

Wydział WFiIS	Imię i nazwisko 1. Mateusz Kulig 2. Przemysław Ryś		Rok 2022	Grupa 3	Zespół 1
PRACOWNIA FIZYCZNA WFiIS AGH	Temat: Dioda półprzewodnikowa				Nr ćwiczenia 123
Data wykonania 26.03.2022	Data oddania	Zwrot do popr.	Data oddania	Data zaliczenia	OCENA

W sprawozdaniu wyznaczyliśmy charakterystyki stałoprądowe dla różnych typów diod. W pierwszej kolejności zmierzaliśmy wartości napięcia dla danych prądów w kierunku przewodzenia dla każdej z diod. W drugiej natomiast dla diod: germanowej, krzemowej oraz świecącej dla danych napięć mierzyliśmy wartości prądów wstecznych. Dla diody Zenera wymuszaliśmy prądy wsteczne w celu znalezienia ich napięć. Uzyskana długość fali dla diody świecącej wydała się zgodna z obserwowanym kolorem fioletowym. Udało się także stwierdzić iż dioda Zenera została wykonana z arsenku galu. Współczynnik stabilizacji dla diody Zenera wyniósł $Z = 0,00336$.

1. Wstęp teoretyczny

Półprzewodnikami nazywamy klasę substancji o specyficznych właściwościach elektrycznych. Nośnikami prądu w półprzewodnikach są elektrony i dodatnio naładowane kwazicząstki zwane dziurami. Mieszając ze sobą odpowiednie pierwiastki (np. fosfor i krzem) możemy otrzymać półprzewodnik n, czyli taki który posiada więcej elektronów. Dodając z kolei atomy innego pierwiastka (np. boru) otrzymujemy półprzewodnik typu p a więc taki w którym dominują dziury. Łatwo zauważyć że złącze p-n jest po prostu połączeniem dwóch półprzewodników, a elementem elektronicznym wykorzystującym jedno złącze nazywamy dioda półprzewodnikowa. Charakteryzuje się ona tym, że łatwo przepuszcza prąd w jednym kierunku (kierunek przewodzenia), natomiast prąd płynący w drugą stronę ma bardzo małe natężenie (kierunek zaporowy).

Model dyfuzyjny jest najprostszym realistycznym modelem złącza. Bierze pod uwagę fakt, że elektrony i dziury zachowują się jak gazy o średniej energii kinetycznej $\frac{3}{2}k_bT$. Efektem ich ruchu termicznego jest, że mogą dyfundować z obszaru o większej koncentracji do mniejszej. Dyfundujące przez powierzchnię złącza np. większościowe elektrony rekombinują z większościami dziurami po jego drugiej stronie. W efekcie po obu stronach złącza pojawia się tzw. „obszar zubożony”, w którym koncentracja i dziur i elektronów staje się bardzo mała. Złącze bez przyłożonego zewnętrznego napięcia osiąga stan równowagi, w którym przez powierzchnię złącza płyną dwa przeciwnie skierowane prądy. Dla ustalenia równowagi rozpatrzmy prądy elektronowe. Strumień większościowych elektronów, które przechodzą z obszaru n tworzy prąd dyfuzyjny I_d . Nazwa bierze się stąd, iż podobnie jak strumień molekuł w zjawisku dyfuzji w gazach, strumienie elektronów i dziur płyną z obszarów o wyższej do niższej ich koncentracji. Przechodzeniu większościowych nośników ładunku przez złącze p-n towarzyszy przechodzenie nośników mniejszościowych, przy czym ich strumień jest skierowany przeciwnie i tworzy tzw. „prąd dryfu” I_f . Nazwa bierze się stąd, iż nośniki mniejszościowe dryfują popychane przez pole elektryczne bariery. Przyłożenie zewnętrznego napięcia w kierunku przewodzenia obniża barierę potencjału do wartości $V - U$. Powoduje to wzrost prądu dyfuzji o czynnik $\exp\left(\frac{U}{k_bT}\right)$. Prąd dryfu natomiast pozostaje ten sam. Zsumowanie

obydwu prądów prowadzi do teoretycznego wzoru na charakterystykę prądowo-napięciową złącza:

$$I = I_s \left[\exp \left(\frac{eU}{k_b T} \right) - 1 \right]. \quad (1)$$

Powyższy wzór zwany jest wzorem Shockleya i opisuje on przypadek diody idealnej. Dla przypadku diod rzeczywistych w kierunku przewodzenia dla niezbyt dużych prądów dobrze opisuje fenomenologiczny wzór:

$$I(U) = I_s \exp \left(\frac{eU}{mk_b T} \right), \quad (2)$$

gdzie m jest tzw. czynnikiem nieidealności, będącym bezwymiarową liczbą większą od 1. W celu sprawdzenia, czy charakterystyka empiryczna spełnia zależność teoretyczną wykonujemy wykres zlogarytmowany funkcji danej równaniem (2), tak by zależność logarytmu naturalnego z natężenia winna być liniową funkcją napięcia, gdzie współczynnik kierunkowy tej prostej zadany jest postacią:

$$a = \frac{e}{mk_b T},$$

gdzie po prostych przekształceniach otrzymujemy:

$$m = \frac{e}{ak_b T} = \frac{1}{aU_T}. \quad (3)$$

U_T to tak zwane napięcie termiczne.

Charakterystyki diod w kierunku przewodzenia zależą od wielkości przerwy energetycznej. Im jest większa, tym większy spadek napięcia potrzebny do uzyskania zadanej wartości prądu I . Po przekształceniu wzoru (2) otrzymujemy zależność na napięcie:

$$U = \frac{mk_b T}{e} \cdot \ln \left(\frac{I}{I_s} \right) \quad (4)$$

Współczynnik stabilizacji jest określony jako stosunek względnej zmiany napięcia do względnej zmiany prądu. Można go też określić jako iloraz oporności dynamicznej do oporności statycznej

$$Z = \frac{r}{R} \quad (5)$$

2. Aparatura

Do wykonania doświadczenia użyliśmy następujących przyrządów:

- Płytką zawierającą cztery diody (germanową, krzemową, świecącą i diodę Zenera). Posiadała również przełącznik do zmiany kierunku prądu na kierunek przewodzenia i zaporowy. Znajdywało się na niej również pokrętło do płynnej regulacji napięcia,
- Woltomierz cyfrowy,
- Wielozakresowy miernik uniwersalny. Służył nam do pomiaru natężenia prądu,
- Zasilacz laboratoryjny.

3. Metodyka doświadczenia

Wykonanie doświadczenia rozpoczęliśmy od połączenia ze sobą wszystkich elementów układu. Następnie wykonaliśmy pomiary, dla kierunku przewodzenia, napięcia na każdej z diod dla ustalonych wartości natężenia prądu. Podpinaliśmy po kolei każdą diodę za pomocą małej zworki, a następnie regulowaliśmy potencjał za pomocą pokrętki i otrzymane wyniki zapisywaliśmy. Dla kierunku zaporowego mierzyliśmy natężenie dla ustalonych wartości napięcia i postępowaliśmy analogicznie jak dla kierunku przewodzenia.

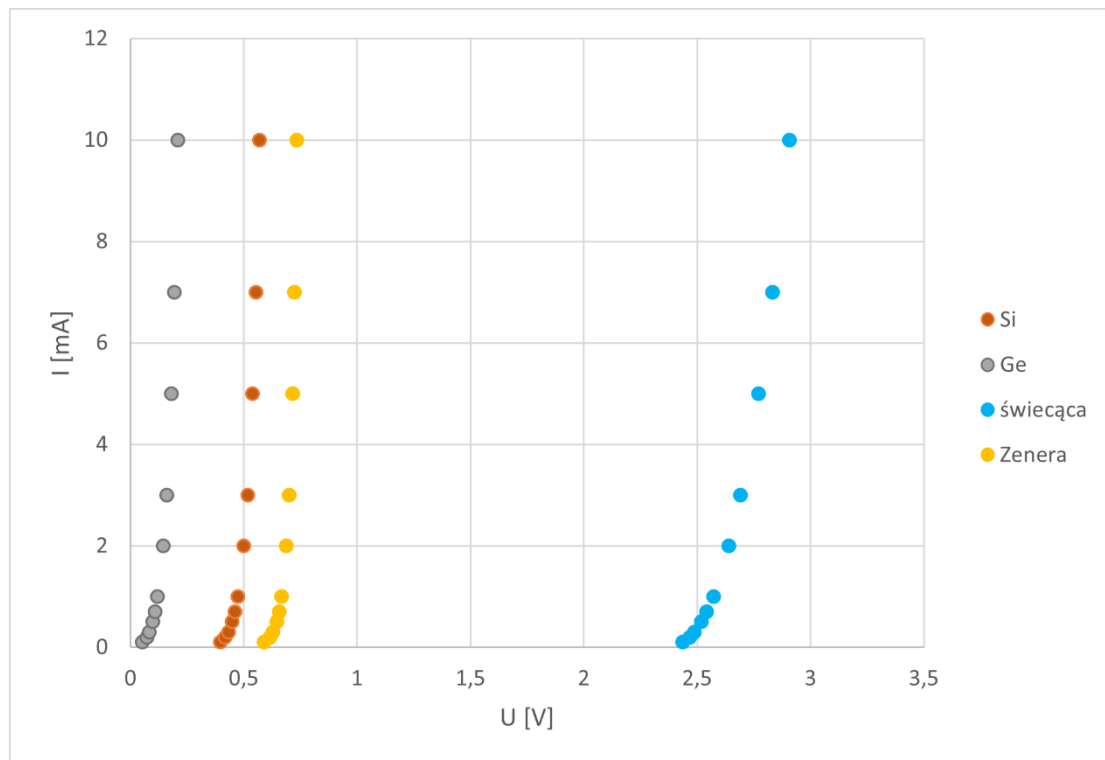
4. Analiza danych

Dokonaliśmy osiem pomiarów dla każdej diody. Wyniki zmierzonych wartości napięcia zebraliśmy w poniższej tabeli.

Tab. 1. Pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych dla kierunku przewodzenia.

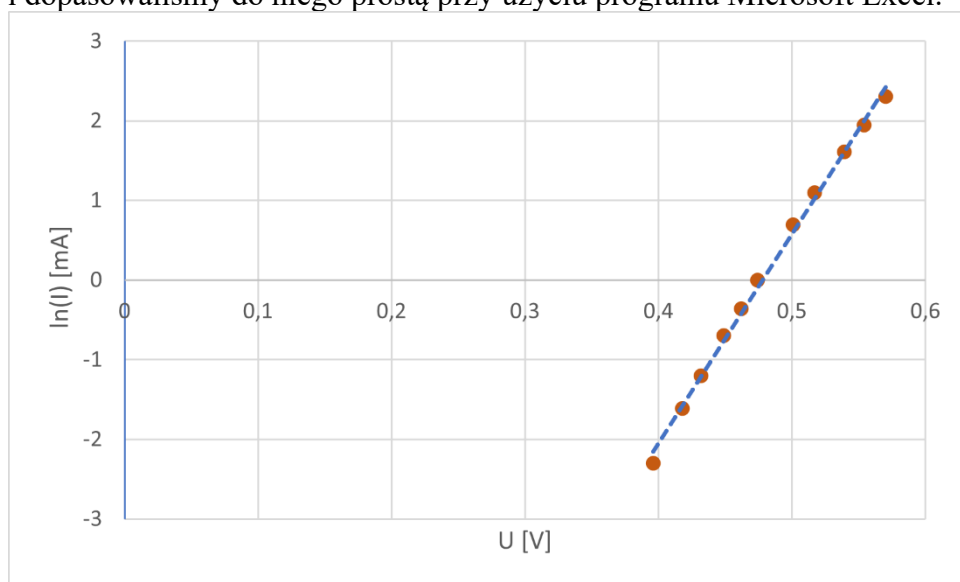
I [mA]	Napięcie U [V] diody:			
	Ge	Si	świecąca	Zenera
0,1	0,053	0,396	2,436	0,591
0,2	0,072	0,418	2,468	0,616
0,3	0,083	0,432	2,488	0,629
0,5	0,098	0,449	2,519	0,646
0,7	0,108	0,462	2,542	0,657
1,0	0,120	0,474	2,572	0,668
2,0	0,144	0,501	2,640	0,688
3,0	0,160	0,517	2,691	0,700
5,0	0,180	0,539	2,771	0,715
7,0	0,194	0,554	2,833	0,724
10,0	0,209	0,570	2,908	0,734

Zebrane pomiary umożliwiają wykonanie wykresu charakterystyki prądowo-napięciowej. Różnymi kolorami oznaczone zostały różne diody.



Rys. 1. Wykres przedstawiający charakterystyki prądowo-napięciowe w kierunku przewodzenia dla wszystkich czterech diod.

Dla diody wykonanej z krzemu wykonaliśmy zlinearyzowany wykres $\ln(f(I)) = f(U)$ i dopasowaliśmy do niego prostą przy użyciu programu Microsoft Excel.



Rys. 2. Wykres przedstawiający zlinearyzowaną charakterystykę prądowo-napięciową w kierunku przewodzenia dla krzemu i przypisaną mu prostą.

Otrzymana prosta ma następujący wzór

$$y = 26,306x - 12,569.$$

Za pomocą formuły (3) obliczyliśmy współczynnik idealności dla diody krzemowej przyjmując że pomiary zostały wykonane w temperaturze $T = 300$ K, tak więc $U_T = 26$ mV:

$$m_{Si} = 1,462.$$

Obliczyliśmy różnicę przerw energetycznych dla germanu i krzemu

$$E_{gSi} - E_{gGe} = 5,495 \text{ eV}$$

Wykorzystując formułę (5) obliczyliśmy wartość przerwy energetycznej diody świecącej i diody Zenera. Przyjęliśmy wartość przerwy energetycznej dla krzemu równą $E_{gSi} = 1,11$ [1].

$$E_{gSw} = 3,18 \text{ eV}$$

$$E_{gZ} = 1,307 \text{ eV}$$

Korzystając ze wzoru na energie kwantu fali elektromagnetycznej $E = \frac{hc}{\lambda}$ można obliczyć długość fali, jaką powinna wydzielać dioda świecąca. Wynik jaki w ten sposób otrzymaliśmy to $\lambda = 389,92 \text{ nm}$. Ta długość fali odpowiada kolorowi fioletowemu[2].

Z kolei substancją z której prawdopodobnie zbudowana została dioda Zenera jest arsenek galu, ponieważ jego przerwa energetyczna równa $E_{gGaAs} = 1,43 \text{ eV}$ [1] najlepiej odpowiada uzyskanemu przez nas wynikowi.

Dla kierunku zaporowego wykonaliśmy 16 pomiarów i sporządziliśmy odrębne wykresy $I = f(U)$ dla każdej diody.

Tab. 2. Pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych dla kierunku zaporowym.

Dioda Ge		Diody inne			Dioda Zenera	
U [V]	I [mA]	U [V]	Si I [mA]	Świecąca I [mA]	I [mA]	U [V]
0,02	0,011	0,1	0	0	0,1	10,321
0,04	0,015	0,2	0	0	0,2	10,343
0,06	0,016	0,3	0	0	0,3	10,358
0,08	0,017	0,5	0	0	0,5	10,367
0,1	0,018	0,7	0	0	0,7	10,373
0,2	0,018	1,0	0	0	1,0	10,379
0,3	0,019	1,5	0	0	1,5	10,389
0,5	0,019	2,0	0,0001	0,0001	2,0	10,395
0,7	0,019	3,0	0,0002	0,0002	3,0	10,404
1,0	0,019	4,0	0,0003	0,0003	4,0	10,411
1,5	0,019	5,0	0,0004	0,0004	5,0	10,417
2,0	0,019	6,0	0,0005	0,0005	6,0	10,425
3,0	0,019	7,0	0,0006	0,0006	7,0	10,430
4,0	0,021	8,0	0,0007	0,0007	8,0	10,435
5,0	0,022	9,0	0,0008	0,0008	9,0	10,438
6,0	0,023	10,0	0,0009	0,0009	10,0	10,441

Dioda krzemowa

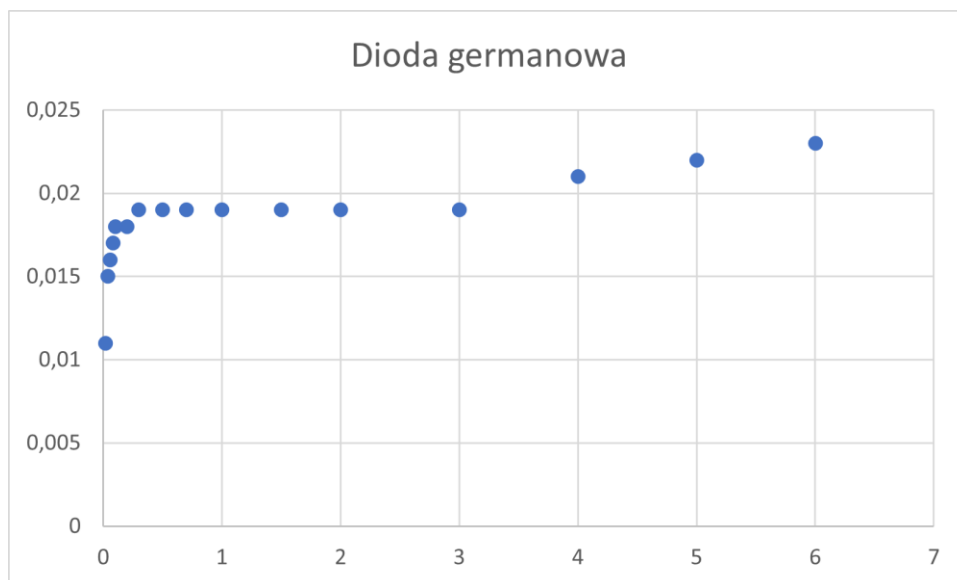
Current I (mA)	Voltage U (V)
0.1	0.00000
0.2	0.00000
0.3	0.00000
0.4	0.00000
0.5	0.00000
1.5	0.00000
2.0	0.00010
3.0	0.00020
4.0	0.00030
5.0	0.00040
6.0	0.00050
7.0	0.00060
8.0	0.00070
9.0	0.00080
10.0	0.00090

Dioda świecąca

Current I (A)	Power P (W)
0.2	0.00000
0.4	0.00000
0.6	0.00000
0.8	0.00000
1.0	0.00000
1.5	0.00000
2.0	0.00010
3.0	0.00020
4.0	0.00030
5.0	0.00040
6.0	0.00050
7.0	0.00060
8.0	0.00070
9.0	0.00080
10.0	0.00090

Dioda Zenera

U [V]	I [A]
10,32	0,1
10,34	0,2
10,36	0,3
10,37	0,5
10,38	1,0
10,39	1,5
10,40	2,0
10,41	3,0
10,42	5,0
10,43	6,0
10,44	8,0
10,45	9,0
10,46	10,0



Rys. 3. Wykres przedstawiający charakterystyki prądowo-napięciowe w kierunku zaporowym.

Dla kierunku zaporowego obliczyliśmy napięcie stabilizujące dla diody Zenera wykorzystując wzór (5). Otrzymana wartość wynosi $U_Z = 10,417 \text{ V}$. za pomocą wzoru (6) obliczyliśmy również współczynnik stabilizacji $Z = 0,00336$.

5. Podsumowanie

Uzyskana długość fali dla diody świecącej wyniosła o $\lambda = 389,92 \text{ nm}$ co odpowiada kolorowi fioletowemu. Jest to zgodne z obserwowanym kolorem. Udało się także stwierdzić iż dioda Zenera została wykonana z arsenku galu, ponieważ jego przerwa energetyczna równa $E_{gGaAs} = 1,43 \text{ eV}$. Współczynnik stabilizacji dla diody Zenera wyniósł $Z = 0,00336$.

6. Literatura

- [1] - https://pl.wikipedia.org/wiki/Przerwa_energetyczna
- [2] - <https://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%9Awiat%C5%82o>