

OPTOELEKTRONIKA

dr inż. Seweryn Lipiński

A209 WNT

seweryn.lipinski@uwm.edu.pl

Czujniki obrazu

Czujniki obrazu

Odbiór bodźców wizualnych stanowi nieodłączny element naszej rzeczywistości.

W elektronice rolę oczu odgrywają oczywiście kamery, zaś siatkówkę zastępują matryce światłoczułe, zwane inaczej czujnikami obrazu.

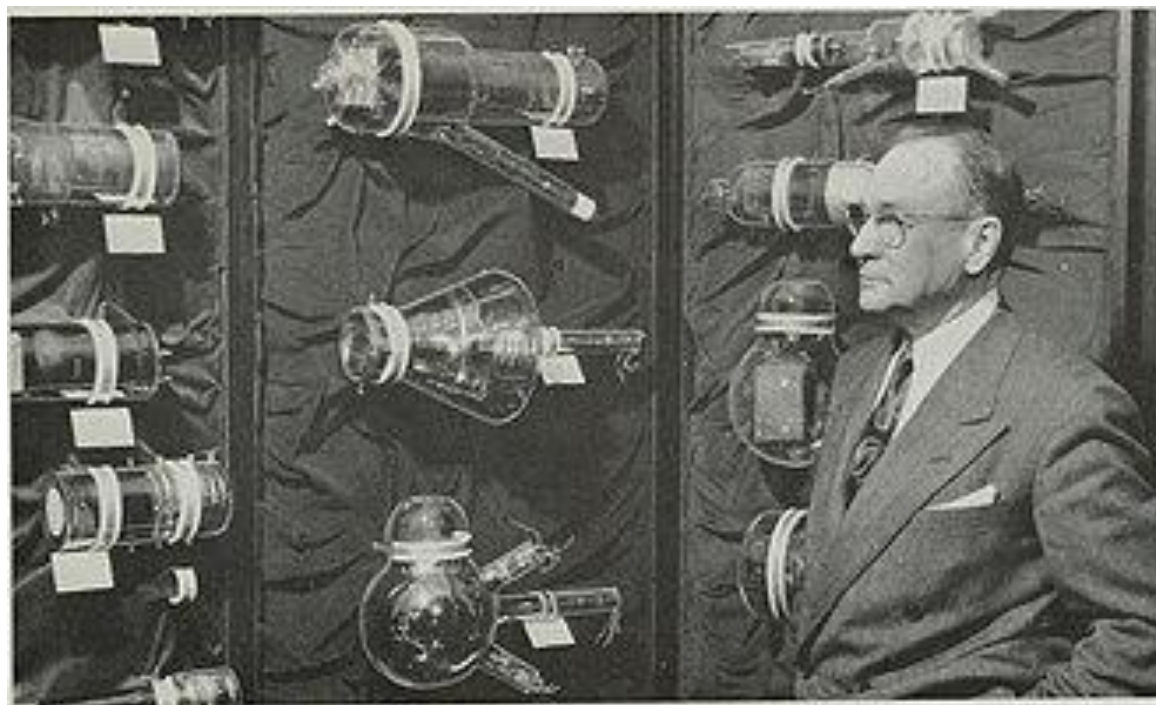
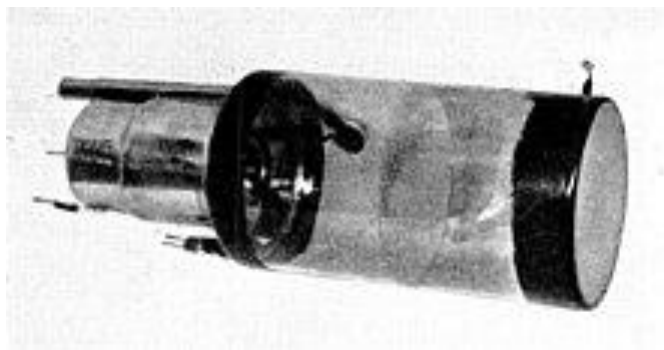
Fotografia cyfrowa zdominowała współczesny świat w każdym jego aspekcie – począwszy od fotografii amatorskiej i profesjonalnej, do badań naukowych (mikroskopy optyczne, satelity obserwacyjne).

Porównując najnowsze modele smartfonów, z których każdy jest dzisiaj wyposażony w trzy, cztery czy pięć kamer, wielu użytkowników zwraca uwagę przede wszystkim na deklarowaną rozdzielczość aparatów, a dopiero w dalszej kolejności na inne cechy, jak zoom optyczny, jakość fotografii w słabym świetle, itp.

Dla elektronika znaczenie ma szereg zagadnień konstrukcyjnych i mniej oczywistych parametrów, które determinują możliwości zastosowania danego czujnika obrazu w określonej aplikacji.

Trochę historii

Historia urządzeń do przetwarzania obrazu na postać sygnału elektrycznego rozpoczęła się na początku ubiegłego wieku i przez przeszło sześć dekad (od lat 30. do lat 90. XX wieku) opierała się na przeróżnych konstrukcjach lamp analizujących.

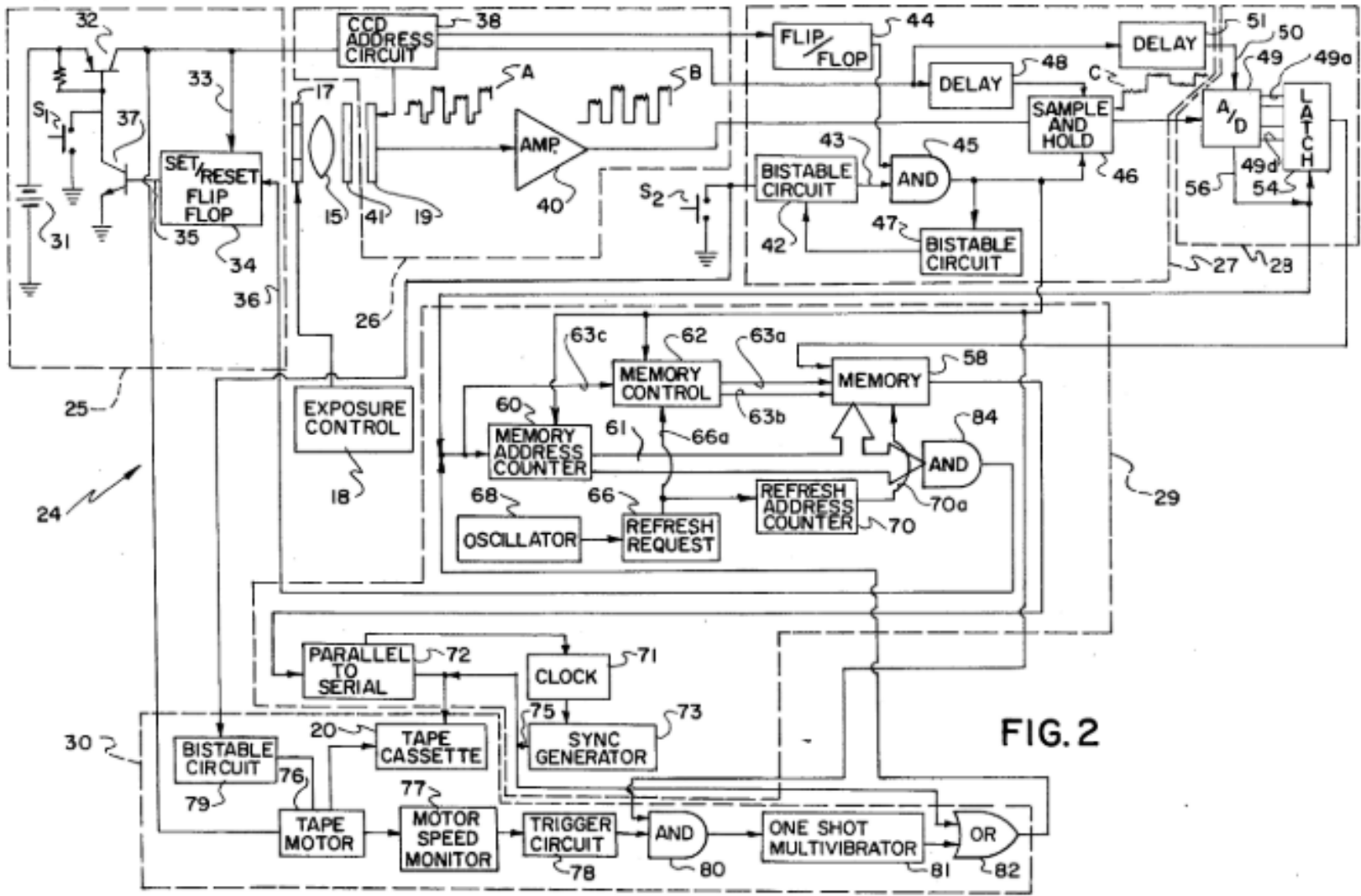


Podwaliny pod fotografię cyfrową położył w roku 1975 Steve Sasson, który w laboratoriach firmy Kodak opracował pierwszy na świecie „samodzielny” aparat cyfrowy.

Warto dodać, że sam układ CCD o rozdzielczości 8×1 px powstał zaledwie kilka lat wcześniej w Bell Labs, zaś już w 1975 roku Sasson korzystał z matrycy o rozdzielczości 100×100 px.



Patent nr US4131919 został zgłoszony do amerykańskiego UP przez Kodaka w roku 1977.



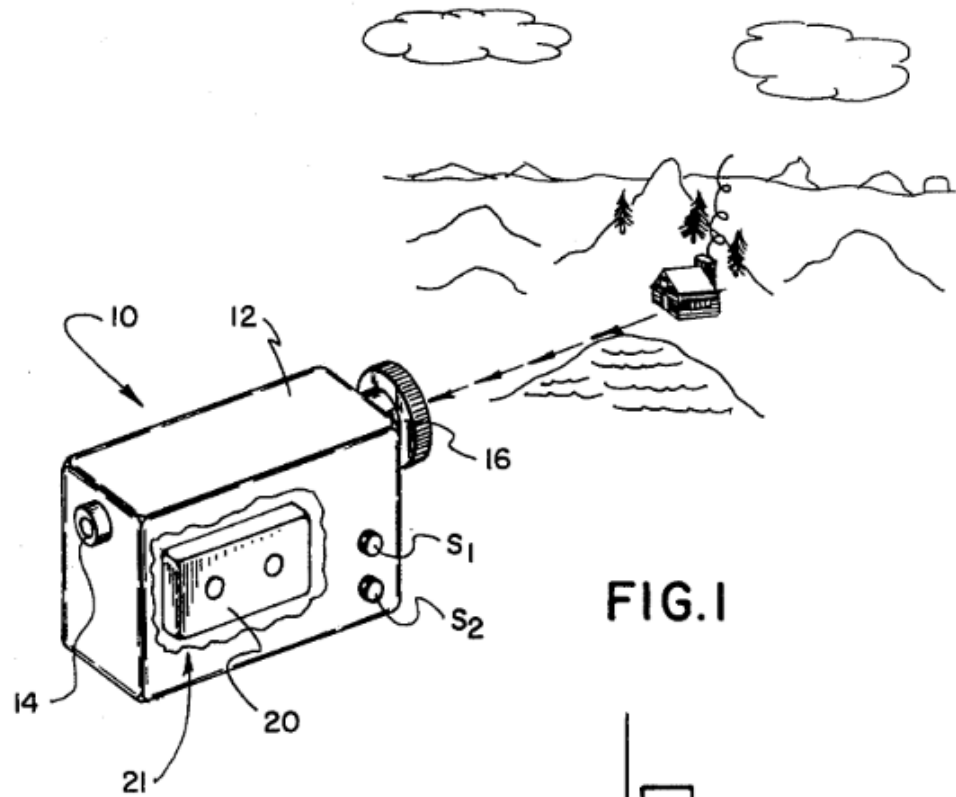


FIG. 1

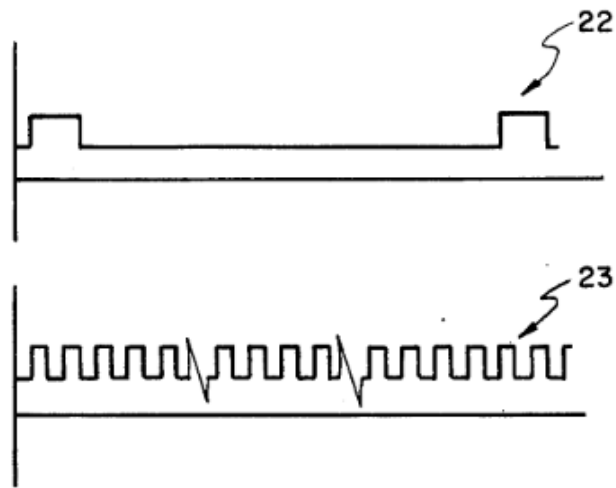


FIG. 3

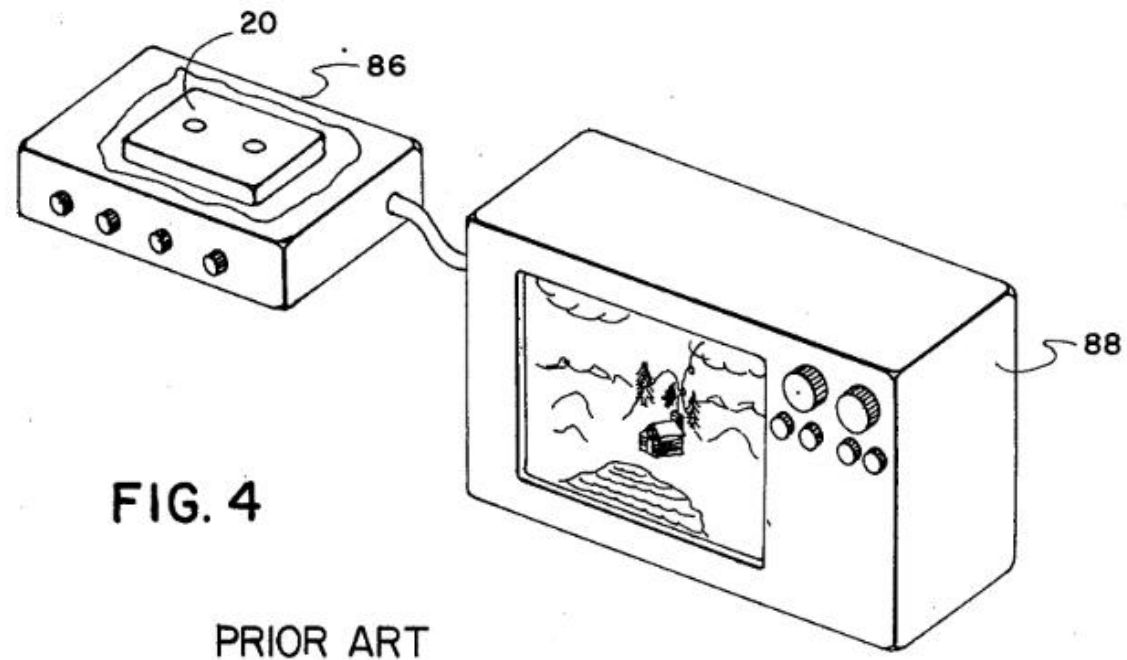


FIG. 4

PRIOR ART

Czujniki obrazu

Po niemal pięciu dekadach od powstania tego wynalazku możemy korzystać z niewiarygodnie szerokiej gamy przetworników obrazu o tak zróżnicowanych parametrach, że naprawdę trudno dziś wskazać obszar aplikacyjny, do którego nie dałoby się dobrać odpowiedniej matrycy z aktualnej oferty producentów optoelektroniki.

Dokonajmy więc przeglądu najważniejszych zagadnień z zakresu konstrukcji i parametrów przetworników obrazu oraz przestrzeni, wraz z subiektywnym wyborem najciekawszych komponentów dostępnych na rynku.

Matryce obrazowe

Dywersyfikacja oferty czujników obrazu jest dziś naprawdę ogromna – do grupy tej zaliczają się bowiem nie tylko matryce dwuwymiarowe, ale także liniały CCD i CMOS, stosowane m.in. w skanerach dokumentów, spektroskopach optycznych czy też laserowych czujnikach przemieszczeń.

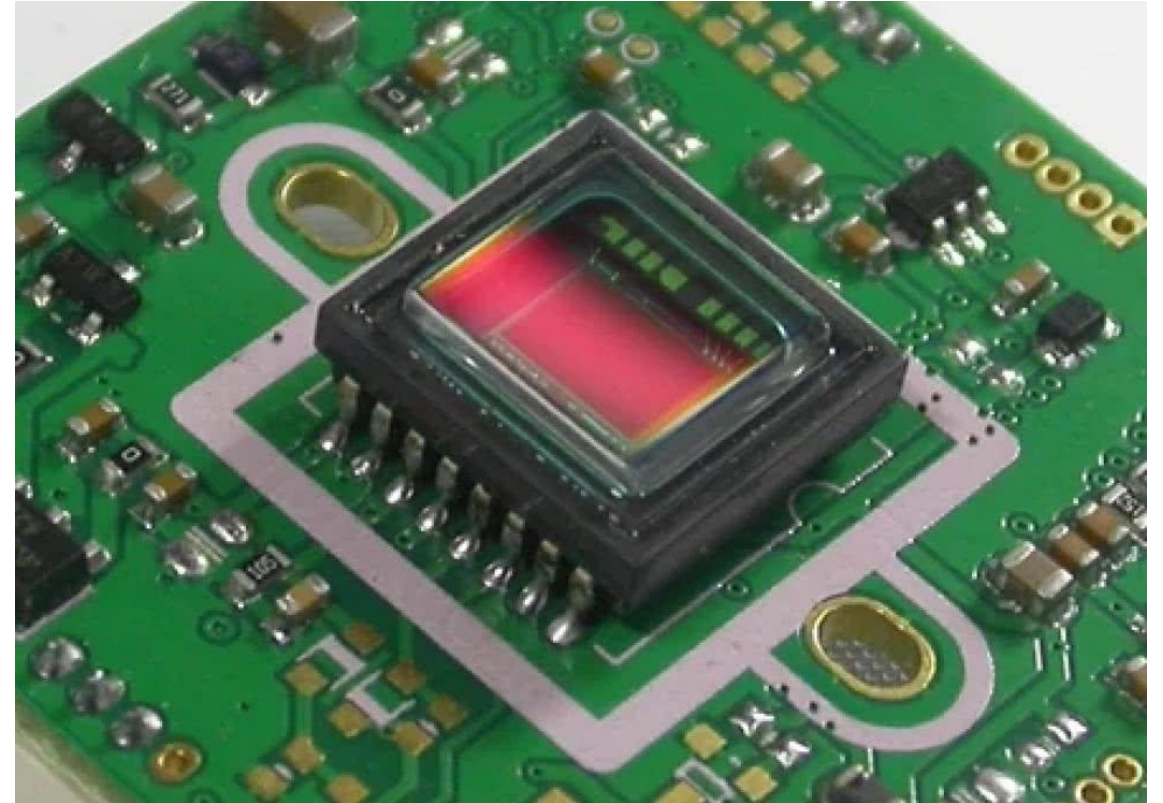


Rozróżnienie dwóch podstawowych grup matryc światłoczułych jest znane dość powszechnie, mamy więc matryce:

- CCD (ang. *charge-coupled device*),
- CMOS (ang. *complementary metal-oxide-semiconductor*).

Przetworniki CCD zostały opracowane jako pierwsze i przez wiele lat stanowiły fundament fotografii cyfrowej oraz wszelkich innych zastosowań związanych z rejestracją obrazów jedno- i dwuwymiarowych.

Matryce CCD przez wiele lat dominowały w kamerach, aparatach i wszystkich pozostałych zastosowaniach.



Matryce typu CMOS, pomimo tego, że wyróżniały się m.in. dużą szybkością działania czy niewielkim zapotrzebowaniem na energię, to oferowały gorsze parametry obrazu i przez to miały ograniczone zastosowanie.

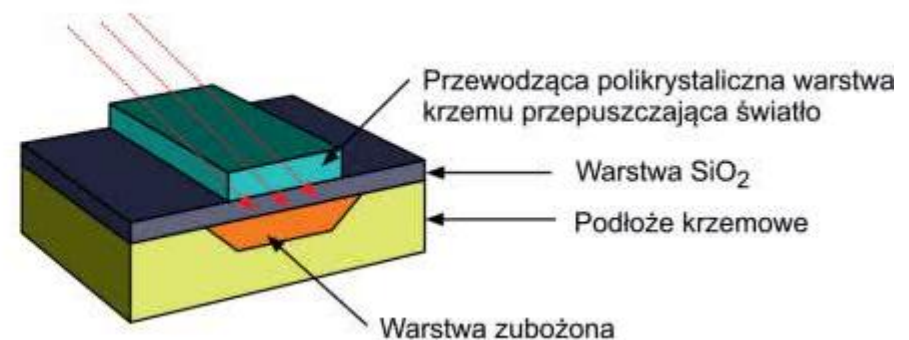
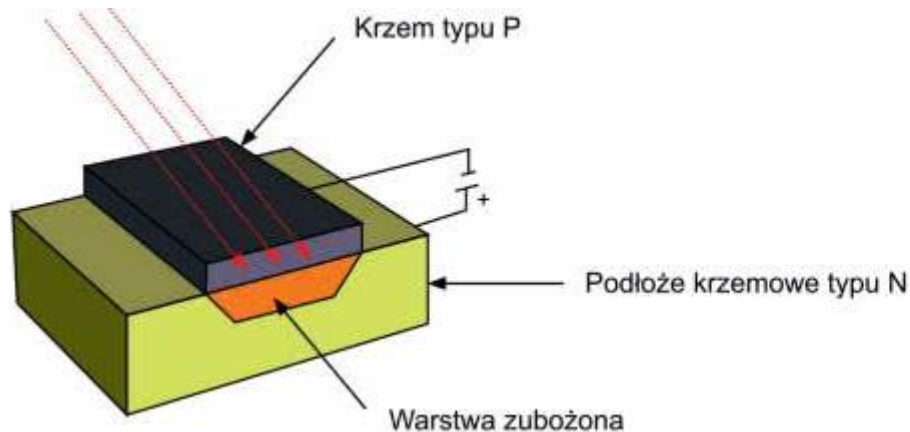
Jednak były one stale udoskonalane, aż w końcu dorównały jakością obrazu matrycom CCD i ostatecznie zdominowały rynek.

Matryce CCD

Matryca ma postać krzemowej płytki składającej się, przede wszystkim, z regularnego układu odizolowanych, światłoczułych komórek - pikseli.

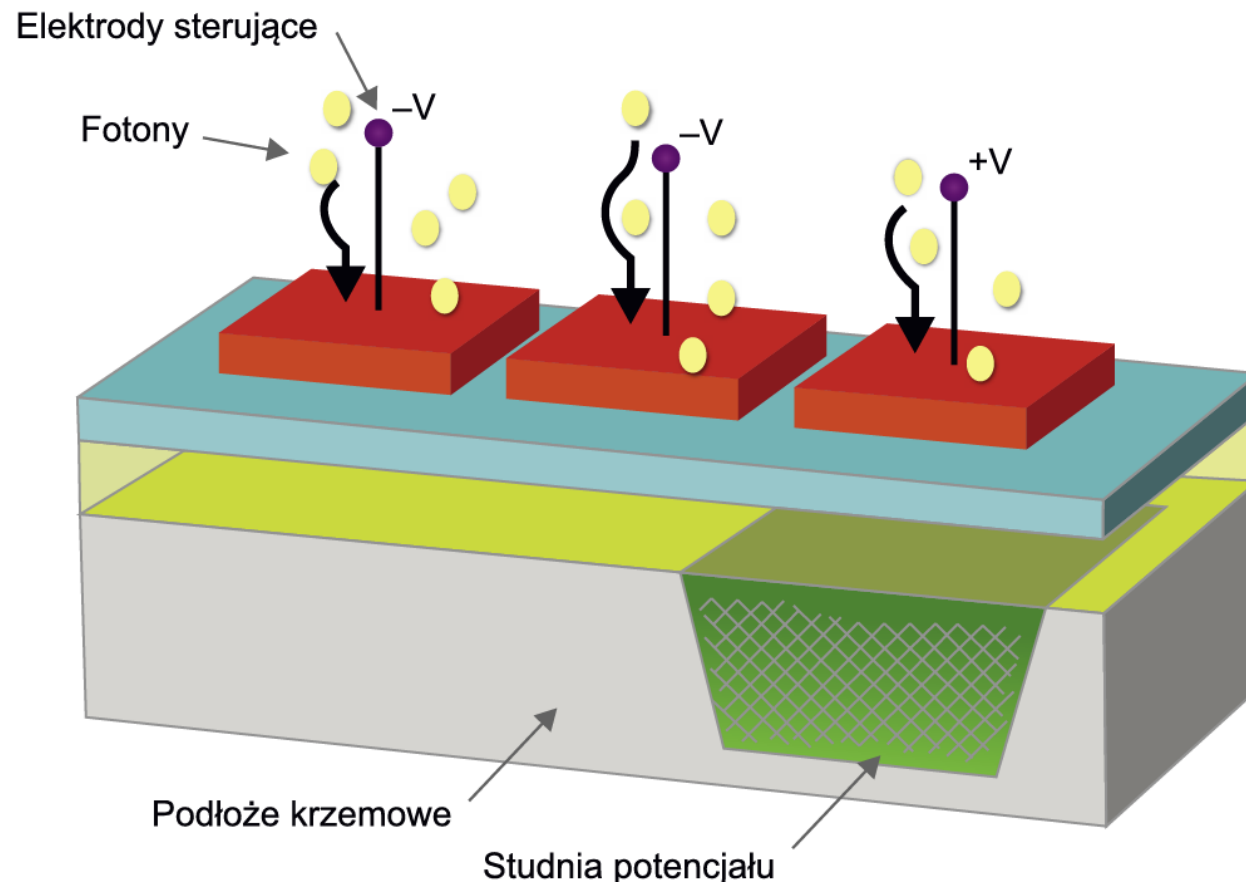
Piksele mogą być wykonane jako fotodiody (po lewej), w których struktura krzemowa typu P-N jest spolaryzowana zaporowo. Padające światło powoduje generowanie elektronów o całkowitym ładunku proporcjonalnym do padającego światła, które zostają zatrzymane w warstwie zubożonej.

Jednak częściej jest spotykane rozwiązanie z pikselami wykonanymi jako kondensatory MOS (po prawej).



Jedną okładzinę stanowi przewodząca i jednocześnie przepuszczająca światło warstwa krzemu. Pełni ona rolę elektrody sterującej – przyłożenie dodatniego potencjału powoduje powstanie obszaru zubożonego.

W reakcji na padające światło, podobnie jak w fotodiodzie, generowane są elektrony i zatrzymywane w warstwie zubożonej. Jest ona nazywana studnią potencjału.

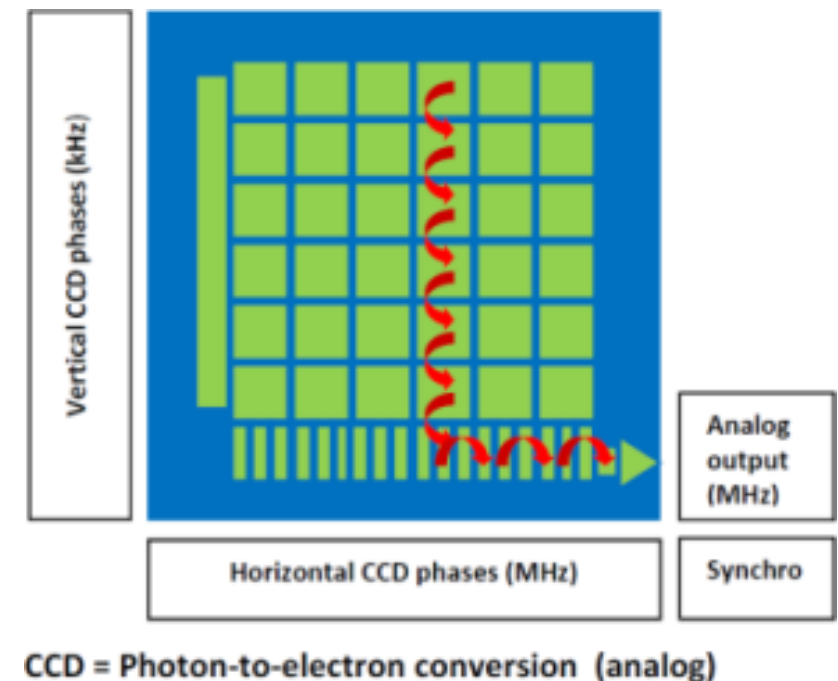
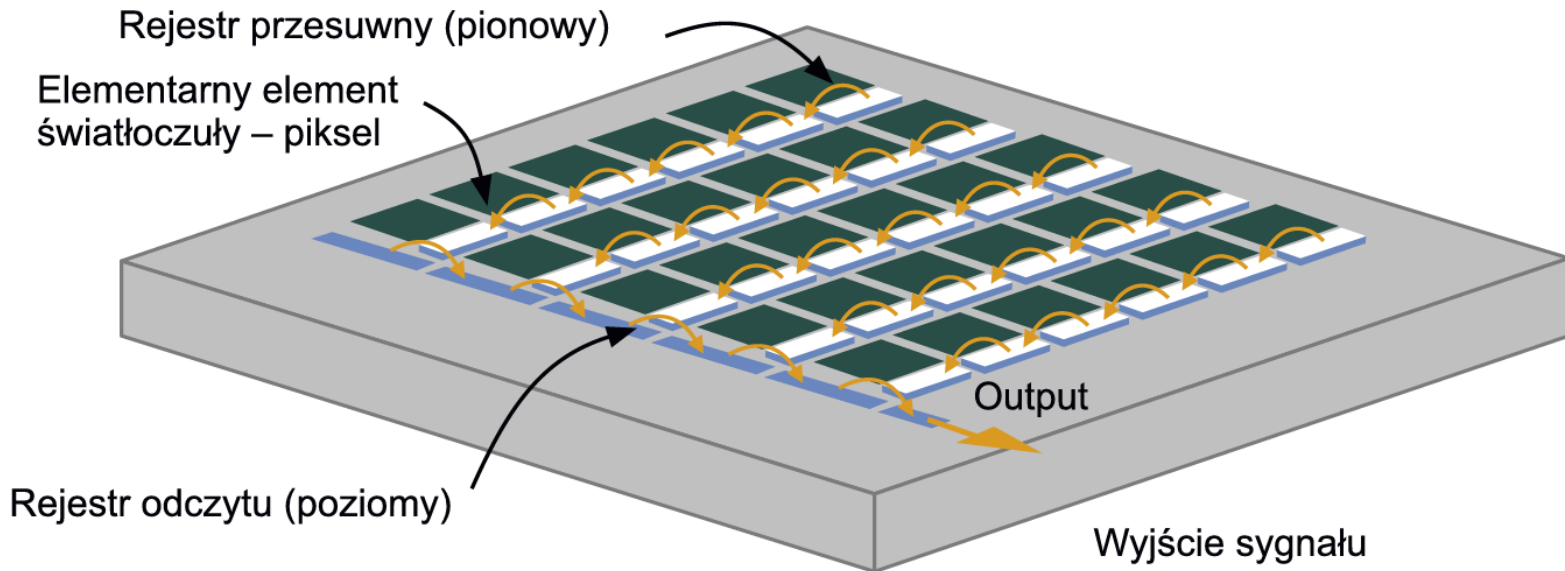


Ładunek, jaki może zgromadzić, jest proporcjonalny do natężenia promieniowania oświetlającego, czasu akumulacji i wartości przyłożonego napięcia.

W przypadku przekroczenia któregoś z tych parametrów może dojść do przelania ładunku do sąsiednich, niezapełnionych studni. Czasami efekt taki widać na zdjęciach bardzo jasnych obiektów – źródło światła zajmuje wtedy większy obszar niż w rzeczywistości, jest to tzw. blooming.



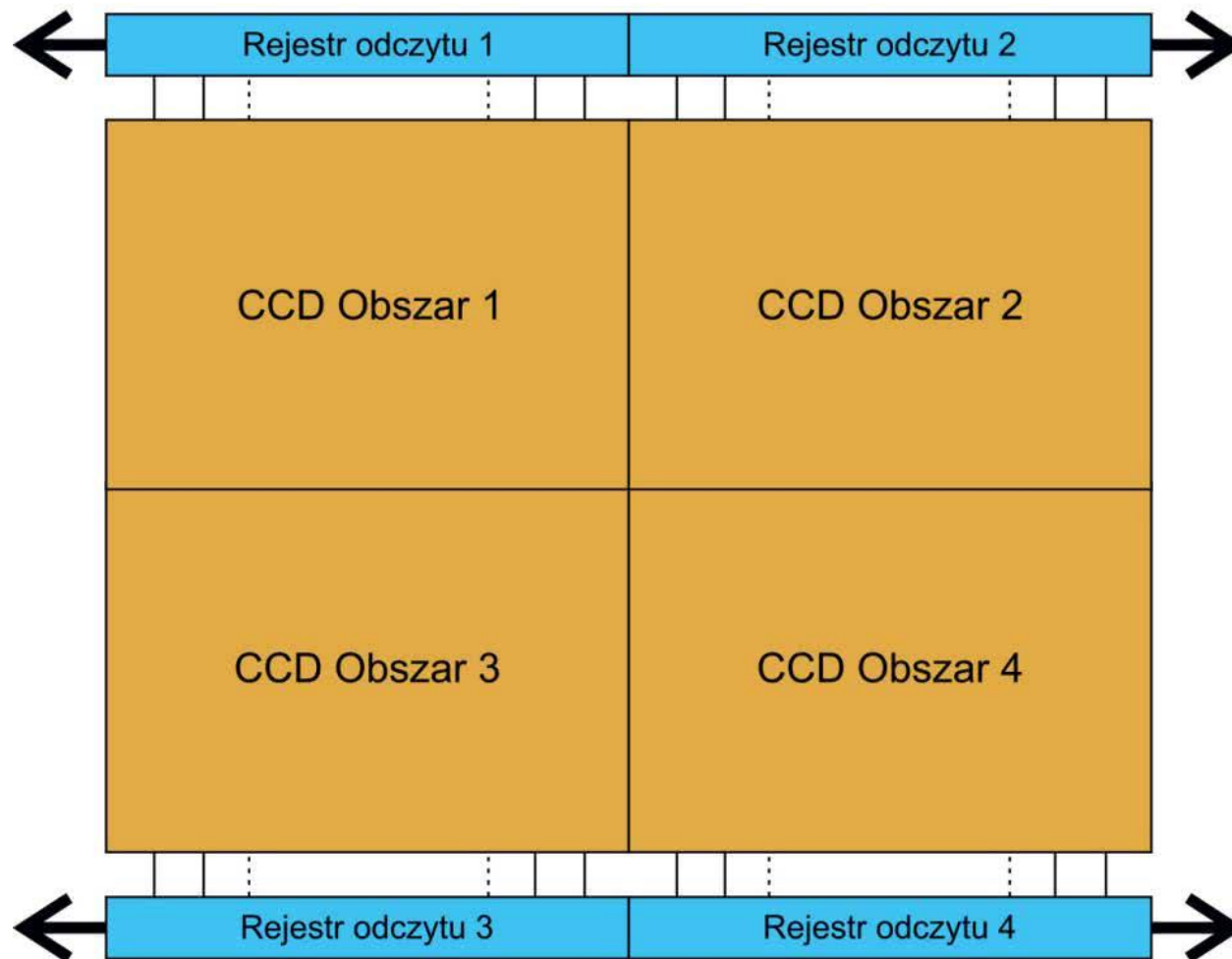
Po zakończeniu akumulacji następuje transfer ładunku przez kolejne elementy pojemnościowe, aż do komórki pamięci znajdującej się w rejestrze odczytu. Najpierw przykładany jest potencjał o odpowiedniej wartości do elektrody sąsiadującej z tą, pod którą znajduje się studnia potencjału, co powoduje częściowe przesunięcie ładunku. Następnie odłączany jest potencjał elektrody znad studni i w efekcie następuje całkowite przeniesienie ładunku. Sekwencyjne powtarzanie tego procesu pozwala na transfer ładunku na zewnątrz matrycy, aż do elektrody odczytującej.



Warto dodać, że ładunki są „przepychane” przez kolejne pola kolumny dzięki zastosowaniu odpowiedniej sekwencji napięć sterujących, która może występować w wielu odmianach (różniących się liczbą faz).

Ponieważ jednak podstawowa konstrukcja matrycy CCD nie sprawdzała się z powodu dość powolnego odczytu (który siłą rzeczy musiał być dokonywany piksel po pikselu, linia po linii) – równolegle ze zwiększaniem rozdzielczości macierzy – wprowadzane były kolejne innowacje, mające na celu przyspieszenie odczytu sygnałów.

Rozwiązanie pośrednie stanowił podział macierzy na kilka sektorów, wyposażonych w niezależne, przesuwne rejestry odczytowe i układy pomiarowe.

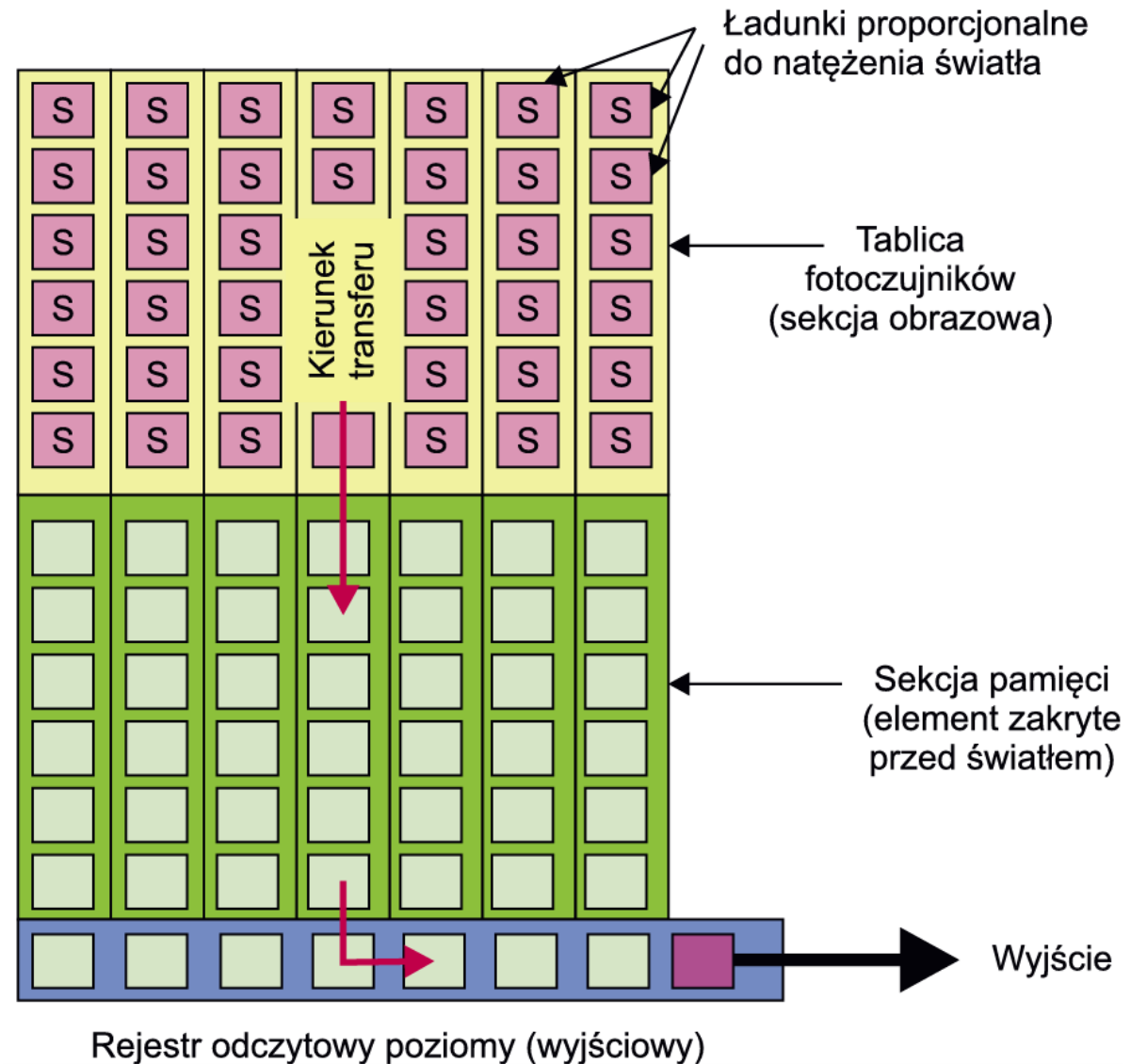


Lepszym rozwiązaniem, wymagającym jednak bardziej złożonej konstrukcji, jest matryca z transferem ramki FT (*frame Transfer*).

Oprócz sekcji czujników na których jest rejestrowany obraz, zawiera ona dodatkową sekcję pamięci zasłoniętą przed oświetleniem, o takiej samej liczbie komórek jak matryca sensorów.

Po zebraniu ładunków, następuje ich przesunięcie do sekcji pamięci. Proces ten uwalnia sensory, umożliwiając im gromadzenie ładunku pochodzącego z oświetlenia następnej ramki. Zawartość pamięci jest w tym czasie przesuwana do rejestru wyjściowego jak w trakcie normalnego transferu.

Ten typ matrycy zapewniał lepszą dynamikę rejestracji szybkozmiennych scen.

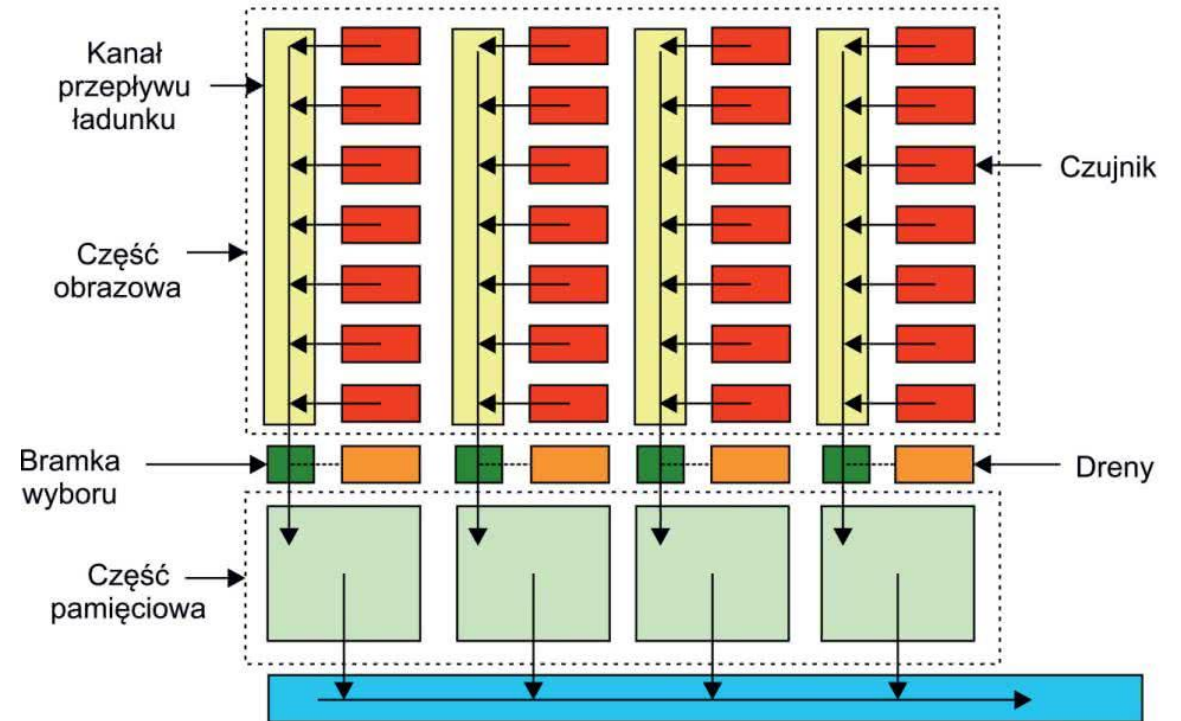
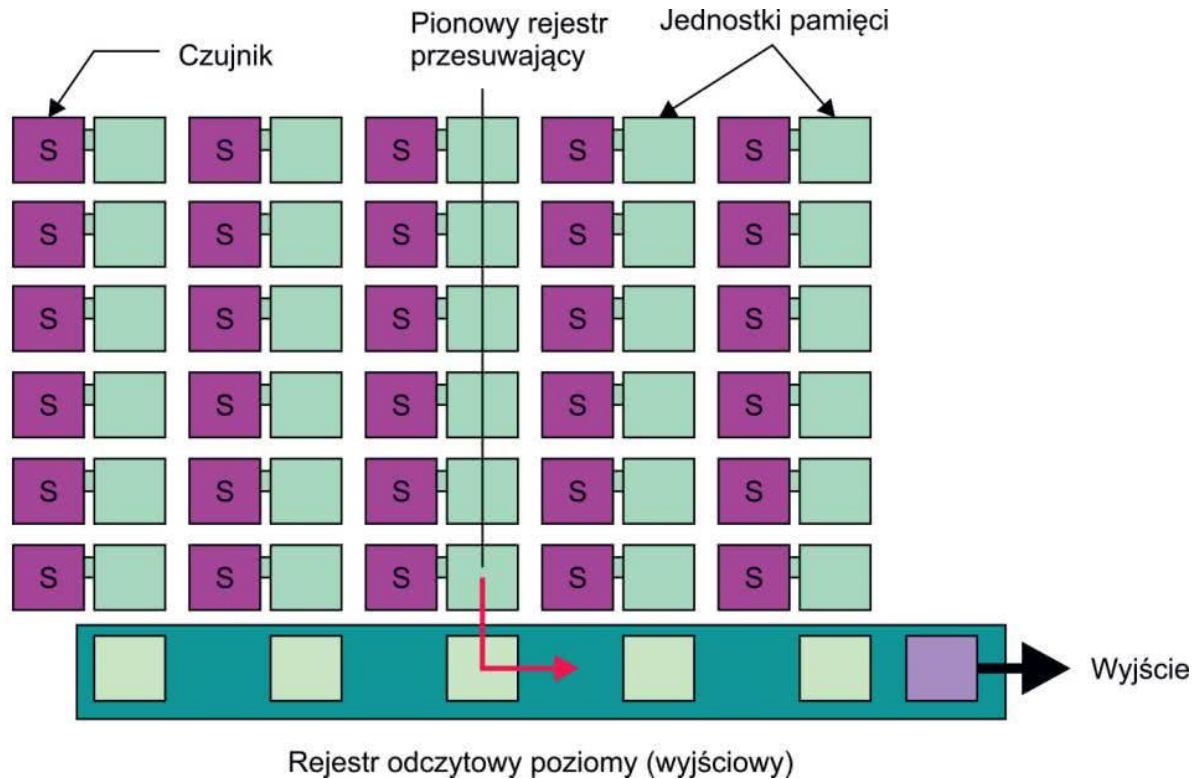


Matryce FT generowały jednak kolejne problemy, związane z powstawaniem artefaktów określanych jako *smearing* – czyli wyraźnych smug, rozchodzących się wzdłuż kolumn od punktów obrazu o wysokiej jasności.

Dzieje się tak, ponieważ oświetlona matryca czujników może przechwytywać niewielkie, fałszywe ładunki z sekcji pamięci w momencie transferu.

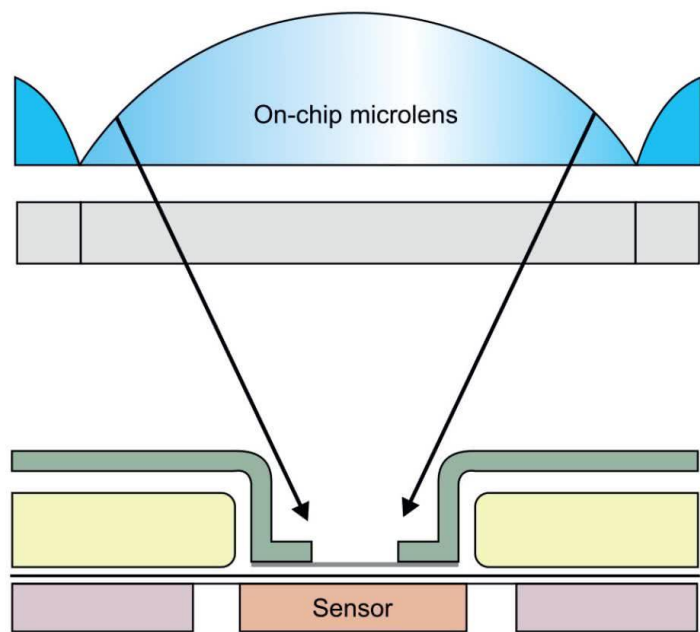


Kolejne wersje matryc CCD określane mianem CCD IT (*interline transfer*) czy CCD FIT (*frame interline transfer*), miały na celu dalsze poprawianie osiągnięć matryc CCD poprzez rozbudowę struktury przełączającej.

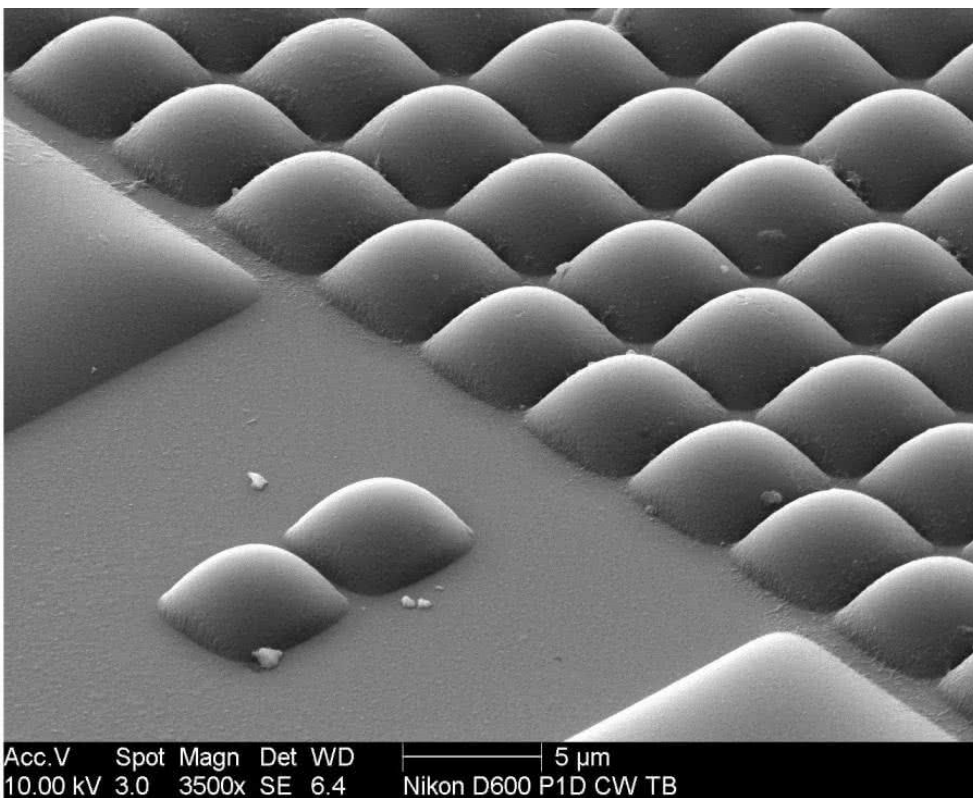


W międzyczasie wprowadzono także struktury CCD HAD (z wysoko domieszkowaną warstwą P fotodiod), których główną zaletą jest znacznie lepsza czułość.

Czułość matrycy CCD można zwiększyć również dzięki zamocowaniu z przodu matrycy warstwy mikrosoczewek, po jednej na każdym fotoczuJNIku. Soczewki skupiają światło, pochodzące z obrazu na obszar piksela. Przetworniki HAD z dodatkową warstwą mikrosoczewek nazywane są Hyper HAD lub Super HAD.



Super HAD CCD Sensor



Tradycyjne przetworniki CCD oferowały wysoką czułość przy niskim poziomie szumów ale kosztem wolnego odczytu, dlatego często nazywano je wolno skanującymi (*slow scan*).

Aby osiągnąć wysoką prędkość działania, szerokość pasma wzmacniacza ładunku musi być jak najszersza, ale poziom szumu skaluje się z szerokością pasma wzmacniacza, stąd wzmacniacze o wyższych prędkościach mają wyższy szum.

Dla zapewnienia wysokiej czułości przy dużej szybkości opracowano matryce z powielaniem elektronów EMCCD (Electron Multiplying CCD).

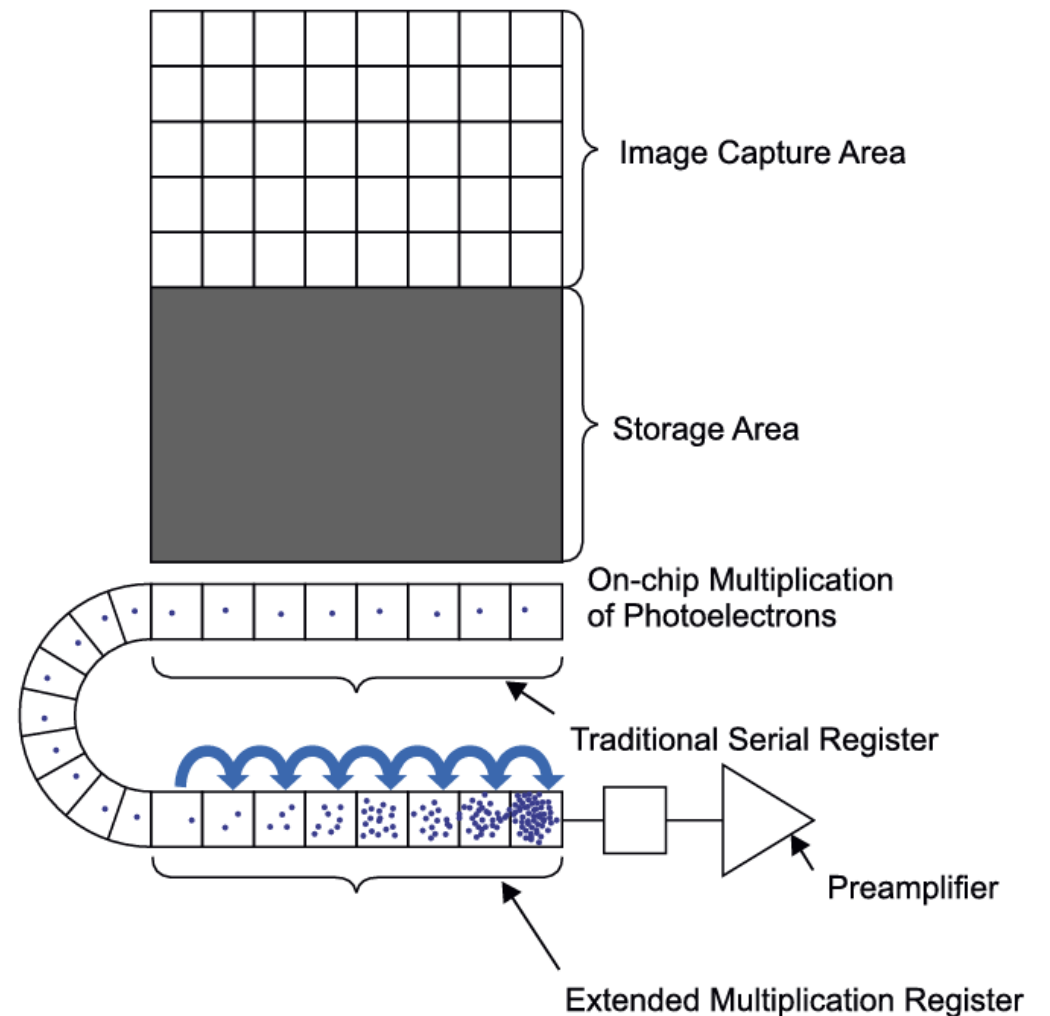
Są one czujnikami obrazu zdolnymi do wykrywania pojedynczych fotonów bez wzmacniacza obrazu.

Technologia ta została osiągnięta dzięki unikalnej strukturze zwielokrotniającej elektrony wbudowanej w przetwornik. Wzmacniając sygnał przed wzmacniaczem ładunku, przetwornik osiąga niespotykaną czułość przy dużych prędkościach. Jednocześnie szum odczytu jest skutecznie omijany.

Jest to w istocie rozbudowana wersja przetwornika CCD FT.

Podczas akwizycji obszar czujnika jest wystawiany na działanie światła i rejestruje obraz, który jest następnie automatycznie przesuwany do osłoniętego obszaru przechowywania. Przy odczytywaniu czujnika, ładunek jest przesuwany przez rejestr odczytowy i przez rejestr mnożenia, gdzie następuje powielenie ładunku jeszcze przed wzmocnieniem i odczytem.

To rozwiązanie znalazło zastosowanie m.in. w przyrządach naukowych wymagających ekstremalnie wysokiej czułości, także astronomicznych.



Prawdopodobieństwo zwielokrotnienia ładunku zmienia się wraz z temperaturą – im niższa temperatura, tym większe prawdopodobieństwo.

Aby zwiększyć czułość strukturę EMCCD schładza się do temperatury np. -100°C . Dodatkowo niezbędna jest dobra stabilizacja chłodzenia, bo zmiana temperatury o 1°C może powodować zmianę wzmocnienia o około 7%. System chłodzenia wiąże się z dodatkowymi kosztami dla kamery EMCCD i często powoduje poważne problemy z kondensacją pary.

Prawdopodobieństwo zwielokrotnienia ładunku zależy również od napięcia przyłożonego do rejestru mnożenia – rośnie wraz ze wzrostem napięcia. Dostosowując temperaturę i napięcie przyłożone do czujnika, przetwornik EMCCD może osiągnąć wzmocnienie od praktycznie jedności do tysięcy.



Innym rodzajem przetwornika CCD, który również odznacza się wysoką czułością to przetwornik ze wzmacniaczem obrazu ICCD (*Intensified CCD*).

Kamery ICCD są nieco droższe niż kamery EMCCD, ponieważ wymagają drogiego wzmacniacza obrazu. Z drugiej strony nie wymagają układu chłodzenia.

Przetworniki ICCD są używane w noktowizorach oraz w różnych zastosowaniach naukowych



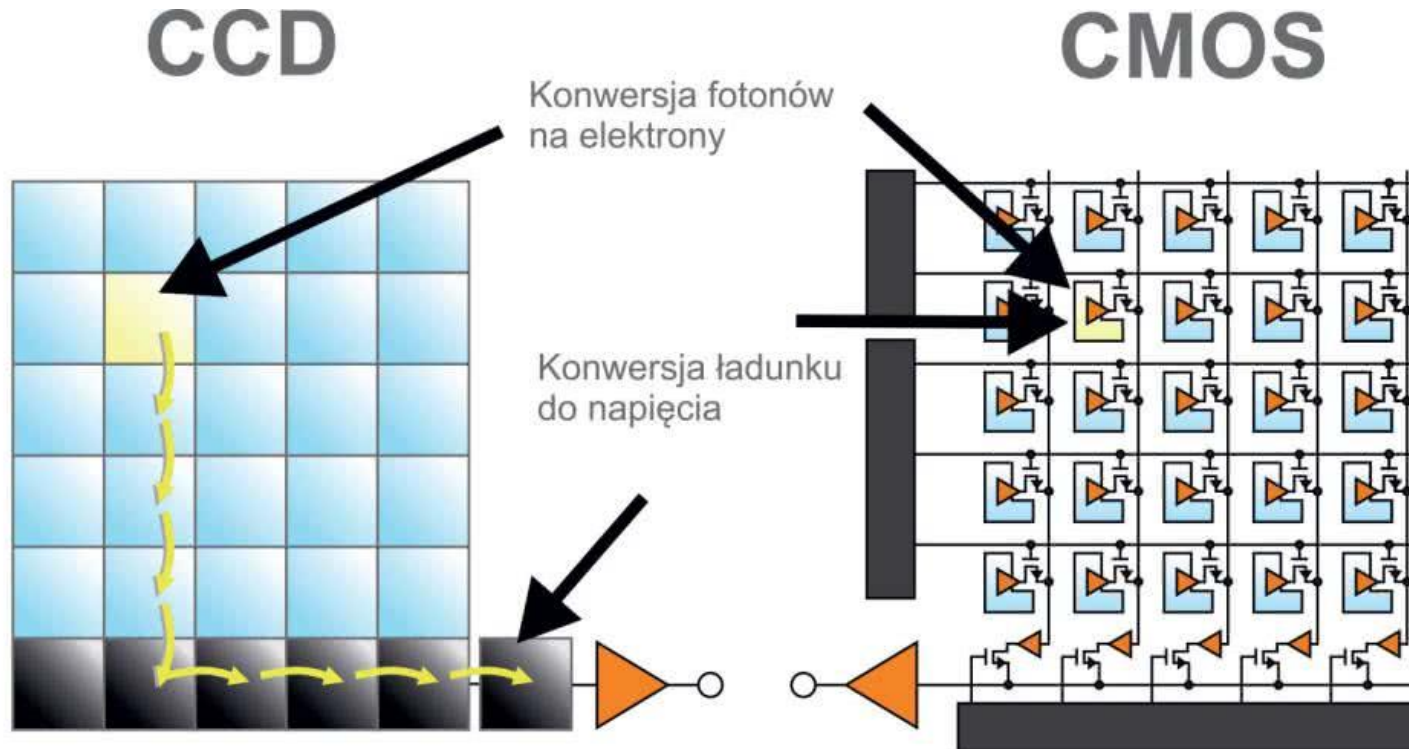
Matryce CMOS

Przetworniki obrazu wykonane na bazie półprzewodników określane jako CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) to technologia, która istnieje od lat 90.

Ogólna zasada działania jest identyczna jak dla CCD - polega na zamianie ładunku nagromadzonego pod wpływem oddziaływania światła na impuls elektryczny. Zasadnicza różnica matryc CMOS w stosunku do CCD polega na sposobie konwersji i transmisji sygnału.

W matrycy CCD sygnały z pikseli odczytywane są całymi rzędami, nie ma możliwości odczytania tylko pojedynczego piksela. Następnie trafiają do jednego przetwornika A/D, na wyjściu którego dostajemy dane cyfrowe. Zatem odczyt całej zawartości matrycy odbywa się przez jeden węzeł wyjściowy.

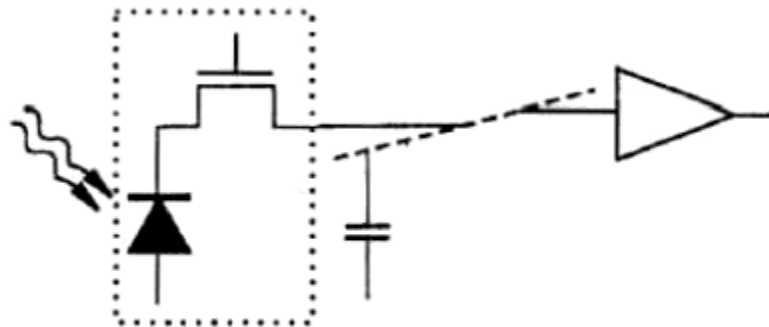
Matryce CMOS także gromadzą dane o intensywności światła w postaci ładunku elektrycznego. Jednak każdy piksel wyposażony jest we wzmacniacz sygnału i klucz, które są połączone z szynami adresowymi wierszy i kolumn.



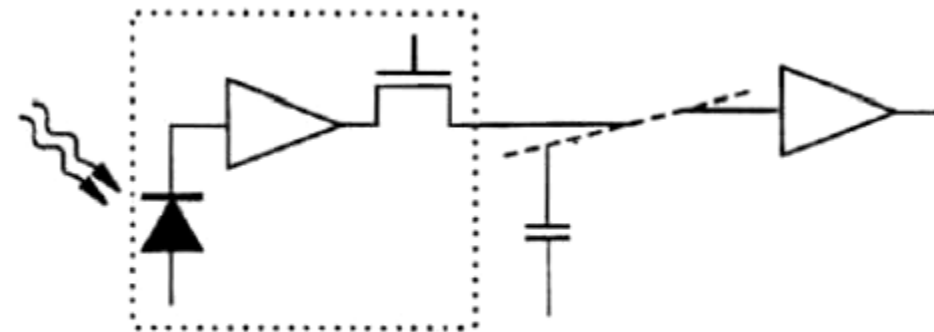
Takie rozwiązanie pozwala przede wszystkim na zwiększenie prędkości odczytu danych ale też odznacza się dużo mniejszym zapotrzebowaniem na energię.

Najprostszy rodzaj matrycy CMOS jest zbudowany z pikseli pasywnych PPS (*passive pixel sensor*). Jest to układ złożony tylko z detektora i tranzystora przełączającego. Charakteryzuje się dużym, sięgającym 80% współczynnikiem wypełnienia matrycy powierzchnią aktywną ale też mniejszą szybkością odczytu.

Nowocześniejszym rozwiązaniem jest matryca z pikselami aktywnymi APS (*active pixel sensor*). Taki układ składa się z detektora, wzmacniacza przetwarzającego ilość ładunku na napięcie i tranzystora przełączającego. Umieszczenie przedwzmacniacza w pikselu aktywnym powoduje zwiększenie wymiarów matrycy i zmniejszenie współczynnika wypełnienia matrycy do wartości 30...50%, ale przyspiesza odczyt treści matrycy.



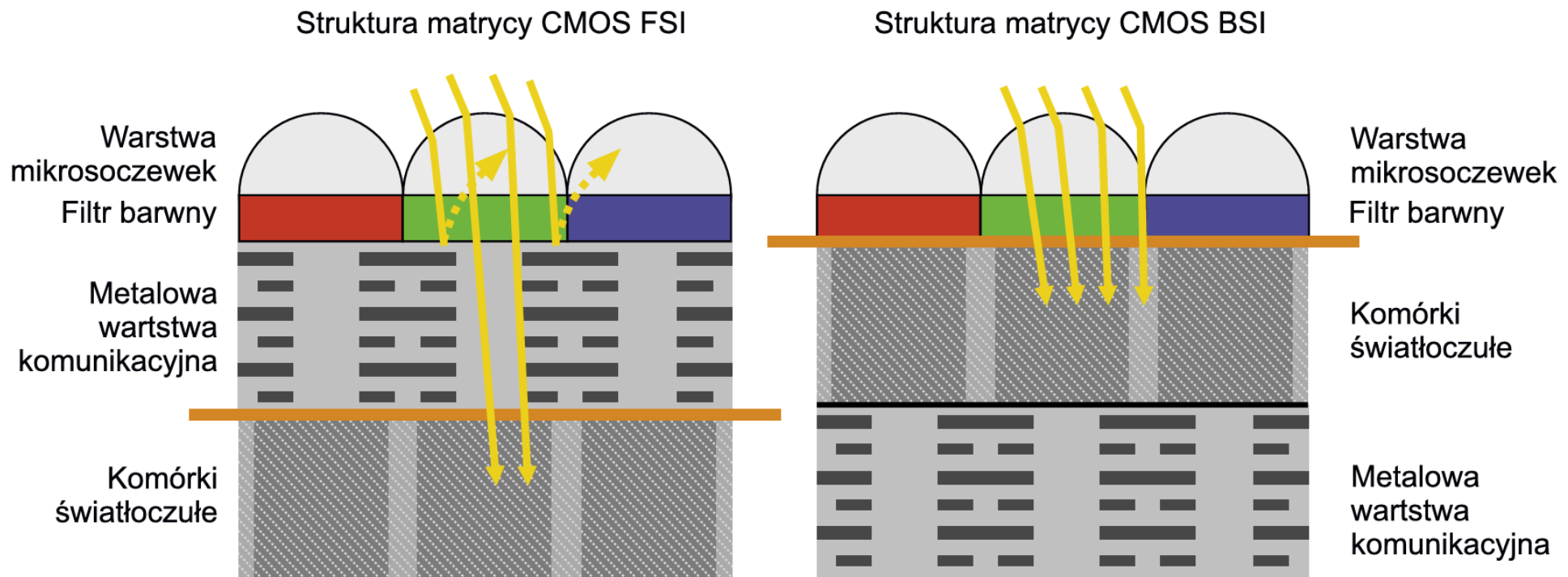
Piksel = Detektor + Klucz



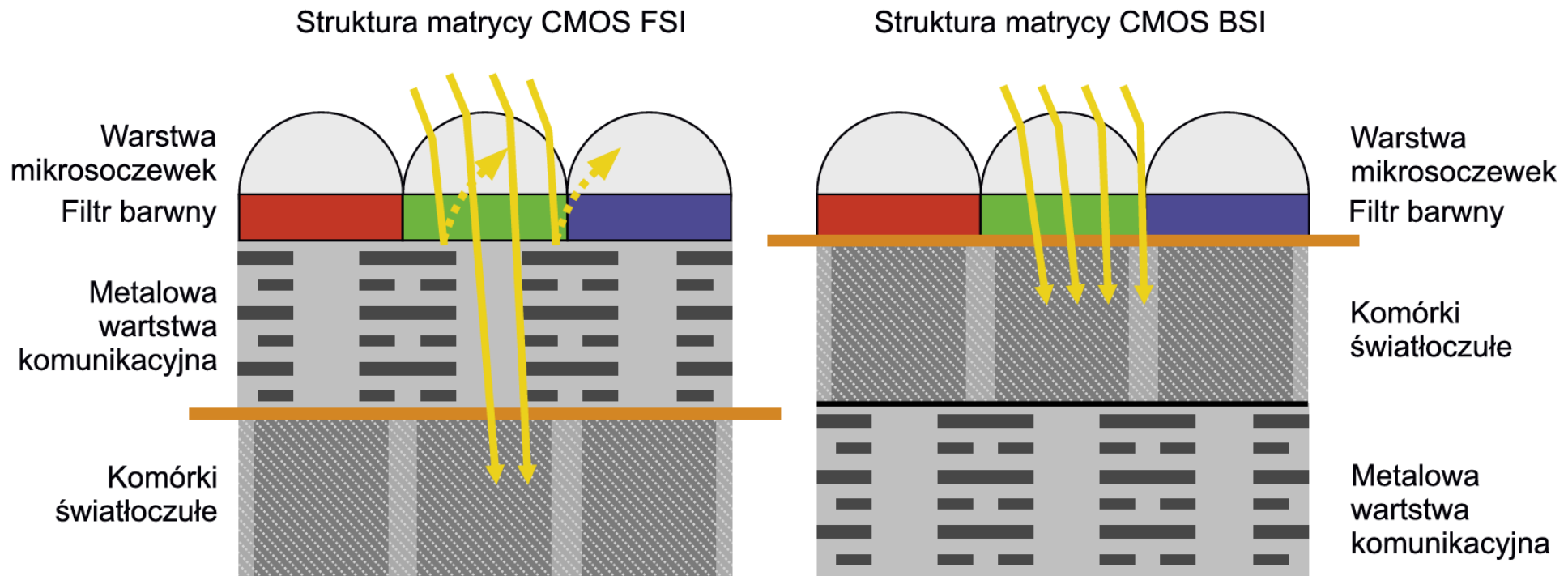
Piksel = Detektor + Wzmacniacz + Klucz

Multipleksowane są zatem napięcia wyjściowe (a nie ładunki) z poszczególnych komórek, dzięki czemu szybkość pracy sensorów CMOS może być naprawdę imponująca.

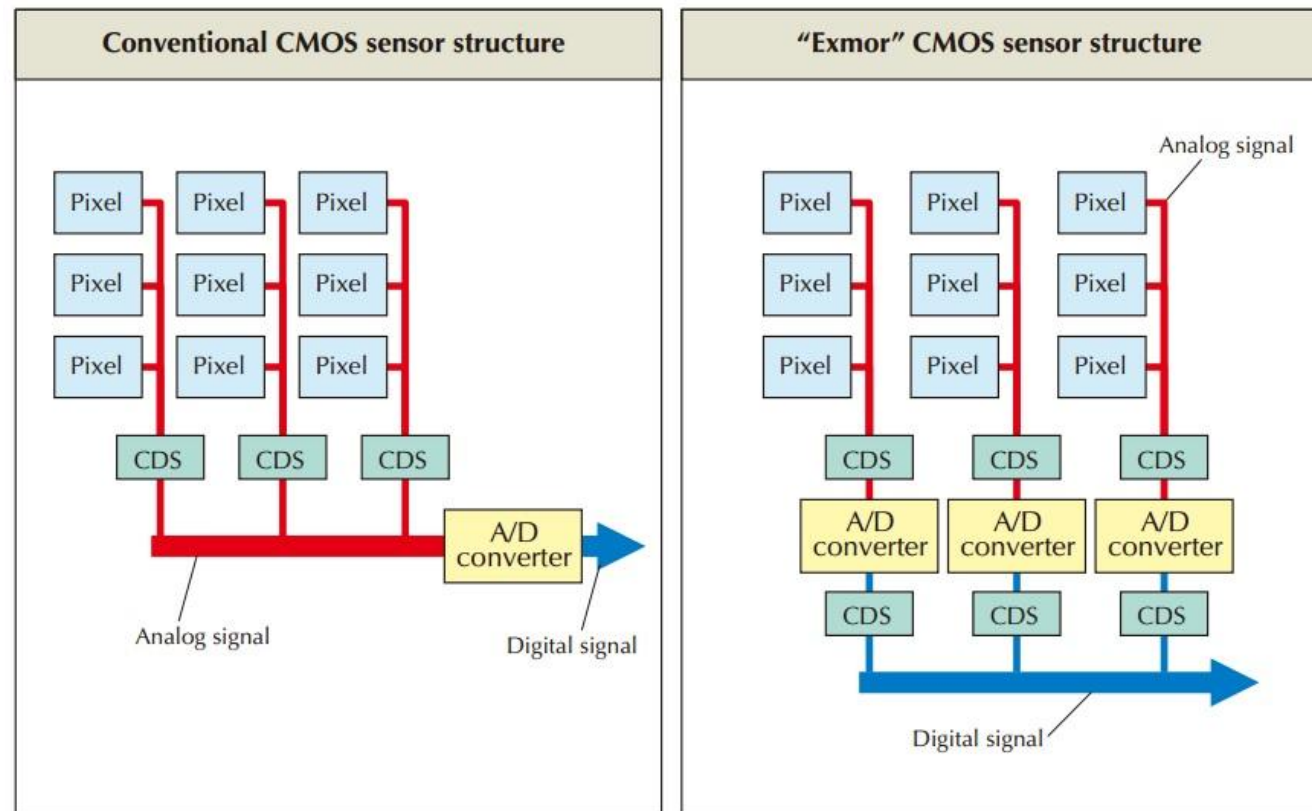
Konstrukcja matrycy może różnić się w zależności od położenia elementów światłoczułych w strukturze przetwornika. Matryca CMOS FSI (*Front-Illuminated Structure*) to tradycyjny rodzaj architektury przetwornika CMOS z fotodiodami ułożonymi pod warstwą przewodów i tranzystorów.



Powoduje to dużą utratę fotonów, które muszą najpierw przebić się przez tę warstwę zanim dotrą do matrycy światłoczułej. Lepsze rozwiązanie zastosowano w matrycach CMOS BSI (*Back-Illuminated Structure*). Jest to nowszy rodzaj architektury, w którym warstwy metalu i dielektryków zostały umieszczone pod warstwą światłoczułą, tworząc w ten sposób bardziej bezpośrednią drogę dla światła w kierunku piksela.

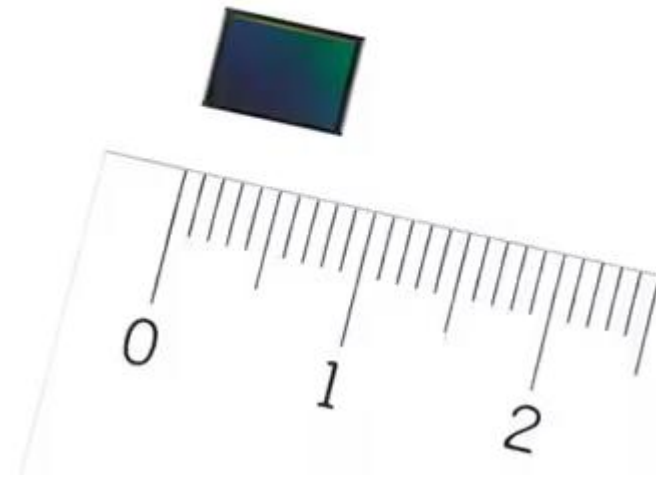
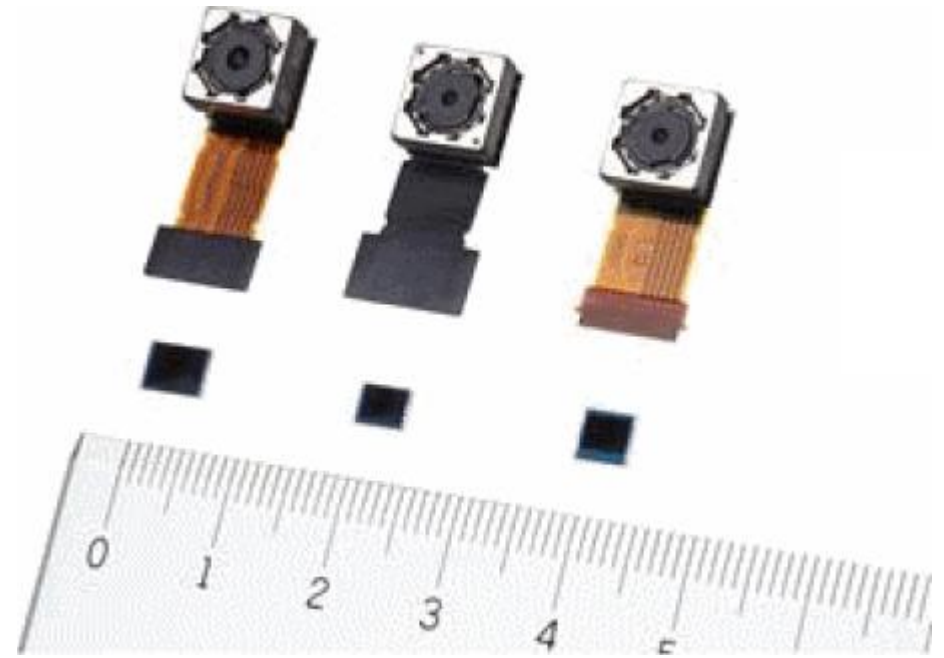


Podstawową wadą sensorów CMOS był wysoki poziom szumów przez co obraz (zwłaszcza zdjęcia) był gorszej jakości. Część tych zakłóceń powstawała podczas transportu sygnału analogowego z pikseli do przetwornika. Sony podjęło działania w celu opracowania struktury o zminimalizowanych szumach. Efektem prac była technologia CMOS Exmor. Zasadniczym udoskonaleniem było zastosowanie niezależnych układów redukcji szumów i przetwarzania analogowo cyfrowego dla każdej kolumny matrycy.



W Exmor RS całość obwodów „peryferyjnych” poszczególnych komórek umieszczono pod pikselami, w ramach rozbudowanej struktury 3-warstwowej, zintegrowanej dodatkowo z pamięcią DRAM.

Dzięki temu współczynnik wypełnienia matrycy przekroczył 80%, co ma niebagatelne znaczenie zwłaszcza w odniesieniu do czujników obrazu o bardzo małych rozmiarach – w przypadku matryc stosowanych w kamerach nowych modeli smartfonów rozmiary pikseli są zwykle na poziomie ułamków mikrometra.



Parametry czujników obrazu Sony IMX586 i IMX582

	Sony IMX586	Sony IMX582
Rozmiar sensora	1/2" (8 mm)	
Rozdzielczość natywna	48 MPx: 8000×6000 px	
Rozdzielczość w trybie łączonych pikseli (Super Pixel Mode)	12 MPx: 4000×3000 px	
Rozmiar piksela (natywny)	0,8 μm	
Rozmiar piksela w trybie Super Pixel Mode	1,6 μm	
Nagrywanie wideo	4K @ 90 fps 1080p @ 240 fps 720p @ 480 fps	4K @ 30 fps 1080p @ 240 fps 720p @ 480 fps

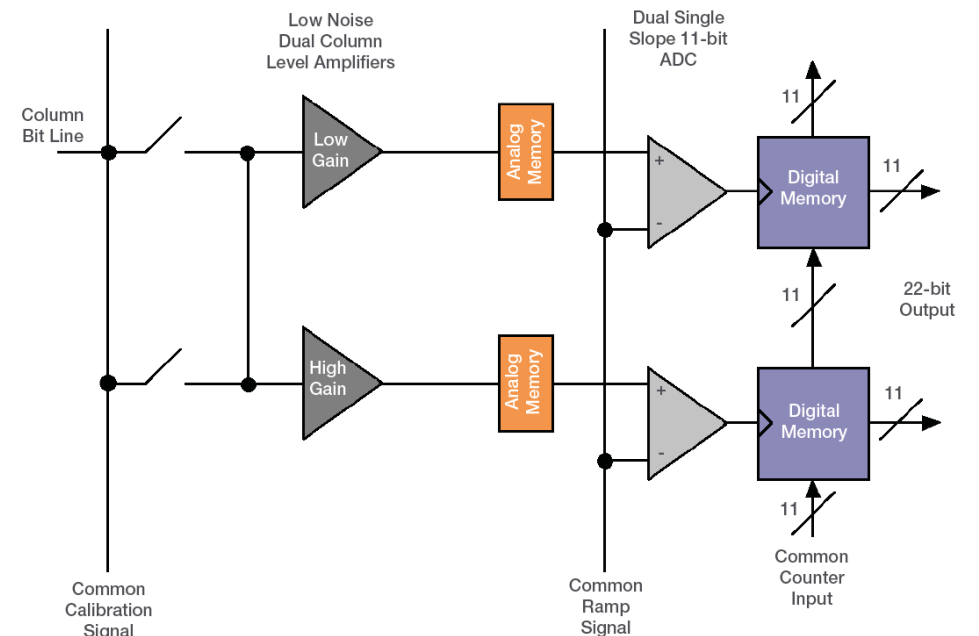
Podobnie jak CDD, także technologia CMOS doczekała się odmian dostosowanych do szczególnie wymagających aplikacji naukowych.

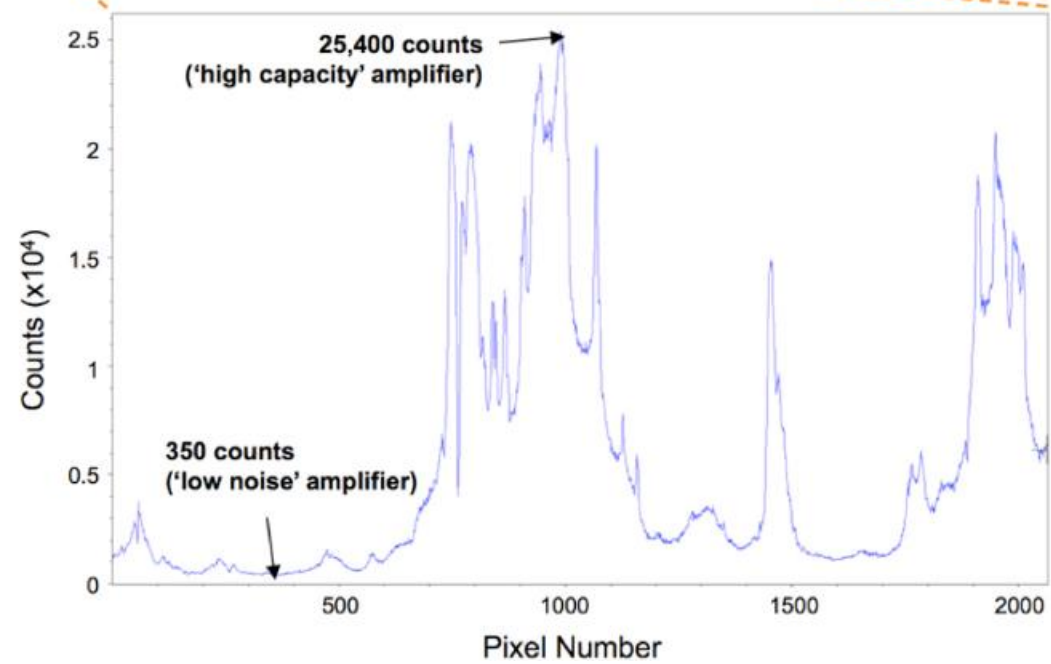
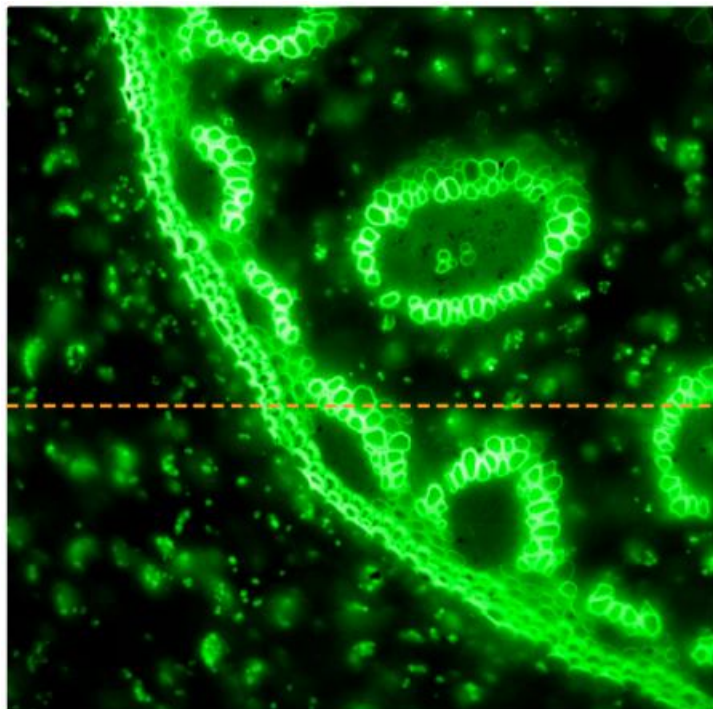
Matryce sCMOS (ang. *scientific CMOS*) są swego rodzaju następcami omawianych wcześniej czujników obrazu typu EMCCD – tutaj także możliwe jest osiągnięcie ogromnej czułości, niezwykle niskiego poziomu szumów RMS (równego 1-2 elektrony) i doskonałego zakresu dynamicznego, ale osiągnięcie takich parametrów mocno odbija się na cenie kamer sCMOS.



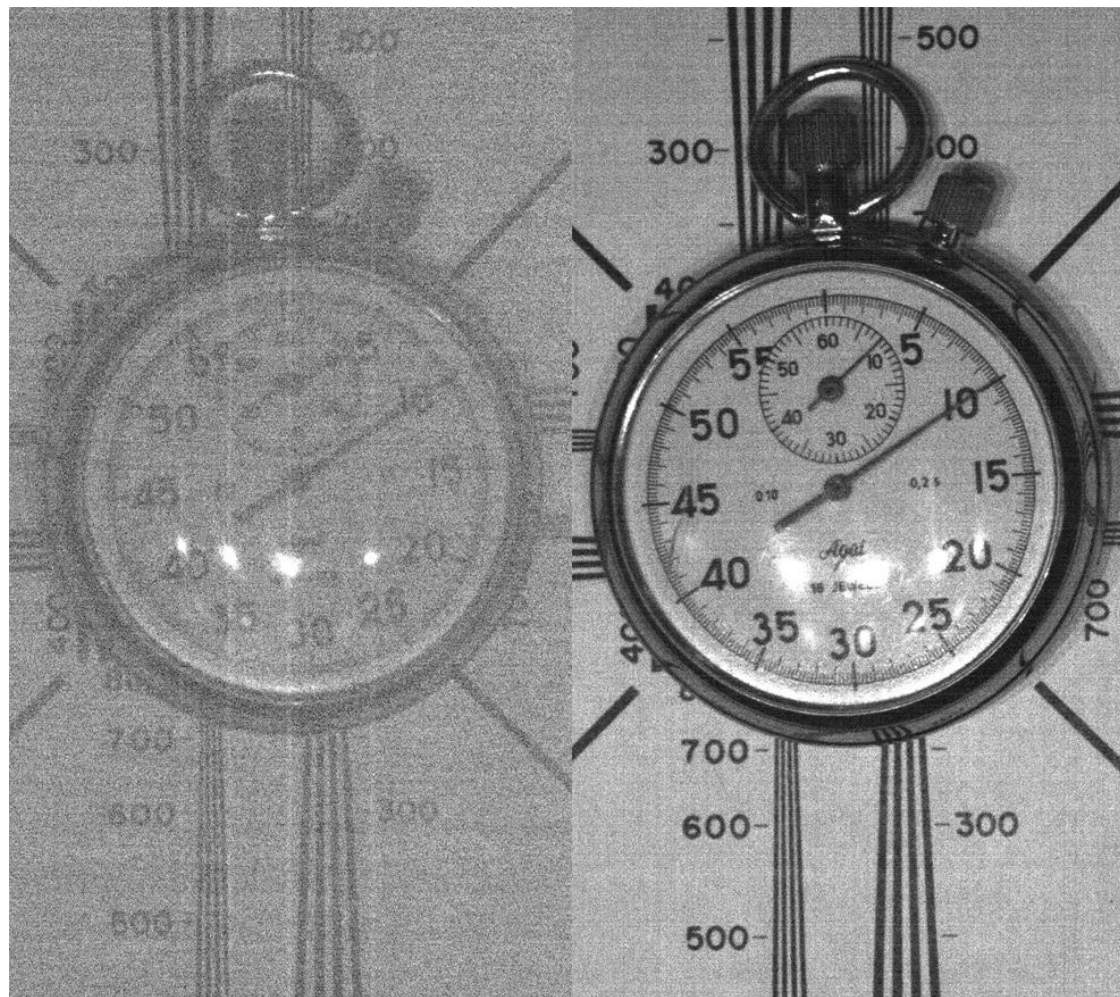
Producenci matryc sCMOS stosują w nich rozmaite, często niezwykle zaawansowane technologie, w tym:

- wbudowane chłodzenie termoelektryczne, wymagające efektywnego chłodzenia gorącej strony ogniów,
- bariery próżniowe zapobiegające kondensacji pary wodnej,
- macierze FPGA kompensujące najsubtelniejsze różnice produkcyjne pomiędzy poszczególnymi pikselami matrycy,
- wysokorozdzielcze, niskoszumne przetworniki ADC (np. 16-bitowe),
- systemy podwójnych torów analogowo-cyfrowych, umożliwiających pomiar każdego piksela za pomocą dwóch niezależnych układów o małym i dużym wzmocnieniu (dane uzyskane z obydwu ramek są następnie „składane” w jedną całość).





Porównanie czułości matrycy CCD (po lewej) i sCMOS (po prawej) w podobnych warunkach słabego oświetlenia fotografowanej sceny – zwróćmy uwagę na *smearing* widoczny w obrazie z matrycy CCD.



Z cech zaprezentowanych do tej pory konstrukcji czujników obrazu wynikają najważniejsze różnice użytkowe pomiędzy matrycami CCD i CMOS.

Podsumowując zatem:

- **Szybkość** – wąskim gardłem matryc CCD jest konieczność odczytu całej macierzy (lub przynajmniej znacznej jej części) przez pojedynczy tor ze wzmacniaczem ładunku; w przypadku matryc CMOS proces ten jest realizowany sekwencyjnie przez zestaw pracujących jednocześnie torów, co znakomicie przyspiesza akwizycję ramek obrazu.
- **Szum** – poziom szumu w standardowych matrycach CMOS jest nierzadko wyższy niż w czujnikach obrazu CCD, co wynika z bardziej rozbudowanej struktury oraz innego sposobu pomiaru komórek fotoczułych.
- **Koszt produkcji** – macierze CMOS są w ogólności tańsze niż czujniki CCD o podobnych parametrach, porównanie to ma sens tylko w przypadku konstrukcji standardowych (nie zaś EMCCD czy sCMOS).

- **Pobór mocy** – sensory CMOS, działające w oparciu o multipleksowanie wstępnie przygotowanych sygnałów napięciowych (zamiast „przepychania” ładunków pomiędzy kolejnymi studniami potencjału), są znacznie bardziej energooszczędne niż porównywalne pod względem rozmiarów i rozdzielczości matryce CCD.
- **Rozdzielczość** – w technologii CMOS łatwiej jest wyprodukować sensory o bardzo wysokiej rozdzielczości, podczas gdy w przypadku CCD szereg ograniczeń technologicznych (w tym bodaj najpoważniejsze, czyli wspomniane „wąskie gardło sygnałowe”) sprawia, że użyteczna rozdzielczość ulega zwykle ograniczeniu.

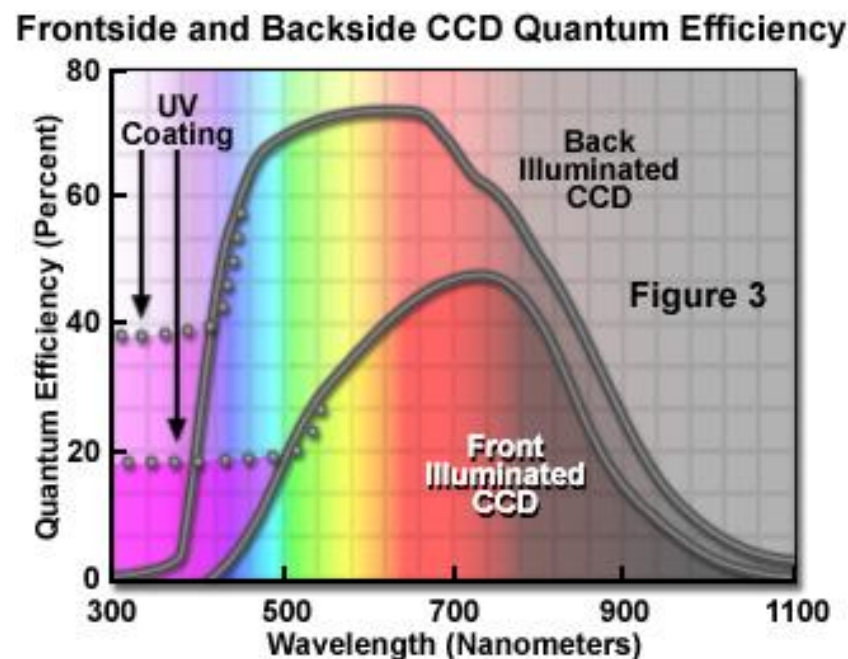
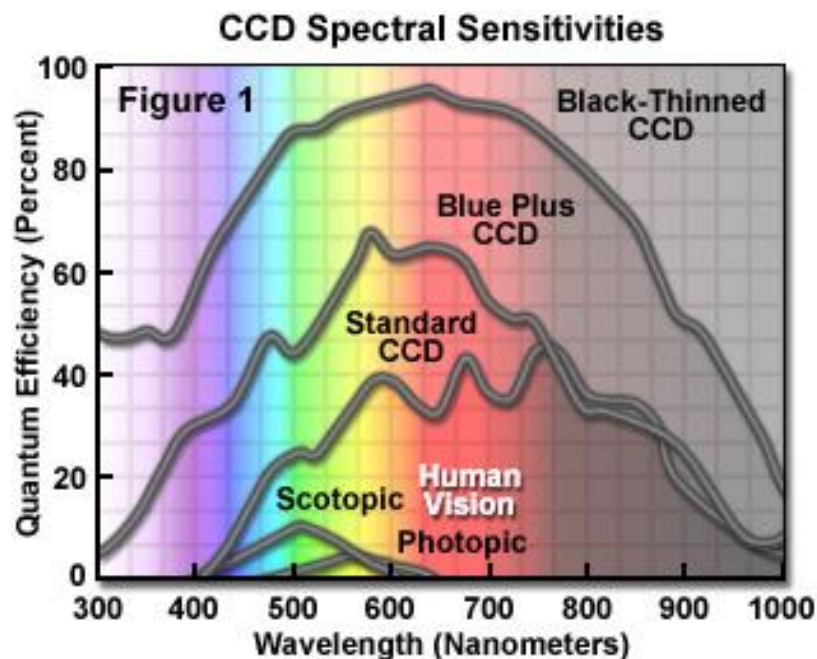
- **Podatność na artefakty** – matryce CCD są podatne na artefakty obrazowe wynikające z efektu „przelewania” ładunku z przepelnionych studni potencjału na otaczające piksele, a także z zaburzeń powstających podczas transferu ładunków (w przypadku matryc typu FT). Problemów tych pozbawione są natomiast matryce CMOS, rzecz jasna z uwagi na niezależną pracę poszczególnych pikseli (ładunki są „mierzone” lokalnie, a nie przesuwane z piksela do piksela).
- **Zakres dynamiki** – współczesne matryce CMOS oferują nieporównanie lepszy zakres dynamiczny niż konstrukcje sprzed kilku czy kilkunastu lat. Co więcej, mają one także wysoką tolerancję na efekt saturacji, tj. lepiej niż czujniki CCD radzą sobie z bardzo jasnymi partiami obrazu – przekroczenie maksymalnej mierzalnej jasności powoduje bowiem po prostu nasycenie toru pomiarowego (tak jak w każdym przetworniku ADC), ale nie skutkuje ono „zalewaniem” otaczających pikseli nadmiarowymi fotoelektronami.

Characteristic	CCD	CMOS
Signal from pixel	Electron packet	Voltage
Signal from chip	Analog Voltage	Bits (digital)
Readout noise	low	Lower at equivalent frame rate
Fill factor	High	Moderate or low
Photo-Response	Moderate to high	Moderate to high
Sensitivity	High	Higher
Dynamic Range	High	Moderate to high
Uniformity	High	Slightly Lower
Power consumption	Moderate to high	Low to moderate
Shuttering	Fast, efficient	Fast, efficient
Speed	Moderate to High	Higher
Windowing	Limited	Multiple
Anti-blooming	High to none	High, always
Image Artefact	Smearing, charge transfer inefficiency	FPN, Motion (ERS), PLS
Biasing and Clocking	Multiple, higher voltage	Single, low-voltage
System Complexity	High	Low
Sensor Complexity	Low	High
Relative R&D cost	Lower	Lower or Higher depending on series

Matryce monochromatyczne i kolorowe

Warto zwrócić uwagę na fakt, że podstawowa struktura czujnika obrazu CMOS bądź CCD nie jest w stanie rozróżnić barwy światła.

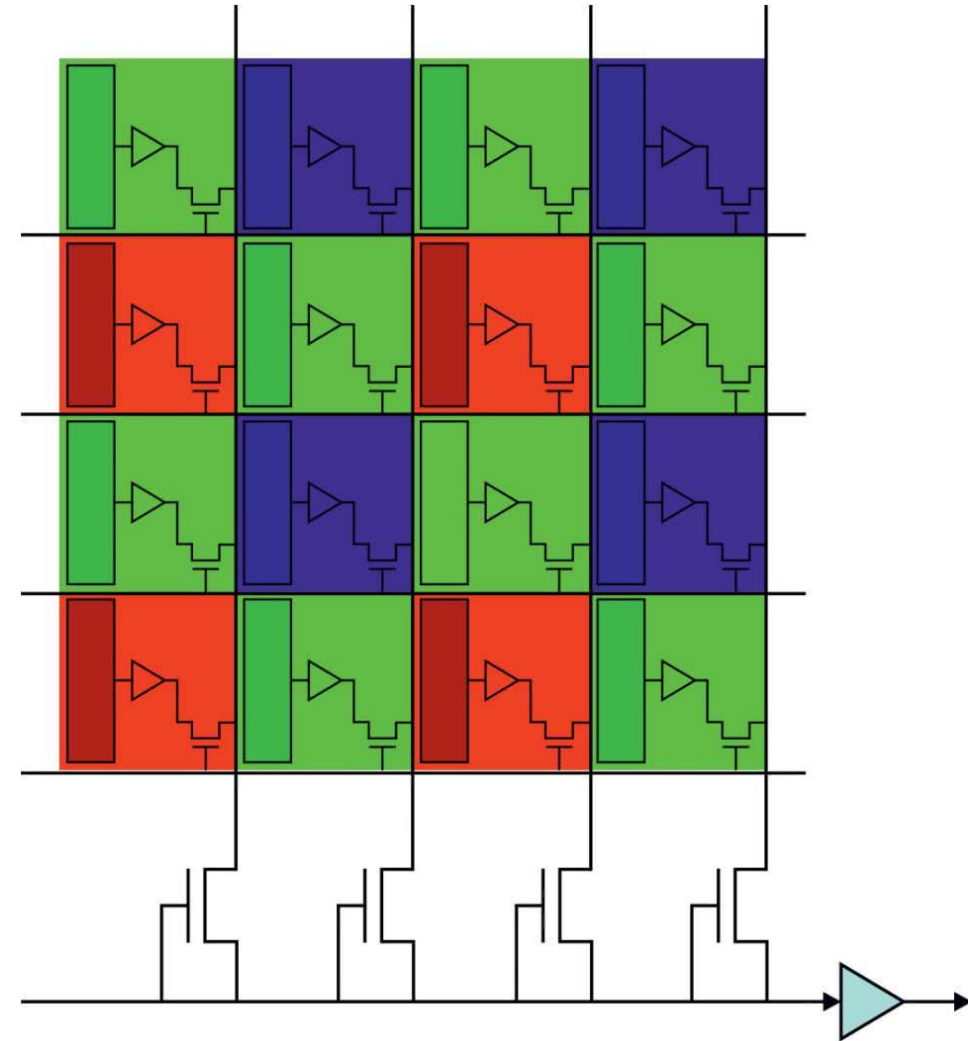
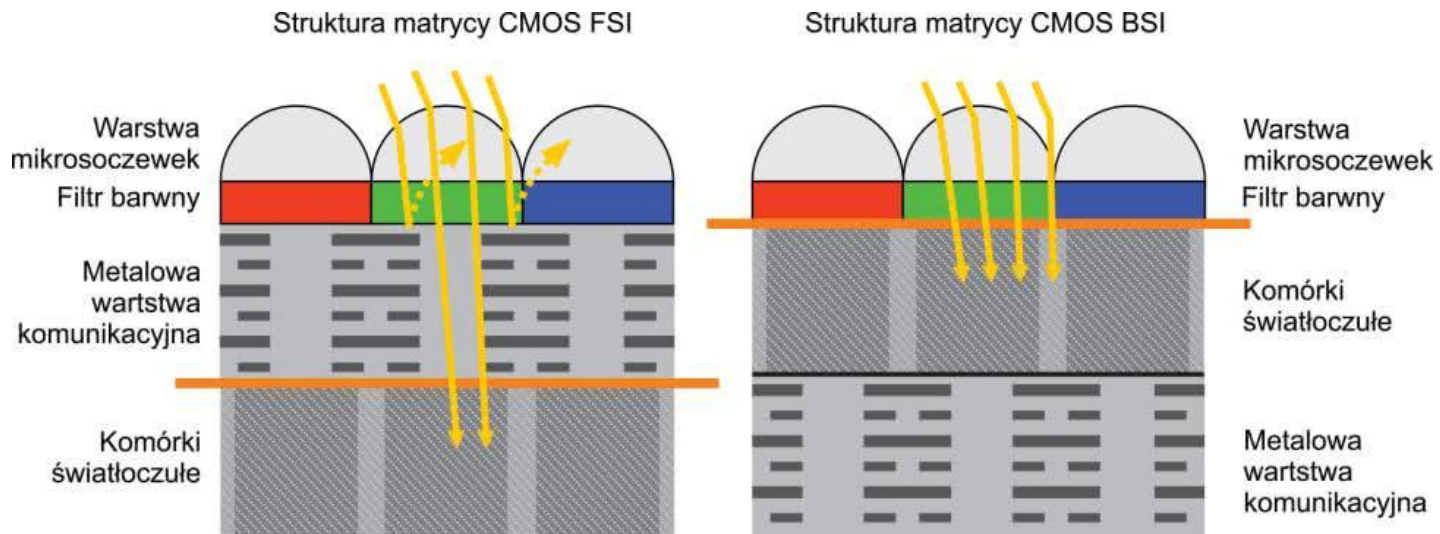
Rzecz jasna, z samej natury zjawisk kwantowych zachodzących w półprzewodniku poddanemu działaniu światła wynika pewna określona dla danego materiału charakterystyka widmowa, ale manifestuje się ona przez zmienną czułość na promieniowanie o różnych długościach fali.



Stosuje się trzy techniki uzyskiwania kolorowego obrazu:

- rejestracja obrazu przez trzy przetworniki, z których każdy zawiera filtr w jednej z trzech barw – rozwiązanie to zapewnia dużą rozdzielczość, ale jest najbardziej skomplikowane technicznie i kosztowne;
- wirujący zestaw filtrów przesuwany nad kolejnymi pikselami jednego przetwornika, tę metodę można stosować głównie do rejestracji obrazów statycznych lub wolnozmiennych ze względu na niską efektywną częstotliwość przetwarzania, jest ono obecnie właściwie już niestosowane;

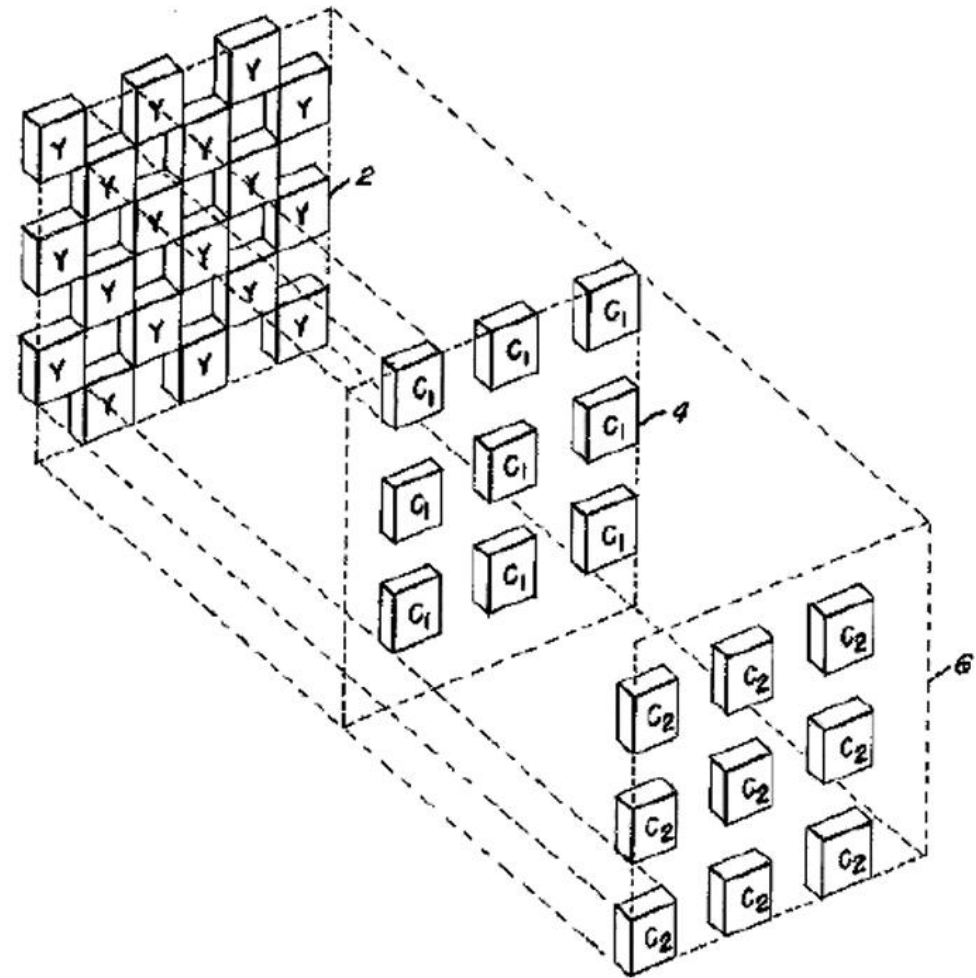
- wykorzystanie filtrów napylnych w trakcie procesu produkcji na elementy światłoczułe lub umieszczone nad nimi. Każdy piksel ma przypisany jeden filtr o danym kolorze - jest to najczęściej stosowane rozwiązanie.



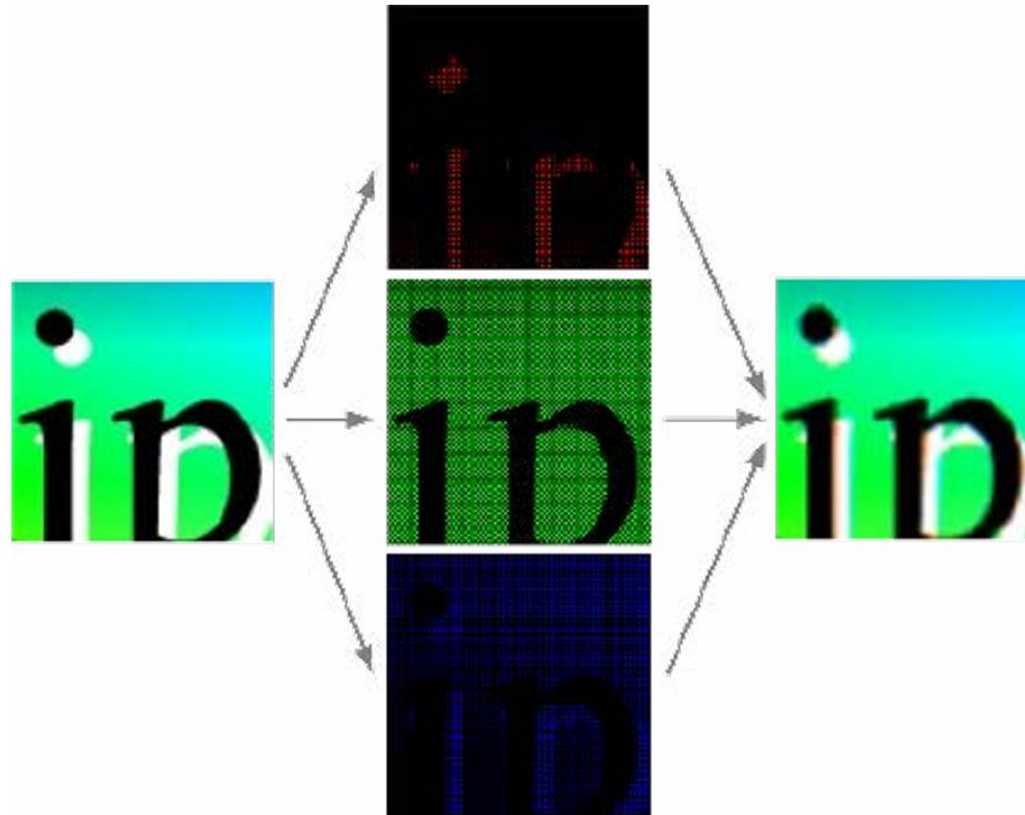
Tutaj pojawia się pierwszy problem – mamy trzy barwy podstawowe, a zatem ułożenie sąsiadujących ze sobą filtrów w postaci ortogonalnej siatki musi prowadzić do dysproporcji w „gęstości” poszczególnych komórek.

W amerykańskim zgłoszeniu patentowym nr US3971065 Bryce E. Bayer uwidoczniał strukturę filtra barwnego, która do dziś stanowi fundament obrazowania cyfrowego w przestrzeni RGB – charakterystyczne ułożenie filtrów czerwonych, zielonych i niebieskich zakłada, że tych drugich jest w macierzy 2-krotnie więcej niż każdego z pozostałych,

Inspiracją do takiego, a nie innego potraktowania zagadnienia filtracji optycznej była znów ludzka siatkówka, szczególnie czuła właśnie na światło zielone.



Drugi problem wynika natomiast ze sposobu rozwiązania pierwszego z nich. Zwróćmy bowiem uwagę na fakt, iż efektem działania filtru Bayera są **trzy** obrazy barwne, prezentujące nieznacznie przesunięte widoki obrazowanej sceny.



Ponadto, pikseli zielonych jest tyle, co wszystkich pozostałych razem wziętych.

Aby uzyskać sensowny obraz z połączenia trzech powyższych, trzeba więc przeliczyć dane wyjściowe z matrycy odpowiednim algorytmem, określanym mianem demozaikowania.

W najprostszej postaci może on wykonywać zwyczajną interpolację wartości dwóch brakujących kanałów barwnych dla każdego piksela – przykładowo, aby wyznaczyć wartość określonego punktu, który w rzeczywistości współpracuje z filtrem zielonym, algorytm uzupełnia dane tegoż punktu poprzez interpolację dwóch otaczających pikseli czerwonych i wykonuje tę samą czynność w odniesieniu do najbliższych punktów niebieskich.

Takie podejście sprawdza się dobrze, ale tylko przy w miarę jednolitych obszarach barwnych, gdyż w przypadku bardziej szczegółowych rejonów sceny (np. krawędzi) może prowadzić do powstawania widocznych artefaktów.

Na kolejnych slajdach zobaczymy przykłady artefaktów powstałych w wyniku demozaikowania algorytmami nieprzystosowanymi do pracy z obrazami o wysokiej częstotliwości przestrzennej szczegółów:

- lewy obraz: demozaikowanie algorytmem najbliższego sąsiada – widoczne zniekształcenia chromatyczne i efekt *zipperingu* (kolorowego, naprzemiennego zafalowania krawędzi);
- środkowy obraz: efekt uzyskany przy zastosowaniu algorytmu interpolacji dwuliniowej, widoczne zniekształcenia kolorystyczne;
- prawy obraz: efekt uzyskany w wyniku demozaikowania algorytmem typu *adaptive homogeneity-directed*.



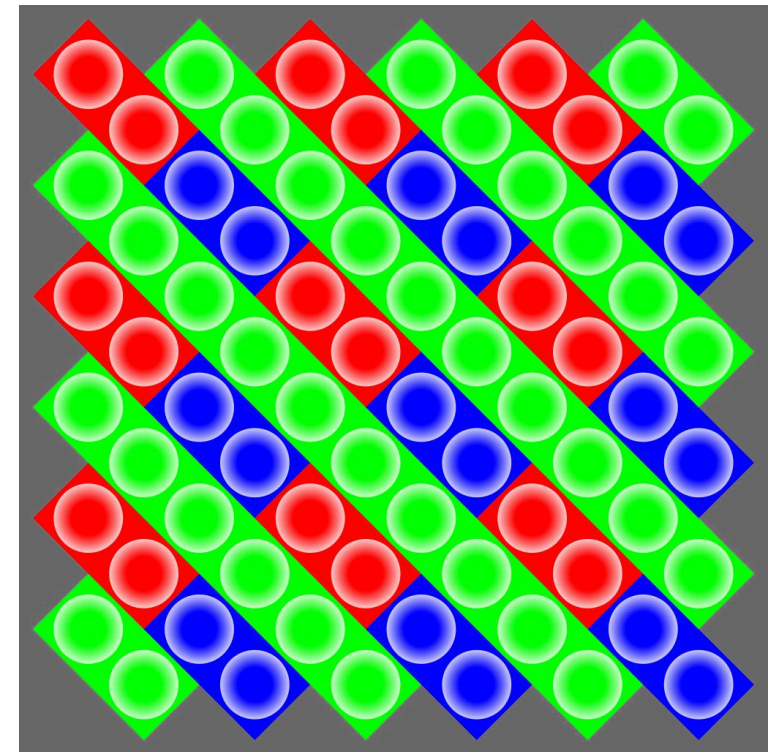
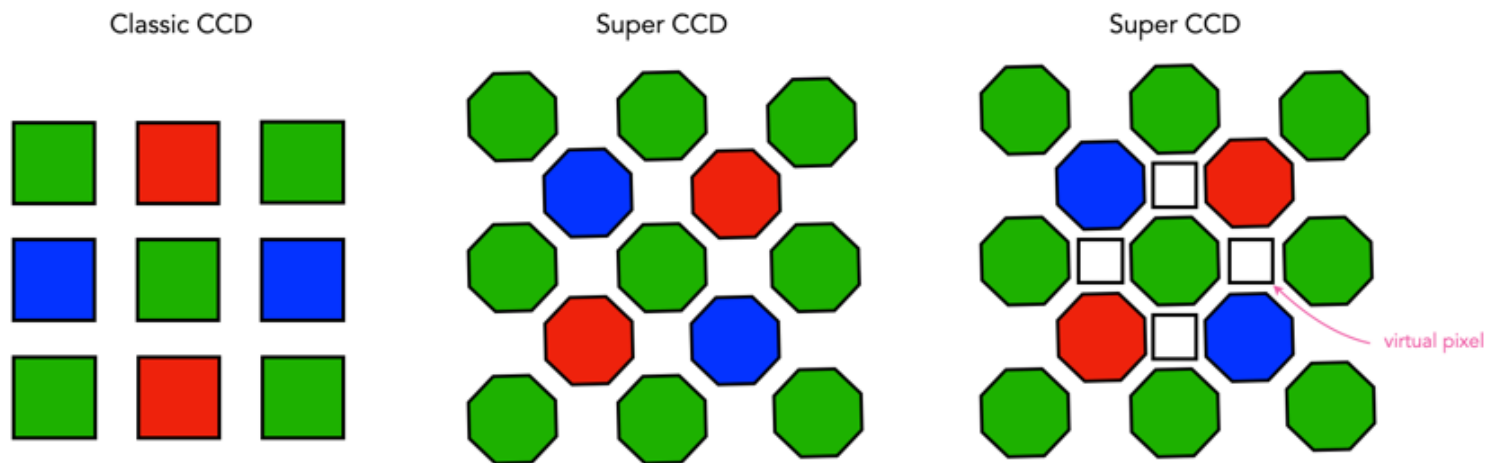


Jak łatwo się domyślić, najlepszy algorytm jest oczywiście algorytmem najbardziej czaso/zasobochłonnym...

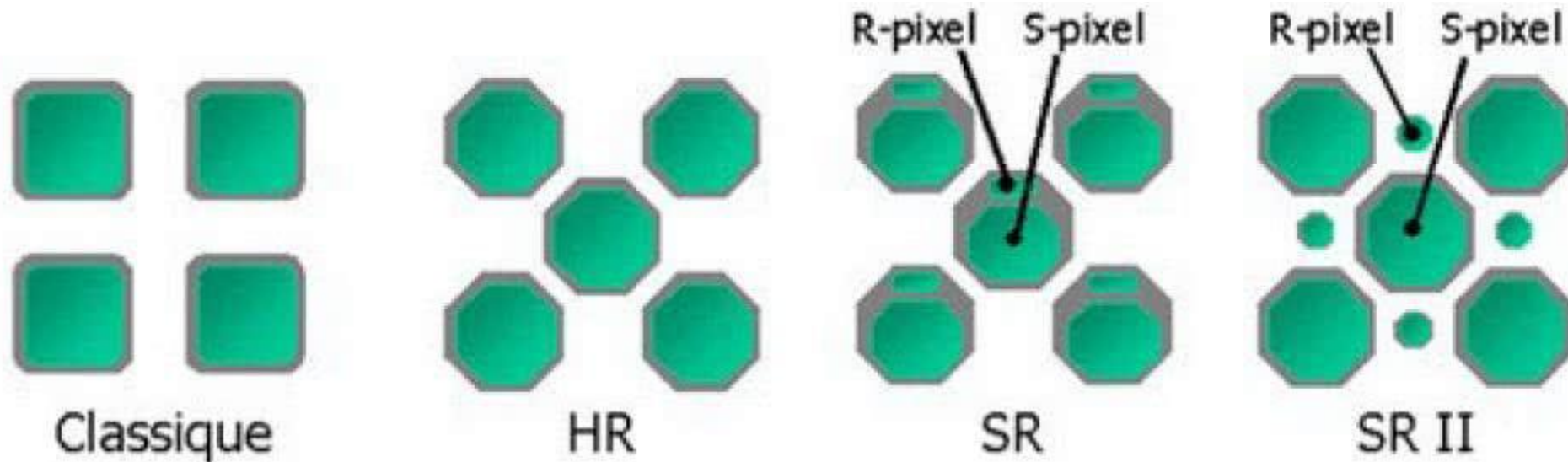
Oprogramowanie do obróbki plików RAW stosuje rozmaite, znacznie bardziej zaawansowane algorytmy, których celem jest poprawa jakości obrazu – zawsze jednak to, co oglądamy, jest w pewnym sensie wytworem komputera, **gdyż nie istnieje ani jeden punkt na obrazie, dla którego wszystkie trzy wartości R, G i B zostałyby rzeczywiście zmierzone jednocześnie.**

Istnieje szereg innych systemów ułożenia filtrów barwnych, np. Fujifilm EXR, Nonacell CFA, czy też Super CCD.

W każdym z tych przypadków nadal istnieje rzecz jasna konieczność stosowania algorytmów demozaikujących, ale poszczególne filtry lepiej lub gorzej radzą sobie np. w kwestiach odporności na artefakty czy też pracy w słabym świetle.

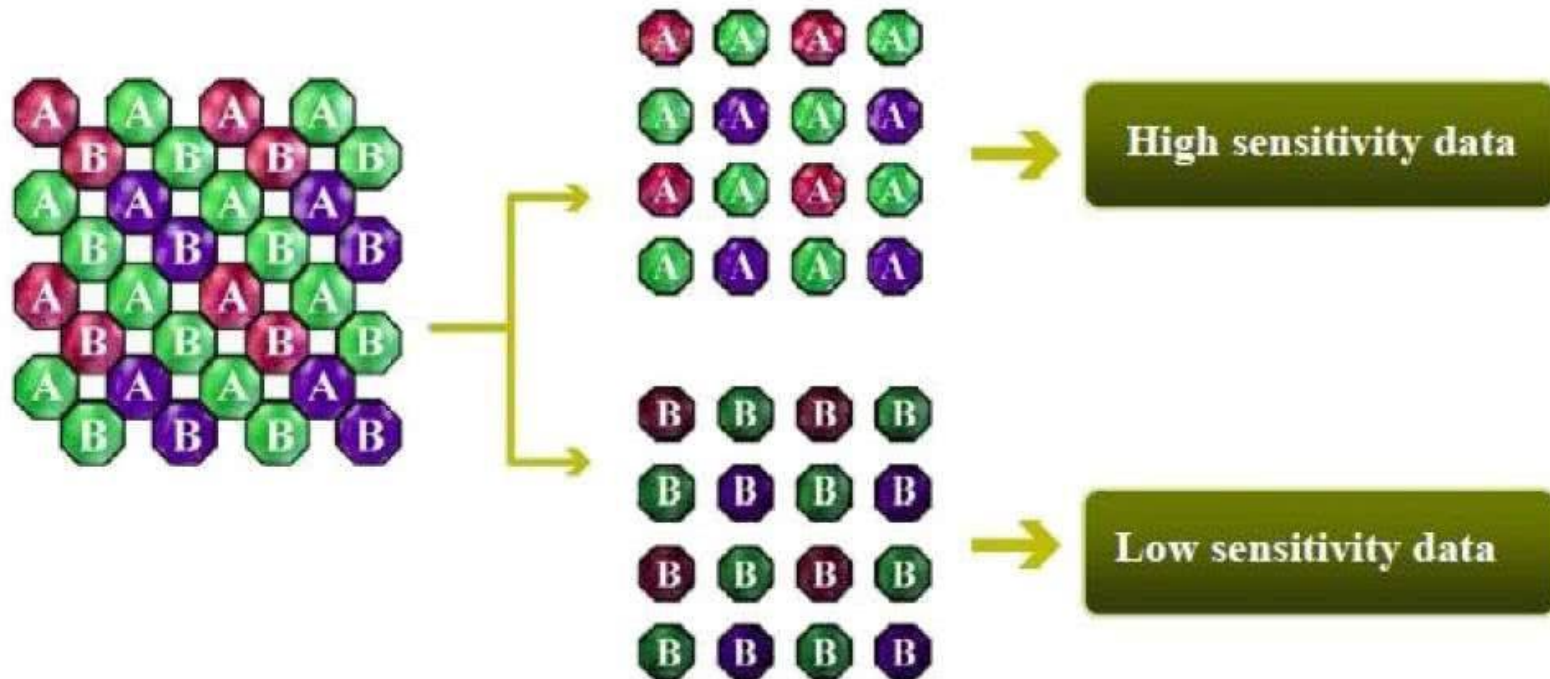


Warto wspomnieć też o matrycach serii Super-CCD, ich standardowa wersja określana jest jako Super-CCD HR. Dla uzyskania szerszego zakresu pomiaru natężenia światła opracowano różne wersje przetworników tego typu wyposażonych w dwa różne typy fotoczuJNIków. Elementy S mają większą powierzchnię i są bardzo czułe, uchwycą ciemniejsze i słabo widoczne elementy obrazu. Natomiast elementy R mają mniejszą powierzchnię i są mniej czułe ale mogą dostrzec szczegóły w jaśniejszych obszarach.



Z połączenia wersji HR i SR powstała matryca Super-CCD EXR.

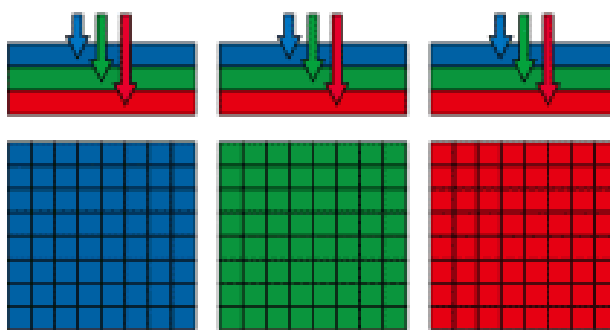
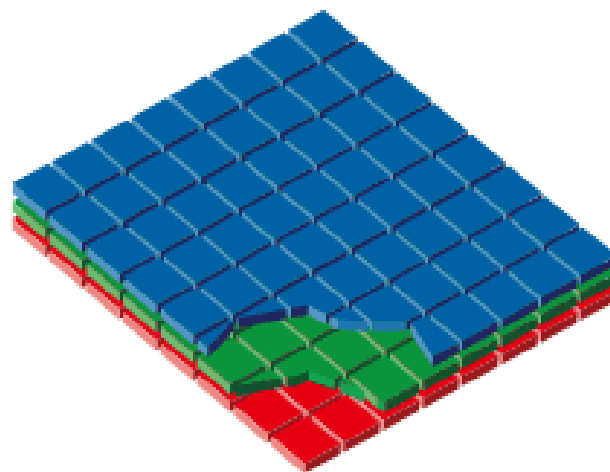
Jej konstrukcja bazuje na grupowaniu sąsiednich pikseli dla tego samego koloru, przy czym mają one różne czułości, wysoką dla jednej połowy fotoczuJNIKÓW i niską dla drugiej połowy. Zatem piksele A rejestrują szczegóły w ciemnych odcieniach, natomiast piksele B rejestrują wyraźne odcienie. Połączenie obu obrazów pomaga zachować dobrą dynamikę oświetlenia całego obrazu.



Warto także dodać, że powstała odmiana czujnika obrazu, w której wszystkie trzy fotodiody „kanałowe” są ustawione jedna na drugiej w sposób wielowarstwowy.

Np. matryca Foveon X3 całkowicie eliminuje potrzebę stosowania demozajkowania, zmniejsza także znacząco liczbę artefaktów na krawędziach obrazu.

Foveon X3
direct image sensor

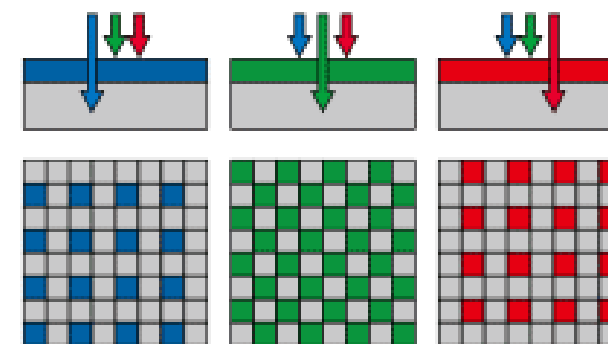
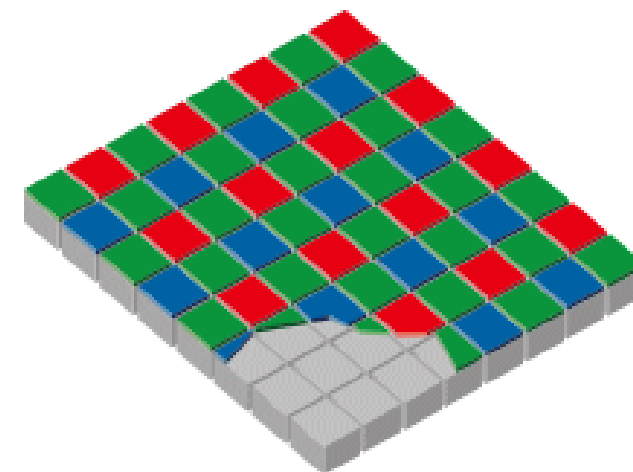


B:100%

G:100%

R:100%

Color filter array sensor
(Bayer filter sensor)



B:25%

G:50%

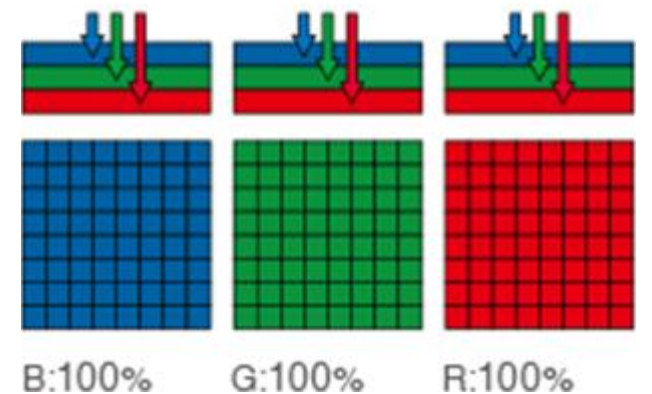
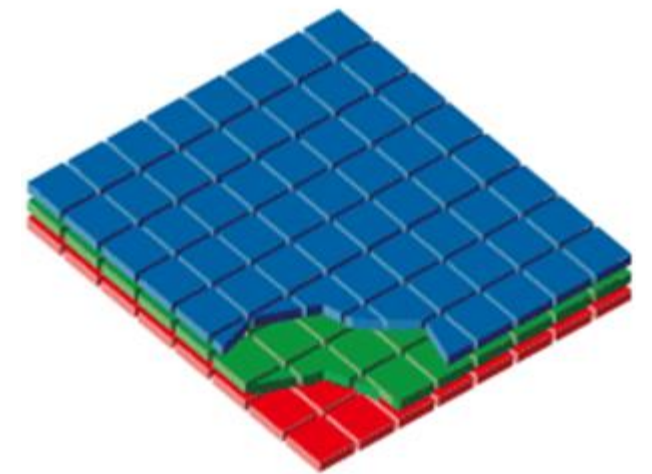
R:25%

I znów rozwiązanie jednego problemu generuje nowe – kolejne warstwy nie mogą bazować na klasycznych filtrach monochromatycznych, gdyby bowiem pierwszy, niebieski filtr zaabsorbował fale o długościach wszystkich innych niż zakres niebieski, to do czujników leżących poniżej nie dotarłoby już żadne promieniowanie spoza tegoż przedziału.

Kwestię tę rozwiązuje się inaczej – filtry optyczne mają charakterystyki pasmowo-zaporowe (tj. absorbują tylko światło – kolejno: niebieskie, zielone i czerwone), a zatem informacje uzyskane z leżących coraz głębiej fotodiod muszą być traktowane nie jako pozyskane subtraktywnie, ale addytywnie.

Algorytm musi więc przeliczyć sygnały z trzech kanałów na – odpowiednią do przyjętej powszechnie w świecie fotografii cyfrowej – przestrzeń barwną RGB.

Foveon X3
direct image sensor



Rodzaj migawki

Do tej pory omówiliśmy zagadnienia związane z szeregiem najważniejszych parametrów przetworników obrazu, zabrakło jednak jednej, równie istotnej cechy konstrukcyjnej, która w dużej mierze warunkuje parametry użytkowe matryc. Mowa o migawce elektronicznej.

W przypadku przetworników obrazu mamy dwa rodzaje migawek:

- Migawka typu *global shutter* pozwala na zarejestrowanie obrazu ze wszystkich pikseli jednocześnie. Dzięki temu uzyskujemy cyfrową reprezentację obrazu sceny, która odpowiada faktycznemu jej wyglądowi w pewnym skończonym przedziale czasowym – rzecz jasna, im krótszy czas ekspozycji, tym mniejsza podatność na rozmazywanie konturów, ale także mniejsza liczba fotonów, które zostaną zarejestrowane przez poszczególne piksele.
- Migawka typu *rolling shutter* działa na drodze sukcesywnego przemiataania kolejnych linii przetwornika w czasie ekspozycji. Oznacza to, że zanim układ odczytowy „dojdzie” do końca obrazu, to szybkozmienna scena może już zdążyć ulec zmianie (np. przesunięciu).

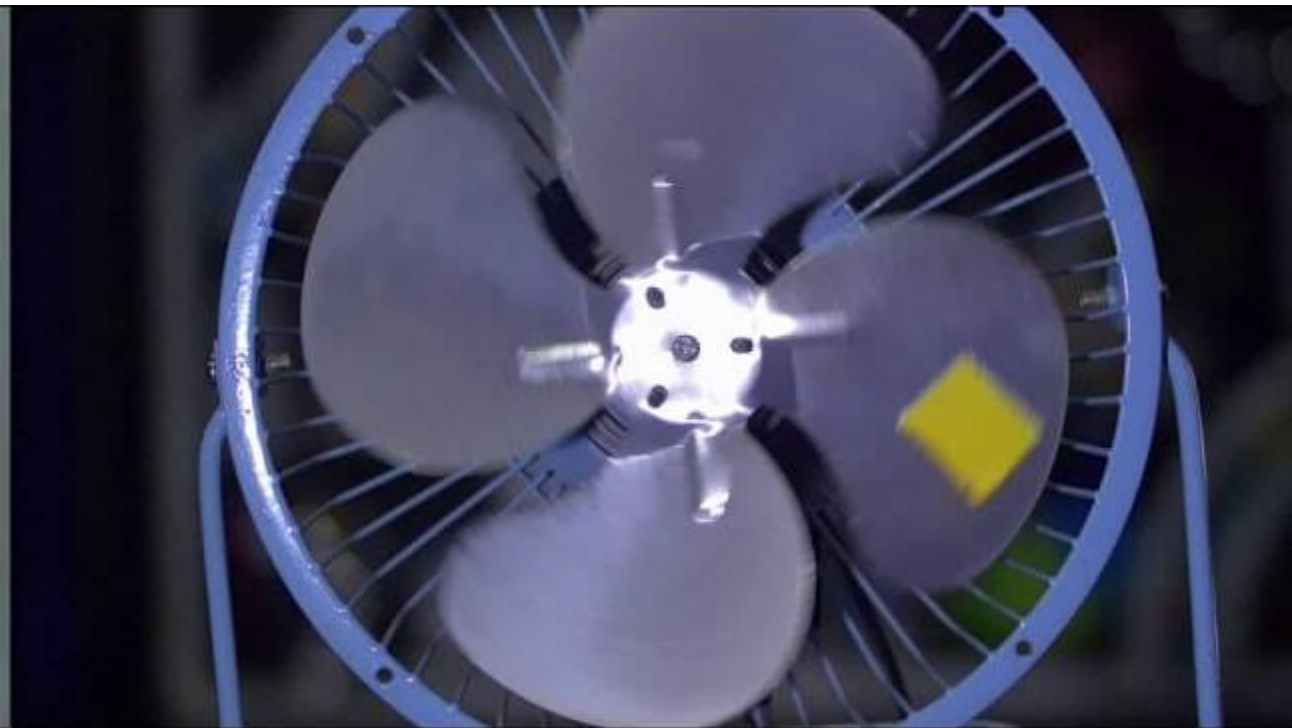
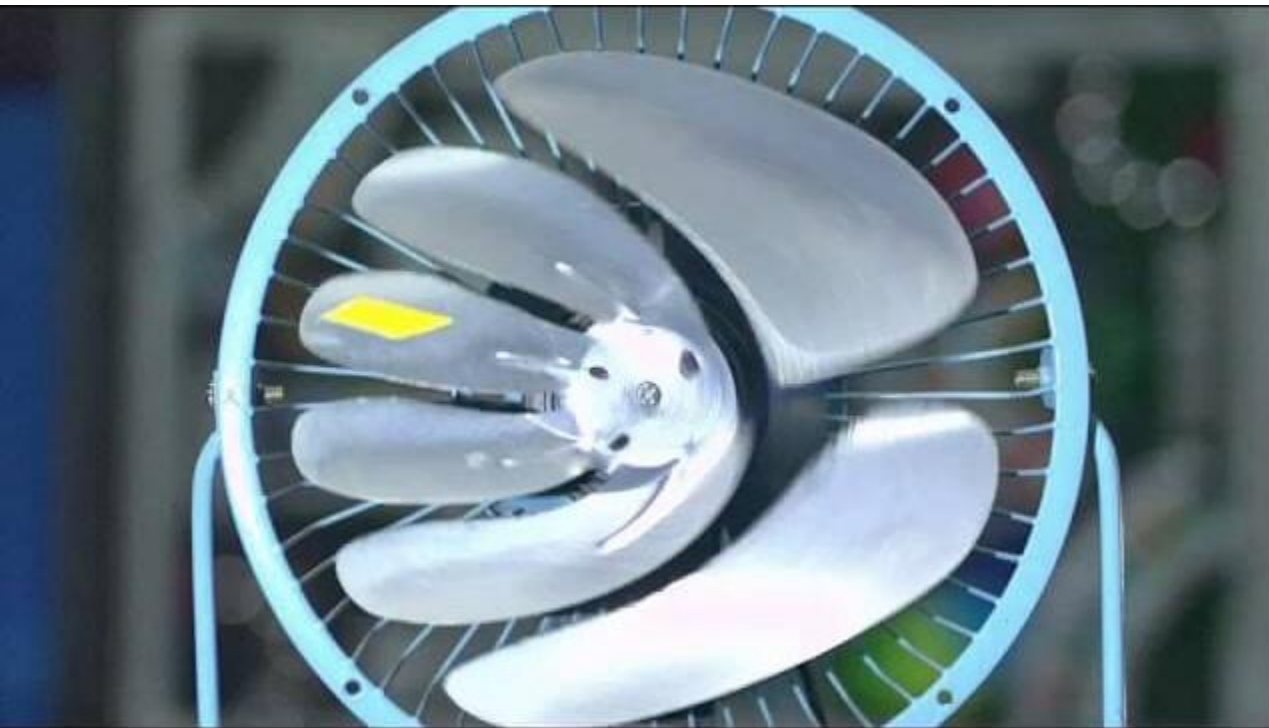
Nietrudno domyślić się, że w przypadku obrazów statycznych lub w czasie rejestracji zjawisk o małej dynamice typ migawki nie ma praktycznie żadnego znaczenia dla obrazu wynikowego.

Jeżeli jednak fotografujemy lub nagrywamy zjawiska szybkozmiennie, to zastosowanie przetwornika z migawką typu rolling shutter prowadzi do powstania artefaktów.

Przykład – wirujące, sześciopłatowe śmigło uchwycione za pomocą kamery wyposażonego w przetwornik z migawką rolling shutter.

Obraz jest silnie zniekształcony, co wynika z rejestracji poszczególnych linii z przesunięciem czasowym względem momentu rozpoczęcia ekspozycji.





Global Shutter

Rolling Shutter

Opisane powyżej artefakty nie wyczerpują jednak tematu wpływu rodzaju migawki na warunki rejestracji obrazu.

Wyobraźmy sobie, że mamy do czynienia z systemem obrazowania mikroskopowego, za pomocą którego obserwujemy np. ruchy drobnoustrojów w polu widzenia mikroskopu:

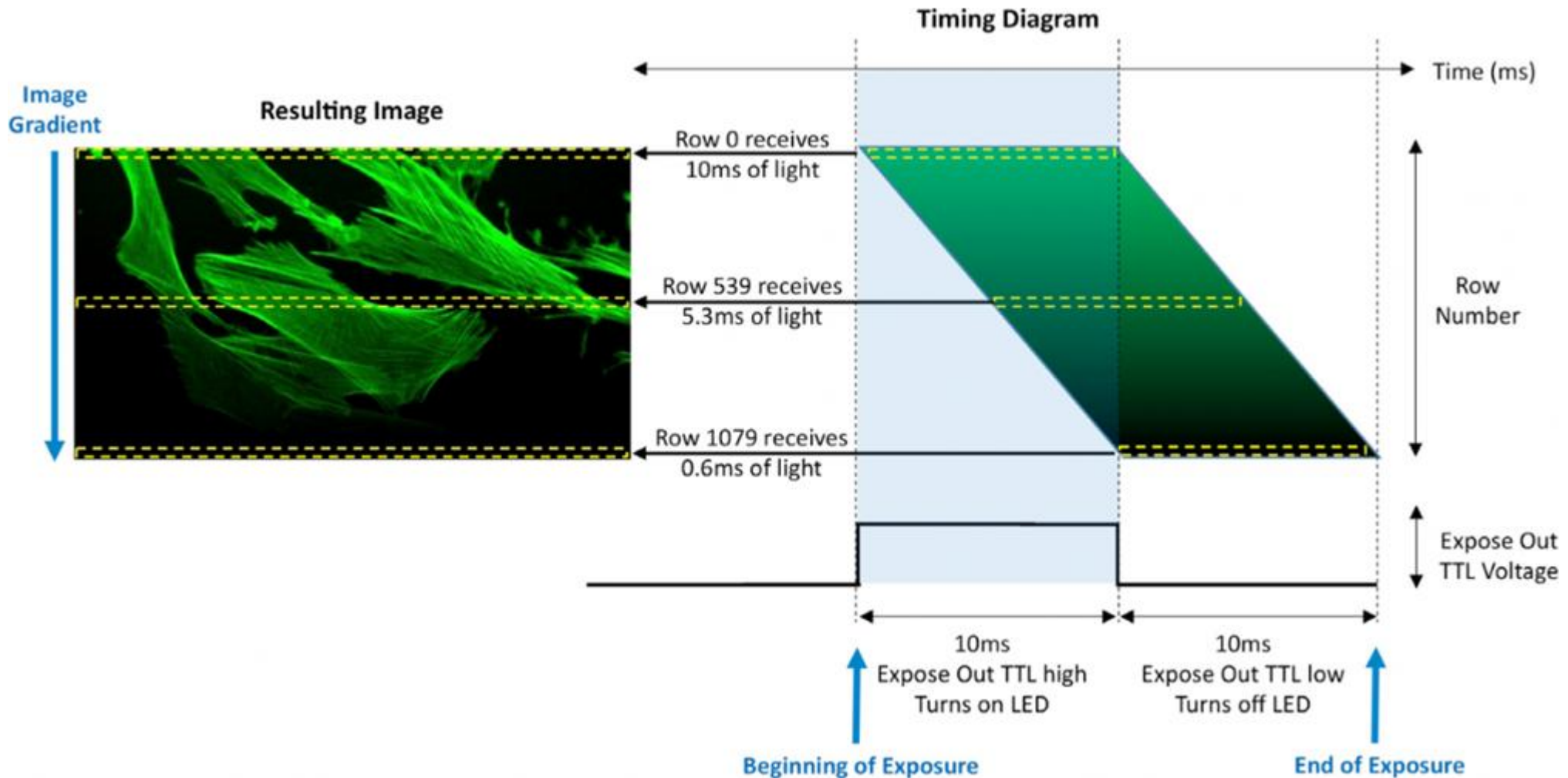
- Jeżeli ruchy są dostatecznie szybkie w stosunku do częstotliwości następujących po sobie ekspozycji (tzw. framerate), to może okazać się, że – zanim układ przemieszczenia matrycy zdąży dojść do ostatniego wiersza pikseli – na obrazie pojawi się organizm, którego wcześniej w owym polu nie było lub ten, który był widoczny w poprzedniej ramce, zniknie z obszaru obrazowania;
- Jeżeli kamera współpracuje z systemem analizy obrazu, realizującym funkcje zliczania obiektów lub ich śledzenia, pomiaru odległości pomiędzy nimi itp., to sposób realizacji migawki będzie w dużej mierze wpływał na błąd metody.

W opracowaniach dotyczących klasycznych zastosowań przetworników obrazu w fotografii cyfrowej rzadko natomiast można znaleźć informacje o powiązaniu migawki z synchronicznym oświetlaczem.

Tymczasem także tutaj rodzaj migawki może mieć kolosalne znaczenie dla uzyskiwanych obrazów.

Spójrzmy na rysunek, na którym zaprezentowano następującą sytuację: preparat mikroskopowy zostaje oświetlony 10 ms impulsem światła z diody LED.

Jednocześnie z początkiem impulsu startuje także ekspozycja, która trwa 20 ms.

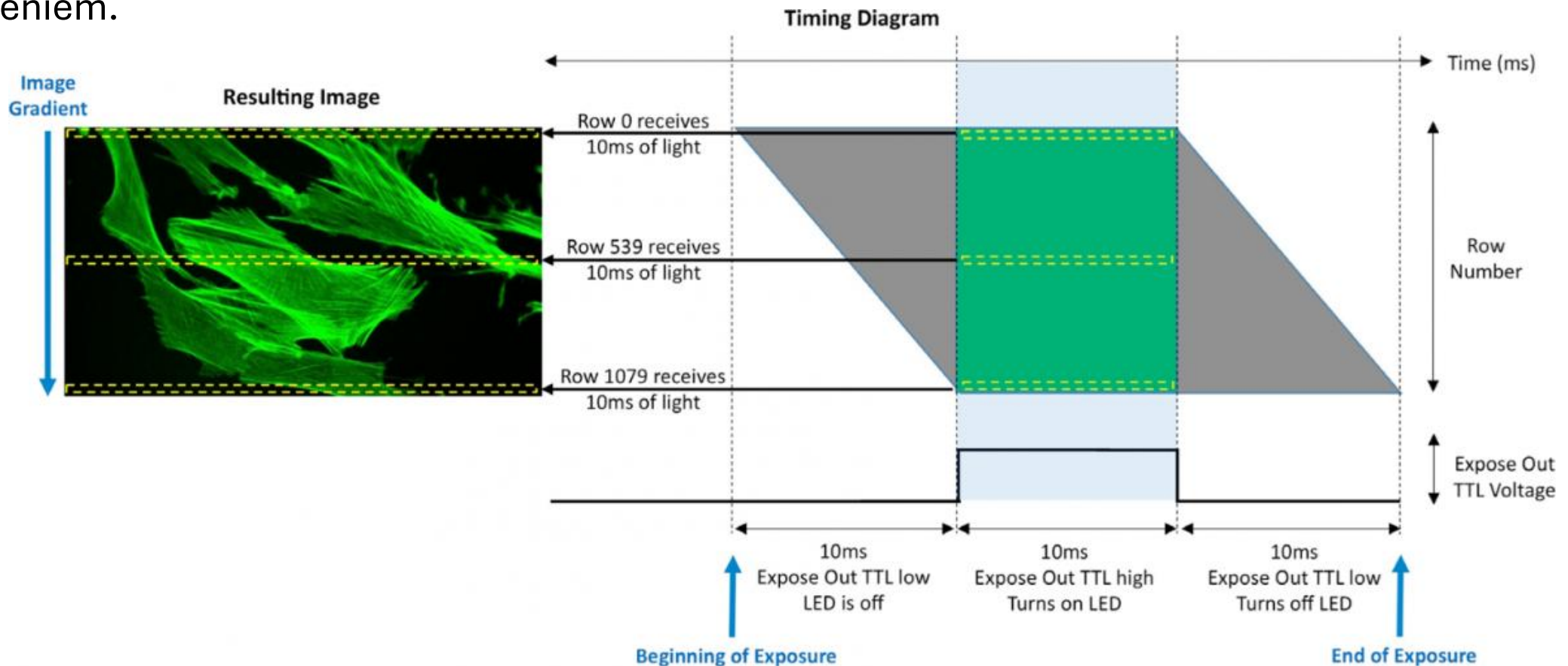


Jak widać, przy takiej konfiguracji układu obrazowania pierwszy wiersz matrycy zostanie naświetlony najsilniej, zaś wszystkie kolejne otrzymają coraz mniej światła. Z punktu widzenia następnych wierszy matrycy będzie to porównywalne z „wirtualnym” zmniejszaniem współczynnika wypełnienia sygnału sterującego diodą – w skrajnym przypadku ostatni wiersz może nawet w ogóle nie zostać oświetlony w czasie, gdy przyjdzie kolej na jego ekspozycję.

Efekt?

Obraz stopniowo ściemnia się w osi pionowej (Y) – jak gdyby na obiektyw został nałożony silny filtr połówkowy.

Istnieją rozwiązania tego problem – można np. tak wydłużyć ekspozycję (i/lub skrócić czas oświetlenia sceny), by na okno czasowe z włączonym oświetlaczem przypadła częściowa ekspozycja wszystkich wierszy matrycy. Takie rozwiązanie nosi miano *pseudo-global shutter* – z jednej strony, zmiana sposobu sterowania oświetlaczem pozwala wykonać prawidłową ekspozycję całej matrycy (tak jak w przypadku klasycznych przetworników obrazu z globalną migawką), z drugiej jednak nie chroni to w żaden sposób przed artefaktami wynikającymi z dynamiki samej sceny – wszystkie opisane wcześniej problemy, związane np. z ruchem obiektu(-ów) w polu obrazowania, wystąpią tutaj z takim samym natężeniem.



Migration of human mesenchymal stem cells stimulated with pulsed electric field and the dynamics of the cell surface glycosylation

Katarzyna Jezierska-Woźniak^{1,A–D}, Seweryn Lipiński^{2,C,D}, Margaret Huflejt^{3,A,C,D}, Łukasz Grabarczyk^{3,B}, Monika Barczewska^{3,A,C}, Aleksandra Habich^{4,B}, Joanna Wojtkiewicz^{5,C}, Wojciech Maksymowicz^{3,A,F}

¹ Department of Neurology and Neurosurgery, Faculty of Medical Sciences, Laboratory for Regenerative Medicine, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland

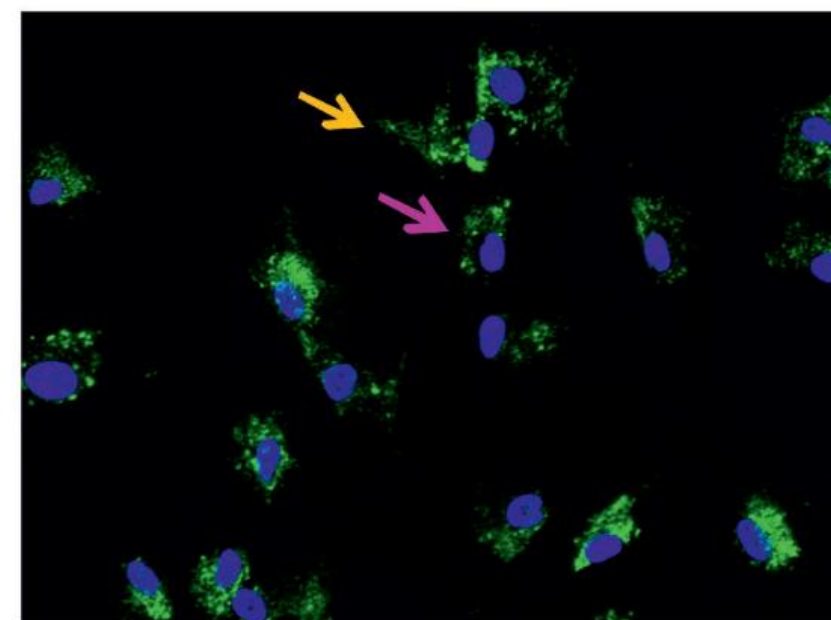
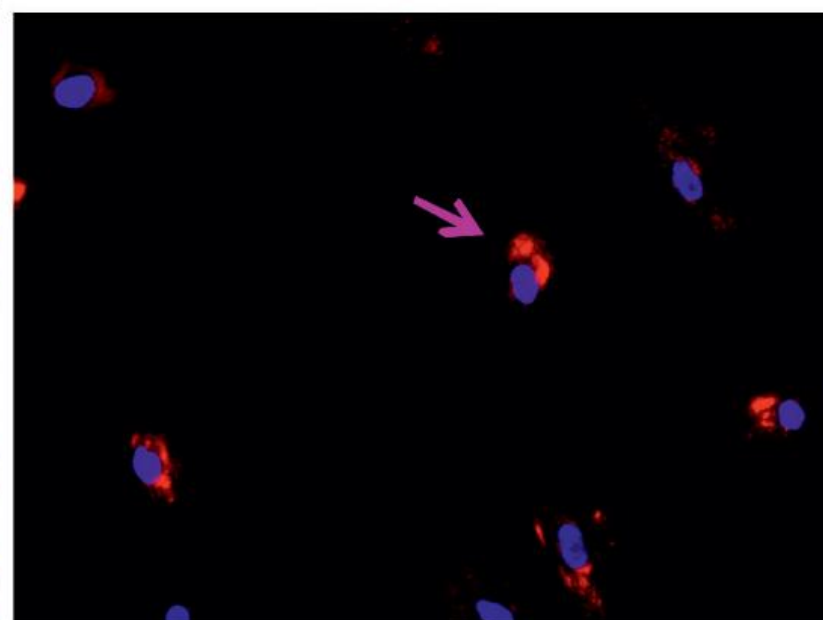
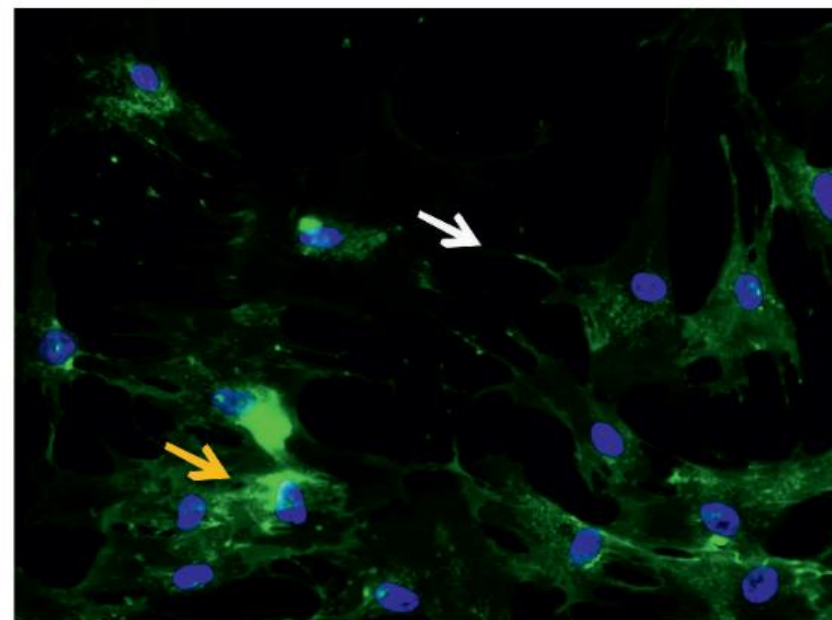
² Department of Electric and Power Engineering, Electronics and Automatics, Faculty of Technical Sciences, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland

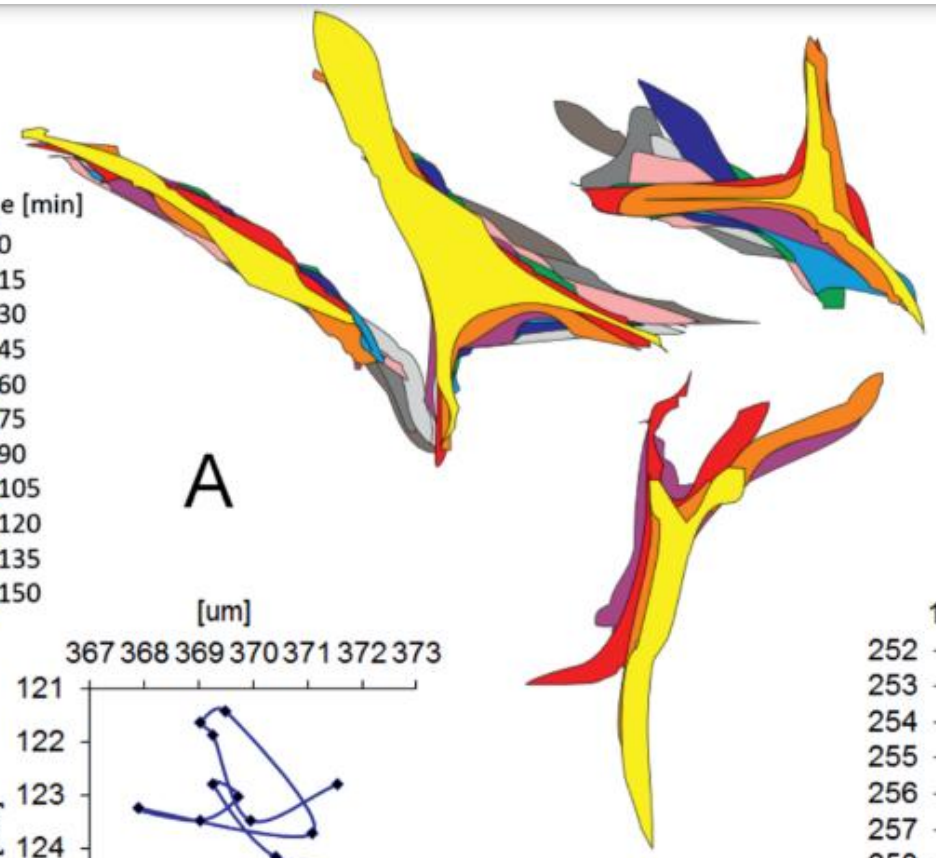
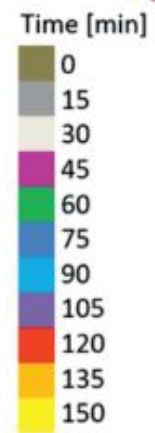
³ Center of Innovative Research in Medical and Natural Sciences, Faculty of Medicine, University of Rzeszów, Poland

⁴ Department of Pathophysiology, Faculty of Medical Sciences, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Poland

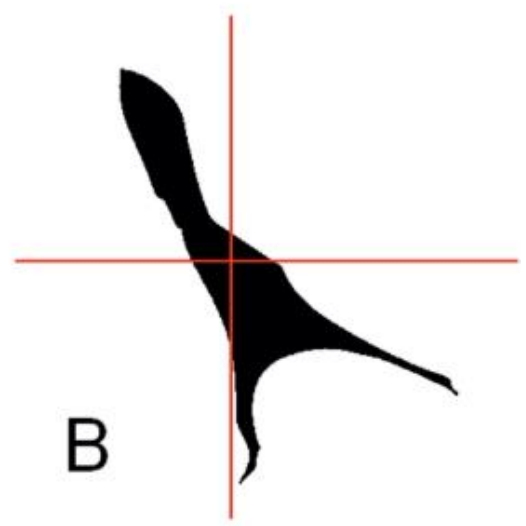
A – research concept and design; B – collection and/or assembly of data; C – data analysis and interpretation;

D – writing the article; E – critical revision of the article; F – final approval of the article

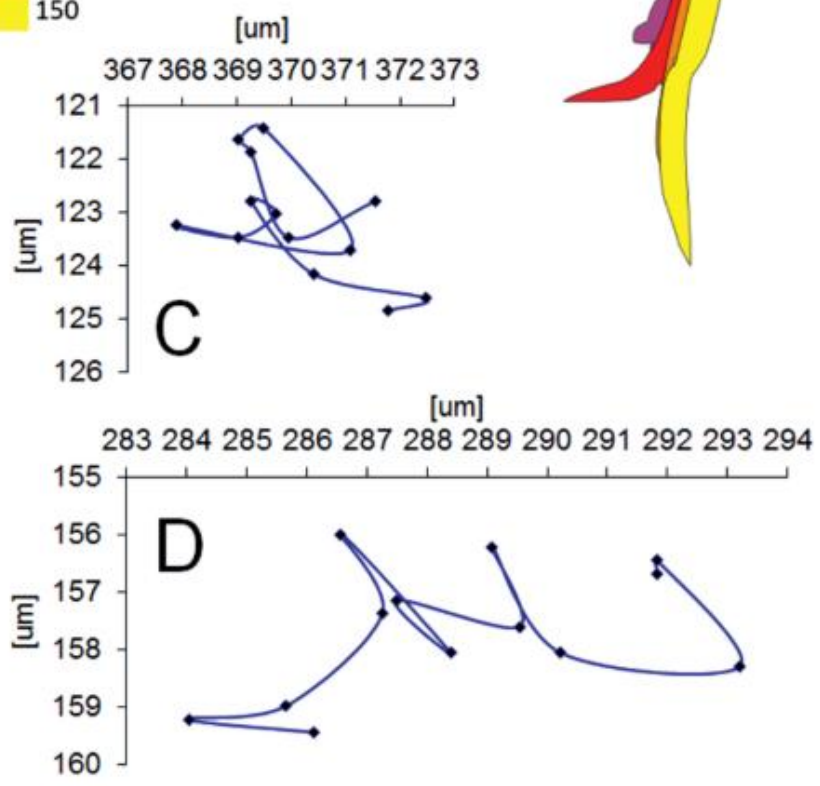




A

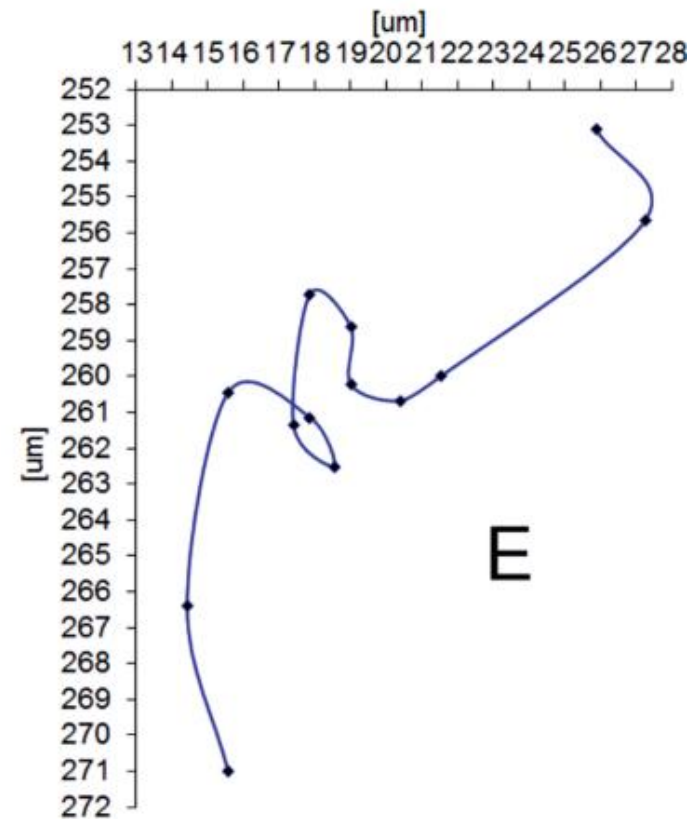


B



C

D



E

Dziękuję za uwagę