

Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН

На правах рукописи

УДК Д 002.023.03

Аристов Андрей Игоревич

Фотохимический XeF(C - A)-усилитель фемтосекундных импульсов с
накачкой излучением электронно-пучкового конвертера

01.04.21 – “Лазерная физика”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва

2011

Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук

Михеев Л.Д.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук

А.М. Бойченко (ИОФАН),

кандидат физико-математических наук

В.О. Компанец (ИСАН)

Ведущая организация: Институт сильноточной электроники СО РАН,

г. Томск.

Защита диссертации состоится 30 января 2012 г. в 12 часов на заседании Диссертационного Совета Д 002.023.03 в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2011г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета

Д 002.023.03

А.С. Шиканов

I. Общая характеристика работы.

Актуальность темы

Основная идея развиваемого в работе подхода состоит в комбинации широко распространенных фемтосекундных комплексов на титан-сапфире и фотохимического XeF(C-A)-усилителя с оптической накачкой, обладающего привлекательными характеристиками для усиления второй гармоники фемтосекундного стартового комплекса. В самом деле, газовая активная среда позволяет работать с гораздо большими интенсивностями, чем в случае использования кристаллов, поскольку разреженный газ обладает меньшей нелинейностью и обладает более высоким порогом ионизации. В отличие от твердотельной активной среды разреженный газ позволяет работать с импульсами, чирпированными до пикосекунд, а не сотен пикосекунд. Если усиливаемый импульс чирпировать отрицательно, что сжатие после усиления можно производить в объеме стекла за счет положительной дисперсии. Удвоение частоты позволяет повысить контраст в пикосекундном и наносекундном диапазоне.

Цели работы

1. Создание фемтосекундного гибридного комплекса на основе титан-сапфирового задающего генератора и фотохимического XeF(C-A)-усилителя с накачкой излучением электронно-пучкового конвертера с целью отработки новых технологий, и выяснения перспектив получения в нем мультитераваттной мощности.
2. Исследование энергетических и усилительных характеристик XeF(C-A)-усилителя с накачкой излучением электронно-пучкового конвертера.
3. Разработка систем чирпирования 50-фс импульса на длине волны 2-ой гармоники Ti:Sa генератора и обратного сжатия усиленного импульса, характеризующихся низким уровнем фазовых искажений порядка длины волны.
4. Достижение режима насыщения в активной среде XeF(C-A) при усилении отрицательно чирпированного импульса и последующее сжатие в 50-фс диапазон в компрессоре на основе положительной дисперсии групповых скоростей в объеме стекла.

Научная новизна

Впервые создана гибридная 50-фемтосекундная система на основе

твердотельного Ti:Sa генератора задающих импульсов и газового фотохимического XeF(C–A)-усилителя. Особенностью данной системы являются видимый спектральный диапазон на длине волны 475 нм и высокий ожидаемый контраст.

Практическая ценность

Создана уникальная фемтосекундная система, работающая в сине-зеленом спектральном диапазоне, и разработаны ключевые технологии, позволяющие конструировать гибридные фемтосекундные системы сине-зеленого спектрального диапазона с пиковой мультитераваттной мощности.

Апробация работы

Все основные результаты получены Аристовым А. И. лично или при его непосредственном участии и содержатся в следующих работах, опубликованных в рецензируемых журналах:

1. Photolytical XeF (C–A) laser amplifier of femtosecond optical pulses: gain measurements and pump efficiency / V. Tcheremiskine, O. Uteza, A. Aristov et al. // *Applied Physics B: Lasers and Optics*.— 2008.— Vol. 91, no. 3.— Pp. 447–454.
2. Гибридная фемтосекундная лазерная система на основе фотохимического XeF(C–A)-усилителя с апертурой 12 см / А.И. Аристов, Я.В. Грудцын, И.Г. Зубарев и др. // *Оптика атмосферы и океана*.— 2009.— Т. 22, № 11. — С. 1029–1034.
3. Характеристики гибридной фемтосекундной системы на базе активной среды XeF(C–A) с фотохимической накачкой / А.И. Аристов, Я.В. Грудцын, Н.Г. Иванов и др. // Приложение к журналу *Физическое образование в вузах*.— 2010.— Т. 16.— С. П4

Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- 1) International Symposium “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics”, NWP-2: “Physics of Extreme Light”, July 20-26, 2008, Nizhny Novgorod, Russia.
- 2) International Conference on Ultrahigh Intensity Lasers, October 27-31, 2008, Tongly, China. Abstracts, p. 30.
- 3) VII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers, 10 September 2007, Tomsk, Russia. Proceedings SPIE 6938, 69380W (2008).
- 4) UFO-HFSW-2009 - Arcachon, France. - 31 August- 4 September 2009. - 2009. - с. 199-201 (93959516)
- 5) Atomic and Molecular pulsed lasers: Abstracts of IX International Conference - Tomsk, Russia. - September 14-18, 2009. - Tomsk: IOA SB RAS. - 2009. - с. 53 (5443930)

- 6) CLEO2009, Munich, Germany
- 7) Laser Optics 2010, St. Petersburg, Russia
- 8) ICONO/LAT2010, Kazan, Russia
- 9) 2010 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 16 May - 21 May 2010, San Jose, CA, USA
- 10) ICUIL2010, Rochester, USA
- 11) Atomic and Molecular pulsed lasers: X International Conference - Tomsk, Russia. - September 12-16, 2011. - Tomsk: IOA SB RAS.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Список использованной литературы содержит 37 наименований. Текст диссертации содержит 72 страниц машинописного текста, включая 43 рисунка.

Защищаемые положения

1. Накачка фотохимического XeF(C-A)-усилителя излучением электронно-пучкового конвертера, который при вложенной в него энергии электронного пучка 2.5 кДж позволяет получать коэффициент усиления малого сигнала до $3 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ в активной среде объемом $12 \times 12 \times 120 \text{ см}^3$ при 0.5 Торр XeF₂ и (0.1-0.5) атм азота. При этом активная среда позволяет осуществлять однородное по профилю интенсивности и спектру многопроходное усиление фемтосекундных импульсов в пучке диаметром 1-2 см.
2. Чирпирование исходного 50-фс импульса до 1 пс позволяет усиливать в XeF(C-A)-усилителе пучки фемтосекундного излучения дифракционного качества до плотности энергии насыщения с минимальными фазовыми искажениями волнового фронта существенно меньше длины волны.
3. Многопроходная оптическая схема усиления на основе трехмерной оптической ловушки обеспечивает полный коэффициент усиления по крайней мере 3×10^2 при входной энергии 0.5 мДж и достижение плотности энергии насыщения активной среды.
4. Метод обратного временного сжатия усиленных импульсов за счет положительной дисперсия групповых скоростей в объеме стекла обеспечивает восстановление длительности 50-фс импульсов, отрицательно чирпированных до 1 пс с помощью призмной пары, при интенсивности в компрессоре по крайней мере 0.02 ТВт/см^2 .

II. Содержание работы

В Главе 1 «Введение» рассматриваются основные исторические моменты в развитии фотохимического метода накачки газовых лазерных сред и обсуждаются принципы и технологии, применяемые в гибридных (твердое тело / газ) системах.

Традиционные эксимерные соединения галогенидов благородных газов с накачкой электронным пучком либо открытым разрядом, такие как ArF, XeCl, KrF и XeF(B – X), широко использовались в качестве выходных каскадов усиления для получения больших энергий в фемтосекундных системах на основе красителей. Подобные системы позволили достичь тераваттных мощностей в импульсах длительностью до полпикосекунды.

Причины, по которым данные системы не нашли в дальнейшем широкого применения состоят в узком (2 нм) спектре усиления, не позволяющим сократить выходную длительность ниже 0.1 пс, низкая энергия насыщения порядка 1 мДж/см² с соответствующей мощностью на выходе 0.01 ТВт/см² а также низкий контраст $10^2 - 10^3$.

Однако существуют более широкополосные переходы в сине-зеленом спектральном диапазоне, например XeF(C–A). Преимущества перехода XeF(C–A) следующие: широкая полоса индуцированного перехода 60 нм, достаточная для усиления 6-фс импульсов, большое время жизни возбужденного состояния 100 нс и высокая энергия насыщения (50 мДж/см²) выделяют переход XeF(C–A) среди традиционных эксимеров.

Впервые усиление на данном переходе было получено с накачкой электронным пучком. Такой способ накачки затрудняет работу на переходе XeF(C–A). Электронный пучок наводит в среде поглощение и генерацию на соседнем переходе В-Х. Однако большое время жизни позволяло наблюдать усиление до $3 \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ в режиме послесвечения после окончания действия накачки и получить 250 мДж в 0.25-пс импульсе. Таким образом была достигнута мощность 1 ТВт. В ряде работ удалось подобрать мощность накачки таким образом, чтобы получить генерацию в видимом диапазоне на всей длительности накачки. Полученная энергия достигла 170 Дж. Из-за большой сложности такого подхода работы не были продолжены.

В качестве альтернативы электронному пучку можно использовать оптическую накачку вакуумным ультрафиолетом (ВУФ). В ФИАНе для этого использовалась электрически взрывающаяся проволока, в США – ксеноновая лампа, возбуждаемая электронным пучком (электронно-пучковый конвертер).

Квант накачки приводит к диссоциации молекулы XeF₂ с образованием возбужденного В-состояния XeF. В присутствии буферного газа азота либо

аргона молекула столкновительно релаксирует из В в С-состояние. Структура термов образовавшейся в результате фотодиссоциации молекулы XeF представлена на Рис. 1. Система термов молекулы XeF.

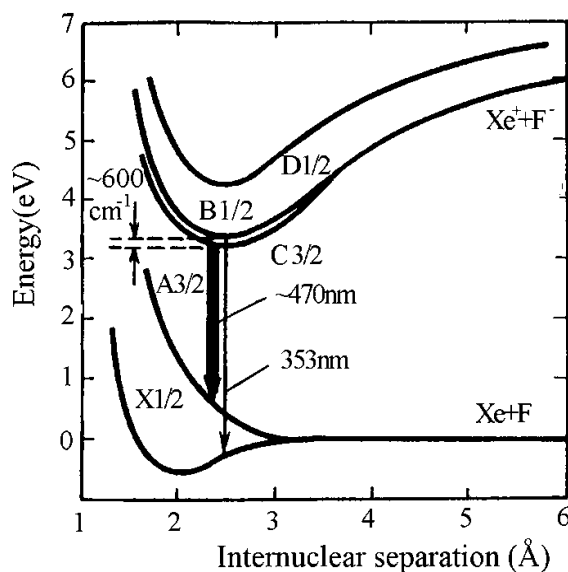


Рис. 1. Система термов молекулы XeF.

Экспериментальные данные по энергии в режиме генерации, достигнутой при оптическом возбуждении: порядка 1 кДж в УФ диапазоне (на В — X переходе **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) с накачкой излучением криптона на фронте ударной волны (так называемая взрывная накачка) и 120 Дж (на С — А переходе [2]) с накачкой поверхностным разрядом.

Концепция гибридной фемтосекундной лазерной системы состоит в использовании газового усилителя в качестве выходного каскада при усилении излучения титан-сапфирового лазера с удвоением частоты. Вторая гармоника позволяет повысить контраст задающего генератора. Плотность энергии насыщения 50 мДж на кв. см позволяет получать 1 ТВт с квадратного сантиметра апертуры в 50 фс импульсе. На три порядка меньшая плотность по сравнению с кристаллами позволяет усиливать импульсы chirпированные до 1 пикосекунды, а не до сотен пикосекунд. Если перед усилением внести отрицательный chirп, то на выходе из системы усиленный импульс можно сжать в стекле за счет положительной дисперсии.

Усилитель с оптической накачкой впервые был реализован с использованием накачки излучением скользящего разряда по поверхности тефлона. Лазерная смесь дифторида ксенона с азотом и аргоном накачивалась ВУФ излучением разогретой до 20 кК плазмы разряда.

Усилители с накачкой поверхностным разрядом были построены в ФИАНе и в Лаборатории LP3 Марсельского Университета, Франция. В усилителе использовалась многопроходная схема на базе зеркальной ловушки с

плоскими зеркалами. Экспериментально продемонстрированы коэффициент усиления $2 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, однородный по сечению лазерной кюветы, а также 100-кратное усиление малого сигнала, однородное по спектру [3].

В Главах 2 и 3 подробно описывается устройство гибридной фемтосекундной системы, полученные результаты и их обсуждение. Установка состоит из титан-сапфирового комплекса с удвоением частоты, призмного стретчера с отрицательной дисперсией, фотохимического XeF(C-A) усилителя и компрессора на базе положительной дисперсии в стекле (рис. 2).

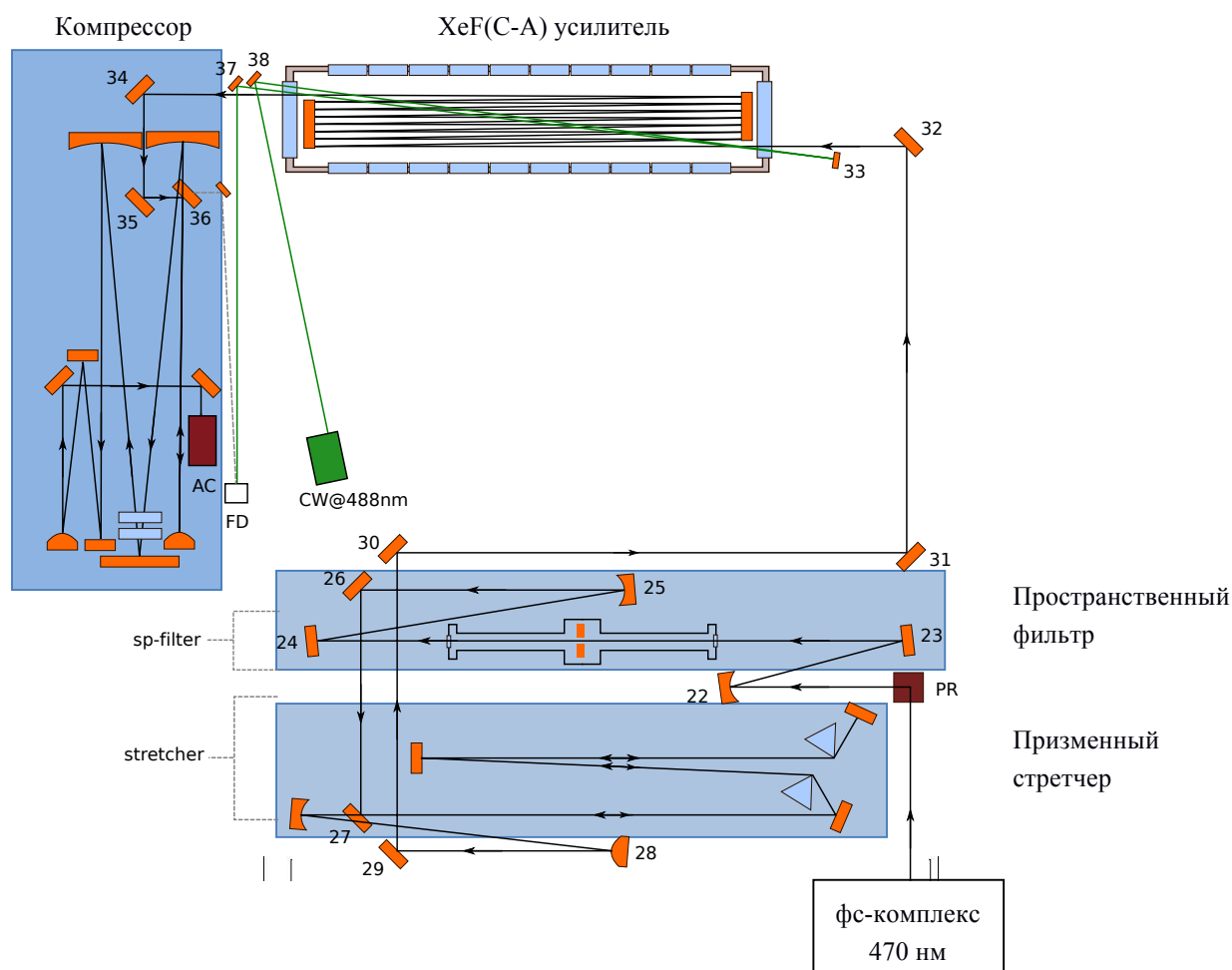


Рис. 2 Схема гибридного фемтосекундного комплекса.

Осциллятор фемтосекундного комплекса построен на кристалле титан:сапфира с самосинхронизацией мод. Импульсы со спектром шириной 25 нм с центральной длиной волны 975 нм поступают в стретчер Ёффнера где положительно chirпируются до длительности 50 пс.

Положительно chirпированные импульсы усиливаются сначала в

регенеративном усилителе, где с помощью тонкопленочного поляризационного фильтра поддерживается длина волны усиления 950 нм, и в четырехпроходном усилителе. Оба усилительных каскада накачиваются 10-Гц неодимовым лазером с ламповой накачкой Solar LQ-529. Усиленные до 20 мДж импульсы увеличиваются в диаметре до 8 мм, сжимаются до длительности 50 фс в компрессоре на паре дифракционных решеток и перед удвоением имеют энергию 12 мДж. Кристалл KDP толщиной 2 мм преобразует излучение в спектральную область 475 нм, при этом энергия достигает 5 мДж.

Волновой фронт второй гармоники имеет искажения, что в дальней зоне приводит к мелкомасштабной самофокусировке в воздухе. Поэтому в системе используется вакуумный пространственный фильтр с сапфировой диафрагмой 200 мкм, выделяющий нулевую моду с энергией 1.3 мДж. После пространственного фильтра пучок удваивается в диаметре и чирпируется.

Стретчер с отрицательной дисперсией используется в системе, чтобы реализовать сжатие усиленных в газовом усилителе импульсов в стекле за счет положительной дисперсии. Величина необходимой дисперсии, вносимой призмным стретчером определяется следующими факторами.

Во-первых, сверхкороткий импульс приобретает положительный чирп в окнах усилителя: 6 см кварца растягивают 50-фс импульс до 250 фс.

Во-вторых, дипольные молекулы возбужденного ХеF наиболее эффективны при усилении линейно поляризованного импульса с длительностью большей периода вращения молекул. Последний оценивается в 300 фс. Данный эффект наиболее ощутим в режиме насыщения.

В-третьих, необходимо уменьшить влияние кубичной нелинейности в выходном окне усилителя. В сильном электромагнитном поле световой волны показатель преломления прозрачной среды изменяется из-за эффекта Керра.

Расчет В-интеграла для чирпированного до 1 пс импульса в окнах усилителя для насыщающей энергии, а также в компрессоре, где пучок расширяется и импульс изменяется по длительности по мере распространения в объеме стекла, дает оценку фазовых искажения на уровне полутора длин волн. Оценка фазовых искажений в газовой среде при усилении до энергии насыщения не превосходит десятой доли длины волны.

В-четвертых, небольшое влияние оказывает разлетное время нижнего состояния. Исходя из ширины спектра перехода разлетное время 3-4 фс.

Таким образом, наиболее важным фактором, определяющим необходимую длительность импульса на выходе из стретчера, являются нелинейные искажения в выходном окне усилителя. Поэтому перед усилением необходимо чирпировать импульс по крайней мере до длительности 1 пс.

После пространственного фильтра с помощью сферического зеркала формируется пучок диаметром 1.5 см, который запускается в призмный стретчер. Принцип работы стретчера следующий: лазерный пучок разлагается в спектр на первой призме, проходит по воздуху до второй призмы, после которой спектральные компоненты становятся параллельными, затем следует вторая пара призм в зеркальной конфигурации, где пучок коллимируется в прежнее поперечное распределение, но с новой спектральной фазой, которая приводит к изменению длительности импульса. В настоящей работе используется одна пара призм и возвращающее зеркало. Такая система компактнее и проще в настройке, чем четырехпризменная конфигурация. Угол при вершине выбирается таким образом, чтобы угол падения соответствовал углу Брюстера. Таким образом обеспечиваются наименьшие потери для пучка с горизонтальной поляризацией (р-поляризация). Длиной плеча стретчера называется расстояние между первой парой призм. От нее зависит квадратичная фаза, вносимая устройством. При нулевом плече квадратичная фаза положительна из-за собственной дисперсии материала призм. По мере увеличения расстояния между призмами дисперсия линейно уменьшается, проходит через ноль и становится отрицательной. В работе обсуждаются характеристики стретчера из различных материалов. В эксперименте используется стекло К-108 как компромисс между компактным стретчером из тяжелого флинта с сильным поглощением на 480 нм и кварцевым стеклом, обладающим малой дисперсией и, следовательно, требующим очень длинное плечо.

Стретчер с плечом 2.5 м, собранный на паре призм из стекла К-108, дает на выходе 1-пс импульсы. После уменьшающего телескопа импульсы поступают в фотохимический усилитель.

На рис. 3 изображено поперечное сечение XeF(C – A)-усилителя. Активная среда формируется в центральной области (лазерной кювете), заполняемой смесью XeF₂ и азота, в результате четырехсторонней накачки через окна из CaF₂ излучением ксенона. Ксенон возбуждается четырьмя электронными пучками, инициируемыми в вакуумном диоде и прошедшими сквозь титановую фольгу. Давление ксенона 3 атм. достаточно для поглощения электронного пучка. Активный объем лазерной кюветы 12x12x120 см³.

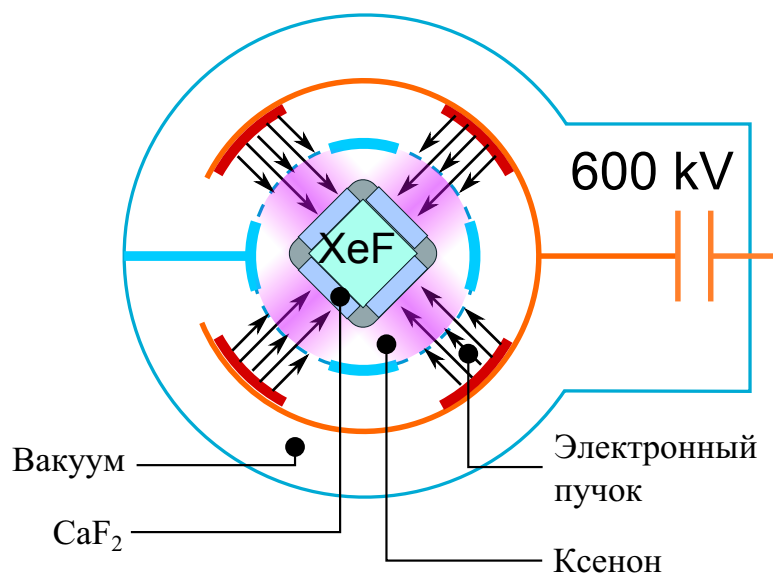


Рис. 3 Сечение фотохимического XeF(C-A) усилителя с накачкой электронно-пучковым конвертером.

В основе вакуумного диода лежит генератор Маркса с зарядным напряжением 600 кВ, который формирует четыре электронных пучка с общей энергией 12.5 кДж. Сквозь фольгу проходит электронный пучок с энергией порядка 3.5 кДж, как было измерено калориметром с графитовой площадкой, устанавливаемого непосредственно за фольгой, отделяющей вакуумный диод от ксеноновой кюветы. Энергия, поглощаемая ксеноном, – 2.5 кДж – была измерена по скачку давления ксенона в момент накачки.

Для высокой эффективности преобразования электронного пучка в ВУФ в ксеноне необходимо поддерживать высокую чистоту благородного газа. В работе использовалась очистительная система на основе фильтра с медной ватой и цеолитом, а также метод криогенной откачки примесей, успешно отработанный на данной установке. Оценочная чистота ксенона после фильтрации примесей – 99.998%.

Ксенон высокой чистоты люминесцирует с эффективностью 30-40%. Исходя из геометрического фактора и пропускания окон из CaF₂ можно оценить энергию накачки, поступающую в лазерную кювету на уровне 150 Дж. Данная оценка хорошо согласуется с результатами калориметрических измерений, где калориметр устанавливался за окнами накачки – 140 Дж.

В лазерную кювету напускалась смесь азота с XeF₂ после предварительной откачки до 10⁻² Торр. Давление азота менялось от 0.1 до 1.5 атм и контролировалось стрелочным манометром. Давление XeF₂ варьировалось от 0.1 до 0.6 Торр и контролировалось с помощью механотрона, а также по поглощению излучения ртутной лампы. При таких концентрациях XeF₂ среда является оптически прозрачной для ВУФ и излучение накачки

поглощается не полностью.

Для контроля концентрации молекул XeF_2 в лазерной смеси использовалось излучение ртутной лампы, пропущенное через лазерную кювету дважды. Молекулы XeF_2 поглощают излучение на длине волны 254 нм и по коэффициенту поглощения можно вычислить концентрацию вещества. По разнице концентрации до и после импульса накачки можно оценить число разложившихся молекул, а значит и энергию ВУФ излучения, поглощенную активной средой (метод актинометрии). Экспериментальные данные актинометрических измерений (рис. 4) позволяют рассчитать энергию накачки, поглощенную активной средой – 47 Дж.

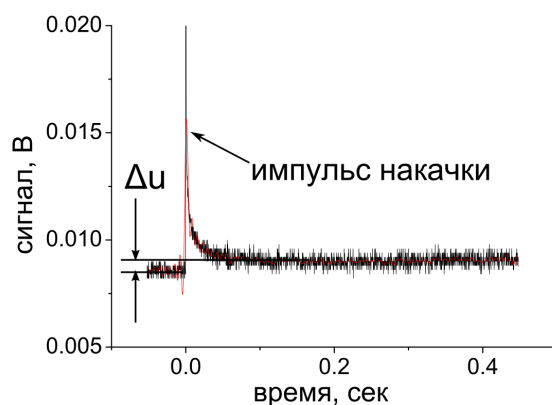


Рис. 4 Сигнал ртутной лампы при актинометрических измерениях

В работе были измерены пространственные и временные профили коэффициента усиления в газовой активной среде при различных концентрациях активного и буферного газов (Рис. 5). Коэффициент усиления активной среды измерялся непрерывным полупроводниковым лазером "Picarro cyan laser" мощностью 20 мВт на длине волны 488 нм. Излучение пропускалось через лазерную кювету в два прохода и фокусировалось на быстром фотодиоде. С увеличением концентрации XeF_2 от 0.3 до 0.5 Торр коэффициент усиления растет у края с 2.1×10^{-3} до $2.5 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ и уменьшается в центре лазерной кюветы с 1.6×10^{-3} до $1.3 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Коэффициент усиления зависит от давления азота. При 0.2 Торр XeF_2 коэффициент усиления увеличивается с 1.2×10^{-3} до $1.6 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ при изменении давления азота с 0.25 до 1 атм.

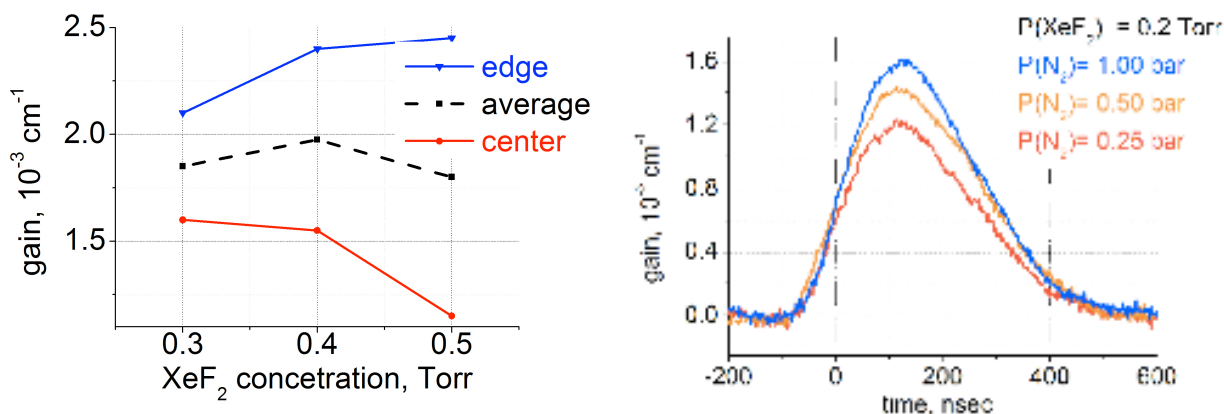


Рис. 5 Распределение по сечению камеры и временные профили коэффициента усиления в зависимости от концентрации активного и буферного газов.

Поскольку коэффициент усиления невелик, необходима многопроходная схема усиления. Внутри лазерной кюветы устанавливается многопроходная схема, разработанная в рамках настоящей работы для эффективного снятия инверсии со всего объема лазерной кюветы. Такая система состоит из двух пар плоских зеркал, установленных внутри лазерной кюветы, и обеспечивает до 105 проходов для 3-см пучка при чистой апертуре усилителя 12x12 см.

Исходя из времени жизни верхнего состояния и сечения усиления на переходе $\text{XeF}(C-A)$, длительности накачки и телесного угла, в котором происходит усиление, можно оценить мощность усиленного спонтанного шума. Исследуемый усилитель обеспечивает контраст по мощности на уровне 10^{14} при усилении ультракоротких импульсов до тераваттного уровня мощности.

После усилителя установлен разработанный для данного проекта компрессор на базе положительной дисперсии в стекле. Используется 9 см кварца в два прохода. Перед сжатием в стекле пучок увеличивается в диаметре вчетверо, чтобы уменьшить фазовые искажения из-за Керровской нелинейности. После сжатия длительности пучок ослабляется с помощью клина и уменьшается в диаметре до 5 мм для того чтобы зарегистрировать профиль с помощью ПЗС камеры и длительности с помощью автокоррелятора.

В разделе 3.2 обсуждаются результаты усиления фемтосекундных импульсов. Фемтосекундный импульс после пространственного фильтра и призмного стретчера уменьшался в диаметре с помощью телескопа до 5 мм. Телескоп настраивался таким образом, чтобы после 33 проходов в усилителе пучок имел диаметр 15 мм.

Задержка фемтосекундного импульса относительно импульса накачки фотохимического усилителя регулировалась блоком синхронизации. Для того, чтобы выставить правильную задержку и вывести на максимум выходную энергию, усиление фемтосекундных импульсов производилось одновременно с контролем коэффициента усиления. Фотодиодом регистрировалось усиленное

излучение непрерывного лазера, а также момент выхода усиленного фс импульса из усилителя. В ходе экспериментов оказалось, что наибольшая энергия получается при выходе импульса из усилителя в момент максимума коэффициента усиления.

При давлении буферного газа в усилителе 1 атм, и выходном окне толщиной 30 мм в профиле пучка на выходе из усилителя наблюдались сильные фазовые искажения. Поэтому выходное окно было заменено на более тонкое (3 мм), а давление азота снижено до 0.1 атм. В этих условиях была получена насыщающая плотность мощности (40 мДж при сечении пучка 0.7 см^2) на выходе из усилителя без видимых фазовых искажений. Также демонстрируется профиль пучка с энергией 150 мДж. Из-за многократного насыщения края пучка усиливаются и испытывают дифракцию на краях оптики (Рис. 6).

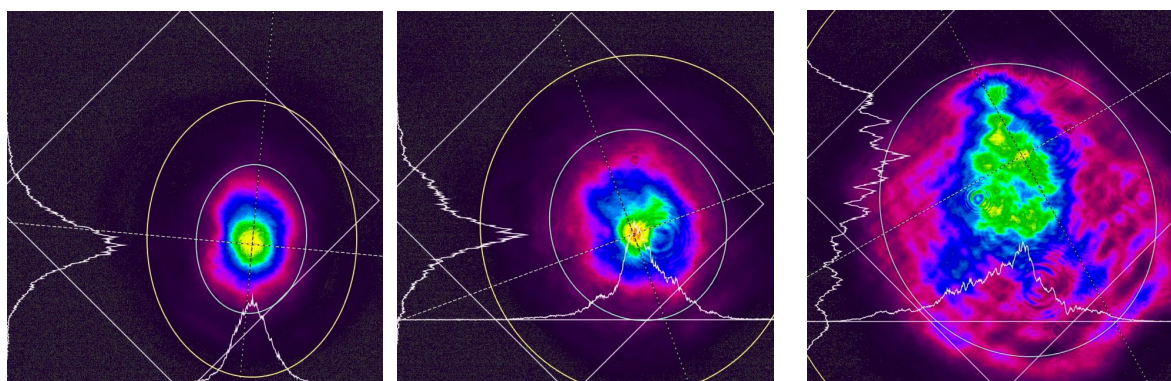


Рис. 6 Профили пучка на выходе из усилителя после 33 проходов: неусиленного с энергией 0.4 мДж и усиленного до 40 мДж и до 150 мДж при давлении буферного газа 0.1 атм., толщине выходного окна 3 мм.

В работе приводятся автокорреляционные кривые для импульса после компрессора (Рис. 7). Без усиления и с усилением до 11 мДж получены длительности 50 и 44 фс, соответственно. Обнаружен эффект самофокусировки, который, согласно расчетам, не связан с сжимающими подложками, а вызван самофокусировкой сжатого пучка на воздушной трассе диагностического тракта. Максимальная энергия, сжатая в компрессоре составляет 20 мДж. Получение больших пиковых мощностей возможно при модификации диагностического тракта.

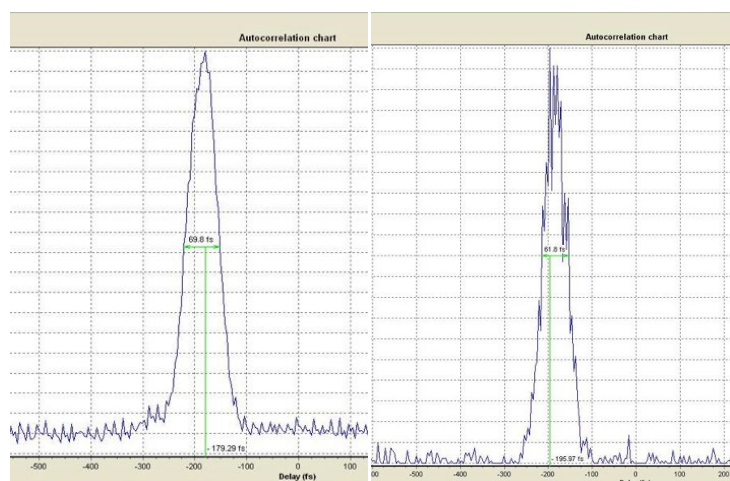


Рис. 7 Автокорреляционные функции неусиленного 0.2 мДж импульса длительностью 50 фс и усиленного до 11 мДж 44-фс импульса на выходе из компрессора.

Спектр 1-пс импульса, усиленного с 0.5 до 6.4 мДж имеет центральную длину волны 470 нм и ширину 8 нм. Видны линии поглощения ксенона, однако влияние их на спектр невелико (Рис. 8). Несмотря на широкий спектр, соответствующий 30-фс импульсу, минимальная зарегистрированная длительность после компрессии составила 50 фс.

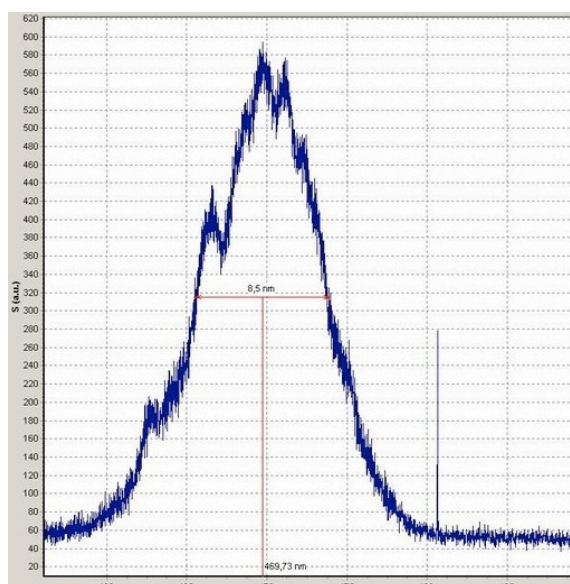


Рис. 8 Спектр усиленного с 0.5 до 6.4 мДж 1-пс импульса. Центральная длина волны 470 нм, ширина спектра 8 нм.

В разделе 3.2.6 проводится обсуждение результатов. В работе было проведено численное моделирование активной среды. На рис. 6 приведена блок-схема кинетических процессов в активной среде. Населенности рассматриваемых состояний XeF (B, C, A) во время действия накачки рассчитываются с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих образование возбужденных состояний XeF(B, C) под действием накачки, процессы столкновительной релаксации между B и C состояниями в

присутствии буферного газа азота, а также тушение возбужденных состояний молекулами XeF_2 и атомами ксенона и фтора, образующимися в результате диссоциации дифторида и фторида ксенона.

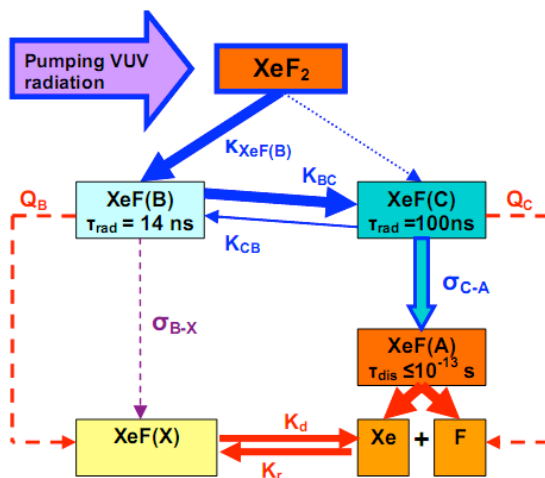


Рис. 9 Блок-схема кинетических процессов в активной среде.

Для моделирования указанных процессов необходимо знать распределение мощности накачки во времени. Поскольку напрямую он не измерялся, делается следующее приближение: при неизменной скорости тушения верхнего состояния XeF(C) временной профиль мощности накачки должен совпадать с профилем коэффициента усиления. При этом интегральная энергия приравнивается к измеренной энергии накачки 47 Дж. Полученная таким образом форма импульса накачки служит входным параметром для кинетических расчетов. Для упрощения математических выкладок, данный профиль аппроксимируется гауссовой функцией распределения. Система кинетических уравнений решается пошагово с помощью программного кода на языке Fortran. На выходе получается зависимость концентрации XeF(C) от времени, по которой оценивается коэффициент усиления, максимум которого отстоит от экспериментально полученного всего на 17 процентов (рис. 10). Данное расхождение объясняется точностью констант, использованных в расчетах, и разницей пространственного разрешения при измерении коэффициента усиления и актинометрического метода, который использовался для измерения энергии накачки.

Программа кинетического моделирования вычисляет кинетическое время жизни состояния XeF(C) во время действия накачки, которое определяется текущими концентрациями XeF_2 , Xe и F . Время жизни меняется незначительно – от 38 до 32 нс – что делает оправданным наше предположение о практически неизменной скорости тушения, а значит временные профили накачки и коэффициента действительно совпадают с высокой точностью.

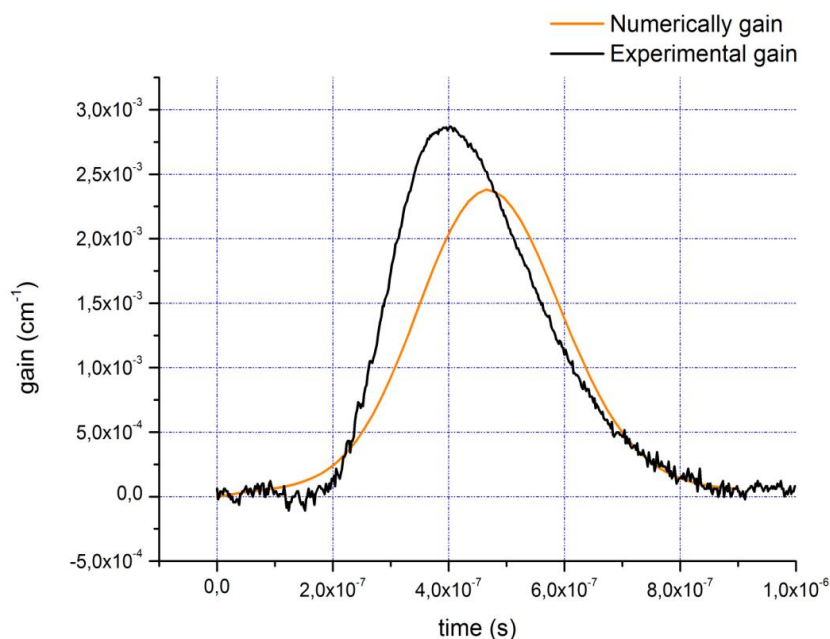


Рис. 10 Экспериментальная кривая и численно смоделированный профиль коэффициента усиления.

В кинетической модели делается еще одно допущение, что квантовый выход в В-состояние близок к единице. Насколько можно судить по результатам моделирования, получено еще одно подтверждение в пользу того, что квантовый выход образования ХеF(В) состояния действительно близок к 1, как отмечалось в работах [6], [7].

Зарегистрированная длительность импульса на выходе из компрессора не соответствует спектрально-ограниченной длительности для спектра шириной 8 нм (30 фс), что объясняется нескомпенсированной дисперсией третьего порядка. Остаточная кубичная фаза после компенсации квадратичной составляет -37000 фс^3 . Для того, чтобы оценить вклад такой дисперсии в конечную длительность импульса, было проведено численное моделирование с использованием быстрого преобразования Фурье. Спектр шириной 8 нм делился на дискретные части в соответствии с теоремой Котельникова и к каждому сегменту прикладывалась комплексная фаза с кубическим членом равным -37000 фс^3 . Результат обратного Фурье преобразования дает временную огибающую поля. Возводя в квадрат, получаем интенсивность. Результат моделирования представлен на графике интенсивности от времени, где видно, что импульс по полувысоте в самом деле имеет длительность 50 фс (Рис. 11). Кроме того, присутствуют предимпульсы с амплитудой до 20% от максимальной интенсивности и содержащие около четверти общей энергии.

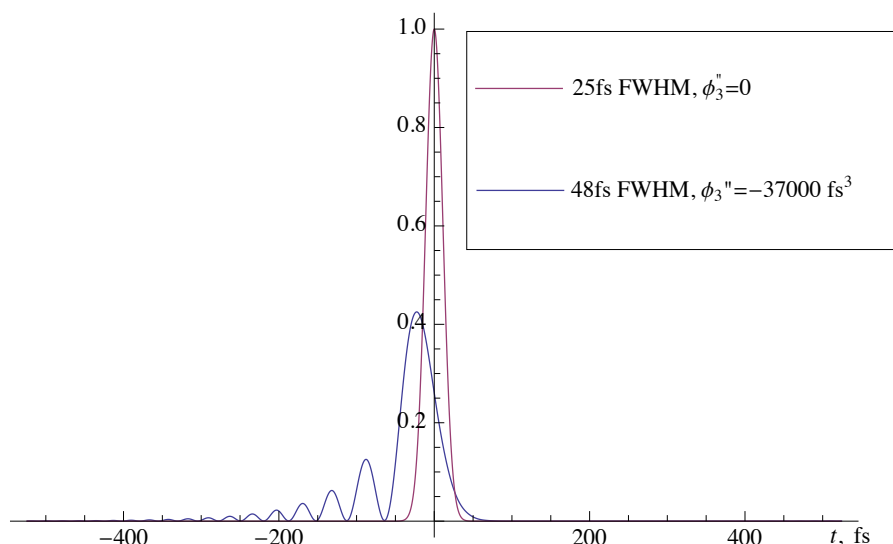


Рис. 11 Профиль интенсивности импульса с шириной спектра 8 нм при двух значениях кубической дисперсии.

Для сравнения моделирование было проведено для более узкого спектра – спектра 50-фс импульса. Под действием такой же спектральной фазы импульс расплывается до 60 фс, при этом амплитуда прединпульса не превышает 2% от максимальной интенсивности. Таким образом, с точки зрения контраста в данной системе выгоднее усиливать излучение со спектром 50-фс импульса, поскольку более широкий спектр сжимается со значительными искажениями.

В-интеграл в усилителе для 1-см пучка не превышает единицы, а в компрессоре для расширенного пучка не превышает 9, что эквивалентно полутора длинам волн. В то же время оценка фазовых искажений на воздушной трассе после сжатия и ослабления от грани клина дает В-интеграл около 4, приводя к самофокусировке.

Разработанная схема многопроходного усиления и конструкция компрессора позволяют работать с гауссовыми пучками на уровне мощности порядка 1 ТВт, при этом переход к мультитераваттному уровню мощности требует использование пучков с однородным профилем интенсивности.

Максимальная энергия 150 мДж, полученная из усилителя в 1-пс импульсе, говорит о перспективности изучаемого подхода для получения мультитераваттных импульсов.

III. Заключение

По итогам работы достигнуты следующие результаты:

1. Создан гибридный фемтосекундный комплекс видимого диапазона 470 нм на основе твердотельного задающего генератора на Ti:Sa и фотохимического XeF(C-A) усилителя с накачкой ВУФ излучением

электронно-пучкового конвертера.

2. Исследованы энергетические и усилительные характеристики фотохимического XeF(C-A) усилителя с накачкой электронно-пучковым конвертером. Запасаемая энергия 5 Дж, коэффициент усиления от 1.2×10^{-3} в центре до $3.3 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ у края камеры. Экспериментальные результаты по измерению коэффициента усиления хорошо согласуются с численной моделью, построенной на основе кинетических уравнений, описывающих фотопроцессы в активной среде.
3. Разработаны призмный стретчер и стеклянный компрессор, которые обеспечивают фазовые искажения в гибридной системе не более длины волны.
4. В экспериментах по усилению фемтосекундного излучения в гауссовых пучках достигнуто 200-кратное усиление фемтосекундных импульсов в режиме насыщения коэффициента усиления и получена выходная энергия 150 мДж при усилении гауссова пучка с начальной энергией 0.7 мДж. Исследованы факторы, влияющие на качество усиленного пучка (фазовые искажения из-за влияния нелинейности активной среды и оптических элементов, дифракция на краях апертуры) и найдены условия получения выходного пучка без видимых искажений его профиля. Используемая конфигурация многопроходной схемы усиления позволяет получать импульсы с энергией до 50 мДж без видимых фазовых искажений и без дифракции. Для повышения качества выходного пучка при более высоких энергиях необходимо увеличить эффективную апертуру внутриврезонаторной многопроходной схемы, и использовать пучки с однородным распределением интенсивности.
5. Экспериментально осуществлено временное сжатие усиленных импульсов с энергией до 20 мДж. Однако автокорреляционная функция пока получена лишь для энергии 11 мДж. При этом наблюдалось обратное сжатие в объеме стекла отрицательно chirпированного импульса до исходной длительности 50 фс.
6. Полученная на выходе усилителя энергия 150 мДж при усилении гауссова пучка с начальной энергией 0.7 мДж указывает на возможность достижения в гибридной системе мультитераваттного уровня мощности.

Полученные результаты свидетельствуют о плодотворности разрабатываемого гибридного подхода для получения фемтосекундных импульсов сверхвысокой мощности в видимом диапазоне спектра.

Список литературы цитированной в автореферате.

- [1] S. V. Anisimov, E. M. Zemskov, V. S. Zuev et al. /Spectrally selective time resolved actinometry of VUV radiation, emitted by a moving gas dynamical discontinuity // Laser Phys. — 1994. — Vol. 4. — P. 416.
- [2] Зуев В.С., Кашников Г.Н., Мамаев С.Б. Spectrally selective time resolved actinometry of VUV radiation, emitted by a moving gas dynamical discontinuity // Квантовая электроника. — 1992. — Т. 19. — С. 1047.
- [3] V. Tcheremiskine, O. Uteza, A. Aristov et al. / Photolytical XeF (C–A) laser amplifier of femtosecond optical pulses: gain measurements and pump efficiency // Applied Physics B: Lasers and Optics. — 2008. — Vol. 91, no. 3. — Pp. 447–454.
- [4] А.И. Аристов, Я.В. Грудцын, И.Г. Зубарев и др. / Гибридная фемтосекундная лазерная система на основе фотохимического XeF(C–A)-усилителя с апертурой 12 см // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22, No 11. — С. 1029–1034.
- [5] А.И. Аристов, Я.В. Грудцын, Н.Г. Иванов и др. / Характеристики гибридной фемтосекундной системы на базе активной среды XeF(C–A) с фотохимической накачкой // Приложение к журналу Физическое образование в вузах. — 2010. — Т. 16. — С. П4.
- [6] Зуев В.С., Михеев Л.Д., Ставровский Д.Б. / Об эффективности XeF-лазера с оптической накачкой // Квантовая электроника. — 1984. — Т. 11, No 11. — С. 1750–1756.
- [7] G. Black, R. L. Sharpless, D. C. Lorents et al. / XeF₂ photodissociation studies. I. Quantum yields and kinetics of XeF(B) and XeF(C) // Journal of Chemical Physics. — 1981. — Vol. 75. — Pp. 4840–4846