

# Генерация в УФ, ИК и видимой областях спектра в диффузном разряде, формируемом убегающими электронами лавин

П.О.Вильтовский, М.И.Ломаев, А.Н.Панченко, Н.А.Панченко, Д.В.Рыбка, В.Ф.Тарасенко

*Проведены исследования лазеров на смесях инертных газов,  $H_2$ ,  $D_2$  и азота с  $NF_3$  и (или)  $SF_6$  при накачке объемным (диффузным) разрядом, формируемым в неоднородном электрическом поле за счет предьонизации убегающими электронами. Получена генерация в ИК, видимой и УФ областях спектра на переходах атомов неона ( $\lambda = 585.3$  нм), аргона (750.3 нм) и фтора (712.8 и 731.1 нм), а также на переходах молекул  $N_2$  (337.1 нм),  $XeF^*$  (351 и 353 нм),  $HF$  (2.8–3.2 мкм) и  $DF$  (3.8–4.2 мкм). Показано, что в смесях  $N_2-SF_6$ ,  $H_2-SF_6$  и  $D_2-SF_6$  достигается эффективность генерации, близкая к предельной.*

**Ключевые слова:** импульсные газовые лазеры ИК, видимого и УФ диапазонов, объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин, высокая эффективность.

## 1. Введение

В работах [1–4] было показано, что при накачке объемным (диффузным) разрядом, инициируемым пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ), в газовых смесях при повышенных давлениях наблюдается генерация в ИК [1], видимой [2] и УФ [3, 4] областях спектра. В указанных работах убегающие электроны и лазерное излучение генерировались в одном разрядном промежутке. Убегающие электроны, формируемые в отдельном промежутке, использовались для предьонизации основного лазерного промежутка, в котором была реализована генерация на молекулах  $N_2$  [5] и  $CO_2$  [6]. Кроме того, импульсы напряжения, используемые для получения убегающих электронов в воздухе атмосферного давления, применялись для накачки лазера на кристаллах  $ZnSe$  [7]. Пучки убегающих электронов, формируемые в отдельном промежутке при амплитудах импульсов напряжения в единицы киловольт, использовались для возбуждения газовых лазеров ИК диапазона при малых и средних давлениях [8–10].

Как показывает проведенный нами анализ известных работ, для накачки лазеров, которые эффективно работают при повышенных давлениях рабочей смеси [11, 12], перспективнее использовать пучок убегающих электронов для формирования диффузного разряда. Длительность импульса тока пучка убегающих электронов, сформированного в газах при давлении в сотни торр и выше, сравнительно мала ( $\sim 100$  пс), а плотность тока пучка при атмосферном давлении обычно не превышает нескольких  $A/cm^2$  [13, 14]. Такие значения обусловлены механизмом формирования пучков убегающих электронов при повышенных давлениях [13]. В этих условиях основное число

убегающих электронов генерируется между фронтом волны ионизации и анодом, а длительность импульса тока пучка ограничена, в частности, приходом фронта волны ионизации на анод.

Цель настоящей работы – исследование параметров генерации в ИК, видимой и УФ областях спектра на переходах атомов неона, аргона и фтора, на молекулах  $HF$ ,  $DF$ ,  $N_2$  и  $XeF^*$  при накачке ОРИПЭЛ, а также определение наиболее перспективных газовых смесей, в которых реализуется эффективная генерация. Данная работа продолжает исследования, начатые в [1–4].

## 2. Экспериментальная установка и методики измерений

Генерация в различных газовых смесях исследовалась при использовании для накачки импульсов напряжения наносекундной длительности, формируемых генератором РАДАН-220 [15] (установка 1), формирующая линия которого имела волновое сопротивление 20 Ом. Конструкции выходной части генератора и разрядной камеры приведены в работе [4]. Напряжение пробоя обострительного разрядника составляло  $\sim 250$  кВ, что соответствует запасенной в формирующей линии генератора энергии 1.5 Дж. Длительность импульса напряжения на полувывсоте при согласованной нагрузке равнялась  $\sim 2$  нс, а длительность фронта импульса напряжения в формирующей линии – примерно 0.5 нс. При подключении разрядной камеры длительность фронта импульса напряжения увеличивалась до  $\sim 2$  нс, а также увеличивалась длительность импульса на полувывсоте. Длительность импульса тока разряда зависела от давления и сорта газа и при низких давлениях гелия и неона могла достигать в колебательном режиме нескольких сотен наносекунд. В данных экспериментах использовался промежуток с расстоянием между катодом и анодом 2 см. Оба электрода были выполнены в виде лезвий. Длина разрядной области равнялась 20 см. Резонатор состоял из плоских зеркал, установленных на торцевых стенках разрядной камеры. В качестве глухого зеркала применялась пластинка с алюминиевым

П.О.Вильтовский, М.И.Ломаев, А.Н.Панченко, Н.А.Панченко, Д.В.Рыбка, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru, alexei@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 27 июня 2012 г., после доработки – 6 марта 2013 г.

покрытием. Выходным зеркалом служили плоскопараллельные пластинки из кварца,  $\text{CaF}_2$ , КРС-5, КРС-6 или Ge. Использовались также плоские зеркала с диэлектрическими покрытиями и коэффициентами отражения в УФ и видимой областях спектра  $R = 20\% - 80\%$ . Камера откачивалась диффузионным насосом и могла заполняться различными газами. На ее боковой стенке имелось дополнительное окно для фотографирования разряда и регистрации импульсов спонтанного излучения.

Амплитудно-временные характеристики видимого и УФ лазерного излучения регистрировались фотодиодом ФЭК-22СПУ, для регистрации ИК излучения использовался фоторезистор ФСГ-23. Область промежутка, из которой выходило лазерное излучение, определялась по люминесценции экрана, установленного на выходном зеркале. Свечения разряда и люминесцентного экрана фотографировались цифровым фотоаппаратом Sony A100. Спектры излучения регистрировались спектрометром StellarNet EPP2000-C25 с известной спектральной чувствительностью в области длин волн  $\lambda = 200 - 850$  нм при разрешении 0.75 нм. Для регистрации спектров в области  $\lambda = 2.8 - 4.2$  мкм использовался монохроматор МДР-23 с решеткой 300 штр./мм и фоторезистором ФСГ-23. Для работы фотоприемников в линейном режиме лазерное излучение ослаблялось последовательностью металлических сеток. Энергия лазерного излучения измерялась прибором Orpik с измерительной головкой PE-50BB. Для регистрации электрических сигналов применялся осциллограф TDS-3054B (0.5 ГГц, 5 выборок за 1 нс). Схемы установки 1 и системы регистрации приведены на рис.1.

Характеристики разряда при накачке ОРИПЭЛ исследовались нами ранее в работах [1, 4] и на установке 2, в которой использовались генератор СЛЭП-150 и камера с емкостным делителем и шунтом. На установке 2 также можно было за анодной фольгой установить коллектор с субнаносекундным временным разрешением [13, 14] для измерения параметров пучка убегающих электронов. Разрядный промежуток был образован катодом из фольги толщиной 100 мкм с длиной острой кромки 2.2 см и плоским анодом, расстояние между которыми составляло 1.3 см.

В настоящей работе основное внимание было уделено изучению особенностей лазерного излучения в смесях различных газов с  $\text{NF}_3$  и  $\text{SF}_6$ . Ранее было установлено, что добавки электроотрицательных газов существенно, на порядок [3], увеличивают энергию и мощность излучения лазера на второй положительной системе азота. Увели-

чение энергии излучения в смесях с электроотрицательными газами обусловлено в первую очередь возрастанием пробивного напряжения промежутка на установках, использующих электрод(ы) с малым радиусом кривизны.

В экспериментах применялись следующие смеси с добавками электроотрицательных газов:  $\text{N}_2 - \text{NF}_3(\text{SF}_6)$ ,  $\text{H}_2 - \text{C}_2\text{H}_6 - \text{SF}_6$ ,  $\text{H}_2(\text{D}_2) - \text{SF}_6$ ,  $\text{He} - \text{NF}_3$ ,  $\text{Ne} - \text{NF}_3$  и  $\text{Ar} - \text{NF}_3$ , а также  $\text{Ne}(\text{He}) - \text{Xe} - \text{NF}_3$ , параметры генерации в которых исследовались ранее при возбуждении поперечным объемным разрядом и пучком электронов [11, 12, 16 - 18].

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

#### 3.1. Азотный лазер ( $\lambda = 337.1$ нм)

Для получения генерации на УФ переходе молекул азота ( $\lambda = 337.1$  нм) значение параметра  $E/p$  на разрядном промежутке должно быть не менее  $100 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$ . При накачке самостоятельным разрядом напряжение на промежутке уменьшается за несколько наносекунд. Соответственно, для повышения эффективности генерации на молекулах азота необходимы импульсы тока разряда длительностью менее 10 нс. Поэтому используемый в экспериментах генератор импульсов оптимален для накачки азотного лазера, а применение смесей азота с  $\text{SF}_6$  позволяет согласовать сопротивление разряда с импедансом генератора и увеличить мощность накачки и энергию УФ излучения. При этом диффузный разряд без предварительной ионизации разрядного промежутка был сформирован в азоте и в смесях азота с  $\text{SF}_6$  при давлениях вплоть до нескольких атмосфер.

Полученные результаты иллюстрирует рис.2. При накачке ОРИПЭЛ наблюдалась одновременная генерация на второй ( $\lambda = 337.1$  нм) и первой ( $\lambda = 865 - 1048$  нм) положительных системах азота, которая начиналась через 3 нс после пробоя разрядного промежутка. Ширина области генерации составила 0.5 см при равномерном распределении мощности лазерного излучения по апертуре разряда, а пиковая мощность излучения достигала 0.7 МВт. Максимальная энергия УФ излучения была равна 3.1 мДж при электрическом КПД (относительно энергии, запасенной в формирующей линии генератора РАДАН-220)  $\eta_0 \approx 0.2\%$ . Такая эффективность азотного лазера близка к предельному расчетному КПД для лазера данного типа [19] и

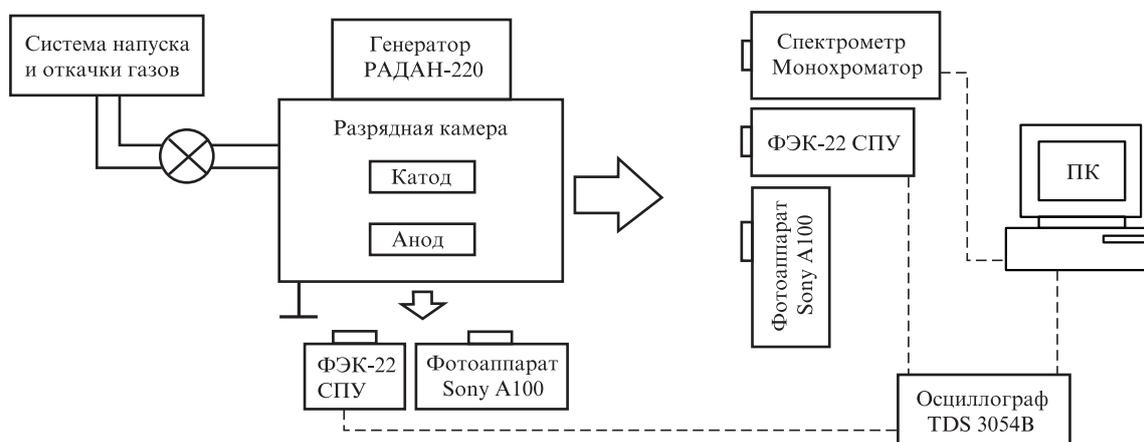


Рис.1. Схемы экспериментальной установки и регистрации параметров лазерного излучения.

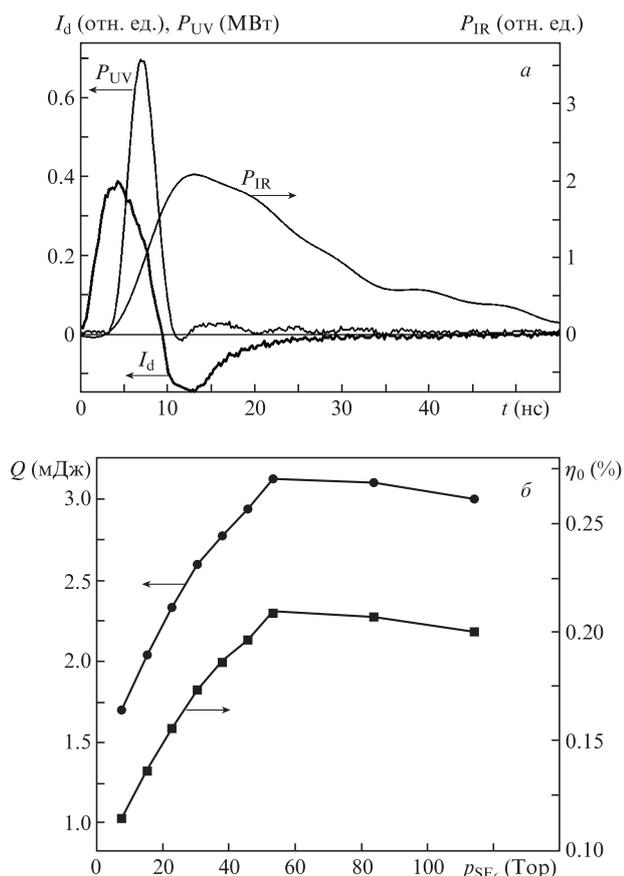


Рис.2. Осциллограммы импульсов тока ОРИПЭЛ  $I_d$  и генерации в смеси  $N_2:SF_6 = 300 : 45$  Тор на первой ( $P_{IR}$ ) и второй ( $P_{UV}$ ) положительных системах азота (а), а также зависимости энергии излучения  $Q$  на  $\lambda = 337.1$  нм и электрического КПД азотного лазера  $\eta_0$  от давления  $SF_6$  при давлении азота 300 Тор.

максимальным значениям эффективности, полученным в экспериментах [19, 20]. В смесях азота с  $NF_3$  энергия излучения азотного лазера не превышала 0.5 мДж.

### 3.2. Нецепные химические HF(DF)-лазеры

Интересной особенностью смесей  $SF_6$  с углеводородами является возможность формирования в них объемного разряда без предыонизации [21]. Однако разряд в смесях  $SF_6$  с  $H_2$  или  $D_2$  в обычных режимах возбуждения неустойчив, поэтому для его формирования необходимы электроды, обеспечивающие однородное электрическое поле в разрядном промежутке [22], а максимальный КПД нецепных HF(DF)-лазеров в смесях с  $H_2(D_2)$  получен при коротких (~20 нс) импульсах накачки [23].

Характерные осциллограммы напряжения на разрядном промежутке и тока ОРИПЭЛ, а также временная зависимость вкладываемой в плазму разряда мощности, полученные на установке 2 для промежутка с зазором 1.3 см и длиной 2.2 см при давлении  $SF_6$ , равном 0.6 атм, представлены на рис.3. При увеличении зазора и длины электродов (установка 1) длительность тока разряда возрастала до 10 нс, а измеренный энерговклад в активную среду лазера был равен ~0.7 Дж. При активном объеме лазера ~10 см<sup>3</sup> такой энерговклад соответствует удельной энергии накачки 70 Дж/л, которая является оптимальной для нецепного электроразрядного HF-лазера [24]. Мощность накачки при данных условиях достигала 20–30 МВт/см<sup>3</sup>.

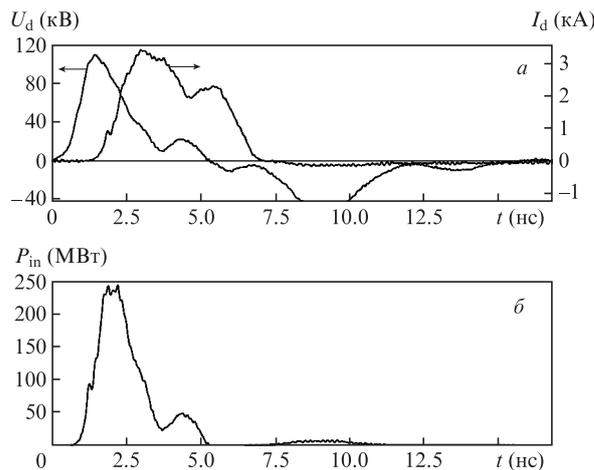


Рис.3. Характерные осциллограммы напряжения на разрядном промежутке, тока ОРИПЭЛ (а) и вкладываемой в плазму разряда мощности (б), полученные на установке 2. Межэлектродный зазор 1.3 см, длина катода 2.2 см; разрядная камера заполнена  $SF_6$  при давлении 0.6 атм.

На рис.4 представлены зависимости энергии генерации HF(DF)-лазеров от коэффициента отражения выходного зеркала. Максимальная энергия излучения лазера на молекулах HF (65 мДж), как и в работе [24], получена в смеси с водородом. Она соответствует внутреннему (относительно вложенной в плазму разряда энергии) КПД генерации  $\eta_{int}$ , близкому к предельному значению ~10%. Энергия излучения DF-лазера линейно возрастала с увеличением добротности резонатора и при коэффициенте отражения выходного зеркала  $R = 55\%$  достигала 45 мДж. Полученный КПД генерации ( $\eta_{int} = 6.5\%$ ) также близок к предельному для DF-лазера значению (~8%). Можно ожидать дальнейшего роста энергии излучения и КПД при увеличении  $R$ . Как и в работе [24], интегральный по спектру импульс излучения нецепных лазеров с накачкой ОРИПЭЛ имел один пик (рис.5,а), а в спектре генерации наблюдались интенсивные каскадные переходы. При этом максимальная энергия излучения HF- и DF-лазеров наблюдалась на полосах  $P_1$  и  $P_2$  (рис.5,б) соответственно. Это свидетельствует о высокой однородности энерговклада в активную среду при накачке ОРИПЭЛ. Известно, что в неоднородном разряде каскадные переходы не происходят, а импульс излучения приобретает ярко выра-

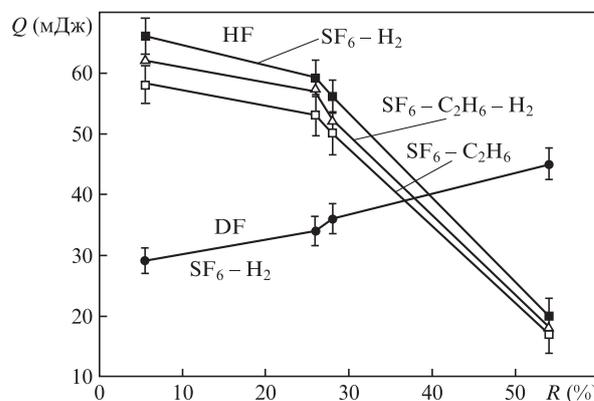


Рис.4. Зависимости энергии генерации  $Q$  лазеров на молекулах HF и DF от коэффициента отражения выходного зеркала резонатора  $R$  для смесей  $SF_6:H_2(D_2) = 8:1$ ,  $SF_6:C_2H_6:H_2 = 44:3:1$  и  $SF_6:C_2H_6 = 20:1$  при давлении 275 Тор.

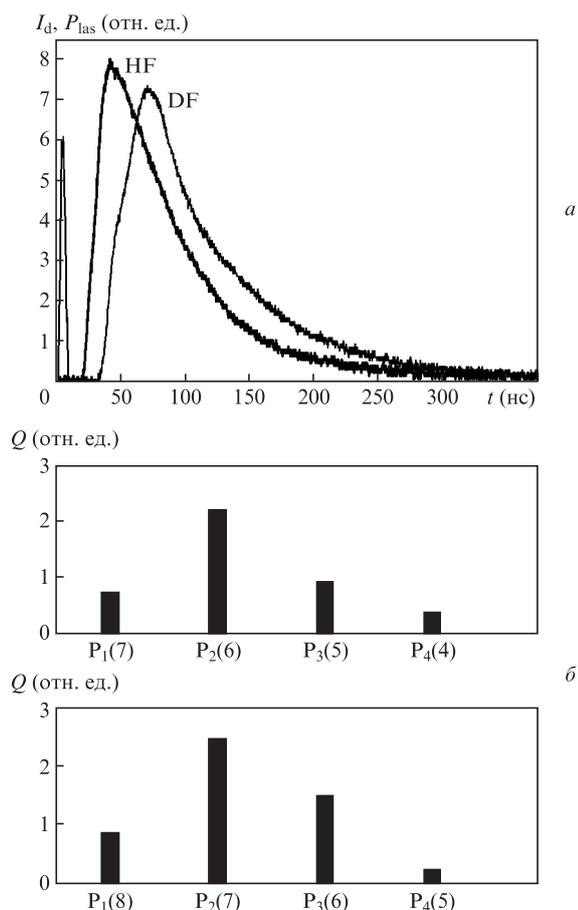


Рис.5. Осциллограмма импульса тока ОРИПЭЛ и интегральные по спектру импульсы генерации лазеров на молекулах HF и DF при коэффициенте отражения выходного зеркала  $R = 25\%$  и  $55\%$  соответственно (а) и распределение энергии генерации DF-лазера по линиям каскадных переходов при коэффициенте отражения выходного зеркала  $R = 55\%$  (б). Газовые смеси  $SF_6:H_2(D_2) = 8:1$  при давлении 275 Тор.

женную пиковую структуру [24, 25]. Каскадные переходы увеличивают эффективность извлечения энергии из активной среды нецепного химического лазера, поскольку одна возбужденная молекула,  $HF^*(v \leq 3)$  или  $DF^*(v \leq 4)$ , где  $v$  – колебательное квантовое число, может излучать до трех-четырех фотонов. Кроме того, за счет мощного импульса накачки генерация на отдельных линиях начиналась через 15–20 нс после пробоя разрядного промежутка с разбросом  $\sim 5$  нс, что снижает потери энергии на достижение порога генерации. Данные факторы обеспечивают высокий КПД нецепного лазера с накачкой ОРИПЭЛ. Отметим, что распределение мощности излучения по апертуре пятна генерации также было сравнительно однородным.

Высокая мощность ОРИПЭЛ при максимальных добротностях резонатора приводила к появлению в спектре генерации молекул HF и DF слабых линий в полосах  $P_4$  и  $P_5$  с  $v = 4$  и  $5$  соответственно. Генерация излучения на данных линиях происходила через  $\sim 75$  нс после начала тока разряда, а их интенсивность была на два-три порядка ниже интенсивности остальных линий. Возбужденные молекулы HF(DF) с колебательным квантовым числом  $v > 3$  ( $v > 4$ ) формируются в «горячей» реакции  $H(D) + F_2$ , а генерация на полосах  $P_4$ – $P_6$  молекул HF обычно наблюдается при мощной однородной накачке электрон-

ным пучком [26]. При возбуждении смесей обычным поперечным самостоятельным разрядом порог генерации на переходах молекул HF(DF) с  $v > 3$ – $4$  не достигается.

### 3.3. Лазер на смесях Ne–NF<sub>3</sub>

В смеси Ne–NF<sub>3</sub> на длине волны 585.3 нм (переход атома неона 3p–3s) ранее была получена генерация при накачке поперечным разрядом, однородность которого обеспечивалась за счет предыонизации от дополнительных искровых промежутков [16]. Применение ОРИПЭЛ позволило в настоящей работе увеличить оптимальное давление рабочей смеси, а также давление электроотродительного газа NF<sub>3</sub>. В зависимости от давления смеси можно было наблюдать импульсы генерации, состоящие как из одного, так и из двух пиков. Максимальная мощность излучения составила 180 Вт. Генерация двух пиков излучения наблюдалась из всего межэлектродного промежутка при давлении смеси менее 100 Тор и отсутствии ярких искровых каналов в промежутке. Второй пик генерации имел меньшую мощность, запаздывал относительно первого на  $\sim 10$  нс и регистрировался из прианодной области разряда. Появление второго пика можно объяснить увеличением мощности накачки во время второго полупериода тока разряда. Длительность первого (основного) пика генерации составляла при оптимальных давлениях  $\sim 3.5$  нс на полувысоте. Исчезновение второго пика генерации при увеличении давления можно объяснить контрагированием разряда. После первого пика генерации интенсивность излучения разряда, регистрируемая через боковое окно лазерной камеры, возрастала, при этом в промежутке регистрировались яркие искровые каналы.

### 3.4. Лазер на смесях Ar–NF<sub>3</sub>

В смесях Ar–NF<sub>3</sub> на  $\lambda = 750.3$  нм (переход атома аргона 4p–4s) ранее [16] была получена генерация при накачке поперечным разрядом с искровой предыонизацией, как и в смеси Ne–NF<sub>3</sub>. ОРИПЭЛ позволил увеличить оптимальное давление рабочей смеси и давление добавки NF<sub>3</sub>. В данной смеси также наблюдалась генерация двух пиков излучения. Длительность первого пика, который имел большую мощность, составляла при оптимальных давлениях  $\sim 5$  нс на полувысоте.

### 3.5. Лазер на смесях He–NF<sub>3</sub>

В смеси He–NF<sub>3</sub> порог генерации на переходе атома гелия 3s–2p ( $\lambda = 706.5$  нм) не был достигнут, по-видимому, из-за меньшей (в четыре раза) активной длины лазера ( $\sim 20$  см) по сравнению с использованной в работе [16], где накачка осуществлялась поперечным разрядом.

Однако при накачке ОРИПЭЛ была получена генерация в области  $\lambda = 620$ – $760$  нм на линиях атомарного фтора, которые ранее наблюдались при возбуждении смесей гелия с различными донорами фтора объемным самостоятельным разрядом [17]. Число линий генерации при увеличении давления гелия достигало семи. Также с увеличением давления увеличивалась мощность генерации. Наибольшую интенсивность имели линии атомарного фтора с  $\lambda = 712.8$  и  $731.1$  нм. Длительность импульса генерации на всех линиях зависела от давления и для смеси He:NF<sub>3</sub> = 99:8 Тор составила  $\sim 10$  нс на полувысоте.

### 3.6. ХеF-лазер

Наибольшие мощности генерации при возбуждении ОРИПЭЛ смесей инертных газов с  $\text{NF}_3$  были получены в условиях нашего эксперимента на переходах молекулы ХеF\*. При давлении смеси 4 атм и ниже мощность излучения в смеси с буферным газом гелием была выше, чем в смеси с буферным газом неоном, и достигала 30 кВт. При больших давлениях измерения не проводились из-за ограничения по давлению смеси для данной установки. Длительность импульса генерации на полувывсоте уменьшалась от 8.5 до 5.5 нс при увеличении давления смеси от 1.2 до 2.6 атм. Спектр генерации зависел от состава рабочей смеси. В смеси Не–Хе– $\text{NF}_3$  лазерное излучение наблюдалось преимущественно на  $\lambda = 351$  нм, а в смеси Не–Хе– $\text{NF}_3$  – как на  $\lambda = 351$  нм, так и на  $\lambda = 353$  нм. При этом мощность излучения на  $\lambda = 353$  нм была в два раза больше.

Невысокие значения параметров генерации различных лазеров на смесях с  $\text{NF}_3$  обусловлены низким сопротивлением разряда, поскольку попытки увеличения в газовой смеси концентрации данной добавки приводили к быстрой потере однородности ОРИПЭЛ за счет его расслоения. Механизм данного явления подробно рассмотрен нами в работе [27].

### 4. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают перспективность применения ОРИПЭЛ для возбуждения ряда газовых лазеров. На молекулах  $\text{N}_2$ , HF и DF получена генерация с КПД, близким к предельному. Установлено, что ОРИПЭЛ наиболее эффективен для накачки лазеров, в состав рабочей смеси которых входит электроотрицательный газ  $\text{SF}_6$ . Добавки  $\text{SF}_6$  увеличивают пробойное напряжение промежутков с электродами в виде лезвий и повышают мощность накачки. Кроме того, при накачке ОРИПЭЛ генерация на переходах гелия, неона, аргона и молекул ХеF\* получена в смесях инертных газов с  $\text{NF}_3$  в видимой и УФ областях спектра. Однако в этих смесях эффективность генерации была сравнительно низкой, по-видимому, из-за потери однородности разряда при увеличении концентрации  $\text{NF}_3$  в смеси.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-08-00556-а).

1. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.М., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34** (11), 1007 (2004).
2. Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тельминов А.Е. *Изв. вузов. Сер. Физика*, №5/2, 5 (2011).
3. Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **39** (12), 1107 (2009).
4. Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е., Бураченко А.Г., Рыбка Д.В., Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Вильтовский П.О. *Квантовая электроника*, **41** (12), 1098 (2011).
5. Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Прикладная физика*, № 6, 77 (2010).
6. Орловский В.М., Алексеев С.Б., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **41** (11), 1033 (2011).
7. Бережной К.В., Насибов А.С., Шапкин П.В., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. *Квантовая электроника*, **38** (9), 829 (2008).
8. Азаров А.В., Митько С.В., Очкин В.Н. *Квантовая электроника*, **32** (8), 675 (2002).
9. Бельская Е.В., Бохан П.А., Закревский Д.Э. *Квантовая электроника*, **40** (7), 599 (2010).
10. Бельская Е.В., Бохан П.А., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. *Квантовая электроника*, **42** (2), 99 (2012).
11. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Washington: SPIE Press, 1995).
12. Endo I., Walter R.F. *Gas Lasers* (New York: CRC Press, 2007).
13. Тарасенко В.Ф. *Физика плазмы*, **37** (5), 444 (2011).
14. Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. *ПТЭ*, № 1, 80 (2012).
15. Яландин М.И., Шпак В.Г. *ПТЭ*, № 3, 5 (2001).
16. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **15** (10), 1978 (1988).
17. Koprnikov I.G., Stamenov K.V., Stankov K.A. *Appl. Phys. B: Photophys. Laser Chem.*, **33** (4), 235 (1984).
18. Burnham R., Powell F.X., Djeu N. *Appl. Phys. Lett.*, **29** (1), 30 (1976).
19. Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **31** (6), 489 (2001).
20. Iwasaki S., Jitsuno T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **18** (3), 423 (1982).
21. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30** (3), 207 (2000).
22. Булаев В.Д., Гусев В.С., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Лысенко С.Л., Морозов Ю.Б., Познышев А.Н., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **40** (7), 615 (2010).
23. Midorikawa K., Sumida S., Sato Y., Obara M., Fujioka T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **15** (3), 190 (1979).
24. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34** (4), 320 (2004).
25. Баранов В.Ю., Высикайло Ф.И., Демьянов А.В., Малюта Д.Д., Толстов В.Ф. *Квантовая электроника*, **11** (6), 1173 (1984).
26. Ерофеев М.В., Орловский В.М., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **30** (6), 486 (2000).
27. Генин Д.Е., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. *Квантовая электроника*, **41** (4), 360 (2011).