

РГБ ОД
22 СЕН 1998

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи
УДК 621.373.826

СИМАКОВА Ольга Владимировна

Кинетика активных сред лазеров на переходах атомов хлора, углерода,
азота, кислорода и ксенона.
(01.04.21 - лазерная физика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва 1998

Работа выполнена в Институте общей физики Российской Академии наук.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук
Карелин А.В.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор Бирюков А.С.
кандидат физико-математических наук
Холин И.В.

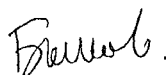
Ведущая организация Московский Инженерно-Физический Институт

Защита состоится «19» ноября 1998 г. в 15 часов
на заседании Диссертационного совета Д-003.49.02
Института общей физики РАН
по адресу: 117942, г. Москва, ул. Вавилова, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН.

Автореферат разослан «5» ноября 1998 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.ф.м.н.



Быков В.П.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Одним из перспективных способов возбуждения лазерно-активных сред является накачка заряженными продуктами ядерных реакций (ядерная накачка). На пути развития лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) появилась идея создания установки принципиально нового типа - реактора-лазера (РЛ), в котором процесс прямого преобразования ядерной энергии в световую осуществляется при совмещении лазерно-активной среды и ядерно-активной зоны реактора, что открывает возможность получения качественно новой энергетики. В связи с этим представляется весьма актуальным поиск перспективных активных сред, обладающих низким порогом накачки и эффективно излучающих в оптическом диапазоне, и выяснение и оптимизация условий, при которых происходит наиболее эффективная лазерная генерация в рабочей среде. Одним из способов решения этих проблем является построение подробных кинетических моделей активных сред лазеров, на основе которых можно не только интерпретировать уже имеющиеся эксперименты и получать информацию о предельных возможностях конкретной среды, но и осуществлять более целенаправленный поиск новых перспективных АС для создания эффективного РЛ.

В качестве возможных АС для лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) рассматриваются смеси инертных газов с молекулярными газами N_2 , CO , CO_2 , O_2 , CCl_4 и др. Лазеры на атомарных переходах азота, углерода, кислорода и хлора привлекают интерес удобными длинами волн излучения (вблизи окон прозрачности атмосферы) и достаточно низкими порогами генерации, что делает их пригодными для использования в устройствах со стационарной накачкой.

Одним из наиболее перспективных среди лазеров, работающих в ближнем ИК диапазоне, является ксеноновый лазер, эффективная генерация в котором возникает при самых различных способах накачки. Достоинства ксенонового лазера с ядерной накачкой связаны с удобным набором длин волн генерации, с низким порогом и потенциальной возможностью накачки больших объемов. Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных Хе-лазеру, к настоящему времени не было построено не противоречащей спектроскопическим исследованиям и адекватно описывающей широкий спектр экспериментальных результатов кинетической модели его активной среды. Не сложилось даже единого мнения относительно механизма создания инверсии в Хе-лазере. В связи с этим задача моделирования АС Хе-лазера продолжает оставаться актуальной.

Построение кинетических моделей АС лазеров является актуальной задачей еще и потому, что подробное изучение кинетики АС позволяет понять глубже физику процессов в активных средах с накачкой жестким ионизатором вообще, уточнить ряд констант скоростей важных плазмохимических реакций, выявить общие черты формирования инверсии в плотной низкотемпературной плазме.

Цель работы.

Анализ перспективности использования смесей инертных газов с молекулярными газами в качестве АС для ЛЯИ. Для чего предполагалось построить подробные кинетические модели АС указанных лазеров с выявлением определяющих релаксационных процессов и установлением основных механизмов накачки и определить оптимальные условия, при которых возможно получение максимальных энергетических параметров данных лазеров.

Построение подробной многоволновой кинетической модели He-Ar-Xe лазера, которая адекватно и непротиворечиво описывала бы широкий круг

экспериментальных данных, и на ее основе получение оптимальных условий генерации и максимальных выходных характеристик ксенонового лазера с накачкой жестким ионизатором.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней построены первые подробные кинетические модели ЛЯИ на смесях инертных газов с молекулярными газами и установлены механизмы создания инверсии. Практическую ценность представляет получение оптимальных условий и параметров генерации указанных лазеров.

Впервые построена кинетическая модель He-Ar-Xe лазера с накачкой жестким ионизатором, которая непротиворечиво описывает широкий круг экспериментов по лазерам на смеси He-Ar-Xe при различных составах и способах возбуждения АС; модель позволяет описывать многоволновую генерацию на шести переходах в атоме ксенона. На основе модели определены максимальные возможности ЛЯИ на переходах ксенона и условия их реализации.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.

Результаты диссертации докладывались на конференции в Томске, на семинарах ИОФАНа и опубликованы в 9 печатных работах.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

На защиту выносятся подробные нестационарные кинетические модели лазеров с накачкой жестким ионизатором на смесях He-Ne-CCl₄ ($\lambda=1.59$ и 2.45 мкм); He-Ar-N₂-CO(CO₂)-O₂-H₂ ($\lambda=833.5, 859.4, 862.9, 904.6, 940.6$ нм); He-Ne-O₂-N₂-H₂-CO(NO) ($\lambda=2.65$ и 2.76 мкм); He-Ar-Xe ($\lambda=1.73, 2.03, 2.65, 2.63, 3.37, 3.51$ мкм). Анализ указанных кинетических моделей позволил сформулировать следующие утверждения.

1. В лазере на переходах атома Cl с $\lambda=1.59$ и 2.45 мкм в смеси He-Ne-CCl₄ с ростом парциального давления CCl₄ происходит смена механизма накачки верхнего рабочего уровня: тройная рекомбинация атомарных ионов

Cl^+ с электронами - диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов Cl_2^+ - диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов CCl_2^+ . В оптимальных условиях генерации основным каналом накачки является диссоциативная рекомбинация Cl_2^+ . Очистка нижних рабочих уровней - радиационная и столкновительная с участием атомов буферного газа.

2. В лазерах с ядерной накачкой высокого давления на переходах атомов C ($\lambda=940.6, 833.5$ нм), N ($\lambda=859.4, 862.9, 904.6$ нм) и O ($\lambda=2.65, 2.76$ мкм), в смесях инертных газов с молекулярными соответственно Ne- N_2 -CO(CO_2)- H_2 - O_2 и Ne-He- O_2 - N_2 -CO(CO_2)- H_2 -NO основным механизмом накачки верхних рабочих уровней является тройная рекомбинация атомарных ионов рабочих газов с электронами. Очистка нижних рабочих уровней - радиационная. При введении в смесь Ne- N_2 -CO(CO_2)- H_2 - O_2 добавок аргона основным каналом накачки лазера на переходах атома C становится диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов ArC^+ .

3. В лазере на ИК переходах атома ксенона в смесях высокого давления, возбуждаемых жестким ионизатором, основной механизм накачки верхних рабочих уровней зависит от состава среды: 1) в чистом ксеноне это диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов Xe_2^+ в сочетании с прямым возбуждением верхних рабочих уровней электронным ударом из $6r^56s'$ состояний ксенона.; 2) в смеси He-Xe - тройная рекомбинация атомарных ионов Xe^+ ; 3) в смеси (He)-Ar-Xe - диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов ArXe^+ в сочетании (как в чистом ксеноне) с прямым возбуждением верхних рабочих уровней электронным ударом из $6r^56s'$ состояний ксенона.

4. Существенную роль в повышении эффективности генерации ксенонового лазера с накачкой жестким ионизатором играет рециркуляция энергии в реакциях хемоионизации метастабильных и резонансных состояний и возбуждения верхнего рабочего уровня электронным ударом из состояний $6r^56s'$.

5. Ксеноновый лазер подвержен сильному влиянию температуры АС, что является следствием преимущественной столкновительной очистки нижних рабочих уровней и смещением (в смесях с Ar) равновесия с ростом температуры АС от образования ионов ArXe^+ в сторону образования ионов Xe_2^+ , которые преимущественно приводят к заселению нижних рабочих уровней.

ОБЪЕМ РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 168 наименований. Общий объем диссертации составляет 175 страниц машинописного текста включая 2 таблицы, 42 рисунка и приложение (25 стр.).

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА.

Все результаты диссертации получены лично автором либо при его непосредственном участии.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

Во введении обсуждаются актуальность рассмотренных задач, сформулирована цель диссертации, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе диссертации дан общий обзор достижений в области лазеров с ядерной накачкой (п.1.1). В п.1.2 приведен обзор экспериментальных и теоретических работ по лазерам на переходах атомов Cl, C, N и O, в п.1.3 рассмотрены работы по исследованию кинетики ксенонового лазера. О механизмах генерации в атомах Cl, C, N, O в литературе определенные данные отсутствуют, имеются лишь предположения, которые обсуждаются в п.1.2. В п.1.3 показано, что несмотря на богатый экспериментальный материал и многообразие существующих кинетических моделей АС ксенонового лазера, до

настоящего времени не сформировалось единой непротиворечивой точки зрения на механизмы накачки в нем. Здесь же обсуждаются недостатки и противоречия уже созданных моделей и предпосылки создания нашей модели Хе-лазера.

Во второй главе диссертации приводится подробная кинетическая модель ЛЯН в смеси высокого давления He-Ne-CCl₄ на переходах атома Cl с $\lambda=1.59$ и 2.45 мкм.

В п.2.1 приведено описание модели Cl-лазера. Модель учитывает 31 компоненту плазмы He-Ne-CCl₄ (атомарные и молекулярные ионы, возбужденные атомы), среди которых 9 возбужденных состояний атома хлора. Учитывалось перемешивание возбужденных состояний атома Cl электронами и атомами буферного газа. Отмечается важная роль свойства электроотрицательности хлорсодержащих молекул в формировании релаксационной картины.

Здесь же формулируются основные механизмы накачки в.р.у. для линий с $\lambda=1.59$ и 2.45 мкм в атоме хлора. Расчетным путем показано, что основными каналами накачки в.р.у. являются процессы тройной рекомбинации (т.р.) ионов Cl⁺ с электронами, диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов Cl₂⁺, CCl₂⁺ и ион-ионная рекомбинация возбужденного иона CCl₂⁺⁺ с отрицательным ионом Cl⁻.

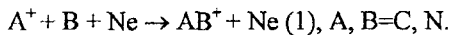
В п.2.2. приводятся сравнительные генерационные характеристики Cl лазера. Вклад каждого из процессов в накачку в.р.у. зависит от парциального давления CCl₄ в смеси. Этим определяется наличие оптимума на зависимостях мощности генерации и пороговой плотности потока нейтронов от парциального давления CCl₄. В оптимальных условиях генерации основным механизмом накачки в.р.у. является диссоциативная рекомбинация Cl₂⁺, в припороговой области - это ион-ионная рекомбинация молекулярных ионов CCl₂⁺⁺ с ионами Cl⁻.

В третьей главе диссертации приводятся подробные кинетические модели ЛЯН на смесях высокого давления Ne-Ar-CO(CO₂)-N₂-O₂-H₂ на переходах атомов С ($\lambda=940.6$ и 833.5 мкм) и N ($\lambda=859.6$, 862.9 , 904.6 нм) и Ne-Ne-O₂-CO(NO)-H₂ на переходах атома кислорода с $\lambda=2.65$ и 2.76 мкм.

В п.3.1. приведено описание кинетики АС указанных лазеров, которое включает перечисление учитываемых при моделировании компонент плазмы (атомарных и молекулярных ионов, возбужденных атомов, с учетом поуровневой кинетики в атомах рабочих газов), создаваемой в данных смесях жестким ионизатором, основных процессов релаксации энергии, и описание механизмов создания инверсии на рабочих переходах. Общими чертами генерации в рассматриваемых системах является то, что накачка в.р.у. происходит в процессах тройной рекомбинации (т.р.) атомарных ионов рабочих газов с электронами. Атомарные ионы во всех случаях образуются главным образом в результате реакций Пеннинга на метастабильных атомах буферных газов. Добавление в смесь неона с молекулярными газами примесей Ar приводит к перехвату релаксационного потока в приведенной в п.3.1 цепочке реакций с метастабилей Ne* к метастабильям Ar*. В присутствии аргона прекращается генерация на переходах атома N из-за исчезновения основного канала образования ионов N⁺ вследствие более низкой энергии возбуждения Ar* по сравнению с потенциалом ионизации N. На углеродных линиях повышаются генерационные характеристики по причине более слабых паразитных каналов исчезновения метастабильных состояний аргона по сравнению с Ne*. В смеси Ne-Ar с молекулярными газами к накачке в.р.у. в атоме С привлечен процесс диссоциативной рекомбинации молекулярного иона ArC⁺.

Тушение н.р.у. для всех рассматриваемых в главе переходов радиационная и столкновительная с участием электронов и атомов буферного газа.

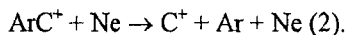
В п.3.2 приводятся расчетные и экспериментальные зависимости мощности излучения и пороговой плотности потока нейтронов на всех длинах волн от давления буферных газов и парциальных давлений молекулярных газов. Наличие оптимума на зависимостях мощности генерации на переходах атомов С и N от давления неона в смеси Ne-CO(CO₂)-N₂-O₂-H₂, также как и от парциального давления рабочего газа, обусловлено с одной стороны, ростом концентрации атомарных ионов рабочих газов в реакциях Пеннинга и с другой - ростом канала их исчезновения в реакциях конверсии:



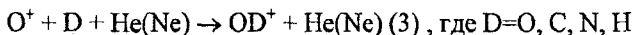
В уменьшении мощности генерации также играет роль увеличение ширины линии рабочего перехода с ростом давления неона.

Оптимум на зависимостях мощности генерации на переходах атома С от давления аргона в смеси Ne-Ar с молекулярными газами связан с конкуренцией процессов наработки ионов ArC⁺ и исчезновения Ar* в реакциях тройной ассоциации с участием атомов Ar и Ne.

Оптимум на зависимостях мощности генерации на переходах атома С от давления неона в смеси Ne-Ar с молекулярными газами определяется совокупностью процессов образования ионов ArC⁺ и разрушением их в реакции:



В смеси Ne-Ne-O₂-CO(NO)-H₂ оптимальные параметры генерации на переходах в атоме кислорода определяются суммой процессов образования атомарных ионов O⁺ в реакциях Пеннинга и перезарядки на компонентах неона и исчезновения ионов O⁺ в реакциях конверсии типа :



и перезарядки на молекулах NO₂, которые активно нарабатываются в данной смеси.

В смеси чистого неона с молекулярными газами генерация в кислороде отсутствует вследствие резкого уменьшения потока т.р. на в.р.у. из-за роста температуры электронов при замещении гелия на неон.

В п.3.3 для каждой из рассмотренных длин волн в данных смесях приводятся результаты полной численной оптимизации.

В четвертой главе представлена подробная многоволновая кинетическая модель He-Ar-Xe лазера на переходах с $\lambda=1.73, 2.03, 2.65, 2.63, 3.37, 3.51$ мкм.

В п.4.1 приведено описание модели. В смеси He-Ar-Xe рассматривалось 32 компонента плазмы: атомарные и молекулярные ионы, димеры He, Ar, Xe, метастабильные состояния атомов гелия и аргона. В том числе все возбужденные уровни атома ксенона, принадлежащие состояниям $5d, 6p, 6s$ и $6s'$. Поуровневая кинетика в модели плазмы He-Ar-Xe включает все радиационные переходы $5d - 6p, 6p - 6s, (6s, 6s') - Xe^1S_0$, перемешивание Xe^* атомами He, Ar и Xe и все возможные реакции внутри- и межмультиплетного электронного перемешивания. В модели учитывается ионизация электронами из всех рассматриваемых возбужденных состояний ксенона. Для излучения на переходах с метастабильного $1s_2(^3P_1)$ и резонансного $1s_4(^3P_1)$ уровней в основное состояние ксенона 1S_0 учитывалось влияние реабсорбции.

Помимо основной схемы He-Ar-Xe лазера модель содержит реакции с участием молекулярного и атомарного азота и кислорода, которые в реальных условиях всегда присутствуют в лазерной среде в качестве примесей.

Всего с учетом поуровневой кинетики и процессов с участием примесных газов модель содержит около 900 плазмохимических реакций.

Приводится описание механизмов создания инверсии в смеси He-Ar-Xe на переходах атома ксенона. Расчеты показали, что вклад того или иного процесса в накачку в.р.у. зависит от конкретных условий - состава и

давления смеси, соотношения компонент, мощности накачки. Рассматриваются отдельно случаи преобладания каждого процесса в создании инверсии, и обосновывается выбор процентных долей потоков каждой реакции, попадающих на в.р.у. В результате установлено, что в чистом ксеноне накачка в.р.у. происходит в процессе диссоциативной рекомбинации Xe_2^+ в сочетании с прямым возбуждением верхних рабочих уровней электронным ударом из br^56s' состояний ксенона; в смеси He-Xe - в ходе тройной рекомбинации ионов Xe^+ с электронами; причем доля потока этой реакции, попадающая на в.р.у., зависит от давления смеси; в смеси (He)-Ag-Xe - диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов AgXe^+ в сочетании (как в чистом ксеноне) с прямым возбуждением верхних рабочих уровней электронным ударом из br^56s' состояний ксенона.

Для смесей разного состава рассматриваются характерные черты формирования релаксационной картины.

Тушение нижних рабочих уровней атомами гелия, аргона и ксенона определяет величину инверсии на лазерных переходах и спектр генерации.

Для каждого состава смеси прослежено влияние электронов на населенности возбужденных уровней, которое определяется параметрами среды - температурой электронов, мощностью накачки.

В п.4.2. приводятся сравнительные расчетные и экспериментальные характеристики лазера на ИК переходах атома ксенона в смеси He-Ag-Xe в широком диапазоне параметров среды и накачки. Рассматривалась накачка миллисекундными, микросекундными, наносекундными ЭП и ядерная накачка.

Максимальная мощность генерации на длине волны 3.51 мкм в ЛЯН на чистом ксеноне достигается при давлении ксенона 0.3 атм. Спад мощности генерации при давлении выше 0.3 атм обусловлен ростом канала тушения ксеноном в.р.у. и уменьшением сечения индуцированного излучения. Значение пороговой плотности потока нейтронов F_t (передний фронт

импульса накачки) определяется тушением в.р.у. атомами ксенона, поэтому E_t растет с ростом давления ксенона.

В смеси He-Xe при накачке ЭП инверсия возникает на всех линиях 2.03, 1.73, 2.65 мкм, начинающихся с общего рабочего уровня $5d[3/2]_1^0$, усиление носит квазинепрерывный характер на каждом переходе. Инверсия на всех переходах обусловлена тушением н.р.у электронами. Генерация наблюдается только на более сильных оптических переходах с $\lambda=2.03$ и 2.65 мкм, максимальная энергия переносится в линии с $\lambda=2.03$ мкм, а генерация на линии с $\lambda=1.73$ мкм отсутствует. Это происходит вследствие того, что нижний уровень для перехода с $\lambda=2.03$ мкм обладает наименьшей населенностью из-за большой ($7.5 \cdot 10^{-11}$ см³/с) константы тушения гелием. Нижний для линии с $\lambda=1.73$ мкм уровень оказывается заселенным больше двух других н.р.у. вследствие слабого тушения гелием и активного перемешивания его электронами с состояниями $6s^2$.

Оптимум на зависимостях полной энергии излучения от относительного содержания ксенона в смеси He-Xe определяется уменьшением роли $6s$ состояний ксенона в образовании иона Xe^+ из-за роста канала потерь их в реакциях ассоциации, и переработкой Xe^+ в молекулярные ионы Xe_2^+ в реакциях конверсии, которые в основном накачивают н.р.у.

В смеси Ar-Xe при ядерной накачке от реактора ВИР-2 максимальный КПД 1.7 % и мощность 505 Вт достигаются при давлениях аргона 0.5 атм и ксенона 2 Торр. Максимальная мощность 530 Вт в расчете получена для давления аргона 0.75 атм.

При накачке ЭП микросекундной длительности с плотностью тока 1.7 А/см² с ростом давления смеси происходит рост значения полной энергии излучения и КПД АС. При давлении смеси 3.5 атм расчетные значения полной энергии излучения и КПД АС составили соответственно 42 Дж и 5.3 %.

Максимальное значение полной энергии излучения 43 Дж в расчете достигаются при содержании ксенона $\delta_{Xe} \approx 5 \cdot 10^{-3}$. При большей относительной концентрации ксенона начинается спад полной энергии. Это происходит вследствие уменьшения потока д.р. ионов $AgXe^+$ на в.р.у. и роста канала образования ионов Xe_2^+ , которые в большей степени накачивают н.р.у. Другой причиной ухудшения генерации является увеличение тушения в.р.у. атомами ксенона. Переходы с $\lambda=1.73, 2.03, 2.65$ мкм и $2.63, 3.37$ мкм имеют соответственно общие в.р.у. Поэтому в условиях многоволновой генерации наблюдался как в эксперименте, так и в расчете эффект конкуренции линий. Генерация на переходах с $\lambda=1.73$ и 2.63 мкм носит квазинепрерывный характер, на остальных линиях - на фронтах импульса накачки. Это различие в поведении разных линий связано с различием в величинах сечений индуцированных переходов и скоростей тушения н.р.у. атомами аргона и ксенона. Линии с $\lambda=2.03$ и 2.65 мкм вследствие большой вероятности перехода имеют меньший порог генерации, чем $\lambda=1.73$ мкм, поэтому генерация на них развивается с меньшей задержкой. По мере заселения н.р.у. вследствие индуцированных переходов и радиационно-столкновительного каскада мощность на $\lambda=2.03$ и 2.65 мкм срывается, а на $\lambda=1.73$ мкм растет, т.к. н.р.у. для этого перехода сильнее тушится аргоном. Генерация на 2.03 и 2.65 мкм возникает снова на заднем фронте импульса накачки, когда заселенности н.р.у. снова малы.

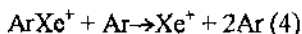
При увеличении величины плотности тока пучка до значения $j=10$ А/см² происходило значительное уменьшение эффективности генерации в смеси Ag-Xe. Сильное тушение электронами в.р.у. и перемешивание н.р.у. с $6s'$ состояниями ксенона приводит при давлениях 1-2 атм к низкому КПД генерации и «двугорбой» форме импульса генерации с провалом, соответствующим максимуму импульса накачки. Повышение давления смеси до 3 атм приводит к росту КПД и сглаживанию импульса генерации.

Уже при небольшом добавлении аргона в смесь He-Xe энергия излучения существенно растет из-за увеличения энерговклада в среду и включения в процесс накачки в.р.у. канала д.р. иона $AgXe^+$. С увеличением содержания аргона в смеси энергия генерации растет. Вплоть до значения $\delta_{Ar}=0.7$ в спектре преобладает линия с $\lambda=2.03$ мкм, с дальнейшим добавлением аргона в смесь спектр перестраивается - появляется генерация на $\lambda=1.73$ мкм и в меньшей мере на $\lambda=2.63$ мкм. При $\delta_{Ar}\approx 0.8$ генерация на линии с $\lambda=2.03$ мкм прекращается, и 90% энергии высвечивается на длине волны 1.73 мкм.

Доминирование той или другой линии в спектре генерации в смеси He-Ar-Xe зависит от относительной доли аргона в смеси, т.к. на соотношение населенностей для швнжих уровней разных переходов влияет величина, равная отношению суммарных скоростей расщеления н.р.у. в реакциях тушения атомами гелия и аргона $k_{He}*[He] + k_{Ar}*[Ar]$ (k_{He} , k_{Ar} - константы скоростей тушения н.р.у. гелием и аргоном).

П.4.3. посвящен влиянию температуры среды на генерационные характеристики ЛЯН. Анализ результатов по генерации в чистом ксеноне позволил сделать вывод, что нагрев среды в течение импульса накачки приводит к снижению максимальных энергетических параметров и обрыву генерации раньше окончания импульса накачки. Срыв инверсии на рабочем переходе происходит вследствие более медленного уменьшения концентрации н.р.у. (по сравнению с концентрацией в.р.у.) из-за роста константы скорости его заселения из $6s'$ состояний атомами ксенона со временем. С увеличением давления ксенона температура газа уменьшается, что приводит к смещению импульса генерации в область больших времен.

В смеси (He)-Ar-Xe при ядерной накачке ухудшение параметров генерации происходит, помимо описанной выше причины, вследствие сильной (экспоненциальной) зависимости скорости развала иона $AgXe^+$ в реакции :



от температуры газа. Поток реакции д.р. ионов ArXe^+ , которая для условий эксперимента является основным механизмом накачки в.р.у., быстро уменьшается. Равновесие смещается в сторону образования Xe^+ , а затем Xe_2^+ , который в большей степени заселяет н.р.у.

В п.4.4 приведены результаты полной оптимизации ЛЯН в смеси Ar-Xe на длине волны 1.73 мкм для реактора ВПР-2М (длительность импульса накачки ~8 мс).

Оценены максимальные возможности ЛЯН при накачке коротким импульсом нейтронов (около 500 мкс) и при квазистационарной накачке (~1 с).

Заключение содержит основные результаты данной диссертации.

1. В ЛЯН на переходах атома Cl в смеси He-Ne- CCl_4 механизм накачки в.р.у. зависит от парциального давления рабочего газа и мощности накачки. В оптимальных условиях генерации основным механизмом накачки является д.р. молекулярных ионов CCl_2^+ . При малых концентрациях CCl_4 (менее 7 мТорр) накачка в.р.у. происходит в процессе т.р. ионов Cl^+ с электронами, а при давлении CCl_4 (свыше 100 мТорр) - преимущественно за счет диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов CCl_2^+ . При малых (вблизи порога) мощностях накачки заселение в.р.у. определяется ион-ионной рекомбинацией ионов CCl_2^{+*} и Cl^+ .

2. Приведены результаты полной оптимизации на длинах волн 1.59 и 2.45 мкм атома Cl.

3. Основными механизмами накачки в.р.у. на переходах атомов C, N, O в смесях He- N_2 -CO(CO_2)- H_2 - O_2 и He-Ne- O_2 - N_2 - H_2 является т.р. атомарных ионов C, N, O с электронами. В смеси He- O_2 - N_2 - H_2 в накачке в.р.у. в атоме O участвует процесс диссоциативного возбуждения. В смеси He-Ar- N_2 -CO(CO_2)- H_2 - O_2 основным каналом накачки в.р.у. атома C становится д.р.

молекулярного иона ArC^+ . Очистка н.р.у. для всех переходов в основном радиационная.

4. Рассчитаны оптимальные характеристики генерации в указанных смесях ЛЯИ на всех переходах в атомах С, N, O.

5. На основе численного моделирования лазера на ИК переходах атома ксенона в смеси He-Ar-Xe установлено, что основными механизмами накачки в.р.у. ИК переходов атома Xe являются :

- в смеси He-Xe тройная рекомбинация ионов Xe^+ с электронами причем доля потока этой реакции, попадающая на в.р.у, зависит от давления смеси;

- в чистом Xe диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов Xe_2^+ с электронами;

- в смеси (He)-Ar-Xe диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов ArXe^+ с электронами и возбуждение из $6s'$ состояний ксенона электронным ударом.

6. Вклад каждого из механизмов в накачку в.р.у. зависит от конкретных условий работы лазера - давление смеси, соотношение компонент, мощности накачки.

7. Метастабильные и резонансные $6s$ и $6s'$ состояния ксенона играют важную роль в рециркуляции энергии в реакциях хемоионизации в смеси He-Xe и возбуждения в.р.у. электронами в смеси (He)-Ar-Xe.

8. Константа скорости реакции трехчастичной конверсии ионов Xe^+ с атомами ксенона и гелия оказалась равной $2 \cdot 10^{-32} \text{ см}^6/\text{с}$, что в несколько раз меньше принятых ранее значений.

9. Нагрев среды при миллисекундных импульсах накачки снижает мощность и КПД лазера и приводит к срыву генерации до окончания импульса накачки. Это происходит вследствие преимущественной столкновительной очистки нижних рабочих уровней и смещения равновесия в цепочке реакций образования-развала иона ArXe^+ и наработки ионов Xe_2^+ в

сторону образования Xe_2^+ , которые приводят к преимущественному заселению н.р.у.

10. При накачке Ag-Xe смеси импульсом тепловых нейтронов от реактора ВИР-2М максимальный КПД генерации 1.8 % на линии с $\lambda=1.73$ мкм достигается при условиях: давление смеси 0.5 атм, давление ксенона 2 Торр, плотность потока нейтронов $1.5 \cdot 10^{15}$ см⁻²с⁻¹, коэффициент пропускания зеркал резонатора T=10 % (длина активной области 200 см).

11. В ЛЯИ на смеси Ag-Xe при плотности потока нейтронов на уровне $2 \cdot 3 \cdot 10^{16}$ см⁻²с⁻¹ возможно достижение КПД до 3 % при накачке коротким импульсом (~500 мкс) и до 3.5 % при квазистационарной накачке (~1 с) при осуществлении эффективного охлаждения лазерной среды.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетика активной среды лазера с ядерной накачкой на ИК переходах атома хлора. //Квантовая электроника. 1997. Т. 24, № 11. С. 993-997.
2. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетика активных сред лазеров с ядерной накачкой на переходах атомов углерода и азота. //Квантовая электроника. 1998. Т. 25, № 4. С. 319-323.
3. Карелин А.В., Симакова О.В. О механизме генерации в лазере с ядерной накачкой на ИК-переходах атома хлора. //Краткие сообщения по физике. 1997. № 7-8. С. 10-15.
4. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетическая модель ИК-лазера с ядерной накачкой в смеси He-Ne-CCl₄ на атомарных переходах хлора. //Оптика атмосферы и океана, 1998. Т. 11, № 2-3. С. 110-115.
5. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетическая модель лазера с ядерной накачкой на переходах атома хлора. Препринт ИОФАН №6, 1997, 47 с.
6. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетика активной среды лазера с ядерной накачкой на переходах атомов углерода и азота. Препринт ИОФАН № 9, 1997, 48 с.

7. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетика активной среды лазера с ядерной накачкой на переходах атома кислорода. Препринт ИОФАН № 2, 1998, 26 с.
8. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетика активной среды лазера с ядерной накачкой на переходах атома кислорода. //Квантовая электроника, 1998, т. 25, №3, с. 779-782.
9. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетика активной среды лазера на ИК переходах атома ксенона в смеси Ne-Ar-Xe с накачкой жестким ионизатором. Препринт ИОФАН № 9, 1998.



Подписано в печать 21 сентября 1998 года.

Формат 60x84/16. Заказ № 190 Тираж 85 экз. П.л. 1,0. Авт.л. 1,0

Отпечатано в РИИС ФИАН. Москва, В-333, Ленинский проспект, 53

Тел.: 132 5128, 132 6137, 132 6839, 132 6298