

Характеристики разряда в нецепном HF(DF)-лазере

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

Установлено, что при стандартных для нецепных HF(DF)-лазеров составах смесей SF₆ с углеводородами (угледейтеридами) приведенная к парциальному давлению SF₆ (p_{SF_6}) напряженность электрического поля в квазистационарной фазе объемного самостоятельного разряда $(E/p_{SF_6})_{st} = 92$ В/(м·Па) близка к известной критической величине $(E/p)_{cr} = 89$ В/(м·Па), задаваемой условием равенства скоростей ионизации SF₆ электронным ударом и прилипания электронов к молекулам SF₆. Это свидетельствует об определяющей роли именно данных двух процессов и позволяет при расчете характеристик разряда использовать известные аппроксимации эффективного коэффициента ионизации и дрейфовой скорости электронов для чистого SF₆. Осциллограммы напряжения и тока, рассчитанные в указанном приближении в лазерах с апертурами 4–27 см, отклонялись от экспериментальных не более чем на 10%.

Ключевые слова: квазистационарное напряжение, объемный самостоятельный разряд, нецепной HF(DF)-лазер.

Иницирование нецепных HF(DF)-лазеров на смесях SF₆ с углеводородами (угледейтеридами) объемным самостоятельным разрядом (ОСР) позволяет получить значительные энергии излучения при достаточно высоких КПД [1–3]. Несмотря на то что этот метод иницирования известен давно, до настоящего времени процессы, протекающие в плазме ОСР в рабочих средах нецепных лазеров, мало изучены. В частности, при расчете характеристик ОСР учитываются десятки элементарных процессов, в том числе увеличение потерь электронов из-за их прилипания к колебательно-возбужденным молекулам SF₆, а также нагрев газа и параметры внешней цепи (см., напр., [4, 5]), однако расчетные осциллограммы напряжения и тока сильно отличаются от экспериментальных. Вероятно, это связано с недостоверностью сведений о константах скоростей многих элементарных процессов, что, в свою очередь, не позволяет выделить основные процессы, которыми определяются характеристики ОСР. Целью настоящей работы является установление процессов, учет которых позволил бы добиться хорошего совпадения расчетных осциллограмм с экспериментальными.

На осциллограммах напряжения ОСР в SF₆ и его смесях с углеводородами (угледейтеридами) наблюдается ярко выраженная «ступенька», соответствующая квазистационарной фазе ОСР, в течение которой напряжение на разрядном промежутке практически не меняется. Легко показать, что при таком характере изменения напряжения максимумы тока ОСР и электронной концентрации с хорошей точностью совпадают по времени, т. е. квазистационарное напряжение, измеряемое по осциллограммам в момент достижения током максимума, близко к напряжению, при котором уравниваются скорости рождения и гибели электронов в разрядной плазме. Следовательно, квазистационарное напряжение опреде-

ляется рождением и гибелью электронов, а его изменения при вариации состава смеси позволяют судить о характере этих процессов.

В эксперименте нами были измерены квазистационарные напряжения ОСР в SF₆ и его смесях с углеводородами (угледейтеридами) в широких диапазонах изменения параметров: давление смеси $p = 10 - 60$ мм рт. ст., межэлектродное расстояние $d = 2 - 27$ см и энерговклад $W = 20 - 200$ Дж/л. Длительность разрядного импульса варьировалась от 200 до 400 нс. Эти условия являются рабочими для нецепных HF(DF)-лазеров с большими объемами активной среды [1–3]. В настоящих экспериментах ОСР зажигался между двумя дисковыми электродами: катодом $\varnothing 6$ см и анодом $\varnothing 12$ см, скругленными по периметру с радиусом скругления 1 см. На промежутке через варьруемую индуктивность разряжался конденсатор. Ток и напряжение ОСР регистрировались калиброванными шунтами или поясами Роговского и делителями напряжения. Электрические сигналы записывались осциллографом Tektronix TDS 220.

На рис.1 представлены зависимости квазистационарного напряжения U_{st} от параметра $p_{SF_6}d$ для чистого SF₆ и его смеси с C₂H₆ при соотношении парциальных давлений компонентов 10:1 (p_{SF_6} – парциальное давление SF₆ в смеси). Видно, что добавка C₂H₆ к SF₆ не влияет существенно на U_{st} , т. е. при обычных для HF(DF)-лазера составах смесей она определяется, главным образом, парциальным давлением SF₆. Напряжение U_{st} линейно зависит от $p_{SF_6}d$, а получаемая из рис.1 приведенная к парциальному давлению SF₆ напряженность электрического поля в квазистационарной фазе $(E/p_{SF_6})_{st} = 92$ В/(м·Па) (где E – напряженность электрического поля в столбе ОСР) близка к известной из литературы критической приведенной напряженности электрического поля для чистого SF₆ $(E/p)_{cr} = 89$ В/(м·Па) [6], задаваемой условием равенства коэффициента прилипания электронов к молекулам SF₆ и коэффициента ионизации SF₆ электронным ударом. Для смесей SF₆ с относительно небольшими, до 20 %, добавками углеводородов (угледей-

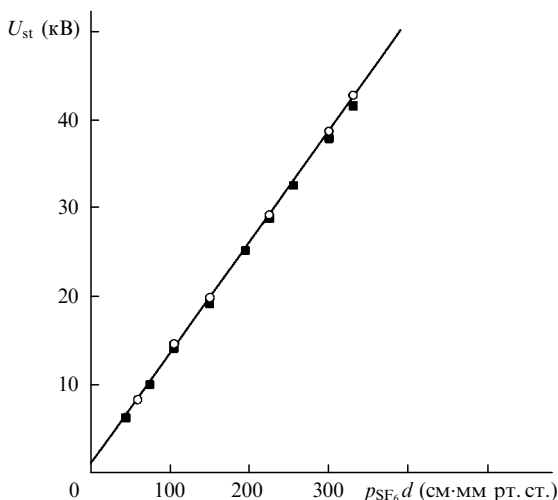


Рис.1. Зависимость квазистационарного напряжения U_{st} от параметра $p_{SF_6}d$ в чистом SF_6 (■) и в смеси состава $SF_6 : C_2H_6 = 10 : 1$ (○).

теридов) U_{st} с хорошей точностью аппроксимируется выражением $U_{st} = (E/p_{SF_6})_{st} p_{SF_6}d + U_c$, где $U_c \approx 800$ В.

Результаты измерений U_{st} позволяют предположить, что существенными для ОСР в рассматриваемых условиях являются лишь процессы ионизации SF_6 электронным ударом и прилипания электронов к молекулам SF_6 , а такими процессами как ступенчатая ионизация, процесс Пеннинга, прилипания электронов к возбужденным молекулам SF_6 и ионизация молекул примесей можно пренебречь, по крайней мере при энерговыкладах, не превышающих 200 Дж/л, и длительности тока ОСР более 200 нс. В этом приближении были проведены расчеты основных характеристик ОСР в рабочих смесях нецепных HF(DF)-лазеров с применением простых аппроксимаций эффективного коэффициента ионизации α_{ef} и дрейфовой скорости электронов u_e для чистого SF_6 , взятых из [6]. Концентрация электронов n_e определялась из решения уравнения непрерывности для электронной компоненты тока совместно с уравнениями Кирхгофа для электрической цепи аналогично тому, как это сделано в [7]. Ионная составляющая тока не учитывалась. Начальная концентрация электронов принималась равной фоновой. В эквивалентной электрической схеме разрядный промежуток представлялся в виде резистивного элемента с сопротивлением $R_d = U/I = U/(en_e u_e S)$, где U – напряжение на промежутке; I – ток разряда; e – заряд электрона; S – площадь катода.

Проверка применимости вышеуказанного приближения осуществлялась на примере простого разрядного контура, эквивалентная электрическая схема которого показана на рис.2,а. Емкость конденсатора $C = 3.9$ нФ, индуктивность и активные потери в контуре определялись экспериментально. Осциллограммы напряжения и тока снимались при $d = 4$ см, $S = 12.6$ см² и давлении смеси состава $SF_6 : C_2H_6 = 10 : 1$ $p = 33.5$ мм рт. ст. В расчете учитывалось, что реальным делителем измеряется сумма падений напряжения на зазоре и на индуктивности подводов к электродам. На рис.2,а представлены также экспериментальные и расчетные осциллограммы напряжения и тока. Видно, что расчетные осциллограммы хорошо совпадают с экспериментальными (отклонения в пределах 6 %).

Эта модель была применена для расчета характеристик ОСР в двух лазерных системах с $d = 5$ см, $p = 67$

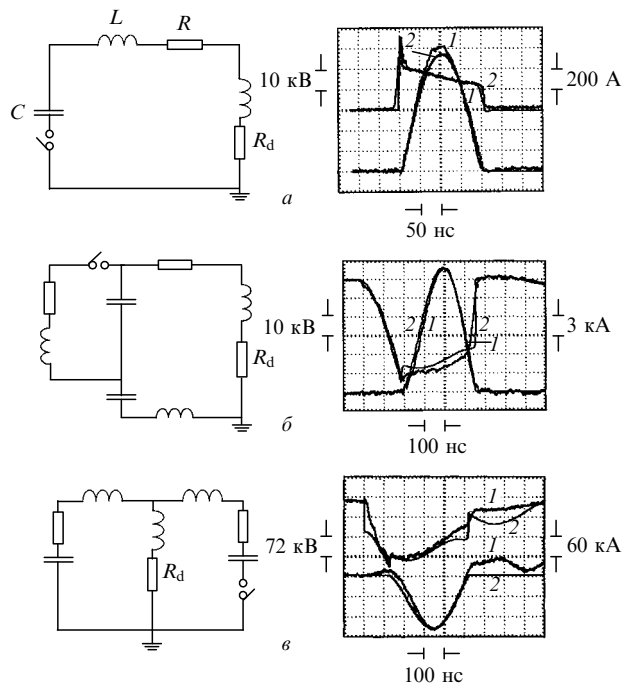


Рис.2. Различные эквивалентные электрические схемы разрядных контуров и соответствующие им экспериментальные (1) и расчетные (2) осциллограммы напряжения (верхняя осциллограмма) и тока (нижняя осциллограмма).

мм рт. ст. и $d = 26.6$ см, $p = 58$ мм рт. ст., эквивалентные электрические схемы которых показаны на рис.2,б и в соответственно. В обоих случаях она дала расхождение расчетных осциллограмм с экспериментальными в пределах 10 %.

Итак, для получения хорошего соответствия между экспериментальными и расчетными осциллограммами напряжения и тока ОСР в SF_6 и его смесях с углеводородами (угледейтеридами) в условиях, типичных для нецепных HF(DF)-лазеров с большими объемами среды (энерговыклады не более 200 Дж/л, длительность тока больше 200 нс), в расчетах достаточно учитывать лишь ионизацию SF_6 электронным ударом и прилипания электронов к молекулам SF_6 . Почему же, несмотря на множество процессов в плазме разряда, существенными являются только эти два?

Возможно, это связано с особенностями развития ОСР в SF_6 и его смесях с углеводородами (угледейтеридами). Ранее мы указывали на существование механизма локального ограничения плотности тока при достижении ею некоторого предельного значения, вследствие чего объем разряда увеличивается в процессе его развития с ростом введенной в плазму энергии [1]. В результате этого в каждый момент времени разрядный ток течет в основном через невозбужденный газ, что и приводит к независимости напряжения на разрядном промежутке от накопления возбужденных частиц в разрядном объеме. Если каким-либо образом увеличить удельный энерговыклад, например за счет ограничения разрядного объема, то, вероятно, можно будет увидеть на осциллограммах зависимость квазистационарного напряжения от удельного энерговыклада.

1. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Oreshkin V.F. *Proc. SPIE*, **3574**, 374 (1998).
2. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 213 (1997).

3. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 123 (1998).
4. Richeboeuf L., Pasquiers S., Legentil M., Puech V. *J. Phys. D*, **31**, 373 (1998).
5. Doussiet F., Legentil M., Pasquiers S., Postel C., Puech V., Richeboeuf L. *Proc. SPIE*, **2702**, 179 (1996).
6. Бортник И.М. *Физические свойства и электрическая прочность элегаза* (М., Энергоатомиздат, 1998).
7. Бычков Ю.И., Кудряшов В.П., Осипов В.В., Савин В.В. *Ж. прикл. мех. и техн. физ.*, **2**, 42 (1976).

V.V. Apollonov, S.Yu. Kazantsev, A.V. Saifulin, K.N. Firsov. **Discharge characteristics in a nonchain HF(DF) laser.**

It is found that for SF₆ – hydrocarbon (deuterocarbon) mixtures having a composition typical for nonchain HF(DF) lasers, the electric field strength reduced to the partial pressure of SF₆ (p_{SF_6}) in the quasi-stationary phase of a volume self-sustained discharge $(E/p_{SF_6})_{st} = 92 \text{ V m}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ is close to the known critical value $(E/p)_{cr} = 89 \text{ V m}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, which is specified by the condition that the electron-impact ionisation rate of SF₆ is equal to the rate of electron attachment to SF₆ molecules. This testifies to the decisive role of these two processes and allows the use of the known approximations of the effective ionisation coefficient and the electron drift velocity for pure SF₆ when calculating the discharge characteristics. The oscilloscope traces of voltage and current calculated in this approximation for lasers with apertures ranging from 4 to 27 cm deviated from the experimental ones by no more than 10%.