

# Импульсно-периодический режим работы лазера на атомарных переходах ксенона при повышенном давлении

С.Б.Алексеев, Н.Н.Коваль, В.М.Орловский, В.С.Скакун, В.Ф.Тарасенко, В.С.Толкачев, А.В.Феденев, М.А.Шулепов, П.М.Щанин

*Проведены экспериментальные исследования лазера на атомарных переходах ксенона в импульсно-периодическом режиме при накачке пучком электронов с различной длительностью импульса и разрядом, инициированным пучком электронов. В лазере с накачкой радиально сходящимся пучком электронов длительностью 100 мкс без прокачки рабочей смеси Ar–Xe в квазистационарном режиме получена средняя мощность излучения 2.5 Вт при частоте следования импульсов 5 Гц. При накачке планарным пучком электронов в квазистационарном режиме получена средняя мощность генерации 2 Вт. Показано, что при удельном энергокладе не более 50 Дж/л и возбуждении пучком электронов в режиме пачки импульсов с частотой 50 Гц амплитудой и длительностью второго импульса генерации практически совпадают с амплитудой и длительностью первого. В лазере с накачкой разрядом, инициируемым пучком электронов наносекундной длительности, при поперечной прокачке рабочей смеси и частоте импульсов возбуждения 25 Гц получена средняя мощность генерации 380 мВт в стационарном режиме. Для создания ксеноновых (длина волны излучения 1.73 мкм) импульсно-периодических лазеров с высокой средней мощностью излучения предлагается использовать накачку пучком электронов от двух ускорителей с длительностью импульса десятки микросекунд при давлении смеси Ar–Xe примерно 1 атм и удельной мощности накачки в импульсе 1–3 кВт/см<sup>3</sup>.*

**Ключевые слова:** импульсно-периодический режим, ксеноновый инфракрасный лазер, пучок электронов, инициируемый пучком электронов разряд.

## 1. Введение

Лазер на атомарных переходах ксенона является наиболее эффективным и мощным газовым лазером ближнего ИК диапазона (см. обзоры [1–3] и цитируемую там литературу, а также новые статьи [4, 5]). Однако исследования данного лазера при повышенных давлениях (1 атм и выше) в смесях с буферным газом аргоном обычно проводились в режиме одиночных импульсов. Известны работы, в которых накачка смесей Ne–Xe осуществлялась самостоятельным разрядом при быстрой поперечной прокачке рабочей смеси [6, 7]. Был зарегистрирован линейный рост средней мощности излучения (до 10 Вт [6] и 25 Вт [7]) с ростом частоты следования импульсов накачки (до 1.2 и 7 кГц соответственно). Однако в этих работах использовались короткие импульсы возбуждения при высоких начальных напряжениях и смеси с большим содержанием гелия (более 99.5%). Это приводило к генерации в основном на длине волны  $\lambda = 2.03$  мкм с низким КПД по вложенной энергии (десятые доли процента). Известно [8–11], что в оптимальных условиях накачки (смесь Ar–Xe,  $\lambda = 1.73$  мкм) эффективность генерации лазера на атомарных переходах ксенона составляет 3%–5% от вложенной энергии. Максимальные КПД ксенонового лазера реализуются при накачке пучком электронов [10, 11] или разрядом, контролируемым пучком электронов [9].

С.Б.Алексеев, Н.Н.Коваль, В.М.Орловский, В.С.Скакун, В.Ф.Тарасенко, В.С.Толкачев, А.В.Феденев, М.А.Шулепов, П.М.Щанин. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 4

Поступила в редакцию 19 декабря 2003 г., после доработки – 10 марта 2004 г.

Недавно появились работы [3, 12], в которых уделено внимание импульсно-периодическому ксеноновому лазеру. В [3] на основании оценок (эксперименты в периодическом режиме не проводились) предлагается для создания ксенонового ИК лазера с высокой средней мощностью излучения (~1 кВт и более) использовать смесь Ar–Xe при давлении ~4 атм, а накачку осуществлять разрядом, контролируемым пучком электронов (электроионизационным способом). В работе [12] сообщалось об исследованиях ксенонового лазера на смеси Ar–Xe с накачкой пучком электронов при частоте следования импульсов до 100 Гц и малой длительности импульса тока пучка (~40 нс на полувысоте). Эксперименты в [12] проводились без прокачки рабочей смеси. Как следствие неоптимальных условий возбуждения (короткий импульс тока пучка, малый удельный энергоклад, отсутствие системы прокачки и т.д.) средняя мощность излучения, полученная авторами [12] в стационарном режиме, не превышала 1.5 мВт при очень низком КПД по мощности электронного пучка, инжектируемого в лазерную камеру.

Цель данной работы – исследование генерации на атомарных переходах ксенона при повышенных давлениях рабочей смеси Ar–Xe в импульсно-периодическом режиме и при накачке пучком электронов, а также разрядом, инициируемым пучком электронов. Кроме того, предлагается оптимальный подход к созданию ксенонового лазера с высокой средней мощностью излучения.

## 2. Экспериментальная установка и методики исследования

В настоящей работе использовались три установки, подробно описанные в [13–15].

Установка 1 [13] состояла из ускорителя электронов с

плазменным вакуумным диодом на основе сетчатого плазменного катода и лазерной камеры, разделенных фольговым окном размером  $10 \times 60$  см, опорная решетка которого охлаждалась проточной водой. Ускоритель формировал пучок с энергией электронов  $150\text{--}200$  кэВ, током  $20\text{--}100$  А при длительности импульсов  $10\text{--}100$  мкс и частоте их следования до  $50$  Гц в повторно-кратковременном режиме. Неоднородность плотности тока по сечению пучка не превышала  $15\%$  от среднего значения. Модуляция тока электронного пучка осуществлялась за счет модуляции тока дугового разряда, генерирующего плазму в электродной системе сетчатого плазменного катода при постоянно приложенном высоком ускоряющем напряжении. Эмиттирующая граница плазмы фиксировалась и стабилизировалась мелкоструктурной металлической сеткой, перекрывающей эмиссионное окно плазменного катода размером  $10 \times 60$  см, равным размеру фольгового выходного окна. Такой принцип получения и формирования электронного пучка отличается высокой энергетической эффективностью и позволяет независимо и в широких пределах проводить изменение энергии ускоренных электронов, амплитуды, длительности и частоты следования импульсов тока пучка. Выведенный через алюминий-бериллиевую фольгу толщиной  $40$  мкм пучок попадал в лазерную камеру. В экспериментах использовалась лазерная камера из нержавеющей стали объемом  $20$  л, однако активный оптический объем был равен  $6$  л и определялся размерами применяемых зеркал.

В установке 2 [14] использовался ускоритель электронов на основе коаксиального вакуумного диода с наружным сетчатым плазменным катодом и внутренним фольговым анодом. Охлаждаемая водой цилиндрическая опорная решетка анода играла роль лазерной камеры объемом  $\sim 18$  л (внутренний диаметр  $\sim 20$  см, активная длина  $60$  см). Ускоритель формировал радиально сходящийся электронный пучок, который через фольгу попадал в лазерную смесь. За счет этого при давлении лазерной смеси  $1\text{--}1.5$  атм обеспечивалась более высокая, чем на установке 1, однородность накачки по сечению активного лазерного объема. Плотность тока пучка при длительностях импульсов тока на полувысоте  $10\text{--}100$  мкс регулировалась в пределах  $0.1\text{--}0.005$  А/см<sup>2</sup> за счет изменения тока разряда плазменного катода при постоянной средней энергии электронов за фольгой, которая в экспериментах выбиралась равной  $\sim 170$  кэВ исходя из однородности энерговклада в лазерную смесь. Частота следования импульсов тока пучка определялась мощностью используемых схем электропитания, а также нагревом лазерной камеры и в повторно-кратковременном режиме в проведенных экспериментах составляла  $5$  Гц.

Установка 3 (модернизированная [15]) состояла из ускорителя электронов с плоским вакуумным диодом, который позволял формировать пучок электронов за разделительной фольгой со следующими параметрами: амплитуда тока  $\sim 7$  кА, сечение  $72 \times 3$  см, длительность импульса тока пучка на полувысоте  $4.2$  нс, частота до  $25$  Гц, максимум на кривой распределения электронов по энергиям соответствовал  $\sim 160$  кэВ. Рабочий объем  $3 \times 3 \times 72$  см возбуждался от конденсаторной батареи емкостью  $0.19$  мкФ, которая размещалась в газовой кювете. Система прокачки газовой смеси обеспечивала скорость потока до  $10$  м/с, что позволяло работать на установке длительное время в импульсно-периодическом режиме.

Рабочие смеси готовились непосредственно в лазерных камерах. Чистота газов согласно паспорту составляла  $99.998\%$  для аргона и  $99.9992\%$  для ксенона. В экспериментах применялись внутренние плоскопараллельные резонаторы, состоящие из медного зеркала либо зеркала с алюминиевым или диэлектрическим покрытием (глухое зеркало). Выходные зеркала имели коэффициент отражения  $99\%$ ,  $95\%$ ,  $33\%$ ,  $27\%$  и  $6\%$  на  $\lambda = 1.73$  мкм, в большинстве экспериментов использовалась плоскопараллельная пластинка из КРС-5 (коэффициент отражения  $\sim 33\%$ ). Энергия лазерного излучения или средняя мощность измерялась калориметром ИМО-2Н, а также пироэлектрическим датчиком PE-25 (OPHIR Opt.). Форма импульса излучения определялась с помощью фотосопроствления ФСГ-22-3А2. Электрические сигналы регистрировались осциллографом TDS-3032.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты, полученные ранее на установках 1 и 2 в режиме одиночных импульсов, подробно описаны в работах [4, 5, 13, 14]. Как показали исследования, наибольшие эффективности излучения (более  $2\%$  в [4] и более  $4\%$  в подобных условиях в [10, 11]) достигаются при длительности импульса накачки десятки микросекунд в смеси Ar–Xe при давлении  $\sim 1$  атм и удельной мощности накачки  $1\text{--}3$  кВт/см<sup>3</sup>. Частичная ( $\sim 50\%$ ) замена аргона гелием приводила к изменению длины волны излучения с  $1.73$  мкм на  $2.03$  мкм и уменьшению энергии излучения примерно в два раза. Однако в импульсно-периодическом режиме без прокачки смеси, содержащие  $\sim 50\%$  гелия, позволяли работать в стационарном режиме при более высокой частоте следования импульсов. Очевидная причина этого – высокая теплопроводность гелия, вследствие чего происходил более быстрый отвод тепла на охлаждаемые стенки лазерной камеры. Поэтому эксперименты в импульсно-периодическом режиме без прокачки были выполнены для обеих рабочих смесей.

#### 3.1. Эксперименты без прокачки лазерной смеси на установке 1

На рис.1 (кривая 1) приведена зависимость средней мощности излучения в смеси Ar–Xe от частоты следования импульсов тока пучка с длительностью на полувысоте  $100$  мкс и амплитудой  $\sim 40$  А. Средняя мощность

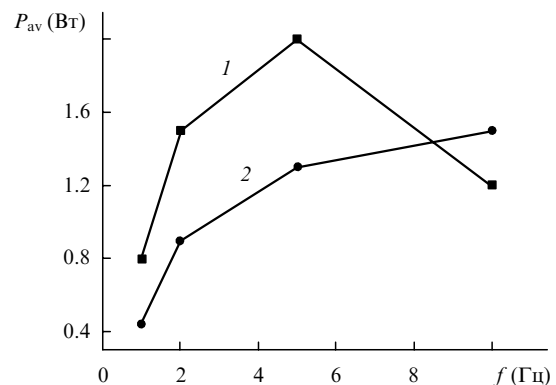


Рис.1. Зависимости средней мощности генерации  $P_{av}$  в смесях состава Ar: Xe =  $100:1$  (1) и He: Ar: Xe =  $100:100:1$  (2) от частоты следования импульсов  $f$ , полученные на установке 1 при давлении смеси  $p = 1.2$  атм.

излучения измерялась калориметром ИМО-2 в квазистационарном режиме через  $\sim 30$  с после включения ускорителя. Видно, что при частоте следования импульсов 5 Гц средняя мощность излучения достигает максимума, равного  $\sim 2$  Вт. КПД по вложенной энергии в этом режиме составил  $\sim 1\%$  при частотах 1–2 Гц и  $\sim 0.5\%$  при частоте 5 Гц. Падение средней мощности генерации с ростом частоты следования обусловлено как нагревом рабочей смеси, так и уменьшением тока пучка ускорителя из-за уменьшения напряжения на вакуумном диоде. При замене 50 % аргона гелием максимальная средняя мощность генерации регистрировалась при частоте следования импульсов 10 Гц, но была на  $\sim 30\%$  меньше. КПД по вложенной энергии для тройной смеси при частотах 1–2 Гц уменьшился в  $\sim 2$  раза по сравнению с КПД для двойной смеси и не превышал  $\sim 0.5\%$ . Однако при частоте 10 Гц КПД для тройной смеси, так же как и средняя мощность генерации, был выше, чем для двойной смеси.

На рис.1 (кривая 2) показана зависимость средней мощности излучения от частоты следования импульсов для тройной смеси при других параметрах тока пучка: длительности тока пучка на полувысоте 15 мкс и его амплитуде 230 А. Средняя мощность излучения так же, как и при длительности импульса тока пучка 100 мкс, увеличивается с ростом частоты следования импульсов до 10 Гц, достигая 1.5 Вт. Частичная замена аргона гелием привела к тому, что максимальная средняя мощность излучения имела место при частоте следования 10 Гц за счет улучшения теплоотвода на стенки лазерной камеры. Измерения температуры различных газов в центре лазерной камеры (в экспериментах без генерации) показали, что, как и следовало ожидать, температура газа в промежутках между импульсами наиболее быстро уменьшается в чистом гелии и наиболее медленно – в ксеноне.

Зависимости средней мощности излучения для смесей Ar–Xe и He–Ar–Xe при длительностях импульса тока пучка 15 и 100 мкс были подобны. Максимальные средние мощности генерации для первой смеси регистрировались при частоте 5 Гц, а для второй – при частоте 10 Гц. Наибольшие средние мощности излучения при одинаковых частотах следования импульсов накачки до 5 Гц достигались в двойной смеси, но длительность работы лазера, при которой сохраняется максимальная средняя мощность генерации, в тройной смеси была больше. Максимальные КПД по вложенной энергии в экспериментах без прокачки рабочей смеси при частотах 1–2 Гц составляли  $\sim 1\%$ .

Чтобы исключить влияние нагрева рабочей смеси, а также уменьшение напряжения на диоде ускорителя, были проведены эксперименты с возбуждением рабочей смеси пачками импульсов. Частоты повторения в каждой пачке из 5–10 импульсов составляли 1, 5, 10, 17, 25 или 50 Гц. В условиях данного эксперимента (удельный энерговыход не более 50 Дж/л) амплитуда второго импульса и его форма оставались практически без изменения, т. е. и энергия, и КПД генерации сохранялись прежними. Амплитуды третьего и последующих импульсов генерации зависели от плотности тока пучка, а также его длительности и при больших энерговыкладах начинали постепенно уменьшаться. Следовательно, при возбуждении пучком электронов можно на одну порцию смеси «накладывать» по крайней мере два импульса. Это позволяет существенно уменьшить скорость прокачки рабочей смеси.

Отметим, что при накачке плоским электронным пучком распределение энерговыклада по сечению лазерной камеры для широкоапертурных установок, как известно, может быть неравномерным, и это приводит к снижению КПД и энергии излучения в импульсе, или же значительная часть электронного пучка поглощается вне области, охватываемой резонатором. Поэтому были проведены эксперименты на ускорителе с радиально сходящимся электронным пучком.

### 3.2. Эксперименты без прокачки лазерной смеси на установке 2

На данной установке при длительности импульса тока пучка на полувысоте 100 мкс была получена средняя мощность излучения до 2.5 Вт в смеси состава Ar : Xe = 100 : 1 при давлении 1 атм и частоте следования импульсов 5 Гц. В смеси состава He : Ar : Xe = 50 : 50 : 1 при тех же давлении и частоте средняя мощность излучения была равна 2 Вт. При частоте следования импульсов 2 Гц средняя мощность излучения в стационарном режиме для этих же смесей составила 1.8 и 1 Вт соответственно. За счет инжекции электронного пучка со всех сторон распределение плотности мощности излучения по сечению пучка было равномерным. Максимальные КПД по вложенной энергии при частотах 1–2 Гц на установке 2 в экспериментах без прокачки рабочей смеси составляли  $\sim 1.5\%$ .

Однако при работе как на установке 1, так и на установке 2 при частоте следования импульсов более 1–2 Гц происходил медленный нагрев смеси, который не могло компенсировать водяное охлаждение лазерной камеры. Вследствие этого за минуты или десятки минут (в зависимости от частоты следования импульсов, параметров импульса тока пучка, состава и давления смеси, конструкции лазерной камеры и системы ее охлаждения) температура рабочей смеси и лазерной камеры повышалась, а средняя мощность генерации падала.

### 3.3. Эксперименты с поперечной прокачкой лазерной смеси на установке 3

Зависимости энергии излучения в импульсе от зарядного напряжения и давления смеси приведены на рис.2 и рис.3, а осциллограммы тока разряда и генерации – на рис.4. На установке 3 удавалось работать при максимальном зарядном напряжении, которое еще обеспечивало увеличение энергии излучения (рис.2). Рост давления смеси так же, как и в [8] при использовании подобной

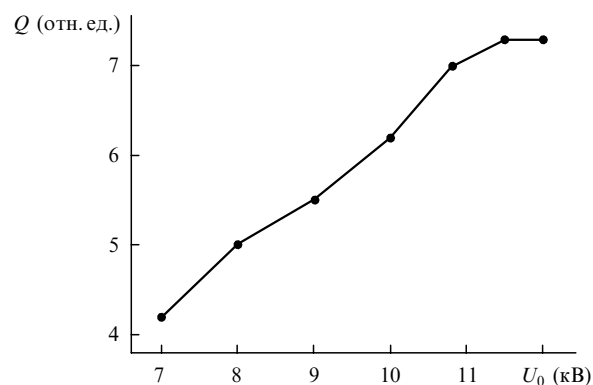


Рис.2. Зависимость энергии излучения в импульсе  $Q$  от зарядного напряжения конденсатора  $U_0$  при давлении  $p = 1.2$  атм смеси состава Ar : Xe = 100 : 1, полученная на установке 3.

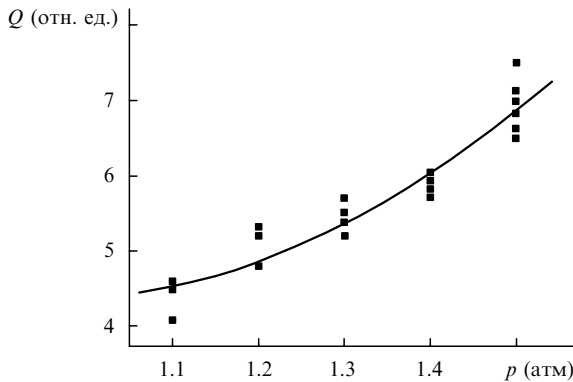


Рис.3. Зависимость энергии излучения в импульсе  $Q$  от давления  $p$  смеси состава  $Ag:Xe = 100:1$  при зарядном напряжении конденсатора  $U_0 = 7$  кВ, полученная на установке 3.

установки, приводил к быстрому росту энергии излучения (рис.3). Однако рабочее давление смеси на установке 3 было ограничено прочностью лазерной камеры, и мы не смогли работать при давлении 5 атм, как в [8], где была получена удельная энергия излучения  $0.75$  Дж/л и КПД по запасаемой в конденсаторе энергии  $\sim 3\%$ . Максимальный же КПД на данной установке не превышал  $\sim 0.5\%$ . Отметим, что на установке 3 и в [8] зарядка накопительного конденсатора осуществлялась от источника постоянного напряжения через индуктивность. При импульсной зарядке накопительного конденсатора [3] надо использовать дополнительный конденсатор и коммутатор, что ведет к увеличению потерь в схеме питания лазера.

На данной установке при накачке разрядом, инициируемым пучком электронов, в смеси состава  $Ag:Xe = 100:1$  при давлении  $1.2$  атм и частоте следования импульсов  $25$  Гц была получена средняя мощность излучения  $380$  мВт (рис.5). В этом режиме лазер мог работать длительное время без существенного уменьшения средней мощности излучения. За  $10$  мин работы лазера средняя мощность излучения снижалась менее чем на  $20\%$  и далее существенно не изменялась. Уменьшение средней мощности излучения происходило, по-видимому, вследствие десорбции молекулярных газов из электродов и фольги, а также «поднятия» пыли со стенок камеры. При увеличении за счет прокачки смеси частоты следования импульсов накачки (рис.5) наблюдался линейный рост средней мощности излучения в стационарном режиме.

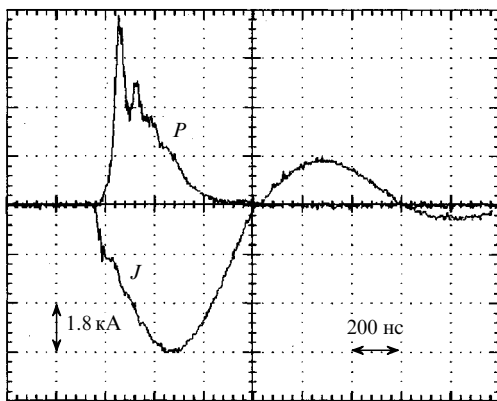


Рис.4. Оциллограммы импульсов генерации  $P$  в смеси состава  $Ag:Xe = 100:1$  и тока разряда  $J$  при  $p = 1.1$  атм и  $U_0 = 9$  кВ, полученные на установке 3.

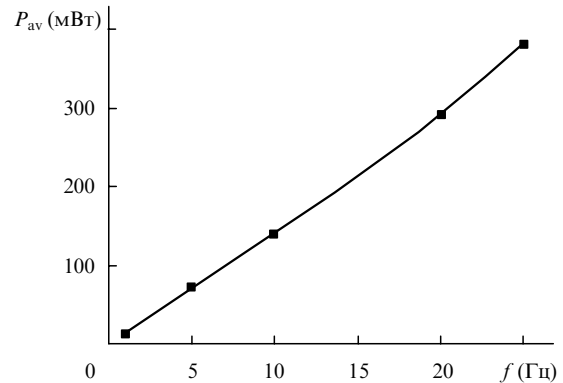


Рис.5. Зависимость средней мощности генерации  $P_{av}$  для смеси состава  $Ag:Xe = 100:1$  от частоты следования импульсов  $f$  при  $p = 1.2$  атм и  $U_0 = 10$  кВ, полученная на установке 3.

Система прокачки обеспечивала не менее чем пятикратную замену рабочей смеси между импульсами. Уменьшение скорости прокачки смеси при заданной частоте следования импульсов приводило (начиная с некоторой скорости прокачки) к контрагированию разряда и срыву генерации. Следовательно, для реализации стационарного импульсно-периодического режима при накачке разрядом, инициируемым или контролируемым электронным пучком, нужна многократная замена рабочей смеси (для установки 3 не менее пяти раз). Как мы отмечали выше, при накачке пучком электронов можно «накладывать» два импульса на одну порцию смеси. Это позволяет уменьшить скорость прокачки до замены в промежутке между импульсами только возбужденной смеси.

Надо сказать, что отключение электрического поля (накачка только пучком электронов) приводило к снижению средней мощности излучения примерно в  $15$  раз. Однако и при накачке одним электронным пучком средняя мощность генерации в стационарном режиме была на порядок больше, чем в [12].

#### 4. Заключение

Проведенные экспериментальные исследования лазера на атомарных переходах ксенона в импульсно-периодическом режиме при повышенных давлениях смеси  $Ag-Xe$  позволили получить:

- среднюю мощность излучения  $380$  мВт в стационарном режиме при частоте  $25$  Гц, поперечной прокачке рабочей смеси и накачке разрядом, инициируемым пучком электронов;

- среднюю мощность излучения  $2.5$  Вт без прокачки рабочей смеси в квазистационарном режиме при накачке электронным пучком длительностью  $100$  мкс.

При создании ксенонового ИК лазера с высокой средней мощностью излучения ( $\sim 1000$  Вт и более) возможны следующие четыре подхода:

1. Использование для накачки электронного пучка и реализация максимальных эффективностей генерации ( $\sim 4\%$  от вложенной энергии). В этом случае оптимальное давление смеси  $Ag-Xe$  равно  $\sim 1$  атм, а удельный энергоъем в отдельном импульсе составляет  $1-2$  Дж/л. Для такого лазера удельная мощность накачки и длительность импульса тока пучка должны составлять соответственно  $1-3$  кВт/см<sup>3</sup> и  $100-10$  мкс. Недостаток данного режима – сравнительно малая удельная энергия генерации.

2. Использование для накачки электронного пучка и реализация высоких удельных энергий генерации (4–6 Дж/л) за счет увеличения плотности тока пучка и рабочего давления смеси. В этом случае оптимальное давление смеси Ag–Xe составляет  $\sim 4$  атм, КПД равен  $\sim 2\%$ . Недостатками данного режима являются снижение КПД лазера в  $\sim 2$  раза относительно режима 1 и высокое рабочее давление, что усложняет систему прокачки и конструкцию лазерной камеры.

3. Использование для накачки разряда, контролируемого электронным пучком (электроионизационный способ накачки). Этот режим предложен для создания ксенонового ИК лазера с высокой средней мощностью излучения в [3]. В данном режиме оптимальное давление смеси Ag–Xe составляет  $\sim 4$  атм, реализуются высокие эффективности генерации ( $\sim 3\%$  от энергии, запасаемой в накопительном конденсаторе) и высокие удельные энергии излучения (4–8 Дж/л). Недостатками такого режима являются высокое рабочее давление, что усложняет систему прокачки и конструкцию лазерной камеры, и в несколько раз более высокая, чем при накачке электронным пучком, скорость прокачки рабочей смеси. Кроме того, имеются дополнительные потери электронного пучка на сетке, установленной на катоде для улучшения однородности электрического поля в разрядном промежутке и предохранения фольги. Отметим также, что в этом варианте даже кратковременное контрагирование разряда (в одном или нескольких импульсах, что возможно при импульсно-периодическом режиме работы лазера) может приводить к повреждению фольги.

4. Использование для накачки самостоятельного разряда с УФ или рентгеновской предыонизацией, высокой частоты следования импульсов (1–10 кГц) и смеси He–Xe. Этот режим перспективен только при получении средней мощности излучения десятки–сотни ватт. Такие установки более просты, но эффективность генерации обычно не превышает долей процента и лазер работает на  $\lambda = 2.03$  мкм.

Во всех вариантах необходимо применять прокачку рабочей смеси, которая должна обеспечивать смену газа в активном объеме в промежутках между импульсами. При этом в случае накачки одним электронным пучком

достаточно одной замены рабочей смеси к следующему импульсу возбуждения, а при накачке разрядами различных типов рабочую смесь между импульсами из-за возможности контрагирования разряда необходимо заменять примерно пять раз.

На основании проведенных исследований и анализа известных экспериментальных данных мы предлагаем для получения высокой средней мощности излучения ( $\sim 1000$  Вт и более) в лазере на атомарных переходах ксенона использовать первый подход. При этом накачка смеси Ag–Xe при давлении 1 атм осуществляется пучком электронов, инжектируемым в лазерную камеру с двух сторон. Удельная мощность накачки и длительность импульса тока пучка должны составлять соответственно 1–3 кВт/см<sup>3</sup> и 100–10 мкс. Необходимо, чтобы прокачка рабочей смеси обеспечивала ее замену в возбуждаемом объеме в промежутке между импульсами.

1. Серeda О.В., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **20**, 535 (1993).
2. Карелин А.В., Синянский А.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **24**, 387 (1997).
3. Холин И.В. *Квантовая электроника*, **33**, 129 (2003).
4. Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Скакун В.С. *Квантовая электроника*, **26**, 209 (1999).
5. Феденев А.В., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С. *Квантовая электроника*, **32**, 449 (2002).
6. Fahlen T.S., Tang R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **9** (6), 609 (1973).
7. Kozlov V.A., Ashurkov R.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4351**, 141 (2001).
8. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **7**, 663 (1980).
9. Basov N.G., Chugunov A.Yu., Danilychev V.A., Kholin I.V., Ustinovskiy N.N. *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 126 (1983).
10. Watterson R.L., Jacob J.H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26**, 417 (1990).
11. Заярный Д.А., Семенова Л.В., Устиновский Н.Н., Холин И.В., Чугунов А.Ю. *Квантовая электроника*, **25**, 493 (1998).
12. Гиматдинов В.Р., Карелин А.В., Кузнецов Д.Л., Новоселов Ю.Н., Симакова О.В., Сурков Ю.С. *Письма в ЖТФ*, **30**, 66 (2004).
13. Винтизенко Л.Г., Гушенец В.И., Коваль Н.Н., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Щанин П.М. *ДАН СССР*, **288**, 609 (1986).
14. Bugaev A.S., Koval N.N., Lomaev M.I., Mel'chenko S.V., Ryzhov V.V., Tarasenko V.F., Turchanovsky I.Yu., Fedenev A.V., Shchanin P.M. *Laser and Particle Beams*, **12** (4), 633 (1994).
15. Карпов В.М., Конев Ю.Г., Орловский В.М., Осипов В.В., Пономарев В.Б. *Квантовая электроника*, **15**, 465 (1988).