

CZUJNIKI WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

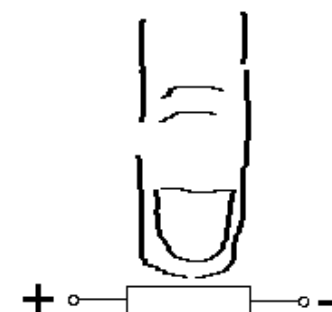
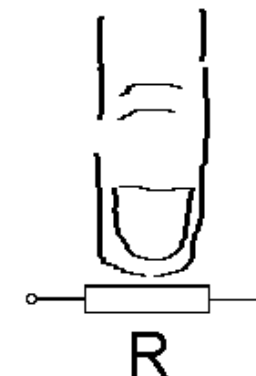
Rozważmy tylko takie czujniki, które nie zawierają żadnych części ruchomych. Zasadniczo, wyróżnia się dwa rodzaje czujników wielkości nieelektrycznych.

Pierwszy rodzaj, to elementy (dwójniki), które zmieniają swoje właściwości elektryczne pod wpływem danej wielkości fizycznej. Przeważnie zmieniającą się własnością elektryczną jest rezystywność. W tej grupie można wymienić czujniki następujących wielkości:

- temperatury – termorezystory metalowe i półprzewodnikowe
- promieniowania elektromagnetycznego – fotorezystory,
- pola magnetycznego – magnetorezystory czyli gaussotrony,
- siły (ciśnienia, naprężenia), ogólnie zwane tensometrami – tensometry metalowe i półprzewodnikowe (piezorezystywne).

Inny rodzaj czujników to takie, które zamieniają daną wielkość fizyczną na sygnał elektryczny np. na napięcie:

- czujniki temperatury – termoelementy (termopary), czujniki z tranzystorem bipolarnym,
- promieniowania elektromagnetycznego – fotodiody,
- pola magnetycznego – hallotrony,
- siły (ciśnienie, naprężenia) – tensometry piezoelektryczne.



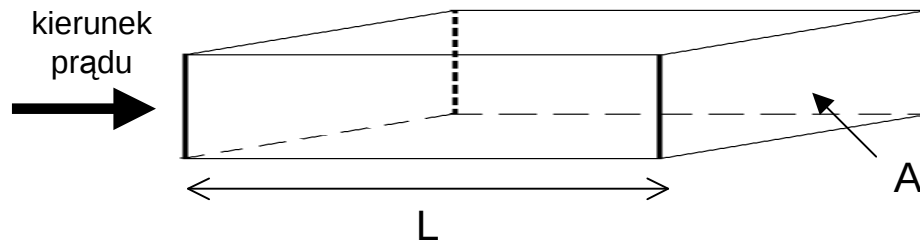
Pojęcia wstępne - rezystywność

Stwierdzono, że opór elektryczny materiału o kształcie prostopadłościanu (lub walca) jest wprost proporcjonalny do jego długości L i odwrotnie proporcjonalny do pola powierzchni bocznej A . Ponadto zauważono, że jeśli stosunek L/A jest stały, to opór nie zmienia się.

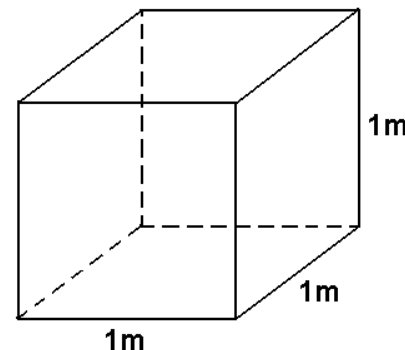
Biorąc pod uwagę powyższe obserwacje, opór elektryczny (rezystancję) bryły materiału można wyrazić wzorem:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Współczynnik proporcjonalności ρ nazwano **oporem właściwym** materiału.

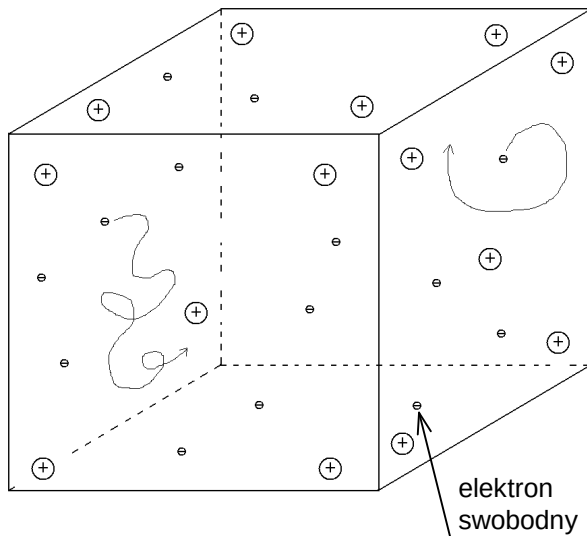


Def.: Rezystywność materiału, nazywana też **oporem właściwym** materiału – jest to opór kostki sześciennej tego materiału o wymiarach $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$. Oznaczana jest literą ρ (rho) i jest w jednostkach $[\Omega \cdot \text{m}]$.

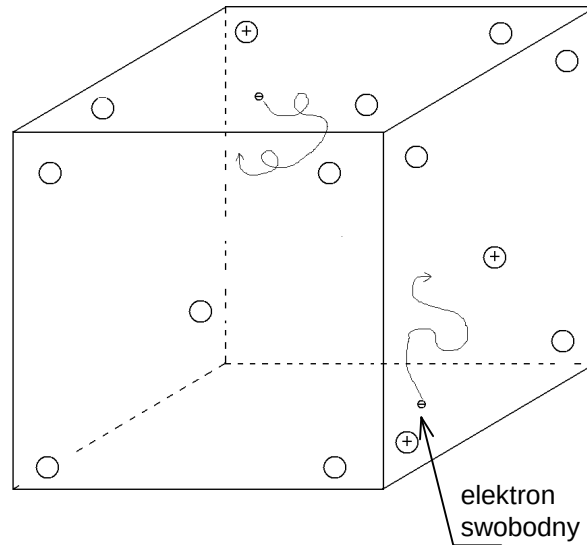


Pojęcia wstępne - półprzewodnik

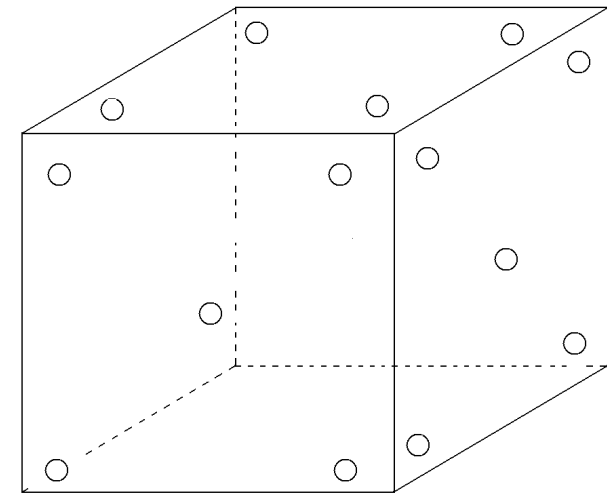
Aby zrozumieć działanie czujników musimy najpierw omówić właściwości półprzewodników.



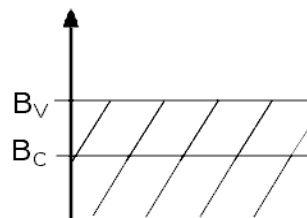
Przewodnik np. metal
 $T_1 \geq 0 \text{ K}$



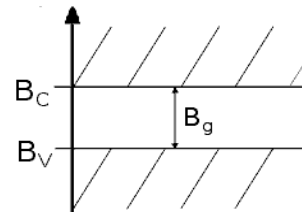
Półprzewodnik samoistny
 $T_1 > 0 \text{ K}$



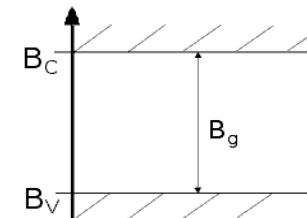
Izolator
 $T_1 > 0 \text{ K}$



$B_g = 0$
metal



$0.1 \text{ eV} < B_g < \sim 3 \text{ eV}$
półprzewodnik

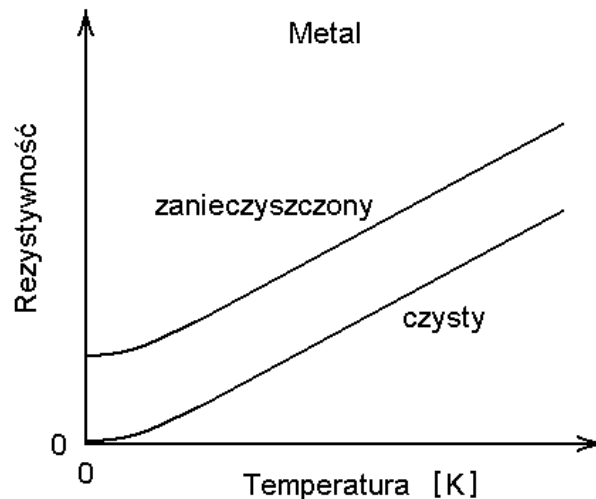


$B_g > 3 \text{ eV}$
izolator

B_C - pasmo przewodnictwa (conduction band)
 B_g - przerwa zabroniona (band gap)
 B_V - pasmo walencyjne (valence band)

$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}, \quad 1 \text{ J} \approx 6.2 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

Pojęcia wstępne - półprzewodnik



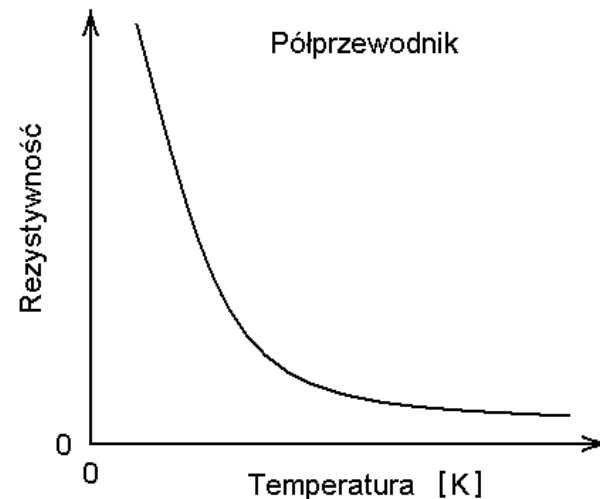
Można przyjąć, że w temperaturach $T > 300\text{K}$ obowiązuje zależność:

$$\rho(T) = \rho_i + \alpha \cdot T$$

natomiast w temperaturach bardzo niskich:

$$\rho(T) = \rho_i + \alpha \cdot T^5$$

ρ_i – rezystancja reszkowa, która zależy głównie od obcych atomów



Rezystywność półprzewodnika samoistnego:

$$\rho(T) = \rho_{\infty} \cdot \exp\left(-\frac{W_g}{2k \cdot T}\right)$$

W_g – szerokość pasma zabronionego (szerokość przerwy energetycznej). Dla krzemu wynosi $\approx 1.1\text{eV}$, dla germanu $\approx 0.7\text{eV}$.

k – stała Boltzmana.

Podsumowując, wpływ temperatury na rezystywność jest dużo silniejszy w przypadku półprzewodników niż w przypadku metali. Ponadto kierunek (znak) zmian rezystywności jest inny.

Termorezystory

Termorezystory można podzielić na dwie grupy:

- **termorezystory metalowe** – inaczej nazywane rezystory termometryczne lub w skrócie RTD. Wykonuje się je np. z platyny, niklu, miedzi. Pomiary w zakresie $273\div 1000^{\circ}\text{C}$. Są typu PTC (ang. *positive temperature coefficient*), czyli posiadają dodatki współczynnik temperaturowy.
- **termorezystory półprzewodnikowe** – inaczej nazywane **termistory**. Pomiary w zakresie $273\div 250^{\circ}\text{C}$. Są w większości typu NTC (ang. *negative temperature coefficient*). Wykonuje się je z polikrystalicznych materiałów półprzewodnikowych. Są to zazwyczaj mieszaniny sproszkowanych tlenków takich metali jak żelazo, mangan, chrom, nikiel (mieszanin TiO_2 i MgO , tlenków Mn , Co , Cu i Ni , Fe_2O_3 i MgAl_2O_4 , MgCr_2O_4 i in., a również z syntetycznych diamentów). Żadziej spotyka się termistory typu PTC, które wykonuje się np. z tytanianu baru z domieszkami bizmutu, antymonu, lantanu.



Tensometry metalowe

Tensometr metalowy jest to (w uproszczeniu) płaski i bardzo cienki odcinek folii metalowej lub bardzo cienki drut. Jest naklejany specjalnym klejem na elementy konstrukcji mechanicznych, poddawanych naprężeniom. Do celów pomiarowych wykorzystuje się zmianę rezystancji drutu pod wpływem rozciągania w granicach odkształceń sprężystych, tj. po usunięciu naprężenia drut wraca do poprzedniej długości.

Rezystancję R drutu można wyrazić wzorem:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

ρ – rezystywność materiału drutu (parametr stały),

L – długość drutu,

A – pole przekroju drutu.

Charakterystyka rozciągania drutu, w granicach deformacji sprężystych (prawo Hooke'a):

$$E \cdot \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{A}$$

F/A – naprężenie jednostkowe zależne od siły naciągu F i przekroju drutu A ,

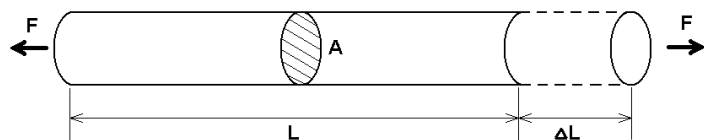
$\Delta L/L$ – wydłużenie jednostkowe (deformacja);

E – moduł sprężystości wzdłużnej (moduł Younga).

Wykonując przekształcenia matematyczne, otrzymuje się zależność zmian rezystancji drutu od jego wydłużenia:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_t \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

k_t – czułość tensometru; dla metalowego wynosi 2÷3, dla półprzewodnikowego jest 20 ÷ 100 razy większa.



Tensometry półprzewodnikowe piezorezystywne

W przewodniku poddanym działaniu sił występują naprężenia w kierunku działania siły, zmiany wymiarów geometrycznych oraz własności elektrycznych. Zmiany wymiarów geometrycznych wyrażają się zmianą długości i pola przekroju poprzecznego. Wynikiem tych zmian jest zmiana rezystancji przewodnika.

W przypadku półprzewodników naprężenia mogą spowodować zmiany siatki krystalicznej i rezystywności kryształu. Zjawisko to znane jest pod nazwą **piezorezystywności**. W zjawisku tym zmiany geometryczne nie odgrywają większej roli, ponieważ o zmianie rezystancji decyduje zmiana rezystywności.

Podczas
odkształcenia

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Stałe dla metalu
(przewodnika)

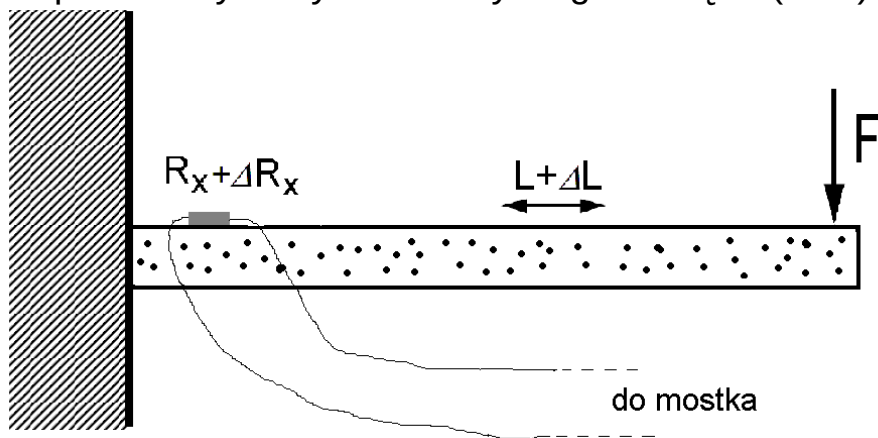
$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Zmienne dla
półprzewodnika



Tensometr przykład

Tensometr naklejono na belkę stalową. Czułość tensometru $k_t = 2$. Zaprojektuj mostek pomiarowy czuły na zmiany długości rzędu $(\Delta L/L) \approx 1\text{mm}/1\text{m}$



Względna zmiana rezystancji tensometru wynosi:

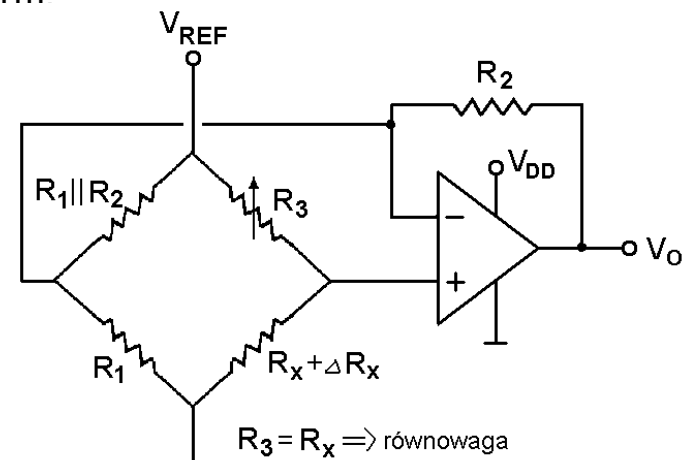
$$(\Delta R_x / R_x) = k_t \cdot (\Delta L / L)$$

Stąd, napięcie wyjściowe mostka pomiarowego wynosi:

$$V_o \cong k_t \frac{\Delta L}{L} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{U_{REF}}{2}$$

Posiadamy wzmacniacz operacyjny z wyjściem i wejściem typu rail-to rail i na napięcie zasilania 10V. Można więc przyjąć napięcie $U_{REF} = 10\text{V}$. Weźmy $R_2 = 19\text{k}$ i $R_1 = 1\text{k}$. Mamy więc:

$$V_o \cong 2 \frac{\Delta L}{L} \cdot \left(1 + \frac{19\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega}\right) \cdot \frac{10\text{V}}{2} = 200 \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad [\text{V}]$$



Mostek aktywny.

$$V_o \cong \frac{\Delta R_x}{R_x} \cdot \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}_{\text{Czułość mostka}} \cdot \frac{U_{REF}}{2}$$

Przy zasilaniu asymetrycznym, napięcie V_o nie może być mniejsze od 0V i większe od V_{DD} .

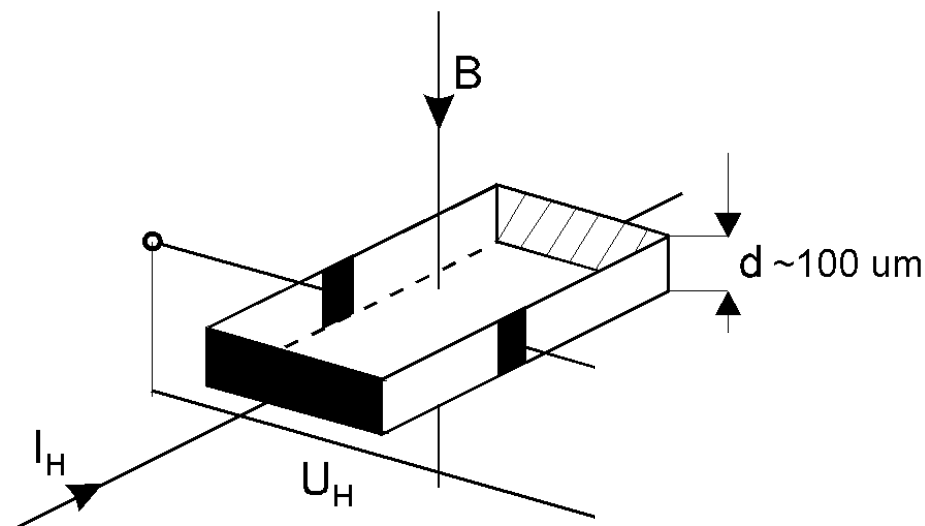
Dyskusja: czy czułość mostka jest wystarczająca?

Hallotron

Hallotron jest cienką płytką mono- lub polikrystaliczną w postaci prostopadłościanu wykonanego z półprzewodnika typu n. Czujniki mają wymiary rzędu milimetrów, ich grubość jest rzędu 100 mikrometrów.

Na poruszające się w płytce elektrony działa pole magnetyczne z siłą Lorentza, powodując skręcenie ich drogi w kierunku jednej z bocznych ścianek. Pojawi się tam ładunek ujemny, a po przeciwnej stronie płytki ładunek dodatni. W miarę wzrostu ładunków wzrasta natężenie pola elektrycznego między ściankami do takiej wartości, przy której siła pochodząca od pola elektrycznego zrównoważy siłę od pola magnetycznego. Ustanie wówczas przepływ elektronów w kierunku prostopadłym do kierunku prądu I_H i pola B , a między ściankami bocznymi ustali się różnica potencjałów U_H , nazywana napięciem Halla.

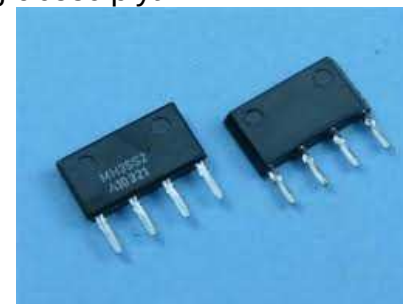
Uzyskiwane napięcia U_H wynoszą kilka miliwoltów, dochodzą do setek miliwoltów i zależą od wartości prądu zasilającego I_H .



B - wektor indukcji magnetycznej; d - grubość płytki czujnika; I_H - prąd zasilający hallotron

$$U_H = R_H \cdot \underbrace{\frac{1}{d}}_{\text{czułość Hallotronu}} \cdot I_H \cdot B$$

R_H – współczynnik Halla. Zależy od materiału i jego czystości, temperatury.



Hallotron

Istotną zaletą hallotronów jest możliwość zintegrowania z innymi układami elektronicznymi w jednym układzie scalonym (np. ze wzmacniaczem operacyjnym, korektorem, koncentratorem strumienia). Prawdopodobnie najważniejszą zaletą hallotyonu są jego małe wymiary, co pozwala na „nieinwazyjne” pomiary.

Zastosowanie:

badanie położenia elementów ruchomych np. w silnikach spalinowych

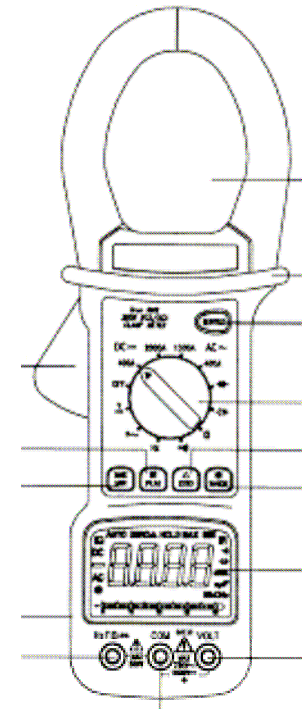
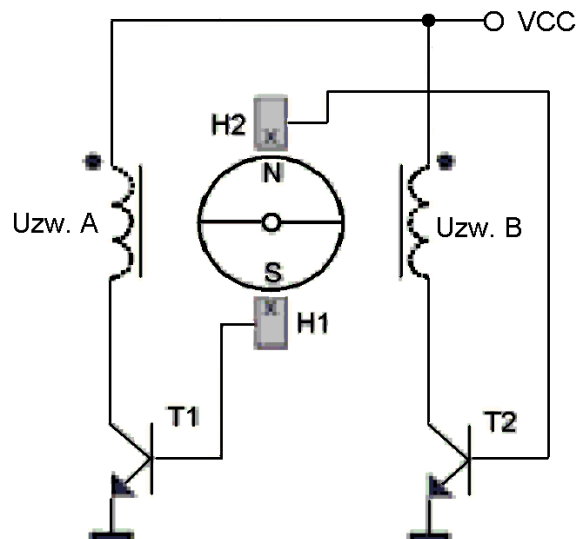
bezinwazyjny pomiar prądu stałego i zmiennego w przewodniku

badanie drgań elementów

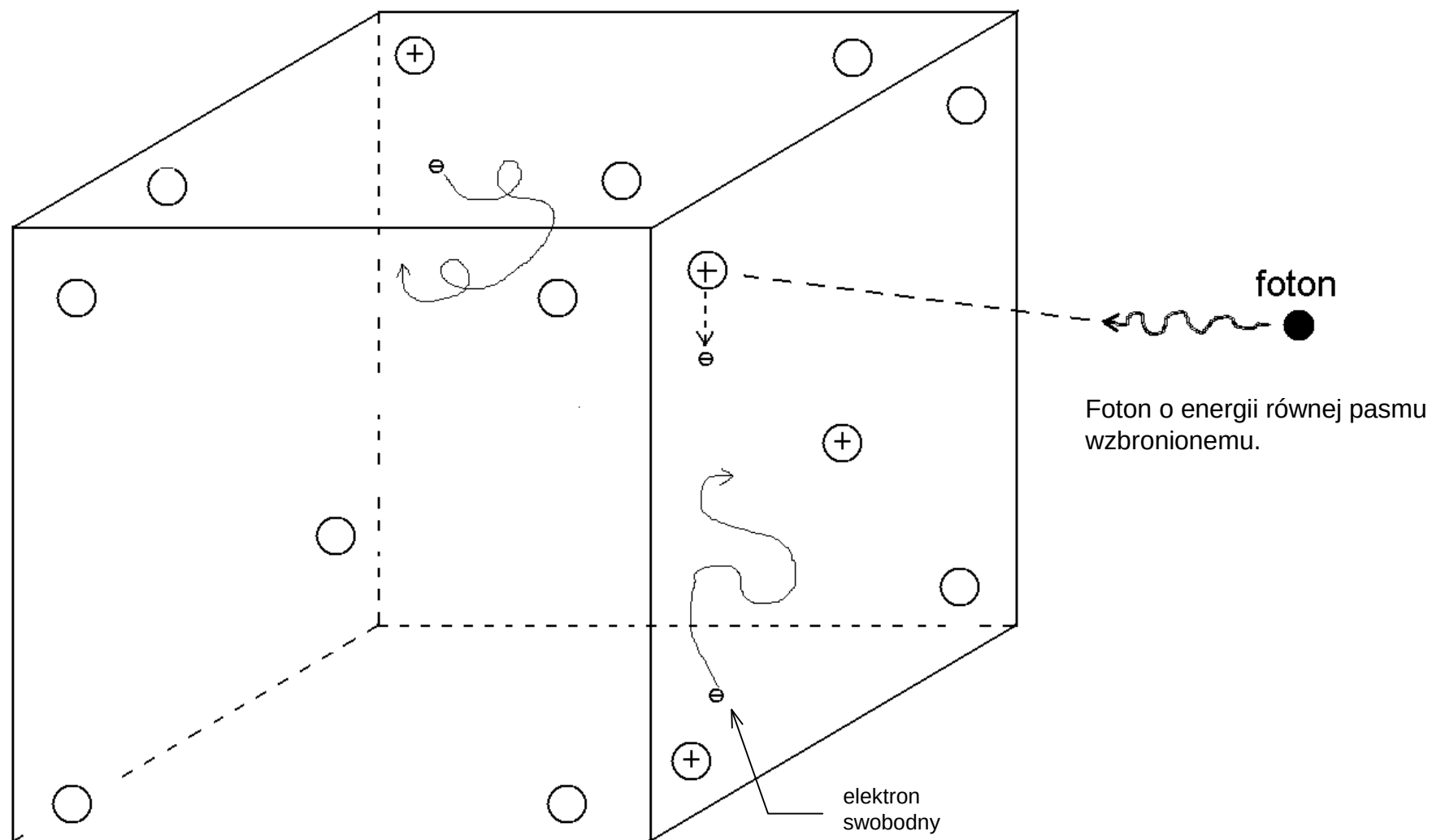
pomiar szybkości obrotowej

w bezszczotkowych silnikach prądu stałego

itd



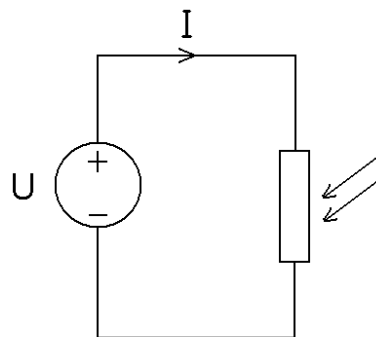
Fotorezystor – zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne



Półprzewodnik samoistny
 $T_1 > 0\text{ K}$

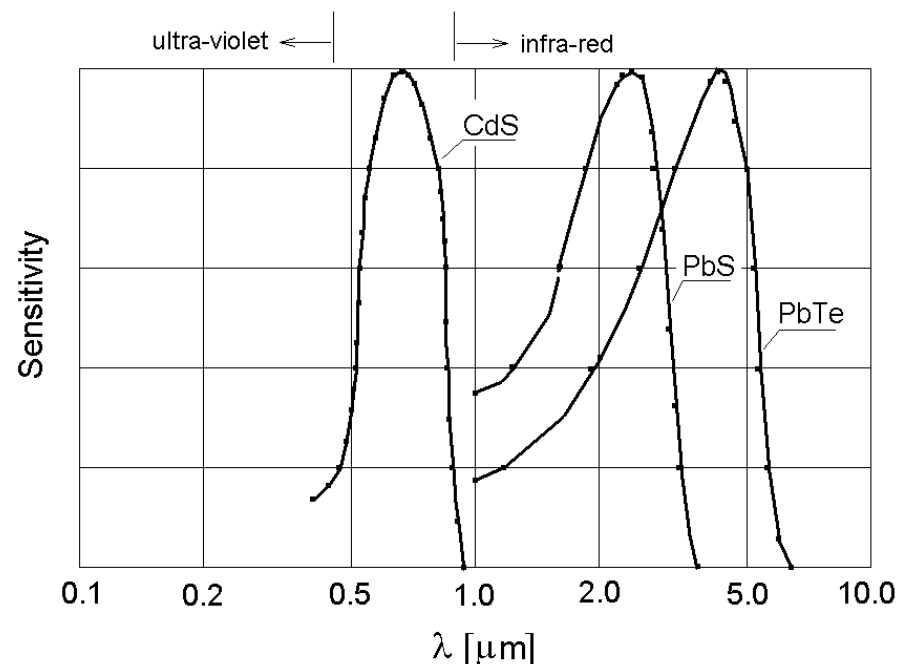
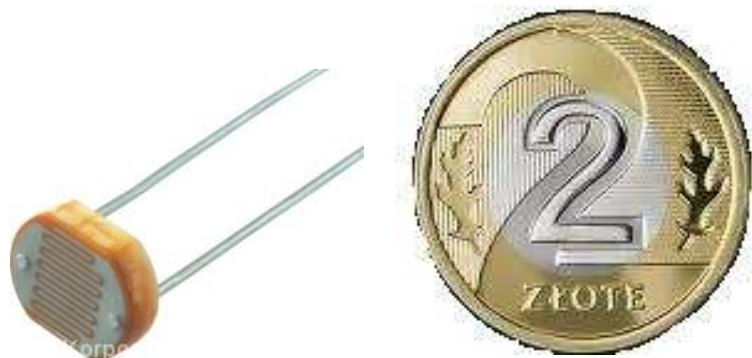
Fotorezystor

Fotorezystor jest elementem, którego rezystancja zależy od natężenia padającego światła (inną kwestią jest długość fali). Przy ustalonym natężeniu oświetlenia ma cechy zwykłego rezystora, to znaczy spełnia prawo Ohma. Część czynną fotorezystora stanowi próbka półprzewodnika umieszczona w obudowie zawierającej okienko, przez które może padać promieniowanie. Najbardziej rozpowszechnionymi materiałami używanymi do wytwarzania fotorezystorów są: siarczki kadmu CdS, selenki kadmu CdSe, siarczki ołowiu PbS i tellurek ołowiu PbTe. (źródło W. Janke „Elementy elektroniczne” Gdańsk PG 1980).



Czułość prądowa fotorezystora jest to stosunek przyrostu prądu ΔI do wywołującego go przyrostu natężenia oświetlenia $\Delta \Phi$, przy ustalonym napięciu:

$$S_I = \left. \frac{\Delta I}{\Delta \Phi} \right|_{U=\text{const}}$$



Fotorezystor

wady i zalety

Duża czułość fotorezystora stanowi istotną zaletę tego elementu w porównaniu z innymi detektorami promieniowania. Zaletą jest również symetria charakterystyki prądowo-napięciowej względem początku układu współrzędnych.

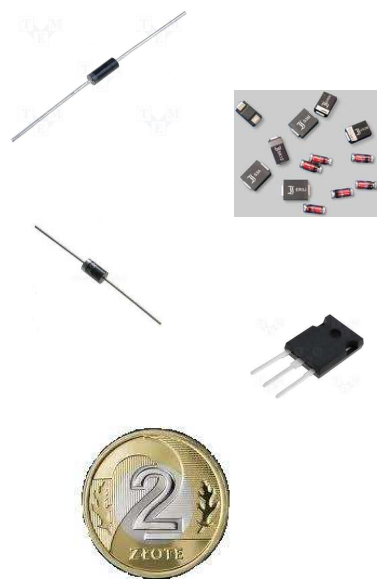
Głównymi wadami fotorezystorów są – ograniczony od góry zakres temperatur pracy (typowo do 75°C) oraz mała szybkość działania uniemożliwiająca zastosowanie do detekcji zmian oświetlenia o częstotliwości przekraczającej 1 kHz. (źródło W. Janke „Elementy elektroniczne” Gdańsk PG 1980).

Poszukajmy więc element pozbawiony wymienionych wad.

Fotodioda – dioda trochę inna

Aby przejść do omawiania fotodiody, musimy najpierw omówić działanie diody.

Diody małej mocy

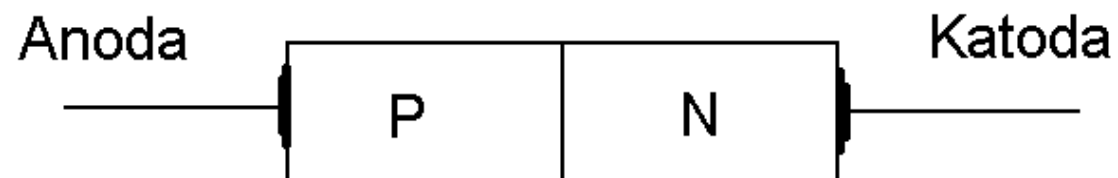


Diody dużej mocy

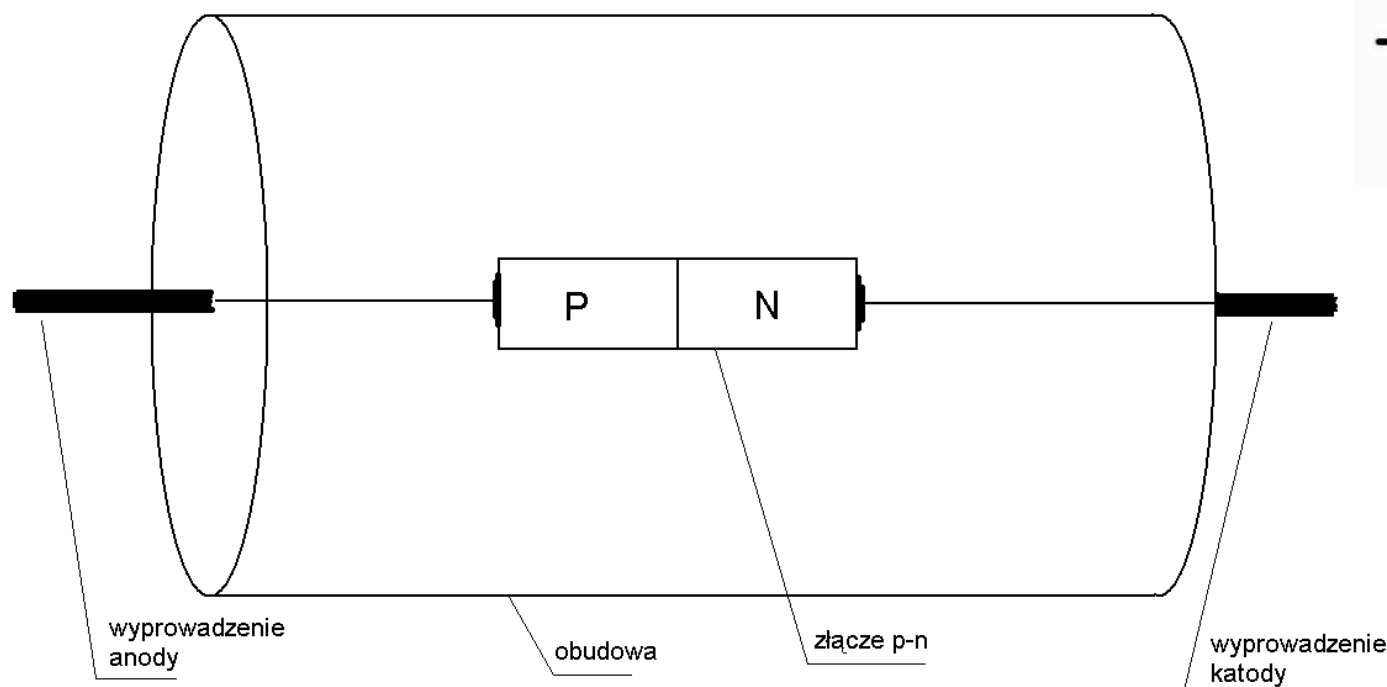
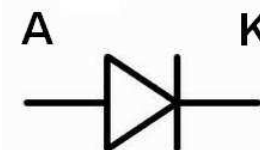


Rys: Prof. dr hab. inż. M. Polowczyk

Dioda złącze półprzewodnikowe

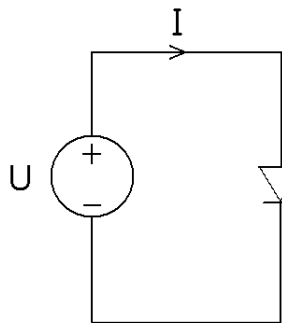


Symbol diody



Dioda

W przybliżeniu pierwszego stopnia prąd diody wyraża się wzorem:



$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{n \cdot V_T}} - 1 \right)$$

gdzie:

I_S – prąd nasycenia złącza (typowo rzędu pA, nA)

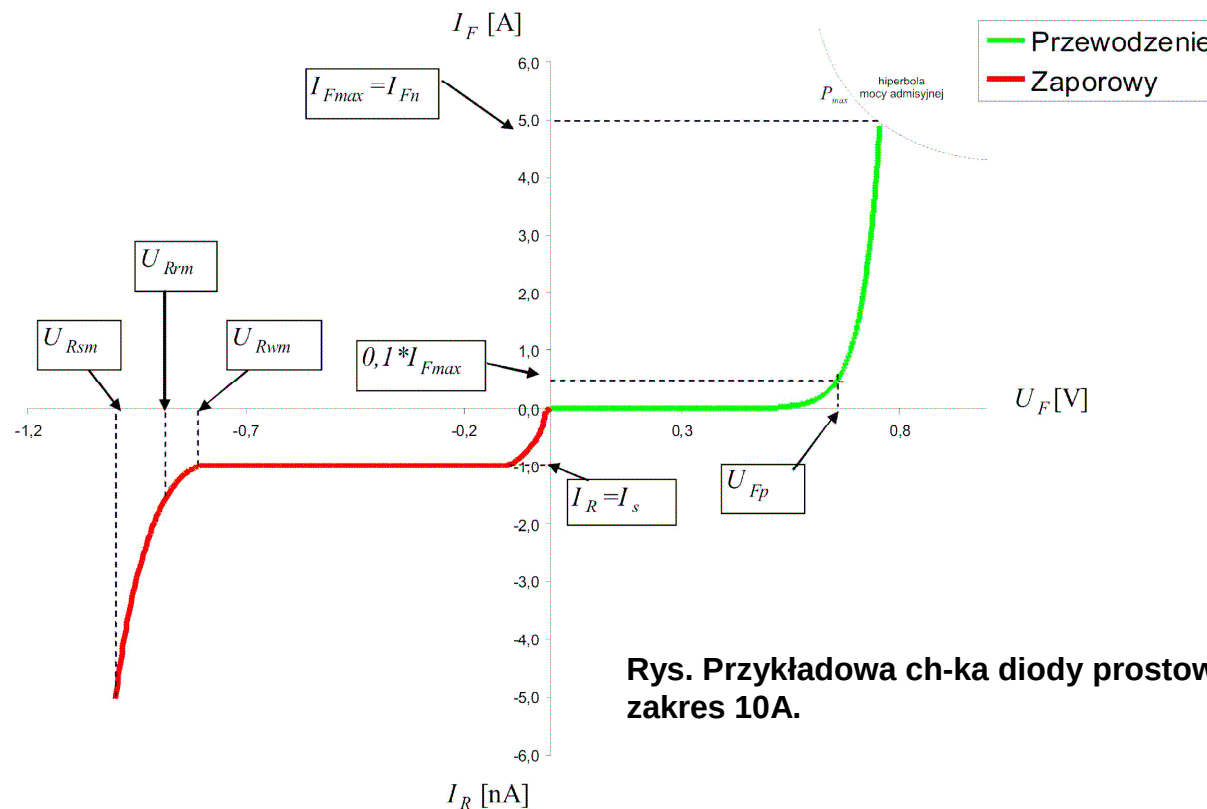
V_T – potencjał elektrotermiczny ($V_T = kT/q$)

n – współczynnik nieidealności złącza (bezwymiarowy, rzędu kilku, często przyjmuje się $n=1$)

Maksymalny średni prąd przewodzenia I_{Fmax} - uznawany za prąd znamionowy I_{Fn} diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia (jest to parametr graniczny, którego nie można przekroczyć bez uszkodzenia diody).

Szczytowe wsteczne napięcie pracy U_{Rwm} (dodatkowo podaje się jeszcze powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne U_{Rsm} i niepowtarzalne szczytowe napięcie wsteczne U_{Rsm}).

Napięcie przewodzenia U_{Fp} przy prądzie przewodzenia $I_F = 0,1 \cdot I_{Fmax}$. Prąd wsteczny I_R przy określonym napięciu wstecznym U_R (zazwyczaj $U_R = U_{Rwm}$).



Rys. Przykładowa ch-ka diody prostowniczej na zakres 10A.

Fotodioda

Co się stanie, kiedy złącze półprzewodnikowe zostanie oświetlone?

$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{n \cdot V_T}} - 1 \right) - S_\Phi \cdot \Phi$$

gdzie:

I_S – prąd nasycenia złącza (typowo rzędu pA, nA),

V_T – potencjał elektrotermiczny ($V_T = kT/q$),

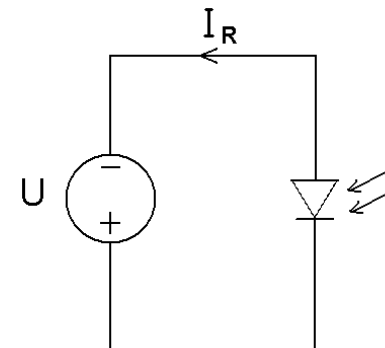
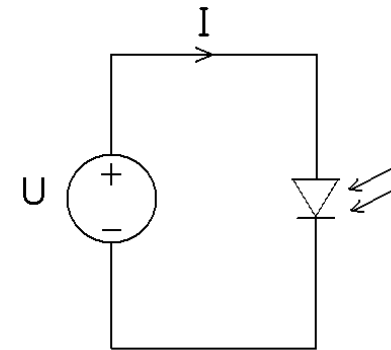
n – współczynnik nieidealności złącza (bezwymiarowy, rzędu kilku, często przyjmuje się $n=1$),

S_Φ – czułość prądowa fotodiody,

Φ – natężenie oświetlenia.

Dla $U < 0$ można zapisać:

$$I_R \cong -S_\Phi \cdot \Phi$$



Fotodioda

FEATURES

- SINGLE SUPPLY: +2.7 to +36V
- PHOTODIODE SIZE: 0.090 x 0.090 inch
- INTERNAL 1MΩ FEEDBACK RESISTOR
- HIGH RESPONSIVITY: 0.45A/W (650nm)
- BANDWIDTH: 14kHz at $R_F = 1M\Omega$
- LOW QUIESCENT CURRENT: 120μA
- AVAILABLE IN 8-PIN DIP, 5-PIN SIP, AND 8-LEAD SURFACE MOUNT PACKAGES
- CLEAR OR RED PLASTIC VERSIONS

APPLICATIONS

- MEDICAL INSTRUMENTATION
- LABORATORY INSTRUMENTATION
- POSITION AND PROXIMITY SENSORS
- PHOTOGRAPHIC ANALYZERS
- BARCODE SCANNERS
- SMOKE DETECTORS
- CURRENCY CHANGERS

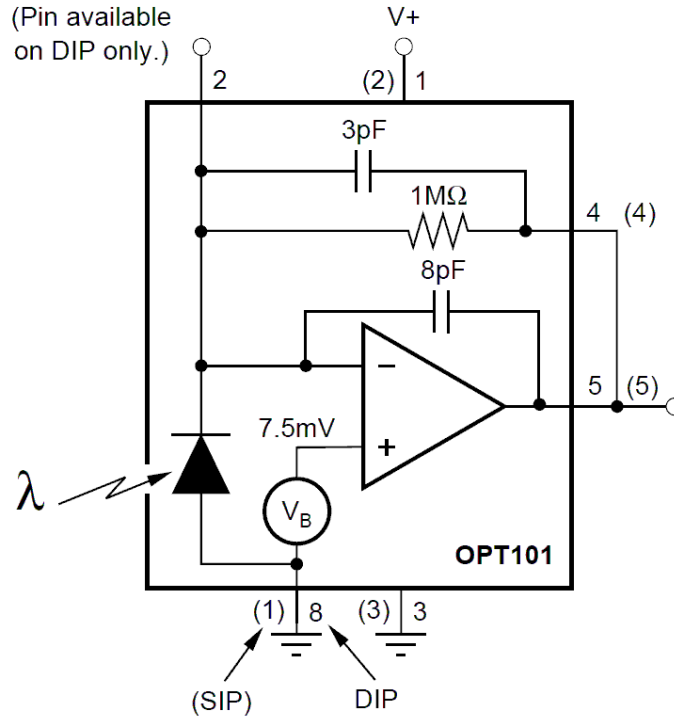
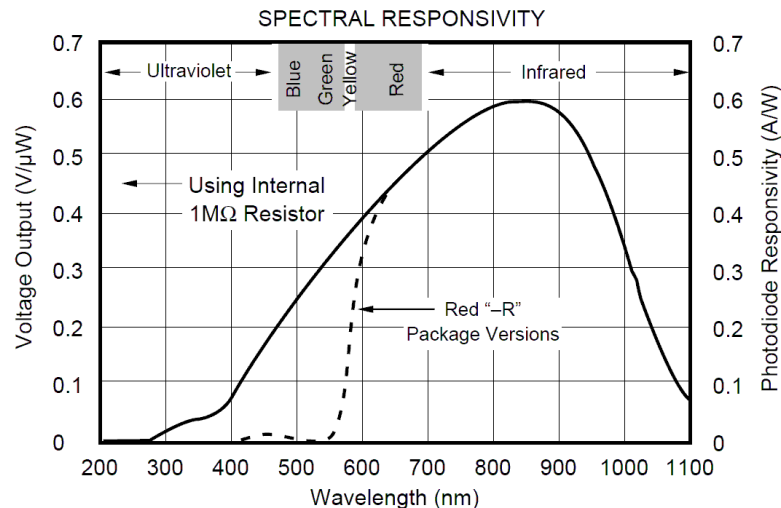


Figure from Datasheet Burr-Brown