



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO  
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE  
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA NUMERO	102006901408849
Data Deposito	26/04/2006
Data Pubblicazione	26/10/2007

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	02	F		

Titolo

ELEMENTI OTTICI A FASE GEOMETRICA A CRISTALLI LIQUIDI E SISTEMA PER LA GENERAZIONE E LA COMMUTAZIONE RAPIDA DI MODI ELICOIDALI DI UN'ONDA ELETTROMAGNETICA, BASATO SU TALI ELEMENTI OTTICI.

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:  
"Elementi ottici a fase geometrica a cristalli li-  
quidi e sistema per la generazione e la commutazio-  
ne rapida di modi elicoidali di un'onda elettroma-  
gnetica, basato su tali elementi ottici"

di: Consiglio Nazionale delle Ricerche - INFM I-  
stituto Nazionale per la Fisica della Materia,  
nazionalità italiana, corso F. Perrone 24, 16152  
GENOVA

Inventore designato: Lorenzo MARRUCCI

Depositata il: 26 Aprile 2006

TO 2006 A 000303

\* \* \*

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda i componenti ottici per il controllo del fronte d'onda di un fascio di radiazione elettromagnetica, ed il loro impiego nel settore delle comunicazioni ottiche per la codifica di informazioni, in particolare per comunicazioni ottiche nel visibile o nel vicino infrarosso.

Più specificamente, l'invenzione riguarda la realizzazione di componenti ottici a fase geometrica e l'impiego di tali componenti ottici per la generazione di modi elicoidali di un'onda elettromagnetica ottica.

INFORMAZIONE

I componenti ottici per il controllo del fronte d'onda normalmente si fondano su una opportuna modulazione spaziale della lunghezza di cammino ottico percorsa da diverse porzioni del fronte d'onda, come avviene per componenti passivi quali lenti, specchi curvi e componenti a gradiente di indice (GRIN), e anche per componenti attivi come i modulatori di fase spaziale ("spatial light modulator", SLM) a cristalli liquidi o altri.

Un approccio diverso e molto versatile è quello offerto dai componenti olografici, in cui la modulazione di fase è introdotta mediante diffrazione. I componenti olografici però hanno di norma il limite di generare simultaneamente più ordini di diffrazione con diversi fronti d'onda oltre a quello desiderato.

Esiste un approccio alla modulazione spaziale della fase ottica completamente diverso dai precedenti, fondato sulla cosiddetta "fase geometrica" o fase di Pancharatnam-Berry.

Si tratta di un ritardo di fase (aggiuntivo rispetto a quello dovuto alla lunghezza del cammino ottico) che un'onda elettromagnetica acquista quando la sua polarizzazione viene sottoposta ad una serie di trasformazioni che abbiano il medesimo

stato iniziale e finale. Tale fase è fissata solo dalla geometria del cammino chiuso percorso nello spazio delle polarizzazioni della luce (ad esempio la sfera di Poincaré). Se la polarizzazione di un'onda viene sottoposta a trasformazioni diverse da punto a punto lungo il profilo trasverso dell'onda, ma che iniziano e terminano con uno stato di polarizzazione spazialmente omogeneo, allora l'onda acquista una ben definita fase geometrica diversa da punto a punto del proprio profilo trasverso, e il fronte d'onda viene conseguentemente modificato.

Di recente è stato proposto di sfruttare tale effetto per la realizzazione di componenti ottici "a fase geometrica" o "di Pancharatnam-Berry" ("Pancharatnam-Berry Optical Elements", PBOE) per la modulazione del fronte d'onda.

Gli unici componenti PBOE realizzati finora sono basati su reticoli ottici con passo inferiore alla lunghezza d'onda (cosiddetti "subwavelength gratings"), il che ne limita l'applicazione al dominio del medio infrarosso con le tecniche di fabbricazione oggi disponibili. Gli specifici componenti realizzati includono divisori di fascio, generatori di modi elicoidali, lenti, tutti funzionanti per lunghezze d'onda intorno ai 10  $\mu\text{m}$ .

WO2004/003596 descrive tali componenti per il controllo spaziale della fase di un fascio elettromagnetico incidente in funzione della sua polarizzazione. L'elemento comprende un substrato con una pluralità di regioni di reticolo con passo inferiore alla lunghezza d'onda incidente, che presentano un orientamento spaziale variabile con continuità.

Il dominio del visibile e del vicino infrarosso è tuttavia quello di maggiore interesse per applicazioni nel campo delle telecomunicazioni, e sarebbe desiderabile realizzare componenti PBOE operanti in questa gamma di lunghezze d'onda (approssimativamente da 400 nm a 1700 nm).

Una specifica tipologia di PBOE che presenta un particolare interesse per le potenziali applicazioni in tale dominio di frequenze ottiche è quella dei generatori di modi elicoidali (ad esempio i modi di Laguerre-Gauss).

Questi particolari modi del campo elettromagnetico sono ad oggi applicati alla manipolazione controllata di particelle micrometriche nelle cosiddette pinzette ottiche.

Lo stato elicoidale (nel seguito denominato più brevemente "elicità") della luce è considerato con interesse come possibile variabile discreta a

più valori con cui codificare le informazioni nella comunicazione ottica in aria o in fibra ottica, nonché per la comunicazione protetta mediante crittografia quantistica.

I metodi convenzionalmente impiegati per generare fasci elicoidali nel visibile o vicino infrarosso possono essere suddivisi nelle seguenti tre categorie:

- (i) metodo delle lenti cilindriche;
- (ii) metodo della lamina a spirale;
- (iii) metodi olografici.

Il metodo (i) si basa sulla trasformazione di modi di Hermite-Gauss in modi di Laguerre-Gauss con il passaggio attraverso due lenti cilindriche opportunamente posizionate. La commutazione dello stato di elicità richiede la movimentazione delle lenti o la commutazione tra diversi modi di Hermite-Gauss, entrambi processi di non facile e soprattutto non rapida automazione.

Il metodo (ii) si basa sulla costruzione di una lamina di un vetro isotropo, lavorata in modo da avere una superficie con la forma di un singolo passo di elica (come una scala a chiocciola), che si chiude con un gradino di spessore opportuno, tale da indurre un ritardo di fase nella luce che at-

traversi la lamina pari esattamente ad un multiplo di  $2\pi$ . La regolazione fine del ritardo di fase può essere ottenuta immergendo la lamina in un liquido e regolando la temperatura in modo da modificare gli indici di rifrazione della lamina e del liquido. Questo metodo non consente alcuna commutazione e fornisce un fascio elicoidale ad elicità sostanzialmente bloccata.

Infine, nei metodi olografici (iii) il fascio viene fatto diffrangere in un ologramma opportunamente concepito in modo da ottenere negli ordini diffratti i fasci elicoidali desiderati. Si possono ottenere anche diversi fasci simultaneamente con diverse elicità, ma viaggianti in direzioni diverse. Se si desidera commutare l'elicità di un singolo fascio, è necessario modificare l'ologramma (cosa fattibile utilizzando ologrammi generati in un modulatore spaziale di fase controllato al computer, che però non consente cadenze di commutazione più rapide di alcune centinaia di Hertz) oppure modificare la direzione da cui proviene il fascio incidente. Quindi una commutazione rapida è realizzabile solo commutando il fascio in ingresso tra più fasci provenienti da diverse direzioni, con evidenti problemi di complessità e di spreco di energia

ottica. Inoltre i metodi olografici hanno un'efficienza di generazione che non supera il 70%, ossia sprecano almeno il 30% dell'energia luminosa di ciascun fascio incidente.

Tali metodi per generare modi elicoidali nel dominio del visibile o vicino infrarosso soffrono quindi tutti di un medesimo limite: non consentono la rapida commutazione dello stato di elicità o "ordine" del modo elicoidale.

Questo limite è particolarmente grave per le possibili applicazioni nelle comunicazioni.

L'impiego alternativo di componenti PBOE realizzati secondo la tecnica nota è, come detto, confinato ad applicazioni nel medio infrarosso, e quindi attualmente escluso dalle applicazioni nelle comunicazioni ottiche alle lunghezze d'onda di interesse.

La presente invenzione si prefigge lo scopo di fornire una soluzione soddisfacente ai problemi in precedenza esposti, ossia di realizzare elementi ottici a fase geometrica funzionanti nel dominio spettrale del visibile e del vicino infrarosso.

Ulteriore scopo dell'invenzione è quello di fornire un sistema per la generazione di modi elicoidali basato su elementi ottici a fase geometrica

che consenta la rapida commutazione dello stato di elasticità del modo elicoidale, evitando gli inconvenienti della tecnica nota.

Secondo la presente invenzione tali scopi vengono raggiunti grazie ad un elemento ottico a fase geometrica avente le caratteristiche richiamate nella rivendicazione 1, ed un sistema avente le caratteristiche richiamate nella rivendicazione 14.

In sintesi, la presente invenzione si fonda sul principio generale di realizzare componenti ottici "a fase geometrica", o "elementi ottici di Pancharatnam-Berry", per il controllo del fronte d'onda (ad esempio, lenti, divisori di fascio, componenti olografici), funzionanti nel dominio spettrale del visibile e del vicino infrarosso impiegando, quale mezzo birifrangente, un cristallo liquido, il cui asse ottico - corrispondente al direttore molecolare - può essere agevolmente controllato, ad esempio mediante applicazione di campi esterni o trattamenti superficiali.

Il metodo è fondato sulla tecnologia dei cristalli liquidi, e più specificamente sulla realizzazione di celle a cristalli liquidi con ancoraggio planare non omogeneo opportunamente disegnato, oppure di pellicole di cristalli liquidi polimerici



sentato un sistema per la commutazione rapida di un fronte d'onda ottica emergente da un componente ottico a fase geometrica mediante la modulazione elettro-ottica della polarizzazione dell'onda incidente sul componente, sfruttando la proprietà dei componenti ottici a fase geometrica di produrre un effetto sull'onda che li attraversa che dipende dalla polarizzazione della luce incidente.

Il sistema proposto è dimostrato praticamente con la realizzazione di uno specifico componente ottico a fase geometrica in grado di generare modi elicoidali della luce a partire da un normale fascio ottico gaussiano.

A differenza dei sistemi comunemente utilizzati per la generazione di modi elicoidali nel dominio visibile o vicino infrarosso, il sistema oggetto dell'invenzione consente di controllare l'elicità del fronte d'onda della luce generata (ossia se l'elica è destrorsa o sinistrorsa) mediante lo stato di polarizzazione della luce incidente, anziché mediante la geometria dell'apparato, il che ne permette una commutazione rapida, impossibile con i metodi noti.

Si presenta inoltre lo schema innovativo di un sistema ottico basato su una serie di componenti

ottici analoghi a quello dimostrato, in grado di generare modi elicoidali con commutazione elettroottica tra una pluralità di stati diversi di elicità.

Il sistema oggetto dell'invenzione è semplice ed efficiente in termini di energia convertita e può vantaggiosamente trovare applicazione nella trasmissione di informazioni classiche o quantistiche, codificate nello stato di elicità del profilo di fase della luce.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione verranno più dettagliatamente esposti nella descrizione particolareggiata seguente, data a titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

la figura 1 è una rappresentazione schematica della sequenza di passi costruttivi ((a)-(d)) per la preparazione di un componente ottico a fase geometrica a cristalli liquidi;

la figura 2 mostra quattro esempi ((a)-(d)) di geometrie di componenti ottici a fase geometrica "a mezza onda";

la figura 3 mostra un'immagine del profilo di intensità di un fascio di luce emergente da un componente ottico a fase geometrica a cristalli liqui-

di secondo l'invenzione;

le figure 4 e 5 mostrano due coppie di immagini che rappresentano figure di interferenza del fascio elicoidale generato da un componente ottico a fase geometrica a cristalli liquidi sovrapposto ad un fascio di riferimento con fronte d'onda rispettivamente piano (figura 4) o sferico (figura 5), per differenti polarizzazioni della luce incidente;

la figura 6 è uno schema a blocchi semplificato di un sistema ottico per la generazione di fasci di luce con fronte d'onda elicoidale con controllo rapido del segno dell'elicità;

la figura 7 è uno schema a blocchi semplificato di un sistema ottico in tre stadi basato sul sistema di figura 6, per la generazione di fasci di luce con fronte d'onda elicoidale con controllo rapido del segno dell'elicità in un insieme di quattro valori; e

la figura 8 è una rappresentazione esemplificativa di fronti d'onda di modi elicoidali per differenti valori di elicità.

Per descrivere l'invenzione si considera una particolare classe di componenti ottici a fase geometrica, costituiti da mezzi birifrangenti a mezza onda il cui asse ottico è spazialmente disomogeneo

in un piano ortogonale alla direzione di propagazione di un fascio ottico incidente, in una forma di realizzazione nella forma di lamina il cui asse ottico è spazialmente disomogeneo nel piano della lamina (chiamati nel seguito "PBOE a mezza onda").

Si consideri una lamina birifrangente piana orientata perpendicolarmente alla direzione di propagazione della luce  $z$ . Si assuma che la lamina induca uno sfasamento pari a  $\pi$  (mezza onda) tra le componenti straordinaria e ordinaria della luce, in modo omogeneo in tutta la lamina, e che l'asse ottico (ad esempio l'asse "veloce") della lamina sia disomogeneo nel piano trasversale  $xy$  (ma omogeneo in direzione  $z$ ). Sia  $\alpha(x,y)$  l'angolo formato dall'asse ottico della lamina con l'asse  $x$  di riferimento nel piano  $xy$ .

L'effetto di tale lamina sul campo elettrico dell'onda, trascurando effetti di diffrazione all'interno della lamina stessa, può essere determinato utilizzando il formalismo di Jones.

La matrice di Jones  $\mathbf{M}(x,y)$  della lamina in ciascun punto  $x, y$  del piano trasverso è la seguente:

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}(-\alpha) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \mathbf{R}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{pmatrix}$$

dove  $\mathbf{R}(\alpha)$  è la matrice bidimensionale di rotazione per un angolo  $\alpha$ .

Un'onda incidente piana polarizzata circolare sinistra, descritta dal vettore (campo elettrico) di Jones

$$\mathbf{E}_{in} = E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$$

verrà trasformata dalla lamina nella seguente onda emergente (a meno di una fase costante, irrilevante ai nostri fini):

$$\mathbf{E}_{out} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{E}_{in} = E_0 e^{i2\alpha(x,y)} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$$

Quest'onda è uniformemente polarizzata circolare destra, ma il suo fronte d'onda ha acquisito un ritardo di fase non uniforme  $\Delta\Phi(x,y)$  pari a  $2\alpha(x,y)$ .

Se l'onda incidente è polarizzata circolare destra, è facile verificare che il fronte d'onda generato è quello coniugato, ossia  $\Delta\Phi(x,y) = -2\alpha(x,y)$ .

Quindi, il fascio emergente possiede un fronte d'onda di forma fissata dalla geometria del componente PBOE, ed in particolare della funzione  $\alpha(x,y)$  che descrive l'orientazione disomogenea dell'asse ottico, con inoltre la possibilità di commutare tra due fronti d'onda coniugati invertendo il verso

della polarizzazione circolare incidente.

Questo è il principio base di funzionamento dei componenti ottici PBOE "a mezza onda" su cui si fonda la presente invenzione.

Un componente ottico PBOE utilizzabile nel dominio visibile o vicino infrarosso può essere vantaggiosamente fabbricato mediante una tecnologia a cristalli liquidi, come dimostrato in seguito.

I cristalli liquidi sono infatti materiali trasparenti e birifrangenti il cui asse ottico (corrispondente al cosiddetto "direttore molecolare") può essere agevolmente controllato, ad esempio mediante trattamenti superficiali o campi esterni applicati, o - nel caso di materiali liquido-cristallini polimerici - determinato in fase di preparazione mediante particolari procedure di fotopolimerizzazione.

E' relativamente agevole ottenere strutture in cui l'asse ottico assume una disposizione disomogenea prestabilita, in modo da poter realizzare la geometria  $\alpha(x,y)$  desiderata.

In particolare, si descrivono due schemi generali per la fabbricazione di componenti PBOE a cristalli liquidi. Il primo è appropriato al caso in cui si utilizzino cristalli liquidi monomerici, il

secondo è specifico per i polimeri liquido-cristallini.

Secondo un primo metodo, illustrato schematicamente nelle sue varie fasi in figura 1, si predispone un primo substrato 20 (tipicamente un vetro, eventualmente ricoperto con strato di polimero o poliimide per un ancoraggio planare del cristallo liquido) con una superficie 22 per "ancoraggio planare" opportunamente "disegnata" ("patterned"), cioè che presenta un "asse facile" orientato secondo la geometria fissata dalla funzione  $\alpha(x,y)$ .

Esistono nella tecnica nota diversi metodi di disegno ("patterning") delle superfici che possono essere impiegati:

(i) micro-rubbing;

(ii) foto-allineamento di polimeri preventivamente depositati sulle superfici con maschere o mediante olografia di polarizzazione;

(iii) opportuni ricoprimenti in ossido di silicio ottenuti per evaporazione.

Si predispone quindi un secondo substrato 24 con una superficie 26 trattata per ottenere un ancoraggio planare "degenere" (ossia che non impone alcuna orientazione preferita al direttore molecolare) a bassa forza di ancoraggio, oppure in alter-

nativa "disegnata" in modo speculare, cioè tale che gli assi facili delle due superfici 20, 24 coincidano ovunque se i substrati sono fatti combaciare dal lato delle superfici trattate 22, 26 (fase (a)).

Quindi, i due substrati 20, 24 vengono assemblati, rivolgendo all'interno le due superfici trattate 22, 26, inserendo opportuni spaziatori 28 (fase (b)) in modo da realizzare una cella vuota planare 30 aperta sui lati (fase (c)).

Nella cella viene inserito un materiale cristallo liquido 32 ed i lati esterni aperti possono infine essere eventualmente sigillati se necessario, ad esempio con un collante 34 (fase (d)).

Dopo l'immissione del cristallo liquido, che qui si assume essere in fase nematica, può essere necessario un trattamento termico di "clearing" (ossia superamento della temperatura di transizione nematico-isotropo) per ottenere l'allineamento desiderato del direttore molecolare. Inoltre, nel caso in cui uno dei due substrati della cella sia del tipo ad ancoraggio degenere, nella fase di raffreddamento dopo il clearing, può essere conveniente mantenere la temperatura di tale substrato ad un valore leggermente superiore a quella del substrato

"disegnato". In questo modo, l'ordine nematico viene nucleato a partire dal substrato disegnato secondo l'allineamento prestabilito e quindi si propaga in tutta la cella.

Lo spessore della cella (definito dagli spaziatori) e il materiale liquido-cristallino impiegato devono essere scelti in modo da imporre un ritardo birifrangente di  $\pi$  alla lunghezza d'onda di lavoro.

Un secondo metodo alternativo per costruire PBOE funzionanti nel visibile si basa sulla preparazione di pellicole di polimeri liquido-cristallini con allineamento molecolare disegnato.

Esistono oggi diversi approcci possibili alla preparazione di polimeri con organizzazione molecolare anisotropa, e quindi birifrangenti, e con asse ottico disomogeneo che segue un "disegno" prestabilito. I metodi più importanti sono fondati sulla foto-polimerizzazione o il foto-allineamento in luce polarizzata che inducono la formazione di catene polimeriche (catene principali o laterali) orientate secondo la polarizzazione della luce incidente (parallele o perpendicolari al campo elettrico della luce).

Per creare il disegno desiderato si può proce-

dere ad una serie di irradiazioni successive che illuminano di volta in volta regioni diverse del polimero, fissando per ogni regione la polarizzazione necessaria per ottenere l'orientazione prestabilita.

Un approccio particolarmente conveniente per una preparazione rapida può essere basato sull'utilizzo di "maschere", in modo da illuminare simultaneamente tutte le regioni che devono acquisire la medesima orientazione, come avviene nelle tecniche foto-litografiche.

Un approccio alternativo è quello fondato sulla cosiddetta "olografia in polarizzazione", che consente di registrare in una sola esposizione l'orientazione desiderata su tutto il polimero. In questo approccio, la tecnica di scrittura del disegno desiderato si basa sulla combinazione di un fascio laser di riferimento con fronte d'onda piano e un fascio laser di "segnale" con il fronte d'onda che si desidera poter ricostruire successivamente, entrambi polarizzati circolarmente con verso opposto e con intensità uniforme. La sovrapposizione di questi due fasci genera un'onda che possiede intensità uniforme e polarizzazione lineare con orientazione non uniforme. Tale orientazione viene quindi

fissata sul polimero e definisce l'orientazione dell'asse ottico birifrangente del materiale. Un materiale preparato in questo modo è un particolare tipo di ologramma, detto "di polarizzazione".

Per ottenere il componente PBOE, è però necessario anche fare in modo che la pellicola polimerica presenti complessivamente una birifrangenza e uno spessore tali da indurre un ritardo di  $\pi$ . Questo può richiedere esposizioni prolungate e l'utilizzo di materiali con coefficienti di assorbimento non eccessivi alla lunghezza d'onda della luce utilizzata per "scrivere" (ossia tali da presentare una lunghezza di penetrazione confrontabile con, o maggiore dello spessore della pellicola).

In alternativa, la pellicola polimerica così disegnata può essere impiegata come la superficie "disegnata" di uno dei due substrati di una cella a cristalli liquidi preparata come descritto nel primo metodo.

Va notato che a differenza di un normale componente olografico per il controllo del fronte d'onda, un PBOE (anche se ottenuto con metodo olografico) ha la proprietà di generare solo il fronte d'onda precedentemente registrato, oppure il fronte d'onda coniugato, se illuminato con un'onda piana

polarizzata circolarmente. Questo è un vantaggio per molte applicazioni.

La scelta tra i due fronti d'onda è fissata dal verso della polarizzazione circolare incidente, il che consente la commutazione rapida utile per alcune applicazioni.

Si considerano ora in figura 2 alcuni esempi di componenti PBOE "a mezza onda" realizzabili mediante la tecnica descritta, senza con questo limitare la generalità del metodo. I trattini indicano l'orientazione locale dell'asse ottico birifrangente (che nel caso di realizzazione mediante cella a cristalli liquidi corrisponde all'orientazione dell'asse facile da "disegnare" sul substrato).

Un primo esempio, illustrato in figura 2(a), è un PBOE a gradiente lineare di orientazione, in grado di agire come divisore di fascio polarizzatore circolare, che presenta una dipendenza lineare dell'angolo  $\alpha$  dalla posizione, come quella descritta dalla relazione seguente:

$$\alpha(x,y) = ax + b$$

dove  $a$  e  $b$  sono costanti. L'effetto su un'onda incidente polarizzata circolarmente è quello di introdurre uno sfasamento pari a  $\Delta\Phi = \pm 2ax$ , a meno di fasi costanti irrilevanti, con il segno  $\pm$  fissato

dal verso della polarizzazione. Tale sfasamento si traduce in una deviazione della direzione di propagazione dell'onda emergente per un angolo  $\beta = \pm a\lambda/\pi$  nel piano  $xz$ , dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda (si assume che  $a\lambda \ll 1$ , ipotesi comunque necessaria per poter trascurare effetti di diffrazione interni alla lamina).

In altre parole, il componente ottico descritto funziona come un divisore di fascio polarizzatore, che separa la luce polarizzata circolare sinistra da quella polarizzata circolare destra (invertendone allo stesso tempo la polarizzazione). Se tale componente viene combinato con un dispositivo elettro-ottico per la commutazione della polarizzazione incidente tra le due polarizzazioni circolari (ad esempio una cella di Pockels seguita da una lamina a quarto d'onda), si ottiene un interruttore elettro-ottico.

Un secondo esempio, illustrato in figura 2(b), è un PBOE a gradiente radiale, funzionante come lente a focale dipendente dalla polarizzazione incidente, che possiede la seguente geometria:

$$\alpha(x,y) = \alpha(r,\varphi) = ar^2$$

dove  $a$  è una costante e  $r, \varphi$  sono coordinate polari nel piano  $xy$ . L'effetto su un'onda incidente pola-

rizzata circolarmente di tale componente è quello di introdurre uno sfasamento parabolico, analogo a quello prodotto da una lente di focale  $f = \pm \pi/(2\lambda a)$ , dove il segno  $\pm$  dipende dal verso della polarizzazione incidente. In combinazione con un controllo elettro-ottico della polarizzazione e con una lente ordinaria si ottiene un sistema ottico focalizzante con distanza focale commutabile automaticamente tra due valori.

E' interessante notare anche che il componente ottico agente come lente viene vantaggiosamente realizzato con una lamina di spessore uniforme, sfruttando l'effetto di fase geometrica anziché quello di lunghezza del cammino ottico.

Sfasamenti anche molto grandi tra diverse porzioni del fronte d'onda possono essere introdotti con lamine anche molto sottili (anche dell'ordine di 1  $\mu\text{m}$ , purché la birifrangenza del materiale sia abbastanza elevata).

Ulteriori esempi, illustrati nelle figure 2(c) e 2(d), riguardano PBOE funzionanti come generatori di modi elicoidali, che presentano una geometria data dalla seguente relazione:

$$\alpha(x, y) = \alpha(r, \varphi) = q\varphi + \alpha_0$$

dove  $r$ ,  $\varphi$  sono le coordinate polari nel piano  $xy$  e

$q$  ed  $\alpha_0$  sono costanti. Si assuma inoltre che la costante  $q$  abbia un valore intero o semi-intero, in modo da evitare la presenza di linee di discontinuità nella lamina (resta invece un difetto nell'origine, dove  $\alpha$  è indefinita).

Componenti con la geometria indicata saranno nel seguito denominati  $q$ -PBOE.

Due esempi di tale geometria, per  $q=1/2$ ,  $\alpha_0=0$  e per  $q=1$ ,  $\alpha_0=\pi/2$ , sono presentati rispettivamente nelle figure 2(c) e 2(d), per la generazione di modi elicoidali rispettivamente di ordine  $\pm 1$  ( $q$ -PBOE con  $q = 1/2$ ) e di ordine  $\pm 2$  ( $q$ -PBOE con  $q = 1$ ).

Un'onda piana incidente polarizzata circolarmente nel passaggio attraverso un  $q$ -PBOE acquista un ritardo di fase pari a  $\Delta\Phi = \pm 2q\varphi$ , ossia viene trasformata in un modo elicoidale di ordine  $m = \pm 2q$ , avente un fronte d'onda a forma di superficie elicoidale (in particolare un'elica singola se  $|q| = 1/2$ , multipla se  $|q|$  è più grande).

Anche in questo caso, il segno  $\pm$  e quindi il verso dell'elica del fronte d'onda generato è determinato dal verso della polarizzazione circolare incidente.

Per la realizzazione dimostrativa dei componenti PBOE oggetto dell'invenzione del tipo raffi-

gurato in figura 2(c) e 2(d), sono stati costruiti alcuni  $q$ -PBOE (cioè PBOE generatori di modi elicoidali) a cristalli liquidi con  $q = 1$  mediante un metodo di patterning basato sul rubbing non omogeneo di una superficie. In particolare, essendo il caso  $q = 1$  simmetrico per rotazioni attorno all'origine, è stato possibile adottare una tecnica particolarmente semplice per ottenere il disegno desiderato: la superficie da trattare (un vetro semplice oppure un vetro coperto con un poliimide per allineamento planare) è stata posta a contatto per alcuni minuti, esercitando una leggera pressione, con un'altra superficie ricoperta di un velluto adatto al rubbing posta in rotazione costante attorno ad un asse perpendicolare alle due superfici in contatto. Tale "rubbing circolare" porta ad un disegno dell'asse facile analogo a quello descritto dall'equazione  $\alpha(x,y) = \alpha(r,\varphi) = q\varphi + \alpha_0$  con  $q = 1$  e  $\alpha_0 = \pi/2$ , ovvero come quello illustrato in figura 2(d).

Nella realizzazione, solo un substrato è stato sottoposto a rubbing, mentre l'altro è stato lasciato non trattato in modo da avere allineamento planare degenere. I due substrati sono stati quindi assemblati, inserendo spaziatori di spessore tale da ottenere, con il cristallo liquido impiegato

(E63, prodotto dalla Merck), la birifrangenza voluta di circa  $\pi$  (o un suo multiplo dispari) per la lunghezza d'onda di prova, ossia  $\lambda = 633$  nm.

Le prove sperimentali che dimostrano che le celle realizzate si comportano effettivamente come dei  $q$ -PBOE con  $q = 1$ , e cioè generano modi elicoidali della luce di ordine  $\pm 2$  con segno fissato dal verso della polarizzazione circolare incidente, sono discusse nel seguito.

Per prima cosa, si è inviato un fascio di luce gaussiano (cioè con modo trasverso  $TEM_{00}$ ) proveniente da un laser a He-Ne (lunghezza d'onda di emissione  $\lambda = 633$  nm) attraverso il  $q$ -PBOE, e il fascio emergente è stato inviato su una telecamera a CCD che ha eseguito una fotografia del profilo di intensità del fascio. Il risultato è presentato nella figura 3. Il fascio emergente risulta possedere una geometria ad anello, consistente qualitativamente con il fatto che si tratta di un modo elicoidale (infatti i modi elicoidali devono avere intensità nulla al centro, dove si trova il difetto del fronte d'onda).

Per caratterizzare in modo completo la struttura elicoidale del fronte d'onda generato e per verificare che il verso dell'elica dipende dalla

polarizzazione incidente è però necessario eseguire misure d'interferenza tra il fascio emergente dal  $q$ -PBOE e un fascio di riferimento.

Il fascio di riferimento, tratto dalla medesima sorgente laser a He-Ne mediante un divisore di fascio, può avere un fronte d'onda approssimativamente piano oppure sferico. Nel primo caso, se si induce una piccola inclinazione tra il fascio da analizzare e quello di riferimento, l'interferenza risultante presenta un sistema di frange lineari, con un difetto di tipo "dislocazione" che si origina nel centro del fascio elicoidale. Il difetto è orientato in modo diverso a seconda del segno dell'elicità del fascio elicoidale, ferma restando la geometria d'interferenza. Inoltre la dislocazione è multipla se il fascio elicoidale presenta un  $|m| > 1$ , ed in particolare è doppia se  $m = \pm 2$ . Nel secondo caso, l'interferenza produce frange di forma a spirale. La spirale ha un verso (orario o antiorario allontanandosi dal centro) che dipende dal segno dell'elicità del fascio elicoidale. Inoltre la spirale è multipla se il fascio elicoidale presenta un  $|m| > 1$ , ed in particolare è doppia se  $m = \pm 2$ .

Le figure 4 e 5 mostrano le fotografie (eseguite con la telecamera a CCD) di queste figure

d'interferenza prodotte da uno dei componenti q-PBOE realizzati a scopo dimostrativo (con  $q = 1$  e quindi  $m = \pm 2$ ), per polarizzazione circolare-sinistra e circolare-destra della luce incidente. Dalle immagini si vede con chiarezza che il fascio emergente è effettivamente elicoidale con  $|m| = 2$  e con segno dell'elicità  $m$  che si inverte all'invertire del verso della polarizzazione incidente (le figure di sinistra (a) sono ottenute con luce incidente polarizzata circolare-sinistra, le figure di destra (b) sono ottenute con luce incidente polarizzata circolare-destra). Dato che la polarizzazione della luce incidente può essere agevolmente commutata in modo automatico ad alta cadenza (mediante una cella elettro-ottica seguita da una normale lamina birifrangente a un quarto di lunghezza d'onda), è evidente che la medesima commutazione automatica può essere estesa all'elicità del fronte d'onda generato secondo il sistema descritto.

In figura 6 è mostrato un sistema ottico per la generazione e la commutazione rapida di modi elicoidali di un'onda ottica, basato sui componenti ottici a fase geometrica sopra descritti, in particolare un sistema per controllare automaticamente l'elicità della luce emergente assumendo un ingres-

so non elicoidale e polarizzato linearmente (come da un normale laser).

Con L è indicata una sorgente di un fascio di luce, ad esempio una sorgente laser di un fascio a polarizzazione lineare. A valle della sorgente laser L è disposta una cella elettro-ottica EO (ad esempio, una cella di Pockels) per effettuare la commutazione tra due polarizzazioni lineari ortogonali, la quale è accoppiata ad una lamina a quarto d'onda QW. A valle della lamina QW è disposto un componente q-PBOE del tipo sopra descritto atto a generare modi elicoidali a partire da un fascio di luce incidente con polarizzazione circolare, avente una geometria data dalla relazione  $\alpha(x,y) = \alpha(r,\varphi) = q\varphi + \alpha_0$  sopra descritta.

La commutazione elettro-ottica della polarizzazione circolare incidente sul componente q-PBOE, ad esempio mediante una cella di Pockels EO combinata con la lamina a quarto d'onda QW, è potenzialmente molto rapida.

Il q-PBOE inserito nel sistema ottico di figura 6 consente dunque di generare modi elicoidali e di commutare molto rapidamente tra le due elicità opposte del fronte d'onda.

L'analisi precedente assumeva che l'onda inci-

dente nel  $q$ -PBOE fosse non elicoidale (ossia con ordine  $m = 0$ ), ma un'analisi del tutto simile può essere applicata al caso in cui l'onda incidente sia un'onda elicoidale, con ordine di elicità  $m$  diverso da zero.

In questo caso, il passaggio dell'onda attraverso il  $q$ -PBOE conduce ad una variazione dell'elicità di  $\pm 2q$  a seconda dello stato di polarizzazione circolare iniziale, ossia si ottiene in uscita un'onda con ordine dell'elicità  $m' = m \pm 2q$  (purché l'asse del fascio elicoidale sia allineato con il centro del  $q$ -PBOE attraversato).

Ciò consente di costruire un sistema ottico a più stadi in serie per controllare l'elicità della luce generata in modo automatico, in un insieme di valori di  $m$  non limitato a due elementi.

Un esempio di un sistema ottico in tre stadi per la generazione di modi elicoidali con  $m$  che può essere commutato nell'insieme di quattro valori  $\{+3, +1, -1, -3\}$  è mostrato in figura 7.

A valle di una sorgente di un fascio laser  $L$  è disposta una serie di tre stadi in cascata  $S1, S2, S3$ , ciascuno comprendente una cella elettro-ottica EO (ad esempio, una cella di Pockels) accoppiata ad una lamina a quarto d'onda QW e - a valle della la-

mina QW, - un componente q-PBOE con geometria definita dalla relazione  $\alpha(x,y)=\alpha(r,\varphi)=q\varphi+\alpha_0$  sopra descritta con  $q = 1/2$ . Una seconda lamina a quarto d'onda QW2 è prevista in cascata al componente q-PBOE, ad eccezione che nell'ultimo stadio. La polarizzazione finale del fascio nel sistema raffigurato non è regolabile, ma lo diviene aggiungendo al terzo stadio la seconda lamina a quarto d'onda QW2 e prevedendo al termine della linea una ulteriore cella elettro-ottica.

Più in generale, un sistema ottico a  $n$  stadi in serie, analogo a quello presentato, sarà in grado di generare modi elicoidali della luce con commutazione automatica dell'elicità tra  $n+1$  valori diversi, da  $-2nq$  a  $+2nq$  a passi di  $4q$ .

La figura 8 mostra esempi indicativi dell'evoluzione spaziale di fronti d'onda di modi elicoidali con elicità  $m = +1$  (a),  $m = -1$  (b),  $m = +2$  (c) e  $m = -2$  (d).

Un siffatto sistema può trovare applicazione nella codifica di informazioni per la comunicazione ottica, basata sui modi elicoidali, ed è naturalmente indipendente dalla tecnologia realizzativa dei q-PBOE, che possono essere realizzati mediante un reticolo con passo inferiore alla lunghezza

d'onda incidente, come noto nella tecnica, o una tecnologia a cristalli liquidi come quella descritta in precedenza.

Naturalmente, fermo restando il principio dell'invenzione, le forme di attuazione ed i particolari di realizzazione potranno essere ampiamente variati rispetto a quanto è stato descritto ed illustrato a puro titolo di esempio non limitativo, senza per questo uscire dall'ambito di protezione della presente invenzione definito dalle rivendicazioni allegate.

## RIVENDICAZIONI

1. Elemento ottico a fase geometrica, comprendente un mezzo birifrangente con asse ottico spazialmente disomogeneo in un piano ortogonale alla direzione di propagazione di un fascio di radiazione incidente, atto a modulare la fase del fronte d'onda di detta radiazione secondo una relazione predefinita,

caratterizzato dal fatto che detto mezzo birifrangente include un materiale liquido-cristallino, la disposizione del direttore molecolare delle molecole del materiale essendo spazialmente controllata nel piano ortogonale alla direzione di propagazione del fascio secondo un predeterminato disegno geometrico.

2. Elemento ottico secondo la rivendicazione 1, comprendente una cella a cristalli liquidi (30) delimitata da almeno una superficie di ancoraggio planare (20) con asse facile orientato secondo un predeterminato disegno geometrico.

3. Elemento ottico secondo la rivendicazione 2, in cui detta superficie di ancoraggio planare (20) include uno strato di allineamento (22) presentante detto disegno geometrico per il controllo della disposizione spaziale del direttore molecolare delle

molecole di materiale liquido cristallino (32) ottenuto mediante trattamenti superficiali.

4. Elemento ottico secondo la rivendicazione 2 o 3, in cui detta cella (30) comprende una seconda superficie di ancoraggio planare (24) con asse facile orientato secondo un predeterminato disegno geometrico, speculare al disegno della prima superficie (20).

5. Elemento ottico secondo la rivendicazione 2 o 3, in cui detta cella (30) comprende una seconda superficie di ancoraggio planare (24) degenere, atta a non imporre alcuna orientazione preferita al direttore molecolare delle molecole del materiale liquido cristallino (32).

6. Elemento ottico secondo la rivendicazione 1, comprendente una cella a cristalli liquidi (30) includente mezzi di allineamento del direttore molecolare delle molecole del materiale liquido cristallino (32) secondo un predeterminato disegno geometrico mediante applicazione di campi elettromagnetici.

7. Elemento ottico secondo la rivendicazione 1, comprendente una pellicola di polimeri liquido-cristallini con allineamento molecolare non omogeneo, secondo un predeterminato disegno geometrico.

8. Elemento ottico secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto mezzo birifrangente è atto a indurre un ritardo di fase omogeneo pari a  $\pi$  tra le componenti straordinaria e ordinaria della radiazione incidente nella direzione di propagazione.

9. Elemento ottico secondo la rivendicazione 8, in cui detto mezzo birifrangente forma una lamina piana a mezza onda, disposta perpendicolarmente alla direzione di propagazione della radiazione incidente.

10. Elemento ottico secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto predeterminato disegno geometrico è definito dalla relazione

$$\alpha(x,y) = ax + b$$

$\alpha$  essendo l'angolo formato tra l'asse ottico del mezzo birifrangente ed un asse di riferimento di un predefinito sistema di riferimento cartesiano in un piano ortogonale alla direzione di propagazione del fascio, in cui  $a$  e  $b$  sono costanti.

11. Elemento ottico secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 a 9, in cui detto predeterminato disegno geometrico è definito dalla relazione

$$\alpha(x,y) = \alpha(r,\varphi) = ar^2$$

$\alpha$  essendo l'angolo formato tra l'asse ottico del

mezzo birifrangente ed un asse di riferimento di un predefinito sistema di riferimento cartesiano in un piano ortogonale alla direzione di propagazione del fascio, in cui  $r$  è il raggio vettore del corrispondente sistema di riferimento polare, centrato sull'asse di propagazione del fronte d'onda.

12. Elemento ottico secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 a 9, in cui detto predeterminato disegno geometrico è definito dalla relazione

$$\alpha(x,y) = \alpha(r,\varphi) = q\varphi + \alpha_0$$

$\alpha$  essendo l'angolo formato tra l'asse ottico del mezzo birifrangente ed un asse di riferimento di un predefinito sistema di riferimento cartesiano in un piano ortogonale alla direzione di propagazione del fascio, in cui  $r, \varphi$  sono coordinate del corrispondente sistema di riferimento polare, centrato sull'asse di propagazione del fronte d'onda,  $q$  e  $\alpha_0$  essendo costanti.

13. Elemento ottico secondo la rivendicazione 12, in cui  $q$  presenta valore intero o semi-intero ed  $\alpha_0$  assume un valore compreso tra 0 e  $2\pi$ .

14. Sistema ottico per la generazione di modi elioidali di propagazione di un fascio di radiazione ottica incidente avente un predeterminato stato di polarizzazione circolare, includente:

- un elemento ottico a fase geometrica ( $q$ -PBOE) disposto trasversalmente alla direzione di propagazione del fascio, comprendente un mezzo birifrangente con asse ottico spazialmente disomogeneo in un piano ortogonale alla direzione di propagazione del fascio di radiazione incidente, atto a modulare la fase del fronte d'onda di detta radiazione, l'asse ottico essendo orientato secondo la relazione geometrica

$$\alpha(x, y) = \alpha(r, \varphi) = q\varphi + \alpha_0$$

$\alpha$  essendo l'angolo formato tra l'asse ottico del mezzo birifrangente ed un asse di riferimento di un predefinito sistema di riferimento cartesiano in un piano ortogonale alla direzione di propagazione del fascio, in cui  $r$ ,  $\varphi$  sono coordinate del corrispondente sistema di riferimento polare, centrato sull'asse di propagazione del fronte d'onda,  $q$  e  $\alpha_0$  essendo costanti,

detto elemento ( $q$ -PBOE) essendo atto a operare la trasformazione di un fascio di radiazione incidente polarizzata circolarmente in un modo elicoidale con fronte d'onda di superficie elicoidale il cui verso è funzione del verso della polarizzazione incidente, e

- mezzi modulatori elettro-ottici (EO, QW) per

la commutazione della polarizzazione circolare della radiazione incidente tra una coppia di stati di polarizzazione di versi opposti,

il sistema essendo predisposto per effettuare la commutazione tra ordini di elicità differenti del fascio di radiazione emergente da detto elemento ottico a fase geometrica ( $q$ -PBOE) attraverso la commutazione dello stato di polarizzazione circolare della radiazione incidente.

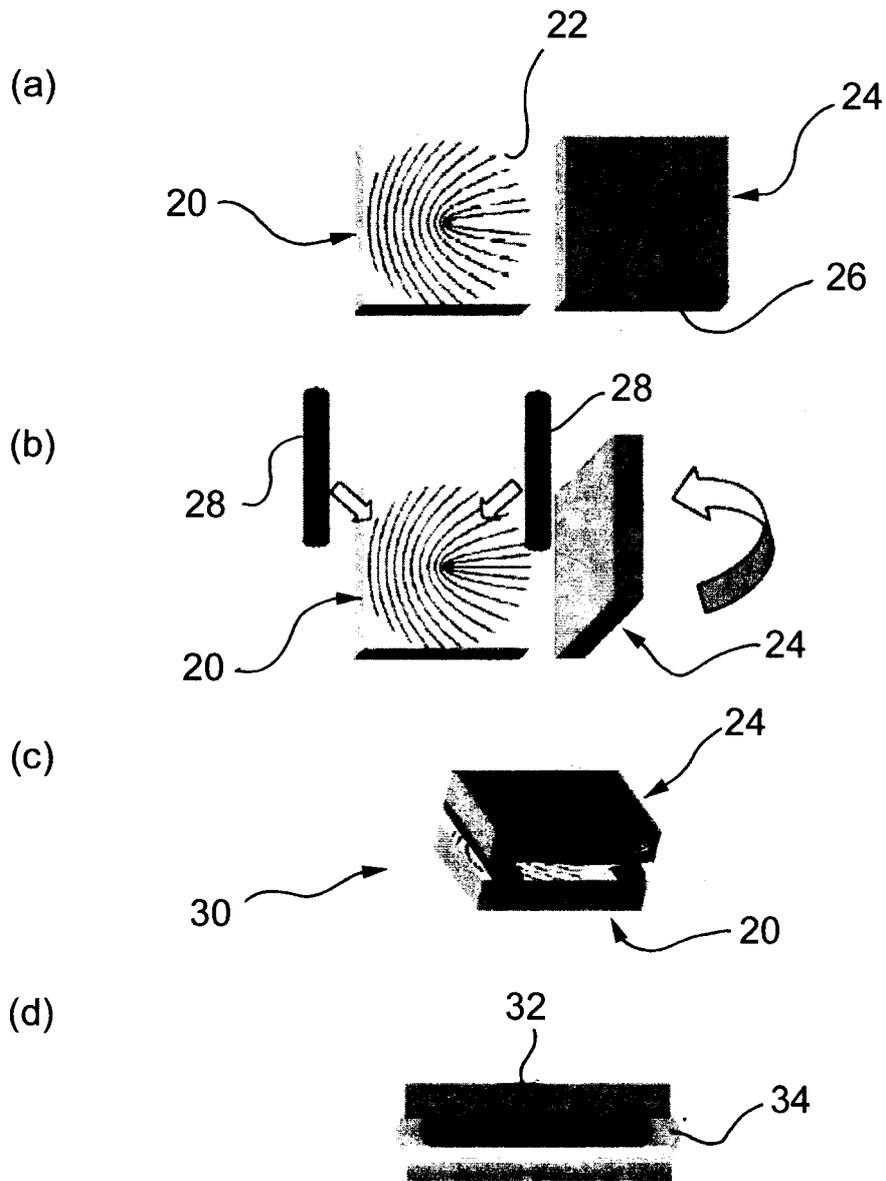
15. Sistema ottico secondo la rivendicazione 14, in cui detto mezzo birifrangente include un materiale liquido-cristallino (32), la disposizione del direttore molecolare delle molecole del materiale essendo spazialmente controllata nel piano ortogonale alla direzione di propagazione del fascio secondo detta relazione geometrica.

16. Sistema secondo la rivendicazione 14 o 15, in cui detti mezzi modulatori elettro-ottici (EO) comprendono una cella di Pockels ed una lamina a quarto d'onda (QW) a valle di detta cella.

17. Sistema secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 14 a 16, comprendente una pluralità di stadi in cascata, ciascuno dei quali include detto elemento ottico a fase geometrica ( $q$ -PBOE) e detti mezzi modulatori elettro-ottici (EO, QW).

CAMERA DI COMMERCIO  
INDUSTRIA ARTIGIANATO E AGRICOLTURA  
DI TORINO

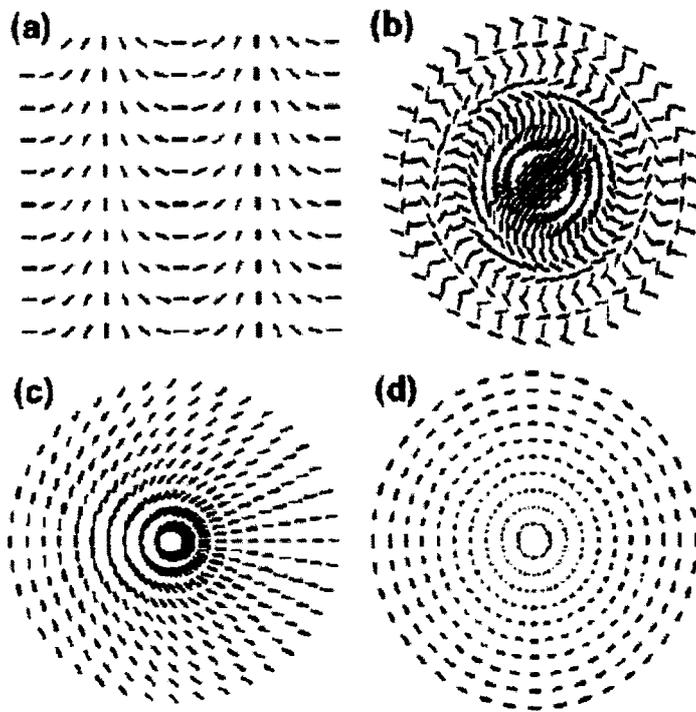
FIG.1



Per incarico di CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA  
FISICA DELLA MATERIA

EDGARDO DEAMBROGI  
(Iscri. No. 93129)  
*Edgardo Deambrogi*

FIG.2



Per incarico di CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA  
FISICA DELLA MATERIA

FRANCESCO DEAMBROSI  
(com. no. 8/72)  
*Edgardo De Ambrosi*

FIG.3



FIG.4

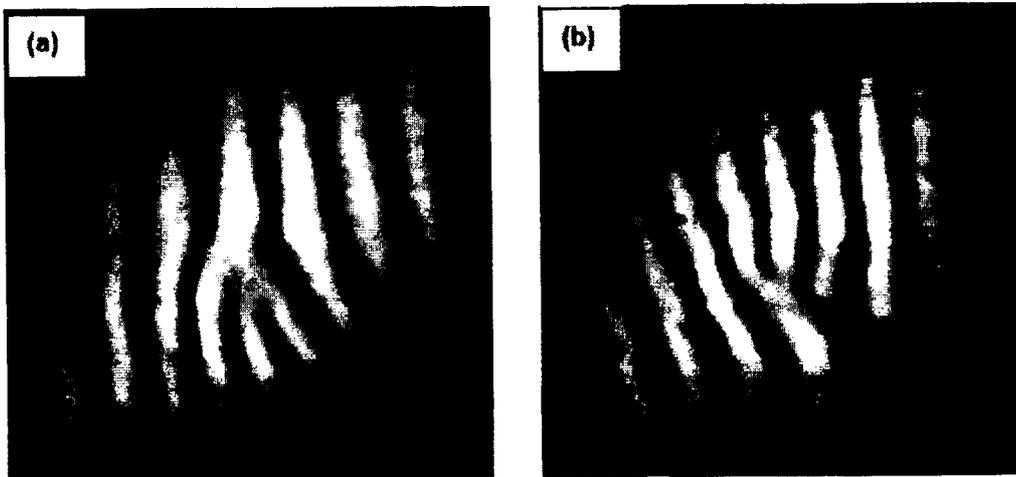
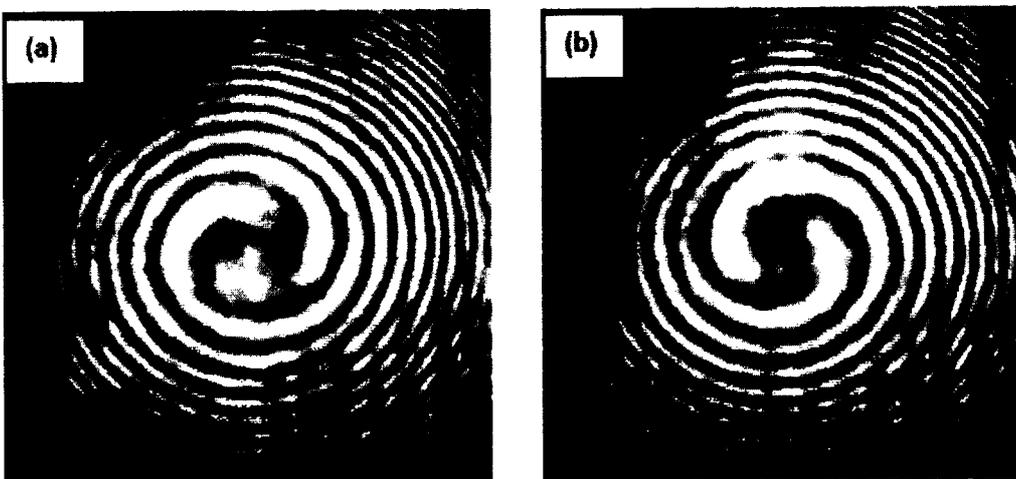


FIG.5



Per incarico di CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA FISICA DELLA MATERIA

FIG.6

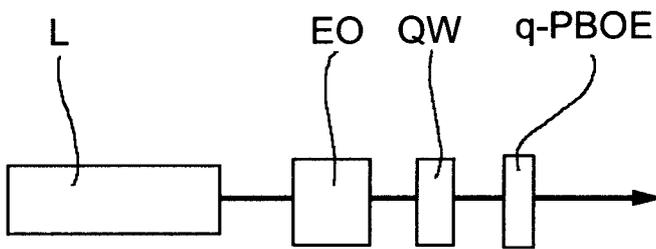


FIG.7

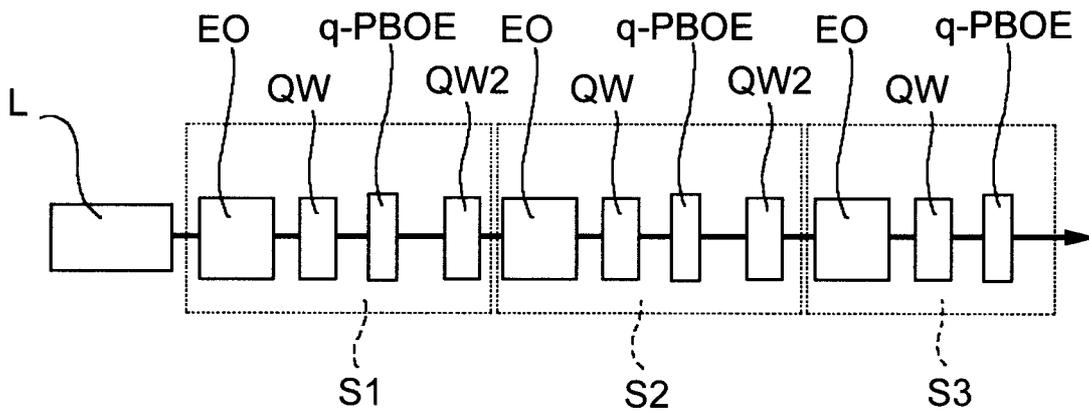
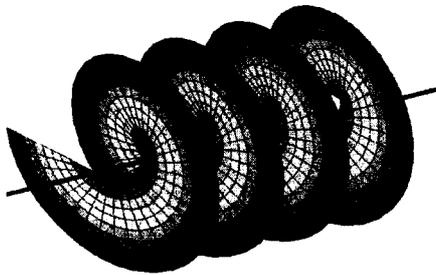
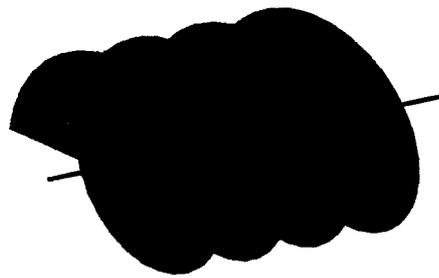


FIG.8

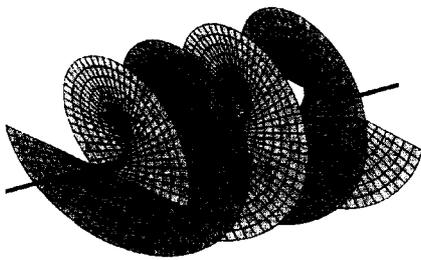
(a)



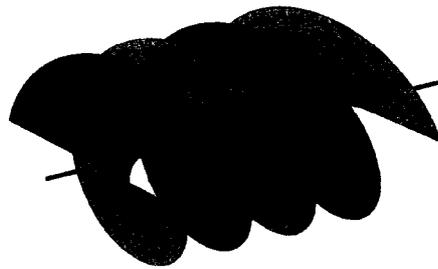
(b)



(c)



(d)



 CAMERA DI COMMERCIO  
INDUSTRIA, ARTIGIANATO E AGRICOLTURA

 CAMERA DI COMMERCIO  
INDUSTRIA, ARTIGIANATO E AGRICOLTURA  
DI TORINO

Per incarico di CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - INFN ISTITUTO NAZIONALE PER LA  
FISICA DELLA MATERIA

*Edgardo Deambrogi*  
EDGARDO DEAMBROGI  
(Iscr. No. 931B)