

OPTOELEKTRONIKA

Seweryn Lipiński

A209 WNT

seweryn.lipinski@uwm.edu.pl

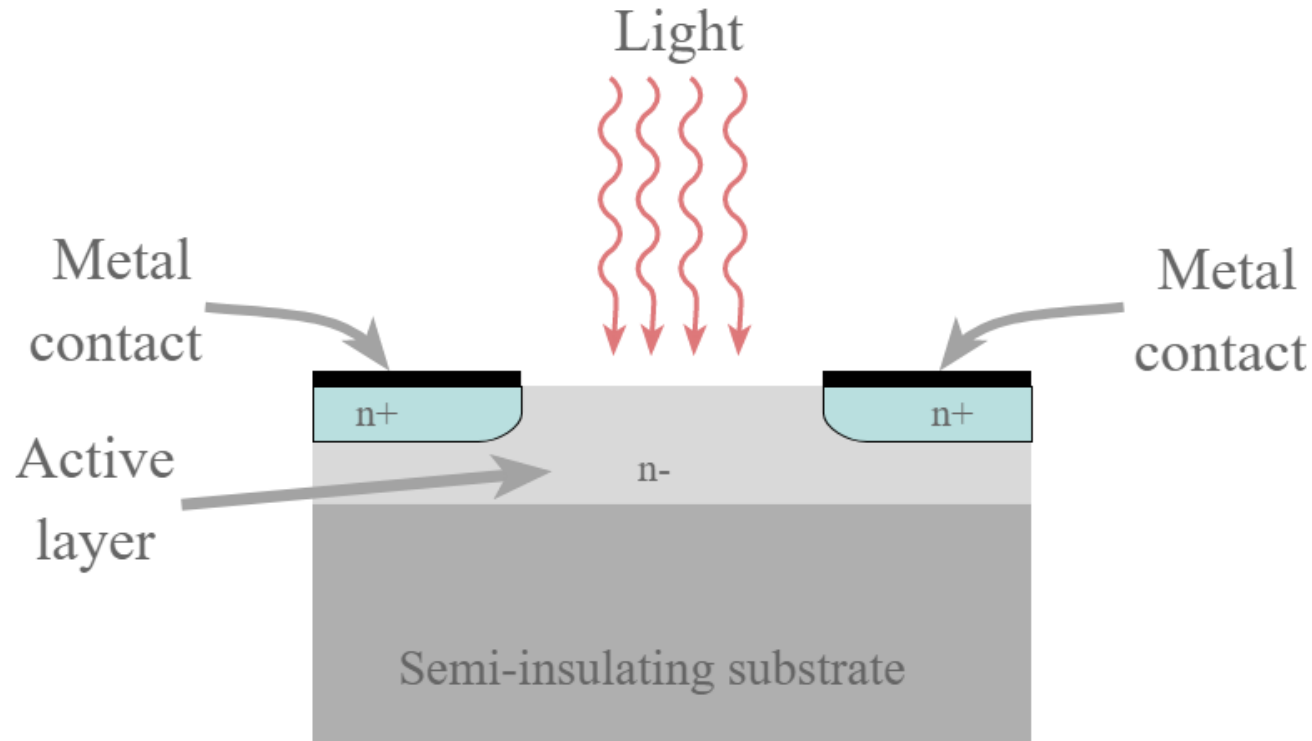
Fotoelementy

Fotoelementy

- Zdecydowana większość rozbudowanych czujników optycznych bazuje na połączeniu przynajmniej jednego fotoelementu oraz odpowiedniego układu scalonego i – jeżeli to konieczne – jednego bądź kilku emiterów światła.
- Znajomość szczegółów konstrukcyjnych oraz różnic pomiędzy parametrami elektrycznymi i optycznymi poszczególnych fotoelementów – zwłaszcza w przypadku gdy te same podzespoły bywają klasyfikowane pod różnymi nazwami handlowymi – pozwala uniknąć wielu błędów w projektach.

Fotorezystory

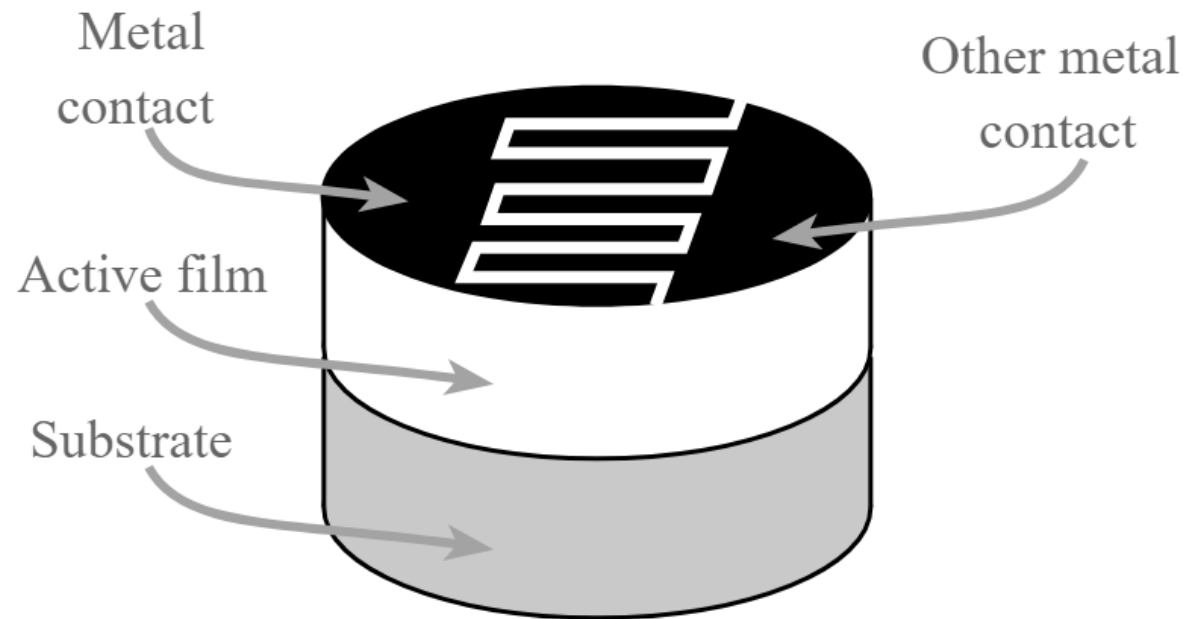
Konstrukcja fotorezystorów, określanych także mianem LDR (*light dependent resistor*), jest zdecydowanie najprostsza spośród wszystkich stosowanych obecnie fotoelementów - strukturalnie jest to światłoczuły rezystor, który ma poziomy korpus wystawiony na działanie światła.

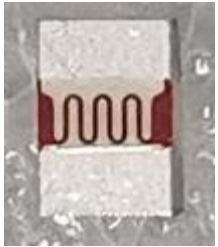
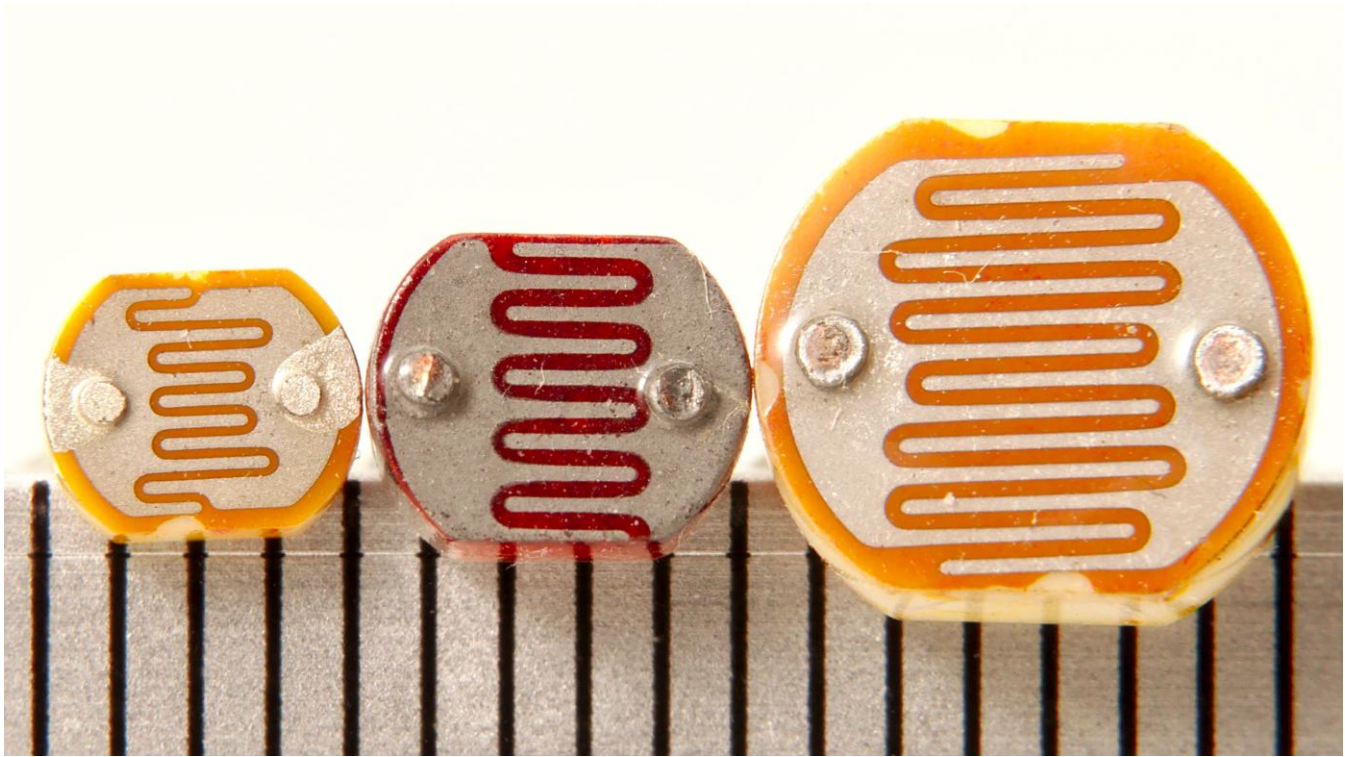


W fotorezystorach stosuje się wzór międzypalcowy w celu zwiększenia obszaru fotorezystora wystawionego na działanie światła.

Wzór jest wycięty w metalizacji na powierzchni obszaru aktywnego, co przepuszcza światło.

Dwa metalizowane obszary działają jak dwa styki rezystora.

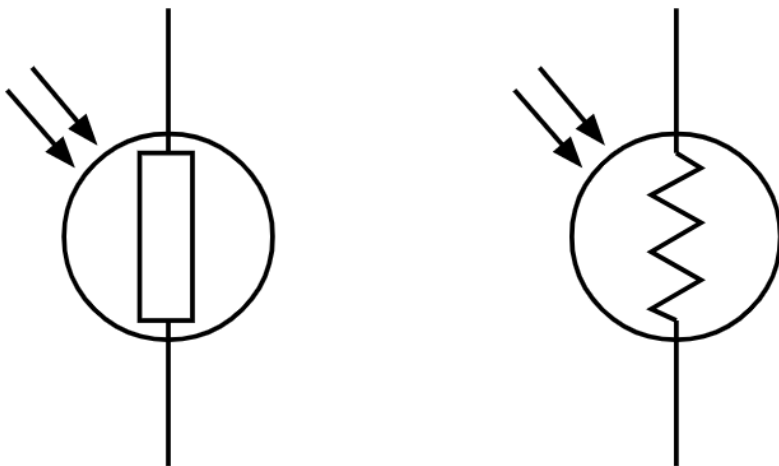




- Fotorezystory - symbol

W symbolu LDR pokazujemy światło w postaci świecących strzałek.

W ten sposób stosuje się tę samą konwencję, co w przypadku symboli fotodiod i fototranzystorów, w których strzałki także służą do pokazania światła padającego na te elementy.



- Fotorezystory – zasada działania

Prąd elektryczny = ruch elektronów w materiale.

Dobre przewodniki mają dużą liczbę swobodnych elektronów, które mogą dryfować w określonym kierunku pod wpływem różnicy potencjałów. Izolatory o mają bardzo mało wolnych elektronów, dlatego trudno jest je poruszyć.

LDR wykonany jest z materiału półprzewodnikowego o wysokiej rezystancji - zdecydowana większość elektronów jest zablokowana w sieci krystalicznej i nie może się poruszać.

Gdy światło pada na półprzewodnik, fotony światła są pochłaniane przez siatkę półprzewodnikową, a część ich energii jest przekazywana elektronom.

Ilość energii przekazanej elektronom daje niektórym z nich energię wystarczającą do wyrwania się z sieci krystalicznej, aby mogły następnie przewodzić prąd.

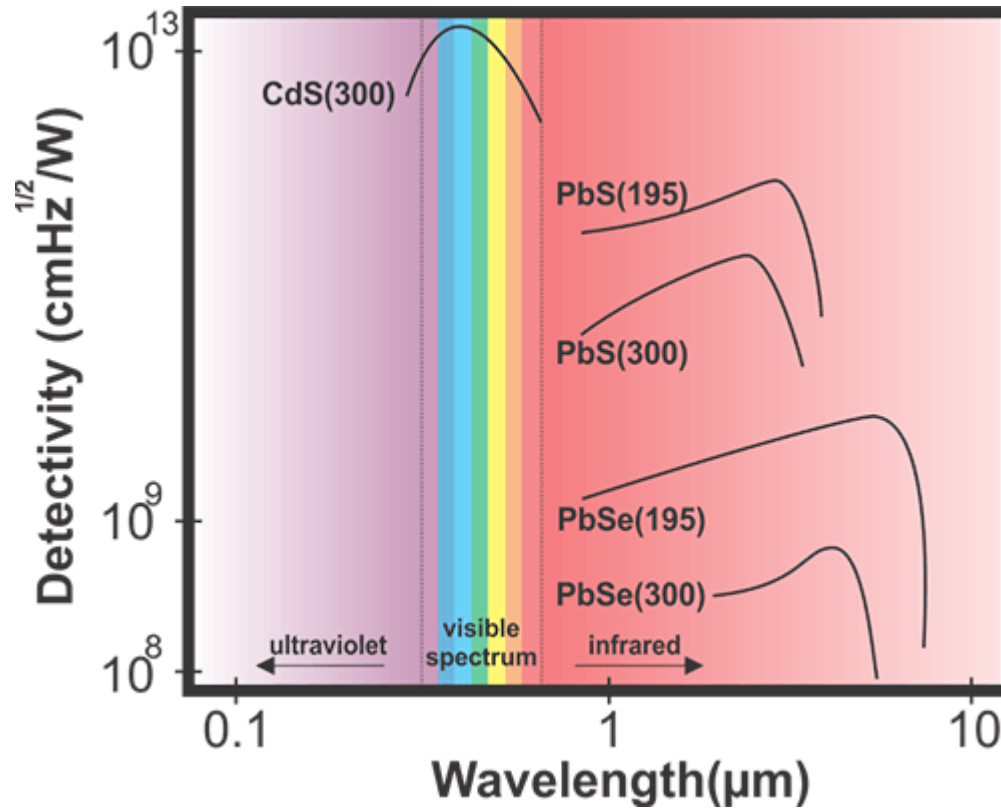
Powoduje to obniżenie rezystancji półprzewodnika.

Proces jest postępujący - im więcej światła pada na półprzewodnik, tym więcej elektronów jest uwalnianych w celu przewodzenia prądu, a rezystancja dalej spada.

- Fotorezystory – materiał wykonania

Zatem materiały stosowane na fotorezystory to półprzewodniki – są to np. CdSe, CdS, CdTe, InSb, InP, PbS, PbSe, Ge, Si, GaAs.

Każdy materiał daje inne właściwości pod względem długości fali czułości itp.



Jednym z popularnych materiałów na te fotorezystory jest siarczek kadmu, CdS , chociaż stosowanie tych ogniw jest obecnie w Europie ograniczone ze względu na problemy środowiskowe związane z użyciem kadmu.

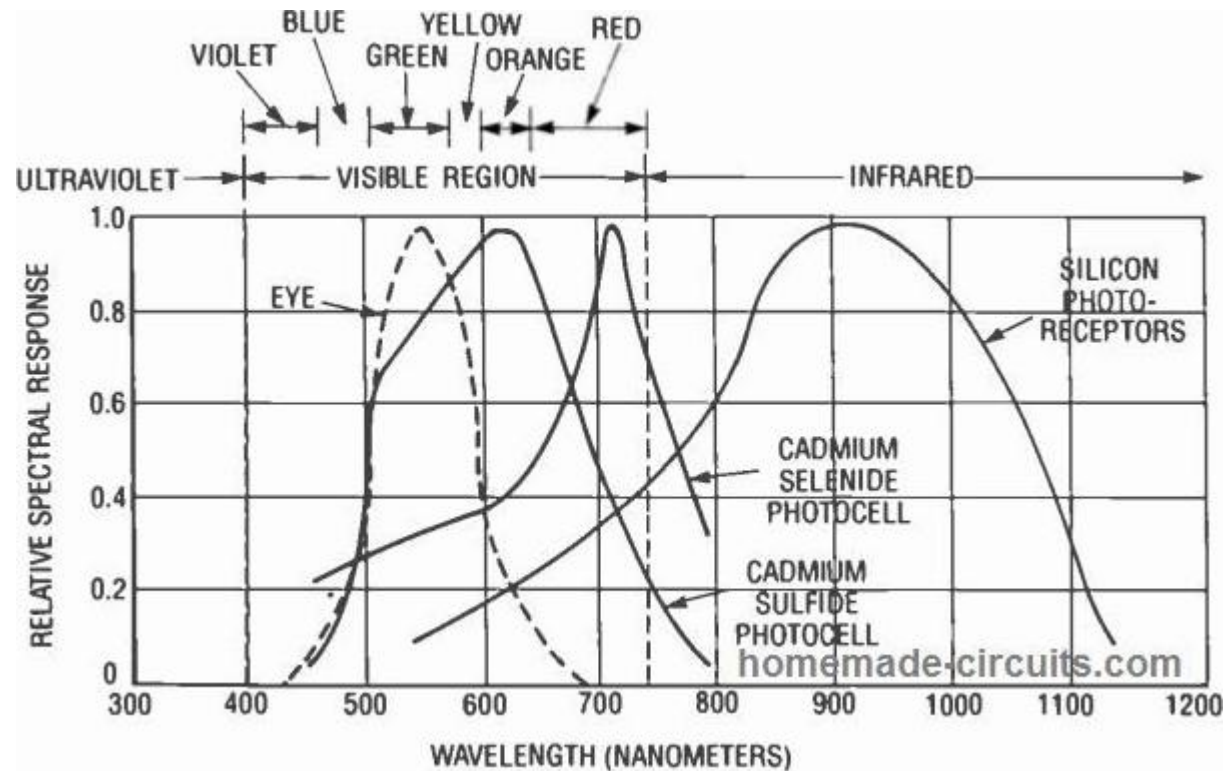
Podobnie inne materiały półprzewodnikowe na bazie kadmu, takie jak selenek kadmu CdSe , również podlegają ograniczeniom.

Inne materiały, które można zastosować, to np. siarczek ołowiu, PbS i antymonek indu, InSb .

Chociaż w fotorezystorach stosuje się materiał półprzewodnikowy, są to urządzenia czysto pasywne, ponieważ nie posiadają złącza P-N, co odróżnia je od innych fotodetektorów, takich jak fotodiody i fototranzystory.

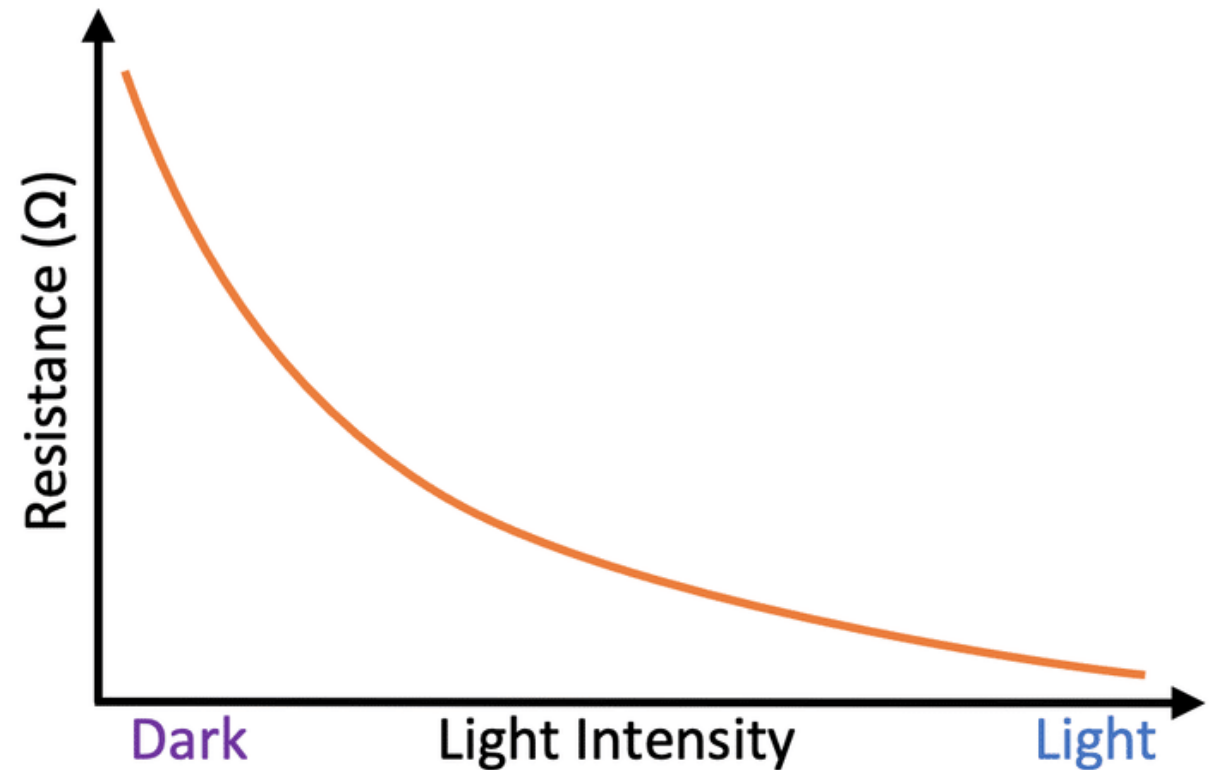
Z uwagi na brak złącza P-N fotorezystory są elementami niespolaryzowanymi, co jest zazwyczaj zaletą.

Fotorezystory są także przeważnie dość tanie, co w połączeniu z charakterystyką czułości sprawia, że ich najczęstszym zastosowaniem stają się układy wyłączników zmierzchowych, stosowanych m.in. w lampach ulicznych, a także oświetlaczach podczerwieni w kamerach CCTV.

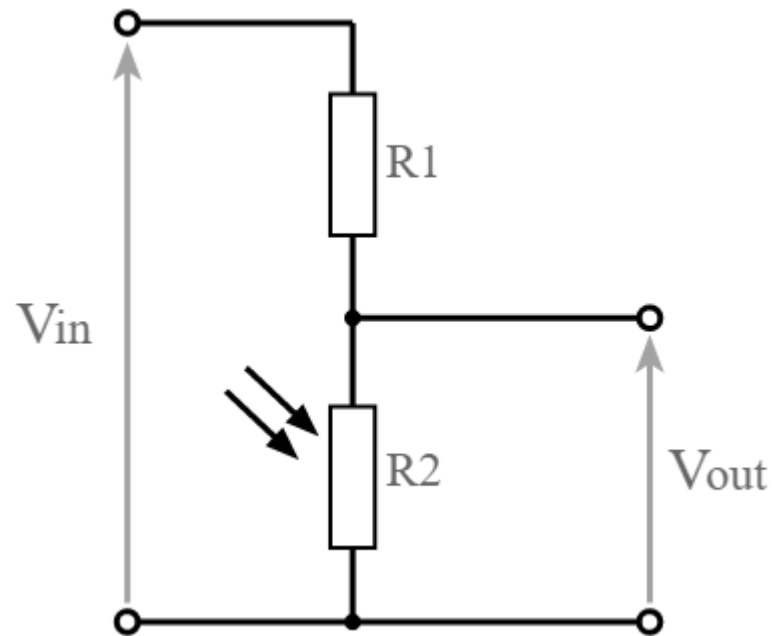


Typowe fotorezystory oferują czas reakcji na poziomie 20...30 milisekund, co rzecz jasna dyskwalifikuje je w bardziej dynamicznych zastosowaniach.

Bodaj najistotniejszą zaletą tych komponentów pozostaje ich bardzo wysoka czułość – przy przejściu z otoczenia ciemnego do oświetlonego (i to zaledwie na poziomie ok. 10 luksów) ich rezystancja spada nawet ponad 200-krotnie.

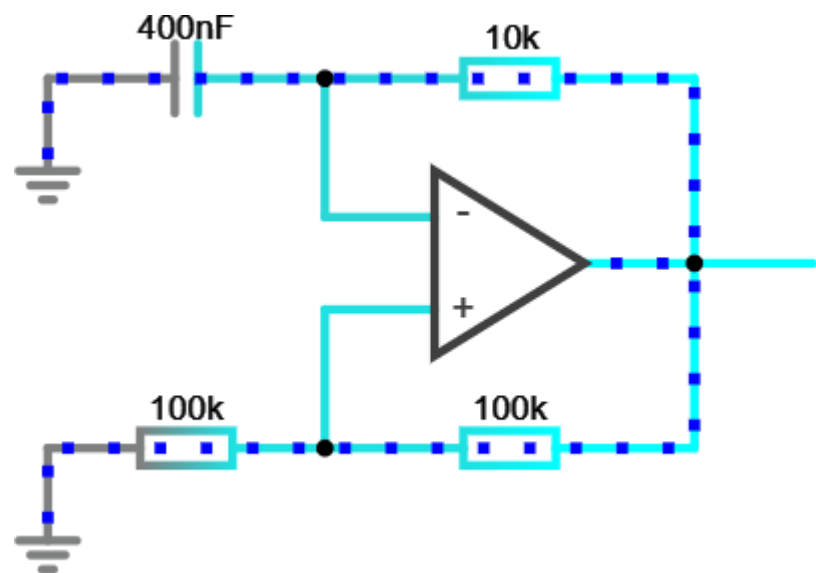


Wysoka czułość fotorezystora sprawia, że nawet najprostszy układ w postaci zwykłego dzielnika napięcia może być z powodzeniem podłączony bezpośrednio do innego układu elektronicznego (np. do wejścia mikrokontrolera):

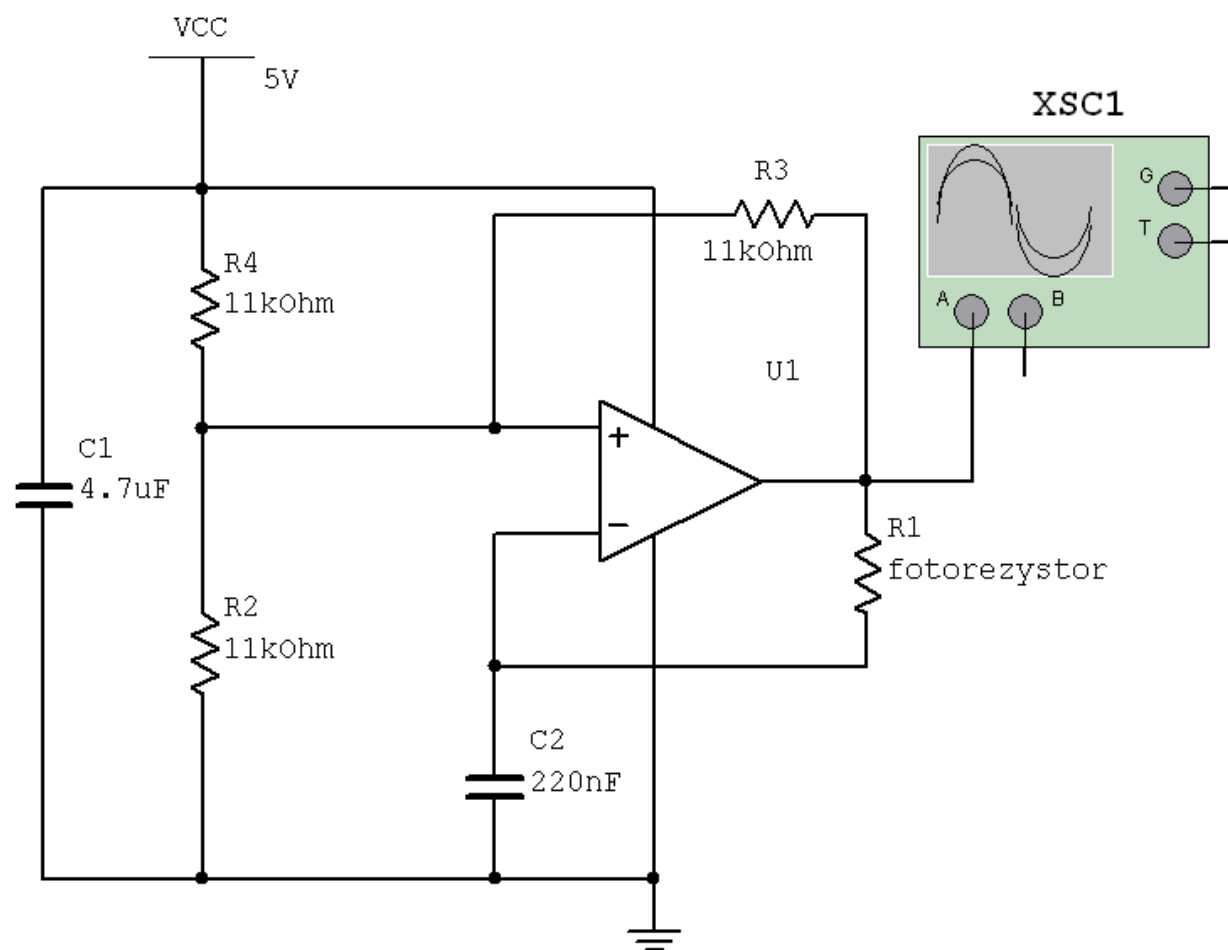


$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Generator relaksacyjny ->



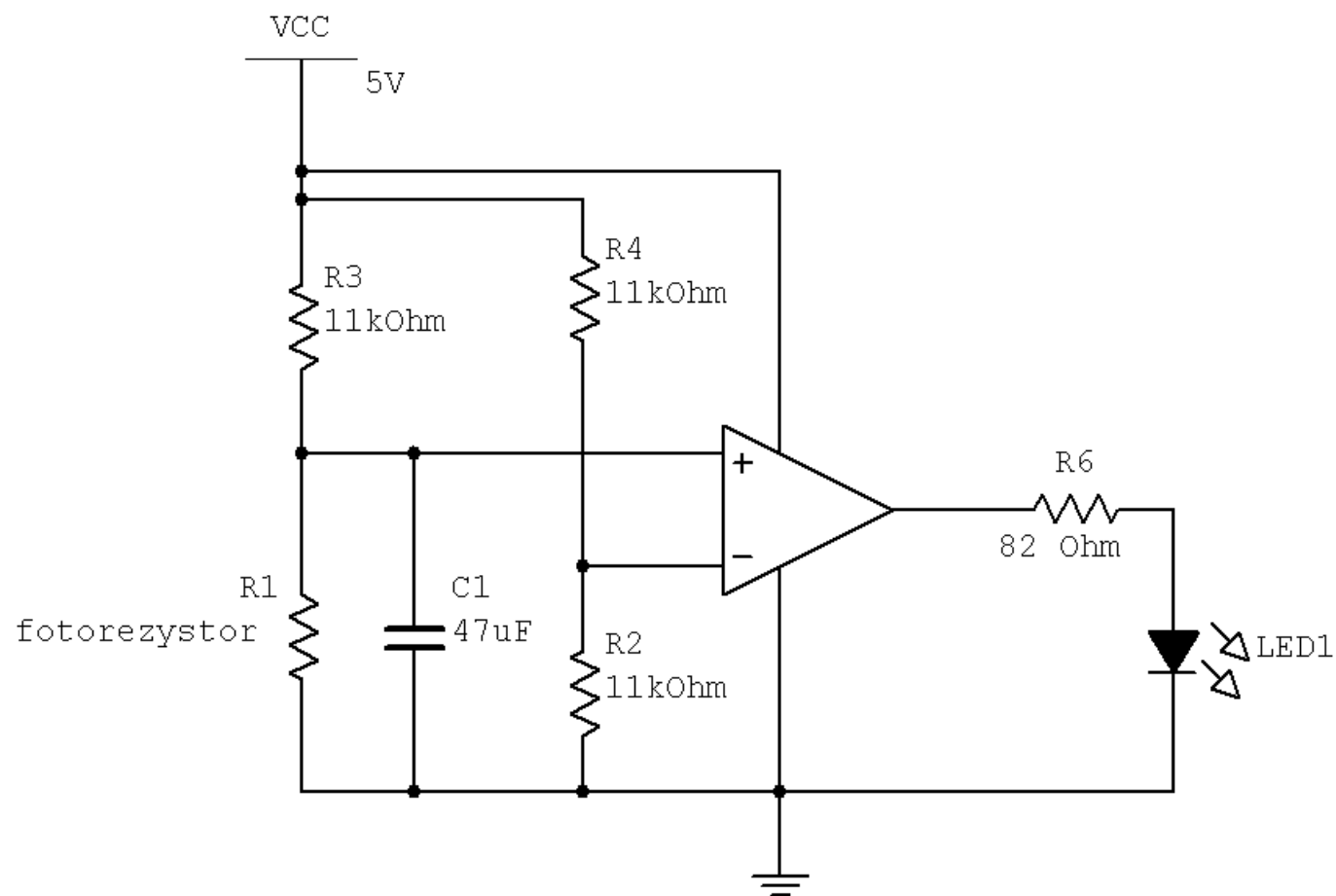
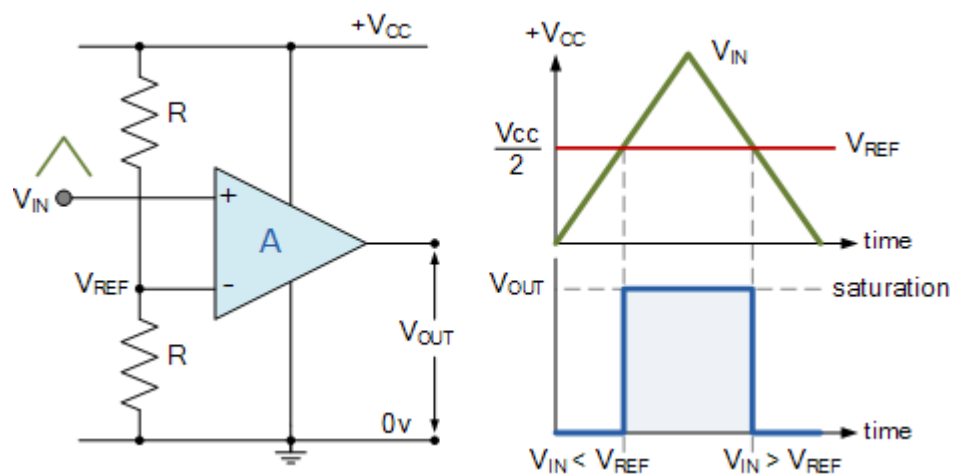
Generator częstotliwości sterowany światłem



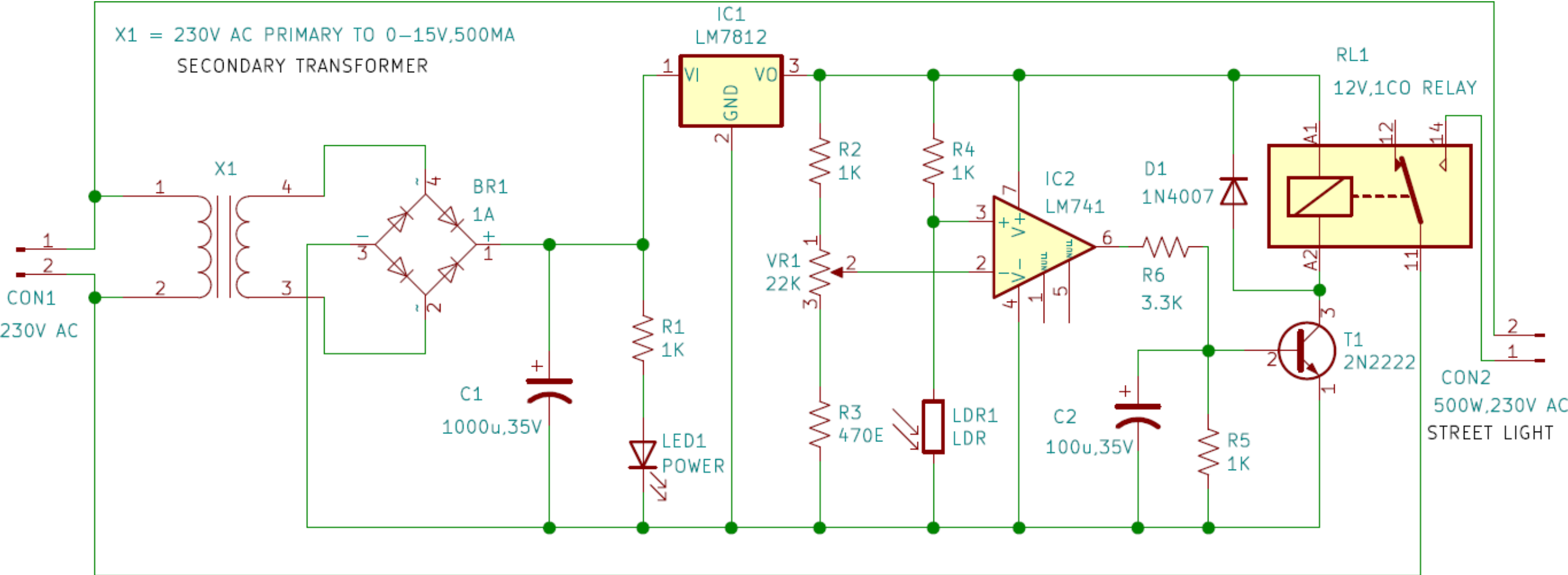
Komparator

->

Włącznik zmierzchowy:



Układ automatycznego włączania/wyłączania oświetlenia ulicznego



Fototranzystory

W praktyce raczej częściej niż fotorezystory spotyka się dziś fototranzystory.

Na pewno też w znacznie szerszym zakresie rozmiarów oraz typów obudowy.

Podręcznikowe fototranzystory z 3 wyprowadzeniami należą dziś do rzadkości, choć nadal można je zakupić – dodatkowe wyprowadzenie bazy umożliwia układową kontrolę czułości i punktu pracy.



Nieporównanie częściej wykorzystywane są natomiast fototranzystory z 2 wyprowadzeniami – te są dostępne zarówno w wersjach do montażu przewlekane, jak i w rozmaitych obudowach typu SMD, w tym odwróconych oraz kątowych:



Wróćmy do podstaw - fototranzystor to urządzenie półprzewodnikowe, które zmienia prąd przepływający między emiterem a kolektorem w zależności od poziomu odbieranego światła.

Co do zasady, wszystkie tranzystory bipolarne same w sobie są światłoczułe, dlatego większość tranzystorów jest zamknięta w metalowych lub plastikowych obudowach, więc tak naprawdę fototranzystory są wyspecjalizowaną formą tranzystora bipolarnego, która została zoptymalizowana pod kątem czułości na światło.

Wydajność fototranzystora może być lepsza niż fotodiody w niektórych zastosowaniach ze względu na jego wzmocnienie.

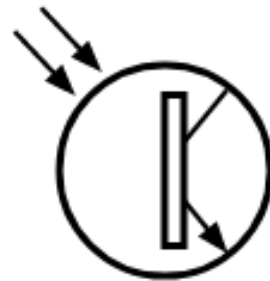
Orientacyjnie, tam gdzie fotodioda może umożliwić przepływ prądu o natężeniu około $1\text{ }\mu\text{A}$ w typowych warunkach pokojowych, fototranzystor może pozwolić na przepływ prądu o natężeniu $100\text{ }\mu\text{A}$.

Są to bardzo przybliżone szacunki, ale pokazują one rząd wielkości różnic.

Warto jednak pamiętać, że wzmocnienie fototranzystora odbywa się kosztem liniowości i powtarzalności, dlatego w precyzyjnych pomiarach fotodiody są rozwiązaniem preferowanym.

- Fototranzystory - symbol

Symbol fototranzystora składa się z podstawowego symbolu tranzystora bipolarnego z dwiema strzałkami skierowanymi w stronę złącza tranzystora bipolarnego:

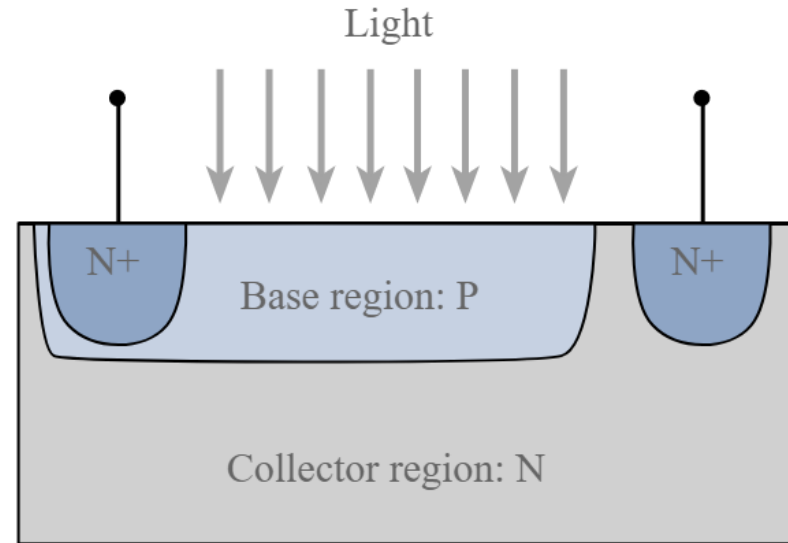


Można zauważyć, że pokazany symbol fototranzystora nie ma bazy.

Często baza pozostaje odłączona, ponieważ to światło służy do umożliwienia przepływu prądu przez fototranzystor. Jak wspomniano wcześniej, w niektórych przypadkach baza może być wykorzystana w celu ustawienia wymaganego punktu pracy. W takim przypadku baza zostanie oczywiście pokazana w normalny sposób na symbolu fototranzystora.

Chociaż zwykłe tranzystory bipolarne, wykazują efekty światłoczułe, struktura fototranzystora jest specjalnie zoptymalizowana do zastosowań optycznych.

Fototranzystor ma znacznie większą powierzchnię podstawy i kolektora niż normalny tranzystor.



Fototranzystory są także szeroko stosowane jako detektory w rozmaitych czujnikach optycznych, złożonych z fotoelementu oraz diody LED – transoptorach szczelinowych oraz odbiciowych (refleksyjnych).

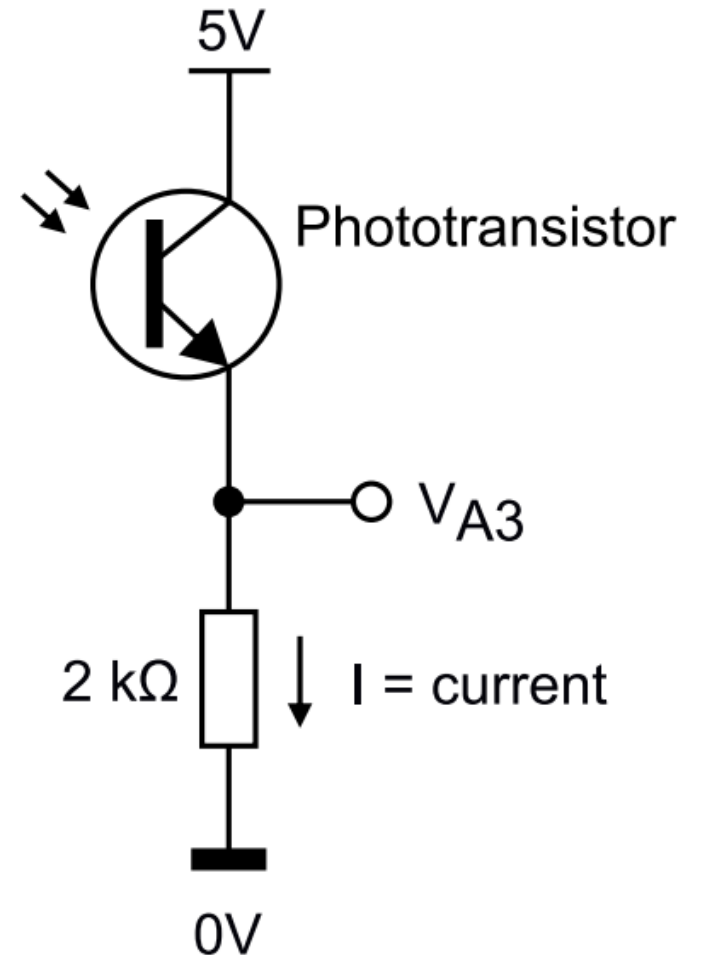
Od strony parametrów elektrycznych fototranzystory plasują się pomiędzy fotorezystorami a fotodiodami.

Z jednej strony oferują stosunkowo dużą czułość i prostotę układową (mogą pracować w dzielniku napięciowym, choć osiągnięcie wymaganego przez projekt punktu pracy i czułości wymaga nieco bardziej skrupulatnego doboru współpracującego rezystora), z drugiej zaś – zapewniają szybkość reakcji większą zazwyczaj o około 3 rzędów wielkości od fotorezystorów (katalogowe czasy narastania i opadania kształtują się zwykle na poziomie od kilku do kilkunastu mikrosekund).

Należy przy tym pamiętać, że na wypadkową dynamikę układu bazującego na fototranzystorze wpływają w dużej mierze parametry oraz sposób jego zasilania.

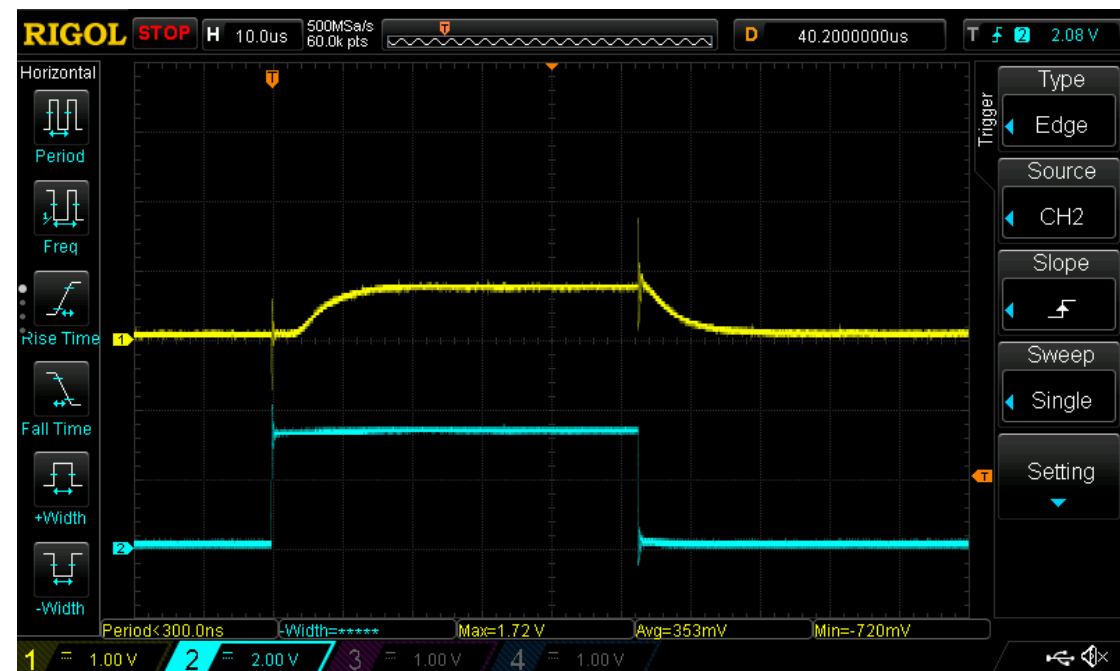
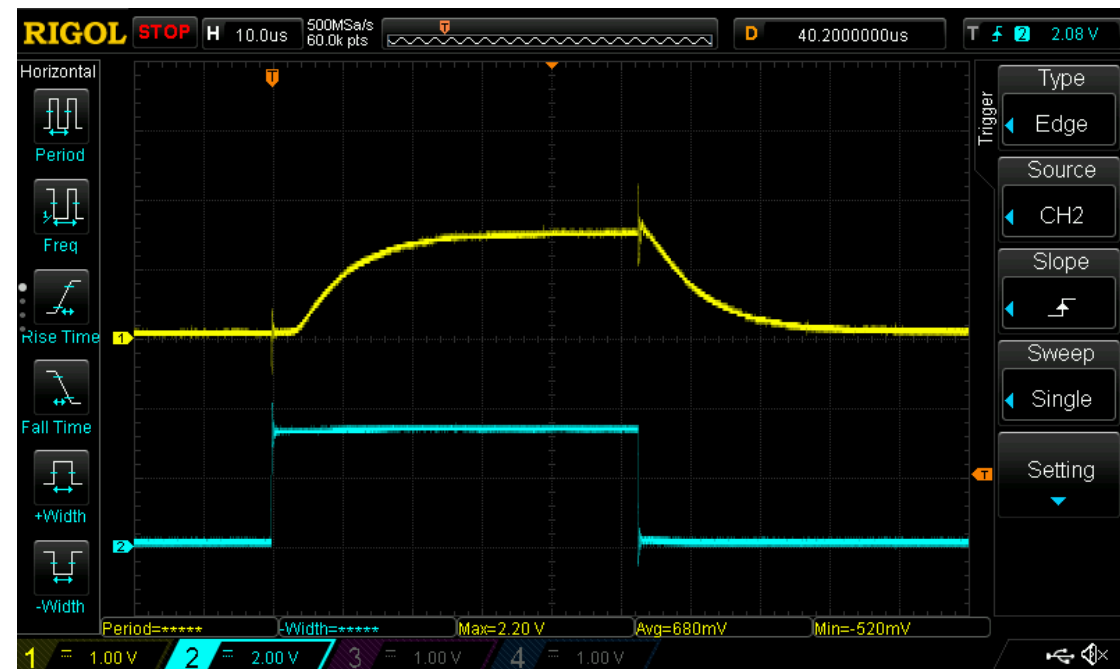
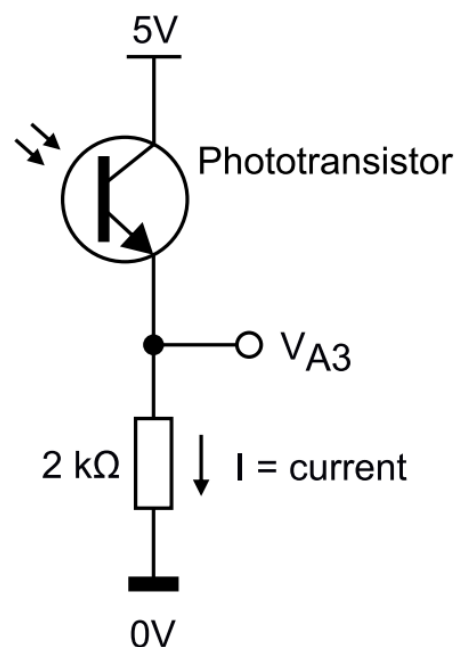
W klasycznej konfiguracji dzielnika napięciowego zwiększanie (rzecz jasna tylko w pewnym zakresie) wartości rezystora powoduje wprowadzie wzrost amplitudy sygnału, ale jednocześnie spora pojemność Millera w połączeniu z dużą rezystancją daje istotną stałą czasową tak powstałego układu RC.

Natomiast zmniejszanie rezystancji obwodu powoduje wprowadzie odpowiedni wzrost dynamiki, ale za cenę spadku amplitudy (nie wspominając o zwiększonym poborze energii).



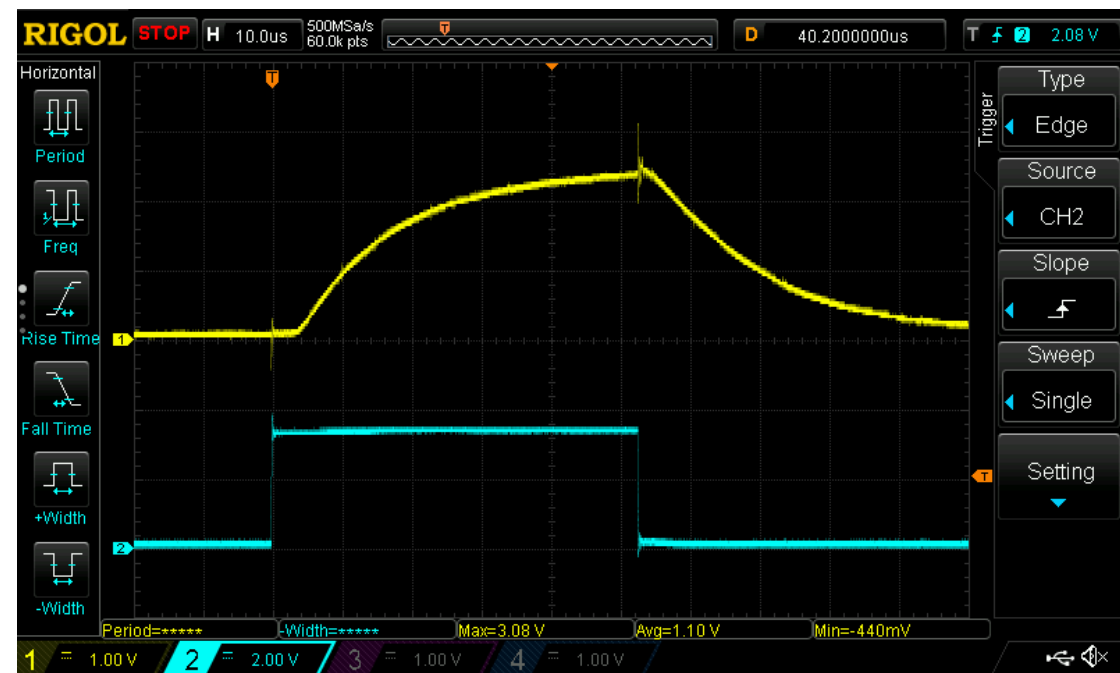
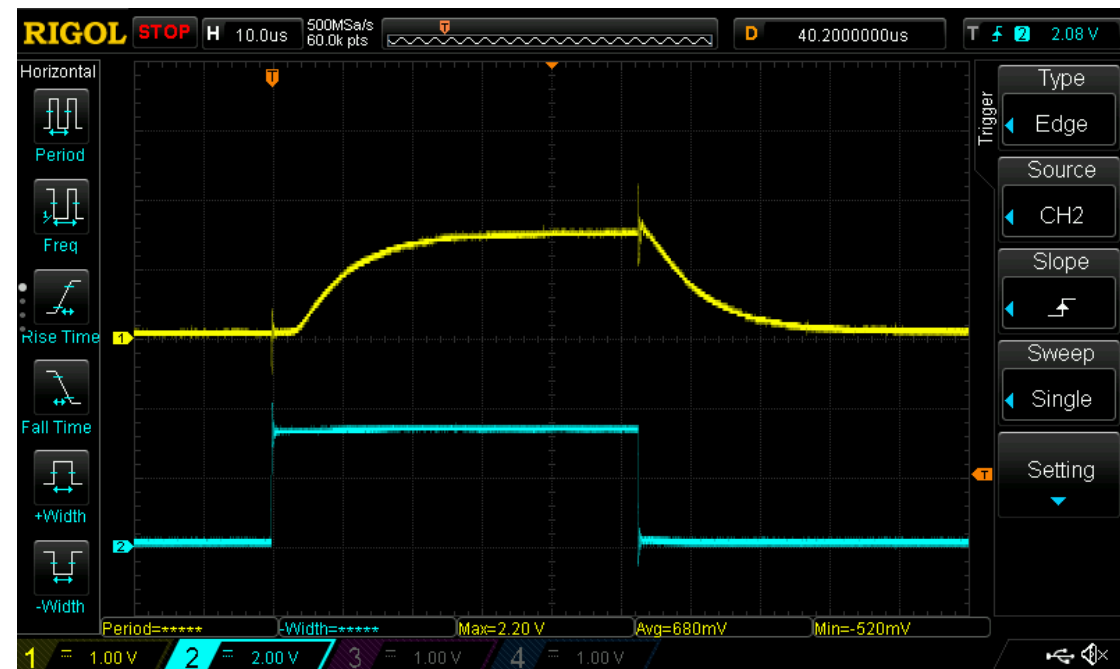
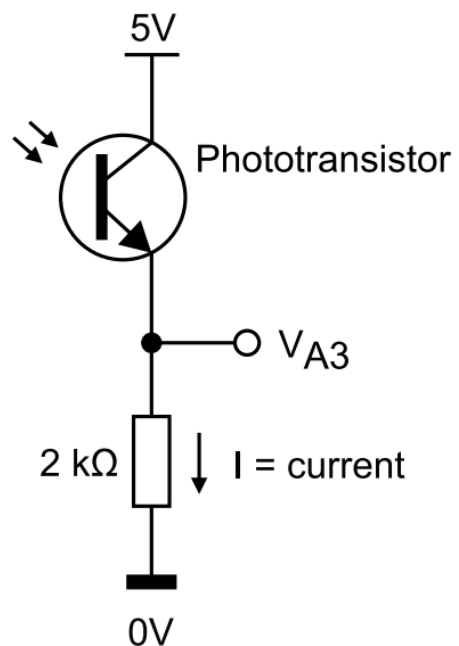
Spójrzmy na przykłady:

- rezystor 1k
- rezystor 470

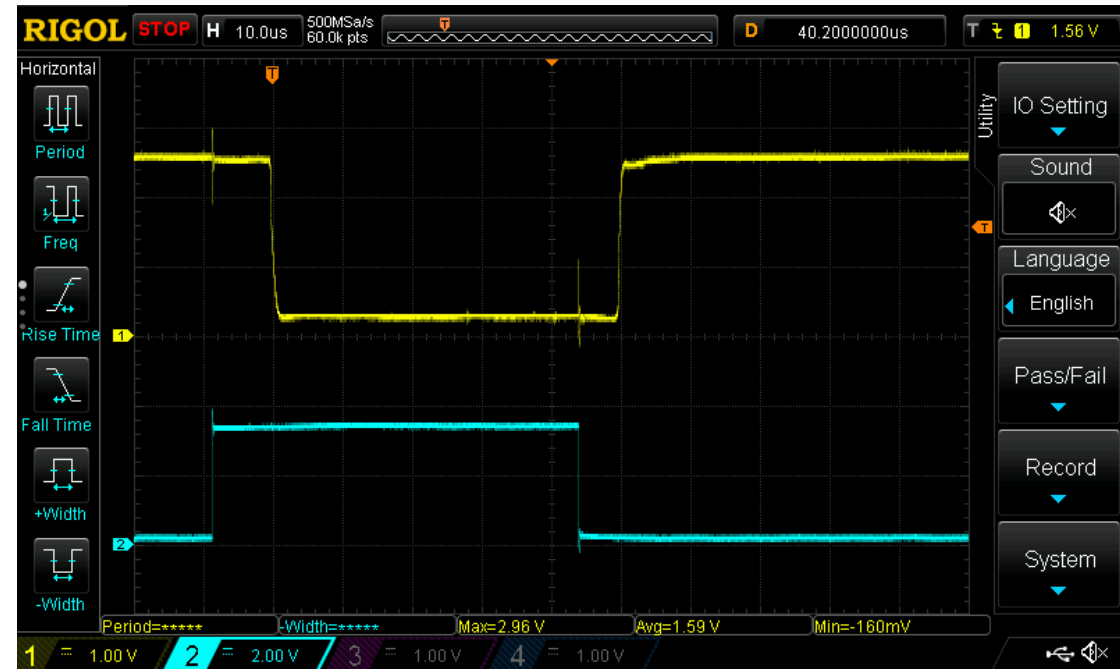
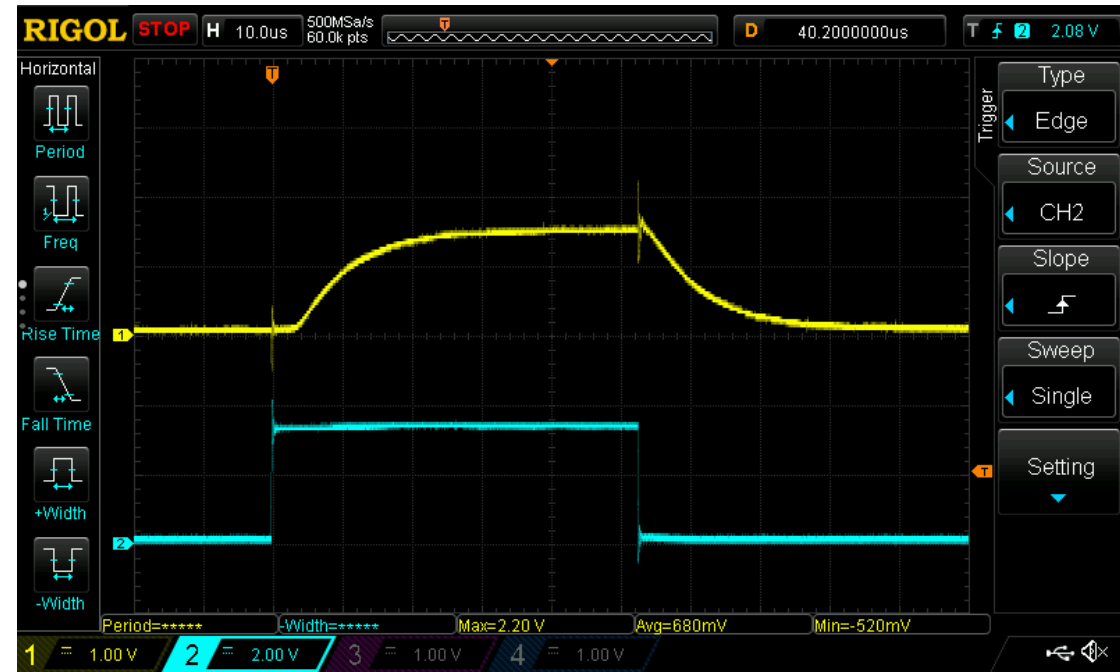
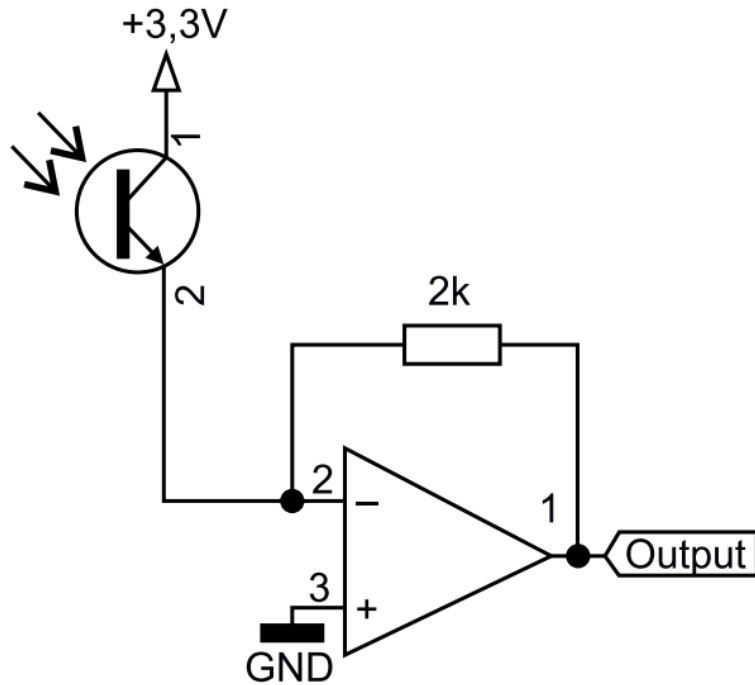


Spójrzmy na przykłady:

- rezystor 1k
- rezystor 2k

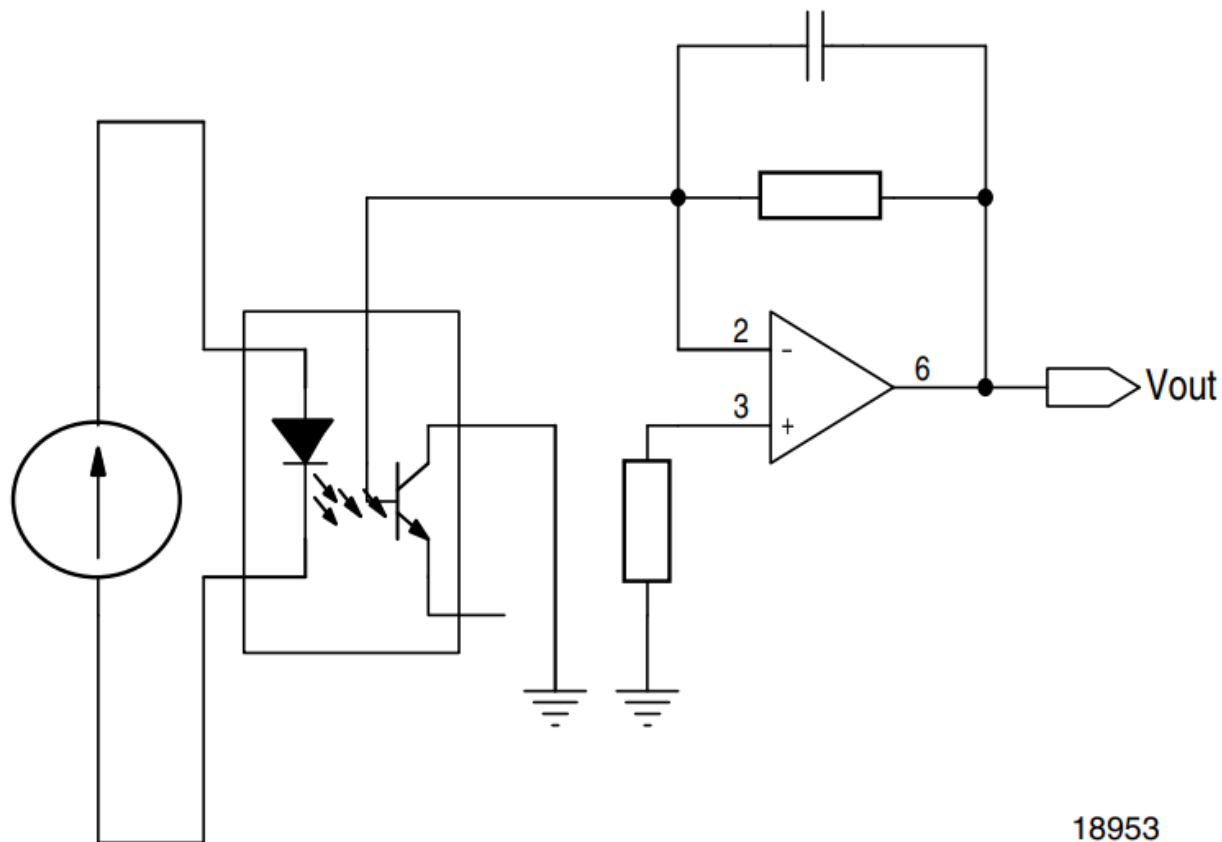


- rezystor 1k
- układ ze wzmacniaczem transimpedancyjnym



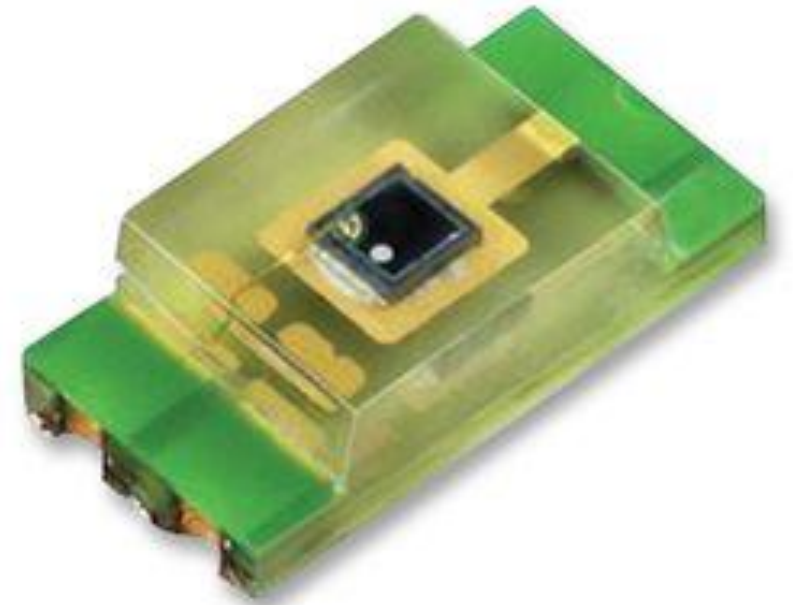
Ogólnie – zawsze warto zaglądać do no katalogowych urządzeń, by nie wywazać otwartych drzwi.

Np. nota katalogowa firmy Vishay (*Faster Switching from Standard Couplers*) proponuje zamiast dzielnika użyć wzmacniacza transimpedancyjnego (TIA) – w konfiguracji często stosowanej z fotodiodami:



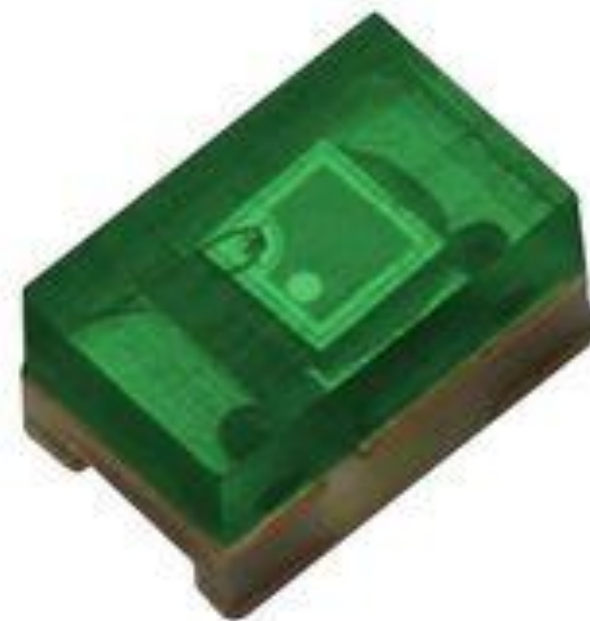
- Fototranzystory – co jeszcze warto wiedzieć...

Dyskretne fototranzystory występują zarówno w wersjach przeznaczonych do pracy w świetle widzialnym, jak i podczerwieni – te ostatnie można zwykle poznać po czarnej soczewce, pełniącej rolę filtra przepuszczalnego dla promieniowania podczerwonego), podczas gdy fototranzystory wykonane w obudowach przeziernych dla światła w zakresie około 400...800 nm bywają czasem wręcz oferowane pod nazwą czujników oświetlenia zewnętrznego (ALS – *ambient light sensor*) – np. TEMT6000X01.



Nieco inna sytuacja ma miejsce w przypadku elementów wyposażonych we wbudowany filtr optyczny, kształtujący charakterystykę czułości spektralnej na wzór ludzkiego oka.

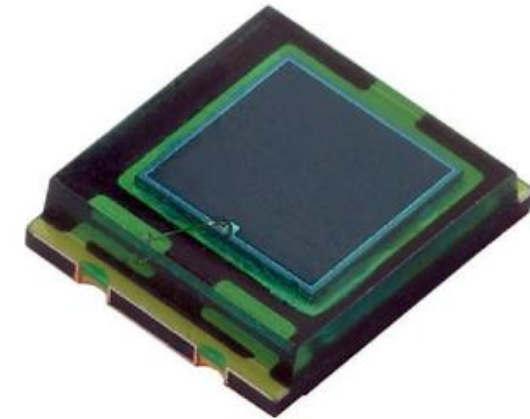
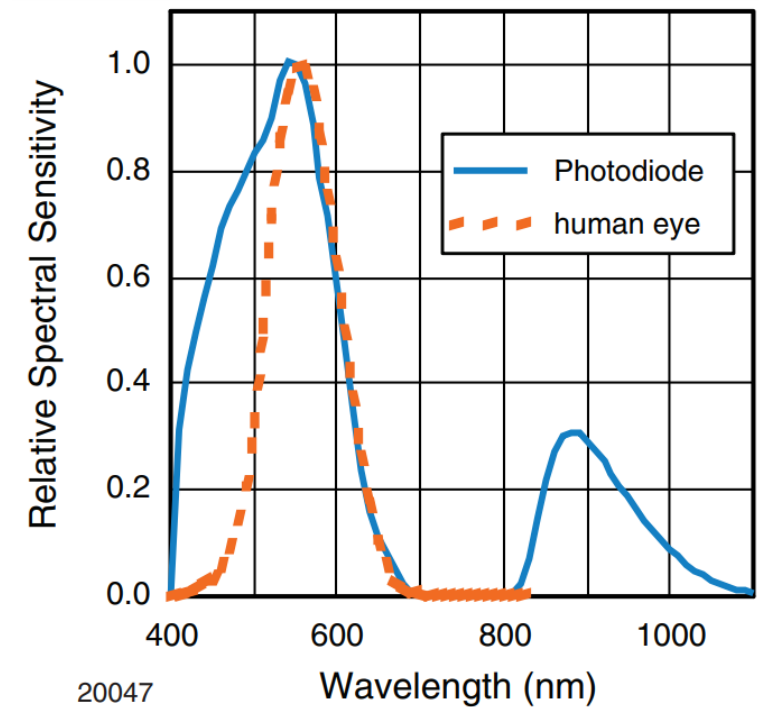
Charakterystyczny, zielony kolor obudowy przykładowego, fototranzystorowego czujnika ALS typu TEMT6200FX01 sprawia, że do struktury światłoczułej dociera widmo „odcięte” w zakresie przekraczającym próg 700 nm, choć akurat w tym przypadku powyżej 800 nm czułość elementu zaczyna znów rosnąć i w zakresie bliskiej podczerwieni dochodzi nawet do 30% wartości maksymalnej.



- Dygresja - a propos czujników oświetlenia zewnętrznego ALS...

Podobne rozwiązanie stosuje się zresztą także w przypadku sensorów ALS bazujących na fotodiodach, a jego celem w każdym przypadku jest sterowanie pracą urządzenia (np. jasnością wyświetlacza) w sposób bardziej naturalny dla odbiorcy, niż miałoby to miejsce przy zastosowaniu zwykłych fotoelementów o szerokiej charakterystyce spektralnej.

Jest to zresztą doskonały przykład przesuwania ciężaru projektowego współczesnych urządzeń elektronicznych w stronę poprawy doświadczeń użytkownika.



DESCRIPTION

TEMD5510FX01 ambient light sensor is a PIN photodiode with high photo sensitivity in a miniature surface mount device (SMD). The detector chip has 7.5 mm² sensitive area. It is sensitive to visible light much like the human eye and has peak sensitivity at 540 nm.

- Fototranzystory są fotoelementami najczęściej wykorzystywanymi do produkcji transoptorów refleksyjnych (odbiciowych) i transmisyjnych (szczelinowych).

[illegible]

Czujniki transmisyjne – zwane także transoptorami szczelinowymi – są szeroko stosowane w roli optycznych wyłączników krańcowych, współpracujących z ruchomymi elementami mechanizmów (np. głowicami drukarek atramentowych i skanerów do dokumentów, systemami napędowymi drukarek 3D, itd.), a także jako sensory służące do odczytu znaczników, znajdujących się na tarczach precyzyjnych enkoderów obrotowych (zdjęcie) oraz paskach inkrementalnych enkoderów liniowych.



Fototranzystory – czujniki oparte na fototranzystorach

Elementy z tej grupy mają w większości przypadków obudowy przewlekane, jednak zdarzają się także miniaturowe czujniki przeznaczone do montażu powierzchniowego – niektóre z nich wykraczają daleko poza możliwości oferowane przez klasyczne, proste czujniki z pojedynczą diodą LED IR oraz jednym fototranzystorem.

Przykładowo, układy TCUT1800X01 o wymiarach zaledwie 5,7×5,9×7,1 mm mają dwie pary częściowo skrzyżowanych torów optycznych, przy czym każdy z dwóch nadajników podczerwieni współpracuje z dwoma własnymi fototranzystorami, co daje cztery niezależne kanały optyczne, umożliwiające realizację enkoderów absolutnych o rozdzielczości do 16 kroków (4 bity).



Fotodiody

Najszerszą i jednocześnie najbardziej zróżnicowaną grupę fotoelementów stanowią fotodiody.

Są to jedyne półprzewodnikowe komponenty optoelektroniczne, zdolne do pracy w niezwykle szerokim paśmie widma elektromagnetycznego, rozciągającym się od twardego promieniowania jonizującego (gamma), poprzez słabsze promieniowanie X, ultrafiolet i światło widzialne, aż do średniej podczerwieni.

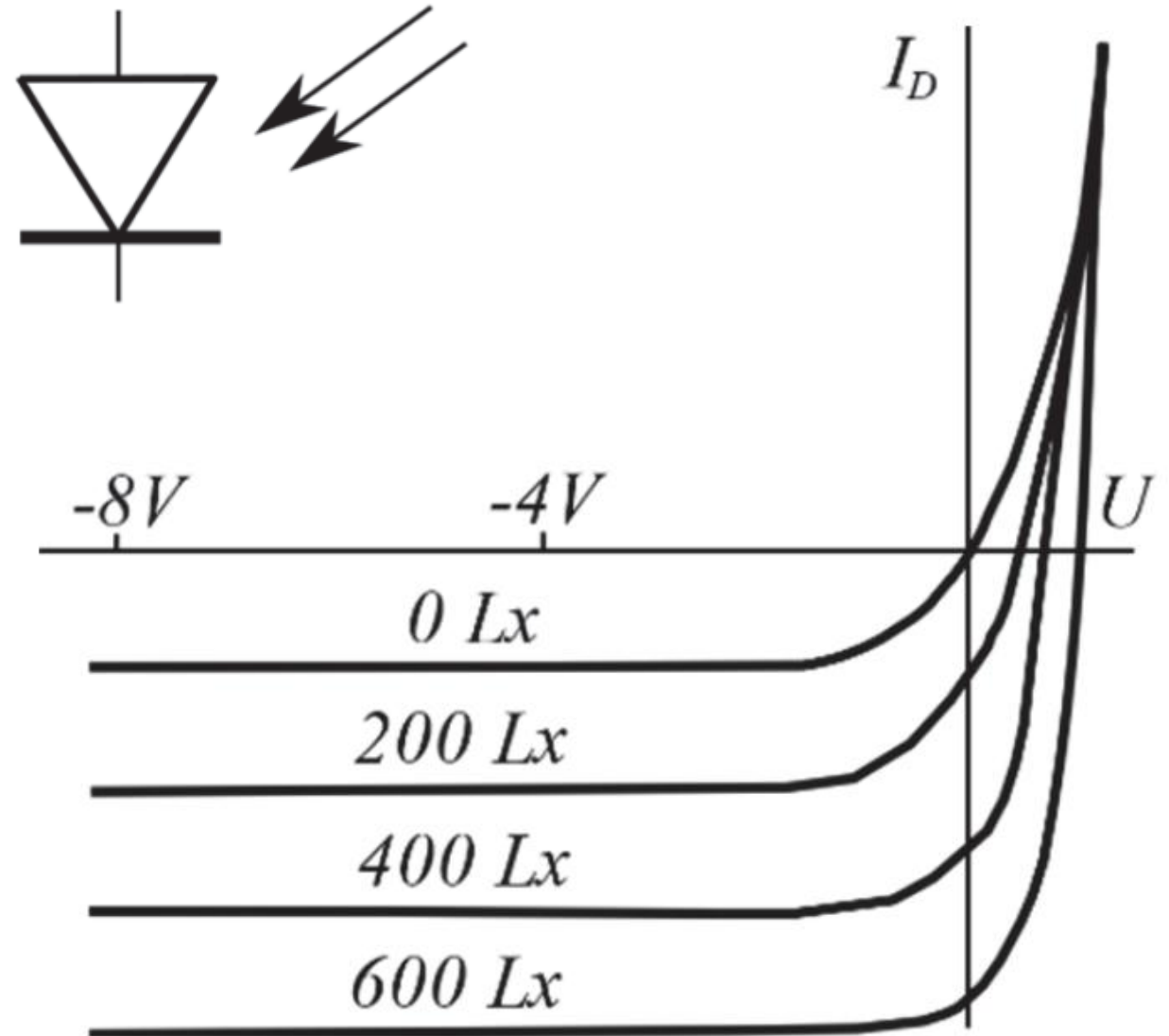
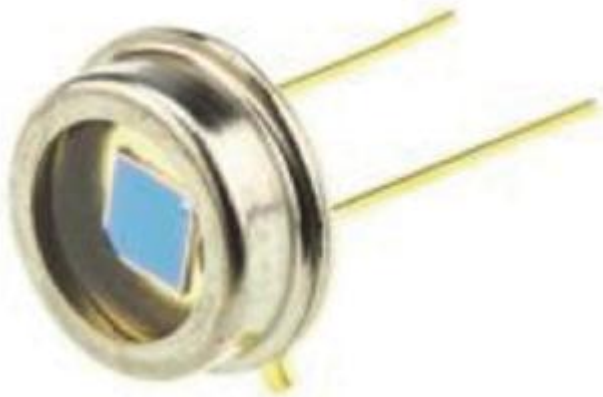
Rzecz jasna, nie istnieje jeden detektor do wszystkiego, ale w większości aplikacji w zupełności wystarczające jest pokrycie pewnego określonego wycinka widma elektromagnetycznego (np. UVA, światło widzialne, bliska podczerwień).



Zanim o fotodetektorach...

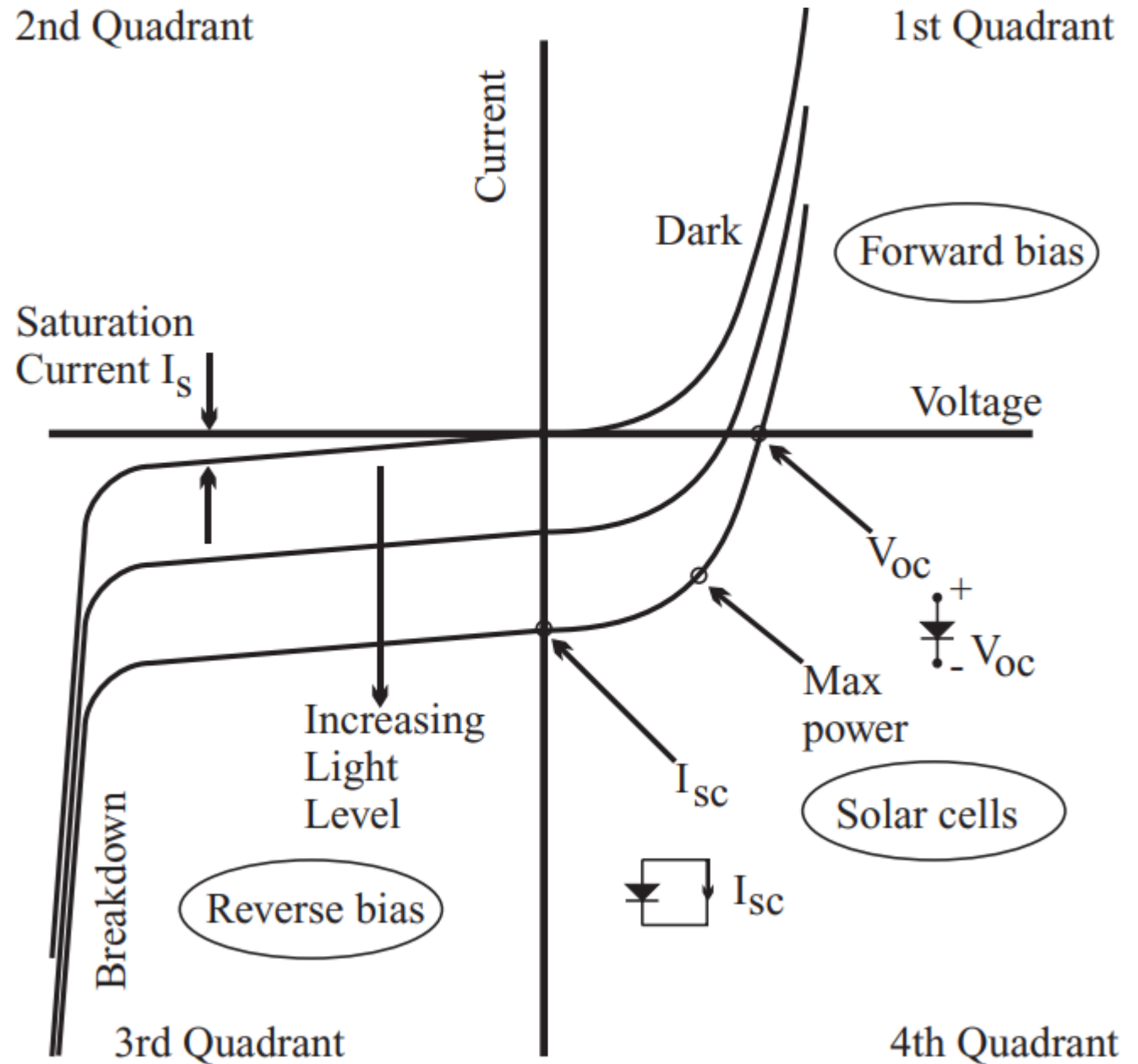
Fotodioda jest diodą, której parametry elektryczne zależą od wartości natężenia padającego światła.

Wykorzystując ogromny zestaw fotodiod, można zbudować panel fotowoltaiczny.

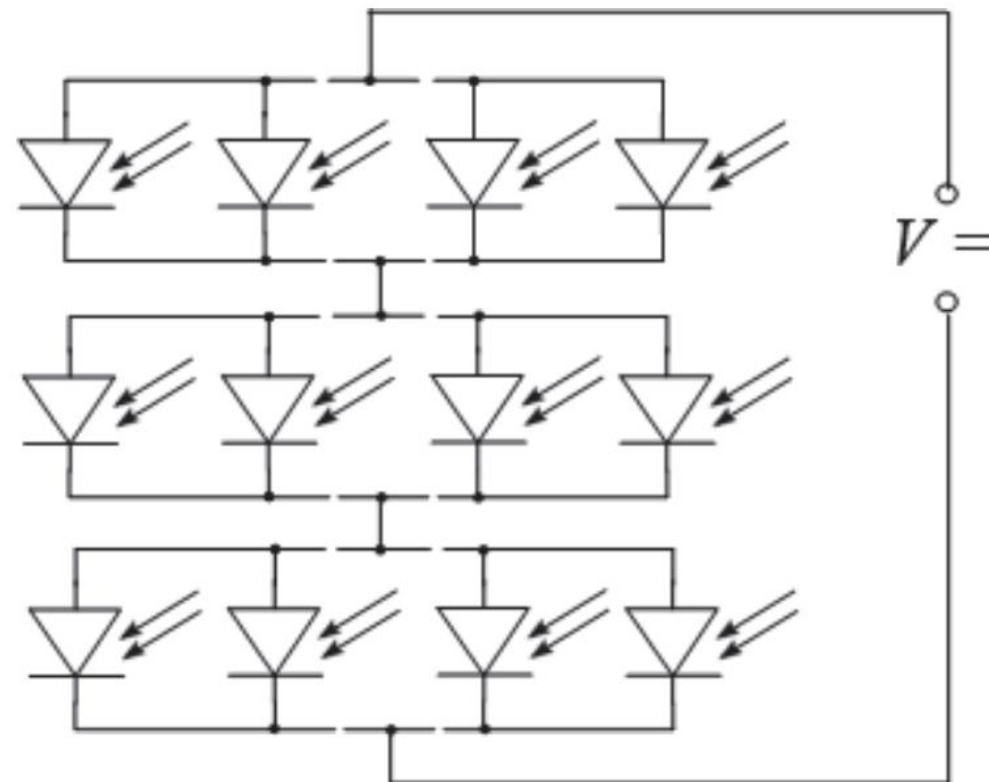
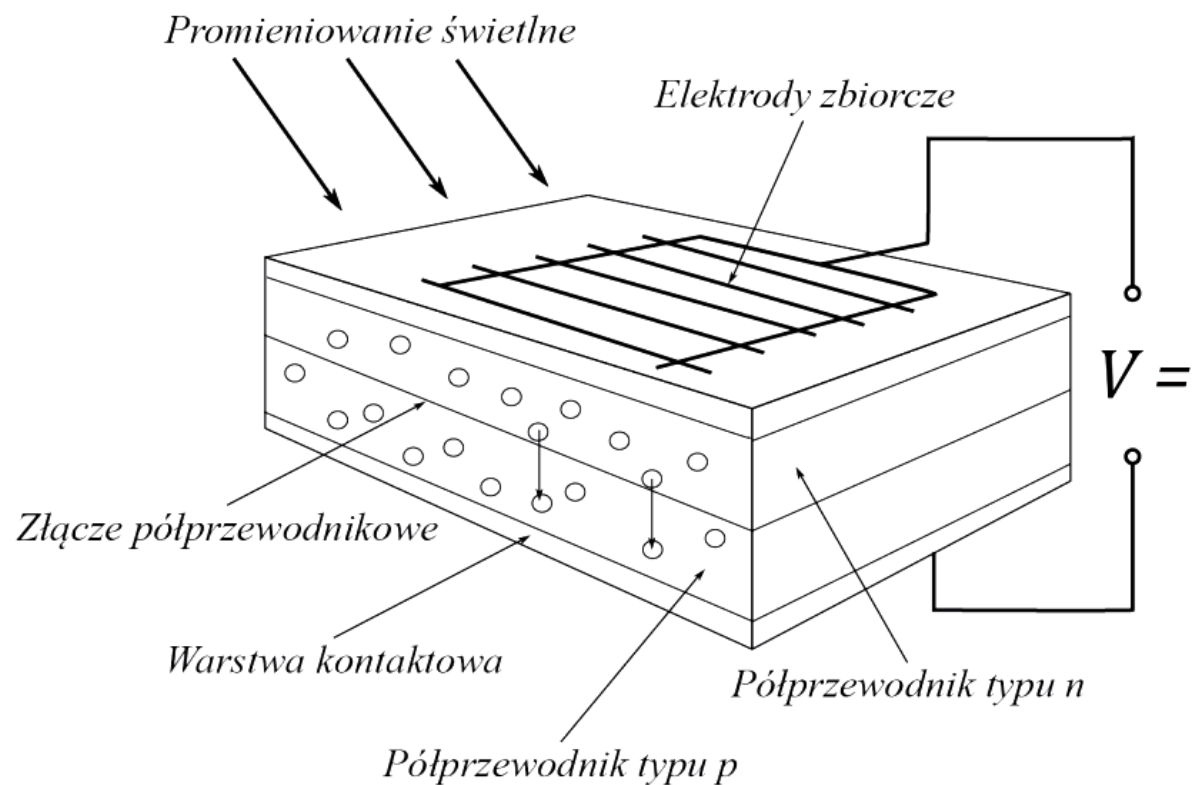


W czwartej ćwiartce charakterystyki fotodiody możemy uzyskać z niej moc.

To właśnie obszar, w którym projektowane są ogniwa słoneczne. Aby uzyskać najwyższą wydajność, powinniśmy zdefiniować punkt pracy poprzez dobór rezystancji obciążenia, aby zmaksymalizować moc.

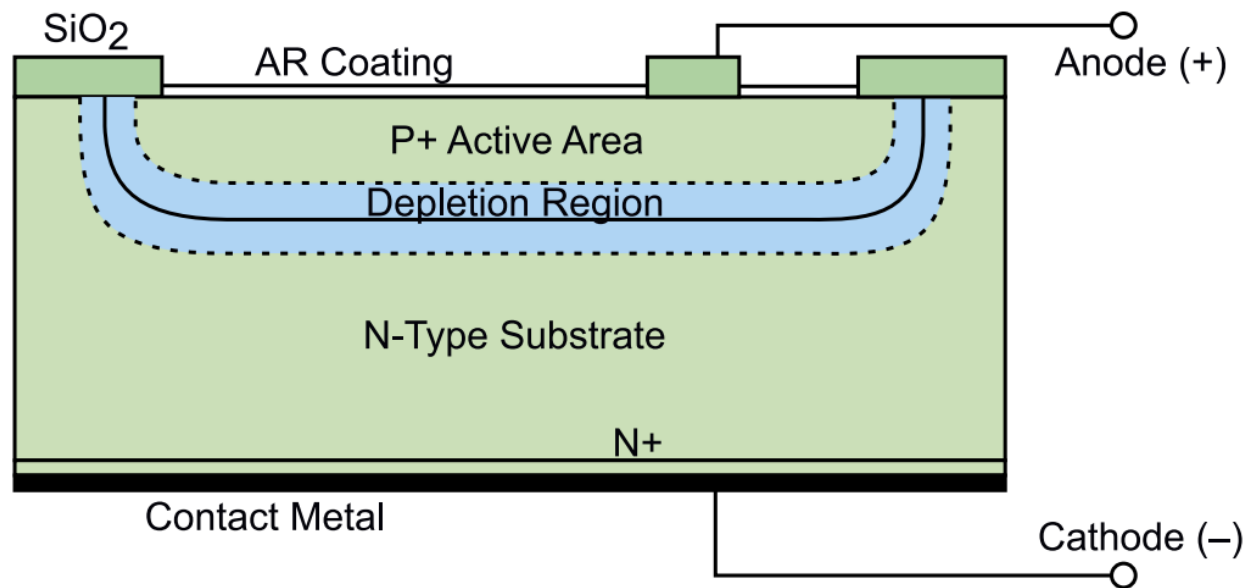


Panel słoneczny to w istocie zestaw fotodiod połączonych równolegle (dla zwiększenia prądu) oraz szeregowo (dla zwiększenia napięcia).

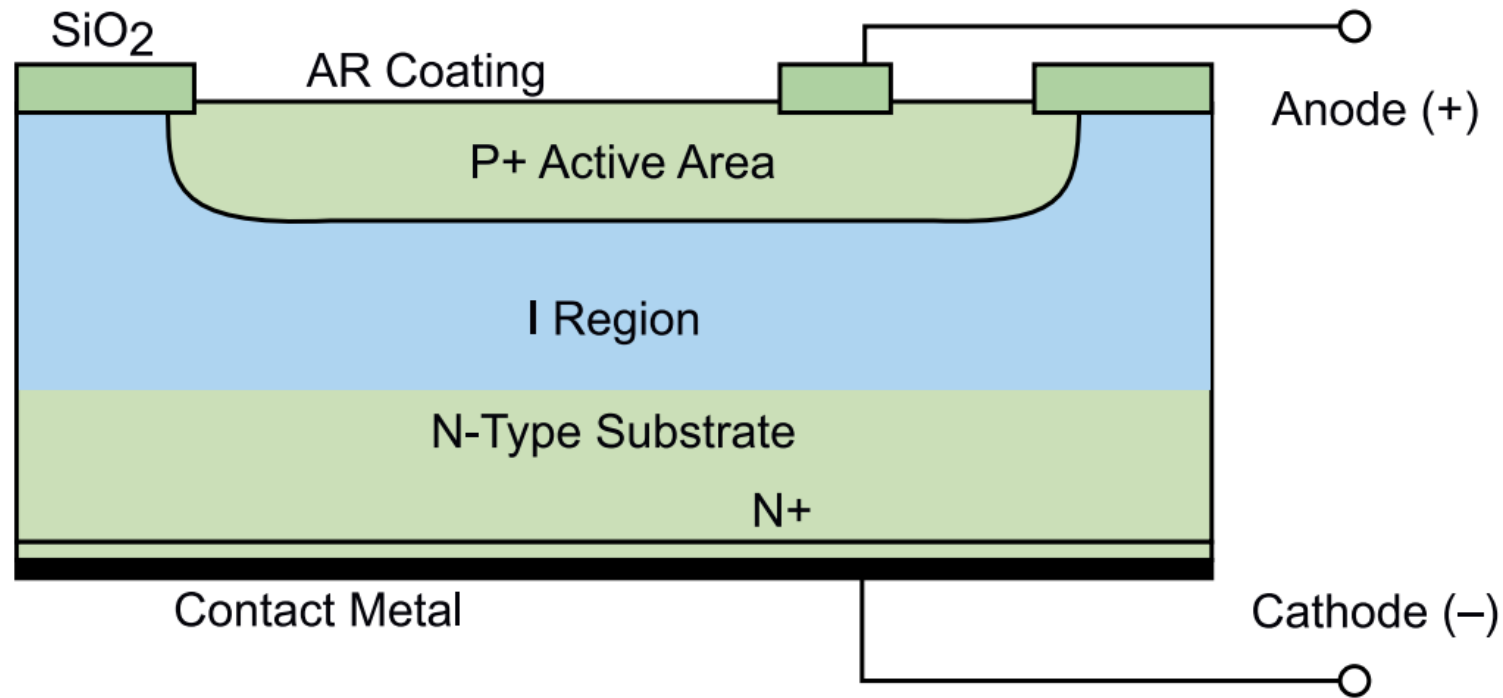


Historycznie najstarsze i jednocześnie najprostsze w budowie są fotodiody typu P-N, bazujące na pojedynczym złączu dwóch przeciwnie domieszkowanych półprzewodników.

Ta struktura dobrze sprawdza się w zastosowaniach fotowoltaicznych, jednak wraz ze wzrostem napięcia zaporowego dość istotnie rośnie jej prąd upływu. Z tego względu zwykłe fotodiody gorzej radzą sobie w klasycznych układach pomiarowych.



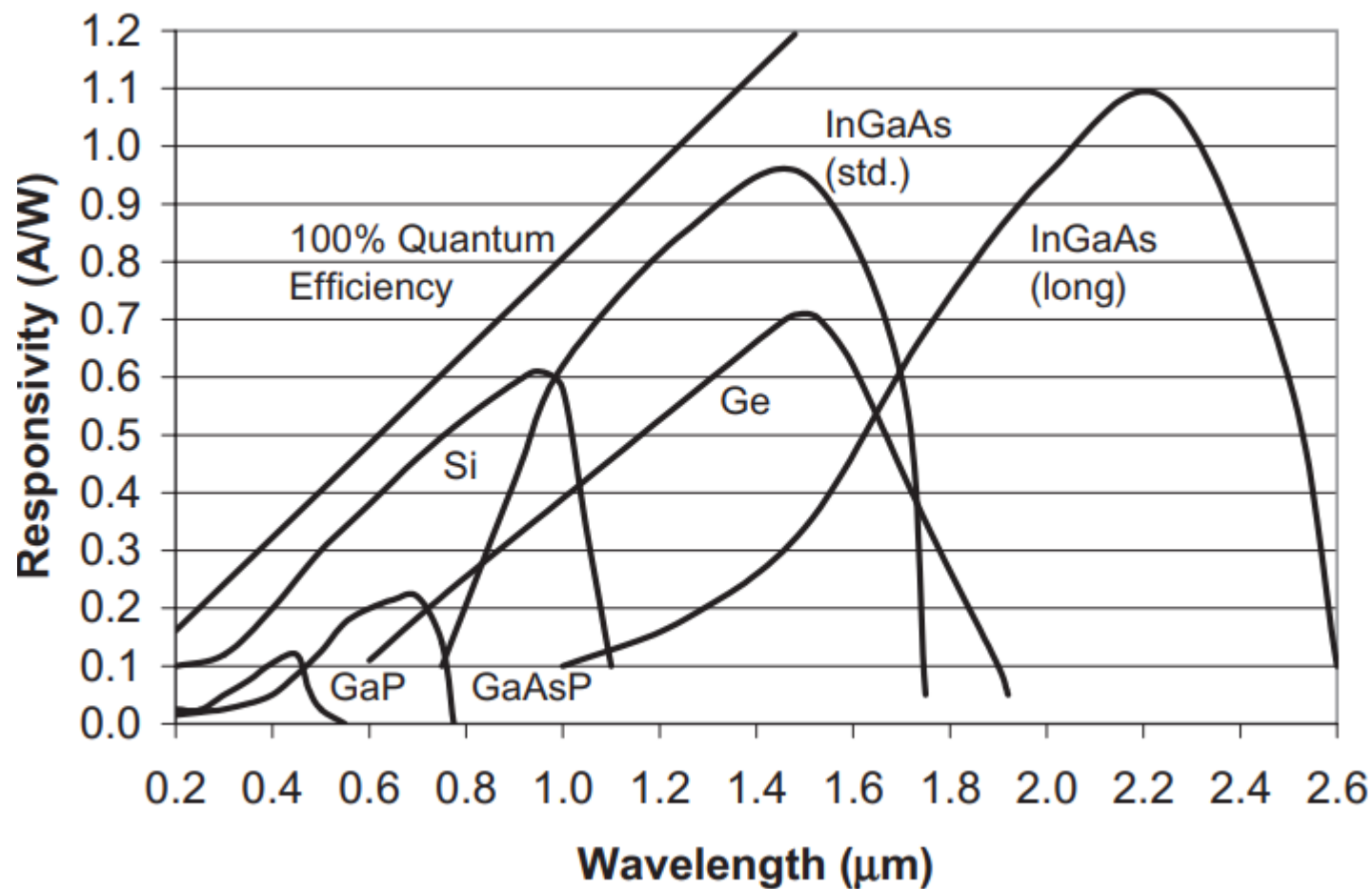
Proste fotodiody P-N zostały w znacznej mierze wyparte przez nowocześniejsze fotodiody PIN, w których obszary przeciwnie domieszkowanego półprzewodnika są przedzielone dość szeroką warstwą półprzewodnika samoistnego lub bardzo słabo domieszkowanego.



Takie rozwiązanie znakomicie poprawia najistotniejsze parametry użytkowe fotodiody – zmniejsza pojemność złącza, co wpływa na wzrost maksymalnej częstotliwości przenoszonych sygnałów i skraca czas reakcji, a dodatkowo (z uwagi na wysoką rezystywność warstwy środkowej) obniża wartość prądu upływu, nawet w warunkach zwiększonego (oczywiście w bezpiecznych dla elementu granicach) napięcia zaporowego.

Warto wspomnieć, że macierze CMOS to w istocie miliony mikroskopijnych fotodiod PIN.

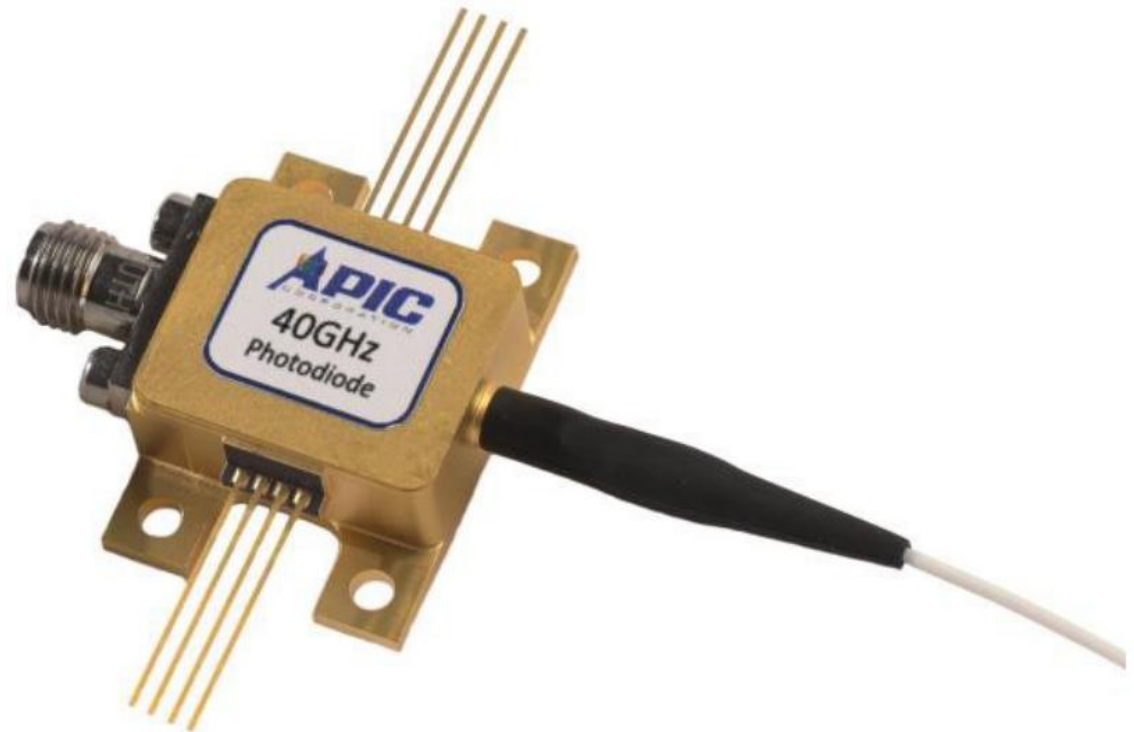
Fotodiody z różnych materiałów półprzewodnikowych wykazują czułość w różnych zakresach długości fal:



100-procentowa wydajność kwantowa oznacza, że jeden foton wytwarza jedną parę dziura-elektron.

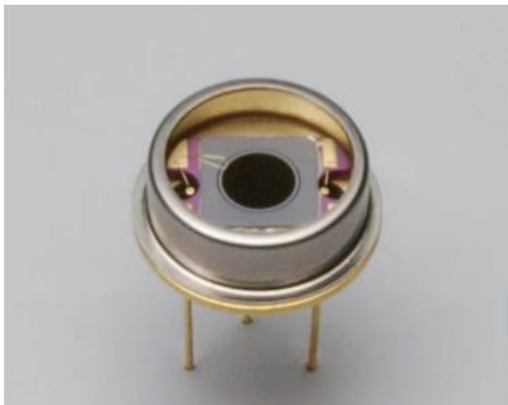
Ultraszybkie fotodiody PIN są szeroko stosowane m.in. w telekomunikacyjnych układach światłowodowych, pracujących z sygnałami o bardzo wysokiej częstotliwości.

Szerokość pasma niektórych modeli, bazujących na arsenku indowo-galowym (InGaAs), dochodzi nawet do 40 GHz.



Fotodiody krzemowe typu PIN są natomiast szeroko stosowane w układach pomiarowych pracujących w paśmie widzialnym oraz bliskiej podczerwieni (a przy zastosowaniu odpowiednich materiałów okna optycznego obudowy – nawet zahaczającym o ultrafiolet, nie tylko z uwagi na dużą szybkość pracy, ale także dobrą wydajność kwantową (ilość generowanych elektronów w stosunku do fotonów odebranych przez detektor) oraz perfekcyjną liniowość.

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

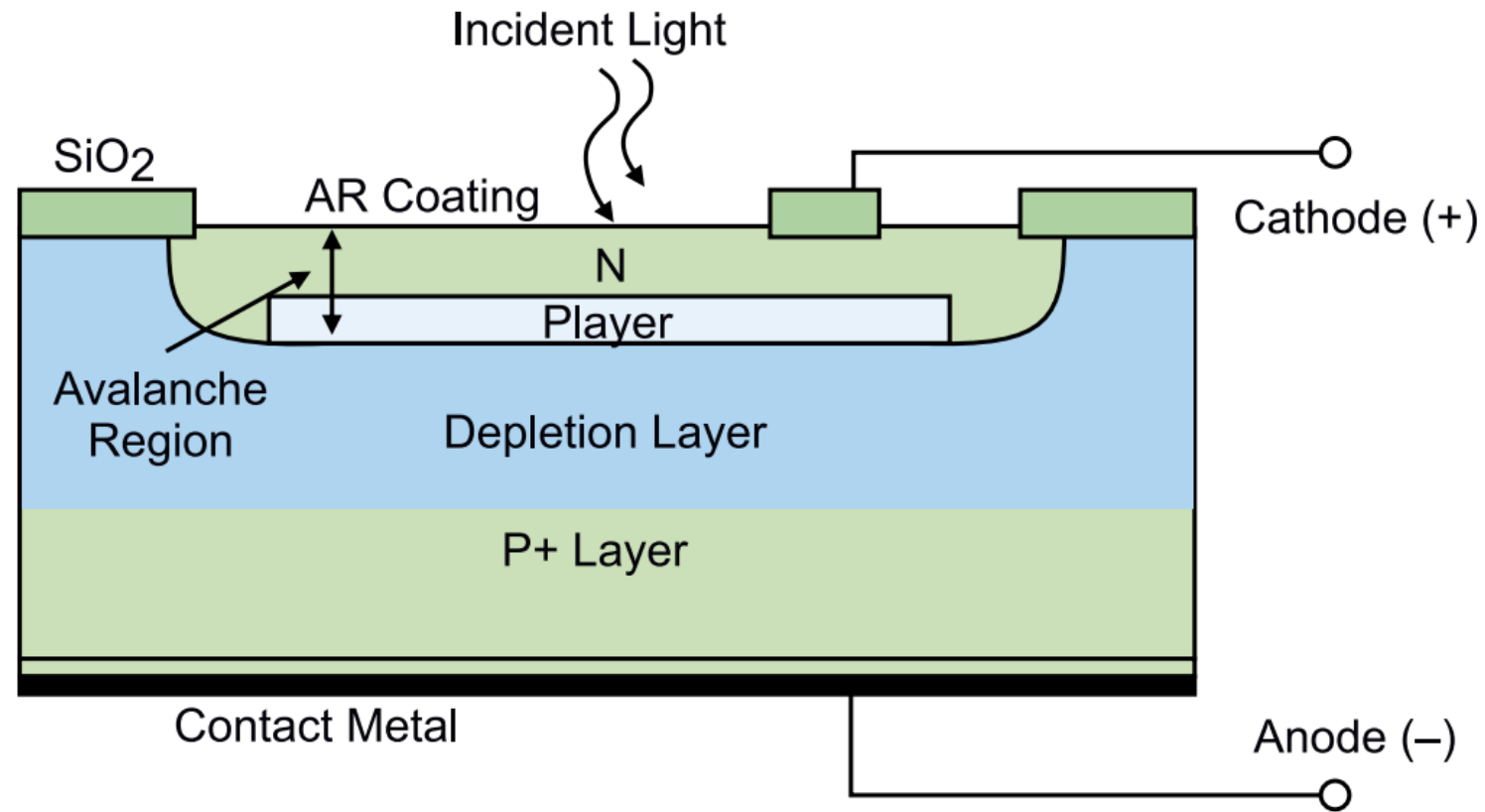


Si PIN photodiode

S12271

Large area, high-speed PIN photodiode for UV to near IR photometry

W zastosowaniach wymagających znacznie większej czułości stosowane są natomiast fotodiody lawinowe APD (*Avalanche PhotoDiode*).



Ich nieco bardziej złożona struktura w porównaniu do fotodiod typu PIN obejmuje dodatkową warstwę półprzewodnika – każda para elektron-dziura, będąca efektem działania fotonu padającego na ów obszar wejściowy w strukturze detektora, staje się źródłem kolejnych par nośników (efekt lawinowy).

Prowadzi to do istotnego wzmocnienia sygnału już wewnątrz fotodiody, choć nie za darmo – fotodiody APD muszą w tym celu pracować z wielokrotnie wyższymi napięciami polaryzacji zaporowej w porównaniu do zwykłych fotodiod PN i PIN (zazwyczaj 100...200 V lub więcej, zależnie od modelu).

Najbardziej czułe fotodiody są w stanie mierzalnie reagować nawet na pojedyncze fotony, przez co elementy te stanowią podstawę urządzeń pracujących z bardzo słabymi sygnałami optycznymi – można je znaleźć m.in. w aparaturze laboratoryjnej (spektrometrach optycznych), dalmierzach i skanerach laserowych (LIDAR) średniego zasięgu, urządzeniach do komunikacji światłowodowej czy też nowoczesnych, scalonych czujnikach ToF (Time-of-Flight).

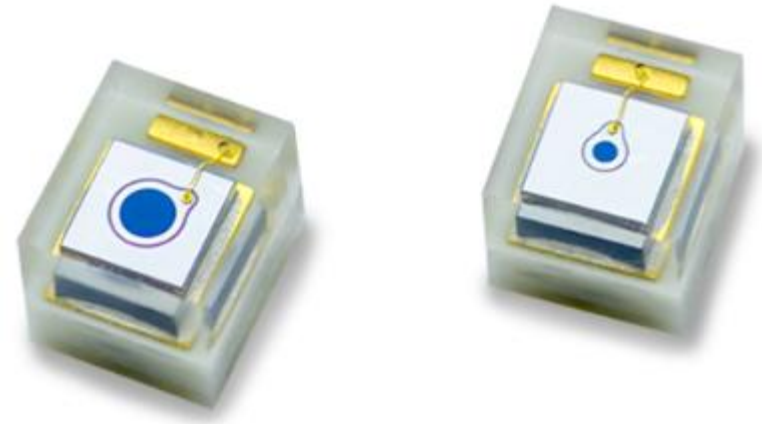
Jakkolwiek APD cechują się wyższym poziomem szumu prądowego w porównaniu do dobrych fotoelementów typu PIN, to w przypadku tak intensywnej odpowiedzi na znikome nawet ilości fotonów można im tę wadę wybaczyć.

Dość powiedzieć, że podczas gdy fotodiody PIN oferują czułość na poziomie poniżej 1 A/W, to w przypadku fotodiod lawinowych wartość ta plasuje się na poziomie kilkudziesięciu A/W – nieco silniejszy szum tła zazwyczaj nie stanowi więc dużego problemu.

W detekcji słabych sygnałów granicą czułości często nie jest sam detektor, lecz szum wzmacniacza i rezystora sprzężenia zwrotnego.

Fotodiody lawinowe wprawdzie nie należą do elementów najtańszych, ale są dostępne w relatywnie przystępnych cenach (w stosunku do oferowanych możliwości) i nierzadko zaskakująco kompaktowych rozmiarach, jak choćby detektory z serii C30737MH w obudowach SMD o wymiarze 1,75×2,0 mm.

W tym przypadku cena detaliczna nie przekracza kilkudziesięciu złotych za sztukę.



Z drugiej strony, w ofercie tego samego producenta (Excelitas Technologies) można znaleźć hybrydowe detektory lawinowe z wbudowanym wzmacniaczem (seria C30659), oferujące pasmo dochodzące do 200 MHz i wyjście 50 Ω .

Ich cena wynosi ponad 5000 złotych/szt...



Osobną grupę stanowią fotodiody Schottky'ego – ich niewielkie i bardzo szybkie (zdolne do pracy w paśmie wielu GHz) struktury opierają się na złączu półprzewodnika (np. AlGaN) z metalem i są czułe szczególnie na promieniowanie o mniejszej długości fali.

Liniowa odpowiedź, mierzona przyrostem prądu w funkcji natężenia padającego światła UV sprawia, że doskonale nadają się m.in. do pomiaru wskaźnika promieniowania nadfioletowego.



Podsumujmy...

Element	Czułość	Szybkość	Liniowość
Fotorezystor	+++	-	-
Fototranzystor	++	+	+-
PIN	+	+++	+++
APD	++++	++	++

Nie istnieje jeden najlepszy fotoelement – istnieje tylko element najlepiej dopasowany do konkretnego zadania.

Element	Typowy tor sygnałowy	Typowe zastosowanie
Fotorezystor	Dzielnik napięcia	Wyłączniki zmierzchowe, proste czujniki światła
Fototranzystor	Rezystor / wzmacniacz transimpedancyjny	Enkodery, transoptory, czujniki obecności
PIN	Wzmacniacz transimpedancyjny	Układy pomiarowe, światłowody, czujniki precyzyjne
APD	Wzmacniacz transimpedancyjny + wysokie napięcie	Bardzo słabe sygnały, LIDAR, ToF, spektrometria

Dziękuję za uwagę