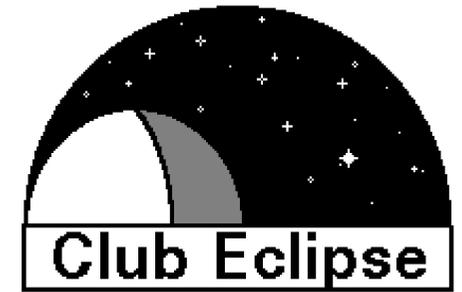


Les nouveaux capteurs CMOS et magnitude limite



➤ Les matrices APS

- Fonctionnement
- Comparaison de leurs performances
- Les perspectives

➤ Modèle de magnitude limite

Thierry Midavaine

thierrymidavaine@saf-astronomie.fr

CT2A

Commission des Techniques en Astronomie Amateur

RCE

11 novembre 2022



Sommaire



1. Le Silicium
2. Les matrices CMOS, le pixel APS
3. Les facteurs de mérite
4. Les nouveautés dans les capteurs CMOS
5. Conclusions vers le futur

1. Le Silicium

Les matériaux pour la détection opto-electronique

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

1 IA												14 IVA						18 VIIIA									
1	1,00794 H <i>Hydrogène</i>											2	4,0026 He <i>Helium</i>														
2	3 6,941 Li <i>Lithium</i>	4 9,01218 Be <i>Béryllium</i>											5 10,811 B <i>Bore</i>	6 12,0107 C <i>Carbone</i>	7 14,0067 N <i>Azote</i>	8 15,9994 O <i>Oxygène</i>	9 18,9984 F <i>Fluor</i>	10 20,1797 Ne <i>Néon</i>									
3	11 22,9898 Na <i>Sodium</i>	12 24,305 Mg <i>Magnésium</i>											13 26,9815 Al <i>Aluminium</i>	14 28,0855 Si <i>Silicium</i>	15 30,9738 P <i>Phosphore</i>	16 32,065 S <i>Soufre</i>	17 35,453 Cl <i>Chlore</i>	18 39,948 Ar <i>Argon</i>									
4	19 39,0983 K <i>Potassium</i>	20 40,078 Ca <i>Calcium</i>	21 44,9559 Sc <i>Scandium</i>	22 47,867 Ti <i>Titane</i>	23 50,9415 V <i>Vanadium</i>	24 51,9961 Cr <i>Chrome</i>	25 54,9380 Mn <i>Manganèse</i>	26 55,845 Fe <i>Fer</i>	27 58,9332 Co <i>Cobalt</i>	28 58,6934 Ni <i>Nickel</i>	29 63,546 Cu <i>Cuivre</i>	30 65,38 Zn <i>Zinc</i>	31 69,723 Ga <i>Gallium</i>	32 72,630 Ge <i>Germanium</i>	33 74,9216 As <i>Arsenic</i>	34 78,96 Se <i>Sélénium</i>	35 79,904 Br <i>Brome</i>	36 83,798 Kr <i>Krypton</i>									
5	37 85,4678 Rb <i>Rubidium</i>	38 87,62 Sr <i>Strontium</i>	39 88,9058 Y <i>Yttrium</i>	40 91,224 Zr <i>Zirconium</i>	41 92,9064 Nb <i>Niobium</i>	42 95,96 Mo <i>Molybdène</i>	43 { 98 } Tc <i>Technetium</i>	44 101,07 Ru <i>Ruthénium</i>	45 102,905 Rh <i>Rhodium</i>	46 106,42 Pd <i>Palladium</i>	47 107,868 Ag <i>Argent</i>	48 112,411 Cd <i>Cadmium</i>	49 114,818 In <i>Indium</i>	50 118,71 Sn <i>Étain</i>	51 121,76 Sb <i>Antimoine</i>	52 127,6 Te <i>Tellure</i>	53 126,905 I <i>Iode</i>	54 131,293 Xe <i>Xénon</i>									
6	55 132,905 Cs <i>Césium</i>	56 137,327 Ba <i>Baryum</i>											72 178,49 Hf <i>Hafnium</i>	73 180,948 Ta <i>Tantale</i>	74 183,84 W <i>Tungstène</i>	75 186,207 Re <i>Rhénium</i>	76 190,23 Os <i>Osmium</i>	77 192,217 Ir <i>Iridium</i>	78 195,084 Pt <i>Platine</i>	79 196,967 Au <i>Or</i>	80 200,59 Hg <i>Mercure</i>	81 204,383 Tl <i>Thallium</i>	82 207,2 Pb <i>Plomb</i>	83 208,98 Bi <i>Bismuth</i>	84 { 209 } Po <i>Polonium</i>	85 { 210 } At <i>Astate</i>	86 { 222 } Rn <i>Radon</i>
7	87 { 223 } Fr <i>Francium</i>	88 { 226 } Ra <i>Radium</i>											104 { 266 } Rf <i>Rutherfordium</i>	105 { 268 } Db <i>Dubnium</i>	106 { 269 } Sg <i>Seaborgium</i>	107 { 270 } Bh <i>Bohrium</i>	108 { 269 } Hs <i>Hassium</i>	109 { 278 } Mt <i>Meitnerium</i>	110 { 279 } Ds <i>Darmstadtium</i>	111 { 281 } Rg <i>Röntgenium</i>	112 { 285 } Cn <i>Copernicium</i>	113 { 284 } Uut <i>Ununtrium</i>	114 { 289 } Fl <i>Flerovium</i>	115 { 288 } Uup <i>Ununpentium</i>	116 { 293 } Lv <i>Livermorium</i>	117 { 294 } Uus <i>Ununseptium</i>	118 { 294 } Uuo <i>Ununoctium</i>
6			57 138,906 La <i>Lanthane</i>	58 140,116 Ce <i>Cérium</i>	59 140,908 Pr <i>Praseodyme</i>	60 144,242 Nd <i>Néodyme</i>	61 { 145 } Pm <i>Prométhium</i>	62 150,36 Sm <i>Samarium</i>	63 151,964 Eu <i>Europium</i>	64 157,25 Gd <i>Gadolinium</i>	65 158,925 Tb <i>Terbium</i>	66 162,5 Dy <i>Dysprosium</i>	67 164,930 Ho <i>Holmium</i>	68 167,259 Er <i>Erbium</i>	69 168,934 Tm <i>Thulium</i>	70 173,054 Yb <i>Ytterbium</i>	71 174,967 Lu <i>Lutécium</i>										
7			89 { 227 } Ac <i>Actinium</i>	90 232,038 Th <i>Thorium</i>	91 231,036 Pa <i>Protactinium</i>	92 238,029 U <i>Uranium</i>	93 { 237 } Np <i>Neptunium</i>	94 { 244 } Pu <i>Plutonium</i>	95 { 243 } Am <i>Americium</i>	96 { 247 } Cm <i>Curium</i>	97 { 247 } Bk <i>Berkélium</i>	98 { 251 } Cf <i>Californium</i>	99 { 252 } Es <i>Einsteinium</i>	100 { 257 } Fm <i>Fermium</i>	101 { 258 } Md <i>Mendélévium</i>	102 { 259 } No <i>Nobelium</i>	103 { 262 } Lr <i>Lawrencium</i>										

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

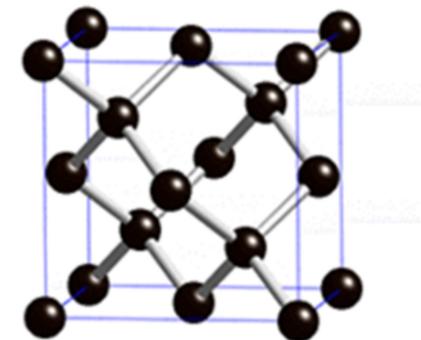
Le Silicium, un semiconducteur



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

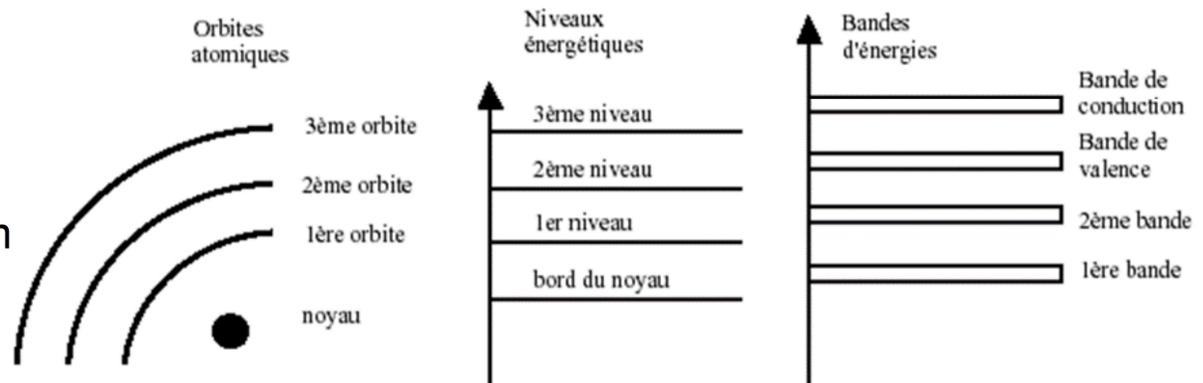
- Un Semi-conducteur constituant un réseau monocristallin identique au diamant

- Bande de Valence et Bande de Conduction séparée par une bande interdite ou gap du semi conducteur
- Direct band gap $E_g(0)=3.65\text{eV}$



- $E(\text{eV}) = 1,24 / \lambda(\mu\text{m})$

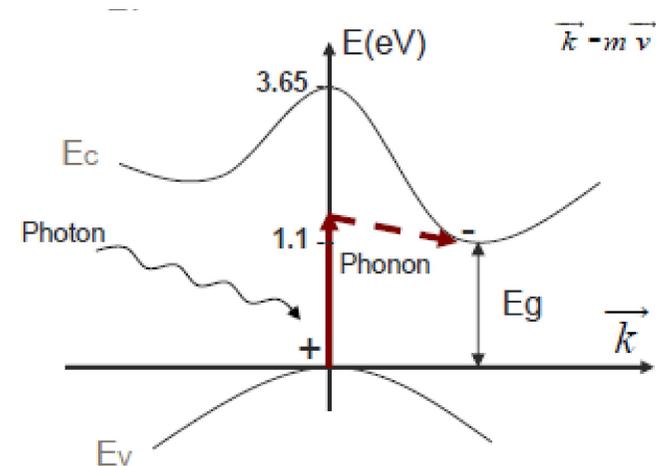
- Longueur d'onde à 339nm



Le 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 :
- $E_g = E_g(0) - \alpha \cdot T^2 / (T + \beta)$
- L'écart d'énergie $E_s = 1,11\text{eV}$



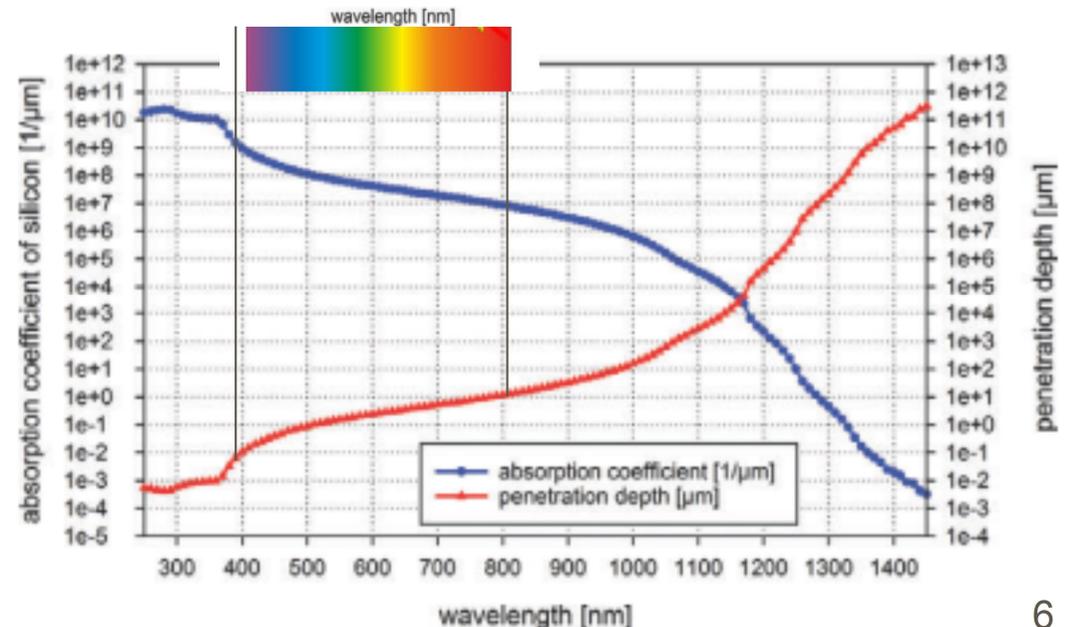
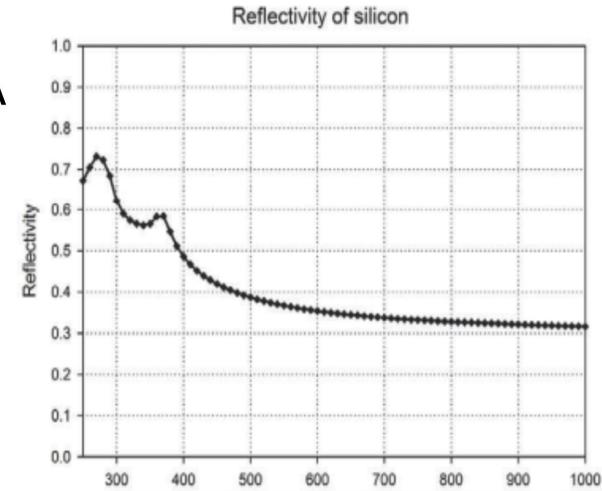
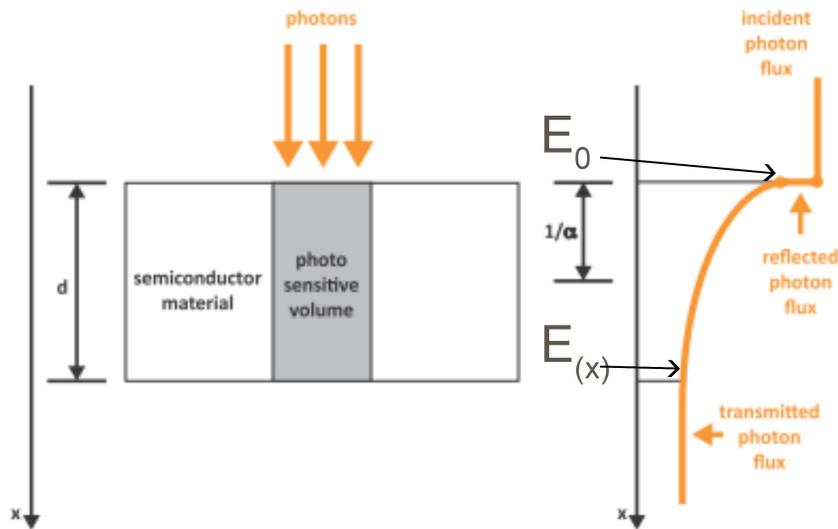
➤ Effet photo-électrique dans le Silicium

- 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

Absorption et réponse spectrale

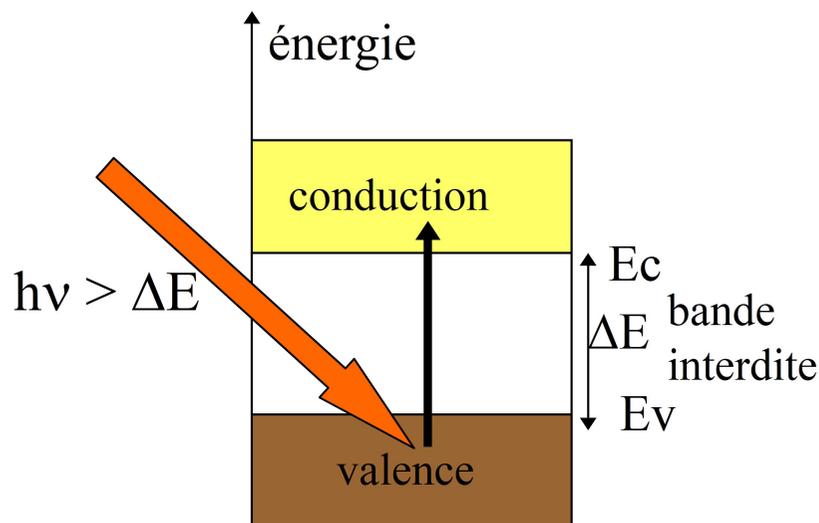
- L'absorption de l'éclairement incident augmente avec la profondeur
- $E(x) = E_0 e^{-\alpha x}$
- Le coefficient d'absorption α dépend de λ
- Au delà de λ_c le matériau est transparent

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



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

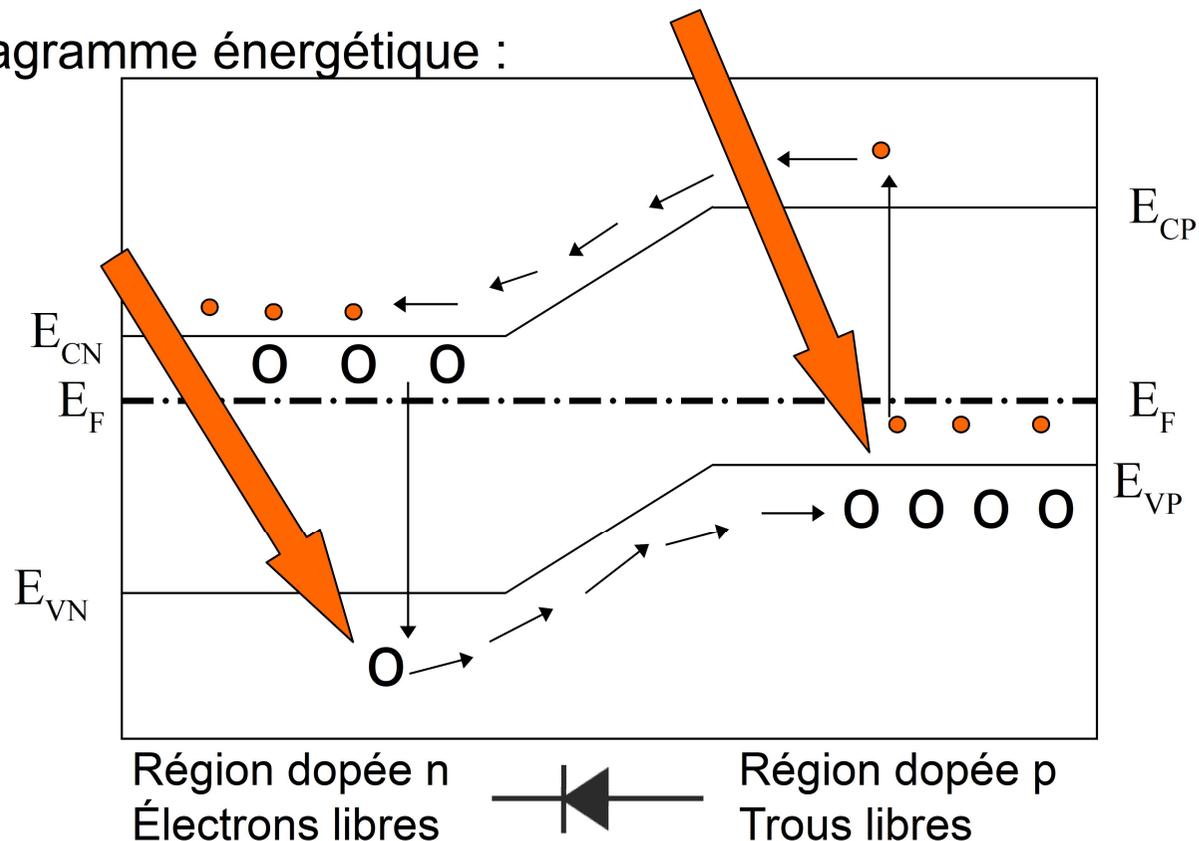
Dopé n
Électrons porteurs
majoritaires

Dopé p
Trous porteurs
majoritaires

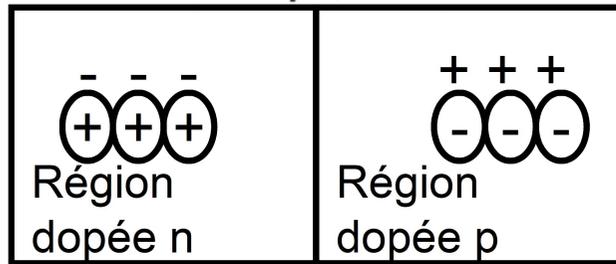
- Au repos et à très basse température le matériau est isolant. Avec une température croissante la conductivité commence à augmenter. Sous l'effet de l'illumination la libération des porteurs augmente la conductivité du matériau qui se comporte comme un métal.

Effet Photovoltaïque

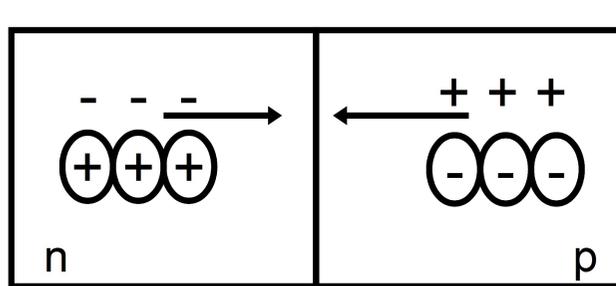
- Une jonction entre un matériau dopé n et un matériau dopé p (matériau hétérogène) forme une diode. Un champ électrique intense est ainsi généré dans une zone autour de la jonction. Les paires e^- / h^+ (électrons trous) photoélectriques libérées à proximité de la barrière de potentiel sont ainsi accélérées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



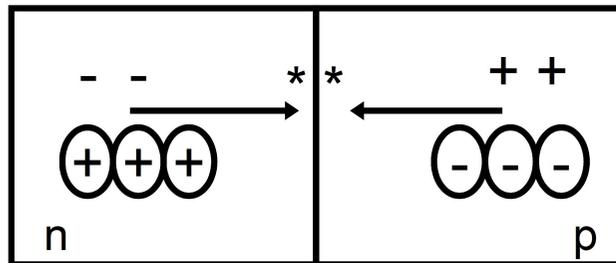
La diode : la jonction p n



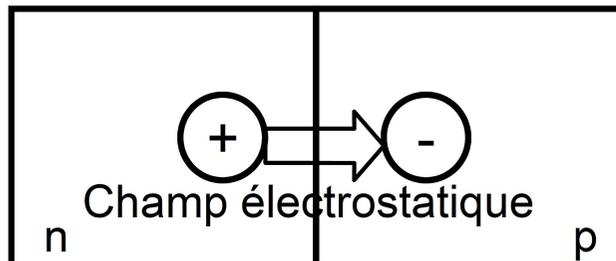
- La région dopée n a un excès de porteurs négatifs (électrons mobiles).
- La région dopée p a un excès de porteurs positifs (trous mobiles).



- Les deux régions sont juxtaposées par la jonction
- 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.

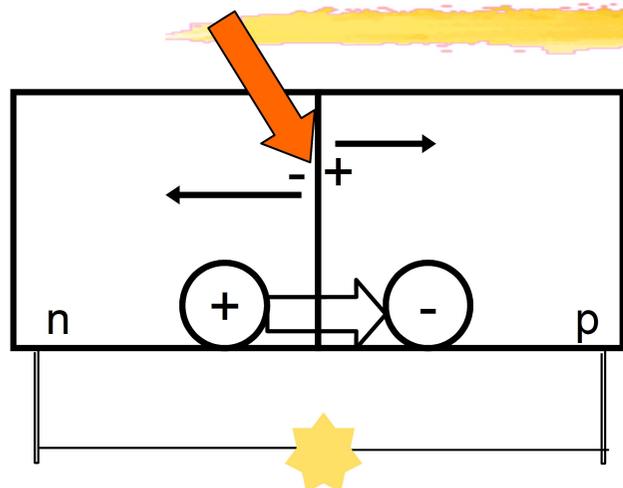


- Le volume autour de la jonction va être ainsi dépeuplée en électron et trou créant ainsi une zone de déplétion, dépeuplée de porteurs.

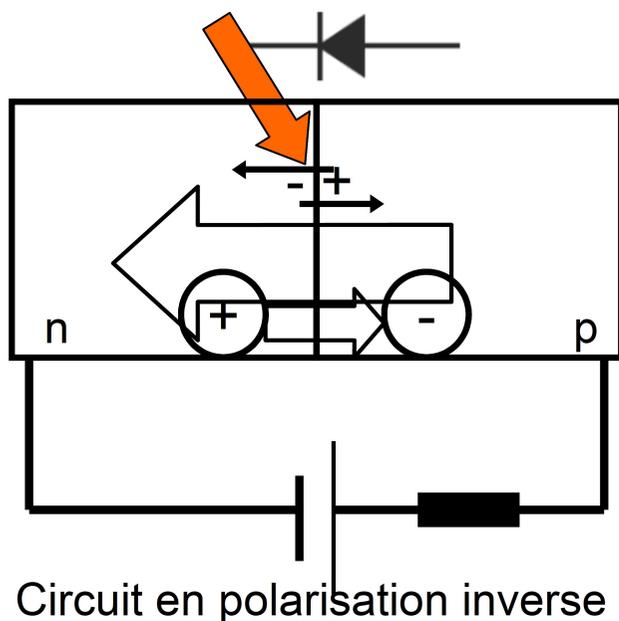


- En final les deux réseaux atomiques autour de la zone de déplétion auront une charge résiduelle (du fait de la disparition des porteurs qui équilibraient les deux régions) faisant apparaître un champ électrique. Nous avons ainsi une différence de potentiel entre la région n et p de la jonction.

Illumination de la diode : la photodiode



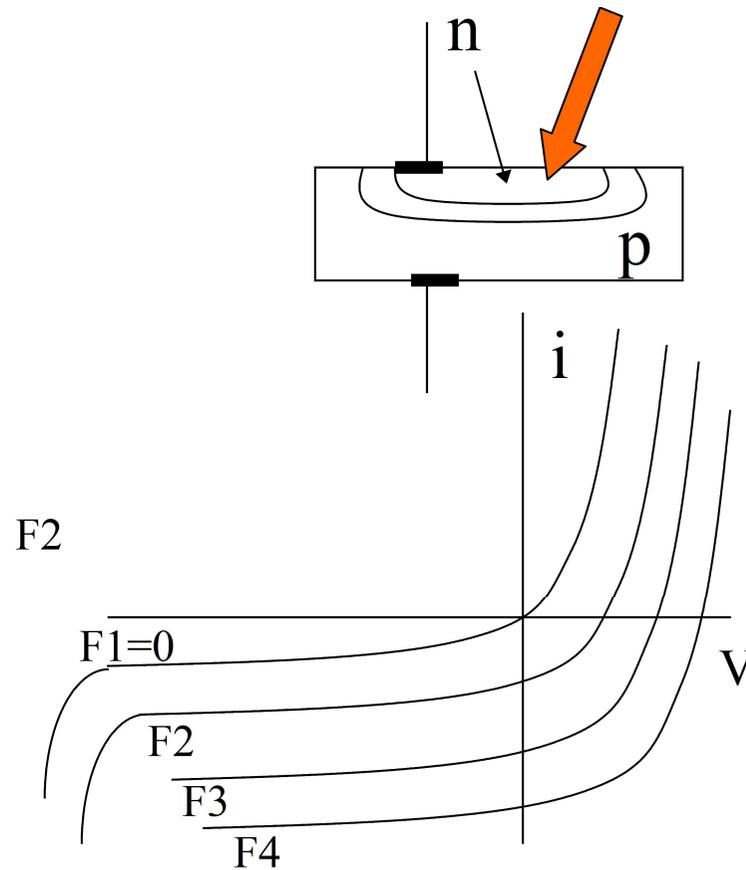
- Si on illumine la jonction, les photons (si leur énergie est suffisante supérieure à l'énergie du gap) vont créer des paires électrons trous libres. Les électrons seront attirés par la région n de charge positive et les trous seront attirés vers la région p de charge négative. Il y a ainsi génération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



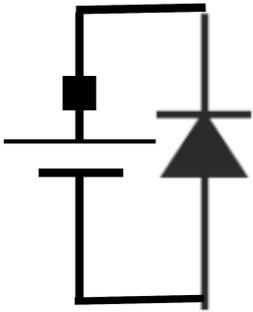
- Si on place la jonction dans un circuit en polarisation inverse: la cathode connectée à la région de dopage n et l'anode à la région de dopage p, on va élargir la zone de déplétion et les photo électrons vont générer un photo courant inverse directement proportionnel au flux photonique.
- En augmentant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

Caractéristiques i de v de la photodiode

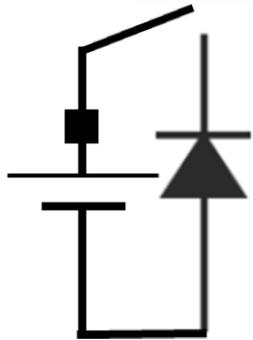
Courbes $i=f(v)$ en fonctions du flux F : $F1$ à l'obscurité, et flux croissant $F2, F3, F4...$



La photodiode flottante en polar inverse

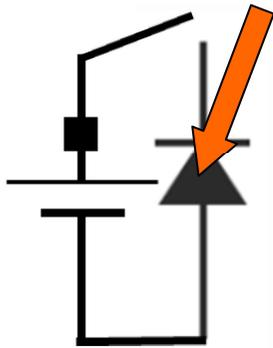


1. La photodiode est polarisée en inverse par une tension de reset V_R



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

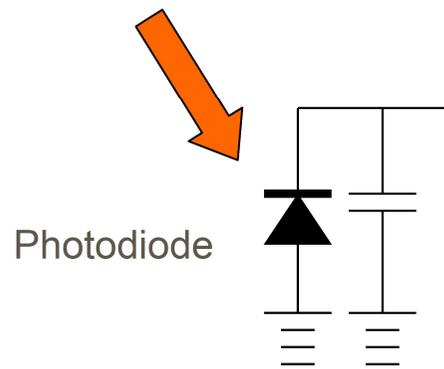
$$N = C_D \cdot V_D / q$$



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}

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

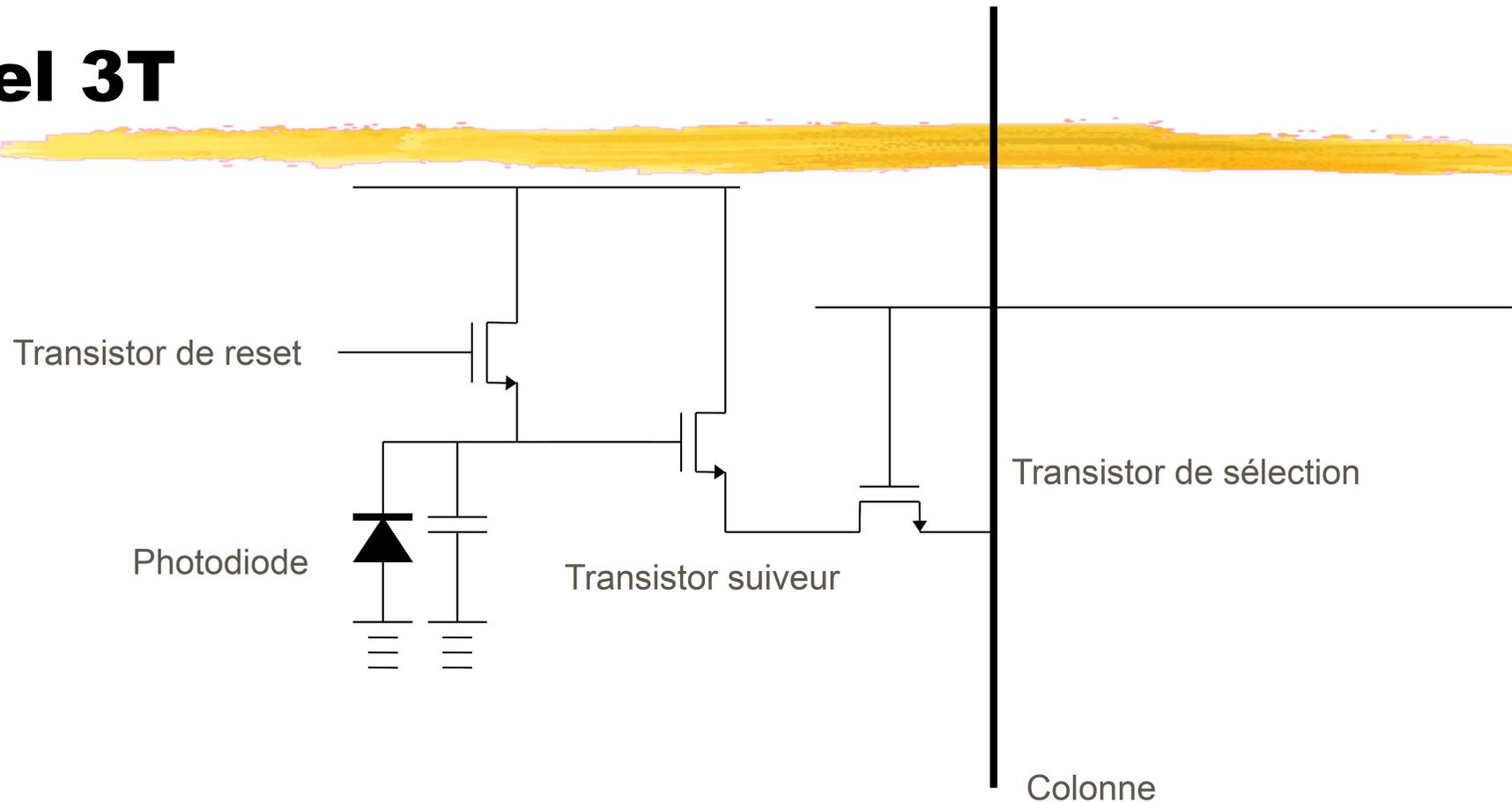
PIN Photodiode



Le pixel est composé :

- d'une photodiode PIN (3 zones : dopage **P**, Intrinsèque et dopage **N**) qui constitue l'élément sensible
- couplée à une capacité
- Et à plusieurs transistors : La gated photodiode avec un ampli MOS ou pixel actif

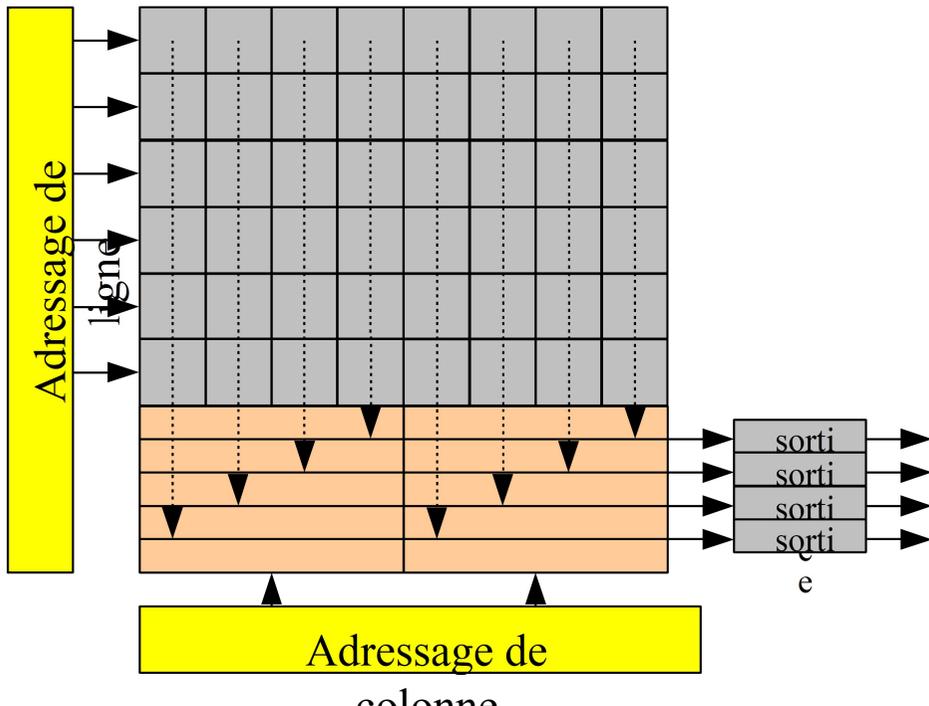
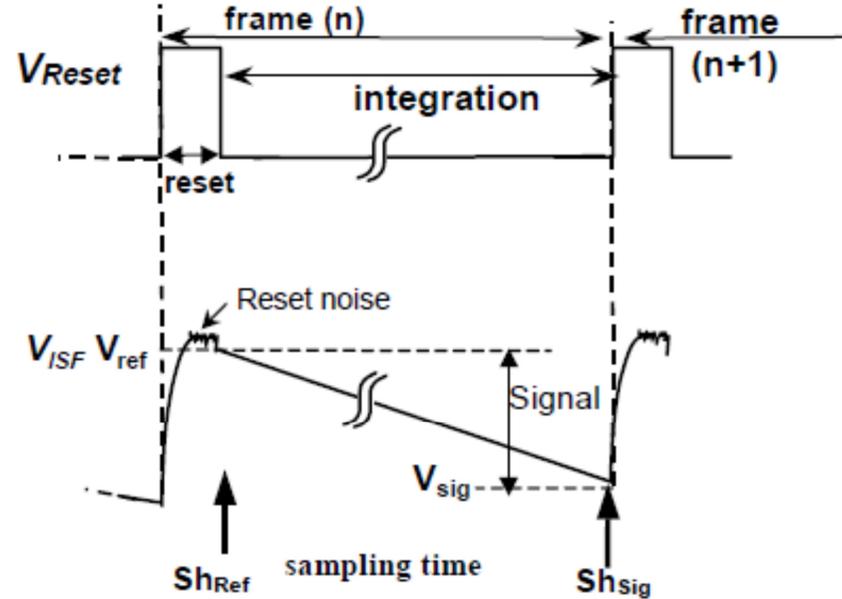
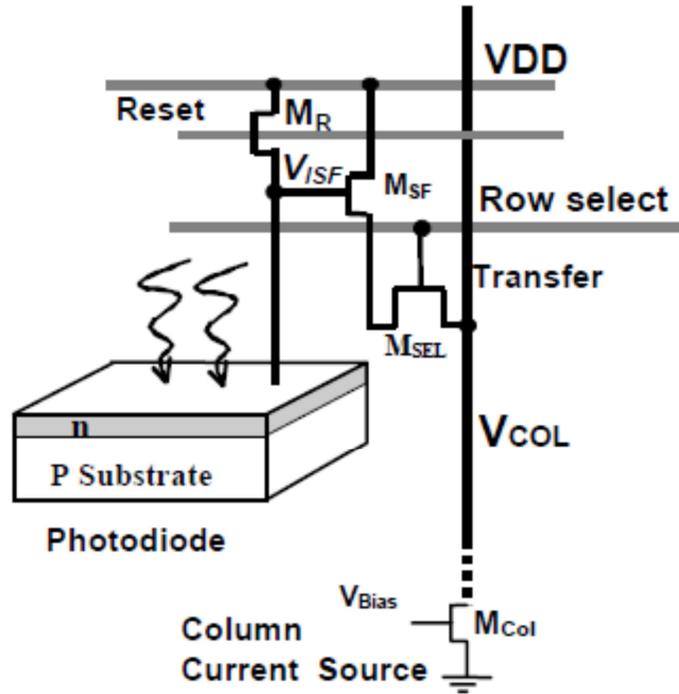
Pixel 3T



➤ Chaque pixel comprend :

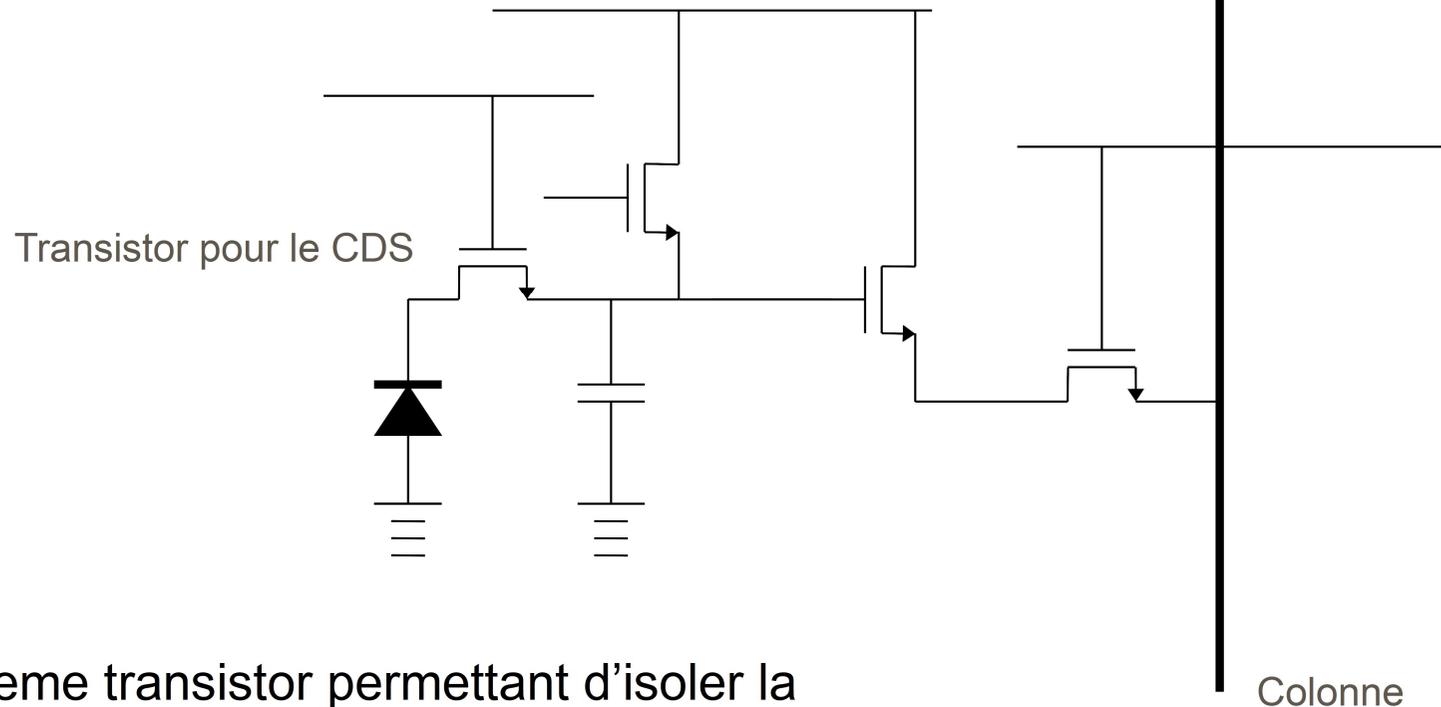
- La photodiode PIN et de stockage des charges
- Un transistor de reset
- Un transistor suiveur qui assure la conversion charge tension sur une haute impédance
- Un transistor de sélection de la ligne du pixel à lire connecté à la colonne

CMOS APS 3T

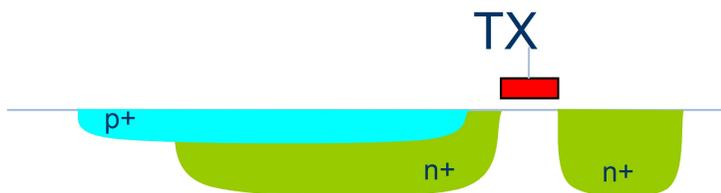


- Mode d'intégration lecture de type ERS (electronic rolling shutter) :
 - S/H dans le pixel
- Bruit important :
 - Bruit de reset en kTC
- Par le passé FF faible pour les petits pixels
 - Couches de métaux
 - μ -lentilles

Pixel 4T : pinned photodiode



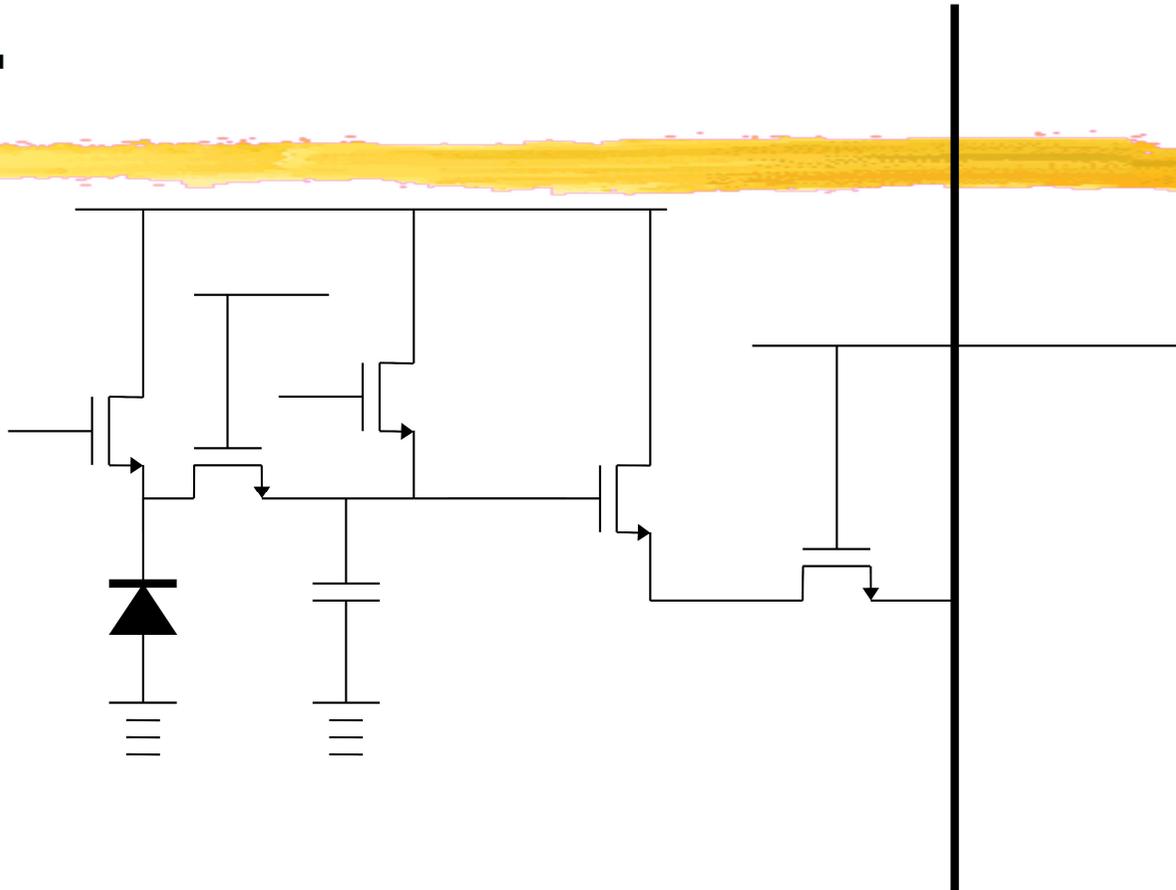
- 4eme transistor permettant d'isoler la photodiode et la capa de collection des charges permettant de faire un CDS et de neutraliser le bruit en kTC



- 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

Transistor de
Global Shutter



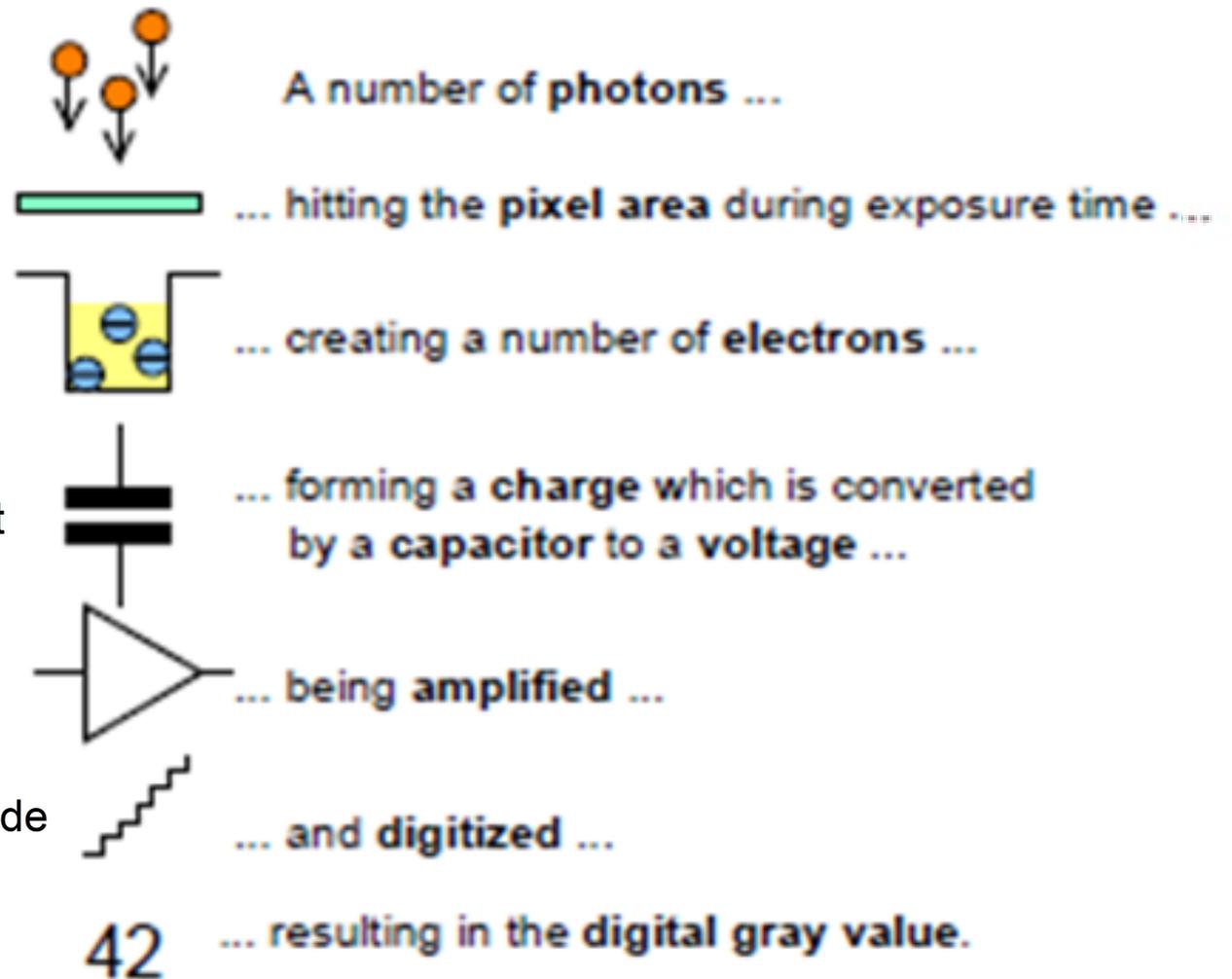
- Introduction d'un 5eme transistor pour réaliser la fonction Global Shutter
- pour synchroniser l'exposition sur tous les pixels
- Piloter le temps d'exposition
- Faire un antiéblouissement
- Intégration pendant la lecture

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.

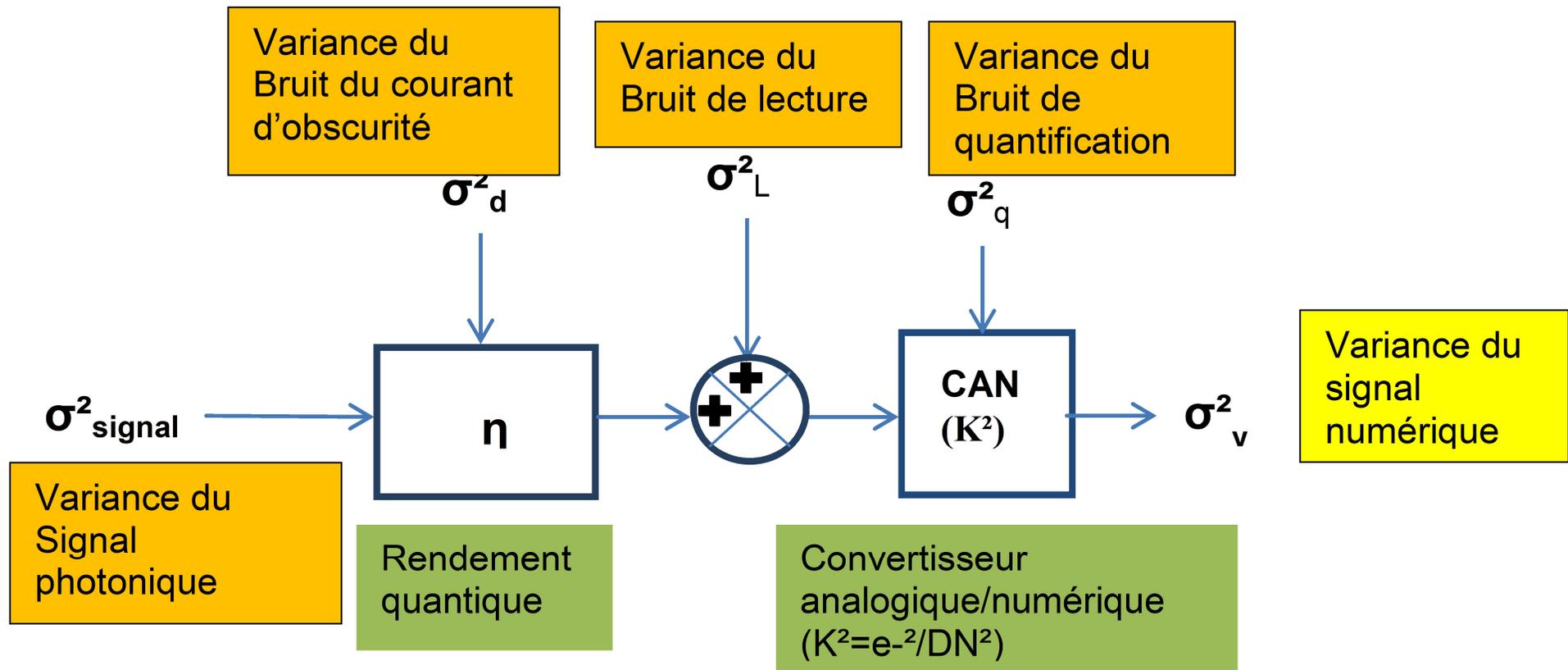
Le signal détecté : Nombre de photons/s – une amplitude digitale

Du photon au bit :

- Un éclairement E_3 en photons/m²/s
- Une surface pixel p^2
- pendant un temps d'exposition t_{exp}
- Génère un nombre de charges en électrons ou en paires électrons trous
- Une capa ou un convertisseur courant tension génère une variation de tension ΔV_D
- Le signal est amplifié et filtré
- Il est convertis par un CAN en niveau de bits
- Il est affiché en niveau de gris



Décomposition des sources de bruits



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

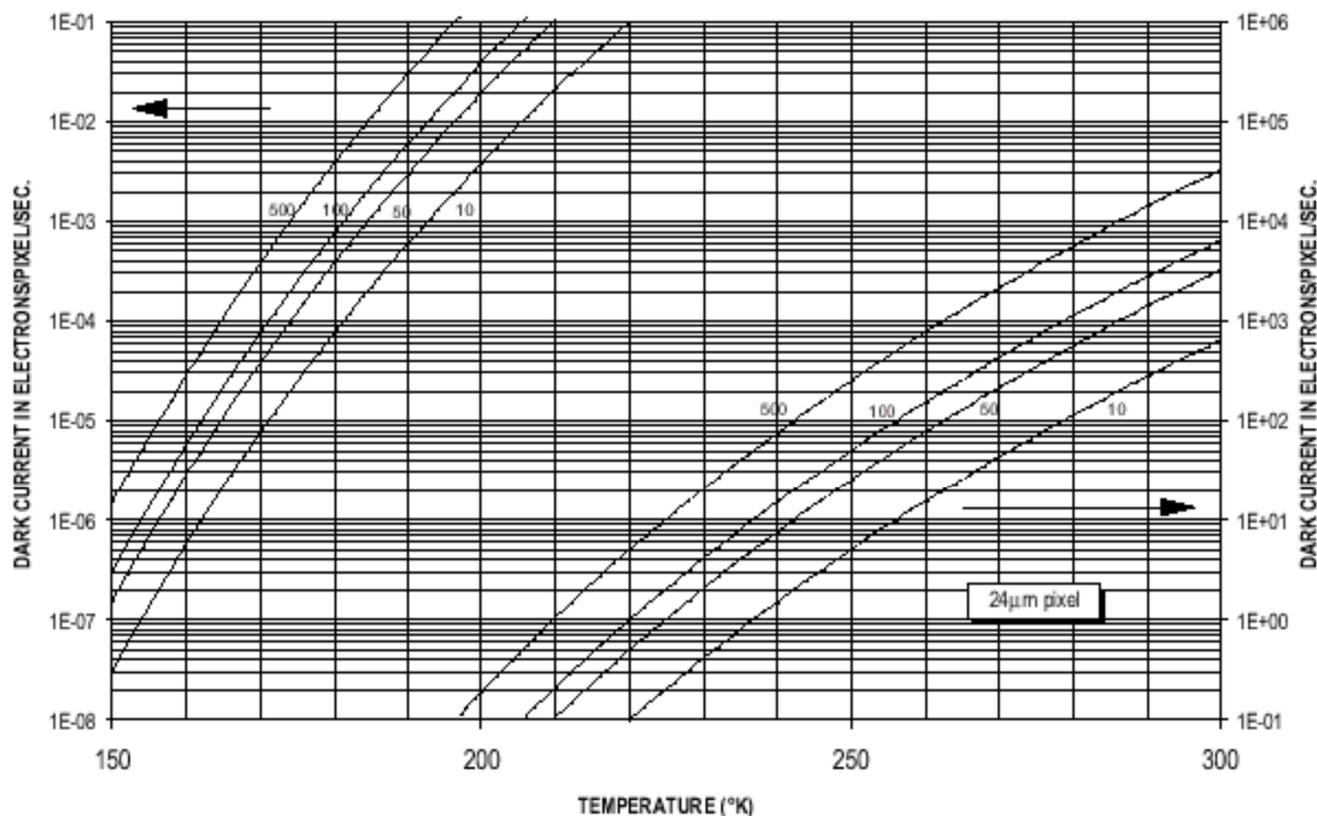
Il faut refroidir le détecteur pour limiter son effet.

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

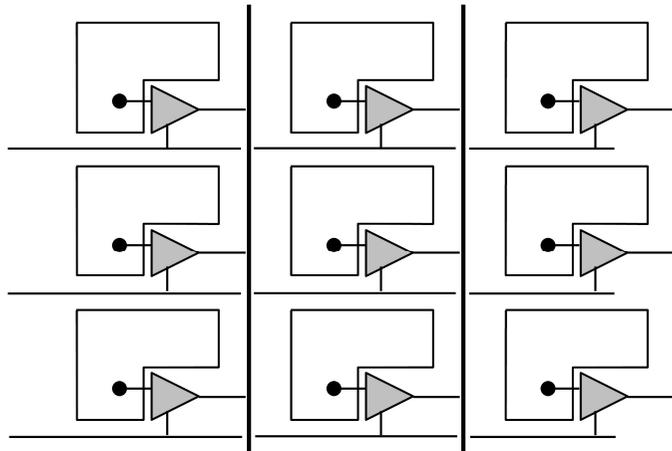
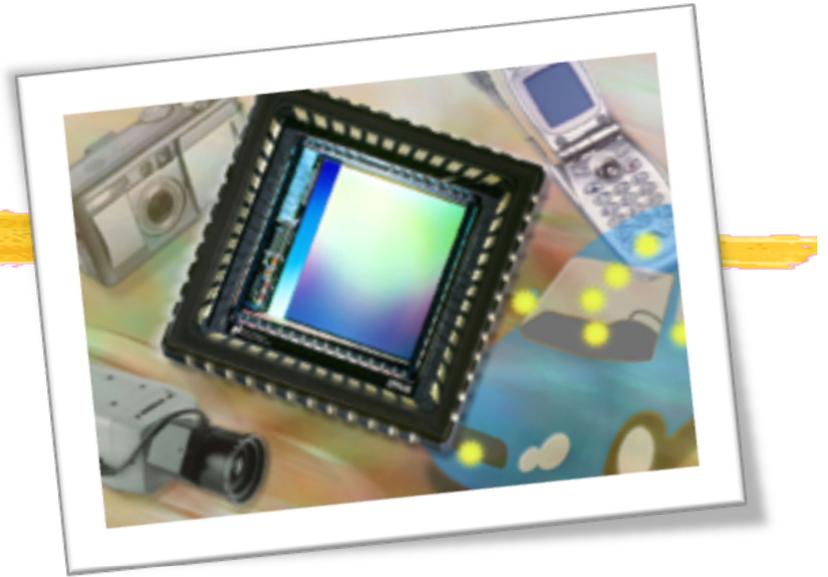
Il est proportionnel à

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

Avec $E_g = E_v - E_c$



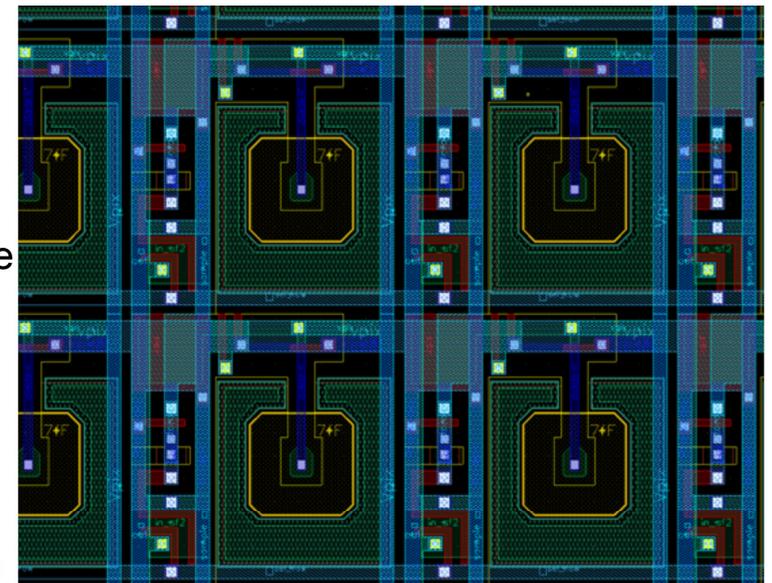
2. Les matrices CMOS le pixel APS



C'est une technologie ancienne des années 70 qui émerge dans les années 80 pour l'imagerie scientifique et les circuits de lecture des détecteurs IR et se diversifie fin des années 90 du fait des progrès de la miniaturisation des motifs dans les fonderies CMOS, tirée par les applications grand public

- Photographie numérique
- Caméscopes
- Téléphonie portable (Marché de 1 milliard d'unités par an à partir de 2010)

Les marchés professionnel, scientifique, spatial et militaire ouvrent de nouveaux débouchés à de nouvelles évolutions de ce type de capteur.

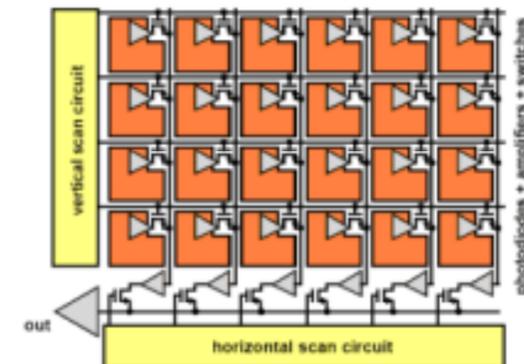
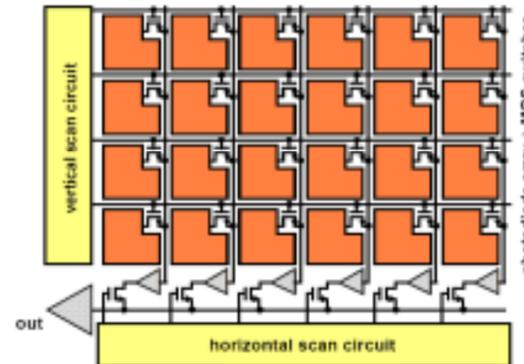
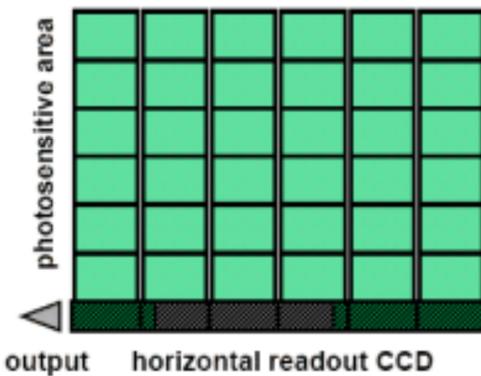


Matrices CCD Interlignes et CMOS DRO

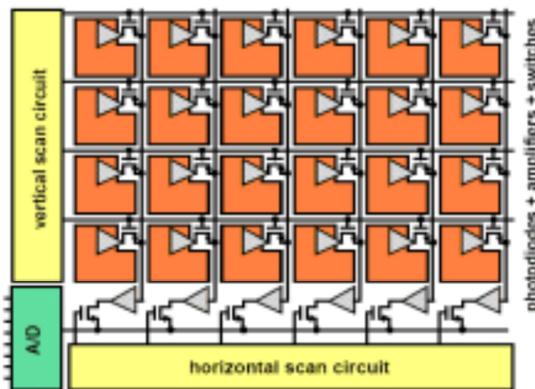
Architecture evolution



of
221

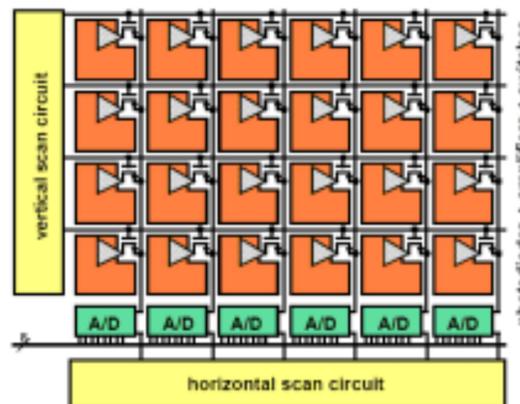


Charge-Coupled-Device



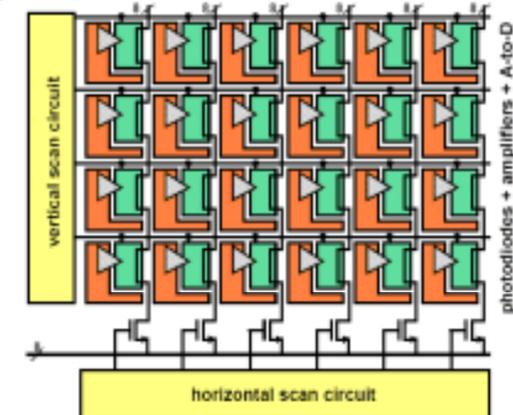
APS on-chip ADC

Passive nixel



APS column ADC

Active nixel

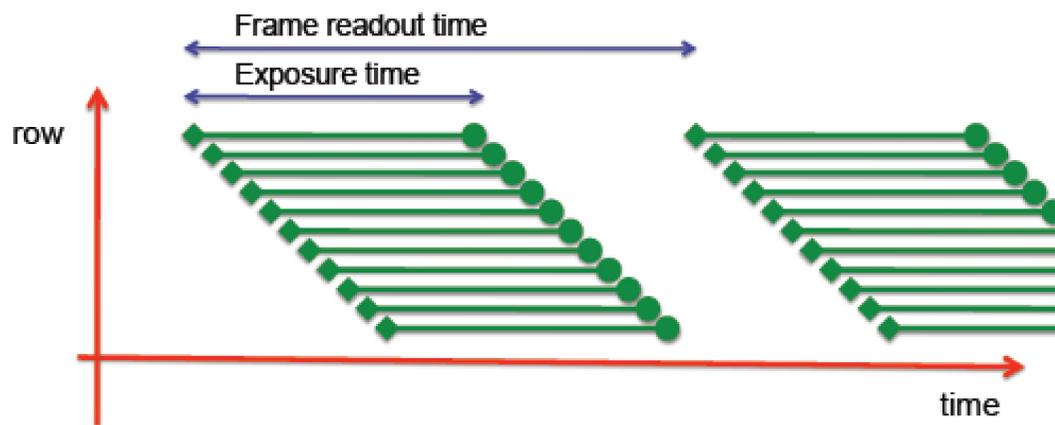
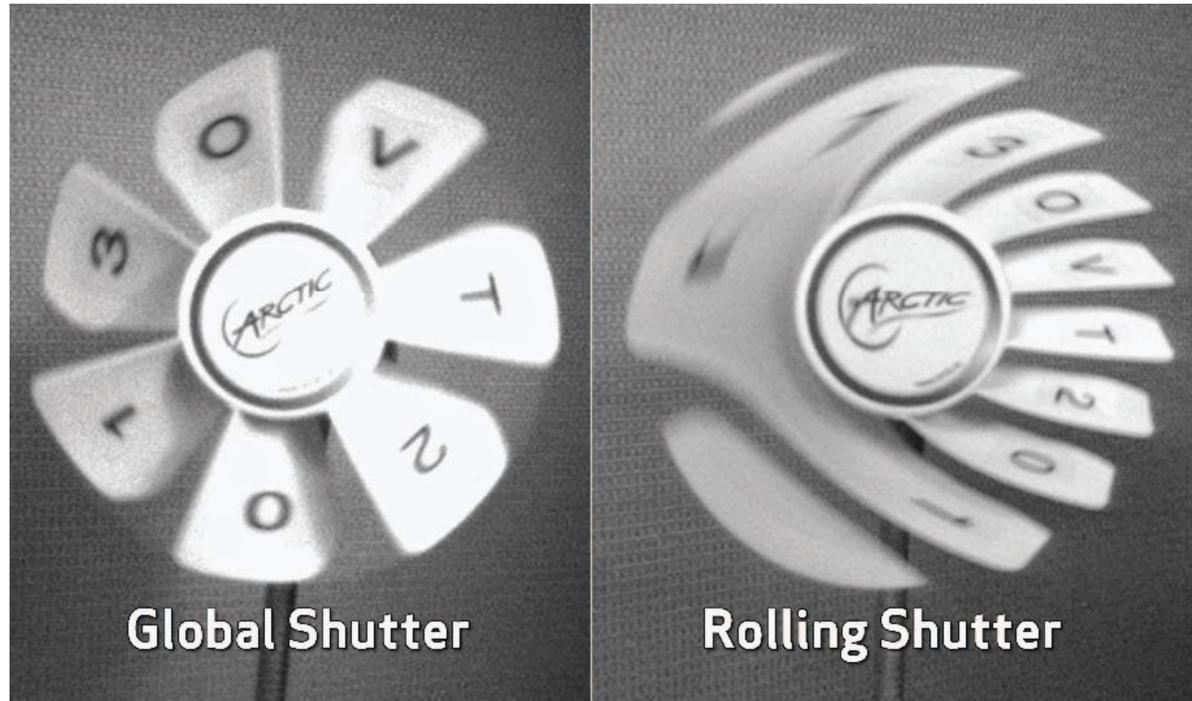


APS In-pixel ADC

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

4T Rolling shutter

5T Global shutter



Intégration sur le chip

- 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
- Vers la camera mono puce (camera on chip)...
- Vers l'intégration en z

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 caméras de cinémas numériques
- Diminution des pixels : 2008 CMOS 3T à 1 μ m de pas avec les technologies 0,065 μ m ainsi nous sommes proche de la longueur d'onde.
- Augmentation du nombre de transistors par pixel : 4, 5, 6T... 100T
- Augmentation de la sensibilité: en 2009 matrices CMOS amincies éclairage face arrière, et PIN diode épaisse pour la réponse dans le PIR
- En route pour le 5nm et l'intégration en Z

Les tendances technologiques

- 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 > 100 Mpixels
 - 2015 : une matrice CMOS 250 Mpixel de 30mm de coté Canon
 - Lancement de la camera du LSST 3GPixel (CCD)
- Réduction du pas <math> < 5\mu\text{m}</math> vers - Réduction du bruit de lecture - Augmentation du QE en back illuminated >90% à - 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 16bits et plus
- Fonderie Wafer 450mm pour matrice CMOS
- Concentration des industriels par rachats et fusions 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 reprends Kodak Truesense, Aptina, Cypress
 - AMS rachète CMOSIS
 - Sony Sony Sony

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)

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
- Un CCD présente un bruit stationnaire et une plus grande uniformité mais avec un bruit plus fort qu'une matrice CMOS 4T
- Capteur complexe mais camera plus simple à concevoir

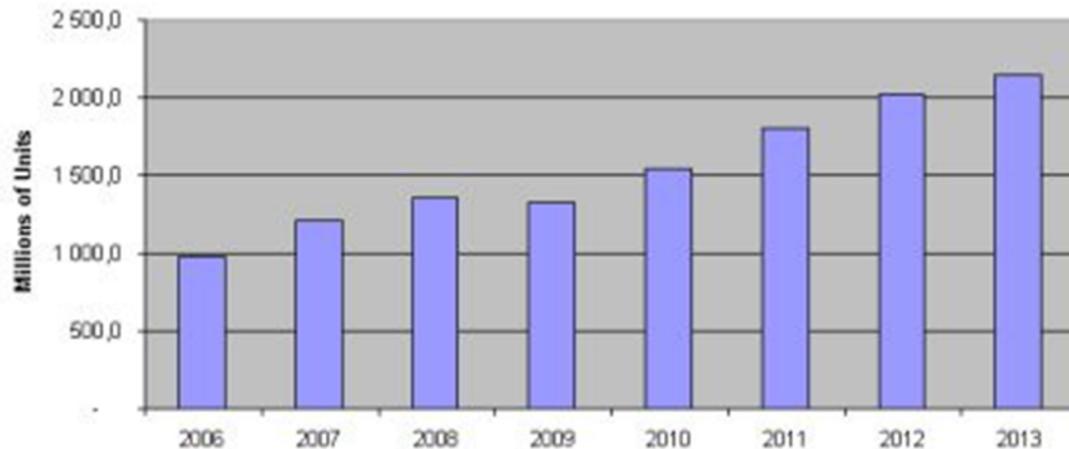
Avantages Inconvénients CCD CMOS

	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



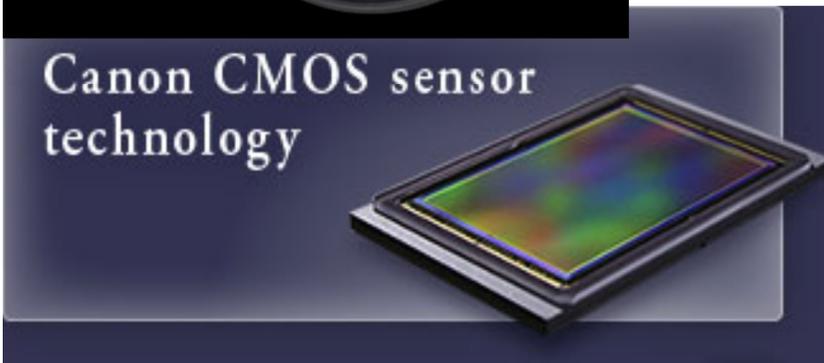
Le coût du composant résulte de :

- 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 μ 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



Exemples de matrices CMOS



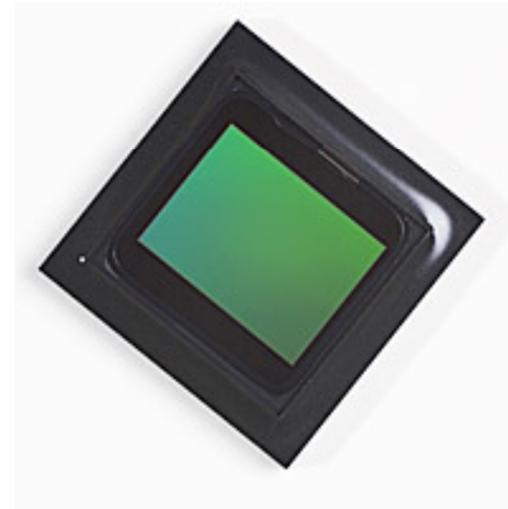
Canon 5Ds et 5Dsr

Matrice CMOS 50,6 millions de pixels

8700 x 5800

24 x 36 mm

Pixels de 4,1 μ m



Aptina (ex Micron) :

Matrice CMOS 8 Mp

3264 x 2448

4.57 x 3.43 mm

Pixels de 1.4 μ m

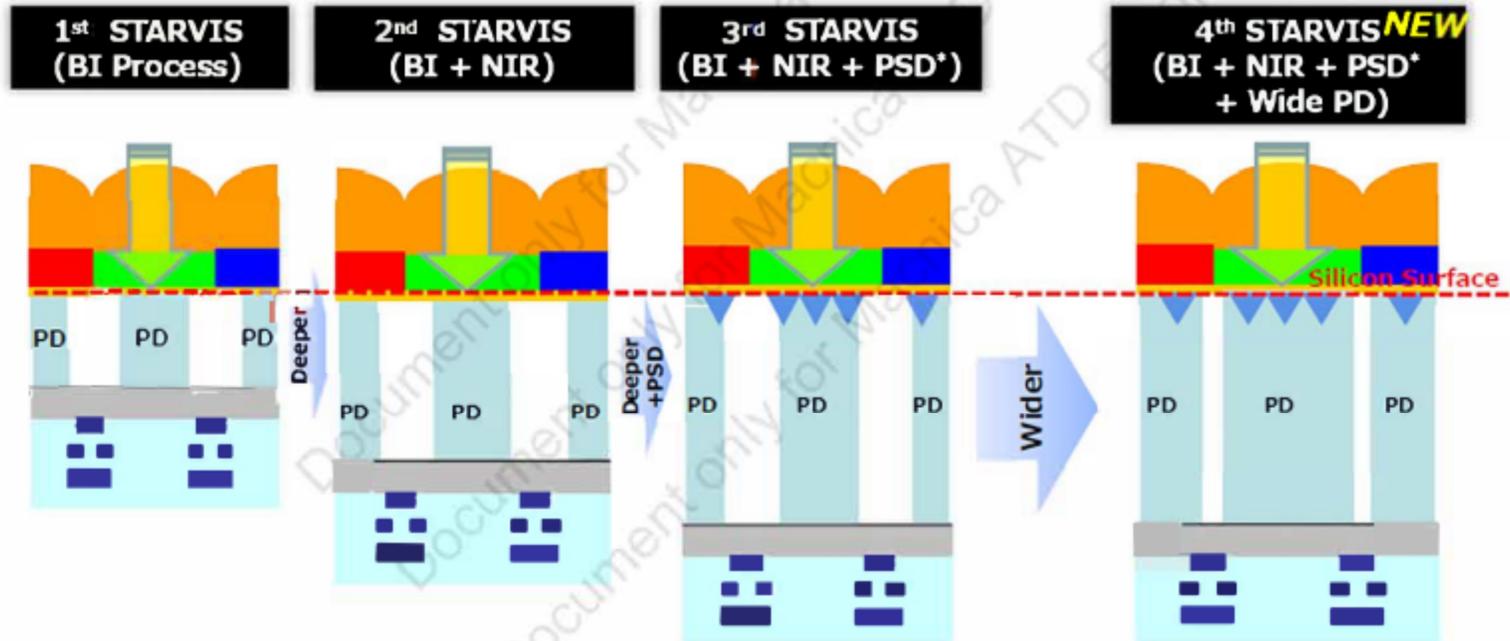
2021 Sony roadmap

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 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

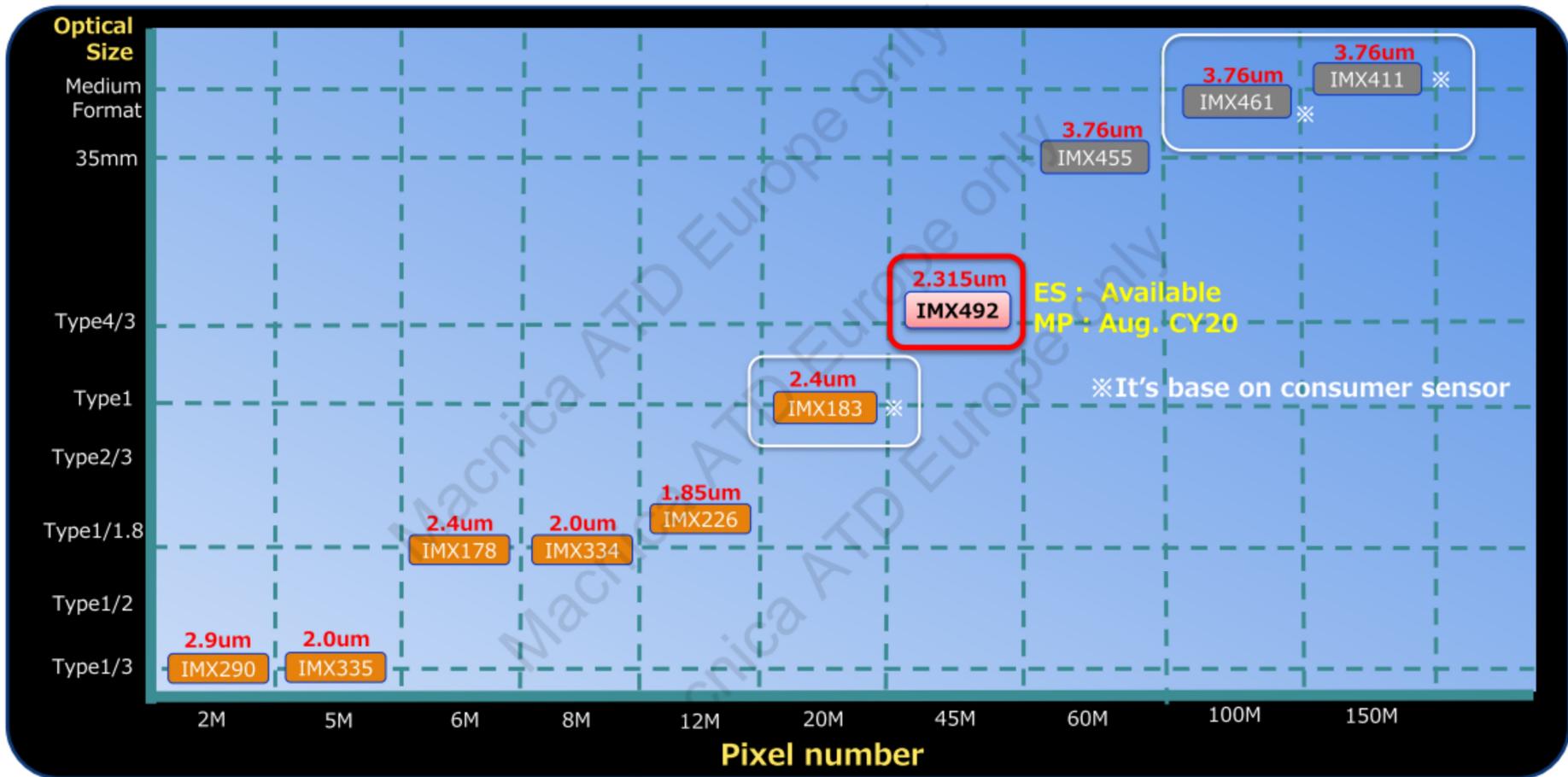
- IMX411
- IMX461
- IMX455
- IMX410
- IMX571
- IMX271
- IMX299
- IMX269
- IMX183
- IMX283

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	IMX455 30fps, SLVS-EC(8)			1.45um	2.0um NIR
	26M	IMX571 60fps, SLVS-EC(8)			monochrome	1.45um NIR
	9M	IMX533 76fps, SLVS-EC(8)			Other	
1/1.2	11M	IMX294 120fps, MIPI(4)/SLVS-EC(8)				
	8M	IMX485 90fp, MIPI(8)		New IMX585 S4 th 90fps, MIPI(8)	ES : CY21/3Q	MP : CY21/4Q
1/1.8	2M	IMX482 90fps, MIPI(8)				
	12M	IMX226 40fps, LVDS(10)	IMX226(mono) 40fps, LVDS(10)			
	8M	IMX334 60fps, MIPI(8)	IMX334(mono) 60fps, MIPI(8)		New IMX678 S4 th 90fps, MIPI(8)	ES : CY21/3Q MP : CY21/4Q
	6M	IMX178 60fps, LVDS(10)	IMX178(mono) 60fps, LVDS(10)			
	4M	IMX347 90fp, MIPI(4)		IMX464 S3 rd 90fps, MIPI(4)		
1/3	2M	IMX385 120fps, LVDS(8)/MIPI(4)				
	12M	IMX412 60fps, MIPI(4)				
	8M	IMX415 90fps, MIPI(4)	IMX415 (mono) 90fps, MIPI(4)	New IMX515 S3 rd 60fps, MIPI(4)	ES : CY21/1Q MP : CY21/3Q	
	5M	IMX335 60fps, MIPI(4)	IMX335(mono) 60fps, MIPI(4)	New IMX715 S3 rd 90fps, MIPI(4)	ES : CY21/2Q MP : CY21/4Q	
	2M	IMX327 60fps, MIPI(4)/LVDS(4)	IMX307 60fps, MIPI(4)/LVDS(4)	IMX462 S3 rd 120fps, MIPI(4) LVDS(8)		

Rolling Shutter Line Product MAP

TENTATIVE

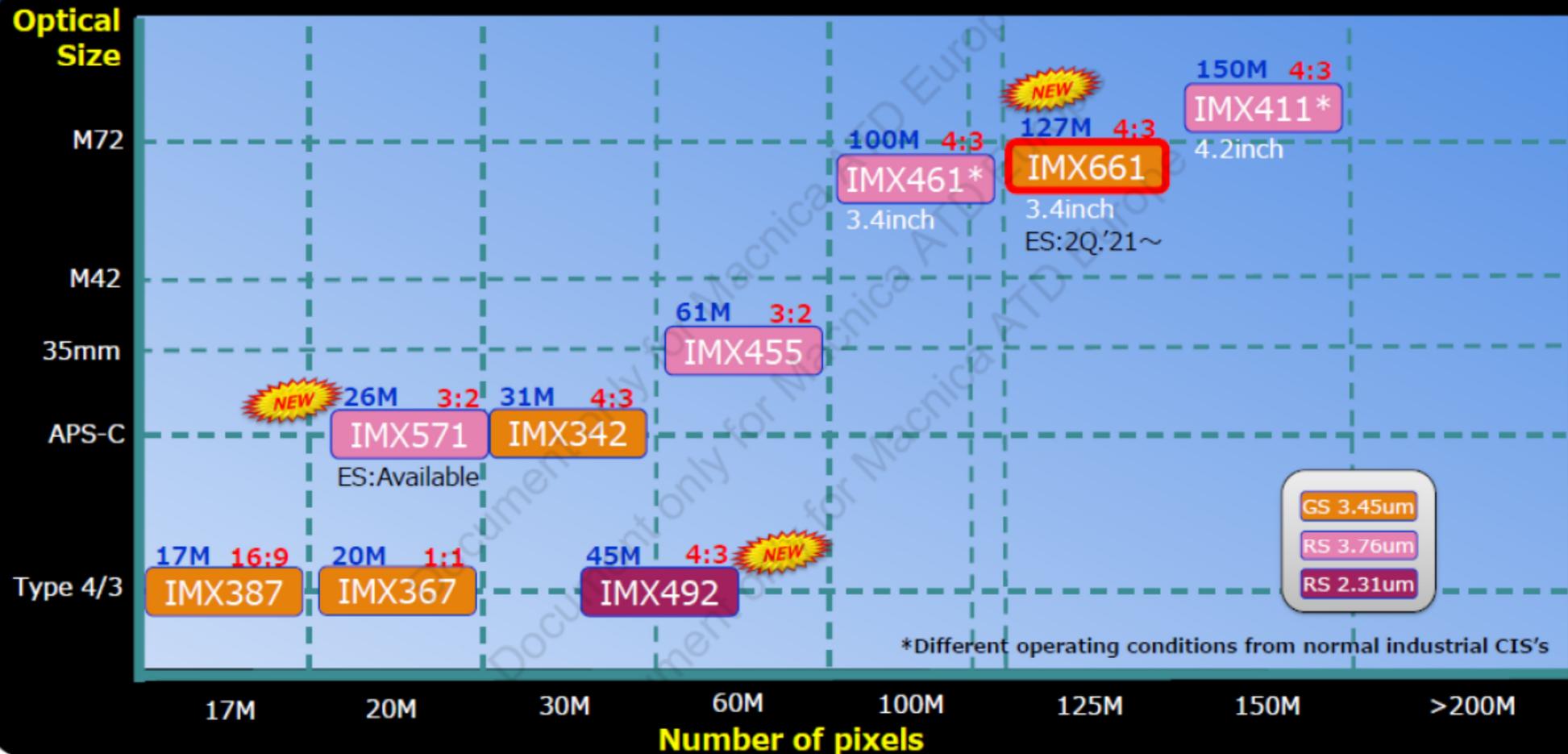
SONY



Large format Sensor Line-Up (GS & RS)

SONY

Optical Size



IMX571 (2021)

IMX455 (2020)

STARVIS Backill 3.76 μ m pitch

22x28, 26Mpixels
6244x4168 pixels

24x36, 61Mpixels
9568x6380 pixels

RS 72MHz 2304Mbps

36dB PGA circuit 16bit A/D

6.84 fps, 16bit

3.9fps, 16bit

12bit 4K video

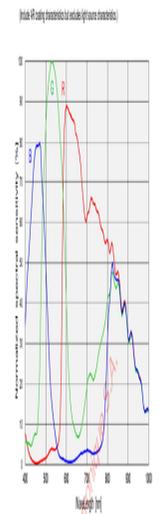
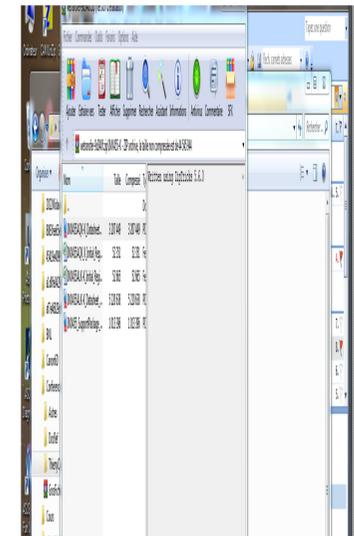
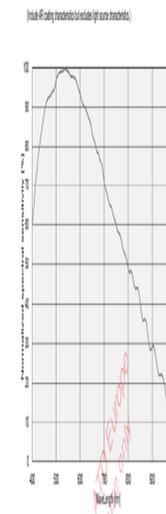
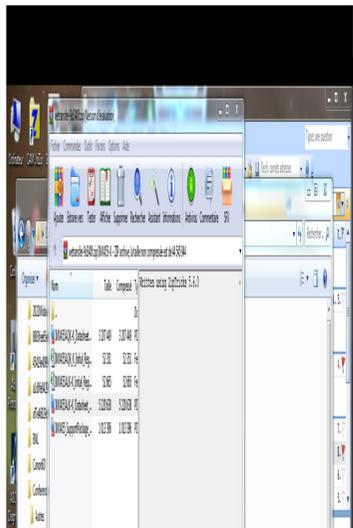
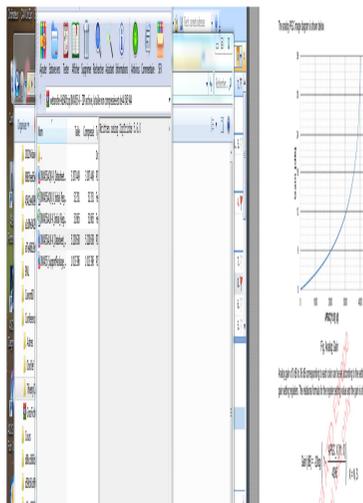
8K video 30fps

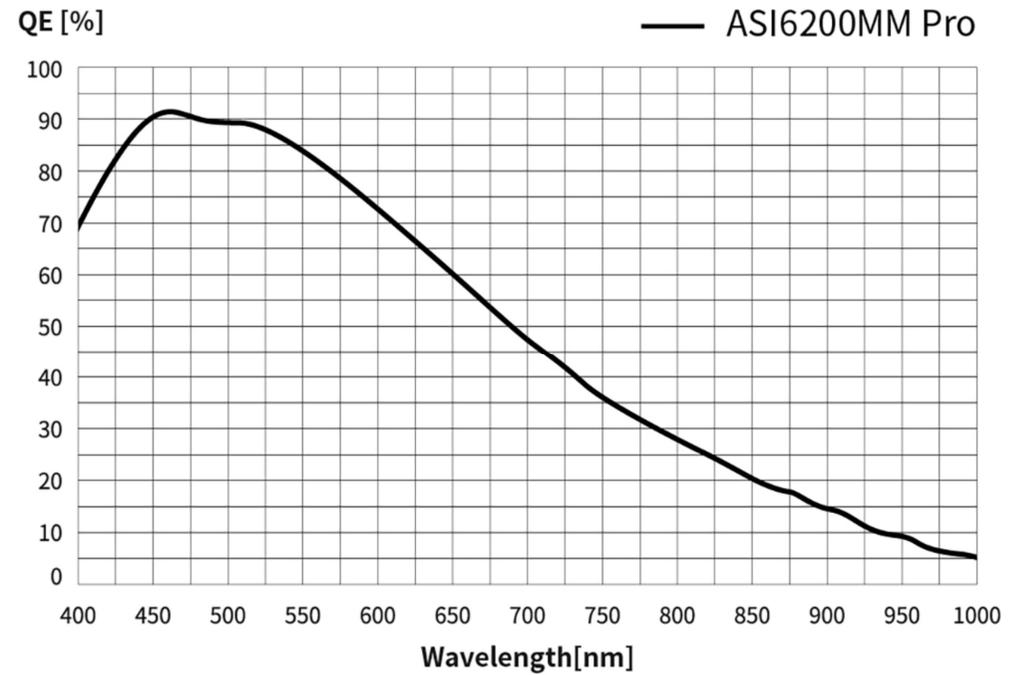
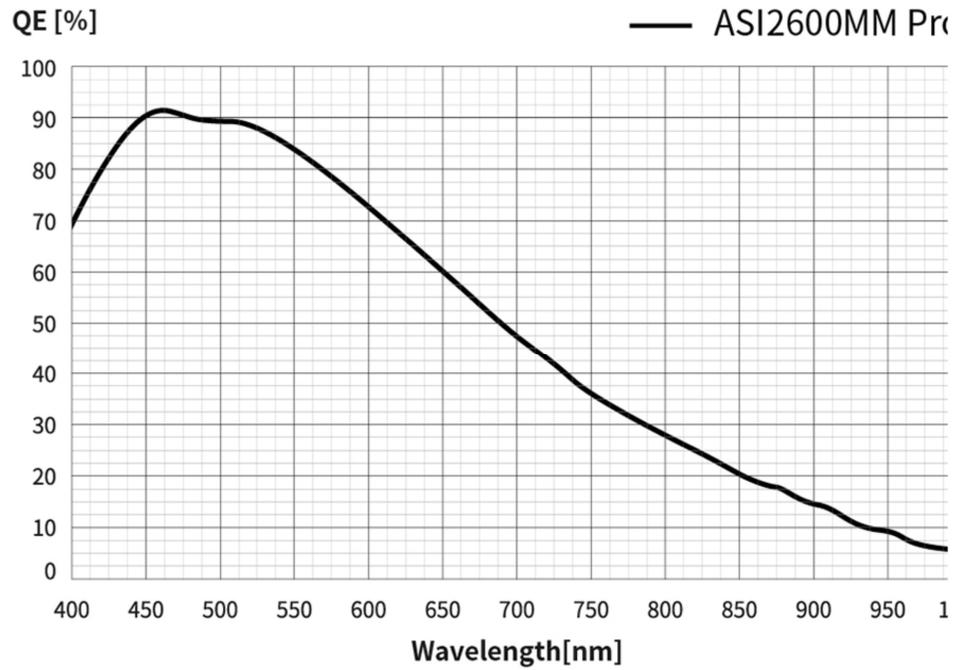
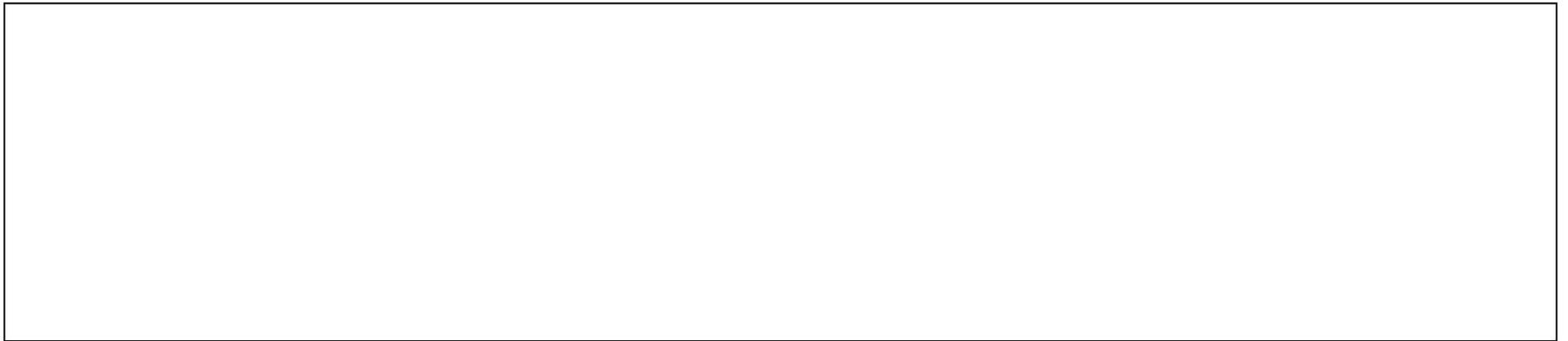
ZWO2600MMPPro

ZWO6200MMPPro

QHY268Mpro

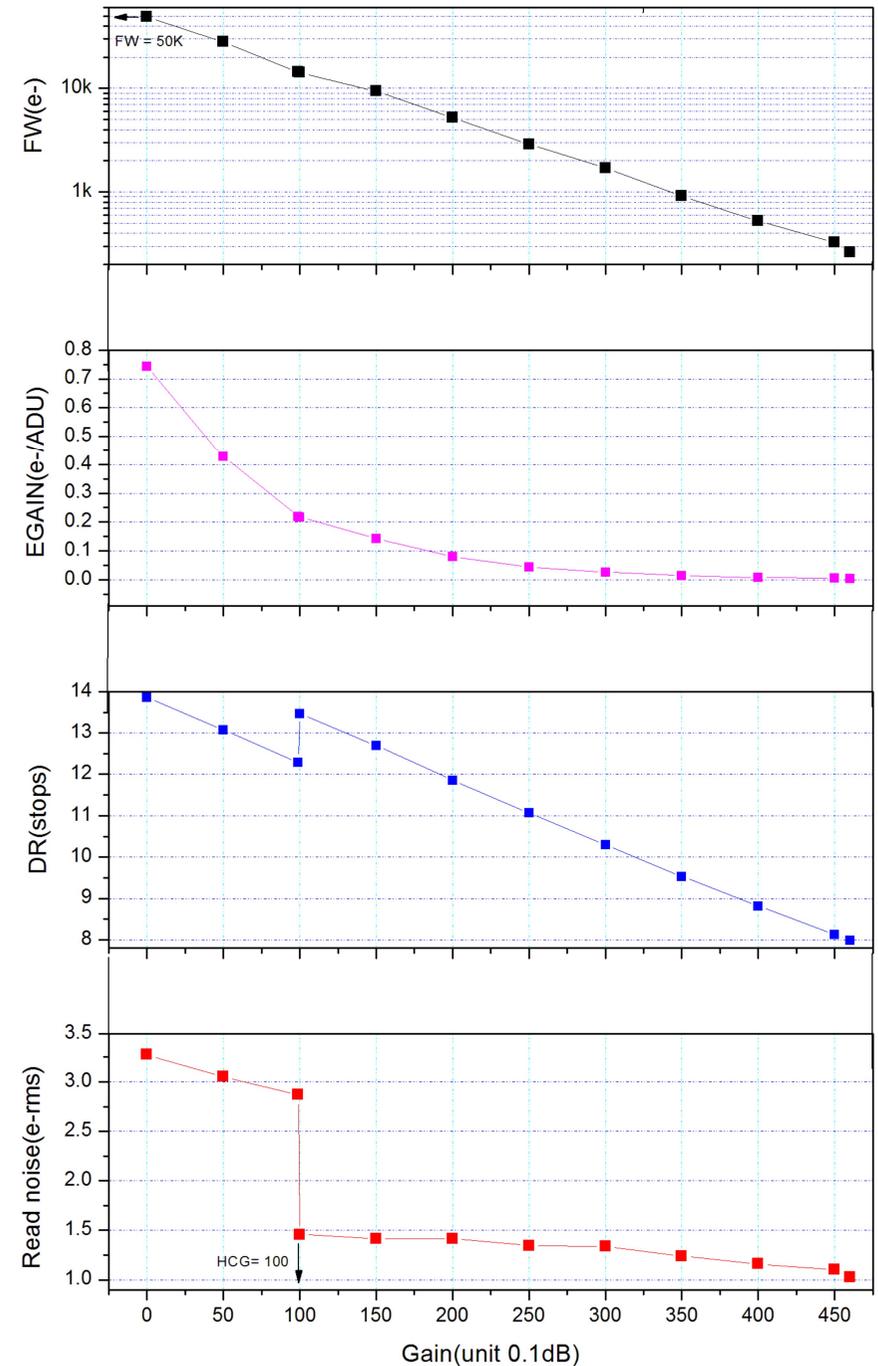
QHY600Pro





Le gain des cameras CMOS Sony

- en centibel !?! C'est pas clair
- Gain de X équivaut à un gain de $10^{X/200}$
- Un gain de 0 vaut x1
- Un gain de 100 vaut x 3,16
- Un gain de 200 vaut x 10
- Un gain de 300 vaut x 31,6
- Un gain de 400 vaut x 100



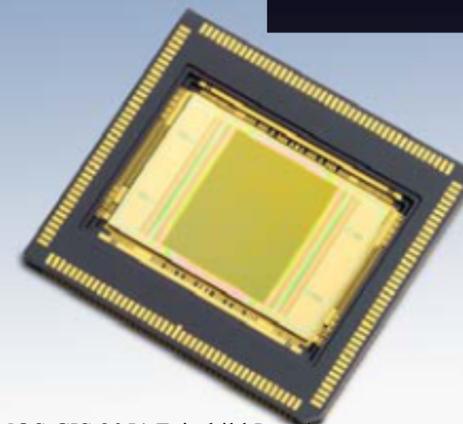
Le sCMOS faible bruit

- Introduction en 2009 de Matrices CMOS scientifiques à faible bruit : sCMOS
- Mise sur le marché de premières cameras en 2010
- Ref workshop dec 2009 CNES Toulouse Matrice 4T CDS et 5T GS
- 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

Fairchild
imaging

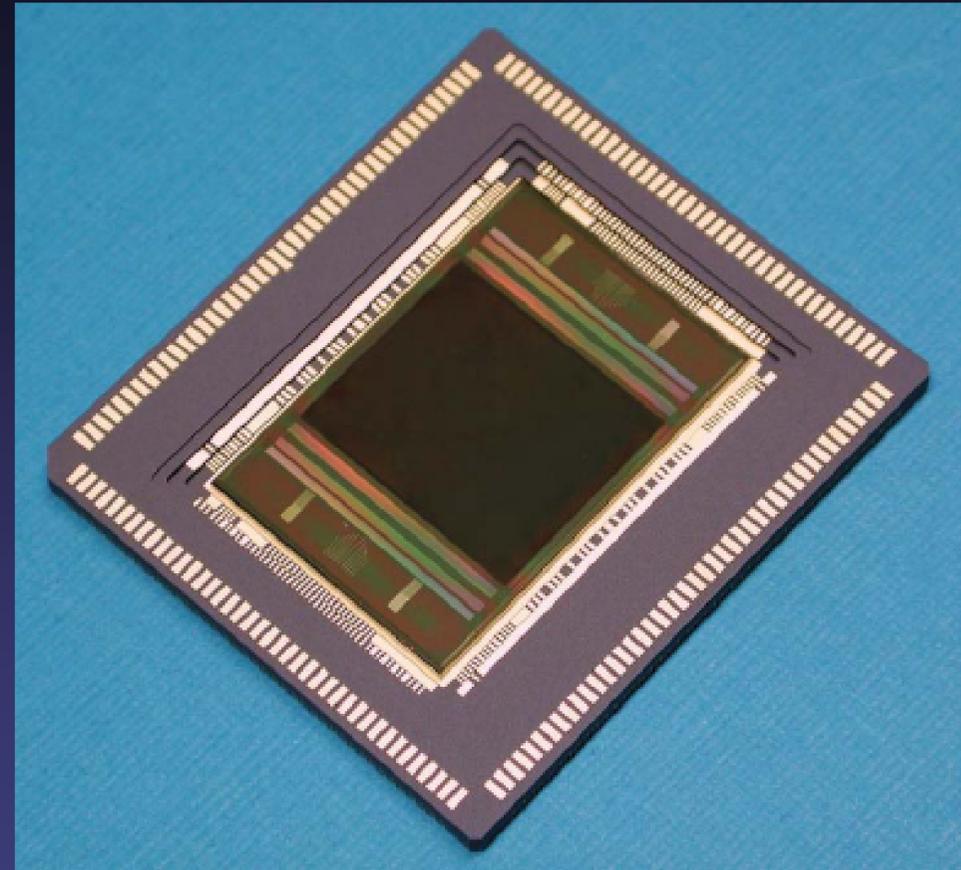


Matrice CMOS CIS 2051 Fairchild Imaging

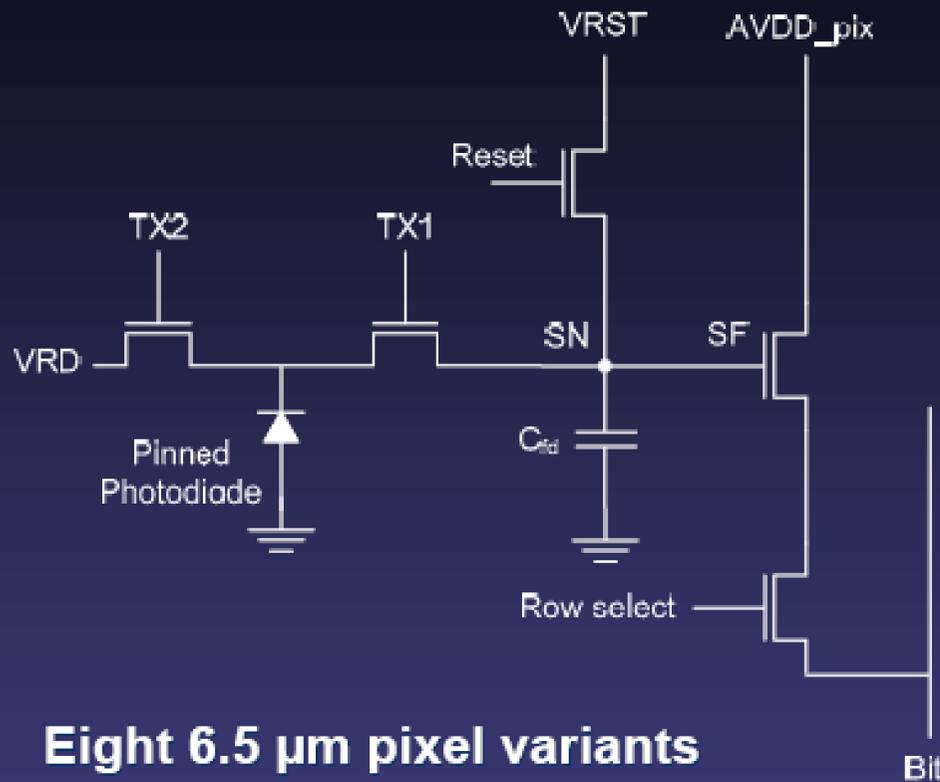


CIS2051 5.5 Mpixel Image Sensor

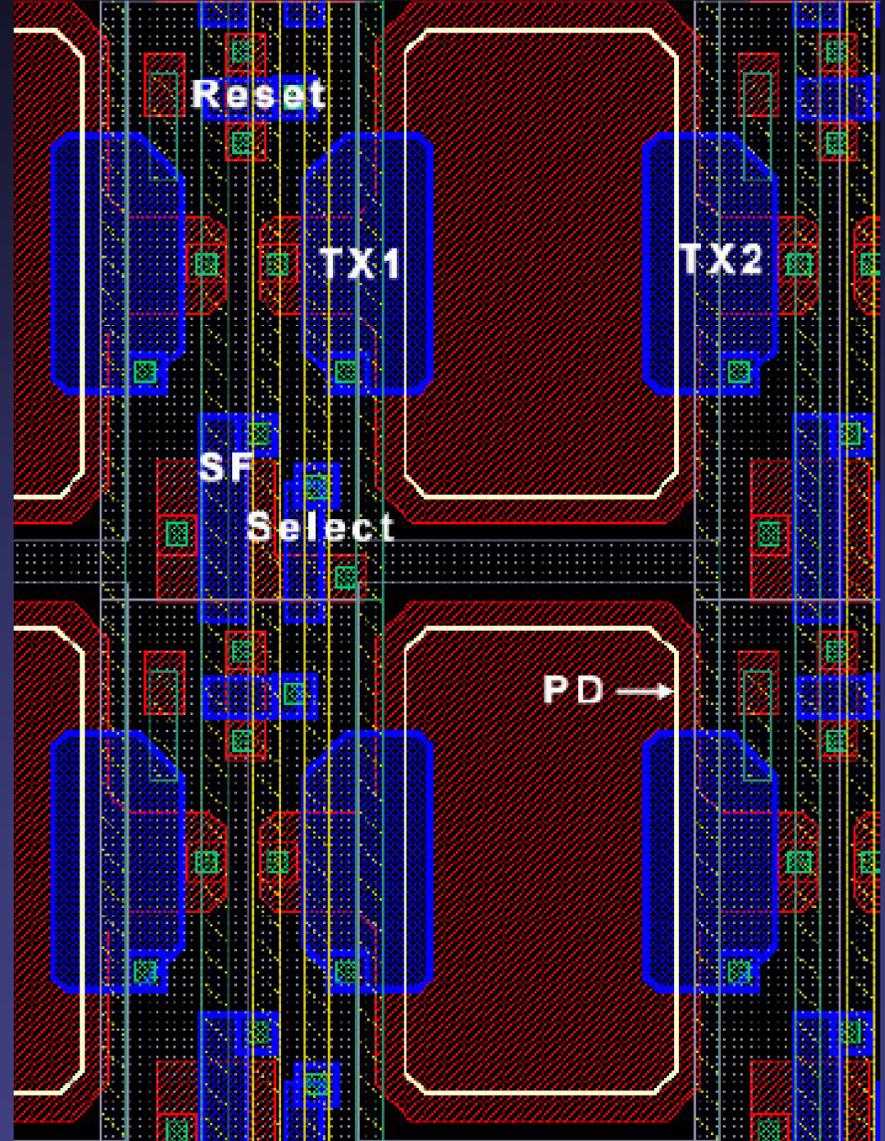
- 6.5 μm^2 5T pixel architecture
- 2560(H) x 2160(V) imaging array
- Dual gain 11-bit output channels
- 100 fps in rolling shutter readout
- 50 fps in global shutter readout
- Read noise < 2e- rms at 30 fps RS
- Dynamic range > 83 dB (15000:1)
- QE > 55% at 600 nm
- Dark current at 20°C 3 pA/cm²



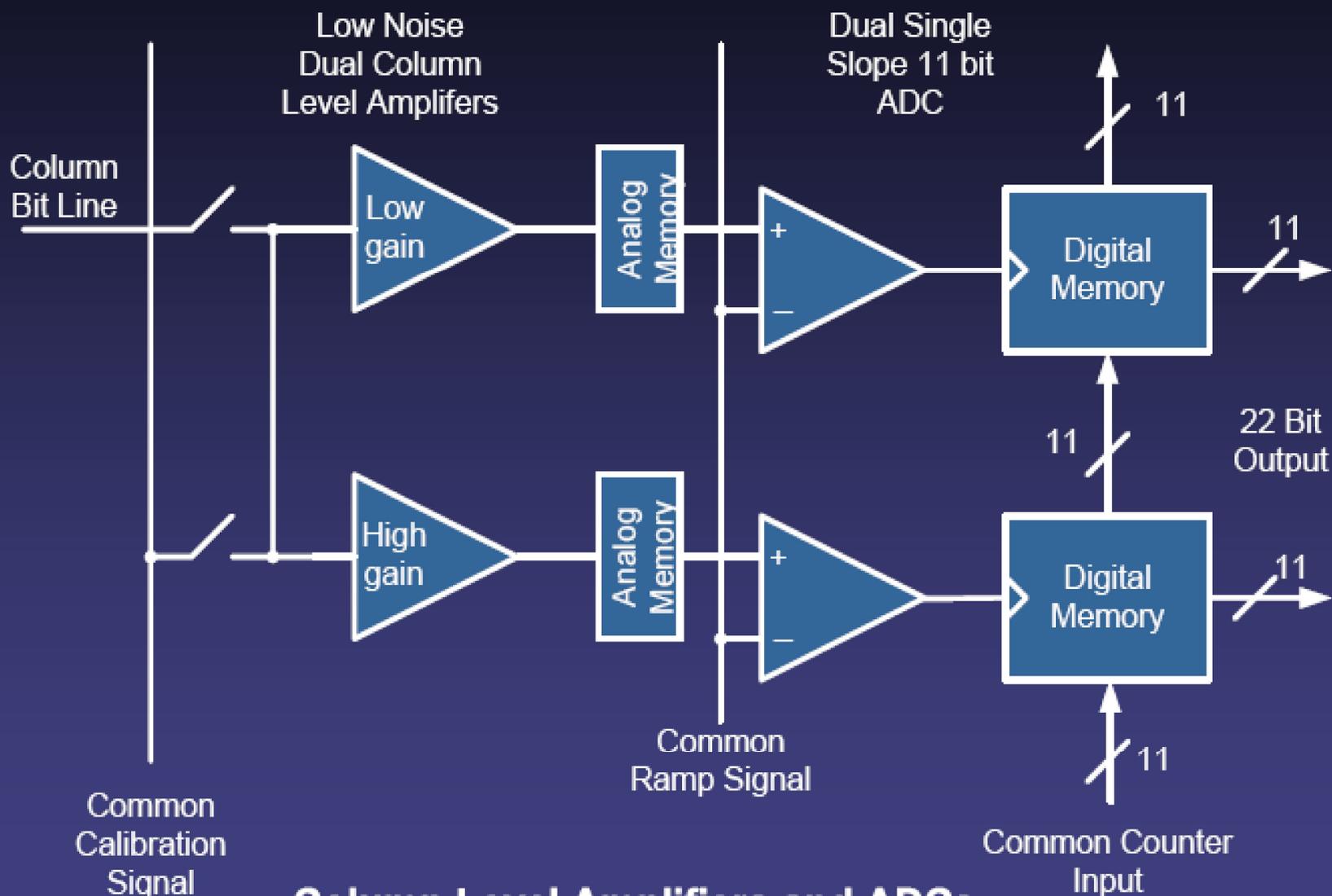
Pixel Design



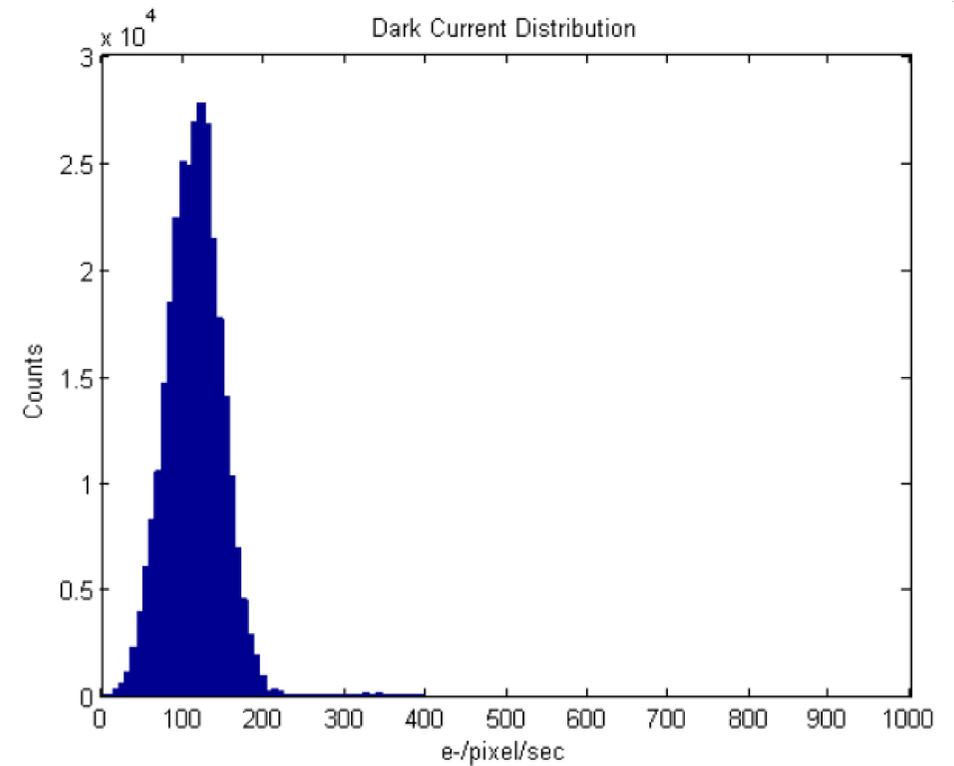
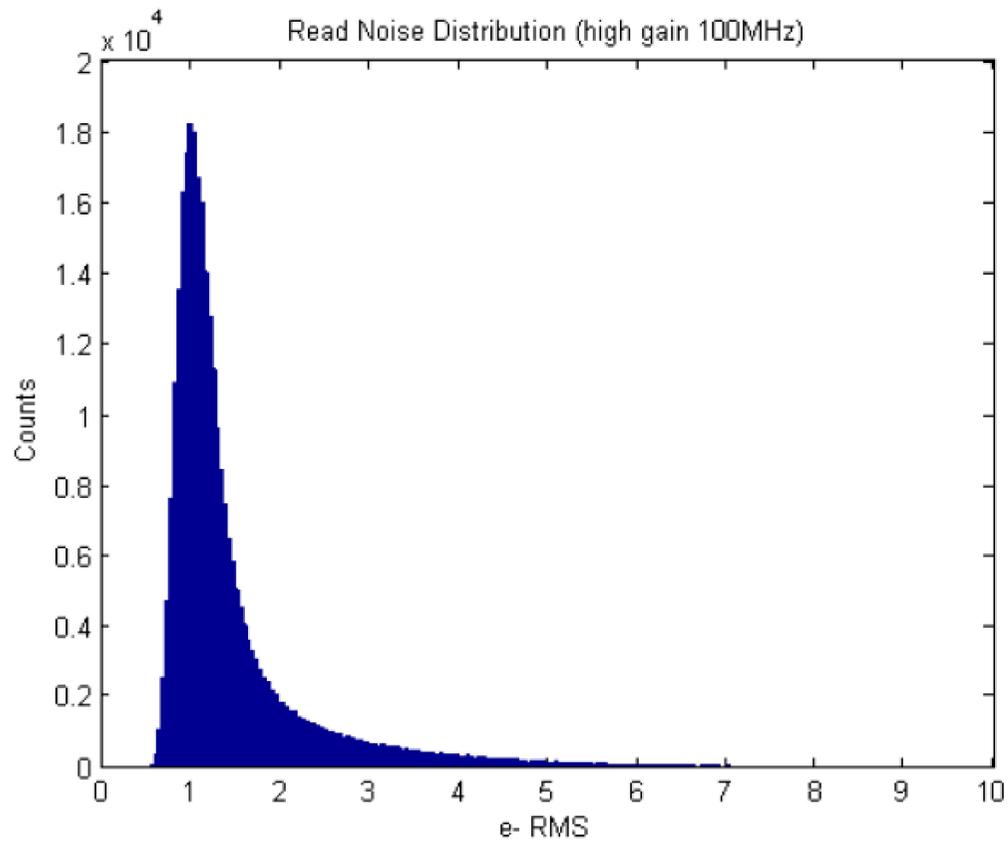
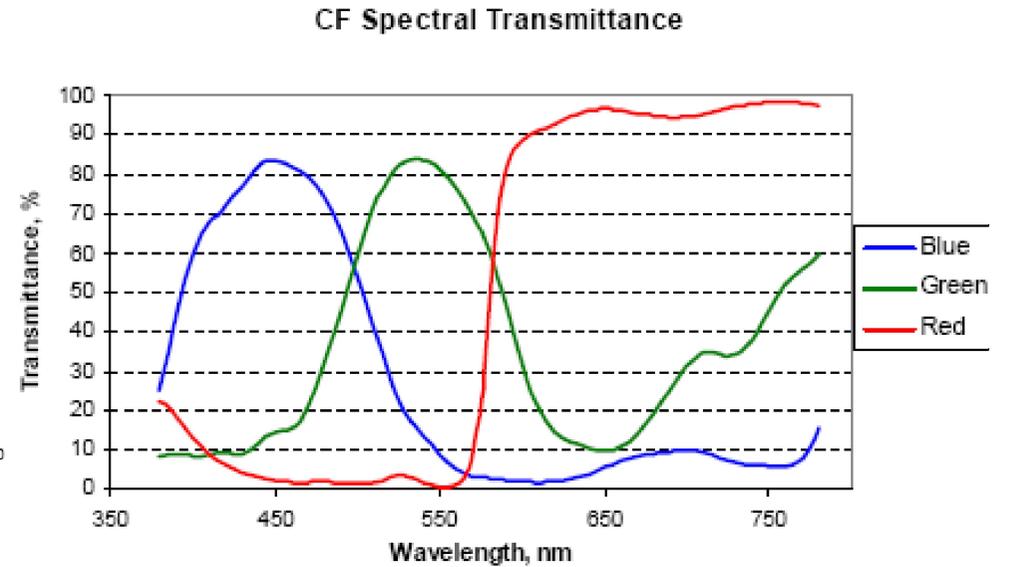
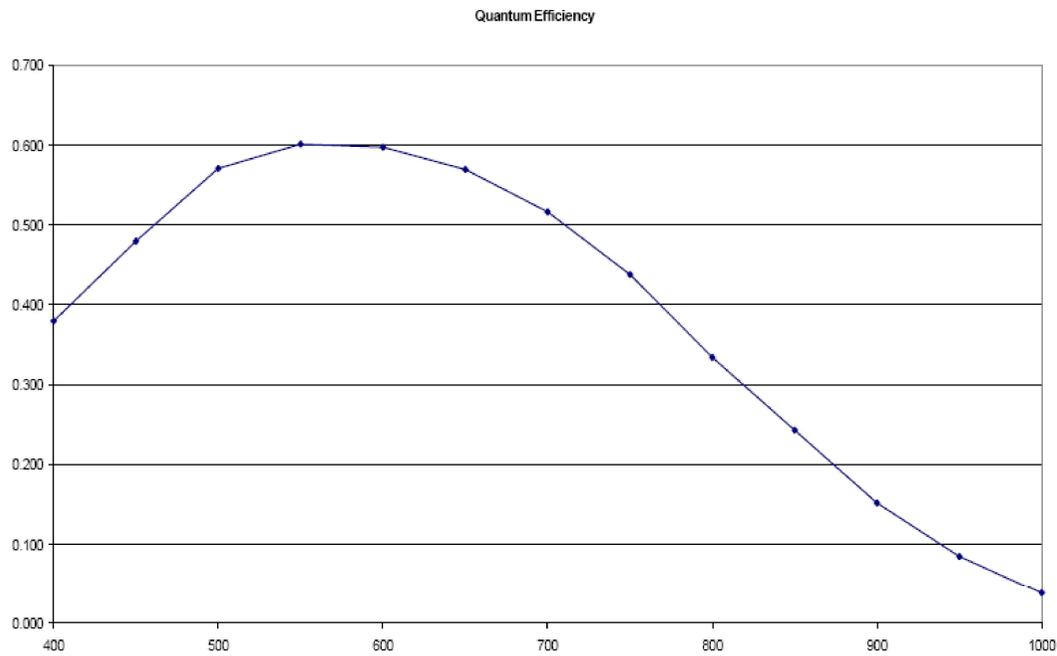
- Eight 6.5 μm pixel variants
- 5T pinned photodiode (PPD) pixel
- High conversion gain ($\mu\text{V}/\text{e}^-$), low dark current, and low lag
- Low readout noise with true CDS
- TX2 transfer gate functions as anti-blooming drain and global reset



Wide Dynamic Range Architecture

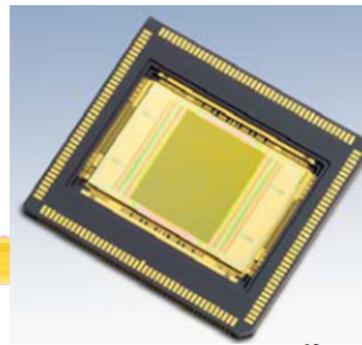


Column Level Amplifiers and ADCs



Technologies sCMOS faible bruit

- Matrice 4T CDS
- Capteur CMOS classe 1 e de bruit
 - Fairchild Imaging – Sony – e2v Teledyne, Gpix
- Camera haute cadence classe 100fps
- sCMOS 2.0 : 0,8^e RMS
- La révolution des dernières années en progrès constant susceptible de remplacer toutes les autres technologies



Spectral response

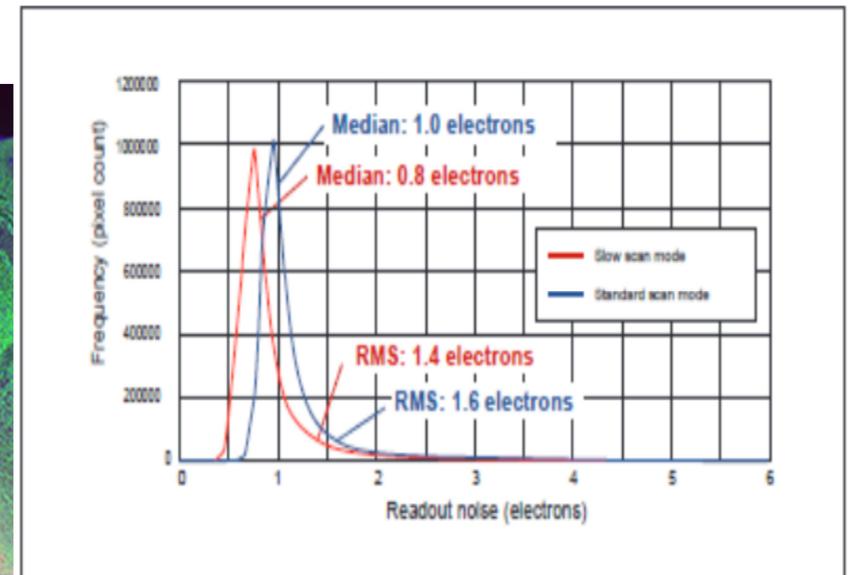
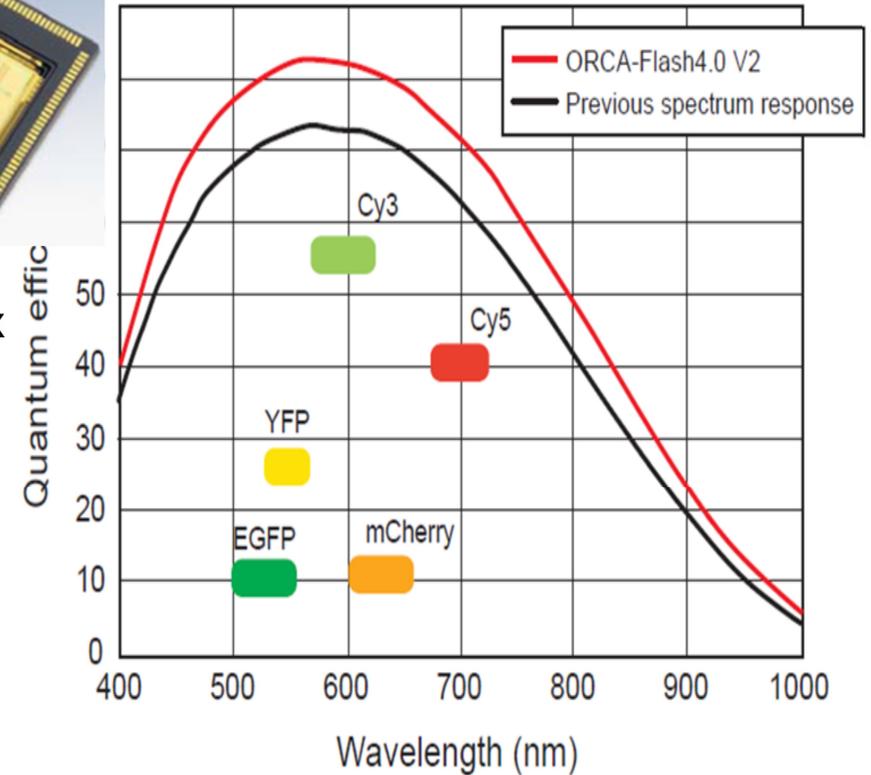


Figure 7. ORCA-Flash 4.0 V2 readout noise distribution

Les Photons

Chaque photon est généré par exemple par un atome ou une molécule suivant deux processus :

- L'émission spontanée dans un processus aléatoire indépendant.
- L'émission stimulée, dans ce cas le photon est émis sous la stimulation d'un photon incident sur l'atome ou la molécule.

Dans des conditions de très faible flux, l'émission spontanée domine.

Dans ce cas une source qui délivre en moyenne n photons par unité de temps peut être caractérisée par le temps moyen τ séparant l'émission de deux photons successifs avec

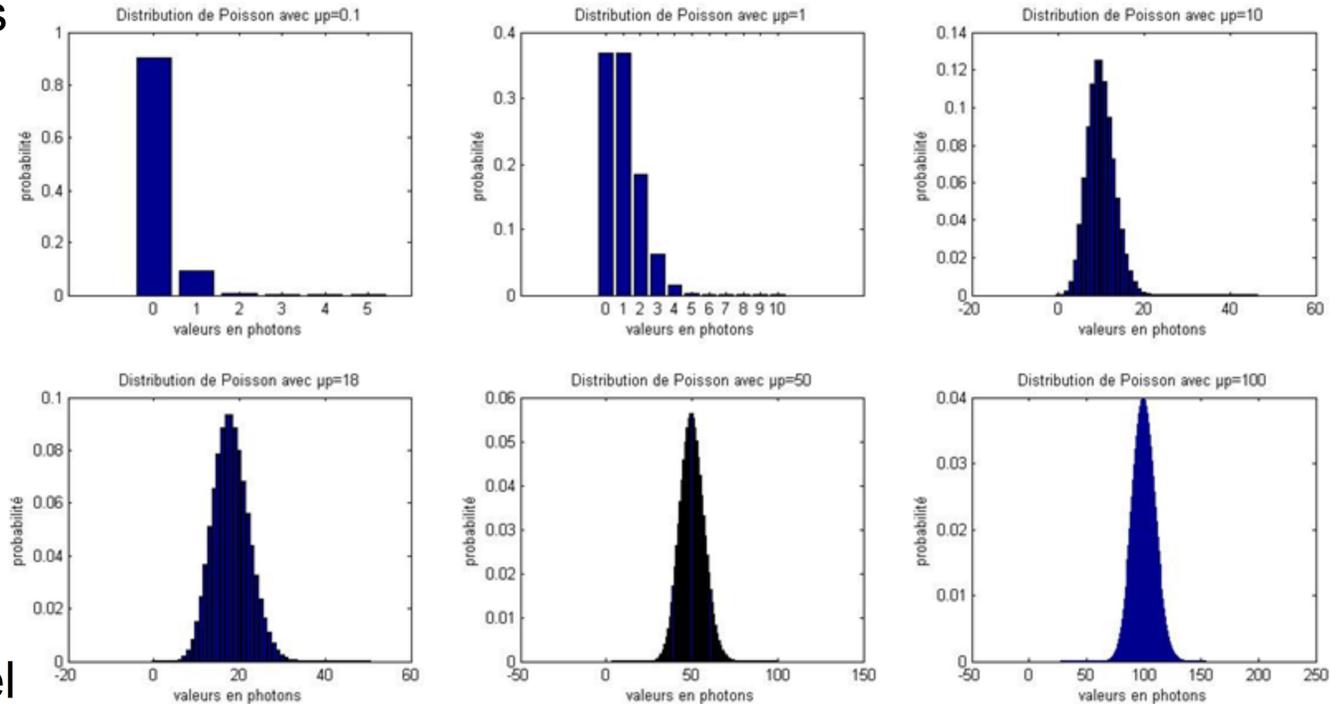
$$\tau = 1/n$$

La probabilité d'émission de k photons pendant un temps δt suit la loi de Poisson :

$$P\{k \text{ sur } \delta t\} = (n \cdot \delta t)^k \cdot \exp(-n \cdot \delta t) / k!$$

Le bruit de photon

- Histogramme des $P\{k\}$ du flux photonique pour $n=0, 1, 10, 18, 50, 100$ photons moyens



- Le bruit temporel
 - Sur un signal constant la fluctuation RMS d'une image à une autre est égal à la racine carré du nombre de photons collectés
- Le bruit spatial
 - Sur un signal constant la fluctuation sur une même image d'un pixel à un autre est égal à la racine carré du nombre de photons collectés

$$\text{Le } S/B = N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$$

La Loi de Poisson et probabilité d'avoir 0, 1 ou plus de 1 photon

- En fonction du flux moyen
 - Probabilité d'avoir 0 photon
 - 1 photon
 - 2 photons
 - ...
 - Et plus de 1 photon

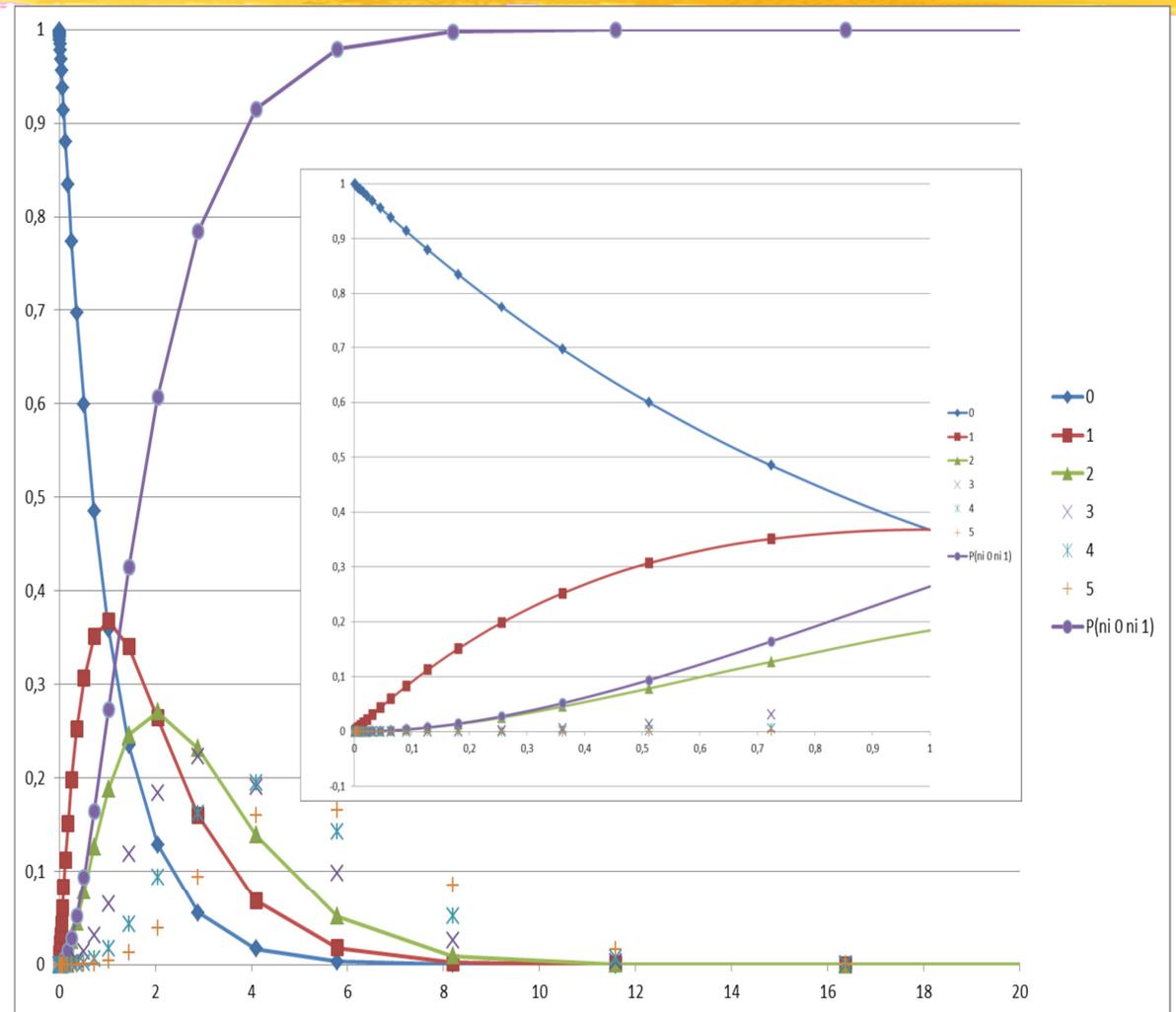
Limite du comptage 0 ou 1 photon

Avec un flux moyen de 0,15 photon par pixel on a :

86% des pixel à 0

13% des pixel à 1

1% des pixels à plus de 1



Probabilité d'avoir 0, 1, 2, 3 et plus de 1 photon par pixel en fonction du flux moyen μ_p en photon(s) par pixel et par unité de temps

Le mode comptage de photon(s)

- Le mode classique :
 - l'image est une superposition du bruit de lecture, d'obscurité, du signal photo électrique (QE) amplifié avec le facteur de bruit d'amplification F
- Le mode comptage de photon(s) : l'amplitude du signal est un entier :
 - le pixel compte 0 ou 1 photon par trame, qui est sommé sur N trames
 - Ou le pixel a convertis N photons par trame avec une variance de bruit inférieure à N
 - Ou on code le δt entre 2 photons pour coder l'amplitude
- En 2017 nous avons 3 alternatives pour le faible bruit :

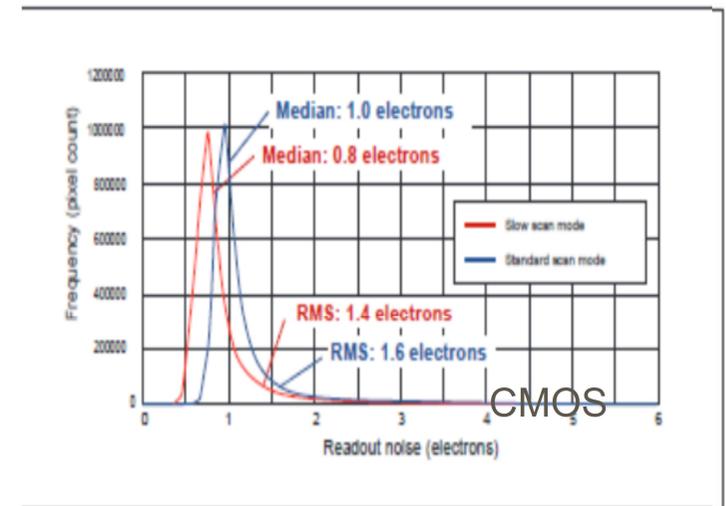
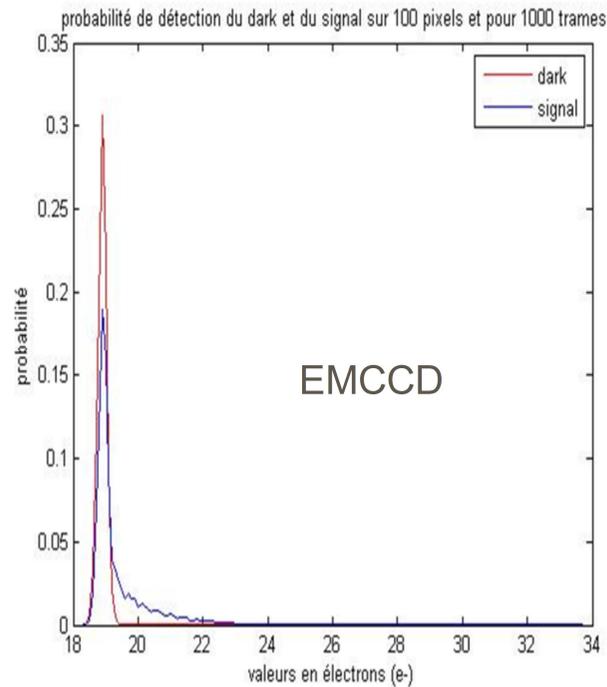
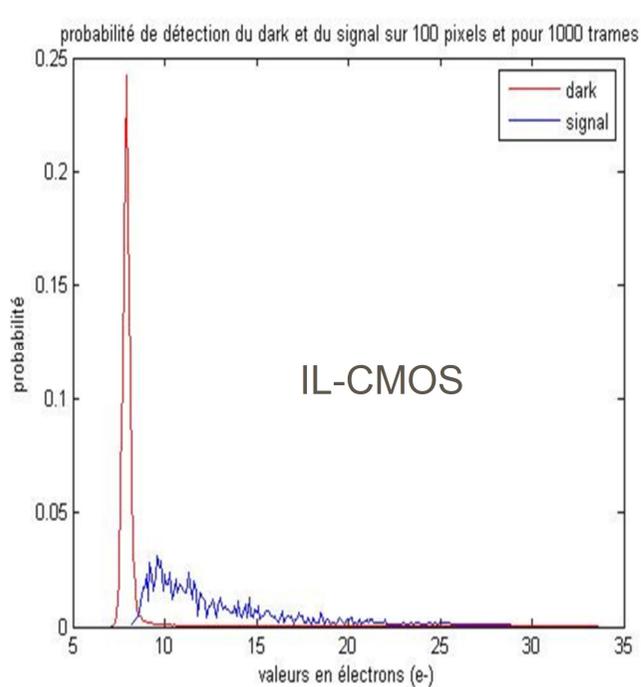


Figure 7. ORCA-Flash 4.0 V2 readout noise distribution

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

$$dyn_{inseens} = \frac{\text{fullwell capacity } [e^-]}{\text{readout noise } [e^-]}$$

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

Resolution [bit] $x \Rightarrow 2^x$	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

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

Figures de Mérites

- L'inverse du NEP :

QE/bruit de lecture ou le bruit min

- La bande spectrale équivalente (FWHM) en octave :

$$(\lambda_{\max} / \lambda_{\min}) - 1$$

- Adaptation du pas pixel à λ :

$$\lambda/p$$

- Ou en tenant compte du Nombre d'Ouverture (ON) :

$$\lambda \cdot \text{ON}/p$$

- La cadence image max $\text{fps}/25$

- La dimension du capteur rapporté au plan focal instrument

$$L_o \cdot L_a / 24 \times 36$$

- La quantité de Photoélectrons max collecté / la surface du pixel :

$$FW/p^2$$

JOTS Eric Fossum Hamamatsu Orca

optica

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: 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®

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)

histogrammes

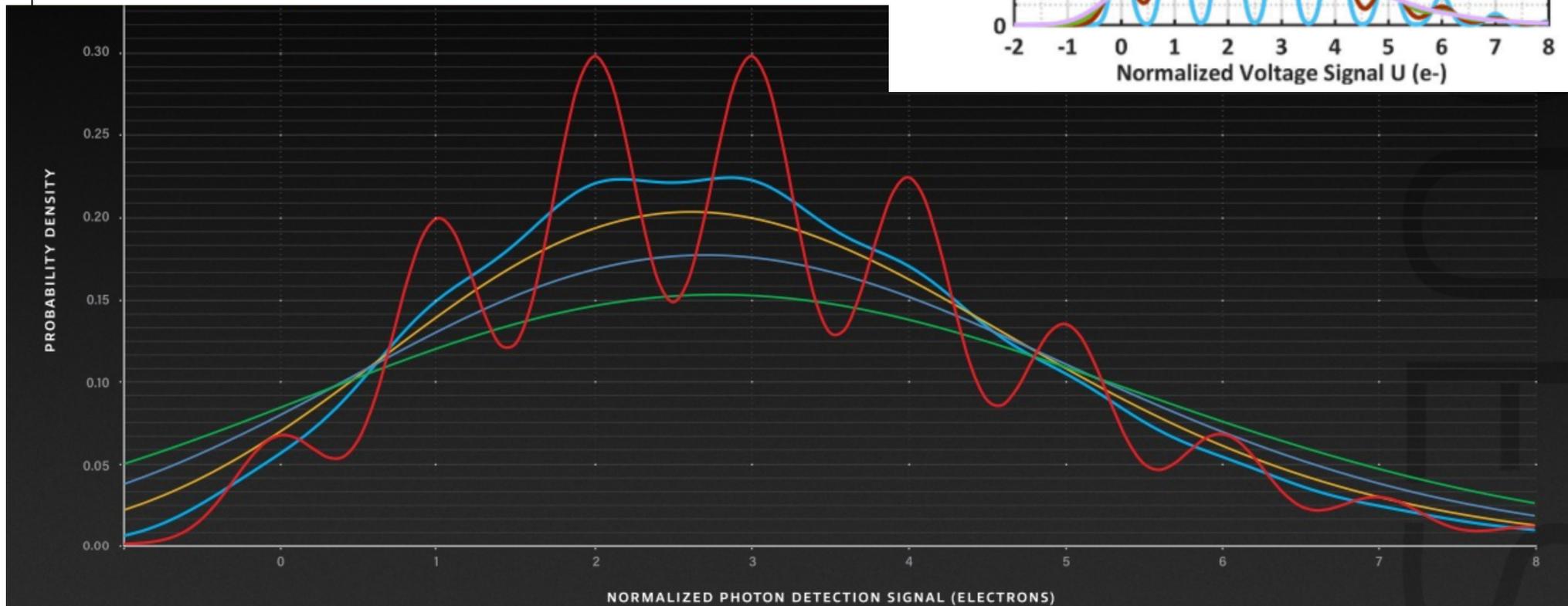
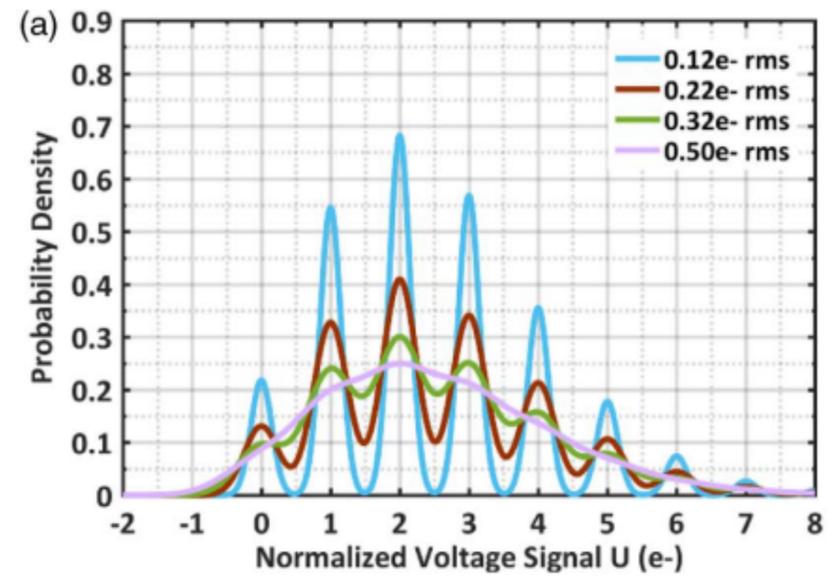


Fig. 1-1

The effect of camera noise on photon number resolving

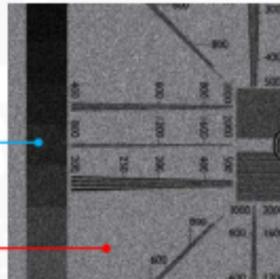
All five curves plot the probability distribution for a theoretical signal with a mean of three photoelectrons. The x-axis is the normalized signal in photoelectrons and the y-axis is the probability for a discrete photon number. In red is the calculated distribution for the ORCA-Quest with 0.27 e- rms. 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 — cyan
- 1.0 electrons — yellow
- 1.5 electrons — blue
- 2.0 electrons — green

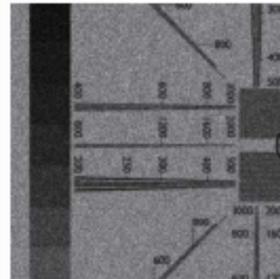
ORCA[®]-Quest
Photon Number Resolving

Approx. 3 electrons/pixel

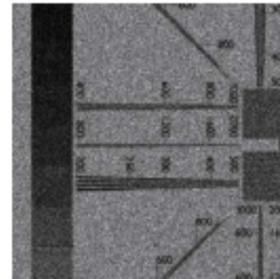
Approx. 10 electrons/pixel



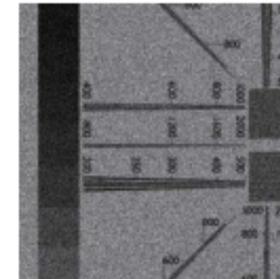
ORCA[®]-Quest
Ultra-Quiet Scan



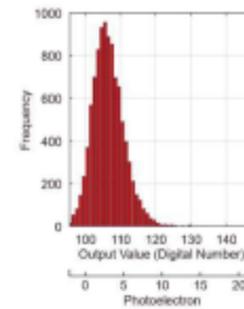
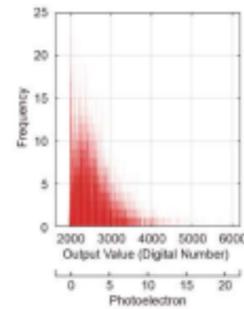
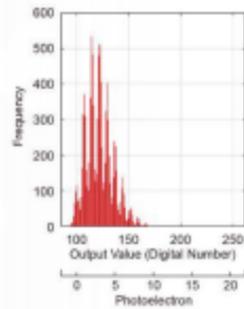
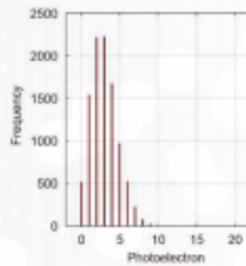
EM-CCD camera



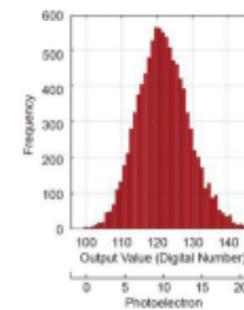
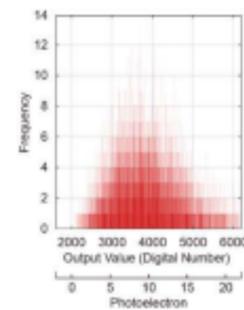
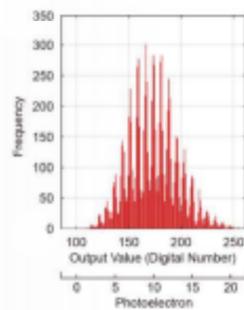
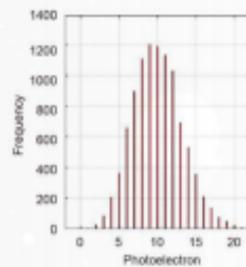
Gen II sCMOS camera



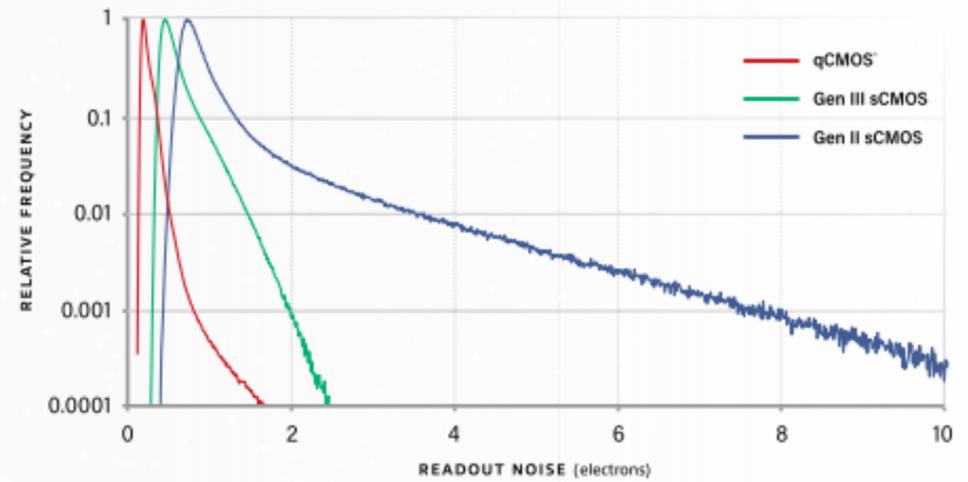
Average number of photoelectrons generated per pixel: 3 electrons



Average number of photoelectrons generated per pixel: 10 electrons



Bruit de lecture



ORCA-Quest

Intro

qCMOS

Noise

QE

Speed

Software

Specs

Team

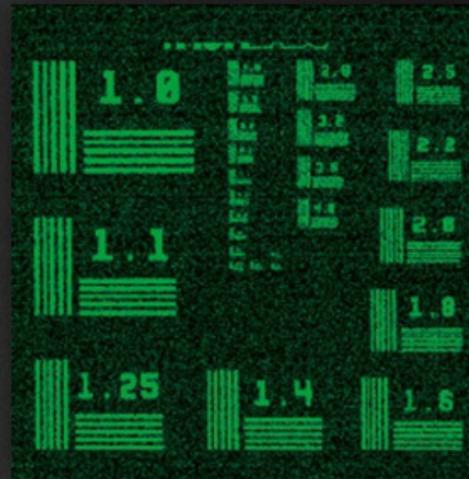
See what's been hidden in the noise

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 manufacturers 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 °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

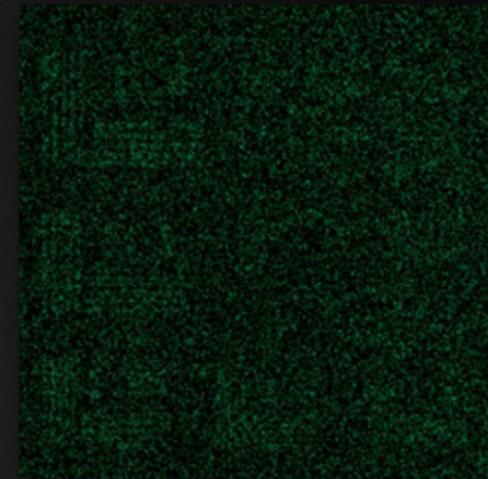


Fig. 2-3

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

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

ORCA-Quest

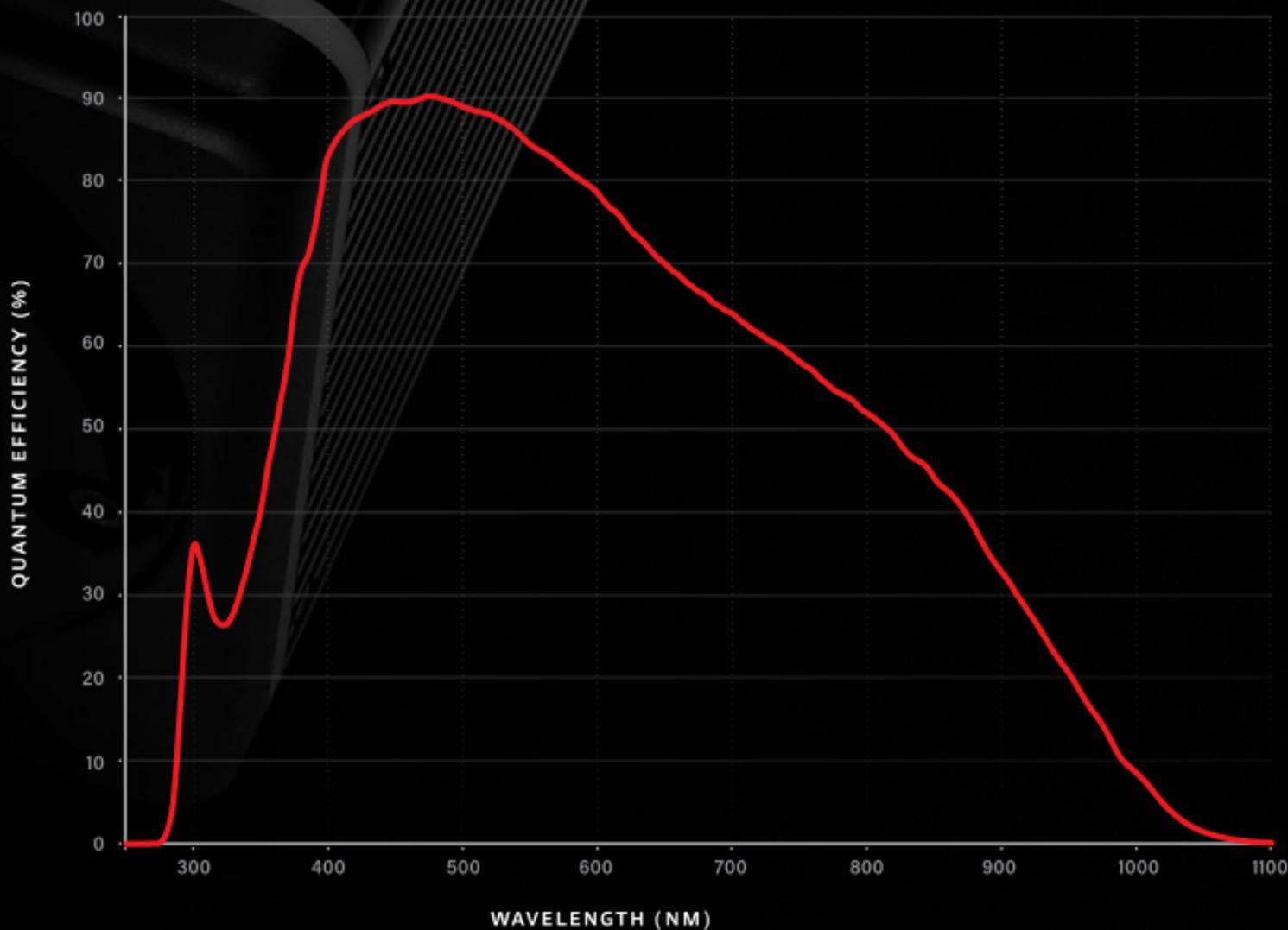
Intro

qCMOS

Noise

QE

Speed



Imaging Device

ORCA[®]-Quest

qCMOS[®] Image Sensor

Product Number

C15550-20UP

Pixel Size

4.6 μm (H) × 4.6 μm (V)

Effective number of pixels

4096 (H) × 2304 (V)

Effective Area

18.841 mm (H) × 10.598 mm (V)

¹Calculated from the ratio of the full well capacity and the readout noise in Ultra quiet scan

²The water temperature is +20° C and the ambient temperature is +20° C

³Software such as HCImage is required. For details, please contact your local Hamamatsu representative or distributor.

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.)¹ 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 μs to 1800 s
Ultra quiet scan 172.8 μs 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 μs to 10 s in 1 μs 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 °C²

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 readout³
Photon number resolving

Readout mode
Full resolution
Digital binning (2×2, 4×4)
Sub-array

TRIGGER INPUT

External trigger input mode

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

Conclusions



- Derniers avantages des CCD :
 - Bining analogique
 - Drift Scan
 - Bruit stationnaire
 - EMCCD
- Les capteurs CMOS
 - Faible coût
 - 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

Bibliographie



- 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
- Boyd Fowler, Paul Vu Fairchild Imaging, CNES workshop dec 2009 Toulouse
- 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
- Th. Midavaine : La révolution CMOS. Les Rencontres du Ciel et de l'Espace 11 – 14 novembre 2010 Cité des Sciences Paris
- Imagerie à Bas Niveau de Lumière- fondamentaux et perspectives, Thierry Midavaine. Les Techniques de l'Ingénieur (2012)

Bibliographie et remerciements



- Pierre Fereyre : Teledyne
- Hamamatsu
- Antoine Hide, Stéphane Amrouch : Macnica ATD Europe
- Sony 2021 roadmap (SSS imaging system business Division)
- PCO sCMOS ebook
- Luca Verre, Christophe Posch : Prophesee
- Eric Fossum : Gigajot