



V. Fototranzystor

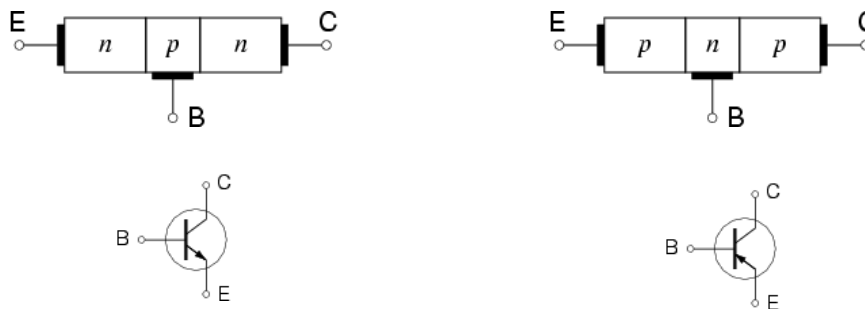
1. Tranzystor

Nazwa tranzystor pochodzi z języka angielskiego: *transistor* - “*transferring an electrical signal across a resistor.*” (transfer sygnału elektrycznego przez rezystancję). Tranzystor bipolarny (BJT) jest zaworem, który jest sterowany prądowo: prąd bazy (I_B) steruje prądem kolektora (I_C). W tranzystorze tym w transporcie biorą udział elektrony i dziury. Jest to tranzystor, który zbudowany jest z trzech warstw półprzewodników o różnym rodzaju przewodnictwa, tworzących dwa złącza **p-n**; sposób polaryzacji złączy determinuje **stan prac** tranzystora.

Tranzystor posiada trzy końcówki przyłączone do warstw półprzewodnika, nazywane:

- **emiter** (ozn. E),
- **baza** (ozn. B),
- **kolektor** (ozn. C).

Ze względu na kolejność warstw półprzewodnika rozróżnia się dwa typy tranzystorów: **pnp** oraz **nnp**; w tranzystorach *nnp* nośnikiem prądu są elektrony, w tranzystorach *pnp* dziury. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie budowę oraz oznaczenia tranzystorów.



Rys. 1. Tranzystory npn i pnp

A. Stany pracy

Rozróżnia się cztery **stany pracy** tranzystora bipolarnego:

- **stan zatkania (odcięcia)**: złącza BE i CB spolaryzowane są w kierunku zaporowym,
- **stan nasycenia**: złącza BE i CB spolaryzowane są w kierunku przewodzenia,
- **stan aktywny**: złącze BE spolaryzowane w kierunku przewodzenia, zaś złącze CB zaporowo,
- **stan aktywny inwersyjny** (krócej: inwersyjny): BE zaporowo, CB w kierunku przewodzenia (odwrotnie niż stanie aktywnym).

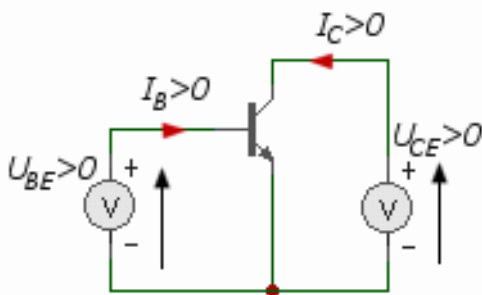
Stan aktywny tranzystora jest podstawowym stanem pracy wykorzystywanym we wzmacniaczach; w tym zakresie pracy tranzystor charakteryzuje się dużym wzmocnieniem prądowym (kilkadziesiąt-kilkuset). Stany nasycenia i zaporowy stosowane są w technice impulsowej, jak również w układach cyfrowych. Stan aktywny inwersyjny nie jest powszechnie stosowanych, ponieważ ze względów konstrukcyjnych tranzystor charakteryzuje się wówczas gorszymi parametrami niż w stanie aktywnym (normalnym), m.in. mniejszym wzmocnieniem



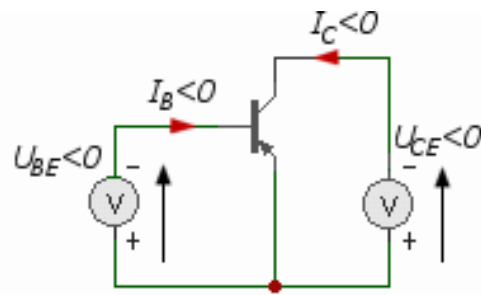
Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

prądowym. Można powiedzieć, że w tranzystorze złącze baza-emiter i kolektor-baza zachowują się jak diody. Aby tranzystor znajdował się w stanie normalnej pracy to muszą być spełnione następujące warunki:

- dla tranzystora npn potencjał kolektora musi być wyższy od potencjału emitera,
- dla tranzystora pnp potencjał kolektora musi być niższy od potencjału emitera,
- „dioda” baza-emiter musi być spolaryzowana w kierunku przewodzenia, a „dioda” kolektor-baza w kierunku zaporowym (rys.2)
- nie mogą zostać przekroczone maksymalne wartości I_C , I_B , U_{CE} , moc wydzielana na kolektorze $I_C \cdot U_{CE}$, temperatura pracy czy też napięcie U_{BE} .



Rys.2.a Polaryzacja tranzystora npn



Rys.2.b Polaryzacja tranzystora pnp

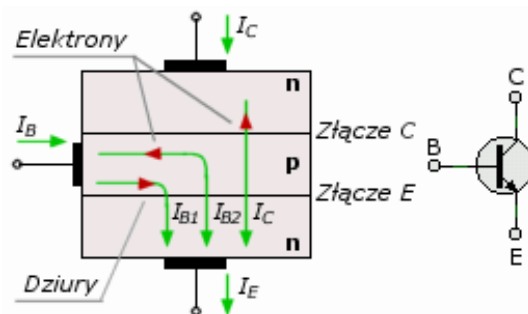
Jeżeli tranzystor jest w stanie normalnej pracy czyli spełnia powyższe warunki to z dobrym przybliżeniem prawdziwa jest zależność (która dalej zostanie pokazana):

$$I_C = \beta I_B \quad (1)$$

gdzie β jest współczynnikiem wzmocnienia prądowego. Współczynnik ten może przyjmować wartości od 50 do 300 A/A dla tego samego typu tranzystora, a więc nie jest parametrem na którym można opierać parametry projektowanego układu.

B. Rozpływ prądu w tranzystorze npn.

Ponieważ złącze baza-emiter jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia to istnieje przepływ dziur z obszaru p do obszaru n oraz przepływ elektronów z obszaru n do obszaru p. Elektrony wprowadzane z emitera do bazy stają się tam nośnikami mniejszościowymi i drogą dyfuzji oddalają się od złącza emiterowego. Część tych elektronów łączy się z dziurami, których w bazie jest bardzo dużo (obszar p). Wszystkie elektrony, które dotrą w pobliże złącza kolektor-baza są unoszone do obszaru kolektora. Dla niedużej szerokości obszaru p (bazy) praktycznie wszystkie elektrony wstrzykiwane przez emiter do bazy dotrą do kolektora. Bardzo ważnym jest aby strata elektronów w bazie była jak najmniejsza. Miarą tego na ile prąd kolektora odpowiada prądowi emitera jest współczynnik α nazywany współczynnikiem wzmocnienia prądowego, przy dużych sygnałach definiowany jako:



Rys.3. Rozpływ prądu w tranzystorze npn



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

$$\alpha = \frac{I_C - I_{C_0}}{I_E} \quad (2)$$

gdzie I_{C_0} jest prądem złącza kolektorowego spolaryzowanego zaporowo przy $I_B = 0$. W tranzystorach krzemowych wartość prądu I_{C_0} (zależąca od temperatury) jest rzędu 0,001pA do 0,01pA i można go zaniedbać. Dla większości tranzystorów wartość α zawiera się w granicach od 0,95 do 0,99. Prąd bazy I_B składa się z prądu dziurowego płynącego od bazy do emitera i z prądu wynikającego z rekombinacji dziur w obszarze bazy. Tranzystory wykonywane są tak aby oba te prądy były jak najmniejsze. Osiągnięte jest to w ten sposób, że obszar n emitera jest bardzo silnie domieszkowany i prąd elektronowy złącza baza-emiter jest zdecydowanie większy od prądu dziurowego. W celu zmniejszenia drugiego składnika prądu bazy czyli prądu wywołanego rekombinacją, zmniejsza się obszar bazy. W efekcie prąd bazy I_B ma wartość bardzo małą w porównaniu z prądem kolektora I_C . W rezultacie można powiedzieć, że mały prąd wejściowy bazy I_B steruje znacznie większym prądem wyjściowym kolektora I_C , a więc następuje efekt wzmacnienia.

$$I_C + I_B = I_E \quad (3)$$

Po uwzględnieniu wzoru (2):

$$I_C = \frac{I_{C_0}}{1 - \alpha} + \frac{\alpha I_B}{1 - \alpha} \quad (4)$$

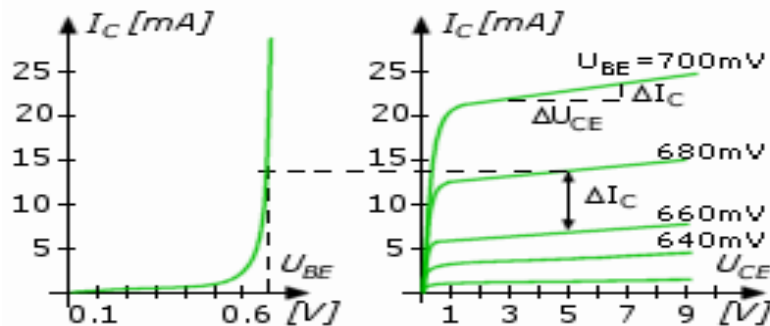
Niech $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$, wówczas prąd kolektora wyraża się wzorem:

$$I_C = (1 + \beta)I_{C_0} + \beta I_B \quad (5)$$

Ponieważ $I_{C_0} \ll I_B$ to $I_C = \beta I_B$ (6)

C. Charakterystyki statyczne tranzystora

Na rys. 4 przedstawiono przykładowe charakterystyki: przejściową $I_C = f(U_{BE})$ oraz wyjściową $I_C = f(U_{CE})$ tranzystora.



Rys. 4 Charakterystyki prądowo-napięciowe tranzystora.



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

Charakterystyka przejściowa tranzystora to zależność prądu kolektora I_C od napięcia baza-emiter U_{BE} . Charakterystyka ta ma charakter wykładniczy:

$$I_C = I_{C_0}(T, U_{CE}) \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) \quad (7)$$

Charakterystyka wyjściowa to zależność prądu kolektora I_C od napięcia kolektor-emiter U_{CE} przy doprowadzonym napięciu wejściowym baza-emiter U_{BE} . Z charakterystyki tej wynika, że:

- powyżej pewnego napięcia prąd kolektora prawie nie zależy od napięcia U_{CE} ,
- do wywołania dużej zmiany prądu kolektora I_C wystarczy mała zmiana napięcia baza-emiter U_{BE} .

Punkt, w którym następuje zagięcie charakterystyki wyjściowej nazywany jest napięciem nasycenia kolektor-emiter U_{CEsat} .

W zależności od sposobu włączenia tranzystora (wspólny emiter, wspólna baza, wspólny kolektor) otrzymujemy różne rodziny charakterystyk statycznych. Przykładowo, dla tranzystora bipolarnego npn w układzie wspólnego emitera,

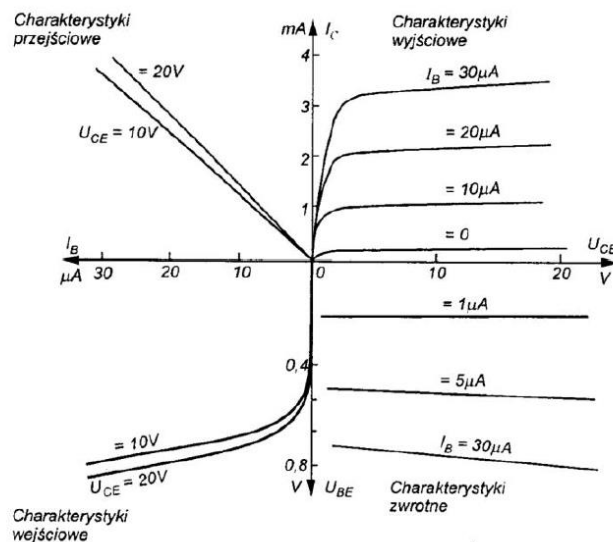
charakterystyki wejściowe: $I_B = f(U_{BE})|_{U_{CE}=const}$

charakterystyki wyjściowe: $I_C = f(U_{CE})|_{I_B=const}$

charakterystyki przejściowe: $I_C = f(I_B)|_{U_{CE}=const}$

charakterystyki zwrotne: $U_{BE} = f(U_{CE})|_{I_B=const}$

Na rys. 6 przedstawiono charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OE.



Rys.5. Charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OE

D. Parametry graniczne tranzystora

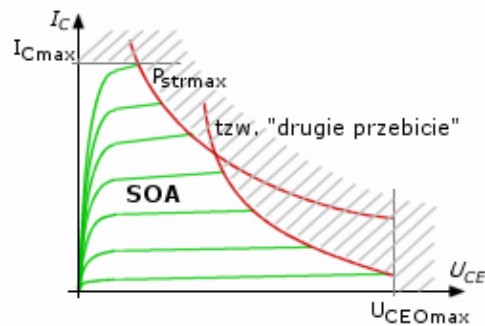


Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

Tranzystory, tak zresztą jak inne elementy elektroniczne, mają charakterystyczne dla siebie parametry graniczne, tzn. takie których przekroczenie grozi uszkodzeniem tranzystora. Do takich parametrów należą:

- U_{EB0max} - dopuszczalne napięcie wsteczne baza-emiter
- U_{CB0max} - dopuszczalne napięcie wsteczne kolektor-baza
- U_{CE0max} - maksymalne dopuszczalne napięcie kolektor-emiter
- I_{Cmax} - maksymalny prąd kolektora
- I_{Bmax} - maksymalny prąd bazy
- P_{strmax} - maksymalna dopuszczalna moc strat

Na rys. 6 zaznaczono niektóre z tych wielkości.

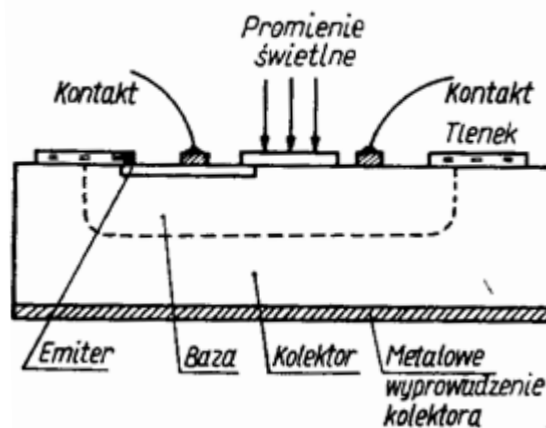


Rys. 6. Charakterystyka wyjściowa tranzystora

2. Fototranzystor

A. Wstęp

Konstrukcja fototranzystora jest zbliżona do konstrukcji zwykłego tranzystora wzmacniającego z tą różnicą, że obudowa umożliwia oświetlenie obszaru jego bazy (rys. 6). W większości fototranzystorów nie stosuje się wyprowadzenia bazy na zewnątrz.



Rys. 6. Budowa fototranzystora.

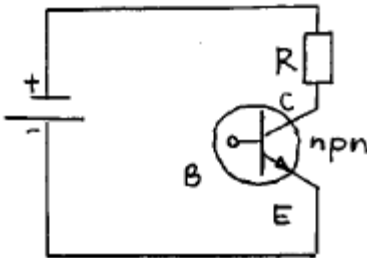
Urządzenie to najczęściej pracuje w układzie wspólnego emitera. Tranzystor n-p-n w układzie o wspólnym emiterze, pracuje w ten sposób, że złącze emiter-baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia a baza-kolektor w kierunku zaporowym. Przez złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia (baza-emiter) płynie duży prąd nośników większościowych, elektronów z n do p i dziur z p do n. Prąd elektronowy w obszarze bazy (p)



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

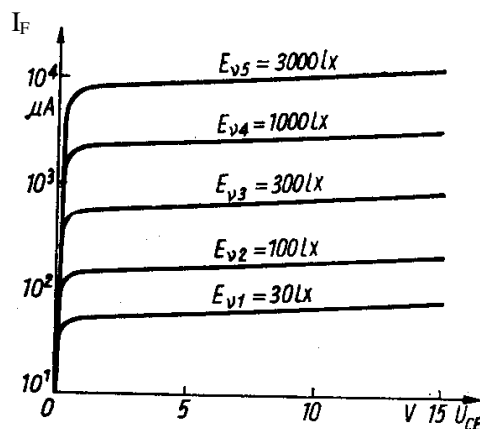
jest prądem nośników mniejszościowych, który z kolei jest dominującym prądem gdy złącze jest spolaryzowane w kierunku zaporowym. Pole elektryczne wzmacnia ten prąd. W ten sposób w tranzystorze uzyskuje się duże wzmocnienie prądowe: prąd kolektora jest zwykle dwa rzędy większy od prądu bazy.

W fototranzystorze baza nie jest nigdzie połączona elektrycznie, czyli złącze baza-emiter jest rozwarte. Fotony generują w tej sytuacji fotonapięcie, które jest równoważne spolaryzowaniu złącza emiter-baza w kierunku przewodzenia. Dalej fototranzystor działa jak zwykły tranzystor. Dodatkowo dziury generowane w obszarze p (bazy) i te wciągane z obszaru kolektora zmniejszają napięcie na złączu baza-emiter, zwiększając prąd nośników większościowych. Zmiany w obszarze bazy spowodowane oświetleniem obserwuje się w obwodzie kolektora, zwykle mierząc spadek napięcia na oporniku połączonym z kolektorem. Na rys.7 przedstawiono schemat układu do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych i oświetleniowych fototranzystora. Dla fototranzystora n-p-n kolektor podłącza się do wyjścia „+” zasilacza a emiter do wyjścia „-”.



Rys. 7. Schemat układu polaryzującego fototranzystor n-p-n.

Fototranzystory charakteryzują się dużą czułością (wielokrotnie większą od czułości diody) i wzmocnieniem (rzędu 100÷1000), natomiast ich wadą jest niezbyt duża szybkość działania, częstotliwość graniczna wynosi około 200kHz. Ponadto zależność sygnału elektrycznego od mocy promieniowania optycznego padającego na złącze jest nieliniowa (zależność prądu kolektora od natężenia oświetlenia jest podobna jak w przypadku tranzystora konwencjonalnego od napięcia bazy). Fotodiody w tym przypadku odznaczają się bardzo dużym zakresem liniowości sygnału oraz bardzo dużą szybkością działania. Na rysunku 8 przedstawiono przykładową zależność fotoprądu (prądu kolektora) w funkcji napięcia kolektor - emiter dla różnych wartości natężenia oświetlenia. Jak widać charakterystyka ta jest podobna do zależności prądu kolektora w funkcji napięcia kolektor-emiter zwykłego tranzystora.



Rys.8. Charakterystyki statyczne fototranzystora, $I_F = f(U_{CE})$ dla różnych wartości natężenia oświetlenia.

Fototranzystor krzemowy, produkcji polskiej typu BPYP21, o strukturze n-p-n wymaga napięcia zasilającego (napięcia U_{CE}) równego 5 V. Prąd ciemny fototranzystora jest równy



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

$0,1\mu\text{A}$, a prąd fotoelektryczny przy oświetleniu $E_v = 1000 \text{ lx}$ wynosi 2 mA .
Graniczna częstotliwość pracy wynosi 90 kHz .

B. Układ pomiarowy

Cel ćwiczenia: Wyznaczenie charakterystyki statycznej I-V oraz charakterystyki spektralnej fototranzystora.

Opis stanowiska:

Oświetlacz - lampa halogenowa (nap. zas. do 16V).

Zasilacz halogenu Z 3020.

Zwierciadła M1 i M2

Monochromator - SPM2 z pryzmatem Si - $0,4 \mu\text{m}$ do $3,5 \mu\text{m}$

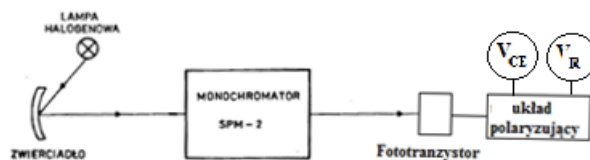
Detektor odniesienia - termoelement VTh-1 z okienkiem CaF_2 , o czułości stałoprądowej 2V/W , stałej czasowej 15 ms i powierzchni światłoczułej 7 mm^2 .

Nanowoltomierz selektywny 233 do pomiaru fotonapięcia detektora termicznego (termopary).

Badany fototranzystor BPYP21 o powierzchni $A=1 \text{ mm}^2$

C. Przebieg ćwiczenia:

- a) Pomiar charakterystyki spektralnej napięcia proporcjonalnego do fotoprądu kolektora fototranzystora.
- Zestawić układ wg. schematu przedstawionego na rys.9, stosując, jako źródło światła halogen. Ustawić na zasilaczu halogenu napięcie $U = 10\text{V}$
 - Ustawić szczelinę monochromatora na $0,7 \text{ mm}$
 - Oświetlić fototranzystor światłem o długości fali z zakresu widzialnego. W tym celu wybrać odpowiednią długość fali monochromatora i ustawić badany fototranzystor naprzeciw szczeliny wyjściowej monochromatora.
 -

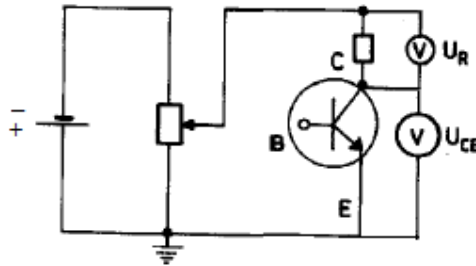


Rys.9.Schemat układu do pomiaru charakterystyki spektralnej fototranzystora

- Podłączyć fototranzystor do układu polaryzującego w przystawce pomiarowej, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 10.



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego



Rys.10. Układ polaryzujący fototranzystor n-p-n. Dla tranzystora p-n-p źródło należy połączyć odwrotnie.

- Spolaryzować fototranzystor napięciem 0.6 V, pamiętając, aby „+” zasilacza został podłączony do kolektora a „-” do emitera. Odpowiada to połączeniu „-” zasilacza do „gorącego” wejścia gniazda w przystawce pomiarowej.
- Zmierzyć napięcie stałe na oporze U_R w funkcji długości fali w zakresie od 450nm do 1600nm.
- Obliczyć czułość względną fototranzystora:

$$R_v(\lambda) = R_{vT} \frac{U_R A_T}{U_T A_d} \quad [\text{V/W}]$$

gdzie R_{vT} – czułość detektora termicznego (2V/W), A_T i A_d – oświetlone powierzchnie detektora termicznego i fototranzystora, napięcie mierzone na oporze U_R i U_T – napięcie na wyjściu termopary. Zależność $U_T(\lambda)$ jest przedstawiona w Tabeli I.

b) Pomiar charakterystyk I-V fototranzystora

- Wyznaczyć maksimum na charakterystyce spektralnej czułości względnej fototranzystora. W tym celu należy podzielić sygnał z fototranzystora przez sygnał z detektora termicznego i znaleźć maksimum tego ilorazu.
- Dla długości fali odpowiadającej temu maksimum zmierzyć zależność fotosygnалу z fototranzystora, tj. napięcia $U_R = I_F R$ w funkcji napięcia kolektor – emiter, od 0.1V do 0,3V co 0.02V i dalej, co 0.1V do 1.5V.
- Powtórzyć te pomiary dla długości fali mniejszej i większej od długości fali odpowiadającej maksimum czułości fototranzystora.
- Powtórzyć te pomiary dla długości fali odpowiadającej maksimum czułości fototranzystora dla dwóch innych wartości napięcia zasilającego halogen.

D. Opracowanie wyników

a) Charakterystyka widmowa na wyjściu detektora termicznego

- Narysować charakterystykę spektralną napięcia na wyjściu detektora termicznego. Zaznaczyć niepewności na wykresie. Przyjąć dla wskazań nanowoltomierza niedokładność wskazań: $\Delta U = \pm (4U + 2U_c) / 100$ gdzie U_c –zakres, U_T – aktualne wskazanie miernika. Natomiast dla monochromatora przyjąć niepewność pomiaru długości fali $u(\lambda) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}}$. Poniżej przedstawiono



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

przykładowy odczyt długości fali i niepewności. Należy zwrócić uwagę, że skala monochromatora nie jest liniowa.



Górna skala – długość fali w μm .

Dolna skala – szerokość szczeliny w mm

Przy szczelinie 1mm: $(1200 \pm 30)\text{nm}$

Przy szczelinie 0.5mm: $(1200 \pm 15)\text{nm}$

Przy szczelinie 0.1mm: $(1200 \pm 3)\text{nm}$

Przy szczelinie o szerokości x mm: $(1200 \pm x \cdot 30)\text{nm}$

b) Charakterystyka widmowa fototranzystora

- Narysować charakterystykę spektralną napięcia na wyjściu rezystancji R. Zaznaczyć niepewność pomiaru napięcia korzystając ze wzoru $u(U) = \frac{\text{dokładność pomiaru napięcia}}{\sqrt{3}}$.

Dokładności pomiaru napięcia obliczyć korzystając z odpowiednich formuł dla mierników. Dla monochromatora przyjąć niepewność pomiaru długości fali $u(\lambda) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}}$.

- Narysować wykres czułości względnej fototranzystora w funkcji długości fali światła $R_v(\lambda)$ (wzór (1)). Zaznaczyć niepewności na wykresie. Dla monochromatora przyjąć niepewność pomiaru długości fali $u(\lambda) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}}$. Niepewność pomiaru czułości obliczyć ze wzoru:

$$u(R_v) = \sqrt{\left[\frac{A_T U_R}{A_D (U_T)^2} u(U_T) \right]^2 + \left[\frac{A_T u(U_R)}{A_D U_T} \right]^2 + \left[\frac{u(A_T) U_R}{A_D U_T} \right]^2 + \left[\frac{u(A_D) U_R}{(A_D)^2 U_T} \right]^2}$$

Obliczyć niepewność pomiaru napięcia na termoparze jak w p.1. Niepewność napięcia na rezystancji obliczyć korzystając z formuł dla użytego multimetru.

- Z odcinka długofalowego tej charakterystyki wyznaczyć przerwę energetyczną E_g materiału półprzewodnikowego, z którego wykonano detektor. W tym celu należy wybrać zakres prostoliniowy przebiegu czułości i korzystając z prostej regresji wyznaczyć przecięcie prostej z osią długości fali $\lambda_{odc} = -\frac{b}{a}$.
- Aby obliczyć niepewność pomiaru $u(\lambda_{odc})$, należy skorzystać z niepewności wynikającej z dokładności skali monochromatora:

$$u(\lambda_{odc}) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}}$$



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

c) Pomiar charakterystyk statycznych fototranzystora

- Narysować wykres zależności sygnału fototranzystora U_R w funkcji napięcia kolektor – emiter U_{CE} dla 3 różnych długości fal. Zaznaczyć niepewność pomiaru napięć U_R i U_{CE} korzystając ze wzoru $u(U) = \frac{\text{dokładność pomiaru napięcia}}{\sqrt{3}}$. Dokładności pomiaru napięcia obliczyć korzystając z odpowiednich formuł dla mierników.
- Narysować wykres zależności sygnału fototranzystora U_R w funkcji napięcia kolektor – emiter U_{CE} dla 3 różnych napięć lampy halogenowej. Zaznaczyć niepewność pomiaru napięć U_R i U_{CE} korzystając ze wzoru $u(U) = \frac{\text{dokładność pomiaru napięcia}}{\sqrt{3}}$. Dokładności pomiaru napięcia obliczyć korzystając z odpowiednich formuł dla mierników.
- Porównać z charakterystyką $I_C=f(U_{CE})$ dla zwykłego tranzystora.

Literatura:

- 1) <http://www.elenota.pl/datasheet-pdf/60544/CEMI/BPYP21?sid=205252d80b2ea291c79d63630a4d9a55>
- 2) <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/548266/TOSHIBA/2SA970-BL.html>

Pytania kontrolne

1. Efekt fotowoltaiczny.
2. Tranzystor i fototranzystor. Zasada działania.
3. Parametry charakteryzujące właściwości detektorów promieniowania.



Detekcja promieniowania elektromagnetycznego

Napięcie na termoparze.

λ [μm]	U_T [μV]	zakres	1	1,1	2,52	24	30 μV
0,45	9,2	10 μV	1,05	1,3	2,54	14	
0,455	11	30 μV	1,1	1,4	2,56	7,5	10 μV
0,46	11,5		1,15	1,5	2,58	4,4	
0,465	12		1,2	1,5	2,6	3,2	
0,47	14		1,25	1,43	2,62	2,8	
0,475	16		1,3	1,43	2,64	2,8	
0,48	17,5		1,35	1,2	2,66	2,1	3 μV
0,485	19,5		1,4	0,7	2,68	2,1	
0,49	21		1,45	1,15	2,7	2,3	
0,495	23		1,5	1,2	2,72	1,7	
0,5	25,5		1,55	1,1	2,74	1,8	
0,51	30	1,6	1,05	2,76	2,3		
0,52	35	1,65	0,94	2,78	2,2		
0,53	42	1,7	0,88	2,8	2,1		
0,54	48	1,75	0,82	2,82	2,5		
0,55	55	1,8	0,72	2,84	2,4		
0,56	64	1,85	0,6	2,86	2,6	10 μV	
0,57	73	1,9	0,54	2,88	2,8		
0,58	82	1,95	0,54	2,9	4,2		
0,59	91,5	2	0,5	2,92	5,5		
0,6	100	2,02	0,48	2,94	7		
0,61	110	2,04	0,42	2,96	9		
0,62	120	2,06	0,4	2,98	12		
0,63	130	2,08	0,38	3	13		
0,64	143	2,1	0,37	3,1	20		
0,65	153	2,12	0,34	3,2	22		
0,66	164	2,14	289			30 μV	
0,67	172	2,16	220				
0,68	187	2,18	135				
0,69	199	2,2	46				
0,7	210	2,22	21				
0,72	225	2,24	27				
0,74	245	2,26	38				
0,76	260	2,28	60				
0,78	270	2,3	96				
0,8	280	2,32	130				
0,82	300	2,34	150				
0,84	0,34	2,36	160				
0,86	0,4	2,38	155				
0,88	0,5	2,4	140				
0,9	0,6	2,42	115				
0,92	0,7	2,44	88				
0,94	0,8	2,46	70				
0,96	0,9	2,48	54				
0,98	1,05	2,5	38				

Wszystkie napięcia U_T należy podzielić przez $10^{5/2}$.

Źródło - lampa halogenowa,
Pryzmat – kwarc
Szczelina 0.7mm.