

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Галунин Сергей Александрович
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 11.07.2023 11:02:46
Уникальный программный ключ:
08ef34338325bdb0ac5a47baa5472ce36cc3fc3b

Приложение к ОПОП
«Возобновляемая солнечная
энергетика (renewable solar
energy)»



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

ДИСЦИПЛИНЫ

**«МНОГОКАСКАДНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ
СОЕДИНЕНИЙ АПБВ (MULTIJUNCTION SOLAR CELLS BASED ON
АПБВ COMPOUNDS)»**

для подготовки магистров

по направлению

11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

по программе

«Возобновляемая солнечная энергетика (renewable solar energy)»

Санкт-Петербург

2022

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

Разработчики:

профессор, д.т.н. Гудовских А.С.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Фот
16.05.2022, протокол № 3\22

Рабочая программа рассмотрена и одобрена учебно-методической комиссией
ФЭЛ, 16.06.2022, протокол № 3\22

Согласовано в ИС ИОТ

Начальник ОМОЛА Загороднюк О.В.

1 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Обеспечивающий факультет	ФЭЛ
Обеспечивающая кафедра	Фот
Общая трудоемкость (ЗЕТ)	4
Курс	2
Семестр	3
Виды занятий	
Лекции (академ. часов)	34
Практические занятия (академ. часов)	34
Иная контактная работа (академ. часов)	1
Все контактные часы (академ. часов)	69
Самостоятельная работа, включая часы на контроль (академ. часов)	75
Всего (академ. часов)	144
Вид промежуточной аттестации	
Дифф. зачет (курс)	2

2 АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

«МНОГОКАСКАДНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ АШВУ (MULTIJUNCTION SOLAR CELLS BASED ON АШВУ COMPOUNDS)»

В результате изучения дисциплины будут рассмотрены следующие темы: Структура энергетических зон полупроводников для солнечной энергетики. Формирование вольт-амперных характеристик солнечных элементов с одним и несколькими р-п переходами, их видоизменение при освещении, связь с характеристиками исходных полупроводниковых материалов. Методы снижения оптических, рекомбинационных и омических потерь в солнечных элементах. Особенности конструирования и применения солнечных элементов для преобразования концентрированного солнечного излучения. Надежность функционирования и срок службы солнечных элементов и энергосистем. Перспективы развития полупроводниковой солнечной электроэнергетики.

SUBJECT SUMMARY

«MULTIJUNCTION SOLAR CELLS BASED ON III -V COMPOUNDS»

The following subjects will be considered during the study of this discipline: Band-gap structure of the materials for solar photovoltaics. Formation of the I-V curves of the one-junction and multijunction solar cells, their modification under illumination, connection with basic properties of the semiconductor material Practical approaches to minimization of the optical, recombination and ohmic losses in solar cells. Principles of design and practical use of the concentrator solar cells. Reliability and life time of the solar cells and photovoltaic systems. Perspectives of the solar photovoltaics.

3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1 Цели и задачи дисциплины

1. Целями изучения дисциплины является приобретение теоретических знаний в области физики полупроводников, необходимых для понимания принципов функционирования фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии и формирование практических умений и навыков для разработки конструкции фотопреобразователей.

2. Задачи изучения дисциплины:

-формирование основополагающих знаний о принципах построения полупроводниковых фотопреобразовательных наногетероструктур на основе соединений АПБВ;

-формирование умений анализировать физические процессы, протекающие в р-п переходах, включая контактные явления на границе полупроводник-полупроводник, полупроводник-диэлектрик, полупроводник-металл;

-формирование практических навыков по разработке конструкции многопереходных солнечных элементов на основе соединений АПБВ.

3. Знания основных положений и понятий физики полупроводников, необходимых для понимания принципов функционирования оптоэлектронных полупроводниковых приборов, в частности, фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии; принципов построения полу-проводниковых фотопреобразовательных наногетероструктур на основе соединений АПБВ.

4. Умения анализировать физические процессы, протекающие в р-п переходах, включая контактные явления на границе полупроводник-полупроводник, полупроводник-диэлектрик, полупроводник-металл

5. Навыки по разработке конструкции многопереходных солнечных элементов на основе соединений АПБВ.

3.2 Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина изучается на основе ранее освоенных дисциплин учебного плана:

1. «Возобновляемые источники энергии (Renewable Energy Sources)»
2. «Материалы солнечной энергетике (Solar Energy Materials)»
3. «Метрология солнечных элементов и модулей (Metrology of Solar Cells and Modules)»

и обеспечивает подготовку выпускной квалификационной работы.

3.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В результате освоения образовательной программы обучающийся должен достичь следующие результаты обучения по дисциплине:

Код компетенции/ индикатора компетенции	Наименование компетенции/индикатора компетенции
ПК-2	Способен разрабатывать эффективные алгоритмы решения сформулированных задач с использованием современных языков программирования и обеспечивать их программную реализацию
<i>ПК-2.1</i>	<i>Знает методы разработки эффективных алгоритмов решения научно-исследовательских задач</i>
<i>ПК-2.2</i>	<i>Умеет использовать алгоритмы решения исследовательских задач с использованием современных языков программирования</i>
СПК-23	Способен осуществлять проектирование солнечных фотоэлектрических преобразователей и выбор конструктивно-технологических вариантов их создания
<i>СПК-23.1</i>	<i>Знает способы организации и проведения экспериментальных исследований солнечных фотоэлектрических преобразователей</i>

4 СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1 Содержание разделов дисциплины

4.1.1 Наименование тем и часы на все виды нагрузки

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Лек, ач	Пр, ач	ИКР, ач	СР, ач
1	Введение	2			
2	Свойства солнечного излучения	2	4		10
3	Эффективность фотоэлектрического преобразования	6	8		12
4	Физические методы снижения оптических и рекомбинационных потерь в структурах солнечных элементов	8	8		21
5	Каскадные наногетероструктурные фотопреобразователи на основе соединений АПВВ	6	8		20
6	Омические потери в солнечных элементах	8	6	1	12
7	Заключение	2			
	Итого, ач	34	34	1	75
	Из них ач на контроль	0	0	0	0
	Общая трудоемкость освоения, ач/зе	144/4			

4.1.2 Содержание

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
1	Введение	Структура и содержание курса, его связь с другими дисциплинами учебного плана и значение в подготовке специалиста в области полупроводниковой солнечной электроэнергетики. Обзор основных тенденций развития наногетероструктурных солнечных элементов.
2	Свойства солнечного излучения	Влияние атмосферы на спектральный состав солнечного излучения. Стандарты солнечного спектра. Классификация солнечных элементов по типу используемых материалов, методам получения и условиям использования.
3	Эффективность фотоэлектрического преобразования	Основные факторы, характеризующие эффективность фотоэлектрического преобразования в солнечном элементе. Значения эффективности, реализованные в солнечных элементах различных типов. Особенности конструирования и применения солнечных элементов для преобразования концентрированного солнечного излучения.

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
4	Физические методы снижения оптических и рекомбинационных потерь в структурах солнечных элементов	Использование явления оптической интерференции. Использование эффектов зонной структуры и встроенных потенциальных барьеров.
5	Каскадные наногетероструктурные фотопреобразователи на основе соединений АПВ	Механическая и монокристаллическая стыковка каскадов. Основная структура монокристаллического каскадного фотопреобразователя. Перспективные варианты. Туннельные диоды: структура, вольт-амперная характеристика, предельный ток туннелирования. Применение наногетероструктур в слоях туннельных диодов. Солнечные элементы на основе массивов квантовых ям и квантовых точек. Метаморфные и ниверсные солнечные элементы.
6	Омические потери в солнечных элементах	Источники омических потерь и методы их минимизации. Распределенные омические потери. Теоретическое рассмотрение влияния омических потерь на вид вольт-амперных характеристик и эффективность фотоэлектрического преобразования. Утечки в р-п переходе, их влияние на вид вольт-амперной характеристики.
7	Заключение	Преимущества концентраторных фотоэлектрических систем, определяемые физическими, технологическими и экономическими аспектами.

4.2 Перечень лабораторных работ

Лабораторные работы не предусмотрены.

4.3 Перечень практических занятий

Наименование практических занятий	Количество ауд. часов
1. Расчет параметров верхнего перехода на основе GaInP	10
2. Расчет параметров среднего перехода на основе GaAs	12
3. Расчет параметров нижнего перехода на основе Ge	12
Итого	34

4.4 Курсовое проектирование

Курсовая работа (проект) не предусмотрены.

4.5 Реферат

Реферат не предусмотрен.

4.6 Индивидуальное домашнее задание

Индивидуальное домашнее задание не предусмотрено.

4.7 Доклад

Доклад не предусмотрен.

4.8 Кейс

Кейс не предусмотрен.

4.9 Организация и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы

Изучение дисциплины сопровождается самостоятельной работой студентов с рекомендованными преподавателем литературными источниками и информационными ресурсами сети Интернет.

Планирование времени для изучения дисциплины осуществляется на весь период обучения, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Обучающимся, в рамках внеаудиторной самостоятельной работы, необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников материал, законспектированный на лекциях. При этом на основе изучения рекомендованной литературы целесообразно составить конспект основных положений, терминов и определений, необходимых для освоения разделов учебной дисциплины.

Особое место уделяется консультированию, как одной из форм обучения и контроля самостоятельной работы. Консультирование предполагает особым образом организованное взаимодействие между преподавателем и студентами, при этом предполагается, что консультант либо знает готовое решение, которое он может предписать консультируемому, либо он владеет способами деятель-

ности, которые указывают путь решения проблемы.

Текущая СРС	Примерная трудоемкость, ач
Работа с лекционным материалом, с учебной литературой	10
Опережающая самостоятельная работа (изучение нового материала до его изложения на занятиях)	0
Самостоятельное изучение разделов дисциплины	0
Выполнение домашних заданий, домашних контрольных работ	0
Подготовка к лабораторным работам, к практическим и семинарским занятиям	15
Подготовка к контрольным работам, коллоквиумам	15
Выполнение расчетно-графических работ	0
Выполнение курсового проекта или курсовой работы	0
Поиск, изучение и презентация информации по заданной проблеме, анализ научных публикаций по заданной теме	0
Работа над междисциплинарным проектом	0
Анализ данных по заданной теме, выполнение расчетов, составление схем и моделей, на основе собранных данных	0
Подготовка к зачету, дифференцированному зачету, экзамену	35
ИТОГО СРС	75

5 Учебно-методическое обеспечение дисциплины

5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

№ п/п	Название, библиографическое описание	К-во экз. в библ.
Основная литература		
1	Основы оптико-электронных измерений в фотонике [Текст] : учеб. пособие [для вузов по направлениям 551900 "Оптехника", 510400 "Физика" и специальностям 190700 "Оптико-электронные приборы и системы", 180600 "Светотехника и источники света"] / [В.С. Иванов [и др.]], 2004. - 496 с.	15
2	Афанасьев, Валентин Петрович. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния [Текст] / В.П. Афанасьев, Е.И. Теруков, А.А. Шерченков, 2010. -167 с.	10
3	Гудовских, Александр Сергеевич. Границы раздела в солнечных элементах на основе гетероструктур [Текст] : [монография] / А. С. Гудовских, 2012. -157, [1] с.	10
4	Роза, Альдо Виейра да. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы [Текст] : [учеб. пособие] / А. да Роза ; пер. с англ. под ред. С. П. Малышенко, О. С. Попеля, 2010. -702, [1] с.	6
Дополнительная литература		
1	Handbook of photovoltaic science and engineering [Текст] / ed. by A. Luque, S. Hegedus, 2011. -XXXII,132 с.	10

5.2 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», используемых при освоении дисциплины

№ п/п	Электронный адрес
1	Pveducation http://www.pveducation.org

5.3 Адрес сайта курса

Адрес сайта курса: <https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=13095>

6 Критерии оценивания и оценочные материалы

6.1 Критерии оценивания

Для дисциплины «Многокаскадные солнечные элементы на основе соединений АІІІВV (Multijunction Solar Cells Based on АІІІВV Compounds)» предусмотрены следующие формы промежуточной аттестации: зачет с оценкой.

Зачет с оценкой

Оценка	Описание
Неудовлетворительно	Курс не освоен. Студент испытывает серьезные трудности при ответе на ключевые вопросы дисциплины
Удовлетворительно	Студент в целом овладел курсом, но некоторые разделы освоены на уровне определений и формулировок
Хорошо	Студент овладел курсом, но в отдельных вопросах испытывает затруднения. Умеет решать задачи
Отлично	Студент демонстрирует полное овладение курсом, способен применять полученные знания при решении конкретных задач

Особенности допуска

Допуск к зачету с оценкой получают студенты успешно выполнившие 2 контрольные работы.

6.2 Оценочные материалы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Вопросы к дифф.зачету

№ п/п	Описание
1	Prospects for the development of solar energy
2	Classification of photoelectric solar energy converters.
3	The principle of operation of solar cells. Solar cell in the absence of lighting and under lighting
4	Main parameters of solar cells
5	Parameters of real solar cells
6	Energy loss in a solar cell. Efficiency of Optical Radiation Conversion in Solar Cells
7	Photocurrent generated in a solar cell
8	Equivalent circuit of a real solar cell
9	Connecting of junctions in solar cells
10	Effect of temperature on solar cell parameters
11	Features of operation, design and characteristics of solar cells based on III-V materials.
12	Multijunction solar cells based on III-V materials
13	Hybrid power plants based on thin-film solar modules.
14	A new generation of solar cells using advances in nanotechnology
15	Prospects for the development of thin-film solar modules
16	Solar modules on flexible substrates
17	Spectral mismatch coefficients.
18	Features of the EQE measurement for multi-junction solar cells solar cell.
19	Optical and recombination losses. External and internal quantum efficiency, reflection and transmittance.
20	Solar radiation, its characteristics. Standard reference conditions. Nominal operating conditions

Форма билета

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)»

БИЛЕТ № 1

Дисциплина **Multijunction Solar Cells Based on AIII BV Compounds** ФЭЛ

1. Prospects for the development of thin-film solar modules.
2. Parameters of real solar cells.

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

С.А. Тарасов

Образцы задач (заданий) для контрольных (проверочных) работ

Контрольная работа №1.

Вариант 5

1. How are solar photovoltaic converters classified?
2. Solar cell in the absence of lighting and under lighting. List the main parameters of solar cells
3. Evaluate the theoretical efficiency of a 2.5 eV bandgap photocell under a solar flux of 100 W/m², provided that the radiation passes through a filter that only allows radiation between 600 and 1000 nm.

Контрольная работа №2.

Вариант 1

1. What are the advantages of multi-junction photocells based on amorphous hydrogenated semiconductors, and what are the disadvantages.
2. What is the similarity and difference between the technology for producing thin films of amorphous hydrogenated (a-Si:H) and microcrystalline (nc-Si:H) silicon? A cascade photocell consists of two cells with different band gaps.

3. The lower bandgap, known as CIGS, is made of $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ and has an efficiency of 15% with a band gap of about 1 eV. What is the optimal band gap for the top photocell to maximize the efficiency of the entire structure? The photocell is irradiated with black body radiation at a temperature of 6000 K, there are no losses.

Примеры вопросов к коллоквиумам

1. I–V characteristics of a multijunction solar cell and its response to the spectral composition of the simulator radiation.
2. Experimental setup based on a pulsed simulator for measuring the CVC of a solar cell, the purpose of its individual elements and the principle of operation.
3. Simulator tuning technique in the study of the I–V characteristics of multijunction SCs using calibrated SCs.
4. What is the peculiarity of measuring the absolute value of the photocurrent and the CVC of a multi-junction solar cell under illumination conditions of one solar constant (compared to a single-junction)?
5. What is the physics of the change in the conductivity of a semiconductor under the action of light?
6. How to explain the course of the spectral characteristics of a semiconductor?
7. What is the physical basis for the operation of photoresistors and photodiodes?
8. Explain the light characteristics of photoresistors and photodiodes.
9. What physical phenomena determine the inertial properties of photoresistors and photodiodes?
10. How do the load resistance and the voltage applied to the photodiode affect its inertial properties?
11. What mode of operation of the photodiode should be used to measure the intensity of optical radiation and why?

Весь комплект контрольно-измерительных материалов для проверки сформированности компетенции (индикатора компетенции) размещен в закрытой

части по адресу, указанному в п. 5.3

6.3 График текущего контроля успеваемости

Неделя	Темы занятий	Вид контроля
9	Физические методы снижения оптических и рекомбинационных потерь в структурах солнечных элементов	Контрольная работа
16	Омические потери в солнечных элементах	Контрольная работа

6.4 Методика текущего контроля

на лекционных занятиях

Текущий контроль включает в себя контроль посещаемости (не менее 80 % занятий), по результатам которого студент получает допуск на зачет с оценкой.

на практических занятиях

Текущий контроль включает в себя контроль посещаемости (не менее 80 % занятий) и написание двух контрольных работ, по результатам которых студент получает допуск на зачет с оценкой.

Контрольные работы оцениваются по системе **”зачтено/ не зачтено”**.

Для получения оценки зачтено необходимо дать удовлетворительные развернутые ответы на теоретические вопросы и правильно решить задачу.

Для получения оценки зачтено необходимо правильно ответить на не менее чем 5 вопросов в тестовой части задания на контрольную работу и дать удовлетворительные развернутые ответы на открытые вопросы во второй части задания.

В ходе проведения семинарских и практических занятий целесообразно привлечение студентов к как можно более активному участию в дискуссиях, решении задач, обсуждениях, коллоквиумах и т. д. При этом активность студентов также может учитываться преподавателем, как один из способов текущего контроля на практических занятиях.

самостоятельной работы студентов.

Контроль самостоятельной работы студентов осуществляется на лекционных и практических занятиях студентов по методикам, описанным выше.

7 Описание информационных технологий и материально-технической базы

Тип занятий	Тип помещения	Требования к помещению	Требования к программному обеспечению
Лекция	Лекционная аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, доска, экран, проектор, ПК, ноутбук,	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше
Практические занятия	Аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, доска, экран, проектор, ПК, ноутбук,	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше
Самостоятельная работа	Помещение для самостоятельной работы	Оснащено компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше

8 Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ

Адаптированная программа разрабатывается при наличии заявления со стороны обучающегося (родителей, законных представителей) и медицинских показаний (рекомендациями психолого-медико-педагогической комиссии). Для инвалидов адаптированная образовательная программа разрабатывается в соответствии с индивидуальной программой реабилитации.

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Дата	Изменение	Дата и номер протокола заседания УМК	Автор	Начальник ОМОЛА