Czy i dlaczego opór półprzewodników jest zależny od temperatury?

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Film samouczek
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela

Źródło: dostępny w internecie: https://lovepik.com/image-605724391/blue-big-data-internet-banner-poster-background.html [dostęp 11.07.2022].

Czy to nie ciekawe?

Typową właściwością metali jest wzrost oporu elektrycznego wraz ze wzrostem temperatury. Dla półprzewodników samoistnych – bez domieszek wzrost temperatury powoduje spadek oporu. Natomiast w półprzewodnikach domieszkowych w zależności od rodzaju materiału i zakresu zmian temperatur opór elektryczny może maleć, być praktycznie stały, a nawet rosnąć wraz ze wzrostem temperatury.

Twoje cele

- Dowiesz się, jakie czynniki wpływają na opór elektryczny materiałów,
- Poznasz wpływ temperatury na koncentrację i ruchliwość nośników,
- Zrozumiesz, dlaczego i jak temperatura wpływa na opór elektryczny półprzewodników,
- Zastosujesz zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań,
- Przeanalizujesz i zinterpretujesz wykresy zależności koncentracji i ruchliwości nośników od temperatury i oporu właściwego od temperatury.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Zdolność materiału do przewodzenia prądu elektrycznego można opisać wielkością fizyczną nazywaną oporem elektrycznym właściwym. Oznacza się go literą ρ, jednostką jest Ωm.

Opór elektryczny właściwy możemy opisać wzorem:

$$\rho = \frac{RS}{l} \qquad (1)$$

gdzie ρ – opór elektryczny właściwy, R – opór elektryczny elementu, S – pole przekroju poprzecznego elementu, l – długość elementu.

Im mniejszy opór elektryczny właściwy materiału, tym lepiej przewodzi prąd elektryczny.

Opór elektryczny właściwy związany jest z właściwościami mikroskopowymi materiału poprzez koncentrację nośników n i ruchliwość nośników μ.

Koncentracja nośników oznaczana jest literą n. Jest to ilość nośników w jednostce objętości materiału.

Ruchliwość nośników oznacza się literą μ. Opisuje ona wpływ zewnętrznego pola elektrycznego na średnią prędkość dryfu nośników. Wyrażamy ją wzorem:

$$\mu = \frac{u}{E} \qquad (2)$$

gdzie u – średnia prędkość dryfu nośników, E – wartość natężenia zewnętrznego pola elektrycznego.

Natężenie pola elektrycznego jest wielkością fizyczną opisującą siłę, z jaką pole elektryczne działa na ładunki elektryczne:

$$\vec{F} = \vec{E} \cdot q \qquad (3)$$

gdzie $\overrightarrow{F}$ – siła, z jaką pole elektryczne działa na ładunek q, $\overrightarrow{E}$ – natężenie pola elektrycznego.

Związek między oporem elektrycznym właściwym a ruchliwością i koncentracją nośników wyraża wzór:

$$\rho = \frac{1}{en\mu} \qquad (4)$$

gdzie $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ - ładunek elementarny.

W półprzewodnikach występują dwa rodzaje nośników prądu: elektrony – nośniki ładunku ujemnego i dziury, które są nośnikami ładunku dodatniego. Koncentracja tych nośników zależy od temperatury, a także od domieszek, wprowadzanych właśnie w celu zmiany koncentracji nośników.

Półprzewodniki samoistne

W półprzewodnikach wzrost temperatury powoduje wzrost energii drgań atomów sieci krystalicznej, co istotnie zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania przez elektrony walencyjne energii z zakresu pasma przewodnictwa. Przejściu elektronu walencyjnego do stanu przewodnictwa towarzyszy powstanie dziury w pasmie walencyjnym – jednocześnie powstaje para nośników prądu przeciwnego znaku. Dlatego, w półprzewodnikach samoistnych koncentracja nośników obu rodzajów jest jednakowa. Więcej o pasmowej teorii przewodnictwa możesz przeczytać w e-materiale „Jak zbudowane są metale". Wpływ temperatury na koncentrację nośników w półprzewodnikach samoistnych przedstawia tabela (Rys. 1.).

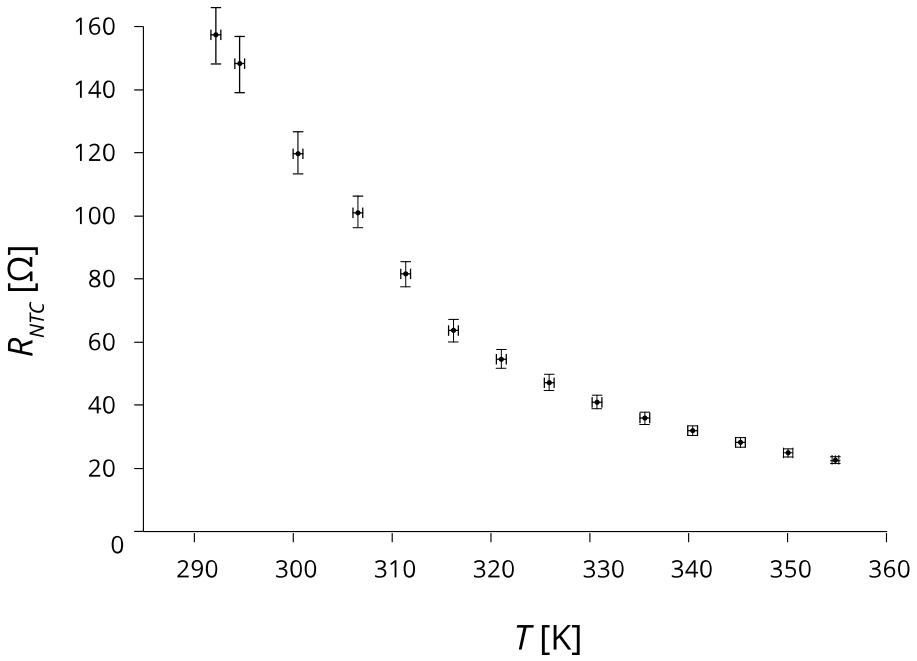
Rys. 1. Koncentracja nośników samoistnych w półprzewodnikach w różnych temperaturach

T[K]	$n_1 \left[m^{-3}\right]$		
	Si	**Ge**	**GaAs**
200	$6,1 \cdot 10^{10}$	$5,5 \cdot 10^{16}$	10^{6}
300	$1,5 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{19}$	10^{13}
500	$9,2 \cdot 10^{19}$	$7,7 \cdot 10^{21}$	$6,1 \cdot 10^{17}$
700	$1,0 \cdot 10^{22}$	$2,7 \cdot 10^{23}$	$1,7 \cdot 10^{20}$

Z przedstawionych danych widać, że wzrost temperatury o kilkaset Kelvinów powoduje silny – o kilka rzędów wielkości – wzrost koncentracji nośników prądu.

Drugim czynnikiem, w znacznie mniejszym stopniu wpływającym na opór elektryczny właściwy, jest ruchliwość nośników, która zależy przede wszystkim od odstępu czasu między zderzeniami dryfujących nośników z drgającymi atomami sieci krystalicznej. W półprzewodnikach samoistnych nośniki tracą energię w wyniku zderzeń z drgającymi atomami sieci krystalicznej, co powoduje spadek ruchliwości przy wzroście temperatury.

Z zależności koncentracji i ruchliwości nośników od temperatury wynika, że opór elektryczny właściwy maleje ze wzrostem temperatury praktycznie w całym zakresie temperatur. Przykładowy wykres zależności oporu od temperatury dla elementu półprzewodnikowego pokazuje Rys. 2.



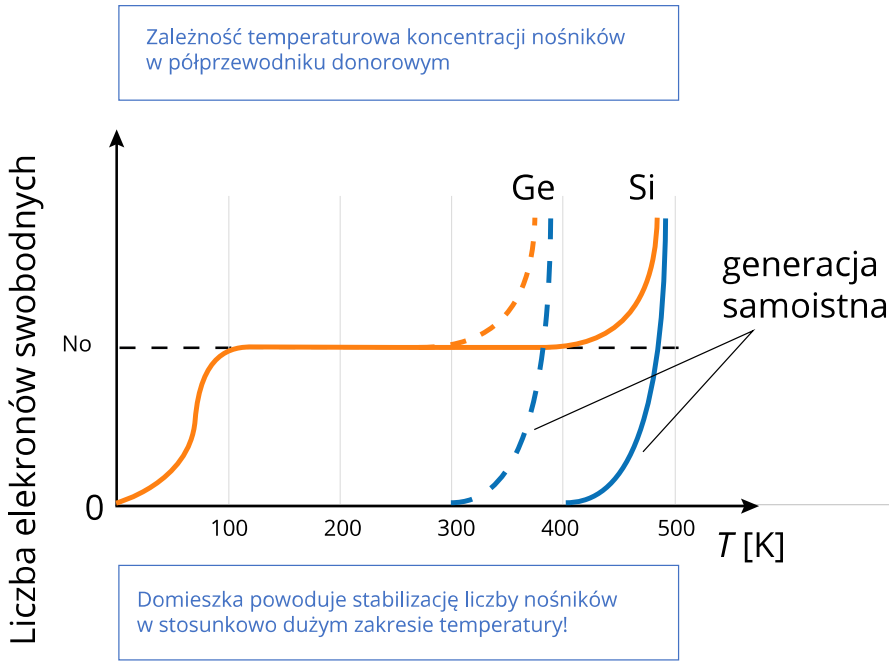
Rys. 2. Wyznaczony doświadczalnie wykres zależności oporu elektrycznego od temperatury dla elementu półprzewodnikowego – termistora typu NTC. Termistory wykorzystuje się jako czujniki temperatury
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Z przedstawionej zależności odczytasz, że przy wzroście temperatury od 290 K = 17°C do 350 K = 77°C opór elektryczny maleje od około 160 Ω do około 20 Ω – przy zmianie temperatury o 60°C opór maleje aż osiem razy.

Półprzewodniki domieszkowe

Kontrolowane domieszkowanie półprzewodników powoduje około milionkrotny wzrost koncentracji jednego rodzaju nośników prądu – nośniki te stają się nośnikami większościowymi i decydują o rodzaju przewodnictwa półprzewodnika. Z tego powodu półprzewodniki domieszkowe dzieli się na dwa typy: półprzewodniki typu *n* – gdzie dominującymi nośnikami prądu są elektrony i typu *p*, w których przeważa przewodnictwo dziur.

W półprzewodnikach domieszkowych zależność koncentracji nośników prądu od temperatury przebiega odmiennie niż dla półprzewodników samoistnych i można go podzielić na trzy przedziały (Rys. 3.):



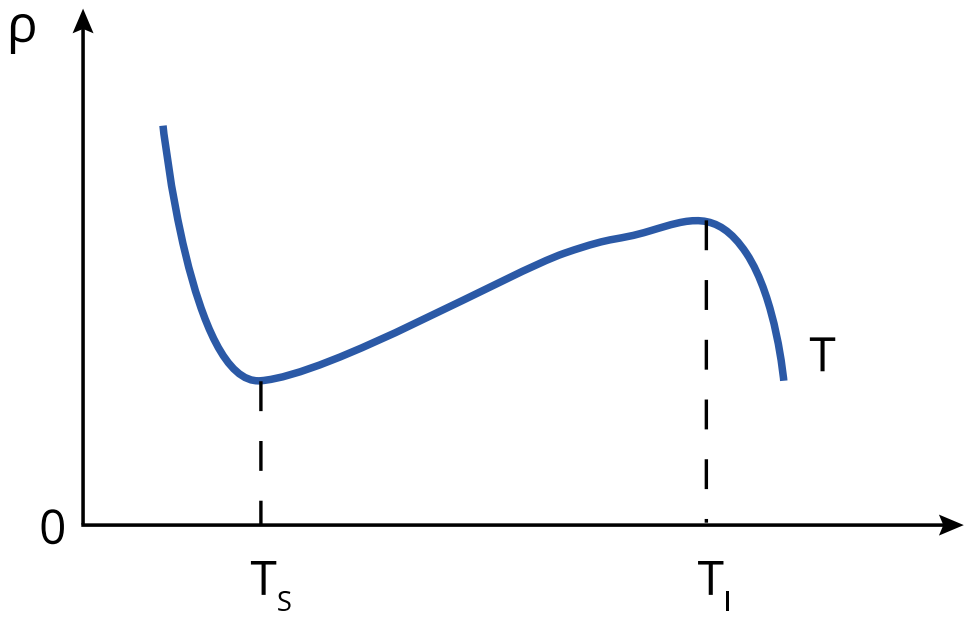
Rys. 3. Zależność koncentracji nośników od temperatury dla półprzewodników domieszkowych typu *n*

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

1. przedział temperatur niskich – do około 100 K, w którym energia drgań termicznych atomów sieci powoduje, że atomy domieszek zaczynają dostarczać właściwych sobie nośników prądu i koncentracja nośników wzrasta;
2. przedział temperatur średnich – od około 100 K do 350-400 K w zależności od materiału, w którym praktycznie wszystkie domieszki oddały swoje nośniki prądu i koncentracja nośników praktycznie się nie zmienia;
3. temperatury wysokie – powyżej 350-400 K, w zakresie których zaczyna wzrastać koncentracja nośników samoistnych – dostarczanych przez atomy pierwiastków macierzystych materiału i ponownie obserwuje się wzrost koncentracji nośników.

Domieszki wpływają również na ruchliwość nośników i poza bardzo niskimi temperaturami – poniżej 100 K, domieszki zmniejszają ruchliwość nośników.

W półprzewodnikach domieszkowych, podobnie jak w samoistnych, większy wpływ na opór elektryczny właściwy wywiera koncentracja nośników prądu. Uwzględniając wpływ domieszek na koncentrację i ruchliwość nośników, przebieg zależności oporu elektrycznego właściwego od temperatury dla półprzewodników domieszkowych można przedstawić schematycznie jak na Rys. 4.



Rys. 4. Zależności oporu elektrycznego właściwego od temperatury dla półprzewodników domieszkowych. T_s – temperatura, w której wszystkie domieszki uwolniły właściwe sobie nośniki prądu, T_i – temperatura, powyżej której staje się istotny wpływ generowanych nośników samoistnych

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Przedziały zmian w przebiegu zależności oporu właściwego od temperatury odpowiadają przedziałom zmian w zależności koncentracji nośników od temperatury. Temperatura T_s wynosi około 100 K czyli -173°C, a temperatura T_i około 350-400 K (77°C-127°C) – w zależności od rodzaju materiału.

W zakresie bardzo niskich temperatur do temperatury T_s, opór właściwy maleje ponieważ rośnie liczba nośników dostarczanych przez domieszki – tzw. nośników większościowych. W temperaturze T_s już praktycznie wszystkie atomy domieszek uwolniły właściwe im nośniki prądu i przy dalszym wzroście temperatury ich koncentracja się praktycznie nie zmienia. Dlatego w zakresie temperatur od T_s do T_i ponieważ koncentracja nośników praktycznie się nie zmienia a maleje ich ruchliwość, rośnie opór elektryczny właściwy półprzewodników.

Na przykład dla krzemu przy koncentracji domieszek rzędu 10^{16} na centymetr sześcienny opór elektryczny właściwy wzrasta od około 0,6 Ωcm przy temperaturze 100 K, do około 5 Ωcm przy temperaturze 300 K i do około 8 Ωcm przy temperaturze 400 K.

Powyżej temperatury T_i zaczyna istotnie wzrastać koncentracja nośników samoistnych i opór elektryczny ponownie zaczyna maleć.

Słowniczek

Opór elektryczny właściwy

(*ang.: specific electrical resistance*) miara zdolności materiału do stawiania oporu przepływającemu prądowi elektrycznemu. Możemy opisać ją wzorem $\rho = \frac{RS}{l}$ gdzie ρ – opór elektryczny właściwy, R – opór elektryczny przewodnika, S – pole przekroju poprzecznego przewodnika, l – długość przewodnika. (Słownik fizyki, Prószyński i S-ka 1999).

Dryf elektronów

(*ang.: electron drift*) przemieszczanie się elektronów w sposób uporządkowany pod wpływem zewnętrznego czynnika wymuszającego – np. pola elektrycznego (Encyklopedia szkolna fizyka, wyd. Zielona Sowa 2006).

Natężenie pola elektrycznego

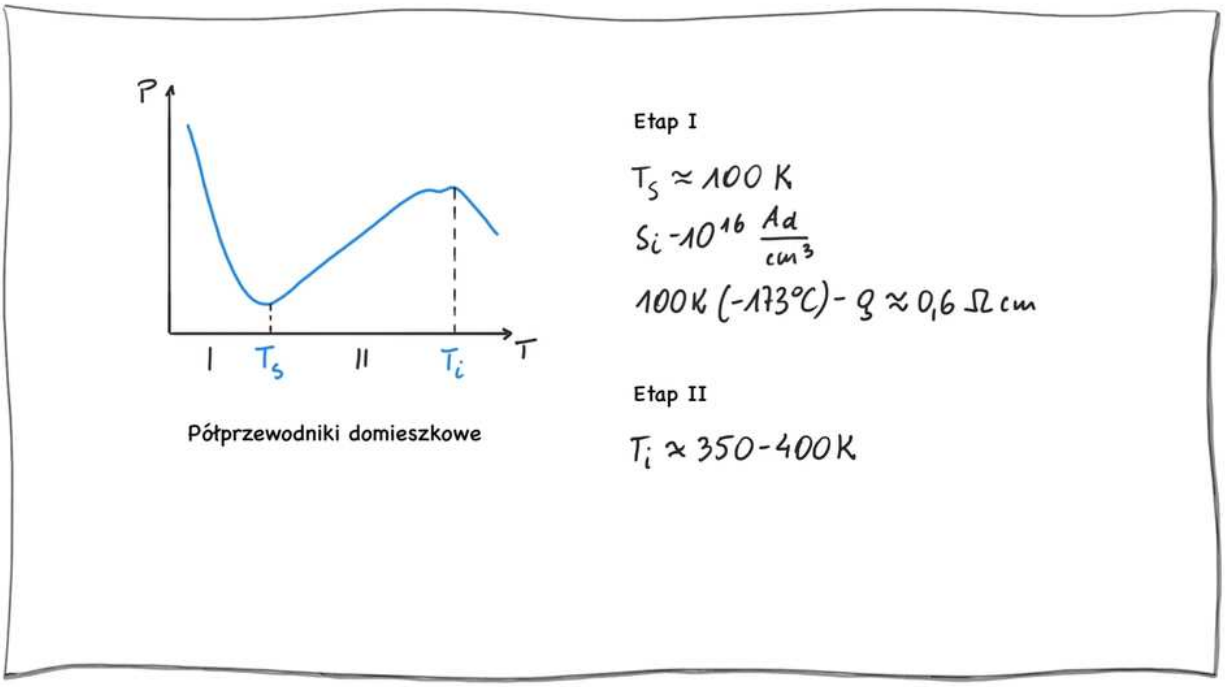
(*ang.: electric field strength*) natężenie pola elektrycznego jest podstawową wielkością opisującą pole elektryczne (i niekiedy samo jest nazywane krótko polem elektrycznym). Jest to wielkość wektorowa zdefiniowana w danym punkcie pola jako stosunek siły, z jaką pole działa na niewielki ładunek dodatni umieszczony w tym punkcie do wartości tego ładunku:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q}$$

Film samouczek

Czy i dlaczego opór półprzewodników jest zależny od temperatury?

Film pokazuje związek między koncentracją i ruchliwością nośników a oporem elektrycznym właściwym i ich zależności od temperatury.



Film dostępny pod adresem /preview/resource/RmEMzGYEeJ385

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Wysłuchaj ścieżki lektorskiej nagrania.

Polecenie 1

Uzasadnij stwierdzenie: Opór elektryczny właściwy półprzewodników samoistnych maleje wraz ze wzrostem temperatury.

Polecenie 2

W półprzewodnikach samoistnych wzrost temperatury w całym zakresie powoduje wzrost koncentracji nośników. W półprzewodnikach domieszkowych:

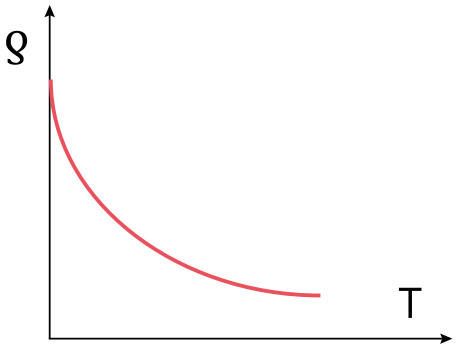
- ○ w pewnym zakresie temperatur wzrost temperatury może spowodować spadek koncentracji nośników na skutek przyłączania ich przez domieszki
- ○ istnieje zakres temperatur, przy którym koncentracja nośników się nie zmienia
- ○ wzrost temperatury powoduje wzrost koncentracji nośników w całym zakresie temperatur podobnie jak w samoistnych

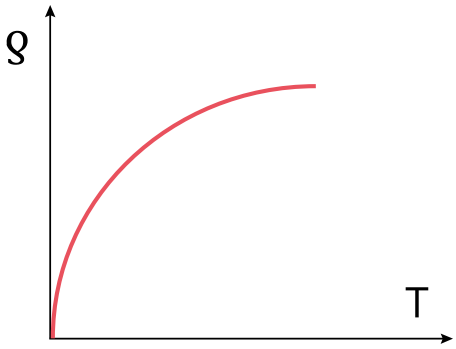
Sprawdź się

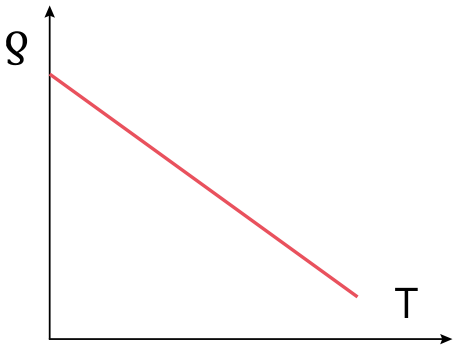
Pokaż ćwiczenia:

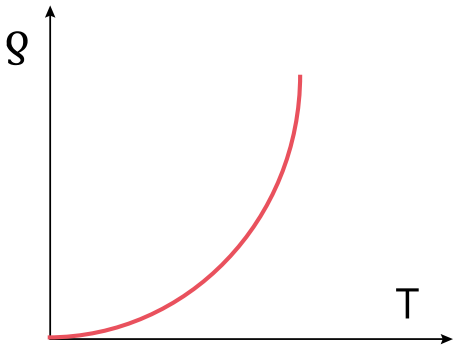
Ćwiczenie 1

Który wykres przedstawia zależność oporu elektrycznego właściwego od temperatury dla półprzewodników samoistnych?









Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Ćwiczenie 2

Na podstawie tabeli, uszereguj półprzewodniki od największego do najmniejszego oporu właściwego w temperaturze 300 K.

Koncentracja nośników samoistnych w półprzewodnikach w różnych temperaturach

T[K]	$n_1 \ [m^{-3}]$		
	Si	Ge	GaAs
200	$6,1 \cdot 10^{10}$	$5,5 \cdot 10^{16}$	10^{6}
300	$1,5 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{19}$	10^{13}
500	$9,2 \cdot 10^{19}$	$7,7 \cdot 10^{21}$	$6,1 \cdot 10^{17}$
700	$1,0 \cdot 10^{22}$	$2,7 \cdot 10^{23}$	$1,7 \cdot 10^{20}$

german

krzem

arsenek galu

Ćwiczenie 3

Wzrost temperatury powoduje jednakowy wzrost koncentracji elektronów i dziur:

- tylko w półprzewodnikach domieszkowych
- w półprzewodnikach samoistnych i domieszkowych
- tylko w półprzewodnikach samoistnych

Ćwiczenie 4

Oceń prawdziwość zdań. Zaznacz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F – jeśli jest fałszywe.

Wzrost temperatury powoduje wzrost ruchliwości nośników we wszystkich rodzajach półprzewodników. P ☐ / F ☐

W półprzewodnika samoistnych wzrost temperatury powoduje spadek ruchliwości nośników P ☐ / F ☐

W półprzewodnikach domieszkowych wzrost temperatury w zależności od zakresu temperatur może powodować wzrost lub spadek oporu elektrycznego właściwego. P ☐ / F ☐

Ćwiczenie 5

Ruchliwość nośników opisuje wpływ zewnętrznego pola elektrycznego na średnią prędkość dryfu nośników. Jednostką ruchliwości wyrażoną w jednostkach podstawowych układu SI jest:

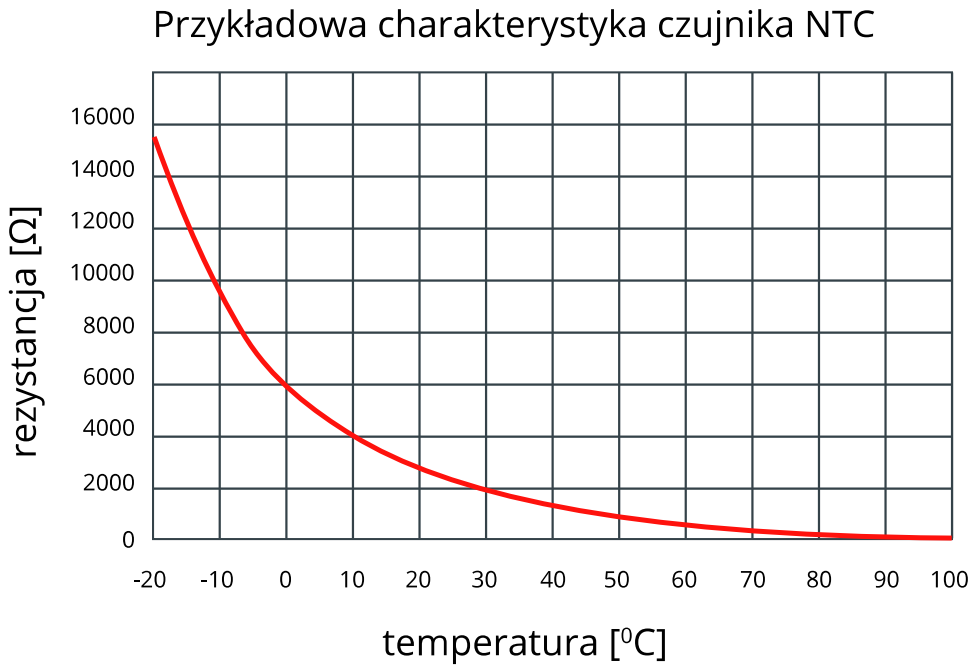
- ○ As^2/kg
- ○ Cs/kg
- ○ Am/N
- ○ m^2/Vs

Ćwiczenie 6

W półprzewodnikach zazwyczaj opór elektryczny właściwy maleje ze wzrostem temperatury. Jednak w półprzewodnikach domieszkowych w typowym zakresie pracy materiałów: -10°C- 60°C opór elektryczny może rosnąć. Dlaczego?

Ćwiczenie 7

W półprzewodnikach samoistnych wzrost temperatury powoduje silny spadek oporu elektrycznego. Ta właściwość jest wykorzystywana w elementach nazywanych termistorami do precyzyjnego pomiaru temperatury. Rysunek przedstawia wykres zależności oporu od temperatury dla typowego termistora.



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Na podstawie wykresu oblicz, ile razy zmniejszy się opór termistora, jeżeli temperatura wzrośnie o dwadzieścia stopni: od -10°C do 10°C.

Odp.: Opór zmniejszy się około _____ krotnie.

Ćwiczenie 8

Jeżeli termistor opisany w ćwiczeniu 7 będzie podłączony do stałego napięcia U = 5 V, to w temperaturze 0°C popłynie przez niego prąd o natężeniu około:

- 0,083 mA
- 830 µA
- 0,83 A
- 8,3 mA

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Jarosław Krakowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Wpływ temperatury na opór półprzewodników**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony
Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. **Zakres podstawowy** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach. VII. Prąd elektryczny. Uczeń: 2) rozróżnia metale i półprzewodniki: omawia zależność oporu od temperatury dla metali i półprzewodników. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach. VIII. Prąd elektryczny . Uczeń: 4) opisuje wpływ temperatury na opór metali i półprzewodników.

Kształtowane kompetencje kluczowe:	**Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:** • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	Uczeń: 1. przedstawi czynniki wpływające na opór elektryczny materiałów i wpływ temperatury na koncentrację i ruchliwość nośników. 2. omówi związek między oporem elektrycznym właściwym a koncentracją i ruchliwością nośników. 3. zastosuje zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań. 4. przeanalizuje i zinterpretuje wykresy zależności koncentracji i ruchliwości nośników od temperatury i oporu właściwego od temperatury.
Strategie nauczania:	IBSE (Inquiry-Based Science Education - nauczanie/uczenie się przedmiotów przyrodniczych przez odkrywanie/dociekanie naukowe).
Metody nauczania:	- wykład problemowy, - burza mózgów, - pokaz multimedialny.
Formy zajęć:	- praca zespołowa, - praca w parach.
Środki dydaktyczne:	Wykresy zależności ruchliwości nośników, koncentracji nośników i oporu elektrycznego właściwego od temperatury. Animacja pokazująca przepływ prądu.
Materiały pomocnicze:	rzutnik mulimedialny
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel zadaje pytania: Co to jest opór elektryczny właściwy? Z czego wynika opór elektryczny materiałów? Oczekiwana odpowiedź: Opór zależy od ilości nośników i od tego, jak często tracą energię uzyskiwaną od zewnętrznego pola.	

Faza realizacyjna:	
1. Nauczyciel omawia wielkości fizyczne: koncentracja i ruchliwość nośników i podaje ich związek z oporem elektrycznym właściwym. 2. Nauczyciel przedstawia wykresy zależności koncentracji nośników od temperatury i ruchliwości nośników od temperatury dla półprzewodników samoistnych, zwracając uwagę na silny wzrost koncentracji ze wzrostem temperatury. 3. Na podstawie analizy wykresów uczniowie z pomocą nauczyciela przewidują wpływ temperatury na opór elektryczny właściwy półprzewodników samoistnych. 4. Nauczyciel przedstawia wykres doświadczalny zależności oporu od temperatury dla półprzewodników samoistnych. 5. Powtórzenie czynności 2-4 dla półprzewodników domieszkowych.	
Faza podsumowująca:	
Uczniowie rozwiązują zadania 2, 3, 4, 6 z zestawu ćwiczeń.	
Praca domowa:	
Zadania 1, 5, 7, 8 z zestawu ćwiczeń.	
Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:	Multimedium może być wykorzystywane przy powtarzaniu wiadomości i na lekcjach, na których są omawiane właściwości półprzewodników.