

1. Materiały elektroniczne

Wstęp

Na ekranie **1.1.** zaprezentowano pierwszą stronę modułu lekcji wykładowej o materiałach elektronicznych w jej wersji poglądowej.

Wykład o materiałach elektronicznych-wersja poglądowa

Otrzymałeś dotąd 0 punktów z 0

Wstęp

Kluczem do wiedzy na temat działania elementów i układów elektronicznych jest znajomość zjawisk fizycznych zachodzących w materiałach wykorzystywanych do ich realizacji (**metale, półprzewodniki izolatory**) już na poziomie budowy struktur atomowych. Bardzo pomocne w tej kwestii są modele pasmowe takich struktur, na bazie których można wyjaśnić takie pojęcia jak: domieszkowanie półprzewodników, koncentracja nośników ładunku w materiałach, pojęcie konduktancji oraz mechanizmy transportu nośników ładunku i to jest przedmiotem pierwszej lekcji kursu. Niektóre treści tej lekcji wymagają odtwarzania animacji flash oraz wykorzystują technikę unity 3D. Jeśli więc używana przeglądarka nie obsługuje w/w dodatków przed przystąpieniem do lekcji należy je zainstalować lub zmienić przeglądarkę (preferowana Internet Explorer).

Celem sprawnej realizacji przebiegu tej lekcji zaleca się zgromadzenie następującej literatury: J. Hennel "Podstawy elektroniki półprzewodnikowej", W. Marciniak "Przrządy półprzewodnikowe i układy scalone" oraz A. Kusy "Podstawy elektroniki cz. 1 przyrządy półprzewodnikowe"

Ta wersja lekcji jest wersją poglądową i nie obowiązują dla niej zasady zapisane w regulaminie. Można jej w razie potrzeby używać równolegle z lekcją zaliczeniową.



Ekran 1.1. Widok pierwszej strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*.

Zawiera ona ważne **informacje organizacyjne**, wskazujące na konieczność użycia odpowiedniej przeglądarki oraz zalecaną literaturę pomocniczą. Określa też tryb i maksymalny czas realizacji modułu jak również przypomina o aspektach regulaminowych, które mogą pomóc w osiągnięciu pozytywnych rezultatów końcowych. Z powyższych względów **nie zaleca się jej pomijania** jako mniej istotnego elementu całego modułu nie zawierającego treści związanych z zaliczanym materiałem dydaktycznym (brak pytania kontrolnego), gdyż w efekcie końcowym brak zastosowania wstępnych wytycznych, może to doprowadzić do nieporozumień i braku sukcesu końcowego.

Pod treścią widoczny jest przycisk „**Dalej**”, który umożliwia przejście do kolejnej strony modułu (kolejnego tematu). U dołu strony znajduje się rozwijane menu wyboru stron, co ułatwia poruszanie się po wszystkich dostępnych elementach kursu. Warto tu jednak zwrócić uwagę, że w momencie zmiany lokalizacji poprzez użycie wybranego linku, moduł lekcji pozostaje cały czas aktywny i stosując listę rozwijaną opcji - *Przejdź do..* możemy do niego wrócić bez żadnych konsekwencji

Budowa atomu

Fragment treści pierwszego tematu opisywanej tu lekcji wykładowej ilustruje poniżej ekran **1.2.** Wprowadzono tu zagadnienia **budowy atomu**, które są punktem wyjścia do zrozumienia właściwości materiałów elektronicznych (izolatorów, pół-

przewodników i przewodników). Wybór tego fragmentu wiedzy to celowe podejście, ponieważ właściwości makroskopowe materiałów (przewodnictwo, izolacja, półprzewodnictwo) wynikają bezpośrednio z zachowania elektronów na poziomie atomowym.

Stan atomu może być opisany przez tzw **liczby kwantowe** są to :

- **główna liczba kwantowa:** $n = 1, 2, 3, \dots$, która oznacza numer energii elektronu i przypisuje numer **powłoki elektronowej**,
- **poboczna liczba kwantowa:** $l = 0, 1, \dots, n-1$, która oznacza numer podpowłoki elektronowej (**orbitalu**), do której przypisany jest elektron. Na jej podstawie można obliczyć wartość **orbitalnego momentu pędu** :

$$J = \hbar \sqrt{l(l+1)},$$

gdzie: $\hbar = 6,626070040(81) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,135667662(25) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$.

- **magnetyczna liczba kwantowa:** $m_l = -l, \dots, -1, 0, 1, \dots, l$, która oznacza numer **rztu orbitalnego momentu pędu** na wybraną oś i pozwala obliczyć wartość tego rzutu. Przykładowo na oś z zgodnie ze wzorem:

$$J_z = m_l \hbar,$$

- **spinowa liczba kwantowa** : s , która jest stałą liczbą dla danej cząstki i pozwala obliczyć wartość **spinu** cząstki ze wzoru :

$$S = \hbar \sqrt{s(s+1)};$$

w przypadku elektronu gdzie $s=1/2$, mamy:

$$S = \hbar \sqrt{3}/2,$$

- **magnetyczna spinowa liczba kwantowa:** $m_s = -s, -s+1, \dots, s-1, s$, która oznacza numer rzutu spinowego momentu pędu cząstki naabrany kierunek zewnętrznego pola magnetycznego; w przypadku elektronu gdzie $s=1/2$ liczba ta przyjmuje dwie wartości $m_s = -1/2$ oraz $m_s = 1/2$.

Ekran 1.2. Początkowy fragment widoku drugiej strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Budowa Atomu*.

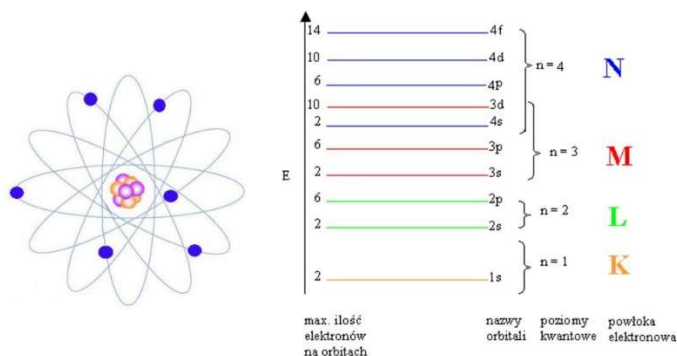
Wiedza ta stanowi **skondensowaną pigułkę** z obszaru **fizyki ciała stałego**, dziedziny która bada makroskopowe właściwości materii, wynikające bezpośrednio z jej struktury atomowej. Ciąg dalszy tego tematu prezentuje ekran **1.3**, gdzie przedstawiono sposoby ilustracji budowy atomu. Z jednej strony atom można sobie wyobrazić jako centralne jądro składające się z nieruchomych cząstek (*protonów* i *neutronów*) wokół którego po swoich orbitach krążą *elektrony* na skutek *oddziaływania Coulomba*¹ (dodatnio naładowanego *jądra* i elektrycznie ujemnych *elektronów*). Z drugiej zaś strony strukturę atomu można przedstawić poprzez rozmieszczenie elektronów na odpowiednio opisanych *powłokach elektronowych* i *orbitalach* z uwzględnieniem *zakazu Pauliego*². Takie podejście pozwala na precyzyjne wyznaczenie dopuszczalnej liczby elektronów na poszczególnych poziomach energetycznych (K, L, M, N) zgodnie z zależnością $2n^2$, co w praktyce inżynierskiej determinuje podział materiałów na *przewodniki*, *izolatory* oraz kluczowe dla elektroniki *półprzewodniki* co zostanie szczegółowo opisane w dalszej

¹ *Prawo Coulomba* – prawo fizyki, opisujące siłę oddziaływania elektrostatycznego ładunków elektrycznych.[36].

² *Reguła Pauliego* (zwana też *zakazem*, *zasadą* lub *prawem Pauliego*) – pojęcie z dziedziny fizyki i chemii, twierdzące, iż prawdopodobieństwo znalezienia pary cząstek o jednakowych liczbach kwantowych w układzie fermionów jest równe zeru.

części skryptu.

Kolejne powłoki elektronowe opisane są przez kolejne wartości głównych poziomów kwantowych lub przyjmują następujące nazwy: **K, L, M, N** itd. Każda z powłok może posiadać elektrony w określonym typie orbitali. Zagadnienie to najlepiej ilustruje Rys 1.1.



Rys. 1.1. Poziomy energetyczne w atomach

Należy tu zwrócić uwagę, że na poziomie **1s** są dwa stany, natomiast na poziomie **2p** jest 6 stanów dozwolonych. Jak więc widać ilość dozwolonych stanów rośnie wraz ze wzrostem energii, co można opisać następująco: na pierwszej powłoce ($n=1$) może się znajdować maksymalnie dwa elektrony ($1^2 \cdot 2=2$), na drugiej ($n=2$) liczba ta wynosi 8 ($2^2 \cdot 2=8$), na trzeciej ($n=3$) jest to już 18 ($3^2 \cdot 2=18$), natomiast na czwartej dochodzi do 32 ($4^2 \cdot 2=32$) elektronów. Ogólnie można to opisać zależnością: $2 \cdot n^2$. Ostatnia powłoka nie

Ekran 1.3. Dalszy ciąg widoku drugiej strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* — temat: *Budowa Atomu*.

Ostatnim elementem tego tematu jest prezentacja multimedialna [atom.swf](#), która na stronie kursu jest widoczna w postaci jak na ekranie 1.4.



atom.swf

Prezentacja 1.1. Poziomy energetyczne w atomach.

Każdej z orbit w atomie odpowiada określona wartość energii. Często zamiast określenia orbita używa się pojęcia **poziom** lub **stan energetyczny**. Elektrony mogą się więc znajdować na ściśle określonych poziomach.

Ekran 1.4. Fragment widoku drugiej strony modułu: *Wykład o materiałach*, w którym umieszczono prezentację multimedialną [atom.swf](#)³

Prezentacja została wykonana w technologii *flash*, która obecnie nie jest wspierana przez większość przeglądarek internetowych, dlatego w tych przypadkach efektu jej działania nie zobaczymy bezpośrednio na stronie kursu. Aby można było zapoznać się z jej treścią należy pobrać plik prezentacji na dysk swojego komputera i uruchomić na uprzednio zainstalowanym odtwarzaczu (np. *Adobe Flash Player 32*). Widok działającej animacji ilustruje ekran 1.5. Należy tu dodać, że kurs zawiera wiele tego typu prezentacji, więc poświęcenie czasu na instalację odpowiedniego programu pozwoli na zaoszczędzenie go w późniejszym terminie. Szczegółowe instrukcje oraz niezbędne pakiety instalacyjne, pozwalające na poprawne uruchomienie tych animacji mimo zakończenia oficjalnego wsparcia technologii, można znaleźć na stronie

³ Na kanwie projektu Y. Yakym " *Materiały półprzewodnikowe*", Podstawy elektroniki 2012.

projektu *Ruffle*⁴ lub w serwisach archiwizujących bezpieczne wersje odtwarzaczy, takich jak *Flash Player Archive*⁵.



Ekran 1.5. Widok działającej prezentacji multimedialnej [atom.swf](#).

Treści materiałowe zaprezentowane na tej stronie lekcji, szczególnie dla studentów których znajomość fizyki jest ograniczona do podstaw, mogą wydawać się nieco przytłaczające. Aby je skutecznie przyswoić, najlepiej więc zastosować **metodę kapsułek wiedzy**, czyli podzielić materiał na mniejsze, logicznie powiązane fragmenty i opanowywać je stopniowo. Podział na takie kapsułki przedstawiono po każdym temacie poniżej znajduje pierwsza porcja wiedzy w takim formacie.

Kapsułki wiedzy:

- **Kapsułka 1: Model Bohra jako narzędzie wyobraźni.**

Model Bohra to narzędzie koncepcyjne, nie dosłowny opis rzeczywistości. Skupiamy się tu na zrozumieniu, że elektrony zajmują ściśle określone poziomy energetyczne. Analogia do układu słonecznego ma jedynie pomóc zwizualizować ich hierarchię i nie należy jej traktować zbyt dosłownie.

- **Kapsułka 2: Liczby kwantowe - nie wszystkie są równie ważne.**

Na tym etapie kursu kluczowe są *główna liczba kwantowa (n)* i *koncepcja powłok elektronowych*. Pozostałe *liczby kwantowe* (l , m_l , m_s) i związane z nimi wielkości (J , J_z , S) stanowią obecnie tylko kontekst. Warto jednak przeliczyć ich wartości na konkretnych przykładach, bo takie ćwiczenie może się przydać podczas zadań rachunkowych modułu zaliczeniowego.

- **Kapsułka 3: Wzór $2n^2$ - logika, nie zapamiętywanie**

Wzór $2n^2$ opisuje maksymalną liczbę elektronów na kolejnych powłokach i wyraża prostą zasadę: im dalej od jądra, tym więcej miejsca na elektrony. Pierwsza powłoka ($n=1$) pomieści 2 elektrony, druga ($n=2$) → 8, trzecia ($n=3$) → 18. Zrozumienie tej logiki jest ważniejsze niż samo zapamiętanie wzoru (patrz Rys. 1.1).

- **Kapsułka 4: Układ okresowy jako mapa elektronowa pierwiastków**

Numer porządkowy pierwiastka w układzie Mendelejewa równa się liczbie protonów, a w obojętnym atomie także liczbie elektronów. Krzem ma numer 14, więc

⁴ *Ruffle*: to obecnie najbezpieczniejsza metoda (*emulator*), która pozwala uruchomić pliki *.swf* bezpośrednio w przeglądarce lub jako osobną aplikację bez instalowania starych wtyczek [37].

⁵ *Archive.org*: udostępnia wersje "Projector" (*standalone*), które nie wymagają przeglądarki, użytkownik po prostu otwiera w nich pobrany plik [38]

ma 14 elektronów rozłożonych na trzech powłokach: 2+8+4. Gdy znamy rozkład elektronów dla jednego pierwiastka, schemat dla pozostałych wyznaczamy w analogiczny sposób, czyli zawsze zaczynamy od numeru porządkowego.

- **Kapsułka 5: Powłoka walencyjna - klucz do wszystkiego**

Zewnętrzna powłoka elektronowa, zwana walencyjną, decyduje o właściwościach elektrycznych materiału. Pierwiastki z jednym *elektronem walencyjnym* (np. miedź) są **przewodnikami**, z czterema (np. krzem, german) – **półprzewodnikami**, a z ośmioma (gazy szlachetne) to doskonale **izolatory**. Pierwiastki z 3 lub 5 *elektronami walencyjnymi* pełnią rolę domieszek w półprzewodnikach.

- **Kapsułka 6: Przykład krzemu - konkretne zastosowanie teorii**

Krzem ($Z=14$) ma rozkład elektronów 2+8+4 czyli cztery *elektrony walencyjne* są bezpośrednią przyczyną jego półprzewodnikowego charakteru i fundamentem nowoczesnej elektroniki. Nie jest to przypadek, lecz konsekwencja struktury atomowej wynikająca wprost z poznanych reguł kwantowych.

Dla uczestników kursu dysponujących podstawową wiedzą, niezbędną do zaliczenia tematu, a chcących jednocześnie poszerzenia swoich umiejętności, przygotowano tzw. **Wyzwania inżyniera**, które będą pojawiać się zawsze po kapsułkach wiedzy.

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Głębokie zrozumienie liczb kwantowych.**

Każda *liczba kwantowa* ma fizyczne znaczenie: n określa *energię wiązania elektronu* (im większe n , tym słabiej związany), l – *kształt orbitalu* (s = kula, p = hantel, d = bardziej złożone), m_l – *orientację orbitalu w przestrzeni*, m_s – *kierunek spinu elektronu w polu magnetycznym*. Jak zakaz Pauliego, odwołując się do wszystkich czterech liczb jednocześnie, wyjaśnia, dlaczego dwa elektrony mogą współistnieć na tym samym orbitalu i co się stanie, gdy spróbujemy umieścić trzeci? ☞ *Wskazówka: Czytaj [7], rozdział 3.2, Kwantowomechaniczna teoria atomu wodoru oraz rozdział 3.3, Spin elektronu.*

- **Wyzwanie 2: Wzór $2n^2$ i granice prostoty**

Zastanów się, dlaczego tak prosty wzór jak $2n^2$ bywa jednocześnie niezwykle użyteczny i zarazem ograniczający. Jakie informacje o strukturze atomu pozwala przewidzieć, a czego już nie da się nim wyjaśnić? Przeanalizuj przykład wapnia ($Z=20$) – ile elektronów da się przewidzieć samym wzorem, a gdzie potrzebna jest już wiedza o orbitalach? ☞ *Wskazówka: Poszukaj w literaturze [33] hasel: Orbital atomowy, Konfiguracja elektronowa.*

- **Wyzwanie 3: Układ okresowy jako kod elektronu**

Wyobraź sobie układ okresowy nie jako tabelę chemiczną, lecz jako „mapę” rozkładu elektronów. Jak zmienia się Twoje spojrzenie na tę tablicę, gdy interpretujesz ją nie przez właściwości chemiczne, ale przez logikę powłok elektronowych? ☞ *Wskazówka: Spróbuj prześledzić kolejne okresy w układzie i zauważ, że długość okresu wynika bezpośrednio z pojemności powłok ($2n^2$). Taki trop można znaleźć w każdym kompendium do chemii ogólnej [10].*

- **Wyzwanie 4: Krzem jako przypadek szczególny**

Spróbuj odpowiedzieć, dlaczego to właśnie *krzem*, a nie inny pierwiastek z czterema elektronami walencyjnymi, stał się fundamentem elektroniki. Czy to

wyłącznie kwestia jego budowy atomowej, czy również innych czynników przyrodniczych i technologicznych? ☞ *Wskazówka: Zajrzyjmy do pozycji [36] (hasła: węglowce i krzem),*

W części zaliczeniowej tego tematu należy się spodziewać zarówno zadań obliczeniowych (odpowiedzi *numeryczne*) jak też pytań wymagających odpowiedzi typu *prawda-falsz* lub *dopasuj odpowiedź*. Poniżej określono sposób przygotowania do odpowiedzi na te pytania.

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Przejrzyj interaktywną prezentację "atom.swf"** kilkakrotnie, skupiając się na wizualizacji poziomów energetycznych.

☞ **Ćwicz wzory** na różnych wartościach n, l, s zwracając uwagę na prawidłowe jednostki *stałej Plancka* aż ich obliczanie stanie się dla Ciebie automatyczne.

☞ **Znajdź w układzie okresowym 5-6 pierwiastków** i określ dla każdego liczbę elektronów walencyjnych. **Ćwicz klasyfikację:** 1 elektron walencyjny = przewodnik, 4 elektrony = półprzewodnik, 8 elektronów = izolator.

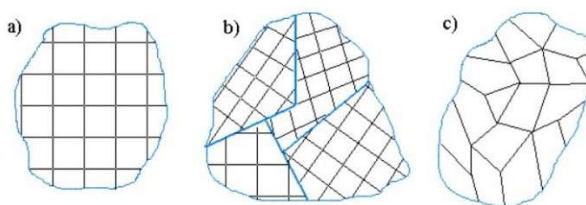
☞ **Przeczytaj polecany podręcznik J. Hennela, ale tylko rozdziały dotyczące budowy atomu** i nie zagłębiaj się w zaawansowane tematy na tym etapie.

☞ **Oblicz wartość orbitalnego momentu pędu elektronu** w atomie dla przypadku, gdy poboczna kwantowa wynosi 2 (odpowiedź podaj w [eV*s])
*Wskazówka: Odp. $L = 1.613 \cdot 10^{-15}$ eV*s.*

Sieci atomowe

Kolejny temat opisywanego tu modułu wykładowego dotyczy sieci atomowych a jego widok prezentuje ekran 1.6. Jego głównym celem jest uświadomienie jak wygląda rozmieszczenie atomów w przestrzeni geometrycznej.

Sieci atomowe w materiałach



Rys.1.2. Obraz sieci atomów w materiałach: a) w monokryształe b) w polikryształe c) w ciele amorficznym.

Ekran 1.6. Fragment widoku strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* — temat: *Sieci atomowe*.

W ramach niniejszego kursu niezbędna wiedza obejmuje właściwości elektryczne ciał stałych w postaci *monokrystalicznej, polikrystalicznej i amorficznej*.

Kapsułki wiedzy:

- **Kapsułka 1: Monokryształ – idealny porządek**

Monokryształ to materiał, w którym cała objętość ma regularny układ atomów połączonych przez **wiązania kowalencyjne**. Jest to kluczowa forma dla elektroniki,

bo tylko w niej własności przewodnictwa są powtarzalne w całej bryle i odnosi się to przede wszystkim do **materiałów półprzewodnikowych**

- **Kapsułka 2: Polikryształ – porządek lokalny**

Polikryształ składa się z wielu uporządkowanych fragmentów (ziaren), ale ich orientacje są przypadkowe. Atomy są połączone przez tzw. **wiązania metaliczne**. Taki układ jest tańszy w produkcji, lecz mniej doskonały niż monokryształ i charakteryzuje **przewodniki (metale)**.

- **Kapsułka 3: Ciała amorficzne – brak regularności**

Amorficzne ciała stałe nie mają uporządkowanej sieci krystalicznej i mogą w nich występować **wszystkie rodzaje wiązań atomowych**. Szkło tworzywa sztuczne, cienkie półprzewodniki to przykłady materiałów amorficznych.

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Monokryształ a własności elektryczne**

Zastanów się, dlaczego w elektronice preferuje się monokryształy, a nie polikryształy. Jakie problemy pojawiają się, gdy granice ziaren zaburzają regularność sieci krystalicznej? ☞ *Wskazówka: Czytaj [7], Rozdział 4 Struktura krystaliczna ciał stałych.*

- **Wyzwanie 2: Granice polikryształu**

Wyobraź sobie *polikryształ* jako mozaikę wielu małych *monokryształków*. Co dzieje się z przepływem prądu, gdy *elektron* napotyka granicę ziarna? Dlaczego takie materiały mogą mieć w tym względzie gorsze parametry przewodnictwa niż *monokryształy* a jak to wygląda w przypadku *metali* (takich jak np. *złoto, srebro, miedź*) ☞ *Wskazówka: Czytaj [9], Rozdział 18 Defekty punktowe fragmenty o defektach i granicach ziaren.*

- **Wyzwanie 3: Amorficzność a elektronika**

Spróbuj wyjaśnić, dlaczego mimo braku uporządkowanej sieci, materiały amorficzne znajdują zastosowanie w elektronice (np. *cienkowarstwowe ogniwa słoneczne*). Co tracimy, a co zyskujemy w stosunku do monokryształu? ☞ *Wskazówka: Czytaj [9], Rozdział 17 Ciała stałe niekrystaliczne.*

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Przeczytaj ze zrozumieniem tekst tego tematu na stronie kursu i przyjrzyj się uważnie temu co przedstawiają rysunki a nie powinieneś mieć problemu z odpowiedzią na potencjalne pytania, gdyż w ramach tego tematu nie przewidziano zadań numerycznych.**

☞ **Naucz się bezbłędnie rozróżniać trzy formy ciała stałego – monokryształ, polikryształ i ciało amorficzne** – i dla każdej z nich przyporządkuj konkretny przykład materiału oraz typowe zastosowanie w elektronice. To najczęściej spotykany typ pytania w tym temacie.

☞ **Zwróć szczególną uwagę na rodzaj wiązań atomowych charakterystyczny dla każdej formy:** wiązania kowalencyjne w monokryształach półprzewodnikowych, metaliczne w polikryształach przewodzących, mieszane w ciałach amorficznych. Powiązanie struktury z typem wiązania to klucz do zrozumienia właściwości elektrycznych.

Modele pasmowe ciał stałych

Temat ten stanowi bezpośrednie rozwinięcie przedstawionej w poprzednim temacie wiedzy o strukturze atomowej i sieci krystalicznej ale tym razem patrzymy na ciało stałe przez pryzmat energii jego elektronów. Z tej perspektywy na ekranie 1.7 przedstawiono mechanizm powstawania pasm energetycznych: gdy dwa atomy wodoru zbliżają się do siebie, *poziom* 1s rozszczepia się na dwa poziomy *wiążący* i *antywiążący* (patrz Rys. 1.3). Dzieje się tak z powodu *zakazu Pauliego*, który nie pozwala dwóm elektronom zajmować dokładnie tego samego stanu kwantowego.

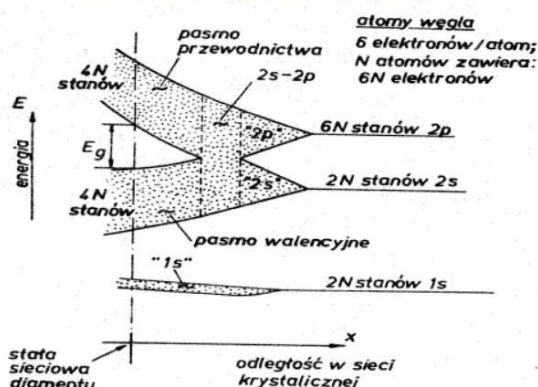


Rys. 1.3 Tworzenie cząsteczki wodoru

Ekran 1.7. Widok fragmentu (a) strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* — temat: *Modele pasmowe ciał stałych*, część dotycząca ilustracji rozszczepiania poziomów energetycznych podczas łączenia atomów gazu.

Gdy zamiast dwóch atomów mamy miliony (jak w prawdziwym kryształ) rozszczepione poziomy tworzą niemal ciągłe **pasma energetyczne**. Ekran 1.8 pokazuje, jak ten proces przebiega w konkretnym materiale (tu *diamencie*).

Proces tworzenia pasm energetycznych



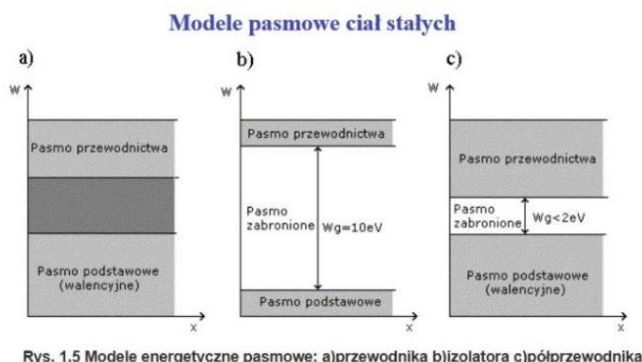
Rys. 1.4 Tworzenie pasm energetycznych w kryształe diamentu.

Ekran 1.8. Widok fragmentu (b) strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* — temat: *Modele pasmowe ciał stałych*, część dotycząca powstawania pasm energetycznych.

Wraz ze zmniejszaniem odległości między atomami węgla do wartości równej stałej sieci krystalicznej, orbitale 2s i 2p nakładają się i reorganizują w dwa wyraźnie oddzielone pasma: walencyjne (zapełnione elektronami) i przewodnictwa (puste w $T=0\text{ K}$). Przestrzeń energetyczna między nimi to pasmo zabronione. To właśnie wzajemne położenie tych dwóch pasm i szerokość przerwy między nimi

decydują o tym, czy mamy do czynienia z przewodnikiem, półprzewodnikiem czy izolatorem.

Ostatnia część tematu widoczna na ekranie 1.9 prezentuje uproszczone modele pasmowe materiałów elektronicznych.



Ekran 1.9. Widok fragmentu (c) strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*, temat: *Modele pasmowe ciał stałych*, część dotycząca ilustracji uproszczonych modeli pasmowych ciał stałych.

W **przewodniku** pasma **walencyjne** i **przewodnictwa** nakładają się a **przerwa energetyczna jest zerowa**. W **izolatorze** przerwa **W_g przekracza 2 eV** (dla *diamentu* wynosi ok. 10 eV), co praktycznie uniemożliwia elektronom przejście do **pasma przewodnictwa**. W **półprzewodniku** przerwa **jest mniejsza niż 2 eV** a elektrony mogą ją pokonać po zaabsorbowaniu wystarczającej energii z zewnątrz.

Kapsułki wiedzy :

- **Kapsułka 1: Zasada Pauliego to zakaz podwójnego miejsca**

Elektrony nie mogą zajmować dokładnie tego samego stanu kwantowego, to fundamentalna reguła rządząca budową materii. Gdy atomy zbliżają się do siebie, ich elektrony muszą „rozsunąć się” energetycznie, co jest bezpośrednią przyczyną powstawania pasm. Bez *zasady Pauliego* nie istniałaby ani chemia, ani elektronika w znanej nam postaci.

- **Kapsułka 2: Rozszczepienie poziomów w cząsteczce H_2**

Po połączeniu dwóch atomów wodoru poziom 1s rozszczepia się na dwa poziomy: *wiążący* (o niższej energii) i *antywiążący* (o wyższej energii). To najmniejsza możliwa grupa energii i najprostszy przykład tworzenia się pasm.

- **Kapsułka 3: Od cząsteczki do kryształu**

Gdy łączą się nie dwa, ale ogromna liczba atomów tworząc sieć atomową ciała stałego, ich orbitale nakładają się, a rozszczepione poziomy tworzą gęsto ułożone stany energetyczne, czyli **pasma energetyczne**.

- **Kapsułka 4: Wzajemne odległości atomów a rozkład pasm**

W zależności od odległości atomów od siebie siły wzajemnego oddziaływania mogą tworzyć różne rozkłady energii wokół orbitali atomowych ale najważniejszy jest ten, który występuje dla przypadku, kiedy są one równe stałej sieciowej.

- **Kapsułka 5: Pasma walencyjne i pasmo przewodnictwa**

Dwa najważniejsze pasma w ciałach stałych to **pasmo walencyjne** (zapełnione elektronami) oraz **pasmo przewodnictwa** (puste lub częściowo obsadzone). To ich wzajemne położenie decyduje o właściwościach elektrycznych materiału.

- **Kapsulka 6: Pasma zabronione**

Odstęp energetyczny pomiędzy wierzchołkiem *pasma walencyjnego* a spodem *pasma przewodnictwa* nazywamy **przerwą energetyczną** (*pasmem zabronionym*). Wielkość tej przerwy decyduje o tym, czy materiał jest *przewodnikiem*, *półprzewodnikiem* czy *izolatorem*.

- **Kapsulka 7: Energia przerwy energetycznej W_g**

Energia W_g (*ang. band gap*) czasami oznaczana też jako E_g (*ang. energy gap*) to minimalna energia potrzebna, aby elektron przeszedł z *pasma walencyjnego* do *pasma przewodnictwa*.

- **Kapsulka 8: Przewodnik to brak przerwy energetycznej**

W przewodnikach *pasmo walencyjne* i *przewodnictwa* nakładają się a więc nie ma tu *przerwy energetycznej*. Dzięki temu elektrony mogą swobodnie przewodzić prąd w każdej temperaturze (nawet 0 K).

- **Kapsulka 9: Półprzewodnik to mała przerwa energetyczna**

W półprzewodnikach *przerwa energetyczna* ma wartość $W_g < 2$ eV. Elektrony mogą przechodzić do *pasma przewodnictwa* po dostarczeniu odpowiedniej energii cieplnej lub świetlnej.

- **Kapsulka 10: Izolator to duża przerwa energetyczna**

W izolatorach *przerwa energetyczna* pomiędzy *pasmem przewodnictwa* i *walencyjnym* jest większa niż 2 eV. Elektronom praktycznie nie udaje się przeskoczyć do *pasma przewodnictwa*, więc materiał nie przewodzi prądu.

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Konsekwencje zasady Pauliego**

Zastanów się, jak wyglądałby świat materii, gdyby *zasada Pauliego* nie obowiązywała wszystkie elektrony opadłyby na najniższy poziom energetyczny. Dlaczego w takim świecie nie mogłoby istnieć ani wiązanie chemiczne, ani półprzewodnik, ani żaden znany nam materiał elektroniczny? ☞ *Wskazówka: Czytaj [9], Rozdział 3 Wiązanie w kryształach i stałe sprężyste.*

- **Wyzwanie 2: Od rozszczepienia do pasma**

Wyobraź sobie kryształ złożony z milionów atomów. Dlaczego w takim układzie nie da się już mówić o „pojedynczych poziomach energetycznych”, tylko o całych pasmach? ☞ *Wskazówka: Czytaj [7], Rozdział 6.1, Rozszczepienie poziomów energetycznych w ciele stałym*

- **Wyzwanie 3: Granica między półprzewodnikiem a izolatorem**

Dlaczego wartość 2 eV przyjmuje się jako umowną granicę między półprzewodnikami a izolatorami? Co decyduje o tym, że poniżej tej wartości przewodnictwo staje się zauważalne? ☞ *Wskazówka: Czytaj [9], Rozdział 7 Pasma energetyczne.*

- **Wyzwanie 4: Granice krawędzi pasm energetycznych**

Czy w rzeczywistości granice krawędzi pasm energetycznych wyglądają jak na 1.9 ? Jaki jest związek pomiędzy dokładnymi i uproszczonymi modelami energetycznymi ciał stałych? ☞ *Wskazówka: Czytaj [7], Rozdział 6.4, Ogólne własności pasm energetycznych;*

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Przeczytaj ze zrozumieniem tekst tematu** na stronie kursu i przyjrzyj się uważnie wszystkim rysunkom (Rys. 1.3, 1.4, 1.5). Samo uważne przestudiowanie ekranów 1.13, 1.14 i 1.15 powinno wystarczyć do zaliczenia podstawowych pytań.

☞ **Upewnij się, że rozumiesz mechanizm przyczynowy:** *zakaz Pauliego* → *rozszerzenie poziomów* → *powstawanie pasm*. To łańcuch logiczny, który warto umieć odtworzyć krokami.

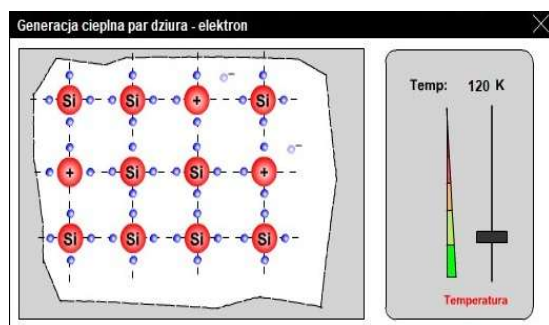
☞ **Zapamiętaj trzy modele pasmowe z Rys. 1.5** i przyporządkuj do nich konkretne materiały: miedź (*przewodnik*), krzem – ok. 1,1 eV, german – ok. 0,67 eV, arsenek galu – ok. 1,4 eV (*półprzewodniki*), diament – ok. 10 eV, SiO₂ (*izolatory*)

☞ **Ćwicz interpretację diagramów pasmowych:** dla każdego rysunku określ, które pasmo jest walencyjne, które jest przewodnictwa, gdzie leży przerwa energetyczna i co oznacza jej szerokość dla właściwości elektrycznych materiału.

☞ **Porównaj modele uproszczone (Rys. 1.5) z bardziej szczegółowym diagramem dla diamentu (Rys. 1.4)** i zauważ, że w rzeczywistości krawędzie pasm nie są prostymi liniami, a uproszczenie jest celowym zabiegiem dydaktycznym, nie opisem fizycznej rzeczywistości.

Półprzewodnik samoistny

W poprzednich tematach poznaliśmy ogólne zasady budowy pasmowej ciał stałych ich modele pasmowe a teraz przyjrzymy się **półprzewodnikowi samoistnemu**, czyli idealnie czystemu kryształowi zbudowanemu wyłącznie z atomów jednego pierwiastka. Prezentację tego tematu rozpoczyna ekran **1.10**, gdzie znajduje się animacja przedstawiająca zjawiska fizyczne zachodzące w sieci krystalicznej *półprzewodnika samoistnego* w różnych temperaturach.

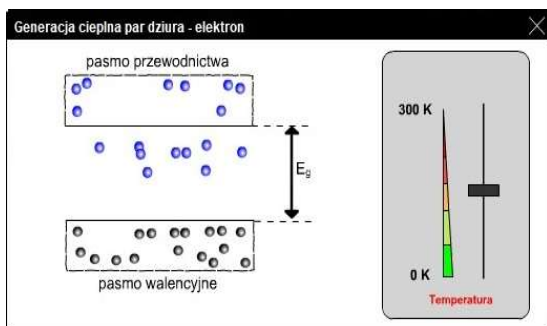


Ekran 1.10. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*– temat: *Półprzewodnik samoistny*, część dotycząca ilustracji zjawisk fizycznych zachodzących w sieci krystalicznej półprzewodnika pod wpływem temperatury⁶

Wzrost temperatury powoduje **drgania sieci krystalicznej (fonony)**, których energia doprowadza do wyrywania elektronów z *powłok kowalencyjnych* atomów, dzięki czemu powstają pary: *elektron swobodny* i *dziura*. **To zjawisko nazywamy**

⁶ Animacja przygotowana na bazie [17].

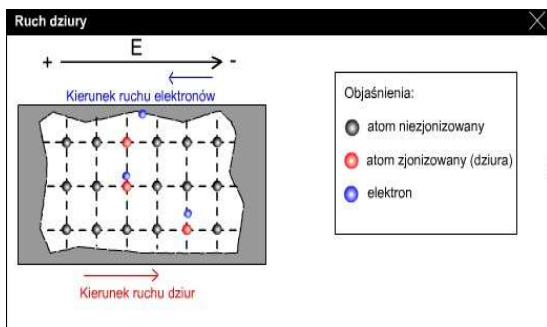
generacją cieplną par elektron-dziura. Ten sam proces można przedstawić na kanwie *uproszczonego modelu pasmowego półprzewodnika* (patrz ekran 1.11).



Ekran 1.11. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Półprzewodnik samoistny*, część dotycząca ilustracji zjawisk zachodzących w półprzewodniku na kanwie modelu pasmowego w zależności od temperatury.

Proces powstawania *par elektron-dziura* odbywa się poprzez przejścia *elektronów* z *pasma walencyjnego* do *pasma przewodnictwa* po zaabsorbowaniu kwantu energii w postaci *fononu*. *Elektrony* zajmują wtedy *pasmo przewodnictwa* a pozostawione przez nie *dziury* - *pasmo walencyjne*. Warto tu dodać że możliwy jest również proces odwrotny czyli **przejście elektronów z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego** połączone z emisją kwantu energii (fotonu lub fononu), **zjawisko to nazywamy rekombinacją**

Istotny aspekt w opisywanym tu temacie stanowi **pojęcie dziury**, które poglądowo zostało zaprezentowane z użyciem animacji na ekranie 1.12.



Ekran 1.12. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Półprzewodnik samoistny*, część dotycząca ilustracji pojęcia *dziury*.⁷

Dziura to **pusty stan energetyczny** pozostający w atomie po jego opuszczeniu przez elektron, który może być w każdej chwili zapelniony przez inny elektron pochodzący z innego atomu lub z chmury elektronów swobodnych. Ruch *dziur* przedstawiony na powyższej animacji polega na wypełnianiu ich przez elektrony. Z punktu widzenia właściwości elektrycznych *dziury* to **dodatnie nośniki ładunku** operujące w zakresie *pasma walencyjnego*, natomiast *elektrony* są

⁷ Animacja przygotowana na bazie [17].

nośnikami ładunku ujemnego i zajmują zakres pasma przewodnictwa.

Kapsułki wiedzy:

- **Kapsułka 1: Półprzewodnik samoistny – charakterystyka ogólna**

To idealnie czysty materiał półprzewodnikowy, zbudowany z atomów jednego pierwiastka (np. Si, Ge, GaAs).

- **Kapsułka 2: Nośniki ładunku w półprzewodniku**

W półprzewodniku samoistnym mamy dwa rodzaje nośników ładunku elektrycznego tworzącego prąd są to: ujemnie naładowane *elektrony swobodne* w *paśmie przewodnictwa* i *dziury* (puste stany energetyczne w *paśmie walencyjnym*) przenoszące ładunek elektryczny dodatni.

- **Kapsułka 3: Nośniki ładunku w temperaturze 0 K**

W zerze bezwzględnym wszystkie elektrony są związane w wiązańach kowalencyjnych, a materiał nie przewodzi prądu.

- **Kapsułka 1: Generacja cieplna nośników ładunku**

W temperaturze powyżej 0 K część elektronów otrzymuje energię wystarczającą do pokonania przerwy energetycznej E_g . Wówczas powstają pary *elektron–dziura*, które są nośnikami ładunku a zjawisko to nazywamy *Generacją cieplną par elektron–dziura*.

- **Kapsułka 2: Rekombinacja nośników ładunku**

To proces odwrotny do generacji, elektron wraca z *pasma przewodnictwa* do *walencyjnego*, a energia E_g zostaje oddana w postaci kwantu promieniowania.

- **Kapsułka 3: Równowaga termodynamiczna**

W stałej temperaturze (np. pokojowej $T=300$ K) procesy generacji i rekombinacji równoważą się. Liczba nośników ładunku nie zmienia się w czasie, mimo że indywidualne przejścia zachodzą nieustannie. Taki stan, w którym nie działają żadne siły zewnętrzne (promieniowanie, polaryzacja napięciem) nazywamy *stanem równowagi termodynamicznej*.

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Temperatura jako regulator nośników**

Dlaczego przy 0 K półprzewodnik samoistny jest idealnym izolatorem, ale już przy temperaturze pokojowej zaczyna przewodzić prąd? ☞ *Wskazówka: Czytaj [13], Rozdział 1.2.1 Półprzewodniki pierwiastkowe*

- **Wyzwanie 2: Generacja i rekombinacja .**

Jak wytłumaczyć proces generacji i rekombinacji w oparciu o sieciowy (przestrzenny) model struktury półprzewodnika ☞ *Wskazówka: czytaj [4], Rozdział 1.3 Półprzewodnik samoistny.*

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Przeczytaj ze zrozumieniem tekst tego tematu na stronie kursu i przyjrzyj się uważnie temu co przedstawiają rysunki spróbuj zrozumieć ich kontekst, to powinno wystarczyć aby zaliczyć ten temat.**

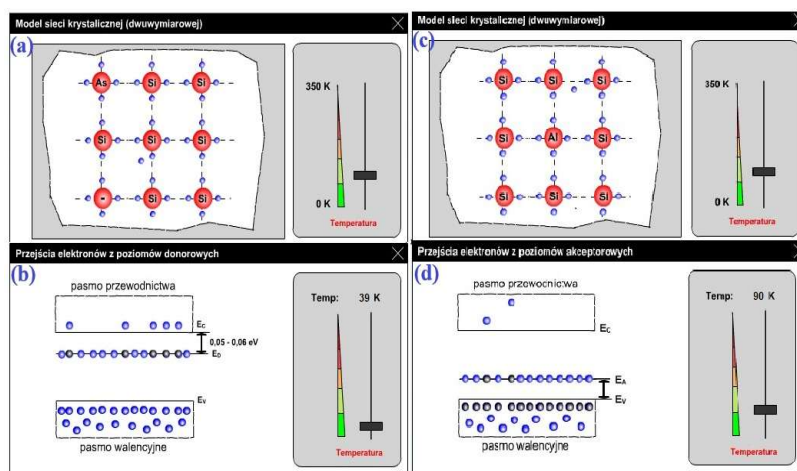
☞ **Upewnij się, że rozumiesz różnicę między generacją a rekombinacją jako procesami przeciwnymi i potrafisz opisać każdy z nich zarówno w modelu sieciowym (ekran 1.16) jak i pasmowym (ekran 1.17), pytania często wymagają**

powiązania obu reprezentacji.

☞ **Zapamiętaj, że dziura to nie „brak elektronu” w potocznym sensie, lecz fizyczny nośnik ładunku dodatniego poruszający się w paśmie walencyjnym.** Animacja z ekranu 1.18 pokazuje ten ruch poglądowo i warto ją przeanalizować krok po kroku.

Półprzewodniki domieszkowane

Czysty półprzewodnik samoistny ma ograniczone zastosowanie praktyczne, ponieważ koncentracja nośników w temperaturze pokojowej jest zbyt mała, aby zapewnić dobre parametry przewodnictwa. Dlatego w elektronice stosuje się **półprzewodniki domieszkowane**, czyli celowo zanieczyszczone niewielką ilością ściśle dobranych pierwiastków. Odpowiednie domieszki wprowadzają do kryształu dodatkowe poziomy energetyczne, które zmieniają koncentrację nośników ładunku i decydują o typie i charakterze przewodnictwa. Pierwszym omawianym przypadkiem jest **półprzewodnik typu n**, w którym rolę *nośników większościowych* odgrywają *elektrony* a dodatkowe atomy które są odpowiedzialne za ich dostarczenie nazywamy *donorami*. Ekran 1.13 ilustruje fragmenty widoku strony opisywanego tu tematu prezentujące poglądowo zjawiska zachodzące w półprzewodniku na kanwie sieci krystalicznej i modelu pasmowego w zależności od temperatury.



Ekran 1.13. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Półprzewodniki domieszkowane*, część dotycząca ilustracji zjawisk zachodzących w półprzewodniku typu n na kanwie modelu pasmowego i sieci krystalicznej w zależności od temperatury⁸.

Animacja *flash* w części (a) pokazuje wprowadzone do sieci krystalicznej atomy *domieszki donorowej* (w tym przypadku *arsen* – As), które posiadają na powłoce walencyjnej pięć elektronów. Podczas gdy cztery z nich tworzą stabilne wiązania kowalencyjne z sąsiednimi atomami, piąty elektron jest związany z jądrem na tyle słabo, że nawet niewielki bodziec energetyczny zależny od temperatury otoczenia (np. oddziaływanie z *fononem*) wystarczy, aby przekształcić go w *nośnik swobodny*. Ten sam proces można przedstawić także na kanwie *uproszczonego*

⁸ Animacja przygotowana na bazie [17].

modelu pasmowego półprzewodnika (patrz animacja w części b), domieszki atomów wprowadzają do pasma zabronionego dodatkowe *stany donorowe* E_D (w $T=0$ K są one całkowicie obsadzone przez elektrony) znajdujące się w pobliżu dna pasma przewodnictwa E_C . Bliska odległość (ok. kilkadziesiąt meV) od pasma przewodnictwa sprawia, że niewielki bodziec energetyczny (zależny od temperatury) może spowodować przejścia elektronów z *pasma donorowego* do zakresu *pasma przewodnictwa*.

Obok *półprzewodników typu n*, równie ważną grupą materiałów w elektronice stanowią **półprzewodniki typu p**. Otrzymuje się je przez wprowadzenie **domieszek akceptorowych** (patrz animacja w części c), które prowadzą do powstania *nośników ładunku* w postaci *dziur*. W tym przypadku wprowadzone do sieci krystalicznej atomy domieszki *aluminium* (Al) posiadają na powłoce walencyjnej trzy *elektrony*. Trzy z nich tworzą wiązania kowalencyjne z sąsiednimi atomami, natomiast jeden brakujący elektron do utworzenia pełnego stabilnego wiązania jest źródłem *dziury*, która może być wypełniona pod wpływem niewielkiego bodźca energetycznego zależnego od temperatury (np. oddziaływanie z *fononem*). Ten sam proces można przedstawić na kanwie *uproszczonego modelu pasmowego półprzewodnika* (patrz animacja w części d), domieszki atomów z trzeciej grupy okresowej wprowadzają do pasma zabronionego dodatkowe *stany akceptorowe* E_A (w $T=0$ K są one nieobsadzone przez elektrony) znajdujące się w pobliżu wierzchołka pasma walencyjnego E_V . Bliska odległość (ok. kilkadziesiąt meV) od *pasma walencyjnego* sprawia, że niewielki bodziec energetyczny (zależny od temperatury) może spowodować przejścia elektronów z *pasma walencyjnego* do zakresu *pasma akceptorowego* tworząc w ten sposób nośniki ładunku (*dziury*) w *paśmie walencyjnym*.

Kapsułki wiedzy:

- **Kapsułka 1: Domieszki donorowe**

Półprzewodnik *typu n* otrzymuje się, domieszkowując go pierwiastkami V grupy (np. As, P, Sb) układu okresowego pierwiastków. Każdy atom domieszki ma jeden elektron walencyjny więcej niż atom krzemu (patrz model sieci krystalicznej).

- **Kapsułka 2: Poziomy donorowe**

Domieszki donorowe wprowadzają dodatkowe poziomy energetyczne (E_D) tuż poniżej pasma przewodnictwa, skąd elektrony łatwo przechodzą do stanu swobodnego (patrz model pasmowy).

- **Kapsułka 3: Elektron swobodny**

Cztery elektrony atomu domieszki tworzą wiązania kowalencyjne, a piąty jest słabo związany – łatwo przechodzi do pasma przewodnictwa (patrz model sieci krystalicznej).

- **Kapsułka 4: Energia jonizacji donorów**

Energia potrzebna do oderwania elektronu od domieszki jest bardzo mała (rzędu dziesiątych części eV), więc w temperaturze pokojowej niemal wszystkie donory są zjonizowane (patrz model pasmowy).

- **Kapsułka 5: Domieszki akceptorowe**

Do krzemu wprowadza się pierwiastki III grupy okresowej pierwiastków (B, Al, Ga, In), które mają tylko trzy elektrony walencyjne. W sieci krystalicznej brakuje im jednego elektronu do pełnego zestawu wiązań kowalencyjnych.

- **Kapsulka 6: Powstanie dziury**

Brakujący elektron może zostać „uzupełniony” przez elektron z pasma walencyjnego, co prowadzi do powstania dziury – nośnika dodatniego (patrz model sieci krystalicznej).

- **Kapsulka 7: Poziomy akceptorowe**

Domieszki akceptorowe wprowadzają dodatkowe poziomy energetyczne (E_A) tuż powyżej pasma walencyjnego, gdzie elektrony łatwo przechodzą z pasma walencyjnego pozostawiając puste stany energetyczne (patrz model pasmowy).

- **Kapsulka 8: Energia akceptorowa**

Energia jonizacji akceptorów jest niewielka (ok. 0,045 eV), dlatego w temperaturze pokojowej prawie wszystkie atomy domieszki akceptorowej są obsadzone elektronami, a dziury mogą się poruszać w obrębie pasma walencyjnego.

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Dobór domieszki**

Dlaczego jako domieszek donorowych używa się pierwiastków z *V grupy* układu okresowego? Co by się stało, gdyby do krzemu wprowadzić pierwiastek z innej grupy? ☞ *Wskazówka: Czytaj [7] Rozdział 7.6. Domieszki w półprzewodnikach.*

- **Wyzwanie 2: Energia aktywacji donorów**

Dlaczego tak niska energia (np. 0,044 eV dla *arsenu* w krzemie) wystarcza, aby w temperaturze pokojowej donory były niemal całkowicie zjonizowane? Jak to wpływa na przewodnictwo półprzewodnika? ☞ *Wskazówka: Czytaj [13] Rozdział 1.2.4. Struktura pasmowa.*

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Przeczytaj ze zrozumieniem opis półprzewodników domieszkowanych** na stronie kursu i zwróć uwagę treści zawarte na ekranie **1.13**, które pokazują różnice między *typem n* i *typem p*. Zapamiętaj, które pierwiastki wprowadza się jako *domieszki donorowe*, a które jako *akceptorowe*.

☞ **Przećwicz interpretację modelu pasmowego dla obu typów domieszkowania:** zlokalizuj na diagramie *poziom donorowy* E_D (tuż pod *pasmem przewodnictwa*) i *poziom akceptorowy* E_A (tuż nad *pasmem walencyjnym*) i wytłumacz słowami, dlaczego ich bliskość krawędzi pasma ma kluczowe znaczenie praktyczne.

☞ **Zapamiętaj konkretne przykłady domieszek:** *arsen* (As), *fosfor* (P), *antymon* (Sb) jako *donory* w krzemie; *bor* (B), *aluminium* (Al), *gal* (Ga) jako *akceptory*. Pytania często wymagają podania przykładu, nie tylko ogólnej zasady.

☞ **Powiąz oba modele – sieciowy i pasmowy**, dla tego samego zjawiska: piąty elektron atomu *arsenu* słabo związany z jądrem (*model sieciowy*) to dokładnie ten sam *elektron*, który w modelu pasmowym przechodzi z *poziomu donorowego* E_D do *pasma przewodnictwa*. Umiejętność łączenia obu opisów jest kluczowa.

☞ **Zwróć uwagę na różnicę między typem n i p półprzewodnika:** w *typie n* jonizacja atomu donora uwalnia *elektron* do *pasma przewodnictwa*, w *typie p* jonizacja akceptora „wciąga” *elektron* z *pasma walencyjnego*, tworząc *dziurę*.

Koncentracja nośników ładunku w półprzewodniku

Wszystkie właściwości elektryczne przyrządów półprzewodnikowych zależą od ilości zgromadzonych w nich nośników ładunku (dziur i elektronów). Właściwość tą określa parametr zwany koncentracją. **Koncentracja nośników ładunku** to liczba nośników (elektronów lub dziur) znajdujących się w jednostce objętości materiału półprzewodnikowego, wyrażana w $[\text{cm}^{-3}]$ lub $[\text{m}^{-3}]$. Dla elektronów oznaczamy ją symbolem n , dla dziur symbolem p .

Aby wyznaczyć koncentrację, należy określić ilość dostępnych stanów energetycznych oraz odpowiedzieć na pytanie jaka część tych stanów jest obsadzona przez elektrony. Ilość dostępnych stanów można uzyskać na podstawie znajomości funkcji gęstości stanów - $N(E)$. Ekran 1.14 ilustruje fragment widoku strony kursu prezentujący fundamentalne zależności matematyczne opisujące funkcję gęstości stanów w zakresie pasm przewodnictwa i walencyjnego.

Funkcja gęstości stanów

Funkcja gęstości stanów $N(E)$ jest to ilość wszystkich dostępnych stanów w przedziale energii $(E, E+dE)$ [eV], w jednostce objętości (m^3). Dla modelu pasmowego półprzewodnika mamy następujące zależności:

$$N(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}}$$

$$N_C(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e)^{\frac{3}{2}} (E - E_C)^{\frac{1}{2}}$$

$$N_V(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_p)^{\frac{3}{2}} (E_V - E)^{\frac{1}{2}}$$
(1.1)

gdzie:

N_C, N_V - efektywna gęstość stanów energetycznych sprowadzona odpowiednio do: dna pasma przewodnictwa i wierzchołka pasma walencyjnego,

E_C, E_V - energia: dna pasma przewodnictwa i wierzchołka pasma walencyjnego,

h - stała Plancka, $h = 6,62491 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

m_e, m_p - masa efektywna, masa dziur.

Ekran 1.14. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— temat: *Koncentracja nośników ładunku w półprzewodniku*, część dotycząca funkcji gęstości stanów.

Funkcja gęstości stanów $N(E)$ opisuje, ile stanów energetycznych przypada na jednostkę energii i jednostkę objętości materiału. Jej wartość rośnie wraz z odległością energetyczną od krawędzi pasma, co oznacza, że im dalej od dna *prasma przewodnictwa* lub *wierzchołka pasma walencyjnego*, tym więcej dostępnych stanów. Kształt tej funkcji zależy od efektywnej masy nośników, która jest różna dla *elektronów w paśmie przewodnictwa* i *dziur w paśmie walencyjnym*, dlatego *gęstość stanów* jest asymetryczna względem *środką przerwy energetycznej*. Jej wartość jest różna dla *prasma przewodnictwa* i *walencyjnego*, ponieważ zależy od *masy efektywnej* nośników, która w obu pasmach przyjmuje różne wartości.

Sama znajomość gęstości stanów nie jest jednak wystarczająca do wyznaczenia *koncentracji nośników*. Niezbędne jest także określenie prawdopodobieństwa obsadzenia tych stanów przez *elektrony*, co opisuje **funkcja rozkładu Fermiego-Diraca**. Kolejna część tematu (patrz ekran 1.15) szczegółowo

przybliżyć tę funkcję wraz z jej *charakterystyką temperaturową*, a zamieszczone pod grafikami „kapsułki wiedzy” systematyzują najważniejsze wnioski płynące z analizy tych zależności.

Funkcja Fermiego - Diraca

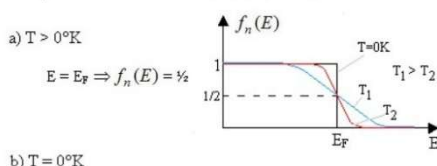
$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp \frac{E - E_F}{kT}} \quad \begin{array}{l} k - \text{stała Boltzmanna} \\ T - \text{temp. w } ^\circ\text{K} \\ E_F - \text{poziom Fermiego} \end{array} \quad (1.2)$$

Interpretacja fizyczna poziomu Fermiego wynika z powyższego wzoru: jeśli za E podstawimy E_F , to wartość $f_n(E)$ będzie równa $1/2$, zatem **energia (poziom) Fermiego określa taką energię, której prawdopodobieństwo obsadzenia jest równe $1/2$** . Indeks n oznacza tu, że funkcja określa prawdopodobieństwo obsadzenia stanu w paśmie przewodnictwa przez elektron swobodny.

Właściwości funkcji $f_n(E)$

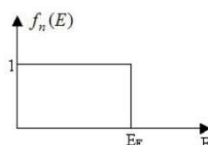
Poniższe są przedstawione różne przypadki funkcji Fermiego - Diraca w zależności od temperatury. W pierwszym z nich (punkt a) gdy $T > 0\text{K}$ dla energii równej poziomowi Fermiego wartość funkcji wynosi $1/2$. W drugim punkcie (b) gdy $T = 0\text{K}$, mogą wystąpić dwie sytuacje:

- gdy $E > E_F$, wówczas wartość funkcji $f(E)$ będzie równa 0.
- gdy $E < E_F$, wówczas wartość funkcji $f(E)$ będzie wynosiła 1.



$$E > E_F \quad \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{1 + \exp \frac{E - E_F}{kT}} = 0 \quad \Rightarrow \quad f_n(E) \approx 0 \quad (1.3)$$

$$E < E_F \quad \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{1 + \exp \frac{E - E_F}{kT}} = 1 \quad \Rightarrow \quad f_n(E) \approx 1 \quad (1.4)$$



Ekran 1.15. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— Temat: *Koncentracja nośników ładunku w półprzewodniku*, część dotycząca *funkcji rozkładu prawdopodobieństwa Fermiego-Diraca*.

Kolejna część niniejszego tematu zaprezentowana na ekranie **1.16** traktuje o finalnej postaci koncentracji nośników ładunku w półprzewodniku, wyprowadzanej przez scałkowanie iloczynu *funkcji gęstości stanów* i *funkcji rozkładu Fermiego-Diraca* po odpowiednim zakresie energii. Dla *elektronów* całkowanie przebiega od dna *pasma przewodnictwa* E_C do nieskończoności (wzór 1.5), natomiast dla *dziur* – od minus nieskończoności do wierzchołka *pasma walencyjnego* E_V (wzór 1.8). Po zastosowaniu przybliżenia *Boltzmanna*, które jest uzasadnione gdy *poziom Fermiego* E_F leży co najmniej kilka kT od krawędzi pasma, obie całki dają się obliczyć analitycznie a wynikiem jest zwarta postać eksponencjalna: **koncentracja elektronów** wyrażona przez **efektywną gęstość stanów** N_C (patrz wzory 1.6 i 1.7), a **koncentracja dziur** przez analogiczną wielkość N_V (patrz wzór 1.10). Obie *efektywne gęstości stanów* zależą od temperatury oraz od masy efektywnej nośników, co sprawia że koncentracja nośników jest czułym wskaźnikiem właściwości termicznych i strukturalnych danego półprzewodnika. Przedstawione wzory mają natomiast

praktyczne zastosowanie teorii do obliczania rzeczywistych koncentracji nośników w półprzewodnikach

Koncentracja nośników ładunku w półprzewodniku

Koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa

Jeśli znana jest funkcja gęstości stanów oraz wiemy jaka część stanów jest obsadzona przez elektrony, możemy wyznaczyć koncentrację tych nośników:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} N_C(E) \cdot f_n(E) dE = \int_{E_C}^{\infty} \frac{4\pi}{h^3} (2m_n^*)^{\frac{3}{2}} (E - E_C)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \exp \frac{E - E_F}{kT}\right)^{-1} dE \quad (1.5)$$

gdzie $f_n(E)$ określa prawdopodobieństwo obsadzenia stanów w paśmie przewodnictwa przez elektrony, co po obliczeniu daje nam:

$$n = N_C \exp \left(-\frac{E_C - E_F}{kT} \right) \quad (1.6)$$

gdzie:

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.7)$$

Koncentracja dziur w paśmie walencyjnym

Koncentracja niezerowa w warunkach równowagi termodynamicznej w paśmie walencyjnym występuje, gdy półprzewodnik ma ustaloną temperaturę i nie działają na niego żadne zewnętrzne siły zewnętrzne:

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} N_V(E) f_p(E) dE \quad (1.8)$$

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanów energetycznych w paśmie walencyjnym (dziur) przez elektrony można wyrazić jako:

$$f_p(E) = 1 - f_n(E) \text{ gdy } E < E_F \text{ i } |E - E_F| \gg kT \Rightarrow f_p(E) \approx \exp \left(\frac{E - E_F}{kT} \right) \quad (1.9)$$

stąd:

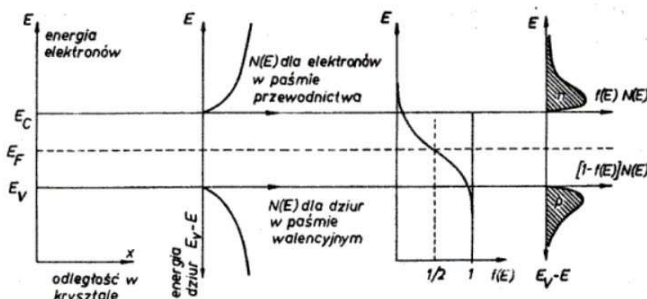
$$p = \int_{-\infty}^{E_V} \frac{4\pi}{h^3} (2m_p^*)^{\frac{3}{2}} (E_V - E)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left(\frac{E - E_F}{kT} \right) dE = N_V \exp \left(\frac{E_V - E_F}{kT} \right) \quad (1.10)$$

Ekran 1.16. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— temat: *Koncentracja nośników ładunku w półprzewodniku*, część dotycząca obliczania koncentracji elektronów i dziur w półprzewodniku.

W dalszej części tematu widocznej na ekranie 1.17 przedstawiono graficzny sposób na określenie koncentracji nośników ładunku w półprzewodniku.

Graficzne wyznaczanie koncentracji w półprzewodniku

Rysunek 1.10 przedstawia graficzny sposób wyznaczania koncentracji w półprzewodniku samoistnym (n_i). Na wykresie końcowym, który jest iloczynem graficznym funkcji gęstości stanów i funkcji prawdopodobieństwa ich obsadzeń. Na wynikowym wykresie koncentracji, widzimy jak wraz ze wzrostem energii w pobliżu krawędzi pasm, liczba nośników ładunku zmniejsza się w paśmie walencyjnym a rośnie proporcjonalnie w paśmie przewodzenia.



Rys. 1.10 Graficzna prezentacja procesu wyznaczania koncentracji nośników ładunku w półprzewodniku samoistnym (n_i). Obszar zakreskowany na wykresie końcowym określa ilość nośników w półprzewodniku.

Ekran 1.17. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— Temat: *Koncentracja nośników ładunku w półprzewodniku*, część dotycząca graficznej interpretacji obliczania koncentracji elektronów i dziur w półprzewodniku.

Ekran 1.18 kończy teoretyczny opis tematu wprowadzając praktyczne wzory na koncentrację nośników dla różnych typów półprzewodników.

Koncentracje nośników większościowych i mniejszościowych

Gdy w warunkach **równowagi termodynamicznej** uwzględnimy wszystkie rodzaje ładunków w półprzewodniku i rozpatrzmy układ równań z których pierwsze uwzględnia tzw. **prawo działania mas** drugie zaś fizyczną **zasadę zachowania ładunku**, to trzymamy zależności na koncentrację elektronów i dziur z uwzględnieniem koncentracji poziomów domieszkowania akceptorami (N_A) i donorami (N_D)

$$\begin{cases} n \cdot p = n_i^2 \\ -q \cdot n + q \cdot p + q \cdot N_D - q \cdot N_A = 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} \Downarrow \\ n &= \frac{N_D - N_A}{2} + \left[n_i^2 + \left(\frac{N_D - N_A}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \\ p &= \frac{N_A - N_D}{2} + \left[n_i^2 + \left(\frac{N_A - N_D}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Można teraz określić z pewnym przybliżeniem:

- Dla półprzewodnika typu n ($N_D \gg n_i$ i $N_A \approx 0$)

$n_n = N_D$ n_n – koncentracja elektronów w półprzewodniku typu n (nośników większościowych).

$p_n = \frac{n_i^2}{N_D}$ p_n – koncentracja dziur w półprzewodniku typu n (nośników mniejszościowych).

- Dla półprzewodnika typu p ($N_A \gg n_i$ i $N_D \approx 0$)

$n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$ n_p – koncentracja elektronów w półprzewodniku typu p

$p_p = N_A$ p_p – koncentracja dziur w półprzewodniku typu p

Ekran 1.18. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— temat: *Koncentracja nośników ładunku w półprzewodniku*, część dotycząca oznaczeń i zależności dla różnych typów półprzewodników

Dość obszerny zakres niniejszego tematu podsumowują zamieszczone poniżej kapsułki wiedzy.

Kapsułki wiedzy:

- Kapsułka 1: Definicja funkcji gęstości stanów**

Funkcja gęstości stanów $N(E)$ jest to ilość wszystkich dostępnych stanów w przedziale energii ($E, E+dE$) [eV], w jednostce objętości (m^3). Należy zapamiętać że dla modelu pasmowego półprzewodnika definiuje się oddzielne funkcje dla pasma przewodnictwa ($N_c(E)$) i walencyjnego ($N_v(E)$).

- Kapsułka 2: Wzory na efektywne gęstości stanów $N_c(E)$ i $N_v(E)$**

Wzory na $N_c(E)$ i $N_v(E)$ wynikają z mechaniki kwantowej i określają dostępność stanów jako funkcję energii (patrz diagram pasmowy) nie musimy ich pamiętać ale warto podstawić konkretne parametry i policzyć jakie to są zakresy wartości.

- Kapsułka 3: Znaczenie fizyczne parametrów**

Stała Plancka (h), **masy efektywne elektronów** (m_e) i **dziur** (m_p) oraz **energje krawędzi pasm przewodnictwa** (E_C) i **walencyjnego** (E_V), to fundamentalne parametry określające właściwości elektronowe materiału półprzewodnikowego dlatego choć nie musimy pamiętać ich wartości to warto je rozumieć. Na przykład **stała Plancka** łączy energię z częstotliwością ($E=hf$) i pojawia się we wzorach jako konsekwencja kwantowej natury materii. **Masy efektywne** (m_e) i (m_p) to pozorne masy

elektronów i dziur poruszających się w polu krystalicznym danego materiału i z reguły są inne niż znana z tablic masa swobodnego *elektronu* oznaczana jako m_0). Energie E_C , E_V określają położenie krawędzi pasm - ich różnica to szerokość pasma zabronionego determinująca właściwości półprzewodnika (patrz model pasmowy).

- **Kapsułka 4: Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa**

Funkcja Fermiego-Diraca określa prawdopodobieństwo obsadzenia stanu energii E przez elektron. Wartość funkcji zawiera się między 0 a 1, gdzie 0 oznacza brak elektronów, a 1 oznacza pełne obsadzenie stanu (patrz wzór 1.2).

- **Kapsułka 5: Poziom Fermiego - interpretacja fizyczna**

Energia (poziom) *Fermiego* E_F określa taką energię, której prawdopodobieństwo obsadzenia jest równe 1/2. Wynika to bezpośrednio z zależności 1.2, gdy zamiast energii E podstawimy wartość E_F wówczas wartość funkcji $f_n(E)=1/2$. Jest to charakterystyczny poziom energetyczny materiału, którego położenie (w dziedzinie energii) decyduje o jego właściwościach elektrycznych.

- **Kapsułka 6: Zachowanie funkcji w różnych temperaturach**

Oto co trzeba zapamiętać o funkcji *Fermiego – Diraca* : dla $T>0$ K funkcja ma kształt sigmoidalny z wartością 1/2 przy $E=E_F$. Dla $T=0$ K funkcja staje się funkcją skokową: $f(E)=1$ dla $E<E_F$ i $f(E)=0$ dla $E>E_F$ (patrz wykres właściwości).

- **Kapsułka 7: Stała Boltzmanana i energia termiczna**

Parametr kT (k - stała Boltzmana, T - temperatura w K) *określa energię termiczną systemu*. Im wyższa temperatura, tym bardziej "rozmyta" jest funkcja *Fermiego-Diraca* wokół poziomu E_F (patrz wzór i wykres).

- **Kapsułka 8: Koncentracja elektronów w paśmie przewodnictwa**

Koncentrację elektronów (n) otrzymuje się przez całkowanie iloczynu gęstości stanów i funkcji *Fermiego-Diraca*, warto to zapamiętać ale w obrębie tego tematu nie musimy wyznaczać tej całki analitycznie. Korzystanie z końcowego wzoru powstałego po jej rozwiązaniu jest wystarczające na poziom podstawowy tego tematu. (patrz wzory 1.5-1.7).

- **Kapsułka 9: Koncentracja dziur w paśmie walencyjnym i prawdopodobieństwo powstania dziury**

Dziury powstają gdy elektrony opuszczają pasmo walencyjne. Dlatego prawdopodobieństwo powstania dziury $f_p(E)$ określamy jako $1-f_n(E)$. Poza tym sposób obliczania koncentracji dziur (p) w paśmie walencyjnym jest analogiczny jak dla pasma przewodnictwa i polega na wyznaczeniu wartości całki z iloczynu funkcji gęstości stanów i funkcji prawdopodobieństwa obsadzenia tych stanów

- **Kapsułka 10: Uwaga na możliwe konflikty oznaczeń dla n i p !**

Należy zwrócić uwagę, że do oznaczania koncentracji elektronów tak samo jak dla typu półprzewodnika donorowego używa się małej litery n . Dlatego tak ważny jest kontekst w którym owe oznaczenia występują. To samo dotyczy małej litery p , która może odnosić się albo do koncentracji dziur albo do typu półprzewodnika akceptorowego w zależności od użytego kontekstu.

- **Kapsułka 11: Metoda graficznego wyznaczania koncentracji nośników**

Koncentrację nośników ładunku można wyznaczyć jako iloczyn graficzny funkcji gęstości stanów $N(E)$ i funkcji prawdopodobieństwa $f(E)$. Wynikowy wykres pokazuje rozkład koncentracji nośników w funkcji energii .

- **Kapsulka 12: Interpretacja pól powierzchni**

Całkowita koncentracja elektronów i dziur jest równa polu powierzchni pod krzywymi koncentracji (obszary zakreskowane). W półprzewodniku samoistnym (*ang. intrinsic*) pola te są równe stąd: $n = p = n_i = p_i$ (patrz obszary zakreskowane).

- **Kapsulka 13: Wizualizacja równowagi nośników**

Graficzna metoda pozwala zobaczyć jak wraz ze wzrostem energii w pobliżu krawędzi pasm, liczba nośników ładunku zmniejsza się w paśmie walencyjnym a rośnie proporcjonalnie w paśmie przewodnictwa (patrz rozkład energetyczny).

- **Kapsulka 14: Prawo działania mas i zasada zachowania ładunku**

W warunkach równowagi termodynamicznej obowiązują dwa fundamentalne prawa: **prawo działania mas** ($n \cdot p = n_i^2$) i **zasada zachowania ładunku** ($-q \cdot n + q \cdot p + q \cdot N_D - q \cdot N_A = 0$), które prowadzą do układu równań określających koncentracje nośników ładunku w każdym rodzaju półprzewodnika (patrz wzór 1.11). Po jego rozwiązaniu otrzymujemy wzory na poszczególne przypadki typów domieszkowania, co upraszcza możliwość kalkulacji ilościowej koncentracji.

- **Kapsulka 15: Wzory dla półprzewodnika typu n**

Ze wzorów tych wynika, że koncentracja elektronów dla tego typu półprzewodnika (n_n) jest praktycznie równa koncentracji donorów (N_D), a powstałe z nich elektrony swobodne są nośnikami większościowymi (jest ich więcej niż dziur, których koncentracja jest oznaczana tu jako p_n a same nośniki są tu mniejszościowe).

- **Kapsulka 16: Wzory dla półprzewodnika typu p**

Ze wzorów wynika, że koncentracja dziur w tym typie półprzewodnika (p_p) jest praktycznie równa koncentracji akceptorów (N_A) a powstałe z nich dziury są nośnikami większościowymi (jest ich więcej niż elektronów, których koncentracja jest oznaczana tu jako n_p a same nośniki są tu mniejszościowe)

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Wpływ temperatury na koncentrację**

Dlaczego koncentracja nośników samoistnych n_i silnie zależy od temperatury? Jak ta zależność może wpływać na działanie przyrządów półprzewodnikowych? ☞ *Wskazówka: Czytaj [4], Rozdział 1.5 Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej.*

- **Wyzwanie 3: Prawo działania mas**

Dlaczego iloczyn $n \cdot p = n_i^2$ jest stały w warunkach równowagi termodynamicznej, niezależnie od poziomu domieszkowania? ☞ *Wskazówka: Czytaj [13], Rozdział 3.1 Koncentracja nośników.*

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Przeczytaj ze zrozumieniem wzory na funkcję gęstości stanów $N(E)$ i zapamiętaj różnice między pasmem przewodnictwa a walencyjnym. Zwróć uwagę na zależności od energii $(E - E_C)^{1/2}$ vs $(E_V - E)^{1/2}$ i związane z nimi wartości znaków, które mogą znacząco wpływać na wyniki po wstawieniu do wzorów.**

☞ **Postaraj się zrozumieć funkcję *Fermiego-Diraca* i znaczenie poziomu Fermiego E_F . Poćwicz rysowanie i obliczanie tej funkcji dla różnych temperatur i pamiętaj, że $f(E_F) = 1/2$. Oblicz prawdopodobieństwo obsadzenia stanu w przypadku, gdy jego odległość od poziomu Fermiego $(E - E_F)$ wynosi 0.1 eV dla temperatury $T = 200$ K. Podaj wartość z dokładnością do 10^{-6} . Wskazówka: Odp. $f(E) \approx 0.003015$.**

☞ **Poćwicz obliczenia z wykorzystaniem wzorów na koncentrację:** $n = N_C \exp(-(E_C - E_F)/kT)$ i $p = N_V \exp(-(E_F - E_V)/kT)$. Zauważ symetrię i zależność exponencjalną od położenia E_F . **Przykład** : oblicz koncentrację donorów, przy której poziom Fermiego E_F leży w odległości $\Delta E = 0.1$ eV poniżej dna pasma przewodnictwa E_C w temperaturze $T=393$ K. *Wskazówka: patrz [11] zad. 1.9*.

☞ **Zapamiętaj prawo działania mas** $np = n_i^2$ i wzory przybliżone dla półprzewodników typu n ($n \approx N_D$) i typu p ($p \approx N_A$). To najczęściej wykorzystywane wzory w praktyce.

☞ **Poćwicz interpretację graficzną wyznaczania koncentracji nośników ładunku** i naucz się rysować i wyjaśniać wykresy koncentracji jako iloczyn $N(E)$ i $f(E)$. To pomoże w zrozumieniu fizyki procesów.

Poziom Fermiego w półprzewodniku

Poziom Fermiego E_F poznaliśmy już jako hipotetyczny poziom energetyczny, którego prawdopodobieństwo obsadzenia przez elektron wynosi $1/2$. Ale jego znaczenie jest szersze i dotyczy informacji o *koncentracjach* nośników ładunku i właściwościach elektrycznych materiału. Nawiązaniem do tego jest fragment strony tematu widoczny na ekranie **1.19**, gdzie przedstawiono zależności, z których wynikają wyżej wymienione właściwości w odniesieniu do półprzewodnika samoistnego.

Poziom Fermiego w półprzewodniku samoistnym

Dla półprzewodnika samoistnego koncentracja dziur jest równa koncentracji elektronów mamy więc $n=p$, co można zapisać:

$$N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) = N_V \exp\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad \text{stad} \quad (1.13)$$

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \ln \frac{N_V}{N_C} \leftarrow \approx 0 \quad (1.14)$$

Analizując wyrażenie możemy przyjąć, że Poziom Fermiego dla półprzewodnika samoistnego znajduje się w środku pasma zabronionego i jest oznaczany dla odróżnienia przez E_i , tak samo:

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_i}{kT}\right) \quad \text{oraz} \quad p_i = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_i}{kT}\right) \quad (1.15)$$

Niezależnie od rodzaju półprzewodnika mamy:

$$\begin{aligned} n \cdot p &= n_i \cdot p_i = n_i^2 \quad \text{bo} \quad n_i = p_i \\ n \cdot p &= n_i^2 = N_V \cdot N_C \exp\left[-\frac{E_C - E_F}{kT} + \frac{E_V - E_F}{kT}\right] = \\ &= N_V \cdot N_C \exp\left(\frac{E_V - E_C}{kT}\right) = N_V N_C \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \end{aligned} \quad (1.16)$$

Jeśli chcemy określić wpływ temperatury na koncentrację n_i to 1.16. przekształcamy do postaci:

$$n_i = a T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad a - \text{stała niezależna od temperatury} \quad (1.17)$$

Ekran 1.19. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— temat: *Poziom Fermiego w półprzewodnikach*, część dotycząca położenia E_F w półprzewodniku samoistnym i jego zależności od temperatury

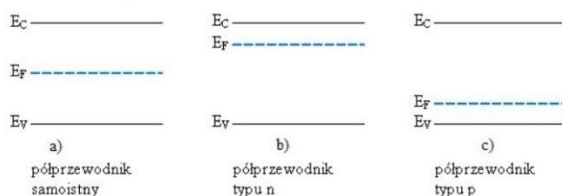
Jak widać w *półprzewodniku samoistnym poziom Fermiego* leży w środku *pasma zabronionego* i reprezentuje równowagę pomiędzy *koncentracją elektronów w paśmie przewodnictwa* i *dziur w paśmie walencyjnym*.

Dalszy fragment strony widoczny na ekranie **1.20** przedstawia kolejny kluczowy aspekt aktualnego tematu dotyczący położenia *poziom Fermiego* (E_F) w

półprzewodnikach domieszkowanych względem poziomu samoistnego E_i .

Odchylenie od poziomu Fermiego E_i

Odchylenie aktualnego poziomu E_F od poziomu Fermiego dla półprzewodnika samoistnego E_i jest miarą domieszkowania w półprzewodniku. Ilustruje to rysunek 1.11.



Rys. 1.11 Położenie poziomu Fermiego dla trzech podstawowych typów półprzewodnika

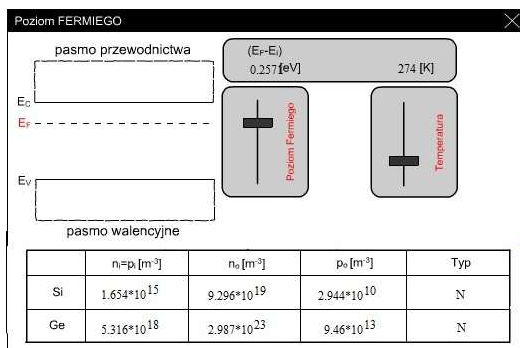
Koncentracja elektronów rośnie expotencjalnie w miarę wzrostu różnicy $(E_F - E_i)$. Można, więc powiedzieć, że dla półprzewodników **typu n** poziom E_F przesuwa się w kierunku pasma przewodnictwa w miarę zwiększania domieszki donorowej, zaś dla półprzewodnika **typu p** poziom E_F przesuwa się w kierunku pasma walencyjnego w miarę zwiększania domieszki akceptorowej.

$$\begin{aligned} n &= N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \\ n_i &= N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_i}{kT}\right) \end{aligned} \Rightarrow n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (1.18)$$

$$\begin{aligned} p &= N_V \exp\left(+\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \\ p_i &= N_V \exp\left(\frac{E_C - E_i}{kT}\right) \end{aligned} \Rightarrow p = p_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

Ekran 1.20. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— temat: *Poziom Fermiego w półprzewodnikach*, część dotycząca odchylenia położenia E_F w półprzewodniku domieszkowanym od położenia E_i .

Przydatnym narzędziem dostępnym w ramach niniejszego tematu jest animacja widoczna na ekranie 1.21.



Ekran 1.21. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— temat: *Poziom Fermiego w półprzewodnikach*, animacja *flash* ilustrująca zależności ilościowe pomiędzy położeniem poziomu Fermiego i koncentracją nośników⁹ dla krzemu i germanu.

Przedstawia zależności ilościowe pomiędzy położeniem poziomu Fermiego i koncentracją nośników ładunku (elektronów i dziur) dla dwóch podstawowych materiałów półprzewodnikowych jakimi są *krzem* (Si) i *german* (Ge). Aplikacja podaje w tabelce przeliczone na podstawie wcześniej podanych wzorów wartości

⁹ Animacja przygotowana na bazie [17].

koncentracji *nośników większościowych, mniejszościowych* a także koncentrację *równowagową* w określonej temperaturze i położeniu *poziomu Fermiego* podawanego jako *odchylenie od poziomu samoistnego* ($E_F - E_i$).

Kapsułki wiedzy:

- **Kapsułka 1: Warunek równowagi koncentracji**

Dla półprzewodnika samoistnego koncentracja dziur jest równa koncentracji elektronów ($n=p$), co pozwala na wyznaczenie położenia *poziomu Fermiego* (patrz wzory 1.13-1.14).

- **Kapsułka 2: Położenie poziomu Fermiego E_i**

Po rozwiązaniu równania równowagi otrzymujemy wzór na *poziom Fermiego* w półprzewodniku samoistnym (E_i), z którego można z przybliżeniem ustalić, że leży on w środku pasma zabronionego (patrz wzór 1.14).

- **Kapsułka 3: Zależność Koncentracji samoistnej n_i od temperatury**

Wykorzystując prawo działania mas i warunek równowagi koncentracji nośników ładunku w półprzewodniku samoistnym (wzory 1.15-1.16), można wyznaczyć wzór na koncentrację, który wyraźnie wskazuje na silną zależność od temperatury (patrz wzór 1.17).

- **Kapsułka 4: Przesunięcie poziomu Fermiego przy domieszkowaniu**

W półprzewodniku *typu n* poziom E_F przesuwa się w kierunku *pasma przewodnictwa*, zwiększając koncentrację elektronów. W półprzewodniku *typu p* poziom E_F przesuwa się w kierunku *pasma walencyjnego*, zwiększając koncentrację dziur (patrz Rys. 1.11).

- **Kapsułka 5: Wzory na koncentrację z uwzględnieniem E_i**

Koncentracje nośników można wyrazić przez różnicę poziomów $E_F - E_i$ (patrz wzory 1.18). Im większe odchylenie E_F od E_i , tym bardziej jedna z koncentracji dominuje nad drugą.

- **Kapsułka 6: Typ przewodnictwa a położenie E_F**

Gdy $E_F > E_i$, przeważa przewodnictwo elektronowe (*typ n*), gdy $E_F < E_i$, przeważa przewodnictwo dziurowe (*typ p*). Wielkość przesunięcia E_F względem E_i określa stopień domieszkowania półprzewodnika (patrz porównanie trzech przypadków na Rys. 1.11).

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Wpływ masy efektywnej na położenie E_i**

Dlaczego w wzorze na *poziom Fermiego* samoistny pojawia się człon $\ln(N_V/N_C)$? Jak wpływają różne masy efektywne elektronów i dziur na dokładne położenie E_i względem środka pasma zabronionego? ☞ *Wskazówka: Czytaj [9], Rozdział 1. Struktura krystaliczna.*

- **Wyzwanie 2: Granice przesunięcia poziomu Fermiego**

Jak daleko od E_i może przesunąć się *poziom Fermiego* przy bardzo silnym domieszkowaniu? ☞ *Wskazówka: Czytaj [13], Rozdział 1.5 Półprzewodniki zdegenerowane i niezdegenerowane.*

- **Wyzwanie 3: Zależność temperaturowa przesunięcia E_F**

Dlaczego przesunięcie poziomu, Fermiego ($E_F - E_i$) zmienia się z temperaturą? ☞ *Wskazówka: Czytaj [13], Rozdział 1.6 Poziom Fermiego i poziomy domieszkowe.*

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Zrozum fizyczne znaczenie poziomu Fermiego** jako energii o prawdopodobieństwie obsadzenia 1/2. Zapamiętaj, że w półprzewodniku samoistnym $E_F \approx E_i \approx (E_C + E_V)/2$.

☞ **Poćwicz wyliczanie wartości ze wzoru na koncentrację samoistną** i zapamiętaj, że w półprzewodniku samoistnym $n_i = p_i$. Pomocny będzie tu skrypt: A.W.S. Stadler, A. Kusy, *A Kolek Elektronika - Zbiór Zadań cz. I Przyrządy półprzewodnikowe i zadania z rozdziału - Materiały półprzewodnikowe*

☞ **Zapamiętaj jak poziom Fermiego przesuwają się przy domieszkowaniu:** w górę dla typu *n* (w stronę E_C), w dół dla typu *p* (w stronę E_V). Poćwicz przeliczanie wzorów na koncentrację *n* i *p* (patrz wzory 1.18).

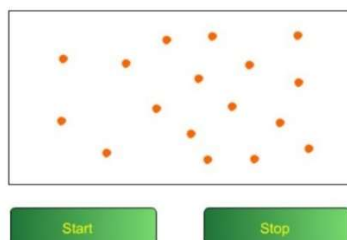
☞ **Poćwicz rysowanie diagramów pasmowych z zaznaczonym poziomem Fermiego dla różnych przypadków.** Umiej wskazać typ przewodnictwa na podstawie położenia E_F względem E_i .

Opanowanie tych zagadnień pozwoli na zrozumienie jednego z najważniejszych pojęć fizyki półprzewodników i przygotuje do bardziej zaawansowanych tematów dotyczących złącz i przyrządów elektronicznych.

Transport nośników ładunku w półprzewodnikach

W temacie tym zajmiemy się wyjaśnieniem **jak płynie prąd w półprzewodnikach i z czego on się składa**. Przeszczanie się nośników ładunku w półprzewodniku odbywa się na dwa sposoby: poprzez **unoszenie** w polu elektrycznym oraz poprzez **dyfuzję** wynikającą z różnic koncentracji. Na stronie kursu temat zamieszczono animację **dyfuzja.swf**,¹⁰ (ekran 1.22) patrz która w prosty sposób ilustruje zjawisko dyfuzji nośników ładunku, pozwalając lepiej zrozumieć różnicę między unoszeniem a wyrównywaniem koncentracji nośników ładunku.

Zjawisko dyfuzji w półprzewodniku domieszkowanym
Wyrównanie koncentracji nośników w całym półprzewodniku



Ekran 1.22. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— temat: *Transport nośników ładunku w półprzewodnikach*, część prezentująca zjawisko dyfuzji nośników ładunku.

Kluczową wielkością charakteryzującą efektywność ruchu nośników jest **ruchliwość nośników ładunku**. Informuje ona, z jaką średnią prędkością poruszają się *elektron* lub *dziura* w jednostkowym polu elektrycznym. *Ruchliwość* zależy od wielu czynników (patrz ekran 1.23), przede wszystkim od *temperatury* i od *poziomu*

¹⁰ Na kanwie projektu Y. Yakym " *Materiały półprzewodnikowe*", Podstawy elektroniki 2012

domieszkowania półprzewodnika i decyduje o praktycznych parametrach przewodnictwa.

Ruchliwość elektronów i dziur w półprzewodniku

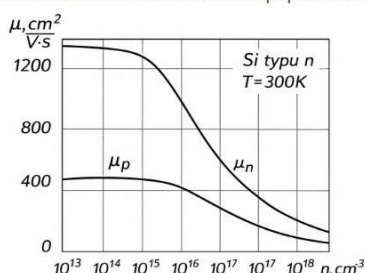
Do próbki półprzewodnika przykładamy pole elektryczne. Elektrony poruszają się wówczas z wypadkową prędkością w kierunku przeciwnym do pola, zaś dziury w kierunku zgodnym z kierunkiem pola. Dla takiej sytuacji ruchliwość nośników ładunku (oznaczona tu jako μ) jest współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy wektorem prędkości i wektorem natężenia pola.

$$\begin{aligned} \text{dla elektronów } \vec{V}_n &= -\mu_n \vec{K} \quad (\text{znak minus oznacza kierunek przeciwny do kierunku pola}) \\ \text{dla dziur } \vec{V}_p &= \mu_p \vec{K} \end{aligned} \quad \mu_n - \text{ruchliwość elektronów} \quad \mu_p - \text{ruchliwość dziur} \quad (1.19)$$

Ruchliwość nośników zależy od temperatury w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-A} \quad 1,5 < A < 2,5 \quad \text{dla } T > 150^\circ\text{K} \\ \mu &\approx T^{\frac{3}{2}} \quad \text{dla } T < 150^\circ\text{K} \end{aligned} \quad (1.20)$$

Występuje też silna zależność ruchliwości od domieszkowania półprzewodnika:



Ekran 1.23. Widok fragmentu strony modułu: Wykład o materiałach elektronicznych— temat: Transport nośników ładunku w półprzewodnikach, część dotycząca ruchliwości ładunku.

W dalszej części tematu (patrz ekran 1.24) przedstawiono opis transportu nośników w postaci wyprowadzenia zależności na gęstość prądu unoszenia.

Wyznaczanie prądu unoszenia i konduktywności półprzewodnika

Wektor gęstości prądu unoszenia definiujemy, jako sumę wektorów gęstości prądu unoszenia elektronów i dziur:

$$\vec{J}_U = \vec{J}_{U_n} + \vec{J}_{U_p} = -q \cdot \vec{V}_n \cdot n + q \cdot \vec{V}_p \cdot p \quad (1.21)$$

Podstawiając do powyższego wzoru zależności 1.19 otrzymujemy:

$$\vec{J}_U = \vec{K} \left(\underbrace{\mu_n q \cdot n}_{\delta_n} + \underbrace{\mu_p q \cdot p}_{\delta_p} \right) \quad (1.23)$$

Wektor gęstości prądu unoszenia to iloczyn konduktywności i wektora natężenia pola:

$$\vec{J}_U = (\delta_n + \delta_p) \vec{K} = \delta \vec{K} \quad (1.24)$$

Konduktywność jest więc właściwością półprzewodnika zależną od koncentracji i ruchliwości nośników ładunku.

Ekran 1.24. Widok fragmentu strony modułu: Wykład o materiałach elektronicznych— temat: Transport nośników ładunku w półprzewodnikach, część dotycząca gęstości prądu unoszenia i konduktywności.

Wprowadzenie pojęcia **konduktywności** pozwala uprościć opis przewodnictwa półprzewodników, ponieważ łączy w jednej wielkości wpływ koncentracji i ruchliwości nośników. Jednak w rzeczywistym półprzewodniku prąd

elektryczny może płynąć nie tylko na skutek unoszenia nośników przez pole elektryczne, lecz również wskutek dyfuzji, czyli wyrównywania się niejednorodnego rozkładu koncentracji nośników w objętości materiału. **Gęstość prądu dyfuzji** (patrz ekran 1.25) jest proporcjonalna do *gradientu koncentracji* i opisana *współczynnikami dyfuzji* (D_n i D_p) odpowiednio dla *elektronów* i *dziur* (wzór 1.26), a całkowita gęstość prądu każdego rodzaju nośników jest sumą składowej unoszenia i składowej dyfuzji, co wyrażają wzory 1.27 i 1.28.

Wyznaczanie prądu dyfuzji w półprzewodniku

Jeśli rozkład nośników ładunku nie jest równomierny w objętości półprzewodnika, to wówczas następuje ruch nośników nazwany dyfuzją. Polega to na wyrównywaniu się koncentracji nośników, czyli przepływie tychże nośników z obszarów o większej koncentracji do obszarów o mniejszej koncentracji. Kierunek przemieszczania wyznacza gradient koncentracji ze znakiem minus. Strumień cząstek biorących udział w wyrównywaniu się koncentracji jest proporcjonalny do gradientu koncentracji. Gęstość prądów dyfuzji elektronów i dziur jest określona poniższymi zależnościami:

$$\begin{aligned}\vec{J}_{D_n} &= D_n \cdot n \cdot \text{grad } n \\ \vec{J}_{D_p} &= -D_p \cdot p \cdot \text{grad } p\end{aligned}\quad (1.26)$$

gdzie:

D_n - współczynnik dyfuzji elektronów,
 D_p - współczynnik dyfuzji dziur,
 J_D - gęstość prądu (w tym przypadku prądu dyfuzji),
 n - koncentracja elektronów w półprzewodniku,
 p - koncentracja dziur w półprzewodniku.

Całkowita gęstość prądu w półprzewodniku

Całkowita gęstość prądu elektronów i dziur (po uwzględnieniu obu mechanizmów transportu nośników) wynosi odpowiednio:

$$\vec{J}_n = \vec{J}_{V_n} + \vec{J}_{D_n} = \vec{K} \cdot \mu_n \cdot n \cdot q + D_n \cdot \text{grad } n = \vec{K} \cdot \delta_n + D_n \cdot \vec{\nabla} n(x) \quad (1.27)$$

$$\vec{J}_p = \vec{J}_{V_p} + \vec{J}_{D_p} = \vec{K} \cdot \mu_p \cdot p \cdot q + D_p \cdot \text{grad } p = \vec{K} \cdot \delta_p + D_p \cdot \vec{\nabla} p(x) \quad (1.28)$$

Ekran 1.25. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Transport nośników ładunku w półprzewodnikach*, część dotycząca gęstości prądu dyfuzji i całkowitego.

Kiedy temperatura w półprzewodniku rośnie, zachodzą dwa przeciwstawne zjawiska, które wpływają na jego przewodnictwo: rośnie *koncentracja nośników*, ale jednocześnie maleje ich *ruchliwość*. Poniższa część tematu którą reprezentuje ekran 1.26 wyjaśnia, jak ta koincydencja tych dwóch zjawisk wpływa na *przewodnictwo elektryczne* w różnych typach półprzewodników. **W półprzewodniku samoistnym dominuje człon eksponencjalny i konduktywność rośnie wykładniczo wraz z temperaturą** zgodnie z wzorem 1.25, co na wykresie $\ln \delta$ v.s. $1/T$ daje prostą o ujemnym nachyleniu (patrz Rys. 1.13), a nachylenie tej prostej pozwala wyznaczyć doświadczalnie szerokość przerwy energetycznej (E_g) w materiale. **W półprzewodniku domieszkowanym zależność ta jest bardziej złożona i przebiega przez trzy charakterystyczne obszary** widoczne na wykresie $\ln \delta$ v.s. $1/T$. W niskich temperaturach (do 150 K) nie wszystkie domieszki są jeszcze zjonizowane i *konduktywność* rośnie w miarę wzrostu temperatury (obszar 1), w zakresie temperatur pokojowych (150 - 450 K) wszystkie domieszki są zjonizowane i koncentracja większościowych nośników ładunku jest stała jednocześnie wzrost temperatury powoduje większe drgania sieci, co jest przyczyną zmniejszenia *ruchliwości nośników* (rozproszenia na fononach), więc konduktywność maleje (obszar 2),

natomiast przy wysokich temperaturach dominuje *generacja par elektron-dziura* i *konduktywność* ponownie rośnie wykładniczo na skutek gwałtownego wzrostu koncentracji nośników jak dla półprzewodnika samoistnego (obszar 3).

Zależność konduktywności od temperatury

Konduktywność półprzewodnika zależy od iloczynu ruchliwości i koncentracji elektronów i dziur. Porównując więc ze sobą wyrażenia ogólne na te oba parametry w przypadku półprzewodnika samoistnego mamy:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-A}$$

$$n_i = aT^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

gdzie $3/2 < A < 5/2$

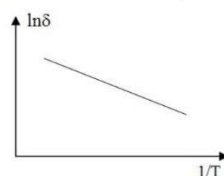
gdzie a jest parametrem niezależnym od temperatury

oraz uwzględniając że:

$$A = \frac{3}{2} \Rightarrow \mu \approx T^{-\frac{3}{2}} \quad \text{otrzymujemy:}$$

$$\sigma \approx B \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (1.25)$$

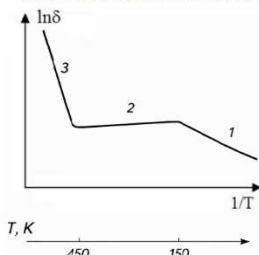
co można zilustrować wykresem:



Rys. 1.13 Zależność konduktywności od temperatury dla półprzewodnika samoistnego

Jeśli $A=3/2$ to funkcja $\exp$ jest i tak silniejszą niż zależna już od temperatury funkcja B wskutek czego zależność konduktywności od temperatury dla tego przypadku jest bardzo podobna.

Dla półprzewodnika niesamoistnego analityczne zależności konduktywności od omawianych powyżej parametrów są dużo bardziej złożone dlatego wygodniej i prościej przedstawić je za pomocą wykresu:



1. Nie wszystkie domieszki są zjonizowane. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta koncentracja zaś mi $\propto T^{\frac{3}{2}}$.

2. Wszystkie domieszki są zjonizowane koncentracja domieszki jest stała, zaś ruchliwość maleje.

3. Na skutek dużej temperatury następuje generacja par elektron – dziura i wzrost koncentracji nośników samoistnych. Konduktywność w tym przedziale rośnie jak dla półprzewodnika samoistnego zgodnie z zależnością

Ekran 1.26. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— temat: *Transport nośników ładunku w półprzewodnikach*, część dotycząca zależności konduktywności od temperatury.

Kapsułki wiedzy:

- **Kapsułka 1: Definicja ruchliwości nośników**

Ruchliwość elektronów (μ_n) i dziur (μ_p) definiuje się jako stosunek prędkości unoszenia do natężenia pola elektrycznego. Należy tu zapamiętać, że znak minus we wzorze 1.19 oznacza kierunek przeciwny do kierunku pola oraz to że ruchliwość wyraża się w jednostkach [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$].

- **Kapsułka 2: Zależność temperaturowa ruchliwości**

Ruchliwość nośników silnie zależy od temperatury. Wyższa temperatura oznacza większe rozpraszanie i mniejszą ruchliwość (patrz wzór 1.20).

- **Kapsułka 3: Wpływ domieszkowania na ruchliwość**

Ruchliwość silnie zależy od poziomu domieszkowania półprzewodnika. Przy małych koncentracjach domieszek dominuje rozpraszanie na fononach, przy wysokich - rozpraszanie na jonach domieszek. Maksimum ruchliwości występuje przy średnich koncentracjach (patrz Rys. 1.12).

- **Kapsulka 4: Praktyczne wartości ruchliwości**

W krzemie *typu n* w temperaturze pokojowej ruchliwość elektronów wynosi około $1200 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, a dziur około $400 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Różnica wynika z różnych mas efektywnych i mechanizmów rozpraszania dla elektronów i dziur (patrz wykres zależności).

- **Kapsulka 5: Wektor gęstości prądu unoszenia**

Całkowity prąd unoszenia jest sumą składowych elektronowej i dziurowej. Elektrony i dziury poruszają się w przeciwnych kierunkach, ale oba wkłady do prądu mają ten sam znak (patrz wzór 1.21).

- **Kapsulka 6: Związek prądu z ruchliwością i koncentracją**

Podstawiając definicje ruchliwości otrzymujemy związek prądu z parametrami materiałowymi. Konduktywności elektronów (σ_n) i dziur (σ_p) to iloczyny odpowiednich ruchliwości, ładunków i koncentracji (patrz wzór 1.23).

- **Kapsulka 7: Prawo Ohma w postaci wektorowej**

Wektor gęstości prądu unoszenia jest iloczynem *całkowitej konduktywności* i *wektora natężenia pola* zgodnie ze wzorem 1.24. Jest to uogólnienie prawa Ohma na przypadek materiałów z dwoma typami nośników.

- **Kapsulka 8: Jednostki i znaczenie fizyczne**

Konduktywność wyraża się w jednostkach $[\text{S/m}]$ lub $[\text{S/cm}]$, gdzie S (simens) $= 1/\Omega$. Jest to fundamentalna właściwość materiałowa określająca jego zdolność do przewodzenia prądu elektrycznego pod wpływem pola.

- **Kapsulka 9: Mechanizm dyfuzji nośników**

Jeśli rozkład nośników nie jest równomierny, następuje przepływ z obszarów o większej koncentracji do obszarów o mniejszej koncentracji. Kierunek i intensywność tego ruchu wyznacza *gradient koncentracji* (grad), czyli miara szybkości zmian koncentracji nośników w przestrzeni. *Dyfuzja* zachodzi w wyniku chaotycznego ruchu termicznego nośników

- **Kapsulka 10: Prądy dyfuzji elektronów i dziur**

Gęstości prądów dyfuzji dla elektronów (J_n) i dziur (J_p) opisują wzory 1.26., które uwzględniają *współczynniki dyfuzji elektronów* (D_n) i *dyfuzji dziur* (D_p). Współczynnik dyfuzji jest miarą, jak szybko dany typ nośnika (elektron lub dziura) rozprzestrzenia się w materiale. Różne znaki we wzorach (1.26) wynikają z przeciwnych ładunków nośników, mimo że kierunek ruchu jest taki sam czyli z obszaru o większym stężeniu do obszaru o mniejszym. Różne znaki wynikają z przeciwnych ładunków nośników przy tym samym kierunku ruchu wynikającym z gradientu koncentracji.

- **Kapsulka 11: Całkowity prąd w półprzewodniku**

Całkowity prąd każdego typu nośników uwzględnia zarówno unoszenie jak i dyfuzję zgodnie ze wzorami 1.27 i 1.28. Oba mechanizmy mogą działać jednocześnie i w różnych kierunkach.

- **Kapsulka 12: Koincydencja dwóch efektów temperaturowych**

Konduktywność zależy od iloczynu ruchliwości i koncentracji nośników. Ruchliwość maleje z temperaturą, ale koncentracja samoistna rośnie exponencjalnie. Dominacja jednego z wyżej wymienionych efektów, zależy od typu półprzewodnika i zakresu temperatur (patrz wzory temperaturowe).

- **Kapsułka 13: Półprzewodnik samoistny – zależność exponencjalna**

Dla półprzewodnika samoistnego konduktywność rośnie exponencjalnie z temperaturą zgodnie ze wzorem 1.25. Na wykresie $\ln \delta$ vs $1/T$ otrzymuje się linię prostą o nachyleniu proporcjonalnym do szerokości pasma zabronionego E_g (patrz ekran 1.13 i wzór 1.25).

- **Kapsułka 14: Półprzewodnik domieszkowany - trzy obszary**

W półprzewodniku niesamoistnym występują trzy charakterystyczne obszary zależności konduktywności od temperatury wyznaczające: jonizacja domieszek, nasycenie jonizacji oraz dominacja przewodnictwa samoistnego. Każdy obszar ma inną zależność temperaturową (patrz Rys. 1.14).

- **Kapsułka 15: Praktyczne znaczenie analizy temperaturowej**

Analiza zależności $\ln \delta(1/T)$ pozwala określić: typ półprzewodnika, koncentrację domieszek, szerokość pasma zabronionego. Jest to podstawowa metoda charakteryzacji materiałów półprzewodnikowych (patrz interpretacja wykresów).

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Mechanizmy rozpraszania nośników**

Dlaczego ruchliwość ma maksimum przy średnich koncentracjach domieszek? Jakie są główne mechanizmy rozpraszania nośników w półprzewodnikach i jak zależą od temperatury? ☞ *Wskazówka: Czytaj [7], Rozdział 10.4. Ruchliwość nośników.*

- **Wyzwanie 2: Związek między dyfuzją a ruchliwością**

Czy istnieje związek między współczynnikiem dyfuzji D a ruchliwością μ ? Jak temperatura wpływa na oba te parametry i dlaczego stosunek D/μ ma szczególne znaczenie? ☞ *Wskazówka: Czytaj [7], Rozdział 10.7 Prąd dyfuzji.*

- **Wyzwanie 3: Interpretacja wykresów temperaturowych**

Jak na podstawie wykresu $\ln \delta$ vs $1/T$ można rozróżnić półprzewodnik samoistny od domieszkowanego? Co oznaczają różne nachylenia prostych w różnych obszarach temperaturowych? ☞ *Wskazówka: Czytaj [3], Rozdział 1.5 Mechanizmy transportu nośników oraz konduktywność półprzewodników.*

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Zapamiętaj definicje ruchliwości μ_n i μ_p oraz jednostki.** Zrozum dlaczego dla elektronów jest znak minus w definicji prędkości unoszenia.

☞ **Naucz się wzorów na konduktywność $\delta = \delta_n + \delta_p = q(\mu_n n + \mu_p p)$ i prawa Ohma $J = \delta K$.** Poćwicz obliczenia liczbowe dla różnych koncentracji i ruchliwości.

☞ **Opanuj zależności temperaturowe: $\mu \sim T^{\alpha}(-A)$ dla ruchliwości oraz $n_i \sim T^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$ dla koncentracji samoistnej.**

☞ **Zapamiętaj wzory na prądy dyfuzji $J_n = D_n \text{ grad } n$ i $J_p = -D_p \text{ grad } p$.** Zrozum różnicę znaków i fizyczne znaczenie gradientów koncentracji.

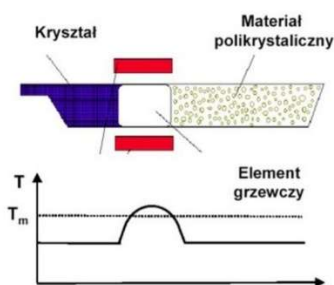
☞ **Poćwicz interpretację wykresów temperaturowych $\ln \delta$ vs $1/T$.** Naucz się rozpoznawać trzy obszary w półprzewodniku domieszkowanym i wyznaczać E_g z nachylenia prostej.

Technologie wytwarzania półprzewodników

Materiały półprzewodnikowe, które są fundamentem współczesnej elektroniki, nie występują naturalnie w czystej, krystalicznej formie. Ich specyficzne właściwości wymagają precyzyjnego procesu produkcji. Jedną z podstawowych i najskuteczniejszych technologii oczyszczania i krystalizacji jest **topnienie strefowe**. W tej metodzie polikrystaliczny materiał jest podgrzewany w taki sposób, że roztopiona strefa przesuwana jest wzdłuż pręta, a zanieczyszczenia koncentrują się w ciekłej fazie, pozostawiając za nią coraz czystszy, monokrystaliczny materiał. Ta część tematu, zilustrowana została przez fragment strony modułu widoczny na ekranie 1.27 oraz opisana przez znajdujące się bezpośrednio pod nim kapsułki wiedzy.

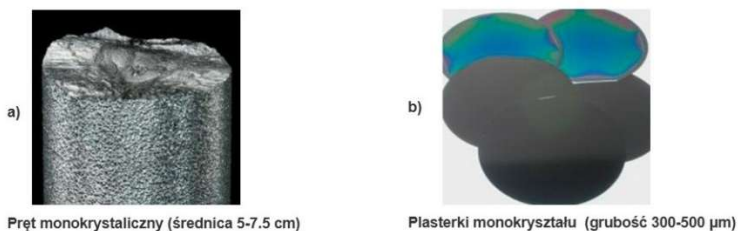
Otrzymywanie czystego krzemu –topnienie strefowe

Materiały wykorzystywane w elektronice nie występują naturalnie w przyrodzie dlatego niezbędne jest zastosowanie odpowiednich technologii w celu ich wytworzenia. Jedną z nich - **topnienie strefowe** pozwala na otrzymywanie bardzo czystego krzemu w postaci krystalicznej. W ruchomym tyglu znajduje się polikrystaliczny piec rozgrzany do odpowiedniej temperatury przesuwana jest wzdłuż niego z odpowiednią prędkością tak dobraną aby materiał roztopiał się a następnie krystalizował:



Rys. 1.15. Krystalizacja materiału półprzewodnikowego

Efektom końcowym zastosowania powyższej technologii są następujące formy:



Pręt monokrystaliczny (średnica 5-7.5 cm)

Plasterki monokrystalu (grubość 300-500 μm)

Rys. 1.16. Postaci i formy krystalicznego materiału półprzewodnikowego

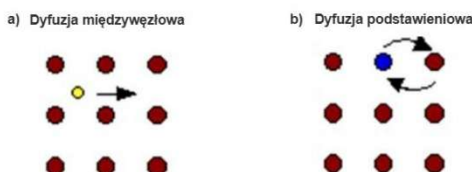
Ekran 1.27. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Technologie wytwarzania półprzewodników*, część dotycząca technologii topnienia strefowego.

W półprzewodnikach domieszkowanie nie jest jednolitym procesem. Nośniki ładunku przemieszczają się przez materiał na dwa główne sposoby: poprzez **dyfuzję międzywęzłową** oraz **dyfuzję podstawieniową**. Ta ostatnia, jest procesem silnie zależnym od temperatury, a także od gęstości defektów krystalograficznych, które ułatwiają przemieszczanie się atomów. Fragment strony kursu widoczny na ekranie 1.28 nawiązuje właśnie do tej części tematu, gdzie zilustrowano obydwa w.w mechanizmy. Na rys. 1.17 podczas procesu *dyfuzji międzywęzłowej* atom domieszki przemieszcza się przez wolne przestrzenie między węzłami sieci, natomiast w *dyfuzji podstawieniowej* zajmuje kolejno miejsca węzłowe sąsiednich atomów, co czyni ją procesem znacznie wolniejszym. **Technologia domieszkownia dyfuzyjnego**

przebiega w dwóch etapach: **predyfuzji** i **redyfuzji**, których efektem są charakterystyczne profile koncentracji domieszki w funkcji głębokości: po **predyfuzji** koncentracja przy powierzchni osiąga graniczną rozpuszczalność i spada stromo, natomiast po **redyfuzji** rozkłada się łagodniej i sięga głębiej przy zachowaniu tej samej dawki atomów (Rys. 1.18).

Technologie domieszkowania - dyfuzja

Dwa główne mechanizmy dyfuzji w ciele stałym to **dyfuzja międzywęzłowa** i **dyfuzja podstawieniowa**. Ta ostatnia jest mechanizmem dyfuzji donorów i akceptorów w krzemie. Szybkość, z jaką zachodzi dyfuzja, zależy bardzo silnie od temperatury. W przypadku dyfuzji podstawieniowej jej szybkość jest także funkcją gęstości defektów krystalograficznych, które ułatwiają przemieszczanie się atomów. W monokryształach bez defektów dyfuzja podstawieniowa zachodzi bardzo powoli.



Rys. 1.17. Rodzaje dyfuzji domieszek.

Domieszkowanie przy użyciu dyfuzji odbywa się w dwóch etapach: **redyfuzji** i **predyfuzji**. Podczas predyfuzji powstaje warstwa bardzo silnie domieszkowana i na ogół płytka. Koncentracja domieszki na powierzchni określona jest przez graniczną rozpuszczalność domieszki w półprzewodniku. Wielkość ta jest charakterystyczna dla danej pary domieszka-półprzewodnik i bardzo słabo zależy od warunków prowadzenia dyfuzji, toteż wynik procesu predyfuzji jest łatwy do kontroli i powtarzalny. Czas i temperatura predyfuzji decydują o dawce (czyli liczbie atomów) wprowadzonej domieszki. W czasie redyfuzji wprowadzona wcześniej domieszka rozprzyska się - wędruje w głąb płytki półprzewodnikowej. Ponieważ dawka nie ulega zmianie, koncentracja przy powierzchni maleje, a zasięg domieszki wzrasta.



Rys. 1.18. Profile rozkładu koncentracji domieszek w technologii dyfuzyjnej.

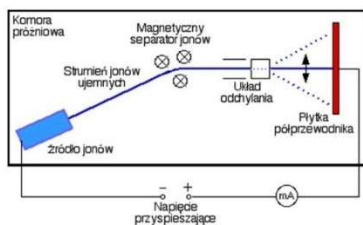
Ekran 1.28. Widok fragmentu strony kursu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Technologie wytwarzania półprzewodników*, część dotycząca technologii domieszkowania dyfuzyjnego półprzewodników.

Kolejnym równie ważnym mechanizmem domieszkowania jest **implantacja jonów**, zilustrowana przez fragment strony modułu widoczny na ekranie 1.28 przedstawiający szczegóły tego procesu. W odróżnieniu od dyfuzji, **implantacja jonów** pozwala na precyzyjne sterowanie zarówno dawką domieszki, jak i głębokością jej wnikania w materiał. Odbywa się to w **implantatorze**, którego budowa przypomina miniaturowy akcelerator cząstek, gdzie jony pierwiastka domieszkującego są najpierw selekcjonowane masowo przez magnetyczny separator, a następnie przyspieszane silnym polem elektrycznym i kierowane na płytkę półprzewodnika (Rys. 1.18). Uderzające w płytkę jony wnikają w głąb materiału, tracąc energię w zderzeniach z atomami sieci krystalicznej, a ich rozkład koncentracji w funkcji

głębokości ma kształt zbliżony do *krzywej Gaussa*¹¹ z maksimum na głębokości x_0 zależnej od napięcia przyspieszającego (Rys. 1.19). Po implantacji konieczne jest wygrzewanie płytki, które usuwa uszkodzenia sieci krystalicznej powstałe podczas bombardowania jonami i powoduje niewielkie poszerzenie profilu rozkładu domieszki w głąb materiału. Istotną zaletą tej metody jest możliwość prowadzenia implantacji przez cienką warstwę SiO_2 , co pozwala precyzyjnie kontrolować położenie maksimum rozkładu domieszki względem powierzchni półprzewodnika.

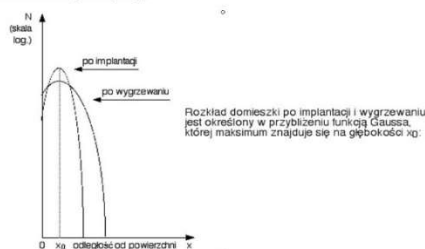
Technologie domieszkowania - implantacja jonów

Implantacja jonów odbywa się w implantatorze, którego budowa przypomina mały akcelerator cząstek elementarnych. Przyspieszane są jednak nie cząstki, lecz jony pierwiastka domieszkującego półprzewodnik.



Rys. 1.18. Schemat działania implantacji jonów..

Jony ze źródła jonów są w poprzecznym polu magnetycznym "oczyszczane" (jony różnych pierwiastków mają różną masę, toteż odchylane są pod różnymi kątami) i przyspieszane w silnym polu elektrycznym. Układ elektrostatyczny odchylenia odchyli strumień jonów i "przemiatą" nim po całej płytce półprzewodnikowej. Jony przyspieszone silnym polem elektrycznym uderzają w płytkę z dużą energią kinetyczną i dzięki temu przemieszczają się w głąb, wytracając stopniowo energię w zderzeniach z atomami sieci krystalicznej półprzewodnika. Równocześnie ich ładunek ulega zobojętnieniu, np. jony ujemne oddają elektron, który przez zewnętrzny obwód odpływa do źródła napięcia przyspieszającego. Równocześnie rozkład domieszki ulega dyfuzji.



Rys. 1.19. Profile rozkładu koncentracji domieszki po implantacji jonów.

Maksimum rozkładu znajduje się na głębokości zależnej od energii implantowanych jonów, czyli od napięcia przyspieszającego. Dawka, czyli liczba atomów domieszki przypadająca na 1 cm^2 powierzchni płytki, jest regulowana przez pomiar i całkowanie w czasie prądu płynącego w obwodzie implantatora. Implantację można wykonać poprzez cienką warstwę SiO_2 . Wówczas maksimum rozkładu domieszki może znaleźć się bliżej powierzchni, a nawet wewnątrz warstwy tlenku. Implantacja przez tlenek zmniejsza energię jonów.

Ekran 1.29. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Technologie wytwarzania półprzewodników*, część o technologii domieszkowania implantacją jonów.

Domykanie procesu domieszkowania to ostatni etap, który ma kluczowe znaczenie dla precyzyjnego wytwarzania struktur półprzewodnikowych. Jedną z najbardziej zaawansowanych metod, która pozwala na tworzenie warstw o grubości liczonej w nanometrach, jest **epitaksja z wiązki molekularnej** (ang. **Molecular Beam Epitaxy, MBE**). Ten złożony proces zachodzi w warunkach ultrawysokiej próżni i pozwala na uzyskanie idealnych warstw monokrystalicznych. Ta część

¹¹ Rozkład normalny, rozkład Gaussa [36] (w literaturze francuskiej zwany rozkładem Laplace'a-Gaussa) – jeden z najważniejszych rozkładów prawdopodobieństwa, odgrywający ważną rolę w statystyce. Wykres funkcji gęstości prawdopodobieństwa tego rozkładu jest nazywany krzywą Gaussa lub krzywą dzwonową (ze względu na kształt podobny do dzwonu).

tematu, została zilustrowana przez fragment strony modułu widoczny na ekranie 1.30. Źródłem wiązek molekularnych są tu **komórki efuzyjne** (patrz Rys. 1.20) zawierające pierwiastki o czystości ~99,9999%, podgrzewane do temperatury sublimacji, a precyzyjna kontrola składu osadzonej warstwy jest możliwa dzięki niezależnemu sterowaniu każdą komórką i możliwości ich dowolnego otwierania i zamykania. Kluczową cechą *metody MBE* jest to, że wiązki molekularne nie reagują ze sobą aż do momentu zetknięcia z podłożem, a przełączanie wiązek odbywa się znacznie szybciej niż prędkość osadzania materiału, co umożliwia to tworzenie warstw o bardzo ostrych granicach międzyfazowych.

Epitaksja z wiązki molekularnej MBE (ang. *Molecular Beam Epitaxy*)

Jest to bardzo złożona technologia wytwarzania uporządkowanych monowarstw o grubości kilku nanometrów. Cały proces odbywa się w warunkach ultrawysokiej próżni (10^{-7} – 10^{-8} Pa). Cienkie warstwy określonego materiału są osadzane na wybrane podłoża z wiązek molekularnych lub atomowych, których źródłem są tzw. komórki efuzyjne. Celem epitaksji jest uzyskanie idealnych warstw monokrystalicznych, których parametry komórki elementarnej są takie same, jak materiału podłoża.

Komórki efuzyjne są to oddzielne części urządzenia do epitaksji. Składają się one przede wszystkim z: tyglia cewki indukcyjnej (grzejnika) oraz systemu chłodzącego.

Bardzo czyste (~99,9999%) pierwiastki w stanie stałym znajdują się w komórkach efuzyjnych. Podczas procesu są one podgrzewane do temperatury ich sublimacji. Utworzona w ten sposób wiązka molekularna jest wyprowadzana z komórki i skierowana w stronę podłoża.

Komórki efuzyjne mogą być zamykane lub otwierane dowolną ilość razy i w różnych przedziałach czasu. Pozwala to na tworzenie związków o precyzyjnym domieszkowaniu.

Ważną sprawą jest tu fakt, że wiązki molekularne nie reagują ze sobą do momentu, aż nie znajdą się blisko podłoża. Wzrost związków odbywa się tylko i wyłącznie na podłożu.

Przełączanie wiązek odbywa się stosunkowo szybko w porównaniu z prędkością osadzania materiału, dlatego możliwe jest tworzenie cienkich warstw o ostrych granicach międzyfazowych

Technikę MBE wykorzystuje się głównie do produkowania studni kwantowych nadstruktur, materiałów gradientowych, materiałów wykazujących gigamagnetoopor, elementów elektrycznych i półprzewodników



Rys. 1.20. Komórka efuzyjna systemu MBE

Ekran 1.30. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych* – temat: *Technologie wytwarzania półprzewodników*, część o technologii domieszkowania z użyciem MBE.

Dzięki tym właściwościom *MBE* znajduje szerokie zastosowanie w tym przy produkcji: *studni kwantowych*,¹² *supersieci półprzewodnikowych*¹³, *materiałów gradientowych*¹⁴ oraz elementów wykazujących *gigamagnetooporność*¹⁵.

¹² **Studnia kwantowa** – studnia potencjału powodująca ograniczenie przestrzenne cząstek w pewnym obszarze poprzez bariery potencjału [36].

¹³ **Supersieci półprzewodnikowe** - to sztucznie wytworzone struktury krystaliczne składające się z naprzemiennie ułożonych, ekstremalnie cienkich warstw (rzędu nanometrów) różnych materiałów półprzewodnikowych [27].

¹⁴ **Tworzywa (materiały) gradientowe** (ang. *Functionally Graded Materials- FGMs*), są to materiały, w których wzdłuż co najmniej jednego określonego kierunku, uzyskano ciągłą zmianę właściwości użytkowych lub konstrukcyjnych w wybranym procesie technologicznym [36].

¹⁵ **Gigamagnetooporność** jest to kwantowomechaniczne zjawisko fizyczne, które polega na gwałtownej zmianie oporu elektrycznego cienkich warstw materiału pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego

Kapsułki wiedzy :

- **Kapsułka 1: Otrzymywanie krzemu w postaci krystalicznej.**

Technologia topienia strefowego pozwala na otrzymanie bardzo czystego krzemu w postaci polikrystalicznej. W technologii tej, ruchoma strefa topnienia przesuwana się wzdłuż pręta, a materiał topi się i następnie krystalizuje. Kryształ rośnie w oparciu o naturalne właściwości, które pozwalają na otrzymanie monokrystalicznej formy. Efektem końcowym jest pręt monokrystaliczny oraz monokrystaliczne plastry, które stanowią podstawę do produkcji elementów półprzewodnikowych.

- **Kapsułka 2: Rodzaje dyfuzji domieszek**

W procesach domieszkowania występują dwa główne mechanizmy dyfuzji: dyfuzja międzywęzłowa, w której atomy domieszek przemieszczają się przez przestrzeń między atomami krzemu, oraz dyfuzja podstawieniowa, gdzie atomy domieszek zajmują miejsca atomów krzemu w sieci krystalicznej.

- **Kapsułka 3: Szybkość dyfuzji**

Szybkość, z jaką zachodzi dyfuzja, zależy silnie od temperatury. W przypadku dyfuzji podstawieniowej, szybkość jest również funkcją gęstości defektów krystalograficznych, które ułatwiają przemieszczanie się atomów.

- **Kapsułka 4: Proces domieszkowania**

Domieszkowanie przez dyfuzję odbywa się w dwóch etapach: predyfuzji i dyfuzji. Podczas etapu predyfuzji powstaje mocno domieszkowana warstwa na powierzchni płytki, a koncentracja domieszek na tej powierzchni jest określona przez granicę rozpuszczalności.

- **Kapsułka 5: Wpływ parametrów na proces domieszkowania**

Czas i temperatura procesu decydują o dawce (całkowitej liczbie atomów) wprowadzanej domieszki, co jest łatwe do kontroli i powtarzalne. Po predyfuzji, dawka nie ulega zmianie, ale koncentracja powierzchniowa maleje, a zasięg domieszki wzrasta.

- **Kapsułka 6: Cel i warunki procesu MBE**

Epitaksja z wiązki molekularnej (MBE) to zaawansowana technologia, której celem jest wytwarzanie uporządkowanych monowarstw o grubości nanometrów. Cały proces odbywa się w warunkach *ultrawysokiej próżni* (ciśnienie rzędu 10^{-10} Pa)

- **Kapsułka 7: Komórki efuzyjne w MBE**

Kluczowym elementem systemu MBE są komórki efuzyjne. Zawierają one bardzo czyste (ponad 99,999%) pierwiastki w stanie stałym, które są podgrzewane do temperatury ich sublimacji. W ten sposób powstaje wiązka molekularna, która jest kierowana w stronę podłoża.

- **Kapsułka 8: Mechanizm wzrostu warstw w MBE**

Ważną cechą tej technologii jest to, że atomy z wiązki nie reagują ze sobą w próżni, a wzrost warstw i tworzenie związków odbywa się dopiero na powierzchni podłoża. Przełączanie wiązek odbywa się bardzo szybko, co umożliwia tworzenie cienkich warstw o ostrych granicach międzyfazowych.

- **Kapsułka 9: Zastosowania praktyczne MBE**

Technikę MBE wykorzystuje się głównie do produkcji zaawansowanych struktur, takich jak studnie kwantowe, supersieci czy materiały gradientowe, które są niezbędne w nowoczesnych elementach elektronicznych.

Wyzwania inżyniera:

- **Wyzwanie 1: Oczyszczanie krzemu**

Dlaczego proces topienia strefowego jest tak efektywny w oczyszczaniu krzemu? Jakie czynniki, oprócz temperatury i prędkości, wpływają na ostateczną czystość materiału? ☞ *Wskazówka: Czytaj [7], Rozdział 4.5 Defekty sieci krystalicznej.*

- **Wyzwanie 2: Różnice między dyfuzją a implantacją**

Porównaj procesy dyfuzji i implantacji jonów pod kątem kontroli parametrów (dawka, profil koncentracji), kosztów i uszkodzeń sieci krystalicznej. W jakich zastosowaniach preferowana jest dyfuzja, a w jakich implantacja? ☞ *Wskazówka: Czytaj [4], Rozdział 2.2.2 Dyfuzja oraz Rozdział 2.2.3 Implantacja jonów.*

- **Wyzwanie 3: Złożoność technologii MBE**

Dlaczego proces MBE musi odbywać się w warunkach ultrawysokiej próżni? Jakie konsekwencje miałyby zanieczyszczenie komory procesowej? ☞ *Wskazówka: Czytaj [4], Rozdział 2 Metody wytwarzania materiałów i struktur półprzewodnikowych.*

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Zrozum, dlaczego topienie strefowe jest tak efektywne w oczyszczaniu krzemu.** Zapamiętaj, że zanieczyszczenia koncentrują się w ciekłej strefie.

☞ **Pamiętaj, że końcowym produktem jest monokrystaliczny pręt,** z którego następnie wytwarza się **plastry** (wafle) używane do produkcji elementów

☞ **Zrozum, że dyfuzja to proces termiczny, w którym atomy domieszki przemieszczają się przez sieć krystaliczną.** Zapamiętaj dwa główne mechanizmy: *dyfuzję międzywęzłową i dyfuzję podstawieniową.* Wiedz, że ten proces jest mniej precyzyjny pod kątem profilu koncentracji, ale powoduje mniejsze uszkodzenia sieci.

☞ **Zapamiętaj, że to metoda precyzyjnego "wstrzeliwania" jonów domieszek.** Jej kluczowe zalety to dokładna kontrola dawki i profilu koncentracji. Pamiętaj, że wadą jest powstawanie uszkodzeń sieci krystalicznej, które muszą zostać naprawione w procesie wygrzewania.

☞ **Zapamiętaj, że Epitaksja z wiązki molekularnej (MBE) to technologia pozwalająca na tworzenie monokrystalicznych warstw atom po atomie w warunkach ultra-wysokiej próżni.** Zrozum, że jest to kluczowe dla produkcji zaawansowanych struktur, takich jak **studnie kwantowe**.

Materiały półprzewodnikowe - przykładowe zadania

Ostatni temat modułu wykładowego o *Materiałach półprzewodnikowych*, którego fragment pokazuje ekran **1.31 to zestaw zadań i rozwiązań z fizyki półprzewodników**, będący Temat dotyczy podstawowych właściwości materiałów półprzewodnikowych, a konkretnie ich przewodnictwa i koncentracji nośników ładunku. Zadania zebrane w tej części stanowią praktyczne podsumowanie całego modułu i wymagają łączenia wiedzy z kilku poprzednich tematów jednocześnie, takich jak *model pasmowy, domieszkowanie, ruchliwość nośników czy konduktywność*. Ich rozwiązanie nie sprowadza się do prostego podstawienia do wzoru, lecz wymaga rozumienia fizycznych zależności między parametrami

materiału, co czyni je dobrym sprawdzianem przygotowania do zaliczenia. Każde zadanie zostało opatrzone interaktywnym kalkulatorem oraz szczegółowym rozwiązaniem analitycznym, dzięki czemu student może samodzielnie zweryfikować tok rozumowania i wynik numeryczny.

Materiały półprzewodnikowe - przykładowe zadania

Zadanie: 1

Do krzemowego półprzewodnika **typu p** o koncentracji nośników w temperaturze pokojowej $p=10^{20} \text{ m}^{-3}$ i $n_i=5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ wprowadzono zadaną ilość akceptorów. Wyznaczyć rezystywność właściwą tego półprzewodnika. Przyjąć $\mu_n=0,15 \text{ m}^2/\text{Vs}$, $\mu_p=0,048 \text{ m}^2/\text{Vs}$.

$N_A =$ $\cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ - ilość akceptorów. Wartość musi być dodatnia.

Wyznacz rezystancję

Dla wprowadzonej $N_A=10 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ilości akceptorów, rezystywność wynosi: 0.030302638998291172 Ω

Rozwiązanie powyższego zadania:

Po domieszkowaniu koncentracja akceptorów jest równa:

$$p_p = N_A + p$$

Z prawa oddziaływania mas: $np = n_i^2 = \text{const}$ wyznacza się koncentrację elektronów:

$$n_p = n_i^2 / p_p \approx np / p_p$$

a stąd konduktywność półprzewodnika:

$$\sigma = (n_p \mu_n + p_p \mu_p) q$$

gdzie:

$$\mu_n = 0.15 \text{ m}^2/\text{Vs}$$

$$\mu_p = 0.048 \text{ m}^2/\text{Vs}$$

$$q = 1.6 \cdot 10^{-19}$$

Stąd rezystywność:

$$\rho = 1/\sigma$$

Ekran 1.31. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— Temat: *przykładowe zadania*.

Pierwsze zadanie koncentruje się na krzemie *typu p*. Pytanie brzmi: jak obliczyć koncentrację akceptorów (N_A), znając koncentracje dziur (p) i elektronów (n), a także koncentrację nośników własnych (n_i). Treść zadania obejmuje zastosowanie następujących praw poznanych w trakcie realizacji tego modułu: **Prawo działania mas** ($p \cdot n = n_i^2$): To podstawowa zasada w fizyce półprzewodników, która mówi, że w równowadze termicznej iloczyn koncentracji dziur i elektronów jest stały i równy kwadratowi koncentracji nośników własnych. Pozwala to na obliczenie brakującej koncentracji jednego z nośników, jeśli znamy pozostałe dwie wartości. **Prawo zachowania ładunku** ($p + N_D = n + N_A$): W neutralnym półprzewodniku ładunek dodatni musi równoważyć ładunek ujemny. W materiale *typu p*, głównymi nośnikami są dziury (p), a akceptory (N_A) są zjonizowane. Dzięki temu wzorowi, znając p i n , można obliczyć poszukiwaną koncentrację akceptorów ($N_A = p - n$). Warto tu zwrócić uwagę na **interaktywność zadania która pozwala na wstawienie różnych wartości N_A i obserwowanie, jak zmieniają się pozostałe parametry**.

Drugie zadanie dotyczy germanowego półprzewodnika *typu n* i wprowadza dodatkowy poziom złożoności, czyli obliczanie natężenia prądu płynącego przez pręt o określonym przekroju. Punktem wyjścia jest tu wyznaczenie natężenia pola elektrycznego na podstawie znajomości składowej prędkości unoszenia elektronów i

ich ruchliwości, co daje $K=v_n/\mu_n$. Kluczową pułapką tego zadania jest fakt, że german jest materiałem słabo domieszkowanym, a zatem przy obliczaniu prądu nie można pominąć składowej dziurowej, stąd całkowity prąd uwzględnia oba typy nośników i wyraża się przez sumę gęstości prądów elektronowej i dziurowej, przy czym koncentrację mniejszościowych dziur wyznacza się właśnie z *prawa działania mas* jako $p=n_i^2/N_D$.

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ **Upewnij się, że rozumiesz i potrafisz stosować prawo działania mas** ($p \cdot n = n_i^2$) oraz **prawo zachowania ładunku** – to dwa fundamentalne narzędzia, które pojawiają się w niemal każdym zadaniu rachunkowym z tego modułu.

☞ **Przećwicz rozróżnianie sytuacji**, w której materiał jest *silnie domieszkowany* (nośniki mniejszościowe można pominąć) od przypadku *słabego domieszkowania* (jak w zadaniu z germanem), gdzie obie składowe prądu – *elektronowa i dziurowa* muszą być uwzględnione. Błędne uproszczenie to najczęstsza przyczyna pomyłek.

☞ **Naucz się wyznaczać natężenie pola elektrycznego** z prędkości unoszenia nośników i ich ruchliwości ($K=v/\mu$), to często pierwszy krok w zadaniach dotyczących prądu w półprzewodniku, który otwiera drogę do dalszych obliczeń.

☞ **Zapamiętaj tok rozwiązania zadania z rezystywnością**: wyznacz koncentracje obu nośników $\rightarrow$ oblicz *konduktywność* $\sigma = (n\mu_n + p\mu_p)q \rightarrow$ wyznacz *rezystywność* jako $\rho = 1/\sigma$. Ten schemat powtarza się w wielu wariantach zadań zaliczeniowych.

☞ **Korzystaj z interaktywnego kalkulatora** dostępnego na stronie tematu wstawiaj różne wartości parametrów i obserwuj, jak zmieniają się wyniki. To najszybszy sposób na zbudowanie intuicji fizycznej przed zaliczeniem.

☞ **Przed przystąpieniem do obliczeń zawsze sprawdź jednostki**, *ruchliwość* w m^2/Vs , *koncentracja* w m^{-3} , *ładunek elementarny* $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Niespójność jednostek to częste źródło błędów numerycznych, które łatwo wyeliminować przez nawyk kontroli na początku rozwiązania.

1.1.1. Wykład o materiałach elektronicznych - wersja zaliczeniowa

Jak już wspomniano każdy moduł wykładowy występuje w dwóch wariantach: *wersji poglądowej*, przeznaczonej do zapoznania się z treścią i samodzielnego utrwalania wiedzy, oraz *wersji zaliczeniowej*, w której student odpowiada na pytania kontrolne zgodnie z zasadami opisanymi w regulaminie kursu.

Wersja zaliczeniowa modułu wykładowego o materiałach elektronicznych, której "Wstęp" ilustruje ekran 1.32, działa w dwóch trybach czasowych: przez pierwszą dobę od uruchomienia nie obowiązuje żaden limit czasu, co pozwala na swobodne zawieszenie realizacji modułu i powrót do niego w dowolnym momencie, po upływie doby następuje jednak przełączenie do trybu z limitem wynoszącym 90 minut. Po każdym temacie pojawia się jedno pytanie kontrolne, przy czym należy pamiętać, że zatwierdzonej odpowiedzi nie można już edytować, dlatego przed jej potwierdzeniem warto upewnić się co do swojego wyboru. Z tego względu zaleca się realizację wersji zaliczeniowej dopiero po dokładnym przestudiowaniu wersji poglądowej i utrwaleniu wiedzy z wszystkich tematów modułu. Warto też mieć na

uwadze, że treści prezentowane w poszczególnych tematach to celowo skondensowane „kapsułki” wiedzy, które w razie potrzeby można i należy uzupełnić korzystając ze źródeł literaturowych podawanych na końcu każdego tematu.

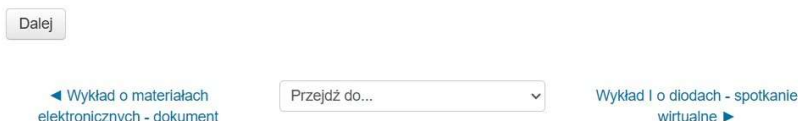
Wstęp do laboratorium

Zadania Wstępne i regulaminowe

Niniejszy moduł stanowi wstępne zapoznanie się z elektronicznym laboratorium pomiarowym A304. Czas jego realizacji biegnie od uruchomienia do momentu zatwierdzenia odpowiedzi na ostatnie pytanie tematyczne. Możliwe jest kilkakrotne podejście do realizacji modułu na zasadach określonych w [regulaminie kursu](#). Należy jednak pamiętać, że termin końcowy działania bloku jest ograniczony terminem podanym w systemowym komunikacie o jego dostępności (panel po prawej stronie). W realizacji modułu pomoże [wirtualny spacer](#) działający w ramach serwisu [www KPE](#). Bardziej szczegółowy opis sprzętu pomiarowego dostępnego w laboratorium zamieszczono na stronie: [Podstawowa Aparatura Pomiarowa](#). Odwiedzając w.w. strony z opisem przyrządów oraz podczas wirtualnego spaceru po laboratorium A304 należy zwrócić szczególną uwagę na sprzęt, dostępny na stanowiskach pomiarowych i jego funkcjonalność. Chodzi tu m.in. w przypadku multimetrów: które zaciski są przyporządkowane do wybranych funkcji (pomiar prądu, napięcia, pojemności), czym przełączamy ich funkcje i zakresy; w przypadku uniwersalnych zestawów pomiarowych (Metex) zlokalizować poszczególne urządzenia pomiarowe (zasilacz, generator, częstotściomierz, multimetr) i zapoznać się z ich funkcjami.

Istotną częścią wirtualnego spaceru po laboratorium jest **przyswojenie instrukcji BHP (Regulaminu Laboratorium)**. Przełączenie aplikacji spaceru w tryb gry a następnie realizacja zadań w postaci przeczytania regulaminu laboratorium i rozwiązania testu, **zastępuje tradycyjne szkolenie BHP i jest obowiązkowym elementem niniejszego modułu**.

Po zrealizowaniu zadań opisanych należy przejść do następnego etapu, gdzie nastąpi weryfikacja uzyskanej wiedzy.



Ekran. 1.32. Kopia ekranu pierwszej strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych – wersja zaliczeniowa*

Po przyswojeniu wszystkich informacji wstępnych należy przejść do kolejnej strony modułu poprzez użycie przycisku "Dalej". **Strony tematyczne w zależności od wersji modułu mogą mieć dwa rodzaje przycisków nawigacyjnych**, co zostało zilustrowane na przykładowym ekranie 1.32.



Ekran 1.33. Widok fragmentu strony modułu *Wykład o materiałach półprzewodnikowych - wersja poglądowa i zaliczeniowa z zaznaczonymi (na czerwono) przyciskami nawigacji*.

Jak można zauważyć *moduły wykładowe w wersji poglądowej* posiadają przyciski nawigacji pomiędzy sąsiednimi tematami a przemieszczanie się pomiędzy stronami modułu nie ma żadnych ograniczeń Tego typu moduły uruchamiane są zazwyczaj w terminach wykładów stacjonarnych i na nich są szczegółowo omawiane, natomiast ich wersje zaliczeniowe są dostępne ok. 2-3 dni później. Wcześniej

dostęp do wersji poglądowych umożliwia nie tylko zapoznanie się z treścią tematyczną wykładów, lecz umożliwia również **sprawdzenie czy cała zawartość lekcji jest wyświetlana prawidłowo**. Jest to szczególnie ważne w sytuacji, kiedy użytkownicy korzystają z wielu różnych przeglądarek internetowych a wykłady zawierają szereg obiektów interaktywnych zrealizowanych przy pomocy różnych technologii. Widoczność poglądowych modułów wykładowych obejmuje cały okres dostępności kursu, a ich aktywowanie przez studentów i liczba instancji nie są obwarowane żadnymi warunkami.

Wprowadzenie do lekcji *e-lerningowych* pytań kontrolnych sprawia, że moduł taki wymaga zachowania większej koncentracji w trakcie jego. **Przystępując do zaliczenia modułu wykładowego z limitem czasu, należy pamiętać że uruchomienie modułu startuje licznik, który po upływie zaprogramowanego czasu blokuje dostęp do lekcji**. Jak widać strony tej wersji modułu nie zawierają przycisków nawigacyjnych tylko przycisk pytania kontrolnego (oznaczony na czerwono). **Dlatego po naciśnięciu przycisku „Pytanie kontrolne” nie ma bezpośredniej możliwości powrotu do aktualnego tematu**. Oczywiście istnieją inne możliwości techniczne aby tego dokonać ale ich wykorzystanie może spowodować powstanie błędów systemowych i zakłóceń przebiegu sesji. To z kolei może mieć wpływ na wynik końcowy testu, **dlatego zaleca się aby w trakcie sesji zaliczeniowej korzystać tylko i wyłącznie z przycisków nawigacyjnych lekcji**.

Oprócz trybu z limitem czasu dość często używany jest **tryb bez limitu czasowego**, dotyczy to zwłaszcza modułów przygotowawczych do laboratoriów i **pierwszej doby po uruchomieniu modułów lekcji wykładowych**. Moduł po uruchomieniu jest wówczas aktywny do momentu, kiedy użytkownik dotrze do jego końca. **Istnieje jednak niebezpieczeństwo utraty dostępu do jego treści, gdy zadziała okno czasowe przewidziane na jego realizację (moduły przygotowawcze do laboratoriów) lub nastąpi przełączenie na tryb z limitem czasowym (moduły zaliczeniowe do wykładów)**. O zmianach trybów i terminach realizacji poszczególnych modułów informują odpowiednie komunikaty widoczne w kalendarzu i panelu bocznym widoku głównego kursu.

Sesja zaliczeniowa powinna być przeprowadzona na jednym rodzaju przeglądarki internetowej najlepiej podczas jednego podejścia. Oczywiście istnieje możliwość przerywania zaliczenia i dalszej kontynuacji ale jest to obwarowane pewnymi warunkami, które są podawane w **regulaminie kursu**. Terminy uruchamiania tego typu modułów są lekko przesunięte w stosunku do terminów wykładów stacjonarnych, których dotyczą, co jak wcześniej wspomniano daje czas na sprawdzenie poprawności działania treści tematycznej i reakcję w przypadku konieczności dodatkowych konsultacji merytorycznych przed zaliczeniem. Dostępność modułów zaliczeniowych obejmuje okresy pomiędzy kolejnymi terminami wykładów stacjonarnych.

W prezentowanym przykładzie modułu zastosowano różne rodzaje pytań, głównie są to pytania typu *dopasowywanie* oraz *pytania numeryczne*, ale używane są także pytania w formie *krótkiej odpowiedzi*, *eseju*, *prawda/fałsz* lub *wyboru wielokrotnego*. Taka różnorodność nie tylko urozmaica formę pracy, ale także pozwala sprawdzić wiedzę w sposób bardziej zbliżony do praktyki inżynierskiej, gdzie równie istotne jest zarówno poprawne kojarzenie pojęć, jak i wykonywanie

prosty obliczeń liczbowych. Dzięki temu lekcja zaliczeniowa pełni podwójną funkcję: z jednej strony kontroluje stopień opanowania wiedzy, a z drugiej rozwija umiejętności jej praktycznego zastosowania. Na ekranie 1.34. zaprezentowano widok treści jednego z tzw. *pytań na dopasowywanie*, które jest jednym z najczęściej używanych w ramach opisywanego tu kursu.

Wykład o materiałach elektronicznych-wersja zaliczeniowa

Otrzymałeś dotąd 0 punktów z 0

(0-2 pkt.) Dopasuj elementarną cząstkę atomu do skojarzonego z nią ładunku elektrycznego:

elektron

proton

neutron

Masz za sobą 2% lekcji

Ekran 1.34. Przykładowy widok pytania przez dopasowanie.

Obsługa takiego pytania polega na dopasowaniu treści z listy rozwijanej do odpowiedniego pola w pytaniu. **Ważne jest to błędne dopasowanie choćby jednej pozycji skutkuje niezaliczeniem całego pytania.** Po dopasowaniu wszystkich pozycji na stronie pytania (może być ich od 1 do 4) i naciśnięciu przycisku "Prześlij" pojawia się ekran z informacją o przekazanej odpowiedzi. Przykładowy widok takiego ilustruje ekran 1.35, gdzie w informacji zwrotnej otrzymujemy komunikat o prawidłowej lub nieprawidłowej odpowiedzi, bez podania lokalizacji popełnionego ewentualnie błędu. Naciśnięcie przycisku Kontynuuj przenosi użytkownika do następnego tematu modułu

Otrzymałeś dotąd 0 punktów z 2

(0-2 pkt.) Dopasuj elementarną cząstkę atomu do skojarzonego z nią ładunku elektrycznego:

Twoja odpowiedź :

elektron

= ładunek ujemny

proton

= ładunek dodatni

neutron

= ładunek dodatni

Informacja zwrotna:

zła odpowiedź

nie dopasowano wszystkich par

Ekran 1.35. Przykładowy widok komunikatu zwrotnego pytania przez dopasowanie.

Na ekranie 1.36 przedstawiono przykładowy widok pytania numerycznego. Przy tego rodzaju pytaniach bardzo istotne jest to aby przestrzegać wskazówek

dotyczących jednostek i podanej dokładności. Niezastosowanie się do tych wytycznych może spowodować błąd polegający na tym, że przesłana wartość znajdzie się poza dopuszczalnym marginesem, co w efekcie spowoduje niezaliczenie pytania.

Wykład o materiałach elektronicznych-wersja zaliczeniowa

Otrzymałeś dotąd 0 punktów z 2

(0-2 pkt.) Oblicz wartość orbitalnego momentu pędu elektronu w atomie dla przypadku, gdy poboczna liczba kwantowa wynosi 3 (odpowieź podaj w [eV*s])

Twoja odpowiedź

Masz za sobą 4% lekcji

4%

Ekran 1.36. Przykładowy widok pytania numerycznego

Częste błędy, prowadzące do niezaliczenia tego typu pytań wynikają też z podawania dodatkowych (innych niż numeryczne) znaków do pola odpowiedzi (np. spacja lub przecinek). Efekt takiego działania ilustruje ekran 1.37

Wykład o materiałach elektronicznych-wersja zaliczeniowa

Otrzymałeś dotąd 0 punktów z 2

Brak odpowiedzi

◀ Wykład o materiałach elektronicznych-wersja poglądowa

Przejdź do...

Rys. 1.37. Przykładowy widok komunikatu zwrotnego numerycznego po błędzie edycyjnym.

Po zatwierdzeniu odpowiedzi na pytanie numeryczne, która zawiera nieprawidłowy znak, system nie akceptuje przesłanych wartości i w komunikacie zwrotnym pojawia się adnotacja „Brak odpowiedzi” a naciśnięcie przycisku *Kontynuuj* powoduje powrót do treści aktualnego pytania.

Innym rodzajem pytania na jakie można trafić w trakcie realizacji sesji zaliczeniowej, to pytanie wielokrotnego lub jednokrotnego wyboru, którego przykład ilustruje **ekran 1.38**.

Wykład o materiałach elektronicznych-wersja zaliczeniowa

Otrzymałeś dotąd 0 punktów z 2

(0-1 pkt) Na Rys.1.8. b) przedstawiono:

☐ Model pasmowy półprzewodnika typu n

☒ Model pasmowy półprzewodnika typu p

☐ Sieć krystaliczną półprzewodnika typu p

☐ Sieć krystaliczną półprzewodnika typu n

Masz za sobą 4% lekcji

4%

Ekran 1.38. Przykładowy widok pytania jednokrotnego wyboru

Przy formułowaniu odpowiedzi na takie pytanie należy zawsze upewnić się czy można zaznaczyć więcej niż jedną opcję odpowiedzi, gdyż jest to jedyna możliwość zidentyfikowania z jakim typem pytania mamy aktualnie do czynienia.

Przedstawione powyżej typy pytań stanowią większość w zdefiniowanej na potrzeby modułów zaliczeniowych bazie, są pytania używane nieco rzadziej, do których zalicza się tzw. *krótka odpowiedź* zilustrowana na **ekranie 1.39**

Wykład o materiałach elektronicznych-wersja zaliczeniowa

Otrzymałeś dotąd 0 punktów z 3

(0-1 pkt.) Ile elektronów walencyjnych mają atomy domieszk w sieci krystalicznej widocznej na Rys. 1.8.

Twoja odpowiedź

[Prześlij](#)

Masz za sobą 5% lekcji

5%

Ekran 1.39. Przykładowy widok pytania typu *krótka odpowiedź*

Pytanie tego typu wymaga podania odpowiedzi w polu tekstowym i jej interpretacja też polega na sprawdzaniu, czy podany ciąg znaków zgadza się ze stałą tekstową (stringiem) zapisaną w treści pytania. Wynika z tego, że cokolwiek wpisujemy do okna odpowiedzi (nawet liczbę), zostanie ona potraktowana jako ciąg znaków. Dlatego posługując się przykładem na ekranie Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania. wpisanie w pole odpowiedzi "5.0" lub "pięć" może być źródłem błędu. Ze względu na podobieństwo formularza tego typu pytania do *pytania numerycznego* może być ono źródłem nieporozumień i błędnych wpisów. Aby odróżnić pytanie numeryczne od pytania z krótką odpowiedzią, w ramach kursu stosowane jest odpowiednie podejście do formułowania ich treści. Wszystkie pytania typu numerycznego mają podawane wymagania co do jednostek i dokładności, co nie jest praktykowane w sytuacji pytań typu *krótka odpowiedź*. Ze względu na powyższe niejasności pytania typu *krótka odpowiedź* zostały obecnie praktycznie wyparte z użytku i zastąpione innymi rodzajami.

1.2.2. Wykład o materiałach elektronicznych – pliki dokumentów

Folder - Pliki dokumentów jest miejscem, gdzie udostępniane są różnorodne materiały dydaktyczne związane z aktualnym wykładem. Znajdują się tu głównie dokumenty w formacie PDF ale też inne pliki, które wspierają proces nauki, umożliwiając samodzielne zapoznanie się z tematyką kursu i uzupełnienie omawianych zagadnień. Widok zawartości folderu przeznaczanego dla *Wykładu o materiałach elektronicznych* przedstawia ekran **1.40**, gdzie zamieszczono dokument pdf zawierający zwarty opis treści prezentowanych na dedykowanym wykładzie.

Wykład o materiałach elektronicznych - pliki dokumentów



Ekran 1.40. Widok fragmentu strony modułu: *Wykład o materiałach elektronicznych*— Temat: *przykładowe zadania*.

W sytuacji kiedy folder zawiera więcej plików wygodnym narzędziem jest widoczny tu przycisk **Pobierz Folder** który jak się łatwo domyśleć umożliwia pobranie całej zawartości folderu przez użytkownika.

1.1. Moduły zajęć laboratoryjnych



Przygotowanie do praktycznych zajęć laboratoryjnych zawarte w tym module, choć nie stanowi głównego elementu procesu edukacyjnego w zakresie *materiałów elektronicznych*, to jednak działa pośrednio na efekty kształcenia w obszarze całego przedmiotu.



1.1.1. Wstęp do laboratorium

Moduł lekcyjny **Wstęp do laboratorium** jak już wcześniej wspomniano został zaprojektowany jako element przygotowawczy, realizowany w okresie poprzedzającym rozpoczęcie pomiarów laboratoryjnych a jego główne cele dydaktyczne to:

- ☞ Zapoznanie z elektronicznym laboratorium pomiarowym A304 i dostępnym wyposażeniem
- ☞ Przyswojenie zasad bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP) obowiązujących w środowisku laboratoryjnym
- ☞ Poznanie regulaminu laboratorium oraz procedur organizacyjnych
- ☞ Wprowadzenie do obsługi podstawowej aparatury pomiarowej
- ☞ Przygotowanie teoretyczne do realizacji zaplanowanych ćwiczeń praktycznych

Opisując ten moduł podobnie zresztą jak inne występujące w kursie EDI moduły przygotowawcze do zajęć laboratoryjnych przyjęto nieco inne podejście niż w przypadku modułów wykładowych. Polega ono na prezentowaniu i opisywaniu tylko wybranych tematów. Takie podejście wynika z faktu powtarzania się pewnych schematów jeśli chodzi o konstrukcję i strukturę przekazywanych treści.

Zadania wstępne i regulaminowe

Na ekranie **1.41** przedstawiono stronę startową opisywanego tu modułu z opisem celów i zakresu wspomnianych wyżej zajęć przygotowawczych. Na stronie tej znajduje się link z odniesieniem do strony internetowej, na której zainstalowano aplikację z **wirtualnym spacerem po laboratorium podstaw elektroniki**. Warto tu dodać, że aplikacja ta umożliwia także zaliczenie podstawowego szkolenia BHP w zakresie zasad bezpiecznej pracy z urządzeniami elektrycznymi oraz organizacji stanowiska pomiarowego w *Laboratorium Podstaw Elektroniki*. Informacje o dostępnej aparaturze pomiarowej udostępniono pod lokalizacją umieszczono pod linkiem **Podstawowa Aparatura Pomiarowa**. Podczas wirtualnego spaceru szczególną uwagę należy zwrócić na sprzęt dostępny na stanowiskach pomiarowych w przypadku multimetrów istotne jest zapoznanie się z przyporządkowaniem zacisków do poszczególnych funkcji pomiarowych, natomiast w przypadku uniwersalnych zestawów pomiarowych (np *Metex*) ważne jest aby przyswoić rozmieszczenie i funkcje poszczególnych sekcji (*zasilacza, generatora, częstotściomierza i multimetru*). Zaliczenie szkolenia BHP realizowanego w trybie gry w ramach aplikacji spaceru jest obowiązkowym elementem niniejszego modułu i

zastępuje tradycyjne szkolenie stacjonarne. Moduł ten można realizować na zasadach określonych w regulaminie kursu, jednak **należy pamiętać, że termin końcowy jego dostępności jest ograniczony i podawany w systemowym komunikacie widocznym w panelu po prawej stronie ekranu.**

Wstęp do laboratorium

Wstęp

Niniejszy moduł stanowi wstępne zapoznanie się z elektronicznym laboratorium pomiarowym A304. Czas jego realizacji biegnie od uruchomienia do momentu zatwierdzenia odpowiedzi na ostatnie pytanie tematyczne. Możliwe jest kilkukrotne podejście do realizacji modułu na zasadach określonych w **regulaminie kursu**. Należy jednak pamiętać, że termin końcowy działania bloku jest ograniczony terminem podanym w systemowym komunikacie o jego dostępności (panel po prawej stronie). W realizacji modułu pomoże **wirtualny spacer** działający w ramach serwisu www.KPE. Bardziej szczegółowy opis sprzętu pomiarowego dostępnego w laboratorium zamieszczono na stronie: **Podstawowa Aparatura Pomiarowa**. Odwiedzając w.w. strony z opisem przyrządów oraz podczas wirtualnego spaceru po laboratorium A304 należy zwrócić szczególną uwagę na sprzęt, dostępny na stanowiskach pomiarowych i jego funkcjonalność. Chodzi tu m.in. w przypadku multimetrów: które zaciski są przyporządkowane do wybranych funkcji (pomiar prądu, napięcia, pojemności), czym przełączamy ich funkcje i zakresy; w przypadku uniwersalnych zestawów pomiarowych (Metex) zlokalizować poszczególne urządzenia pomiarowe (zasilacz, generator, częstotściomierz, multimetr) i zapoznać się z ich funkcjami.

Istotną częścią wirtualnego spaceru po laboratorium jest **przyswojenie instrukcji BHP (Regulaminu Laboratorium)**. Przeglądanie aplikacji spaceru w tryb gry a następnie realizacja zadań w postaci przeczytania regulaminu laboratorium i rozwiązania testu, **zastępuje tradycyjne szkolenie BHP i jest obowiązkowym elementem niniejszego modułu**.

Po zrealizowaniu zadań opisanych należy przejść do następnego etapu, gdzie nastąpi weryfikacja uzyskanej wiedzy.

Dalej

◀ Wykład o materiałach
elektronicznych - dokument

Przejdź do...

Wykład I o diodach - spotkanie
wirtualne ▶

Ekran 1.41. Widok strony startowej modułu: *Wstęp do laboratorium*

Aplikacja spaceru wirtualnego jest jednym z najlepszych owoców partnerskiej współpracy prowadzącego i studentów. Począwszy od etapu pomysłu, poprzez prace projektowe i realizacyjne, studenci uczestniczyli aktywnie w różnych pomysłach o podobnym charakterze i ostatecznie najlepsze rozwiązanie znalazło swój finał w aplikacji, której stronę startową ilustruje ekran **1.42**. Ekran powitalny aplikacji (patrz fragment (a)) oferuje dwa tryby jej działania: *Uruchom grę* oraz *Swobodne przemieszczanie*. Po wyborze drugiej z wymienionych opcji program umożliwia swobodne przemieszczanie się, przy pomocy klawiszy nawigacyjnych i ikonki i opcji pomocniczych, po całym obszarze *budynku A* (fragment (b)). Taka forma eksploracji wspomaga proces nauczania poprzez praktyczne zapoznanie się z lokalizacją sal, laboratoriów oraz innych pomieszczeń, co ułatwia późniejsze punktualne dostarcenie i uczestnictwo w zajęciach stacjonarnych. Jest to szczególnie przydatne dla studentów, którzy nie mają zajęć w opisywanym tu budynku A. Po wyborze opcji gry oczom użytkownika ukazuje się postać ekranu jak na ekranie **1.42.(c)**.

Jak widać interfejs aplikacji prezentuje fotorealistyczny widok głównego wejścia do *budynku A* wydziału z nałożonymi elementami interaktywnymi gry edukacyjnej. Po prawej stronie ekranu znajduje się panel zadań zawierający listę celów do realizacji:

☞ **1. Dostań się do sali A304** - główne zadanie nawigacyjne prowadzące do laboratorium w którym odbywają się zajęcia praktyczne z przedmiotu.

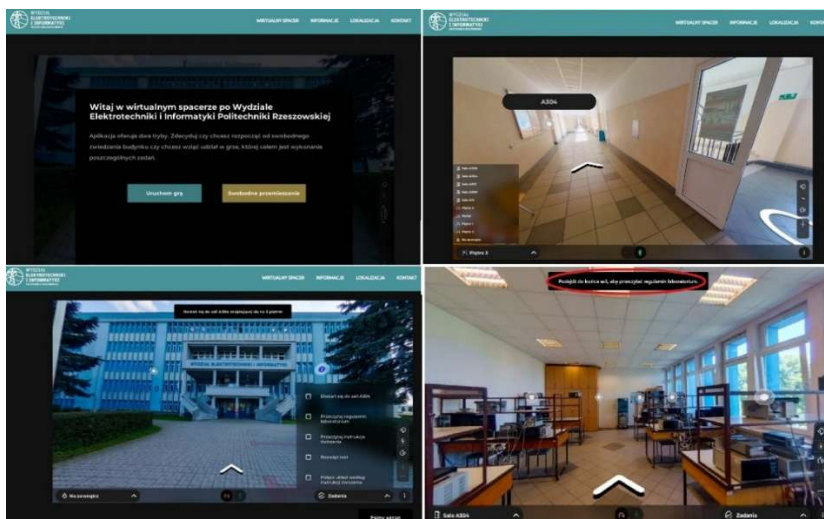
☞ **2. Przeczytaj regulamin laboratorium** - element edukacyjny dotyczący zasad BHP (zadanie obowiązkowe)

☞ **3. Przeczytaj instrukcje ćwiczenia** - przygotowanie merytoryczne do zajęć praktycznych

☞ **4. Rozwiąż test** - weryfikacja przyswojonych informacji z zakresu znajomości zasad BHP i Regulaminu laboratorium (**zadanie obowiązkowe**)

☞ **5. Połącz układ według instrukcji ćwiczenia** - symulacja praktycznych czynności laboratoryjnych

Dolna część interfejsu zawiera standardowe kontrolki nawigacyjne umożliwiające poruszanie się po wirtualnym środowisku, z opcją przejścia na tryb pełnoekranowy oraz dostępem do dodatkowych funkcji aplikacji. System punktowy i wskaźnik postępów motywują użytkownika do systematycznego realizowania kolejnych etapów przygotowania do zajęć laboratoryjnych.



Ekran 1.42. Widoki wybranych ekranów aplikacji wirtualnego spaceru po budynku A Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej¹⁶: ekran startowy aplikacji (a), widok trybu swobodnego przemieszczania po budynku (b), widok ekranu początkowego aplikacji w trybie gry edukacyjnej, widok wnętrza sali laboratoryjnej A 304.

Jak wynika z regulaminu kursu, niektóre zadania dostępne w ramach aplikacji są obowiązkowe, a inne nie jak na przykład *swobodne przemieszczanie się i wirtualne zwiedzanie budynku A*. Warto jednak zwrócić uwagę, że choć obowiązkowe *zadanie nr 3 ("Przeczytaj regulamin laboratorium")* wydaje się wymagać wykonania *zadania nr 1 ("Dostań się do sali A304")*, to uważny użytkownik może przenieść się do wybranej sali bezpośrednio, używając specjalnych opcji (patrz ekran 1.43 (b)). Ponadto w każdej lokalizacji pojawiają się komunikaty i odpowiedzi dotyczące aktualnego zadania i celu.

Do obowiązkowych zadań użytkownika należy opanowanie instrukcji BHP i regulaminu laboratorium, co potwierdza się poprzez zaliczenie testu dostępnego w ramach aplikacji. Poglądowo ilustruje to ekran 1.43, gdzie w części (a) widoczny jest fragment wspomnianego *regulaminu laboratorium*, natomiast w części (b) przedstawiono ekran pojawiający się po zapoznaniu się z treścią dokumentu i potwierdzeniu tego faktu przyciskiem „Przeczytane”, gdzie na środku ekranu

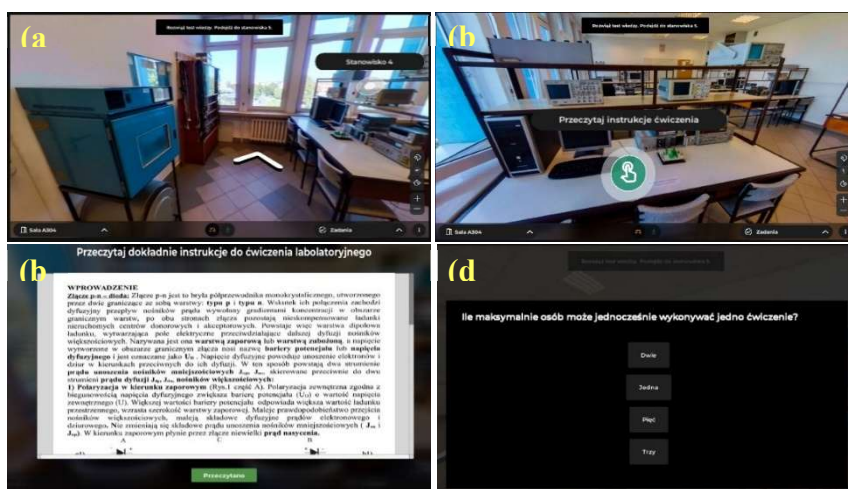
¹⁶ Przygotowano na bazie materiałów zawartych w pracy [21]

pojawia się ikona wskazówki z widocznym przyciskiem o treści "**Rozwiąż quiz**". Po jego aktywacji użytkownik rozpoczyna rozwiązywanie testu sprawdzającego.



Ekran 1.43. Widoki ekranów z regulaminem laboratorium (a) i poleceniem rozwiązania testu z BHP (b) aplikacji *wirtualny spacer* w trybie *gry edukacyjnej*.

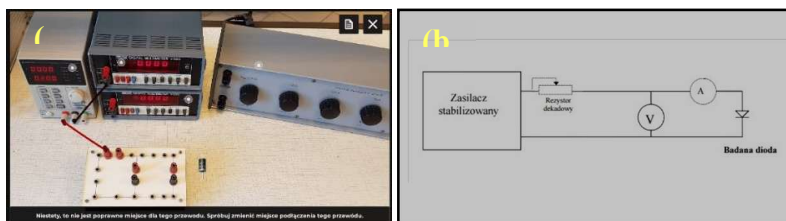
Należy tu jednak mieć na uwadze, że możliwość rozwiązania testu jest dostępna dopiero po przeczytaniu wszystkich dostępnych na sali dokumentów. Do tej grupy zalicza się też instrukcja do *wirtualnego ćwiczenia z diodą*, która jest usytuowana na stanowisku nr 4. Poszczególne jego etapy przedstawia ekran 1.44: w części (a) widać stanowisko, do którego należy podejść aby wykonać ćwiczenie, w części (b) jest ekran z poleceniem zapoznania się z instrukcją, w części (c) treść instrukcji a w części (d) przykładowe pytanie testowe



Ekran 1.44. Widoki ekranów aplikacji *wirtualny spacer* w trybie *gry edukacyjnej* dedykowanych ćwiczeniu z diodą: na stanowisko nr 4 (a), z poleceniem przeczytania instrukcji do ćwiczenia (b), z treścią instrukcji do ćwiczenia (c), z przykładowym pytaniem testowym (d).

Opisywane tu ćwiczenie nie należy do zadań obowiązkowych, jednak wymagane jest zapoznanie się z treścią instrukcji. **Do zadań fakultatywnych w tej części kursu należy natomiast wirtualna realizacja ćwiczenia zgodnie z instrukcją.** Student, posługując się myszką i interfejsem ekranowym, może przełączać widoki: aktualnego stanu swojego wirtualnego połączenia na ekranie roboczym (patrz ekran 1.45 (a)) lub schematem układu pomiarowego (patrz ekran 1.45 (b)) poprzez ikonkę dokumentu w prawym górnym rogu ekranu roboczego. Jednocześnie w dolnej części ekranu wyświetlane są komunikaty informujące o

poprawności lub niepoprawności aktualnego połączenia oraz wskazówki dotyczące dalszego postępowania.



Ekran 1.45. Widoki ekranów z wirtualnym ćwiczeniem na stanowisku nr 4 : (a) i poleceniem rozwiązania testu z BHP (b) aplikacji *wirtualny spacer* w trybie gry edukacyjnej.

Znaczenie tego ćwiczenia wykracza poza samo zapoznanie się z regulaminem czy instrukcją. Dzięki wirtualnemu spacerowi student może zobaczyć, jak będą wyglądały zajęcia laboratoryjne, jakie stanowiska są dostępne oraz z jakim sprzętem pomiarowym będzie miał do czynienia. Szczególnie ważne jest to, że w laboratorium znajdują się multimetry różnych typów i generacji. Takie zróżnicowanie nie jest przypadkowe, w praktyce inżynierskiej często spotyka się aparaturę zarówno nowoczesną, jak i starszą, a umiejętność sprawnego korzystania z różnych przyrządów pomiarowych jest cenną kompetencją zawodową. Przykład takiego zestawienia zaprezentowano na ekranie na ekranie 1.46.

Zestawy pomiarowe i multimetry (c)

L.p.	Nazwa	Podgląd	Plik
1.	Uniwersalny zestaw pomiarowy METEX typ 9160		metex_ms-915060.pdf
2.	Uniwersalny zestaw pomiarowy METEX typ 9140		metex9140.pdf
3.	Multimetr Agilent (HP) 34401A		multimeter_hp_34401a_users_guide.pdf
4.	Multimetr cyfrowy MERA-TRONIK V560		multimetr_cyfrowy_v560.pdf

Ekran 1.46. Widoki stron serwisu www KPE w części dotyczącej laboratorium podstaw elektroniki: grupy dostępnego sprzętu pomiarowego (a), przykład stanowiska modułowego złożonego z wkładek zawierających konkretne układy elektroniczne (b), fragment zestawienia dostępnego sprzętu pomiarowego (c).

Zestawiono tu kilka widoków stron serwisu www KPE dostępnych poprzez link opisany jako **Podstawowa Aparatura Pomiarowa**, gdzie znajdują się opisy i szczegółowe dokumentacje sprzętu dostępnego w ramach laboratorium podstaw elektroniki. W części (a) widoczny jest **podział aparatury na główne grupy urządzeń pomiarowych**, co pozwala szybko zorientować się w zasobach laboratorium. W części (b) zaprezentowano **stanowisko modułowe**, w którym zamiast jednego złożonego układu stosuje się zestaw wymiennych wkładek zawierających konkretne układy elektroniczne, takie rozwiązanie ułatwia różnorodność ćwiczeń i elastyczność dydaktyczną. Natomiast w części (c) pokazano **fragment listy dostępnych przyrządów pomiarowych**, co daje wyobrażenie o skali i różnorodności aparatury, z którą student może mieć kontakt podczas zajęć.

Odwołanie do tego serwisu pełni ważną rolę dydaktyczną, gdyż student już na etapie przygotowania zajęć może zapoznać się ze strukturą laboratorium i rodzajami aparatury, z jaką będzie pracował. Znajomość podstawowej aparatury pomiarowej przed wejściem na salę pozwala skrócić czas potrzebny na organizację pracy, a jednocześnie zwiększa efektywność wykonywania ćwiczeń. Serwis pełni więc funkcję swego rodzaju **katalogu wprowadzającego**, który ułatwia zrozumienie, jak wygląda typowe stanowisko modułowe, jakie przyrządy będą używane i jaką dokumentacją techniczną można się posługiwać. Co istotne, dostępne zestawienia obejmują zarówno aparaturę nowoczesną, jak i starsze przyrządy, co lepiej odzwierciedla realia pracy inżyniera w praktyce zawodowej.

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ Z uwagi na fakt szeregu istotnych elementów jakie powiązane zostały z pierwszą stroną opisywanego tu modułu, przejście do kolejnego tematu zostało poprzedzone pytaniem kontrolnym. Aby poprawnie je zaliczyć, warto utrzymywać kontakt z serwisem KPE i uważnie notować najważniejsze etapy gry edukacyjnej. Przykładowe pytanie zaliczeniowe z tego tematu zilustrowano na ekranie **1.47**.

Wstęp do laboratorium

(0-2 p)Ustal prawdziwość zdań

W aplikacji spaceru wirtualnego klawisz na klawiaturze komputera oznaczony "4" umożliwia zmianę widoku kamery, po dotarciu do stanowiska pomiarowego w laboratorium A 304 .

Wybierz ...

prawda
falsz

netowej KPE ilustrującej przyrządy pomiarowe laboratorium podstaw elektroniki opisano 6

Wybierz ...

Marka oscyloskopu analogowego widocznego na stanowisku demonstracyjnym (oznaczonym zielonym krzyżem) prezentowanym w aplikacji spaceru wirtualnego po laboratorium A 304 to Goldstar

Wybierz ...



Przedstawiony przyrząd to multimetr cyfrowy marki Agilent

Wybierz ...

Ekran 1.47. Przykładowe pytanie zaliczeniowe z tematu - *Zadania wstępne i regulaminowe*.

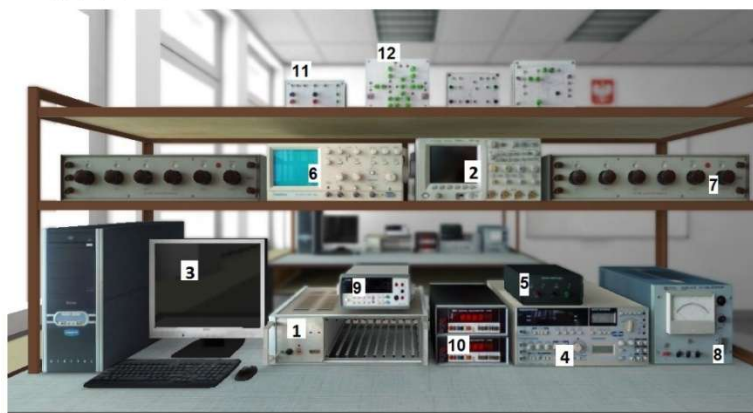
Opis stanowiska laboratoryjnego

Każdy kto odbył wirtualny spacer po laboratorium, to na pewno zauważył, że typowe stanowisko pomiarowe w sali A304 wygląda podobnie, jak na ekranie 1.48. Jest ono wyposażone w zestaw klasycznych przyrządów pomiarowych¹⁷, źródeł zasilania oraz specjalnych podstawek do badania elementów półprzewodnikowych. Numeracja na rysunku odpowiada szczegółowemu opisowi podanemu poniżej. Zadaniem studenta jest uważne prześledzenie tej listy i powiązanie jej z widokiem stanowiska. Dzięki temu łatwiej będzie zapamiętać, jakie urządzenia są do dyspozycji i do czego służą.

Wstęp do laboratorium

Opis stanowiska laboratoryjnego

Jeśli odbyliśmy wirtualny spacer po laboratorium, to na pewno zauważyliśmy, że typowe stanowisko pomiarowe w sali A304 wygląda jak poniżej:



Rys. 1.21. Stanowisko laboratoryjne.

Ekran 1.48. Widok fragmentu strony modułu: *Wstęp do laboratorium*— Temat: Opis stanowiska laboratoryjnego.

Zapoznanie się ze standardowym stanowiskiem laboratoryjnym jest niezbędnym krokiem przed rozpoczęciem zajęć. Wiedza o tym, jakie przyrządy znajdują się na stole i jakie pełnią funkcje, pozwala szybciej odnaleźć się podczas ćwiczeń i sprawnie wykonać polecane pomiary. Różnorodność wyposażenia – od komputerowo wspomaganych systemów pomiarowych, przez nowoczesne oscyloskopy cyfrowe, po starsze multimetry – odzwierciedla rzeczywistość pracy inżyniera, w której spotyka się zarówno z nowym, jak i z klasycznym sprzętem.

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

☞ Aby zaliczyć ten temat, dokładnie obejrzyj Rys. 1.21 na stronie modułu i porównaj go z listą opisującą kolejne elementy stanowiska. Zwróć szczególną uwagę na przyrządy, które będą używane najczęściej w trakcie ćwiczeń: *oscyloskop cyfrowy, multimetry i podstawki pomiarowe*. Zapamiętaj ich rozmieszczenie i przeznaczenie.

¹⁷ Należy tu wziąć pod uwagę fakt, że wirtualny spacer po laboratorium został wykonany kilka lat wstecz i aktualny stan wyposażenia stanowiska znacząco się zmienił, dlatego temat jest traktowany poglądowo i wymaga uzupełnienia o wiedzę w zawartą dalszych tematach niniejszej lekcji.

Przykładowe pytanie zaliczeniowe z tego tematu zilustrowano na ekranie **1.47**.

Wstęp do laboratorium

(0-1 pkt) Zweryfikuj prawdziwość zdań

Cyfrą 12 na ilustracji 1.21 przedstawiającej stanowisko laboratoryjne oznaczono podstawkę do badania diod

Wybierz ...
Wybierz ...
prawda
fałsz

Cyfrą 9 na ilustracji 1.21 przedstawiającej stanowisko laboratoryjne oznaczono multimetr cyfrowy

Cyfrą 2 na ilustracji 1.21 przedstawiającej stanowisko laboratoryjne oznaczono zasilacz laboratoryjny

Wybierz ...

Cyfrą 5 na ilustracji 1.21 przedstawiającej stanowisko laboratoryjne oznaczono zasilacz symetryczny

Wybierz ...

Prześlij

Ekran 1.49. Przykładowe pytanie zaliczeniowe z tematu - *Zadania wstępne i regulaminowe*.

Metex - podstawowe funkcje

Przyjrzymy się teraz jednemu z najbardziej uniwersalnych przyrządów dostępnych na laboratorium. Zdjęcie na ekranie **1.50** przedstawia wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy **METEX UNIVERSAL SYSTEM RS-9140**. Jest to urządzenie, które łączy w sobie funkcje kilku podstawowych aparatów pomiarowych, takich jak:

- **Licznik częstotliwości** (Frequency Counter)
- **Multimetr cyfrowy** (Digital Multimeter)
- **Generator funkcji** (Function Generator)
- **Zasilacz laboratoryjny** (Power Supply)

Każda z tych sekcji jest wyraźnie oznaczona i zawiera zestaw zacisków, przełączników i pokręteł do obsługi.

Metex -- podstawowe funkcje

Przyjrzymy się teraz dokładnie jednemu z najbardziej uniwersalnych przyrządów dostępnych na laboratorium:



Jeśli zapoznaliśmy się z dostępną na stronie KPE instrukcją i wiemy do czego służą poszczególne zaciski i klawisze

Pytanie kontrolne

Ekran 1.50. Widok fragmentu strony modułu: *Wstęp do laboratorium*— Temat: Metex -- podstawowe funkcje.

Zapoznanie się z tym urządzeniem jest kluczowe, ponieważ jego uniwersalność pozwala na wykonywanie wielu różnych pomiarów, co czyni go sercem typowego stanowiska laboratoryjnego. Zrozumienie, do czego służą poszczególne zaciski i klawisze, jest niezbędne do prawidłowego przeprowadzenia eksperymentów.

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

Aby zaliczyć ten temat, uważnie przeanalizuj zdjęcie przedstawiające przyrząd Metex RS-9140. Zwróć szczególną uwagę na cztery główne sekcje i przyporządkuj im ich funkcje: **zasilacz**, **multimetr**, **generator** i **licznik częstotliwości**. Zapamiętaj, jakie pokrętki i przełączniki odpowiadają za kluczowe ustawienia, np. wybór funkcji pomiarowej, zakresu czy kształtu generowanego sygnału. Ta wiedza pozwoli ci bez problemu odpowiedzieć na **pytanie kontrolne** i sprawnie rozpocząć pracę z urządzeniem w laboratorium

Oscyloskop cyfrowy

Oscyloskop cyfrowy jest niezwykle uniwersalnym i potężnym narzędziem. Umożliwia nie tylko obserwację sygnałów, ale także ich szczegółową analizę dzięki wbudowanym funkcjom pomiarowym (np. pomiar częstotliwości, amplitudy czy okresu). Urządzenie to pozwala również na zapisywanie przebiegów i ich eksport do dalszej analizy na komputerze.

Zdjęcie na ekranie 1.51 przedstawia często spotykany na stanowiskach laboratoryjnych w sali A304 model **oscylloskopu cyfrowego** z serii DSO. Jest to jedno z kluczowych urządzeń, bez którego trudno wyobrazić sobie jakiegokolwiek pomiaru w elektronice. Służy do wizualizacji i analizy przebiegów sygnałów elektrycznych w funkcji czasu.



Ekran 1.51. Widok fragmentu strony modułu: *Wstęp do laboratorium*— Temat: Oscyloskop cyfrowy

Zapoznanie się z jego obsługą jest kluczowe dla każdego inżyniera, ponieważ oscyloskop stanowi podstawę diagnostyki układów elektronicznych. Umożliwia szybkie wykrywanie błędów, takich jak szумы, zniekształcenia czy niewłaściwa synchronizacja sygnałów. Różnorodność jego zastosowań sprawia, że jest to jedno z najważniejszych narzędzi w pracy inżyniera. W przeciwieństwie do multimetru, który mierzy wartości statyczne (np. napięcie stałe), oscyloskop pozwala obserwować, jak napięcie zmienia się w czasie, co jest niezbędne do badania sygnałów zmiennych, takich jak przebiegi sinusoidalne, prostokątne czy sygnały impulsowe.

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

Aby zaliczyć ten temat, dokładnie przeanalizuj zdjęcie przedstawiające oscyloskop. Skoncentruj się na najważniejszych sekcjach panelu sterowania:

- **Sterowanie horyzontalne (Horizontal):** Do ustawiania podstawy czasu (skali osi X).
- **Sterowanie wertykalne (Vertical):** Do ustawiania skali napięcia (skali osi Y) dla każdego kanału.
- **Sterowanie wyzwalaniem (Trigger):** Do stabilizacji obrazu, aby przebieg był nieruchomy na ekranie.

Upewnij się, że wiesz, do czego służą poszczególne pokręta i przełączniki w tych sekcjach, ponieważ to one są najczęściej używane podczas pomiarów. Ta wiedza jest niezbędna, aby poprawnie odpowiedzieć na **pytanie kontrolne** i efektywnie pracować z oscyloskopem w laboratorium.

Multimetr Agilent

Multimetr to narzędzie, od którego często zaczyna się każdy pomiar. Jego prosta obsługa i wszechstronność sprawiają, że jest niezastąpiony zarówno podczas szybkiej diagnostyki, jak i precyzyjnych badań. Zrozumienie, jak prawidłowo podłączyć przewody pomiarowe i wybrać odpowiednią funkcję, jest absolutnie fundamentalne. Niewłaściwe ustawienie może prowadzić do uszkodzenia urządzenia lub błędnych odczytów. Prezentowany na zdjęciu **multimetr cyfrowy firmy Agilent** to kolejny podstawowy i niezwykle wszechstronny przyrząd, który znajdziesz na stanowisku laboratoryjnym. W odróżnieniu od oscyloskopu, który służy do analizy dynamicznych przebiegów, multimetr jest przeznaczony do **precyzyjnego pomiaru stałych wartości elektrycznych**, takich jak napięcie, prąd, rezystancja, czy pojemność. Jego nazwa, "multi-metr", odzwierciedla wielość funkcji pomiarowych w jednym urządzeniu. Nowoczesne multimetry cyfrowe, jak ten model Agilent, charakteryzują się wysoką dokładnością, co jest kluczowe w profesjonalnych zastosowaniach, i oferują automatyczny dobór zakresu, co znacznie ułatwia pracę.

Kolejny ważny przyrząd dostępny na stanowisku laboratoryjnym to multimetr firmy Agilent widoczny na f.



Jeśli poświęciliśmy mu wystarczającą ilość czasu na zapoznanie się z jego podstawowymi funkcjami spr

Pytanie kontrolne

Ekran 1.52. Widok fragmentu strony modułu: *Wstęp do laboratorium*— Temat: *Multimetr Agilent*

Multimetr to narzędzie, od którego często zaczyna się każdy pomiar. Jego prosta obsługa i wszechstronność sprawiają, że jest niezastąpiony zarówno podczas szybkiej diagnostyki, jak i precyzyjnych badań. Zrozumienie, jak prawidłowo podłączyć przewody pomiarowe i wybrać odpowiednią funkcję, jest absolutnie fundamentalne. Niewłaściwe ustawienie może prowadzić do uszkodzenia urządzenia lub błędnych odczytów.

Przygotowanie do zaliczenia tematu:

Aby zaliczyć ten temat, dokładnie zapoznaj się z panelem przednim multimetru Agilent 34401A. Zwróć uwagę na kluczowe elementy:

- **Zaciski pomiarowe:** Gniazda do podłączania przewodów. Pamiętaj, że dla pomiarów prądu (A) i napięcia/rezystancji (V/ Ω) używa się różnych gniazd.
- **Przyciski funkcyjne:** Służą do wyboru mierzonej wartości (np. DCV dla napięcia stałego, ACV dla napięcia zmiennego, RES dla rezystancji).

- **Wyświetlacz:** Pokazuje wynik pomiaru oraz informuje o wybranej funkcji i zakresie.

Twoim zadaniem jest zapamiętanie, do czego służą poszczególne gniazda i przyciski, co pozwoli ci prawidłowo przygotować się do **pytania kontrolnego** oraz sprawnie wykonywać zadania w laboratorium.

Literatura:

1. M. Suszał, *Moodle, Ćwiczenia praktyczne*. Helion, 2012.
2. W. Howil, *Moodle, Stwórz własny serwis e-learningowy*. Empik
3. A. Kusy, *Podstawy Elektroniki cz I Przyrządy półprzewodnikowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1984
4. W. Marciniak, *Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone*, WNT, 1987
5. A. Filipkowski, *Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe*, WNT, 1993
6. M. Olszewski, *Elektronika Dla Informatyków i studentów kierunków nieelektrycznych*, Helion, Gliwice , 2022
7. J. Hennel , *Podstawy elektroniki półprzewodnikowej*, WNT, 1995
8. J. Kalisz, *Podstawy elektroniki cyfrowej*, WKiŁ, 2002.
9. Ch. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, PWN,1999
10. L. Pajdowski, *Chemia ogólna*, PWN,1994
11. A.W. Stadler, A. Kusy, A. Kolek, *Elektronika zbiór zadań cz. I przyrządy półprzewodnikowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1995
12. A.W. Stadler, A. Kusy, A. Kolek *Elektronika zbiór zadań cz. II Podstawowe układy elektroniczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1996
13. H.F. Wolf „*Półprzewodniki*”, WNT
14. Z. Nosal, J. Baranowski, *Układy elektroniczne cz I Układy analogowe liniowe*, WNT, 1994
15. W. J. Stepowicz, K. Górecki. *Materiały i elementy elektroniczne*, Wydawnictwo Akademii Morskiej (Gdynia), 2008 , WNT
16. S. Januszewski, H. Świątek „*Diody i tyrystory w pytaniach i odpowiedziach*”, WNT,1984
17. M. Dąbrowiecki, "Zastosowanie środowiska flash do prezentacji wybranych zagadnień z elektroniki", praca dyplomowa, P.Rz. 2003.
18. K. Szczęch, *Symulacje projektów układów logicznych z użyciem*
19. J. Kościółek, *Zastosowanie pakietu Multisim w laboratorium elektronicznym cz. II - symulacje układów analogowych*”, praca dyplomowa, P.Rz. 2011.
20. D. Kudyba, *Stanowisko laboratoryjne do badania wybranych układów elektronicznych z wykorzystaniem modułów programowalnych Arduino*, praca dyplomowa, P.Rz. 2016.
21. D. Działo, *Modelowanie trójwymiarowego świata wirtualnego z elementami multimedialnych interakcji*, praca dyplomowa, P.Rz. 2019
22. K. Szczęch, *Symulacje projektów układów logicznych z użyciem modułów FPGA - Altera*, praca dyplomowa, P.Rz. 2022.

23. K. M. Noga, M. Radwański, *Multisim Technika cyfrowa w przykładach*
24. M. Bojarska-Kowalik, A. Cichy, J. Kwiczala *Zbiór Zadań z Elektroniki*, Wydawnictwo Politechniki śląskiej, 2001
25. K. Saeed, M. Parfieniuk, *Podstawy elektrotechniki i elektroniki dla studentów informatyki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej Białystok 2020
26. K. Iniewski., A. Jakubowski, B. Majkusiak, *Przyrządy MOS w Zadaniach*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1991.
27. M. Mączka, *Metody efektywnego modelowania kwantowych przyrządów półprzewodnikowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2018
28. S. Kuta, G. Krajewski, J. Jasielski, *Układy elektroniczne część pierwsza*, Wydawnictwo AGH Kraków 1995.
29. S. Kuta, *Elementy i Układy elektroniczne Część 2* , Wydawnictwo AGH Kraków 2000.
30. T. Masewicz, *Radioelektronika dla praktyków*.
31. M. Nadachowski, Z. Kulka, *Analogowe układy scalone*, WKŁ, 1979.
32. U. Tietze, CH. Schenk, *Układy półprzewodnikowe*, WNT, 1976.
33. A. Guziński, "Liniowe elektroniczne układy analogowe", WNT, 1993.
34. P. H. Sydenham, "Podręcznik metrologii. Tom I: Podstawy teoretyczne", WKŁ, 1988.
35. W. Majewski, "Układy logiczne", WNT, 1999.
36. <https://pl.wikipedia.org/wiki/>
37. <https://ruffle.rs/>
38. https://archive.org/details/flashplayer_32_sa
39. <https://esezam.okno.pw.edu.pl/>
40. <https://www.falstad.com/circuit/polish/index.html>
41. <https://www.allaboutcircuits.com>
42. <https://elektronika327.blogspot.com/>
43. <https://resources.pcb.cadence.com/>
44. <https://nicerland.com/eduFiles/STM32F4/Tutorials/AppendixA-v111.pdf>
45. <https://www.allaboutcircuits.com/>
46. <https://ep.com.pl/kursy/tutoriale/9128-programowanie-ukladow-fpga-w-altium-designer-tworzenie-projektu-hierarchicznego>
47. <https://faculty-web.msoe.edu/meier/ce1900/del1manual.pdf>
48. <https://www.altera.com/design/guidance/software/sof-qts-scripting>
49. <https://www.arduino.cc/>
50. <https://www.arduino.cc/en/software/>
51. <http://fritzing.org/home/>
52. <https://www.tinkercad.com/circuits>