

– Budowa i działanie elektronicznych detektorów obrazu

1. Materiał nauczania

Najważniejszym elementem aparatów cyfrowych jest elektroniczny detektor rejestrujący obraz optyczny i przekształcający sygnał świetlny w sygnał elektryczny (fotony w elektrony) Wyróżniamy trzy rodzaje elektronicznych detektorów obrazu:

- matryce CCD (Super CCD, Super CCD HR, SR),
- matryce CMOS,
- trójwarstwowe matryce X3 o technologii CMOS.

Dwa główne rodzaje tych przetworników to układy ze sprzężeniem ładunkowym (CCD - Charge Coupled Device) oraz matryce CMOS wykorzystujące fotodiody wykonane tradycyjną metodą (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Elektroniczne detektory obrazu zbudowane są z milionów elementów światłoczułych (fotoelementów) równomiernie rozmieszczonych na płaskiej płytce. Każdy fotoelement rejestruje informację o szczególe fotografowanego obiektu i odpowiada pikselowi obrazu cyfrowego. Fotoelementy działają jak miniaturowe światłomierze. Pod wpływem padającego światła w każdym fotoelemencie powstaje ładunek elektryczny proporcjonalny do jego ilości. Powstały sygnał prądowy jest przesyłany, odczytywany i przetwarzany przez układy elektroniczne aparatu cyfrowego z postaci ciągłej (sygnał analogowy) do postaci dyskretnej (sygnał skwantowany - zdigitalizowany).

Elektroniczne detektory obrazu różnią się budową oraz sposobem odczytywania i przetwarzania informacji zgromadzonej w fotoelementach o budowie warstwowej.

Pojedynczy element CCD, zwany złączem MIS, ma budowę warstwową (rys.2). Warstwy składowe to

M – Metal

I – Insulator

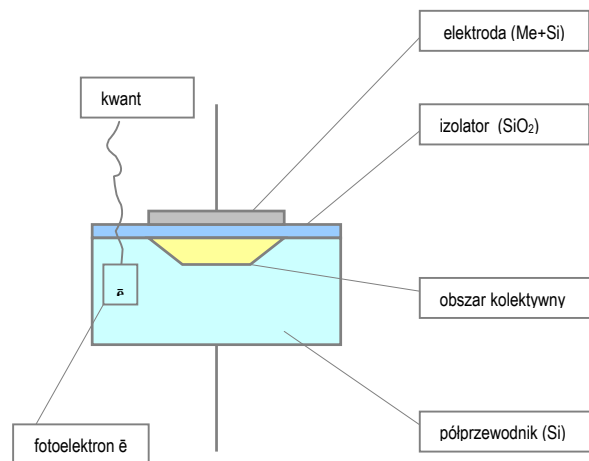
S – Semiconductor

Elektroda (M) stanowi górną warstwę złącza MIS. Wykonana jest z warstwy nieprzezroczystego metalu domieszkowanego krzemem (Me+Si). Zastłania część powierzchni fotoelementu zmniejszając jego efektywną aperturę, która informuje o procentowym udziale aktywnej powierzchni fotoelementu w stosunku do powierzchni całkowitej.

Zadaniem dodatniej elektrody jest utrzymywanie wygenerowanych podczas naświetlania elektronów w obszarze fotoelementu (rys. 2 obszar kolektywny).

Zapobiega to efektowi „bloomingu” polegającemu na rozmyciu się ładunku na sąsiednie elementy. Efekt ten dotyczy stanu nasycenia komórki detektora, której przepełnienie powoduje odpływ zgromadzonego ładunku do komórek sąsiednich, powodując efekt zbliżony do efektu rozpraszania światła w tradycyjnych materiałach halogenosrebrowych przy wysokich wartościach ekspozycji.

Poniżej elektrody znajduje się cieniutka warstewka półprzezroczystego izolatora (I) wykonanego z czystej krzemionki (SiO_2 – dwutlenku krzemu). Zadaniem izolatora jest zapobieganie niekontrolowanemu odpływowi ładunków do elektrody. Elementem

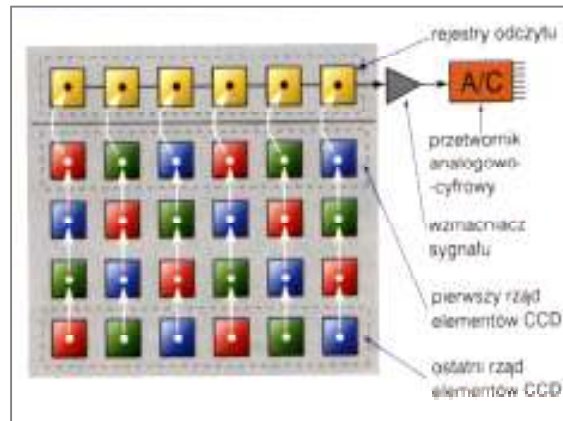


Rys. 2. Budowa pojedynczego elementu CCD

światłoczułym złącza MIS jest dolna warstwa krzemowego **półprzewodnika (Si)**. Pod działaniem światła w warstwie półprzewodnika pękają wiązania między atomami krzemu z uwolnieniem elektronu. Ilość uwolnionych nośników prądu jest wprost proporcjonalna do ilości (natężenia i czasu działania) padającego światła.

Matryca CCD (Charge Coupled Device – urządzenie ze sprzężeniem ładunkowym)

CCD jest najlepszym detektorem stosowanym w procesie elektronicznej rejestracji obrazu. Technologię CCD wynaleziono w 1970 roku w laboratoriach Bella, cechują ją małe zniekształcenia obrazu, szybkość działania oraz duża czułość układów.

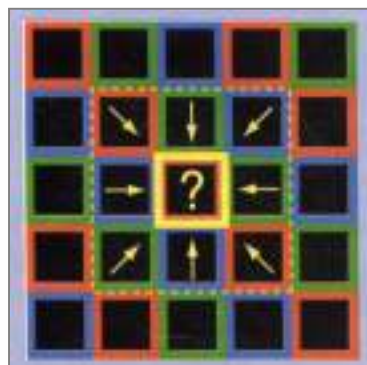


Rys. 3. Schemat budowy matrycy CCD [10, s. 33]

Matryca CCD zbudowana jest z elementów światłoczułych umieszczonych na płaskiej płytce w kolumnach i wierszach, pokrytych siatką filtrów barwnych RGB. Ilość elementów decyduje o rozdzielczości uzyskiwanych obrazów cyfrowych.

Podczas naświetlania w każdym elemencie zostaje zmierzona ilość światła, a następnie zamieniona na odpowiadającą jej wartość natężenia prądu. W ten sposób otrzymujemy informację o luminancji szczegółów rejestrowanego obiektu.

Informację o barwie fotografowanego obiektu uzyskujemy dzięki siatce/mozaice filtrów



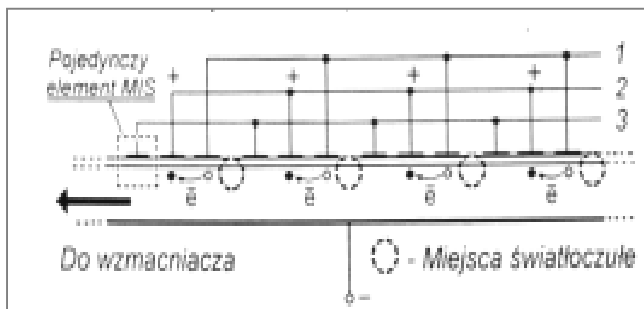
Rys.4. Odwzorowanie barw w matrycy CCD [2 s.34]

barwnych (zgodnej z wzorem Bayera) umieszczonych nad warstwą fotoelementów. Ponieważ każdy fotoelement pokryty jest innym filtrem niebieskim zielonym lub czerwonym (rys. 3) – rejestruje informację o jednej składowej barwnej (R, G lub B). W celu otrzymania pełnej informacji o barwie obrazu analizowane są sąsiednie elementy światłoczułe. Jest to tzw. proces „demozaikowania” [17].

Na rysunku 4 przedstawiono jeden ze sposobów tworzenia rzeczywistej barwy piksela na drodze obliczeń (interpolacji) o udziale składowych chromatycznych RGB na sąsiednich fotoelementach.(rys. 4). W tym algorytmie demozaikowania informacja z piksela pobierana jest kilka razy.

Inna metoda demozaikowania do odtworzenia barwy jednego punktu obrazu opiera się na pobieraniu informacji o natężeniu światła zarejestrowanego na 4 sąsiadujących pikselach pokrytych filtrami RGBG. Taki algorytm demozaikowania powoduje czterokrotny spadek rozdzielczości obrazu względem rozdzielczość detektora, ale otrzymujemy rzeczywistą informację o barwie piksela bez interpolacji danych [17].

Odczyt zgromadzonych w fotoelementach matrycy ładunków odbywa się sekwencyjnie. Wzdłuż każdej kolumny matrycy znajduje się kanał CCD, którym ładunki wędrują do rejestrów odczytu (rys.3)



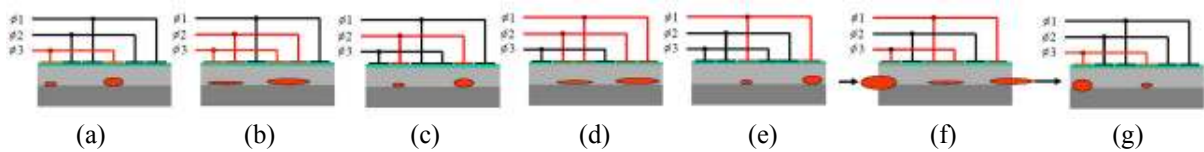
Rys.5. Transport ładunków kanałem CCD [13, s.28]

Elektrony z pierwszego wiersza sensorów przesyłane są do rejestrów odczytu stamtąd do wzmacniacza sygnału, a następnie do przetwornika analogowo-cyfrowego gdzie sygnał prądowy zostaje zdigitalizowany i zapisany na nośniku pamięci.

Transport elektronów kanałem CCD przylegającym do każdej kolumny fotoelementów odbywa się skokowo. Ładunek jest przesuwany przez zmiany potencjału elektrycznego na elektrodach trzech grup 1,2,3 (rys. 5).

Kolejne etapy transferu ładunku zachodzą według schematu (rys. 6):

- (a) do elektrod grupy 3 jest przyłożony potencjał dodatni, podczas gdy do elektrod grup 1,2 ujemny,
- (b) wzrasta potencjał dodatni na elektrodach 2 grupy i maleje na elektrodach 3 grupy – ładunek jest rozciągany pod elektrodami obu grup (2 i 3),
- (c) do elektrod grupy 2 jest przyłożony potencjał dodatni, 1,3 ujemny,
- (d) wzrasta potencjał dodatni na elektrodach 1 grupy i maleje na elektrodach 2 grupy – ładunek jest rozciągany pod elektrodami obu grup (1 i 2),



Rys. 6. Transfer ładunków w matrycy CCD do rejestrów odczytu (element CCD) [15]

- (e) do elektrod grupy 1 jest przyłożony potencjał dodatni, do elektrod grup 2,3 ujemny,
- (f) pakiet ładunkowy z sąsiedniego piksela wchodzi od lewej strony podczas gdy pakiet z danego piksela przesuwa się do piksela na prawo,
- (g) do elektrod grupy 3 jest przyłożony potencjał dodatni, do elektrod grup 1,2 ujemny, rozpoczyna się etap transferu ładunku przez kolejny fotoelement [15].

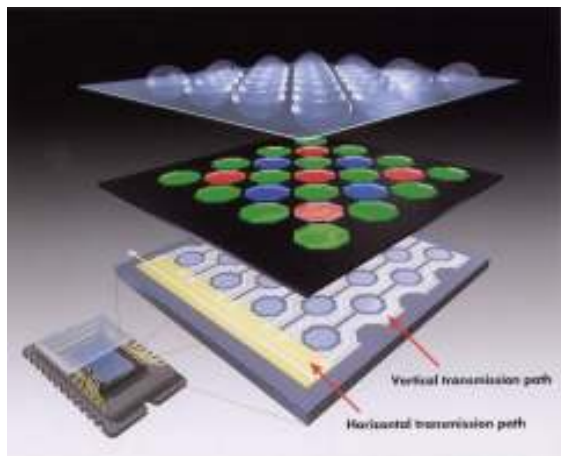
Pierwsze przetworniki CCD posiadały prostokątny kształt fotoelementów. W celu osiągnięcia lepszych efektów rejestracji obrazu firma Fuji Photo Film opracowała przetwornik Super CCD posiadający strukturę plastra miodu, o oktagonalnych komórkach, czyli zbliżoną do budowy siatkówki oka.

(rys.7) Ośmiokątny kształt fotoelementów pozwala

na lepsze wypełnienie powierzchni fotoelementami, wzrost efektywnej apertury (powierzchni aktywnej), wzrost rozdzielczości matrycy czyli upakowanie na tej samej powierzchni więcej fotoelementów.



Fot.7. Porównanie kształtu fotoelementów matrycy CCD i Super CCD [7, s. 9]

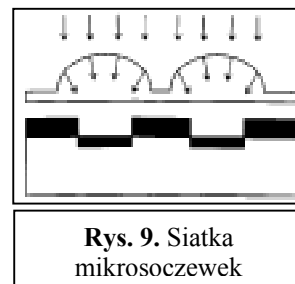


Rys. 8. Budowa warstwowa matrycy Super CCD [7, s. 10]

Rysunek 8 przedstawia budowę warstwową matrycy Super CCD od warstwy fotoelementów przez siatkę filtrów barwnych ze zwiększoną ilością fotoelementów pokrytych filtrem zielonym i warstwę mikrosoczewek.

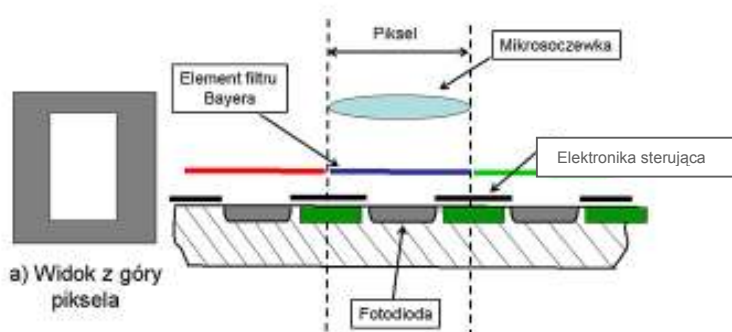
Siatka filtrów barwnych z mozaiką RGBG lub CMYG pozwala uzyskać lepsze odwzorowanie barw ponieważ wyrównuje nadwrażliwość matrycy na światło czerwone przez zwiększony udział fotoelementów pokrytych filtrem zielonym. Przesuwa to sposób rejestracji informacji o barwie w kierunku światła zielonego, na które oko ludzkie jest najbardziej czułe.

Siatka mikrosoczewek (rys.9) „zbiera”, całe światło, padające na matrycę i kieruje je na fotoelementy, zapobiegając rozproszeniu. Dzięki temu wzrasta efektywna apertura, a tym samym czułość, ponieważ więcej światła dociera do fotoelementów i po naświetleniu powstają większe impulsy prądowe, co poprawia wskaźnik stosunku sygnału do zakłócenia oraz zakres dynamiki (rejestrowany zakres jasności).



Rys. 9. Siatka mikrosoczewek

Matryca CMOS - *Complementary Metal Oxide Semiconductor*, to nazwa, oznaczająca technologię wykonania elementów półprzewodnikowych, charakteryzujących się niższym napięciem zasilania, mniejszym poborem mocy i większą odpornością na zakłócenia (w porównaniu z elementami matryc CCD). Głównym wyróżnikiem matryc CMOS, jest sposób (architektura) przesyłu informacji oraz technologia wytwarzania zastosowanych elementów półprzewodnikowych oparta na linii technologicznej masowych pamięci.



Rys. 10. Przekrój matrycy CMOS [16]

Ogólna zasada działania matrycy CMOS jest taka jak matrycy CCD. Matryca CMOS posiada tak zwane „inteligentne piksele” tzn. każdy fotoelement posiada elektroniczne układy sterujące jego pracą w tym wzmacniacz sygnału i rejestrator odczytu. Daje to możliwość szybszego odczytywania, wzmacniania i przetwarzania informacji zgromadzonej w fotoelementach, kosztem zmniejszenia powierzchni elementu światłoczułego.

Na rysunku 10 zielone prostokąty, oznaczają układ elektroniczny konwersji ładunku na napięcie i wzmacniacz tego napięcia. Zintegrowanie z każdym fotoelementem matrycy CMOS układu elektronicznej konwersji ładunku na napięcie i odczytywanie tego napięcia w systemie adresowania (x, y) znacząco skraca czas odczytu całej matrycy, gdyż przetwarzanie ładunków na napięcie odbywa się równocześnie dla wszystkich pikseli, podczas gdy w matrycy CCD ładunki z każdego piksela doprowadzane są po kolei do jednego układu przetwarzającego.

Wada matryc CMOS wynika z ograniczeń technologicznych. Nie można wytworzyć kilkunastu milionów idealnie jednakowych fotoelementów zamieniających ładunek na napięcie. Oznacza to, że przy jednakowym naświetleniu całej matrycy CMOS z każdego piksela odczytamy nieco inne napięcie, co na obrazie będzie widoczne jako szum. Wadę tę eliminuje się funkcją programu, która pozwala, bezpośrednio po wykonaniu podstawowego zdjęcia, wykonanie przez aparat drugiego, przy zamkniętej migawce mechanicznej. Następnie od wartości napięć reprezentujących obraz obiektu odejmuje się napięcia reprezentujące obraz rejestrowany przy zamkniętej migawce otrzymując obraz pozbawiony szumów. W ten sposób eliminuje się zarówno szумы pochodzące od nierównomiernego wzmacniania sygnału przy poszczególnych pikselach, jak i szумы pochodzące od prądu ciemnego.

Zaletami detektorów CMOS w porównaniu z CCD są:

- mniejsze zużycie energii co ogranicza wydzielanie ciepła, a tym samym zmniejsza intensywność szumów widocznych na obrazie,
- niższe koszty produkcji,
- istnienie dla każdego fotoelementu wzmacniacza odczytu, poprawiającego stosunek sygnału użytecznego do szumu (zmniejszenie szumów poprzez możliwości odczytu tzw. prądu ciemnego),
- możliwość swobodnego dostępu do poszczególnych punktów rejestrowanego obrazu.- **adresowalność** (x,y) określająca położenie fotoelementów w matrycy CMOS daje ogromne możliwości programowej kontroli jakości obrazu. Pozwala na szybkie odczytywanie pikseli w dowolnej kolejności, ale też dowolnej ich liczby. Daje to możliwość łatwego odczytu fragmentu obrazu (ang. Windowing- "okienkowanie"),
- możliwość fragmentarycznego sterowania wzmacniaczami odczytu, upraszcza proces ustawiania balansu bieli i pozwala na znaczne przyspieszenie wykonania sekwencji kilku lub nawet kilkunastu zdjęć. Umożliwia też uzyskiwanie efektów artystycznych oraz wykrywanie krawędzi przedmiotów w obrazie, co jest przydatne przy ustawianiu ostrości. Metodą okienkowania możemy zarejestrować zdjęcie o mniejszej rozdzielczości, wczytując np. co któryś piksel, ale możemy też zapisać mały fragment dużego zdjęcia. Może to być fragment o dowolnych wymiarach z dowolnego fragmentu obrazu zarejestrowanego przez matrycę. Okienkowanie pozwala bardzo łatwo i szybko realizować ustawianie ostrości metodą maksymalizacji kontrastu. Wczytujemy bowiem do pamięci procesora małe fragmenty obrazu (te potrzebne do analizy kontrastu), a nie cały obraz, by następnie wybrać z niego potrzebne nam fragmenty [16].

System fragmentarycznego odczytywania pozwala także łatwo sumować ładunki z kilku sąsiednich pikseli. Obniża to wprawdzie rozdzielczość, ale zwiększa czułość, co jest bardzo przydatne przy fotografowaniu w słabym świetle. Mamy bowiem do czynienia z podwyższaniem czułości bez zwiększania poziomu szumów. Konwencjonalne zwiększanie czułości w aparacie cyfrowym polega na zwiększaniu wzmocnienia napięcia uzyskanego z piksela przed podaniem go na przetwornik analogowo-cyfrowy. Wzmacnianie takie wnosi szумы, analogicznie jak przy wzmacnianiu sygnałów akustycznych.

Wadą układów CMOS jest mniejsza powierzchnia aktywna co wpływa na obniżenie czułości układu na skutek zajmowania części powierzchni przetwornika przez tranzystory wzmacniające sygnał, co sprawia, że gorsza również jest jakość rejestrowanego obrazu. [16]

Matryca X3 firmy Foveon to przetwornik obrazu, wykonany w technologii CMOS, w którym zastosowano trzy warstwy z fotodetektorami. Każdy punkt matrycy X3 składa się z trzech fotodetektorów umieszczonych na różnych głębokościach w krzemowej płytce. Matryca X3 działa podobnie jak barwna błona fotograficzna. Wykorzystano tu zjawisko absorpcji fotonów na różnych

głębokościach półprzewodnika. Promieniowanie niebieskie pochłaniane jest na powierzchni krzemowej płytki, zielone dociera głębiej, a czerwone światło "dociera" praktycznie do samego spodu czujnika. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie pełnej informacji o barwie światła padającego na

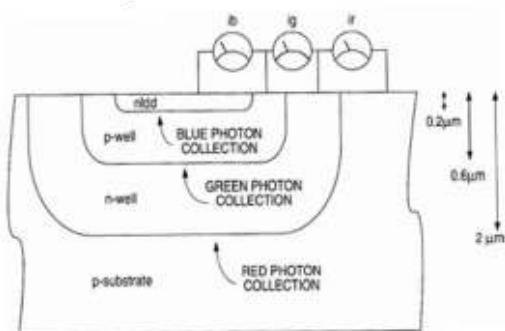
każdy pojedynczy punkt matrycy bez interpolacji. Wyeliminowanie interpolacji przy rejestracji zdjęć pozwoliło na zwiększenie ostrości oraz widoczności drobnych szczegółów i znaczne zmniejszenie liczby barwnych artefaktów na zdjęciach (Fot.1).

Artefakty to błędy odwzorowania i zakłócenia powstałe podczas cyfrowej rejestracji obrazu nie istniejące w rzeczywistości [3, s. 66].

Pierwszym aparatem cyfrowym, w którym zastosowano przetwornik X3 jest Sigma SD9. Technologia Foveon® X3™ pozwala na uzyskanie dwukrotnie lepszej ostrości oraz lepszego odwzorowania kolorów.

Rysunek 12 przedstawia przekrój fotoelementu matrycy X3 z mechanizmem odczytu ładunku elektrycznego zgromadzonego na różnej głębokości warstwy krzemowej.

W strukturze warstwy krzemowej

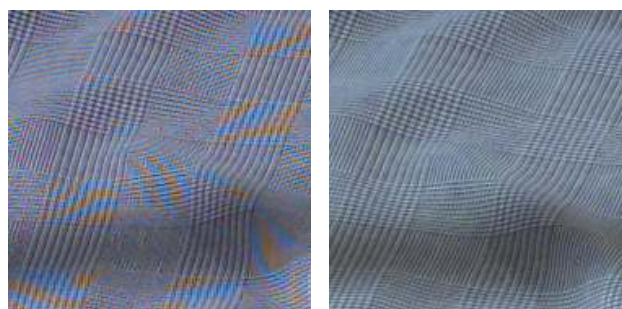


Rys. 12. Przekrój fotoelementu matrycy X3

pojedynczego punktu, ale także zapewnia większą liczbę punktów rejestrowanych



Rys. 11. Przekrój warstwowo matrycy X3 oraz klasycznego materiału fotograficznego barwnego [18]



a. obraz zarejestrowany matrycą z filtrami mozaikowymi b. obraz zarejestrowany matrycą Foveon X3

Fot. 1. Artefakty występujące na obrazie (a) [18]

wytworzone są trzy warstwy półprzewodnikowe, których granice znajdują się na odpowiedniej głębokości. Odczytywane są wartości ładunków zgromadzonych w każdej warstwie, które odpowiadają intensywności barw podstawowych w danym pikselu (ib, ig, ir). W ten sposób X3 zapewnia pomiar całego widma światła dokładnie w tym samym punkcie - każdy punkt zawiera więc pełną informację o barwie. Takie rozwiązanie nie tylko eliminuje zbędne obliczenia, prowadzące w klasycznych rozwiązaniach do odtworzenia koloru

w przetworniku o takiej samej powierzchni lub większą czułość matrycy przy takiej samej rozdzielczości [12, s. 42].

2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

- a) Jaka rolę w procesie zdjęciowym pełni detektor obrazu?
- b) Jakie detektory obrazu stosowane są w aparatach cyfrowych?
- c) Jaki detektor posiada budowę zbliżoną do barwnego materiału fotograficznego?
- d) W jaki sposób pozyskujemy informacje o barwach obrazu w elektronicznych detektorach obrazu?
- e) Jaka jest ogólna zasada działania elektronicznych detektorów obrazu?
- f) Co to jest efektywna apertura w odniesieniu do elektronicznego detektora obrazu?
- g) Jakie różnice występują pomiędzy detektorem CCD i CMOS?
- h) Jakie zalety posiada matryca Super CCD?
- i) Jaką rolę pełni siatka mikrosoczewek w budowie detektora?
- j) Jaką budowę posiada pojedynczy fotoelement matrycy (tzw. złącze MIS)?
- k) Jak następuje sczytywanie informacji w matrycy CCD?

3. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyszczególnić elektroniczne detektory obrazu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) określić elementarną budowę detektora obrazu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) wyjaśnić ogólną zasadę działania elektronicznego detektora obrazu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) wyjaśnić proces zapisu informacji obrazowej na nośnikach elektronicznych?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) określić rolę poszczególnych elementów budowy złącza MIS w matrycach CCD i CMOS?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) wyjaśnić budowę i zapis informacji optycznej na fotoelementach matrycy firmy Foveon - X3?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) wskazać zalety matrycy Super CCD?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) wyjaśnić funkcję elektronicznego detektora obrazu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) uzasadnić układ filtrów barwnych we współczesnych matrycach CCD?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) wyjaśnić zasadę działania matrycy X3?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) uzasadnić zalety wynikające z wprowadzenia oktagonalnych fotoelementów w matrycy CCD?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12) porównać działanie różnych detektorów obrazu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>