



Półprzewodniki typu p

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Animacja](#)
- [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 ?

W materiałach półprzewodnikowych występują dwa rodzaje nośników prądu: elektrony - będące nośnikami ładunku ujemnego i tak zwane dziury, które są nośnikami ładunku dodatniego. Dodając odpowiednie domieszki można regulować liczbę poszczególnych nośników prądu i dzięki temu sposób przewodzenia prądu. Możliwość regulowania sposobu przewodzenia prądu istotnie wpływa na zastosowania półprzewodników do przetwarzania sygnałów elektrycznych.

Twoje cele

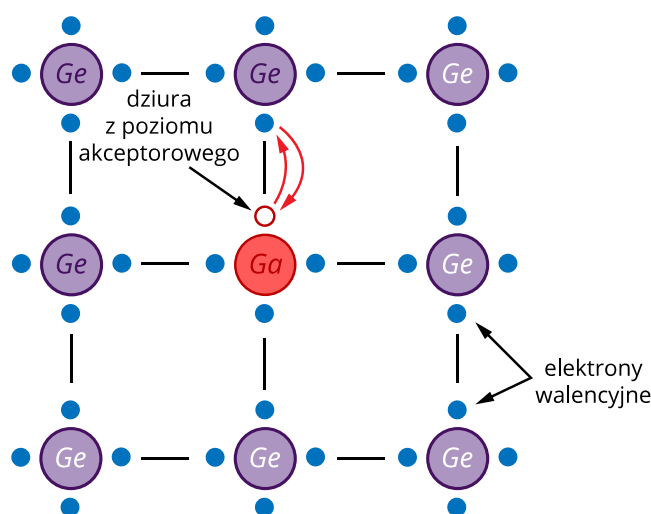
- dowiesz się, co to jest półprzewodnik typu p ,
- poznasz wpływ domieszek na liczbę nośników prądu,
- zrozumiesz, dlaczego domieszki powodują wzrost liczby nośników prądu w półprzewodnikach, a tym samym zmniejszenie oporu elektrycznego,
- zastosujesz zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań,
- przeanalizujesz i zinterpretujesz animację ilustrującą wpływ domieszek na liczbę nośników prądu w półprzewodnikach.

Przeczytaj

Warto przeczytać

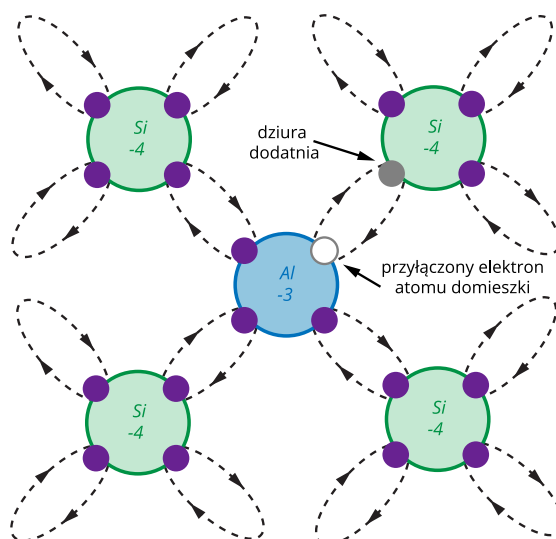
W półprzewodnikach typu *p* dominującymi nośnikami prądu są tak zwane dziury, czyli wolne miejsca po elektronie w wiązaniu międzyatomowym. Przemieszczającym się dziurom przypisuje się dodatni ładunek elektryczny. Więcej o nośnikach prądu w półprzewodnikach przeczytasz w e-materiale: „W jaki sposób półprzewodniki przewodzą prąd elektryczny”.

Liczbę dziur w krzemie i germanie zwiększa się, gdy dodaje się do kryształów tych pierwiastków atomy innych pierwiastków – trójwartościowe – z trzynastej grupy układu okresowego. Najczęściej są to atomy boru i glinu, mogą też być to atomy galu lub indu. Atomy te wykorzystują do tworzenia wspólnych par elektronowych z sąsiednimi atomami pierwiastka macierzystego swoje trzy elektrony walencyjne. W wiązaniu z jednym z czterech sąsiadów brakuje do utworzenia pary jednego elektronu – w sposób naturalny tworzy się dziura (Rys. 1a., Rys. 1b.).



Rys. 1a. Model domieszki typu *p* w germanie.

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

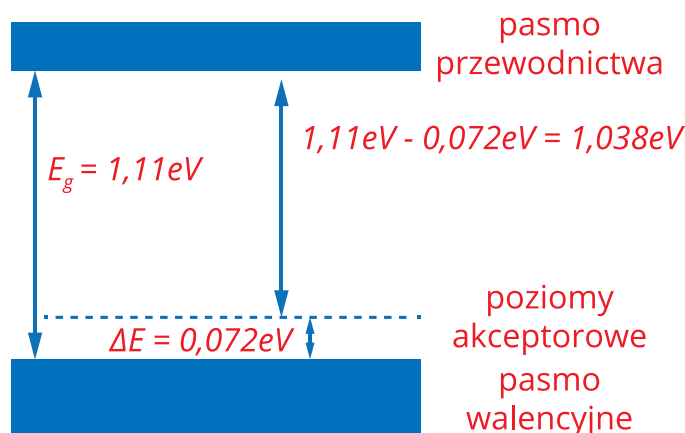


Rys. 1b. Model domieszki typu *p* w krzemie.

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

W związkach półprzewodnikowych przewodnictwo typu *p* uzyskuje się na różne sposoby. Może to być domieszkowanie pierwiastkami dwuwartościowymi. Na przykład arsenek galu może być domieszkowany berylem lub cynkiem. Przewodnictwo typu *p* w arsenku galu można też uzyskać podstawiając w miejsce arsenu krzem lub german.

Teoria pasmowa przewodnictwa, o której możesz przeczytać w e-materiale „Jak zbudowane są metale”, efekty związane z domieszkowaniem typu *p* tłumaczy wprowadzeniem przez atomy domieszek nieobsadzonych poziomów energetycznych o energii niewiele większej (rzędu 10^{-2} eV) od energii elektronów walencyjnych. Poziomy te nazywane są akceptorowymi, ponieważ chętnie przyjmują elektrony z pasma walencyjnego. Rys. 2. pokazuje różnice energii między poziomami energetycznymi w krzemie domieszkowanym glinem.



Rys. 2. Poziomy akceptorowe wprowadzone do krzemu przez aluminium typu *p* w modelu pasmowym.

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

Rys. 2. pokazuje, że odległość energetyczna między pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa, nazywana przerwą wzbronioną, w krzemie wynosi 1,11 eV. Czyli elektrony walencyjne, aby posiadać energię z zakresu pasma przewodnictwa, muszą uzyskać energię co najmniej 1,11 eV. Przerwa wzbroniona na Rys. 2. oznaczona jest jako E_g . Gdy elektrony uzyskują energię z zakresu pasma przewodnictwa, pozostawiają dziury w pasmie walencyjnym, pomiędzy którymi mogą się przemieszczać elektrony o energii z zakresu pasma walencyjnego. Ruch elektronów pomiędzy wolnymi stanami energetycznymi w pasmie walencyjnym opisuje się jako zwrócony przeciwnie do ruchu elektronów, ruch dodatnich nośników prądu – dziur.

W półprzewodnikach samoistnych (bez domieszek) liczba elektronów w pasmie przewodnictwa i dziur w pasmie walencyjnym jest jednakowa – każdy elektron uzyskujący energię z zakresu pasma przewodnictwa, pozostawia dziurę w pasmie walencyjnym.

Dodanie atomów glinu do krzemu powoduje powstanie nieobsadzonych poziomów energetycznych odległych energetycznie tylko o 0,072 eV od pasma walencyjnego. Elektrony o energii z zakresu pasma walencyjnego łatwo uzyskują taką energię od drgających atomów sieci krystalicznej i przechodzą w zakres energii poziomów akceptorowych. Elektrony, które osiągną energię poziomów akceptorowych, nie mogą przemieszczać się w kryształ – są przez ten poziom „uwięzione”. Pozostawiają jednak w pasmie walencyjnym nieobsadzone stany energetyczne – czyli dziury, pomiędzy którymi mogą się przemieszczać elektrony o energii z zakresu pasma walencyjnego. Dziury tworzą się zatem bez przechodzenia elektronów z zakresu energii pasma walencyjnego do zakresu pasma przewodnictwa. Dlatego też dziury stają się dominującymi nośnikami prądu w półprzewodnikach typu *p*.

Podobnie, jak dodanie atomów glinu do krzemu, działa dodanie atomów glinu do germanu. Także bor, ind lub gal mogą być bardzo dobrymi domieszkami krzemu lub germanu. Na przykład bor wprowadza do germanu poziomy akceptorowe o energii o 0,011 eV, a w krzemie o 0,045 eV wyższe niż energia z zakresu pasma walencyjnego. Energia, jaką muszą uzyskać elektrony walencyjne, aby przejść w zakres energii pasm przewodnictwa jest kilkadziesiąt razy większa. W germanie wynosi około 0,67 eV, w krzemie 1,11 eV.

Typowa liczba atomów domieszek, jaką się dodaje, wynosi około 10^{15} – 10^{18} atomów domieszek na cm^3 – tak, jak w półprzewodnikach typu *n*. Powoduje to zmniejszenie oporu elektrycznego od tysiąca do stu tysięcy razy

w porównaniu z półprzewodnikiem samoistnym. Wpływ domieszek na **opór elektryczny właściwy** krzemu ilustruje tabela:

Koncentracja domieszek [1/cm ³]	5·10 ¹²	10 ¹³	5·10 ¹³	10 ¹⁴	5·10 ¹⁴	10 ¹⁵	5·10 ¹⁵	10 ¹⁶	5·10 ¹⁶	10 ¹⁷	5·10 ¹⁷	10 ¹⁸
Opór elektryczny właściwy półprzewodnika typu <i>n</i> [Ωcm]	1000	400	200	50	10	5	1	0,5	0,18	0,1	0,04	0,01
Opór elektryczny właściwy półprzewodnika typu <i>p</i> [Ωcm]	3000	1500	500	150	30	15	3	2	1	0,2	0,08	0,03

Dane umieszczone w tabeli pokazują, że większy **opór właściwy** przy tej samej koncentracji domieszek mają półprzewodniki typu *p*. Wynika to z mniejszej **ruchliwości** dziur niż elektronów swobodnych.

Słowniczek

elektronowolt

(ang.: *electronvolt*) jednostka energii równa energii kinetycznej, jaką uzyskuje elektron rozpędzony napięciem 1 V. Stąd 1 eV = 1,6·10⁻¹⁹ CV = 1,6·10⁻¹⁹ J.

opór elektryczny właściwy

(ang.: *electrical resistivity*) 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.

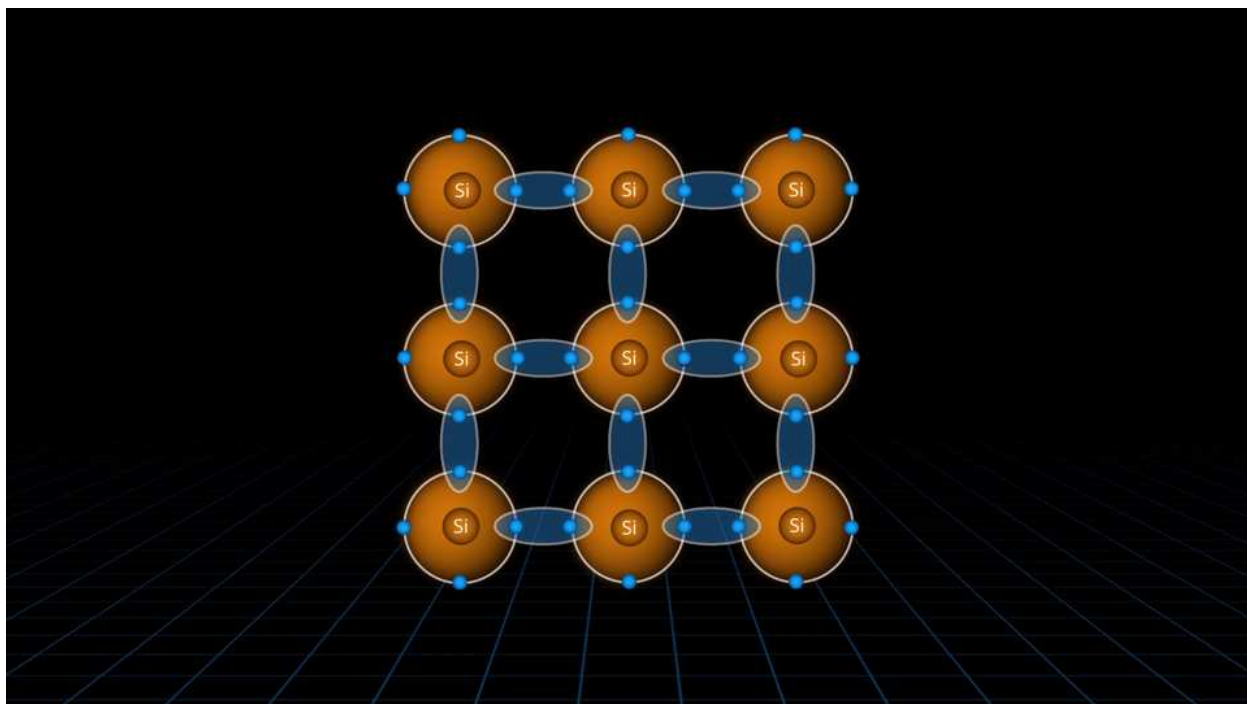
ruchliwość nośników

(ang.: *electron mobility*) wielkość opisująca wpływ zewnętrznego pola elektrycznego na średnią prędkość dryfu nośników. Wyrażamy ją wzorem $\mu = \frac{u}{E}$, gdzie μ - ruchliwość u- średnia prędkość dryfu nośników, E- natężenie zewnętrznego pola elektrycznego.

Animacja

Półprzewodniki typu p

Animacja pokazuje, w jaki sposób domieszki zwiększają liczbę dziur w półprzewodnikach na przykładzie krzemu domieszkowanego borem.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1DwFmCwM2aLz>

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

Zapoznaj się z audiodeskrypcją animacji.

Polecenie 1

Domieszkami typu p są atomy, które w porównaniu z atomami materiału macierzystego mają:

- ☐ o jeden mniej elektron walencyjny
- ☐ o dwa mniej elektrony walencyjne
- ☐ o jeden więcej elektron walencyjny
- ☐ o dwa więcej elektrony walencyjne

Polecenie 2

Uzupełnij tekst.

Jeżeli do krzemu doda się niewielką liczbę trójwartościowego boru, to atomowi boru brakuje jednego do utworzenia jednej z pary wiązań z sąsiednimi atomami. Tworzy się – brak elektronu w wiązaniu. W miejsce to mogą przeskakiwać elektrony z sąsiednich wiązań. Powstaje efekt przemieszczania się pustego miejsca po elektronie, który można interpretować jako ruch nośnika prądu.

jonów

atomów

elektronu

ujemnego

dodatniego

dziura

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Wybierz pierwiastki, które mogą być domieszką typu p w krzemie:

fosfor ☐

węgiel ☐

ind ☐

siarka ☐

bor ☐

azot ☐

german ☐

Ćwiczenie 2



W półprzewodniku typu p nośnikami prądu elektrycznego są:



wyłącznie dziury



elektrony i dziury, ale dominuje przewodnictwo elektronów



elektrony i dziury, ale dominuje przewodnictwo dziur



wyłącznie elektrony

Ćwiczenie 3



Przerwa wzbroniona – czyli najmniejsza energia, jaką muszą otrzymać elektrony walencyjne, aby uzyskać energię z zakresu pasma przewodnictwa – w germanie samoistnym wynosi około 0,67 eV. Domieszkowanie borem wprowadza poziomy akceptorowe, dla których odległość energetyczna od pasma walencyjnego wynosi około 11 meV. Ile razy mniejsza jest energia, jaką potrzebują elektrony walencyjne, aby przejść do poziomu akceptorowego, w stosunku do energii, jaką muszą mieć, aby przejść do pasma przewodnictwa? Odpowiedź podaj w postaci liczby całkowitej.

Odpowiedź: razy

Ćwiczenie 4



Tabela ilustruje wpływ koncentracji domieszek typu n i p na opór elektryczny właściwy krzemu.

Koncentracja domieszek [1/cm ³]	$5 \cdot 10^{12}$	10^{13}	$5 \cdot 10^{13}$	10^{14}	$5 \cdot 10^{14}$	10^{15}	$5 \cdot 10^{15}$
Opór elektryczny właściwy półprzewodnika typu n [Ωcm]	1000	400	200	50	10	5	1
Opór elektryczny właściwy półprzewodnika typu p [Ωcm]	3000	1500	500	150	30	15	3

Łączymy równolegle dwa elementy o jednakowych wymiarach i jednakowej koncentracji domieszek - 10^{16} na centymetr sześcienny. Jeden z elementów wykonano z krzemu typu n , drugi z krzemu typu p . Znajdź odpowiednie dane w tabeli i wyznacz stosunek natężenia prądu płynącego przez element wykonany z półprzewodnika typu n do natężenia prądu płynącego przez element wykonany z półprzewodnika typu p .

Ćwiczenie 5



Bor wprowadza do germanu poziomy akceptorowe o energii 0,011 eV, a do krzemu – o energii 0,045 eV. Energia ta jest określona w stosunku do pasma walencyjnego. Wynika z tego, że:



elektrony walencyjne w germanie potrzebują około cztery razy więcej energii, aby przejść do poziomu akceptorowego



elektrony walencyjne w germanie potrzebują około cztery razy więcej energii, aby przejść do poziomu przewodnictwa



elektrony walencyjne w germanie potrzebują około cztery razy mniej energii, aby przejść do poziomu akceptorowego



elektrony walencyjne w germanie potrzebują około cztery razy mniej energii, aby przejść do poziomu przewodnictwa

Ćwiczenie 6



Wprowadzenie do materiałów półprzewodnikowych domieszek typu *p* powoduje między innymi:



zwiększenie koncentracji elektronów swobodnych i dziur



zwiększenie ruchliwości nośników prądu



zwiększenie koncentracji dziur



zwiększenie koncentracji elektronów swobodnych

Ćwiczenie 7



Dla danego materiału, przy tej samej koncentracji domieszek typu n i p , opór elektryczny właściwy półprzewodników typu p jest większy niż półprzewodników typu n . Przyczyną tego jest:

- ☐ mniejsza koncentracja dziur niż elektronów przy tej samej koncentracji atomów domieszek danego typu
- ☐ większy ładunek elektryczny elektronów niż dziur
- ☐ większa ruchliwość elektronów niż dziur

Ćwiczenie 8



Atomy glinu wprowadzone do krzemu tworzą poziomy akceptorowe o energii 1,038 eV mniejszej niż energia elektronów z zakresu pasma przewodnictwa. Przerwa wzbroniona w krzemie wynosi około 1,11 eV. Wynika z tego, że energia, jaką potrzebują elektrony z pasma walencyjnego, aby przejść do poziomów akceptorowych, wynosi około:

- ☐ 72 meV
- ☐ 72 eV
- ☐ 0,72 meV
- ☐ 0,72 eV

Dla nauczyciela

Scenariusz lekcji

Imię i nazwisko autora:	Jarosław Krakowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Półprzewodniki typu p
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	Cele kształcenia – wymagania ogólne II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. Zakres rozszerzony Treści nauczania – wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. VIII. Prąd elektryczny. Uczeń: 1) opisuje przewodnictwo w metalach, elektrolitach i gazach; wyjaśnia proces jonizacji w gazach, wskazuje rolę promieniowania, wysokiej temperatury i dużego natężenia pola elektrycznego.
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. wyjaśni, co to jest półprzewodnik typu <i>p</i>. 2. omówi wpływ domieszek na ilość nośników prądu. 3. wyjaśni, dlaczego domieszki powodują wzrost liczby nośników prądu w półprzewodnikach, a tym samym zmniejszenie ich oporu elektrycznego. 4. zastosuje zdobytą wiedzę do rozwiązywania zadań. 5. przeanalizuje i zinterpretuje interaktywną animację ilustrującą wpływ domieszek na ilość nośników prądu.
Strategie nauczania:	IBSE (Inquiry-Based Science Education - nauczanie/uczenie się przedmiotów przyrodniczych przez odkrywanie/dociekanie naukowe)
Metody nauczania:	- burza mózgów, - wykład informacyjny.
Formy zajęć:	- praca w parach, - praca w grupach.
Środki dydaktyczne:	animacja, ilustrująca wpływ domieszek typu <i>p</i> na koncentrację nośników prądu, zestaw zadań, rzutnik z dostępem do internetu.
Materiały pomocnicze:	brak
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Pytania nauczyciela: 1. Co wiecie o półprzewodnikach? Podsumowanie odpowiedzi: półprzewodniki są stosowane powszechnie w elektronice, przewodzą prąd elektryczny gorzej niż metale. 2. Jakie nośniki prądu występują w półprzewodnikach i jak powstają? Podsumowanie odpowiedzi: elektrony i dziury powstające parami w wyniku urywania się elektronów z wiązań międzyatomowych.	
Faza realizacyjna:	
Nauczyciel objaśnia, wykorzystując multimedia, dlaczego wprowadzenie domieszek powoduje wzrost liczby nośników prądu i zmniejszenie oporu elektrycznego półprzewodników.	
Faza podsumowująca:	

Uczniowie rozwiązują zadania: 1-4 z zestawu ćwiczeń w celu zweryfikowania osiągniętej wiedzy. Nauczyciel pełni rolę doradcy, obserwuje i kontroluje pracę uczniów.

Praca domowa:

Zadania 5-8 z zestawu ćwiczeń w celu powtórzenia i utrwalenia zdobytych na lekcji wiadomości.

**Wskazówki
metodyczne opisujące
różne zastosowania
danego multimedium:**

Animacja może być wykorzystana przy powtórzeniu wiadomości i realizowaniu innych tematów z zakresu półprzewodników.