

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан физического факультета



С.Н. Филимонов

2021 г.

Рабочая программа дисциплины

ДЕФЕКТЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:

«Фундаментальная физика»

Форма обучения

Очная

Квалификация

Бакалавр


Год приема

2021

Код дисциплины в учебном плане Б1.В.ДВ.01.07.14

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий;

ОПК-2. Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК 1.1. Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования;

ИОПК 2.2. Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования.

2. Задачи освоения дисциплины

– Изложение представлений об основных типах и классификации дефектов кристаллического строения.

– Рассмотрение термодинамики точечных дефектов кристаллов. Использование методов механики сплошной среды для оценки энергии образования точечных дефектов в кристаллах.

– Описание экспериментальных методов и результатов исследования образования, подвижности и аннигиляции точечных дефектов.

– Теоретический анализ взаимосвязи диффузионных процессов с точечными дефектами в кристаллах

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в модуль по выбору "Физика металлов".

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Семестр 7, экзамен.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для изучения и понимания материала данной дисциплины обучающийся должен владеть основными представлениями и понятиями из курсов: Рентгеноструктурный анализ; Кристаллография; Физика твердого тела; Математический анализ; Дифференциальные уравнения.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часа, из которых:

– лекции: 32 ч.;

– практические занятия: 16 ч.;

в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Классификация дефектов в кристаллах.

Доказательство существования дефектов в кристаллах. Типы и классификация дефектов решетки. Точечные, линейные и плоские дефекты. Вакансии, межузельные атомы и их комплексы. Дислокация. Атомная модель дислокаций. Ядро дислокаций. Вектор Бюргерса. Типы дислокаций. Дисклинации. Типы дисклинаций. Дефекты упаковки. Атомная модель дефекта упаковки в ГЦК и ГПУ кристаллах. Понятие о динамических дефектах.

Тема 2. Термодинамика точечных дефектов.

Термодинамика точечных дефектов. Энергия и энтропия образования точечных дефектов и их комплексов. Вакансии в упруго-изотропной среде. Расчет поля смещений, энергии и объема вакансии. Оценка энергии образования вакансий по температуре плавления и модулям упругости. Оценка энергии образования межузельного атома.

Тема 3. Экспериментальные методы измерения энергии образования и движения вакансий.

Подвижность избыточных вакансий. Закалка избыточных вакансий. Экспериментальные методы измерения энергии активации образования и миграции вакансий. Кинетика выхода вакансий на стационарные и переменные стоки.

Тема 4. Радиационные дефекты в кристаллах.

Радиационные дефекты. Каскады столкновений. Структура каскадов. Кластеры точечных дефектов. Межузельные атомы. Гантельная конфигурация межузельных атомов. Явления неупругости и гистерезиса. Сравнительная оценка энергий активаций образования и миграции точечных дефектов различного типа.

Тема 5. Диффузия в кристаллах.

Диффузия в кристаллах. Уравнения Фика. Механизмы диффузии. Диффузия вакансий. Задача выхода вакансий из тонкой пластины Сток вакансий на дислокации. Вакансионный механизм самодиффузии. Связь параметров диффузии с плотностью и подвижностью вакансий. Эффект Киркенделла. Диффузионная пористость.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения заданий по материалам курса (выступление и работа на практических занятиях), и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): посещаемость – максимальный балл 10, выполнение заданий по материалам курса – 40. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Экзамен в седьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

На промежуточную аттестацию планируется не более 50 баллов.

Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученных по итогам текущего контроля и промежуточной аттестации.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Экзаменационная оценка определяется исходя из результатов экзамена и текущей аттестации в течение семестра и согласуется с принятым соответствием с 5-ти балльной

шкалой оценивания: 100-86 – «отлично»; 85-66 – «хорошо»; 65-50 – «удовлетворительно», менее 50 – «неудовлетворительно».

Экзаменационный билет включает 2 вопроса из списка контрольных вопросов по курсу (приведен в разделе 11), проверяющих сформированность компетенции ПК-1 в соответствии с индикаторами ИПК-1.1 и ИПК-1.2. Ответы даются в развернутой форме.

Пример экзаменационного билета:

БИЛЕТ № 1

Вопрос 1. Подвижность вакансий. Время оседлой жизни вакансий.

Вопрос 2. Микроскопические механизмы диффузии в кристаллах. Расчет коэффициента самодиффузии при вакансионном механизме диффузии.

Дополнительные и/или уточняющие вопросы по основным темам и содержанию курса (разделы 8, 11), позволяющие оценить уровень освоения всей программы. Ответ на уровне формулировки основных определений и/или краткого изложения физики явления и соответствующих представлений.

Например:

Вопрос 1. Дефект упаковки в ГЦК кристаллах.

Вопрос 2. Стадии отжига точечных дефектов в облученных кристаллах.

Вопрос 3. Экспериментальные доказательства вакансионного механизма диффузии в металлах.

Вопрос 4. Опыты Киркендалла.

И т.д.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=21855>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен.

1. Подвижность вакансий. Время оседлой жизни вакансий.
2. Микроскопические механизмы диффузии в кристаллах. Расчет коэффициента самодиффузии при вакансионном механизме диффузии.
3. Микроскопические механизмы диффузии в кристаллах. Расчет коэффициента самодиффузии при вакансионном механизме диффузии.
4. Опыты Симмонса-Баллуффи по измерению энергии образования вакансий в экспериментах по измерению температурной зависимости размеров кристаллов и параметра решетки.
5. Избыточные вакансии. Измерение энергии образования вакансий в закаленных кристаллах.
6. Комплексы вакансий. Равновесная концентрация простейших комплексов.
7. Термодинамика точечных дефектов. Равновесная концентрация при произвольной температуре.
8. Подвижность вакансий. Частота прыжков вакансий по узлам решетки.
9. Отжиг вакансий. Методы экспериментального определения энергии активации миграции вакансий.
10. Самодиффузия в кристаллах. Феноменологические уравнения самодиффузии. Коэффициент и энергия активации самодиффузии.
11. Оценка вибрационной энтропии вакансий.
12. Формирование вакансионных кластеров при отжиге закаленных кристаллов. Особенности кинетики отжига вакансий с образованием переменных стоков.
13. Феноменологические уравнения диффузии (Уравнения Фика). Задача о самодиффузии в полубесконечном стержне.

14. Явления упругого последствия в кристаллах с межузельными атомами.
15. Задача об отжиге вакансий в тонкой пластине. Кинетика отжига вакансий в тонкой пластине.
16. Стадии отжига точечных дефектов в облученных кристаллах. Сравнительные оценки энергии миграции вакансий и межузельных атомов.
17. Оценка изменения объема при образовании вакансий в модели упруго-изотропного кристалла.
18. Кинетика отжига вакансий с образованием парных вакансий.
19. Дефект упаковки в ГЦК кристаллах.
20. Механизм образования вакансий. Радиационные дефекты в каскадах столкновений.
21. Оценка энергии образования вакансий в модели упруго-изотропного кристалла (смещение в полости $U = \delta_0 r_0^2 / r^2$).
22. Гантельная конфигурация межузельных атомов. Экспериментальное доказательство гантельской конфигурации в облученных кристаллах.
23. Оценка энергии образования межузельного атома в модели упруго-изотропного твердого тела.
24. Закалка вакансий. Влияние скорости закалки и плотности стоков.
25. Модель вакансии в упруго-изотропном твердом теле. Решение уравнения для поля смещений вакансии в упруго-изотропном твердом теле.
26. Экспериментальные доказательства вакансионного механизма диффузии в металлах. Опыты Киркендалла.
27. Понятие дефекта в кристаллической решетке. Типы дефектов (классификация). Типы точечных дефектов.
28. Понятие дислокации. Определение дислокаций через контур Бюргерса. Ядро дислокации
29. Расчет плотности упругой энергии W_0 в модели изотропного упругого твердого тела. Энергия кристалла через энергию связи атомов.
30. Экспериментальные доказательства существования дефектов. Природа переменных стоков дефектов. Вывод конфигурационной энтропии для n вакансий
31. Дефект упаковки в ГЦК кристаллах.
32. Уравнения Фика и их вывод. Уравнение диффузии. Механизмы диффузии. Пути ускорения диффузии. Механизм диффузии в чистых кристаллах

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. Практическое занятие № 1. «Представления об основных дефектах кристаллической решетки, структурных моделях их строения и основных свойствах».
2. Практическое занятие № 2. «Методы и способы экспериментального измерения энергии активации образования и миграции вакансий и межузельных атомов. Экспериментальные методы изучения точечных дефектов».
3. Практическое занятие № 3. «Радиационная повреждаемость и каскады атомных соударений».

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к экзамену.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Б. Дудникова, В.С. Урусов, Е.В. Жариков Точечные дефекты и их кластеры в кристаллах форстерита. Изучение компьютерными методами и компьютерное моделирование. Изд-во ЛАМБЕРТ, 2013.
2. Сапарова А.С. Аникина В.И. Основы кристаллографии и дефекты кристаллического строения. Практикум Изд-во "Перспектив", 2015, 146с.
3. Дамаск А., Динс Дж. Точечные дефекты в металлах. - М: Мир, 1996. - С. 288. - Гл. 1,2,3,4.
4. Орлов А. Н. Дефекты // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — Т. 1. — С. 595—597. — 704 с.,
5. Штремель М. А. Прочность сплавов. Ч. I Дефекты решетки. М.: Изд. МИСиС, 1999. - С. 383. - Гл. 2, 4.

б) дополнительная литература:

1. Гегузин Я. Е. Диффузионная зона. - М.: Наука, 1979. - С. 343. Гл. 1-7.
2. Зайт В. Диффузия в металлах. - М.: Изд. И. Л., 1958. - С. 372
3. Орлов А. Н., Трушин Ю. В. Энергия точечных дефектов в металлах. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - Гл. 1-3.
4. Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М., Черняева Т. П. Радиационные дефекты и набухание металлов. - Киев: Научная мысль, 1988. - С. 293. - Гл. 1-4.
5. Баллуфи Р. В., Кинг А. Г. Стоки для точечных дефектов в металлах и сплавах. Сб. Фазовые превращения при облучении. - Челябинск: Изд. Metallurgy, 1989. - С. 118-150.
6. Томпсон Т. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. - М.: Мир, 1971. - С. 366. - Гл. 1, 5.
7. Кирсанов В. В., Суворов А. А., Трушин Ю. В. Процессы радиационного дефектообразования в металлах. М.: Энергоатомиздат, 1985. - С. 210.
8. Келли А., Гровз Г. Кристаллография и дефекты в кристаллах. - М.: Мир, 1974.
9. Рогман С. Дж. Влияние облучения на диффузию в металлах и сплавах. Сб. Фазовые превращения при облучении. - Челябинск: Изд. Metallurgy, 1989. - С. 151-167.
10. J.E.Bauerle, J.S. Koehler Quenched-in Lattice Defects in Gold / Phys. Rev V.107, N6.- 1957. P. 1493- 1498.
11. R.O.Simmons, R.W. Balluffi Measurements of equilibrium vacancy concentrations in aluminum / Phys Rev V. 117 N1 P. 52- 61.
12. Границы зерен и свойства металлов. Кайбышев О. А., Валиев Р. З. М.:Metallurgy, 1987. 214 с.
13. Ehrhart, P. (1991) Properties and interactions of atomic defects in metals and alloys, volume 25 of Landolt-Börnstein, New Series III, chapter 2, p. 88, Springer, Berlin
14. Hong, J.; Hu, Z.; Probert, M.; Li, K.; Lv, D.; Yang, X.; Gu, L.; Mao, N.; Feng, Q.; Xie, L.; Zhang, J.; Wu, D.; Zhang, Z.; Jin, C.; Ji, W.; Zhang, X.; Yuan, J.; Zhang, Z. (2015). "Exploring atomic defects in molybdenum disulphide monolayers". Nature Communications 6: 6293.
15. Mayr, S.; Ashkenazy, Y.; Albe, K.; Averbach, R. (2003). "Mechanisms of radiation-induced viscous flow: Role of point defects". Phys. Rev. Lett. 90 (5): 055505.
16. Ashkenazy, Yinon; Averbach, Robert S. (2012). "Irradiation Induced Grain Boundary Flow— A New Creep Mechanism at the Nanoscale". Nano Letters 12 (8): 4084–9.
17. M. Murayama, J. M. Howe, H. Hidaka, S. Takaki. Atomic-Level Observation of Disclination Dipoles in Mechanically Milled, Nanocrystalline Fe. Science 29 (2002) 2433. DOI:10.1126/science.1067430

в) ресурсы сети Интернет:

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Дефекты_кристалла

2. <http://frrc.itep.ru/rus/media/presentations/feb2012/Zaluzhnuy.pdf>
3. <http://tw.t.mpei.ru/ochkov/TM/lection1.htm>

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX;

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –
<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешанном формате, оснащенные системой «Актру».

Все виды материально-информационной базы Научной библиотеки ТГУ.

Мультимедийное оборудование физического факультета ТГУ.

Программное обеспечение курсов, предшествующих изучению представленной дисциплины.

15. Информация о разработчиках

Дмитриев Андрей Иванович, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра физики металлов физического факультета ТГУ, профессор.