

# Les capteurs matriciels CMOS présents et futurs



Thierry Midavaine  
RCE 2024  
10 Novembre 2024



# Sommaire

1. Préambules
2. Le Silicium
3. La composition du pixel CMOS, le pixel APS, les matrices CMOS
4. La caractérisation des sCMOS faible bruit, focus Sony
5. En route vers le futur
6. Conclusions

# 1. Préambules

## Quelques questions ??? Un Quizz ?

1. Le principe des capteurs CMOS est très récent par rapport au CCD ?
  1. Oui le principe du capteur CMOS apparait dans les années 2000
  2. Oui les capteurs CCD sont apparus à la fin des années 1960
  3. Non les capteurs de type CCD et CMOS sont apparus à la même époque
2. Le fonctionnement d'un pixel CCD et CMOS est similaire ?
  1. Non le principe de fonctionnement du pixel est différent.
  2. Dans les deux cas on a un semi-conducteur Silicium qui absorbe les photons.
  3. Oui dans les deux cas le pixel consiste en une simple capacité qui accumule des photoélectrons.
3. Un capteur avec des gros pixels est plus sensible que si il a des petits pixels ?
  1. Oui car un gros pixel est moins bruyant
  2. Non car un petit pixel peut avoir un bon rendement quantique et un faible bruit
  3. Oui car un gros pixel collecte plus de flux sur une étoile
4. Le fonctionnement de la lecture de la matrice de pixel est similaire entre un CCD et un détecteur CMOS ?
  1. Oui il se fait ligne par ligne ou colonne par colonne
  2. Oui il se fait trame par trame
  3. Oui la lecture de la matrice est destructive et ne peut se faire qu'une seule fois
5. Le bruit de lecture dans une matrice CCD et une matrice CMOS est similaire ?
  1. Oui il est dépendant du nombre de pixels et de la cadence de lecture de toute la matrice
  2. Non il est dépendant du nombre de pixels par colonne et du nombre de convertisseurs
  3. Non chaque pixel a son propre bruit dans une matrice CMOS

# Les sigles et acronymes

- AB system : Système photométrique astronomique
- ADC Analog Digital Converter
- ADU Analogic Digital Unit
- APD Avalanche PhotoDiode
- APN Appareil Photo Numérique
- APS Active Pixel Sensor
- BI Back Illuminated
- BNL Bas Niveau de Lumière
- BSF Bruit Spatial Fixe
- BSI BackSide Illumination
- CAN Convertisseur Analogique Numérique
- CCD Charge Couple Device
- CDS Correlated Double Sampling
- CID Charge Induced Device
- CMOS Complementary Metal-Oxyde-Semiconductor
- DR Dynamic Range
- DSNU Dark Signal Non Uniformity
- ICCD Intensified CMOS
- IRCCD & IRCMOS plan focal IR à circuit de lecture
- DDP Digital Development Process
- DRO Direct Read Out
- DSLR Digital Single Lens Reflex Camera
- DVR Direct Voltage Read-out
- EBCCD or EBCMOS Electron Bombarded CCD or CMOS
- EMCCD Electron Multiplied CCD
- EVF Electronic ViewFinder
- FF Fill Factor taux de remplissage
- FFT Fast Fourier Transform
- FOM Figure Of Merite
- FPA Focal Plan Array
- FPN Fixed Pattern Noise
- FPS Frames Per Second
- FTM Fonction de Transfert de Modulation
- FW Full Well
- FWHM Full Width Half Maximum
- GS Global Shutter
- ICCD ICMOS Intensified CCD or CMOS arrays
- IFOV Instantaneous Field Of View
- I1 or I2 Image Intensifier
- IPCS Image Photo Counting System
- L3CCD Low Light Level CCD
- LCD Liquid Cristal Display
- LRVB Luminance Rouge Vert Bleu
- LSB Least Significant Bit
- LUT Look Up Table
- L3CCD Low Light Level CCD
- MIS Metal Insulator Semiconductor
- MOS Metal Oxyde Semiconductor
- MOSFET Field Effect Transistor en technologies MOS
- NA Numerical Aperture
- NEP Noise Equivalent Power
- NIR Near InfraRed
- NUC Non Uniformity Correction
- OSC One Shot Color
- PD PhotoDiode
- PIN Diode dopage P, Intrinsèque et dopage N
- Pixel Picture Element
- PLU Plage de Luminance Uniforme (FLAT)
- PK Photo-Cathode
- PRNU Pixel Response Non Uniformity
- PSF Point Spread Function (fonction d'étalement de tache)
- qCMOS Capteur CMOS comptant les photons
- QIS Quanta Image Sensor
- QE Quantum Efficiency, Rendement Quantique
- RAW Brut
- RMS Root Mean Square
- RON Read Out Noise
- RTN Random Telegraph Noise
- sCMOS Scientific CMOS
- S&P Salt and Pepper noise
- TDI Time Delay Integration
- TF Transformée de Fourier
- UHD Ultra High Definition 4K : 3820x2160



# Historique CCD et CMOS

- 1968 Peter Noble invente le réseau de pixels actifs intégrant un ampli MOS et
- 1969 Chamberlain invente la matrice XY CMOS 10x10 APS
- 19 octobre 1969 invention du CCD à Bell lab par Boyle & Smith et de manière indépendante par Sangster et Teer à Philips Eindhoven
- 1972 Fairchild : CCD de format 100 x 100
- 1976 CCD de format 256x256 Thomson CSF, RCA et General Electric (CID)
- Années 1970 barettes Reticon réseau de photodiodes commutées
- Années 1980 matrices Reticon
- 1985 Les CCD remplacent progressivement l'argentique et les tubes électroniques dans tous les observatoires.
- 1990 Tektronix propose un CCD au format 2048 x 2048
- 1996 Eric Fossum multi T CMOS pixel design
- 2000 plafonnement des fab CCD au profit des fab des matrices CMOS
- 2001 Matrices CMOS Foveon 4096 x 4096
- 2002 Mise sur le marché des cameras EMCCD
- 2005 le Chiffre d'Affaire des matrices CMOS dépasse celui des CCD
- 2008 Fabrication des matrices haute perfo CMOS à 4, 5 ou 6 T (Canon, Fairchild, Sony,...)
- 2008 marché mondial de 1,363 milliards de capteurs d'images
- 6 octobre 2009 Attribution du prix Nobel de Physique à Boyle & Smith pour l'invention du CCD et à Kao pour la fibre optique
- 2012 le marché devient supérieur à 2 milliards de capteurs CMOS par an
- 2015 Sony arrête la fabrication des CCD (LBO) pour les matrices CMOS qui remplacent toutes ses gammes de matrices
- 2020 large adoption des matrices sCMOS par la communauté astronome professionnel !

# Une dynamique de développement importante !

Les capteurs CMOS sont très performantes dans les versions de cameras refroidies longue pose et dans les versions courte pose à haute cadence

Les matrices CMOS délivrent les formats Vidéo HDTV et Cinéma Numérique du format HD puis 2K (FHD) puis 4K au format 8K la chaine Broadcast des jeux Olympiques de Tokyo 2021. Les DSLR et Bridges offrent ces multiples fonctions en plus de la photo.

Au delà du format 35 mm des matrices grands formats sont en production

Les capteurs CMOS ont pénétré le domaine astro amateur avant le domaine astro professionnel. Plusieurs publications examinent les performances radiométriques des senseurs et valident les performances de futurs instruments professionnels.

[6] M. Alarcon et al. Scientific CMOS sensors in Astronomy : IMX455 and IMX411. PASP may 17 2023

[7] M. Betoule et al. StarDICE I: sensor calibration and absolute photometric calibration of a Sony IMX411 sensor. Astro-ph.IM 18 nov 2022

# 2. Le Silicium

Les matériaux pour la détection opto-électronique et les dopages P ou N

## CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

1	IA	1	1,00794	H	Hydrogène	2	IIA	2	4,0026	He	Hélium																																																												
3	6,941	Li	Lithium	4	9,01218	Be	Béryllium	13	10,811	B	Bore	14	12,0107	C	Carbone	15	14,0067	N	Azote	16	15,9994	O	Oxygène	17	18,9984	F	Fluor	18	20,1797	Ne	Néon																																								
11	22,9898	Na	Sodium	12	24,305	Mg	Magnésium	13	26,98	Al	Aluminium	14	28,0855	Si	Silicium	15	30,9738	P	Phosphore	16	32,065	S	Soufre	17	35,453	Cl	Chlore	18	39,948	Ar	Argon																																								
19	39,0983	K	Potassium	20	40,078	Ca	Calcium	21	44,9559	Sc	Scandium	22	47,867	Ti	Titane	23	50,9415	V	Vanadium	24	51,9961	Cr	Chrome	25	54,9380	Mn	Manganèse	26	55,845	Fe	Fer	27	58,9332	Co	Cobalt	28	58,6934	Ni	Nickel	29	63,546	Cu	Cuivre	30	65,38	Zn	Zinc	31	69,723	Ga	Gallium	32	72,6	Ge	Germanium	33	74,9216	As	Arsenic	34	78,96	Se	Sélénium	35	79,904	Br	Brome	36	83,798	Kr	Krypton
37	85,4678	Rb	Rubidium	38	87,62	Sr	Strontium	39	88,9058	Y	Yttrium	40	91,224	Zr	Zirconium	41	92,9064	Nb	Niobium	42	95,96	Mo	Molybdène	43	[98]	Tc	Technetium	44	101,07	Ru	Ruthénium	45	102,905	Rh	Rhodium	46	106,42	Pd	Palladium	47	107,868	Ag	Argent	48	112,411	Cd	Cadmium	49	114,818	In	Indium	50	118,71	Sn	Étain	51	121,76	Sb	Antimoine	52	127,6	Te	Tellure	53	126,905	I	Iode	54	131,293	Xe	Xénon
55	132,905	Cs	Césium	56	137,327	Ba	Baryum	57	[138]	La	Lanthane	58	140,116	Ce	Cérium	59	140,908	Pr	Praseodyme	60	144,242	Nd	Néodyme	61	[145]	Pm	Prométhium	62	150,36	Sm	Samarium	63	151,964	Eu	Europium	64	157,25	Gd	Gadolinium	65	158,925	Tb	Terbium	66	162,5	Dy	Dysprosium	67	164,930	Ho	Holmium	68	167,259	Er	Erbium	69	168,934	Tm	Thulium	70	173,054	Yb	Ytterbium	71	174,967	Lu	Lutécium				
87	[223]	Fr	Francium	88	[226]	Ra	Radium	89	[227]	Ac	Actinium	90	232,038	Th	Thorium	91	231,036	Pa	Protactinium	92	238,029	U	Uranium	93	[237]	Np	Neptunium	94	[244]	Pu	Plutonium	95	[243]	Am	Americium	96	[247]	Cm	Curium	97	[247]	Bk	Berkélium	98	[251]	Cf	Californium	99	[252]	Es	Einsteinium	100	[257]	Fm	Fermium	101	[258]	Md	Madillivium	102	[259]	No	Nobelium	103	[262]	Lr	Lawrencium				

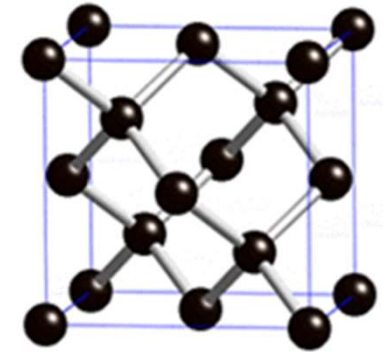
14 IVA  
6 12,0107  
C  
Carbone

SYMBOLE : C  
NOM DE L'ÉLÉMENT : CARBONE  
NUMÉRO ATOMIQUE : 6  
MASSE ATOMIQUE : 12,0107  
GROUPE : 14 (IUPAC) - IVA (CAS)  
PÉRIODE : 2

- MASSES ATOMIQUES DES ISOTOPES LES PLUS STABLES ENTRE ACCOLADES
- MASSES ATOMIQUES DONNÉES À 6 CHIFFRES SIGNIFICATIFS

- NON MÉTAUX
- MÉTALLOÏDES
- MÉTAUX ALCALINS
- HALOGÈNES
- MÉTAUX ALCALINO-TERREUX
- GAZ NOBLES
- MÉTAUX DE TRANSITION
- LANTHANIDES
- MÉTAUX PAUVRES
- ACTINIDES

# Le Silicium : un semiconducteur

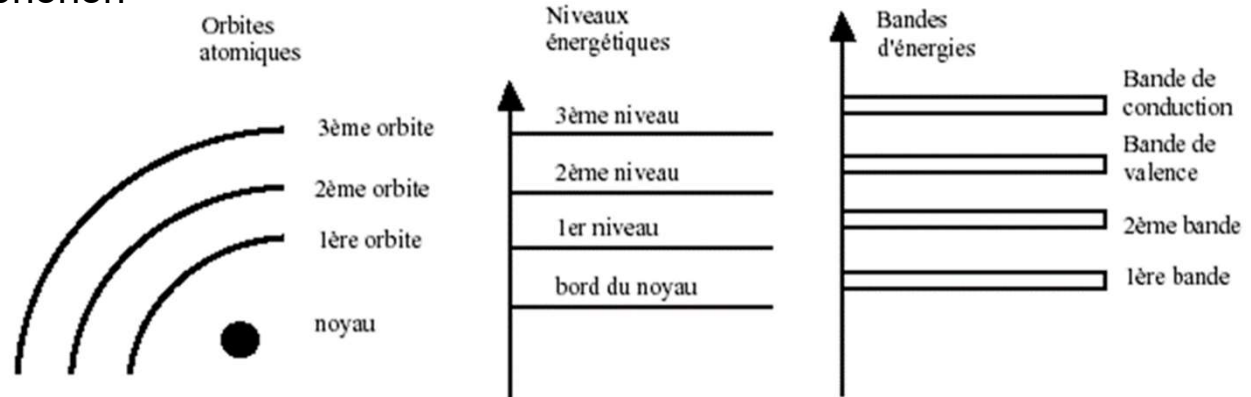


## ➤ Le Silicium Si (groupe IV)

- 14 électrons, sur trois couches 2-8-4
- 4 électrons dans la couche périphérique (tétravalent)
- Densité d'atomes par  $\text{cm}^3$   $5.0 \cdot 10^{22}$
- Résistivité :  $2 \cdot 10^5 \text{ ohm.cm}$

## ➤ Un Semi-conducteur constituant un réseau monocristallin identique au diamant

- Bande de Valence et Bande de Conduction séparées par une bande interdite ou gap du semi conducteur
- Direct bandgap  $E_g(0) = 3.65 \text{ eV}$  (339nm)
- Gap indirect avec un couplage par phonon
- L'écart d'énergie  $E_s = 1,11\text{eV}$



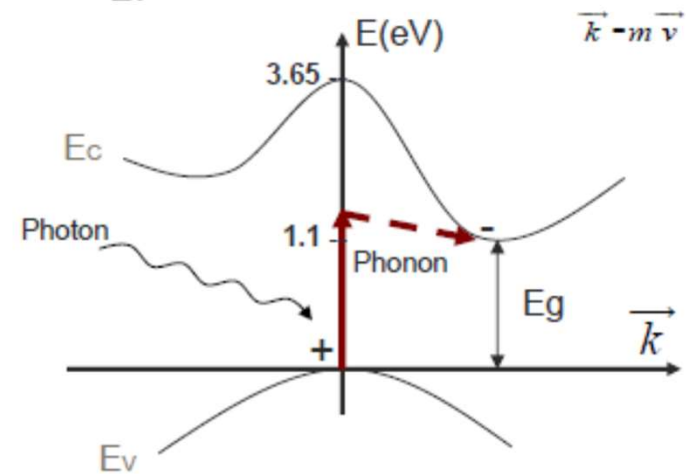
## ➤ Effet photo-électrique dans le Silicium

- Lorsque l'énergie du photon  $E_p = hc/\lambda$  est suffisante, pour  $\lambda < 1,14\mu\text{m}$ , elle provoque l'ionisation d'un atome en libérant un porteur de charge dans le réseau cristallin et induit une modification de sa conductivité électrique
- A température nulle (0K) le matériau est isolant, tous les électrons sont dans la bande de valence. La conductivité augmente avec la température T, en particulier lorsque  $kT$  progresse vers  $E_s$

# Le Silicium : un semiconducteur

## ➤ Absorption des photons et des phonons

- Indirect Band Gap dans le Silicium
- Absorption de l'énergie des photons et absorption de l'énergie du réseau cristallin (phonons).
- Dépendant de la température :
- $E_g = E_g(0) - \alpha \cdot T^2 / (T + \beta)$
- Avec T la température en K
- Alpha
- Beta
- L'écart d'énergie  $E_s = 1,11\text{eV}$



## ➤ Effet photo-électrique dans le Silicium

- Lorsque l'énergie du photon  $E_p = hc/\lambda$  est suffisante, pour  $\lambda < 1,14\mu\text{m}$ , elle provoque l'ionisation d'un atome en libérant un porteur de charge dans le réseau cristallin et induit une modification de sa conductivité électrique
- A température nulle le matériau est isolant, tous les électrons sont dans la bande de valence. La conductivité augmente avec la température T, en particulier lorsque kT progresse vers  $E_s$

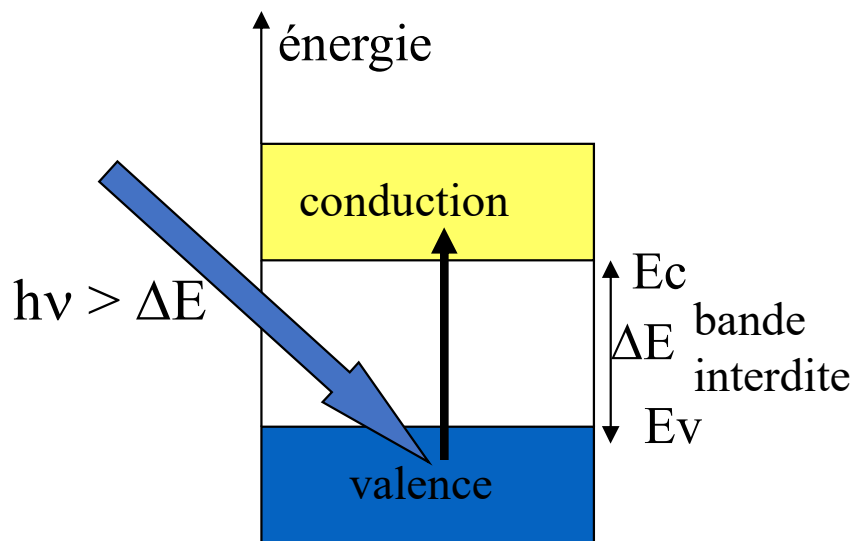


# Effet Photoconducteur

## ➤ Matériau homogène pur ou accueillant des impuretés:

- dopage n porteurs majoritaires des  $e^-$  par du Phosphore ou de l'Arsenic (groupe V) donneurs
- dopage p porteurs majoritaires des trous + par du Bore ou du Gallium (groupe III) accepteurs

## ➤ Diagrammes énergétiques



Photoconduction intrinsèque

La bande interdite est la différence entre le point le plus bas de la bande de conduction et le point le plus haut de la bande de valence

La conductivité est contrôlée par  $\Delta E/kT$

Et par l'absorption des photons si leur énergie est suffisante

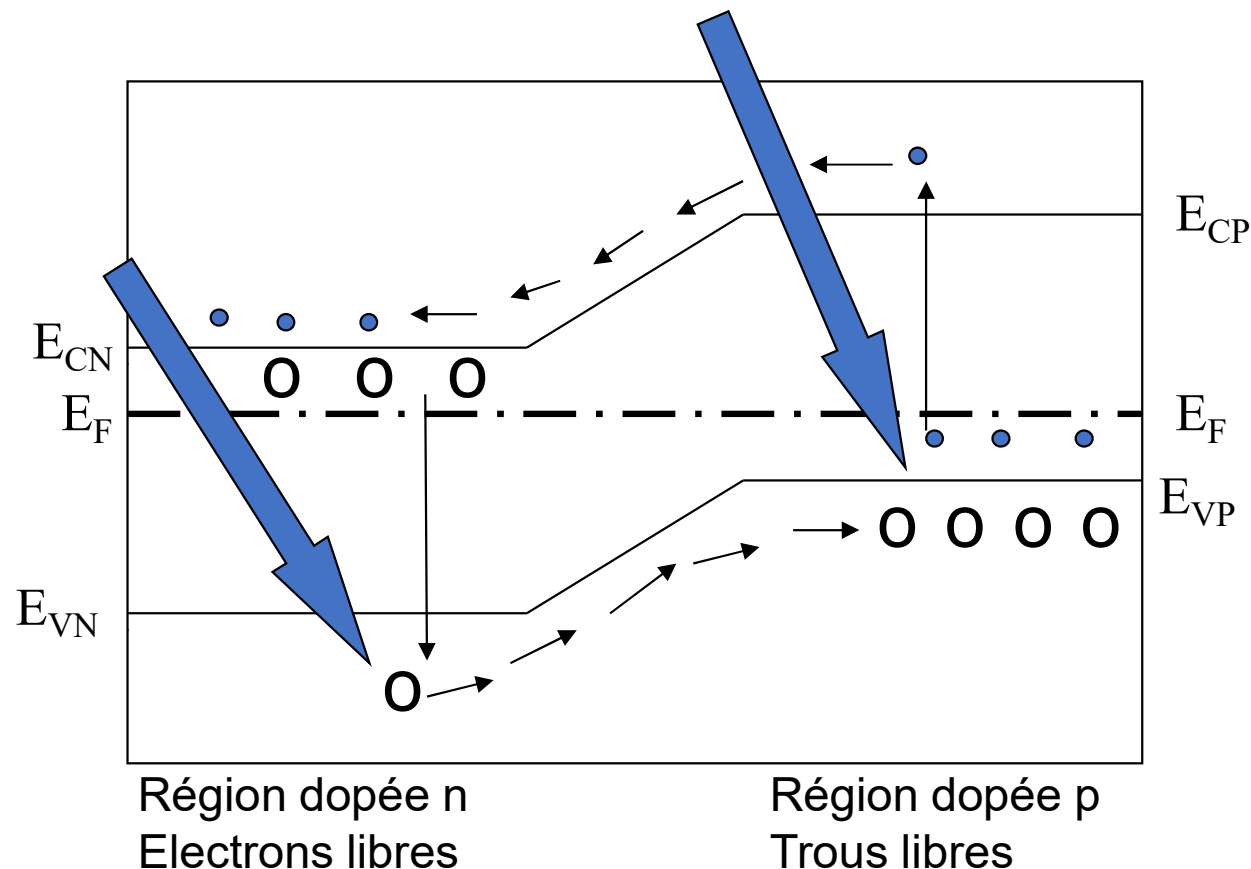
Dopé n  
Électrons porteurs majoritaires

Dopé p  
Trous porteurs majoritaires

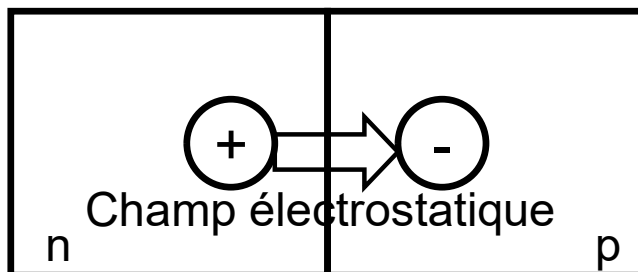
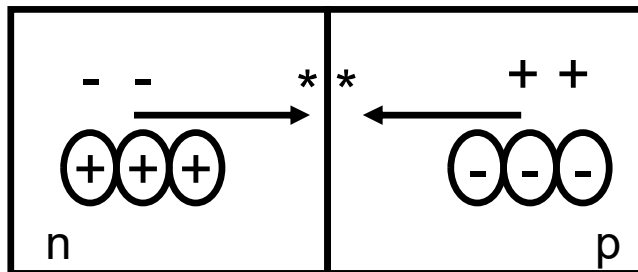
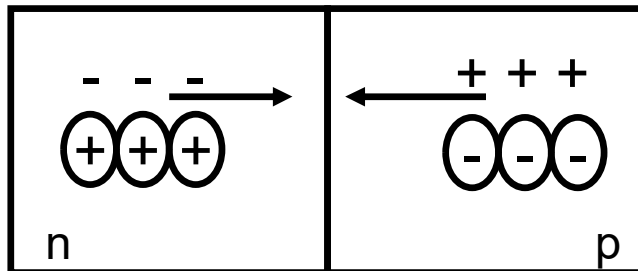
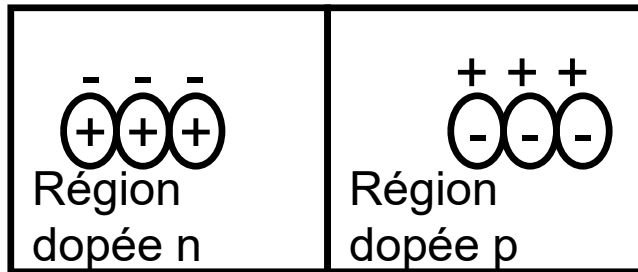
- Au repos et à très basse température le matériau est isolant. Avec une température croissante la conductivité commence à augmenter. Sous l'effet de l'illumination la libération des porteurs augmente la conductivité du matériau qui se comporte comme métal.

# Effet Photovoltaïque

- Une jonction entre un matériau dopé n et un matériau dopé p (matériau hétérogène) forme une diode. Un champ électrique intense est ainsi généré dans une zone autour de la jonction. Les charges ( $e^-$  et les trous) photoélectriques libérées à proximité de la barrière de potentiel sont ainsi accélérées créant une fem ou une tension  $V$  au borne.
- Diagramme énergétique :

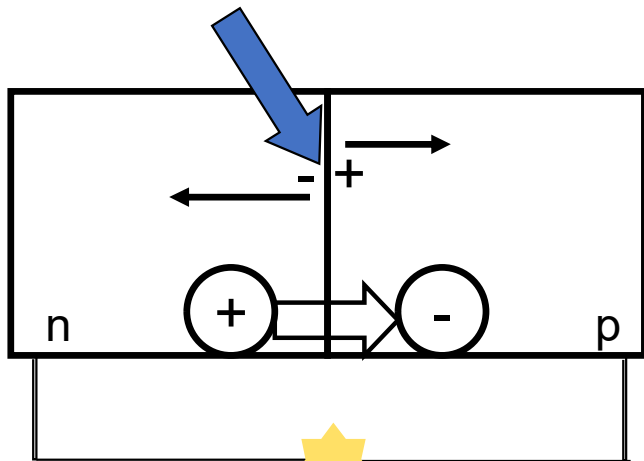


# La diode : la jonction p n

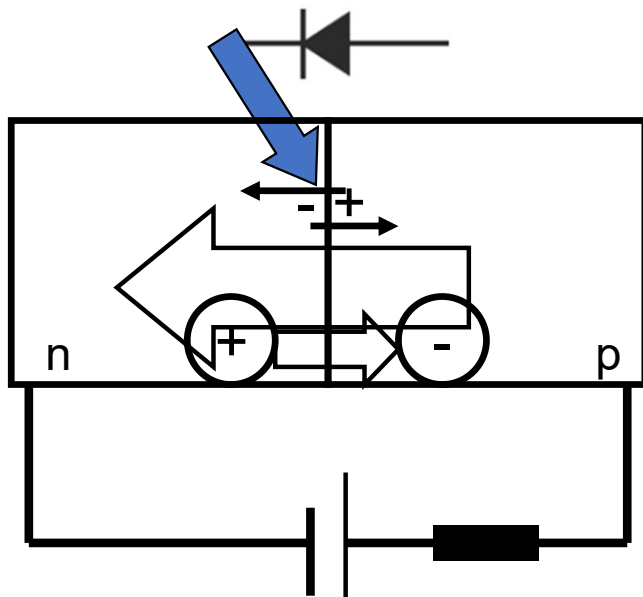


- La région dopée n a un excès de porteurs négatifs (électrons mobiles).
- La région dopée p a un excès de porteurs positifs (trous mobiles).
- Les deux régions sont juxtaposées par la jonction éventuellement composée de matériau intrinsèque : diode PIN
- Les électrons vont diffuser vers la région dopée p et les trous vont diffuser vers la zone dopées n.
- Si les trous et les électrons se rencontrent, ils se recombinent dans la région de la jonction.
- Le volume autour de la jonction va être ainsi dépeuplé en électron et trou créant ainsi une zone de déplétion, dépeuplée de porteurs.
- En final les deux réseaux atomiques autour de la zone de déplétion auront une charge résiduelle (du fait de la disparition des porteurs qui équilibraient les deux régions) faisant apparaître un champ électrique. Nous avons ainsi une différence de potentiel entre la région n et p de la jonction.

# Illumination de la diode : la photodiode



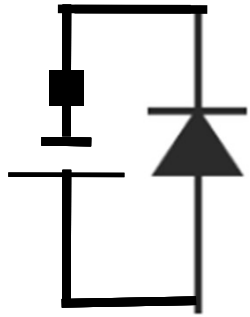
- Si on illumine la jonction, les photons (si leur énergie est suffisante supérieure à l'énergie du gap) vont créer des paires électrons trous libres. Les électrons seront attirés par la région n de charge positive et les trous seront attirés vers la région p de charge négative. Il y a ainsi génération d'un courant. C'est l'effet photovoltaïque : on a un générateur de tension courant.



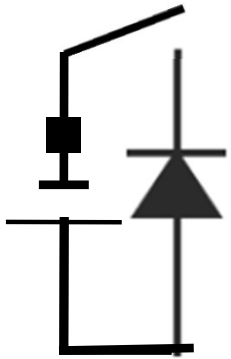
- Si on place la jonction dans un circuit en polarisation inverse: la cathode connectée à la région de dopage n et l'anode à la région de dopage p, on va élargir la zone de déplétion et les photoélectrons vont générer un photocourant inverse directement proportionnel au flux photonique.
- En augmentant la polarisation on va créer un détecteur à avalanche (APD) par le double effet de l'accélération des charges qui vont gagner en énergie et impacter le réseau cristallin en libérant des charges supplémentaires...

Circuit en polarisation inverse

# La photodiode flottante en polar inverse



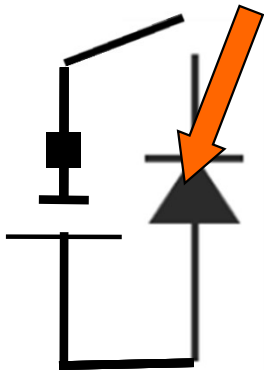
1. La photodiode est polarisée en inverse par une tension de reset  $V_R$



2. Le circuit est ouvert, la photodiode est équivalente à une capa  $C_D$  avec une tension aux bornes  $V_D = V_R$

Le nombre d'électrons stockés dans la capa vaut :

$$N_e = C_D \cdot V_D / q$$



3. La photodiode est illuminée, un photo courant décharge la capa  $C_D$ . La tension  $V_D$  aux bornes de la diode diminue comme le nombre de photoelectron  $N_{pe}$

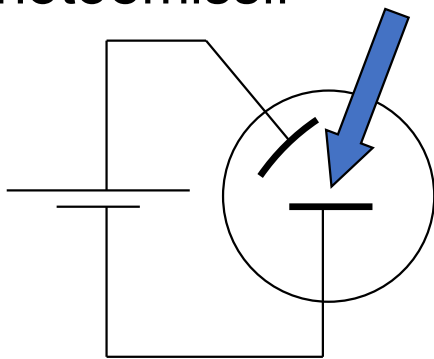
$$\Delta V_D = N_{pe} \cdot q / C_D$$



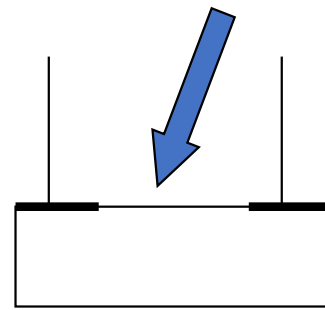
# Caractéristiques $i$ de $v$ des détecteurs photoniques

Courbes  $i=f(v)$  en fonctions du flux  $F$  :  $F1$  à l'obscurité, et flux croissant  $F2, F3, F4...$

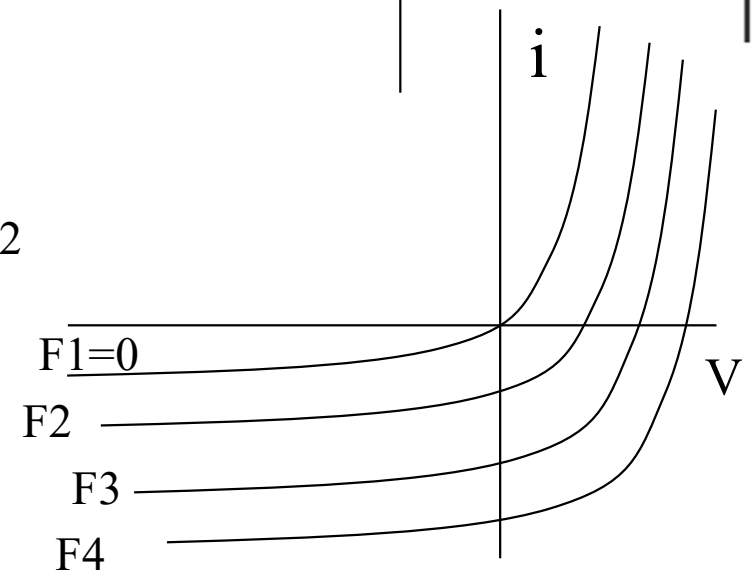
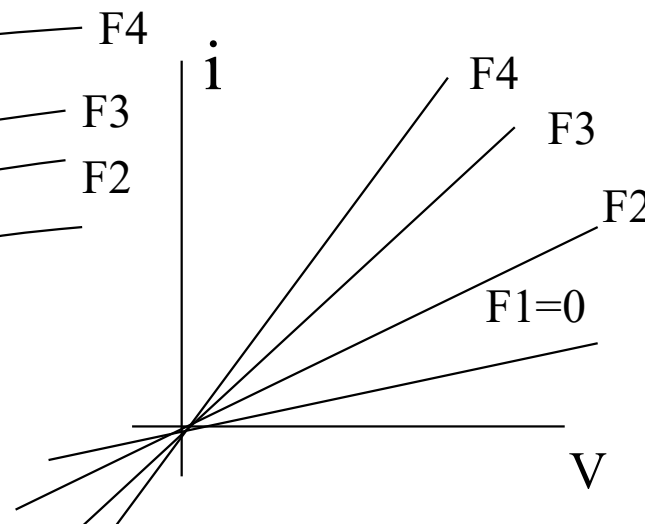
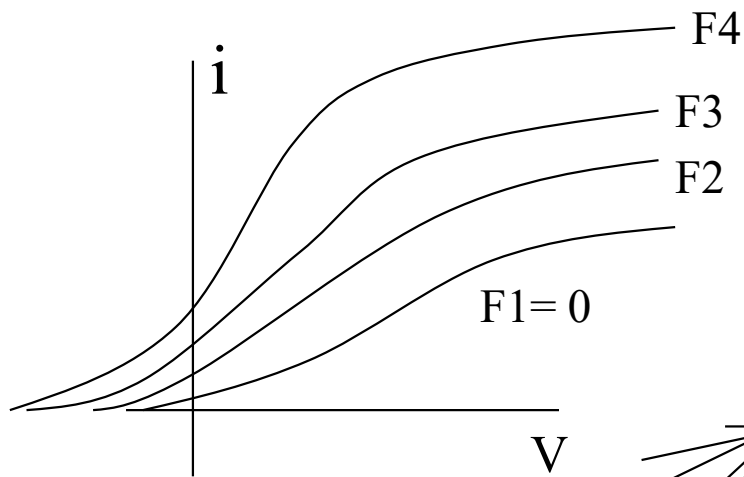
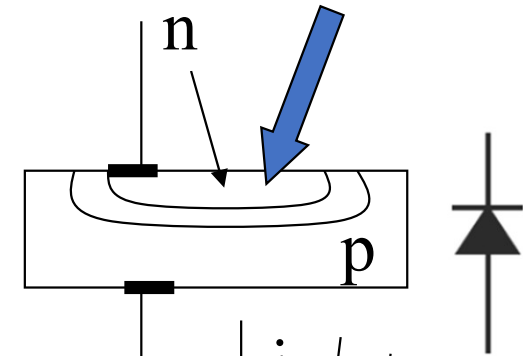
photoémissif



photoconducteur

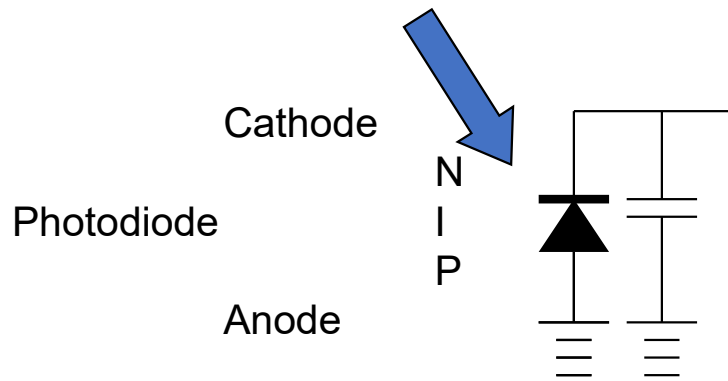


photovoltaïque



### 3. La composition du pixel CMOS, le pixel APS, les matrices CMOS

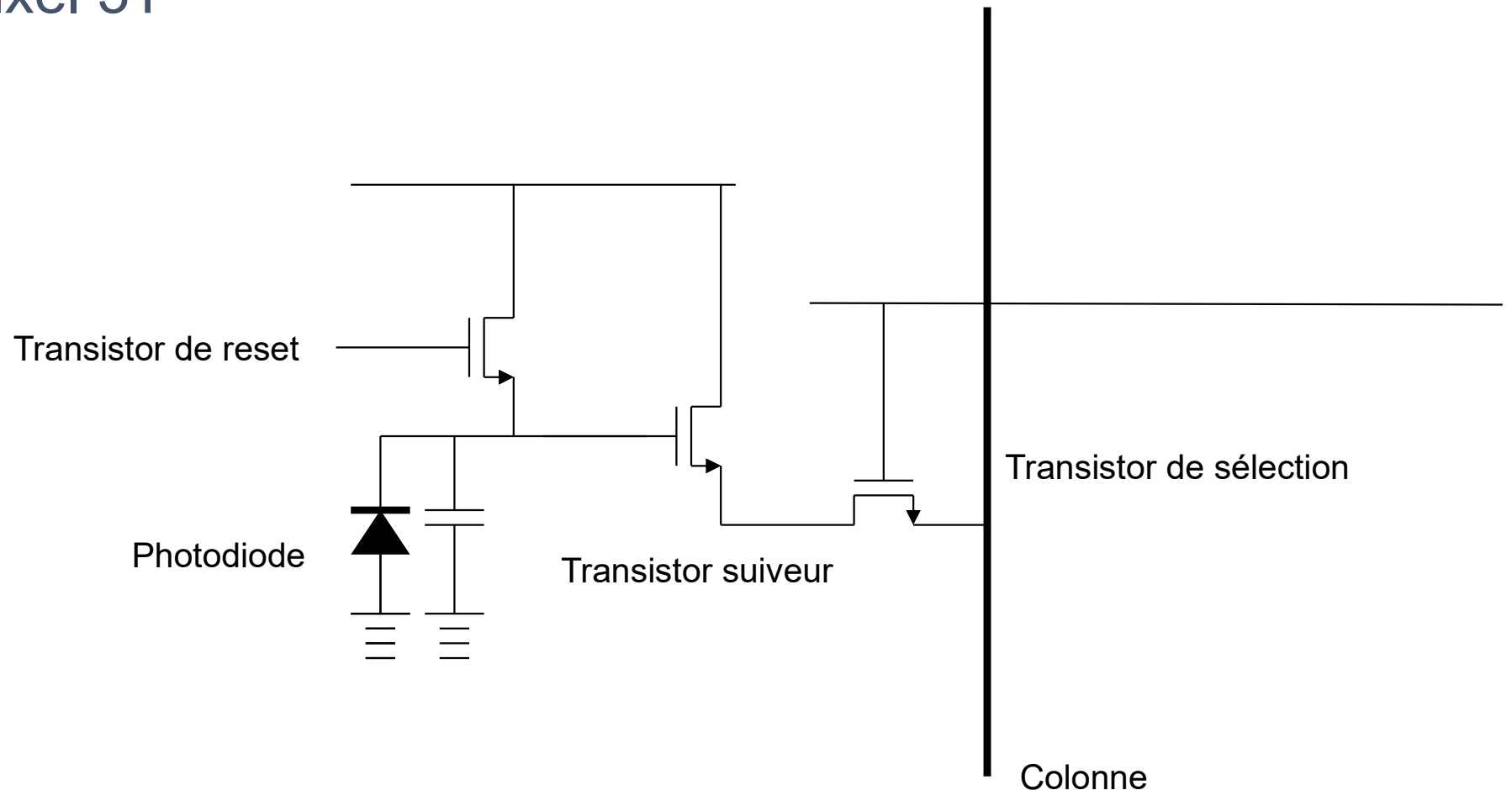
#### La PIN Photodiode



Le pixel est composé :

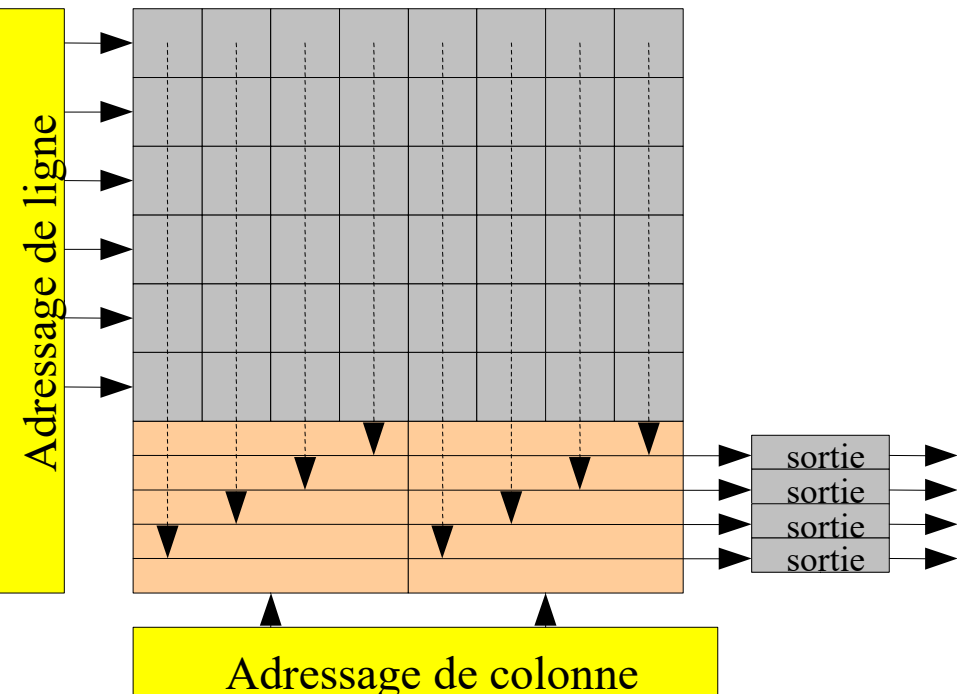
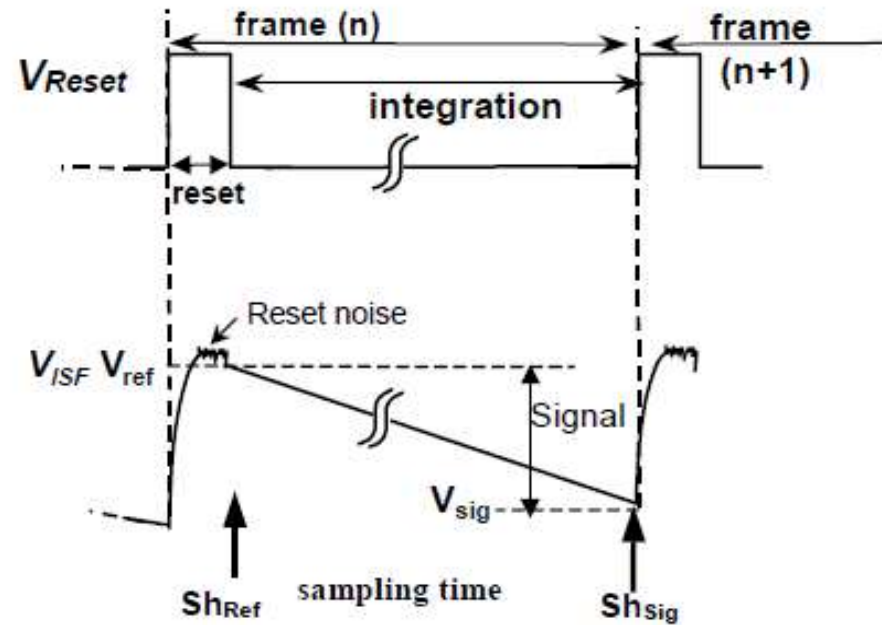
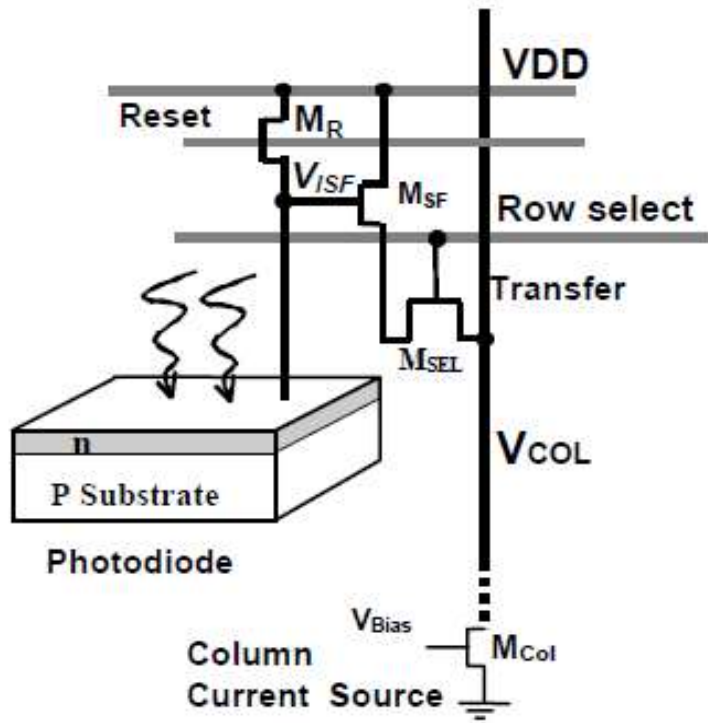
- ⑩ d'une photodiode PIN (3 zones : dopage **P**, Intrinsèque et dopage **N**) qui constitue l'élément sensible
- ⑩ couplée à une capacité

# Le Pixel 3T



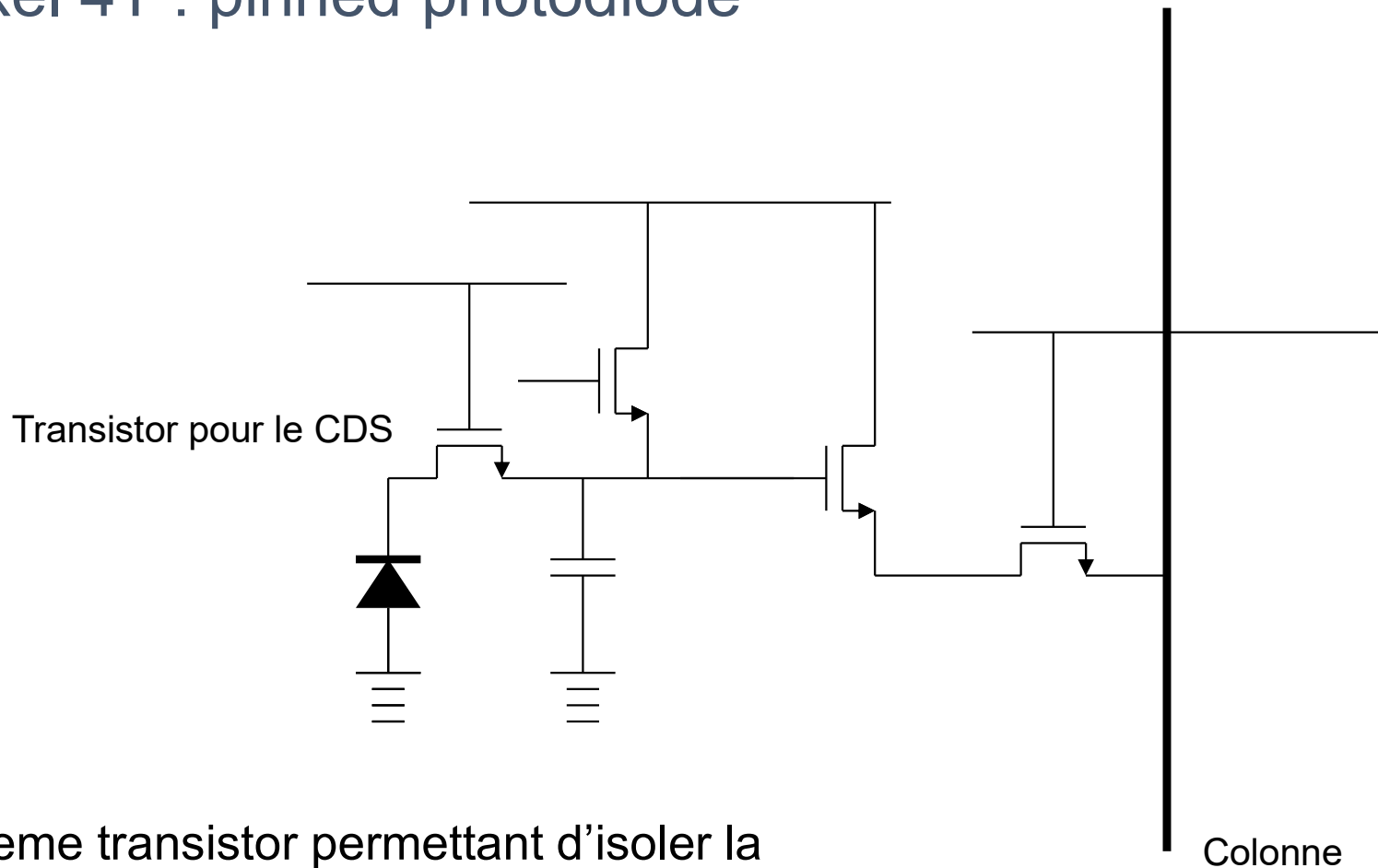
- ⑩ Le pixel intègre plusieurs transistors : La gated photodiode avec un ampli MOS ou pixel actif
- ⑩ Chaque pixel comprend :
  - ⌘ La photodiode PIN et une capa de stockage des charges
  - ⌘ Un transistor de reset
  - ⌘ Un transistor suiveur (Source Follower) qui assure la conversion charge tension sur une haute impédance
  - ⌘ Un transistor de sélection de la ligne du pixel à lire connecté à la colonne

# CMOS APS 3T



- Mode d'intégration lecture de type ERS (electronic rolling shutter) :
  - S/H dans le pixel
- Bruit important :
  - Bruit de reset en kTC
- Par le passé FF faible pour les petits pixels
  - Couches de métaux
  - $\mu$ -lentilles

# Pixel 4T : pinned photodiode



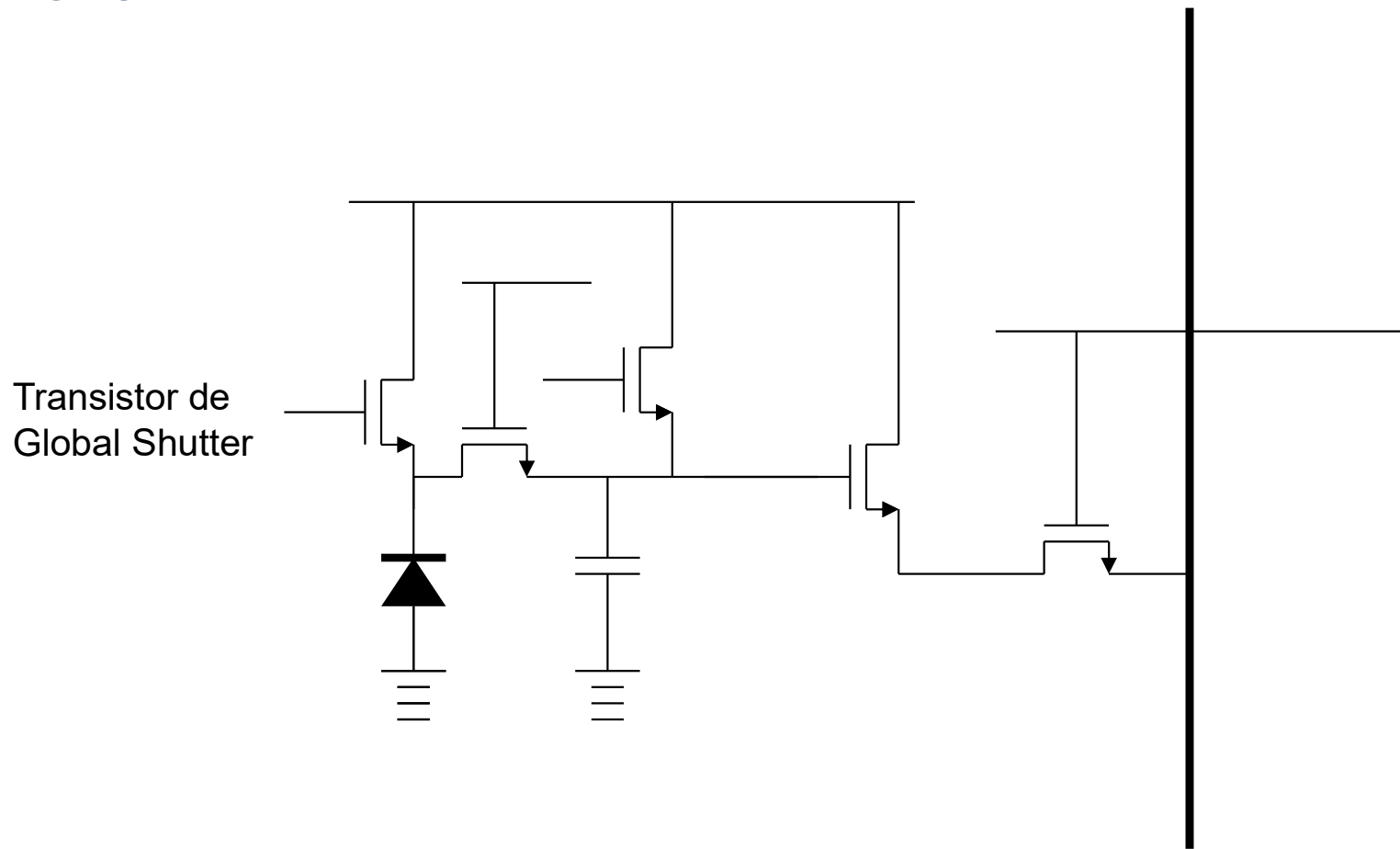
⑩ 4eme transistor permettant d'isoler la photodiode et la capa de collection des charges permettant de faire un CDS et de neutraliser le bruit en kTC

- CMOS+diffusion spéciale
  - Pour le marché des mobiles
- Permet de faire du CDS :
  - Diminution forte du bruit kTC 1 e- ou moins
  - Réduction du FPN
- Accessible en standard
- Mode Rolling Shutter





# Pixel 5T



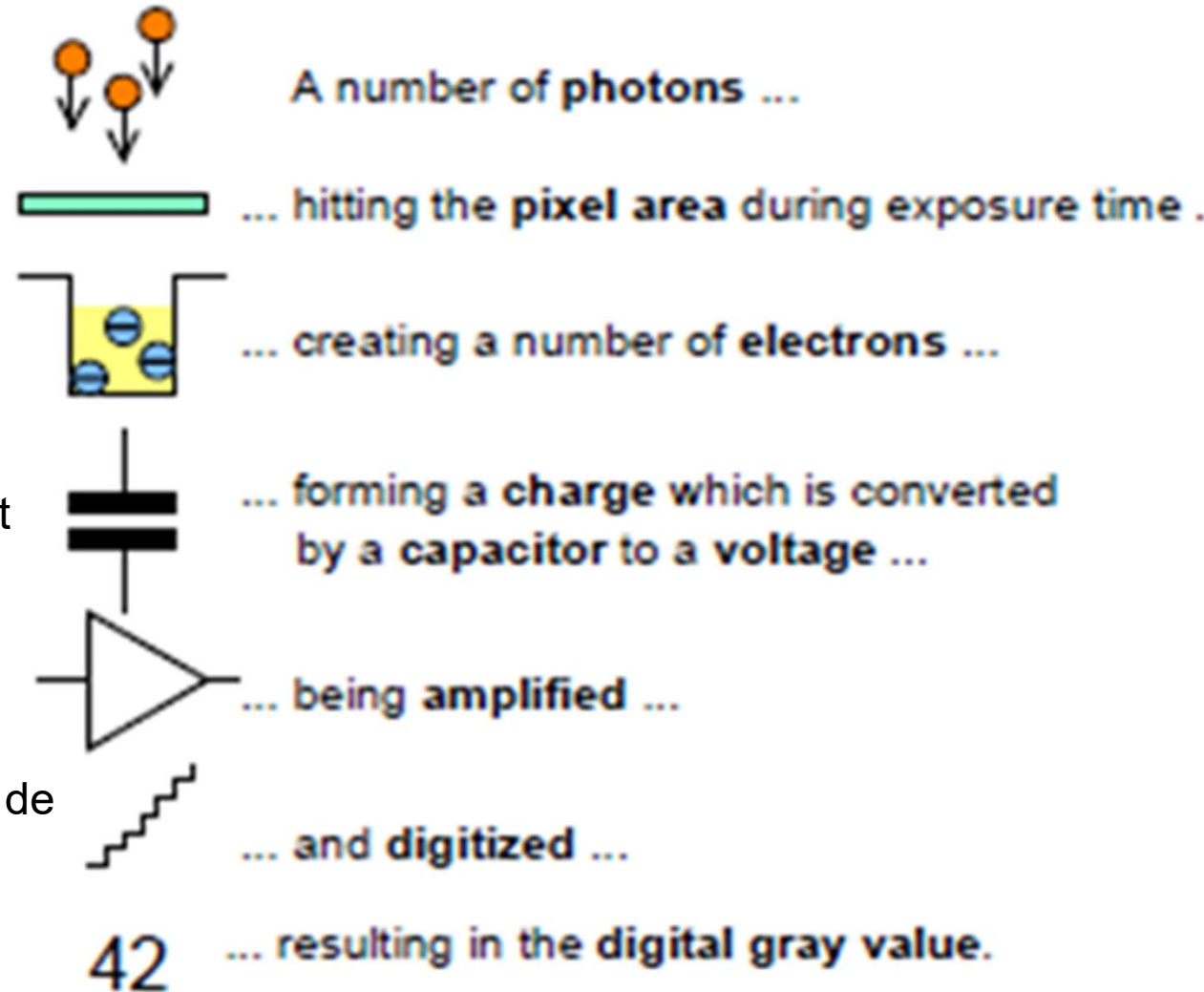
- 10 Introduction d'un 5eme transistor pour réaliser la fonction Global Shutter
- 10 pour synchroniser l'exposition sur tous les pixels
- 10 Piloter le temps d'exposition
- 10 Faire un antiéblouissement
- 10 Intégration pendant la lecture

L'introduction de transistors supplémentaires (6T, 7T, 8T...), de capa supplémentaires pour augmenter la dynamique reduire le bruit à bas niveau. Des interconnexions entre pixels peut permettre de faire du traitement d'image dans le pixel ou entre pixels voisins.

# Le signal détecté : Nombre de photons/s – une amplitude digitale

## Du photon au bit :

- ⑩ Un éclairement  $E_3$  en photons/m<sup>2</sup>/s
- ⑩ Une surface pixel  $p^2$
- ⑩ pendant un temps d'exposition  $t_{exp}$
- ⑩ Génère un nombre de charges en électrons ou en paires électrons trous
- ⑩ Une capa ou un convertisseur courant tension génère une tension  $U$
- ⑩ Le signal est amplifié et filtré
- ⑩ Il est convertis par un CAN en niveau de bits
- ⑩ Il est affiché en niveau de gris



# Rendement quantique et facteur de réponse

- ⑩ Efficacité ou rendement quantique  $\eta(\lambda)$ : nombre moyen d'électrons libres générés pour un nombre moyen de photons incidents
- ⑩ Facteur de réponse ou sensibilité spectrale  $R_i(\lambda)$  ou  $R_v(\lambda)$  rapport entre les variations de courant ou de tension apportées par un flux monochromatique  $F(\lambda)$  et ce flux.

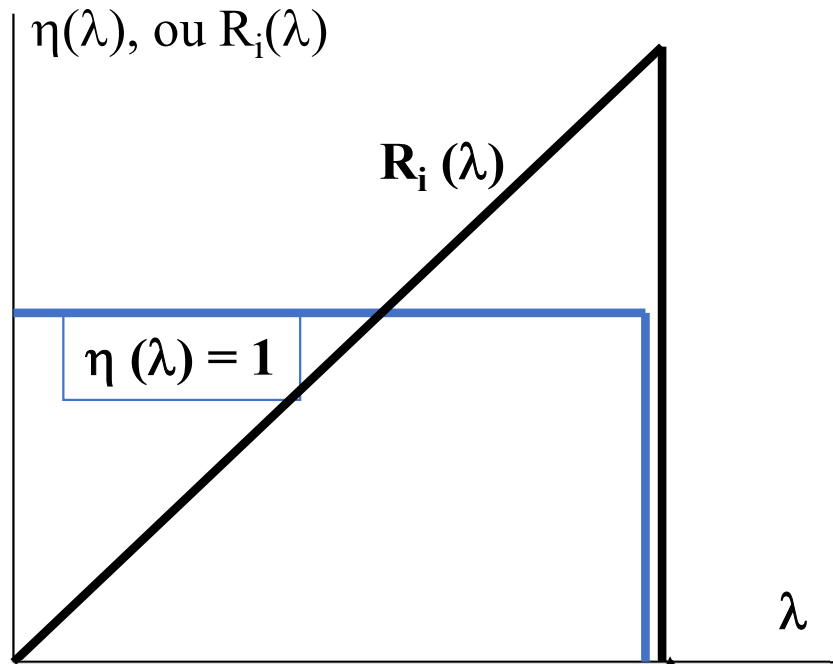
$$R_i(\lambda) = i_s / F_s(\lambda) = \eta(\lambda) \cdot e \cdot \lambda / hc, \text{ en } A \cdot W^{-1}$$

$$R_v(\lambda) = v_s / F_s(\lambda), \text{ en } V \cdot W^{-1}$$

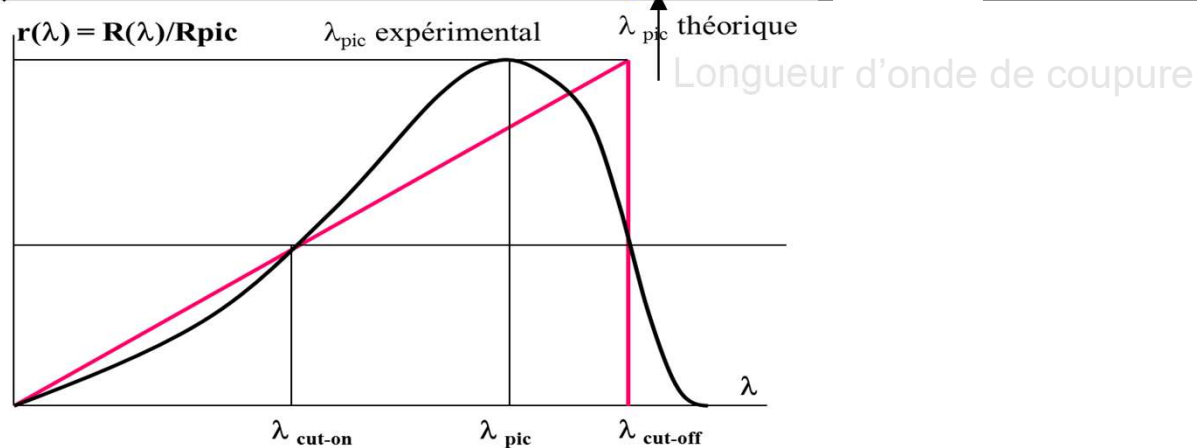
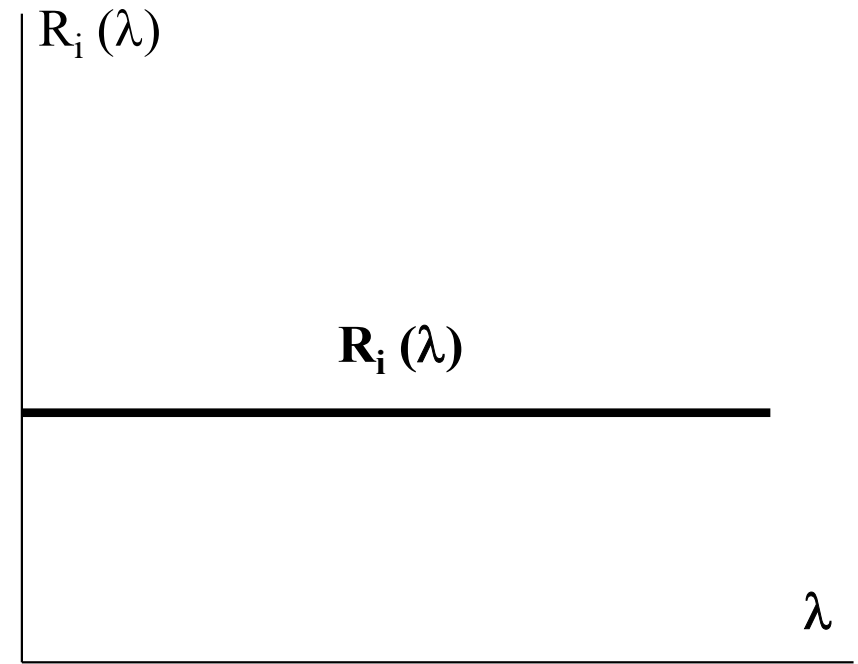
Le facteur de réponse spectrale peut être normalisé par rapport à la réponse spectrale maximale

# Réponse et efficacité quantique théorique :

➤ Détecteur quantique (parfait)

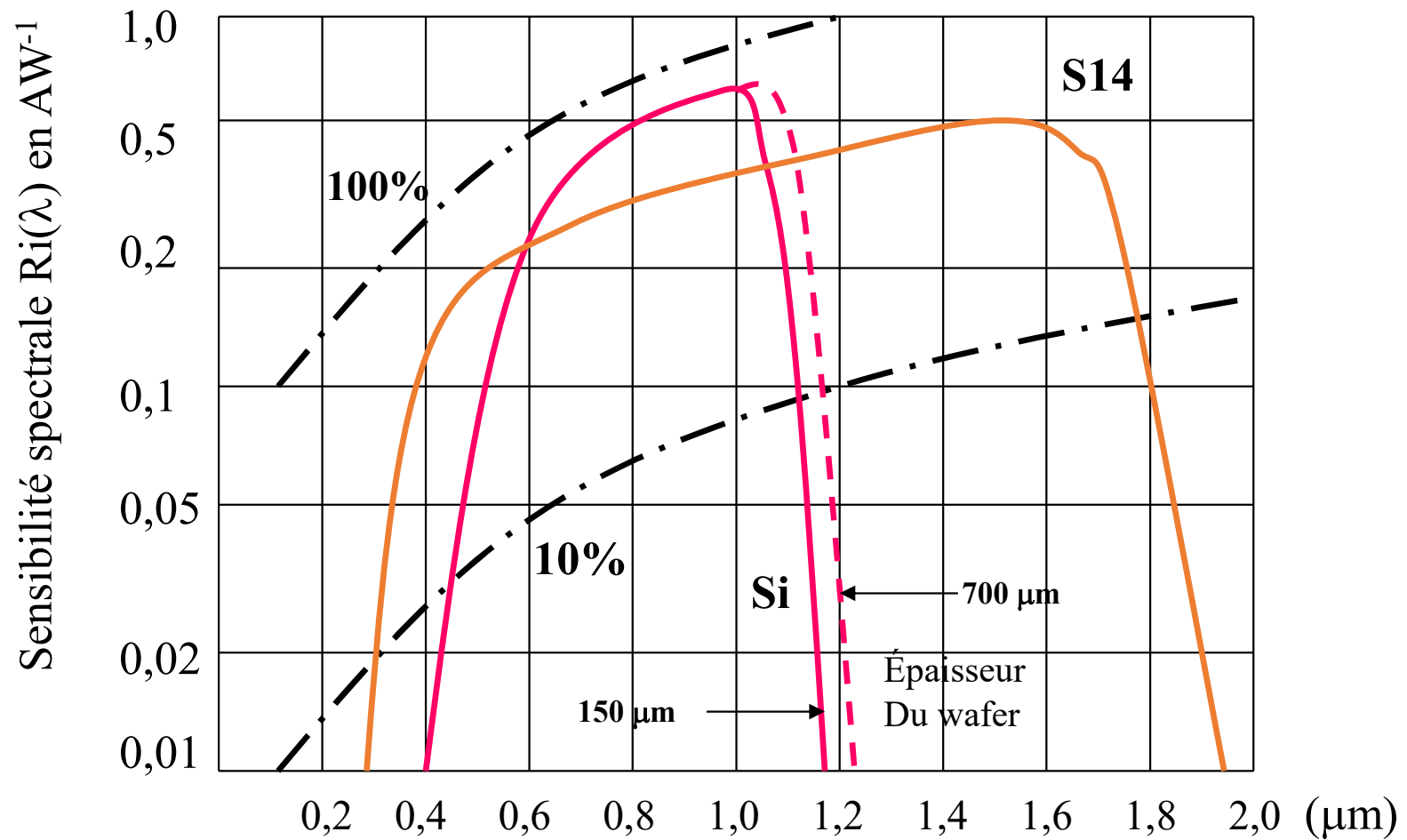


Détecteur thermique parfait



# Sensibilités spectrales

## ⑩ Silicium et Germanium

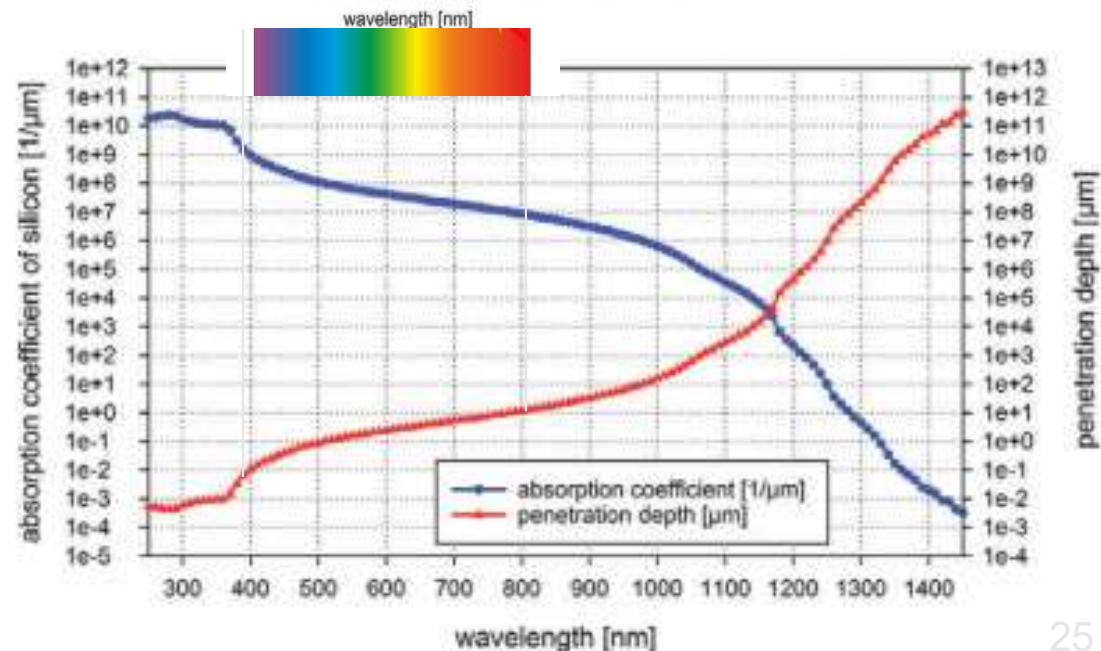
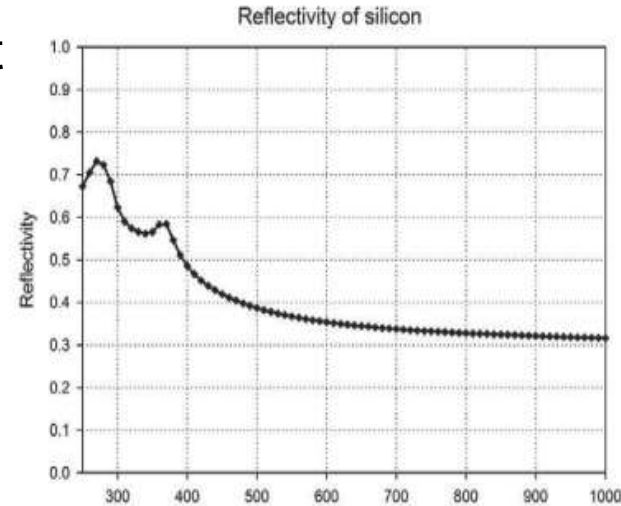
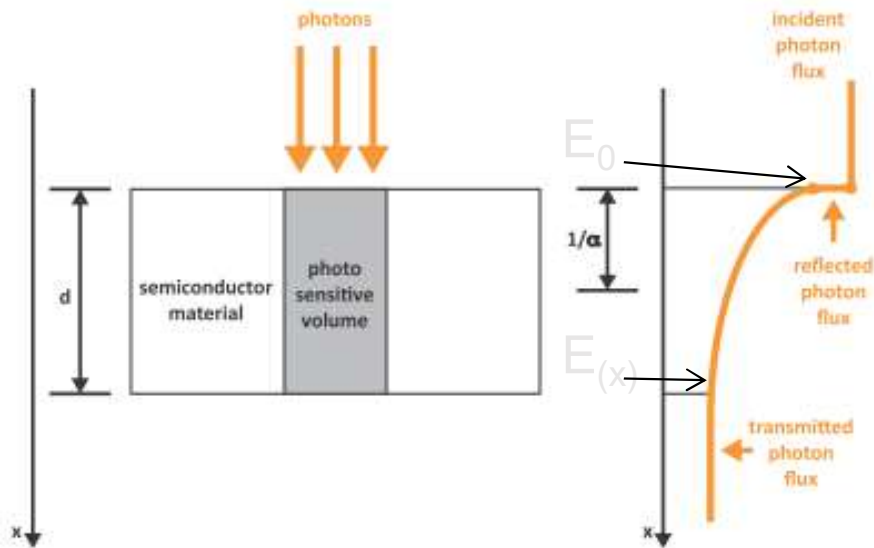




# Absorption du Silicium et réponse spectrale

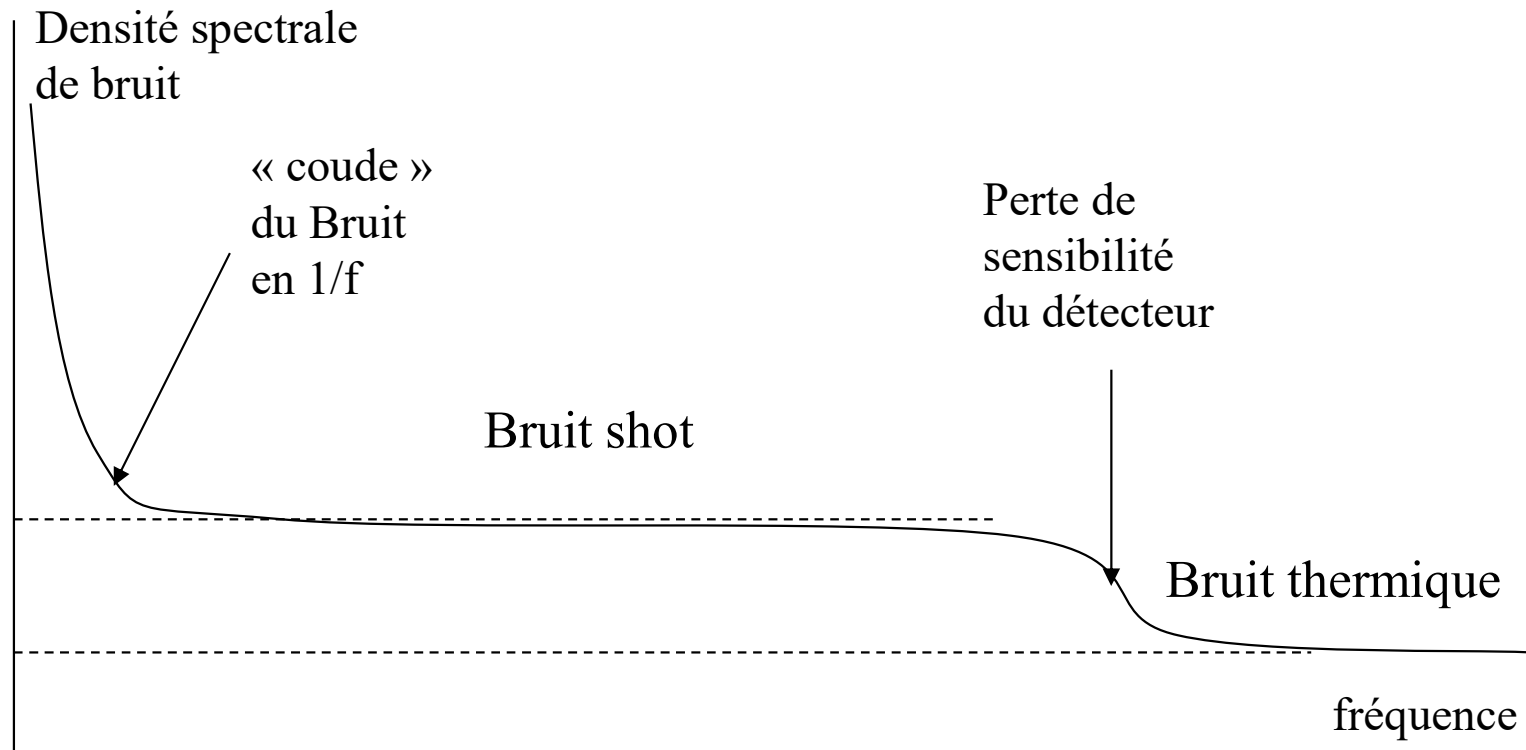
- L'absorption de l'éclairement incident  $E_0$  augmente avec la profondeur
- $E(x) = E_0 e^{-\alpha x}$
- Le coefficient d'absorption  $\alpha$  dépend de  $\lambda$
- Au delà de  $\lambda_c$  le matériau est transparent

$$QE = (1 - R) \cdot \zeta \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot d})$$



# Densité spectrale de bruit

## 10 Bruits « blancs »



# Le courant d'obscurité

Courant d'obscurité : c'est le courant permanent  $I_{obs}$  délivré par le dispositif photosensible polarisé dans les conditions de fonctionnement et placé dans l'obscurité.

Le courant d'obscurité dépend de la température et présente des fluctuations autour de sa valeur moyenne ( bruit Schott).

Il est proportionnel avec la surface ou avec le volume du détecteur

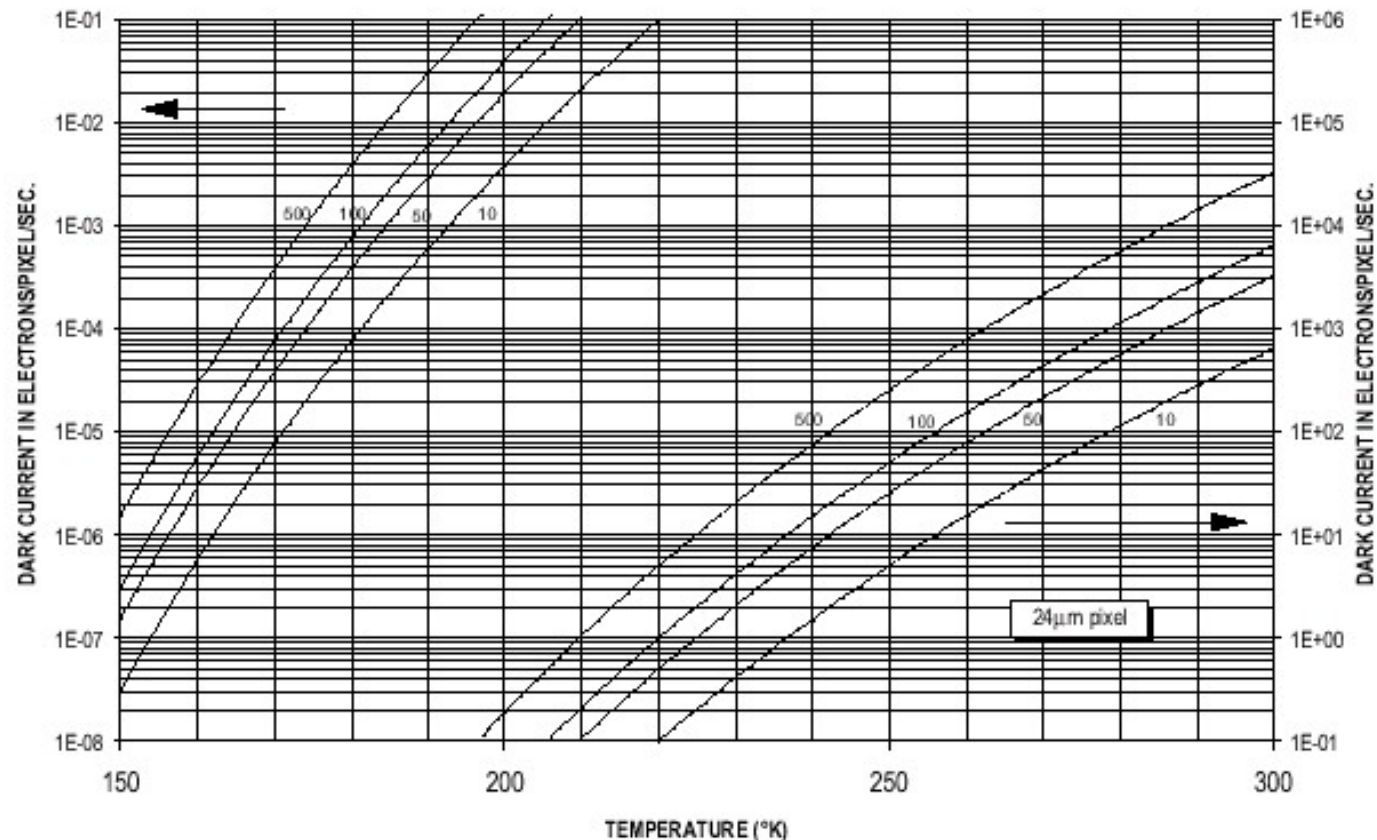
Il faut refroidir le détecteur pour limiter son effet.

Sur le Silicium le courant d'obscurité est divisé par deux pour un delta T de 7°C de 6 à 9°C suivant les matériaux

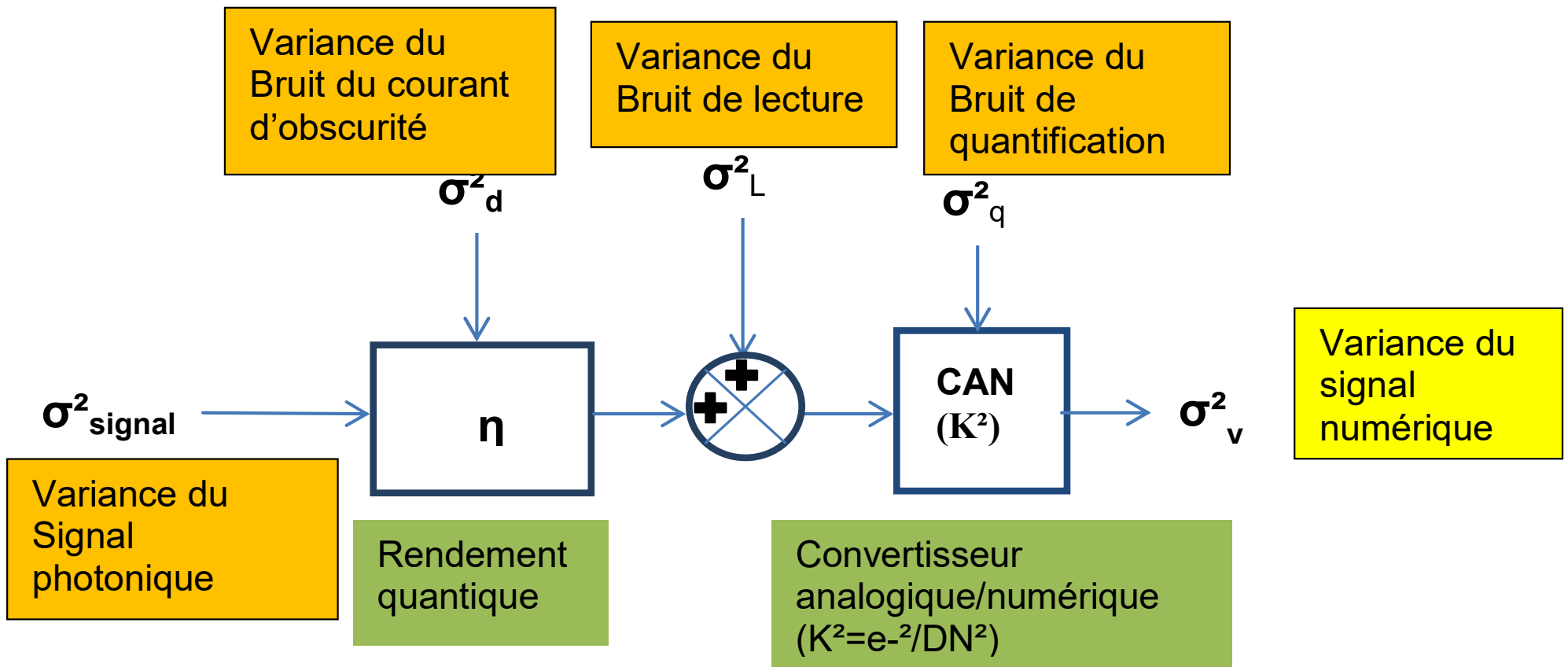
Il est proportionnel à

$$I_d = Cste.T^{3/2}.e^{(-E_g/2kT)}$$

Avec  $E_g = E_v - E_c$



# Décomposition des sources de bruits



# Flux équivalent au bruit (spectral)

- ⑩ **Courant de signal  $i_s = R_i(\lambda) F_s(\lambda)$**
- ⑩ Courant de bruit = fluctuations du courant, autour de sa valeur moyenne (en absence ou en présence de signal utile), aux bornes de la résistance de charge du détecteur
- ⑩ Le flux équivalent au bruit spectral (FEB ( $\lambda$ ) ou NEP( $\lambda$ )) est la quantité de flux qui crée en sortie de détecteur une variation de signal égale à la valeur efficace du bruit :

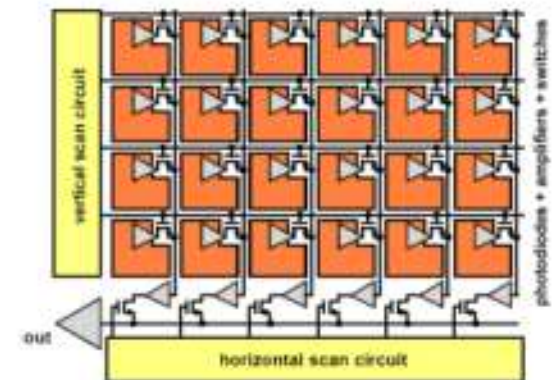
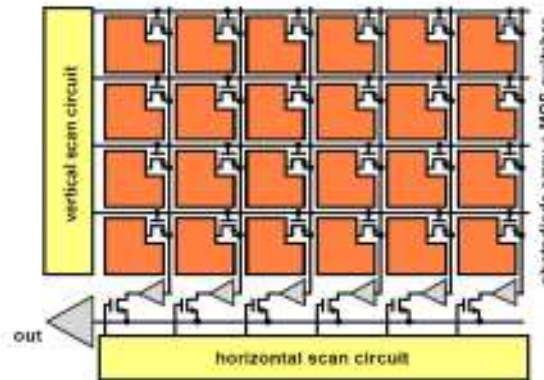
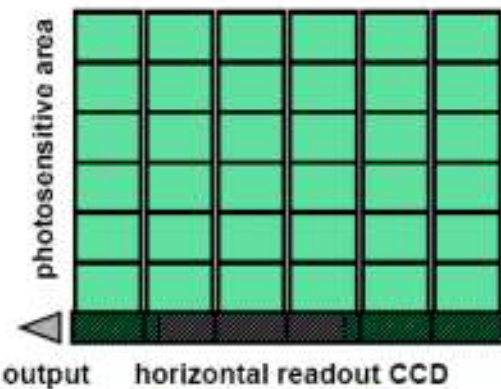
$$\sigma_i = R_i(\lambda) \text{NEP}(\lambda) \quad \rightarrow \quad \text{NEP}(\lambda) = \sigma_i / R_i(\lambda) \text{ en } \mathbf{W.Hz^{-1/2}}$$

- ⑩ Le rapport signal à bruit est : **(S/B) vidéo =  $i_s / \sigma_i = F_s(\lambda) / \text{NEP}(\lambda)$**

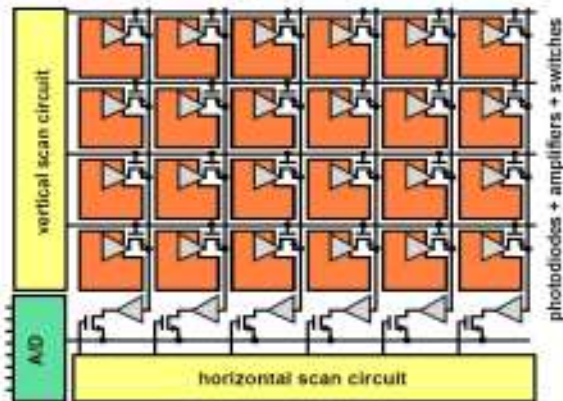


# Matrices CCD Interlignes et CMOS DRO

## Architecture evolution

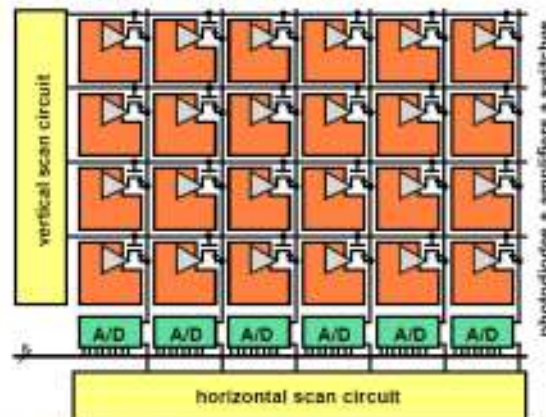


## Charge-Coupled-Device



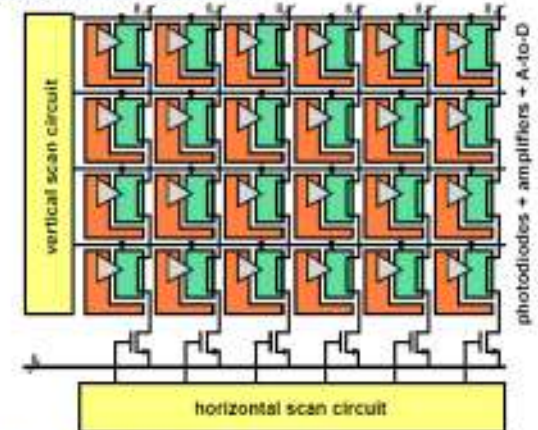
APS on-chip ADC

## Passive nixel



APS column ADC

## Active nixel

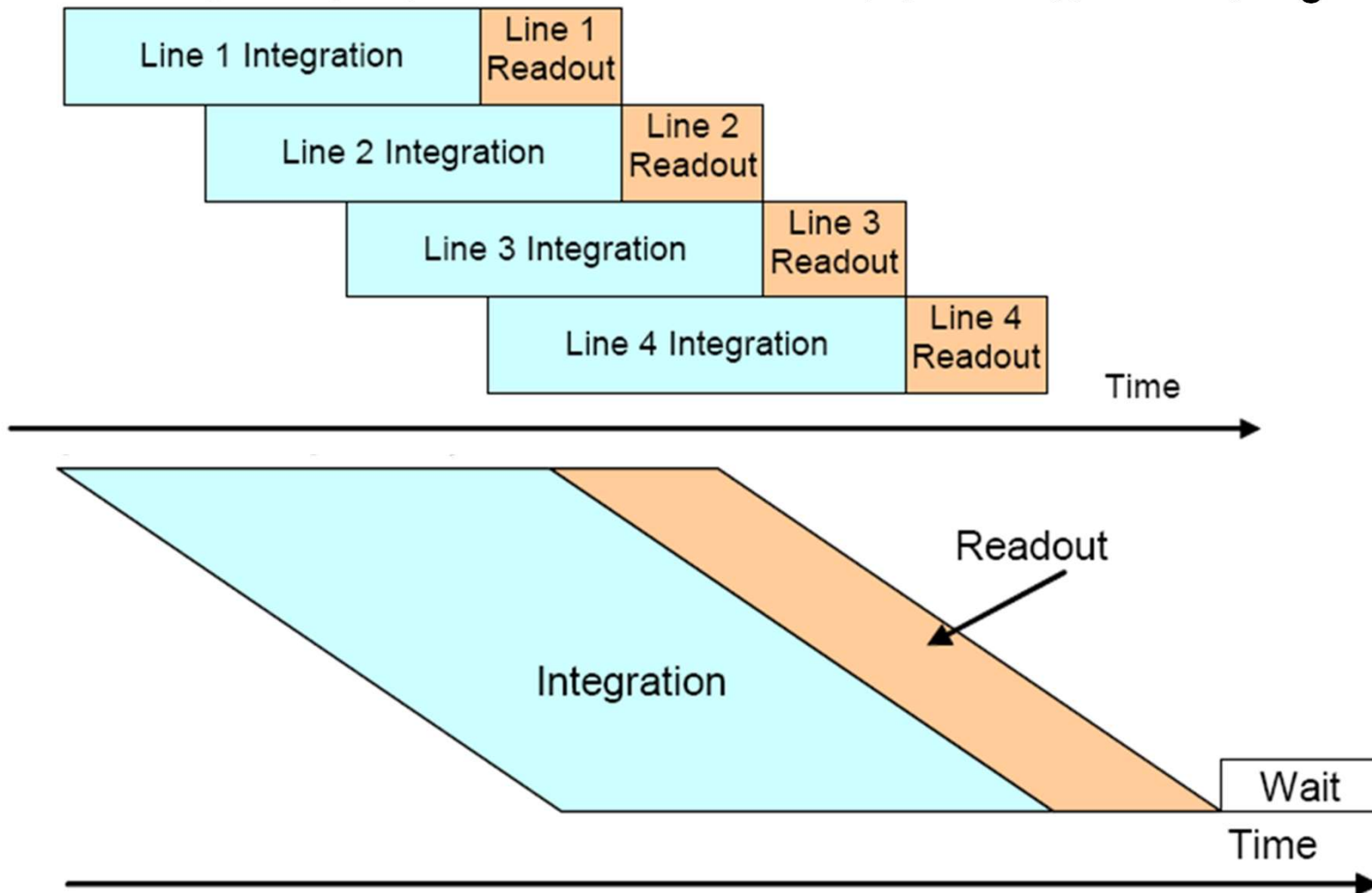


APS In-pixel ADC

CCD or CMOS image sensors for consumer digital still photography ? Prof. Albert J.P. THEUWISSEN, 2001

# Modes d'acquisition et de lecture du plan focal RS

- Progressive scan ou RS (Rolling Shutter)
  - Le signal multiplexé balaye l'ensemble de l'image.
  - C'est le format du standard Full HD 1080p (1080 lignes en progressif)



# Mode d'intégration : GS (Global Shutter)

## Intégration : Snap shot (Global Shutter)

Spécifie l'intégration du signal simultanément sur l'ensemble de la matrice.

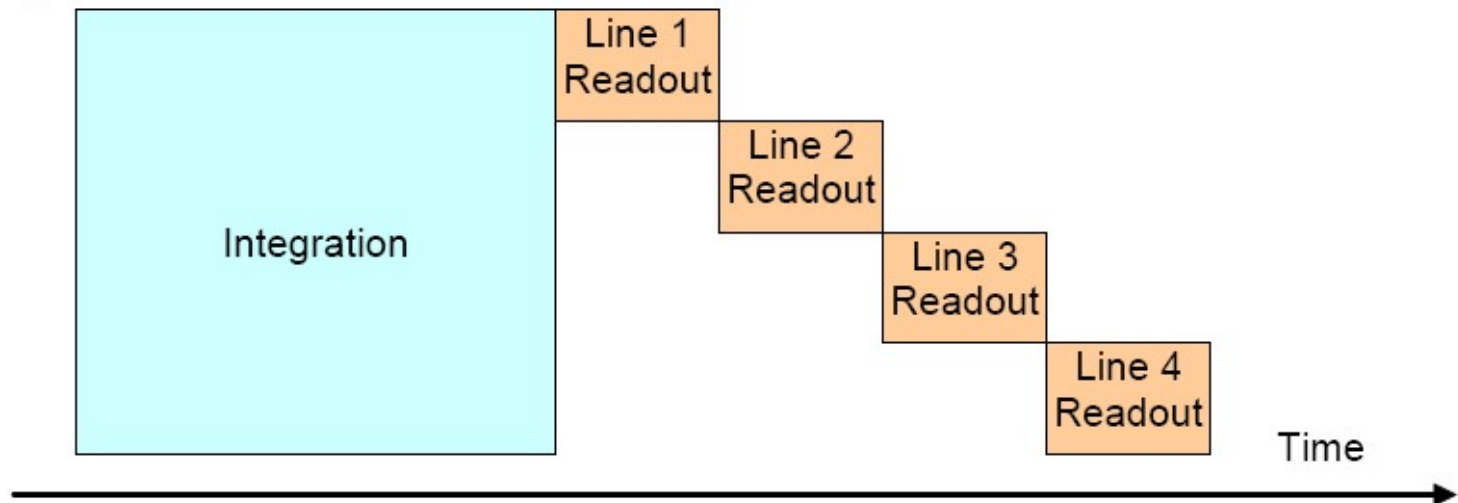
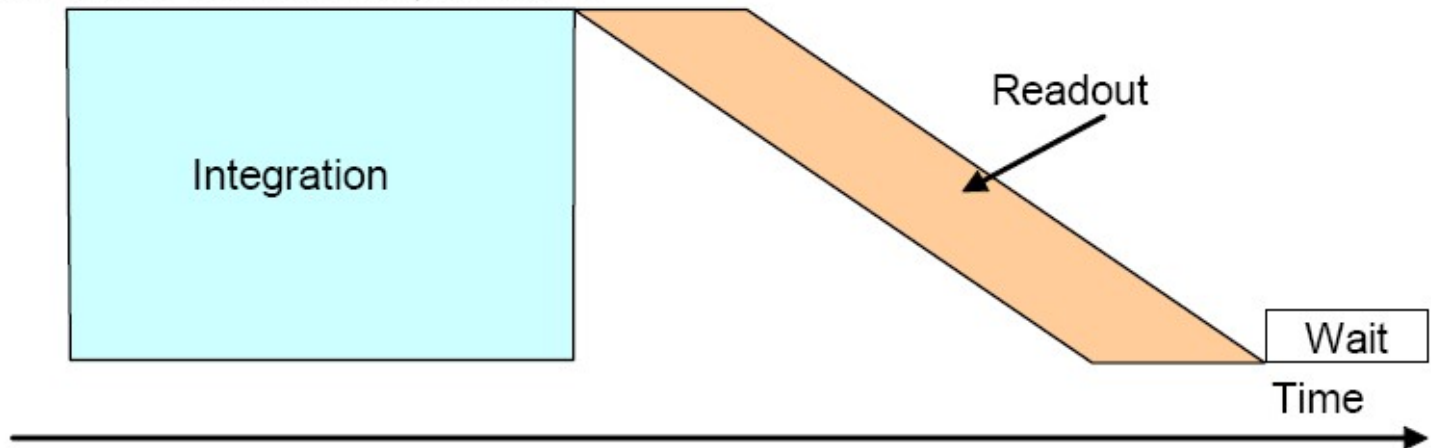


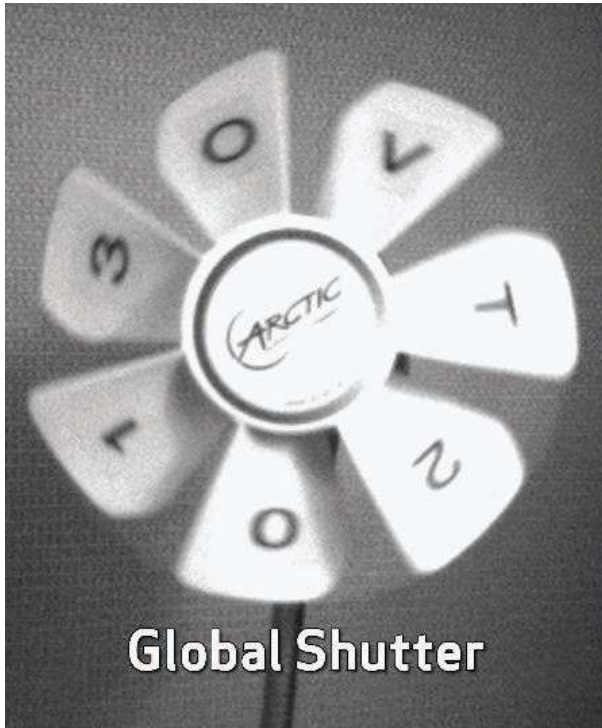
Figure 18-6. Global shutter symbolization



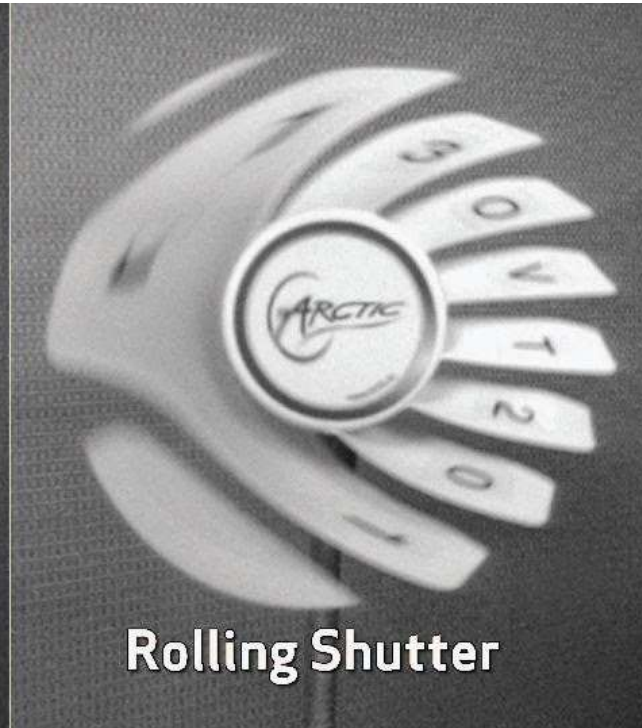


# 4T Rolling Shutter

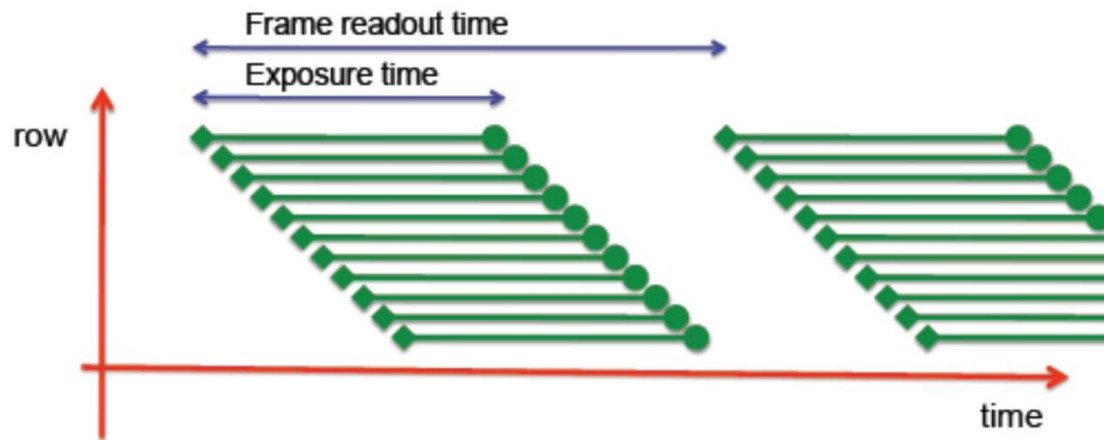
## 5T Global Shutter



Global Shutter



Rolling Shutter



# Intégration sur le chip

- ⑩ Sur le chip on peut intégrer :
  - ⌘ La surface sensible (génération des photoélectrons)
  - ⌘ L'accumulation du signal
  - ⌘ La fonction obturation pour le pixel et pour toute la matrice
  - ⌘ La conversion courant tension avec des lois linéaires ou non linéaires
  - ⌘ Des éventuelles fonctions de détection ou de traitement local dans le pixel ou avec les pixels adjacents
  - ⌘ les fonctions de pilotage du capteur et de lecture (avec des tensions plus faibles que sur un CCD) avec des fonctions : fenêtrage, accès aléatoire...
  - ⌘ L'amplification du signal et la conversion analogique numérique : jusqu'à un ou deux CAN par colonne
  - ⌘ Des fonctions de mémoire
  - ⌘ Des fonctions de traitement d'image
  - ⌘ La correction de non uniformité
- ⑩ Vers la camera mono puce...

# Les tendances sur les Matrices CMOS

- Diminution des coûts :
  - 2008 l'objectif est de faire un module complet pour 1\$ pour les téléphones portables
- Diminution des formats 1/7 " en 352x288
- Et augmentation du format sans stitching ou avec stitching : 24x36 ... 60x60
- Augmentation des formats limités par les dimensions des process de photolithographie et par stitching :
  - Photographie numérique 24x36 et plus
  - 16M pixels pour les cameras de cinémas numériques
- Diminution du pas pixel : 2008 CMOS 3T à 1 $\mu$ m de pas avec les technologies 65nm ainsi nous sommes proche de la longueur d'onde. Vers le 5nm...
- Augmentation du nombre de transistors par pixel :4, 5, 6T... 100T
  - 3T dans les années 1990, 4T dans les années 2000, 5T en 2008, 7T chez Sony depuis 2016
- Augmentation de la sensibilité: en 2009 matrices CMOS amincies éclairage face arrière, augmentation du Fill Factor, et PIN diode épaisse pour le réponse dans le PIR
- En route pour le 5nm et l'intégration en Z (Stacked)

# Les tendances technologiques CMOS et CCD

- Les matrices CMOS prennent le lead sur les matrices CCD
  - 2015 annonce de l'arrêt de la production CCD chez Sony (LBO)
- Augmentation du nombre de pixel par matrice > 100 Mpixels
  - 2015 : une matrice CMOS 250 Mpixel de 30mm de côté Canon
  - Lancement de la camera du LSST 3GPixel (CCD) les derniers CCD scientifiques
- Réduction du pas de 5 $\mu$ m à moins de 1 $\mu$ m dans la téléphonie mobile
- Augmentation des surfaces capteurs 24x36 et au-delà
- Réduction du bruit de lecture 2e à 0,8e par pixel, 0,5 e en 2020, 0,23<sup>e</sup> en 2021...
- Augmentation du QE en back illuminated >80%, 90% en BSI à  $\lambda_{pic}$  dans le Visible et vers le proche IR
- ⑩ Augmentation du nombre de T par pixel :
  - ☞ 3T dans les années 1990, 4T dans les années 2000, 5T en 2008, 7T chez Sony depuis 2016
- Augmentation de la dynamique, mode HDR ou réponse non linéaire
- Augmentation de la dynamique des CAN 14 à 16bit et plus vers 18bit
- Fonderie Wafer 450mm pour matrice CMOS (Sony)
- Concentration des industriels par rachats et fusion dans les CCD puis les CMOS
  - e2v rachète Atmel St Egreves (Thomson Composants spécifiques CCD, ADC et DAC,...)
  - Teledyne reprends Dalsa – Philips CCD et e2v en 2017 puis e2v en 2018
  - OnSemiconductors reprend Kodak Truesense, Aptina, Cypress
  - AMS rachète CMOSIS
  - Sony
  - ST micro (Grenoble)

# Les tendances technologiques



# Les avantages des capteurs CMOS

- Pas de transferts de charges à basse impédance comme sur les CCD
- Mesure d'une tension sur le pixel à haute impédance
- Lecture non destructive
- Réduction du bruit par la lecture en parallèle sur chaque colonne
- CAN en parallèle par colonne
- Permet d'augmenter la cadence trame en lecture à bas bruit
- CAN et mémoire sur le chip, camera one chip
- Lecture d'une sélection de pixels en accès aléatoire ou fenêtrée (ou fenêtres multiples) haute cadence possible
- Très bonne isolation des pixels (pas de blooming)
- Bas coût grâce à l'utilisation de fonderie CMOS amorties sur toute la diversité des composants

# Les inconvénients des capteurs CMOS

- Faible taux de remplissage qui progresse grâce à la miniaturisation des techno 180nm, 65nm... 5nm
- Surface limitée par la dimension du masque sans stitching
- Bruit non stationnaire : chaque pixel a son bruit, histogramme des bruits des pixels
- Le transistor suiveur (SFD Source Follower per Detector) fait l'objet de bruits propre à chaque pixel qui est de type RTN (Random Telegraph Noise). Nous pouvons neutraliser ces pixels dans un process de binning numérique intelligent.
- Un CCD présente un bruit stationnaire et une plus grande uniformité mais avec un bruit plus fort qui progresse comme la racine du nombre de pixel/s qu'une matrice CMOS 4T
- Capteur complexe mais camera plus simple à concevoir



# Avantages Inconvénients CCD CMOS

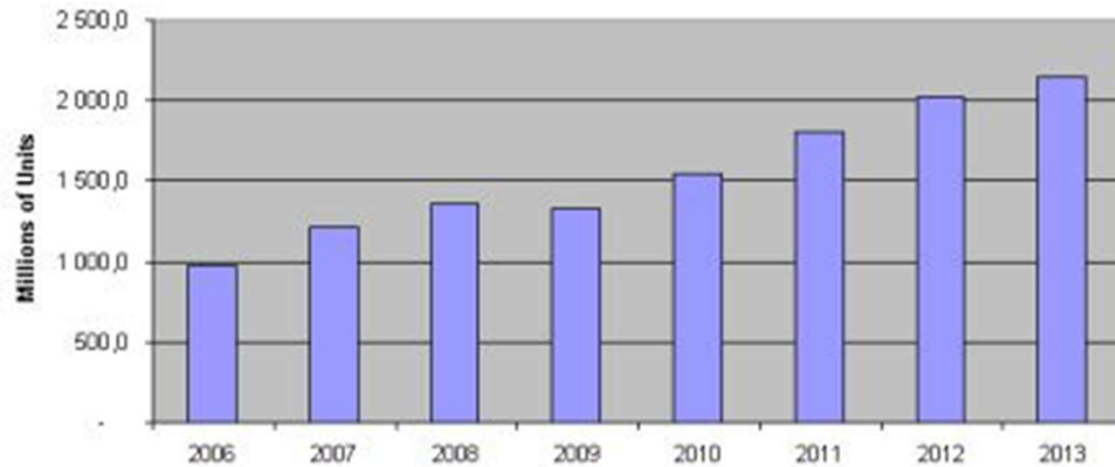
	CCD FF	CCD FT	CCD IL	EMCCD	CMOS 4T	CMOS 5T
Intégration long temps de pose						
Taux de remplissage	+++	+++	-		+	+
Bruit de lecture					+	
Binning analogique	+++	+++				
Eclairage face arrière						
Reponse proche IR						
TDI et Drft Scan	+++	+	+			
Cadence image			+		+++	++
Comptage de photon				++		
Faible bruit de lecture				+	+++	+
Sorties paralleles			+		++	++
CAN					++	++
Cout unitaire					++++	+++
Absence du besoin d'un obturateur		+	++		+	++
Global Shutter			++			++
Faible temps de lecture					+	+
Faible temps mort entre les trames			++		++	
Cadence image			+		+++	+++
Dynamique	+++	+++	++		+++	++
Bonne uniformité	+++	+++	+++	+	+	+
Faible courant d'obscurité	++	++	++		+	+
Petit pixel					+++	++
Taille de matrices	+++	++			+	+
ROI	+	+	+	+	+++	+++
Acces aleatoire au pixel					+++	+++



# Les tendances du marchés

Sources : Frost & Sullivan et IC Insights 2017

iSuppli Figure: Global Image Sensor Shipment Forecast (Millions of Units)



## CMOS Image Sensor Growth Continues into Next Decade



Source: IC Insights

# Éléments de coûts

Le coût du composant résulte de :

- ⌘ l'amortissement de la chaîne de production Silicium
- ⌘ Le cout du design de la matrice de 1M€ à qq M€
- ⌘ du coût du wafer ~1K€ - 4K€ suivant le nombre d'opérations
- ⌘ de process spécifiques (CCD)
- ⌘ De process standards CMOS (amortissement sur la production de  $\mu$ proc et mémoires).
- ⌘ du nombre de composants par wafer (coût proportionnel à la surface du composant)
- ⌘ Du rendement de fabrication (inversement proportionnel à la surface du composant) ou du nombre de défauts sur chaque composant
- ⌘ Des processus unitaires de conditionnement du composant.

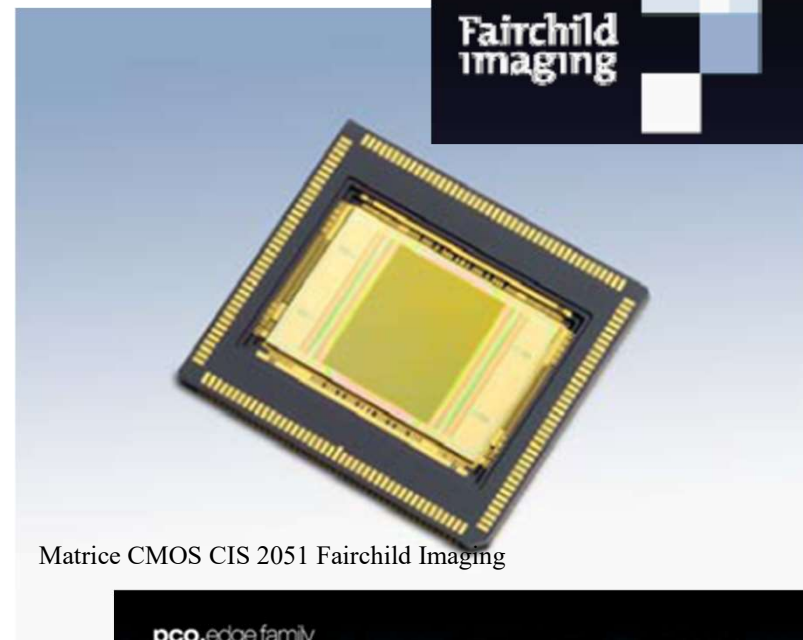
Les processus de photolithographie limite la surface du composant à des dimensions de 24mm x 36mm au maximum. Au-delà, des techniques de stichings ou d'aboutage permettent de faire des composant plus grands. Motif 35 nm

## 4. Le sCMOS faible bruit

- ⑩ Introduction en 2009 de Matrices CMOS scientifiques à faible bruit : sCMOS
- ⑩ Mise sur le marché de premières cameras en 2010
- ⑩ Ref workshop dec 2009 CNES Toulouse Matrice 4T CDS et 5T GS
- ⑩ La révolution des dernières années en progrès constant susceptible de remplacer toutes les autres technologies

**Low Noise High Dynamic Range  
CMOS Image Sensor for  
High Performance Imaging Applications**

Boyd Fowler, Chiao Liu, Steve Mims, Janusz Balicki,  
Wang Li, Hung Do, and Paul Vu



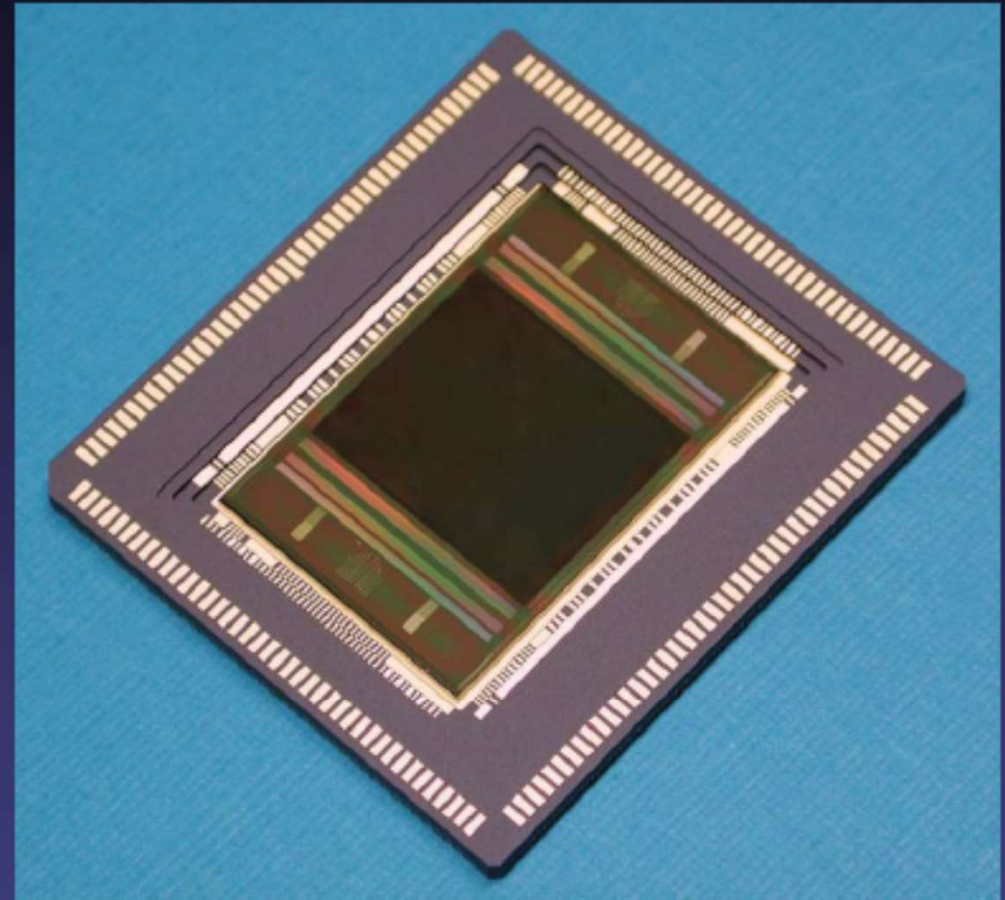
Matrice CMOS CIS 2051 Fairchild Imaging





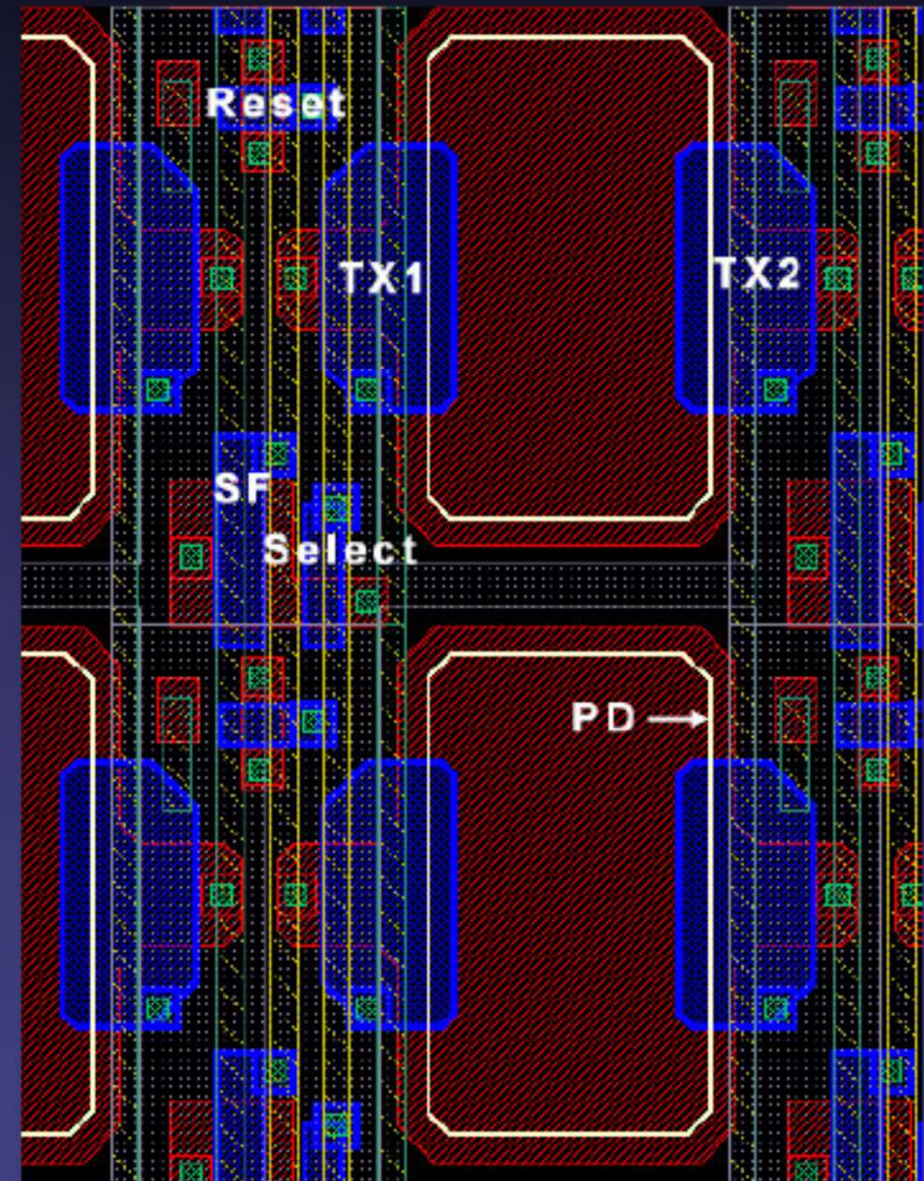
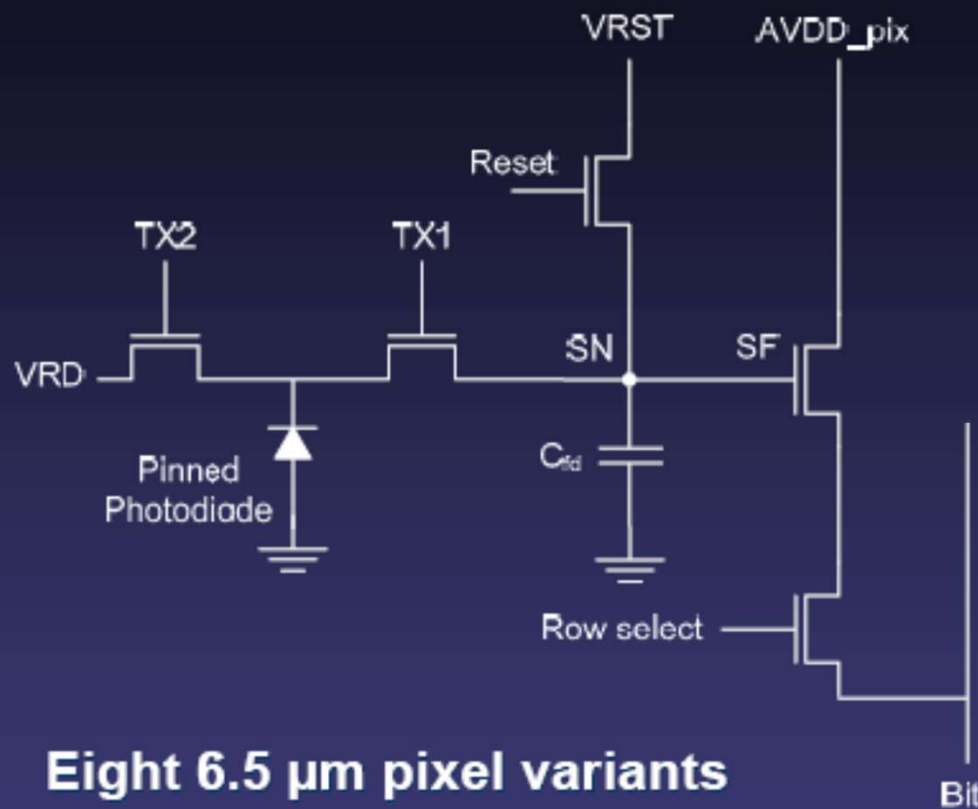
# CIS2051 5.5 Mpixel Image Sensor

- 6.5  $\mu\text{m}^2$  5T pixel architecture
- 2560(H) x 2160(V) imaging array
- Dual gain 11-bit output channels
- 100 fps in rolling shutter readout
- 50 fps in global shutter readout
- Read noise < 2e- rms at 30 fps RS
- Dynamic range > 83 dB (15000:1)
- QE > 55% at 600 nm
- Dark current at 20°C 3 pA/cm<sup>2</sup>



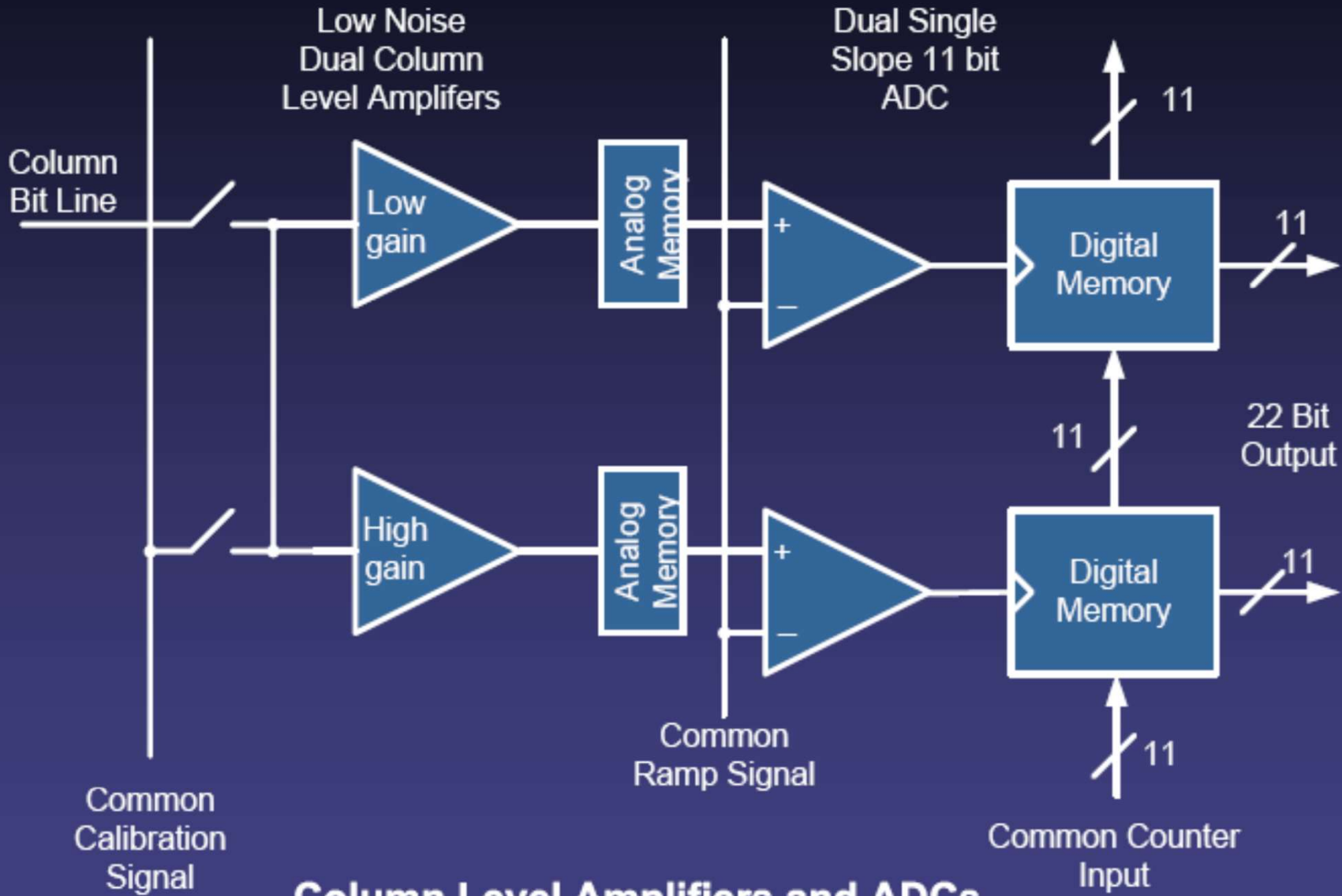


# Pixel Design



- Eight 6.5  $\mu\text{m}$  pixel variants
- 5T pinned photodiode (PPD) pixel
- High conversion gain ( $\mu\text{V}/\text{e}^-$ ), low dark current, and low lag
- Low readout noise with true CDS
- TX2 transfer gate functions as anti-blooming drain and global reset

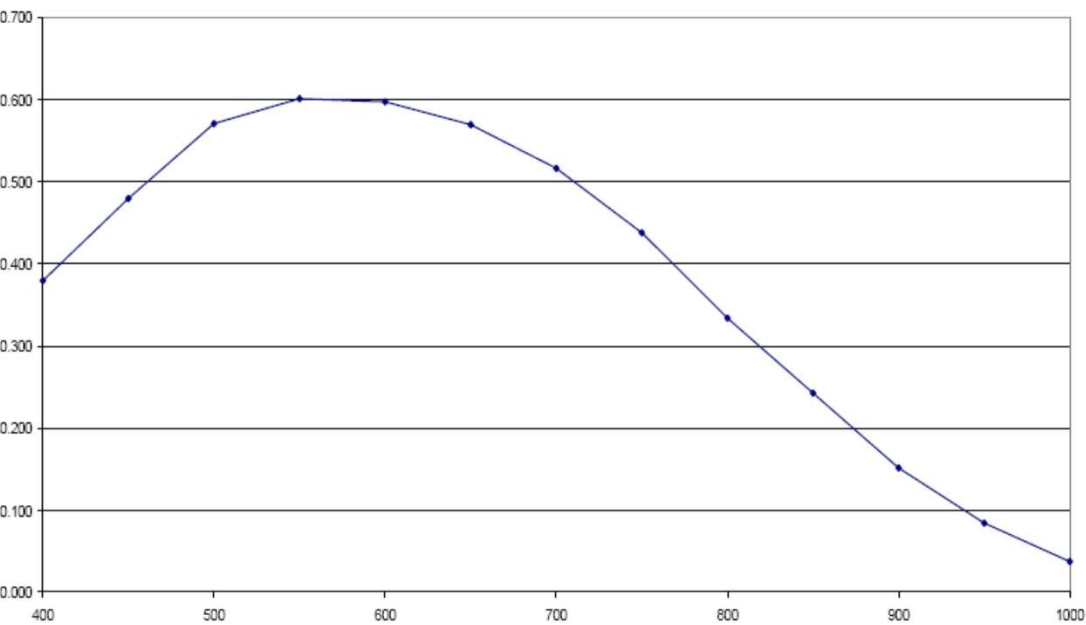
# Wide Dynamic Range Architecture



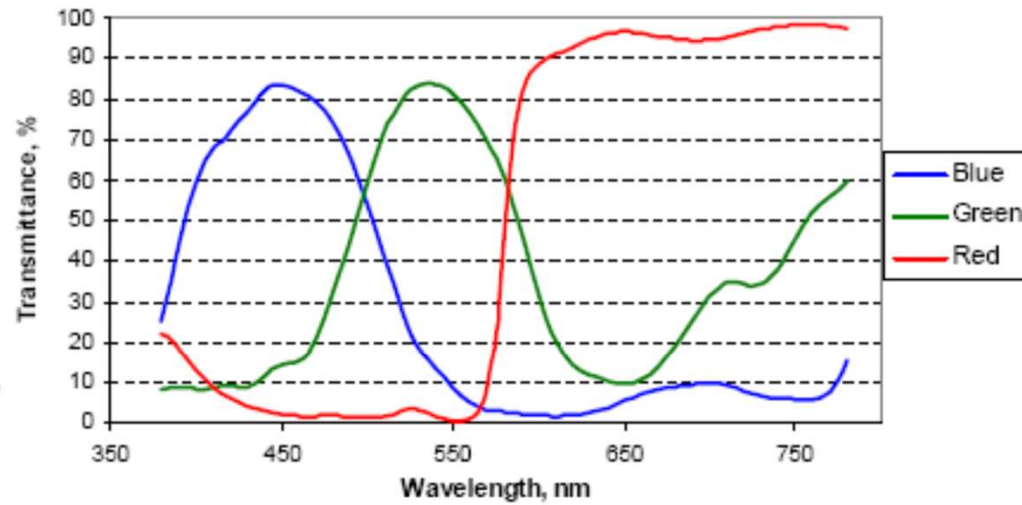
**Column Level Amplifiers and ADCs**



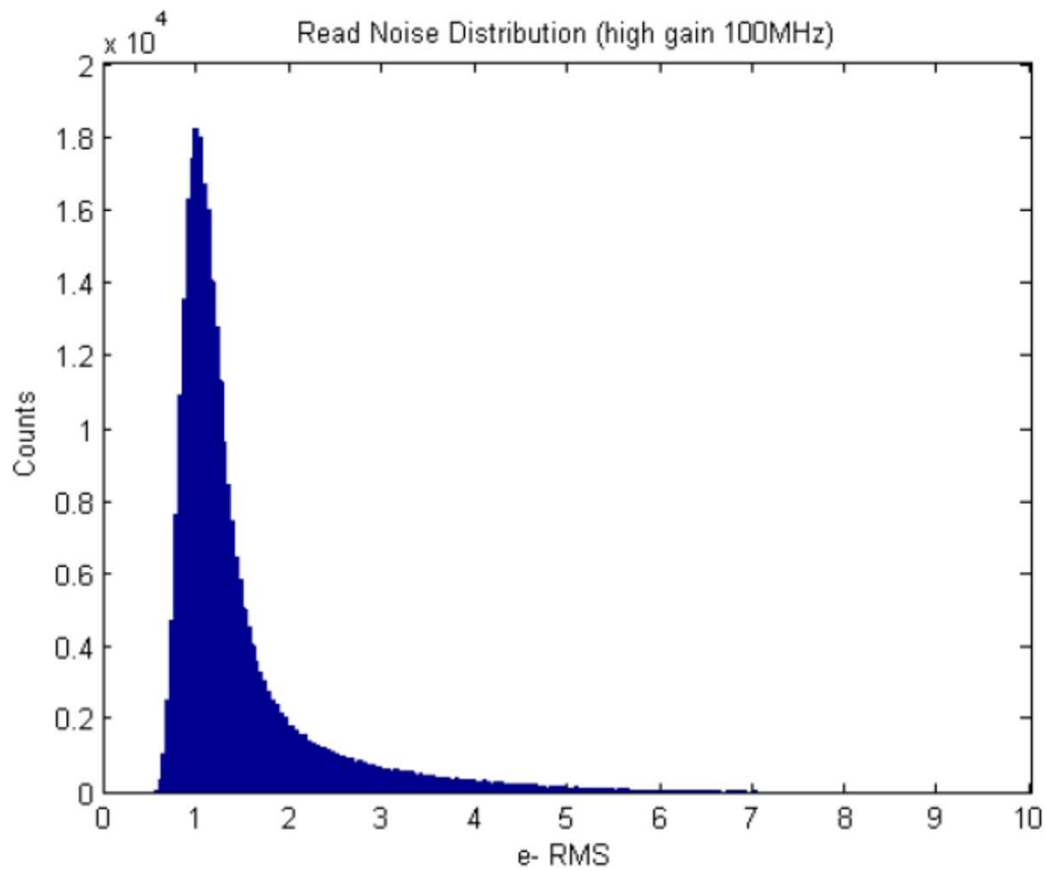
Quantum Efficiency



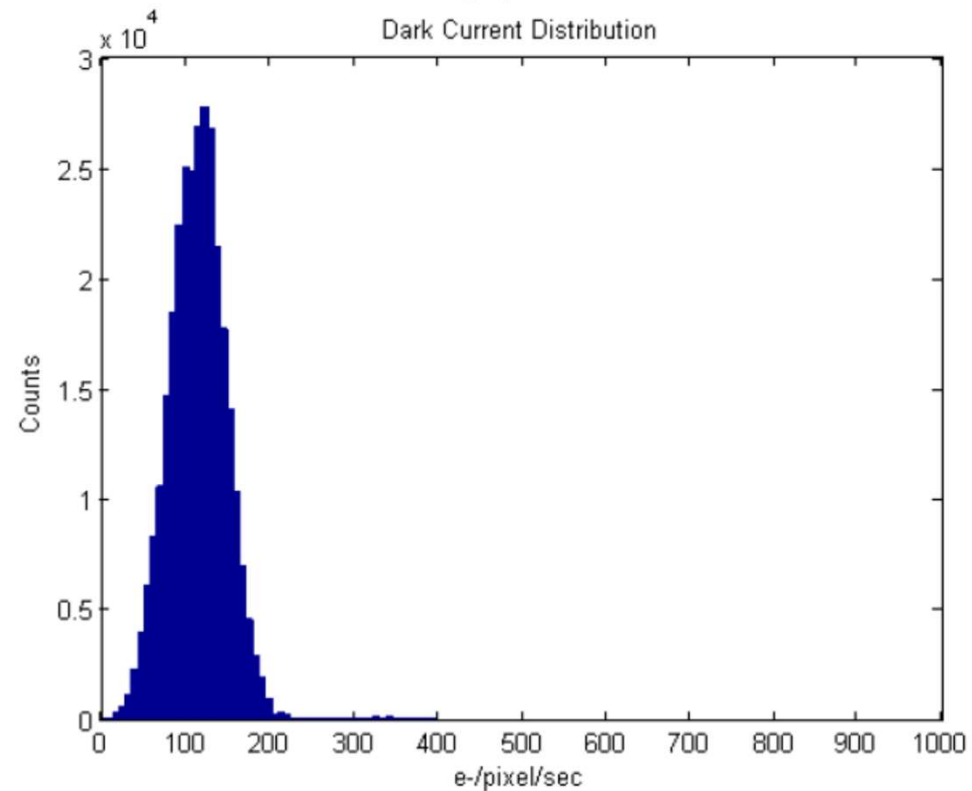
CF Spectral Transmittance



Read Noise Distribution (high gain 100MHz)



Dark Current Distribution



# Technologies sCMOS

- Capteur sCMOS classe 1 e de bruit ( $0,8^e$  rms)  
Matrice 4T CDS
  - Fairchild Imaging
  - Sony
  - e2v / Teledyne
  - Gpixel
- Camera haute cadence classe 100fps
- La révolution des dernières années en progrès constant susceptible de remplacer toutes les autres technologies

## Spectral response

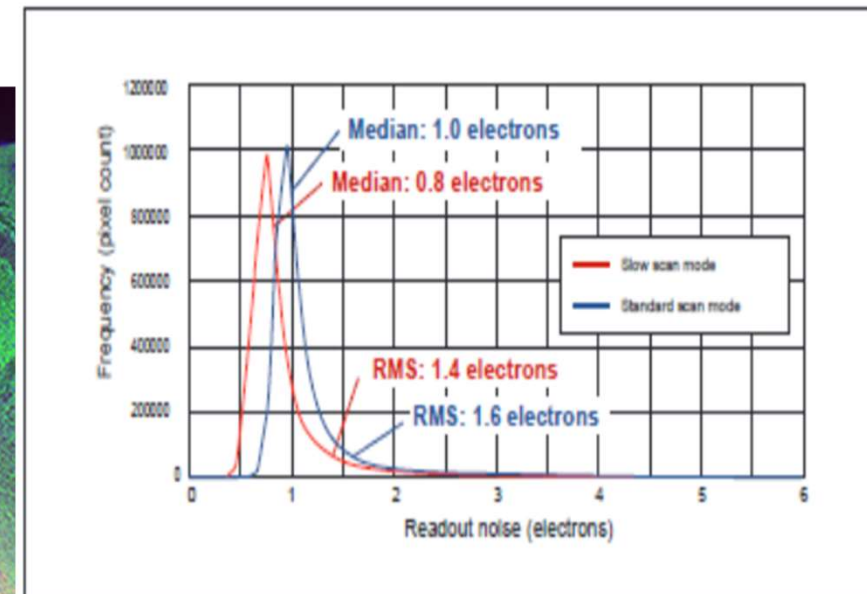
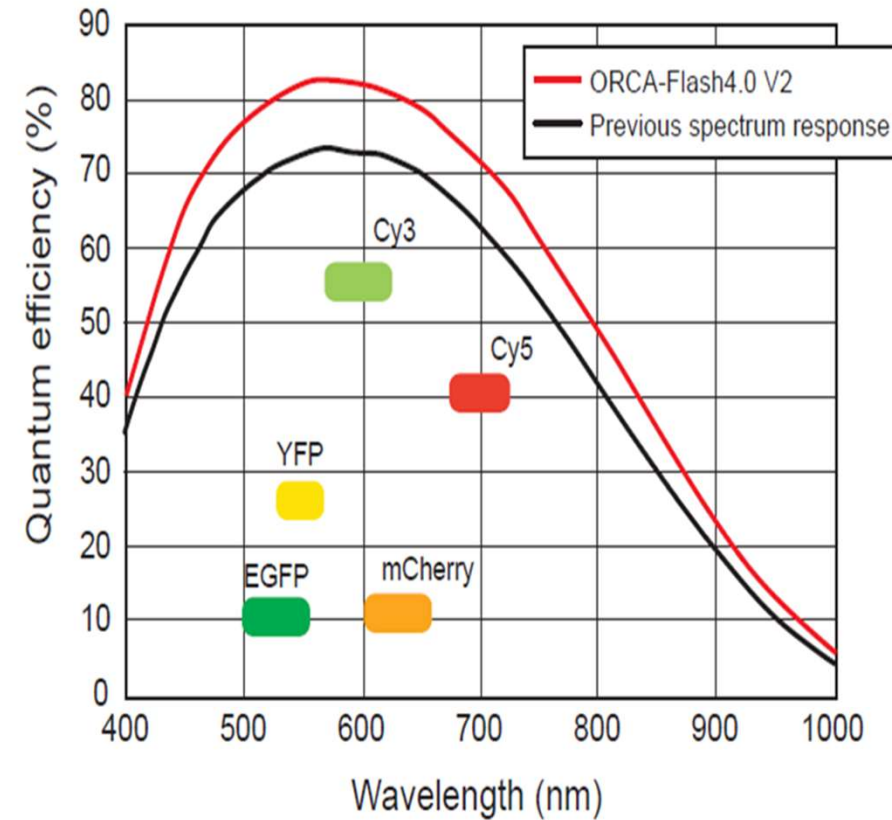


Figure 7. ORCA-Flash 4.0 V2 readout noise distribution



# Figures de Mérites

- ⑩ L'inverse du NEP :  
 $QE/\text{bruit de lecture ou le bruit min}$
- ⑩ La bande spectrale équivalente (FWHM) en octave :  
 $(\lambda_{\max}/\lambda_{\min})^{-1}$
- ⑩ Adaptation du pas pixel à  $\lambda$  :  
 $\lambda/p$
- ⑩ Ou en tenant compte de ON :  
 $\lambda.ON/p$
- ⑩ La cadence image max  
 $\text{fps}/25$
- ⑩ La dimension du capteur rapporté au plan focal instrument  
 $Lo.La/24x36$
- ⑩ La quantité de Photoélectrons max collecté / la surface du pixel :  
 $FW/p^2$

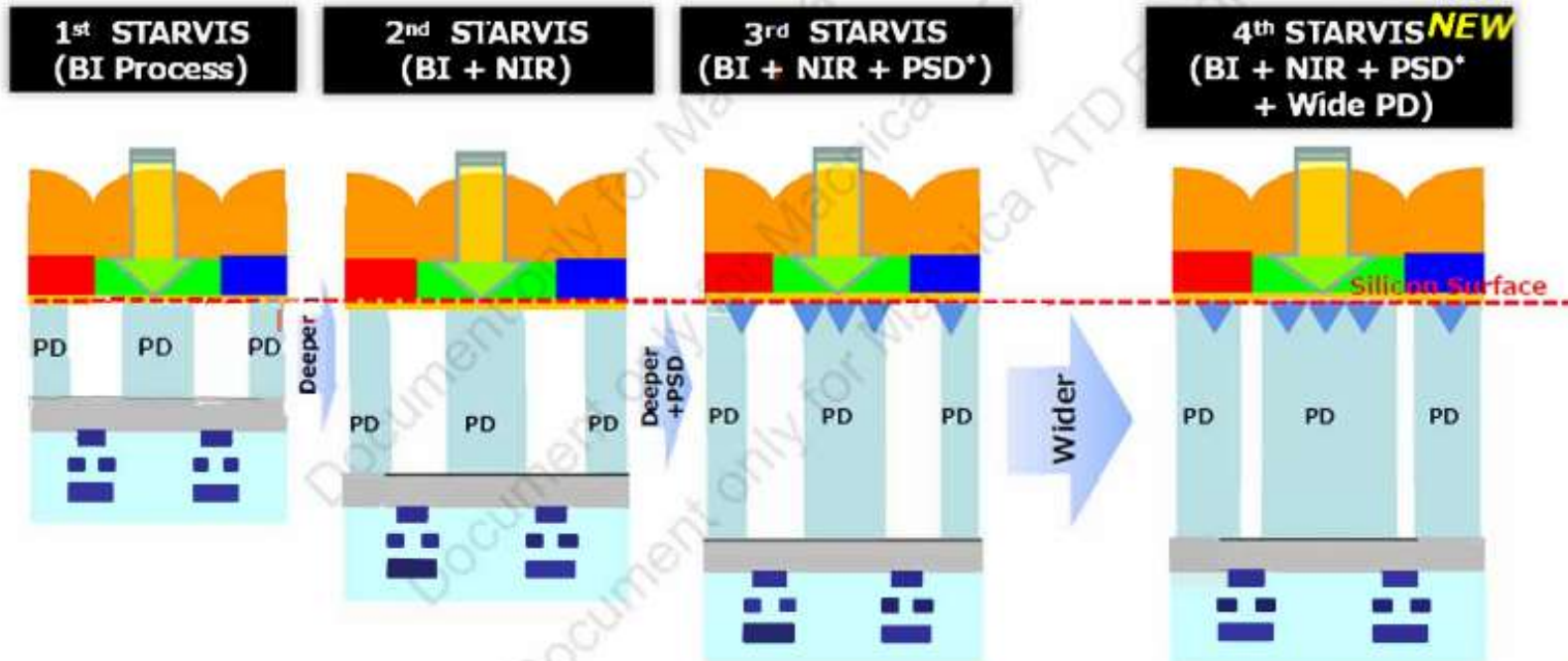
# 2021 Sony roadmap

## STARVIS technology History

**STARVIS**

The STARVIS is back-illuminated pixel technology used in CMOS image sensors for security camera applications. It features a sensitivity of **2000 mV\*** or more per  $1 \mu\text{m}^2$  (color product, when imaging with a  $706 \text{ cd/m}^2$  light source, F5.6 in 1 s accumulation equivalent), and realizes high picture quality in the visible-light and near infrared light regions.

\* 2 times of the definition of EXview HAD CCD II



\*PSD(Pyramid Surface for Diffraction)

# Les derniers capteurs CMOS Sony

- IMX411
- IMX461
- IMX455
- IMX410
- IMX571
- IMX271
- IMX299
- IMX269
- IMX183
- IMX283

## Sony's CMOS Image Sensor Roadmap for Industrial TENTATIVE **SONY**

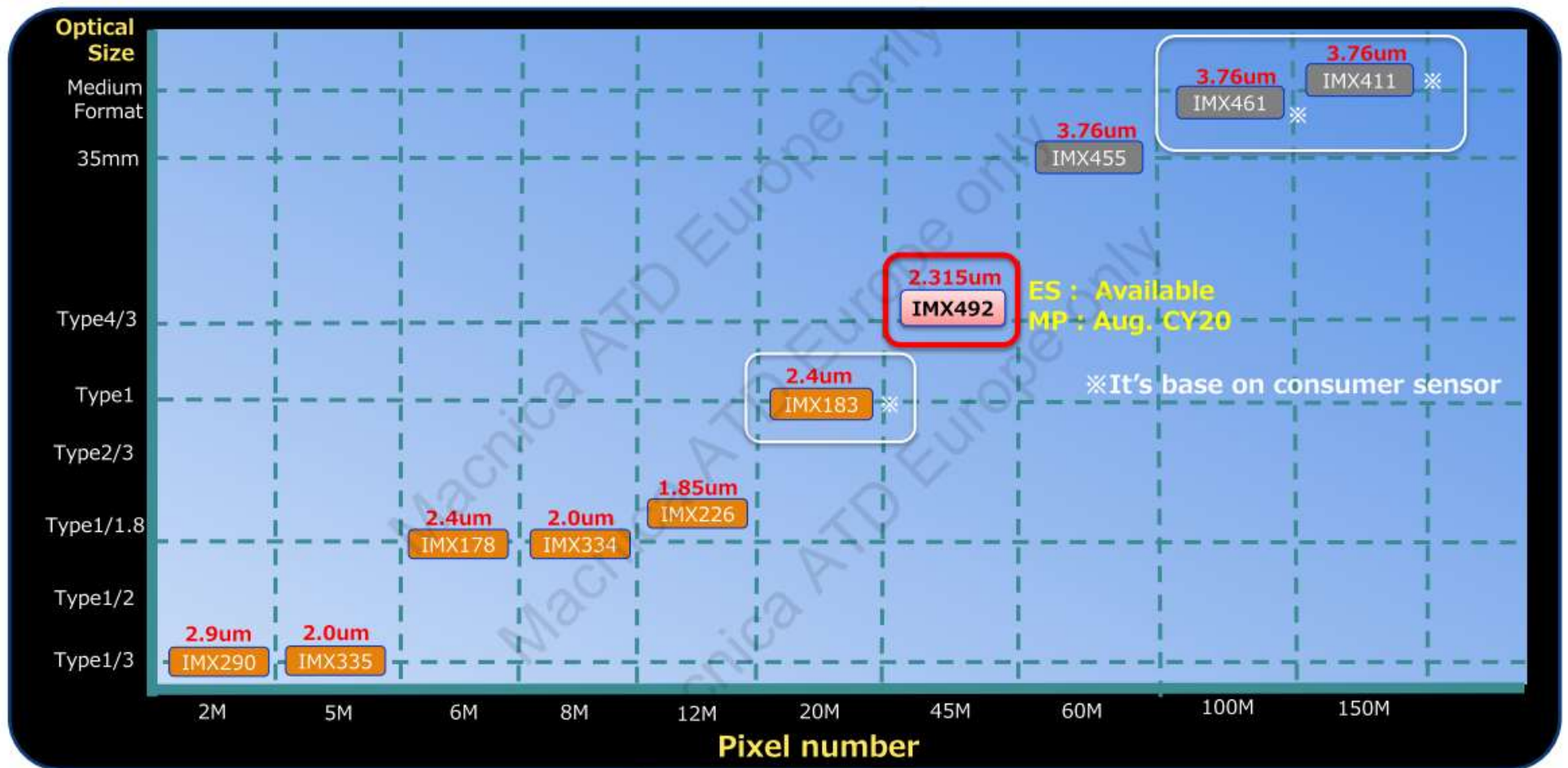
### Sony's CMOS Image Sensor Roadmap for Security

	Available(MP)		CY21 1H	CY21 2H	2.9um	2.9um NIR
Over	61M	<b>IMX455</b> 30fps, SLVS-EC(8)			1.45um	2.0um NIR
	26M	<b>IMX571</b> 60fps, SLVS-EC(8)			monochrome	1.45um NIR
	11M	<b>IMX294</b> 120fps, MIPI(4)/SLVS-EC(8)			Other	
	9M	<b>IMX533</b> 76fps, SLVS-EC(8)				
1/1.2	8M	<b>IMX485</b> 90fp, MIPI(8)		<b>New</b> <b>IMX585</b> <b>S4<sup>th</sup></b> 90fps, MIPI(8) ES : CY21/3Q MP : CY21/4Q		
	2M	<b>IMX482</b> 90fps, MIPI(8)				
1/1.8	12M	<b>IMX226</b> 40fps, LVDS(10)	<b>IMX226(mono)</b> 40fps, LVDS(10)			
	8M	<b>IMX334</b> 60fps, MIPI(8)	<b>IMX334(mono)</b> 60fps, MIPI(8)			
	6M	<b>IMX178</b> 60fps, LVDS(10)	<b>IMX178(mono)</b> 60fps, LVDS(10)			
	4M	<b>IMX347</b> 90fp, MIPI(4)	<b>IMX464</b> <b>S3<sup>rd</sup></b> 90fps, MIPI(4)			
	2M	<b>IMX385</b> 120fps, LVDS(8)/MIPI(4)				
1/3	12M	<b>IMX412</b> 60fps, MIPI(4)				
	8M	<b>IMX415</b> 90fps, MIPI(4)	<b>IMX415 (mono)</b> 90fps, MIPI(4)	<b>New</b> <b>IMX515</b> <b>S3<sup>rd</sup></b> 60fps, MIPI(4) ES : CY21/1Q MP : CY21/3Q		
	5M	<b>IMX335</b> 60fps, MIPI(4)	<b>IMX335(mono)</b> 60fps, MIPI(4)	<b>New</b> <b>IMX715</b> <b>S3<sup>rd</sup></b> 90fps, MIPI(4) ES : CY21/2Q MP : CY21/4Q		
	2M	<b>IMX327</b> 60fps, MIPI(4),LVDS(4)	<b>IMX307</b> 60fps, MIPI(4)/LVDS(4)	<b>IMX462</b> <b>S3<sup>rd</sup></b> 120fps, MIPI(4) LVDS(8)		

# Rolling Shutter Line Product MAP

TENTATIVE

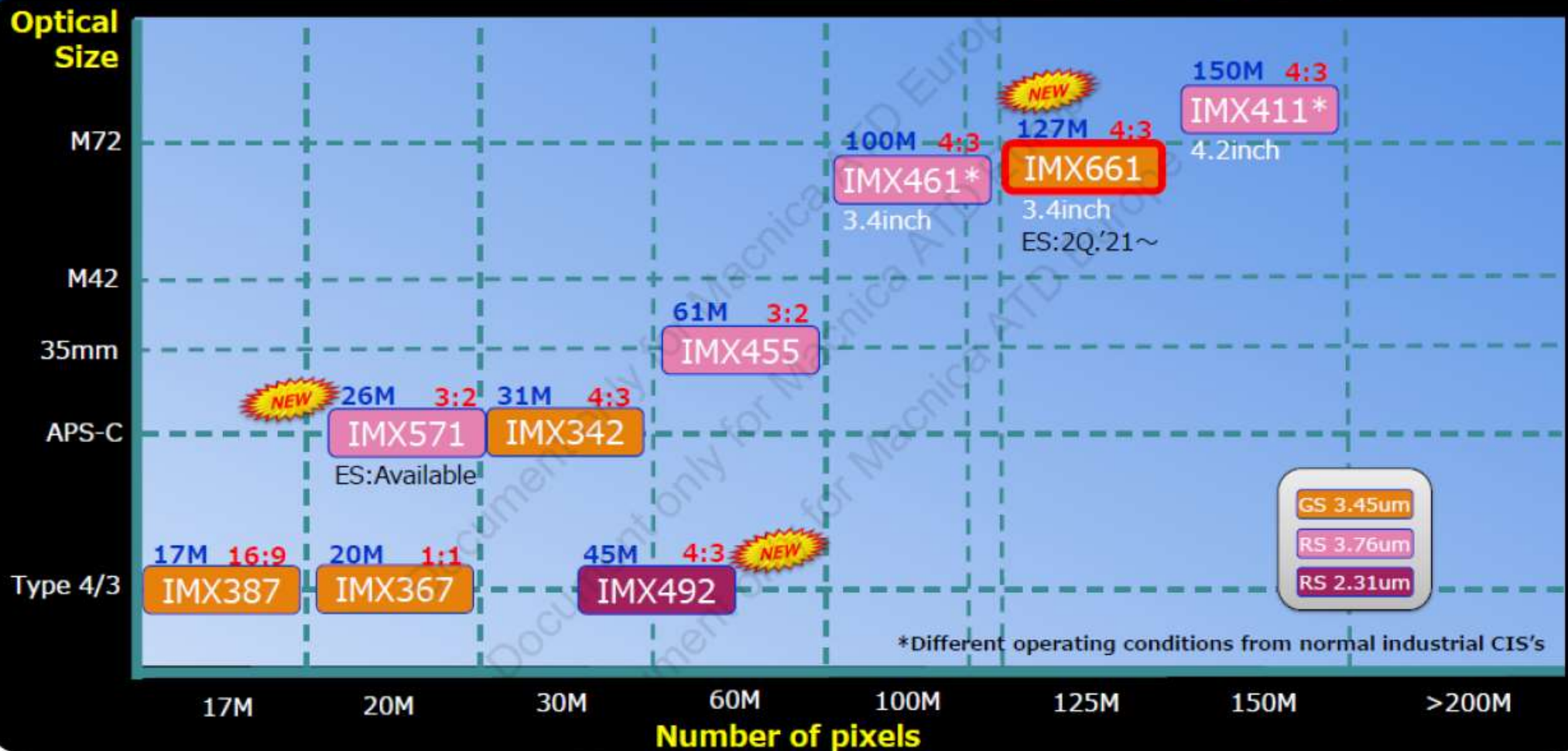
SONY





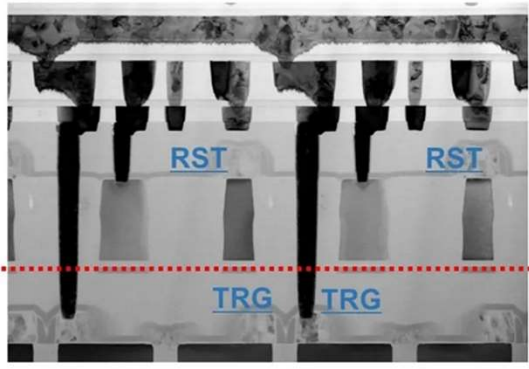
# Large format Sensor Line-Up (GS & RS)

SONY



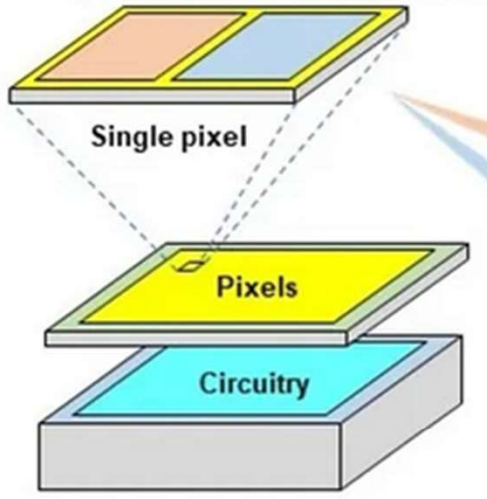
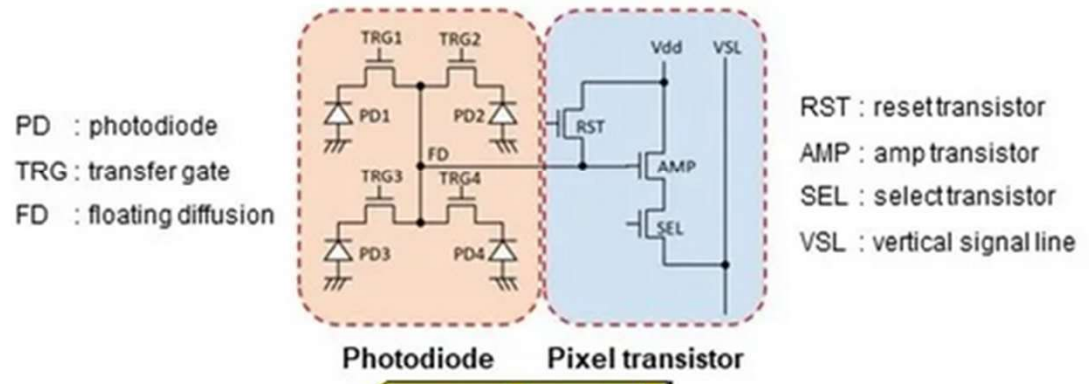
# Sony Develops World's First<sup>\*1</sup> Stacked CMOS Image Sensor Technology with 2-Layer Transistor Pixel

Widens Dynamic Range and Reduces Noise by Approximately Doubling<sup>\*2</sup> Saturation Signal Level<sup>\*3</sup>

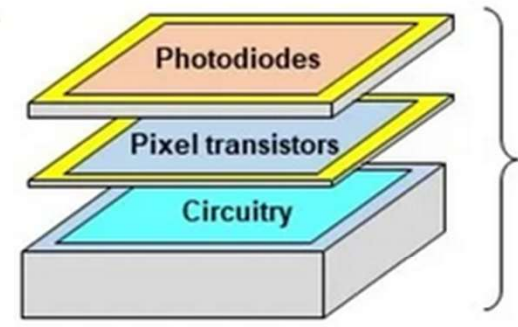


↑ Pixel transistor layer  
↓ Photodiode layer

Cross-section photo of CMOS image sensor with 2-Layer Transistor Pixel technology



Conventional stacked CMOS image sensor



Stacked CMOS image sensor with newly developed 2-Layer Transistor Pixel technology



Sony BI

IMX571(2021)

IMX455(2020)

IMX411(2022)

STARVIS Back Side Illuminated

3.76µm X 3.76µm pitch,

RS 72MHz 2304Mbps, 36dB PGA circuit 16bit

Dimension

22x28

24x36

40x54

mm<sup>2</sup>

Diagonale

43.3

66.7

mm

Nbre de pixels

6244x4168

9568x6380

14304x10768

pixels

9600x6422

pixels

Over scan

33

91

rows

26M

61,17M

151M

pixels

6.84fps 16bit

3.9fps 16bit

1fps 16 bit

I<sub>dark</sub>

0.011<sup>e</sup>/px/s -10°C

0.007 e/pix/s -10°C

0.024% warm pixel

0.005%

video 4K 12bit

video 8K 30fps

ZWO2600MMPro

ZWO6200MMPro

QHY268Mpro

QHY600Pro

QHY411

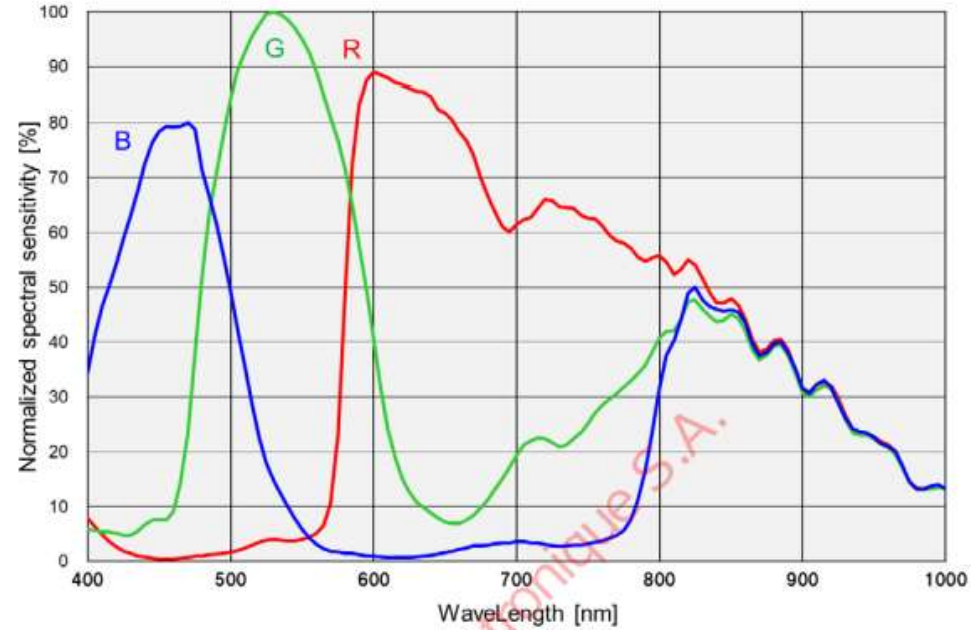
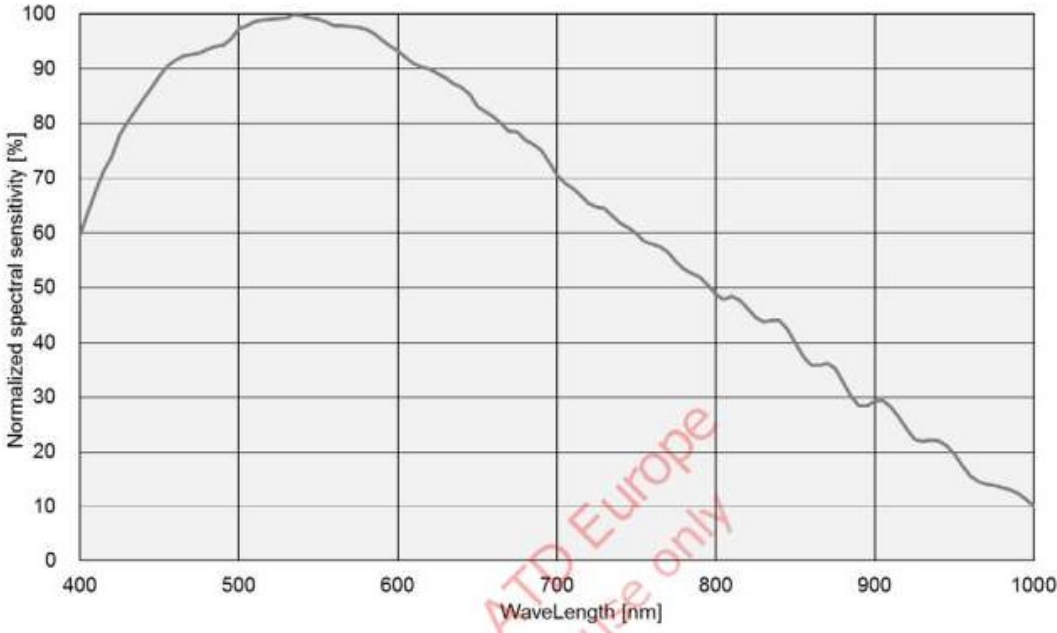
Atik APX60





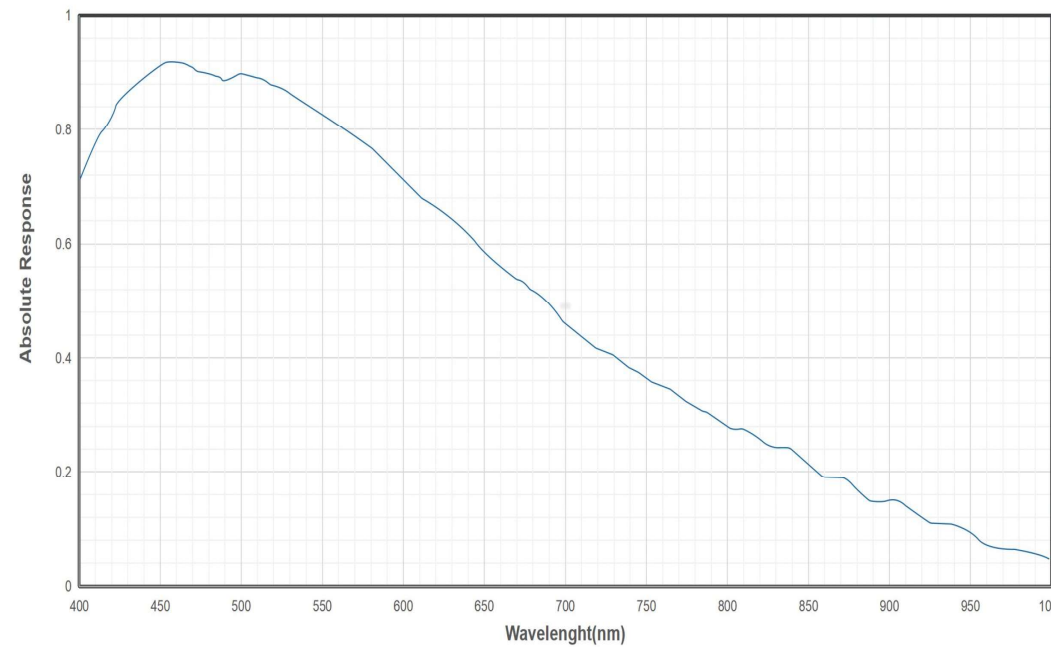
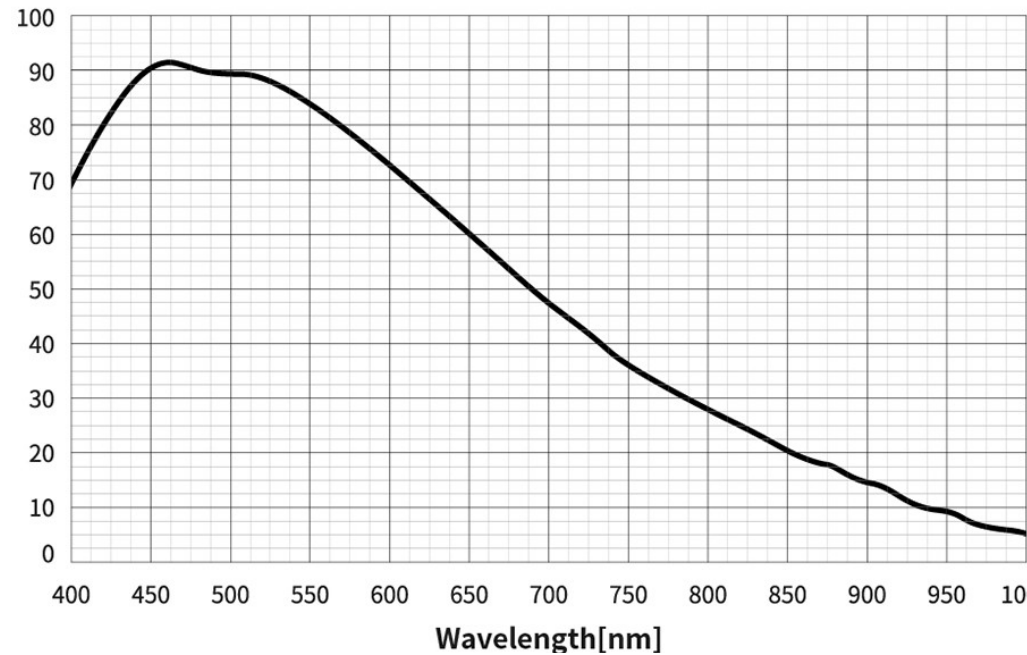
(Include AR coating characteristics but excludes light source characteristics.)

(Include AR coating characteristics but excludes light source characteristics.)

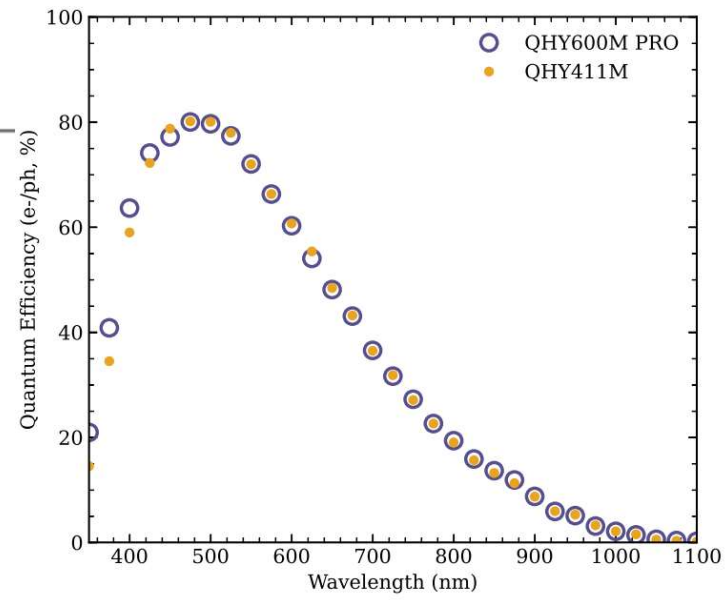
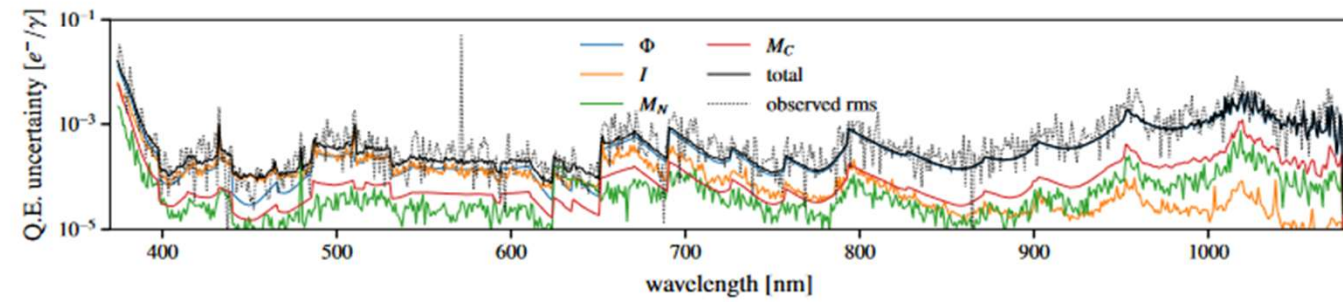
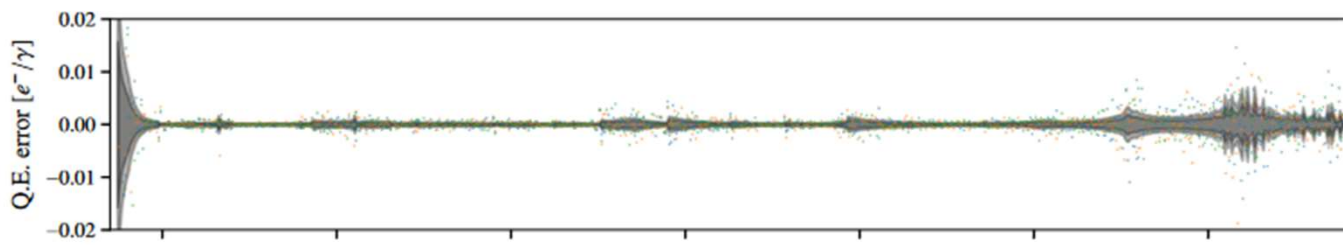
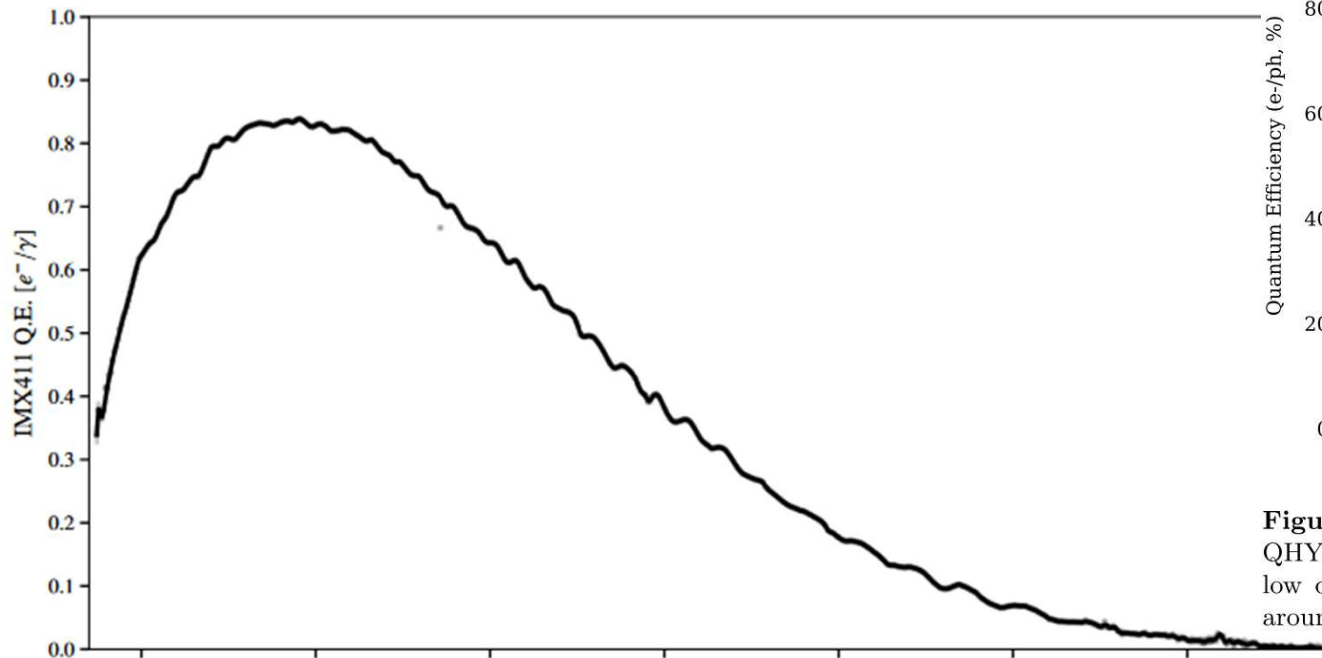


QE [%] — ASI2600MM Pro

QHY600 QE





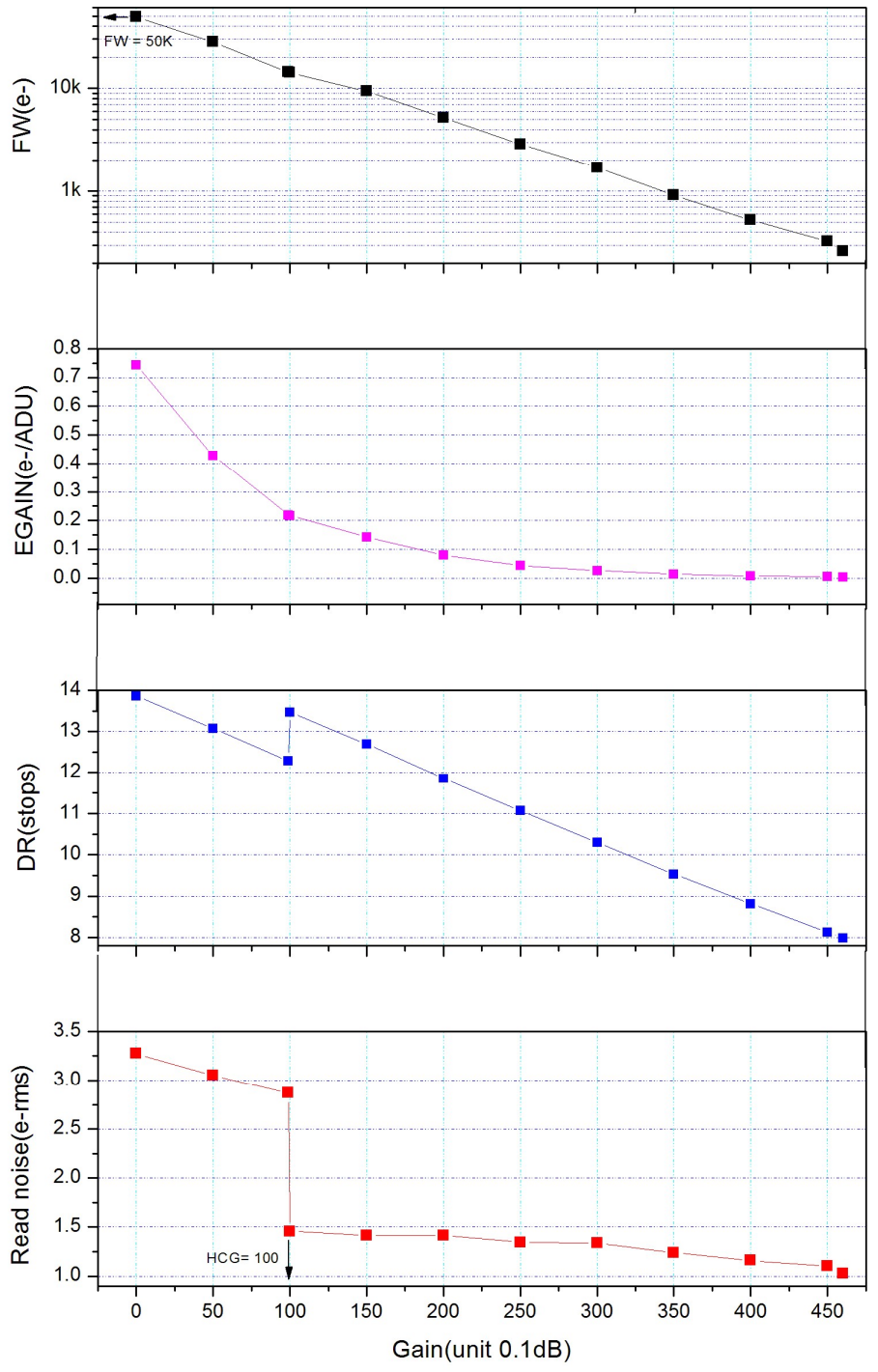
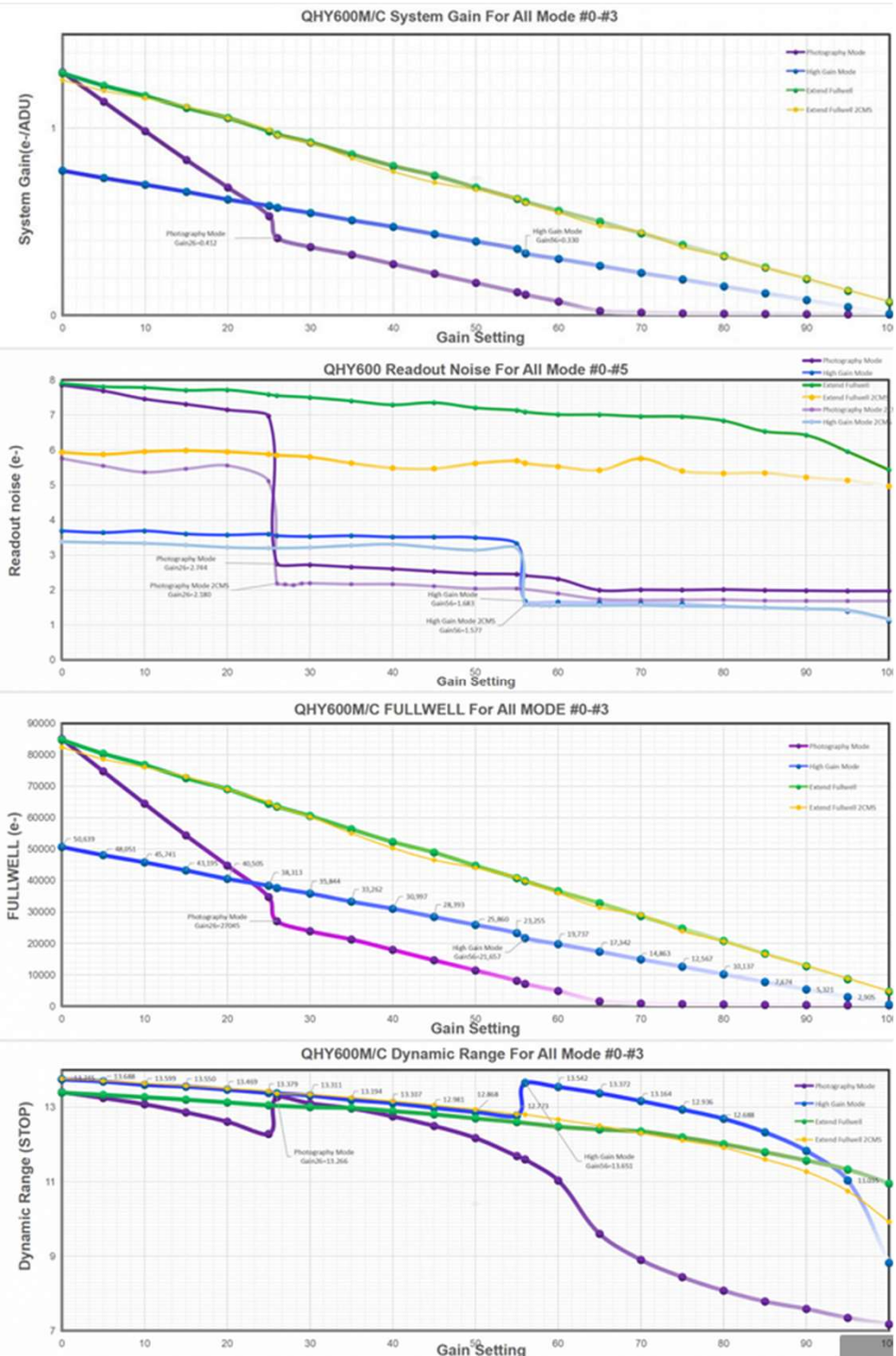


**Figure 10.** Absolute quantum efficiency curves of the QHY600M Pro (blue-open circles) and the QHY411M (yellow dots). The systematic uncertainty is estimated to be around 2%

**Fig. 17.** *Top:* Quantum efficiency curve of the QHY411M camera (window included). Three independent measurements at the same location are superimposed. The solid black line correspond to a smooth B-spline fit to the data. *Middle:* Residuals to the B-spline fit. The three colors correspond to the three independent measurements. *Bottom:* Breakout of the noise in the quantum efficiency measurement according to the origin of the contribution from the four different terms in Eq. (4). The plot also presents the quadratic sum of the four contributions (solid black line) and the RMS of the 3 independent measurements recalled from the middle panel (dotted black line).

# Le gain des cameras CMOS Sony

Read noise, full well, gain and dynamic range for ASI2600MM-Pro



# Le gain des cameras CMOS Sony

- en centibel !?! C'est pas clair
- Gain de X équivaut à un facteur de multiplication  $M = 10^{X/200}$ 
  - Un gain de 0 vaut x1
  - Un gain de 100 vaut x3,16
  - Un gain de 200 vaut x10
  - Un gain de 300 vaut x31,6
  - Un gain de 400 vaut x100

log PGC image diagram is shown below.

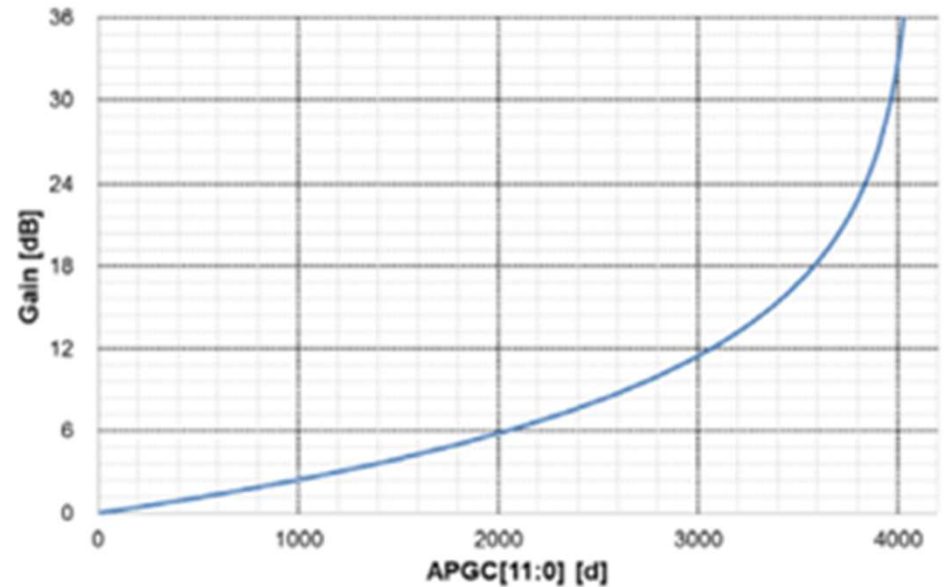
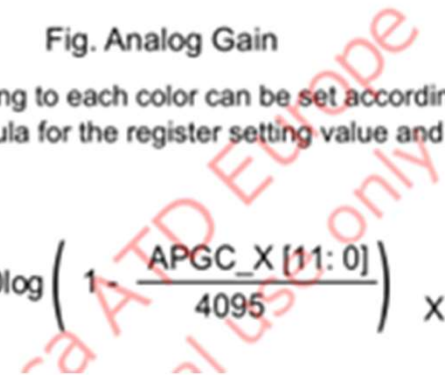


Fig. Analog Gain

Gain of 0 dB to 36 dB corresponding to each color can be set according to the setting value of the registers. The relational formula for the register setting value and the gain is shown below.

$$\text{Gain [dB]} = -20 \log \left( 1 - \frac{\text{APGC\_X [11: 0]}}{4095} \right) \quad X = N, S$$



Gain	Multiplication	FWC	e-/ADU
0	1.0	5.14E+04	0.7843
50	1.8	2.89E+04	0.4410
100	3.2	1.63E+04	0.2480
150	5.6	9.14E+03	0.1395
200	10.0	5.14E+03	0.0784
250	17.8	2.89E+03	0.0441
300	31.6	1.63E+03	0.0248
350	56.2	9.14E+02	0.0139
400	100.0	5.14E+02	0.0078
450	177.8	2.89E+02	0.0044
500	316.2	1.63E+02	0.0025



# La dynamique

- Elle compare le niveau max que le capteur peut collecter rapporté au bruit rms de lecture. Il est exprimé sans dimension par exemple par :
  - le rapport en nombre de photoélectron collectés au maximum rapporté au nombre de charge équivalente au bruit rms
  - ou le rapport des tensions max et rms.
  - Ou encore le niveau max en bit / par le bruit rms en bit
- Ou encore en dB
  - $20 \log$  du rapport précédent

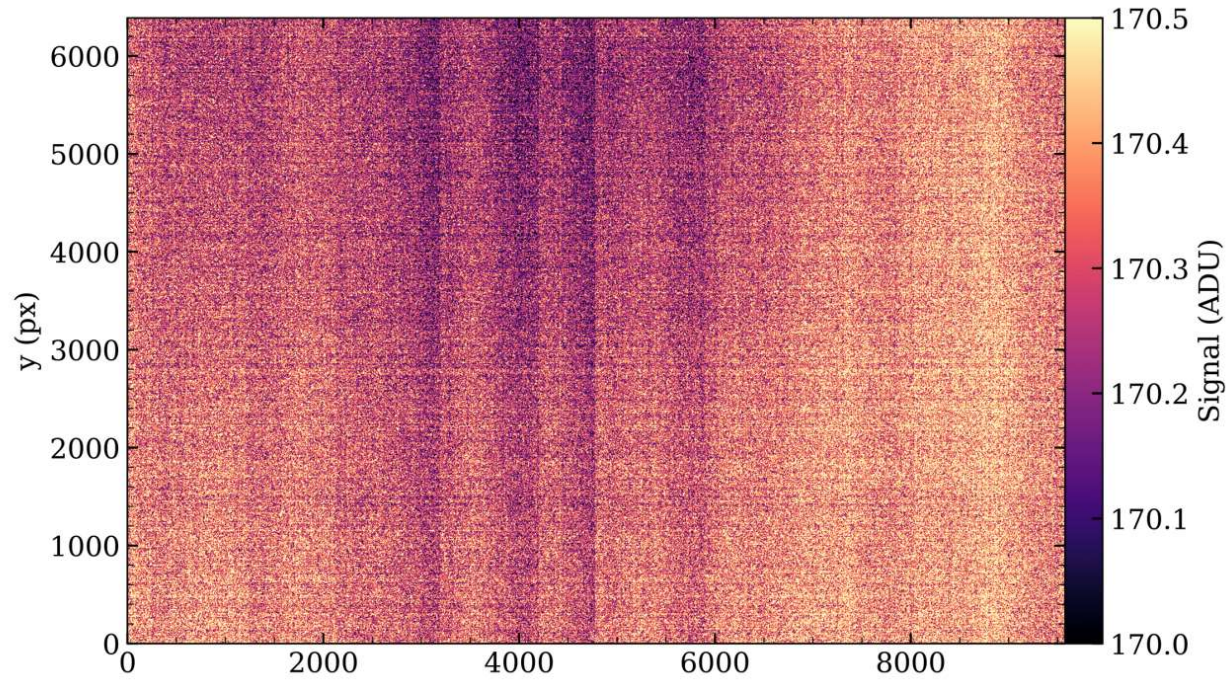
$$\text{dyn}_{\text{imsens}} = \frac{\text{fullwell capacity } [e^-]}{\text{readout noise } [e^-]}$$

$$\text{dyn}_{\text{imsens}} = 20 \cdot \log \left( \frac{\text{fullwell capacity } [e^-]}{\text{readout noise } [e^-]} \right) [\text{dB}]$$

Resolution [bit] x => 2 <sup>x</sup>	Dynamic range A/D conversion [digitizing steps]	Dynamic range A/D conversion [dB]
8	256	48.2
10	1024	60.2
12	4096	72.3
14	16384	84.3
16	65536	96.3

$$\text{SNR}_{\text{large signal}} = \frac{\text{number of photons}}{\sqrt{\text{number of photons}}} = \sqrt{\text{number of photons}}$$

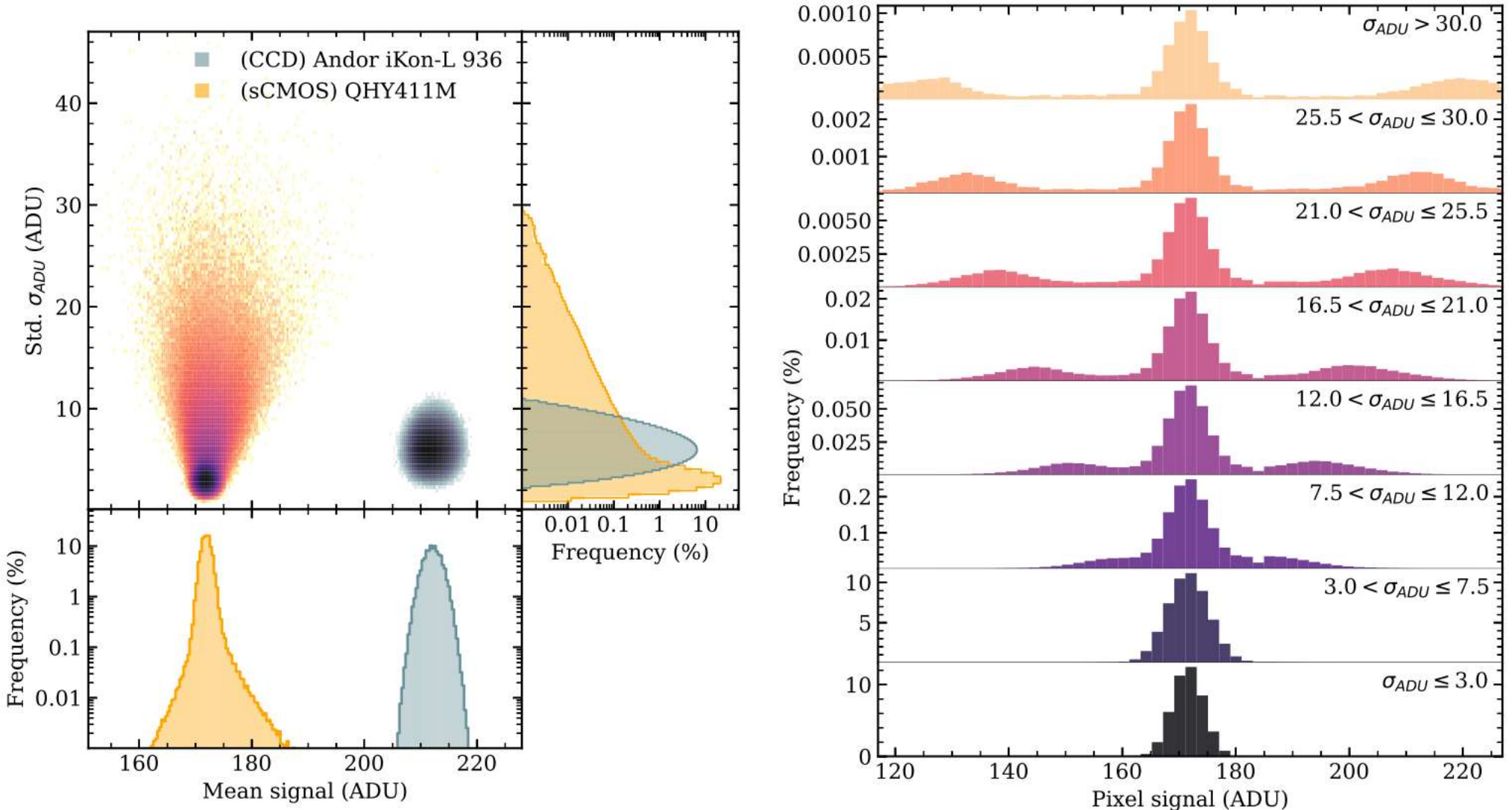
# Bias à $-5^{\circ}\text{C}$



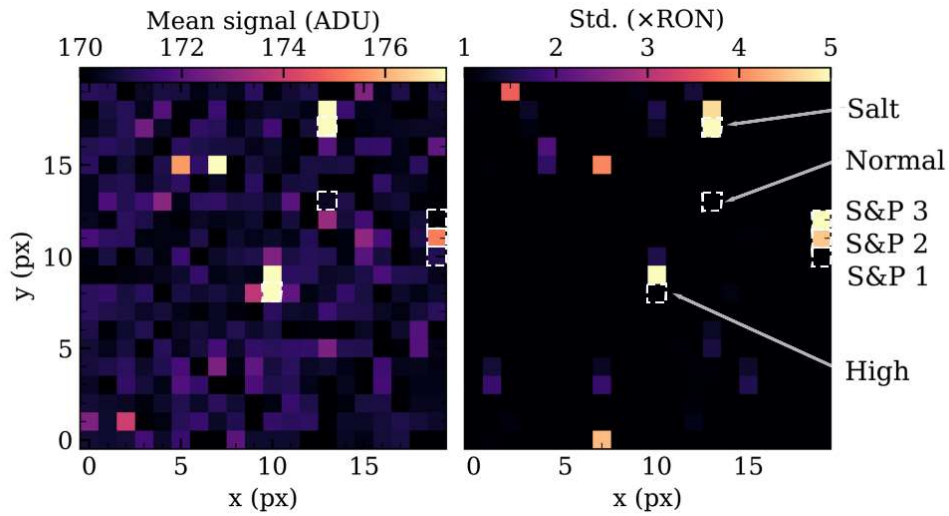
**Figure 2.** Full-frame master bias of the QHY600M Pro (top) and QHY411M (bottom) obtained by  $3\sigma$ -clipping median stacking of 21 bias frames taken consecutively.



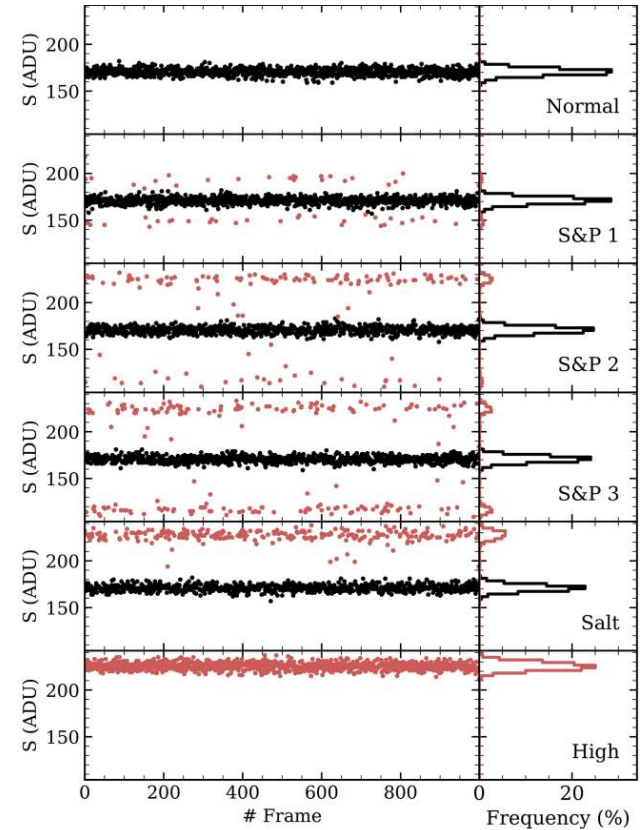
Std <4ADU mean 170-175 ADU, 11% pixels higher std

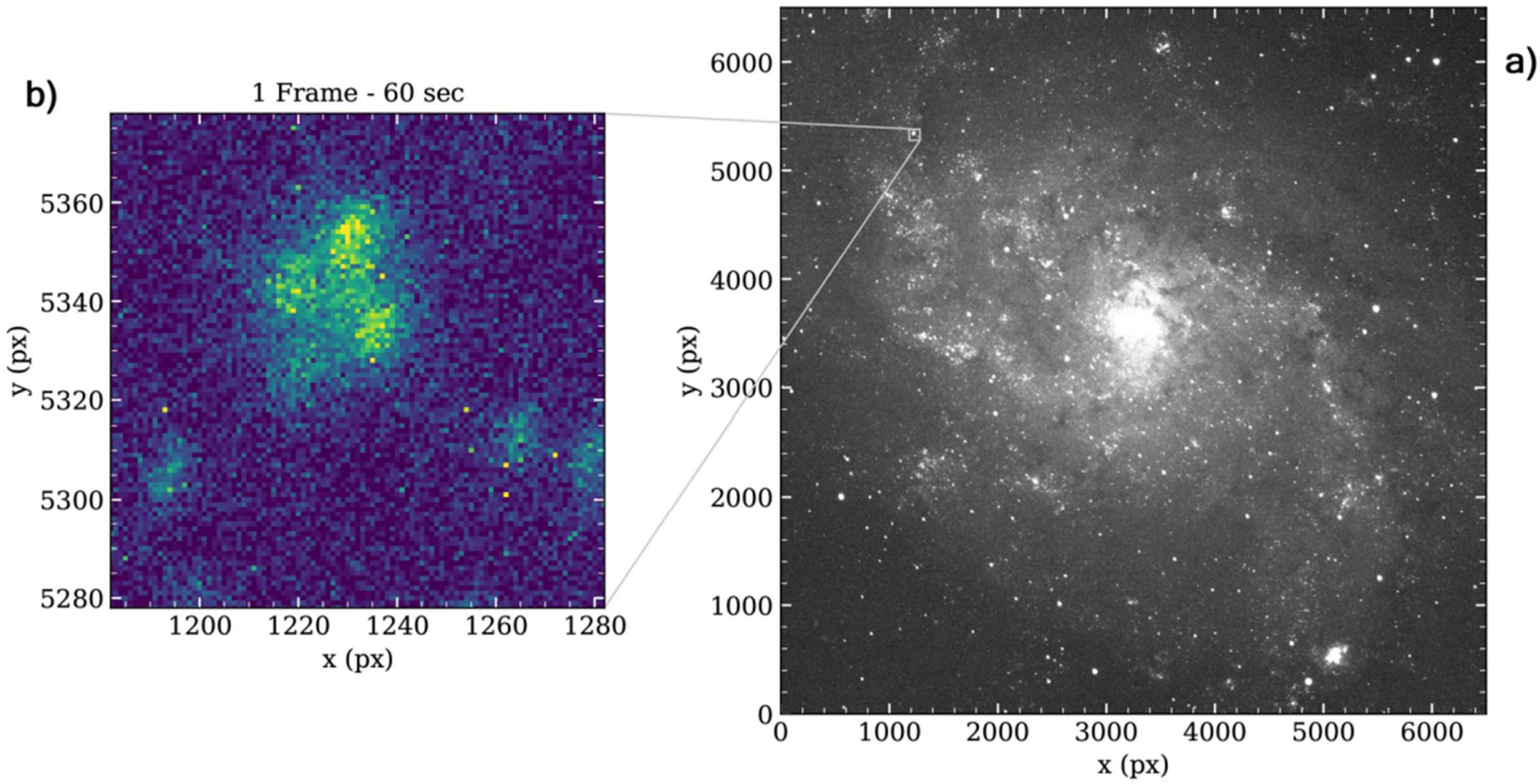


**Figure 3.** Left-hand panel: Standard deviation vs. mean signal of each QHY411M pixel (warm colors) in 21 consecutive bias frames. Color indicates data density on a logarithmic scale. The histogram of the distribution of these two variables is included below and to the right-hand side. For comparison, the same information is shown in blue tones for a CCD, the ANDOR iKon-L 936 BEX2DD. The QHY411M pixels have been grouped according to their standard deviation over the 21 frames and, for each of them, the signal measured in these frames was taken individually. The distributions of each group are given in the right-hand

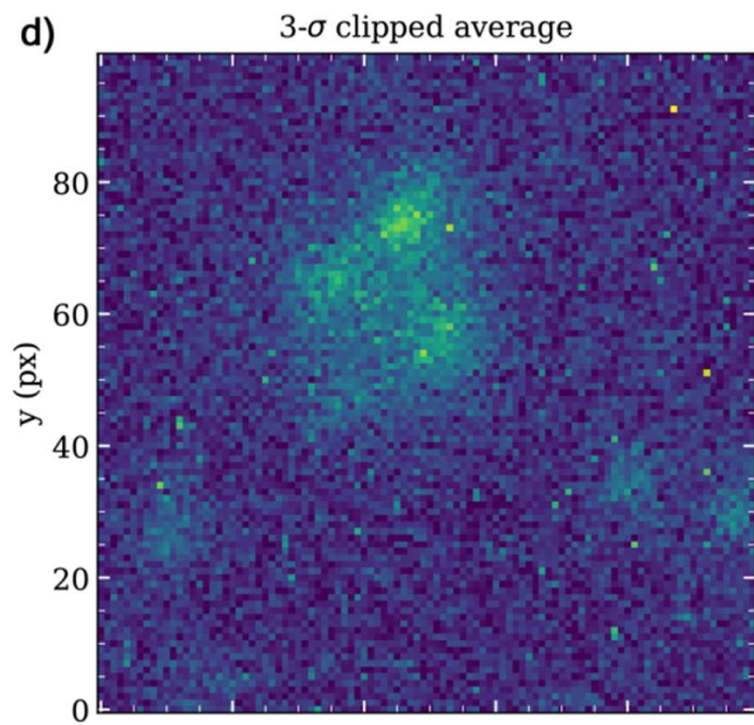
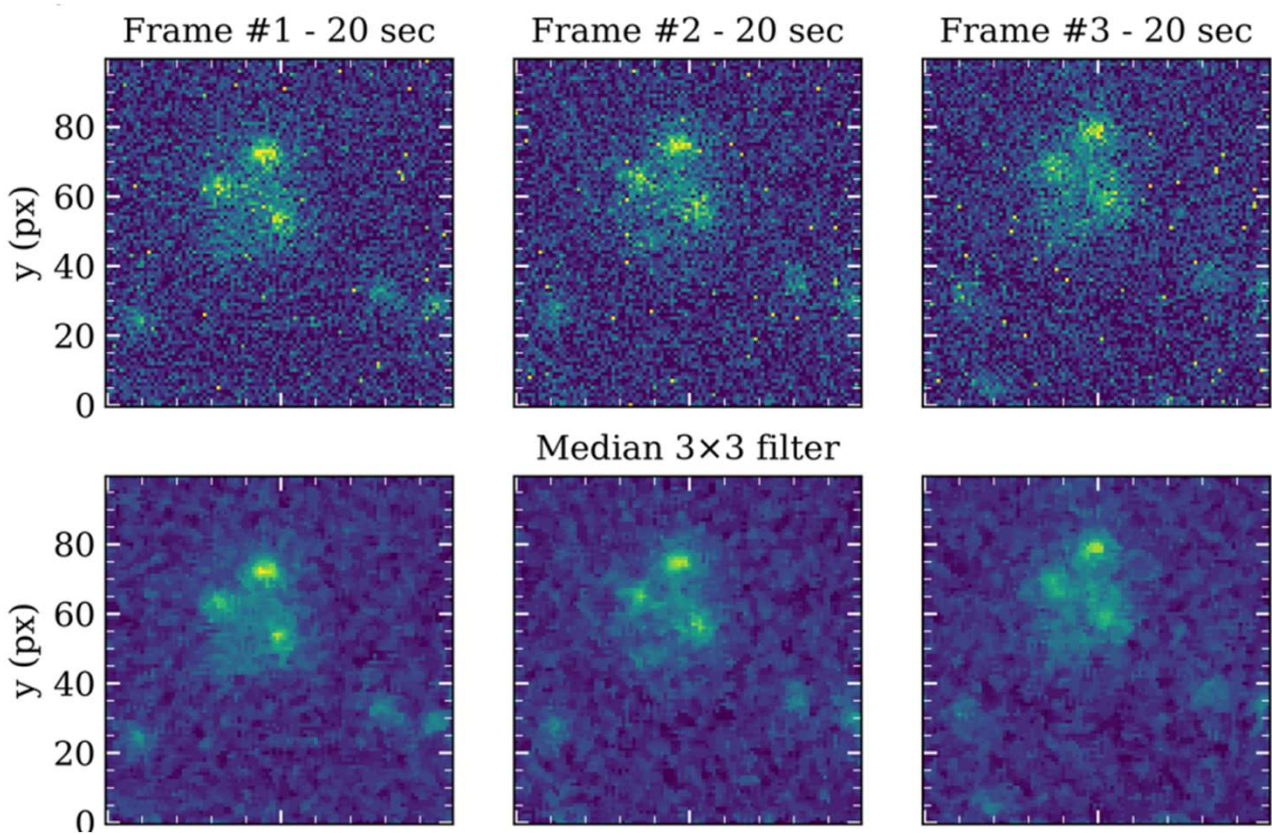


**Figure 4.** Top: temporal mean signal (left-hand) and standard deviation in terms of readout noise (right-hand) obtained in a  $20 \times 20$  pixel central region of 1000 bias frames taken consecutively with the QHY600M Pro. Bottom: signal vs. frame number for some relevant pixels identified in the images above. Points within the average value of the master bias  $\pm 3 \times \text{RON}$  are shown in black, with outliers identified in red. The signal distribution of these pixels is displayed on the right-hand side.

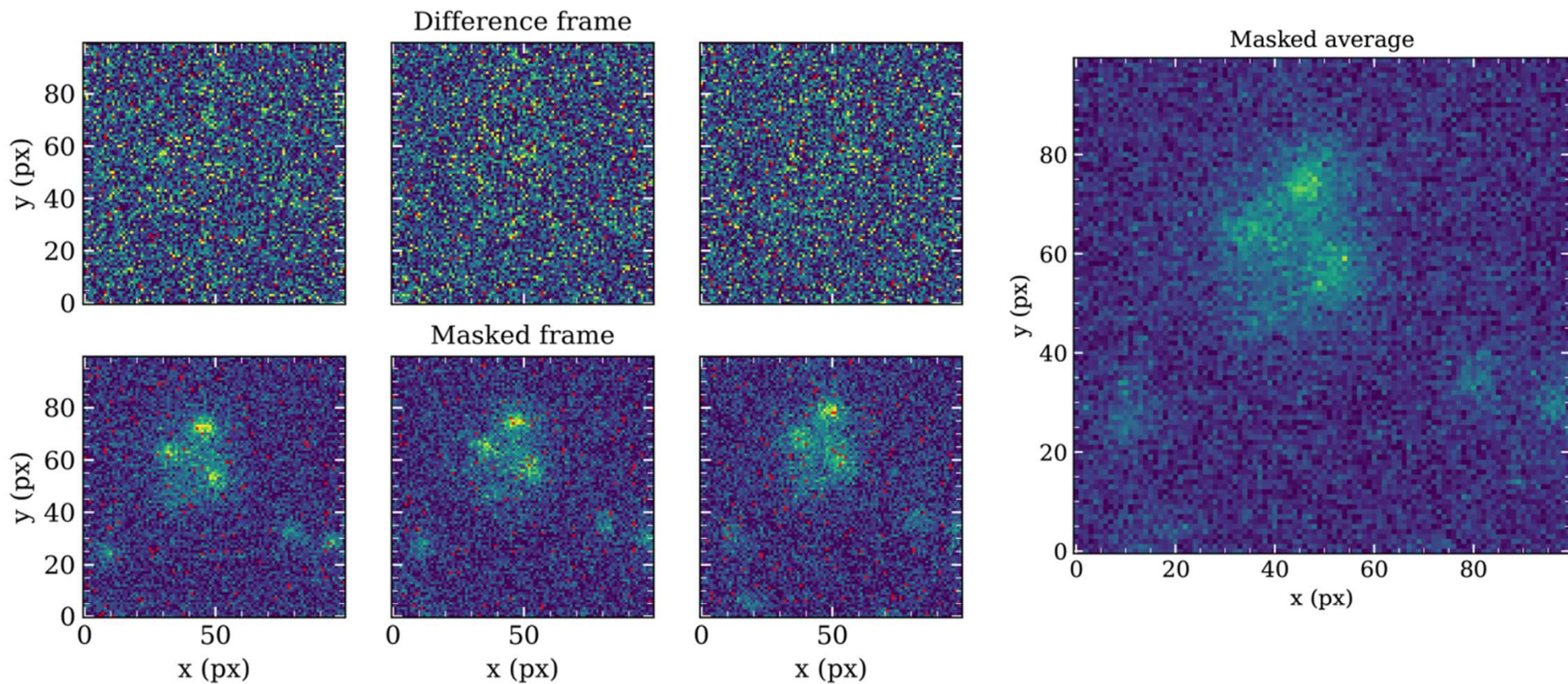












**Figure 15.** (a) Image of M33 taken with the QHY411M at the TAR04 telescope with an exposure time of 60 s. (b) Zoomed region  $100 \times 100$  pixels where the Salt & Pepper effect is visible. (c) From top to bottom:  $3 \times 20$  s sequence of the same zoomed region; convolution with a  $3 \times 3$  median filter; difference between the frames in the previous rows, showing the S&P contaminated pixels in red; and raw frames with those pixels masked in red. (d) Result of stacking the three frames with an average  $3\sigma$ -sigma clipping (top) and with an average after masking the S&P affected pixels.



# Les boîtiers Sony



- Sony  $\alpha$ 7S
  - 24x36 de 12,2 mégapixels
  - 4240x2832 au pas de 8,4 $\mu$ m
  - Vidéo Full HD 50fps et 4K 3840x2160

- Sony  $\alpha$ 7RIII
  - 24x36 de 42,40 mégapixels BSI
  - 7952 x 5304 au pas de 4,5 $\mu$ m
  - 10fps

- Sony  $\alpha$  7RV
  - 24x36 de 61 MP
  - vidéo 8K,
  - système de stabilisation d'image intégré 8 stops,
  - un écran multi-angle de 2 millions de points

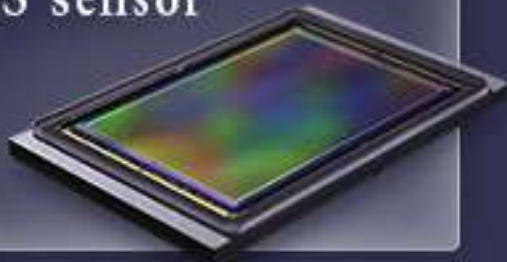
- Sony  $\alpha$ 9 stacked CMOS
  - 24x36 de 24,2 mégapixels
  - 6000 x 4000 au pas de 6 $\mu$ m
  - Stacking 3D sur un ROIC mémoire
  - 20 fps





# Exemples de matrices CMOS

Canon CMOS sensor technology



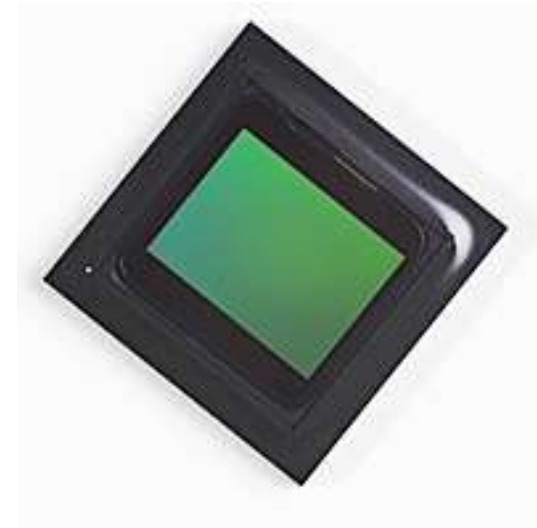
Canon 5Ds et 5Dsr

Matrice CMOS 50,6 millions de pixels

8700 x 5800

24 x 36 mm

Pixels de 4,1 $\mu$ m



Aptina (ex Micron) :

Matrice CMOS 8 Mp

3264 x 2448

4.57 x 3.43 mm

Pixels de 1.4 $\mu$ m

# 2024 Sony CMOS arrays start of the art :

Sony is more than 40% of the market, 450mm wafer foundry

Starvis (BSI, high sensitivity RS)

Pregius (High dynamic GS)

Intégrés par plusieurs fabricants de cameras : ZWO, QHYCCD, ATIK,...

IMX571 : APSC 26Mp, 3.76 $\mu$ m ROI window up to 1125fps 1e noise

IMX455 : 35mm 61Mp, 3.76 $\mu$ m (102Mp et 151Mp) ROI w up to 558fps 1e noise

IMX811 : 247Mp 2.81 $\mu$ m (19240x12840)

IMX462 : 2.1 Mp, 2.9 $\mu$ m, 12bit 0.5e rms 135fps 8bit

Stacked arrays :

IMX900 : GS, 3.2Mpixels, 2.25 $\mu$ m, 8bit 120fps, 12bit 70fps

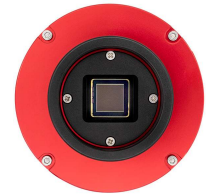
Arrays fitted to high aperture telescopes F/2.8, F/2

# Quelques exemples de bons choix...



	pixel	format im	fw	bruit digit	fps	prix
QHY5III462M/C	IMX462 2.9 $\mu$ m	1920x1080	12ke 0.5 <sup>e</sup>	12 bit	135fps	189-249\$

<https://www.qhyccd.com/planetary-camera-qhy5iii462c/>



ASI533MMPPro	IMX533 3.76 $\mu$ m	3008x3008	50ke 1.0 <sup>e</sup>	14bit	20fps	999\$
--------------	---------------------	-----------	-----------------------	-------	-------	-------

<https://www.zwoastro.com/product/asi533-pro-series/>



ASI2600MMDUO	IMX571 3.76 $\mu$ m	6248x4176	50ke 0.9 <sup>e</sup>	16bit	15fps	2499\$
--------------	---------------------	-----------	-----------------------	-------	-------	--------

<https://www.zwoastro.com/product/asi2600mc-duo/>



ASI6200MM-P	IMX455 3.76 $\mu$ m	9576x6388	51ke 1.2e	16bit	4.93fps	3799\$
-------------	---------------------	-----------	-----------	-------	---------	--------

<https://www.zwoastro.com/product/asi6200/>



# I'm back Film

Module pour Reflex argentique 35mm  
Capteur 20 MP Sony micro 4/3

<https://imback.eu/home/>

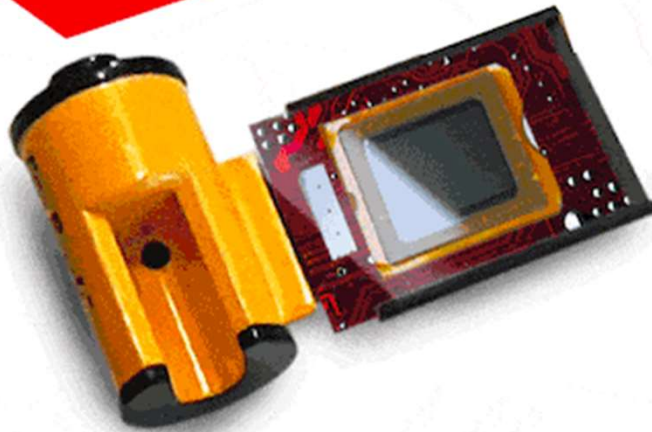
<https://www.indiegogo.com/projects/i-m-back-film#/>



2024 July  
Start delivery

**I'm Back<sup>®</sup> Film**

*Many had thought about it,  
but we made it happen.*



**I'm Back Film<sup>®</sup>**

€705 EUR ~~€947 EUR~~ (25% OFF)

Fr 669 CHF

**Estimated Shipping**

July 2024

4 claimed

Ships worldwide.



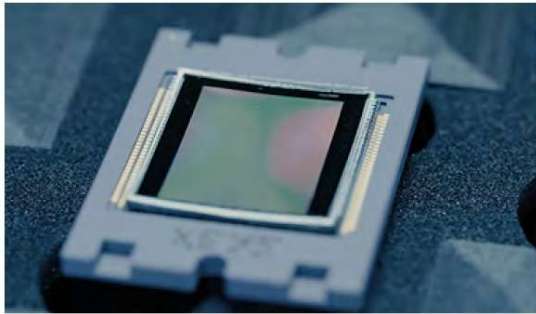
## 5. En route vers le futur :

1. CMOS arrays with photon counting capability
2. SPAD arrays single photon avalanche detectors
3. Event based CMOS arrays allowing sub  $\mu\text{s}$  resolution

# Courbure des matrices de détecteurs

Curve : Emmanuel Hugot

Silina : Wilfried Jahn



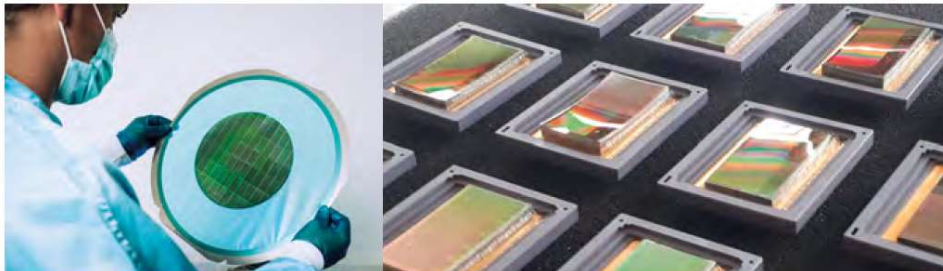
ADVANTAGE 2

## Simpler and less expensive camera

SILINA curved sensors enable to remove optical elements. The camera is simpler, less expensive, and faster to align.

You realize significant savings on components and on alignment time during camera production :

- ▶ Up to **-60%** optical elements
- ▶ Up to **-75%** aspherics
- ▶ Faster metrology & alignment
- ▶ Faster integration



optica

## Gigajot Hamamatsu

Jot : the smallest little thing

from 0,17 to 0,21 e rms

0 1 2 3 4... photons give an integer value

## Photon-number-resolving megapixel image sensor at room temperature without avalanche gain

JIAJU MA,\* SALEH MASOODIAN, DAKOTA A. STARKEY, AND ERIC R. FOSSUM

Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire 03784, USA

\*Corresponding author: [jjaju.ma.th@dartmouth.edu](mailto:jjaju.ma.th@dartmouth.edu)

Received 7 July 2017; revised 22 October 2017; accepted 23 October 2017 (Doc. ID 301901); published 29 November 2017

Introducing the new qCMOS\*

## ORCA-Quest

Photon Number Resolving



“Light is possibility itself.”

— TERUO HIRUMA  
PHOTONICS VISIONARY AND FORMER  
PRESIDENT OF HAMAMATSU PHOTONICS

LOW READOUT NOISE

**0.27** ELECTRONS RMS

ULTRA-QUIET SCAN

HIGH QE

**90%** @475 nm

BACK-ILLUMINATED qCMOS

HIGH RESOLUTION

**4096 × 2304**

9.4 MEGAPIXELS

HIGH SPEED

**120** FRAMES/S

@4096 × 2304 PIXELS (16 BIT)

optica

## Photon-number-resolving megapixel image sensor at room temperature without avalanche gain

JIAJU MA,<sup>\*</sup> SALEH MASOODIAN, DAKOTA A. STARKEY, AND ERIC R. FOSSUM

Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire 03784, USA

<sup>\*</sup>Corresponding author: [jiaju.ma.th@dartmouth.edu](mailto:jiaju.ma.th@dartmouth.edu)

Received 7 July 2017; revised 22 October 2017; accepted 23 October 2017 (Doc. ID 301901); published 29 November 2017

Jot : la plus petite chose en grec

De 0,17 à 0,21 e rms

Le pixel intègre des photons et délivre des bits

Introducing the new qCMOS<sup>®</sup>

# ORCA<sup>®</sup>-Quest

Photon Number Resolving



“Light is possibility itself.”

— TERUO HIRUMA  
PHOTONICS VISIONARY AND FORMER  
PRESIDENT OF HAMAMATSU PHOTONICS

LOW READOUT NOISE

**0.27** ELECTRONS RMS

ULTRA-QUIET SCAN

HIGH QE

**90%** @475 nm

BACK-ILLUMINATED qCMOS

HIGH RESOLUTION

**4096 × 2304**

9.4 MEGAPIXELS

HIGH SPEED

**120** FRAMES/S

@4096 × 2304 PIXELS (16 BIT)



# histogram

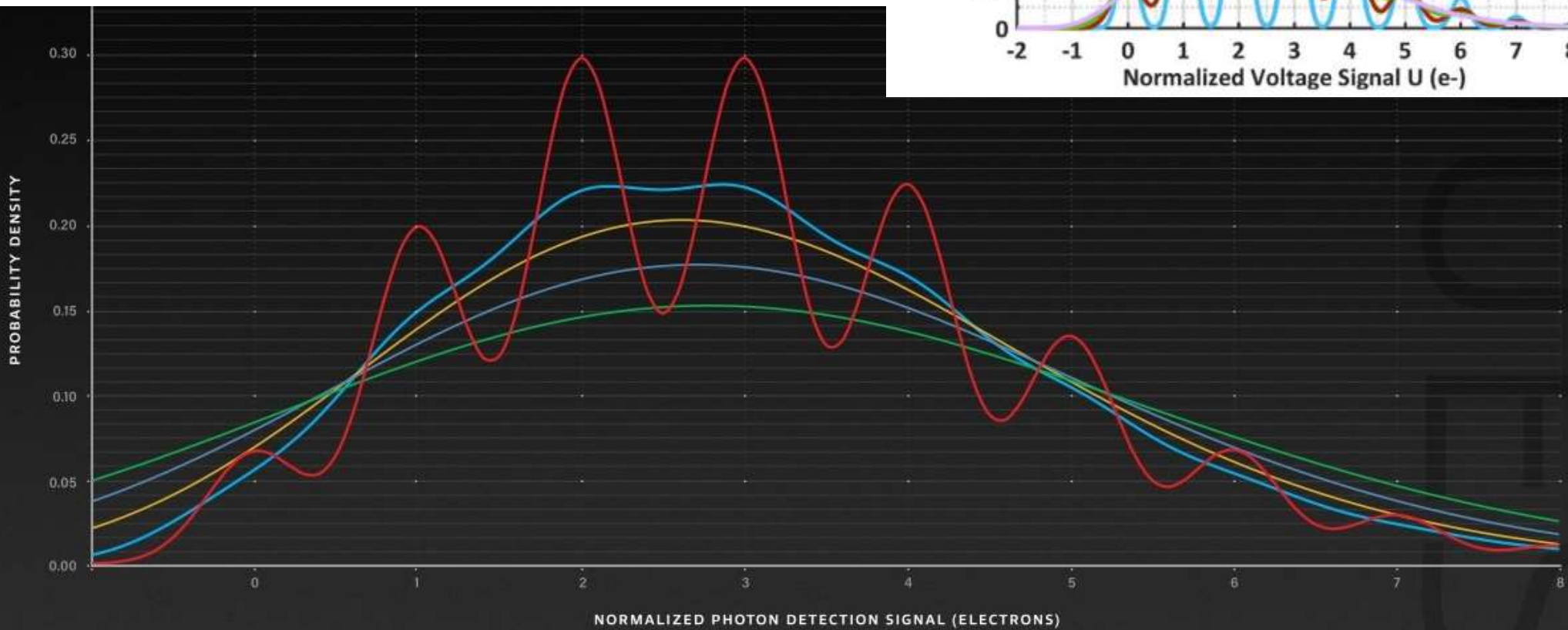
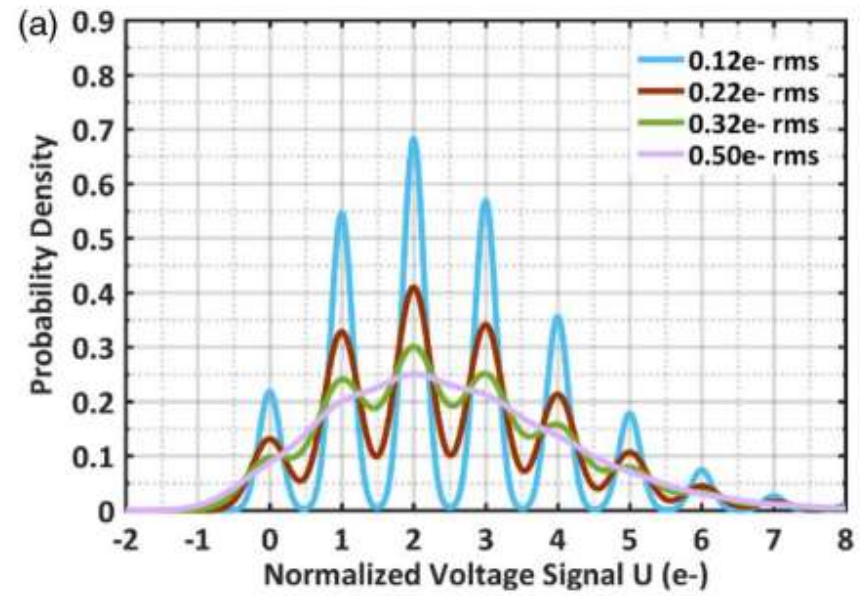


Fig. 1-1

## The effect of camera noise on photon number resolving

All five curves plot the probability distribution for a theoretical signal with a mean of three photoelectrons. The x-axis is the normalized signal in photoelectrons and the y-axis is the probability for a discrete photon number. In red is the calculated distribution for the ORCA-Quest with 0.27 e- rms. All other curves are calculated with increasing read noise: 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 e- rms. As read noise increases, the distribution becomes blurred and there is no distinction between discrete photoelectron numbers. Photon number resolving is impossible even at 0.5 e- rms.

- 0.27 electrons — red
- 0.5 electrons — blue
- 1.0 electrons — yellow
- 1.5 electrons — light blue
- 2.0 electrons — green



**ORCA<sup>®</sup>-Quest**  
Photon Number Resolving

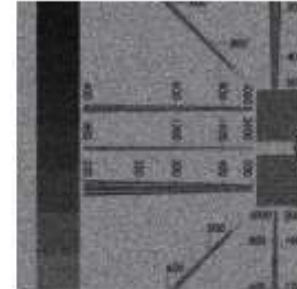
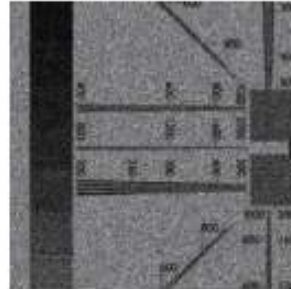
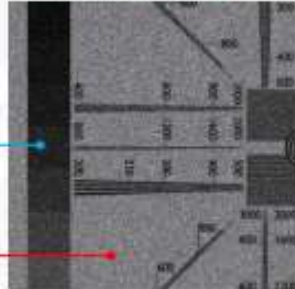
**ORCA<sup>®</sup>-Quest**  
Ultra-Quiet Scan

**EM-CCD camera**

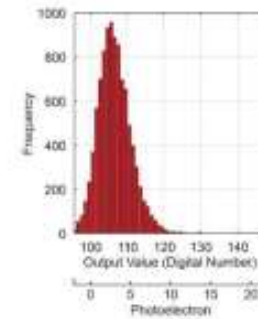
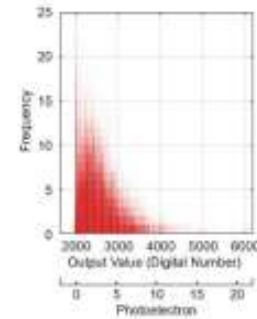
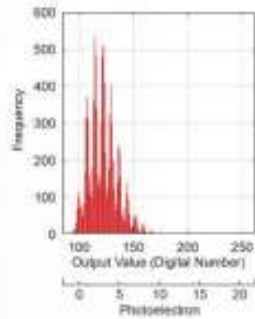
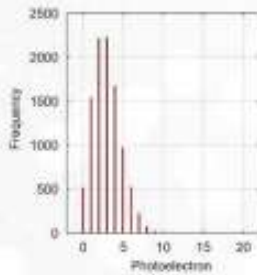
**Gen II sCMOS camera**

Approx. 3 electrons/pixel

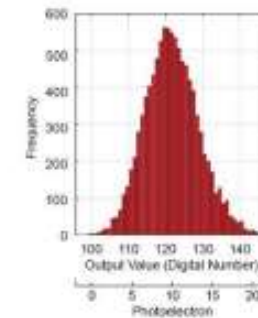
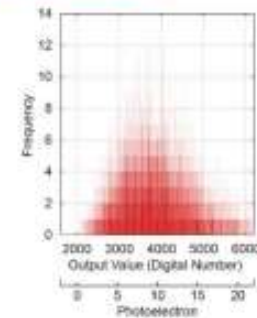
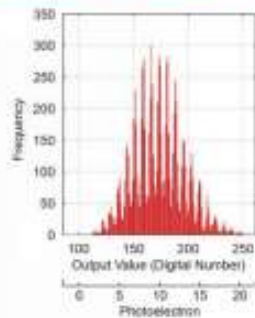
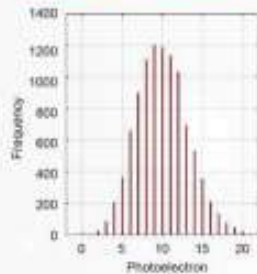
Approx. 10 electrons/pixel



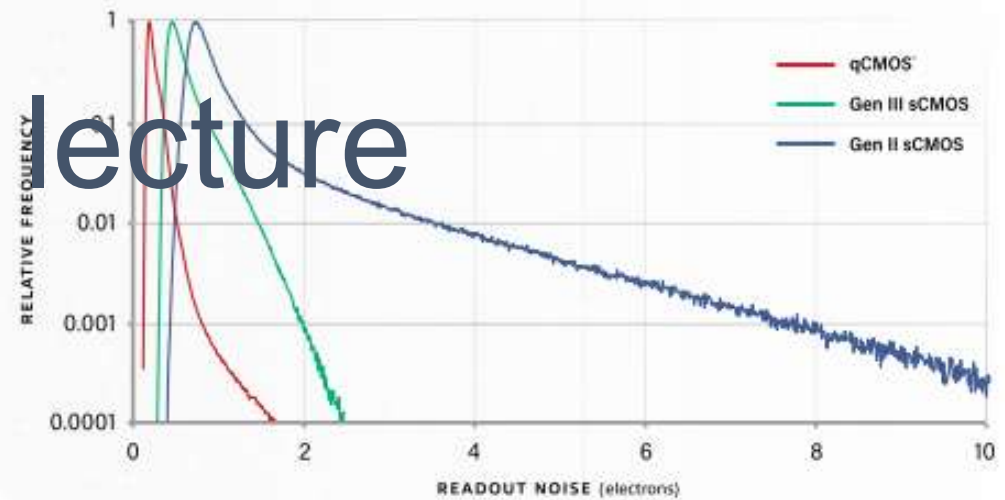
Average number of photoelectrons generated per pixel: 3 electrons



Average number of photoelectrons generated per pixel: 10 electrons



# Bruit de lecture



ORCA-Quest

Intro

qCMOS

Noise

QE

Speed

Software

Specs

Team

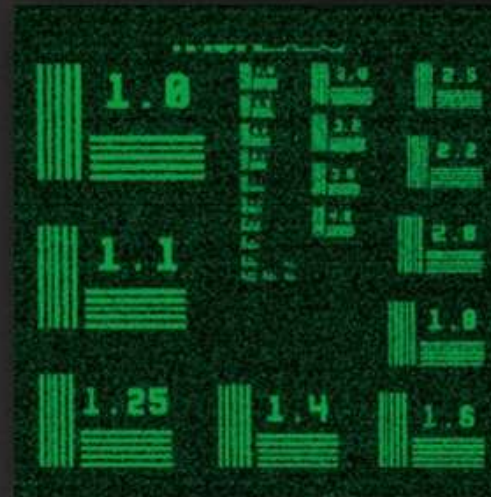
## See what's been hidden in the noise

CONTINUED

### Staying Dark in the Heat

An unavoidable issue with using silicon for sensing photons is that as the sensor heats up, electrons can be generated in the detector that are indistinguishable from electrons generated from photons. There is a known amount of this dark current for each sensor that depends on the particular chemistry of the silicon substrate and is expressed as electrons/pixel/second. This value can be reduced by cooling the sensor. But cooling is a complex part of camera design and the goal of sensor manufactures is to create a detector with very little dark current even with little or no cooling. This is yet another breakthrough for the ORCA-Quest. With  $0.006 e^-/p/s$  dark current at  $-35^\circ C$ , the contribution of dark noise to the overall noise is very small and is low enough for exposures beyond a few seconds. This is yet another area of unexplored terrain for CMOS imaging and the ORCA-Quest, by staying dark, can light the way.

ORCA-Quest



Gen II sCMOS camera

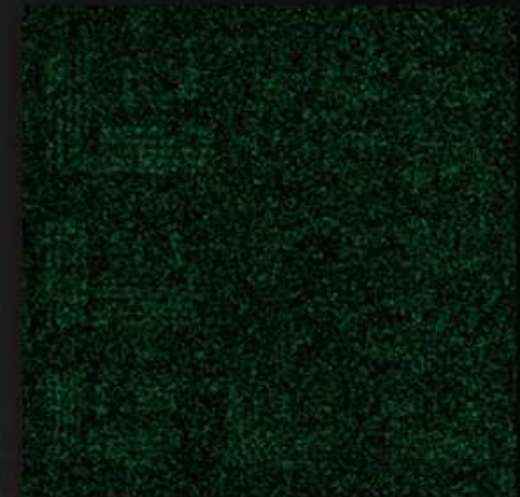


Fig. 2-3

Image quality comparison at long exposure time (pseudo-color)

Exposure time: 15 min (10 s x 90 times integration)

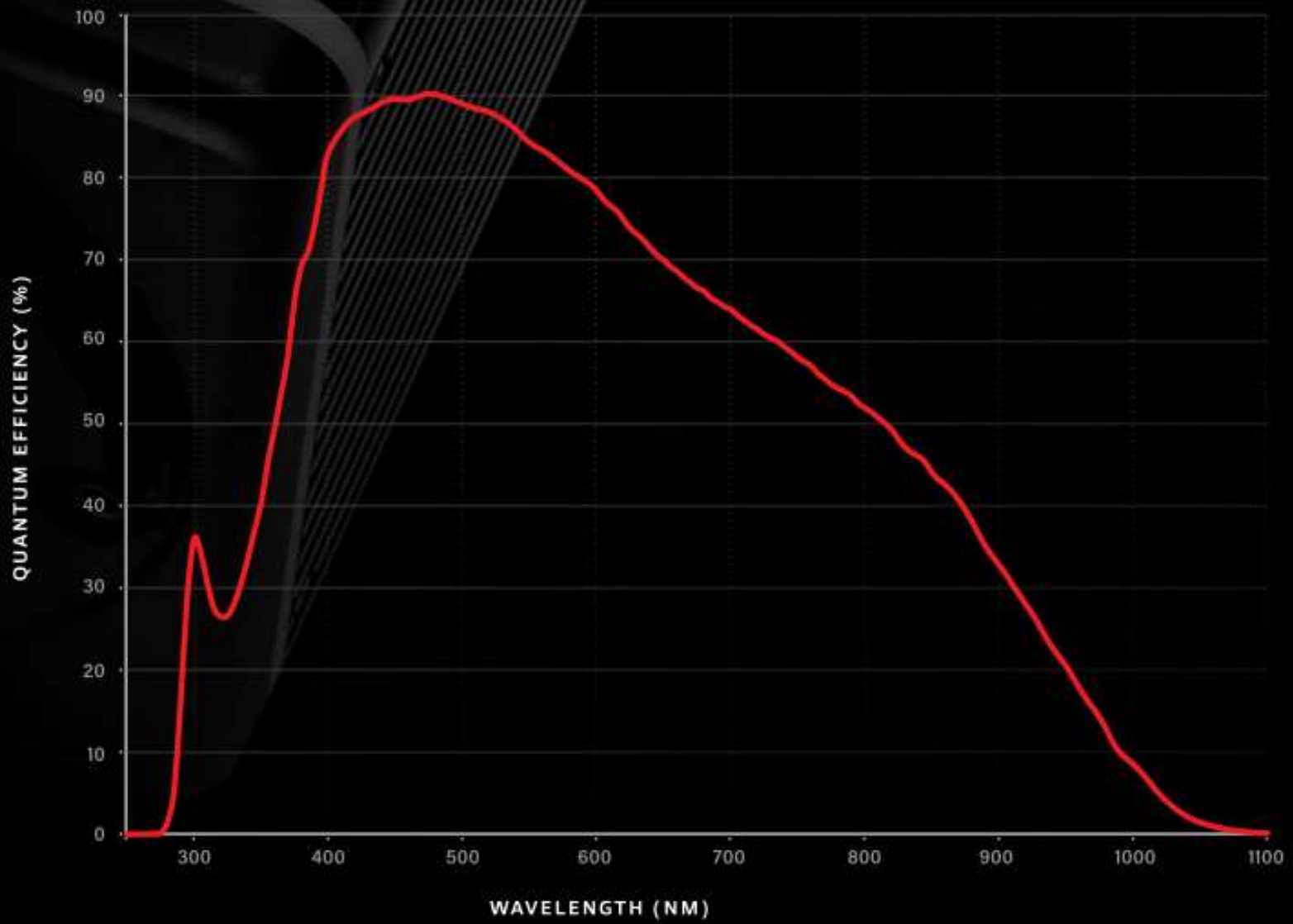
ORCA-Quest

[Intro](#)

[qCMOS](#)

[Noise](#)

[QE](#)





## Imaging Device

ORCA<sup>®</sup>-Quest

qCMOS<sup>®</sup> Image Sensor

## Product Number

C15550-20UP

## Pixel Size

4.6  $\mu\text{m}$  (H)  $\times$  4.6  $\mu\text{m}$  (V)

## Effective number of pixels

4096 (H)  $\times$  2304 (V)

## Effective Area

18.841 mm (H)  $\times$  10.598 mm (V)

**Quantum efficiency** 90 % @ 475 nm

**Full well capacity (typ.)** 7000 electrons

**Readout noise (typ.)**  
Standard scan 0.43 electrons rms  
Ultra quiet scan 0.27 electrons rms

**Dynamic range (typ.)<sup>1)</sup>** 25 900 : 1

**Linearity error**  
EMVA 1288 standard (typ.) 0.5 %

**Digital output** 16 bit / 12 bit / 8 bit

**Exposure time**  
Standard scan 7.2  $\mu\text{s}$  to 1800 s  
Ultra quiet scan 172.8  $\mu\text{s}$  to 1800 s

**Interface** USB 3.1 Gen 1, CoaXPress (Quad CXP-6)

**Lens mount** C-mount

**Master pulse**  
Pulse mode Free running / Start trigger / Burst  
Pulse interval 5  $\mu\text{s}$  to 10 s in 1  $\mu\text{s}$  steps  
Burst count 1 to 65 535

**Image processing function** Defect pixel correction (ON or OFF, hot pixel correction 3 steps)

**Power supply** AC100 V to AC240 V, 50 Hz/60 Hz  
**Power consumption** Approx. 155 VA

**Ambient operating temperature** 0 °C to +40 °C  
**Ambient operating humidity** 30 % to 80 % (with no condensation)  
**Ambient storage temperature** -10 °C to +50 °C  
**Ambient storage humidity** 90 % max. (with no condensation)

**Cooling method** (Peltier cooling)  
Forced-air cooled (Ambient temperature: +25 °C) -20 °C  
Water cooled (Water temperature: +25 °C) -20 °C  
Water cooled (max cooling) Less than -35 °C<sup>2)</sup>

**Sensor temperature**

**Dark current (typ.)**  
0.016 electrons/pixel/s  
0.016 electrons/pixel/s  
0.006 electrons/pixel/s

**Frame rate (at full resolution)**  
Standard scan 120 frames/s  
Ultra quiet scan 5 frames/s

**CoaXPress** 120 frames/s  
5 frames/s

**USB** 17.6 frames/s  
5 frames/s

**MODE**

**Sensor mode**  
Area readout  
Lightsheet readout<sup>3)</sup>  
Photon number resolving

**Readout mode**  
Full resolution  
Digital binning (2 $\times$ 2, 4 $\times$ 4)  
Sub-array

## TRIGGER INPUT

### External trigger input mode

Area readout, Photon number resolving Edge / Global reset edge / Level / Global reset level / Sync readout / Start Edge / Start  
Lightsheet readout Edge / Start

### Software trigger function

Area readout, Photon number resolving Edge trigger / Global reset edge trigger / Start trigger  
Lightsheet readout Edge trigger / Start trigger

### Trigger input connector

SMA

### Trigger delay function

0 s to 10 s in 1  $\mu\text{s}$  steps

## TRIGGER OUTPUT

### Trigger Output

Global exposure timing output / Any-row exposure timing output / Trigger ready output / 3 programmable timing outputs / High output / Low output

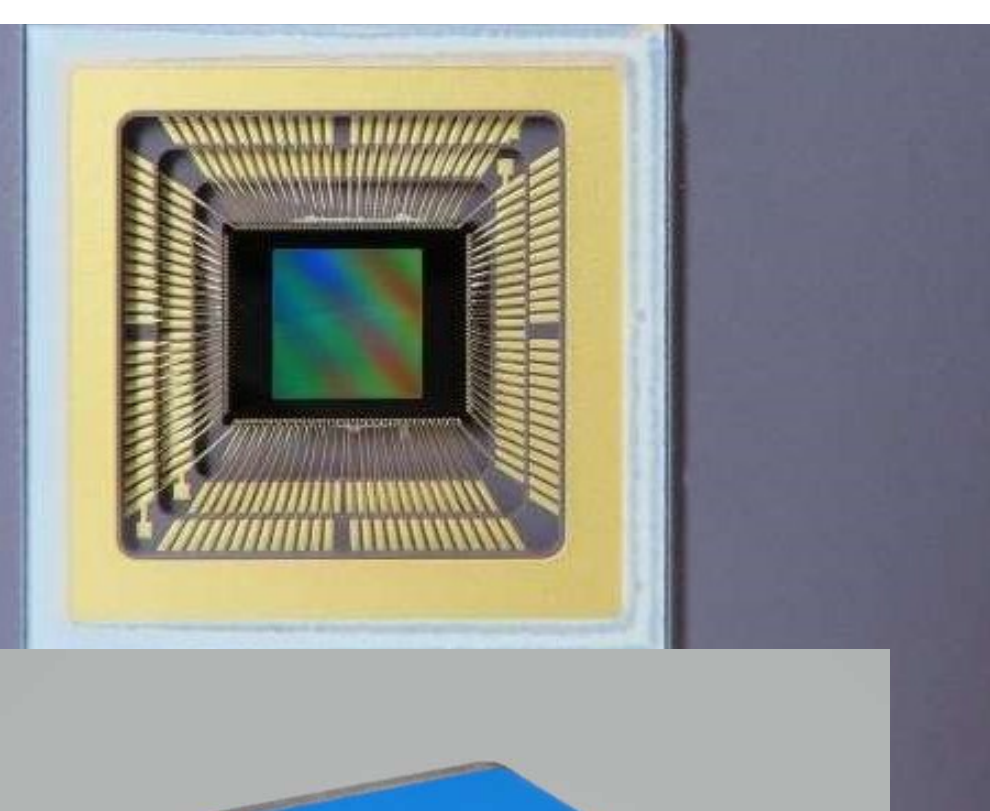
### Trigger output connector

SMA

<sup>1)</sup> Calculated from the ratio of the full well capacity and the readout noise in Ultra quiet scan

<sup>2)</sup> The water temperature is +20 °C and the ambient temperature is +20 °C

<sup>3)</sup> Software such as HCImage is required. For details, please contact your local Hamamatsu representative or distributor.



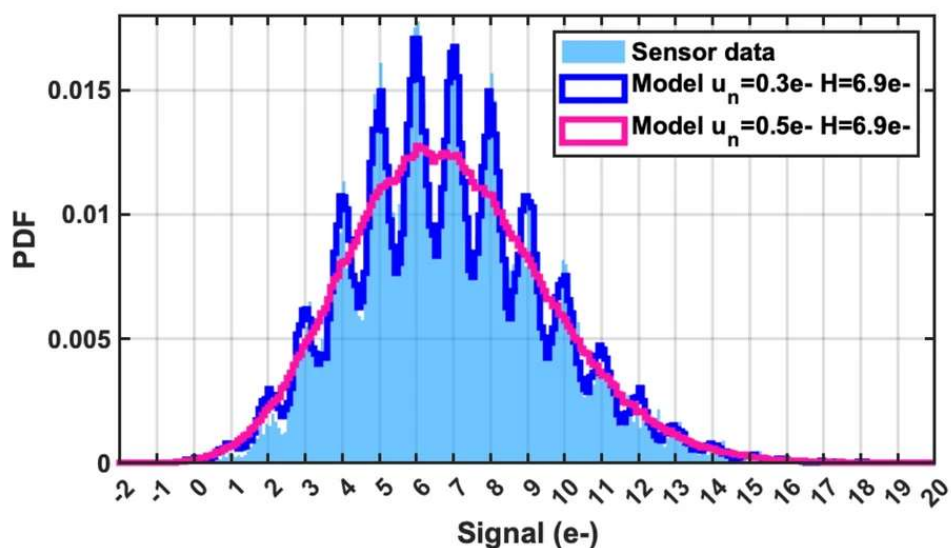
Gigajot fpa and camera demonstrators

16 Megapixel (2048x2048  $1\mu\text{m}$  0.27 e rms 60fps)

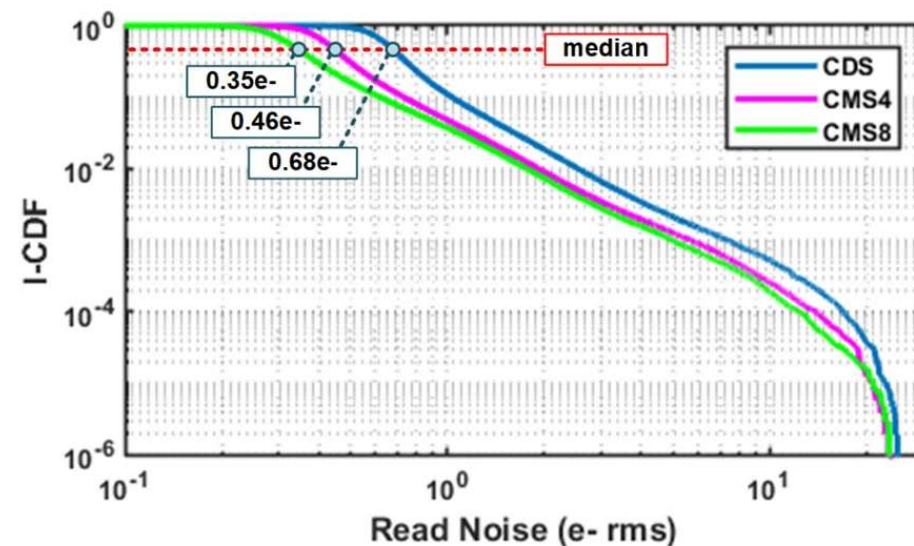
40 Megapixel



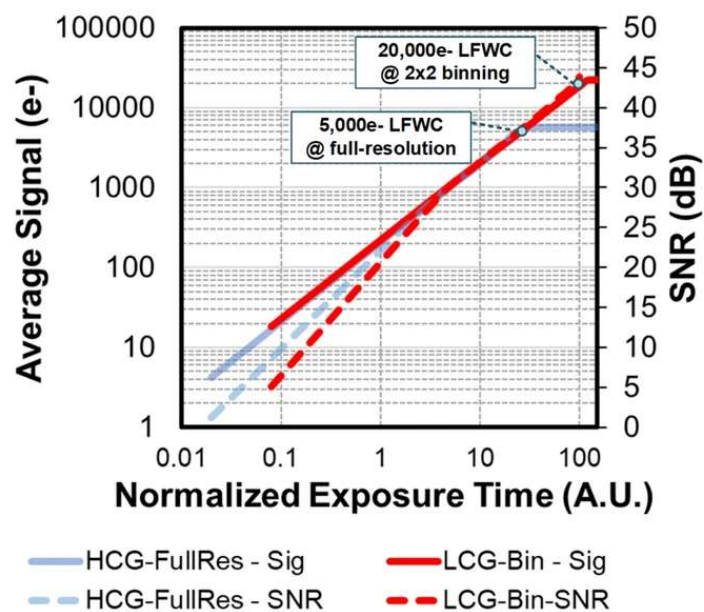
a



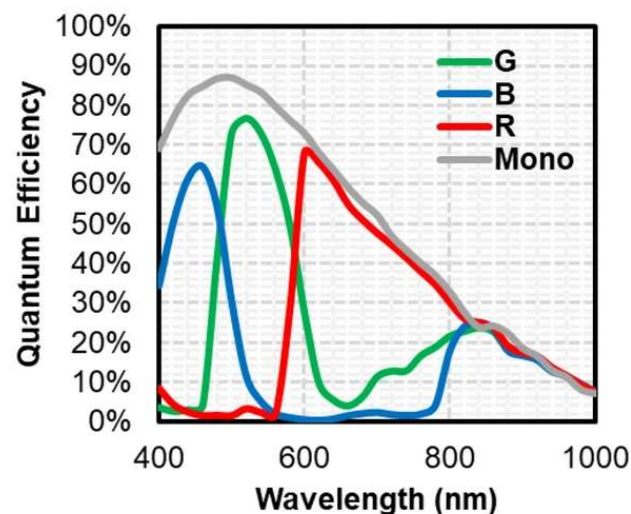
b



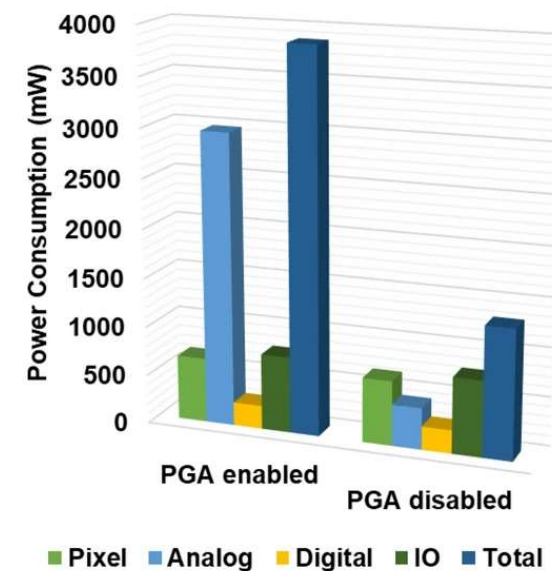
c



d



e



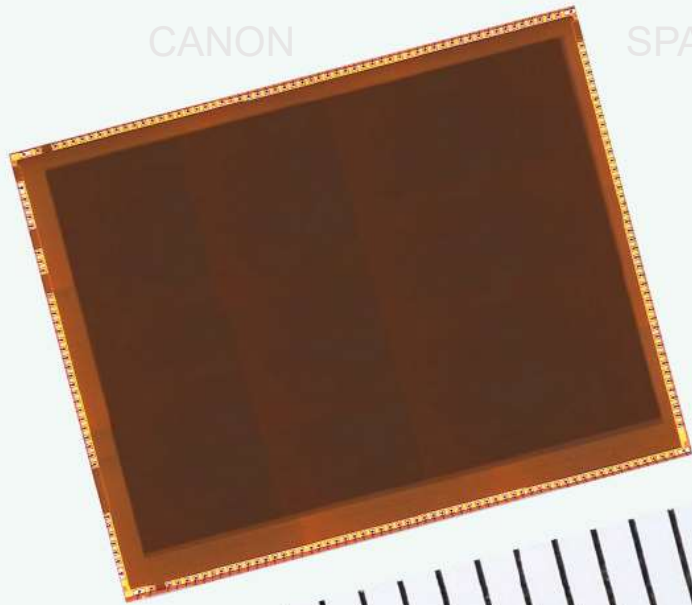
Ultra-high-resolution quanta image sensor with reliable photon-number-resolving and high dynamic range

• [Jiaju Ma](#), [Dexue Zhang](#), [Dakota Robledo](#), [Leo Anzagira](#) & [Saleh Masoodian](#)

[Scientific Reports](#) volume 12, Article number: 13869 (2022) [Cite this article](#)

CANON

SPAD ARRAYS

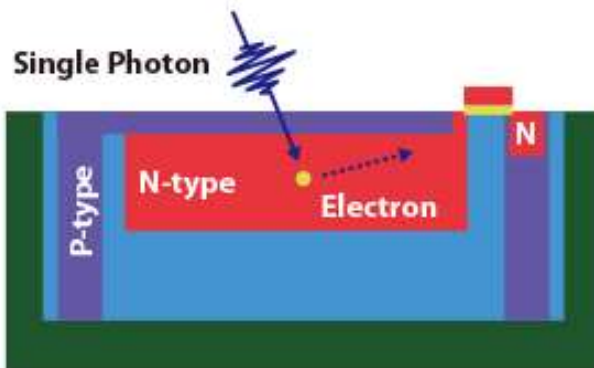


3.2 megapixel SPAD array

**approx. 1X multiplication**

Due to the impact of noise, may not be able to detect a single photon, leading to degraded accuracy.

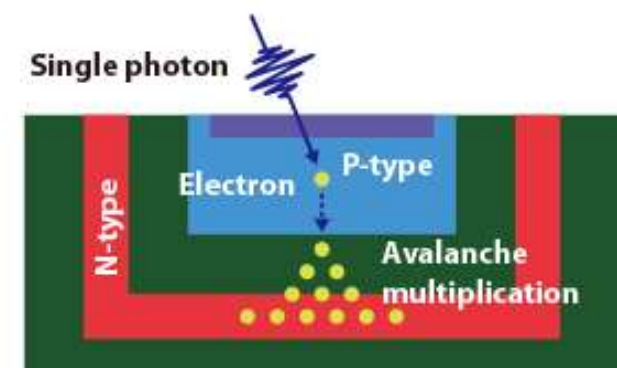
**CMOS sensor**



**approx. 1000000X multiplication**

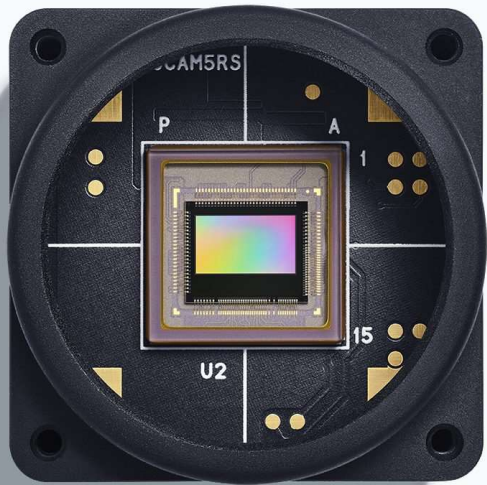
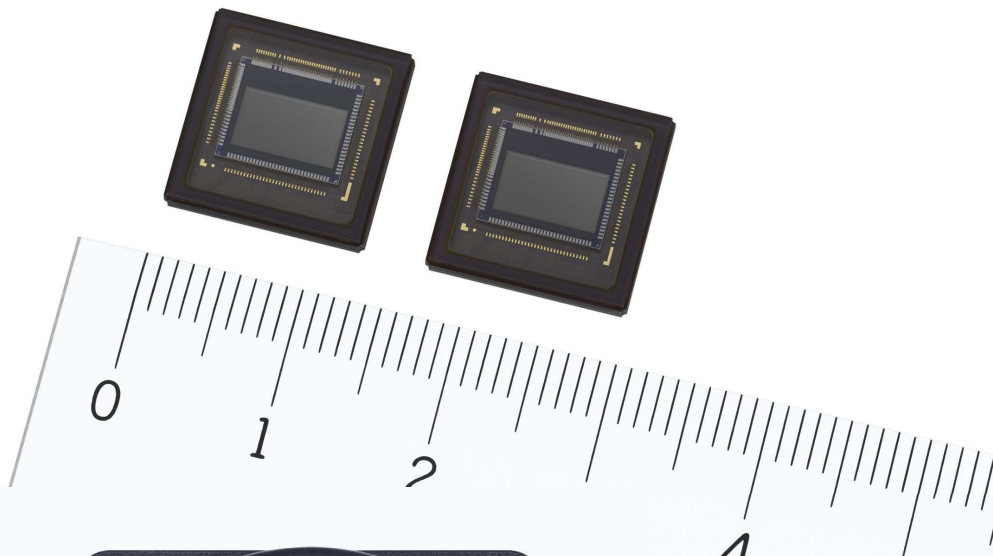
Correctly detect an incident of single photon. Detection of an individual photon without noise increases the accuracy of information.

**SPAD sensor**



# Prophesee event based fpa

Sony partnership for mass prod stacking  
Imx 636 – 0.92 megapixel 4.86 $\mu$ m 1Geps  
giga event per second





# Conclusions

## ⑩ Derniers avantages des CCD :

- ☞ Bining analogique
- ☞ Drift Scan
- ☞ Bruit stationnaire
- ☞ EMCCD
- ☞ Très long temps d'exposition à basse température

## ⑩ Les capteurs CMOS

- ☞ Faible coût capteur et simplification de la camera
- ☞ Petits pixels adaptés à la tache d'Airy
- ☞ Camera on chip
- ☞ Très faible bruit à cadence rapide vers  $0,5^e$  rms, et en perspective  $0,15^e$  rms
- ☞ Surface croissante des matrices

A la fois pour :

- les cameras refroidies pour les longues poses
- les caméras video pour l'imagerie planétaire ou les acquisitions à résolution temporelle
- les appareils photo numériques reflex ou bridges avec une video 8K

☞ Le futur fait rêver !



# Bibliographie

- [1] Th. Midavaine, S. Pelliard, E. Belhaire : Apport des bandes spectrales du proche ultraviolet à l'infrarouge et les technologies pouvant répondre aux besoins de vision nocturne. 3eme Séminaire Vision Nocturne CEAT Toulouse 26-27 Novembre 2008
- [2] Boyd Fowler, Paul Vu, Fairchild Imaging : CNES workshop dec 2009 Toulouse
- [3] Th. Midavaine, E. Belhaire, S. Pelliard Solid state low light level imaging, from UV to IR, needs and solutions. Optro 2010, OECD CONFERENCE CENTER, PARIS, FRANCE / 3 – 5 FEBRUARY 2010
- [4] Th. Midavaine : La révolution CMOS. Les Rencontres du Ciel et de l'Espace 11 – 14 novembre 2010 Cité des Sciences Paris
- [5] Th. Midavaine : Imagerie à Bas Niveau de Lumière- fondamentaux et perspectives. Les Techniques de l'Ingénieur (2012 et 2023 édition 2 partie1)
- [6] M.R. Alarcon et al. : Scientific CMOS sensors in Astronomy : IMX455 and IMX411. arXiv:2302.03700v2 16 May 2023  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/acd04a>.
- [7] M. Betoule et al. StarDICE I: sensor calibration and absolute photometric calibration of a Sony IMX411 sensor. Astro-ph.IM 18 nov 2022
- [8] E.O.Ofer et al.: The large array survey telescope – system overview and performances PASP 10 april 2023 arXiv : 2304.04796v1
- [9] C. Yi-Ping Chao et al. Identifying the sources of random telegraph noises in pixels of CMOS Image Sensors

# Sources et remerciements

- Canon
- Fairchild Imaging Boyd Fowler
- Hamamatsu
- Jigajot Eric Fossum
- Macnica ATD Europe Antoine Hide, Stéphane Amrouch,
- PCO sCMOS ebook
- ISAE Pierre Magnan
- PCO sCMOS ebook
- Prophesee Luca Verre, Christophe Posch
- QHYCCD Qyu
- Sony 2021 roadmap (SSS imaging system business Division)
- Teledyne Pierre Fereyre
- Thales
- Zwo ASI camera

# Quelques questions, les réponses !!!

1. Le principe des capteurs CMOS est très récent par rapport au CCD ?
  1. Oui le principe du capteur CMOS apparait dans les années 2000
  2. Oui les capteurs CCD sont apparus à la fin des années 1960
  3. Non les capteurs de type CCD et CMOS sont apparus à la même époque
2. Le fonctionnement d'un pixel CCD et CMOS est similaire ?
  1. Non le principe de fonctionnement du pixel est différent.
  2. Dans les deux cas on a un semi-conducteur Silicium qui absorbe les photons.
  3. Oui dans les deux cas le pixel consiste en une simple capacité qui accumule des photo-electrons.
3. Un capteur avec des gros pixels est plus sensible que si il a des petits pixels ?
  1. Oui car un gros pixel est moins bruyant
  2. Non car un petit pixel peut avoir un bon rendement quantique et un faible bruit
  3. Oui car un gros pixel collecte plus de flux sur une étoile
4. Le fonctionnement de la lecture de la matrice de pixel est similaire entre un CCD et un détecteur CMOS ?
  1. Oui il se fait ligne par ligne ou colonne par colonne
  2. Oui il se fait trame par trame
  3. Oui la lecture de la matrice est destructive et ne peut se faire qu'une seule fois
5. Le bruit de lecture dans une matrice CMOS est similaire à celui d'un CCD ?
  1. Oui il est dépendant du nombre de pixels et de la cadence de lecture de toute la matrice
  2. Non il est dépendant du nombre de pixels par colonne et du nombre de convertisseurs
  3. Non chaque pixel a son propre bruit dans une matrice CMOS