

УФ генерация в азоте при накачке объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин

Е.Х.Бакшт, А.Г.Бураченко, В.Ф.Тарасенко

Исследована УФ генерация в азоте и смеси N_2-SF_6 при накачке объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ), сформированным в неоднородном электрическом поле. Показано, что в этом случае генерация на длине волны 337.1 нм наблюдается при давлениях до 2.5 атм без источника дополнительной предьонизации. При давлении 0.5 атм, использовании электродов в виде лезвий и длине активной среды ~ 6 см в смеси $N_2:SF_6 = 10:1$ получено лазерное излучение с энергией ~ 2 мДж при мощности в импульсе 0.55 МВт. Проведено сравнение режима накачки ОРИПЭЛ и режима накачки объемным разрядом, формируемым за счет источника дополнительной ионизации.

Ключевые слова: объемный разряд без источника дополнительной предьонизации, неоднородное электрическое поле, азотный лазер.

1. Введение

Одной из важнейших областей применения различных типов разрядов и пучков электронов является лазерная техника [1–4]. Объемные разряды используются в разных областях науки и техники, в том числе и для создания импульсных лазеров на плотных газах. В связи с этим изучению объемных (диффузных) разрядов при повышенных давлениях различных газов уделялось и уделяется очень большое внимание [4–10]. Для накачки лазеров в основном использовались разряды в однородном электрическом поле при предьонизации промежутка от дополнительного источника [1–4]. Формирование объемных разрядов при повышенных давлениях и в сравнительно сильных электрических полях объясняется тем [6], что в этом случае создается достаточно высокая начальная концентрация электронов в межэлектродном зазоре. При данной начальной концентрации электронов головки электронных лавин перекрываются до достижения критического размера лавины и образования стримера. В сильных электрических полях происходит ускорение части электронов в головках электронных лавин, не ограничивающее формирование диффузных разрядов [5, 10]; разряды при этом состоят из отдельных диффузных нитей, что приводит к неоднородности энерговклада и уменьшению КПД различных лазеров [10].

Весьма интересны объемные разряды, формируемые в неоднородном электрическом поле. О возможности получения в нем диффузного разряда при атмосферном давлении гелия [11] и воздуха [12] впервые сообщалось в конце 1960-х годов. На разрядный промежуток подавались наносекундные импульсы напряжения с амплитудой

более 100 кВ. Работы в этом направлении стимулировались тем, что при пробое промежутка импульсами высокого напряжения наблюдалось рентгеновское излучение и пучки убегающих электронов (см. обзор [7] и ссылки в нем). Однако для накачки лазеров данный режим разряда не был использован, а затем интерес к исследованиям объемных разрядов в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях уменьшился.

В недавних работах [13, 14] было показано, что в неоднородном электрическом поле, при наносекундной длительности импульса напряжения и без дополнительного источника предьонизации в различных газах формируется объемный (диффузный) разряд при давлениях выше атмосферного. В [13] в объемной стадии разряда были получены рекордные удельные мощности энерговклада (~ 0.8 ГВт/см³ при давлении воздуха 1 атм). Объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ) в неоднородном электрическом поле, был реализован при напряжении на разрядном промежутке различной геометрии 10–300 кВ и частоте следования импульсов до 160 Гц.

Было установлено, что формирование объемного разряда обусловлено предьонизацией промежутка убегающими электронами, которые ускоряются за счет усиления электрического поля в приэлектродной области и в разрядном промежутке [13–15]. При накачке ОРИПЭЛ в смеси Ag:Xe = 240:1 при давлении 1.2 атм и активной длине всего 1.5 см была получена ИК генерация на атомарных переходах ксенона [13, 14]. Однако на второй положительной системе азота порог генерации в этих условиях достигнут не был. Представляет интерес получение генерации лазерного излучения в ВУФ области на димерах тяжелых инертных газов при возбуждении ОРИПЭЛ [16, 17]. Эффективная генерация в таких лазерах пока реализована только при возбуждении электронным пучком [1, 3, 4]. Как правило, возбуждение самостоятельным объемным разрядом сложно осуществить из-за трудностей, связанных с формированием и поддержанием объемного разряда. Для получения эффективной

Е.Х.Бакшт, А.Г.Бураченко, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: VEN@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 24 марта 2009 г., после доработки – 19 августа 2009 г.

лазерной генерации объемный разряд в тяжелых инертных газах необходимо формировать при высоких давлениях и активной длине лазера в десятки сантиметров и более.

Отметим, что ранее ОРИПЭЛ был реализован в тяжелых инертных газах и использован для получения мощного ВУФ излучения на димерах Ar, Kr и Xe [18], в том числе при давлениях ксенона до 12 атм [19]. Вместе с тем свойства ОРИПЭЛ с точки зрения его использования для получения генерации на переходах различных атомов и молекул остаются малоизученными. Поэтому, прежде чем приступить к сложной задаче получения лазерной генерации на димерах инертных газов, необходимо более широко исследовать возможности ОРИПЭЛ для получения лазерной генерации в протяженных разрядных промежутках и при повышенных давлениях. При этом на начальном этапе целесообразно использовать в качестве рабочих такие газовые среды, в которых сравнительно легко можно получить лазерную генерацию при накачке объемным импульсным разрядом, например азот. УФ генерация в азоте впервые была получена в 1963 г. [20]. В результате исследований были разработаны многочисленные образцы N_2 -лазеров с накачкой продольным и поперечным разрядами от импульсных генераторов с емкостными накопителями энергии различной конструкции. Измерены спектральные характеристики излучения азотного лазера, определено влияние параметров импульсов возбуждения, состава и давления газовой смеси на пиковую мощность излучения, длительность и энергию импульса (см. монографии [3, 4] и обзоры [21, 22]). Обширный опубликованный материал по исследованию генерации в азоте позволяет сравнить известные режимы накачки азотного лазера самостоятельным разрядом с накачкой ОРИПЭЛ.

Цель настоящей работы – исследование возможностей получения лазерного излучения в азоте и смесях азота с другими газами при накачке ОРИПЭЛ.

2. Экспериментальные установки и методики

При проведении работы использовались генераторы наносекундных импульсов РАДАН-220 и СЛЭП-150, а также три разрядные камеры. РАДАН-220 [23] имел волновое сопротивление накопительной линии 20 Ом и формировал на высокоомной нагрузке импульс напряжения с амплитудой до 280 кВ. Его длительность при согласованной нагрузке составляла ~ 2 нс, а длительность фронта импульса в передающей линии была равна ~ 0.5 нс. Генератор СЛЭП-150 [24] формировал импульсы напря-

жения с амплитудой до 150 кВ (напряжение при высокоомной нагрузке) при длительности фронта импульса напряжения ~ 0.3 нс. На выходе генератора СЛЭП-150 устанавливалась передающая линия с волновым сопротивлением 100 Ом (при заполнении ее трансформаторным маслом) и 140 Ом (при заполнении воздухом). Длительность импульса напряжения на полувысоте в передающей линии генератора СЛЭП-150 могла изменяться от 1 до 0.1 нс с помощью срезающего разрядника.

Конструкция камеры для получения лазерного излучения приведена на рис. 1. Расстояние между катодом и анодом равнялось 14 мм. Катод (длина ~ 6 см) и анод (~ 8 см) были выполнены из фольги из нержавеющей стали толщиной 120 мкм. Два электрода представляли собой лезвия с закругленными краями, что способствовало реализации более равномерного энерговклада накачки по длине межэлектродного зазора в лазерном промежутке. Дело в том, что в геометрии острие – плоскость или лезвие – плоскость удельная мощность накачки существенно различна по длине промежутка, достигая максимальных значений (~ 800 МВт/см³ [13]) у электрода с малым радиусом кривизны. Как показали наши предыдущие исследования [25], при использовании обоих электродов с малым радиусом кривизны достигается сравнительно равномерный энерговклад вдоль промежутка длиной 12–20 мм. В работе [25] применялись электроды в виде иголок, а на промежутке подавались импульсы напряжения от генератора АРИНА [23]. По сравнению с работой [13], в которой порога генерации в азоте достичь не удалось, активная длина лазера была увеличена в ~ 4 раза. Кроме того, была уменьшена индуктивность подводов от генератора к электродам разрядной камеры, что позволило увеличить напряжение на промежутке. На боковых стенках разрядной камеры устанавливались кварцевые окна или зеркала. Максимальные мощности и энергии генерации были получены с использованием низкодобротного резонатора с кварцевой пластинкой в качестве выходного зеркала. Поскольку лазерная камера не была оборудована датчиками тока и напряжения, электрические характеристики разряда измерялись а помощью двух дополнительных камер. Электроды, применяемые при использовании генератора РАДАН-220, имели длину 6 см и были изготовлены из фольги толщиной 100 мкм. С генератором СЛЭП-150 использовались плоский анод и катод, представляющий собой трубку диаметром 6 мм из фольги толщиной 100 мкм. Все электроды с малым радиусом кривизны были изготовлены из нержавеющей стали. Дополнительные камеры не предназначались для получения и вывода лазерного излуче-

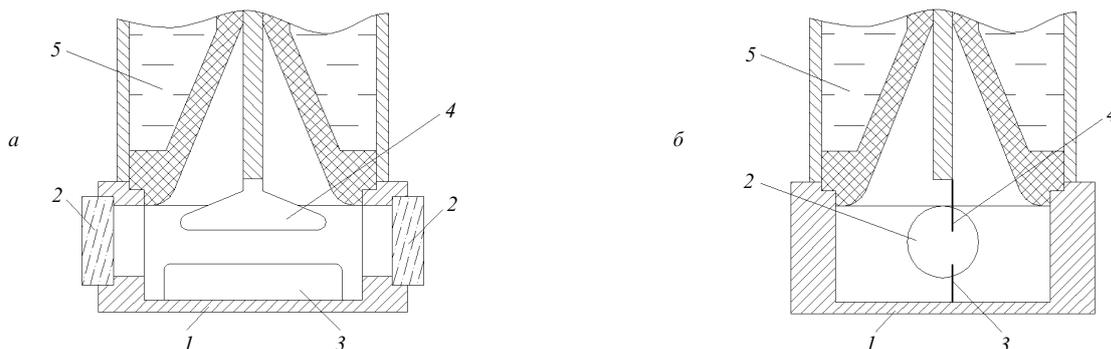


Рис. 1. Конструкция лазерной камеры – сечения камеры вдоль (а) и поперек (б) оптической оси резонатора: 1 – лазерная камера; 2 – кварцевые окна; 3 – анод; 4 – катод; 5 – высоковольтный генератор РАДАН-220.

ния, однако в них были вмонтированы токовые шунты и емкостные делители напряжения. В одной из камер, используемой с генератором СЛЭП-150, имелось боковое окно для фотографирования разряда.

Лазерное излучение регистрировалось фотоэлементом ФЭК-22 и калориметром ИМО-2Н. Для регистрации сигналов с ФЭК-22, емкостного делителя и шунта применялся осциллограф TDS-3054В (0.5 ГГц, пять выборок за 1 нс). Эксперименты проводились с использованием в качестве активных сред азота и смесей азота с аргоном, гелием и SF₆.

3. О формировании ОРИПЭЛ

Как мы уже отмечали, для формирования ОРИПЭЛ необходимо подать на разрядный промежуток импульсы высокого напряжения малой длительности. Были проведены предварительные исследования вольт-амперных характеристик разряда и его пространственной формы в азоте, воздухе и SF₆. На рис.2 приведены характерные осциллограммы тока разряда и напряжения на емкостном делителе при разряде в азоте, полученные с использованием дополнительной камеры, о которой говорилось выше. На осциллограмме импульса напряжения, как и в случае формирования импульсного объемного разряда с преионизацией от дополнительного источника [3, 8], можно выделить фронт импульса, стадию быстрого спада напряжения и квазистационарную стадию, продолжительность которой в данных условиях примерно соответствует длительности импульса генератора. «Полезная» накачка УФ азотного лазера, как было показано ранее [3, 22], происходит на участке быстрого спада напряжения. В данных экспериментах за счет уменьшения индуктивности подводов к лазерному промежутку и сокращения фронта импульса напряжения нам удалось увеличить напряжение на разрядном промежутке по сравнению с достигнутым в [13]. При использовании смеси азота с SF₆ напряжение на промежутке в исследуемом лазере, как и в других азотных лазерах [22], дополнительно увеличивается по сравнению со случаем использования только азота. Это, как известно, вызвано ростом напряжения пробоя разрядного промежутка и позволяет увеличить мощность генерации на второй положительной системе азота. Однако давление рабочей смеси при использовании импульсного объемного разряда обычно не превышает 0.3 атм. При накачке ОРИПЭЛ удалось реализовать условия, близкие к оптимальным, при высоких давлениях смеси азота с SF₆. Так, при длительности

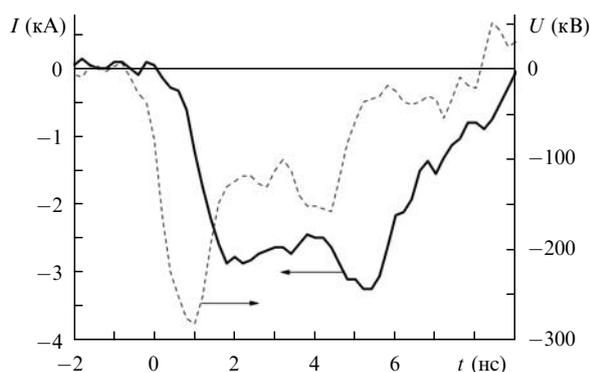


Рис.2. Характерные осциллограммы тока разряда и напряжения на емкостном делителе для разряда в азоте; давление азота $p = 1$ атм.

импульса напряжения $\tau_p \sim 2$ нс, амплитуде ~ 150 кВ и межэлектродном зазоре $d = 10$ мм разряд даже в SF₆ атмосферного давления был диффузным. Ток разряда возникал на фронте импульса напряжения, направление тока разряда не изменялось. При ОРИПЭЛ в SF₆ сопротивление разрядной плазмы превышало волновое сопротивление генератора. Более 80 % энергии от генератора вкладывалось в разрядную плазму за ~ 3 нс. В лазере с УФ и рентгеновской преионизацией от искровых промежутков [26] максимальное давление SF₆, при котором разряд оставался диффузным, не превышало 0.1–0.3 атм. В азоте при межэлектродном зазоре 12–16 мм диффузный разряд в резко неоднородном поле был получен при давлениях до ~ 5 атм (с генератором РАДАН-220). Однако при уменьшении зазора ($d \leq 6$ мм), длительностях импульса напряжения 1 и 2 нс и атмосферном давлении SF₆, воздуха и азота разряд контрагировался. В целом вероятность контрагирования разряда растет при увеличении длительности импульса напряжения и его переднего фронта, при уменьшении межэлектродного зазора, а также при увеличении давления газа в разрядной камере до нескольких атмосфер.

Длительность импульса напряжения на полувывоте, формируемого генератором СЛЭП-150 на согласованной нагрузке, составляла ~ 1 , ~ 0.2 , ~ 0.15 и ~ 0.1 нс. В зависимости от величины межэлектродного промежутка, сорта газа и его давления реализовывались различные режимы разряда, при этом диффузная форма разряда наблюдалась в широком диапазоне экспериментальных условий. На рис.3 приведены фотографии свечения разряда в воздухе при τ_p в передающей линии ~ 0.2 нс и различных межэлектродных зазорах. Яркие пятна видны только на катоде. Вследствие сокращения длительности импульса напряжения контрагирования разряда в воздухе атмосферного давления при $d = 4$ мм не наблюдалось. При увеличении зазора ($d = 16$ мм) ОРИПЭЛ не успевал сформироваться, а свечение наблюдалось только у катода, что характерно для импульсного коронного разряда. Однако катодные пятна видны и в этом режиме. При $d = 12$ мм диффузное свечение наблюдалось у всей кромки катода, а промежуток замыкался только одним диффузным «каналом», который формировался у нижней кромки катода (рис.3,б).

Из проведенных экспериментов следует, что ОРИПЭЛ является начальной стадией разряда при подаче на промежуток с неоднородным электрическим полем импульсов напряжения с крутым передним фронтом. При этом первой стадией ОРИПЭЛ является импульсный коронный разряд. Плотная диффузная плазма формируется вначале у электрода с малым радиусом кривизны [15].

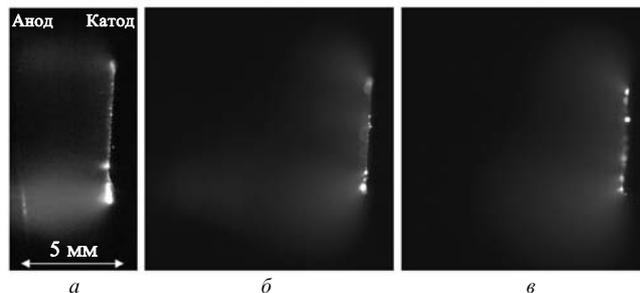


Рис.3. Фотографии свечения разряда в воздухе при длительности импульса напряжения в передающей линии ~ 0.2 нс и межэлектродных зазорах 4 мм (а), 12 мм (б) и 16 мм (в).

Затем фронт плотной плазмы с высокой скоростью (до 10 см/нс) распространяется от электрода с малым радиусом кривизны и через некоторое время, в данных условиях меньше 1 нс, замыкает промежуток. Далее ионизационные процессы развиваются во всем промежутке, напряжение на промежутке уменьшается, разряд переходит в квазистационарную стадию и начинает соответствовать аномальному тлеющему разряду. При увеличении длительности импульса напряжения происходит контрагирование импульсного тлеющего разряда. При контрагировании свечение объемной стадии разряда (ОРИПЭЛ) маскируется излучением высокой интенсивности от искрового канала. Объемный импульсный разряд, формируемый в лазерах за счет источника дополнительной предьонизации, принято относить к импульсному тлеющему разряду (обычно аномальному).

Основное отличие ОРИПЭЛ заключается в формировании диффузного разряда за счет предьонизации убегающими электронами и рентгеновским излучением, которые генерируются при разряде в неоднородном электрическом поле. При этом заполнение промежутка плотной плазмой происходит в результате движения фронта волны ионизации от электрода (электродов) с малым радиусом кривизны. Предьонизация убегающими электронами позволяет существенно увеличить рабочее давление в лазерном промежутке простой конструкции. Конечно, объемные разряды при высоком давлении можно получить и без использования режима генерации убегающих электронов, однако при этом нужно создавать очень сложные установки с ускорителями электронов, осуществляющими предьонизацию промежутка. Более того, для получения УФ генерации в азоте необходимо инжектировать электронный пучок в промежуток при напряжении на нем, в несколько раз превышающем статическое пробивное напряжение.

4. Результаты измерений характеристик генерации и их обсуждение

В ходе экспериментов по получению генерации диффузный разряд без предварительной ионизации разрядного промежутка был получен как в азоте, так и в смесях азота с аргоном, гелием и SF_6 при давлениях до нескольких атмосфер. На промежуток подавались наносекундные импульсы напряжения от генератора РАДАН-220. На рис.4 представлена фотография автографа лазерного пучка – люминесценции бумаги под действием УФ лазерного излучения, полученного в смеси $N_2:Sf_6 = 10:1$. Аналогичная картина наблюдалась при генерации в чистом азоте. По сравнению с конфигурацией электродов нож – плоскость применение двух электродов с малым радиусом кривизны позволило получить сравнительно равномерное распределение интенсивности излучения по длине разрядного промежутка. Дополнительное слабосветящееся пятно справа обусловлено, по-видимому, формированием слаботочного разряда во всем объеме разрядной камеры. Генерация была получена как в азоте, так и в смесях азота с SF_6 . Осциллограммы импульсов лазерного излучения в чистом азоте для разных давлений приведены на рис.5,а. С уменьшением давления азота передний фронт импульса излучения становится более пологим, а длительность импульса увеличивается. Аналогичный результат наблюдался при генерации излучения в смеси $N_2:Sf_6 = 10:1$ (рис.5,б). Минимальная длительность

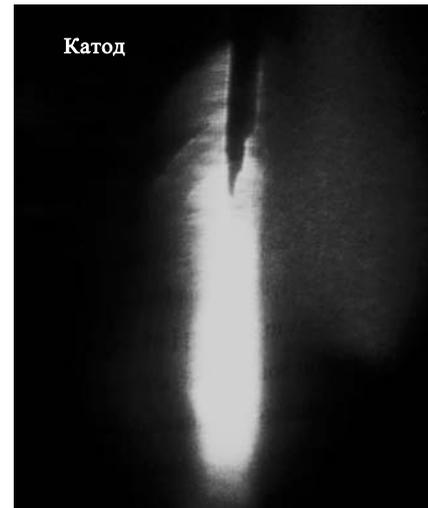


Рис.4. Фотография люминесценции белой бумаги под действием УФ лазерного излучения. Смесь $N_2:Sf_6 = 10:1$, давление смеси $p = 0.5$ атм.

импульса генерации была зарегистрирована в азоте при давлениях 1.2–1.6 атм и составила ~ 1 нс.

Зависимости пиковой мощности лазерного излучения в азоте, а также длительности этого излучения на полувысоте от давления азота представлены на рис.6,а. Видно, что мощность излучения достигает максимального значения при давлении ~ 0.5 атм, а длительность импульса излучения с увеличением давления уменьшается. Средняя энергия импульса излучения лазера при давлении азота 0.5 атм составила ~ 0.1 мДж. В случае смесей азота с гелием и аргоном энергия излучения при данных условиях уменьшалась.

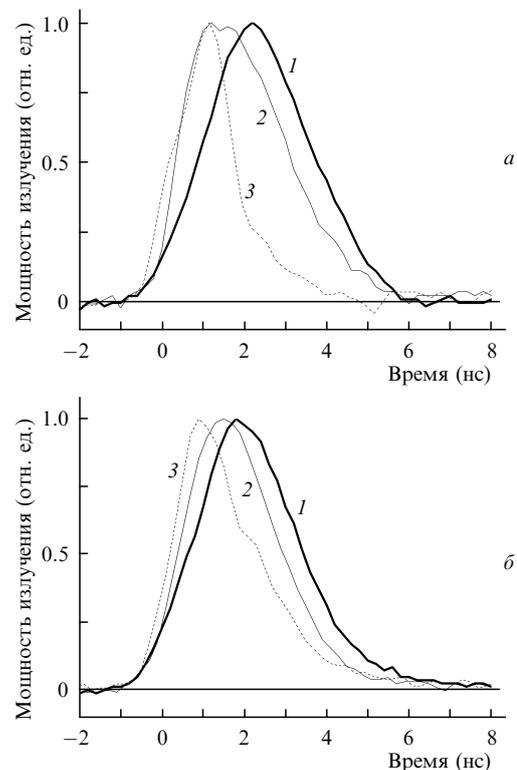


Рис.5. Осциллограммы импульсов лазерного излучения в азоте (а) и в смеси $N_2:Sf_6 = 10:1$ (б) при $p = 0.4$ атм (1), 1 атм (2), 1.6 атм (а; 3) и 2 атм (б; 3).

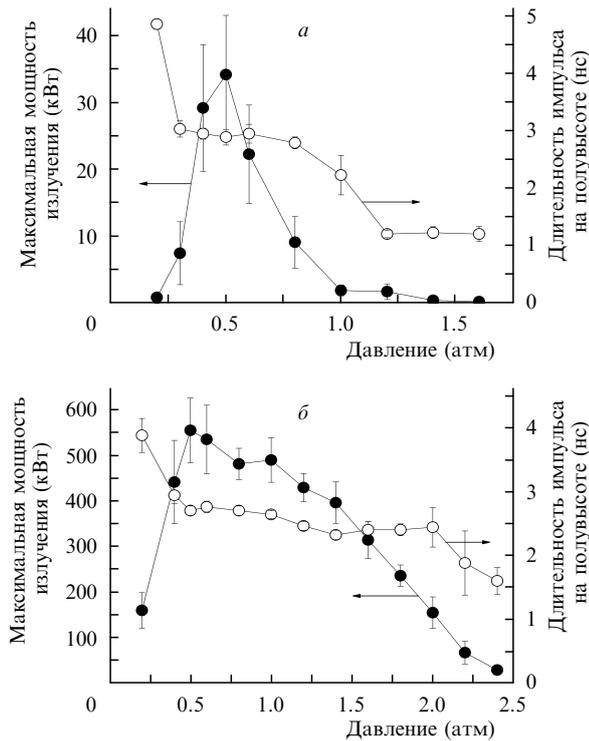


Рис. 6. Зависимости максимальной мощности лазерного излучения, а также его длительности на полувысоте от давления азота (а, генерация в чистом азоте) и смеси $N_2:SF_6 = 10:1$ (б).

При использовании смеси $N_2:SF_6 = 10:1$ наблюдалось изменение характеристик лазерного импульса в зависимости от давления смеси (рис. 5, б и 6, б), аналогичное их изменению при генерации в чистом азоте. Вместе с тем максимальная пиковая мощность излучения при давлении смеси 0.5 атм увеличилась в ~ 16 раз по сравнению с генерацией в азоте и составила ~ 0.55 МВт. Энергия излучения лазера в импульсе при давлении смеси 0.5 атм была равна ~ 2 мДж, что соответствует удельному энергосъему ~ 0.1 мДж/см³. КПД от энергии, запасаемой в формирующей высоковольтной линии генератора РАДАН-220, составил $\sim 0.1\%$, что является высоким значением для лазера со сравнительно малой активной длиной (~ 6 см) и большим давлением рабочей смеси. Данные параметры генерации получены в азотном лазере, конструкция которого существенно отличается от традиционной [3, 4, 21, 22]. Так, например, в лазерах традиционной конструкции добавление SF_6 к азоту увеличивает энергию излучения обычно в два-три раза. Также следует отметить высокие оптимальные давления рабочей смеси; этот фактор можно будет использовать при создании лазеров с малой длительностью импульса излучения.

Спектральный состав излучения азотного лазера соответствовал генерации на линии с $\lambda = 337.1$ нм и не менялся при переходе от чистого N_2 к смеси $N_2:SF_6 = 10:1$. Обычно в лазерах с накачкой поперечным разрядом в смесях с SF_6 наблюдается излучение и на $\lambda = 358$ нм [22].

5. Заключение

Проведенные исследования показали, что мощность накачки и степень однородности ОРИПЭЛ достаточны для получения лазерной генерации в азоте и в смеси $N_2:SF_6 = 10:1$ при давлениях до 2.5 атм. При этом достигнут удельный энергосъем лазерного излучения ~ 0.1

мДж/см³ на второй положительной системе азота на длине волны 337.1 нм. Данные результаты позволяют прогнозировать получение мощного лазерного излучения при накачке ОРИПЭЛ в различных газовых средах, в том числе и на димерах тяжелых инертных газов. Для этого мы планируем создать разрядные камеры с большими объемами и активными длинами. В заключение отметим, что формирование объемного (диффузного) разряда, как было показано нами ранее [13–15], обусловлено предыонизацией убегающими электронами, которые генерируются за счет усиления электрического поля у электродов и в разрядном промежутке. Использование ОРИПЭЛ позволяет увеличить рабочее давление смеси и упростить конструкцию разрядного промежутка. При накачке ОРИПЭЛ нет необходимости в применении дополнительной системы для предыонизации разрядного промежутка.

Авторы благодарят М.И. Ломаева за полезные обсуждения, а Д.В. Рыбку за помощь при проведении экспериментов.

1. Газовые лазеры. Под ред. И. Мак-Даниэля, У. Нигена (М.: Мир, 1986).
2. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. *Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
3. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Washington: SPIE Press, 1995).
4. Endo I., Walter R.F. *Gas Lasers* (New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007).
5. Месяц Г.А., Бычков Ю.И., Кремнев В.В. *УФН*, **107** (2) 201 (1972).
6. Palmer A.I. *Appl. Phys. Lett.*, **25** (3), 138 (1974).
7. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. *УФН*, **160** (7), 49 (1990).
8. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. *Физика импульсного пробоя газов* (М.: Наука, 1991).
9. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филогин И.В. *УФН*, **164** (3), 263 (1994).
10. Осипов В.В. *УФН*, **170** (3), 225 (2000).
11. Noggle R.C., Krider E.P., Wayland J.R. *J. Appl. Phys.*, **39** (10), 4746 (1968).
12. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. *ЖТФ*, **39** (8), 1530 (1969).
13. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34** (11), 1007 (2004).
14. Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. *ЖТФ*, **74** (8), 35 (2004).
15. Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V. *Plasma Devices and Operation*, **16** (4), 267 (2008).
16. Бойченко А.М., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **36** (12), 1176 (2006).
17. Зверева Г.Н., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. *Оптика и спектроскопия*, **102** (1), 46 (2007).
18. Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **36** (6), 576 (2006).
19. Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **37** (6), 595 (2007).
20. Heard H. G. *Nature*, **200**, 667 (1963).
21. Kunabench R.S., Gorbali M.R., Savadatti M.I. *Progr. Quantum Electron.*, **9**, 259 (1984).
22. Panchenko A.N., Suslov A.I., Tarasenko V.F., Kononov I.N., Tel'minov A.E. *Phys. Wave Phenomena*, **17** (4), 251 (2009).
23. Месяц Г.А. *Импульсная энергетика и электроника* (М.: Наука, 2004, с. 302).
24. Тарасенко В.Ф., Бураченко А.Г., Бакшт Е.Х., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. *ПТЭ*, № 3, 59 (2009).
25. Костыря И.Д., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. *Письма в ЖТФ*, **31** (11), 19 (2005).
26. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.А. *Квантовая электроника*, **37** (1), 103 (2007).