

Исследование электроразрядного ВУФ лазера на молекулярном фторе

С.К.Вартапетов, А.А.Жигалкин, К.Э.Лапшин, А.З.Обидин, В.Ю.Хомич, В.А.Ямщиков

Исследовано влияние разрядного напряжения, состава и давления газовой смеси He–F₂ на выходные характеристики вакуумного ультрафиолетового F₂-лазера. Показано, что в процессе возбуждения активной среды существенную роль играет реакция диссоциативного прилипания электронов к молекулам фтора. Определено условие для выбора оптимального состава смеси. Применение генератора накачки с многоступенчатым магнитным сжатием высоковольтных импульсов и системы предыонизации с барьерным разрядом на поверхности керамической трубки позволило обеспечить высокую однородность газовых разрядов (без катодных пятен). Создан малогабаритный F₂-лазер (активный объем ~9 см³) с энергией излучения 2.5 мДж, частотой следования импульсов до 1 кГц, работающий при давлении смеси He–F₂ до 3500 мбар.

Ключевые слова: F₂-лазер, реакция диссоциативного прилипания к молекулам фтора, генератор с магнитным сжатием высоковольтных импульсов, согласованный режим накачки.

1. Введение

Лазер на молекулярном фторе является одним из самых мощных источников ВУФ излучения (длина волны $\lambda = 157$ нм) [1–3]. В настоящее время он не имеет альтернативы даже среди лазеров с диодной накачкой из-за отсутствия нелинейных кристаллов, конвертирующих излучение в область длин волн менее 180 нм [4].

Рассматриваемый лазер обладает уникальными свойствами. Его излучение поглощается почти всеми материалами, что дает возможность использовать этот лазер для обработки даже таких материалов, как кварц, тефлон, сверхтвердые сплавы, керамики и т. д. Экстремально короткая длина волны позволяет создавать фотонные структуры размером до 100 нм, которые невозможно получить с помощью других высокоточных средств обработки. В обозримом будущем на основе таких структур предполагается создавать многофункциональные оптические устройства, заключенные в одном чипе, которые придут на смену современным микроэлектронным приборам [5–7]. F₂-лазер используется при записи брэгговских решеток в оптических волокнах, применяемых в средствах телекоммуникаций [8–10]. Оптоволоконные брэгговские интерферометры служат также датчиками физических величин и их полей (температуры, давления, электромагнитных полей, акустических полей и др.). Лазерное излучение с $\lambda = 157$ нм применяется в фотолитографической микротехнологии с пространственным разрешением менее 100 нм [1–4, 11]. Наконец, F₂-лазер неза-

меним при изготовлении деталей для микроэлектромеханических систем, которые находят все большее применение в охранных устройствах, для сбора разведывательной информации, для диагностических целей в медицине. Большое значение микроэлектромеханические системы представляют для развития постоянно растущего рынка мобильных телефонов [5].

Традиционный подход к созданию мощных F₂-лазеров базируется на получении высокой мощности накачки, достигаемой при использовании экстремально высоких давлений активной среды (6–10 бар). В работах [2, 3] нами был предложен другой подход, основанный на повышении мощности накачки лазера за счет оптимизации условий энерговыклада. Обоснованы преимущества подхода, позволяющего существенно снизить рабочее давление F₂-лазера. Был создан F₂-лазер, способный конкурировать с новейшими разработками ведущих зарубежных фирм. Он эффективно генерировал энергию 28 мДж при давлении 3300 мбар. Тем не менее ряд вопросов, связанных с влиянием состава смеси на получение оптимальных условий накачки или с возможностью дальнейшего снижения рабочего давления смеси, остался нерешенным.

В современных технологиях F₂-лазеры с высокой энергией излучения (десятки миллиджоулей) обычно применяются совместно с фотомасками. На такой маске может теряться до 90 % энергии светового пучка [5–10]. Кроме того, подобные лазеры имеют высокую стоимость и довольно внушительные массогабаритные показатели.

В ряде других технологий выгоднее использовать малогабаритный F₂-лазер с энергией в импульсе около 1 мДж. В этом случае почти все оптическое излучение можно фокусировать в пятно диаметром менее 1 мкм и с помощью сканирующей зеркальной системы выборочно воздействовать на поверхность облучаемой мишени. До настоящего времени подобные лазеры могли эффективно работать только при давлениях свыше 6 атм [12, 13].

Целью данной работы являлось исследование влияния давления и состава смеси на получение оптимальных

В.Ю.Хомич, В.А.Ямщиков. Институт электрофизики и энергоэлектроники РАН, Россия, 191186 С.-Петербург, Дворцовая набережная, 18; e-mail: Yamschikov52@mail.ru, rutberg@iperas.spb.ru

С.К.Вартапетов, А.А.Жигалкин, К.Э.Лапшин, А.З.Обидин. Центр физического приборостроения Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 142190 Троицк, Московская обл; e-mail: info@lasersys.ru

Поступила в редакцию 21 февраля 2006 г.

условий накачки F_2 -лазера, а также создание малогабаритного лазера с выходной энергией более 1 мДж, работающего при давлении смеси 3000–3500 мбар.

2. Основные требования к системам и условиям накачки лазера

Задача создания мощного F_2 -лазера требует правильного выбора системы возбуждения, включающей в себя генератор накачки, систему предыонизации и разрядный контур, а также корректного определения параметров оптического резонатора и подбора оптимальных условий возбуждения активной среды. Рассмотрим эти требования по отдельности.

2.1. Генератор накачки

Для работы лазера при относительно низких давлениях газовой смеси необходим генератор накачки с крутым (длительностью менее 100 нс) фронтом нарастания напряжения, способным обеспечить достаточно высокое напряжение на разрядном промежутке. Лучше всего для этого подходит генератор с магнитным сжатием высоковольтных импульсов, который позволяет получать импульсы с длительностью фронта несколько десятков наносекунд [14].

На рис.1 изображена электрическая схема применяемого генератора накачки, который содержит два магнитных звена сжатия высоковольтных импульсов и LC -генератор Фитча [15]. Коммутатором служил тиратрон с холодным катодом типа ТПИ1-1к/20. Суммарная емкость накопительных конденсаторов $C_1 + C_2 = 12$ нФ. Емкость обострительного конденсатора $C_4 = 3.5$ нФ. Приведенные на схеме индуктивности L_1 , L_2 и L_3 магнитных звеньев сжатия соответствуют насыщенному состоянию их сердечников. Индуктивности L_1 и L_3 намотаны на ферритовые кольца 1000НН К100 × 60 × 15, а индуктивность L_2 – на магнитный сердечник из аморфного железа. Обратное перемагничивание сердечника L_1 производится импульсным током заряда накопительных конденсаторов, текущим от высоковольтного источника, а сердечников L_2 и L_3 – с помощью катушек подмагничивания, питаемых от источника постоянного тока ($J = 2$ А).

2.2. Система предыонизации

Искровая система предыонизации, часто применяемая в эксимерных лазерах, имеет два существенных недо-

статка: неоднородность УФ подсветки вдоль разрядного промежутка, вызывающая неоднородное распределение энергии накачки, и необходимость применения большого числа индуктивных или емкостных развязок для равномерного распределения токов в отдельных искрах [1–3, 16]. Вместо искровой системы мы использовали предыонизацию протяженным барьерным разрядом через диэлектрик. Предыонизатор находился сбоку от разрядного промежутка. Он состоял из двух параллельно расположенных электродов – ножевого и цилиндрического, которые разделялись керамической трубкой. Ножевой электрод соединялся с высоковольтным электродом лазера. Однородный барьерный разряд растекался по поверхности трубки, обеспечивая достаточно равномерную заставку рабочего объема и необходимую начальную концентрацию электронов. Благодаря ограниченной плотности тока барьерного разряда ослабляется эрозия ножевого электрода, что существенно замедляет нежелательный процесс металлизации оптических элементов лазера.

2.3. Разрядный контур

Основой для создания F_2 -лазера служил малогабаритный эксимерный лазер серии CL5000 (рабочие длины волн 308, 248 и 193 нм), выпускаемый ЦФП ИОФРАН [17]. Его особенностью являются металлокерамическая конструкция и компьютерное управление, обеспечивающие высокий ресурс работы, возможность плавной регулировки и высокую стабильность лазерных импульсов. Активный объем лазера $V = d \times w \times l \approx 9$ см³ (где $d = 1.2$ см – межэлектродное расстояние, $w \approx 0.3$ см – ширина разряда, $l \approx 25$ см – длина разрядной зоны). Эксперименты проводились при давлении газа в разрядной камере $p \leq 3500$ мбар.

Радиационное время жизни τ_r верхнего лазерного уровня $D^{13}P_{2g}$ составляет всего 3.7 нс (эффективное время еще меньше) [18]. Реализовать накачку с такой длительностью сложно. Обычно накачка F_2 -лазера происходит в квазистационарном режиме, когда длительность импульсов накачки много больше характерных времен протекающих в лазере процессов. Из-за этого около 30 % энергии излучения теряется за счет спонтанной эмиссии [18, 19], т. е. чем короче импульс накачки, тем меньше должны быть радиационные потери и выше эффективность генерации.

С другой стороны, длительность импульса накачки влияет на свойства объемного самостоятельного разряда. При горении разряда на поверхности катода могут

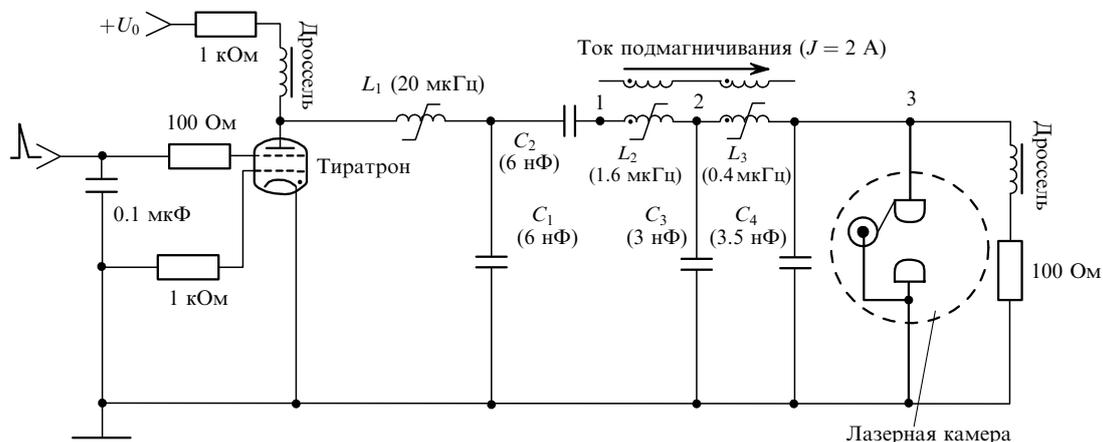


Рис.1. Электрическая схема генератора накачки.

образовываться локальные перегретые области с интенсивной эмиссией электронов (катодные пятна). Они вызывают повышенную эрозию электродов и способны спровоцировать появление искр, что сказывается на сокращении ресурса работы лазера, особенно при больших частотах следования импульсов. Время образования катодного пятна обратно пропорционально квадрату плотности тока разряда и при характерных для F₂-лазера условиях (плотность тока $j > 1 \text{ кА/см}^2$) составляет более 20 нс [12]. Вот почему для получения однородного объемного самостоятельного разряда без катодных пятен также очень важно иметь малую длительность импульса накачки. Длительность тока накачки пропорциональна $(L_d C_4)^{1/2}$, где L_d – индуктивность разрядного контура. При конструировании лазера принимались меры для того, чтобы свести к минимуму величину L_d путем уменьшения площади сечения разрядного контура и длины токопроводов.

2.4. Оптический резонатор

При переходе к более низким рабочим давлениям и укороченной длине резонатора необходимо провести соответствующую оптимизацию коэффициентов отражения зеркал резонатора. Условие максимального вывода излучения из резонатора имеет вид [20]

$$\frac{\ln(R_1 R_2)}{2l} = \beta \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{1/2} \right], \quad (1)$$

где α – коэффициент усиления слабого сигнала; β – коэффициент поглощения (сумма коэффициентов «переходного» поглощения в течение импульса возбуждения и стационарного поглощения, вызванного присутствием в газовой смеси посторонних включений); R_1 и R_2 – коэффициенты отражения глухого и выходного зеркал резонатора соответственно. В работе [21] приводятся экспериментальные зависимости α от p для F₂-лазера. Из них следует, что для рассматриваемых условий (при $p \approx 3500$ мбар) $\alpha \approx 0.14 \text{ см}^{-1}$, $\alpha/\beta \approx 10$ [18]. Полагая далее, что $R_1 = 0.98$, из (1) находим значение $R_2 = 0.23$, необходимое для получения максимального энергосъема. Коэффициент отражения одной плоскопараллельной пластины из CaF₂ (от двух поверхностей) составляет примерно 10%. Очевидно, что для увеличения добротности резонатора необходимо использование хотя бы двух таких пластин.

2.5. Оптимальные условия возбуждения активной среды

Для эффективной накачки F₂-лазера энергию накопительных конденсаторов ($C_1 + C_2$) необходимо вложить в плазму разряда с минимальными потерями в режиме максимальной мощности накачки [2, 3]. Если не учитывать неизбежные потери в схеме генератора накачки, то это возможно в том случае, когда предельное напряжение (соответствующее напряжению холостого хода для данной схемы генератора накачки) на разрядном промежутке (РП) и согласованный режим накачки реализуются одновременно.

Условие согласованного режима накачки имеет вид

$$\frac{E_m}{p} = \frac{2E_{qs}}{p}, \quad (2)$$

где E_m – максимальная напряженность поля; E_{qs}/p – отношение напряженности поля к давлению газа в квазистационарном режиме, соответствующее максимуму тока самостоятельного разряда. Условие (2) означает равенство сопротивления разрядного промежутка $R_{qs} = U_{qs}/J_m$ в максимуме тока и волнового сопротивления $Z = (L_d/C_4)^{1/2}$ контура разряда C_4 через РП. Только при согласованном режиме накачки практически вся энергия, накопленная в обостряющей емкости C_4 , успевает вложиться в плазму разряда за время действия импульса тока накачки.

3. Эксперимент

Для исследования характеристик оптического излучения применялась, как и в работах [2, 3], специальная измерительная камера, герметично соединенная с выходным окном лазера, которая откачивалась и затем наполнялась азотом. Внутри камеры располагался пироэлектрический приемник Gentech, которым измерялась выходная энергия лазера. Импульсы напряжения генератора накачки и напряжения на разрядном промежутке регистрировались с помощью высоковольтного щупа Tektronix P6015A и осциллографа LeCroy WaveSurfer 432.

Оптический резонатор общей длиной 54 см был образован глухим плоским зеркалом, выходным окном в виде плоскопараллельной пластины из CaF₂ и дополнительной плоскопараллельной пластиной из CaF₂. Вторая пластина располагалась внутри измерительной камеры на расстоянии ~ 20 см от первой.

Исследуемый лазер мог работать на частоте повторения импульсов до 1000 Гц, но измерения его характеристик проводились на частоте 10 Гц. В ходе экспериментов регистрировались импульсы высокого напряжения и энергии лазерного пучка при разных зарядных напряжениях U_0 , составах и давлениях газовой смеси.

На рис.2 изображены осциллограммы импульсов напряжения в характерных точках схемы генератора накачки (точки 1, 2 и 3 на рис.1). Видно, что магнитный генератор обеспечивал четырнадцатикратное сжатие импульсов и формировал на РП импульсы напряжения с длительностью фронта до ~ 70 нс и амплитудой до 21 кВ.

На рис.3 представлены зависимости энергии генерации F₂-лазера W_g от полного давления газовой смеси p при разных U_0 для смесей He – F₂ с различным содержанием фтора [F₂]. Поскольку энергия генерации зависит от запасаемой в обостряющей емкости энергии $W_4 = C_4 \times U_m^2/2$, где U_m – максимальное напряжение на РП, то для

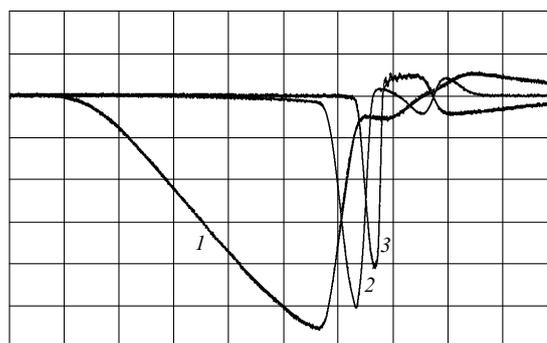


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения в схеме генератора накачки в точках 1 (1), 2 (2) и 3 (3), указанных на рис.1 (масштаб по вертикали – 5 кВ/дел., по горизонтали – 200 нс/дел.).

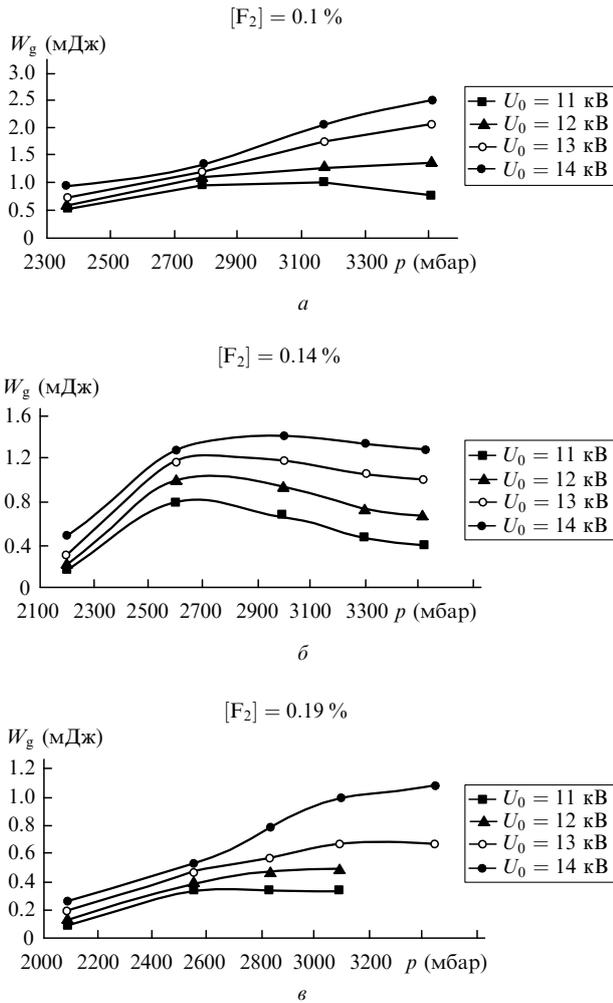


Рис.3. Зависимости энергии генерации W_g от полного давления p смеси He–F₂ при разных зарядном напряжении U_0 и содержании фтора $[F_2]$.

сравнения на рис.4 приводятся экспериментальные зависимости U_m от p . Видно, что напряжения U_m сначала растут, а затем насыщаются, достигая одинаковых предельных значений U_{lim} , определяемых величиной U_0 [2, 3]. Чем выше процентное содержание фтора в смеси, тем меньше давление p , при котором наступает насыщение. Зависимости же $W_g = f(p)$ ведут себя совершенно иначе. Они различаются как по абсолютным значениям, так и по положению максимумов. Визуальные наблюдения разрядной зоны показали, что благодаря равномерной предьонизации и малой длительности накачки разряд в РП был совершенно однородным (без катодных пятен, искр и зон с повышенной яркостью свечения). Поэтому неоднородности разряда не могли быть причиной столь значительных изменений выходной энергии лазера.

Понять эволюцию зависимостей $W_g = f(p)$ позволяет учет процесса согласования сопротивления плазмы с волновым сопротивлением разрядного контура. Для получения согласованного режима необходимо знать величину E_{qs}/p (см. (2)), которую оценим исходя из следующих допущений.

В смеси He–F₂ доминирующей реакцией является реакция диссоциативного прилипания электронов к молекулам фтора [19, 22]:

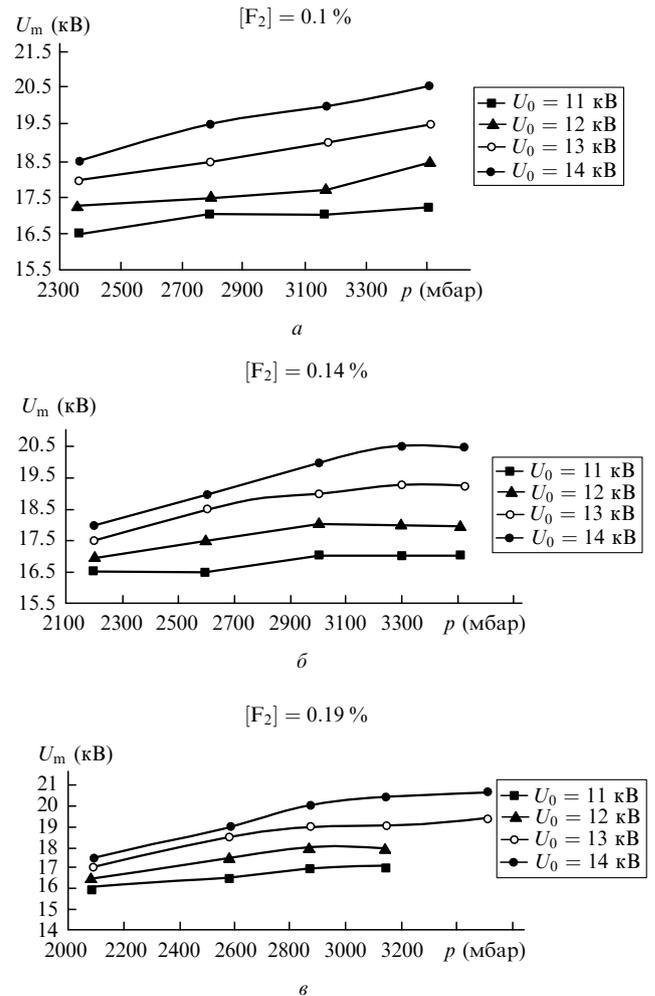


Рис.4. Зависимости максимального напряжения U_m на РП от полного давления p смеси He–F₂ при разных зарядном напряжении U_0 и содержании фтора $[F_2]$.

Она контролирует потери электронов в лазерной плазме. Коэффициент прилипания растет с уменьшением электронной энергии $W_e = (3/2)kT_e$, где k – постоянная Больцмана, T_e – электронная температура. Чем выше концентрация фтора, тем большая часть электронов «уходит» из плазмы за счет прилипания, что вызывает быстрый рост W_e и T_e . В работе [19] приводится расчетная зависимость T_e от $[F_2]$ в смеси He–F₂, ионизируемой квазистационарным электронным пучком, которая показана на рис.5 (нижняя кривая). В газовом разряде $T_e \sim E/p$ [23]. Механизм влияния $[F_2]$ на характер поведения T_e и E/p не зависит от способа ионизации газовой смеси. Поэтому можно предположить, что зависимости $T_e = f([F_2])$ в плазме, создаваемой электронным пучком и самостоятельным разрядом, имеют одинаковый вид. Тогда, зная, что $E_{qs}/p = 1.6 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{мбар}^{-1}$ при $[F_2] = 0$ [18], нетрудно получить зависимость $E_{qs}/p = f([F_2])$, которая также приведена на рис.5 (верхняя кривая). Откуда для экспериментальных значений $[F_2] = 0.1\%$, 0.14% и 0.19% получаем $E_{qs}/p = 2.6, 3$ и $3.5 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{мбар}^{-1}$ соответственно.

Согласно равенству (2) давление смеси, соответствующее согласованному режиму накачки, находится по точкам пересечения зависимостей $E_m/p = U_m/(pd) = f(p)$ на рис.6, построенным на основании экспериментальных данных рис.4, с расчетными значениями $2E_{qs}/p = 5.2, 6$ и $7 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{мбар}^{-1}$.

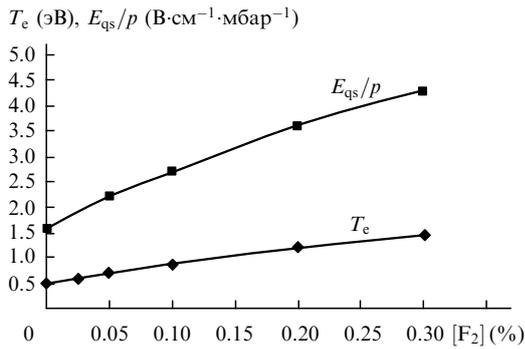
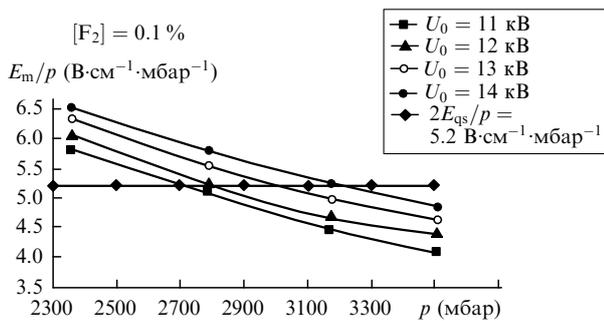
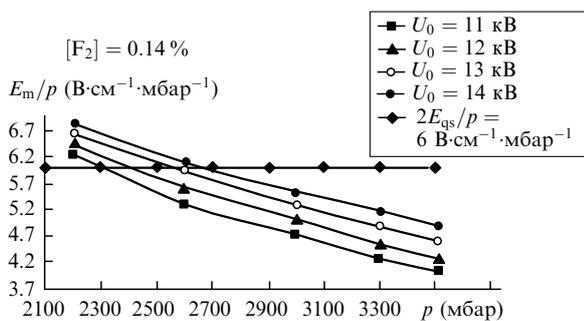


Рис.5. Расчетные зависимости электронной температуры T_e и отношения напряженности поля к давлению газа E_{qs}/p от содержания молекулярного фтора $[F_2]$ в плазме F_2 -лазера.

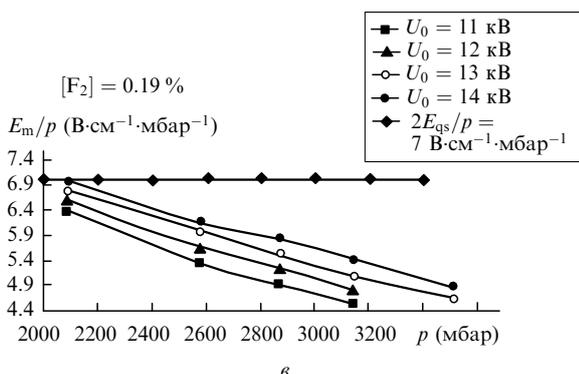
Из сравнения рис.3, 4 и 6 видно, что в случае повышенного содержания фтора ($[F_2] \geq 0.19\%$, см. рис.3,в, 4,в, 6,в) согласованный режим возможен только при $p \leq 2100$ мбар, когда напряжение на РП не является достаточно высоким. Во всем же остальном диапазоне рабочих давлений поведение зависимостей $W_g(p)$ определяется как поведением $U_m(p)$, так и ростом α с увеличением p [18].



а



б



в

Рис.6. Зависимости отношения максимальной напряженности поля к полному давлению смеси E_m/p от p при разных U_0 и $[F_2]$.

Однако чем выше p , тем меньшая доля энергии поступает в активную среду из C_4 [2, 3]. В результате выходная энергия лазера оказывается низкой.

Для $[F_2] = 0.1\%$, $U_0 = 14$ кВ согласованный режим и предельное напряжение на РП реализуются при рабочем давлении, близком к предельному давлению $p_{lim} = 3500$ мбар. В этих условиях благодаря максимальным энерго-вкладу и коэффициенту усиления α (для $p \leq p_{lim}$) достигаются наиболее высокие значения W_g .

При $[F_2] = 0.14\%$ максимумы W_g (рис.3,б) находятся в области значений p , соответствующих согласованному режиму накачки (рис.6,б). Однако в этом промежуточном случае согласованный режим реализуется при p и U_m , меньших p_{lim} и U_{lim} , и поэтому получают промежуточные значения W_g . При использовании резонатора только с одной плоскопараллельной выходной пластиной из CaF_2 при прочих равных условиях энергия генерации падала примерно в два раза из-за уменьшения добротности резонатора.

Из приведенных результатов следует, что для получения максимальной энергии генерации электроразрядного F_2 -лазера требуется такой состав смеси $He-F_2$, при котором согласованный режим накачки активной среды реализуется в условиях предельного (для данной схемы возбуждения) напряжения на РП и предельного рабочего давления.

При попытках перейти к еще меньшему рабочему давлению необходимо использовать смеси с большим содержанием фтора. Вместе с тем, чтобы не снижать напряжение U_m , следует либо повышать крутизну фронта напряжения накачки, что весьма затруднительно, либо расширять межэлектродный зазор, что приведет к большому различию расходимости излучения по вертикальной и горизонтальной координатам пучка.

Следует отметить, что по сравнению с аналогичными зарубежными лазерами, которые имели энергию 2 мДж при рабочем давлении смеси 6 бар [13] и 7 бар [12], лазер, описанный в настоящей работе, генерировал энергию до 2.5 мДж при давлении смеси 3.5 бар, значительно меньшем, чем в указанных работах.

4. Выводы

Исходя из особенностей и требований, предъявляемых к работе электроразрядного F_2 -лазера, предложено использовать усовершенствованную систему возбуждения активной среды на основе генератора магнитного сжатия высоковольтных импульсов и с предыонизацией межэлектродного промежутка барьерным разрядом по поверхности керамической трубки. Такая система позволяет получать высокооднородные объемные самостоятельные разряды без катодных пятен в смесях $He-F_2$.

Исследование зависимостей выходных характеристик лазера от состава смеси, ее давления и разрядного напряжения показало, что существенное влияние на процессы накачки оказывает реакция диссоциативного прилипания электронов к молекулам фтора, которая контролирует электронную температуру плазмы и процесс энерго-вклада в активную среду. Установлено, что оптимальным является такой состав смеси $He-F_2$, при котором согласованный режим накачки активной среды реализуется в условиях предельных значений (для данной системы возбуждения) напряжения на разрядном промежутке и рабочего давления.

В результате проведенных исследований создан ма­логабаритный F₂-лазер с характеристиками излучения, не уступающими характеристикам мировых аналогов (энергия излучения 2.5 мДж, активный объем ~9 см³), но работающий при значительно меньшем давлении га­зовой смеси (до 3500 мбар).

Данная работа была поддержана грантом РФФИ № 05-02-08218 офи-а.

1. *Excimer Laser Technology*. Ed. by D.Basting et al. (Göttingen: Lambda Physik, AG, 2001).
2. Атежев В.В., Вартапетов С.К., Жуков А.Н., Курзанов М.А., Обидин А.З., Ямшиков В.А. *Квантовая электроника*, **33** (8), 677 (2003).
3. Atejev V.V., Vartapetov S.K., Zhukov A.N., Kurzanov M.A., Obidin A.Z., Yamschikov V.A. *Techn. Program XI Conf. on Laser Opt.* (St. Petersburg, 2003, p. 18).
4. Peters P., Feenstra L., Bastiaens H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 338 (2001).
5. Herman P.R., Chen K.P., Wei M., Zhang J., Ihlemann J., Schäfer D., Marowsky G., Oesterlin P., Burghardt B. *Techn. Dig. Conf. on Lasers and Electro-Optics* (Washington, DC, OSA, 2001, p. 574).
6. Herman P.R., Chen K.P., Corkum P., Naumov A., Ng S., Zhang J. *RIKEN Review*, № 32, 31 (2001).
7. Chen K.P., Herman P.R. *Electron. Lett.*, **37**, 822 (2001).
8. Larionov Y., Rybaltovsky A., Semjonov S., Bubnov M., Dianov E., Vartapetov S., Kurzanov M., Obidin A., Yamschikov V. *Techn. Dig. Conf. on Optical Fiber Communication (OFC-2003)* (Atlanta, Georgia, USA, 2003, Vol. 1, p. 38).
9. Larionov Yu.V., Rybaltovsky A.A., Semjonov S.L., Bubnov M.M., Dianov E.M., Vartapetov S.K., Kurzanov M.A., Obidin A.Z., Yamschikov V.A. *Techn. Dig. Conf. on Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides (BGPP'2003)* (Monterey, Cal, USA, 2003, MD28, p. 136).
10. Larionov Yu.V., Rybaltovsky A.A., Semjonov S.L., Bubnov M.M., Dianov E.M., Vartapetov S.K., Kurzanov M.A., Obidin A.Z., Yamschikov V.A., Guryanov A.N., Yashkov M.V., Umnikov A.A. *Techn. Digest Conf. on Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides (BGPP'2003)* (Monterey, Cal, USA, 2003, MC4, p. 46).
11. Wallace J. *Laser Focus World*, August, 139 (1999).
12. Treshalov A., Lissovski A., Chikeev E. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 253 (2002).
13. Gortler A., Strowitzki C., Geiger S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 330 (2001).
14. Атежев В.В., Вартапетов С.К., Жигалкин А.К., Лапшин К.Э., Обидин А.З. *Квантовая электроника*, **34** (9), 790 (2004).
15. Месяц Г.А. *Генерирование мощных наносекундных импульсов* (М.: Сов. радио, 1974).
16. Frowein H., Schillinger P. *Laser Focus World*, July, S9 (2002).
17. Physics Instrumentation Center. <http://www.pic.troitsk.ru/>.
18. Kakehata M., Uematsu T., Kannari F., Obara M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 2456 (1991).
19. Kochetov I.V., Demyanov A.V., Napartovich A.P. *Review of Troitsk Institute of Innovative and Thermonuclear Research* (Troitsk, Russia, 2000).
20. Rigrod W.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**, 377 (1978).
21. Kitamura T., Arita Y., Maeda K., Takasaki M., Nakamura K., Fujiwara Y., Horiguchi S. *J. Appl. Phys.*, **81**, 2523 (1997).
22. Chantry P.J. In: *Applied Atomic Collision Physics. Vol. 3. Gas Lasers*. Ed. by H.S.W.Massey, E.W.McDaniel, B.Bederson (New York: Acad. Press, 1982, p. 35).
23. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1980).