





MODÉLISATION DES COMPOSANTS DIFFRACTIFS POUR LA CONCEPTION DE SYSTÈMES OPTIQUES HYBRIDES

Hervé Sauer, Pierre Chavel
 Équipe Systèmes d'Imagerie et Physique des Images (SPIM)
 Laboratoire Charles Fabry
 Institut d'Optique, CNRS, Univ Paris Sud – Palaiseau (France)

Club SFO «Calcul Optique»
 Journée thématique du 31 mai 2012
 « Les nouvelles technologies de fabrication changent-elles vraiment nos méthodes de conception ? »
 IOGS - Palaiseau



PLAN DE L'EXPOSÉ

- Introduction - Les composants diffractifs et leurs (±nouvelles) techniques de fabrication - Systèmes optiques hybrides - Principe de fonctionnement
- Modélisation par tracé de rayons
- Modélisations par somme (cohérente) d'ondes
- Quelques exemples de simulations
- Conclusion - Optimisation pratique des composants diffractifs dans les logiciels de conception optique



INTRODUCTION

- Qu'est-ce qu'un 'composant diffractif' (Diffractive Optical Element, DOE?) (Élément Optique Diffusif, EOD)?



une fente



un réseau



un hologramme synthétique



Un réseau zoné (en phase, ≠ en amplitude)
→
Lentille diffractive
→
'(phase) Fresnel zone plate'

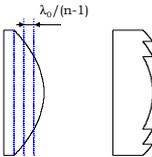
Cet exposé se restreint essentiellement aux lentilles diffractives utilisées dans des systèmes optiques pour l'imagerie...

Edmund Optics, Lentille Asphérique Hybride TechSpec® 3-5µm



INTRODUCTION

- Technologies de fabrication

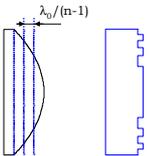


$\lambda_0 / (n-1)$

Usinage diamant



Photo Nanotech®



$\lambda_0 / (n-1)$

Optiques (dites) 'binaires'

Techniques photolithographiques
(1, 2, 3, ..., niveaux de masques)





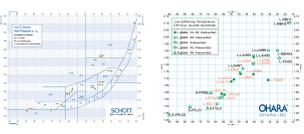
INTRODUCTION

- Technologies de fabrication (suite)



LightPath® Technologies

Moulage du verre





Syntec Optics

Moulage de plastique

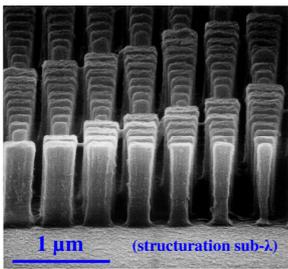




INTRODUCTION

- Technologies de fabrication (suite)

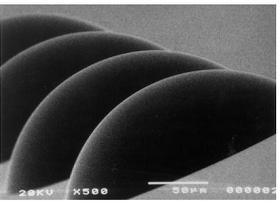
Méta-matériaux



1 µm (structuration sub-λ)

IOGS - LCF - Équipe Naphel / L2M

Gravure par insolation variable
(ou 'photolithographie en niveaux de gris')



RPC-photonics®

etc...

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL **INTRODUCTION**

● **Systèmes optiques 'hybrides'**

Doublet hybride

Lentille diffractive gravée

Lentille plan-convexe en Germanium

Edmund Optics

Doubléts Si/Ge

Doubléts hybrides (Diffractive + lentille) 20 mm

Objectif de Petzval IR *standard* (100mm F1.1 ±3°)

Objectif de Petzval IR *hybride* (100mm F1.1 ±3°)

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL **INTRODUCTION**

● **Principe du fonctionnement des composants diffractifs**

À une longueur d'onde λ donnée, différence de marche introduite par l'élément optique diffractif (EOD)

hauteur radiale sur le composant

Différence de marche souhaitée

Différence de marche réalisée modulo λ

différence de marche introduite [λ]

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL **INTRODUCTION**

● **Structure de la lentille diffractive**

$\lambda_0 / (n-1)$

Lentille de Fresnel contrôlée en phase

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL **MODÉLISATION PAR TRACÉ DE RAYONS**

● **Ordres de diffraction et modélisation par tracé de rayons**

Réseau de diffraction (linéaire) local

hauteur radiale sur le composant

$\phi(h)/2\pi$

différence de marche [en λ d'utilisation]

- Fonction caractéristique $\phi(h)$
- Réseau de pas local: $P(h) = 2\pi / (d\phi/dh)(h)$
- Direction des rayons calculée par l'équation des réseaux: $\frac{2\pi n_1}{\lambda} \sin \theta_t = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \sin \theta_i - m \frac{2\pi}{P(h)}$
- m : ordre de diffraction unique fixé (usuellement +1)
- ⊕ Efficacité de diffraction
- ⊕ Lumière parasite due aux autres ordres

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL **MODÉLISATION PAR TRACÉ DE RAYONS**

À une longueur d'onde donnée

ordre 0

ordre 1

ordre 2

...

ordre -1

ordre 0

ordre 1

ordre 2

ordre 3

...

$f_m = f_1 / m$

NOTA: Les ordres sont cohérents entre eux et peuvent donc interférer!

modélisation simplifiée d'optique géométrique

INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL **MODÉLISATION PAR TRACÉ DE RAYONS**

● **Dépendance avec la longueur d'onde**

Dans l'ordre nominal +1

Lentille diffractive 100mm f/1.1

$\lambda_c = 643,8 \text{ nm}$

$\lambda_e = 546,1 \text{ nm}$

$\lambda_p = 480,0 \text{ nm}$

Aberration chromatique À L'ÉCHELLE!

Lentille (asphérique) en SF57 ($v_e \approx 23,6$) 100mm f/2

INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

MODÉLISATION PAR TRACÉ DE RAYONS

- Application: correction de l'aberration chromatique

Doublet hybride achromatique 100mm f/2 IR bande 3µm-5µm:

Lentille diffractive gravée
Lentille plan-convexe en Germanium

Chromatisme	Doublet hybride f = 100mm N=20.00 0	Lentille simple Ge f = 102mm N = 9.82 0	Lentille diffractive f = 5400mm N = 0.19 0	
0.08				
0.06				
0.04				
0.02				
0.00				
-0.02				
-0.04				
-0.06				
-0.08				
3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Longueur d'onde (µm)				

Variaison de la puissance (dioptries)

Lentille en Germanium $f_{Ge} = 102\text{mm}$ – Lentille diffractive $f_{LD} = 5400\text{mm}$.

La lentille diffractive est constituée de 14 zones.

INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

MODÉLISATION PAR SOMME D'ONDES

- Ordres et efficacités de diffraction

Indépendant du profil spatial de la phase. Valable pour toute fonction $\varphi(x,y)$

déphasage obtenu Φ
déphasage souhaité φ

$\exp(-i\Phi(\varphi))$ est une fonction de φ périodique de période 2π .

Elle se décompose en série de Fourier: $\exp(-i\Phi(\varphi)) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \eta_m \cdot \exp(-i.m.\varphi)$

$\eta_1 = 1, \eta_m = 0$ pour $m \neq 1$, réseau blazé

η_m^2 efficacité de diffraction dans l'ordre m .

$\eta_1^2 = \text{sinc}^2(m - \Phi_{\text{max}}/2\pi)$

$\eta_1^2 \approx 0.41$

$\sum_{m=-\infty}^{+\infty} |\eta_m|^2 = 1$

INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

MODÉLISATION PAR SOMME D'ONDES

Pour un éclairage incident par une onde plane normale à la surface :

- $\varphi(x,y) = \alpha.y$ (réseau linéaire ou prisme diffractif),
 $a_t(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \eta_m \cdot \exp(-i.m.\alpha.y)$
- $\varphi(x,y) = \pi/(\lambda.f).(x^2+y^2)$ (lentille diffractive en approximation paraxiale),
 $a_t(x,y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \eta_m \cdot \exp\left(-\frac{i\pi}{\lambda} \cdot \frac{m}{f^*} (x^2 + y^2)\right)$

INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

MODÉLISATION PAR SOMME D'ONDES

- Déphasage local effectif introduit par une gravure

$\Phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1(\lambda) \cdot \cos(\Theta_1) - n_2(\lambda) \cdot \cos(\Theta_2)) \cdot \cos(\alpha) \cdot e(x,y)$

Dans le cas paraxial, verre peu dispersif | air:

$\Phi(x,y) \approx \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) \cdot e(x,y)$

- Effets principaux d'un changement de longueur d'onde
 - changement des efficacités de diffraction.
Pour le profil en dent de scie blazé à $\lambda_0, \eta_m^2 = \text{sinc}^2(m - \lambda_0/\lambda)$
 - changement de la focale de la lentille diffractive
 $\lambda \times f_\lambda \equiv C^{te}, f_\lambda = f_{\lambda_0} \times \lambda_0/\lambda$
- Effets de l'ouverture et du champ (au delà du cas paraxial)
 - $\Phi(x,y)$ n'est plus nécessairement exactement proportionnel à $e(x,y)$

INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

MODÉLISATION PAR SOMME D'ONDES

- Les limites de la décomposition en ordres de diffraction

- À chaque longueur d'onde, il faut sommer de manière cohérente une infinité d'ordres :
 ⇒ calcul lourd et nécessairement approché (troncature à un nombre fini d'ordres)...
- Si les sauts de déphasage ne sont pas de hauteur constante à la frontière de toutes les zones (e.g., gravure non compensée ou système optique simultanément à fort champ et forte ouverture) :
 ⇒ La fonction $\Phi(\varphi)$ N'est PLUS périodique
 ⇒ La décomposition en série de Fourier n'existe plus
 ⇒ on ne peut plus définir les ordres de diffraction!

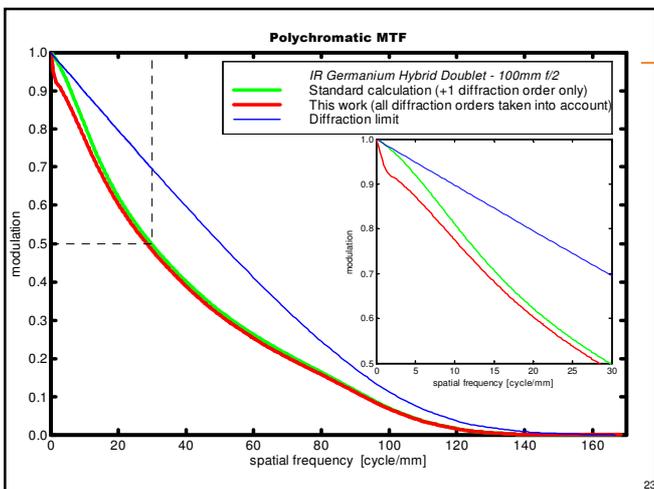
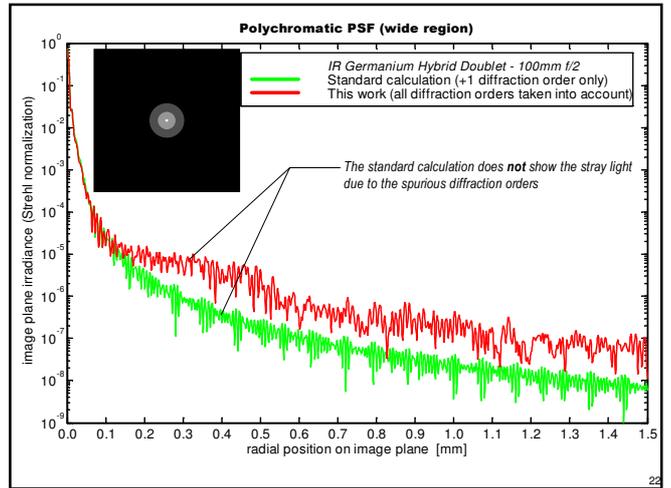
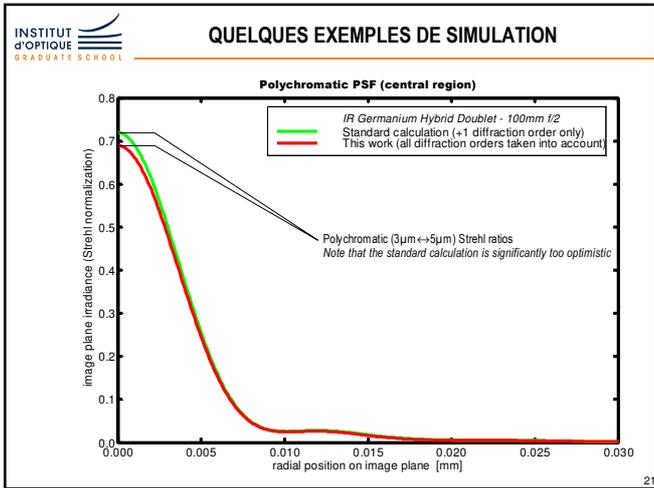
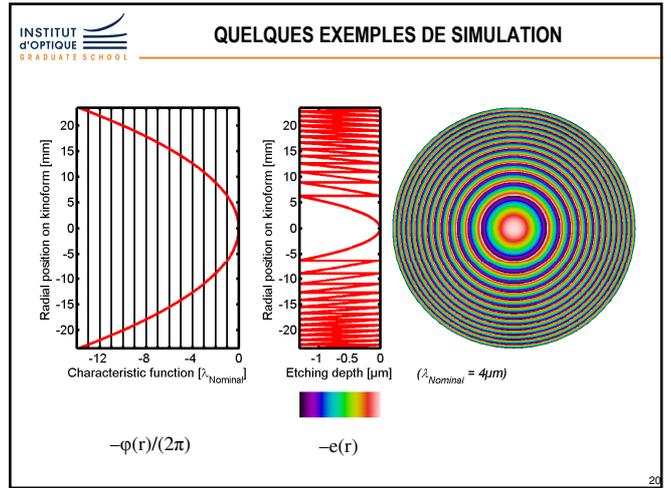
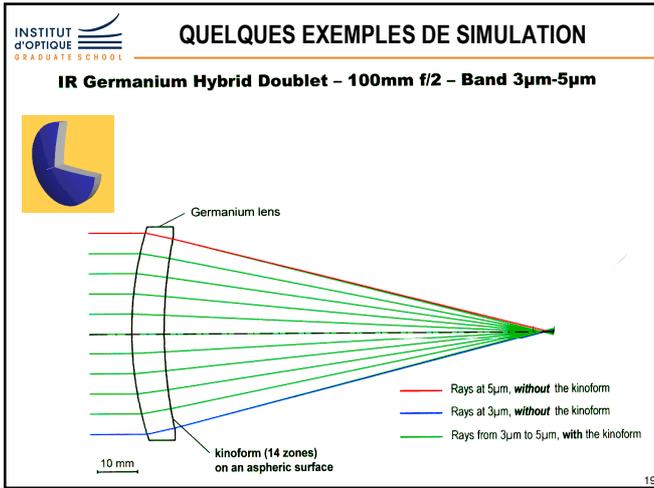
INSTITUT D'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL

MODÉLISATION (2) PAR SOMME D'ONDES

- La décomposition zonale

- Chaque zone d'un composant diffractif est comme une optique annulaire, i.e. une optique centrée standard avec obturation centrale :
 - ⇒ On peut en calculer sa PSF complexe avec les logiciels standard
 - ⇒ Somme cohérente finie sur toutes les zones du composant diffractif
 - ⇒ Peut éventuellement être implémenté (±efficacité) avec une surface particulière type User Defined Surface ou lentille de Fresnel ...

Réf.: H.Sauer et al., "Diffraction optical element in hybrid lenses: modeling and design by zone decomposition", Appl Opt. 38(31), p.6482-6486 (1999)



Apochromatic Diffractive/Refractive Doublets

New Melles Griot Dapromat™

WAVELENGTHS: 1064 nm, 532 nm, 355 nm, 266 nm

ON AXIS

± 0.01%

DIFFRACTION MTF

MELES GRIOT P/N: 01-LAO-014

21 mm total length, 11.7 mm diameter

Standard Achromat

WAVELENGTHS: 1064 nm, 532 nm, 355 nm, 266 nm

ON AXIS

± 0.01%

DIFFRACTION MTF

MELES GRIOT P/N: 01-LAO-014

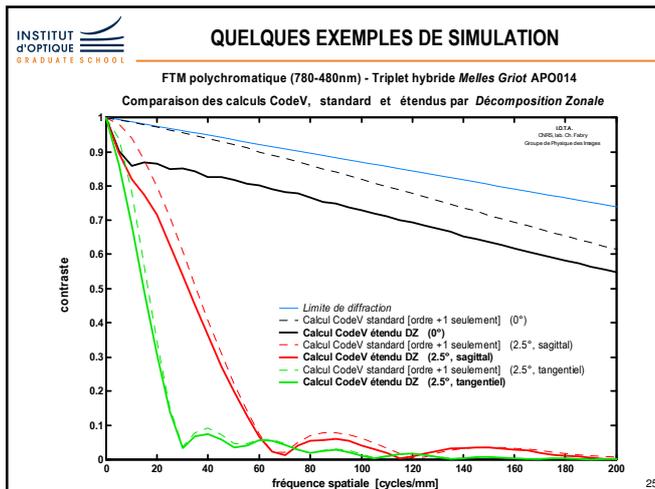
21 mm total length, 11.7 mm diameter

Melles Griot introduces diffractive/refractive doublet lenses that significantly outperform conventional achromats. Try these revolutionary new lenses for your wavelength-tunable and multiple wavelength applications:

- 10x less chromatic aberration
- Far superior out-of-axis MTF
- Near-diffraction-limited performance — 480 to 760 nm
- No need to refocus for wavelength changes
- Outperforms achromatic doublets — even at single wavelengths

MELLES GRIOT

24



- INSTITUT d'OPTIQUE GRADUATE SCHOOL
- ### CONCLUSION & OUVERTURE
- Nécessité d'aller au delà de l'analyse par tracé de rayons dans un seul ordre pour éviter de fortement surestimer la FTM
 - Le calcul par décomposition zonale est une alternative intéressante à la décomposition en ordres de diffraction
 - La chute de la FTM due aux ordres parasites (*aux 'interférences des PSF zonales'*) est essentiellement gouvernée par la technologie de fabrication et la bande spectrale de travail, sans réel paramètre ajustable
 - ⇒ *Optimisation sur la fonction caractéristique du composant diffractif en travaillant dans l'ordre nominale (Utilisation efficace du logiciel en mode tracé de rayons)*
- 26