

## Энергетические характеристики и устойчивость разряда нецепного HF-лазера с накачкой самостоятельным разрядом

В.Ф.Тарасенко, В.М.Орловский, А.Н.Панченко

*Исследованы генерация и разряд в нецепном HF-лазере на смесях SF<sub>6</sub> с водородом и углеводородами. Получены удельная энергия излучения 8.8 Дж/л (73 Дж/л·атм) и полная эффективность генерации по энергии 5.5%. Показано, что в HF-лазерах с накачкой самостоятельным разрядом формирование и поддержание объемного разряда в смесях с большим содержанием электроотрицательных газов обусловлены накоплением в токопроводящих областях объемного заряда отрицательных ионов.*

**Ключевые слова:** нецепной HF-лазер, устойчивость разряда, SF<sub>6</sub>, объемный заряд.

В последние годы HF- и DF-лазерам с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой самостоятельным разрядом, уделяется большое внимание [1–6]. Это обусловлено высокими энергетическими характеристиками данных лазеров в импульсном и импульсно-периодическом режимах. Важной особенностью лазера на смесях водорода с SF<sub>6</sub> является формирование объемного разряда без использования источника дополнительной предыонизации, в том числе при больших межэлектродных промежутках [7]. Однако механизмы формирования и поддержания объемного разряда в смесях SF<sub>6</sub> (тяжелый электроотрицательный газ с большим атомным номером) с углеводородами и водородом в таких лазерах не установлены, что ограничивает создание HF-(DF)-лазеров и усилителей с максимальными энергетическими параметрами.

В настоящей работе проведено исследование разряда и генерации в нецепном HF-лазере, определены оптимальные условия накачки и получены максимальные для данного типа лазера эффективность и удельная энергия излучения.

В экспериментах использовались лазеры с активными объемами 2.3 × 1.2 × 62 см (межэлектродный зазор  $d = 2.3$  см) и 3.3 × 1 × 55 см ( $d = 3.3$  см). Накачка осуществлялась самостоятельным разрядом от индуктивного [1] и емкостного накопителей энергии.

Предыонизация разрядного промежутка осуществлялась излучением поверхностного разряда на одном из электродов, который был выполнен сетчатым. Интенсивность предыонизации могла изменяться за счет изменения энергии, вкладываемой в поверхностный разряд. В ряде экспериментов система предыонизации отключалась. Для сравнения использовался лазер с накачкой несамостоятельным разрядом, инициированным электронным пучком в объеме 1 × 2 × 42 см ( $d = 1$  см). Характеристики разряда изучались при давлениях 0.03–0.2 атм

SF<sub>6</sub> и смесей SF<sub>6</sub> с углеводородами (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) или водородом при большом содержании электроотрицательного газа (свыше 70 %).

Измерения показали, что при наличии предыонизации напряжение пробоя разрядного промежутка обычно на ~10–20 % меньше, чем в ее отсутствие. Это приводит к уменьшению амплитуды тока через лазерную камеру, но энергия генерации при этом увеличивается. В отсутствие предыонизации, как и в работах [3, 5], разряд возникает в локальных областях, а затем заполняет всю рабочую поверхность электрода. При малых начальных напряжениях и малых энерговкладах разряд состоит из одного или небольшого числа диффузных каналов, которые оканчиваются на ярких катодных пятнах.

Накопительный конденсатор C<sub>0</sub> при уменьшении зарядного напряжения или увеличении индуктивности разрядного контура разряжается неполностью, и на разрядном промежутке остается напряжение, при котором  $E/p$  может достигать 40 кВ/см·атм ( $E$  – напряженность электрического поля,  $p$  – давление). Наличие высокого остаточного напряжения обычно приводит к повторному пробоя разрядного промежутка и образованию яркого канала.

Время запаздывания повторного пробоя существенно зависит от уровня предыонизации, зарядного напряжения  $U_0$  и увеличивается с уменьшением  $U_0$ . Например, для лазера с активным объемом 2.3 × 1.2 × 62 см при максимальной интенсивности предыонизации и зарядном напряжении  $U_0 = 30$  кВ запаздывание пробоя составило 750 нс. В отсутствие предыонизации лазерного промежутка запаздывание повторного пробоя при тех же условиях существенно меньше (~100 нс). При инициировании разряда пучком электронов повторного пробоя промежутка не наблюдалось даже в случае начального напряжения, близкого к статическому пробивному (удельный энерговклад 0.07 кДж/см<sup>3</sup>, уменьшение начального напряжения в результате разряда ~8 %).

Для получения объемного разряда при оптимальных для эффективной генерации энерговкладах 1–2 кДж × л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup> и малом остаточном напряжении на промежутке необходимо увеличивать начальное напряжение на

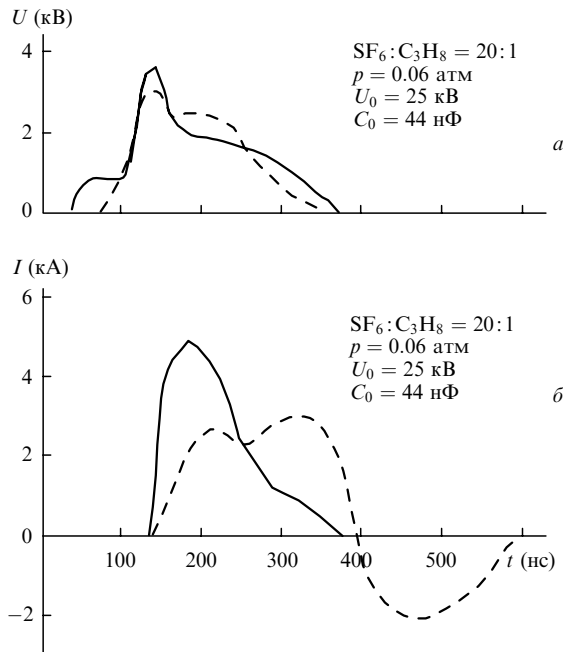


Рис.1. Осциллограммы импульсов напряжения (а) и тока (б), полученные при одинаковых индуктивностях разрядного контура с накачкой от индуктивного (сплошные кривые) и емкостного (штриховые кривые) накопителей энергии при высокой интенсивности предыонизации.

промежутке и (или) уменьшать индуктивность разрядного контура. В этом случае длительность импульса возбуждения не должна превышать 100–300 нс. Наиболее легко данные условия выполняются при накачке от индуктивного накопителя и от емкостных накопителей с минимальной индуктивностью разрядного контура. На рис.1 приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока для различных генераторов, полученные при одинаковых накопительном конденсаторе, составе и давлении рабочей смеси. Видно, что с индуктивным накопителем была получена полная передача энергии от индуктивности в разрядную плазму. При накачке от емкостного накопителя в этих условиях через 200 нс разряд контура проваливался и ток возрастал.

Характеристики лазерного излучения приведены на рис.2 и 3. При использовании предварительной ионизации энергия и эффективность генерации во всех экспериментах были более высокими (рис.2). Это объясняется

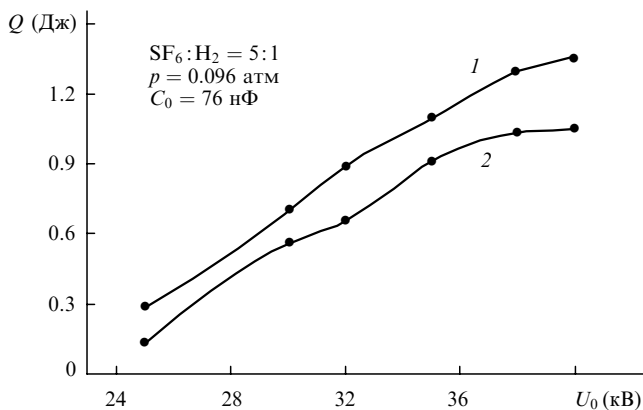


Рис.2. Зависимости энергии излучения от зарядного напряжения при накачке от емкостного накопителя энергии с использованием предыонизации (1) и без нее (2).

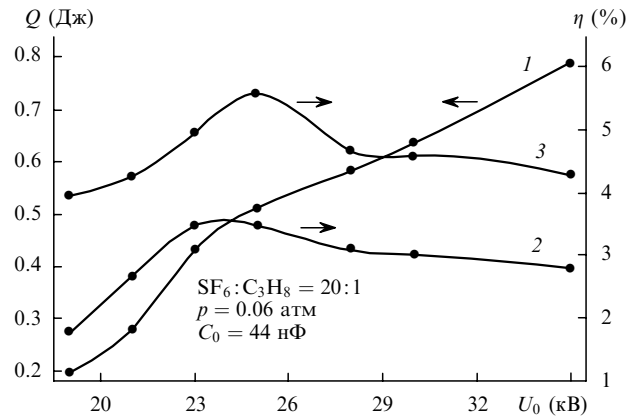


Рис.3. Зависимости энергии излучения HF-лазера (1) и КПД от запасенной (2) и вложенной (переданной в индуктивный накопитель) энергии (3) от зарядного напряжения при высокой интенсивности предыонизации.

неодновременным формированием объемного разряда по всей поверхности электродов в отсутствие предыонизации. Сравнение энергии генерации в смесях с водородом и углеводородами показало, что при уменьшении интенсивности предыонизации или в ее отсутствие более выгодно использовать смеси с углеводородами. Однако при увеличении интенсивности предыонизации и использовании индуктивного накопителя энергии, который позволяет увеличивать амплитуду напряжения на промежутке и осуществлять накачку в согласованном режиме, в обеих смесях достигаются одинаковые эффективности и энергии лазерного излучения.

В оптимальных условиях на лазере с индуктивным накопителем энергии были получены эффективность генерации относительно вложенной энергии 5.5 % и удельная энергия излучения 4.3 Дж/л (72 Дж/л·атм) (рис.3). При оптимизации разрядного контура с накачкой от емкостного накопителя и эффективной предыонизации на лазере с активным объемом  $2.3 \times 1.2 \times 62$  см энергия излучения составила 8.8 Дж/л (73 Дж/л·атм) при КПД от запасенной энергии 3.3 %.

Для создания HF- и DF-лазеров с высокими параметрами излучения очень важно выяснить причины формирования и поддержания объемного разряда в смесях SF<sub>6</sub> с водородом или углеводородами при давлении 0.05–0.1 атм, в том числе в отсутствие предыонизации. На основании полученных результатов, а также анализа известных данных следует, что формирование объемного разряда и его поддержание определяются образованием и накоплением тяжелых отрицательных ионов электроотрицательного газа.

Накопление отрицательного заряда в разрядном промежутке ограничивает разрядный ток, который переносится электронами. Скорость образования отрицательных ионов превышает скорость роста концентрации электронов, что и приводит к ограничению плотности электронного тока в местах ее увеличения и к сохранению объемного характера разряда. Более быстрый рост концентрации отрицательных ионов по сравнению с концентрацией электронов также следует из теоретического моделирования [5]. Объемный отрицательный заряд препятствует развитию стримера из катодных пятен. При отсутствии предыонизации диффузный канал, образовавшийся в области максимального усиления поля на катоде, за счет предыонизации собственным УФ излуче-

нием инициирует разряд на остальной поверхности катода.

В заключение отметим, что для достижения максимальных энергетических параметров в HF- и DF-лазерах необходимо использовать как предьонизацию, так и профилированные электроды. Это особенно важно при создании лазеров и лазерных систем с дифракционной расходимостью излучения.

Работа была выполнена при поддержке МНТЦ, проект № 1206.

1. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая элек-*

*троника*, **24**, 457 (1997).

2. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 123 (1998).
3. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).
4. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.В. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 225 (2000).
5. Бычков Ю.И., Горчаков С.Л., Ястремский А.Г. *Квантовая электроника*, **30**, 733 (2000).
6. Булаев В.Д., Куликов В.В., Петин В.Н., Югов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 218 (2001).
7. Запольский А.Ф., Юшко К.Б. *Квантовая электроника*, **2**, 408 (1979).