**Nazwa przedmiotu:**

Laboratorium nanotechnologii

**Koordynator przedmiotu:**

dr hab. Michał Marzantowicz

**Status przedmiotu:**

Obowiązkowy

**Poziom kształcenia:**

Studia II stopnia

**Program:**

Fizyka Techniczna

**Grupa przedmiotów:**

Obowiązkowe

**Kod przedmiotu:**

1050-FTFZM-MSP-2LNA

**Semestr nominalny:**

1 / rok ak. 2020/2021

**Liczba punktów ECTS:**

5

**Liczba godzin pracy studenta związanych z osiągnięciem efektów uczenia się:**

1. godziny kontaktowe – 77 h; w tym
 a) obecność na wykładach – 15 h
 b) obecność na ćwiczeniach laboratoryjnych – 60 h
 d) uczestniczenie w konsultacjach – 2 h
2. praca własna studenta – 50 h; w tym
 a) przygotowanie do ćwiczeń labor. i kolokwium – 20 h
 b) zapoznanie się z literaturą – 6 h
 b) przygotowanie sprawozdań – 24 h

Razem w semestrze 127 h, co odpowiada 5 pkt. ECTS

**Liczba punktów ECTS na zajęciach wymagających bezpośredniego udziału nauczycieli akademickich:**

1. obecność na wykładach – 15 h
2. obecność na laboratoriach – 60 h
3. uczestniczenie w konsultacjach – 2 h
Razem w semestrze 77 h, co odpowiada 3 pkt. ECTS

**Język prowadzenia zajęć:**

polski

**Liczba punktów ECTS, którą student uzyskuje w ramach zajęć o charakterze praktycznym:**

1. zajęcia laboratoryjne – 60 h
2. opracowanie sprawozdań z laboratorium – 24 h
Razem w semestrze 84 h, co odpowiada 3 pkt. ECTS

**Formy zajęć i ich wymiar w semestrze:**

|  |  |
| --- | --- |
| Wykład:  | 15h |
| Ćwiczenia:  | 0h |
| Laboratorium:  | 60h |
| Projekt:  | 0h |
| Lekcje komputerowe:  | 0h |

**Wymagania wstępne:**

Nanostruktury, Strukturalne i termiczne metody badania materiałów

**Limit liczby studentów:**

**Cel przedmiotu:**

Otrzymywanie nanostruktur (nanodruty, mikroelektronika) oraz wykorzystanie technik wysokorozdzielczych w badaniach materiałów i nanostruktur (mikroskopy skanujące AFM/STM, mikroskopia elektronowa SEM/TEM, mikro-Raman)

**Treści kształcenia:**

Wykład:
Mikroskopia skanująca AFM,STM
1. Podstawy techniki mikroskopii skanującej (AFM,STM) Zasada działania, budowa i warianty konstrukcji mikroskopów skanujących. Funkcje poszczególnych elementów mikroskopu: sonda, układ przesuwu, detekcja oddziaływania sonda-próbka, pętla sprzężenia zwrotnego.
2. Podstawowe techniki pomiarowe. Opis podstawowych technik pomiaru z omówieniem możliwości zastosowania, wady i zalety każdej z metod. Tryb tunelowy STM: tryb stałego prądu, skanowanie w płaszczyźnie, pomiar lokalnej gęstości stanów. Obrazowanie powierzchni metodą mikroskopii sił atomowych - techniki kontaktowe: pomiar sił skręcenia bocznego sondy, modulowana siła docisku, pomiary efektów piezoelektrycznych. Pomiar rozpływu prądu i sił elektrostatycznych. Techniki częściowego kontaktu sony z próbką (oscylacyjne): topografia, przesunięcie fazowe.
3. Zaawansowane techniki pomiarowe. Metody wykorzystujące kilka przejazdów sondy skanującej: siły elektrostatyczne, lokalna pojemność, potencjał kontaktowy, pomiary magnetyków
4. Przygotowanie próbek, oprzyrządowanie i sondy pomiarowe. Przygotowanie próbek do pomiaru mikroskopami skanującymi. Uchwyty do pomiarów temperaturowych, pomiar próbek ciekłych, mikroskopy do pomiarów elementów wielkoskalowych. Sprzężenie mikroskopu skanującego z innymi technikami: elektrochemia, metody optyczne, spektroskopia Ramana. Omówienie typów sond pomiarowych oraz kryteriów doboru sondy do próbki.
5. Analiza danych i zniekształcenia pomiarowe. Podstawowe sposoby analizy danych uzyskanych z mikroskopów skanujących. Interpretacja wyników ilościowych i jakościowych, metody kalibracji. Przyczyny występowania zniekształceń danych pomiarowych i sposoby ich kompensacji.
6. Nanomanipulacja i nanolitografia. Zastosowanie mikroskopów skanujących w wytwarzaniu struktur o rozmiarach nanoskopowych. Nanomanipulacja w chemii i biomedycynie.
7. Zastosowanie mikroskopów skanujących w badaniach właściwości materiałów. Rodzaje materiałów i struktur badanych mikroskopią sił atomowych i tunelową: od obrazowania atomów do pomiarów żywych próbek biologicznych.

Mikroskopia elektronowa SEM
8. Postawy fizyczne techniki skaningowej mikroskopii elektronowej. Oddziaływanie elektronów z materią. Próbki objętościowe i cienkie.
9. Budowa i zasada działania mikroskopu typu SEM. Elementy optyczne w mikroskopii elektronowej. Budowa mikroskopu skaningowego i jego podzespołów. Rozdzielczość obrazowania i jej ograniczenia.
10. Techniki mikroanalizy. Spektroskopia dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego EDX i jej zastosowanie w mikroskopie SEM.
11. Preparatyka próbek dla badań SEM. Rodzaje obrazowanych materiałów. Metody przygotowania materiału oraz powierzchni materiału do badania metodą SEM.

Mikroskopia transmisyjna TEM
12. Podstawy transmisyjnej mikroskopii elektronowej: budowa i zasada działania mikroskopu TEM
13. Analiza danych pomiarowych uzyskanych metodą TEM. Analiza strukturalna na podstawie zdjęć wysokorozdzielczych i dyfrakcji elektronowej. Wyznaczanie składu atomowego na podstawie pomiarów EDX w mikroskopie TEM. Spektroskopia Strat Energii Elektronów EELS.
14. Preparatyka próbek dla badań TEM. Omówienie podstawowych metod przygotowania próbek do badań TEM. Wpływ metody przygotowania na rezultaty obrazowania
Nano i mikrostruktury
15. Nanodruty. Podstawowe metody otrzymywania nanodrutów półprzewodnikowych. Właściwości fizyczne nanodrutów. Metody charakteryzacji nanodrutów.
16. Mikroelectronika Wprowadzenie do problematyki miniaturowych elementów elektronicznych. Rodzaje struktur mikroelektronicznych. Techniki wytwarzania i metody charakteryzacji.

Laboratorium:
AFM/STM
1. Zapoznanie się z budową i działaniem mikroskopu sił atomowych Ntegra i Nanoeducator oraz programami sterującymi pomiarem. Pomiar gotowych próbek mikroskopem Nanoeducator: przygotowanie i montaż sond, montaż próbki, zbliżanie (lądowanie) i oddalanie sondy, wpływ parametrów skanowania na jakość obrazowania.
2. Tryb kontaktowy w mikroskopii sił atomowych: montaż sondy w mikroskopie, dobór parametrów skanowania, wpływ parametrów skanowania na uzyskane wyniki. Badanie wpływu parametrów pomiaru i typowych zniekształceń pomiarowych na uzyskane dane.
3. Tryb częściowego kontaktu: ustawianie częstotliwości rezonansowej sondy, pomiar próbek o rozwiniętej topografii.
4. Pomiary próbek miękkich: obrazowanie fazowe, sygnał z pętli sprzężenia zwrotnego. Obrazowanie materiałów niejednorodnych.
5. Pomiary elektryczne: przygotowanie próbek oraz konfiguracja mikroskopu do pracy z pomiarem wielkości elektrycznych. Pomiary sił elektrostatycznych lub rozpływu prądu.
6. Techniki wielokrotnego skanowania. Wykorzystanie techniki wielokrotnego skanowania do pomiaru właściwości elektrycznych lub magnetycznych materiału.
Raman
Pomiary właściwości warstw grafenu i nanorurek węglowych przy pomocy sprzężonych mikroskopów AFM i Ramana, interpretacja uzyskanych wyników.
 SEM
1. Zapoznanie się z budową, działaniem i oprogramowaniem sterującym mikroskopu SEM. Pokazowy pomiar metodą SEM.
2. Przygotowanie próbek do mikroskopii SEM, nakładanie warstwy przewodzącej na powierzchnię.
3. Przeprowadzenie badań próbek za pomocą SEM pod nadzorem prowadzących.
4. Badanie materiałów niejednorodnych na podstawie pomiarów EDX. Metody obróbki i analizy danych.
TEM
1. Zapoznanie się z budową, działaniem i oprogramowaniem sterującym mikroskopu TEM. Pokazowy pomiar metodą TEM.
2. Wykonanie własnych próbek do mikroskopii TEM – metoda proszkowana
3. Przeprowadzenie badań wykonanych próbek za pomocą TEM pod nadzorem prowadzących.
4. Analiza strukturalna na podstawie zdjęć wysokorozdzielczych i dyfrakcji elektronowej. Wyznaczanie składu atomowego na podstawie pomiarów EDX.
Nanodruty
Pokaz otrzymywania nanodrutów półprzewodnikowych. Charakteryzacja gotowych nanodrutów ze szczególnym uwzględnieniem właściwości elektrycznych.
Mikroelektronika
Pokaz technik wytwarzania cienkich warstw półprzewodnikowych. Charakteryzacja struktur cienkowarstwowych i elementów mikroelektronicznych.

**Metody oceny:**

Ocena z przedmiotu jest wystawiana na podstawie łącznej ilości punktów zdobytych na wykładach i ćwiczeniach laboratoryjnych, z uwzględnieniem wymogu obecności na wszystkich ćwiczeniach laboratoryjnych. Na ocenę składają się punkty uzyskane z kolokwium pisemnego z wykładu (12p) oraz punkty uzyskane na ćwiczeniach laboratoryjnych, proporcjonalnie do wymiaru godzinowego poszczególnych części laboratorium (w proporcji 2p za 4h laboratorium). Do zaliczenia przedmiotu wymagane jest 50% możliwych punktów.

**Egzamin:**

nie

**Literatura:**

1. Teodor P. Gotszalk, Systemy mikroskopii bliskich oddziaływań w badaniach mikro i nanostruktur, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004
2. Atomic Force Microscopy, Peter Eaton and Paul West
DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199570454.001.0001
3. W. Dziadur, J. Mikuła, Mikroskopia elektronowa tom I – mikroskopia transmisyjna, Politechnika Krakowska 2014
4. W. Dziadur, J. Mikuła, Mikroskopia elektronowa tom II – mikroskopia skaningowa, Politechnika Krakowska 2016
5. Technologie mikroelektroniczne, K. Waczyński, E. Wróbel, Politechnika Śląska 2006

**Witryna www przedmiotu:**

Regulamin, harmonogram i materiały dostępne na stronie http://adam.mech.pw.edu.pl/~marzan/ Pozostałe materiały dostępne w instytucjach prowadzących zajęcia.

**Uwagi:**

## Efekty przedmiotowe

### Profil ogólnoakademicki - wiedza

**Efekt LNA\_W01:**

Rozumie zasady fizyczne działania mikroskopów skanujących AFM/TEM oraz mikroskopów elektronowych SEM i TEM.

Weryfikacja:

kolokwium

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_W03

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_W03, X2A\_W04, X2A\_W05, T2A\_W03, T2A\_W04, InzA\_W02, InzA\_W05

**Efekt LNA\_W02:**

Zna budowę mikroskopów oraz dostępne techniki pomiarowe.

Weryfikacja:

kolokwium

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_W03

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_W03, X2A\_W04, X2A\_W05, T2A\_W03, T2A\_W04, InzA\_W02, InzA\_W05

**Efekt LNA\_W03:**

Zna ograniczenia rozdzielczości każdej z metod oraz występujące w niej zniekształcenia.

Weryfikacja:

kolokwium, sprawozdania z laboratoriów

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_W03

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_W03, X2A\_W04, X2A\_W05, T2A\_W03, T2A\_W04, InzA\_W02, InzA\_W05

**Efekt LNA\_W04:**

Zna sens fizyczny wyników otrzymanych każdą techniką oraz metody analizy tych wyników.

Weryfikacja:

kolokwium, sprawozdania z laboratoriów

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_W03

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_W03, X2A\_W04, X2A\_W05, T2A\_W03, T2A\_W04, InzA\_W02, InzA\_W05

**Efekt LNA\_W05:**

Zna przykłady i sposoby zastosowania technik nanoskopowych w charakteryzacji materiałów i struktur.

Weryfikacja:

kolokwium

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_W04

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_W06, T2A\_W05, T2A\_W07

**Efekt LNA\_W06:**

Ma wiedzę o cienkowarstwowych i jednowymiarowych strukturach półprzewodnikowych, metodach i wytwarzania i zastosowaniach w mikroelektronice.

Weryfikacja:

kolokwium

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_W04

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_W06, T2A\_W05, T2A\_W07

### Profil ogólnoakademicki - umiejętności

**Efekt LNA\_U01:**

Potrafi wybrać właściwą metodę badania uwzględniając zarówno cel badań, jak i właściwości fizyczne próbki.

Weryfikacja:

kolokwium, sprawozdania z laboratoriów

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_U06, FT2\_U08, FT2\_U11

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_U02, X2A\_U04, T2A\_U09, T2A\_U08, X2A\_U04, T2A\_U12

**Efekt LNA\_U02:**

Umie przygotowywać próbki do pomiarów metodami mikroskopii skanującej AFM/STM oraz mikroskopii elektronowej SEM/TEM.

Weryfikacja:

ocena wykonania ćwiczeń i sprawozdania z laboratoriów

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_U08

**Powiązane efekty obszarowe:** T2A\_U08

**Efekt LNA\_U03:**

Umie w podstawowym zakresie obsługiwać mikroskop skanujący AFM/STM oraz mikroskop elektronowy SEM i TEM.

Weryfikacja:

ocena wykonania ćwiczeń i sprawozdania z laboratoriów

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_U08

**Powiązane efekty obszarowe:** T2A\_U08

**Efekt LNA\_U04:**

Potrafi dokonać analizy wyników otrzymanych poszczególnymi metodami mikroskopowymi oraz ocenić wpływ warunków pomiaru na jakość wyników.

Weryfikacja:

sprawozdania z laboratoriów

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_U08

**Powiązane efekty obszarowe:** T2A\_U08

### Profil ogólnoakademicki - kompetencje społeczne

**Efekt LNA\_K01:**

Potrafi pracować w zespole przy realizacji określonego zadania. Potrafi dzielić się obowiązkami i jest odpowiedzialny za swoją część przygotowanego raportu.

Weryfikacja:

Sprawozdania z laboratoriów

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_K04

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_K02, T2A\_K03

**Efekt LNA\_K02:**

Potrafi krytycznie weryfikować poprawność wyników i rozwiązań przedstawionych przez innych członków zespołu.

Weryfikacja:

Sprawozdania z laboratoriów

**Powiązane efekty kierunkowe:** FT2\_K04

**Powiązane efekty obszarowe:** X2A\_K02, T2A\_K03