

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 535.53

ТАРКОВСКИЙ
ВИКЕНТИЙ ВИКЕНТЬЕВИЧ

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЛАЗЕРНЫХ СРЕД НА КРАСИТЕЛЯХ
В РАСТВОРАХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТРИЦАХ
ПРИ МИКРО- И НАНОСЕКУНДНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Минск, 2025

Работа выполнена в учреждении образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Научный консультант: **Ануфрик Славамир Степанович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теоретической физики и
теплотехники физико-технического факультета
учреждения образования «Гродненский
государственный университет имени Янки Купалы»

Официальные
оппоненты: **Шкадаревич Алексей Петрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
академик НАН Беларуси, директор НТЦ «ЛЭМТ»
БелОМО

Рябцев Геннадий Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий центром «Лазерная техника и
технологии» ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси

Кисель Виктор Эдвардович,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий научно-исследовательским центром
оптических материалов и технологий филиала БНТУ
«Научно-исследовательский политехнический
институт», профессор кафедры «Лазерная техника и
технология» приборостроительного факультета БНТУ

Оппонирующая
организация: **Белорусский государственный университет**

Защита состоится « 2 » декабря 2025 г. в 14.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.01 при ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ НАН Беларуси по адресу 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 68-2, тел. ученого секретаря: 270-87-98, e-mail: m.parkhots@ifanbel.bas-net.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНСТИТУТА ФИЗИКИ НАН Беларуси.

Автореферат разослан «30» октября 2025 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
канд. физ.-мат. наук

 М.В. Пархоц

ВВЕДЕНИЕ

Все спектральные, энергетические и временные характеристики излучения лазеров на красителях определяются, прежде всего, активной средой. В настоящее время известно более 600 различных красителей, на которых получена генерация в диапазоне от 310 до 1800 нм. Однако, не весь спектральный диапазон перекрыт достаточно высокоэффективными и фотостойкими соединениями. Поэтому поиск новых перспективных сред с хорошими параметрами является актуальной задачей. Целенаправленный поиск новых эффективных и фотостойких лазерных красителей немыслим без детального исследования основополагающих процессов, происходящих в молекулах в процессах возбуждения-девозбуждения. В связи с этим фундаментальной проблемой физики молекул органических красителей является установление взаимосвязи их структуры и спектрально-люминесцентных, физико-химических и генерационных свойств, а также изучение особенностей их внутри- и межмолекулярных взаимодействий в растворах. Решение этих задач позволит прогнозировать и синтезировать новые высокоэффективные лазерные красители с наперед заданными параметрами с минимальными собственными потерями и высокой фотостабильностью.

В этой связи большой интерес представляет использование в качестве активных сред в лазерах на красителях производных кумарина. Они при мощной ламповой накачке обладают в сине-зеленой области спектра наилучшими энергетическими характеристиками и фотостойкостью, а также ярко выраженная поляризация их молекулярной структуры позволяет расширить диапазон перестройки спектра генерации, используя эффекты сольватации.

Также перспективным направлением исследований является создание твердотельных лазерных элементов на красителях. Прогресс в этой области наметился в 1980-е годы после создания твердотельных матриц с высокой лучевой стойкостью. Сейчас предложены новые активные элементы на основе композита нанопористое стекло-полимер (НПС-П), активированного красителем, который является перспективным материалом для создания твердотельных лазерных элементов. Лазеры, созданные на основе НПС-П, характеризуются высокой механической и лазерной прочностью, хорошими термооптическими характеристиками, стабильностью работы в частотном режиме, легко активируются красителями.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами.
Результаты диссертационного исследования получены при выполнении следующих государственных программ:

- Республиканская программа фундаментальных исследований на 1996–2000 гг. «Физические основы лазерной техники и использование оптического излучения» (Квант). Задание: «Квант 08» – «Исследование активных лазерных сред на молекулах эксимеров и красителей и взаимодействие их излучения с атомными системами», «Исследование активных сред лазеров на эксимерах и красителях и использование их излучения для современных технологий» (гос. рег. №19962772; срок выполнения 01.01.96–31.12.2000);
- Проект БРФФИ №Ф00-316 «Исследование и выяснение причин аномальной зависимости генерационных характеристик лазерных красителей кумаринового, родаминового, оксазинового и других классов от спектра и длительности возбуждающего излучения» (гос. рег. №20014458; срок выполнения 2001–2003 гг.);
- Проект БРФФИ-РФФИ №Ф04Р-176 «Разработка эффективных твердотельных материалов активированных красителями, и создание на их основе лазеров нового поколения» (гос. рег. №20063359; срок выполнения 2004–2006 гг.);
- Государственная комплексная программа научных исследований «Кристаллические и молекулярные структуры», задание А31-06 «Повышение эффективности и ресурса работы новых производных бензопирана с целью создания перестраиваемых лазеров на красителях для фотохимии и биомедицины» (гос. рег. №20071453; срок выполнения 2006–2010 гг.);
- Проект БРФФИ №Ф07-354 «Исследование и создание новых лазерных композитных сред нанопористое стекло-полимер, активированных органическими красителями» (гос. рег. №2008311; срок выполнения 2007–2009 гг.);
- Проект БРФФИ-РФФИ Ф10Р-235 «Разработка и создание твердотельных активных сред перестраиваемых лазеров на основе гибридных нанокompозитов» (гос. рег. №20120126; срок выполнения 2010–2012 гг.);
- Государственная программа «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», тема А06-11 «Исследование новых лазерных композитных сред нанопористое стекло-полимер, активированных органическими красителями» (гос. рег. №20120658; срок выполнения 2011–2013 гг.);

- Проект БРФФИ-УКРФФИ Ф11УКР-008 «Создание и исследование новых активных сред для твердотельных перестраиваемых лазеров на красителях» (гос. рег. №20120645; срок выполнения 2011–2013 гг.);
- Проект БРФФИ Ф13К-150 «Нелинейно-оптические и генерационные свойства наномодифицированных лазерно-активных сред на молекулах органических красителей» (гос. рег. №20132293; срок выполнения 2013–2015 гг.).

Цель, задачи, объект и предмет исследования. Цель диссертационной работы – выяснение влияния молекулярных структурных факторов на фотофизические процессы во вновь синтезированных красителях кумаринового класса и создание на их основе лазерных сред в растворах и твердотельных матрицах с повышенной эффективностью генерации, ресурсом работы, расширенным диапазоном генерации в красную область спектра.

Для достижения этой цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Установить основные закономерности спектральной эффективности генерации красителей в растворах и твердотельных матрицах в лазере-преобразователе микросекундной длительности при изменении длины волны накачки в пределах основной полосы поглощения соединений.

2. Исследовать спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики (при микросекундной когерентной накачке) производных 3-(2-бензимидазол) и 3-имидазопиридил кумарина, содержащие в структуре электронодонорные группировки (*Et*₂- и *ОН*-) и электроноакцепторные гетероциклические радикалы.

3. С целью увеличения эффективности генерации, фотохимической устойчивости и ресурса работы активных сред экспериментально исследовать водно-этанольные растворы красителей при ламповой и лазерной накачке микросекундной и наносекундной длительности.

4. Изучить возможность практического получения генерации в красной области спектра на красителях бензопиранового класса производных солей пирилия отличающихся содержанием ядра бензопирилия в положении 3 кумаринового кольца, в условиях возбуждения ацетонитриловых растворов излучением эксимерного ХеСl-лазера.

5. Выявить особенности применения комплексов включения красителей с β-циклодекстрином в водно-этанольных растворах для увеличения эффективности генерации и увеличения ресурса работы различных классов красителей при когерентной наносекундной накачке.

6. Изучить спектрально-люминесцентные характеристики и эффективность генерации и фотохимическую стойкость красителей пиррометенового и феналеминового классов, внедренных в композит нанопористое стекло-полимер, при микросекундной когерентной накачке.

Объектами исследования являлись: активные лазерные среды на основе сложных органических соединений в растворах и твердотельных матрицах, созданные на их основе лазерные системы с когерентной и некогерентной накачкой микросекундного и наносекундного диапазонов.

Предметом исследований являлись: установление взаимосвязи фотофизических характеристик кумариновых красителей различной структуры с их лазерными свойствами при нано- и микросекундном возбуждении.

Методология и методы исследования. Для исследования активных сред лазеров и происходящих в них процессов использовались спектральные, люминесцентные и генерационные методы, методы физико-химического анализа, атомно-силовой микроскопии. В отдельных случаях для анализа работы лазеров и их систем применялись методы численного и компьютерного моделирования.

Научная новизна полученных результатов заключается:

1) в установлении аномальной зависимости эффективности генерации от спектрального состава излучения накачки при микросекундной когерентной накачке различных классов красителей (кумариновых, родаминовых, пиррометеновых, оксазиновых феналеминовых) в растворах и твердотельных матрицах, которая заключается в том, что КПД генерации достигает максимума не при возбуждении в максимум основной полосы поглощения красителя;

2) в получении новых бихромофорных молекул кумарина, существенной особенностью которых является наличие объемного гетероциклического радикала (триазольного-, оксадиазольного- или тиазольного) в третьем положении кумаринового ядра, который является связующим звеном с арильным фрагментом молекулы. Установлена роль гетероциклического радикала и арильного фрагмента в структуре молекулы бихромофора, теоретически и экспериментально показано, что заместители в 3 и 7 положениях кумаринового ядра играют ключевую роль в формировании спектральных и генерационных свойств сложной молекулы;

3) в получении впервые в условиях когерентной накачки (эксимерный *HeCl*-лазер) генерации на 15-ти соединениях – производных 3-(2-бензимидазолил) и 3-имидазопирил кумарина. Данные соединения генерируют в спектральном диапазоне 490–580 нм, имеют высокую

генерационную эффективность ~ 20 %. При некогерентной ламповой накачке они обладают высокой фотохимической и генерационной устойчивостью в 3–5 раз выше, чем у родамина 6Ж. Установлено, что наибольшей генерационной эффективностью обладают кумариновые соединения, которые в седьмом положении кумаринового кольца содержат наиболее сильные электронодонорные группировки, например, Et_2 - и OH -группы, а в третьем положении – гетероциклические радикалы, которые являются достаточно сильными акцепторами, такими, как ядро бензимидазолила и его солевые формы;

4) в получении впервые генерации в спектральной области 730–740 нм на красителях кумаринового класса – производных бензопирилия. Установлено, что наибольшей генерационной эффективностью обладают соединения, у которых в положении 7 кумариновой основы и в положении 7 ядра бензопирилия находится Et_2N -группа. Показано, что данные соединения наиболее эффективно генерируют в ацетонитриле;

5) в получении в условиях когерентной микросекундной накачки генерации у 5 красителей, внедренных в композит нанопристое стекло-полимер НПС-П (пиррометены, феналемины, перилен). Максимальная эффективность генерации составила 32 % для феналемина 512, 47 % – для пиррометена 580 и 40,2 % – для перилена;

6) в установлении оптимальной длительности лампового некогерентного возбуждения красителя равной ~1 мкс, при которой реализуется такой же КПД, как при наносекундном возбуждении соответствующей плотности мощности. При этом потери, связанные с поглощением в канале возбужденных триплетных уровней и продуктами необратимых фотохимических реакций, играют второстепенную роль по сравнению с потерями в канале возбужденных синглетных уровней.

Положения, выносимые на защиту:

1. Органические красители кумарины, пиррометены, родамины, феналемины, оксазины, ДСМ в условиях когерентной микросекундной накачки при изменении спектрального состава возбуждающего излучения в пределах основной полосы поглощения обладают аномальными генерационными характеристиками, которые выражаются в том, что КПД генерации по мере изменения длины волны возбуждающего излучения вначале возрастает, затем вблизи максимума полосы поглощения падает, с последующим ростом на длинноволновом склоне. Указанный эффект обусловлен положением спектров и величиной синглет-синглетного поглощения в возбужденных уровнях и термооптическими процессами в активной среде.

2. Органические красители на основе производных 3-(2-бензимидазолил) и 3-имидазопиридил кумарина, генерирующие при когерентной и некогерентной накачке, имеют высокий КПД и фотостойкость, обусловленные наличием в структуре молекулы в положении 7 электронодоноров, таких как *диэтил-* и *гидроксильная* группы, повышающих электронную плотность на остатке молекулы красителя, а в положении 3 - гетероциклических радикалов, являющихся акцепторами электронов, таких как ядро бензимидазолила и его солевые формы, понижающих электронную плотность на связанном с акцептором углеводородном фрагменте.

3. Возрастание эффективности генерации красителей кумарина 4 и незамещенного родамина, содержащих в молекулярной структуре в положении 7 гидроксильную группу, при увеличении полярности растворителя связано с образованием комплекса с водородной связью, перераспределением электронной плотности и увеличением дипольного момента молекулы красителя в основном состоянии.

4. Новый класс кумариновых бензопирановых красителей – производных солей пирилия, отличающихся содержанием ядра бензопирилия в положении 3 кумаринового ядра, при возбуждении в ацетонитриле излучением эксимерного ХеСl-лазера (308 нм) позволяет получать генерацию в спектральном диапазоне 730–740 нм. При этом спектрально-люминесцентные характеристики и генерационная эффективность определяется тремя факторами: природой заместителей в 6 и 7 положениях кумаринового кольца, природой заместителей в ядре бензопирилия и типом растворителя.

5. Механизм формирования комплексов включения красителей родамина 6Ж, феналемина 160, родамина С, DCM, оксазина 17, оксазина 9 с β -циклодекстрином в водно-этанольных растворах, заключающийся в создании мицелярного комплекса, в котором часть молекулы красителя, преимущественно ауксохромный заместитель, находится внутри гидрофобной полости β -циклодекстрина, а его внешняя сольватная гидрофильная оболочка образована водородными связями с молекулами воды, что обеспечивает эффективную экранировку молекул красителя от водной среды и увеличивает КПД генерации.

6. Новые лазерные среды на основе композита нанопористое стекло-полимер, активированные феналеминном 510, феналеминном 512, пиррометеном 580, периленом, при микросекундной когерентной накачке ($\lambda_{\text{нак}}^{\text{макс}} = 525$ нм) позволяют получить максимальную эффективность генерации 32 % – феналемин 512, 47 % – пиррометен 580 и 40,2 % – перилен.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации. В диссертацию вошли результаты исследований, выполненные автором за время его научной работы по данной теме. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад автора в проведенные исследования и опубликованные материалы. Автору принадлежит идея и выбор направления исследования, разработка методик экспериментов и аппаратуры, включая проведение экспериментальных и теоретических исследований в их основной части, а также обработка и анализ приведенных в диссертации результатов.

На разных этапах работы эксперименты проводились совместно с В.А. Мостовниковым, С.А. Батище, С.С. Ануфриком, В.М. Никитченко, В.Ю. Курстаком. Расчеты, касающиеся влияния наведенных термооптических эффектов на спектральную эффективность генерации красителей, выполнены совместно В.Ю. Курстаком. Квантово-химические расчеты производных безопирилия выполнены совместно с А.В. Лавышем. Новые кумариновые соединения и бифлуорофоры были синтезированы и предоставлены В.М. Никитченко (доцент кафедры органической химии, Харьковского национального университета радиоэлектроники имени В.Н. Каразина), твердотельные активные элементы с внедренными красителями в полиуретане были предоставлены М.И. Дзюбенко (профессор кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники имени В.Н. Каразина), гибридные нанокompозиты, допированные красителями были предоставлены Т.Н. Копыловой (профессор Томского государственного университета). Остальные соавторы участвовали в обсуждении результатов и написании публикаций.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты диссертации представлялись на следующих научных конференциях, симпозиумах и семинарах: III Межреспубликанском семинаре «Физика быстропротекающих плазменных процессов» (Гродно, 1992); Международной конференции «Современные проблемы лазерной физики и спектроскопии» (Гродно, 1993); III конференции по лазерной физике и спектроскопии, (Минск, 1997); II, IV Международной конференции по лазерной физике и спектроскопии (Гродно, 1995, 1999); II, III, V, IX, X, XII Международных научно-технических конференциях «Квантовая электроника» (Минск, 1998, 2000, 2002, 2004, 2013, 2015, 2019); Международной конференции «Лазеры в биомедицине» (Гродно, 2002); Международной конференции «Лазерная физика и применение лазеров» (Минск, 2003); Proceedigs International Conference on Advanced Optoelectronics

& Lasers (Alushta, 2003); VI, VII, VIII, IX, Международных конференциях «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно, 2006, 2007, 2008, 2010, 2012); X International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Lasers» (Tomsk, 2011); 2nd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering (Chisinau, 2013); XI Международной конференции «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии» (Минск, 2014); XX, XXI Всероссийских научных конференциях «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2014, 2015); V конгрессе физиков Беларуси (Минск, 2015); VI Международном Балтийском морском форуме «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве» (Калининград, 2018).

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на предприятии Гродненского региона ООО «Зовпласт» (справка о практическом использовании в Приложении А к диссертации), внедрены в учебный процесс учреждений образования «Гродненский государственный медицинский университет» (акт внедрения в Приложении А к диссертации), «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (акт внедрения в Приложении А к диссертации).

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 73 публикациях, из них: 32 статьи – в научных изданиях, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (8,0 авт. л.), 11 статей – в иных научных изданиях (2,2 авт. л.), 22 материала (3,2 авт. л.) и 7 тезисов докладов (0,5 авт. л.) научных конференций, 1 заявка на выдачу патента на изобретение. Общий объем опубликованных по теме диссертации материалов составляет 13,9 авт. л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка используемых источников и приложения. Полный объем диссертации составляет 245 страниц: текст диссертации изложен на 208 страницах (в том числе 108 рисунков и 30 таблиц на 73 страницах), список используемых источников занимает 29 страниц и включает 294 наименований (включая 73 публикации автора), одно приложение размещено на 8 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена аналитическому обзору и методике эксперимента. В разделе 1.1, на основании аналитического обзора, дано

обоснование выбора для исследования активных сред на основе сложных органических соединений. Особое внимание привлекают кумариновые красители. Во-первых, этот класс красителей характеризуется в сине-зеленой области спектра наилучшими энергетическими характеристиками и ресурсом работы, особенно при мощной некогерентной накачке, во-вторых, они обладают ярко выраженной поляризацией молекулярной структуры, а также обладают несколькими центрами специфических взаимодействий с окружающей средой. Это позволяет расширить возможный спектральный диапазон перестройки генерации. Для этого можно использовать различные сольватохромные и сольватофлорные эффекты.

В разделе 1.2 изложена методика исследования спектрально-люминесцентных характеристик лазерных красителей. Для этого использовался метод наносекундной импульсной спектрофлуориметрии. Для измерения длительности затухания флуоресценции использовалась лабораторная установка, работающая в режиме времякоррелированного счета одиночных фотонов.

В разделе 1.3 сформулирована методика исследования однородности и морфологии поверхности твердотельных лазерных элементов, включающая оптическую схему классического интерферометра типа Маха – Цендера, а для визуализации свилей, отображающих оптическое качество исследуемых образцов, использовалась система, состоящая из гелий-неонового лазера и телескопической системы. Изучение морфологии поверхности образцов было выполнено с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) NT-206 в статическом режиме сканирования кремниевым кантилевером CSC 12/15.

В разделе 1.4 рассмотрена методика исследования генерационных параметров лазерных красителей. Для этого использовались различные лазерные системы: лазеры на красителях с ламповой накачкой, двух- и трехступенчатые лазеры-преобразователи на красителях микро- и наносекундной длительности на основе эксимерного ХеСl-лазера и лазера на алюмо-иттриевом гранате.

В разделе 1.5 рассмотрена техника зондирования наведенных накачкой потерь в растворах красителей. Использовалась оптическая схема лазера на красителях с двухступенчатым возбуждением с системой импульсной лазерной спектроскопии «накачка-зондирование».

Также в первой главе описана методика квантово-химических расчетов исследуемых соединений, которые выполняли в программном пакете Firefly 8.0.1. При расчетах применяли метод функционала электронной плотности с использованием трехпараметрического гибридного функционала B3LYP и базисного набора функций 6-31G(d,p).

Вторая глава посвящена активным средам на основе сложных органических соединений в растворах. В разделе 2.1 исследованы спектрально-люминесцентные и лазерные свойства новых кумаринов при ламповой и когерентной накачке различного спектрального состава и временной длительности. В данном разделе описаны результаты исследований спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик одиннадцати новых кумаринов, отличающихся природой заместителей в 3-м и 7-м положениях кумаринового кольца (рисунок 1).

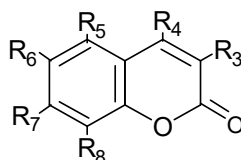
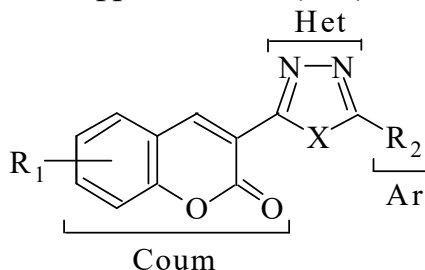


Рисунок 1 – Структурная формула оксикумаринового кольца

Исследование спектрально-люминесцентных характеристик показало, что наиболее высоким квантовым выходом люминесценции отличаются 3N–пиридил–карбамоил–7–хинолизинилкумарины. Особенно благоприятное воздействие на увеличение квантового выхода люминесценции оказывает введение в 3-е положение кумаринового кольца α -формы 3N–пиридил–карбамоил группировки. Введение в 7-е положение кумаринового кольца вместо хинолизина диэтиламиногруппы несколько снижает квантовый выход флуоресценции. Все указанные благоприятные факторы находят свое подтверждение в увеличении времен жизни возбужденных состояний. Все указанные выше структуры способствуют сохранению жесткой плоскостной структуры молекулы и π -электроны получают возможность свободного перемещения вдоль всей молекулярной структуры. Введение в 3-е положение кумаринового кольца вместо 3N–пиридил–карбамоил группировки 3N–(2 метил) фенил–карбамоил или 3N–4–бифенил–карбамоил группировок приводит к существенному уменьшению как квантового выхода люминесценции, так и уменьшает время жизни возбужденного состояния. В этом случае создаются благоприятные факторы для поворота или вращения отдельных фрагментов молекулы, что и приводит к указанным негативным явлениям. Впервые получена генерация у семи новых соединений. Новые кумарины позволяют получать генерацию в спектральном диапазоне 483–525 нм. Наибольшую генерационную эффективность и фотохимическую устойчивость показали хинолизиновые соединения, которые отличаются заместителями в третьем положении кумаринового кольца. На увеличение генерационной эффективности и фотостойкости благоприятно влияет наличие у соединений в третьем положении такого сильного акцептора электронов, как фенил–

карбомоил группировка. Необходимо отметить, что некоторые из указанных соединений обладают самой высокой фотохимической устойчивостью, которая превосходит таковую для эталонного кумарина 334 на 66%.

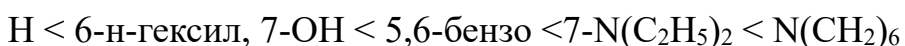
В разделе 2.2 представлены результаты исследования бихромофорных гетерил-кумариновых красителей. Отличительной особенностью вновь синтезированных кумариновых соединений является наличие объемного гетероциклического радикала (триазольного-, оксадиазольного- или тиазольного) в 3-ем положении кумаринового ядра, который выступает в виде связующего звена с арильным фрагментом (АФ) молекулы (рисунок 2).



Coum – кумариновое ядро; Het – гетероциклический радикал; Ar – арильный фрагмент

Рисунок 2 – Структурная формула бихромофорного гетерил-кумаринового красителя

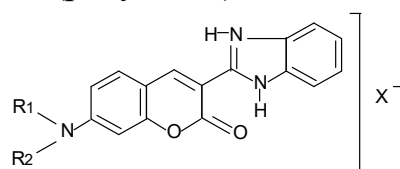
Такие бифлуорофоры (БФ) характеризуются достаточно сложными электронными спектрами поглощения и флуоресценции, обусловленными наличием двух хромофоров в молекуле. Введение заместителя электронодонорной природы в положение 7 кумаринового цикла или его аннелирование смещает длинноволновую полосу батохромно. По батохромному влиянию заместители в кумариновом фрагменте (КФ) можно расположить в ряд:



Природа заместителя в АФ изученных БФ практически не влияет на положение длинноволновых полос поглощения. В большинстве случаев полученные соединения ярко люминесцируют и обладают высокими квантовыми выходами (КВ) флуоресценции. Данные соединения генерируют при ламповой накачке только в щелочной среде ($E_{\text{ген}} = 0,082$ Дж) в области 502-506 нм. При накачке эксимерным ХеС1-лазером ($\lambda_{\text{нак}} = 308$ нм) КПД генерации составил 5%, а спектральный интервал $\Delta\lambda_{\text{ген}} = 510\text{-}520$ нм. Существенно, что присоединение дополнительно к фенилу CH_3 -группы в АФ практически не отражается на спектрально-люминесцентных свойствах, но сопровождается резким (более чем в 20 раз) возрастанием эффективности генерации. Влияние метильной группы связано с ее стабилизирующим

действием на фенильный радикал, что способствует установлению определенной плоскостной структуры молекулы. Это в свою очередь уменьшает вероятность безызлучательных переходов в триплетное состояние и приводит к столь резкому увеличению генерационной способности молекулы. Введение в положения 5,6 кумарина бензольного кольца (переход от 7-окси-6-гексил-7-гидроокси- к 5,6-бензикумарину с триазольным гетероциклом приводит к синхронному смещению спектров поглощения и флуоресценции на 10 нм в длинноволновую сторону, при этом коэффициент экстинкции основной полосы поглощения снижается в 2-3 раза, а КВ флуоресценции восстанавливается до 65%. Переход к оксидазольному гетероциклу, содержащему различные арильные заместители, практически не отражается на КВ флуоресценции и спектральных характеристиках соединений. Однако, данная группа соединений не обладает генерационной способностью ни при изменении кислотно-основного равновесия этанола, ни в других растворителях (бутанол, изоамиловый спирт, гексан) как при лазерной, так и при ламповой накачках.

В разделе 2.3 исследованы спектрально-люминесцентные характеристики, а также генерационные параметры производных 3-(2-бензимидазолил) кумарина в условиях когерентной накачки излучением эксимерного ХеСl-лазера. Объектом исследования являлись 14 новых кумариновых красителей – производных 3-(2-бензимидазолил) кумарина с общей структурной формулой (рисунок 3).



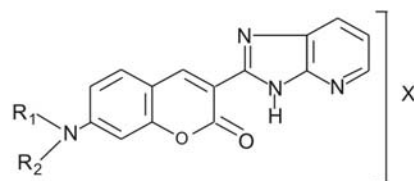
R_1 и R_2 – этил, или R_1 и R_2 образуют с атомом азота два приконденсированных насыщенных шестичленных гетероцикла; X —Cl или ClO_4

Рисунок 3 – Структурная формула 3-(2-бензимидазолил) кумарина

Установлено, что на их спектрально-люминесцентные характеристики и генерационную эффективность, в основном, оказывают влияние два фактора: природа заместителей в 6-м и 7- положениях кумаринового кольца и ионная структура красителя. Наибольшей генерационной эффективностью обладают катионные формы исследованных красителей – перхлораты. Флуоресценция красителя тушится некоторыми анионами в зависимости от их природы. Например, способность к тушению флуоресценции постепенно уменьшается в следующем ряду анионов: I^- , SCN^- , Br^- , Cl^- , ClO_4^- . Такая последовательность позволяет предположить, что возбужденное состояние

красителя дезактивируется при взаимодействии, характеризующемся переносом заряда. Таким образом, перхлораты являются наиболее эффективными лазерными красителями, как при ламповой, так и лазерной накачке. Установлен вклад ионной формы красителей. Видно, что *ОН*-группа в электронейтральной форме красителя предпочтительнее диэтиламиногруппы. В случае хлоридов или перхлоратов всё обстоит наоборот – для них более предпочтительным является наличие в 7-м положении диэтиламиногруппы. Замена диэтиламиногруппы в 7-м положении кумаринового кольца двумя насыщенными гетероциклами значительно улучшает генерационные характеристики новых кумариновых красителей. Эти соединения являются юлолидин-кумарины и при высокой энергетической эффективности обладают повышенной фотохимической устойчивостью, которая в 3–5 раз выше, чем у родамина 6Ж.

В разделе 2.4 исследованы новые лазерные красители на основе производных 3-имидазопиридил кумарина (рисунок 4). В качестве объекта исследования было использовано 3 новых кумариновых красителя – производных 3-имидазопиридил кумарина с общей структурной формулой (рисунок 4).



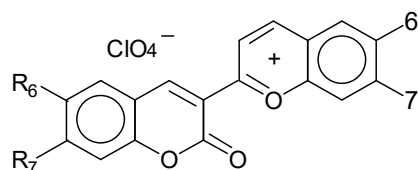
R_1 и R_2 – этил, или R_1 и R_2 образуют с атомом азота два приконденсированных насыщенных шестичленных гетероцикла; X —Cl, HCl или 2HCl

Рисунок 4 – Структурная формула 3-имидазопиридил кумарина

На примере исследованных кумаринов видно, что на их спектрально-люминесцентные характеристики и генерационную эффективность, в основном, также оказывают влияние два фактора: природа заместителей в 7-м положении кумаринового кольца и ионная структура красителя (рисунок 1). При сравнении генерационных характеристик новых кумаринов со свободной и закрепленной диэтиламиногруппой видно, что фотохимическая устойчивость и ресурс работы у последних существенно выше. По эффективности генерации 3-имидазопиридил кумарины несколько хуже 3-(2-бензимидазоллил) кумаринов, но обладают более широкими спектральными диапазонами генерации, что предпочтительнее в перестраиваемых лазерах.

В разделе 2.5 исследованы производные бензопирилия в этаноле и ацетонитриле при возбуждении излучением эксимерного XeCl-лазера.

Данные соединения отличаются тем, что в положении 3 кумаринового кольца содержат ядро бензопирилия (рисунок 5).



$R_6 - C_6H_{13}$; R_7 : Et_2N , OH ; 6 – C_6H_{13} ; 7 – Et_2N , OH .

Рисунок 5 – Структурная формула бензопирилиевого кумарина

Все они являются перхлоратами. Исследованы различные варианты данных кумаринов, отличающихся заместителями в 6-м и 7-м положениях (OH , C_6H_{13} , $(Et)_2N$). Впервые получена генерация у 3-х из 6-ти исследованных кумаринов. Новые соединения генерируют в желто-зеленой и красной области спектра. На их спектрально-люминесцентные характеристики и генерационную эффективность, в основном, оказывают влияние три фактора: природа заместителей в 6-м и 7- положениях кумаринового кольца, природа заместителей в ядре бензопирилия и тип растворителя. Генерационная способность у кумаринов данного класса проявляется только при наличии в положении 7 наиболее сильных донорных группировок, например, Et_2N - и OH -группы, а в положении 3 - достаточно сильных акцепторов электронов. Наибольшую генерационную эффективность показали те соединения, у которых в положении 7 кумаринового кольца и в положении 7 ядра бензопирилия находится Et_2N -группа. Меньшую эффективность генерации показали соединения, содержащие в положении 7 кумаринового кольца и в положении 7 ядра бензопирилия OH -группу. Наличие гексила в 7-м положении кумаринового кольца и 6-м положении ядра бензопирилия ухудшает генерационную способность исследованных соединений. Это подтвердилось квантово-химическими расчетами, которые показывают, что введение в 7-е положение гексила нарушает плоскостную структуру молекулы. Впервые получена генерация на производных кумарина в далекой красной области спектра.

В разделе 2.6 исследовано влияние вязкости среды на спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики новых кумаринов. Исследованы спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики четырех новых иминокумаринов, отличающихся природой заместителей во 2-м, 3-м и 7-м положениях кумаринового кольца (рисунок 6) в зависимости от типа и вязкости растворителя:

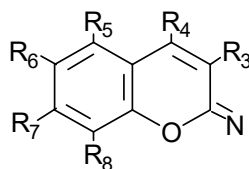


Рисунок 6 – Структурная формула кольца иминокумаринового красителя

Изменение типа растворителя сильно повлияло на квантовый выход флуоресценции. Исследование спектрально-люминесцентных характеристик показало, что на них существенное влияние оказывает изменение молекулярной структуры красителей. Введение во второе положение кумаринового кольца таких объемных заместителей как 2N-(4-метил) фенил, 2N- α -пиридил, 2N-(4-диэтиламинофенил) и 2N-фенил негативным образом влияют на квантовый выход флуоресценции. Можно предположить, что эти заместители не способствуют сохранению жесткой плоскостной структуры молекулы и π -электроны не могут свободно перемещаться вдоль цепи сопряженных молекулярных связей. Указанные заместители могут испытывать повороты и вращения, что приводит к увеличению безызлучательных переходов и уменьшает квантовый выход флуоресценции. Подтверждением вышесказанного является переход на вязкий растворитель глицерин, который существенным образом ограничивает возможность вращения указанных заместителей. При этом для соединений, содержащих во втором положении кумаринового кольца 2N-(4-метил) фенил- и 2N- α -пиридил-группировки в вязких растворах происходит 10-20-кратное увеличение квантового выхода флуоресценции и восстанавливается способность к генерации.

Третья глава посвящена исследованию активных сред на красителях в твердотельных матрицах. В разделе 3.1 изучены свойства пирометеновых и феналеминовых красителей внедренных в композит нанопористое стекло-полимер (НПС-П). Использовались: пиррометен 580, три феналемина (510, 512, 640) и перилен. Были проведены исследования спектрально-люминесцентных характеристик красителей внедренных в композит НПС-П. Для сравнения аналогичные параметры исследовались и для жидких растворов рассматриваемых соединений. Данные об измерениях времен жизни возбужденных состояний позволяют сделать ряд важных выводов. Первый касается увеличения времени жизни возбужденного состояния красителя феналемина 512 в НПС-П по сравнению с тем же феналеминем 512 в этанольном растворе. Кроме того установлено, что возбуждение флуоресценции на длине волны 408 нм увеличивает время жизни возбужденных состояний по сравнению с возбуждением на длине волны 514

нм как для жидких растворов красителей так и внедренных в НПС-П. Именно эта длина волны лежит в начале смещения спектра генерации в коротковолновую область, т.е. там, где начинается рост вредных потерь. Подобные закономерности наблюдаются и для феналемина 510 и пиррометена 580. Кроме того, данные свидетельствуют о том, что увеличение времени жизни возбужденного состояния коррелирует с ростом длины волны регистрации флуоресценции. Наличие указанного эффекта говорит, скорее всего, в пользу внутримолекулярного переноса энергии. Все исследованные соединения имеют достаточно жесткую плоскостную структуру, что благоприятствует свободному перемещению π -электронов в пределах их плоскостного распределения по цепи сопряжения. Что касается феналемина 512, то бензольное кольцо, которое могло бы вращаться, в данном случае закреплено аминной группой. В условиях когерентной микросекундной накачки исследовано 5 красителей, внедренных в НПС-П. При накачке излучением с длиной волны $\lambda_{\text{нак}}^{\text{макс}}=525$ нм получена максимальная эффективность генерации 32 % для феналемина 512, 47 % для пиррометена 580 и 40,2 % для перилена.

В разделе 3.2 представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных свойств и кинетики флуоресценции активных элементов в зависимости от типа матрицы и внедренного красителя. Были исследованы образцы на основе полиуретановых матриц, активированных сульфородаминоом 101, оксазином 1, оксазином 17, родамином 6Ж. Существенных изменений в спектрах поглощения красителей, внедренных в полиуретан, по сравнению с их спектрами в этаноле не произошло, хотя и наблюдались некоторые смещения максимумов полос поглощения. Причем, для родамина 6Ж спектр сместился на 6 нм в длинноволновую сторону, тогда как для оксазина 17 произошло коротковолновое смещение на 10 нм. В области длин волн менее 400 нм полиуретан обладает сильным поглощением, а значит, эта область не пригодна для возбуждения матрицы с красителем. Зато в области длин волн от 420 нм и более полиуретан практически прозрачен для света и не должен поглощать излучение накачки. Для накачки выбранных красителей в полиуретановой матрице наиболее подходящим является излучение зеленой области спектра в диапазоне 500–550 нм.

В разделе 3.3 представлены результаты исследования морфологии поверхности и оптические свойства полиуретановых и композитных матриц. Морфология и структура поверхности исследована методом АСМ-микроскопии. Оптическое качество образцов исследовалось методом двухлучевой интерферометрии. Сравнительный анализ элементов на основе композитных и полиуретановых матриц показал, что оба материала обладают

достаточно высоким оптическим качеством и могут быть перспективными для создания активных сред твердотельных перестраиваемых лазеров на красителях.

В разделе 3.4 исследована однородность и морфология поверхности лазерных элементов на основе гибридных нанокompозитов. Гибридные нанокompозиты являются комбинацией органических полимеров и неорганических стекол, вследствие этого они сочетают в себе преимущества и тех и других – высокую оптическую однородность, низкую усадку органического полимера и термическую стабильность, высокую лучевую стойкость неорганического стекла. В качестве красителя использовался родамин 6Ж, а в качестве компонентов гибридного полимера – органические мономеры метилметакрилат (ММА) с 2-гидроксиэтилметакрилатом (ГЭМА) в соотношении 1:1 и неорганический прекурсор – тетраэтоксисилан (ТЭОС). Изучение морфологии поверхности образцов было выполнено методом атомно-силовой микроскопии.

Проведенные исследования подтвердили данные, содержащиеся и в других работах, указывающие на то, что в образцах на основе гибридных полимеров содержатся полиэдральные силесквioxанальные - наноструктурированные молекулярные системы, имеющие кристаллическую ячейку и способные агрегироваться и формировать нанокристаллы.

В разделе 3.5 рассмотрены особенности расходимости излучения микросекундного твердотельного лазера на основе композита НПС-П, активированного красителями и сравнение их с аналогичными показателями для жидких активных сред. Определение расходимости генерируемого излучения для лазера накачки и лазера-преобразователя производилось методом Фуко. Результаты эксперимента говорят о том, что расходимость для лазера-преобразователя на основе красителя, внедренного в НПС-П существенно выше, чем для жидкого раствора красителя. При микросекундной накачке она выше на порядок ($\approx 3,5 \cdot 10^{-3}$ рад для родамина 6Ж в этаноле и $\approx 2 \cdot 10^{-2}$ рад для перилена в НПС-П), при наносекундной – в 3 раза ($\approx 2 \cdot 10^{-3}$ рад для родамина 6Ж в этаноле и $\approx 6 \cdot 10^{-3}$ рад для перилена в НПС-П). Основная причина более высокой расходимости излучения элемента на основе НПС-П по сравнению с жидким раствором красителя связана, вероятнее всего, со светорассеянием излучения накачки и генерации в активном элементе на основе НПС-П, который представляет собой гетерогенную среду. На фотографиях пятен генерации для случая когерентной микросекундной накачки отчетливо видна характерная интерференционная структура, причем, в большей степени она характерна для случая жидкого раствора красителя и в меньшей – для красителя

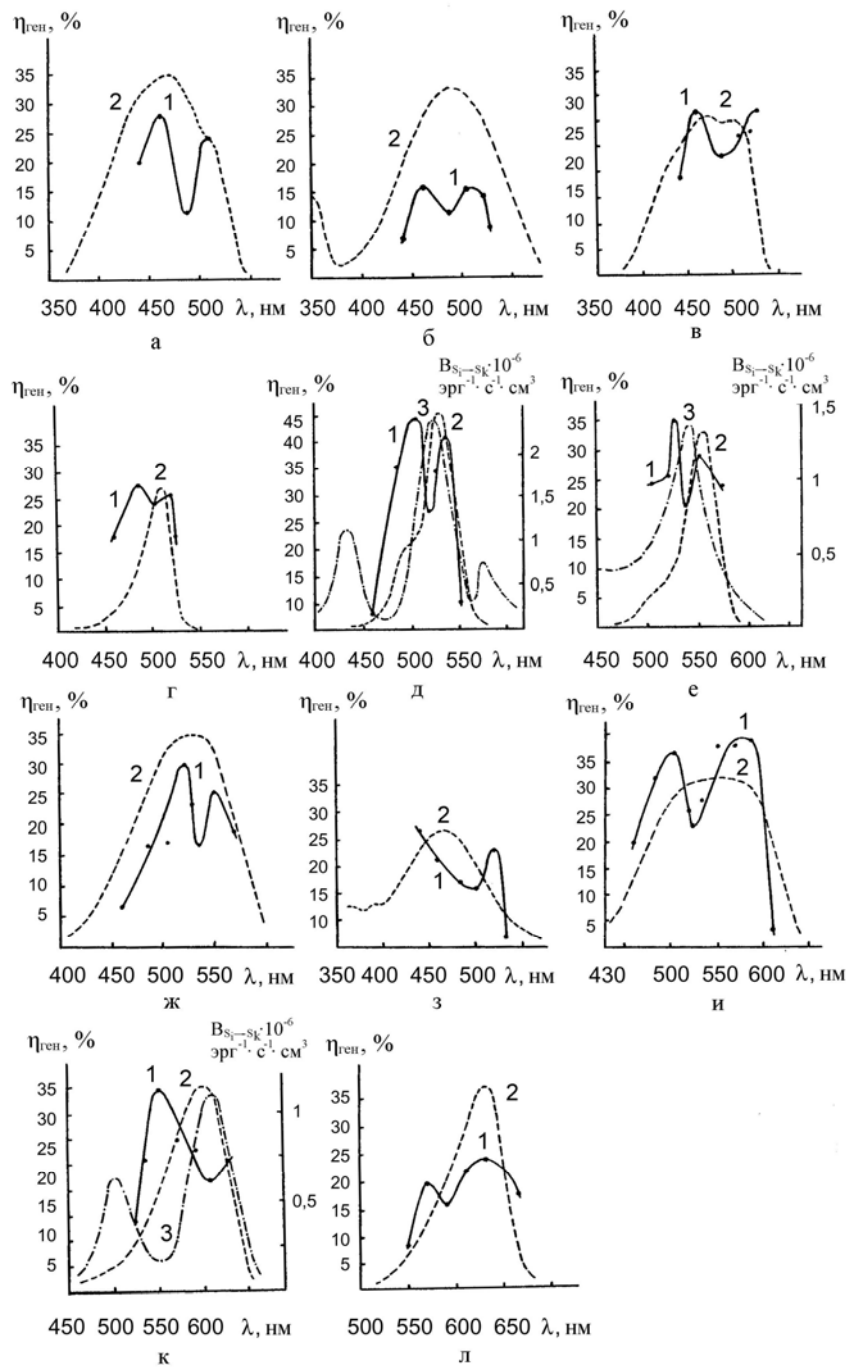
внедренного в НПС-II. Такой вид пятен генерации говорит о наличии эффекта теплового самовоздействия, который заключается в изменении показателя преломления среды при воздействии электрического поля излучения пучка накачки, сфокусированного в активную среду. Если в случае активной среды используется краситель, внедренный в НПС-II, то по характеру пятна генерации видно, что теплопроводность образца меньше, чем жидкого раствора красителя. Это может иметь место из-за полимера, заполняющего поры НПС. В результате эффект теплового самовоздействия проявляется в меньшей степени, чем для жидкости. Зато здесь превалирует явление рассеяния излучения, которое увеличивает расходимость излучения в гораздо большей степени, чем эффект теплового самовоздействия.

В четвертой главе описаны особенности генерации активных элементов на основе сложных органических соединений при различных спектральных и временных режимах возбуждения. В разделе 4.1 представлены результаты исследования эффективности генерации красителей при когерентной микросекундной накачке. Были исследованы причины падения КПД генерации лазера-преобразователя на этанольных растворах различных красителей в зависимости от плотности энергии и спектрального состава возбуждающего излучения и определены условия, обеспечивающие реализацию высоких КПД генерации при когерентной накачке импульсами микросекундной длительности. Сравнение экспериментальных данных, полученных при микросекундном возбуждении, с результатами для наносекундного возбуждения показывает, что при оптимальных плотностях энергии накачки при возбуждении импульсами длительностью ~ 1 мкс реализуются практически такие же КПД, как при наносекундном возбуждении при соответствующих плотностях мощности накачки. Эти данные, а также равенство порогов начала и окончания генерации в лазере-преобразователе на родамине 6Ж при оптимальных условиях накачки показывает, что за время генерации не появляются дополнительных, зависящих от времени потерь и это позволяет предположить, что в оптимальных условиях возбуждения генерации импульсами длительностью ~ 1 мкс потери, связанные с поглощением молекулами в канале возбужденных триплетных уровней, играют второстепенную роль по сравнению с потерями в канале возбужденных синглетных уровней. При превышении оптимальных интенсивностей накачки начинают играть существенную роль потери в канале возбужденных триплетных уровней, а также потери, связанные с термооптическими и термоакустическими искажениями активной среды и приводящие к падению КПД. Установлено, что в области высоких плотностей энергии накачки происходит возрастание потерь и соответственно падение

КПД генерации лазера-преобразователя. Результаты экспериментов, полученные при использовании источников накачки разной длительности, позволили сделать вывод, что падение эффективности генерации не определяется заселением высоковозбужденных синглетных уровней в Родамине 6Ж (по оценкам при плотности мощности излучения накачки $P \cong 370 \text{ МВт/см}^2$ на высоковозбужденных синглетных уровнях находится $\geq 10\%$ от числа частиц). Основную роль в снижении эффективности генерации при мощной накачке играют два процесса – светорассеивание излучения накачки и генерации и появление коротко- и долгоживущих продуктов фотовозбуждения. Кроме того, при большом диаметре зоны возбуждения возможен срыв генерации в результате возникновения конкуренции между генерацией, развивающейся в резонаторе, и одно- или двухпроходовой усиленной люминесценцией, формирующейся в активной среде в направлении, перпендикулярном оси резонатора. Нелинейное рассеяние накачки возникает в результате нестационарной самодифракции излучения накачки на фазовых «шумовых» решетках, формирующихся в результате тепловыделения при поглощении света в канале возбужденных синглетных уровней в просветляющемся растворе красителя. Оценки показали, что вероятность фотопревращения для молекулы Родамина 6Ж при трехступенчатом возбуждении излучением с $\lambda = 532 \text{ нм}$ достигает достаточно большой величины $\sim 0,005 \div 0,007$. Кроме вышеуказанных причин величина КПД генерации лазера-преобразователя на красителях микросекундной длительности и характер его падения может быть связан со спектральным составом возбуждающего излучения.

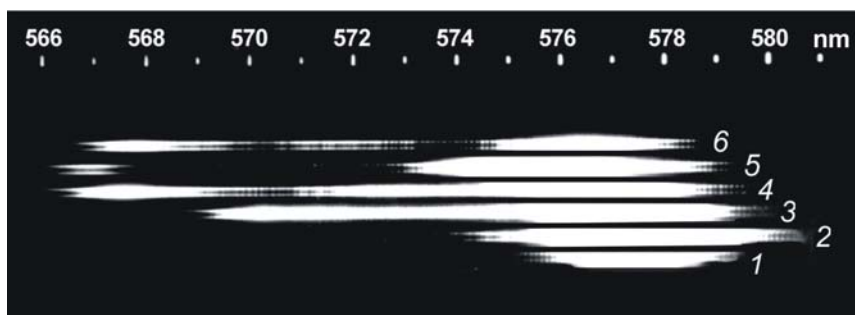
В разделе 4.2 представлены результаты исследования аномальной зависимости генерационных характеристик растворов красителей от спектрального состава возбуждающего излучения при микросекундной когерентной накачке (рисунок 7).

Для этанольных растворов кумариновых, родаминовых, оксазиновых красителей, а также ДСМ и феналемина 160 обнаружена аномальная зависимость эффективности генерации, а также спектральных характеристик от длины волны накачки, которая выражается в том, что максимум КПД генерации достигается не при накачке в максимум основной полосы поглощения (рисунок 7). Спектральный ход КПД вблизи максимума поглощения обнаруживает «провал», спектры генерации при этом обнаруживают коротковолновое смещение, причем, длинноволновая граница их меняется незначительно (рисунок 8).



а – 3-бензмидазоллил-7-юлолидин иминокумарин перхлорат; б – 3-(2-бензимидазо [4,5 v]-пиридил)-7-юлолидино кумарин гидрохлорид; в – 2-(юлолидинкумарин-3ил) бензимидазолий перхлорат; г – незамещенный родамин; д – родамин бЖ; е – родамин С; ж – феналемин 160; з – DCM; и – оксазин 17; к – оксазин 9; л – оксазин 1

Рисунок 7 – Зависимость КПД генерации этанольных растворов лазерных красителей от длины волны возбуждения (1); контуры основных полос поглощения в относительных единицах (2); спектры коэффициента Эйнштейна для поглощения в канале возбужденных синглетных уровней (3)



1 – $\lambda_{\text{нак}}^{\text{макс}} = 460$ нм; 2 – $\lambda_{\text{нак}}^{\text{макс}} = 485$ нм; 3 – $\lambda_{\text{нак}}^{\text{макс}} = 505$ нм; 4 – $\lambda_{\text{нак}}^{\text{макс}} = 520$ нм;
5 – $\lambda_{\text{нак}}^{\text{макс}} = 525$ нм; 6 – $\lambda_{\text{нак}}^{\text{макс}} = 535$ нм.

Рисунок 8 – Спектры генерации этанольного раствора родамина 6Ж при изменении спектрального состава возбуждающего излучения

При увеличении длины волны накачки происходит расширение генерируемой полосы в область коротких длин волн на 10–12 нм, а в области «провала» наблюдается двухполосная генерация. Смещение спектров генерации в коротковолновую область говорит о возрастании в процессе генерации вредных потерь.

Сравнение спектрального хода потерь в канале возбужденных синглетных уровней с зависимостью КПД генерации указанных соединений от длины волны возбуждения позволяет сделать предположение о том, что при микросекундной когерентной накачке растворов красителей также, как и в случае наносекундной накачки в результате поглощения излучения в канале возбужденных синглетных уровней, образуются обратимые фотопродукты, которые имеют сильное поглощение в определенной спектральной области усиления и приводят к падению эффективности генерации.

Подбор оптимального спектрального состава излучения накачки позволяет существенно улучшить энергетические параметры лазера-преобразователя на красителях микросекундной длительности.

В разделе 4.3 рассмотрены особенности спектральной эффективности генерации новых бихромовых красителей в красной области спектра. (рисунок 9):

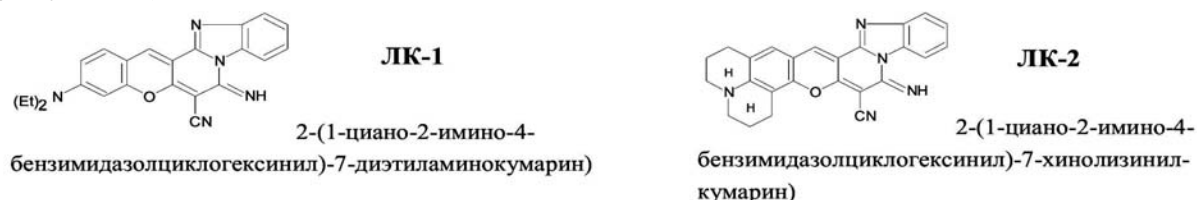


Рисунок 9 – Формулы новых кумариновых бихромовых молекул

Для некогерентной накачки использовалась коаксиальная лампа-кювета конструкции Дзюбенко. В случае когерентной наносекундной накачки использовался электроразрядный эксимерный ХеСl-лазер. Исследование времен жизни возбужденных состояний показало, что у ЛК-2 (2-(циано-2-

имино-4-бензимидазоолциклогексинил)-7-хинолизинилкумарин) они выше, чем таковые для ЛК-1, как при возбуждении на длине волны 450 нм, так и 580 нм. Это может быть связано с тем, что приконденсированный насыщенный гетероцикл в 7-м положении ЛК-2 обеспечил более жесткую кампланарную структуру молекулы, в отличие от ЛК-1 (2-(циано-2-имино-4-бензимидазоолциклогексинил)-7-диэтиламинокумарин), где в 7-м положении кумаринового кольца находится диэтиламиногруппа, которая может совершать в плоскости молекулы колебательно-вращательные движения и тем самым снижать время жизни возбужденного состояния.

В целом исследование спектрально-люминесцентных характеристик бихромофоров показывает, что удлинение цепи сопряжения у кумариновых красителей позволяет существенным образом сместить спектры поглощения и люминесценции вплоть до красной области спектра. Важным результатом проведенных исследований является установление у бихромофора ЛК-1 двух центров излучения, в то время как у ЛК-2 он один. Об этом свидетельствуют спектры возбуждения флуоресценции бихромофоров. Новые бихромофоры позволяют получать генерацию в спектральном диапазоне 585–640 нм. Наибольшую генерационную эффективность при мощной некогерентной накачке показало соединение ЛК-2, а при лазерной накачке – ЛК-1, причем, как при когерентной микросекундной, так и наносекундной накачке. При когерентной микросекундной накачке достигнут коэффициент преобразования свыше 36% и для ЛК-1 наблюдается двухполосная генерация. Это как раз подтверждает наблюдавшиеся закономерности в спектрах возбуждения флуоресценции. Обнаружена аномальная зависимость эффективности генерации, а также спектральных характеристик от длины волны накачки, описанная выше. Вследствие того, что молекула ЛК-1 обладает двумя излучающими центрами, в зависимости КПД преобразования от длины волны возбуждения возникает два характерных «провала». Впервые получена генерация на двух новых бихромофорных соединениях и изучено влияние длины волны накачки на эффективность преобразования и спектральные характеристики генерации.

В разделе 4.4 рассмотрена возможность увеличения фотостабильности и эффективности генерации путем использования водно-этанольных растворов лазерных красителей кумарина 1, кумарина 120, кумарина 4, незамещенного родамина и родамина С. Генерационные характеристики водно-этанольных растворов красителей исследовались при ламповой и лазерной накачке. Были проведены экспериментальные исследования зависимости эффективности генерации от процентного содержания воды в этанольном растворе. Осуществлялось сравнение этого генерационного

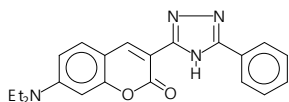
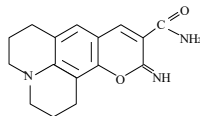
параметра для необлученных растворов и растворов, предварительно облученных мощным УФ излучением коаксиальной лампы в широком спектральном диапазоне. Также проводились сравнительные исследования фотохимической стойкости нейтральных этанольных растворов красителей и растворов с добавкой воды. В результате обнаружено возрастание энергии генерации красителей кумарин 4 и незамещенный родамин, содержащих гидроксильную группу при добавлении в их этанольные растворы воды. Это связано с тем, что при увеличении полярности растворителя происходит образование комплекса с водородной связью и перераспределение электронной плотности, т. е. увеличивается дипольный момент молекулы в основном состоянии, в результате чего она стабилизируется и это сопровождается увеличением эффективности генерации. Также изменяются потери, наведенные излучением накачки. Изменение дипольного момента перехода молекулы, приводящее к батохромному сдвигу полос поглощения, вызывает большее смещение полос в канале триплетных уровней, чем в канале синглетных уровней: $\Delta\tilde{\nu}_{S_0 \rightarrow S_1} < \tilde{\nu}_{T_1 \rightarrow T_2}$. В результате этого происходит уменьшение триплет-триплетных потерь, так как уменьшается перекрытие спектров флуоресценции и триплетного поглощения. Для некоторых красителей обнаружен эффект стабилизации энергии генерации, который наблюдается при концентрации воды равной ~10–20% (кумарин 120) и ~15–25% (кумарин 1). Также происходит существенное увеличение их ресурса работы. Это можно объяснить образованием мицеллярных комплексов при оптимальной концентрации воды, т. е. молекулы воды окружают и стабилизируют молекулы красителя и тем самым предохраняют их от разрушения мощным УФ излучением.

В разделе 4.5 исследована фотостабильность красителей при различных условиях возбуждения (интенсивности, длительности, длины волны). В данном разделе описываются результаты исследований фотохимической устойчивости ряда новых кумариновых красителей в условиях лазерной и ламповой накачки. Исследовались кумариновые соединения в этаноле (рисунок 10).

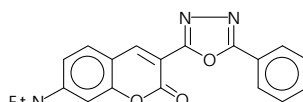
Использовалась наносекундная лазерная накачка с помощью электроразрядного эксимерного ХеСl-лазера и микросекундная лазерная накачка с помощью лазера на красителях на основе коаксиальной лампы-кюветы. Исследование генерации новых кумариновых соединений показали, что основной причиной падения эффективности является образование фотопродуктов, поглощающих генерируемое излучение. Наибольшей фотостойкостью в условиях ламповой накачки обладает ряд 7-диэтиламинокумаринов, объединенных в бифлуорофоре оксадиазольным циклом, а

несколько меньшей те, которые объединены в бифлуорофоре триазольным циклом. Хотя последние обладают значительно более высокой эффективностью генерации.

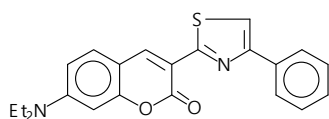
Эталонное соединение



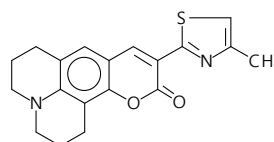
Соединение №1



Соединение №2



Соединение №8



Соединение 12

Рисунок 10 – Формулы новых кумариновых бихромоформных молекул

Новые кумариновые соединения обладают более высокой фотохимической устойчивостью по сравнению с таким наиболее эффективным красителем, как родамин 6Ж. Так, если у новых соединений эффективность генерации при ламповой накачке падает в два раза после 10-12 вспышек, то для родамина Ж - после 2-3 вспышек. В условиях накачки эксимерным ХеСл-лазером новые кумариновые красители по сравнению с ламповым возбуждением показали значительно более высокую фотостойкость. У многих соединений генерация не прекращалась после 2000 вспышек и энерговыкладе до ~300 Дж. Как показали эксперименты при таком виде накачки наибольшей фотостойкостью обладает ряд 7-диэтил -(юлолидин) кумаринов, содержащих триазольный гетероциклический радикал в 3-м положении кумаринового ядра в качестве связующего звена бифлуорофора. Наиболее высокой фотохимической стойкостью новые кумариновые красители обладают в лазере-преобразователе микросекундной длительности, описанном выше. Эффективность генерации в таких условиях возбуждения практически не снижается. Это объясняется тем, что в данном случае максимально согласованы спектры генерации красителя, используемого в лазере накачки со спектром поглощения красителя, используемого во 2-й ступени лазера-преобразователя. Кроме того, в излучении накачки

отсутствует УФ-составляющая, приводящая к интенсивному фотохимическому распаду красителя.

В разделе 4.6 рассмотрены генерационные характеристики комплексов включения красителей различных классов с β -циклодекстрином и с добавкой наночастиц серебра в этанольных и водно-этанольных растворах. Для устранения эффекта агрегации и димеризации необходимо защитить молекулы красителя от водной сольватной оболочки и, таким образом, снизить потери на Т-Т поглощение и ингибировать фотохимические реакции при УФ возбуждении. Данные показывают, что перспективными добавками являются циклодекстрины, молекулы которых имеют тороидальную форму и полость, в которую могут внедряться молекулы красителя. Обнаружено увеличение фотостабильности комплексов включения красителей различных типов (феналемины, родамины, оксазины) свидетельствует о том, что молекулы β -CD создают защитную оболочку для молекул красителя и, тем самым, эффективно экранируют их от фотораспада. Кроме того, образование комплексов включения красителей с β -CD в водно-этанольном растворе обеспечивают создание мицелярного комплекса, в котором молекулы красителя находятся внутри гидрофобной полости, а внешняя сольватная гидрофильная оболочка β -CD образована водородными связями с молекулами воды.

Пятая глава посвящена поиску направлений практического применения разработанных активных сред на основе сложных органических соединений. В разделе 5.1 даются результаты использования 2-(юлолидинкумарина-3-ил) бензимидазолий хлорида в качестве эффективного трансформатора возбуждения в лазере на красителях с ламповой накачкой. Проведены исследования, направленные на повышение генерационной эффективности и ресурса работы красителей, предложенных для генерации излучения в спектральной области 660–860 нм, путем использования трансформатора излучения импульсной лампы на основе этанольного раствора 2-(юлолидинкумарин-3-ил) бензимидазолий хлорида. Для этого использовалась лампа-кювета конструкции Дзюбенко, как наиболее подходящая система для трансформации излучения накачки. В качестве генерирующих соединений использовались растворы красителей ЛК-678, ЛК-703, ЛК-747, ЛК-790, ЛК-800, ЛК-840 в ацетонитриле. Используемый трансформатор излучения эффективно поглощает излучение в спектральной области 200–540 нм и эффективно переизлучает излучение в спектральную область 530–650 нм. Эксперименты показали, что при изменении концентрации раствора трансформатора в диапазоне, соответствующем изменению оптической плотности в слое толщиной 2 мм на длине волны максимума спектра

поглощения D ($\lambda^{max} = 500$ нм) в пределах 2–10, генерационная эффективность активных сред практически не изменялась. В лазере с коаксиальной лампой-кюветой применение 2-(юлолидинкумарин-3-ил) бензимидазолий хлорида в качестве трансформатора излучения накачки для эффективно генерирующих в ИК-области спектра красителей ЛК-678, ЛК-703, ЛК-747, ЛК-790, ЛК-800, позволяет повысить энергетическую эффективность в 1,4–2 раза, а ресурс работы – в 3–4 раза.

В разделе 5.2 приведены результаты экспериментов по использованию новых кумариновых соединений для возбуждения генерации в титан-сапфировом лазере при микросекундной когерентной накачке. Для накачки активного элемента титан-сапфирового лазера использовались новые кумариновые красители: 3-карбамидоюлолидин-2-иминокумарин, 2-(7-диэтиламинокумарин-3-ил) бензимидазолий перхлорат, 2-(юлолидинкумарин-3-ил) бензимидазолий перхлорат. Благодаря использованию новых высокоэффективных кумаринов были исследованы спектры генерации титан-сапфирового лазера при изменении спектрального состава накачки. Титан сапфировый лазер генерировал в спектральном диапазоне $\approx 765 - 805$ нм и положение спектральной полосы генерации при изменении длины волны накачки не менялось. Проведенные исследования показывают, что при возбуждении генерации в лазере на $Al_2O_3: Ti^{3+}$ излучением лазера на красителях микросекундной длительности наблюдается отчетливая спектральная зависимость КПД от длины волны возбуждающего излучения. Причем максимум указанной зависимости лежит в области 555 нм и не совпадает с максимумом спектра поглощения кристалла (490 нм). Данные позволяют предположить, что этот факт объясняется образованием под действием коротковолнового мощного излучения накачки метастабильных четырехвалентных ионов титана Ti^{4+} , которые поглощают в сине-зеленой области спектра и снижают эффективность генерации. Часть ионов Ti^{4+} в возбужденном состоянии релаксирует с постоянной времени ~ 3 мкс в возбужденный ион Ti^{3+} и, вследствие этого, принимает участие в генерации. Обнаруженное явление должно учитываться при создании мощных лазеров на титане в сапфире.

В разделе 5.3 описывается применение новой активной среды на основе 3-бензимидазолила-7-юлолидина-2-иминокумарина перхлората для применения в селективной лазерной медицине. Исследования показывают, что излучение в области 577-578 нм наиболее эффективно и безопасно для лечения сосудистых патологий в противовес излучению с длиной волны 514 нм аргонового лазера. Это объясняется тем, что гемоглобин и оксигемоглобин желтое излучение поглощает в 3-4 раза эффективнее

зеленого. 50-60% мощности излучения с длиной волны 514 нм поглощается в слое от 15 до 45 мкм, а глубина проникновения желтого излучения с длиной волны 578 нм составляет 65-125 мкм. Для целей селективного биомедицинского воздействия предлагается использовать новый кумариновый краситель – 3-бензимидазолил-7-юлолидин-2-иминокумарин перхлорат (рисунок 11).

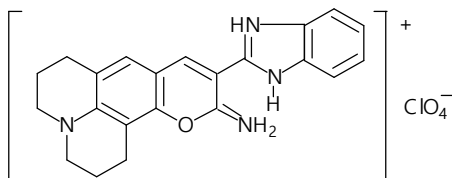


Рисунок 11 – Структурная формула 3-бензимидазолил-7-юлолидин-2-иминокумарин перхлората

Новый краситель при всех трех использованных видах возбуждения обладает высокой эффективностью преобразования и фотостойкостью. Так, у данного соединения генерация не прекращалась даже после суммарного энергозатрата превышающего 20 000 джоулей. Кроме очевидных преимуществ использования новой активной среды в лазерных системах для лечения сосудистых заболеваний, а также в дерматологии для лечения псориаза, новый краситель можно с успехом использовать также и в лазерных абляционных литотрипторах, что подтверждается измеренными спектрами отражения почечных камней.

Отражательная способность различных типов почечных камней, начиная с длины волны 600 нм, резко увеличивается, а в зелено-желтой области спектра они обладают максимальным поглощением (рисунок 12).



1 – оксалат мочевого пузыря; 2 – урат; 3 – оксалат;
4 – смешанный урат-фосфат-оксалат; 5 – кальций

Рисунок 12 – Спектры отражения почечных камней

Именно в диапазоне длин волн от 400 до 580 нм наблюдается наиболее сильное поглощение излучения материалом камней (таблица 1).

Таблица 1 – Генерационные параметры 3-бензимидазолила-7-юлолидина-2-иминокумарина перхлората

Генерационные характеристики					
Ламповая микросекундная накачка		Когерентная микросекундная накачка ($\lambda_{\text{нак}}=460$ нм)		Когерентная наносекундная накачка ($\lambda_{\text{нак}}=308$ нм)	
$\eta_{\text{ген}}, \%$	$\Delta\lambda_{\text{ген}},$ нм	$\eta_{\text{ген}}, \%$ ($\lambda_{\text{нак}}$)	$\Delta\lambda_{\text{ген}},$ нм	$\eta_{\text{ген}}, \%$	$\Delta\lambda_{\text{ген}},$ нм
1,03	570-580	28,4	550-570	20,5	552-573

Лазерное дробление можно организовать таким образом, чтобы использовался режим лазерной абляции без выхода на режим генерации ударной волны, при которой наблюдается разрушение выходного торца световода. По спектральному составу для этого больше всего подходит излучение от рассмотренных новых кумариновых красителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Исследование зависимости эффективности генерации основных наиболее эффективных классов этанольных растворов красителей (кумариновых, родаминовых, оксазиновых красителей, а также DCM и феналемина 160) от спектрального состава излучения накачки при возбуждении импульсами микросекундной длительности обнаруживает аномальную зависимость эффективности генерации, выражающуюся в том, что максимальная эффективность генерации достигается не при накачке в максимум полосы поглощения. При увеличении длины волны накачки происходит расширение генерируемой полосы в область коротких длин волн на 10–12 нм, а в области «провала» наблюдается двухполосная генерация. Это объясняется тем, что в результате поглощения излучения в канале возбужденных синглетных уровней образуются обратимые фотопродукты, которые имеют сильное поглощение в определенной спектральной области усиления и приводят к падению эффективности генерации, а также термооптическими искажениями активной среды [1; 2, с. 50–51; 3; 5, с. 651–652; 6, с. 71–73; 7, С. 702–705; 9, с. 800–802; 10, с. 123–125; 18, с. 111–116; 19, с. 111–117; 23, с. 121–125; 24, с. 526–530; 25, с. 110–117; 27, с. 22–24; 33; 34, с. 236–240; 40, с. 673137-2–673137-5; 44; 46; 51; 68; 69].

2. В условиях когерентной накачки излучением эксимерного *XeCl*-лазера впервые получена генерация у 12-ти соединений – производных 3-(2-бензимидазоллил) и 3-имидазопиридил кумарина. Новые соединения генерируют в спектральном диапазоне 490–580 нм, имеют высокую генерационную эффективность, достигающую 20%, а при ламповой накачке более 1%, и обладают в условиях мощной немонохроматической накачки высокой фотохимической устойчивостью, которая в 3–5 раз выше, чем у родамина 6Ж. В спектральной области генерации новых красителей в условиях мощной некогерентной накачки отсутствуют в настоящее время достаточно фотостойкие и высокоэффективные красители [13, с. 698–702; 15, с. 56–58; 21, с.136–137; 27, с. 22–24; 36; 37, с. 190–195; 38, с. 605640V-2–605640V-4; 39; 47; 48; 50; 52; 63, с. 15–18; 66; 67].

3. Применение водноэтанольных растворов позволяет увеличить эффективность генерации и фотостабильность лазерных красителей. Увеличение ресурса работы водно-этанольных растворов красителей можно объяснить образованием структур наподобие мицеллярных комплексов при оптимальной концентрации воды, т.е. молекулы воды окружают и стабилизируют молекулы красителя и тем самым предохраняют их от

разрушения мощным УФ-излучением. Возрастание энергии генерации может быть связано с изменением потерь, наведенных излучением накачки, т. к. изменение дипольного момента перехода молекулы, приводящее к батохромному сдвигу полос поглощения, вызывает большее смещение полос в канале триплетных уровней, чем в канале синглетных уровней: $\Delta\tilde{\nu}_{S_0 \rightarrow S_1} < \tilde{\nu}_{T_1 \rightarrow T_2}$, а это, в свою очередь, приводит к уменьшению триплет-триплетных потерь, так как уменьшается перекрытие спектров флуоресценции и триплетного поглощения [12, с. 102–104; 14, с. 350–354; 16, с. 113–118; 20, с. 117–120; 22, с. 1890–1896; 30, с. 1624–1632; 32, с. 99–102; 45; 65; 70].

4. Проведено исследование шести новых производных бензопирилия в условиях возбуждения излучением эксимерного ХеСl-лазера. Впервые получена генерация в спектральной области 730–740 нм на красителях кумаринового класса. Для генерирующих соединений в состоянии S_0 характерной является практически плоская конформация ароматической части этих молекул, которая достигается благодаря малому торсионному углу поворота. В состоянии S_1 возможна как плоская, так и ортогональная конформация молекулы, которая определяется наличием заместителей в определённых положениях ядра кумарина и бензопирилия и обеспечивает формирование единой цепи π -электронного сопряжения между бензопирилиевым и кумариновым фрагментами [4; 5, с. 651–652; 26, с. 30–36; 30, с. 1624–1632; 42, с. 67351X-4–67351X-13; 43].

5. Применение комплексов включения красителей различных классов с β -циклодекстрином (β -CD) и с добавкой наночастиц серебра в этанольных и водно-этанольных растворах позволяет увеличить фотостабильность красителей различных типов (феналемины, родамины, оксазины), что свидетельствует о том, что молекулы β -CD создают защитную оболочку для молекул красителя и тем самым эффективно экранируют их от фотораспада. Кроме того, образование комплексов включения красителей с β -CD в водно-этанольном растворе обеспечивают создание мицелярного комплекса, в котором молекулы красителя находятся внутри гидрофобной полости, а внешняя сольватная гидрофильная оболочка β -CD образована водородными связями с молекулами воды [20, с. 117–120; 28, с. 1183–1191; 31, с. 24–28; 56; 57; 61; 63, с. 15–18; 64].

6. Исследование спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик красителей различных классов (пиррометена 580, феналемина 510, феналемина 512, феналемина 640, перилена), внедренных в композит нанопористое стекло-полимер (НПС-П), позволило при накачке излучением с длиной волны $\lambda_{\text{нак}}^{\text{max}} = 525$ нм получить максимальную эффективность генерации 32 % для феналемина 512, 47 % для пиррометена 580 и 40,2 % для

перилена [8, с. 711–719; 11, с. 99–102; 17, с. 33–36; 25, с. 110–118; 29, с. 700–703; 35, с. 242–248; 41, с. 67341X-3–67341X-8; 49; 53; 54, с. 178-181; 55; 58, с. 160-164; 59, с. 43–46; 60, с. 275–278; 62; 71; 72].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Активная среда лазера на красителях на основе 3-бензимидазолила-7-юлолидина-2-иминокумарина перхлората применяется в учебном процессе кафедры медицинской и биологической физики при изучении селективной лазерной медицины у студентов всех специальностей учреждения образования «Гродненский государственный медицинский университет» (акт внедрения в приложении А к диссертации) и в учебном процессе учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (акт внедрения в приложении А к диссертации).

2. Двухступенчатый лазер-преобразователь на красителях микросекундной и наносекундной длительности применяется в научном процессе учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (акт внедрения в приложении А к диссертации; заявка на изобретение на выдачу патента № а20230140 ВУ).

3. Как показала апробация на ООО «ОВ-ПластСнаб»-ЗОВПЛАСТ (г. Гродно), некоторые разработанные красители, такие как 7-диэтиламино-3-имидазопиридил кумарин гидрохлорид, 7-диэтиламино-3-бензимидазолил кумарин гидрохлорид, 7-диэтиламино-3-бензимидазолил кумарин перхлорат, 7-диэтиламино-3-бензимидазолил кумарин перхлорат, 3-бензимидазолил-7-юлолидин-2-иминокумарин перхлорат, 3-(2-бензимидазо [4,5 в]-пиридил)-7-юлолидин кумарин гидрохлорид, 2-(7-диэтиламинокумарин-3-ил) бензимидазолий перхлорат, 2-(юлолидинкумарин-3-ил) бензимидазолий хлорид, 2-(юлолидинкумарин-3-ил) бензимидазолий перхлорат, могут быть использованы при окрашивании полимеров в изделиях изготавливаемых для непищевых целей (справка о практическом применении в приложении А к диссертации).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Ануфрик, С. С. Оптимизация характеристик импульсных ламп для лазеров на красителях / С. С. Ануфрик, С. В. Нечаев, В. В. Тарковский // Журнал прикладной спектроскопии. – 1998. – Т. 65, № 1. – С. 134–137.
2. Ануфрик, С. С. Новые лазерные среды на основе бифлуорофорных молекул кумарина / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, В. М. Никитченко // Журнал прикладной спектроскопии. – 1999. – Т. 66, № 5. – С. 675–681.
3. Тарковский, В. В. Простая методика определения коэффициента усиления активной среды лазера на красителях / В. В. Тарковский // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Тэхніка. Інфарматыка. Біялогія. Хімія. Экалогія. Эканоміка. – 2001. – № 2. – С. 48–51.
4. Тарковский, В. В. Зависимость эффективности генерации от частоты возбуждения при накачке раствора родамина 6Ж лазерными импульсами микросекундной длительности / В. В. Тарковский, В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик // Журнал прикладной спектроскопии. – 2002. – Т. 69, № 6. – С. 747–750.
5. Тарковский, В. В. Аномальная зависимость генерационных характеристик растворов красителей от спектрального состава возбуждающего излучения при микросекундной когерентной накачке / В. В. Тарковский, В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33, № 10. – С. 869–875.
6. Тарковский, В. В. Узкополосная микросекундная лазерная система на красителях для голографирования нестационарных объектов / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Тэхніка. Інфарматыка. Вылічальная тэхніка і упраўленне. Біялогія. – 2008. – № 2. – С. 68–74.
7. Ануфрик, С. С. Спектроскопические и генерационные свойства новых бихромофоров / С. С. Ануфрик, М. М. Асимов, В. В. Тарковский // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 8. – С. 700–706.
8. Эффективность генерации красителей, внедренных в композит нанопористое стекло-полимер / С. С. Ануфрик, М. Ф. Колдунов, А. А. Маненков, В. В. Тарковский // Журнал прикладной спектроскопии. – 2008. – Т. 75, № 5. – С. 708–716.

9. Тарковский, В. В. Эффективность генерации этанольных растворов красителей при когерентной микросекундной накачке / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т. 105, № 5. – С. 873–879.

10. Особенности расходимости излучения микросекундного твердотельного лазера на основе композита нанопористое стекло-полимер, активированного красителями / В. В. Тарковский, В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик, М. Ф. Колдунов, А. А. Маненков // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Тэхніка. Інфарматыка. Вылічальная тэхніка і упраўленне. Біялогія. – 2008. – № 3. – С. 121–126.

11. Спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики красителей в жидких растворах и твердотельных композитных средах / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик, М. Ф. Колдунов, А. А. Маненков // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Тэхніка. Інфарматыка. Вылічальная тэхніка і упраўленне. Біялогія. – 2009. – № 3. – С. 96–103.

12. Ануфрик, С. С. Увеличение фотостабильности и эффективности генерации водно-этанольных растворов лазерных красителей / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Тэхніка. Інфарматыка. Вылічальная тэхніка і упраўленне. Біялогія. – 2010. – № 2. – С. 99–105.

13. Ануфрик, С. С. Производные 3-(2-бензимидазолил) кумарина – высокоэффективные лазерные среды / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский // Журнал прикладной спектроскопии. – 2010. – Т. 77, № 5. – С. 695–703.

14. Anufriuk, S. Influence of an Environment on spectral-luminescent and generation characteristics of new coumarins / S. Anufriuk, V. Tarkovsky, G. Sazonko // Nonlinear phenomena in complex systems. – 2011. – Vol. 14, № 4. – P. 348–355.

15. Новые лазерные красители на основе производных 3-имидазопиридил кумарина / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, Г. Г. Сазонко, М. М. Асимов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79, № 1. – С. 53–59.

16. Ануфрик, С. С. Влияние вязкости среды на спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики новых кумаринов / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, Г. Г. Сазонко // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Тэхніка. Інфарматыка. Вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2012. – № 2. – С. 111–119.

17. Исследование характеристик твердотельных активных сред на основе пиррометена 567 / Т. Н. Копылова, С. С. Ануфрик, Г. В. Майер, Т. А. Солодова, Е. Н. Тельминов, К. М. Дегтяренко, Л. Г. Самсонова, Р. М. Гадилов, С. Ю. Никонов, Е. Н. Понявина, В. В. Тарковский, Г. Г. Сазонко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 10. – С. 32–37.

18. Влияние длины волны возбуждения на генерационные характеристики лазеров на красителях с когерентной накачкой / С. С. Ануфрик, М. И. Дзюбенко, С. В. Николаев, В. В. Пожар, Г. Г. Сазонко, В. В. Тарковский // Вести Национальной академии наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2013. – № 2. – С. 111–117.

19. Ануфрик, С. С. Зависимость эффективности генерации лазера на красителях от длины волны микросекундной накачки / С. С. Ануфрик, В. Ю. Курстак, В. В. Тарковский // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Тэхніка. Інфарматыка. Вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 1. – С. 110–119.

20. Ануфрик, С. С. Генерационные характеристики водно-этанольных растворов красителей и их комплексов включения с β -циклодекстрином и наночастицами серебра / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, В. В. Тарковский // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 116–122.

21. Тарковский, В. В. Активная среда лазера на красителях на основе 3-бензимидазолила-7-юлолидина-2-иминокумарина перхлората для применения в селективной лазерной медицине / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 133–142.

22. Ануфрик, С. С. Структура, генерационные характеристики и фотостабильность новых гетерилкумаринов / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, В. В. Тарковский, // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, вып. 12. – С. 1889–1897.

23. Ануфрик, С. С. Универсальная лазерная система на красителях микросекундного диапазона длительностей генерируемого излучения / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2021. – Т. 11, № 1. – С. 118–127.

24. Тарковский, В. В. Влияние наведенных потерь на спектральную эффективность генерации родамина 6Ж при микросекундной когерентной

накачке / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик, В. Ю. Курстак // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51, № 6. – С. 525–532.

25. Эффективность генерации красителей, внедренных в твердотельные матрицы при микросекундной когерентной накачке / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, А. О. Ромашкевич, П. Р. Макей // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 107–120.

26. Ануфрик, С. С. Спектральные и генерационные свойства новых кумаринов – производных бензопирилия / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, С. Н. Анучин // Журнал БГУ. Физика. – 2022. – № 2. – С. 19–25.

27. Тарковский, В. В. Влияние наведенных потерь на спектральную эффективность генерации этанольных растворов красителей различных классов / В. В. Тарковский // Журнал БГУ. Физика. – 2022. – № 2. – С. 26–38.

28. Ануфрик, С. С. Спектрально-генерационные свойства и механизм формирования интеркалированных комплексов «краситель-циклодекстрин» / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, В. В. Тарковский // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130, вып. 8. – С. 1181–1192.

29. Тарковский, В. В. Расходимость излучения микросекундных лазеров на этанольном растворе родамина 6Ж и твердотельного лазера на основе нанокompозита, активированного периленом / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик, А. О. Ромашкевич, П. Р. Макей // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – С. 698–704.

30. Взаимосвязь структуры и спектрально-генерационных свойств кумаринов – производных бензопирилия / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, А. В. Лавыш, В. В. Тарковский // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131, вып. 12. – С. 1623–1632.

31. Ануфрик, С. С. Строение и спектрально–генерационные свойства комплексов с β -циклодекстрином / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, С. Н. Анучин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90, № 1. – С. 22–28.

32. Ануфрик, С. С. Перспективные диэтиламино-кумариновые красители со структурой бихромофоров / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, П. Р. Макей // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 96–105.

Статьи в иных научных изданиях

33. Структурная модификация и формирование спектрально-люминесцентных свойств кумаринов / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский,

В. М. Никитченко, А. В. Борисов, Н. Ю. Горобец // Лазерная и оптоэлектронная техника : сб. науч. ст. / Белгосуниверситет ; отв. ред. И. С. Манак. – Минск, 2002. – Вып. 7. – С. 18–25.

34. Тарковский, В. В. Эффективность генерации красителей при когерентной микросекундной накачке / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик // Ковариантные методы в физике: оптика и акустика : сб. науч. тр. / Институт физики имени Б. И. Степанова НАН РБ ; ред. А. М. Гончаренко. – Минск, 2005. – С. 235–242.

35. Новые кумариновые красители для зелено-голубой области спектра / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, В. М. Никитченко, А. В. Борисов, Н. Ю. Горобец // Ковариантные методы в физике: оптика и акустика : сб. науч. тр. / Институт физики имени Б. И. Степанова НАН РБ ; ред. А. М. Гончаренко. – Минск, 2005. – С. 242–248.

36. Ануфрик, С. С. Производные 3- (2-бензимидазолил) кумарина – высокоэффективные лазерные среды при накачке излучением эксимерного ХеСl-лазера / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, В. М. Никитченко // Лазерная и оптоэлектронная техника : сб. науч. ст. / Белгосуниверситет ; отв. ред. И. С. Манак. – Минск, 2005. – Вып. 9. – С. 168–182.

37. Ануфрик, С. С. Особенности возбуждения генерации в лазерах на $Al_2O_3:Ti^{3+}$ и $Al_2O_3:Cr^{3+}$ при когерентной накачке микросекундной длительности / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский // Лазерная и оптоэлектронная техника : сб. науч. ст. / Белгосуниверситет ; отв. ред. И. С. Манак. – Минск, 2005. – Вып. 9. – С. 183–195.

38. Lasing characteristics of phenolemine 512 and pyrromethene 580 dyes, impregnated to polymer-filled nanoporous glass, at various excitation wavelengths / S. S. Anufriuk, M. F. Koldunov, Yu. M. Kuznetsov, A. A. Mannekov, E. P. Ponomarenko, V. V. Tarkovsky // Proceedings by SPIE. – 2005. – Vol. 6054. – P. 60540V–60545V.

39. New high performance laser dyes in the basis of quinolisinocoumarin's derivatives / S. S. Anufriuk, V. V. Tarkovsky, Yu. M. Kuznetsov, V. M. Nikitchenko. // Proceedings by SPIE. – 2005. – Vol. 6358. – P. 625801–625808.

40. The space-angular characteristics of a microsecond solid laser on the basis of a nano-porous glass polymer composite activated with dyes / V. Tarkovsky, S. Anufrik, M. Koldunov, A. Manenkov // Proceedings by SPIE. – 2007. – Vol. 6731. – P. 673137–673142.

41. Tarkovsky, V. Peculiarities of laser lithotripsy using a microsecond laser / V. Tarkovsky, S. Anufrik // Proceedings by SPIE. – 2007. – Vol. 6734. – P. 67341X–67348X.

42. Optical, structural, and lasing properties of a composite material nanoporous glass filled with an organic dye activated polymer / S. S. Anufrik, M. I. Ihnatouski, M. F. Koldunov, A. M. Lyalikov, A. A. Manenkov, V. V. Tarkovsky. // Proceedings by SPIE. – 2007. – Vol. 6735. – P. 67351X–67358X.

43. Ануфрик, С. С. Генерационные характеристики производных бензопирилия при возбуждении эксимерным лазером / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, С. Н. Анучин // Университет – территория опережающего развития: сб. науч. ст., посвящённый 80-летию ГрГУ имени Янки Купалы / Гродненский гос. ун-т им. Янки Купалы; гл. ред. Ю. Я. Романовский; редкол.: В. Г. Барсуков [и др.]. – Гродно, 2020. – С. 105–108.

Материалы научных конференций

44. Батище, С. А. Широкодиапазонный лазер-преобразователь микросекундной длительности с малой расходимостью на основе растворов красителей / С. А. Батище, В. А. Мостовиков, В. В. Тарковский // Труды III кон. По лазерной физике и спектроскопии, Минск, 2–4 июля 1997 г. / Ин-т физики им. Б.И. Степанова Академии наук Беларуси. – Минск, 1997. – С. 132–135.

45. Ануфрик, С. С. Генерационные характеристики гетерилкумариновых красителей при микро- и наносекундном возбуждении / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, В. М. Никитченко // Труды IV Междунар. конф. по лазерной физике и спектроскопии, Гродно, 4–8 окт. 1999 г. : в 2 ч / под ред. В. К. Кононенко. – Гродно, 1999. – Ч. 2. – С. 192–194.

46. Тарковский, В. В. Изучение спектров эффективности генерации новых кумариновых красителей / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик // Квантовая электроника: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 нояб. 2000 г. / БГУ; под ред. И. С. Манака. – Минск, 2000. – С. 74–79.

47. Структурная модификация и формирование спектрально-люминесцентных свойств кумаринов / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, В. М. Никитченко, А. В. Борисов, Н. Ю. Горобец // Квантовая электроника : материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–21 нояб. 2002 г. / БГУ ; под ред. И. С. Манака. – Минск, 2002. – С. 25.

48. Тарковский, В. В. Производные 3- (2-бензимидазолил) кумарина – высокоэффективные лазерные среды при накачке излучением эксимерного ХеС1-лазера / В. В.Тарковский, С. С. Ануфрик, В. М. Никитченко // Квантовая электроника : материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–25 нояб. 2004 г. / БГУ. – Минск, 2004. – С. 55.

49. Эффективность генерации и красителей в жидких растворах, а также внедренных в композит нанопористое стекло-полимер при микросекундной когерентной накачке / С. С. Ануфрик, М. Ф. Колдунов, А. М. Лях,

А. А. Маненков, Е. П. Пономаренко, В. В. Тарковский, Ю. М. Кузнецов // Лазерная физика и оптические технологии : материалы VI Междунар. конф., Гродно, 25–29 сент. 2006 г. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Н. С. Казак [и др.]. – Гродно, 2006. – Ч. 1. – С. 138–140.

50. Новая активная среда на основе 3–бензимидазолила–7–юлолидина–2–иминокумарина перхлората для применения в селективной лазерной медицине / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик, А. М. Лях, В. М. Никитченко // Лазерная физика и оптические технологии : материалы VI Междунар. конф., 25–29 сент. 2006 г., Гродно : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Н. С. Казак [и др.]. – Гродно, 2006. – Ч. 1. – С. 141–143.

51. Тарковский, В. В. Особенности спектральной эффективности генерации новых бихромофорных красителей в красной области спектра / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик, М. М. Асимов // Лазерная физика и оптические технологии : VII Междунар. науч. конф., Минск, 17–19 июня 2008 г. : в 3 т. / под ред. Н. С. Казака, П. А. Апанасевича, В. В. Кабанова [и др.]. – Минск, 2008. – Т. 3. – С. 393–396.

52. Тарковский, В. В. Спектрально-люминесцентные и лазерные свойства новых кумаринов при ламповой и когерентной накачке различного спектрального состава и временной длительности / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик, М. М. Асимов // Лазерная физика и оптические технологии : VII Междунар. науч. конф., Минск, 17–19 июня 2008 г. : в 3 т. / под ред. Н. С. Казака, П. А. Апанасевича, В. В. Кабанова [и др.]. – Минск, 2008. – Т. 3. – С. 397–401.

53. Свойства новых активных сред твердотельных лазеров на красителях / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, А. А. Маскевич, Г. Г. Сазонко // Лазерная физика и оптические технологии (ЛФиОТ'2010) : сб. науч. тр. VIII Междунар. науч. конф., Минск, 27–30 сент. 2010 : в 2 т. / ИФ НАН Беларуси. – Минск, 2010. – Т. 1. – С. 121–124.

54. Исследование однородности и морфологии поверхности лазерных элементов на основе гибридных полимеров / А. Н. Рубинов, С. С. Ануфрик, А. М. Ляликов, В. В. Тарковский, Г. Г. Сазонко, Т. Н. Копылова, Т. А. Солодова, К. М. Дегтяренко, Р. М. Гадиров, Е. Н. Тельминов, Е. Н. Понявина // Лазерная физика и оптические технологии : материалы IX Междунар. науч. конф., Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г. : в 2 ч. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: С. А. Маскевич (гл. ред.), С. С. Ануфрик (зам. гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2012. – Ч. 1. – С. 176–182.

55. Оптические и генерационные свойства полиуретановых матриц, активированных красителями при микро- и наносекундном когерентном возбуждении / С. С. Ануфрик, М. И. Дзюбенко, В. В. Тарковский,

С. В. Николаев, А. М. Ляликов, В. В. Пожар, Г. Г. Сазонко // Лазерная физика и оптические технологии: материалы IX Междунар. науч. конф., Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г.: в 2 ч. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: С. А. Маскевич (гл. ред.), С. С. Ануфрик (зам. гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2012. – Ч. 1. – С. 182–190.

56. New Compositions of Cadmium Selenium Nanoparticles and Dye Molecules with Cyclodextrin Inclusion Complexes / М. М. Asimov, S. S. Anufrik, V. V. Tarkovsky, Н. Н. Sazonko // Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering (ICNBME–2013) : proceedings of 2nd Intern. Conf., Chisinau, Moldova, 18–20 April 2013. – Chisinau, 2013. – P. 274–277.

57. Asimov, M. M. New Laser Active Medium with Cyclodextrin Inclusion Complexes of Cadmium Selenium and Dye Molecules / М. М. Asimov, S. S. Anufrik, G. G. Sazonko // Квантовая электроника : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–21 нояб. 2013 г. – Минск, 2013. – С. 92–93.

58. Ануфрик, С. С. Расходимость излучения микросекундного лазера на растворе Родамина 6Ж и композита нанопористое стекло-полимер, активированного периленом / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, Г. Г. Сазонко // Оптика и спектроскопия конденсированных сред : материалы XX Всерос. науч. конф., Краснодар, 14–20 сент. 2014 г. / Кубанский гос. ун-т. – Краснодар, 2014. – С. 159–165.

59. Морфология тонких пленок наночастиц золота и серебра, адсорбированных на стеклянных подложках из коллоидных растворов / С. С. Ануфрик, М. И. Игнатовский, Г. Г. Сазонко, В. В. Тарковский // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : сб. докл. XI Междунар. конф., Минск, 21–24 окт. 2014 г. – Минск, 2014. – С. 42–47.

60. Оптические и генерационные свойства новых твердотельных лазерных сред на основе активированного полиуретана с добавками наночастиц / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, Г. Г. Сазонко, А. М. Ляликов // Оптика и спектроскопия конденсированных сред : материалы XXI Всерос. науч. конф., Краснодар, 13–19 сент. 2015 г. / Кубанский гос. ун-т. – Краснодар, 2015. – С. 273–287.

61. Генерационные свойства комплексов включения на основе феналемина 160 с α - и γ -циклодекстринами / С. С. Ануфрик, Г. Г. Сазонко, В. В. Тарковский, М. М. Асимов // V Конгресс физиков Беларуси : сб. науч. тр., Минск, 27–30 окт. 2015 г. / редкол.: С.Я. Килин (гл.ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 98–99.

62. Твердотельные лазерные среды на основе полиуретановых матриц с добавками наночастиц / С. С. Ануфрик, Г. Г. Сазонко, В. В. Тарковский,

М. И. Дзюбенко, С. В. Николаев, В. В. Пожар // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–13 нояб. 2015 г. – Минск, 2015. – С. 66–67.

63. Ануфрик, С. С. Спектральные особенности комплексов включения родаминов с γ -циклодекстрином [Электронный ресурс] / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, В. В. Тарковский // Балтийский морской форум.: материалы VI Междунар. Балтийского морского форума, XVI Междунар. науч. конф., Калининград, 3–6 сент. 2018 г. : в 6 т. / БГАРФ ; оргкомитет: В. А. Волкогон, Н. А. Кострикова [и др.]; сост.: Н. А. Кострикова. – Калининград, 2018. – Т. 1. Инновации в науке, образовании и предпринимательстве. – С. 11–20. – 1 электрон. опт. диск.

64. Ануфрик, С. С. Спектральные свойства комплексов включения кумаринов β -циклодекстрином и наночастицами серебра / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, В. В. Тарковский // Квантовая электроника : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 нояб. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 110–112.

65. Ануфрик, С. С. Генерационные характеристики водно-этанольных растворов красителей и их наноструктурированных комплексов включения β -циклодекстрином / С. С. Ануфрик, С. Н. Анучин, В. В. Тарковский // Квантовая электроника : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 нояб. 2019 г. – Минск, 2019. – С. 124–127.

Тезисы докладов

66. Ануфрик, С. С. Новые лазерные среды на основе бифлуорофоров молекул кумарина / С. С. Ануфрик, В. В. Тарковский, В. М. Никитченко // Квантовая электроника : материалы II Межгосударственной науч.-техн. конф. : тез. докл., Минск, 23–25 нояб. 1998 г. / БГУ ; под ред. И. С. Манака. – Минск, 1998. – С. 181.

67. Тарковский, В. В. О возможности разработки отечественной установки для дробления почечных камней на основе лазера на красителях с ламповой накачкой / В. В. Тарковский, Л. С. Гайда // Лазеры в биомедицине : тез. докл. Междунар. конф., Гродно, 1–3 окт. 2002 г. / Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси. – Минск, 2002. – С. 54.

68. Исследование эффективности генерации новых кумаринов в зависимости от временных и спектральных параметров возбуждающего излучения / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик, В. М. Никитченко, А. В. Борисов, Н. Ю. Горобец // Лазерная физика и применения лазеров : тез. докл. Междунар. конф., Минск, 14–16 мая 2003 г. – Минск, 2003. – С. 63.

69. Тарковский, В. В. Особенности кинетики генерации этанольных растворов красителей при когерентной микросекундной накачке /

В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик // Лазерная физика и применения лазеров : тез. докл. Междунар. конф., Минск, 14–16 мая 2003 г. – Минск, 2003. – С. 64.

70. Anufrik, S. Layh increase in photostability and efficiency of generating of water and ethanol solutions of laser dyes / S. Anufrik, V. Tarkovsky // Proceedigs International Conference on Advanced Optoelectronics & Lasers (CAOL 2003), Alushta, 16–20 Sept. 2003. – Alushta, 2003. – Vol. 1 – P. 130.

71. Anufrik, S. S. The Microsecond Solid State Laser in the Basis of Rhodamine 6G in Hybrid Nanocomposite / S. S. Anufrik, V. V. Tarkovsky, G. G. Sazonko // Atomic and Molecular Pulsed Lasers : Conference Abstracts X International Conference, Tomsk, 12–16 Sept. 2011. – Tomsk, 2011. – P. 88.

72. Термооптический эффект и аномальная спектральная эффективность генерации красителей в растворах и твердотельных матрицах / В. В. Тарковский, В. Ю. Курстак, С. С. Ануфрик, Г. Г. Сазонко // Лазерная физика и оптические технологии : сб. тез. IX Междунар. науч. конф., Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г. / НАН Беларуси, Гродненский гос. ун-т им. Янки Купалы, Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси. – Минск, 2012. – С. 284.

Заявки

73. Заявка № а20230140 ВУ, МПК6 H01S 3/06, C 09B 57/02 Активная среда лазера и способ ее получения / Тарковский В.В.; заявитель и патентообладатель ГрГУ им. Янки Купалы; заявлено 05.06.2023.

РЕЗЮМЕ

Тарковский Викентий Викентьевич

Генерационные характеристики лазерных сред на красителях в растворах и твердотельных матрицах при микро- и наносекундном возбуждении

Ключевые слова: флуоресценция, лазер-преобразователь, органический краситель, активная среда, фотораспад, кумарины, родамины, пиррометены, оксазины, феналемин, эффективность генерации

Цель исследования – выяснение влияния молекулярных структурных факторов и внутримолекулярных процессов во вновь синтезированных красителях кумаринового класса для создания на их основе лазерных сред в растворах и твердотельных матрицах с повышенной эффективностью генерации, ресурсом работы, расширенным диапазоном генерации в красную область спектра.

Методы исследования: спектральные, люминесцентные и генерационные, физико-химический анализ, атомно-силовая микроскопия, численное и компьютерное моделирование.

Полученные результаты и их новизна. Обнаружена аномальная зависимость КПД генерации красителей в растворах и твердотельных матрицах от спектрального состава накачки в микросекундном диапазоне длительностей. Получена генерация у целого ряда соединений – производных 3-(2-бензимидазоллил) и 3-имидазопиридил кумарина. Новые соединения в сине-желтом диапазоне спектра имеют высокую генерационную эффективность (свыше 20% при когерентной и 1% некогерентной накачках). При возбуждении эксимерным XeCl-лазером впервые получена генерация в спектральной области 730–740 нм у кумаринов – производных бензопирилия. При когерентной микросекундной накачке красителей в НПС-П (пиррометены, феналемин, перилен), получена эффективность преобразования 32% (феналемин 512), 47% (пиррометен 580) и 40,2% (перилен).

Рекомендации по использованию. Область применения. Новые кумариновые красители рекомендуется использовать при окрашивании полимеров в изделиях для непивцевых целей на ООО «ОВ-ПластСнаб»-ЗОВПЛАСТ (г. Гродно), в учебном процессе кафедры теоретической физики и теплотехники Учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», а также в учебном процессе кафедры медицинской и биологической физики при изучении селективной лазерной медицины у студентов всех специальностей учреждения образования «Гродненский государственный медицинский университет».

РЭЗІЮМЭ

Таркоўскі Вікенцій Вікенцьевіч

Генерацыйныя характарыстыкі лазерных асяроддзяў на фарбавальніках у растворах і цвёрдацельных матрыцах пры мікра- і наносекундным узбуджэнні

Ключавыя словы: флуарэсцэнцыя, лазер-пераўтваральнік, арганічны фарбавальнік, актыўнае асяроддзе, фотораспад, кумарыны, радаміны, пірраметэны, аксазіны, феналеміны, эфектыўнасць генерацыі

Мэта даследавання – высвятленне ўплыву малекулярных фактараў і ўнутрымалекулярных працэсаў ва ўзною сінтэзаваных фарбавальніках кумарынавага класу для стварэння на іх аснове лазерных асяроддзяў у растворах і цвёрдацельных матрыцах с павышаннай эфектыўнасцю генерацыі, расурсам працы, расшыраным дыяпазнам генерацыі ў чырвоную вобласць спектру.

Метады даследавання: спектральныя, люмінісцэнтныя і генерацыйныя, фізіка-хімічны аналіз, атамна-сілавая мікраскапія, лічбавае і кампутарнае мадэляванне.

Атрыманя вынікі і іх навізна. Выяўленая анамальная залежнасць ККД генерацыі фарбавальнікаў у растворах і цвёрдацельных матрыцах ад спектральнага выпраменьвання пампоўкі ў мікрасекундным і наносекундным дыяпазоне працягласцей. Атрымана генерацыя ў цэлага раду злучэнняў – вытворных 3- (2-бензімідазаліл) і 3-імідазапірыдыл кумарыну. Новыя злучэнні ў сіне-жоўтым дыяпазоне спектру маюць высокую генерацыйную эфектыўнасць (звыш 20% пры кагерэнтнай і 1% некагерэнтнай пампоўках). Пры ўзбуджэнні эксімерным ХеСІ-лазерам упершыню атрымана генерацыя ў спектральнай вобласці 730-740 нм у кумарынаў – вытворных бензапірылія. Пры кагерэнтнай мікрасекунднай пампоўцы фарбавальнікаў у НПШ-П (пірраметэны, феналеміны, перылен) атрымана эфектыўнасць пераўтварэння 32% (феналемін 512), 47% (піраметэн 580) і 40,2% (перылен).

Рэкамендацыі па ўжыванні. Вобласць прымянення. Новыя кумарынавыя фарбавальнікі прапануецца выкарыстоўваць пры фарбаванні палімераў у вырабах для нехарчовых мэтаў на ТАА “ОВ-ПластЗаб”-ЗАУПЛАСТ (г. Гродна), у навучальным працэсе кафедры тэарэтычнай фізікі і цеплатэхнікі ўстанова адукацыі “Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы”, у навучальным працэсе кафедры медыцынскай і біялагічнай фізікі пры вывучэнні селектыўнай лазернай медыцыны ў студэнтаў усіх спецыяльнасцяў установы адукацыі “Гродзенскі дзяржаўны медыцынскі ўніверсітэт”.

SUMMARY

Tarkovsky Vikenty Vikentievich

Generation characteristics of dye laser media in solutions and solid matrices under micro- and nanosecond excitation

Keywords: fluorescence, laser converter, organic dye, active medium, photodecomposition, coumarins, rhodamines, pyrromethenes, oxazines, phenalemines, lasing efficiency

The purpose of investigation. Elucidation of the influence of molecular structural factors and intramolecular processes in newly synthesized coumarin-class dyes to create laser media based on them in solutions and solid-state matrices with increased lasing efficiency, operating life, and extended lasing range in the red region of the spectrum.

Methods of investigation. Spectral, luminescent and generation, physical and chemical analysis, atomic force microscopy, numerical and computer modeling

The results obtained and their novelty. An anomalous dependence of the efficiency of dye generation in solutions and solid-state matrices on the spectral composition of the pump in the microsecond duration range was discovered. Generation was obtained in a number of compounds – derivatives of 3-(2-benzimidazolyl) and 3-imidazopyridyl coumarin. New compounds in the blue-yellow spectral range have high lasing efficiency (over 20% with coherent and 1% incoherent pumping). When excited by an excimer XeCl laser, lasing in the spectral region of 730–740 nm was obtained for the first time in benzopyrylium derivatives of coumarins. With coherent microsecond pumping of dyes into NPS-P (pyrromethenes, phenalemines, perylene), conversion efficiencies of 32% (phenalemin 512), 47% (pyrromethene 580) and 40.2% (perylene) were obtained.

Recommendations for use. Field of application. New coumarin dyes are recommended for use in coloring polymers in products for non-food purposes at LLC OV-PlastSnab-ZOVPLAST (Grodno), in the educational process of the Department of Theoretical Physics and Heat Engineering of the Educational Institution "Grodno State Yanka Kupala University", as well as in the educational process of the Department of Medical and Biological Physics when studying selective laser medicine among students of all specialties of the educational institution "Grodno State Medical University".

ТАРКОВСКИЙ
Викентий Викентьевич

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЛАЗЕРНЫХ СРЕД НА КРАСИТЕЛЯХ
В РАСТВОРАХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТРИЦАХ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физ.-мат. наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Подписано в печать 16.10.2025 г. Формат 60x90 1/16
Бумага офисная. Печать: ризография.
Печ. л. 3.0. Учетн. изд. л. 2.7.
Тираж 60 экз. Заказ № 7



Государственное научное учреждение «ИНСТИТУТ ФИЗИКИ
имени Б.И. СТЕПАНОВА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
БЕЛАРУСИ»

220072, Минск, Пр. Независимости, 68-2.

Отпечатано на ризографе Института физики НАН Беларуси.

Лист исправлений

в текст автореферата диссертационной работы Тарковского В.В. «Генерационные характеристики лазерных сред на красителях в растворах и твердотельных матрицах при микро- и наносекундном возбуждении» по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

№ п/п	Написано	Следует читать
1.	На с.29 в строках 16-19 Заключения «[1; 2, с. 50–51; 3; 5, с. 651–652; 6, с. 71–73; 7, с. 702–705; 9, с. 800–802; 10, с. 123–125; 18, с. 111–116; 19, с. 111–117; 23, с. 121–125; 24, с. 526–530; 25, с. 110–117; 27, с. 22–24; 33; 34, с. 236–240; 40, с. 673137-2–673137-5; 44; 46; 51; 68; 69]»	«[1-3, 5-7, 9, 10, 18, 19, 23-25, 27, 33, 34, 40, 44, 46, 51, 68, 69]»
2.	На с.29 в строках 28-30 Заключения «[13, с. 698–702; 15, с. 56–58; 21, с.136–137; 27, с. 22–24; 36; 37, с. 190–195; 38, с. 605640V-2–605640V-4; 39; 47; 48; 50; 52; 63, с. 15–18; 66; 67]»	«[13, 15, 21, 27, 36-39, 47, 48, 50, 52, 63]»
3.	На с.30 в строках 8-9 Заключения «[12, с. 102–104; 14, с. 350–354; 16, с. 113–118; 20, с. 117–120; 22, с. 1890–1896; 30, с. 1624–1632; 32, с. 99–102; 45; 65; 70]»	«[12, 14, 16, 20, 22, 30, 32, 45, 65, 70]»
4.	На с.30 в строках 20-21 Заключения «[4; 5, с. 651–652; 26, с. 30–36; 30, с. 1624–1632; 42, с. 67351X-4–67351X-13; 43]»	«[4, 5, 26, 30, 42, 43]»
5.	На с.30 в строках 32-33 Заключения «[20, с. 117–120; 28, с. 1183–1191; 31, с. 24–28; 56; 57; 61; 63, с. 15–18; 64]»	«[20, 28, 31, 56, 57, 61, 63, 64]»
6.	На с.31 в строках 1-3 Заключения «[8, с. 711–719; 11, с. 99–102; 17, с. 33–36; 25, с. 110–118; 29, с. 700–703; 35, с. 242–248; 41, с. 67341X-3–67341X-8; 49; 53; 54, с. 178-181; 55; 58, с. 160-164; 59, с. 43–46; 60, с. 275–278; 62; 71; 72]»	«[8, 11, 17, 25, 29, 35, 41, 49, 53-55, 58-60, 62, 71, 72]»
7.	На с.45 в строках 3-5 «ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ СРЕД НА КРАСИТЕЛЯХ В РАСТВОРАХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТРИЦАХ»	«ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ СРЕД НА КРАСИТЕЛЯХ В РАСТВОРАХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТРИЦАХ ПРИ МИКРО- И НАНОСЕКУНДНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ»

Соискатель



Тарковский В.В.

Ученый секретарь совета Д 01.05.01



Пархоц М.В.