

Atomes et nanostructures: Dispositif de lithographie atomique et Réponse optique d'ouvertures sub-longueur d'onde

Guillaume Gay

LCAR
Université Paul Sabatier
Toulouse

23 juin 2006

I – Nanolithographie atomique

Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

- Détails du dispositif
- Caractérisation du jet

Lithographie atomique

- Le substrat
- Caractérisation du protocole expérimental
- Masques matériels nanométriques

I – Nanolithographie atomique

Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

- Détails du dispositif
- Caractérisation du jet

Lithographie atomique

- Le substrat
- Caractérisation du protocole expérimental
- Masques matériels nanométriques

II – Réponse optique d'ouvertures sub-longueur d'onde

Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus
Mesures
Propriétés du champ issu du sillon
Effets de la géométrie du sillon

Conclusion

II – Réponse optique d'ouvertures sub-longueur d'onde

Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus

Mesures

Propriétés du champ issu du sillon

Effets de la géométrie du sillon

Conclusion

II – Réponse optique d'ouvertures sub-longueur d'onde

Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

- Transmission de la lumière par une ouverture unique
- Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

- Description simple du processus
- Mesures
- Propriétés du champ issu du sillon
- Effets de la géométrie du sillon

Conclusion

II – Réponse optique d'ouvertures sub-longueur d'onde

Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

- Transmission de la lumière par une ouverture unique
- Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

- Description simple du processus
- Mesures
- Propriétés du champ issu du sillon
- Effets de la géométrie du sillon

Conclusion



Première partie I

Nano-lithographie atomique



Nanofabrication atomique

Masque optique

Masque matériel

¹J.J. McClelland, *JOSA B*, **12**, (1995)

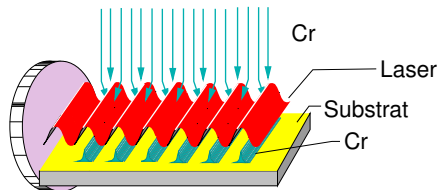
²M. Mützel *et al.*, *Appl. Phys. B*, **80**, (2005)



Nanofabrication atomique

Masque optique

Masque matériel



¹J.J. McClelland, *JOSA B*, **12**, (1995)

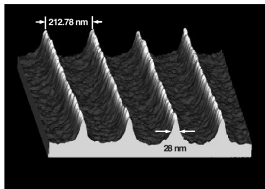
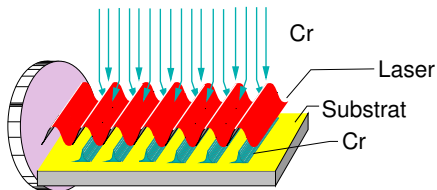
²M. Mützel *et al.*, *Appl. Phys. B*, **80**, (2005)



Nanofabrication atomique

Masque optique

Masque matériel



Dépot direct de motifs périodiques¹

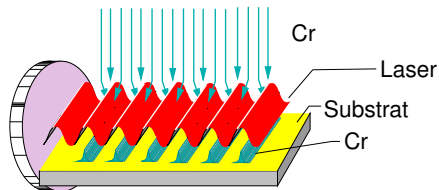
¹J.J. McClelland, *JOSA B*, **12**, (1995)

²M. Mützel *et al.*, *Appl. Phys. B*, **80**, (2005)

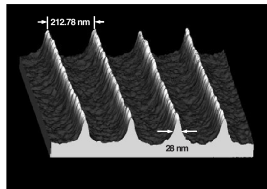
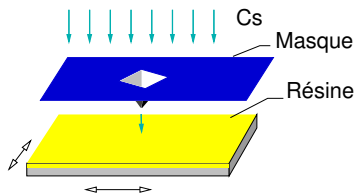


Nanofabrication atomique

Masque optique



Masque matériel



Dépot direct de motifs périodiques¹

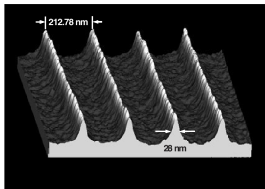
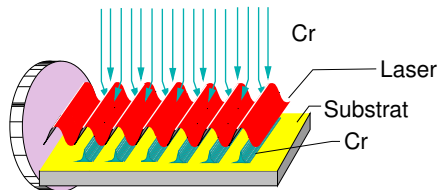
¹J.J. McClelland, *JOSA B*, **12**, (1995)

²M. Mützel *et al.*, *Appl. Phys. B*, **80**, (2005)



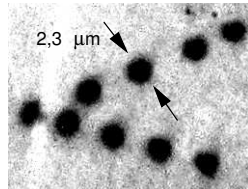
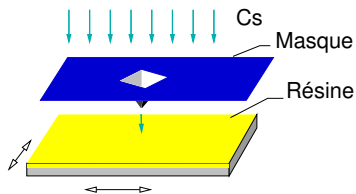
Nanofabrication atomique

Masque optique



Dépot direct de motifs périodiques¹

Masque matériel



Lithographie structurée²

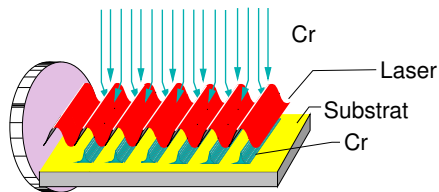
¹J.J. McClelland, *JOSA B*, **12**, (1995)

²M. Mützel *et al.*, *Appl. Phys. B*, **80**, (2005)



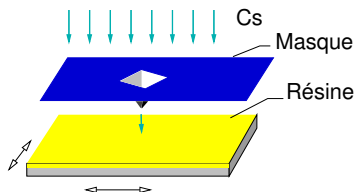
Nanofabrication atomique

Masque optique



- + Collection de tous les atomes du jet
- Pas de bouchage
- Motifs périodiques
- Limité à $\lambda/2$

Masque matériel

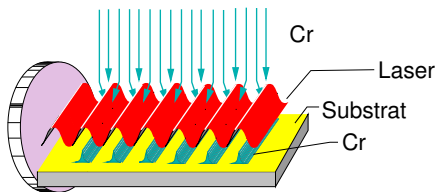


- Limite de taille < 50 nm
- Structures arbitraires
- Bouchage
- Seulement une fraction du jet est utilisée



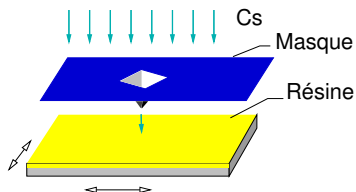
Nanofabrication atomique

Masque optique



- + Collection de tous les atomes du jet
- + Pas de bouchage
 - Motifs périodiques
 - Limité à $\lambda/2$

Masque matériel

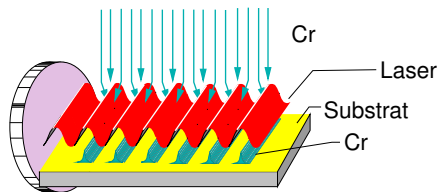


- Limite de taille < 50 nm
- Structures arbitraires
- Bouchage
- Seulement une fraction du jet est utilisée



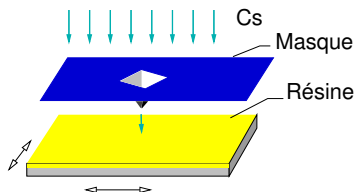
Nanofabrication atomique

Masque optique



- + Collection de tous les atomes du jet
- + Pas de bouchage
- Motifs périodiques
- Limité à $\lambda/2$

Masque matériel

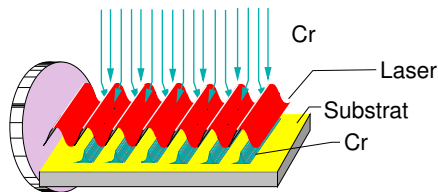


- Limite de taille < 50 nm
- Structures arbitraires
- Bouchage
- Seulement une fraction du jet est utilisée



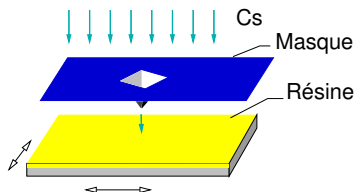
Nanofabrication atomique

Masque optique



- + Collection de tous les atomes du jet
- + Pas de bouchage
- Motifs périodiques
- Limité à $\lambda/2$

Masque matériel

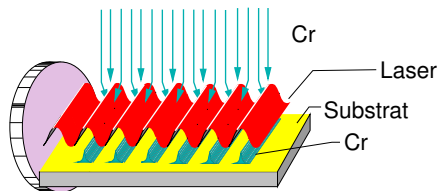


- Limite de taille < 50 nm
- Structures arbitraires
- Bouchage
- Seulement une fraction du jet est utilisée



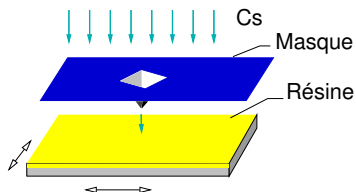
Nanofabrication atomique

Masque optique



- + Collection de tous les atomes du jet
- + Pas de bouchage
- Motifs périodiques
- Limité à $\lambda/2$

Masque matériel

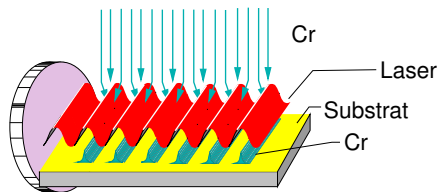


- + Limite de taille < 50 nm
- + Structures arbitraires
 - Bouchage
 - Seulement une fraction du jet est utilisée



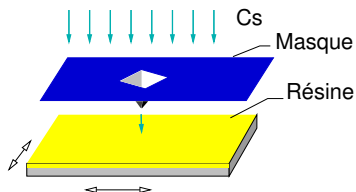
Nanofabrication atomique

Masque optique



- + Collection de tous les atomes du jet
- + Pas de bouchage
- Motifs périodiques
- Limité à $\lambda/2$

Masque matériel

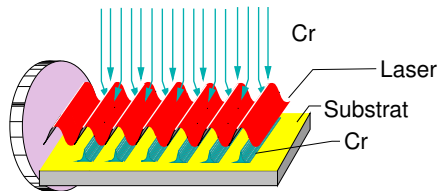


- + Limite de taille < 50 nm
- + Structures arbitraires
- Bouchage
- Seulement une fraction du jet est utilisée



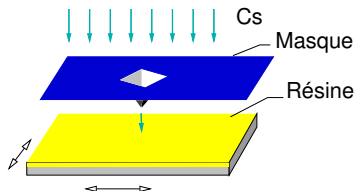
Nanofabrication atomique

Masque optique



- + Collection de tous les atomes du jet
- + Pas de bouchage
- Motifs périodiques
- Limité à $\lambda/2$

Masque matériel



- + Limite de taille < 50 nm
- + Structures arbitraires
- Bouchage
- Seulement une fraction du jet est utilisée

Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

- Détails du dispositif
- Caractérisation du jet

Lithographie atomique

- Le substrat
- Caractérisation du protocole expérimental
- Masques matériels nanométriques



Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

Détails du dispositif

Caractérisation du jet

Lithographie atomique

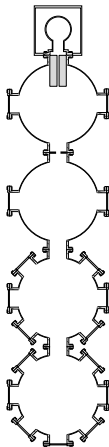
Le substrat

Caractérisation du protocole expérimental

Masques matériels nanométriques



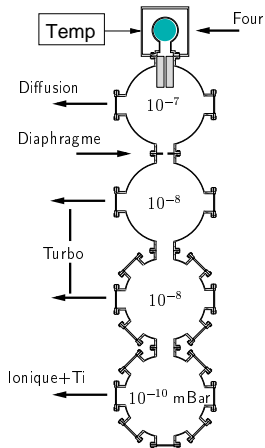
Vue d'ensemble du dispositif



- Vide différentiel
- Détection par fluorescence
- Refroidissement optique transverse à 2D



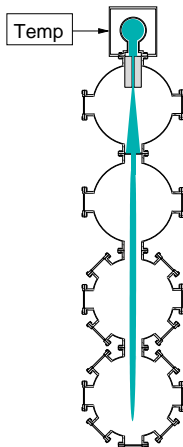
Vue d'ensemble du dispositif



- Vide différentiel
- Détection par fluorescence
- Refroidissement optique transverse à 2D



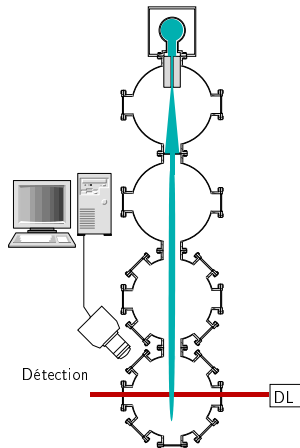
Vue d'ensemble du dispositif



- Vide différentiel
- Détection par fluorescence
- Refroidissement optique transverse à 2D



Vue d'ensemble du dispositif



- Vide différentiel
- Détection par fluorescence
- Refroidissement optique transverse à 2D

Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

Détails du dispositif

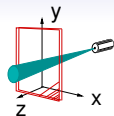
Caractérisation du jet

Lithographie atomique

Le substrat

Caractérisation du protocole expérimental

Masques matériels nanométriques

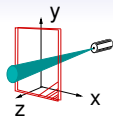


Distribution de densité

Jet non-refroidi

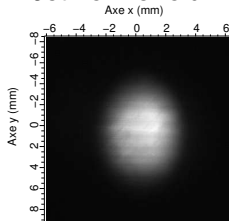
Jet refroidi

- Mélasse asymétrique
- Augmentation de la densité sur l'axe
- Diminution de la divergence < 1 mrad



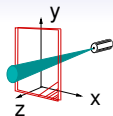
Distribution de densité

Jet non-refroidi



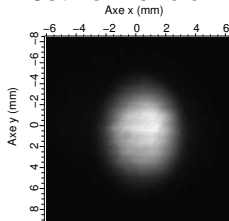
Jet refroidi

- Mélasse asymétrique
- Augmentation de la densité sur l'axe
- Diminution de la divergence < 1 mrad

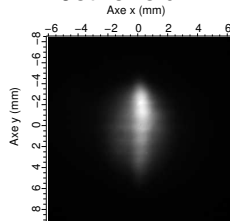


Distribution de densité

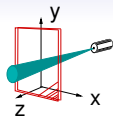
Jet non-refroidi



Jet refroidi

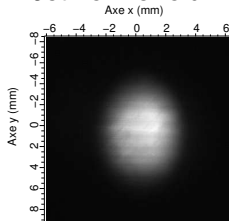


- Mélasse asymétrique
- Augmentation de la densité sur l'axe
- Diminution de la divergence < 1 mrad

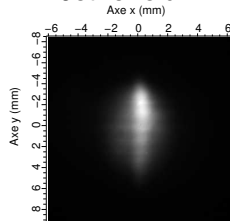


Distribution de densité

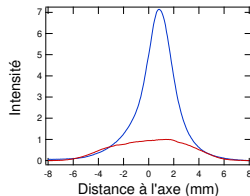
Jet non-refroidi

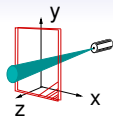


Jet refroidi



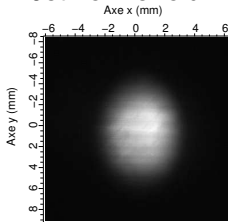
- Mélasse asymétrique
- Augmentation de la densité sur l'axe
- Diminution de la divergence < 1 mrad



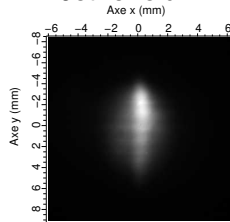


Distribution de densité

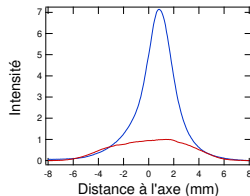
Jet non-refroidi

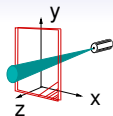


Jet refroidi



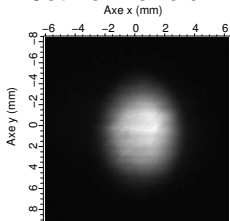
- Mélasse asymétrique
- Augmentation de la densité sur l'axe
- Diminution de la divergence < 1 mrad



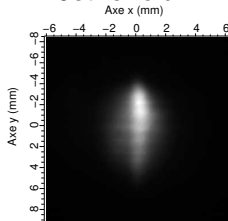


Distribution de densité

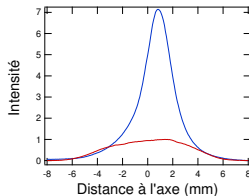
Jet non-refroidi

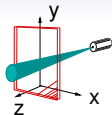


Jet refroidi



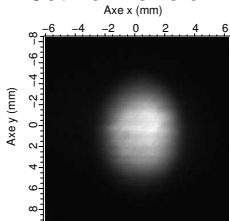
- Mélasse asymétrique
- Augmentation de la densité sur l'axe
- Diminution de la divergence < 1 mrad



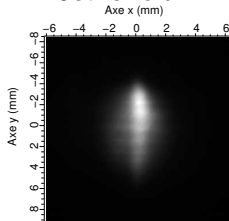


Distribution de densité

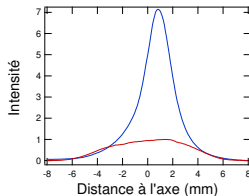
Jet non-refroidi



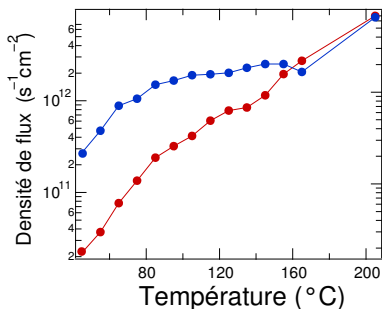
Jet refroidi



- Mélasse asymétrique
- Augmentation de la densité sur l'axe
- Diminution de la divergence < 1 mrad

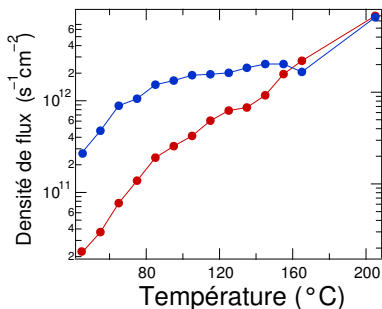


Densité de flux et température du four



- Mesure par absorption
- Augmentation de la température
 - Diminution de l'efficacité du refroidissement
 - Température du four : 95°C

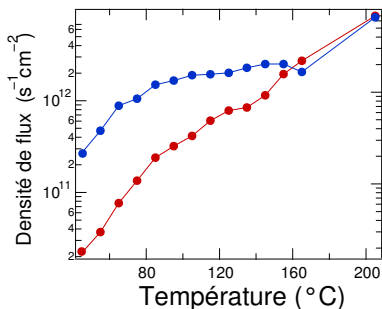
Densité de flux et température du four



- Mesure par absorption
- Augmentation de la température
 - Diminution de l'efficacité du refroidissement
 - Température du four : 95°C



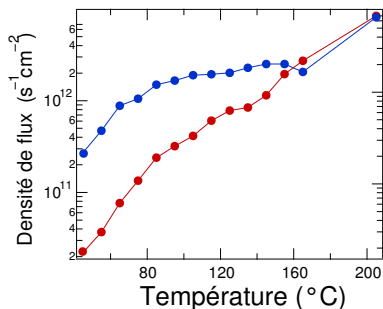
Densité de flux et température du four



- Mesure par absorption
- Augmentation de la température
 - ⇒ Diminution de l'efficacité du refroidissement
 - Température du four : 95°C

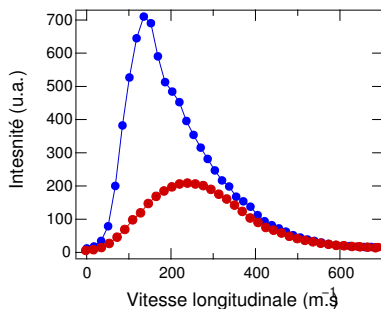


Densité de flux et température du four



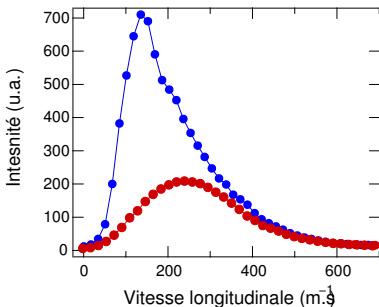
- Mesure par absorption
- Augmentation de la température
 - ⇒ Diminution de l'efficacité du refroidissement
 - ⇒ Température du four : 95°C

Distribution de vitesse



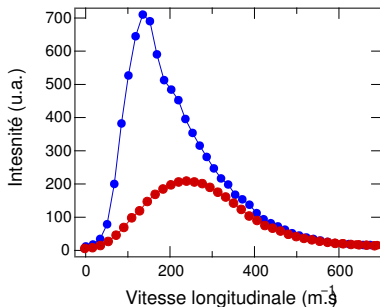
- Mesure par fluorescence et effet Doppler
- Pour le jet non-refroidi, distribution de Maxwell-Boltzmann
- Pour le jet refroidi, quand v augmente :
 - Diminution du temps d'interaction
 - Diminution de la fraction capturée

Distribution de vitesse



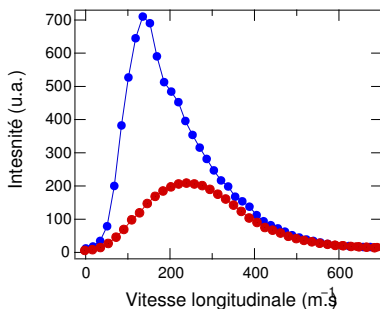
- Mesure par fluorescence et effet Doppler
- Pour le jet non-refroidi, distribution de Maxwell-Boltzmann
- Pour le jet refroidi, quand v augmente :
 - Diminution du temps d'interaction
 - Diminution de la fraction capturée

Distribution de vitesse



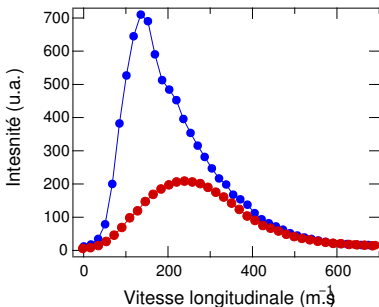
- Mesure par fluorescence et effet Doppler
- Pour le jet non-refroidi, distribution de Maxwell-Boltzmann
- Pour le jet refroidi, quand v augmente :
 - Diminution du temps d'interaction
 - Diminution de la fraction capturée

Distribution de vitesse



- Mesure par fluorescence et effet Doppler
- Pour le jet non-refroidi, distribution de Maxwell-Boltzmann
- Pour le jet refroidi, quand v augmente :
 - ⇒ Diminution du temps d'interaction
 - Diminution de la fraction capturée

Distribution de vitesse



- Mesure par fluorescence et effet Doppler
- Pour le jet non-refroidi, distribution de Maxwell-Boltzmann
- Pour le jet refroidi, quand v augmente :
 - ⇒ Diminution du temps d'interaction
 - ⇒ Diminution de la fraction capturée



Résumé des caractéristiques du jet

	non-refroidi	refroidi
Divergence	8 mrad	<1 mrad
Flux	$2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$
Intensité sur l'axe	$1,5 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
Densité de flux	$2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

- Diminution de la divergence
- Meilleure définition des motifs
- Augmentation du flux
- Diminution du temps d'écriture



Résumé des caractéristiques du jet

	non-refroidi	refroidi
Divergence	8 mrad	<1 mrad
Flux	$2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$
Intensité sur l'axe	$1,5 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
Densité de flux	$2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

- Diminution de la divergence
- ⇒ Meilleure définition des motifs
 - Augmentation du flux
 - Diminution du temps d'écriture



Résumé des caractéristiques du jet

	non-refroidi	refroidi
Divergence	8 mrad	<1 mrad
Flux	$2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$
Intensité sur l'axe	$1,5 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
Densité de flux	$2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

- Diminution de la divergence
- ⇒ Meilleure définition des motifs
- Augmentation du flux
- Diminution du temps d'écriture



Résumé des caractéristiques du jet

	non-refroidi	refroidi
Divergence	8 mrad	<1 mrad
Flux	$2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$
Intensité sur l'axe	$1,5 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
Densité de flux	$2 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

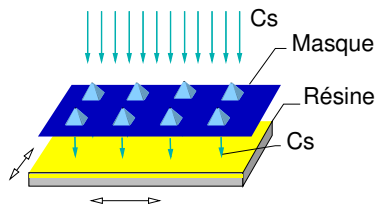
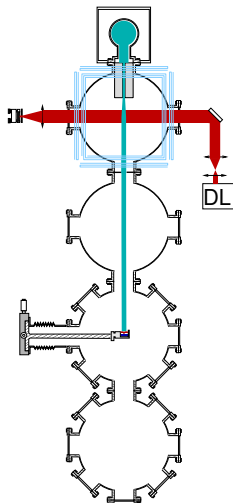
- Diminution de la divergence
- ⇒ Meilleure définition des motifs
- Augmentation du flux
- ⇒ Diminution du temps d'écriture

Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

Détails du dispositif
Caractérisation du jet

Lithographie atomique

Le substrat
Caractérisation du protocole expérimental
Masques matériels nanométriques



- Collaborations au sein du réseau NanoCold
- Expériences menées par Colm O'Dwyer, postdoc. FastNet
- Objectif : réalisation d'un *stylet atomique*

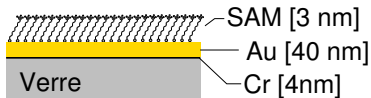
Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

Détails du dispositif
Caractérisation du jet

Lithographie atomique

Le substrat
Caractérisation du protocole expérimental
Masques matériels nanométriques

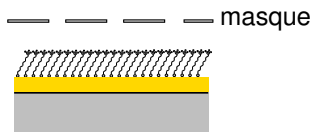
Principe



- Film moléculaire déposé sur une surface d'or
- Exposition au césium
- Gravure chimique



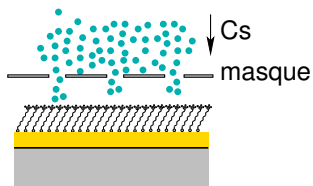
Principe



- Film moléculaire déposé sur une surface d'or
- Exposition au césium
- Gravure chimique



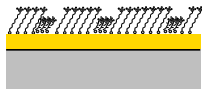
Principe



- Film moléculaire déposé sur une surface d'or
- Exposition au césium
- Gravure chimique



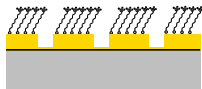
Principe



- Film moléculaire déposé sur une surface d'or
- Exposition au césium
- Gravure chimique



Principe



- Film moléculaire déposé sur une surface d'or
- Exposition au césium
- Gravure chimique



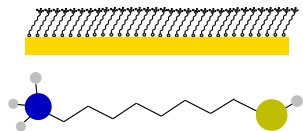
Principe

- Film moléculaire déposé sur une surface d'or
- Exposition au césium
- Gravure chimique

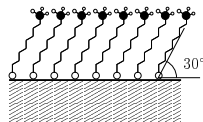
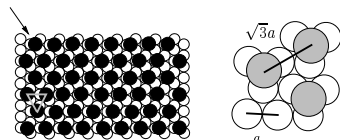




Les monocouches moléculaires auto-assemblées



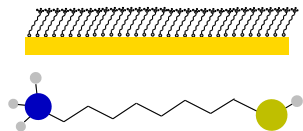
- Organisation à grande échelle
- Stable à l'air
- Épaisseur nanométrique



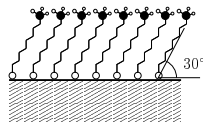
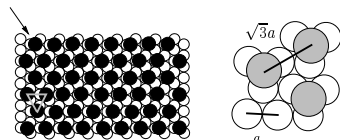
Organisation sur une surface d'or
orientée (111)



Les monocouches moléculaires auto-assemblées



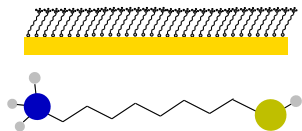
- Organisation à grande échelle
- Stable à l'air
- Épaisseur nanométrique



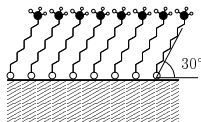
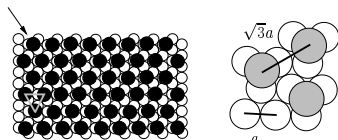
Organisation sur une surface d'or
orientée (111)



Les monocouches moléculaires auto-assemblées



- Organisation à grande échelle
- Stable à l'air
- Épaisseur nanométrique

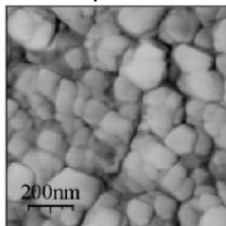


Organisation sur une surface d'or
orientée (111)



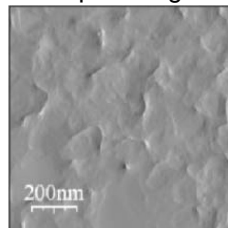
La surface d'or

Évaporation



- Rugosité $6,7 \pm 1,2$ nm
- Taille des grains = 45 nm
- 49 % d'orientation (111)
- Couverture par le SAM : 21%

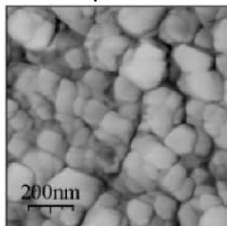
Sputtering



- Rugosité = $1,8 \pm 0,4$ nm
- Taille des grains = 150 nm
- 94 % d'orientation (111)
- Couverture par le SAM : 59%

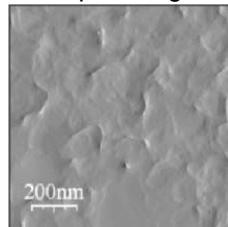
La surface d'or

Évaporation



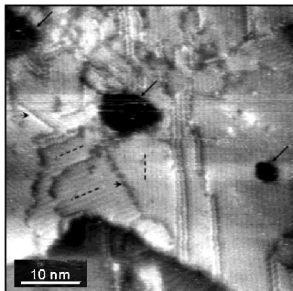
- Rugosité $6,7 \pm 1,2$ nm
- Taille des grains = 45 nm
- 49 % d'orientation (111)
- Couverture par le SAM : 21%

Sputtering



- Rugosité = $1,8 \pm 0,4$ nm
- Taille des grains = 150 nm
- 94 % d'orientation (111)
- Couverture par le SAM : 59%

Organisation de la monocouche sur la surface



- Taille des domaines : ~ 20 nm
 - Plusieurs domaines sur un grain d'or
- Défauts ponctuel dus au substrat

Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

Détails du dispositif
Caractérisation du jet

Lithographie atomique

Le substrat
Caractérisation du protocole expérimental
Masques matériels nanométriques

Temps d'exposition

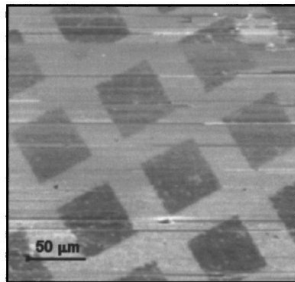


Image par microscopie
de force latérale

⇒ SAM exposé/non-
exposé

- Exposition d'une grille micrométrique
- Temps d'exposition minimal : 15 min
- Dose de césium minimale : 6 – 9 atomes par molécule

Temps d'exposition

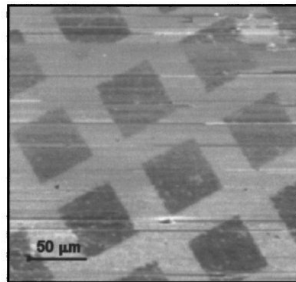


Image par microscopie
de force latérale

⇒ SAM exposé/non-
exposé

- Exposition d'une grille micrométrique
- Temps d'exposition minimal : **15 min**
- Dose de césium minimale : 6 – 9 atomes par molécule



Temps d'exposition

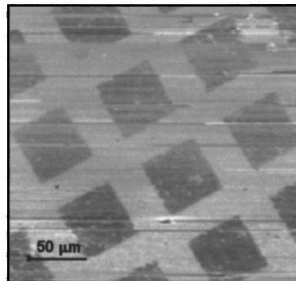


Image par microscopie
de force latérale

⇒ SAM exposé/non-
exposé

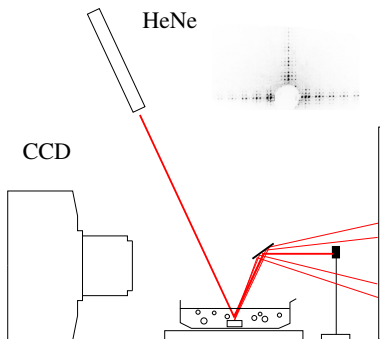
- Exposition d'une grille micrométrique
- Temps d'exposition minimal : **15 min**
- Dose de césium minimale : 6 – 9 atomes par molécule



Optimisation du temps de gravure

- Grille micrométrique \Rightarrow motif périodique
- Zone exposée éclairée par HeNe pendant la gravure
- Intensité diffracté \propto Pofondeur des motifs
- Temps de gravure optimal : 20 min

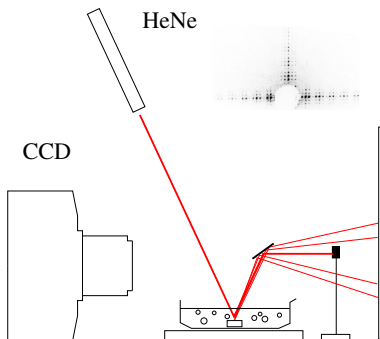
Optimisation du temps de gravure



- Grille micrométrique \Rightarrow motif périodique
- Zone exposée éclairée par HeNe pendant la gravure
- Intensité diffracté \propto Pofondeur des motifs
- Temps de gravure optimal : 20 min



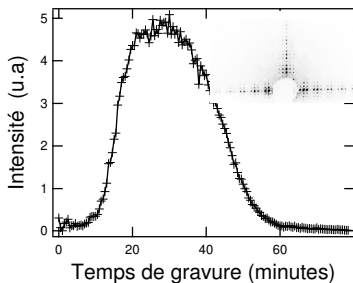
Optimisation du temps de gravure



- Grille micrométrique \Rightarrow motif périodique
- Zone exposée éclairée par HeNe pendant la gravure
- Intensité diffracté \propto Pofondeur des motifs
- Temps de gravure optimal : 20 min



Optimisation du temps de gravure



- Grille micrométrique \Rightarrow motif périodique
- Zone exposée éclairée par HeNe pendant la gravure
- Intensité diffracté \propto Pofondeur des motifs
- Temps de gravure optimal : **20 min**



Résumé

- Meilleure surface d'or : sputtering
- Temps d'exposition minimal 15 minutes
- Temps de gravure optimal 20 minutes



Résumé

- Meilleure surface d'or : sputtering
- Temps d'exposition minimal 15 minutes
- Temps de gravure optimal 20 minutes



Résumé

- Meilleure surface d'or : sputtering
- Temps d'exposition minimal 15 minutes
- Temps de gravure optimal 20 minutes

Dispositif expérimental de jet de césium refroidi transversalement

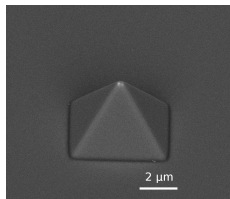
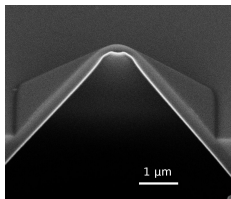
Détails du dispositif
Caractérisation du jet

Lithographie atomique

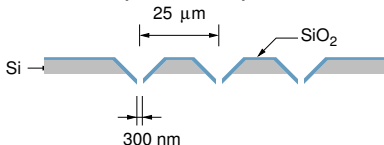
Le substrat
Caractérisation du protocole expérimental
Masques matériels nanométriques



Masques pyramidaux



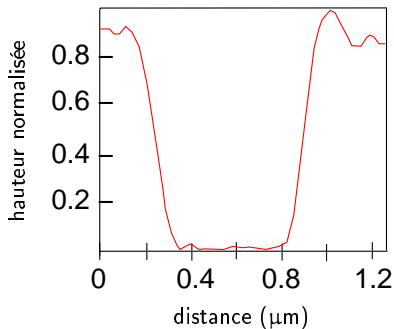
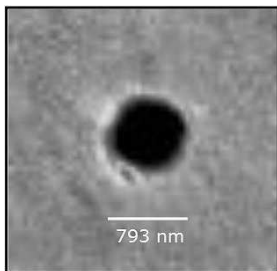
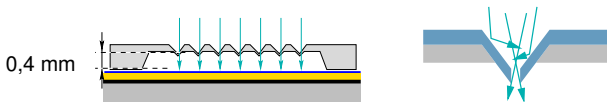
Masques fabriqués dans l'équipe de E. Oesterschultze, Univ. Kassel



- Gravure anisotrope par KOH
- Réseau d'ouvertures
- Diamètres : 50 – 300 nm

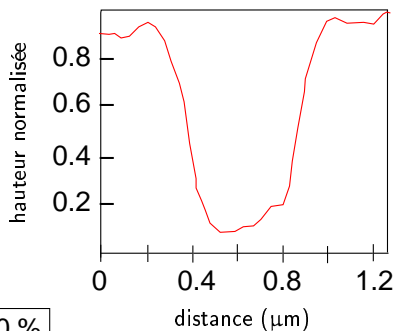
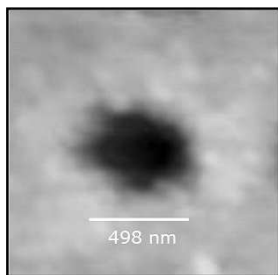
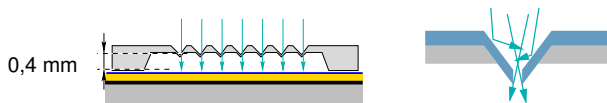


Motifs obtenus - orientation aval





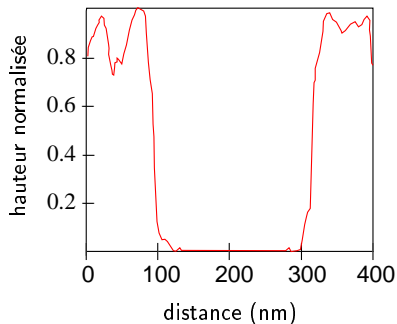
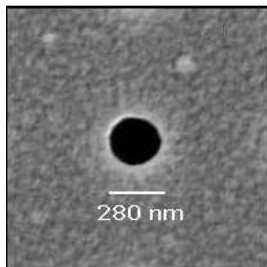
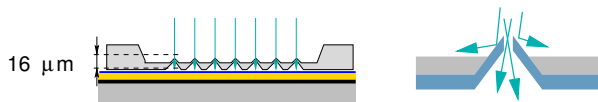
Motifs obtenus - orientation aval



Diminution du diamètre : 40 %

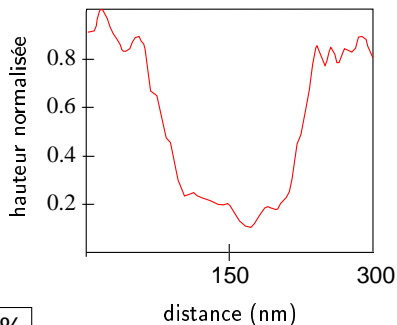
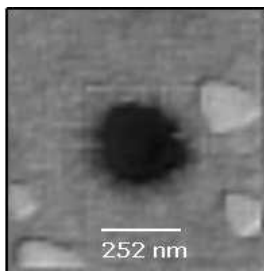
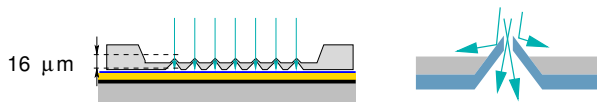


Motifs obtenus - orientation amont





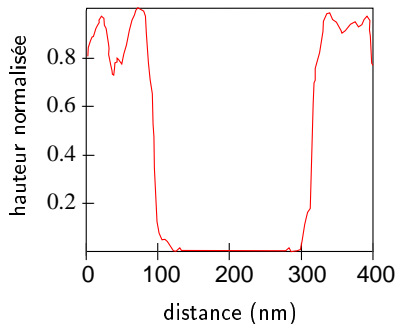
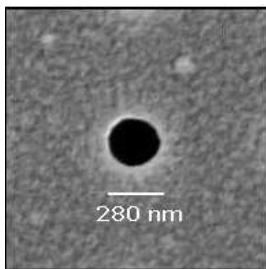
Motifs obtenus - orientation amont



Diminution du diamètre : 10 %

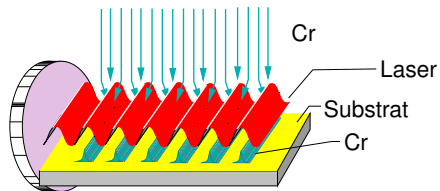


Motifs obtenus - orientation amont

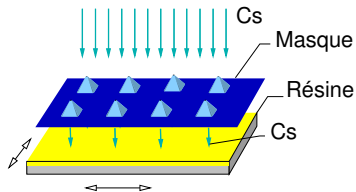




Masque optique

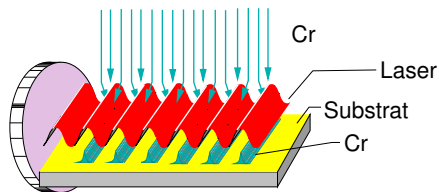


Masque matériel

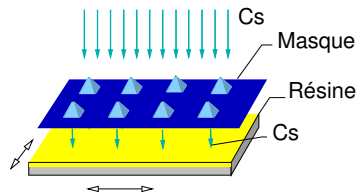




Masque optique



Masque matériel



Combinaison de masques matériels et de champs optiques ?



Deuxième partie II

Optique des ouvertures sub-longueur d'onde d'onde



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

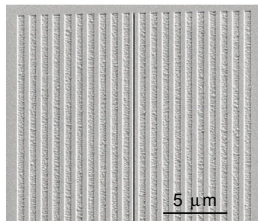
Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus
Mesures
Propriétés du champ issu du sillon
Effets de la géométrie du sillon

Conclusion



Ouverture unique décorée par des sillons périodiques

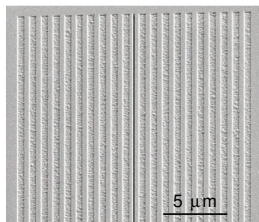


Fente de 150 nm, sillons : 415 nm, période
830 nm¹

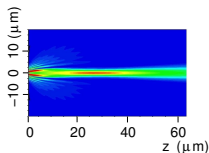
¹H. Lezec *et al.*, *Science*, **297**, (2003)



Ouverture unique décorée par des sillons périodiques



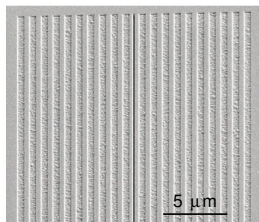
Fente de 150 nm, sillons : 415 nm, période
830 nm¹



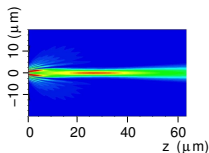
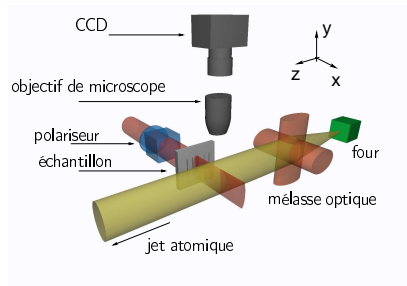
¹H. Lezec *et al.*, *Science*, **297**, (2003)



Ouverture unique décorée par des sillons périodiques



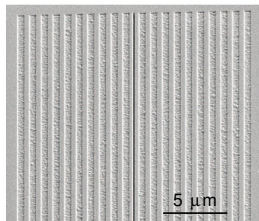
Fente de 150 nm, sillons : 415 nm, période
830 nm¹



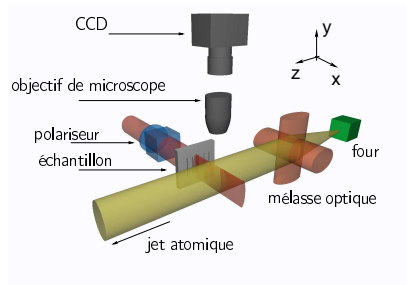
¹H. Lezec *et al.*, *Science*, **297**, (2003)



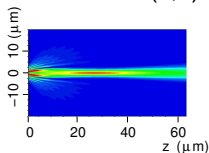
Ouverture unique décorée par des sillons périodiques



Fente de 150 nm, sillons : 415 nm, période
830 nm¹



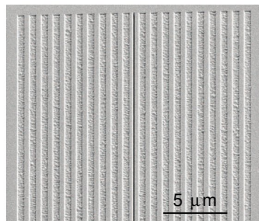
$$\text{Fluo}(x,z) \propto \text{Intensité}(x,z) \times \text{Densité}$$



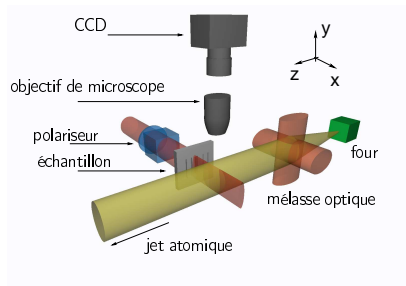
¹H. Lezec *et al.*, *Science*, **297**, (2003)



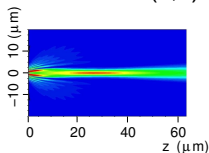
Ouverture unique décorée par des sillons périodiques



Fente de 150 nm, sillons : 415 nm, période
830 nm¹



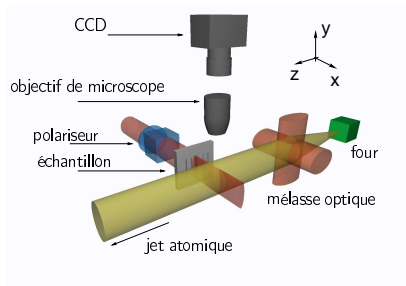
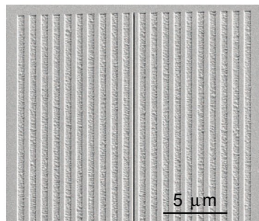
$$\text{Fluo}(x,z) \propto \text{Intensité}(x,z) \times \text{Densité}$$



¹H. Lezec *et al.*, *Science*, **297**, (2003)

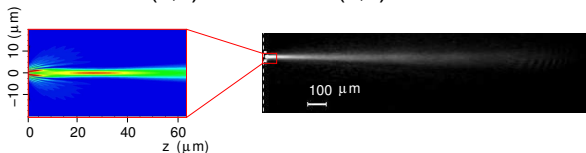


Ouverture unique décorée par des sillons périodiques



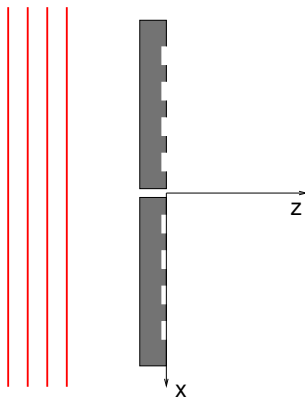
Fente de 150 nm, sillons : 415 nm, période
830 nm¹

$$\text{Fluo}(x,z) \propto \text{Intensité}(x,z) \times \text{Densité}$$



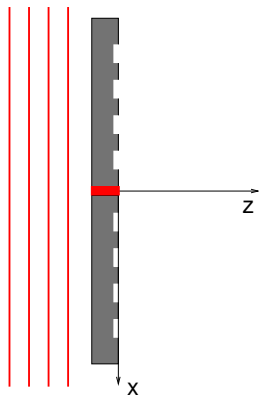
¹H. Lezec *et al.*, *Science*, **297**, (2003)

Effet de Collimation



- Le champ incident est guidé à travers la fente
- La diffraction par la fente crée un champ de surface
- Les sillons constituent des sources secondaires qui interfèrent constructivement
- Et produisent un faisceau collimaté

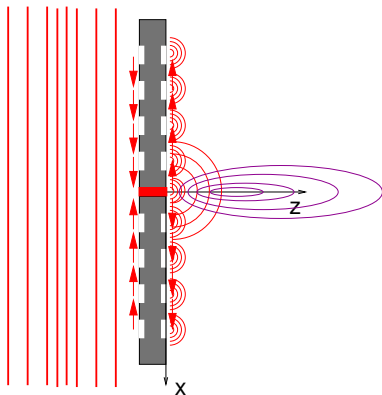
Effet de Collimation



- Le champ incident est guidé à travers la fente
- La diffraction par la fente crée un champ de surface
- Les sillons constituent des sources secondaires qui interfèrent constructivement
- Et produisent un faisceau collimaté

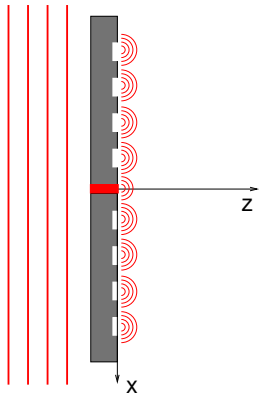


Effet de Collimation



- Le champ incident est guidé à travers la fente
- La diffraction par la fente crée un champ de surface
- Les sillons constituent des sources secondaires qui interfèrent constructivement
- Et produisent un faisceau collimaté

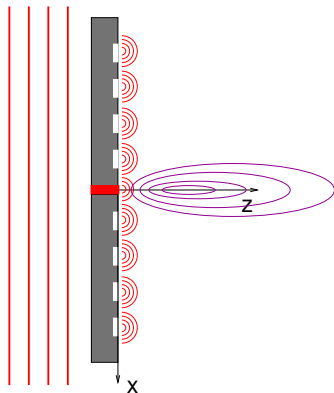
Effet de Collimation



- Le champ incident est guidé à travers la fente
- La diffraction par la fente crée un champ de surface
- Les sillons constituent des sources secondaires qui interfèrent constructivement
- Et produisent un faisceau collimaté



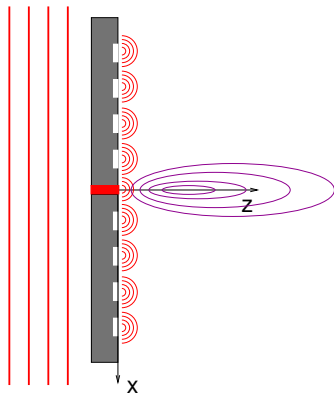
Effet de Collimation



- Le champ incident est guidé à travers la fente
- La diffraction par la fente crée un champ de surface
- Les sillons constituent des sources secondaires qui interfèrent constructivement
- Et produisent un faisceau collimaté



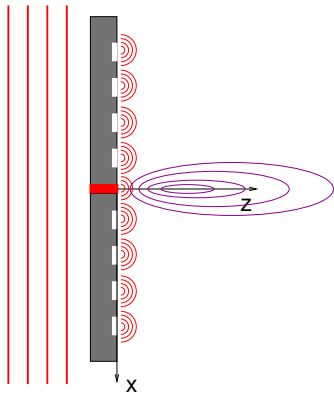
Effet de Collimation



- Le champ incident est **guidé** à travers la fente
- La diffraction par la fente crée un champ de surface
- Les sillons constituent des sources secondaires qui interfèrent constructivement
- Et produisent un faisceau collimaté



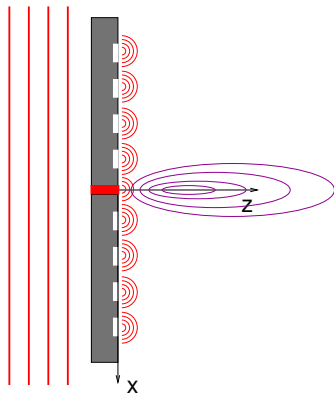
Effet de Collimation



- Le champ incident est guidé à travers la fente
- La diffraction par la fente crée un **champ de surface**
- Les sillons constituent des sources secondaires qui interfèrent constructivement
- Et produisent un faisceau collimaté



Effet de Collimation



- Le champ incident est guidé à travers la fente
- La diffraction par la fente crée un **champ de surface**
- Les sillons constituent des sources secondaires qui **interfèrent** constructivement
- Et produisent un faisceau collimaté



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

- Transmission de la lumière par une ouverture unique
- Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

- Déscription simple du processus
- Mesures
- Propriétés du champ issu du sillon
- Effets de la géométrie du sillon

Conclusion



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique

Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus

Mesures

Propriétés du champ issu du sillon

Effets de la géométrie du sillon

Conclusion



Diffraction par une ouverture sub-longueur d'onde

- Contribution importante du champ proche
- Les approximations classiques ne sont pas valides
- Résolution numérique des équations de Maxwell



Diffraction par une ouverture sub-longueur d'onde

- Contribution importante du champ proche
- Les approximations classiques ne sont pas valides
- Résolution numérique des équations de Maxwell



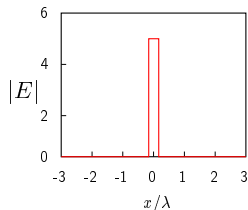
Diffraction par une ouverture sub-longueur d'onde

- Contribution importante du champ proche
- Les approximations classiques ne sont pas valides
- Résolution numérique des équations de Maxwell



Fente dans un écran opaque

hypothèse:



champ total ($z = 0$)

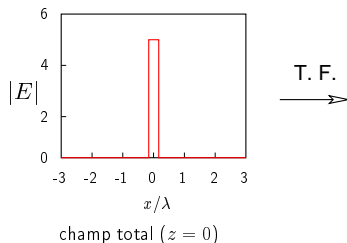
- Ouverture sub- $\lambda \Leftrightarrow$ spectre de k_x large
- Répartition champ radiatif ($k_x < |k_0|$)/champ évanescent¹
($k_x > |k_0|$)

¹M.W. Kowarz *Appl. Opt.* 34, (1995)



Fente dans un écran opaque

hypothèse:



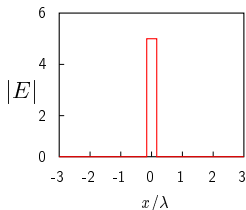
- Ouverture sub- $\lambda \Leftrightarrow$ spectre de k_x large
- Répartition champ radiatif ($k_x < |k_0|$)/champ évanescent¹
($k_x > |k_0|$)

¹M.W. Kowarz *Appl. Opt.* 34, (1995)



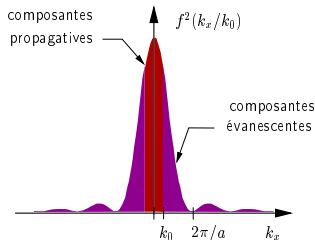
Fente dans un écran opaque

hypothèse:



champ total ($z = 0$)

T. F.
→

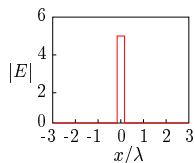


- Ouverture sub- $\lambda \Leftrightarrow$ spectre de k_x large
- Répartition champ radiatif ($k_x < |k_0|$)/champ évanescent¹ ($k_x > |k_0|$)

¹M.W. Kowarz *Appl. Opt.* **34**, (1995)



Modèle CDEW²



total ($z = 0$)

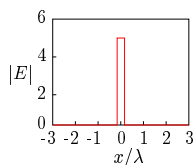
- Champ évanescent \equiv *paquet* de vecteurs k_x , $|k_x| > k_0$
- Modèle *Composite Diffracted Evanescent Wave* :

$$E_{cdew} = -\frac{E_i}{\pi} \frac{a}{x} \cos\left(k_s x + \frac{\pi}{2}\right)$$

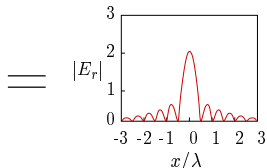
pour $|x| > a/2$



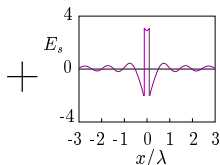
Modèle CDEW²



total ($z = 0$)



radiatif



évanescent

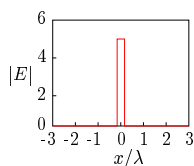
- Champ évanescent \equiv *paquet* de vecteurs k_x , $|k_x| > k_0$
- Modèle *Composite Diffracted Evanescent Wave* :

$$E_{cdeW} = -\frac{E_i}{\pi} \frac{a}{x} \cos\left(k_s x + \frac{\pi}{2}\right)$$

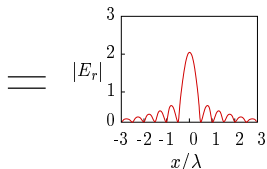
pour $|x| > a/2$



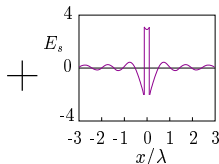
Modèle CDEW²



total ($z = 0$)



radiatif



évanescent

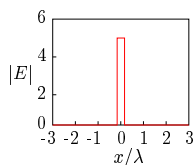
- Champ évanescent \equiv *paquet* de vecteurs k_x , $|k_x| > k_0$
- Modèle *Composite Diffracted Evanescent Wave* :

$$E_{cdeW} = -\frac{E_i}{\pi} \frac{a}{x} \cos\left(k_s x + \frac{\pi}{2}\right)$$

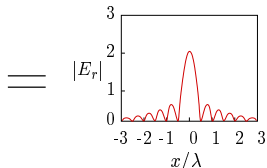
pour $|x| > a/2$



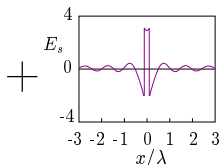
Modèle CDEW²



total ($z = 0$)



radiatif

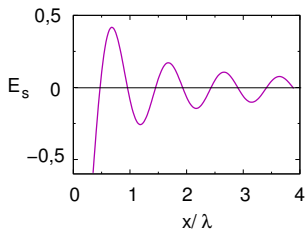


évanescent

- Champ évanescent \equiv *paquet* de vecteurs k_x , $|k_x| > k_0$
- Modèle *Composite Diffracted Evanescent Wave* :

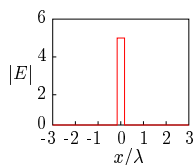
$$E_{cdeW} = -\frac{E_i}{\pi} \frac{a}{x} \cos\left(k_s x + \frac{\pi}{2}\right)$$

pour $|x| > a/2$

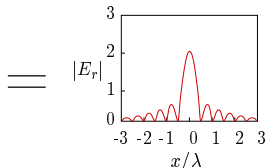




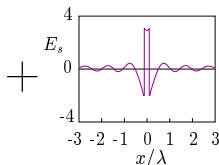
Modèle CDEW²



total ($z = 0$)



radiatif

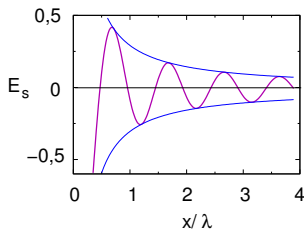


évanescent

- Champ évanescent \equiv *paquet* de vecteurs k_x , $|k_x| > k_0$
- Modèle *Composite Diffracted Evanescent Wave* :

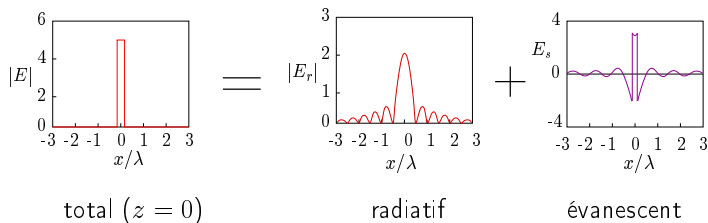
$$E_{cdeW} = -\frac{E_i}{\pi} \frac{a}{x} \cos\left(k_s x + \frac{\pi}{2}\right)$$

pour $|x| > a/2$





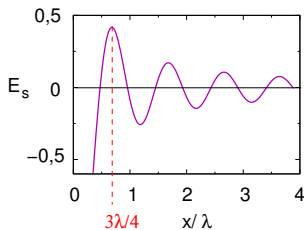
Modèle CDEW²



- Champ évanescent \equiv *paquet* de vecteurs k_x , $|k_x| > k_0$
- Modèle *Composite Diffracted Evanescent Wave* :

$$E_{cdeW} = -\frac{E_i}{\pi} \frac{a}{x} \cos\left(k_s x + \frac{\pi}{2}\right)$$

pour $|x| > a/2$





Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

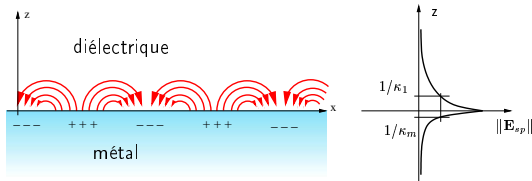
Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus
Mesures
Propriétés du champ issu du sillon
Effets de la géométrie du sillon

Conclusion



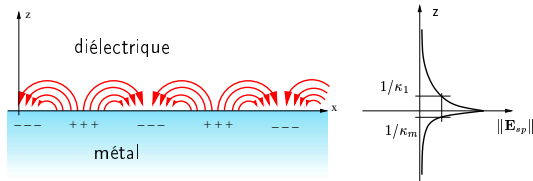
Interface métal/diélectrique



- Solution des équations de Maxwell à l'interface métal/diélectrique
- Mode guidé dans le plan, évanescent selon z
- Couplé aux électrons du métal



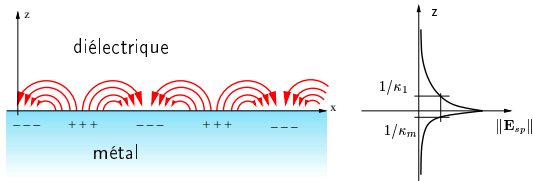
Interface métal/diélectrique



- Solution des équations de Maxwell à l'interface métal/diélectrique
- Mode guidé dans le plan, évanescent selon z
- Couplé aux électrons du métal



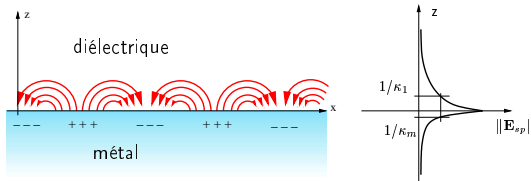
Interface métal/diélectrique



- Solution des équations de Maxwell à l'interface métal/diélectrique
- Mode guidé dans le plan, évanescent selon z
- Couplé aux électrons du métal



Interface métal/diélectrique



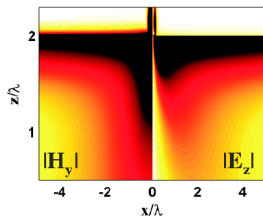
- Solution des équations de Maxwell à l'interface métal/diélectrique
- Mode guidé dans le plan, évanescent selon z
- Couplé aux électrons du métal

$$E_{sp}(x, z) \propto \exp i(k_{sp}x - \omega t) \exp -\kappa_1 z \quad (z > 0)$$

$\text{\AA } 852 \text{ nm } k_{sp} = n_{sp}k_0, n_{sp}=1.015$



Ouverture sub- λ et plasmon polariton de surface ³

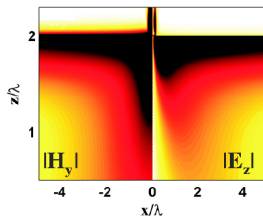


Simulation du champ de surface issu
d'une fente

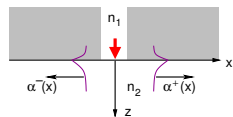
³P. Lalanne *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, **95**, (2005)



Ouverture sub- λ et plasmon polariton de surface ³



Simulation du champ de surface issu
d'une fente

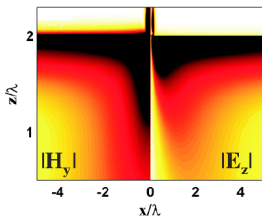


Décomposition :
SPP + champ radiatif

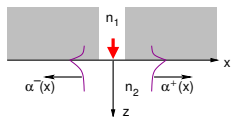
³P. Lalanne *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **95**, (2005)



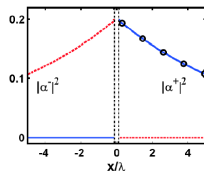
Ouverture sub- λ et plasmon polariton de surface ³



Simulation du champ de surface issu d'une fente



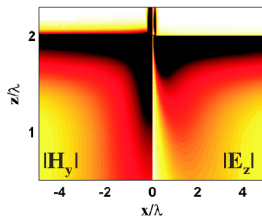
Décomposition :
SPP + champ radiatif



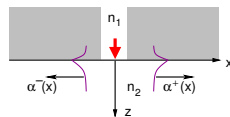
³P. Lalanne *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **95**, (2005)



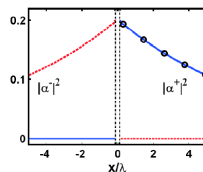
Ouverture sub- λ et plasmon polariton de surface ³



Simulation du champ de surface issu d'une fente



Décomposition :
SPP + champ radiatif



Couplage efficace du champ issu de la fente à un plasmon polariton de surface

³P. Lalanne *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, **95**, (2005)



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus

Mesures

Propriétés du champ issu du sillon

Effets de la géométrie du sillon

Conclusion



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus

Mesures

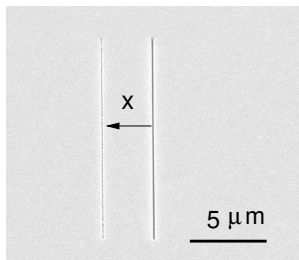
Propriétés du champ issu du sillon

Effets de la géométrie du sillon

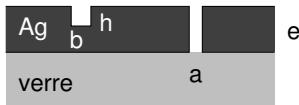
Conclusion



Ouvertures uniques décorées par des motifs discrets

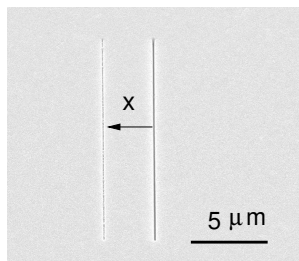


- Structures simples asymétriques
- Échantillonnage fin de la distance fente – sillon
- Tous les échantillons sont fabriqués par H. Lezec

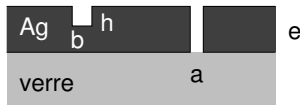




Ouvertures uniques décorées par des motifs discrets

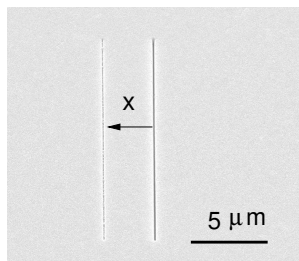


- Structures simples asymétriques
- Échantillonnage fin de la distance fente – sillon
- Tous les échantillons sont fabriqués par H. Lezec

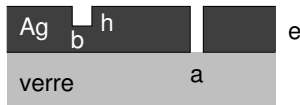




Ouvertures uniques décorées par des motifs discrets

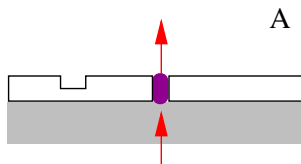


- Structures simples asymétriques
- Échantillonnage fin de la distance fente – sillon
- Tous les échantillons sont fabriqués par H. Lezec





Modèle phénoménologique



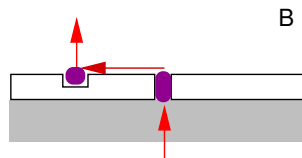
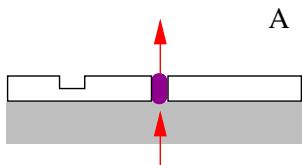
- Transmission directe
- Transmission indirecte
- Fentes d'Young

$$I(\theta, x) = I_0 [1 + \eta_o(x) + 2\eta_o(x) \cos \phi(\theta, x)]$$

⇒ Étude de $I(\theta)$ pour différents x



Modèle phénoménologique



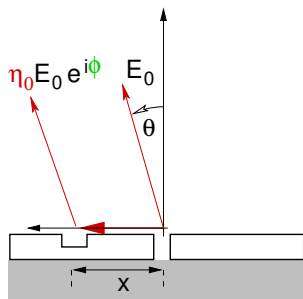
- Transmission directe
- Transmission indirecte
- Fentes d'Young

$$I(\theta, x) = I_0 [1 + \eta_o(x) + 2\eta_o(x) \cos \phi(\theta, x)]$$

⇒ Étude de $I(\theta)$ pour différents x



Modèle phénoménologique



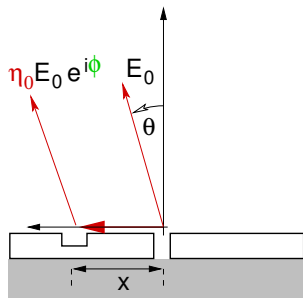
- Transmission directe
 - Transmission indirecte
- ⇒ Fentes d'Young

$$I(\theta, x) = I_0 [1 + \eta_0(x) + 2\eta_0(x) \cos \phi(\theta, x)]$$

⇒ Étude de $I(\theta)$ pour différents x



Modèle phénoménologique



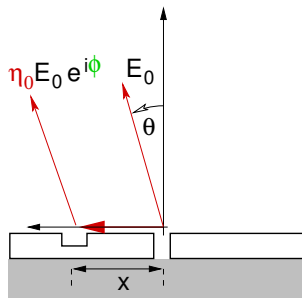
- Transmission directe
 - Transmission indirecte
- ⇒ Fentes d'Young

$$I(\theta, x) = I_0 [1 + \eta_o(x) + 2\eta_o(x) \cos \phi(\theta, x)]$$

⇒ Étude de $I(\theta)$ pour différents x



Modèle phénoménologique



- Transmission directe
 - Transmission indirecte
- ⇒ Fentes d'Young

$$I(\theta, x) = I_0 [1 + \eta_o(x) + 2\eta_o(x) \cos \phi(\theta, x)]$$

⇒ Étude de $I(\theta)$ pour différents x



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus

Mesures

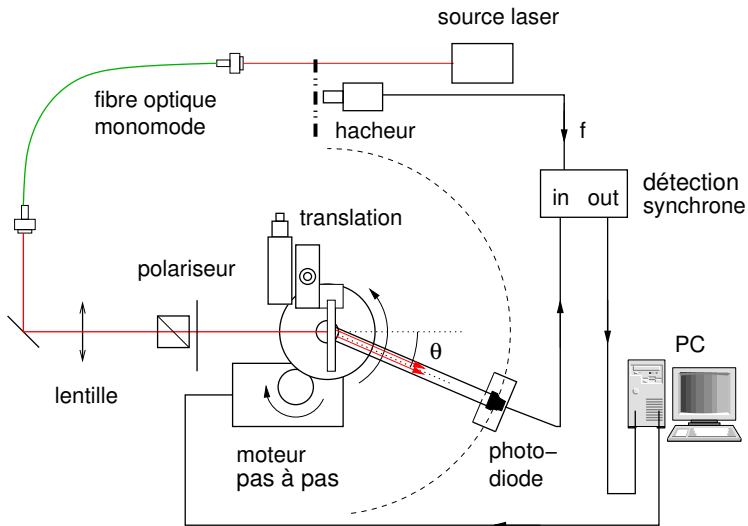
Propriétés du champ issu du sillon

Effets de la géométrie du sillon

Conclusion

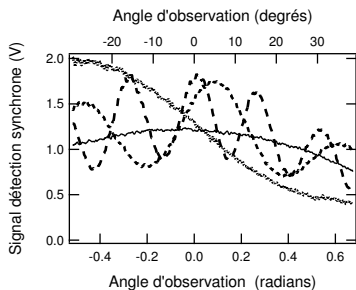


Goniomètre

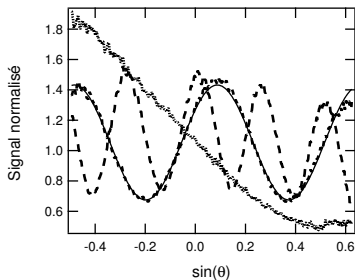




Exemples de mesures



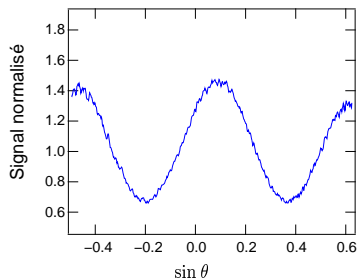
Données brutes



Données normalisées, représentées en fonction de $\sin \theta$



Grandeurs déductibles pour le champ issu du sillon

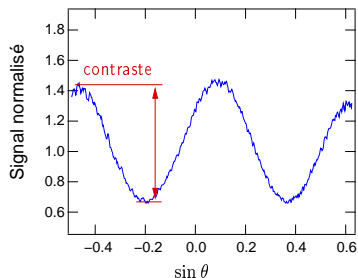


- Amplitude relative $\eta_o(x)$
- Retard de phase $\phi(x, \theta = 0)$

$$I(\sin \theta) = 1 + \eta_o^2 + \eta_o \cos [k_0 x \sin \theta + \phi(0)]$$



Grandeurs déductibles pour le champ issu du sillon

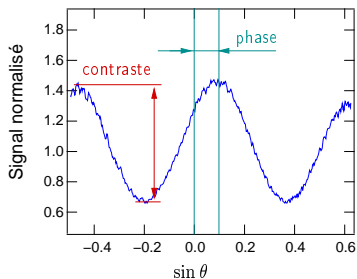


- Amplitude relative $\eta_o(x)$
- Retard de phase $\phi(x, \theta = 0)$

$$I(\sin \theta) = 1 + \eta_o^2 + \eta_o \cos [k_0 x \sin \theta + \phi(0)]$$



Grandeurs déductibles pour le champ issu du sillon



- Amplitude relative $\eta_o(x)$
- Retard de phase $\phi(x, \theta = 0)$

$$I(\sin \theta) = 1 + \eta_o^2 + \eta_o \cos [k_0 x \sin \theta + \phi(0)]$$



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

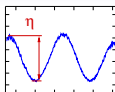
Description simple du processus

Mesures

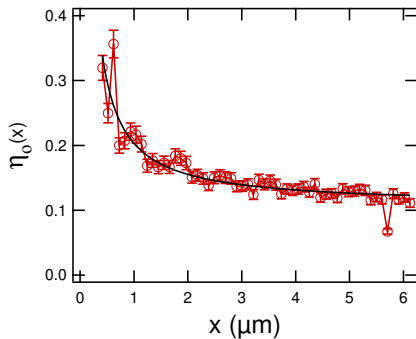
Propriétés du champ issu du sillon

Effets de la géométrie du sillon

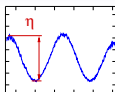
Conclusion



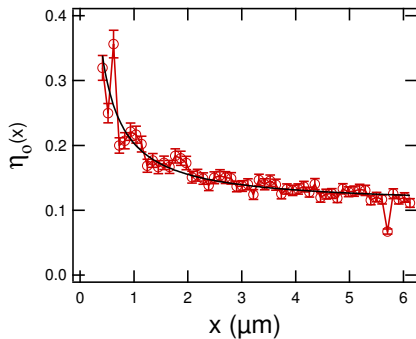
Amplitude



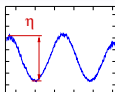
- Variation à deux composantes :
 - Courte portée
 - Longue portée



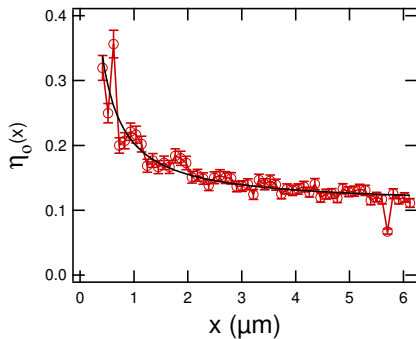
Amplitude



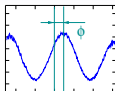
- Variation à deux composantes :
- Courte portée
- Longue portée



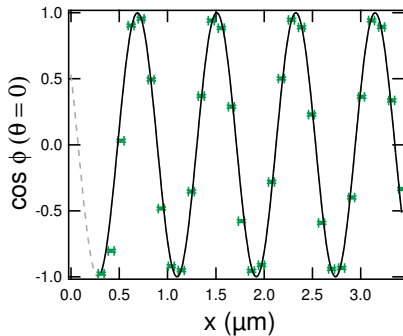
Amplitude



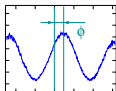
- Variation à deux composantes :
- Courte portée
- Longue portée



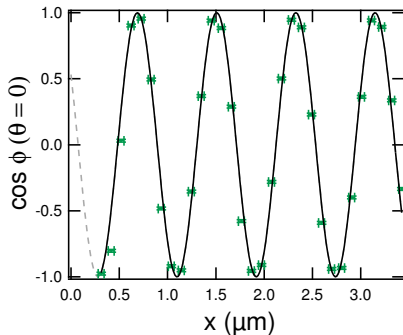
Phase



- Fréquence des oscillations : \Rightarrow mesure de l'indice n_s
- Mesure de la phase intrinsèque quand $x \rightarrow 0$

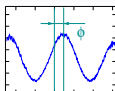


Phase

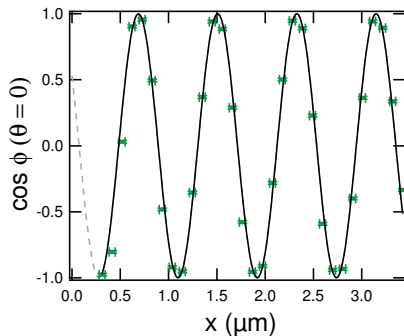


- Fréquence des oscillations : \Rightarrow mesure de l'indice n_s
- Mesure de la phase intrinsèque quand $x \rightarrow 0$

$$\text{Hypothèse : } \phi(x, \theta = 0) = n_s k_0 x + \phi_0$$

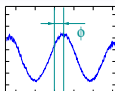


Phase

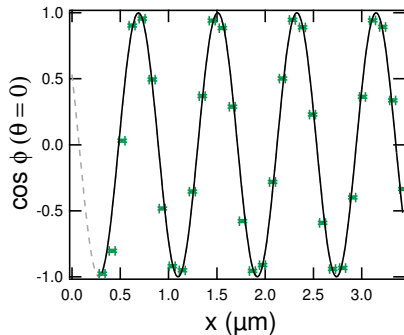


- Fréquence des oscillations : \Rightarrow mesure de l'indice n_s
- Mesure de la phase intrinsèque quand $x \rightarrow 0$

$$\text{Hypothèse : } \phi(x, \theta = 0) = n_s k_0 x + \phi_0$$

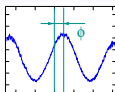


Phase

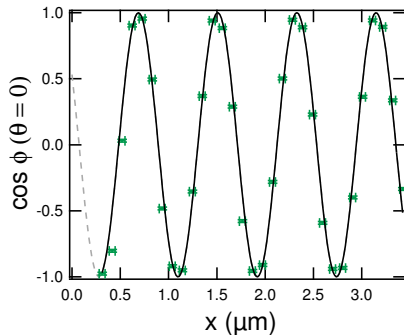


- Fréquence des oscillations : \Rightarrow mesure de l'indice n_s
- Mesure de la phase intrinsèque quand $x \rightarrow 0$

$$\text{Hypothèse : } \phi(x, \theta = 0) = n_s k_0 x + \phi_0$$



Phase

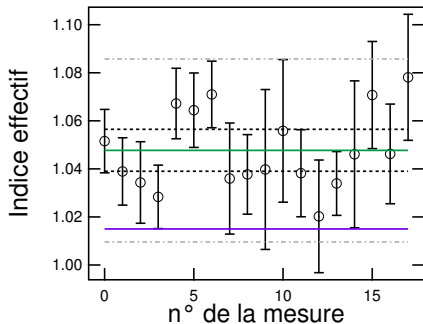


- Fréquence des oscillations : \Rightarrow mesure de l'indice n_s
- Mesure de la phase intrinsèque quand $x \rightarrow 0$

$$\text{Hypothèse : } \phi(x, \theta = 0) = n_s k_0 x + \phi_0$$



Indice effectif



Indice effectif $n_s = 1,047 \pm 0,012$



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

Transmission de la lumière par une ouverture unique
Plasmon polariton de surface

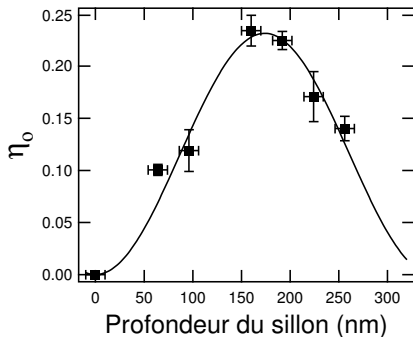
Études de structures simples en champs lointain

Description simple du processus
Mesures
Propriétés du champ issu du sillon
Effets de la géométrie du sillon

Conclusion



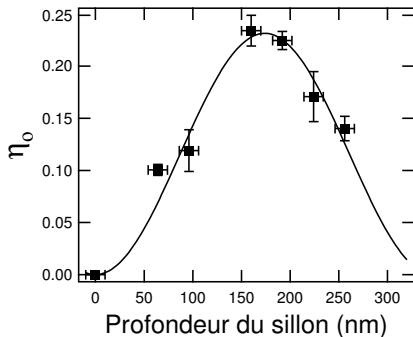
Amplitude



- Même comportement pour des sillons fins et larges
- Résonance pour $h \simeq 175$ nm : mode de cavité ?



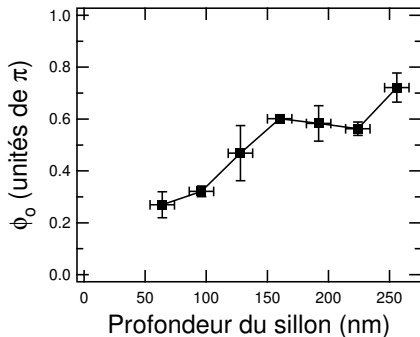
Amplitude



- Même comportement pour des sillons fins et larges
- Résonance pour $h \simeq 175$ nm : mode de cavité ?



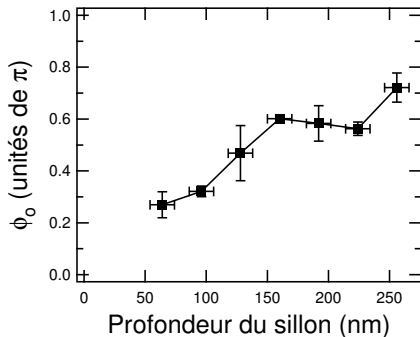
Phase intrinsèque



- Même comportement pour des sillons fins et larges
- $\phi_0 \simeq \pi/2$ quand $h \simeq 175$ nm



Phase intrinsèque



- Même comportement pour des sillons fins et larges
- $\phi_0 \simeq \pi/2$ quand $h \simeq 175$ nm



Ouvertures décorées par des motifs périodiques

Transmission des ouvertures sub-longueur d'onde

- Transmission de la lumière par une ouverture unique
- Plasmon polariton de surface

Études de structures simples en champs lointain

- Description simple du processus
- Mesures
- Propriétés du champ issu du sillon
- Effets de la géométrie du sillon

Conclusion



Résumé

- Champ de surface propagatif, à longue portée
- Indice effectif $n_s = 1,047 \pm 0,012 \neq n_{spp}$
- Géométrie du sillon \Rightarrow optimisation du couplage
- Études expérimentales complémentaires
- Simulations numériques en cours (M. Sukharev, Univ. Northwestern)



Résumé

- Champ de surface propagatif, à longue portée
- Indice effectif $n_s = 1,047 \pm 0,012 \neq n_{spp}$
- Géométrie du sillon \Rightarrow optimisation du couplage
- Études expérimentales complémentaires
- Simulations numériques en cours (M. Sukharev, Univ. Northwestern)



Résumé

- Champ de surface propagatif, à longue portée
- Indice effectif $n_s = 1,047 \pm 0,012 \neq n_{spp}$
- Géométrie du sillon \Rightarrow optimisation du couplage
- Études expérimentales complémentaires
- Simulations numériques en cours (M. Sukharev, Univ. Northwestern)



Résumé

- Champ de surface propagatif, à longue portée
- Indice effectif $n_s = 1,047 \pm 0,012 \neq n_{spp}$
- Géométrie du sillon \Rightarrow optimisation du couplage
- Études expérimentales complémentaires
- Simulations numériques en cours (M. Sukharev, Univ. Northwestern)

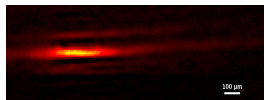
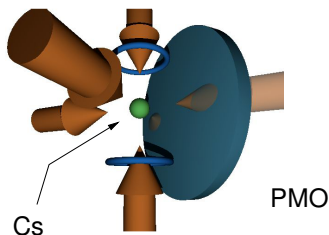


Résumé

- Champ de surface propagatif, à longue portée
- Indice effectif $n_s = 1,047 \pm 0,012 \neq n_{spp}$
- Géométrie du sillon \Rightarrow optimisation du couplage
- Études expérimentales complémentaires
- Simulations numériques en cours (M. Sukharev, Univ. Northwestern)



Perspectives



atomes de césium piégés

lentilles de Fresnel

