

Atelier Plasmonique du 5 février 2015, LAAS-CNRS, Toulouse

Intégration de lentilles métalliques dans des capteurs d'images silicium CMOS

Thomas Lopez¹, **Sébastien Massenot**¹, Magali Estribeau¹, Pierre Magnan¹ et Jean-Luc Pelouard²

1 ISAE-SUPAERO, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Université de Toulouse, Toulouse

2 Laboratoire de Photonique et Nanostructure, LPN-CNRS, Marcoussis, France



Plan de la présentation

- Contexte des capteurs d'images CMOS
 - Description et principales propriétés / structure d'un pixel
 - Contraintes associées

- Etat de l'art sur l'intégration de fonctions plasmoniques dans les imageurs CMOS

- Conception de lentille (concentrateurs de champs) pour une application d'imagerie monochromatique à $1,064\mu\text{m}$
 - Lentille Plasmonique
 - Lentille de Huygens (sténopé)

- Conclusions et perspectives

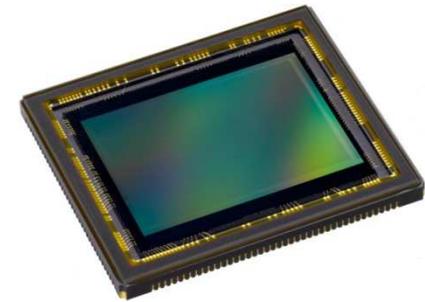
Plan de la présentation

- **Contexte des capteurs d'images CMOS**
 - **Description et principales propriétés / structure d'un pixel**
 - **Contraintes associées**
- Etat de l'art sur l'intégration de fonctions plasmoniques dans les imageurs CMOS
- Conception de lentille (concentrateurs de champs) pour une application d'imagerie monochromatique à $1,064\mu\text{m}$
 - Lentille Plasmonique
 - Lentille de Huygens (sténopé)
- Conclusions et perspectives

Capteurs d'images CMOS (1)

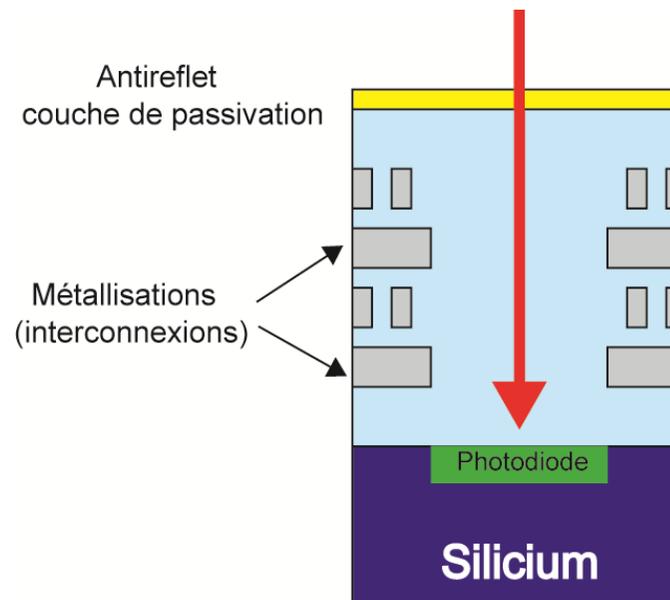
Principales propriétés:

- Utilisation directe des **procédés standards de la microélectronique**
- **Moins coûteux** que les capteurs CCD
- Puissance consommée moindre
- **Adressage pixel par pixel**
- Moins bonnes performances intrinsèques en bruit et en dynamique que les CCD
- Possibilité d'**intégration de fonctions de traitement de signal** au niveau du plan focal



(source: www.cobrason.com)

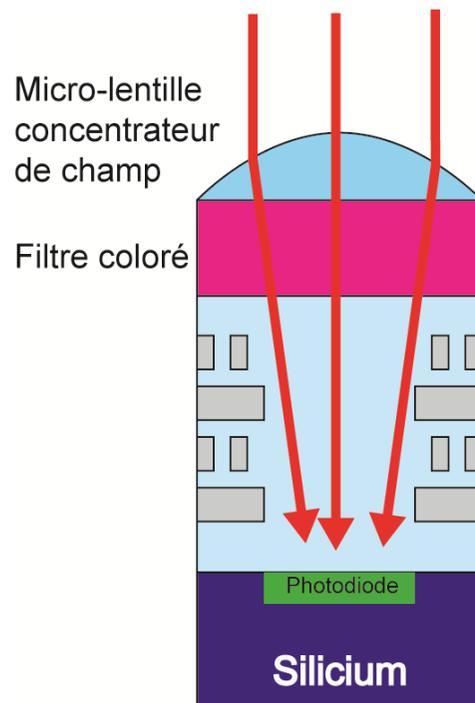
Pixel standard monochrome
(configuration front-side) –
schéma simplifié



Empilement métallo-diélectrique
(Al / SiO₂)

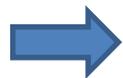
Capteurs d'images CMOS (2)

Fonctions optiques couramment
intégrées au niveau de chaque pixel



Quelques problématiques:

- La présence de filtres colorés épais peut introduire de la diaphonie entre pixels lorsque leur taille est réduite
- Dégradation des performances de certains composants optiques pour des très petits pixels (lentilles)
- Certaines applications spécifiques demandent un fort encombrement par les métallisations



Etudier la possibilité d'utiliser les niveaux métalliques du procédé de fabrication CMOS standard pour y réaliser des opérations de filtrage / concentration de champ (lentille, exaltation au niveau de la photodiode)

Capteurs d'images CMOS (3)

Contraintes associées:

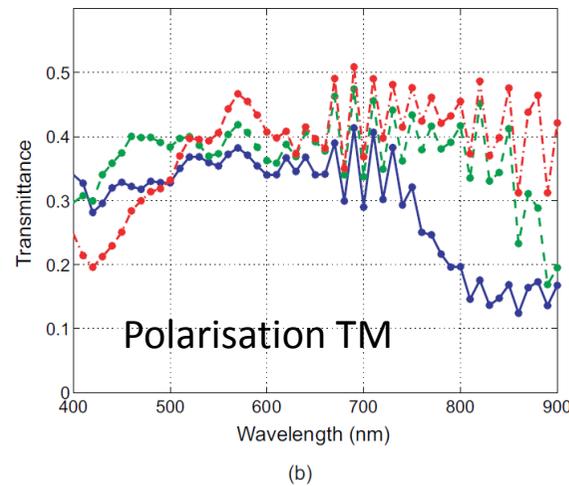
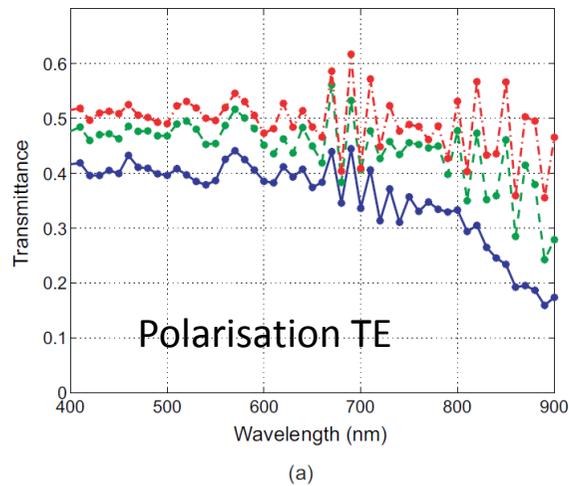
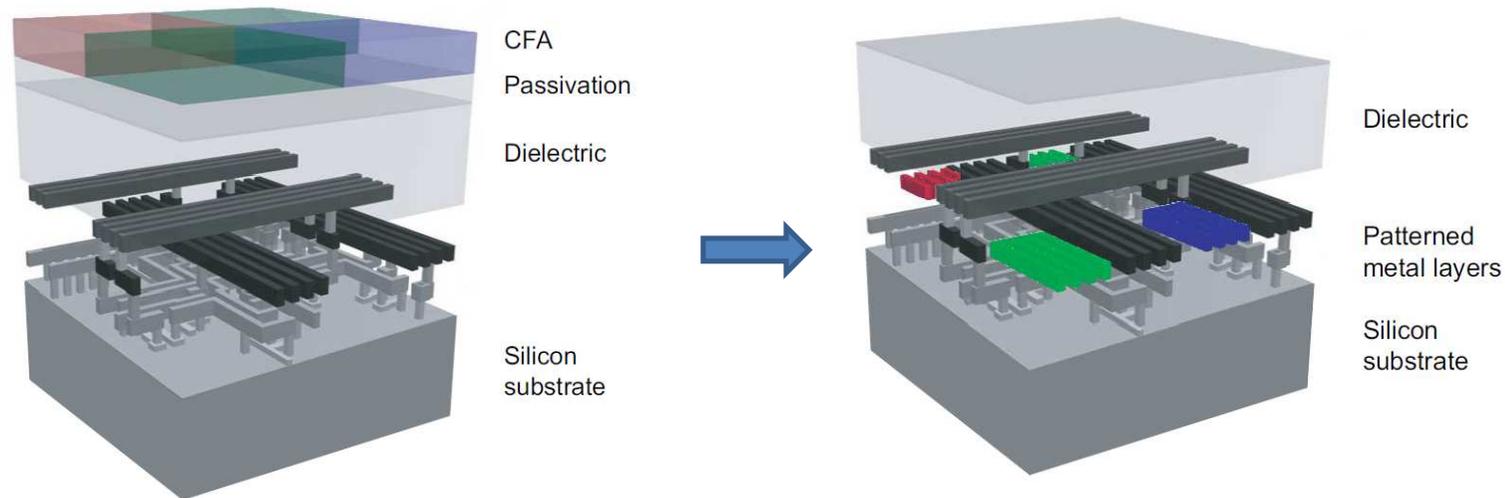
- Conservation de l'intégrité électrique du capteur
- Ne pas dégrader les performances optiques du capteur nu
- Respect des règles de dessin imposées par le fondeur pour la réalisation des masques
- Utilisation des matériaux disponibles dans le procédé de fabrication (sauf si dépôt au dessus de la couche de passivation) ⇒ **Aluminium / cuivre pour les métaux, SiO_2 , Si_3N_4 pour les diélectriques**

Plan de la présentation

- Contexte des capteurs d'images CMOS
 - Description et principales propriétés / structure d'un pixel
 - Contraintes associées
- **Etat de l'art sur l'intégration de fonctions plasmoniques dans les imageurs CMOS**
- Conception de lentille (concentrateurs de champs) pour une application d'imagerie monochromatique à $1,064\mu\text{m}$
 - Lentille Plasmonique
 - Lentille de Huygens (sténopé)
- Conclusions et perspectives

Etat de l'art (1)

- Première intégration de filtres colorés (Stanford - 2003)

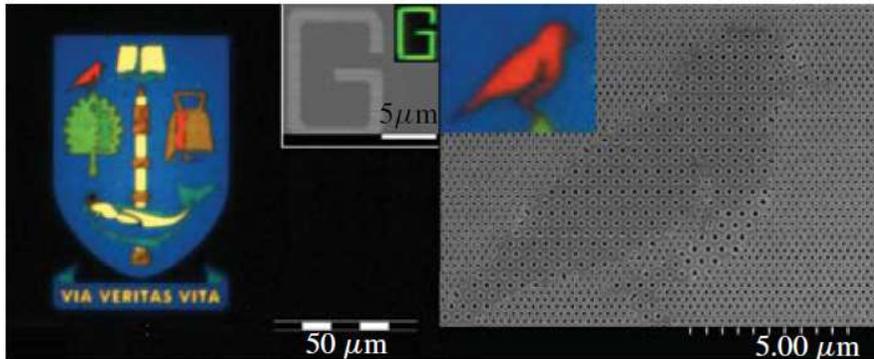


Lignes métalliques larges de 270 nm espacées de 270 nm (bleu), 360 nm (vert) et 450 nm (rouge) avec un procédé CMOS 180 nm

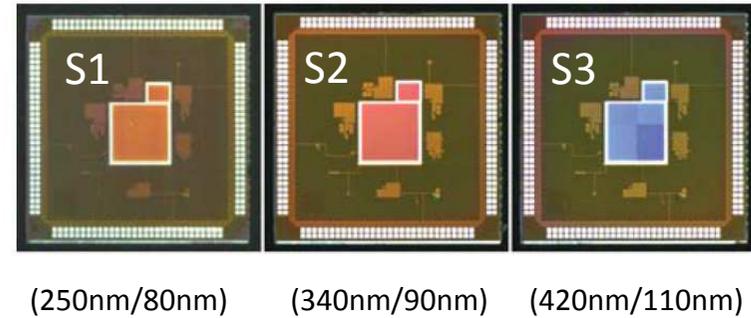
Etat de l'art (2)

- Intégration d'un filtre coloré basé sur un réseau de trous sur une photodiode monopixel:

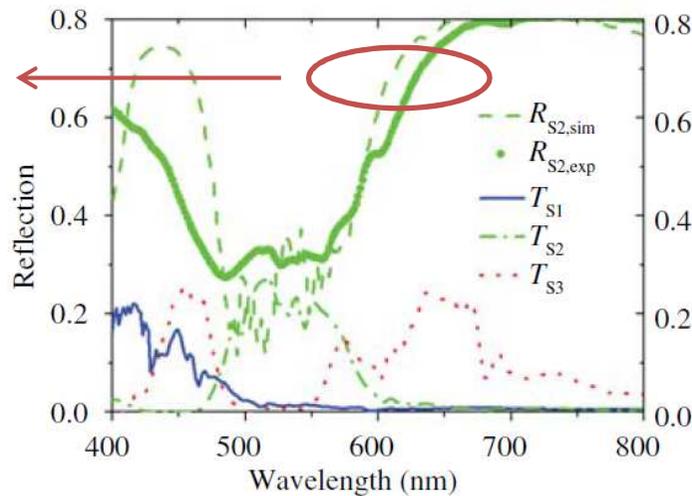
Filtre déposé sur une lame de verre (150 nm Al)



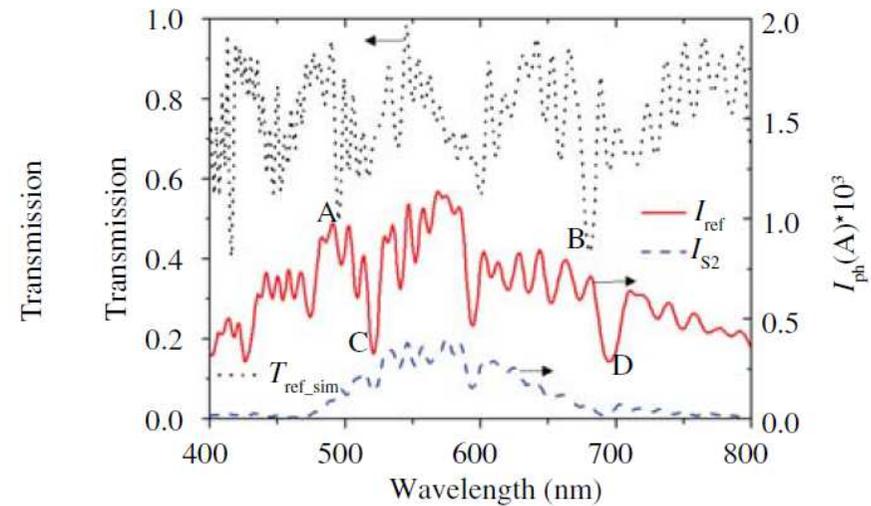
Filtres intégrés sur photodiodes isolées



Comparaison expérience / mesure pour le filtre S2

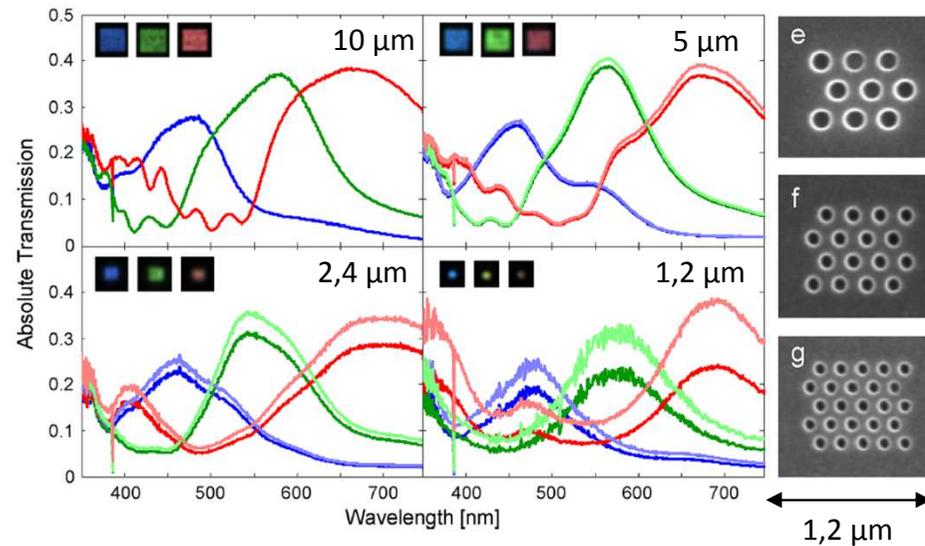
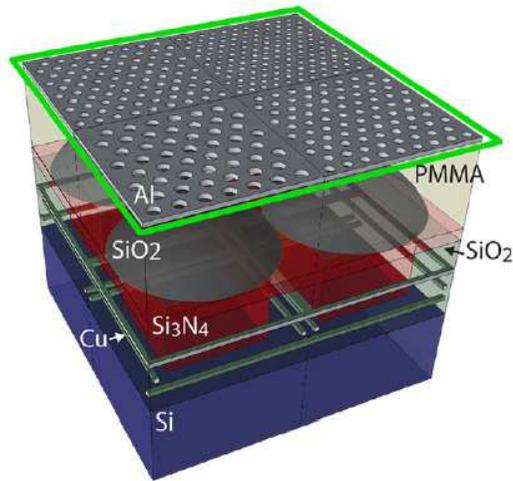


Mesures de photocourant

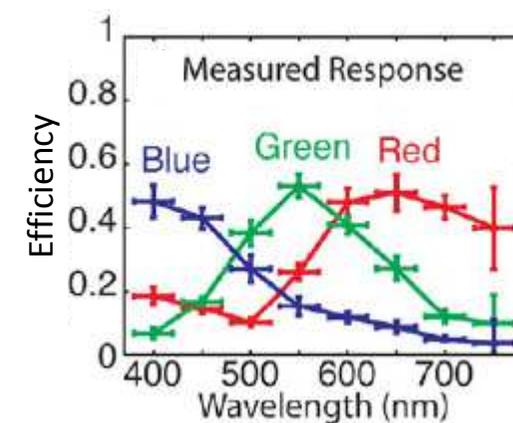
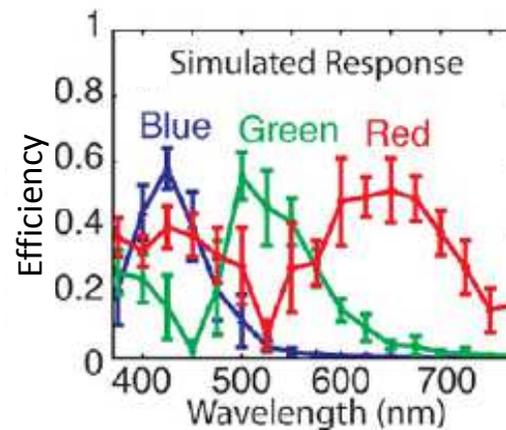
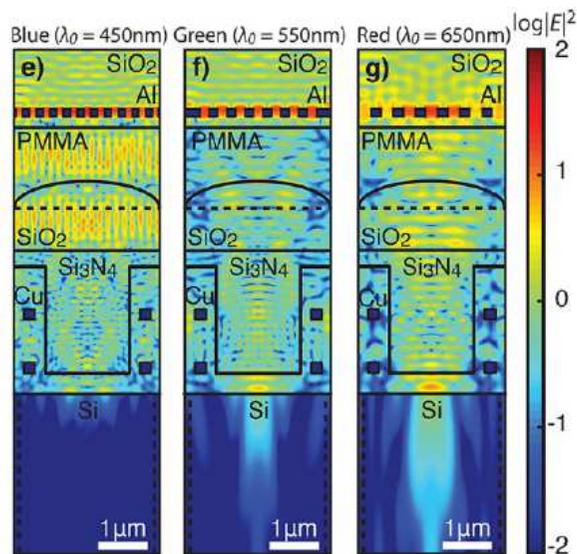


Etat de l'art (3)

- Intégration de filtres colorés basés sur un réseau de trous sur un capteur complet:



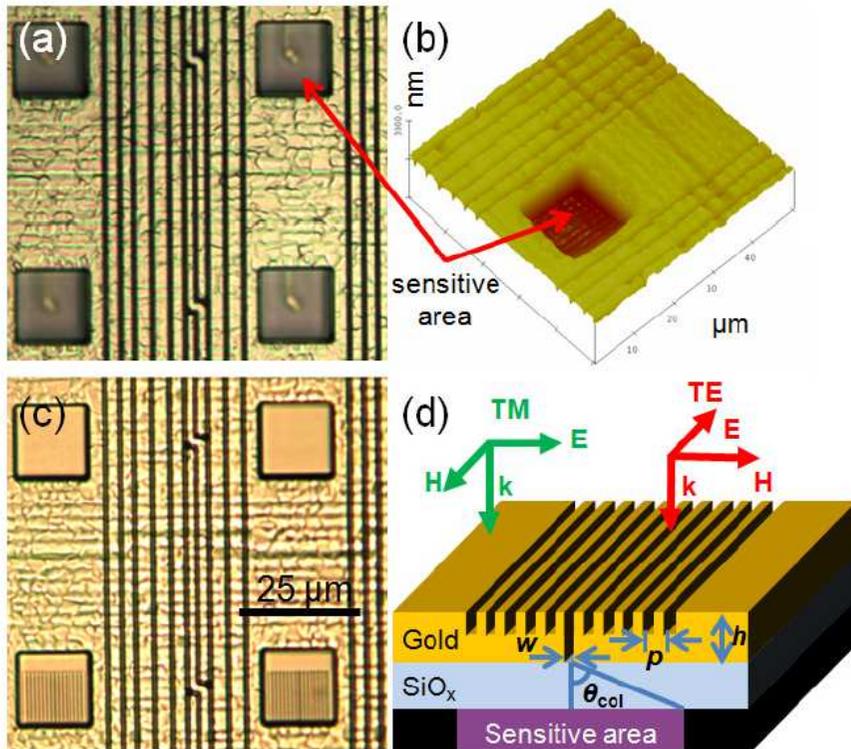
Réponse des filtres isolés sur verre



(S. Burgos et al., « Color imaging via nearest neighbor hole coupling in plasmonic color filters integrated onto a CMOS image sensor », ACS Nano, 7(11), 2013)

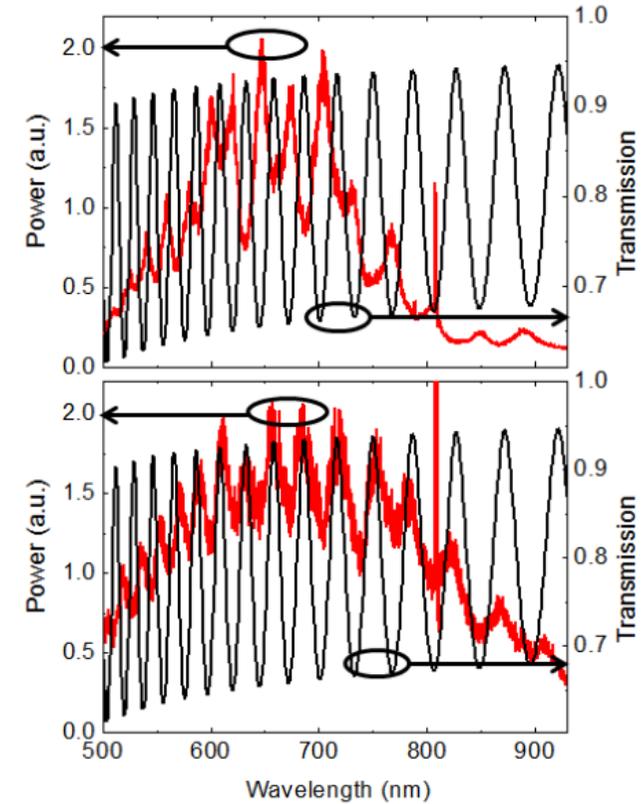
Etat de l'art (4)

- Dépôt d'un réseau de fentes en or au-dessus d'un capteur d'image CMOS:



Pixel de référence

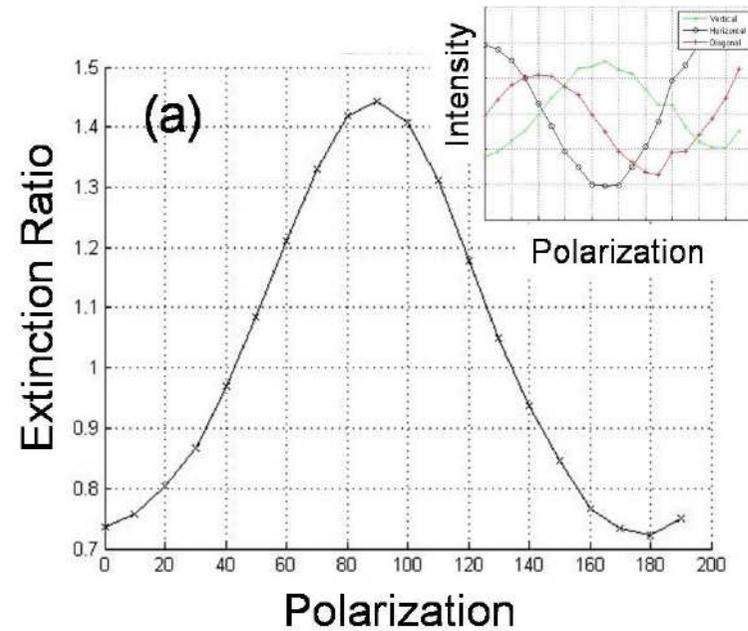
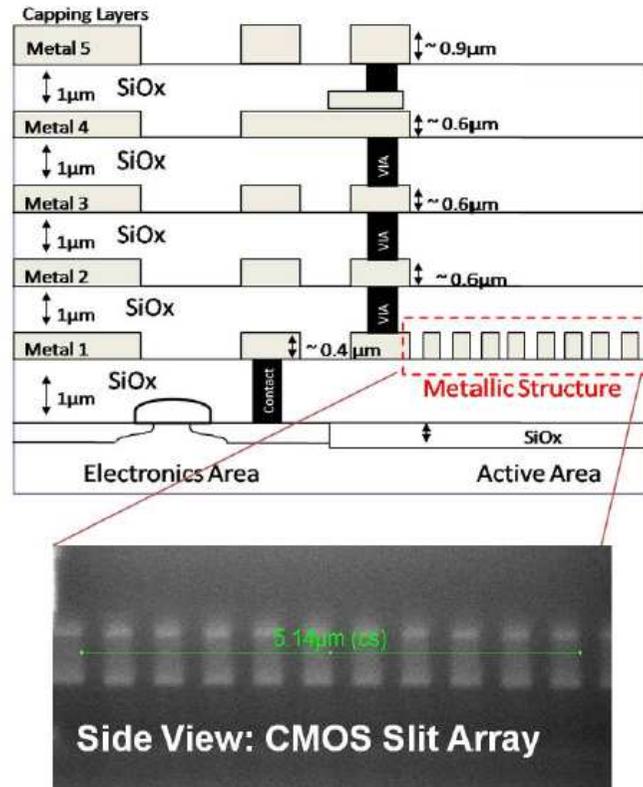
Pixel avec un réseau de fentes



Réseau de 20 fentes (épaisseur 340 nm, période 400 nm et largeur 150 nm)

Etat de l'art (5)

- **Filtres en polarisation:**

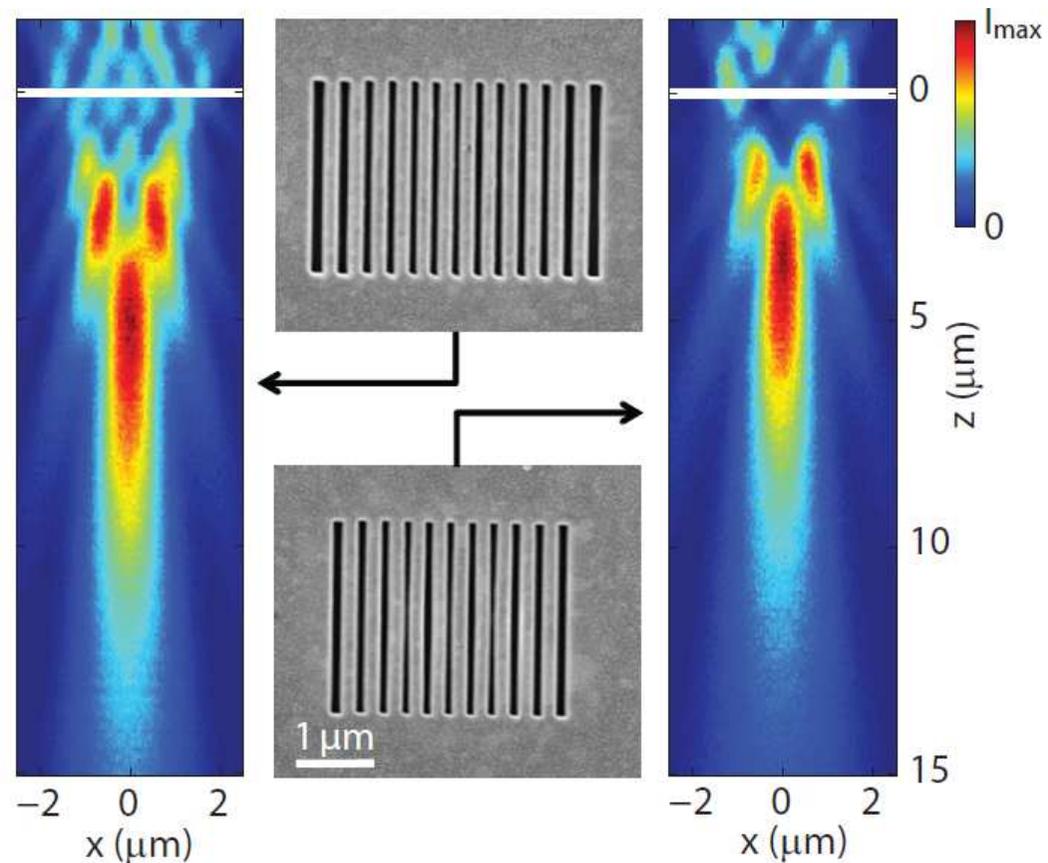


Intégration dans le premier niveau de métal (période 500 nm, fentes de 230 nm) en CMOS 180 nm

Etat de l'art (6)

- Lentilles planaires:

Réalisation de transformateurs de phase grâce à des structures Métal / Isolant / Métal



Pas d'intégration sur capteur d'image

Plan de la présentation

- Contexte des capteurs d'images CMOS
 - Description et principales propriétés / structure d'un pixel
 - Contraintes associées

- Etat de l'art sur l'intégration de fonctions plasmoniques dans les imageurs CMOS

- **Conception de lentille (concentrateurs de champs) pour une application d'imagerie monochromatique à 1,064 μ m**
 - **Lentille Plasmonique**
 - **Lentille de Huygens (sténopé)**

- Conclusions et perspectives

Introduction

- **Application visée**: imagerie active monochromatique à 1,064 μm
 - ⇒ **Intérêt technologique**: pouvoir pousser les composants silicium avec un procédé CMOS au maximum de leurs performances notamment dans le proche infrarouge
 - ⇒ **Intérêt applicatif**: Nombreuses applications de la bande proche-infrarouge en imagerie laser
 - Vision en conditions dégradées
 - Télémétrie
 - Composition d'atmosphère
 - Champ de vitesse de vents

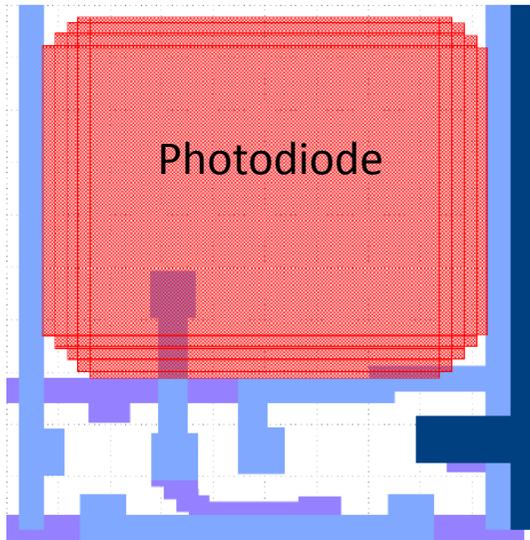


Conception de concentrateurs de champs métalliques permettant de collecter le plus grand nombre de photons infrarouge.

Etude du concept en l'intégrant sur un capteur d'image existant (post-process)

Propriétés du pixel nu

Vue de dessus

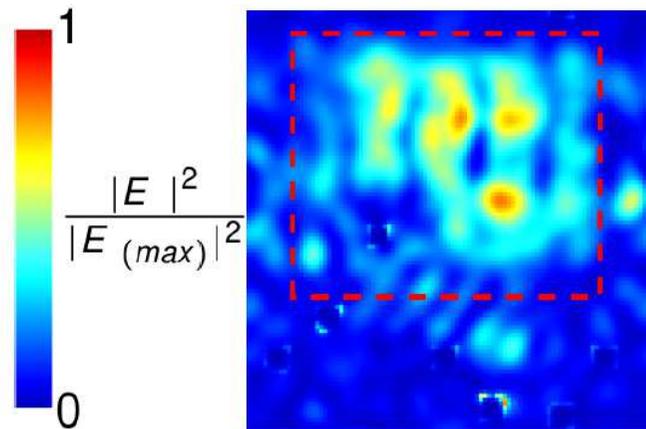
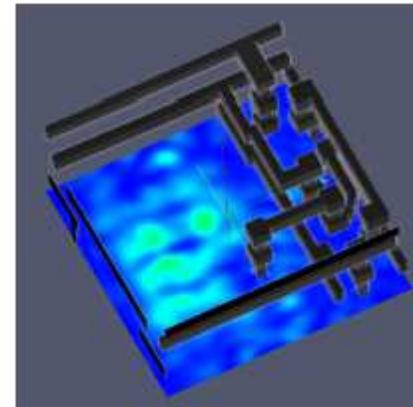


Métallisations

Dimensions $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$

Facteur de remplissage
de la photodiode $\sim 60\%$

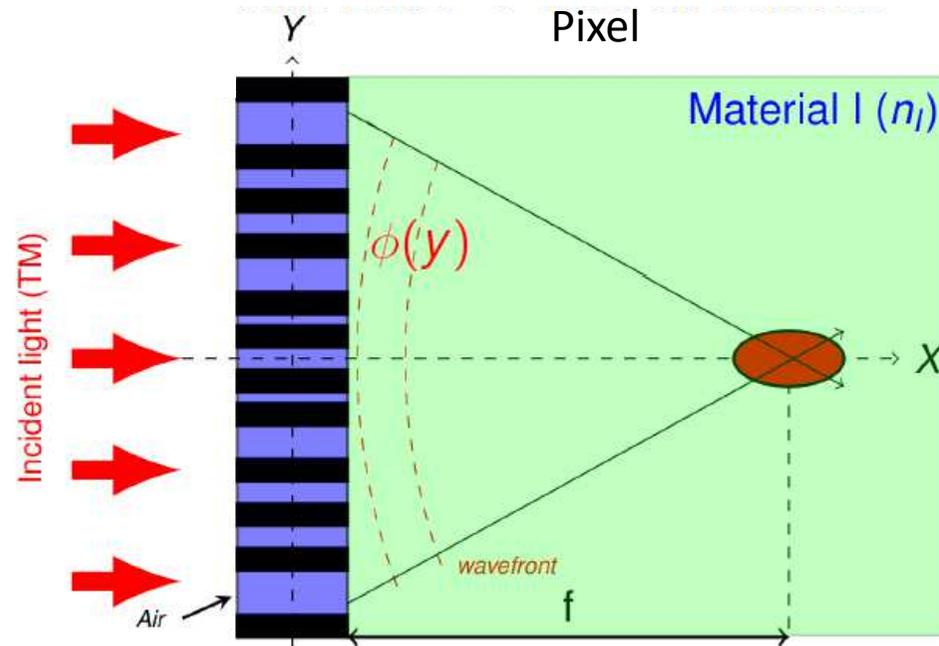
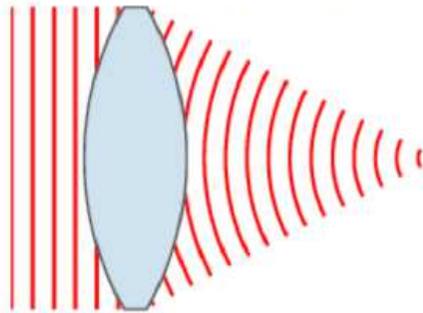
Modélisation FDTD de l'intensité du champ électrique en incidence normale @ $1,064\ \mu\text{m}$, polarisation TM



43% de l'énergie incidente à la surface
de la photodiode

Lentille plasmonique (1)

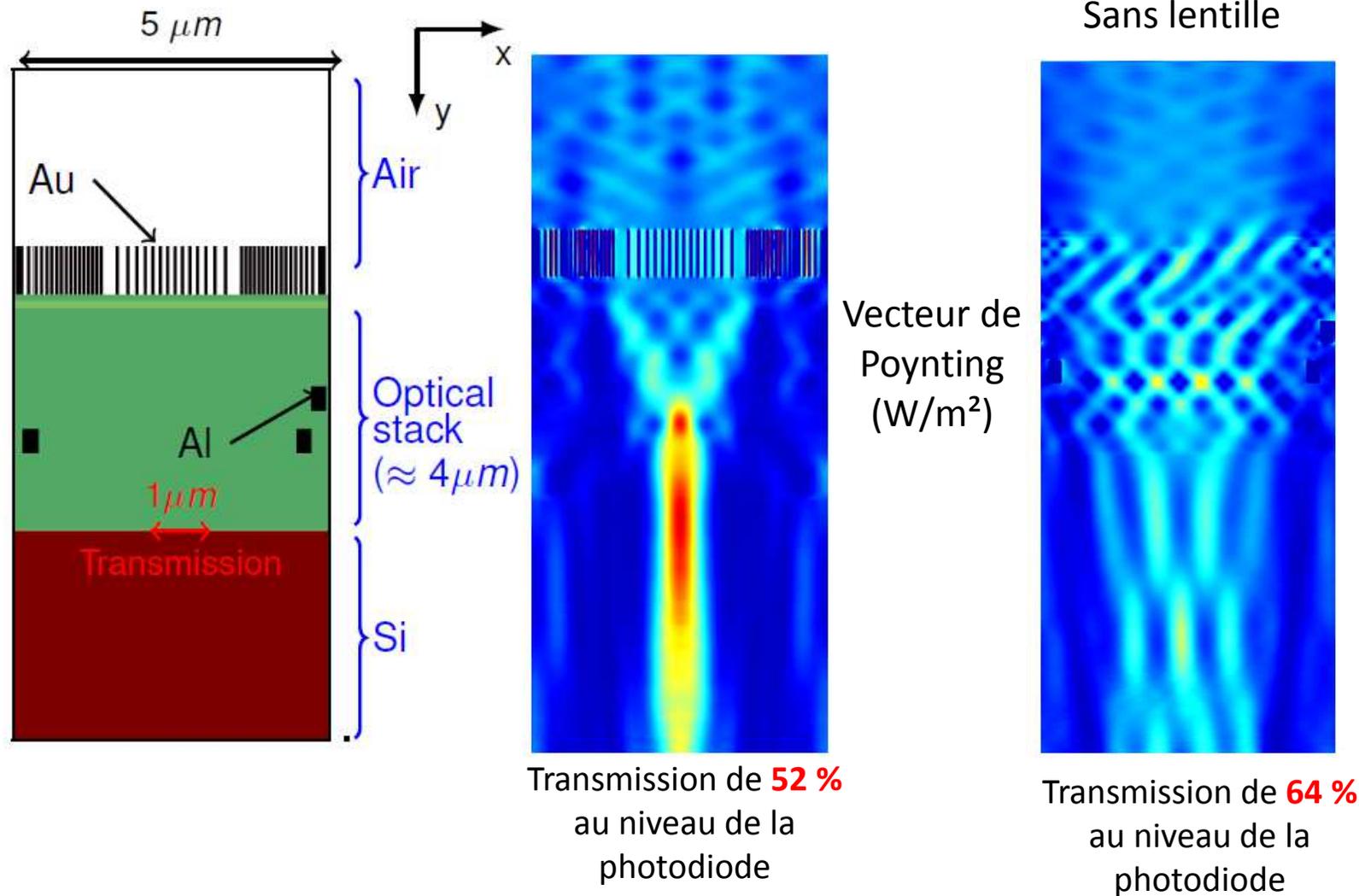
Lentille conventionnelle:
transformateur de phase



Réalisation d'une fonction de phase variable grâce à un assemblage
d'une collection de **structures Métal / Isolant / Métal (MIM)**

Lentille plasmonique (2)

- Simulation 2D d'une lentille en or épaisse de 800 nm

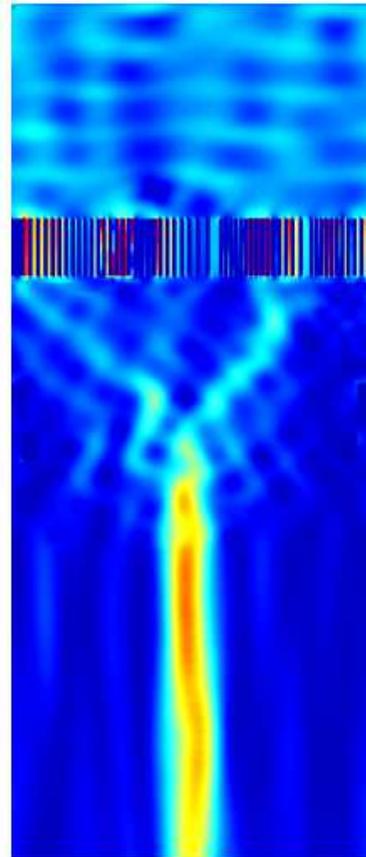


Lentille plasmonique (3)

- Prise en compte de l'angle d'incidence (25°)

Modification asymétrique
de la variation spatiale de la
phase

Permet de compenser la
présence d'une optique
devant le plan focal

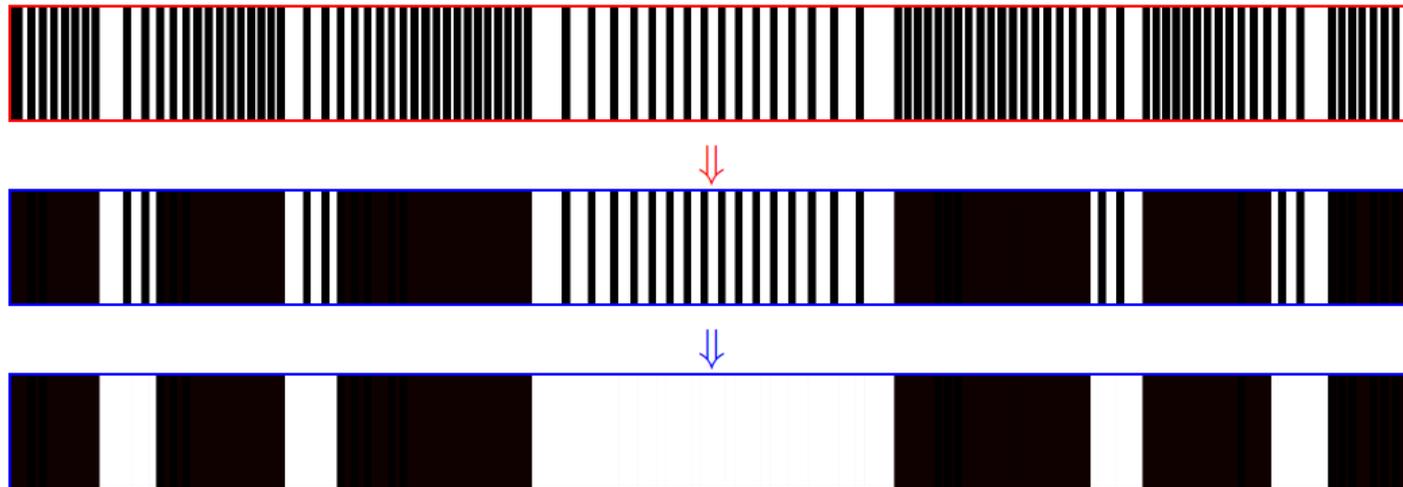


Transmission de **46 %**
au niveau de la
photodiode

Lentille de Huygens (1)

- Lentille plasmonique pas réalisable d'un point de vue technologique sur l'échelle d'un capteur d'image entier
- Etude d'une **version simplifiée de la lentille** potentiellement intégrable directement dans le procédé CMOS

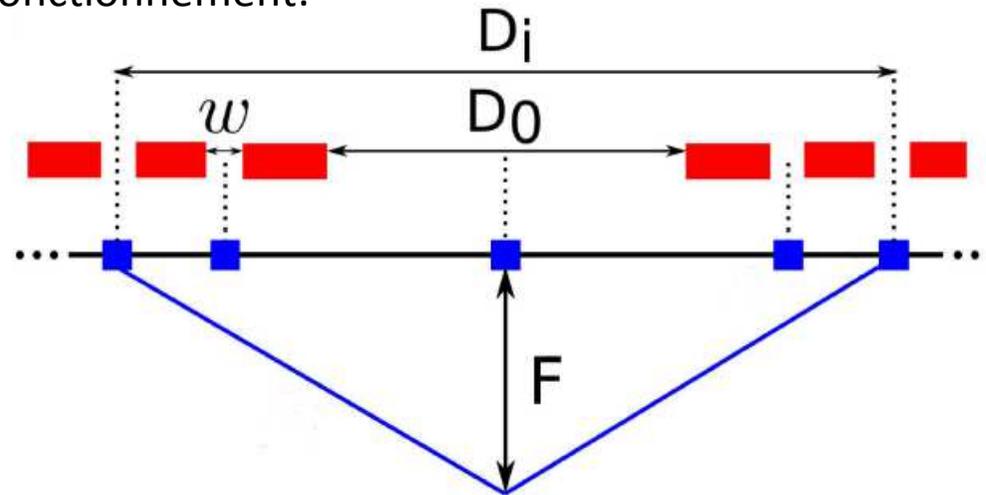
Lentille plasmonique



Lentille dite de Huygens basée sur un sténopé adjointe de fentes latérales permettant de contrôler la focalisation

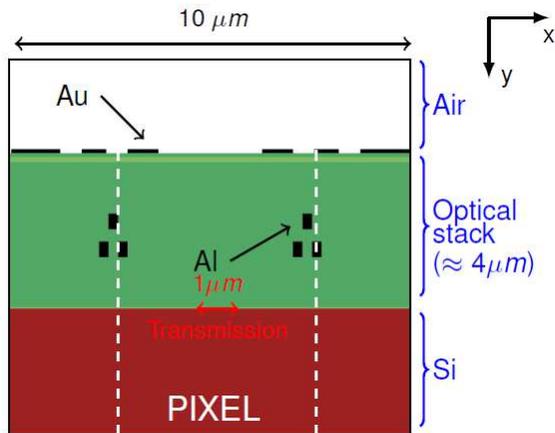
Lentille de Huygens (2)

- Principe de fonctionnement:

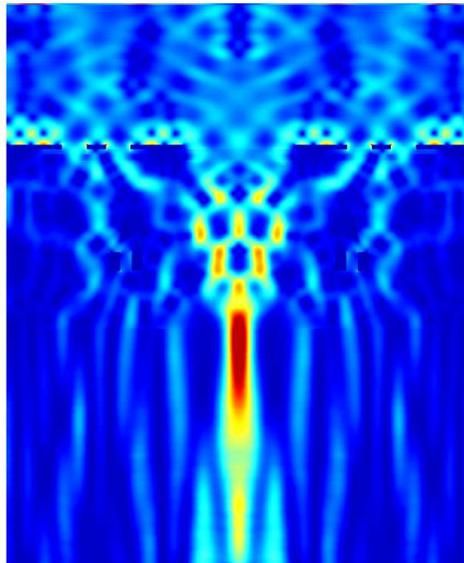


- Focale donnée par la taille du trou central
- Les fentes latérales permettent d'ajuster la focalisation
- Deux stratégies étudiées:
 - Focalisation au niveau de la photodiode
 - Défocalisation de façon à couvrir toute la surface de la photodiode

Lentille de Huygens (3)

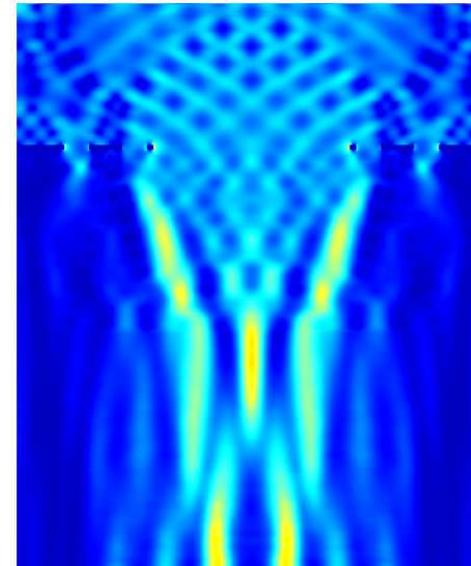


- Epaisseur 100 nm d'or
- Transmission de **34%** au niveau de la photodiode pour le pixel sans lentille (Polarisation TM)



32 % d'énergie à la surface de la photodiode pour une structure focalisée

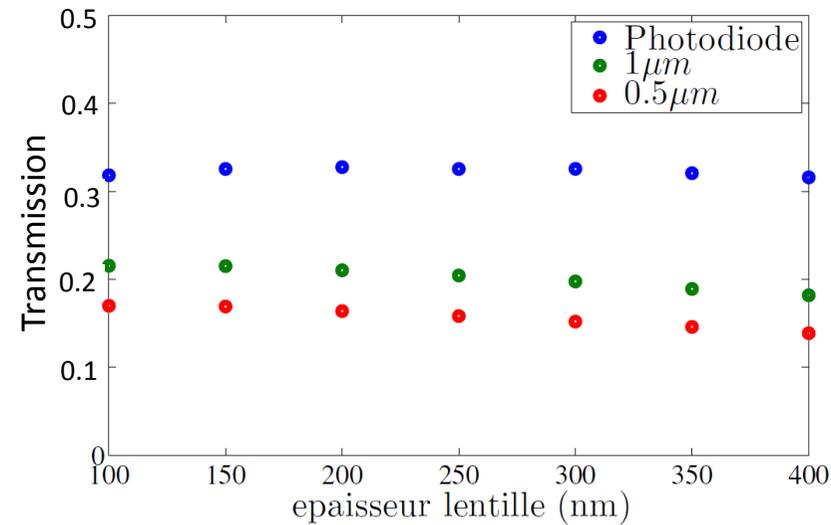
Vecteur de Poynting
(W/m²)



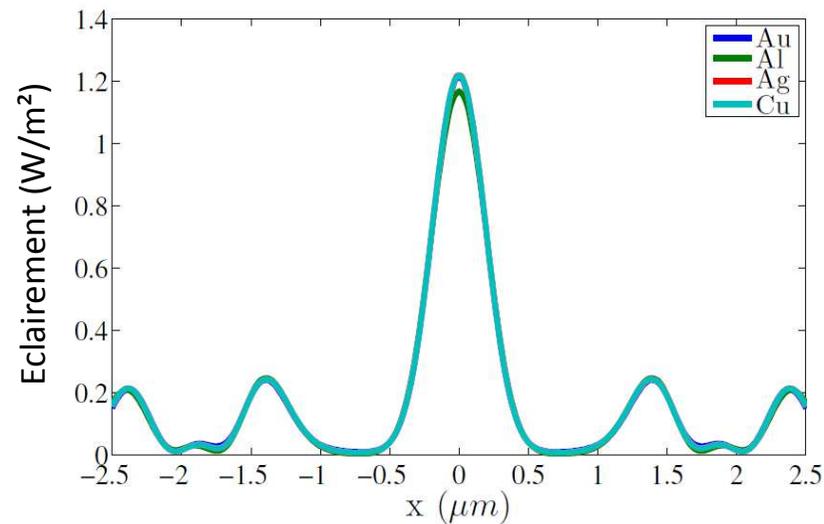
47 % d'énergie à la surface de la photodiode pour une structure défocalisée

Lentille de Huygens (4)

- Influence de l'épaisseur de la lentille:



- Influence de la nature du métal



Plan de la présentation

- Contexte des capteurs d'images CMOS
 - Description et principales propriétés / structure d'un pixel
 - Contraintes associées

- Etat de l'art sur l'intégration de fonctions plasmoniques dans les imageurs CMOS

- Conception de lentille (concentrateurs de champs) pour une application d'imagerie monochromatique à $1,064\mu\text{m}$
 - Lentille Plasmonique
 - Lentille de Huygens (sténopé)

- **Conclusions et perspectives**

Conclusion et perspectives

- Etude de la conception de deux structures de lentilles métalliques destinées à être intégrées en post-process au-dessus d'un capteur d'image CMOS
 - ⇒ **Amélioration de la collection des photons avec la lentille de Huygens défocalisée**
- **Cas particulier de la lentille de Huygens**
 - Potentiellement **réalisable technologiquement à l'échelle d'un capteur entier**
 - **Intégrable dans le procédé CMOS**
 - **Applicable à des pixels > 10 μm** encombrés par les métallisations
- **Perspectives**
 - **Phase 1:** Réalisation, caractérisation et intégration de la lentille de Huygens sur un capteur d'image CMOS existant (validation)
 - **Phase 2:** réalisation d'un pixel dédié intégrant directement la lentille

Remerciements

