

На правах рукописи

Бельская Екатерина Викторовна

**Разряды, генерирующие электронные пучки с
высокой эффективностью, и возбуждение ими
газовых лазеров**

01.04.04 " Физическая электроника "

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск—2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики
полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

Научный руководитель доктор физико-математических наук
Бохан Петр Артемович

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор
Казарян Мишик Айразатович

доктор физико-математических наук
Ражев Александр Михайлович

Ведущая организация Институт электрофизики
Уральского отделения
Российской академии наук

Защита состоится " __ " _____ 2011 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Учреждении Российской академии наук Институте автоматизации и электротехники СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института автоматизации и электротехники СО РАН.

Автореферат разослан " __ " _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Насыров К.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Световые источники и лазеры используются в самых различных областях: обработке материалов, медицине, обработке и передаче информации, физических, химических и биологических исследованиях. Среди других лазеры на парах металлов обладают рядом привлекательных выходных параметров (дифракционное качество пучка, высокие средние и импульсные мощности). Наивысшее КПД генерации лазерного излучения при широко используемом газоразрядном возбуждении наиболее эффективных лазеров составляет 1.5–3%.

Одним из вариантов дальнейшего увеличения энергетических параметров лазерной генерации и расширения набора активных сред, рабочих переходов и механизмов создания инверсии является применение электронно-пучкового возбуждения активной среды лазера [1, 2]. Согласно модельным экспериментам и теоретическим расчетам использование электронно-пучковой накачки может привести к погонной мощности генерации до 10 kW/m [3] (лазеры на парах *Cu* и *Mn*), что является наивысшей величиной для любых газовых лазеров, работающих без режима быстрой смены рабочей среды.

В последнее время наблюдается существенный прогресс в методах генерации пучков заряженных частиц. Для возбуждения газовых лазеров перспективно применение низковольтных (3...5) kV электронных пучков, генерируемых непосредственно в активных объемах (внутри газовой среды). Это позволяет вводить его в активную среду лазера без использования дополнительных устройств типа разделительной фольги и газодинамических окон.

Таким образом, можно говорить о том, что, во-первых, задача дальнейшего улучшения параметров газовых лазеров, увеличения их мощности, эффективности генерации, расширения круга рабочих сред, переходов и процессов является актуальной; во-вторых, существуют методы её решения — это реализация и исследование электронно-пучкового возбуждения активных сред лазеров.

Цель работы

Исследование газовых разрядов, генерирующих электронный пучок с высокой эффективностью, и их применение для создания когерентных и некогерентных источников излучения.

Решаемые задачи

1. Реализация и исследование различных типов разрядов с преобладающей ролью фотоэмиссии, перспективных для генерации электронных пучков с энергией 0.3...10 keV: открытый разряд, открытый разряд с катодной полостью, широкоапертурный тлеющий разряд.

2. Исследование физики и параметров генерации электронного пучка в широкоапертурном тлеющем разряде с сетчатым анодом.

3. Получение и исследование лазерной генерации на средах с различными механизмами создания инверсии при накачке электронным пучком, генерируемым в фотоэмиссионных разрядах.

4. Моделирование и экспериментальное исследование гелиевого лазера, накачиваемого электронным пучком, генерируемым в открытом разряде.

5. Моделирование и экспериментальное исследование возможности перевода генерации на самоограниченном переходе гелия в столкновительный режим.

Научная новизна

1. Впервые осуществлен перевод генерации излучения на самоограниченном лазерном переходе в столкновительный режим с использованием двух универсальных механизмов девозбуждения нижнего метастабильного состояния: в столкновениях с электронами и молекулами.

2. Исследован новый тип разряда — широкоапертурный тлеющий разряд с преобладанием фотоэмиссии, генерирующий электронный пучок с высокой эффективностью в простой геометрии.

3. Рассчитано распределение потенциала в ускорительном зазоре импульсного открытого разряда.

4. Измерены с указанием точности константы скоростей девозбуждения состояния $He(2^1S_0)$ молекулами H_2O , NH_3 , N_2O , CO_2 . Для H_2O данные были получены впервые.

5. При возбуждении электронным пучком получена генерация на новых линиях иона таллия: $1.92 \mu m$, $1.395 \mu m$ в смеси $Ne - Tl$.

Публикации

Автор имеет 1 патент и 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 7, работ, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 7.

Практическая значимость

1. Показано, что широкоапертурный тлеющий разряд позволяет генерировать электронный пучок с эффективностью $\eta \approx 100\%$ в непрерывном и квазинепрерывном режимах при давлениях газа единицы Торг в кювете простой геометрии. Широкоапертурный тлеющий разряд можно использовать в качестве перспективного источника электронного пучка.

2. Созданы высокотемпературные лазерные кюветы цилиндрической геометрии с большой апертурой с электронно-пучковым возбуждением. Результаты исследования демонстрируют масштабируемость разрядов, определяющих конструк-

цию кювет и используемых в качестве источника электронного пучка: открытого разряда и открытого разряда с катодной полостью. Показано, что использование электронного пучка эффективно для возбуждения лазеров с различными механизмами создания инверсии и позволяет получать новые линии генерации.

3. Осуществлено возбуждение газовых сред в режиме регулярных импульсов с высокими частотами следования в кюветах большого объема, что демонстрирует возможность реализации газовых лазеров большой мощности.

Защищаемые положения

1. В открытом разряде в импульсном режиме (длительность импульса < 100 ns) генерируемый электронный пучок практически моноэнергетичен с энергией, равной приложенному на катод напряжению. Моноэнергетичность обусловлена бесстолкновительным ускорением электронов в области катодного падения потенциала, составляющей малую часть ($< 20\%$) величины ускорительного зазора катод — сетчатый анод.

2. В широкоапертурном тлеющем разряде с преобладанием фотоэмиссии существуют условия функционирования, характеризующиеся генерацией электронного пучка с близкой к единице эффективностью при падающей ВАХ.

3. В широкоапертурном тлеющем разряде в гелии основной вклад в фотоэмиссию вносит излучение с резонансного уровня, возбужденного во вторичных процессах: через ступенчатое возбуждение с нижних уровней и рекомбинационное заселение с верхних уровней.

4. При электронно-пучковом возбуждении комбинированный механизм девозбуждения нижнего метастабильного состояния в столкновениях с электронами и молекулами приводит к переводу генерации излучения на самоограниченном лазерном переходе в квазинепрерывный столкновительный режим.

Личный вклад автора

Основные результаты получены автором лично. Е.В. Бельская принимала активное участие в постановке задач, обсуждении результатов, подготовке статей. Из печатных работ, опубликованных диссертантом в соавторстве, в диссертацию вошли только те результаты, в получении которых она приняла непосредственное участие на всех этапах: от постановки задач и теоретического анализа до проведения экспериментов.

Апробация работы

Результаты были доложены на всероссийских симпозиумах "Лазеры на парах металлов" (Сочи, 2006, 2008, 2010), VII, IX и X международных конференциях "Atomic and molecular pulsed lasers" (Tomsk, 2007, 2009, 2011), молодежных конкурсах - конференциях "Фотоника и оптические технологии" (Новосибирск, 2008, 2010,

2011), международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2006).

Структура диссертации состоит из введения, шести глав и заключения. Диссертация изложена на 127 страницах, включает 55 рисунков, 8 таблиц и список цитируемой литературы из 142 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы работы, сформулированы ее цель и задачи, определены объекты исследования. Показаны научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, описаны апробация работы, личный вклад автора, раскрыта структура работы, дана краткая характеристика каждой главы.

Первая глава носит обзорный характер. Описываются различные способы возбуждения активной среды газовых лазеров и указывается на преимущество электронно-пучковой накачки в импульсно-периодическом режиме по сравнению с газоразрядным способом возбуждения. Описываются условия генерации электронного пучка в газах и его параметры в различных типах разрядов, используемых для накачки лазеров: аномальный тлеющий разряд с холодным катодом, разряд с катодной полостью, открытый разряд.

Открытый разряд реализуется в малом ускорительном зазоре между катодом и сетчатым анодом с дрейфовым пространством за анодом. Геометрические характеристики кюветы: расстояние между катодом и анодом $l=1..3\text{ mm}$, $l > l_n$, где l_n — длина катодного падения потенциала (КПП) в нормальном тлеющем разряде, размер ячейки анодной сетки $\delta < l$, прозрачность сетки больше 85% (в оптимальном варианте $l \gg l_n$, $\delta \ll l$). При выполнении условия убегания электронов $E \gg E_{Dr}$ электроны, эмитированные с катода, ускоряются в разрядном промежутке, ионизуют и возбуждают газ в области без поля за сетчатым анодом. Открытый разряд в импульсном режиме (длительность импульсов $< 50\text{ ns}$) может генерировать электронный пучок с эффективностью, близкой к 100%, тогда как эффективность генерации пучка электронов в аномальном тлеющем разряде составляет 50 — 70% при экстремальных условиях возбуждения. Это обусловлено различием в основных механизмах эмиссии электронов с катода: в открытом разряде преобладает фотоэмиссия, а в обычном аномальном тлеющем — эмиссия электронов в результате бомбардировки катода тяжелыми частицами.

Во второй главе описываются разновидности тлеющего разряда в газах, генерирующего электронный пучок с высокой эффективностью.

В 2.1. описаны аппаратура регистрации и необходимые предварительные про-

цедуры по подготовке кювет, предшествующие эксперименту.

В разделе 2.2 представлено численное моделирование распределения потенциала и напряженности поля в ускорительном зазоре импульсного наносекундного открытого разряда, приведенное на рис. 1. Величины потенциала на катоде и тока разряда взяты из экспериментальных осциллограмм.

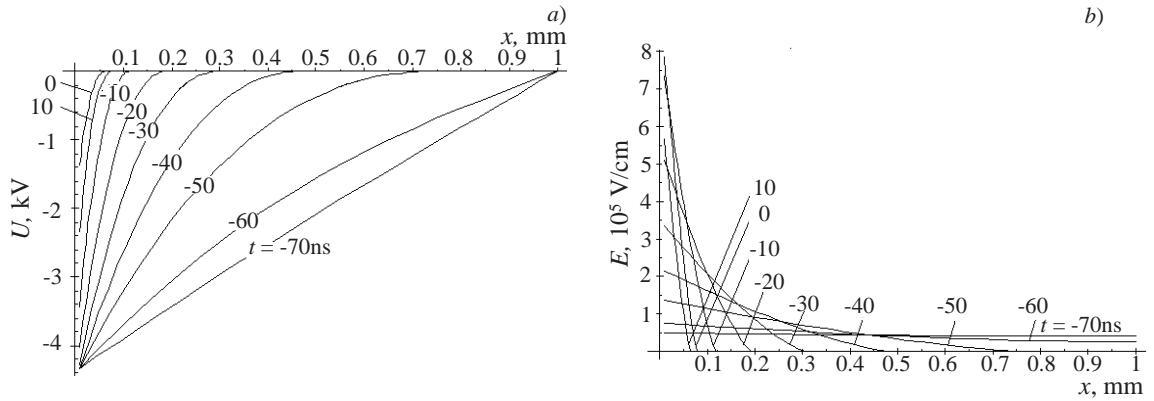


Рис. 1. Распределение потенциала $U(x, t)$ (a) и напряженности электрического поля $E(x, t)$ (b) в ускорительном зазоре лазера; $x = 0$ соответствует местоположению катода, $x = 1 \text{ mm}$ — местоположению сетчатого анода; $t = 0$ — момент максимума тока; длительность тока на полувысоте — 20 ns

Было получено, что на протяжении импульса тока электрическое поле концентрируется в узкой прикатодной области, составляющей $l_p \simeq 0.1 \dots 0.2l$, что согласуется с проведенными ранее зондовыми измерениями распределения потенциала в ускорительном зазоре открытого разряда. Поскольку длина области КПП l_p мала, а напряженность электрического поля велика, то, во-первых, электроны ускоряются практически без столкновений; во-вторых, размножение электронов в области КПП незначительно и нет источника ионов; в-третьих, ионы, создаваемые вне области КПП, не успевают достичь катода в течение разрядного импульса. Поэтому самоподдерживание разряда осуществляется главным образом за счет фотоэмиссии. Полученная большая величина напряженности поля на катоде при максимальной амплитуде тока приводит к тому, что пучок электронов в каждый момент времени моноэнергетичен с энергией, равной $eU(t)$, e — заряд электрона, $U(t)$ — напряжение на катоде.

Особенностью реализованных лазерных кювет с открытым разрядом является использование катодов из SiC , что позволило увеличить диапазон рабочих напряжений и давлений, поскольку объемное сопротивление материала уменьшает возникновение катодных неустойчивостей, приводящих к искрообразованию. При

длительных сроках эксплуатации (более 1000 часов работы) отсутствует распыление катода, что свидетельствует о долговечности разрядных кювет с открытым разрядом.

Раздел 2.3. посвящен открытому разряду с катодной полостью. В этом разряде катод и анод разделены диэлектрической вставкой с отверстием, расположенной на расстоянии 1 mm от катода, тем самым образуется катодная полость. Анод при этом может располагаться непосредственно за диэлектрической вставкой, либо вне ее. Диэлектрическая вставка создает сильно неоднородное поле у катода [4], при движении в котором ионы тратят энергию в основном в упругих соударениях ($\sim 75\%$) и на возбуждение резонансного состояния (25%). Ионы достигают катод в процессе амбиполярной диффузии, не переносящей ток. В результате реализуется преимущественно фотоэлектронный механизм эмиссии электронов под действием ВУФ-излучения из разряда, что объясняет получение практически 100% эффективности генерации электронного пучка.

В работах [4, 5] в тестовых ячейках с плоскими электродами малого диаметра и коллектором электронов были исследованы свойства электронного пучка в открытом разряде с катодной полостью. В данной работе разряд реализован в цилиндрической геометрии и исследована возможность получения лазерной генерации при электронно-пучковом возбуждении. Экспериментально показано, что открытый разряд с катодной полостью устойчиво функционирует в каждой катодной полости независимо от их количества и формы. Соответственно, значительное увеличение площади катода (от $S=2.5\text{ cm}^2$ в работе [5] до $S=2500\text{ cm}^2$ в настоящей работе) и использование щелевых цилиндрических отверстий в катодной полости вместо круглых не приводит к потере стабильности разряда. Полученная в исследуемой цилиндрической кювете (диаметр катода $D=8.4\text{ cm}$, длина $L=110\text{ cm}$) плотность тока близка к реализованной в ячейке с диаметром плоского катода 1.8 cm [5]. Этот факт указывает на масштабируемость открытого разряда с катодной полостью.

В разделе 2.4. исследуется широкоапертурный тлеющий разряд. Ранее было продемонстрировано, что эффективность генерации электронного пучка возрастает при увеличении диаметра катода и, соответственно, объема разряда (расстояние катод-анод сохранялось) [6]. В настоящей работе реализован и изучен разряд в плоской геометрии при диаметре круглого катода $d = 20\text{ cm}$. Геометрически широкоапертурный тлеющий разряд отличается от открытого большей длиной разрядного промежутка $l = 3\text{ cm}$, при этом появляется требование большой апертуры катода с тем, чтобы выполнялось условие $d \gg l > l_n$ либо $l \gg l_n$ (в эксперименте $d = 6.5l$), необходимость высокой прозрачности сетки сохраняется, а неравенство

$\delta \ll l$ выполняется легче.

В тестовой кювете были измерены ВАХ разряда, эффективность генерации электронного пучка η как в непрерывном, так и в импульсном режимах в гелии. Основные особенности разряда (рис. 2): повышенная η , в том числе в непрерывном режиме; наличие перегибов в вольт-амперной характеристике, включая существование падающего участка; немонотонность величины $\eta(U)$ (наличие диапазона, где η падает при увеличении напряжения на катоде U), её рост при увеличении давления гелия. В непрерывном режиме $\eta \approx 100\%$ уже при $U \geq 300$ V. Особенности разряда объясняются его фотоэмиссионной природой.

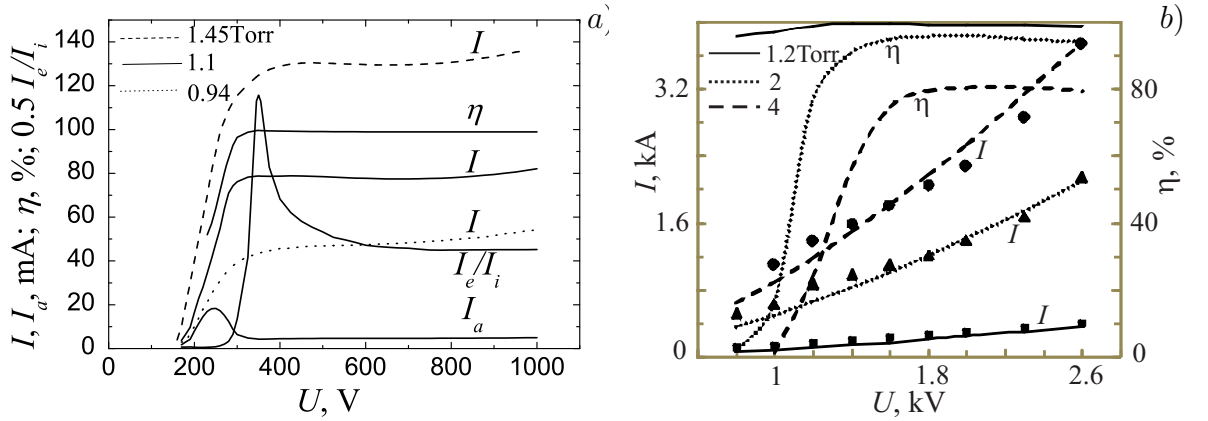


Рис. 2. Зависимости от напряжения U тока разряда I , эффективности генерации электронного пучка η , анодного тока I_a , отношения тока пучка электронов к току ионов I_e/I_i при различных p_{He} в непрерывном (a) и импульсном (b) (длительность импульсов 15...30 μs) режимах

Показано, что основной вклад в фотоэмиссию вносит излучение с резонансного состояния, возбужденного во вторичных процессах за счет рекомбинационного заселения с верхних уровней и ступенчатого возбуждения с нижних. Этот результат свидетельствует о том, что в непрерывном режиме в кюветах с малым диаметром катода, где велика скорость тушения метастабильных атомов в столкновениях со стенкой, а ионов за счет амбиполярной диффузии, фотоэмиссия не может обеспечить самоподдерживание разряда.

Третья глава посвящена исследованию импульсной генерации $\text{He}(2^1P_1^0 - 2^1S_1)$ с $\lambda = 2.058 \mu\text{m}$ при поперечном возбуждении электронным пучком, генерируемым в открытом разряде. Генерация на переходе атома гелия интересна тем, что, во-первых, является трудно реализуемой в газовом тлеющем разряде, во-вторых, гелий является удобным физическим инструментом исследования, поскольку для него существует большой набор данных по константам и сечениям элементарных

процессов с участием электронов и тяжелых частиц.

В разделе 3.1. представлены результаты экспериментального исследования лазерной генерации в смеси гелий — азот. Параметры лазера были измерены в режиме как генерации, так и насыщенного усиления, при котором излучение задающего генератора сжималось телескопом до диаметра 5 mm и направлялось в кювету — усилитель мощности. На рис. 3 при $p_{He} = 16$ Torr и $p_{N_2} = 0.15$ Torr показаны зависимости амплитуды тока I_{max} через ускорительный зазор, приведенной мощности излучения P_{las} и эффективности генерации излучения по отношению к запасаемой в обострительной емкости энергии η_{las} от амплитуды ускоряющего напряжения на катоде U_{max} (длительность импульса тока на полувысоте 20 ns).

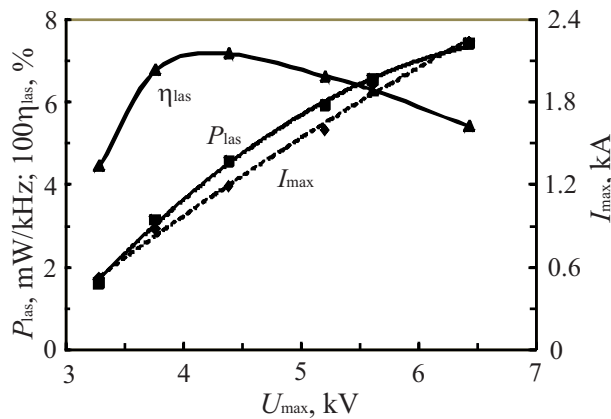


Рис. 3. Зависимости тока разряда I , мощности излучения P_{las} и эффективности генерации излучения η_{las} от амплитуды напряжения на катоде U_{max}

деляемой параметрами источника питания, поэтому генерацию при электронном возбуждении удобно характеризовать приведенной величиной mW/kHz.

В разделе 3.2. проводится расчет населенностей рабочих уровней и энергетических характеристик лазера. Величина мощности генерации излучения, вычисленная при тех же параметрах разряда, при которых получили наибольшую мощность в эксперименте, составила $P_{teor} = 19.4$ mW/kHz. Сравнение радиальных распределений плотности мощности излучения в режимах генерации и усиления показывают, что даже на оси лазерной кюветы в режиме генерации снимается не вся инверсия населенностей — периферийная часть кюветы работает только в режиме усиления, что объясняется большим усилением в среде и, соответственно, потерей мощности в неаксиальных лучах.

В разделе 3.3. приведены результаты экспериментов со сдвоенными импульса-

В эксперименте при $p_{He} = 16$ Torr, $p_{N_2} = 0.15$ Torr, $U_{max} = 4.4$ kV, $I_{max} = 1.2$ kA получена мощность излучения $P_{las} = 4.5$ mW/kHz. Мощность излучения, вычисленная в соответствии с ее измеренным радиальным распределением в режиме насыщенного усиления, равна $P_{las}^{max} = 35.6$ mW/kHz. Эффективность генерации излучения по вложенной энергии составила 16% от квантовой эффективности рабочего перехода. Энергия генерации лазерного излучения в импульсе не уменьшалась вплоть до частоты следования импульсов накачки 10 kHz, опре-

ми в чистом гелии и в смесях гелия с молекулярными примесями с целью определения предельных возможностей He -лазера. Генерация во втором импульсе в чистом гелии возникает через $\Delta t_{min} \approx 1.25 \mu s$ и полностью восстанавливается к $5 \mu s$, что позволяет увеличить частоту в гелии вплоть до 200 kHz без падения энергии в импульсе.

Исследовались смеси гелия с H_2 , N_2 , O_2 , N_2O , H_2O , NH_3 , CO_2 . Уже небольшие их добавки приводят к сокращению времени как появления генерации во втором импульсе Δt_{min} , так и времени полного восстановления генерации. В смесях с димерами вплоть до предельного давления примеси, при котором генерация еще сохраняется, Δt_{min} находится на уровне 650 ns (в случае $He + H_2$). Для CO_2 и N_2O $\Delta t_{min} = 150$ ns. Наименьшая величина Δt_{min} реализуется в смесях с NH_3 (60 ns) и H_2O , причем в последнем случае импульсы генерации могут сливаться.

В четвертой главе описаны методика и анализ возможных ошибок измерения констант девозбуждения уровня $He(2^1S_1)$ в столкновениях с молекулами. Необходимость в данных экспериментах возникла из-за того, что, во-первых, известна только одна оригинальная статья по измерениям косвенным способом констант тушения состояния $He(2^1S_1)$ сложными молекулами без указания точности. Данные, полученные в этой работе по двухатомным молекулам, отличаются от данных пучковых экспериментов до 3-х раз. Во-вторых, данные о константах необходимы для анализа результатов исследования генерации в смесях гелия с молекулярными примесями, а именно, для обоснования механизма получения квазинепрерывной генерации на самоограниченном переходе гелия.

В разделе 4.1. описана методика измерения. В качестве метода регистрации населенностей метастабильного состояния (МС) был выбран метод поглощения лазерного излучения на переходе $He(2^1P_1^0 - 2^1S_1)$ с $\lambda = 2.056 \mu m$. Проанализированы ограничения на параметры источника пробного излучения и населенность МС, возникающие при данном методе регистрации. Показано, что для случая использования лазерного излучения в качестве пробного, отличие измеряемых параметров от тех же величин при монохроматичном сигнале не превышает 4%.

В разделе 4.2. показаны результаты измерений констант девозбуждения уровня $He(2^1S_1)$ в столкновениях с молекулами H_2O , NH_3 , N_2O , CO_2 .

В разделе 4.3. проведен анализ возможных ошибок измерения методом поглощения. Определено влияние на точность измерения других каналов девозбуждения МС, рекомбинационного заселения, продуктов реакций взаимодействия электронов и МС гелия с молекулой воды.

Пятая глава посвящена получению и исследованию столкновительного режима генерации на самоограниченном переходе $He(2^1P_1^0 - 2^1S_1)$.

В разделе 5.1. приведен расчет длительности генерации на переходе $He(2^1P_1^0 - 2^1S_1)$ с учетом различных механизмов девозбуждения рабочих уровней. Генерация на самоограниченном переходе в приближении насыщенной мощности прекращается при выравнивании скоростей заселения рабочих состояний, т.е. $\dot{n}_r/g_r = \dot{n}_m/g_m$, где n_r, n_m, g_r, g_m — населенности и статистические веса состояний $He(2^1P_1^0)$ (r) и $He(2^1S_1)$ (m) соответственно. Система кинетических уравнений, описывающих ионизацию и заселение резонансных и метастабильного состояний атомов гелия в осевой области трубки, включая каскадные переходы имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{n}_i &= n_0\nu_i F, \\ \dot{n}_k &= n_0\nu_k F - n_k A_{km}, \\ \dot{n}_r &= n_0\nu_r F - n_r A_\Sigma, \\ \dot{n}_m &= n_0\nu_m F + n_r A_{rm} + \sum_{k=3}^5 n_k A_{km} - n_m A_m, \end{aligned} \quad (1)$$

где n_0, n_k ($k=3,4,5$) — населенности основного и $k^1P_1^0$ состояний; n_i — концентрация ионов; A_{km} — вероятности переходов $He(k^1P_1^0 - 2^1S_0)$; $A_\Sigma = A_{rm} + A_r + A_{col}$; $A_r = 0.238A_0\sqrt{\lambda_0/r} = 0.65 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ — вероятность выхода резонансного излучения из центра трубки ($r=2.5 \text{ см}$); $A_0 = 1.8 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ — вероятность перехода $2^1P_1^0 - 1^1S_0$ с $\lambda_0 = 58.3 \text{ нм}$; F — скорость накачки в актах в расчете на один атом He ; $\nu_{m,k,r}$ — относительные частоты возбуждения состояний электронным пучком; $A_{col} = A_{mol}^r + k_e^r n_e^{pl}$ и $A_m = A_{mol}^m + k_e^m n_e^{pl}$ — вероятности безизлучательных переходов; $A_{mol}^{r,m}$ — скорости девозбуждения уровней в столкновениях с молекулами, $k_e^{r,m}$ — константы электронного девозбуждения уровней, n_e^{pl} — концентрация плазменных электронов. Поскольку плазма нейтральна, то $n_e^{pl} = n_i$. Начальными условиями полагаем $n_l(t=0) = 0, l = i, m, k, r$. Схема уровней гелия и процессов, участвующих в расчете, приведена на рис. 4.

Вычисленная максимальная длительность импульса генерации в гелии при линейном нарастании во времени импульса накачки ($F = F_0 t$) и $A_m = 0$ равна $\tau_{max} = 50 \text{ пс}$, что совпадает с экспериментом. При электронном девозбуждении рабочих состояний существует такая величина концентрации плазменных электронов n_e^{pl} , при которой реализуется $\tau_{max} \rightarrow \infty$ (рис. 5), т.е. квазинепрерывный режим генерации. В случае $F = F_0 t$ длительность генерации стремится к бесконечности при $n_e^{pl} = 3.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (кривая 1), в случае прямоугольного импульса накачки $F = F_0$ (кривая 2) — при $n_e^{pl} = 4.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При тушении $He(2^1S_0)$ молекулами также может реализоваться режим квазинепрерывной генерации (кривые 3,4) уже при сравнительно малом давлении молекулярной примеси $\sim 0.1 \text{ Торр}$. Отметим, что при равных скоростях девозбуждения уровней $He(2^1P_1^0)$ и $He(2^1S_0)$

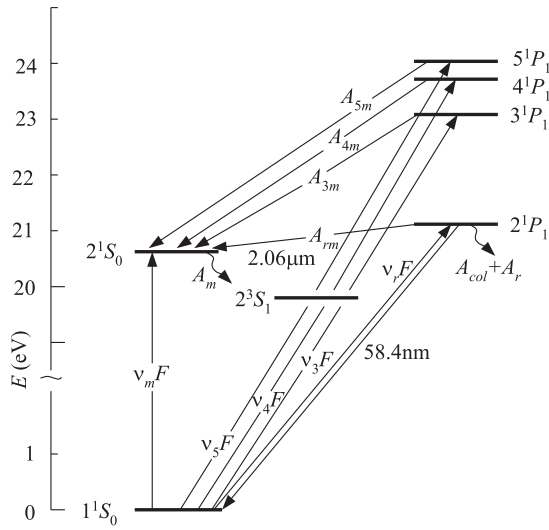


Рис. 4. Схема уровней гелия и процессов, участвующих в рассмотрении (ν_i - относительные частоты ионизации и возбуждения для пучка электронов, F - скорость накачки в актах в расчете на один атом гелия)

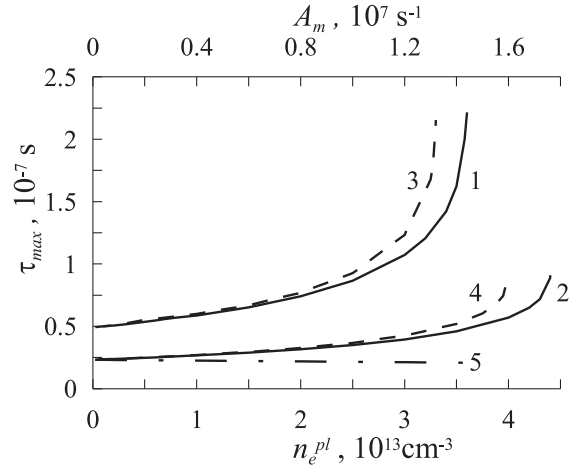


Рис. 5. Зависимость τ_{max} от n_e^{pl} с учетом электронного девозбуждения лазерных уровней (1, 2) и от скорости A_m (3-5) в отсутствии тушения $2^1P_1^0$ $A_{col} = 0$ (3, 4) и при $A_{col} = A_m$ (5). (1, 3) соответствуют $F = F_0 t$, (2, 4, 5) — $F = F_0$

($A_{col} = A_m$) длительность генерации всегда является конечной величиной и режим квазинепрерывной генерации не осуществляется (кривая 5, рис. 5).

В разделе 5.2. даны результаты исследования генерации с длинными импульсами накачки. Увеличение длительности импульса генерации вплоть до длительности накачки по сравнению с чистым гелием (рис. 6a) достигнуто в смесях с NH_3 и H_2O (рис. 6b). Показано, что осуществление квазинепрерывного режима достигается благодаря совместному действию двух универсальных для всех газов механизмов девозбуждения: медленными плазменными электронами и в соударениях с молекулами.

В шестой главе описаны результаты исследования генерационных характеристик лазеров с различными механизмами создания инверсии.

В разделе 6.1. приведены результаты исследования генерации на переходах иона таллия, накачиваемых в процессах перезарядки в смесях $Ne - Tl$ и $He - Tl$. Возбуждение парогазовой среды осуществлялось электронным пучком, генерируемым в открытом разряде в высокотемпературной (до $1000^{\circ}C$) кювете объемом $\sim 1 \text{ cm}^3$ (диаметр катода 4.7 см, длина 50 см). Получены генерации на нескольких новых длинах волн в инфракрасной области спектра (рис. 7).

Потенциально лазер на парах Tl II обладает высокими параметрами излуче-

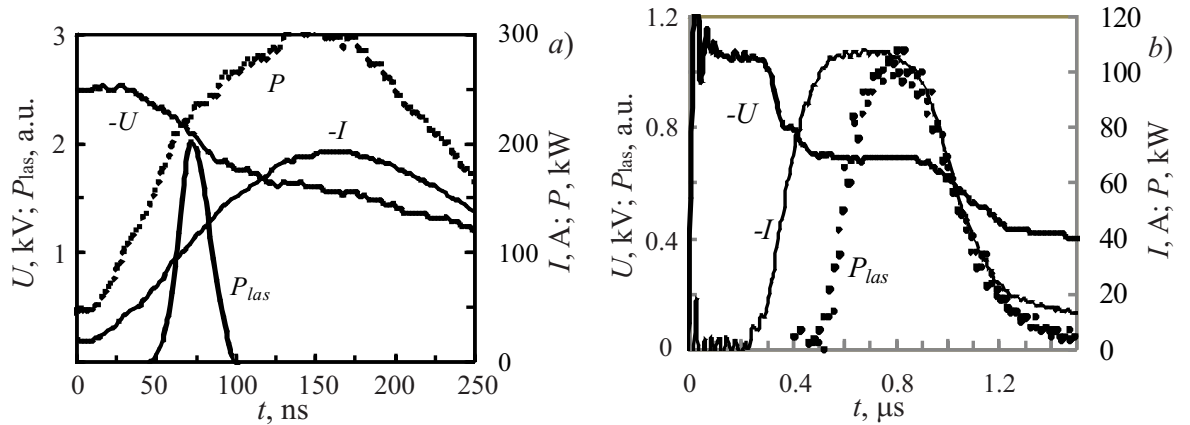


Рис. 6. Осциллограммы напряжения U , тока разряда I , мощности разряда P и импульса генерации излучения P_{las} при а) $p_{He} = 6 \text{ Torr}$; б) $p_{He} = 6 \text{ Torr}$, $p_{H_2O} = 1.07 \text{ Torr}$

ния. Показано, что при возбуждении электронным пучком для перехода с $\lambda = 1.922 \mu\text{m}$ эффективность генерации, определяемая как отношение числа фотонов к числу ионов таллия, прошедших через верхнее рабочее состояние, составляет 18%. В то же время для видимого излучения эффективность использования ионов намного меньше. Это связано с тем, что реабсорбция излучения в системе нижних уровней увеличивает время жизни нижних уровней, тем самым ограничивая их время релаксации и соответственно реализуемую мощность генерации. В связи с этим для увеличения лазерной мощности на линиях видимого диапазона требуется расселение основного состояния иона таллия, что может быть реализовано, например, с помощью перезарядки ионов таллия на атомах лития.

В разделе 6.2. описывается генерация лазерного излучения в смеси $He - Xe$ на переходе ксенона $5d[3/2]_1^0 - 6p[3/2]_1$ с $\lambda = 2.026 \mu\text{m}$ в кювете большого объема $V = 6200 \text{ cm}^3$ (диаметр катода 8.4 см, длина 110 см) при накачке электронным пучком, генерируемым в открытом разряде с катодной полостью. Наибольшая импульсная мощность излучения при одинаковой мощности накачки реализуется при соотношении концентраций в газовой смеси $p_{He} : p_{Xe} = 99.5 : 0.5$ ($p_{He} = 4 \dots 8 \text{ Torr}$). В этом случае пороговая мощность, при которой появляется генерация излучения, минимальна (рис. 8 а). Такая же величина наилучшего соотношения давлений наблюдалась и в плотных газах при давлениях буферного газа 1...3 atm. Зависимость мощности излучения от мощности накачки $P_{las}(P)$ в исследуемом диапазоне параметров линейна при напряжении до $U = 2 \text{ kV}$ и токе разряда до $I = 10 \text{ A}$ (рис. 8 б). Наибольшая достигнутая мощность импульсной генерации при оптимальных

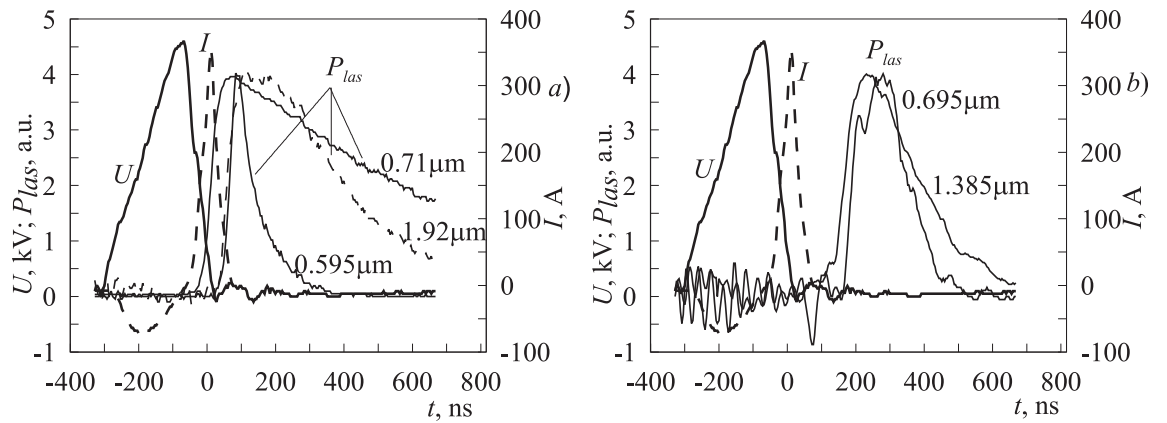


Рис. 7. Осциллограммы напряжения U , тока разряда I , мощности лазерной генерации P_{las} при $p_{Ne}=20$ Torr, $p_{TI}=0.5$ Torr а) с уровней $7p^3P_{0,2}^0$ и б) - с $7p^1P_1^0$

условиях превышает 100 W при практической эффективности до 2%.

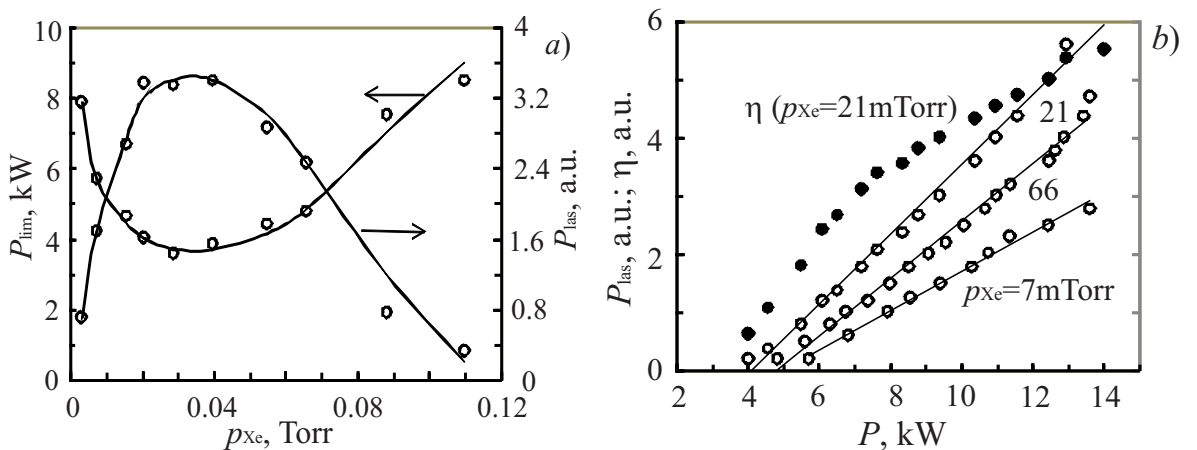


Рис. 8. Характеристики генерации на атоме ксенона при $p_{He}=5$ Torr: пороговая мощность разряда P_{lim} и мощность лазерной генерации P_{las} при мощности разряда $P=10$ kW (а), P_{las} (○) и эффективность излучения η_{las} (●) (б)

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. Реализован новый тип тлеющего разряда — широкоапертурный тлеющий разряд, генерирующий электронный пучок с эффективностью, близкой к 100%, в кювете с простой геометрией, где выполнено условие $d \gg l > l_n$ (d — диаметр катода, l — расстояние между катодом и сетчатым анодом, l_n — длина катодного падения потенциала в нормальном тлеющем разряде). Высокая эффективность

генерации электронного пучка обусловлена фотоэмиссионной природой разряда. Достигнутый уровень мощности электронного пучка и диапазон рабочих давлений в квазинепрерывном тлеющем разряде позволяют применять его для накачки газовых лазеров.

2. Показано, что при использовании катодов из SiC в открытом разряде можно получать устойчивую генерацию мощных электронных пучков с высокой частотой следования. В проведенных исследованиях гелиевого лазера энергия генерации излучения не уменьшалась вплоть до частоты следования импульсов накачки 10 кГц, а достигнутая эффективность лазера составила 16% от квантовой. Эти результаты подтверждают перспективность использования электронного пучка, генерируемого в открытом разряде, для накачки лазеров на самоограниченных переходах.

3. Показано, что скорость тушения метастабильного уровня гелия $He(2^1S_0)$ при добавлении молекулярной примеси увеличивается за счет двух механизмов: во-первых, непосредственно в столкновениях $He(2^1S_0)$ с молекулами, во-вторых, за счет более эффективного электронного девозбуждения из-за охлаждения плазменных электронов в столкновениях с молекулами. Величину изменения скорости тушения определяет тип примеси. Наибольшее влияние оказывают полярные молекулы с большим дипольным моментом и высокой скоростью релаксации колебательных состояний NH_3 и H_2O .

4. Константы скоростей девозбуждения $He(2^1S_0)$ молекулами H_2O , NH_3 , N_2O , CO_2 равны соответственно $(1.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-9}$, $(0.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-9}$, $(1.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-9}$, $(2.2 \pm 0.4) \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$.

5. Реализована генерация лазерного излучения на нескольких линиях иона таллия в смесях $Ne - Tl$ при возбуждении электронным пучком, генерируемым в открытом разряде: $\lambda=1.385, 1.922, 0.5951, 0.6953, 0.7074 \mu\text{m}$. Генерация с длинами волн $\lambda = 1.385 \mu\text{m}$ на переходе $TIII (7p^1P_1^0 - 6d^1D_2)$ и $\lambda = 1.922 \mu\text{m}$ на переходе $TIII (7p^3P_2^0 - 6d^3D_3)$ была получена впервые. Показано, что электронно-пучковое возбуждение эффективно для накачки лазеров на ионных переходах атомов.

6. Продемонстрирована масштабируемость открытого разряда с катодной полостью и устойчивость генерации электронного пучка в коаксиальной кювете большого объема ($V=6200 \text{ cm}^3$, $D=8.4 \text{ cm}$, $L=110 \text{ cm}$). Масштабируемость достигнута за счет увеличения числа ускорительных структур с катодной полостью. Результаты исследования лазерной генерации на атоме ксенона в смеси $He - Xe$ указывают на возможность использования открытого разряда с катодной полостью в качестве источника пучка электронов для возбуждения газовых лазеров.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Бельская Е. В., Бохан П. А., Закревский Д. Э. Исследование гелиевого лазера, возбуждаемого импульсным электронным пучком, генерируемым в открытом разряде // Квантовая электроника, 2008, т. 38, № 9, с. 823-828.
2. Belskaya E. V., Bokhan P. A., Zakrevsky D. E. Highly efficient electron beam generation in a wide aperture discharge in helium // Appl. Phys. Letters, 2008, vol. 93, p. 091503(1-3).
3. Бельская Е. В., Бохан П. А., Закревский Д. Э. Переходные процессы и высокоэффективная генерация электронных пучков в импульсном широкоапертурном тлеющем разряде // ЖТФ, 2008, т. 78, № 8, с. 132-134.
4. Бельская Е. В., Бохан П. А., Закревский Д. Э. Генерация электронного пучка в открытом разряде с катодной полостью и характеристики He-He - лазера на линии ксенона с $\lambda = 2.026 \mu\text{m}$ // Квантовая электроника, 2010, т. 40, № 7, с. 599-603.
5. Бельская Е. В., Бохан П. А., Закревский Д. Э., Лаврухин М. А. Столкновительная генерация на самоограниченном переходе атома гелия // Квантовая электроника, 2010, т. 40, № 12, с. 1116-1117.
6. Belskaya E. V., Bokhan P. A., Zakrevsky D. E. and Lavrukhin M. A. Influence of Molecular Gases on the Lasing on the Self-terminating $He(2^1P_1^0 - 2^1S_0)$ Transition // IEEE Journal Quantum Electronics, 2011, vol. 47, № 6, p. 795-802.
7. Belskaya E. V., Bokhan P. A., Zakrevsky D. E. and Lavrukhin M. A. Fast relaxation of the metastable helium state 2^1S_0 in collisions with molecules and collisional lasing on the $(2^1P_1^0 - 2^1S_0)$ transition // Optics Communications, 2011, vol. 284, p. 4961-4964.
8. Бельская Е. В., Бохан П. А., Закревский Д. Э. Газовый лазер с электронным пучком // Патент Российской Федерации № 2380805 от 10.11.2008

Список цитированной литературы

1. Басов Н. Г., Александров А. Ю., Данилычев В. А., Долгих В. А., Керимов О. М., Мызников Ю. Ф., Рудой И. Г., Самарин А. Ю., Сорока А. М. Эффективный квазинепрерывный лазер высокого давления на первой отрицательной системе азота // Письма в ЖЭТФ, 1985, т. 42, вып. 1, с. 39-42.
2. Бохан П. А. Накачка газовых лазеров убегающими электронами, генерируемыми в открытом разряде. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Под ред. В.Е.Фортова. М.: Физматлит, 2005, сер. Б, т. XI-4, с. 316.
3. Батенин В. М., Бучанов В. В., Казарян М. А., Климовский И. И., Молодых Э. И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Научная кни-

га, 1998, 544 с.

4. Бохан П. А., Закревский Д. Э. Исследование механизма высокоэффективной генерации электронных пучков в пикселе плазменного дисплея на основе открытого разряда // Физика плазмы, 2006, т. 32, № 9, с. 853-863.

5. Bokhan P. A., Zakrevsky D. E. Self-sustained photoelectron discharge // Appl. Phys. Lett., 2002, vol.81, № 14, p. 2526-2528.

6. Бохан А. П., Бохан П. А., Закревский Д. Э. Эффективная генерация электронных пучков в аномальном разряде с повышенной фотоэмиссией катода // Письма в ЖТФ, 2003, т. 29, вып. 20, с. 81-87.

7. Иванов И. Г., Латуш Е. Л., Сэм М. Ф. Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990, 259 с.

Подписано в печать "3 "ноября 2011 г.
Формат бумаги 60x84 1/18. Объем 1.1 печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 118

Типография Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 5.