

На правах рукописи

Тельминов Алексей Евгеньевич

ДЛИННОИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА СМЕСЯХ
ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ И АЗОТА С ФТОРСОДЕРЖАЩИМИ МОЛЕКУЛАМИ

01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО Томский государственный университет и в Институте сильноточной электроники СО РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
Тарасенко Виктор Федотович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук,
Панченко Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Евтушенко Геннадий Сергеевич
доктор физико-математических наук,
Лосев Валерий Федорович

Ведущая организация:
Институт Оптики атмосферы СО РАН, г.Томск

Защита состоится 12 марта 2009 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 при Томском государственном университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 34а

Автореферат разослан 9 февраля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



/Б.Н. Пойзнер/

Актуальность работы. Увеличение длительности импульса и энергии излучения электроразрядных газовых лазеров имеет большое практическое и научное значение. С одной стороны, снижение импульсной мощности излучения позволяет существенно увеличить энергию в импульсе, а также среднюю мощность излучения, передаваемую по световоду. С другой стороны, увеличение числа проходов в резонаторе дает возможность эффективно управлять такими параметрами лазерного излучения, как расходимость и ширина линии генерации, что важно для различных технологических приложений электроразрядных лазеров. Поэтому задачи исследований, поставленные и решаемые в данной диссертационной работе, актуальны.

Для увеличения длительности импульса излучения электроразрядных газовых лазеров необходимо увеличить длительность импульса накачки, что приводит к рассогласованию импеданса генератора накачки и сопротивления объемного разряда, и как следствие влечет падение коэффициента полезного действия (КПД) генерации. Поэтому задачи повышения длительности импульсов генерации, энергии излучения и эффективности работы электроразрядного лазера достаточно тесно связаны. Значительные длительности импульсов излучения газового лазера и его КПД могут быть получены при решении следующих двух основных проблем: 1) формирование и поддержание в течение длительного времени (0,1 мкс и более) однородного объемного разряда в газовых смесях, содержащих молекулы доноров фтора; 2) обеспечение высокой эффективности передачи энергии, запасенной в накопительном элементе генератора накачки, в активную среду лазера (плазму объемного разряда). Для этого разработан метод накачки двойным разрядом с использованием достаточно сложных импульсных генераторов на основе искровых разрядников и магнитных ключей. При этом генератор накачки формирует сначала высоковольтный предимпульс, инициирующий объемный разряд в лазерном промежутке, а затем основной накопитель (конденсатор или формирующая линия) вкладывает в активную среду лазера основную часть запасенной энергии в режиме согласования импедансов. Подобные генераторы с использованием импульсных формирующих линий позволили создать электроразрядные лазеры на хлоридах инертных газов с эффективностью до 4-5 % и длительностью импульса генерации до 1 мкс. Однако до настоящего времени не удалось одновременно увеличить длительность и эффективность генерации в смесях, содержащих NF_3 или F_2 (F_2 , XeF , KrF , и ArF – лазеры, лазеры на линиях атомарного фтора), из-за быстрого развития контракции объемного самостоятельного разряда.

Ранее в ИСЭ СО РАН был предложен способ формирования и поддержания

объемного разряда при помощи генераторов с прерывателями тока (ГПТ) [1] на основе взрывающихся проводников, плазменно-эрозионных и полупроводниковых прерывателей основе SOS-диодов. Проведены исследования возбуждения различных газовых лазеров двойным разрядом от ГПТ. Получены уникальные параметры излучения эксимерных ХеСl- лазеров на 308 нм: плотность мощности 150 мДж/см² при длительности импульса на полувысоте до 300 нс [2]. Получен предельный КПД (до 10% относительно вложенной в активную среду энергии) электроразрядных HF(DF)-лазеров [3]. Была осуществлена эффективная накачка СО₂-лазера, КПД которого составил 15% [4]. Однако характеристики разряда и лазерного излучения в смесях инертных газов и азота с фторсодержащими молекулами подробно не исследовались.

Данная диссертационная работа является продолжением исследований по возбуждению электроразрядных лазеров при помощи генераторов с полупроводниковыми прерывателями тока. Основное внимание при выполнении работы уделялось исследованию параметров объемного разряда и лазерных характеристик в смесях Ne-Xe(Kr)-NF₃(F₂), N₂-SF₆(NF₃), He-F₂ (NF₃).

Целью данной работы является: увеличение длительности импульсов излучения и энергии генерации азотных, эксимерных ХеF- и KrF- лазеров и лазера на переходах атомарного фтора при накачке двойным разрядом с формированием высоковольтного предымпульса ГПТ и прерывателем тока на основе SOS-диодов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Определить параметры предымпульсов, формируемых генератором с прерывателем тока, при которых достигается максимальная длительность объемной стадии разряда в газовых смесях с фторсодержащими молекулами.
2. Экспериментально исследовать характеристики объемного разряда и параметров генерации при различных режимах накачки ХеF, KrF, N₂ и F_I – лазеров с использованием ГПТ и двухконтурных LC – генераторов с обострительными и накопительными емкостями.

Методы исследования. Основным методом исследования в работе является физический эксперимент, включающий в себя измерения энергетических, временных и спектральных характеристик лазерного излучения и электрических параметров объемного разряда в различных газовых смесях. Дополнительно проводилось сравнение экспериментальных результатов и результатов численного моделирования N₂- и KrF-лазеров с накачкой поперечным объемным разрядом.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. При накачке смесей KrF- и XeF-лазеров с содержанием электроотрицательной добавки $\leq 1,5$ Top генератором с прерывателем тока, высоковольтный предимпульс с передним фронтом $\tau_{\phi} = 10-20$ нс обеспечивающий максимальную напряженность поля на лазерном промежутке не менее $E/p = 5$ кВ/см \times атм и скорость нарастания тока разряда не менее $dI/dt = 2,6$ кА/нс увеличивает длительность импульсов генерации на $\lambda = 353$ и 248 нм до ~ 100 нс.
2. Реализация одновременной генерации на второй ($C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$) и первой ($B^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+$) положительных системах азота увеличивает длительность импульса УФ-излучения до 100 нс за счет разгрузки нижнего лазерного уровня $B^3\Pi_g$.
3. При возбуждении смесей азота с NF_3 и SF_6 LC-генераторами с соотношением величин обострительной и накопительной емкостей $C_1:C_0 < 1:20$ и периоде колебаний тока в цепи C_1 менее 35 нс реализуется двухпиковый режим генерации лазера на самоограниченных переходах азота на длине волны $337,1$ нм.
4. В электроразрядном XeF-лазере с накачкой от генератора с прерывателем тока при передаче в промежуточный индуктивный накопитель 10% запасаемой энергии и длительности импульса тока разряда 150 нс реализуется режим генерации с внутренним КПД до 3% .

Достоверность научных положений и других результатов подтверждается:

- применением общепринятых методик измерения параметров объемного разряда и лазерного излучения, использованием современной регистрационной аппаратуры,
- согласование полученных экспериментальных данных, результатов численных расчетов и данных, приведенных в работах других авторов.
- воспроизводимостью полученных результатов;

Новизна защищаемых положений и других результатов:

1. Определены параметры предимпульсов, формируемых генератором с полупроводниковым прерывателем тока, при которых длительность объемной стадии разряда в рабочих смесях XeF-, KrF- и FI-лазеров возрастает до $100 - 200$ нс.
2. Экспериментально показана возможность разгрузки нижнего лазерного уровня перехода $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ молекулы азота на $\lambda = 337,1$ нм вынужденными переходами первой положительной системы азота $B^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+$ на $\lambda = 869,5 - 1046,9$ нм.

3. Впервые при накачке самостоятельным поперечным разрядом реализован режим работы азотного лазера на длине волны $\lambda = 337.1$ нм с двумя пиками излучения в течение одного импульса возбуждения.
4. Впервые в электроразрядном ХеF – лазере при длительности импульса возбуждения ~ 150 нс реализован КПД относительно вложенной энергии 3 %.
5. Впервые зарегистрировано рентгеновское излучение из искровых промежутков системы УФ – предыонизации электроразрядных лазеров.
6. Впервые получены максимальные на данное время энергия и импульсная мощность излучения азотного лазера на $\lambda = 337,1$ нм. При активной длине лазера $l = 1$ м и поперечном сечении области объемного разряда до 6×10 см² в смеси N₂ - SF₆ энергия излучения на молекулах азота достигала 80 мДж при пиковой мощности излучения до 6 МВт.

Научная ценность результатов:

1. Показано, что ГПТ позволяет формировать предимпульсы с оптимальными для различных газовых смесей, содержащих молекулы галогенов, амплитудой напряжения, длительностью переднего фронта и скоростью нарастания тока разряда, что повышает стабильность и время горения объемной стадии разряда, улучшает энергетические и временные параметры лазерного излучения в газовых смесях инертных газов и азота с молекулами SF₆, NF₃, F₂.
2. Экспериментально показана возможность увеличения длительности импульса УФ - генерации азотного лазера до ~ 100 нс за счет разгрузки нижнего лазерного уровня вынужденными переходами на первой ($B^3P_g - A^3\Sigma_u^+$) положительной системе азота.
3. Показано, что система предыонизации на основе искровых промежутков, кроме УФ и ВУФ излучения формирует импульсы мягкого рентгеновского излучения, которые могут влиять на формирование объемного разряда в различных газовых смесях.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны импульсные генераторы с полупроводниковыми прерывателями тока, позволяющие реализовать оптимальные режимы накачки двойным разрядом и получить максимальные энергетические и временные характеристики импульсов излучения различных газовых лазеров.
2. Найдены новые режимы работы азотного лазера при накачке от ГПТ, в которых наблюдаются два пика излучения в течение одного импульса

накачки, а полная длительность импульса генерации достигает 50 нс. В данных режимах достигается максимальная энергия излучения на $\lambda = 337,1$ нм и $\lambda = 869,5 - 1046,9$ нм.

3. Создан электроразрядный эксимерный KrF лазер с накачкой от ГПТ с энергией в импульсе 0,65 Дж и длительностью импульса излучения ~90 нс на полувысоте при полной длительности импульса излучения до 120 нс.
4. Создан электроразрядный эксимерный XeF лазер с накачкой от генератора с полупроводниковым прерывателем тока с энергией в импульсе 0,4 Дж при электрическом КПД до 1,6% и КПД от вложенной энергии 3%. Полная длительность импульса составила 200 нс, длительность на полувысоте 100 нс.
5. Получены максимальные энергия и мощность излучения лазера на атомарных переходах фтора при накачке двойным разрядом от ГПТ. Энергия и мощность излучения достигали значений 7.5 мДж и 400 МВт, соответственно.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях: International Conference on High-Power Laser Ablation VI, VII, Taos, NM, USA, 2006, 2008; 13th International Conference on Method of Aerophysical Research (ICMAR), Novosibirsk, Russia, 2007; International Conference ICONO/LAT, Minsk, Belarus, 2007; Харитоновские чтения - международная научная конференция «Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергий», РФЯЦ - ВНИИЭФ, г.Саров, Россия, 2006 и 2008; VII и VIII Международные конференции Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул, г.Томск, Россия, 2005, 2007; 13th and 14th Symposiums on High Current Electronics, Tomsk, 2006, 2008, 9th Russian-Chinese Symposium on Laser Physics and Laser Technologies, Tomsk, 2008.

Личный вклад автора состоит в участии в постановке экспериментов, разработке и создании экспериментальных установок, проведении экспериментальных исследований, интерпретации и анализе полученных результатов.

Моделирование двухпиковой генерации азотного лазера Гл. 4 п. 4.2, 4.3 проводилось на основе модели, разработанной научным сотрудником лаборатории теоретической физики ИСЭ СО РАН А.И. Суловым. Расчеты параметров электроразрядных KrF - лазеров производились на основе модели, разработанной в

лаборатории газовых лазеров д.ф.-м.н. Ю.И. Бычковым, к.ф.-м.н. А.Г. Ястремским и к.ф.-м.н. С.А. Ямпольской.

Постановка задачи и общее руководство работой осуществлялось профессором, д.ф.-м.н. (специальность 01.04.03–радиофизика) Тарасенко В.Ф. Экспериментальные исследования проводились в Институте сильноточной электроники СО РАН под руководством научного консультанта, с.н.с, к.ф.-м.н. (специальность 01.04.04-физическая электроника) Панченко А.Н. Представленные в диссертационной работе результаты получены лично Тельминовым А.Е. или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, и библиографического списка. Диссертационная работа изложена на 132 страницах машинописного текста, иллюстрируется 61 рисунком, содержит 122 библиографические ссылки.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, а также новизна, научная ценность и практическая значимость работы.

В первой главе дан обзор литературы, посвященный физике процессов, происходящих в плазме объемного самостоятельного разряда в смесях эксимерных и азотных лазеров, лазера на атомарных линиях фтора. Рассматриваются условия, необходимые для создания инверсии населенностей, на переходах молекулы азота, эксиплексных молекул и атомарного фтора. Также описаны конструкции и принципы работы импульсных генераторов, применяемых для создания активной среды газовых лазеров с накачкой объемным самостоятельным разрядом.

Лазер на молекулах N_2 на УФ – переходах первой положительной системы был создан в 1963 г. и до сих пор находит широкое применение благодаря не токсичности и дешевизне рабочей смеси, простоте конструкции. Азотный лазер относится к лазерам на самоограниченных переходах, поскольку время жизни нижнего лазерного уровня (НЛУ) в 250 раз больше, чем время жизни верхнего лазерного уровня (ВЛУ). На рис. 1 показаны термы молекулы азота. ВЛУ азотного лазера на переходе $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ лежит на 11 эВ выше основного состояния молекулы N_2 , и его радиационное время жизни всего ~ 40 нс. Заселение ВЛУ происходит в столкновениях с электронами, чья энергия $\epsilon \geq 11$ эВ. Для получения такой температуры электронов необходимо иметь на лазерном промежутке величину параметра E_0/p не менее 100 В/см \times Тор, где $E_0/p = U_0/pd$ – напряженность электрического поля на лазерном промежутке, определяемая приложенным напряжением U_0 , расстоянием между электродами d и давлением газа p . Требуемую величину параметра E_0/p можно

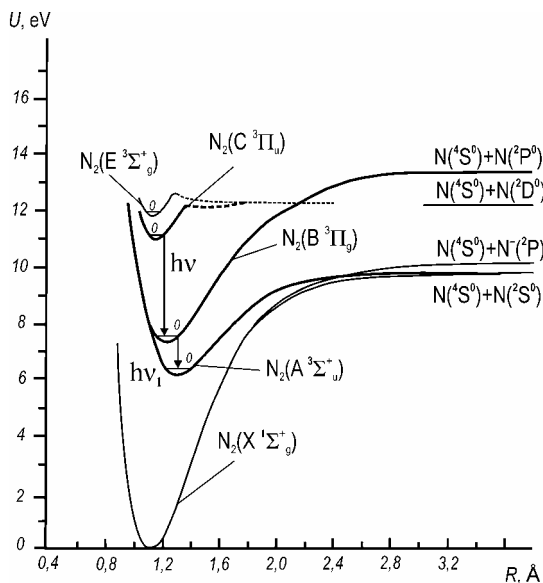


Рисунок 1 - Потенциальные кривые молекулы азота и лазерные переходы $h\nu - \lambda=337,1$ нм; $h\nu_1 - \lambda= 1048$ нм.

поддерживать длительное время только при использовании напряжений на лазерном промежутке U_0 , давлений и межэлектродных промежутков d , соответствующих левой ветви кривой Пашена. Однако давление азота в данных условиях оказываются настолько малыми, что порог генерации не достигается.

При накачке азотного лазера поперечным разрядом требуемая электронная температура может быть получена в течение очень короткого интервала времени (менее 10 нс) на стадии спада напряжения после пробоя лазерного промежутка. Соответственно, длительность лазерного импульса

на $\lambda=337,1$ нм также обычно не превышает $\sim 5-10$ нс. При этом начальное напряжение на лазерном промежутке должно в несколько раз превышать его статическое пробивное напряжение. Перенапряжение на лазерном промежутке обеспечивается коротким фронтом подаваемого импульса. Поэтому для накачки азотных лазеров применяются высоковольтные генераторы с емкостными накопителями энергии на основе полосковых линий или LC - контуры с низким импедансом на основе керамических конденсаторов, которые формируют короткие импульсы возбуждения. Максимальные энергия (40 мДж) и мощность (5 МВт) излучения на $\lambda=337,1$ нм получены в [5-6]. Максимальная энергия генерации на $\lambda=1047$ нм не превышала 5 мДж [7].

В свою очередь лазеры на молекулах галогенидов инертных газов работают в квазистационарной стадии разряда при небольших значениях параметра $E\rho$. Поэтому для оптимальной накачки данных лазеров необходимо обеспечить следующие два основных условия:

1. Сформировать однородный объемный разряд и поддерживать его в течение максимально возможного времени.

2. Обеспечить эффективную передачу энергии из импульсного генератора накачки в активную среду лазера. Для формирования однородного объемного разряда применяют системы предыонизации газа, специальные профили электродов. Кроме того, очень важно обеспечить высокое перенапряжение в момент пробоя разрядного промежутка и крутой передний фронт роста разрядного тока. Эффективность передачи энергии от генератора накачки в газоразрядную нагрузку η согласно [8, 9] определяется как:

$$\eta = 1 - \left(\frac{2V_S - V_0}{V_0} \right)^2, \quad (1)$$

где V_S - напряжение в квазистационарной стадии разряда, а V_0 - зарядное напряжение емкостного накопителя генератора импульсов. Сопротивление объемного разряда R при этом равно:

$$R = \frac{V_S Z_0}{V_0 + V_S}, \quad (2)$$

где Z_0 - импеданс цепи генератора. При $V_0 = 2V_S$ и $R = Z_0$ емкостной накопитель разряжается в согласованном режиме, а эффективность передачи энергии в разряд $\eta = 100\%$. Однако, при $V_0 = 2V_S$ практически невозможно формировать объемный разряд в газовой смеси эксиплексного лазера.

Поэтому для создания эффективных газоразрядных лазеров необходимы сложные схемы накачки двойным разрядом на основе искровых разрядников [10] и магнитных ключей [11]. Например, в [11-12] применение генератора с использованием импульсной формирующей линии позволило создать длинноимпульсные ХеСl-лазеры с полной длительностью импульса до 1 мкс нс. При длительности импульсов возбуждения ~ 200 нс КПД ХеСl-лазера может достигать 4-5% [10].

Однако способ накачки с двойным разрядом оказался малоэффективным для возбуждения газовых смесей, содержащих фториды (F_2 , ХеF, КrF* и ArF* лазеры). Для накачки этих лазеров в настоящее время используются импульсы малой длительности и большой мощности [13-15], соответственно, длительность импульса излучения оказывается малой и обычно не превышает ~ 30 нс. Попытки увеличения длительности импульса накачки [11] приводили к контракции объемного разряда и снижению энергии излучения и эффективности лазеров на молекулах КrF*. В связи с этим общепринято считать, что для лазеров на молекулах ХеF*, КrF* и ArF* и F1 лазера малая длительность импульса возбуждения является необходимым условием эффективной накачки.

Во второй главе описаны конструкции лазерных установок, используемых в экспериментах, а также описаны приборы и методики измерений спектров излучения систем искровой предыонизации, параметров объемного разряда, лазерного излучения которые использовались для решения задач, поставленных в диссертационной работе, рассмотрены вопросы, связанные с погрешностями измеряемых величин.

В экспериментах использовались три лазерные установки, активная среда в

которых создавалась генераторами с прерывателями тока или обычными двухконтурными LC-генераторами с обострительной и накопительной емкостями. Две лазерные установки с поперечным сечением разрядного промежутка (зазор × ширина) $4 \times 2 \text{ см}^2$ были идентичны по конструкции и отличались только длиной активной области ($l = 72$ и 90 см). В данных установках использовалась УФ - предыонизации от искровых промежутков, образованных острыми электродами.

Третья установка представляла собой широкоапертурный лазер с поперечным сечением разрядного промежутка $6 \times 10 \text{ см}^2$, $l = 100 \text{ см}$ и рентгеновской подсветкой, разработанная в лаборатории газовых лазеров ИСЭ СО РАН к.ф.-м.н. И.Н. Коноваловым.

Во всех установках в качестве прерывателя тока использовались полупроводниковые SOS - диоды, подключенные параллельно обострительным конденсаторам. Каждый SOS – диод обрывал ток до 4 кА за время, не превышающее $\approx 10 \text{ нс}$.

Принципиальные электрические схемы установок приведены на рис. 2. Сравнение режимов накачки лазеров от ГПТ и LC-генераторами показано на рис. 3. Для работы диодов в режиме прерывателя через них в течение 500 нс пропускаться в прямом направлении от конденсатора C_D . Если конденсатор C_D не заряжается, схема работает как обычный LC - генератор. После срабатывания разрядника SW_0 через диоды в цепи $C_0 - L_0 - D - SW_0$ начинает протекать обратный ток. Через $\sim 30 \text{ нс}$ сопротивление диодов начинает расти, и ток в них прерывается. В течение этого времени часть энергии, запасенной в накопительном конденсаторе $E_L = L_0 I_{open}^2 / 2$, где I_{open} - ток срабатывания полупроводникового прерывателя, передается в индуктивность контура L_0 (индуктивный накопитель энергии).

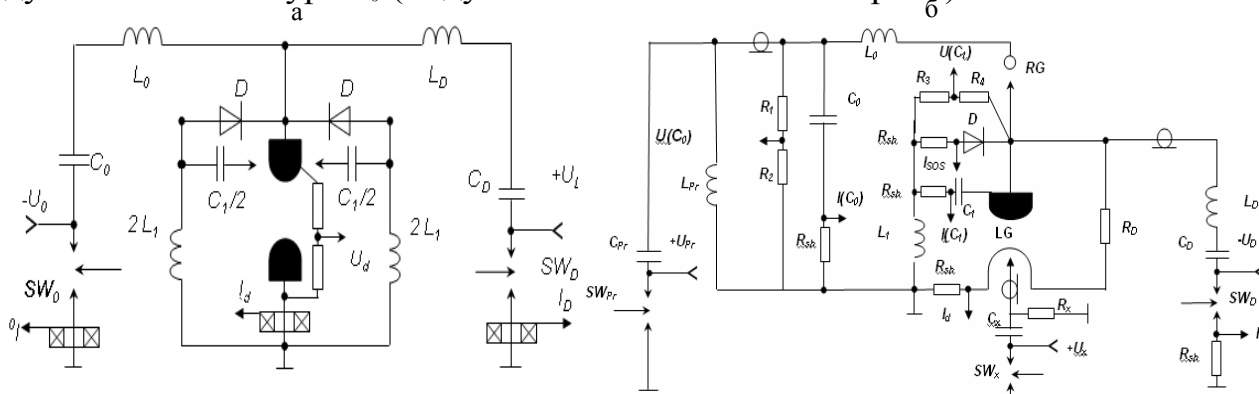


Рисунок 2 - Принципиальная электрическая схема лазеров с накачкой от генераторов с прерывателем тока с апертурой излучения $4 \times 2 \text{ см}^2$ (а) и $6 \times 10 \text{ см}^2$ (б): D - SOS – диоды, LG - лазерный промежуток; SW - искровые разрядники; C_0 – первичный емкостной; накопитель; C_1 – обострительные конденсаторы; L – индуктивности; R_{sh} - токовые шунты, U_i - зарядные напряжения, U_d , $U(C_0)$, $U(C_1)$, I_i - сигналы с делителей напряжения, поясов Роговского и токовых шунтов.

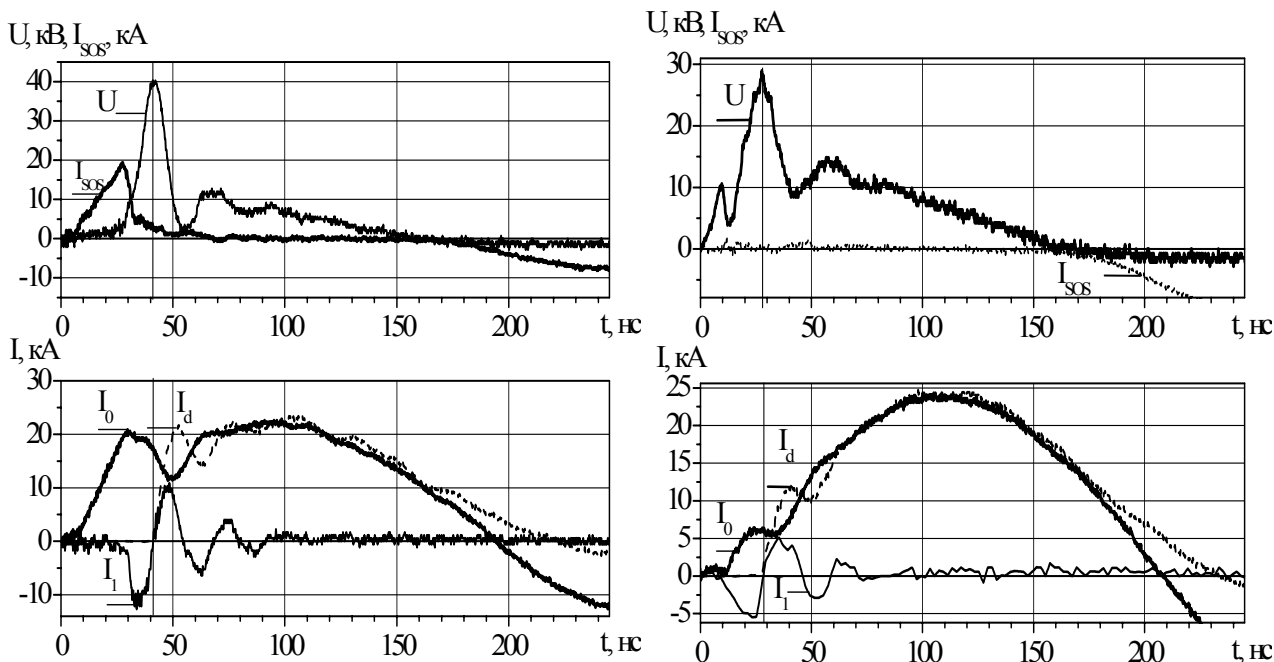


Рисунок 3 - Осциллограммы напряжения на SOS-диодах и обострительных конденсаторах (U), тока через диоды (I_{SOS}), лазерный промежуток (I_d) и токов в цепях накопительного (I_0) и обострительных (I_1) конденсаторов при накачке азота при 78 Торр от ГПТ (а) и LC- (б) генераторов, $C_0=70$ нФ, $U_0=30$ кВ, $U_1=25$ кВ.

На стадии обрыва тока происходит быстрое нарастание напряжения на лазерном промежутке. После формирования объемного разряда ток индуктивного накопителя I_0 складывается с током разряда обострительных конденсаторов I_1 , что обеспечивает быстрое нарастание тока разряда. При не полном согласовании импеданса импульсного генератора и сопротивлением объемного разряда все последующие осцилляции тока протекали через диоды, что уменьшает эрозию электродов лазера.

Из рис. 3 видно, что использование ГПТ увеличивает перенапряжение на лазерном промежутке, скорость нарастания тока разряда и формирует короткий мощный пик накачки. Данный пик, с одной стороны, облегчает формирование объемного разряда, а с другой стороны, уменьшает время запаздывания импульса генерации лазера.

В третьей главе проведено сравнение режимов накачки, эксимерных лазеров и лазера на атомарных переходах фтора от различных импульсных генераторов, исследован спектр излучения искровых промежутков системы УФ – предыонизации.

В п. 3.2 и 3.3. исследованы характеристики разряда и лазерного излучения при возбуждении смесей Ne:Xe:NF₃ и Ne:Kr:F₂ двойным разрядом от ГПТ. Проведенные исследования показали, что высоковольтный предимпульс, формируемый генератором с индуктивным накопителем, существенно повышает стабильность и длительность горения объемной стадии разряда в смесях с NF₃ и F₂, а также

увеличивает энергию излучения и длительность импульса генерации на В - Х переходе молекул XeF* и KrF*. Полученные результаты представлены на рис. 4-5. При использовании искровой предыонизации получены импульсы излучения XeF-лазера с полной длительностью до 200 нс при длительности на полувысоте до 100 нс. Максимальная энергия излучения XeF - лазера ($\lambda = 348, 351$ и 353 нм) достигала 0,4 Дж при электрическом КПД до 1,6%. КПД от вложенной в газ энергии составил 3 %. Столь высокие значения КПД характерны для накачки XeF лазеров пучками электронов, когда проблемы с развитием неоднородностей объемного разряда отсутствуют. Для KrF – лазера максимальная энергия излучения составила 650 мДж при КПД от вложенной энергии 3.3% и электрическом КПД 1.5%. Максимальная мощность излучения составила 8 МВт. Максимальная длительность импульса составила 150 нс (на полувысоте 90 нс) (рис. 4).

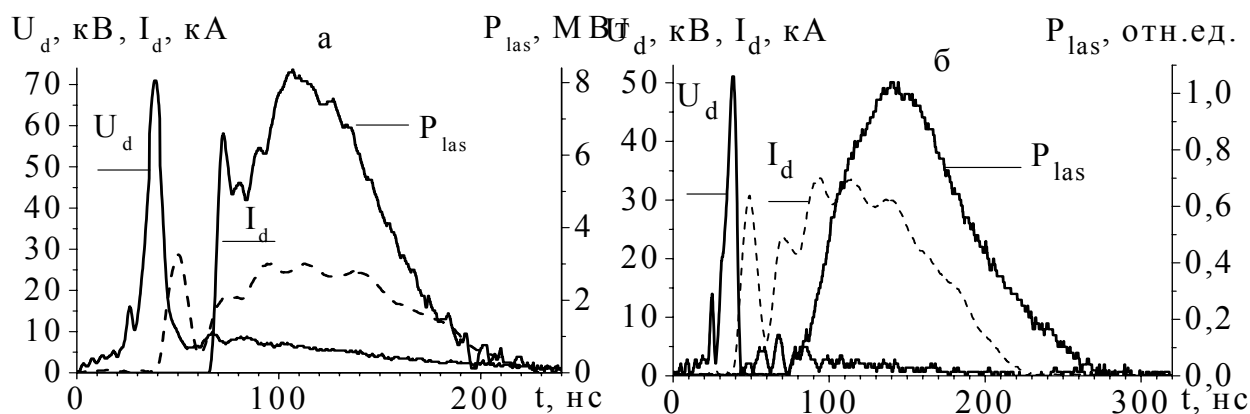


Рисунок 4 - Осциллограммы напряжения на лазерном промежутке, тока разряда и временная форма лазерного импульса в смеси Ne:Kr:F₂=3 атм:60:1.5 Торр (а), Ne:Xe:NF₃ = 2.5 атм :3:0.75 Торр (б), U₀ = 36 кВ.

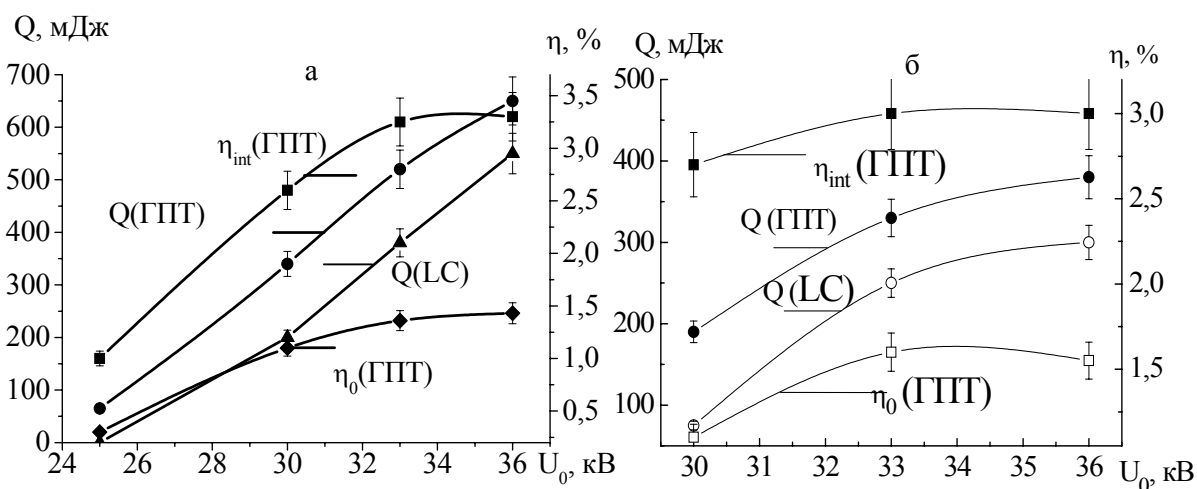


Рисунок 5 - Зависимость энергии выходного излучения и КПД от U₀, для ГПТ и LC генератора а) смесь Ne:Kr:F₂=3 атм:60:1.5 Торр б) смесь Ne:Xe:NF₃ = 2,5 атм:6:1.5 Торр.

Проведено математическое моделирование кинетических процессов формирования плазмы, создания инверсной населенности и характеристик лазерного излучения в смесях Ne-Kr-F₂. Рассмотрены характерные электрофизические процессы в схеме питания, содержащей полупроводниковый прерыватель тока и индуктивный накопитель энергии.

На рис. 7-8 представлены расчетные зависимости от времени: концентрации различных частиц в плазме объемного разряда в смеси Ne-Kr-F₂, а также скоростей

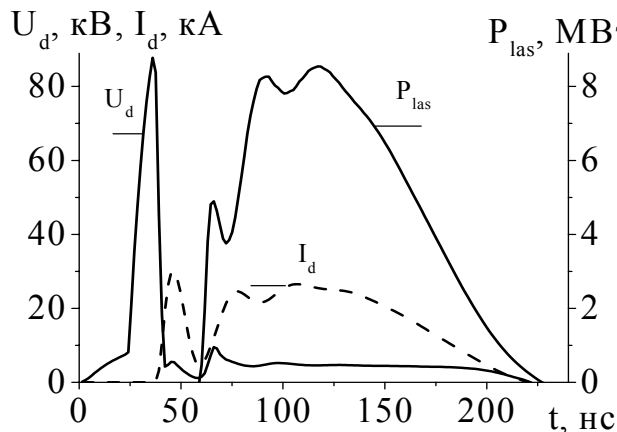


Рисунок 6 - Расчетные временные зависимости напряжения на лазерном промежутке U_d , тока разряда I_d , и мощности лазерного излучения P_{las} .

процессов ионизации, рекомбинации и прилипания. Получено хорошее согласие расчетных (рис. 6) и экспериментальных (рис. 4 а) временных зависимостей характеристик разряда и лазерного излучения. Следует отметить, что в расчетах объемный разряд принимался полностью однородным. Поэтому хорошее совпадение расчетных и экспериментальных импульсов излучения KrF-лазера является

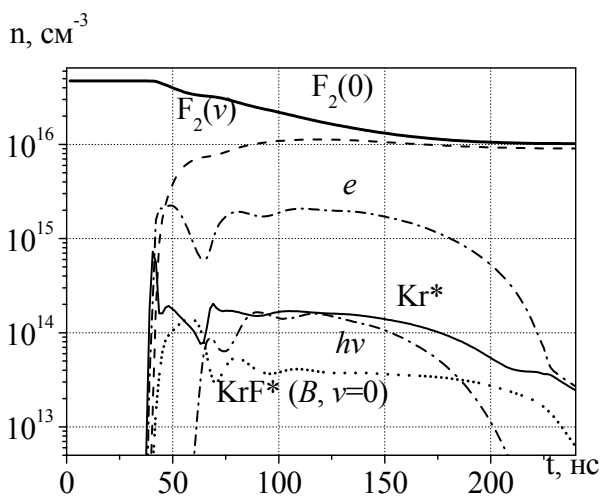


Рисунок 7 - Временные зависимости концентраций молекул фтора в основном $F_2(0)$ и колебательно-возбужденном $F_2(v)$ состояниях, электронов e , возбужденного криптона Kr^* и молекул KrF^* в B - состоянии $KrF^*(B, v=0)$.

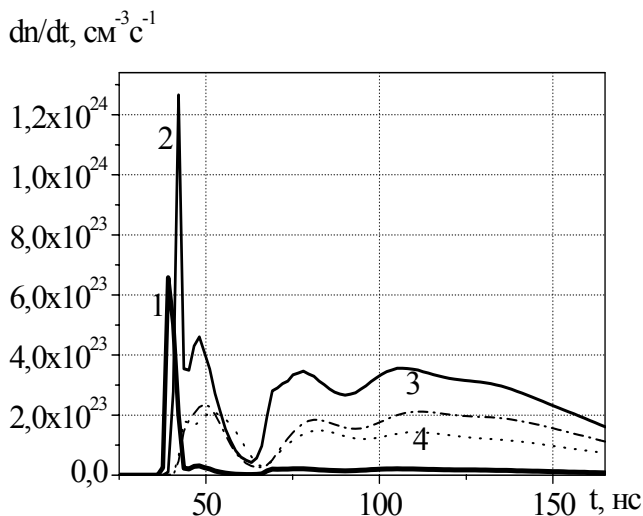


Рисунок 8 - Временные зависимости скоростей: 1 - прямой ионизации (увеличено в 10 раз), 2 - ступенчатой ионизации, 3 - рекомбинации и 4 - прилипания электронов к $F_2(0)$ и $F_2(v)$.

дополнительным доказательством высокой однородности и устойчивости объемного разряда в смесях Ne-Kr-F₂, формируемого ГПТ. На рис. 5-8 видно что, при

использовании ГПТ высоковольтный предимпульс и быстрое нарастание тока в первые ~ 5 нс развития объемного разряда обеспечивают рост концентраций электронов в плазме до $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$. В этот период времени рост концентрации заряженных частиц происходит в основном в процессе прямой ионизации. Можно предположить, что данная особенность накачки от ГПТ может обеспечить высокую однородность формируемого объемного разряда. Поясним это следующими рассуждениями: прямая ионизация является процессом, который сильно зависит от параметра E/p на лазерном промежутке. Если в какой-то малой области разряда увеличится концентрация электронов, напряженность электрического поля в этой области снизится из-за роста проводимости, что замедлит дальнейший рост концентрации электронов. Этот процесс приведет к выравниванию концентрации плазмы во всей области объемного разряда при его формировании от ГПТ. Расчеты также показали, что в квазистационарной стадии разряда основным каналом гибели заряженных частиц является рекомбинация, которая может замедлить развитие неоднородностей в активном объеме KrF-лазера.

В п. 3.4 исследовался лазер на атомарных переходах фтора. Типичные формы импульсов напряжения на лазерном промежутке, тока разряда и интегрального

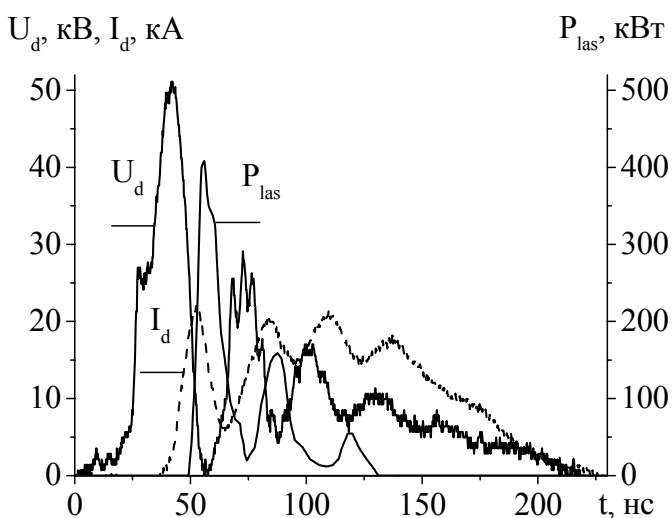


Рисунок 9 - Оциллограммы напряжения на лазерном промежутке, тока разряда и временная форма лазерного импульса с накачкой от ГПТ в He:F $_2$ =760:2 Торр.

лазерного импульса на красных линиях фтора в оптимальной газовой смеси приведены на рис. 9. Использование генератора с индуктивным накопителем энергии позволяло зажигать устойчивый объемный разряд с длительностью до 200 нс. В результате длительность лазерного импульса увеличилась с 10 до 80 нс. Энергия лазерного излучения (7,5 мДж) была удвоена по сравнению с литературными данными [16], а пиковая лазерная мощность излучения достигала 400 кВт.

Энергия лазерного излучения была сосредоточена в 5 дублетных и квартетных линиях. Максимальная интенсивность во всех смесях наблюдалась на $\lambda=731,1$ нм, переход $3p^2S^0_{1/2}-3s^2P_{3/2}$. До 70% и 85% энергии испускалось на этой линии, соответственно, в смесях с NF $_3$ и F $_2$.

В п. 3.5 показано, что искровые промежутки системы УФ - предыонизации кроме УФ и ВУФ излучения формирует импульсы мягкого рентгеновского

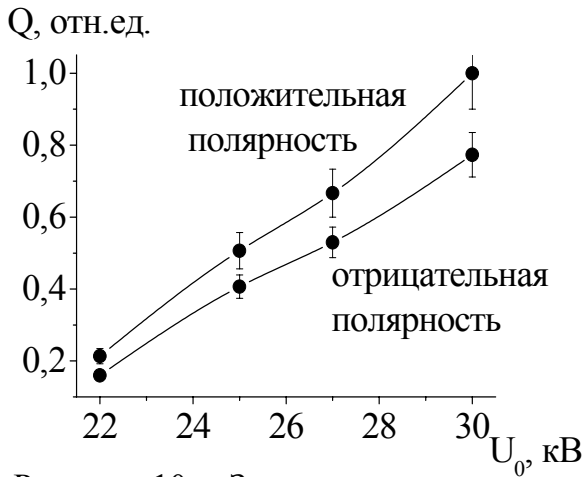


Рисунок 10 - Зависимость энергии генерации от зарядного напряжения для HF лазера при различных полярностях на электроде предыонизации.

излучения. Рентгеновское излучение зарегистрировано в различных газовых смесях при давлении до >0.5 атм. Максимум распределения рентгеновских квантов по энергиям лежал в диапазоне менее 5,5 кэВ. Показано, что рентгеновское излучение позволяет увеличить энергию генерации электроразрядных лазеров. Наиболее сильно этот эффект проявлялся в не цепных химических лазерах (рис. 10). При положительной полярности подаваемых на лазерный промежуток импульсов в искровых промежутках генерируется рентгеновское

излучение, которое осуществляет дополнительную предыонизацию активной среды, что может улучшить условия формирования объемного разряда и характеристики лазеров.

В главе 4 экспериментально исследованы характеристики генерации в азотном лазере с апертурой разряда $2 \times 4 \text{ см}^2$ и $6 \times 10 \text{ см}^2$ при различных режимах накачки. Показано, что добавки электроотрицательных газов позволяют управлять формой и длительностью импульса генерации на переходе $C^3P_u - B^3P_g$ азота. В смесях азота с NF_3 и SF_6 за счет увеличения коэффициента прилипания электронов происходит повторный рост электрического поля на разрядном промежутке, достаточный для повторного достижения инверсии населенностей. Это приводит к генерации импульсов излучения на длине волны 337,1 нм, состоящих из двух пиков, расположенных друг от друга на ~ 20 нс (рис. 11).

При снижении давления рабочей смеси и увеличении активной длины лазера получены импульсы излучения на $\lambda = 337,1$ нм, близкие по форме к прямоугольным, длительностью 40 - 50 нс с энергией до 50 мДж (рис. 12). В этих условиях получена максимальная на сегодняшний день энергия генерации на ИК переходах первой положительной системы азота (до 20 мДж).

На основе численной модели (п. 4.2, 4.3), разработанной научным сотрудником лаборатории теоретической физики А.И. Суловым проведены расчеты режимов работы лазера на смесях азота с электроотрицательными газами. Результаты моделирования работы азотного лазера с апертурой $2 \times 4 \text{ см}^2$ показали хорошее согласование с экспериментальными данными. Модель дала возможность прогнозировать характеристики азотных лазеров при изменении состава смеси и

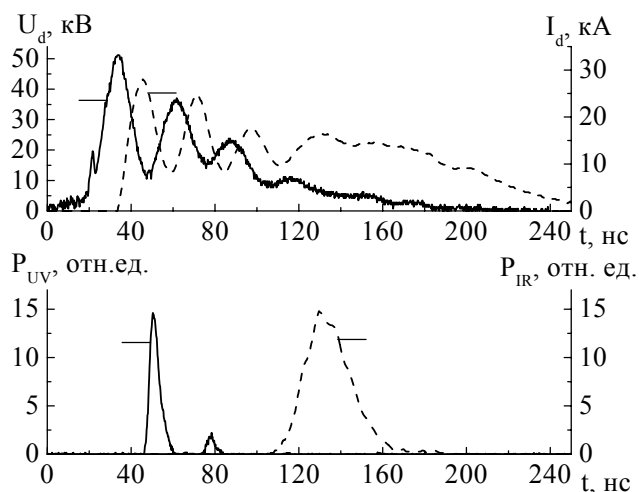


Рисунок 11 - Осциллограммы напряжения на лазерном промежутке, тока разряда и временная форма лазерного импульса с накачкой от ГПТ на 337 и 1047 нм в смеси $N_2:NF_3=75:3$ Торр, $U_0=36$ кВ.

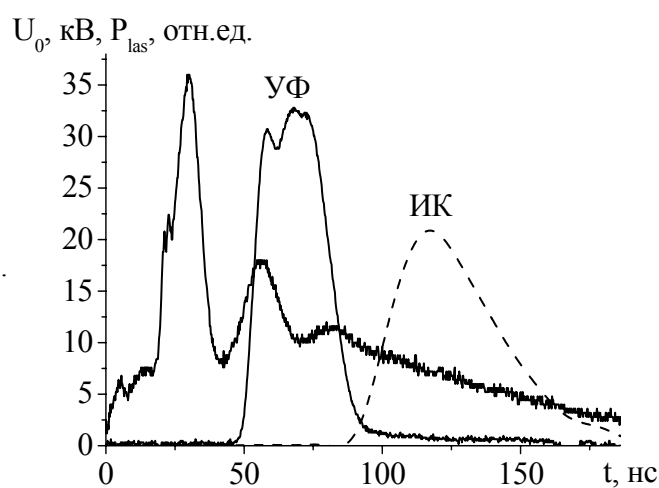


Рисунок 12 - Временная форма импульсов напряжения на разрядном промежутке, и лазерного излучения на УФ и ИК длинах волн; смесь $N_2:SF_6=30:3$ Торр, $U_0=33$ кВ.

параметров генератора накачки. Проведенные расчеты позволили определить оптимальные плотность тока разряда и величину обострительной емкости в генераторе накачки, при которых энергия и мощность излучения широкоапертурного азотного лазера максимальны. При уменьшении ширины области объемного разряда до ~ 3 см и величине $C_1=8,5$ нФ энергия излучения в импульсе в смеси N_2-SF_6 достигала ~ 80 мДж при пиковой мощности излучения до 6 МВт.

Показана возможность разгрузки нижнего лазерного уровня $B^3\Pi_g$ перехода $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ вынужденными переходами на переходе $B^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+$ первой положительной системы азота. На рис. 12 приведены осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке и временная форма импульсов УФ- и ИК-генерации. Видно что, импульс генерации УФ излучения продолжается в течение импульса ИК генерации на первой положительной системе азота. Следует отметить, что в данном режиме работы азотного лазера энергия излучения на УФ и ИК переходах была одинакова. При этом энергия кванта ИК-излучения примерно в 3 раза ниже, чем на $\lambda=337,1$ нм. Поэтому скорость разгрузки уровня $B^3\Pi_g$ вынужденными ИК-переходами при низкой мощности УФ-излучения может быть достаточной для эффективной разгрузки НЛУ второй положительной системы и поддержания инверсии на переходе $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ во время импульса ИК-генерации.

Основные результаты работы:

1. Показано, что искровая система предыонизации помимо УФ излучения также генерирует рентгеновское излучение, которое увеличивает энергию выходного излучения нецепных HF(DF)- и экимерных лазеров.

2. Показано, что предимпульс с высокой амплитудой и коротким фронтом совместно с резким нарастанием тока разряда и однородной подсветкой УФ и рентгеновским излучением значительно улучшает устойчивость и время поддержания объемного разряда в галогеносодержащих газовых смесях.
3. Реализовано увеличение длительности импульсов генерации N_2 - и электроразрядных лазеров на молекулах XeF и KrF в ~ 1.5 раза. Получена длительность импульса лазерного излучения на 337,1 нм в смесях азота с NF_3 и SF_6 ~ 100 нс.
4. Показана возможность разгрузки нижнего лазерного уровня второй положительной системы азота, генерацией на первой положительной системе азота, которая приводит к дополнительному увеличению импульса УФ-генерации (длительность возрастает до ~ 100 нс)
5. При накачке от генератора с прерывателем тока, получены наибольшие энергия (7.5 мДж) и мощность излучения (400 кВт) для электроразрядного лазера на красных линиях атомарного фтора.
6. Получен внутренний КПД 3% (относительно вложенной энергии) электроразрядного XeF -лазера.

Список использованных источников и литературы:

1. Бычков Ю.И., Котов Ю.А., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. Применение колебательного контура с прерывателем тока для возбуждения лазеров на самоограниченных переходах // Квантовая электроника. - 1976. - Т. 3, № 7. - С. 1607-1608.
2. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Газовые лазеры с накачкой от генератора с плазменным прерывателем тока и индуктивным накопителем // Квантовая электроника.- 1990.- Т.17.- № 1.- С. 32-34.
3. Baksht E.H., Panchenko A.N., and Tarasenko V.F. Discharge Lasers Pumped by Generators with Inductive Energy Storage // IEEE J. Quant. Electron.- 1999.- Vol. 35.- № 3.- P. 261-265.
4. Bychkov Yu.I., Baksht E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Yampolskaya S.A., and Yastremsky A.G. Formation of pumping discharge of $XeCl$ laser by means of semiconductor opening switch // Proc. SPIE.- 2001.- Vol. 4747.- P. 99-105.
5. Буранов С.Н., Горохов В.В, Карелин В.И. Репин П.Б. Электроразрядный N_2 -лазер с добавками SF_6 и He // Квантовая электроника.- 1990.- Т.17.- №3.- С. 161-163.
6. Armandillo E., and Kearsley A.J. High-power nitrogen laser // Appl. Phys. Lett.- 1982.- Vol.41.- № 7.- P. 611-613.

7. Sanz F.E., and Perez J.M.G. A high power high energy pure N₂ laser in the first and second positive system // Appl. Phys. B.- 1991.- Vol.52.- № 1.- P. 42-45.
8. Rothe D.E., Wallace C., Retach I. Efficiency optimization for discharge - excited high-energy excimer lasers // Proc. Conf. Excimer Lasers. - 1983. - New York. - P. 33 – 43.
9. Osborne H.R., Smith P.W., Hutchinson M.H.R. The effect of pulse forming line impedance on the performance of an X - ray preionized XeCl discharge laser // Opt. Comm. - 1985.- Vol. 52.- № 6. - P. 415-420.
10. Long W.H., Plummer J., Stappaerts E.A. Efficient discharge pumping of an XeCl laser using a high-voltage prepulse // Appl. Phys. Lett.- 1983.- Vol.43.- № 8.- P. 735-737.
11. Taylor R.S., and Leopold K.E. Ultralong optical-pulse corona preionized XeCl laser // J. Appl.Phys.- 1989.- Vol. 65.- № 1.- P. 22-29.
12. Taylor R.S., and Leopold K.E. Pre-preionization of a long optical pulse magnetic-spiker sustainer XeCl laser // Rev. Sci. Instrum.- 1994.- Vol.65.- № 12.- P. 3621-3627.
13. Mathew D., Bastianes H.M.J., Boller K.-J., and M.Peters P.J. Current filamentation in discharge-excited F₂-based excimer laser // Appl.Phys.Lett.- 2006. - Vol.88.- № 10.- Paper No.101502, 3 pages.
14. Жупиков А.А., Ражев А.М. Эксимерный KrF-лазер на основе буферного газа He с энергией 0.8 Дж и КПД 2% // Квантовая электроника.- 1998.- Т. 25.- №8.- С. 687-689.
15. Mizoguchi H., Endoh A., Jethwa J., Rácz B., and Schgifer F.P. Rapid Discharge-Pumped Wide Aperture X-ray Preionized KrF Laser // Appl. Phys. B.- 1991.- Vol. 52.- № 3.- P. 195-199.
16. Bigio I.J., and Begley R.F. High-power visible laser action in neutral atomic fluorine // App. Phys. Lett.- 1976.- Vol.28.- № 5.- P. 263-264.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. УФ азотный лазер с накачкой поперечным разрядом, формирующий двойные импульсы генерации // **Оптика атмосферы и океана.**- 2006.- Т.19.- №2-3.- С. 178-181.
2. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов Эффективный электроразрядный ХеF - лазер с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии // **Квантовая электроника.**- 2006.- Т.36.- №5.- С.403-407.
3. Tarasenko Victor F., Panchenko Alexei N., and Tel'minov Alexei E., Gas discharge lasers pumped by generators with inductive energy storage // Proceedings of SPIE.- 2006.- Vol.6261.- paper № 626137.- 11 p.
4. Panchenko A.N., Telminov A.E., and Tarasenko V.F. Long-pulse excimer and nitrogen lasers pumped by generators with inductive energy storage // **Известия ВУЗов.**

Физика.- 2006.- №11 Приложение. С. 476-479.

5. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. Рентгеновское излучение искровой системы предыонизации и плазмы объемного разряда в лазере с индуктивным накопителем энергии // **Квантовая электроника.**- 2007.- Т.37.-№1.- С. 103-107.

6. Бычков Ю.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е., Ямпольская С.А., Ястремский А.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование ХеСl - лазера с использованием полупроводникового прерывателя тока в схеме питания // **Квантовая электроника.**- 2007. Т.37. №4, С. 319-324.

7. Панченко А.Н., Суслов А.И., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. Лазер на смеси азота с электроотрицательными газами, накачиваемый поперечным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии: теория и эксперимент // **Квантовая электроника.**- 2007.- Т.37.- №5.- С. 433-439.

8. Коновалов И.Н., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. Широкоапертурный электроразрядный азотный лазер // **Квантовая электроника.**- 2007.- Т.37.- №7.- С. 623-627.

9. Panchenko A.N., Tel'minov A.E., and Tarasenko V.F. Efficient discharge lasers with semiconductor opening switch in pumping circuit // Proc. XIII International Conference on Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, Russia, 5-10 February, 2007, Part II, p. 137-142.

10. Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Tel'minov A.E. Efficient lasers pumped by generators with semiconductor opening switch // Proc. SPIE.- 2007.- Vol. 6735.- paper № 67350C.- 10 p.

11. Konovalov I.N., Panchenko A.N., Suslov A.I., Tarasenko V.F., Tel'minov A.E Long-pulse discharge nitrogen lasers // Proc. SPIE.- 2007.- Vol. 6735.- paper № 67350G.- 7 p.

12. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. Рентгеновское излучение из разрядника с лазерным запуском // **Известия ВУЗов, Физика.**- 2008.- Т.51.- №11.- С.105-106.

13. Tarasenko Victor F., Panchenko Alexei N, and Tel'minov Alexei E. Efficient gas lasers pumped by the generators with inductive energy storage // Proc. High-Power Laser Ablation VII conference 20-24 April 2008.- the Sagebrush Inn and Convention Center in Taos, New Mexico USA.

14. Бычков Ю.И., Панченко А.Н., Тельминов Е.А., Тарасенко В.Ф., Ямпольская С.А., Ястремский А.Г. КгF-лазер с накачкой двойным разрядом от генератора с индуктивным накопителем // **Известия Томского политехнического**

университета.- 2008.- Т.312.- № 2.- С.113–116.

15. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. УФ и ИК лазеры с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии // Труды международной научной конференции «X Харитоновские тематические научные чтения - Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергий», РФЯЦ-ВНИИЭФ, г.Саров, 11–14 марта 2008 г. С.25-30.

Тираж 100. Заказ 1145.
Институт сильноточной электроники.
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.