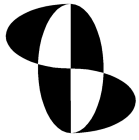


DISPENSE DI

PROGETTAZIONE OTTICA
PROGETTAZIONE DI STRUMENTI OTTICI

Cap.8 – COMPONENTI OTTICI E TECNOLOGIE DI REALIZZAZIONE

Ing. Fabrizio Liberati



Cap.8 COMPONENTI OTTICI E TECNOLOGIE DI REALIZZAZIONE

8.1 Lavorazione ottiche convenzionali

Fasi

Grazie alla sua durezza e al suo elevato grado di isotropia, il vetro dimostra una particolare attitudine alle lavorazioni che richiedono un elevato grado di finitura superficiale e rappresenta il materiale classicamente usato per la realizzazione di componenti ottici rifrattivi e riflessivi. I componenti riflessivi sono generalmente ottenuti depositando un sottile strato metallico riflettente su un substrato di vetro lavorato otticamente. I componenti rifrattivi, cioè le lenti, sono normalmente delimitati da due superfici sferiche in quanto la sfera è la superficie generata dalla cinematica delle macchine per la lavorazione ottica. Il vetro ha struttura amorfa ed è, entro considerevoli limiti, chimicamente inerte. Inoltre segue la legge di Hooke fino al punto di rottura fragile. Dal vetro grezzo, fornito in blocchi di varie dimensioni, l'iter seguito per realizzare un elemento ottico di precisione può essere suddiviso in cinque fasi: sbazzatura, smerigliatura ("lapping"), lucidatura o pulitura ("polishing"), generazione di forma, centraggio.

Sbozzatura

Dai blocchi di vetro grezzo si ricavano, per mezzo di opportuni utensili quali la sega da vetro e la mola a tazza, i pezzi della forma e delle dimensioni desiderate; questi vengono poi ulteriormente molati fino a dare loro profili e curvatura superficiali che sono quelli del pezzo finito con sovra materiale che successivamente verrà asportato. La figura 8.1 mostra la geometria secondo cui viene ottenuta la forma per ciascuna singola lente. Naturalmente nel caso di superfici concave cambia l'inclinazione dell'angolo θ .

Negli ultimi anni, a causa del crescente costo della manodopera, in molti casi questa fase viene eliminata in quanto risulta più conveniente fondere il vetro direttamente in sbocchi semilavorati anche per produzioni di quantità limitata.

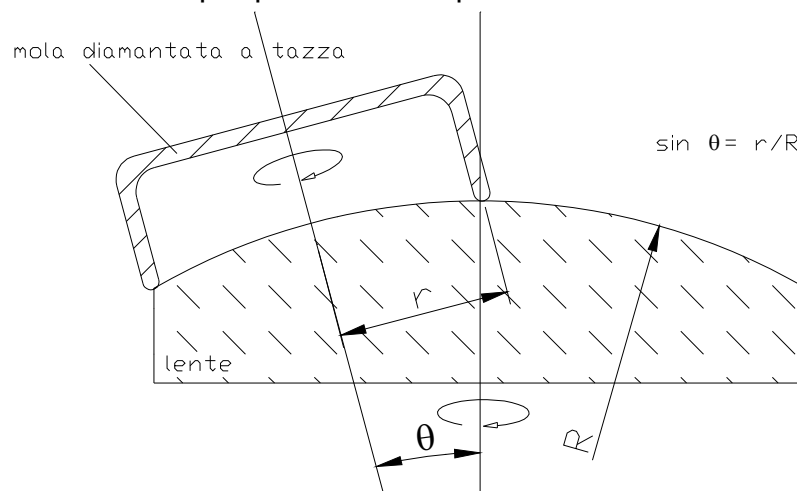
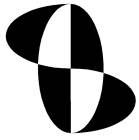


figura 8.1



OPTO SERVICE srl

Smerigliatura

In una prima fase della smerigliatura (*grossolana*) si rimuovono le scheggiature generate dalla sbazzatura e si controlla con maggiore precisione il raggio di curvatura delle superfici, mentre in una seconda fase (*fine*) si riduce la rugosità delle superfici. Complessivamente la smerigliatura deve portare la rugosità R_t da circa $100\mu\text{m}$, tale è la rugosità delle superfici generate dalla mola, a circa $3\mu\text{m}$.

Come le successive fasi di lavorazione ottica, la smerigliatura si svolge su appositi macchinari che permettono di lavorare insieme lenti uguali tra loro, il numero delle quali dipende dal diametro e dal raggio di curvatura.

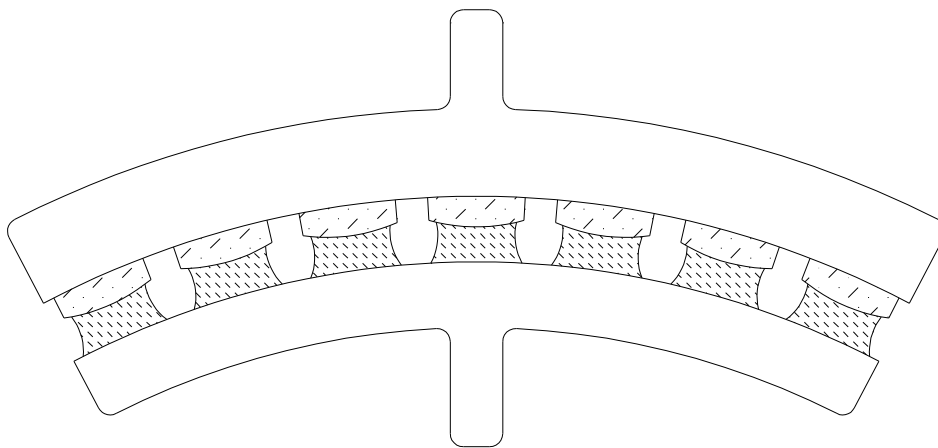
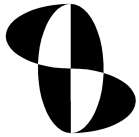


figura 8.2

Le lenti sono incollate su un supporto con della pece che viene scaldata sino al rammollimento, in modo che le singole superfici da lavorare formino una unica sfera (figura 8.2) il cui raggio è pari al raggio di curvatura desiderato e che viene fatto coincidere con quello dell'attrezzo, un utensile sferico detto *patina*. Il supporto viene messo in rotazione intorno al proprio asse e la patina è trascinata, libera di ruotare sui pezzi, da un braccio che oscilla guidato da un eccentrico. La cinematica del macchinario di lavorazione è mostrata in figura 8.3; in particolare in figura è rappresentata la lavorazione di superfici piane, come accade nel caso di lenti con una superficie piana, prismi, lamine di vetro.

La smerigliatura prevede l'uso di particelle abrasive più dure del materiale da lavorare, disperse in un liquido che generalmente è acqua, con l'eventuale aggiunta di petrolio o glicerina. Tale sospensione è interposta tra i pezzi e la patina. Le pressioni esercitate e le velocità relative mantenute tra le superfici del pezzo e dell'utensile variano secondo i casi e determinano la velocità con cui il materiale viene asportato. La durezza della patina è solitamente inferiore a quella dell'abrasivo ma uguale o superiore a quella del materiale da lavorare.

I grani abrasivi, che rotolano tra le due superfici contrapposte in moto relativo, provocano con il loro impatto numerose microfrazture nel materiale più tenero. Nel caso del vetro, l'acqua penetra nelle microfrazture e indebolisce la struttura



OPTO SERVICE srl

circostante cosicché successive collisioni producono il distacco di minuscoli frammenti.

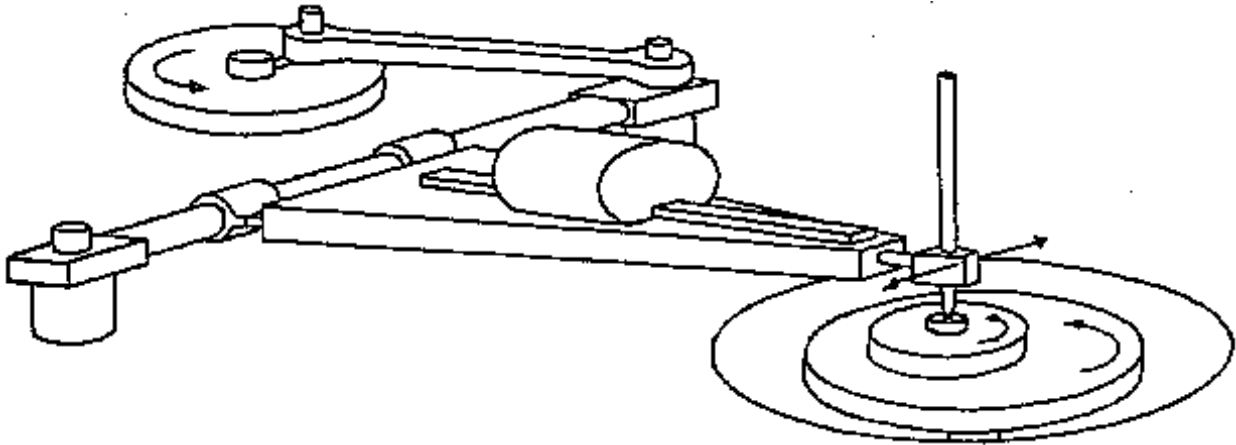


figura 8.3

La profondità dello strato danneggiato a causa delle tensioni prodotte dall'azione dello smeriglio è maggiore della profondità delle microfratture. Allo scopo di non far avanzare il fronte della regione danneggiata durante la lavorazione, si procede a sgrossatura con smerigli i cui grani hanno dimensioni via via decrescenti. La scelta delle dimensioni dell'abrasivo è tale da minimizzare il tempo richiesto dalla smerigliatura. La durata dell'impiego di ogni granulometria deve essere maggiore di quella necessaria alla sola rimozione delle asperità superficiali prodotte dallo smeriglio precedente, in modo da garantire che la regione danneggiata da quell'abrasivo venga rimossa.

Al termine della smerigliatura la superficie risulta, a meno di qualche lunghezza d'onda, prossima a quella richiesta.

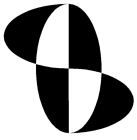
Lucidatura

Nel corso di questa fase si devono rimuovere le microfratture e i piccoli intagli causati dall'ultima smerigliatura fino a portare la superficie alla qualità ottica.

La lucidatura viene effettuata in modo assai simile alla smerigliatura e si differenzia da quella solo perché l'utensile, e in alcuni casi anche l'abrasivo, sono più teneri del materiale da lucidare e perché le velocità mantenute nel moto relativo tra utensile e pezzo e le pressioni esercitate sono minori di quelle utilizzate in precedenza. Anziché rotolare come nella smerigliatura, i grani abrasivi vengono parzialmente trattenuti dall'utensile e levigano la superficie. Il meccanismo fisico della lucidatura, non ancora pienamente compreso, sembra il risultato di tre effetti contemporanei: termico, chimico ed abrasivo.

Generazione di forma

Per far sì che la superficie risulti regolare e della curvatura desiderata bisogna agire, ed eventualmente operare correzioni, sui parametri di lavorazione delle fasi di



smerigliatura e pulitura. E' necessario, infatti, controllare la quantità di materiale che va asportato dalle diverse zone della superficie mediante le variabili da cui essa dipende: velocità relativa e pressione locali. La dipendenza da tali variabili è talmente complessa che è difficile prevedere con certezza in quale misura il materiale è rimosso in ogni istante della lavorazione.

Poiché l'utensile può ruotare senza alcuna restrizione, la sua velocità angolare è continuamente variabile e il suo moto sulla superficie del pezzo è determinato dalle forze di attrito generate dal processo abrasivo. Il moto relativo casuale rende impossibile il calcolo delle pressioni e delle velocità relative dei punti dell'utensile sul pezzo.

Per apportare le correzioni finali, l'operatore può variare velocità e pressioni medie, oppure lo "sbraccio" dell'utensile, cioè di quanto questo arriva a sporgere lateralmente rispetto al pezzo durante l'oscillazione, modificando le aree mediamente a contatto. Un'ultima possibilità consiste nel modificare la forma dell'utensile per meglio adattarlo a quella della zona da pulire: così ad esempio, se si vuole lavorare in misura maggiore il pezzo al centro e se il materiale di cui è costituito l'utensile lo consente (in particolare nel caso in cui si tratti di pece), se ne può asportare un sottile strato dal bordo in modo che la superficie dell'utensile risulti leggermente convessa. Pertanto gli operatori devono basarsi sull'esperienza acquisita con la pratica per ottenere la forma desiderata. Come detto, con lavorazioni curate si riescono a raggiungere errori di forma, cioè scostamenti tra la superficie ottenuta e la sfera osculatrice dell'ordine di centesimi di lunghezza d'onda e rugosità dell'ordine di pochi Å.

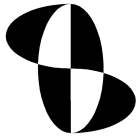
Centraggio

Come ultima fase della lavorazione ottica, si effettua il centraggio della lente che ha lo scopo di portare l'asse meccanico a coincidere con l'asse ottico. Al termine della precedente fase, la lente ha un diametro leggermente maggiore del richiesto. Questo avviene sia per evitare scheggiature o finiture di qualità inferiore al bordo della lente, sia per consentire, tramite l'arrotondatura finale, di ottenere un centraggio nelle tolleranze richieste. L'operazione di centraggio è stata descritta nella prima parte di questo corso.

Macchine per lappatura e pulitura

La configurazione classica è già stata descritta nel precedente paragrafo; la figura 8.3 ne riporta un esempio.

La macchina deve riprodurre al meglio il movimento casuale che si aveva nell'antica lavorazione manuale delle superfici; in alcuni casi quest'ultima rappresenta ancora l'unico modo possibile per ottenere pezzi con le tolleranze desiderate, come nel caso dei prismi a tetto. Operatori esperti, tenendo il pezzo nelle mani, lo strofinano contro l'utensile effettuando un ampio movimento ad otto, ruotandolo spesso così da evitare periodicità del moto relativo ed esercitando una pressione che consente loro di lavorare uniformemente su tutta la superficie oppure prevalentemente su una parte di essa.



OPTO SERVICE srl

Utensili

Per la lappatura si utilizzano patine metalliche, mostrate in figura 8.4, e per la pulitura le stesse patine rivestite di materiale tenero (poliuretano espanso, pece, filtri sintetici, panni) o patine di metalli meno duri quali rame, stagno, ottone, indio. Le patine vengono normalmente realizzate per tornitura, e quindi ultimate a mano per ridurre la rugosità della loro superficie.

Le caratteristiche del materiale di cui sono fatte e il loro spessore ne garantiscono la necessaria rigidezza. Sulle patine di grosse dimensioni sono praticate scanalature a spirale o a rete le quali, catturando e rilasciando il fluido abrasivo, evitano entrambi i fenomeni di coesione (attrito secco) tra patina e pezzo e di "acqua-planing": la lappatura progredisce più rapidamente, il consumo della patina è più lento e minore è il rischio che essa si danneggi.

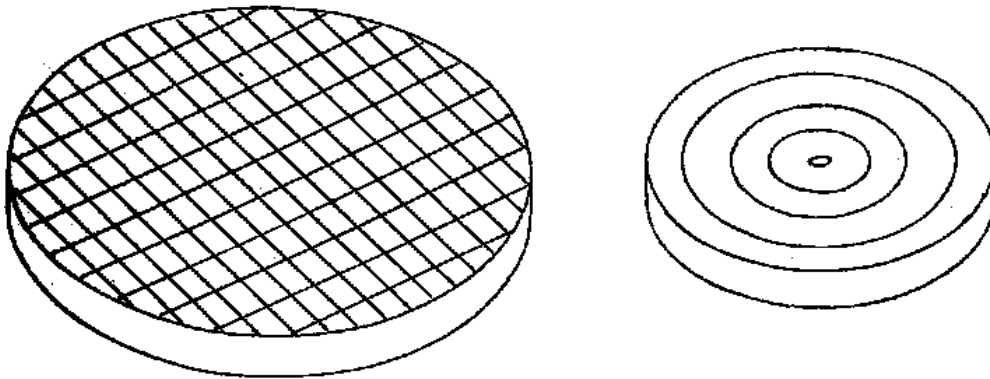


figura 8.4

Fluidi abrasivi

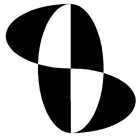
Le qualità che deve avere il fluido che veicola l'abrasivo sono:

- mantenere le polveri abrasive in sospensioni uniformi e prive di agglomerati;
- non essere corrosivi nei riguardi del materiale da lavorare e facilmente detergibili a lavorazione ultimata;
- costituire un meato fluido continuo tra utensile e pezzo in modo da evitare il contatto diretto tra le superfici in moto relativo che potrebbe danneggiare tanto il pezzo quanto l'utensile;
- asportare il calore che si genera nella lavorazione (funzione di liquido refrigerante);
- non essere tossici per gli operatori.

I fluidi abrasivi più spesso utilizzati sono acqua, eventualmente con l'aggiunta di acido acetico, soluzioni a base di oli vegetali o minerali (cherosene), alcool, glicerina. La sospensione abrasiva può essere usata a perdere oppure può essere previsto un suo recupero, con successivo filtraggio e ricircolo.

Abrasivi

I parametri che caratterizzano l'abrasivo sono la granulometria, la durezza e la forma. Particelle abrasive di forma arrotondata sono meno aggressive e più adatte al polishing finale, mentre polveri più grossolane e aguzze sono più efficaci nella sgrossatura.



Gli abrasivi più utilizzati sono l'allumina, il carburo di silicio, il carburo di boro, il diamante, l'ossido di cerio.

8.2 Lavorazioni ottiche non convenzionali

Il metodo convenzionale appena descritto è rimasto praticamente invariato da secoli e ancora oggi rappresenta il metodo con cui si costruiscono la maggior parte dei componenti ottici. Nel recente passato lo sforzo maggiore è stato rivolto a cercare di automatizzare ed accelerare le fasi realizzative allo scopo di aumentare la produttività, piuttosto che a cercare nuovi approcci. Oggi esistono macchinari che a partire dal vetro grezzo riescono ad ottenere il pezzo finito senza diretto intervento dell'uomo, ma per ora questi processi sono limitati per lo più a produzioni di larga scala e qualità medio-bassa.

Metodi di lavorazione alternativi si sono per lo più sviluppati per la realizzazione di componenti ottici che non si riuscivano ad ottenere con la lavorazione convenzionale, come alcune le di superfici asferiche non a simmetria assiale.

Un nuovo impulso è stato dato dalla possibilità teorica di sfruttare proprietà fisiche diverse dalla rifrazione per formare un'immagine o modificare la propagazione della luce. Questo ha portato ai primi tentativi di realizzare componenti a gradiente di indice di rifrazione, diffrattivi (binari o olografici), che sono realizzati con tecnologie decisamente diverse, anche se il materiale di base rimane spesso il vetro. Questo sviluppo, per alcuni aspetti già molto avanzato, ha portato anche alla realizzazione di componenti ibridi, in cui le nuove tecnologie di lavorazione integrano le lavorazioni ottiche convenzionali e mettono a disposizione del progettista una serie di nuove interessantissime possibilità .

Passeremo ora in breve rassegna i metodi più diffusi ed interessanti.

Single point diamond turning

Questa tecnica di lavorazione ottica si è potuta sviluppare grazie al miglioramento della precisione delle macchine per lavorazione meccanica convenzionale, capaci di avvicinare l'accuratezza necessaria ad una superficie ottica. L'utensile utilizzato è un diamante a singolo cristallo. Il componente ottico viene lavorato come lo sarebbe un pezzo meccanico in un tornio o in una fresa. E' quindi possibile ottenere in modo relativamente semplice anche superfici asferiche. Per quanto accurata, questo tipo di lavorazione lascia tracce dell'utensile e la superficie finale presenta dei caratteristici solchi a pettine, per cui deve successivamente essere leggermente lucidata per cercare di cancellare, smussandoli, i segni della lavorazione.

Una limitazione più severa è che solo pochi materiali, tra i quali non figura purtroppo il vetro per ottica, sono adatti ad un tale tipo di lavorazione. I materiali lavorabili sono le plastiche, il germanio, il silicio, l'alluminio, il solfuro ed il selenuro di zinco, il nickel: praticamente tutti i materiali utilizzabili nell'infrarosso.

Ciò, unito al fatto che le tolleranze che riguardano le superfici nell'infrarosso sono 20 volte meno stringenti rispetto al visibile in quanto la lunghezza d'onda di riferimento è 10 micron anziché 0.5 micron, che il costo dei materiali ottici trasparenti nell'infrarosso è molto alto e che l'uso di superfici asferiche consente di risparmiare sul numero di componenti di un progetto ottico, rende questa tecnica molto

interessante per essere applicata nell'infrarosso. Numerosi sistemi contengono al loro interno già da tempo componenti asferici ottenuti in questo modo.

Replica

Questo processo viene generalmente impiegato per la costruzione di componenti riflessivi la cui superficie è di forma complessa (ad esempio asferica) o di difficile realizzazione in relazione allo spessore e alle altre caratteristiche geometriche. Un esempio è dato dal caso di un componente molto sottile che abbia una superficie piana con tolleranza molto spinta. Per ottenere con lavorazioni convenzionali una superficie piana o sferica che abbia tolleranza di frazioni di frangia per cm^2 , occorre uno spessore di materiale consistente, in modo da evitare che le deformazioni elastiche dovute all'incollaggio del pezzo con la pece o alla pressione durante la lavorazione si traducano in errori di forma sul pezzo finito. La replica permette di ottenere specchi sottili con errori di forma molto contenuti.

La lavorazione di precisione si effettua su un "master" lavorato in maniera ottimale in quanto di spessore consistente. Su questo si deposita prima un sottilissimo strato uniforme di materiale facilmente asportabile e quindi il coating riflettente. Questo pacchetto viene successivamente incollato ad un sottile substrato realizzato secondo la forma del componente voluto; la colla compensa le differenze di spessore. Infine si separa il master, che sarà riutilizzabile, ottenendo il sottile componente definitivo. La figura 8.5 mostra le varie fasi di lavorazione.

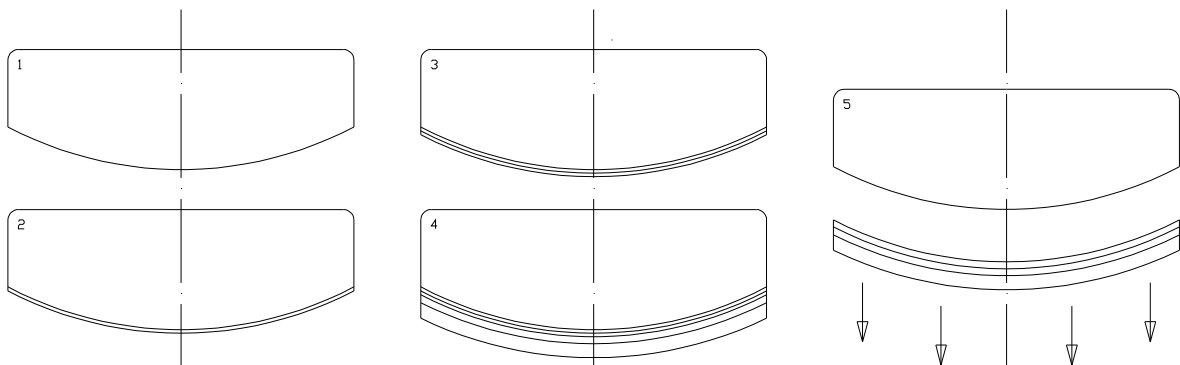
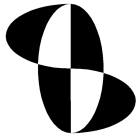


figura 8.5

Un'altra applicazione del processo di replica riguarda il caso in cui si voglia rendere asferica la superficie di una lente precedentemente realizzata con lavorazione convenzionale. In questo caso deve essere usata una colla trasparente ed il materiale che si riporta sulla lente ha la superficie esterna di forma asferica.

Stampaggio

Uno dei metodi che si va diffondendo rapidamente per la fabbricazione di lenti è lo stampaggio. Questo si può applicare sia alle plastiche che al vetro, in particolar modo ad alcuni specifici vetri concepiti appositamente, come il Corning C0550. Le principali plastiche utilizzabili sono l'Acrilico, il Polistirene, il Policarbonato.



OPTO SERVICE srl

Analogamente a quanto detto per la Single Point Diamond Turning, con questa tecnica si possono ottenere componenti asferici con le stesse difficoltà con cui si otterrebbero componenti sferici: per questo motivo questo tipo di produzione riveste un particolare interesse. Senza addentrarsi nei dettagli, diremo soltanto che questa tecnica è simile a quella di stampaggio di oggettistica di plastica, ma che richiede una maggiore cura in quanto le tensioni residue dovute ad un raffreddamento troppo rapido possono generare gradienti di indice di rifrazione tali da compromettere la qualità del componente. Per questo motivo e per la fluidodinamica del liquido caldo che va a riempire lo stampo durante la fabbricazione, ci sono limitazioni sulle dimensioni, sulla forma e sul rapporto tra spessore e diametro dei componenti.

Occorre sottolineare che un vantaggio di questa tecnica è che il componente ottico può essere disegnato in modo da contenere direttamente l'interfaccia meccanica, come ad esempio una flangia con dei fori per il fissaggio, consentendo di risparmiare sia sulla componentistica a corredo sia sui successivi tempi di assemblaggio.

Lo stampaggio di componenti ottici sta invadendo il mercato commerciale risultando estremamente conveniente per produzioni su larga scala. Le applicazioni che attualmente stanno avendo maggiore successo per quanto riguarda l'utilizzo di vetro come materia prima sono i collimatori asferici per diodi laser ed i fari di automobili. Alcune lampadine alogene dotate di lentine integrate per ridurre la divergenza angolare emessa si possono in qualche modo far ricadere in questa famiglia.

Elementi ottici diffrattivi e binari

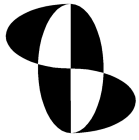
Dopo un lungo periodo di studio teorico e di ricerca applicata, i componenti ottici diffrattivi possono contare su strumenti di progettazione adeguati e su una serie di tecnologie realizzative sviluppate appositamente.

In realtà i componenti ottici olografici e binari fanno parte della più generale famiglia dei diffrattivi in quanto, a differenza dei componenti convenzionali che modificano la propagazione della luce sfruttando le leggi di Snell della riflessione e della rifrazione, modificano i fronti d'onda prevalentemente per diffrazione. La divisione che abbiamo scelto si riferisce soprattutto alle diverse tecniche di realizzazione, che pure come detto sono molteplici.

Il principio di funzionamento è quello di realizzare un reticolo che diffranga la luce incidente modificandone il fronte d'onda nella maniera voluta. I reticoli sono costituiti da variazioni discrete dell'indice di rifrazione del mezzo di propagazione con passo e ampiezza opportuni.

A seconda delle tecniche realizzative, i reticoli possono essere ottenuti per deposizione di materiale trasparente, per incisione da parte di un utensile o con tecniche di tipo fotografico. In ogni caso si ottengono delle microstrutture a rilievo continue (tipo solchi) o a gradini (ottiche binarie, a due o più livelli).

In figura 8.6 sono mostrati alcuni esempi di componenti diffrattivi, avendone esagerato l'ampiezza dei rilievi rispetto alle dimensioni trasversali.



OPTO SERVICE srl

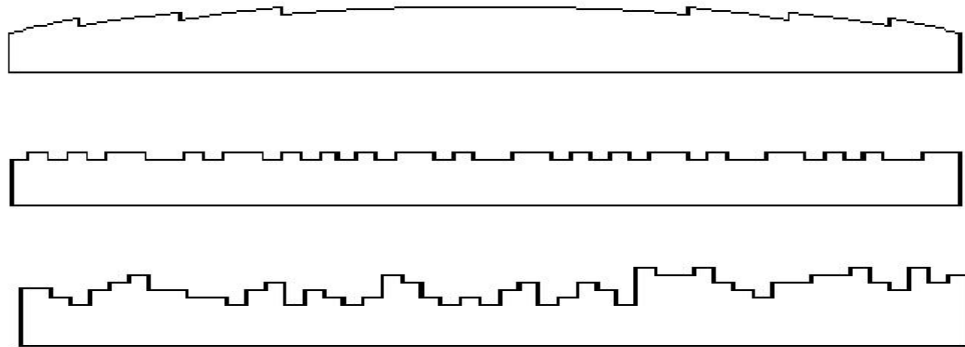


figura 8.6

Si va diffondendo anche l'uso, molto interessante, di componenti ibridi, in cui una superficie di una lente convenzionale è resa diffrattiva. I campi in cui i componenti ibridi appaiono più promettenti, e dove infatti esistono già delle applicazioni, sono alcuni tipi di oculari o sistemi infrarossi.

Gli elementi ottici diffrattivi si prestano ad essere prodotti con la tecnica dello stampaggio, in cui il negativo del reticolo da riprodurre viene formato una volta per tutte sullo stampo, consentendo evidenti vantaggi sulla produzione su larga scala.

Gli ostacoli che ne hanno in passato limitato l'utilizzo sono di diverso tipo:

- Difficoltà di realizzazione, elevato numero di imperfezioni, delicatezza
- Criticità di posizionamento nel sistema
- Intrinseca bassa efficienza di diffrazione con perdite assimilabili a mancanza di trasparenza, anche dovute all' "effetto ombra" dei rilievi
- Dipendenza lineare dell'effetto diffrattivo dalla lunghezza d'onda e conseguente cromatismo di notevole intensità
- Difficoltà di progettazione e mancanza di strumenti software adeguati

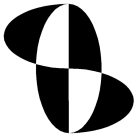
Di contro i principali vantaggi sono:

- Riduzione del numero di elementi
- Nuove prospettive di progetto
- Riduzione di peso e ingombro
- Notevoli riduzioni di costi in relazione al numero di esemplari prodotti

Elementi ottici olografici

Gli elementi ottici olografici (o HOE, Holographic Optical Elements) sono componenti ottici utilizzati per produrre una deformazione per diffrazione alla propagazione del fronte d'onda. Essi vengono prodotti mediante la registrazione del pattern generato dall'interferenza di due laser su un substrato di materiale opportuno.

La fase di progetto di sistemi ottici che utilizzino HOE, come per i componenti diffrattivi in generale, differisce notevolmente dalla progettazione che fa uso di componentistica convenzionale. Infatti piuttosto che il tracciamento di singoli raggi occorre trattare la propagazione di fronti d'onda e correggere le distorsioni di fronte d'onda piuttosto che le aberrazioni dei singoli raggi.



OPTO SERVICE srl

La realizzazione di tali componenti prevede caso per caso un vero e proprio progetto della disposizione dei componenti con tolleranze stringenti di costruzione, posizionamento e stabilità durante l'esposizione. La riproduzione di successivi campioni può essere anche rapida in funzione dei tempi di esposizione. L'assenza di imperfezioni o difetti locali (qualità cosmetiche) richiede particolari condizioni di pulizia, mentre risulta complesso il più generale collaudo dell'HOE. Infatti è difficile riuscire a misurare i parametri ottici tipici del singolo componente, mentre è di più facile riscontro il comportamento a livello di sistema mediante verifica delle prestazioni dell'assieme. I materiali utilizzati per ospitare il reticolo olografico diffrattivo sono diversi, ma i più utilizzati sono il photoresist per gli ologrammi a rilievo e la gelatina dicromata per gli ologrammi di volume. Per evitare danneggiamenti, spesso il reticolo olografico è contenuto tra due vetri incollati.

Gli HOE sono stati applicati in campi particolari soprattutto nei casi in cui è stato possibile ottenere prestazioni non raggiungibili con componenti convenzionali. Un caso riguarda i reticoli di diffrazione comunemente usati nei monocromatori e negli spettrometri, in cui la deposizione del reticolo è realizzata di solito su uno specchio concavo. Applicazioni avioniche significative riguardano gli Head Up Displays e gli Helmet Mounted Displays. In entrambi i casi i combiners olografici consentono un più ampio campo di vista ed una luminosità accresciuta a scapito però della precisione di rappresentazione dell'immagine; un tale combiner consente pure una maggiore luminosità della scene esterna, questa volta a scapito della fedeltà con cui vengono trasmessi i colori.

Ulteriori applicazioni possono essere ricercate in tutti i casi in cui sono sufficienti precisioni relativamente basse anche su grosse dimensioni trasversali.