

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ)**

На правах рукописи

Чжо Мое Аунг

**КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА С
АВТОКАТОДАМИ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ
ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ РАСТЕНИЙ**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа прошла апробацию на кафедре вакуумной электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:

Шешин Евгений Павлович

доктор физико-математических наук,
заслуженный профессор, зам. зав. кафедрой
«Кафедра вакуумной электроники» МФТИ.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова»

Защита состоится «_» _____ 2021 г. на заседании диссертационного совета ФЭФМ 01.04.04, по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, МФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Работа представлена «__» _____ 2021 г. В Аттестационную комиссию Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п. 3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
доцент диссертационного совета

кандидат физико-математических наук,
Токунов Юрий Матвеевич

Актуальность темы

Солнечный свет выступает в качестве основного абиотического фактора, который существенным образом влияет на такие характеристики, как жизнедеятельность, урожайность и продуктивность растений. В природных условиях растениям не свойственно испытывать дефицит солнечного света, однако при выращивании в условиях закрытых помещений, теплиц, растения испытывают недостаток солнечного света, что негативно сказывается на основных процессах, протекающих в растении, вплоть до полной остановки роста и развития. Также нужно учитывать, что в отдельных зонах, например, при выращивании растений в условиях Севера, им также может не хватать солнечного света. Поэтому растение нуждается в искусственном освещении. Все это указывает на необходимость детального изучения особенностей влияния солнечного света на продуктивность сельскохозяйственных растений и их основные характеристики.

В качестве важного фактора, при помощи которого можно обеспечить контроль за состоянием растений, может выступать спектральное качество света, а также его интенсивность и продолжительность. В контролируемых условиях эти факторы могут выступать в качестве важного фактора оптимизации роста и развития растений, увеличения урожая и биомассы.

Нужно понимать, что важную роль играет именно состав и основные характеристики света, поскольку просто обеспечить растению яркое освещение - это неправильный подход, который не принесет ожидаемых результатов. Это обусловлено тем, что процесс фотосинтеза происходит под действием определенного светового спектра, под воздействием световых волн строго определенной длины волны. Искусственный свет должен быть максимально приближен к солнечному свету, поскольку фотосинтез происходит именно в условиях солнечного излучения

Воздействие света определенной длины волны - важнейший фактор, от которого во многом зависит жизнедеятельность, урожайность растения, и другие базовые характеристики. Для каждой конкретной культуры нужно обеспечить оптимальную длину волны, что позволит добиться контролируемых результатов. Также важно контролировать и другие показатели, такие как микроклимат (температура, влажность). Из световых характеристик наиболее значимыми является спектральный состав и продолжительность светового излучения. Все эти характеристики должны быть максимально адаптированы под потребности каждого отдельного растения.

Как правило, при выращивании растений, предпочтение отдается естественному освещению, поскольку это наиболее экономный и рациональный вариант. Однако при условии круглогодичного выращивания растений, искусственное освещение является обязательным условием успешного выращивания растительной биомассы. Дополнительное освещение требуется в условиях укороченного светового дня, а также при пребывании в закрытых помещениях.

Увеличение производства сельскохозяйственной продукции также возможно только при условии использования дополнительного освещения. При этом целесообразно использовать технологии, которые позволят максимально экономить энергию и ресурсы. Применение излучения в условиях выращивания светокультур предъявляет различного рода требования к источникам освещения, что неизбежно отражается на энергетических и материальных ресурсах. Как показывает практика, основные ресурсы тратятся на то, чтобы создать растению условия, в которых будет эффективно протекать фотосинтез. Поэтому разработка нового поколения экономичных и экологически чистых источников света является чрезвычайно актуальной темой.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы является исследование автоэлектронной эмиссии на основе углеродных материалов и разработка прототипов устройств с автокатадами для искусственного освещения растений в теплицах.

Поставленная цель достигается решением следующих задачи:

1. Рассмотрение влияния параметров освещения на различные стадии растений.
2. Выполнение подробного обзора типов ламп для искусственного освещения растений.
3. Разработка комплексной методики измерений световых и электрических характеристик катодолюминесцентных источников света.
4. Определение особенностей катодолюминесцентных ламп с автокатадами для тепличных хозяйств.
5. Исследование основных закономерностей возбуждения катодолуминофоров, используемых в лампах нового поколения.
6. Разработка, изготовление и исследование прототипов катодолюминесцентных ламп разного спектрального диапазона для тепличных хозяйств.

Научная новизна

1. Разработана комплексная методика измерений световых и электрических характеристик катодолюминесцентных источников света.
2. Определены особенности катодолюминесцентных ламп с автокатадами для тепличных хозяйств.
3. Используются основные закономерности возбуждения катодолюминофоров, используемых в лампах нового поколения.
4. Разработаны, изготовлены и исследованы прототипы катодолюминесцентных ламп различного спектрального диапазона для тепличных хозяйств.

Практическая значимость работы

Заключается в том, что технологии и методики, представленные в работе могут стать основой при ОКР для промышленного производства источников света с автокатадами из полиакрилонитрильных углеродных волокон различного спектрального диапазона для тепличных хозяйств разного назначения.

Научные результаты, выносимые на защиту

1. Разработка комплексной методики измерений световых и электрических характеристик катодолюминесцентных источников света.
2. Определение особенностей катодолюминесцентных ламп с автокатадами для тепличных хозяйств.
3. Исследование основных закономерностей возбуждения катодолюминофоров, используемых в лампах нового поколения.
4. Разработка, изготовление и исследование прототипов катодолюминесцентных ламп различного спектрального диапазона для тепличных хозяйств.

Апробация результатов диссертационного исследования

Основные результаты работы представлены на следующих конференциях:

- Научные конференции МФТИ, Долгопрудный, 2018,2019,2020.
- II международная конференция молодых ученых, работающих в области углеродных материалов, г. Троицк, 2019.
- International conference on electrical and electronics engineering (Seoul, South Korea, 2020).

- 12-я международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология», г. Троицк, 2019.
- X Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2021 г.

Публикации

Основные результаты проведенных исследований изложены в 7 печатных работах, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе. Список печатных работ проводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы: изложена на листах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 2 таблицы, список литературы включает 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность выбранной темы, описаны основные цели, задачи и научная новизна диссертационной работы.

Первая глава включает в себя полный обзор влияния света на рост растений. В настоящее время овощи и фрукты выращивают в искусственных условиях с использованием различных ламп, но это не является принципиально новой технологией. Однако, в последние годы потребление продуктов питания увеличилось из-за интенсивного роста населения мира. В связи с этим, повышение продуктивности и эффективности систем искусственного выращивания растений является актуальным.

Критерием количественной оценки выращивания является полезный вес сухого вещества или объем целевого экстракта листьев/корней. Для качественной оценки можно анализировать химический состав растений и морфологию (отклонение формы и размеров стебля/листьев/плода). Для большинства культур лучший урожай и качеств продукции могут быть получены при обеспечении растениям комфортных условий, где все основные физиологические потребности максимально использованы. Таким образом, в большинстве фактических задач за эталон для сравнения и оценки результатов искусственного выращивания можно брать растение, выращенное в естественных условиях. Естественные условия для конкретной культуры, как правило, соответствуют климату в регионе его изначального происхождения.

Рассматривая процесс выращивания растений как замкнутую систему, можно выделить следующие основные факторы, влияющие на результат (рис. 1).

- солнечный свет, основной источник энергии.
- содержание диоксида углерода (CO_2) в воздухе (углерод - основной элемент, используемый для формирования новых клеток).
- вода, в основном, как источник кислорода, входящего в ее состав, необходимого для реакции фотосинтеза.
- температура окружающего воздуха.

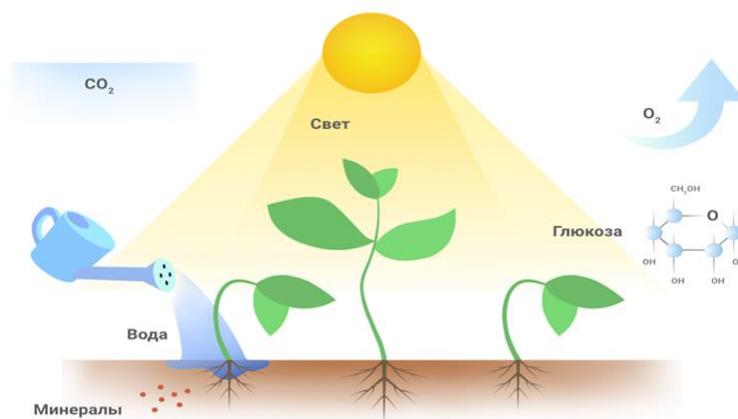


Рис. 1. Основные факторы, влияющие на рост растений.

Оптимальная температура фотосинтеза для большинства растений средней полосы составляет примерно 20-25°C. Например, для подсолнечника повышение температуры в интервале от 9 до 19°C увеличивает интенсивность фотосинтеза в 2,5 раза. Так, при фотосинтезе за счет энергии света происходит образование органических веществ (углеводов) при участии хлорофилла. Хлорофилл (от греч. «зелёный» и «лист») — зелёный пигмент, окрашивающий хлоропласты растений в зелёный цвет.

Таким образом, количество света является важным фактором, влияющим на интенсивность роста растений. Также на протяжении многих лет эволюции этот процесс адаптировался к суточному циклу "день/ночь". Днем под воздействием света вода разделяется на кислород и водород, а растение запасает энергию и питательные вещества. Ночью, в темноте углекислый газ под воздействием запасенной энергии соединяется с водородом, образуя молекулы углеводов, т.е. происходит собственно рост культуры. Таким образом, при искусственном выращивании растений важно обеспечить не только высокую освещенность, но и правильную цикличность включения света, чтобы получить лучший результат.

Современные светодиодные технологии позволяют форматировать сложные спектры освещения растений. Рассмотрим, каким образом спектр влияет на процесс роста. На рис. 2 детально показаны энергетические спектры поглощения базовых пигментов растения.

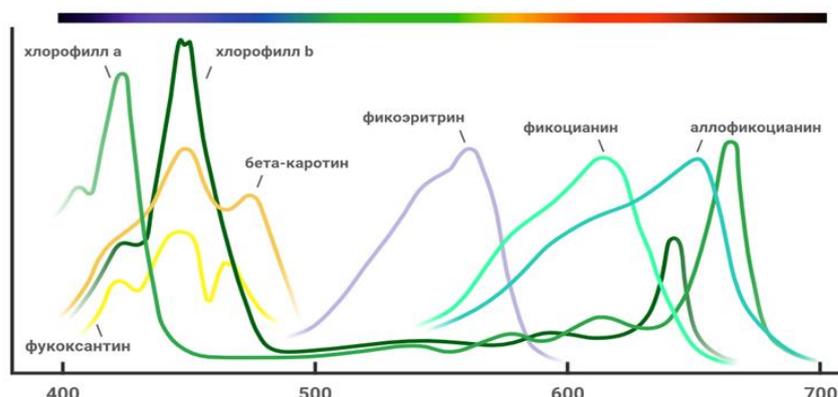


Рис. 2. Энергетические спектры поглощения базовых пигментов растений.

Видно, что помимо традиционно упоминаемых пигментов хлорофилла с пиками поглощения в диапазоне 400-500 нм и 650-700 нм, на процессы роста также влияют вспомогательные пигменты из семейства светособирающих фикобилипротеинов.

Вторая глава посвящена обзору ламп, применяемых для искусственного освещения растений и их анализ. В сельском хозяйстве довольно часто применяются различные светильники. Так, они предназначены для использования в небольших по площади и объему помещениях, теплицах. Чаще всего используются электрические светильники, которые представляют собой осветительные приборы, оснащенные источником света и осветительной арматурой. Светильники используют для освещения отдельных объектов, которые расположены на расстоянии не более 20-30 метров от источника света. При выборе светильника нужно учитывать ряд факторов, в том числе, характеристики окружающей среды. Важно, чтобы светильники были экономичными, безопасными и долговечными. К примеру, с осторожностью нужно применять светильники в помещениях с высоким риском пожаров взрывов. Тогда как применение светильников в сухих, незапыленных помещениях, где нет опасности взрыва горючих веществ, вполне оправданно и безопасно. В таких условиях светильники не требуют соблюдения дополнительных мер безопасности. Однако в сырых или особо сырых помещениях необходимо использовать специальные светильники, которые имеют полугерметическую конструкцию и характеризуются

отдельным вводом проводов. В пыльных помещениях целесообразно использовать закрытые и уплотненные светильники.

Светильники отличаются в первую очередь, характером светораспределения. Также есть определенные отличия в целевом назначении и способе установки. При оборудовании рабочего освещения в теплице, необходимо следить за тем, чтобы все токоприемники включались одновременно. Не стоит объединять светильники различных типов теплиц.

Для характеристики светильников используются основные понятия, приведенные ниже. В светильнике используют следующие основные понятия:

- силовой поток «F» - характеристик, определяющая показатель мощности светового излучения. При этом в качестве основного показателя, по которому производится оценка данного параметра, выступает световое ощущение, воспринимаемое глазом человека;
- яркость «V» - поверхностная плотность силы света I к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную тому же направлению;
- светимость «R» - поверхностная плотность светового потока, испускаемого поверхностью, равна отношению светового потока F к площади S - светящейся поверхности;
- освещённость «E» - поверхностная плотность светового потока, испускаемого поверхностью, равна отношению светового потока F к площади светящейся поверхности S.

Искусственное освещение благодаря техническому прогрессу, современные огородники обеспечивают тепличные растения светом и ночью, и зимой, при этом искусственное освещение:

- улучшает рост растений (выращивание исключительно естественным светом значительно снижает продуктивность);
- позволяет получить продукцию за более короткие сроки и в то время, когда спрос на нее наиболее высок;
- помогает выращивать теплолюбивые культуры, не встречающиеся в местном климате;
- снижает конечную себестоимость овощей на 15% путем повышения урожайности.

Световой поток идет в строго требуемом для растения количестве. Плотность световой энергии колеблется в диапазоне 400-1000 ммоль/м². Освещение можно сделать непрерывным, если использовать специальные

геле, автоматически включающие светильники при снижении интенсивности солнечного света. Ночное освещение требуется, когда искусственно продлевают световой день. Энергетическая плотность снижается до 5-10 ммоль/м². Лампы включают лишь время от времени. При подобном подходе можно либо притормозить, либо ускорить время цветения.

Третья глава посвящена методике и технике эксперимента. В данной главе предложена методика измерения световых характеристик катодолюминесцентных источников света с автокатодом. Также описана методика проведения испытаний автоэмиссионных катодов на основе углеродных материалов. Описано несколько методов анализа экспериментальных данных, позволяющих получить наиболее полную информацию об исследуемом автокатоде. На основе разработанной методики световых измерений автором был создан специализированный измерительный стенд и уникальное программное обеспечение, позволяющее полностью автоматизировать процесс измерения спектрально-яркостных параметров излучения катодолюминесцентных ламп и обработки экспериментальных данных.

Для измерения электрооптических параметров катодолюминесцентных ламп разработан экспериментальный стенд (рис. 3), который обеспечивает снятие спектра излучения испытываемых катодолюминесцентных ламп, с одновременным вычислением яркости, светосилы и светового потока.

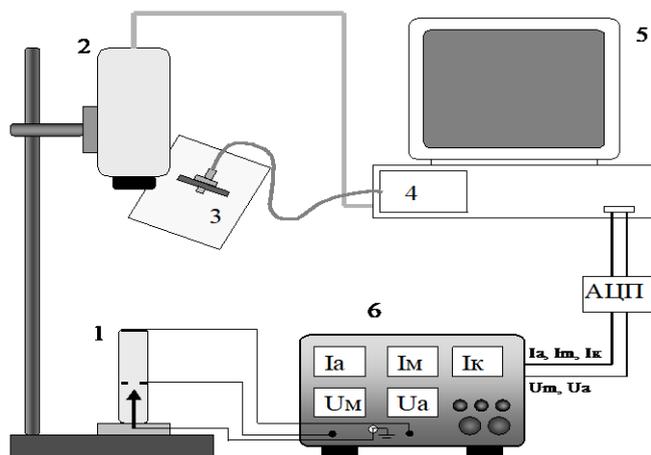


Рис. 3. Схема стенда для измерения светоэлектрических параметров светоизлучающих ламп: 1 — катодолюминесцентная лампа; 2 — цифровая видеокамера; 3 — коллиматор оптического волокна; 4 — дифракционный спектрометр; 5 — компьютер; 6 — высоковольтный блок питания.

В состав измерительного стенда входят: дифракционный спектрометр, цифровая видеокамера, высоковольтный блок питания для управления катодолюминесцентной лампой.

Дифракционный спектрометр: Измерения спектра излучения производятся с помощью дифракционного спектрометра PC2000 Ocean Optics Corp. Принцип работы спектрометра иллюстрируется на рис. 4.

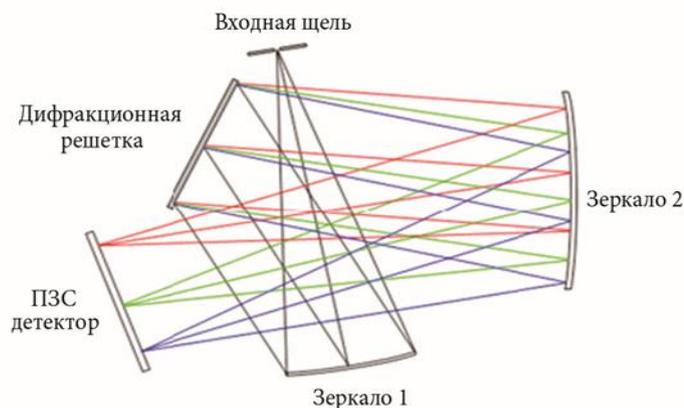


Рис. 4. Оптическая система спектрометра

Свет от источника попадает в коллиматор оптического волокна. Проходя через оптическое волокно, он попадает на сферическое зеркало. Отражаясь от него, свет падает на дифракционную решетку. Дифрагированный свет фокусируется вторым сферическим зеркалом, и изображение спектра проецируется на одномерный ПЗС массив, данные с которого передаются в компьютер.

Фотодиоды ПЗС массива включены с обратным смещением. Они заряжают соответствующие емкости пропорционально падающему потоку «лучения». Время регистрации излучения задается программно (от 3 мс до 10). По окончании времени интегрирования, после серии переключений, заряды емкостей передаются на сдвиговый регистр, после которого данные представлены уже в оцифрованном виде. Спектральная зависимость энергии излучения представлена в отсчетах АЦП спектрометра. Спектральный диапазон регистрации излучения составляет от 350 нм до 1000 нм. Разрешение спектрометра составляет 0,3 нм.

Цифровая видеокамера: Для исследования распределения интенсивности излучения по поверхности источника света применялась видеокамера. В работе использовалась черно-белая цифровая видеокамера без автоматической подстройки яркости. Объектив видеокамеры снабжен светофильтром, состоящим из двух скрещенных поляризаторов. Это позволяет

менять коэффициент пропускания излучения от 40% до 0,1% в зависимости от положения осей поляризации поляроидов. Разрешение используемой цифровой видеокамеры составляет 832x625 пикселей. С помощью видеокамеры оценивалась площадь светящейся поверхности источника.

Оценка площади проводилась следующим образом. Фотографируем поверхность анода. Получаем черно-белое растровое изображение (рис. 6), то есть каждому пикселю картинки соответствует некоторый уровень цвета i (градация серого, $i=(0\div 255)$). Построим гистограмму числа пикселей полученного изображения (рис. 3.7), то есть зависимость числа пикселей f_i , от уровня цвета i .

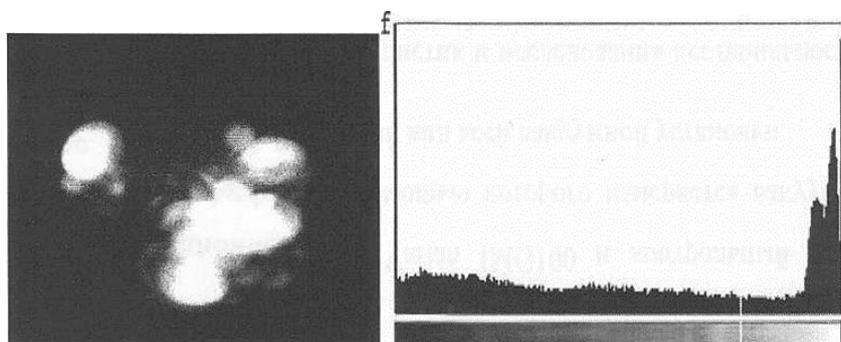


Рис. 5. Светящаяся поверхность анода; Рис. 6. Гистограмма числа пикселей растрового изображения

Определив уровень цвета k ($0 < k < 255$), ниже которого можно считать, что точка не светится (для наших применений мы берем коэффициент $k = 5 * 256 = 128$), площадь светящейся поверхности рассчитаем по формуле:

$$S = S_0 \frac{\sum_{i=k}^{255} f_1}{\sum_{i=0}^{255} f_1},$$

где S_0 — площадь сфотографированной поверхности анода; $\sum_{i=k}^{255} f_1$ — площадь под гистограммой, рассчитываемая от выбранного уровня до максимального; $\sum_{i=0}^{255} f_1$ — общая площадь под гистограммой.

Высоковольтный блок питания: Высоковольтный блок питания катодолюминесцентных ламп позволяет устанавливать напряжения анода (U_A) и модулятора (U_M) в диапазонах: $U_A = 0\div 12$ кВ, $U_M = 0\div 10$ кВ, а также (егистрировать ток анода (I_A), ТОК модулятора (I_M) и ток катода (I_K). Данные с шока питания с помощью АЦП записываются в компьютер. Мощность блока питания составляет 60 Вт. Высоковольтный блок питания управляется через компьютер.

Для определения характерного времени включения/выключения катодолю-минесцентного источника света (или времени разгорания и послесвечения катодолюминофора) создан измерительный стенд, позволяющий регистрировать временные характеристики катодолюминофора при работе светоизлучающих ламп в импульсном режиме.

Стенд для измерения интенсивности импульсного излучения. Блок-схема измерительного стенда для регистрации временных характеристик источников света представлена (на рис. 7).

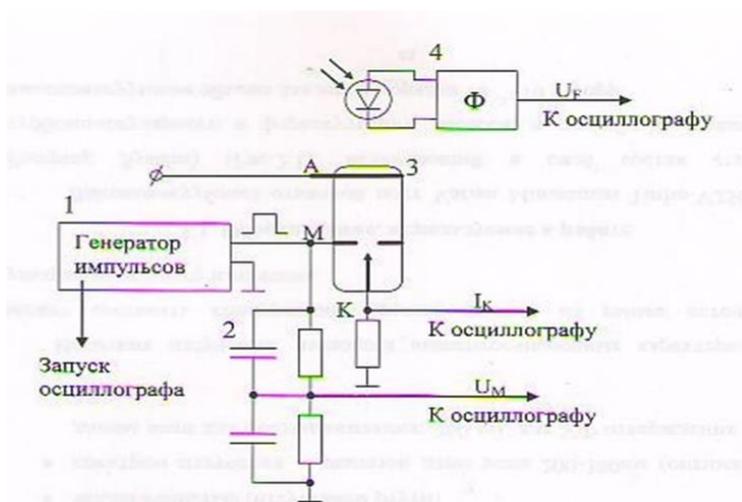


Рис. 7. Блок-схема измерительного стенда для определения времени включения/выключения катодолюминесцентного источника света (или времени разгорания и затухания катодолюминофоров): 1 — генератор высоковольтных импульсов; 2 — компенсированный делитель; 3 — катодолюминесцентная лампа; 4 — фотометр импульсного излучения.

На модулятор подаются серии импульсов напряжения (до 4 кВ) от генератора высоковольтных импульсов. Сигналы модуляторного напряжения U_M и эмиссионного тока катода (I_K) через соответствующие измерительные цепи подаются на вход осциллографа. С помощью фотометра импульсного излучения свет преобразуется в электрический импульс U_F , пропорциональный интенсивности светового потока. По осциллограммам сигналов U_M , I_K , и U_F определяется время разгорания и затухания люминофора. На рис. 8. представлена схема фотометра.

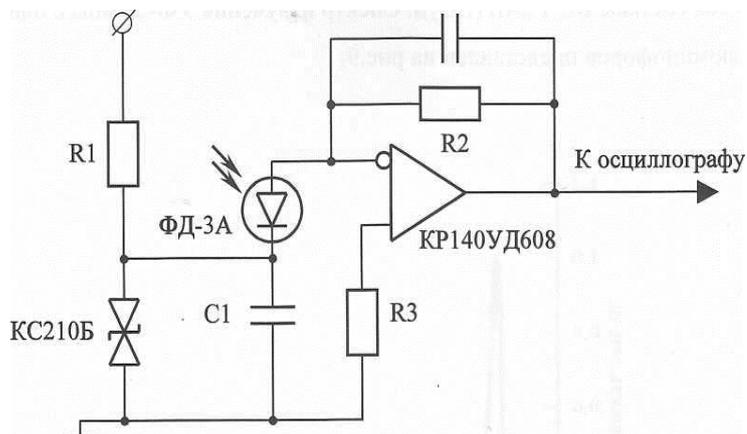


Рис. 8. Схема фотометра импульсного излучения на основе германиевого фотодиода. $R1=1\text{ кОм}$, $R2=50\text{ кОм}$, $R3=50\text{ кОм}$, $C1=10\text{ мкФ}$, $C2=33\text{ пкФ}$.

Принцип работы фотометра заключается в следующем. Фотодиод (ФД-3А) преобразует световой поток в электрический ток, пропорциональный интенсивности излучения. Операционный усилитель (КР140УД608) включен по схеме преобразователя ток - напряжение, поэтому напряжение на выходе пропорционально интенсивности светового потока. Сигнал U_p с выхода фотометра подается на вход осциллографа. Стабилитрон КС210Б задает рабочий режим фотодиода. Фотодиод включен в обратном смещении (+10В). Резистор R3 компенсирует входные токи операционного усилителя. Емкость C2 подобрана оптимальным образом, чтобы уменьшить высокочастотный шум, при высоком быстродействии схемы Быстродействие разработанного фотометра составляет $t \sim 3-5\text{ мкс}$.

Определение времени разгорания и послесвечения люминофора.

Для оценки времени разгорания и послесвечения люминофора пользовались отдельные осциллограммы фронтов нарастания (рис. 9) и спадания (рис.10) импульсов сигналов U_M , I_K и U_F .

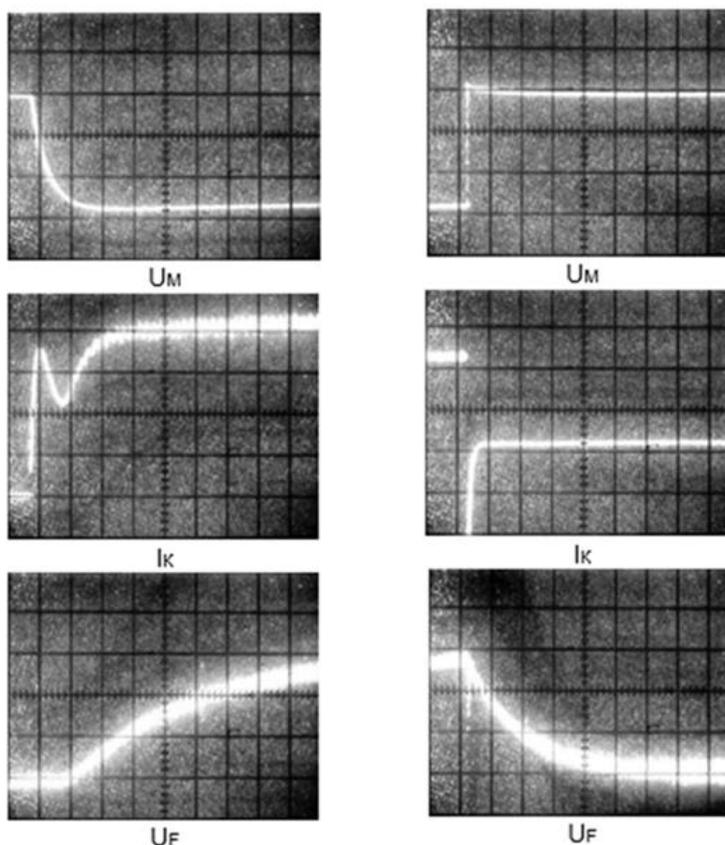


Рис. 3.9. Осциллограммы фронтов нарастания сигналов U_M , I_K и U_F . Горизонтальная развертка: 200 мкс/дел.

Рис. 3.10. Осциллограммы фронтов спадания сигналов U_M , I_K и U_F . Горизонтальная развертка: 200 мкс/дел.

В четвертой главе приведены описания конструкций прототипов приборов с автокатадами углеродных волокон разного спектра излучения и результаты их испытаний.

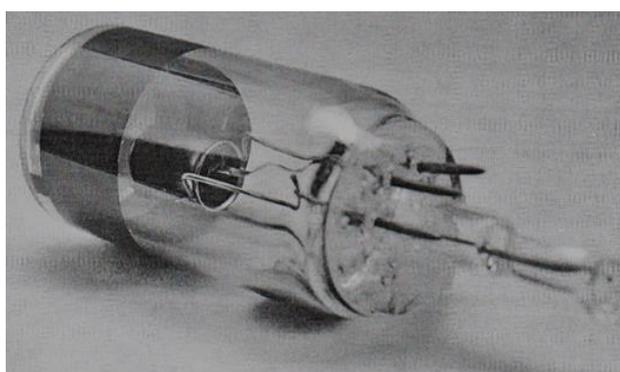


Рис. 11. Внешний вид автокатодной лампы.

Электроны, вылетевшие из катода под действием поля модулятора, ускоряются электрическим полем анода и, попадая в нанесенный на анод слой люминофора, вызывают его свечение.

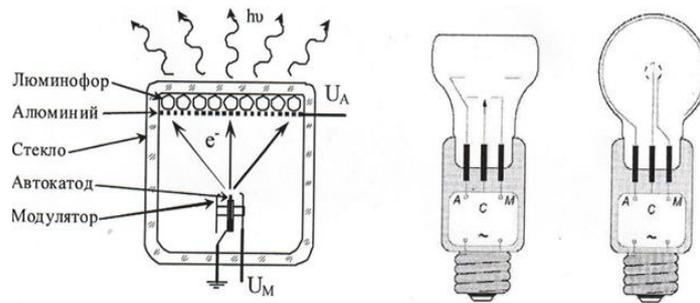


Рис. 12. Принципиальная схема катодной лампы. Рис. 13. Варианты компоновки под стандартный патрон.

В состав источника света входит автокатод (наноструктурированный углерод), модулятор (нержавеющая сталь), анод (алюминий, телевизионный люминофор), корпус (стекло). Новизна этих источников света заключается в автокатоде на основе специально обработанного наноструктурированного углеродного материала и в электронном прожекторе, который обеспечивает засветку люминесцентного экрана.

Физическая основа работы автокатаода - туннелирование электронов на границе проводник- вакуум в присутствии сильного электрического поля.

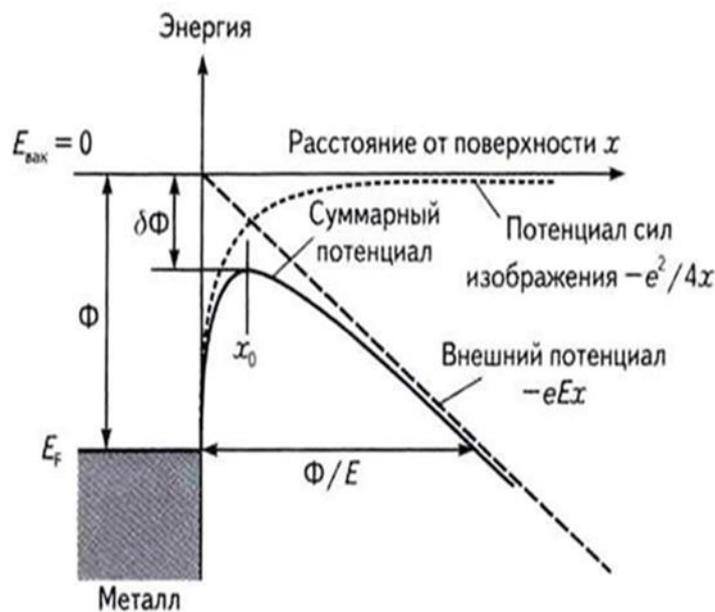


Рис. 14. Поверхностный потенциальный барьер на границе металл-вакуум в присутствии сильного электрического поля. Волнистой линией показан эффект туннелирования электронов сквозь барьер.

При изготовлении автокатаода используются промышленно производимые в Российской Федерации углеродные материалы, которые для увеличения эмиссионного ресурса и эффективности автокатаода

подвергаются дополнительной специальной обработке, что позволило получать автокатоды с высокой долговечностью и стабильностью параметров. При оптимальных режимах эксплуатации они имеют практически неограниченный эмиссионный ресурс.

К наиболее привлекательным свойствам рассматриваемых катодолюминесцентных источников излучения следует отнести их высокую экологичность, широкий диапазон рабочих температур, высокую устойчивость к механическим вибрациям и колебаниям напряжения в сети, низкую инерционность (время «электрического» включения катода не превышает 10^{-8} с), широчайший диапазон цветности и высокую долговечность.

По результатам моделирования электронно-оптической системы разработан прототип катодолюминесцентной пальчиковой лампы с оптимизированной электронно-оптической системой (рис. 15). Прототип катодолюминесцентного источника света представляет собой триодную вакуумную лампу с электронной пушкой и экраном, на который нанесен люминофор.

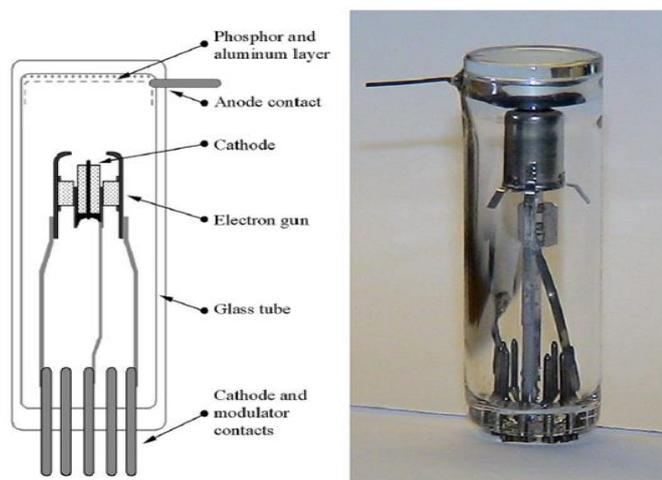


Рис. 15. Прототип пальчиковой лампы

Основой электронно-оптической системы разработанного прототипа катодолюминесцентной лампы с автокатодом является катодно модуляторный узел (КМУ), состоящий из автоэмиссионного катода и вытягивающего электрода (модулятора), выполненного в виде металлической диафрагмы. Конструкция лампы разрабатывалась таким образом, чтобы наибольшая часть потребляемой энергии выделялась на аноде.

Для каждой лампы из тестовой партии были сняты по 4 вольт-амперных характеристики (снималась зависимость автоэмиссионного тока катода от

напряжения на модуляторе при фиксированном анодном напряжении ($U_A = 7, 8, 9, 10$ кВ). На рис. 16 представлены вольт-амперные характеристики всех катодоллюминесцентных ламп из тестовой партии при анодном напряжении $I_d = 10$ кВ.

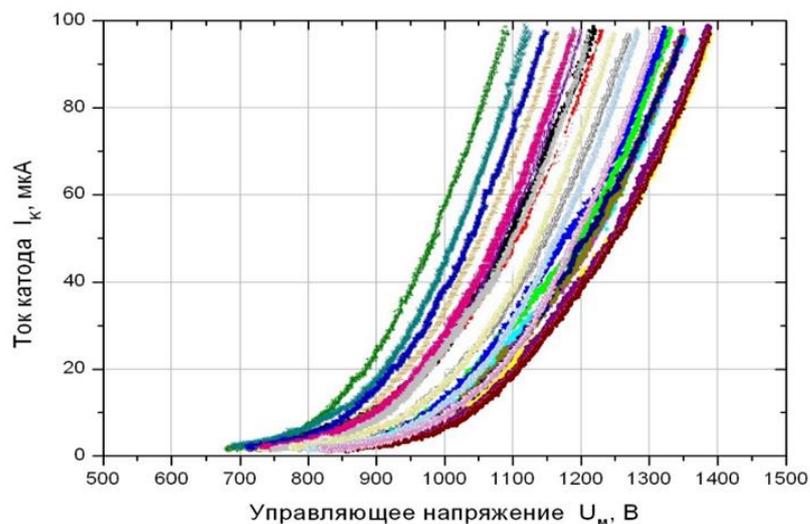


Рис. 16. Вольт-амперные характеристики ламп из тестовой партии.

Зависимость автоэмиссионного тока I_K катода от напряжения на управляющем электроде U_M при напряжении на аноде $U_A = 10$ кВ.

Исходя из полученных экспериментальных данных по вольт-амперным характеристикам каждой катодоллюминесцентной лампы (рис. 4.15, рис. 4.16), следует отметить несколько моментов.

Во-первых, вольт-амперные характеристики всех светоизлучающих пальчиковых ламп из тестовой партии (рис. 16) лежат в области управляющих напряжений $U_M [I_K \text{ max} = 100 \text{ мкА}] < 1500 \text{ В}$.

Во-вторых, вольт-амперные характеристики катодоллюминесцентных ламп не смещены в область отрицательных управляющих напряжений, а, наоборот, при некотором положительном потенциале на модуляторе автоэмиссионный ток еще практически отсутствует: $U_M [I_K \text{ min} < 0,5 \text{ мкА}] > 500 \text{ В}$.

В-третьих, очевидно, что существует заметный разброс по величинам управляющих напряжений модулятора $U_M [I_K \text{ max.} = 100 \text{ мкА}] \sim 300\text{-}400 \text{ В}$. Видимо, такой разброс характеристик связан с комплексом технических причин: это — неточность установки катода в держатель, неточность выставления расстояния модулятор-анод в процессе запайки вакуумной оболочки лампы, небольшой разброс длин пучков углеродных волокон, а также различное количество волокон в пучке для каждой лампы.

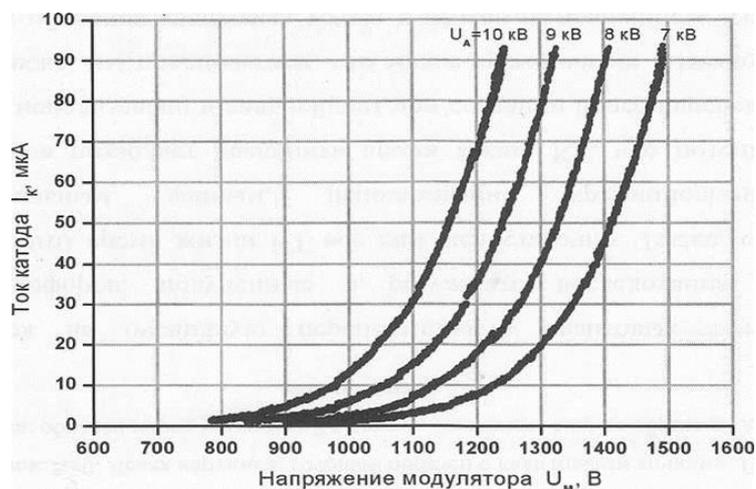


Рис. 17. Типичная вольт-амперная характеристика лампы с новым КМУ из тестовой партии. Зависимость автоэмиссионного тока С катода от напряжения на управляющем электроде U_M при фиксированных напряжениях на аноде $U_A = 7, 8, 9, 10$ кВ

Полученные результаты по электрическим характеристикам тестовой партии ламп дают возможность создания простой схемы управления катодолюминесцентной пальчиковой лампой с автоэмиссионным катодом из пучка углеродных волокон. Используя разработанную методику измерения спектрально-яркостных характеристик были проведены измерения световых характеристик пальчиковых катодолюминесцентных ламп с новым КМУ. На рис. 18-20 представлены спектры излучения катодолюминесцентных пальчиковых ламп из тестовой партии.

Поскольку для различных этапов вегетации даже одного растения нужен свет различного спектрального состава, то были созданы и исследованы катодолюминесцентные лампы с автокатадами из углеродных материалов с различным способом излучения.

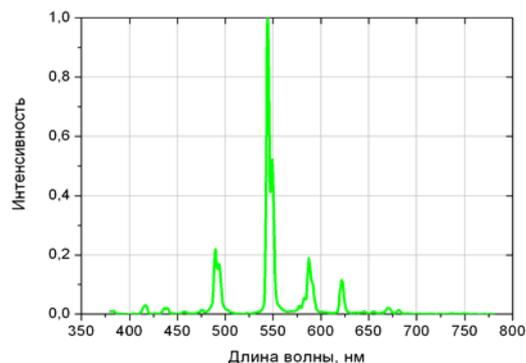
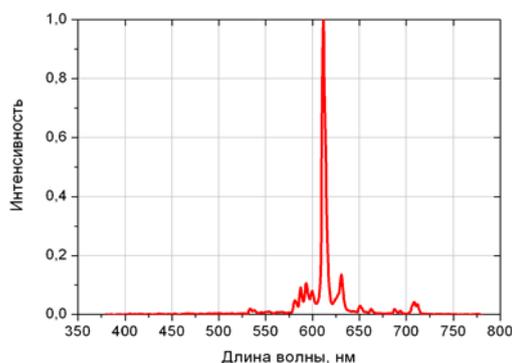


Рис. 18. Спектр излучения лампы красного цвета. Рис. 19. Спектр излучения лампы зеленого цвета.

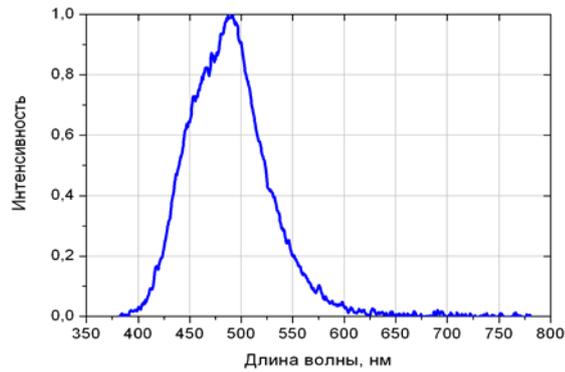


Рис. 20. Спектр излучения лампы синего цвета

Проведены измерения яркости излучения и светового потока ламп в зависимости от величины автоэмиссионного тока. Экспериментальная зависимость, характерная для каждой катодлюминесцентной лампы из тестовой партии, приведена на рис.22.

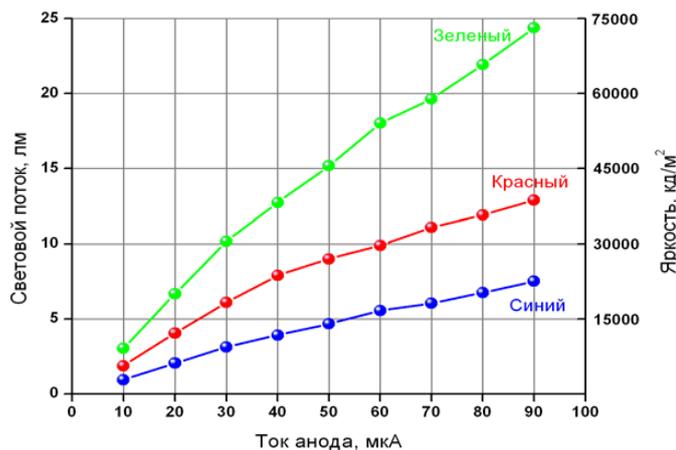


Рис. 21. Зависимость яркости излучения и светового потока пальчиковой лампы от величины автоэмиссионного тока.

При малых потребляемых мощностях (имеется в виду электрическая мощность, рассеиваемая на аноде и равная $W = U_A \cdot I_K = U_A \cdot I_A$) эффективность преобразования электроэнергии в свет при катодлюминесцентном процессе в разрабатываемом источнике света (при удельной мощности 0,1-0,2 Вт/см²) достигает значений в 35-40 Лм/Вт по зеленому цвету, 20-23 лм/Вт по красному цвету, 10-12 Лм/Вт по синему цвету. А уже при относительно больших рассеиваемых мощностях (при этом удельная мощность составляет ~1 Вт/см²) световая эффективность падает до 25-30 Лм/Вт по зеленому цвету, 14-17 лм/Вт по красному цвету, 7-9 Лм/Вт по синему цвету. Уменьшение световой эффективности при постоянном ускоряющем напряжении связано с тепловым

гашением в люминофоре (в то время как световая эффективность люминофора также непосредственно связана с ускоряющим напряжением, чем выше анодное напряжение, тем выше эффективность).

В природных условиях растениям не свойственно испытывать дефицит солнечного света, однако при выращивании в условиях закрытых помещений, теплиц, растения испытывают недостаток солнечного света, что негативно сказывается на основных процессах, протекающих в растении, вплоть до полной остановки роста и развития. В качестве важного фактора, при помощи которого можно обеспечить контроль за состоянием растений, может выступать спектральное качество света, а также его интенсивность и продолжительность.

Как было неоднократно показано, спектральный состав света оказывает существенное воздействие на процессы роста, развития, размножения растения увеличивалась скорость роста. Оценка производилась по таким параметрам, как накопление надземной биомассы. Сухая биомасса распределялась по-разному под воздействием различных видов излучения.

Сегодня, несмотря на большое разнообразие источников света, в том числе и тех, которые могут успешно применяться в сельском хозяйстве и растениеводстве для выращивания и досвечивания растительности, все еще остается не до конца решенным вопрос относительно производства и применения наиболее рациональных, энергоэффективных средств. Определенным потенциалом обладают полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД), однако, они отличаются высокой стоимостью, низкой степенью экологичности.

Поэтому до сих пор остается актуальным поиск рациональных путей создания освещения и поиск альтернативных источников освещения. В качестве альтернативы можно рассматривать катодолюминисцентные источники света на основе автокатодов из углеродных наноструктурированных материалов, которые могут обладать широким спектральным диапазоном, пригодным для тепличных хозяйств различного назначения.

Основные результаты дистанционной работы заключаются в следующем:

1. Рассмотрено влияние параметров освещения на различные стадии развития растений.
2. Выполнен подробный обзор типов ламп для искусственного освещения растений и проведен их анализ.

3. Разработана и изготовлена универсальная установка для исследования характеристик катодоллюминесцентных источников света с автокатодом, таких как: яркость, светосила, световой поток, световая эффективность, спектр излучения и время включения/выключения источника света.
4. Определены особенности катодоллюминесцентных ламп с автокатадами для тепличных хозяйств.
5. Исследованы основные закономерности возбуждения катодоллюминофоров, используемых в лампах нового поколения.
6. Организовано производство опытной партии источников света разного спектрального диапазона с автоэмиссионными катодами с остаточным вакуумом ($\sim 10^{-6}$ мм.рт.ст). Показана их эффективная работа с течением по крайней мере, десятков часов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. М. М. Мье, Е. П. Шешин, З. Я. Лвин, Ч. М. Аунг, Й. М. Хтуе. Катодоллюминесцентные источники в диапазоне ультрафиолетового излучения с автоэмиссионным катодом на основе углеродных материалов. // Труды МФТИ. 2019. Том 11, № 4, С. 37 – 46.
2. Ч. М. Аунг, Е. П. Шешин, Й. М. Хтуе, В. З. Хлаинг, Х. В. Аунг. Миниатюрные рентгеновские трубки с автоэлектронным катодом из углеродных материалов. // Труды МФТИ. 2020. Том 12, № 2, С. 99 – 110.
3. Myo M. Maung, Evgeny P. Sheshin, Ye H. Min, Kyaw A. Moe. Cathodoluminescent UV radiation sources with a field-emission cathode based on carbon materials. // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29, № 2, pp. 1933 – 1940..
4. Wai Zin Hlaing, Evgeny P. Sheshin, Htet Win Aung, Ye Min Htwe, Kyaw Moe Aung. Research of field-emission properties of flat field emission cathodes based on graphite foils. // International journal of advances in electronics and computer science (IJAECS). 2020, Vol. 7, Issue -5, pp. 11 – 15.
5. Й. М. Хтуе, Е. П. Шешин, Ч. М. Аунг, В.З. Хлаинг, Х.В. Аунг, М.Х. Жамд, В.И. Фролов. Нестабильность тока автоэлектронной эмиссии от катодов из углеродного волокна. // Труды МФТИ. 2020. Том 12, № 4, С. 144 – 154.
6. Ч. М. Аунг, Е. П. Шешин, Й. М. Хтуе. Использование катодоллюминесцентных источников света для тепличных хозяйств. // Труды МФТИ. 2021. Том 13, № 2, С. 5 – 22.
7. Й. М. Хтуе, Е. П. Шешин, Ч. М. Аунг. Автоэмиссионные свойства полиакрилонитрильных углеродных волокон при различных температурах обработки. // Труды МФТИ. 2021. Том 13, № 2, С. 32 – 39.
8. Ч. М. Аунг, Е. П. Шешин. Различные конструкции миниатюрных рентгеновских трубок. // Труды 61-я научная конференция МФТИ. 2018.- Долгопрудный.
9. Ч. М. Аунг, Е. П. Шешин, Й. М. Хтуе. Применение углеродных материалов для создания автоэмиссионного катода рентгеновского источника. // II Международная конференция молодых ученых, работающих в области углеродных материалов. - 2019 г. Г.Троицк.

10. Ч. М. Аунг, Е. П. Шешин, Й. М. Хтуе. Микрофокусные рентгеновские трубки с автоэлектронным катодом из углеродных материалов. // Труды 62-я научная конференция МФТИ. 2019. - Долгопрудный.
11. Wai Zin Hlaing, Evgeny P. Sheshin, Htet Win Aung, Ye Min Htwe, Kyaw Moe Aung. Research of field-emission properties of flat field emission cathodes based on graphite foils. // International conference on electrical and electronics engineering, Seoul, South Korea, 18th - 19th February 2020. P. 6 –10.
12. Ч. М. Аунг, Е.П. Шешин, Й. М. Хтуе. Автоэмиссионные катоды на основе углеродных материалов. // 12-я Международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология» CFPMST. -2020. -Троицк.
13. Ч. М. Аунг, Е. П. Шешин, Й. М. Хтуе. Свойства углеродных волокнистых материалов, применяемых для изготовления автоэлектронных катодов. // Труды 63-я научная конференция МФТИ, 2020. - Долгопрудный.
14. И. Н. Косарев, Б. И. Масनावиев, В. И. Фролов, Е. П. Шешин, Чжо Мое Аунг, Йе Мин Хтуе. Углеродные материалы для автокатодов люминесцентных источников света. // X Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 31 мая – 4 июня, 2021, Санкт-Петербург.

Чжо Мое Аунг

Катодолюминесцентные источники света с автокатадами из углеродных материалов для искусственного освещения растений

Автореферат

Подписано в печать _____;

Формат 60*84 1/16. Усл.печ.л.

Тираж 100 экз. Заказ №.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)»

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»

141700, Московская обл., г.Долгопрудный, Институтский пер.,9.