

Еще раз о роли УФ подсветки в нецепных электроразрядных HF(DF)-лазерах

А.А.Белевцев, С.Ю.Казанцев, А.В.Сайфулин, К.Н.Фирсов

Исследовано влияние УФ подсветки разрядного промежутка на устойчивость и однородность объемного самостоятельного разряда (ОСР) в рабочих смесях нецепного HF-лазера (смеси SF₆ с углеводородами) в широком диапазоне изменения длительности тока разряда и величины энерговыклада. Показано, что в лазерах с площадью катода $S \leq 300$ см², а также в лазерах с длительностью токового импульса $T \leq 150$ нс, роль подсветки сводится к стабилизации времени запаздывания и амплитуды напряжения электрического пробоя промежутка и выравниванию (за счет фотоэффекта) распределения плотности тока ОСР по поверхности катода. Объемная предыонизация рабочей смеси нецепного HF-лазера УФ излучением невозможна из-за сильного его поглощения в SF₆. В лазерах с большими апертурами и объемами активной среды в УФ подсветке нет необходимости при наличии на поверхности катода мелкомасштабных (~ 50 мкм) неоднородностей.

Ключевые слова: нецепной HF(DF)-лазер, объемный самостоятельный разряд, предыонизация, УФ подсветка.

1. Введение

Основной проблемой при создании мощных нецепных HF(DF)-лазеров с инициированием химической реакции объемным самостоятельным разрядом (ОСР), как, впрочем, и других газовых лазеров, работающих при средних и повышенных давлениях газа, является получение самого ОСР. Для обеспечения развития самостоятельного объемного разряда в плотных газах должен быть выполнен ряд условий, основными из которых являются следующие [1]. Во-первых, необходимо осуществить предварительную ионизацию газа (например, электронным пучком, УФ или мягким рентгеновским излучением) с целью достижения в объеме начальной концентрации электронов, достаточной для перекрытия электронных лавин, развивающихся из начальных электронов при приложении к разрядному промежутку импульса высокого напряжения. Во-вторых, при зажигании ОСР в лазерной среде необходимо обеспечить однородность электрического поля в разрядном промежутке для однородного возбуждения активного объема. Указанные требования должны жестко выполняться в большинстве газовых лазеров (CO₂, N₂O, эксимерные лазеры), поскольку от уровня предыонизации зависят как устойчивость ОСР, так и энергия излучения и КПД лазера.

При анализе публикаций, посвященных нецепным электроразрядным HF(DF)-лазерам, обращает на себя внимание одна особенность этих систем – несмотря на различие условий эксперимента, типов и мощности применяемых источников предыонизации (рентгеновское и

УФ излучение, барьерный разряд), разные авторы получают близкие результаты. Так, например, в работах [2, 3] были получены одинаковые выходные энергии HF-лазера, равные 11 Дж, несмотря на то, что в [3] специальные устройства предыонизации вообще отсутствовали, а в [2] предыонизация осуществлялась мощной вспышкой рентгеновского излучения от сильноточного скользящего разряда, причем КПД лазера в [3] оказался в 1.9 раза выше, чем в [2]. Это дает основания усомниться в том, что роль предыонизации в нецепных HF(DF)-лазерах столь же существенна, как и в других газовых лазерах.

Действительно (см. [4–7]), в рабочих смесях нецепного HF(DF)-лазера (смеси SF₆ с водородо- и дейтериеносителями) самостоятельный разряд принципиально отличается от разряда в других, менее электроотрицательных газах – он может развиваться в форме ОСР в отсутствие какой бы то ни было предыонизации среды (в форме самоиницирующегося объемного разряда [6]). В [4–7] объем активной среды V изменялся в пределах 0.05 – 60 л при площади катода $S = 12 – 2000$ см², межэлектродном расстоянии $d = 2 – 27$ см и парциальном давлении SF₆ в смеси $p_{SF_6} \leq 120$ Тор. Необходимым и достаточным условием зажигания объемного разряда как в однородном электрическом поле, так и в промежутках с высоким краевым усилением поля, оказалось наличие на поверхности катода мелкомасштабных (~ 50 мкм) неоднородностей, возникающих, например, при пескоструйной обработке электрода. Использование же различных источников предыонизации не влияло существенно на устойчивость ОСР и выходные характеристики лазера. Однако авторы ряда публикаций, в том числе и недавних [8–11], отмечают повышение устойчивости ОСР и энергии генерации HF-лазера в результате предыонизации среды не только мягким рентгеновским [11], но и УФ излучением [8–10].

В связи с изложенным выше мы решили вернуться к вопросу о роли предыонизации в нецепных электрораз-

А.А.Белевцев. Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, Россия, 127412 Москва, ул. Ижорская, 13/19

С.Ю.Казанцев, А.В.Сайфулин, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kazan@kapella.gpi.ru

рядных HF-лазерах. Для этого в настоящей работе приняты целенаправленные исследования влияния УФ подсветки на устойчивость и однородность ОСР в рабочих смесях HF-лазера в широком диапазоне изменения длительности тока разряда и величины энерговклада. Анализируются также результаты работы [11], где предыонизация среды в HF-лазере осуществлялась мягким рентгеновским излучением.

2. Экспериментальная установка

На рис.1 представлена схема установки для исследования ОСР. Разряд зажигался в смеси $SF_6 : C_2H_6 = 10 : 1$ при давлении $p = 33$ Торр и межэлектродном расстоянии $d = 4$ см между дисковым катодом диаметром 6 см, скругленным по периметру радиусом 1 см и подвергнутым пескоструйной обработке, и сеточным анодом, за которым располагались 4 параллельных искровых зазора для осуществления УФ подсветки промежутка. Емкости используемых конденсаторов составляли $C_1 = 4 - 15$ нФ и $C_2 = 680$ пФ (конденсатор C_2 состоял из четырех конденсаторов по 170 пФ, каждый из которых разряжался на свой искровой зазор).

В экспериментах с зажиганием ОСР без УФ подсветки конденсатор C_2 удалялся из схемы, а высоковольтные выводы искровых зазоров подсветки закорачивались на землю. В процессе исследований контролировались ток и напряжение ОСР поясом Роговского R_c и делителем напряжения R_1, R_2 соответственно. Однородность разряда (степень перекрытия диффузных каналов, определяемая поверхностной плотностью катодных пятен) оценивалась по фотографиям разрядного промежутка. Устойчивость ОСР в режимах с УФ подсветкой и без подсветки характеризовалась зависимостью предельной энергии $W_{lim} = C_1 U^2 / 2$, запасенной в конденсаторах, при которой ОСР еще не переходит в искру, от параметра контура $T = \pi(LC_1)^{1/2}$, характеризующего длительность тока разряда, где U – напряжение на C_1 , L – индуктивность контура. Чем больше W_{lim} при заданном T , тем выше устойчивость.

3. Результаты эксперимента

На рис.2 представлены зависимости W_{lim} от параметра контура T , снятые с УФ подсветкой и без нее. Предельная энергия слабо зависит от подсветки во всем исследованном диапазоне изменения длительности тока ОСР.

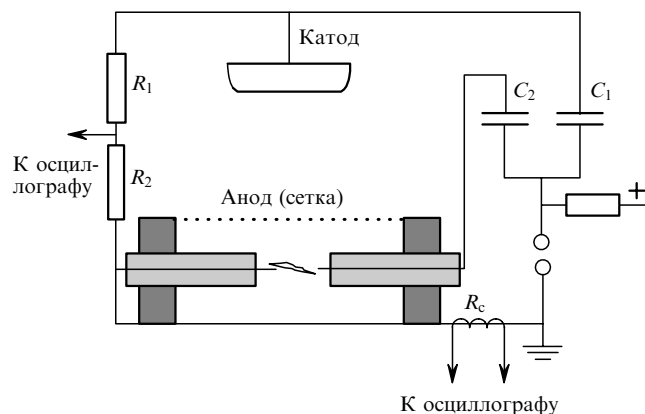


Рис.1. Схема установки для исследования ОСР.

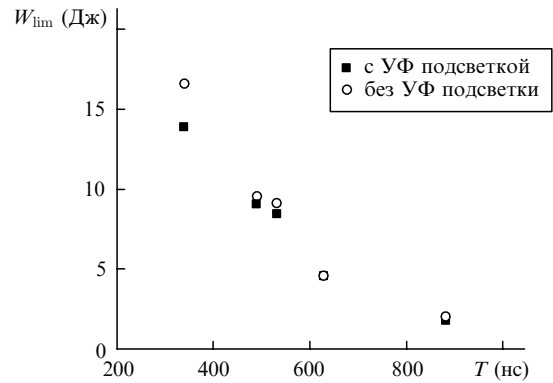


Рис.2. Зависимости W_{lim} от T при наличии (■) и в отсутствие (○) УФ подсветки.

На рис.3 приведены фотографии свечения прикатодной области разряда, полученные при различных значениях T и вводимой в плазму энергии W_{in} с включением УФ подсветки и в ее отсутствие. Фотографирование специально проводилось так, чтобы менее яркие, чем катодные пятна, диффузные каналы (привязанные к катодным пятнам) не регистрировались. Поверхностная плотность катодных пятен характеризует степень перекрытия привязанных к ним каналов и, в конечном счете, однородность ОСР. Как видно из рис.3, при достаточно большой длительности тока разряда, $T = 260 - 270$ нс, плотность катодных пятен и равномерность их распределения по поверхности катода практически не зависят от УФ подсветки. Как с подсветкой, так и в ее отсутствие общее число пятен и их плотность растут с увеличением вводимой в плазму энергии, что согласуется с полученными нами ранее результатами [6, 7]. В случае короткого разряда, при $T = 130$ нс (см. рис.3, а, б), в отсутствие подсветки зона, в которой горят пятна, занимает лишь часть поверхности катода. Это также соответствует полученному нами ранее результату [6] и объясняется конечной скоростью распространения разряда (напомним, что в данном случае мы имеем дело с самоиницирующимся объемным разрядом [6]) в поперечном к электрическому полю направлении после начального пробоя разрядного промежутка без подсветки в зоне краевого усиления поля.

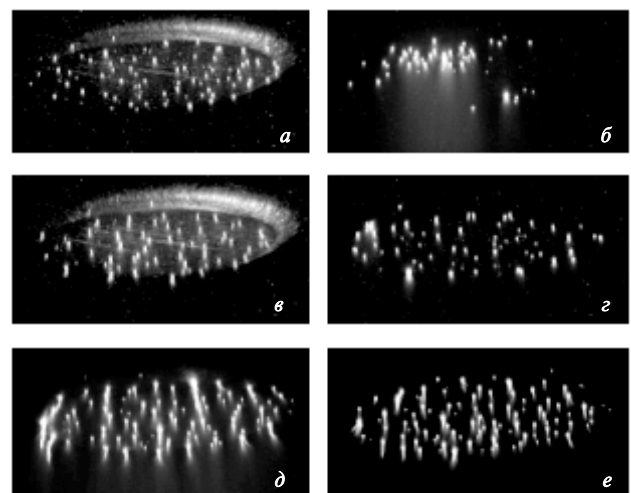


Рис.3. Фотографии свечения прикатодной области разряда с УФ подсветкой (а, в, д) и без нее (б, г, е) при $W_{in} = 1.4$ Дж и $T = 130$ нс (а, б), $W_{in} = 1.4$ Дж и $T = 270$ нс (в, г) и $W_{in} = 10$ Дж, $T = 260$ нс (д, е).

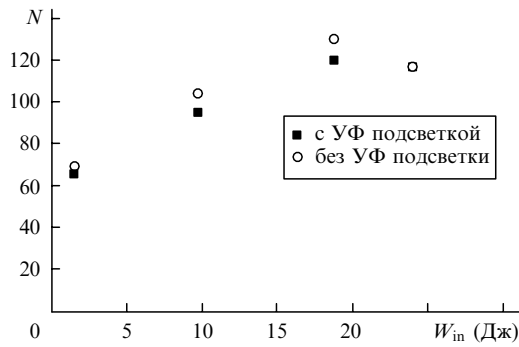


Рис.4. Зависимость числа катодных пятен N от введенной в плазму разряда энергии W_{in} при наличии (■) и в отсутствие (○) УФ подсветки.

На рис.4 приведены зависимости N – полного числа пятен на катоде – от введенной в плазму энергии W_{in} при фиксированной длительности тока ОСР ($T = 260 - 270$ нс), снятые с УФ подсветкой и в ее отсутствие. Число пятен с увеличением энерговклада растет, причем подсветка практически не влияет на N . Уменьшение N при больших энергиях обусловлено началом контрагирования ОСР в результате прорастания из катодного пятна искрового канала и стягивания на него тока разряда.

На рис.5 приведена зависимость полного числа пятен на катоде (без подсветки) от T при фиксированном энерговкладе. При изменении T параметр N меняется мало, его снижение при больших T , так же, как и при больших энерговкладах, связано с началом контрагирования ОСР.

4. Обсуждение результатов

Таким образом, УФ подсветка не оказывает существенного влияния на устойчивость и однородность ОСР в рабочих смесях электроразрядного нецепного HF-лазера. В чем же тогда причина наблюдаемой в некоторых работах зависимости выходной энергии HF-лазера от наличия УФ подсветки?

Следует сразу же отметить, что в широкоапертурных нецепных HF(DF)-лазерах УФ излучение в принципе не может обеспечить объемной ионизации рабочей среды из-за сильного его поглощения в SF_6 , т. е. в данном случае термин «предыонизация» в его обычном понимании [1] вообще не применим. Проиллюстрируем сказанное простой оценкой. Используя данные по поглощению УФ излучения в SF_6 из [12], легко показать, что при типичном для HF-лазера парциальном давлении SF_6 в смеси $p_{SF_6} \approx 60$ Тор длина пробега фотона с энергией кванта ~ 11 эВ, близкой к потенциалам ионизации «тяжелых» углеводородов (доноров водорода), не превышает ~ 5 мм. Этого явно не достаточно для того, чтобы говорить

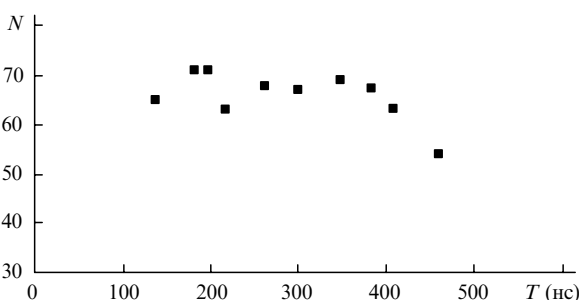


Рис.5. Зависимость числа катодных пятен N от T при фиксированной введенной в плазму разряда энергии (без УФ подсветки).

о возможности предыонизации среды УФ излучением даже в малогабаритных HF-лазерах.

Что же в таком случае все-таки дает УФ подсветка в HF(DF)-лазерах? При энергии кванта менее 5 эВ поглощение УФ излучения в SF_6 незначительно [12], и УФ подсветка разрядного промежутка даже слаботочной, ~ 1 А, искрой позволяет, за счет фотоэффекта на катоде, стабилизировать характеристики электрического пробоя разрядного промежутка [13].

Для иллюстрации сказанного на рис.6,а приведены осциллограммы напряжения на промежутке для двух разрядных импульсов, снятые при зажигании ОСР без подсветки в установке, электрическая схема которой показана на рис.1. Даже при перенапряжении на промежутке, превышающем более чем в 2 раза напряжение в квазистационарной фазе ОСР, разница времени запаздывания электрического пробоя для двух импульсов в отсутствие УФ подсветки достигает ~ 450 нс. На рис.6,б приведены осциллограммы напряжения U_1, U_2 и тока I_1, I_2 ОСР для двух разрядных импульсов, снятые в этой же установке при зажигании ОСР (также без подсветки) с использованием схемы генератора импульсных напряжений Фитча. Увеличение длительности фронта нарастания импульса напряжения в отсутствие УФ подсветки приводит не только к временному разбросу, но и к разбросу амплитуды напряжения пробоя промежутка от импульса к импульсу, а это, в свою очередь, в отличие от электрических схем с разрядом на промежуток конденсатора или генератора импульсных напряжений Аркадьева – Маркса, сопровождается большим разбросом амплитуды тока ОСР и, соответственно, энерговклада в плазму разряда.

Подобная ситуация наблюдается в разрядных промежутках с площадью катода $S \leq 300$ см² и межэлектродными расстояниями $d \leq 5$ см, особенно в лазерах, электроды которых имеют специальный профиль для обеспечения однородности электрического поля в промежутке и полированную поверхность (напомним, что в описываемых здесь экспериментах применялся катод, поверхность которого была подвергнута пескоструйной обработке для нанесения на нее мелкомасштабных неоднородностей). Естественно, что нестабильность тока и напряжения ОСР приводит к невоспроизводимости выходной энергии HF-лазера от импульса к импульсу. Для стабилизации характеристик электрического пробоя промежутка в таких системах обычно бывает достаточно подсвечивать катод искрой [13], которая может располагаться даже за пределами разрядной камеры лазера (УФ подсветка через выходное окно лазера). С увеличением

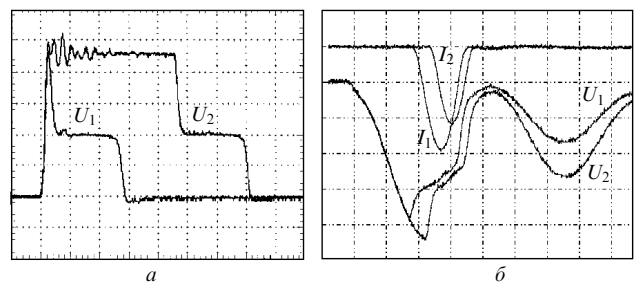


Рис.6. Осциллограммы напряжения U_1, U_2 на разрядном промежутке и тока I_1, I_2 (развертка 100 нс/дел.) для двух разрядных импульсов в отсутствие УФ подсветки промежутка при разряде конденсатора (а) и генератора Фитча (б).

межэлектродного расстояния и площади катода, а также при использовании электродов с большим краевым усилением электрического поля проблема стабилизации характеристик электрического пробоя отпадает (см., напр., [7]).

Таким образом, из проведенного выше рассмотрения следует, что роль УФ подсветки в нецепных HF(DF)-лазерах сводится к стабилизации времени запаздывания и амплитуды напряжения импульсного пробоя разрядного промежутка за счет фотоэффекта на катоде. При $d \geq 5$ мм фотоионизация среды УФ излучением в принципе не способна обеспечить необходимой для зажигания ОСР объемной концентрации начальных электронов из-за сильного поглощения УФ излучения в SF₆ (вторую причину невозможности предыонизации – большие потери фотоэлектронов в процессе прилипания – мы здесь не обсуждаем).

Как уже отмечалось выше, при малой длительности тока разряда ($T \leq 150$ нс), характерной для установок с малыми объемами активной среды ($\sim 100 - 200$ см³ [8–10]), в отсутствие УФ подсветки, кроме нестабильности электрического пробоя промежутка, может также наблюдаться неравномерность распределения плотности разрядного тока по поверхности (особенно по длине) катода из-за конечной скорости распространения разряда в поперечном к электрическому полю направлении после локального начального пробоя промежутка [6]. Это, естественно, приводит к снижению выходных характеристик HF-лазера за счет уменьшения длины активной среды и повышения локального энерговыделения, и выравнивание распределения плотности тока по длине катода при включении УФ подсветки (в этом случае целесообразно распределять источники УФ излучения вдоль катода), сопровождаемое увеличением выходной энергии, воспринимается как результат предыонизации среды.

В заключение коротко остановимся на анализе результатов работы [11], где предыонизация осуществлялась мягким рентгеновским излучением в режиме так называемого фотоиницируемого разряда [14], в котором источник излучения включался при напряжении на промежутке, превышающем статическое пробивное напряжение. В этом режиме действительно возможно получение начальной концентрации электронов в промежутке, которая достаточна для развития разряда в объемной форме, поскольку скорость ионизационного размножения электронов превышает скорость их потерь в процессе прилипания к молекулам SF₆. Однако для детального анализа реальных причин повышения устойчивости ОСР и энергии генерации лазера при воздействии на промежуток вспышки рентгеновского излучения нам

представляется целесообразным исследовать распределение плотности тока по поверхности катода, так как максимальная длительность токового импульса в [11] не превышала 155 нс при $d = 2.5$ см в промежутке с однородным электрическим полем, что, как следует из представленного выше материала, в отсутствие предыонизации могло приводить к неравномерности распределения энерговклада по промежутку вдоль оптической оси лазера.

5. Заключение

Таким образом, результаты настоящей работы еще раз подтверждают, что роль УФ подсветки в HF-лазерах с площадью катода $S \leq 300$ см², а также в лазерах с длительностью токового импульса $T \leq 150$ нс сводится, соответственно, к стабилизации времени запаздывания и амплитуды напряжения электрического пробоя промежутка и выравниванию, за счет фотоэффекта, распределения плотности тока разряда по поверхности катода. В лазерах с большими апертурами и объемами активной среды в подсветке нет необходимости при наличии на поверхности катода мелкомасштабных (~ 50 мкм) неоднородностей.

1. Карнюшин В.Л., Солоухин Р.И. *Макроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах* (М.: Атомиздат, 1981).
2. Бурцев В.А., Водовозов В.М., Дашук П.Н., Кулаков С.Л., Прокопенко В.Ф., Фомин В.М., Челноков Л.Л. *Тезисы докл. II Всесоюз. совещ. по физике электрического пробоя газов* (Тарту, 1984, с. 414).
3. Pummer H., Breitfeld W., Welder H., Klement G., Kompa K.L. *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 7 (1973).
4. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 213 (1997).
5. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Oreshkin V.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 374 (1998).
6. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).
7. Apollonov V.V., Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Saifulin A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 31 (2001).
8. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Панченко А.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 1035 (2001).
9. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **73**, 136 (2003).
10. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **33**, 401 (2003).
11. Lacour B., Pasquiers S., Postel C., Puech V. *Appl. Phys. B.*, **72**, 289 (2001).
12. Bastein F., Chatterton P.A., Marode E., et al. *J. Appl. Phys.*, **18**, 1327 (1985).
13. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Y., Oreshkin V.F., Saifulin A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3886**, 370 (2000).
14. Puech V., Prigent P., Brunet H. *Appl. Phys. B.*, **55**, 183 (1992).