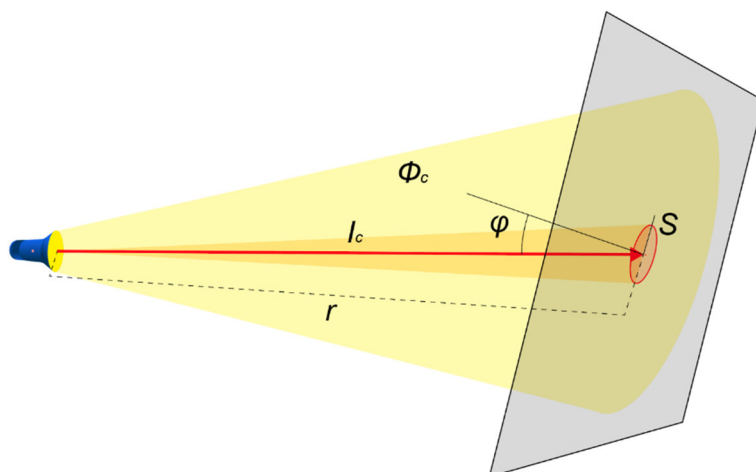


**Е.С. Колодезный, А.И. Бородкин, С.С. Рочас,  
О.А. Козырева, В.Е. Бугров**

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ:  
ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЯ**



**Санкт-Петербург  
2020**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Е.С. Колодезный, А.И. Бородкин, С.С. Рочас,  
О.А. Козырева, В.Е. Бугров**

## **ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ: ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЯ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика  
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных  
профессиональных образовательных программ высшего образования  
магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Санкт-Петербург  
2020**

Колодезный Е.С., Бородкин А.И., Рочас С.С., Козырева О.А., Бугров В.Е., Оптоэлектронные приборы: характеристики и применения– СПб: Университет ИТМО, 2020. – 78 с.

Рецензенты:

Гордеев Никита Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Вознесенская Анна Олеговна, кандидат технических наук, доцент факультета прикладной оптики, Университет ИТМО

Представленные в сборнике лабораторные работы предлагаются студентам факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники для освоения навыков проведения исследований в области светотехнических и фотометрических параметров оптоэлектронных приборов с использованием современного научного измерительного оборудования. Приведено подробное описание лабораторных работ и методик измерений характеристик светодиодных излучателей. В издании освещены вопросы комплексного моделирования освещения с использованием программного пакета DIALux.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020

© Колодезный Е.С., Бородкин А.И., Рочас С.С., Козырева О.А., Бугров В.Е., 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1. Исследование вольт-амперной характеристики светодиода видимого диапазона излучения при амплитудной модуляции питания .....	4
Лабораторная работа 2. Исследование изменения сигнала во времени при передаче данных по атмосферному оптическому каналу связи .....	13
Лабораторная работа 3. Зависимость спектра светодиода от параметров его питания .....	26
Лабораторная работа 4. Пространственное распределение силы света светодиодного осветительного прибора.....	33
Лабораторная работа 5. Светотехнический расчет освещения с использованием программных средств. ....	46
Лабораторная работа 6. Измерение светотехнических параметров освещения на рабочем месте .....	63
Приложение А Пример оформления отчета .....	73



## Лабораторная работа 1.

### Исследование вольт-амперной характеристики светодиода видимого диапазона излучения при амплитудной модуляции питания

#### 1. Цель

Исследование вольт-амперной характеристики светодиода при постоянном питании и при импульсной амплитудной модуляции питающего напряжения.

#### 2. Краткие теоретические сведения

##### 2.1. Вольт-амперная характеристика светодиода

Светодиод – полупроводниковое устройство, основанное на использовании полупроводников двух типов:  $p$  (positive) и  $n$  (negative), которые образуют  $p$ - $n$ -переход. Электрический ток, пропускаемый через  $p$ - $n$ -переход в прямом направлении, приводит к рекомбинации носителей заряда (электрон, дырка), что сопряжено с излучением фотонов при переходе электрона с одного энергетического уровня на другой.

Важность исследования электрических характеристик светодиодов обусловлена необходимостью работы светодиода в рабочем режиме для полной реализации собственного ресурса и возможностью управлять яркостью и изменять цвет светодиода, построенного по системе RGB. Наиболее полную информацию о поведении светодиода дает вольт-амперная характеристика (ВАХ), состоящая из прямой и обратной ветвей.

Обратная ветвь ВАХ измеряется при обратном включении светодиода. В таком случае, как и при обратном включении обычного диода, через светодиод протекает малый ток утечки  $I_{обр}$  [А], при этом светодиод не излучает свет. Приложенное к светодиоду обратное напряжение  $U_{обр}$  [В], превышающее предельно допустимое значение, приводит к пробое  $p$ - $n$  перехода и выводу светодиода из строя. При этом пробой бывает двух типов: электрический, который является обратимым и подразделяется на лавинный и туннельный, и необратимый – тепловой.

Рабочий режим светодиода отражает ВАХ при прямом включении светодиода (Рисунок 1.1). Поскольку прямая ВАХ имеет экспоненциальный характер, важной задачей является поиск рабочей точки и ограничение предельно допустимого прямого тока  $I_{пр}$  [А], в противном случае светодиод выйдет из строя. Экспоненциальный рост тока происходит только в начале прямой ветви ВАХ при открытии светодиода, далее при увеличении напряжения ВАХ имеет квазилинейную зависимость.

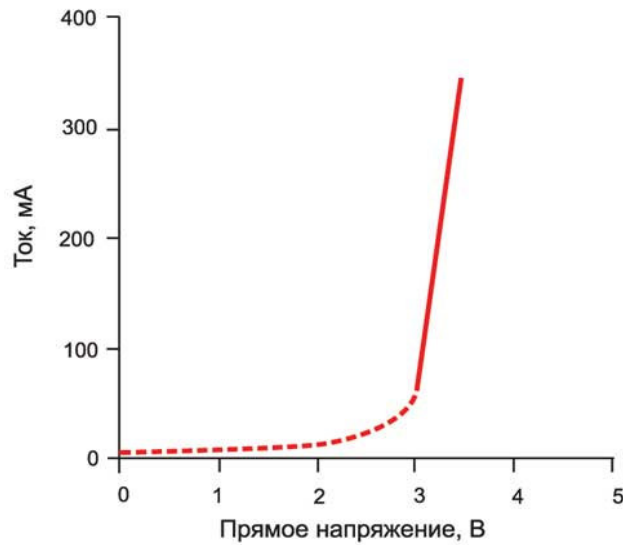


Рисунок 1.1 — Типичная прямая ВАХ светодиода

Стоит помнить, что на вид ВАХ влияет температура, с повышением которой растет наклон ВАХ, и материальная платформа, на основе которой изготовлен светодиод (Рисунок 1.2).

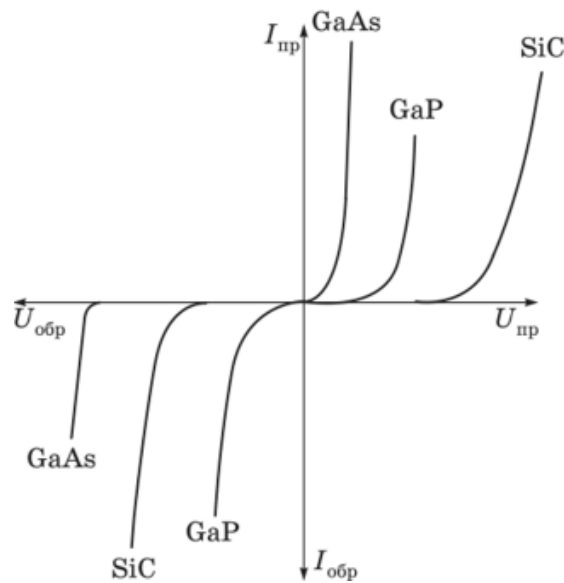


Рисунок 1.2 — ВАХ светодиодов для разных полупроводниковых материалов

Выходное излучение полупроводникового светодиода можно модулировать посредством изменения подаваемого на светодиод тока так, чтобы получить модуляцию мощности излучения или импульсную модуляцию. Для реализации прямой модуляции и получения линейного процесса необходимо осуществить подачу постоянного смещения (Рисунок 1.3). Изменение мощности излучения может происходить импульсно или по

закону изменения модулирующего сигнала. Непрерывные (аналоговые) сигналы при модуляции могут искажаться. Поэтому при модуляции интенсивности выбирается линейный участок ватт-амперной характеристики излучателя.

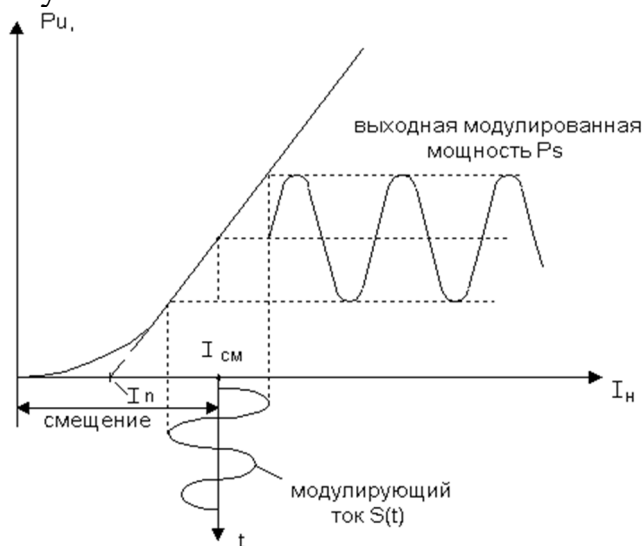


Рисунок 1.3 — Прямая модуляция оптического сигнала со смещением

### 3. Схема выполнения лабораторной работы

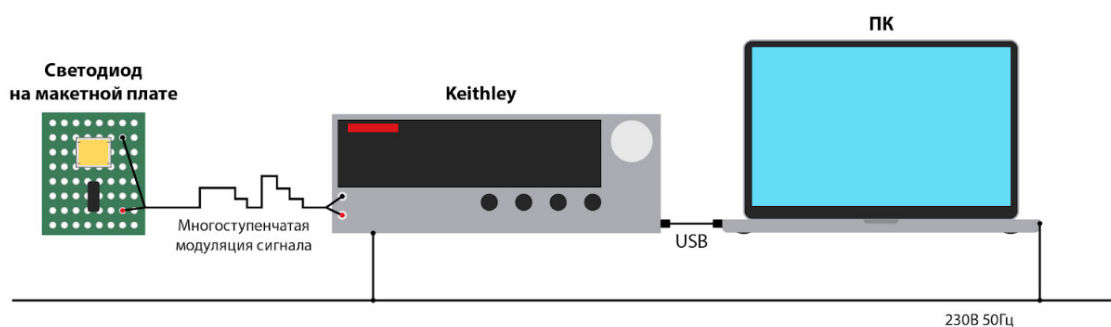


Рисунок 1.4 — Схематичное изображение используемого для выполнения лабораторной работы оборудования и его коммутации между собой

### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выводу из строя аппаратуры.

#### 4.1. Подготовка

##### 4.1.1. Определение объекта испытаний

Получив у преподавателя указания о том, какой светодиод необходимо использовать для измерений, необходимо визуально убедиться

в целостности его элементов, записать название, изучить спецификацию, рабочие характеристики, серийный номер.

#### 4.1.2. Подключение источника-измерителя Keithley 2611B

4.1.2.1. Соединить источник-измеритель Keithley 2611B и используемый в лабораторной работе ПК посредством сетевого кабеля LAN, используя LAN разъем источника-измерителя Keithley 2611B, расположенный на задней панели прибора (Рисунок 1.5);



Рисунок 1.5 — Задняя панель источника-измерителя Keithley 2611B

4.1.2.2. Включить питание источника-измерителя Keithley 2611B;

4.1.2.3. Разместить используемые для соединения с исследуемым светодиодом провода, совмещенные с зажимом, соответствующим топологии исследуемого светодиода, в разъем CHANNEL A, расположенный на задней панели источника-измерителя Keithley 2611B, каналы HI и LO соответствуют аноду и катоду исследуемого светодиода;

4.1.2.4. Соблюдая полярность, соединить исследуемый светодиод с зажимами;

4.1.2.5. Нажать клавишу «MENU», расположенную на передней панели источника-измерителя Keithley 2611B (Рисунок 1.6), после чего, используя поворот вращающегося управляющего кольца для выбора, нажатие на кольцо для перехода в выбранный пункт меню, совершить следующий алгоритм: LAN→STATUS→IP-ADDRESS. Записать IP адрес. Использовать клавишу «EXIT» для выхода в рабочее окно прибора;



Рисунок 1.6 — Передняя панель источника-измерителя Keithley 2611B

**4.1.2.6.** Запустить на используемом в лабораторной работе ПК интернет-браузер Internet Explorer. В адресной строке интернет-браузера вписать IP адрес, полученный в пункте 4.1.2.5;

**4.1.2.7.** В открывшемся Web интерфейсе выбрать вкладку «TSP Express», после чего нажать кнопку «Launch» для запуска программы;

**4.1.2.8.** В окне программы TSP Express выбрать пункт меню быстрого старта «Multiple SMU sweeps and measurements» (Рисунок 1.7).

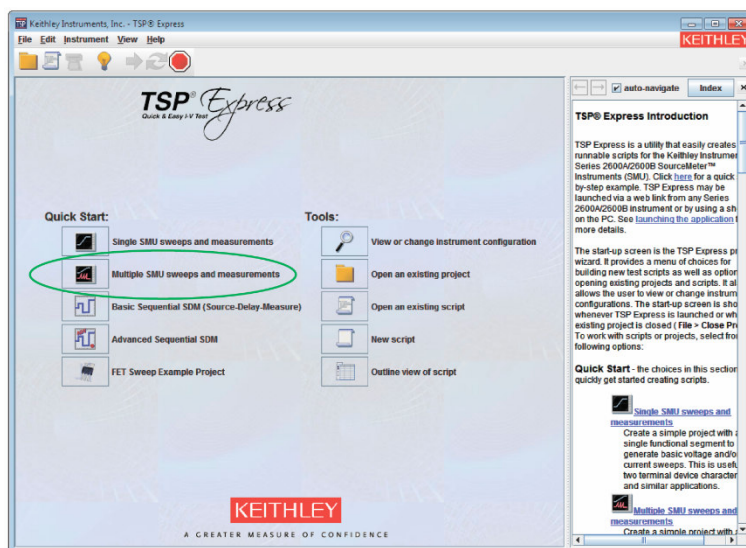


Рисунок 1.7 — Стартовое меню программы TSP Express

## 4.2. Проведение измерений

### 4.2.1. Исследование вольт-амперной характеристики светодиода

**4.2.1.1.** Нажав клавишу «SMU Assignment», убедиться, что в окне Sweep расположен только канал А (localnode.smua (2602B)), канал Б (localnode.smub (2602B)) вынести в окно «Available» (Рисунок 1.8);

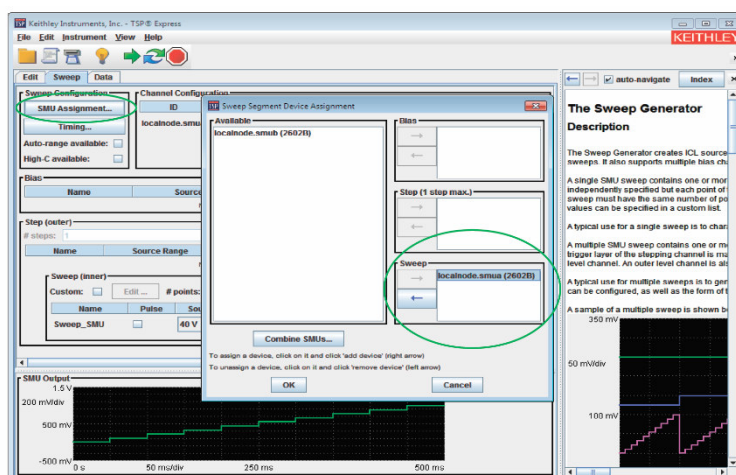


Рисунок 1.8 — Установка канала питания в программе TSP Express

**4.2.1.2.** Установить верхнее значение диапазона тока посредством выбора предела во вкладке «Meas.Range». Установить токовое ограничение, соответствующее исследуемому светодиоду выбрав вкладку «Advanced» (Рисунок 1.9);

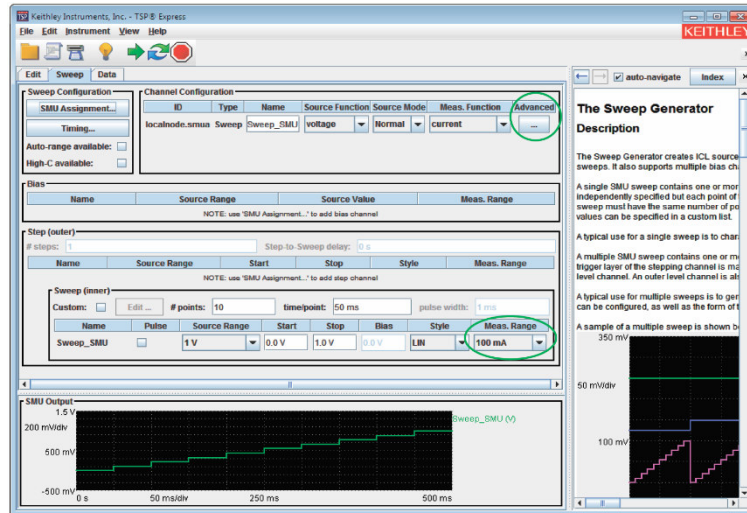


Рисунок 1.9 — Установка силы тока в программе TSP Express

**4.2.1.3.** Установить верхнее значение диапазона напряжения посредством выбора предела во вкладке «Source Range». Установить конечное напряжение, соответствующее исследуемому светодиоду, в окне программы «Stop» (Рисунок 1.10);

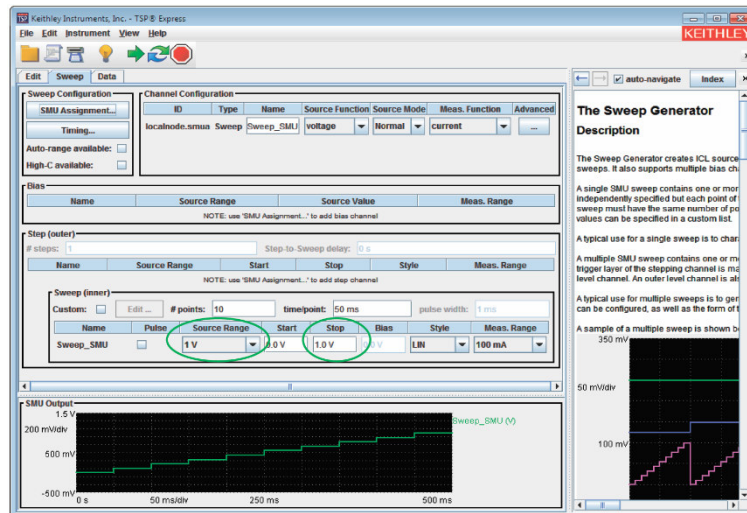


Рисунок 1.10 — Установка напряжения в программе TSP Express

**4.2.1.4.** Установить количество точек и время измерения значений тока и напряжения в одной точке, вписав значения в окна «# points» и «time/point» соответственно (Рисунок 1.11);



4.2.1.5. Перейти во вкладку «Data». Для визуализации вольт-амперной характеристики в пункте «Display» выбрать значение «Graph». Выбрать параметры осей X и Y, соответствующие напряжению (Sweep\_SMU (Volts)) и току (Sweep\_SMU (Amps)) (Рисунок 1.12);

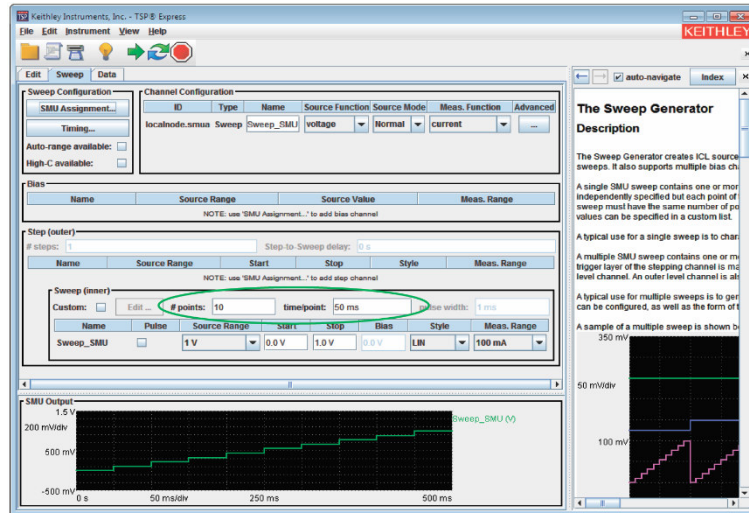


Рисунок 1.11 — Установка точек и времени измерений в программе TSP Express

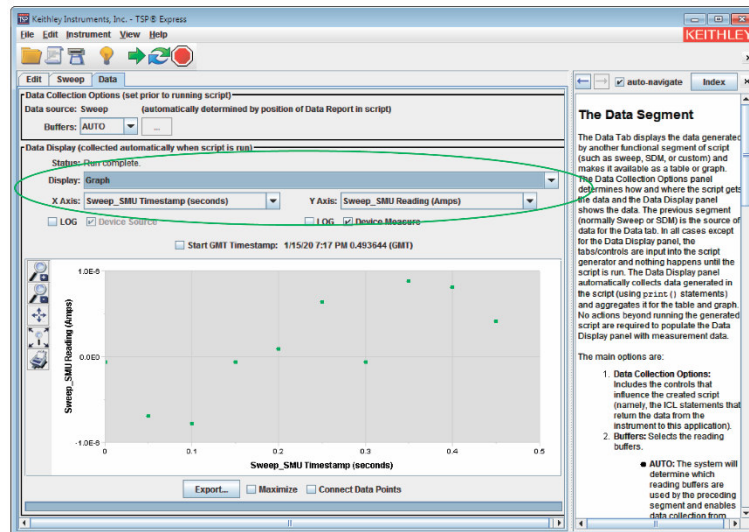


Рисунок 1.12 — Визуализация данных в программе TSP Express

4.2.1.6. Запустить измерение, нажав клавишу  ;

4.2.1.7. Посредством нажатия клавиши «Export» сохранить полученные данные в текстовом формате в папке Вашей группы.

4.2.2. Исследование вольт-амперной характеристики светодиода в импульсном режиме

4.2.2.1. Перейти во вкладку «Sweep» и установить галочку в столбце «Pulse» (Рисунок 1.12), ширину импульса установить в окне «pulse width»;

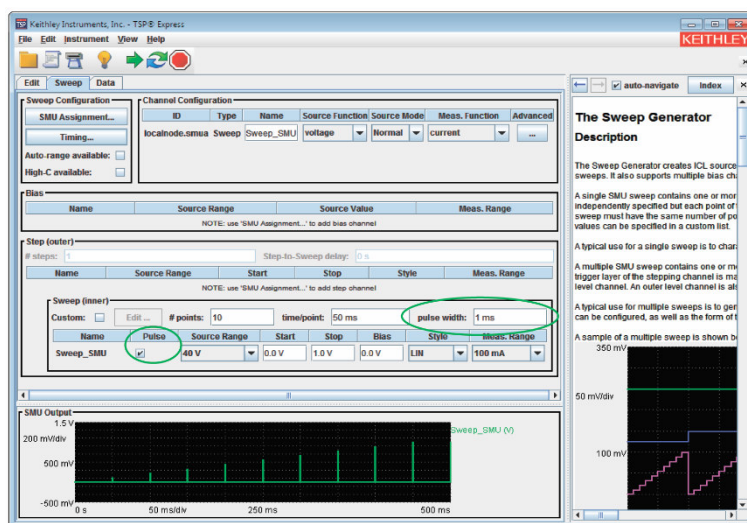


Рисунок 1.12 — Выбор импульсного режима в программе TSP Express

4.2.2.2. Запустить измерение нажав клавишу  ;

4.2.2.3. Посредством нажатия клавиши «Export» во вкладке «Data» сохранить полученные данные в текстовом формате в папке Вашей группы;

4.2.2.4. Закрыть программу TSP Express, выключить питание источника-измерителя Keithley 2611B.

### 4.3. Обработка результатов

Обработать полученные массивы данных с целью описания и графического представления вольт-амперной характеристики при постоянном питании и вольт-амперной характеристики, полученной в импульсном режиме, для исследуемого светодиода.

## 5. Форма отчета

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

## 6. Рекомендуемый список литературы для ознакомления

— ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи;

— Источники-измерители SourceMeter (SMU) серии 2600B [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://ru.tek.com/keithley-sourcemeter-units/smu-2600b-series-sourcemeter>. – Заглавие с экрана;



— Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов т. 2., глава 12 – Рипол Классик, 1973.

### **7. Контрольные вопросы**

- Устройство и принцип работы светодиода;
- Понятие *p-n*-перехода;
- Прямая и обратная ветвь вольт-амперной характеристики светодиода;
- Полупроводниковые материалы для светодиодов;
- Прямая токовая модуляция.

## Лабораторная работа 2.

### Исследование изменения сигнала во времени при передаче данных по атмосферному оптическому каналу связи

#### 1. Цель

Исследование совокупности электронно-оптического и оптико-электронного преобразований сигнала в оптическом атмосферном канале связи при его амплитудной модуляции.

#### 2. Краткие теоретические сведения

##### 2.1. Фотодиод

Фотодиод – полупроводниковое устройство, основанное на использовании полупроводников двух типов:  $p$  (positive) и  $n$  (negative), которые образуют  $p-n$ -переход. Устройство фотодиода изображено на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 — Устройство фотодиода

В системах передачи данных фотоприемники используются для преобразования оптического сигнала в электрический. В настоящее время основное распространение получили следующие типы фотодиодов:  $p-n$ ,  $p-i-n$ , с барьером Шоттки и лавинный.

Для высокоскоростных приложений используются  $p-i-n$  фотоприемники, они имеют широкую слаболегированную, обедненную, область между слоями  $p$ - и  $n$ -типа проводимости, что обеспечивает более быстрое переключение по сравнению с другими фотодиодами.

Поглощение излучения в полупроводнике вызывает генерацию электронно-дырочных пар, которые, создаваемые в обедненной области, разделяются электрическим полем, ввиду чего во внешней цепи во время дрейфа носителей возникает ток. Под действием приложенного электрического поля электрон-дырочные пары разделяются (Рисунок 2.2), вследствие чего появляется фототок. При разомкнутой цепи фотодиод может работать в фотогальваническом режиме.

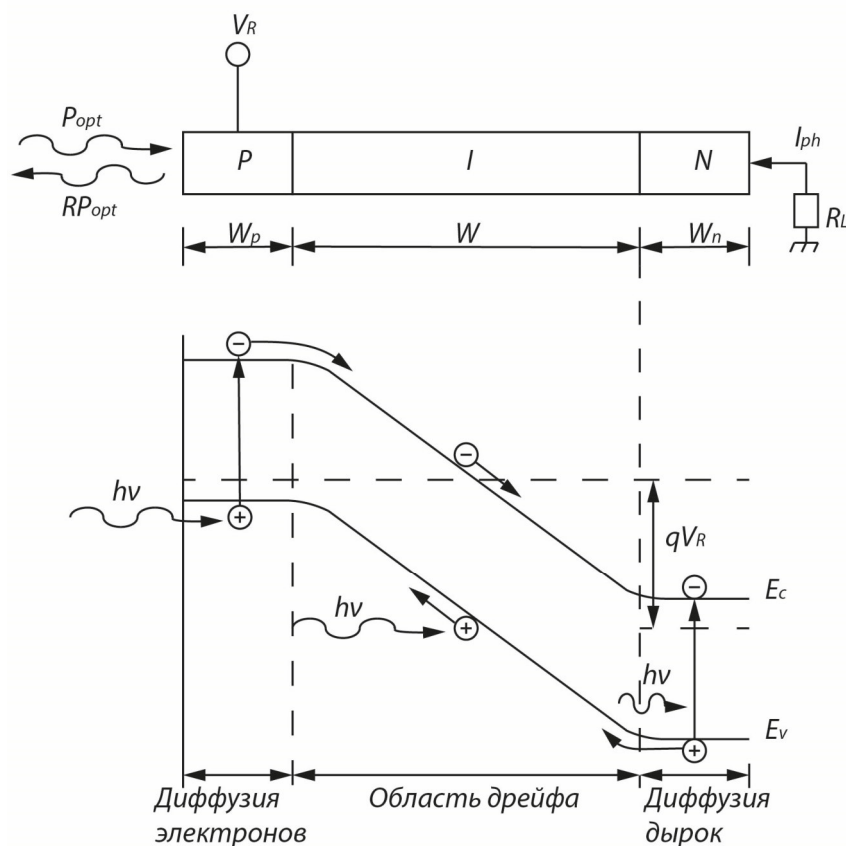


Рисунок 2.2 — Поперечный разрез и зонная диаграмма p-i-n фотоприемника

## 2.2. Модуляция сигнала

Модуляция – процесс изменения сигнала по одному (амплитуда) или нескольким (амплитуда, фаза, длина волны, и т.д.) параметрам с помощью управляющего сигнала с целью увеличения скорости или объемов передачи информации. В качестве несущего сигнала может быть использован как радиочастотный сигнал, так и свет.

Простейшей модуляцией является *On-Off Keying* (OOK) или включение/выключение светодиода. При данной модуляции передается 1 бит информации, и светодиод модулируется напрямую по току. Более сложным видом модуляции является импульсно-амплитудная модуляция – *Pulse-amplitude modulation* (PAM). При данной модуляции светодиод способен излучать на нескольких уровнях яркости. Например, PAM4 – светодиод будет светить на 4-х уровнях яркости – 100%, 66%, 33%, 0% от максимальной яркости, что позволяет передавать в 2 раза больше информации, чем при OOK.

Основным видом модуляций на сегодняшний день является мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов – *orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM). В основе OFDM технологии лежит алгоритм быстрого преобразования Фурье (FFT).

Создается спектр сигнала, из которого обратным быстрым преобразованием Фурье (IFFT) получается аналоговый сигнал. Плюсы метода:

1. Высокая эффективность использования радиочастотного спектра благодаря почти прямоугольной форме огибающей спектра при большом количестве поднесущих.

2. Простая аппаратная реализация: базовые операции реализуются методами цифровой обработки.

3. Хорошее противостояние межсимвольным помехам (ISI – *intersymbol interference*) и интерференции между поднесущими (ICI – *intercarrier interference*), следовательно, лояльность к многолучевому распространению.

4. Возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации.

Минусы метода:

1. Необходима высокая синхронизация частоты и времени.

2. Чувствительность к эффекту Доплера, ограничивающая применение OFDM в мобильных системах.

3. Несовершенство современных приемников и передатчиков вызывает фазовый шум, что ограничивает производительность системы.

4. Защитный интервал, используемый в OFDM для борьбы с многолучевым распространением, снижает спектральную эффективность сигнала.

Несмотря на некоторые недостатки, OFDM является отличным решением для архитектур современных сетей, работающих в условиях мегаполиса. Общая идея метода передачи OFDM заключается в том, чтобы разделить общую доступную ширину полосы пропускания  $B$  на множество узкополосных подканалов на равноотстоящих частотах. Спектры подканалов перекрывают друг друга, но сигналы поднесущих ортогональны. Один поток с высокой скоростью передачи данных подразделяется на множество потоков с низкой скоростью передачи данных для подканалов. Каждый подканал модулируется индивидуально и будет передаваться одновременно и параллельно. Поэтому передаваемый сигнал OFDM состоит из  $N$  смежных и ортогональных поднесущих, расположенных на частотном расстоянии  $\Delta f$  по оси частот. Все сигналы поднесущей являются взаимно ортогональными в пределах длительности сигнала  $T_S$ , при условии, что расстояние между поднесущими и длительность сигнала выбраны так, что  $T_S = 1/\Delta f$ . Сигнал  $k$ -й немодулированной поднесущей описывается аналитически комплексной функцией с несущей частотой  $k\Delta f$ ,  $\tilde{g}_k(t)$ ,  $k = 0, \dots, N-1$ .

$$\tilde{g}_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi k\Delta f t}, & \forall t \in [0, T_s] \\ 0 & , \forall t \notin [0, T_s] \end{cases}. \quad (2.1)$$

Ортогональность несущих сигналов обеспечивается только тогда, когда за время длительности одного символа  $T$  несущий сигнал будет совершать целое число колебаний.

В передатчике каждый сигнал поднесущей модулируется независимо посредством комплекснозначного символа модуляции  $S_{n,k}$ , где  $n$  относится к временному интервалу,  $k$  – к номеру сигнала поднесущей в рассматриваемом OFDM-символе. Таким образом, в интервале времени  $T$  длительности символа непрерывный по времени сигнал  $n$ -го символа OFDM формируется суперпозицией всех  $N$  одновременно модулированных сигналов поднесущей:

$$s_n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_{n,k} g_k(t - nT). \quad (2.2)$$

Полный непрерывный по времени сигнал, состоящий из всех символов OFDM, последовательно передаваемых по времени, описывается уравнением (2.3):

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} S_{n,k} e^{j2\pi k\Delta f(n-nT)} \text{rect}\left(\frac{2(t - nT) + T_G - T_S}{2T}\right). \quad (2.3)$$

Благодаря прямоугольному формированию импульса спектры всех рассматриваемых сигналов поднесущих являются функциями *sinc*, которые равноудалены на оси частот, например, для сигнала  $k$ -й поднесущей, спектр описывается в уравнении (2.4):

$$G_k(f) = T \text{sinc}[\pi T(f - k\Delta f)]. \quad (2.4)$$

Типичный спектр OFDM, показанный на рисунках 2.3 и 2.4, состоящий из  $N$  смежных *sinc* функций, которые сдвинуты на  $\Delta f$  по оси частот.

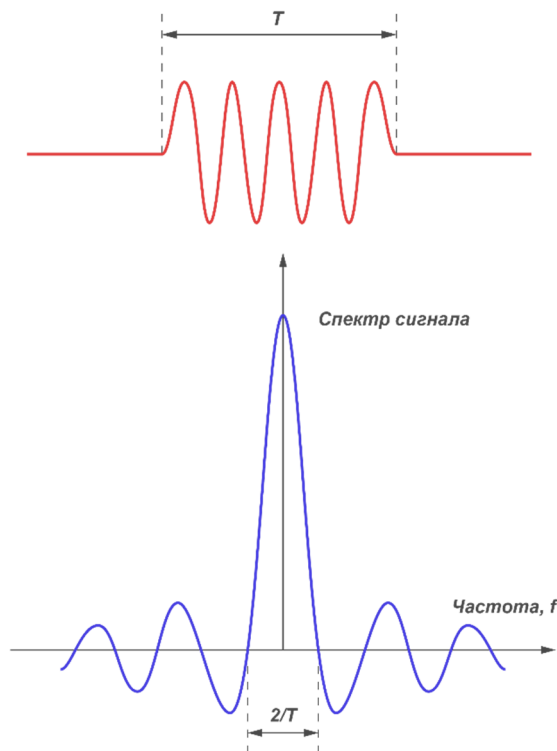


Рисунок 2.3 — Символ длительностью  $T$  и его спектр

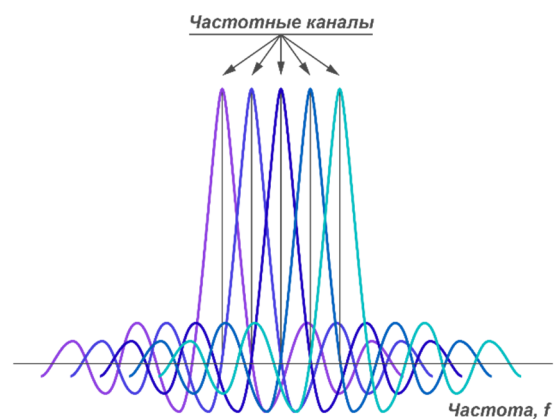


Рисунок 2.4 — Частотное разделение каналов с ортогональными несущими сигналами

В методе OFDM используются различные методы модуляции, позволяющие в одном дискретном состоянии сигнала (символе) закодировать несколько информационных битов. Так, в протоколе IEEE 802.11a используются двоичная и квадратурная фазовые модуляции (BPSK и QPSK), а в протоколах IEEE 802.11b и более поздних – двоичная (BDPSK) и квадратурная (QDPSK) относительная фазовая модуляция.

При квадратурной амплитудной модуляции (QAM) информация кодируется как за счет изменения фазы сигнала, так и за счет изменения его амплитуды. Например, в протоколе IEEE 802.11a используется модуляция 16QAM и 64QAM. В первом случае имеется 16 различных состояний сигнала, что позволяет закодировать последовательность из 4 битов в одном символе. Во втором случае имеется 64 возможных состояния сигнала. Это дает возможность закодировать последовательность из 8 бит в одном символе. На выходе модуляторов на сигналы накладываются ортогональные поднесущие, а также они дискретизируются по времени, что эквивалентно обратному быстрому преобразованию Фурье.

Квадратурная модуляция – разновидность амплитудной модуляции сигнала, которая представляет собой сумму двух несущих колебаний одной

частоты, но сдвинутых по фазе относительно друг друга на 90 градусов, каждая из которых модулирована по амплитуде своим модулирующим сигналом:

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad (2.5)$$

где  $I(t)$  и  $Q(t)$  — модулирующие сигналы,  $f_0$  — несущая частота QAM. QAM манипулятор можно представить в виде алгебраической схемы, изображенной на рисунке 2.5.

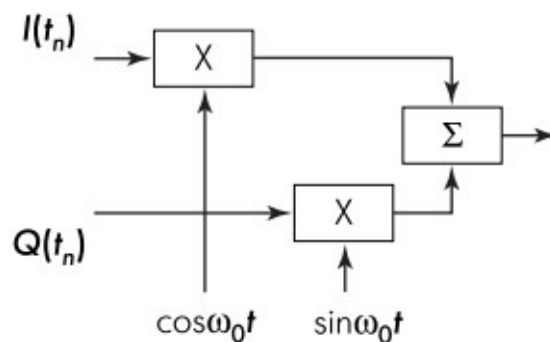


Рисунок 2.5 — Схема QAM-манипулятора

На вход модулятора поступают 2 информационных сигнала, которые перемножаются с несущими колебаниями  $\sin(\omega_0 t)$  и  $\cos(\omega_0 t)$ , далее эти колебания суммируются и передаются на выход модулятора.

Модулированные сигналы удобно представлять в созвездиях. Как пример на рисунке 2.6 приведено созвездие при модуляции QAM-16.

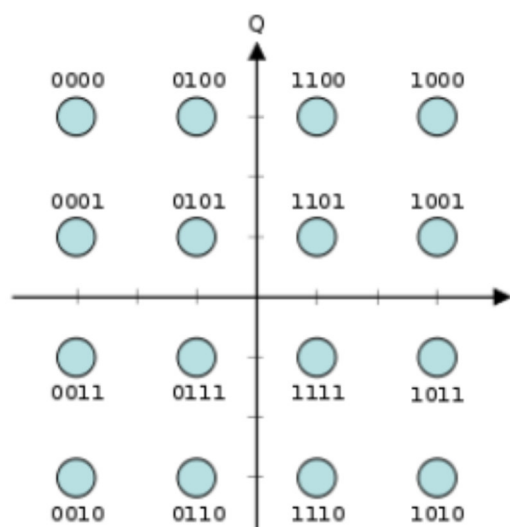


Рисунок 2.6 — Сигнальное созвездие 16-ти позиционного QAM сигнала

Далее данный сигнал идет на обратное преобразование Фурье, где его отсчеты считываются, и на выходе формируется готовый сигнал OFDM.

### 2.3. Осциллограф

Осциллограф — это электронный прибор, позволяющий наблюдать и измерять электрические сигналы в цепи во времени. С его помощью можно наблюдать и измерять форму электрических сигналов, напряжение, ток, определять частоту, временной промежуток и т.д.

Современные цифровые осциллографы зачастую обладают следующими элементами: усилитель и делитель напряжения, аналогово-цифровой преобразователь, контроллер, запоминающее устройство, оперативное запоминающее устройство, экран, органы управления (Рисунок 2.7).

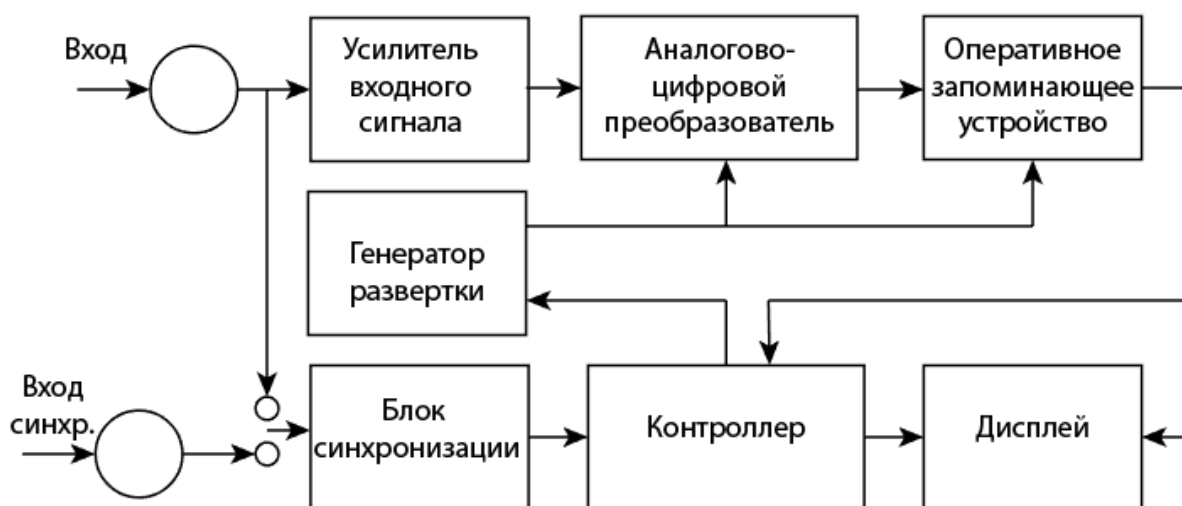


Рисунок 2.7 — Упрощенная структурная схема цифрового осциллографа

Входное напряжение, проходя через усилитель и делитель напряжения, преобразуется в дискретную последовательность кодов с помощью аналогово-цифрового преобразователя. Мгновенные значения напряжения, отображенные в кодах, записываются в оперативное запоминающее устройство, причем во время записи все предыдущие отсчеты сдвигаются на одну ячейку. Содержимое ячеек переписывается в запоминающее устройство после того, как выполнены заданные пользователем условия, что приводит к появлению на экране рисунка сигнала. Это связано с соответствием каждой ячейки запоминающего устройства точке на экране, отличающейся по цвету от фона.



### 3. Схема выполнения лабораторной работы

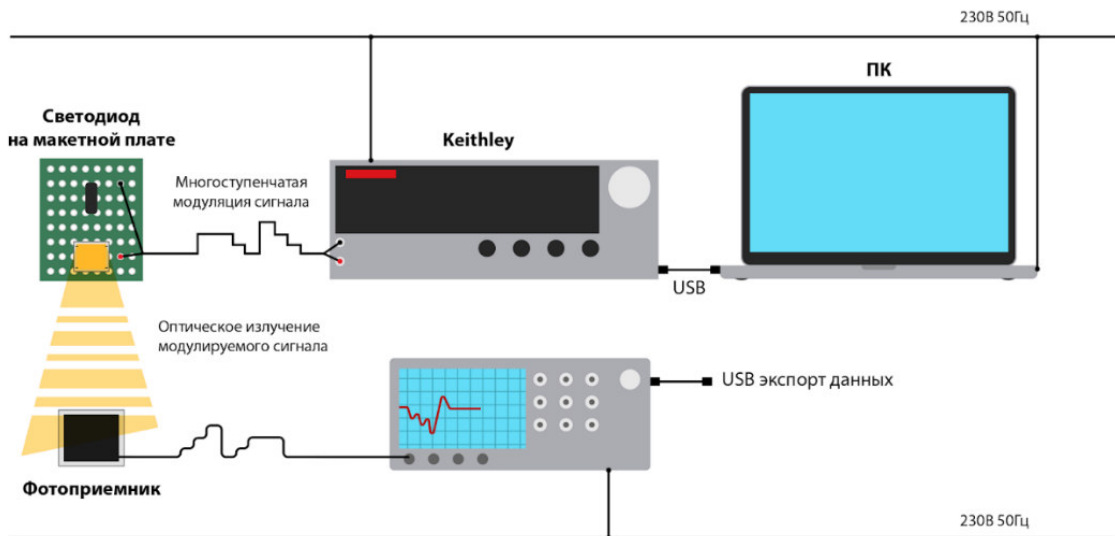


Рисунок 2.8 — Схематичное изображение используемого для выполнения лабораторной работы оборудования и его коммутации между собой

### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выводу из строя аппаратуры.

#### 4.1. Подготовка

##### 4.1.1. Определение объекта испытаний

4.1.1.1. Получив у преподавателя указания о том, какой светодиод необходимо использовать для модуляции, необходимо визуально убедиться в целостности его элементов, записать название, рабочие характеристики, серийный номер;

4.1.1.2. Получив у преподавателя указания о том, какой фотодиод необходимо использовать для измерений, необходимо визуально убедиться в целостности его элементов, записать название, рабочие характеристики, серийный номер.

##### 4.1.2. Подключение источника-измерителя Keithley 2611B

4.1.2.1. Соединить источник-измеритель Keithley 2611B и используемый в лабораторной работе ПК посредством сетевого кабеля LAN, используя LAN разъем источника-измерителя Keithley 2611B, расположенный на задней панели прибора;

4.1.2.2. Включить питание источника-измерителя Keithley 2611B;

4.1.2.3. Разместить используемые для соединения с исследуемым светодиодом провода, совмещенные с зажимом, соответствующим топологии исследуемого светодиода, в разъем CHANNEL A,

расположенный на задней панели источника-измерителя Keithley 2611В, каналы HI и LO соответствуют аноду и катоду исследуемого светодиода;

**4.1.2.4.** Соблюдая полярность, соединить исследуемый светодиод с зажимами;

**4.1.2.5.** Нажать клавишу «MENU», расположенную на передней панели источника-измерителя Keithley 2611В (Рисунок 4), после чего, используя поворот вращающегося управляющего кольца для выбора, нажатие на кольцо для перехода в выбранный пункт меню, реализовать следующий алгоритм: LAN→STATUS→IP-ADDRESS. Записать IP адрес. Использовать клавишу «EXIT» для выхода в рабочее окно прибора;

**4.1.2.6.** Запустить на используемом в лабораторной работе ПК интернет-браузер Internet Explorer. В адресной строке интернет-браузера вписать IP адрес, полученный в пункте 4.1.2.5;

**4.1.2.7.** В открывшемся Web интерфейсе выбрать вкладку «TSP Express», после чего нажать кнопку «Launch» для запуска программы;

**4.1.2.8.** В окне программы TSP Express выбрать пункт меню быстрого старта «Multiple SMU sweeps and measurements».

#### **4.1.3. Подключение осциллографа Keysight DSOX3034T**

**4.1.3.1.** Включить питание осциллографа Keysight DSOX3034T;

**4.1.3.2.** Установить токовый пробник Keysight N2843A в указанный преподавателем аналоговый порт осциллографа Keysight DSOX3034T (Рисунок 2.9);

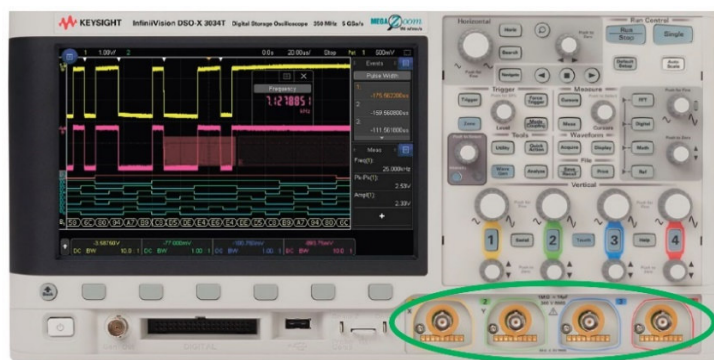


Рисунок 2.9 — Аналоговые каналы осциллографа Keysight DSOX3034T

**4.1.3.3.** Совместить токовый пробник Keysight N2843A с используемым фотодиодом, соблюдая полярность;

**4.1.3.4.** Разместить фотодиод на расстоянии не более 1 см от модулируемого светодиода. Рабочие стороны диодов должны быть друг напротив друга.

## **4.2. Проведение измерений**

### **4.2.1. Подача импульсного сигнала на светодиод**

**4.2.1.1.** Нажав клавишу «SMU Assignment», убедиться, что в окне Sweep расположен только канал А (localnode.smua (2602B)), канал Б (localnode.smub (2602B)) вынести в окно «Available» (Рисунок 2.10);

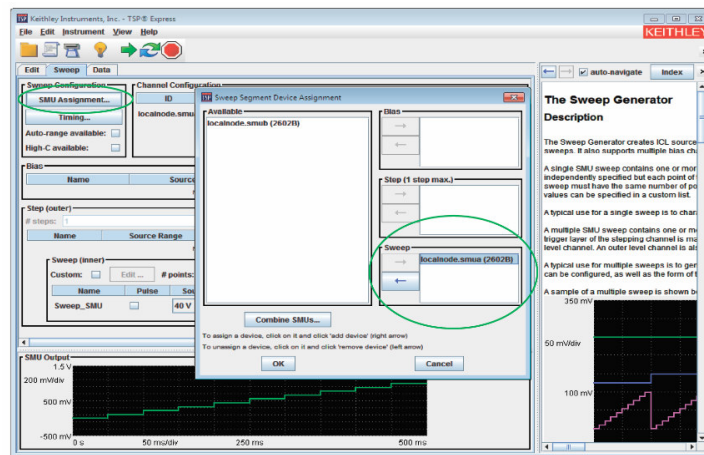


Рисунок 2.10 — Установка канала питания в программе TSP Express

**4.2.1.2.** Установить верхнее значение диапазона тока посредством выбора предела во вкладке «Meas. Range». Установить токовое ограничение, соответствующее исследуемому светодиоду, выбрав вкладку «Advanced» (Рисунок 2.11);

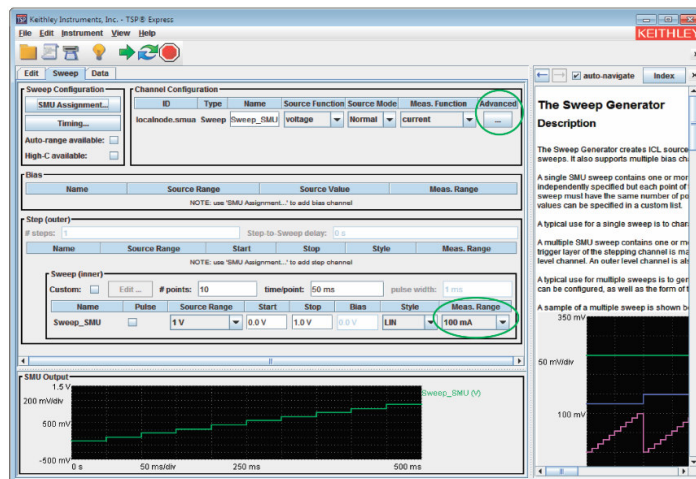


Рисунок 2.11 — Установка силы тока в программе TSP Express

**4.2.1.3.** Установить верхнее значение диапазона напряжения посредством выбора предела во вкладке «Source Range». Установить конечное напряжение, соответствующее исследуемому светодиоду, в окне программы «Stop» (Рисунок 2.12);

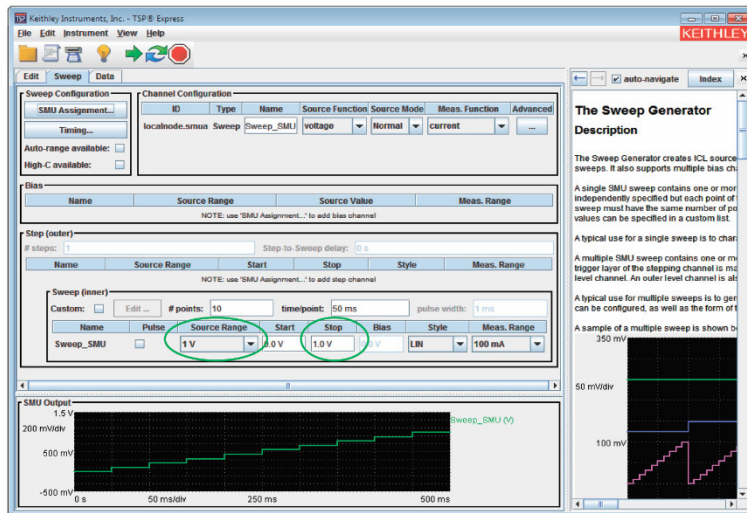


Рисунок 2.12 — Установка напряжения в программе TSP Express

**4.2.1.4.** Установить количество точек и время подаваемого сигнала в одной точке, вписав значения в окна «# points» и «time/point» соответственно (Рисунок 2.13);

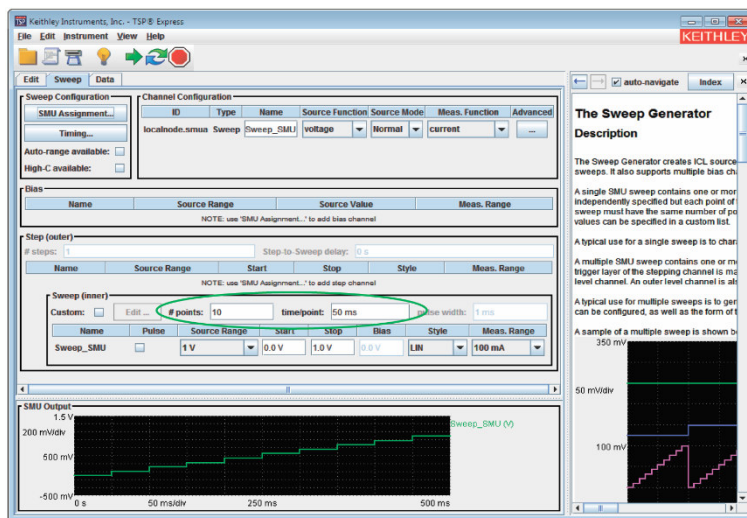


Рисунок 2.13 — Установка точек и времени измерений в программе TSP Express

**4.2.1.5.** Установить галочку в столбце «Pulse» (Рисунок 2.14). Ширину импульса установить в окне «pulse width»;



Рисунок 2.14 — Выбор импульсного режима в программе TSP Express



4.2.1.6. Подать сигнал в импульсном режиме, нажав клавишу

4.2.2. Детектирование модулированного сигнала

4.2.2.1. Нажать клавишу «Run/Stop» осциллографа Keysight DSOX3034T. Аналоговый канал с размещенным токовым пробником Keysight N2843A должен быть включен;

4.2.2.2. Нажать клавишу «Auto Scale» для поиска сигнала, дальнейшее масштабирование осуществлять при помощи вращающихся колец масштабирования, соответствующих каждому аналоговому разъему (Рисунок 2.15);

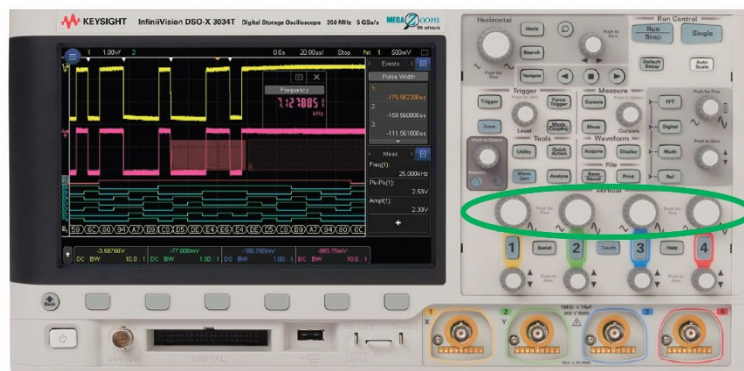


Рисунок 2.15 — Элементы поиска сигнала осциллографа Keysight DSOX3034T

4.2.2.3. При нахождении сигнала нажать клавишу «Single» для проведения разового измерения;

4.2.2.4. Разместить USB носитель в USB порте. Сохранить полученные данные в формате .csv на USB носитель.

### **4.3. Обработка результатов**

Обработать полученные массивы данных с целью описания и графического представления полученного модулированного сигнала. Сравнить полученный на осциллографе сигнал с импульсным сигналом, подаваемым на светодиод.

### **5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

### **6. Рекомендуемый список литературы для ознакомления**

- ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи;
- Источники-измерители SourceMeter (SMU) серии 2600B [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://ru.tek.com/keithley-sourcemeasure-units/smu-2600b-series-sourcemeater>. – Заглавие с экрана;
- InfiniiVision 3000T X-Series Oscilloscopes [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-04570/data-sheets/5992-0140.pdf>. – Заглавие с экрана;
- Rohling H. (ed.). OFDM: concepts for future communication systems. – Springer Science & Business Media, 2011;
- Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов т. 2., глава 13 – Рипол Классик, 1973.

### **7. Контрольные вопросы**

- Устройство и принцип работы фотодиода;
- Понятие модуляции и ее простейшие виды;
- OFDM модуляция;
- Квадратурная модуляция;
- Устройства и принцип работы осциллографа.



### Лабораторная работа 3.

#### Зависимость спектра светодиода от параметров его питания

##### 1. Цель

Исследование изменения спектральных характеристик светодиодов при изменении питающего напряжения.

##### 2. Краткие теоретические сведения

###### 2.1. Интегрирующая сфера

Интегрирующая сфера – полая конструкция в форме сферической оболочки, внутренняя поверхность которой покрыта однородным диффузно отражающим белым материалом, спектральный коэффициент отражения которого равномерен для всего видимого диапазона.

Использование красок и порошков, обладающих высоким коэффициентом отражения, для внутреннего покрытия, а также специальной методики окрашивания, позволяет достичь коэффициент отражения, близкий к 100 %, и диффузное отражение по закону Ламберта (Рисунок 3.1).

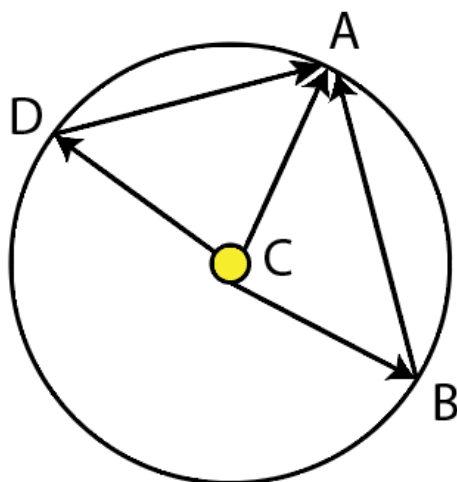


Рисунок 3.1 — Принцип распределения излучения в интегрирующей сфере

Так как освещенность в произвольно выбранной на внутренней поверхности сферической оболочки точке А складывается из прямой освещенности источника излучения С и дополнительной освещенности от условных точек отражения В, D, то освещенность в точке А равна:

$$E = E_1 + \frac{\Phi}{4\pi R^2} * \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (3.1)$$

где  $E_1$  – прямая освещенность в точке от источника излучения С [лк],  $R$  – внутренний радиус интегрирующей сферы,  $\rho$  – отражающая способность внутренней поверхности интегрирующей сферы.

При размещении диффузно отражающего белого экрана на отрезке AC прямая освещенность в точке A от источника излучения C равна нулю,  $E_1 = 0$ , следовательно можно упростить уравнение (3.1):

$$E = \frac{\Phi}{4\pi R^2} * \frac{\rho}{1 - \rho}. \quad (3.2)$$

## 2.2. Спектрометр

Спектром является распределение интенсивности электромагнитного излучения по длинам волн (диапазон длин волн видимого диапазона: 380 – 780 нм).

Оптические спектрометры – устройства, предназначенные для измерения спектра в координатах интенсивность света от длины волны или частоты.

Основные конструктивные элементы:

1. Оптическая щель. Оптическая щель спектрометра определяет его рабочие характеристики. Она пропускает и визуализирует излучение, поступающие в анализатор устройства. От ее ширины зависят такие параметры, как оптическое разрешение, пропускная способность, угол расходимости света.

2. Дифракционная решетка. Представляет собой устройство, состоящее из равноудаленных друг от друга щелей, обладающих одинаковой формой. Световая волна разбивается щелями решетки на отдельные пучки когерентного света, которые претерпевают дифракцию и интерферируют друг с другом, что приводит к разложению белого света в спектр, поскольку для разных длин волн максимумы интерференции оказываются под разными углами.

3. Детектор. В зависимости от устройства спектрометра и поставленной задачи детектором может служить как фотоприемное устройство, так и глаз человека.

Отклонение излучения производится либо преломлением в призме, либо дифракцией в дифракционной решетке. Схематическое изображение оптического спектрометра и расположение основных конструктивных элементов приведено на рисунке 3.2.



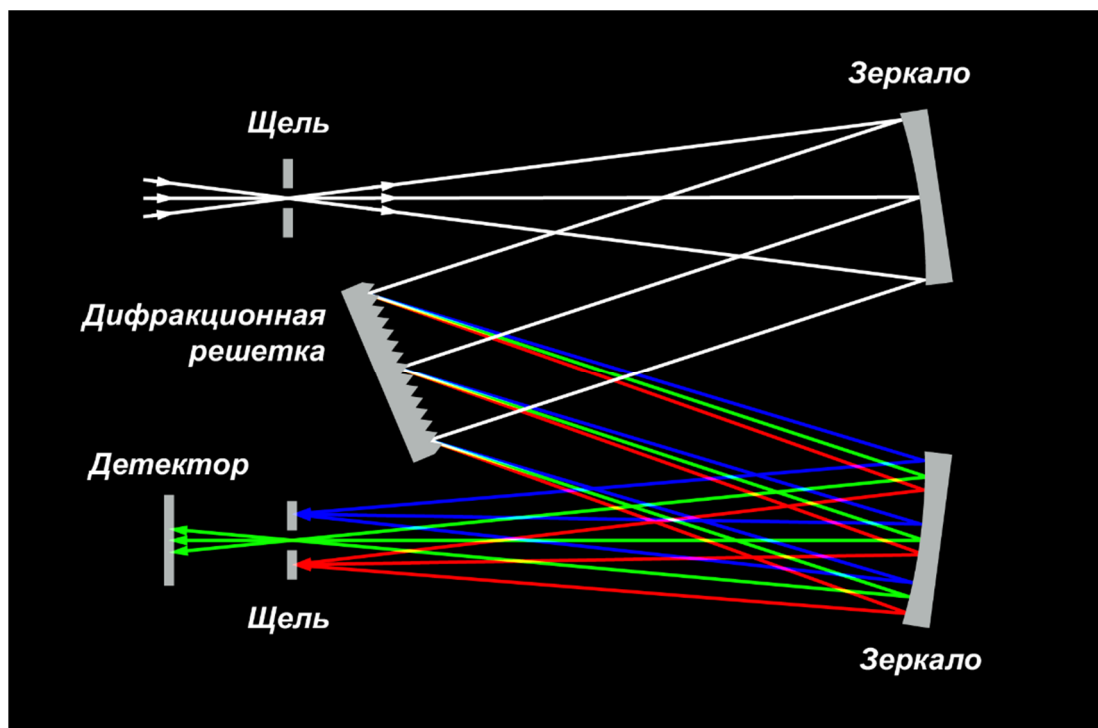


Рисунок 3.2 — Схематическое изображение оптического спектрометра на основе дифракционной решетки

### 3. Схема выполнения лабораторной работы

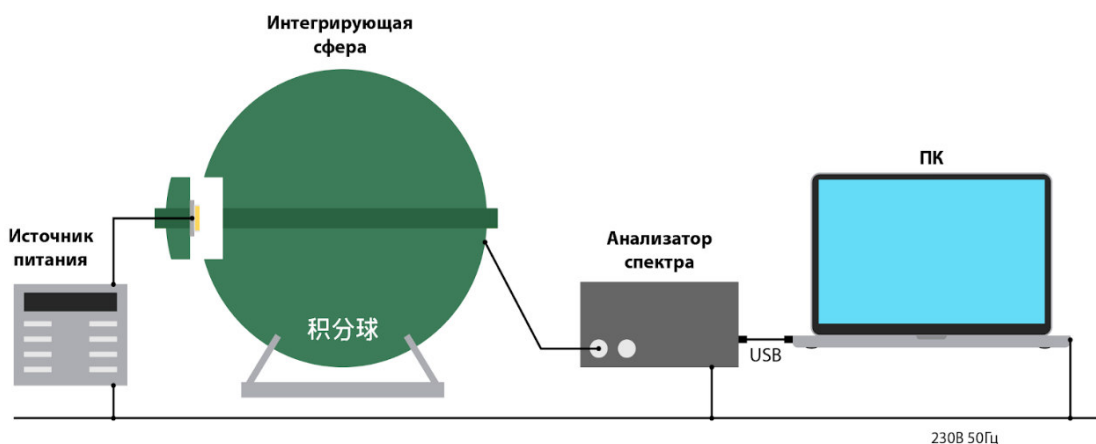


Рисунок 3.3 — Схематичное изображение используемого для выполнения лабораторной работы оборудования и его коммутации между собой

### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями по электробезопасности. Нарушение предъявляемых требований может привести к выводу из строя аппаратуры.

## 4.1. Подготовка

### 4.1.1. Определение объекта испытаний

Получив у преподавателя указания о том, какой светодиод необходимо использовать для измерений, необходимо визуально убедиться в целостности его элементов, записать название, рабочие характеристики, серийный номер.

### 4.1.2. Размещение исследуемого светодиода в сфере

4.1.2.1. Разместить исследуемый светодиод на головке питания источника питания LED300E (Рисунок 3.4) соблюдая полярность исследуемого светодиода;

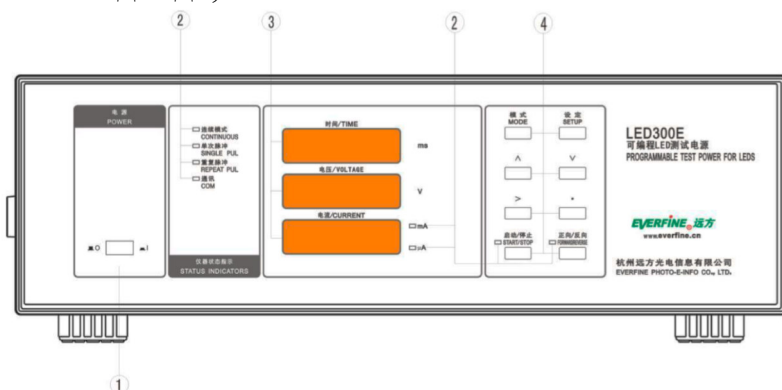


Рисунок 3.4 — Источник питания LED300E

4.1.2.2. Удалить заглушку технологического отверстия интегрирующей сферы Everfine;

4.1.2.3. Головку источника питания LED300E разместить в технологическом отверстии интегрирующей сферы Everfine.

### 4.1.3. Подключение спектрометра

4.1.3.1. Удалить заглушку входного окна спектрометра Hamamatsu PMA-12 (рисунок 3.5);



Рисунок 3.5 — Спектрометр Hamamatsu PMA-12 с размещенным приемным оптоволоконном

**4.1.3.2.** Удалить заглушку разъема для ввода оптического кабеля интегрирующей сферы Everfine;

**4.1.3.3.** Разместить приемное оптоволокно спектрометра Hamamatsu PMA-12 так, чтобы приемная часть волокна располагалась в разъеме для ввода оптического кабеля интегрирующей сферы Everfine;

**4.1.3.4.** Спектрометр Hamamatsu PMA-12 соединить посредством USB-кабеля с ПК с предварительно установленным программным обеспечением PMA6039-01;

**4.1.3.5.** Вставить ключ программы, расположенный на USB носителе, в используемый в лабораторной работе ПК.

## **4.2. Проведение измерений**

### **4.2.1. Установка питающего напряжения**

**4.2.1.1.** Включить питание источника питания LED300E;

**4.2.1.2.** Установить положение переключателя в положение «CAL» на задней панели источника питания LED300E;

**4.2.1.3.** Нажимать клавишу «SETUP» до выбора питающего напряжения;

**4.2.1.4.** Посредством нажатия клавиш  $\uparrow, \downarrow, \rightarrow$  установить значение питающего напряжения, соответствующее исследуемому светодиоду;

**4.2.1.5.** Нажимать клавишу «SETUP» до выбора номинального значения силы тока;

**4.2.1.6.** Посредством нажатия клавиш  $\uparrow, \downarrow, \rightarrow$  установить номинальное значения силы тока, соответствующее исследуемому светодиоду;

**4.2.1.7.** Установить положение переключателя в положение «TEST» на задней панели источника питания LED300E;

**4.2.1.8.** Подать питающее напряжение на исследуемый светодиод посредством нажатия клавиши «START/STOP» источника питания LED300E.

### **4.2.2. Снятие спектра исследуемого светодиода**

**4.2.2.1.** Включить питание спектрометра Hamamatsu PMA-12;

**4.2.2.2.** Запустить предустановленное программное обеспечение PMA6039-01 на используемом в лабораторной работе ПК;

**4.2.2.3.** Открыть рабочее окно программы PMA6039-01 для вывода спектра посредством нажатия клавиш Module  $\rightarrow$  Color (Рисунок 3.6);

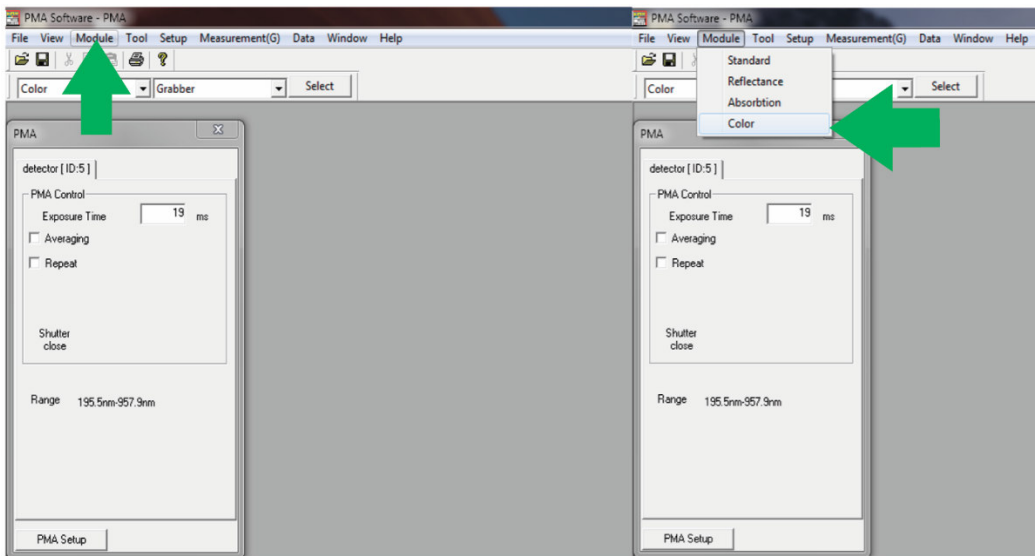


Рисунок 3.6 — Действия для открытия рабочего окна программы PMA6039-01 для вывода спектра

**4.2.2.4.** Нажать клавишу «Measure» для проведения разового измерения спектра исследуемого светодиода;

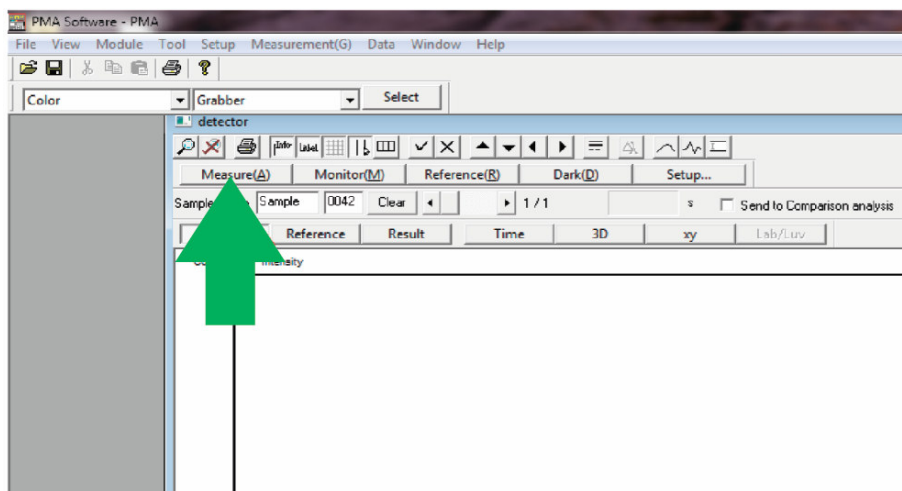


Рисунок 3.7 — Рабочее окно программы PMA6039-01 для вывода спектра

**4.2.2.5.** Прекратить подачу питающего напряжения на исследуемый светодиод посредством нажатия клавиши «START/STOP» источника питания LED300E;

**4.2.2.6.** Сохранить полученные данные в текстовом формате в папке Вашей группы;

**4.2.2.7.** Повторить пункты 4.2.1.2 - 4.2.1.8, 4.2.2.4 - 4.2.2.6 не менее 10 раз, изменяя питающее напряжение исследуемого светодиода с шагом, указанным преподавателем.

#### **4.3. Обработка результатов**

Обработать полученные массивы данных с целью графического представления спектров исследуемого светодиода при разных значениях питающего напряжения.

#### **5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

#### **6. Рекомендуемый список литературы для ознакомления**

— ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи;

— PMA-12 Photonic multichannel analyzer C10027-01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.hamamatsu.com/jp/en/C10027-01.html>.  
Заглавие с экрана.

#### **7. Контрольные вопросы**

- Спектр электромагнитного излучения;
- Устройство и принцип работы интегрирующей сферы;
- Закон Ламберта;
- Устройство и принцип работы спектрометра.

## Лабораторная работа 4.

### Пространственное распределение силы света светодиодного осветительного прибора

#### 1. Цель

Исследование кривой силы света светодиодного осветительного прибора методом измерения в дальнем поле и расчет светового потока осветительного прибора.

#### 2. Краткие теоретические сведения

##### 2.1. Кривая силы света (КСС)

Распределение силы света – это параметр, описывающий область значений силы света осветительного прибора и соответствующие направления, задаваемые меридиональным и экваториальным углами в системе фотометрирования. Систему фотометрирования можно получить путем сечения фотометрического тела осветительного прибора меридиональными и экваториальными плоскостями или поверхностями. Фотометрическим телом считают область пространства, ограниченную радиус-векторами, обладающими длиной, пропорциональной силе света осветительного прибора в соответствующем направлении, начало которых лежит на излучающей поверхности осветительного прибора. Полученные зависимости представляют в графической или табличной форме.

Кривая силы света, или, как принято сокращать в литературе — КСС, есть распределение силы света, получаемое сечением фотометрического тела осветительного прибора характерной плоскостью или поверхностью. КСС принято изображать в форме графика. Примеры таких графиков КСС для меридиональных сечений приведены на рисунке ниже.

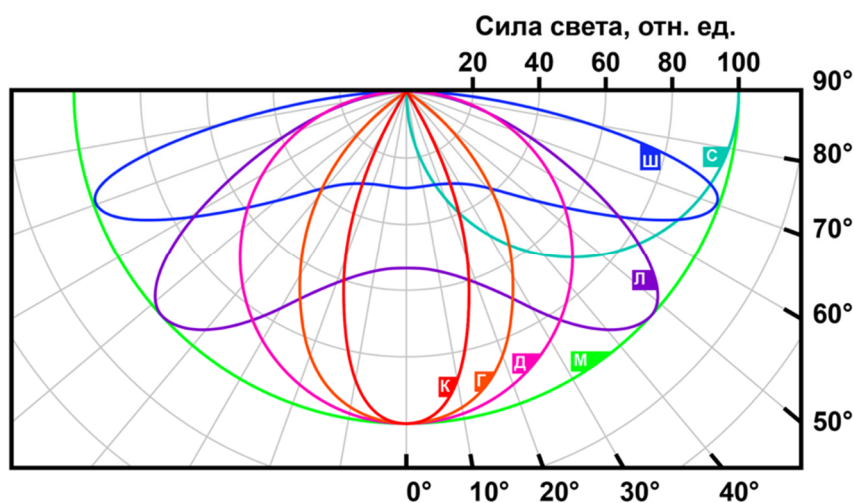


Рисунок 4.1 — Типы меридиональных КСС осветительных приборов, К – концентрированная, Г – глубокая, Д – косинусная, Л – полуширокая, Ш – широкая, М – равномерная, С – синусная

Кроме меридиональных КСС, также принято выделять экваториальные КСС осветительного прибора. На рисунке 4.2 представлена схема определения экваториальных КСС, а на рисунке 4.3 – типичные условные экваториальные КСС осветительных приборов.

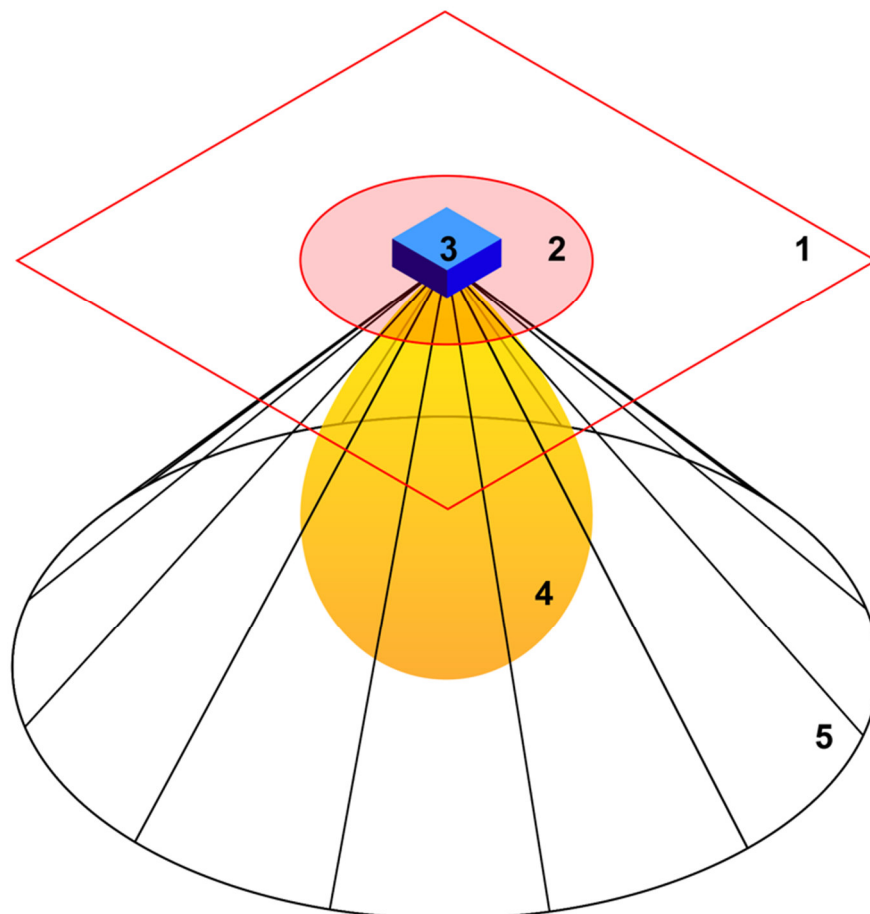


Рисунок 4.2 — Определение условной экваториальной КСС осветительного прибора, 1 – экваториальная плоскость, 2 – условная экваториальная КСС, 3 – осветительный прибор, 4 – фотометрическое тело осветительного прибора, 5 – коническая поверхность, ограничивающая фотометрическое тело осветительного прибора

Правильное построение серии КСС осветительного прибора позволяет не только осуществить моделирование его фотометрического тела, но и определить сферу применения осветительного прибора. Кроме того, обладая знаниями о КСС осветительного прибора, можно оптимизировать конструкцию его светоизлучающих, отражающих и рассеивающих элементов, что позволит не только повысить суммарное КПД осветительного прибора, но и, например, ограничить его защитные углы при необходимости.

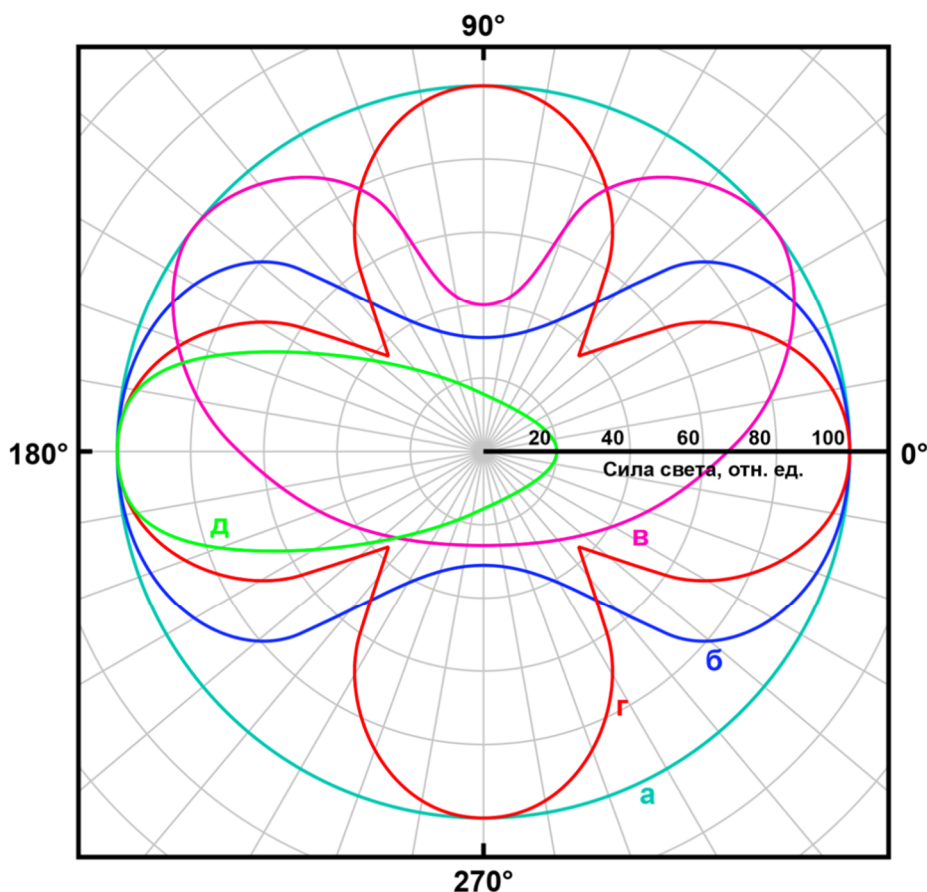


Рисунок 4.3 — Типы условных экваториальных КСС осветительных приборов, а – круглосимметричная, б – осевая, в – боковая, г – многолучевая, д – асимметричная

## 2.2. Гониофотометр

Гониофотометр – это прибор, предназначенный для измерения распределения силы света осветительного прибора или источника света, состоящий из поворотного устройства (гониометра) и фотоприемного устройства (фотометра). Выделяют два вида гониофотометров: гониофотометр ближнего поля (зоны) и гониофотометр дальнего поля (зоны). Принципиальным отличием двух типов гониофотометров является расстояние, на котором расположен измеряемый осветительный прибор от фотометра. Так, для получения корректных данных при светотехнических измерениях параметров осветительного прибора с помощью гониофотометра дальней зоны необходимо обеспечить соотношение расстояния от излучающей плоскости осветительного прибора до фотометра к наибольшему линейному размеру излучающей плоскости как 10 к 1. Причем, данное соотношение закреплено нормами, регулирующими корректность проведения светотехнических измерений. При измерениях, проводимых с помощью гониофотометра ближней зоны, выполнение такого



соотношения не требуется, что обуславливается особенностью конструкции гониометра и фотометра такого типа гониофотометра.

При проведении измерений на гониофотометре ближней зоны светильник фиксируется на неподвижной опоре, а фотометр вращается вокруг излучающей поверхности. Изображение гониофотометра ближней зоны приведено на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 — Гониофотометр ближней зоны компании TechnoTeam RiGO801 – 600

В противоположность этому, при проведении измерений на гониофотометре дальней зоны фотометр остается неподвижным, а источник света вращается. На рисунке 4.5 ниже изображен гониофотометр дальней зоны.

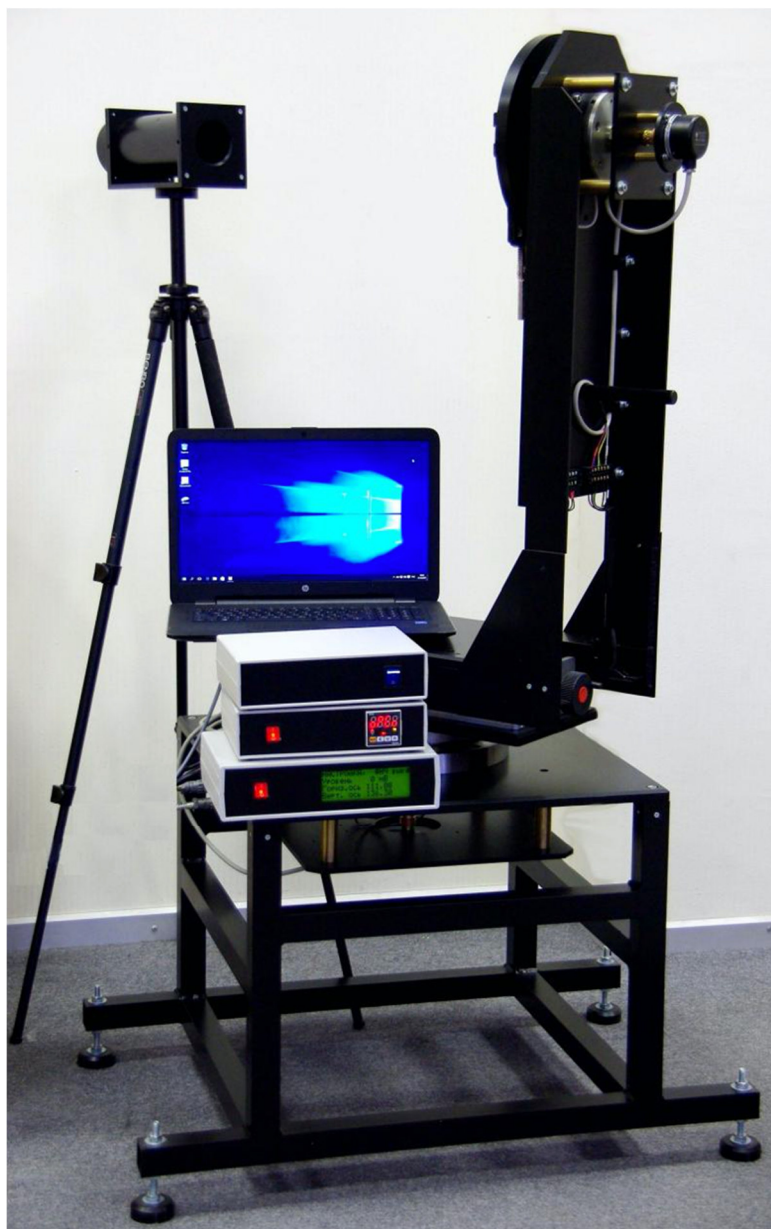


Рисунок 4.5 — Гониофотометр дальней зоны Флакс компании ООО «Архилайт»

Несмотря на принципиальные различие в схемах измерений, условия светотехнических измерений для обоих типов гониофотометров одинаковые. Так, оба типа гониофотометров необходимо располагать в темной комнате при отсутствии внешних источников света. В случае использования гониофотометра ближней зоны габариты темной комнаты могут быть значительно меньше, чем при использовании гониофотометра дальней зоны – несколько десятков метров при необходимости измерения светильников, обладающих существенными линейными размерами излучающей поверхности.

### 2.3. Метод измерения светового потока с помощью гониофотометра дальней зоны

В общем случае для определения светового потока по распределению силы света при измерении осветительного прибора в системе фотометрирования  $C, \gamma$  используют выражение:

$$\Phi = \int_{C=0}^{2\pi} \int_{\gamma=0}^{\pi} I(C, \gamma) \sin \gamma \cdot d\gamma \cdot dC, \quad (4.1)$$

где  $I(C, \gamma)$  — сила света осветительного прибора в направлении, определяемом углами  $C, \gamma$

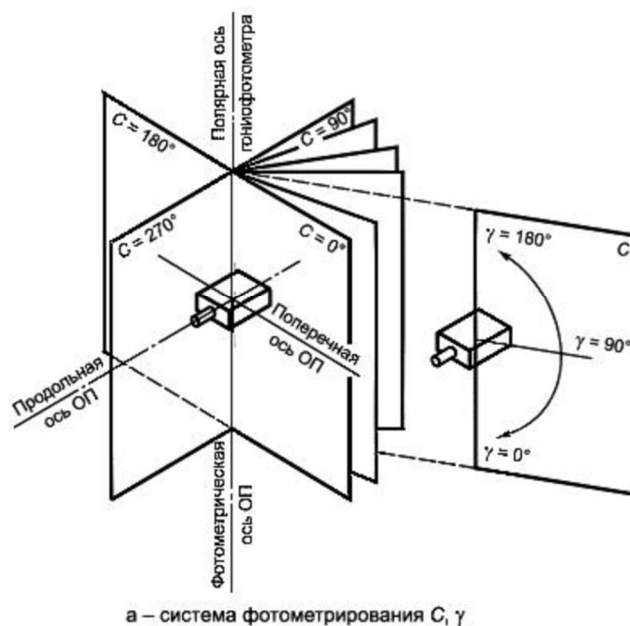


Рисунок 4.6 — Схематичное изображение принципа системы фотометрирования  $C, \gamma$

При наличии массива данных в результате измерений на гониофотометре, содержащего три подмассива значений: экваториальных углов ( $C$ ), меридиональных углов ( $\gamma$ ) и сил света ( $I$ ) выражение (4.1) принимает следующий вид:

$$\Phi = \int_{C=C_0}^{C_n} \int_{\gamma=\gamma_0}^{\gamma_m} I(C, \gamma) \sin \gamma \cdot d\gamma \cdot dC, \quad (4.2)$$

где  $m + 1$  и  $n + 1$  — число меридиональных и экваториальных углов соответственно.

Если нахождение приближенного значения светового потока для имеющегося массива углов с определенным шагом  $\Delta C$  и  $\Delta \gamma$  является достаточным, то выражение (4.2) может быть преобразовано следующим образом:

$$\Phi = \Delta C \Delta \gamma \left\{ \frac{f_{00} + f_{n0} + f_{0m} + f_{nm}}{4} + \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^{n-1} (f_{i0} + f_{im}) + \sum_{j=1}^{m-1} (f_{0j} + f_{nj}) \right] + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} f_{ij} \right\}, \quad (4.3)$$

где  $f_{ij} = I_{ij} \sin \gamma_j$ ,  $\Delta C = \frac{C_n - C_0}{n}$ ,  $\Delta \gamma = \frac{\gamma_m - \gamma_0}{m}$ .

### 3. Схема выполнения лабораторной работы

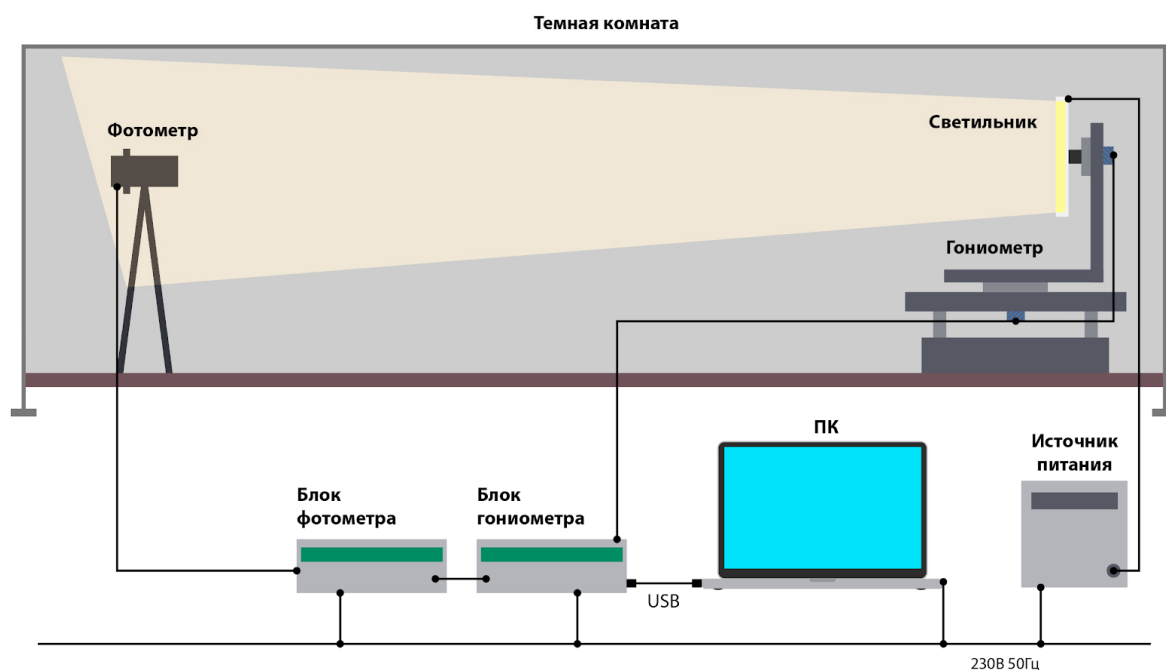


Рисунок 4.7 — Схематичное изображение используемого для выполнения лабораторной работы оборудования и его коммутации между собой

### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с основными требованиями у оператора оборудования темной комнаты. Нарушение предъявляемых оператором требований может привести к загрязнению темной комнаты, что, в свою очередь, внесет существенную погрешность при проведении измерений.

В общем случае все работы, проводимые для успешного выполнения лабораторной работы, можно разделить на 3 основных этапа: этап подготовки, этап проведение измерений, этап обработки результатов.

#### **4.1. Подготовка**

##### **4.1.1. Определение объекта испытаний**

Получив у преподавателя указания о том, какой световой прибор использовать для измерений, необходимо визуально убедиться в целостности его элементов и замерить линейные размеры светоизлучающей области. Записать полученные габариты.

##### **4.1.2. Выбор оснастки для крепления**

Крепление осветительного прибора на гониометр, несмотря на кажущуюся изначальную простоту, является крайне важной частью подготовки к измерениям. Кроме того, что осветительный прибор необходимо закрепить таким образом, чтобы ось вращения проходила строго по центру излучающей поверхности в двух плоскостях, крепление должно быть выполнено таким образом, чтобы при вращении осветительного прибора отсутствовали его вибрации и люфты, что может привести к нежелательным погрешностям в процессе измерений. Более того, конструкция многих светильников не предполагает стандартное крепление, что приводит к необходимости изготовления из подручных средств специальных держателей для фиксации светильника на гониометре.

##### **4.1.3. Установка светильника на гониометр**

После выбора/изготовления оснастки необходимо закрепить осветительный прибор на гониометр таким образом, чтобы оси вращения проходили через центр излучающей поверхности. Данную операцию легче всего проделать с помощью лазерного уровня, способного строить проекции в двух плоскостях. На рисунке 4.8 приведено схематическое расположение светильника и проекций лазерного уровня на его излучающую поверхность при верном расположении светильника на гониометре. Стоит отметить, что для верного определения расположения светильника пересечение проекций лазерного уровня должно находиться на одной высоте с центром чувствительной области фотометра и осью вращения светильника в плоскости, параллельной плоскости чувствительной области фотометра.

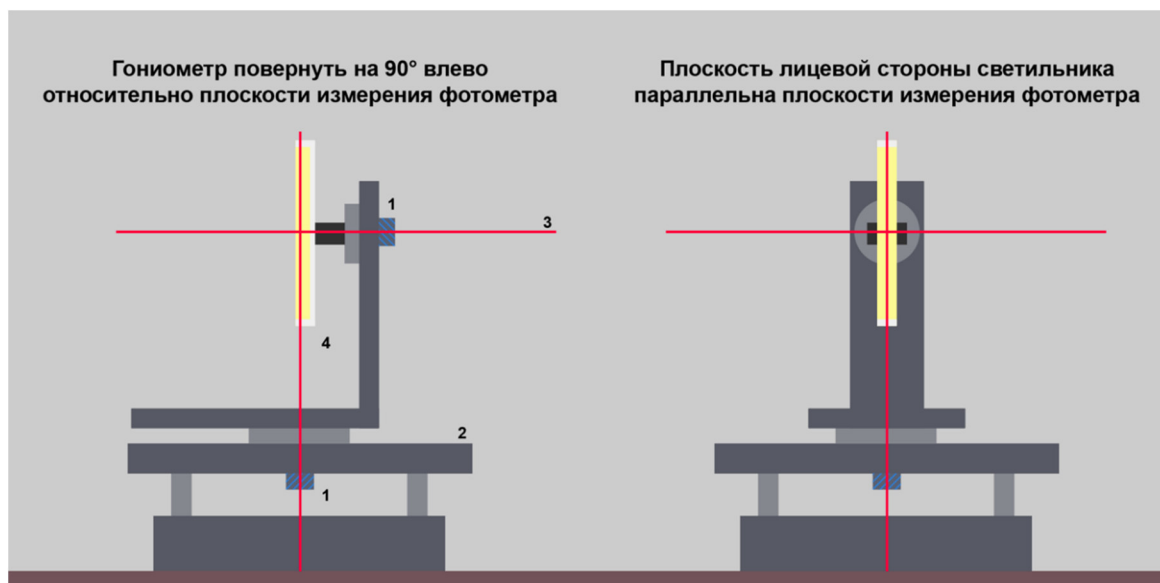


Рисунок 4.8 — Обозначение верного закрепления светильника в двух плоскостях, слева — вид при повороте гониометра, справа — в нулевом сечении, где 1 – датчики угла поворота, 2 – неподвижное основание гониометра, 3 – проекции лазерного уровня, 4 – исследуемый осветительный прибор

#### 4.1.4. Выставление оптической оси

Для получения корректных данных центр чувствительной области фотометра и центр осей вращения светильника должны находиться на одной оптической оси, а плоскость чувствительной области и плоскость передней излучающей поверхности светильника должны быть параллельны. Для верного выставления вышеупомянутых параметров используют метод коллимации с помощью лазера видимого излучения, согласно тому, как изображено на рисунке 4.9 далее.

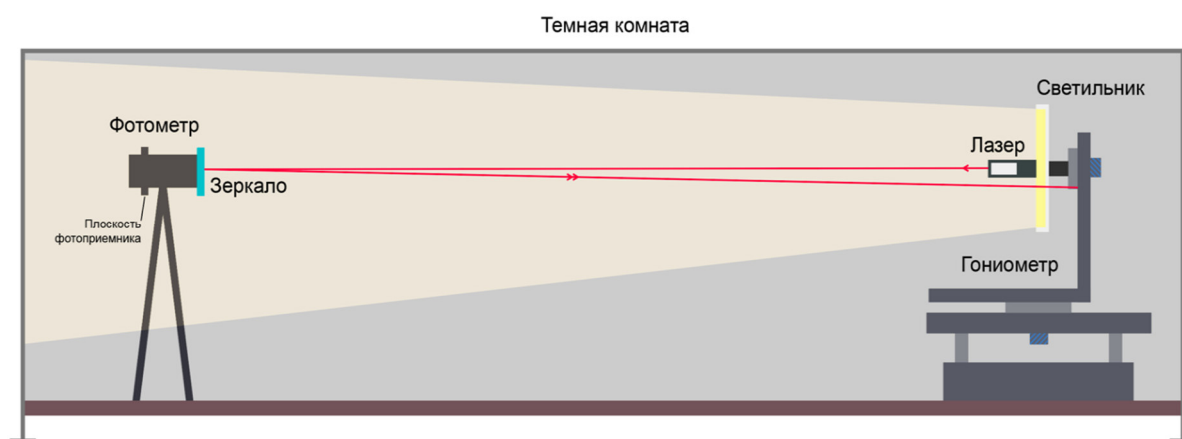


Рисунок 4.9 — Схема нахождения оптической оси с помощью коллиматора, красными линиями изображены лучи с допустимым отклонением, радиус окружности допустимого отклонения составляет порядка нескольких сантиметров от центра излучения лазера

#### **4.1.5. Определение расстояния измерений**

Для верного расчета светотехнических параметров необходимо знать точное расстояние от центра излучающей поверхности светильника до чувствительной плоскости фотоприемника. Данное расстояние необходимо измерить с помощью лазерного дальномера и зафиксировать. Важно отметить, что расстояние необходимо измерять не до ближайшей к гониометру плоскости фотометра (плоскость торца диафрагмы), а до плоскости расположения фотоприемника. Для лучшего понимания данная плоскость обозначена на рисунке 4.9.

#### **4.1.6. Прогрев светильника**

Перед проведением испытаний осветительный прибор необходимо вывести на рабочий режим. Существует несколько способов определения того, что светильник находится в рабочем режиме, однако для упрощения процедуры следует прогревать светильник (оставлять его во включенном режиме перед измерениями) в течение 30 минут, что является достаточным временем для всех типов светильников, используемых в лабораторных целях. Для осуществления прогрева следует выполнить следующие операции:

**4.1.6.1.** Подключить светильник к источнику питания, визуально убедившись в исправности прибора;

**4.1.6.2.** Выставить требуемые для светильника параметры питания на источники питания;

**4.1.6.3.** Подать питание на светильник;

**4.1.6.4.** Визуально убедившись в его корректной работе, оставить его во включенном состоянии на 30 минут;

**4.1.6.5.** В течение всего времени не создавать дополнительного охлаждения/разогрева светильника за исключением того, которое задумано его конструкцией.

### **4.2. Проведение измерений**

#### **4.2.1. Запуск программы и внесение данных**

**4.2.1.1.** Запустить программу Фотон V11.0 с помощью ПК, подключенного через USB к установке ФЛАКС компании Архилайт;

**4.2.1.2.** Выставить ранее измеренную дистанцию с точностью до 1 мм в графе «Дистанция в метрах» интерфейса программы, изображенного на рисунке 4.10;

**4.2.1.3.** С помощью коэффициентов усиления и уровнем сигнала в реальном времени подобрать оптимальный коэффициент усиления.

Оптимальный коэффициент усиления в общем случае должен быть подобран таким образом, чтобы полоса уровня сигнала в пике (при измерении в одном сечении) не заполнялась более чем на 2/3. В случае, если изменение коэффициентов не приводит к изменению уровня сигнала и значение всегда остается нулевым, необходимо зайти в настройки, нажав

кнопку «сервис», находящуюся в левой части экрана, и с помощью кнопки «Поиск COM-портов» обнаружить порт USB в выпадающем левее списке. После чего необходимо нажать кнопку «Сохранить информацию». Вернувшись на главный экран программы, можно будет обнаружить, что отображение уровня сигнала появилось.

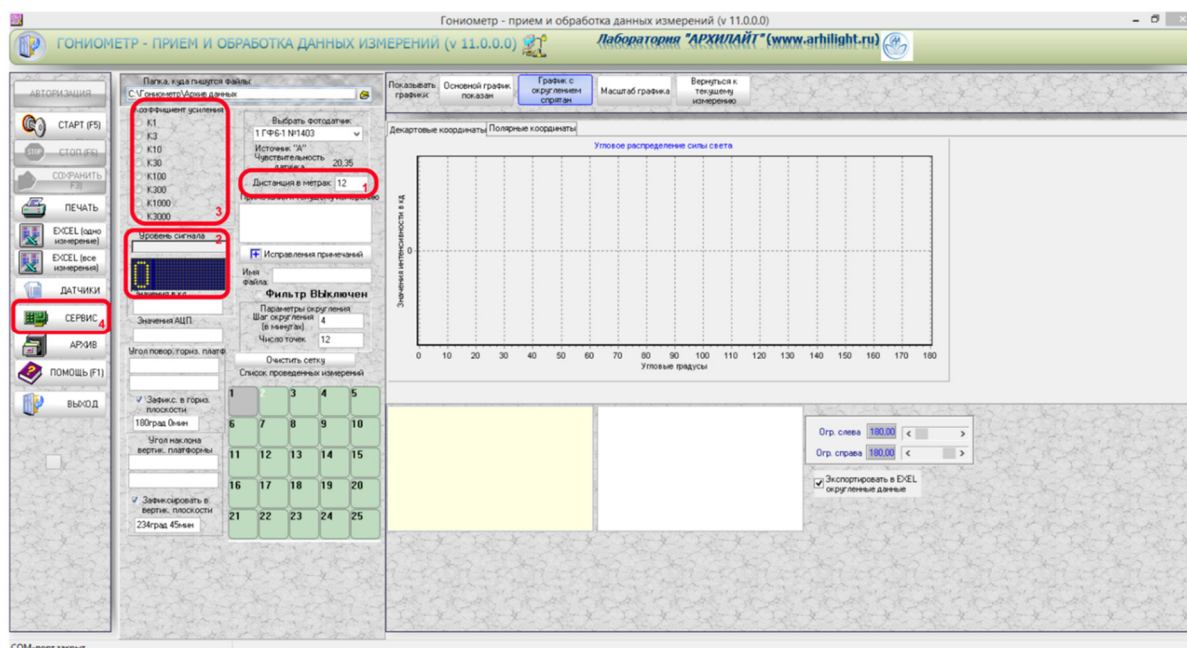


Рисунок 4.10 — Интерфейс программы Фотон, 1 – дистанция в метрах, 2 – уровень сигнала в реальном времени, 3 – коэффициенты усиления, 4 – настройки

#### 4.2.2. Измерение меридиональных КСС

4.2.2.1. Нажать кнопку «Старт», располагающуюся в левой части экрана, запустив цикл измерения одного сечения;

4.2.2.2. Плавно осуществить вращение против часовой стрелки гониометра в горизонтальной плоскости на угол, позволяющий сместить поток излучения осветительного прибора таким образом, чтобы излучение в крайней точке НЕ попадало на фотометр, вернув гониометр в изначальное положение, аналогично выполнить вращение в другое направление. Под понятием «плавно» имеется в виду — без резких движений, с угловой скоростью порядка 30°/с;

4.2.2.3. Повторить предыдущий пункт дважды;

4.2.2.4. Нажать кнопку «Старт» повторно, закончив цикл измерения.

При корректном проведении измерения интерфейс программы отобразит полученное угловое распределение силы света. Данные операции будет необходимо повторить с выбранным шагом поворота



светильника на гониометре в вертикальной плоскости необходимое количество раз.

#### 4.2.3. Сохранение и экспорт полученных данных

4.2.3.1. Нажать кнопку «Сохранить», подождать пока блок интерфейса программы «Список проведенных измерений» опустеет;

4.2.3.2. Нажать кнопку «Архив» и в появившемся окне выбрать необходимую серию измерений с помощью «списка файлов архива», находящегося в левой части экрана. Интерфейса данного окна программы изображен на рисунке 4.11;

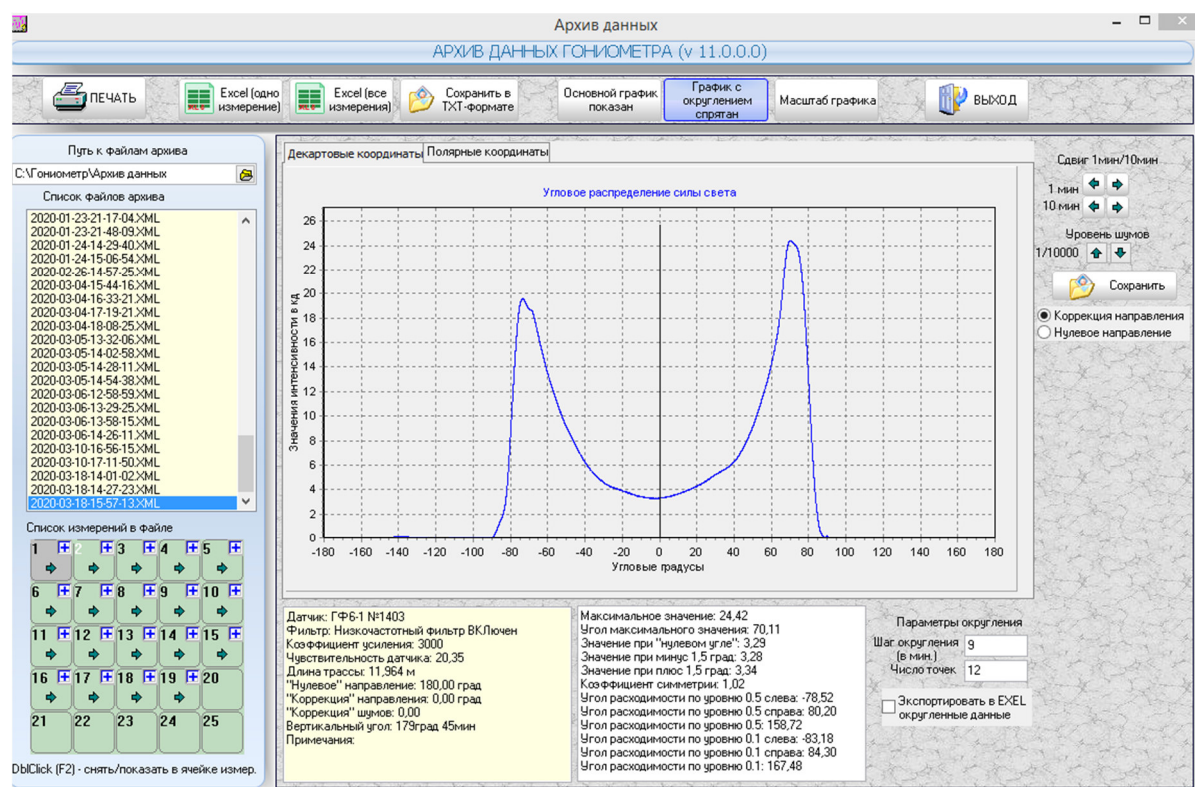


Рисунок 4.11 — Интерфейс работы с архивами данных и экспорта данных программы Фотон V11.0

4.2.3.3. Нажать кнопку «Excel (все измерения)» и выбрать максимальный шаг измерений. Подождать, пока программа откроет файл Excel с сохраненными данными;

4.2.3.4. Сохранить открывшийся массив данных в удобное для последующего экспорта с компьютера место;

4.2.3.5. Экспортировать данные с компьютера и закрыть программу.

#### 4.2.4. Завершение проведения измерений

4.2.4.1. Выключить компьютер и, отключив подачу питания на светильник, выключить источник питания;

**4.2.4.2.** Выключить блоки гониофотометра и осуществить демонтаж светильника с гониометра;

**4.2.4.3.** При необходимости также демонтировать оснастку для крепления светильника.

### **4.3. Обработка результатов**

**4.3.1.** Рассчитать световой поток, используя выражение (4.3) и полученный массив данных светового потока исследуемого источника. Для расчета потока могут быть использованы программные средства любого вида.

**4.3.2.** Обработать полученный массив данных с целью графического представления полученных КСС.

## **5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

## **6. Рекомендуемый для ознакомления список литературы**

— ГОСТ Р 54350-2015 Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний

— ГОСТ Р МЭК 60598-1-2011 Светильники. Часть 1. Общие требования и методы испытаний

— ГОСТ Р 56231-2014/IEC/PAS 62722-2-1:2011 Светильники. Часть 2-1. Частные требования к характеристикам светильников со светодиодными источниками света.

## **7. Контрольные вопросы**

— Кривая силы света;

— Устройство и принцип работы гониофотометра;

— Ближняя и дальняя зоны.

## **Лабораторная работа 5.**

### **Светотехнический расчет освещения с использованием программных средств.**

#### **1. Цель**

Проведение светотехнического расчета освещения общего назначения в помещении с использованием программного комплекса DIALux.

#### **2. Краткие теоретические сведения**

##### **2.1. Что такое DIALux?**

DIALux является самым широко используемым программным комплексом для планировки освещения в разнообразных отраслях. Программа разработана немецкой компанией DIAL, также осуществляющей поддержку и развитие программы уже на протяжении более 20 лет. Во всем мире около миллиона инженеров в области светотехники используют данный комплекс для проектировки и визуализации освещения.

Помимо широкой распространенности программы, одним из важных преимуществ DIALux является бесплатная доступность для всех желающих, что, наряду с большим количеством существующих сторонних плагинов от более чем 190 компаний, делает данный инструмент ультимативным для задач обучения в области проектирования и визуализации функционального и декоративного освещения.

Ядро расчетов DIALux базируется на «излучающем методе» и носит название RadiCal. Основной принцип RadiCal заключается в расчете двух типов излучения: прямого (от излучающей поверхности к поверхности) и отраженного (от освещаемой поверхности к поверхности). Причем, в качестве излучающей поверхности может выступать не только осветительный прибор, но и естественные источники освещения, например — прямой солнечный свет. Основным преимуществом используемого ядра RadiCal является не только возможность визуализации световой среды с высокой степенью точности отображения картины освещения в 3D пространстве, но и расчет численных значений освещения в заданных областях, что крайне важно при проектировании рабочих и жилых помещений.

##### **2.2. Основы работы RadiCal**

Как уже было сказано ранее, ядро расчетов RadiCal основано на «излучающем методе». «Излучающий метод» является одним из видов моделей, основанных на законе сохранения энергии. При облучении поверхности все непоглощенное этой поверхностью излучение будет отражаться, и поверхность может являться первичным источником излучения. Таким образом, для каждой элементарной поверхности

формируется собственная система уравнений, учитывающая как поглощение и отражение излучения, падающего на данную поверхность, так и излучение самой поверхности. Благодаря такой системе уравнений можно рассчитать яркость каждой поверхности индивидуально и не привязываться к конкретному местоположению наблюдателя. Это позволяет создавать визуализацию полученных расчетов в 3D пространстве с просмотром из любой точки этого пространства.

Однако такой метод не лишен и недостатков. Так, на данный момент RadiCal учитывает только диффузионное отражение поверхностей, что ограничивает возможности программы при особо сложных расчетах.

### **2.3. Адаптивное создание сетки**

Согласно таким стандартам Европейского союза, как, например, EN 12193 и EN 12464-2, освещенность на указанной области необходимо характеризовать в нескольких точках (поверхностях). Максимальный размер такой поверхности не может быть превышен и определяется согласно выражению (1):

$$p = 0,2 \cdot 5^{\log_{10} d}, \quad (5.1)$$

где  $d$  — линейный размер большей стороны области,  $p$  — максимальный размер поверхности или размера ячейки сетки.

Формула не позволяет с достаточной точностью рассчитать освещение в помещении. Так, например, имея сетку 10×10 ячеек для области 10×10 метров, размер элементарной поверхности составит 1 метр.

Для более точных расчетов программа DIALux использует адаптивную сетку. Такая сетка имеет вариативные размеры элементарной поверхности, что позволяет получить не только более точные результаты, но и значительно сократить время расчетов, которое имеет экспоненциальную зависимость от размера элементарной поверхности сетки. Суть метода такой сетки заключается в следующем: в зонах с сильным перепадом освещенности сетка дробится на большее количество ячеек (элементарных поверхностей), а в зонах, где преобладает равномерное освещение, элементарные ячейки имеют большие размеры. Таким образом, сетка адаптируется под тип и характер реализуемого освещения, позволяя найти баланс между точностью и скоростью вычисления. Пример такой сетки приведен на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 — 3D изображение рабочего пространства, поделенного на элементарные поверхности для последующего светотехнического расчета

## **2.4. Алгоритмы коррекции сетки**

### **2.4.1. Алгоритм деления поверхностей**

Как было сказано ранее, RadiCal способен адаптивно делить поверхности на нужное количество ячеек для каждой области, однако необходимо пояснить, как именно происходит деление поверхностей на более мелкие ячейки.

Для того, чтобы понять, необходимо ли делить отражающую поверхность на более мелкие сегменты, требуется оценить ошибку в расчетах, которая возникнет при отражении света в том месте поверхности, где она была разделена. Причем, такую оценку необходимо производить только в случае, если элементарные ячейки поверхности будут взаимодействовать между собой после разделения поверхности. Иначе говоря, направлены ли друг на друга ячейки или нет. В случае, если ячейки не направлены друг на друга, то взаимодействие не случится. Проведя подобную операцию, алгоритм понимает взаиморасположение отдельных ячеек и может произвести более точный расчет.

Также при расчете излучения может возникнуть два вида ошибок, связанных с взаиморасположением излучающей и отражающей поверхностей — непостоянный угол наблюдения и слишком близкое расстояние. Данные ошибки также влияют на принятие алгоритмом решения о делении поверхности на более мелкие ячейки. Пример работы алгоритма приведен на рисунке 5.2.

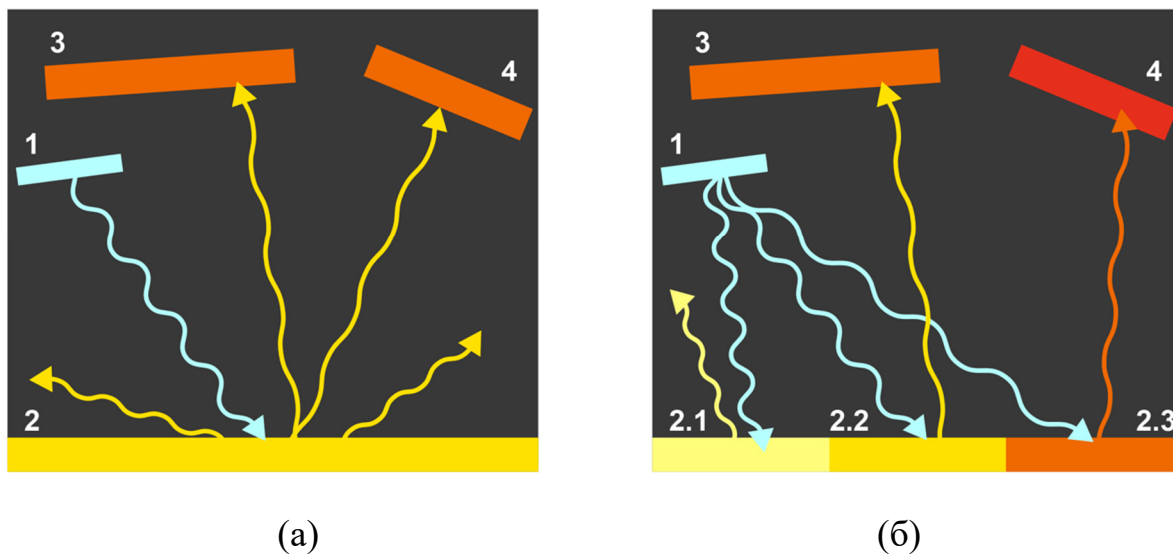


Рисунок 5.2 — Схематическое изображение влияние деления поверхности на более мелкие ячейки на точность расчета, где 1 – излучающая поверхность, 2,3,4 – диффузно отражающие поверхности, (а) – поверхность 2 не поделена, поверхности 3 и 4 освещены одинаково, (б) – поверхность 2 разделена на 3 ячейки, поверхности 3 и 4 имеют разную освещенность.

Учитывая все вышеописанные факторы, RadiCal определяет необходимую сетку и моделирует все заданное пространство, после чего, рассчитав суммарный световой поток, алгоритм определяет степень получившейся ошибки при данной сетке и, при необходимости, повторяет все операции заново, изменяя сетку с целью минимизации получившейся ошибки.

#### 2.4.2. Комбинирования нескольких сеток

При расчете освещения в большом пространстве с использованием значительного числа светильников на рассчитываемой поверхности возникают зоны с высоким значением неравномерности освещенности. Такие зоны необходимо делить на большое число элементарных поверхностей для более точного расчета. Однако алгоритм программы подразумевает несколько итераций в процессе расчета, и, благодаря переотражению от других элементарных поверхностей, общий уровень освещенности на поверхности в описанных зонах может оказаться достаточно равномерным, что позволит сократить количество ячеек сетки и повысить скорость расчета. Иначе говоря, RadiCal позволяет производить многоитерационный расчет, предугадывая необходимые размеры элементарных поверхностей создаваемой сетки. Пример работы такого алгоритма программы изображен на рисунке 5.3.



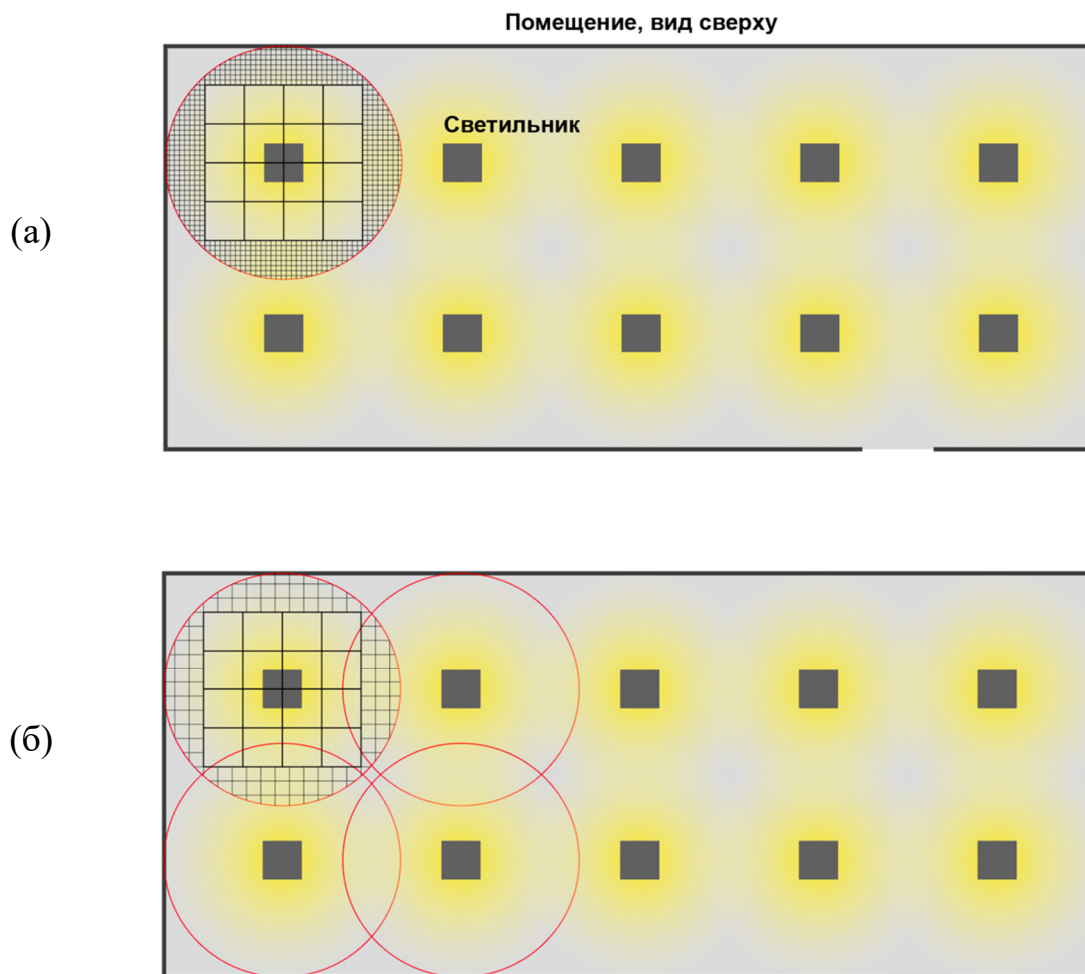


Рисунок 5.3 — Схематическое изображение работы итерационного алгоритма при построении сетки, (а) – изображение предварительной сетки, не учитывающей излучение после переотражений, (б) – изображение конечной сетки, учитывающей переотражение и излучение всех светильников, располагающихся в заданном пространстве; сетка изображена не для всей поверхности, а только для области у 1-го светильника для простоты иллюстрации.

### 2.4.3. Иерархия излучения

RadiCal использует итерационный метод не только для построения адаптивной сетки, но и для более точного расчета переотражения. Во время первой итерации, прежде чем производить светотехнический расчет, алгоритм определяет взаимодействие элементарных ячеек сетки между собой — иначе говоря, определяет, как в заданном пространстве с заданным освещением будет происходить переотражение между элементарными поверхностями. Затем программа моделирует освещение и оценивает результат, корректируя взаимодействие элементарных ячеек, определенное перед проведением моделирования. После чего RadiCal повторяет цикл, и так до тех пор, пока результат не будет наиболее точным.

#### 2.4.4. Создание искусственной сетки

Несмотря на то что алгоритм RadiCal самостоятельно создает адаптивную сетку для реализации точного светотехнического расчета, пользователь имеет возможность задать сетку и параметры необходимой области вручную. Такая функция может быть полезна для моделирования возможных проверок будущего реализованного освещения в соответствии с предъявляемыми нормами законодательства.

### 3. Схема выполнения лабораторной работы

В данной лабораторной работе в качестве схемы необходимо использовать выданный преподавателем план помещения, в котором будет производиться проектировка освещения.

#### 4. Порядок выполнения лабораторной работы

##### 4.1. Создание помещения

4.1.1. Установить программу DIALux evo 9.0 (или более новую версию)

4.1.2. Создать новый проект, выбрав пункт «Планировка здания и внешнего пространства», согласно тому, как изображено на рисунке 5.4.

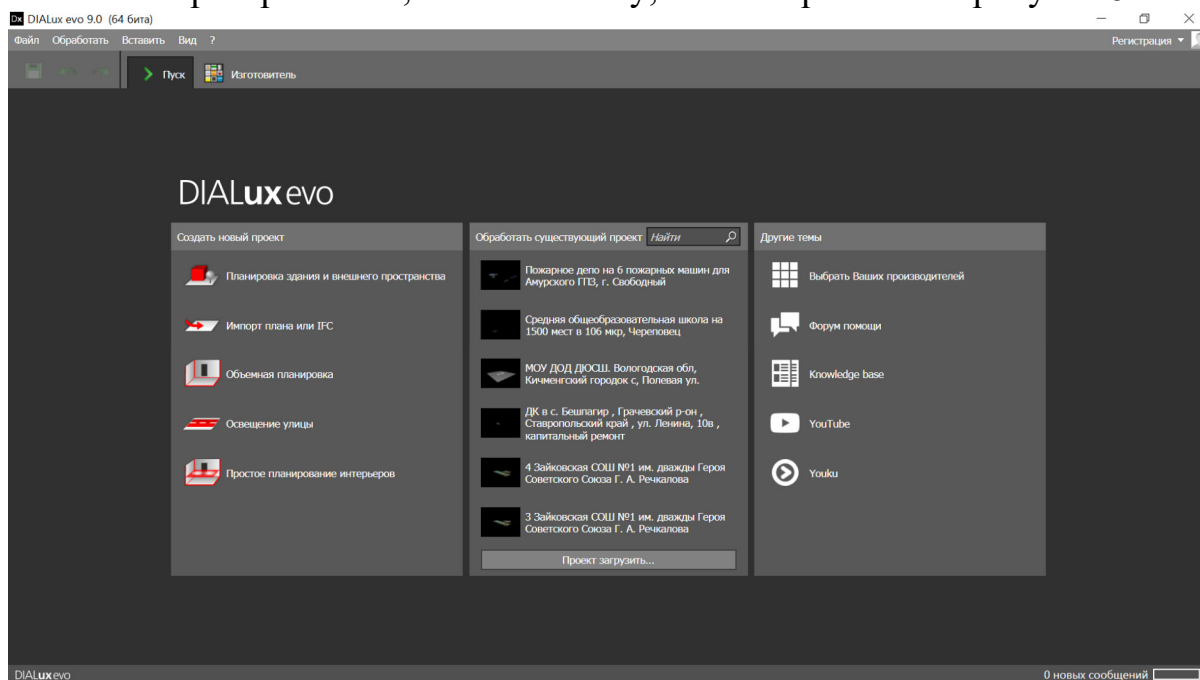


Рисунок 5.4 — Стартовое окно программы DIALux evo 9.0

После этого откроется основное окно интерфейса программы, подробное описание представлено на рисунке 5.5.

4.1.3. Перед началом работы необходимо загрузить план помещения (группы помещений, здания...), для которого будет осуществляться проектировка освещения. Для этого во вкладке «планы» необходимо выбрать пункт «Загрузить план...»



4.1.4. После загрузки плана необходимо задать масштаб для дальнейшей работы, согласно тому, как указано на рисунке 5.6.

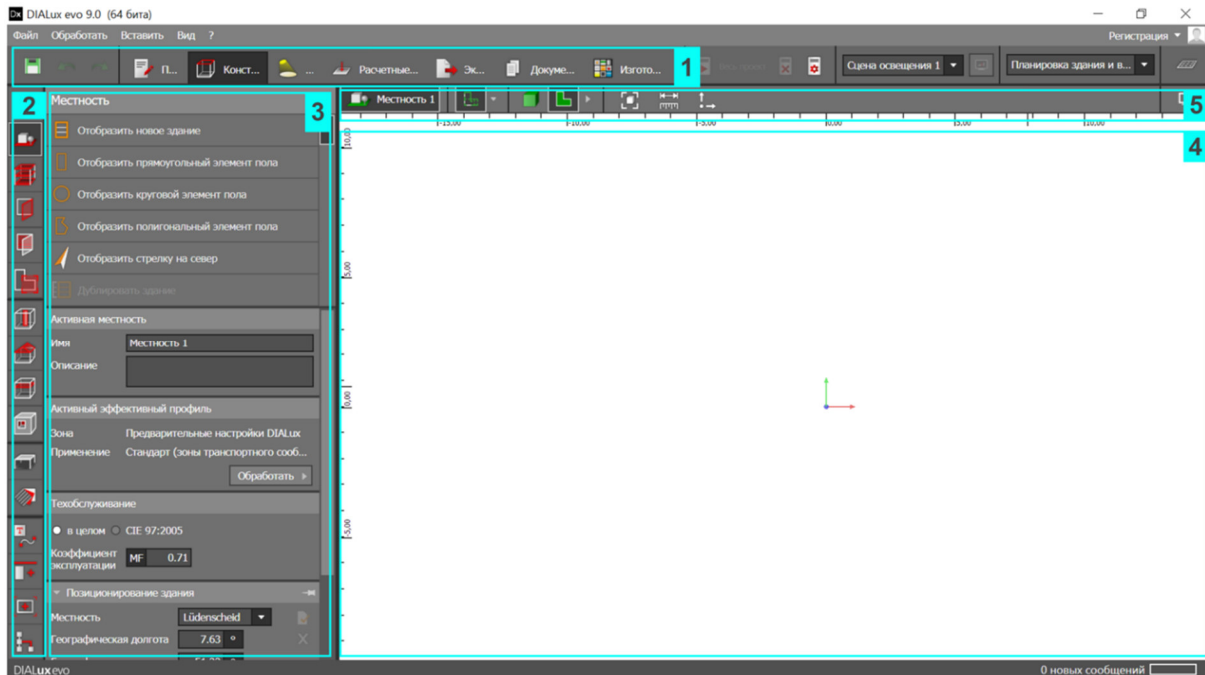


Рисунок 5.5 — Основное окно интерфейса программы DIALux evo 9.0, 1 - категории инструментов, 2 – вкладки инструментов, 3 – параметры выбранного инструмента или объекта, 4 – область редактирования проекта, 5 – окно настроек редактирования способов отображения области редактирования проекта

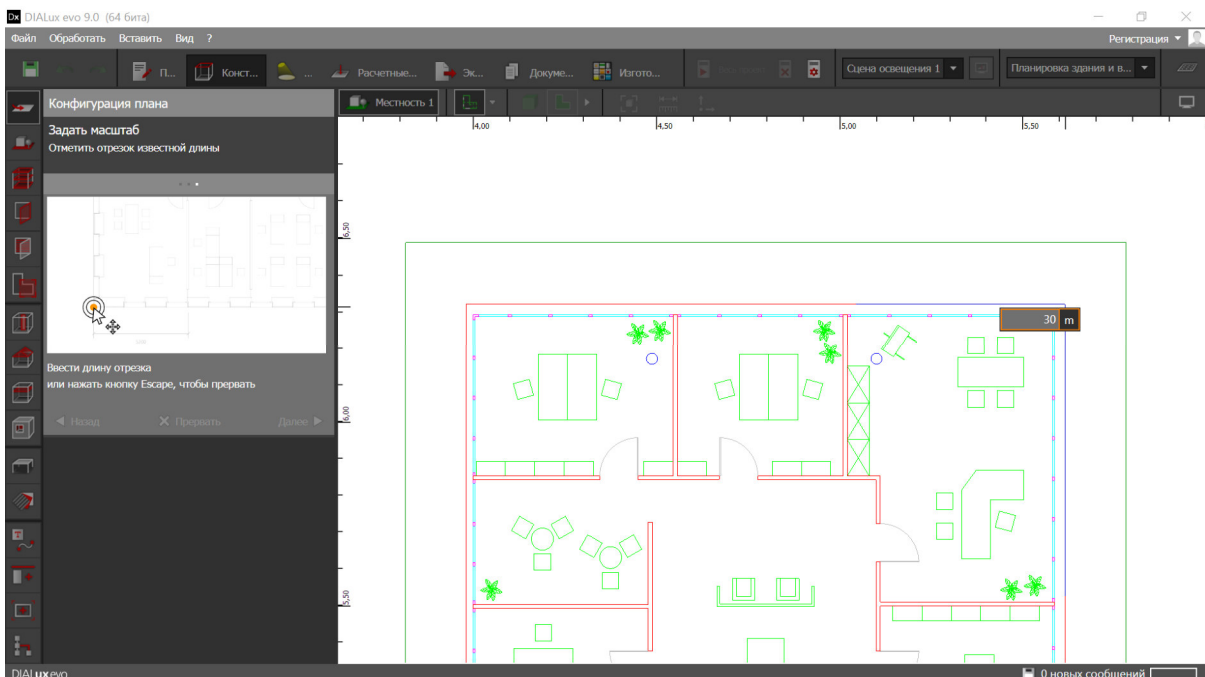


Рисунок 5.6 — Окно настройки масштаба загруженного плана помещения

**4.1.5.** Далее нужно создать объемную модель согласно плану помещения. Для этого следует перейти во вкладку «местность» — «Отобразить новое здание».

**4.1.6.** Затем следует создать контуры нового здания по точкам на общем плане согласно рисунку 5.7.

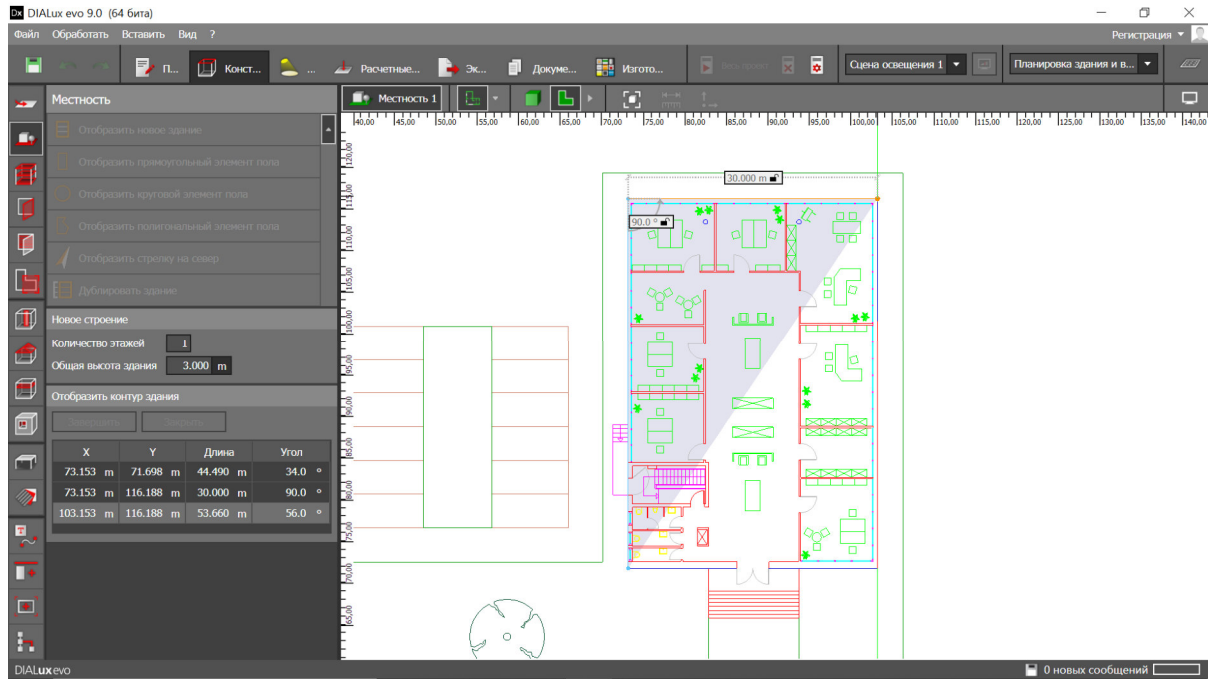


Рисунок 5.7 — Создание контуров помещения с использованием загруженного плана

**4.1.7.** Создав здание, необходимо перейти во вкладку «Этажи» и «Начертить новое помещение», аналогично тому, как было создано новое здание.

**4.1.8.** После чего необходимо задать высоту этажа в панели «Свойства»

**4.1.9.** Далее, при необходимости, создаются дополнительные внутренние элементы во вкладке «Выбрать элемент помещения» согласно рисунку 5.8.

**4.1.10.** При необходимости, используя вкладку «Мебель и объекты», можно добавить в соответствии с планом необходимые внутренние объекты помещения.

При желании можно воспользоваться встроенным в программу каталогом объектов, находящемся во вкладке «Активный объект» — «выбрать» — «Каталог». Добавленные из каталога объекты появятся во вкладке «Объекты».

**4.1.11.** Далее необходимо разместить выбранные объекты на плане, нажав кнопку «Разместить отдельный объект». А также задать его

габариты с помощью окна «Позиционирование» аналогично тому, как показано на рисунке 5.9.

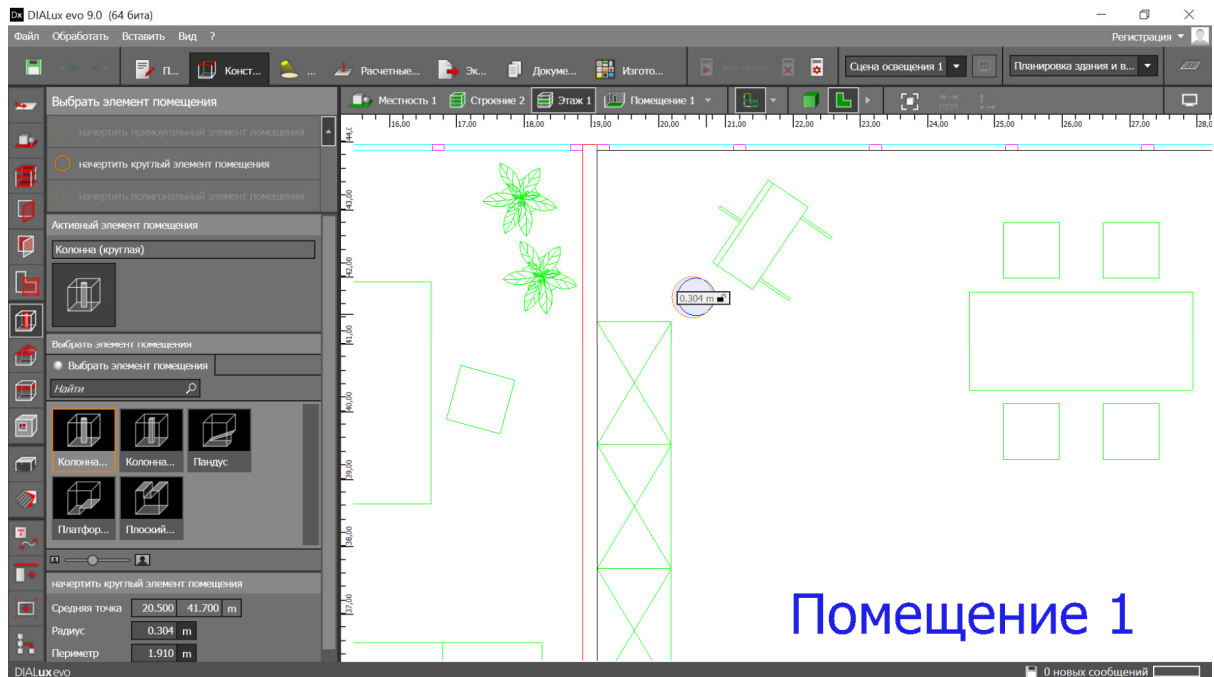


Рисунок 5.8 — Окно создания и размещения дополнительных элементов помещения

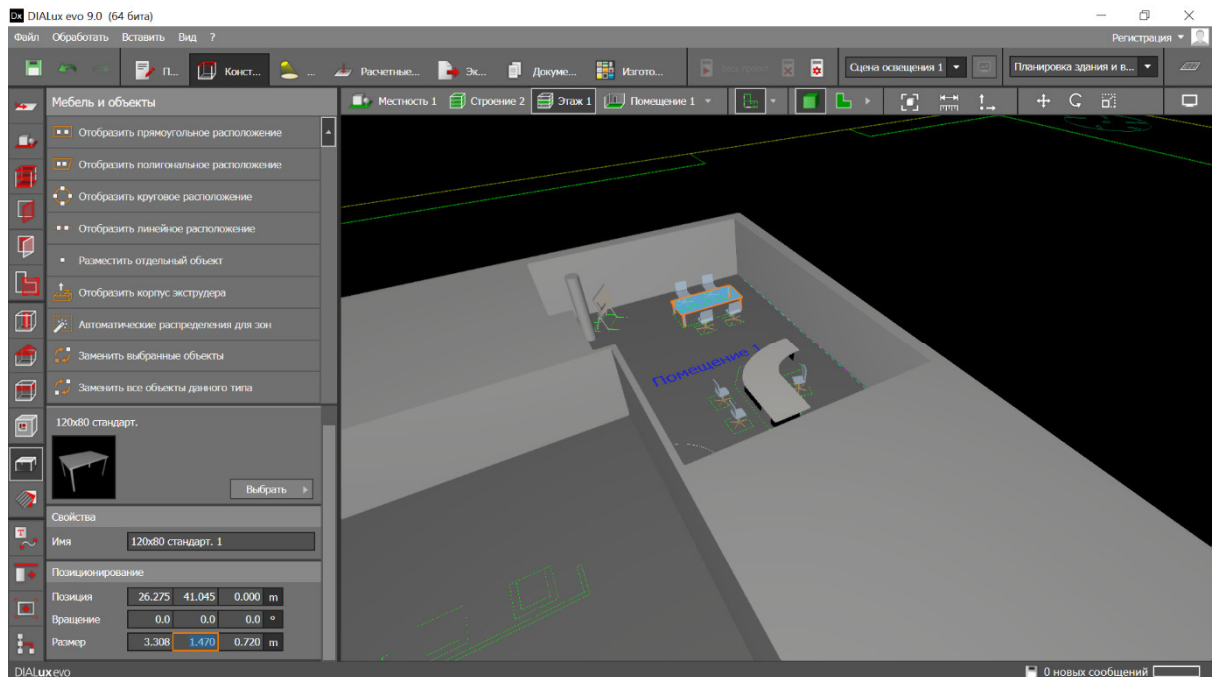


Рисунок 5.9 — Пример размещения объектов мебели

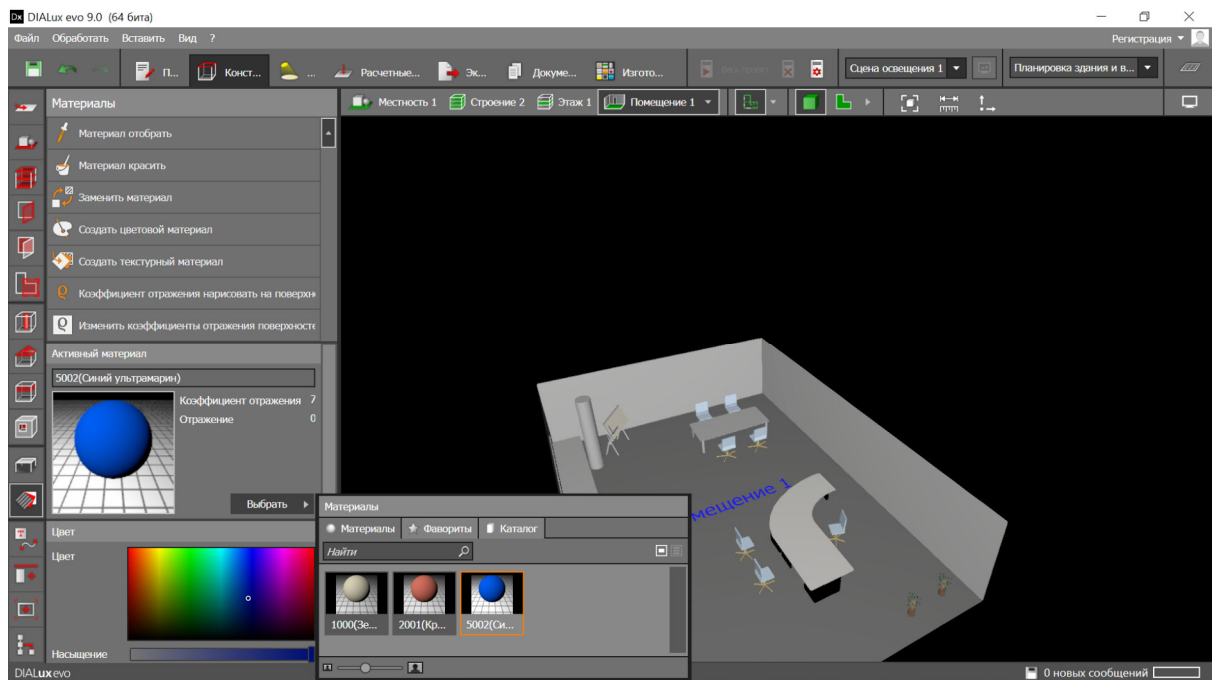


Рисунок 5.10 — Интерфейс выбора материалов покрытий

**4.1.12.** После чего необходимо, используя кнопку «Материал покрасить», задать требуемые цвета и текстуры объектов.

**4.1.13.** Далее необходимо задать рабочие плоскости, коэффициент техобслуживания и требуемые для рабочей поверхности нормы освещения. Для этого следует перейти во вкладку «Секторы» и задать параметры, согласно тому, как изображено на рисунке 5.11.

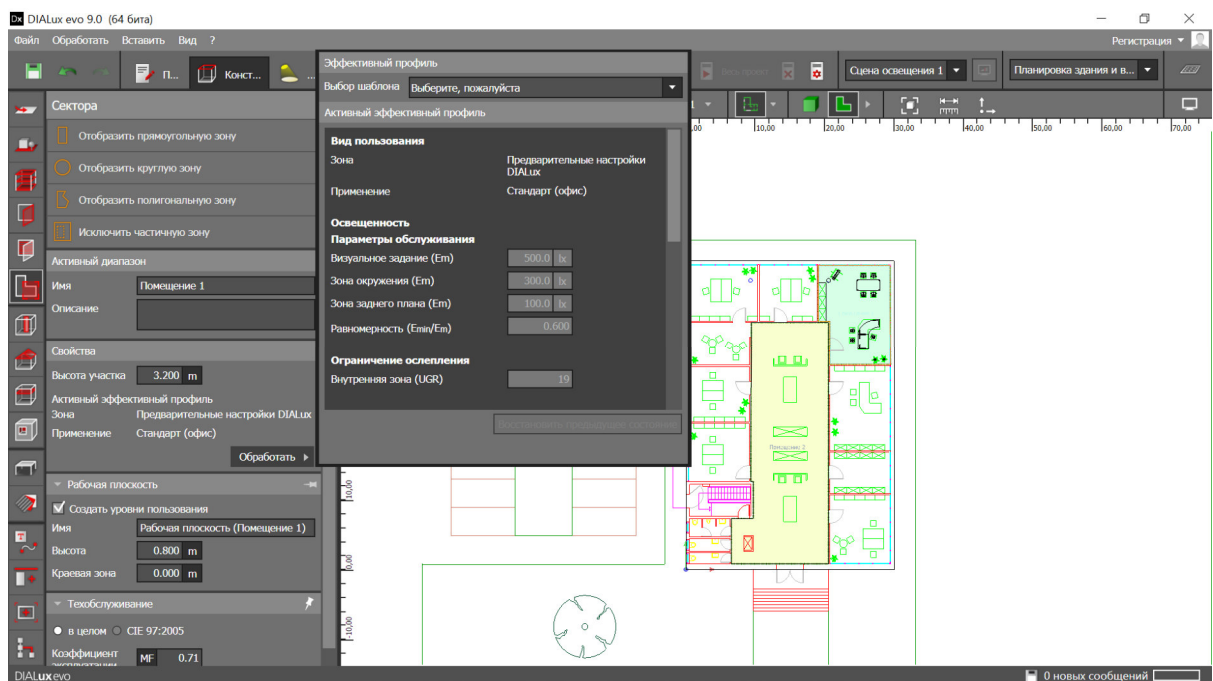


Рисунок 5.11 — Окно работы с параметрами рабочей поверхности

## 4.2. Проектирование освещения

На данном этапе работа с «Конструкцией» может считаться законченной.

4.2.1. После этого следует перейти к разделу «Расчетные объекты» и во вкладке «Расчетные объекты» задать область, для которой программа позже будет отображать произведенный расчет, согласно тому, как изображено на рисунке 5.12.

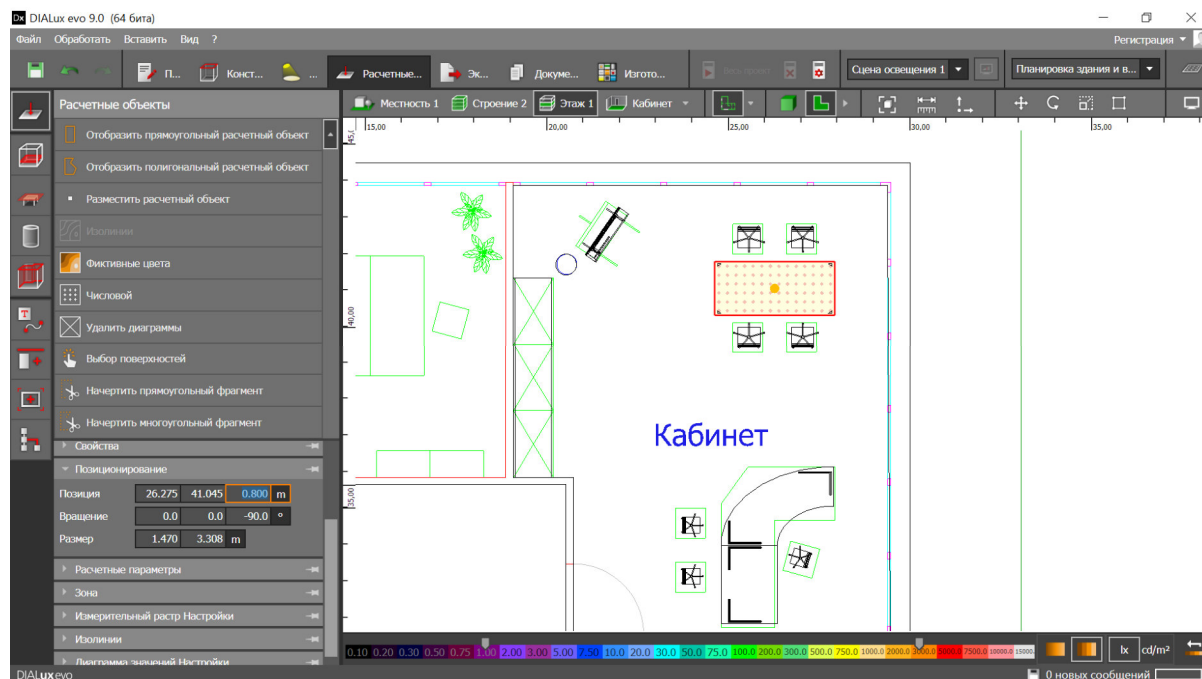


Рисунок 5.12 — Определение области расчета освещенности

При необходимости можно задать свойства для выбранного «Расчетного объекта»

Также следует задать «Расчетные параметры», если разрабатываемый проект этого требует.

4.2.2. Далее необходимо расположить объекты освещения.

Для этого следует перейти в категорию «Свет» вкладку «Светильники», и либо «Импортировать файл светильников», либо воспользоваться категорией «Изготовитель», загрузив необходимые файлы определенного производителя, согласно тому, как показано на рисунках 5.13 и 5.14.

4.2.3. После импорта необходимых светильников следует выбрать светильник, используя «Активный светильник» — «Выбрать», и расположить его на плане, используя инструменты вкладки «Светильник». При необходимости следует задавать требуемые параметры во вкладках «Расположение растров» и «Сметный калькулятор». Пример расположения нескольких светильников изображен на рисунке 5.15.

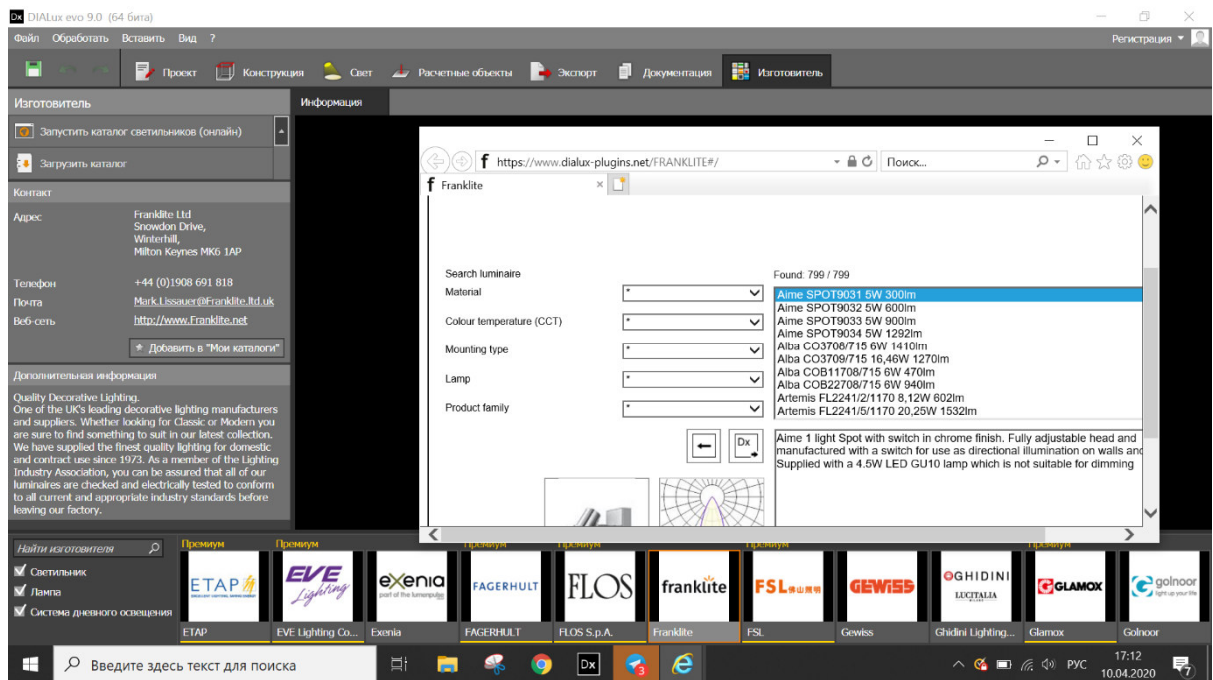


Рисунок 5.13 — Каталоги производителей светотехнического оборудования

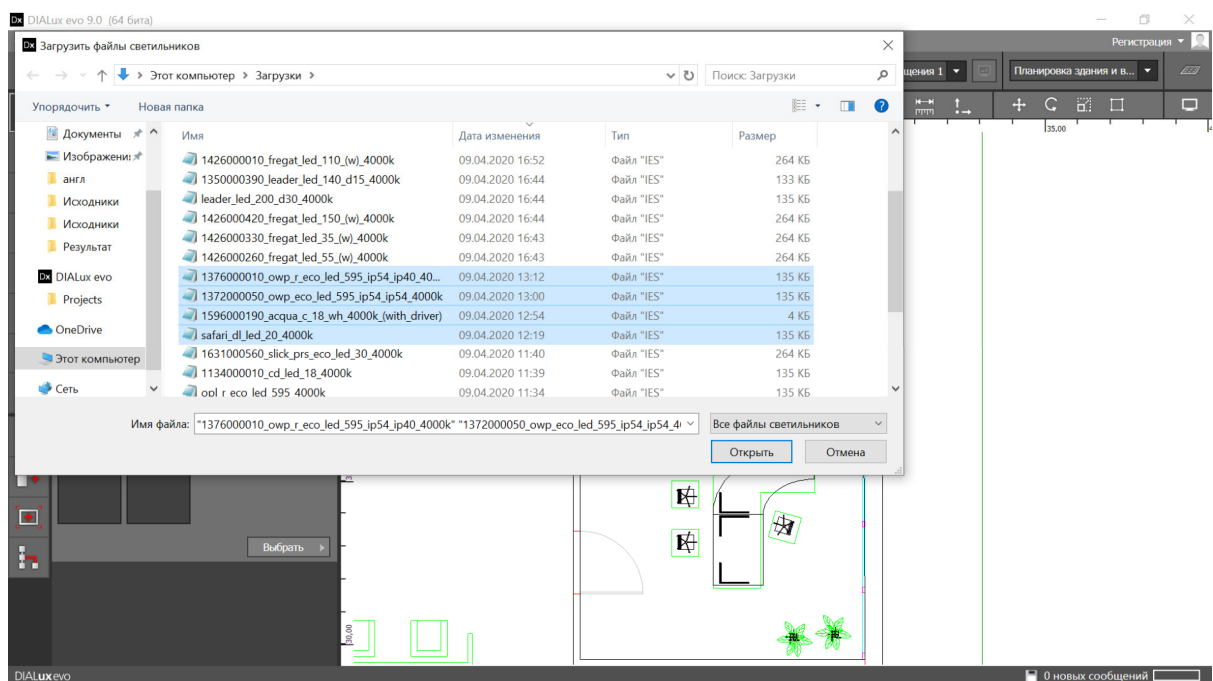


Рисунок 5.14 — Загрузка библиотеки .ies файлов из локального диска ПК



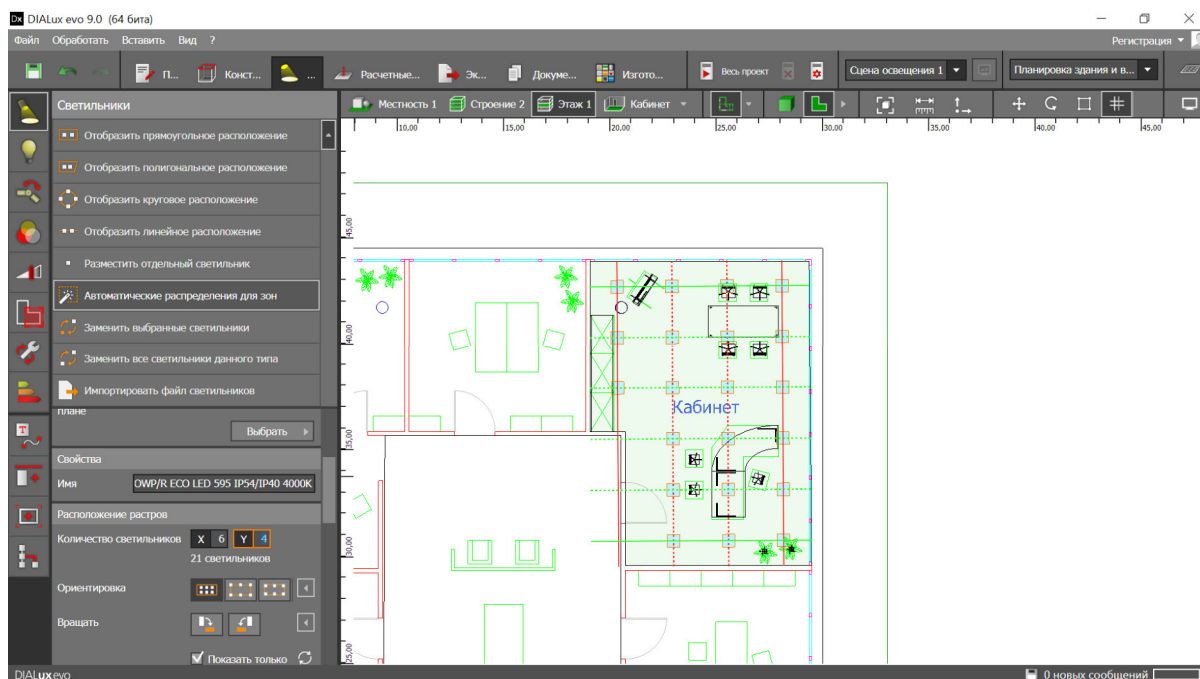


Рисунок 5.15 — Автоматическое расположение светильников в помещении

Следует отметить, что данное расположение светильников было создано автоматически, основываясь на заданной ранее высоте рабочей плоскости и заданному значению необходимой освещенности.

### 4.3. Светотехнический расчет

**4.3.1.** Выполнив проектирование освещения, можно переходить к «Расчету освещения». Скорость выполнения данной операции программой зависит от сложности и размера созданного проекта.

Результаты проведенного расчета будут отображены на экране, согласно тому, как изображено на рисунке 5.16.

Как может быть видно на правой части рисунка 5.16, программа отображает, выполняются ли заданные изначально нормы освещенности на поверхностях или нет. Можно заметить, что в помещении, где автоматически было задано освещение, нормы выполнены, а в помещении, где количество и расположение светильников задавалось в ручном режиме, выполнить нормы не удалось.

Программа DIALux позволяет создавать несколько сцен освещения в рамках одного помещения с использованием одной группы светильников. Рассмотрим функцию использования нескольких сцен освещения на примере реализации аварийного режима освещения на тех же светильниках, которые были использованы для расчета общего освещения ранее.

**4.3.2.** Необходимо перейти во вкладку «Сцены освещения» и «Создать пустую сцену освещения».

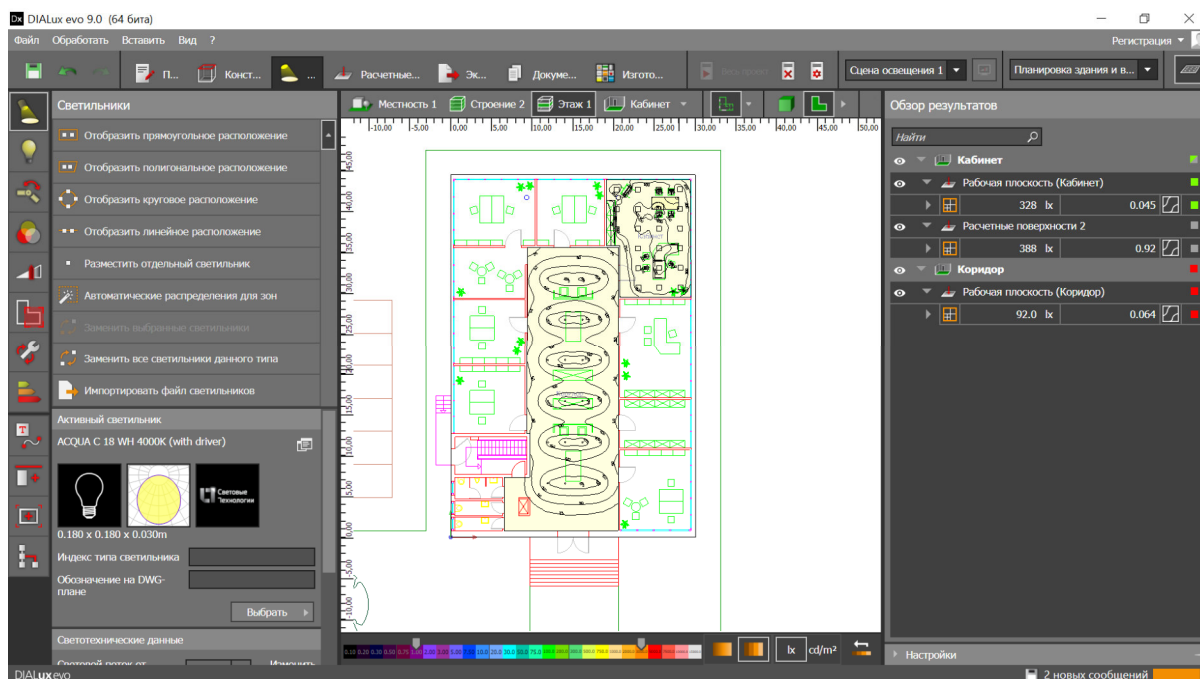


Рисунок 5.16 — 2D визуализация проведенного светотехнического расчета

**4.3.3.** В созданной новой сцене необходимо «Создать новую группу светильников».

**4.3.4.** Создав две новые группы светильников, необходимо выделить все существующие светильники, добавить их в группу 1 и задать уровень группы 0 процентов. После этого необходимо выбрать часть светильников, которые будут работать в аварийном режиме, удалить их из группы 1 и добавить их в группу 2, используя инструменты работы с группой «+» и «-», согласно тому, как изображено на рисунке 5.17. Также необходимо в зависимости от спецификации светильника указать процентное соотношение группы светильников с помощью фейдера.

**4.3.5.** После чего необходимо запустить расчет всех сцен освещения.

Произведя расчет, этап светотехнического расчета может считаться законченным.



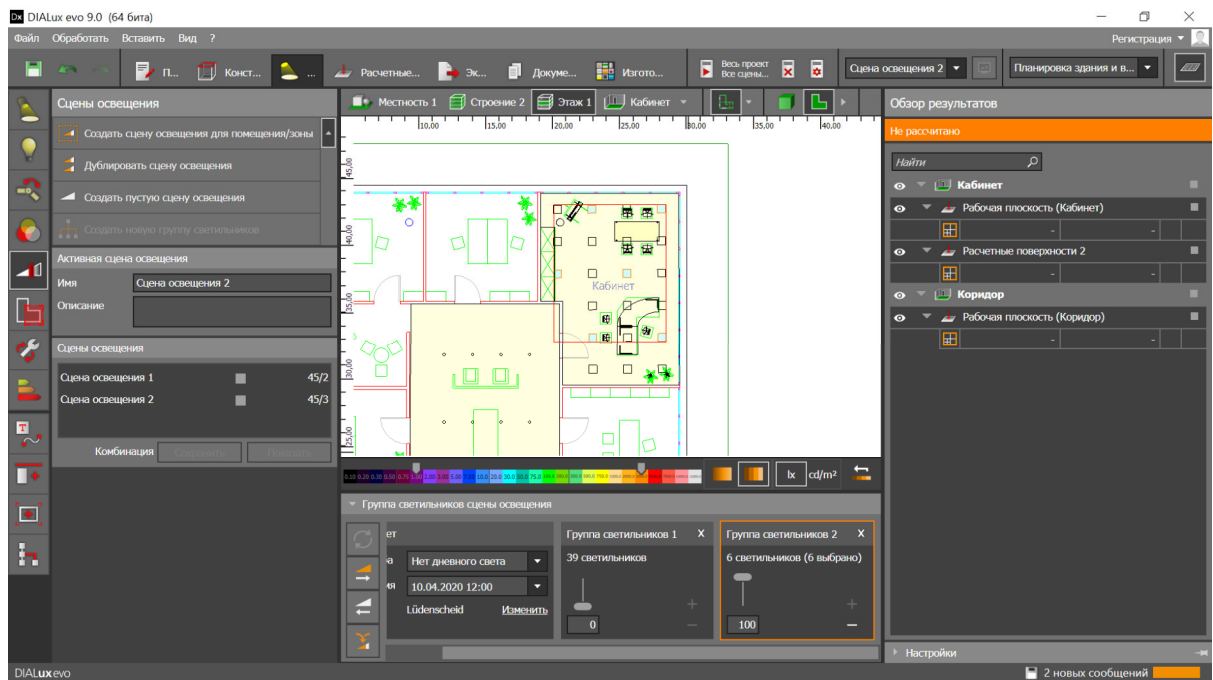


Рисунок 5.17 — Интерфейс использования нескольких групп светильников

## 4.4. Создание отчета

4.4.1. Далее необходимо экспортировать полученные данные с помощью категории «Документация».

4.4.2. В данной категории с помощью кнопки «Обработать» необходимо выбрать требуемые листы, согласно тому, как это изображено на рисунке 15. После этого необходимо нажать кнопку «Показать полную документацию» согласно рисунку 5.18.

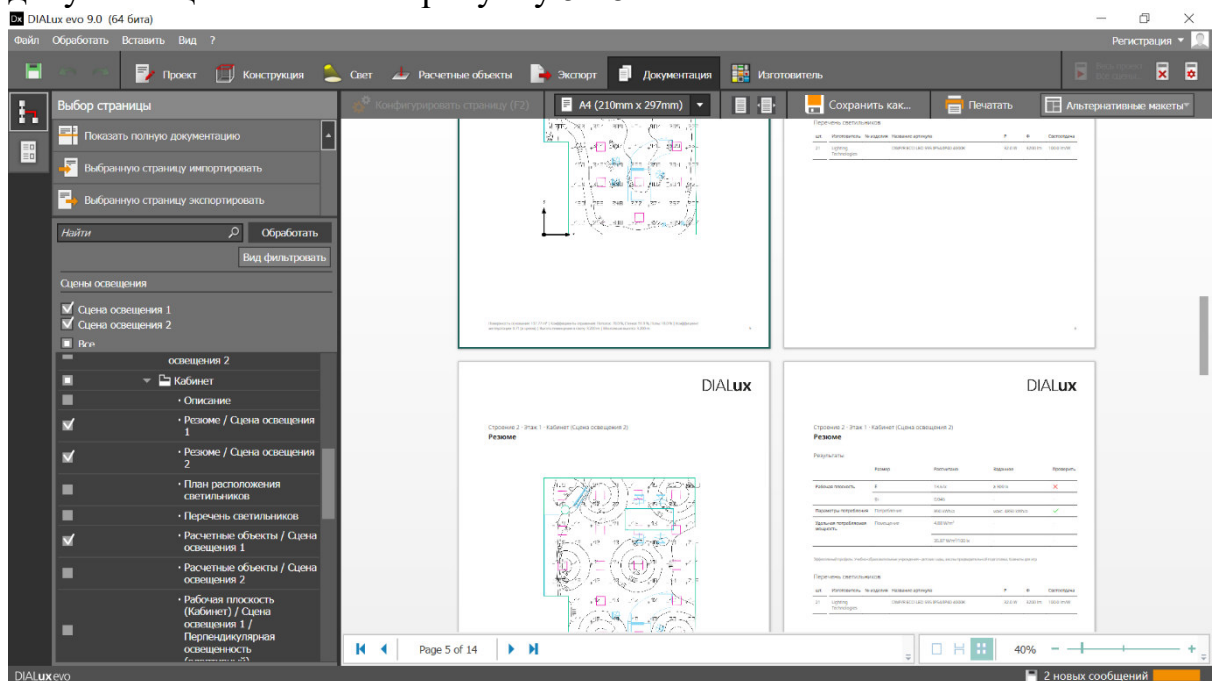


Рисунок 5.18 — Окно экспорта отчета

Экспортировать полученные результаты можно с помощью кнопки «Сохранить как».

Кроме того, программа DIALux позволяет создавать визуализацию освещения, что может быть крайне полезно для коммерческих целей.

Создание такой визуализации возможно с использованием вкладки «Виды» — «Создать новый вид». Важно, чтобы при этом рабочая область находилась в режиме 3D согласно тому, как изображено на рисунках 5.19 и 5.20.

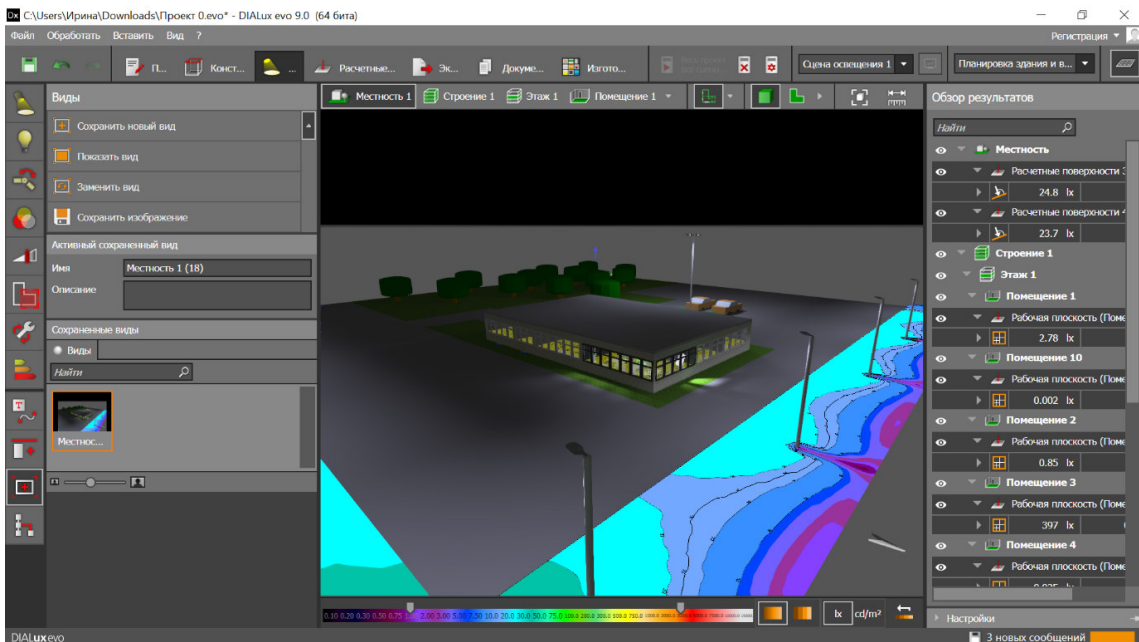


Рисунок 5.19 — 3D визуализация моделирования освещения

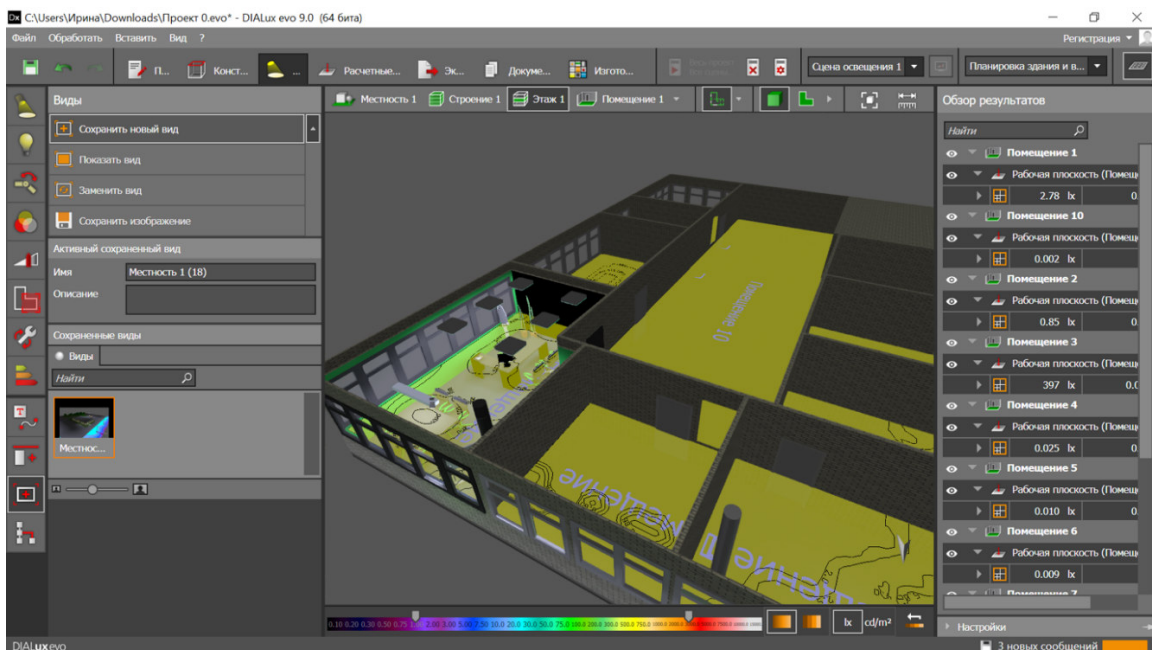


Рисунок 5.20 — 3D визуализация моделирования освещения в помещении

## **5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

## **6. Рекомендуемый для ознакомления список литературы**

- DIALux 4 with new improved calculation kernel, DIAL;
- DIALux evo – new calculation method, DIAL;
- DIALux evo manual A collection of all wiki articles, DIAL.

## **7. Контрольные вопросы**

- Принцип работы RadiCal;
- Адаптивное создание сетки;
- Алгоритм деления поверхностей;
- Комбинирование сеток и создание искусственной сетки;
- Иерархия излучения.

## Лабораторная работа 6.

### Измерение светотехнических параметров освещения на рабочем месте

#### 1. Цель

Исследование освещенности рабочей поверхности прямым методом и яркости прямым и косвенным методами.

#### 2. Краткие теоретические сведения

Исследование и анализ освещенности и яркости рабочего пространства позволяет установить взаимосвязь основных светотехнических величин, а также ознакомиться с базовыми процедурными принципами измерений в этой области. Однако, прежде чем переходить к непосредственным измерениям величин, нельзя не остановиться на физическом смысле понятий и их взаимосвязи.

##### 2.1. Световой поток

Световой поток определяет количество световой энергии на единицу площади за единицу времени, содержащейся в потоке излучения. Для лучшего понимания сути понятия светового потока необходимо обратиться не к световой величине, коей является световой поток, а к его энергетическому аналогу — потоку излучения.

Поток излучения равен соотношению энергии излучения к площади сечения, через которую распространяется излучение за единицу времени, при этом период электромагнитных колебаний на несколько порядков превышает выбранную единицу времени. Таким образом, поток излучения может быть выражен как:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}, \quad (6.1)$$

где  $Q_e$  — энергия излучения [Вт],  $t$  — время [с].

При условии, что световой поток содержит именно световую энергию (энергию видимого диапазона излучения), он может быть выражен следующим образом:

$$\Phi_c = K_m \int_{380 \text{ нм}}^{780 \text{ нм}} V(\lambda) \cdot \Phi_{e,\lambda} \cdot d\lambda, \quad (6.2)$$

где  $K_m$  — коэффициент, равный 683 лм/Вт,  $V(\lambda)$  — нормированная относительная спектральная световая эффективность,  $\lambda$  — длина волны, лежащая в диапазоне видимого оптического излучения 380–780 нм.

##### 2.2. Сила света

Распределение световой энергии от источника не является равномерным, именно поэтому необходима физическая величина, способная характеризовать такую неравномерность пространственной

плотности светового потока. Такой физической величиной и является сила света, численно выражаемая следующим образом:

$$I_c = \frac{d\Phi_c}{d\omega}, \quad (6.3)$$

где  $\omega$  – телесный угол, в который заключен световой поток.

Для лучшего понимания физического смысла силы света можно обратиться к рисунку 6.1.

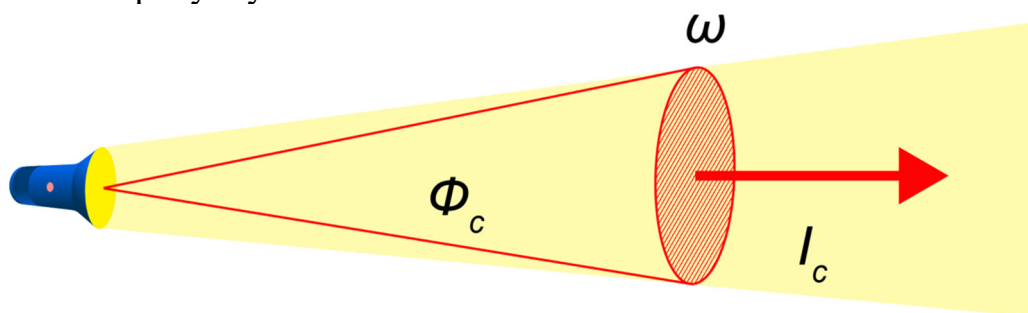


Рисунок 6.1 — Схематическое изображение физического смысла силы света

### 2.3. Освещенность

Освещенностью принято называть отношение количества световой энергии, падающей на площадь. В общем случае освещенность может быть описана следующим выражением:

$$E_c = \frac{d\Phi_c}{dS}, \quad (6.4)$$

где  $S$  – площадь.

Данное соотношение также проиллюстрировано рисунком 6.2 ниже.

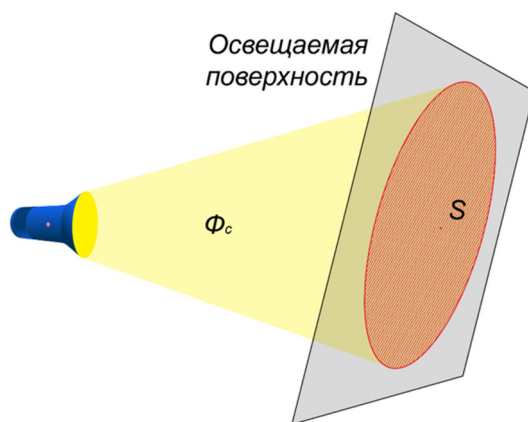


Рисунок 6.2 — Схематическое изображение физического смысла освещенности

Однако на практике провести измерения суммарного светового потока, падающего на определенную площадь интересующей поверхности, крайне сложно даже в лабораторных условиях.

В таком случае, если принять источник излучения за точечный по отношению к поверхности, можно рассчитать освещенность на определенной площади по следующему закону:

$$E_c = \frac{I_c}{r^2} \cos \varphi, \quad (6.5)$$

где  $r$  – расстояние между источником освещения и точкой измерения освещенности, а  $\varphi$  – угол между направлением падением излучения на поверхность и нормалью к поверхности, согласно тому, как изображено на рисунке 6.3 ниже.

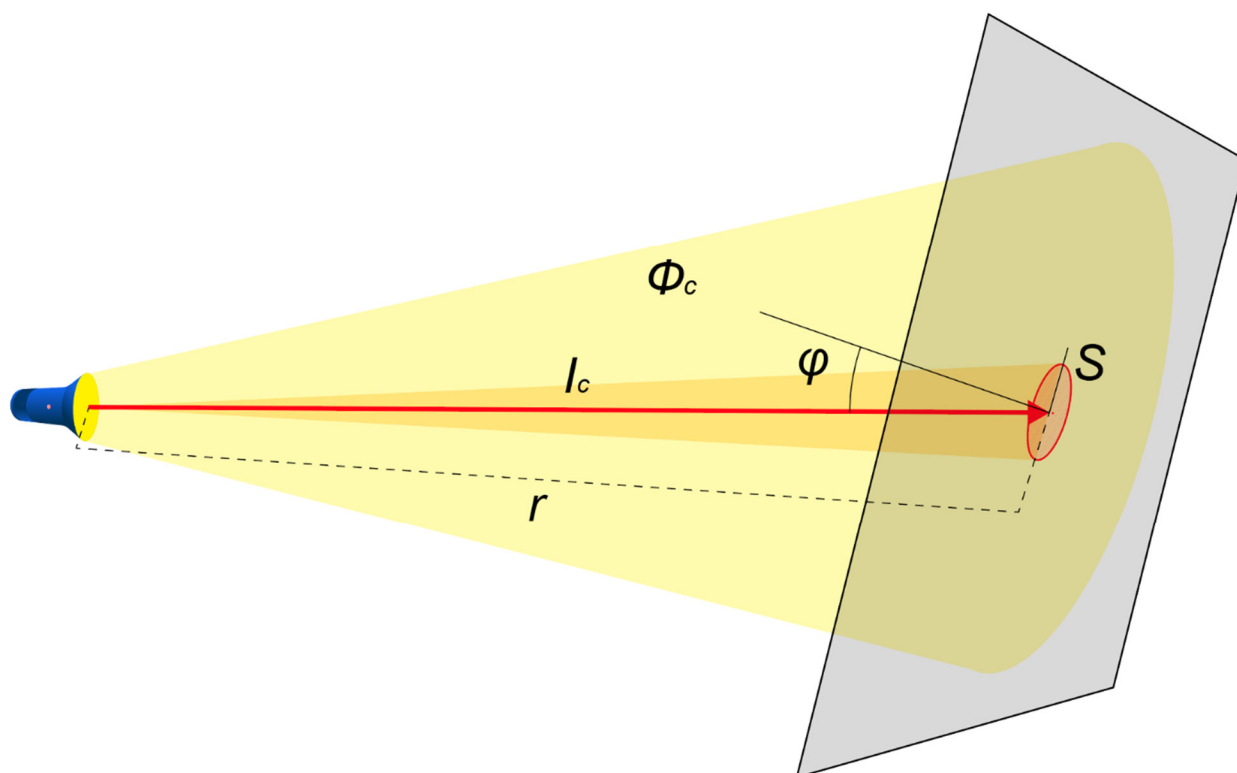


Рисунок 6.3 — Схематическое изображение физического смысла выражения 6.5

#### 2.4. Яркость

Яркость — это отношение световой энергии, заключенной в малый телесный угол, согласно направлению излучения, к проекции площади источника излучения на поверхность, перпендикулярную направлению оси наблюдения источника, как описано в выражении 6.6:

$$L = \frac{d^2 \Phi_c}{d\omega dS \cos \alpha'} \quad (6.6)$$

где  $\alpha$  – угол между нормалью к плоскости излучателя и осью наблюдения источника.

Важно заметить, что данное выражение справедливо только для малых значений площади излучающей поверхности. В случае, если источник излучение имеет существенные линейные размеры, то яркость разных его областей для одного наблюдателя будет различной, согласно тому, как изображено на рисунке 6.6.

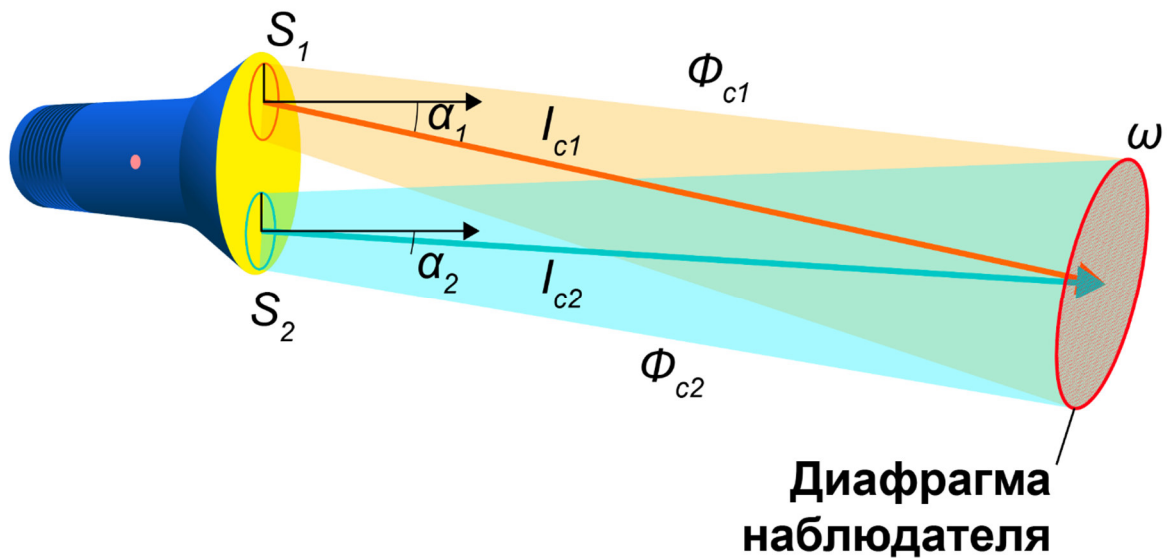


Рисунок 6.6 — Схематичное изображение физического смысла яркости источника, имеющего линейные размеры; в качестве ограничивающего малого телесного угла выступает диафрагма наблюдателя за источником

Кроме того, учитывая выражения (6.3) и (6.4), яркость может быть выражена следующим образом:

$$L = \frac{dE}{d\omega \cos \alpha'} \quad (6.7)$$

а также:

$$L = \frac{dI}{dS \cos \alpha'} \quad (6.8)$$

## 2.5. Приборы-измерители светотехнических величин

Стоит немного познакомиться с основными принципами работы приборов, использующихся для измерения таких светотехнических величин, как яркость и освещенность.

### 2.5.1. Яркомер

Яркомером является прибор, предназначенный для прямого измерения яркости. Основа работы яркомера заключается в использовании фоточувствительного элемента, преобразующего оптический сигнал в электрический, и использовании крайне узкой диафрагмы, позволяющей создавать малые телесные углы для точного измерения значений яркости. Принципиальная схема яркомера изображена на рисунке 6.7.

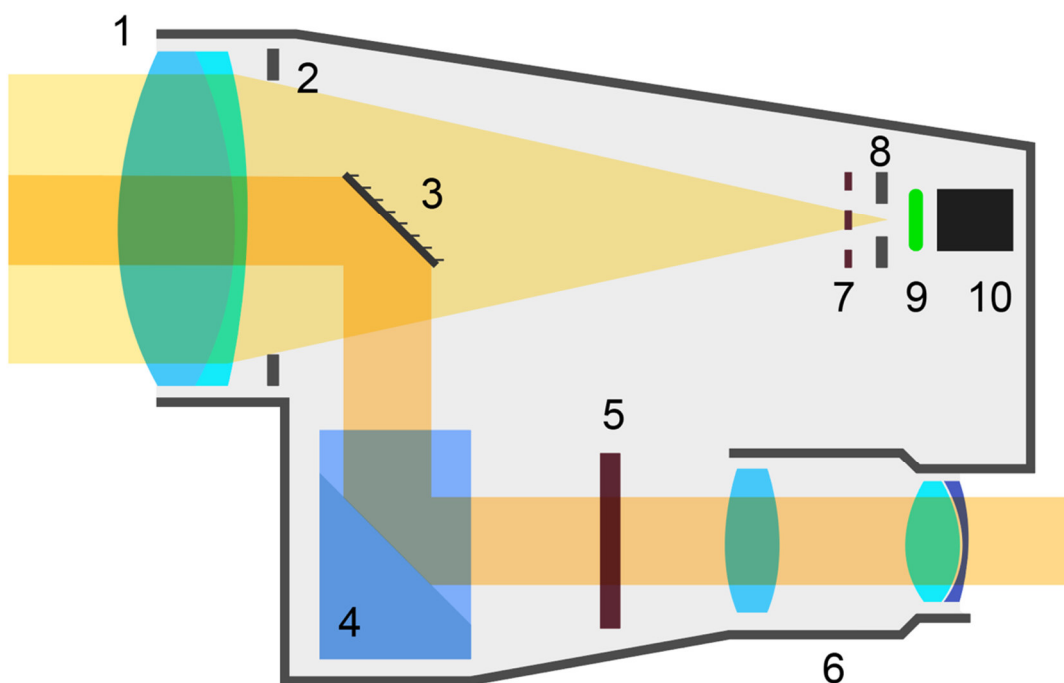


Рисунок 6.7 — Схема устройства яркомера, 1 – линза объектива, 2 – апертурная диафрагма, 3 – зеркало, 4 – призма, 5 – фокусирующий экран, 6 – система линз видоискателя, 7 – прерыватель, 8 – диафрагма поля зрения, 9 – частотный фильтр, 10 – фоточувствительный элемент

### 2.5.2. Люксметр

По аналогии с яркомером люксметр также предназначен для прямого измерения освещенности. В отличие от яркомера, люксметр не имеет сложную оптическую систему и несколько диафрагм. Основным принцип работы люксметра — измерение оптического сигнала фоточувствительным элементом известной площади. Простейший люксметр, а также



схематичное устройство измерительной головки люксметра изображены на рисунке 6.8.

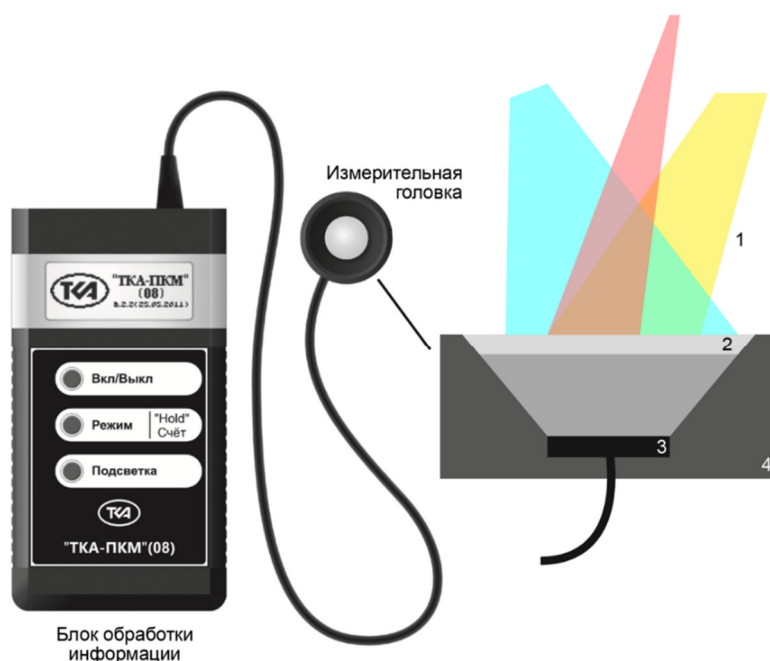


Рисунок 6.8 — Изображение внешнего вида люксметра ТКА-ПКМ 08 и устройства его измерительной головки, 1 – хаотичное излучение, создающее освещение поверхности головки, 2 – матовый рассеивающий фильтр, обеспечивающий равномерное освещение фотоприемника – 3, 4 – корпус головки

### 3. Схема выполнения лабораторной работы

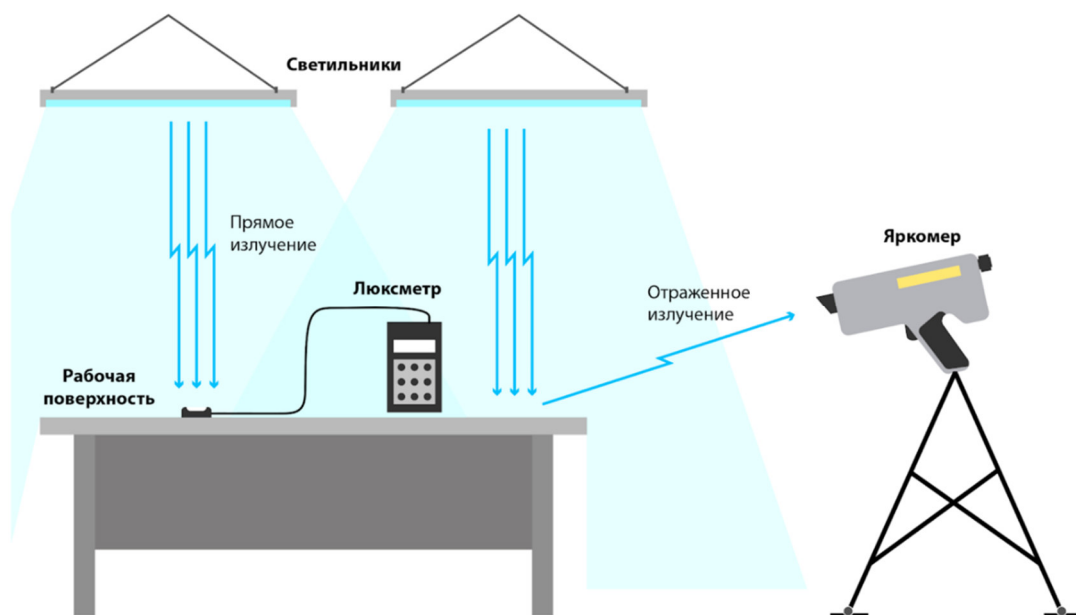


Рисунок 6.9 — Схематическое изображение используемого для выполнения лабораторной работы оборудования и объектов испытаний

## 4. Порядок выполнения лабораторной работы

Перед выполнением лабораторной работы необходимо убедиться в исправности используемого оборудования, а именно — яркомера и люксметра.

### 4.1. Подготовка к проведению измерений

**4.1.1.** Необходимо получить задание у преподавателя, а именно — указание, в каком помещении и на какой рабочей поверхности следует проводить измерения. Кроме того, необходимо также получить информацию о режиме работы всех осветительных приборов в помещении, где будут производиться светотехнические замеры.

**4.1.2.** Далее необходимо убедиться в исправности всех светильников, создающих освещение на рабочей поверхности. При необходимости нужно определить другую рабочую поверхность.

**4.1.3.** Также, необходимо убедиться в отсутствии посторонних источников света, не являющихся светильниками общего назначения. Также стоит избегать естественных источников излучения, если выполнение лабораторной работы происходит в светлое время суток.

#### 4.1.4. Определение сетки измерений

Одним из наиболее важных этапов периода подготовки к выполнению светотехнических замеров является определение точек измерения поверхности.

В общем случае при измерении средней освещенности на рабочей поверхности в помещении количество точек измерения определяется в соответствии со следующим выражением:

$$i = \frac{ab}{h_0(a + b)}, \quad (6.9)$$

где  $a$  и  $b$  есть длина и ширина помещения соответственно,  $h_0$  — вертикальное расстояние от излучающей поверхности светильников до рабочей поверхности

Исходя из полученных результатов расчета, минимальное значение точек замеров составляет: при  $i$  менее 1 — 4, при  $i$  от 1 до 2 — 9, при  $i$  от 2 до 3 — 16, и при  $i$  более 3 — 25.

Однако данное количество точек справедливо по отношению к измерению средней освещенности и яркости во всем помещении. В рамках данной лабораторной работы будут проводиться измерения отдельно взятой рабочей поверхности (стола). Поэтому определим точки измерения в соответствии с рисунком 6.10.

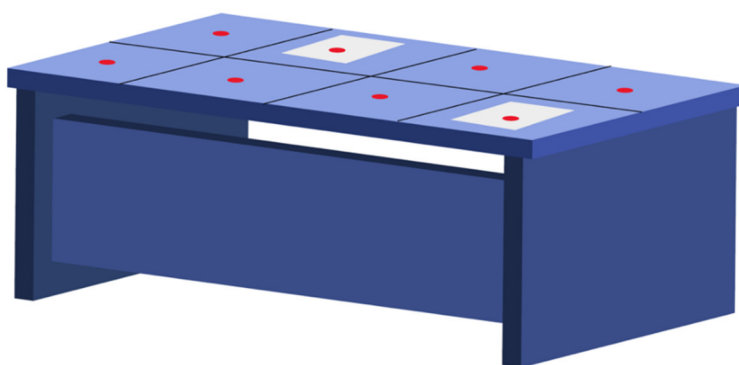


Рисунок 6.10 — Сетка точек измерений яркости и освещенности на рабочем месте, красными точками обозначены примерные области расположения фотоприемной головки люксметра и центральной зоны видоискателя яркомера, черными линиями обозначены сектора сетки

Также стоит расположить выборочно в нескольких секторах сетки белые листы бумаги так, чтобы контрольные точки замеров попадали на данные листы.

## **4.2. Проведение измерений**

Прежде всего необходимо проверить, исключено ли постороннее освещение. Для этого необходимо измерить горизонтальную освещенность на рабочей поверхности, НЕ включая осветительные приборы. Получившееся значение должно составлять не более 2 лк.

Кроме того, необходимо обеспечить стабилизацию светового потока осветительных приборов перед началом измерений. Для этого требуется включить светильники и оставить их во включенном состоянии в течение 15 минут.

### **4.2.1. Измерение освещенности**

**4.2.1.1.** Согласно определенной ранее сетки измерений провести замеры освещенности в каждой из точек;

**4.2.1.2.** Повторить предыдущий пункт трижды;

**4.2.1.3.** Все полученные данные освещенности необходимо зафиксировать.

Стоит помнить, что при наличии комбинированного освещения на рабочем месте (например, настольной лампы) необходимо провести замеры сначала только при работе общего освещения, а затем при комбинированном освещении.

Важным аспектом измерения люксметром является отсутствие тени от каких-либо посторонних предметов на чувствительной области фотометрической головки люксметра.

### **4.2.2. Измерение яркости прямым способом**

При выполнении измерений необходимо помнить, что в объектив яркомера не должно попадать стороннее излучение. На измеряемой поверхности не должно быть теней от посторонних предметов.

**4.2.2.1.** Расположить яркомер таким образом, чтобы его объектив находился на уровне глаз сотрудника, эксплуатирующего измеряемое рабочее место;

**4.2.2.2.** Измерить яркость во всех обозначенных точках, согласно сетке, определенной на подготовительном этапе, и сохраняя расположения яркомера в пространстве, изменяя только угол его обзора, путем наведения средней области видоискателя в зоны, определенные для замеров ранее на этапе подготовки;

**4.2.2.3.** Повторить предыдущих пункт трижды;

**4.2.2.4.** Все полученные данные яркости необходимо зафиксировать.

#### **4.2.3. Измерения яркости косвенным способом**

Измерение яркости рабочей поверхности косвенным способом осуществляется с помощью измерения освещенности в точках, определенных ранее, с дальнейшим усреднением, и пересчетом полученных данных. В рамках выполняемой работы исходными данными для косвенного измерения яркости могут считаться данные, полученные в результате измерения освещенности рабочей поверхности

### **4.3. Обработка результатов измерений**

#### **4.3.1. Определение средней освещенности рабочей поверхности**

Средняя освещенность рабочей поверхности может быть определена с использованием следующего выражения:

$$E_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i, \quad (6.10)$$

где  $E_i$  – измеренные значения освещенности в точках замеров, согласно определенной на этапе подготовки сетке,  $N$  – количество точек.

**4.3.2.** Определение средней яркости рабочей поверхности прямым способом.

Средняя яркость рассчитывается аналогично средней освещенности.

**4.3.3.** Определение средней яркости рабочей поверхности косвенным способом.

Для определения средней яркости рабочей поверхности косвенным способом необходимо рассчитать полученные данные освещенности согласно следующему выражению:

$$L_{cp} = K \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i, \quad (6.11)$$

где  $K$  – коэффициент пересчета для рабочих поверхностей, имеющих диффузное отражение и определяющийся как:

$$K = \frac{\rho}{\pi}, \quad (6.12)$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения рабочей поверхности, определяющийся в соответствии с специальной шкалой при визуальном сравнении по цвету и светлоте образца с исследуемой поверхностью.

## **5. Форма отчета**

Форма отчета должна соответствовать предъявляемым в Приложении А требованиям к отчету.

## **6. Рекомендуемый для ознакомления список литературы**

— ГОСТ 26824-2018 Здания и сооружения. Методы измерения яркости;

— ГОСТ Р 54944-2012 Здания и сооружения. Методы измерения освещенности;

— ПРИБОР КОМБИНИРОВАННЫЙ “ТКА-ПКМ”(08) Пульсметр + Люксметр (ТУ 4215-003-16796024-16 с изм.2) Руководство по эксплуатации

— Luminance meter LS-100 LS-110 Instruction manual, Konica Minolta.

## **7. Контрольные вопросы**

- Связь светового потока и силы света;
- Понятие яркости и освещенности;
- Принцип работы и устройство яркомера;
- Принцип работы и устройство люксметра.

**Приложение А**  
**Пример оформления отчета**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет ИТМО»**

**ОТЧЕТ**

**О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1**

«Название лабораторной работы согласно методическому пособию»

**Выполнили:**

А.А. Иванов \_\_\_\_\_

А.Б. Иванов \_\_\_\_\_

А.Г. Иванов \_\_\_\_\_

**Проверил:**

А.В. Иванов \_\_\_\_\_

Санкт-Петербург

2020

## 1. Цель

В соответствии с методическими указаниями.

## 2. Задачи

### 2.1. Ознакомиться с конструкцией светодиода

### 2.2. ...

### 2.3. Исследовать спектр светодиода

### 2.4. Рассчитать поток светодиода

### 2.5. ...

Задачи необходимо ставить в соответствии с ожидаемыми результатами выполнения лабораторной работы. Задачи могут быть поставлены как теоретические (изучить, ознакомиться...), так и практические (получить, исследовать...). Каждая поставленная задача должна быть выполнена, а процесс выполнения должен быть описан в разделе «Ход работы».

## 3. Обзор литературы

### 3.1. Конструкция светодиода

Описание конструкции...

### 3.2. ...

В пунктах раздела «Обзора литературы» должны содержаться все пункты из раздела «Задачи», содержащие слова «изучить, ознакомиться...» однако, если раздел «Обзор литературы» будет содержать большее количество пунктов, то это будет приветствоваться.

## 4. Схема измерений

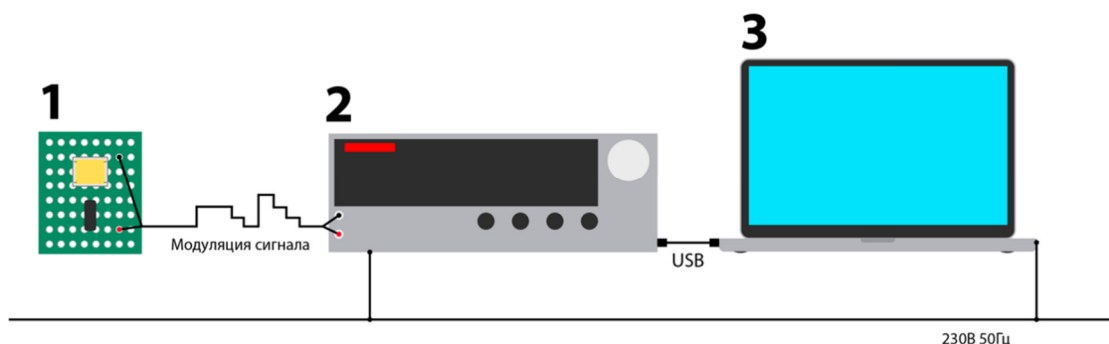


Рисунок 1 — Схема измерений может быть скопирована из методических указаний



## **5. Ход работы**

### **5.1. Конструкция светодиода**

Результаты выполнения данной задачи изложены в пункте 3.1 раздела «Обзор литературы».

### **5.2. ...**

### **5.3. Исследование спектра светодиода.**

### **5.4. Расчет потока светодиода.**

### **5.5. ...**

Пункты раздела «Ход работы» должны быть строго согласованы с поставленными задачами. Для теоретически изученных задач, описание которых вошло в раздел «Обзор литературы», в тексте соответствующего пункта раздела «Ход работы» можно сослаться на пункт «Обзора литературы» БЕЗ необходимости дублирования информации.

## **6. Заключение**

В разделе «Заключение» не следует использовать рисунки и формулы, при необходимости на них нужно сослаться в соответствующие пункты раздела «Ход работы». Раздел «Заключение» должен содержать краткое описание всех результатов работы с авторскими комментариями для каждого результата. Объем данного раздела должен составлять ориентировочно 500 слов.

## **7. Список использованных источников**

На каждый источник должна быть приведена ссылка в разделе «Обзор литературы». НЕ следует ссылаться на источники в других разделах.

Колодезный Евгений Сергеевич  
Бородкин Алексей Игоревич  
Рочас Станислав Станиславович  
Козырева Ольга Андреевна  
Бугров Владислав Евгеньевич

## **Оптоэлектронные приборы: характеристики и применения**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А