

LE NUOVE FRONTIERE DELL'OTICA

di Sergio Musazzi*

Dopo l'Anno Internazionale della luce e delle tecnologie su di essa basate, proclamato nel 2015 dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite, nel 2018 è stata dedicata alla luce la giornata del 16 Maggio. Questa data scelta dall'Unesco è quella della prima realizzazione di un laser al cristallo di rubino, cinquantotto anni fa, nel 1960.

In questa occasione la rivista vuole dare spazio alla descrizione di alcuni di quei nuovi dispositivi, nati dalle applicazioni tecnologiche della ricerca sulla luce, i cui aspetti innovativi sono tali da collocarli a pieno titolo fra i risultati più significativi ottenuti dalla ricerca in questi ultimi anni. L'autore in questo contributo parla in particolare di «cristalli fotonici», di «fibre ottiche a cristalli fotonici» e di «metamateriali», senza pretendere di essere esaustivo, ma inquadrando correttamente l'argomento.

* Ricercatore e divulgatore scientifico

L'Unesco ha dichiarato il prossimo 16 Maggio 2018 *Giornata internazionale della luce e delle tecnologie a essa collegate*. Questa data è stata scelta perché coincide con quella della prima emissione di luce coerente da parte di una sorgente laser a cristalli di rubino, avvenuta proprio il 16 Maggio di cinquantotto anni fa presso i Laboratori di Ricerca della *Hughes Corporation* (USA) a opera del fisico e ingegnere elettronico statunitense Theodore Maiman.

Da allora, quella che a prima vista era sembrata essere una scoperta in cerca di un'applicazione, ne ha fatta di strada! Esistono ormai numerosissime sorgenti laser con potenze che possono variare da pochi milliwatt a decine di megawatt e in grado di emettere luce coerente in un'ampia regione spettrale (dal lontano infrarosso ai raggi X).

Grazie a questo enorme sviluppo, i laser hanno trovato applicazioni nei più svariati settori della tecnologia e della scienza; li troviamo, infatti, alle casse dei supermercati, nelle officine per il taglio e la saldatura dei più svariati materiali, negli ospedali come bisturi di precisione o nei laboratori di ricerca per realizzare esperimenti al limite delle umane possibilità, come per esempio riuscire a rallentare la luce nel vuoto oppure creare le condizioni per ottenere il «condensato di Bose-Einstein».

Occorre, tuttavia, notare che le attività relative allo sviluppo di nuove sorgenti laser, pur avendo rappresentato in questi ultimi Cinquanta-Sessanta anni uno dei principali filoni di ricerca a livello internazionale, non sono state le uniche a monopolizzare gli interessi dei ricercatori nel campo dell'ottica e della fotonica.

Un altro fondamentale settore di ricerca in questo ambito ha riguardato, infatti, lo sviluppo e la messa a punto di nuovi materiali con proprietà ottiche non riscontrabili nei materiali convenzionali. Si tratta di dispositivi molto sofisticati la cui realizzazione (in molti casi) non sarebbe stata possibile senza l'ausilio di nanotecnologie divenute disponibili solo in questi ultimi anni.



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



International
Day of Light

I cristalli fotonici e le fibre ottiche a cristalli fotonici

I cristalli fotonici sono strutture dielettriche periodiche opportunamente realizzate, caratterizzate da particolari geometrie e indici di rifrazione che determinano nel materiale la proprietà di esibire un intervallo di frequenze per le quali non è permessa la propagazione della luce.

In pratica, si tratta di materiali realizzati in modo tale da possedere un gap di banda fotonica (*Photonic Band Gap*, PBG) analogo al gap di banda presente nei semiconduttori elettronici in modo tale da consentire anche alla luce di sfruttare lo stesso tipo di fenomeni che caratterizzano il comportamento degli elettroni nei semiconduttori. Analizziamo un po' più in dettaglio questa analogia.

Ricordiamo che il gap di banda elettronica nei semiconduttori rappresenta un intervallo di livelli energetici che gli elettroni non possono occupare. Quando gli elettroni riempiono tutti gli stati disponibili sotto questo intervallo, la corrente elettrica non può fluire perché gli elettroni non hanno spazio in cui muoversi. Tuttavia, se ci sono elettroni in eccesso essi debbono obbligatoriamente restare sopra il gap, dove possono facilmente spostarsi attraverso gli stati energetici non occupati.

Allo stesso modo, una mancanza di elettroni determina la presenza di lacune cariche positivamente al di sotto del gap, fornendo così un'altra modalità di flusso della corrente elettrica. Ovviamente, le proprietà del gap di banda elettronica dipendono strettamente dal tipo di atomi presenti nel materiale e dalla struttura cristallina in cui gli atomi sono organizzati, vale a dire dalla spaziatura e dalla forma del reticolo che essi sono in grado di costruire.

Nel silicio, per esempio, gli atomi adiacenti sono separati di circa un quarto di nanometro. Introducendo altri atomi (i cosiddetti droganti) nel reticolo o nei suoi interstizi si può determinare con precisione il numero di elettroni e lacune presenti nel semiconduttore e, in questo modo, individuarne le proprietà.

I materiali a gap di banda fotonica coinvolgono strutture simili, ma su scale spaziali decisamente più grandi. Un tipico esempio è rappresentato da un blocco di vetro speciale con una matrice bidimensionale di fori cilindrici impaccati molto strettamente (il passo della matrice deve essere prossimo alla lunghezza d'onda della luce). Questi fori (del diametro di alcune centinaia di nanometri) costituiscono l'analogo dello spazio tra gli atomi in un semiconduttore.

La luce che incide sul materiale forato, pertanto, dà origine a fenomeni di rifrazione e di parziale riflessione sulle interfacce interne fra aria e vetro generando così fasci di luce che propagano nel materiale in direzioni diverse. A causa dell'interferenza, là dove si sovrappongono i fasci si rinforzeranno o si cancelleranno in dipendenza dalla lunghezza d'onda della luce, dalla direzione di propagazione all'interno del cristallo, dall'indice di rifrazione del vetro e dalle dimensioni della matrice di fori.

La perfetta cancellazione in tutte le direzioni per una certa banda (ristretta) di lunghezze d'onda rappresenta l'analogo del gap di banda nei semiconduttori: la luce di quelle lunghezze d'onda, infatti, non può propagarsi all'interno del cristallo. Modificando la struttura del gap di banda, per esempio riempiendo le cavità cilindriche con altri materiali, si producono effetti simili a ciò che si può ottenere drogando i semiconduttori elettronici.

Cristalli fotonici

I tipi più semplici di cristalli fotonici sono i cosiddetti specchi di Bragg, strutture composte da due o più materiali con indici di rifrazione diversi, disposti su strati alterni. Per la legge di Bragg, queste strutture presentano un intervallo di frequenze per le quali la riflettanza è molto elevata. Gli specchi di Bragg furono studiati inizialmente da Lord Rayleigh a fine Ottocento e oggi sono comunemente usati nell'industria ottica per conferire a lenti e filtri le proprietà desiderate.

Nel 1987, Eli Yablonovitch e Sajeev John in due articoli distinti, ma pubblicati quasi contemporaneamente su *Physical Review Letters*^{1,2} proposero la possibilità di realizzare cristalli fotonici non più in una sola dimensione (come negli specchi di Bragg) ma anche in due o tre dimensioni.

La prima prova sperimentale dell'esistenza di cristalli fotonici in tre dimensioni (limitatamente alle microonde) fu fornita da Yablonovitch pochi anni dopo. Da allora la ricerca, sia fondamentale, sia applicata sui cristalli fotonici, ha conosciuto un'enorme espansione.



Theodore Maiman (1927-2007)



Eli Yablonovitch (1929-...)

I cristalli fotonici sono stati utilizzati per diverse applicazioni nel campo dell'ottica e della fotonica. Per esempio sono stati usati per realizzare guide d'onda ottiche con curvature molto accentuate (da 60 a 90 gradi) con bassissime perdite, non realizzabili con le usuali fibre ottiche.

Tali dispositivi permettono di costruire le giunzioni a Y che sono alla base delle strutture interferometriche di tipo Mach-Zehnder (molto usate per l'analisi interferometrica dei segnali nei sensori in fibra ottica).

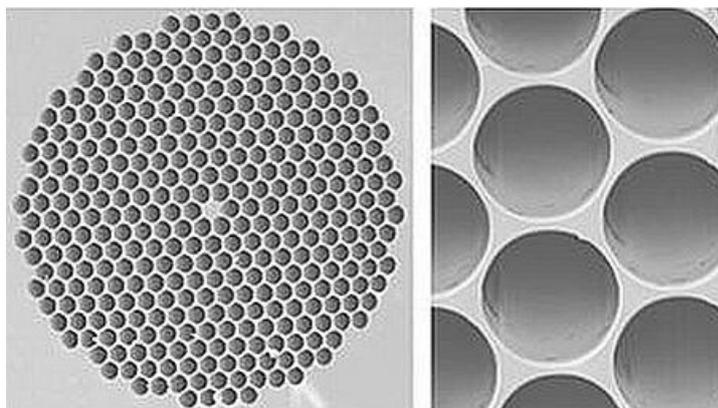
I cristalli fotonici sono stati usati anche per realizzare filtri ottici, per esempio mediante la rimozione selettiva di pori in una struttura bidimensionale come quella descritta precedentemente. La possibilità di intervenire a livello strutturale modificando la dimensione dei pori permette di sagomare opportunamente la risposta del filtro, ottenendo in questo modo anche profili altamente selettivi in lunghezza d'onda.

Un'altra fondamentale applicazione dei cristalli fotonici è rappresentata dai laser a cristalli fotonici che si possono realizzare introducendo nei microtubi presenti nel cristallo materiali opportuni (come ad esempio coloranti dye) per realizzare il mezzo attivo della sorgente laser. È possibile in questo modo realizzare sorgenti laser in grado di emettere sia orizzontalmente sia verticalmente e che possono essere strutturate in configurazioni a schiera (*tunable array*).

Fibre ottiche a cristalli fotonici

Un parente molto stretto dei cristalli fotonici è rappresentato dalle cosiddette fibre ottiche a cristalli fotonici (note anche col nome di fibre microstrutturate).

Si tratta di fibre ottiche che, a differenza di quelle convenzionali, non sono composte da un nucleo e un mantello di diverso indice di rifrazione, bensì da un unico filamento in vetro al cui interno, lungo tutta la sua lunghezza, è presente un reticolo (non necessariamente regolare) di canali d'aria di dimensioni micrometriche.



Esempio di fibra ottica microstrutturata (diametro dei fori 4 micron)

Questa struttura reticolare permette di confinare la luce e di guidarla lungo la fibra. L'utilizzo di queste fibre come sensore di grandezze fisiche è legato alla possibilità di riempire i canali micrometrici con liquidi sensibili alle grandezze di interesse (come la temperatura o il campo elettrico).

I cambiamenti che avvengono nei liquidi di riempimento a causa di variazioni di questi agenti esterni, modificano le proprietà guidanti della fibra microstrutturata rendendola di fatto sensibile alla grandezza fisica da misurare.

Un tipico esempio di questo modo di procedere è offerto da un sensore di campo elettrico realizzato recentemente con una fibra ottica a cristalli fotonici i cui canali sono stati parzialmente riempiti con dei cristalli liquidi di tipo nematico (dello stesso tipo, cioè, di quelli usati per realizzare i display digitali che, com'è noto, possono ruotare sotto l'azione di un campo elettrico).

Poiché le molecole dei cristalli liquidi nematici hanno una forma allungata e, in genere, tendono ad allinearsi alle pareti dei canali micrometrici che le ospitano, una loro rotazione indotta dalla presenza di un campo elettrico esterno provoca una variazione dell'indice di rifrazione effettivo all'interno della fibra, e di conseguenza una modificazione delle sue proprietà guidanti.

Variazioni del campo elettrico possono pertanto essere rivelate come variazioni dell'intensità luminosa trasmessa dalla fibra. Poiché le fibre ottiche microstrutturate sono realizzate con materiali dielettrici (che cioè non conducono la corrente elettrica), il loro utilizzo risulta essere estremamente interessante per effettuare misure lungo le linee elettriche di alta tensione dove i requisiti di isolamento elettrico sono di fondamentale importanza tanto per la buona riuscita della misura quanto per la sicurezza dell'operatore che la deve eseguire.

I metamateriali

I metamateriali sono materiali che non esistono in natura ma devono essere creati artificialmente dall'uomo. Si tratta, infatti, di «oggetti» macroscopici composti da un insieme ordinato di celle elementari (dette meta-atomi) opportunamente realizzate, che di fatto sostituiscono le molecole e gli atomi presenti nei materiali tradizionali.

Da un punto di vista squisitamente ottico, affinché le celle elementari svolgano effettivamente il ruolo di meta-atomi nel nuovo materiale, è indispensabile che le loro dimensioni siano piccole rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione luminosa in modo tale che il rapporto fra lunghezza d'onda e dimensione delle celle diventi il più possibile simile a quello fra lunghezza d'onda e dimensioni atomiche nei materiali convenzionali.

Se questa condizione viene rispettata, l'interazione della radiazione luminosa con il metamateriale sarà tale da non dipendere dalle proprietà chimico-fisiche dei singoli atomi e molecole di cui sono composte le sue celle elementari, bensì esclusivamente dalla loro peculiare struttura e ordinamento spaziale; caratteristiche queste che possono essere progettate *ad hoc* per ottenere dal metamateriale le proprietà desiderate.

Le proprietà ottiche di un metamateriale visto come mezzo omogeneo, pertanto, saranno caratterizzate dalla sua costante dielettrica ϵ e dalla sua permeabilità magnetica μ definite esclusivamente dalle caratteristiche fisiche delle celle elementari che lo costituiscono. In questo modo è possibile creare artificialmente materiali con caratteristiche diverse da quelle di qualunque altro materiale esistente in natura.

La classe più interessante di questi nuovi dispositivi è sicuramente quella caratterizzata dall'aver la costante dielettrica ϵ e la permeabilità magnetica μ entrambe negative e quindi, in definitiva, un indice di rifrazione anch'esso negativo. Infatti, poiché dalle equazioni di Maxwell si ricava che l'indice di rifrazione è:

$$n = \pm \sqrt{\epsilon \mu}$$

nel caso in cui ϵ e μ siano entrambe negative, il loro prodotto è un numero positivo e quindi la sua radice quadrata un numero reale (che in questo caso deve essere preso col segno negativo).

Per capire cosa significa avere un indice di rifrazione negativo allarghiamo lo sguardo su tutti i materiali esistenti in natura e osserviamo come sono classificabili sulla base dei valori che assumono la loro costante dielettrica e la loro permeabilità magnetica. Il risultato di questa suddivisione è riportato nel grafico che segue.

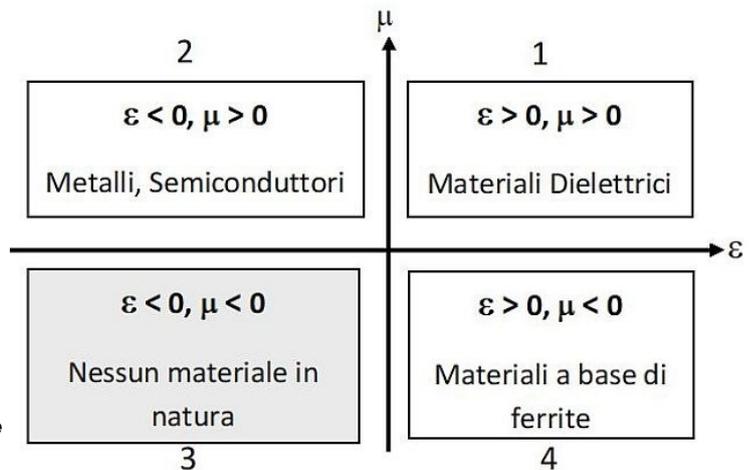


Diagramma delle proprietà elettromagnetiche dei materiali definite dalla costante dielettrica ϵ (asse orizzontale) e dalla permeabilità magnetica μ (asse verticale).

Come si può notare, il primo quadrante comprende i materiali che possiedono ε e μ entrambe positive. Si tratta del caso più comune e ne fanno parte quasi tutti i materiali dielettrici trasparenti alla radiazione elettromagnetica (come per esempio il vetro e l'acqua). Nel secondo quadrante troviamo invece i metalli, i semiconduttori drogati e i materiali ferroelettrici, tutti materiali che in determinati intervalli di lunghezza d'onda esibiscono una permeabilità magnetica μ positiva e una costante dielettrica ε negativa. La loro principale caratteristica è quella di essere sostanze assorbenti e quindi opache alla radiazione elettromagnetica (dato confermato dal fatto che il prodotto $\varepsilon\mu$ in questo caso è negativo e quindi l'indice di rifrazione diventa un numero immaginario).

Il quarto quadrante comprende alcuni materiali a base di ferrite, che presentano una costante dielettrica positiva e una permeabilità magnetica negativa. Pertanto anch'essi – come quelli del secondo quadrante - assorbono la radiazione elettromagnetica senza riuscire a trasmetterla.

Il terzo quadrante, infine, quello relativo ai materiali con costante dielettrica e permeabilità magnetica entrambe negative è completamente vuoto in quanto non esistono in natura sostanze con queste caratteristiche. Questo quadrante è stato attualmente occupato dai metamateriali con indice di rifrazione negativo.

La possibilità di realizzare materiali artificiali con indice di rifrazione negativo non è un'idea del tutto nuova; l'esistenza di materiali con questa peculiare caratteristica, infatti, era già stata ipotizzata da alcuni fisici teorici sovietici fin dagli anni trenta del secolo scorso.

Nel 1968, inoltre, un altro fisico russo: Victor G. Veselago³, aveva pubblicato un articolo che descriveva le proprietà ottiche di un ipotetico materiale con costante dielettrica e permeabilità magnetica contemporaneamente negative. L'articolo di Veselago, tuttavia, non menzionava come tale materiale potesse essere effettivamente realizzato.

Finalmente nel 1999 il fisico inglese John Pendry⁴, dell'*Imperial College* di Londra, suggerì come tale materiale avrebbe potuto essere effettivamente costruito (anche se limitatamente al dominio delle microonde).

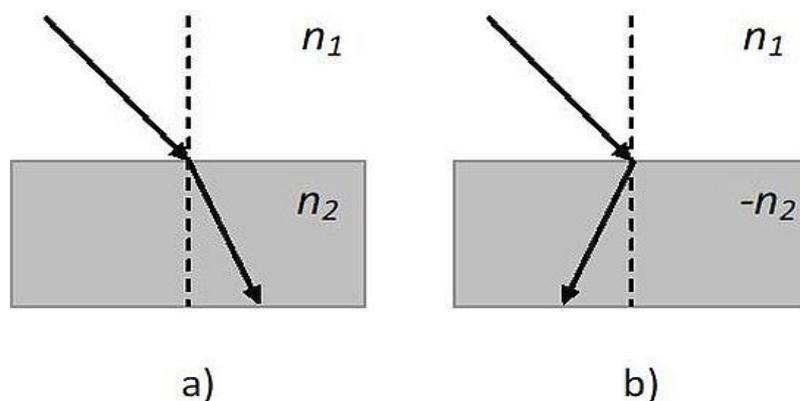
Applicando le indicazioni fornite da Pendry vennero così realizzati i primi dispositivi sperimentali in grado di riprodurre le caratteristiche tipiche dei metamateriali con indice di rifrazione negativo (che furono presto battezzati con l'acronimo NIM – *Negative Index Materials*)⁵.

Le anomalie dei NIM

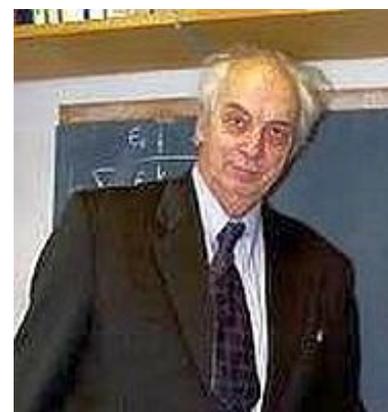
Un NIM è un materiale trasparente alla radiazione luminosa ma con proprietà ottiche alquanto bizzarre. La più sorprendente è sicuramente quella che si manifesta nel fenomeno della rifrazione.

Quando il mezzo rifrangente è un NIM, il fenomeno della rifrazione continua a verificarsi, ma con modalità non riscontrabili in natura.

Applicando la legge di Snell, infatti, si scopre che in questo caso, penetrando nel NIM, il raggio luminoso continua ad essere deviato dello stesso angolo a cui sarebbe rifratto da un mezzo ordinario, ma... nella direzione sbagliata - cioè dalla stessa parte del raggio incidente - come mostrato nell'immagine che segue.



Confronto fra la rifrazione in un mezzo ordinario (a) e in un mezzo con indice di rifrazione negativo (b).



Victor G. Veselago (1929-...)

Un'altra importante anomalia dei NIM è rappresentata dall'inversione dell'effetto Doppler. Com'è noto, l'effetto Doppler si verifica quando una sorgente di onde (luminose nel nostro caso) è in movimento rispetto ad un osservatore, e si manifesta come variazione della frequenza dell'onda in arrivo.

In particolare, se la sorgente si sta avvicinando all'osservatore, costui percepirà un'onda con una frequenza più alta di quella naturale emessa dalla sorgente a riposo; mentre se il movimento è di allontanamento, la frequenza rilevata dall'osservatore sarà più bassa.

Ebbene, nei NIM questo effetto è invertito: la radiazione proveniente da una sorgente di luce in movimento avrà una frequenza più bassa di quella emessa dalla stessa sorgente a riposo se quest'ultima si sta avvicinando all'osservatore e più alta se, invece, si sta allontanando.

Un ulteriore fenomeno di inversione presente nei NIM è osservabile anche nell'effetto Čerenkov, cioè l'emissione di luce da parte di una particella carica che si muove in un mezzo trasparente ad una velocità superiore a quella che avrebbe la luce nello stesso mezzo.

Nei materiali ordinari la radiazione Čerenkov viene emessa in avanti, cioè nella stessa direzione del moto della particella, all'interno di una regione spaziale di forma conica. Nei NIM lo stesso effetto si manifesta con modalità invertite, cioè con l'emissione di un cono di luce rivolto all'indietro rispetto alla direzione di moto della particella.

Da un punto di vista più fondamentale, la causa di questi comportamenti anomali va ricercata nel fatto che la velocità di gruppo di un'onda luminosa (a cui è associato il flusso di energia trasportato dall'onda) e la sua velocità di fase (che invece caratterizza il movimento delle creste dell'onda), nei materiali con indice di rifrazione negativo hanno direzioni opposte. Cosa che invece non si verifica nei materiali ordinari, nei quali le due velocità pur essendo in genere diverse hanno sempre direzioni concordi.

Nuovi «oggetti»

Grazie alle loro straordinarie proprietà, i metamateriali con indice di rifrazione negativo hanno reso possibile la creazione di nuovi «oggetti» con caratteristiche eccezionali, non ottenibili cioè con l'uso di materiali convenzionali, come per esempio lenti in grado di superare il limite di diffrazione della luce.

Questo limite inviolabile, imposto dalla natura ondulatoria della luce, viene interpretato come una conseguenza del fatto che l'informazione relativa alla microstruttura dell'oggetto osservato è contenuta nelle cosiddette «onde evanescenti»: onde elettromagnetiche che non si propagano liberamente nello spazio ma che muoiono subito dopo essere state generate.

Si tratta, insomma, di onde la cui ampiezza si riduce esponenzialmente man mano che si allontanano dal punto da cui sono state emesse. Ne consegue, allora, che la radiazione diffusa dai minuscoli dettagli della superficie in esame sotto forma di onde evanescenti viene persa prima ancora di essere raccolta dal sistema ottico.

L'immagine risultante, pertanto, risulta mancante di tutti quei particolari che hanno dimensioni inferiori al limite di diffrazione.

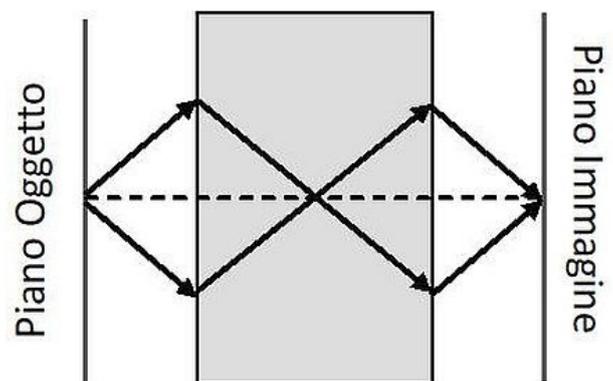
Fu ancora John Pendry, a suggerire l'utilizzo di un metamateriale con indice di rifrazione negativo per realizzare una superlente in grado di risolvere la struttura fine di un oggetto e riuscire in questo modo a ricreare un'immagine con dettagli di dimensioni inferiori al limite di diffrazione.

La possibilità di superare i limiti dei sistemi ottici convenzionali è una diretta conseguenza del fatto che nei NIM le onde evanescenti vengono amplificate mentre la normale radiazione diffusa dall'oggetto è automaticamente focalizzata a causa della inversione nella direzione di propagazione dei raggi rifratti. In questo modo, una superlente riesce a mettere a fuoco nel piano immagine contemporaneamente sia le onde propaganti sia quelle evanescenti.

Il principio di funzionamento di una lente planare realizzata con un NIM è mostrato schematicamente nell'immagine *qui a fianco*.



John Brian Pendry (1943-...)



Schema di funzionamento di una superlente.

Come si può notare quando la luce diffusa da un punto del piano oggetto incontra la faccia d'ingresso della superlente i raggi luminosi vengono focalizzati dapprima al centro della lamina e successivamente nel punto coniugato sul piano immagine.

Le onde evanescenti che riescono a raggiungere la superlente prima di estinguersi, vengono invece amplificate all'interno della lamina per poi decadere nuovamente nel tratto compreso fra la faccia d'uscita della superlente e il piano immagine.

Tuttavia, a causa del processo di amplificazione la loro intensità non è nulla nel piano immagine e quindi contribuiscono anch'esse alla formazione dell'immagine, che in questo modo risulta essere super-risolta.

Naturalmente anche le superlenti hanno dei limiti. In primo luogo, occorre tener presente che le perdite all'interno dei NIM comportano un forte assorbimento della radiazione incidente e quindi un'attenuazione della sua intensità.

In secondo luogo, va rilevato che per riuscire ad accoppiare le onde evanescenti al NIM, la distanza della superlente dal piano oggetto deve essere molto piccola (dell'ordine di alcune lunghezze d'onda) e questo comporta sia una maggiore difficoltà nella messa a fuoco dell'immagine sia l'impossibilità di realizzare immagini di oggetti non piani.

Sergio Musazzi

(Ricercatore e divulgatore scientifico)

Note

1. E. Yablonovitch, *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics*, Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987).
2. S. John, *Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices*, Phys. Rev. Lett. 58, 2486 (1987).
3. Victor Georgievich Vaselago nasce nel 1929 in Ucraina (URSS). Dopo aver lavorato presso l'Istituto di Fisica "Lebedev" di Mosca, nel 1983 diventa responsabile del Laboratorio dei Materiali Magnetici dell'Istituto di Fisica Generale "Prokhorov". Nel 1980 viene nominato Professore di Fisica Applicata presso l'Istituto di Fisica e Tecnologia di Mosca.
4. Sir John Brian Pendry nasce nel 1943 a Manchester (UK). Nel 1981 viene nominato Professore di Fisica Teorica presso l'*Imperial College* di Londra. La sua fama è legata soprattutto alle sue ricerche sui metamateriali.
5. L'idea di Pendry fu quella di utilizzare microcircuiti RLC risonanti ottenuti sagomando opportunamente le singole celle del metamateriale. Vedi: J. B. Pendry, *Negative Refraction Makes a Perfect Lens*, Phys. Rev. Lett. 85, 3966, (2000).

