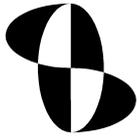


DISPENSE DI

PROGETTAZIONE OTTICA
PROGETTAZIONE DI STRUMENTI OTTICI

Cap.6 – METODI DI TEST DI COMPONENTI E SISTEMI

Ing. Fabrizio Liberati



Cap. 6 METODI DI TEST DI COMPONENTI E SISTEMI

6.1 Collaudo di componenti

Il collaudo dei componenti ottici deve essere effettuato con la massima attenzione in luoghi appositamente predisposti poiché la natura e la delicatezza dei pezzi rendono rischiosa ogni operazione. In questo modo e affidando le operazioni a personale esperto, i danni accidentali diventano abbastanza rari.

Il collaudo può essere effettuato più volte tra la costruzione ed il montaggio del componente, anche se per lo più consiste solo in una attenta *ispezione visiva*. L'ispezione visiva stessa comporta di dover pulire accuratamente il pezzo per non confondere eventuali difetti con la presenza di polvere o di particelle estranee. A parte i controlli durante le fasi di lavorazione ottica di cui si parlerà in seguito, per i componenti con requisiti stringenti occorrono almeno un collaudo finale al termine della lavorazione, due collaudi prima e dopo il trattamento superficiale, uno da parte dell'utente finale per l'accettazione e due prima e dopo il montaggio definitivo.

Il collaudo completo consiste nel verificare le *caratteristiche del materiale*, le *dimensioni*, la *forma* e la *finitura superficiale* del pezzo. Un discorso a parte va fatto per i *trattamenti superficiali*. In qualche caso possono essere richieste, e quindi verificate, proprietà di comportamento legate alla *polarizzazione*. La figura 6.1 riporta un tipico disegno di un particolare ottico.

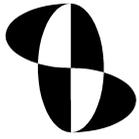
Le caratteristiche del materiale, indice di rifrazione e coefficiente di dispersione, generalmente non vengono misurate perché per avere risultati certi occorrerebbero prove lunghe ed accurate eseguite con strumenti molto particolari; inoltre per la maggior parte delle applicazioni le tolleranze garantite dai produttori dei vetri o degli altri materiali ottici sono sicuramente adeguate. Normalmente l'officina ottica si limita a documentare il tipo di materiale usato allegando alla fornitura dei componenti ottici una copia del certificato emesso dal produttore del materiale.

Il collaudo delle dimensioni per certi aspetti è simile al collaudo di un pezzo meccanico. Occorre verificare quote come spessori o diametri di lenti per cui si utilizzano calibri e micrometri ponendo particolare attenzione nell'evitare di graffiare le superfici con cui questi vengono a contatto. Per fare ciò si possono interporre i foglietti di carta usati anche per la pulizia delle ottiche.

Nel caso dei *prismi*, nel misurare gli angoli tra le superfici occorre utilizzare dei *goniometri ottici*, che sono costituiti da autocollimatori montati su basi rotanti dotate di nonio: si pone l'autocollimatore in posizione ortogonale a ciascuna superficie e si legge il valore dell'angolo di cui ci si è spostati.

Per collaudo della *forma* si intende la misura del raggio di curvatura delle lenti e dello scostamento della superficie della lente da una sfera o, nel caso di una superficie piana, da un piano ideale.

Oltre che in fase di collaudo, questa misura si effettua anche durante la lavorazione ottica, allo scopo di apportare le azioni correttive atte ad ottenere la forma della superficie con la precisione desiderata. Gli strumenti usati durante la lavorazione e durante il collaudo sono completamente diversi, ma il principio è il medesimo, cioè quello di generare un *interferogramma* come risultato del confronto tra la superficie sotto test ed una campione.



Nel caso dell'officina ottica la superficie campione è un pezzo precedentemente lavorato di cui si conosce con esattezza il raggio di curvatura ed il cui scostamento da una sfera perfetta è dell'ordine di centesimi di lunghezza d'onda visibile, cioè dell'ordine di 0,000005mm. Si appoggia la superficie campione al pezzo in lavorazione, si illuminano le due superfici a contatto con luce monocromatica (anche a bassa coerenza come quella di una lampada al sodio) ed il riflesso delle due superfici genera le *frange di interferenza*. La presenza di frange "aperte" è sintomo di una non perfetta aderenza tra le superfici a contatto e non costituisce un errore. Il numero delle frange circolari "chiuse" dà la misura della differenza di curvatura, mentre la loro forma irregolare fornisce l'informazione dell'errore di sfericità del pezzo (o di planarità nel caso di componenti nominalmente piani).

Nella fase di collaudo presso l'ente che deve montare il componente, normalmente non si dispone di pezzi campione e per ottenere l'interferogramma si ricorre ad un *interferometro laser*. La superficie campione in questo caso è il fronte d'onda sferico generato da un obiettivo che permette di focalizzare al limite di diffrazione un fronte d'onda piano ottenuto espandendo un fascio laser a circa 100mm di diametro. Durante la propagazione, il fronte d'onda sferico assume con continuità tutti i valori di raggi di curvatura che da convessi diventano concavi oltre il punto di fuoco. Occorre portare a coincidere la superficie da collaudare con il fronte d'onda ove il raggio di curvatura di questo eguaglia quello della superficie da esaminare. Il fronte d'onda riflesso che la superficie sotto test produce contiene le informazioni relative alla forma della superficie stessa. L'interferogramma in questo caso si genera facendo battere il fronte d'onda ottenuto da questa riflessione con uno di riferimento. Questo metodo consente anche di misurare il raggio di curvatura, come distanza tra questa posizione e il punto di fuoco del fronte d'onda.

L'errore di *centraggio* si verifica quando l'asse meccanico della superficie cilindrica che costituisce il bordo della lente non coincide con l'asse *ottico* della lente. Questo è definito come la retta che unisce i centri di curvatura delle due superfici sferiche. In figura 6.2 si può vedere, esagerata, la mancata coincidenza tra le due rette.

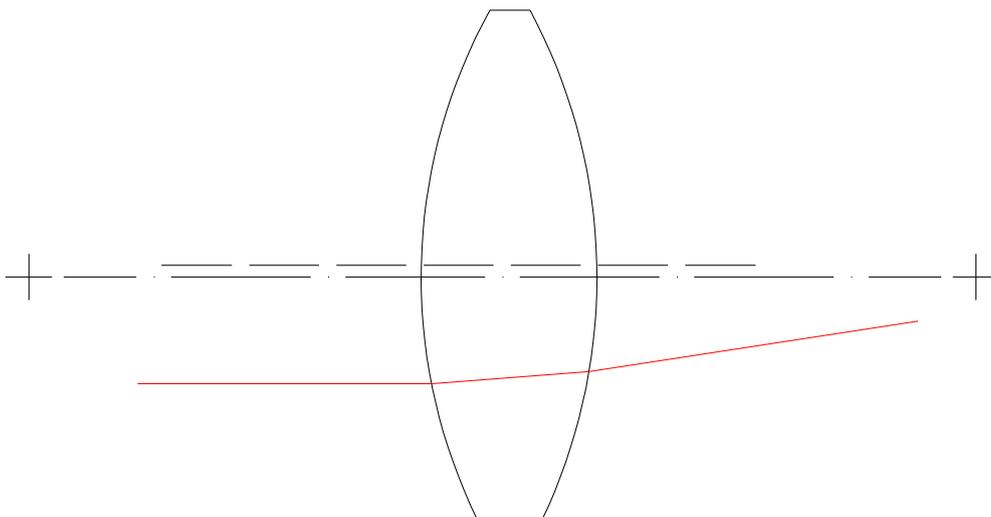
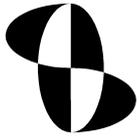


Figura 6.2



La tolleranza di centraggio può essere data in termini lineari, come distanza tra l'asse meccanico e l'asse ottico, o, più spesso, in termini angolari, come deviazione del raggio che passa attraverso il centro meccanico della lente; si può ottenere un valore dall'altro semplicemente moltiplicando o dividendo per la focale della lente. Il centraggio della lente, ossia la riduzione di questo errore, si effettua nell'ultima fase di costruzione della lente. Le fasi di lavorazione precedenti al centraggio portano ad una lente di diametro leggermente più grande di quanto richiesto dal disegno. Per centrare la lente, questa viene montata su un particolare tornio dotato di un cilindro cavo che tiene incollata la lente con un mastice per una delle superfici sferiche; il mastice è tale da permettere dei piccoli aggiustamenti. Il cilindro cavo e la lente sono messi in rotazione ed attraversati da un fascio laser. Il centraggio si ottiene spostando la lente rispetto all'asse di rotazione sino a quando la deviazione del raggio laser non cambia, o cambia entro la misura tollerabile. Una volta ottenuta questa condizione, una mola diamantata effettua l'arrotondatura della superficie esterna della lente sino a portare il diametro al valore richiesto. Il collaudo si effettua in maniera simile, misurando lo spostamento angolare durante la rotazione della lente rispetto al proprio asse meccanico.

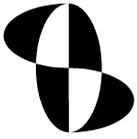
La presenza di errori di centraggio in un sistema ottico può provocare l'insorgere di aberrazioni inattese, quali coma o astigmatismo nel fuoco del sistema, cioè lungo l'asse ottico. L'errore deve essere contenuto da tolleranze che devono tener conto anche delle modalità di montaggio. Infatti un eccessivo lasco tra il bordo della lente e la sua sede meccanica che la conterrà può compromettere il centraggio. D'altra parte una differenza tra il diametro della lente e della sua sede deve essere prevista per consentire il montaggio, per evitare rotture in caso di variazioni termiche e per le inevitabili tolleranze di lavorazione. E' comunque possibile in fase di montaggio annullare o ridurre l'errore di centraggio. Nei casi più critici si può prevedere una regolazione per il posizionamento trasversale della lente. Un accorgimento utilizzato qualche volta è quello di tenere la lente in posizione non riferendosi al diametro esterno, ma poggiandola direttamente sulle superfici ottiche.

La *qualità superficiale* si riferisce al numero e alle dimensioni delle imperfezioni presenti sulle superfici. Si suole raggruppare i difetti in *graffi* e *buchi*, comprendendo nel primo gruppo tutti quelli in cui una dimensione eccede di gran lunga l'altra, mentre nel secondo quelli che hanno dimensioni trasversali paragonabili (inclusioni, crateri, macchioline eccetera). Tali difetti comportano la diffusione di luce che non segue più le rifrazioni e le riflessioni per cui il sistema ottico è stato realizzato: questo provoca disturbo e, nel caso di un numero eccessivo di imperfezioni, riduzione di risoluzione. Nel caso di sistemi laser di potenza, gli effetti possono essere diversi, primo tra tutti il danneggiamento permanente del materiale.

Spesso questi difetti vengono chiamati *cosmetici* in quanto se sono in numero e dimensioni limitate, non producono altri effetti se non quelli di natura estetica.

6.2 Disegno di componenti ottici secondo la norma ISO 10110

La norma ISO 10110 definisce il modo di rappresentare i componenti ottici quali lenti, prismi, filtri e simili, la misura delle loro caratteristiche, le quote, i simboli grafici



e tutto ciò che è possibile richiedere. E' stata emessa nel tentativo di superare le varie normative relative ai componenti che in qualche caso erano di difficile interpretazione e spesso avevano approcci assai diversi alla misura della stessa caratteristica. La norma nazionale che più si avvicina alla ISO 10110 dal punto di vista formale è la DIN. Dal punto di vista strutturale, il disegno del componente è costituito da almeno una rappresentazione del pezzo in sezione ed eventuali viste o ingrandimenti di particolari, dalle quote e da una serie di notazioni e simboli grafici. Le caratteristiche di tipo ottico sono rappresentate mediante un numero che individua il tipo di richiesta, seguito da una barra e dai valori quantitativi richiesti. I numeri da 0 a 2 si riferiscono a proprietà del materiale, i numeri da 3 a 6 fanno riferimento ai requisiti delle singole superfici.

Proprietà del materiale

Viene indicato il nome commerciale, l'indice di rifrazione alla lunghezza d'onda corrispondente alla riga verde dell'elio (587.56 nm), il coefficiente di dispersione o numero di Abbe.

I coefficienti fanno riferimento, rispettivamente:

- 0/ Valore tollerabile di stress, in termini di birifrangenza.
- 1/ Numero ed entità di bolle ed inclusioni tollerabili
- 2/ Valore tollerabile di disomogeneità e strie

Requisiti riguardanti le singole superfici

- 3/ Tolleranza relativa alla forma della superficie
- 4/ Errore di centraggio
- 5/ Numero ed entità di buchi, imperfezioni di trattamento, scheggiature ai bordi
- 6/ Soglia di danneggiamento da esposizione a laser

0/ Stress birefringence

Il formalismo è del tipo $0/A$ ove A è il massimo valore di birifrangenza in nanometri per centimetro di cammino ottico.

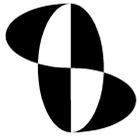
Valori tipici richiesti per A sono:

- $A=20$ per lenti di ingrandimento o sistemi commerciali di bassa qualità
- $A=10$ per microscopi o obiettivi fotografici
- $A=5$ per telescopi astronomici
- $A<2$ per interferometri e strumenti a polarizzazione

1/ Bolle e inclusioni

Il requisito si esprime come $1/N \times A$, ove N è il numero consentito di bolle o inclusioni di area A^2 (si trascura il termine $\pi/4$, ammesso che il difetto sia di sezione circolare). E' ammissibile un numero di difetti maggiore se l'area totale non eccede $N \times A^2$. Bolle più piccole di $0.16A$ non sono considerate.

I valori di A da preferire sono 0,1; 0,16; 0,25; 0,4 e 0,63 e loro multipli e sottomultipli di 10. In questo modo per salire o scendere di un livello qualitativo, occorre moltiplicare o dividere x2.5, per due livelli x6.3, per tre livelli x16. Se ad esempio è richiesto $1/2 \times 0,25$, nel pezzo possono essere presenti 2 inclusioni da 0,25mm di diametro (o di lato), o 5 da 0,16mm, o 12 da 0,1mm, o 32 da 0,063mm; inclusioni



minori di 0.04mm non sono considerate, mentre non è tollerabile una sola inclusione di lato maggiore di 0,25, anche se l'area totale dovesse risultare inferiore a quella ammissibile. Non più del 20% delle bolle (o 2, se N è inferiore a 10), possono essere concentrate in meno del 5% dell'area di test.

2/ Disomogeneità e strie

Si indica come 2/A;B ove A indica la classe di omogeneità di indice di rifrazione del materiale grezzo, B indica classe di densità di strie che causa una differenza di cammino ottico di 30nm, che costituisce il valore di soglia di visibilità della stria. Sono previste 6 classi di omogeneità (da A=0, che corrisponde a variazione di indice di rifrazione $< \pm 50 \cdot 10^{-6}$, ad A=5, che corrisponde a variazione di indice di rifrazione $< \pm 0,5 \cdot 10^{-6}$) e 5 classi di densità di strie (da B=1, in cui le strie possono occupare sino al 10% dell'area proiettata, a B=4 in cui possono occupare sino all'1%; B=5 indica che le strie non sono visibili e vanno specificate a parte).

3/ Forma della superficie

Si può indicare con 3/A(-) ove A = freccia, ossia massimo scostamento in numero di frange dalla sfera oscuratrice. Se non altrimenti specificato, le frange si intendono alla lunghezza d'onda della linea verde di emissione del mercurio, cioè 546,07 nm. Si può anche indicare con 3/A(B), distinguendo l'errore di sfericità (A), dall'irregolarità B, ossia massimo scostamento dalla sfera oscuratrice (o dal piano). La norma prevede anche casi particolari applicabili, ad esempio, alle superfici asferiche.

4/ Errore di centraggio

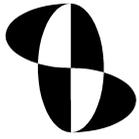
Si esprime come 4/ σ ove σ è angolo in minuti di arco della superficie relativa rispetto ai riferimenti, ad esempio 4/2 AB se A e B sono i riferimenti.

Si può esprimere anche come 4/ σ (L), ove L è spostamento laterale, o, per superfici incollate, come 4 $\Delta\tau$ ove τ è l'angolo tra le due superfici.

5/ Buchi e imperfezioni

Esistono due metodi di specificare e misurare i difetti superficiali. Secondo il primo metodo i difetti si indicano come 5/N x A, nella stessa maniera delle bolle e inclusioni e con le stesse possibilità di considerare difetti di dimensioni diverse. N è il numero di buchi, inclusioni o difetti le cui dimensioni sono confrontabili, A è la radice quadrata dell'area del massimo difetto consentito. Si possono separare i difetti dovuti al coating aggiungendo il requisito CN'xA'. I graffi vengono indicati come LN"xA": sono tollerati N" graffi di larghezza A" lunghi almeno 2mm. Se si indica anche EA", è permesso un numero qualsiasi di scheggiature che non sporga oltre A" mm dal bordo fisico del componente. Pertanto secondo questo metodo il requisito può avere la forma: 5/N x A; CN'xA'; LN"xA"; EA".

Il metodo alternativo considera simultaneamente i difetti di entrambe le superfici e del materiale. Consiste nel verificare, in una stazione di collaudo che la norma definisce, la visibilità dei difetti contro uno sfondo di illuminazione data. Si può indicare la misura in luce trasmessa (5/TV) o riflessa (5/RV) essendo V è la classe di visibilità da 1 (più stringente) a 5.



6/ Soglia di danneggiamento da esposizione a laser

Il formalismo per componenti soggetti a esposizione di laser impulsati è $6/E_{th}$; λ ; pdg ; f_p ; $N_{TS} \times N_T$, ove E_{th} è la soglia di danneggiamento in J/cm^2 , λ la lunghezza d'onda, pdg la classe di durata di impulso (da 1 a 6), f_p la frequenza di ripetizione, N_{TS} il numero di punti di test, N_T il numero di impulsi per punto di test.

Per componenti soggetti a esposizione continua, si indica $6/H_{th}$; λ ; N_{TS} for CW, ove H_{th} è la soglia di danneggiamento in W/cm^2 .

6.3 Collaudo di sistemi

La rispondenza o meno di un sistema ottico ai requisiti atti allo svolgimento del compito per il quale è stato pensato è un problema che riguarda molti aspetti. A parte le caratteristiche di tipo fisico o ambientale (dimensioni, masse, centro di gravità, comportamento in temperatura, resistenza a shock e vibrazioni) che non rivestono uno specifico interesse in questa sede, intendiamo riferirci alla rispondenza ai requisiti di tipo ottico.

Tra questi possiamo dividere in aspetti di tipo *quantitativo* e prestazioni *qualitative*. Tra i primi c'è ad esempio la *distanza focale* o gli *ingrandimenti*, l'*apertura*, la *trasparenza*, la *distorsione*; tra i secondi essenzialmente la *risoluzione*, che può essere definita e richiesta in vari modi.

Questi sono i principi di misura delle caratteristiche di tipo quantitativo.

La verifica della distanza focale di un sistema ottico normalmente si effettua con il focometro. Di fatto si misurano le dimensioni dell'immagine che il sistema sotto test forma partendo da un reticolo di dimensioni note e che viene collimato da un sistema ottico di focale nota. L'ingrandimento tra le immagini è pari al rapporto tra le focali.

In modo analogo il numero di ingrandimenti di un sistema afocale si può calcolare misurando l'angolo di uscita dal sistema ottico a partire da un angolo, ad esempio tra due sorgenti puntiformi a distanza infinita, proiettato verso la pupilla di ingresso del sistema ottico. Se l'ingrandimento angolare, ovvero la dimensione dell'immagine, varia allontanandosi dall'asse ottico, si è in presenza di distorsione.

L'apertura si può misurare, per i sistemi afocali, conoscendo l'ingrandimento e misurando la pupilla di uscita o, se è più semplice, traslando un sottile fascio laser parallelamente all'asse ottico davanti al sistema tra i punti di estinzione.

La trasparenza si calcola facendo il rapporto delle intensità di un fascio di luce prima e dopo che ha attraversato il sistema ottico. In molti casi è interessante conoscere la *trasparenza spettrale* o quella *fotopica*. La prima è la trasparenza in funzione della lunghezza d'onda nell'intervallo di interesse e si ottiene facendo in modo che il fascio di luce attraversi un monocromatore per isolare ciascun intervallo spettrale; la seconda si può ottenere allo stesso modo dando poi a ciascuna lunghezza d'onda il peso che corrisponde alla risposta fotopica relativa oppure semplicemente inserendo un filtro fotopico ed effettuando una misura integrata.

La *risoluzione* è la capacità di distinguere i particolari della scena osservata. Le definizioni ed i concetti relativi sono stati dati nel paragrafo 2.2. La misura della risoluzione può essere effettuata mediante trasformata di Fourier dell'immagine di un punto (point spread function), di una linea (line spread function) o di uno spigolo (metà immagine bianca, metà nera).

Il modo più rapido e semplice di effettuare questa misura consiste nel distinguere attraverso il sistema ottico i tratti di un apposito *reticolo di risoluzione*, del tipo di quello rappresentato in figura 6.2.

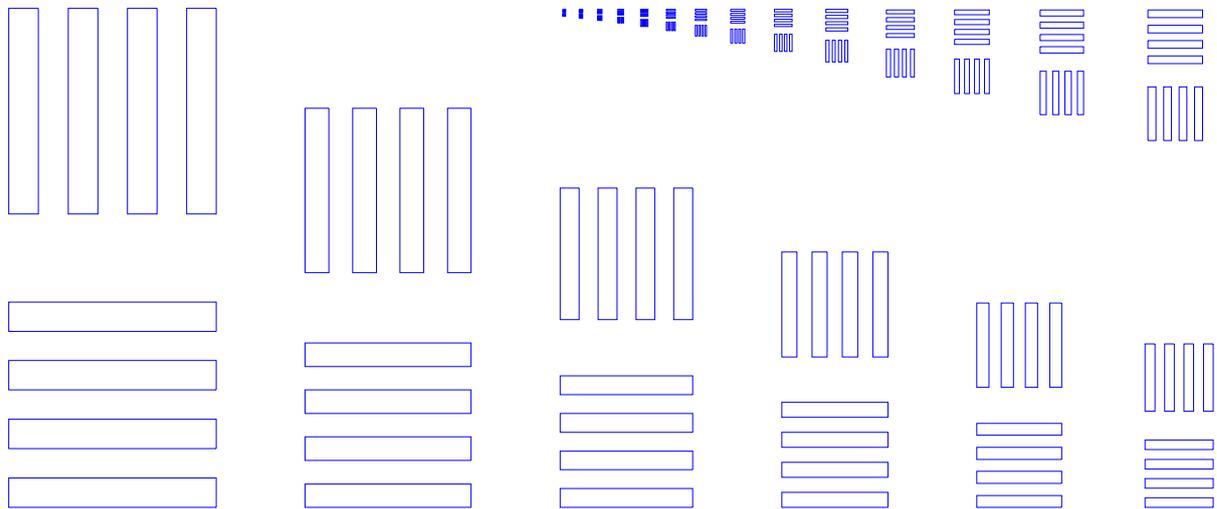


figura 6.2

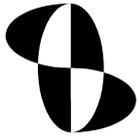
Questa misura in realtà consente di trovare solo il limite di risoluzione, cioè la massima frequenza spaziale risolvibile dal sistema ottico, ma è comunque un sistema utilizzato spesso come passa/non passa. I tratti sono orizzontali e verticali per dar modo di rivelare aberrazioni quali l'astigmatismo o il coma.

Nell'effettuare questa prova, occorre tener presente diversi punti. Innanzitutto il minimo contrasto distinguibile dall'occhio umano (in realtà sarebbe più corretto dire "ricostruibile dalla catena occhio-cervello") è di circa il 5%: perciò la frequenza limite è quella alla quale il contrasto vale 0.05. In secondo luogo i reticoli di risoluzione hanno una distribuzione di intensità rettangolare, mentre per il calcolo della MTF occorrerebbe un profilo sinusoidale: questo favorisce il riconoscimento delle immagini specialmente alle frequenze intermedie (con guadagno di 0.10÷0.15 in termini di MTF), mentre alle più alte il guadagno è poco significativo. In ogni caso nell'effettuare queste prove ci si deve mettere nelle condizioni di illuminazione più favorevoli evitando abbagliamenti e luci troppo basse.

6.4 Strumenti ottici da laboratorio

Interferometro

Molte misure in laboratorio ottico sono basate sul fenomeno dell'interferenza di fronti d'onda. Gli interferometri laser commerciali mettono a disposizione un ramo dell'interferometro il cui fronte d'onda ha circa 100mm di diametro. La configurazione più utilizzata è quella in cui il fronte d'onda è piano con una planarità migliore di $\lambda/20$, ma sono disponibili accessori per ottenere fronti d'onda sferici. Il principio di misura è quello di ricavare ed interpretare la figura di interferenza tra due fronti d'onda



nominalmente della stessa forma: uno di qualità ottima e comunque nota, l'altro da verificare. La figura di interferenza (*interferogramma*) avrà delle zone di intensità maggiore in corrispondenza ai punti in cui la differenza di cammino ottico è in fase, minore ove è presente uno sfasamento. Per avere un'idea della sensibilità di questo strumento, si consideri che la lunghezza d'onda dei laser utilizzati, normalmente helio-neon, è di $0.6328\mu\text{m}$ e che si riescono a stimare facilmente differenze di cammino ottico di un decimo di lunghezza d'onda. I moderni interferometri sono dotati di sistemi di acquisizione ed interpretazione ed elaborazione delle frange con in uscita direttamente i risultati quantitativi relativi agli errori di fronte d'onda.

Autocollimatore

L'autocollimatore è un particolare telescopio che può essere utilizzato per proiettare a distanza infinita un reticolo di riferimento ed osservarne il riflesso da superfici piane lucide. Di solito ha lo schema ottico di un telescopio classico con un beam splitter in grado di separare due reticoli, posti entrambi sul piano focale dell'obiettivo: un reticolo graduato osservabile direttamente dall'oculare ed un secondo reticolo illuminato in modo da poter essere collimato e proiettato verso l'esterno (si veda la figura 6.3).

L'immagine riflessa dalla superficie lucida o da uno specchio si forma sul reticolo di misura e la sua distanza dal centro di questo è pari a:

$$d = 2 \cdot f \cdot \tan \alpha \quad (6.1)$$

ove f è la distanza focale dell'obiettivo ed α l'angolo formato tra la normale alla superficie e la direzione di puntamento dell'autocollimatore.

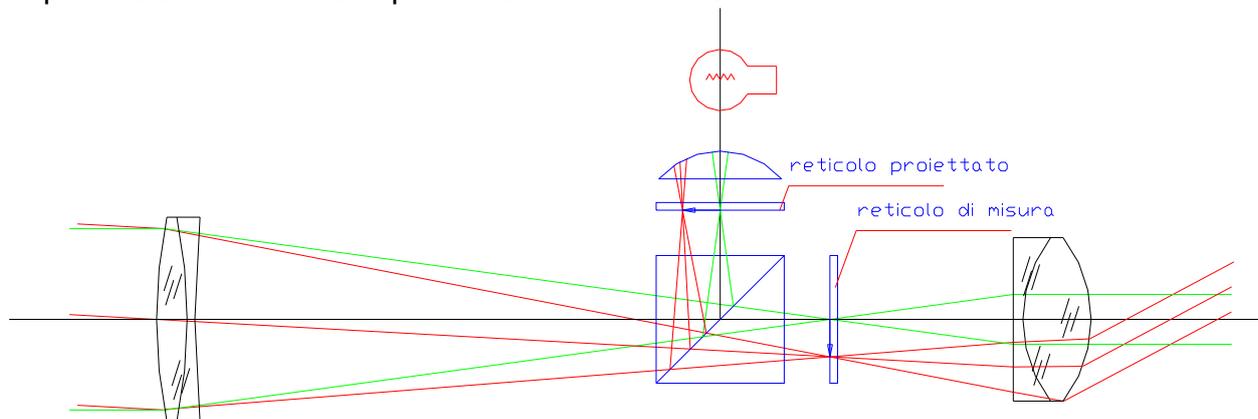
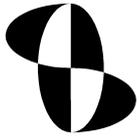


Figura 6.3

Goniometro ottico

Il goniometro ottico è costituito essenzialmente da due autocollimatori indipendenti in grado di ruotare su due assi ortogonali tra loro: uno intorno ad un asse verticale, l'altro intorno ad un asse orizzontale. Gli assi degli autocollimatori convergono verso l'intersezione dei due assi di rotazione. L'ampiezza dei movimenti angolari è leggibile

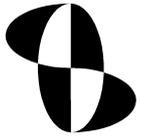


OPTO SERVICE srl

su un nonio graduato. Puntando gli autocollimatori in modo da illuminare le superfici di un oggetto posto nel centro, di solito un prisma, lo strumento consente di misurarne gli angoli relativi.

Focometro

Il focometro si usa per la misura della distanza focale di una lente o di un sistema ottico. Il principio di funzionamento è il seguente: si proietta verso la lente un'immagine di dimensioni note collimata da un sistema ottico di focale nota e si misurano le dimensioni dell'immagine formata dalla lente sotto test. Per agevolare la misura e ridurre gli errori, a questa immagine viene sovrapposto un reticolo graduato posto sul piano focale di un microscopio. Focometri di questo tipo consentono una precisione della misura non migliore di 0.5mm, che comunque nella maggior parte delle applicazioni è sufficiente.



OPTO SERVICE srl