

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

«МЕТРОЛОГИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МОДУЛЕЙ (METROLOGY  
OF SOLAR CELLS AND MODULES)»

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)	3
Курс	1
Семестр	2
<b>Виды занятий</b>	
Лекции (академ. часов)	17
Лабораторные занятия (академ. часов)	17
Практические занятия (академ. часов)	17
Иная контактная работа (академ. часов)	1
Все контактные часы (академ. часов)	52
Самостоятельная работа, включая часы на контроль (академ. часов)	56
Всего (академ. часов)	108
<b>Вид промежуточной аттестации</b>	
Экзамен (курс)	1

## **2 АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **«МЕТРОЛОГИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МОДУЛЕЙ (METROLOGY OF SOLAR CELLS AND MODULES)»**

В результате изучения дисциплины будут рассмотрены следующие темы: «Солнечное излучение, его характеристики» где будут рассмотрены характеристики солнечного излучения и способы моделирования параметров светового потока в лабораторных условиях, а также методы контроля параметров солнечного излучения.

«Эталонные солнечные элементы и их конструкция». Раздел посвящен конструкции эталонных солнечных элементов, способами их калибровки и эталонирования.

«Вольт-амперные характеристики солнечных элементов». Раздел знакомит с методиками и оборудованием для измерения вольт-амперных характеристик солнечных элементов и фотоэлектрических модулей.

«Спектральные характеристики солнечных элементов». В данном разделе представлены методики и оборудование для измерения спектральных характеристик тонкопленочных солнечных элементов, включая многопереходные элементы.

«Фотоиндуцированная деградация солнечных элементов». Раздел знакомит с проблемами фотоиндуцированной деградации тонкопленочных солнечных элементов и методами ее характеристики.

## **SUBJECT SUMMARY**

### **«METROLOGY OF THE THIN FILM SOLAR MODULES AND SYSTEMS»**

The following subjects will be considered during the study of this discipline: «Sunlight, its characteristics» where the sunlight characteristics and methods of indoor light parameters modeling, also a quality monitoring of parameters of sunlight

will be considered.

«Reference solar cells and their design». The section is devoted to design of reference solar cells, ways of their calibration.

«Current-voltage characteristics of solar cells». The section acquaints with techniques and the equipment for measurement of the current-voltage characteristics of solar cells and solar modules, as well as specific features of tandem thin-film solar cells modules current-voltage characteristics.

«Spectral characteristics of solar cells». In the given section techniques and the equipment for spectral characteristics measurement of thin-film solar cells, including multijunction cells are presented.

«The photoinduced degradation of solar cells». The section acquaints with problems of the photoinduced degradation of thin-film solar cells and its characterization methods.

## **3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **3.1 Цели и задачи дисциплины**

1. Цели изучения дисциплины:

-изучение принципов разработки методов и средств измерений характеристик солнечных элементов (СЭ) и солнечных модулей (СМ);

-освоение базовых программ и методик испытаний элементов (СЭ) и солнечных модулей (СМ).

2. Задачи изучения дисциплины: формирование знаний, умений и практических навыков работы с измерительным оборудованием.

3. Знания, необходимые для освоения и применения базовых программ и методик испытаний элементов (СЭ) и солнечных модулей (СМ).

4. Формирование умений выбора и работы программ и методик испытаний элементов (СЭ) и солнечных модулей (СМ).

5. Формирование практических навыков работы с измерительным оборудованием.

### **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 энергетики (Solar Energy Materials)»

и обеспечивает изучение последующих дисциплин:

1. «Производственная практика (научно-исследовательская работа) (Internship (Research Project))»

2. «Компьютерное моделирование гибридных систем возобновляемой энерге-

тики (Computer Simulation of Hybrid Renewable Energy Systems)»

3. «Многокаскадные солнечные элементы на основе соединений АІІІВV (Multijunction Solar Cells Based on АІІІВV Compounds)»

4. «Технология солнечных элементов и модулей (Technology of Solar Cells and Modules)»

5. «Производственная практика (преддипломная практика) (Internship (Pre-degree Internship))»

### 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:

<b>Код компетенции/ индикатора компетенции</b>	<b>Наименование компетенции/индикатора компетенции</b>
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-2.3</i>	<i>Владеет навыками разработки стратегии и методологии исследования изделий микрои нанoeлектроники</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>
<i>СПК-23.2</i>	<i>Умеет самостоятельно проводить экспериментальные исследования солнечных фотоэлектрических преобразователей</i>
<i>СПК-23.3</i>	<i>Владеет навыками проведения исследования с применением современных средств и методов солнечных фотоэлектрических преобразователей</i>
СПК-24	Способен осуществлять разработку и оптимизацию технологии производства солнечных фотоэлектрических преобразователей
<i>СПК-24.3</i>	<i>Владеет навыками измерения параметров приборов и устройств 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	Лаб, ач	ИКР, ач	СР, ач
1	Введение	1				
2	Солнечное излучение и его характеристики	2	2			4
3	Эталонные солнечные элементы	3	3	5		15
4	Спектральные характеристики СЭ	4	5	6		15
5	Вольт-амперные характеристики СЭ	4	5	6	1	15
6	Фотоиндуцированная деградация солнечных элементов	2	2			7
7	Заключение	1		0		
	Итого, ач	17	17	17	1	56
	Из них ач на контроль	0	0	0	0	35
	Общая трудоемкость освоения, ач/зе	108/3				

#### 4.1.2 Содержание

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
1	Введение	Предмет курса, цели и задачи измерений при разработке и создании фотоэлектрической продукции, проведении аттестационных, ресурсных и эксплуатационных испытаний. Структура и содержание курса, его связь с другими дисциплинами учебного плана и значение в подготовке специалиста в области оптоэлектроники.
2	Солнечное излучение и его характеристики	Солнечное излучение, его характеристики. Моделирование характеристик солнечного излучения на имитаторах излучения. Методики и средства контроля и корректировки характеристик излучения имитаторов.
3	Эталонные солнечные элементы	Эталонные солнечные элементы и их конструкция. Подбор СЭ для создания эталонов. Стабильность характеристик эталонных солнечных элементов. Градуировка и поверка эталонных солнечных элементов.

№ п/п	Наименование темы дисциплины	Содержание
4	Спектральные характеристики СЭ	Методы и средства исследования спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фотоответа, спектральные зависимости коэффициентов отражения и пропускания. Особенности формообразования вольт-амперных характеристик двухпереходных СЭ при измерении спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фотоответа. Экспериментальные установки для исследования спектральных характеристик солнечных элементов.
5	Вольт-амперные характеристики СЭ	ВАХ солнечных элементов и их измерение. Влияние спектрального состава излучения на форму ВАХ и КПД солнечных элементов. Требования к экспериментальному оборудованию для измерения ВАХ СЭ различных конструкций. Температурные зависимости фотоэлектрических параметров солнечных элементов.
6	Фотоиндуцированная деградация солнечных элементов	Измерение характеристик солнечных элементов и батарей под воздействием солнечного излучения. Методики старения солнечных элементов.
7	Заключение	Последние достижения и основные тенденции в области метрологии фотоэлектрических преобразователей.

## 4.2 Перечень лабораторных работ

Наименование лабораторной работы	Количество ауд. часов
1. Исследование фотоэлектрических характеристик полупроводниковых материалов и структур на их основе.	5
2. Исследование оптических свойств СЭ.	6
3. Измерение ВАХ СЭ в условиях импульсной засветки (установка для измерения ВАХ СЭ импульсного имитатора солнечного излучения)	6
Итого	17

## 4.3 Перечень практических занятий

Наименование практических занятий	Количество ауд. часов
1. Солнечное излучение и его характеристики.	2
2. Эталонные солнечные элементы.	3
3. Спектральные характеристики однопереходных СЭ.	5
4. Спектральные характеристики многопереходных СЭ.	5
5. Вольт-амперные характеристики СЭ.	2
6. Фотоиндуцированная деградация солнечных элементов	
Итого	17

#### **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 деятельности, которые указывают путь решения проблемы.

<b>Текущая СРС</b>	<b>Примерная трудоемкость, ач</b>
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	11
Подготовка к контрольным работам, коллоквиумам	0
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
<b>ИТОГО СРС</b>	<b>56</b>

## 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	da Rosa, Aldo Vieira. Fundamentals of renewable energy processes [Текст] : монография / A. V. da Rosa, 2013. -884 с.	4
5	DiMarzio Charles A. Optics for engineers [Текст] / C. A. DiMarzio, 2012. - XXIII, 535 с.	6
Дополнительная литература		
1	Handbook of photovoltaic science and engineering [Текст] / ed. by A. Luque, S. Hegedus, 2011. -XXXII,132 с.	10
2	Василевский, Александр Михайлович. Optics and optical measurements in solar energy [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. пособие / А. М. Василевский, Г. А. Коноплев, О. С. Степанова, 2020. -1 эл. опт. диск (CD-ROM)	неогр.

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

№ п/п	Электронный адрес
1	Measurement and Instrumentation Data Center <a href="http://www.nrel.gov/midc/">http://www.nrel.gov/midc/</a>
2	Solar spectra <a href="http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/">http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/</a>

### **5.3 Адрес сайта курса**

Адрес сайта курса: <https://vec.etu.ru/moodle/course/view.php?id=13096>

## 6 Критерии оценивания и оценочные материалы

### 6.1 Критерии оценивания

Для дисциплины «Метрология солнечных элементов и модулей (Metrology of Solar Cells and Modules)» предусмотрены следующие формы промежуточной аттестации: экзамен.

#### Экзамен

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

Допуском к экзамену является посещение лекций -не менее 80%, выполнение и защита 3 лабораторных работ.

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

### Вопросы к экзамену

№ п/п	Описание
1	Solar radiation, its characteristics.
2	The experimental setups for the measurements of EQE spectral dependences.
3	The temperature dependences of solar cell parameters.
4	The experimental setups for the measurements of the reflection and transmittance spectra.
5	Optical and recombination losses.
6	External and internal quantum efficiency, reflection and transmittance.
7	Requirements to experimental equipment for the measurement of I-V curves of solar cells. Error sources.
8	Measurement of the external quantum efficiency.
9	Features of the EQE measurement for multi-junction solar cells solar cell.
10	The problem of the photoinduced degradation of thin-film solar cells.
11	Spectral mismatch coefficients.
12	Light soaking methods.
13	Solar simulators: requirements, classification, design.
14	Standard reference conditions. Nominal operating conditions.
15	Measurement of I-V curves of solar cells. Two-and four-probe measurement techniques.
16	Reference solar cells and their design. Choose of the solar cells for the reference cells.
17	Equivalent circuit of a real solar cell
18	Effect of temperature on solar cell parameters
19	Main parameters of solar cells
20	Photocurrent generated in a solar cell
21	Parameters of real solar cells

### Форма билета

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



---

## ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

Дисциплина Metrology of Solar Cells and Modules ФЭЛ

1. Solar radiation, its characteristics.
2. Requirements to experimental equipment for the measurement of I-V curves of solar cells. Error sources.

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

С. А. Тарасов

### **Образцы задач (заданий) для контрольных (проверочных) работ**

#### **Примеры вопросов к коллоквиумам**

1. Define the phenomenon of interference.
2. Describe methods for observing interference in thin films.
3. Give examples of the use of thin films. List the main elements of the installation and the scheme of their connection.
4. What are the light sources in the installation?
5. How to choose the level of the light signal for measurements?
6. How is the light signal transmitted to the measuring device?
7. The principle of transmission of light signals by fiber optic line. What data about sample materials do you need to know in order to carry out measurements with the method used?
8. What is the control sample used for?

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
4	Солнечное излучение и его характеристики	Отчет по лаб. работе
6	Эталонные солнечные элементы	Коллоквиум
7	Спектральные характеристики СЭ	Отчет по лаб. работе
9	Спектральные характеристики СЭ	Коллоквиум
10	Вольт-амперные характеристики СЭ	Отчет по лаб. работе
12	Вольт-амперные характеристики СЭ	Коллоквиум
17	Фотоиндуцированная деградация солнечных элементов	Коллоквиум

### 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 экзамен.

на лабораторных занятиях

- Порядок выполнения лабораторных работ, подготовки отчетов и их защиты

В процессе обучения по дисциплине «Метрология солнечных элементов и модулей (Metrology of Solar Cells and Modules)» студент обязан выполнить 3 лабораторных работы. Под выполнением лабораторных работ подразумевается подготовка к работе, проведение экспериментальных исследований, подготовка отчета и его защита на коллоквиуме. После каждой лабораторной работы предусматривается проведение коллоквиума на 6, 9, 12 неделях, на которых осуществляется защита лабораторных работ. Выполнение лабораторных работ студентами осуществляется индивидуально. Оформление отчета студентами осуществляется индивидуально в соответствии с принятыми в СПбГЭТУ правилами оформления студенческих работ. Отчет оформляется после выполнения экспериментальных исследований и представляется преподавателю на проверку. После проверки отчет либо возвращается (при наличии замечаний) на доработку, либо подписывается к защите.

Лабораторные работы защищаются студентами индивидуально. Каждый студент получает вопрос по теоретической части, или по процедуре проведения экспериментальных исследований, или по последующей обработке результатов, после чего ему предоставляется время для подготовки ответа. При обсуждении ответа преподаватель может задать несколько уточняющих вопросов. В случае если студент демонстрирует достаточное знание вопроса, работа считается защищенной.

На защите лабораторной работы студент должен показать: понимание методики исследования и знание особенностей её применения, понимание и умение объяснять особенности применяемых методов, возможные области их применения и т.д., умение давать качественную и количественную оценку полученных экспериментальных результатов и прогнозировать реакции исследуемого объекта на различные воздействия, навыки и умения, приобретенные при выполнении лабораторной работы.

Текущий контроль включает в себя выполнение, сдачу в срок отчетов и их защиту по всем лабораторным работам, по результатам которой студент получает допуск на экзамен.

на практических (семинарских) занятиях

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

В ходе проведения семинарских и практических занятий целесообразно привлечение студентов к как можно более активному участию в дискуссиях, решении задач, обсуждениях 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 лекции-

онных, лабораторных 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, компьютер, ЭВМ	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше; ПК
Лабораторные работы	Лаборатория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, ПК, лабораторный стенд для измерения оптических свойств тонких пленок, импульсный имитатор солнечного излучения для измерения ВАХ, лабораторный стенд для измерения температурных зависимостей ВАХ	1) Windows XP и выше;
Практические занятия	Аудитория	Количество посадочных мест – в соответствии с контингентом, рабочее место преподавателя, доска, экран, проектор, ПК, ноутбук, компьютер, ЭВМ	1) Windows XP и выше; 2) Microsoft Office 2007 и выше; ПК
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; ПК

## **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

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