

«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

На правах рукописи



Подкопаев Антон Викторович

**ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНЫХ СРЕД
ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ
Ar-Xe-CCl₄ И Ar-Xe-C₂HBrClF₃ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПУЧКОМ
ЭЛЕКТРОНОВ И ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ ²³⁵U**

Специальность 01.04.21. – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Акционерном обществе «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»

**Научный
руководитель:**

Миськевич Алексей Иустинович
доктор физико-математических наук,
ведущий инженер кафедры «Лазерная физика»
НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты:

Стариков Федор Алексеевич
доктор физико-математических наук,
начальник теоретического отдела ИЛФИ
ФГУП «РФЯЦ – НИИЭФ»

Дудоров Вадим Витальевич
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе
ИОА СО РАН

Бочков Александр Викторович
кандидат физико-математических наук,
начальник отделения 505, главный конструктор
по лазерным системам и комплексам
ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ»

Защита состоится «29» сентября 2022 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета «МИФИ.01.04» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru/> Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
канд. физ.-мат. наук



Краснов В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Одним из возможных вариантов использования осколков деления ^{235}U является прямое преобразование их энергии в световое излучение. Такое преобразование позволяет получать высокоэнергетические источники светового излучения, в том числе в виде лазерного излучения.

Наиболее высокой эффективностью преобразования энергии продуктов ядерных реакций в световое излучение обладают активные среды на основе эксимерных молекул галогенидов инертных газов типа RgX^* , где Rg – атом инертного газа (Ar, Ne, Kr, Xe), а X – атом галогена (F, Br, Cl, I). Эти молекулы существуют только в возбужденном состоянии, а их нижний рабочий уровень является разлетным или слабо связанным.

Выбор молекулы донора галогена влияет на эффективность люминесценции газовой смеси. Молекулы галогенов Cl_2 , Br_2 , I_2 и F_2 отличаются высокой химической активностью по отношению к большинству материалов, что усложняет их использование в качестве компонент лазерно-активных сред газовых лазеров. Чистые галогены даже в небольших концентрациях в газовой смеси вызывают сильное столкновительное тушение образующихся эксимерных молекул. По этой причине поиск и изучение новых химически нейтральных доноров является важной практической задачей, связанной с повышением долговечности и эффективности работы лазера.

Одними из наиболее перспективных молекул доноров являются сложные многоатомные органические соединения, содержащие в своём составе атомы галогенов. Большое разнообразие органических соединений с галогенами делает возможной ситуацию, когда такая молекула может содержать несколько атомов разного типа галогенов. Использование такого донора в смеси с инертным газом позволяет получать одновременно несколько видов эксимерных молекул, излучающих на разных длинах волн.

Широкое использование эксимерных сред в лазерах с ядерной накачкой сдерживается недостаточным знанием физических процессов, происходящих в

ядерно-возбуждаемой плазме при образовании и распаде эксимерных молекул. Построение теоретических моделей, описывающих кинетику процессов в активных средах эксимерных лазеров, возбуждаемых продуктами ядерных реакций, затруднительно из-за недостатка экспериментальных данных. В связи с этим проведение экспериментальных исследований ядерно-возбуждаемой люминесценции эксимерных молекул в плотных газовых смесях на основе галогенидов инертных газов различного состава является актуальной задачей. Настоящая работа посвящена таким экспериментальным исследованиям.

Цель диссертационной работы состояла в определении излучательных характеристик новых активных сред эксимерных лазеров на основе плотных газовых смесей Ar-Xe с галогеносодержащими соединениями CCl_4 и $\text{C}_2\text{HBrClF}_3$ при возбуждении пучком электронов и осколками деления ^{235}U .

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать и изготовить экспериментальную установку для измерения характеристик люминесценции плотных газовых смесей при возбуждении пучком электронов малогабаритного импульсного ускорителя электронов РАДАН-220.

2. Разработать и создать оптическую схему для измерения характеристик люминесценции плотных газовых смесей при возбуждении осколками деления ^{235}U на базе импульсного ядерного реактора БАРС-6.

3. Провести цикл экспериментальных исследований излучательных характеристик люминесценции эксимерных молекул XeCl^* , Xe_2Cl^* , XeBr^* , Xe_2Br^* , XeF^* , образующихся в плотных газовых смесях Ar-Xe- CCl_4 и Ar-Xe- $\text{C}_2\text{HBrClF}_3$ при возбуждении пучком электронов и осколками деления ^{235}U .

4. Провести исследования генерационных и усилительных характеристик эксимерных молекул XeCl^* в газовых смесях Ar-Xe- CCl_4 с низким содержанием донора CCl_4 при импульсной накачке пучком электронов и осколками деления ^{235}U .

5. Разработать кинетическую модель плазмохимических процессов образования и распада эксимерных молекул XeBr^* , XeCl^* и XeF^* в плотной

газовой среде $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$ при возбуждении пучком электронов и осколками деления ^{235}U .

Основные научные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментальных исследований спектрально-кинетических характеристик люминесценции эксимерных молекул XeCl^* и XeBr^* в газовых смесях Ar-Xe-CCl_4 и $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$ при накачке пучком электронов и осколками деления ^{235}U .

2. Результаты исследований усиленного спонтанного и лазерного излучения эксимерных молекул XeCl^* в условиях накачки пучком электронов и осколками деления ^{235}U .

3. Новая активная среда на основе газовой смеси $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$, позволяющая получать УФ излучение одновременно трех эксимерных молекул XeBr^* , XeCl^* и XeF^* при возбуждении осколками деления ^{235}U .

Научная новизна

Научная новизна определяется тем, что в работе впервые:

1. Проведены комплексные исследования излучательных характеристик люминесценции газовых смесей $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$ различного состава при возбуждении осколками деления ^{235}U и пучком электронов со средней энергией 150 кэВ.

2. Экспериментально установлено, что при использовании $\text{C}_2\text{HBrClF}_3$ в активной среде под воздействием осколков деления ^{235}U происходит образование трех эксимерных молекул XeBr^* , XeCl^* и XeF^* .

3. Обнаружен режим суперлюминесценции на С-А переходе эксимерной молекулы XeCl^* ($\lambda \approx 352$ нм) при накачке плотной Ar-Xe-CCl_4 газовой смеси осколками деления ^{235}U .

4. На основе полученных экспериментальных данных рассчитаны константы скоростей столкновительного тушения люминесценции эксимерных молекул XeBr^* и XeCl^* молекулами донора $\text{C}_2\text{HBrClF}_3$.

Практическая значимость

1. Предложено новое малотоксичное донорное соединение $C_2HBrClF_3$ для экспериментального исследования эксимерных лазерных сред, позволяющее получать излучение одновременно трех эксимерных молекул $XeBr^*$, $XeCl^*$ и XeF^* .

2. Создана установка для исследования люминесценции плотных газовых сред при возбуждении пучком электронов со средней энергией 150 кэВ, с возможностью очистки и регенерации Хе.

3. Выдвинуто предположение о влиянии гамма-излучения реактора на кинетику процессов возбуждения лазерных сред продуктами ядерных нейтронных реакций, открывающее новое направление исследований.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе экспериментальные данные были получены автором лично либо при его непосредственном участии. Автор лично участвовал в разработке, сборке и настройке экспериментальной установки, созданной при выполнении данной работы. Автор самостоятельно разработал и реализовал с помощью средств программирования расчетную кинетическую модель, представленную в работе. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

Апробация работы

Основные результаты работы прошли апробацию на следующих международных и российских конференциях:

- «Будущее атомной энергетики – atomfuture», Обнинск, 2017 г.;
- VII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», Москва, 2018 г.;
- VII, VIII и IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2018–2020 гг.;

- International Conference on Lasers, Optics and Photonics, Осака, Япония, 2018 г.

Публикации по теме

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, среди них:

- 4 статьи в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ,
- 7 – в трудах международных и всероссийских конференций,
- 2 – в прочих изданиях.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 145 наименований. Общий объем диссертации составляет 150 страниц, включая 58 рисунков и 8 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** в показана актуальность темы исследования, установлены цель и задачи. Показана научная новизна и практическая значимость работы. Приведены научные положения, выносимые на защиту. Указаны сведения об апробации полученных результатов. Приведена информация о публикациях по теме диссертационной работы.

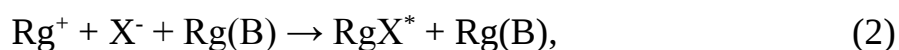
В первой главе приводится обзор научных публикаций по теме ксенон содержащих инертно-галоидных эксимерных молекул.

Рассмотрены основные научные работы, касающиеся исследования эксимерных лазерных сред на основе плотных газовых смесей, возбуждаемых частицами высокой энергии. Образование эксимеров типа RgX^* в основном происходит по двум каналам, первый – гарпунная реакция:



где RX – молекула, содержащая атом галогена и радикал R . Данная реакция преобладает при низких давлениях газовых смесей.

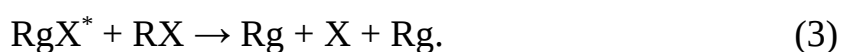
Второй тип реакций – ион-ионные рекомбинации, в общем случае имеющие вид:



где В – атом буферного газа, которым чаще всего является инертный газ (He, Ne, Ar). Реакция (2) преобладает в плотных газовых смесях давлением порядка атмосферы и выше при возбуждении пучком электронов и тяжелыми заряженными частицами. Эксимерные молекулы находятся в одном из возбужденных состояний, имеющих время жизни от 10 до 100 нс. Основное состояние эксимеров является либо разлетным, либо слабосвязанным. При переходе в основное состояние эксимерные молекулы RgX^* излучают квант света определенной длины волны, в основном в УФ и ВУФ области длин волн.

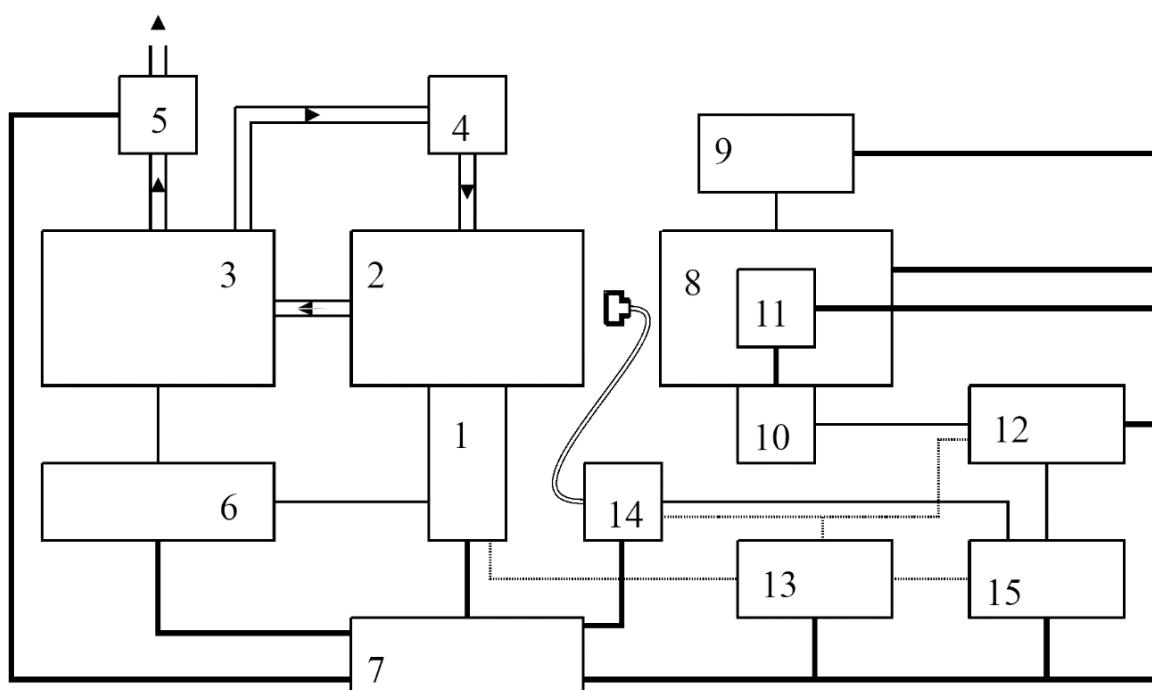
Одним из возможных источников накачки для эксимерных лазерных сред могут служить продукты нейтронных ядерных реакций. Экспериментальные работы, которые выполнялись в СССР, а затем и в России, а также в США показали, что эксимерные лазерные среды обладают высокой эффективностью при возбуждении продуктами ядерных нейтронных реакций. Достигнуты показатели квантовой эффективности до 16% при передаче энергии продуктов ядерной реакции в эксимерные среды на основе эксимеров XeF^* , $XeCl$ и $XeBr^*$. В ряде экспериментов достигнуты значения усиления в $0,007\text{ см}^{-1}$ для излучения с длиной волны 351 нм В-Х перехода эксимерной молекулы XeF^* , при возбуждении осколками деления ^{235}U с мощностью энерговклада $\approx 5\text{ кВт/см}^3$.

Наиболее перспективными донорными соединениями считаются тяжелые органические молекулы. Их преимущество состоит в меньшей химической активности по сравнению с чистыми галогенами F_2 , Cl_2 , Br_2 . Это позволяет продлить срок службы элементов конструкции эксимерных лазеров и повысить их эффективность. Одним из основных параметров, характеризующих донор атомов галогена, является константа скорости столкновительного тушения эксимерной молекулы в реакции типа:



Скорость реакции (3) ограничивает предельную концентрацию атомов донора и эффективность образования эксимерных молекул.

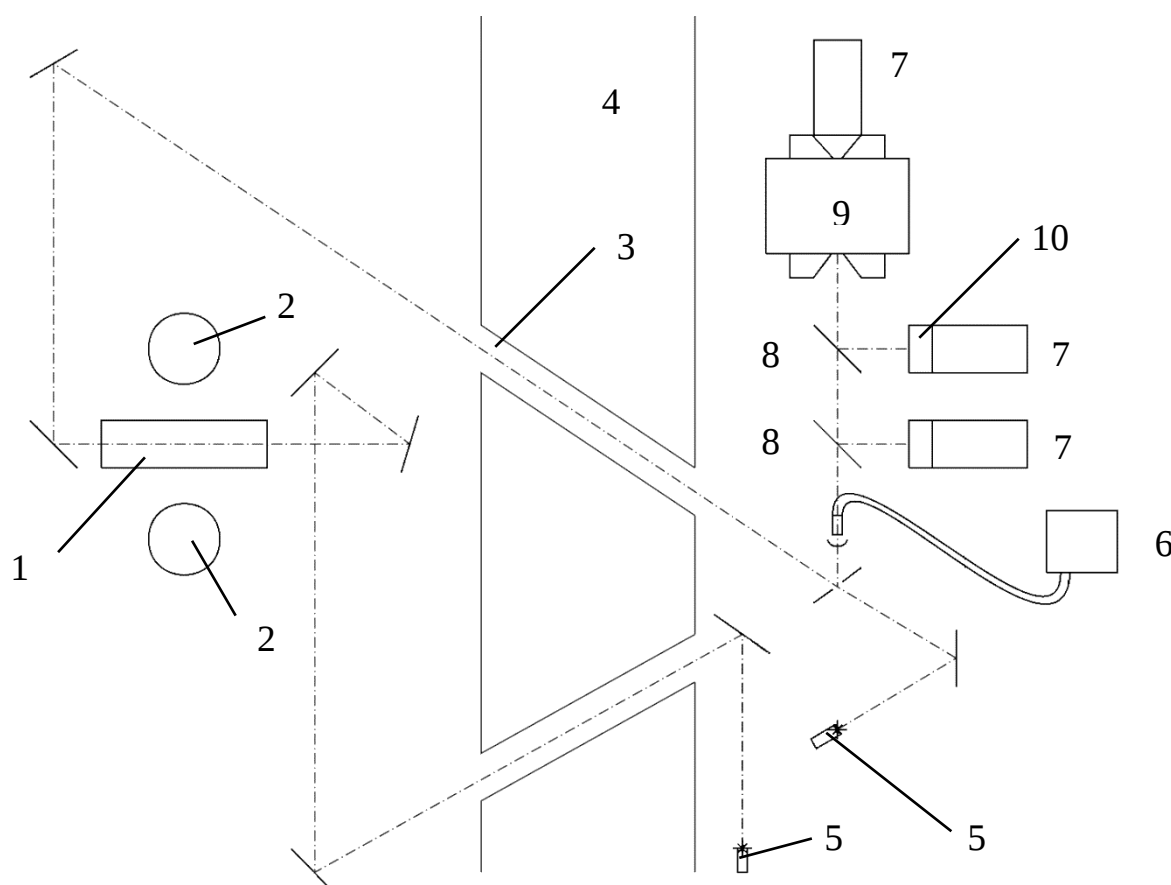
Во второй главе приводится описание созданных экспериментальных установок для исследования характеристик люминесценции плотных газовых смесей, возбуждаемых пучком электронов со средней энергией 150 кэВ и осколками деления ^{235}U .



1 – ускоритель электронов Радан-220; 2 – экспериментальная камера;
3 – газовый пост; 4 – система очистки и рециркуляции газов; 5 – вакуумный насос;
6 – блок управления газовым постом; 7 – система питания и заземления установки;
8 – монохроматор МДР-23; 9 – блок управления монохроматором;
10 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106; 11 – блок питания ФЭУ-106;
12 – цифровой осциллограф *Tektronix TDS-1012*; 13 – блок синхронизации;
14 – спектрометр *Maya 2000 Pro*; 15 – персональный компьютер

Импульсный ускоритель электронов РАДАН-220 обеспечивает ток электронов ≈ 150 А с длительностью импульса ≈ 2 нс. Для создания плотных газовых смесей высокого (до 4 атм) давления применяется газовый контур с возможностью очистки и регенерации Хе. Точность определения парциального давления компонент газовой смеси составляет $\pm 0,005$ Торр.

Установка для исследования излучательных характеристик плотных газовых смесей, возбуждаемых осколками деления ^{235}U , создана на базе реакторно-лазерного комплекса «Стенд-Б». Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.



- 1 – экспериментальное устройство; 2 – активные зоны реактора БАРС-6;
 3 – оптический канал; 4 – биологическая защита; 5 – лазеры для настройки
 оптической схемы; 6 – спектрометр *Maya 2000 Pro*; 7 – фотоэлектронные
 умножители; 8 – кварцевые делительные пластины; 9 – монохроматор МДР-12;
 10 – интерференционные светофильтры

Рисунок 2 – Оптическая схема измерительной системы, использованной
 в экспериментах на реакторе

Источником нейтронов служит быстрый импульсный реактор БАРС-6 с плотностью потока нейтронов на поверхности активной зоны $\approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Возбуждение исследуемой газовой смеси происходит в экспериментальном устройстве ЭУС-25. Экспериментальное устройство представляет собой стальную трубу, в которую вложен цилиндр из алюминиевой фольги, на внутреннюю поверхность которой нанесен слой из U_3O_8 (обогащение по $^{235}\text{U} \approx 90\%$). Плотность ядер ^{235}U в слое составляет $\approx 3 \text{ мг/см}^2$. Труба окружена слоем полиэтиленового замедлителя. Длительность импульсного воздействия осколков деления ^{235}U составляет $\approx 250 \text{ мкс}$.

Для измерения спектральных характеристик в экспериментальных установках применяется спектрометр *Maya-2000 Pro*, основанный на полупроводниковом детекторе *Hamamatsu S10420*. Спектрометр позволяет записывать спектры люминесценции в области 200 – 1100 нм с разрешением 0,5 нм. Для записи временных характеристик использовались фотоэлектронные умножители ФЭУ-100 и ФЭУ-106 совместно с быстрым цифровым осциллографом *Tektronix TDS-1012*. В установке на базе ускорителя электронов для выделения конкретной длины волны при записи временных характеристик использовался монохроматор МДР-24. В установке на базе реакторно-лазерного комплекса для этих целей применялся монохроматор МДР-12, а также набор узкополосных интерференционных фильтров.

Проведена оценка КПД преобразования энергии пучка электронов и осколков деления ^{235}U в энергию квантов излучения эксимерных молекул. Методика оценки основана на пересчете относительной интенсивности полос В-Х переходов эксимерных молекул в измеряемых спектрах люминесценции в количество квантов света, излучаемого возбуждаемым объемом исследуемой плотной газовой среды. КПД преобразования в излучение XeCl^* составили приблизительно 3% и 11% для электронов и осколков деления соответственно.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования спектрально-кинетических и генерационных характеристик плотной газовой смеси Ar-Xe-CCl₄ различного парциального состава, возбуждаемой пучком электронов и осколками деления ²³⁵U. На рисунке 3 представлен спектр люминесценции смеси Ar-Xe-CCl₄ (760-15-0,05), возбуждаемой продуктами ядерной реакции деления ²³⁵U

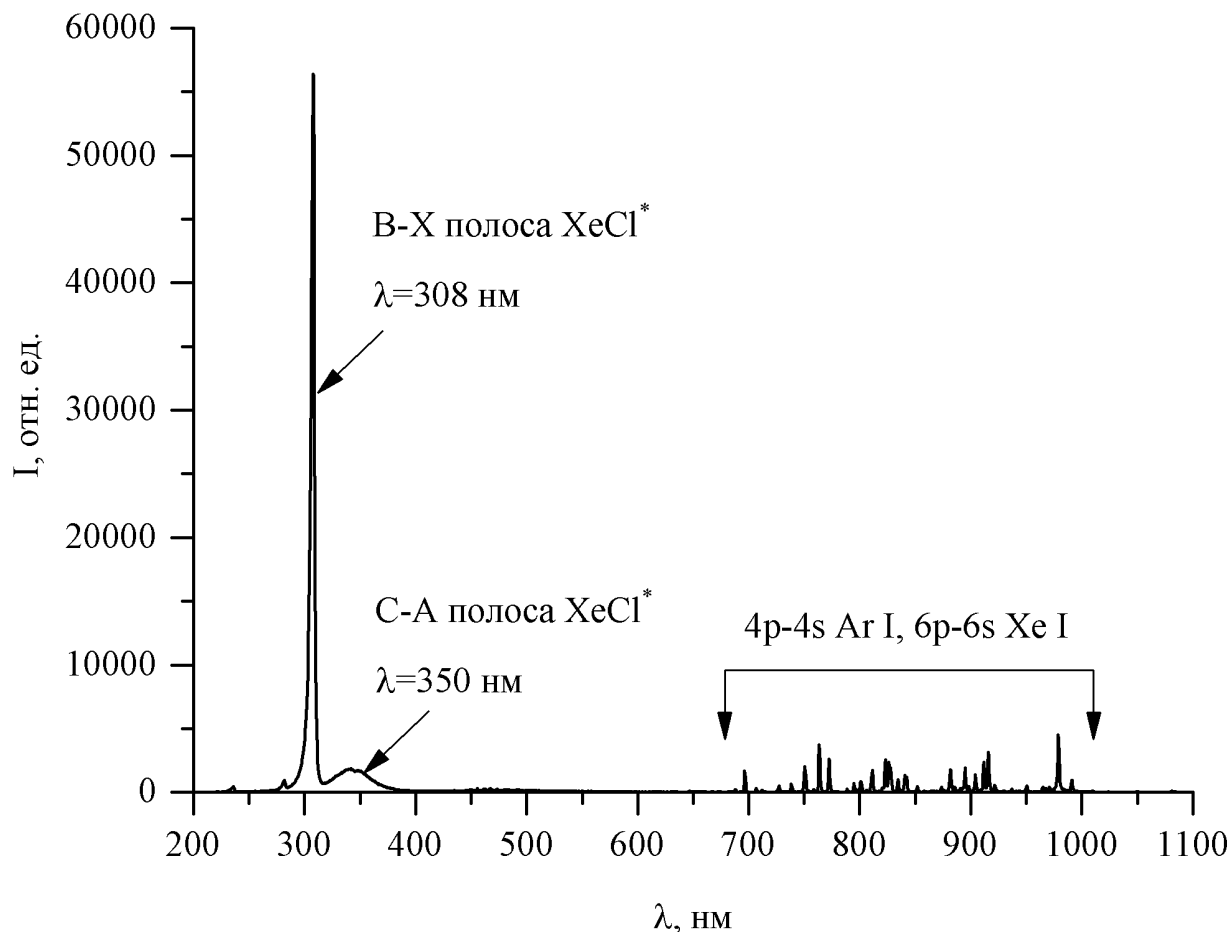
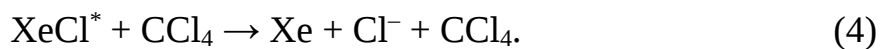


Рисунок 3 – Спектр люминесценции смеси Ar-Xe-CCl₄ (760-15-0,05), возбуждаемой продуктами ядерной реакции деления ²³⁵U

На основе измерений времени высвечивания эксимерной молекулы XeCl* были рассчитана константа скорости столкновительного тушения в реакции:

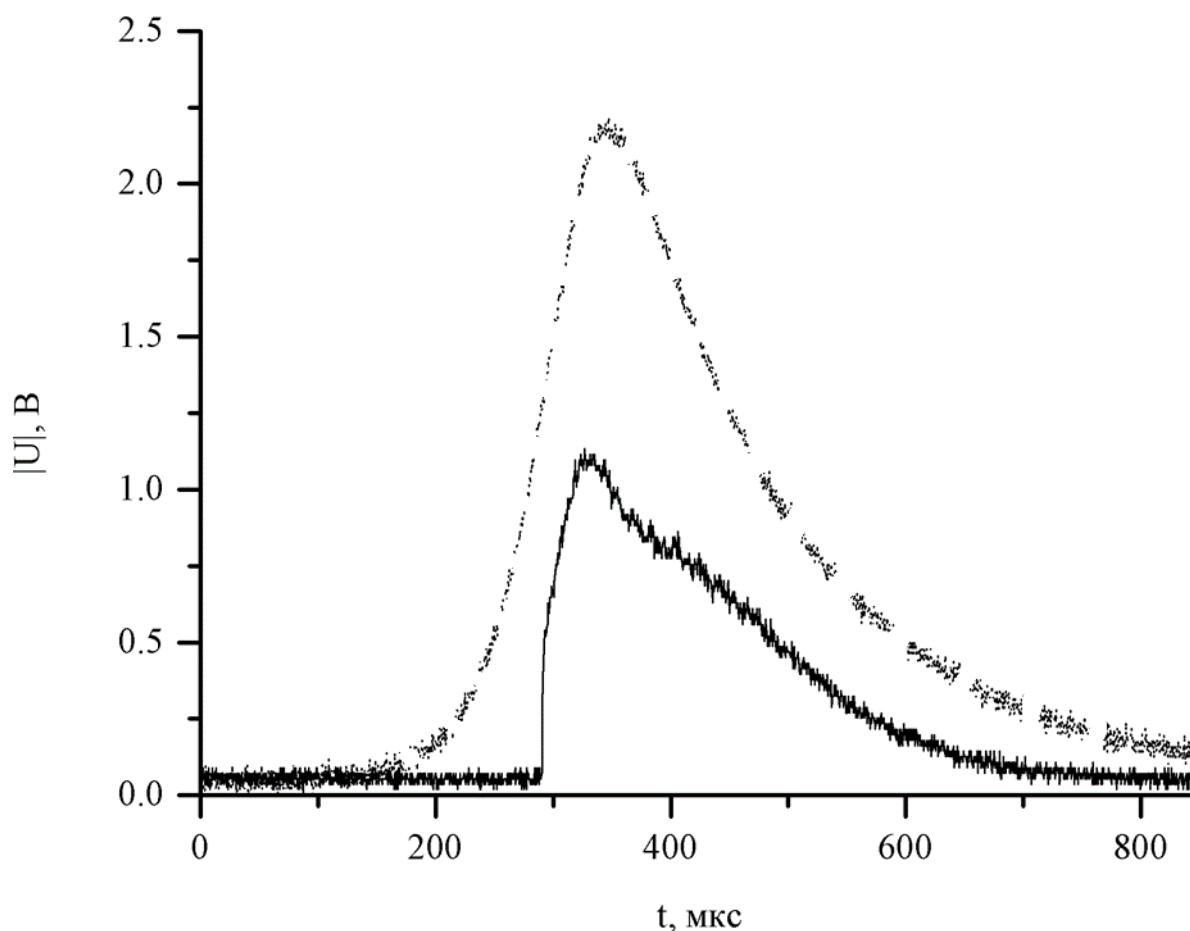


Значение константы скорости реакции столкновительного тушения составляет $(2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$.

Проведены эксперименты по получению генерации на длине волны 308 нм с использованием газовой смеси Ar-Xe-CCl₄. В экспериментах использовался резонатор на основе зеркал с коэффициентом отражения 99,5% на длине волны 308 нм.

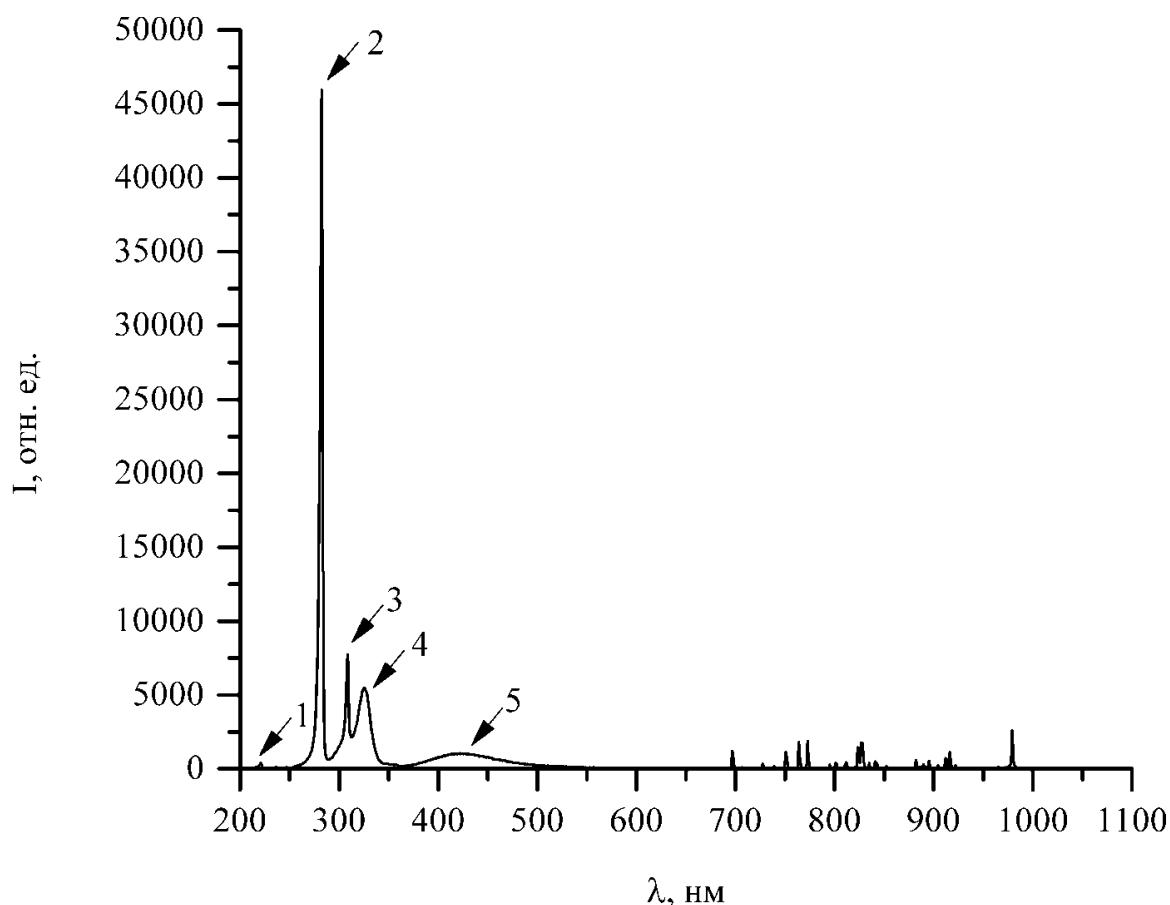
Зафиксировано сужение полосы В-Х перехода эксимерной молекулы ХеСl*. Расходимость пучка излучения на длине волны 308 нм составляет $\approx 0,02$ радиан. Верхняя оценка коэффициента усиления среды на длине волны 308 нм, соответствующей В-Х переходу эксимерной молекулы ХеСl*, составляет $\approx 0,01$ см⁻¹.

В работе впервые наблюдается режим суперлюминесценции на длине волны 352 нм С-А перехода эксимерной молекулы ХеСl*. Режим был выражен в лавинообразном увеличении интенсивности сигнала на длине волны 352 нм (рисунок 4).



Риснок 4 – Зависимость инетенсивности люминесценции (—) на длине волны 352 нм и плотности потока нейтронов (— —) от времени

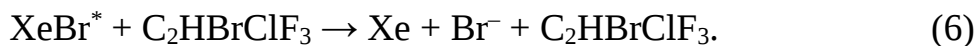
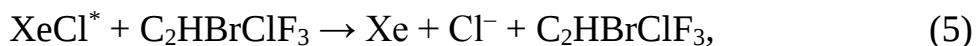
В четвертой главе приводятся результаты экспериментального исследования характеристик люминесценции плотной газовой смеси Ar-Xe-C₂HBrClF₃ различного парциального состава, возбуждаемой пучком электронов и продуктами реакции деления ²³⁵U. На рисунке 5 представлен спектр люминесценции смеси Ar-Xe-C₂HBrClF₃ при возбуждении пучком электронов.



1 – D-X переход XeBr*^{*}; 2 – B-X переход XeBr*^{*}; 3 – B-X переход XeCl*^{*};
4 – C-A переход XeBr*^{*}; 5 – полоса Xe₂Br*^{*}

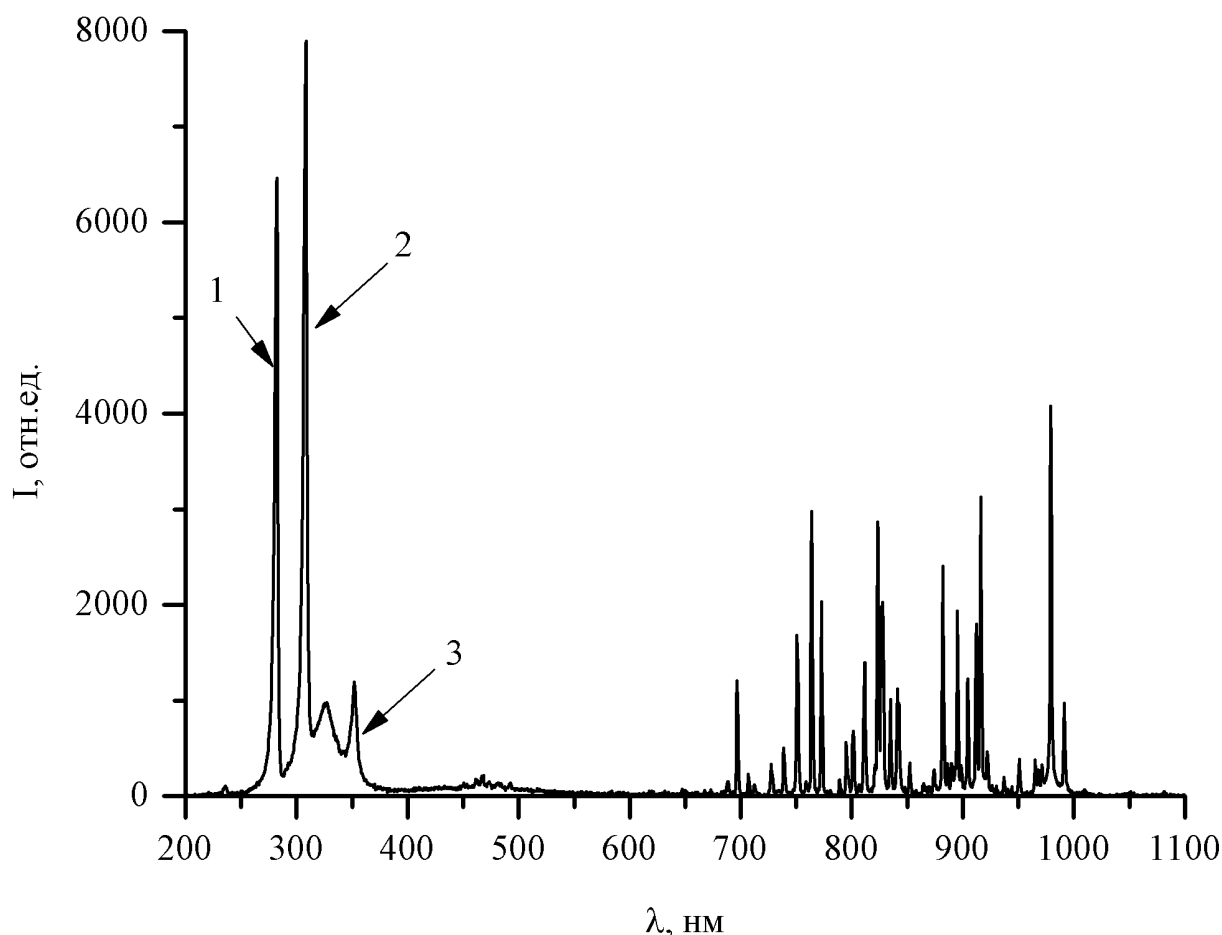
Рисунок 5 – Спектр люминесценции газовой смеси Ar-Xe-C₂HBrClF₃, парциальный состав (760-15-0,05), возбуждаемой пучком электронов

На основе измерений времени высвечивания эксимерных молекул XeCl*^{*} и XeBr*^{*} были рассчитаны константы скоростей столкновительного тушения в реакциях:



Для эксимерной молекулы XeBr^* значение константы скорости реакции столкновительного тушения составляет $(2,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$, для XeCl^* – $(2,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$.

На рисунке 6 представлен спектр люминесценции газовой смеси $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$, полученный при возбуждении осколками деления ^{235}U .



1 – В-Х переход XeBr^* ; 2 – В-Х переход XeCl^* ; 3 – В-Х переход XeF^*

Рисунок 6 – Спектр люминесценции газовой смеси $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$ с соотношением парциальных давлений 760-20-0,05 Торр, возбуждаемой осколками деления урана

Помимо полос с максимумами на длине волны 282 нм и 308 нм, соответствующими В-Х переходам эксимерных молекул XeBr^* и XeCl^* , в спектре присутствует полоса с максимумом около 351 нм, которая принадлежит В-Х переходу эксимерной молекулы XeF^* .

Создана плазмохимическая модель кинетики плазмохимических процессов в среде Ar-Xe-C₂HBrClF₃. В модели учитывается 46 реакций с константами скоростей k_i на основе которых была составлена система дифференциальных уравнений для концентраций 18 компонент:

$\begin{aligned} [\dot{Ar}] = & k_5[Ar^+][e_1] + k_9[Ar^*] + 2k_8[Ar_2^*][e_1] + 2k_{10}[Ar_2^*] + k_{17}[Ar^+][Xe] + k_{18}[Ar^*][Xe] + \\ & + 2k_{19}[Ar_2^+][Xe] + 2k_{20}[Ar_2^*][Xe] - k_1[Ar][e_2] - k_2[Ar][e_3] - \\ & - k_6[Ar]([Ar][Ar^+] - [Ar_2^+]) - k_7[Ar]([Ar][Ar^*] - [Ar_2^*]) \end{aligned}$
$[\dot{Ar}^+] = k_2[Ar][e_3] + k_3[Ar^*][e_3] - k_5[Ar^+][e_1] - k_4[Ar^+][e_1] - k_6[Ar^+][Ar]^2 - k_{17}[Ar^+][Xe]$
$[\dot{Ar}^*] = k_1[Ar][e_2] + k_4[Ar^+][e_1] - k_3[Ar^*][e_3] - k_9[Ar^*] - k_7[Ar^*][Ar]^2 - k_{18}[Ar^*][Xe]$
$\begin{aligned} [\dot{Xe}] = & -k_{11}[Xe][e_2] - k_{12}[Xe][e_3] + k_{15}[Xe^+][e_1] + k_{16}[Xe^*] - k_{17}[Ar^+][Xe] - k_{18}[Ar^*][Xe] - \\ & - k_{19}[Ar_2^+][Xe] - k_{20}[Ar_2^*][Xe] + k_{33}[XeBr^*][Ft] + k_{34}[XeCl^*][Ft] + \\ & + k_{35}[XeF^*][Ft] + k_{36}[XeBr^*][Ar] + k_{37}[XeCl^*][Ar] + k_{38}[XeF^*][Ar] + \\ & + k_{39}[XeBr^*] + k_{40}[XeCl^*] + k_{41}[XeF^*] + k_{45}[XeBr^*][e_1] + k_{46}[XeCl^*][e_1] + \\ & + k_{47}[XeF^*][e_1] \end{aligned}$
$\begin{aligned} [\dot{Xe}^+] = & k_{12}[Xe][e_3] + k_{13}[Xe^*][e_3] - k_{14}[Xe^+][e_1] - k_{15}[Xe^+][e_1] + k_{17}[Xe][Ar^+] + \\ & + k_{19}[Xe][Ar_2^+] - k_{27}[Xe][Xe^+][Br^-] - k_{28}[Xe][Xe^+][Cl^-] - k_{29}[Xe][Xe^+][F^-] - \\ & - k_{30}[Ar][Xe^+][Br^-] - k_{31}[Ar][Xe^+][Cl^-] - k_{32}[Ar][Xe^+][F^-] - k_{42}[Xe^+][Br^-] - \\ & - k_{43}[Xe^+][Cl^-] - k_{44}[Xe^+][F^-] \end{aligned}$
$[\dot{Xe}^*] = k_{11}[Xe][e_2] - k_{13}[Xe^*][e_3] + k_{14}[Xe^+][e_1] - k_{16}[Xe^*] + k_{18}[Ar^*][Xe] + k_{20}[Ar_2^*][Xe] - \\ - k_{24}[Xe^*][Ft] - k_{25}[Xe^*][Ft] - k_{26}[Xe^*][Ft]$
$\begin{aligned} [\dot{e}_1] = & k_1[Ar][e_2] + k_2[Ar][e_3] + k_3[Ar^*][e_3] - k_4[Ar^+][e_1] - k_5[Ar^+][e_1] - k_8[Ar_2^+][e_1] + \\ & + k_{12}[Xe][e_3] + k_{13}[Xe^*][e_3] - k_{14}[Xe^+][e_1] - k_{15}[Xe^+][e_1] - k_{21}[e_1][Ft] - \\ & - k_{22}[e_1][Ft] - k_{23}[e_1][Ft] \end{aligned}$
$[\dot{e}_2] = k_2[Ar][e_3] + k_3[Ar^*][e_3] - k_1[Ar][e_2] - k_{11}[Xe][e_2] + k_{12}[Xe][e_3] + k_{13}[Xe^*][e_3]$
$[\dot{e}_3] = -k_2[Ar][e_3] - k_3[Ar^*][e_3] - k_{12}[Xe][e_3] - k_{13}[Xe^*][e_3]$
$[\dot{Ft}] = -k_{21}[e_1][Ft] - k_{22}[e_1][Ft] - k_{23}[e_1][Ft] - k_{24}[Xe^*][Ft] - k_{25}[Xe^*][Ft] - k_{26}[Xe^*][Ft]$
$[\dot{Ar}_2^+] = k_6[Ar^+][Ar]^2 - k_8[Ar_2^+][e_1] - k_{19}[Ar_2^+][Xe]$
$[\dot{Ar}_2^*] = k_7[Ar^*][Ar]^2 - k_{10}[Ar_2^*] - k_{20}[Ar_2^*][Xe]$
$[\dot{Br}^-] = k_{21}[e_1][Ft] - k_{27}[Xe][Xe^+][Br^-] - k_{30}[Ar][Xe^+][Br^-] - k_{42}[Xe^+][Br^-]$
$[\dot{Cl}^-] = k_{22}[e_1][Ft] - k_{28}[Xe][Xe^+][Cl^-] - k_{31}[Ar][Xe^+][Cl^-] - k_{43}[Xe^+][Cl^-]$
$[\dot{F}^-] = k_{23}[e_1][Ft] - k_{29}[Xe][Xe^+][F^-] - k_{32}[Ar][Xe^+][F^-] - k_{44}[Xe^+][F^-]$
$\begin{aligned} [\dot{XeBr}^*] = & k_{24}[Xe^*][Ft] + k_{27}[Xe^+][Br^-][Xe] + k_{30}[Xe^+][Br^-][Ar] + k_{42}[Xe^+][Br^-] - \\ & - k_{45}[XeBr^*][e_1] - k_{33}[XeBr^*][Ft] - k_{36}[XeBr^*][Ar] - k_{39}[XeBr^*] \end{aligned}$
$\begin{aligned} [\dot{XeCl}^*] = & k_{25}[Xe^*][Ft] + k_{28}[Xe^+][Cl^-][Xe] + k_{31}[Xe^+][Cl^-][Ar] + k_{43}[Xe^+][Cl^-] - \\ & - k_{34}[XeCl^*][Ft] - k_{37}[XeCl^*][Ar] - k_{40}[XeCl^*] - k_{46}[XeCl^*][e_1] \end{aligned}$
$\begin{aligned} [\dot{XeF}^*] = & k_{26}[Xe^*][Ft] + k_{29}[Xe^+][F^-][Xe] + k_{32}[Xe^+][F^-][Ar] + k_{44}[Xe^+][F^-] - \\ & - k_{35}[XeF^*][Ft] - k_{38}[XeF^*][Ar] - k_{41}[XeF^*] - k_{47}[XeF^*][e_1] \end{aligned}$

Модель описывает возбуждение плотной газовой смеси Ar-Xe-C₂HBrClF₃ импульсным пучком электронов со средней энергией 150 кэВ и осколками деления ²³⁵U с мощностью энерговклада ≈ 800 Вт/см³. На основе разработанной модели были рассчитаны зависимости концентрации эксимерных молекул XeBr*, XeCl* и XeF* от времени. На рисунке 7 представлено сравнение формы зависимости концентрации XeBr* от времени, полученной расчетным путем и формы зависимости интенсивности люминесценции XeBr*, полученной в эксперименте.

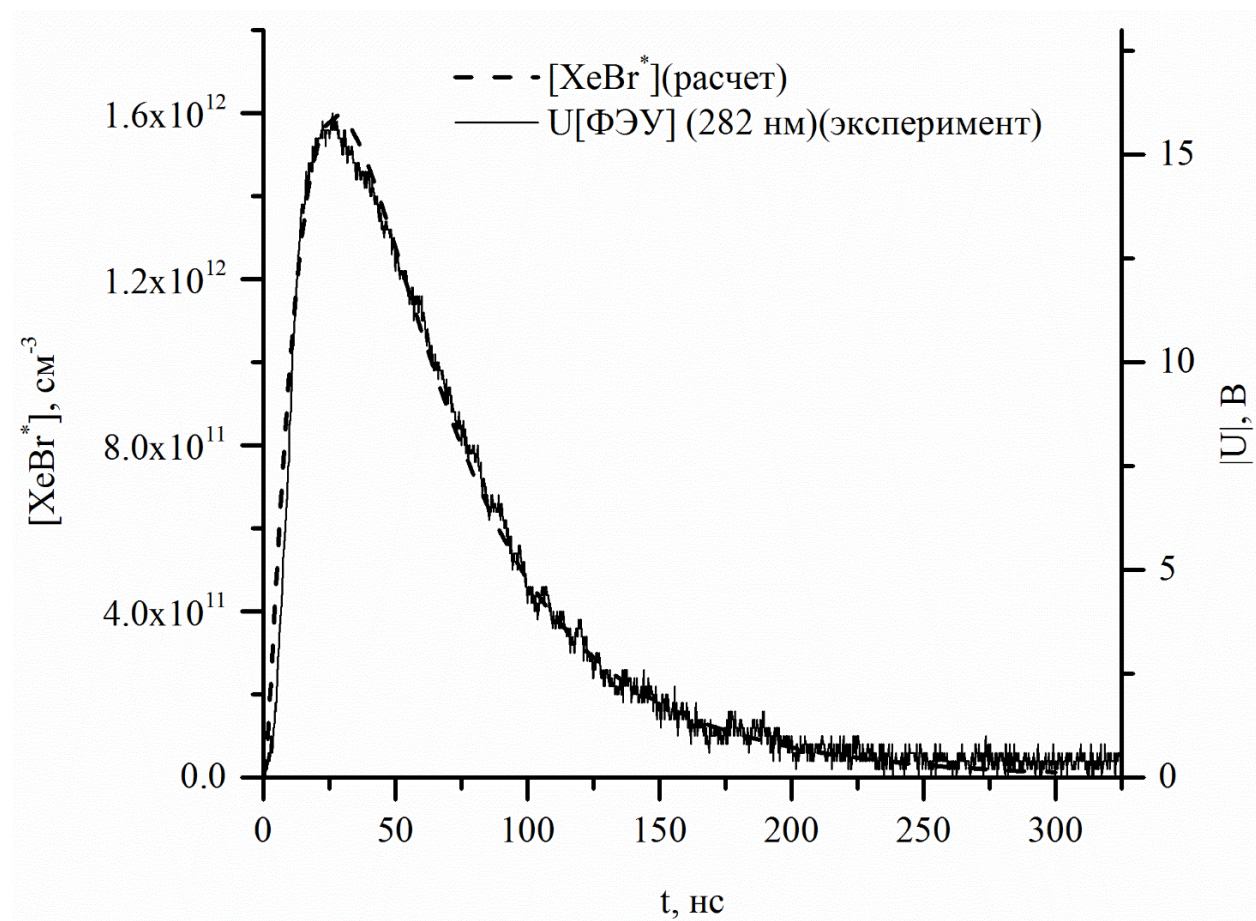


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальной зависимости интенсивности люминесценции XeBr* от времени с расчетной зависимостью концентрации эксимерных молекул XeBr* от времени

Рассчитанные коэффициенты усиления на В-Х переходах XeBr*, XeCl* и XeF* составляют $7 \cdot 10^{-4}$, $2 \cdot 10^{-4}$ и $6,9 \cdot 10^{-5}$ см⁻¹ для возбуждения осколками деления и $3,2 \cdot 10^{-4}$, $2,3 \cdot 10^{-4}$ и $5,4 \cdot 10^{-5}$ см⁻¹ для возбуждения пучком электронов.

Основные выводы работы

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Экспериментально показано, что использование смеси Ar-Xe-CCl₄ с низким парциальным давлением CCl₄ ($\approx 0,05$ Торр) позволяет существенно улучшить излучательные характеристики В-Х перехода 308 нм эксимерной молекулы XeCl*. Константа тушения эксимерной молекулы XeCl* молекулой CCl₄ составила $(2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$ см³/с. Коэффициент усиления на длине волны 308 нм в газовой среде Ar-Xe-CCl₄ (760-15-0,05) может достигать 0,01 см⁻¹. КПД преобразования энергии, вложенной в газовую среду осколками деления, в энергию излучения В-Х перехода XeCl* составляет $\approx 11\%$.

2. Впервые наблюдался режим суперлюминесценции на С-А переходе эксимерной молекулы XeCl* длина волны 352 нм в среде на основе плотной газовой смеси Ar-Xe-CCl₄ (760-15-0,05), возбуждаемой осколками деления ²³⁵U. Эффект проявлялся в лавинообразном увеличении интенсивности излучения на длине волны 352 нм.

3. Экспериментально установлено достижение режима, близкого к лазерной генерации, на длине волны 308 нм В-Х перехода эксимерной молекулы XeCl* в газовой смеси Ar-Xe-CCl₄, возбуждаемой пучком электронов и осколками деления ²³⁵U. В резонаторе с коэффициентом отражения на длине волны генерации $\approx 99,5\%$ наблюдается сужение ширины полосы В-Х перехода на 17%, пучок излучения на выходе из резонатора обладает расходимостью $\approx 0,02$ радиан.

4. Впервые было проведено экспериментальное исследование C₂HBrClF₃ (фторотана) как нового донорного соединения для получения эксимерных соединений. Экспериментально установлено, что при использовании фторотана в исследуемых смесях при возбуждении осколками деления ²³⁵U одновременно образуется три эксимерные молекулы XeBr*, XeCl* и XeF*. Рассчитаны константы скоростей столкновительного тушения молекулой C₂HBrClF₃, для молекулы XeCl* $(2,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-10}$ см³/с, а для XeBr* – $(2,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$ см³/с.

5. Создана экспериментальная установка для исследования спектрально-кинетических свойств люминесценции плотных газовых смесей при возбуждении пучком электронов. Установка создана на базе компактного

ускорителя электронов РАДАН-220, средняя энергия электронов 150 кэВ, длительность возбуждения ≈ 2 нс. В установке применяется система очистки и регенерации Хе, разработанная в настоящей работе.

6. Создана плазмохимическая модель, описывающая кинетику процессов образования и распада эксимерных молекул XeBr^* , XeCl^* и XeF^* в новой активной среде на основе плотной газовой среды $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$. Численные расчеты показали, что в имеющихся экспериментальных условиях коэффициенты усиления на В-Х переходах эксимерных молекул XeBr^* , XeCl^* и XeF^* достигают $7 \cdot 10^{-4}$, $2 \cdot 10^{-4}$ и $6,9 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ для возбуждения осколками деления и $3,2 \cdot 10^{-4}$, $2,3 \cdot 10^{-4}$ и $5,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ для возбуждения пучком электронов

7. Были обнаружены новые особенности кинетики процессов образования и распада эксимерных молекул во время импульсного воздействия осколков деления ^{235}U . Выдвинуто предположение о негативном влиянии гамма-излучения реактора на процессы образования эксимерных молекул.

Статьи в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ

1. Миськевич А. И., Подкопаев А. В. Установка для исследования люминесценции, возбуждаемой заряженными частицами высокой энергии в плотных ксенонсодержащих газовых средах, с возможностью регенерации и повторного использования ксенона // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 3. – С. 154–159.

2. Миськевич А. И., Подкопаев А. В. Образование эксимерных молекул XeCl^* , XeBr^* , XeF^* в плотной газовой смеси $\text{Ar-Xe-C}_2\text{HBrClF}_3$ при возбуждении пучком электронов и осколками деления урана // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2019. – Т. 8, № 2. – С. 1–7.

3. Mis'kevich A.I., Guo Jin Bo, Duyzov Y.A., Podkopaev A.V. The effect of super-radiance on the C-A transition of the excimer molecule XeCl^* at 352 nm excited only by ^{235}U fission fragments // American Journal of Modern Physics. – 2019. – Vol. 8, no 2. – P. 14–17. DOI 20.11648/J.Amp. 2019 08 02.11/

4. Миськевич А. И., Подкопаев А. В. Излучательные характеристики эксимерных молекул Ar_2Cl^* при накачке плотной $\text{Ar} + \text{CCl}_4$ газовой смеси быстрыми электронами // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, № 9. – С. 1146 – 1151.

Тираж 80 экз. Заказ № 135. 07.07.2022

Отпечатано с оригинала автора в ОПиНТИ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.