

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Mise en forme programmable de faisceau laser femtoseconde pour le micro-usinage et la photoinscription de guides d'ondes

Nicolas SANNER



Introduction

I Correction de front d'onde

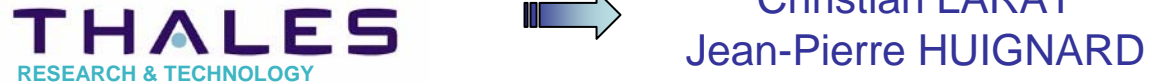
II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Participants



Motivations – Contexte du travail

Contexte : micro- nano-technologies

Intérêt des lasers à impulsions ultra-courtes : déjà démontré pour le traitement précis des matériaux (échelle μm)

Objectif : **Apporter un contrôle dynamique du faisceau**

→ Accès direct à des formes complexes

→ Améliorer qualité et précision de l'interaction laser-matière

Introduction

1. Interaction fs
2. Applications
3. Objectifs

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Impulsions ultra-courtes (10^{-13} s) focalisées

- ⇒ Intensité crête très élevée ($\sim 10^{15}$ W.cm⁻²)
- ⇒ Excitation électronique
- ⇒ Modification ou ablation du matériau

Caractéristique principale :

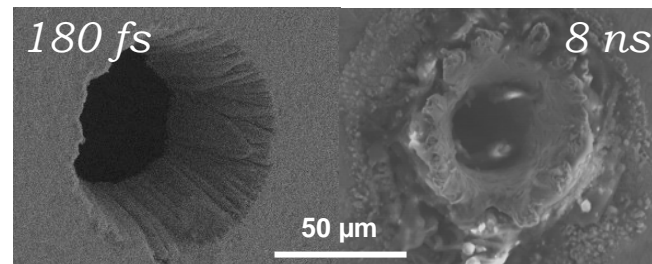
L'interaction a lieu sur une durée plus courte que le temps nécessaire à la diffusion de la chaleur au sein du matériau

- ⇒ Energie laser absorbée par les électrons
- ⇒ Transfert aux ions régi par les propriétés du matériau
- ⇒ Modifications du matériau avant la diffusion thermique

Conséquences :

- ⇒ Interaction très localisée (grande précision)
- ⇒ Dommages collatéraux réduits

Exemple :



Thèse R. Le Harzic
(Univ. St-Etienne)

Exemples d'applications

Introduction

1. Interaction fs
2. Applications
3. Objectifs

I Correction de front d'onde

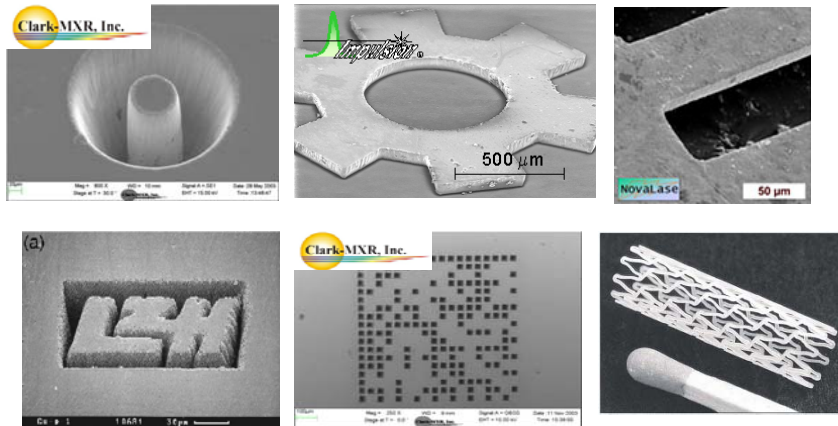
II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

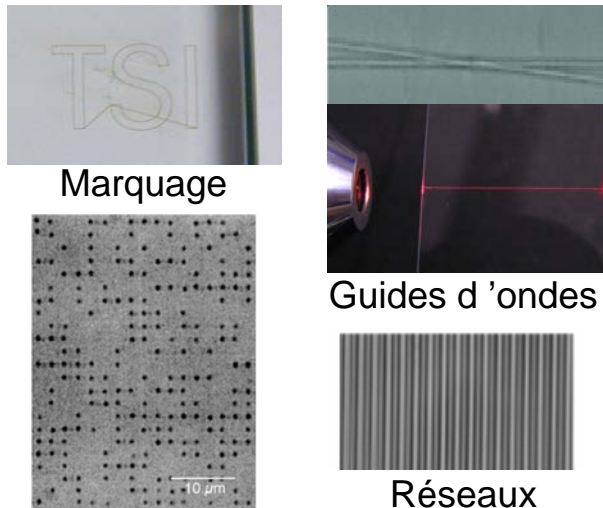
Conclusion

Micro-usinage



Micro-mécanique
Micro-électronique
Médecine

Modifications en volume



Télécoms (guides d'ondes)
Composants optiques intégrés
Stockage d'information
Microfabrication 3D
Micro-chirurgie

Thématique en plein essor, applications industrielles concrètes

Objectifs de ce travail

Introduction

1. Interaction fs
2. Applications
3. Objectifs

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Plan de la présentation

Contrôler de façon programmable la forme de la tache focale

I – Correction de front d'onde

II – Mise en forme de tache focale

Démontrer l'intérêt pour les applications d'interaction laser-matière

III – Micro-usinage de surface

IV – Photoinscription de guides d'ondes

Introduction

I Correction de front d'onde

1. Principe
2. La valve optique
3. Montage
4. Résultats

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

I – Correction de front d'onde

Correction de front d'onde

Introduction

I Correction de front d'onde

1. Principe
2. La valve optique
3. Montage
4. Résultats

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Principe :

Correction des déformations du front d'onde (aberrations) par ré-orientation locale des vecteurs d'onde

Historique :

- Au départ pour la correction des aberrations des chaînes laser femtoseconde de puissance :

LULI (France)

CUOS (USA)

ATLAS (Allemagne)

⇒ augmenter la qualité de focalisation du faisceau

Travail réalisé ici :

Correction + Mise en forme sur chaîne laser fs commerciale

Originalité : mise en forme de faisceau au point focal d'une lentille

Atout : modulateur de grande résolution spatiale

Correction de front d'onde : Principe

Introduction

I Correction de front d'onde

1. Principe
2. La valve optique
3. Montage
4. Résultats

II Mise en forme de tache focale

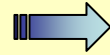
III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

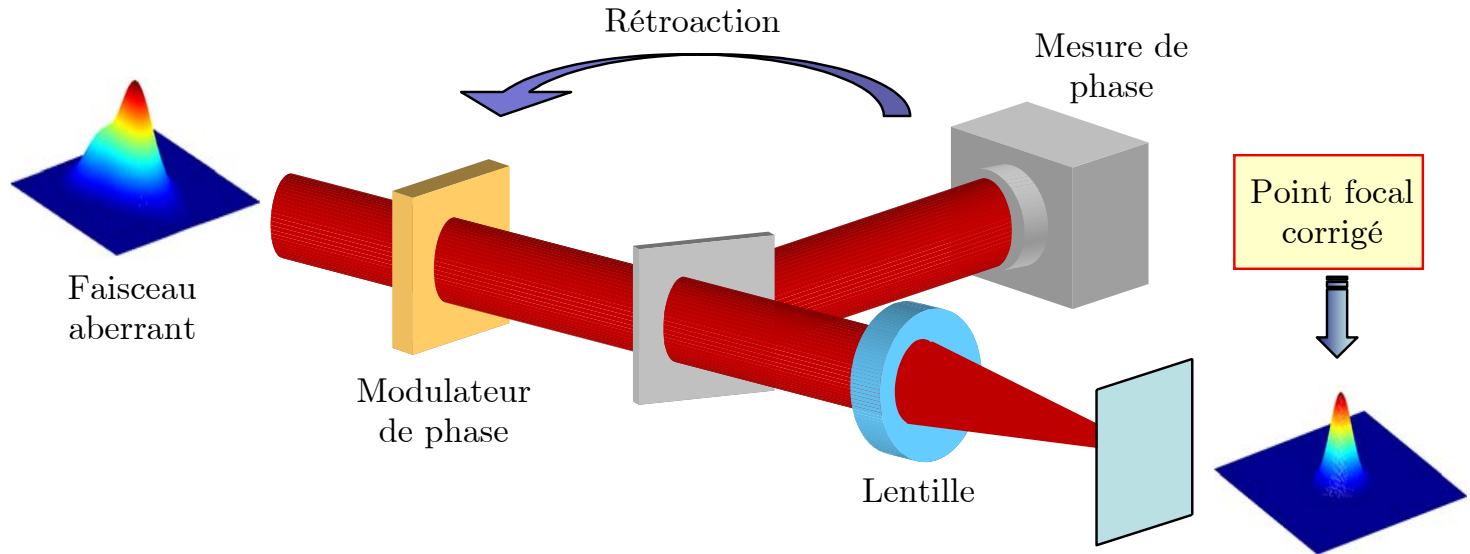
Conclusion

Principe :

Correction de la phase spatiale



Faisceau corrigé des aberrations au point focal d'une lentille



Mise en oeuvre :

Modulateur de phase

Mesure de phase et rétroaction en temps réel

Le modulateur de phase : valve optique Thales

THALES
RESEARCH & TECHNOLOGY

Introduction

I Correction de front d'onde

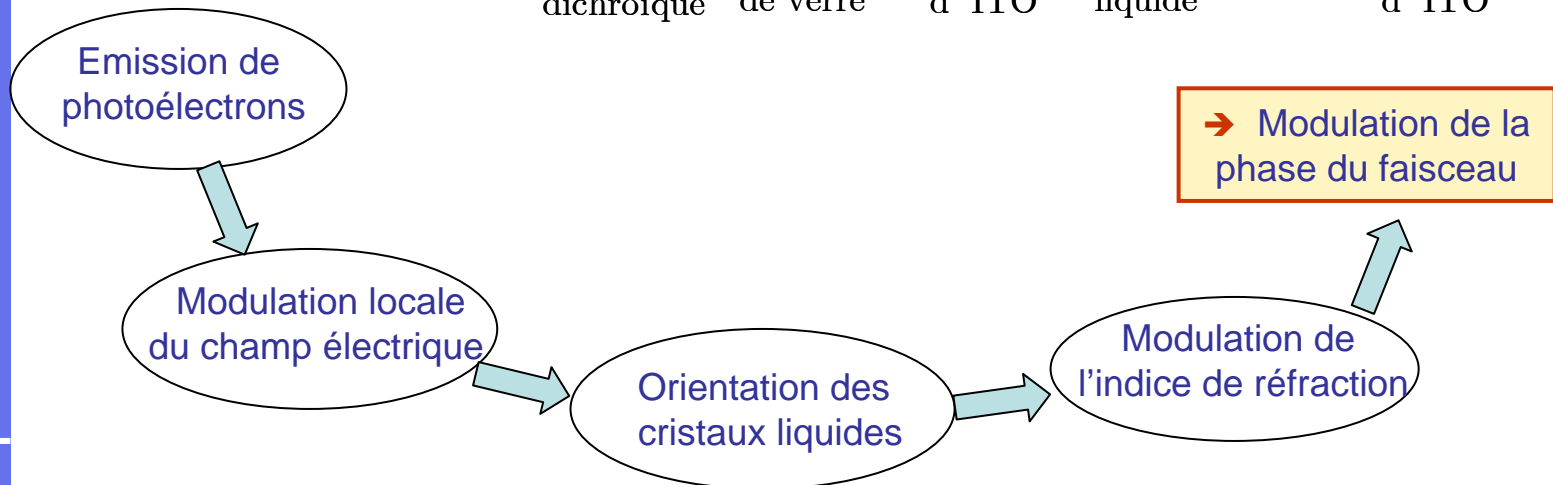
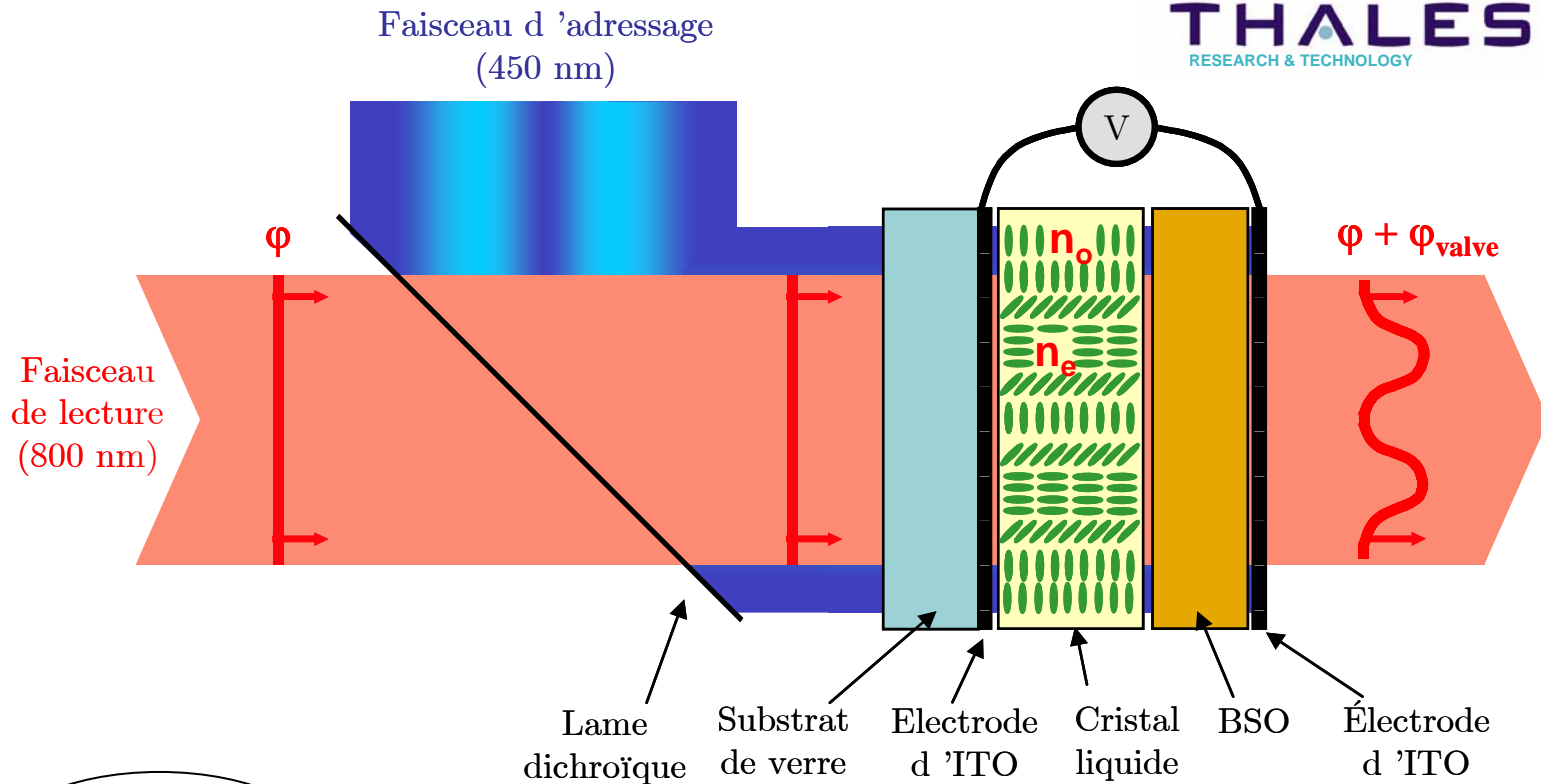
1. Principe
2. La valve optique
3. Montage
4. Résultats

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion



Propriétés de la valve optique

Introduction

I Correction de front d'onde

1. Principe
2. La valve optique
3. Montage
4. Résultats

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

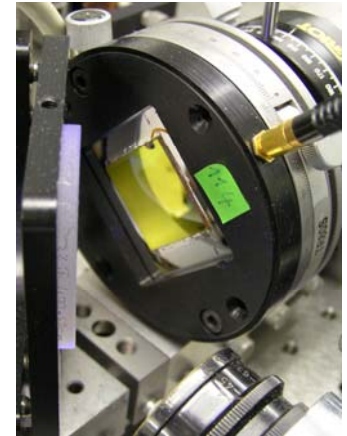
IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Propriétés :

- Composant non pixellisé
- Adressage optique
- Contrôle en temps réel
- **Bonne résolution spatiale** ($\sim 100 \mu\text{m}$)
→ 10 000 points de contrôle

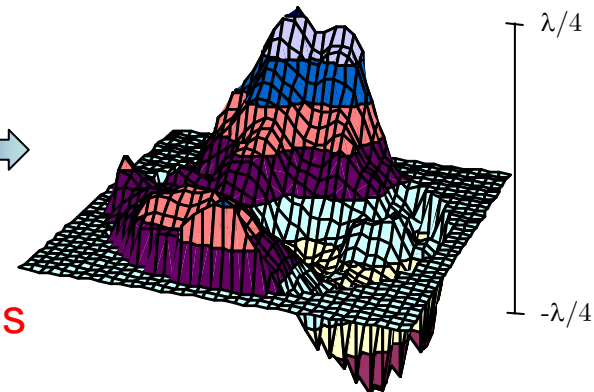
Ouverture utile	1cm×1cm
Amplitude de modulation	6π ou $2.4 \mu\text{m}=3 \lambda$ à 800 nm
Transmission	80%
Sensibilité à la polarisation	



Insertion dans le dispositif expérimental :

Aberrations : valve + laser fs

{ courbure de phase
autres aberrations d'amplitude $\lambda/2$ →



⇒ Corriger l'ensemble de ces distorsions

Dispositif expérimental

Introduction

I Correction de front d'onde

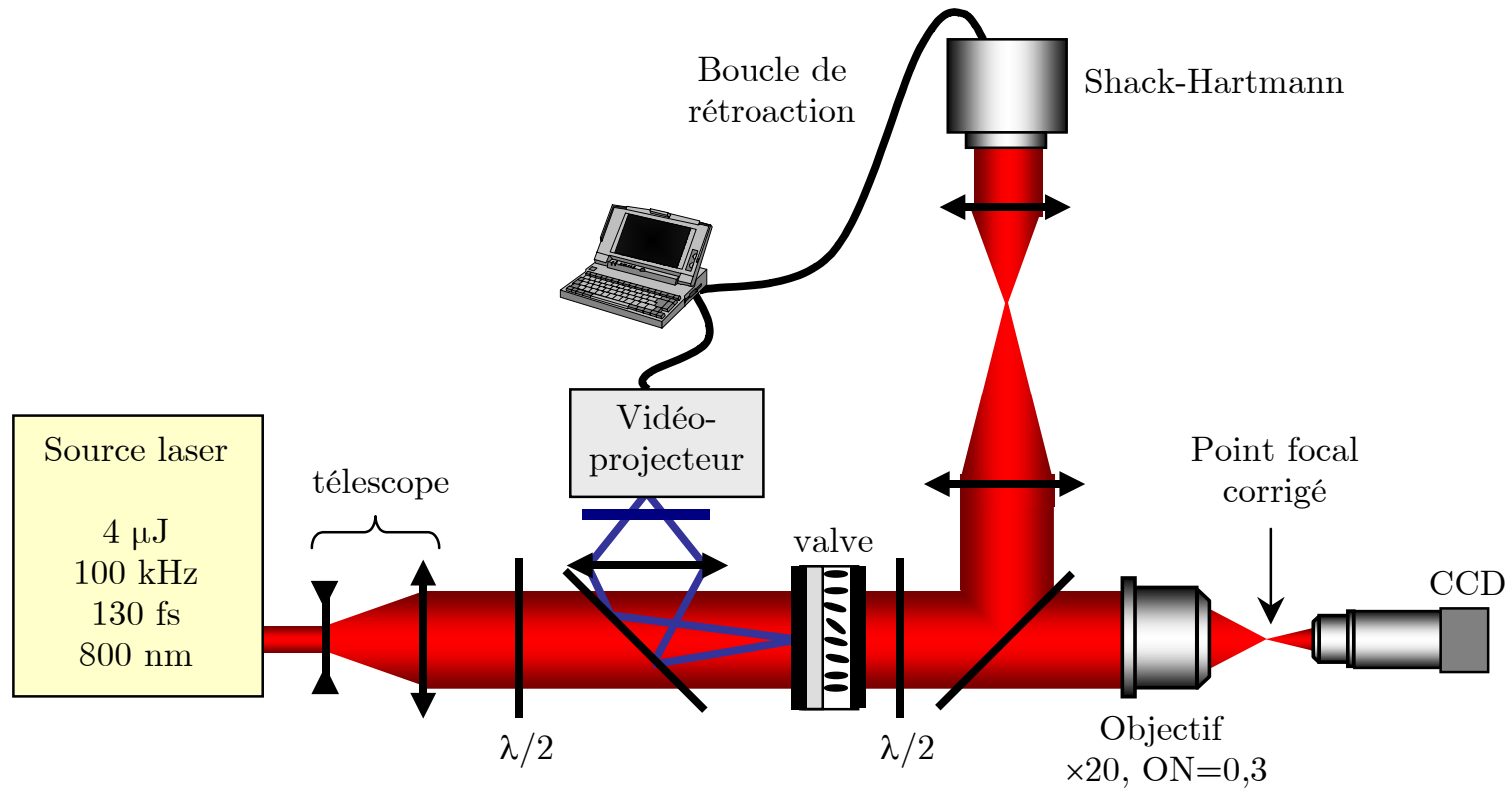
1. Principe
2. La valve optique
3. Montage
4. Résultats

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion



Boucle d'optique adaptative :

Senseur de front d'onde Shack-Hartmann + PC

\Rightarrow Ajustement et contrôle en temps réel de la modulation de phase



Correction des distorsions de front d'onde

Résultats de correction de front d'onde (1)

Introduction

I Correction de front d'onde

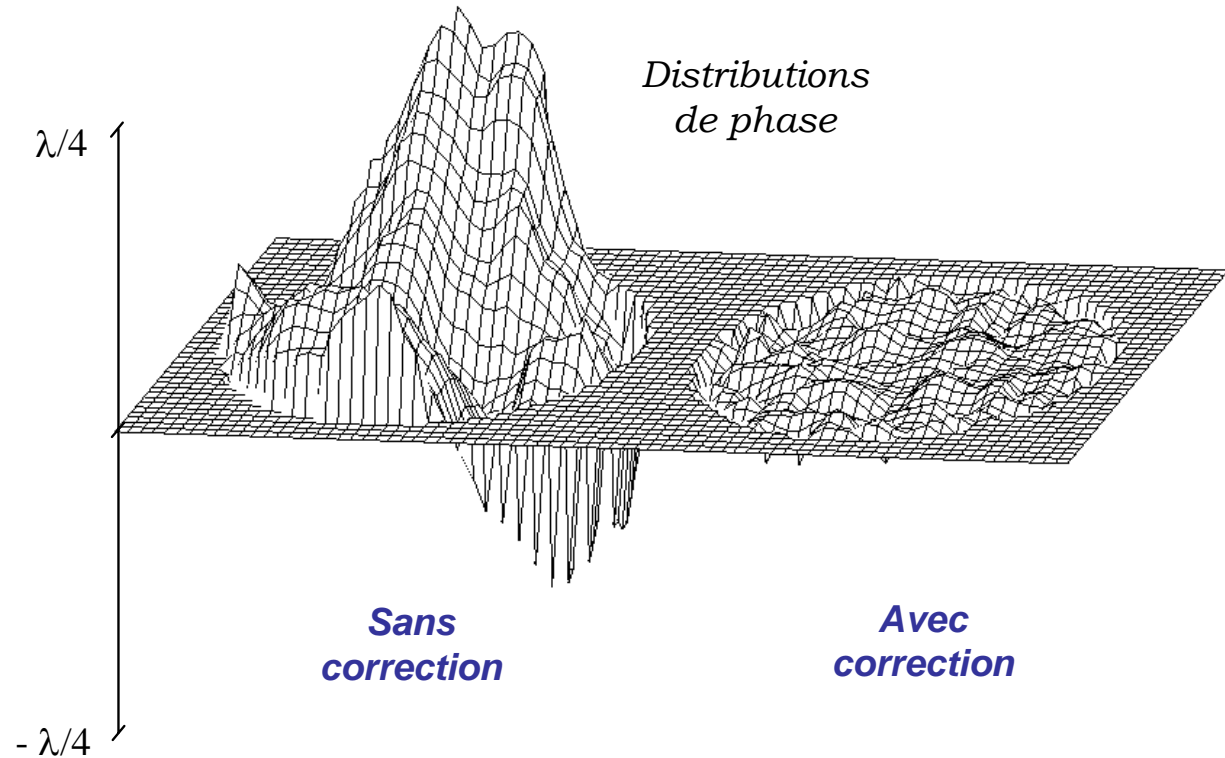
1. Principe
2. La valve optique
3. Montage
4. Résultats

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion



Phase distordue



Phase quasi-plane

$$PV = \lambda/2, \sigma = \lambda/12$$

$$PV = \lambda/15, \sigma = \lambda/100$$



Phase quasi-plane

Résultats de correction de front d'onde (2)

Introduction

I Correction de front d'onde

1. Principe
2. La valve optique
3. Montage
4. Résultats

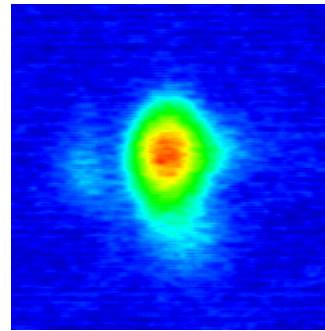
II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

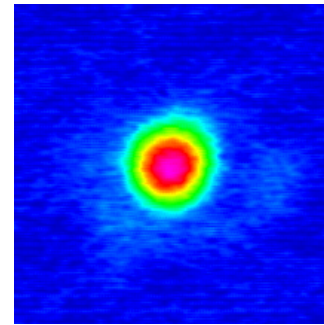
IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

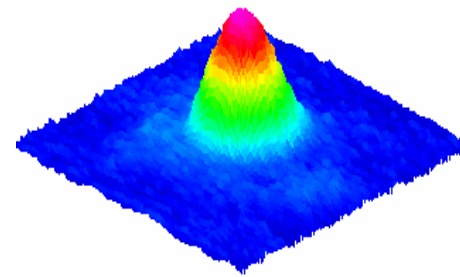
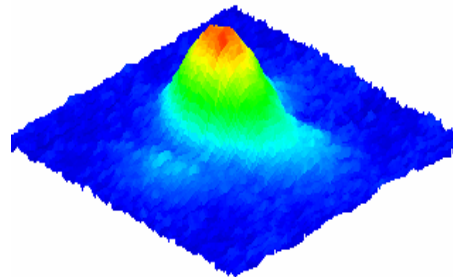
Sans correction



Avec correction



Taches focales correspondantes



Amélioration de la tache focale (1,7 μm)

La qualité du point focal se mesure grâce au rapport de Strehl :

$$R_s = 1 - \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right)^2$$

$$R_s = 0,73$$



$$R_s = 0,996 \quad : \quad \text{très proche de 1}$$

Limite de diffraction :
 $1,22\lambda/2ON = 1,63 \mu\text{m}$



Point focal limité par diffraction

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

II – Mise en forme de tache focale

Modulation de phase spatiale : principe

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

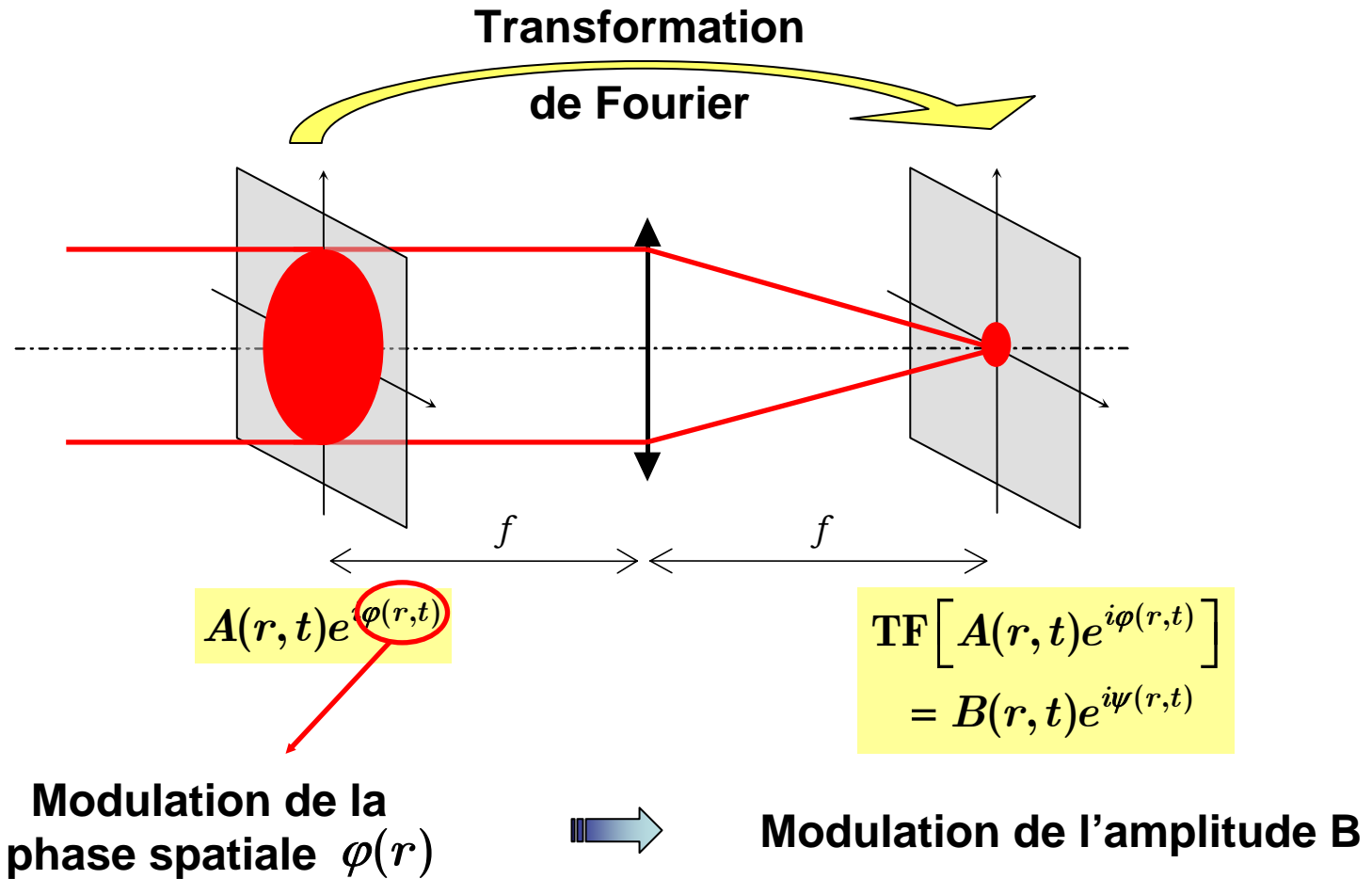
1. Principe

2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion



Mise en forme du faisceau au point focal par modulation de la phase spatiale du faisceau initial

Mise en forme programmable de tache focale

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

1. Principe

2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

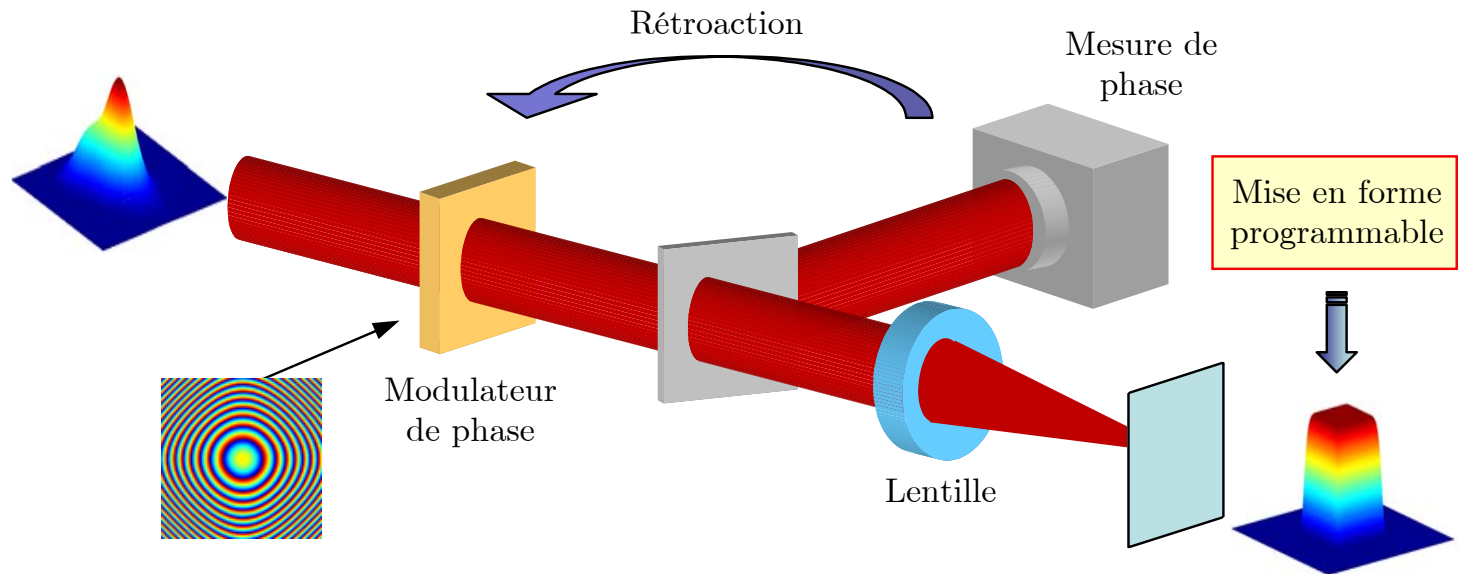
IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Principe :

Modulation programmable de la phase spatiale

➡ *Tache focale de forme et dimensions **arbitraires**, choisies par l'utilisateur*



Mise en oeuvre :

Calcul 2D de la modulation de phase adéquate pour chaque forme
Application correcte de cette modulation

Calcul de la modulation de phase

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

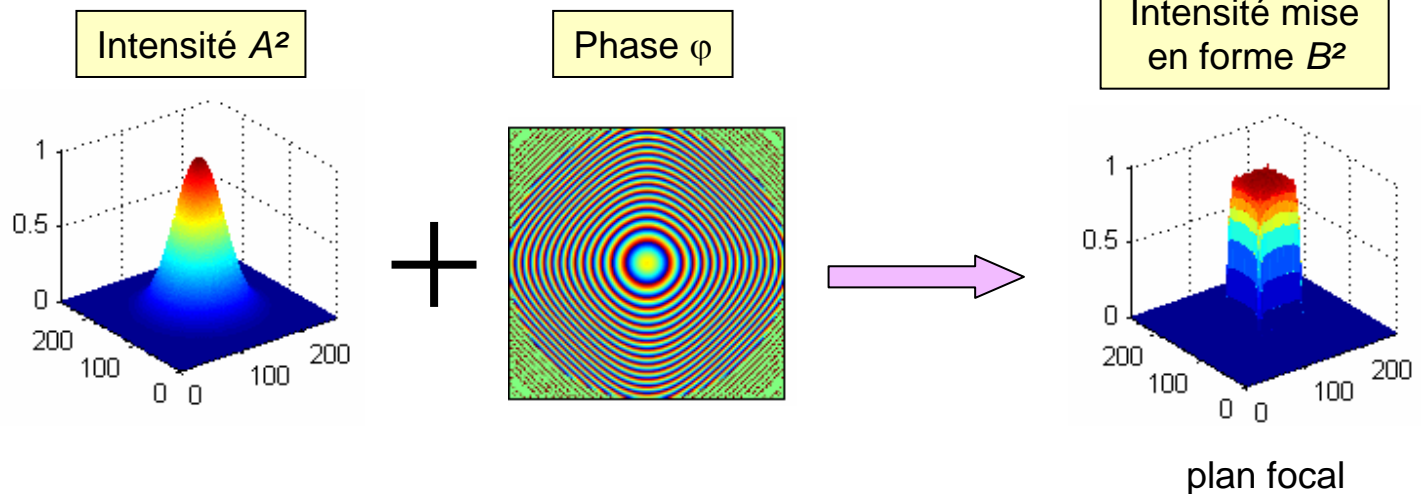
Quelle distribution de phase doit être appliquée au champ complexe incident pour obtenir la répartition d'intensité désirée dans le plan focal ?

Entrée : $\begin{cases} \text{Amplitude incidente } A \\ \text{Amplitude désirée } B \end{cases}$

Sortie : Distribution de phase φ

$$Ae^{i\varphi} \rightleftharpoons Be^{i\psi}$$

Procédure numérique itérative
(algorithme de Gerchberg & Saxton)



Résultats typiques du calcul

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

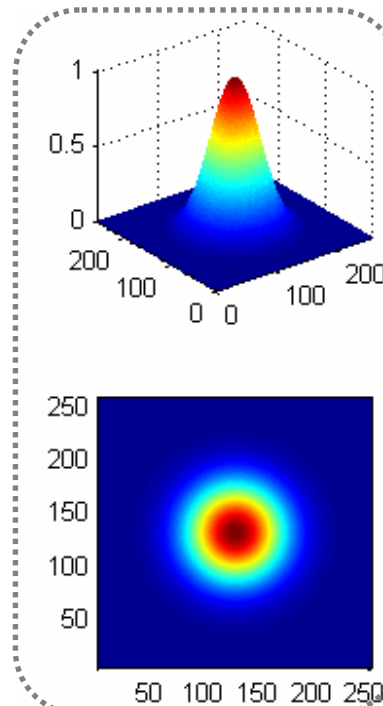
1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

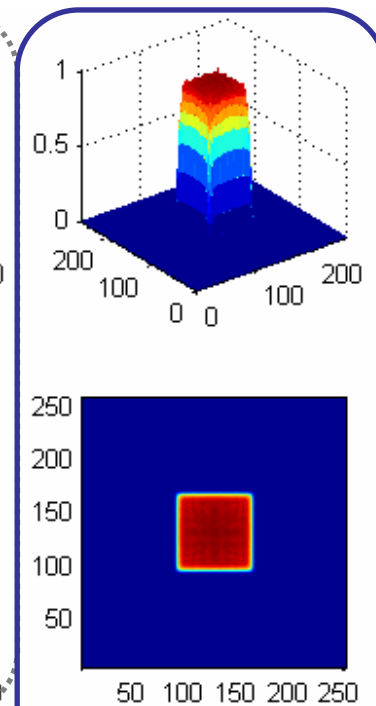
IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

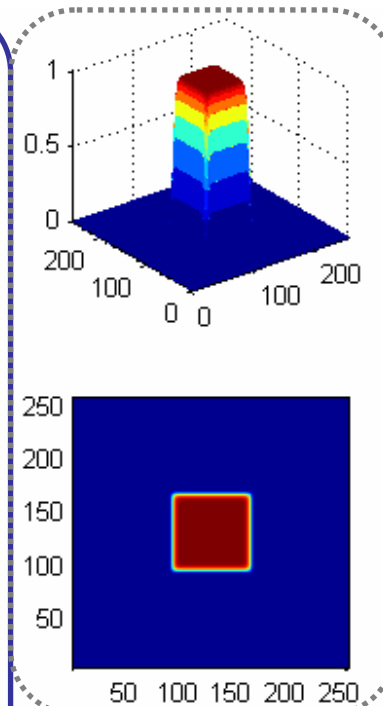
Faisceau incident



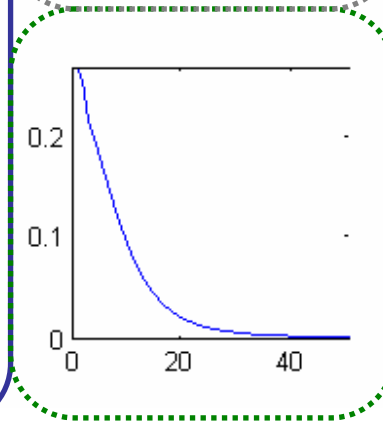
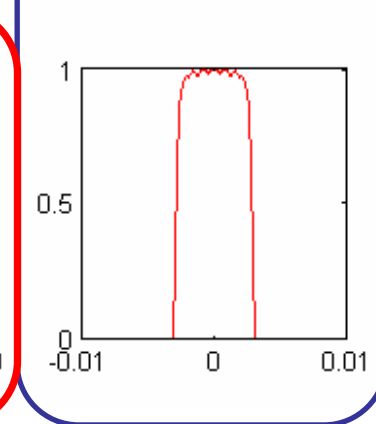
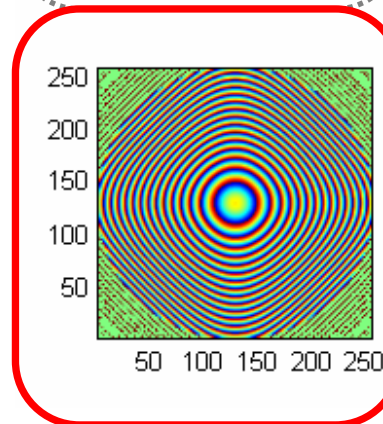
Forme obtenue



Forme désirée



Taille = αf



Résultat du calcul :
phase à appliquer

Erreur en fonction du
nombre d'itérations

Le problème des sauts de phase

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

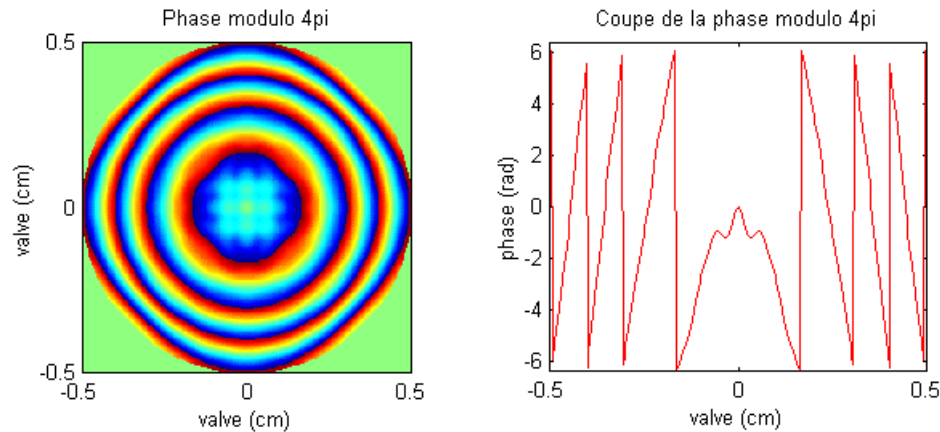
1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Carte de phase calculée pour obtenir un point focal carré :

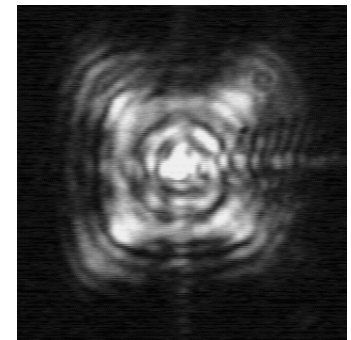
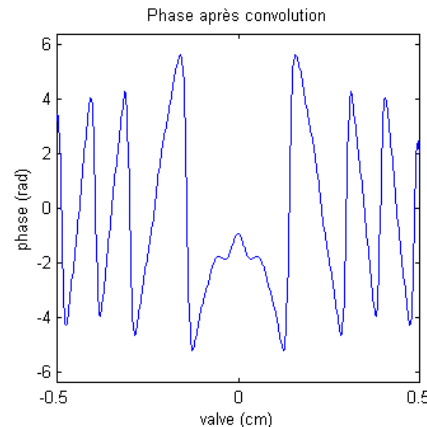


3 sauts de phase

Prise en compte de la **réponse percussive** de la valve optique (gaussienne de largeur 100 μm)



Déformation des sauts de phase (filtrage)



Mauvaise qualité de mise en forme

Solution : soustraction de la courbure de phase

Introduction

I Correction de front d'onde

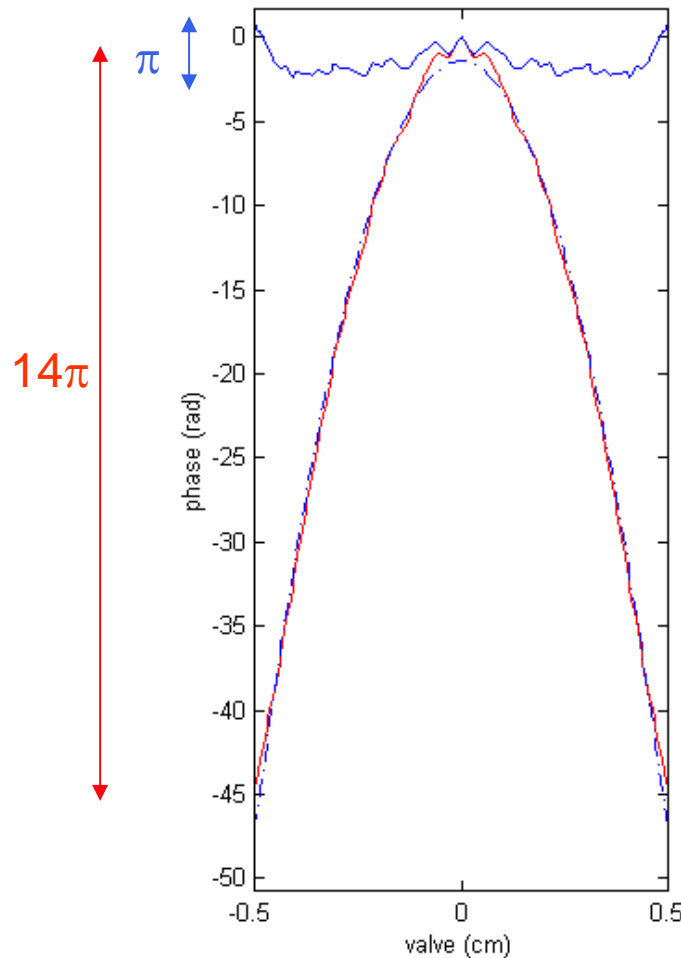
II Mise en forme de tache focale

1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion



- phase
- - ajustement parabolique
- résidu = phase - courbure

Ajustement parabolique



Soustraction de la courbure de phase



Résidu de phase :

- faible amplitude
- suppression des sauts de phase



Insensibilité à la réponse percussionnelle de la valve optique

Soustraction de la courbure de phase : Résultat

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

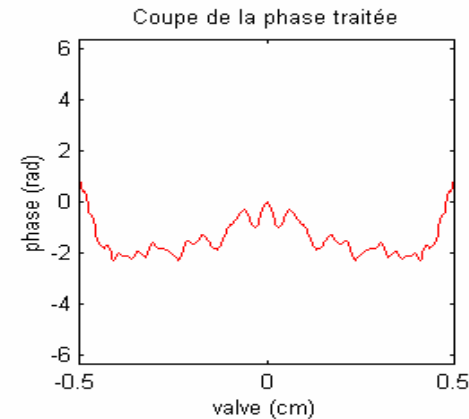
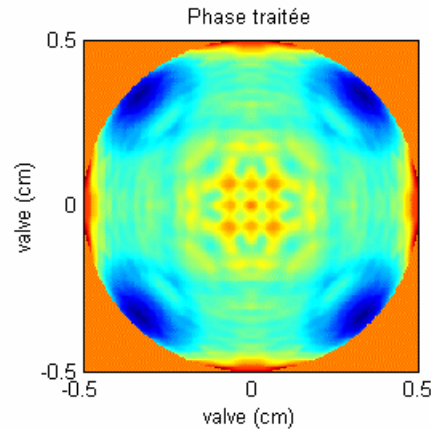
1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

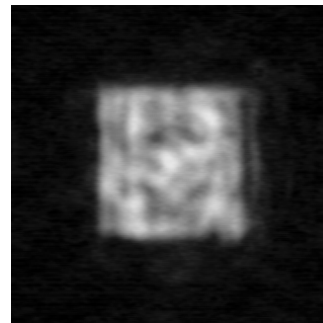
Carte de phase après soustraction de la courbure :



aucun saut de phase

Expérimentalement :

- courbure de phase appliquée par un télescope déréglé
- résidu de phase appliqué par la valve optique



Mise en forme de qualité

Procédure expérimentale

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

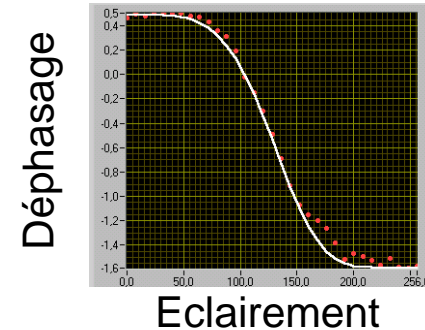
III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

- **Même montage** que pour la correction de front d'onde

- **Etalonnage** de la valve optique



- **Conversion** des cartes de phase calculées
- **Boucle d'optimisation**

Procédure pour obtenir une forme de faisceau donnée :

- Application de la carte de phase (résidu)
- Application de la courbure de phase adéquate
- Boucle d'optimisation

- Points délicats :
- alignements
 - convergence des boucles d'optique adaptative

Résultats de mise en forme (1)

Introduction

I Correction de front d'onde

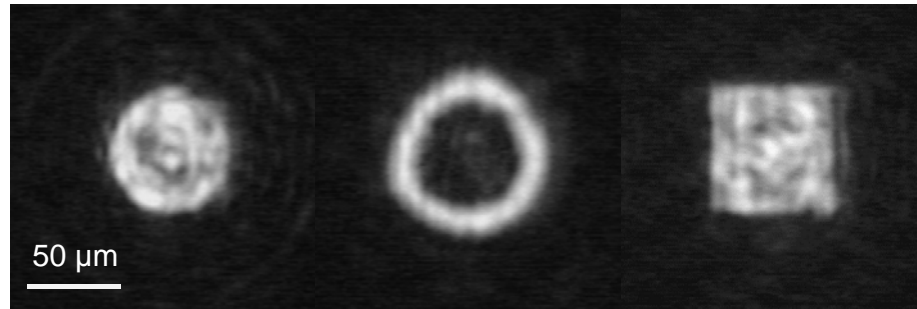
II Mise en forme de tache focale

1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

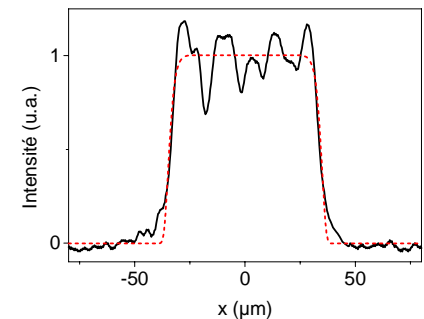
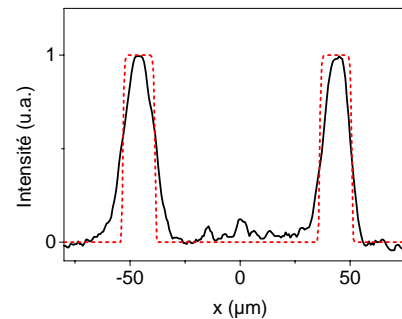
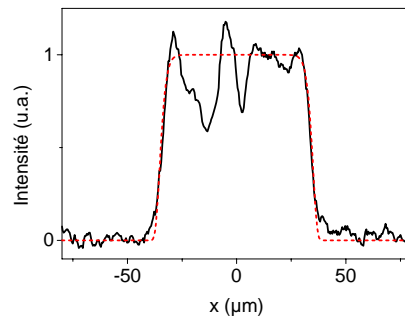
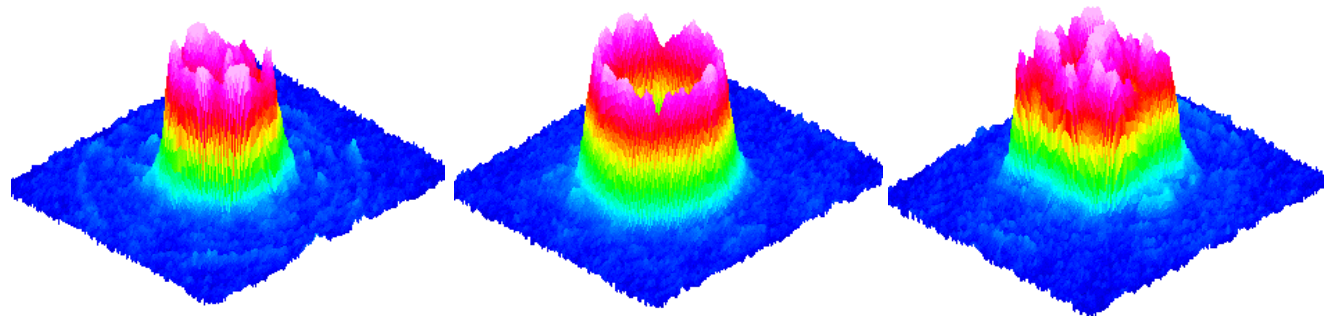
III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion



Taille des motifs :
70 μm



Formes et dimensions des motifs en bon accord avec les résultats demandés

Résultats de mise en forme (2) : motifs dissymétriques

Introduction

I Correction de front d'onde

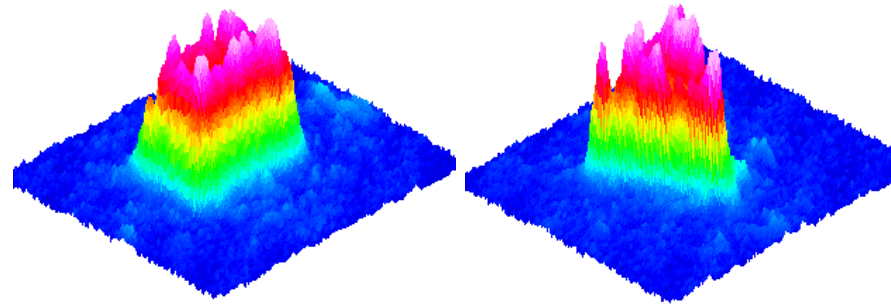
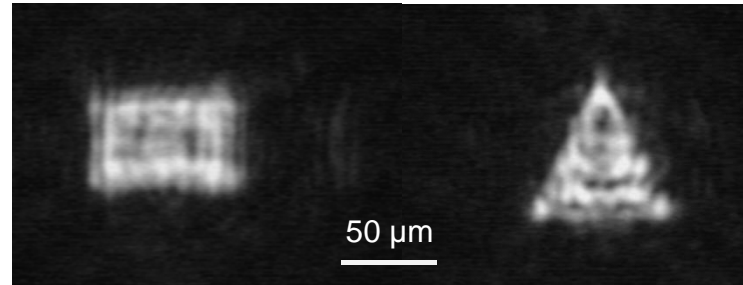
II Mise en forme de tache focale

1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion



Erreurs calculées (moindres carrés) par rapport à la forme parfaite :

Motif	Top-hat rond	Top-hat carré	Couronne	Rectangle	Triangle
Erreur	6%	5%	19%	7%	13%



Formes variées, complexes et de petites dimensions



Contrôle informatique : passage direct d'une forme à l'autre

Plan de mise en forme (1)

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

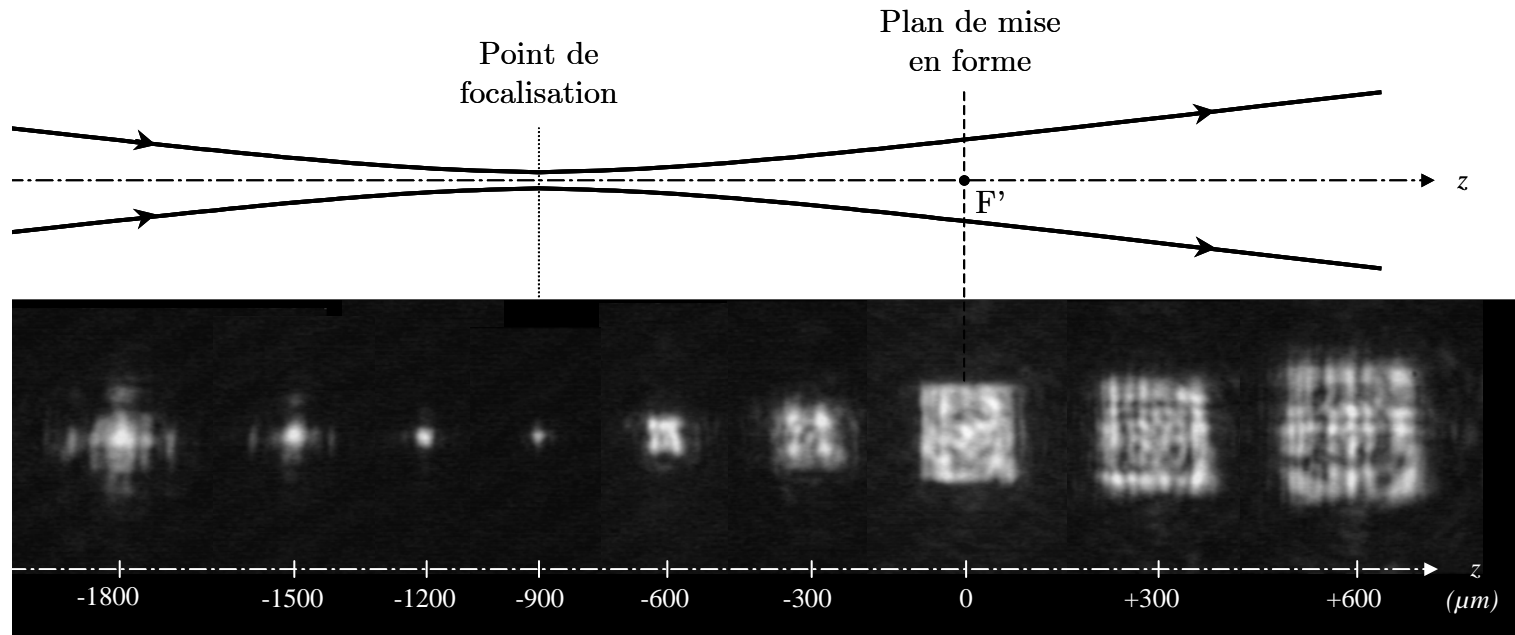
1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Observation : plan de mise en forme et point de focalisation décalés



Explication :

La courbure de phase crée une convergence additionnelle

⇒ Focalisation avant F'

⇒ En F' : mise en forme + courbure de phase résiduelle

Solution : compenser la courbure de phase dans le plan de mise en forme grâce à un deuxième modulateur de phase

Plan de mise en forme (2) : solution

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

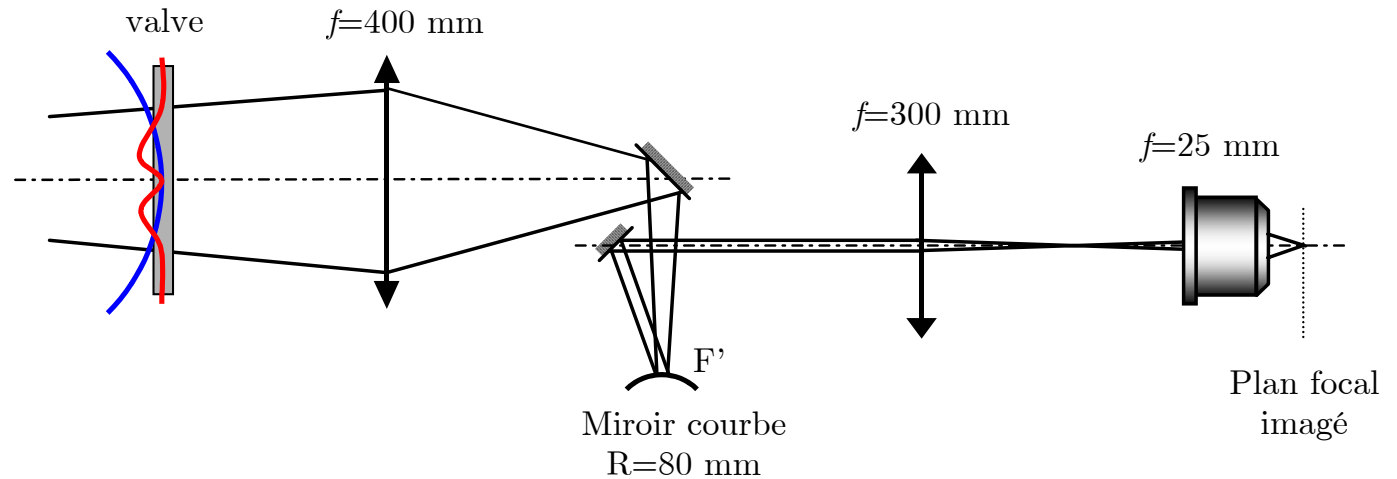
1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

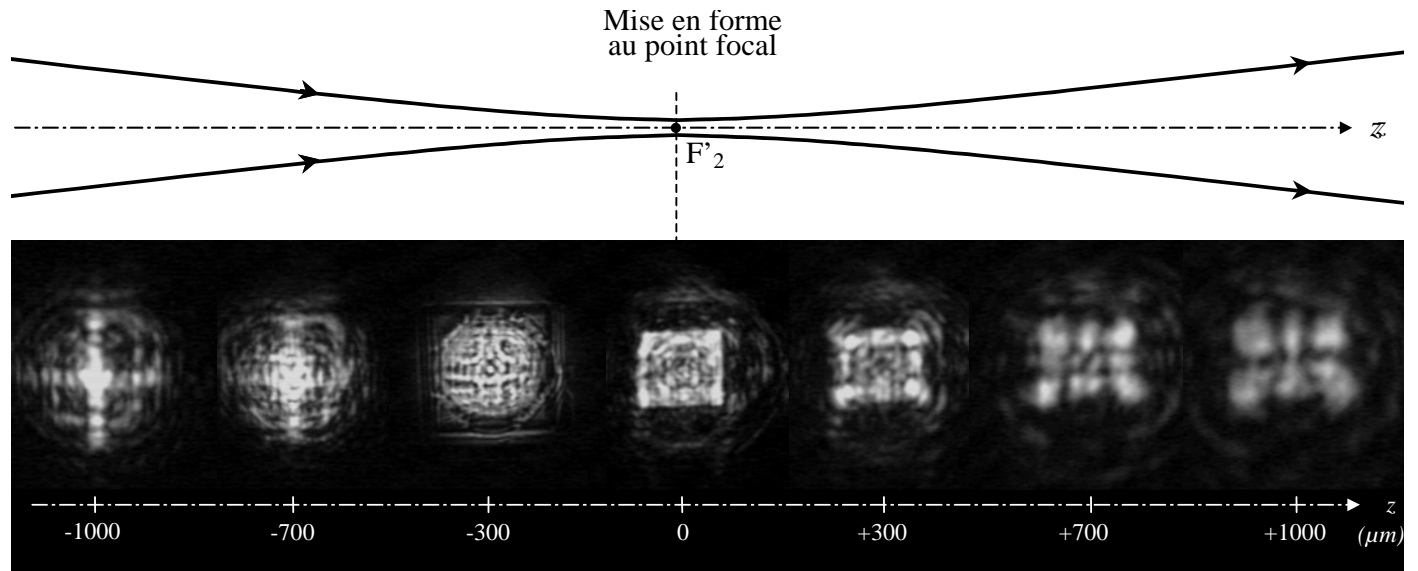
IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Expérience : compensation de courbure



Résultat : mise en forme dans le plan où le faisceau est le plus petit



Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Conception d'un outil de conformation dynamique de la tache focale

1. Correction de front d'onde de grande qualité :

- ⇒ $\lambda/15$ pic-vallée, $\lambda/100$ rms
- ⇒ Rapport de Strehl très proche de 1
- ⇒ Point focal limité par diffraction

2. Mise en forme programmable de tache focale :

- ⇒ Calcul de la modulation de phase pour générer une forme arbitraire
- ⇒ Décomposition de la phase : courbure + résidu
- ⇒ Obtention de formes variées au point focal ($70 \mu\text{m}$)
- ⇒ Contrôle informatique (grande souplesse)
- ⇒ Durée d'impulsion non affectée



Utilisation pour l'interaction laser-matière femtoseconde

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

1. Principe
2. Calcul de la modulation de phase
3. Sauts de phase
4. Procédure exp
5. Résultats
6. Conclusion

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

III – Micro-usinage de surface

Dispositif expérimental

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

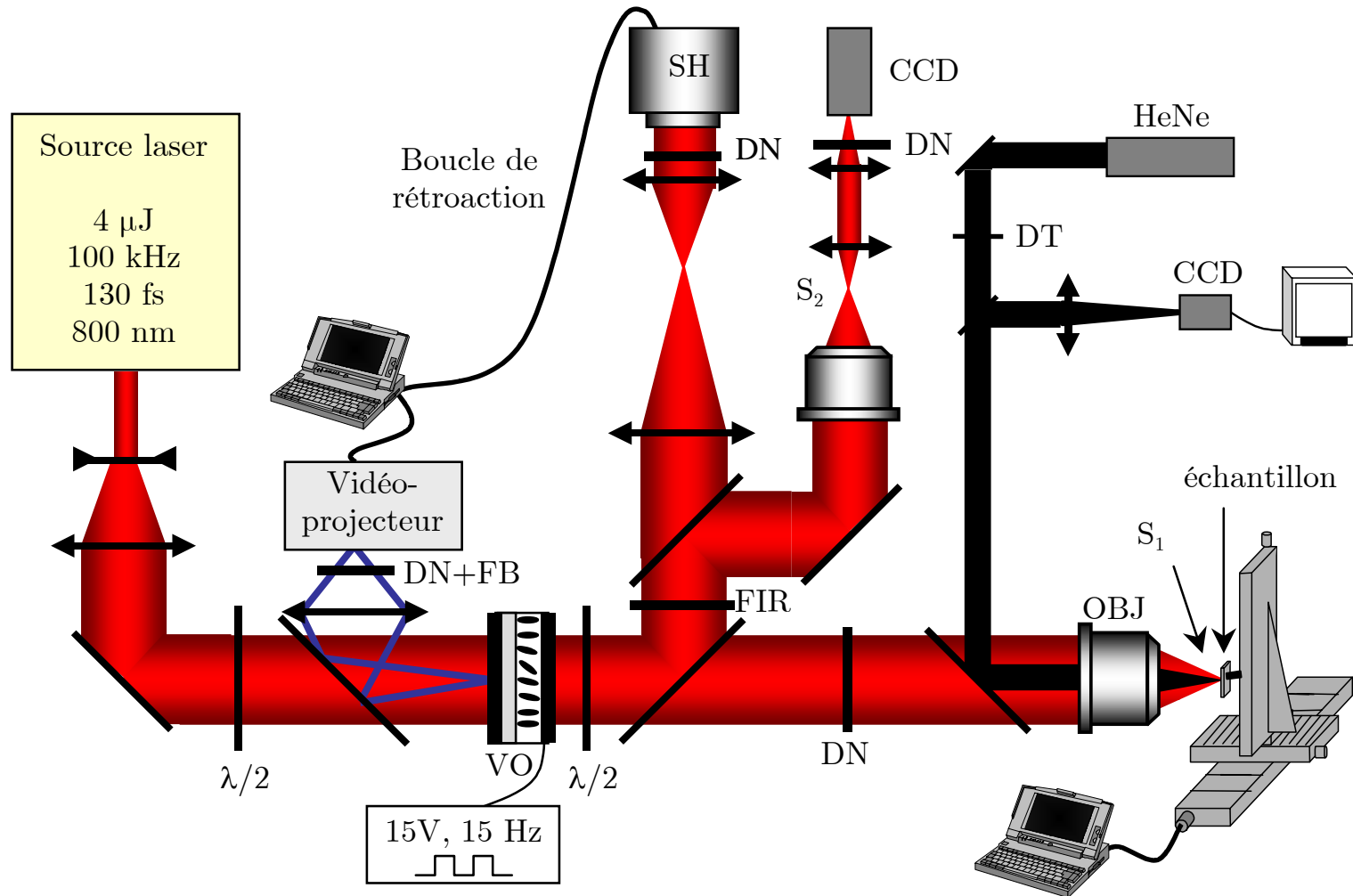
III Micro-usinage

1. Montage

2. Usinage à la limite de diffraction
3. Usinage avec un faisceau top-hat
4. Usinage direct avec un motif complexe
5. Ondulations de surface
6. Conclusion

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion



Micro-usinage au point focal

Contrôle en temps réel par imagerie de l'échantillon

Micro-usinage à la limite de diffraction (1)

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

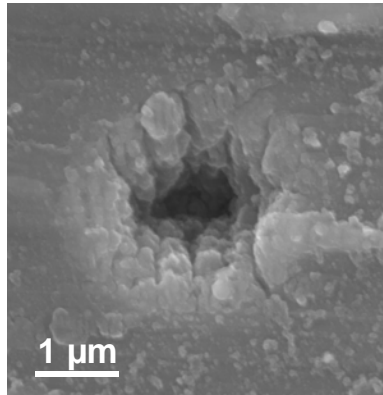
III Micro-usinage

1. Montage
2. Usinage à la limite de diffraction
3. Usinage avec un faisceau top-hat
4. Usinage direct avec un motif complexe
5. Ondulations de surface
6. Conclusion

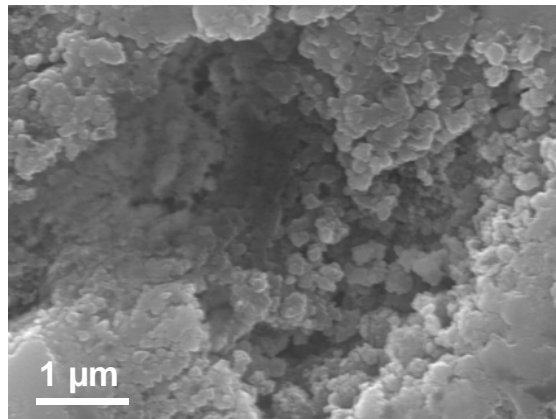
IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Sans correction de front d'onde

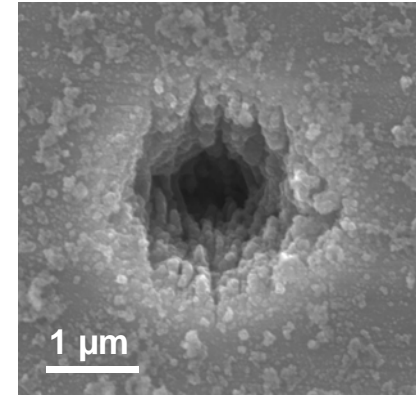


Trou distordu de 1 μm × 0,5 μm

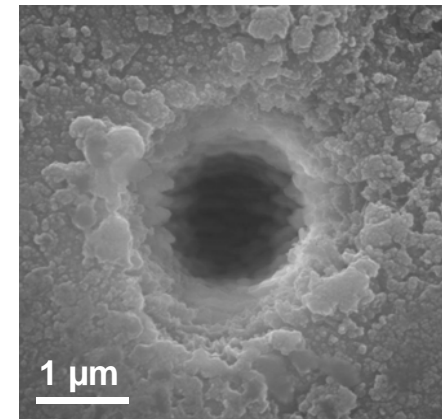


Trou extrêmement distordu

Avec correction de front d'onde



Trou de diamètre 1,8 μm



Trou de diamètre 1,7 μm

Inox
5.10⁴ imp.
20 nJ
130 fs
100 kHz

Rubis
5.10⁴ imp.
650 nJ
130 fs
100 kHz



Usinage propre à la limite de diffraction

Usinage avec un faisceau limité par diffraction (2)

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

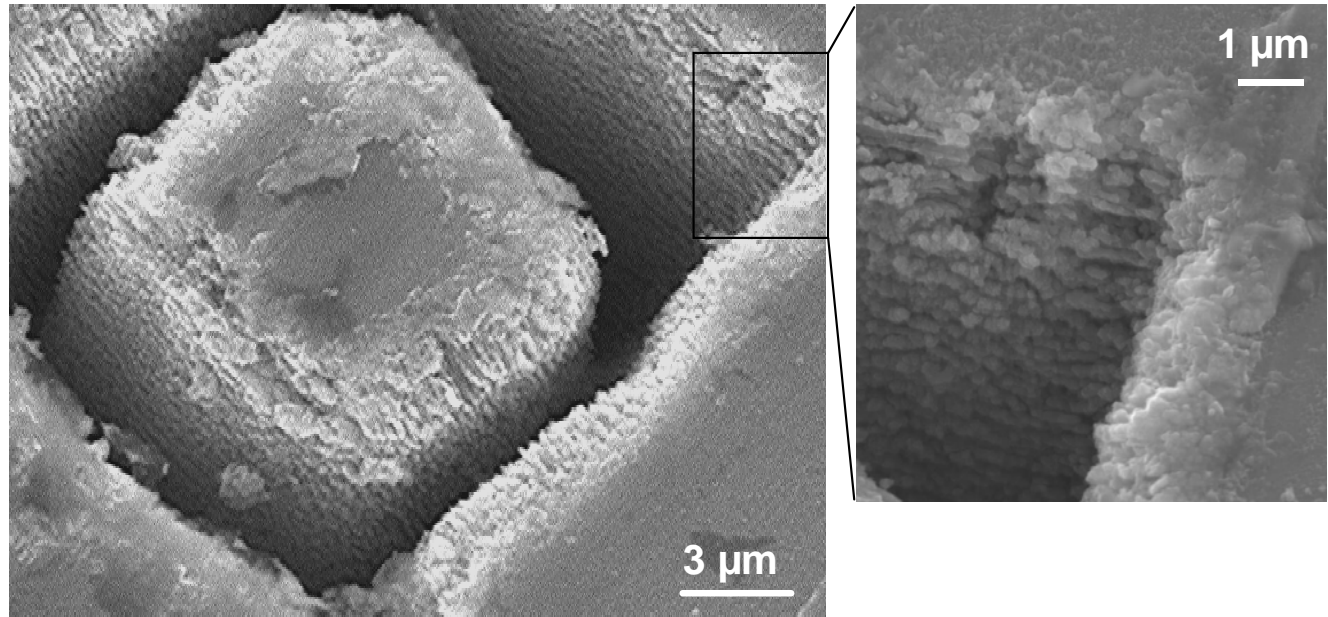
1. Montage
2. Usinage à la limite de diffraction
3. Usinage avec un faisceau top-hat
4. Usinage direct avec un motif complexe
5. Ondulations de surface
6. Conclusion

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Contrôle précis du point focal

⇒ usinage de grande **précision** et de grande **qualité**



Carré de $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ (inox) usiné par translation de l'échantillon

Faisceau gaussien / faisceau top-hat

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

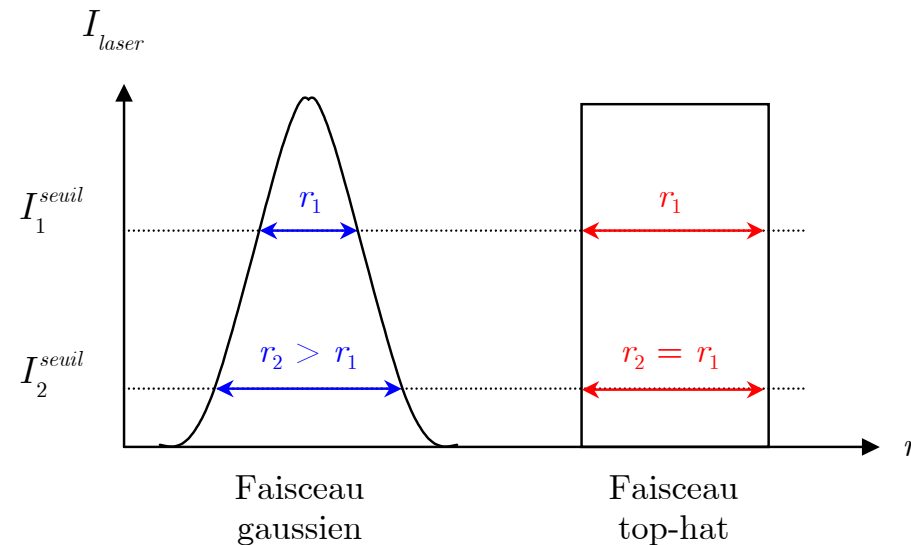
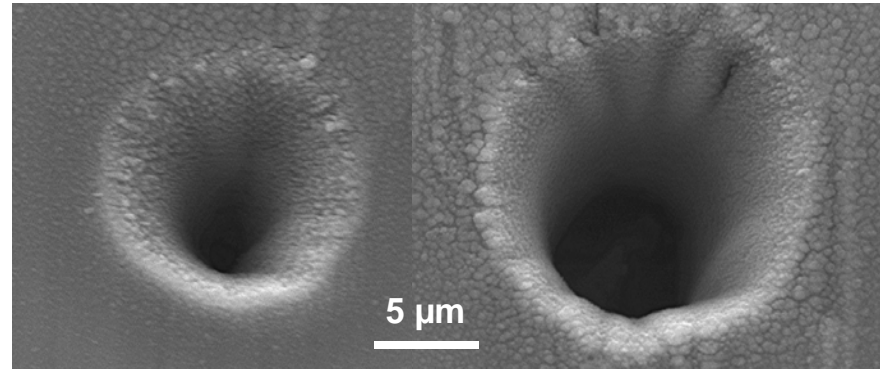
1. Montage
2. Usinage à la limite de diffraction
3. Usinage avec un faisceau top-hat
4. Usinage direct avec un motif complexe
5. Ondulations de surface
6. Conclusion

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Point focal limité par diffraction

Tache focale top-hat



Faisceau top-hat : **diamètre du trou = diamètre du faisceau**
indépendamment de l'énergie

Usinage de sillons avec un faisceau top-hat

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

1. Montage
2. Usinage à la limite de diffraction
3. Usinage avec un faisceau top-hat
4. Usinage direct avec un motif complexe
5. Ondulations de surface
6. Conclusion

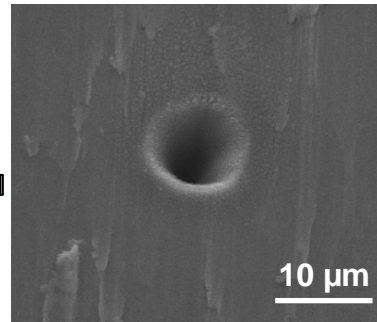
IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Point focal limité par diffraction

Tache focale top-hat

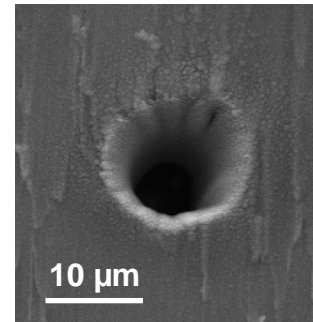
Trou gaussien



10 μm

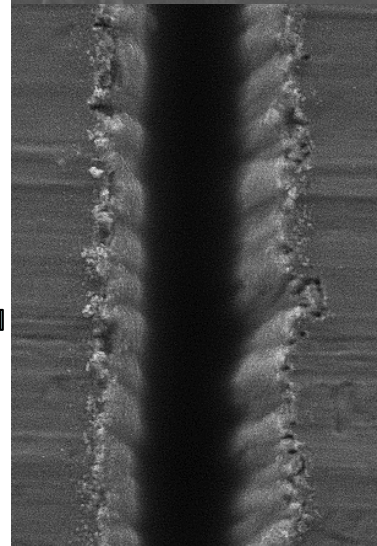


Trou avec des bords raides



10 μm

Diamètre du sillon
≠
Diamètre du trou



Diamètre du sillon
=
Diamètre du trou
=
Diamètre du faisceau

⇒ Amélioration de { la qualité d'usinage
la précision de contrôle

10 passages à 100 μm/s
1.5 μJ, 130 fs, 100 kHz

Marquage avec des motifs complexes

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

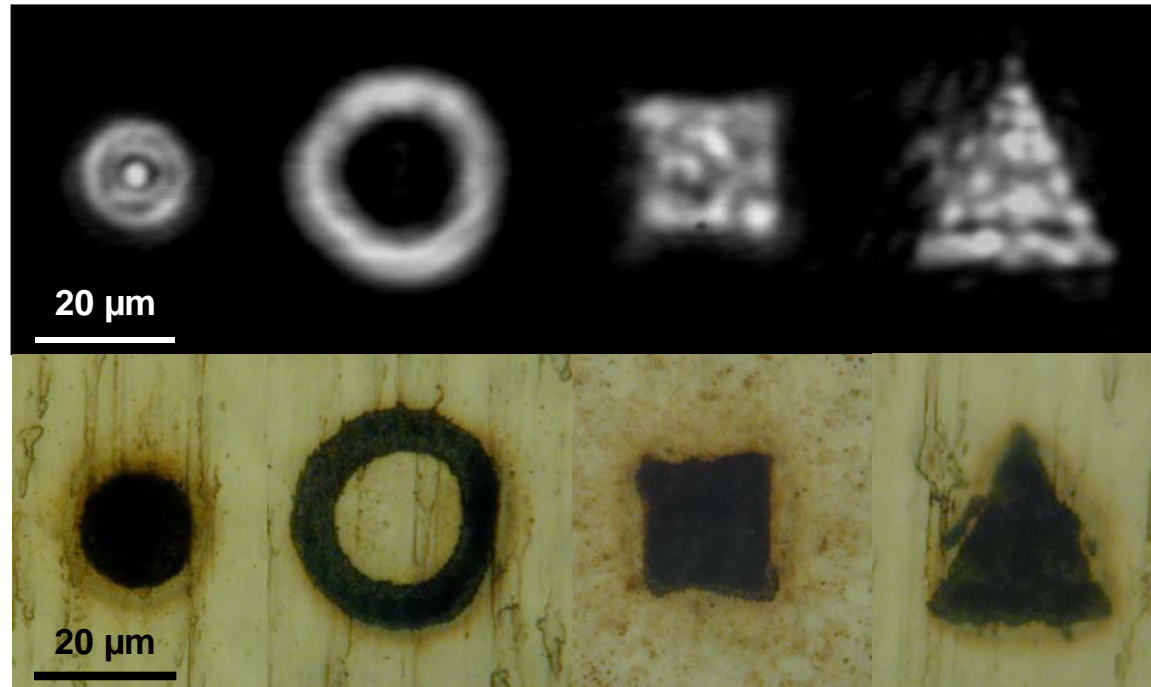
III Micro-usinage

1. Montage
2. Usinage à la limite de diffraction
3. Usinage avec un faisceau top-hat
4. Usinage direct avec un motif complexe
5. Ondulations de surface
6. Conclusion

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Marquage en surface $< 1 \mu\text{m}$



Tache focale

Marquage (inox)

0.48 μJ , 130 fs, 100 kHz

⇒ Bonne correspondance entre forme du faisceau et forme du marquage réalisé



Contrôle extrêmement précis du marquage grâce au contrôle de la tache focale

Micro-usinage direct de formes complexes

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

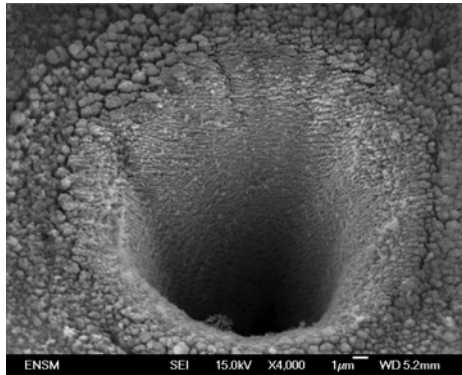
III Micro-usinage

1. Montage
2. Usinage à la limite de diffraction
3. Usinage avec un faisceau top-hat
4. Usinage direct avec un motif complexe
5. Ondulations de surface
6. Conclusion

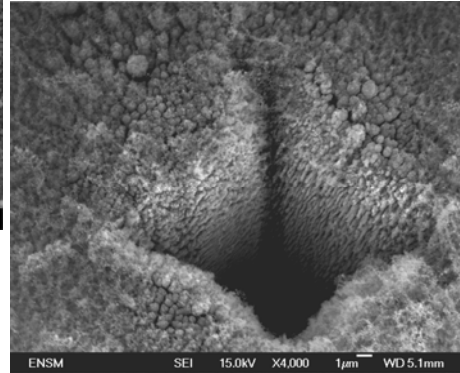
IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

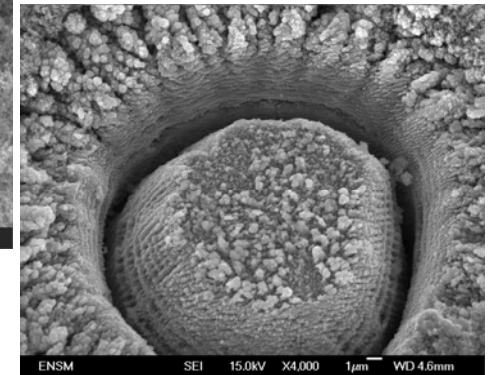
Top-hat



Carré



Couronne



Profondeur ~ 15 µm

1.5 µJ, 130 fs, 100 kHz



**Micro-usinage direct
de formes complexes**

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

1. Montage
2. Usinage à la limite de diffraction
3. Usinage avec un faisceau top-hat
4. Usinage direct avec un motif complexe
5. Ondulations de surface
6. Conclusion

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Mise en forme programmable de faisceau = outil pour optimiser le micro-usinage de surface

▪ Point focal limité par diffraction

⇒ **Micro-usinage de qualité à la limite de diffraction (1.7 μm)**

▪ Faisceau top-hat

⇒ **Adéquation entre taille du faisceau et taille de l'usinage**

- Usinage percussion (fixe)
- Usinage en mouvement

⇒ **Découplage entre taille du trou et énergie**

▪ Mise en forme

⇒ **Micro-usinage et micro-marquage directs de formes complexes**

⇒ **Extension des possibilités applicatives**

Introduction

I Correction de
front d'onde

II Mise en forme
de tache focale

III Micro-usinage

**IV Photoinscription
de guides d'ondes**

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des
guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion

IV – Photoinscription de guides d'ondes

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

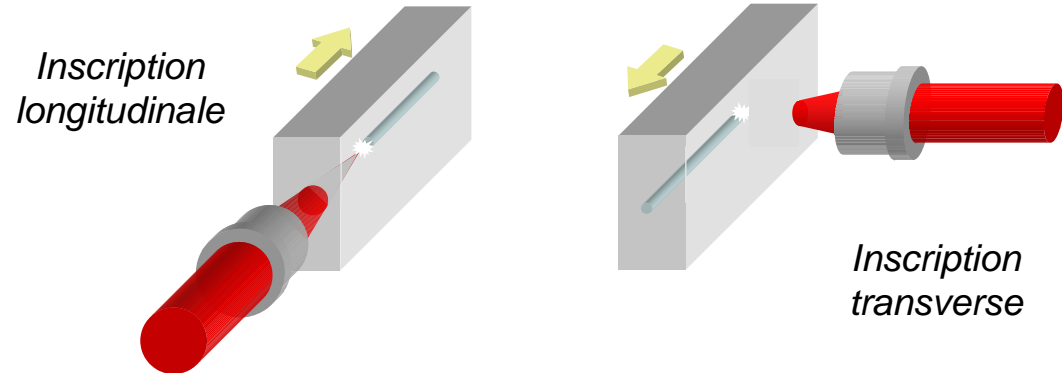
IV Photoinscription de guides d'ondes

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion

Principe :

Focalisation dans la masse du verre \Rightarrow augmentation de l'indice
Par translation : on inscrit une ligne \Rightarrow guide d'ondes



Historique :

- Emergence de cette thématique : 1996-98 [Hirao, Miura]
- Premier composant : coupleur Y [Homoelle 1999]
- Inscription transverse : 2001 [Schäffer, Mazur]
- Etudes de la section du guide : 2002 [Will], [Cerullo, Osellame]

\Rightarrow Problématique : **contrôle précis** de la forme et des dimensions des guides inscrits

\Rightarrow **Intérêt d'un dispositif de mise en forme de tache focale**

Choix de la configuration d'inscription

Introduction

I Correction de front d'onde

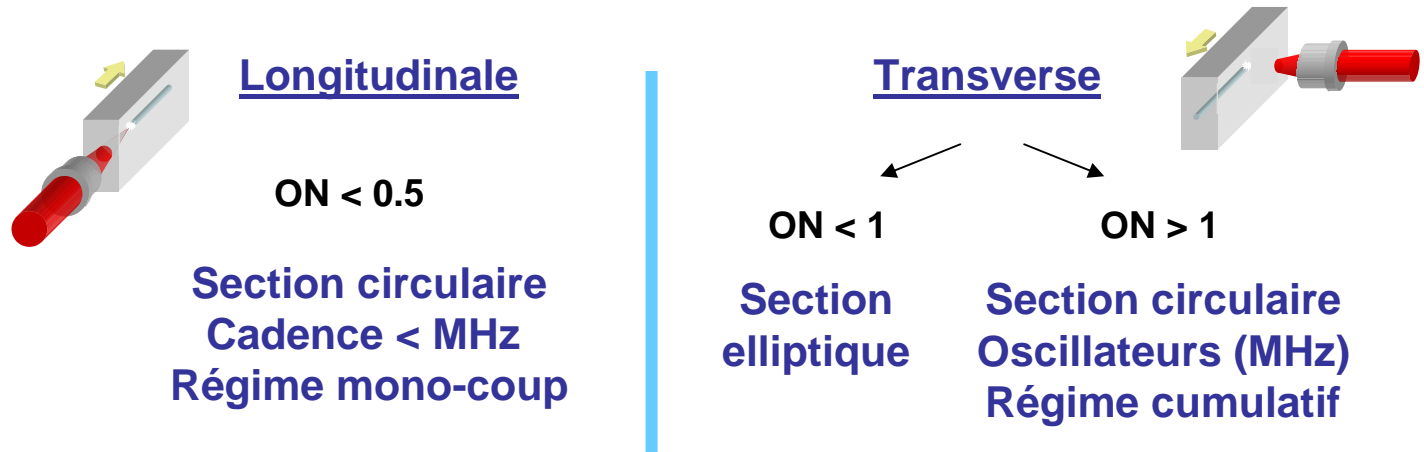
II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion



Pour contrôler le profil \Rightarrow **Configuration longitudinale**

- 😊 {
- Guide à section symétrique
 - Contrôle de la section du guide par contrôle du faisceau
 - Injection immédiate après inscription

- ☹️ {
- Longueur limitée par la distance de travail des objectifs
 - Aberrations géométriques et effets non-linéaires

Dispositif expérimental

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

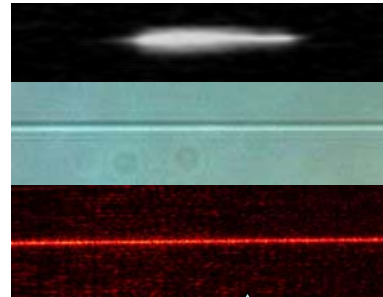
III Micro-usinage

IV **Photoinscription de guides d'ondes**

1. Principe
2. **Montage**
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion

Imagerie latérale

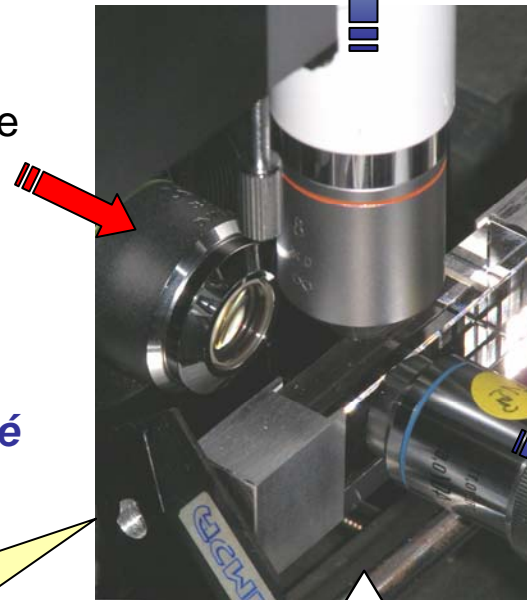


plasma

modification d'indice

guide injecté

- Inscription fs
- Injection He-Ne

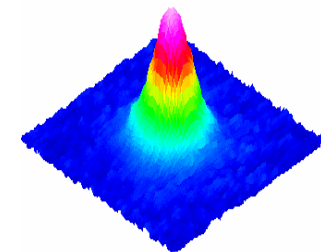


Point focal limité par diffraction

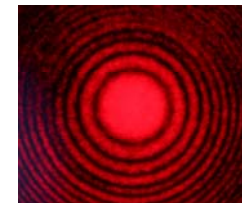
Guides inscrits dans la masse du verre

Silice pure

Eclairage blanc



Analyse du mode guidé



Analyse en champ lointain

Contrôle par observation du plasma

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

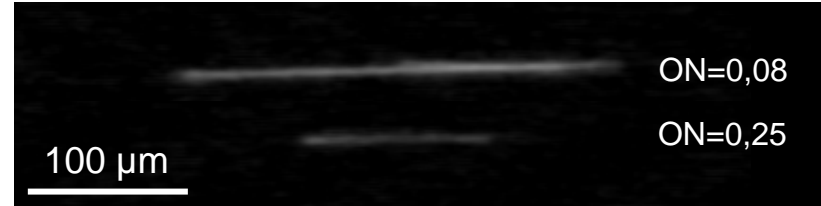
IV Photoinscription de guides d'ondes

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

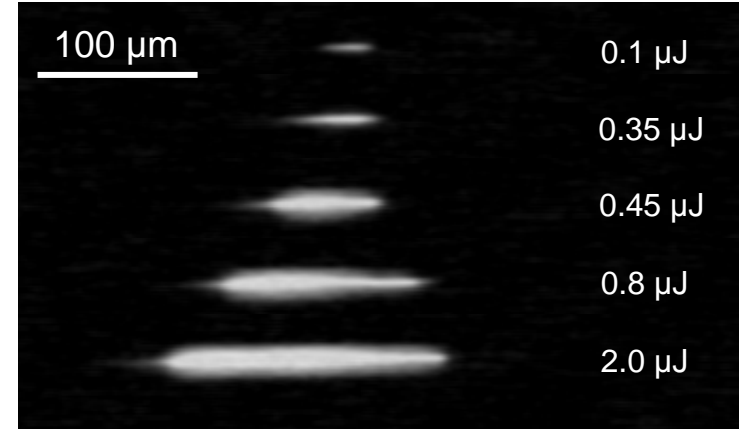
Conclusion

Contrôle de la longueur du plasma

Influence de la focalisation (ON)

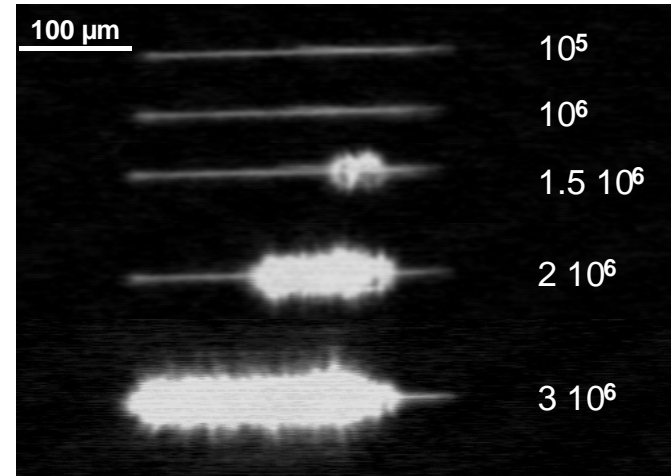


Influence de l'énergie



Contrôle du dommage produit

Influence du nombre d'impulsions



Ajustement des paramètres pour éviter le dommage

Étude morphologique des guides (1)

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion

Etude systématique des conditions d'inscription



Analyse des guides



Aachen (Allemagne)

Influence de l'énergie



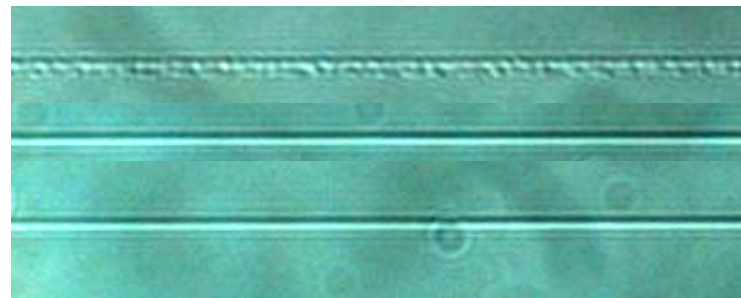
0.5 μJ

0.8 μJ

1.5 μJ

10 $\mu\text{m/s}$

Influence de la vitesse de translation



10 $\mu\text{m/s}$

20 $\mu\text{m/s}$

50 $\mu\text{m/s}$

1.5 μJ



Ajustement du couple {énergie, vitesse de translation}

Étude morphologique des guides (2)

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

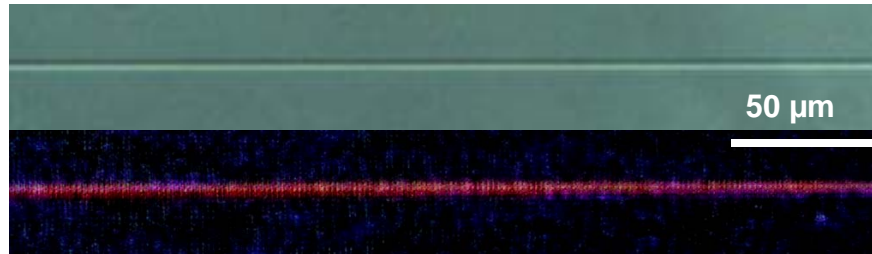
III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

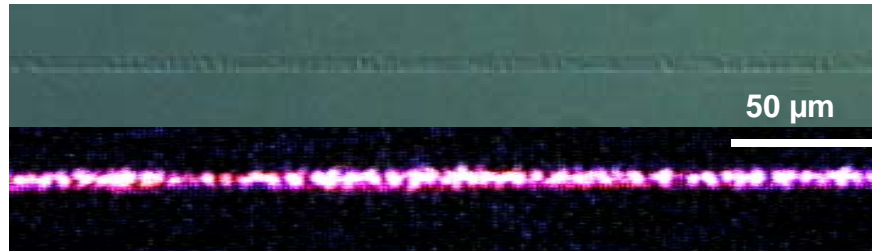
1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion

Relation morphologie / propriétés guidantes



Guide régulier et homogène
⇒ **Guidage correct**



Guide endommagé
⇒ **Pertes élevées**

Étude morphologique des guides (3) : conclusion

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

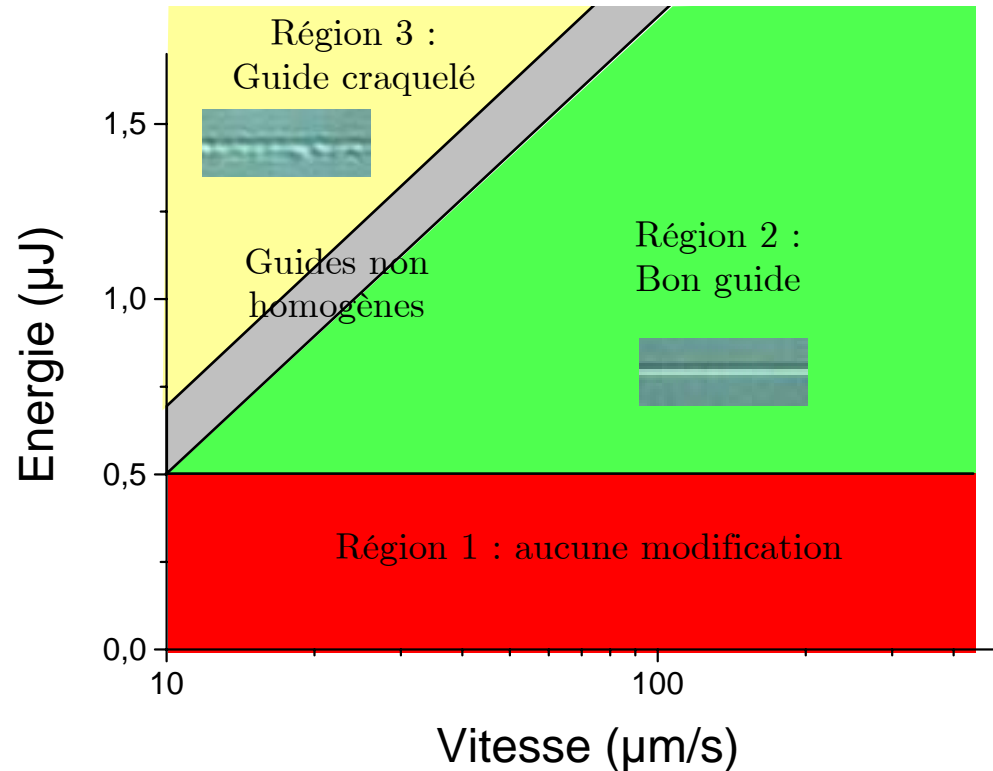
IV Photoinscription de guides d'ondes

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion

Ajustement de paramètres interdépendants

- focalisation (ON)
- énergie
- vitesse de translation



Maîtrise des procédures de photoinscription de guides

Diamètre : influence des paramètres expérimentaux

Introduction

I Correction de front d'onde

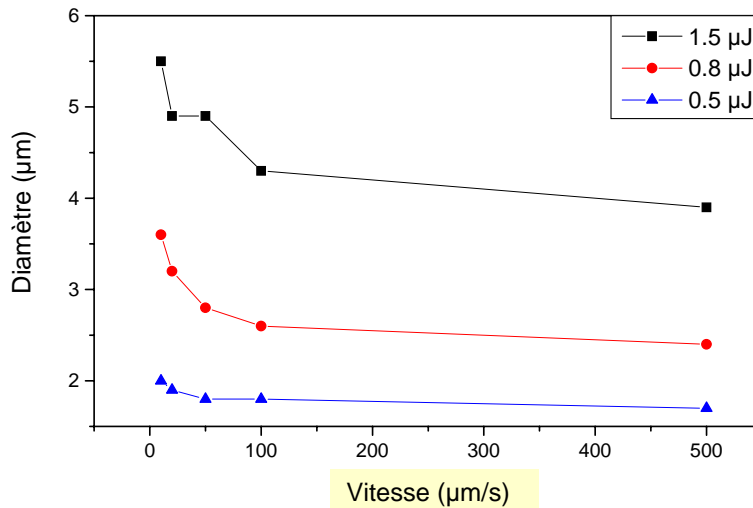
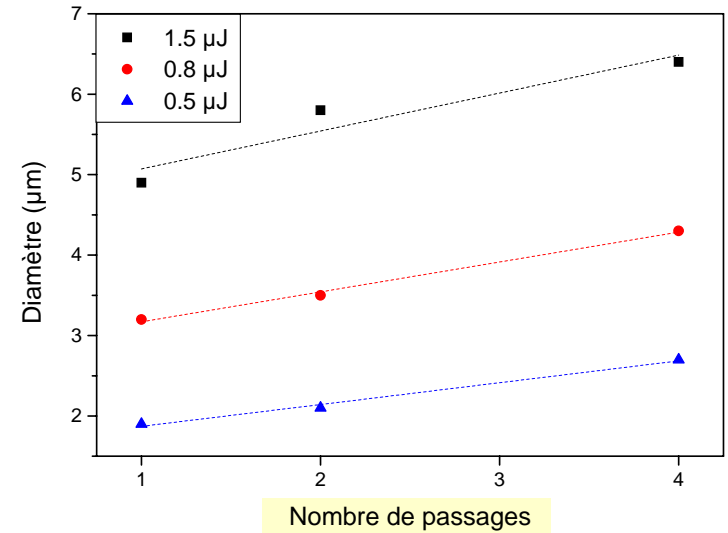
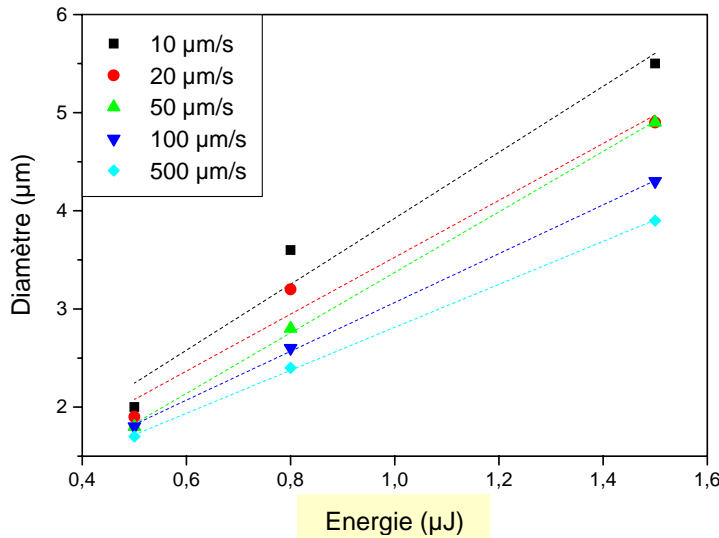
II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion



$$1.2 \mu\text{m} < \text{diamètre guides} < 7.4 \mu\text{m}$$

(point focal limité par diffraction : 2 μm)



Diamètre du guide :

↗ avec énergie

↗ avec nombre de passages

↘ si vitesse ↗

Propriétés guidantes

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

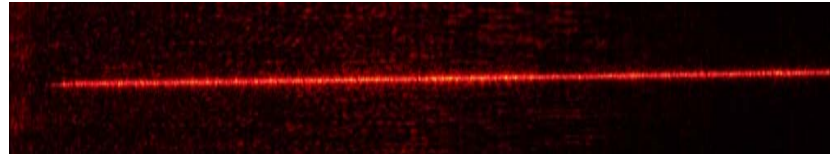
III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion

Injection He-Ne

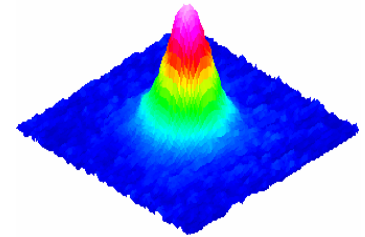
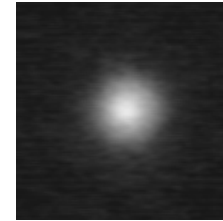


Analyse du mode guidé

Faisceau d'inscription limité par diffraction

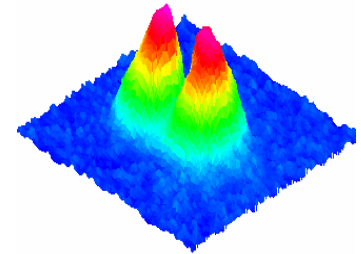
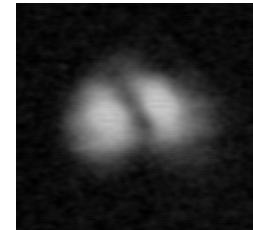
Inscription : $ON=0.25$ → LP₀₁ 14 μm

$$\phi_{\text{théo}} = 13 \mu\text{m}$$



Inscription : $ON=0.08$ → LP₁₁ 20 μm

$$16 \mu\text{m} < \phi_{\text{théo}} < 26 \mu\text{m}$$



Estimation de l'ouverture numérique en sortie : $ON \sim 0.04$

$$ON = \sqrt{2n\Delta n}$$

$$\Delta n \sim 5 \cdot 10^{-4}$$

ON } ⇒ Calcul des diamètres théoriques des modes guidés ⇒ Bon accord avec les mesures



Contrôle du mode par contrôle du faisceau d'inscription

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

1. Principe
2. Montage
3. Analyse du plasma
4. Morphologie des guides
5. Diamètre des guides
6. Propriétés guidantes
7. Conclusion

Conclusion

Conclusion

Etudes : plasma et morphologie des guides

⇒ Détermination des paramètres expérimentaux optimums

{ Focalisation
Énergie
Vitesse de translation

⇒ Démonstration de la possibilité de **contrôle du mode guidé** par **contrôle du faisceau d'écriture**

Perspectives

Contrôle de phase → Contrôle des aberrations et effets NL en profondeur

Mise en forme →

- Guides à section non circulaire (carré, anneau)
- Guides à diamètre variable (composants télécom)
- Inscription simultanée multi-points
- Contrôle du profil d'indice

CONCLUSION

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Conformation dynamique de faisceau femtoseconde par modulation de la phase spatiale



Correction de front d'onde

Point focal limité par diffraction



Mise en forme programmable de tache focale

Formes complexes et variées, de petites dimensions

Application : Optimisation des procédés laser ultra-brefs



Photoinscription en volume

Guides d'ondes :

- Meilleure maîtrise des procédés
- Contrôle des propriétés des guides



Micro-usinage

- Amélioration de la qualité d'usinage
- Usinage direct de motifs complexes



Outil innovant pour la structuration du faisceau
Optimisation et extension des procédés laser femtoseconde

Introduction

I Correction de front d'onde

II Mise en forme de tache focale

III Micro-usinage

IV Photoinscription de guides d'ondes

Conclusion

Amélioration et simplification du dispositif de mise en forme



Transfert industriel pour l'usinage précis de surface

Mise à profit pour le contrôle de l'interaction laser-matière



Dans la masse de matériaux transparents



Aide à la compréhension fine des mécanismes physiques



Contrôle du procédé d'inscription



Applications nouvelles (télécoms)

Merci de votre attention !