

Systemy dla Internetu Rzeczy (45)

Czujniki koloru

Podziękowania dla pana Janusza Rzeszuta za konsultacje fachowe przy pracy nad przygotowaniem tekstu.

Scalone czujniki koloru True Color (XYZ) oraz RGB pozwalają na łatwą realizację dokładnego pomiaru koloru w systemie procesorowym. Ich duża czułość w połączeniu z szerokim zakresem dynamicznym sprawiają, że są dobrze przystosowane do ciągłego pomiaru temperatury barwowej światła otoczenia w systemach zarządzania wyświetlaczami oraz do wspomagania automatycznego balansu bieli w kamerach. Czujniki pozwalają na polepszenie rozdzielczości i jakości wyświetlania koloru w telewizorach, monitorach, urządzeniach mobilnych i systemach specjalistycznego sprzętu oświetleniowego. Dostępnych jest wiele zestawów różnych firm do szybkiego prototypowania urządzeń IoT z tymi układami.

Proste czujniki światła otoczenia (ALS, Ambient Light Sensor) zostały wyposażone w kanał pomiaru bliskiej podczerwieni (NIR, Near Infrared) oraz umożliwiają pomiar światła widzialnego z rozróżnieniem na trzy kanały: czerwony (R, red), zielony (G, green) i niebieski (B, blue). Kolejnym postępowaniem było opracowanie filtrów interferencyjnych i skonstruowanie czujników XYZ oraz wielospektralnych.

W tym ostatnim skokowym rozwoju wiodącą rolę odegrała firma AMS AG (z oficjalną nazwą pisaną małymi literami: amg). Firma AMS, kupując firmę MAZE w 2016 roku, umocniła swoją pozycję lidera w dziedzinie zaawansowanych czujników optycznych. Przejęcie przyniosło firmie AMS kilka innowacyjnych technologii, w tym wykrywanie spektralne. Opracowując nową serię czujników wielospektralnych, firma AMS utrzymała wiodące miejsce w łańcuchu dostaw czujników światła otoczenia dla Apple. AMS zapewni szeroki wachlarz rozwiązań, od czujnika RGB, XYZ i czujnika

NIR po czujnik światła widzialnego wykonany w całości z filtrów interferometrycznych.

Widzenie oczne

Ludzkie oko jest zbudowane z trzech rodzajów czopków (cones) czułych na różną długość fal: długich 560...580 nm (L), średnich 530...540 nm (M) i krótkich 420...440 nm (S). Dają one percepcję kolorów przez człowieka w warunkach średniej i dużej jasności (rysunek 1). Widzenie kolorów maleje w bardzo słabym świetle, wtedy główną rolę przejmują monochromatyczne receptory, określone jako pręciki (rods). Zatem trzy parametry, odpowiadające poziomom bodźca trzech rodzajów komórek czopków, w zasadzie tworzą trójwymiarową przestrzeń zwaną „przestrzenią kolorów LMS”, która jest jedną z wielu przestrzeni kolorów opracowanych w celu ilościowego określenia ludzkiego widzenia kolorów. Przestrzeń kolorów

odwzorowuje zakres kolorów wytwarzanych fizycznie, światła mieszanego, pigmentów, itp. W niektórych przestrzeniach kolorów, w tym w przestrzeniach LMS i XYZ, używane kolory podstawowe nie są kolorami rzeczywistymi w tym sensie, że nie mogą być generowane w żadnym widmie światła.

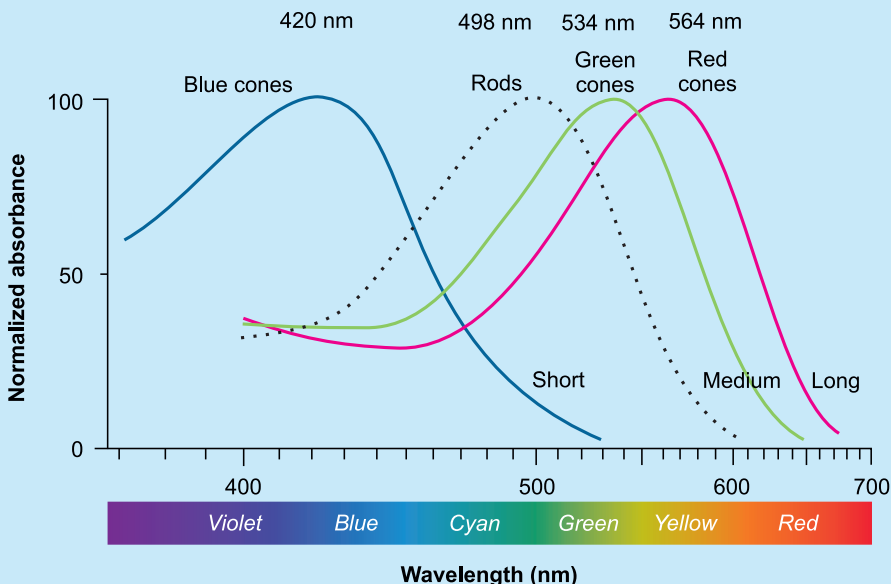
Czujniki koloru XYZ

Czujniki XYZ, znane również jako czujniki True Color, mogą być używane do pomiarów koloru o wartości bezwzględnej. Są wyposażone w filtry interferencyjne, które zapewniają solidną podstawę technologiczną do pomiaru koloru zgodnie ze standardowymi definicjami koloru. Filtry interferencyjne przypisują określone wartości czułości do każdej długości fali w każdym z trzech kanałów koloru. Po kalibracji możliwe jest określanie mierzonych wartości kolorów jako wartości XYZ (współrzędne chromatyczności), które są używane jako wartości podstawowe do konwersji na inne przestrzenie kolorów.

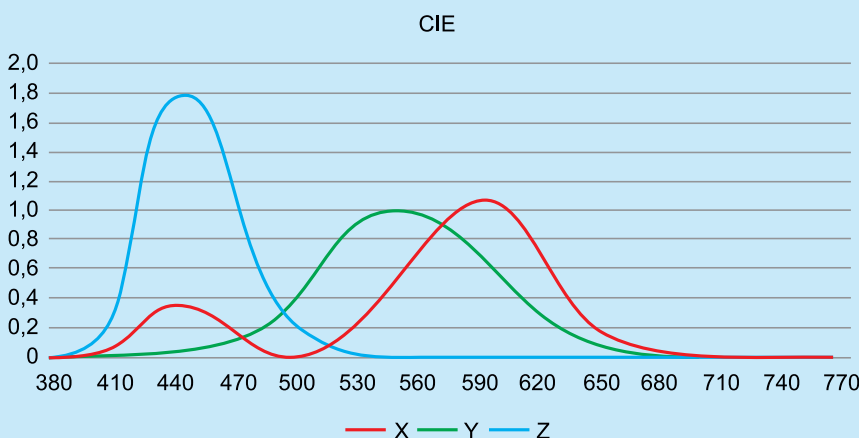
Współrzędne XYZ oparte są na charakterystyce CIE 1931. Czujniki XYZ mierzą wartości tak dokładnie, jak widzi je ludzkie oko. Dane XYZ można łatwo przekonwertować na inne przestrzenie kolorów, w tym RGB, sRGB, CIE-L* a b, L* c h lub L* u v.

Nowa generacja filtrów XYZ firmy AMS jest oparta na technologii filtrów interferencyjnych, która obejmuje złożone warstwy materiałów, takich jak dwutlenek krzemu, skutecznie budowane w procesie typu CMOS. Filtry te są stabilne jak wysokiej jakości szkło. W laboratoriach firmy AMS obserwowano przesunięcie termiczne filtra około 1 pikometra na stopień Celsjusza. Dla typowego zakresu temperatury pracy urządzenia od -40...85°C jest to mniej niż jedna dziesiąta nanometra w widzialnym zakresie od 390 do 700 nm. Ta stabilność w całym okresie eksploatacji i zakres temperatur pracy oznaczają, że fabryczna kalibracja przeprowadzona na dowolnym czujniku XYZ z filtrem interferencyjnym wystarczy na cały okres użytkowania [4].

Firma AMS produkuje wiele układów scalonych czujników XYZ, rozpoczynając w roku 2017 od czujnika TCS3430, aż do nowego układu AS73211 [3]. Na przykład układ AS7261 integruje czujnik XYZCIR + D (dark) w obudowie LGA z osłoną i mikro-soczewką. Jest przeznaczony do pracy z elektroniczną migawką.



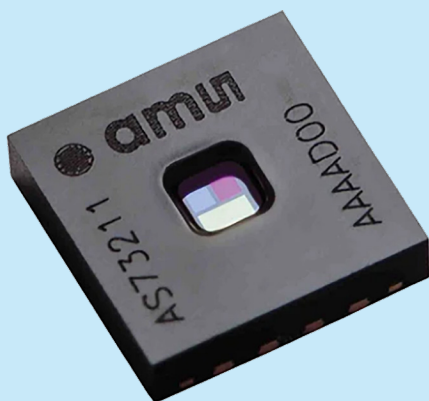
Rysunek 1. Typowa czułość oka ludzkiego na kolor i intensywność światła [1]



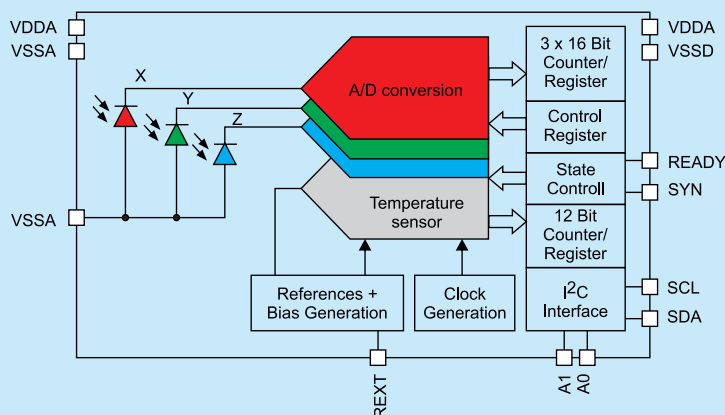
Rysunek 2. Typowa odpowiedź spektralna XYZ czujnika AS73211 firmy AMS [2]

Układ AS73211 firmy AMS

Sensor firmy AMS typu AS73211 – JENCOLOR XYZ True Color (fotografia 1) to cyfrowy czujnik XYZ z interfejsem I²C do względnego i bezwzględnego pomiaru koloru. Układ należy do rodziny czujników koloru JENCOLOR i zapewnia ulepszone właściwości optyczne dzięki technologii filtra na szkle. Oferuje pomiary światła i koloru ściśle odpowiadające percepcji światła typowego ludzkiego oka, zgodnie z definicją branżowego standardu CIE 1931/DIN 5033. Wewnętrzna kompensacja, oparta na odczytach ze zintegrowanego czujnika temperatury, zapewnia utrzymanie dokładności pomiaru koloru w całym zakresie temperatury roboczej.



Fotografia 1. Sensor firmy AMS typu AS73211 – JENCOLOR XYZ True Color



Rysunek 3. Schemat blokowy układu AS73211 firmy AMS [2]

Układ ma filtr blokujący podczerwień oraz zintegrowane silikonowe filtry interferencyjne na szkło JENCOLOR X ($\lambda=600$ nm), Y ($\lambda=555$ nm), Z ($\lambda=445$ nm) (**rysunek 2**). Takie rozwiązanie zapewnia gładką charakterystykę oraz brak dryftu starzenia filtra pod wpływem temperatury i czasu oraz odporność na promieniowanie UV. Umożliwia to szybkie i bardzo dokładne pomiary koloru i światła przy słabym oświetleniu, jak również przy świetle bardzo jasnym. Czułość wynosi od 13,85\14,91\8,01 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (X/Y/Z) do 28,37\30,55\16,40 mW/cm^2 i jest regulowana w 12 krokach, z wskazaniem czasu przetwarzania w 15 krokach. Przetwarzanie daje odporność na zakłócenia 50/60 Hz.

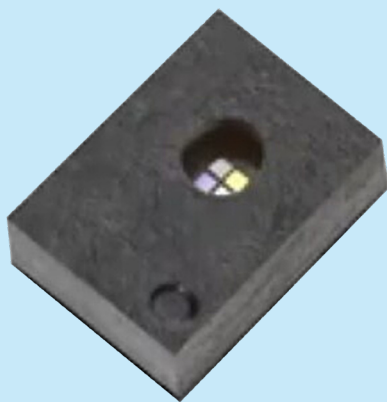
Na **rysunku 3** zostały pokazane główne komponenty układu AS73211. Trzy fotodiody przetwarzają światło na prąd, a następnie równolegle pracują trzy 24-bitowe przetworniki A/C (typu delta-sigma). Wyniki przechowywane w trzech 16-bitowych rejestrach są dostępne przez interfejs I²C. Możliwe jest także odczytanie pozostałych 8 bitów wyniku pomiaru. Wejście SYN służy do wyzwalania przetwarzania. Wyjście READY sygnalizuje zakończenie przetwarzania. Układ zawiera wewnętrzny 12-bitowy czujnik temperatury, odczytywany razem z pomiarem oświetlenia, również dostępny przez interfejs I²C. Wyprowadzenia A0 i A1 ustawiają adres slave na magistrali. Oddzielne analogowe i cyfrowe wyprowadzenia zasilania i uziemienia zmniejszają sprzężenie szumów zasilania. Układ może wchodzić w tryb Power Down, w którym nie pracuje zegar i część analogowa, lecz aktywna jest obsługa szyny I²C. Podstawowe cechy układu AS73211 [2]:

- czułość: 0,4 lux do 208 klux (duża powierzchnia fotoczuła trzech diod),
- zakres dynamiczny: 250 mln: 1 (od 16 do 24 bitów ADC),
- czas konwersji: od 125 μs do 16 s,
- zakres temperatury pracy: $-40\dots 125^\circ\text{C}$,
- napięcie zasilania: 2,7...3,6 V,
- prąd zasilania: 1,5 mA (pomiar), 800 μA (oczekiwanie), 1 μA (wyłączenie),
- interfejs: I²C 16b 400 kHz,
- obudowa: QFN16 (4×4×0,9 mm) z oknem 1×1 mm.

Układ TCS3430 firmy AMS

Cyfrowy czujnik XYZ z interfejsem I²C z pomiarem światła otoczenia (ALS) i podczerwieni (IR) to układ typu TCS3430 firmy AMS (**fotografia 2**). Pomiary te służą do obliczania natężenia oświetlenia i temperatury barwowej z dokładnością do 10%. Układ umożliwia programowanie wzmocnienia i czasu integracji. Przekroczenie dolnego lub górnego zakresu wartości kanału ALS może powodować zgłoszenie sygnału przerwania. Podstawowe cechy układu TCS3430 [3]:

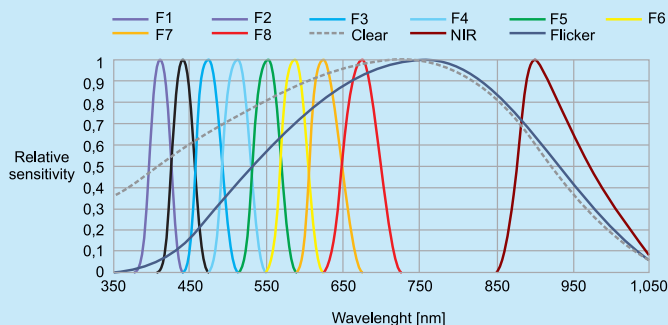
- czas integracji: 2,78...711 ms,
- zakres temperatury: $-40\dots 85^\circ\text{C}$,
- napięcie zasilania: 1,7...2,0 V,
- prąd zasilania: 100 μA (pomiar), 30 μA (oczekiwanie), 0,7 μA (uśpienie),
- interfejs: I²C 16b 400 kHz 1,8 V,
- obudowa: 2,41×1,75×1,00 mm.



Fotografia 2. Cyfrowy czujnik XYZ z interfejsem I²C z pomiarem światła otoczenia (ALS) i podczerwieni (IR) typu TCS3430

Wielospektralne czujniki koloru

Wielokanałowe czujniki widmowe to czujniki nowej generacji, które mają wiele kanałów



Rysunek 4. Rozłożenie kanałów pomiarowych układu AS7341 firmy AMS [4]

pomiarowych w celu zapewnienia wysokiej jakości informacji o kolorze, przy niskiej cenie układu. Czujniki wielospektralne rozdzielają wybrane widmo na kanały widmowe. Poprzez pomiar widma obiektów można kompensować fałszywe dopasowanie kolorów. Czujnik wielospektralny daje odpowiedź na pytanie, czy próbka koloru pomarańczowego to mieszanka czerwieni i żółci, czy też czystą pomarańcz. Mogą też mierzyć widmowe wartości światła, takie jak współczynnik oddawania barw (CRI), a także powszechnie mierzone wartości, takie jak jasność i skorelowana temperatura barwowa CCT [1]. Układ AS7263 to 6-kanałowy spektrometr w obudowie LGA z osłoną i mikrosoczewką. Jest przeznaczony do pracy z elektroniczną migawką.

W styczniu roku 2020 firma AMS zapowiedziała nowy układ AS7350. Czujnik widmowy AS7350 jest zoptymalizowany do użytku w urządzeniach przenośnych i mobilnych i jest dostarczany w małej obudowie 3,1×2×1 mm odpowiedniej do montażu w smartfonie lub urządzeniu konsumenckim.

Układ AS7341 firmy AMS

Czujnik typu AS7341 to 11-kanałowy sensor wielospektralny (**fotografia 3**) do zastosowań związanych z wykrywaniem kolorów i analizą widmową. Odpowiedź widmową definiuje w zakresie długości fal od około 350 nm do 1000 nm. Sześć kanałów może być przetwarzanych równolegle

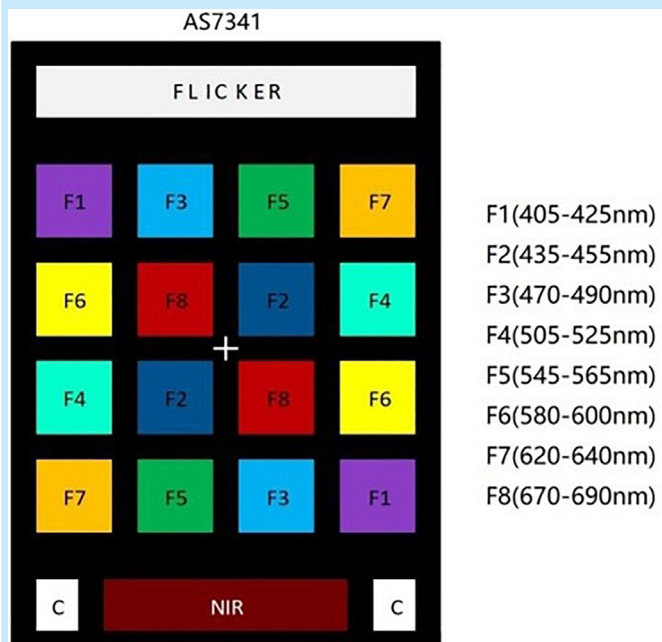


Fotografia 3. Czujnik typu AS7341 - 11-kanałowy sensor wielospektralny

przez niezależne przetworniki ADC, podczas gdy inne kanały są dostępne za pośrednictwem multiplexera. Osiem kanałów optycznych obejmuje widmo widzialne, jeden kanał może służyć do pomiaru bliskiej podczerwieni, a jeden kanał to fotodiody bez filtra – „czysta”. Urządzenie ma również dedykowany kanał do wykrywania migotania światła otoczenia 50 lub 60 Hz. Mechanizm wykrywania migotania może również buforować dane do obliczania innych częstotliwości migotania. Kanał NIR w połączeniu z innym kanałem VIS może dostarczać informacji o otaczających warunkach oświetleniowych (wykrywanie źródła światła).

Jak pokazano na **rysunku 4**, filtry są ułożone w taki sposób, że ich graniczne zakresy są wyrównane, nie pozostawiając prawie żadnych przerw w wybranym widmie. W zakresie widzialnym pomiar czujnika wielospektralnego odbywa się na poziomie radiometrycznym, a nie kolorymetrycznym. Oznacza to, że czujnik mierzy widmowy rozkład mocy próbki i oblicza punkt koloru na podstawie tych wartości widmowych.

Układ AS7341 integruje filtry ze standardowym krzemem CMOS za pomocą technologii nanooptycznych filtrów interferencyjnych osadzonych, a jego obudowa zapewnia wbudowaną osłonę



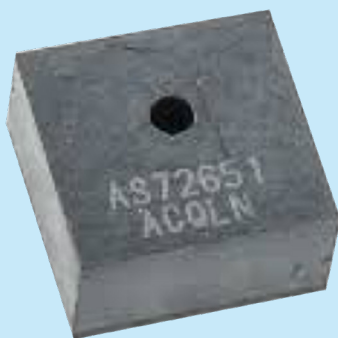
Rysunek 5. Organizacja matrycy czujnikowej układu AS7341 firmy AMS [11]

do kontrolowania światła wpadającego do matrycy czujnika. Zorganizowanie matrycy czujnikowej zostało pokazane na rysunku 5.

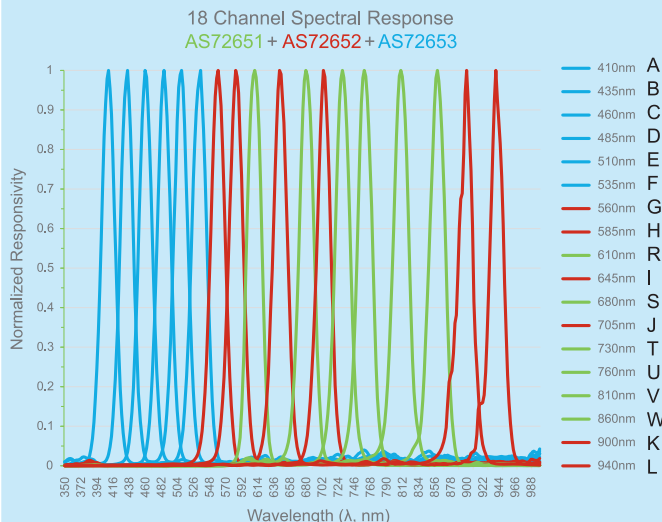
Kontrola i dostęp do danych widmowych są realizowane przez interfejs szeregowy I²C. Urządzenie dostępne jest w ultraniskoprofilowej obudowie o wymiarach 3,1×2×1 mm.

Zestaw układów AS7265x firmy AMS

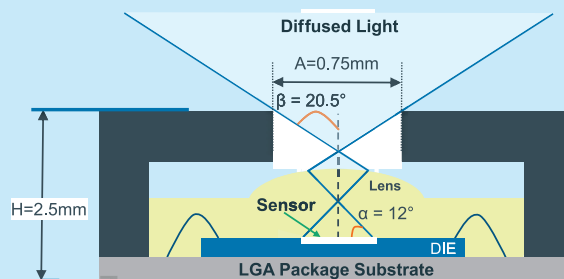
Rodzina czujników AS7265x (fotografia 4) obejmuje 3 układy scalone, każdy wyposażony w 6 kanałów pomiarowych. Dostarczają one 18-kanałową, matrycę czujnikową obejmującą długości fal bliskiego nadfioletu do bliskiej podczerwieni (410...940 nm) z szerokością kanałów FWHM 20 nm (rysunek 6). Rodzina urządzeń integruje filtry Gaussa ze standardowym krzemem CMOS za pomocą technologii



Fotografia 4. Układ z rodziny czujników AS7265x



Rysunek 6. Kanały pomiarowe zestawu układów AS7265x firmy AMS [4]



Rysunek 7. Obudowa LGA układów AS7265x firmy AMS [3]

nanooptycznego filtra interferencyjnego. Każdy układ AS7265x ma dwa zintegrowane sterowniki diod LED (100 mA) z programowalnym prądem, które można synchronizować do zastosowań z elektronicznymi migawkami. Każdy ma wbudowany czujnik temperatury. Zestaw AS7265x jest skalibrowany fabrycznie. W połączeniu z wysoką stabilnością filtra w czasie i temperaturze umożliwia to skalibrowanie na cały okres użytkowania.

Układy są umieszczone w obudowach LGA (4,5×4,4×2,5 mm) z przesłoną ograniczającą wpływ światła rozproszonego oraz mikrosoczewką (rysunek 7). Charakterystyka optyczna jest zoptymalizowana do pomiarów światła rozproszonego.

Podstawowe cechy układów zestawu AS7265x:

- przetworniki AC 16b (dla każdej fotodiody),
- czas integracji: 2,78...711 ms,
- czułość: znormalizowana 35 zliczeń/μW/cm² w każdym kanale, w całym widmie z dokładnością ±12%,
- zakres temperatur pracy: -40...85°C,
- napięcie zasilania: 2,97...3,6 V,
- interfejs: I²C 16b 400 kHz,
- obudowa: LGA 4,5×4,4×2,5 mm (taka sama dla trzech układów scalonych).

Układy zestawu AS7265x są połączone magistralą I²C (rysunek 8):

- AS72651 (610, 680, 730, 760, 810, 860 nm) – służy jako główny kontroler zestawu. Wymaga dołączenia zewnętrznej pamięci Flash z firmowym oprogramowaniem. Port UART służy do komunikacji z systemem komputerowym.
- AS72652 (560, 585, 645, 705, 900, 940 nm) – port I²C służy do komunikacji z głównym kontrolerem zestawu.
- AS72653 (410, 435, 460, 485, 510, 535 nm) – port I²C służy do komunikacji z głównym kontrolerem zestawu.

Czujniki koloru RGB

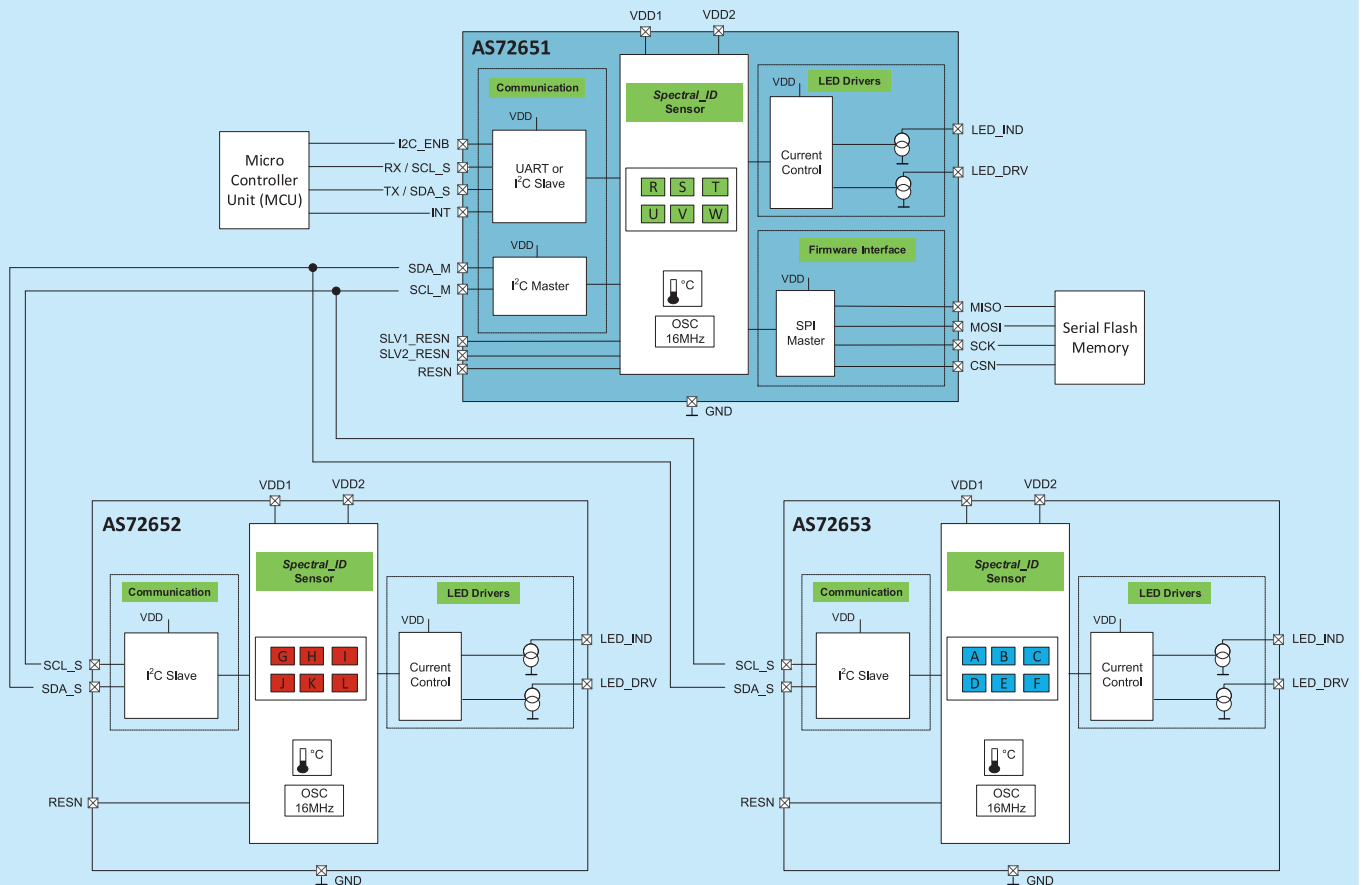
Tradycyjną technologię RGB można postrzegać jako podzbiór czujników spektralnych. Czujnik RGB zwykle wyposażony jest w trzy filtry pasmowo-przepustowe w widmie światła widzialnego. Ten rodzaj pomiaru koloru nie jest dostosowany do żadnego standardu ani modelu postrzegania koloru przez ludzkie oko. Nawet przy zastosowaniu złożonej kalibracji dokładność pomiaru koloru czujnika RGB jest ograniczona przez trzykanałową konfigurację urządzenia.

Scalone układy czujników RGB wykonują pomiar w trzech zakresach widma światła: czerwony (R) 590...720 nm, zielony (G) 480...600 nm oraz niebieski (B) 400...540 nm. Czujniki koloru zawierają typowo filtry blokujące niepożądane światło podczerwone. Niektóre czujniki wykonują dodatkowo pomiar w zakresie podczerwieni (IR) powyżej 700 nm oraz pomiar całego widma światła (C), bez filtra kolorowego.

Scalone układy czujników koloru RGB są produkowane przez wielu producentów: Hamamatsu [5], AMS (dawniej TAOS) [3], Vishay [8], Rohm [12], Renesas (dawniej Intersil) [10], Broadcom (dawniej AVAGO) [9] i inni.

Scalone czujniki koloru RGB dostarczają sygnał wyjściowy w postaci:

- analogowej, przetworniki światło-napięcie,
- cyfrowej – jako częstotliwość,



Rysunek 8. Konfiguracja pracy zestawu układów AS7265x firmy AMS [3]

- cyfrowej szeregowej,
- cyfrowej w standardzie I²C.

Czujniki scalone mają powierzchnie światłoczułe o różnych kształtach: prostokąta (wiele układów) lub koła. Powierzchnie światłoczułe typowo są podzielone na obszary osobne dla każdego kanału koloru. Mogą być zorganizowane w postaci matrycy elementów. Rozdzielczość wewnętrznego pomiaru cyfrowego zależy od czasu integracji i może się zmieniać w dużym zakresie, np. od 10 do 24 bitów. Pomiar dla poszczególnych kanałów mogą być wykonywane synchronicznie w kilku kanałach lub sekwencyjnie.

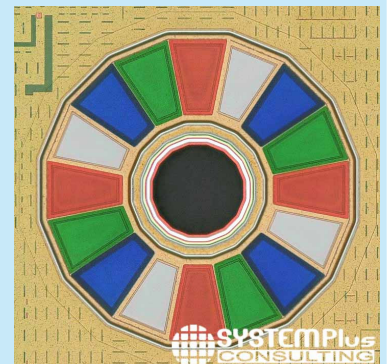
Obecnie obserwuje się integrowanie w jednym układzie z pomiarami koloru innych funkcji związanych ze światłem. Scalone czujniki koloru mogą być również zintegrowane z czujnikami zbliżeniowymi (proximity sensor), jak w układach TCS37727 i TMD4903 firmy AMS. Mogą być również zintegrowane z wykrywaniem gestów, jak TMG4903 oraz TMG39923 firmy AMS.

Układ TCS3400 firmy AMS AG (dawniej TAOS)

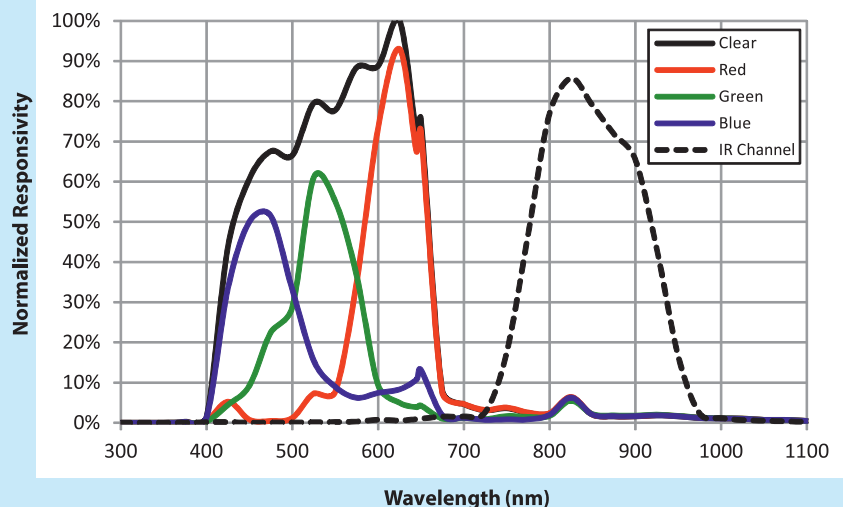
Firma AMS AG przejęła firmę TAOS Inc, która była wcześniej działem układów fotoczułych wydzielonym z firmy Texas Instruments. Rodzina czujników RGB firmy AMS obejmuje wiele układów scalonych: układy poprzedniej generacji, układy aktualnie zalecane (TCS3400) oraz układy nowe w trakcie przygotowania (TCS3408, TCS34010). AMS jest wieloletnim dostawcą czujników koloru do iPhone'ów firmy Apple i ma największy udział w rynku czujników światła otoczenia (ALS).

TCS3400 jest typowym układem RGBCIR z interfejsem I²C i z wielosegmentowym sensorem o średnicy 0,471 mm (rysunek 9). Centralny

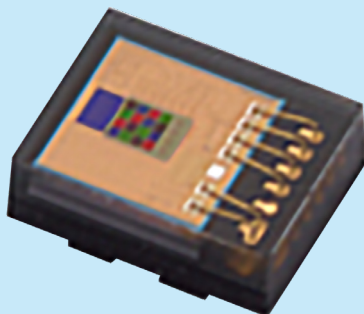
obszar filtru jest przeznaczony dla czujnika podczerwieni, a czujniki koloru są umieszczone wokół niego (fotografia 5) [7]. Składają się z organicznych filtrów kolorowych i filtrów interferometrycznych. Takie rozmieszczenie segmentów pozwala na stabilny pomiar koloru niezależnie od kierunku padającego światła. Układ ma zamontowany filtr



Fotografia 5. Budowa filtra układu TCS3400 [7]



Rysunek 9. Rozkład kanałów RGBCIR układu TCS3400 firmy AMS [4]



Fotografia 6. Układ APDS-9251 – 20-bitowy sensor RGBIR z interfejsem I²C [9]

podczerwieni dla sensorów RGBC. Struktury scalone sensorów firma umieszcza w różnych obudowach, przykład iPad Pro [6] na rysunku tytułowym.

Cztery niezależne przetworniki AC (16b)

wykonują pomiary z fotodiod jednocześnie (**rysunek 10**). Przekroczenie dolnego lub górnego zakresu wartości kanału C może powodować zgłoszenie sygnału przerwania. Układ umożliwia programowanie wzmocnienia analogowego oraz ustawianie czasu integracji, co daje zakres dynamiki pomiarów 1000000:1. Pracuje z napięciem zasilania 2,7...3,6 V z poborem prądu 235 μ A w czasie pomiaru i 1 μ A w stanie uśpienia. Jest dostarczany w obudowie WDFN6 2,4×2,0 mm.

Dalszym rozszerzeniem możliwości pracy jest układ TCS3707 zawierający czujnik RGBCW oraz niezależny kanał detekcji migotania F (*flicker detection*) i detekcji zbliżenia P (*proximity*).

Układ APDS-9251 firmy Broadcom (dawniej AVAGO)

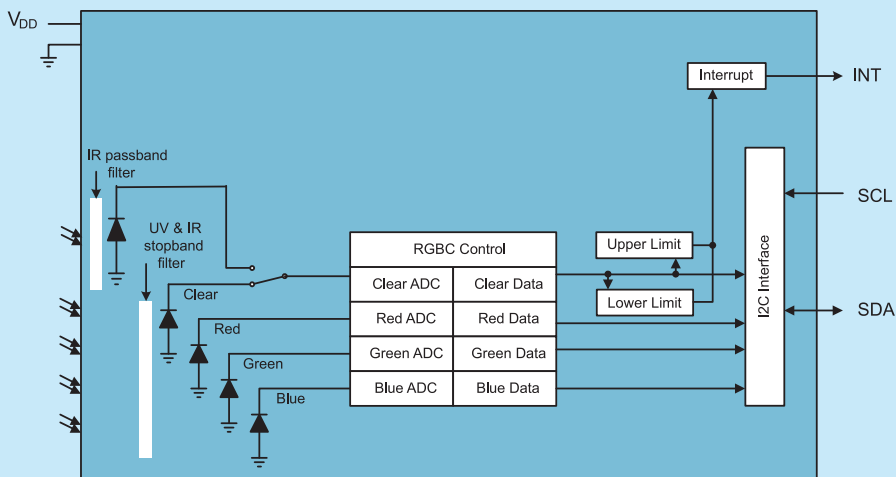
Firma Broadcom przejęła firmę AVAGO razem z czujnikiem APDS-9250. Jego ulepszona wersja APDS-9251 (**fotografia 6**) jest 20-bitowym układem RGBIR z interfejsem I²C [9]. Daje to ogromny zakres dynamiki 18000000:1. Układ ma zamontowany filtr podczerwieni oraz czujnik temperatury. Wykonuje liniowe pomiary poziomu oświetlenia w zakresie do 20000 lux. Przy czasie integracji przetwarzania AC od 50 ms usuwane są zakłócenia 50 i 60 Hz. Pracuje z napięciem zasilania 1,75...3,6 V z poborem prądu 130 μ A w czasie pomiaru i 1 μ A w stanie oczekiwania. Zastosowano obudowę 8-ODFN 2,0×2,0×0,65 mm.

Układ S13683 firmy Hamamatsu

Firma Hamamatsu produkuje dwa układy scalone z interfejsem I²C i z tym samym sensorem RGB [5]. Sensor ma rozmiary 1,1×0,54 mm i jest zorganizowany w postaci matrycy: cztery pola RGBC powtórzone 10 razy (**fotografia 7**). Czwarte pole służy do pomiaru światła rozproszonego, które ominęło filtr RGB – jego pomiar jest odejmowany od pomiarów kanałowych RGB. Czułość jest przełączana w stosunku 1:10 poprzez wybór pojedynczego pola RGBC (mała czułość) lub całej matrycy. Czułość można też regulować w zakresie od 1 do 65535 razy poprzez zmianę czasu integracji pomiaru. Zakres dynamiczny pomiaru dla niskiej czułości wynosi od 1 do 10 klux. Układ ma jeden przetwornik prąd-częstotliwość ze zliczaniem wyniku



Fotografia 7. Sensor RGB S13683 firmy Hamamatsu [5]



Rysunek 10. Schemat blokowy układu TCS3400 firmy AMS [3]

do 16-bitowej dokładności. Pola RGBC są mierzone sekwencyjnie. Jest czuły na światło w zakresie podczerwieni, co wymaga zewnętrznego filtra. Pracuje z napięciem zasilania 2,5...3,3 V z poborem prądu 75 μ A.

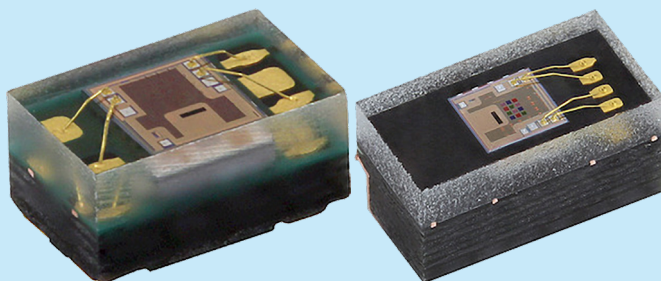
Układ S13683-02WT jest dostarczany w obudowie WL-CSP6 1,75×1,25×0,61 mm. Układ S13683-03DT (-04DS) ma obudowę SMD10 3,2×4,2×1,3 mm.

Firma Hamamatsu produkuje również dwa scalone układy RGB (S9706, S11012-01CR) z równoległym pomiarem cyfrowym 12b oraz z sekwencyjnym wyprowadzaniem wyników w postaci transmisji szeregowej. Produkowane są też analogowe czujniki RGB w postaci trzech diod fotoczułych w jednej obudowie (RGB S7505-01). Są również wersje monochromatyczne, które wykrywają tylko jeden kolor: czerwony S6430-01 (R), zielony S6429-01 (G) oraz niebieski S6428-01 (B).

Układy VEML3328 i VEML3328SL firmy Vishay

Firma Vishay produkuje dwa układy scalone z interfejsem I²C i z tym samym sensorem RGBCIR [8] (**fotografia 8**). Fotodiody, wzmacniacze i przetwornik AC wykonane jako jeden układ scalony CMOS. Układ charakteryzuje się bardzo dużą liniowością (kompensacja temperatury) i czułością (do 0,003 lux/krok zliczania), co pozwala na pracę z ciemnymi soczewkami. Układ umożliwia programowanie wzmocnienia analogowego oraz cyfrowego, wybór zakresu pomiarowego i ustawianie czasu integracji. Wyniki pomiaru (16b) umożliwiają obliczanie temperatury barwowej oraz współrzędnych przestrzeni barw XYZ (z podaną macierzą transformacji). Pomiar może być wykonywany pojedynczo (po odbiorze polecenia) lub z automatycznym powtarzaniem. Pracuje z napięciem zasilania 2,5...3,6 V z poborem prądu 580 μ A w czasie pomiaru i 80 nA w stanie wyłączenia.

Układ VEML3328 jest dostarczany w obudowie OPLGA-4 2×1,25×1 mm. Układ VEML3328SL ma okno optyczne skierowane do boku i ma obudowę OPLGA4 SV (side view) 2,95×1,5×1,5 mm. Układy otrzymały nagrodę AspenCore World Electronics Achievement Award 2020 w kategorii czujniki.



Fotografia 8. Układy VEML3328 i VEML3328SL firmy Vishay [8]

Układ VEML6040 firmy Vishay

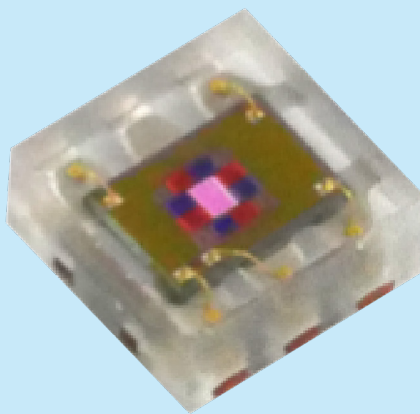
Układ scalony VEML6040 firmy Vishay (fotografia 9) z interfejsem I²C jest czujnikiem RGBW (white light) [8]. Zastosowanie technologii Filtron pozwala na osiągnięcie widmowej czułości światła otoczenia najbliższej czułości ludzkiego oka. Układ ma taką samą obudowę i podobne parametry co VEML3328 przy maksymalnej czułości 0,007865 lux/krok zliczania. Pracuje z napięciem zasilania 2,5...3,6 V z poborem prądu 200 µA w czasie pomiaru i 800 nA w stanie wyłączenia.



Fotografia 9. Układ scalony VEML6040 firmy Vishay – czujnik RGBW white light [8]

Układ ISL29125 firmy Renesas (dawniej Intersil)

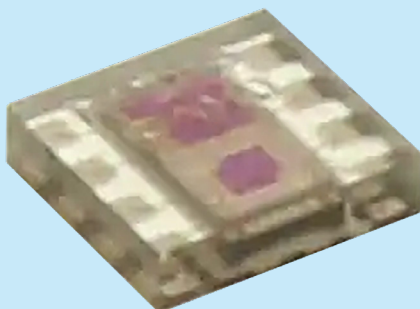
Firma Renesas (dawniej Intersil) produkuje układ scalony ISL29125 z interfejsem I²C i z sensorem RGB o rozmiarach 0,49×0,48 mm [10] (fotografia 10). Układ ma zamontowany filtr podczerwieni oraz charakterystyki fotodiod dopasowane do standardu CIE 1931. Ma dwa zakresy czułości optycznej: 0,0057...375 lux oraz 0,152...10000 lux. Prąd fotodiod jest mierzony przez integrowalny przetwornik AC. Przy czasie integracji 100 ms usuwane są zakłócenia 50 i 60 Hz. Wyniki pomiaru (16b) umożliwiają obliczanie temperatury barwowej oraz współrzędnych przestrzeni barw XYZ (z podaną macierzą transformacji). Pracuje z napięciem zasilania 2,25...3,63 V z poborem prądu 56 µA w czasie pomiaru i 500 nA w stanie wyłączenia. Zastosowano obudowę 6-WDFDN 1,65×1,65×0,7 mm.



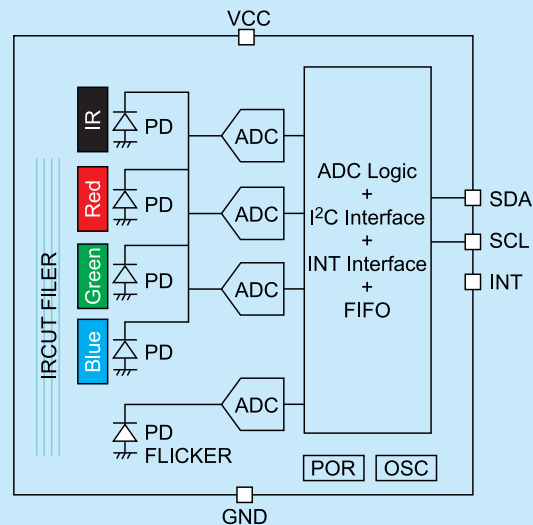
Fotografia 10. Układ scalony ISL29125 z interfejsem I²C i z sensorem RGB firmy Renesas [10]

Układ BU27006 firmy Rohm Semiconductor

Firma Rohm Semiconductor oferuje trzy układy scalone do pomiaru koloru. BU27006 to układ scalony cyfrowego czujnika koloru RGBIR z funkcją wykrywania migotania i z sensorem o rozmiarach 0,40×0,63 mm [12] (fotografia 11). Duża czułość (do 0,015 lux/zliczenie), szeroki zakres dynamiczny



Fotografia 11. Układ BU27006 firmy Rohm Semiconductor [12]



Rysunek 11. Schemat blokowy układu BU27006 firmy Rohm Semiconductor [12]

(do 50 klux) i doskonałe właściwości wbudowanego filtra podczerwieni umożliwiają temu układowi scalonemu dokładne pomiary natężenia oświetlenia i temperatury barwowej światła otoczenia. Układ zawiera 5 fotodiod dołączonych do 4 przetworników AC (16b) (rysunek 11). Wysoka częstotliwość próbkowania 1/2 kHz pozwala na usuwanie zakłóceń 50/60 Hz. Wyjątkowe jest wyposażenie układu w bufor FIFO umożliwiający zapis do 100 rezultatów pomiarów i ich odczyt w jednej sekwencji.

Układ pracuje z napięciem zasilania 1,7...3,6 V z poborem prądu 220 µA (pomiar koloru) i 2 µA w stanie wyłączenia. Zastosowano obudowę WQFN12 2,5×2,0×0,55 mm.

W opracowaniu jest układ BU27007 o tych samych parametrach, ale z rozszerzoną możliwością pracy interfejsu I²C z napięciem 1,2

Wybrane pozostałe artykuły kursu Systemy dla Internetu Rzeczy

- [S21] Zestaw Nordic Thingy:52 IoT Sensor Kit, EP 12/2008
- [S31] Nordic Thingy:91 – platforma prototypowania dla mobilnego IoT, EP 11/2009

Bibliografia

- [1] Chip-scale spectral sensing: understanding the new uses for ultra-precise light-source measurement, Kevin Jensen, April 8, 2020, AMS AG, <http://bit.ly/3pqjBFS>
- [2] AS73211 – JENCOLOR Digital XYZ True Color Sensor with I²C Interface, AMS, <http://bit.ly/3qVWJmk>
- [3] Light Sensors, AMS, <http://bit.ly/36eAwhT>
- [4] Comparing Color Sensor ICs, 08/20/2020, Kevin Jensen, AMS, Circuit Cellar, <http://bit.ly/3a4R4n2>
- [5] Color sensors, Hamamatsu, <https://bit.ly/3oo0xLn>
- [6] Front light sensor chip from iPad Pro showing RGBY colour sensor, <http://bit.ly/3pm6lAX>
- [7] ams's Color Sensor in the Apple iPhone 8, 28/03/2018, System Plus Consulting, <https://bit.ly/3iNL0TQ>
- [8] Vishay Semiconductor Opto Division 3, <http://bit.ly/3qYcdpE>
- [9] Ambient Light Sensors, Broadcom, <http://bit.ly/2KR3k1T>
- [10] SL29125 Active Samples Available, Renesas, <https://bit.ly/3iNQ6Q2>
- [11] Gravity: AS7341 11-Channel Visible Light Sensor, DFRobot, <http://bit.ly/3qMNZPk>
- [12] Color Sensor ICs, Rohm Semiconductor, <http://bit.ly/2NE7Hyu>
- [13] 11 Myths About XYZ Color Sensing, Tom Griffiths, AMS, DEC 21 2016, <http://bit.ly/3iX3rpq>
- [14] Apple Pencil wyposażony w czujnik do próbkowania kolorów z prawdziwego świata? Tak, to nowy patent Apple, Cezary Pagórek, 18 lipca 2020, <http://bit.ly/39iUuDC>

oraz 1,8 V. Firma Rohm oferuje również starszy układ BH1749 czujnika RGB o podobnych parametrach, który został zastosowany w zestawie IoT komunikacji mobilnej Thingy:91 firmy Nordic Semiconductor [S31]. Poprzedni model został zastosowany w zestawie IoT komunikacji Bluetooth Low Energy Thingy:52 firmy Nordic Semiconductor [S21].

Realizacje praktyczne

Układy scalone do pomiaru koloru są stosunkowo tanie. Jednak mają one bardzo małe obudowy trudne do montażu powierzchniowego i mają wysokie wymagania w stosunku do procesu lutowania do płytki drukowanej. Dlatego dużym ułatwieniem są zestawy do szybkiego prototypowania urządzeń IoT z tymi układami. Dostępnych jest wiele zestawów różnych firm.



Fotografia 12. AS7341 11-Channel Visible Light Sensor firmy DFRobot [11]

Dobrym przykładem jest płytka Gravity: AS7341 11-Channel Visible Light Sensor firmy DFRobot [11]. Przy cenie tylko dwukrotnie większej niż cena samego układu scalonego, płytka oferuje możliwość łatwego zasilania w granicach od 3,3 do 5 V, zamontowane dwie białe diody LED (4...24 mA), bibliotekę do Arduino oraz kody przykładów programowych (fotografia 12). Na forum firmowym jest dokładny opis eksperymentów spektrometrycznych, które można przeprowadzić z użyciem tego modułu.

Czujniki koloru są często stosowane w zestawach IoT zawierających wiele układów czujnikowych. Dobrym przykładem są zestawy Nordic Thingy:52 IoT Sensor Kit [S21] oraz Nordic Thingy:91 [S31] firmy Nordic Semiconductor.

Podsumowanie

W artykule zostały pokazane rozwiązana typowe oraz wiodące w dziedzinie układów do pomiaru koloru. Nie jest to pełny przegląd, ale o niektórych układach bardzo trudno uzyskać jakiegokolwiek informacje. Także firma ST Microelectronics zapowiedziała w roku 2019 nowy czujnik RGB z pięciokrotnie większą czułością niż dotychczasowe układy – jednak do dzisiaj nie jest dostępny do zakupu.

Testy pokazują, że dla każdego zastosowania istnieje odpowiednie rozwiązanie czujnika. Czujniki True Color są w stanie osiągnąć dokładność minispektrometru podczas wykonywania pomiarów koloru [4]. Czujniki RGB idealnie pasują do prostego wykrywania kolorów w zastosowaniach takich, jak sterowanie podświetleniem LED RGB, oświetlenie półprzewodnikowe, próbnik odbitych kolorów LED i wykrywanie temperatury barwowej światła fluorescencyjnego. Czujniki True Color (XYZ) są idealne do bezwzględnych pomiarów kolorów. Czujniki wielospektralne nadają się do pomiarów absolutnych lub spektralnych.

Różnice kolorów $\Delta u'v' \leq 0,005$ są widoczne dla przeciętnego oka ludzkiego. W rzeczywistości wprawne oko może nawet dostrzec różnice w kolorach tak małe, jak wartość $\Delta = 0,003$. Testy pomiaru światła białego pokazują, że odchylenie pomiaru koloru wykonywanego przez czujnik XYZ (AS7261, AS7221 firmy AMS) pozostaje niedostrzegalne dla ludzkiego oka i wynosi 0,0011. Czujnik RGB (TSC3400 firmy AMS) wykazywał odchylenie rzędu 0,007, jednak z dryftem temperaturowym.

Możemy również spodziewać się szybko rosnącego zestawu aplikacji, gdy czujniki XYZ zaczną pojawiać się w urządzeniach mobilnych lub jako akcesoria dodatkowe. „Włącz to, a aplikacje nadejdą” staje się standardową mantrą wielu naszych urządzeń mobilnych. Jedną z nowych aplikacji, która niedawno się pojawiła, jest przenośna ocena rzeczywistego koloru w celu dopasowania farby. Zwykle konsumenci musieliby zabrać próbkę materiału lub kawałek pomalowanej ściany do sklepu z farbami, aby można było je przeanalizować pod kątem pasującego koloru. Teraz mogą korzystać z kompaktowego, niedrogiego przyrządu, który oceni kolor na miejscu, a następnie, za pomocą aplikacji na smartfona, zidentyfikuje dokładny kod farby potrzebny do idealnego dopasowania od różnych producentów farb [13].

Obecne układy scalone czujników koloru sprawiają, że zdjęcia wykonywane najnowszym iPhone'em, z czujnikami XYZ, mają jakość znacznie wyższą niż w starszych modelach. Zgodnie z niedawno opublikowanym patentem, Apple pracuje nad nową technologią umożliwiającą próbkowanie kolorów ze świata rzeczywistego [14]. Trwają prace nad nowym Apple Pencil. Patent opisuje działanie stylusa wyposażonego w funkcje „kopiowania” koloru z rzeczywistego obiektu i wykorzystania go w grafice cyfrowej. Czujnik koloru ma zawierać kilka fotodetektorów zdolnych do pomiaru światła. Wystarczyłoby zbliżyć końcówkę z sensorem do wybranego obiektu. Po chwili zidentyfikowany kolor zostanie dodany do palety barw programu graficznego. Rysik z wbudowanym czujnikiem koloru mógłby mieć szersze zastosowanie, jak kalibracja wyświetlaczy lub drukarek czy identyfikacja dokładnych kolorów farb w projektach architektonicznych.

Henryk A. Kowalski
Instytut Informatyki
Politechnika Warszawska



Miesięcznik „Elektronika Praktyczna” (12 numerów w roku) jest wydawany przez AVT-Korporacja Sp. z o.o. we współpracy z wieloma redakcjami zagranicznymi.

Wydawnictwo:

AVT-Korporacja Sp. z o.o.
03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11
tel. 22 257 84 99, faks 22 257 84 00

Wydawca:

Wiesław Marciniak

Adres redakcji:

03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11
tel. 22 257 84 60
faks 22 257 84 00
e-mail: redakcja@ep.com.pl
www.ep.com.pl

Redaktor Naczelny:

Damian Sosnowski

Redaktor Programowy, Przewodniczący Rady Programowej:

Piotr Zbysiński

Menedżer Magazynu:

Katarzyna Gugąta

Szef Pracowni Konstrukcyjnej:

Grzegorz Becker

Redakcja strony internetowej www.ep.com.pl

MAD Sp. z o.o.

Zespół marketingu i reklamy:

Katarzyna Gugąta, tel. 22 257 84 64
Bożena Krzykawska, tel. 22 257 84 42
Grzegorz Krzykawski, tel. 22 257 84 60

Sekretarz Redakcji:

Grzegorz Krzykawski, tel. 22 257 84 60

DTP i okładka:

MAD Sp. z o.o.

Stali Współpracownicy:

Nikodem Czechowski, Jakub Tyburski, Lucjan Bryndza, Jarosław Doliński, Andrzej Gawryluk, Krzysztof Górski, Tomasz Jabłoński, Michał Kurzela, Szymon Panecki, Sławomir Skrzyński, Ryszard Szymański, Adam Tatus, Robert Wołgajew

Uwaga!

Kontakt z wymienionymi osobami jest możliwy via e-mail, według schematu: imię.nazwisko@ep.com.pl

Prenumerata w Wydawnictwie AVT

www.avt.pl/prenumerata

lub tel. 22 257 84 22

e-mail: prenumerata@avt.pl

www.sklep.avt.pl, tel. 22 257 84 66

Prenumerata w RUCH S.A.

www.prenumerata.ruch.com.pl

lub tel. 801 800 803, 22 717 59 59

e-mail: prenumerata@ruch.com.pl



Wydawnictwo
AVT-Korporacja Sp. z o.o.
należy do Izby Wydawców Prasy

Copyright AVT-Korporacja Sp. z o.o.

03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11

Projekty publikowane w „Elektronice Praktycznej” mogą być wykorzystywane wyłącznie do własnych potrzeb. Korzystanie z tych projektów do innych celów, zwłaszcza do działalności zarobkowej, wymaga zgody redakcji „Elektroniki Praktycznej”. Przedruk oraz umieszczanie na stronach internetowych całości lub fragmentów publikacji zamieszczanych w „Elektronice Praktycznej” jest dozwolone wyłącznie po uzyskaniu zgody redakcji. Redakcja nie odpowiada za treść reklam i ogłoszeń zamieszczanych w „Elektronice Praktycznej”.

