

Microscopie optique en champ proche (MOCP)

Une introduction

Jean-Louis Bijeon

LNIO/ICD et UMR 6279
Université de technologie de Troyes

Forum des microscopies à sonde locale 2011
28 mars - 1^{er} avril
Écully-Valpré

1 Introduction

- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

1 Introduction

- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

1 Introduction

- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

Plan du cours

1 Introduction

● Préambule

- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

Public concerné

Ce cours s'adresse aux personnes :

Qui souhaitent découvrir la microscopie optique en champ proche, les notions théoriques nécessaires sont les caractéristiques des ondes électromagnétiques et l'optique ondulatoire en générale. Le cours de 30 min constitue un survol de la MOCP et ne se prétend nullement exhaustif. Il souhaite modestement susciter un intérêt vers la MOCP domaine qui se diversifie grandement actuellement vers la nano-optique.

Plan du cours

1 Introduction

- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

Bref historique

Limite de la microscopie optique classique

Ernst Abbe au milieu du 19^{ème} siècle, met en évidence la limite de résolution et l'importance de l'ouverture numérique en microscopie optique classique.

$$d = 1,22 \times \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (1)$$

Les différents paramètres

- λ : la longueur d'onde ;
- n : l'indice du milieu ;
- θ : demi angle d'ouverture de l'objectif du microscope ;
- $n \sin \theta$: ouverture numérique du système imageur ;
- d distance entre le maximum et le premier minimum de la figure de diffraction de la pupille d'entrée circulaire du système.

Bref historique

Limite de la microscopie optique classique

Ernst Abbe au milieu du 19^{ème} siècle, met en évidence la limite de résolution et l'importance de l'ouverture numérique en microscopie optique classique.

$$d = 1,22 \times \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (1)$$

Les différents paramètres

- λ : la longueur d'onde ;
- n : l'indice du milieu ;
- θ : demi angle d'ouverture de l'objectif du microscope ;
- $n \sin \theta$: ouverture numérique du système imageur ;
- d distance entre le maximum et le premier minimum de la figure de diffraction de la pupille d'entrée circulaire du système.

Plan du cours

1 Introduction

- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- **Le critère de résolution en microscopie classique**

2 La microscopie optique en champ proche

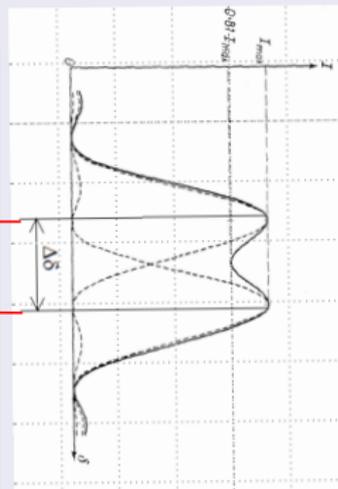
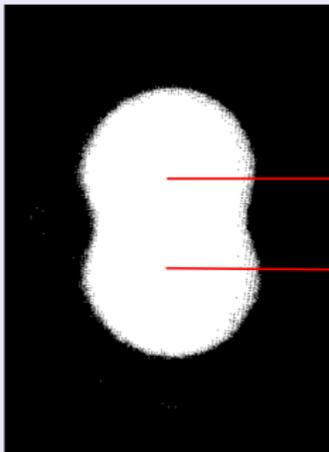
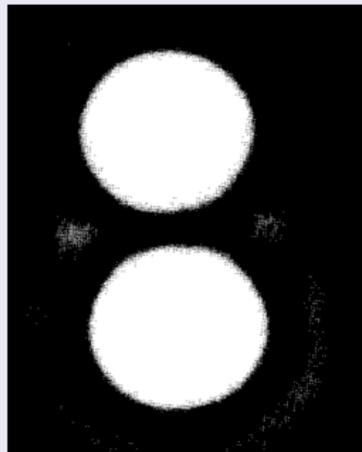
- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

Bref historique (suite)

L'énoncé du critère de Rayleigh

Deux points sont résolus si le maximum de la figure de diffraction du premier point (une tâche d'Airy dans le cas d'une pupille circulaire) coïncide avec le premier minimum de la figure de diffraction du second point.



Question : Comment améliorer la résolution ?

Jouer sur les paramètres : la voie classique

- Diminuer λ , exemple des DVD avec le passage de la lumière rouge à la lumière bleue (plus grande densité de stockage), microscopie électronique, lithographie extrême UV... ;
- $n \sin \theta$: Augmenter l'ouverture numérique du système imageur, par des gels d'indice $> 1,7$, forte toxicité ;
- Exploiter les effets non-linéaires des matériaux, lithographie 2 photons par exemple.

La quatrième voie les ondes évanescentes et leurs caractéristiques inhabituelles

C'est la base de l'idée de la microscopie en champ proche optique, exploiter les informations de surfaces *cachées* dans les ondes évanescentes.

Question : Comment améliorer la résolution ?

Jouer sur les paramètres : la voie classique

- Diminuer λ , exemple des DVD avec le passage de la lumière rouge à la lumière bleue (plus grande densité de stockage), microscopie électronique, lithographie extrême UV... ;
- $n \sin \theta$: Augmenter l'ouverture numérique du système imageur, par des gels d'indice $> 1,7$, forte toxicité ;
- Exploiter les effets non-linéaires des matériaux, lithographie 2 photons par exemple.

La quatrième voie les ondes évanescentes et leurs caractéristiques inhabituelles

C'est la base de l'idée de la microscopie en champ proche optique, exploiter les informations de surfaces *cachées* dans les ondes évanescentes.

Plan du cours

1 Introduction

- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

Bref historique sur les ondes évanescentes

L'expérience de la réflexion totale frustrée de Newton, effet tunnel optique

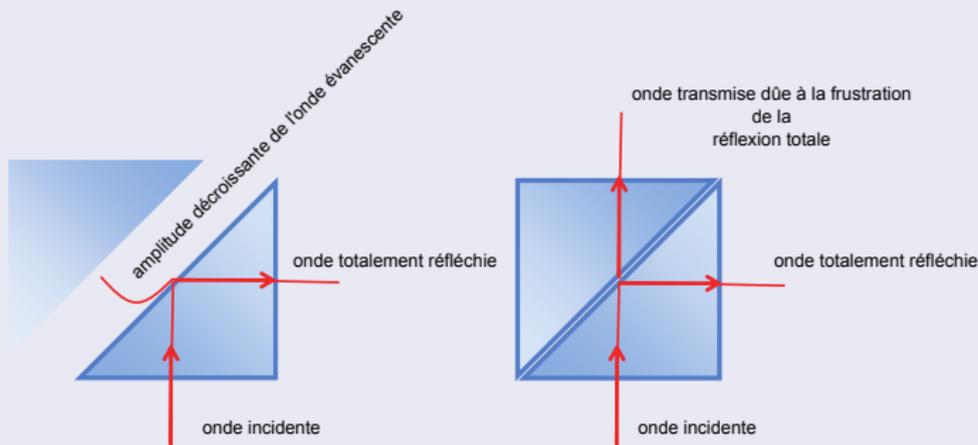


FIGURE: Mise en évidence des ondes évanescentes : expérience de Newton avec deux prismes

Un peu de théorie

La théorie ondulatoire de la lumière

Cette théorie rend compte parfaitement du phénomène, une onde est mathématiquement définie dans tout l'espace en conséquence elle ne peut être non nulle d'un côté du dioptré sans l'être de l'autre côté.

Dans une direction perpendiculaire au dioptré on aura donc les deux possibilités suivantes pour l'onde :

- Propagation, dans ce cas c'est l'onde transmise habituelle ;
- Non propagation, c'est l'onde évanescente dont l'amplitude décroît exponentiellement avec la distance à la surface du dioptré.

Un peu de théorie

La théorie ondulatoire de la lumière

Cette théorie rend compte parfaitement du phénomène, une onde est mathématiquement définie dans tout l'espace en conséquence elle ne peut être non nulle d'un côté du dioptré sans l'être de l'autre côté.

Dans une direction perpendiculaire au dioptré on aura donc les deux possibilités suivantes pour l'onde :

- Propagation, dans ce cas c'est l'onde transmise habituelle ;
- Non propagation, c'est l'onde évanescente dont l'amplitude décroît exponentiellement avec la distance à la surface du dioptré.

Un cas d'école sur le prisme : l'onde de Fresnel

Si n_1 désigne l'indice du prisme et n_2 l'indice de l'air l'angle critique θ_c est donné par :

L'angle critique

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Pour $n_1 = 1,458$ et $n_2 = 1$ on obtient $\theta_c = 43,3^\circ$ à 45° pour les prismes droits nous sommes bien en réflexion totale.

L'amplitude du champ évanescent en fonction de z la distance à la surface du prisme est donnée par :

L'amplitude du champ de l'onde de Fresnel

$$E(z) = E_0 \exp\left(-\frac{z}{d_p}\right) \quad (3)$$

Où E_0 est l'amplitude du champ à $z = 0$ et d_p est appelée profondeur de pénétration. Cette grandeur exprime la rapidité de décroissance du champ évanescent selon la direction z perpendiculaire à la surface du prisme.

La profondeur de pénétration

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi(n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

Pour $\theta_i = 45^\circ$, on obtient $d_p = 402$ nm pour $\lambda = 633$ nm, c'est la d_p de l'onde de Fresnel.

Un cas d'école sur le prisme : l'onde de Fresnel

Si n_1 désigne l'indice du prisme et n_2 l'indice de l'air l'angle critique θ_c est donné par :

L'angle critique

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Pour $n_1 = 1,458$ et $n_2 = 1$ on obtient $\theta_c = 43,3^\circ$ à 45° pour les prismes droits nous sommes bien en réflexion totale.

L'amplitude du champ évanescent en fonction de z la distance à la surface du prisme est donnée par :

L'amplitude du champ de l'onde de Fresnel

$$E(z) = E_0 \exp\left(-\frac{z}{d_p}\right) \quad (3)$$

Où E_0 est l'amplitude du champ à $z = 0$ et d_p est appelée profondeur de pénétration. Cette grandeur exprime la rapidité de décroissance du champ évanescent selon la direction z perpendiculaire à la surface du prisme.

La profondeur de pénétration

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi(n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

Pour $\theta_i = 45^\circ$, on obtient $d_p = 402$ nm pour $\lambda = 633$ nm, c'est la d_p de l'onde de Fresnel.

Un cas d'école sur le prisme : l'onde de Fresnel

Si n_1 désigne l'indice du prisme et n_2 l'indice de l'air l'angle critique θ_c est donné par :

L'angle critique

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Pour $n_1 = 1,458$ et $n_2 = 1$ on obtient $\theta_c = 43,3^\circ$ à 45° pour les prismes droits nous sommes bien en réflexion totale.

L'amplitude du champ évanescent en fonction de z la distance à la surface du prisme est donnée par :

L'amplitude du champ de l'onde de Fresnel

$$E(z) = E_0 \exp\left(-\frac{z}{d_p}\right) \quad (3)$$

Où E_0 est l'amplitude du champ à $z = 0$ et d_p est appelée profondeur de pénétration. Cette grandeur exprime la rapidité de décroissance du champ évanescent selon la direction z perpendiculaire à la surface du prisme.

La profondeur de pénétration

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi(n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

Pour $\theta_i = 45^\circ$, on obtient $d_p = 402$ nm pour $\lambda = 633$ nm, c'est la d_p de l'onde de Fresnel.

Vecteur d'onde de l'onde évanescente

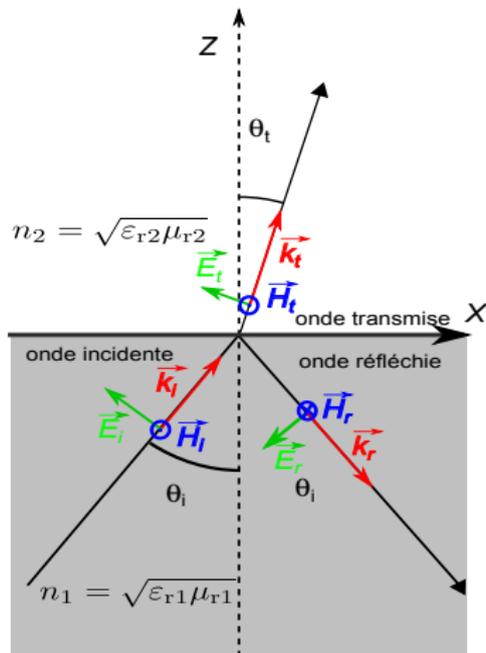


FIGURE: La configuration géométrique des champs en polarisation TM à l'interface prisme-air

Vecteur d'onde de l'onde évanescente

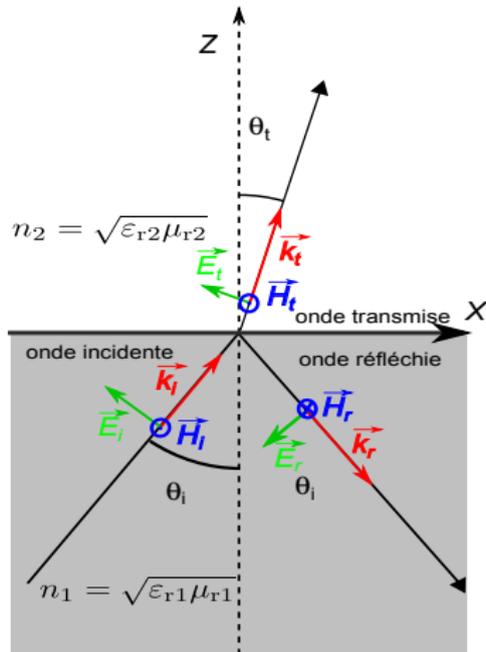


FIGURE: La configuration géométrique des champs en polarisation TM à l'interface prisme-air

Vecteur d'onde de l'onde évanescente

Les vecteurs d'ondes incident et transmis

$$\vec{k}_i = \left(\frac{\omega}{c} \sin \theta_i, 0, \frac{\omega}{c} \cos \theta_i \right) \quad (5)$$

$$\vec{k}_t = \left(\frac{\omega}{c} \sin \theta_t = \frac{\omega}{c} n_1 \sin \theta_i, 0, \frac{\omega}{c} \cos \theta_t = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \theta_i} \right) \quad (6)$$

Si $\theta_i > \theta_c$ angle critique alors $n_1 \sin \theta_i > 1$ l'onde transmise devient évanescente et on trouve pour \vec{k}_t :

$$\vec{k}_t = \left(\frac{\omega}{c} n_1 \sin \theta_i, 0, j \frac{\omega}{c} \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - 1} \right) \quad (7)$$

Vecteur d'onde de l'onde évanescente

Les relations intéressantes de l'onde évanescente

La composante k_z imaginaire pure va conduire à la décroissance exponentielle de l'amplitude du champ vue dans l'équation 3.

La composante k_x est la plus intéressante en terme de résolution car on peut réécrire l'équation de Abbe 1 en fonction de k_x .

$$d = \frac{2\pi}{k_x} \times \frac{0,61}{O.N} \quad (8)$$

$O.N$ est l'ouverture numérique.

L'onde de Fresnel n'est donc pas une bonne candidate pour un gain de résolution tout au plus de 2, il faudra donc aller chercher la résolution (grands k_x) par un autre moyen, non pas par le phénomène de réflexion totale mais par la diffraction.

Plan du cours

1 Introduction

- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

- Les propriétés des ondes évanescentes
- **Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP**
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

Spectre de diffraction d'un objet

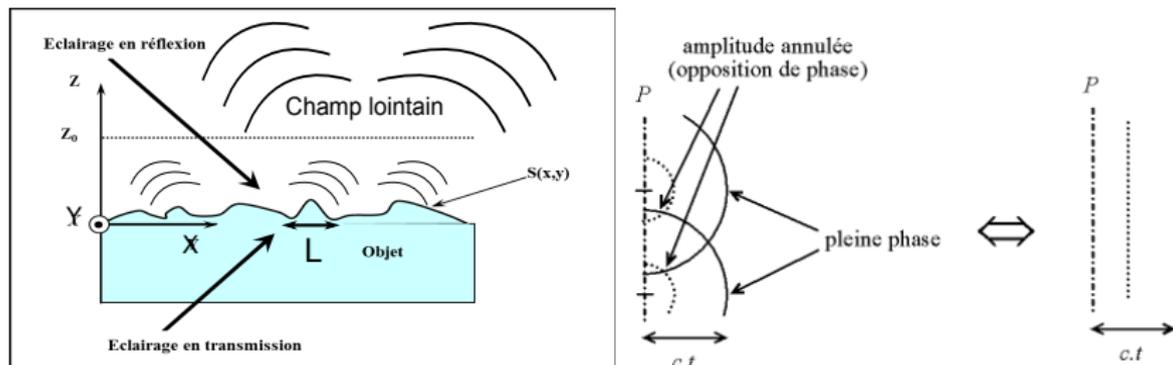


FIGURE: Représentation des ondelettes de Huygens-Fresnel pour une surface diffractante. Équivalence entre le front plan et la réémission sphérique ; le trait plein figure le maximum de l'onde, le trait pointillé le minimum (les deux sont distants d'une demi-longueur d'onde).

Ondes planes

On peut montrer que tout champ diffracté par un objet ou une surface peut être décrit sous la forme d'un spectre d'ondes planes.

Fréquences spatiales

Modes évanescents

Chaque objet diffractant de dimension latérale L se comporte comme une source d'ondelettes, le spectre des fréquences spatiales de l'objet comporte tous les k_x compris entre 0 et $\frac{1}{L}$, en champ lointain l'onde progressive que l'on détecte a été moyennée spatialement.

Il y a perte de la résolution initiale en champ proche car seules les fréquences spatiales comprises entre $[-\frac{\omega}{c}, \frac{\omega}{c}]$ peuvent se propager, les autres sont piégées sous forme de *modes évanescents*.

Distinction microscopie classique *champ lointain* et MOCP

- La microscopie *champ lointain* détecte le champ diffracté à grande distance, donc les ondes qui ont pu se propager jusqu'au détecteur (notre œil par exemple) avec des $k_x \in [-\frac{\omega}{c}, \frac{\omega}{c}]$. Ces ondes ne contiennent que les informations d'objets de dimensions $> \lambda$.
- La MOCP permet de détecter quant à elle le spectre le plus large possible des fréquences spatiales incluant à la fois l'information champ lointain et celle champ proche contenue dans les modes évanescents.

Fréquences spatiales

Modes évanescents

Chaque objet diffractant de dimension latérale L se comporte comme une source d'ondelettes, le spectre des fréquences spatiales de l'objet comporte tous les k_x compris entre 0 et $\frac{1}{L}$, en champ lointain l'onde progressive que l'on détecte a été moyennée spatialement.

Il y a perte de la résolution initiale en champ proche car seules les fréquences spatiales comprises entre $[-\frac{\omega}{c}, \frac{\omega}{c}]$ peuvent se propager, les autres sont piégées sous forme de *modes évanescents*.

Distinction microscopie classique *champ lointain* et MOCP

- La microscopie *champ lointain* détecte le champ diffracté à grande distance, donc les ondes qui ont pu se propager jusqu'au détecteur (notre œil par exemple) avec des $k_x \in [-\frac{\omega}{c}, \frac{\omega}{c}]$. Ces ondes ne contiennent que les informations d'objets de dimensions $> \lambda$.
- La MOCP permet de détecter quant à elle le spectre le plus large possible des fréquences spatiales incluant à la fois l'information champ lointain et celle champ proche contenue dans les modes évanescents.

Fréquences spatiales

Modes évanescents

Chaque objet diffractant de dimension latérale L se comporte comme une source d'ondelettes, le spectre des fréquences spatiales de l'objet comporte tous les k_x compris entre 0 et $\frac{1}{L}$, en champ lointain l'onde progressive que l'on détecte a été moyennée spatialement.

Il y a perte de la résolution initiale en champ proche car seules les fréquences spatiales comprises entre $[-\frac{\omega}{c}, \frac{\omega}{c}]$ peuvent se propager, les autres sont piégées sous forme de *modes évanescents*.

Distinction microscopie classique *champ lointain* et MOCP

- La microscopie *champ lointain* détecte le champ diffracté à grande distance, donc les ondes qui ont pu se propager jusqu'au détecteur (notre œil par exemple) avec des $k_x \in [-\frac{\omega}{c}, \frac{\omega}{c}]$. Ces ondes ne contiennent que les informations d'objets de dimensions $> \lambda$.
- La MOCP permet de détecter quant à elle le spectre le plus large possible des fréquences spatiales incluant à la fois l'information champ lointain et celle champ proche contenue dans les modes évanescents.

Détection et Résolution en MOCP

Comment capter les ondes évanescentes ?

Ces ondes ne vérifient pas les conditions de propagation pour venir les capter, il faut :

- Une sonde de petite dimension au voisinage immédiat des ondes.
- Les conditions du théorème de réciprocité : objet petit diffracte sous forme d'ondes évanescentes et réciproquement une onde évanescente est diffractée sous forme d'onde progressive par un petit objet.

On reconnait ici un mode de détection qui s'apparente à la frustration de l'onde réfléchi dans le cas du prisme.

La résolution d'un tel dispositif dépend donc :

- de la distance de la sonde à la surface ;
- de la dimension L de la sonde.

Si L est la dimension de cette sonde elle ne pourra être capable de diffracter que les fréquences spatiales de l'intervall $[0, \frac{1}{L}]$ ce qui revient à dire que les k_x appartiennent à cet interval et donc que la résolution sera d'autant meilleure que la sonde sera petite.

Plan du cours

1 Introduction

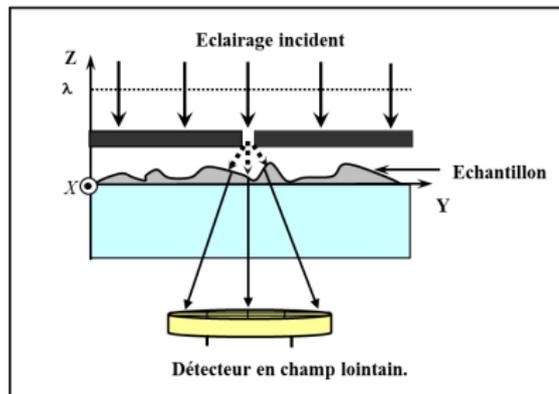
- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

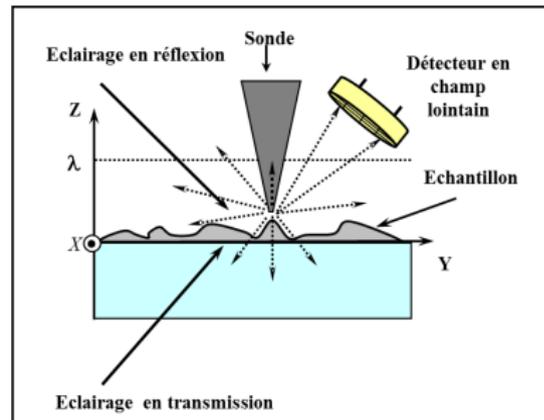
- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- **L'expérimentation**
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

Le principe général d'une expérimentation MOCP



Principe d'une nano-source optique
(Synge 1928)



Conversion par une nano-sonde des ondes évanescentes en ondes progressives.

FIGURE: Les deux approches de la MOCP décrites dans ce schéma, sonde à ouverture et sonde diffusante.

Schéma général de fonctionnement, identique aux systèmes à sonde locale AFM, STM

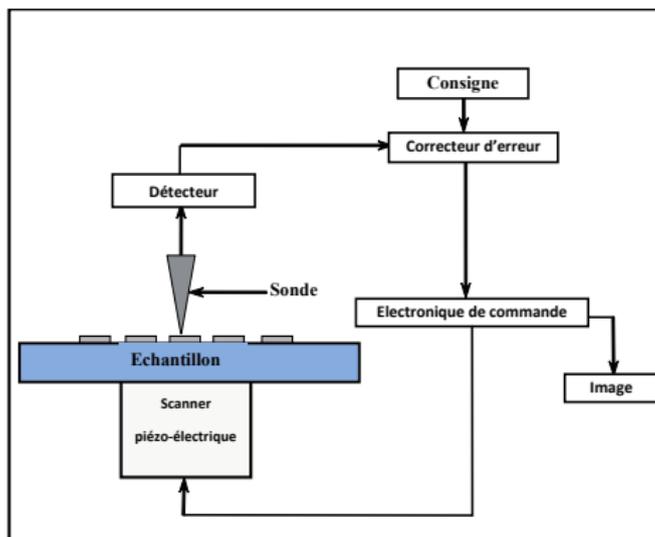


FIGURE: Schéma d'une boucle de régulation en MOCP

Contrôles de la distance sonde échantillon

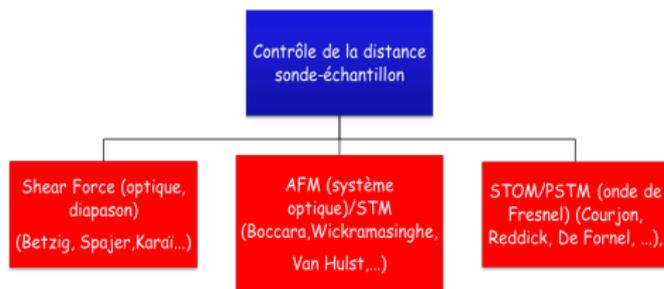


FIGURE: Les différentes écoles des modes de régulation en MOCP

Les intérêts primordiaux de la régulation en MOCP

- Contrôler efficacement la distance sonde-échantillon (éviter la destruction de sondes)
- La recherche de la résolution optique impose d'être le plus près possible de l'échantillon (fonction également de la taille de la sonde)
- Acquisition simultanée d'images topographique et optique
- Bénéficier de moyens efficaces d'approche et d'acquisition de données

MOCP avec sonde à ouverture

Le PSTM/STOM

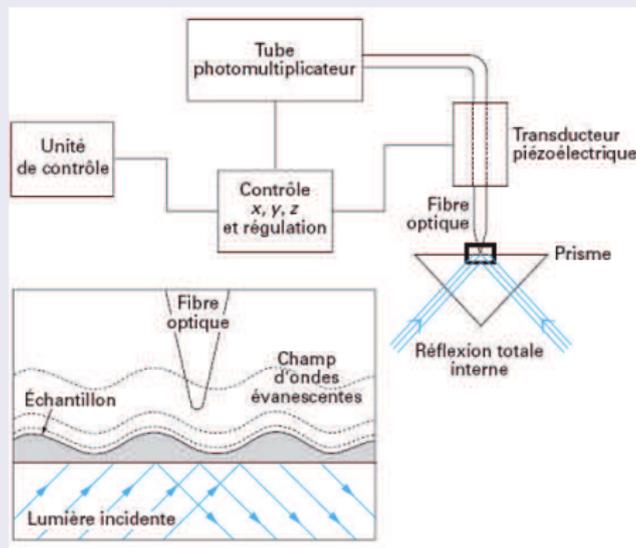


FIGURE: Schéma de principe d'un microscope PSTM-STOM : la régulation s'effectue sur l'onde de Fresnel, la sonde est une fibre optique effilée.

MOCP avec sonde à ouverture (suite)

Le SNOM/NSOM

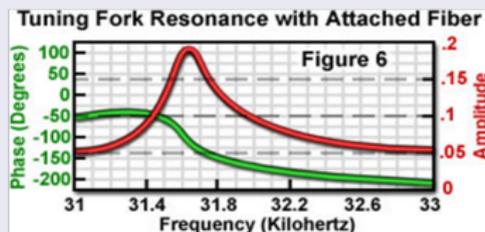
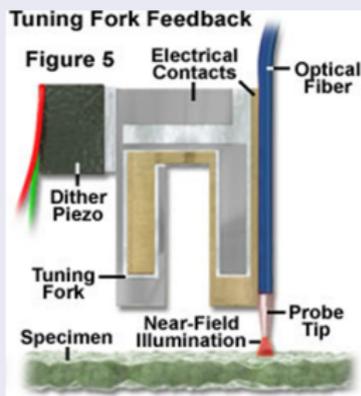


FIGURE: Dispositif de régulation sur les forces de cisaillement, shear forces avec diapason

MOCP avec sonde diffusante

Le s-SNOM

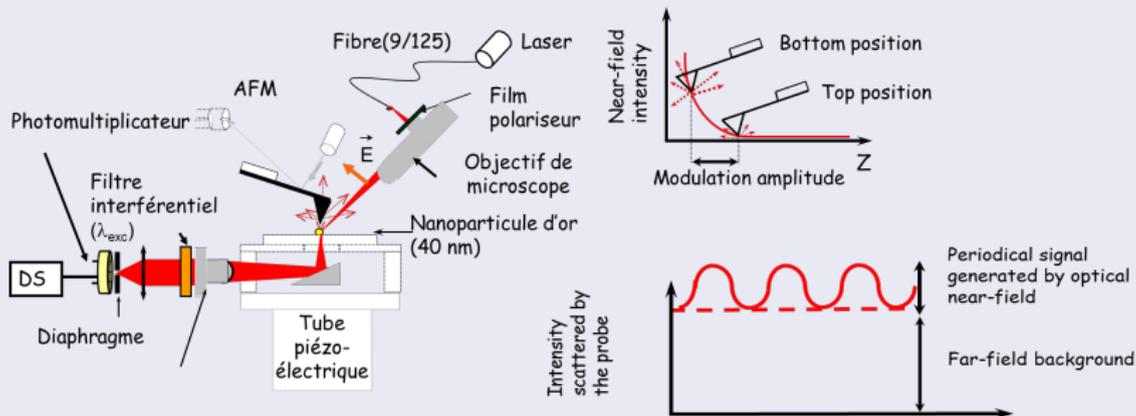


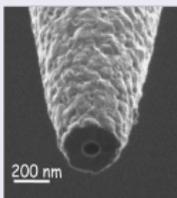
FIGURE: Dispositif de régulation par AFM en mode tapping, extraction du signal par DS

Ensemble de sondes à ouvertures

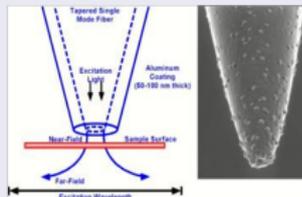
Sondes à ouvertures

- **Fibres optiques effilées (Tapered Fiber).**

(Mesa +/ Twente et FEMTO / Besançon)



Usinée par FIB



Traditionnelle : obtenu par chauffage étirage dans un système industriel de fabrication de Micropipette. L'extérieur est recouvert d'une couche métallique d'Al (épaisseur de peau 13 nm à 509 nm).

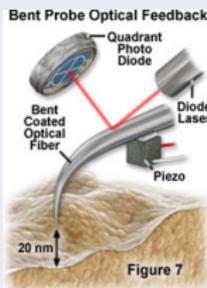
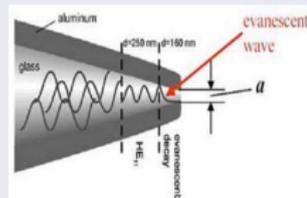


Figure 7

- **Micropointe optique polymère**

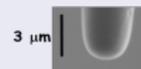
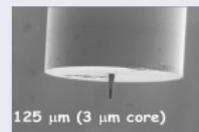
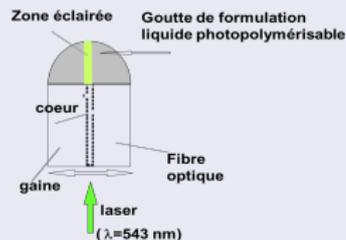
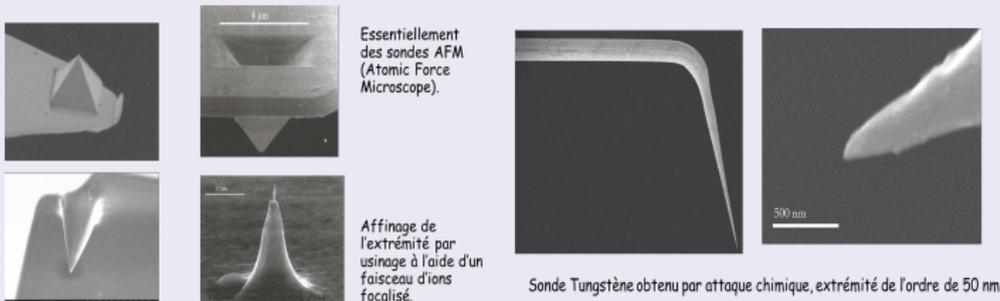


FIGURE: Différents types de sondes à ouverture

Ensemble de sondes diffusantes

Sondes diffusantes



- On choisit la sonde adaptée à son système de détection :
exemple détection en réflexion

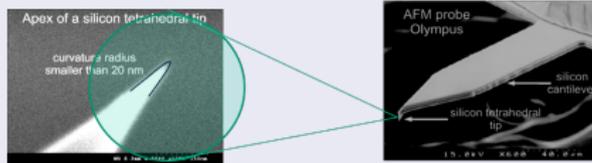


FIGURE: Différents types de sondes diffusantes

Plan du cours

1 Introduction

- Préambule
- Les limites de la microscopie optique classique
- Le critère de résolution en microscopie classique

2 La microscopie optique en champ proche

- Les propriétés des ondes évanescentes
- Diffraction, fréquences spatiales et résolution en MOCP
- L'expérimentation
 - Le mode général de fonctionnement : la régulation de la distance sonde échantillon
 - Les modes sonde à ouverture
 - Le mode sonde diffusante
 - Les sondes
- Pour conclure quelques images s-SNOM et informations

3 Bibliographie

Expérience s-SNOM

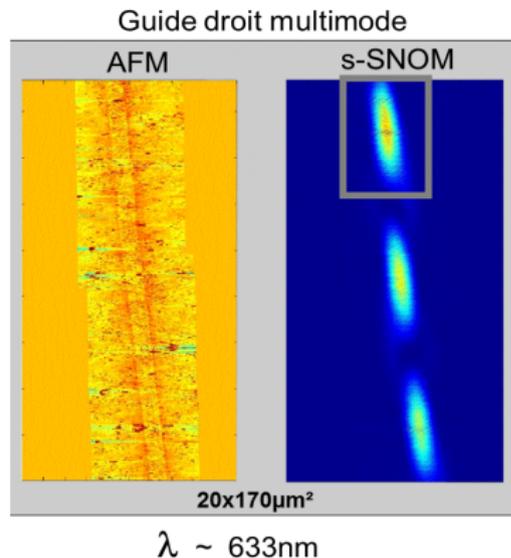
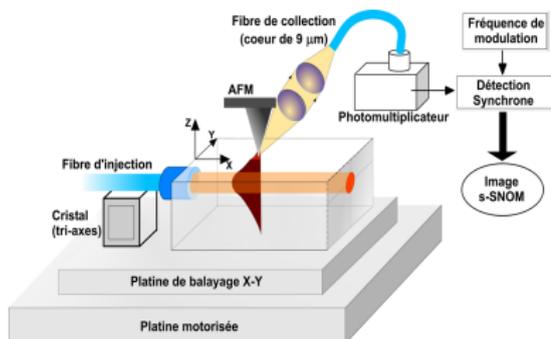
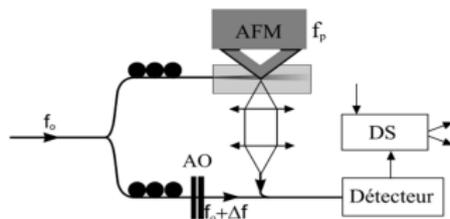
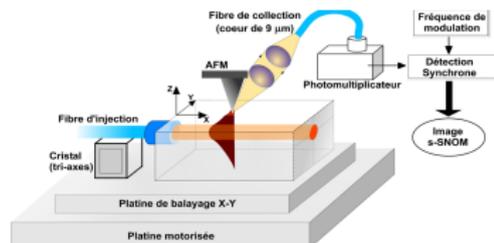


FIGURE: Image sur un guide d'onde à faible Δn courtoisie de A. Bruyant-LINIO

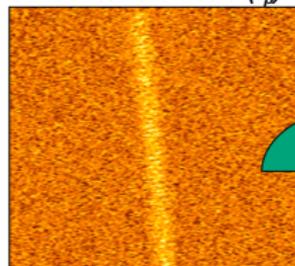
Expérience s-SNOM, en détection hétérodyne

Détection hétérodyne (hétérodynage optique)

Exemple sur un guide d'onde



Sans interféromètre (f_p)



AMPLIFICATION



Détection à $f_p - \Delta F$

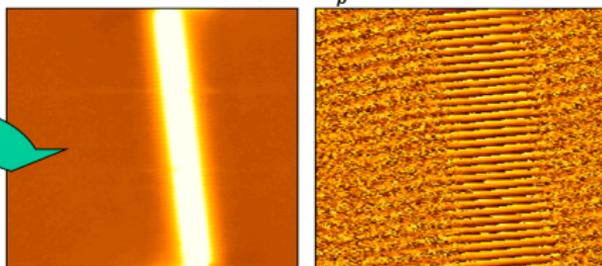


FIGURE: Image sur un guide d'onde, mise en évidence de l'amplification de l'amplitude, courtoisie de A. Bruyant LNIO

Pour en savoir plus la conférence NFO-12 : Conference on Near-Field Optics and Related Techniques

NFO-12 in 2012 will be held in Donostia-San Sebastián, Spain

Conference topics :

- Near-field optics
- Nanophotonics
- Novel instrumentation for nano-imaging
- Plasmonics
- Theory and modeling
- Quantum optics in the near-field
- Quantum optics in the near-field
- Nanophotonic circuits and designs
- Nonlinear and ultrafast phenomena
- Near-field and local field enhancement
- Photonic crystals and plasmonic crystals
- Nanophotonic devices
- Optical metamaterials
- Applications in physics, chemistry, biology, material sciences
- Industrial applications
- Spectroscopy and TERS

Bibliographie

- F. de Fornel, Les ondes évanescentes en optiques et en optoélectronique. Eyrolles et CNET-ENST, Paris, collection technique et scientifique des télécommunications ed., 1998.
- D. Courjon and C. Bainier, Le Champ Proche : Théorie et Applications. Ed. Springer-Verlag, Paris, 2001.
- D. Courjon Near-Field Microscopy and Near-Field Optics Imperial College Press, London, 2003