlare di permittività elettrica ε e permeabilità magnetica μ effettive. D'altronde i metamateriali, ed i cristalli fotonici in questo contesto non fanno eccezione, sono materiali fortemente dispersivi spazialmente, per cui può risultare più agevole ragionare in termini di campi macroscopici \vec{E} , \vec{D} e \vec{B} , considerando semplicemente $\mu = 1$ e $\varepsilon(\omega, \vec{k})$, in cui la dipendenza dal vettore d'onda comporta l'inclusione di effetti di dispersione spaziale, un approccio seguito anche da Landau e Lifschitz [6] e per cui è possibile mostrare l'equivalenza nella derivazione delle proprietà di rifrazione negativa [7].

È questa la strada che abbiamo deciso di seguire nei laboratori dell'Istituto di Microelettronica e Microsistemi del CNR di Napoli avvalendoci della collaborazione del Molecular Foundry dei Berkeley Labs negli Stati Uniti, dove l'esperienza dell'equipe capeggiata dall'italiano Stefano

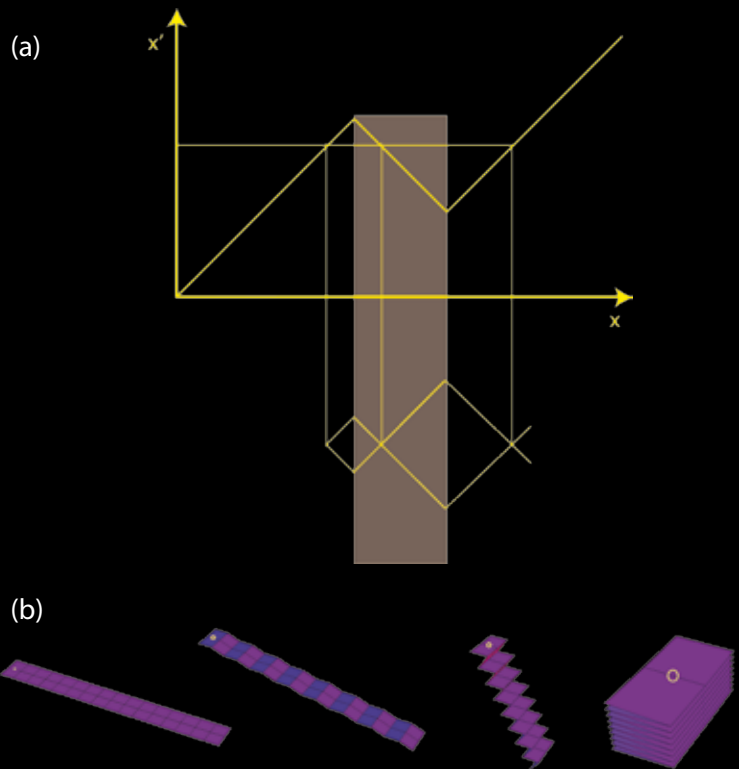


Fig. 5 La trasformazione del tipo spazio ripiegato (a) equivale alla superlente di cui alla fig. 3. Ripetendo tale trasformazione varie volte si rende otticamente inesistente una porzione dello spazio, trasferendo così la sorgente a valle della zona ripiegata, (b).

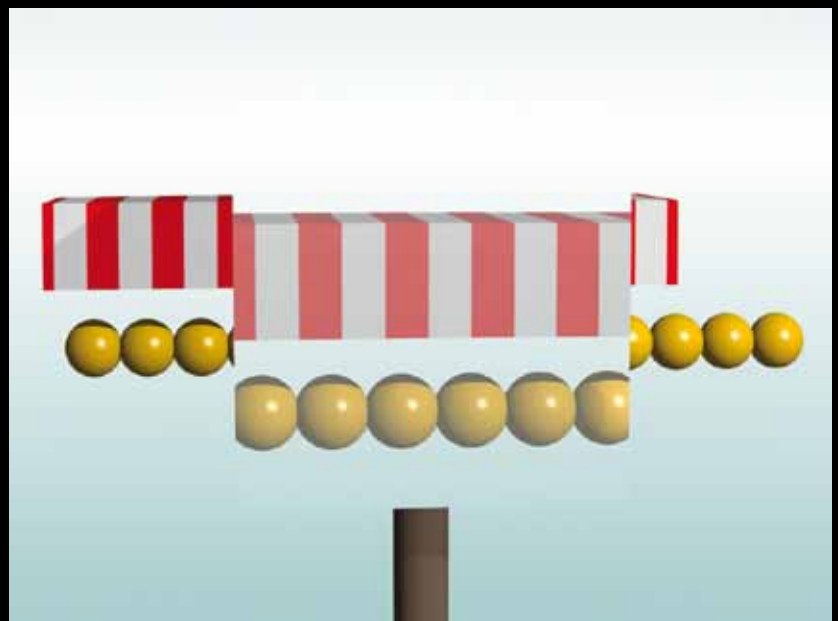


Fig. 6 L'immagine di un oggetto situato dietro ad uno strato ad indice di rifrazione pari a -1 , posto sul supporto scuro nel basso della figura, viene trasferita a valle dello stesso del tutto inalterata, come se lo spazio compreso fra oggetto ed immagine fosse stato rimosso.

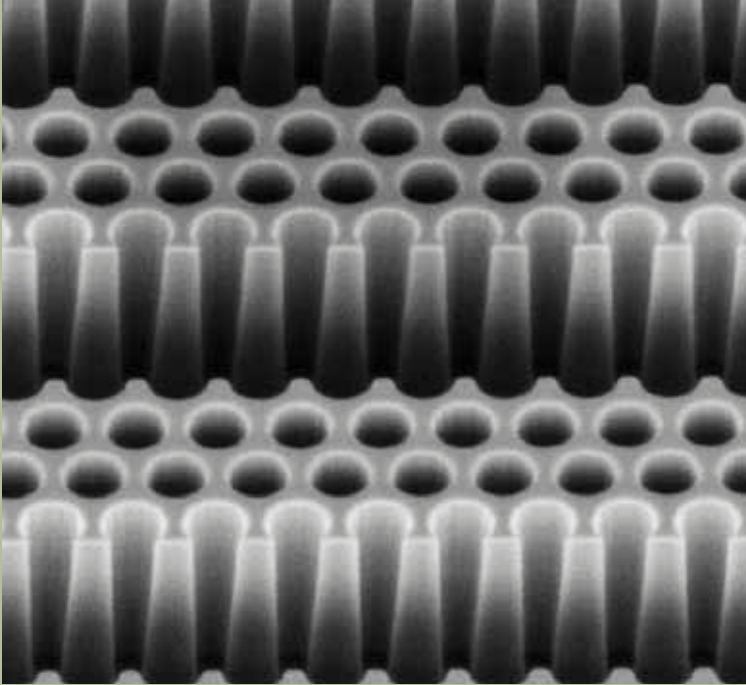


Fig. 7 Un campione di cristallo fotonico con indice effettivo pari a -1 , alternato a regioni di aria di egual lunghezza [8].

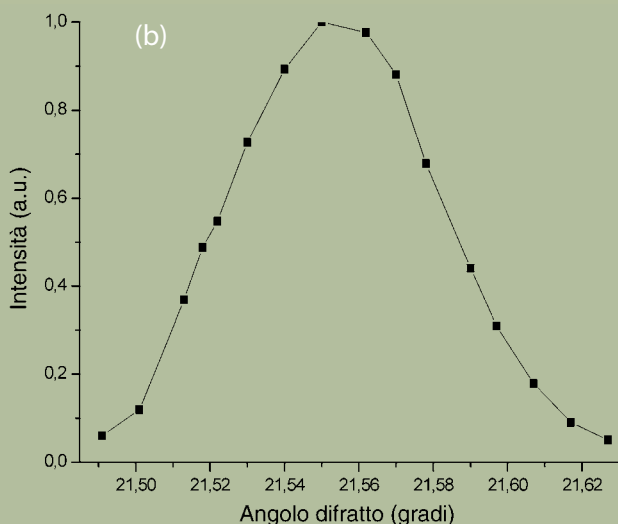
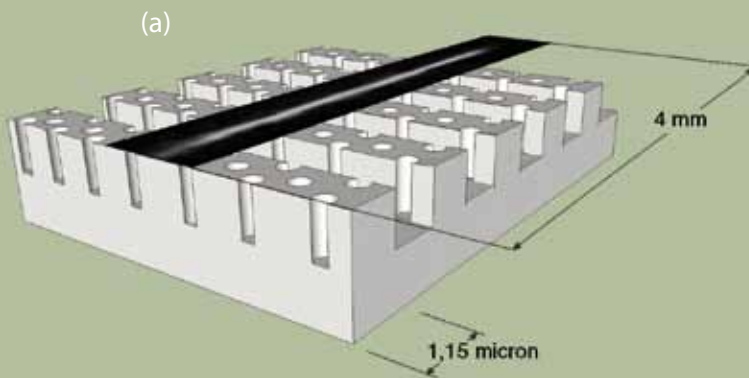


Fig. 8 Le zone di aria ed "anti-aria", di cui alla fig. 7, si annullano a vicenda e la luce posta in ingresso viene trasferita inalterata all'uscita. Si noti che, per motivi espositivi, in (a) la regione di metamateriale ad indice negativo ha una lunghezza di circa $1 \mu\text{m}$ e non è in scala con l'immagine sperimentale, di lunghezza 4 mm , ad esso sovrapposta. Il fascio diffratto dalla struttura ha una divergenza estremamente ridotta il cui picco è pari a $0,06^\circ$ (b).

Cabrini, utilizzando le strumentazioni di nanofabbricazione all'avanguardia dei loro laboratori, ha realizzato campioni basati sul progetto da noi effettuato, un progetto particolarmente impegnativo poiché esso ha richiesto una precisione nanometrica su una dimensione di alcuni millimetri.

Un esempio è illustrato in fig. 7, dove è possibile apprezzarne la qualità fabbricativa, in particolare delle regioni dove il cristallo fotonico, ad indice di rifrazione negativo, è stato terminato in modo tale da consentire l'accoppiamento di onde evanescenti necessarie per la super-risoluzione della lente "perfetta". Nel caso in questione si tratta di migliaia di terminazioni che accoppiano migliaia di superlenti a porzioni di aria di egual lunghezza. Come sopra ricordato il cristallo fotonico, con opportune caratteristiche, si comporta come un metamateriale con indice di rifrazione pari a -1 ed è pertanto otticamente un'anti-aria rispetto all'adiacente porzione di aria con indice vicino a quello del vuoto. Ogni porzione di anti-aria otticamente annulla l'adiacente porzione di aria ed il risultato finale è pari alla rimozione di una porzione macroscopica lunga, nel caso in questione, 4 mm . In termini di trasformate ottiche questo equivale quindi ad un ciclico ripiegamento dello spazio su se stesso per migliaia di volte fino a riportare la sorgente in ingresso all'uscita della regione. Sperimentalmente abbiamo pertanto posto all'ingresso una radiazione incidente fortemente focalizzata e pertanto immediatamente divergente a valle del fuoco ($3 \mu\text{m}$ la dimensione del fuoco del fascio incidente per $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$) ed abbiamo osservato che essa viene trasferita tal quale all'uscita dopo aver attraversato ben 4 mm cioè una lunghezza pari a migliaia di lunghezze d'onda (cf. fig. 7) laddove un fascio così fortemente divergente, poiché non è presente alcuna struttura che lo confini lateralmente, dovrebbe divergere per diffrazione molto rapidamente [8]. D'altra parte le straordinarie proprietà della propagazione della luce in queste strutture che alternano materia ed antimateria ottica sono confermate dall'analisi dei picchi di diffrazione della radiazione che, per quanto in misura molto ridotta, inevitabilmente viene diffusa verso l'alto dalla

struttura.

Nonostante la presenza di un'onda incidente estremamente divergente i picchi di diffrazione mostrano una radiazione diffratta estremamente collimata: la collimazione misurata è di $0,06^\circ$, ai limiti del nostro apparato sperimentale. Tale direttività conferma il comportamento atteso dell'antimateria ottica, che annulla l'equivalente parte di aria ad essa adiacente, finendo per ripiegare su se stessa una porzione di 4 mm di spazio che in definitiva "non esiste" per la propagazione della luce al suo interno e non subisce quindi l'inevitabile allargamento – tanto nella direzione laterale quanto in quella verticale – legato alla propagazione di un fascio divergente su una lunghezza macroscopica rispetto alla lunghezza d'onda. Nel muoversi all'interno di tale spazio ripiegato la debole luce che viene comunque persa verso l'alto per gli inevitabili difetti fabbricativi, finisce per avere un ben determinato vettore d'onda lungo la direzione del ripiegamento e questo determina l'estrema collimazione della luce diffratta il cui profilo angolare estremamente direttivo è illustrato in fig. 8 [9].

4 Conclusioni

Il concetto di antimateria ottica che generalizza, anche per geometrie complesse, il risultato della superlente proposta da Pendry e che offre, insieme all'utilizzo delle trasformate ottiche, un nuovo approccio per ridisegnare lo spazio elettromagnetico in cui virtualmente la luce si propaga, permette di studiare effetti e realizzare dispositivi ottici impensabili fino a pochi anni fa.

Lo sviluppo delle ricerche nel campo dei metamateriali insieme all'utilizzo delle nanotecnologie consente oggi l'applicazione di queste metodologie anche nel campo ottico del visibile e del vicino infrarosso ed è facilmente prevedibile che questo comporterà un cambiamento sostanziale nel mondo dell'ottica tanto dal punto di vista teorico quanto nelle applicazioni, molte delle quali futuribili appaiono oggi meno lontane di quanto si potesse pensare fino a pochi anni or sono.

Bibliografia

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Sov. Phys. Usp.*, 10 (1968) 509 (edizione in lingua russa: *Usp. Fiz. Nauk*, 92 (1967) 517).
- [2] J. B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", *Phys. Rev. Lett.*, 85 (2000) 3966.
- [3] D. Maystre e S. Enoch, "Perfect lenses made with left-handed materials: Alice's mirror?", *J. Opt. Soc. Am. A*, 21 (2004) 122.
- [4] U. Leonhardt e T. G. Philbin, *Geometry and Light: The Science of Invisibility* (Dover, Mineola) 2010.
- [5] J. B. Pendry e S. Anantha Ramakrishna, "Focussing light with negative refractive index", *J. Phys.: Condens. Matter*, 15 (2003) 6345.
- [6] L. D. Landau e E. M. Lifshitz, *Electrodynamics of continuous media* (Elsevier) 1984.
- [7] V. M. Agranovich e Y. N. Gartstein, "Spatial dispersion and negative refraction of light", *Phys. Usp.*, 49 (2006) 1029.
- [8] V. Mocella *et al.*, "Self-Collimation of Light over Millimeter-Scale Distance in a Quasi-Zero-Average-Index Metamaterial", *Phys. Rev. Lett.*, 102 (2009) 133902.
- [9] V. Mocella *et al.*, "An extraordinary directive radiation based on optical antimatter at near infrared", *Optics Express*, 18 (2010) 25068.

Ulteriori approfondimenti

Per una discussione dettagliata sulle aberrazioni dei sistemi ottici basati su materiali ad indice negativo è possibile riferirsi a:

D. Schurig e D. R. Smith, "Negative index lens aberrations", *Phys. Rev. E*, 70 (2004) 065601.

Il libro citato in [4] è particolarmente completo per quanto riguarda le trasformate ottiche, vi sono comunque degli ottimi lavori di rassegna sull'argomento, come: U. Leonhardt e T. G. Philbin, "Transformation Optics and the Geometry of Light", *Prog. Optics*, 53 (2009) 69.

Vito Mocella

Vito Mocella, laureato presso l'Università di Napoli "Federico II" ha conseguito il dottorato all'Università J. Fourier di Grenoble (Francia) lavorando presso l'European Synchrotron Radiation Facility e dopo un periodo di post-doc presso gli Argonne National Labs (USA) è attualmente ricercatore presso l'Unità di Napoli dell'IMM-CNR, dove coordina le attività nel campo dei cristalli fotonici e dei metamateriali. Nel 2007 è stato nominato Cavaliere al Merito della Repubblica dal Presidente della Repubblica Giorgio Napolitano.