

Plateforme caractérisation de pixels CMOS par détection de photons unique

(emCMOS, ebCMOS, sCMOS, emCCD, SPAD, SiPM)

R. Barbier, C. Buton, T. Brugière, D. Chaize, A. Dominjon, S. Ferriol, C. Guerin, L. Vagneron

Expertise bas niveau de lumière

Comment être sensible au photon unique?

Réduction du bruit de lecture

Multiplication du signal avant la lecture

CMOS bas bruit

Ionisation par impact dans les registres de lecture

Accélération des électrons sous vide

Scientific CMOS Neo

emCCD: iXon Ultra 897

Electron-Bombarded CMOS

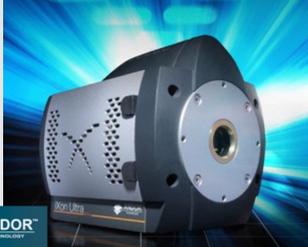


Fig 1: Différentes caméras bas niveau de lumière disponibles sur la plateforme Single Photon Detection à l'IPNL.

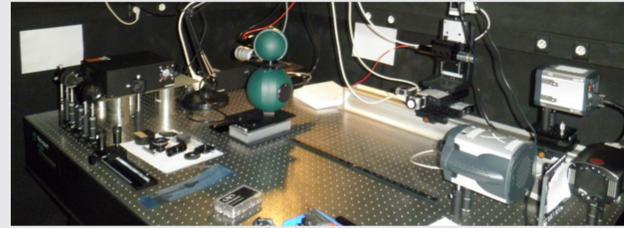


Fig 2: Photographie de la chambre noire et des trois différents bancs de mesure bas niveau de lumière de l'IPNL.

Table 1: Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des caméras photon unique du groupe détecteurs de l'IPNL.

Détecteurs	CCD	sCMOS	emCCD	ebCMOS
Taille du pixel [µm]	16	6.5	16	10
Bruit de lecture [e ⁻]	65	3	65*	8
Taux de faux [pix/fr]	-	-	5x10 ⁻³	1.25x10 ⁻⁵
Gain	-	-	300 - 1000	200

* < 1 avec multiplication

La plateforme de mesure « ebCMOS / emCMOS » développée à l'IPNL a pour but d'explorer les conditions extrêmes de l'imagerie bas niveau de lumière à partir d'une technologie CMOS standard. Elle est composée de trois bancs de caractérisation distincts qui mettent en œuvre plusieurs méthodes de mesures afin d'analyser les paramètres des détecteurs pixels.

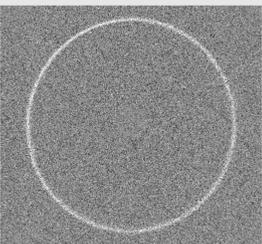


Fig 3: Image du continuum de solutions issues de l'émission de paires de photons via le mécanisme SPDC (Spontaneous Parametric Down-Conversion) mettant en évidence leur corrélation spatiale.

Laser UV, pulsé (CNI MPL-F-266):

- Longueur d'onde: 266nm (UV)
- Taux de répétition: 1kHz – 5kHz
- Durée du pulse: ~ 7ns
- Puissance moyenne: 24 mW
- Taille du spot: ~ 2mm

Cristal BBO, non linéaire:

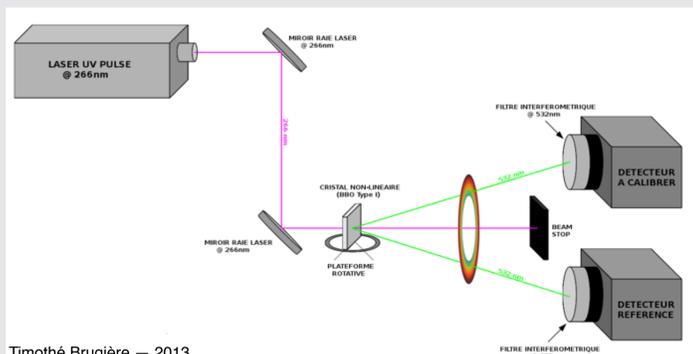
- Symétrie: uniaxe négatif (n_o > n_e)
- Transparence: 189 – 3500nm
- Coefficient non-linéaire: ~ 2.22pm/V
- Longueur: 1mm

Plateforme rotative motorisée:

- Précision > 1/10^{ème} de degrés nécessaire en raison de la sensibilité de la SPC: l'angle d'incidence du faisceau définit l'ouverture du cône d'émission.

Filtre passe bande:

- λ = 532nm, Δλ = 10nm



Timothé Brugière – 2013

Fig 4: Schéma de principe de l'étalonnage d'un détecteur à l'aide du banc « photons corrélés ».

Photons corrélés

Le banc « photons corrélés » utilise un laser UV pulsé et un cristal de BBO non linéaire pour produire des photons corrélés qui sont ensuite perçus simultanément par un détecteur de référence (emCCD, ebCMOS) et par un détecteur à calibrer. Ce montage permet d'atteindre une mesure de QE de manière directe (i.e. sans photo-détecteur calibré).^[1]

[1] Absolute detector quantum-efficiency measurements using correlated photons, Migdall et al. 1995, Metrologia

Spotting XYZ

La plateforme micrométrique XYZ motorisée permet de déplacer le spot de diamètre ~1µm (à 1σ, objectif 50X)

→ obtention de la fonction d'étalement de point (PSF)

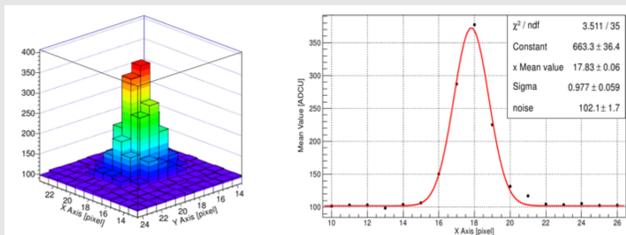


Fig 5: Fonction d'étalement de point. Image du spot focalisé avec l'objectif 50X.

Thomas Caifinger – 2012

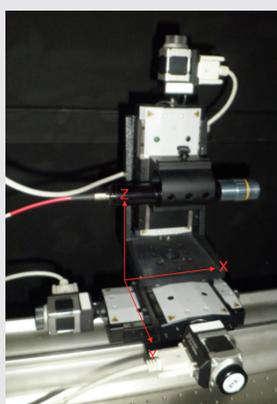


Fig 6: Photographie de la plateforme micrométrique motorisée 3 axes.

Différents choix de source:

- LED: 365nm, 380nm, 395nm, 470nm, 518nm, 590nm, 640nm + LED blanche à large spectre
- Halogène, blanc à large spectre (300nm → 1µm)
- Xenon ARC (Ocean Optics PX – 2), blanc à large spectre

Différents choix des paramètres de fibre:

- D = 8µm, 50µm, 400µm

Différents choix d'objectif:

- MITUTOYO, longue distance de travail, corrigés à l'infini, apochromatiques → 10X, 50X

Le banc de « spotting » s'articule autour d'une plateforme micrométrique 3 axes motorisée permettant de déplacer un spot lumineux (de l'ordre du micromètre de diamètre) afin d'obtenir la fonction d'étalement de point de l'instrument. L'intensité du spot est réglable, grâce à l'utilisation de fibres à densité neutre, jusqu'au photon unique par trigger de la diode LED.

Sphère intégrante

Méthode Photon Transfer Curve:

- Observation du bruit associé aux mesures en fonction du signal
- Étude d'une matrice complète ou de pixels indépendant
- Analyse de la réponse en échelle log-log
- Détermination du Conversion Gain [ADU/e⁻] et du CVF [µV/e⁻]

Fig 8: Graphe de la Photon Transfer Curve d'une puce emCMOS (MultiMOS / E2V).

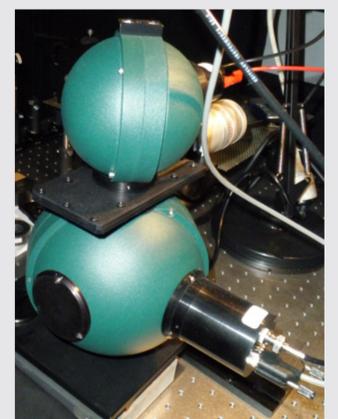
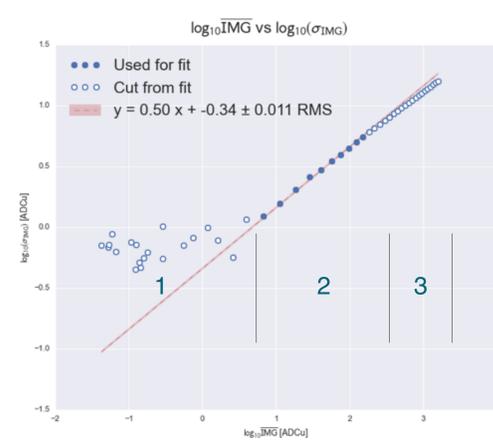


Fig 7: Photographie du couple de sphères intégrantes imbriquées. Le flux est étalonné de manière absolue grâce à une photodiode calibrée et intégrée dans la sphère principale.

Zone identifiables

1. Bruit de lecture
2. Bruit shot (pente=1/2)
3. Saturation

Le banc « sphère intégrante » est comme son nom l'indique lié à un couple de sphères intégrantes imbriquées et étalonnées permettant d'effectuer un champ plat homogène utilisé notamment pour déterminer la Photon Transfer Curve (PTC) des détecteurs à caractériser ainsi que leur efficacité quantique.