

# Спонтанное и вынужденное излучение эксимерных молекул $\text{XeCl}^*$ при накачке газовых смесей $\text{Xe}-\text{CCl}_4$ и $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$ с низким содержанием $\text{CCl}_4$ быстрыми электронами и осколками деления урана

А.И.Миськевич, Цзиньбо Го, Ю.А.Дюжов

Приведены результаты экспериментальных исследований спонтанного и вынужденного излучений эксимерных молекул  $\text{XeCl}^*$  при возбуждении газовых смесей  $\text{Xe}-\text{CCl}_4$  и  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  с низким содержанием  $\text{CCl}_4$  заряженными частицами высокой энергии – импульсным пучком быстрых электронов и продуктами нейтронной ядерной реакции  $^{235}\text{U}(n, f)$ . Энергия электронов равнялась 150 кэВ, длительность и амплитуда импульса тока накачки – 5 нс и 5 А. Энергия осколков деления не превышала 100 МэВ, длительность нейтронного импульса накачки – 200 мкс, удельная мощность энергоклада в газ – около 300 Вт/см<sup>3</sup>. При накачке электронным пучком в кювете длиной 4 см в резонаторе с пропусканием выходного зеркала 2.7% реализуется режим генерации лазерного излучения на  $\text{V} \rightarrow \text{X}$ -переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$  ( $\lambda = 308$  нм) с коэффициентом усиления  $\alpha = 0.0085$  см<sup>-1</sup> и эффективностью флуоресценции на  $\text{V} \rightarrow \text{X}$ -переходе  $\eta \approx 10\%$ , а при накачке осколками деления в кювете длиной 250 см в резонаторе, образованном глухим зеркалом и кварцевым окном, – режим усиленного спонтанного излучения (УСИ) с выходной мощностью излучения 40–50 кВт/см<sup>2</sup> и длительностью импульса УСИ по основанию  $\sim 200$  мкс.

**Ключевые слова:** активная среда, эксимер, люминесценция,  $\text{XeCl}^*$ , ядерная накачка.

## 1. Введение

Лазеры с ядерной накачкой работают при низких удельных энергокладах в газ, обычно менее 10<sup>4</sup> Вт/см<sup>3</sup>. Их высокие энергетические характеристики достигаются за счет большой длительности импульса накачки (от нескольких сотен микросекунд вплоть до непрерывного режима работы) и возможности возбуждения большого (до нескольких кубических метров) объема активной среды [1]. Полученный в настоящее время удельный энерго-съем лазерного излучения при ядерной накачке составляет 32 Дж/л за импульс длительностью 200 мкс при эффективности  $\eta \sim 3\%$  от вложенной в газ энергии продуктов ядерной реакции [2]. Рабочие характеристики таких лазеров могут быть улучшены при использовании сред с высокой квантовой эффективностью лазерного перехода, которой обладают, например, галогеносодержащие эксимерные молекулы инертных газов. Молекула  $\text{XeCl}^*$  относится к таким молекулам – для нее квантовая эффективность  $\text{V} \rightarrow \text{X}$ -перехода ( $\lambda = 308$  нм) составляет  $\sim 27\%$ . Целью настоящей работы является выяснение возможности использования эксимерных молекул  $\text{XeCl}^*$  в качестве рабочей среды лазеров с ядерной накачкой.

Излучательное время жизни  $\text{V}$ -состояния  $\text{XeCl}^*$  равно 11 нс, полуширина полосы излучения – 1.4 нм [3, 4]. Глубина потенциальной ямы  $\text{X}$ -состояния составляет около 30 мВ [5], что сравнимо с энергией теплового движения ато-

мов. В связи с этим инверсная населенность уровней для  $\text{V} \rightarrow \text{X}$ -переходов молекулы  $\text{XeCl}^*$  должна существовать уже при очень низких уровнях накачки. Однако результаты экспериментальных работ показывают, что вынужденное излучение на переходах молекулы  $\text{XeCl}^*$  возникает при очень высоких уровнях накачки, составляющих 0.3–3 МВт/см<sup>3</sup> [6–8]. Это может быть вызвано большой шириной верхнего уровня лазерного перехода, низкой эффективностью его возбуждения и высокими внутрирезонаторными потерями.

Наиболее эффективным хлорсодержащим донором для образования эксимерных молекул  $\text{XeCl}^*$  и  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  является четыреххлористый углерод  $\text{CCl}_4$  [9]. В работе [10] было показано, что эффективности возбуждения  $\text{V}$ -состояния молекулы  $\text{XeCl}^*$  и  $4^2\text{G}$ -состояния молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  сильно зависят от парциального давления галогенсодержащего донора  $\text{CCl}_4$  в смеси, возрастая многократно при низких (30–50 мТор) давлениях. В таких газовых смесях (с низким содержанием  $\text{CCl}_4$ ) усиление вынужденного излучения было зарегистрировано во всей полосе  $4^2\text{G} - 1,2,3^2\text{G}$  эксимерной молекулы  $\text{Xe}_2\text{Cl}^*$  шириной  $\Delta\lambda = 90$  нм при удельной мощности энергоклада в газ около 7 кВт/см<sup>3</sup> в лазерной кювете длиной 4 см при накачке пучком электронов с энергией 150 кэВ [11].

В настоящей работе сообщается о получении низкороговой квазинепрерывной генерации лазерного излучения на  $\text{V} \rightarrow \text{X}$ -переходах молекулы  $\text{XeCl}^*$  при накачке газовых смесей  $\text{Xe}-\text{CCl}_4$  и  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  с низким содержанием  $\text{CCl}_4$  частицами с высокой энергией. Газовые смеси возбуждались импульсным пучком быстрых электронов при удельном энергокладе в газ менее 10 кВт/см<sup>3</sup> ( $E_e = 150$  кэВ, ток пучка 5 А, длительность  $5 \times 10^{-9}$  с) и продуктами нейтронной ядерной реакции  $^{235}\text{U}(n, f)$  с энергией  $\sim 100$  МэВ (осколки деления урана-235) при удельном энергокладе в газ  $\sim 300$  Вт/см<sup>3</sup> и длительности нейтронного импульса накачки около 200 мкс.

А.И.Миськевич, Цзиньбо Го, Ю.А.Дюжов. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: miskev@mail.ru, hellogib@yahoo.com.cn, yu.dyuz@gmail.com

Поступила в редакцию 29 января 2013 г, после доработки – 31 мая 2013 г.

## 2. Экспериментальная установка

Исследования с электронным пучком проводились на установке, схема которой представлена на рис.1. Газовые смеси Xe–CCl<sub>4</sub> и Ar–Xe–CCl<sub>4</sub> различного состава (Ar – 1140 Тор, Xe – от 10 до 150 Тор, CCl<sub>4</sub> – от 0.038 до 2 Тор) напускались в кювету 1 из нержавеющей стали (∅110 × 130 мм) с двумя фланцами 2 на боковой поверхности для установки кварцевых окон или лазерных зеркал (∅40 × 10 мм). На нижнем торце кюветы была установлена импульсная трубка ИМА-150Э 3 с взрывоэмиссионным катодом, формирующая импульсный пучок быстрых электронов с энергией 150 кэВ и длительностью ~5 нс на полувысоте. Пучок вводился в кювету перпендикулярно оптической оси резонатора, длина возбуждаемой активной среды лазера составляла ~4 см. На рис.2 показаны измеренная с помощью плоского зонда форма импульса тока пучка электронов накачки, вводимого в кювету, и пространственное распределение плотности тока пучка электронов на оси резонатора в момент действия импульса накачки. Из-за сильной поперечной и продольной неоднородностей пучка и большого пробега электронов с энергией 150 кэВ в газовой смеси, превышающего поперечные размеры активной среды лазера, удельный энерговыход в активную среду лазера составил менее 10 кВт/см<sup>3</sup> для импульса накачки длительностью 5 нс.

На боковых фланцах кюветы 2 устанавливались два кварцевых окна или два узкополосных сферических зеркала на кварцевой подложке с многослойными диэлектрическими покрытиями, имеющие высокий коэффициент отражения ( $\rho_1 = 99.8\%$  и  $\rho_2 = 97.3\%$ ) на длине волны 308 нм. При соответствующей юстировке эти зеркала могли образовывать оптический резонатор. Кварцевые окна использовались при измерениях спектральных и временных характеристик спонтанного излучения газовых смесей Xe–CCl<sub>4</sub> и Ar–Xe–CCl<sub>4</sub>. На верхней крышке кюветы имелось третье кварцевое окно 4, через которое при работе лазера можно было регистрировать спонтанное излучение газовой смеси с помощью спектрометра MAYA-2000Pro 5 с ПЗС-матрицей.

Запись временных сигналов производилась быстрым цифровым осциллографом RIGOL DS 5022ME 6 с помо-

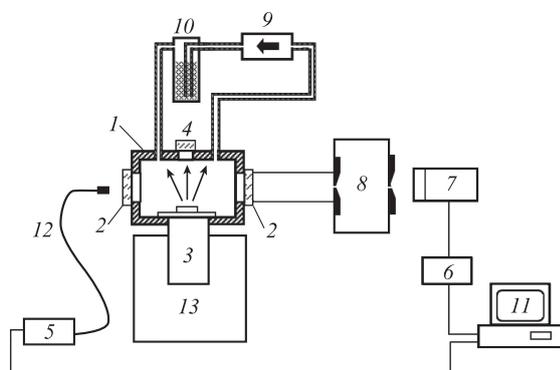


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – камера; 2 – фланец с кварцевым окном или зеркалом; 3 – импульсная трубка ИМА-150Э; 4 – верхнее кварцевое окно; 5 – спектрометр MAYA-2000Pro; 6 – цифровой осциллограф RigolDS5022; 7 – фотоумножитель ФЭУ-106 (ФЭУ-62); 8 – монохроматор МДР-23; 9 – циркуляционный насос; 10 – титановый фильтр; 11 – компьютер IBM PC; 12 – волоконный кварцевый световод с входной линзой; 13 – ускоритель электронов «Арина-2».

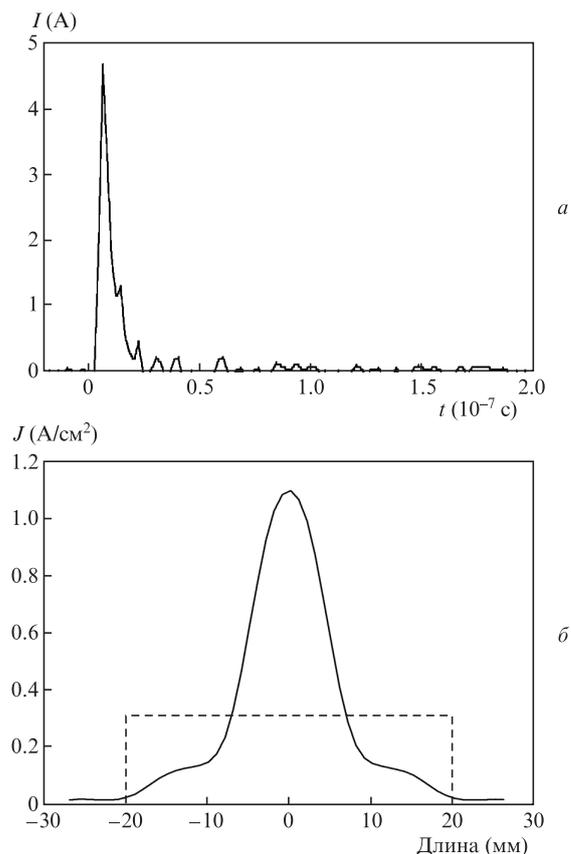


Рис.2. Осциллограмма импульса тока  $I$  пучка электронов накачки, вводимого в кювету (а), и пространственное распределение плотности тока  $J$  пучка электронов вдоль оси кюветы в момент действия импульса накачки (б). Штриховая линия – усредненные значения плотности тока пучка электронов накачки на оси лазера ( $l = 4$  см).

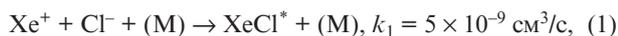
щью фотоумножителя ФЭУ-106 или ФЭУ-62 7, установленного на выходной щели спектрометра МДР-23 8. При проведении экспериментов особое внимание уделялось чистоте газовой смеси. Для этого перед ее окончательным приготовлением (т. е. перед напуском CCl<sub>4</sub>) проводилась очистка ксенонсодержащего буферного газа от молекулярных примесных газов (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), десорбируемых со стенок кюветы. Очистка проводилась непосредственно в кювете путем многократной прокачки газа с помощью циркуляционного насоса 9 через фильтр 10 с разогретой до 700 °С титановой губкой. Конструкция циркуляционного насоса и системы очистки газа описана в работе [12].

При накачке продуктами нейтронной ядерной реакции <sup>235</sup>U(n, f) использовался лазерный элемент стэнда Б ядерного реактора «БАРС-6» длиной 250 см, диаметром 4.8 см со слоем металлического урана-235 толщиной 5 мкм на внутренней поверхности и двумя многослойными диэлектрическими зеркалами в качестве окон [13]. Накачка лазерного элемента производилась нейтронным импульсом ядерного реактора «Барс-6» длительностью на полувысоте ~200 мкс, объем возбуждаемой активной среды составлял 4 л при удельной мощности энерговыхода в газ до 300 Вт/см<sup>3</sup>. При установке или замене зеркал лазерный элемент откачивался турбомолекулярным насосом до остаточного давления  $3 \times 10^{-2}$  Тор и заполнялся газом из баллона с заранее приготовленной газовой смесью без проведения операции дополнительной очистки газа. Перенаполнение лазерного элемента после каждого импульса накачки не проводилось.

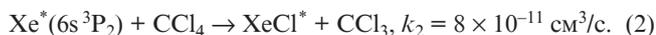
### 3. Обсуждение результатов

Спектры спонтанного излучения газовых смесей Xe-CCl<sub>4</sub> и Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> различного состава приведены на рис.3. В синие-зеленых областях спектров (430–650 нм) присутствует континуум, приписываемый переходам 4<sup>2</sup>G-1<sup>2</sup>, 2<sup>2</sup>, 3<sup>2</sup>G молекулы Xe<sub>2</sub>Cl\*<sup>+</sup>, и относительно узкие полосы при λ = 308, 345 и 282 нм, приписываемые переходам В-Х, С-А и D-Х молекулы XeCl\*<sup>+</sup>. Все спектры записаны при одинаковых условиях возбуждения газовых смесей электронным пучком.

Образование эксимерных молекул XeCl\* в бинарной газовой смеси Xe-CCl<sub>4</sub> происходит по каналу ион-ионной рекомбинации [14]



и в реакции с участием молекул CCl<sub>4</sub> и метастабильных атомов Xe\*(6s<sup>3</sup>P<sub>2</sub>) [15]



Ионы Xe<sup>+</sup> и возбужденные атомы Xe\* образуются непосредственно первичной заряженной частицей высокой энергии при ее торможении в газовой среде. Из всех возможных возбужденных состояний атома Хе наибольшую вероятность возбуждения имеют низколежащие уровни, оптически связанные с основным состоянием атома [16]. Образование отрицательных ионов Cl<sup>-</sup> происходит в реакции диссоциативного прилипания электронов низких энергий к молекуле CCl<sub>4</sub> [17]:

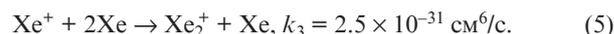


Собственно ионы CCl<sub>4</sub><sup>-</sup> не образуются вследствие того, что энергия диссоциации



на 0.5 эВ меньше энергии основного состояния молекулы CCl<sub>4</sub><sup>-</sup>. Электроны с большими энергиями (несколько электронвольт) при прилипании могут сильнее разрушать молекулу CCl<sub>4</sub> и образовывать ионы CCl<sub>3</sub><sup>-</sup>, CCl<sub>2</sub><sup>-</sup>, Cl<sub>2</sub><sup>-</sup> [17, 18]. При энергии электронов E<sub>e</sub> = 0.05 эВ, по данным работы [18], сечение их прилипания к молекулам CCl<sub>4</sub> равно 2.22 × 10<sup>-14</sup> см<sup>2</sup>. Это соответствует константе скорости прилипания k<sub>a</sub> ≈ 2.2 × 10<sup>-7</sup> см<sup>3</sup>/с. При парциальном давлении галогенсодержащего донора 30 мТор время прилипания электронов составляет несколько наносекунд.

Тушение молекул XeCl\* в газовой смеси Xe-CCl<sub>4</sub> происходит при их столкновениях с молекулами CCl<sub>4</sub> и атомами Хе. При низких давлениях донора (менее 1 Тор) константы скоростей реакций тушения XeCl\* молекулами CCl<sub>4</sub> и атомами Хе равны 1.98 × 10<sup>-9</sup> и 1.4 × 10<sup>-12</sup> см<sup>3</sup>/с соответственно при p<sub>Xe</sub> = 500 Тор [10]. С увеличением давления Хе возрастает скорость реакции конверсии атомарных ионов Хе<sup>+</sup> в молекулярные ионы Хе<sup>2+</sup> [3]:



Этот канал приводит к уменьшению концентрации ионов Хе<sup>+</sup> в смеси и, следовательно, к снижению концентрации молекул XeCl\*, нарабатываемых в реакции (1).

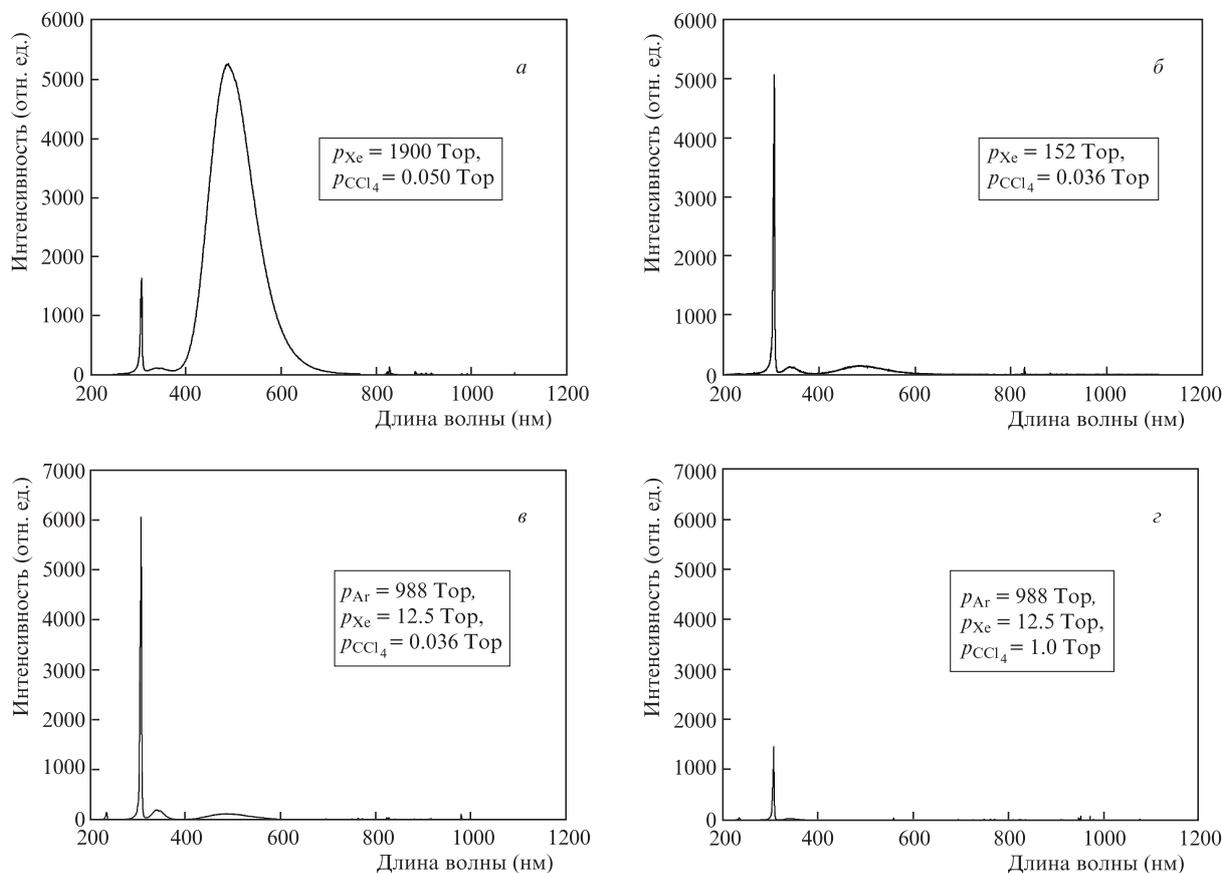


Рис.3. Спектры спонтанного излучения молекул XeCl\* и Xe<sub>2</sub>Cl\* в газовых смесях Xe-CCl<sub>4</sub> (а, б) и Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> (в, з) различного состава при возбуждении импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 кэВ.

Таким образом, для эффективной работы лазера на В–Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$  ( $\lambda = 308$  нм) с использованием бинарной газовой смеси  $\text{Xe}-\text{CCl}_4$  в ней необходимо поддерживать низкое парциальное давление  $\text{CCl}_4$  ( $p_{\text{CCl}_4} \ll 1$  Тор) и давление  $\text{Xe}$  ( $p_{\text{Xe}} \ll 100-200$  Тор). Для увеличения энерговклада в газовую смесь с низким содержанием ксенона следует вводить буферный газ ( $\text{Ne}$ ,  $\text{Ar}$ ) под давлением в несколько атмосфер.

Генерационные эксперименты со смесями с низким содержанием донора  $\text{CCl}_4$  проводились при накачке газовых смесей  $\text{Xe}-\text{CCl}_4$  и  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  маломощным импульсным пучком электронов, смесей  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  – осколками деления урана-235. Использовались смеси следующего состава:  $\text{Xe}$  (152 Тор)– $\text{CCl}_4$  (36 мТор) и  $\text{Ar}$  (1140 Тор)– $\text{Xe}$  (12.5 Тор)– $\text{CCl}_4$  (37 мТор) при накачке пучком электронов и  $\text{Ar}$  (1000 Тор)– $\text{Xe}$  (15 Тор)– $\text{CCl}_4$  (50 мТор) при накачке осколками деления урана-235.

### 3.1. Результаты экспериментов по накачке эксимерных молекул $\text{XeCl}^*$ пучком быстрых электронов

Расстояние между зеркалами в лазерной кювете (см. рис.1) равнялось 19 см, при этом длина активной области лазера составляла только 4 см. Амплитудное значение плотности тока быстрых электронов на оси лазерной кюветы, усредненное по длине активной среды, было равно  $\sim 0.4$  А/см<sup>2</sup> (см. рис.2,б). Входная линза волоконного световода спектрометра Maya-2000Pro размещалась на оптической оси резонатора на расстоянии 100–200 мм от выходного зеркала. Спектрометр регистрировал излучение, проходящее через выходное зеркало, при настроенном и разъюстированном резонаторе. Разрешение спектрометра составляло 1 нм. Одновременно с измерениями спектрального состава излучения с помощью осциллографа RIGOL DS 5022 ME и монохроматора МДР-23 производилась запись формы импульса излучения с длиной волны 308 нм. Полученные спектрограммы и осциллограммы приведены на рис.4 и 5.

В экспериментах была зарегистрирована низкопороговая генерация на  $\lambda = 308$  нм на В–Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$  при использовании зеркал с коэффициентами отражения 99.8% и 97.3% на  $\lambda = 308$  нм и пропусканием 60%–80% в остальной части спектрального диапазона. Длительность генерации для газовых смесей  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  составила  $\sim 120$  нс, что значительно превышает длительность импульса накачки (5 нс) и излучательное время В–Х-перехода молекулы  $\text{XeCl}^*$  (11 нс). Это указывает на возможность получения квазинепрерывной генерации на В–Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$  при накачке длинным импульсом.

Осциллограммы импульса генерации (рис.5) позволяют оценить усиление активной среды. Рассматривая последовательное прохождение луча света между зеркалами в усиливающей среде, можно показать, что при условии ненасыщенного усиления амплитуды импульсов тока  $U_1$  и  $U_2$ , зарегистрированные фотоприемником в начальные моменты времени развития генерации  $t_1$  и  $t_2$ , соотносятся между собой следующим образом:

$$U_1/U_2 = (\rho_1\rho_2)^m \exp(2\pi\kappa L). \quad (6)$$

Здесь  $\rho_1, \rho_2$  – коэффициенты отражения глухого и выходного зеркала;  $\kappa$  – коэффициент усиления активной среды;

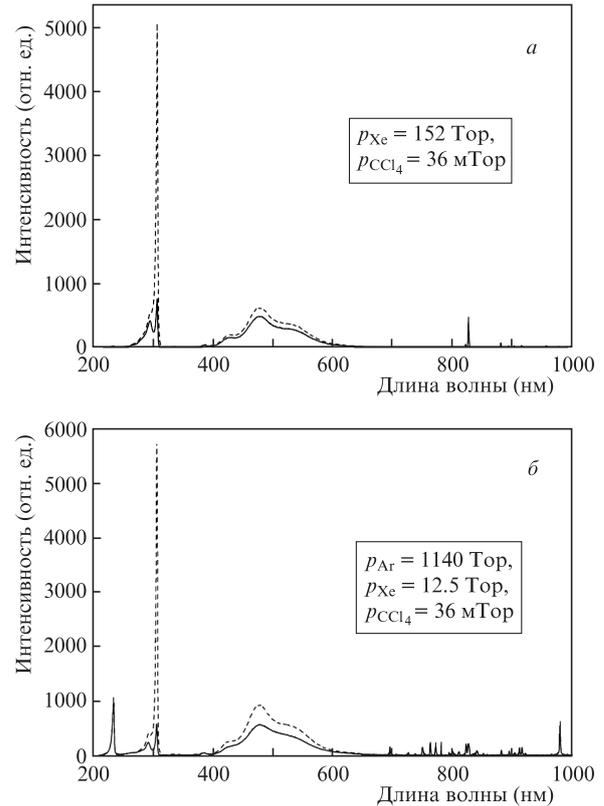


Рис.4. Спектры излучения с длиной волны  $\sim 308$  нм в смесях  $\text{Xe}-\text{CCl}_4$  (а) и  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  (б) при настроенном (штриховые кривые) и разъюстированном (сплошные кривые) резонаторах; накачка производится импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 кэВ и длительностью 5 нс при удельном энерговкладе в активную среду лазера  $\sim 7$  кВт/см<sup>2</sup>.

$m = c(t_1 - t_2)/2L_0$  – число проходов светового луча между зеркалами за промежуток времени  $t_1 - t_2$ ;  $L$  и  $L_0$  – длина активной среды лазера и расстояние между зеркалами.

Отсюда получаем

$$\kappa = [\ln(U_1/U_2) - m \ln(\rho_1\rho_2)]/(2mL). \quad (7)$$

Для условий нашего эксперимента  $\rho_1 = 0.998, \rho_2 = 0.973, L = 4$  см,  $L_0 = 19$  см,  $U_1/U_2 \approx 1.207$  (для моментов времени  $t_1 = 15$  нс и  $t_2 = 10$  нс от начала генерации; интервал  $t_1 - t_2 = 5$  нс соответствует четырем проходам резонатора). Отсюда  $\kappa = 0.0085$  см<sup>-1</sup>.

Сечение вынужденного излучения для В–Х-перехода молекулы  $\text{XeCl}^*$  определяется свойствами молекулы и равно [3]

$$\sigma(308 \text{ нм}) = (1/4\pi)(\ln 2/\pi)^{0.5} A \lambda^4 / (c \Delta \lambda) = 7.275 \times 10^{-16} \text{ см}^2. \quad (8)$$

Здесь  $\lambda = 3.08 \times 10^{-5}$  см;  $\Delta \lambda = 1.4 \times 10^{-7}$  см;  $A = 10^9/11 = 9.09 \times 10^7$  с<sup>-1</sup>.

Поскольку  $\kappa = \sigma(308 \text{ нм}) \Delta N$ , можно определить инверсную населенность  $\Delta N$  верхнего рабочего уровня молекулы  $\text{XeCl}^*$ :

$$\Delta N = \kappa / \sigma(308 \text{ нм}) = 0.0085 / 7.286 \times 10^{-16} = 1.16 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}. \quad (9)$$

Удельная мощность энерговклада в газовую смесь  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{CCl}_4$  есть  $w = I_{\text{ав}} E_0 / R(E_0)$ , где  $I_{\text{ав}} = 0.4$  А/см<sup>2</sup> –

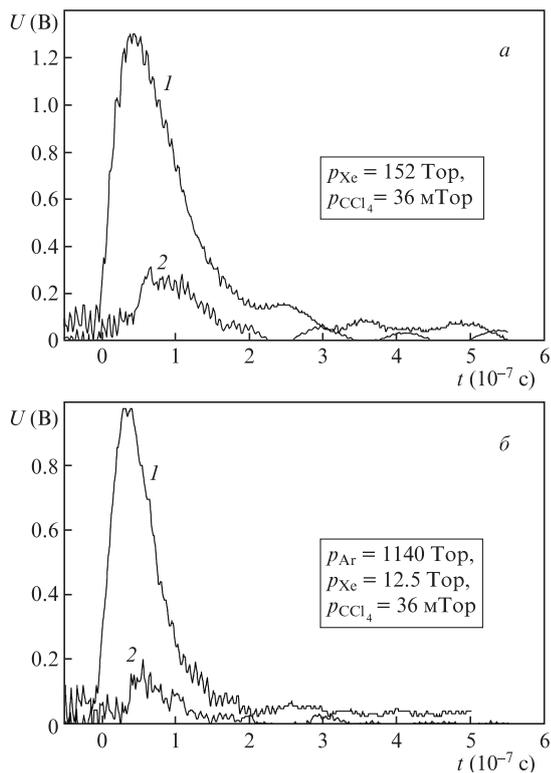


Рис.5. Осциллограммы импульсов излучения с длиной волны ~308 нм в смесях Xe-CCl<sub>4</sub> (а) и Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> (б) при настроенном (1) и разъюстированном (2) резонаторах; накачка производится импульсным пучком быстрых электронов с энергией 150 кэВ и длительностью 5 нс при удельном энергокладе в активную среду менее 10 кВт/см<sup>3</sup>.

усредненное значение плотности тока на оси лазерной кюветы (рис.2,б);  $E_0 = 1.56 \times 10^5$  эВ – энергия электронов пучка;  $R(E_0) = 8.51$  см – пробег электрона в газовой смеси Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> ( $p_{Ar} = 1.5$  атм,  $p_{Xe} = 12.5$  Торр,  $p_{CCl_4} = 0.036$  Торр). Используя эти значения, получаем  $w = 7.05$  кВт/см<sup>3</sup>. Отсюда эффективность флуоресценции на В-Х-переходе молекулы XeCl\*

$$\eta = \Delta N A h \nu / w = 668 / 7.05 \times 10^3 = 9.48\% \quad (10)$$

Эти экспериментальные результаты открывают возможность создания эксимерного лазера с ядерной накачкой, поскольку требуемая для его работы удельная мощность энергоклада в газовую среду (менее 10 кВт/см<sup>3</sup>) достижима для существующих импульсных ядерных реакторов. Для проверки этого предположения были проведены эксперименты на ядерном реакторе «Барс-6» по накачке газовой смеси Ar-Xe-CCl<sub>4</sub> продуктами ядерной реакции <sup>235</sup>U(n, f).

### 3.2. Результаты экспериментов по накачке эксимерных молекул XeCl\* осколками деления <sup>235</sup>U

Лазерный элемент размещался вблизи активных зон двухзонного ядерного реактора «Барс-6» на расстоянии 45 см от их боковой поверхности [13]. Усредненная по длине лазерного элемента пиковая удельная мощность энергоклада в активную среду лазера для номинального нейтронного импульса реактора ( $2 \times 10^{17}$  делений в обеих зонах реактора) составляла 300 Вт/см<sup>3</sup>. Резонатор лазерного элемента образовывали узкополосные зеркала с многослойными диэлектрическими покрытиями, имеющие

максимальные коэффициенты отражения в области 308 нм. Использовались три комплекта таких зеркал со следующими коэффициентами отражения: 1) 99.5% и 99% на  $\lambda = 308$  нм с пропусканием выходного зеркала  $T = 0.3\%$  на  $\lambda = 308$  нм и пропусканием 60%–80% в остальной части спектра; 2) 99.5% и 98.25% на  $\lambda = 308$  нм с пропусканием выходного зеркала  $T = 1.4\%$ ; 3) 99.5% на  $\lambda = 308$  нм и кварцевым окном в качестве выходного зеркала с пропусканием  $T = 91.3\%$ .

Регистрация спектрального состава излучения проводилась с помощью спектрометра МАУА-2000Pro. Монохроматор МДР-52 с фотоумножителем использовался для временных измерений интенсивности излучения на длине волны 308 нм. Оба прибора размещались на расстоянии ~20 м от выходного зеркала лазерного элемента. Термопарный измеритель энергии излучения с узкополосным отражательным фильтром на  $\lambda = 308$  нм устанавливался на расстоянии 2 м от выходного зеркала. Форма реакторного нейтронного импульса в замедлителе нейтронов регистрировалась камерой деления КНТ-5.

Основные результаты представлены на рис.6, 7. Осциллограммы импульса тепловых нейтронов накачки и импульса излучения лазерного элемента ( $\lambda = 308$  нм) при накачке осколками деления урана представлены на рис.6, а спектрограммы выходного излучения лазерного элемента с резонаторами указанных трех типов – на рис.7. Следует отметить сужение спектральной ширины полосы излучения при  $\lambda = 308$  нм и увеличение ее интенсивности с увеличением пропускания выходного зеркала. Наибольшая интенсивность выходного излучения достигается при использовании в качестве выходного зеркала кварцевого окна (рис.7,б). В этом случае выходное излучение формируется в основном за два прохода внутри лазерного элемента, причем интенсивность этого излучения мало отличается от интенсивности внутрирезонаторного излучения, полученной из спектров рис.7,а,б с учетом пропускания сильно отражающих зеркал. Это указывает на возникновение в лазерном элементе длиной 250 см при накачке осколками деления урана режима усиленного спонтанного излучения. Измеренная с кварцевым окном и пересчитан-

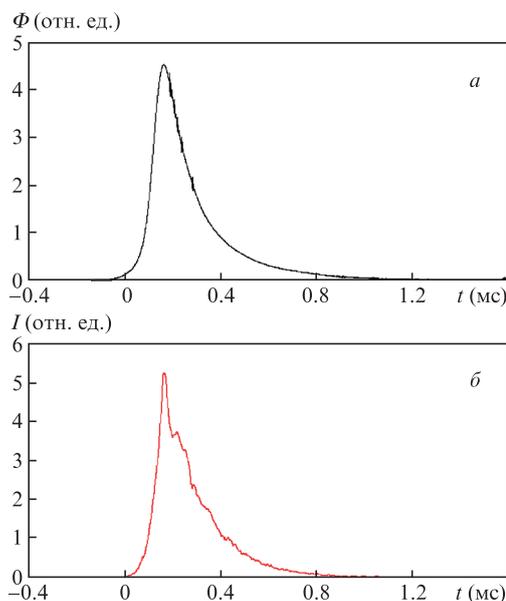


Рис.6. Осциллограммы импульса нейтронов накачки «БАРС-6» (а) и импульса лазерного излучения на длине волны 308 нм (б).

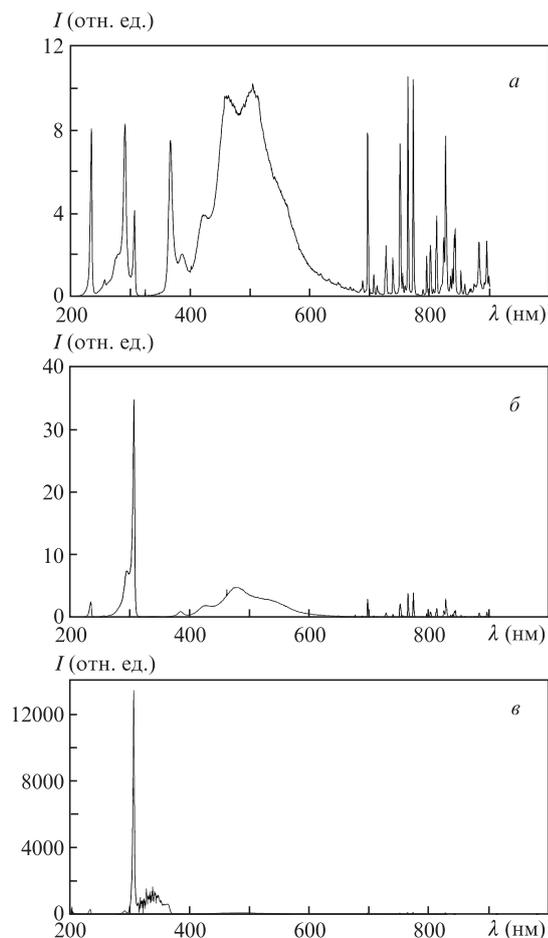


Рис.7. Спектры выходного излучения лазерного элемента длиной 250 см с резонатором, образованным глухим зеркалом ( $R = 99,5\%$ ) и выходным зеркалом с  $T = 0,3\%$  (а),  $1,4\%$  (б) и  $91,3\%$  (в); накачка производится осколками деления урана с мощностью удельного энерговыклада в газ  $\sim 300$  Вт/см<sup>3</sup>. Спектры а и б взаимно нормированы.

ная с учетом геометрии измерений мощность этого излучения составила  $40-50$  кВт/ср с длительностью импульса по основанию  $\sim 200$  мкс при эффективности флуоресценции на В-Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$ , равной  $\sim 10\%$ .

Могут возникнуть вопросы о стабильности свойств газовых смесей с низким содержанием донора  $\text{CCl}_4$ , о возможном выгорании этого компонента в процессе накачки и о его радиационной стойкости. Известны три экспериментальные работы [19–21], в которых рассматривались эти вопросы и где не было обнаружено каких-либо препятствий для использования малых концентраций донора  $\text{CCl}_4$  ( $\sim 30$  мТор) в условиях накачки осколками деления урана [19] и продуктами ядерной реакции  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$  [20, 21]. Эксперименты, выполненные в настоящей работе, подтвердили длительную сохранность газовой смеси  $\text{Ar-Xe-CCl}_4$  (в течение 30 суток) и возможность ее многократного использования при накачке импульсным электронным пучком и продуктами ядерной реакции  ${}^{235}\text{U}(n, f)$ .

#### 4. Заключение

Экспериментальные исследования люминесценции газовых смесей  $\text{Xe-CCl}_4$  и  $\text{Ar-Xe-CCl}_4$ , проведенные при их накачке импульсным пучком быстрых электронов, по-

казали, что для получения эффективной работы лазера на В-Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$  ( $\lambda = 308$  нм) с использованием газовых смесей  $\text{Ar-Xe-CCl}_4$  и  $\text{Xe-CCl}_4$  необходимо поддерживать в смеси низкое парциальное давление хлорсодержащего донора  $\text{CCl}_4$  ( $p_{\text{CCl}_4} \ll 1$  Тор) и низкое парциальное давление  $\text{Xe}$  ( $p_{\text{Xe}} \sim 12$  Тор). При накачке таких бедных газовых смесей импульсным пучком быстрых электронов умеренной мощности ( $E_e = 150$  кэВ,  $I_{\text{av}} = 0,4$  А,  $T_p = 5$  нс) и удельном энерговыкладе в газ менее  $7$  кВт/см<sup>3</sup> в кювете длиной  $4$  см была получена квазинепрерывная лазерная генерация на В-Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$  ( $\lambda = 308$  нм) с коэффициентом усиления  $\alpha = 0,0085$  см<sup>-1</sup> и эффективностью флуоресценции  $\eta \sim 10\%$ . При накачке газовых смесей  $\text{Ar-Xe-CCl}_4$  осколками деления урана, образующимися при облучении слоя урана импульсом тепловых нейтронов с энерговыкладами в газ  $\sim 300$  Вт/см<sup>3</sup> в кювете длиной  $250$  см в резонаторе с глухим зеркалом и кварцевым окном на В-Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$  ( $\lambda = 308$  нм), был зарегистрирован режим усиленного спонтанного излучения с выходной мощностью светового излучения  $40-50$  кВт/ср и длительностью импульса по основанию  $\sim 200$  мкс при эффективности флуоресценции на В-Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$   $\eta \sim 10\%$ .

Полученные в работе экспериментальные результаты открывают возможность создания эффективного эксимерного лазера с ядерной накачкой на В-Х-переходе молекулы  $\text{XeCl}^*$  ( $\lambda = 308$  нм), поскольку требуемая для его работы удельная мощность энерговыклада в газовую среду (менее  $10$  кВт/см<sup>3</sup>) достижима для существующих импульсных ядерных реакторов.

Авторы выражают глубокую благодарность Б.П.Меркулову (ООО «Плазма», Рязань) за техническую помощь и полезные консультации по работе импульсного ускорителя электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-00382-а).

1. Мельников С.П., Сизов А.Н., Синянский А.А. *Лазеры с ядерной накачкой* (Саров: изд-е РФЯЦ ВНИИЭФ, 2008, с. 439).
2. Загидулин А.В., Бочков А.В., Мироненко В.В., Софиенко Г.С. *Письма в ЖТФ*, **38** (23), 31 (2012).
3. *Эксимерные лазеры*. Под ред. Ч.Роудза (М.: Мир, 1981, с. 245).
4. Мавлютов А.А. и др. *ПТЭ*, № 3, 114 (2001).
5. Хьюбер К.-П., Герцберг Г. *Константы двухатомных молекул (в двух частях)*. Пер. с англ. под ред. Н.Н.Соболева (М.: Мир, 1984, с. 366).
6. Abdullin E.N., Ivanov N.G., et al. *Laser Phys.*, **16**, 89 (2006).
7. Tang K.Y., Lorents D.C., Huestis D.L. *Appl. Phys. Lett.*, **36** (5), 347 (1980).
8. Tittel F.K. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **36** (6), 405 (1980).
9. Marowsky G. et al. *Chem. Phys. Lett.*, **98** (2), 167 (1983).
10. Миськевич А.И., Го Цзиньбо. *Квантовая электроника*, **43**, 489 (2013).
11. Миськевич А.И., Го Цзиньбо. *Письма в ЖТФ*, **39** (8), 33 (2013).
12. Копай-Гора А.П., Миськевич А.И., Саламаха Б.С. *ПТЭ*, № 5, 171 (1986).
13. Дюжов Ю.А., Кухарчук О.Ф., Полетаев Е.Д., Смольский В.Н. и др. *Квантовая электроника*, **40**, 11 (2010).
14. Johnson T.H., Cartland H.E., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 5707 (1989).
15. Kolts J.H., Velazco J.E., Setser D.W. *J. Chem. Phys.*, **71**, 1247 (1979).
16. Bennett W.R. Jr. *Ann. Phys.*, **18**, 367 (1962).
17. Scheunemann H.-U. et al. *Phys. Chem.*, **84**, 580 (1980).
18. Braun M. et al. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **42**, 125202 (2009).
19. Мельников С.П., Порхаев В.В. *Труды II междунар. конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой* (Арзамас-16, 1995, т. 1, с. 307).
20. Хасенов М.У., Накискожаев М.Т., Сырлыбаев А.С., Смирнова И.И. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 1057 (2009).
21. Мавлютов А.А., Миськевич А.И. *Письма в ЖТФ*, **22** (8), 48 (1996).