

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В.С. Солдаткин

**БИОФОТОНИКА И ФОТОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В
БИОСИСТЕМАХ**

Методические указания для лекционных, лабораторных,
практических и самостоятельных занятий
для обучающихся по направлению подготовки
05.04.06 «Экология и природопользование»

Томск
2022

УДК 681.586: 504 (075.8)
ББК 32.854
С 600

Солдаткин, Василий Сергеевич,

С 600 Биофотоника и фотонное регулирование процессов в биосистемах: методические указания для лекционных, лабораторных, практических и самостоятельных занятий для обучающихся по направлению подготовки 05.04.06 «Экология и природопользование» / В.С. Солдаткин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022 – 36 с.

Настоящие методические указания для лекционных, лабораторных, практических и самостоятельных занятий для обучающихся по направлению подготовки 05.04.06 «Экология и природопользование» предназначены для методического обеспечения дисциплин «Биофотоника и фотонное регулирование процессов в биосистемах», разработаны с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) и содержат необходимую информацию, используемую для лекционных, лабораторных, практических и самостоятельных занятий.

Одобрено на заседании каф. РЭТЭМ протокол № 78 от 16.02.2022.

УДК 681.586: 504 (075.8)

ББК 32.854

© Солдаткин В.С. 2022

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ	5
ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ РАБОТ	6
Глава 1. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ.....	7
1. Источники оптического излучения	7
2. Воздействие оптического излучения на семена растений	9
3. Воздействие оптического излучения на рост и развитие растений	10
4. Воздействие оптического излучения на микроорганизмы	15
5. Воздействие оптического излучения на живые организмы	17
Глава 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	21
1. Лабораторная работа №1	21
2. Лабораторная работа №2	24
3. Лабораторная работа № 3	26
Глава 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....	29
1. Практическое занятие № 1 «Расчёт силы света светодиода»	29
2. Практическое занятие № 3 «Светотехнические характеристики источников света»	30
3. Практическое занятие № 1 «Вывод света из светодиода»	31
Глава 4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА	32
1. Задание на самостоятельную работу № 1 «Инфракрасное излучение».....	32
2. Задание на самостоятельную работу № 2 «Красного цвета свечения»	32
3. Задание на самостоятельную работу № 3 «Оранжевый и жёлтый цвета свечения»	33
4. Задание на самостоятельную работу № 4 «Зелёный цвет свечения».....	33
5. Задание на самостоятельную работу № 5 «Синий цвет свечения».....	33
6. Задание на самостоятельную работу № 6 «Фиолетовый цвет свечения».....	33
7. Задание на самостоятельную работу № 7 «Ультрафиолетовое излучение»	34
8. Задание на самостоятельную работу № 8 «Светодиоды белого цвета свечения».	34
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	35

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания для лекционных, лабораторных, практических и самостоятельных занятий для обучающихся по направлению подготовки 05.04.06 «Экология и природопользование» предназначены для методического обеспечения дисциплин «Биофотоника и фотонное регулирование процессов в биосистемах», разработаны с учетом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) и содержат необходимую информацию, используемую для лекционных, лабораторных, практических и самостоятельных занятий.

Целью преподавания дисциплины является дать базовые знания по воздействию оптического излучения на биологические процессы.

Задачи изучения дисциплины:

- Ознакомление с источниками оптического излучения.
- Ознакомление с воздействием оптического излучения на семена растений.
- Ознакомление с воздействием оптического излучения на рост и развитие растений.
- Ознакомление с воздействием оптического излучения на микроорганизмы.
- Ознакомление с воздействием оптического излучения на живые организмы.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Перед началом лабораторных работ студенты должны получить инструктаж по технике безопасности в лаборатории и ознакомиться с правилами эксплуатации приборов и другого оборудования, используемого при выполнении работ. Инструктаж проводит преподаватель, ведущий занятия. После проведения инструктажа студент расписывается в регистрационном журнале о том, что он ознакомлен с правилами безопасной работы в лаборатории и обязуется их выполнять. Студенты не прошедшие инструктаж к работе не допускаются. Студенты, замеченные в нарушении настоящих правил, отстраняются от выполнения лабораторных работ.

Требования безопасности перед началом и окончанием работы

Каждый студент должен:

- Знать расположение щита электропитания напряжением 220 В, частотой 50 Гц для того, чтобы в случае необходимости быстро отключить питание от лабораторных установок.
- Изучить описание лабораторной работы и инструкции к используемым приборам.
- Ознакомиться с макетом установки.
- Проверить наличие заземления на каждом приборе, подлежащем заземлению. В случае отсутствия заземления сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией;

Запрещается:

- Включать в сеть приборы, вращать ручки настройки без разрешения преподавателя.
- Переставлять приборы из установки;
- Разбирать схемы, вскрывать приборы и т.д.
- Начинать проведение эксперимента без разрешения преподавателя.
- Загромождать рабочее место и установку одеждой, сумками и др. посторонними предметами.

Перед началом эксперимента получить допуск у преподавателя. В присутствии преподавателя включить приборы, входящие в установку, в соответствии с инструкциями к приборам и описанием лабораторной работы. Если приборы не работают, сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией. При нарушении нормальной работы прибора (сильное зашкаливание, характерный запах горелого и т.п.) немедленно отключить прибор и сообщить об этом преподавателю или зав. лабораторией.

Запрещается:

- Работать с незаземленными и неисправными приборами.
- Самим проводить устранение неисправностей.
- Оставлять без наблюдения включенные приборы.

Если работа выполнена полностью и правильно, то по указанию преподавателя выключить приборы в соответствии с инструкцией и привести в порядок рабочее место.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

При появлении запаха гари, дыма или возгорания принять меры по обнаружению источника возгорания и его ликвидации. В случае пожара обесточить помещение, вызвать по телефону 01 пожарную охрану, произвести эвакуацию людей, сообщить администрации о случившемся и приступить к тушению пожара с помощью имеющихся средств пожаротушения. В случае поражения человека электрическим током, необходимо быстро освободить пострадавшего от действия тока. Вызвать врача. Если пострадавший находится без сознания, то нужно привести его в сознание, давая нюхать нашатырный спирт, если пострадавший плохо дышит, начать делать искусственное дыхание и массаж сердца и продолжать их делать до прибытия врача. В случае затопления помещения водой необходимо обесточить помещение, вызвать сантехника, вынести ценное оборудование и при необходимости сообщить администрации о случившемся.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ РАБОТ

В процессе выполнения лабораторной работы студент должен наблюдать за ходом эксперимента, отмечая все его особенности: изменение цвета, тепловые эффекты, выделение газа и т.д. Результаты наблюдений записывают в протокол, придерживаясь определенной последовательности:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- краткая теория;
- результаты эксперимента;
- оценка погрешности измерений;
- выводы по результатам работы.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями ОС ТУСУР 01-2021.

Глава 1. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ

1. Источники оптического излучения

Физик В.В. Петров в 1803 году совершил научное открытие, предложив использование электрической энергии для освещения. Свет излучало пламя между древесными углями, подключенными к полюсам батареи и расположенными на расстоянии 2–6 мм друг относительно друга. Это явление получило название электрической дуги. Расстояние между электродами в условиях его естественного увеличения по мере сгорания углей необходимо поддерживать постоянным. При чрезмерном увеличении расстояния между электродами дуга исчезает и свечение прерывается.

Электротехник В.И. Чикалев через 70 лет создал устройство для авторегулирования угольных стержней дуговых ламп. Но и с этим приспособлением дуговые лампы не получили широкого распространения, так как они имели сложную и дорогостоящую регулировку.

Лодыгин Александр Николаевич в 1870 г. разработал новые электрические лампы накаливания с угольным стержнем [1]. Изобретатель наполнил колбу инертным газом, и лампа накаливания проработала несколько часов. В 1873 году на одной из улиц Петербурга было установлено первое электрическое освещение. Российской академией наук А.Н. Лодыгину присуждена Ломоносовская премия. В патентах Лодыгин закрепил за собой первенство в разработке ламп с нитями накаливания из молибдена, платины, иридия, вольфрама, осмия и палладия. Вольфрамовые нити используются в лампах накаливания и сегодня.

Учёный-изобретатель Павел Николаевич Яблочков в 1876 г. на выставке точных физических приборов в Лондоне продемонстрировал усовершенствованную дуговую электрическую лампу и стал первым человеком, который практически применил переменный электрический ток в электротехнике. До появления его работ считалось, что переменный ток не годится для широкого практического применения. Усовершенствование состояло в том, что длинные электроды располагались не концами друг к другу, а рядом, параллельно. Электроды были разделены слоем каолина – инертного материала, не позволяющего дуге возникнуть по всей длине электродов. Дуга появлялась только на их концах. По мере выгорания видимой части электродов каолин плавился и свет спускался вниз по электродам. Горела такая лампа не более двух-трех часов, но зато невероятно ярко [1]. Эдисон Т.А. организовал массовое производство ламп накаливания. В отличие от А.Н. Лодыгина, который работал один, у Эдисона была собственная лаборатория с необходимым оборудованием, в которой он проводил серии экспериментов. Добившись вакуума порядка 10⁻⁶ мм рт. ст. он занялся подбором материала для нити. Т.А. Эдисон применил волокно обугленного бамбука и получил отличный результат, что послужило основанием для организации компании по массовому производству. Эдисон занялся другими разработками, но письма недовольных потребителей заставили его вернуться к продолжению доработки лампы накаливания и установить, что угольные ниточки в баллоне слишком нежные – легко рвутся и ломаются. Так американский изобретатель приходит к давней мысли А.Н. Лодыгина о возможности использования вольфрамовой проволоки – проволоке из самого тугоплавкого материала.

В настоящее время световая эффективность ламп накаливания достигает 15 лм/Вт. Серийная лампа, потребляющая 100 Вт электрической энергии, излучает световой поток примерно 1250 лм.

Профессор Боннского университета Ю. Плюккер в 1856 году предложил конструкцию газонаполненной стеклянной трубки, через пространство которой он решил пропустить электрический ток. Плюккер подключил электричество к трубке и стал наблюдать, как с ростом напряжения появляется бледное свечение сначала возле положительного электрода, а затем во всей трубке. Было установлено, что различные газы, заполняющие трубку, давали различные цвета свечения. Пары ртути светились зелено-фиолетовым цветом, а пары натрия – желтым.

В конце XIX в. в Англии появилась первая газоразрядная лампа – трубка длиной около

метра. Воздух из нее был тщательно выкачен, а пространство заполнено парами металла натрия. Эти лампы светились ярким жёлтым светом. Но жёлтый свет газоразрядных ламп не передаёт всех цветов окружающих предметов.

Молодой профессор С.И. Вавилов в 1920 году на лекциях по физике в Высшем техническом училище города Москвы сказал студентам: «Будущие города и заводы должны освещаться светом без тепла – холодным светом». Вскоре была разработана газоразрядная ртутная лампа с трубкой, внутренняя поверхность которой была покрыта люминофором. При воздействии ультрафиолетового излучения, испускаемого парами ртути и аргона низкого давления, комбинация люминофоров излучает тёплый белый цвет с желтоватым оттенком. Излучение люминофора основано на явлении фотолюминесценции.

Такие лампы (лампы дневного света) получили широкое распространение в системах освещения. На сегодня промышленные образцы газоразрядных флуоресцентных ламп имеют световую эффективность до 90 лм/Вт.

Создание светодиодной лампы неразрывно связано с созданием и совершенствованием твердотельных полупроводниковых приборов. В этом процессе можно выделить некоторые важные моменты.

Английским инженером Г.Д. Раундом впервые было обнаружено свечение вокруг точечного контакта работающего детектора в 1907 г. [2]. В 20-е годы XX в. Олегом Владимировичем Лосевым обнаружено явление излучательной рекомбинации носителей зарядов в кристаллах карбида кремния и открыта электролюминесценция полупроводников [11]. В 1946 г. Лошкарёвым В.Е. открыта биполярная диффузия неравновесных носителей тока в полупроводниках. В 1947 г. американскими учёными Дж. Бардиным, У. Бреттейном и У. Шокли был создан первый транзистор [3]. Инженер А.В. Красилов и его группа разработали германиевые диоды для радиолокационных станций в НИИ «Исток», а совместно с С.Г. Мадоян впервые обнаружили транзисторный эффект. Лабораторные образцы германиевых транзисторов были разработаны в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) учеными Б.М. Вулом, А.В. Ржановым, В.С. Вавиловым и др.; в Ленинградском физикотехническом институте им. А.Ф. Иоффе (ЛФТИ) – В.М. Тучкевичем и Д.Н. Наследовым; в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ РАН) – С.Г. Калашниковым, Н.А. Пениным и др.

В Америке в 1951 году был создан центр по разработке «полупроводниковых лампочек», действующих на основе «эффекта Лосева» (Losev Light), под руководством К. Леховец. В городе Санта-Клара (Калифорния) в 1955 году У. Шокли основал компанию «Shockley Semiconductor Laboratories» по разработке германиевых и кремниевых транзисторов [3, 4].

В Томске в 1954 году В.А. Пресновым была открыта лаборатория полупроводников в Сибирском физико-техническом институте (СФТИ). Томские исследователи приступили к исследованию арсенида галлия. Совместная работа коллективов Томского государственного университета, СФТИ и НИИ полупроводниковых приборов (АО «НИИ ПП», г. Томск) позволила создать на основе арсенида галлия приборы для СВЧ-электроники и оптики инфракрасного диапазона длин волн. Определяющую роль в разработке этих приборов сыграли профессора С.С. Хлудков, О.П. Толбанов, В.Г. Воеводин, Н.П. Криворотов, А.А. Вилисов, В.Г. Божков, А.В. Войцеховский [5].

В лабораториях Иллинойского университета (США) в 1962 г. на основе структур GaAsP/GaP Н. Холоньяком созданы первые промышленные светодиоды. Первая светодиодная лампочка была создана в 1968 году; в 60-е годы были созданы светодиоды из GaP с красным и желто-зеленым свечением. Внешний квантовый выход составлял не более 0,1 %, спектр излучения находился в диапазоне длин волн 500-600 нм. Световая отдача светодиодов при этом составляла 1-2 лм/Вт.

В 70-е годы Ж.И. Алферов с сотрудниками разработал многопроходные двойные гетероструктуры, позволившие увеличить внешний квантовый выход до 15 % за счет

ограничения активной области рекомбинации для полупроводниковых материалов GaAs и AlGaAs [6]. Для красной части спектра значение световой отдачи достигло 10 лм/Вт и более 30 % КПД – для инфракрасной.

Группа Дж. Панкова из компании «IBM» в 70-х годах создала фиолетовые и голубые диоды на основе полупроводникового материала GaN. Компанией Hewlett Packard в 1976 г. разработаны светодиоды на основе полупроводниковых материалов фосфидов алюминия-галлия-индия, которые излучали краснооранжевый, желтый и желто-зеленый свет. В девяностые годы прошлого столетия световой поток светодиодов увеличился до 100 лм. Сюдзи Накамура из японской компании Nichia Chemical в 1991 г. с помощью гетероструктуры на основе нитрида индиягаллия InGaN создал светодиод синего цвета свечения. Корпорацией «Nichia» с 1993 г. организовано серийное производство светодиодов на основе кристалла InGaN, а в 1996 г. разработан и внедрён в массовое производство светодиод белого цвета свечения на основе кристалла InGaN и фотолюминофора YAG [7]. Светодиоды начали широко использоваться в устройствах освещения, обеспечив создание индустрии полупроводниковых энергоэффективных источников света.

2. Воздействие оптического излучения на семена растений

По предпосевные обработки семян ультрафиолетовым излучением известен способ [8]. Способ предпосевной обработки семян сосны обыкновенной включает обработку семян излучением разрядной ртутной лампы высокого давления через светофильтры или в сочетании с химическими стимуляторами. Обработку проводят на расстоянии 20 см в течение 1-40 с. В качестве светофильтров используют выделяющие ультрафиолетовые и фиолетовые светофильтры и отсекающие бесцветные светофильтры толщиной 1-5 мм. В качестве химических стимуляторов применяют фумар, крезацин и парааминобензойную кислоту. Изобретение позволяет увеличить всхожесть семян и ускорить рост проростков сосны обыкновенной.

В [9] показано, что для предпосевной обработки семян УФ-излучением, наиболее эффективным является диапазон длин волн 302-365 нм, так как в этой области коэффициент поглощения семян составляет 80-85%. УФ-излучение влияет на электрическое состояние молекул вещества, клеточных мембран и биocolлоидов, что в свою очередь активирует обменные процессы между клетками и окружающей средой. В момент прорастания семян, УФ-излучение, за счёт ускорения обменных процессов, способствует ускорению доставки воды и питательных веществ к зародышу, усиливает дыхание и ростовые процессы, что оказывает положительное влияние на рост и развитие растения [10].

В работе [11] приведены результаты исследований процессов прорастания семян *Pinus silvestris* L после предпосевной обработки УФ-излучением газоразрядной лампы ДРТ 400 и установлено, что наиболее эффективной экспозиционной дозой предварительного облучения прорастания семян является 14900 Дж/м². В работе [12] приведены результаты предпосевной обработки семян УФ излучением семян туи декоративной, установлено, что обработка семян УФ излучением позволила повысить длину корня на 20%, сухую массу на 25% и приживаемость растений на 26% по сравнению с контрольным образцом. Для проведения исследований использовалась облучательная установка на основе УФ-светодиодной матрицы с длиной волны излучения 360 нм. Наиболее эффективная дозой облучения семян туи оказалась равной 2,2 кДж/м². В работе [13] приведены результаты экспериментов по влиянию УФ излучения на семена западной туи и колючей ели, наилучший количественный результат при прорастании семян наблюдается после облучения дозой 9,9 кДж/м².

Известен ряд технических решений устройств для облучения семян УФ-излучением. Например, в [14] предложен следующий способ повышения всхожести семян бобовых растений за счёт облучения УФ-излучением. Предпосевная обработка семян включает в себя два этапа, на первом этапе семена подвергают аэрозольному увлажнению водным раствором до влажности семян 25-30%, затем семена выдерживаются в течение двух трёх часов, чтобы

пропитаться влагой. После этого семена облучают УФ-излучением в диапазоне длин волн 300-350 нм в течение 50-60 с. Для облучения использовалась газоразрядная лампа ДРТ – 400. В [15] предложено устройство для ультрафиолетовой обработки семян, в котором вместо ртутной газоразрядной лампы предлагается использовать эксиплексную лампу барьерного разряда на рабочих молекулах ХеСl*. В [16] предложен способ предпосевной обработки семян сосны обыкновенной УФ излучением газоразрядной лампой высокого давления через светофильтры на расстоянии 20 см в течение 1-40 с, а также том числе с применением химических стимуляторов. В [17] предложено устройство для ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием. Устройство содержит бункер, пульт управления, электропривод с редуктором, шнек, заслонку, кожух, крышку кожуха, ультрафиолетовую лампу, отражающее покрытие, отсек выгрузки, раму. В [18] предложено устройство для предпосевной обработки семян с автоматическим механизмом подачи семян, источником ультрафиолетового излучения Camelion LH26 FS/BLB/E2, приводного вала, подшипника, электромотора, редуктора, блока питания и счетчика мощности дозы.

3. Воздействие оптического излучения на рост и развитие растений

Известно, что применение светодиодов для выращивания растений способствует повышению урожайности.

Основными целями применения садоводческого освещения могут являться:

- поддержание состояния растения в условиях недостаточной освещённости;
- повышение продуктивности, которое включает в себя повышение биомассы растений, увеличение количества всходов, повышение количества плодов и т.д.
- повышение витаминного содержания в растениях, данная цель актуальна для выращивания растений в условиях космической орбитальной станции.

В соответствии с ГОСТР 57671 приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц классифицируют:

- по светораспределению и кривой силы света – в соответствии с п. 5.1.1 ГОСТ Р 54350;
- по климатическому исполнению и категории размещения – в соответствии с ГОСТ 15150;
- по механической прочности – в соответствии с ГОСТ 17516.1;
- степени защиты от воздействия окружающей среды (код IP) – в соответствии с ГОСТ 14254.

По основным способам освещения:

- освещение растений сверху;
- дополнительное освещение растений в объеме ценоза (междурядное освещение);
- освещение растений в многоярусных установках стеллажного типа.

Исходя из поставленной цели возможны различные варианты конструкции светильников.

В настоящее время существует три подхода к светодиодному освещению. Первый тип, это теплицы, в которых светодиодные светильники используются в качестве дополнительного освещения к естественному или искусственному освещению лампами ДНАТ. На разных стадиях роста растений требуются определённые спектры освещения, такое освещение используется, например, для утолщения стебля, увеличения размеров листьев, цветения, плодоношения и размеров плодов.

Второй тип, это теплицы, в которых светодиодное освещение используется в качестве досветки когда не хватает естественного освещения. Такой тип светильников применяется в зимний период, в условиях Крайнего Севера, в условиях короткого светового дня. Обеспечивает для растения необходимый спектр излучения и освещённость.

Третий тип, это теплицы, в которых светодиодное освещение используется как основное, а естественное освещение отсутствует.

Исходя из выше указанных подходов к организации освещения в теплице,

светодиодные светильники можно разделить на две группы. К первой группе относятся светильники для дополнительного освещения в комбинации с естественным или искусственным освещением от ламп ДНАТ для дополнительного воздействия на тепличные растения излучением в синей и красной области оптического спектра видимого диапазона. Ко второй группе относятся светильники высокой мощности с широким оптическим спектром видимого диапазона, которые используются в качестве основного освещения при отсутствии естественного освещения или досветки в условиях короткого светового дня.

Спектральные кривые синтеза хлорофилла, фотосинтеза и поглощения лучистой энергии листом приведены на Рис. 1.

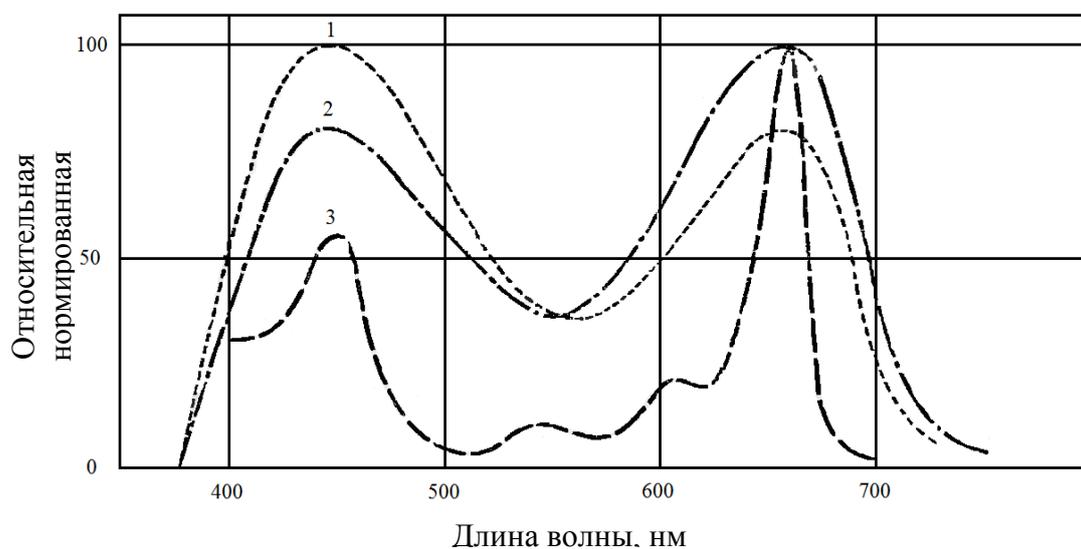


Рисунок 1 – Спектральные кривые:
 1. – поглощение лучистой энергии листом; 2. – фотосинтез;
 3. – синтез хлорофилла

Эффективный спектр излучения для роста растений приведен на Рис. 2.

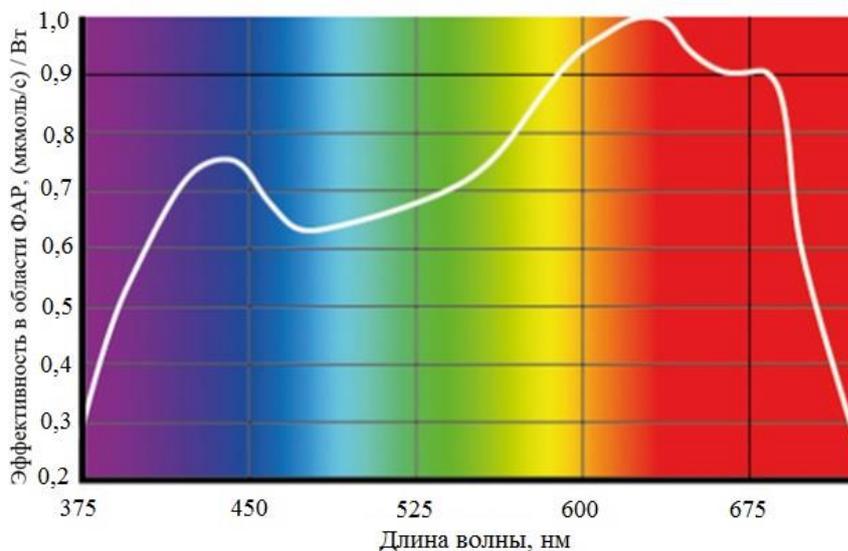


Рисунок 2 – Эффективный спектр излучения для роста растений

Известно, что качество освещения напрямую влияет на качество и объём урожая в теплице. Свет влияет на фотосинтез растения. В общем смысле фотосинтез можно представить

в виде формулы:



Процесс фотосинтеза делится на два этапа:

– поглощение фотонов зелёным пигментом молекулы хлорофилла приводя его в возбужденное состояние, электроны, они переходят на более высокие уровни и участвуют в процессе синтеза, при расщеплении воды, под воздействием электронов, протоны превращаются в атомы водорода и участвуют в синтезе углеводов, в завершении происходит синтез аденозинтрифосфата – в биологических системах выполняет роль аккумулятора энергии;

– синтез глюкозы и выделение кислорода происходит в тёмное время суток и обусловлен тем, что не расходуется световая энергия, процесс происходит в строме хлоропластов.

Хлорофилл А – необходим для окисленного фотосинтеза, передаёт резонансную энергию в реакционный центр, где расположены специальные хлорофиллы и является частью антенного комплекса. Поглощение свет происходит в фиолетово-голубой и оранжево-красной области оптического спектра.

Хлорофилл В – вспомогательный пигмент фотосинтеза, он имеет жёлто-зеленый цвет. При низкой освещённости расширяется диапазон длин волн оптического спектра, которые поглощают хлоропласты, адаптированными к низкой освещенности.

Каротиноиды – вспомогательными пигментами поглощаемое излучение переносят на хлорофилл, желтый, оранжевый, красный или коричневый пигменты, активно поглощающие излучение в сине-фиолетовой области оптического спектра. Предназначены для защиты хлорофиллов от избыточного излучения и от окисления кислородом, выделяемым при фотосинтезе.

Для оценки воздействия излучения на растение используется понятие фотосинтетически активная радиация (ФАР) – оптическое излучение в диапазоне от 400 до 700 нм, используемое растениями для фотосинтеза, роста и развития.

Рассчитывают фотосинтетический поток фотонов по формуле:

$$E_{\text{ФАР}} = \int_{400 \text{ нм}}^{700 \text{ нм}} E_{\lambda} \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot N_A} d\lambda = K \int_{400 \text{ нм}}^{700 \text{ нм}} E_{\lambda} \cdot \lambda d\lambda, \quad (1)$$

где, E_{λ} – спектральная плотность энергетической облучённости, Вт/(м²·с);

λ – длина волны, нм;

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^{17}$ нм/с – скорость света;

$N_A = 6,022 \cdot 10^{17}$ мкмоль⁻¹ – число Авогадро;

$K = 8,36 \cdot 10^{-3}$ мкмоль⁻¹·Дж⁻¹ – коэффициент.

Соответствие величин световой и фотосинтетической фотонной систем приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Соответствие величин световой и фотосинтетической фотонной систем

Световая величина	Единицы измерения	Соответствие величин световой и фотосинтетической фотонной систем	Единицы измерения
Световой поток	лм	Фотосинтетический фотонный поток	мкмоль/с
Освещенность	лм/м ²	Фотосинтетическая фотонная облученность	мкмоль/(м ² ·с)
Световая отдача	лм/Вт	Фотосинтетическая фотонная отдача	мкмоль/(с·Вт)

Объективным показателем величины урожая (высокий, средний, низкий) может служить коэффициент использования ФАР. Хорошие урожаи соответствуют 2 – 3%

использования ФАР. При использовании сортов интенсивного типа и оптимизации всех процессов формирования урожая возможна аккумуляция в урожае 3,5 – 5% ФАР и более.

Доказано, что для образования продуктов фотосинтеза при всех благоприятных условиях (орошение, высокая концентрация CO₂) солнечная энергия используется только на 2%. В среднем КПД фотосинтеза сельскохозяйственных растений в реальных условиях составляет около 0,5 – 1% (то есть около 16 кДж/м² в час), теоретически же возможно повышение уровня этого показателя до 4 – 6%. Одной из самых насущных задач, стоящих перед практическим сельскохозяйственным производством, и является повышение эффективности фотосинтеза.

Согласно результатам исследований различных организаций, имеем следующие результаты:

15 – 30 Вт/м² – низкая интенсивность ФАР (минимально допустимая): рост вегетативных органов происходит, но не образуются полноценные генеративные органы.

40 Вт/м² – согласно разработкам Института Гипронисельпрома такая ФАР с фотопериодом 14 часов (0,56 кВт×ч/м²×день) является оптимальной нормой облученности в теплице для выращивания рассады.

65 – 90 Вт/м² – на высокоэффективных фитокомплексах круглогодичного интенсивного производства растительной продукции разработки Агрофизического института достигается высокая урожайность.

Коэффициент равномерности облученности 0.55÷0.75. Длительность облучения не указана. Видимо зависит от выращиваемой культуры (12÷16 часов).

100 Вт/м² – согласно разработкам Института Гипронисельпрома такая ФАР с фотопериодом 16 часов (1,6 кВт×ч/м²×день) является оптимальной нормой облученности в теплице для выращивания на продукцию.

150 – 220 Вт/м² – согласно многим источникам считается оптимальной интенсивностью ФАР, при которой наблюдается максимальное накопление биомассы в единицу времени. Фотосинтез и рост хорошо сбалансированы при фотопериоде 16 часов (2.4÷3.52 кВт×ч/м²×день).

280 – 300 Вт/м² – верхний разумный предел применения досветки. В зависимости от метода управления искусственным освещением реализуется соответствующий алгоритм отключения досветки.

400 Вт/м² (фотопериод 16ч. – 6.4 кВт×ч/м²×день) и более – насыщенная интенсивность ФАР, при которой достигается выход фотосинтеза на плато светового насыщения, т.е. максимальный фотосинтез. Растения приобретают низкорослую форму.

Современное состояние садоводческого освещения

Светодиодный светильник для садоводческого освещения производства OSRAM GmbH PHYTOFY RL 150 Вт приведён на Рис. 3.

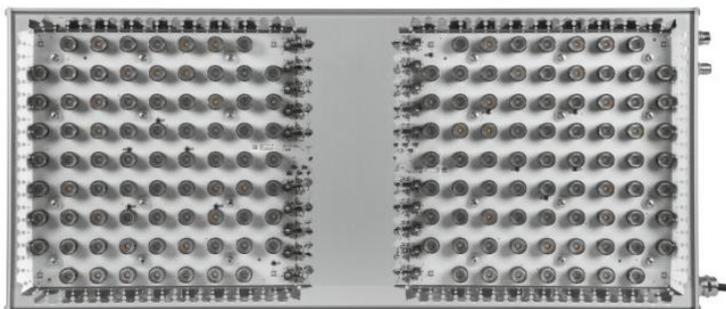


Рисунок 3 – Светодиодный светильник для садоводческого освещения производства OSRAM GmbH PHYTOFY RL

Светильник OSRAM GmbH «PHYTOFY RL» имеет мощность 150 Вт, спектр излучения: 385 нм, 450 нм, 521 нм, 660 нм, 730 нм., обеспечивает фотосинтетическую фотонную облученность: УФ 50, синий 250, зелёный 100, красный 250, ИК 100 мкмоль/м²·с.

Светодиодный светильник для садоводческого освещения производства Diode System Copyright DS-FITO A 150 приведён на Рис. 4.



Рисунок 4 – Светодиодный светильник для садоводческого освещения производства Diode System Copyright DS-FITO A 150

Светильник Diode System Copyright «DS-FITO A 150» имеет мощность 150 Вт, составляющие спектра излучения 440-460 нм – 17%, 640 нм – 79%, 730 нм – 4%.

Внешний вид светодиодного светильника УСС 120 БИО для садоводческого освещения производства компании Фокус приведён на Рис 5.



Рисунок 5 – Светодиодный светильник для садоводческого освещения производства Фокус УСС 120 БИО

Светильник Dioga Quadro Agro 30/4000 (PPF 70) Д лира, мощностью 30 Вт, обеспечивает фотосинтетический поток излучения (PPF) – 70 мкмоль/с. Рис. 6 [18]



Рисунок 6 – Светодиодный светильник для садоводческого освещения производства Diora Quadro Agro 30/4000 (PPF 70) Д лира

4. Воздействие оптического излучения на микроорганизмы

К микроорганизмам относятся микробы, бактерии, вирусы, риккетсии, грибы, актиномицеты и дрожжи.

Микробы – одноклеточными, многоклеточными и неклеточными живые организмы размеры которых составляют от 1 нм до 100 мкм.

Бактерии – одноклеточные микроорганизмы размерами от 10 до 500 мкм, бывают трёх основных форм: шаровидные (кокки), палочковидные (бациллы и т.д.) и извитые (вибрионы, спирохеты, спириллы). Шаровидные бактерии могут располагаться в питательной среде по одиночке (микрোকки), попарно (диплококки), в виде цепочек (стрептококки) или виноградных гроздьев (стафилококки), пакетом (сарцины). Палочковидные бактерии могут располагаться в питательной среде по одиночке, попарно (диплобактерии) или в цепочки (стрептобактерии). Палочковидные бактерии, которые образуют споры называются бациллами, бациллы имеющие внешний вид веретена называются клостридиями. Извитые бактерии классифицируются по внешнему виду: в виде запятой (вибрионы), с несколькими завитками (спириллы) и тонкие извитые палочки (спирохеты). Клетка бактерии состоит из оболочки покрытой слизью, внутри оболочки содержится цитоплазма, отделённая от оболочки клеточной мембраной. Цитоплазма – это прозрачная белковая масса, находящаяся в коллоидном состоянии. Цитоплазма содержит рибосомы и питательных веществ (гликогена, жира и др.). Рибосомы – это ядерный аппарат с молекулами ДНК. Микоплазмы – бактерии без клеточной стенки. Для развития и роста микоплазм необходимы вещества, содержащиеся в дрожжах. Вирусы – разновидность микроорганизмов, не имеющих клеточного строения, размеры от 8 до 150 нм. Существуют вирусы, состоящие только из белка и одной из нуклеиновых кислот (ДНК или РНК). Риккетсии – разновидность микроорганизмов, занимающих промежуточное положение между бактериями и вирусами. Это неподвижные палочки (размеры не более 1 мкм), они не образующие спор и капсул и являются внутриклеточными паразитами, как и вирусы. Грибы – особые растительные организмы, не имеют хлорофилла и не синтезируют органические вещества. Грибы нуждаются в готовых органических веществах. Клетки грибов имеют ядра и вакуоли и похожи на растительные клетки. Актиномицеты – разновидность микроорганизмов с признаками бактерий и грибов. Дрожжи – разновидность одноклеточных микроорганизмов. Дрожжи неподвижные и имеют

размеры до 15 мкм. Клетки имеют ядро и вакуоли [19-23].

Из выше сказанного видно, что все микроорганизмы в своей структуре имеют белок.

Для проведения санитарно-бактериологического анализа используется метод, сущность которого заключается в определении в 1 см³ воды общего содержания мезофильных, мезотрофных аэробов и факультативных анаэробов, способных расти на питательном агаре данного состава при температуре (37±0,5) °С в течение (24±2) ч, образуя колонии, видимые при увеличении в 2-5 раз. Требования к микробиологическим и паразитологическим показателям в соответствии с [24]: термотолерантные колиформные бактерии число бактерий в 100 мл – отсутствие; общие колиформные бактерии число бактерий в 100 мл – отсутствие; общее микробное число образующих колонии бактерий в 1 мл – не более 50; колифаги число бляшкообразующих единиц в 100 мл – отсутствие; споры сульфитредуцирующих клостридий число спор в 20 мл – отсутствие; цисты лямблий число цист в 50 л – отсутствие.

Известен способ идентификации микроорганизмов по их флуоресценции белков. Способ идентификации микроорганизмов, включает облучение микробной взвеси светом с последующей регистрацией их люминесценции. Микроорганизмы облучённые видимым или/и ультрафиолетовым излучением в диапазоне 250 – 600 нм, излучают в оптическом спектра при комнатной температуре в диапазоне 300 – 800 нм. По измеренным данным определяют положение максимумов спектральной характеристики и соотношение интенсивностей этой люминесценции в различных максимумах и по набору этих величин идентифицируют микроорганизмы.

Для проведения исследований по воздействию излучения УФ диодов на микроорганизмы в водной среде не требуется идентификация микроорганизмов. Поэтому на данном этапе исследований достаточно использовать метод визуальной микроскопии. Таким образом можно сформулировать требования к методике эксперимента:

- провести анализ количества и форм микроорганизмов в водной среде с использованием цифрового микроскопа;
- построить график зависимости количества микроорганизмов в водной среде от времени облучения;
- после облучения, для подтверждения факта полной дезинфекции воды, нанести воду после облучения на питательную среду агара, поместить в термостат при температуре (37±0,5) °С на течение (24±2) ч., под микроскопом проверить наличие колоний микроорганизмов.

К бактерицидному излучению относится электромагнитное излучение УФ диапазона длин волн в интервале от 205 до 315 нм. Бактерицидная облученность – это поверхностная плотность падающего бактерицидного потока излучения (отношение бактерицидного потока к площади, облучаемой поверхности). Бактерицидный поток излучения (эффективный) – это бактерицидная мощность излучения, оцениваемая по ее воздействию на микроорганизмы согласно относительной спектральной бактерицидной эффективности. Объемная бактерицидная доза (экспозиция) – это объемная плотность бактерицидной энергии излучения (отношение энергии бактерицидного излучения к воздушному объему облучаемой среды). Поверхностная бактерицидная доза (экспозиция) – это поверхностная плотность бактерицидной энергии излучения (отношение энергии бактерицидного излучения к площади облучаемой поверхности).

На рисунке 7 приведена кривая относительной спектральной бактерицидной эффективности.

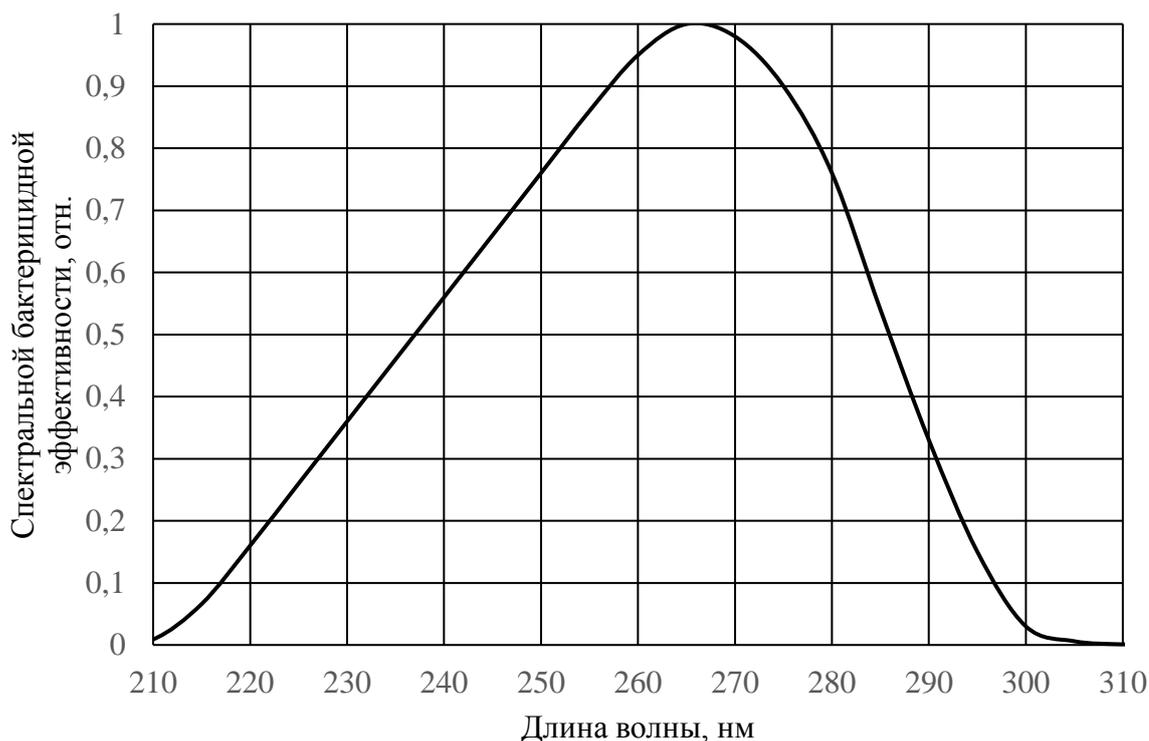


Рисунок 7. – Кривая относительной спектральной бактерицидной эффективности

УФ диод – это полупроводниковый прибор, как и у светодиода, его работа основана на явлении электролюминесценции – излучение фотонов твёрдым телом под воздействием электрического тока. УФ диод содержит излучающий кристалл на основе твёрдых соединений нитридов индия, галлия и алюминия, теплопроводящий корпус в отражатель которого смонтирован кристалл и герметично залить оптически прозрачным компаундом на основе эпоксидной смолы или кремнийорганических материалов в зависимости от спектрального диапазона излучения. Основными характеристиками УФ диодов являются максимум длины волны излучения, оптическая мощность излучения, значение прямого постоянного тока, значение прямого постоянного напряжения, кривая силы излучения и тепловое сопротивление.

Согласно [25] доза ультрафиолетового облучения необходимая для инактивации 99,9% различных видов микроорганизмов: *Shigella flexneri* – 5,2 мДж/см²; *Salmonella typhi* – 7,5 мДж/см²; *Shigella dysenteriae* – 8,8 мДж/см²; *Proteus vulgaris* – 7,8 мДж/см²; *Staphylococcus aureus* – 7,8 мДж/см²; *Escherichia coli* – 6,0 мДж/см²; *Virus poliomyelitis* – 6,0 мДж/см²; *Salmonella paratyphi* – 6,1 мДж/см²; *Vibrio cholerae* – 6,5 мДж/см²; *Orthomyxoviridae* (вирусы гриппа) – 6,6 мДж/см²; *Salmonella enteritidis* – 7,6 мДж/см²; *Mycobacterium tuberculosis* – 10,0 мДж/см²; *Pseudomonas aeruginosa* – 10,5 мДж/см²; *Virus hepatitis A* – 11,0 мДж/см².

Исходя из вышесказанного устройство для обеззараживания воды на основе УФ диодов должно обеспечивать дозу облучения не менее 25 мДж/см². Берём двукратный запас по дозе облучения, чтобы предусмотреть деградацию УФ диодов от времени наработки.

5. Воздействие оптического излучения на живые организмы

Аэрозольные частицы классифицируют по агрегатному состоянию, дисперсной фазы, по дисперсности и по происхождению.

По агрегатному состоянию аэрозоли делят на туманы – системы с жидкой дисперсной фазой и дымы – системы с твердыми частицами. К дымам следует отнести по

этой классификации и пыли – системы с твердыми, но более крупными частицами. Смог это дым с туманом.

По дисперсности аэрозоли с твердой дисперсной фазой разделяют на дымы с частицами от 10^{-7} до 10^{-3} см и на пыли, размер частиц которых обычно больше 10^{-3} см.

Туманы, как правило, имеют довольно крупные капельки размером от 10^{-5} до 10^{-3} см.

По происхождению системы с газовой дисперсионной средой разделяют, как и все дисперсные системы, на диспергационные и конденсационные аэрозоли.

Диспергационные аэрозоли, образующиеся при измельчении твердых тел или распылении жидкостей, как и лиозоли, полученные путем диспергирования, имеют довольно крупные частицы и, как правило, полидисперсны. Аэрозоли, полученные методом конденсации из пересыщенных паров или в результате химических реакций, наоборот, обычно являются высокодисперсными системами с более однородными по размеру частицами [21].

Известно, что излучение отражается, преломляется и поглощается при переходе из одной оптической среды в другую.

Отражение света – возвращение световой волны при ее падении на поверхность раздела двух сред с различными показателями преломления «обратно» в первую среду.

Преломление света – явление, заключающееся в изменении направления распространения световой волны при переходе из одной среды в другую, отличающуюся показателем преломления света.

Поглощение света – это уменьшение интенсивности света, проходящего через среду, вследствие взаимодействия его с частицами среды.

Сумма коэффициента поглощения, коэффициентов отражения, пропускания (τ) и рассеяния равна единице. Коэффициенты поглощения и рассеяния принято объединять в коэффициент поглощения (a).

$$\tau = 1 - a, \quad (2)$$

Тогда, поток излучения $\Phi = \Phi_e \times \tau$.

Человеческое зрение воспринимает свет в диапазоне от 380 до 780 нм (рисунок 8).

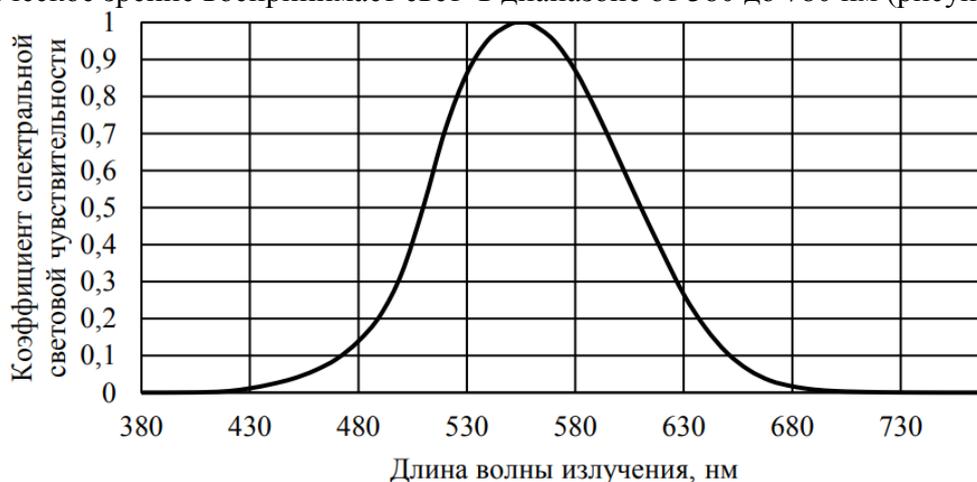


Рисунок 8. Спектральная чувствительность человеческого зрения

А так можно описать измеряемыми величинами каждый цвет и оттенок (рисунок 9).

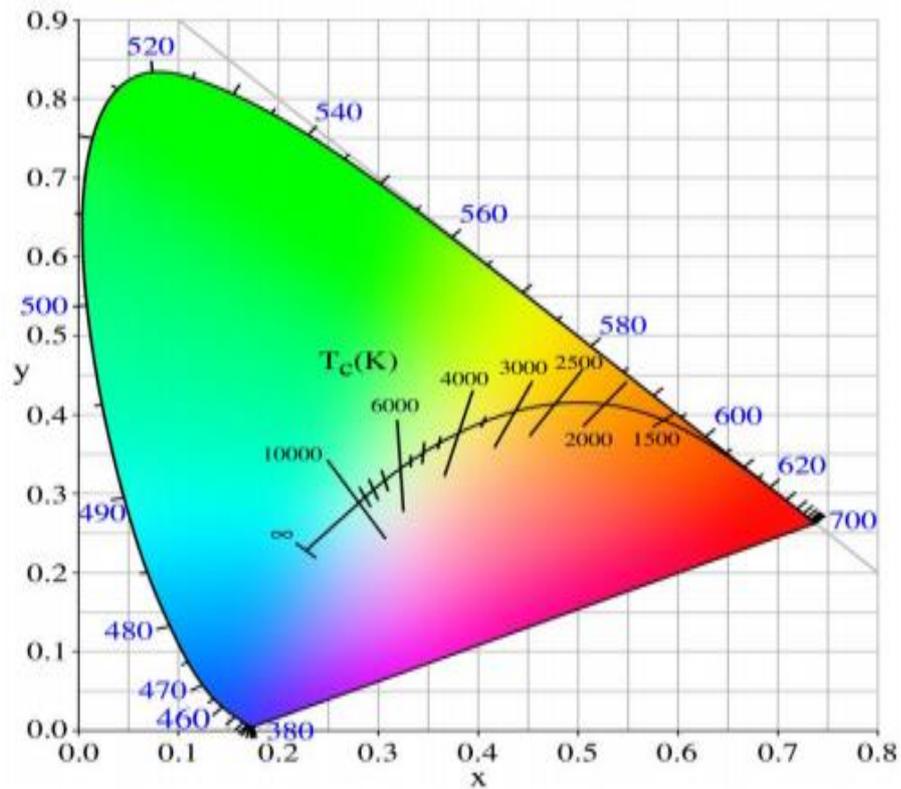


Рисунок 9 – Диаграмма МКО

Но среднестатистический наблюдатель не может так чётко определять цвета, поэтому по результатам ряда исследований установлены эллипсы, в рамках которых человек видит один и то же цвет (рисунок 10).

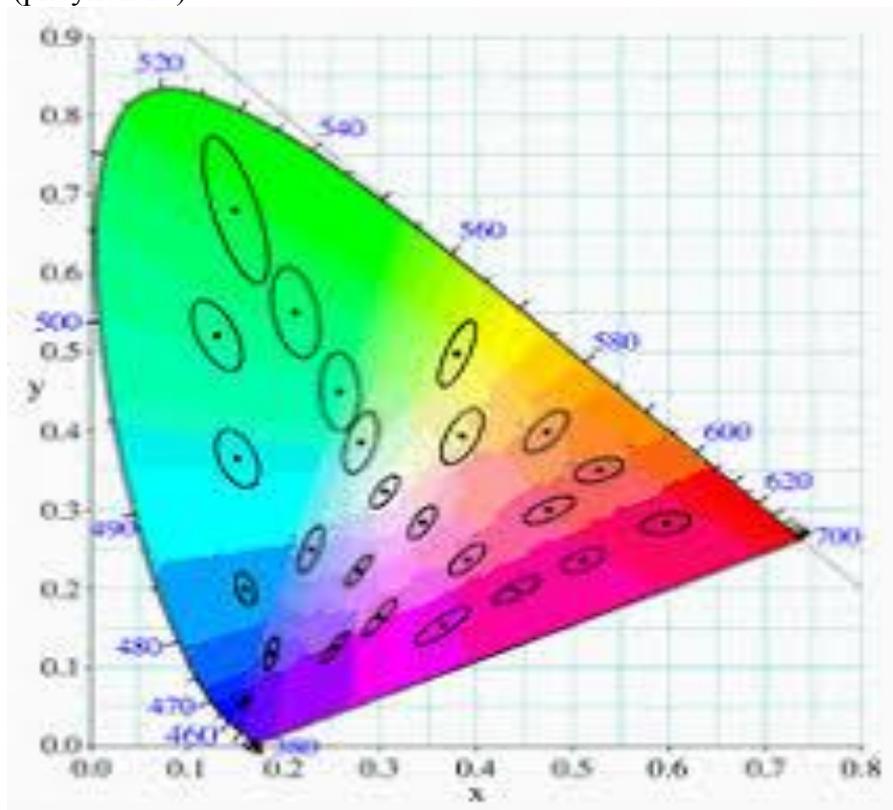


Рисунок 10 – Эллипсы Макадама

За последнее время произошло мощное развитие светодиодных технологий. Внутренний квантовый выход СД близок к 100%, внешний квантовый выход 90%, а световая отдача 270 лм/Вт. Работа светодиода основана на явлении электролюминесценции – излучение фотонов твёрдым телом под воздействием электрического тока [27].

Для инфракрасных диодов (ИК-диодов) более 760 нм применяется арсенид галлия и алюминий галлий арсенид (GaAs, AlGaAs). Данные твердотельные соединения производят методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Сущность метода заключается в осаждении испарённого в молекулярном источнике вещества на кристаллическую подложку, при этом в реакторе должен быть вакуум порядка 10^{-8} Па, чистота материалов 99,999999%, а скорость роста составляет 1 мкм в час. Ширина запрещённой зоны полупроводника составляет от 1,42 до 2,16 эВ.

Для светодиодов красного цвета свечения (610 – 760) нм применяется алюминий галлий арсенид, галлий арсенид-фосфид, галлий фосфид и алюминий-галлий-индий фосфид (AlGaAs, GaAsP, GaP, AlGaInP). Для получения таких материалов применяется метод газофазной эпитаксии (и его разновидности, например, МОС-гидридная эпитаксия (МОСVD)). Данный метод основан на подаче в реактор материалов эпитаксиальных слоев в виде легколетучих веществ или соединений в потоке газа-носителя. В реакторе происходит разложение этих материалов, стимулированное термически и идут химические реакции с их участием, при этом требуемые компоненты осаждаются на подложку, являющуюся основой полупроводникового прибора.

Для светодиодов оранжевого цвета свечения (590 – 610) нм применяется галлий фосфид-арсенид, галлий фосфид и алюминий-галлий-индий фосфид (GaAsP, GaP, AlGaInP). Для получения таких материалов применяется метод газофазной эпитаксии (и его разновидности, например, МОС-гидридная эпитаксия (МОСVD)).

Для изготовления светодиодов жёлтого цвета свечения (570 – 590) нм применяют галлий фосфид-арсенид, галлий фосфид и алюминий-галлий-индий фосфид (GaAsP, GaP, AlGaInP). Для получения таких материалов применяется метод газофазной эпитаксии (и его разновидности, например, МОС-гидридная эпитаксия (МОСVD)).

Для изготовления светодиодов зелёного цвета свечения (500 – 570) нм применяется индий-галлий нитрид/галлий нитрид, галлий фосфид, алюминий-галлий фосфид и алюминий-галлий-индий фосфид (InGaN/GaN, GaP, AlGaP, AlGaInP). В настоящее время наибольшее применение получила МОСVD эпитаксия.

Для изготовления светодиодов синего цвета свечения (450 – 500) нм применяется нитрид галлия и его соединения с индием и алюминием. Такие материалы получают методом МОСVD эпитаксии.

Светодиоды фиолетового цвета свечения (380 – 450) нм изготавливают из InGaN, применяется метод МОСVD эпитаксии.

Ультрафиолетовые светодиоды изготавливают из (менее 380 нм) преимущественно изготавливают из нитрида алюминия и InGaN.

Глава 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1. Лабораторная работа №1

Целью работы является знакомство с методами и средствами измерения светотехнических характеристик источников света, оценка их возможностей и погрешностей.

Краткая теория

Свет – это видимая область электромагнитного излучения в диапазоне от 380 до 750 нм.

В таблице 2 приведены диапазоны спектров оптического излучения.

Таблица 2. Диапазоны спектров оптического излучения

ИК – излучен (10 ³ – 10 ⁵ ГГц) 300 мкм – 750 нм	Видимый свет (10 ¹³ – 10 ¹⁵ ГГц) 750 – 380 нм	УФ – излучение (7,5·10 ¹⁴ Гц – 3·10 ¹⁶ Гц) 380 нм – 10 нм
Сверхдальняя зона 34 – 15 мкм	Красный 620 – 760 нм	Ближний (длинноволновый) 400 – 300 нм
Дальняя зона 15 – 6 мкм	Оранжевый 590 – 620 нм	Средний (средневолновый) 300 – 200 нм
Средняя зона 6 – 3 мкм	Жёлтый 560 – 590 нм	Дальний (коротковолновый) 200 – 122 нм
Ближняя зона 3 – 0,76 мкм	Зелёный 500 – 560 нм	Экстремальный 121 – 10 нм
	Голубой 470 – 500 нм	
	Синий 430 – 470 нм	
	Фиолетовый 380 – 430 нм	

Человеческий глаз содержит экстерорецепторы называемые колбочками. Восприятие человеком света описывается фотопической функцией, графическая зависимость приведена на рисунке 11.

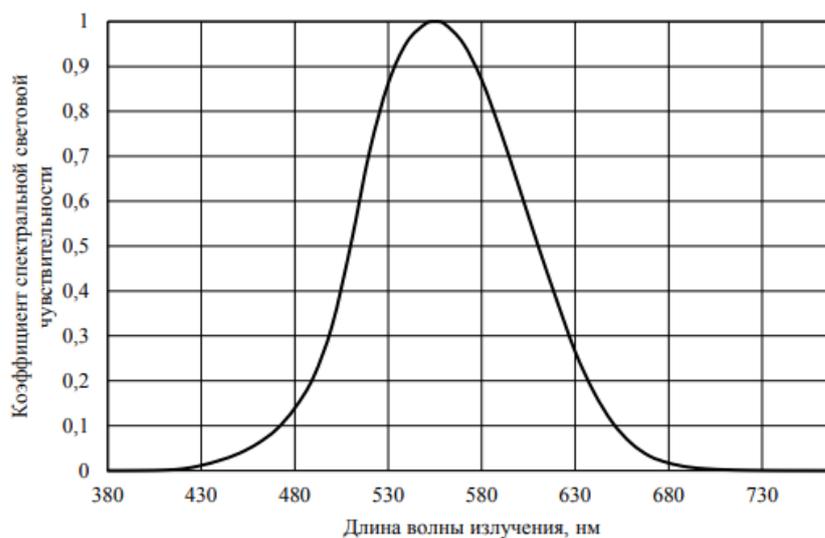


Рисунок 11 – Фотопическая функция

Основываясь на фотопической функции физические величины, описывающие излучение можно разделить на энергетические и световые. Переход от энергетических величин к световым осуществляется по формуле (3):

$$\Phi = 683(\text{лм/Вт}) \times K \times P \quad (3)$$

где, Φ – световой поток, лм; K – уровень спектральной световой чувствительности для данной длины волны излучения; P – оптическая мощность излучения, Вт.

В таблице 3 приведены энергетические величины в таблице 3 световые.

Таблица 3. Энергетические величины

Наименование	Символ	Единица измерения		
		Россия	Система СИ	Квантовый аналог
Поток излучения	Φ_e	Вт	W	N_{ph}/s (кол-во фотонов в секунду)
Энергия излучения	Q_e	Дж	J	N_{ph} (кол-во фотонов)
Энергетическая сила излучения (сила излучения)	I_e	Вт/ср	W/sr	$N_{ph}/sr \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле 1ср в секунду)
Поверхностная плотность потока излучения	M_e	Вт/м ²	W/m^2	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов излучаемых с 1м ² в секунду)
Энергетическая освещенность (облученность)	E_e	Вт/м ²	W/m^2	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов на 1м ² в секунду)
Энергетическая яркость	L_e	Вт/ср*м ²	$W/sr \cdot m^2$	$N_{ph}/sr \cdot m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле в 1ср на 1м ² в секунду)

Таблица 4. Световые величины

Наименование	Символ	Единица измерения	
		Россия	Система СИ
Световой поток	Φ_v	лм	lm
Световая энергия	Q_v	лм*с	$lm \cdot s$
Сила света	I_v	лм/ср = кд	$lm/sr = cd$
Поверхностная плотность светового потока	M_v	лм/м ²	lm/m^2
Освещенность	E_v	лк	$lm/m^2 = lx$
Яркость	L_v	лм/ср*м ² = кд/м ² = нит	$lm/sr \cdot m^2 = cd/m^2 = nit$

Мощность излучения или поток излучения – это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через известную площадь

$$\Phi_e (P_e) = dQ_e/dt \quad (4)$$

где Φ_e – поток излучения (Вт), P_e – мощность излучения (Вт);

Q_e – энергия излучения (Дж);

t – время (с).

Сила излучения – поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла в котором он распространяется.

$$I_e = \Phi_e/\Omega \quad (5)$$

где I_e – сила излучения (Вт/ср);

Φ_e – поток излучения (Вт);

Ω – телесный угол (ср).

Телесный угол расположен в конусе с вершиной в центре сферы (место расположения источника излучения) и равен отношению площади, вырезанной в сфере этим конусом к квадрату радиуса сферы, измеряется в стерadianах.

$$\Omega = S/r^2 \quad (6)$$

где Ω – телесный угол (ср),

S – площадь основания конуса ограниченного сферой в которой распространяется

излучение,

r – радиус сферы в которой распространяется излучение.

Поверхностная плотность потока излучения – поток излучения, проходящий через единицу поверхности по всевозможным направлениям в пределах полусферического телесного угла.

Если площадка освещается потоком, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической освещенности или облученности:

$$E_e = d\Phi_e/dS \quad (7)$$

где E_e – энергетической освещенности или облученности (Вт/м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – единица площади (м²).

Если поток излучается площадкой, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической светимости:

$$E_e = d\Phi_e/dS \quad (8)$$

где M_e – энергетической освещенности или облученности (Вт/м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – площадь поверхности источника (м²).

Энергетическая яркость – величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла в данном направлении:

$$L_e = d^2\Phi_e/d\Omega dS \cos\theta \quad (9)$$

где L_e – энергетическая яркость (Вт/ср·м²);

Φ_e – поток излучения (Вт);

S – площадь поверхности источника (м²);

θ – угол между направлением излучения и нормалью к площадке.

Световой поток, Φ_v – это величина, образующаяся от лучистого потока Φ_e при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя МКО, измеряется в люменах, лм. Световой поток Солнца равен $3,63 \cdot 10^{28}$ лм, световой поток лампы накаливания мощностью 100 Вт составляет 1250 лм, мощность светодиодной лампы со световым потоком 1250 лм составляет примерно 10 Вт.

Сила света – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в котором он распространяется, измеряется в канделах, кд. Кандела от лат. – свеча, одна кандела примерно соответствует силе света свечи.

Освещенность – световой поток, проходящий через единицу поверхности по всевозможным направлениям в пределах полусферического телесного угла, измеряется в люксах, лк.

Яркость – величина световой поток, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла в данном направлении, измеряется в кд/м².

Световая отдача n (лм/Вт) – отношение излучаемого светового потока к мощности, потребляемой источником света. Световая отдача определяется по формуле:

$$n = \Phi_v / P, \quad (10)$$

где, n – световая отдача, лм/Вт; Φ_v – световой поток, лм; P – потребляемая мощность, Вт.

Задание на лабораторную работу

1. Ознакомится с требованиями по охране труда и пожарной безопасности, расписаться в журнале инструктажа.

2. Ознакомится с оборудованием и методами измерения светотехнических характеристик источников света.

3. Зачистить и залудить монтажные провода, припаять к светодиоду.

4. С шагом 10 мА провести измерение светового потока с помощью фотометрического шара.

5. С помощью гониметра измерить кривую силы света при рабочем значении тока.

6. По значениям кривой силы света рассчитать световой поток светодиода.
7. Построить график зависимости светового потока и световой отдачи от тока.

Контрольные вопросы

1. Что такое световой поток.
2. Что такое гонеофотометр.
3. Что такое фотопическая функция человеческого глаза.
4. Какие длины волн оптического излучения бывают.
5. Почему с ростом прямого тока у светодиода снижается световая отдача.

2. Лабораторная работа №2

Целью работы является знакомство с методами и средствами измерения колориметрических характеристик источников света, оценка их возможностей и погрешностей.

Краткая теория

Коррелированная цветовая температура КЦТ (К) – температура черного тела, при которой координаты цветности его излучения близки в пределах заданного допуска к координатам цветности рассматриваемого излучения на цветовом графике МКО.

Координаты цвета – количество трех основных цветовых стимулов в данной трехцветной колориметрической системе, необходимое для уравнивания по цвету с измеряемым цветом.

В стандартах приняты соответствия значений коррелированной цветовой температуры координатам цветности. Стандартные координаты цветности, соответствующие этим КЦТ:

F6500 (КЦТ 6400, $x=0,313$, $y=0,337$),
F5000 (КЦТ 5000, $x=0,346$, $y=0,359$),
F4500 (КЦТ 4500, $x=0,361$, $y=0,366$),
F4000 (КЦТ 4040, $x=0,380$, $y=0,380$),
F3500 (КЦТ 3450, $x=0,409$, $y=0,394$),
F3000 (КЦТ 2940, $x=0,440$, $y=0,403$),
F2700 (КЦТ 2720, $x=0,463$, $y=0,420$).

Допуск заданных в стандарте значений КЦТ определяются типами эллипса МакАдама.

Диаграммы цветности МКО x , y являются основой для ранжирования графиков или их отбора (бининга). Эти кривые используют геометрическое пространство диаграммы цветности в соответствии с графиком чёрного излучателя для определения изменений в координатах хроматичности. Эти координаты используются для классификации по цветовой температуре светодиода в оттенках белого света и индекса цветопередачи (CRI), тесный контакт будет расположен вблизи графика чёрного излучателя (или линии цветности Планка), диаграмма МКО приведена на рисунке 12.

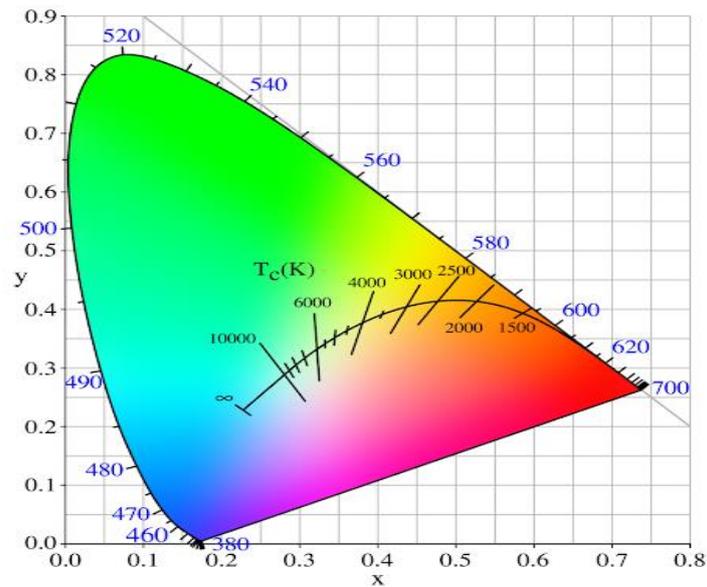


Рисунок 12 – Диаграмма МКО

Индекс цветопередачи CRI (относительные единицы) – общее понятие, характеризующее влияние спектрального состава излучения источника на зрительное восприятие цветных объектов по сравнению с восприятием их при освещении стандартным источником света. Для определения индекса цветопередачи используются эталонный источник (лампа накаливания) и эталонные поверхности цвета основные (цвет увядшей розы, горчичный, салатный, светло-зеленый, бирюзовый, небесно-голубой, цвет фиолетовой астры, сиреневый) и дополнительные (красный, желтый, зеленый, синий, цвет кожи, цвет зеленого листа).

Эллипсы Мак Адама представляют собой систему измерения цвета. Она измеряет изменение и отличие цветов, различимое человеческим глазом в зависимости от расстояния в цветовом пространстве. Группы эллипсов начерчены вокруг заданного цвета. Чем ближе цвет светодиода к заданному цвету в центре эллипса, тем меньшее значение будет иметь его изменение и, таким образом, различие в цветах данной серии светодиодов будет менее заметно. Стандартный набор состоит из 25 эллипсов Мак Адама. Каждый эллипс содержит цвета, которые не могут быть дифференцированы средним наблюдателем, когда они имеют одинаковую яркость. Эллипсы Мак Адама имеют 7 ступеней, которые используются для сравнения двух источников света, при этом ступени представляют собой пределы цветового пространства. Источники света с цветовым пространством 3-ступенчатого эллипса Мак Адама отличаются друг от друга меньше, чем два источника света, цветовое пространство которых соответствует 5-ступенчатому эллипсу. Для значений коррелированной цветовой температуры установлены требования к категории в зависимости от типа эллипса Мак Адама, таблица 5.

Таблица 5. Категория КЦТ в зависимости от типа эллипса Мак Адама

Тип эллипса Мак Адама	Категория КЦТ
Все измеренные КЦТ в пределах 1-ступенчатого эллипса	Категория 1
Все измеренные КЦТ в пределах 2-ступенчатого эллипса	Категория 2
Все измеренные КЦТ в пределах 3-ступенчатого эллипса	Категория 3
Все измеренные КЦТ в пределах 4-ступенчатого эллипса	Категория 4
Все измеренные КЦТ в пределах 5-ступенчатого эллипса	Категория 5
Все измеренные КЦТ в пределах 6-ступенчатого эллипса	Категория 6
Все измеренные КЦТ в пределах 7-ступенчатого эллипса	Категория 7
Все измеренные КЦТ вне 7-ступенчатого эллипса	Категория 8

Задание на лабораторную работу

1. Ознакомится с требованиями по охране труда и пожарной безопасности, расписаться в журнале инструктажа.
2. Ознакомится с оборудованием и методами измерения колориметрических характеристик источников света.
3. Зачистить и залудить монтажные провода, припаять к светодиоиду.
4. С шагом 10 мА провести измерение коррелированной цветовой температуры и цветowych координат с помощью спектроколориметра.
5. Для рабочего значения прямого тока измерьте спектр излучения светодиода и рассчитайте индекс цветопередачи.
6. Постройте графики зависимость коррелированной цветовой температуры и цветowych координат от значений прямого тока
7. По п. 6 определите, выходят ли значения коррелированной цветовой температуры и цветowych координат в зависимости от прямого тока за эллипсы Мак Адама.

Контрольные вопросы

1. Что такое коррелированная цветовой температура.
2. Что такое индекс цветопередачи.
3. Что такое эллипсы Мак Адама.
4. Как работает спектроколориметр.
5. Чем отличается цветовой температура от коррелированной цветовой температуры.

3. Лабораторная работа № 3

Цель работы: научиться рассчитывать дозу облучения для дезинфекции поверхностей.

Краткая теория

На рис. 13 приведён внешний вид УФ диода High Power UVC LED производства Shenzhen Shining Opto-electronic Co, в таблице 6 приведены его технические характеристики.



Рисунок 13 – Внешний вид

Таблица 6. Технические характеристики

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Длина волны излучения	нм	275
Оптическая мощность излучения	мВт	19
Значение прямого напряжения	В	5,0 – 7,0
Угол излучения по уровню 0,5	градус	120
Значения приведены для прямого тока	мА	200

Основные формулы для расчёта:

Поверхностная бактерицидная доза облучения (экспозиция) (H), мДж/см², определяется по формуле:

$$H = E \times t \quad (11)$$

где, E – бактерицидная облучённость поверхности, Вт/м²;
 t – времени облучения, с;

Бактерицидная облучённость поверхности определяется по формуле:

$$E = I_e / r^2, \quad (12)$$

где, I_e – силы бактерицидного излучения, Вт/ср;
 r – расстояние от источника излучения до облучаемой поверхности, м.

Сила бактерицидного излучения определяется по формуле:

$$I_e = \Phi_e / \Omega \quad (13)$$

где, Φ_e – бактерицидный поток излучения, Вт;
 Ω – телесный (объёмный) угол.

Для пересчёта значения телесного (объёмного) угла Ω из стерадиан в плоский угол по уровню 0,5 от максимального значения силы бактерицидного излучения (ϕ) в градусы используется формула:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(((\phi \times \pi) / 180) / 2)) \quad (14)$$

Для пересчёта значения бактерицидного потока излучения в оптическую мощность излучения (Pe) применяется формула:

$$\Phi_e = Pe \times S(\lambda)_{отн.}, \quad (15)$$

где, $S(\lambda)_{отн.}$ – коэффициент относительной спектральной бактерицидной эффективности.

Варианты в соответствии со списком группы:

№	Расстояние облучателя от поверхности, мм	Время облучения, с	Вид микроорганизма, подлежащего инактивации
1.	1	1	Shigella flexneri
2.	2	2	Salmonella typhi
3.	3	3	Shigella dysenteriae

4.	4	4	Proteus vulgaris
5.	5	5	Staphylococcus aureus
6.	6	6	Escherichia coli
7.	7	7	Virus poliomyelitis
8.	8	8	Salmonella paratyphi
9.	9	9	Vibrio cholerae
10.	10	10	Orthomyxoviridae (вирусы гриппа)
11.	11	11	Salmonella enteritidis
12.	12	12	Mycobacterium tuberculosis
13.	13	13	Pseudomonas aeruginosa
14.	14	14	Virus hepatitis A
15.	15	15	Shigella flexneri
16.	16	16	Salmonella typhi
17.	17	17	Shigella dysenteriae
18.	18	18	Proteus vulgaris

Ответ необходимо представить в виде файла в формате MS Word, с указанием варианта задания и расчётами.

Задание на лабораторную работу

1. Изучите термины и определения: Р 3.5.1904-04 «Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях».

2. Изучите значения доз облучения для дезинфекции различных видов микроорганизмов МУ 2.1.4.719-98 «Санитарный надзор за применением ультрафиолетового излучения в технологии подготовки питьевой воды».

3. Рассчитайте количество УФ диодов для дезинфекции поверхности площадью 1 см².

Контрольные вопросы

1. Что такое бактерицидная эффективность.

2. Чем отличается поверхностная бактерицидная доза облучения (экспозиция), от объёмной бактерицидной дозы облучения.

3. Какой КПД УФ диода, приведённого в краткой теории.

Глава 3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

1. Практическое занятие № 1 «Расчёт силы света светодиода»

Целью работы является научиться рассчитывать силы света светодиода.

Краткая теория

Свет – это видимая область электромагнитного излучения в диапазоне от 380 до 750 нм.

Человеческий глаз содержит экстерорецепторы называемые колбочками. Восприятие человеком света описывается фотопической функцией, графическая зависимость приведена на рисунке 14, табл. 6.

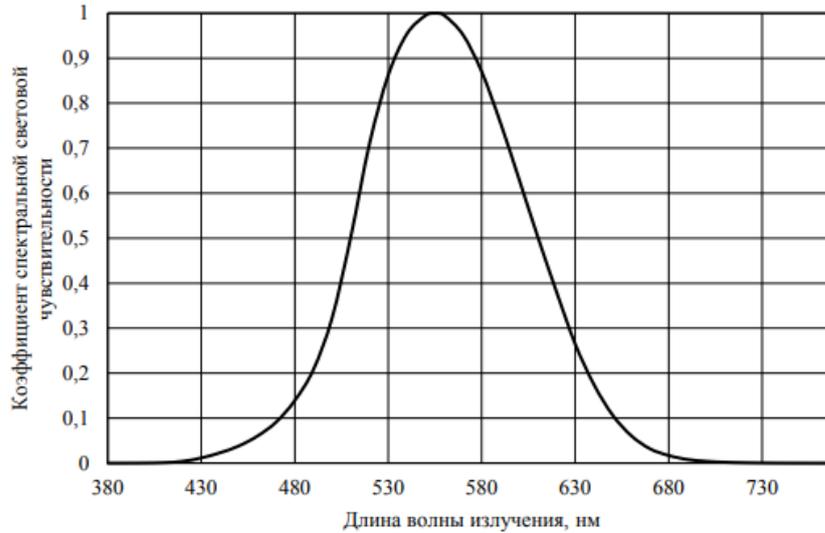


Рисунок 14 – Фотопическая функция

Таблица 6. Фотопическая функция человеческого глаза

λ , нм	K	λ , нм	K	λ , нм	K	λ , нм	K
380	0,00004	480	0,139	580	0,870	690	0,0082
390	0,00012	490	0,208	590	0,757	700	0,0041
400	0,00040	500	0,323	600	0,631	710	0,0021
410	0,0012	510	0,503	610	0,503	720	0,00105
420	0,0040	520	0,710	620	0,381	730	0,00052
430	0,0116	530	0,862	630	0,265	740	0,00025
440	0,023	540	0,954	640	0,175	750	0,00012
450	0,038	550	0,995	650	0,107	760	0,00006
460	0,060	555	1,0000	660	0,061	770	0,00003
470	0,091	560	0,995	670	0,032		
		570	0,952	680	0,017		

Основываясь на фотопической функции физические величины, описывающие излучение можно разделить на энергетические и световые. Переход от энергетических величин к световым осуществляется по формуле (5):

$$\Phi = 683(\text{лм/Вт}) \times K \times P \quad (16)$$

где, Φ – световой поток, лм;

K – уровень спектральной световой чувствительности для данной длины волны излучения;

P – оптическая мощность излучения, Вт.

Сила света определяется по формуле:

$$I = \Phi / \Omega \quad (17)$$

где, Φ – световой поток, лм;

Ω – телесный (объёмный) угол.

Для пересчёта значения телесного (объёмного) угла Ω из стерадиан в плоский угол по уровню 0,5 от максимального значения силы света (ϕ) в градусы используется формула:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(((\phi \times \pi) / 180) / 2)) \quad (18)$$

Известно, что светодиод имеет кристалл с оптической мощностью 500 мВт и длину волны излучения 460 нм. По формуле (1), определяем световой поток светодиода с кристаллом синего цвета свечения, который составляет 20,5 лм. Известно, что современные люминофорные композиции преобразуют синий цвет свечения в белый цвет свечения и световой поток увеличивается примерно в 10 раз за счёт спектрального заполнения в видимой области оптического спектра. Тогда световой поток светодиода белого цвета свечения составит 205 лм. Далее определим значение максимальной силы света, исходя из того, что угол излучения по уровню 0,5 составляет 120 градусов, такое значение характерно для светодиодов без линз. По формуле (3) пересчитываем плоский угол 120 градусов в объёмный (телесный) угол 3,137113 стерадиан (ср). По формуле (3) определяем значение максимальной силы света: $205 \text{ лм} / 3,137113 = 65,35 \text{ кд}$.

Задача по практическому занятию № 1

Светодиод имеет кристалл синего цвета свечения с оптической мощностью (согласно варианту), длину волны (согласно варианту) и угол излучения по уровню 0,5 от значения максимальной силы света (согласно варианту). Определить значение максимальной силы света.

Индивидуальное задание

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P, \text{ мВт}$	25	100	115	125	250	275	300	350	400	450
$\lambda, \text{ нм}$	450	450	450	455	455	455	460	460	460	460
$\phi, \text{ град}$	30	30	30	60	60	60	60	80	80	80

2. Практическое занятие № 3 «Светотехнические характеристики источников света»

Цель работы: научиться рассчитывать освещённость рабочего места.

Краткая теория

Освещённость определяется по формуле:

$$E = I / r^2, \quad (19)$$

где, I – силы света, кд;

r – расстояние от источника освещения до поверхности, м.

Задача по практическому занятию № 3

По результатам выполнения задания № 2, нужно рассчитать максимальную силу света, согласно с заданием № 1 и определить освещённость на расстоянии одного метра по формуле (19).

3. Практическое занятие № 1 «Вывод света из светодиода»

В светодиодном кристалле генерируется свет, при выходе из кристалла свет, лишь часть его может выйти из кристалла, за счёт разности двух сред – воздуха и материала полупроводника. Так как из законов оптики часть светового потока отражается (коэффициент отражения ρ), часть рассеивается (коэффициент рассеивания σ), часть поглощается (коэффициент поглощения α) и лишь часть проходит насквозь (коэффициент пропускания τ). Необходимо определить критический угол и долю вышедшего излучения из светодиодного кристалла GaN в воздух.

Дано:

Показатель преломления воздуха,

показатель преломления кристалла GaN ,

$P_{внутр}$ мощность оптического излучения внутри кристалла

Определить

Критический угол $\varphi_{кр}$,

долю оптической мощности вышедшей из кристалла $P_{внеш}$.

Решение:

По формулам:

$$\varphi_{кр} = \arcsin(n_2 / n_1),$$

$$P_{внеш} / P_{внутр} = (1/4) \times (n_2^2 / n_1^2)$$

Рассчитаем значения $\varphi_{кр}$, и $P_{внеш}$.

Ответ

Критический угол для GaN составляет $\varphi_{кр} = 23,6$ град., а доля вышедшего излучения в воздух $P_{внеш} = 4,18\%$.

Индивидуальное задание

№	n_1	n_2	$P_{внутр}$
1	1	1,1	2
2	2,1	1,1	1,5
3	1,5	1	3
4	1,7	1,5	1
5	1	2	2,5
6	1,3	1	2
7	1	1,3	3
8	1,1	1,7	2
9	2,2	1,5	1
10	3	2,5	1

Определить значение критического угол $\varphi_{кр}$ и доли вышедшего излучения в воздух $P_{внеш}$.

Глава 4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

1. Задание на самостоятельную работу № 1 «Инфракрасное излучение»

Краткая теория

Инфракрасное (ИК) излучение – это электромагнитное излучение с длинами волн в диапазоне от 740 нм (частота 430 ТГц) до 1 мм (частота 300 ГГц). С одной стороны, от ИК излучения расположен диапазон видимого (светового) излучения с длинами волн 380 – 740 нм, с другой стороны, радиоволновое с длинами волн от 1 мм до 100 км.

ИК излучение делится на:

- ближнюю зону с длинами волн от 740 нм до 3 мкм;
- среднюю зону с длинами волн от 3 мкм до 6 мкм;
- дальнюю зону с длинами волн от 6 мкм до 15 мкм;
- сверхдальнюю зону с длинами волн от 15 мкм до 1 мм.

Задание на самостоятельную работу № 1

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по ИК-диодам и их применению.

Найдите на ресурсах интернет ИК-диоды с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

2. Задание на самостоятельную работу № 2 «Красного цвета свечения»

Краткая теория

Излучение красного цвета свечения – это электромагнитное излучение с длинами волн в диапазоне от 620 нм до 760 нм. С одной стороны, от излучения красного цвета свечения расположено излучение оранжевого цвета свечения 590 – 620 нм, с другой стороны ИК излучение от 760 нм до 1 мм.

Излучение красного цвета свечения в технике используется в навигации аэрокосмического, автомобильного, железнодорожного и водного транспорта. Используется для индикации, отображения информации и сигнализации, в светотерапии, животноводстве и растениеводстве.

Известно, что атмосферные аэрозоли делятся на облака (5 – 50) мкм, туман (1 – 60) мкм при положительной температуре (5 – 15) мкм, при отрицательной температуре (2 – 5) мкм, дымку (0,1 – 5) мкм, осадки, которые могут быть в виде снега (0,1 – 0,35) мм, града (от 1 мм до нескольких сантиметров) и дождя (0,5 – 5) мм.

Известны два основных механизма ослабление оптического сигнала атмосферной средой, это рассеяние, приводящее к изменению направления излучения и поглощение веществами в атмосфере, которое преобразует энергию излучения в другой вид энергии.

Известно, что излучение красного цвета свечения имеет самую большую длину волны в видимой области оптического спектра, соответственно будет меньше рассеиваться при прохождении через атмосферные аэрозоли. В том числе по этой причине источники излучения красного цвета применяются на высотных объектах чтобы сигнализировать об опасности воздушному движению. Светофор красного цвета запрещает движение, у автомобилей красного цвета стоп-сигналы и габаритные фонари. На автомобильной дороге красными светоотражателями обозначается опасность с правой стороны. В водном транспорте красные бакены, буи, вехи и светосигнальные огни красного цвета свечения ограждают опасности судового хода с правой его стороны, т. е. примыкают к правому берегу. Светодиоды красного цвета свечения применяются в RGB дисплеях и архитектурном освещении.

Задание на самостоятельную работу № 2

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам красного цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды красного цвета свечения с потребляемой

мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

3. Задание на самостоятельную работу № 3 «Оранжевый и жёлтый цвета свечения»

Краткая теория

Оранжевый цвет свечения находится в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 590 нм до 620 нм, жёлтый от 560 нм до 590 нм.

Оранжевый и жёлтый цвета свечения в основном используются в иллюминации, и дисплеях. Жёлтый используется в светофорах, в автомобильном транспорте.

Задание на самостоятельную работу № 3

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам оранжевого и жёлтого цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды оранжевого и жёлтого цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

4. Задание на самостоятельную работу № 4 «Зелёный цвет свечения»

Краткая теория

Зелёный цвет свечения расположен в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 560 до 500 нм. Зелёный цвет свечения применяется в навигации, в дисплеях и RGB подсветке для архитектурного и интерьерного освещения.

Задание на самостоятельную работу № 4

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам зелёного цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды зелёного цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

5. Задание на самостоятельную работу № 5 «Синий цвет свечения»

Краткая теория

Синий цвет свечения расположен в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 500 до 430 нм. Синий цвет свечения применяется в навигации, например, на аэродроме показывают границы рулёжных дорожек, в дисплеях и RGB подсветке для архитектурного и интерьерного освещения и т.д.

Задание на самостоятельную работу № 5

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам синего цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды синего цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

6. Задание на самостоятельную работу № 6 «Фиолетовый цвет свечения»

Краткая теория

Фиолетовый цвет свечения расположен в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 430 до 380 нм. Фиолетовый цвет свечения применяется для архитектурного, интерьерного освещения, в иллюминации и т.д.

Задание на самостоятельную работу № 6

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам фиолетового цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды фиолетового цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

7. Задание на самостоятельную работу № 7 «Ультрафиолетовое излучение»

Краткая теория

Фиолетовой цвет свечения расположен в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 430 до 380 нм. Фиолетовый цвет свечения применяется для архитектурного, интерьерного освещения, в иллюминации и т.д.

Задание на самостоятельную работу № 7

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам фиолетового цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды фиолетового цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

8. Задание на самостоятельную работу № 8 «Светодиоды белого цвета свечения»

Краткая теория

Известно, что для того чтобы человек воспринимал электромагнитное излучение оптического спектра как белый цвет, необходимо задействовать два рецептора человеческого глаза. Т.е., достаточно смешать излучение синего цвета с жёлтым. На практике важен не только факт получения белого цвета, но и качество этого цвета. Качественными характеристиками источников белого цвета являются индекс цветопередачи, цветовая температура и координаты цветности.

Способность источника излучения передавать все цвета освещаемого объекта определяется его индексом цветопередачи (CRI). Цветовая температура – это такая температура черного тела, при которой его энергетическая светимость равна энергетической светимости данного источника.

В современных светодиодах, в большинстве случаев используют кристалл синего цвета свечения и фотолуминофор жёлтого свечения с полушириной спектра порядка 110 нм. Это наиболее эффективный и дешёвый метод, т.к. КПД фотолуминофора на основе YAG и YGG достигает 90%. Для повышения индекса цветопередачи используют смесь люминофоров. В качестве базового используют люминофоры типа YAG или YGG и добавляют в композицию красные и зелёные люминофоры (нитридные и силикатные).

Люминофор представляет собой порошок с частицами размерами 6 – 15 мкм. Частицы люминофора состоят из кристаллов ((Y1-a Gda) Al5 O12 × Ce3+ (YGG)). Кристаллическая решетка YAl5O12 активирована атомами Ce. Gd позволяет сместить максимум спектра излучения в длинноволновую область, Ga в коротковолновую, к тому же Ga повышает временную стабильность люминофора. YGG (YAG) имеет неравновесные состояния кристаллической решетки и при воздействии излучения с длиной волны 450 – 465 нм электроны возбуждаются на высокие энергетические уровни, а затем переходят на равновесные с выделением энергии путём излучения фотона.

Задание на самостоятельную работу № 8

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по светодиодам белого цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет светодиоды белого цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Люди мира. Русское научное зарубежье / Ред.-сост. Д. Баяк. – М.: Альпина нон-фикшн, 2018. – 516 с.
2. Генри Раунд [Электронный ресурс]: сайт «Популярная электроника». – Режим доступа: <http://scsiexplorer.com.ua/index.php/izvesnie-ludi/zarubezhnye-umy/1498-genri-raund.html> (дата обращения: 05.06.2022).
3. Транзисторная история. Изобретение транзисторов и развитие полупроводниковой электроники. [Электронный ресурс]: сайт «Изобретение транзистора». – Режим доступа: <https://www.sites.google.com/site/izobretenietranzistora/home/olegvladimirovic-losev> (дата обращения: 05.06.2022).
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – В 2-х книгах. Кн. 1; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
5. Шуберт Ф. Светодиоды: пер. с англ. / Ф. Шуберт; под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
6. Шарапова Н. История полупроводников: томский период / Н. Шарапова // Alma Mater: газета Томск. гос. ун-та. – 2005. – № 2380.
7. Nakamura S. The Blue Laser Diod / S. Nakamura, G. Fasol. – Berlin: Springer, 1997. – 335 p.
8. Патент на изобретение 2 390 117 С2. Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Способ предпосевной обработки семян сосны обыкновенной: № 2006143121/13: заявл. 05.12.2006: опубл. 27.05.2010 / М.В. Беляков, С.В. Рыбкина.
9. Гордеев Ю.А., Юлдашев Р.З. Биоактивация семян культурных растений ультрафиолетовым и плазменным излучениями // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2011. – №24. – С.343-348.
10. Газалов В.С., Пономарёва Н.Е., Беленов В.Н. Оптическая система предпосевной обработки семян // Вестник агронауки Дона. – 2018. – №3. – С. 21-30.
11. Корепанов Д.А., Романов В.Ю., Лощенов П.Ю., Богатырев М.Д. Влияние длинноволнового УФ облучения на повышение посевных качеств семян *Pinus silvestris* L // Лесотехнический журнал. – 2014. – №1. – С. 27-30.
12. иодная облучательная установка для обработки семян перед посевом // Агротехника и энергообеспечение. – 2016. – № 4 (13). – Том 1. – С. 22-31.
13. Кондратьев Н.П., Корепанов Д.А., Краснолуцкая М.Г., Предпосевная обработка семян декоративных растений хвойных пород ультрафиолетовым излучением // Инновации в сельском хозяйстве. – 2017. – №2. – С. 45-54.
14. Патент на изобретение 2 312 481 С1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Способ повышения всхожести семян бобовых растений: № 2006118458/13, заявл. 29.05.2006: опубл. 20.12.2007 / Н.Н. Гриднев, С.А. Бекузарова, Х.М. Унежев.
15. Патент на полезную модель 139 005 U1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Устройство для ультрафиолетовой обработки семян: № 2013152705/13, заявл. 27.11.2013: опубл. 27.03.2014 / Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко, В.А. Панарин, Ю.В. Чудинова, И.А. Викторова, А.Е. Чеглоков.
16. Патент на изобретение 2 390 117 С2 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Способ предпосевной обработки семян сосны обыкновенной: № 2006143121/13, заявл. 05.12.2006: опубл. 27.05.2010 / М.В. Беляков, С.В. Рыбкина.
17. Патент на изобретение 2 728 184 С1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Устройство для ультрафиолетовой обработки зерна перед проращиванием: № 2019131990, заявл. 09.10.2019: опубл. 28.07.2020 / С.В. Вендин.
18. Патент на полезную модель 142 430 U1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Устройство предпосевной обработки семян: 2013148152/13, заявл. 29.10.2013: опубл. 27.06.2014 / Е.А. Васенев, В.Ю. Романов, Д.А. Корепанов, А.В. Бывальцев.

19. Кобышев И.С. Гигиеническая оценка установок по обеззараживанию питьевой воды ультрафиолетовым излучением после обработки ультразвуком / В книге: Защита населения и территорий при чрезвычайных ситуациях в мирное и военное время как составная часть национальной безопасности России тезисы докладов и выступлений. – 1997. – С. 302-308.
20. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А. Модульная установка с использованием ИК- и УФ-облучателей // Вестник ВИЭСХ. – 2015. – № 3 (20). – С. 38-43.
21. Кузнецов С.М., Лихачев И.В., Закуражный А.А., Федоров И.С. Способы повышения эффективности обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением путем активации патогенетических механизмов фотосенсибилизации у микроорганизмов // Клиническая патофизиология. – 2015. № 4. – С. 22-25.
22. Бокарев М.А., Кузнецов С.М., Майдан В.А., Лихачёв И.В., Фёдоров И.С., Кузьмин С.Г., Гайсин Р.А. Анализ эффективности перспективных технологий обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2016. – № 4 (56). – С. 210-216.
23. Патент на изобретение №2054486 Способ идентификации микроорганизмов / В.Г. Петухов, заявка №5061195/13 от 01.09.1992, опубликовано 20.02.1996.
24. Методические указания по применению бактерицидных ламп для обеззараживания воздуха и поверхностей в помещениях. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084894> (дата обращения: 05.06.2022).
25. Михальченко Т.С., Шардина А.О., Юлдашова Л.Ш., Солдаткин В.С. Влияние ультрафиолетового излучения на микроорганизмы в водной среде // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2019. – № 1-2. – С. 24-26.
26. Солдаткин, В. С. Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий: Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. С. Солдаткин. — Томск: ТУСУР, 2018. — 60 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7825> (дата обращения: 05.06.2022).
27. СТО.69159079-05-2020 Приборы осветительные светодиодные. Требования к комфортной световой среде. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.russia-led-ssl.ru/wp-content/uploads/2020/11/СТО_69159079-05.pdf (дата обращения: 05.06.2022).