

**SYLABUS**

DOTYCZY CYKLU KSZTAŁCENIA 2021/22 – 2022/23

(skrajne daty)

Rok akademicki 2021/2022

**1. PODSTAWOWE INFORMACJE O PRZEDMIOCIE**

Nazwa przedmiotu	<b>Fizyka fazy skondensowanej</b>
Kod przedmiotu*	
Nazwa jednostki prowadzącej kierunek	Kolegium Nauk Przyrodniczych
Nazwa jednostki realizującej przedmiot	Kolegium Nauk Przyrodniczych
Kierunek studiów	Fizyka
Poziom studiów	studia drugiego stopnia, po studiach inż.
Profil	ogólnoakademicki
Forma studiów	studia stacjonarne
Rok i semestr/y studiów	I rok, semestr 1
Rodzaj przedmiotu	przedmiot kierunkowy
Język wykładowy	polski
Koordinator	<b>dr hab. Małgorzata Sznajder, prof. UR</b>
Imię i nazwisko osoby prowadzącej / osób prowadzących	dr hab. Małgorzata Sznajder, prof. UR

\* -opcjonalnie, zgodnie z ustaleniami w Jednostce

**1.1. Formy zajęć dydaktycznych, wymiar godzin i punktów ECTS**

Semestr (nr)	Wykł.	Ćw.	Konw.	Lab.	Sem.	ZP	Prakt.	Projekt	Liczba pkt. ECTS
1	45	25						5	5

**1.2. Sposób realizacji zajęć**

- zajęcia w formie tradycyjnej  
 zajęcia realizowane z wykorzystaniem metod i technik kształcenia na odległość

**1.3 Forma zaliczenia przedmiotu (z toku) (egzamin, zaliczenie z oceną, zaliczenie bez oceny)**

WYKŁAD – EGZAMIN

ĆWICZENIA – ZALICZENIE Z OCENĄ

PROJEKT – ZALICZENIE Z OCENĄ

## 2. WYMAGANIA WSTĘPNE

Wiedza z zakresu podstaw fizyki (kinematyki, mechaniki, elektromagnetyzmu, optyki i budowy atomu) na poziomie studiów I stopnia, analizy matematycznej (rachunek całkowy i różniczkowy). Znajomość zagadnień z fizyki kwantowej dotyczących rozwiązań stacjonarnego równania Schroedingera dla cząstki w studni potencjału, barier potencjału, efektu tunelowego, wiedza na temat spinu elektronu, zakazu Pauliego, momentów magnetycznych, rachunku zaburzeń dla przypadku niezdegenerowanego oraz zdegenerowanego.

## 3. CELE, EFEKTY UCZENIA SIĘ, TREŚCI PROGRAMOWE I STOSOWANE METODY DYDAKTYCZNE

### 3.1 Cele przedmiotu

C <sub>1</sub>	Nabycie przez studenta gruntownej wiedzy na temat własności fizycznych ciał stałych: metali, półprzewodników, dielektryków, magnetyków, nadprzewodników i materiałów amorficznych
C <sub>2</sub>	zaznajomienie z podstawami metodami obliczeniowymi struktury pasmowej ciał stałych
C <sub>3</sub>	zaznajomienie z podstawową metodyką badań eksperymentalnych w fizyce ciała stałego
C <sub>4</sub>	wykształcenie umiejętności intuicyjnego rozumienia omawianych zjawisk fizycznych i posługiwania się poprawną terminologią fizyczną
C <sub>5</sub>	zdobycie wiedzy umożliwiającej prowadzenie badań naukowych w zakresie wybranych zagadnień fizyki fazy skondensowanej

### 3.2 Efekty uczenia się dla przedmiotu

EK (efekt uczenia się)	Treść efektu uczenia się zdefiniowanego dla przedmiotu	Odniesienie do efektów kierunkowych
EK_01	Student zna i rozumie w pogłębionym stopniu zagadnienia z zakresu własności fizycznych ciał stałych, w tym metali, półprzewodników, dielektryków, magnetyków oraz ciał amorficznych, jak i znaczenie fizyki fazy skondensowanej dla postępu nauk ścisłych i przyrodniczych	K_Wo1
EK_02	Student zna aktualne kierunki rozwoju i najnowsze odkrycia w zakresie eksperymentalnych metod wytwarzania nowoczesnych półprzewodników, w tym pracujących w ekstremalnych warunkach wysokich mocy, częstotliwości i temperatur	K_Wo6
EK_03	Student zna fundamentalne dylematy współczesnego rozwoju fizyki	K_Wo7
EK_04	Student potrafi zaplanować badania struktury krystalicznej materiału metodą rozpraszania promieniowania rentgenowskiego, efektu Halla, przerwy energetycznej materiału	K_Uo1
EK_05	Student potrafi w sposób krytyczny ocenić wyniki eksperymentów, obserwacji i obliczeń teoretycznych	K_Uo2

	dotyczących struktury pasmowej materiału, wartości energii adsorpcji pierwiastka na powierzchni materiału, potrafi ocenić eksperymentalne zależności temperaturowe podstawowych charakterystyk metali i półprzewodników i na podstawie ich przebiegu zidentyfikować typ materiału, a także przedyskutować błędy pomiarowe	
EK_o6	Student potrafi przedstawić wyniki badań w postaci samodzielnie przygotowanego raportu zawierającego opis i uzasadnienie celu pracy, przyjętą metodologię, wyniki oraz ich analizę	K_Uo4
EK_o7	Student jest gotów do uznania ograniczeń własnej wiedzy i potrzeby zasięgnięcia opinii ekspertów w przypadku trudności z samodzielnym rozwiązaniem problemu dotyczącym fizyki fazy skondensowanej	K_Ko2
EK_o8	Student jest gotów do systematycznego zapoznawania się z czasopismami naukowymi i popularnonaukowymi, podstawowymi dla fizyki fazy skondensowanej, w celu poszerzenia i pogłębiania wiedzy oraz rozwijania dorobku zawodowego	K_Ko6

### 3.3 Treści programowe

#### A. Problematyka wykładu

Treści merytoryczne
<b>Wstęp.</b> Stany skupienia - faza skondensowana – kryształy, materiały amorficzne, materiały polikrystaliczne, kryształy ciekłe, szkła – usystematyzowanie podstawowych własności.
<b>Krystalografia</b> Zagadnienia symetrii kryształów, pojęcie grupy symetrii, klasy symetrii, grupy przestrzennej kryształu, klasy krystalograficznej. Hierarchia układów krystalograficznych pod względem symetrii. Wybrane struktury krystaliczne (np. wurcyt, perowskit i przykłady nowoczesnych materiałów krystalizujących w tych strukturach). Zjawisko politypizmu na przykładzie żelaza i węgla krzemowego. Wskaźniki Millera. Porównanie metod LEC, Czochralskiego i Bridgmana wzrostu monokryształów.
<b>Wiązania chemiczne w ciałach stałych</b> Wiązanie jonowe, kowalencyjne, wodorowe, metaliczne, van der Waalsa.
<b>Dyfrakcja fal na kryształach</b> Dyfrakcja fotonów, neutronów i elektronów na kryształach, mechanizm powstawania wiązki ugiętej na kryształach. Amplituda fali rozproszonej i analiza Fouriera. Wyprowadzenie równań Lauego przy wykorzystaniu pojęcia wektorów sieci odwrotnej. Warunek dyfrakcji sformułowany dla rozpraszania sprężystego i jego równoważność z warunkiem Lauego. Konstrukcja Ewalda. Sieci odwrotne do sieci sc, bcc, fcc oraz do sieci heksagonalnej. Czynniki struktury sieci fcc i bcc, czynniki atomowe.
<b>Dynamika i własności termiczne sieci krystalicznej</b> Drgania i fale w jednowymiarowej sieci krystalicznej z jednym oraz z dwoma atomami w komórce. Krzywe dyspersji: gałęzie akustyczne i optyczne. Prędkość grupowa i fazowa, przybliżenie długofalowe. Drgania cieplne sieci jednowymiarowej jako drgania normalne, kwantowanie drgań sieci. Fonony. Drgania atomów w trójwymiarowej złożonej sieci krystalicznej. Funkcje termodynamiczne w ciele stałym. Gęstość stanów. Model Debye'a ciepła właściwego. Doświadczenia z niesprężystym rozpraszaniem neutronów w kryształach, procesy N oraz U.
<b>Najważniejsze przybliżenia w teorii pasmowej ciała stałego</b> Przybliżenie adiabatyczne, Przybliżenie jednoelektronowe.
<b>Stany elektronowe w kryształach doskonałych</b> Ogólne własności elektronu poruszającego się w polu periodycznym. Rozwiązanie równania

<p>Schroedingera w ramach przybliżeń elektronów swobodnych i prawie swobodnych oraz interpretacja graficzna rozwiązań. Mechanizm powstawania energetycznych przerw wzbronionych i schemat struktury pasmowej w zredukowanej strefie Brillouina. Diagramy energetyczne dielektryka, przewodnika, półprzewodnika i półmetal – różnice ze schematem pasmowym. Przykłady struktur pasmowych wybranych metali i półprzewodników. Twierdzenie Blocha i jego dowód. Wektor <math>k</math> jako liczba kwantowa, kwazipęd elektronu w kryształach. Warunki brzegowe Borna – Karmana dla funkcji falowej elektronu w kryształach. Kwantowanie stanów elektronowych w paśmie energetycznym. Ruch elektronów pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego, Tensor masy efektywnej. Funkcja gęstości stanów energetycznych.</p>
<p><b>Wybrane metody obliczeń struktury pasmowej ciał stałych</b>  Pojęcie pseudopotencjału, funkcji pseudofalowej oraz postać równania pseudofalowego. Metoda półempirycznego pseudopotencjału, idea obliczeń z pierwszych zasad metodą pseudopotencjału (<i>ab initio</i> pseudopotential methods). Metoda <i>kp</i>. Pojęcie masy efektywnej niezdegenerowanego pasma wyznaczonej metodą <i>kp</i>. Metoda ciasnego wiązania. Oznaczanie symetrii stanów energetycznych za pomocą nieprzywiedlnych reprezentacji grupy wektora falowego.</p>
<p><b>Elektrony swobodne w metalach</b>  Zwyrodniały gaz elektronowy w metalach. Funkcja rozkładu Fermiego-Diraca w różnych warunkach temperaturowych, opis ilościowy. Powierzchnia Fermiego w metalach i konstrukcje Harrisona. Doświadczalne metody badania powierzchni Fermiego: efekt de Haasa-van Alphen w ujęciu Onsagera. Poziomy Landaua elektronu swobodnego w polu magnetycznym. Struktury niskowymiarowe: nanodruki i kropki kwantowe. Grafen, podstawowe własności, metody wytwarzania, zastosowanie, nagroda Nobla z fizyki w 2010r. Izolatory topologiczne na przykładzie <math>\text{Bi}_2\text{Se}_3</math>, <math>\text{SnTe}</math>, nagroda Nobla z fizyki w 2016 r.</p>
<p><b>Przewodnictwo elektryczne półprzewodników</b>  Masy efektywne w półprzewodnikach. Struktury pasmowe wybranych półprzewodników. Prawa dyspersji nośników ładunku. Ciężkie i lekkie dziury. Wyprowadzenie równań opisujących koncentracje równoważne swobodnych nośników ładunku w półprzewodnikach samoistnych, wyprowadzenie temperaturowej zależności koncentracji nośników oraz poziomu Fermiego. Wpływ domieszek na elektroprzewodnictwo półprzewodnika. Przykłady półprzewodników pracujących w ekstremalnych warunkach wysokich mocy, temperatur i częstotliwości (<math>\text{GaN}</math>, <math>\text{BN}</math>), wybrane metody wytwarzania heterostruktur półprzewodnikowych tych materiałów (MBE, MOCVD). Materiały azotkowe i nagroda Nobla z fizyki z 2014r. za osiągnięcia w dziedzinie ich wytwarzania.</p>
<p><b>Zjawiska transportu w metalach i półprzewodnikach</b>  Braki teorii Drudego przewodnictwa. Równanie Boltzmanna w przybliżeniu czasu relaksacji – człon polowy i człon zderzeniowy. Przewodnictwo elektryczne niezdegenerowanych półprzewodników o prostej strukturze pasmowej. Rodzaje mechanizmów rozpraszania nośników i ich wpływ na czas relaksacji. Efekt Halla w półprzewodnikach – stała Halla dla dwóch typów nośników większościowych. Wyznaczanie koncentracji i ruchliwości nośników. Kwantowe zjawisko Halla.</p>
<p><b>Dielektryki</b>  Dielektryk w polu elektrycznym, wektor polaryzacji, elektryczny moment dipolowy, podatność dielektryczna, straty dielektryczne, relaksacja dielektryczna. Ferroelektryki, prawo Curie-Weissa, zastosowanie ferroelektryków. Piezoelektryki, mechanizm powstania efektu piezoelektrycznego, materiały piezoelektryczne.</p>
<p><b>Magnetyczne własności ciał stałych</b>  Magnetyki – materiały. Kwantowa teoria paramagnetyzmu. Przenikalność magnetyczna, prawo Curie. Atom jako dipol magnetyczny. Spin. Uporządkowanie ferromagnetyczne, ferri- i antyferromagnetyczne. Temperatura Neela. Punkt Curie. Histereza magnetyczna. Pochodzenie domen magnetycznych, koercja.</p>
<p><b>Fizyka powierzchni i międzypowierzchni</b>  Adsorpcja fizyczna i chemiczna. Rekonstrukcja powierzchni – projekt.</p>

## B. Problematyka ćwiczeń audytoryjnych

<b>Treści merytoryczne</b>
<b>Symetria i struktura kryształów</b> Obliczanie gęstości upakowania atomów w sieciach krystalicznych różnego rodzaju, liczby koordynacyjnej, konstruowanie dwuwymiarowej komórki Wignera-Seitza, identyfikowanie płaszczyzn sieciowych i kierunków w sieci za pomocą wskaźników Millera. Wyznaczanie elementów punktowych grup symetrii wybranych molekuł.
<b>Rentgenografia</b> Równoważność podejścia Bragów i Lauego.
<b>Sieć odwrotna</b> Obliczenie wektorów bazowych dla różnych typów sieci odwrotnych. Wykorzystanie twierdzeń o wektorze translacji sieci odwrotnej i płaszczyznach sieciowych.
<b>Strefa Brillouina</b> Konstrukcja strefy Brillouina dla sieci dwuwymiarowych. Wyznaczanie równań płaszczyzn strefy Brillouina. Budowa trójwymiarowej strefy Brillouina dla sieci regularnej powierzchniowo centrowanej.
<b>Fonony</b> Obliczanie częstości drgań optycznych i akustycznych dla jednowymiarowego łańcucha liniowego zbudowanego z dwóch rodzajów atomów.
<b>Własności pasm energetycznych</b> Prędkość grupowa elektronów. Masa efektywna – obliczenie składników. Obliczenie funkcji gęstości stanów.
<b>Statystyka elektronów i dziur</b> Obliczenie samoistnych koncentracji elektronów i dziur dla różnych półprzewodników przy różnych temperaturach. Określenie energii Fermiego. Obliczenie koncentracji elektronów i dziur dla różnych poziomów domieszkiowania półprzewodników przy różnych temperaturach.
<b>Przewodnictwo elektryczne półprzewodników</b> Obliczenie temperaturowej zależności przewodnictwa elektrycznego w wybranych półprzewodnikach. Określenie energii aktywacji.
<b>Efekt Halla</b> Obliczenie koncentracji i ruchliwości nośników ładunku na podstawie danych pomiarów efektu Halla i elektroprzewodnictwa.
<b>Projekt</b> Wstępna analiza zagadnień związanych z Projektami nr 1, 2 i 3, przygotowanie danych wejściowych i ich konsultacja. Testowe obliczenia.

### 3.4 Metody dydaktyczne

Wykład z prezentacją multimedialną

Ćwiczenia: rozwiązywanie zadań, praca w grupach, dyskusja, praca z bazami danych materiałów półprzewodnikowych,

Projekt 1 – konstrukcje stref Brillouina na papierze milimetrowym dla wybranych typów sieci,

Projekt 2 – konstrukcje Ewalda lub opis eksperymentalnej metody wyznaczania struktury pasmowej kryształów: spektroskopii emisyjnej

Projekt 3 – wyznaczenie wartości energii adsorpcji pierwiastka na powierzchni podłoża na podstawie danych numerycznych.

## 4. METODY I KRYTERIA OCENY

### 4.1 Sposoby weryfikacji efektów uczenia się

Symbol efektu	Metody oceny efektów uczenia się (np.: kolokwium, egzamin ustny, egzamin pisemny, projekt, sprawozdanie, obserwacja w trakcie zajęć)	Forma zajęć dydaktycznych (w., ćw., ...)
EK_01	OBSERWACJA W TRAKCIE ZAJĘĆ, ROZWIĄZANIE ZADANIA	ĆWICZENIA

	PROBLEMOWEGO, KOLOKWIMUM, EGZAMIN	WYKŁAD
EK_02	EGZAMIN	WYKŁAD
EK_03	EGZAMIN	WYKŁAD
EK_04	EGZAMIN	WYKŁAD
EK_05	PROJEKT, OBSERWACJA W TRAKCIE ZAJĘĆ	PROJEKT, ĆWICZENIA
EK_06	PROJEKT, OBSERWACJA W TRAKCIE ZAJĘĆ	PROJEKT, ĆWICZENIA
EK_07	OBSERWACJA W TRAKCIE ZAJĘĆ, ROZWIĄZANIE ZADANIA PROBLEMOWEGO, KOLOKWIMUM, EGZAMIN	ĆWICZENIA WYKŁAD
EK_08	OBSERWACJA W TRAKCIE ZAJĘĆ, ROZWIĄZANIE ZADANIA PROBLEMOWEGO, KOLOKWIMUM, EGZAMIN	ĆWICZENIA WYKŁAD

#### 4.2 Warunki zaliczenia przedmiotu (kryteria oceniania)

Zaliczenie przedmiotu uzyskiwane jest na podstawie zaliczonych ćwiczeń, zaliczonego projektu oraz uzyskaniu pozytywnej oceny z pisemnego egzaminu. Student zalicza obowiązkowo Projekt nr 1 i 3 oraz dowolny temat w ramach projektu 2. Ocena końcowa z ćwiczeń jest średnią arytmetyczną ocen z dwóch kolokwiumów śród-semesteralnych. Brana jest także pod uwagę aktywność studenta na zajęciach i zdobyte oceny cząstkowe za dyskusje i odpowiedzi przy tablicy.

**Egzamin pisemny** składa się z 1-6 zagadnień do opracowania. Każdemu zadaniu odpowiada punktacja 0 – 6pkt. Część pisemna egzaminu jest zaliczona po zdobyciu przez studenta minimum 51% maksymalnej liczby punktów.

#### 5. CAŁKOWITY NAKŁAD PRACY STUDENTA POTRZEBNY DO OSIĄGNIĘCIA ZAŁOŻONYCH EFEKTÓW W GODZINACH ORAZ PUNKTACH ECTS

Forma aktywności	Średnia liczba godzin na zrealizowanie aktywności
Godziny kontaktowe wynikające z harmonogramu studiów	75
Inne z udziałem nauczyciela akademickiego (udział w konsultacjach, egzaminie)	6
Godziny niekontaktowe – praca własna studenta (przygotowanie do zajęć, egzaminu, napisanie referatu itp.)	44
SUMA GODZIN	125
<b>SUMARYCZNA LICZBA PUNKTÓW ECTS</b>	<b>5</b>

*\* Należy uwzględnić, że 1 pkt ECTS odpowiada 25-30 godzin całkowitego nakładu pracy studenta.*

#### 6. PRAKTYKI ZAWODOWE W RAMACH PRZEDMIOTU

wymiar godzinowy	Nie dotyczy
zasady i formy odbywania praktyk	Nie dotyczy

## 7. LITERATURA

### Literatura podstawowa:

1. C. Kittel „Wstęp do fizyki ciała stałego” PWN, W-wa 1999 lub 2012
2. N. Ashcroft, N. Mermin, „Fizyka ciała stałego”, PWN, W-wa 1986
3. H. Ibach, H. Luth, „Fizyka ciała stałego”, PWN, W-wa 1996
4. A. Oleś, „Metody doświadczalne fizyki ciała stałego, WNT, W-wa, 1999 – podręcznik udostępniany przez wykładowcę
5. Andrzej Twardowski, „Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego” Warszawa, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, 2002
6. J. Spałek, „Wstęp do fizyki materii skondensowanej”, PWN, W-wa, 2015 lub 2016
7. W.L. Boncz-Brujewicz, S.G. Kałasznikow, „Fizyka półprzewodników”, PWN, Warszawa, 1985
8. K. Sierański, M. Kubisa, J. Szatkowski, J. Misiewicz, „Półprzewodniki i struktury półprzewodnikowe”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002 – podręcznik udostępniany przez wykładowcę
9. Hennel, W. Szuszkiewicz – Zadania z fizyki atomu cząsteczki i ciała stałego, PWN, 1994

### Literatura uzupełniająca:

1. Michael C. Petty “Molecular Electronics From Principles to Practice”, John Wiley & Sons, Ltd, 2008 – podręcznik udostępniany przez wykładowcę
2. O. Madelung, “Semiconductors: Data Handbook”, 3rd ed. Edited by O. Madelung, Springer, Berlin 2004 – podręcznik udostępniany przez wykładowcę
3. Eugenie Samuel Reich, Hopes surface for exotic insulator, Nature vol. 492, page 165 (2012) – dostępny w sieci uczelnianej Biblioteki UR
4. M. Sznajder, R. Hrytsak, DFT-Based Studies on Carbon Adsorption on the wz-GaN Surfaces and the Influence of Point Defects on the Stability of the Diamond–GaN Interfaces, Materials, 14, 6532 (2021) – dostęp online
5. M. Sznajder, N. Hrushka, M. Grabowski, and J.A. Majewski, Comparative ab initio studies on morphology and stability of the C/BN and SiC/GaN heterostructure interfaces, Materials Research Express, 4, 045902 (8pp) (2017).
6. T. M. Al Tahtamouni, J. Y. Lin, H. X. Jiang, Appl. Phys. Lett. 101, 192106 (2012). – dostępny w sieci uczelnianej Biblioteki UR
7. Shuji Nakamura, Masayuki Seno and Takashi Mukai, Appl. Phys. Lett. 62, 2390 (1993). – dostępny w sieci uczelnianej Biblioteki UR
8. E. Dumiszewska, D. Lenkiewicz, W. Strupiński, A. Jasik, R. Jakięła, Epitaksja MOVPE Azotków III Grupy Układu Okresowego – Główne Problemy Technologiczne, Materiały Elektroniczne, T. 31 -2003 NR 3-4, str. 76-91. – dostęp online
9. Piotr Caban, Kinga Kościewicz, Włodzimierz Strupiński, K. Pągowska, R. Ratajczak, Marek Wójcik, Jarosław Gaca, Andrzej Turos, J. Szmidt, Wpływ Trawienia Podłoża 4H-SiC Na Epitaksję GaN, Materiały Elektroniczne, T. 36-2008 NR 4, str. 5-16. – dostęp online
19. Łusakowski, A., Bogusławski, P., Story, T., Band structure and topological phases of  $Pb_{1-x-y}Sn_xMn_yTe$  by ab initio calculations, Physical Review B, 2021, 103(4), 045202 – dostępny w sieci uczelnianej Biblioteki UR
20. Sadowski, J., Dziawa, P., Kaleta, A., Kurowska, .B, Reszka, A., Story, T., Kret, Sł., Defect-free SnTe topological crystalline insulator nanowires grown by molecular beam epitaxy on graphene, Nanoscale, 2018, 10(44), pp. 20772–20778 – dostępny w sieci uczelnianej Biblioteki UR

Akceptacja Kierownika Jednostki lub osoby upoważnionej