



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

**DIPARTIMENTO  
DI  
INGEGNERIA ELETTRONICA**

Ottica Binaria: introduzione ed applicazioni.

L. Masotti, L. Capineri,  
Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università di Firenze

G. Longobardi, C. Ciamberlini  
Istituto Nazionale di Ottica, Firenze

G.C. Righini, A. Verciani  
Istituto di Ricerca Onde Elettromagnetiche, Firenze

Report. N. 931202



## INDICE

INTRODUZIONE .....	2
1. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E CARATTERISTICHE .....	5
1.1 Reticoli di Dammann .....	6
2. TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE .....	9
2.1 Scrittura con fascio di elettroni .....	10
2.2 Tecniche di scrittura diretta mediante laser. ....	10
2.3 Tecniche di trasferimento del reticolo. ....	11
2.4 Metodi di riproduzione. ....	15
3. APPLICAZIONI .....	17
3.1 Correzione di aberrazione cromatica e controllo della forma del fascio laser .....	17
3.2 Divisione e deviazione di un fascio .....	18
3.3 Somma coerente di fasci laser .....	19
3.4 Sistemi di correlazione ottica .....	20
4. CONCLUSIONI .....	24
BIBLIOGRAFIA GENERALE .....	26

Il fenomeno fisico della diffrazione è generalmente considerato in senso negativo quale elemento limitante le prestazioni dei sistemi ottici, prima fra tutte la risoluzione. L'ottica diffrattiva sfrutta invece le proprietà della diffrazione per modificare in modo flessibile ed efficiente la propagazione della luce.

L'interesse per l'ottica diffrattiva come alternativa ai sistemi ottici tradizionali basati su elementi riflettenti e rifrattivi si è manifestato alla fine degli anni '60 quando è stata dimostrata la possibilità di generare ologrammi con il computer e kinoforme<sup>1</sup> [1]. Lo sviluppo di questo tipo di ottiche ha però incontrato diverse difficoltà per la mancanza di tecnologie adeguate alla fabbricazione di sistemi ottici con dimensioni caratteristiche dell'ordine delle lunghezze d'onda del visibile e del vicino infrarosso.

E' negli anni '70 che le tecnologie costruttive nel campo dell'elettronica ricevono un grosso impulso principalmente per l'introduzione di tecniche di attacco a secco con plasma (*dry etching*) [2] che permettono la fabbricazione dei primi circuiti integrati a media e larga scala d'integrazione e dei primi microprocessori. Tecnologie come la litografia ottica o a fascio elettronico insieme a queste nuove tecniche di attacco rendono possibile raggiungere risoluzioni dell'ordine delle decine di  $\mu\text{m}$  ed anche migliori.

Solo negli anni '80, con il completo sviluppo della tecnologia litografica per microriproduzione, si hanno le prime applicazioni delle ottiche diffrattive. Tra queste, un ruolo molto importante è costituito dai dispositivi *binari*.

Generalmente con questo termine si indicano componenti ottici in cui il coefficiente di trasmissione e/o di riflessione e/o la modulazione di fase sono discretizzati a passi binari. Il termine ottica binaria è stato impiegato in senso più generale da W. Veldkamp del MIT Lincoln Laboratory [3] riferendosi al fatto che l'intero processo di fabbricazione (progettazione, produzione di maschere, trasferimento del reticolo sul substrato) è di tipo binario.

In un primo momento il comportamento di questi elementi ottici è stato analizzato tramite la teoria scalare della diffrazione [4], adatta per trattare sistemi con dimensioni caratteristiche molto maggiori della lunghezza d'onda. Successivamente l'interesse si è concentrato su dispositivi con strutture reticolari di dimensioni comparabili a quelle della lunghezza d'onda impiegata. Per la loro descrizione e progettazione si è quindi reso necessario l'uso della teoria elettromagnetica vettoriale [5], principalmente con lo sviluppo di opportuni modelli al calcolatore.

Negli anni '90 si prospetta un grosso sviluppo per questo tipo di componenti ottici, sia per la disponibilità di processi di fabbricazione avanzati che per l'accresciuta potenza delle macchine di calcolo che permettono l'impiego di modelli teorici sufficientemente accurati per la valutazione dell'efficienza di questi componenti.

---

<sup>1</sup> Le kinoforme sono particolari ologrammi di fase generati al calcolatore che, al contrario degli usuali ologrammi che producono una immagine reale ed una virtuale, sono in grado di ricostruire una sola immagine, concentrando in essa tutta l'energia incidente.

Uno dei principali campi di ricerca nell'ambito delle ottiche binarie è costituito dallo studio di tecniche per migliorare la loro *efficienza di diffrazione*, cioè minimizzare la potenza raccolta negli ordini di diffrazione non di interesse, e per compensare le aberrazioni cromatiche, intrinseche degli elementi diffrattivi, attraverso l'uso di componenti ibridi, cioè parzialmente rifrattivi e parzialmente diffrattivi.

L'ottica binaria è un esempio di trasferimento di tecnologia dall'elettronica all'ottica con nuova ricaduta sulla microelettronica; infatti la costruzione delle prime maschere ad elementi reticolari binari è stata eseguita con processi di incisione ionica sviluppati per la VLSI (integrazione a larghissima scala) mentre ora si possono utilizzare microfasci laser, formati con l'ottica binaria, per riparare i circuiti integrati. La tecnologia VLSI è ora capace di realizzare strutture nell'ordine delle lunghezze d'onda del visibile.

A livello mondiale vi sono numerosi laboratori che lavorano su questo argomento e nell'aprile 1992 a New Orleans si è svolta la prima conferenza internazionale dedicata solo all'ottica diffrattiva; sono però numerose, già da tempo, le conferenze che includono tra i loro temi i componenti ottici diffrattivi, in particolare olografici.

Lo scopo di questo lavoro è quello di fornire al lettore lo stato dell'arte di questa nuova tecnologia le cui ricadute a livello di applicazioni industriali sono promettenti. Inoltre i concetti alla base di questi sistemi possono essere esportati in altre discipline come ad esempio in acustica per quanto riguarda le strutture di trasduttori integrati di ultrasuoni.

Rimandando il lettore interessato ad approfondimenti alla bibliografia riportata alla fine di questo lavoro, di seguito sono riportati i principali settori della ricerca sulle ottiche binarie:

A) Applicazione della teoria vettoriale della diffrazione alla progettazione di nuove ottiche binarie e reticoli a multilivelli e a trattamenti di superficie.

B) Realizzazione dei dispositivi a ottica binaria:

B.1) Ottimizzazione in fase di progettazione con analisi numerica e simulazione al calcolatore.

B.2) Tecnologie di fabbricazione: fotolitografia, scrittura diretta laser o con fascio elettronico, lavorazione meccanica, etc.

B.3) Analisi della dipendenza dell'efficienza del dispositivo dai seguenti fattori: uniformità delle dimensioni del reticolo, effetti ambientali ad esempio termici, stress etc.

B.4) Impiego di materiali attivi come i cristalli liquidi.

C) Sviluppo di applicazioni in campo scientifico ed industriale:

C.1) Correzione delle aberrazioni ottiche di lenti convenzionali.

C.2) Generatori e formatori di fasci laser: microlasers per le riparazioni di circuiti integrati, ottimizzazione del profilo del fascio laser.

- C.3) Generatori di matrici di fasci laser per:  
- eventuali applicazioni in un futuro computer ottico.  
- pompaggio ottico per microlaser.
- C.4) Sistemi ottici complessi di microlenti per:  
- interruttori e deviatori per reti ottiche in guida d'onda.  
- rivelatori a matrice ad alta efficienza.
- C.5) Sistemi di correlazione ottica con filtri a fase binaria per riconoscimento di immagini sia con materiali passivi che con modulatori a cristalli liquidi.

## Bibliografia

- [1] Hariharan P., *Optical holography*, Cambridge University Press, Cambridge 1984
- [2] Boenig H. V., *Fundamentals of plasma chemistry and technology*, Technomic Publishing Company, 1988
- [3] *Binary optics and its applications. An interview with W. Veldkamp*, SPIE - OE Reports n. 67 (1989)
- [4] Born M., Wolf E., *Principles of optics - 6th ed.*, Pergamon press, Oxford, 1980
- [5] Petit R., *Electromagnetic theory of gratings*, Springer, Berlin, 1980

# 1. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E CARATTERISTICHE

Le ottiche binarie sono strutture il cui elemento base è il reticolo di diffrazione. L'interesse per tali ottiche nasce dalla possibilità di intervenire in maniera semplice sulla forma del campo, in modo da ottenere la distribuzione di intensità desiderata tramite una opportuna progettazione delle microstrutture costituenti il dispositivo.

Come detto, l'elemento binario più semplice è il reticolo di diffrazione: in genere la modulazione della funzione di trasmissione è costituita soltanto da una variazione di fase, dando quindi origine ai cosiddetti reticoli di fase. In linea di principio in questo tipo di strutture non si hanno perdite per attenuazione e si tratta dunque di dispositivi in grado di ottenere una notevole efficienza nella trasmissione della potenza incidente.

La modulazione di fase del campo viene indotta da una variazione del cammino ottico nei vari punti del dispositivo che può essere dovuta, ad esempio, ad un cambiamento dello spessore o ad una variazione di indice di rifrazione del materiale. Nel primo caso sono disponibili varie tecniche per la creazione di dispositivi con struttura a rilievo, sia a due che a molti livelli ed anche con profilo continuo. Tali tecniche verranno discusse in seguito. Il secondo metodo è invece particolarmente adatto a dispositivi ottici integrati per ottica guidata, dove l'indice può essere modificato tramite, ad esempio, lo scambio ionico [1, 2, 3].

La progettazione di dispositivi diffrattivi binari avviene usualmente tramite l'impiego di tecniche di analisi numerica (diffusione di errore, *simulated annealing*, *phase retrieval* sono alcune delle tecniche utilizzate [4]-[10]), poiché una soluzione analitica delle equazioni di Maxwell è possibile solo in casi particolari. In pratica anche il trattamento numerico è fattibile solo nei casi a geometria più semplice a causa delle notevoli richieste dal punto di vista computazionale.

Il primo approccio per l'analisi del comportamento di una struttura diffrattiva è costituito dall'impiego della teoria scalare della diffrazione. Tale teoria è applicabile per l'analisi di strutture di passo  $p$  molto maggiore della lunghezza d'onda utilizzata  $\lambda$ , cioè nel limite  $\lambda/p \rightarrow 0$ . In questo caso la luce è deviata di piccoli angoli dalla direzione di incidenza. Se ci si pone a grande distanza dall'elemento in esame, più esattamente ponendosi nella zona di Fraunhofer, l'ampiezza del campo diffratto può essere ottenuta tramite la trasformata di Fourier della trasmittanza del reticolo.

Nel caso in cui il passo della struttura sia dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda, la teoria scalare non è più sufficiente per descrivere correttamente il comportamento del campo diffratto ed è necessario impiegare la teoria vettoriale. E' possibile ottenere soluzioni numeriche delle equazioni di Maxwell per strutture periodiche, ad esempio impiegando la teoria delle onde accoppiate, ma per ottenere una buona accuratezza è necessario tenere conto non solo degli ordini di diffrazione che si propagano oltre il reticolo, ma anche di alcuni ordini evanescenti. Poiché il numero di ordini cresce con il rapporto  $p/\lambda$ , se il periodo del reticolo è maggiore di alcune lunghezze d'onda il problema diviene troppo complesso anche per essere trattato numericamente [11].

E' stato infine proposto l'uso di una teoria scalare estesa per coprire parzialmente la zona in pratica non analizzabile con le teorie scalare e vettoriale [11]. Questa teoria tiene conto dello spessore finito del reticolo descrivendo la

propagazione all'interno di esso tramite l'ottica geometrica e impiegando la teoria scalare per la propagazione all'uscita del dispositivo.

### 1.1 Reticoli di Dammann

Recentemente un notevole interesse è stato rivolto allo studio dei cosiddetti reticoli di Dammann [12]. Si tratta di reticoli di fase binari progettati per suddividere

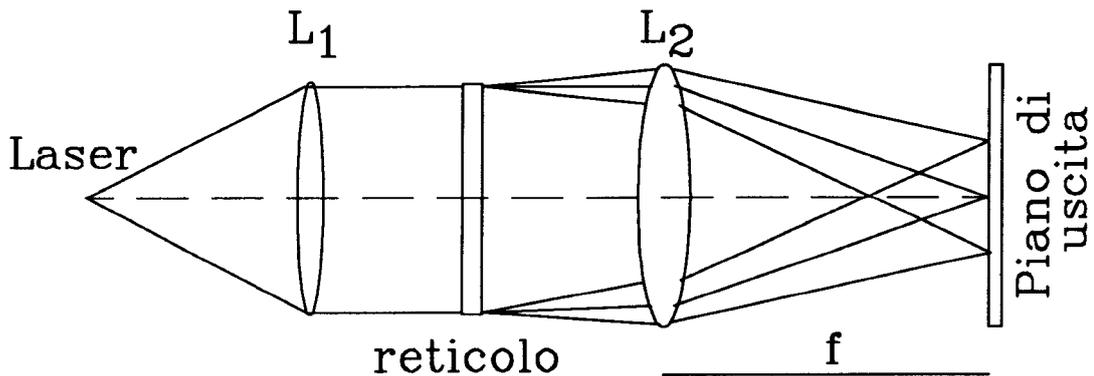


Figura 1.1 Generazione di fasci laser tramite l'impiego di un reticolo binario:  $f$  lunghezza focale della lente  $L_2$ ,  $L_1$  lente di collimazione.

un fascio incidente in  $N$  fasci di uguale intensità (o, per estensione, aventi un desiderato involuppo di intensità). Data la loro importanza analizziamo brevemente il loro comportamento [13].

L'uso di un reticolo di Dammann come divisore di fascio è illustrato in figura 1.1: un fascio collimato viene fatto incidere sul dispositivo e gli ordini diffratti vengono focalizzati da una lente convergente che produce una matrice di punti nel proprio piano focale. Un esempio di reticolo bidimensionale è mostrato in figura 1.2. Se si assume che la trasmissione del reticolo  $G(x,y)$  sia separabile, si può scrivere  $G(x,y)=g_1(x)g_2(y)$ . Per semplicità porremo  $g_1=g_2=g$  e  $G=g(x)g(y)$ .

La funzione  $g(x)$  che descrive il reticolo è periodica, simmetrica e binaria, assume cioè soltanto 2 valori, in questo caso  $+1$  e  $-1$ . L'ampiezza dell' $m$ -mo ordine diffratto nel piano focale è data dalla trasformata di Fourier della trasmissione del reticolo:

Il problema da risolvere è quello di determinare i punti di transizione  $x=(x_1...x_n)$  in modo tale che i primi  $N$  ordini diffratti abbiano la stessa intensità, cioè

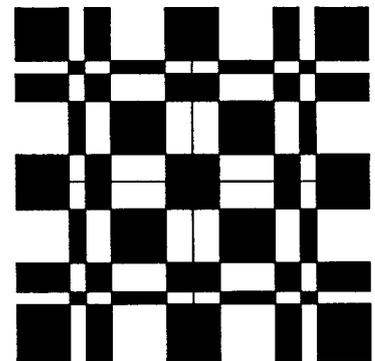


Figura 1.2 Esempio di reticolo Dammann.

$$A_m = 2 \int_0^{0.5} g(x) \cos(2\pi mx) dx \quad (1)$$

risolvere l'insieme di equazioni:

$$I_0(x) = I_{\pm 1}(x) = \dots = I_{\pm N}(x) \quad (2)$$

con  $I_m = IA_m^2$ ,  $I$  Intensita' incidente.

E' possibile mostrare che un tale problema possiede  $2^N$  soluzioni: in generale non è possibile ottenere una soluzione analitica del sistema (2) ma esso può essere affrontato numericamente.

Oltre a ricercare l'uniformità delle intensità in uscita, in genere si ricerca tra le  $2^N$  soluzioni di (2) quella che rende massima l'efficienza del dispositivo: in questo caso il compito è ancora più impegnativo dal punto di vista del tempo di calcolo in quanto la complessità del problema risulta crescere esponenzialmente con  $N$ . La dimensione della matrice di uscita, cioè il numero di fasci ottenibile, ha quindi un limite costituito dalla complessità di progettazione. Un limite ancora più forte è però dato dalle richieste di accuratezza nella realizzazione: è stato analizzato [13,14] come le prestazioni del dispositivo dipendano fortemente dal rispetto dei valori di progetto. La risoluzione ottenibile, la precisione e l'uniformità dello spessore delle microstrutture influenzano pesantemente la distribuzione di intensità degli ordini diffratti: ad esempio, se la variazione di fase non è esattamente  $\pi$  ma ne differisce per un piccolo valore  $R$ , è possibile mostrare che l'uniformità dei fasci di uscita, cioè la loro variazione relativa di intensità è approssimata da:

$$\frac{\Delta I_m}{I_m} \sim \sqrt{2} \frac{2N+1}{\eta} R. \quad (3)$$

ed è quindi necessario curare attentamente la precisione di etching per ottenere in uscita dal dispositivo l'uniformità desiderata. Nel caso di strutture multilivello, è la precisione nell'allineamento delle maschere durante il processo litografico che sembra essere il fattore limitante le prestazioni [14]. Da queste considerazioni si evidenzia la necessità di un processo di fabbricazione accurato e ripetibile.

## Bibliografia

- [1] Salin A., *Use of mask technology in producing high quality, low cost passive optical devices*, SPIE, vol. 1088 pag. 527 (1989)
- [2] Saarinen J., Huttunen J., Vasara A., Turunen J., *Computer-generated guided-wave holography: application to beam splitting*, Opt. Lett., vol. 17(4) pag. 300 (1992)
- [3] Buczek H., Mayor J.-M., Regnault P., *DOE design and manufacture at CSEM*, SPIE, vol. 1574 pag. 48 (1991)

- [4] Piliavin M. A., Foo L. D., Mercado R. I., *Binary diffractive optical element computer aided design*, SPIE, vol. 1211 pag. 50 (1990)
- [5] Wong V. V., Swanson G. J., *Binary optic interconnects: design, fabrication and limits on implementation*, SPIE, vol. 1544 pag. 123 (1991)
- [6] Ekberg M., Larsson M., Hard S., Turunen J., Taghizadeh M., Westerholm J. et al., *Multilevel grating array illuminators manufactured by electron-beam lithography*, Opt. Comm., vol. 88(1) pag. 37 (1992)
- [7] Vasara A., Noponen E., Turunen J., Miller J. M., Taghizadeh M. R., *Rigorous diffraction analysis of Dammann gratings*, Opt. Comm., vol. 81(6) pag. 337 (1991)
- [8] Krackhardt U., Streibl N., *Design of Dammann-gratings for array generation*, Opt. Comm., vol. 74(1,2) pag. 31 (1989)
- [9] Kirk A., Powell K., Hall T., *A generalization of the error diffusion method for binary computer generated hologram design*, Opt. Comm., vol. 92(1,2,3) pag. 12 (1992)
- [10] Kirk A. G., Hall T. J., *Design of binary computer generated holograms by simulated annealing: coding density and reconstruction error*, Opt. Comm., vol. 94(6) pag. 491 (1992)
- [11] Swanson G. J., *Binary optics technology: theoretical limits on the diffraction efficiency of multilevel diffractive optical elements*, MIT Technical Report, (1991)
- [12] Dammann H., Görtler K., *High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms*, Opt. Comm., vol. 3(5) pag. 312 (1971)
- [13] Jahns J., Downs M. M., Prise M. E., Streibl N., Walker S. J., *Dammann gratings for laser beam shaping*, Opt. Eng., vol. 28(12) pag. 1267 (1989)
- [14] Miller J. M., Taghizadeh M. R., Turunen J., Ross N., *Multilevel-grating array generators: fabrication error analysis and experiments*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2518 (1993)

## 2. TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE

In generale i dispositivi ottici binari possono essere fabbricati impiegando le stesse tecnologie usate per la produzione di circuiti elettronici integrati tipo LSI e VLSI. Tuttavia, come vedremo in questo paragrafo, tali tecnologie hanno dovute essere adattate ai requisiti specifici di fabbricazione delle ottiche binarie.

In figura 2.1 è schematizzato il processo di produzione che è costituito dalle seguenti fasi:

1) Progetto del componente diffrattivo: in questa fase vengono definite le specifiche di progetto come la dimensione e la forma dei reticoli, il tipo di materiale etc., fino a giungere alla definizione del reticolo con metodi di calcolo numerico considerando i vari fattori di errore e vincoli di progetto.

2) Fabbricazione della maschera: partendo dalla descrizione matematica del reticolo si deve fabbricare la maschera da sovrapporre al substrato. La tecnica più usata è quella di scrittura a fascio elettronico.

3) Trasferimento della maschera sul substrato: il trasferimento della maschera bidimensionale sul substrato viene effettuato con le diverse tecniche fotolitografiche. Il profilo tridimensionale dell'ottica binaria può essere su due o più livelli.

4) Tecniche di replicazione: questo passo, reso possibile dall'innovazione tecnologica, costituisce un obiettivo fondamentale nel caso di produzione di massa di questi dispositivi.

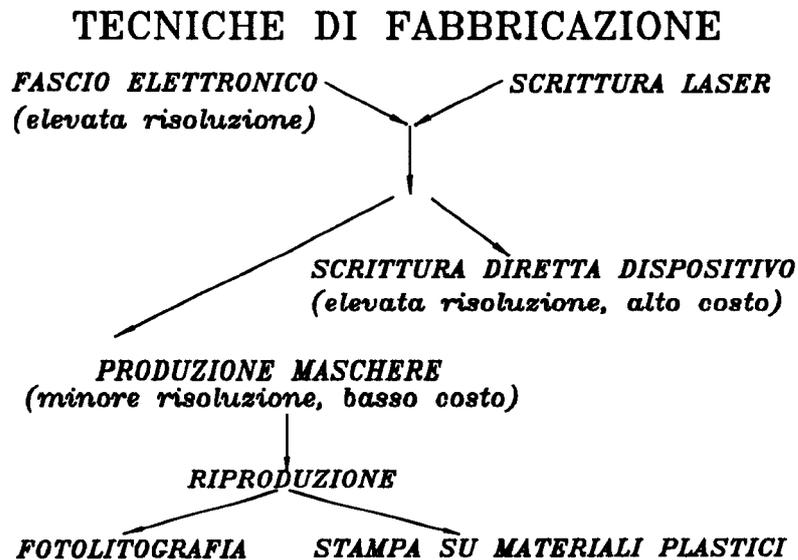


Figura 2.1 Schema del processo di fabbricazione di un dispositivo ottico binario.

Prima di passare ad una analisi più in dettaglio delle varie tecnologie di fabbricazione è utile osservare che al fine di migliorare l'accuratezza della fabbricazione e quindi l'efficienza di diffrazione, si tende oggi ad integrare alcuni passi del processo suddetto. Un esempio è rappresentato dai metodi di scrittura diretta del reticolo sul fotoresist che sostituiscono i passi 2) e 3). Diminuendo il numero di passi non solo si introducono meno errori ma si accelera il tempo di produzione abbassando i costi.

Quindi per alcune delle tecniche descritte in seguito lo schema rappresentato in figura 2.1 è da considerarsi solo un processo logico, in quanto esistono nella pratica delle integrazioni tra le varie fasi. Vediamo ora più in dettaglio le varie fasi della realizzazione di questi dispositivi.

### 2.1 Scrittura con fascio di elettroni

Negli anni '80 si è affermata la tecnologia di produzione delle maschere con fascio di elettroni (*e-beam*) [1]. Questo metodo permette di realizzare maschere con risoluzione di circa  $0.25 \mu\text{m}$ . L'elevata accuratezza di questo metodo lo rende adatto a fabbricare dispositivi ottici come le *zone plates* ed i *reticoli di diffrazione* a passo così piccolo da permetterne il funzionamento fino nel visibile.

Lavori riportati in bibliografia [2] e [3] citano il sistema di scrittura MEBESIII alla Perkin-Elmer o il Philips Beam Writer, che hanno un controllo di posizionamento di circa  $0.1 \mu\text{m}$ .

Questa tecnica è utilizzata per fabbricare delle maschere da considerare gli "originali" (*master*) di elevata qualità e risoluzione, che servono per replicare il reticolo sul substrato con tecniche fotolitografiche.

Negli anni '90 la tecnica a fascio di elettroni è stata modificata per effettuare la scrittura diretta sul fotoresist [4]. Questa tecnica non rientra strettamente nelle tecnologie delle ottiche binarie poiché non esistono livelli binari della maschera. E' adatta alle realizzazioni di profili continui o per approssimare superfici inclinate.

Il principale vantaggio della scrittura diretta sta nel fatto di non dover realizzare nessuna maschera e quindi di evitare il processo di allineamento della varie maschere che introduce inevitabilmente degli errori. La maggiore limitazione di questo metodo è l'elevato tempo di scrittura: con campioni di grandi dimensioni si hanno tempi di esposizione di diverse ore [2]. Grazie alla sua elevata risoluzione è possibile realizzare strutture multilivello submicrometriche. Per formare i vari livelli si varia la dose del fascio elettronico e si adotta un'esposizione parziale (vedi figura 2.2). Il trasferimento sul substrato avviene poi con tecniche tipo RIE (Reactive

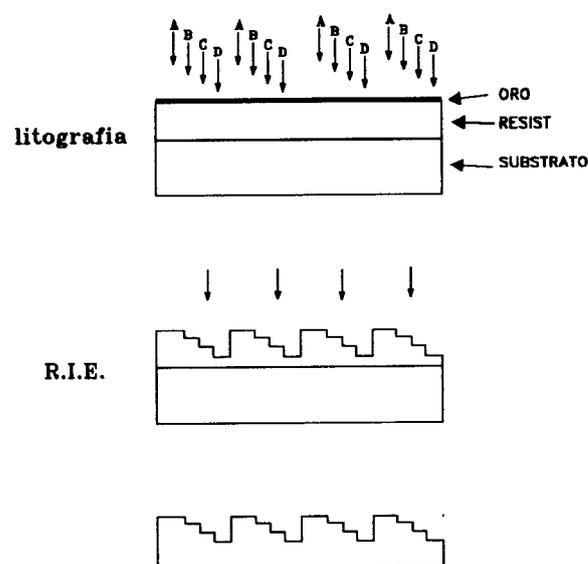


Figura 2.2 Processo di fabbricazione di una struttura multilivello con scrittura a fascio di elettroni.

Ion Etching) che verranno descritte di seguito. Nonostante che la tecnica a scrittura diretta su fotoresist con fascio elettronico permetta di migliorare significativamente la qualità del dispositivo, ancora non è economicamente competitiva per la necessità di ripetere l'intero processo di scrittura per ogni pezzo da produrre.

## 2.2 Tecniche di scrittura diretta mediante laser.

Fra le varie tecniche di fabbricazione alternative a quelle utilizzate per i componenti VLSI, è stata recentemente proposta una tecnica di scrittura sul fotoresist con laser HeCd ( $\lambda=442\text{nm}$ ); il diametro del fascio focalizzato può essere dell'ordine di  $8\ \mu\text{m}$  [5]. Questa tecnica è stata sperimentata per la fabbricazione di matrici di fasci laser con ottiche a profilo continuo, le quali hanno il vantaggio di una maggiore efficienza di diffrazione rispetto alle ottiche diffrattive multilivello.

La scrittura avviene direttamente su uno strato di resist depositato su un substrato di vetro.

Con questo metodo si ottengono spaziature tra le linee di circa  $2\ \mu\text{m}$  con un sistema di posizionamento del substrato con accuratezza dinamica rms di circa  $0.15\ \mu\text{m}$  (vedi figura 2.3). Sebbene questa tecnica risulti più economica di quella con fascio elettronico, i tempi di scrittura sono di circa 6 ore per una piastrina di  $10\times 10\ \text{mm}$ . Il principale vantaggio di questo metodo è l'integrazione della fase di generazione della maschera e di trasferimento del reticolo.

L'altro vantaggio è dato dalla possibilità di costruire un profilo metallico tridimensionale dalla matrice di fotoresist per effettuare riproduzioni a costo contenuto.

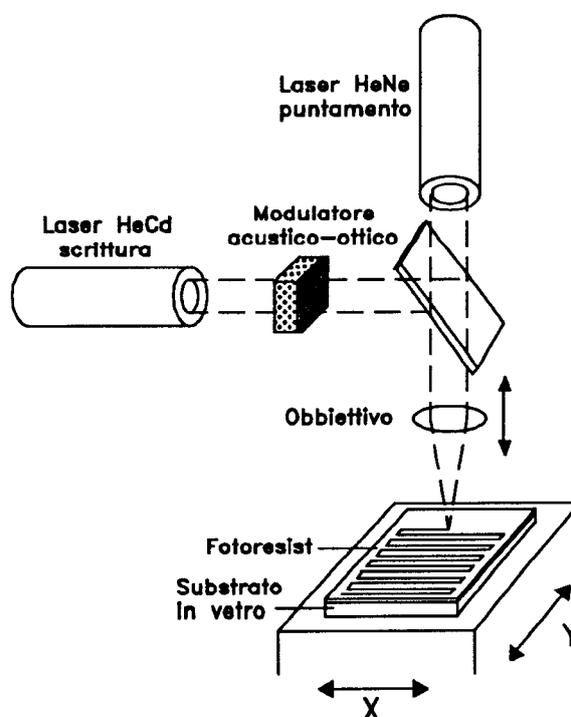


Figura 2.3 Tecnica di scrittura diretta mediante sistema laser

## 2.3 Tecniche di trasferimento del reticolo.

Dopo la fase di scrittura della maschera bidimensionale si deve passare alla effettiva realizzazione del componente binario. Per il trasferimento del reticolo sul substrato sono impiegate le seguenti tecniche:

- I. Attacco chimico con soluzione (*Wet Etching*)
- II. Attacco con plasma (*Plasma Etching*)

- III. Fresatura a fascio di ioni (*Ion Beam Milling*)
- IV. Lavorazione con tornio a punta di diamante
- V. Produzione di un salto d'indice con scambio ionico (*Ion Exchange*)

Le principali caratteristiche delle tecniche di trasferimento ed i relativi meriti per la fabbricazione delle ottiche binarie sono riassunti di seguito, rimandando il lettore alla bibliografia specializzata riportata alla fine di questo paragrafo.

#### I. Attacco chimico con soluzione (*Wet Etching*)

Con questo metodo [3], dopo avere trasferito la maschera su uno strato di  $\text{Si}_3\text{N}_4$  depositato su un substrato di Si, l'attacco del Si avviene con KOH a  $60^\circ$ . Questa tecnica è interessante per la fabbricazione di ottiche rifrattive dove è necessaria la rimozione del Si mantenendo una certa angolazione del piano di rifrazione. Sono stati realizzati dei campioni con circa 500-1000 linee/mm ed efficienza di diffrazione del 70%.

Tra i maggiori inconvenienti di questa tecnica è il controllo della velocità di attacco che è dell'ordine dei 100 nm/min e quindi il controllo della profondità (vedi figura 2.4). Inoltre non è adatta per inclinazioni maggiori di  $20^\circ$ .

Per ottenere risoluzioni migliori si adotta la tecnica di scrittura diretta a fascio elettronico raggiungendo così 1500 linee/mm. Come già detto in precedenza quest'ultimo metodo, se pur accurato, è lungo e costoso e quindi più adatto alla realizzazione di prototipi campione che per una produzione di massa.

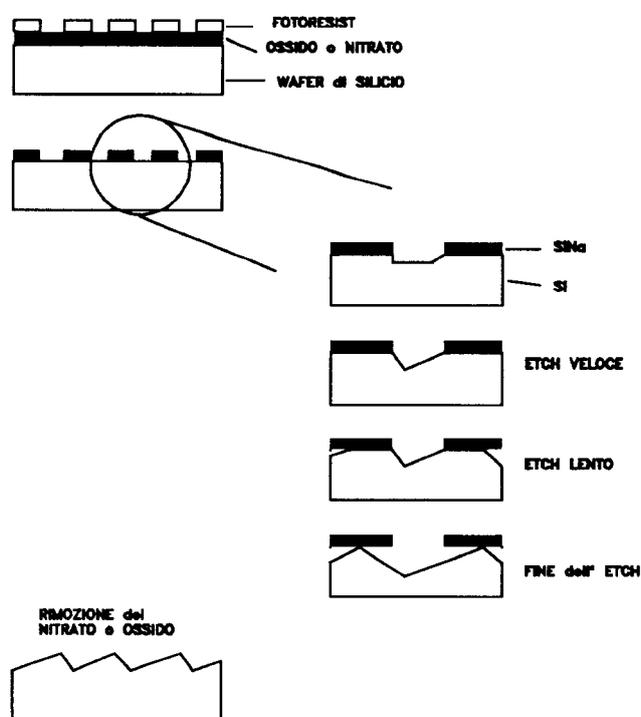


Figura 2.4 Tecnica di fabbricazione con attacco chimico: le varie figure sulla destra mostrano gli effetti dovuti alle difficoltà di controllare la velocità di attacco.

#### II. Attacco con plasma (*Plasma Etching*)

La struttura viene stampata a contatto su fotoresist utilizzando una sorgente UV e quindi trasferita nel substrato tramite un processo di attacco con plasma (vedi figura 2.5). Questo processo permette potenzialmente la realizzazione di strutture a profilo rettangolare con larghezza comparabile alla profondità. Questa tecnica fu

svilupata in alternativa alle tecniche di *sputter etching* le quali erano limitate dal fenomeno della rideposizione del materiale asportato.

La risoluzione ottenibile è inferiore al micron, sebbene vari fattori, tra i quali principalmente la diffrazione in fase di esposizione, limitino praticamente a circa 1 micron la risoluzione per un processo in serie.

Inoltre se il processo viene ripetuto più volte allo scopo di ottenere strutture multilivello, è necessario mantenere la riproducibilità dell'allineamento delle maschere entro stretti margini di tolleranza per non peggiorare la risoluzione del dispositivo.

Data la sua larga diffusione [2, 4, 6, 7] per la produzione di ottiche

diffrattive citiamo anche la tecnica RIE (*Reactive Ion Etching*). Questa tecnica è a secco poiché non necessita di soluzioni chimiche e quindi presenta un minore livello di impurezze introdotte ed è una combinazione di un processo di sputtering con un processo di reazione chimica che trasforma materiale solido in gas, asportabile tramite un sistema di pompaggio. La direzionalità dell'attacco è raggiunta grazie all'autopolarizzazione degli elettrodi della camera dove viene generato il plasma. Infatti nasce una tensione di polarizzazione continua dovuta alla diversa mobilità degli elettroni e degli ioni sufficiente a provocare un bombardamento di ioni sui campioni collegati all'elettrodo negativo.

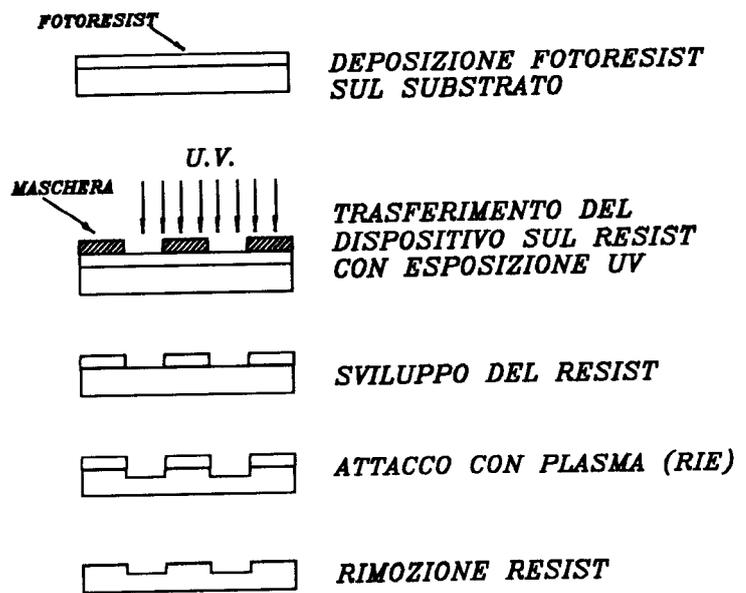


Figura 2.5 Tipico processo di fabbricazione con sviluppo fotolitografico della maschera e trasferimento con attacco con plasma tipo RIE.

### III. Fresatura a fascio di ioni (*Ion Beam Milling*)

Questa tecnica è già stata utilizzata per la produzione di circuiti integrati ma poi abbandonata per la sua lentezza e bassa selettività di attacco [3, 8, 9, 10, 11]. Queste due caratteristiche sono invece sfruttate vantaggiosamente per la fabbricazione delle ottiche binarie. Infatti grazie alla bassa velocità di attacco, 5-10 nm/min, è possibile un preciso controllo della profondità del dispositivo. La bassa selettività fa sì che la velocità di attacco del fotoresist è circa uguale a quella del substrato e quindi rende possibile la riproduzione diretta del reticolo sul substrato eliminando così una fase nel processo di fabbricazione.

Il metodo ha inoltre il vantaggio di essere adatto per tutti i tipi di materiale.

L'inconveniente principale è nella lentezza del processo (ordine dei 60 minuti per 1  $\mu\text{m}$  di spessore).

#### IV. Lavorazione con tornio a punta di diamante

Per completezza accenniamo anche alla lavorazione delle ottiche binarie con tornio a punta di diamante. Sebbene questa tecnologia sia già nota per la fabbricazione di lenti, può essere qui impiegata per realizzare ottiche diffrattive a simmetria cilindrica con costi molto contenuti. Questo metodo è principalmente utilizzato per modificare lenti circolari realizzando una lente asferica con bassa aberrazione cromatica [10].

#### V. Scambio ionico (*Ion Exchange*)

Questa tecnica è stata introdotta [3, 12] per le sue caratteristiche di basso costo e per la possibilità di ricavare direttamente la struttura diffrattiva nel substrato evitando ogni possibilità di contaminazione da polvere. Questa tecnica viene applicata su substrati di vetro con evidenti vantaggi sui costi di fabbricazione. Il campione, su cui è stata realizzata una maschera metallica, generalmente di alluminio, viene immerso in un bagno di un opportuno sale fuso. Applicando un campo elettrico esterno si ha uno scambio di ioni preferibilmente nella direzione del campo elettrico. Lo scambio di ioni varia l'indice di rifrazione nelle zone non coperte dalla maschera

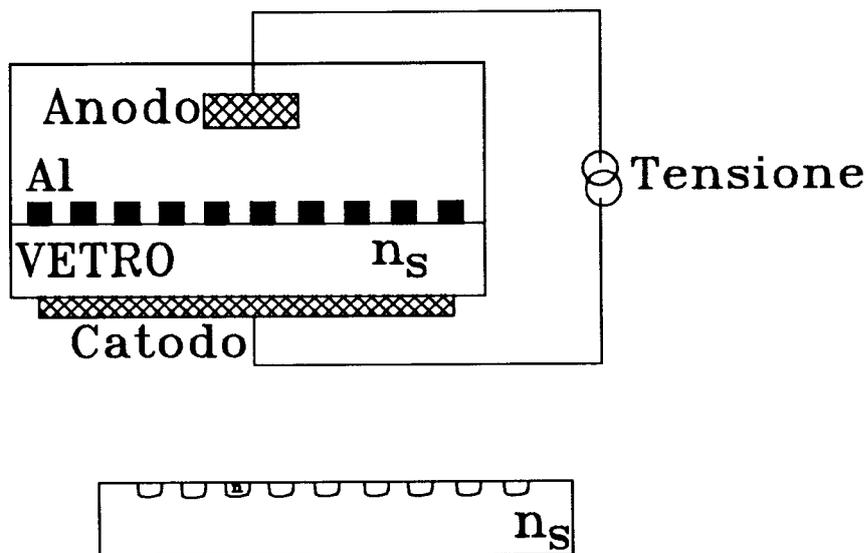


Figura 2.6 Tecnica di fabbricazione con scambio ionico:  $n_s$  indice di rifrazione del substrato,  $n$  indice di rifrazione del reticolo prodotto dallo scambio ionico.

di Al (vedi figura 2.6). La maschera viene poi rimossa con le usuali tecniche con soluzione acide. Con tensioni dell'ordine dei 50-100 V e con tempi di esposizione dell'ordine dei 60 minuti si sono realizzati campioni con risoluzione di 200 linee/mm con variazioni locali di fase di circa  $\lambda/3$ .

Concludendo, ricordiamo che per quanto riguarda la fattibilità di reticoli binari, un'analisi riportata da Jahns et al. [13] mostra che, nel caso della generazione di matrici, è richiesta una notevole precisione nella fabbricazione del reticolo; in particolare è necessario mantenere la profondità di attacco entro circa l'1% del valore di progetto e condizioni ancora più restrittive sono poste sull'uniformità spaziale del dispositivo.

#### 2.4 Metodi di riproduzione.

Esistono diverse tecniche di riproduzione in serie. Le più promettenti sono la riproduzione tramite stampa su materiali plastici (*casting* o *embossing* o *moulding*); in queste tecniche viene prodotta una copia in metallo della struttura da replicare che viene poi impiegata per stampare il dispositivo su film termoplastici.

La costruzione di una matrice in metallo avviene mediante evaporazione di Ag sul fotoresist. Poi effettuando una nichelatura si ottiene uno strato di circa 100  $\mu\text{m}$  di spessore ed infine quest'ultimo viene separato dal fotoresist.

I metodi principali di riproduzione su film termoplastici sono:

1. Fusione con colata (*Casting*)
2. Stampaggio con forma a caldo (*Hot embossing stamping*)
3. Stampaggio a rullo caldo (*Hot embossing rolling*)
4. Fusione ad iniezione di materiale (*Injection moulding*)

Mentre le prime due tecniche sono adatte per effettuare riproduzioni di alta qualità in laboratorio partendo da matrici metalliche di 50x50 mm le ultime due sono più adatte per una produzione di massa a basso costo. In particolare la tecnica di stampaggio a rullo caldo ha dimostrato di poter riprodurre velocemente ( $1 \text{ m}^2/\text{s}$ ) microstrutture dell'ordine di 1  $\mu\text{m}$  ad un costo di circa  $\$1/\text{m}^2$ . La tecnica con fusione ad iniezione di materiale è ormai ben consolidata perché già impiegata nella produzione di compact disk con elevata qualità, ma i costi per adattarla a questo tipo di oggetto sono ancora troppo elevati per pensare ad una produzione di massa.

#### Bibliografia.

- [1] Swanson G. J., Veldkamp W. B., *Binary lenses for use at 10.6 micrometers*, Opt. Eng., vol. 24(5) pag. 791 (1985)
- [2] Logue J., *Fabrication of binary optics using electron beam lithography*, SPIE, vol. 884 pag. 95 (1988)
- [3] Buczek H., Mayor J.-M., Regnault P., *DOE design and manufacture at CSEM*, SPIE, vol. 1574 pag. 48 (1991)
- [4] Walker S., Jahns, Li, Mansfield, Mulgrew, Tennant, Roberts, West, Ailawadi, *Design and fabrication of high-efficiency beam splitters and beam deflectors for integrated planar micro-optic systems*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2494 (1993)

- [5] Gale M. T., Rossi M., Schütz H., Ehbets P., Herzig H. P., Prongué D., *Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2526 (1993)
- [6] Wong V. V., Swanson G. J., *Binary optic interconnects: design, fabrication and limits on implementation*, SPIE, vol. 1544 pag. 123 (1991)
- [7] Wong V. V., Swanson G. J., *Design and fabrication of a Gaussian fan-out optical interconnect*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2505 (1993)
- [8] Rastani K., Marrakchi A., Habiby S. F., Hubbard W. M., Gilchrist H., Nahory R.E., *Binary phase Fresnel lenses for generation of two-dimensional beam arrays*, Appl. Opt., vol. 30(11) pag. 1347 (1991)
- [9] Rossnagel S.M., Cuomo J.J., Westhood W. D., *Handbook of plasma processing technology, Fundamentals, Etching, Deposition and Surface Interactions*, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey USA
- [10] Carts Y.A., *Microelectronics methods push binary optics frontiers*, Laser focus World magazine, vol. 28 n. 2, pag 87-95 (1992)
- [11] Schuegraf K. K., *Handbook of thin film deposition processes and techniques. Principles Methods and applications*, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey USA
- [12] Salin A., *Use of mask technology in producing high quality, low cost passive optical devices*, SPIE, vol. 1088 pag. 527 (1989)
- [13] Jahns J., Downs M. M., Prise M. E., Streibl N., Walker S. J., *Dammann gratings for laser beam shaping*, Opt. Eng., vol. 28(12) pag. 1267 (1989)

### 3. APPLICAZIONI

I dispositivi ottici binari sono molto interessanti per il loro possibile impiego in molteplici applicazioni:

- Correzione di aberrazioni ottiche.
- Controllo della forma del fascio per ottimizzare l'efficienza di accoppiamento laser-guida d'onda.
- Divisione di un fascio laser per interconnessioni ottiche nello spazio o in guida, o per accoppiatori a stella laser-fibra.
- Deviazione di fasci per la realizzazione di dispositivi micro-ottici integrati planari.
- Ricombinazione di fasci per effettuare la somma coerente di fasci laser.
- Elementi di sistemi per la correlazione di segnali ottici in tempo reale.

In particolare, un gran numero di lavori riportati in letteratura riguarda la progettazione e l'impiego di reticoli binari per controllare la forma del fascio o per effettuare la divisione di un fascio, ad esempio in una matrice  $N \times N$  di fasci sia di intensità uniforme e no. Come già detto, poichè tali dispositivi si prestano alla realizzazione tramite tecniche tipiche della microelettronica, essi risultano competitivi rispetto agli analoghi sistemi non diffrattivi, laddove esistenti.

#### 3.1 Correzione di aberrazione cromatica e controllo della forma del fascio laser

Fin dall'inizio degli anni '80 sono stati usati dispositivi diffrattivi per correggere le aberrazioni cromatiche presenti nell'ottica convenzionale. Ad esempio sono state costruite delle lenti binarie per formare un sistema telescopico [1] per la visione nell'infrarosso (IR) che utilizza come sorgente luminosa un laser a  $\text{CO}_2$ .

Un fattore determinante in un qualsiasi sistema ottico è la efficienza di diffrazione. Lowen et al. [2] hanno calcolato le curve di efficienza di diffrazione in funzione del rapporto  $\lambda/p$  per le polarizzazioni P ed S (parallela e perpendicolare). Da queste curve risulta che, per polarizzazione S, l'efficienza di diffrazione è superiore al 95% per  $\lambda/p$  compreso tra 0.8 e 1.8 quando il parametro  $a$  (illustrato in figura 3.1) e la profondità  $h$  del reticolo sono pari, rispettivamente, a 0.5 ed a 0.25 del periodo  $p$ .

Weldkamp et al. hanno ottenuto, sperimentalmente, efficienze pari al 84%, 87.1%, 88.5% e 94.7% con un fascio laser a  $\text{CO}_2$ , polarizzato S, con profondità del reticolo 1.5, 1.8, 2.0 e 2.1  $\mu\text{m}$  rispettivamente, non raggiungendo i valori teorici predetti ma avvicinandosi in maniera soddisfacente.

Questo tipo di lente inoltre non presenta aberrazione cromatica, infatti misure della dimensione della macchia focale con in ingresso un fascio gaussiano non rivelano differenze significative tra una lente piana reticolare binaria e una lente parabolica [3].

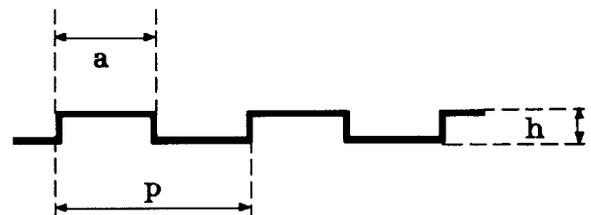


Figura 3.1 Definizione dei parametri del reticolo:  $p$  passo,  $h$  altezza,  $a$  rapporto vuoto/pieno nel passo.

Un altro settore di ricerca molto sviluppato, in particolare al Massachusetts Institute of Technology (MIT), è inerente all'utilizzo dell'ottica binaria per il controllo della forma e del profilo dei fasci laser. Una ricerca ha avuto come obiettivo la messa a punto di un sistema laser-radar nel quale il profilo del fascio laser doveva essere adattato a quello del rivelatore per aumentare l'efficienza del sistema.

Questo sistema di formazione del fascio si basa sul teorema di Helmholtz della reciprocità ottica [4], per il quale una distribuzione rettangolare di intensità nel campo lontano è correlata, tramite la trasformata di Fourier, al profilo nel campo vicino che in tal caso deve essere  $\text{sinc}^2(x) = \sin^2 x / x^2$ . Quindi un sistema focale piano può convertire il fascio laser gaussiano di ingresso in uno con una distribuzione di intensità del tipo a  $\text{sinc}^2(x)$ .

Con i sistemi di formatori con reticoli binari a riflessione, sono state ottenute delle buone efficienze di diffrazione (81%) [5, 6] e dei fasci con profilo rettangolare; tale profilo si deteriora se si utilizza un dispositivo binario a trasmissione ma aumenta l'efficienza di diffrazione (fino al 90%) [7].

Recentemente [8] sono stati messi a punto sistemi per la trasformazione di un fascio laser circolare in uno a forma quadrata con intensità uniforme per pompaggio di laser a colorante, avendo solitamente questi ultimi delle finestre di ingresso con forma rettangolare.

### *3.2 Divisione e deviazione di un fascio*

Un altro settore di ricerca in forte sviluppo è la generazione di matrici di fasci laser tramite reticoli binari. Si tratta di reticoli per i quali la variazione di fase indotta assume solo due valori, in genere 0 e  $\pi$ . Progettando opportunamente la posizione e la larghezza delle strutture che compongono il reticolo è possibile rendere uguale l'intensità dei vari ordini di diffrazione. In particolare, è possibile rendere uguale l'intensità dei primi N ordini diffratti e sopprimere quasi del tutto i successivi; inoltre sovrapponendo due reticoli ortogonali fra loro (reticoli separabili) si ottiene una matrice NxN di fasci lasers.

Una matrice di fasci di uguale intensità può essere realizzata direttamente con un reticolo bidimensionale, cioè con reticoli non separabili. Come già illustrato in figura 1.1, dapprima il reticolo genera un certo numero di fasci che vengono poi focalizzati da una lente il cui piano focale anteriore si trova sul dispositivo binario. La progettazione di tali strutture richiede l'utilizzo delle trasformate di Fourier, poiché nella teoria scalare della diffrazione il campo lontano è dato, a parte un fattore di fase che non interviene nel calcolo dell'intensità, dalla trasformata di Fourier della distribuzione di ampiezza sul reticolo.

Sono state proposte varie soluzioni per la progettazione di questi reticoli binari generatori di matrici. Nel caso di reticoli unidimensionali il progetto può essere ottimizzato utilizzando la teoria proposta da Prongué et al. [9], mentre nel caso bidimensionale di reticoli non separabili risulta utilizzabile la teoria di Ehbets et al. [10]. In fase di progettazione di questi reticoli può essere ricercato un compromesso tra un'alta efficienza di diffrazione e l'uniformità dei singoli fasci componenti la matrice.

Esistono varie tecniche di ottimizzazione del progetto, le due più utilizzate sono: la simulated-annealing [11] e la Gerchberg-Saxton a recupero di fase [12].

Tuttavia è mostrato sperimentalmente che non si riesce mai a raggiungere i limiti teorici sull'uniformità dei fasci a causa principalmente di errori di fabbricazione quali la non uniformità della profondità dei canali e il disallineamento delle varie maschere [13]. Nonostante ciò, partendo da progetti che prevedono la possibilità di costruire reticoli per generare matrici fino a 11x11 fasci, sia separabili che non, con un'efficienza pari al 95.5% e una disuniformità dei fasci minore del 10%, si riesce ad ottenere in campioni reali efficienza uguale al 94% con un errore del  $\pm 8\%$  sull'uniformità dei fasci [14].

E' stato messo a punto anche un sistema per realizzare matrici molto grandi (maggiori di 100x100) con metodi relativamente semplici. Questi metodi utilizzano due reticoli Damman, realizzati per piccole matrici (es. 8x8, 9x9, etc.) posti in sequenza sui piani focali anteriori di due lenti convergenti [15]. Con questo metodo sono state ottenute matrici 81x81 con efficienza pari al 50% e uniformità del 14% contro i valori teorici di 70% e 0.4% rispettivamente.

Varie sono le possibilità di impiego di tali dispositivi:

- a) Migliorare l'efficienza dei rivelatori a matrici, concentrando l'energia incidente sulla sola zona attiva dei rivelatori;
- b) Interconnessione ottica, sia nello spazio libero che in forma integrata planare;
- c) Accoppiamento di laser con cavi in fibra ottica [16]. Al riguardo di quest'ultimo impiego occorre osservare che è stato progettato e realizzato un reticolo con cui si ottiene una matrice esagonale con 37 fasci [17]. Concettualmente questa matrice viene realizzata progettando una matrice quadrata, sopprimendo i fasci che si trovano agli angoli opposti e poi operando una trasformazione lineare per ottenere una forma esagonale.

Per mezzo dei reticoli binari multilivello sono stati progettati e realizzati anche dei deviatori e divisori di fascio. Alcuni ricercatori [18] hanno integrato in un unico dispositivo ottico questi componenti binari ottenendo così una matrice di fasci collimati che non richiede l'uso di una lente per operare nel campo lontano. Le misure sperimentali ottenute per una lunghezza d'onda di  $9.23 \mu\text{m}$  danno un'efficienza di diffrazione del 77% del sistema complessivo ed una buona uniformità per i vari fasci.

### *3.3 Somma coerente di fasci laser*

Come si è visto nel paragrafo precedente, si possono progettare reticoli binari di fase per ottenere delle matrici di fasci laser di uguale potenza usando una sola sorgente. Questo impiego ha suggerito lo studio della possibilità inversa, ovvero la somma di un certo numero di fasci laser coerenti; infatti un reticolo progettato per suddividere un unico fascio laser in N fasci di uscita può essere utilizzato in maniera duale per la somma di N laser in un fascio più potente (figura 3.2).

E' noto che la maggior parte dei lasers sono, individualmente, limitati in radianza assoluta da varie restrizioni sia fisiche che tecniche: la principale è probabilmente la difficoltà di estrarre dal sistema laser il calore prodotto. Questa limitazione è nota sia per i laser a HeNe che per quelli a semiconduttore. Questi due tipi di sorgenti sono stati impiegati per la caratterizzazione sperimentale dei reticoli binari.

Tre sono le richieste principali per un efficiente dispositivo di somma laser:

- i) Buon accoppiamento ottico delle sorgenti lasers, quindi stessa  $\lambda$  e polarizzazione ed uguale radianza;
- ii) Conservazione della coerenza fra i vari laser per ottenere un fascio somma coerente;
- iii) Relazione ottimale di fase reciproca fra i vari laser, da determinare per massimizzare la potenza laser in uscita.

### SOMMA COERENTE A CAVITA' COMUNE

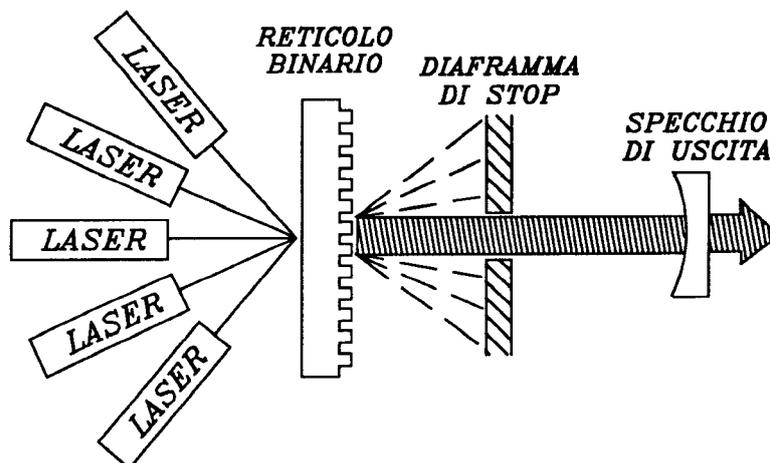


Figura 3.2 Somma coerente di fasci laser con ottiche binarie.

Le sorgenti da sommare vengono fatte incidere sulla struttura binaria con angoli corrispondenti ai vari ordini di diffrazione del reticolo. La cavità "laser somma" è chiusa da uno specchio di uscita ed un diaframma interno è utilizzato per lo stop dei modi negli ordini di diffrazione diversi dallo zero, cioè seleziona il singolo modo.

L'efficienza di tali dispositivi è definita come il rapporto tra la potenza laser effettivamente ottenuta in uscita e quella della somma teorica delle singole sorgenti. Presso i laboratori del MIT sono stati realizzati sistemi ottici per la somma coerente di laser a HeNe e a semiconduttore; è stata raggiunta un'efficienza del 68% sommando 6 laser ad Arsenurio di Gallio [19] e un'efficienza dell'83% sommando 7 laser ad Elio-Neon operanti a  $\lambda=3.39 \mu\text{m}$  [20].

Un elemento determinante per ottenere una buona efficienza, come già detto, è l'ottimizzazione della fase reciproca dei laser. I migliori risultati previsti teoricamente e verificati sperimentalmente si ottengono con laser con fasi simmetriche rispetto a quello incidente sul reticolo binario nell'ordine zero con sfasamenti relativi pari a 0 o  $\pi$  [19].

Questo accoppiamento laser è molto importante per tutti quei sistemi in cui è richiesta una radiazione laser con elevata potenza, ad esempio le comunicazioni ottiche, l'elaborazione di immagini, gli effetti ottici nonlineari etc.; questa soluzione può essere di rilevanza economica, dato che consente di ottenere elevate potenze ottiche partendo da sorgenti discrete di basso costo.

### 3.4 Sistemi di correlazione ottica

In generale i sistemi di correlazione ottica sono impiegati per riconoscere un segnale ottico (in particolare un'immagine) mescolato fra altri. Il riconoscimento avviene appunto tramite la funzione matematica di correlazione [21].

I sistemi di elaborazione ottica offrono il vantaggio di una elevata velocità di elaborazione rispetto a quelli elettronici tradizionali anche con immagini ad elevata risoluzione in quanto operano in parallelo. Per questo motivo sono di particolare interesse in tutte quelle applicazioni industriali dove è richiesta un'elaborazione in tempo reale. Oggi sono usualmente impiegati sistemi di correlazione che operano con luce coerente, tuttavia l'ampio spettro di frequenze disponibili operando in luce bianca suggerisce il loro utilizzo per elaborare immagini a colori [22]. In tale caso, però, la limitata coerenza spaziale riduce la risoluzione delle immagini che possono essere correlate [23].

Un sistema di correlazione molto noto e utilizzato è il correlatore di Vander-Lugt [24] a 4 distanze focali (figura 3.3); l'operazione di correlazione può essere eseguita utilizzando diversi tipi di filtri:

- i) Filtri classici adattati: filtri di fase e ampiezza.
- ii) Filtri di sola fase POF (*Phase Only Filters*).
- iii) Filtri di sola ampiezza AOF (*Amplitude Only Filters*).

I filtri classici adattati hanno minori prestazioni rispetto agli altri due tipi per quanto riguarda l'altezza del picco di correlazione, il rapporto segnale-rumore, la distinzione tra picco di correlazione e quello di autocorrelazione; questo anche utilizzando nuovi tipi di filtri classici come quelli a complessità ternaria [24]. I filtri di fase hanno migliori caratteristiche rispetto a quelli di ampiezza sia in termini di ampiezza del picco (circa 200 volte maggiore) che del rapporto segnale-rumore della

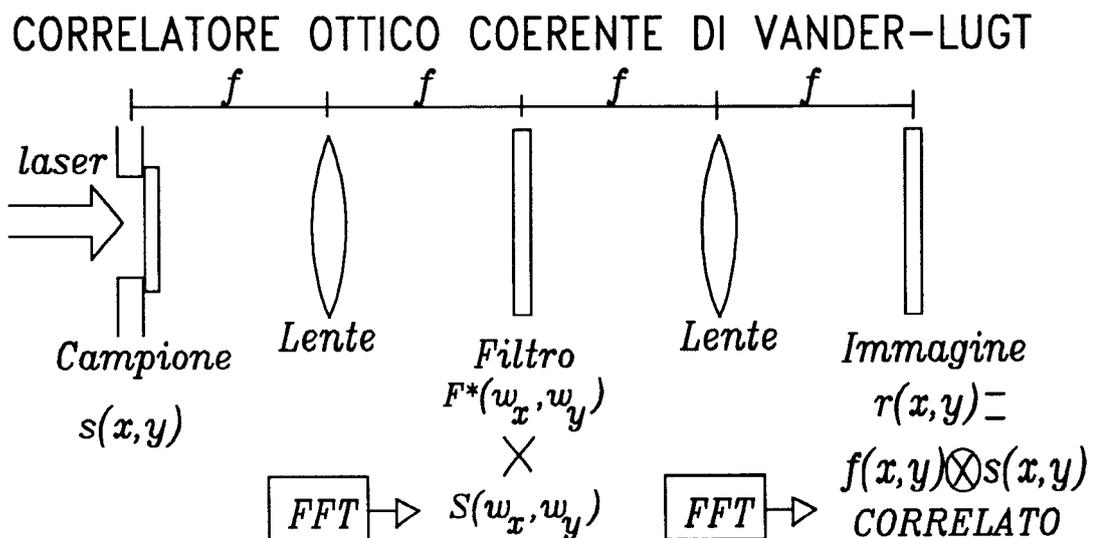


Figura 3.3 Correlatore ottico di Vander-Lugt a quattro lunghezze focali.

funzione di correlazione, e anche una maggiore efficienza di diffrazione (5 volte circa) [25].

Un ulteriore sviluppo dei filtri di fase, importante grazie alla semplificazione del processo di fabbricazione, è costituito da quelli a fase binaria. Questi sono ottenuti con una discretizzazione su due livelli dello spettro di fase dell'immagine campione del filtro e dell'immagine da riconoscere. Ad esempio se il campione può essere rappresentato da una funzione  $g(x,y)$  con trasformata di Fourier  $G(u,v)$ , separando l'ampiezza dalla fase si ha:

$$G(u,v) = |G(u,v)|e^{i\phi G(u,v)} \quad (4)$$

Quindi un filtro a fase continua è costruito con la seguente funzione:

$$G_{\phi}(u,v) = \frac{G^*(u,v)}{|G(u,v)|} = e^{-i\phi G(u,v)} \quad (5)$$

dove  $*$  indica il complesso coniugato.

Questa funzione può essere discretizzata in vari modi per ottenere una funzione a due livelli in dipendenza della soglia imposta; la formula più utilizzata [26] è:

$$G_{B\phi}(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{se } \text{Re}\{G(u,v)\} \geq 0 \\ 1 & \text{se } \text{Re}\{G(u,v)\} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

La teoria e le simulazioni al computer del comportamento dei filtri binari di fase indicano che si possono raggiungere alti valori dei picchi della funzione di correlazione del segnale [27]. Ad esempio l'efficienza di diffrazione è il 19% contro il 3% dei filtri a sola ampiezza, anche se per quelli a fase continua si arriva anche al 100% [28].

Tuttavia i sistemi di correlazione basati sui filtri binari di fase presentano alcune limitazioni. Tra queste una importante è l'errore di classificazione che si genera, anche in assenza di rumore ottico del segnale di ingresso, nel caso in cui l'immagine da indagare sia simmetrica [29]. Un altro fattore limitante è il minore rapporto segnale-rumore rispetto a quelli a fase continua (anche 5 volte minore) [30]. D'altro canto la tecnica di fabbricazione e progettazione di questi filtri binari è sicuramente più semplice, rapida, controllabile, accurata e riproducibile rispetto a quella per i filtri a fase continua.

Lo sviluppo di tecnologie di fabbricazione delle ottiche binarie su materiali passivi ed attivi ha permesso la realizzazione di correlatori ottici che impiegano:

- i) Filtri binari su lamine di quarzo [31], con la tecnica di integrazione a larga scala.
- ii) Filtri binari programmabili con dispositivi magneto-ottici [29] e/o a cristalli liquidi [32].

Mentre i secondi hanno caratteristiche di funzionamento inferiori rispetto ai primi, hanno però il vantaggio della flessibilità della maschera del filtro, cioè possono essere riprogrammati facilmente, come nel caso dell'immagine sul cristallo liquido. Tuttavia essi sono ancora limitati dalla bassa risoluzione spaziale raggiungibile con gli attuali processi di fabbricazione (pixel con dimensioni superiori a 100  $\mu\text{m}$ ).

Possibili applicazioni dei correlatori ottici sono:

- i) Riconoscimento di strutture nel campo industriale, medico e militare [33].
- ii) Riconoscimento automatico dei difetti e metrologia sempre in campo industriale.

Lo sviluppo di tali sistemi deve tuttavia tenere conto degli altri sistemi di correlazione quali le reti neurali o quelli implementati con tecnologie ottiche-elettroniche; inoltre per la diffusione dei sistemi ottici di elaborazione deve essere vantaggioso anche il confronto costo prestazioni della componentistica ottica rispetto a quella elettronica.

## Bibliografia

- [1] Swanson G.J., Weldkamp W.B. *Binary lenses for use at 10.6 micrometers* Opt. Eng., vol. 24, pag. 791 (1985).
- [2] Loewen E. G., Nevière M., Maystre D., *Efficiency optimization of rectangular groove gratings for use in the visible and IR regions*, Appl. Opt., vol. 18(13) pag. 2262 (1979)
- [3] Weldkamp W.B., Swanson G.J., Shaver D.C. *High efficiency binary lenses* Opt. Comm., vol. 53, pag. 353 (1985).
- [4] Born M., Wolf E., *Principles of optics - 6th ed.*, Pergamon press, Oxford, 1980
- [5] Weldkamp W.B. *Developments in laser-beam control with holographic diffraction gratings* Proc. of Soc. Photo-Opt Instr. Eng., vol. 255, pag. 136 (1980).
- [6] Weldkamp W.B. *Laser beam profile shaping with interlaced binary diffraction gratings* Appl. Opt., vol. 21, pag. 3209 (1982).
- [7] Weldkamp W.B. Kastner C.J. *Beam profile shaping for laser radars that use detector arrays* Appl. Opt., vol. 21, pag. 345 (1982).
- [8] Sweatt W.C. *Transforming a circular laser beam into a square or trapezoid-almost* Opt. Eng., vol. 31, pag. 245 (1992).
- [9] Prongué D., Herzig H.P., Dändliker R., Gale M.T. *Optimized Kinoform Structures for highly efficient fan-out elements* Appl. Opt., vol.31, pg.5706 (1992).
- [10] Ehbets P., Herzig H.P., Prongué D., Gale M.T. *High efficiency continuous surface-relief gratings for two-dimensional array generation* Opt.Lett., vol.17 pg. 908.
- [11] Kirpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. *Optimization by simulated annealing* Science, vol 220, pag. 671 (1983).
- [12] Gerchberg R.W., Saxton W.O. *A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures* Optik, vol. 35, pag. 237 (1972).
- [13] Wong V.V., Swanson G.J. *Design and fabrication of Gaussian fan-out optical interconnect* Appl. Opt., vol 32, pag. 2502 (1993).
- [14] Gale M.T., Rossi M., Schültz H. Ehbets P. Herzig H.P., Prongué D. *Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation* Appl. Opt., vol 32, pag. 2526 (1993).

- [15] McCormick F.B., *Generation of large spot arrays from a single laser beam by multiple imaging with binary phase gratings* Opt. Eng., vol. 28, pag. 299 (1989).
- [16] Killat U., Rabe G., Rave W. *Binary phase gratings for stars couplers with high splitting ratio* Fiber and Integr. Opt., vol. 4, pag. 159 (1982).
- [17] Roberts N.C., Kirk A.G., Hall T.J. *Binary phase gratings for hexagonal array generation* Opt. Comm., vol. 94, pag. 501 (1992).
- [18] Walker S.J., Jahns J., Li L., Mansfield W.M., Mulgrew P., Tennant D.M., Roberts C.W., West L.C., Ailawadi N.K. *Design and fabrication of high-efficiency beam splitters and beam deflectors for integrated planar micro-optic system* Appl. Opt., vol. 32, pag. 2494 (1993).
- [19] Leger J.R., Swanson G.J., Weldkamp W.B. *Coherent laser addition using binary phase gratings* Appl. Opt., vol. 26, pag. 4391 (1987).
- [20] Weldkamp W.B., Leger J.R., Swanson G.J., *Coherent summation of laser beams using binary phase gratings* Opt. Lett., vol. 11, pag. 303 (1986).
- [21] Casasent D. *Coherent optical pattern recognition* Proc. IEEE, vol. 67, pag. 813 (1979).
- [22] Sirotti P. *Correlazione ottica* Alta Frequenza, vol. 3, pag. 231 (1991).
- [23] Yu F.T.S. *White-light optical signal processing* Ed. J. Wiley (1985).
- [24] Dickey F.M., Vijaya Kumar B.V.K., Romero L.A., Connelly J.M. *Complex ternary matched filters yielding high signal-to-noise ratios* Opt. Eng., vol. 29, pag. 994 (1990).
- [25] Horner J.L., Gianino P.D. *Phase-only matched filtering* Appl. Opt., vol. 23, pag. 812 (1984).
- [26] Psaltis D., Paek E.G., Venkatesh S.S. *Optical image correlation with a binary spatial light modulator* Opt. Eng., vol. 23, pag. 698 (1984).
- [27] Javidi B., Tang Q. *Binary representation of nonlinear correlators* Opt. Comm., vol. 87, pag. 287 (1992).
- [28] Tang Q, Javidi B., Jäger E., Tschudi T. *Design of binary phase-only filters implemented with computer-generated holograms* Opt. Comm., vol. 87, pag. 87 (1992).
- [29] Wunsch D.C., Marks R.J., Caudell T.P., Capps C.D. *Limitations of a class of binary phase-only filters* Appl. Opt., vol. 31, pag. 5681 (1992).
- [30] Horner J.L., Javidi B., Wang J. *Analysis of the binary phase-only filter* Opt. Comm., vol. 91, pag. 189 (1992).
- [31] Flavin M.A., Horner J.L. *Correlation experiments with a binary phase-only filter implemented on a quartz substrate* Opt. Eng., vol. 28, pag. 470 (1989).
- [32] Barnes T.H., Johnson F.T.J., Eiju T., Haskell T.G., Matsuda K., Kokaji S. *Optoelectronic determination of binary phase-only filters for optical correlation* Opt. Eng., vol. 31, pag. 1936 (1992).
- [33] Horner J.L., Leger J.R. *Pattern recognition with binary phase-only filters* Appl. Opt., vol. 24, pag. 609 (1985).

#### 4. CONCLUSIONI

Con questo rapporto tecnico si è voluto fornire un panorama sui recenti sviluppi nel campo delle ottiche diffrattive, in particolare dei nuovi dispositivi ottici binari. L'interesse crescente per questo tipo di dispositivi è dimostrato dall'incremento del numero di pubblicazioni negli ultimi anni.

Nonostante il grande numero di pubblicazioni, ci è sembrato interessante riassumere con questo lavoro i vari aspetti teorici, sperimentali ed applicativi delle ottiche binarie. Senza pretendere di essere esaustivi, un'aggiornata ricerca bibliografica tematica sui singoli argomenti è riportata alla fine dei vari paragrafi.

Concludendo, con questo rapporto si sono messi in evidenza i seguenti punti:

- 1) Le ottiche binarie sono componenti con grosse potenzialità per essere introdotti nell'arco dei prossimi 5-10 anni sia in apparecchi di largo consumo (tipo video camera) che nella strumentazione scientifica ed industriale;
- 2) La tecnologia necessaria alla produzione è direttamente importata dalla produzione dei circuiti integrati a semiconduttori, raggiungendo precisioni dell'ordine del micron. Per l'estensione dell'impiego delle ottiche binarie nel visibile o U.V. è comunque necessario un ulteriore sforzo per la messa a punto di tecniche di fabbricazione a basso costo. Allo stato attuale le tecniche di stampaggio su film termoplastici (tecnologia già consolidata per i compact disk) sembrano le più adatte ad una produzione di massa a costi contenuti;
- 3) In campo industriale i dispositivi binari rappresentano una tecnologia di frontiera per quanto riguarda la formazione di fasci laser (deviatori, divisori e sommatore di fasci laser), come anche nel campo dell'elaborazione ottica in tempo reale delle immagini (metrologia, riconoscimento di forme).

Tuttavia la loro affermazione rispetto a soluzioni alternative basate su sistemi a semiconduttore è subordinata ad una valutazione dei costi di fabbricazione e sulla determinazione di specifiche aree di impiego, come ad esempio le ottiche integrate, dove rappresentano una interessante alternativa ai sistemi ottici tradizionali.

## BIBLIOGRAFIA GENERALE

- Barnard T. W., *Binary imagery and its application to beam shaping*, Appl. Opt., vol. 10(10) pag. 2274 (1971)
- Dammann H., Görtler K., *High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms*, Opt. Comm., vol. 3(5) pag. 312 (1971)
- Gerchberg R.W., Saxton W.O., *A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures*, Optik, vol. 35, pag. 237 (1972)
- Casasent D., *Coherent optical pattern recognition*, Proc. IEEE, vol. 67, pag. 813 (1979)
- Loewen E. G., Nevière M., Maestre D., *Efficiency optimization of rectangular groove gratings for use in the visible and IR regions*, Appl. Opt., vol. 18(13) pag. 2262 (1979)
- Veldkamp W. B., *Developments in laser-beam control with holographic diffraction gratings*, Proc. of Soc. Photo-Opt. Instr. Eng., vol. 255 pag. 136 (1980)
- Petit R., *Electromagnetic theory of gratings*, Springer, Berlin, 1980
- Born M., Wolf E., *Principles of optics - 6th ed.*, Pergamon press, Oxford, 1980
- Patorski K., *Production of binary amplitude gratings with arbitrary opening ratio and variable period*, Optics and laser technology, (oct.) pag. 267 (1980)
- Veldkamp W. B., Kastner C. J., *Beam profile shaping for laser radars that use detector arrays*, Appl. Opt., vol. 21(2) pag. 345 (1982)
- Killat U., Rabe G., Rave W., *Binary phase gratings for star couplers with high splitting ratio*, Fiber and Int. Opt., vol. 4(2) pag. 159 (1982)
- Veldkamp W. B., *Laser beam profile shaping with interlaced binary diffraction gratings*, Appl. Opt., vol. 21(17) pag. 3209 (1982)
- Kirpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P., *Optimization by simulated annealing*, Science, vol. 220, pag. 671, (1983)
- Hariharan P., *Optical holography*, Cambridge University Press, Cambridge, 1984
- Psaltis D., Paek E.G., Venkatesh S.S., *Optical image correlation with a binary spatial light modulator*, Opt. Eng., vol. 23, pag. 698 (1984)
- Horner J.L., Gianino P.D., *Phase-only matched filtering*, Appl. Opt., vol. 23, pag. 812 (1984)
- Swanson G. J., Veldkamp W. B., *Binary lenses for use at 10.6 micrometers*, Opt. Eng., vol. 24(5) pag. 791 (1985)
- Veldkamp W. B., Swanson G. J., Shaver D. C., *High efficiency binary lenses*, Opt. Comm., vol. 53(6) pag. 353 (1985)
- Horner J.L., Leger J.R., *Pattern recognition with binary phase-only filters*, Appl. Opt., vol. 24, pag. 609 (1985)
- Yu F.T.S., *White-light optical signal processing*, Ed. J. Wiley (1985)
- Leger J. R., Swanson G. J., Veldkamp W. B., *Coherent beam addition of GaAlAs lasers by binary phase gratings*, Appl. Phys. Lett., vol. 48(14) pag. 888 (1986)
- Veldkamp W. B., Leger J. R., Swanson G. J., *Coherent summation of laser beams using binary phase gratings*, Opt. Lett., vol. 11(5) pag. 303 (1986)
- Leger J. R., Swanson G. J., Veldkamp W. B., *Coherent laser addition using binary phase grating*, Appl. Opt., vol. 26(20) pag. 4391 (1987)
- Wronkowski L., *Fresnel images of a binary diffraction grating with open ratio less than 0.5*, J. of Mod. Opt., vol. 34(8) pag. 1057 (1987)

- Blakemore J. S., *Mid-infrared dispersion of the refractive index and reflectivity for GaAs*, J. Appl. Phys., vol. 62(11) pag. 4528 (1987)
- Logue J., *Fabrication of binary optics using electron beam lithography*, SPIE, vol. 884 pag. 95 (1988)
- Boenig H. V., *Fundamentals of plasma chemistry and technology*, Technomic Publishing Company, 1988
- Schuegraf K. K., *Handbook of thin film deposition processes and techniques. Principles Methods and applications*, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA
- Davis J. A., Bach G. W., Cottrell D. M., Lilly R. A., *Suppression of selected diffraction orders with programmable masks written on spatial light modulators*, Appl. Opt., vol. 27(14) pag. 2949 (1988)
- Whang A. J. W., Gallagher N. C., *Synthetic approach to designing optical alignment systems*, Appl. Opt., vol. 27(16) pag. 3534 (1988)
- Binary optics and its applications. An interview with W. Veldkamp*, SPIE - OE Reports n. 67 (1989)
- Flavin M.A., Horner J.L., *Correlation experiments with a binary phase-only filter implemented on a quartz substrate*, Opt. Eng., vol. 28, pag. 470 (1989)
- Jahns J., Downs M. M., Prise M. E., Streibl N., Walker S. J., *Dammann gratings for laser beam shaping*, Opt. Eng., vol. 28(12) pag. 1267 (1989)
- Krackhardt U., Streibl N., *Design of Dammann-gratings for array generation*, Opt. Comm., vol. 74(1,2) pag. 31 (1989)
- Mc Cormick F. B., *Generation of large spot arrays from a single laser beam by multiple imaging with binary phase gratings*, Opt. Eng., vol. 28(4) pag. 299 (1989)
- Rossnagel S.M., Cuomo J.J., Westhood W. D., *Handbook of plasma processing technology, Fundamentals, Etching, Deposition and Surface Interactions*, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA
- Davis J. A., Cottrell D. M., Bach G. W., Lilly R. A., *Phase-encoded binary filters for optical pattern recognition*, Appl. Opt., vol. 28(2) pag. 258 (1989)
- Salin A., *Use of mask technology in producing high quality, low cost passive optical devices*, SPIE, vol. 1088 pag. 527 (1989)
- Heissmeier M., Krackhardt U., Streibl N., *A Dammann grating with diffraction orders of arbitrary intensity etched into Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, Opt. Comm., vol. 76(2) pag. 103 (1990)
- Friesem A. A., Davidson N., Hasman E., Kinrot O., *Advances in holographic optical elements*, SPIE, vol. 1319 pag. 276 (1990)
- Piliavin M. A., Foo L. D., Mercado R. I., *Binary diffractive optical element computer aided design*, SPIE, vol. 1211 pag. 50 (1990)
- Gallagher N. C., *Binary optics in the 90's*, SPIE, vol. 1396 pag. 722 (1990)
- Taghizadeh M. R., Turunen J., Vasara A., *Binary phase wave fronts reconstructed from internal reflection metal on glass holograms*, Appl. Phys. Lett., vol. 56(13) pag. 1195 (1990)
- Dickey F.M., Vijaya Kumar B.V.K., Romero L.A., Connelly J.M., *Complex ternary matched filters yielding high signal-to-noise ratios*, Opt. Eng., vol. 29, pag. 994 (1990)
- Sedukhin A. G., *Diffraction reticles: the capabilities of novel optical components for displacement or distance measurements*, Optik, vol. 85(2) pag. 47 (1990)
- Jahns J., Brumback B. A., *Integrated-optical split-and-shift module based on planar optics*, Opt. Comm., vol. 76(5,6) pag. 318 (1990)
- Lohmann A. W., Thomas J. A., *Making an array illuminator based on the Talbot effect*, Appl. Opt., vol. 29(29) pag. 4337 (1990)
- Krackhardt U., Heissmeier M., Sinzinger S., Streibl N., *New algorithm for the design of binary phase gratings*, SPIE, vol. 1319 pag. 342 (1990)

- Farn M. W., Kane J. S., Delaney W., *Dual-sided lithography: a method for evaluating alignment accuracy*, Appl. Opt., vol. 31(34) pag. 7295 (1992)
- Ehbets P., Herzig H.P., Prongué D., Gale M.T., *High efficiency continuous surface-relief gratings for two-dimensional array generation*, Opt.Lett., vol. 17, pag. 908
- Glytsis E. N., Gaylord T. K., *High-spatial-frequency binary and multilevel stairstep gratings: polarization-selective mirrors and broadband antireflection surfaces*, Appl. Opt., vol. 31(22) pag. 4459 (1992)
- Wunsch D. C., Marks R. J., Caudell T. P., David Capps C., *Limitations of a class of binary phase-only filters*, Appl. Opt., vol. 31(26) pag. 5681 (1992)
- Carts Y.A., *Microelectronics methods push binary optics frontiers*, Laser focus World magazine, vol. 28 n. 2, pag 87-95 (1992)
- Ekberg M., Larsson M., Hard S., Turunen J., Taghizadeh M., Westerholm J. et al., *Multilevel grating array illuminators manufactured by electron-beam lithography*, Opt. Comm., vol. 88(1) pag. 37 (1992)
- Prongué D., Herzig H.P., Dändliker R., Gale M.T. *Optimized kinoform structures for highly efficient fan-out elements*, Appl.Opt., vol. 31, pag. 5706 (1992)
- Barnes T. H., Johnson F. T. J., Eiju T., Haskell T. G., Matsuda K., Kokaji S., *Optoelectronic determination of binary phase-only filters for optical correlation*, Opt. Eng., vol. 31(9) pag. 1936 (1992)
- Morrison R. L., *Symmetries that simplify the design of spot array phase gratings*, JOSA A, vol. 9(3) pag. 464 (1992)
- Sweatt W. C., *Transforming a circular laser beam into a square or trapezoid-almost*, Opt. Eng., vol. 31(2) pag. 245 (1992)
- Krackhardt U., Mait J. N., Streibl N., *Upper bound on the diffraction efficiency of phase-only fanout elements*, Appl. Opt., vol. 31(1) pag. 27 (1992)
- O'Shea D. C., Beletic J. W., Poutous M., *Binary-mask generation for diffractive optical elements using microcomputers*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2566 (1993)
- Gale M. T., Rossi M., Schütz H., Ehbets P., Herzig H. P., Prongué D., *Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2526 (1993)
- Wong V. V., Swanson G. J., *Design and fabrication of a Gaussian fan-out optical interconnect*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2505 (1993)
- Walker S., Jahns, Li, Mansfield, Mulgrew, Tennant, Roberts, West, Ailawadi, *Design and fabrication of high-efficiency beam splitters and beam deflectors for integrated planar micro-optic systems*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2494 (1993)
- Leger J. R., Morris G. M., *Diffractive optics: an introduction to the feature*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2481 (1993)
- Miller J. M., Taghizadeh M. R., Turunen J., Ross N., *Multilevel-grating array generators: fabrication error analysis and experiments*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2518 (1993)
- Granger A., Song L., Lessard R. A., *Multiple beam generation using a stratified volume holographic grating*, Appl. Opt., vol. 32(14) pag. 2534 (1993)
- Lüpken H., Pauka T., Bräuer R., Wyrowski F., Bryngdahl O., *On the design of Dammann gratings*, Opt. Comm., vol. 100(5,6) pag. 415 (1993)