

На правах рукописи

Ямпольская Софья Александровна

**КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ РАЗРЯДА НАКАЧКИ ХеСІ-ЛАЗЕРА И
ИХ ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.13 — электрофизика, электрофизические установки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск — 2007

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники СО РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
А.Г. Ястремский

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Климкин В.М. (Институт оптики атмосферы
СО РАН, г. Томск)

кандидат физико-математических наук
Соснин Э.А. (Институт сильноточной
электроники СО РАН, г. Томск)

Ведущая организация: Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится «__» _____ 2007 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 003.031.01. в Институте сильноточной электроники СО
РАН (634055 г. Томск, пр. Академический, 2/3)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института сильноточной
электроники СО РАН

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Д.И. Проскуровский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эксимерный лазер на молекуле ХеСl является мощным источником интенсивного ультрафиолетового излучения. Тридцатилетняя история его исследований позволила достичь большого прогресса в этой области. На сегодняшний день реализованы как частотные, так и моноимпульсные режимы с генерацией в диапазоне длительностей от десятка до нескольких сотен наносекунд. Большинство лазерных установок, работает в диапазоне удельной энергии излучения 2 – 3.5 Дж/л при эффективности 2 – 3 %. Однако есть сообщения о полученной удельной энергии излучения превышающей 7 Дж/л¹ и эффективности относительно вложенной энергии ~5 %². Широкий диапазон возможных характеристик излучения, а так же длина волны $\lambda = 0,308$ мкм, позволяют ХеСl-лазеру находить применение в различных областях индустрии, медицины, а так же делают его мощным инструментом научных исследований.

Для накачки ХеСl-лазера используется объемный электрический разряд в трехкомпонентной смеси газов Ne/Xe/HCl с концентрацией электронов $\sim 10^{15}$ см⁻³. В такой плазме происходит большое число кинетических реакций. Конечным результатом является то, что часть энергии накачки преобразуется в лазерное излучение, а остальная энергия по разным каналам переходит в тепло. Проблема прогнозирования характеристик лазерного излучения, а также создания лазеров с максимальной энергией излучения и эффективностью, сводится к изучению процессов, по которым энергия накачки преобразуется в лазерное излучение, а так же выяснению физической возможности снижения потерь энергии в плазме.

В опубликованных работах по моделированию ХеСl-лазера к настоящему времени, определены основные процессы, происходящие в плазме, получены расчетные зависимости концентраций частиц, мощности и энергии излучения для ряда режимов с определенными начальными параметрами накачки, проведена оптимизация некоторых лазерных систем. При этом остается неизвестным, как изменение рабочих условий влияет на процессы в разрядной плазме и как, в свою очередь, от происходящих в плазме процессов зависят характеристики лазерного излучения.

¹ Riva R., Legentil M., Pasquiers S., Puech V. Experimental and theoretical investigations of a XeCl phototriggered laser // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1995. — V. 28. — P. 856-872.

² Makarov M., Bonnet J., Pigache D. High efficiency discharge-pumped XeCl laser // Appl. Phys. B. — 1998. — V. 66. — P. 417-426.

Цель работы. Провести анализ динамики процессов в плазме разряда накачки во всем диапазоне рабочих условий ХеСl-лазера. Обосновать возможность получения максимальных характеристик излучения. Выявить процессы, в которых происходят потери энергии в плазме и влияние на них начальных параметров.

Задачи исследований:

- Провести моделирование режимов накачки ХеСl-лазера, отличающихся длительностью импульса возбуждения, мощностью и вложенной энергией. Выявить зависимости характеристик излучения от начальных параметров.
- Определить временные зависимости скоростей процессов рождения и гибели электронов и эксимерных молекул.
- Выявить основные процессы, в результате которых происходит потеря энергии в плазме.
- Определить процессы, влияющие на время запаздывания начала генерации относительно накачки, выяснить возможность уменьшения времени запаздывания генерации.
- Определить скорости реакций, в которых происходит разрушение молекул НСl, выяснить возможность уменьшения потерь.
- Выяснить возможность увеличения удельной энергии излучения.

Методика исследований. Методом исследований является численное моделирование режимов накачки, отличающихся мощностью накачки, длительностью импульса и составом газовой смеси. Получение временных зависимостей: концентрации электронов, возбужденных и нейтральных частиц, скоростей основных реакций, распределений поглощенной мощности и энергии по процессам.

Положения, выносимые на защиту

1. Энергия излучения определяется начальной концентрацией молекул НСl в газовой смеси и эффективностью их преобразования в фотоны индуцированного излучения. С увеличением концентрации молекул НСl происходит снижение эффективности их преобразования в фотоны. Оптимальная энергия накачки, при заданной концентрации молекул НСl, соответствует условию, при котором выгорание молекул НСl составляет ~ 80% от начального их значения. Более высокая энергия накачки дает малое приращение энергии излучения и снижает эффективность лазера.
2. В широком диапазоне параметров: удельной энергии накачки ($60 \div 360$) мДж·см⁻³, мощности ($0.5 \div 6.0$) МВт·см⁻³ и длительности импульса ($20 \div 150$) нс, энергия

создания эксимерных молекул составляет $(47 \pm 3)\%$ вложенной энергии. Оставшаяся часть энергии переходит в тепло по трем каналам в следующем соотношении: процессы тушения возбужденных уровней Хе и HCl ($\sim 30\%$), преобразование атомарных ионов Хе⁺ в молекулярные NeХе⁺ ($\sim 15\%$) и рекомбинация электронов ($\sim 7\%$).

3. Энергия возбуждения молекул ХеCl(B,C) и ХеCl(B₀,C₀) составляет $\sim 16\%$ от энергии накачки. Тушение этих молекул происходит в столкновениях с электронами, молекулами HCl(v) и атомами неона. Суммарные потери энергии в процессах тушения соизмеримы с энергией индуцированного излучения при оптимальных условиях накачки, и возрастают с увеличением концентрации электронов.
4. Кинетические процессы в плазме разряда накачки ХеCl-лазера позволяют увеличить удельную энергию излучения до 10 Дж/л при эффективности излучения 1.3%. Дальнейшее увеличение энергии накачки и содержания HCl, ведет к снижению эффективности.

Достоверность, полученных результатов, подтверждается согласием расчетных зависимостей от времени тока разряда, напряжения на плазме, мощности излучения, а так же значений энергии излучения в широком диапазоне условий: мощности накачки $0.5 - 6 \text{ МВт}\cdot\text{см}^{-3}$, давления 2 – 6 атм, длительности импульса 20 – 150 нс и вложенной энергии $50 - 350 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}$, с экспериментальными данными, полученными в работах¹, [2, 10, 17], а также с расчетными результатами других авторов¹.

Научная новизна работы

- 1) Впервые с использованием одной модели проведено моделирование процессов протекающих в плазме разряда накачки ХеCl-лазера в диапазоне мощностей накачки $0.5 - 6 \text{ МВт}\cdot\text{см}^{-3}$, длительностей импульса 20 – 150 нс и вложенной энергии $50 - 350 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}$.
- 2) Впервые получено распределение энергии вложенной в плазму по процессам создания лазерного излучения и в реакциях тепловых потерь.
- 3) Впервые обосновано существование предельного значения удельной энергии излучения с увеличением в активной среде содержания HCl.

Научная ценность работы

- 1) На основе расчетных данных выявлены основные каналы потерь поглощенной энергии в плазме, а так же влияние на них таких параметров как мощность накачки, вложенная энергия и состав смеси.

- 2) Обоснованы оптимальные соотношения начальной концентрации HCl, вложенной энергии и мощности накачки, необходимые для получения максимальной энергии излучения и эффективности преобразования энергии вложенной в плазму в энергию излучения.

Практическая значимость работы

Полученные результаты позволяют:

1. Выбирать оптимальные начальные параметры для заданных характеристик излучения.
2. Разрабатывать инженерные методы расчета конкретных лазеров.
3. Проводить обучение студентов и аспирантов по специальностям физика плазмы и физика лазеров.

Личный вклад автора заключается в активном участии в постановке задач и целей исследований, проведении расчетов, анализе полученных результатов и формулировке выводов. Все результаты получены лично соискателем или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

Апробация работы. Материалы, вошедшие в диссертацию, обсуждались на следующих конференциях: III, IV, V, VI International Conference “Atomic and Molecular Pulsed Lasers” (Томск 1997, 1999, 2001, 2003), школе-семинаре Сибирского физико-технического института (Томск, 2000), 5-th Russian-Chinese Symposium on Laser Physics and Laser Technology (Томск, 2000), XXVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases (Greifswald (Germany), 2003), XXVII International Conference on Phenomena in Ionized Gases (Eindhoven (the Netherlands), 2005), XIII Международной конференции по методам аэрофизических исследований ICMAR (Новосибирск, 2007).

Основные результаты исследований опубликованы в 13 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 125 страницах машинописного текста, иллюстрируется 46 рисунками и 8 таблицами. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (69 источников) и приложения (16 страниц).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, их научная новизна, приведена практическая значимость и защищаемые положения.

В первой главе проведен обзор литературы и представлено состояние проблемы исследований. Проведен анализ достигнутых к настоящему времени

характеристик ХеСl-лазеров. Рассмотрены основные способы накачки. Рассмотрены основные подходы к моделированию электроразрядного ХеСl-лазера.

Вторая глава посвящена результатам моделирования ХеСl-лазера, на котором была получена в эксперименте рекордная на сегодняшний день удельная энергия излучения 7.6 Дж/л при длительности импульса ~ 50 нс¹. Такая удельная энергия превышает типичные значения в два раза. Генерация была получена в условиях повышенного содержания в активной среде донора галогена. Отношение парциальных давлений компонент газовой смеси было равно Ne/Xe/HCl=1000/5/1.7, при полном давлении 6 атм. Представляло интерес выяснить особенности протекания кинетических процессов в плазме для этих условия, а также определить, является ли полученная удельная энергия максимально возможной.

В п. 2.1 рассматриваются условия эксперимента. Представлены результаты расчета во всем диапазоне экспериментальных условий ($(E/N)_0$ 5–30 Тд, давлений 2–6 атм). Показано, что результаты расчетов и данные эксперимента хорошо согласуются.

П. 2.2 посвящен режиму с максимальной полученной энергией излучения. Рассмотрены процессы, влияющие на электрические свойства плазмы, а так же кинетика эксимерной молекулы ХеСl*.

Представлены (рис. 1) временные зависимости концентраций: электронов, возбужденных атомов Хе*, молекул HCl(0) в основном состоянии и HCl(v) в

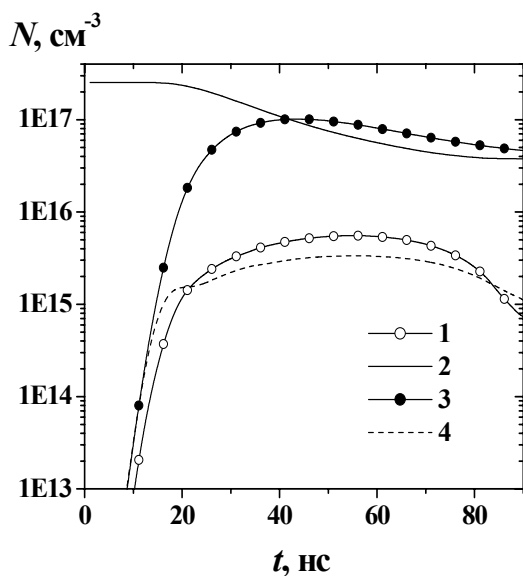


Рис. 1. Концентрации частиц: 1 - электроны, 2 - HCl(0), 3 - HCl(v), 4 - Хе* (сумма всех уровней).

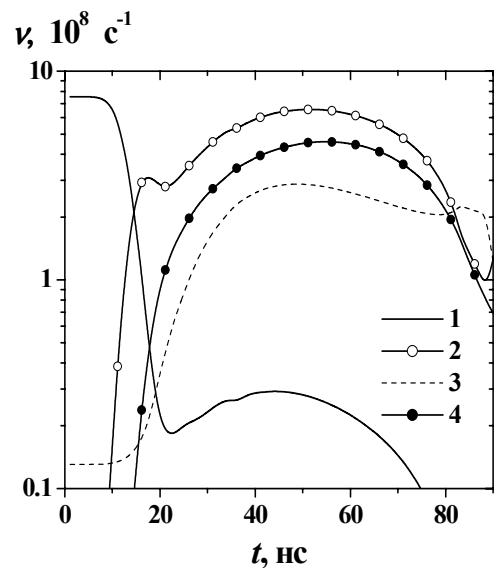


Рис. 2. Частоты (количество актов происходящих на один электрон) процессов: 1 - прямой ионизации, 2 - ступенчатой ионизации, 3 - прилипания, 4 - рекомбинации.

колебательно возбужденном состоянии. А также частоты (количество актов приходящихся на один электрон) (рис. 2) прямой и ступенчатой ионизации, суммарной частоты прилипания электронов к молекулам $\text{HCl}(0)$ и $\text{HCl}(v)$ и частоты рекомбинации. Выявлено, что в рассматриваемом режиме большая концентрация электронов до $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, быстрый рост концентраций Xe^* и $\text{HCl}(v)$ и сильное (90%) выгорание HCl за время импульса накачки.

В начальной стадии (до 10 нс), рост концентрации электронов до уровня 10^{13} см^{-3} осуществляет прямая ионизация. За последующие 10 нс происходит переход от прямой к ступенчатой ионизации и свойства плазмы качественно изменяются. Ступенчатая ионизация снижает энергетическую цену ионизации. При максимальной мощности накачки $6.2 \text{ МВ} \cdot \text{см}^{-3}$ и скорости ионизации равной $2.4 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-3}$ расход энергии накачки на одну ионизацию составляет 16 эВ, что соизмеримо с потенциалом ионизации атома ксенона 12.2 эВ, поэтому эффективность создания иона Xe^+ очень высокая.

Потери электронов в плазме происходят в реакциях рекомбинации и диссоциативного прилипания к молекулам HCl . Частота прилипания полностью определяется концентрацией колебательно-возбужденных молекул $\text{HCl}(v)$, прилипание к которым во много раз выше, чем прилипание к основному состоянию $\text{HCl}(0)$. Поэтому рост скорости ионизации обеспечивает одновременный рост скорости возбуждения молекул $\text{HCl}(v)$ и это создает условия для высокой скорости создания положительных и отрицательных ионов Xe^+ и Cl^- .

Здесь же, рассматриваются процессы с участием молекулы XeCl^* . Около 90% молекул XeCl^* создается в реакции ион-ионной рекомбинации с участием NeXe^+ и Cl^- . Экимерные молекулы рождаются в колебательно возбужденных состояниях XeCl^{**} на уровнях с энергией ~ 8 эВ и выше. Сталкиваясь с атомами Ne , они релаксируют на нижние колебательные уровни $\text{XeCl}(B)$ и $\text{XeCl}(C)$, а затем на уровни B_0 и C_0 . Система уровней находится в связанном состоянии. До начала генерации скорости переходов между уровнями B , B_0 , C и C_0 в несколько раз больше, чем скорость релаксации на них с верхних уровней XeCl^{**} . После достижения порога генерации возникает отток энергии с уровня $\text{XeCl}(B_0)$. Энергия с остальных уровней $\text{XeCl}(B, C, C_0)$ начинает передаваться на уровень $\text{XeCl}(B_0)$. Таким образом, поскольку мощность возбуждения распределяется по четырем уровням, а инверсная населенность создается только на уровне $\text{XeCl}(B_0)$, необходима большая мощность для преодоления порога генерации.

Это является одной из причин большого времени запаздывания генерации в ХеСl-лазере.

Тушение эксимерных молекул на всех уровнях ХеСl(B, B₀, C, C₀) значительно снижает эффективность лазерного излучения. Тушение происходит в результате столкновений с электронами и тяжелыми частицами (в основном с HCl(v) и Ne). До начала лазерной генерации до 90 % всех созданных молекул ХеСl* гибнет в реакциях тушения. По мере увеличения интенсивности излучения в резонаторе, увеличивается вероятность индуцированного излучения. Это снижает концентрацию ХеСl(B₀) и остальных связанных с ним уровней ХеСl(B, C, C₀). В результате происходит снижение скорости тушения возбужденных эксимерных молекул. После этого ~ 60% энергии возбуждения молекул ХеСl* переходит в энергию индуцированных фотонов. При этом 25% всех молекул ХеСl* гибнет в столкновениях с электронами и 15% в столкновениях с тяжелыми частицами (рис. 3).

В п. 2.3 представлен анализ распределения поглощенной энергии в плазме по основным процессам. За время всего импульса накачки, 80% энергии передается на возбуждение Хе и HCl. Энергия (~18%), расходуется в процессах ступенчатой ионизации. Оставшаяся часть 2-3% энергии расходуется на возбуждение и ионизацию других частиц.

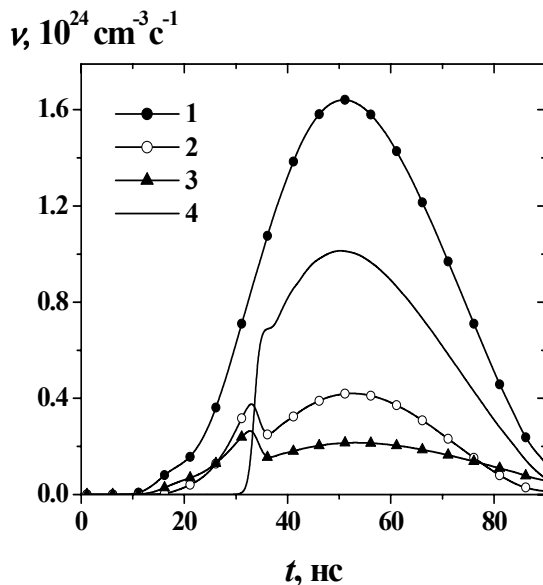


Рис. 3. Скорости процессов рождения (1) и гибели молекулы ХеСl*: 2 — тушение электронами, 3 — тушение тяжелыми частицами, 4 — индуцированное излучение.

Часть энергии поглощенной в плазме передается на образование эксимерных молекул, остальная часть уходит в тепло (рис. 4). В момент времени соответствующий максимуму излучения ~50% энергии в единицу времени передается на образование эксимерных молекул ХеСl**. Потери энергии распределяются по четырем основным каналам. Большая часть энергии теряется в процессах тушения уровней электронного и колебательного возбуждения молекул HCl и возбужденных уровней атома ксенона Хе*. Эти потери составляют ~ 30% от

вложенной энергии.

В актах электрон-ионной рекомбинации гибнет ион NeXe^+ с энергией 11 эВ и рождается возбужденный атом Xe^* с энергией ~ 9.9 эВ. Энергия порядка 1 эВ уходит в тепло. В максимуме тока потеря 1 эВ со скоростью $2.5 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, дает 0.4 МВт мощности уходящей на нагрев газа. За весь импульс накачки в процессах рекомбинации в тепло уходит $\sim 10\%$ от вложенной энергии.

Из-за высокого содержания Ne в активной среде, в плазме с высокой скоростью происходят реакции конверсии атомарного иона Xe^+ в молекулярный ион NeXe^+ . Реакция идет с потерей энергии ~ 1.2 эВ в каждом акте. Полные потери за весь импульс возбуждения в таких реакциях составляют 14% энергии накачки.

Только часть энергии молекул XeCl^{**} переходит в индуцированное излучение, остальная теряется в процессах их релаксации на уровни $\text{XeCl}(B, B_0, C, C_0)$ и тушения молекул $\text{XeCl}(B, B_0, C, C_0)$, которое происходит при столкновении с электронами и тяжелыми частицами (рис. 5). Основная доля потерь энергии приходится на релаксацию эксимерных молекул с верхних колебательных уровней XeCl^{**} на уровень $\text{XeCl}(B_0)$. Так теряется 31% энергии накачки.

Представленные на рисунке 5 зависимости показывают, что суммарные потери мощности при тушении эксимерных молекул соизмеримы с мощностью индуцированного излучения. Процессы тушения снижают эффективность лазера,

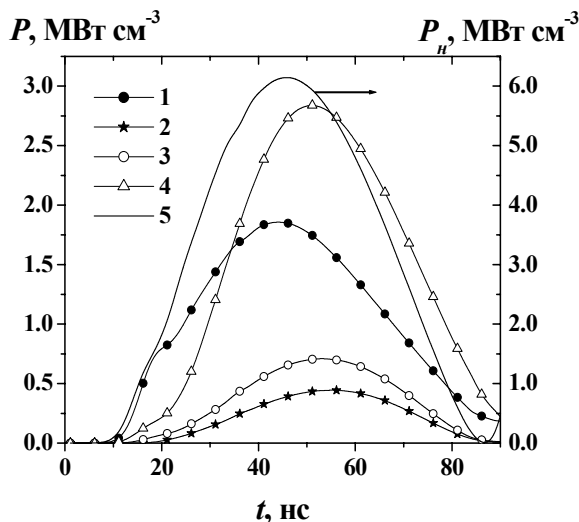


Рис. 4. Мощность создания XeCl^{**} – 4; мощность уходящая в тепло в реакциях: тушения $\text{HCl}(v)$, HCl^* и Xe^* – 1, рекомбинации – 2, конверсии Xe^+ в NeXe^+ – 3; мощность накачки – 5.

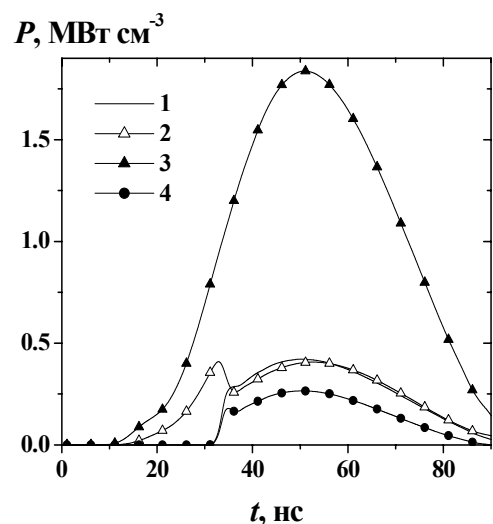


Рис. 5. Мощность индуцированного излучения – 1; мощность теряемая в процессах: 2 – тушения XeCl^* , 3 – релаксации с XeCl^{**} на $\text{XeCl}(B_0)$, 4 – поглощения излучения.

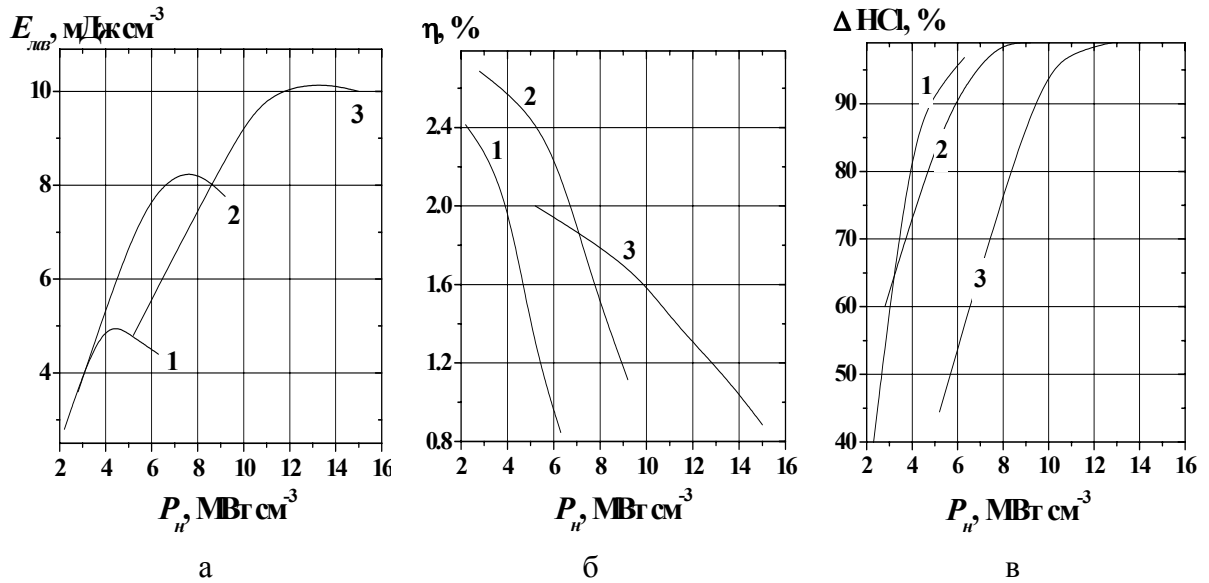


Рис. 6. Зависимость энергии излучения (а), эффективности (б) и степени выгорания HCl от мощности накачки для газовой смеси Ne:Xe:HCl: 1 - 1000:5:0.85, 2 - 1000:5:1.7, 3 - 1000:5:3.4.

примерно в два раза. Процессы тушения электронами создают большую часть потери мощности, чем процессы тушения тяжелыми частицами. При этом частицами, участвующими в тушении, в основном, являются молекулы HCl.

Потери мощности в реакциях поглощения лазерных фотонов в полтора раза превышают выходную мощность лазера. Частицами, создающими наибольшее поглощение являются отрицательные ионы хлора. Эффективность лазера, определяемая, как отношение максимальных значений мощности генерации к мощности накачки составила 2.6%.

В п. 2.4 обсуждается возможность увеличения энергии излучения при увеличении содержания HCl в смеси. Зависимости энергии излучения от удельной мощности накачки для разных парциальных давлений HCl, представлены на рис. 6(а). Для смеси 1000:5:0.85, максимальная энергия составляет $5 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}$. Увеличение концентрации HCl в два раза позволяет поднять энергию излучения до $8 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}$. При увеличении HCl еще в два раза максимальная лазерная энергия возрастает до $10 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}$.

Таблица 1. Число частиц необходимое для создания одного кванта излучения

Ne:Xe:HCl	$\text{HCl} \rightarrow \text{Cl}^- \rightarrow \text{XeCl}^* \rightarrow h\nu_{\text{res}} \rightarrow h\nu_{\text{rad}}$					
1000:5:0.84	14.6	$\xrightarrow{7.0}$	6.6	$\xrightarrow{0.5}$	7.0	$\xrightarrow{4.0}$ 3.0 $\xrightarrow{2.0}$ 1
1000:5:1.7	18.7	$\xrightarrow{10.4}$	7.2	$\xrightarrow{0.6}$	7.7	$\xrightarrow{4.1}$ 3.6 $\xrightarrow{2.6}$ 1
1000:5:3.4	27.5	$\xrightarrow{15.9}$	9.8	$\xrightarrow{1.1}$	10.3	$\xrightarrow{5.9}$ 4.4 $\xrightarrow{3.4}$ 1

Последовательность преобразования молекул HCl в кванты излучения показана в таблице 1. Числа в строке показывают число соответствующих частиц необходимых для получения одного лазерного фотона. Данные таблицы 1 соответствуют режимам, в которых получается максимальная энергия. С увеличением концентрации HCl потери молекул HCl, эксимерных молекул и фотонов в среде существенно увеличиваются, и увеличивается число молекул HCl необходимых для получения одного кванта излучения. С увеличением содержания в смеси HCl эффективность уменьшается (рис. 6(б)).

Для каждой смеси максимум излучения достигается, когда выгорает 90% от начального содержания молекул HCl (рис. 6(в)). При дальнейшем увеличении мощности накачки происходит увеличение потерь (тушение возбужденных частиц и поглощение излучения) без увеличения количества эксимерных молекул. Энергия излучения уменьшается.

Третья глава посвящена режимам с короткой длительностью импульсов накачки. Простые электрические схемы, высокие пиковые мощности и возможность создавать лазеры с высокой частотой повторения импульсов делают ХеСl-лазеры с длительностями импульсов накачки 20-30 нс привлекательным инструментом для различных применений.

В п. 3.1 представлены результаты численного моделирования ХеСl-лазера с

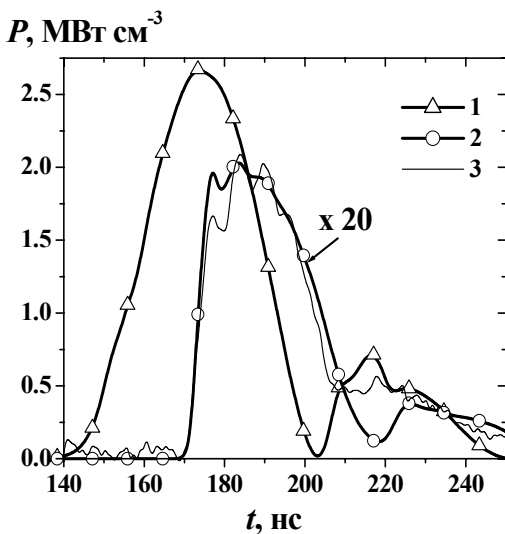


Рис. 7. Мощность накачки - 1 и мощность лазерного излучения: 3 - эксперимент, 2 - расчет.

длительностью импульса излучения ~ 30 нс [10]. В эксперименте и расчетах использовалась смесь Ne/Xe/HCl=770/8.0/1.1 при давлении 3.6 атм. Объем разряда ~ 100 см³. В этом режиме при мощности накачки 2.7 МВт·см⁻³, получена мощность излучения 10 МВт и лазерная энергия 360 мДж (3.6 мДж·см⁻³) при эффективности 3.2%. Концентрация электронов в максимуме достигает значения $4 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента показывают хорошее

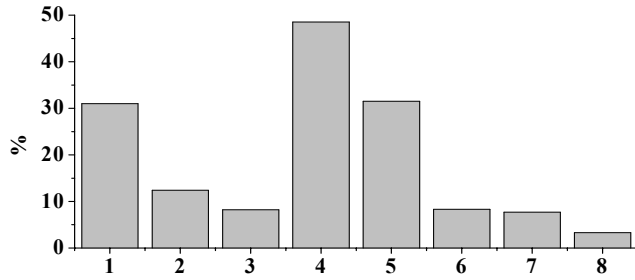


Рис. 8. Траты энергии по основным каналам за весь импульс возбуждения (в % от E_n): тушение Xe^* , $\text{HCl}^*(v)$ – 1, конверсия – 2, рекомбинация – 3, образование XeCl^{**} – 4, релаксация – 5, тушение XeCl^* – 6, интвипированное *злучение – 7, кпл. лазера – 8.

запаздывания начала генерации. До начала генерации около 75% образовавшихся молекул XeCl^* гибнет в реакциях тушения и ~3% в процессах спонтанного излучения. При достижении порога генерации, потери эксимерных молекул в процессах тушения и спонтанного излучения уменьшаются больше, чем в полтора раза.

Распределение энергии накачки по основным процессам показано на рис. 8. Можно видеть, что на образование эксимерных молекул в плазме было затрачено 48% вложенной энергии.

В п. 3.2 представлены результаты численного моделирования XeCl -лазера с длительностью импульса накачки ~20 нс [17]. Представленные результаты были получены для газовой смеси $\text{Ne/Xe/HCl}=1750/30/2$ при общем давлении 3.6 атм. Объем разряда ~74 см³. В этом режиме при мощности накачки 3.2 МВт·см⁻³, получена мощность излучения 7.5 МВт (рис. 9) и лазерная энергия 200 мДж (2.7 мДж·см⁻³) при эффективности 3.1%. Максимальная концентрация электронов $6 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента показывает хорошее согласие.

Анализируется влияние увеличения мощности накачки на процессы в активной среде. Показано, что даже с увеличением мощности

согласие. Характерно, что генерация начинается в области максимума накачки и лазерная генерация происходит на спаде первого импульса накачки и продолжается на втором импульсе (рис. 7). Высокие скорости тушения эксимерных молекул являются причиной большого времени

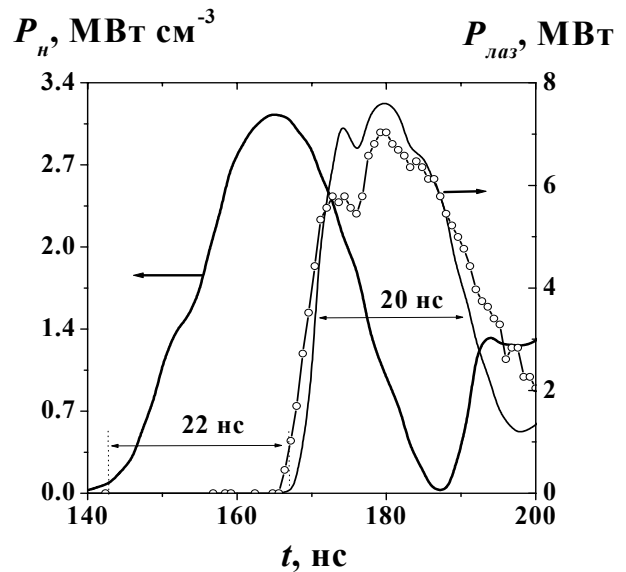


Рис. 9. Мощность накачки и мощность излучения (сплошная линия – расчет, точки – эксперимент).

накачки P_n в несколько раз, не удается заметно уменьшить время запаздывания начала генерации. Так при увеличении P_n с 3 МВт·см⁻³ до 9 МВт·см⁻³, время запаздывания уменьшилось с 22 нс до 15 нс. Анализ скоростей процессов рождения и гибели молекулы XeCl^* , показал, что с ростом мощности накачки (концентрации электронов) увеличиваются, не только скорости рождения XeCl^* , но и скорости их гибели в реакциях тушения. Поэтому уменьшить время запаздывания начала генерации путем увеличения скорости

нарастания концентрации электронов меньше значений 10-15 нс не представляется возможным. Большие времена запаздывания накладывают ограничение на возможности уменьшения длительности импульса накачки в обычной двух контурной схеме.

Кроме того, было показано, что в рассматриваемом диапазоне мощности накачки эффективность преобразования вложенной энергии в излучение снижается с ее ростом (рис.10). Причиной такого поведения эффективности является увеличение потерь энергии в процессах рекомбинации, конверсии атомарного иона Xe^+ в молекулярный ион NeXe^+ . Уменьшается часть энергии накачки, которая используется в плазме для образования эксимерных молекул. Так, увеличение концентрации электронов с $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (3 МВт·см⁻³) до 10^{16} см^{-3} (9 МВт·см⁻³) уменьшает эффективность образования молекул XeCl^* с 49% до 33%.

Четвертая глава посвящена результатам численных исследований режима накачки XeCl -лазера с электрической схемой, содержащей полупроводниковый прерыватель тока [2]. Использование таких прерывателей тока позволяет увеличить напряжение на обострительном конденсаторе более, чем в два раза, тогда как двухконтурная схема дает превышение напряжения менее чем в два раза, по сравнению с напряжением основного конденсатора. При срабатывании прерывателя генерируется высоковольтный предимпульс, который позволяет сформировать плазму разряда и создать инверсную населенность за время ~ 10 нс. Дальнейшая накачка активной среды

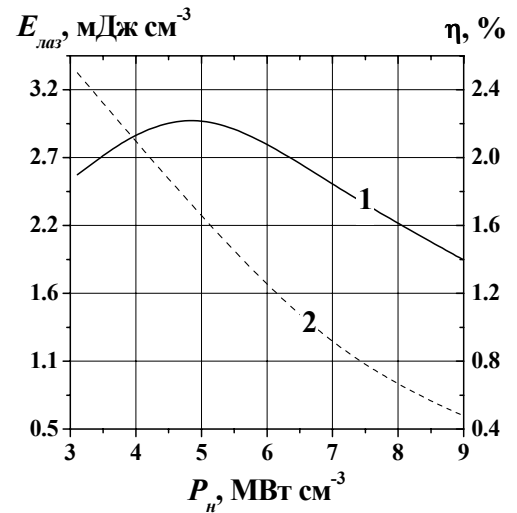


Рис. 10. Зависимость удельной энергии излучения $E_{\text{лаз}}$ и эффективности η от мощности накачки P_n .

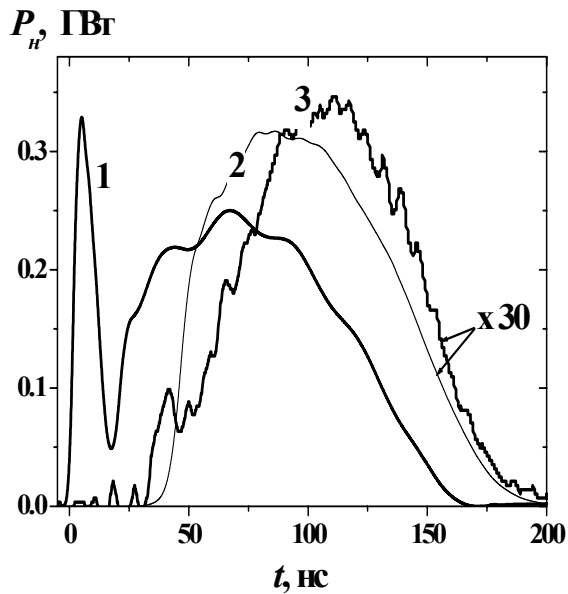


Рис. 11. Мощность накачки - 1 и мощность излучения: 2 - расчет, 3 - эксперимент.

осуществляется от основного конденсатора. Проведены расчеты для диапазона зарядных напряжений 24-36 кВ. Расчетные зависимости энергии излучения и эффективности лазера от зарядного напряжения хорошо согласуются с зависимостями полученными экспериментально. Максимальная энергия излучения 1 Дж ($2.3 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}$) получена при максимальном достигнутом в эксперименте зарядном напряжении 36 кВ. На рис. 11 приведены мощность,

вводимая в разряд и мощность излучения. Первый пик мощности накачки $0.81 \text{ МВт}\cdot\text{см}^{-3}$ уже к моменту времени 9 нс создает концентрацию электронов $1.3\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и концентрации молекул $\text{HCl}(v)$ в состоянии колебательного возбуждения увеличиваются до $2\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Основной импульс накачки с мощностью $0.5 \text{ МВт}\cdot\text{см}^{-3}$ поддерживает концентрацию электронов на уровне 10^{15} см^{-3} и обеспечивает эффективную генерацию $\sim 150 \text{ нс}$.

Анализ распределения энергии по основным процессам показал, что снижение концентрации электронов до уровня 10^{15} см^{-3} , по сравнению с предыдущими рассмотренными режимами накачки, уменьшает потери энергии в процессах тушения эксимерных молекул. Это позволило получить эффективность от вложенной энергии 4%.

Кроме того, в главе рассматривается влияние времени запаздывания начала генерации на эффективность лазера. С увеличением зарядного напряжения U_0 с 25 кВ до 36 кВ, эффективность лазера возрастает от 3.1% до 4%. Показано, что в этом диапазоне увеличения U_0 уменьшается время запаздывания начала генерации с 77 нс до 39 нс. В результате этого, уменьшается часть энергии накачки, которая теряется в процессах тушения эксимерных молекул XeCl^* . До начала генерации, в режиме с $U_0 = 25 \text{ кВ}$ теряется 6.6% вложенной энергии. Уменьшение времени запаздывания на 40 нс, снижает эту долю почти в 2 раза.

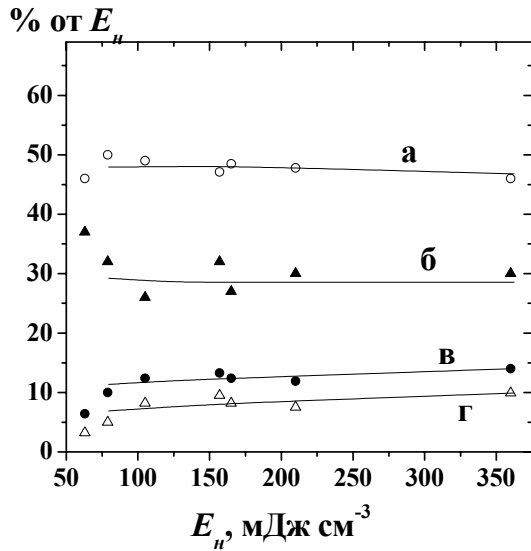


Рис. 12. Зависимость от энергии накачки E_n доли E_n распределенной по каналам: образование XeCl^{**} – а, тушение Xe^* , $\text{HCl}^*(v)$ – б, конверсия – в, рекомбинация – г.

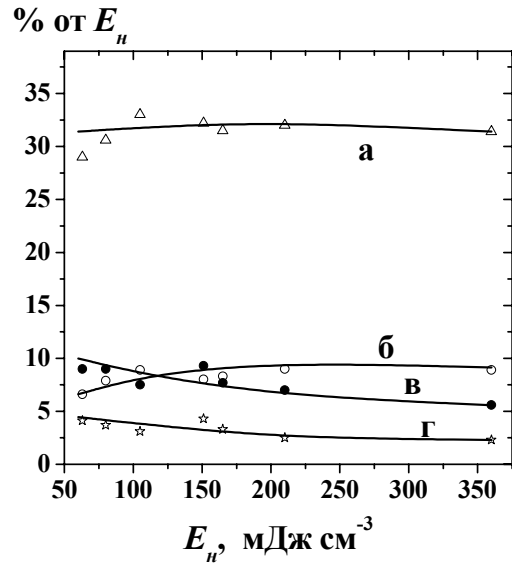


Рис. 13. Зависимость от энергии накачки E_n доли E_n распределенной по каналам: релаксация – а, тушение XeCl^* – б, индуцированное излучение – в, кпд лазера – г.

В заключение главы, приводится обобщение результатов полученных во всем диапазоне условий рассмотренных в главах 2, 3 и 4. Приведены зависимости от энергии накачки распределения ее доли по основным процессам, происходящим в плазме (рис. 12, 13). Показано, что в режимах отличающихся длительностью импульса возбуждения, давлением и составом газовой смеси, с изменением энергии накачки в диапазоне 80 – 360 мДж·см⁻³, сохраняется относительное распределение энергии затраченной в процессах: образования молекул XeCl^* , тушения возбужденных уровней Xe^* , $\text{HCl}(v)$ и HCl^* , рекомбинации и конверсии Xe^+ в NeXe^+ .

Уменьшение эффективности с ростом вкладываемой энергии коррелирует с увеличением потерь энергии в процессах тушения эксимерных молекул электронным ударом.

Кроме того, были выявлены еще некоторые закономерности (таблица 2). Во всех режимах, где получена максимальная для данной смеси энергия излучения, на использование одной молекулы HCl затрачена энергия накачки ~10 эВ.

С ростом начальной концентрации HCl уменьшается эффективность его использования, т.е. возрастает количество молекул необходимых для образования одного кванта излучения.

Наиболее высокая эффективность получена в режимах с концентрацией электронов 10^{15} см⁻³. Увеличение концентрации электронов в плазме позволяет

получать энергию излучения $5 \text{ мДж}\cdot\text{см}^{-3}$ и выше, но приводит к снижению эффективности лазера.

Таблица 2. Основные характеристики некоторых рассмотренных режимов

E_n , мДж·см ⁻³	P_n , МВт·см ⁻³	HCl_0 , см ⁻³	n_e , см ⁻³	ΔHCl , %	$E_{\text{лаз}}$, мДж·см ⁻³	$P_{\text{лаз}}/P_n$, %	$E_n/\Delta\text{HCl}$, эВ	кол-во HCl на 1 фотон
640	11.4	$5.0\cdot 10^{17}$	$7\cdot 10^{15}$	98	10	1.8	8.2	31.4
360	6.2	$2.5\cdot 10^{17}$	$6\cdot 10^{15}$	90	8	2.6	10.0	17.84
172	3.	$1.3\cdot 10^{17}$	$4\cdot 10^{15}$	73	4.3	3.1	11.6	13.7
165	2.7	$1.3\cdot 10^{17}$	$4\cdot 10^{15}$	65	3.5	3.7	11.8	15.8
158	1.	$1.2\cdot 10^{17}$	$3\cdot 10^{15}$	82	5.6	4.2	9.9	11.4
123	0.8	$1.0\cdot 10^{17}$	$2\cdot 10^{15}$	79	4.9	4.2	9.7	10.4
63	0.6	$1.0\cdot 10^{17}$	$1\cdot 10^{15}$	50	2.8	4.8	7.9	11.3

В заключении перечислены основные выводы и результаты работы, полученные впервые:

1. Увеличение частоты прилипания электронов к молекулам $\text{HCl}(v)$ с колебательным возбуждением происходит одновременно с ростом частоты ступенчатой ионизации. Этим обусловлена большая скорость образования XeCl^{**} молекул и высокая эффективности их создания.
2. Энергия, вложенная в плазму, расходуется по следующим четырем основным каналам - образование эксимерных молекул, тушение возбужденных состояний Xe и HCl , электрон-ионная рекомбинация и конверсия атомарного иона Xe^+ в молекулярный ион NeXe^+ .
3. Значительные потери эксимерных молекул происходят в процессах их тушения электронами и молекулами $\text{HCl}(v)$. До начала генерации они составляют 80% всех образованных XeCl^* . Начало генерации снижает эти потери до 40%.
4. При увеличении мощности накачки, которое необходимо при малой длительности импульса накачки, тушение электронами становится доминирующим процессом. Это затрудняет формирование фотонной лавины и снижает эффективность лазера.
5. Обоснована возможность увеличения удельной энергии излучения путем одновременного повышения концентрации HCl в газовой смеси и увеличении мощности накачки. При этом увеличиваются потери энергии в процессах тушения, и увеличение удельной энергии излучения происходит при снижении эффективности генерации.

В приложении описывается модель ХеСl-лазера, на основе которой, получены все изложенные в работе результаты. Основное приближение – предположение, что во время всей длительности импульса накачки сохраняется пространственная однородность разряда. Кинетика процессов в плазме описывается балансными уравнениями, которые учитывают 229 реакций между 39 частицами. Для определения скоростей процессов с участием электронов решается уравнение Больцмана. Используется одномерная модель резонатора, в которой лазерное излучение формируется двумя потоками лазерных фотонов направленных на встречу друг другу. Кроме того, систему уравнений завершают уравнения для цепи накачки, в которые разряд входит как переменное сопротивление.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бычков Ю. И., Макаров М. К., Ямпольская С. А., Ястремский А. Г. 0D Модель ХеСl-лазера. Проблема оптимизации разряда накачки // Оптика атмосферы и океана. — 1998. — Т. 11, № 2-3. — С. 149-154.
2. Бычков Ю.И. Горчаков С.Л. Ямпольская С.А. Ястремский А.Г. Электрический разряд накачки ХеСl лазера // Известия ВУЗов, серия Физика. — 2000. — №5. — С.76-86.
3. Ямпольская С.А. Расчет пространственно-временных характеристик разряда в активном объеме ХеСl лазера // Известия ВУЗов, серия Физика. — 2000. — №9. — С. 108-110.
4. Bychkov Yu., Gortchakov S., Yampolskaya S., Yastremsky A. Experimental and theoretical investigations of a discharge pumped ХеСl laser // Proc. V Russian-Chinese Symposium on Laser Physics and Laser Technology. — Tomsk, 2001. — P. 316-333.
5. Bychkov Yu. I., Gortchakov S. L., Yastremsky A.G., Yampolskaya S. A. 2D simulation of the plasma channels formation in ХеСl discharges // Proc. XXVI ICPIG. — Greifswald, Germany, 2003. — V. 3. — P. 73-75.
6. Bychkov Yu., Yampolskaya S., Yastremsky A. Influence of Q-factor value of optical resonator on spatial discharge structure and output characteristics of long pulse ХеСl laser // SPIE proc. — 2002. — V. 4047. — P. 93-98.
7. Bychkov Yu. I., Gortchakov S. L., Yastremsky A.G., Yampolskaya S. A. Effect of pre-ionization border on development of inhomogeneities in electrical discharge pumped ХеСl laser // SPIE proc. — 2002. — V. 4047. — P. 106-112.

8. Bychkov Yu., Baksht E., Panchenko A., Tarasenko V., Yampolskaya S., Yastremsky A. Formation of pumping discharge of XeCl laser by means of semiconductor opening switch // SPIE proc. — 2002. — V. 4047. — P. 99-105.
9. Bychkov Yu., Yampolskaya S., Yastremsky A. Two-dimensional simulation of initiation and evolution a plasma channel in the XeCl laser pumping discharge // Laser and Particle Beams. — 2003. — V. 21. — P. 233–242.
10. Bychkov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yampolskaya S.A., Yastremsky A.G. Peculiarities of work of short pulse electrical discharge XeCl laser // Proc. SPIE. — 2003. — V. 5483. — P. 60–66.
11. Bychkov Yu. I., Gorchakov S. L., Yampolskaya S. A., Yastremsky A. G. Analysis of a short pulse operation of a discharge-pumped XeCl laser // Proc. XXVII Intr. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. — Eindhoven, the Netherlands, 2005. — P.18-22.
12. Bychkov Yu. I., Losev V. F., Panchenko Yu. N., Yampolskaya S. A., Yastremsky A. G. Research of short pulse discharge XeCl laser // SPIE proc. — 2004. — V. 5777. — P. 558-561.
13. Bychkov Yu. I., Yampolskaya S. A., Yastremsky A. G. The possibility to obtain the maximum energy of a discharge-pumped XeCl-laser // Proc. XIII Intr. Conf. on Methods of Aerophysical Research. — Novosibirsk, 2007. — V. 2. — P. 47-51.